

공사차량 조기개통 영향을 고려한 LH형 아스콘포장 단면 도입 연구

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

정종석 · 박용부 · 심영종 · 김경진 · 최민준



연구관리 2024-079호

공사차량 조기개통 영향을 고려한 LH형 아스콘포장 단면 도입 연구

지 은 이 정종석 · 박용부 · 심영종 · 김경진 · 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.

공사차량 조기개통 영향을 고려한 LH형 아스콘포장 단면 도입 연구

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

정종석 · 박용부 · 심영종 · 김경진 · 최민준

참여연구진

연구책임

정종석 LH 토지주택연구원 연구위원

연구진

박용부 LH 토지주택연구원 연구위원

심영종 LH 토지주택연구원 연구위원

김경진 LH 토지주택연구원 연구위원

최민준 LH 스마트건설본부 스마트단지기술처 차장

학술용역 수행기관

명지대학교 산학협력단

김인태 명지대학교 교수(학술용역 책임)

연구심의위원

전주영 LH 토지주택연구원 실장(심의위원장)

박종배 LH 토지주택연구원 단장(심의위원장)

김민준 LH 토지주택연구원 수석연구원

박정수 LH 스마트건설본부 스마트단지기술처 팀장

박찬교 LH 세종특별본부 단지사업처 소장

이수형 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원

박대욱 군산대학교 토목공학과 교수

연구요약 Summary

본 연구는 공사차량의 조기 개통에 따른 포장 파손 및 보수 범위 최소화를 위한 도로 설계 방법 및 시공/ 관리 방안을 포함한 지침을 마련하는 것으로 LH 모든 현장에 지침 적용을 목표로 함.

■ 연구의 필요성

- 대지조성 사업지구내 도로는 비산먼지 방지 목적으로 도로의 중간층 또는 기층 포설 후 공사 차량 개방하여 공사의 마지막 단계에서 파손된 포장 표층을 제거한 후 표층 포설
- 이로 인해 설계단면에 비하여 과도한 공사차량으로 인한 파손 발생후 표층 포설 → 표층 (반사균열), 중간층(피로균열 및 스폴링), 기층(두께 감소) 등 다양한 문제점 발생하여 지자체 인수 거부 및 빈번한 설계 변경 시행
- 현재, 공사용 차량의 조기 개통에 대응하여 현장마다 시공 및 관리 방안을 마련하여 시행하고 있으나, 이는 검증되지 않았기 때문에 포장파손 및 보수 범위 최소화 등을 위한 도로 설계 방법의 마련은 필수적 요소임
- 따라서, 다수의 사업지구내 도로의 빈번한 재시공과 설계변경에 따른 고충 등의 문제가 발생하고 있는 실정이고, 이를 지침화를 하여 LH 모든 현장에 적절한 설계방법 및 관리 방안을 제시하여 문제점 해결 필요

■ 연구의 목적

- 본 연구는 공사차량의 조기 개통에 따른 포장 파손 및 보수 범위 최소화를 위한 최적 설계단면 제시하여, LH 모든 현장에 지침 적용을 목표로 하며 연구내용은 아래와 같음
- 공사차량 조기개통에 따른 하자를 최소화하기 위한 세대수별/누적교통량별 LH형 아스콘포장 설계단면 제시

■ 주요 연구결과

○ 공사차량 산정 방법

- 선행연구의 교통량 산정방법을 이용하여 산출한 누적 공사차량을 산출하여 A 현장조사 및 구조해석을 적용
- 공사차량 산정방법은 [그림 i]에 나타내고 있으며, 현장조사결과 및 구조해석에 타당성을 검증하였다.

< 토사 운반차량 추정 방법 >



단계	내용	세부내용
①	4개 단지의 평균 토공 물량 산출	$\frac{158,000 + 260,000 + 95,599 + 177,155}{4} = 172,685m^3$
②	4개 단지의 평균 면적 산출	$\frac{50,835 + 43,549 + 48,900 + 32,644}{4} = 43,982m^2$

< 레미콘 운반차량 추정 방법 >



단계	내용	세부내용
①	4개 단지의 시멘트 물량을 통한 추정식 도출	$Y = 137.46x + 7904.6$
②	세대수에 필요한 시멘트 물량 산출	Aa-39: $137.46m^3 \times (811) + 7904.6 = 119,385m^3$ Aa-40: $137.46m^3 \times (655) + 7904.6 = 97,941m^3$

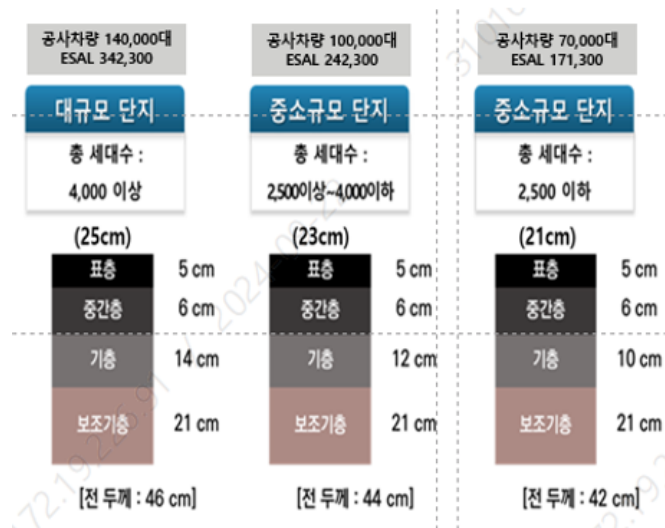
[그림 i] 세대수별/누적 공사차량 규모별 설계단면

○ 현장조사 결과

- P 지구 시험시공 현장 조사 결과, 5cm 절삭 후 표층 5cm를 덧씌운 단면 1, 2, 3은 균열율이 1% 미만으로 안정적이며, 단면 4, 5-1, 5-2는 48개월 이후 다른 단면에 비해 높은 표면 균열율이 발생
- 5-1과 5-2구간은 중간층 포설 후, 공사차량 하중이 재하되고 표층 5cm를 재포설하여 도로를 개통하였으나, 균열율이 최대 7.7%까지 증가하였으며, 동일한 설계 단면임에도 불구하고 약 5%의 균열율 차이가 존재
- 5-2구간은 5-1구간 대비 통행한 공사차량 교통량이 많았기 때문에 균열이 상대적으로 많이 발생한 것으로 판단됨
- A 현장조사 결과 누적교통하중과 균열율 및 코어파손과 밀접한 관계를 보이며, A-1 구간 6,170세대에서 균열율은 51.2%인 반면, A-2 구간 1,200세대는 균열율은 1.3% 정도임
- 따라서, 시험시공 현장 및 A 현장 표면조사 결과를 바탕으로 교통하중별 또는, 세대수 별로 적정 두께로 설계 기준을 제시할 필요가 있음

○ 세대수별/누적 공사차량별 최적 설계단면 제시

- P지구 시험시공 현장 및 A 현장 조사와 구조해석 결과에 따르면, KPRP에서 15년 이상 공용된 설계단면이 조기개통 공사차량 구간의 공용연수 10년 이상을 만족하는 설계단면으로 분석되었음
- 따라서, 설계단면은 조기개통 공사차량을 고려했을 때, Damage 10%이하가 목표이며, 이에 따른 세대수별/누적 공사차량별 설계단면을 [그림 ii]에 나타내었음



[그림 ii] 세대수별/누적 공사차량 규모별 설계단면

○ 표층 미포설 공사차량 조기 개통 설계단면

- 불가피하게 중간층(기층)을 보강(3cm)하여 포설하여 공사차량을 조기에 개통할 경우, 누적 공사차량은 48,000대 이하(ESAL 115,000)일 경우, 유지보수기간 5~7년 기간에 손상된 구간을 절삭하고 표층 5cm를 덧씌우기가 권장됨

○ 하자관리방안

- 도로의 파손은 교통하중과 밀접한 관계가 있기 때문에 하중을 분산시키는 것이 하자를 감소시키는 최적의 방안이며, 현장조사 결과에서도 하중이 중첩·집중되는 경로 및 교차로 부근에서의 균열이 상대적으로 높게 발생하였으며, 요구하는 허용 교통하중(Nf)가 높음.
- 따라서, 공사차량의 주요한 잔·출입로 및 교차로와·공사차량이 중첩이 예상되는 구간 등에 조기개통 공사차량을 효율적으로 분산시킬 방안을 수립하여 시행하는 것이 갖은 파손을 예방하는 효율적인 방안임

■ 개정이 필요한 지침

○ LH 설계지침(토목) - 공사용 가설도로(2024.01.22)

2.5 공사용 가설도로

나. 계획도로 표층이전의 도로를 공사용 가설도로로 이용하려는 경우 표층을 제외한 포장단면이 공사 차량 통행에 견딜수 있도록 반영한다.

- (변경안) 1. 계획도로를 공사용 가설도로로 이용하려는 경우 전단면 시공을 원칙으로 한다.
2. 공사차량 누적교통량이 예측되는 계획도로는 누적 공사차량을 고려하여 아스팔트 기층을 보강한 전단면 시공을 해야한다.
3. 공사차량 누적교통량이 적게 예상되는 계획도로는 표층을 제외한 포장단면이 공사차량 통행에 견딜수 있도록 반영한다.

주제어

조기개통, 공사차량, 도로설계, 구조해석

차 례 Contents

제1장 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 필요성 및 목적	1
1.3 연구 범위 및 절차	2

제2장 문헌고찰

2.1 개 요	5
2.2 관련 연구고찰	5
2.3 선행 연구고찰	10
2.4 소결	14

제3장 현장조사 및 결과분석

3.1 개 요	15
3.2 조사구간	15
3.3 도로포장 표면상태 조사	16
3.4 코어시험	26
3.5 포장상태 평가	29
3.6 소 결	31

제4장 구조해석 및 결과분석

4.1 개 요	33
4.2 공사 물량 기반 공사차량 교통량 추정 방법을 활용한 대수 산출	33
4.3 프로그램을 활용한 구조해석	35
4.4 구조해석 결과	41

제5장 요약 및 결론

5.1 공사차량 산정 방법	43
5.2 현장조사 결과	43
5.3 세대수별/누적 공사차량별 최적 설계단면 제시	44
5.4 하자관리방안	45
5.5 지침 개정	46

참고문헌	47
------	----

표 차례 List of Tables

[표 1.1] 연구 범위별 상세 내용	3
[표 2.1] 트럭하중에 따른 DLT와 ESAL Factor 분류	7
[표 2.2] 시험시공 단면별 구조해석 결과	10
[표 2.3] 차종별 교통량 비율 및 공사차량 비율	12
[표 2.4] 공사차량 추정 방법론을 통한 공사차량 대수 산출 과정	13
[표 2.5] 문헌조사 결과 요약	14
[표 3.1] 아스팔트 포장 표면 결함 종류 및 발생 원인	17
[표 3.2] 단면별 표면 균열을 산출 결과	23
[표 3.3] A 현장 표면 균열을 산출 결과	26
[표 3.4] A 현장 코어 채취 결과	28
[표 3.5] 통행 하중 지표 산출 과정	29
[표 3.6] 현장조사 결과 및 포장품질 유지가능 여부	31
[표 3.7] 교통량에 의한 시험시공 현장 표면 균열을	32
[표 4.1] 공사차량 교통량 추정 방법론 기반 공사차량 대수 산출	34
[표 4.2] 구간별 공사차량 교통량 추정 결과	35
[표 4.3] 포장층별 탄성계수 및 포아송비	36
[표 4.4] 공사차량 추정 교통량에 따른 Damage 산출 결과	37
[표 4.5] KPRP 프로그램 설계 입력변수 설정	38
[표 4.6] 구조해석 결과와 현장조사 결과 비교	41

그림 차례 List of Figures

[그림 2.1] 교통량과 광산 운반도로의 유형에 따른 도로구조설계	6
[그림 2.2] 도로포장 손상 추정치	6
[그림 2.3] 차량 대수에 따른 교통량 분류	8
[그림 2.4] 노면 상태 조사 장비	8
[그림 2.5] 코어 채취 및 상태 평가 모습	9
[그림 2.6] 통행 하중 지표에 따른 표면 균열율(左) 코어 등급(右)	9
[그림 2.7] 시험시공 설계단면	10
[그림 2.8] 실측 교통량과 예측 교통량 비교·분석	12
[그림 2.9] 세대수별 최적 단면 제시(일반 포장)	13
[그림 3.1] 현장조사 항목 및 내용	15
[그림 3.2] 포장단면 구성 및 두께	16
[그림 3.3] (左)균열조사표 및 (右)도로포장 표면상태 조사 모습	17
[그림 3.4] 표면 결함 종류	18
[그림 3.5] 5-1구간 표면상태 모습((左) 소파보수(Patching), (右) 거북등 균열)	20
[그림 3.6] 3구간 표면상태 모습((左) 전반적인 표면 상태, (右) 종방향 균열 모습)	20
[그림 3.7] 1구간 표면상태 모습((左) 전반적인 표면 상태, (右) 종방향 균열 모습)	21
[그림 3.8] 2구간 표면상태 모습((左) 횡방향 및 종방향균열, (右) 포트홀)	21
[그림 3.9] 4구간 표면상태 모습((左) 종방향균열, (右) 횡방향 균열 및 소파보수)	22
[그림 3.10] 5-2구간 표면상태 모습((左) 종방향균열, (右) 거북등 균열)	22
[그림 3.11] A-1 구간 표면상태 모습	24
[그림 3.12] A-2 구간 표면상태 모습	24
[그림 3.13] A-3 구간 표면상태 모습	25
[그림 3.14] A-4 구간 표면상태 모습	25
[그림 3.15] 코어 상태 평가 지표	27
[그림 3.16] 구간별 코어 채취 모습	27
[그림 3.17] 통행 하중 지표에 따른 표면 균열을 비교(A 현장)	30

[그림 4.1] 공사차량 조기개통 포장설계 단면 구조해석 과정	33
[그림 4.2] KENPAVE 프로그램	36
[그림 4.3] KPRP 프로그램 결과	39
[그림 4.4] 절삭 후 덧씌우기시 단면 N_f 와 공사차량 Damage 10% 수준의 ESAL 영향	40
[그림 4.5] A지구 단면의 절삭 후 덧씌우기 후 KPRP 공용 결과	40
[그림 4.6] LH 단지 내 도로 포장 설계 및 적정성 검토 과정	41
[그림 5.1] 공사차량 산정방법	43
[그림 5.2] 세대수별/누적 공사차량 규모별 설계단면	45
[그림 5.3] 하중분산을 위한 공사차량 관리방법	46

제1장 서론

1.1 연구 배경

택지개발지구 및 단지 내 도로포장은 우리나라 국내 환경과 교통 특성을 반영한 한국형 도로포장 설계법을 이용하여 일률적인 포장 두께를 적용하고 있다. 그러나 한국형 도로포장 설계법은 대지조성사업 완료 후 설계공용기간 동안의 장래 추정 교통량만 반영하므로 공사 중 통행하는 중차량에 대한 교통량에 대한 영향을 고려하지 못하고 있는 실정이다.

기존의 LH 도로 포장공사는 비산먼지 방지의 목적으로 도로의 중간층 또는 기층 포설 후, 공사차량을 사전 개방하고 사업 준공 단계에서 표층을 시공하는 단계시공을 적용하고 있으며, 대형 덤프, 백호우 등 고하중의 차량은 포장 손상과 직접적으로 연관되고, 중간층 및 기층이 파손된 후, 표층을 시공하게 되므로 표층의 반사균열, 중간층의 피로균열·스폴링, 기층의 두께 감소 등 다양한 문제 발생의 원인으로 작용된다.

즉, 공사 중 통행하는 중차량의 미고려는 포장단면 두께에 대한 공용수명을 만족하지 못하게 되어 포장수명 단축, 공사 중 하자발생 및 반복적 보수공사로 지자체 인수 거부 등의 문제를 유발시키므로 표층 포설 이전 포장 단면에 재하되는 공사차량이 포장에 미치는 영향을 고려한 설계기준 정립이 필요성이 대두되고 있는 추세이다.

1.2 연구 필요성 및 목적

1차 연구에서 단지 내 도로포장 공사 시, 발생하는 반복적인 파손을 방지하고자 표층 포설 이전 포장단면에 재하되는 공사차량이 구조적으로 미치는 영향을 고려한 설계 기준 정립을 위한 연구를 진행하였으며, 단지 규모별 적정 및 최적 설계 단면을 제시하여 실제 택지개발지구 조성 사업을 실시하고 있는 단지를 대상으로 시험시공을 수행하였다. 또한, 현장 모니터링을 통해 포장체에 가해지는 온도·습도·장래교통량과 같은 현장 환경 조건에서의 공용성을 평가하여 LH형 도로포장 설계법의 적용 가능성을 검증하였다.

그러나 시공 직후 6개월에 대한 초기 공용성능에 대한 검증일뿐이며, 도로 개통 이후 통행한 공사차량 및 발생교통량이 포장체에 구조적으로 미친 영향을 평가하기에는 부족하다. 도로포장의 공용성능은 일정 공용기간 이후 포장체의 구조적 지지력과 표면상태 변동성 조사를 통한 정량적 분석이 수반되어야 적정성 평가의 근간이 될 수 있다.

따라서 LH형 도로설계법을 적용한 시험시공 구간을 대상으로 공용 4년 이후의 모니터링 조사를 수행하여 설계 단면의 적정성을 평가함으로써 적용 가능성을 검증하는 것을 목적으로 하며, 기존의 설계기준을 적용한 타 사업지구 내 도로포장 상태와 비교를 통해 도입 가능성을 검토한다. 이를 통해, 공사차량 조기개통으로 인해 발생하는 원인을 분석하여 문제점이 보완된 최종 단면두께를 도출하며, LH 공사현장에 적용할 수 있는 종합적인 공사차량 조기개통 도로설계 단면 및 관리 지침을 개발하고자 한다.

1.3 연구 범위 및 절차

본 연구는 현장 시험시공 구간을 대상으로 모니터링을 실시하여 선행연구에서 제시한 설계단면 두께의 적정성을 평가하는 것이 목적이다. 따라서, 선행연구에서 진행한 모니터링 구간과 동일해야하므로 P 지구 시험시공현장 2-1, 2-2 공구 내 공사차량 주요 통행 경로 포장을 대상으로 현장조사를 실시하며, 설계단면 두께의 적정성을 평가하기 위해 기존에 일반적으로 적용되고 있는 단지 내 도로를 추가로 선정하였다. 연구항목, 수행방법, 결과물 등 연구범위의 상세내용은 [표 1.1]과 같다.

[표 1.1] 연구 범위별 상세 내용

연구항목		수행목적	수행방법	결과물
사례 조사	• 시험시공 현장 정밀 분석	• 단면별 주요 파손 현황 및 원인 정밀 조사 • 타 현장 사례조사	• 현장 방문 조사	• 조기개통 설계단면별 적용 적합성 분석 • 시공/운영 문제점 조사
설계 단면 검토	• 공사차량 및 단지 규모별 구조해석 • 시공/운영 등 문제점 분석	• 시험시공 보완 설계단면 적정성 검토 • 시공/운영 등 문제점 해결 방안 모색	• 구조해석(외부위탁) • 현장조사 비교 분석 및 전문가 자문	• 지침개발 기초자료
• 지침마련		• 설계단면 및 단계별 시공 지침 마련	• 내외부 전문가 자문 • 실용화 협의회 개최	• 공사차량 조기개통 도로설계 및 시공 방법 지침 마련

본 연구는 선행연구로 수행한 “공사차량 조기개통에 따른 LH 도로설계법 개발을 위한 공용성 조사 및 구조해석(2000)”, “공사차량 조기개통 영향을 고려한 LH 도로 포장 단면 검증 연구(2021)”를 바탕으로 연구방법론을 정립하였으며, 원활한 목적 달성과 연구내용의 적절성을 확보하기 위해 앞서 선정한 연구범위를 바탕으로 연구절차를 수립하였다.

우선, 선행연구에서 개발한 LH형 도로설계법의 설계단면의 적합성을 검토하기 위해 시험시공 구간에서 현장조사를 수행하였으며, 도로 표면상태·코어시험을 실시하였고, 시공 직후 모니터링 결과와 비교함으로써 파손의 변화 양상을 살펴보았다. 또한, 일반적으로 사용되고 있는 기존의 설계단면을 적용하고 단지 규모가 유사한 타 사업지구 내 공용 중인 도로를 선정하여 동일한 지표에 대해 현장조사를 수행함으로써 두께 변화에 따른 결과를 비교하였다.

두 번째로 선행연구에서 제시한 공사차량 교통량 추정 방법론을 바탕으로 공사차량 교통량을 산출하고 공용 중인 도로임을 고려하여 장래교통량 적용한 설계AADT를 산정함으로써 구조해석을 수행한다. 이를 통해 산출된 Damage와 현장조사 결과를 비교하여 설계단면의 적용 가능성을 평가함으로써 보완된 최적 설계단면을 제시하고자 한다.

제2장 문헌고찰

2.1 개요

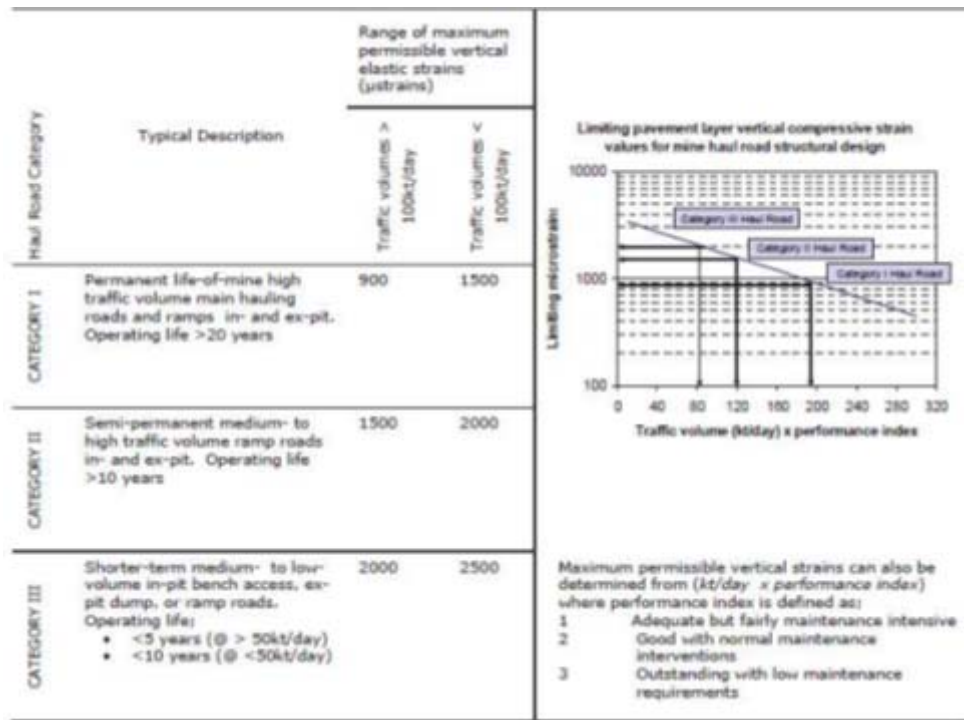
공사차량은 고하중으로 도로포장 파손에 직접적으로 영향을 미치므로 차량의 특성과 관련된 하중 축과 차량 중량을 고려할 필요가 있다. 따라서, 국내외 공사차량 통행을 고려한 포장설계를 수행한 관련 연구를 조사하였으며, 설계 단면의 적정성을 평가하기 위해 포장상태 평가에 대한 문헌을 고찰하였다.

또한, 앞서 수행한 선행연구 결과를 검토하고 수행할 연구의 방향 및 보완사항을 검토하고자 한다.

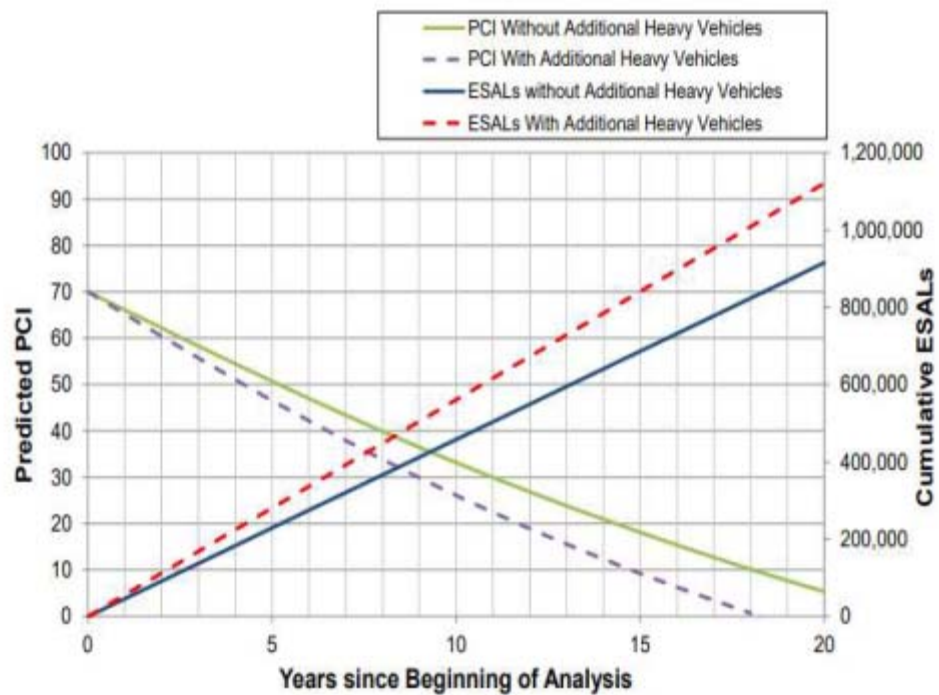
2.2 관련 연구고찰

RJ Thompson(2010)는 중차량이 많은 미국 광산 운반도로의 설계방안 및 적정 포장두께를 제시하였다. 광산 운반도로는 중차량의 교통량이 지역별·지점별로 상이하므로 교통량을 예측하여 포장설계에 반영하는 것은 한계가 존재하므로 일정 동안 측정한 경험적인 데이터로 추정할 필요가 있다. 따라서, 교통량의 범위를 상·중·하 3개로 분류하여 통행하는 일일 교통량과 공용연수에 따른 도로포장 최적 두께를 제시하였다.

W.James Wilde(2014)는 지방 관공서에서 실시하는 도로포장에 대해 중차량의 영향을 고려하여 포장 예상수명에 따른 공용수명 비율의 추정치를 예측하였으며, 새로운 산업시설 등의 변화는 포장 구조 설계 당시 예상되는 교통량보다 중차량의 통행이 많이 발생하므로 설계수명보다 파손이 빠르게 진행된다. 따라서 단일 도로 구간 또는 전체 도로 네트워크를 분석하여 공용연수 동안 예상하지 못한 차량이 통행할 수 있는 비율과 추가 교통량에 따른 도로포장 손상 추정치를 제시하였다. PCI에서 추가 중차량을 고려할 경우, 더 빠른 파손이 발생하며 예상 교통량과 예상하지 못한 교통량을 합하여 ESAL을 산정하였다.



[그림 2.1] 교통량과 광산 운반도로의 유형에 따른 도로구조설계



[그림 2.2] 도로포장 손상 추정치

Wisconsin department of transportation에서는 공사차량의 운반을 고려한 최적 포장 두께재료 및 설계방안을 제시하고 있다. 최적 포장 두께를 설정하기 위해서는 교통량 정보가 필요하며 현재 연평균 AADT, 건설연도의 AADT, 설계연도의 AADT를 모두 고려한다. 또한, AADT 안에서도 고하중의 트럭을 하중에 따라 분류하여 지점의 설계차선 교통량(Design lane Traffic, DLT)과 ESAL Factor를 결정하며, DLT는 건설년도 AADT와 설계년도 AADT의 평균에 방향 요인(Direction Factor, DF)과 차선 분포계수(Lane of multi-lane highway, LDT)를 곱한 값과 같다.

[표 2.1] 트럭하중에 따른 DLT와 ESAL Factor 분류

Truck Classification		
Heavy Single unit trucks 2 Axles, 6 Tires 3 Axles	Designation 2D 3SU	
Tractor-Semitrailer 3 or 4 axles 5 Axles and Above	Designation 2S-1, 2S-2 3S-2	
Tractor-Semitrailer-Trailer 5 Axles and Above Double Bottom	Designation 2-S1-2	
ESAL factors		
Truck Type	Flexible	Rigid
2D	0.3	0.3
3SU	0.8	1.2
2-S1, 2-S2	0.5	0.6
3-S2 & Above	0.9	1.6
Double Bottom	2.0	2.1

ASPHALT PAVEMENT DESIGN GUIDE에서는 산업용 진입로와 차량용 주차장 설계 및 사공에 대한 방법이 제시되었으며, 중차량의 통행이 많으므로 교통량과 배수의 고려가 필요하다고 강조하였다. 교통량 분석을 통해 적절한 포장 두께를 결정하며, 물이 포장에 침투되지 않도록 적절한 배수 시스템을 설계해야 한다. 교통량은 승용차 및 중차량 대수에 따라 4가지로 분류되며, 설계에 적합한 구간을 제시하고 있다.

Class 1 (≤ 50 cars/day)	Class 2 (≤ 5 trucks/day)	Class 3 (≤ 65 trucks/day)	Class 4 (≤ 200 trucks/day)
<ul style="list-style-type: none"> • Driveways • Play areas • Parking lots (≤ 50 stalls) • Seasonal recreation roads 	<ul style="list-style-type: none"> • Residential streets • Parking lots (> 50 stalls) 	<ul style="list-style-type: none"> • Collector streets • Industrial lots and truck stalls • Bus driveways and loading zones 	<ul style="list-style-type: none"> • Major arterial streets • Local business streets • Local industrial streets • Major service drives or entrances

[그림 2.3] 차량 대수에 따른 교통량 분류

Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013)에 의해 도로 파손은 환경적인 특성(지반의 특성, 기온 변화, 강우량 등)과 교통 특성(교통량, 중차량 구성비 등)에 따라 매우 다양하게 발생한다. 따라서 스케치 방법 또는 자동포장 상태 조사 장비를 이용하여 노면 조사를 수행함으로써 포장의 파손 상황(유형, 정도, 파손율 등), 파손원인을 파악한다.



[그림 2.4] 노면 상태 조사 장비

Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2021)에 의하면 포장층 접착도는 여러 층을 포장한 후에 코어를 채취할 때 코어채취 시에 접합된 면이 떨어지거나 손으로 잡아당겨서 떨어지지 않는지 검토하여야 한다. 또한, 코어의 다짐 두께가 설계두께보다 10% 이상 초과하거나 5% 이상 부족하면 안되며, 조기 파손이 발생할 경우 현장조사와 시험을 통해 파손원인을 규명할 필요가 있다.

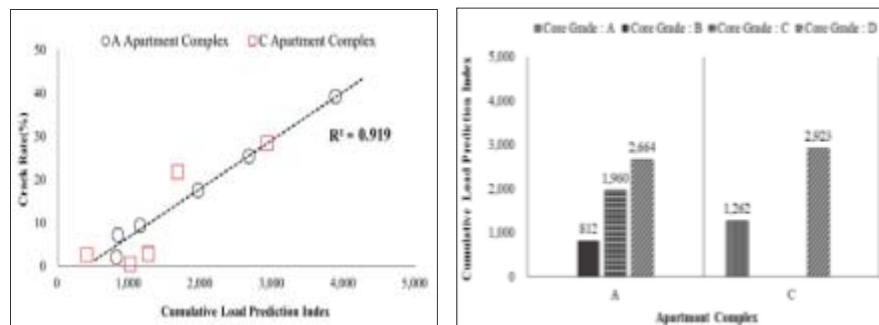
Beak et al.(2021)은 제주도 지역 특성을 고려하여 환경, 교통, 재료 등에 적합한 제주형 도로포장 설계법을 개발하였으며, 현장시공 후 파손구간에 대한 코어채취 및 포장지지력 현장조사를 통해 적정성을 검증하였다. 구간별로 건전구간과 손상 구간으로 구분하여 코어를 채취하였으며, 포장층별 두께를 확인하고, 균열 진전

깊이와 기층부 및 하부층 손상 여부를 통해 코어 상태를 평가하였다. 코어에 나타난 균열 진전 깊이는 채취한 코어의 층 분리 유무로 판단한다.



[그림 2.5] 코어 채취 및 상태 평가 모습

Jung et al.(2019)은 단지 내 도로포장 공사 시, 공사차량 교통량을 고려한 설계를 실시하기 위해 공사차량 대수를 추정할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 단지 내 공구별 세대수를 활용하여 공사차량 주요 통행경로에 재하되는 누적하중 정도를 예측하였다. 또한, 표면상태, 코어, FWD 조사 결과와 통행 하중 지표를 매칭하여 가정에 대한 검증을 실시하였다.



[그림 2.6] 통행 하중 지표에 따른 표면 균열율(좌) 코어 등급(우)

Park et al.(2021)은 공사차량을 고려한 도로포장 설계 단면을 실제 공사현장에 시험시공하여 단면별로 공용성을 분석하였으며, 경험적 데이터로 제시된 공사차량 대수 추정 방법론을 검증하기 위해 실제 투입된 토공 및 레미콘 물량 데이터 확보함으로써 추정치와 실측치를 비교하였다. 또한, 구조해석 결과 Damage가 20%보다 높으면 공사차량 통행에 의한 파손이 발생할 우려가 있음을 제시하였고, 공사차량 교통량의 추정치가 실측치보다 5% 과소산정되었으므로 15% 이하가 되도록 단면을 설계할 필요가 있다.

[표 2.2] 시험시공 단면별 구조해석 결과

Section	Thickness(cm)	Nf	Estimation of construction vehicles	ESAL of Construction Vehicles	Damage (%)
A	40	1,159,246	216,130	518,712	53
B	46	3,425,321			15
C	44	2,424,736			21
D	42	1,712,024			30

2.3 선행 연구고찰

선행연구에서 시험시공 단면(5개 단면, 총 2.145km)에 대한 약 6개월간의 단기 모니터링을 실시하고 기존 설계 단면 대비 처짐량, 표면 상태, 층 유분리 등을 평가하였다. [그림 2.7]은 시험시공 설계 단면을 보여준다.

단면	5-1	3	1
포장 구성 및 두께	<div> <div>표층</div> <div>중간층</div> <div>보조기층</div> <div>보조기층</div> </div> <div> 9cm 10cm 21cm </div> <div>전 두께 : 40cm</div>	<div> <div>표층</div> <div>중간층</div> <div>보조기층</div> <div>보조기층</div> </div> <div> 5cm 6cm 14cm 21cm </div> <div>전 두께 : 46cm</div>	<div> <div>표층</div> <div>중간층</div> <div>보조기층</div> <div>보조기층</div> </div> <div> 5cm 6cm 12cm 21cm </div> <div>전 두께 : 44cm</div>
단면	2	4(표층 후 시공)	5-2(U-Turn구간)
포장 구성 및 두께	<div> <div>표층</div> <div>중간층</div> <div>보조기층</div> <div>보조기층</div> </div> <div> 5cm 6cm 10cm 21cm </div> <div>전 두께 : 42cm</div>	<div> <div>표층</div> <div>중간층</div> <div>기층</div> <div>보조기층</div> </div> <div> 5cm 6cm 10cm 21cm </div> <div>전 두께 : 42cm</div>	<div> <div>중간층</div> <div>보조기층</div> <div>보조기층</div> </div> <div> 9cm 10cm 21cm </div> <div>전 두께 : 40cm</div>

[그림 2.7] 시험시공 설계단면

시험시공은 2020년 6월부터 7월까지 진행되었으며, 모니터링은 시험시공 후 6개월 동안 진행되었다.

단면 1(표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 12cm)은 단면 3보다 기층의 두께가 2cm 정도 적으며 개통 후 교차로 형태로 신호가 운영되었으며, 교통량 조사 결과 단지 내 공사를 위한 공사차량의 통행이 시작되어 일반차량의 주행은 거의 없었다. 개통 후 6개월 동안 실시된 포장 표면상태 균열율은 0%로 산출되었다.

단면 2(표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm)는 육안조사 결과, 균열이나 파손은 없으나 표면 박리나 골재 까짐현상이 많이 조사되었다.

단면 3(표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 14cm + 보조 21cm)은 개통 후 공사차량의 주요 통행로 였다. 6개월 동안 표면상태 조사결과, 선형, 면적 균열율 및 종합 균열율은 모두 0%로 산출되었다

단면 4(표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm)는 중간층 포설 후, 공사차량을 개통하였으며 7월 이후 표층 시공을 완료하였다. 포장 표면에 균열, 파손은 없으나 고온에 의해 골재와 아스콘사이 친화력 감소상태에서 포장 표면에 재하된 차량 바퀴에 의한 패임 혹은 까짐 수준의 파손으로 판단된다.

단면 5-1은 포장 단면의 시작 지점으로 전체 두께 40cm(중간층 9cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm)로 시공되었다. 개통 후 6개월 동안의 표면상태 조사 결과, 선형, 면적 균열율과 종합 균열율은 모두 0%로 산출되었다.

시험 포장 가장 끝 지점에 위치한 단면 5-2 구간은 전두께 40cm(중간층 9cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm)로 시공되었으며 폭우 및 코로나19로 인해 시공상 연기로 차단되어 공사차량의 통행이 상대적으로 적은 특징이 존재한다.

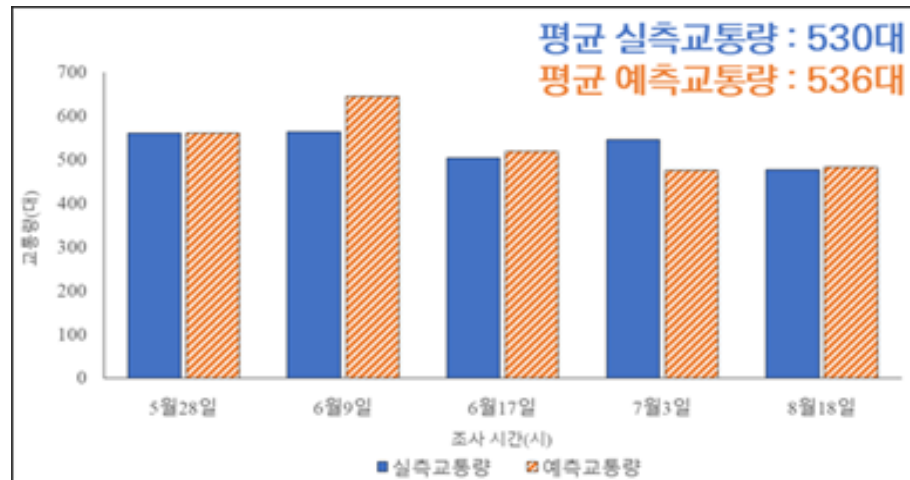
교통량 조사는 비디오 비디오 촬영을 이용한 수동식 방식을 통하여 3개 지점에서, 사전조사 1회(3월 6일), 개통 전 1회(5월 12일)를 포함하여 총 18회 실시하였다. [표 2.3]에서 보는 바와 같이 공사 차량은 주로 4종(12.1%), 5종(43.7%), 6종(42.2%)으로 대부분 레미콘 및 덤프트럭 등이었다. 또, 아파트 세대별 콘크리트 및 토공 물량을 산출하여 공사기간 동안의 총 공사 차량을 추정하였다.

교통량 조사 결과, 총 11,000 대의 교통량이 발생하였으며 전체 교통량 대비 공사 차량 교통량의 비율은 약 46.5 %, 이중 공사차량은 12종 차종 분류 체계 중 5종·6종 차종이 총 공사차량 교통량의 85 % 이상의 비중을 차지하는 것으로 조사되었다.

[표 2.3] 차종별 교통량 비율 및 공사차량 비율

분류	차종(대)											
	1종	2종	3종	4종	5종	6종	7종	8종	9종	10종	11종	12종
교통량	4,499	156	1,302	630	2,266	2,188	80	2	0	17	0	0
전체 비율	40.4 %	1.4 %	11.6 %	5.6 %	20.3 %	19.6 %	0.7 %	0.01 %	0 %	0.1 %	0 %	0 %
공사차량 비율	-	-	-	12.1 %	43.7 %	42.2 %	1.5 %	0.03 %	0 %	0.3 %	0 %	0 %

공사차량 조사일자별 평균 실측교통량과 예측교통량은 각각 530대, 536대로 6대의 오차가 발생하였으며, 예측교통량의 1.1%의 해당하는 값이므로 상당히 근소한 차이로 판단된다(그림 2.8).



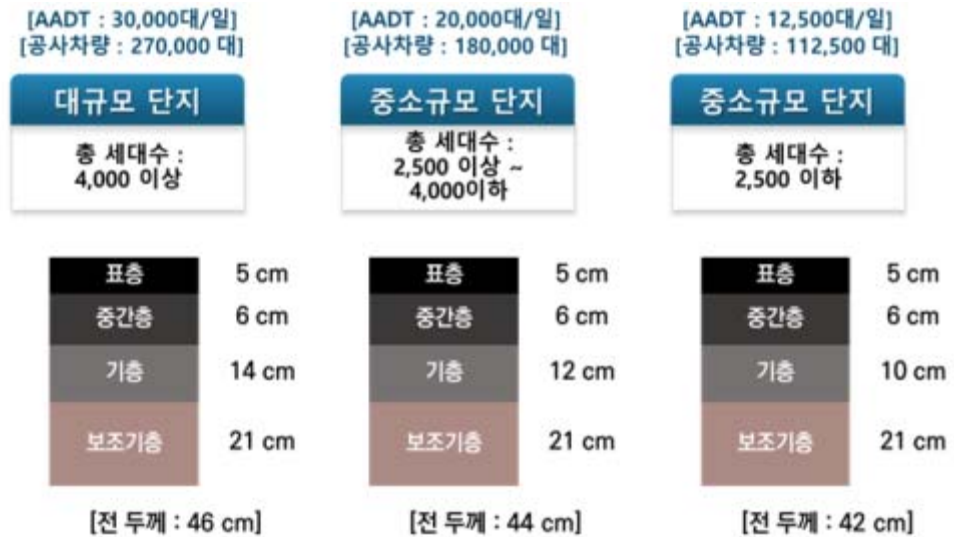
[그림 2.8] 실측 교통량과 예측 교통량 비교·분석

공사차량 조사결과와 교통량 추정 방법론을 비교·검토하여 신뢰성을 검증하였으며, 공사차량 추정 방법론을 통한 공사차량 산출과정은 [표 2.4]와 같다.

[표 2.4] 공사차량 추정 방법론을 통한 공사차량 대수 산출 과정

구분	단계	내용	세부내용	
토공	①	4개 단지의 평균 토공 물량 산출	$\frac{158,000 + 260,000 + 95,599 + 177,155}{4} = 172,685\text{m}^3$	
레미콘	①	세대수에 따른 레미콘 물량 추정식	$Y = 137.46 \times x + 7904.6$	
	②	세대수에 필요한 레미콘 물량 산출	Aa-39	$137.46\text{m}^3 \times 811\text{세대} + 7904.6 = 119,385\text{m}^3$
			Aa-40	$137.46\text{m}^3 \times 655\text{세대} + 7904.6 = 97,941\text{m}^3$

KENPAVE, KPRP 프로그램 및 AASHTO 설계법을 활용한 구조해석 결과, 공사차량을 포함할 경우에 포장의 기대수명은 약 2년 감소하므로 이를 바탕으로 피로 균열 20% 이하, 목표 공용수명 10년을 만족하는 세대 규모별 최종 단면을 [그림 2.9]와 같이 제시하였다.



[그림 2.9] 세대수별 최적 단면 제시(일반 포장)

2.4 소결

문헌조사 결과, 국내·외 공사차량을 고려한 포장 두께 설계법 개발이 일부 진행되었으나 단지 내 도로포장 공사 중 공사차량 조기개통을 고려할 수 있는 방안에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 선행연구에서 공사차량 교통량 추정 방법론을 개발하였으며, 재하되는 하중을 반영한 최적 단면 두께를 제시하여 시험시공을 진행하였으나, 완전한 연구결과를 도출하기에는 한계가 존재하였다. 짧은 6개월 모니터링 결과는 단면과 상관없이 균열율이 0%였다.

따라서, 공사차량 교통량을 고려한 설계 단면에 대해 공사차량 및 일반 교통량 통행에 따른 공용성을 분석 및 현장평가를 통하여 설계단면을 검증한 후에 현장 적용에 대한 적정성을 검토할 필요가 있다.

[표 2.5] 문헌조사 결과 요약

연번	선행연구	연구기관	주요 연구내용	시사점
[1]	Mine Haul Road Design&Construction	PrEng MIEAust (2010)	미국 광산 운반 도로 설계시 중차량을 고려한 적정포장 두께 제시	차량 조기개통 시 도로파손 방지를 위한 설계법 개발
[2]	Assessing the Effects of heavy vehicles on local roadway	W.James Wilde (2014)	산업시설 포장 구조 설계 시, 중차량 영향을 고려한 포장 예상수명에 따른 공용수명 비율 추정	추가 통행 중차량 영향을 고려할 시, 파손 진행속도 증가
[3]	Facilities Development Manual	Wisconsin Department of Transportation	공사차량 운반을 고려한 최적 포장두께 설계방안 및 교통량과 하중 축을 고려한 포장층별 설계법 제시	교통량, 하중 축 외 골재입도를 고려한 보조기층 두께 적정성 판단
[4]	제주도 지역특성을 고려한 도로포장 성능 개선 연구	Korea Institute of Construction Technology (2021)	제주지역 특성을 반영한 도로포장 설계법 개발 및 현장시험을 통한 적정성 평가	현무암 골재 물성 평가 및 코어 분석을 통한 설계법 검증
[5]	단지 내 도로포장설계를 위한 공사차량 대수 추정 방법론 개발 기초연구	Jung et al (2019)	공사차량을 고려한 포장설계법 개발을 위해 공사차량 교통량 추정 방법론 개발 및 현장시험을 통한 검증	세대수 기반 공사차량 교통량을 추정하였으나 차로 수 및 차로 폭 등의 요인 미고려
[6]	공사차량을 고려한 단지 내 도로포장의 구조성능 비교평가 연구	Park et al (2021)	공사차량 교통량을 반영한 설계 단면의 시험시공 및 구조해석을 통한 공용성 분석	공사차량 물량 기반 교통량 추정치 및 실측치 비교를 통한 방법론 검증과 안정성 향상을 위한 구조해석 damage 15% 이하 설계 제시

제3장 현장조사 및 결과분석

3.1 개요

시험구간에 시공한 5개 단면(6구간)에 대한 현장 적용성 모니터링을 위해 도로포장 표면상태 조사를 수행하였으며, 현재 일반적으로 준용되고 있는 단지 내 도로포장 설계기준을 적용한 타 사업지구를 추가로 선정하여 비교·분석함으로써 적정성을 검토하였다.



[그림 3.1] 현장조사 항목 및 내용

3.2 조사구간

3.2.1 현장 시험시공 구간

P현장 시험시공 현장을 대상으로 6개 구간(연장 2,145km)에 대해 선행연구(1차)로 도출된 공사차량 교통량을 고려한 단지 내 도로 설계단면 두께를 반영하여 시험 시공하였다.

시험 구간의 도로는 5개의 설계 단면으로 시공되었으며, 단면 1, 2, 3는 기존 단면에서 5cm 절삭하고 표층을 덧씌우기를 하였으며, 단면 4는 기존 단면을 그대로 이용하였으며, 단면 5-1, 5-2는 5cm 절삭하고 중간층 3cm를 시공하여 교통을 개방하였다.

그러나, 2021년말 저소음포장 5cm를 시험사공 단면 위에 포설하여 시험사공 현장은 훼손되었다. 따라서, 현장 조사는 한계점이 있을 것으로 판단되어 추가로 공사차량 조기 개통 현장 조사가 필요하다고 판단되었다.

단면	5-1	3	1
포장 구성 및 두께	<div> <div>중간층 9cm</div> <div>보조기층 10cm</div> <div>보조기층 21cm</div> </div> <div>전 두께 : 40cm</div>	<div> <div>표층 5cm</div> <div>중간층 6cm</div> <div>보조기층 14cm</div> <div>보조기층 21cm</div> </div> <div>전 두께 : 46cm</div>	<div> <div>표층 5cm</div> <div>중간층 6cm</div> <div>보조기층 12cm</div> <div>보조기층 21cm</div> </div> <div>전 두께 : 44cm</div>
단면	2	4(표층 후 시공)	5-2(U-Turn구간)
포장 구성 및 두께	<div> <div>표층 5cm</div> <div>중간층 6cm</div> <div>보조기층 10cm</div> <div>보조기층 21cm</div> </div> <div>전 두께 : 42cm</div>	<div> <div>표층 5cm</div> <div>중간층 6cm</div> <div>기층 10cm</div> <div>보조기층 21cm</div> </div> <div>전 두께 : 42cm</div>	<div> <div>중간층 9cm</div> <div>보조기층 10cm</div> <div>보조기층 21cm</div> </div> <div>전 두께 : 40cm</div>

[그림 3.2] 포장단면 구성 및 두께

3.2.2 추가 조사구간(A현장)

설계단면 두께의 적정성 평가를 위해 현재 준용되고 있는 기존 포장 설계법을 반영한 A 현장 단지 내 도로를 대상으로 추가 조사를 실시하였다. 해당 현장의 단면은 표층 5cm, 중간층 6cm, 기층 10cm, 보조기층 21cm로 설계되었으며, 포설 후 72개월간 공사차량 및 일반 교통량이 통행하였다.

3.3 도로포장 표면상태 조사

3.3.1 표면조사 방법

본 연구에서는 인력에 의한 육안조사와 카메라 촬영을 통해 도로포장 표면 상태를 기록하였다. 현장 여건상 모든 구간을 촬영하기에는 시간적 한계가 있어, 중요한 구간을 우선적으로 촬영하였고, 특이사항이 있는 경우 조사자가 표면 상태를 기록하였다.

도로포장은 교통의 반복하중을 포함한 노상토의 지지력 및 포장 두께 부족 등 다양한 원인에 의해 노면결함이 발생하여 파손으로 연결되며, 형태와 심각도가 상이하다.

아스팔트 포장 표면에서 발생하는 결함의 종류와 주요 원인은 표 3.1과 같다.

3.3.2 표면상태 조사 결과 및 분석

포장 표면상태 조사는 육안조사를 통해 포장에 발생한 결함량을 파악하며, PMS(Pavement Management System; 포장관리시스템)에서는 표면결함과 소성 변형, 종단평탄성으로 구분하여 포장결함을 관리하고 있다(최병국, 2012). 따라서 본 연구에서도 이를 활용하여 종·횡방향 균열, 거북등 균열, 소파보수, 포트홀에 대한 파손을 중심으로 결함 정도를 조사하였으며, 균열율을 산출함으로써 표면상태를 평가하였다.



[그림 3.4] 표면 결함 종류

조사된 표면결함 자료는 도로의 포장 면적에 대한 균열면적의 정도를 나타내는 균열율(%)로 표현할 수 있다(배윤신, 2011). 따라서 해당 Section 길이 대비 발생한 종방향 균열의 길이 비율을 나타낸 선형 균열율로 표면결함 정도를 나타냈으며, 산정식은 식(1)과 같다.

$$\text{선형 균열율 (\%)} = \frac{\sum \text{종방향 균열 발생량 (m)}}{\text{Section 길이 (m)}} \times 100 \quad \text{식(1)}$$

또한 해당 Section 면적 대비 발생한 거북등 균열과 포트홀, 패칭의 면적을 합하여 면적 균열율을 산정하였으며, 식(2)를 통해 산출하였다.

$$\text{면적균열율}(\%) = \frac{\text{거북등균열}(m^2) + \text{포트홀}(m^2) + \text{패칭}(m^2)}{\text{차로폭}(m) \times \text{Section길이}(m)} \quad \text{식(2)}$$

PMS 운영기관에서는 단위면적에 발생한 표면 결함을 정량화하여 균열율을 산출하고 있으며, 식(3)과 같이 종방향 균열 발생 연장에 30cm 폭을 적용하여 면적단위로 계산한다. 본 연구에서도 이와 같은 방법을 적용하여 포장 표면에 발생한 종합 균열율을 산출하였다.

$$\text{총균열율}(\%) = \frac{\sum \text{면적결함발생량}(m^2) + \sum (\text{선형결함발생량}(m) \times 0.3(m))}{\text{차로폭}(m) \times \text{Section길이}(m)} \times 100 \quad \text{식(3)}$$

포장 표면 결함 분석 시, 맨홀이나 방지턱 등의 환경적으로 영향을 주는 부분에서 발생한 파손은 제외하고 산정하였으며 다차로인 경우, 공사차량의 주 통행 차로에 대해 결함 정도를 계산하였다.

시험시공 구간의 경우, 표층까지 포설한 후 공사차량을 개방한 1, 2, 3 구간에서는 선형 균열만 발생하였으며, 면적 균열은 나타나지 않았고 전반적으로 포장상태가 좋은 것으로 조사되었다. 그러나 중간층 포설 후, 공사차량을 개통한 단면 4와 5-1, 5-2 구간에서는 선형균열과 면적 균열이 발생하였으며, 일부 소파보수를 실시한 구간도 존재하였다.

3.3.2.1 시험시공현장 표면상태 조사 결과 및 분석

① 5-1구간

5-1구간은 중간층 포설 후, 공사차량을 개방한 구간으로 중간층 9cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm로 설계되었다. 해당 구간은 편도 5차로이나 2차로는 버스 전용차로로 운영되고 있었다. 일부구간에 종방향 균열이 발생하였으며, 교차로 진입 전 신호등 부근에서 4차로에 걸쳐 소파보수를 진행한 것으로 조사되었다. 이는 신호에 의한 정차 또는 가감속의 영향으로 하중이 가중되어 발생한 것으로 판단되며, 직진 교통량이 비교적 많을 것으로 예상되는 4차로에서 약간의 거북등 균열이 조사되었다.



[그림 3.5] 5-1구간 표면상태 모습((左) 소파보수(Patching), (右) 거북등 균열)

② 3구간

3구간은 3차로로 운영되고 있었고, 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 14cm + 보조기층 21cm로 설계되었으며, 공사차량 개방 후 표층을 절삭하고 5cm 재포설 하였다. 다른 구간 대비 비교적 표면에 파손이 발생하지 않았으며, 횡단보도 부근에 약 9m 정도의 종방향균열이 조사되었다.



[그림 3.6] 3구간 표면상태 모습((左) 전반적인 표면 상태, (右) 종방향 균열 모습)

③ 1구간

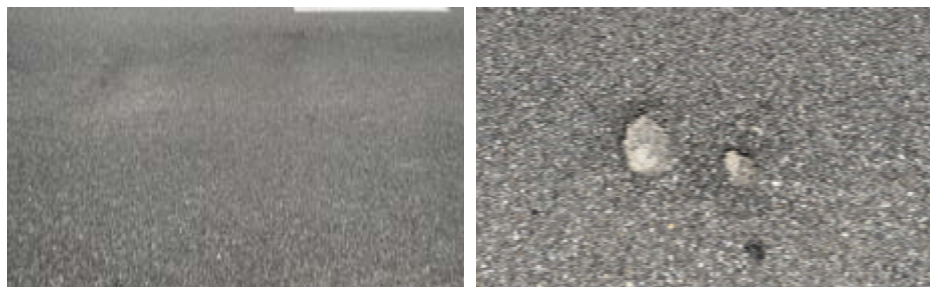
1구간은 4차로(1차로는 24시간 버스전용차로)로 운영되고 있었고, 3구간과 동일하게 표층까지 시공하고 공사차량을 개방하였다. 단면은 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 12cm + 보조기층 21cm로 설계되었다. 3구간 대비 좌측 Wheel-pass에 대해 종방향균열이 다소 발생하였으나 구조적 손상을 야기하거나 심각한 수준의 파손은 조사되지 않았다.



[그림 3.7] 1구간 표면상태 모습((左) 전반적인 표면 상태, (右) 종방향 균열 모습)

④ 2구간

2구간은 3차로로 다른 구간과 달리 교차로 또는 정류장이 없는 연속류로 운영되고 있었다. 포장 단면은 1, 3구간과 동일하게 표층까지 시공하여 공사차량 통행을 개방하였다. 단면은 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm로 설계되었다. 도로 표면상태 조사 결과, 2개의 포트홀과 짧은 길이의 횡방향 및 종방향균열이 발생하였으나, 이를 제외하고 파손이 발견되지 않았다. 이는 신호대기 또는 교차로 진입 등 정차와 가감속하는 구간 없이 차량 통행이 이루어지므로 정적 하중이 발생하여 하중 재하가 가중되지 않아 파손이 타구간 대비 현저히 적게 나타난 것으로 판단된다.



[그림 3.8] 2구간 표면상태 모습((左) 횡방향 및 종방향균열, (右) 포트홀)

⑤ 4구간

4구간은 5차로 중 2차로가 버스전용차로로 운영되고 있었으며, 기존에 적용되고 있는 도로포장 두께와 동일한 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm로 설계되었다. 표면의 골재 탈리 현상이 조사되었으며, 3차로에서 종방향 및 횡방향 균열과 가로 20m × 세로 15m 크기의 소파보수를 실시하였다.



[그림 3.9] 4구간 표면상태 모습((左) 종방향균열, (右) 횡방향 균열 및 소파보수)

⑥ 5-2구간

5-2구간은 5-1구간과 동일한 단면으로 중간층 9cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm로 설계되었으며, 공사차량 개통 후 표층 5cm를 포설하였다.

표면에서 골재 탈리와 우측 Wheel-pass를 중심으로 종방향 균열이 나타났으며, 특히, 2차로에서 다량의 종방향 균열과 다소 넓은 면적의 거북등 균열이 발생한 것으로 조사되었다.



[그림 3.10] 5-2구간 표면상태 모습((左) 종방향균열, (右) 거북등 균열)

표면상태 조사 결과를 바탕으로 선형, 면적, 종합 균열율을 산출하였으며, 표층까지 포설하고 공사차량을 개방한 1, 2, 3구간에서의 균열율은 1% 미만으로 나타났다. 이는 공용 4년임에도 포장상태가 신설과 동일한 수준으로 포장상태가 매우 좋은 것으로 판단되며, 대로와 인접한 교차로가 있는 1구간에서 상대적으로 균열율이 높게 나타났다.

구간은 일반적으로 적용되고 있는 기존 설계두께로 균열율이 7.57%로 다른 구간 대비 높게 나타났으며, 공사차량 개방 이후 절삭 없이 표층을 포설하여 중간층에

발생한 반사균열로 작용됨에 따라 조기파손으로 연결된 것으로 보여 진다.(배운신 외, 2012).

5-1과 5-2구간은 중간층 포설 후, 공사차량 하중이 재하되고 표층 5cm를 재포설 하여 도로를 개통하였으나, 균열율이 최대 7.7%까지 증가하였으며, 동일한 설계 단면임에도 불구하고 약 5%의 균열율 차이가 존재하였다.

5-2구간은 5-1구간 대비 통행한 공사차량 교통량이 많으며, 공사가 진행될 때 별도의 출구가 없어 공사차량의 회차가 이루어진 곳으로 중차량의 하중이 가중됨에 따라 균열이 상대적으로 많이 발생한 것으로 판단된다.

[표 3.2] 단면별 표면 균열율 산출 결과

단면	선형 균열율(%)	면적 균열율(%)	종합 균열율(%)
1	31.7	0	0.6
2	3.4	0	0.1
3	4.5	0	0.13
4	2.5	7.5	7.57
5-1	3.2	2.8	2.88
5-2	33.2	2.79	7.7

3.3.2.2 A현장 표면상태 조사 결과 및 분석

시험시공 구간과의 비교를 위해 기존 도로설계 기준을 준용한 타 사업지구 단지 내 도로를 대상으로 표면조사를 실시하였다. 조사 결과, 모든 구간에서 종방향균열 및 거북등 균열이 조사되었으며, 공사차량의 진출입로인 1구간의 표면 파손이 심각한 수준으로 나타났다.

① A-1 구간

A-1 구간은 양방향 2차로로 운영되고 있었으므로 공사차량 통행이 1차로로 집중되어 하중 재하 영향이 클 것으로 판단된다. 또한, 공사차량 진입이 시작되는 지점으로 전 구간으로 분산되는 차량 하중이 집중됨에 따라 다른 구간 대비 파손이 심각한 상태였으며, 넓은 면적으로 거북등 균열이 지속적으로 발생하였다.



[그림 3.11] A-1 구간 표면상태 모습

② A-2 구간

A-2 구간은 양방향 4차로로 1,200세대의 공사차량 교통량이 통행하며, 다른 구간 대비 균열율이 낮게 산출되었으며, 약간의 종방향 균열만 조사되었다.



[그림 3.12] A-2 구간 표면상태 모습

③ A-3 구간

A-3 구간은 양방향 4차로로 종방향 균열과 거북등 균열이 조사되었다. 특히, 회전 교차로 진입 부근에서 심각한 수준의 거북등 균열이 넓은 면적으로 발생하였으며, 이는 진입 시 차량 주행속도 감소 및 대기에 의한 하중 재하가 영향을 미친 것으로 판단된다.



[그림 3.13] A-3 구간 표면상태 모습

④ A-4 구간

A-4 구간은 양방향 4차로로 다소 넓은 면적에 대해 종방향 균열 및 거북등 균열이 발생하였으며, 5cm × 1.5cm의 크기로 포트홀이 조사되었다. 해당 구간은 상가가 존재하여 정차를 하는 차량이 빈번하게 나타났으며, A-3 구간과 동일하게 회전교차로 진입 구간에서 파손이 다수 발생하였다.



[그림 3.14] A-4 구간 표면상태 모습

이처럼 기존 설계 기준을 준용한 A 현장의 경우, 시험사공 구간 대비 표면에서 파손이 다수 발생하였으며, 넓은 면적으로 거북등 균열이 존재함에 따라 표면 상태가 심각한 수준으로 판단할 수 있다. 또한, 표면 파손이 심각함에 따라 하부에 영향을 미쳤을 가능성이 존재하므로 코어시험을 통해 구조적 안정성을 평가하였다.

[표 3.3] A 현장 표면 균열을 산출 결과

단면	선형 균열율(%)	면적 균열율(%)	종합 균열율(%)
A-1	65.5	44.7	51.2
A-2	23.5	0.13	1.3
A-3	6.5	7.00	7.28
A-4	28.4	9.1	10.5

3.4 코어시험

표면조사 결과, 파손이 심각한 구간에 대해 구조적 안정성을 평가하고자 코어 조사를 수행하였으며, 코어채취기(CORE DRILL)장비를 사용하여 시료를 채취하고 평가하였다. 이를 통해 포장층의 두께, 균열 진전 깊이, 포장의 구조적 파손을 확인하며, 채취 가능 구간을 건전부와 손상부로 구분하여 A 현장에서 각 구간별로 3개씩 채취하였다.

코어는 도로의 우측 Wheel-pass 구간 및 맨홀 등 시설물이 없는 구간에서 채취하였으며, 한국건설품질시험연구원(K-TI)에 시험을 의뢰하여 수행하였다. 또한, 안전에 유의하여 교통차단을 진행하였으며, 차량 통행에 있어 위험이 없게 하였다.

아스팔트 포장은 골재 간 접착력 약화로 균열이 발생하므로 코어 채취 시, 골재가 넓은 면적에 대해 떨어져 나간 것은 균열 진전에 따라 접착력이 약화되어 나타난 결과로 판단할 수 있다. 또한, 균열, 골재의 부서짐, 층 분리의 파손 형태가 나타날 수 있으며 3가지 모두 구조적인 문제를 발생시키는 원인에 해당한다.

포장 표면에 발생한 균열이 하부로 진행되게 되면 수분이 침투되어 포장상태의 구조적인 열화를 심화시키며 골재의 부착 강도 저하로 코어의 일부분이 넓은 면적으로 부서져 떨어져 나간 것은 포장의 구조적 지지력이 저하된 것을 의미한다. 층의 상·하부층이 분리된 코어는 구조적 하중분산 능력을 감소시키므로 구조적으로 문제를 발생시키는 요소로 판단할 수 있다.

따라서, 코어별 상이한 파손 정도를 정량적으로 비교하기 위해 구조적 기능 수행 여부에 영향을 미칠 것으로 판단되는 파손 유형들을 평가지표로 선정하여 코어 상태를 분석하였다. 균열의 경우 표면에 발생한 균열 및 하부층으로 타고 내려온 균열의 최대 길이를 측정하였고, 골재의 부서짐은 코어 공시체 전체에서 골재가 떨어져 나간 면적을 확인하였다. 층 분리는 발생 여부를 기준으로 평가하였다.



[그림 3.15] 코어 상태 평가 지표

코어 채취 결과, 12개의 코어 중 1개를 제외한 모든 구간의 파손부 코어에서 층 분리 현상이 발생하였으며, 전반적으로 넓은 면적에 대해 골재 부서짐이 존재하였다. 특히, 구간 3, 구간 4에서 코어 파손이 심각한 수준으로 나타났으며, 중간층 및 기층이 부서진 상태로 채취되었다. 구간 2는 3개 중 2개의 코어에서 층 분리 현상이 발생하였고, 골재 부서짐이나 균열이 미미하였으며, 상대적으로 코어 상태가 양호하였다.



[그림 3.16] 구간별 코어 채취 모습

[표 3.4] A 현장 코어 채취 결과

위치		층	두께(cm)	코어 전길이	코어상태	균열 최대 깊이	충분리
구간1	1	표층	9	20cm	-	9cm	O
		중간층					
		기층	11			8cm	
	2	표층	10.2	16.7cm	하부파손	7cm	O
		중간층					
		기층	6.5			6.5cm	
	3	표층	11	20cm	-		O
		중간층					
		기층	9				
구간2	1	표층	11	21cm	-		O
		중간층					
		기층	10				
	2	표층	-	21cm	-	7cm	X
		중간층					
		기층					
	3	표층	11	21cm	-		O
		중간층					
		기층	10			10cm	
구간3	1	표층	6.1	16.6cm	하부파손	3cm	O
		중간층	5.5			5.5cm	
		기층	5			5cm	
	2	표층	7	16.1cm	하부파손	5.1cm	O
		중간층	3.8			3.8cm	
		기층	5.3			5.3cm	
	3	표층	10.5	20cm	-		O
		중간층					
		기층	9.5			3cm	
구간4	1	표층	11.2	11.2cm	하부파손	11cm	O
		중간층					
		기층	-				
	2	표층	6	17cm	코어파손	6cm	O
		중간층	6			6cm	
		기층	5			5cm	
	3	표층	5.5	11.5cm	-	5cm	O
		중간층	6			6cm	
		기층					

3.5 포장상태 평가

조사구간별 공사차량 하중이 포장체에 미치는 영향을 평가하기 위해 세대수를 기반으로 교통량을 추정하는 통행 하중 지표를 산출하였으며, 이는 전체 공사기간 동안 재하되는 하중을 의미한다.

통행 하중 지표는 공사차량 루트별 세대수에 따른 누적 하중을 예측하는 방법으로 단지 내 도로포장 공사 시 운용되는 공사차량 교통량이 공사 단지 규모, 기간, 세대수 등 공사 환경 및 조건에 따라 영향을 받으므로 단지별 세대수를 활용하여 공사차량 주요 통행 경로에 재하되는 누적하중 정도를 예측하는 방법이다.

통행하는 공사차량이 운반로에 재하되는 하중 영향을 추정하기 위해 조사된 단지내 도로의 포장형식, 포장두께, 누적하중으로 구분하여 동질성구간을 분류하고 일련의 가정과 단계를 통해 통행 하중 지표를 산출한다.

[표 3.5] 통행 하중 지표 산출 과정

단계	내용
1 단계	단지 내 위치하고 있는 각 공구의 세대수를 설정한다.
2 단계	경로 내 교차로 및 공구 출입구가 포함된 경우, 정지선을 기준으로 Section을 분류하며 교차로와 공구 출입구는 제외하고 Section을 설정한다.
3 단계	각 Section 안에 공사차량의 통행 경로가 중복될 경우, 중첩되는 횟수만큼 누적하여 재하된 총 하중을 산정한다.
4 단계	위의 단계를 통해 분류된 Section에 중첩 횟수와 출입구 및 최단 경로를 고려하여 세대수를 적용한다.
5 단계	1 단계에서 설정된 단지별 세대수는 단지내 도로포장의 전체 개방기간을 나타내므로 기층 포설 후부터 표층 포설 전까지에 따라 실제 개방기간으로 보정한다.

시험시공 구간의 경로별 재하되는 공사차량 하중 정도를 산정하기 위해 본 연구에서 제시하는 통행 하중 지표 산출 과정을 적용하였다. 공사차량 출입구를 통해 출입하며, 각 경로별로 재하되는 하중 지표를 산출하면, 구간 5-1 : 2,368, 구간 3 : 2,368, 구간 1 : 3,163, 구간 2 : 2,352, 구간 4 : 2,352, 구간 5-2 : 1,697로 제시할 수 있다. 공사차량 통행이 시작되는 구간 1과 3에 가장 많은 하중이 작용될 것으로 예측할 수 있으며, 구간 5-2에서 가장 낮은 하중이 발생할 것으로 예상되나 출입구가 별도로 존재하지 않아 회차가 이루어지는 구간이므로 이에 대한 영향을 고려할 필요가 있다.

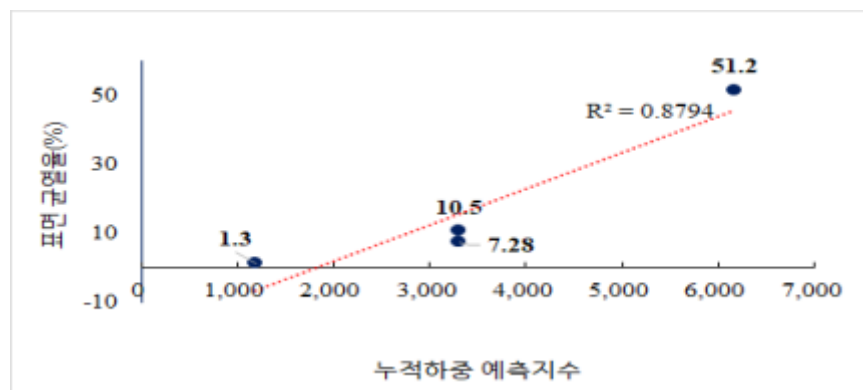
이를 바탕으로 A 현장에 대해 통행 하중 지표를 산출하였으며, 총 6,170세대로 Section 1을 통해 공사를 위한 중차량들이 진·출입하므로 가장 많은 하중이 재하될 것으로 예상된다. 통행 하중 지표 산출 결과, 구간 1 : 6,170, 구간 2 : 1,200, 구간 3 : 3,307, 구간 4 : 3,307로 제시할 수 있다.

포장 상태의 지속 가능 여부를 판단하기 위해 통행 하중 지표, 표면 균열율, 그리고 코어 상태를 서로 매칭하였다.

공사차량 출입이 시작되는 구간 1의 통행 하중 지표가 가장 높았으며, 균열율도 51.2%로 가장 높게 나타났다. 또한, 통행 하중 지표가 높을수록 표면 균열율이 증가하는 경향이 있었고, 상관성 분석 결과 결정계수 값(R^2)이 0.88로 매우 높은 상관관계가 확인되었다.

구간 3과 4의 통행 하중 지표는 동일했으나, 균열율은 차이가 있었는데, 이는 공사 이후 발생한 교통량의 차이에 따른 영향으로 분석된다. 코어 상태에서는 구간 2를 제외한 모든 구간에서 파손이 발생하였으며, 이는 골재 간 접착력 약화로 인해 균열이 하부로 진전된 결과로 판단된다(백철민, 2021).

따라서 공사차량 통행과 공용기간 동안 발생하는 교통량에 따른 표면 균열율과 구조해석의 피로 균열율을 비교하여, 적정 두께로 상향된 설계 기준을 제시할 필요가 있다.



[그림 3.17] 통행 하중 지표에 따른 표면 균열율 비교(A 현장)

[표 3.6] 현장조사 결과 및 포장품질 유지가능 여부

구간	통행 하중 지표	차로 수	종합 균열율	코어		포장품질 유지가능 여부
				파손여부	두께	
A-1	6,170	양방향 2차로	51.2 %	2/3	20cm	X
A-2	1,200	양방향 4차로	1.3 %	0/3	21cm	O
A-3	3,307	양방향 4차로	7.28 %	2/3	20cm	X
A-4	3,307	양방향 4차로	10.5 %	3/3	17cm	X

3.6 소 결

3.6.1 시험시공 현장 표면상태 분석 결과

단면 1, 2, 3은 5cm 절삭 후 표층 5cm를 덧씌우기 하였기 때문에 시험시공 이후의 공사기간 교통량 산출하였으며, 단면 4, 5-1, 5-2는 공사기간 전체의 공사차량을 산출하였다.

그러나, 시험시공 현장은 5cm 비배수저소음포장 덧씌우기를 하여 시험시공 현장이 보존되어 있지 않았다. [표 3.7]은 교통량에 의한 시험시공 현장 표면 균열율을 보여준다. 같은 조건으로 5cm 덧씌우기를 하였지만, 균열율이 교통량에 따라 차이가 있음을 보여준다.

표층 시공 없이 중간층을 보강(3cm)할 경우 균열율이 다른 다면에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 단면 4는 중간층 포설 후 2개월 정도 공사차량을 개통한 후 5cm 덧씌우기를 시행하였다. 따라서, 표층 시공 없이 중간층만 시공하고 공사차량을 개통할 경우, 포장의 Damage 상당한 것으로 판단된다.

5-1과 5-2구간은 동일한 설계 단면임에도 불구하고 약 5%의 균열율 차이가 존재하였다. 이는 5-2구간은 공사가 진행될 때 별도의 출구가 없어 공사차량의 회차가 이루어진 곳으로 중차량의 하중이 가중됨에 따라 균열이 상대적으로 많이 발생한 것으로 판단된다.

따라서, 5-2구간같이 교통에 취약한 구간은 중간층에 많은 Damage 큰 것으로 나타났으며, 반사균열로 인한 파손이 나타난 것으로 분석되었다.

[표 3.7] 교통량에 의한 시험시공 현장 표면 균열율

단면	1	2	3	4	5-1	5-2
누적 공사 차량 대수	15,000	14,000	14,000	14,000 (69,164)	11,000 (69,556)	12,000 (53,107)
종합 균열율(%)	0.6	0.1	0.13	7.57	2.88	7.7

3.6.2 A 현장 표면상태 분석 결과

A 현장조사는 조기개통 현장을 추가로 조사하여 시험시공 현장조사 결과와 비교 및 보완하여 최적 설계단면 제시를 위해 실시하였다. [표 3.6]에서 보는 바와 같이 누적교통하중과 균열율 및 코어파손과 밀접한 관계를 알 수가 있다. A-1 구간 6,170세대에서 균열율은 51.2%인 반면, A-2 구간 1,200세대는 균열율은 1.3% 정도이다.

따라서, 시험시공 현장 및 A 현장 표면조사 결과를 바탕으로 교통하중별 또는, 세대수 별로 적정 두께로 설계 기준을 제시할 필요가 있다.

제4장 구조해석 및 결과분석

4.1 개요

선행연구에서 제시한 공사차량 교통량 추정 방법론을 적용하여 산정한 통행 하중 지표와 현장조사 결과와의 비교를 통해 설계 단면에 대한 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

KENPAVE 및 KPRP 프로그램을 활용한 구조해석을 위해 공사 물량을 산정하여 운반에 필요한 공사차량 대수를 추정함으로써 공사차량 교통량을 계산하였고, 장래교통량을 반영한 설계 AADT를 산정한다. 이를 통해 구조해석 프로그램을 수행하여 공용기간 동안 발생한 Damage를 산출함으로써 실제 현장조사 결과와 비교한다.



[그림 4.1] 공사차량 조기개통 포장설계 단면 구조해석 과정

4.2 공사 물량 기반 공사차량 교통량 추정 방법을 활용한 대수 산출

구조해석 프로그램을 활용하여 공용성을 분석하기 위해 세대수 및 단지 개수에 따른 공사 물량을 산정하여 운반 시 필요한 공사차량 대수를 추정하였다.

이는 단지 공사 과정에서 필요한 운반의 대부분을 차지하는 토사 운반과 시멘트 운반을 고려하는 방법으로 서로 다른 공사 환경의 단지별 면적과 토공물량

Data를 활용하여 단지 당 평균 토공 물량을 산출하고 필요한 덤프트럭 대수로 나타내는 토사 운반차량을 추정한다.

또한 단지별 세대수에 따른 시멘트 물량 Data를 활용하여 해당 단지의 레미콘 필요대수를 나타내는 레미콘 운반차량 추정 방법을 통해 각 단지별 공사차량 필요대수를 산출하였다.

따라서, 1차·2차 선행연구를 통해 수집된 데이터를 바탕으로 제시된 추정식 (식 (4))을 통해 공사차량 누적 교통량을 산출하였다.

$$Y = (147.09 \times x) + 9028.7 \quad \text{식(4)}$$

[표 4.1] 공사차량 교통량 추정 방법론 기반 공사차량 대수 산출

구간	공구	세대수	추정 물량(m³)		추정 교통량(대)		공사차량 총 대수
			토공	시멘트	덤프(17m³)	레미콘(6m³)	
A	A-31	699	170,000	111,845	10,000	18,641	28,641
	A-37	575	170,000	93,605	10,000	15,601	25,601
	A-38	1,094	170,000	169,945	10,000	28,325	38,325
	A-39	811	170,000	128,319	10,000	21,387	31,387
	A-40	655	170,000	105,373	10,000	17,563	27,563
	A-41	877	170,000	138,027	10,000	23,005	33,005
	A-42	820	170,000	129,643	10,000	21,608	31,608
계		5,531	1,190,000	876,757	70,000	146,130	216,130(대)
B	L1	338	170,000	58,745	10,000	9,791	19,791
	L2	508	170,000	83,750	10,000	13,958	23,958
	L3	318	170,000	55,803	10,000	9,301	19,301
	L4	1,200	170,000	185,537	10,000	30,923	40,923
	L5	499	170,000	82,427	10,000	13,738	23,738
	M1	612	170,000	99,048	10,000	16,508	26,508
	M2	1,500	170,000	229,664	10,000	38,277	48,277
	M3	597	170,000	96,841	10,000	16,140	26,140
	M4	598	170,000	96,989	10,000	16,165	26,165
계		6,170	1,530,000	988,804	90,000	164,801	254,801(대)

A 현장 자료를 바탕으로 공사차량 대수 추정 방법론을 적용하여 교통량을 산출하였으며, 통행 하중 지표 차이가 크므로 하중 영향이 구간별로 다르게 나타났다.

[표 4.2] 구간별 공사차량 교통량 추정 결과

구간	통행 하중 지표 (세대수)	차로수	공사차량 교통량 추정
A-1	6,170	양방향 2차로	$41,2968 \times 6,170 = 254,801$ 대 차로당 공사차량 일 교통량 = 698대 (254,801/365일)
A-2	1,200	양방향 4차로	$41,2968 \times 1,200 = 49,556$ 대 차로당 공사차량 일 교통량 = 68대 (49,556/2차로/365일)
A-3	3,307	양방향 4차로	$41,2968 \times 3,307 = 136,568$ 대 차로당 공사차량 일 교통량 = 187대 (136,568/2차로/365일)
A-4	3,307	양방향 4차로	$41,2968 \times 3,307 = 136,568$ 대 차로당 공사차량 일 교통량 = 187대 (136,568/2차로/365일)

4.3 프로그램을 활용한 구조해석

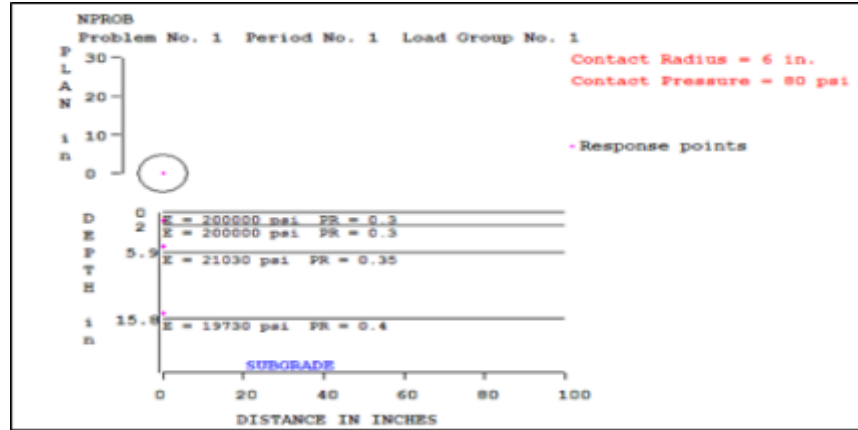
구조해석을 위해 다층탄성이론 기반의 KENPAVE와 한국형 도로포장 설계 프로그램인 KPRP를 활용하였으며, 공사차량 누적 교통량 및 장래 AADT (Annual Average Daily Traffic) 하중 작용이 도로포장 단면별 구조적 거동에 미치는 영향을 분석하고, 세대수 규모별 최적 단면의 장래 공용성을 검토하였다.

4.3.1 KENPAVE 프로그램을 활용한 구조해석

KENPAVE 프로그램을 이용한 구조해석을 통해 단지 내 출입 교통량에 따른 등가단축하중(ESAL)을 계산하고, KENPAVE의 Asphalt KENLAYER를 사용해 허용 가능한 반복하중 횟수(Nf) 값을 비교하여 포장 두께 변화에 따른 ESAL을 허용하는 적정 두께를 평가하였다.

KENPAVE는 1993년 Kentucky 대학에서 도로 포장 분석을 위해 개발된 프로그램으로, 각 층별로 선형, 비선형, 점성 등의 탄성 특성을 다르게 설정하여 특정 조건에서의 변형률을 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 이를 통해, 세대수에 따른

공사차량 추정 교통량을 구간별로 구분하고, 해당 구간의 추정 교통량 ESAL과 Nf 값을 비교하였다.



[그림 4.2] KENPAVE 프로그램

A 현장에 대해 설계 단면 Nf를 산출하기 위해 층별로 구분하여 포장두께와 깊이 별로 각 층의 물성인 탄성계수, 포아송비를 입력하였다.

[표 4.3] 포장층별 탄성계수 및 포아송비

층	두께	탄성계수(psi)	포아송비
표층	5cm	300,000	0.3
중간층	6cm	300,000	0.3
기층	10cm	200,000	0.3
보조기층	21cm	21,030	0.35
노상	-	09,730	0.4

아스팔트 포장 하부의 수평인장 변형률은 피로 파손에 의하여 발생하는 균열과 직접적인 상관관계를 갖고 있으며 이러한 상관관계는 공용성 예측 모델에 의하여 변형률의 크기에 의해서 결정되는 N_f 로 정량화가 가능하다.

일반적으로 아스팔트 포장의 구조적 파손은 반복적인 교통하중의 재하에 의한 피로균열로 정의할 수 있기 때문에 산출된 변형률 값을 사용하여 포장의 공용 수명을 추정할 수 있다. 또한 포장의 공용성 모형은 도로 포장의 Critical responses를 통해 포장체의 거동특성을 파악하여 포장의 설계 수명을 예측하는 역할을 한다.

주로 사용되어지는 공용성 모형들은 경험적 파손예측 모형이 주를 이루고 있으며 다양한 피로 모델들 중 적절한 모델을 선택하여 기대수명을 예측한다. 본 연구에서는 1982년 미국 아스팔트 협회(AI)에서 AASHTO road test를 통해 개발된 AI fatigue model을 활용하였으며, 여기서 적용된 한계 피로 수명은 전체 포장면적의 약 20%에 해당하는 균열률로 설정하였다(N_f : 허용 반복하중 횟수, ϵ : 아스팔트 층 하부의 최대 횡방향 인장변형률, E : 아스팔트층의 탄성계수(psi)).

$$N_f = 0.0796 \times \epsilon^{-3.291} \times E^{-0.854} \quad \text{식(5)}$$

A 현장의 인장변형률은 0.0002242로 AI Model을 적용하여 N_f 1,712,024를 산출하였다. 산출한 N_f 와 공사차량이 미치는 하중 영향을 평가하기 위해 추정 교통량을 5종 등가단축환산계수를 적용하여 ESAL로 환산하였다.

이를 바탕으로 A 현장 구간별 공사차량 추정 교통량에 따른 Damage를 산출하였으며, 현장 표면 균열을 결과와 비교하였다. 비교 결과, 공사차량에 의한 Damage와 표면 균열을 추세가 유사한 것으로 나타났으므로 유의미한 결과로 판단된다.

또한, 서울시(2018)에 의하면 균열율 8%가 초과할 경우 노후화된 포장층으로 판단하여 유지보수를 실시하고 있으며, 일반적으로 도로 유지보수 필요 주기는 공용 5 ~ 7년이므로 A 현장에 6년 공용임에 따라 구간 3, 4의 표면 균열율은 일반적인 공용 결과로 판단할 수 있다.

[표 4.4] 공사차량 추정 교통량에 따른 Damage 산출 결과

구간	공사차량 추정 교통량	5종 등가단축 환산계수(2.4ton) 적용	허용가능 하중횟수(N_f)	Damage(%)
2	24,778	59,467	1,712,024	$\frac{59,467}{1,712,024} \times 100 = 3.47\%$
3, 4	68,284	163,882		$\frac{163,882}{1,712,024} \times 100 = 9.57\%$
1	254,000	609,600		$\frac{609,600}{1,712,024} \times 100 = 35.6\%$

4.3.2 KPRP 프로그램을 활용한 구조해석

KENPAVE를 활용하여 허용가능 하중횟수와 공사차량 ESAL을 비교하여 포장층에 재하되는 Damage를 산출하였다. 그러나 국내 실정에 맞게 개발된 한국형 포장설계 프로그램을 활용하여 공용성을 검토할 필요가 있다.

따라서, KPRP를 통해 공용성 분석을 수행하였으며, 교통량 정보는 공사차량에 의한 영향을 평가하기 위해 5년에 대해서는 5종 교통량(차로별 공사차량 ADT)과 이후 15년에 대해서는 2% 증가율로 발생하는 장래 AADT를 입력하였다.

장래 AADT는 차량 1종부터 12종에 대해 교통량 분포를 입력할 수 있으며, 전체 교통량 중 포장설계 측면에서 다루는 중차량(5~12종) 비율은 3%, 소형~대형을 포함하는 전체 중차량(3~12종) 비는 24%의 비율이 적용된다.

이를 바탕으로 공사차량 교통량을 고려할 때 설계두께에 대한 설계 공용년수 20년을 만족하는 장래 AADT를 제시하며, 피로 균열 20% 미만일 때 15년 이상 공용을 만족하는 것을 허용 장래교통량으로 판단하였다.

입력변수는 [표 4.5]와 같으며, 포장정보는 A 현장 단면인 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 10cm + 보조기층 21cm로 설정하였다. 교통정보는 공사차량 교통량이 미치는 영향을 고려하기 위해 차종 5종에 대해 설계 구간별 통행하는 공사차량 대수를 적용하였다.

공사차량 대수는 본 연구에서 제시한 공사 물량 기반 공사차량 교통량 추정 방법론에 의거하여 산출하였으며, 이는 전체 기간동안 발생한 교통량에 해당하므로 일 교통량으로 환산하여 적용하였다.

국토교통부(2020) 「도로교통량 조사지침」에 12종 차종 분류 체계에 의해 5종은 믹서, 15톤 덤프, 9.5~10톤 카고 등의 차량이 해당된다.

[표 4.5] KPRP 프로그램 설계 입력변수 설정

연장	도로구분	설계속도	차로수
3km	지방도, 도시지역	50km/h	양방향 4차로
기상관측소	설계 교통량	방향분배계수	차로분배계수
수원	68대/일 187대/일 698대/일	0.55	0.90

KPRP 분석 결과, 통행 하중 지표가 1,200 및 3,307이면 20,000대/일까지 목표 공용년수를 만족하였으나 6,170은 파괴가 발생하였으므로 해당 세대수에 대해서는 두께를 상향하여 설계할 필요가 있을 것으로 판단된다.



[그림 4.3] KPRP 프로그램 결과

4.3.3 표층 미포설 공사차량 조기 개통 적정성 검토

평택 고덕지구 시험시공 구간과 A 현장의 공사차량 추정 대수를 바탕으로 포장 표면 파손 상태 및 공용성에 대한 비교를 수행한 결과, 설계 수명을 만족하는 단면을 KPRP 프로그램을 통해 산출할 수 있었다. 하지만 이는 표면 균열을 상태를 정확하게 반영한 결과라고 보기 어렵다.

유지보수 기준에 따라 5~7년 동안 공용된 포장에서 나타나는 균열율을 기준으로 분석했을 때, 구조해석에서 나타나는 Damage는 10%, KPRP 피로 균열은 6% 이하로 유지되면 10년 이상의 공용이 가능하다는 결론을 도출할 수 있었다.

그러나, 절삭 후 덧씌우기를 진행하지 않은 포장 단면에서는 상대적으로 높은 표면 균열율이 발생하므로, 이를 보완하기 위해서는 절삭 후 덧씌우기 공법을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

절삭 후 덧씌우기 공법을 적용할 때는 잔존 수명을 예측하는 것이 중요하며, 절삭 전 공사차량의 하중이 포장체에 미치는 영구 변형과 목표 설계수명을 고려하여 절삭 깊이를 적절히 설정해야 한다.

공사차량의 하중이 포장 공용성에 영향을 미치는 기준은 5년 이내에 초기 표면 균열율이 8% 기준을 넘어서 조기 파손 양상이 발생하는 경우로 판단할 수 있으며, 조사 결과 공사차량의 하중이 Damage 10% 수준을 초과할 때 이러한 문제가 발생하는 것으로 확인되었다.

단면 절삭 시나리오에 따라 잔존 수명을 예측한 결과, 일반적인 균열율 수치를 고려했을 때 공사차량 통행 이후 절삭하고 표층을 포설했을 때 5년 동안의 공용 후 표면 균열율은 약 8% 수준으로 나타났고, A 지구의 단면의 경우 공사차량 대수 약 68,000대에 해당하는 ESAL의 영향으로 나타났다.

포장 단면의 절삭 후 덧씌우기 단계별 Nf 변화					A 지구의 표면 균열율 및 구조해석 결과 비교			
설계 단면	표층	중간층	기층	Nf	공사차량 교통량	Damage (공사차량)	표면 균열율(%)	피로균열 20% 공용년수
초기 단면	-	9cm	10cm	1,159,246	24,778 대	약 3%	1.3 %	AADT 20,000: 11년 9개월 AADT 25,000: 9년 6개월
절삭	-	6cm	10cm	655,797	68,284 대	약 10%	7.28 ~ 10.5 %	AADT 20,000: 11년 8개월 AADT 25,000: 9년 5개월
표층 포설	5cm	6cm	10cm	1,712,024	254,000 대	약 36%	51.8%	AADT 20,000: 9년 9개월 AADT 25,000: 7년 9개월

[그림 4.4] 절삭(3cm) 후 덧씌우기(5cm) 시 단면 Nf와 공사차량 Damage 10% 수준의 ESAL 영향

이 경우 Damage는 10% 수준이며, 절삭 깊이는 품질 상태와 오차율을 고려했을 때 최소 3cm 이상의 깊이로 진행할 경우 절삭에 따른 Nf 변화 수치 대비 약 23% 수준으로 낮은 수치이기 때문에 이를 표층 5cm 포설에 따라 온전한 단면의 Nf를 확보할 수 있다고 판단하였다. 결과적으로, 이 조건을 충족하면 재포장 후 장래 교통량 25,000대의 통행에도 설계 공용수명 10년을 만족할 수 있는 것으로 분석되었다.

단면	Nf	Damage 10% 공사차량 대수
9cm 10cm	1,159,246	48,302대(115,925)

설계 단면	표층	중간층	기층	Nf
초기 단면	-	9cm	10cm	1,159,246
절삭	-	6cm	10cm	655,797
표층 포설	5cm	6cm	10cm	1,712,024

장래 교통량(증가율 2%)	두께: 5+6+10+21
AADT: 10,000대	20년 이상 공용
AADT: 15,000대	17년 8개월 파괴
AADT: 20,000대	13년 9개월 파괴
AADT: 25,000대	11년 7개월 파괴

[그림 4.5] A지구 단면의 절삭 후 덧씌우기 후 KPRP 공용 결과(온전한 Nf 확보 가정)

[illegible]

KPRP에서 교통량을 입력할 때, 5년 단위로 설정되므로 전체 공용년수를 20년 한도로 설정하고, 입력변수로 0~5년은 조기개통 공사차량, 5~20년은 장래교통량 AADT로 설정하여 공용성 분석 결과를 산출하였다.

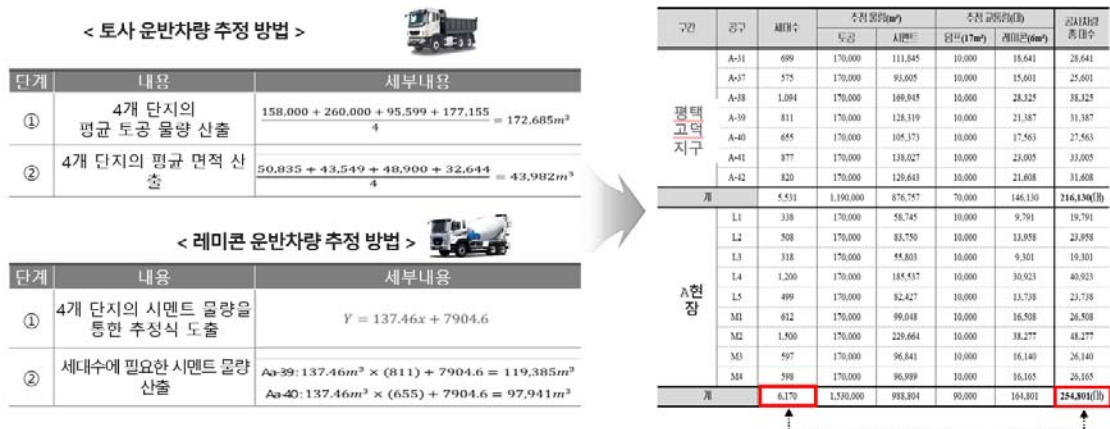
Damage 10% 수준에 해당하는 공사차량 교통량은 KPRP에서 피로균열 5.9%이며, 이는 A 현장 표면균열을 7.3~10.5%와 유사하게 나타났다. 따라서, 통행 하중 지표(세대수)가 1,200 및 3,307이면 20,000대/일까지 목표 공용년수를 만족하였으나 6,170은 파괴가 발생하였으므로 해당 세대수에 대해서는 두께를 상향하여 설계할 필요가 있을 것으로 판단된다.

A현장 현장조사 결과를 근거하여 표층을 미포설하고 중간층 9cm를 보강하여 공사차량 조기 개통할 경우는 누적 공사차량은 48,000대 이하(ESAL 115,000)일 경우, 유지보수기간 5~7년 기간 동안 Damage는 10%, KPRP 피로 균열은 6% 이하로 유지되면 10년 이상의 공용이 가능하다는 결론을 도출할 수 있다고 판단된다. 유지보수 기간 내 손상된 중간층 단면을 절삭한 수 표층 5cm를 덧씌우기를 한다면, 10년 이상 설계 공용년수를 만족하는 것으로 나타났다.

제5장 요약 및 결론

5.1 공사차량 산정 방법

선행연구의 교통량 산정방법을 이용하여 산출한 누적 공사차량을 산출하여 A 현장조사 및 구조해석을 적용하였다. 공사차량 산정방법은 [그림 5.1]에 보여주며, 현장조사결과 및 구조해석에 타당성을 검증하였다.



[그림 5.1] 공사차량 산정방법

5.2 현장조사 결과

표면상태 조사 결과를 바탕으로 선형, 면적, 종합 균열율을 산출하였으며, 표층까지 포설하고 공사차량을 개방한 1, 2, 3구간에서의 균열율은 1% 미만으로 나타났다. 이는 공용 4년임에도 포장상태가 신설과 동일한 수준으로 포장상태가 매우 좋은 것으로 판단되었다.

5-1과 5-2구간은 중간층 포설 후, 공사차량 하중이 재하되고, 4년 후 표층 5cm를 재포설하여 도로를 개통하였으나, 균열율이 최대 7.7%까지 증가하였으며, 동일한 설계 단면임에도 불구하고 약 5%의 균열율 차이가 존재하였다.

5-2구간은 5-1구간 대비 통행한 공사차량 교통량이 많았기 때문에 균열이 상대적으로 많이 발생한 것으로 판단된다.

5-1과 5-2구간은 중간층 포설 후, 공사차량 하중이 재하되고 표층 5cm를 재포설 하여 도로를 개통하였으나, 균열율이 최대 7.7%까지 증가하였으며, 동일한 설계 단면임에도 불구하고 약 5%의 균열율 차이가 존재하였다.

A 조기개통 현장조사의 추가는 시험시공 현장조사 결과와 비교 및 보완하여 최적 설계단면 제시를 위해 실시하였다. 현장조사결과 누적교통하중과 균열율 및 코어 파손과 밀접한 관계를 알 수가 있다. A-1 구간 6,170세대에서 균열율은 51.2%인 반면, A-2 구간 1,200세대는 균열율은 1.3% 정도이다.

따라서, 시험시공 현장 및 A 현장 표면조사 결과를 바탕으로 교통하중별 또는, 세대수 별로 적정 두께로 설계 기준을 제시할 필요가 있다.

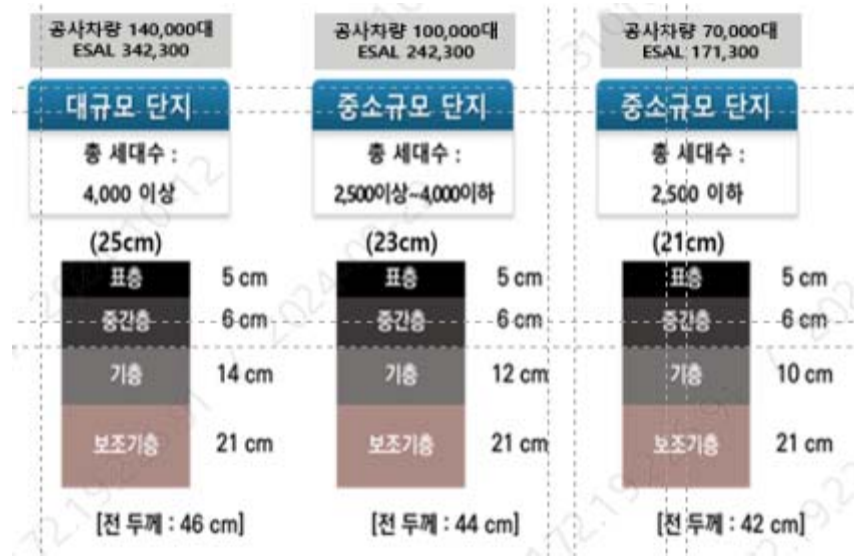
5.3 세대수별/누적 공사차량별 최적 설계단면 제시

평택 고덕지구 및 A 현장 조사와 구조해석 결과, KPRP에서 15년 이상 공용된 설계단면이 조기개통 공사차량 구간의 공용연수 10년 이상을 만족하는 설계단면으로 분석되었다.

따라서 설계단면은 조기개통 공사차량을 고려했을 때, Damage 10%이하가 목표이며, 이에 따른 세대수별/누적 공사차량별 설계단면을 [그림 5.2]와 아래에 나타내었다.

- (1) 대규모 단지 : 4,000이상의 세대수 수준(최대 6,000세대)
 - AADT 범위는 25,000대/일(공사차량 140,000대) 이상
 - 설계단면 : 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 14cm
- (2) 중소규모 단지 : 2,500세대 이상 4,000세대 이하
 - AADT 범위는 25,000대/일(공사차량 100,000대)이하
 - 설계단면 : 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 12cm
- (3) 소규모 단지 : 2,500세대 이하
 - AADT 범위는 20,000대/일(공사차량 70,000대)이하
 - 설계단면 : 표층 5cm + 중간층 6cm + 기층 10cm

아스팔트 기층을 2cm 및 4cm를 보강한 단면은 1m² 당 4,000~7,500원이 비용이 상승하지만, 조기파손에 의한 유지 보수비용보다 훨씬 경제적이라고 판단된다.



[그림 5.2] 세대수별/누적 공사차량 규모별 설계단면

5.3.1 표층 미포설 공사차량 조기 개통 설계단면

불가피하게 중간층(기층)을 보강(3cm)하여 포설하여 공사차량을 조기에 개통할 경우, 누적 공사차량은 48,000대 이하(ESAL 115,000)일 경우, 유지보수기간 5~7 년 기간에 손상된 구간을 절삭하고 표층 5cm를 덧씌우기가 권장된다.

위의 경우를 만족한다면 중간층을 보강하여 공사차량을 조기에 개통이 가능할 것으로 판단된다.

5.4 하자관리방안

조사 결과, 하중이 중첩·집중되는 경로 및 교차로 부근에서의 균열이 상대적으로 높게 발생하였으며, 요구하는 Nf가 높다. 따라서, 효율적인 단면 설계를 위해서는 단일 진출입로에 의해 공사차량 하중이 집중되지 않도록 통행 경로의 적절한 배치가 필요할 것으로 판단된다.

균열 및 파손이 빈번하게 발생하는 공사차량주 진출입로와 감속 또는 대기행렬에 의해 하중이 집중적으로 분산되는 교차로 등을 고려해 경로를 단지 세대수별 누

적하중으로 우선적으로 예측하고, 효율적으로 분배할 수 있는 최적 경로를 설정한다면, 하자 발생 빈도 감소를 유도할 수 있을 것으로 분석되었다.



[그림 5.3] 하중분산을 위한 공사차량 관리방법

5.5 지침 개정

LH 토목설계지침 공사용 가설도로(2024.01. 개정)에 조기개통 공사차량에 관한 사항이 명시되어 있지만, 이러한 지침은 잦은 설계변경과 시공사와 마찰을 야기 하는 책임소재가 명확히 하기 위하여 [표 5.1]과 지침개정이 필요하다.

[표 5.11] LH 토목설계지침 개정(안)

2.5 공사용 가설도로

나. 계획도로 표층이전의 도로를 공사용 가설도로로 이용하려는 경우 표층을 제외한 포장단면이 공사 차량 통행에 견딜수 있도록 반영한다.

- (변경안) 1. 계획도로를 공사용 가설도로로 이용하려는 경우 전단면 시공을 원칙으로 한다.
2. 공사차량 누적교통량이 예측되는 계획도로는 누적 공사차량을 고려하여 아스팔트 기층을 보강한 전단면 시공을 해야한다.
3. 공사차량 누적교통량이 적게 예상되는 계획도로는 표층을 제외한 포장단면이 공사차량 통행에 견딜수 있도록 반영한다.

참고문헌 Reference

1. 단지내 도로보장단면 결정기법에 관한 연구 (김대하 외 2인, 1993)
2. 부체도로 포장의 단면 설계 지침 개발 연구 (황성도 외 2인, 2017)
3. 인천시 도로포장관리시스템(PMS)의 구축방안 (최병국, 2012)
4. 강성 및 연성포장의 파손에 대한 원인과 보수방법 검토(이재만, 2005)
5. 택지개발지구 및 단지내 도로포장설계 개선 연구(정종석 외 5인, 2010)
6. 통계적인 기법을 활용한 동질성구간에 따른 교통량 수시조사 효율성 연구(정유석 외1인, 2015)
7. LH 건설 도심지 교량의 차량통행량에 따른 적용기준 설정연구(김효진 외3인, 2018)
8. GIS를 이용한 토공 운반로 탐색 방법론(강상혁 외3인, 2010)
9. 강민수, 서영찬, 박동엽, 조용주, "차량 Wandering의 포장손상 저감 정량화 연구", 대한토목학회 논문집 23권 5호 PP. 623-629, 2003
10. 고훈범, "공시체에 포함된 철근이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향", 한국산학기술학회 논문집 17권 9호 PP. 52-558, 2016
11. 국토교통부, 「도로포장 구조 설계 요령」, 2015
12. 국토해양부, "도로 공사장 교통관리지침" 2012
13. 김상룡, 이동은, 김병수 "국도건설공사 도로분야의 공종별 환경부하량 특성분석", 대한토목학회 논문집 37권 1호 PP. 143-151, 2017
14. 박민철, "우리나라 화물차의 일상, 2011년도 화물차 통행패턴 분석 결과", 한국교통연구원 보도자료, 2012
15. 백철민, 양성린, 박희문, 강태욱 "역학적-경험적 덧씌우기 포장 설계 프로그램 개발", 한국도로학회 논문집 14권 4호 PP. 19-28, 2012
16. 서주원, "오르막 경사구간에서 중차량 속도감소를 고려한 아스팔트 포장구조체 내 부거동 분석", 한국도로학회 논문집 16권 2호 PP. 53-59, 2014
17. 여인수, 서영찬, 문성호, "포장가속시험을 이용한 아스팔트 안정처리층의 피로모형 개발", 한국도로학회 논문집 9권 4호 PP. 11-20, 2007

18. 연구민, “침투도랑의 도로공용성 현장실험분석(2) 용역 보고서”, 2016
19. 이관호, 이경숙 "한국형포장설계법을 이용한 아스팔트포장의 파손특성", 한국산학기술학회논문지 18권 4호 PP. 487-493, 2017
20. 이상염, “도로포장 표면조사와 FWD정보에 기반한 도심지 도로포장 유지보수 기법 개선방안 연구”, 한국산학기술학회논문지 17권 12호, PP. 532-541, 2016
21. 이재만, 박진희, “해외 도로의 연성포장 덧씌우기 설계 사례”, 유신기술회보 제13호, 2006
22. 정종석·심영중·안제신·박용부, “단지내 아스팔트 콘크리트 포장 설계 개선 연구”, 한국도로학회 논문집 12권 3호 PP. 121-129, 2010
23. 정종석 외 5인, “택지개발지구 및 단지내 도로포장설계 개선 연구”, LH 토자주택연구원, 2011
24. 최준성, 서주원, 김종우, "주행차량의 종류와 아스팔트 콘크리트 포장 평탄성에 따른 동적하중 증가계수 산정", 한국도로학회 논문집 14권 2호 PP. 29-36, 2012
25. 홍성호, 이동욱 "공종별 특성을 고려한 대소규모 공사의 실적공사비 비교 및 보정 방안", 대한토목학회논문집 34권 1호 PP. 293-303, 2014
26. James Crovetii, "Early Opening of Portland Cement Concrete Pavements to Traffic, Transporation Technical Reports, 2005
27. Katelyn Freesean외 3인, "Effect of Early opening to Traffic on Fatigue Damage to Concrete pavement", Transportation Research Record, 2016
28. RJ Thompson, "Mining road design, Construction & Maintance Management" 2010
29. Robert A Douglas, "Optimizing Haul road design, A challenge for resource development in Northern Canada", Transportation Association of Canada", 2014
30. Wisconsin Department of Transportation, "Facilities Development Manual", 2013
31. Mine Haul Road Design&Construction(PrEng MIEAust, 2013)
32. Facilities Development Manual(Wisconsin Department of Transportation, 2019)
33. Optimizing Haul Road Design – A Challenge for Resource Development in Northern Canada(Transportation Association of Canada, 2014)
34. Early Opening of Portland Cement Concrete pavement to Traffic(Marquette University, 2005)
35. Assessing the Effects of heavy vehicles on local roadway(Assessing the Effects of heavy vehicles on local roadway, 2014)