

고성능 저소음포장공법 개발현황 조사 및 효과 분석 연구

연구관리 2024-087

고성능 저소음포장공법 개발현황 조사 및 효과 분석 연구

지 은 이 정종석 · 심영중 · 김태민 · 김경진 · 이성림 · 박원형 · 문장혁 · 안광철 · 최민준

발 행 인 정창무

발 행 처 한국토지주택공사 토지주택연구원

주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99

홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

전화번호 042-866-8420

이 메 일 pobyasu@lh.or.kr

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로써 공사나 정부의 공식적인 견해와 관계가 없습니다.

우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

고성능 저소음포장공법 개발현황 조사 및 효과 분석 연구

The Development of LH Pavement Design Guideline
by Early Construction Vehicles Opening

정종석 · 심영종 · 김태민 · 김경진 · 이성림 · 박원형 · 문장혁 · 안광철 · 최민준

참여연구진

연구책임

정종석 LH 토지주택연구원 연구위원

연구진

심영종 LH 토지주택연구원 연구위원

김태민 LH 토지주택연구원 책임연구원

김경진 LH 토지주택연구원 연구원

이성림 LH 국토도시본부 선교통환경처 차장

박원형 LH 세종특별본부 국가스마트시티사업단 차장

문장혁 LH 국토도시본부 신도시사업1처 차장

안광철 LH 국토도시본부 신도시사업1처 차장

최민준 LH 스마트건설본부 스마트단지기술처 차장

학술용역 수행기관

한국건설기술연구원

이수형 한국건설기술연구원 연구위원(학술용역 책임)

연구심의위원

전주영 LH 토지주택연구원 실장(심의위원장)

박종배 LH 토지주택연구원 단장

박시현 LH 토지주택연구원 수석연구원

김수영 LH 경기지역남부분부 광명시흥사업본부 팀장

김용수 LH 경기지역남부분부 차장

이승준 국토도시본부 선교통환경처 대리

이병찬 한국교통대학교 환경공학과 교수

김인태 명지대학교 교통공학과 교수

문성호 서울과학기술대학 토목공학과 교수

박대욱 군산대학교 토목공학과 교수

연구요약 Summary

본 연구는 저소음포장의 소음저감성능 및 공용성능에 대한 종합적인 저소음포장 성능인정 기준을 개발하는 것임

■ 연구의 필요성

- 3기 신도시에 도로소음 환경기준(낮 65dB, 밤 55dB)을 만족시키기 위하여 방음벽, 방음터널, 저소음포장 등 여러 소음저감방안을 설계에 반영하고자 함.
- 최근, 저소음포장과 방음벽 구성이나, 소음효과가 우수한 고성능 저소음포장으로 소음 저감방안으로 적용되고 있는 경우가 증가하고 있으며, 최근 소음저감효과가 우수한 포장 공법이 개발되어 우리공사에 적용을 요구하는 민원이 증가하고 있음
- 그러나, 저소음포장은 포장은 지속적으로 소음효과가 감소하는 단점이 있어, 저소음포장의 성능 검증 및 도로소음이 환경기준치 이상 되는 시기를 예측하기 위하여 장기 도로소음 모니터링 필요
- 따라서, 본 연구를 통해 국내 저소음포장의 소음측정결과, 소음저감효과 검증, 내구성 및 공용성 분석, 등에 대한 기초자료 구축하여 종합적인 LH 저소음포장 인정기준을 개발하여 LH 현장적용하고자 함

■ 연구의 목적

- 본 연구의 목표는 저소음포장의 소음저감성능 및 공용성능에 대한 종합적인 저소음포장의 성능인정기준을 개발하는 것임
 - 현장 적용 가능한 저소음포장 공법 검증
 - 저소음포장 성능인정기준 개발(소음 및 공용성)

■ 주요 연구결과

1. 저소음포장 소음성능 인정기준(안) 제시

- 저소음포장 소음성능을 평가하기 위하여 일반 아스팔트포장의 기준소음도를 아래와 같이 선정

-LH 단지 조성구간의 제한속도 등을 고려하여 50km/h를 기준속도로 선정

구분	공용기간			
	2년 이하	4년 이하	6년 이하	8년 이하
기준소음도(dB)	90	92	94	96

- 기준소음도를 선정하기 위하여 일반아스팔트 포장 35개 구간 분석
- 소음측정방법은 ISO 11819-2의 근접소음도 측정 방법(Close-proximity method, CPX)이며 자세한 사항은 아래 규격 참조하며, 측정값은 마이크로폰 5번에서 속도별 (40km/h~80km/h, 70km/h이상은 가능한 구간에 한하여 측정) 측정된 값

· **참조규격** : ISO 11819-2 Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: Close-proximity method

- 저소음포장 소음측정 대상 도로 및 인정방법
 - 공용기간이 1년 초과한 저소음포장 구간을 대상으로, 1개 구간 이상 소음을 측정하며, 저소음포장 소음성능 인정방법은 일반포장 기준소음도와 차이를 소음저감효과로 인정함
- **일반포장 기준소음도 - 해당 저소음포장 측정소음도 = 해당공법의 소음저감 효과**

2. 저소음 아스팔트 포장의 공용성능 기준(안) 제시

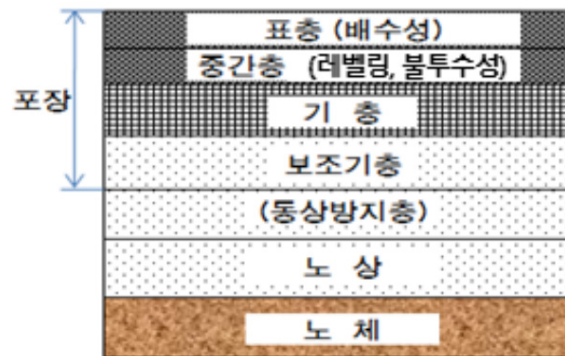
- 저소음 아스팔트 포장의 일반적인 사항
 - “LHCS 44 50 10 30 배수성 아스팔트 콘크리트 포장공사”를 따르며 본 기준에 규정되어 있지 않은 사항은 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”, “도로공사 표준시방서”에 따름.

○ 저소음 아스팔트 바인더의 품질 기준

- 국토교통부 “아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침(2024)”중 배수성 포장용 아스팔트 기준이 개정됨에 따라 개정된 기준을 적용

○ 저소음 아스팔트 콘크리트 포장 단면

- 저소음아스팔트콘크리트포장을 공극률 16%이상의 배수성 포장으로 적용할 경우 아스팔트 포장의 전 층 구성 단면은 다음과 같이 적용



○ 저소음 아스팔트 혼합물의 골재 배합설계 및 품질관리 기준

- 국토교통부 기준을 기본 기준으로 적용하고, 배수성 아스팔트 혼합물의 공용성능과 소음저감 효과 등을 고려하여 (사)한국배수성아스팔트기술협회에서 제안한 입도를 추가하여 적용
- 국토교통부 기준 중 고내구성 입도 기준인 PA-13P, PA-10P 제외
- 공용성능을 높이기 위해 공극률을 낮추는 입도로 소음저감 효과가 낮아지기 때문
 - 비배수형 저소음포장의 경우 제품의 시방을 참조하여 적용
 - 비배수형 저소음포장의 경우 공극률, 실내투수계수 항목은 제외

주제어

저소음포장, 성능인정기준, 3D시뮬레이션, CPX

차 례 Contents

제1장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 범위 및 목적	2
제2장 문헌고찰 및 사례분석	3
2.1 저소음포장 정의	3
2.2 국내외 현황 및 적용사례	5
제3장 저소음포장의 공용성능 평가	10
3.1 저소음포장 공용성능 시험 공모	10
3.2 저소음포장용 아스팔트 바인더 성능 평가	12
3.3 저소음포장용 아스팔트 혼합물 성능 평가	17
3.4 인장강도비(TSR) 시험 및 결과	20
3.5 동적안정도 시험 및 결과	23
3.6 흐름손실률 시험 및 결과	26
3.7 드레인 다운 시험 및 결과	28
3.8 칸타브로 시험 및 결과	30
3.9 실내투수계수 시험 및 결과	34
3.10 흡음률 시험 및 결과	37
제4장 저소음포장의 소음성능 평가	41
4.1 저소음포장 적용 구간 소음측정	41
4.2 저소음포장 소음 성능 분석	50

제5장 3D 시뮬레이션을 통한 소음저감 효과 분석	87
5.1. 시뮬레이션의 개요	87
5.2 시뮬레이션 결과	92
제6장 결론 및 향후 방향	109
6.1 요약	109
6.2 저소음포장 성능 결과 분석	110
6.3 저소음포장 성능 인정기준(안) 요약	111
6.4 향후 연구방향	113
참고문헌	115
부록(아스팔트 포장 성능 인정 기준(안))	117

표 차례 List of Tables

[표 1.1] 연구 범위별 상세 내용	2
[표 2.1] 덴마크 저소음포장의 소음기준도	6
[표 3.1] 목표 변형률 값	13
[표 3.2] 비배수성 바인더 시험 결과	15
[표 3.3] 배수성 바인더 시험 결과	16
[표 3.4] 배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 공극률 시험 결과	18
[표 3.5] 비배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 공극률 시험 결과	19
[표 3.6] 인장강도비 시험 결과	22
[표 3.7] 배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 동적안정도 시험 결과	24
[표 3.8] 비배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 동적안정도 시험 결과	25
[표 3.9] 흐름손실률 시험 결과	27
[표 3.10] 드레인 다운 시험 결과	29
[표 3.11] 상온 칸타브로 시험 결과	31
[표 3.12] 저온 칸타브로 시험 결과	33
[표 3.13] 실내투수계수 시험 결과	36
[표 3.14] 비배수성 저소음포장용 아스팔트 혼합물 흡음률 시험 결과	38
[표 3.15] 배수성 저소음포장용 아스팔트 혼합물 흡음률 시험 결과	39
[표 4.1] ISO11819-2에서의 CPX 측정조건 요약	42
[표 4.2] 타이어와 노면으로부터 마이크로폰의 거리 (단위 : m)	45
[표 4.3] 저소음포장 소음측정 구간	46
[표 4.4] CPX 측정결과(ISO Mandatory Position, 1, 2번 평균)	48
[표 4.5] CPX 측정결과(ISO Optional Position, 그림1.3의 5번)	49
[표 4.6] 측면 소음도 분석 결과	54
[표 4.7] 후면 소음도 분석 결과	54

[표 4.8] 포장공법에 따른 소음 성능 분산분석	61
[표 4.9] 포장공법에 따른 소음 차이 - Tukey 사후분석	62
[표 4.10] 공용년수에 따른 소음 성능 분산분석	63
[표 4.11] 포장공법에 따른 소음 성능 공분산분석 - 교호효과 반영	64
[표 4.12] 포장공법에 따른 소음 성능 공분산분석 - 교호효과 미반영	65
[표 4.13] 포장공법에 따른 소음 성능 모형의 추정값	65
[표 4.14] 포장공법에 따른 소음성능 - 보정평균 & Tukey 사후분석	66
[표 4.15] 주행속도에 따른 소음성능 분산분석	67
[표 4.16] 포장공법에 따른 소음 성능 공분산분석 (공변량: 속도)	68
[표 4.17] 포장공법에 따른 소음 성능 모형의 추정값 (공변량: 속도)	68
[표 4.18] 포장공법에 따른 소음성능 (공변량: 속도) - 보정평균 & Tukey 사후분석	69
[표 4.19] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 40km/h+50km/h+60km/h)	70
[표 4.20] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 40km/h)	70
[표 4.21] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 50km/h)	71
[표 4.22] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 60km/h)	72
[표 4.23] 주행속도 구분에 따른 소음 평균 비교	72
[표 4.24] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 공용년수와 속도)	73
[표 4.25] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수와 속도)	74
[표 4.26] 보정평균과 사후분석 결과	74
[표 4.27] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석	75
[표 4.28] 포장공법에 따른 소음 차이 - Tukey 사후분석	75
[표 4.29] 공용년수에 따른 소음성능 분산분석	76
[표 4.30] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 공용년수)	77
[표 4.31] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수)	77
[표 4.32] 포장공법에 따른 소음성능 - 보정평균 & Tukey 사후분석	78
[표 4.33] 주행속도에 따른 소음성능 분산분석	79
[표 4.34] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 속도)	80
[표 4.35] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 속도)	80
[표 4.36] 포장공법에 따른 소음성능 - 보정평균 & Tukey 사후분석	81
[표 4.37] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석(측정속도 40km/h+50km/h+60km/h)	82
[표 4.38] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석(측정속도 40km/h)	83

[표 4.39] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 50km/h)	83
[표 4.40] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 60km/h)	84
[표 4.41] 주행속도 구분에 따른 소음 평균 비교	84
[표 4.42] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 공용년수와 속도)	85
[표 4.43] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수와 속도)	86
[표 4.44] 보정평균과 사후분석 결과	86
[표 5.1] 도로교통소음 예측식(RLS-90 기본식)	89
[표 5.2] 도로 횡단면도	90
[표 5.3] 교통 시나리오별 도로교통소음원 입력인자	90
[표 5.4] 저소음포장 보정치	91
[표 5.5] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=40km/h) (단위 : dB(A))	94
[표 5.6] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=50km/h)(단위 : dB(A))	95
[표 5.7] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=60km/h) (단위 : dB(A))	96
[표 5.8] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=70km/h) (단위 : dB(A))	97
[표 5.9] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=40km/h) (단위 : dB(A))	99
[표 5.10] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=50km/h) (단위 : dB(A))	100
[표 5.11] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=60km/h) (단위 : dB(A))	101
[표 5.12] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=70km/h) (단위 : dB(A))	102
[표 6.1] 기준소음도	112

그림 차례 List of Figures

[그림 3.1] 저소음포장 기술 참여 설명회	11
[그림 3.2] DSR 시험장비	13
[그림 3.3] RTFO 시험장비(왼쪽) 및 PAV 시험장비(오른쪽)	13
[그림 3.4] BBR 시편 준비 과정	14
[그림 3.5] BBR 시험장비	14
[그림 3.6] 공극률 측정시험 절차	17
[그림 3.7] 배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 공극률 시험 결과	19
[그림 3.8] 인장강도비 시험 과정	21
[그림 3.9] 인장강도비 시험 결과	21
[그림 3.10] 동적안정도 시험 과정	23
[그림 3.11] 비배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 동적안정도 시험 결과	25
[그림 3.12] 휠 트래킹 시험 후 공시체	26
[그림 3.13] 흐름손실률 시험 결과	28
[그림 3.14] 드레인 다운 시험 과정	29
[그림 3.15] 상온 칸타브로 손실률 시험 수행절차	30
[그림 3.16] 상온 칸타브로 시험 전후	32
[그림 3.17] 상온 칸타브로 시험 결과	32
[그림 3.18] 저온 칸타브로 손실률 시험 수행절차	32
[그림 3.19] 저온 칸타브로 시험 전후	34
[그림 3.20] 저온 칸타브로 시험 결과	34
[그림 3.21] 실내투수계수 시험 장면	34
[그림 3.22] 실내 투수계수 시험 결과	35
[그림 3.23] 흡음률 시험 장비 및 시험 과정	37
[그림 3.24] 저소음포장용 아스팔트 혼합물 흡음률 시험 결과	38
[그림 4.1] CPX 측정 트레일러	45

[그림 4.2] CPX 측정 시스템 마이크로폰	45
[그림 4.3] 마이크로폰 설치 위치	45
[그림 4.4] CPX 장비를 이용한 소음 측정	47
[그림 4.5] 속도별 소음 측정 결과 예	47
[그림 4.6] 복층 저소음포장의 소음 특성(측면)	50
[그림 4.7] 복층 저소음포장의 소음 특성(후면)	51
[그림 4.8] 단층 저소음포장의 소음 특성(측면)	51
[그림 4.9] 단층 저소음포장의 소음 특성(후면)	52
[그림 4.10] 비배수 저소음포장의 소음 특성(측면)	52
[그림 4.11] 비배수 저소음포장의 소음 특성(후면)	53
[그림 4.12] 일반포장의 소음 특성(측면)	53
[그림 4.13] 일반포장의 소음 특성(후면)	54
[그림 4.14] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(40km/h 측면)	55
[그림 4.15] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(40km/h 후면)	55
[그림 4.16] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(50km/h 측면)	56
[그림 4.17] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(50km/h 후면)	56
[그림 4.18] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(60km/h 측면)	57
[그림 4.19] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(60km/h 후면)	57
[그림 4.20] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(70km/h 측면)	58
[그림 4.21] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(70km/h 후면)	58
[그림 4.22] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(80km/h 측면)	59
[그림 4.23] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(80km/h 후면)	59
[그림 4.24] 측정 위치에 따른 속도별 소음 특성(저소음포장)	60
[그림 4.25] 측정 위치에 따른 속도별 소음 특성(일반포장)	60
[그림 4.26] 공용년수에 따른 소음 성능 분산분석	63
[그림 5.1] 시뮬레이션 대상지역	88
[그림 5.2] 소음 영향 시뮬레이션 대상지점 및 영향 도로	89
[그림 5.3] 저소음포장 보정치 적용구간	91
[그림 5.4] 수음점 설정 위치	92
[그림 5.5] 3차원 도시 모형 생성	93
[그림 5.6] 3D 소음지도(Q=500veh/h, V=70km/h, : 배수성(복층))	98

[그림 5.7] Cross-section noise map(Q=500veh/h, V=70km/h, : 배수성(복층))	98
[그림 5.8] 3D 소음지도(Q=2,000veh/h, V=70km/h, 포장재질: 배수성(복층))	103
[그림 5.9] Cross-section noise map(Q=2,000veh/h, V=70km/h, 포장재질: 배수성(복층))	103
[그림 5.10] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=500veh/h, V=40km/h)	104
[그림 5.11] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=500veh/h, V=70km/h)	105
[그림 5.12] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=2,000veh/h, V=40km/h)	106
[그림 5.13] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=2,000veh/h, V=70km/h)	107
[그림 6.1] 저소음포장 단면	113

제1장 서론

1.1 연구 배경

한국토지주택공사(LH)는 경기 남양주시 왕숙 하남시 교산 고양시 창릉 등 9개 지구에 달하는 대규모 기 신도시 건설을 앞두고 있으며 기 3기 신도시에 도로 소음 환경 기준(낮 65dB, 밤 55dB)을 만족시키기 위하여 방음벽 방음 터널 저소음포장 등 여러 소음저감 방안을 설계에 반영하려고 한다.

방음벽의 경우 높이가 높을수록 공사비가 급격하게 증가하는데 이는 방음벽이 높을수록 기초의 깊이와 규모가 커지기 때문이며, 또는 지하공간이 지하구조물이 밀접하게 있는 복합 주거단지에서 공간도 협소하여 방음벽 시공이 어려운 경우가 빈번히 발생하고 있다.

방음터널의 경우 공사비가 과도하기 높을 뿐만 아니라 교통사고 시 터널 화재 발생 등 대규모 안전 문제를 초래할 수 있어 방음터널의 설치에 제한하고 있다.

이에 대안으로 저소음포장과 방음벽 구성이나 소음효과가 우수한 고성능 저소음포장으로 소음저감 방안으로 적용되고 있는 경우가 증가하고 있으며 최근 소음저감 효과가 우수한 포장공법이 개발되어 LH에 적용을 요구하는 민원이 증가하고 있다.

이에 대해 정부는 도로법을 개정하여 시행하였다.('24.1.9. 개정, '24.7.10. 시행) 도로법 제29조의 2 “사고 예방과 소음저감을 위한 배수성 저소음포장”를 신설하여 저소음포장이 활성화 되도록 권장하고 있다. 따라서 향후 국내 저소음포장이 활성화 될 것으로 예상된다.

그러나, 저소음포장은 포장의 상태, 포장의 설계 시간 혹은 누적 교통량 등에 따라 지속적으로 소음효과가 감소하는 단점이 있어서 저소음포장을 적용하기 위해서는 저소음포장의 성능 검증 및 도로 소음이 환경 기준치 이상 되는 시기를 예측하기 위하여 장기간의 도로 소음 모니터링 필요하다.

따라서 국내 저소음포장의 종합적인 LH 저소음포장 인정기준(안)을 개발하기 위하여 소음측정, 소음저감 효과, 검증 내구성 및 공용성을 분석하였다.

1.2 연구 범위 및 목적

본 연구는 저소음포장 기업의 공모를 통하여 소음측정 대상 구간 선정 및 내구성을 평가하여 저소음포장의 종합적인 LH 저소음포장 인정기준을 개발하는 것이 목적이다.

이를 위하여 저소음포장의 국내외 문헌조사와 사례조사를 수행하여 저소음포장의 문제점을 분석하고 연구방향을 수립하였다. 또한, 기업체 공모에 의한 저소음포장의 소음측정 및 내구성 평가를 실시하여 공정성을 담보하였다. 연구항목, 수행방법, 결과물 등 연구범위 상세내용은 [표 1.1]과 같다.

[표 1.1] 연구 범위별 상세 내용

연구항목		수행목적	수행방법	결과물
사례 조사	<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 문헌조사 • 국내 저소음포장 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 저소음포장 사례 및 기준조사 • 저소음포장 현황 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 저소음포장의 문제점 분석 및 연구방향 수립
소음 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 공법·공용년수별 저소음포장 소음 측정 • 공용년수별 일반 포장 소음 측정 	<ul style="list-style-type: none"> • 저소음포장 소음측정 • 저소음포장 소음저감 효과 분석 • 기준소음도 설정 	<ul style="list-style-type: none"> • 소음측정(외부위탁) • 기업대상 공모하여 소음측정 대상구간 선정 • 현장조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 지침개발 기초자료
내구성 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 공법별 저소음 포장 내구성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 저소음포장 품질시험 • 저소음포장 내구성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 품질시험(외부위탁) • 기업대상 공모하여 공법별 공시체 품질시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 지침개발 기초자료
<ul style="list-style-type: none"> • 지침마련 		<ul style="list-style-type: none"> • 저소음포장 성능 인정기준 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 내외부 전문가 자문 • 실용화 협의회 개최 	<ul style="list-style-type: none"> • 공저소음포장 성능 인정기준 실무 적용 추진

제2장 문헌고찰 및 사례분석

2.1 저소음포장 정의

저소음포장은 일반적으로 사용되고 있는 밀입도 아스팔트포장이나 시멘트 콘크리트포장과 비교해서 동종의 포장에서 자동차 주행 소음이 작은 포장을 말하며, 사용하는 재료, 포장의 형식, 구조 등에 따라 다양한 공법이 개발되어 적용되고 있다.

저소음포장은 다공성의 배수성포장이 적용되고 소음저감의 효과가 확인되면서 소음저감을 목적으로 적용하면서 저소음포장으로 불리기 시작했다.

배수성포장은 1950년대 중반 영국에서 공항 활주로의 수막현상을 방지하기 위하여 공극이 20% 정도 되는 아스팔트포장을 시공한 것이 최초의 배수성포장으로 알려지고 있다. 그러나 당시에는 포장의 내구성이 문제였다.

그 후 1980년대 아스팔트 바인더의 특성을 개선한 개질 아스팔트가 개발되어 배수성포장의 내구성 문제가 해결되면서 유럽과 일본 등에서 시공면적이 확대되었다. 배수성포장이 배수 기능뿐만 아니라 혼합물 속의 공극으로 인해 자동차 소음의 저감 기능도 확인되면서 저소음포장으로도 적용되고 있다.

저소음포장은 기존 포장에 비해 공기의 투과성이 높아 타이어에 의한 공기의 압축이 작아지기 때문인 것으로 인식되고 있다. 다공질 구조가 할 수 있는 것은 에어펌핑을 저하, 소음 전파 시 흡음, 전파에 수반되는 초과 감쇄에 따른 저하 세 가지라고 한다.

저소음포장은 공극률이 높을수록, 사용하는 골재 최대 크기가 작을수록, 포장의 두께가 두꺼울수록 소음저감 효과가 우수한 것으로 알려지고 있다. 최근 국내에서는 최대 크기가 작은 소입정의 골재를 사용하여 소음을 줄이는 공법도 저소음포장으로 활용되고 있으며, 비배수성 저소음포장이라고 불리고 있다.

(1) 에어펌핑음의 저하 메커니즘

밀입도 아스팔트포장처럼 공극이 없는 포장과 달리 다공질 구조 포장의 경우 트래드 패턴의 홈과 노면 사이에 끼인 관 모양의 공기는 공극으로 빠지기 때문에 트래드 패턴의 홈벽이 변형되면서 진동하는 소음이 억제된다. 또 차가 나갈 때에 공극으로부터 방출되는 소리도 마찬가지로 억제된다.

(2) 타이어 가진음 저하 원리

타이어 가진음의 경우 노면의 경도와 형상이 큰 영향을 미친다. 일반적인 포장은 단단하기 때문에 그 경도가 타이어에 충격을 줘서 타이어 가진음이 발생하기 때문이다. 만약에 포장을 탄성체로 만들 수만 있다면 타이어와 노면이 접촉할 때의 충격음과 타이어의 가진음을 완화시킬 수 있다. 노면의 요철은 타이어/노면소음 중 타이어 가진음, 충격음 및 에어펌핑음 등에 영향을 미친다. 입경이 작은 골재를 사용한 저소음포장은 포장 표면의 결이 세밀해서 평탄성이 좋고 소음 저하 효과도 더 높일 수 있다. 그러나 위에서도 언급한 에어펌핑 소음의 영향을 고려한다면, 타이어와 노면 사이에 끼인 공기가 빠져나갈 구조가 필요하다. 따라서 소음 저하 효과를 높이려면 공극이 있으면서도 포장 표면에 적당한 요철이 있어야 한다.

(3) 그 외의 소음저하 원리

저소음포장 도로 설계시 고려 될 사항으로 소음을 저하 시킬 수 있는 방법이 있다. 실제로 공극이 클수록 소음이 줄어들기 때문에 포장체 자체의 두께를 증가시켜 유효 공극률을 늘려주거나 표층을 2층으로 하는 2층식 저소음 포장을 이용하여 상층에는 작은 골재를 하층에는 큰 골재를 사용함으로써 소음저감 효과를 높일 수 있게 된다. 또한 다공성 탄성포장을 이용하여 반사음을 줄이는 것도 소음저감 효과를 볼 수 있다.

2.2 국내외 현황 및 적용사례

2.2.1 국외 현황

배수성포장은 1980년대에 아스팔트 바인더의 특성을 개선한 고점도 개질 아스팔트가 개발되면서 유럽을 중심으로 적용 국가와 시공면적이 확대되었으며, 일본에서는 유럽에서 배수성포장의 효과가 확인되면서 그 기술을 도입하면서 시공면적이 확대되었다.

본 절에서는 유럽, 일본의 배수성포장 및 저소음포장 현황과 적용 효과 분석 사례에 대해 살펴보았다.

1) 유 럽

유럽에서는 활주로의 수막현상을 방지하기 위하여 개발되었으나, 소음저감 효과가 확인되면서 현재는 유럽의 여러 나라에서는 소음저감 효과를 목적으로 배수성포장을 적용하고 있다.

영국의 경우 1999년 신설도로와 재포장에 저소음포장을 적용하는 정책을 발표하였으며, 2011년까지 고속도로와 주요한 간선도로 저소음포장을 60% 까지 적용하는 것으로 공표하였다. 기존 일반포장 대비 2.5dB(A) 이상을 저감하는 것을 저소음포장의 소음 저감 목표로 하였으며, 이는 시공 후 12개월 경과한 시점에서 소음을 측정하고 시공 후 24개월이 경과한 시점에서 노면 거칠기를 모니터링하여 저소음포장 인증서에 명시하도록 하였다.

독일에서는 1986년 처음으로 배수성포장이 시공되었으며 1990년부터 시공 실적이 급격히 증가하였다. 저소음포장에 대한 구체적인 기준을 정의하고 있지는 않지만 국내와 마찬가지로 도로를 신설하거나 확장할 때 도로교통 소음에 대한 기준에 따라 기준을 초과하지 않도록 하고 있다. 도로교통소음을 산정할 때 쇄석매스틱 아스팔트(Stone Mastic Asphalt)는 2dB(A), 배수성 아스팔트는 5dB(A)를 저감하여 산정하도록 하고 있다.

오스트리아의 배수성포장은 기존 공용 구간에서 일부 터널을 제외하고는 전면적으로 사용을 권장하고 있다. 혼합물의 골재 최대치수는 8~11mm, 공극률은 20%,

결합재는 개질아스팔트에 화이버를 첨가하거나 고무 아스팔트를 사용하고 있다.

프랑스는 시가지 지역에서는 저소음에 착안한 소음 대책, 고속도로에서는 우천 시의 배수성에 착안한 미끄럼 대책을 목적으로 배수성포장을 적용하고 있다.

네덜란드의 배수성포장은 교통안전과 소음저감을 목적으로 도입되었다. 1950년대에 공항에서 처음 적용되어 1970년대 들어와서 일반 포장에 도입이 검토되었고, 1992년부터 본격적인 연구에 착수하고 있다.

네덜란드에서는 골재 크기의 혼합비율에 변화를 주어 저소음·배수성 포장의 효과를 검토하기 위한 다양한 실험을 시행하고 있다. 다년간 저소음·배수성 포장을 사용하여 도시의 환경적 문제에 대처하고 있으며, 새로운 개념인 복층 형태의 저소음·배수성 포장 시공기법을 제안하였다. 그 결과 차량이 50km/h의 속도일 때 전체 소음이 3~4dB(A), 100km/h의 속도일 때는 5.5dB(A) 감소하는 효과가 있었다. 또한 PCC(Portland Cement Concrete)와 비교했을 때 7~12dB(A) 소음저감 효과가 있었다. 이외에도 골재 크기의 변화에 따른 감속도와 미끄럼 저항에 대한 연구가 이루어지고 있다. 다만 복층 형태의 저소음포장은 비용편익분석을 통하여 적용 여부를 결정하도록 하고 있다.

덴마크는 저소음포장의 인증시스템을 개발하여 활용하고 있는 국가이다. 오랜 연구를 통해 저소음포장의 기능을 측정하여 성능을 평가하는 시스템을 개발하였으며 저소음포장 도로는 최소 100m 이상 CPX 측정방법으로 50km/h와 80km/h에서 소음을 측정하여 3등급으로 저소음포장을 인정하고 있다. 일반포장 대비하여 7dB(A) 이상 A등급, 5~7dB(A) B등급, 3~5dB(A) C등급으로 구분하고 있다. 공극률이 클수록 소음이 감소하는 경향을 보기 때문에 덴마크에서는 공극률 18% 이상을 요구한다. 덴마크의 소음인정기준은 [표 2.1]에서 보는 바와 같다.

[표 2.1] 덴마크 저소음포장의 소음기준도

측정방법	측정속도	기준소음도	평가구간	기준도로
cpx (ISO 11819-2)	50km/h	94.0dB(A)	최소 100m	<ul style="list-style-type: none"> - 골재크기 11mm - 밀입도 아스콘 - 공용 8년
	80km/h	102.0dB(A)		

(2) 미 국

미국에서는 1959년 애리조나, 네바다주에서 개립도 마모층(Open-Grade Friction Course ; OGFC)을 처음으로 적용하였으며, 이 후 1973년 미연방도로국(FHWA)에서 OGFC 지침서를 제시하고 각 주에서 사용을 권장하고 있다. 미국에서의 배수성포장은 유럽에서 소음저감 효과를 목적으로 적용하는 것과는 달리 우천시 미끄럼 저항을 확보하는 것을 목적으로 적용하고 있다.

OGFC의 경우 1950년대에 개발된 이후로 70년대부터 상용화가 시작되어 미국의 각 주에서는 OGFC의 사용이 증가하였다. 그러나 포장면의 라벨링 및 골재박리 현상이 발생하면서, 기대수명에 미치지 못하는 성능저하의 이유로 70년대 말부터 사용이 중지되었다. 그 후 아스팔트의 성능이 개선되고, 유럽의 배수성 포장 배합설계를 활용하여 20%이상의 공극률에 골재는 거칠어지는 경향의 새로운 배합설계를 개발하였다. 2011년에는 CRM같은 개질제를 이용한 OGFC의 수명이 10~12년까지 연장되어서 과거의 단기수명이라는 문제점도 해결되었다.

OGFC는 애리조나, 캘리포니아, 텍사스, 앨라배마, 플로리다에서 시공되고 있으며 WDOT의 보고서에 따르면 시공 시 초기 소음감소가 3~5dB(A) 효과가 있다고 보고되었다(Tim Sexton, 2010).

(3) 일 본

일본에서는 1987년 유럽의 기술을 도입하여 동경시에 저소음을 목적으로 최초로 시험시공을 추진하였고(동경도 환상 7호선 일대), 고속도로 도로공단에서는 1989년에 토호쿠 고리아마에서 처음으로 시험시공을 실시하였다. 초창기에는 미국이나 유럽의 저소음포장 기술을 도입하여 시공하였으나 재료의 성능 문제로 대규모 하자가 발생하는 문제가 많았다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 1991년 일본 도로협회 주관으로 유럽포장조사연구단을 구성하여 다양한 연구를 통해 일본형 개질 아스팔트 바인더를 개발하고 그에 맞는 혼합물의 생산 및 시공 방법 등을 정리하여 1996년에 배수성포장기술지침(안)을 작성하였다. 이후 2001년 포장 설계구조령이 개정되면서 모든 고속도로에 배수성포장을 적용하고 일반도로에도 특별한 사유가 있는 경우를 제외하면 배수성포장 적용을 원칙으로 하고 있다.

일본의 저소음포장의 인정기준은 별도의 기준은 없으나, 입도 기준과 공극율(20%) 만족한다면 단층은 6~7dB, 복층은 8~9dB 인정하며, 기본적으로 대부분 도시도로는 단층 저소음포장을 적용한다.

2.2.2 국내 현황

국내에는 소음저감 보다는 주행안정성 확보를 목적으로 하는 배수성포장이 도입되었다.

1997년 정부고속도로 양산인근 200m 구간에 배수성 포장에 최초 시험포장 실시하였으며, 이 후 2001년 남해고속도로 400m 구간 배수성포장을 적용하였다. 일반국도의 경우 1999년 충북 영동의 국도 19호선에 500m 구간에 시험포장 실시 후 시가지 소음 억제를 목적으로 2000년 약 15km 구간과 2001년 34km 구간에 적용하였으며, 2002년에는 미끄럼 사고 저감을 위해 위험 도로 구간 약 23km, 2003년에는 약 55km 적용 (한국도로공사 도로교통 기술원, 2009) 하였다.

시가지 도로의 경우 1999년 저소음 배수성 포장이 국토해양부의 건설신기술 지정에 따라 서울특별시에 약 152km가 적용되었으며, 1999년에서 2004년까지 약 34km 구간을 시공하여 적용이 미진하였으나, 2005년 포장도로 품질향상 추진 계획에 따라 2005년 17km, 2006년 이후 시범시공을 거쳐 114km 등 적용 구간 확대를 위해 노력하였다.(김재원, 2003)

초기 배수성포장은 골재 탈리 및 조기 파손으로 인한 내구성 문제로 발주처의 소극적인 적용 경향으로 활성화 되지 못하였다.(한국건설기술연구원, 2008)

배수성 포장의 품질향상을 위해 배수성 아스팔트 콘크리트 포장의 배합설계, 품질기준 등이 2011년 마련되었으며, 새로운 배수성 아스팔트 포장 공법이 개발되는 등 기술의 발전과 2020년 “배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침”을 제정하는 등의 기술 발전이 이루어졌다. 2020년 정부는 보도자료를 통해 겨울철 도로 살얼음 위험 등으로부터 안전한 도로 조성을 위해 행정안전부, 경찰청 등 관계부처 합동으로 ‘겨울철 도로교통 안전 강화대책’을 수립하고, 빗길 교통사고 예방을 위한 배수성 포장 활성화 기반을 마련하였다. (임경빈, 2023)

국내에서의 측정 사례에 따르면 일반국도에서 2.2~3.9dB, 고속도로에서 2.6dB 자동차소음이 저감되는 것을 확인한 바 있으며, 서울시 북부간선도로 구리 IC 부근에 시공된 배수성포장의 소음저감 효과를 측정한 보고에 따르면 일반포장에

비해 3~6dB(A)정도의 소음저감 효과가 있다고 보고하였다.

한국도로공사 도로교통연구원에서는 배수성포장 시험시공 구간에 대한 소음 측정을 실시하였다. 서로 다른 포장 구간을 주행속도 80km/h로 일정하게 주행하여 타이어 근접 소음(CPX)의 방식으로 각각 3회씩 동일한 시간동안 측정 후 상대적인 비교를 실시하였다. 이 실험이 상대적인 측정이지만 배수성 포장에서 평균적으로 약 3.9dB(A) 정도 소음저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 2002년에는 경부고속도로 부산 방향 384.32km~385.72km 구간에서 일반포장 구간과 배수성포장 구간에서 소음정도를 측정하였다(도로교통연구원, 2005). 총 3회에 걸쳐 측정한 결과, 배수성포장 구간이 2.6dB(A) 정도 낮게 측정되었다.

현재 제2경부고속도로(구리~세종)가 배수성포장으로 시공되고 있으며, 서울시는 우천시 이용자의 안전을 확보하기 위하여 배수성포장의 적용 확대를 검토하고 있다.

2024년 국내 도로법에 배수성 저소음포장의 적용 규칙이 신설되면서 배수성 저소음포장의 적용이 확대될 것으로 예상되고 있다. 그러나, 국내의 저소음 포장의 인정기준이 없이 단층 및 비배수 저소음포장은 -3dB(A), 복층 저소음 포장은 속도에 따라 5~7dB(A) 소음저감효과를 관례적으로 적용하고 있다.

제3장 저소음포장의 공용성능 평가

3.1 저소음포장 공용성능 시험 공모

국내에 저소음포장이 활용되고 있으나 성능을 평가할 수 있는 기준이 마련되어 있지 않아 저소음포장의 기술 수준을 평가하기 어렵다. 따라서 국내에서 적용되고 있는 저소음포장의 성능을 확인하고 관련 기준을 마련하기 위해서는 저소음포장 기술을 소유하고 있는 기업의 참여가 무엇보다도 중요하다.

본 연구에서는 한국배수성기술협회와 한국도로과학회를 통해 저소음포장 기술을 소유하고 있는 기업의 참여를 요청하였다. 기업의 참여를 통해 국내 저소음포장 기술 적용 현황과 성능 평가결과를 기반으로 DB를 구축하고 이를 통해 LH공사 현장 중 저소음포장 적용이 필요한 구간에 활용하고자 하며, LH 저소음포장 성능 인정기준을 마련하고자 하였다.

기업의 참여는 신청서와 아스팔트포장 품질기준에 해당되는 공인시험 성적서 대상 기술의 소음측정 자료는 있는 경우 같이 제출하도록 요청하였다.

기업이 소유하고 있는 기술은 국토교통부가 제시하고 있는 기준을 만족하는 기술, 본 내용과 관련하여 인증 신기술 또는 기타 신기술을 보유한 기술, 신기술은 없지만 다수의 시공실적이 있는 기술도 참여가 가능하도록 하였다.

저소음포장 성능시험 신청 요건은 다음과 같다.

- 1) 저소음포장에 대한 지식재산권(인증신기술 및 기타신기술, 단 통상실시권 제외) 및 포장공사업 면허를 보유한 자
 - 지식재산권에 대한 품질기준을 만족하는 공인 시험성적서 제출 가능한 자
 - 지식재산권에 대한 권리권자가 다수일 경우 대표하는 1인 혹은 1개 기업에서만 신청(중복참여 불가)
- 2) 신기술이 없는 저소음포장 기술을 보유한 자
 - 품질기준을 만족하는 공인 시험성적서 제출 가능한 자
 - 저소음포장 시공실적 제출 가능한 자

참여를 신청한 기업에서 제출한 자료를 검토하여 참여 요건을 만족하는 기술에 대하여 저소음포장 성능시험 대상을 선정하였다.

저소음포장 성능시험 대상으로 선정된 기술에 대해서 제출된 자료와 동일한 혼합물 및 공시체를 제출받아 공용성능 시험을 실시하고 기 적용된 구간에 대해 소음 성능시험을 실시하여 평가하고자 하였다.

저소음포장 기술 참여 공모에 참여한 업체는 총 16개 업체, 21개 기술이 참가 신청을 하였으며, 제출된 자료를 검토하여 최종 13개 업체, 16개 공법을 대상으로 선정하였다. 16개 공법으로는 배수성포장 10개, 비배성포장 6개 기술이 참여하였다.

최종 선정된 업체를 대상으로 설명회를 실시하였다.



[그림 3.1] 저소음포장 기술 참여 설명회

저소음포장 기술 참여 설명회에서는 수행하고 있는 과제의 수행 배경과 목적, 저소음포장 기술의 성능평가 및 성능 인정 방안 수행 계획에 대해 설명하였다. 저소음포장 기술의 공용성능 평가는 참여 업체에서 대상 기술의 혼합물과 공시체를 제작하여 제출하면 연구팀에서 관련 기준에 따라 시험을 수행하고 국토교통부의 품질기준에 따라 성능을 평가하는 것으로 하였다. 공용성능 평가는 각 기업에서 개발 또는 사용하고 있는 아스팔트 바인더와 혼합물의 성능을 평가하는 것으로 하였으며, 혼합물을 제작하기 위하여 1등급 골재원을 선정하고 그 골재로 혼합물을 제작 제출하도록 하였다.

저소음포장 기술의 소음성능 평가는 참여 기업에서 기 시공한 구간의 위치 자료를 제출하면 그 구간에 대해 근접소음을 측정하고 성능을 평가하는 것으로 하였다.

3.2 저소음포장용 아스팔트 바인더 성능 평가

저소음포장용 아스팔트 바인더의 성능 평가는 국토교통부의 아스팔트 바인더의 품질 항목 중 공용성 등급 시험으로 평가하고자 한다. 배수성포장은 공용성 등급 82-22 이상, 비배수성은 공용성 등급 76-22 이상을 성능 평가 기준으로 하였다.

(1) 아스팔트 바인더 공용성 등급시험

저소음포장용 아스팔트 바인더의 공용성 등급을 구하기 위해서 KS F 2389 아스팔트의 공용성 등급시험 방법을 준수하여 시험을 수행하였다. KS F 2389 방법에 따라 동적 전단 유변 물성 시험(Dynamic Shear Rheometer, DSR)과 보형상 유변 물성 시험(Bending Beam Rheometer, BBR), 회전 박막 가열 시험(Rolling Thin Film Oven, RTFO) 및 압력 노화 시험(Pressure Aging Vessel, PAV)을 수행하였다. 아스팔트 바인더의 소성변형률과 탄성회복률은 ASTM D 7405 방법에 따라 아래의 식을 사용하여 계산하였다.

$$\text{소성변형률}(J_{irr}, kPa-1) = \text{회복되지 않은 전단변형률}/3.2kPa \quad \text{식 (1)}$$

$$\text{탄성회복률}(\%) = \text{회복된 전단변형률}/\text{최대전단변형률} \quad \text{식 (2)}$$

(2) 동적 전단 유변 물성(DSR) 시험 방법

본 시험은 KS F 2393 방법을 준수하여 시험을 수행하였으며, 아래 그림에 DSR 시험장비를 나타내었다. DSR 시험은 변형률 제어 방식과 응력 제어 방식으로 실시할 수 있으며 본 연구에서는 변형률 제어 방식을 사용하여 시험을 수행하였다. 변형률 제어 방식으로 측정하는 경우에는 복합전단계수의 값에 따라 변형률을 정해야 하며, 다음 식에 의해 계산된 값의 20% 이내로 하여야 한다.

$$\gamma(\%) = 12.0 / (G^*)^{0.29} \quad \text{식 (3)}$$

여기서,

γ : 전단변형률(%)

G^* : 복합전단계수(kPa)

변형률 제어 방식에서 목표 변형률 값은 [표 3.1]에 나타난 바와 같이 재료에 따라 적절한 값을 선택하여야 한다.

[표 3.1] 목표 변형률 값

재료	kPa	변형률 %	
		목표값	범위
원 아스팔트($G^*/\sin\delta$)	1.0 이상	12	9~15
롤링 박막 가열 시험 후 잔류 아스팔트($G^*/\sin\delta$)	2.2 이상	10	8~12
압력 노화 시험 후 잔류 아스팔트 ($G^*\sin\delta$)	5000 이상	1	0.8~1.2



[그림 3.2] DSR 시험장비



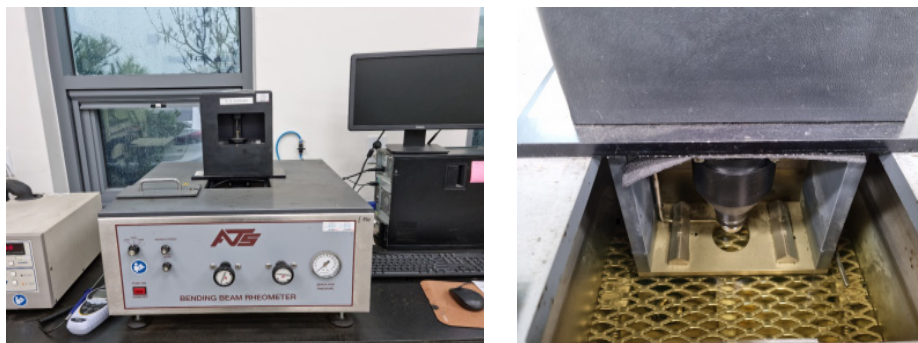
[그림 3.3] RTFO 시험장비(왼쪽) 및 PAV 시험장비(오른쪽)

(3) 보형상 유변 물성 측정(BBR)시험 방법

본 시험은 KS F 2390 방법을 준수하여 시험을 수행하였으며, [그림 3.4]에 BBR 시험장비를 나타내었다. 아스팔트 보 시험편은 KS F 2390에 따라 [그림 3.5]와 같이 조립한 시험편 몰드에 가열한 아스팔트를 부어 제작하였으며, 상온에서 45~60분 방치하여 식힌 후, 가열한 스페츨러를 사용하여 시험편 몰드 윗부분의 아스팔트 잔여분을 잘 다듬었다. 그 후 시험편은 몰드별로 $-5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 냉동고나 얼음물에 넣어 5~10분 냉각시켰으며, 후에 시험편 몰드에서 아스팔트 보 시험편을 떼어 내어 사용하였다. 제작한 시험편은 미리 시험 온도로 맞추어 둔 시험 수조 안에 즉시 넣어 양생하였으며, 시험은 양생 시작으로부터 60 ± 5 분 이내에 완료하도록 하여야 한다.



[그림 3.4] BBR 시험편 준비 과정



[그림 3.5] BBR 시험장비

(4) 아스팔트 바인더공용성 등급시험 결과

아스팔트 바인더 성능 등급시험 결과를 아래 표에 나타내었다. 소성변형률 시험 결과 16개의 바인더 모두 품질기준을 만족하였다. 탄성회복률 시험 결과 16개의 아스팔트 바인더 중 15종류(1번, 2번, 3번, 4번, 5번, 6번, 8번, 9번, 10번, 11번, 12번, 13번, 14번, 15번, 16번)가 품질기준을 만족하였으며, 아스팔트 성능등급 시험 결과 16종류의 아스팔트 바인더 중 11종류(2번, 4번, 5번, 6번, 8번, 9번, 10번, 11번, 14번, 15번, 16번)만 품질기준인 PG82-22를 만족하였다.

[표 3.2] 비배수성 바인더 시험 결과

항목	3번	8번	12번	13번	17번	품질기준
$G^*/\sin\delta@76^\circ\text{C}$	1.70	3.6	1.46	3.15	0.96(F)	-
$G^*/\sin\delta@82^\circ\text{C}$	1.08	2.3	0.84(F)	1.79	@70°C:1.75	
$G^*/\sin\delta@88^\circ\text{C}$	0.70(F)	1.5	n/a	1.03	n/a	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@76^\circ\text{C}$	2.84	4.7	3.64	5.91	2.24	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@82^\circ\text{C}$	1.69(F)	3.4	2.12(F)	3.39	1.26(F)	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@88^\circ\text{C}$	n/a	2.4	n/a	1.95(F)	n/a	
Creep Stiffness (S) @-12°C	205.66	36	108.47	158.07	138.39	
Creep Stiffness (S) @-18°C	430.16(F)	86	233.87	301.15(F)	280.53	
Creep Stiffness (S) @-24°C	n/a	-	n/a	n/a	n/a	
m-Value @-12°C	0.30	0.3	0.313	0.281(F)	0.301	
m-Value @-18°C	0.221(F)	0.3	0.251	0.219(F)	0.244(F)	
m-Value @-24°C	n/a	-	n/a	n/a	n/a	
MSCR Jnr, 3.2kPa ⁻¹ @64°C	0.1385	0.206	0.179	0.150	0.4436	0.5 이하
MSCR % Recovery @64°C	80.49%	86.4%	67.92%	56.96%	40.66%	55 이상
PG 등급	76-22	88-28	76-22	82-16	70-22	76-22 이상

[표 3.3] 배수성 바인더 시험 결과

항목	1번	2번	4번	5번	6번	9번	품질기준
$G^*/\sin\delta@76^\circ\text{C}$	2.03	3.85	3.58	2.94	3.4	2.9	-
$G^*/\sin\delta@82^\circ\text{C}$	1.48	2.84	2.48	2.02	2.7	1.7	
$G^*/\sin\delta@88^\circ\text{C}$	1.02	2.16	1.72	1.54	2.2	1.1	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@76^\circ\text{C}$	3.63	4.75	4.59	4.48	3.7	3.9	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@82^\circ\text{C}$	2.47	3.52	3.06	2.57	3.0	2.2	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@88^\circ\text{C}$	1.67(F)	2.68	2.06(F)	1.55(F)	2.4	-	
Creep Stiffness (S) @-12°C	87.73	80.28	35.7	128.45	17	108	
Creep Stiffness (S) @-18°C	n/a	191.13	76.79	261.77	46	360	
Creep Stiffness (S) @-24°C	n/a	371.08(F)	123.45	n/a	97	-	
m-Value @-12°C	0.284(F)	0.357	0.356	0.314	0.3	0.3	
m-Value @-18°C	n/a	0.301	0.304	0.234(F)	0.3	0.4	
m-Value @-24°C	n/a	0.262(F)	0.283(F)	n/a	-	-	
MSCR Jnr, 3.2kPa^{-1} @64°C	0.0352	0.0092	0.0284	0.149	0.105	0.459	0.5 이하
MSCR % Recovery @64°C	93.79%	97.93%	93.42%	67.71%	92.7%	55.2%	55 이상
PG 등급	82-16	88-28	82-28	82-22	88-28	82-28	82-22 이상

항목	10번	11번	14번	15번	16번	품질기준
$G^*/\sin\delta@76^\circ\text{C}$	3.04	3.04	3.83	3.63	3.0	-
$G^*/\sin\delta@82^\circ\text{C}$	2.17	2.17	2.48	2.36	1.8	
$G^*/\sin\delta@88^\circ\text{C}$	1.73	1.73	1.63	1.57	1.2	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@76^\circ\text{C}$	4.61	4.61	4.38	6.73	3.8	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@82^\circ\text{C}$	2.84	2.84	2.83	4.39	2.2	
(RTFOT 후) $G^*/\sin\delta@88^\circ\text{C}$	1.90(F)	1.90(F)	1.86(F)	2.89	-	
Creep Stiffness (S) @-12°C	57.67	57.67	150.64	133.75	89	
Creep Stiffness (S) @-18°C	100.85	100.85	321.45(F)	281.6	201	
Creep Stiffness (S) @-24°C	211.79	211.79	n/a	n/a	-	
m-Value @-12°C	0.35	0.35	0.34	0.31	0.3	
m-Value @-18°C	0.311	0.311	0.28(F)	0.255(F)	0.2	
m-Value @-24°C	0.248(F)	0.248(F)	n/a	n/a	-	
MSCR Jnr, 3.2kPa^{-1} @64°C	0.0585	0.0585	0.04	0.03	0.310	0.5 이하
MSCR % Recovery @64°C	87.14%	87.14%	91.08%	90.72%	56.5%	55 이상
PG 등급	82-28	82-28	82-22	88-22	82-22	82-22 이상

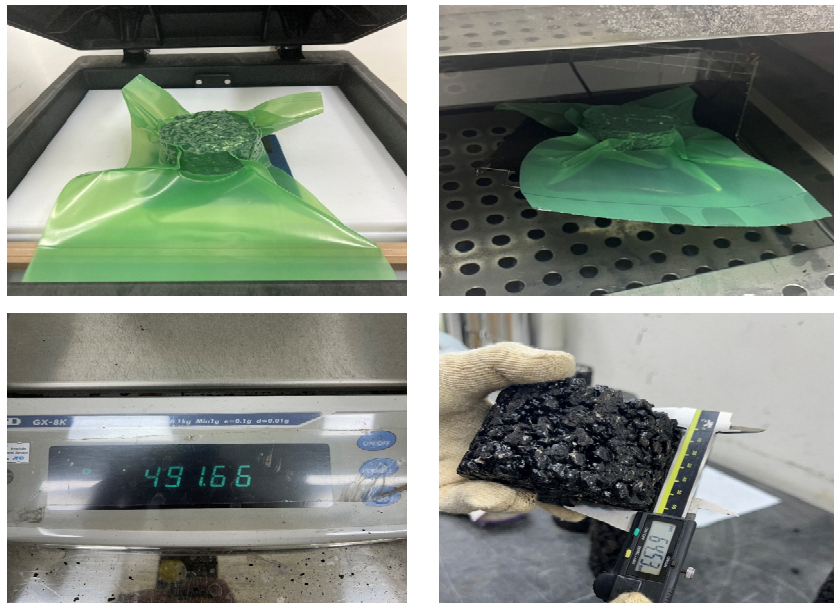
3.3 저소음포장용 아스팔트 혼합물 성능 평가

3.3.1 공극률 시험 및 결과

3.3.1.1 공극률 시험 방법

본 시험은 KS F 2346 시험 방법을 준수하여 수행하였다. KS F 2353 또는 KS F 2446에 따라 다져진 아스팔트혼합물의 겉보기 밀도를 구하였다. 그 후 입도나 아스팔트 함유량의 차이에서 오는 영향을 피하기 위하여 비교될 수 있는 아스팔트혼합물의 이론 최대 밀도를 구하였다(KS F 2366). 다져진 아스팔트혼합물의 공극률을 구하는 식(7)을 아래에 나타내었다.

$$\text{공극률(\%)} = \left(1 - \frac{\text{겉보기 밀도}}{\text{이론 최대 밀도}}\right) \times 100 \quad \text{식 (7)}$$



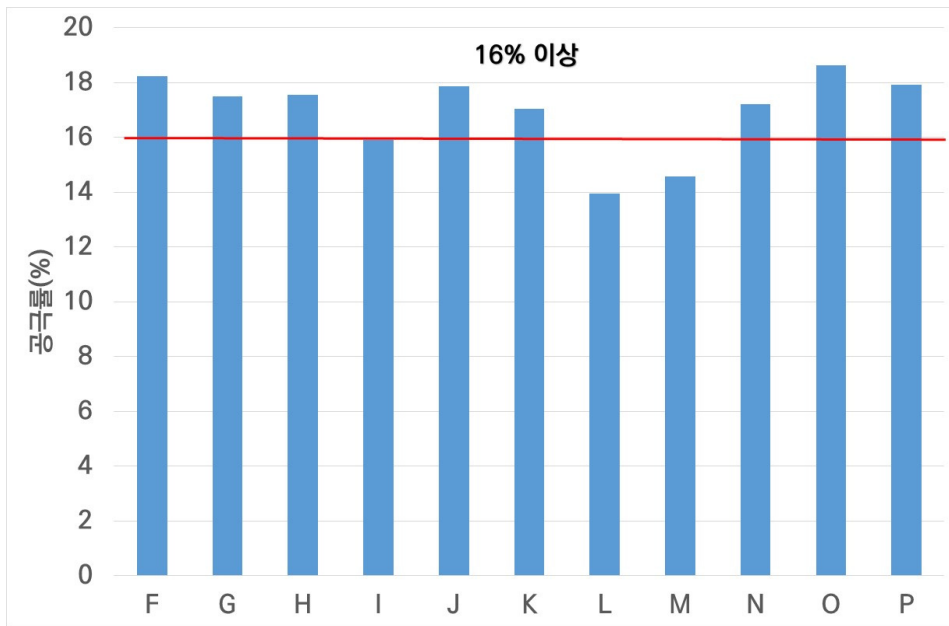
[그림 3.6] 공극률 측정시험 절차

3.3.1.2 공극률 시험 결과

아래 표에 배수성과 비배수성 저소음포장용 아스팔트 혼합물 공극률 시험 결과와 품질기준을 각각 나타내었다. 16개 업체(배수성 11개, 비배수성 5개) 중 3개의 업체(5번, 10번, 11번)를 제외하고 모두 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3.4] 배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 공극률 시험 결과

업체명		공극률 (%)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
1번	1-F-1	18.16	18.24	0.50	3	16 이상
	1-F-2	18.78				
	1-F-3	17.79				
2번	2-F-1	17.60	17.50	0.09	0	
	2-F-2	17.46				
	2-F-3	17.44				
4번	4-F-1	16.48	17.56	2.32	13	
	4-F-2	15.98				
	4-F-3	20.22				
5번	5-F-1	15.85	15.90	0.60	4	
	5-F-2	16.53				
	5-F-3	15.33				
6번	6-F-1	18.50	17.85	0.94	5	
	6-F-2	18.28				
	6-F-3	16.77				
9번	9-F-1	16.80	17.05	0.79	5	
	9-F-2	16.42				
	9-F-3	17.93				
10번	10-F-1	13.83	13.95	0.53	4	
	10-F-2	13.48				
	10-F-3	14.53				
11번	11-F-1	14.68	14.56	0.83	6	
	11-F-2	15.32				
	11-F-3	13.68				
14번	14-F-1	18.05	17.20	0.86	5	
	14-F-2	16.33				
	14-F-3	17.21				
15번	15-F-1	18.13	18.62	0.46	2	
	15-F-2	18.68				
	15-F-3	19.05				
16번	16-F-1	21.12	17.92	2.78	16	
	16-F-2	16.06				
	16-F-3	16.59				



[그림 3.7] 배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 공극률 시험 결과

[표 3.5] 비배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 공극률 시험 결과

업체명		공극률 (%)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
3번	3-F-1	3.11	3.4	0.22	7	2.0~4.0
	3-F-2	3.43				
	3-F-3	3.52				
8번	8-F-1	4.11	3.9	0.48	12	
	8-F-2	4.16				
	8-F-3	3.30				
12번	12-F-1	3.01	3.09	0.40	13	
	12-F-2	3.52				
	12-F-3	2.73				
13번	13-F-1	2.31	2.55	0.24	9	
	13-F-2	2.56				
	13-F-3	2.78				
17번	17-F-1	4.05	4.0	0.14	3	
	17-F-2	3.84				
	17-F-3	4.11				

3.4 인장강도비(TSR) 시험 및 결과

3.4.1 인장강도비 시험 방법

인장강도비 시험은 아스팔트혼합물의 수분 저항성을 측정하기 위한 시험으로 KS F 2398 시험 방법을 준수하여 시험을 진행하였다. 공시체는 건조상태 3개와 습윤상태 3개로 회사별 6개의 공시체를 준비하였다. 건조상태 공시체는 시험 전까지 실온에 방치하고, 2중으로 지퍼백 등에 비닐에 넣은 후 25℃의 항온수조에 120±10분간 수침 후 간접인장강도 시험을 수행하였다. 습윤상태 공시체는 60±1℃의 항온수조에 24±1시간 동안 수침 후 -18±3℃의 온도로 16시간 냉각하였다. 그 후 공시체를 60±1℃의 항온수조에 24±1시간 동안 수침한 후 공시체를 꺼내 25±0.5℃의 항온수조에 2±0.5시간 수침 후 간접인장강도 시험을 수행하였다. 인장강도는 최대 하중 강도 값을 이용하여 식(8)로 계산하였다.

$$S_t = 2000 \frac{P}{\pi t D} \quad \text{식 (8)}$$

여기서,

S_t =인장강도 (kPa)

P = 최대 하중 (N)

t = 인장 시험 직전에 측정한 공시체 두께(mm)

D = 공시체 직경(mm)

인장강도비는 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$TSR = \left(\frac{S_{tm}}{S_{td}} \right) \times 100 \quad \text{식 (9)}$$

여기서,

TSR =인장강도비(%)

S_{tm} =수분처리 된 공시체의 평균 인장강도(kPa)

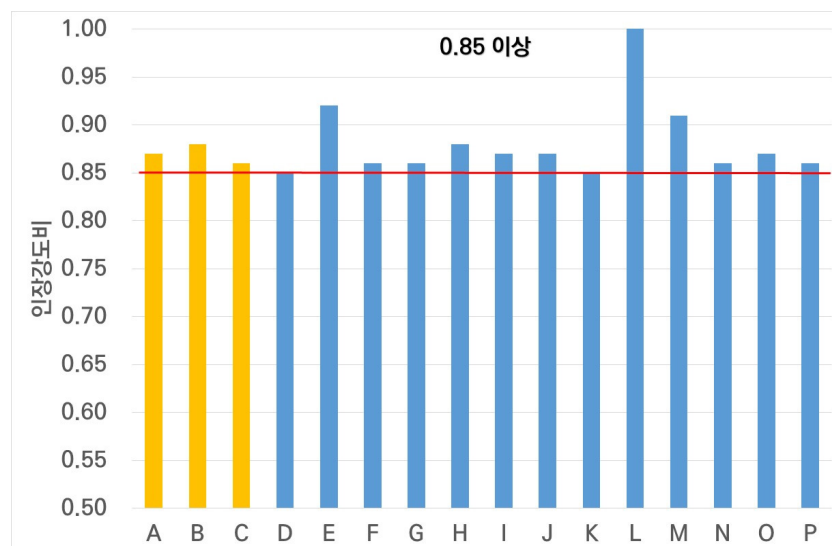
S_{td} = 건조 공시체의 평균 인장강도(kPa)



[그림 3.8] 인장강도비 시험 과정

3.4.2 인장강도비 시험 결과

아래 표에 인장강도비 시험 결과와 품질기준을 나타내었으며, 비배수성 혼합물 5종(3번, 8번, 12번, 13번, 17번)과 배수성 혼합물 11종(1번, 2번, 4번, 5번, 6번, 9번, 10번, 11번, 14번, 15번, 16번) 모두 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.



[그림 3.9] 인장강도비 시험 결과

[표 3.6] 인장강도비 시험 결과

업체명	건조상태					습윤상태					TSR	품질 기준
	공시체	인장 강도 (kPa)	평균	표준 편차	COV (%)	공시체	인장 강도 (kPa)	평균	표준 편차	COV (%)		
1번	1-1	657.2	605.3	51.1	8	1-4	548.3	523.2	29.2	6	0.86	
	1-2	555.0				1-5	491.1					
	1-3	603.5				1-6	530.2					
2번	2-1	657.7	620.3	38.1	6	2-4	513.4	536.0	19.6	4	0.86	
	2-2	581.6				2-5	548.0					
	2-3	621.6				2-6	546.5					
3번	3-1	656.6	643.1	28.9	4	3-4	463.8	557.3	84.3	15	0.87	
	3-2	662.7				3-5	627.7					
	3-3	609.9				3-6	580.3					
4번	4-1	551.1	534.6	16.0	3	4-4	465.3	471.9	7.9	2	0.88	
	4-2	519.1				4-5	469.6					
	4-3	533.6				4-6	480.7					
5번	5-1	778.8	767.8	43.7	6	5-4	660.4	668.7	34.8	5	0.87	
	5-2	804.9				5-5	706.9					
	5-3	719.6				5-6	638.8					
6번	6-1	614.8	609.2	8.2	1	6-4	538.7	528.6	19.8	4	0.87	
	6-2	613.0				6-5	505.8					
	6-3	599.7				6-6	541.3					
8번	8-1	527.7	497.9	26.9	5	8-4	437.2	437.1	23.9	5	0.88	
	8-2	490.6				8-5	413.1					
	8-3	475.5				8-6	461.0					
9번	9-1	875.9	855.0	48.8	6	9-4	720.7	728.8	9.8	1	0.85	
	9-2	799.2				9-5	739.7					
	9-3	890.0				9-6	725.9					
10번	10-1	668.7	743.8	68.7	9	10-4	603.5	748.3	180.4	24	1.01	
	10-2	759.1				10-5	691.0					
	10-3	803.5				10-6	950.3					
11번	11-1	721.8	710.7	65.2	9	11-4	690.0	648.0	48.8	8	0.91	
	11-2	769.6				11-5	594.5					
	11-3	640.6				11-6	659.6					
12번	12-1	674.7	683.0	35.1	5	12-4	533.1	581.5	43.7	8	0.85	
	12-2	652.7				12-5	593.4					
	12-3	721.5				12-6	618.0					
13번	13-1	709.9	727.9	16.8	2	13-4	707.4	668.8	41.9	6	0.92	
	13-2	743.1				13-5	624.2					
	13-3	730.6				13-6	674.7					
14번	14-1	837.7	882.2	70.4	8	14-4	724.7	754.9	28.5	4	0.86	
	14-2	845.6				14-5	758.7					
	14-3	963.4				14-6	781.4					
15번	15-1	578.4	606.1	24.3	4	15-4	512.6	524.9	30	6	0.87	
	15-2	615.9				15-5	559.1					
	15-3	623.9				15-6	503					
16번	16-1	932.6	898.5	34.5	4	16-4	762.7	775.5	24.7	3	0.86	
	16-2	899.1				16-5	759.8					
	16-3	863.7				16-6	804.0					
17번	17-1	822.0	824.6	43.8	5	17-4	692.4	706.6	36.3	5	0.86	
	17-2	782.2				17-5	679.5					
	17-3	869.7				17-6	747.8					

3.5 동적안정도 시험 및 결과

3.5.1 동적안정도 시험 방법

동적안정도 시험은 소성변형 저항성을 측정하기 위한 시험으로 KS F 2374 시험 방법을 준수하여 시험을 진행하였다. 시험 시작 약 5시간 전에 공시체를 24시간 건조 후 항온실에 넣어 공시체 중심까지 소정의 온도로 가열[(60±0.5) °C로 5시간 이상] 시킨 후 휠 트래킹 시험을 진행하였다.

*양생 시간은 24시간을 초과하지 않도록 하여야 함



[그림 3.10] 동적안정도 시험 과정

3.5.2 동적안정도 시험 결과

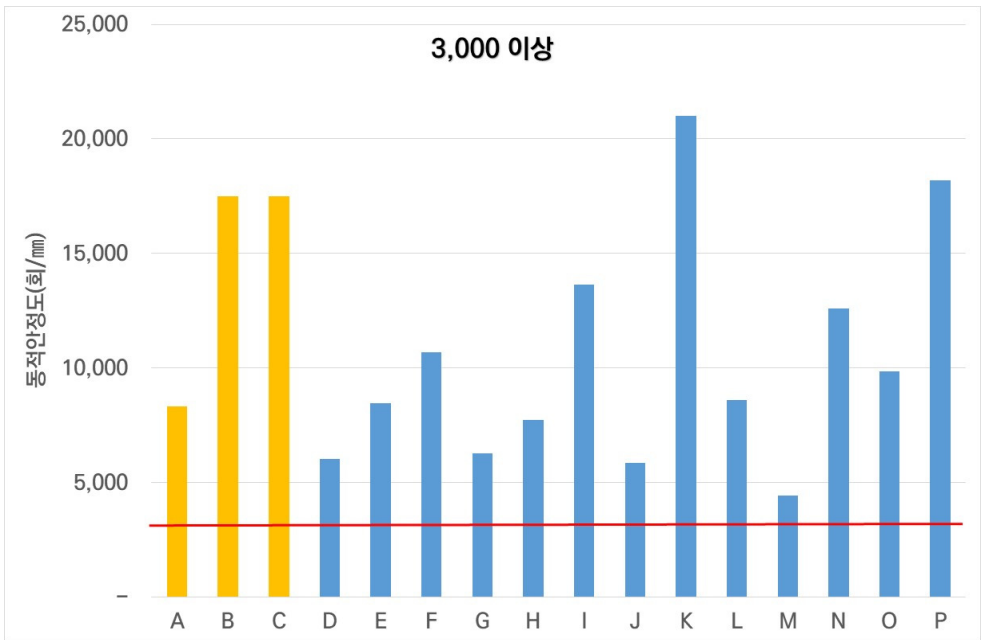
아래 표에 동적안정도 시험 결과와 품질기준을 나타내었으며, [그림 3.12]에 휠트래킹 시험 후 사진을 나타내었다. 배수성 혼합물 11종, 비배수성 혼합물 5종 총 16종 모두 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3.7] 배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 동적안정도 시험 결과

업체명		동적안정도 (회/mm)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
1번	1-D-1	9,000	10,700	1,808	17	3,000 이상
	1-D-2	12,600				
	1-D-3	10,500				
2번	2-D-1	5,250	6,284	1,398	22	
	2-D-2	5,727				
	2-D-3	7,875				
4번	4-D-1	9,000	7,750	2,165	28	
	4-D-2	9,000				
	4-D-3	5,250				
5번	5-D-1	12,600	13,650	1,819	13	
	5-D-2	12,600				
	5-D-3	15,750				
6번	6-D-1	4,846	5,858	1,083	18	
	6-D-2	7,000				
	6-D-3	5,727				
9번	9-D-1	31,500	21,000	9,093	43	
	9-D-2	15,750				
	9-D-3	15,750				
10번	10-D-1	7,875	8,625	650	8	
	10-D-2	9,000				
	10-D-3	9,000				
11번	11-D-1	6,300	4,441	1,622	37	
	11-D-2	3,706				
	11-D-3	3,316				
14번	14-D-1	21,000	12,600	7,572	60	
	14-D-2	10,500				
	14-D-3	6,300				
15번	15-D-1	15,750	9,855	6,242	63	
	15-D-2	3,316				
	15-D-3	10,500				
16번	16-D-1	21,000	18,200	4,850	27	
	16-D-2	21,000				
	16-D-3	12,600				

[표 3.8] 비배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 동적안정도 시험 결과

업체명		동적안정도 (회/mm)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
3번	3-D-1	9,000	8,333	1,155	14	2,000이상
	3-D-2	7,000				
	3-D-3	9,000				
8번	8-D-1	15,750	17,500	3,031	17	
	8-D-2	15,750				
	8-D-3	21,000				
12번	12-D-1	4,846	6,049	1,099	18	
	12-D-2	6,300				
	12-D-3	7,000				
13번	13-D-1	7,000	8,458	1,821	22	
	13-D-2	7,875				
	13-D-3	10,500				
17번	17-D-1	15,750	17,500	3,031	17	
	17-D-2	15,750				
	17-D-3	21,000				



[그림 3.11] 비배수성 저소음포장용 아스팔트혼합물 동적안정도 시험 결과



[그림 3.12] 휠 트래킹 시험 후 공시체

3.6 흐름손실률 시험 및 결과

3.6.1 흐름손실률 시험 방법

흐름손실률 시험은 KS F 2489 다져지지 않은 아스팔트혼합물의 드레인 다운 시험 방법을 준수하여 시험을 수행하였다. 시험 절차는 다음과 같다. 철재 바구니의 질량을 측정한 후 다져지지 않은 혼합물을 철재 바구니에 담아 혼합물이 포함된 철재 바구니의 질량을 0.1g까지 측정하였다. 그 후 팬의 질량을 측정한 후, 받침대에 혼합물이 포함된 철재 바구니를 놓고 175°C의 건조로에 60±5분 동안 넣어두었다. 건조가 종료된 후 철재 바구니와 팬을 꺼내 상온에서 냉각시켰다. 그 후 흘러내린 바인더를 포함한 팬의 질량을 0.1g까지 측정하고 기록하였다. 드레인 다운 양은 식(10)을 사용하여 계산하였다.

* 철재 바구니는 표준 6.3mm 체를 사용하였다.

$$\text{드레인 다운 양(\%)} = \{(D - C) / (B - A)\} \times 100 \quad \text{식 (10)}$$

여기서,

A: 빈 철재 바구니의 질량

B: 혼합물을 포함한 철재 바구니의 질량

C: 빈 팬의 질량

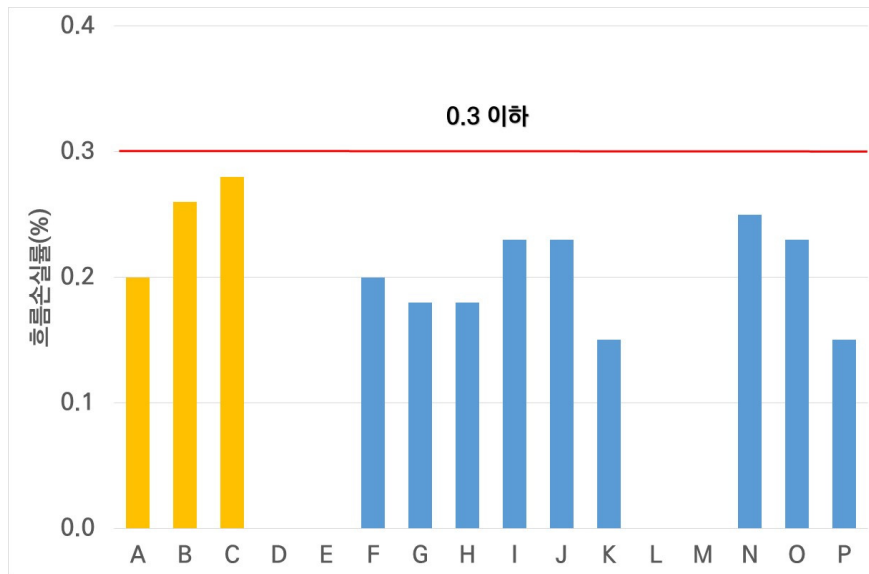
D: 흘러내린 바인더를 포함한 팬의 질량

3.6.2 흐름손실률 시험 결과

[표 3.9]에 흐름손실률 시험 결과와 품질기준을 나타내었으며, 시험 결과 9개의 아스팔트혼합물 모두 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3.9] 흐름손실률 시험 결과

업체명		흐름손실률(%)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
1번	1-1	0.31	0.20	0.12	57	0.3 이하
	1-2	0.23				
	1-3	0.08				
2번	2-1	0.08	0.18	0.09	50	
	2-2	0.23				
	2-3	0.23				
4번	4-1	0.08	0.18	0.09	50	
	4-2	0.08				
	4-3	0.23				
5번	5-1	0.23	0.23	0.08	33	
	5-2	0.31				
	5-3	0.15				
6번	6-1	0.23	0.23	0.08	33	
	6-2	0.31				
	6-3	0.15				
9번	9-1	0.23	0.15	0.08	50	
	9-2	0.08				
	9-3	0.15				
14번	14-1	0.30	0.25	0.04	17	
	14-2	0.23				
	14-3	0.23				
15번	15-1	0.39	0.23	0.15	67	
	15-2	0.08				
	15-3	0.23				
16번	16-1	0.23	0.15	0.08	50	
	16-2	0.08				
	16-3	0.15				



[그림 3.13] 호름손실률 시험 결과

3.7 드레인 다운 시험 및 결과

3.7.1 드레인 다운 시험 방법

드레인 다운 시험은 비배수성 아스팔트 혼합물에 대해서 실시하였다. 드레인 다운 시험은 아스팔트 혼합물에서 흘러내리는 바인더 양을 측정하여 과잉 아스팔트 사용을 예방하는 목적이며, KS F 2489 방법을 준수하여 시험을 수행하였다. 시험 절차는 다음과 같다. 철재 바구니의 질량을 측정 후 다져지지 않은 혼합물을 철재 바구니에 담아 혼합물이 포함된 철재 바구니의 질량을 0.1g까지 측정하였다. 그 후 팬의 질량을 측정한 후, 받침대에 혼합물이 포함된 철재 바구니를 놓고 175°C의 건조로에 60±5분 동안 넣어두었다.

건조가 종료된 후 철재 바구니와 팬을 꺼내 상온에서 냉각시켰다. 그 후 흘러내린 바인더를 포함한 팬의 질량을 0.1g까지 측정하고 기록하였다. 드레인 다운 양은 식(11)을 사용하여 계산하였다.

* 철재 바구니는 표준 6.3mm 체를 사용하였다.

$$\text{드레인 다운 양(\%)} = \{(D - C) / (B - A)\} \times 100 \quad \text{식 (11)}$$

여기서,

A: 빈 철재 바구니의 질량

B: 혼합물을 포함한 철재 바구니의 질량

C: 빈 팬의 질량

D: 흘러내린 바인더를 포함한 팬의 질량



[그림 3.14] 드레인 다운 시험 과정

3.7.2 드레인 다운 시험 결과

[표 3.10]에 드레인 다운 시험 결과와 품질기준을 나타내었으며, 시험 결과 모든 아스팔트혼합물이 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3.10] 드레인 다운 시험 결과

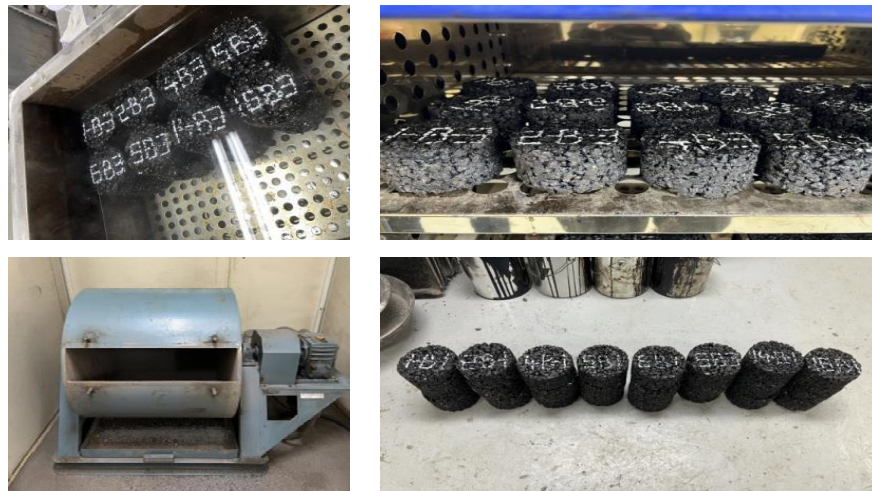
업체명		드레인 다운양(%)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
3번	3-1	0.08	0.20	0.16	78	0.3 이하
	3-2	0.38				
	3-3	0.15				
8번	8-1	0.15	0.26	0.09	35	
	8-2	0.31				
	8-3	0.31				
17번	17-1	0.23	0.28	0.04	15	
	17-2	0.30				
	17-3	0.31				

3.8 칸타브로 시험 및 결과

칸타브로 손실률 시험은 골재의 탈리 저항성을 측정하기 위한 시험으로 KS F 2492 시험 방법을 준수하여 시험을 진행하였으며, 20℃와 -20℃의 온도에서 각각 시험을 수행하였다.

3.8.1 상온(20℃) 칸타브로 시험 방법

본 시험은 KS F 2492 시험 방법을 준수하여 수행하였다. 다져진 시편의 질량을 0.1g까지 측정하고 기록하였다. 시험 시편을 $60\pm1^{\circ}\text{C}$ 의 시험 온도에서 24시간 수침 후 완전건조 시킨 후 시편을 $20\pm1^{\circ}\text{C}$ 의 시험 온도에서 20시간 이상 양생 시킨 후 시험을 수행하였다.



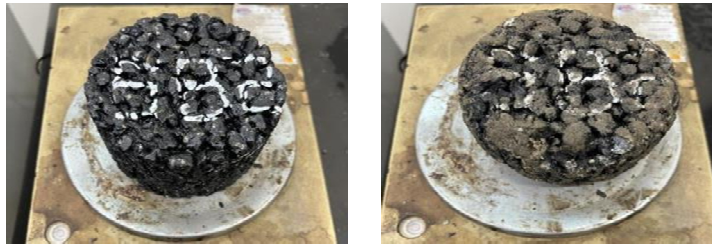
[그림 3.15] 상온 칸타브로 손실률 시험 수행절차

3.8.2 상온(20℃) 칸타브로 시험 결과

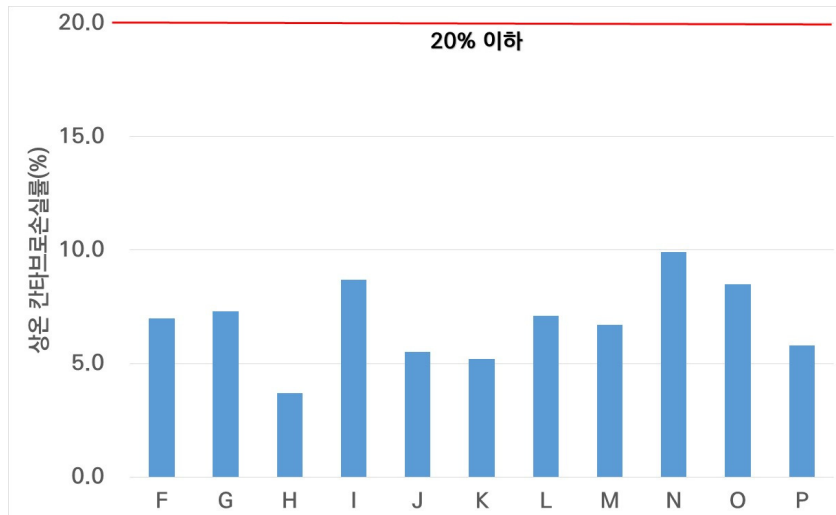
아래 표에 상온 칸타브로 손실률 시험 결과를 나타내었으며, 상온 칸타브로 시험 전후 사진을 [그림 3.16]에 나타내었다. 11개의 업체 모두 손실률이 20% 이하로 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3.11] 상온 칸타브로 시험 결과

업체명		칸타브로 손실률 (%)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
1번	1-B-1	7.0	7.0	0.90	13	20 이하
	1-B-2	7.9				
	1-B-3	6.1				
2번	2-B-1	6.8	7.3	0.72	10	
	2-B-2	8.1				
	2-B-3	6.9				
4번	4-B-1	3.2	3.7	0.47	13	
	4-B-2	4.1				
	4-B-3	3.9				
5번	5-B-1	8.1	8.7	1.16	13	
	5-B-2	10.0				
	5-B-3	7.9				
6번	6-B-1	6.5	5.5	0.92	17	
	6-B-2	4.7				
	6-B-3	5.3				
9번	9-B-1	5.2	5.2	0.55	11	
	9-B-2	4.6				
	9-B-3	5.7				
10번	10-B-1	6.7	7.1	0.45	6	
	10-B-2	7.1				
	10-B-3	7.6				
11번	11-B-1	6.6	6.7	0.15	2	
	11-B-2	6.7				
	11-B-3	6.9				
14번	14-B-1	8.6	9.9	1.10	11	
	14-B-2	10.4				
	14-B-3	10.6				
15번	15-B-1	8.2	8.5	0.93	11	
	15-B-2	7.7				
	15-B-3	9.5				
16번	16-B-1	6.7	5.8	0.90	15	
	16-B-2	4.9				
	16-B-3	5.9				



[그림 3.16] 상온 칸타브로 시험 전후



[그림 3.17] 상온 칸타브로 시험 결과

3.8.3 저온(-20℃) 칸타브로 시험 방법

저온 칸타브로 시험은 KS F 2492 시험 방법을 준수하여 수행하였다. 다져진 시편의 질량을 0.1g까지 측정하고 기록한 후, 시편을 $-20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 시험 온도에서 20시간 이상 양생시킨 후 시험을 수행하였다.



[그림 3.18] 저온 칸타브로 손실률 시험 수행절차

3.8.4 저온(-20℃) 칸타브로 시험 결과

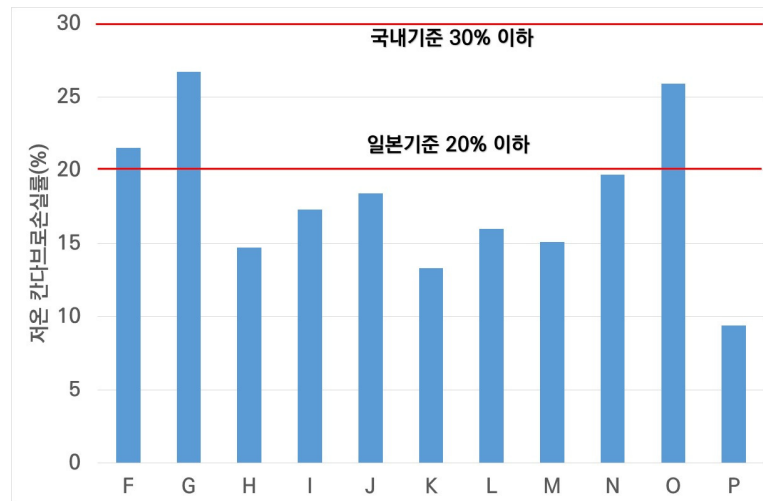
[표 3.12]에 저온 칸타브로 손실률 시험 결과 및 품질기준을 나타내었으며, 저온 칸타브로 시험 전후 사진을 [그림 3.19]에 나타내었다. 11개의 업체 모두 손실률 30% 이하로 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 3.12] 저온 칸타브로 시험 결과

업체명		칸타브로 손실률 (%)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
1번	1-B-1	19.7	21.5	2.75	13	30 이하
	1-B-2	20.2				
	1-B-3	24.7				
2번	2-B-1	21.7	26.7	4.30	16	
	2-B-2	29.3				
	2-B-3	29.0				
4번	4-B-1	17.6	14.7	2.85	19	
	4-B-2	14.5				
	4-B-3	11.9				
5번	5-B-1	19.8	17.3	3.04	18	
	5-B-2	13.9				
	5-B-3	18.1				
6번	6-B-1	16.4	18.4	2.06	11	
	6-B-2	20.5				
	6-B-3	18.2				
9번	9-B-1	11.2	13.3	3.35	25	
	9-B-2	11.6				
	9-B-3	17.2				
10번	10-B-1	16.0	16.0	0.55	3	
	10-B-2	15.4				
	10-B-3	16.5				
11번	11-B-1	15.1	15.1	0.15	1	
	11-B-2	14.9				
	11-B-3	15.2				
14번	14-B-1	20.1	19.7	0.40	2	
	14-B-2	19.3				
	14-B-3	19.7				
15번	15-B-1	21.5	25.9	3.83	15	
	15-B-2	27.7				
	15-B-3	28.5				
16번	16-B-1	8.5	9.4	1.62	17	
	16-B-2	11.3				
	16-B-3	8.5				



[그림 3.19] 저온 칸타브로 시험 전후



[그림 3.20] 저온 칸타브로 시험 결과

3.9 실내투수계수 시험 및 결과

3.9.1 실내투수계수 시험 방법

실내투수계수 시험은 투수 성능을 평가하기 위한 시험으로 KS F 2494 시험 방법을 준수하여 수행하였다. [그림 3.21]에 시험 장면을 나타내었으며, 투수 계수를 구하는 방법은 식(12)로 나타내었다.



[그림 3.21] 실내투수계수 시험 장면

$$K_T = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \quad \text{식 (12)}$$

여기에서,

KT: 투수계수(mm/sec)

L: 시편의 두께(mm)

A: 시편의 단면적(mm²)

h: 수위차(mm)

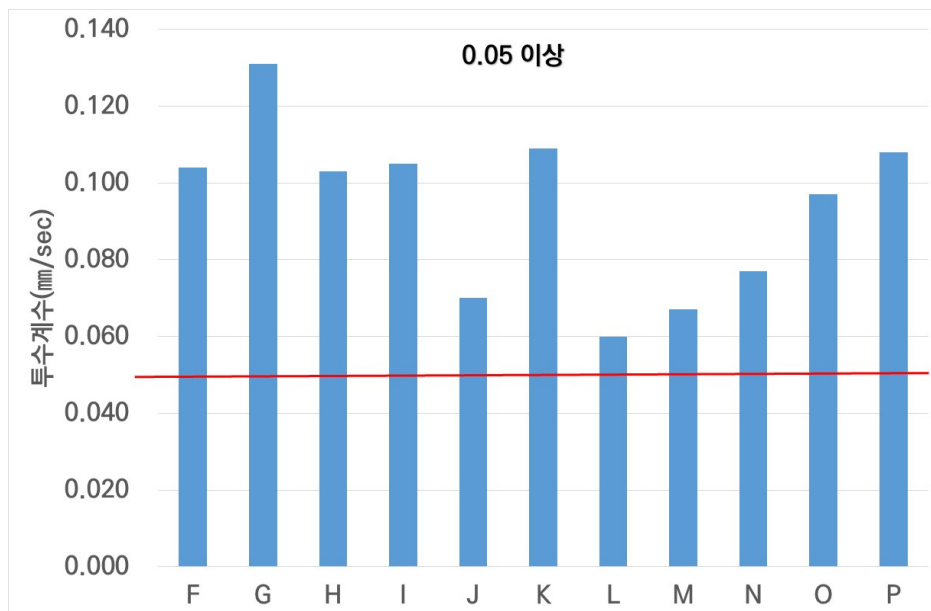
t1: 측정 개시 시간(초)

t2: 측정 종료 시간(초)

Q: t1~t2에 배수된 수량(mm³)

3.9.2 실내투수계수 시험 결과

[표 3.13]에 실내투수계수 시험 결과와 품질기준을 나타내었다. 배수성 혼합물 11종 모두 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.



[그림 3.22] 실내 투수계수 시험 결과

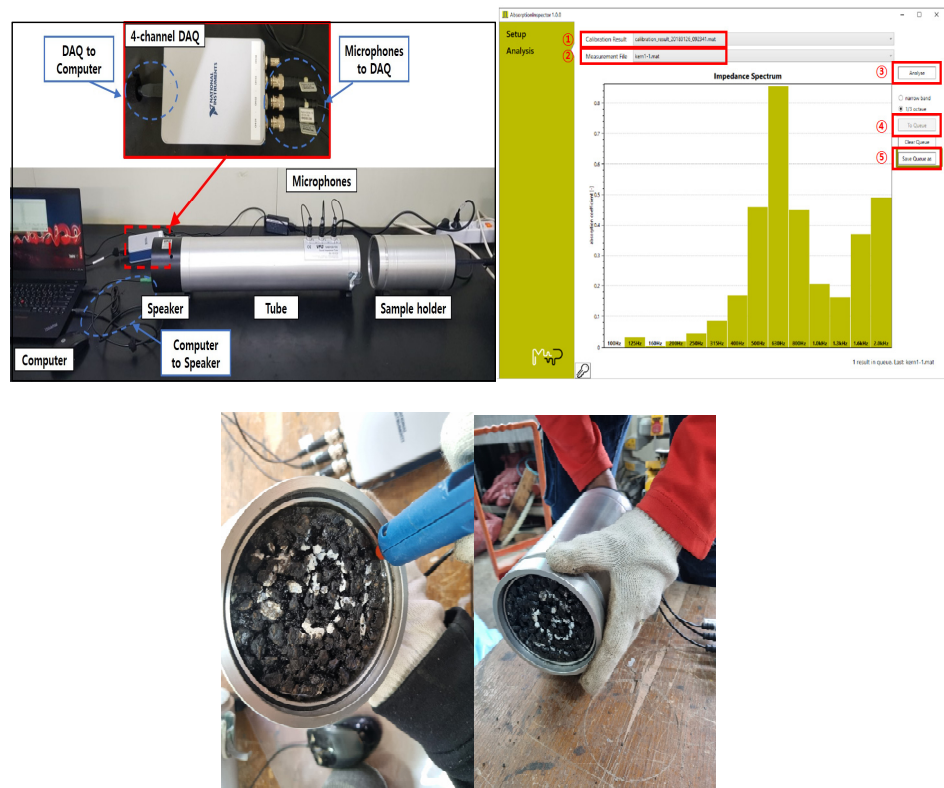
[표 3.13] 실내투수계수 시험 결과

업체명		실내투수계수 (mm/sec)	평균	표준편차	COV (%)	품질기준
1번	1-E-1	0.094	0.104	0.013	12	0.05 이상
	1-E-2	0.100				
	1-E-3	0.119				
2번	2-E-1	0.114	0.131	0.016	12	
	2-E-2	0.146				
	2-E-3	0.132				
4번	4-E-1	0.109	0.103	0.005	5	
	4-E-2	0.099				
	4-E-3	0.101				
5번	5-E-1	0.094	0.105	0.013	13	
	5-E-2	0.101				
	5-E-3	0.120				
6번	6-E-1	0.065	0.070	0.006	9	
	6-E-2	0.069				
	6-E-3	0.076				
9번	9-E-1	0.088	0.109	0.023	21	
	9-E-2	0.106				
	9-E-3	0.133				
10번	10-E-1	0.063	0.060	0.004	6	
	10-E-2	0.056				
	10-E-3	0.062				
11번	11-E-1	0.066	0.067	0.005	8	
	11-E-2	0.062				
	11-E-3	0.072				
14번	14-E-1	0.080	0.077	0.002	3	
	14-E-2	0.075				
	14-E-3	0.076				
15번	15-E-1	0.106	0.097	0.009	9	
	15-E-2	0.090				
	15-E-3	0.094				
16번	16-E-1	0.114	0.108	0.011	10	
	16-E-2	0.095				
	16-E-3	0.115				

3.10 흡음률 시험 및 결과

3.10.1 흡음률 시험 방법

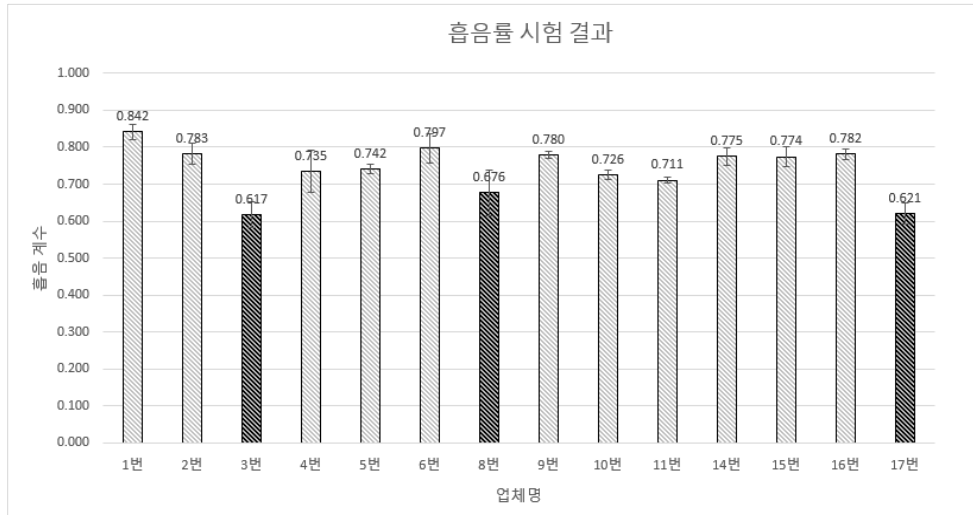
흡음률 시험은 임피던스 관을 이용해 아스팔트혼합물의 흡음률을 측정하기 위한 시험으로 KS F 2814-2 시험 방법을 준수하여 시험을 진행하였다. 공시체는 직경 100mm, 높이 62.5mm로 회사별 3개의 공시체를 준비하였다. 시험 전 원활한 시험을 위해 스피커를 최소 10분간 작동한 뒤 공시체 고정기 내에 흡음재를 거치하고 임피던스 관과 체결한 뒤 대기 온도를 측정하고, 마이크 위치를 변경해가며 총 4회 흡음재의 흡음량을 측정하여 0.4~0.6 Pa가 되도록 컴퓨터의 음량을 설정하였다. 그 후 공시체를 공시체 고정기 내에 거치 후 측정의 정확도를 위해 모서리를 글루건으로 밀봉한 뒤 흡음률을 측정하였다. 총 3개의 공시체 흡음률을 측정한 뒤 평균으로 각 시편의 흡음률 결과를 나타내었다.



[그림 3.23] 흡음률 시험 장비 및 시험 과정

3.10.2 흡음률 시험 결과

[그림 3.24]에 비배수성 혼합물 3종, 배수성 혼합물 총 11종 총 14종의 흡음률 시험 결과를 그래프로 나타내었으며, 아래 표에 비배수성, 배수성 각각의 시험 결과를 나타내었다. 비배수성 혼합물 3종의 경우 흡음 계수가 0.7 이하로 나타났으며, 배수성 혼합물 11종의 경우 흡음 계수가 0.7 이상으로 나타났다.



[그림 3.24] 저소음포장용 아스팔트 혼합물 흡음률 시험 결과

[표 3.14] 비배수성 저소음포장용 아스팔트 혼합물 흡음률 시험 결과

업체명		흡음 계수	평균	표준편차	COV (%)
3번	3-G-1	0.545	0.617	0.068	11
	3-G-2	0.625			
	3-G-3	0.681			
8번	8-G-1	0.681	0.676	0.123	18
	8-G-2	0.797			
	8-G-3	0.551			
17번	17-G-1	0.658	0.621	0.059	9
	17-G-2	0.651			
	17-G-3	0.553			

[표 3.15] 배수성 저소음포장용 아스팔트 혼합물 흡음률 시험 결과

업체명		흡음 계수	평균	표준편차	COV (%)
1번	1-G-1	0.794	0.842	0.043	5
	1-G-2	0.854			
	1-G-3	0.877			
2번	2-G-1	0.738	0.783	0.057	7
	2-G-2	0.847			
	2-G-3	0.765			
4번	4-G-1	0.812	0.735	0.113	15
	4-G-2	0.605			
	4-G-3	0.788			
5번	5-G-1	0.733	0.742	0.025	3
	5-G-2	0.770			
	5-G-3	0.722			
6번	6-G-1	0.708	0.797	0.077	10
	6-G-2	0.847			
	6-G-3	0.836			
9번	9-G-1	0.794	0.780	0.020	2
	9-G-2	0.789			
	9-G-3	0.758			
10번	10-G-1	0.741	0.726	0.025	3
	10-G-2	0.697			
	10-G-3	0.741			
11번	11-G-1	0.694	0.711	0.015	2
	11-G-2	0.716			
	11-G-3	0.723			
14번	14-G-1	0.776	0.775	0.045	6
	14-G-2	0.819			
	14-G-3	0.729			
15번	15-G-1	0.836	0.774	0.054	7
	15-G-2	0.754			
	15-G-3	0.733			
16번	16-G-1	0.771	0.782	0.029	4
	16-G-2	0.760			
	16-G-3	0.815			

저소음포장의 공용성능 평가를 위하여 아스팔트 바인더와 아스팔트 혼합물에 대하여 국토교통부 품질기준에 만족하는지를 평가하였다. 총 16개의 회사에서 제출한 저소음 아스팔트혼합물을 평가하였으며, 배수성 11종류와 비배수성 5종류로 이루어져 있다. 흡음률 시험의 경우 배수성 11종류와 비배수성 3종류로 총 14개의 저소음 아스팔트혼합물을 평가하였다. 흐름손실을 시험의 경우 배수성 9종류와 비배수성 3종류로 총 12개의 저소음 아스팔트혼합물을 평가하였다.

- 아스팔트 바인더 공용성 등급시험 결과 16종류의 아스팔트 바인더 중 11종류만 품질기준인 PG82-22 이상을 보였으며, 5종류는 기준을 통과하지 못하였다 (만족 11종류: No. 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16)
- 소성변형률 시험 결과는 16개 종류의 아스팔트 바인더 모두 품질기준인 0.5 이하를 만족하였다.
- 탄성회복률 시험 결과는 16개 종류의 아스팔트 바인더 중 15종류만 품질기준인 55 이상을 만족하였으며, 1종류는 기준을 통과하지 못하였다(만족 15종류 : No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16)
- 공극률 시험 결과 비배수성 아스팔트혼합물 5종은 품질기준 2.0~4.0%를 모두 만족하였으나, 배수성 아스팔트혼합물 11개 종류 중 3종류의 아스팔트혼합물이 품질기준인 16%를 만족하지 못하였다(불만족: No. 5, 10, 11)
- 인장강도비, 동적안정도는 16종류 모두 만족하였다.
- 흐름손실율은 12종류 모두 만족하였다.
- 배수성 아스팔트혼합물에 대한 상온 칸타브로, 저온 칸타브로, 실내투수시험은 11종류 모두 만족하였다.
- 흡음률 시험 결과 비배수성 혼합물 3종 모두 흡음 계수가 0.7 이하, 배수성 혼합물 11종 모두 흡음 계수가 0.7 이상으로 나타났다.

제4장 저소음포장의 소음성능 평가

4.1 저소음포장 적용 구간 소음측정

저소음포장 적용 구간 소음성능 평가는 참여 기업에서 적용한 구간에 대해 소음을 측정하고 분석하여 성능을 평가하고자 한다.

참여 기업에 제출된 기 적용구간은 22개 구간으로 구간에 대해 근접소음도 측정방법을 사용하여 근접소음을 측정하고 평가하고자 한다.

4.1.1 소음측정 방법

근접 소음 측정 방법은 차량 주행 시 포장체와 타이어 간의 접촉으로 인해 발생하는 에어펌핑음을 측정대상으로 한다. 이 소음원은 일정속도 이상이 되면 엔진소음 보다 커지는 특성이 있어 고속 주행이 이루어지는 도로의 주요 교통소음원으로 인식되고 있다. 특히 복층저소음포장의 소음감소와 직접적으로 연관이 있는 요소이다.

근접 소음의 대표적인 측정방법은 CPX로 국제기준인 ISO11819-2에서 규정한 바 있다. CPX에 개념은 간단히 소개하면, 차량의 타이어에 마이크로폰을 근접하게 위치시켜 평균 LA(The Average A-weighted Sound Pressure Levels, A특성 음압 레벨)를 측정하는 방법이다. [표 4.1]에서는 ISO에서 제안하고 있는 CPX에 대한 일반적인 요건을 요약하고 있다.

[표 4.1] ISO11819-2에서의 CPX 측정조건 요약

구분	주요내용
제정목적	<ul style="list-style-type: none"> ○ 포장의 표면이 양호한 상태에서 표면의 종류를 분류 ○ 포장상태와는 관계없이 특정현장에서 서로 다른 표면이 교통소음에 미치는 영향 평가
범위/일반조건	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주행속도가 40km/h이상의 일정한 속도로 원활한 도로를 대상으로 함 (즉, 타이어/노면 간의 소음이 타 소음보다 우세할 경우만 유효) ○ 도로의 세그먼트는 20m로 하며, 각 세그먼트 값을 평균 ○ 소음은 일반 A-가중 음압으로 정의 ○ 근접소음지수(CPXI) 사용. 이는 승용차 대표소음지수(CPXP)와 대형차 대표소음지수(CPXH)의 가중평균 ○ 측정속도는 40km/h, 50km/h, 80km/h으로 하며 옵션으로 100km/h 조사가능 ○ 속도보정, 타이어 온도보정, 음 반사에 대한 기구보정을 실시 ○ 기준타이어를 사용. 차량에 하나씩 혹은 동시에 2개가 장착 ○ 최소 2개의 마이크로폰을 사용하여 평균
측정기구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 315Hz~5000Hz의 소음측정이 가능해야 함 ○ 최소 90mm의 지름을 가진 적절한 바람막이(마이크 슝?) 설치 ○ 1/3 옥타브밴드 해상도를 사용하여 측정. 밴드필터는 IEC61260에 부합되어야 함. ○ 측정기구에서 제시한 워밍업 시간을 지켜야 하며, 캘리브레이션 실시 ○ 캘리브레이션은 조사 전은 물론 조사 후에도 이루어져야 하며, 작동 후 매 4시간마다 반복매번 편차는 기록되어야 하며 0.5dB이상 차이나면 해당측정값은 무효 ○ 소음교정기는 최소한 IEC 60942 Class 1을 충족해야 하며, 충족여부를 1년에 1번 검증 ○ 소음측정계는 IEC61672-1 요건에 부합하는지 최소 2년에 한 번씩 검증. 해당 검증은 공인된 실험실에 의해 수행 ○ 차량속도 측정의 오차율 $\pm 1\%$ 미만 ○ 온도측정의 정확도는 제조업체에서 명시한대로 오차율 $\pm 1^\circ$ 미만. 적외선 기술 사용 금지 ○ 테스트 타이어로 사용할 타이어 무게는 기준 타이어 대비 $\pm 5\%$ 미만 ○ 타이어 공기압 측정 장비의 오차율은 $\pm 4\%$ 미만. ○ 테스트 차량에 대한 인증 필요

[표 4.1] ISO11819-2에서의 CPX 측정조건 요약(계속)

구분	주요내용
테스트 현장	<ul style="list-style-type: none"> ○ 측정구간의 진입 시 기준속도가 확보될 정도의 구간이 확보 ○ 측정의 시작은 동일 표면을 가진 도로의 최소 10m 이후 ○ 측정구간은 진입구간 10m 제외 최소 20m, 가능한 100m이상 권장 ○ 곡률반경은 50km/h에서 최소 250m, 80km/h에서는 500m이상 ○ 마이크폰을 향하는 테스트 타이어의 옆면과 수직되는 0.5m까지의 도로구간의 표면은 측정구간과 동일한 표면타입 ○ 테스트 현장의 배경소음에 대한 제한사항은 아래와 같다. <ul style="list-style-type: none"> - 주변차량의 속도가 70km-90km이어야 한다. - 주변차량과의 이격거리는 최대 1.5m까지 허용한다. - 노면은 최소한 잘고 조밀한 아스팔트로 한다 (DAC, SMA) - 비로 노면이 습할 경우 24-48시간 후 측정 (다공성 표면일 경우). - 한쪽에만 마이크를 설치할 경우 갓길쪽 타이어에 설치한다. - 통과차량 등으로 인한 방해잡음, 특히 오토바이, 대형차량, 고속주행차량, 건설장비, 공사 ○ 주변사물에 대한 반사, 도로파손 등으로 발생한 이벤트를 기록하고, 해당 구간의 편차가 1.5dB이상 발생할 경우 평가에서 제외 ○ 덮개가 없는 경우 마이크 2m이내 반사체(가드레일, 저지방벽, 제방, 암벽, 주차된 차량, 교량, 건물 등)가 있는 경우 평가에서 제외
기상조건	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주변풍속은 덮개 없는 경우 5m/s, 덮개 있는 경우 10m/s까지 허용 ○ 기온은 온대일 경우 5~30도
테스트 차량	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기준 테스트 타이어가 최소 1개 장착된 차량, 혹은 트레일러를 견인하는 차량 중 택 1 ○ 마이크는 타이어 옆면에서 20cm(오차 1cm), 노면으로부터 10cm ○ 마이크는 타이어를 45도 각도에서 바라보도록 장착 (오차는 5도) ○ 테스트 차량은 ISO기준 부록 A에 해당하는 테스트를 받아야 함 ○ 기준타이어는 ISO11819-3에서 명시된 기준에 부합되어야 하며, P1, H1타이어를 사용. 이 외의 타이어는 근접소음도 대푯값인 CPXI를 도출할 수 없다. ○ 타이어 경도는 ISO11819-3의 절차와 주기에 따라 측정 ○ 테스트 타이어는 최소 200km 정도의 길들이기 주행 필요, 4륜은 100km 이상

[표 4.1] ISO11819-2에서의 CPX 측정조건 요약(계속)

구분	주요내용
측정절차	<ul style="list-style-type: none"> ○ 마이크론 위치 점검 (운전자/오퍼레이터 승차, 연료는 전형적 연료양인 상태에서) ○ 타이어의 예열 (속도에 따라 5분~15분 운행) ○ 타이어 트레드 손상 및 이물질 확인, 실험중간에도 주기적으로 확인 ○ 측정구간을 20m로 구분하여 세그먼트를 구성하고, 비 정상적인 세그먼트(심한 배경 소음, 속도편차발생 등)를 제외시킨다. 최소 5개 이상 (100m)의 세그먼트 확보 ○ 측정은 최소 2회. 만약 이 값이 특정타이어에 대해 0.5dB 편차가 발생하면 다시 2회 주행하고 모든 자료를 산술평균 ○ 조사가 가능 구간이 짧을 경우, 총 측정거리가 200m이상 되어야 한다. (주행횟수와 측정 길이 명확히 기록) ○ 마이크 설치 위치가 한쪽인지, 양쪽인지, 한쪽이라면 어느쪽 인지 기록 ○ 테스트 차량이 기준에 적합하더라도, 소음에 방해를 받았을 것으로 간주되는 자료들은 모두 폐기 (특히, 비밀폐형 시스템의 경우) ○ 테스트 속도는 40km, 50km, 80km가 기준이며, 필요에 의해 100km까지 조사 가능 ○ 주행 중 실제속도를 측정하고, 평균값을 도출하여 기록 ○ 속도편차는 주행 프로파일 기준 $\pm 15\%$, 평균값 기준 $\pm 5\%$까지 가능 ○ 속도편차에 대한 보정 필수 ○ 테스트 타이어가 받는 하중은 운전자, 오퍼레이터가 모두 탑승한 상태에서 타이어 당 3200N(± 200N). ○ 타이어 공기압은 타이어가 예열되지 않은 상태에서 200kPa (± 10kPa). 공기압을 현저히 변경한 경우, 2분 후에 재 측정 ○ 타이어의 기압은 질소를 권장하나 일반 공기, 건조공기 활용가능 ○ 기온측정은 의무, 노면온도 측정은 권장 ○ 기온 측정은 각 도로 세그먼트 별로 1회 15초 이상 측정 (가능한 경우 연속적으로 측정), 높이는 0.5m ~1.5m

측정에서 가장 중요한 마이크로 폰에 대한 기준을 살펴보면 최소 2개 이상을 설치하여야 하며, 설치 높이 및 위치는 [그림 4.1]에서 [그림 4.3]에 따르며 지점 1과 2에 설치하는 것을 필수로 한다 (다른 위치의 설치 선택). 지점 1과

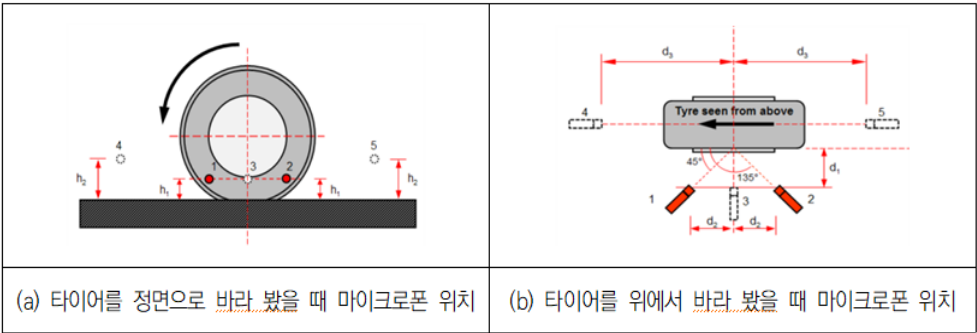
2의 설치는 차량 진행 방향으로 각각 $45 \pm 5^\circ$ 와 $135 \pm 5^\circ$ 로 설치가 바람직하나 마이크론의 밀폐 장치가 구비되지 않았을 경우에는 차량 진행 방향으로 평행하게 장착하는 것을 추천하고 있다.



[그림 4.1] CPX 측정 트레일러



[그림 4.2] CPX 측정 시스템 마이크론



[그림 4.3] 마이크론 설치 위치

[표 4.2] 타이어와 노면으로부터 마이크론의 거리 (단위 : m)

마이크론 위치	h ₁	h ₂	d ₁	d ₂	d ₃
1 and 2	0.10		0.20	0.20	
3	0.10		0.20	0.00	
4 and 5		0.20			0.65

4.1.2 측정 대상 구간 및 소음측정

저소음포장은 배수성포장과 비배수성포장으로 분류한다. 배수성포장은 구조적으로 단층 구조와 복층 구조로 나누어 복층 저소음포장, 단층 저소음포장, 비배수 저소음포장으로 분류한다. 저소음포장 소음측정 대상 구간은 [표 4.3]에서 보는바와 같다.

[표 4.3] 저소음포장 소음측정 구간

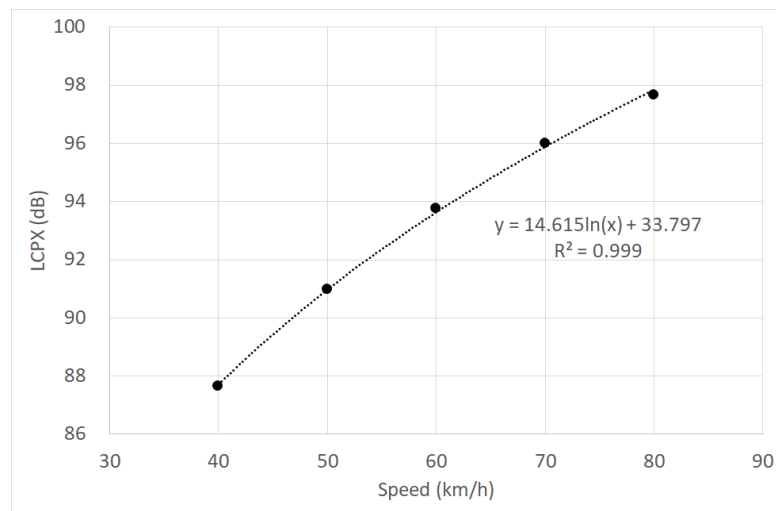
대분류	현장번호	바인더	준공년월	위치
복층	1	PG 82-22	'23년12월	경기도 이천시
	2	PG 82-34	'23년03월	경기도 부천시
	3	PG 82-34	'20년05월	경기도 남양주시
	4	PG 82-34	'19년12월	경기도 남양주시
	5	PG 82-34	'15년10월	경기도 남양주시
단층	6	PG 82-34	-	경기도 안양시
	7	PG 82-34	-	충청북도 청주시
	8	PG 82-22	-	경기도 광주시
	9	PG 82-22	-	경기도 양주시
	10	PG 82-22	'23년10월	경기도 안성시
	11	PG 82-34	'23년09월	경기도 안양시
	12	PG 82-34	'22년11월	경기도 남양주시
	13	PG 82-22	'20년11월	경기도 하남시
	14	PG 82-22	'20년01월	경상남도 진주시
	15	PG 82-22	'18년08월	경상남도 진주시
	16	-	'18년05월	경기도 하남시
	17	-	'16년06월	경기도 구리시
비배수	18	PG 82-34	'22년04월	충청북도 청주시
	19	PG 82-34	'21년12월	경기도 과천시
	20	PG 82-34	'21년12월	충청남도 서산시
	21	PG 82-34	'20년03월	경기도 화성시
	22	PG 82-34	'19년12월	경기도 성남시

저소음포장의 소음 측정은 주행속도 40km/h, 50km/h, 60km/h, 70km/h, 80km/h 범위에서 현장상황(제한속도)을 고려하여 최소 2개 속도 이상을 측정하였으며, 측정시 GPS 정보(위치, 속도)와 ISO 규정에서 요구하는 환경요인(대기온도, 노면온도)을 동시에 측정 및 기록하였다. ISO 규정에 따라 기상 및 환경 요구

조건인 풍속 10 m/s 이하, 대기온도 5℃ ~ 30℃ 및 노면 잔류 수분을 확인한 후 측정하였다.



[그림 4.4] CPX 장비를 이용한 소음 측정



[그림 4.5] 속도별 소음 측정 결과 예

4.1.3 근접 소음도 측정 결과

조사 구간별 소음 측정 결과를 [표 4.4]와 [표 4.5]에 나타내었다.

[표 4.4] CPX 측정결과(ISO Mandatory Position, 1, 2번 평균)

현장번호	중분류	준공년월	측정속도[km/h]					
			30	40	50	60	70	80
1	복층	'23년12월	-	88.0	90.5	93.1	-	-
2		'23년03월	-	86.4	89.5	91.6	-	-
3		'20년05월	-	87.9	91.0	93.3	-	-
4		'19년12월	-	86.9	90.3	92.5	-	-
5		'15년10월	-	87.3	90.4	92.9	-	-
6	단층	'24년08월	-	86.9	90.3	92.8	-	-
7		-	-	84.7	88.1	-	91.6	-
8		-	-	88.3	91.6	-	95.8	-
9		-	-	86.6	91.2	-	-	94.3
10		'23년10월	-	86.0	89.1	-	92.5	-
11		'23년09월	-	88.5	91.5	94.3	-	-
12		'22년11월	-	86.3	89.2	-	-	94.1
13		'20년11월	-	89.3	92.4	95.3	-	-
14		'20년01월	83.7	88.2	91.5	94.0	-	-
15		'18년08월	81.6	85.8	89.2	-	-	-
16		'18년05월	-	89.4	93.0	95.5	-	-
17		'16년06월	-	89.4	92.9	95.7	-	-
18	비배수성	'22년04월	-	87.7	91.1	93.8	96.0	97.7
19		'21년12월	-	88.1	91.3	93.4	-	-
20		'21년12월	-	88.2	91.3	94.2	-	-
21		'20년03월	-	88.0	91.4	94.2	-	-
22		'19년12월	-	89.4	92.6	-	-	99.2

[표 4.5] CPX 측정결과(ISO Optional Position, 그림1.3의 5번)

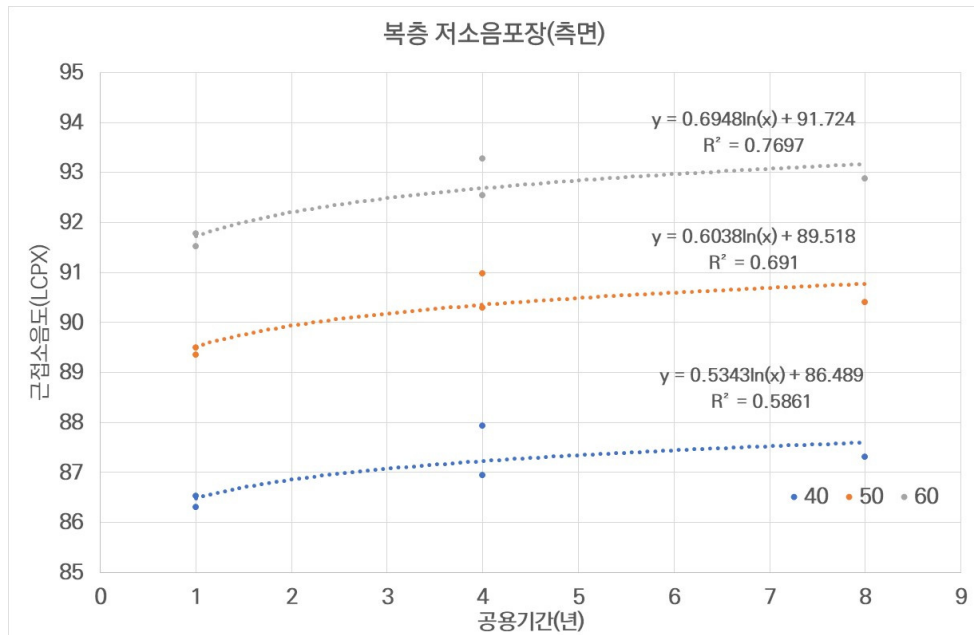
현장번호	중분류	준공년월	측정속도[km/h]					
			30	40	50	60	70	80
1	배수성	'23년03월	-	80.9	84.0	86.7	-	-
2		'20년05월	-	82.0	85.0	87.6	-	-
3		'19년12월	-	81.4	84.6	87.1	-	-
4		'15년10월	-	81.6	84.7	87.4	-	-
5		'24년08월	-	82.4	85.9	88.7	-	-
6		-	-	80.7	84.4	-	88.5	-
7		-	-	84.4	86.9	89.9	-	-
8		-	-	84.1	87.7	-	92.8	-
9		-	-	82.4	87.0	-	-	91.6
10		'23년10월	-	80.6	83.7	-	88.0	-
11		'23년09월	-	84.5	87.7	90.8	-	-
12		'22년11월	-	81.4	84.2	-	-	90.3
13		'20년11월	-	83.7	87.1	90.1	-	-
14		'20년01월	78.3	82.8	86.0	89.0	-	-
15		'18년08월	76.3	80.7	83.8	-	-	-
16		'18년05월	-	86.6	90.4	93.3	-	-
17		'16년06월	-	87.2	90.9	94.0	-	-
18	비배수성	'22년04월	-	85.0	88.7	91.9	94.1	96.3
19		'21년12월	-	84.7	88.4	90.8	-	-
20		'21년12월	-	85.1	88.6	91.9	-	-
21		'20년03월	-	85.5	89.0	92.4	-	-
22		'19년12월	-	85.7	89.2	-	-	96.7

4.2 저소음포장 소음 성능 분석

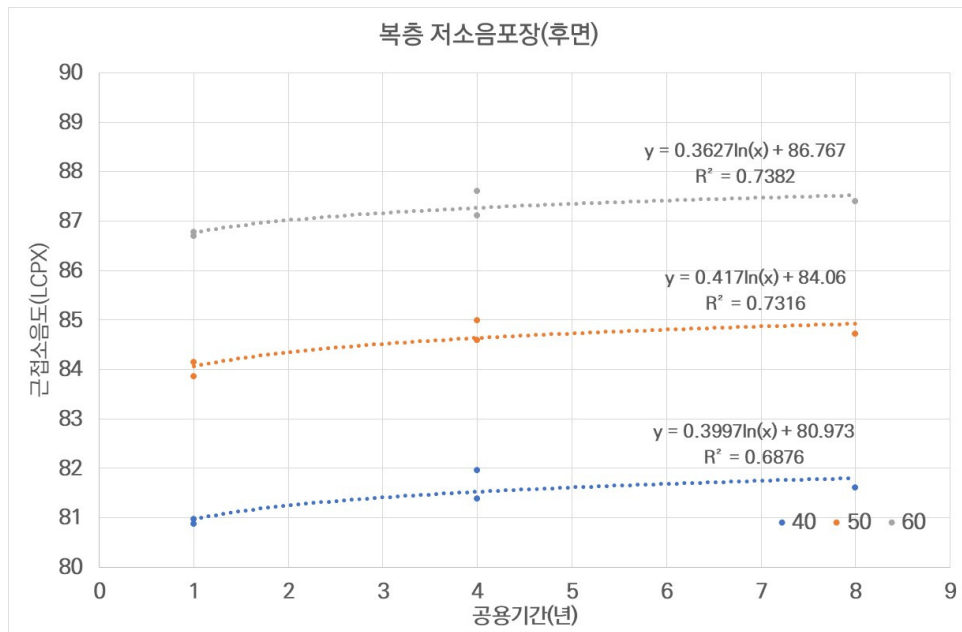
4.2.1 저소음포장의 소음 특성 분석

저소음포장의 현장 소음성능 평가는 현장에서 측정된 소음측정 결과를 토대로 저소음 포장의 형식 및 특성, 소음에 영향을 미치는 인자 등을 검토하여 종합적인 소음 성능을 평가할 필요가 있으며, 이를 위해서는 현장에서 측정된 소음의 특성을 다양한 소음 영향 인자를 고려한 분석이 필요하다. 국내 저소음 포장의 현장 소음측정 결과를 토대로 포장공법별 공용기간별 소음특성을 분석하였다.

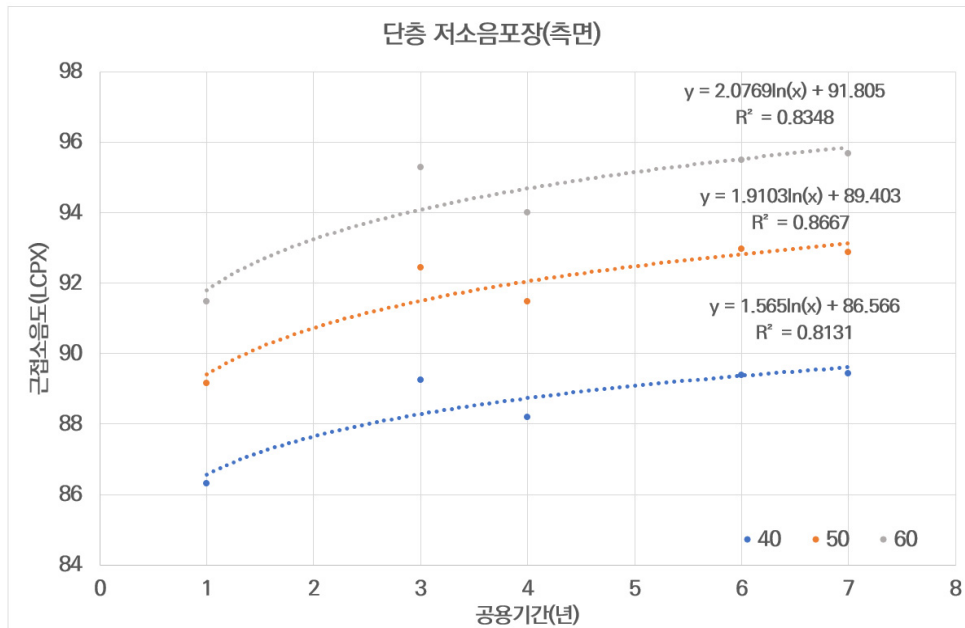
저소음포장의 성능을 평가하기 위해서는 기준이 되는 일반포장의 소음 특성을 분석하여 기준소음도를 선정하는 것이 중요하다. 자동차 주행 소음은 공용되는 도로의 사용 기간이 지날수록 증가하는 경향을 나타낸다. 일반포장 구간은 2016년에 공용기간이 1년~6년인 일반국도 35개 구간을 대상으로 측정된 결과를 토대로 분석하였으며 35개 대상구간은 밀입도 아스팔트포장 구간이다.



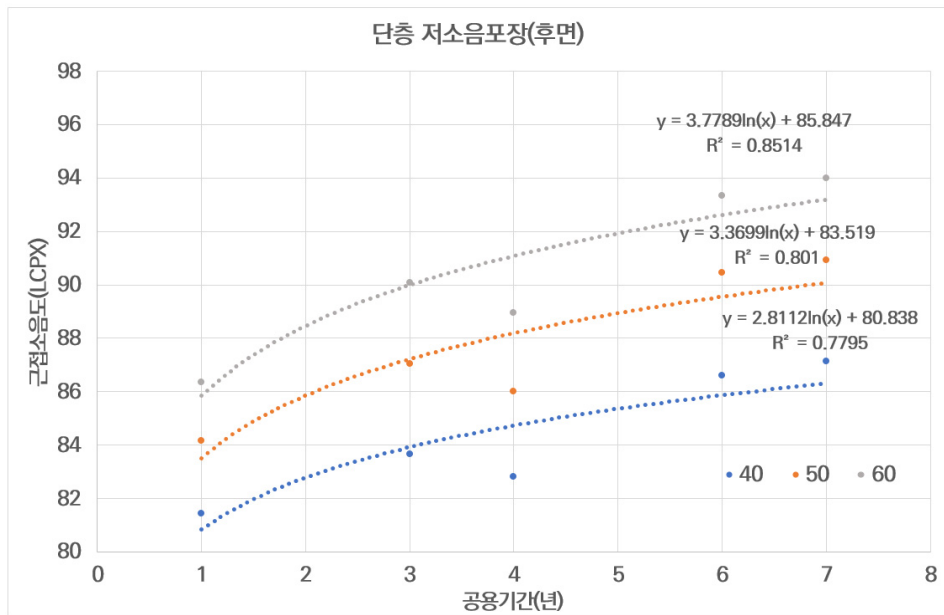
[그림 4.6] 복층 저소음포장의 소음 특성(측면)



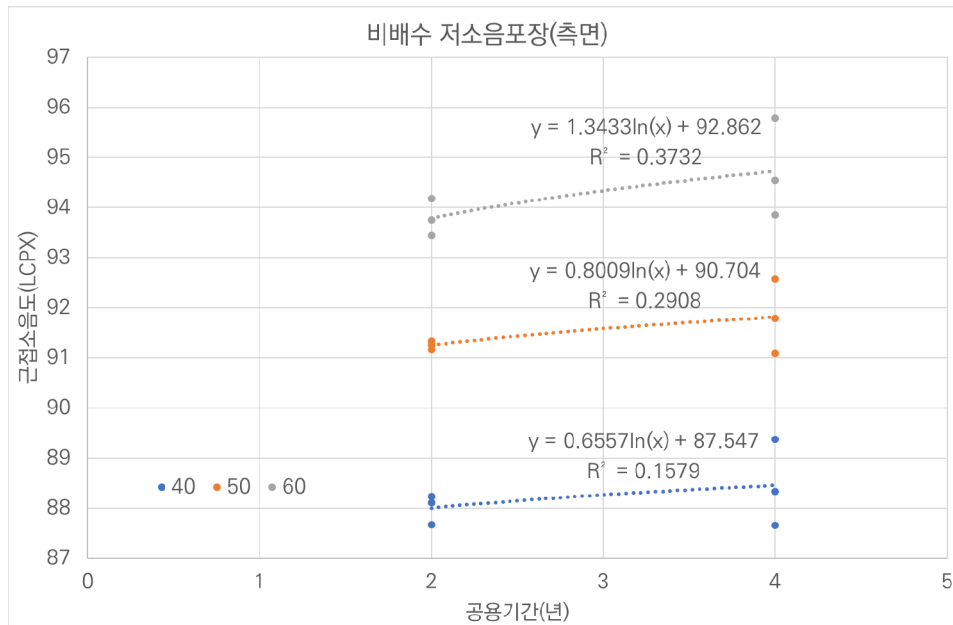
[그림 4.7] 복층 저소음포장의 소음 특성(후면)



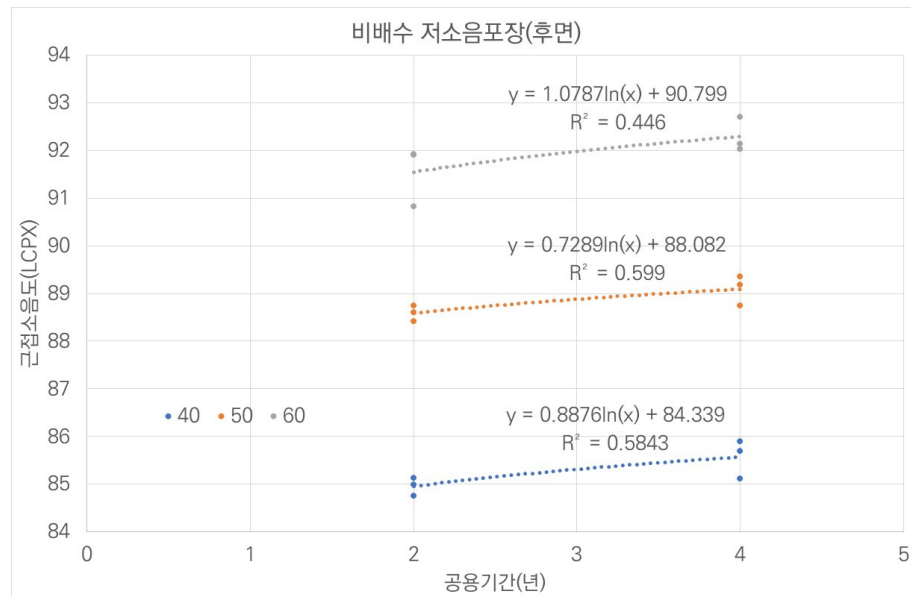
[그림 4.8] 단층 저소음포장의 소음 특성(측면)



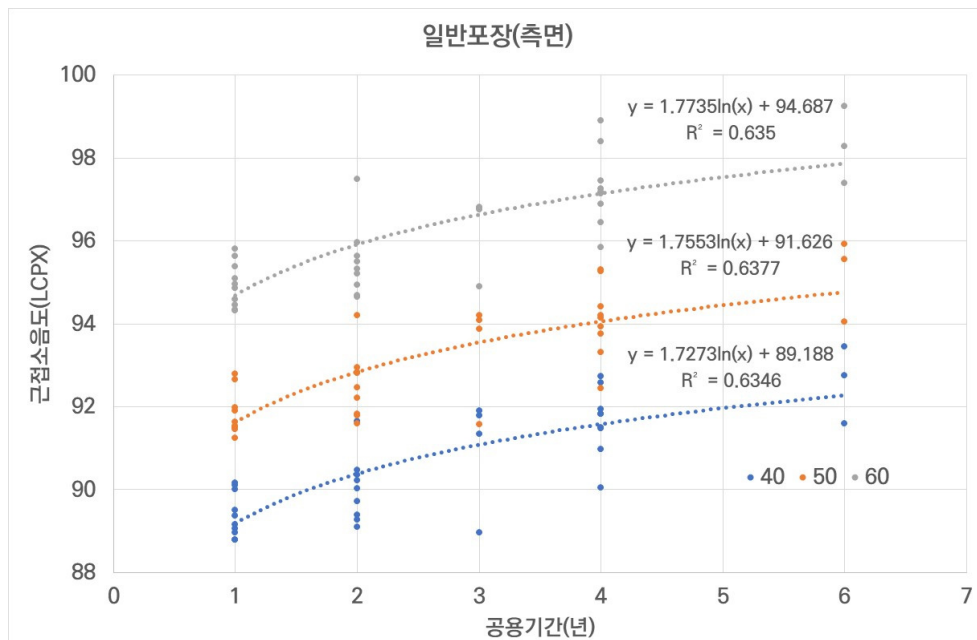
[그림 4.9] 단층 저소음포장의 소음 특성(후면)



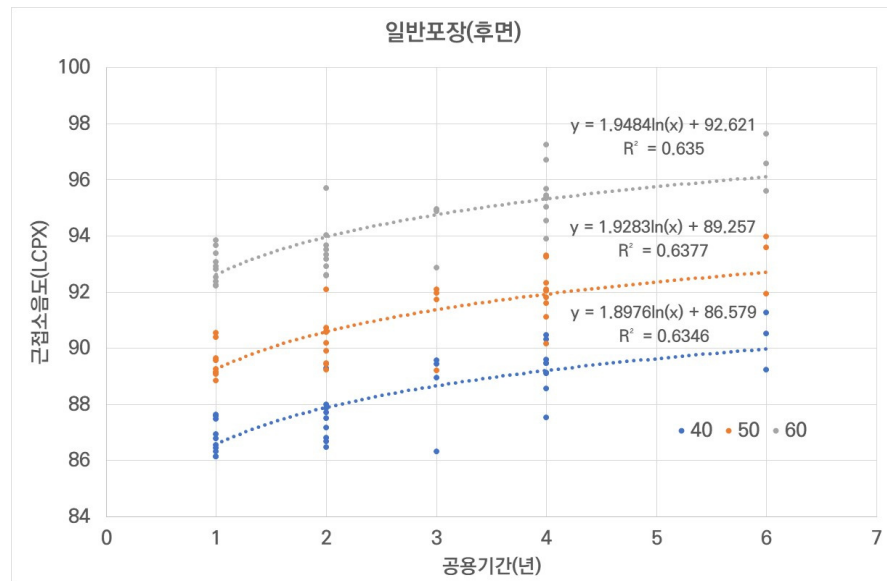
[그림 4.10] 비배수 저소음포장의 소음 특성(측면)



[그림 4.11] 비배수 저소음포장의 소음 특성(후면)



[그림 4.12] 일반포장의 소음 특성(측면)



[그림 4.13] 일반포장의 소음 특성(후면)

저소음포장과 일반포장의 소음 특성은 측면과 후면에서의 특성을 보면 후면의 소음도가 측면의 소음도보다 작다. 이는 측정되는 마이크로폰의 위치가 측면인 1, 2번이 후면인 5번의 위치에 비해 가까운 위치에서 측정되기 때문인 것으로 판단된다.

공법별 소음도 분석결과 저소음포장은 일반포장에 비해 측면의 경우 평균 약 3dB(A), 후면의 경우 평균 약 5dB(A)의 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

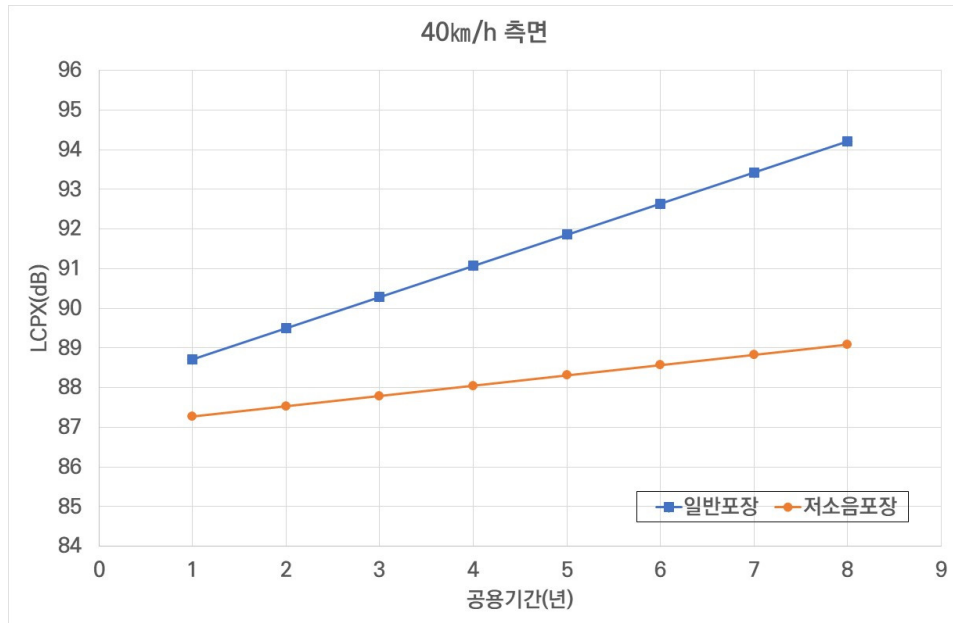
[표 4.6] 측면 소음도 분석 결과

주행속도	일반포장	저소음포장	소음도차이			
			평균	복층	단층	비배수
40km/h	91.9	88.1	3.7	2.9~6.7	2.8~4.3	1.9~5.4
50km/h	94.3	91.3	3.0	2.3~6.1	2.5~3.5	1.2~4.5
60km/h	97.5	94.4	3.1	3.2~6.8	3.1~3.9	2.0~4.4

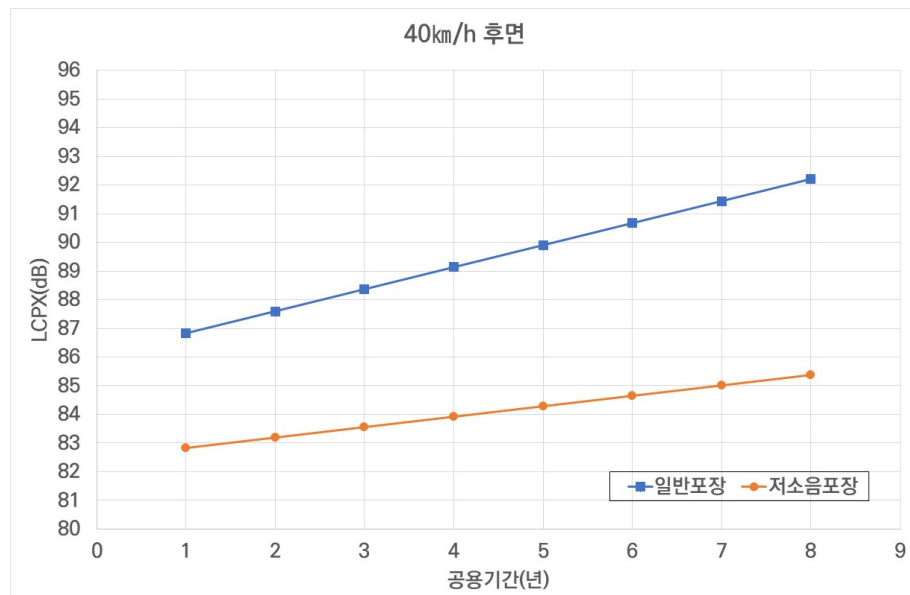
[표 4.7] 후면 소음도 분석 결과

주행속도	일반포장	저소음포장	소음도차이			
			평균	복층	단층	비배수
40km/h	89.5	83.9	5.6	4.8~7.3	5.5~5.9	2.5~6.0
50km/h	95.2	87.2	5.0	5.5~10.0	4.5~6.0	1.4~5.4
60km/h	95.7	90.2	5.5	6.1~10.9	4.3~7.0	2.1~5.4

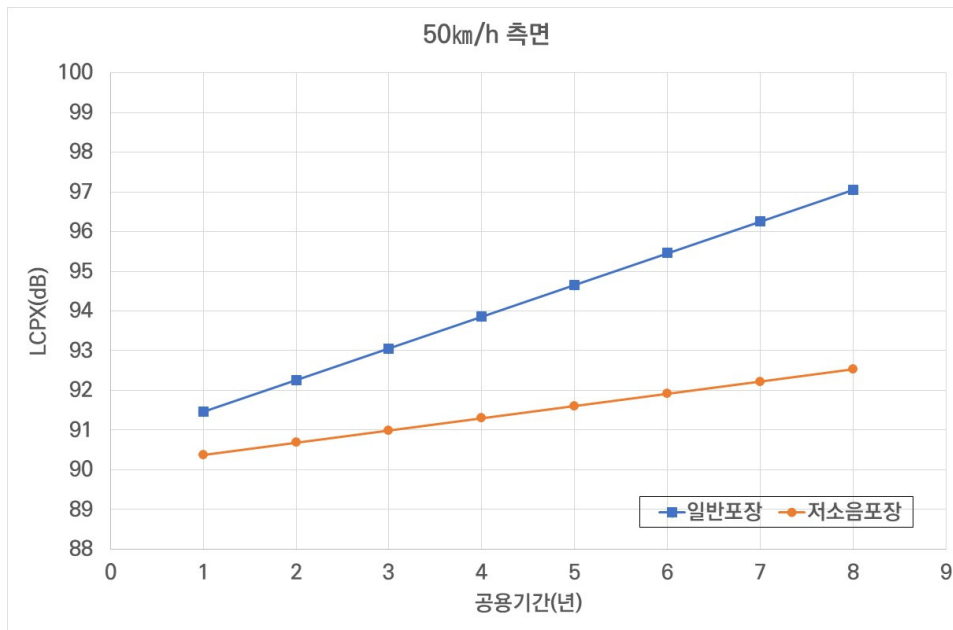
저소음포장과 일반포장의 속도별(40km/h~80km/h)소음 특성 분석결과를 [그림 4.14]에서 [그림 4.23]에 나타내었다.



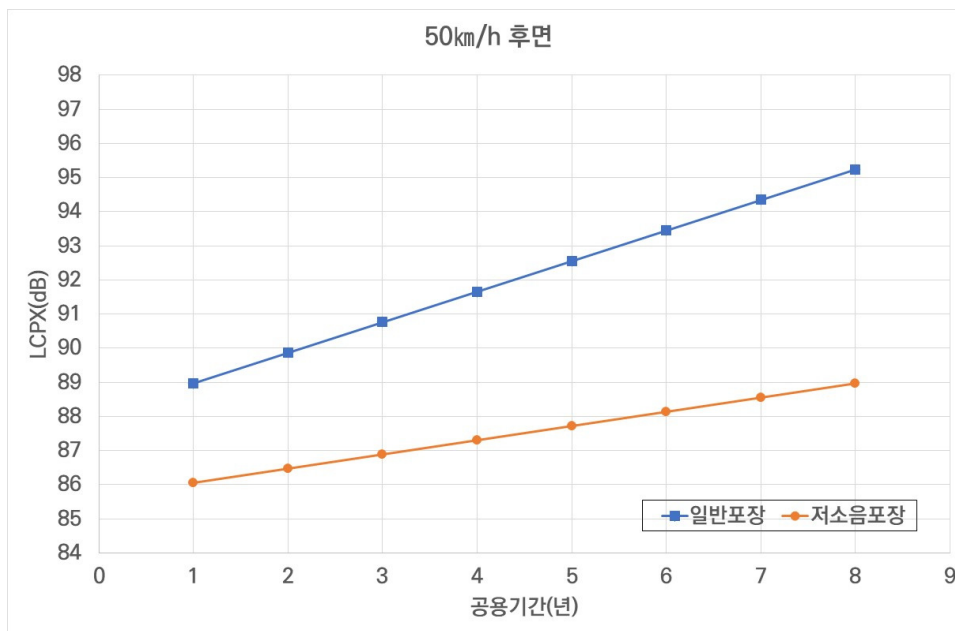
[그림 4.14] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(40km/h 측면)



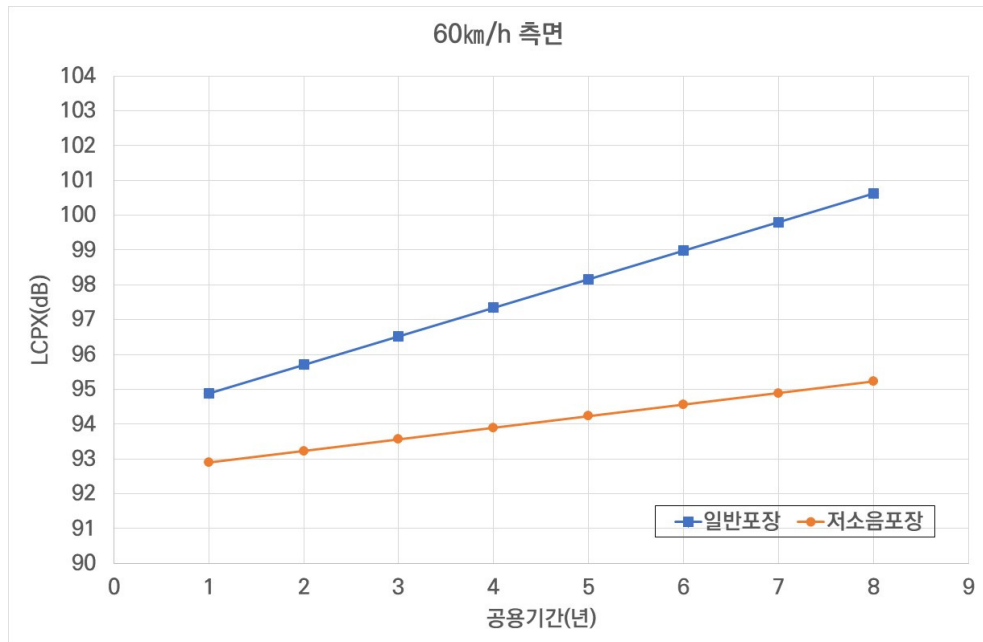
[그림 4.15] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(40km/h 후면)



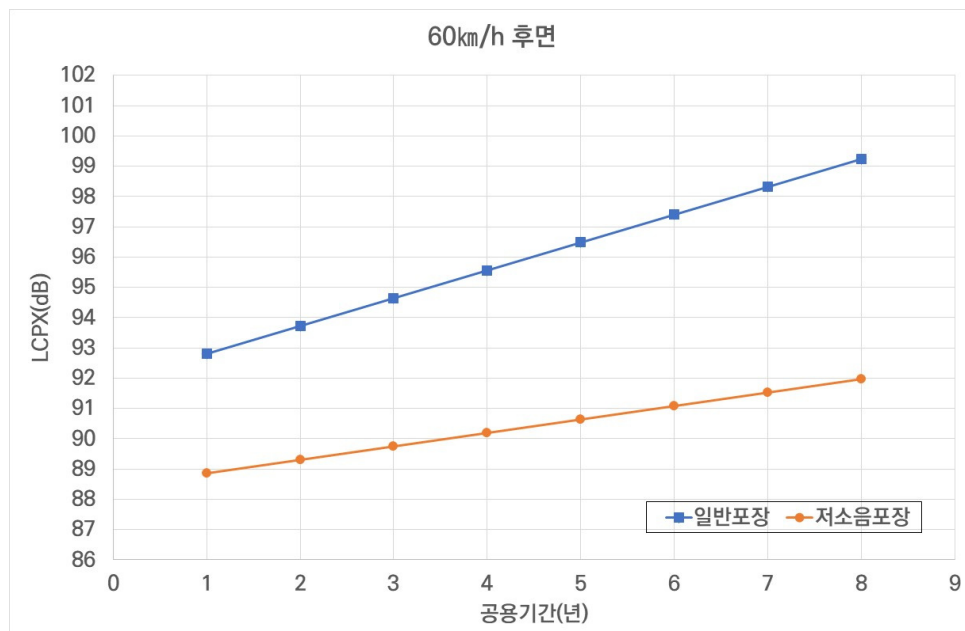
[그림 4.16] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(50km/h 측면)



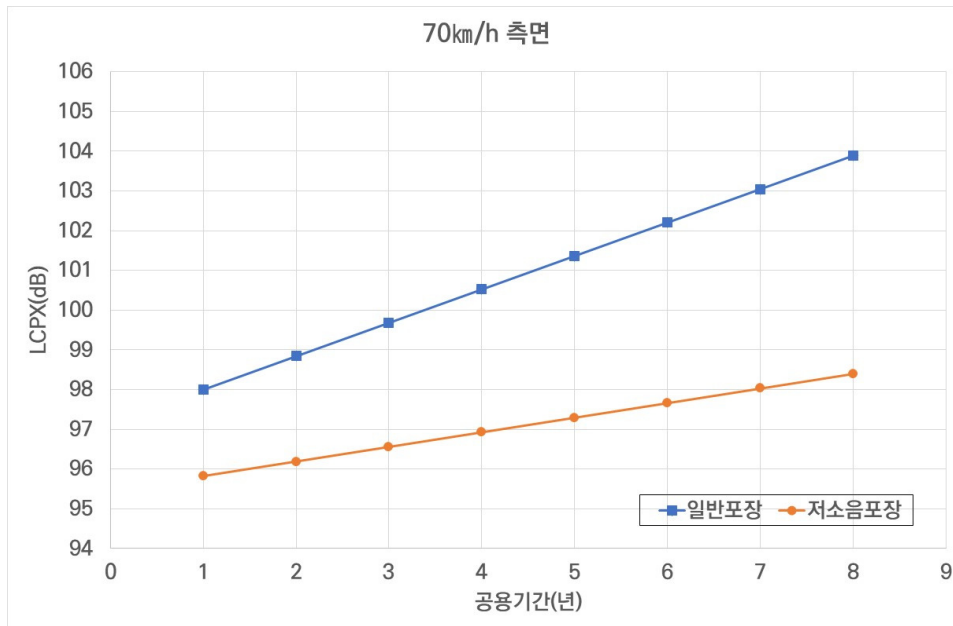
[그림 4.17] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(50km/h 후면)



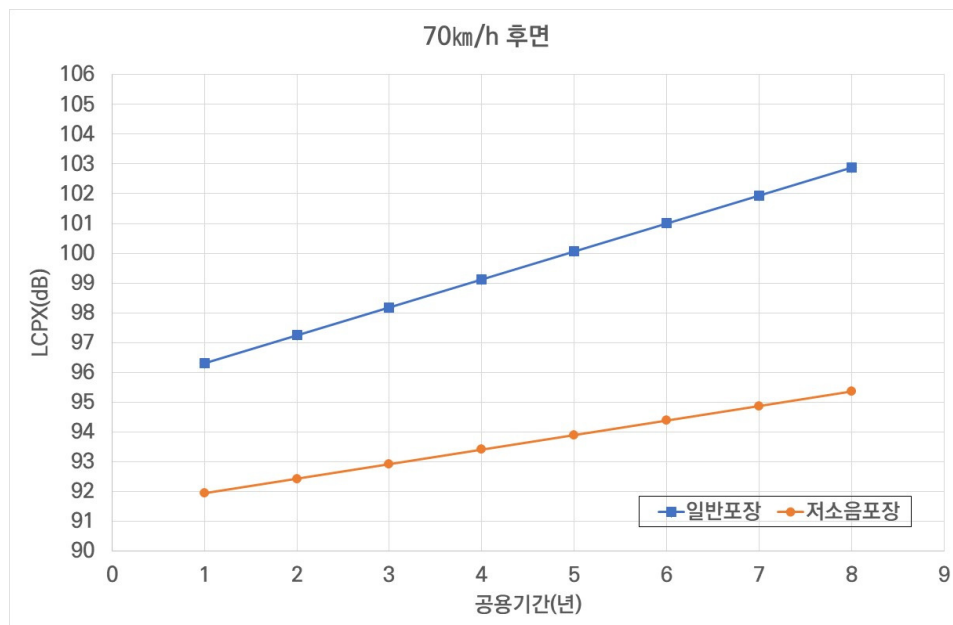
[그림 4.18] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(60km/h 측면)



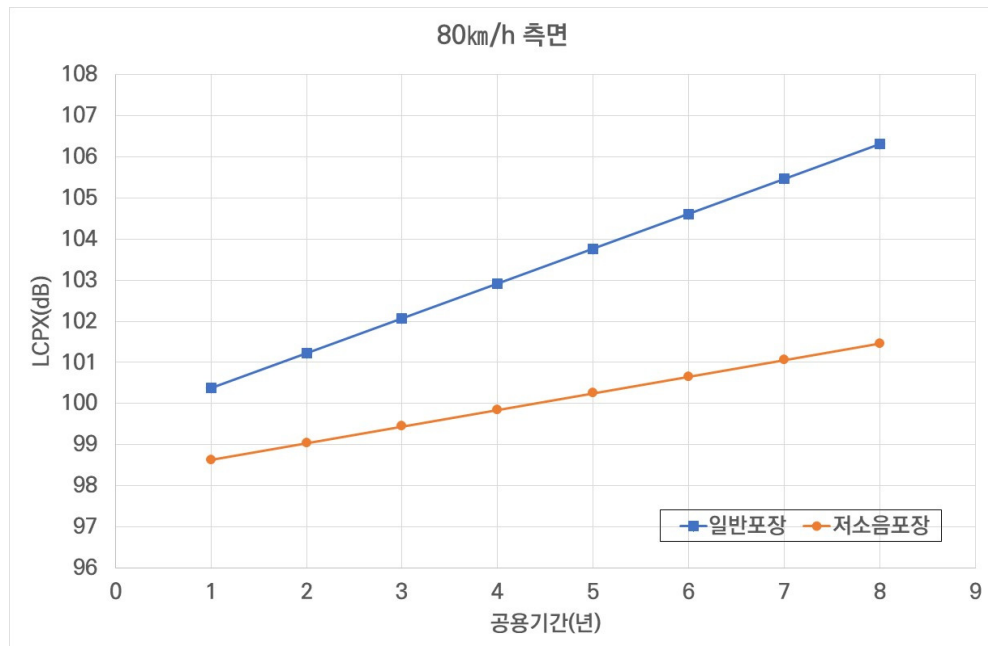
[그림 4.19] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(60km/h 후면)



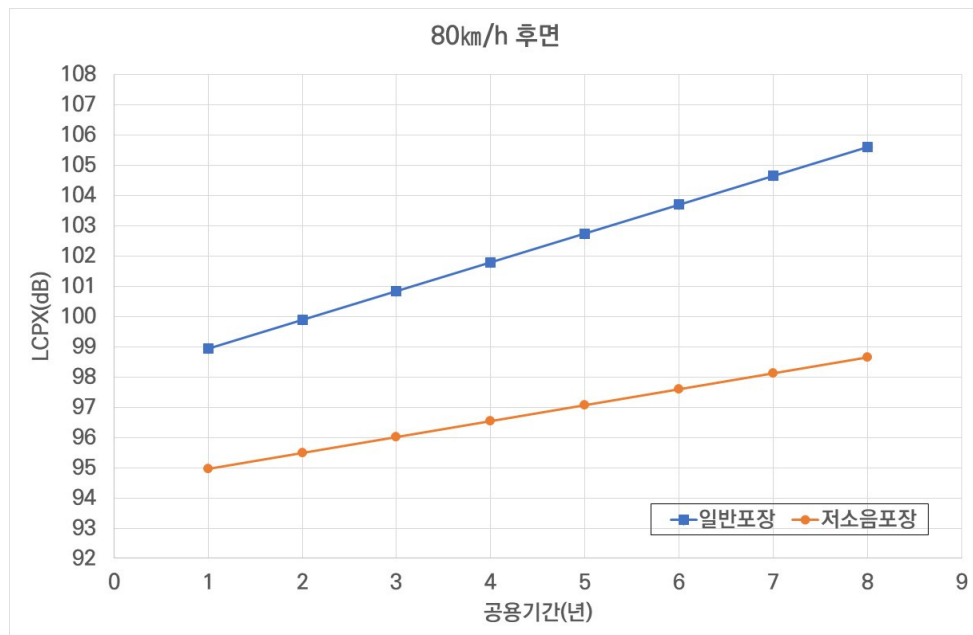
[그림 4.20] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(70km/h 측면)



[그림 4.21] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(70km/h 후면)

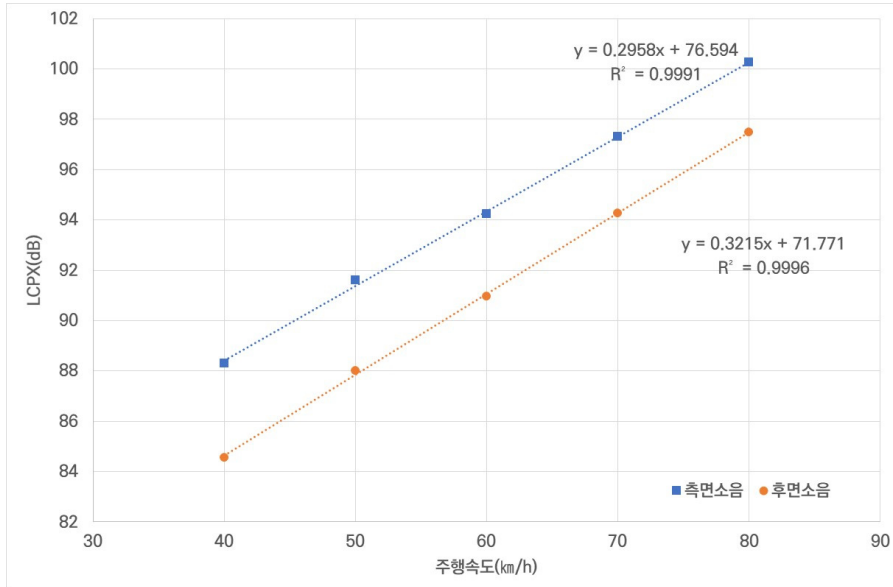


[그림 4.22] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(80km/h 측면)

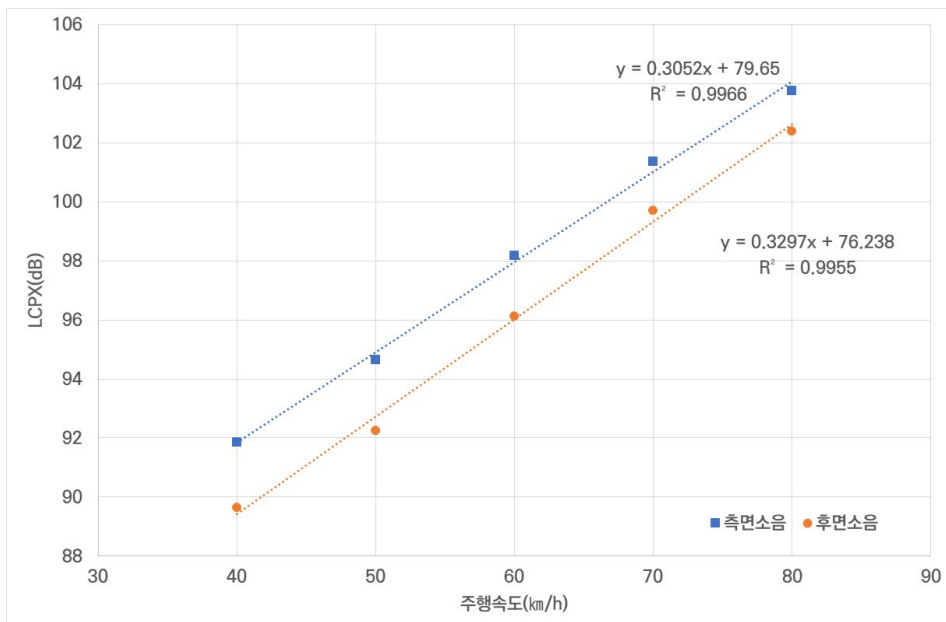


[그림 4.23] 저소음포장과 일반포장의 소음 특성(80km/h 후면)

측정 위치에 따른 저소음포장과 일반포장의 소음 특성 분석 결과를 [그림 4.24]와 [그림 4.25]에 나타내었다.



[그림 4.24] 측정 위치에 따른 속도별 소음 특성(저소음포장)



[그림 4.25] 측정 위치에 따른 속도별 소음 특성(일반포장)

4.2.2 포장공법별 소음성능 분석(측면 소음)

4.2.2.1 저소음포장 공법에 따른 소음성능 비교

일반, 비배수, 단층, 복층 4가지 포장공법에 따라 소음의 평균이 차이가 있는지 분산분석(ANalysis Of VAriance; ANOVA)을 수행하였다. y_{ik} 를 공법 i ($i = 0$ (일반), $i = 1$ (비배수), $i = 2$ (단층), $i = 3$ (복층))에 대한 k 번째 소음이라고 하면 분산분석은 다음과 같은 모형을 가정한다.

$$y_{ik} = \mu_i + \varepsilon_{ik} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ik}, \varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2)$$

여기서 μ_i 는 포장공법 i 에서 소음의 평균, μ 는 전체 모평균, α_i 는 포장공법 i 의 효과로 $\alpha_i = \mu_i - \mu$ 이다. 오차항은 독립이고 동일한 분포를 따르는 $\varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2)$ 라고 가정한다. 분산분석의 가설은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 귀무가설은 다음과 같다. 귀무가설은 포장공법에 따른 소음의 평균이 동일하여 포장공법에 따른 소음의 차이가 없다는 의미이다.

$$H_0 : \mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu \text{ vs } H_1 : \text{not } H_0$$

$$H_0 : \alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0 \text{ vs } H_1 : \text{not } H_0$$

포장공법에 따른 소음성능의 분산분석 결과는 다음 표에 나타내었다. 포장공법에 따른 소음성능의 효과를 검정하면 유의수준 5%에서 유의확률 <0.001로 매우 작아 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 통계적으로 포장공법에 따라 소음의 차이가 있다고 할 수 있다.

[표 4.8] 포장공법에 따른 소음 성능 분산분석

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	221.07	73.69	6.958	<0.001
오차	156	1652.13	10.591		

분산분석으로 포장공법에 따라 소음이 있는 것을 통계적으로 검정하였으니 이제 어떤 포장공법에 소음의 차이가 있는지 알아보기 위하여 Tukey 사후분석을 실시한 결과는 다음 표 와 같다. 포장공법에 따른 소음 평균은 일반a~비배수a>단층b~복층b 순이다. 같은 아래첨자는 같은 그룹을 의미하며 그룹안에서는 그 차이가 유의하지 않고, 다른 그룹간에서는 그 차이가 유의하다. 단층~복층, 비배수~일반 차이를 제외하고는 다른 포장공법에 따른 소음 차이에 대한 유의수준 5%에서 유의확률이 모두 매우 작은 값을 갖기에 포장공법에 따라 소음의 차이가 유의하다. 일반-복층 포장공법의 소음차이가 2.913, 일반-단층 소음차이가 2.480, 비배수-복층 소음차이가 2.401, 비배수-단층 소음차이가 1.968로 이 차이들은 통계적으로 유의하게 나타났다.

따라서 포장공법에 따른 소음은 일반~비배수, 단층~비배수 2개의 그룹으로 나뉜다.

[표 4.9] 포장공법에 따른 소음 차이 - Tukey 사후분석

포장공법	평균차이	신뢰하한	신뢰상한	p-value
복층-일반	-2.913	-5.060	-0.766	0.003
단층-일반	-2.480	-4.412	-0.548	0.006
비배수-복층	2.342	0.395	4.289	0.011
비배수-단층	1.909	0.201	3.617	0.022
비배수-일반	-0.571	-2.518	1.377	0.872
단층-복층	0.433	-1.499	2.365	0.937
포장공법	일반	비배수	단층	복층
소음(LCPX)	92.812	92.241	90.332	89.899

4.2.2.2 공용년수를 고려한 포장공법에 따른 소음성능 비교

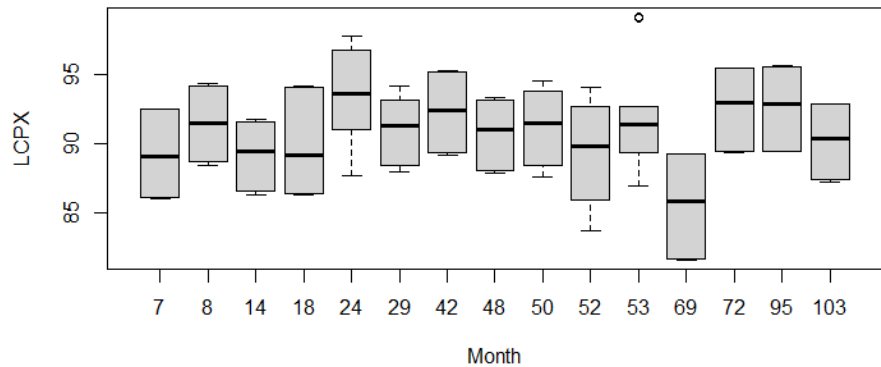
일반적으로 공용년수가 길어질수록 소음의 정도가 증가한다고 알려져 있다. 분산분석을 통하여 공용년수에 따라 소음성능의 차이가 있는지 확인한다. 복층, 단층, 비배수 3가지 저소음포장 공법에 따라 소음의 평균이 차이가 있는지 분산분석을 수행하였다. 여기서 공용년수는 모두 개월을 활용하였다.

공용년수에 따른 소음성능 분산분석 결과는 [표 4.10]에 나타내었다. 유의수준

5%에서 유의확률은 <0.001로 매우 작아 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻어 공용년수에 따른 소음의 차이가 있다고 할 수 있다. 다만 그림에서 볼 수 있듯이 예상한 것처럼 공용년수가 증가할수록 소음이 증가하는 현상은 특별히 눈에 띄지 않는다. 또한 사후분석은 공용년수 조합의 결과가 너무 많아 확인하는 것이 큰 의미가 없어 생략한다.

[표 4.10] 공용년수에 따른 소음 성능 분산분석

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
공용년수	14	419.8	29.8721	3.263	<0.001
오차	114	1043.6	9.154		



[그림 4.26] 공용년수에 따른 소음 성능 분산분석

분산분석 결과 공용년수에 따라 소음성능이 다르다는 것은 통계적으로 확인할 수 있었다. 따라서 공용년수를 공변량(covariate)으로 고려하여 저소음포장 공법에 따른 소음성능 비교를 위하여 공분산분석(ANalysis of COVariance; ANCOVA)을 수행한다. 여기서 x_{ij} 는 공변량인 공용년수를 나타내며, β 는 공통으로 작용하는 공변량의 효과를 말한다.

$$y_{ijk} = \mu_i + \beta x_{kj} + \varepsilon_{ik} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ik}, \quad \varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2),$$

$i = 1$ (비배수), $i = 2$ (단층), $i = 3$ (복층).

저소음포장 공법과 공용년수의 효과가 서로 독립적이지 않고 교호작용이 있는지 검정하고자 교호작용을 포함함 공분산분석 결과를 다음 표에 나타내었다. 여기서 교호작용이란 포장공법에 따라 공용년수의 소음효과가 교호하다는 의미이다. 교호작용의 예를 들면 비배수 포장공법에서 공용년수가 커질수록 소음이 증가하는데 복층 포장공법에서 공용년수가 커질수록 소음이 감소한다면 포장공법에 따라 공용년수에 대한 소음효과가 교호작용을 일으킨다. 만약 비배수 포장공법에서 공용년수가 1 커질수록 소음이 2 증가하고, 마찬가지로 복층 포장공법에서도 공용년수가 1 커질수록 소음이 2 증가하는 효과가 비슷하다면 포장공법에 따라 공용년수의 소음효과가 동일하여 교호작용이 없다고 할 수 있다.

교호작용을 검정하기 위한 가설은 다음과 같고, 교호작용에 대한 검정 결과 유의수준 5%에서 유의확률 0.694로 커 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻지 못하여 교호작용은 존재하지 않는다고 할 수 있다. 따라서 포장공법에 따라 공용년수가 소음에 미치는 효과가 동일하다고 판단할 수 있다.

H_0 : 교호작용이 존재하지 않는다. H_0 : 공변량의 효과가 없다.

H_1 : 교호작용이 존재한다. H_1 : 공변량의 효과가 있다.

[표 4.11] 포장공법에 따른 소음 성능 공분산분석 (공변량: 공용년수) - 교호효과 반영

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	2	133.3	66.67	6.225	0.003
공용년수	1	3.3	3.32	0.310	0.579
포장공법*공용년수	2	7.8	3.92	0.366	0.694
오차	123	1317.3	10.71		

통계적으로 교호효과가 없어 저소음포장 공법에 따라 공변량인 공용년수의 효과가 동일함을 확인하였다. 공변량인 공용년수의 효과를 제어하고 저소음포장 공법의 효과를 검정하고자 공분산분석을 수행한 결과는 [표 4.12]에 나타내었다. 공변량인 공용년수 효과를 제어했을 때 포장공법에 따른 소음 성능이 차이가 나는지 포장공법의 효과를 검정하는 유의확률은 0.002로 귀무가설을 기각할

충분한 근거를 얻었다. 따라서 공용년수를 제어했을 때 포장공법에 따라 소음 성능은 통계적으로 차이가 있다.

[표 4.12] 포장공법에 따른 소음 성능 공분산분석 (공변량: 공용년수) -교호효과 미반영

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
공용년수	1	0.01	0.009	0.001	0.977
포장공법	2	136.64	68.321	6.445	0.002
오차	125	1325.14	10.601		

저소음포장 공법에 따른 소음 성능에 대한 공분산-회귀 모형의 추정치는 [표 4.13]에 나타내었고 이를 바탕으로 추정한 공분산-회귀 모형식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_{1j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}x_{1j} = 92.013 + 0 + 0.006x_{1j}$$

$$\hat{y}_{2j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}x_{2j} = 92.013 - 1.966 + 0.006x_{2j}$$

$$\hat{y}_{3j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_3 + \hat{\beta}x_{3j} = 92.013 - 2.397 + 0.006x_{3j}$$

[표 4.13] 포장공법에 따른 소음 성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수)

회귀계수	추정량	표준오차	t-value	p-value	모형 p-value
절편	92.013	0.623	147.751	<0.001	0.006
포장공법:단층	-1.966	0.666	-2.953	0.004	
포장공법:복층	-2.397	0.757	-3.168	0.002	
공용년수	0.006	0.011	0.559	0.577	
R^2	0.072	F	4.297	p-value	0.006

공변량 공용년수에 대한 회귀계수 0.006은 모든 저소음 포장공법에 대하여 공통이다. 비배수 포장공법에 대한 효과를 0으로 놓았을 때, 비배수와 단층 공법의 소음은 -1.966 차이(유의확률 0.004)이며, 비배수와 복층 공법의 소음은 -2.397 차이(유의확률 0.002)가 난다.

[표 4.14]는 공변량을 공용년수로 하여 저소음포장 공법에 따른 소음 성능에

대한 보정평균과 사후분석 결과이다. 보정평균은 공변량인 공용년수 효과를 보정한 상태에서의 반응변수의 평균으로, 비배수 a >단층 $b \approx$ 복층 b 순으로 비배수와 복층 \approx 단층 두 그룹으로 나눌 수 있다.

[표 4.14] 포장공법에 따른 소음성능 (공변량: 공용년수) - 보정평균 & Tukey 사후분석

포장공법	보정평균	표준오차	자유도	신뢰하한	신뢰상한
비배수	92.277	0.474	125	91.338	93.215
단층	90.311	0.462	125	89.396	91.225
복층	89.879	0.586	125	88.720	91.039
대비	차이	표준오차	자유도	t-value	p-value
비배수-복층	2.397	0.757	125	3.168	0.005
비배수-단층	1.966	0.666	125	2.953	0.010
복층-단층	-0.431	0.744	125	-0.579	0.831

4.2.2.3 주행속도를 고려한 포장공법에 따른 소음 성능 비교

도로의 소음은 속도가 높을수록 클 것이라고 예상할 수 있다. 이처럼 주행속도는 도로 소음의 주요 인자로 고려되기 때문에 주행속도에 따른 소음성능의 차이를 분산분석 하였으며, 속도를 공변량으로 하여 포장공법에 따른 소음 성능을 공분산분석 하였다. 또한 가장 많이 측정된 40km/h, 50km/h, 60km/h 속도 자료를 각각 추출하여 포장공법별 소음성능을 분산분석 하였다.

(1) 주행속도에 따른 소음성능 분석

측정속도 30~80km/h인 모든 속도를 대상으로 속도에 따라 소음의 차이가 있는지 알아보기 위하여 분산분석을 수행한 결과는 [표 4.15]와 같다. 유의확률은 <0.001로 유의수준 5% 하에서 속도에 따라 소음이 차이가 있다고 할 수 있다. Tukey 사후분석 결과 속도가 커질수록 소음은 증가하는 경향을 볼 수 있으나 속도가 70km/h와 시속 80km/h일 때 소음의 차이는 유의하지 않다. 따라서 소음의 성능은 다음과 같이 80km/h \approx 70km/h > 60km/h > 50km/h > 40km/h > 30km/h 나타낼 수 있다.

[표 4.15] 주행속도에 따른 소음성능 분산분석

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value	
속도	5	1556	311.24	151.2	〈0.001	
오차	154	317	2.06			
속도	평균차이		신뢰하한	신뢰상한	p-value	
40-30	5.421		3.266	7.576	〈0.001	
50-30	8.652		6.505	10.799	〈0.001	
60-30	11.349		9.178	13.520	〈0.001	
70-30	13.838		11.243	16.434	〈0.001	
80-30	14.530		11.995	17.066	〈0.001	
50-40	3.231		2.406	4.056	〈0.001	
60-40	5.928		5.042	6.815	〈0.001	
70-40	8.418		6.742	10.093	〈0.001	
80-40	9.109		7.528	10.691	〈0.001	
60-50	2.697		1.830	3.564	〈0.001	
70-50	5.187		3.522	6.852	〈0.001	
80-50	5.878		4.308	7.449	〈0.001	
70-60	2.489		0.793	4.186	0.001	
80-60	3.181		1.578	4.785	〈0.001	
80-70	0.692		-1.451	2.835	0.938	
측정속도	30	40	50	60	70	80
소음(LCPX)	82.640	88.061	91.292	93.989	96.479	97.170

(2) 주행속도를 고려한 포장공법에 따른 소음성능 비교

분산분석 결과 속도에 따라 소음이 다르다는 것은 통계적으로 확인할 수 있었기에 속도를 공변량(covariate)으로 고려하여 포장공법에 따른 소음의 평균비교를 위하여 공분산분석을 수행한다.

먼저 포장공법과 속도가 효과가 서로 독립적이지 않고 교호작용이 있는지 검정하고자 공분산분석을 수행한 결과 유의확률 0.101로 유의수준 5%하에서 교호효과는 없다고 할 수 있다. 따라서 포장공법에 따라 속도가 소음에 미치는 효과가 동일하다. 교호효과가 없어 포장공법 간 공변량 속도의 효과가 동일하다고 확인하였기에 공변량의 효과를 제어하고 포장공법의 효과를 검정하고자 공분산분석을 실행한 결과는 [표 4.16]에 나타내었다. 공변량 속도 효과를 제어했을 때 포장공법별 소음 평균이 차이가 나는지 보기 위한 유의확률은 <0.001로 유의수준 5%하에서 귀무

가설을 기각할 충분한 근거를 얻었다. 따라서 주행속도를 제어했을 때 포장공법별 소음은 차이가 난다.

[표 4.16] 포장공법에 따른 소음 성능 공분산분석 (공변량: 속도)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	119.92	39.97	22.802	<0.001
속도	1	1481.57	1481.57	845.163	<0.001
오차	155	271.71	1.75		

포장공법에 따른 소음 성능에 대한 공분산-회귀 모형의 추정결과는 [표 4.17]에 나타내었고 이를 바탕으로 추정한 공분산-회귀 모형식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_{1j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}x_{1j} = 79.128 + 0 + 0.267x_{1j}$$

$$\hat{y}_{2j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}x_{2j} = 79.128 - 1.394 + 0.267x_{2j}$$

$$\hat{y}_{3j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_3 + \hat{\beta}x_{3j} = 79.128 - 1.922 + 0.267x_{3j}$$

$$\hat{y}_{4j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_4 + \hat{\beta}x_{4j} = 79.128 - 2.655 + 0.267x_{4j}$$

[표 4.17] 포장공법에 따른 소음 성능 모형의 추정값 (공변량: 속도)

회귀계수	추정량	표준오차	t-value	p-value	모형 p-value
절편	79.128	0.543	145.853	<0.001	<0.001
포장공법:비배수	-1.394	0.306	-4.548	<0.001	
포장공법:단층	-1.922	0.303	-6.337	<0.001	
포장공법:복층	-2.655	0.336	-7.891	<0.001	
속도	0.267	0.010	28.062	<0.001	
R^2	0.8512	F	228.4	p-value	<0.001

공변량 속도에 대한 회귀계수 0.267은 모든 포장공법에 대하여 공통이다. 포장공법 일반에 대한 효과를 0으로 놓았을 때, 일반과 비배수 공법의 소음은 -1.394, 일반과 복층 포장공법의 소음은 -2.655 차이가, 일반과 단층 공법의 소음은 -1.922 차이,

차이가 난다. 또한 회귀계수는 모두 유의확률 0.05 하에서 유의한 소음차이가 난다.

[표 4.18]은 공변량을 속도로 하여 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석의 보정 평균과 사후분석 결과이다. 보정평균은 공변량 속도의 효과를 보정한 상태에서의 반응변수의 평균으로, 일반_a>비배수_b≈단층_{bc}≈복층_c 순으로 일반, 비배수≈단층, 단층≈복층 세 개의 그룹으로 나눌 수 있다.

[표 4.18] 포장공법에 따른 소음성능 (공변량: 속도) - 보정평균 & Tukey 사후분석

포장공법	보정평균	표준오차	자유도	신뢰하한	신뢰상한
일반	92.835	0.2378	155	92.365	93.304
비배수	91.441	0.193221	155	91.059	91.823
단층	90.913	0.188381	155	90.540	91.285
복층	90.180	0.238009	155	89.710	90.650
대비	차이	표준오차	자유도	t-value	p-value
일반-비배수	1.394	0.306	155	4.548	<0.001
일반-복층	2.655	0.336	155	7.891	<0.001
일반-단층	1.922	0.303	155	6.337	<0.001
비배수-복층	1.261	0.307	155	4.101	<0.001
비배수-단층	0.528	0.272	155	1.943	0.215
복층-단층	-0.733	0.303	155	-2.419	0.078

(3) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 40, 50, 60km/h)

가장 많이 측정된 측정속도 40km/h, 50km/h, 60km/h 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음성능 분산분석을 수행한 결과는 [표 4.19]와 같다. 유의확률 0.014로 유의 수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 40km/h, 50km/h, 60km/h일 때, 포장공법에 따른 소음성능의 차이가 있다고 할 수 있다.

Tukey 사후분석을 결과 일반과 복층의 소음은 2.199 차이로 유의확률 0.008로 유의하며 다른 포장공법에 따른 소음의 차이가 없다. 일반_a≈비배수_{ab}≈단층_{ab}≈복층_b으로 일반≈비배수≈단층, 비배수≈단층≈복층 2개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.19] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 40km/h+50km/h+60km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	74.2	24.729	3.651	0.014
오차	137	927.8	6.773		
포장공법	평균차이	신뢰하한	신뢰상한	p-value	
비배수-일반	-0.934	-2.602	0.734	0.466	
복층-일반	-2.199	-3.964	-0.434	0.008	
단층-일반	-1.318	-2.969	0.333	0.166	
복층-비배수	-1.265	-2.885	0.355	0.182	
단층-비배수	-0.384	-1.879	1.112	0.909	
단층-복층	0.881	-0.721	2.484	0.483	
포장공법	일반	비배수	단층	복층	
소음(LCPX)	92.098	91.164	90.780	89.899	

(4) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 40km/h)

측정속도가 40km/h인 자료 48개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음성능 분산 분석을 수행한 결과는 [표 4.20]과 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 40km/h인 경우 포장공법에 따른 소음 성능의 차이가 있다고 할 수 있다. Tukey 사후분석을 결과 일반a~비배수ab~단층bc~복층c으로 전체 자료와 동일한 결과로 일반~비배수, 비배수~단층, 단층~복층 3개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.20] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 40km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	25.48	8.494	7.655	〈0.001
오차	44	48.83	1.110		
포장공법	평균차이	신뢰하한		신뢰상한	p-value
복층-일반	-2.214	-3.471		-0.956	〈0.001
단층-일반	-1.352	-2.485		-0.218	0.014
비배수-복층	1.221	0.017		2.426	0.046
비배수-일반	-0.992	-2.197		0.212	0.139
단층-복층	0.862	-0.272		1.996	0.193
비배수-단층	0.359	-0.715		1.433	0.809
포장공법	일반	비배수		단층	복층
소음(LCPX)	89.221	88.228		87.869	87.007

(5) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 50km/h)

측정속도가 50km/h인 자료 53개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음 성능을 분산 분석한 결과는 [표 4.21]과 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 50km/h인 경우 4가지 포장공법별 소음의 차이가 있다고 할 수 있다. 어떤 포장공법 별 소음차이가 있는지 알아보기 위하여 Tukey 사후분석을 실시한 결과는 [표 4.21]과 같다. 포장공법별 소음 평균은 일반a ~비배수ab~단층bc~복층c으로 일반~비배수, 비배수~단층, 단층~복층 3개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.21] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 50km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	31.21	10.405	8.766	〈0.001
오차	49	58.16	1.187		
포장공법	평균차이	신뢰하한		신뢰상한	p-value
비배수-일반	-1.115	-2.270		0.040	0.062
복층-일반	-2.453	-3.749		-1.158	〈0.001
단층-일반	-1.475	-2.643		-0.307	0.008
복층-비배수	-1.338	-2.493		-0.184	0.017
단층-비배수	-0.360	-1.369		0.649	0.779
단층-복층	0.979	-0.189		2.147	0.130
포장공법	일반	비배수		단층	복층
소음(LCPX)	92.558	91.443		91.083	90.104

(6) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 60km/h)

측정속도가 60km/h인 자료 40개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음성능 분산분석을 수행한 결과는 [표 4.22]와 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 60km/h인 경우 4가지 포장공법 별 소음의 차이가 있다고 할 수 있다. 어떤 포장공법별 소음 차이가 있는지 알아보기 위하여 Tukey 사후분석을 실시한 결과는 [표 4.22]와 같다. 포장공법별 소음 평균은 일반a~단층a>비배수b>복층c으로 일반~단층, 비배수, 복층 3개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.22] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 60km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	49.44	16.482	46.94	〈0.001
오차	36	12.64	0.351		
포장공법	평균차이		신뢰하한	신뢰상한	p-value
비배수-일반	-1.185		-1.926	-0.443	0.001
복층-일반	-2.779		-3.521	-2.037	〈0.001
단층-일반	-0.166		-0.923	0.591	0.934
복층-비배수	-1.594		-2.275	-0.914	〈0.001
단층-비배수	1.018		0.321	1.716	0.002
단층-복층	2.613		1.915	3.310	〈0.001
포장공법	일반		단층	비배수	복층
소음(LCPX)	95.121		94.954	93.936	92.342

주행속도별로 자료를 나누어 포장공법에 따른 소음성능을 분산분석하여 사후 분석 한 결과를 보면, 60km/h일 때 사후분석의 결과가 전체(속도를 공변량으로 하여 공분산분석) 자료나 다른 속도 40km/h, 50km/h, 60km/h일 때와는 다르게 일반~단층>비배수>복층 순으로 비배수와 단층의 소음효과가 역전된 것을 확인할 수 있었다.

[표 4.23] 주행속도 구분에 따른 소음 평균 비교

자료구분	일반	비배수	단층	복층	포장공법 비교
전체 (공변량 속도)	92.835	91.441	90.913	90.180	일반a>비배수b~단층bc~복층c
40+50+60	92.098	91.164	90.78	89.899	일반a~비배수ab~단층ab~복층b
40km/h	89.221	88.228	87.869	87.007	일반a~비배수ab~단층bc~복층c
50km/h	92.558	91.443	91.083	90.104	일반a~비배수ab~단층bc~복층c
60km/h	95.121	94.954	94.954	92.342	일반a~단층a>비배수b>복층c

4.2.2.4 공용년수와 주행속도를 고려한 포장공법에 따른 소음성능 비교

앞서 도로의 포장공법, 속도, 공용년수가 소음에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 속도와 공용년수 모두를 공변량으로하는 공분산분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

먼저 교호효과를 보면 포장공법과 공용년도의 교호효과에 대한 검정은 유의확률 0.164, 포장공법과 속도의 교호효과 검정은 유의확률 0.480으로 유의수준 5% 하에서 교호효과가 없다는 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 각각의 교호효과는 없다고 할 수 있다.

교호효과가 없기 때문에 공용년수와 속도를 공변량으로 하여 포장공법에 따른 소음 성능을 공분산분석한 결과는 [표 4.24]에 나타내었다. 공변량인 공용년수와 속도를 제어한 상태에서 순수한 포장공법에 따른 소음 효과는 유의확률 <0.001로 유의수준 5%하에서 유의하다. 따라서 공변량인 공용년수와 속도를 제어한 상태에서 포장 공법에 따른 소음 성능은 차이가 있다.

[표 4.24] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 공용년수와 속도)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	2	40.0	20.0	12.620	<0.001
공용년수	1	0.0	0.0	0.006	0.940
속도	1	1225.0	1225.0	772.257	<0.001
오차	124	196.7	1.6		<0.001

속도와 공용년수를 공변량으로 하여 포장공법에 따른 소음 성능을 나타내는 공분산-회귀 모형은 [표 4.25]와 같이 추정하였고, 추정한 회귀식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_{Uj} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_U + \hat{\beta}_1 x_{1Uj} + \hat{\beta}_2 x_{2Uj} = 77.015 + 0 + 0.023x_{1Uj} + 0.265x_{2Uj}$$

$$\hat{y}_{Sj} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_S + \hat{\beta}_1 x_{1Sj} + \hat{\beta}_2 x_{2Sj} = 77.015 - 0.747 + 0.023x_{1Sj} + 0.265x_{2Sj}$$

$$\hat{y}_{Dj} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_D + \hat{\beta}_1 x_{1Dj} + \hat{\beta}_2 x_{2Dj} = 77.015 - 1.471 + 0.023x_{1Dj} + 0.265x_{2Dj}$$

[표 4.25] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수와 속도)

포장공법	추정량	표준오차	t-value	p-value
절편	77.015	0.612	125.897	<0.001
포장공법:단층	-0.747	0.262	-2.856	0.005
포장공법:복층	-1.471	0.295	-4.990	<0.001
공용년수	0.023	0.004	5.233	<0.001
속도	0.265	0.010	26.671	<0.001
R^2	0.8611	F	199.4	p-value
				<0.001

위의 식에 나타난 각 회귀식의 추정결과 모든 포장공법에 대해서 공변량 공용년수와 속도의 회귀계수는 각각 동일하다. 속도를 제어한 공용년수의 효과는 공용년수가 1개월 늘어남에 따라 소음은 0.023dB 늘어나며, 유의확률 <0.001로 회귀계수는 유의하다. 또한 공용년수를 제어한 속도의 효과는 속도가 1km/h 증가하면 소음은 0.265dB 증가하며, 유의확률 <0.001로 유의하다.

[표 4.26]은 각 포장공법에 대한 보정평균값이 출력되어 있다. 보정평균은 공변량인 공용년수와 속도 효과를 제어했을 때 소음의 평균으로 앞선 추정식에서 공용년수와 속도는 전체 평균을 넣어 포장공법 별 보정평균을 계산한다. 보정평균을 살펴보면 비배수>단층>복층 순이며, 사후분석 결과 이 차이는 모두 유의하다.

[표 4.26] 보정평균과 사후분석 결과

포장공법	보정평균	표준오차	자유도	신뢰하한	신뢰상한
비배수	391.582	0.185	124	91.215	91.948
단층	90.834	0.180	124	90.479	91.190
복층	90.111	0.227	124	89.662	90.560
대비	차이	표준오차	자유도	t-value	p-value
비배수-복층	1.471	0.295	124	4.990	<0.001
비배수-단층	0.747	0.262	124	2.856	0.014
복층-단층	-0.724	0.288	124	-2.511	0.035

4.2.3 포장공법별 소음성능 분석 (후방 소음)

4.2.3.1 저소음포장 공법에 따른 소음 성능 비교

4가지 포장공법에 따라 소음의 평균이 차이가 있는지 분산분석을 수행한 결과는 [표 4.27]과 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5% 하에서 포장공법에 따라 소음 성능의 차이가 있다고 할 수 있다.

[표 4.27] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	904.0	301.335	19.899	<0.001
오차	156	2362.3	15.143		

분산분석 후 어떤 포장공법에 소음의 차이가 있는지 알아보기 위하여 Tukey 사후 분석을 실시한 결과는 [표 4.28]에 나타내었다. 포장공법에 따른 소음 평균은 일반a ~비배수a>단층b~복층b 순이다. 비배수~일반, 단층~복층 간 소음 차이는 유의하지 않고, 다른 공법간 소음차이는 유의하여 일반~비배수, 단층~복층 두 개 그룹으로 나눈다.

[표 4.28] 포장공법에 따른 소음 차이 - Tukey 사후분석

포장공법	평균차이	신뢰하한	신뢰상한	p-value
비배수-일반	-0.776	-3.104	1.553	0.823
복층-일반	-6.197	-8.764	-3.630	0.000
단층-일반	-4.261	-6.571	-1.951	0.000
복층-비배수	-5.421	-7.750	-3.093	0.000
단층-비배수	-3.486	-5.528	-1.443	0.000
단층-복층	1.936	-0.374	4.246	0.134
포장공법	일반	비배수	단층	복층
소음(LCPX)	90.589	89.813	86.327	84.392

4.2.3.2 공용년수를 고려한 포장공법에 따른 소음 성능 비교

분산분석을 통하여 공용년수에 따라 소음 성능의 차이가 있는지 확인한다. 다만 일반포장 기법에 대한 공용년수 정보가 없기에 일반포장 기법을 제외한 복층, 단층, 비배수 3가지 저소음포장 공법에 따라 소음의 평균이 차이가 있는지 분산분석을 수행하였다.

[표 4.29]의 결과를 보면 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻어 공용년수에 따른 소음의 차이가 있다고 할 수 있다. 그러나 사후분석은 공용년수 조합의 결과가 너무 많아 확인하는 것이 큰 의미가 없어 생략한다.

[표 4.29] 공용년수에 따른 소음성능 분산분석

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
공용년수	14	1170	83.58	6.876	<0.001
오차	114	1386	12.15		

분산분석 결과 공용년수에 따라 소음 성능이 다르다는 것은 통계적으로 확인할 수 있었다. 이어서 공용년수를 공변량(covariate)으로 고려하여 저소음포장 공법에 따른 소음 성능 비교를 위하여 공분산분석을 진행하였다. 포장공법과 공용년수의 교호작용을 검정 결과 유의확률 0.551로 유의수준 5% 하에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻지 못하여 교호작용은 존재하지 않다고 할 수 있다. 따라서 포장공법에 따라 공용년수가 소음에 미치는 효과가 동일하다. 공변량인 공용년수의 효과를 제어하고 저소음포장 공법의 순수한 효과를 검정하고자 공분산분석을 수행한 결과는 [표 4.30]에 나타내었다. 공변량인 공용년수 효과를 제어했을 때 포장공법에 따른 소음 성능이 차이가 나는지 포장공법의 효과를 검정하는 유의확률은 <0.001로 유의수준 5% 하에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었다. 따라서 공용년수를 제어했을 때 포장공법에 따라 소음 성능은 차이가 있다.

[표 4.30] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 공용년수)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	2	613.58	306.79	19.768	<0.001
공용년수	1	2.18	2.178	0.140	0.7086
오차	125	1939.92	15.519		

저소음포장 공법에 따른 소음 성능에 대한 공분산-회귀 모형의 추정치는 [표 4.31]에 나타내었고 이를 바탕으로 추정한 공분산-회귀 모형식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_{1j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}x_{1j} = 89.513 + 0 + 0.008x_{1j}$$

$$\hat{y}_{2j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}x_{2j} = 89.513 - 3.560 + 0.008x_{2j}$$

$$\hat{y}_{3j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_3 + \hat{\beta}x_{3j} = 89.513 - 5.493 + 0.008x_{3j}$$

[표 4.31] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수)

회귀계수	추정량	표준오차	t-value	p-value	모형 p-value
절편	89.513	0.753	118.798	<0.001	<0.001
포장공법:단층	-3.560	0.805	-4.420	<0.001	
포장공법:복층	-5.493	0.915	-6.001	<0.001	
공용년수	0.008	0.014	0.606	0.545	
R^2	0.2227	F	13.23	p-value	<0.001

공변량 공용년수에 대한 회귀계수 0.008은 모든 저소음 포장공법에 대하여 공통이다. 공용년수의 효과를 제어하고 포장공법 비배수에 대한 효과를 0으로 놓았을 때, 비배수와 복층 공법의 소음은 -5.493 차이(유의확률 <0.001)가 나며 비배수와 단층 공법의 소음은 -3.560 차이(유의확률 <0.001) 이다.

[표 4.32]는 공변량을 공용년수로 하여 저소음포장 공법에 따른 소음 성능에 대한 보정평균과 사후분석 결과이다. 보정평균은 공변량인 공용년수 효과를 보정한 상태에서의 반응변수의 평균으로, 비배수a) 단층b) 복층b) 순으로 비배수와 복층≈단층 두 그룹으로 나눌 수 있다.

[표 4.32] 포장공법에 따른 소음성능 (공변량: 공용년수) - 보정평균 & Tukey 사후분석

포장공법	보정평균	표준오차	자유도	신뢰하한	신뢰상한
비배수	89.859	0.574	125	88.724	90.994
단층	86.299	0.559	125	85.193	87.406
복층	84.366	0.709	125	82.963	85.769
대비	차이	표준오차	자유도	t-value	p-value
비배수-복층	5.493	0.915	125	6.001	<0.001
비배수-단층	3.560	0.805	125	4.420	<0.001
복층-단층	-1.933	0.901	125	-2.147	0.085

4.2.3.3 주행속도를 고려한 포장공법에 따른 소음성능 비교

(1) 속도에 따른 소음 성능 분석

측정속도 30~80km/h인 모든 속도를 대상으로 속도에 따라 소음의 차이가 있는지 알아보기 위하여 분산분석을 수행한 결과는 [표 4.33]과 같다. 유의확률은 <0.001로 유의수준 5% 하에서 속도에 따라 소음이 차이가 있다고 할 수 있다. Tukey 사후분석 결과 측정속도 30~80km/h 사후분석 결과까지 살펴보면 속도가 커질수록 소음은 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 속도가 70km/h와 시속 80km/h일 때 소음의 차이는 유의하지 않다. 따라서 소음의 성능은 다음과 같이 80km/h≈70km/h>60km/h>50km/h>40km/h>30km/h 나타낼 수 있을 것이다.

[표 4.33] 주행속도에 따른 소음성능 분산분석

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value	
속도	5	2017	403.4	49.72	〈0.001	
오차	154	1249	8.1			
속도	평균차이	신뢰하한		신뢰상한	p-value	
40-30	7.120	2.842		11.397	〈0.001	
50-30	10.320	6.058		14.582	〈0.001	
60-30	13.413	9.102		17.723	〈0.001	
70-30	16.833	11.681		21.985	〈0.001	
80-30	17.621	12.587		22.655	〈0.001	
50-40	3.201	1.563		4.838	〈0.001	
60-40	6.293	4.533		8.053	〈0.001	
70-40	9.713	6.388		13.039	〈0.001	
80-40	10.501	7.362		13.641	〈0.001	
60-50	3.093	1.371		4.814	〈0.001	
70-50	6.513	3.207		9.819	〈0.001	
80-50	7.301	4.183		10.419	〈0.001	
70-60	3.420	0.052		6.788	〈0.001	
80-60	4.208	1.025		7.392	〈0.001	
80-70	0.788	-3.466		5.043	0.995	
측정속도	30	40	50	60	70	80
소음(LCPX)	77.298	84.418	87.619	90.711	94.131	94.920

(2) 주행속도를 고려한 포장공법에 따른 소음성능 비교

분산분석 결과 속도에 따라 소음이 다르다는 것은 통계적으로 확인할 수 있었기에 속도를 공변량(covariate)으로 고려하여 포장공법에 따른 소음의 평균비교를 위하여 공분산분석을 수행한다. 먼저 포장공법과 속도가 효과가 서로 독립적이지 않고 교호작용이 있는지 검정하고자 공분산분석을 수행한 결과 유의확률 0.349로 유의수준 5%하에서 교호효과는 없다고 할 수 있다.

따라서 포장공법에 따라 속도가 소음에 미치는 효과가 동일하다. 교호효과가 없어 포장공법 간 공변량 속도의 효과가 동일하다고 확인하였기에 공변량의 효과를 제어하고 포장공법의 효과를 검정하고자 공분산분석을 실행한 결과는 [표 4.34]에

나타내었다. 공변량 속도 효과를 제어했을 때 포장공법별 소음평균이 차이가 나는지 보기 위한 유의확률은 <0.001로 유의수준 5% 하에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었다. 따라서 속도를 제어했을 때 포장공법별 소음은 차이가 난다.

[표 4.34] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 속도)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	1	1923.7	1923.7	421.021	<0.001
속도	3	634.41	211.47	46.282	<0.001
오차	155	708.22	4.57		

포장공법에 따른 소음 성능에 대한 공분산-회귀 모형의 추정결과는 [표 4.35]에 나타내었고 이를 바탕으로 추정한 공분산-회귀 모형식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_{1j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}x_{1j} = 75.610 + 0 + 0.292x_{1j}$$

$$\hat{y}_{2j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}x_{2j} = 75.610 - 1.677 + 0.292x_{2j}$$

$$\hat{y}_{3j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_3 + \hat{\beta}x_{3j} = 75.610 - 5.914 + 0.292x_{3j}$$

$$\hat{y}_{4j} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_4 + \hat{\beta}x_{4j} = 75.610 - 3.651 + 0.292x_{4j}$$

[표 4.35] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 속도)

회귀계수	추정량	표준오차	t-value	p-value	모형 p-value
절편	75.610	0.876	86.325	<0.001	<0.001
포장공법:비배수	-1.677	0.495	-3.388	0.001	
포장공법:단층	-3.651	0.490	-7.455	<0.001	
포장공법:복층	-5.914	0.543	-10.889	<0.001	
속도	0.292	0.015	19.027	<0.001	
R^2	0.7776	F	140	p-value	<0.001

공변량 속도에 대한 회귀계수 0.292는 모든 포장공법에 대하여 공통이다. 포장공법 일반에 대한 효과를 0으로 놓았을 때, 일반-비배수 공법의 소음은 1.677, 일반-복층 포장공법의 소음은 5.914 차이가, 일반-단층 공법의 소음은 3.651 차이가 난다. 또한 회귀계수는 모두 유의확률 0.05 하에서 유의한 소음 차이가 난다.

[표 4.36]은 공변량을 속도로 하여 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석의 보정 평균과 사후분석 결과이다. 보정평균은 공변량 속도의 효과를 보정한 상태에서의 반응변수의 평균으로, 일반a>비배수b>단층c>복층d 순으로 모든 포장공법에서 소음성능의 차이가 유의하다.

[표 4.36] 포장공법에 따른 소음성능 (공변량: 속도) - 보정평균 & Tukey 사후분석

포장공법	보정평균	표준오차	자유도	신뢰하한	신뢰상한
일반	90.613	0.384	155	89.855	91.372
비배수	88.937	0.312	155	88.321	89.553
단층	86.963	0.304	155	86.362	87.563
복층	84.699	0.384	155	83.940	85.458
대비	차이	표준오차	자유도	t-value	p-value
일반-비배수	1.677	0.495	155	3.388	0.005
일반-단층	3.651	0.490	155	7.455	<0.001
일반-복층	5.914	0.543	155	10.889	<0.001
비배수-단층	1.974	0.439	155	4.495	<0.001
비배수-복층	4.238	0.496	155	8.536	<0.001
단층-복층	2.264	0.489	155	4.629	<0.001

(3) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 40, 50, 60km/h)

가장 많이 측정된 측정속도 40km/h, 50km/h, 60km/h인 자료 141개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음성능 분산분석을 수행한 결과는 [표 4.37]과 같다.

세 개의 측정속도를 포함한 데이터에서 포장공법에 따른 소음 성능 비교결과 유의

수준 5%에서 유의확률 <0.001로 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 40km/h, 50km/h, 60km/h인 경우 포장공법에 따른 소음 성능의 차이가 있다고 할 수 있다. 사후검정 결과 일반 $a \approx$ 비배수 $ab \approx$ 단층 $b >$ 복층 c 순으로 일반 \approx 비배수, 비배수 \approx 단층, 복층 3개 그룹으로 나눌 수 있다.

[표 4.37] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 40km/h+50km/h+60km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	505.9	168.64	16.19	〈0.001
오차	137	1427.4	10.42		
포장공법	평균차이		신뢰하한	신뢰상한	p-value
비배수-일반	-1.174		-3.243	0.894	0.454
단층-일반	-2.859		-4.907	-0.811	0.002
복층-일반	-5.383		-7.572	-3.194	〈0.001
단층-비배수	-1.685		-3.539	0.170	0.089
복층-비배수	-4.209		-6.217	-2.200	〈0.001
복층-단층	-2.524		-4.512	-0.536	0.007
포장공법	일반	비배수	단층	복층	
소음(LCPX)	89.775	88.600	86.916	84.392	

(4) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 40km/h)

측정속도가 40km/h인 자료 48개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음성능 분산 분석을 수행한 결과는 [표 4.38]와 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 40km/h인 경우 포장공법에 따른 소음 성능의 차이가 있다고 할 수 있다. Tukey 사후분석을 결과 일반 $a \approx$ 비배수 $a \approx$ 단층 $a >$ 복층 b 으로 일반 \approx 비배수 \approx 단층, 복층 2개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.38] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 40km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	152.7	50.91	7.205	〈0.001
오차	44	310.9	7.07		
포장공법	평균차이	신뢰하한	신뢰상한	p-value	
비배수-일반	-1.403	-4.442	1.636	0.610	
단층-일반	-2.373	-5.234	0.489	0.135	
복층-일반	-5.304	-8.478	-2.130	0.000	
단층-비배수	-0.970	-3.680	1.741	0.775	
복층-비배수	-3.901	-6.940	-0.862	0.007	
복층-단층	-2.931	-5.792	-0.070	0.043	
포장공법	일반	비배수	단층	복층	
소음(LCPX)	86.665	85.262	84.292	81.361	

(5) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 50km/h)

측정속도가 50km/h인 자료 53개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음 성능을 분산분석한 결과는 [표 4.39]와 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 50km/h인 경우 4가지 포장공법 별 소음의 차이가 있다고 할 수 있다. 어떤 포장공법 별 소음차이가 있는지 알아보기 위하여 Tukey 사후분석을 실시한 결과는 [표 4.39]와 같다. 포장공법 별 소음 평균은 일반a<비배수a>단층b>복층c 순으로 사후분석 결과는 일반~비배수, 단층, 복층 3개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.39] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 50km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	202.7	67.56	24.01	〈0.001
오차	49	137.9	2.81		
포장공법	평균차이		신뢰하한	신뢰상한	p-value
비배수-일반	-1.353		-3.131	0.424	0.193
단층-일반	-3.464		-5.262	-1.665	〈0.001
복층-일반	-5.712		-7.707	-3.717	〈0.001
단층-비배수	-2.110		-3.664	-0.556	0.004
복층-비배수	-4.358		-6.136	-2.580	〈0.001
복층-단층	-2.248		-4.046	-0.450	0.009
포장공법	일반	비배수	단층	복층	
소음(LCPX)	90.176	88.823	86.712	84.464	

(6) 포장공법에 따른 소음 성능 비교 (측정속도 70km/h)

측정속도가 60km/h인 자료 40개 자료에 대하여 포장공법에 따른 소음성능 분산 분석을 수행한 결과는 [표 4.40]과 같다. 유의확률 <0.001로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 측정속도가 60km/h인 경우 4가지 포장공법 별 소음의 차이가 있다고 할 수 있다. 어떤 포장공법 별 소음차이가 있는지 알아보기 위하여 Tukey 사후분석을 실시한 결과는 [표 4.40]과 같다. 포장공법 별 소음 평균은 일반a~비배수ab~단층b>복층c으로 전체 자료와 다른 결과를 보인다. 사후분석 결과는 일반~비배수, 비배수~단층, 복층 3개 그룹으로 나뉜다.

[표 4.40] 포장공법에 따른 소음성능 분산분석 (측정속도 60km/h)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	3	213.77	71.26	54.16	<0.001
오차	36	47.36	1.32		
포장공법	평균차이	신뢰하한	신뢰상한	p-value	
비배수-일반	-1.262	-2.698	0.173	0.102	
단층-일반	-1.721	-3.187	-0.256	0.016	
복층-일반	-6.080	-7.515	-4.644	<0.001	
단층-비배수	-0.459	-1.809	0.891	0.796	
복층-비배수	-4.817	-6.135	-3.500	<0.001	
복층-단층	-4.358	-5.708	-3.008	<0.001	
포장공법	일반	비배수	단층	복층	
소음(LCPX)	93.161	91.898	91.439	87.081	

속도별로 자료를 나누어 포장공법에 따른 소음성능을 분산분석하여 사후분석 한 결과를 보면, 일반-비배수-단층-복층 순이지만, 측방 소음자료보다 복층의 효과가 두드러진다.

[표 4.41] 주행속도 구분에 따른 소음 평균 비교

자료구분	일반	비배수	단층	복층	포장공법 비교
전체 (공변량 속도)	90.613	88.937	86.963	84.699	일반a>비배수b>단층c>복층d
40+50+60	89.775	88.600	86.916	84.392	일반a~비배수ab~단층b>복층c
40km/h	86.665	85.262	84.292	81.361	일반a~비배수a~단층a>복층b
50km/h	90.176	88.823	86.712	84.464	일반a~비배수a>단층b>복층c
60km/h	93.161	91.898	91.439	87.081	일반a~비배수ab~단층b>복층c

4.2.3.4 공용년수와 속도를 고려한 포장공법에 따른 소음 성능 비교

앞서 도로의 포장공법, 속도, 공용년수가 소음에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 속도와 공용년수 모두를 공변량으로하는 공분산분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

먼저 교호효과를 보면 포장공법과 공용년도의 교호효과에 대한 검정은 유의확률 0.133, 포장공법과 속도의 교호효과 검정은 유의확률 0.959으로 유의수준 5%하에서 교호효과가 없다는 귀무가설을 기각할 충분한 근거를 얻었기에 각각의 교호효과는 없다고 할 수 있다.

교호효과가 없기 때문에 공용년수와 속도를 공변량으로 하여 포장공법에 따른 소음 성능을 공분산분석한 결과는 [표 4.42]에 나타내었다. 공변량인 공용년수와 속도를 제어한 상태에서 포장공법에 따른 소음차이 효과는 유의확률 <0.001로 유의수준 5% 하에서 유의하다. 따라서 공변량인 공용년수와 속도를 제어한 상태에서 포장공법에 따른 소음 성능은 차이가 있다.

[표 4.42] 포장공법에 따른 소음성능 공분산분석 (공변량: 공용년수와 속도)

변동원인	자유도	제곱합	평균제곱합	F-value	p-value
포장공법	2	370.8	185.4	38.593	<0.001
공용년수	1	2.2	2.2	0.453	0.502
속도	1	1586.9	1586.9	330.31	<0.001
오차	124	595.7	4.8		

속도와 공용년수를 공변량으로 하여 포장공법에 따른 소음 성능을 나타내는 공분산-회귀 모형은 [표 4.43]과 같이 추정하였고, 추정한 회귀식은 다음과 같다.

$$\hat{y}_{Uj} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_U + \hat{\beta}_1 x_{1Uj} + \hat{\beta}_2 x_{2Uj} = 73.145 + 0 + 0.026x_{1Uj} + 0.289x_{2Uj}$$

$$\hat{y}_{Sj} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_S + \hat{\beta}_1 x_{1Sj} + \hat{\beta}_2 x_{2Sj} = 73.145 - 2.230 + 0.026x_{1Sj} + 0.289x_{2Sj}$$

$$\hat{y}_{Dj} = \hat{\beta}_0 + \hat{\alpha}_D + \hat{\beta}_1 x_{1Dj} + \hat{\beta}_2 x_{2Dj} = 73.145 - 4.482 + 0.026x_{1Dj} + 0.289x_{2Dj}$$

[표 4.43] 포장공법에 따른 소음성능 모형의 추정값 (공변량: 공용년수와 속도)

포장공법	추정량	표준오차	t-value	p-value
절편	73.145	1.065	68.707	<0.001
포장공법:복층	-4.482	0.513	-8.738	<0.001
포장공법:단층	-2.230	0.455	-4.899	<0.001
공용년수	0.026	0.008	3.463	0.001
속도	0.289	0.017	16.727	<0.001
R^2	0.7594	F	102	p-value
				<0.001

위의 식에 나타난 각 회귀식의 추정결과 모든 포장공법에 대해서 공변량 공용년수와 속도의 회귀계수는 각각 동일하다. 속도를 제어한 공용년수의 효과는 공용년수가 1개월 늘어남에 따라 소음은 0.026dB 늘어나며, 유의확률 0.001로 회귀계수는 유의하다. 또한 공용년수를 제어한 속도의 효과는 속도가 1km/h 증가하면 소음은 0.289dB 증가하며, 유의확률 <0.001로 유의하다.

[표 4.44]는 각 포장공법에 대한 보정평균값이 출력되어 있다. 보정평균은 공변량인 공용년수와 속도 효과를 제어했을 때 소음의 평균으로 앞선 추정식에서 공용년수와 속도는 전체 평균을 넣어 포장공법 별 보정평균을 계산한다. 보정평균을 살펴보면 비배수a>단층b>복층c 순이며, 사후분석 결과 이 차이는 모두 유의하다.

[표 4.44] 보정평균과 사후분석 결과

포장공법	보정평균	표준오차	자유도	신뢰하한	신뢰상한
비배수	89.100	0.322	124	88.462	89.739
단층	86.871	0.313	124	86.251	87.490
복층	84.618	0.395	124	83.837	85.399
대비	차이	표준오차	자유도	t-value	p-value
비배수-복층	2.230	0.455	124	4.899	<0.001
비배수-단층	4.482	0.513	124	8.738	<0.001
복층-단층	2.252	0.501	124	4.492	<0.001

제5장 3D 시뮬레이션을 통한 소음저감 효과 분석

5.1. 시뮬레이션의 개요

저소음포장 공법의 적용 전/후에 따른 주변지역의 소음도 차이에 대한 소음 예측과 도로교통소음에 영향을 주는 다양한 교통상황에 의한 저소음포장의 소음 저감 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

이와 함께 교통상황과 저소음포장 소음저감 성능에 대한 상관성 분석을 수행하고자 하며, 저소음포장 적용 구간 소음 성능평가는 참여 기업에서 적용한 구간에 대해 소음을 측정하고 분석하여 성능을 평가하고자 한다.

5.1.1 시뮬레이션 지역 선정

본 연구의 목적인 저소음포장의 소음 저감성능 평가를 위한 시뮬레이션을 위해 소음 영향 인자들(포장종류, 교통량, 속도) 이외에 소음도에 영향을 미칠 수 있는 외부 영향 변수들을 최대한 통제 가능한 지역을 선정하였다.

시뮬레이션 대상지역은 시뮬레이션 조건이 실제로 반영될 수 있으며(시속 70km/h 이상의 속도를 낼 수 있는), 대상 도로는 일반국도 제43호선(세종 ~ 고성선) 중 공동주택이 도로와 면하여 있는 구간을 찾아 선정하였다.

평가를 위해 선정된 공동주택은 강원도 철원에 위치한 14층의 유명한들아파트(강원 철원군 군탄로 8번길 16)이고, 일반국도 제43호선 연봉제삼거리 ~ 드르니교차로 사이에 위치해 있으며, 아래 [그림 5.1]에서 확인할 수 있다.

대상 소음원인 일반국도 제43호선 도로는 해당 구간에서 왕복 4차선 도로이나 드르니교차로에서 약 100m 거리에 위치한 유명한들아파트 앞에서는 드르니교차로로 분기해 나가는 도로와 합류하는 도로가 생겨 6차선 도로로 구성되어 있어 본 연구의 시뮬레이션에서는 분기 및 합류도로를 제외하고 왕복 4차선 도로만을 대상으로 한다.



[그림 5.1] 시뮬레이션 대상지역

5.1.2 소음 시뮬레이션 방법

저소음포장의 소음 저감성능 평가를 위한 시뮬레이션을 위해 소음 상용 예측프로그램의 최신 버전인 SoundPLAN ver.9.0을 사용하였다. SoundPLAN은 지형에 의한 회절, 구조물에 의한 반사영향 등을 고려하여 수음점에서 소음도를 예측하고, 소음 지도를 제작할 수 있는 소음전문 예측 프로그램으로서 독일 SoundPLAN GmbH사에서 개발되었으며, 산업 및 교통소음(도로, 철도, 항공)등의 환경소음을 예측할 수 있는 환경소음 전용 해석 프로그램이다.

환경부는 「소음지도의 작성방법(제5조 제2항 관련)」에서 소음원별 예측식 중 도로소음원은 CRTN, RLS-90, NMPB, Nord 2000, ASJ 2003을 따르며, 그 외 예측식에 대해서는 국립환경과학원의 검증을 거쳐 사용할 수 있다고 규정하고 있다.

본 연구의 시뮬레이션을 위해 도로교통소음 예측식은 독일의 RLS-90을 적용한다. 도로교통소음 예측식 RLS-90은 음원모델과 전달모델로 이루어져 있으며 예측식별 간략적인 계산인자들은 [표 5.1]과 같다.

[표 5.1] 도로교통소음 예측식(RLS-90 기본식)

● RLS-90 기본식

〈음원모델(The source model)〉

$$L_{me} = L_m(25, \text{basic}) + C_s + C_{rs} + C_g + C_r$$

L_{me} : 평균배출소음도[dB(A)]

$L_m(25, \text{basic})$: 도로변 25m, 지상 4m 지점의 소음도[dB(A)]

C_s : 차속 보정치, C_{rs} : 도로표면 보정치

C_g : 도로경사 보정치, C_r : 다중반사 보정치

〈전달모델(The propagation model)〉

$$L_m = L_{me} + C_{sl} + C_{sp} + C_{ga} + C_{sc}$$

L_m : 수음점 소음도[dB(A)]

C_{sl} : 음원길이 보정치, C_{sp} : 확산 및 공기흡수 보정치

C_{ga} : 지면감쇠 및 기상흡수 보정치

C_{sc} : 스크리닝 보정치

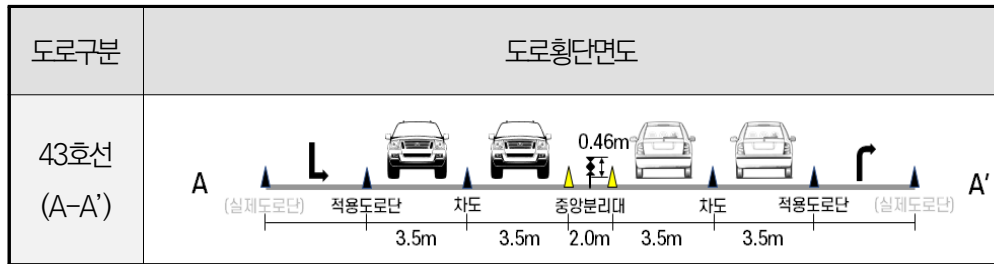
(1) 도로제원

대상 소음원인 일반국도 제43호선 도로 연봉제삼거리 ~ 드르니교차로(A-A')의 도로제원은 다음과 같으며 왕복 4차선 도로에 차선당 도로폭은 3.5m, 중앙분리대는 2.0m, 중앙분리대 높이는 지면으로부터 0.35m 위 높이 0.46m로 실제와 같이 구현하였다.



[그림 5.2] 소음 영향 시뮬레이션 대상지점 및 영향 도로

[표 5.2] 도로 횡단면도



(2) 도로교통소음원 관련 영향인자 산정

교통량은 2가지 시나리오로 많을 때(2,000대/시간)와 적을 때(500대/시간)를 가정하여 시뮬레이션을 하였고, 대형차량 혼입률은 각각 전체 교통량의 5%로 가정하였다. 따라서 교통량이 많을 때는 차선당 500대/시간, 적을 때는 차선당 125대/시간으로 할당되며, 주행속도는 40, 50, 60, 70km/h로 각 교통량 시나리오에 따라 시뮬레이션 하였다.

[표 5.3] 교통 시나리오별 도로교통소음원 입력인자

시나리오	차선당 교통량 [vehicles/h/lane]			차량 속도 [km/h]
	전체	소형	대형	
2,000대/시간	500	475	25	40, 50, 60, 70
500대/시간	125	118.8	6.3	40, 50, 60, 70

(3) 도로포장 보정치

시뮬레이션 시 도로포장 재질에 따른 보정치는 한국건설기술연구원에서 각 포장 재질별 CPX 방법으로 실측한 소음도를 바탕으로 도출된 것을 사용하였으며, 각 포장 재질별 통행 속도에 따른 보정치는 다음과 같다.

저소음포장 보정치는 각 저소음포장 재질별(배수형(복층), 배수형(단층), 비배수형) 일반포장 대비 저감량을 나타낸다.

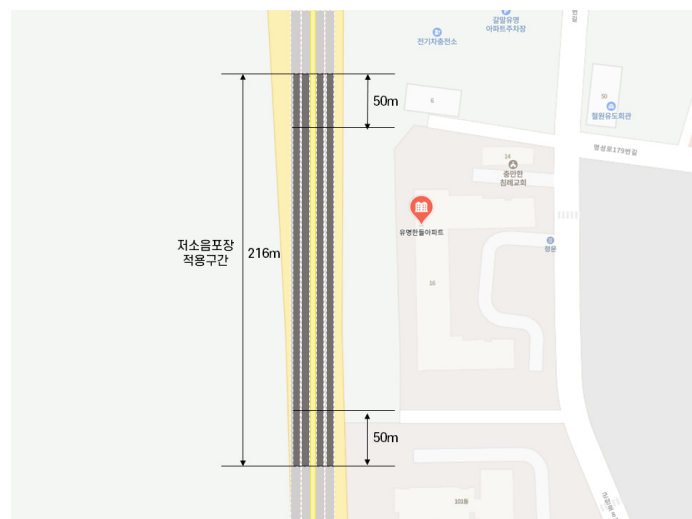
[표 5.4] 저소음포장 보정치

보정치 [dB] (일반포장 대비 저감량)		통행속도 [km/h]			
		40	50	60	70
저소음포장 재질	배수형(복층)	-1.8	-2.1	-2.5	-2.9
	배수형(단층)	-1.0	-1.2	-1.4	-1.8
	비배수형	0.2	-0.1	-0.3	-0.7

대상 소음원인 일반국도 제43호선의 시뮬레이션 고려 구간은 대상지역인 유명한들아파트 반경 1km내의 도로로 하였고 구간 전체에 일반포장(RLS-90 예측식의 포장재질 Smooth asphalt, asphalt concrete, grit asphalt)을 적용하여 각 교통량별 속도별 시나리오에 따라 우선 시뮬레이션 하였다.

저소음포장은 유명한들아파트 부지경계를 기준으로 상하로 50m 이격된 도로까지 총 216m 구간에 적용하였으며, 다음 [그림 5.3]과 같이 해당 구간에 각 저소음포장 재질별 보정치를 적용하여 시뮬레이션 하였다.

따라서 2가지 교통량별(2000, 500대/시간), 4가지 속도별(40, 50, 60, 70km/h), 4가지 포장별(일반, 배수형(복층), 배수형(단층), 비배수형) 시나리오에서 총 32가지 시나리오별 시뮬레이션을 실시하였다.



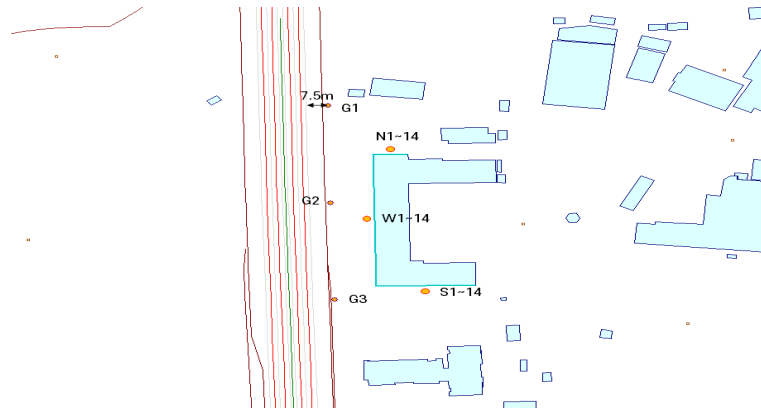
[그림 5.3] 저소음포장 보정치 적용구간

(4) 계산관련 영향인자

시뮬레이션은 『소음지도의 작성방법』(환경부고시 제2021-54호)에 따라 반사차수 3차, 영향 소음원의 거리 2,000m, 수음점에서의 소음 계산 각도는 360° 로 설정하였다.

(5) 수음점 설정

저소음포장에 따른 소음 저감성능 평가를 위해 유명한들아파트 부지경계선을 기준으로 도로단에서 7.5m 이격하여 1.2m 높이 지점에 [그림 5.4]와 같이 수음점 3개를 설정하였고, 도로에 접한 유명한들아파트 방향별(북측, 서측, 남측) 외벽 1m 지점에 층별(14층) 수음점을 설정하였다.



[그림 5.4] 수음점 설정 위치

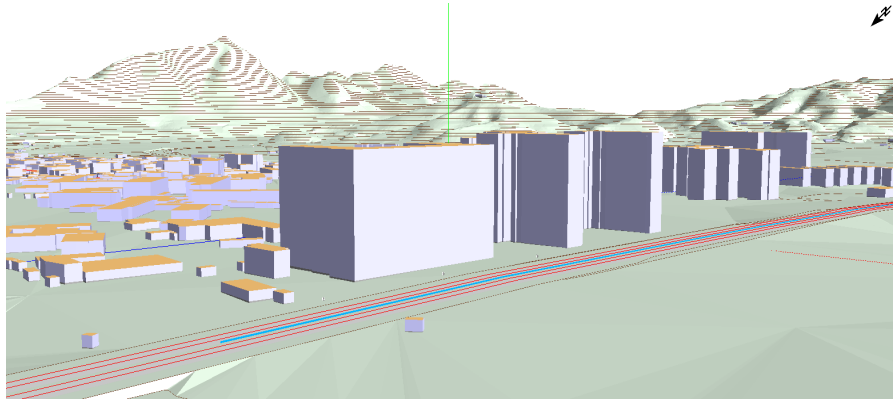
5.2 시뮬레이션 결과

5.2.1 3차원 도시 모형 생성

먼저 저소음포장의 소음 저감성능 평가를 위한 3차원 시뮬레이션을 위해 지반고를 고려하여 DGM(Digital Ground Model)을 생성하고, 이를 기반으로 도로고와 건물의 높이를 모델링하여 3차원 도시 모형을 생성하였다.

3차원 도시 모형 생성을 위해 국토지리정보플랫폼에서 1:5000 축적의 shp 파일을 내려받아 사용하였다.

[그림 5.5]는 생성된 3차원 도시 모형을 보여준다.



[그림 5.5] 3차원 도시 모형 생성

5.2.2 시나리오별 소음 예측 결과

5.2.2.1 낮은 교통량(500대/시간) 시나리오

낮은 교통량(500대/시간) 시나리오에서 각 속도별(40, 50, 60, 70km/h) 공법별 (일반, 배수성(복층), 배수성(단층), 비배수성) 예측 소음도는 [표 5.5]에서 [표 5.8]과 같다.

[표 5.5] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=40km/h) (단위 : dB(A))

수음점 구분		도로포장 공법				소음 기준
		일반	배수성(복층)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 지점	G1	62.3	60.6	61.4	62.5	55.0
	G2	62.5	60.8	61.6	62.7	
	G3	62.3	60.6	61.4	62.5	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	55.0	53.5	54.2	
		2층	56.1	54.6	55.2	
		3층	56.7	55.1	55.8	
		4층	56.7	55.2	55.9	
		5층	56.6	55.0	55.7	
		6층	56.5	55.0	55.6	
		7층	56.4	54.9	55.5	
		8층	56.2	54.8	55.4	
		9층	56.1	54.7	55.3	
		10층	55.9	54.5	55.1	
		11층	55.7	54.4	54.9	
		12층	55.5	54.2	54.8	
		13층	55.3	54	54.6	
		14층	55.2	53.9	54.4	
	W (서측)	1층	57.8	56.2	56.9	
		2층	59.5	57.9	58.6	
		3층	60.0	58.3	59.0	
		4층	60.0	58.4	59.1	
		5층	60.0	58.3	59.1	
		6층	59.9	58.2	59.0	
		7층	59.7	58.1	58.8	
		8층	59.5	57.9	58.6	
		9층	59.3	57.7	58.4	
		10층	59.1	57.5	58.2	
		11층	58.9	57.3	58.0	
		12층	58.6	57.2	57.8	
		13층	58.4	57.0	57.6	
		14층	58.2	56.8	57.4	
	S (남측)	1층	51.6	49.9	50.7	
		2층	52.7	51.1	51.8	
		3층	54.0	52.3	53.0	
		4층	54.5	52.8	53.6	
		5층	54.7	53.0	53.8	
		6층	54.8	53.1	53.8	
		7층	54.8	53.0	53.8	
		8층	54.7	53.0	53.8	
		9층	54.6	52.9	53.7	
		10층	54.5	52.8	53.6	
		11층	54.4	52.7	53.4	
		12층	54.3	52.6	53.3	
		13층	54.1	52.4	53.2	
		14층	54.0	52.4	53.1	

[표 5.6] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=50km/h)(단위 : dB(A))

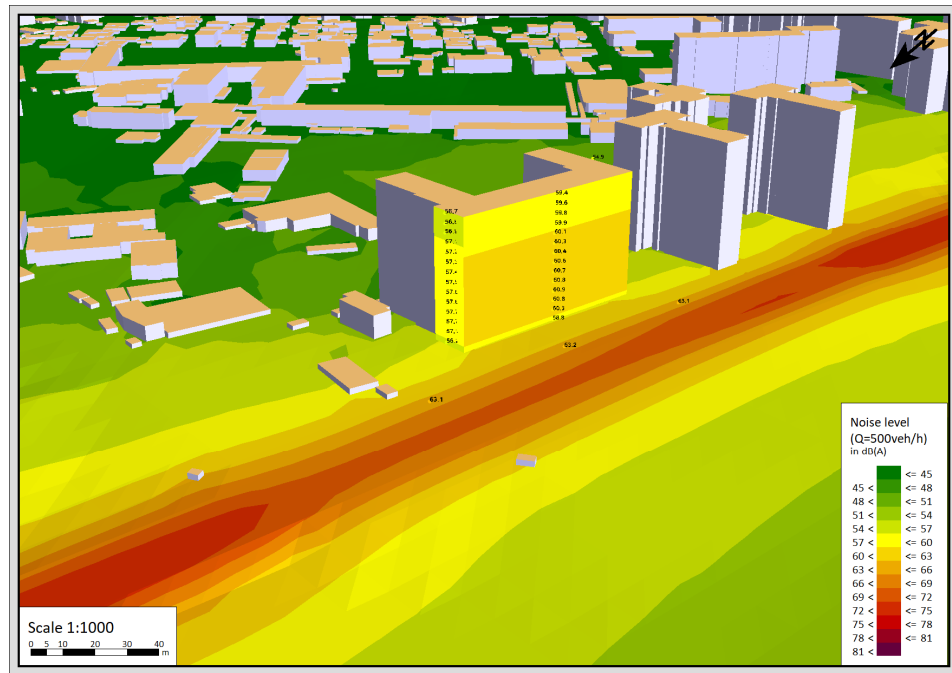
수음점 구분		도로포장 공법				소음 기준
		일반	배수성(복층)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 자점	G1	63.5	61.6	62.4	63.4	55.0
	G2	63.7	61.7	62.6	63.6	
	G3	63.5	61.5	62.4	63.4	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	56.2	54.5	55.2	
		2층	57.3	55.5	56.3	
		3층	57.9	56.1	56.8	
		4층	57.9	56.1	56.9	
		5층	57.8	56.0	56.8	
		6층	57.7	56.0	56.7	
		7층	57.6	55.9	56.6	
		8층	57.4	55.8	56.5	
		9층	57.3	55.7	56.3	
		10층	57.1	55.5	56.2	
		11층	56.9	55.4	56.0	
		12층	56.7	55.2	55.8	
		13층	56.5	55.0	55.7	
		14층	56.4	54.9	55.5	
	W (서측)	1층	59.1	57.2	58.0	
		2층	60.7	58.8	59.6	
		3층	61.2	59.2	60.1	
		4층	61.3	59.3	60.1	
		5층	61.2	59.3	60.1	
		6층	61.1	59.2	60.0	
		7층	60.9	59.0	59.8	
		8층	60.7	58.9	59.7	
		9층	60.5	58.7	59.5	
		10층	60.3	58.5	59.3	
		11층	60.1	58.3	59.1	
		12층	59.9	58.1	58.9	
		13층	59.6	57.9	58.6	
		14층	59.4	57.8	58.5	
	S (남측)	1층	52.8	50.9	51.7	
		2층	54.0	52.0	52.8	
		3층	55.2	53.2	54.0	
		4층	55.7	53.7	54.6	
		5층	55.9	53.9	54.8	
		6층	56.0	54.0	54.8	
		7층	56.0	54.0	54.8	
		8층	55.9	53.9	54.8	
		9층	55.8	53.8	54.7	
		10층	55.7	53.7	54.6	
		11층	55.6	53.6	54.5	
		12층	55.5	53.5	54.3	
		13층	55.3	53.4	54.2	
		14층	55.2	53.3	54.1	

[표 5.7] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=60km/h) (단위 : dB(A))

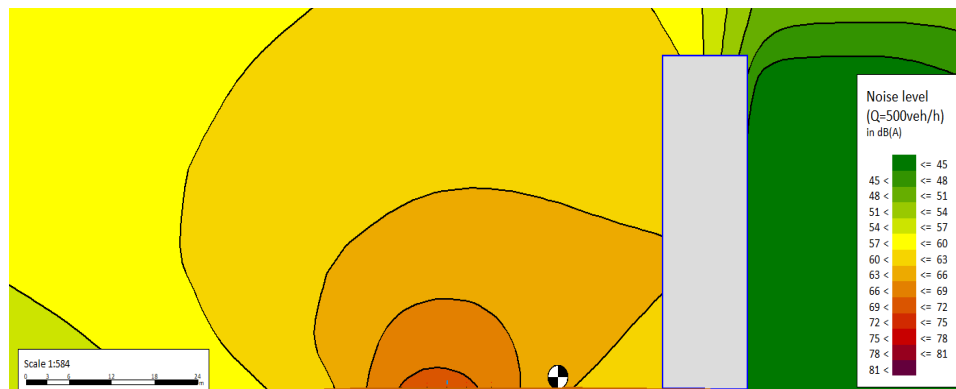
수음점 구분		도로포장 공법				소음 기준
		일반	배수성(북측)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 지점	G1	64.7	62.4	63.4	64.4	55.0
	G2	64.9	62.5	63.5	64.6	
	G3	64.7	62.3	63.3	64.4	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	57.4	55.4	56.2	
		2층	58.5	56.3	57.3	
		3층	59.0	56.9	57.8	
		4층	59.1	57.0	57.9	
		5층	58.9	56.8	57.7	
		6층	58.9	56.8	57.7	
		7층	58.7	56.7	57.6	
		8층	58.6	56.6	57.5	
		9층	58.4	56.5	57.3	
		10층	58.3	56.4	57.2	
		11층	58.1	56.2	57.0	
		12층	57.9	56.1	56.8	
		13층	57.7	55.9	56.7	
		14층	57.5	55.8	56.5	
	W (서측)	1층	60.2	58.0	59.0	
		2층	61.9	59.6	60.6	
		3층	62.3	60.0	61.0	
		4층	62.4	60.1	61.1	
		5층	62.4	60.1	61.1	
		6층	62.2	60.0	61.0	
		7층	62.1	59.8	60.8	
		8층	61.9	59.7	60.6	
		9층	61.7	59.5	60.4	
		10층	61.5	59.3	60.2	
		11층	61.2	59.2	60.0	
		12층	61.0	59.0	59.8	
		13층	60.8	58.8	59.6	
		14층	60.6	58.6	59.5	
	S (남측)	1층	54.0	51.6	52.7	
		2층	55.1	52.8	53.8	
		3층	56.3	54.0	55.0	
		4층	56.9	54.5	55.6	
		5층	57.1	54.7	55.8	
		6층	57.1	54.8	55.8	
		7층	57.1	54.8	55.8	
		8층	57.1	54.7	55.7	
		9층	57.0	54.6	55.7	
		10층	56.9	54.5	55.5	
		11층	56.8	54.4	55.4	
		12층	56.6	54.3	55.3	
		13층	56.5	54.2	55.2	
		14층	56.4	54.1	55.1	

[표 5.8] 도로포장 공법별 예측 소음도(Q=500veh/h, V=70km/h) (단위 : dB(A))

수음점 구분		도로포장 공법				소음 기준
		일반	배수성(복층)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 자점	G1	65.8	63.1	64.1	65.1	55.0
	G2	66.0	63.2	64.3	65.3	
	G3	65.8	63.1	64.1	65.1	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	58.5	56.2	57.0	
		2층	59.6	57.1	58.0	
		3층	60.1	57.7	58.6	
		4층	60.2	57.7	58.6	
		5층	60.0	57.6	58.5	
		6층	60.0	57.6	58.5	
		7층	59.8	57.5	58.4	
		8층	59.7	57.4	58.3	
		9층	59.5	57.3	58.1	
		10층	59.4	57.2	58.0	
		11층	59.2	57.1	57.8	
		12층	59.0	56.9	57.7	
		13층	58.8	56.8	57.5	
		14층	58.6	56.7	57.4	
	W (서측)	1층	61.3	58.8	59.7	
		2층	63.0	60.3	61.3	
		3층	63.4	60.8	61.8	
		4층	63.5	60.9	61.9	
		5층	63.5	60.8	61.8	
		6층	63.3	60.7	61.7	
		7층	63.2	60.6	61.6	
		8층	63.0	60.4	61.4	
		9층	62.8	60.3	61.2	
		10층	62.6	60.1	61.0	
		11층	62.3	59.9	60.8	
		12층	62.1	59.8	60.6	
		13층	61.9	59.6	60.4	
		14층	61.7	59.4	60.3	
	S (남측)	1층	55.1	52.4	53.4	
		2층	56.2	53.5	54.5	
		3층	57.4	54.7	55.7	
		4층	58.0	55.2	56.3	
		5층	58.2	55.4	56.5	
		6층	58.2	55.5	56.5	
		7층	58.2	55.5	56.5	
		8층	58.2	55.4	56.5	
		9층	58.1	55.4	56.4	
		10층	58.0	55.3	56.3	
		11층	57.9	55.1	56.2	
		12층	57.7	55.0	56.0	
		13층	57.6	54.9	55.9	
		14층	57.5	54.9	55.8	



[그림 5.6] 3D 소음지도(Q=500veh/h, V=70km/h, : 배수성(복층))



[그림 5.7] Cross-section noise map(Q=500veh/h, V=70km/h, : 배수성(복층))

5.2.2.2 높은 교통량(2,000대/시간) 시나리오

높은 교통량(2,000대/시간) 시나리오에서 각 속도별(40, 50, 60, 70km/h) 포장별 (일반, 배수성(복층), 배수성(단층), 비배수성) 예측 소음도는 [표 5.9]에서 [표 5.12]와 같다.

[표 5.9] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=40km/h) (단위 : dB(A))

수음점 구분		도로포장 재질				소음 기준
		일반	배수성(북측)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 지점	G1	68.3	66.6	67.4	68.5	55.0
	G2	68.5	66.8	67.6	68.7	
	G3	68.3	66.6	67.4	68.5	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	61.0	59.6	60.2	
		2층	62.1	60.6	61.3	
		3층	62.7	61.1	61.8	
		4층	62.8	61.2	61.9	
		5층	62.6	61.1	61.7	
		6층	62.5	61.0	61.7	
		7층	62.4	60.9	61.6	
		8층	62.3	60.8	61.4	
		9층	62.1	60.7	61.3	
		10층	61.9	60.5	61.1	
		11층	61.7	60.4	61.0	
		12층	61.5	60.2	60.8	
		13층	61.4	60.1	60.6	
		14층	61.2	59.9	60.5	
	W (서측)	1층	63.9	62.3	63.0	
		2층	65.5	63.9	64.6	
		3층	66.0	64.3	65.1	
		4층	66.1	64.4	65.1	
		5층	66.0	64.4	65.1	
		6층	65.9	64.3	65.0	
		7층	65.7	64.1	64.8	
		8층	65.5	63.9	64.6	
		9층	65.3	63.8	64.4	
		10층	65.1	63.6	64.2	
		11층	64.9	63.4	64.0	
		12층	64.7	63.2	63.8	
		13층	64.4	63.0	63.6	
		14층	64.2	62.8	63.4	
	S (남측)	1층	57.6	55.9	56.7	
		2층	58.8	57.1	57.8	
		3층	60.0	58.3	59.0	
		4층	60.6	58.8	59.6	
		5층	60.7	59.0	59.8	
		6층	60.8	59.1	59.8	
		7층	60.8	59.1	59.8	
		8층	60.7	59.0	59.8	
		9층	60.6	58.9	59.7	
		10층	60.5	58.8	59.6	
		11층	60.4	58.7	59.5	
		12층	60.3	58.6	59.3	
		13층	60.2	58.5	59.2	
		14층	60.1	58.4	59.1	

[표 5.10] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=50km/h) (단위 : dB(A))

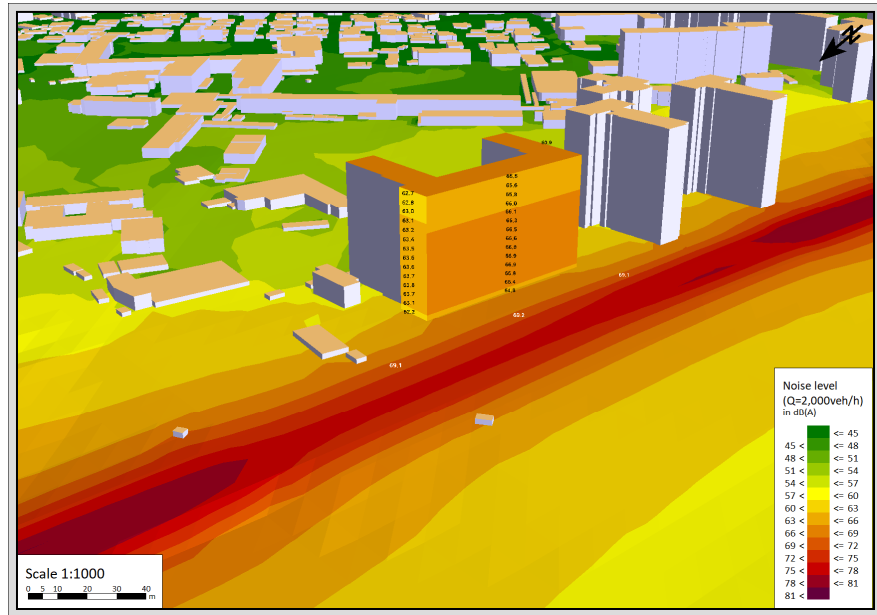
수음점 구분		도로포장 재질				소음 기준
		일반	배수성(북측)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 지점	G1	69.5	67.6	68.4	69.4	55.0
	G2	69.8	67.7	68.6	69.7	
	G3	69.5	67.6	68.4	69.4	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	62.2	60.5	61.2	
		2층	63.3	61.5	62.3	
		3층	63.9	62.1	62.9	
		4층	64.0	62.2	62.9	
		5층	63.8	62.0	62.8	
		6층	63.7	62.0	62.7	
		7층	63.6	61.9	62.6	
		8층	63.5	61.8	62.5	
		9층	63.3	61.7	62.3	
		10층	63.1	61.5	62.2	
		11층	62.9	61.4	62.0	
		12층	62.8	61.2	61.9	
		13층	62.6	61.1	61.7	
		14층	62.4	60.9	61.5	
	W (서측)	1층	65.1	63.2	64.0	
		2층	66.8	64.8	65.6	
		3층	67.2	65.3	66.1	
		4층	67.3	65.3	66.2	
		5층	67.2	65.3	66.1	
		6층	67.1	65.2	66.0	
		7층	66.9	65.1	65.9	
		8층	66.7	64.9	65.7	
		9층	66.5	64.7	65.5	
		10층	66.3	64.5	65.3	
		11층	66.1	64.3	65.1	
		12층	65.9	64.1	64.9	
		13층	65.7	64.0	64.7	
		14층	65.5	63.8	64.5	
	S (남측)	1층	58.8	56.9	57.7	
		2층	60.0	58.0	58.8	
		3층	61.2	59.2	60.1	
		4층	61.8	59.8	60.6	
		5층	62.0	60.0	60.8	
		6층	62.0	60.0	60.9	
		7층	62.0	60.0	60.8	
		8층	61.9	59.9	60.8	
		9층	61.8	59.9	60.7	
		10층	61.7	59.8	60.6	
		11층	61.6	59.6	60.5	
		12층	61.5	59.5	60.4	
		13층	61.4	59.4	60.2	
		14층	61.3	59.3	60.2	

[표 5.11] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=60km/h) (단위 : dB(A))

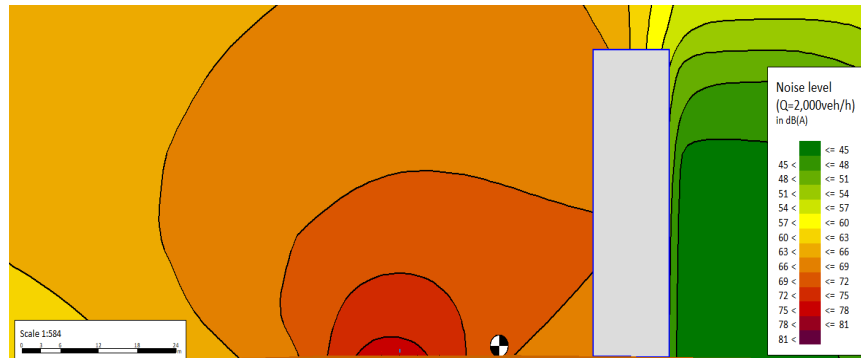
수음점 구분		도로포장 재질				소음 기준
		일반	배수성(북측)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 지점	G1	70.7	68.4	69.4	70.4	
	G2	70.9	68.5	69.6	70.6	
	G3	70.7	68.3	69.4	70.4	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	63.4	61.4	62.2	55.0
		2층	64.5	62.4	63.3	
		3층	65.1	62.9	63.8	
		4층	65.1	63.0	63.9	
		5층	65.0	62.9	63.8	
		6층	64.9	62.8	63.7	
		7층	64.8	62.8	63.6	
		8층	64.6	62.7	63.5	
		9층	64.5	62.5	63.4	
		10층	64.3	62.4	63.2	
		11층	64.1	62.3	63.0	
		12층	63.9	62.1	62.9	
		13층	63.7	62.0	62.7	
		14층	63.6	61.8	62.6	
	W (서측)	1층	66.2	64.0	65.0	
		2층	67.9	65.6	66.6	
		3층	68.4	66.1	67.1	
		4층	68.4	66.1	67.1	
		5층	68.4	66.1	67.1	
		6층	68.3	66.0	67.0	
		7층	68.1	65.9	66.8	
		8층	67.9	65.7	66.7	
		9층	67.7	65.5	66.5	
		10층	67.5	65.4	66.3	
		11층	67.3	65.2	66.1	
		12층	67.0	65.0	65.9	
		13층	66.8	64.8	65.7	
		14층	66.6	64.6	65.5	
	S (남측)	1층	60.0	57.7	58.7	
		2층	61.1	58.8	59.8	
		3층	62.4	60.0	61.0	
		4층	62.9	60.5	61.6	
		5층	63.1	60.7	61.8	
		6층	63.2	60.8	61.8	
		7층	63.2	60.8	61.8	
		8층	63.1	60.7	61.8	
		9층	63.0	60.6	61.7	
		10층	62.9	60.5	61.6	
		11층	62.8	60.4	61.5	
		12층	62.7	60.3	61.3	
		13층	62.5	60.2	61.2	
		14층	62.4	60.1	61.1	

[표 5.12] 도로포장 재질별 예측 소음도(Q=2,000veh/h, V=70km/h) (단위 : dB(A))

수음점 구분		도로포장 재질				소음 기준
		일반	배수성(복층)	배수성(단층)	비배수성	
도로단 7.5m 이격 지점	G1	71.8	69.1	70.1	71.1	55.0
	G2	72.0	69.2	70.3	71.3	
	G3	71.8	69.1	70.1	71.1	
유명 한들 Apt.	N (북측)	1층	64.5	62.2	63.0	
		2층	65.6	63.1	64.0	
		3층	66.2	63.7	64.6	
		4층	66.2	63.8	64.7	
		5층	66.1	63.7	64.5	
		6층	66.0	63.6	64.5	
		7층	65.9	63.6	64.4	
		8층	65.7	63.5	64.3	
		9층	65.6	63.4	64.1	
		10층	65.4	63.2	64.0	
		11층	65.2	63.1	63.8	
		12층	65.0	63.0	63.7	
		13층	64.8	62.8	63.5	
		14층	64.7	62.7	63.4	
	W (서측)	1층	67.3	64.8	65.7	
		2층	69.0	66.4	67.3	
		3층	69.5	66.8	67.8	
		4층	69.5	66.9	67.9	
		5층	69.5	66.9	67.8	
		6층	69.4	66.8	67.7	
		7층	69.2	66.6	67.6	
		8층	69.0	66.5	67.4	
		9층	68.8	66.3	67.2	
		10층	68.6	66.1	67.0	
		11층	68.4	66.0	66.8	
		12층	68.1	65.8	66.6	
		13층	67.9	65.6	66.4	
		14층	67.7	65.5	66.3	
	S (남측)	1층	61.1	58.4	59.4	
		2층	62.2	59.5	60.5	
		3층	63.5	60.7	61.7	
		4층	64.0	61.3	62.3	
		5층	64.2	61.5	62.5	
		6층	64.3	61.5	62.5	
		7층	64.2	61.5	62.5	
		8층	64.2	61.5	62.5	
		9층	64.1	61.4	62.4	
		10층	64.0	61.3	62.3	
		11층	63.9	61.2	62.2	
		12층	63.8	61.0	62.1	
		13층	63.6	60.9	61.9	
		14층	63.5	60.9	61.9	



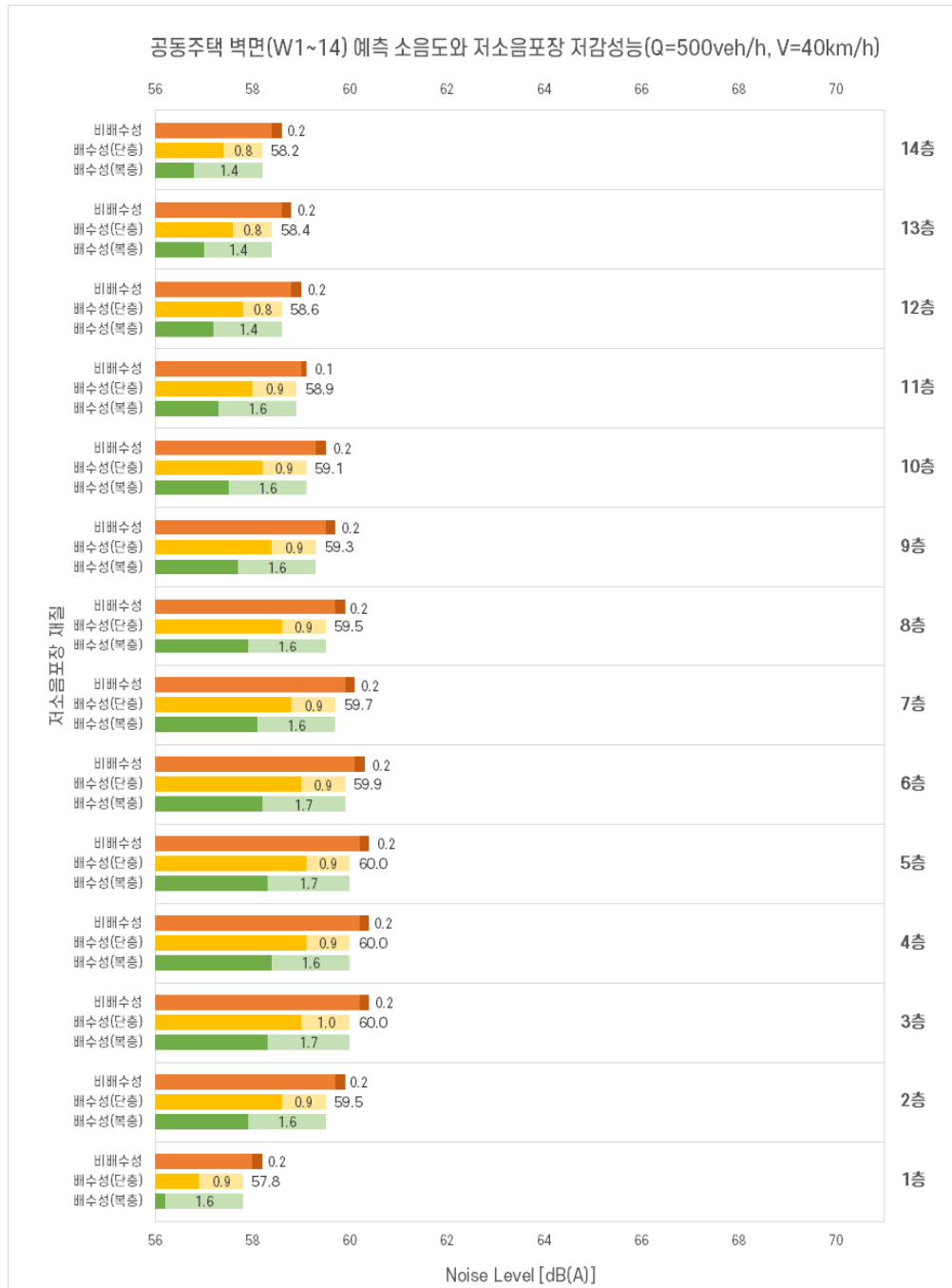
[그림 5.8] 3D 소음지도(Q=2,000veh/h, V=70km/h, 포장재질: 배수성(복층))



[그림 5.9] Cross-section noise map(Q=2,000veh/h, V=70km/h, 포장재질: 배수성(복층))

낮은 교통량(500대수/시간), 속도 40km/h 시나리오에서 도로에 접한 유명한들 아파트 서측 벽면에서 예측된 소음도와 저감성능을 종합하여 정리하면 [그림 5.10]과 같다.

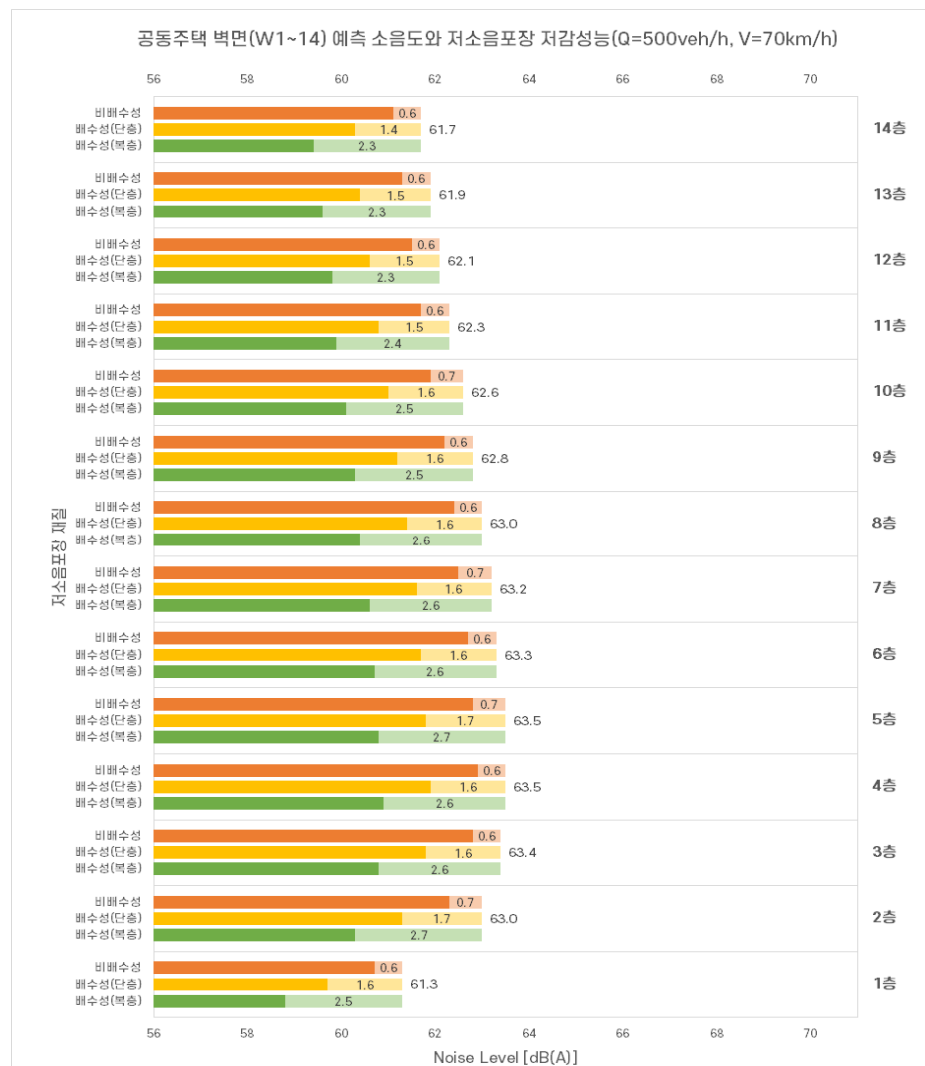
일반포장 소음도는 57.8~60.0dB(A)로 예측되었으며, 3~5층에서 60.0dB(A)로 가장 높은 것으로 분석되었다. 저소음포장은 주행속도 40km/h에서의 보정치와 비례하게 배수성(복층)>배수성(단층)>비배수성 순으로 낮아졌으며, 저감량은 배수성(복층) 1.4~1.7dB(A), 배수성(단층) 0.8~1.0dB(A), 비배수성 -0.1~-0.2 dB(A)로 나타났다.



[그림 5.10] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=500veh/h, V=40km/h)

낮은 교통량(500대수/시간), 주행속도 70km/h 시나리오에서 도로에 접한 유명한들 아파트 서측 벽면에서 예측된 소음도와 저감성능을 종합하여 정리하면 [그림 5.11]과 같다.

일반포장 소음도는 61.3~63.5dB(A)로 예측되었으며, 4~5층에서 63.5dB(A)로 가장 높은 것으로 분석되었다. 저소음포장 성능은 보정치와 비례하게 배수성(복층) > 배수성(단층) > 비배수성 순으로 낮아졌으며, 저감량은 배수성(복층) 2.3~2.7dB(A), 배수성(단층) 1.4~1.7dB(A), 비배수성 0.6~0.7dB(A)로 나타났다.



[그림 5.11] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=500veh/h, V=70km/h)

높은 교통량(2,000대수/시간), 주행속도 40km/h 시나리오에서 도로에 접한 유명한들 아파트 서측 벽면에서 예측된 소음도와 저감성능을 종합하여 정리하면 [그림 5.12]와 같다.

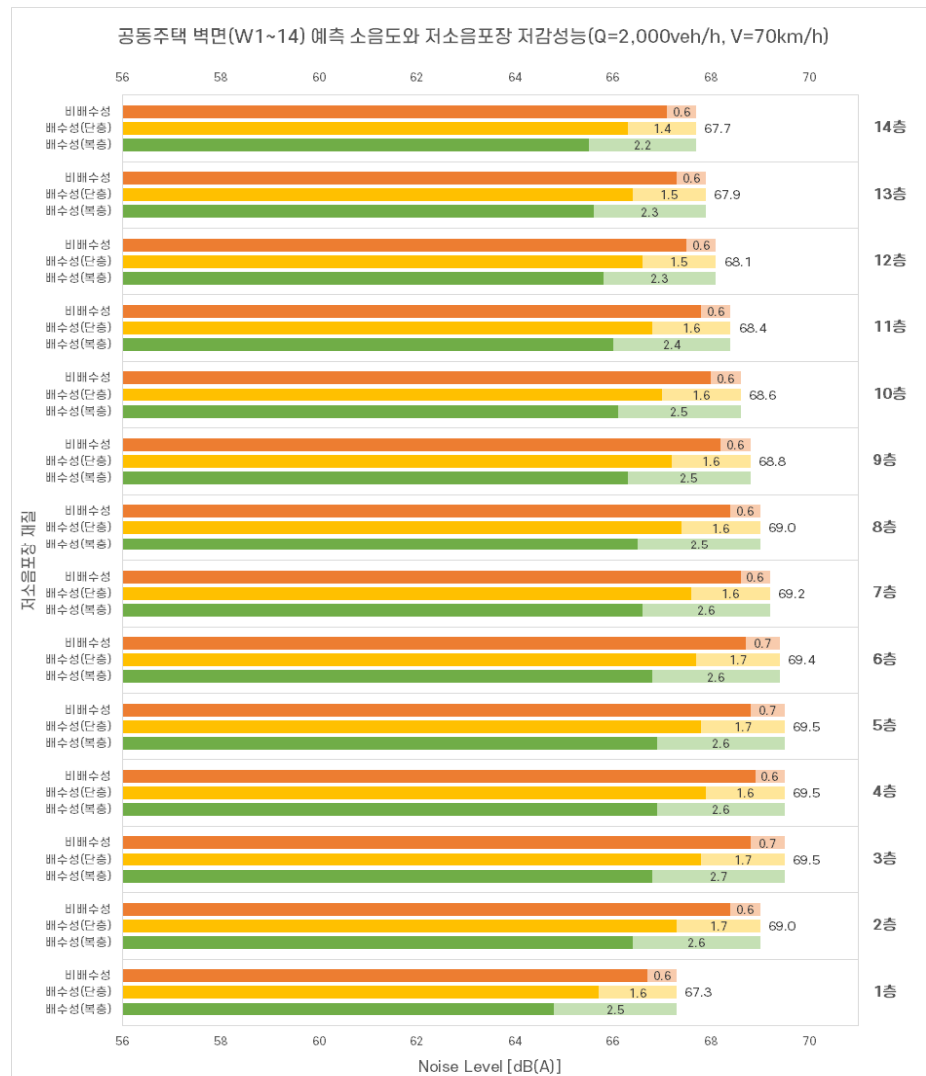
일반포장 소음도는 63.9~66.1dB(A)로 예측되었으며, 4층에서 66.1dB(A)로 가장 높은 것으로 분석되었다. 저소음포장은 보정치와 비례하게 배수성(복층)>배수성(단층)>비배수성 순으로 낮아졌으며, 저감량은 배수성(복층) 1.4~1.7dB(A), 배수성(단층) 0.8~1.0dB(A), 비배수성 -0.1~-0.2 dB(A)로 나타났다.



[그림 5.12] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=2,000veh/h, V=40km/h)

높은 교통량(2,000대수/시간), 속도 70km/h 시나리오에서 도로에 접한 유명한들 아파트 서측 벽면에서 예측된 소음도와 저감성능을 종합하여 정리하면 [그림 5.13]과 같다.

일반포장 소음도는 67.3~69.5dB(A)로 예측되었으며, 3~5층에서 69.5dB(A)로 가장 높은 것으로 분석되었다. 저소음포장 성능은 보정치와 비례하게 배수성(복층) > 배수성(단층) > 비배수성 순으로 낮아졌으며, 저감량은 배수성(복층) 2.2~2.7dB(A), 배수성(단층) 1.4~1.7dB(A), 비배수성 0.6~0.7dB(A)로 나타났다.



[그림 5.13] 공동주택 벽면 예측 소음도와 저소음포장 저감성능(Q=2,000veh/h, V=70km/h)

본 연구는 실제 도로와 접한 공동주택에서 일반포장 대비 3가지 저소음포장(배수성(복층), 배수성(단층), 비배수성)의 소음저감 성능평가를 위하여 소음영향 인자인 교통량(2,000, 500veh/h), 속도(40, 50, 60, 70km/h), 대형차량혼입률(5%) 시나리오를 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션 결과는 2가지 교통량 시나리오와 무관하게 모든 수음점에서 속도별, 공법별 로 일정한 저감효과를 가지는 것으로 분석되었다.

주행속도별 저소음포장 공법별 저감 효과는 기존 삽입한 보정치와 동일하게 속도가 클수록 저감효과가 커지는 것으로 분석되었다.

저소음포장 공법별 저감 효과는 기존 삽입한 보정치와 동일하게 배수성(복층)>배수성(단층)>비배수성 순으로 저감효과가 낮아지는 것으로 분석되었다.

본 시뮬레이션 결과는 대상 수음점 공동 주택의 부지 경계의 길이에서 상하로 50m 연장된 길이로 포장하였을 때의 결과이며, 포장의 길이가 달라지거나 공동주택의 위치, 배치 등의 구조가 변경되었을 경우 저감성능이 달라질 가능성이 있다.

상기의 조건으로 포장하였을 경우, 속도 70km/h에서 도로에 면한 14층의 공동주택의 경우 배수성(복층) 포장은 삽입 보정치 대비 76%이상, 배수성(단층) 포장은 77.8%이상, 비배수성 포장은 85.7% 이상의 저감성능을 보이는 것으로 분석되었다.

공동주택 층별로는 대체로 2~7층에서 저감 성능이 우수하였으며, 이후 고층으로 갈수록 저감량이 줄어드는 것으로 분석되었다.

향후 저소음포장 공법별 차량의 주행속도와 경년변화에 따른 소음도 데이터베이스의 장기적인 구축이 필요하다. 본 연구 결과는 단순한 환경 및 영향 조건에서 나온 결과이며, 향후 신뢰성 있는 저소음포장 데이터와 넓은 범위의 다양한 조건별 시나리오를 바탕으로 한 추가적인 연구가 필요하다.

제6장 결론 및 향후 방향

6.1 요약

본 연구는 LH에서 3기 신도시 건설을 앞두고 국내 저소음포장의 종합적인 LH 저소음포장 인정기준(안)을 개발하기 위하여 소음측정 결과 소음저감 효과 검증 내구성 및 공용성을 분석하였다.

문헌조사에 따르면 유럽 및 일본 등의 국가에서는 소음저감 대책으로 저소음포장이 매우 활발히 적용되고 있으며 각국에 맞는 기준을 정립하여 활용하고 있다.

유럽의 대부분의 국가에서 저소음포장의 소음저감 성능을 평가하는 방법으로 CPX 측정방법을 활용하고 있으며 일본의 경우에는 자체 성능평가 방법을 마련하여 적용하고 있다.

본 연구는 국내 저소음포장 기술의 수준을 평가하고 그 결과를 토대로 저소음포장 인정기준을 마련하기 위하여 국내 저소음포장 기술을 보유하고 있는 기업의 참여를 요청하였으며, 13개 기업 16개 공법이 참여를 하였다.

참여 기업이 보유하고 있는 저소음포장 기술에 대해 공용성능과 소음저감 성능을 평가하였다. 공용성능 평가는 국토교통부의 배수성포장의 품질 기준을 기준으로 평가하였다.

참여 기업이 제작하여 제출한 재료 및 공시체에 대해 시험을 실시하였으며 평가 결과 모든 기업의 저소음포장 기술은 국토교통부 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

2024년 국토교통부의 배수성포장 품질 기준이 일부 개정되었다. 개정된 내용은 적설 및 한냉 지역에 배수성을 적용할 경우 공극률은 기존 16% 이상에서 12% 이상으로 하며, 아스팔트 바인더의 등급을 기존 PG82-22에서 PG82-34 등급의 바인더를 적용해야 하고 저온 칸타브로 손실률은 기존 30%이하에서 20%이하로 기준이 변경되었다. 이 기준은 공극률이 낮아져 저소음포장의 소음저감 효과가 낮아지게 되므로 이 기준 적용시 어느 정도 소음이 저감되는지에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 추가적인 연구를 통해 이 기준의 적용 여부를

판단할 필요가 있다.

참여 기업이 기 적용한 구간에 대해 소음을 측정하고 성능을 평가하였다. 참여 기업이 기 적용한 구간을 대상으로 사전조사를 실시하여 최종 측정 대상구간으로 22개 구간과 일반포장 5개 구간을 선정하였다. 저소음포장 공법별로는 복층 및 단층 배수성포장 18개 구간과 비배수성포장 4개 구간을 선정하였다.

소음 측정은 ISO 11819-2 측정 방법으로 측정하였으며 측정은 주행속도 40km/h부터 10km/h 단위로 모든 구간에서 2개 속도 이상을 측정하였다. 측정 결과 저소음 포장의 소음저감 효과를 확인하였다. 측면 소음의 경우 평균 3dB(A) 이상, 후면 소음의 경우 평균 5dB(A) 이상 소음저감 효과가 있는 것으로 평가되었다. 공법별로는 복층 저소음포장의 경우 측면 소음 2.9~6.8dB(A), 후면 소음 4.8~10.9B(A), 단층 저소음포장의 경우 측면 소음 2.8~4.9B(A), 후면 소음 5.5~7.0dB(A), 비배수 저소음포장의 경우 측면 소음 1.9~4.5dB(A), 후면 소음 2.5~6.0dB(A) 소음저감 효과가 있는 것으로 평가되었다.

6.2 저소음포장 성능 결과 분석

6.2.1 소음성능 결과 분석

앞서 언급한 바와 같이 관련업체 대상으로 공모절차를 통하여 복층 5개구간, 단층 13개 구간, 비배수 6개 구간을 최종 선정하였다. 저소음포장의 소음저감 효과는 복층, 단층, 비배수 저소음포장 순으로 나타났다. 복층 및 비배수 저소음포장의 소음측정결과에 비해서 단층저소음포장의 소음저감편차가 큰 것으로 나타났다.

이는 단층 저소음포장 기업의 기술수준이 상당히 차이가 난다는 것을 의미하며, 저소음포장 소음성능 기준을 수립하여 적용하는 것이 소음성능 품질 관리에 필수적이라고 판단된다.

또한, 측면소음 측정값보다 후면소음 측정값이 공법별 소음성능평가에 더 적절한 것으로 분석되었다. 이는 측면소음은 후면소음보다 타이어 가진음을 측정하는데 불리하다고 판단된다.

6.2.2 저소음포장 공용성능 결과 분석

저소음포장 관련업체 대상으로 시편을 제공받아 최종 13개업체, 배수성 11개, 비배수 5개를 대상으로 국토부 “아스팔트 콘크리트 포장 시공지침, 배수성 (저소음) 포장 품질기준(2021)” 시험을 수행하였다.

제출된 시편은 대부분 관련기준을 통과하였으며, 소음저감효과가 큰 구간의 시편과 소음저감효과가 작은 구간의 시편을 대상으로 시험결과를 비교 및 분석을 하였지만 차이가 나타나지 않았다.

일본 전문가 자문을 의뢰하였으며, 일본과 비교하여 2.5mm미만의 입도분포가 과도하여 유효공극률 감소로 인한 소음저감효과가 제한된다는 의견을 주었다. 이는 현재 국토부 기준은 저소음포장 품질기준으로 한계가 존재한다는 것을 의미하여, 저소음포장의 입도 분포에 따른 내구성 관련 연구가 필요하다고 판단되었다.

6.3 저소음포장 성능 인정기준(안) 요약

저소음포장의 성능 인정 기준은 저소음포장의 성능 평가 결과를 기준으로 기준(안)을 마련하였다. 저소음포장의 소음성능 인정하기 위해 일반포장의 기준소음도를 주행속도별(40km/h~80km/h) 제시하였다. 저소음포장 기술의 소음성능을 인정 받기 위해서는 저소음포장 소음측정 대상 도로는 공용기간이 1년 이상 경과한 도로로 하였으며, 소음은 ISO11819-2 측정 방법으로 측정하는 것으로 하였다. 평가시 측정값은 측면 소음과 후면 소음도의 평균을 저소음포장의 소음도로 하였다. 평가 방법으로는 1개 구간 이상 측정하여 일반포장 기준 소음도와 차이가 적은 구간을 기준으로 소음저감 효과를 인정하는 것으로 하였다.

저소음포장의 공용성능기준은 국내 저소음포장 기업의 제품에 품질시험결과와 국토부, 한국도로공사, 한국토지주택공사, 관련 학회 등의 지침을 참조하여 마련 하였으며, 부록에 자세한 저소음포장 인정기준(안)을 제시하였다.

6.3.1. 저소음포장 소음성능 인정기준(안) 제시

저소음포장 소음성능을 평가하기 위하여 일반 아스팔트포장의 기준소음도를 선정하는 것이 필수적이다. 기준소음도를 선정하기 위하여 일반아스팔트 포장 35개 구간 분석하여 [표 6.1]에 나타내었다. LH 단지 조성구간의 제한속도 등을 고려하여 50km/h를 기준속도로 선정하였다.

[표 6.1] 기준소음도

구분	공용기간			
	2년 이하	4년 이하	6년 이하	8년 이하
기준소음도(dB)	90	92	94	96

소음측정방법은 ISO 11819-2의 근접소음도 측정 방법(Close-proximity method, CPX)이며 자세한 사항은 아래 규격 참조하며, ISO 소음성능평가 방법 개정 방향에 따라 측정값은 마이크로폰 1번, 2번 측정된 값의 평균값(측면소음)과 마이크로폰 5번에서 측정된 값의 평균값(후면소음)으로 한다.

· 참조규격 : ISO 11819-2 Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close-proximity method

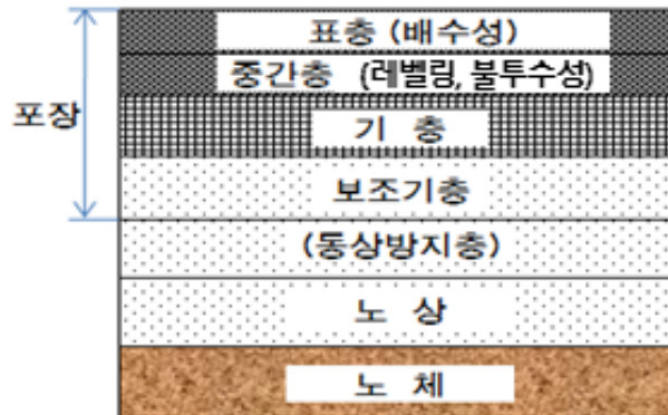
저소음포장 소음측정 대상 도로는 공용기간 1년을 초과한 저소음포장 구간을 대상으로 하며, 소음 측정은 1개 구간 이상 측정하며, 일반포장 기준소음도와 차이를 소음저감효과로 인정한다.

· 일반포장 기준소음도 - 해당 저소음포장 측정소음도 = 해당공법의 소음저감효과

6.3.2. 저소음 아스팔트 포장의 공용성능 기준(안) 제시

본 기준에서 저소음 아스팔트 포장은 “LHCS 44 50 10 30 배수성 아스팔트 콘크리트 포장공사”를 따르며 본 기준에 규정되어 있지 않은 사항은 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”, “도로공사 표준시방서”에 따른다.

저소음 아스팔트 바인더의 품질 기준은 국토교통부 “아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침(2024)”중 배수성 포장용 아스팔트 기준이 개정됨에 따라 개정된 기준을 적용하며 저소음 아스팔트 콘크리트 포장을 공극률 16% 이상의 배수성 포장으로 적용할 경우 아스팔트 포장의 전 층 구성 단면은 [그림 6.1]과 같이 적용한다.



[그림 6.1] 저소음포장 단면

저소음 아스팔트 혼합물의 골재 배합설계 및 품질관리 기준은 국토교통부 기준을 기본 기준으로 적용하고, 배수성 아스팔트 혼합물의 공용성능과 소음 저감 효과 등을 고려하여 (사)한국배수성아스팔트기술협회에서 제안한 입도를 추가하여 적용한다.

그러나, 국토교통부 기준 중 고내구성 입도 기준인 PA-13P, PA-10P 제외하며, 이 입도기준은 공용성능을 높이기 위해 공극률을 낮추는 입도로 소음저감 효과가 낮아지기 때문이다.

비배수형 저소음포장의 경우 제품의 시방을 참조하여 적용하며, 비배수형 저소음포장의 경우 공극률, 실내투수계수 항목은 제외한다.

6.4 향후 연구방향

2024년 국토교통부에서 배수성 저소음포장의 적용 규칙을 신설하는 도로법 개정을 시행하였으며, LH공사, 한국도로공사, 서울시, 성남시 등에서 저소음포장 적용을 확대하고 있는 추세이다. 그러나 저소음포장에 대한 국내 관련 기준은 미비한 상황이며 저소음포장 확대 적용에 따른 인정 기준 마련의 필요성이 증대되고 있다.

본 연구에서 시행한 공용성능 실험과 소음 측정은 한정된 구간을 대상으로 시행되었다. 본 결과로 국내 저소음포장의 성능평가 기준을 마련하기에는 결과나 신뢰성에 있어서 한계가 있다. 보다 신뢰성 있는 기준을 마련하기 위해서는

제안된 기준을 시범적용하여 한계점을 분석하고, 보다 많은 구간에 대한 소음 측정과 평가를 통해 기준을 보완할 필요가 있다.

따라서, 저소음포장 성능인정기준을 전면적으로 적용하기 위해서는 시범적용 결과, 신뢰성 확보를 위한 다양한 구간의 소음측정, 저소음포장의 입도에 따른 소음 및 공용성능 확보를 위한 후속 연구 수행이 필요하다고 판단된다.

참고문헌 Reference

1. 국립환경연구원 (1999), 도로교통소음, 국립환경연구원
2. 국토교통부 (2020), 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침,
3. 국토교통부 (2024), 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침, 국토교통부
4. 김재원, (2003), 저소음포장의 소음저감 효과 분석 및 개질(RSBS) 아스팔트 혼합물의 기본물성 평가, 국내석사학위논문 경희대학교 대학원
5. 임경빈 (2023), 저소음 배수성 포장의 경제적 효과분석에 관한 연구, 국내석사학위논문 경기대학교 공학대학원
6. 한국건설기술연구원 (2008), 도시부 Green Street System 기술 개발, 한국건설기술연구원
7. 한국도로공사 도로교통연구원 (2011), 저소음 포장 소음예측 프로그램 입력변수 및 유지관리 방안 연구, 한국도로공사
8. 한국도로공사 도로교통연구원 (2009), 고속도로 포장노면과 타이어간의 마찰음 분석 및 평가기법 연구, 한국도로공사
9. 한국토지주택공사 토지주택연구원 (2017), 복층 저소음포장공법 소음저감효과 분석 및 모니터링 연구, 한국토지주택공사
10. 환경부 (2016), 저소음포장도로 소음저감 성능인정 기준마련 연구(Ⅱ), 환경부
11. KS F 2389 (2014), KS F 2389:2014; 아스팔트의 공용성 등급, 한국표준협회
12. KS I ISO11819-2 음향 (2023), - 교통소음에 미치는 노면의 영향 측정 - 제2부:근접 노면소음(CPX) 방법, 한국표준협회
13. ISO 11819-1:2017, Acoustics - Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise - Part 1:Statistical Pass-By Method, International Standard Organization
14. ISO 11819-2:2017, Acoustics - Measurement of the influence of road

surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method, International Standard Organization

15. Sexton, T. (2010), Evaluating Quieter Pavement in Washington State; WSDOT and the OBSI Method, 2010 Annual TRB Conference, Washington D.C.

부록

저소음 아스팔트 포장 성능 인정 기준(안)

저소음 아스팔트 포장 성능 인정 기준(안)

이 기준(안)은 한국토지주택공사(이하 LH라 한다)에서 저소음 아스팔트 포장을 적용하는 데 있어 저소음 아스팔트 포장의 성능을 인정하는 기준(안)으로 저소음 아스팔트 포장의 설계 및 참여 기업의 기술을 인정하는 기준으로 활용한다.

1. 저소음포장 기술의 소음성능 기준(안)

1.1 저소음포장의 정의

저소음포장은 일반적으로 사용되고 있는 밀입도 아스팔트포장이나 시멘트 콘크리트 포장과 비교해서 동종의 포장에서 자동차 주행 소음이 작은 포장을 말한다.

저소음포장에는 아스팔트계 및 시멘트계 등 다양한 종류가 실용화되고 있으며, 여기서 저소음포장은 아스팔트 혼합물로 구성되는 아스팔트계 저소음포장을 말한다.

일반적으로 공극률이 높은 다공질 아스팔트 혼합물로 구성되는 저소음포장은 배수성포장으로 불리고 있다. 저소음(배수성) 아스팔트 포장은 다공성 아스팔트 혼합물을 포장의 표층에 사용하여, 빗물이 하부의 불투수성 포장층 표면을 흘러 측면의 배수로로 신속히 배수되도록 설계 및 시공된 포장이다.

저소음포장은 공극률이 높을수록, 사용하는 골재 최대 크기가 작을수록, 포장의 두께가 두꺼울수록 소음저감 효과가 우수하다. 최근 국내에서는 최대 크기가 5mm인 작은 골재를 사용하여 소음을 줄이는 공법도 저소음포장으로 적용되고 있으며, 비배수성 저소음포장으로 불리고 있다.

1.2 저소음포장 소음성능 인정을 위한 기준소음도

(1) 저소음포장 소음성능 인정을 위한 기준도로

저소음포장의 소음성능 인정을 위해서는 일반도로에서 소음 특성을 분석하여 기준 소음도를 선정하는 것이 중요하다.

자동차 주행 소음은 공용되는 도로의 사용 기간이 지날수록 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 특성을 고려하여 공용기간이 1년~6년인 일반국도 35개 구간을 기준소음도 선정을 위한 대상구간으로 선정하으며 35개 대상구간은 밀입도 아스팔트포장 구간이다.

(2) 기준도로 소음측정

기준소음도 선정을 위한 35개 대상구간에서 소음측정 방법은 ISO 11819-2의 근접소음도 측정 방법(Acoustics —Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: Close-proximity method ; 이하 CPX)으로 측정하였다. CPX 측정 방법 중 밀폐형 트레일러 방법을 사용하였다. 근접소음 측정은 40km/h~60km/h(70km/h, 측정이 가능한 구간인 경우) 매 10km/h 단위로 측정하였다.

(3) 기준소음도 선정

기준소음도를 선정하기 위해서는 기준이 되는 공용기간을 선정해야 한다. 국내 저소음 포장의 공용수명은 최대 8년 정도로 보고되고 있다. 소음은 공용 기간이 경과함에 따라 증가하기 때문에 2년 단위로 기준소음도를 선정하였다. LH 공사는 주거단지 내나 주변 도로를 대상으로 하므로 제한속도는 대부분 30km/h~70km/h이다. 최근 교통안전을 위하여 제한속도를 낮추고 있는 상황과 LH 단지 조성구간의 제한속도 등을 고려하여 50km/h를 기준속도로 선정하였다. 측정값은 측면소음도와 후면소음도의 평균값으로 한다. 저소음포장의 성능 인정을 위한 일반포장 기준소음도는 다음과 같다.

[표 1] 기준소음도

구분	공용기간			
	2년 이하	4년 이하	6년 이하	8년 이하
기준소음도(dB)	90	92	94	96

1.3 저소음포장 기술 소음성능 인정(안)

(1) 목표 소음저감량 선정

국내에서 저소음포장은 일반적으로 -3dB 소음저감 효과를 인정받고 있다. 그러나 저소음 포장 형식, 공용기간, 소음의 측정 방법과 측정 속도에 따라 소음저감 효과는 다르게 나타나고 있다. 국내 저소음포장은 CPX 측정방법을 기준으로 소음저감량은 3~6dB를 나타내기 때문에 목표 소음저감량은 대상 구간의 조건에 따라 선정해야 한다.

(2) 저소음포장 소음측정 대상 도로

일반(밀입도)포장은 재료적 특성으로 공용초기와 공용 1년 경과 후의 소음 특성이 다르게

나타나며 저소음포장의 소음저감 효과는 공용기간이 1년 경과 후의 효과라고 할 수 있다. 따라서 저소음포장의 소음성능 인정은 공용기간이 1년 초과한 구간을 대상으로 한다.

(3) 소음측정 방법

소음측정 방법은 ISO 11819-2의 근접소음도 측정 방법(Close-proximity method; 이하 CPX)으로 하며 CPX 측정 방식 중 트레일러 방식으로 한다. 트레일러 방식으로 측정할 때 주변 풍속은 개방형이면 5m/s, 밀폐형이면 10m/s까지 주변 풍속을 허용하고 눈, 비가 오지 않으며, 대기 온도는 5~30℃ 이내여야 한다. 측정 구간은 누적 거리로 최소 200m 이상이어야 한다. 자세한 사항은 아래 참조규격을 참조한다.

- 참조규격 : ISO 11819-2 Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: Close-proximity method

(4) 저소음포장 기술 소음성능 인정

저소음포장 기술 소음성능 인정은 공인된 기관에서 측정된 시험성적서로 확인한다. 저소음포장 기술이 시공된 구간에서 측정된 소음도 값이 일반포장 기준소음도 대비 목표 소음저감량을 만족한 경우 저소음포장 기술의 소음성능을 인정한다.

- 일반포장 기준소음도 - 목표 소음저감량 > 저소음포장 기술 소음도 ; 인정

시험성적서에는 저소음포장 기술 소음 측정구간의 위치(시종점 포함), 측정연장, 측정구간의 시공년월일, 대기온도, 주변풍속, 측정 속도 및 측정값을 확인할 수 있어야 한다.

CPX 측정 방법에서는 아래 그림 1과 같이 기준타이어 가까이에 여러 개의 마이크로폰을 설치하여 소음도 측정한다. 일반(밀입도)포장과 저소음(다공성)포장은 포장 표면의 질감(Texture)과 공극에 의한 흡음 특성이 달라 마이크로폰의 위치에 따라 다른 경향을 나타낸다. 여기에서 측정값은 마이크로폰 1번, 2번에서 측정된 값의 평균값과 마이크로폰 5번에서 측정된 값의 평균값을 말한다.

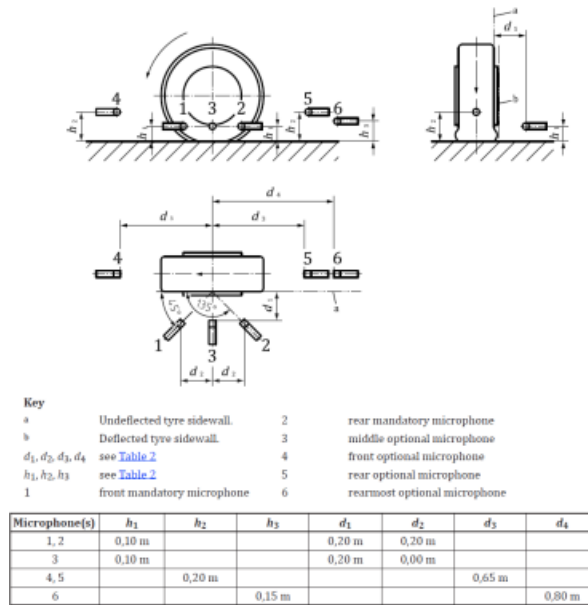


그림 1 CPX 측정용 마이크로폰 위치

(5)소음저감량 산정

- 일반적으로 저소음포장은 주행속도에 따라 소음저감 효과가 다른 것으로 보고되고 있다.
- 저소음포장을 설계하는데 있어 목표 소음저감량은 설계 대상구간의 주행 제한속도를 고려하여 산정할 필요가 있다.

[표 2] 일반포장 기준소음도와 저소음포장 평균 소음도 차이

주행속도 (km/h)	공용기간			
	2년 이하	4년 이하	6년 이하	8년 이하
40	3	4	5	6
50	3	4	5	6
60	3	4	5	6
70	4	5	6	6
80	4	5	6	6

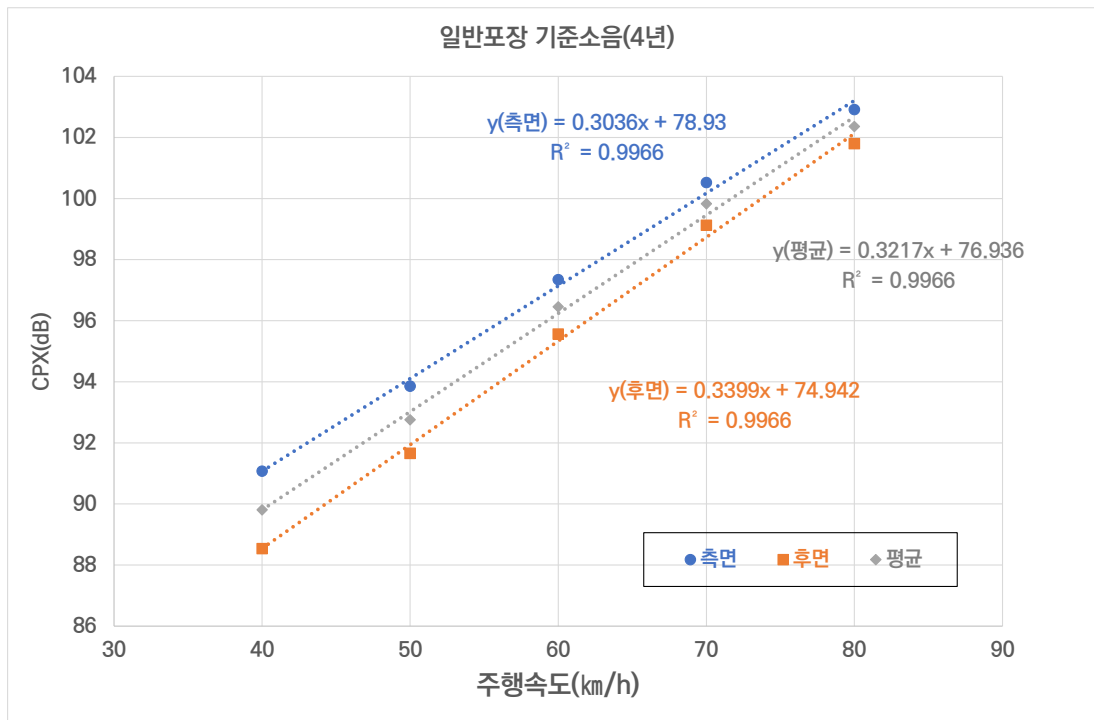


그림 3 일반포장의 기준소음도

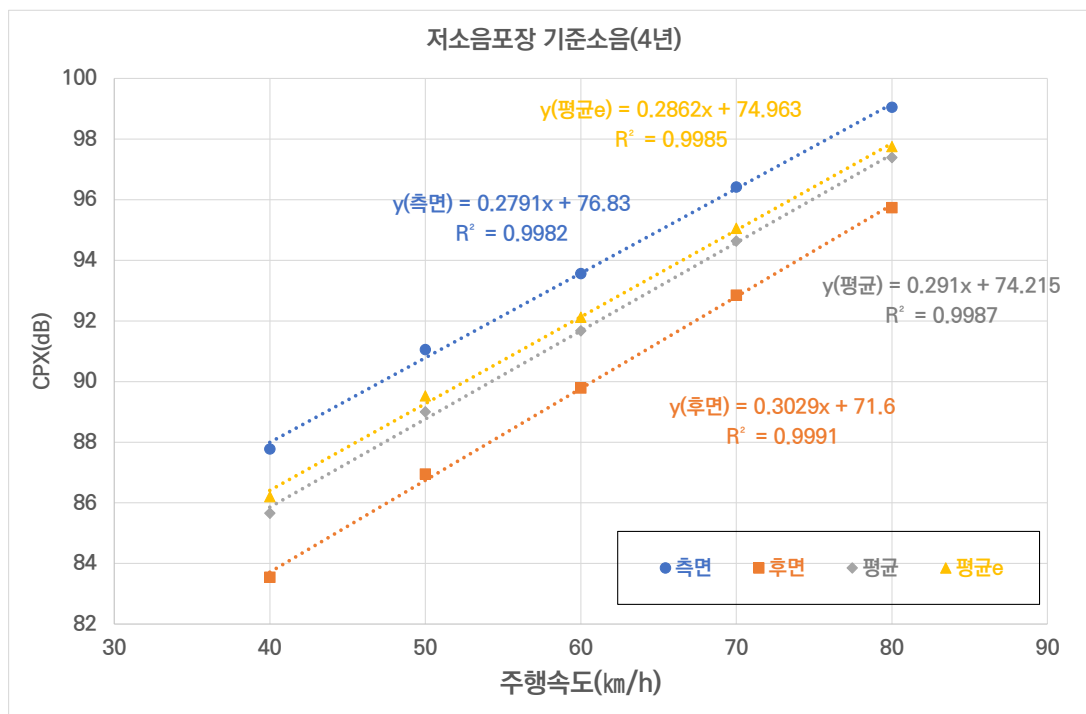


그림 4 저소음포장의 기준소음도

- 일반포장 기준소음도는 일반국도 35개 구간, 저소음포장 22개 구간(복층 저소음포장 5개, 단층 저소음포장 8개, 비배수 저소음포장 6개)에서 측정된 측정값을 기준으로 산정하였다.
- 일반포장 기준소음도는 국내 저소음포장의 평균 공용수명을 감안하여 공용기간 2년 단위의 평균소음도를 기준소음도로 선정하였다.
- 일반포장도 공용기간이 경과함에 따라 소음이 증가하는 것으로 보고되고 있고, 일반포장과 저소음포장의 소음도 차이도 변화하는 것으로 보고되고 있다.

(5) 시험성적서 유효기간

저소음포장은 기술 특성, 공용기간 동안 통과되는 교통량, 기후, 공용 후 유지관리 여부에 따라 소음저감 효과가 큰 폭으로 감소하거나 소폭으로 감소하기 때문에 일정 기간마다 성능을 확인할 필요가 있다. 시험성적서는 저소음포장 기술 소음성능 인정을 받고자 하는 날로부터 2년 이내 측정하여 발급받은 것으로 한다.

2. 저소음 아스팔트 포장의 공용성능 기준

2.1 일반 사항

이 기준(안)은 한국토지주택공사(이하 LH라 한다)에서 발주하는 저소음 아스팔트 포장에 적용한다.

저소음 아스팔트 포장의 일반적인 사항은 “LHCS 44 50 10 30 배수성 아스팔트 콘크리트 포장공사”를 따르며 본 기준에 규정되어 있지 않은 사항은 국토교통부 “아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침”, “도로공사 표준시방서”에 따른다.

2.2 참고 기준

- LHCS 44 50 10 30 배수성 아스팔트 콘크리트 포장공사

2.3 관련 기준

- KCS 44 55 10 아스팔트 콘크리트 포장공사
- LHCS 44 50 05 05 동상방지층공사
- LHCS 44 50 05 10 보조기층공사
- LHCS 44 50 05 15 입도조정기층공사
- LHCS 44 50 05 20 아스팔트 콘크리트 기층공사
- LHCS 44 50 10 10 택 코트
- LHCS 44 50 10 20 아스팔트콘크리트 표층 및 중간층
- 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침(국토교통부)
- 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침(국토교통부)
- KS F 2337 아스팔트 혼합물의 마찰안정도 및 흐름값 시험방법
- KS F 2350 아스팔트 포장 혼합물의 시료 채취 방법
- KS F 2354 아스팔트 포장용 혼합물의 아스팔트 함유량 시험방법
- KS F 2355 아스팔트 골재 혼합물의 피막 박리 시험방법
- KS F 2364 다져진 역청 혼합물의 공극률 시험 방법
- KS F 2366 아스팔트 혼합물의 이론 최대 비중 시험방법
- KS F 2374 아스팔트 혼합물의 휠 트래킹 시험방법
- KS F 2379 낙하식 충격 하중 장치에 의한 변형 측정 방법
- KS F 2384 다져지지 않은 잔골재의 공극률 시험방법
- KS F 2389 아스팔트 공용성 등급

- KS F 2390 보형상 유변물성 측정기를 이용한 아스팔트의 휨크리프 강성 시험방법
- KS F 2391 압력노화 용기를 이용한 아스팔트의 촉진노화 시험방법
- KS F 2392 회전점도계를 이용한 아스팔트의 점도 시험방법
- KS F 2493 배수성 아스팔트 혼합물의 유출 시험방법
- KS F 2494 배수성 아스팔트 혼합물의 실내 투수 시험방법
- KS F 2496 진공 밀봉방법을 이용한 다져진 아스팔트 혼합물의 건보기 비중 및 밀도 시험방법
- KS F 2393 동적전단 유변물성 측정기를 이용한 아스팔트의 유변특성 시험방법
- KS F 2394 투수성 포장체의 현장 투수 시험방법
- KS F 2398 아스팔트 혼합물의 수분 저항성 시험 방법
- KS F 2446 다져진 아스팔트 포장 혼합물의 건보기 비중 및 밀도 시험방법(표면건조 포화상태의 공시체를 사용한 경우)
- KS F 2488 개질 아스팔트의 파악력 및 점결력 시험
- KS F 2490 연소법을 이용한 아스팔트 함량 결정 방법
- KS F 2491 아스팔트 바인더의 휨 굴곡 시험방법
- KS F 2492 배수성 아스팔트 혼합물의 칸타브로 시험방법
- KS F 2502 굵은 골재 및 잔골재의 체가름 시험방법
- KS F 2503 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험방법
- KS F 2507 골재의 안정성 시험방법
- KS F 2508 로스엔젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험방법
- KS F 2575 굵은 골재 중 편장석 함유량 시험방법
- KS F 2594 굳지 않는 콘크리트의 슬럼프 플로 시험방법
- KS M 2201 스트레이트 아스팔트
- KS M 2203 유화아스팔트
- KS M 2247 아스팔트의 절대 점도 시험방법
- KS M 2250 역청 재료의 연화점 시험방법
- KS M 2252 역청 재료의 침입도 시험방법
- KS M 2254 역청재료의 신도 시험방법
- KS M ISO 6245 석유제품-회분 시험방법
- ASTM D 2412-96 EN-Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading
- ASTM D 7173 Standard practice for determining the separation tendency of polymer from polymer

modified asphalt

- ASTM D 7405 Standard test method for Multiple Stress Creep and Recovery(MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer

2.4 아스팔트

국토교통부 “아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침(2024)”중 배수성 포장용 아스팔트 기준이 개정됨에 따라 개정된 기준을 적용한다.

[표 3] 저소음 아스팔트 바인더의 품질 기준

항목	국토교통부 (2024)	LH공사 (2020)
저장안정성(%)	5 이하	5 이하
용해율(%) (30 min)	95 이상	95 이상
PG	82-22 이상 (82-34)	82-22 이상
소성변형률 (Jnr, kPa-1)	0.5 이하	0.5 이하
탄성회복률(%)	55 이상	55 이상
연화점(°C)	80 이상	80 이상
신도 (15 °C, 5 cm/min) (cm)	50 이상	50 이상

- 적설 및 한냉지역은 조기 골재탈리 파손 등을 예방할 수 있도록 아스팔트의 품질이 다짐의 다음의 기준을 만족하여야 한다. ① 개질 아스팔트 품질기준 PG 82-34, 소성변형률 0.2 이하, 탄성회복률 80% 이상, 또는 ② 아스팔트 바인더 휨 굴곡 시험(KS F 2491)에 따라 -20°C의 온도에서 휨 에너지 400kPa 이상, 휨 스티프니스 100MPa 이하
- 적설 및 한냉지역은 일 최저기온 -2°C이하가 90일 이상, 누적적설량 60cm 이상, 강설일수 14일 이상
- 거창, 대관령, 동두천, 보은, 봉화, 북춘천, 속초, 양평, 영월, 의성, 이천, 인제, 장수, 정선, 청송, 충주, 태백, 파주, 홍천 등

2.5 저소음 아스팔트 혼합물

2.5.1 저소음 아스팔트 콘크리트 포장 단면

저소음 아스팔트 콘크리트 포장을 공극률 16% 이상의 배수성 포장으로 적용할 경우 아스팔트 포장의 전 층 구성 단면은 다음과 같이 적용한다.

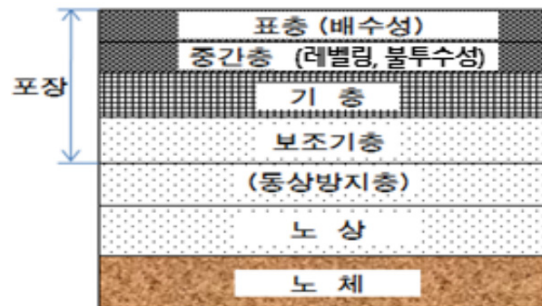


그림 5 배수성 아스팔트 포장의 구성

- 저소음 아스팔트 혼합물은 골재 배합입도에 적합한 종류를 적용하며, 아스팔트 콘크리트 포장의 표층용으로 사용한다.
- 저소음 포장에 노면 골재탈리 발생 시 8mm 혹은 6mm 배수성저소음 혼합물을 이용하여 보수할 수 있다.
- 저소음 포장 하부의 중간층용 아스팔트 혼합물 종류는 <표 1>에서 선정한다.
- 표층 하부의 중간층은 상부에서 투수되는 수분을 측면의 배수시설로 유도하는 역할을 해야 하며, 이를 위하여 하부로 수분이 침투되지 않도록 하는 불투수층이어야 한다. 또한, 일반 포장에서 요구되는 기존 중간층의 구조적·재료적 내구성 역할도 충실히 수행해야 한다.
- 중간층은 3m 직선자를 도로중심선에 직각 또는 평행으로 대었을 때 가장 들어간 곳이 5mm 미만이어야 한다. 단, 절삭 덧씌우기 포장은 10mm 미만이어야 한다.

[표 4] 저소음 아스팔트 포장의 중간층(불투수성) 혼합물의 종류(국토교통부, 2024)

아스팔트 혼합물 종류	최대골재 치수	용도	특징
WC-1 아스팔트 콘크리트	13mm	아스팔트 기층	〈교면포장용 아스팔트 혼합물〉 “교면포장용 13mm(WC-1, WC-6) 개질 아스팔트 혼합물의 배합설계 기준”의 하부층 기준
WC-1 아스팔트 콘크리트			13mm SMA 수밀성 중간층 기준
SMA 아스팔트 콘크리트	13mm	아스팔트 기층	〈SMA 혼합물〉 “교면포장용 SMA 혼합물의 배합설계 기준”의 하부층 기준
	10mm	콘크리트 기층	
구스 아스팔트 혼합물		콘크리트 기층	〈구스 아스팔트 혼합물〉 구스 아스팔트 혼합물 품질 기준

2.5.2 저소음 아스팔트 혼합물의 골재 배합설계 및 품질관리 기준

“LH 44 50 10 30 : 배수성 아스팔트 콘크리트 포장공사(2020)”의 배수성 아스팔트 혼합물의 표준배합입도에서 혼합물의 종류에 따라 국토교통부, 한국도로공사 기준을 혼용하여 적용하고 있어 국토교통부 기준을 기본 기준으로 적용하고, 배수성 아스팔트 혼합물의 공용성능과 소음저감 효과 등을 고려하여 (사)한국배수성아스팔트기술협회에서 제안한 입도를 추가하여 적용한다.

다만, 국토교통부 기준 중 고내구성 입도 기준인 PA-13P, PA-10P 의 경우 공용성능을 높이기 위해 공극률을 낮추는 입도로 이 입도의 경우 소음저감 효과가 낮아지기 때문에 이 기준에는 포함하지 않는다.

비배수형 저소음포장의 경우 제품의 시방을 참조하여 적용한다.

[표 5] 저소음 아스팔트 혼합물의 표준 배합입도

혼합물 종류 체의 호칭크기		PA-20	PA-13	PA-10	PA-8	PA-6	PA-20J	PA-13J	PA-10J	PA-8J	PA-5J
통 과 질 량 백 분 율 (%)	25mm	100	-	-	-	-	100	-			-
	20mm	95~100	100	-	-	-	95~100	100			-
	13mm	53~78	92~100	100	-	-	65~84	90~100	100	100	100
	10mm	35~62	62~81	90~100	100	-	-	-	95~100	-	-
	8mm	-	-	-	90~100	100	-	-	-	95~100	-
	6mm	-	-	-	-	90~100	-	-	-	-	-
	5mm	10~31	10~31	8~22	10~25	-	10~31	11~35	11~35	11~35	95~100
	2.5mm	10~21	10~21	6~17	8~20	8~20	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20
	0.6mm	4~17	4~17	4~13	5~12	5~12	-	-	-	-	-
	0.3mm	3~12	3~12	3~9	4~10	4~10	-	-	-	-	-
	0.15mm	3~8	3~8	2~8	3~8	3~8	-	-	-	-	-
	0.08mm	2~7	2~7	2~7	3~7	2~7	3~7	3~7	3~7	3~7	3~7

[표 6] 저소음 아스팔트 혼합물의 배합설계 기준

항 목		시험방법	품질기준
흐름손실률(%)			0.3 이하
공극률 (%)		KS F2496, KS F2366, KS F2364	16 이상
칸타브로 손실률 (%)	20°C (60°C, 24시간 수침)	KS F 2492	20 이하
	-20°C		30 이하
인장강도비(TSR, 1회동결)		부록 IV-7 배수성아스팔트 혼합물 인장강도비 시험 참조	0.85 이상
동적안정도(회/mm)		KS F 2374	3,000 이상
실내투수계수(cm/sec)		KS F 2594	0.05 이상
다짐횟수			선회다짐 : 75, 마샬다짐 : 양면 각 50

- 흐름손실률은 KS F 2489에 섬유질이 혼합되지 않은 아스팔트 혼합물은 팬을 이용한 방법과 섬유질이 혼합된 아스팔트 혼합물은 유리비커를 이용한 방법에 따라 시험한다.
- 상온 칸타브로 시험은 공시체를 60°C에서 24h±10min 수침 후 60°C 오븐에서 4h±10min 건조 하고, 30min 간격으로 질량을 0.1g 단위로 측정하여 질량 차이가 없을 경우, 20°C 항온챔버에서 2h 이상 양생 후 KS F 2492에 따라 시험한다.
- KS F 2494에 따라 투수계수 시험을 수행하되, 고무 멤브레인(Membrane)을 반드시 적용하여

공시체 측면에서의 누수방지를 철저히 해야 한다.

- 일반적인 포장에서는 마샬 다짐 양면 각 50회, 또는 선회다짐 75회를 사용한다. 단, 대형차 교통량이 1일 한 방향 1,000대 이상, 또는 20년 설계 ESAL >107인 경우인 중교통 포장에서는 마샬다짐 양면 각 75회 또는 선회다짐 100회를 사용한다.
※ ESAL(Equivalent Single Axle Load) : 등가 단축하중
- 공시체는 골재와 아스팔트 등을 혼합한 후 해당 아스팔트 혼합물의 다짐 온도상태(열풍순환 오븐 내에서)에서 1시간 단기노화 후 제조하여야 한다.
- 2023년 기준 최근 5년 기상자료 분석 적설 및 한냉 지역은 다음과 같다.
- 거창, 대관령, 동두천, 보은, 봉화, 북춘천, 속초, 양평, 영월, 의성, 이천, 인제, 장수, 정선, 청송, 충주, 태백, 파주, 홍천 등
- 공시체 공극률은 KS F 2496에 의한 진공밀봉법에 따라 측정한 겉보기 밀도와 KS F 2337에 의한 이론최대밀도 시험방법에 의해 측정하여 계산한다.
- 인장강도비(TSR)은 부속서 배수성 · 저소음 아스팔트 혼합물의 인장강도비 시험방법에 따르며, 1회 동결융해한다.
- 비배수형 저소음포장의 경우 공극률, 실내투수계수 항목은 제외한다.

[표 7] 저소음 아스팔트 바인더 및 혼합물의 생산 시 품질관리 기준

구분	항 목		시험방법	품질기준
생산 온도 (℃)				목표온도 ± 15
흐름손실률 (%)				0.3 이하
개질 아스팔트	소성변형율 (Jnr, kPa-1)		KS F2393, ASTM D7173	0.5 이하
	탄성회복률 (Recovery, %)			55 이상
추출시험 후 시료	아스팔트 함량 (%)		KS F2354, KS F2490	± 0.3
	추출골재 체통과질량 백분율 (%)	4.75 mm 이상	KS F2502	± 5
		2.36 mm		± 4
		0.6 ~ 0.15 mm		± 3
		0.075 mm		± 2
공시체	공극률 (%)		KS F2496, KS F2366, KS F2364	설계 공극률 ± 1
	칸타브로 손실률 (%)	20℃ (60 ℃, 24시간 수침)	KS F 2492	20 이하
		-20 ℃		30 이하
	인장강도비 (TSR)			0.85 이상
	실내투수계수 (cm/sec)		KS F 2594	0.05 이상
	다짐횟수			선회다짐 : 75, 마샬다짐 : 양면 각 50

- 소성변형률 및 탄성회복률 시험은 KS F 2393에 따라 64°C에서 3.2kPa의 하중(응력)으로 시험 하며, ASTM D 7405(Multiple Stress Creep and Recovery, MSCR)에 따라 개질 아스팔트의 소성 변형률 및 탄성회복률을 측정한다. 소성변형률은 반복되는 하중 하에 발생하는 영구변형에 대한 개질 아스팔트 바인더의 저항성 지표로 사용된다. 또한, 탄성회복률을 통해 배수상저소음 아스팔트 혼합물 생산 중 개질제의 적정 사용 함량과 개질 아스팔트의 적정 공용성 등급(PG) 사용을 평가할 수 있다. 생산 중 소성변형률 및 탄성회복률 품질관리 기준은 제품별 설계 PG를 만족시켜야 한다.
- 적설 및 한냉지역은 조기 골재탈리 파손 등을 예방할 수 있는 대책(개질 아스팔트 품질기준 PG 82-34, 소성변형률 0.2 이하, 탄성회복률 80% 이상, 또는 아스팔트 바인더 휨 굴곡 시험(KS F 2491)에 따라 -20°C의 온도를 유지하면서 휨 에너지 400kPa 이상, 휨 스티프니스 100kPa 이하)을 마련하여 시공해야 한다.
- 공시체는 아스팔트 플랜트에서 생산된 아스팔트 혼합물을 목표 다짐온도까지 1시간 이상 가열한 후 제조해야 한다.
- 골재 입도가 배합설계 결과와 동일한지 여부와 골재의 함수율이 3% 이내인지 확인한다.
- 생산온도는 규정된 온도에서 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 넘어서는 안 되고, 골재의 온도는 아스팔트의 주입온도보다 10°C 이상 높아서는 안 된다.
- 혼합물의 생산온도는 시험생산에서 결정된 혼합물 온도의 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 의 범위 내에 있어야 한다.
- 비배수형 저소음포장의 경우 실내투수계수 항목은 제외한다.