실유속 적용에 따른 급경사지 하수도 맨홀 안정성 확보방안 연구

연구지원 2018-138

실유속 적용에 따른 급경사지 하수도 맨홀 안정성 확보방안 연구

지은이 이정민·김효진·진규남·김수성
발행인 손경환
발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원
편 집 이정민·김효진·진규남·김수성

주소 (우)34047 대전광역시 유성구 엑스포로 539번길 99
전화/전송 042) 866-8464 / 866-8431
전자우편 andrew4502@lh.or.kr
홈페이지 http://lhi.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.

연구지원 2018-138

실유속 적용에 따른 급경사지 하수도 맨홀 안정성 확보방안 연구

LH 토지주택연구원

참여연구진

연구총괄
이정민 LH 토지주택연구원 수석연구원

공동연구진
김효진 LH 토지주택연구원 선임연구위원
진규남 LH 토지주택연구원 연구위원
김수성 LH 경남지역본부 과장

자문· 심의위원
윤여진 건양대학교 교수(심의위원장)
최종수 LH 토지주택연구원 실장
이동찬 LH 청년주택계획처 부장
장재호 LH 하남사업본부 소장
이승수 LH 충북지역본부 소장
이상진 K-wter연구원 책임연구원
이상은 국토연구원 책임연구원
김하룡 공주대학교 연구교수

위탁용역(모니터링 및 수치해석) : ㈔ 한국방재학회
강태욱 경성대학교 연구교수

연 구 요 약

□ 연구의 목표 및 주요내용

(연구의 목표)

○ 하수관거 내 유속은 저유속에 따른 관로내 오물침전, 침전물 준설에 따른 유지관리비용과 과유속에 따른 관로손상, 내용연수 감소 등을 고려하여 일반적으로 하류방향 흐름에 따라 점차로 커지고, 관로경사는 점차 작아지도록 고려하여 시공하도록 규정하고 있음

○ 하수도 설치기준에 대해 관로시설 설계기준(환경부, 2017)에 따르면 우수관로 및 합류식관로는 계획우수량에 대해 최소유속 0.8 m/s, 최대유속 3.0 m/s로 제시하고 있으며, 비중이 상대적으로 큰 토사류의 침전방지가 필요하며, 급경사지 등에서 과유속에 따른 관로손상, 유달시간 단축에 따른 하류지점 유량집중을 방지하기 위하여 단차 및 계단을 두어 경사를 완만하게 하여야 한다고 제시하고 있음

○ 설계기준에 의거하여 사업지구에서는 급경사지의 경우 최대유속 3.0 m/s 기준을 부합하기 위하여 맨홀 설치를 강제하고 있어 맨홀 추가 설치에 따른 공사비 과다로 인한 사업성 저하와 유지관리 및 지자체 인수인계에 대한 문제점이 발생하고 있는 실정임

○ 최근 급경사지를 포함한 도시개발이 증가하는 추세로 급경사지는 도로, 배수로 진입로 등이 포함이 되며 강우시 급경사지 구간의 강우유출수는 측구 등을 통한 하수관로 내 유입보다 지표면에서 흐름이 대부분인 특징을 가지고 있음. 일반적으로 하수관로 설계는 만관흐름에 대한 유속 기준을 맞추는 실정으로 급경사지 구간에는 적합하지 않는 기준으로 급경사지 내 강우유출수의 흐름양상을 고려한 기준의 개선이 필요함

○ 본 연구에서는 급경사지 구간의 하수관로 기준 개선 방안 도출을 위하여 실제 사업지구(청주 동남지구)의 급경사지 구간의 설계를 검토하여 문제점을 분석하고 사

업지구의 급경사지 구간 하수관로 내 강우시 유출모니터링을 수행, 이를 도시유출모형과 비교를 통해 강우유출수의 관거 내 유입비율을 모의하였음. 그리고 수치해석모형을 이용하여 2차선 도로의 표준단면을 구축하고 경사별 강우유출수의 관거 내 유입비율을 모의하였음.

○ 또한, 급경사기 하수관로 내 강우유출수의 흐름이 맨홀부에 대한 충격 영향을 분석하기 위하여 경남 산청군 일원에 하수관로를 대상으로 유속 및 유량별 맨홀부 수충격력 현장모의실험을 수행하였음. 그리고 대상지구를 수치해석모형으로 구축하여 경사별, 유속별로 맨홀부의 수충격력 모의분석을 수행하였음

(연구의 주요내용)

○ 국외 우수관에 대한 최대 유속 기준검토

○ 유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정

- 연구대상지구 선정 및 모니터링 계획 수립
- 급경사지 내 하수관로 유출모니터링 수행

○ 도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행

- 도시유출모형의 선정
- 대상지구에 대한 도시유출모형의 구축 및 우수수리계산서와 비교분석
- 실유속 측정자료를 이용한 하수관로 내 우수유입비율 산정
- 급경사지 내 맨홀 및 관로의 추가 여부에 따른 하수관로 유속 분석
- 급경사지 상류부 유역의 U형 측구 적용에 대한 하수관로 유속 분석

○ 현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정

- 맨홀부의 구조적 안정성 분석을 위한 수충격력 실험 개요
- 맨홀부 수충격력 측정을 위한 연구대상지구 선정 및 현장모의실험 수행

○ 현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석

- 수치해석모형의 선정
- 현장모의실험 지구의 모형구축 및 맨홀부 충격압 분석

- 급경사지 도로부에 대한 모형 구축 및 경사별 강우 유출 모의

○ 급경사지 하수관로 및 맨홀부에 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시

□ 연구결과

○ 국외 우수관에 대한 최대 유속 기준검토

- 우리나라의 우수관에 대한 설계는 지난 40년간 획일적으로 최대 허용 유속을 3.0 m/s로 고정하여 사용해왔음. 하지만 조사된 국외의 대부분의 기준에서는 우수관의 종류(재질, 공법, 크기 등)와 우수관의 보호 조치(앵커 설치, 변형 및 부식 방지 조치)의 반영에 따라 다양한 기준을 적용하고 있음. 이에 따라 우수관의 최대 유속 기준이 대부분 4.5 m/s~6.0 m/s의 범주에 있는 것으로 파악되었음. 또한, 본연구의 공간적인 범위인 급경사지와 관련한 국외의 우수관의 설계기준을 검토한 결과, 우수관에 앵커를 활용한 충격 방지, 우수관의 종류, 우수관 내 유속저감장치를 두면 최대 9.14 m/s까지 관내 유속을 허용하는 것으로 조사되었음

○ 유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정

- 연구대상지구인 청주 동남지구 내 급경사지 구간에 시공된 도로부의 하수관거를 대상으로 유속 측정 모니터링을 수행하였음. 모니터링 수행기간은 2018년 6월부터 9월까지 3개월에 걸쳐 수행하였으며, 강우시 하수관거 내 유속측정값을 제시하여 도시유출모형을 통한 유속모의의 자료로 활용하였음

○ 도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행

- 하수관거의 유속모의를 위하여 도시유출모형 중 SWMM 모형은 선정하였음. 연구대상지구의 급경사지 구간에 대해 설계시 작성된 수리계산서를 검토하였으며, 수리계산서와 우수종단면도 상의 구배설정 및 맨홀 및 관거의 추가 과정에 대해 검토하고 SWMM 모형과 비교 분석하였음. 그 결과 단순 Manning 공식을 사용한 관거 설계프로그램인 MAKESW와 SWMM 모형에 유속의 차이가 발생하였으며 전반적으로는 SWMM 모형이 맨홀의 낙차공 등을 고려하기에 작은 유속 값으로 분석하는 것으로 검토되었음. 하류부로 갈수록 상부유역의 영향을

보다 고려하는 SWMM 모형에서는 설계에서 제시하는 유속값 보다 큰 값이 모의되었으며 최대유속 기준 3.0 m/s를 초과하는 구간도 발생하였음

- 유속 측정 모니터링 수행구간에 대해 SWMM 모형을 구축하고 유속을 비교한 결과, 측정값이 모형모의값에 비해 작은 값으로 나타났음. 이는 SWMM 모형은 해당유역에서 발생하는 모든 강우유출수가 맨홀로 유입되는 조건으로 발생하며 실제 급경사지 구간의 강우유출수 흐름은 지표면 흐름이 대부분으로 관거 유입비율이 적은 이유로 판단됨. 이에 2018년 6월 28일에 발생한 강우사상을 대표로 분석한 결과 강우량의 30%를 적용하였을 때, 실측값과 유사한 것으로 분석되었음
- 급경사지에서 하수관거로 유입되는 강우유출수의 비율은 후속되는 연구를 통해 경사, 강우, 도로단면에 대한 지속적인 분석이 필요함. 본 연구에서는 우선적으로 강우량의 30%가 유입된다는 가정으로 두고 홍수량의 30%를 적용하였을 때 하수관거의 유속 분석을 수행하였음. 그 결과 홍수량 100% 적용에서 최대유속 기준을 초과하는 구간을 포함한 모든 관거에서 최대유속기준을 만족하였음
- 급경사지 구간의 경우 최초 우수관을 포함한 일부 유역에서는 U형 측구로 강우유출수를 처리하는 방안에 대한 분석을 수행하였음. 모니터링 지점 구간에 대해 상류부 관거 2구간을 U형 측구로 대처하여 분석한 결과, 하류부 관거의 유속 영향은 미비한 것으로 분석되어, 상류부 유역면적이 작으면 U형 측구로 대체하는 기준 마련의 필요성을 제시하였음

○ 현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정

- 본 연구수행기관인 토지주택연구원에서는 2010년 관거의 유속 및 유량에 따른 맨홀부 수충격력시험을 한국건설기술연구원에서 수행한 바 있음. 이와 관련한 자료의 축적을 위하여 본 연구에서는 경상남도 산청군 산청읍 고모리 1177번지 일원에 하수관거 시공 지점을 연구대상지구로 선정하고 살수차를 이용하여 맨홀부 수충격력 실험을 수행하였음. 실험 결과, 최대유속으로 나타난 1.95 m/s에서는 수충격력이 32 kgf로 나타났음. 이는 1호 맨홀 자체의 하중 3.7 ton에 비해 약 1% 정도에 해당하는 값으로 수충격력이 맨홀에 주는 영향은 거의 없는 것으로 판단됨. 또한 본 실험과 관련하여 전문가 자문을 요청하였으며 검토의견서에서도 관거 내 흐름에 따른 맨홀부의 영향은 미미한 것으로 판단하였음

○ 현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석

- 현장에서 수행한 수충격력 실험을 바탕으로 하수관로를 모델링하여 수치해석을 통해 하수관로의 유량 및 경사에 따른 유속 및 충격압 분포 특성을 알아보았음. 하수관로의 유량에 따른 하수관거 유출부의 유속 분포를 살펴보면, 유량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 관수로 내 수위는 점차 높아지는 것으로 나타났음. 충격압의 크기는 유량이 증가함에 따라 점차 증가하였으며, 최대 충격압의 위치는 더 멀리 작용하였음. 하수관로의 경사에 따른 유속 분포 특성을 살펴보면, 경사가 높아짐에 따라 유속이 증가하였으며, 관수로 내 수위는 점차 감소하였음. 충격압의 크기는 경사가 높아짐에 따라 증가하였으며, 최대 충격압의 위치 또한 맨홀부의 벽면에 가까워지는 경향을 보였음. 특히 맨홀부의 바닥뿐만 아니라 벽면에도 충격압이 작용하는 결과를 보였음. 다양한 경사 조건에 따른 급경사지 도로부 해석 결과, 도로부에 유출되는 우수의 유속 분포는 경사가 올라갈수록 증가하였으며, 이로 인해 맨홀에 유입되지 않고 일부 우수의 경우 월류(overflow)되는 현상을 보였음. 또한 경사가 증가함에 따라 맨홀에 유입되는 우수의 비율이 감소하는 경향을 보였음

○ 급경사지 하수관로 및 맨홀부에 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시

- 현재 한국토지주택공사의 토목 설계지침(2018)은 관로시설 설계기준(환경부, 2018)과 마찬가지로 최대 유속 기준과 원형관거의 경우 만관흐름이라는 기준으로 제시하고 있음. 본 연구에서 수행한 국외 우수관의 최대유속 기준과 급경사지의 강우유출수 흐름양상 분석으로 LH 설계기준에 대한 개선 방향의 설정은 가능하였으나, 구체적인 개선방안의 제시를 위하여 후속 연구를 통해 자료의 축적과 분석을 수행하고자 함. LH 설계 지침 개선방향 중 하나의 예로써 본 연구에서 제시한 급경사지의 최초 우수관을 포함한 상류부 유역을 U형 측구로 대체 가능하다는 결과를 이용하여 연구대상지구인 청주 동남지구 내 급경사지 구간으로 과대한 맨홀과 우수관이 계획된 배수지의 우수계획의 변경안을 제시하였음. 기존 지하구조물로 구성된 우수관과 맨홀을 U형 측구로 대체, 지표에서 처리함으로써 시공성 향상 및 원가절감의 효과를 기대할 수 있음

차 례

제1장 서론 ····· 3

1.1 연구의 배경 및 필요성 ····· 3

1.2 연구의 내용 ····· 6

제2장 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준 검토 ····· 11

2.1 한국토지주택공사(2010)의 조사결과 분석 ····· 11

2.2 금회 조사 결과 ····· 13

2.2.1 미국의 우수관에 대한 최대 유속 기준 ····· 13

2.2.1 캐나다의 우수관에 대한 최대 유속 기준 ····· 19

2.2.3 홍콩의 우수관에 대한 최대 유속 기준 ····· 20

2.3 국외 사례의 조사를 통한 시사점 ····· 21

제3장 유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정 ····· 25

3.1 연구대상지구의 개요 ····· 25

3.2 급경사지 내 하수관로의 유출 모니터링 방법 ····· 26

3.2.1 모니터링 지점 선정 ····· 26

3.2.2 모니터링 계획 및 수행 ····· 29

3.3 급경사지 내 하수관로의 유출 모니터링 결과 ····· 33

제4장 도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행 ····· 43

4.1 도시유출모형 선정 및 개요 ····· 43

4.1.1 도시유출모형의 선정 ····· 43

4.1.2 도시유출모형(SWMM)의 개요 ····· 50

4.2 대상지구에 대한 도시유출모형 구축 및 우수수리계산서와 비교 분석 ····· 51

4.2.1 대상지구에 대한 우수수리계산서 분석 ····· 51
4.2.2 대상지구에 대한 도시유출모형 모의(동남지구 E유역) ····· 54
4.3 실유속 측정자료를 이용한 하수관로 내 우수유입비율 산정 ····· 57
4.3.1 대상지구에 대한 도시유출모형 구축(모니터링 지점) ····· 58
4.3.2 유출모형을 이용한 하수관로 내 강우유입수 유입비율 산정 ····· 60
4.4 급경사지 내 맨홀 및 관로의 추가 여부에 따른 하수관로 유속 분석 ····· 63
4.5 급경사지 상류부 유역의 U형 측구 적용에 대한 하수관로 유속 분석 ····· 67

제5장 현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정 ····· 73
5.1 맨홀부의 구조적 안정성 분석을 위한 수충격력 실험 개요 ····· 73
5.2 맨홀부 수충격력 실험을 위한 연구대상 지구 선정 ····· 75
5.3 맨홀부 수충격력 측정을 위한 현장모의실험 ····· 80

제6장 현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석 ····· 85
6.1 수치해석모형(FLOW-3D)의 개요 ····· 85
6.1.1 지배방정식 ····· 85
6.1.2 자유수면 표현기법 (Volume of Fluid method, VOF) ····· 88
6.1.3 FAVOR 방법 ····· 90
6.2 하수관로 수치해석 경계조건 및 제원 ····· 92
6.3 하수관로 모형 해석을 이용한 수치 해석 결과 ····· 94
6.3.1 유량에 따른 관로 내 유속 분석 ····· 94
6.3.2 유량에 따른 맨홀부 충격압 분석 ····· 101
6.3.3 하수관로 경사에 따른 관로 내 유속 분석 ····· 102
6.3.4 하수관로 경사에 따른 맨홀부 충격압 분석 ····· 109
6.4 경사지 도로부 강우 유출 모의 ····· 111
6.4.1 도로 유출부 수치해석 조건 및 제원 ····· 111
6.4.2 도로 경사에 따른 관거 유입량 분석 ····· 114

6.5 요약 및 추후 연구 방향 ····· 118
6.5.1 요약 ····· 118
6.5.2 추후 연구 방향 ····· 119

제7장 급경사지 하수관로 및 맨홀부에 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시 ····· 123

제8장 결론 ····· 129

참고문헌 ····· 135

표 차 례

[표 1-1] 연구 내용 ····· 6
[표 2-1] 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준(한국토지주택공사, 2010) ····· 21
[표 2-2] 미국 텍사스 주 웨더퍼더(weatherford)시의 최대 유속 기준 ····· 14
[표 2-3] 급경사지에 대한 관거 종류별 최대 허용 유속(Clark County, 2009) ····· 16
[표 2-4] 캐나다의 우수관에 대한 최대 유속 기준 ····· 19
[표 3-1] 유량계(Stingray) 장비 사진 및 제원 ····· 32
[표 3-2] 지점1,2 유속 모니터링 결과 ····· 3
[표 4-1] SWMM 모형의 기본 가정 ····· 74
[표 4-2] 우수관거 수리계산시 적용되는 모형 비교 및 선정 ····· 49
[표 4-3] 대상유역 관거에 대한 우수수리계산서(수정)와 SWMM 모형 결과값 비교 ····· 55
[표 4-4] 맨홀 추가 여부 및 홍수량 적용 비율에 따른 관거 내 유속 모의결과 ····· 6
[표 4-5] 급경사지 상류부 관거의 U형 측구로 대처에 따른 관거 유속 모의결과(홍수량 100%) ····· 86
[표 4-6] 급경사지 상류부 관거의 U형 측구로 대처에 따른 관거 유속 모의결과(홍수량 30%) ····· 96
[표 5-1] 유속, 유량별 맨홀부 수충격력 실험 결과 ····· 8
[표 6-1] 수치해석에 사용된 유량 및 경사 조건 ····· 9
[표 6-2] 경사지 도로부 수치해석 조건 ····· 114
[표 7-1] 한국토지주택공사 토목 설계지침 내 하수관거의 유속 및 유효수심 기준 ····· 123

그림차례

[그림 1-1] 경사에 따른 관로 설계 ····· 3
[그림 1-2] 하수도 설계기준 내 최소, 최대 유속경사(건설부, 1980) ····· 4
[그림 1-3] 연구의 세부수행계획 ····· 7
[그림 2-1] 금속 재질의 주름관과 고밀도 폴리에틸렌 관 ····· 15
[그림 2-2] 우수관의 고정을 위한 앵커 모습 ····· 17
[그림 2-3] Flanged pipe joint와 Butt-fused pipe joint ····· 17
[그림 2-4] 나선형의 관, SWPE관, 주철관 ····· 18
[그림 3-1] 모니터링 대상 사업지구 ····· 23
[그림 3-2] 모니터링 지점 선정 ····· 27
[그림 3-3] 강우 유출수 유입 형태에 따른 모니터링 지점 분류 ····· 28
[그림 3-4] 모니터링 1지점 맨홀 ····· 30
[그림 3-5] 모니터링 2지점 맨홀 ····· 33
[그림 3-6] 2지점 모니터링결과(2018.06.26~27) ····· 43
[그림 3-7] 1,2지점 모니터링결과(2018.07.01~06) ····· 53
[그림 3-8] 1,2지점 모니터링결과(2018.07.09~10) ····· 63
[그림 3-9] 1,2지점 모니터링결과(2018.07.28) ····· 73
[그림 3-10] 1,2지점 모니터링결과(2018.08.23~28) ····· 83
[그림 3-11] 1,2지점 모니터링결과(2018.08.30~09.01) ····· 93
[그림 4-1] RRL 모형에 의한 유출 계산 과정 ····· 45
[그림 4-2] ILLUDAS 모형의 유출계산 흐름도 ····· 46
[그림 4-3] SWMM 모형의 유출해석 절차 ····· 48
[그림 4-4] SWMM 모형을 이용한 우수관거 수리계산 적용(예시) ····· 105
[그림 4-5] 청주 동남지구 E유역 위치도 ····· 55
[그림 4-6] 연구대상지구 설계 우수수리계산서 검토 ····· 58

[그림 4-7] 우수수리계산서(수정)에 대한 관내 유속 산정 ····· 35
[그림 4-8] 청주 동남지구 E유역 SWMM 모형 구축 ····· 45
[그림 4-9] 우수종단면도에서 추가되는 맨홀 및 하수관거 ····· 56
[그림 4-10] 급경사지 구간의 유출 양상 ····· 73
[그림 4-11] 모니터링 지점 유역에 대한 SWMM 모형 구축 ····· 85
[그림 4-12] 우수종단면도를 이용한 SWMM 모형의 관망 구성 ····· 95
[그림 4-13] 강우의 100% 유입적용 시 SWMM 모형 결과값과 측정값의 비교 ····· 06
[그림 4-14] 강우의 30% 유입적용 시 SWMM 모형 결과값과 측정값의 비교 ····· 16
[그림 4-15] 맨홀 추가 전후의 관망 구성(청주 동남지구) ····· 46
[그림 4-16] 수리계산서상의 맨홀 추가부 구성 전 관망 구성(청주 동남지구) ····· 46
[그림 4-17] 급경사지 상류부 유역 관거의 U형 측구 대체(안) ····· 76
[그림 5-1] 맨홀 내 내충격성 실험(토지주택연구원, 2010) ····· 47
[그림 5-2] 맨홀부 수충격력 실험을 위한 연구대상지구 ····· 73
[그림 5-3] 계획평면도 및 종단면도 ····· 76
[그림 5-4] 관기초 및 관부설 상세도 ····· 77
[그림 5-5] 집수정 및 U형 측구 상세도 ····· 78
[그림 5-6] 원형1호맨홀 상세도 ····· 79
[그림 5-7] 맨홀부 수충격력 실험 수행 ····· 80
[그림 5-8] 자문을 통한 맨홀부 수충격력 실험 검토의견서 ····· 82
[그림 6-1] 유한체적방법 도해 ····· 86
[그림 6-2] VOF 방법의 개념 ····· 89
[그림 6-3] FAVOR 방법의 개념 ····· 91
[그림 6-4] 하수관거 격자망(mesh) 구성 ····· 92
[그림 6-5] 하수관거 경계조건 구성 ····· 93
[그림 6-6] 하수관거 해석 결과(Q = 0.0785 m^3/sec) ····· 59
[그림 6-7] 하수관거 해석 결과(Q = 0.0942 m^3/sec) ····· 59
[그림 6-8] 하수관거 해석 결과(Q = 0.1177 m^3/sec) ····· 69
[그림 6-9] 하수관거 해석 결과(Q = 0.1421 m^3/sec) ····· 69

[그림 6-10] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.0785 m^3/sec) ····· 79
[그림 6-11] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.0942 m^3/sec) ····· 79
[그림 6-12] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.1177 m^3/sec) ····· 89
[그림 6-13] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.1421 m^3/sec) ····· 89
[그림 6-14] 유량 - 도달시간 관계 ····· 99
[그림 6-15] 해석 단면 ····· 100
[그림 6-16] 유량에 따른 유속 분포 (A-A' line) ····· 101
[그림 6-17] 유량에 따른 최대 유속 및 최대 수심 ····· 101
[그림 6-18] 맨홀부 충격압 분포 특성 (B-B' line) ····· 102
[그림 6-19] 하수관거 해석 결과(degree = 1.23°) ····· 103
[그림 6-20] 하수관거 해석 결과(degree = 3.23°) ····· 103
[그림 6-21] 하수관거 해석 결과(degree = 5.23°) ····· 104
[그림 6-22] 하수관거 해석 결과(degree = 7.23°) ····· 104
[그림 6-23] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 1.23°) ····· 105
[그림 6-24] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 3.23°) ····· 105
[그림 6-25] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 5.23°) ····· 106
[그림 6-26] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 7.23°) ····· 106
[그림 6-27] 경사 - 도달시간 관계 ····· 107
[그림 6-28] 경사에 따른 유속 분포 (A-A' line) ····· 108
[그림 6-29] 경사에 따른 최대 유속 및 최대 수심 ····· 108
[그림 6-30] 경사에 따른 충격압 분포 (B-B' line) ····· 109
[그림 6-31] 경사에 따른 충격압 분포 (C-C' line) ····· 110
[그림 6-32] 경사지 도로부 강우 유입 양상 ····· 111
[그림 6-33] 경사지 도로부 격자망 구성 ····· 112
[그림 6-34] 경사지 도로부 제원 ····· 113
[그림 6-35] 경사지 도로부 경계조건 구성 ····· 113
[그림 6-36] 도로부 경사도 1° 해석 결과 ····· 115
[그림 6-37] 도로부 경사도 3° 해석 결과 ····· 115

[그림 6-38] 도로부 경사도 3.95° 해석 결과 ····· 116
[그림 6-39] 도로부 경사도 5° 해석 결과 ····· 116
[그림 6-40] 도로부 경사도 7° 해석 결과 ····· 117
[그림 6-41] 도로부 경사에 따른 맨홀 유입 비율 ····· 117
[그림 7-1] 연구대상지구 내 배수지 진입로 우수처리 계획(기존) ····· 125
[그림 7-2] 연구대상지구 내 배수지 진입로 우수처리 계획(변경) ····· 126

제 1 장
서 론

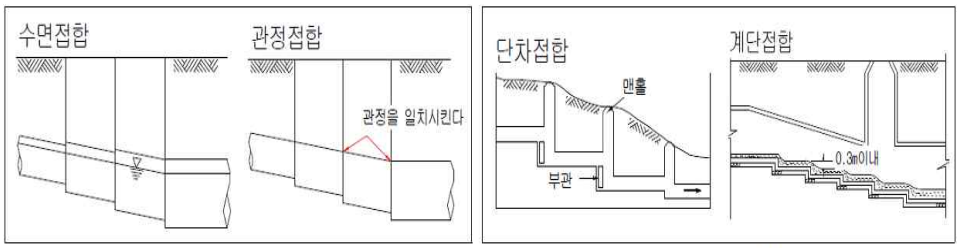
LAND & HOUSING INSTITUTE

제1장 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

하수관거 내 유속은 저유속에 따른 관로내 오물침전, 침전물 준설에 따른 유지관리비용과 과유속에 따른 관로손상, 내용연수 감소 등을 고려하여 일반적으로 하류방향 흐름에 따라 점차로 커지고, 관로경사는 점차 작아지도록 고려하여 시공하도록 규정하고 있다.

하수도 설치기준에 대해 관로시설 설계기준(환경부, 2017)에 따르면 오수관로는 계획시간 최대오수량에 대해 최소유속 0.6 m/s, 최대유속 3.0 m/s로 제시하고 있으며, 지표경사로 관로경사가 급하게 되어 최대유속이 3.0 m/s를 넘게 될 때에는 단차를 설치하여 유속을 감소시키거나 단차설치가 곤란한 경우에는 감세공 설치, 관경이나 맨홀의 종별 상향 또는 수격에 의한 맨홀파손 방지조치를 고려하도록 하고 있다. 또한, 우수관로 및 합류식관로는 계획우수량에 대해 최소유속 0.8 m/s, 최대유속 3.0 m/s로 제시하고 있다. 이는 비중이 상대적으로 큰 토사류의 침전방지와 급경사지 등에서 과유속에 따른 관로손상, 유달시간 단축에 따른 하류지점 유량집중을 방지하기 위한 것으로 유속기준을 만족시키기 위해서는 단차 및 계단을 두어 경사를 완만하게 하여야 한다고 제시하고 있다.



〈거의 평지인 경우 적용〉 〈비교적 경사지인 경우 적용〉

[그림 1-1] 경사에 따른 관로 설계

설계기준에 의거하여 사업지구에서는 급경사지의 경우 최대유속 3.0 m/s 기준을 부합하기 위하여 맨홀 설치를 강제하고 있어 맨홀 추가 설치에 따른 공사비 과다로 인한 사업성 저하와 유지관리 및 지자체 인수인계에 대한 문제점이 발생하고 있는 실정이다.

그러나 현재 적용되고 있는 최대 유속규정인 3.0 m/s에 대한 기준은 하수도 설계기준(건설부, 1980)에서도 명시하고 있는 바, 지난 37년간 기준의 개선없이 적용되어 오고 있다. 이는 하수관로 및 맨홀부 등의 토목기술에 대한 설계 및 시설의 비약적인 발달 이전의 상황으로 시대에 맞지 않는 설계기준으로 개선의 필요가 있다고 판단된다.

1.3 流速 및 勾配

流速은 一般的으로 下流로 流下함에 따라 漸次로 커지고 勾配는 下流로 감에 따라 漸次 적어지도록 다음의 各項을 考慮하여 決定 하여야 한다.

(1) 汚水管渠

汚水管渠에 있어서는 最大下水量에 對하여 流速을 最小 0.6m/초, 最大 3.0m/초로 한다.

(2) 雨水管渠 및 合流管渠

雨水管渠 및 合流管渠에 있어서는 計劃下水量에 對하여 流速을 最小 0.8m/초, 最大 3.0m/초로 한다.

[그림 1-2] 하수도 설계기준 내 최소, 최대 유속경사(건설부, 1980)

급경사지 하수관로 및 맨홀 설치에 대한 개선 기준 마련에 있어서 필요한 연구는 크게 2가지로 구분될 수 있다. 첫째, 경사에 따른 하수관로의 실유속 산정 방법론 구축과 둘째, 실유속 적용에 따른 하수관로 및 맨홀의 안정성 확보가 있다.

하수관로의 실유속 산정 방법론 구축 측면에서 살펴보면, 현재 관로시설의 설계기준에 적용되는 관로 내 유속 산정은 자연유하일 경우 Manning 공식 또는 Kutter 공식을 사용하고 있다. 이는 유속 산정에 대한 간략식으로 실유속과는 차이가 나며, 기본계획 수립 시에는 적용이 가능하나 실시설계 단계에서는 유속 산정 방식에 대한

개선의 필요성이 있다. 또한, 우수관로 내의 유속을 산정하는 기술이 과거 등류 계산방식이였으나, 현재 기술의 발달로 인하여 수리학적 동역학과 추적을 계산하는 수준으로 발전하고 있다. 미국환경청(EPA)에서 개발한 SWMM(Storm Water Management Model) 모형의 경우 도시유출해석 모형으로 관망의 정밀한 구성 및 수리학적 동역과 추적이 가능한 모형으로 관거 유속산정에 있어 Manning 공식 또는 Kutter 공식을 사용하는 간략적으로 유속을 구하는 방법과는 달리 우수관로의 실제 자연현상을 엄밀하게 해석할 수 있는 단계에 이르렀다.

실유속 적용에 따른 하수관로 및 맨홀의 안전성 확보 측면에서 살펴보면, 하수관거 및 맨홀부 내 유속에 따른 흐름 및 하중 분석에 대해서 모형수치해석 프로그램의 적용이 가능하다. 이 중 FLOW-3D는 유한차분법(FDM; Finite Difference Method)에 따라 비정상 흐름을 해석하는 범용 3차원 해석 프로그램으로 유속에 따른 하수관로 및 맨홀부의 흐름 양상과 하중에 대한 모의가 가능하다.

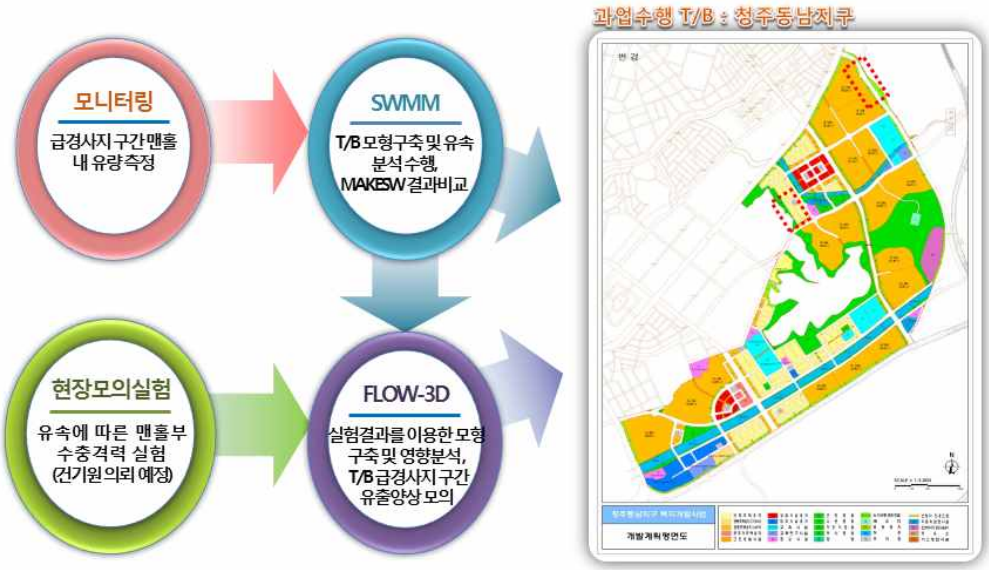
따라서, 본 연구에서는 급경사지 하수관로에 대해 유출모니터링과 도시유출모형을 통한 급경사지 하수관로의 실유속의 산정, 현장모의실험과 수치해석모형을 통한 하수관로 및 맨홀부의 안정성 분석을 수행하고 급경사지에 과다하게 설치되는 맨홀을 합리적으로 최소화하는 근거를 제시함으로써 설계기준 개정, 재무안정 및 원가절감 분야에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 내용

본 연구의 목적을 달성하기 위한 연구의 개략 내용과 범위는 [표 1-1]과 같다.

[표 1-1] 연구 내용

연구 범위	내 용
국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준 검토	• 국외 우수관에 대한 설치기준 검토 • 국내 기준에 대한 문제점 및 개선 필요성 제시
유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정	• 유출모니터링을 위한 연구대상지구 선정 • 급경사지 내 하수관로의 유출 모니터링 계획 및 수행
도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행	• 대상지구에 대한 도시유출모형 구축 및 우수수리계산서와 비교 분석 • 실유속 측정자료를 이용한 하수관로 내 우수유입비율 산정 • 급경사지 내 맨홀 및 관로의 추가 여부에 따른 하수관로 유속 분석 • 급경사지 상류부 유역의 U형 측구 적용에 대한 하수관로 유속 분석
현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정	• 현장모의실험을 위한 대상지구 선정 • 맨홀부의 구조적 안정성을 위한 현장모의실험 수행
현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로의 유출에 다른 맨홀부 영향분석	• 유량에 따른 관로 내 유속 및 수충격력 분석 • 경사에 따른 맨홀부 충격압 분석 • 경사지 도로부 경사에 따른 관거 유입량 분석
급경사지 하수관로 및 맨홀부에 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시	• 설계지침 개선 방향 제시 • 연구대상지구 내 적용 사례



[그림 1-3] 연구의 세부수행계획

제 2 장
국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준 검토

LAND & HOUSING INSTITUTE

제2장 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준 검토

전 절에서 기술한 바와 같이 우리나라의 우수 관거에 대한 최대 유속의 설계 기준은 환경부(2017)에서 3.0 m/s로 제시하고 있다. 관내 최대 유속의 제한 기준을 두는 이유는 관내에 유속이 크면, 우수관의 경우에 유출량과 함께 유입되는 모래질 토사가 관체에 마모 손상을 일으킬 가능성이 있으므로 이를 방지하기 위한 안전성 측면에서 고려한 점이 크다(한국토지주택공사, 2010).

본 연구에서는 우리나라에서 사용하고 있는 우수 관거에 대한 최대 유속 기준의 적절성을 검토하기 위해 국외의 사례를 조사하였다. 국외 사례는 선행 연구인 한국토지주택공사(2010)에서 조사한 자료와 금회 추가 조사한 자료를 함께 기술하였다. 그리고 조사된 국외 사례를 통한 시사점을 제시하였다.

2.1 한국토지주택공사(2010)의 조사결과 분석

[표 2-1]은 한국토지주택공사(2010)에서 제시한 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준을 요약하여 나타낸 표이다. 우수관의 최대 유속 기준은 국가와 지역에 따라 상이한 기준을 가지는 것으로 나타났고, 대체로 3.0~4.5 m/s의 범위인 것으로 분석되었다. 특히, 일본과 미국의 Michigun 주, 캐나다의 City of Edmonton에서만 우리나라와 동일한 3.0 m/s의 기준을 가질 뿐 대부분의 국가와 주에서는 이를 상회하거나 기준 자체가 존재하지 않는 것으로 나타났다.

특이할만한 점은 호주의 퀸스랜드 배수 매뉴얼에서는 급경사 지형의 최대 유속을 만관 시에 6.0 m/s보다 크지 않도록 하되, 본 조건을 충족하기 위해서 흐름의 운동에너지의 일정 부분을 소산시키기 위한 낙차 구조물(drop structure)을 두거나, 관경을 제한하도록 한 것이다.

[표 2-1] 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준(한국토지주택공사, 2010)

국가(출처)		최대 유속	비고
일본	하수도 핸드북(1987)	3.0 m/s	개수로이며 깨끗한 물의 경우, 12.2 m/s까지 가능
	하수도시설계획·설계지침과 해설(2001)	3.0 m/s	
미국	Wastewater Engineering: Collection and pumping of wastewater	기준 없음	명기되지 않음
	Florida 주	파형 강관: 3.0 m/s 흄관: 3.6 m/s	
	Iowa 주	4.5 m/s	
	South Carolaina 주	우수관: 3.6 m/s 암거: 4.5 m/s	
	Michigun 주	3.0 m/s	
	City of Rohnert Park	기준 없음	최대경사: 10%
캐나다	Region of Peel	3.5 m/s	
	City of Oshawa	4.0 m/s	
	City of Edmonton	3.0 m/s	
유럽(영국)	BS EN 752-4 (유럽기준)	기준 없음	명기되지 않음
호주	Queensland Urban Drainage Manual(2007)	부분 흐름: 7.0 m/s 만관 흐름: 6.0 m/s	권장 최대 유속 부분 흐름: 4.7 m/s 만관 흐름: 4.0 m/s

2.2 금회 조사 결과

금회 조사에서는 한국토지주택공사(2010)에서 조사한 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준과 중복되지 않는 지역에 대하여 보다 구체적으로 조사하였다. 금회 조사된 국가는 크게 미국, 캐나다, 홍콩이고, 미국과 캐나다의 경우에는 여러 지역(주, 도시 등)에 대하여 조사된 결과를 포함하였다.

2.2.1 미국의 우수관에 대한 최대 유속 기준

미국의 우수관에 대한 최대 유속 기준은 텍사스 주 웨더퍼더(weatherford) 시, 노스캐롤라이나(North Carolina) 주, 워싱턴(Washington) 주 등에 대하여 조사하였다.

우선, 미국 텍사스 주 웨더퍼더시의 우수관에 대한 최대 유속 기준은 City of Weatherford(2007)를 참고하여 조사하였다. City of Weatherford(2007)에서는 우수관의 재질에 따라 최대 허용 속도를 제한하고 있는데, [표 2-2]는 해당 기준을 나타낸다. 즉, 콘크리트 우수관의 최대 허용 속도는 10 ft/s(3.65 m/s), 콘크리트 암거(culvert), 금속 재질의 주름진 관(Corrugated Metal Pipe; CMP), 고밀도 폴리에틸렌 관(High-Density Polyethylene(HDPE) Pipe)의 최대 속도는 15 ft/s(4.57 m/s)로 제시하였다. 참고로 [그림 2-1]은 금속 재질의 주름진 관과 고밀도 폴리 에틸렌 관의 예를 제시한 그림이다.

노스캐롤라이나(North Carolina) 주의 우수관의 설계 기준 North Carolina(2008)를 통해 조사하였다. 해당 문헌에서는 최대 유속 기준을 직접적으로 제시하기 보다는 설계 유속이 특정 값을 초과하는 경우에 대한 조치 계획만을 제시하고 있다. 즉, 설계 유속이 4.57 m/s를 초과하는 경우에는 우수관과 맨홀이 부식(erosion)과 충격(impact)에 의한 변형(displacement)에 대비되어야 함을 명시하고 있다. 그리고 설계 유속이 20 ft/s(6.10 m/s)를 초과하는 경우, 설계 보고서와 도면에 부식 제어 공법(erosion control measures)에 관하여 설명되어야 함을 기술하고 있다. 즉, 노스캐롤라이나 주에서는 관의 부식과 충격에 대한 적절한 조치만 계획된다면, 설계 유

속이 6.10 m/s를 초과하더라도 관의 안전에 문제가 되지 않을 것으로 판단한 것이다.

[표 2-2] 미국 텍사스 주 웨더퍼더(weatherford)시의 최대 유속 기준

Type of Section/Feature	Coefficient of Roughness "n"	Velocity, fps[1]
I. Natural Creeks		
A. Creek Section		
1. Some grass & weeds; little or no brush	0.045	3.0 to 6.0
2. Dense growth of grass or brush	0.055	3.0 to 6.0
3. Dense brush and trees	0.065	3.0 to 6.0
B. Floodplain/Overbank Areas		
1. Grass, Weeds, Some brush & trees	0.045	3.0 to 6.0
2. Dense Grass, Weeds or Brush	0.055	3.0 to 6.0
3. Dense Brush & Trees	0.080	3.0 to 6.0
II. Improved Open Channels		
A. Gabion Channels	0.035	3.0 to 10.0
B. Pre-Cast Concrete Block Channels	0.035	3.0 to 10.0
C. Natural Stone Channels	0.035	3.0 to 10.0
D. Grass Vegetated Channels (maintained)	0.035	3.0 to 6.0
E. Concrete Channels	0.016	5.0 to 15.0
F. Rock Rip-Rap Channels	0.035	5.0 to 10.0
III. Streets		
A. Concrete	0.015	N/A
B. Asphalt	0.018	N/A
VI. Pipe		
A. Reinforced Concrete Pipe		
1. Inlet Laterals	0.013	3.0 to 10.0
2. Storm Sewer Mains	0.013	3.0 to 12.0
3. Culverts	0.013	3.0 to 15.0
*B. Corrugated Metal Pipe	0.022	3.0 to 15.0
*C. High Density Polyethylene Pipe	0.011	3.0 to 15.0
VII. Reinforced Concrete Box	0.015	3.0 to 15.0
* Not used in design of the public storm drain system.		

(a) 금속 재질의 주름관(CMP)

(b) 고밀도 폴리에틸렌 관(HDPE 관)

[그림 2-1] 금속 재질의 주름관과 고밀도 폴리에틸렌 관

워싱턴 주에서는 금회 연구와 직접적으로 관련되어 있는 급경사지에 대한 우수관의 설계 기준을 제시하였다. 관련 내용은 워싱턴 주에 있는 여러 지자체 및 도시의 공통된 기준을 통해 검토할 수 있었는데, 구체적인 참고자료는 Santa Clara County(2007), Clark County(2009), City of Tukwila(2010), King County(2016)이다. 해당 문헌들에서는 [표 2-3]과 같이 우수관의 최대 유속 기준을 제시하고 있는데, 해당 표는 Clark County(2009)에서 발췌한 자료이다.

[표 2-3] 급경사지에 대한 관거 종류별 최대 허용 유속(Clark County, 2009)

Type of Pipe Material	Pipe Slope Above Which Pipe Anchors Required	Maximum Slope Allowed	Maximum Velocity Allowed
CMP, Spiral Rib, PVC, CPE	20% (1 anchor per 100 L.F. of pipe)	30%	30 fps
Concrete or smooth-lined CPE	10% (1 anchor per 50 L.F. of pipe)	20%	30 fps
Ductile Iron*	20% (1 anchor per pipe section)	None	None
HDPE**	40% (1 anchor per 100 L.F. of pipe)	None	None

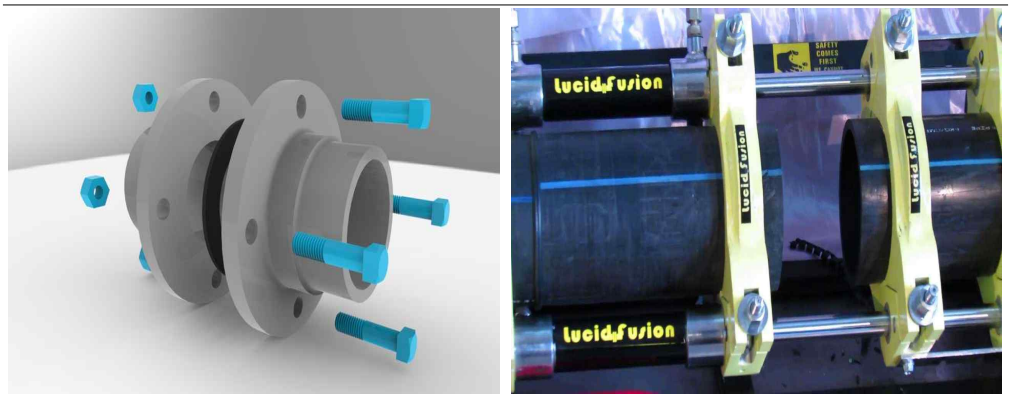
* *Flanged joints required.*

** *Butt-fused joints required.*

CPE = corrugated polyethylene; HDPE = high density polyethylene; L.F. = linear feet; fps = feet per second; PVC = polyvinyl chloride

관련 내용을 보면, 금속 재질의 주름관(CMP), 나선형 관(Spiral Rib pipe), 주름진 폴리에틸렌(Corrugated Poly Ethylene; CPE) 관은 수로 경사가 최대 20~30%일 때 최대 유속이 30 ft/s(9.14 m/s)까지 허용된다. 다만, 수로 경사가 20%를 넘으면, 100 ft(30 m)당 우수관을 고정시킬 수 있는 앵커(pipe anchor)가 설치되어야 한다. 유사하게 콘크리트 관과 직선의 주름진 폴리에틸렌(Line Corrugated Poly Ethylene; LCPE)관은 수로 경사가 10~20%인 경우에 적용될 수 있고 최대 유속은 동일하게 9.14 m/s까지 허용되는데, 50 ft(15 m)당 관을 고정할 수 있는 앵커 설치가 요구된다. 참고로 [그림 2-2]는 우수관의 고정용 앵커를 나타낸 그림이다. 또한, 주철(ductile iron)관과 SWPE(Solid Wall Poly Ethylene)관의 경우, 설치할 수 있는 최대의 수로 경사와 최대 유속에 대한 기준이 없는 것이 특징이다. 다만, 이때에도 [그림 2-3]과 같이 우수관의 연결을 flanged joint 또는 butt-fused joint를 통해 관거의 접합부에서 강도가 저하되는 문제를 해결하도록 하고 있다. [그림 2-4]는 참고로 상기에 언급된 여러 관들의 사진을 나타낸다.

[그림 2-2] 우수관의 고정을 위한 앵커 모습



(a) Flanged pipe joint (b) Butt-fused pipe joint

[그림 2-3] Flanged pipe joint와 Butt-fused pipe joint

(a) 나선형의 관(Spiral Rib pipe)

(b) SWPE(Solid Wall Poly Ethylene)관

(c) 주철 관(ductile iron)

[그림 2-4] 나선형의 관, SWPE관, 주철관

2.2.1 캐나다의 우수관에 대한 최대 유속 기준

캐나다의 우수관에 대한 최대 유속 기준은 Ministry of the Environment(2003), City of Toronto(2014), City of London(2018)을 통해 온타리오(Ontario) 주, 토론토(Toronto) 시, 런던(London) 시에 대한 자료를 조사하였다. 해당 문서들의 공통된 특징은 우수관의 최대 유속 기준을 대체로 6.0 m/s로 제시하고 있다는 점과 해당 기준을 매우 간략히만 소개하고 있다는 점이다.

우선, 온타리오 주에서는(Ministry of the Environment, 2003) 우수관의 최대 허용 속도를 6.0 m/s인 것으로만 기술하고 있을 뿐 어떠한 부연 설명도 없다. 토론토 시(City of Toronto, 2014)에서는 온타리오 주와 동일하게 우수관의 최대 허용 속도를 6.0 m/s로 제시하고 있는데, 3.0 m/s를 초과하는 경우, 관의 변형, 세굴(scouring), 부식, 도수(hydraulic jump)에 대하여 보호할 수 있는 설계 요소를 추가하도록 제시하고 있다. 런던(London) 시에서는 우수관의 직경에 따라 최대 유속 기준을 구분하고 있는데, 우수관의 직경이 300~825 ㎜인 경우에는 4.5 m/s, 우수관의 직경이 900 ㎜ 이상일 때는 6.0 m/s로 제한하고 있다. [표 2-4]은 상기의 내용을 종합하여 정리한 캐나다 주요 지역의 우수관에 대한 최대 유속 기준을 나타낸다.

[표 2-4] 캐나다의 우수관에 대한 최대 유속 기준

지역	최대 유속 기준	비고
온타리오(Ontario) 주	6.0 m/s	최대 유속 기준 이외의 요소 없음
토론토(Toronto) 시	6.0 m/s	3.0 m/s를 초과하는 경우, 관의 변형, 세굴, 부식, 도수에 대한 대책 요구
런던(London) 시	300~825 ㎜: 4.5 m/s 900 ㎜ 이상: 6.0 m/s	관거의 직경에 따른 구분

2.2.3 홍콩의 우수관에 대한 최대 유속 기준

홍콩의 우수관에 대한 최대 유속 기준은 Drainage Services Department(2013)을 통해 조사하였다. Drainage Services Department(2013)에서는 우수관의 최대 허용 유속을 3.0 m/s로 제시하고 있지만, 다음의 조건을 만족하는 경우에는 6.0 m/s까지 허용하는 것으로 기술하고 있다.

① 연속적이고 매끄러우며 내구성이 있는 내마모성의 관(예: 주철관) 또는 내부 라이닝이 된 관

② 모든 접합부, 굴곡부, 맨홀 또는 기타 부속 장치가 적절한 부식 방지 조치로 설계된 경우

즉, 홍콩에서는 관의 불연속 구간(접합부) 없이 연속적으로 설치되면서 부식과 충격에 대한 저항성을 높일 경우, 허용 최대 유속의 기준을 크게 완화하여 준 것이다.

2.3 국외 사례의 조사를 통한 시사점

국외의 여러 사례 조사로부터 우수관에 대한 최대 유속 기준이 국가 또는 지역별로 다양하게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 기준의 차이는 국가(지역)의 지형 및 기상학적 특성과 기술력, 문화 등의 차이에서 비롯되었을 가능성이 크다. 비록 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준이 서로 상이할지라도 공통된 특징을 가지고 있는 바, 본 절에서는 이에 대한 두 가지 시사점을 제시하고자 한다.

우선, 서론에서 기술한 바와 같이 우리나라의 우수관에 대한 설계는 지난 40년간 획일적으로 최대 허용 유속을 3.0 m/s로 고정하여 사용해왔다. 하지만 조사된 국외의 대부분의 기준에서는 우수관의 종류(재질, 공법, 크기 등)와 우수관의 보호 조치(앵커 설치, 변형 및 부식 방지 조치)의 반영에 따라 다양한 기준을 적용하고 있다. 이에 따라 우수관의 최대 유속 기준이 대부분 4.5 m/s~6.0 m/s의 범주에 있는 것으로 파악되었다. 우리나라의 토목 기술 역시 지난 40년간 비약적으로 발전되어 온 만큼, 다양한 조건을 고려한 설계 기준의 제시가 요구된다.

두 번째는 급경사 지역에 대한 설계 기준이다. 급경사 지역은 노면 경사가 매우 급하므로 우리나라 우수 관거의 설계 유속인 3.0 m/s를 맞추기 위해서는 구간을 매우 세분화하고, 맨홀을 포함하여 많은 단차를 두어 설치하는 것이 불가피하다. 또한, 맨홀의 깊이도 수 m에 이르는 등 유지관리에도 어려움이 있다. 하지만 여러 국외의 기준을 보면, 관거 접합부에서 강도 저하로 인한 문제가 발생할 수 있으므로 우수관의 안정성을 높이기 위해서는 오히려 우수관을 연속적으로 설치하고, 접합부의 손상을 막을 수 있는 보호 조치를 계획하도록 하고 있다. 한편, 미국의 워싱턴 주에서는 급경사지에 대한 우수관의 설치 시 앵커를 설치하여 우수관의 안정성을 확보하면, 콘크리트 관일지라도 최대 9.14 m/s의 유속으로 설계가 가능한 것으로 제시하고 있다. 해당 기준은 우리나라의 여건 상 많은 연구 이후에 적용이 시도되어야 할 것으로 판단되고, 현 시점에서는 설계 유속이 4.57 m/s를 초과하는 경우에 굴곡부와 접합부에 앵커를 설치해야 함을 기술하고 있는 Clark County(2009)의 기준을 보완한 적용 정도를 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 급경사 지역에 대하여 노면 경사가 크지 않은 일반적인 도시 지역의 우수관에 대한 설계 기준을 일괄 적용하기 보다는 기술적인 보완책을 두어 적용하는 것을 고려해야 할 것으로 판단된다.

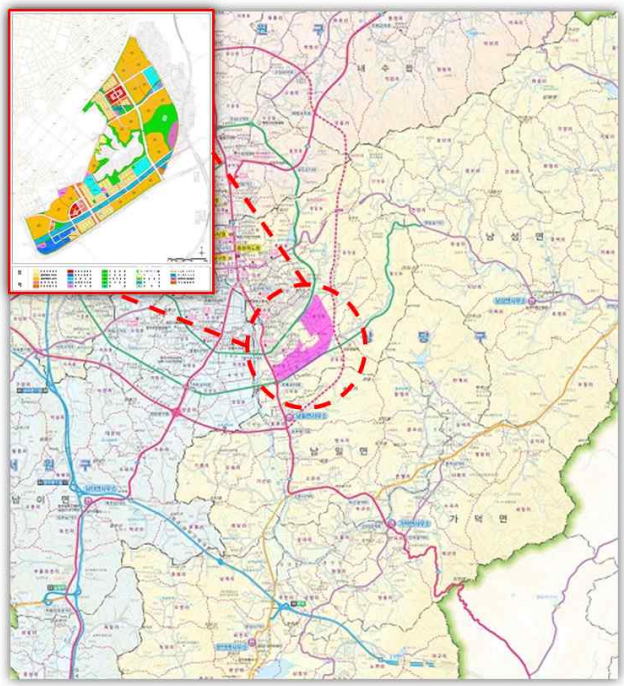
제 3 장
유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정

LAND & HOUSING INSTITUTE

제3장 유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정[1)]

3.1 연구대상지구의 개요

본 연구에서는 기 설치된 도시 급경사지 하수관로 내 실제 유속을 측정하여 실제 유출 양상을 파악하기 위하여 구릉지가 포함된 최대유속이 발생 가능하며, 사업지구 내 단차접합 및 계단접합을 사용한 하수관로가 설치된 사업지구를 연구대상지구로 선정하고자 하였다. 청주 동남지구 택지개발 사업지구는 충청북도 청주시 상당구 용정, 용망, 지북, 둔동, 방서, 평촌동 일원에 위치하고, 면적은 총 2,073,999 m^3으로 사업지구 내 급경사지 구간이 다수 존재한다. 또한, 급경사지 구간에 시공된 도로부와 맨홀의 추가 시공지지점이 존재하여 본 연구의 대상지구로 선정하였다.



[그림 3-1] 모니터링 대상 사업지구

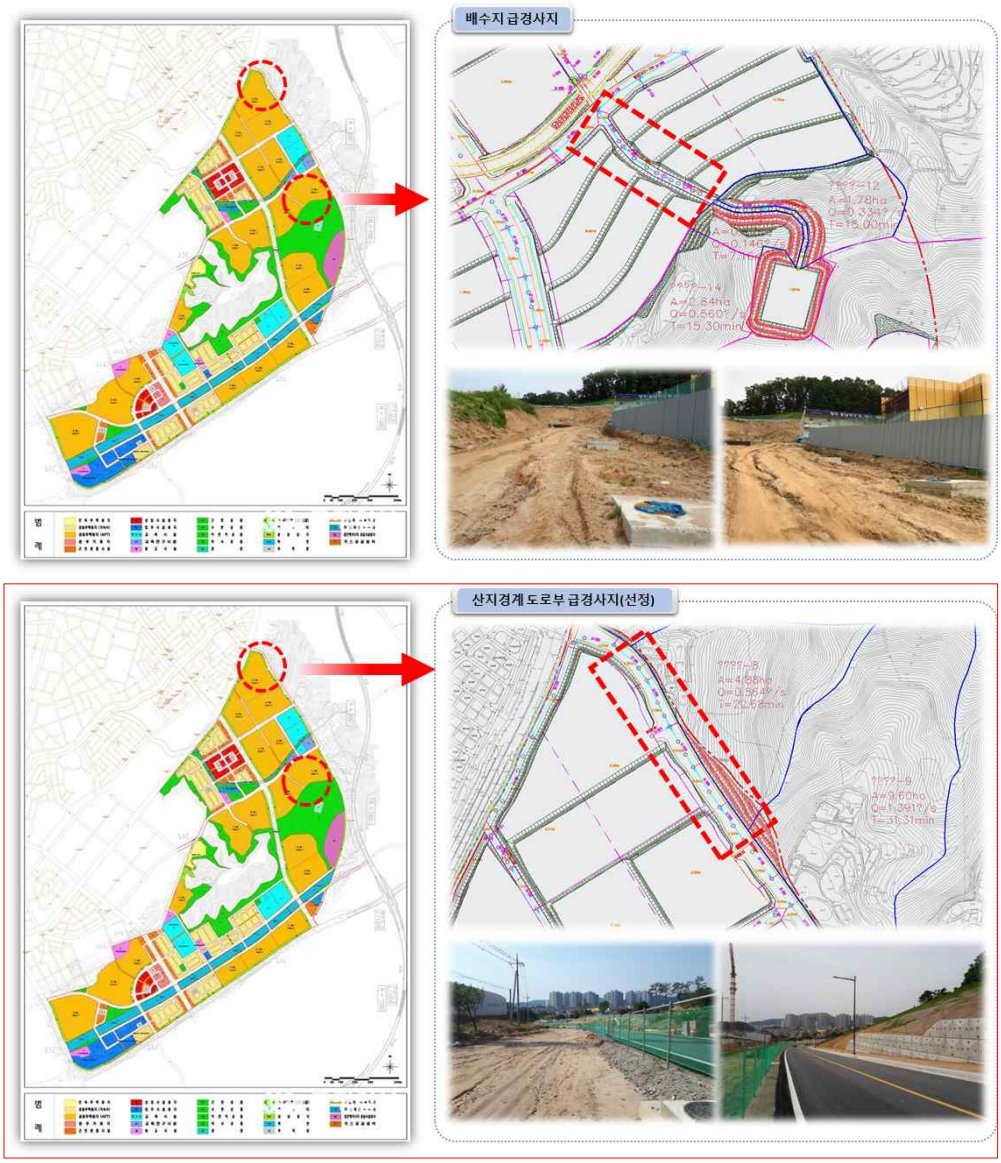
1) 본 장의 내용은 위탁용역의 결과물을 바탕으로 재정리하여 작성함

3.2 급경사지 내 하수관로의 유출 모니터링 방법

3.2.1 모니터링 지점 선정

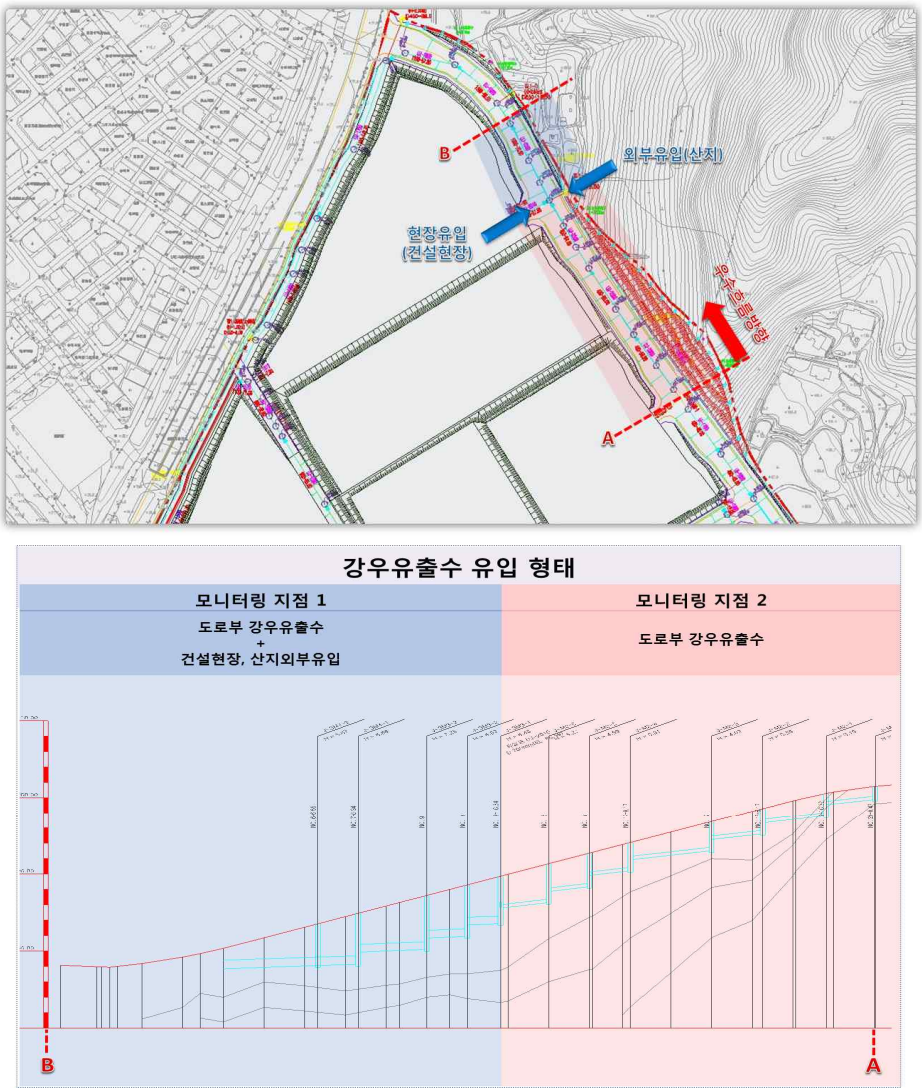
청주 동남지구 택지개발 사업지구 내에는 급경사지 구간이 다수 존재한다. 일차적으로 도면상 사업지구 내 모니터링 가능 지점을 산지경계에 존재하는 도로부 급경사지와 배수지에 위치한 급경사지로 선정하였다.

이 후 사업지구 현장답사와 현업 부서 관계자들과 회의를 진행하여 배수지에 위치한 급경사지의 경우 맨홀 내로 유입되는 우수의 집수구역이 불명확하고 시공이 완료된 도로부는 원할한 모니터링 수행이 가능하여 [그림 3-2]와 같이 산지경계에 존재하는 도로부 급경사지를 하수관로 실유속 모니터링 지점으로 선정하였다.



[그림 3-2] 모니터링 지점 선정

선정된 산지경계 도로부 급경사지를 대상으로 강우유출수의 유입형태를 살펴본 결과, 도로부 강우유출수의 유입 외 건설현장과 산지외부 유입부(1지점)와 도로부 강우유출수의 유입부(2지점)로 구분되었으며, 우천시 유출양상 파악을 통해 최종 실유속 모니터링 맨홀 지점을 선정하였다.

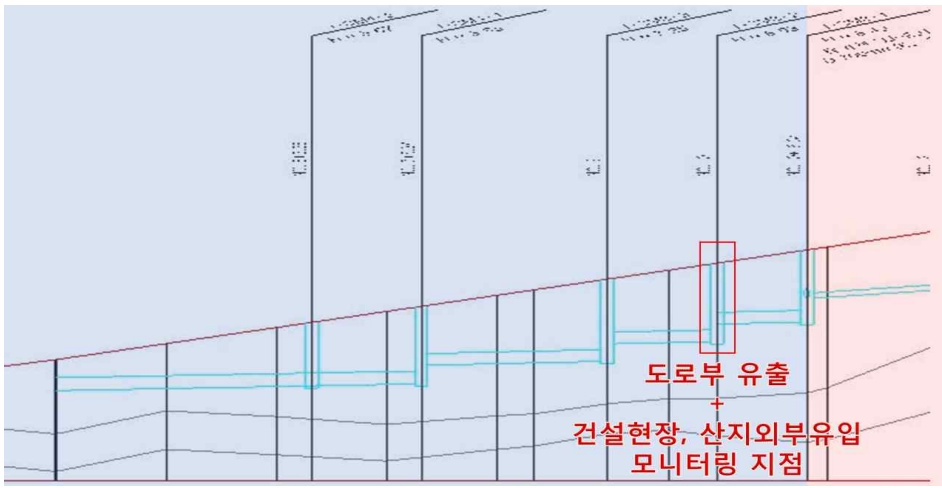


[그림 3-3] 강우 유출수 유입 형태에 따른 모니터링 지점 분류

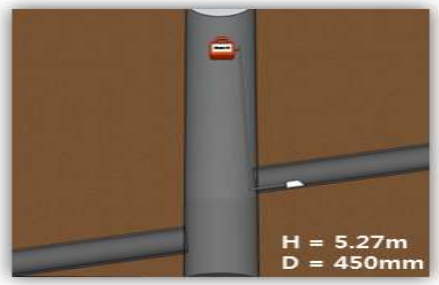
3.2.2 모니터링 계획 및 수행

통상 하수관로 내 유속측정은 맨홀 내부에서 측정원이 직접 측정하는 방법과 유량계를 통한 측정방법이 있다. 하수관로에서 직접 측정하는 방식은 측정지점에 따른 공간적인 한계점이 있으며, 연속적인 측정이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 경제적이며, 자동측정 방식인 로거형식의 유량계를 적용하여 강우에 따른 연속적인 유속 모니터링이 가능하도록 하였다.

앞 절에서 선정된 1지점은 외부 유입수 합류로 많은 유출이 예상되는 지점인 도로부 유출수와 외부 유입수가 합류되는 지점 다음 맨홀 연결관인 UJ-2000관으로 선정하였으며, 2지점은 도로부 급경사지 모니터링 지점 중 최하류단 맨홀 연결관인 UJ-2100관을 선정하여 유속을 측정하였다. 두 지점을 포함한 급경사지 구간의 맨홀은 바다까지 깊이가 5~7 m 정도로 상당히 깊어 모니터링 수행을 위한 측정 장비의 설치가 어려웠으며, 추후 사업지구의 유지관리가 어려울 것으로 보여졌다. [그림 3-4]와 [그림 3-5]는 모니터링 측정 지점 위치와 관거 구성, 모니터링 수행을 위한 측정장비의 설치 모습이다.



[그림 3-4] 모니터링 1지점 맨홀



[그림 3-5] 모니터링 2지점 맨홀

선정된 지점에서 실유량(유속)을 측정하기 위하여 개수로나 부분적으로 흐르는 하수관, 만수도관에서 통상적으로 사용되고 있는 초음파유량계(Stingray 2.0)를 활용하여 유출 모니터링을 수행하였으며, 제원은 [표 3-1]과 같다.

[표 3-1] 유량계(Stingray) 장비 사진 및 제원

장비사진	제원	
	정확도	수위 표시 범위의 ±0.25%; 유속: 측정치의 ±2%
	표시	액정표시기 : 수위, 유속, 물 온도, 건전지와 남은 기억 용량
	출력통신	USB
	USB연결선	DB9 M/F연결구가 달린 기본 6 m(20 ft) 차폐선
	포장무게	약 4.5 kg(10 lbs)
	유속 측정 범위	0.03~3.5 m/sec(0.1~12ft/sec)
	수위 측정 범위	최소 수두:25.4 mm(1 in), 최대 수두:4.5 m(15 ft)
	동작 온도	−15~65 °C(5~150 °F)

3.3 급경사지 내 하수관로의 유출 모니터링 결과

도로부 강우유출수의 유입 외 건설현장, 산지 외부 유입 1지점과 도로부 강우유출수의 유입 2지점을 선정 후 1지점에 해당하는 UJ-2000관과 2지점에 해당하는 UJ-2100관에 대해 6월부터 9월까지 유출 모니터링을 실행하였다.

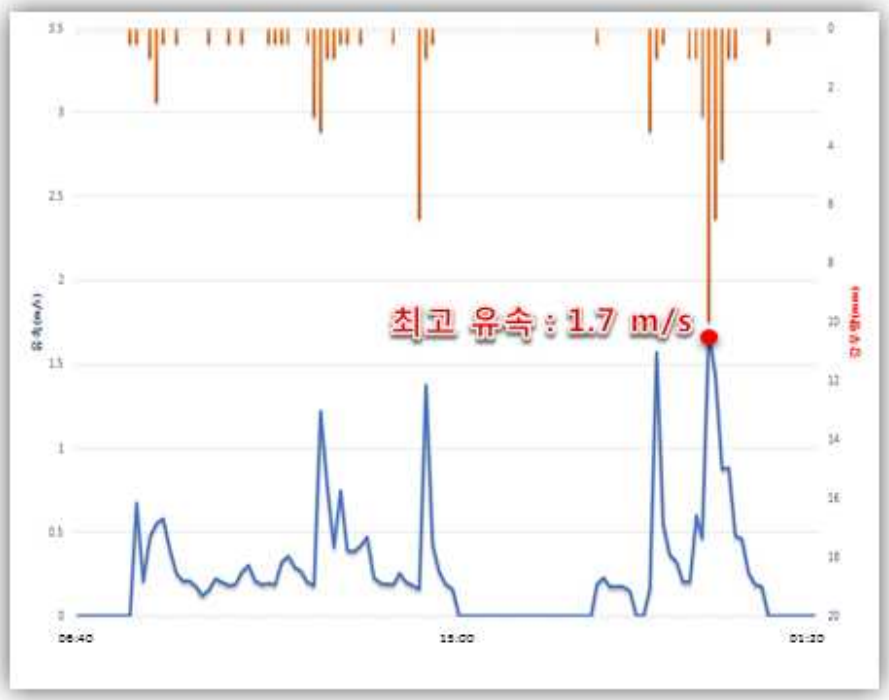
1지점(도로부 유출수+건설현장 및 산지 외부유입수)과 2지점(도로부 유출수)의 실유속 모니터링 측정 결과는 [표 3-2]와 같다.

[표 3-2] 지점1,2 유속 모니터링 결과

강우 발생 기간	총 누적 강우량 (mm)	1지점 최대 유속(m/s)	2지점 최대 유속(m/s)
18.06.26~27	62	-	1.700
18.07.01~06	243.9	1.895	1.740
18.07.09~10	23.1	1.980	1.201
18.07.28	57.5	1.415	1.193
18.08.23~28	139.7	1.932	1.862
18.08.30~09.01	103	1.925	1.740

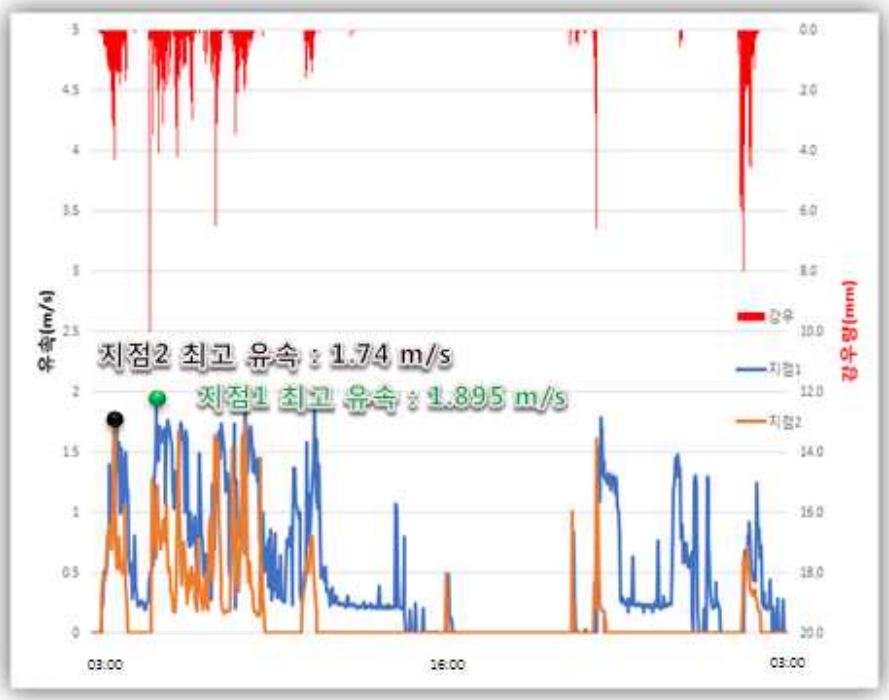
모니터링 지점 선정에 대한 유출양상을 파악하기 위하여 2018년 6월 26일~27일 동안 유출 모니터링을 수행하였다. 본 모니터링에서는 1지점의 모니터링 측정 장비 설치 전으로 2지점 UJ-2100관에 대한 실유속 측정만 수행하였다.

모니터링기간 동안 총 누적강우량 62mm, 10분 간격 최대강우는 10mm로 나타났다. 2지점에 해당하는 UJ-2100관 내 유속 모니터링 결과, 강우시작 약 10분 후 하수관 내로 유출이 발생되었으며, 강우 양상과 같은 형태로 하수관 내 유속의 변화가 나타났다. 관내 최대유속은 1.7m/s로 나타났다.



[그림 3-6] 2지점 모니터링결과(2018.06.26~27)

7월 1일부터 6일까지의 모니터링기간 동안 총 누적강우량은 243.9mm, 10분 간격 최대강우는 10mm로 나타났다. 각 지점에 해당하는 관내 유속 모니터링 결과, 약 10~20분 후 하수관 내로 유출이 발생되었으며, 도로부 유출수만 발생하는 2지점은 최대유속 1.74m/s로 나타났고, 도로부 유출수 포함 건설현장과 산지외부 유출수까지 유입되는 1지점은 최대유속 1.895m/s로 2지점과의 유출 양상은 비슷하나 2지점보다 높은 유속이 측정되고 외부 유입수가 발생하여 지속적인 유출 양상이 나타났다.



[그림 3-7] 1,2지점 모니터링결과(2018.07.01~06)

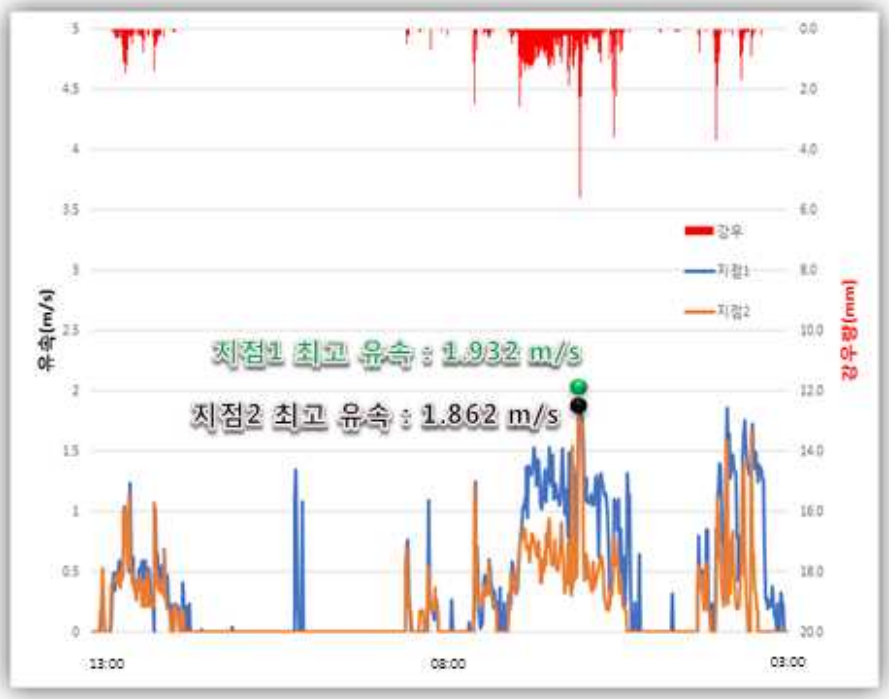
7월 9일부터 10일까지의 모니터링기간 동안 총 누적강우량은 23.1mm, 10분 간격 최대강우는 1.6mm로 나타났다. 2지점의 관내 최대유속은 1.201m/s로 앞선 모니터링의 최대 유속보다 낮은 수치를 보였으나 1지점의 관내 최대 유속은 1.98m/s로 나타났다. 1지점의 경우 2지점과 유출 양상은 비슷하나 산지, 건설현장의 외부 유입수의 발생으로 외부 유입량에 따라 유속의 변화의 폭이 크게 나타난다.

[그림 3-8] 1,2지점 모니터링결과(2018.07.09~10)

7월 28일 모니터링기간 동안 총 누적강우량은 57.5mm, 10분 간격 최대강우는 14.7mm로 나타났다. 각 지점에 해당하는 관내 유속 모니터링 결과, 1지점 관내 최대 유속은 1.415m/s, 2지점 관내 최대 유속은 1.193m/s로 나타났다.

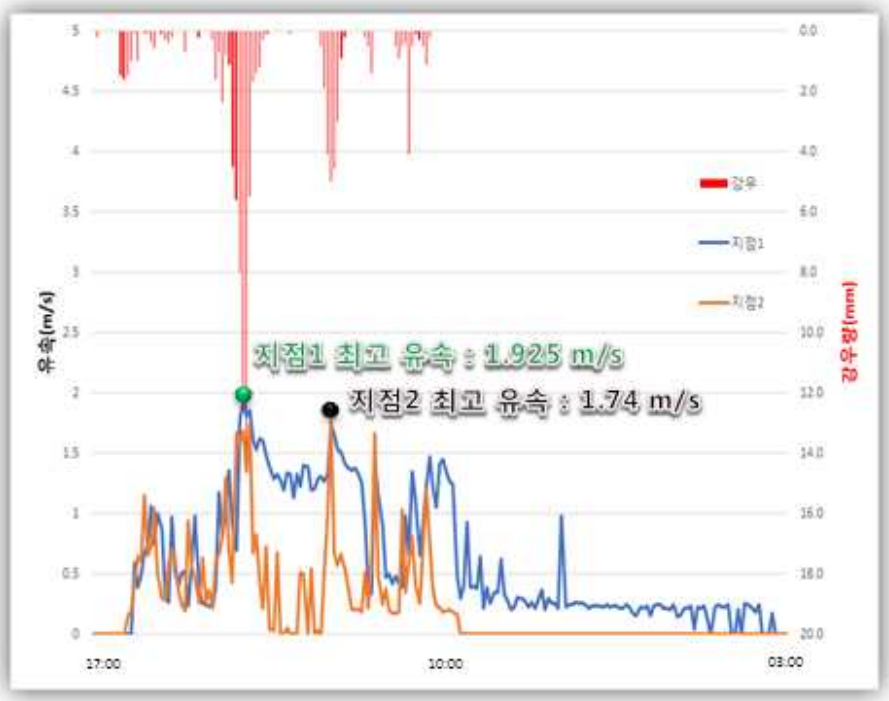
[그림 3-9] 1,2지점 모니터링결과(2018.07.28)

8월 23일부터 28일 까지의 모니터링기간 동안 총 누적강우량은 139.7mm, 10분 간격 최대강우는 5.6mm로 나타났다. 각 지점에 해당하는 관내 유속 모니터링 결과, 1지점 관내 최대유속은 1.932m/s, 2지점 관내 최대유속은 1.862m/s로 나타났다. 각 지점은 강우 양상과 같은 형태로 유속의 변화가 나타났고, 1지점의 경우 외부 유입수의 유입량에 따라 관내 유속의 변화가 크게 나타났다.



[그림 3-10] 1,2지점 모니터링결과(2018.08.23~28)

8월 30일부터 9월 1일까지의 모니터링기간 동안 총 누적강우량은 103mm, 10분 간격 최대강우는 14.1mm로 나타났다. 1지점 관내 최대유속은 1.925m/s로 10분 간격 최대인 14.1mm의 많은 강우에도 최대유속은 2m/s를 넘지 않는 것으로 나타났으며, 강우 양상과 같은 형태로 하수관 내 유속의 변화가 나타났다. 그리고 건설현장과 산지에서 유입되는 외부 유입수로 인해 강우 종료 시에도 지속적인 유출이 나타났다. 2지점의 관내 최대유속은 1.74m/s로 나타났다.



[그림 3-11] 1,2지점 모니터링결과(2018.08.30~09.01)

제 4 장
도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행

LAND & HOUSING INSTITUTE

제4장 도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행[2)]

4.1 도시유출모형 선정 및 개요

4.1.1 도시유출모형의 선정

도시유역에서의 설계홍수량 산정을 위하여 국내에서 사용되고 있는 모형들로는 합리식, RRL, ILLUDAS 모형 등이 있다. 행정안전부(2017)에서도 도시유출에 대한 방재성능 평가의 수행 모형으로 선정된 모형들로 이 중 합리식과 RRL 모형은 적용이 간편하다는 이점으로 널리 사용되고 있으나, 설계자의 주관에 따라 유출량 계산에 큰 차이를 나타낼 수 있다는 단점을 가지고 있다. 한편, ILLUDAS 모형은 지표면의 양상과 배수관로의 계통을 고려하므로 앞의 두 모형 보다는 정확한 계산결과를 기대할 수 있다. 그러나 배수관망이 각종 수리구조물을 포함하고 있는 경우에는 정확한 유출량을 산정한다고 보기는 어려움이 있으며, 관로에서의 흐름을 등류로 보고 해석함으로서 관로 내 수위 변화에 배수의 영향을 고려할 수 없는 한계가 있다.

이러한 한계로 인하여 기존 우수관거 수리계산은 대부분 합리식에 기반을 둔 MAKESW 모형을 이용하였으나 최근 우수관거 BTL 사업 등에서는 SWMM 모형을 이용한 수리특성 분석을 병행하여 수행하고 있다. 그러나 실제 유역의 강우특성 및 하도특성, 배수위 영향을 분석할 수 있는 SWMM 모형의 경우 설계의 기초자료가 아닌 관거 설계 후 안정성 평가차원에서 관내의 유속, 유량을 분석하는 경우가 대부분이다.

(1) 합리식

합리식은 다음과 같은 가정 하에 제안된 공식이므로 가급적 가정에 가까운 유출특성을 갖는 배수구역에 적용함이 바람직하다.

가. 도달시간은 유역 내 가장 먼 지점에서부터 설계지점까지 물이 유입하는데 소요되는 시간이다.

2) 본 장의 내용은 위탁용역의 결과물을 바탕으로 재정리하여 작성함

나. 도달시간 내에서 강우강도는 변하지 않는다.

다. 유역 도달시간과 동일한 지속기간을 갖는 강우조건에서 최대홍수가 발생한다.

라. 강우의 지속시간이 유역의 도달시간과 같거나 길 때 일정 강우강도의 강우에 의한 첨두유출량은 그 강우강도와 직선적 관계를 가진다.

마. 첨두유출량의 발생확률은 주어진 도달시간에 대응하는 강우강도의 발생확률과 동일하다.

바. 유출계수는 각각 다른 발생확률을 갖는 강우-유출 사상에 관계없이 동일하다.

사. 유출계수는 동일한 유역에 내리는 모든 강우에 대하여 같다.

아. 합리식에 의한 첨두홍수량의 산정방법은 다음과 같다.

$$Q_p = \frac{1}{360} CIA' = 0.27778 CIA$$

여기서, Q_p는 첨두홍수량(㎥/sec), C는 유출계수, I는 홍수도달 시간을 강우지속시간으로 하는 특정발생빈도의 강우강도(mm/hr), A는 유역면적(㎢), 그리고 A'는 유역면적을 헥타르(ha)로 표시한 것이다.

(2) RRL 모형

RRL 모형은 1962년 영국에서 도시 소유역의 강우-유출자료를 사용한 도시배수망 설계를 위해 고안된 모형으로 유역에 내리는 강우 중 우수관로와 직접 연결된 불투수 지역만 고려한다. RRL 모형은 계산과정이 간편하고 소규모 배수영향이 크지 않은 지역에 유출 수문 검토 시 간편하게 적용할 수 있는 모형으로 기본가정은 다음과 같다.

가. 소유역에서의 직접 연결된 불투수지역만 주요 강우기간 동안 직접유출에 기여하므로 유출계수는 1.0이다.

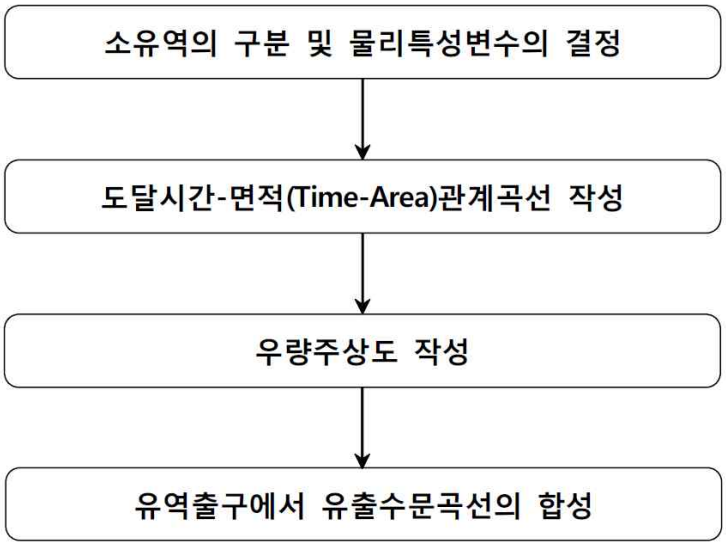
나. 유역의 도달시간은 강우지속기간으로 가정한다.

다. 관거 내 흐름을 정상등류로 가정하여 유출량을 Manning공식으로 계산한다.

RRL 모형에 의한 각 시간별 유출량은 다음과 같이 계산되며, 유출 계산과정은 아래와 같다.

$$Q_J = 0.2777 \times \sum_{i=1}^{j} I \times A_{j+1-i}$$

여기서, Q_j는 시간별 유출량(㎥/sec), I_i는 우량주상도의 i번째 시간구간의 강우강도(mm/hr), A는 j시간의 유역출구 유출량에 기여하는 소유역 면적(㎢)이다.



[그림 4-1] RRL 모형에 의한 유출 계산 과정

(3) ILLUDAS 모형

ILLUDAS 모형은 1974년 미국에서 Stall과 Terstriep에 의해 RRL 모형을 기초로 개발된 모형으로 기본가정은 RRL 모형과 유사하며 간접연결 불투수지역을 고려한 것에서 그 차이가 있다. ILLUDAS 모형의 주요 기본가정은 다음과 같다.

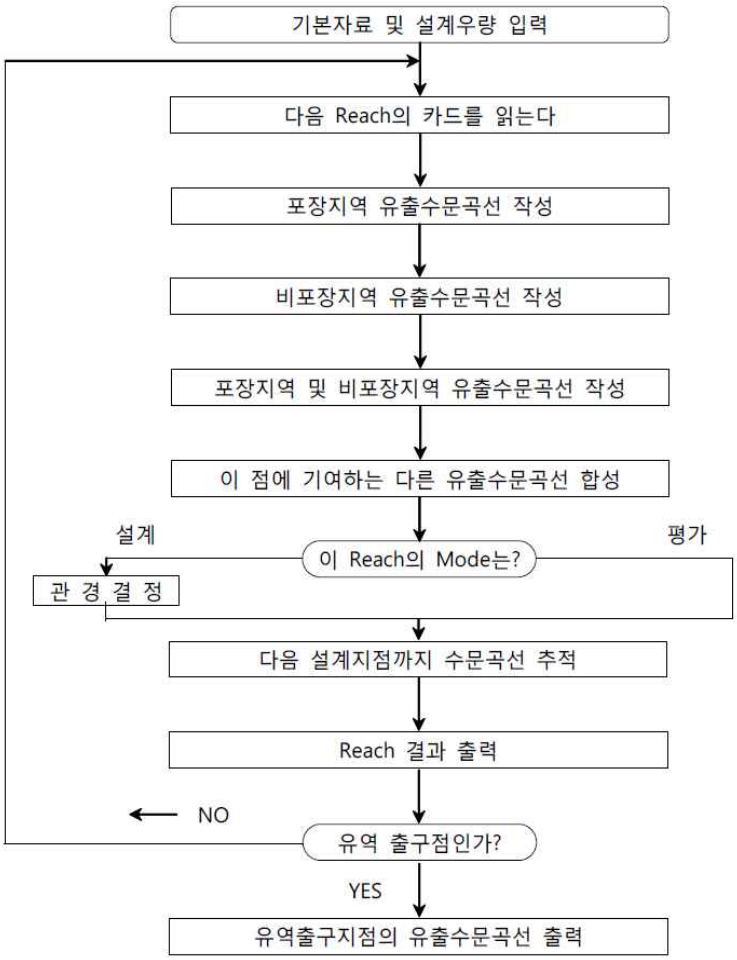
가. 단위 계산시간에서의 도달시간-누가면적 관계를 선형으로 가정한다.

나. 간접연결 불투수지역은 투수지역에 둘러싸여 있고 간접연결 불투수지역의 총 유출용적은 투수지역에 균등하게 배분할 수 있는 것으로 가정한다.

ILLUDAS 모형은 배수구역을 여러 개의 소유역으로 나누고 그 배수구역에서의 투수지역 및 불투수지역에 대한 유출을 분석함으로써 지표면 유출수문곡선을 산정하게 된다. 이러한 과정을 통하여 얻어진 수문곡선들은 유역 출구지점에 이르는 하류방향

의 관로를 따라 추적·합성하여 하류지점에서의 총 유출수문곡선을 구한다.

주어진 설계 및 실측 강우는 등시간 간격으로 나누어 그 증분을 분할된 소유역에 적용한 후 그 증분만큼의 유출이 소유역 출구점까지 도달하는데 걸리는 시간을 산정한다. 이 모형은 또한 각 지점에서의 우수관거 크기를 결정할 수 있으며 설계의 한 부분으로서 저류지도 포함시킬 수 있다. ILLUDAS 모형의 유출계산 흐름도는 [그림 4-2]와 같다.



[그림 4-2] ILLUDAS 모형의 유출계산 흐름도

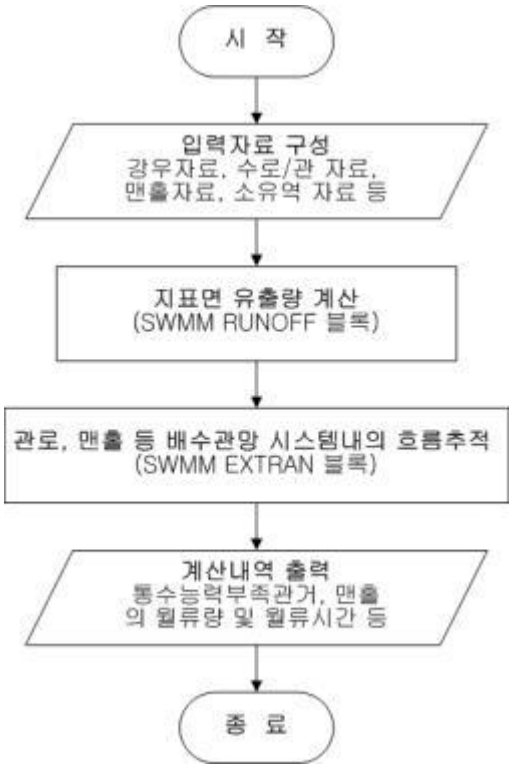
(4) SWMM 모형

SWMM 모형은 1971년 미국 EPA의 지원 아래 Metcalf & Eddy사가 Florida 대학 및 Water Resources Engineers사와 공동연구하여 개발한 모형으로 상업용으로 SWMM 모형을 이용한 XP-SWMM 및 MOUSE 모형이 개발 되었다.

강우-유출 해석조건에 따라 Runoff 블록, Transport 블록, Extran 블록을 조합하여 부정류 해석을 실시함으로써, 기존 모델에서 해석하지 못하였던 수리구조물로 인한 월류, 배수효과, 압력류, 지표면 저류 등의 수리현상 및 관로 내 수질변화 모의를 동시에 수행할 수 있도록 구성되어 있다. [표 4-1]은 SWMM 모형에서의 주요 기본가정을 정리한 것이고, [그림 4-3]은 SWMM 모형을 이용한 유출해석 절차를 나타낸 것이다.

[표 4-1] SWMM 모형의 기본 가정

구분	특성
소유역	· 강우는 시간에 따라 균등하게 분포한다. · 강우는 공간적으로 균등하게 분포한다. · 강우지속기간은 도달시간을 초과한다. · 유출은 주로 지표면 유출로 구성된다. · 수로내 저류의 영향의 무시된다.
분할된 소유역	· 각 소유역은 유사한 지표면 특성을 갖는다. · 지표면 흐름이 집수로에 유입할 때 수직한 방향으로 유입한다. · 소유역 유출은 집수로에 유입되며 다른 유역으로는 흐르지 않는다. · 지표면 유로의 길이는 지표면 흐름이 집수로와 만나는 길이다.



[그림 4-3] SWMM 모형의 유출해석 절차

본 연구의 수행에 있어 도시유출모형을 [표 4-2]와 같이 수행기능에 대한 비교를 통해 RRL 모형과 ILLUDAS 모형에 비해서 다양한 유역의 토지이용 속성의 적용이 가능하고 관망에서 배수의 영향을 모의할 수 있는 2차원 모형인 SWMM 모형이 유리한 것으로 평가되어 금회 연구의 도시유출모형으로 선정하였다.

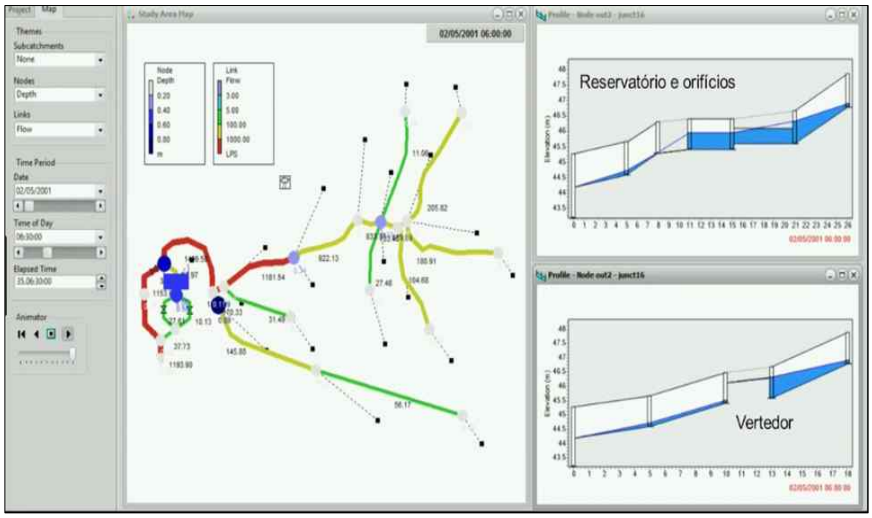
[표 4-2] 우수관거 수리계산시 적용되는 모형 비교 및 선정

구분		RRL	ILLUDAS	SWMM
차원		1차원 모형	1차원 모형	2차원 모형
장점		· 계산과정이 간편 · 소규모 배수영향이 크지 않는 지역에 적합	· 저류방정식 적용 · RRL 모형에 비해 정확한 결과 기대	· 도시유역 특성(토지이용, 관망)에 대한 모의 가능 · 각종 수공구조물의 수리학적인 흐름 추적 가능 · 배수효과 모의 가능 · 수질 모의 가능 · 2D 모의 가능
단점		· 유역 내 관로 저류효과 모의 불가 · 시간-면적 곡선에 따라 결과가 좌우 · 연속강우 분석 불가	· 홍수추적방법의 한계성 내포 · 각종 수리구조물에 대한 모의 제한 · 배수효과 모의 불가 · 연속강우 분석 불가	· 입력변수 산정 및 모의 수행에 많은 시간과 전문성 필요
수행기능	홍수추적	×	○	○
	압력류 계산	×	○	○
	저류효과	×	○	○
	배수영향	×	×	○
	침수모의	×	×	○
	수질모의	×	×	○
채택여부		×	×	◎

4.1.2 도시유출모형(SWMM)의 개요

SWMM 모형은 1971년 미국 EPA의 지원아래 Metcalf & Eddy사가 Florida 대학 및 W.R.E와의 공동 연구로 도시유력 하수시스템 내의 유량과 수질을 시뮬레이션할 수 있도록 개발되었다. 1981년에는 SWMM 모형 내의 Transport 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 Extran 블록을 SWMM 모형에 포함시켜 보완시켰다. SWMM 모형은 도시유역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서 유출량추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.

SWMM 모형의 기본적 특성은 다음과 같이 정리될 수 있다. 적용 가능한 대상유역은 도시유역, 인위적 배수계통을 갖는 소유역 등이다. 시간적 특성은 단일, 연속강우에 의한 계산이 가능하며, 강우간격은 임의로 설정할 수 있다. 공간적 특성은 소배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하다. 물리적 특성으로 유출은 강우와 유출로 발생하고 지표면 유출은 비선형저류방정식을 사용한다.



[그림 4-4] SWMM 모형을 이용한 우수관거 수리계산 적용(예시)

4.2 대상지구에 대한 도시유출모형 구축 및 우수수리계산서와 비교 분석

4.2.1 대상지구에 대한 우수수리계산서 분석

연구대상지구인 청주 동남지구의 하수관거 설계 분석을 위하여 기존 설계에 반영된 우리수리계산서와 SWMM 모형을 통한 수문분석의 차이를 검토하고자 한다. 급경사지가 포함된 유역 중 현업부서의 분석 요청 유역인 동남지구 E유역을 대상유역으로 선정하였다. 동남지구 E유역은 급경사지로 인하여 추가 맨홀이 반영이 계획된 지점으로 현재 맨홀 추가건에 대해 협의가 진행되고 있으며, 관련 하수관거에 대한 분석이 필요한 유역이다.

[그림 4-5] 청주 동남지구 E유역 위치도

E 유역의 하수관거 설계를 분석하기 위하여 먼저 우수수리계산서를 검토하였다. 우수수리계산서는 일반적으로 EXCEL 기반의 설계 프로그램을 사용하는데 유역면적, 홍수량을 산정하고 관규격을 결정하며, 관규격에 따른 만관유속 기준 충족을 위하여 구배를 설정하는 방법으로 진행된다. Manning 공식을 통해 만관유속을 설정하기 때문에 최대유속 기준인 3.0 m/s 내로 분포시키는 과정에서 관의 구배는 규격별로 경사가 정해지게 된다.

구배를 관경에 따라 미리 설정하고 관저고를 구하게 되는데 이때 관의 낙차고를 고려한다. 이 과정에서 관의 시점은 낙차고를 고려하여 미리 표고를 정한 뒤 구배에 따라 관을 설정한 뒤 종점에서 낙차고 다음관의 낙차고를 빼주게 된다. 구배에 맞는 관의 설정 후에 낙차고만큼 관저고를 낮추면서 기존 구배와는 다른 구배를 가지게 되는 오류가 발생한다.

우수수리계산서(기존)

현재관	다음관	각 선 (ha)	외부 (ha)	누 계 (ha)	연장(M)	유 입 시 간 (분) 유 입	유 하	유달	10년 600mm 미만	20년 600mm 미만	강우강도 (mm/hr)	유출계수	유 출 량 (㎥/s)		관규격 관수	B	H	관두께	관단면적 (m2)	만관유속 m/sec	계획유량 (㎥/s)	유량비 %	구배(유입) 지반	관도
UE-1900	UE-1800	0.17	1.71	1.88	70.00	14.19	0.40	14.59	136.08	152.99	152.99	0.79	0.6943	700			700	58	0.38	2.95	1.134	163	44.00	15.00
UE-1800	UE-1700	0.14		2.02	66.50	14.59	0.38	14.96	135.18	152.00	152.00	0.79	0.7411	700			700	58	0.38	2.95	1.134	153	61.95	15.00
UE-1700	UE-1600	0.09		2.11	65.00	14.96	0.37	15.33	134.31	151.04	151.04	0.79	0.7693	700			700	58	0.38	2.95	1.134	147	48.62	15.00
UE-1600	UE-1500	0.50		2.61	61.00	15.33	0.35	15.68	133.50	150.15	150.15	0.79	0.9460	800			800	66	0.50	2.94	1.470	156	80.23	12.50
UE-1500	UE-1400	0.08		3.24	54.50	15.68	0.31	15.98	132.79	149.36	149.36	0.79	1.1685	800			800	66	0.50	2.94	1.508	129	24.22	12.50
UE-1400	UE-1300	0.17		6.48	75.00	15.98	0.44	16.42	131.60	148.26	148.26	0.79	2.3188		1	1,500	1,000	300	2.43	2.86	6.961	300	31.10	4.50
UE-1300	UE-1200	0.09		6.57	57.10	16.42	0.33	16.75	131.06	147.44	147.44	0.79	2.3379		1	1,500	1,000	300	2.43	2.86	6.961	298	-15.24	4.50
UE-1200	UE-1100	0.03		6.33	25.00	16.75	0.15	16.90	130.73	147.08	147.08	0.79	2.9595		1	1,500	1,000	300	2.43	2.86	6.961	235	6.40	4.50
UE-1100	UE-1000	0.09		10.29	46.30	16.77	0.27	19.04	126.15	142.01	142.01	0.79	3.5276		1	1,500	1,000	300	2.43	2.86	6.961	197	67.17	4.50
UE-1000	OUT	-		10.37	29.20	19.04	0.17	19.21	125.80	141.62	141.62	0.79	3.5453		1	1,500	1,000	300	2.43	2.86	6.961	196	60.96	4.50

우수수리계산서(금회)

관거 경로					관내 흐름 시간					강우의 지속기간				홍수량			
관거 번호	맨홀 번호 시점		종점	조도계수	관단면적 (m²)	동수반경 (m)	관거 경사 (fraction)	관내 유속 (m/s)	관거 내 흐름 시간 (min)	자체 유역 유입시간 (min)	상류 우수거 흐름시간 (min)	시점까지의 도달시간 (min)	종점까지의 도달시간 (min)	면적 (ha)	유출 계수 (C)	강우강도 (mm/hr)	홍수량 Q(m³/S)
UE-1900	1	-	2	0.013	0.38	0.18	0.01500	2.95	0.40	14.19		14.19	14.59	1.88	0.79	147.31	0.608
UE-1800	2	-	3	0.013	0.38	0.18	0.03756	4.66	0.24	7.00	14.59	14.59	14.82	0.14	0.79	147.31	0.045
UE-1700	3	-	4	0.013	0.38	0.18	0.03808	4.70	0.23	7.00	14.82	14.82	15.05	0.09	0.79	147.31	0.029
UE-1600	4	-	5	0.013	0.50	0.20	0.03701	5.06	0.20	7.00	15.05	15.05	15.26	0.50	0.79	147.31	0.162
UE-1500	5	-	6	0.013	0.50	0.20	0.04002	5.26	0.17	7.00	15.26	15.26	15.43	0.08	0.79	147.31	0.026
UE-1450	7	-	8	0.013	0.20	0.13	0.04533	4.09	0.29	14.33		14.33	14.62	1.59	0.79	147.31	0.514
UE-1440	8	-	9	0.013	0.28	0.15	0.04071	4.38	0.26	7.00	14.62	14.62	14.88	0.14	0.79	147.31	0.045
UE-1430	9	-	10	0.013	0.38	0.18	0.01500	2.95	0.20	7.00	14.88	14.88	15.08	0.03	0.79	147.31	0.010
UE-1420	10	-	11	0.013	0.50	0.20	0.01200	2.88	0.20	7.00	15.08	15.08	15.28	0.03	0.79	147.31	0.010
UE-1410	11	-	6	0.013	0.50	0.20	0.06655	6.79	0.07	7.00	15.28	15.28	15.35	0.02	0.79	147.31	0.007
UE-1422	12	-	13	0.013	0.16	0.11	0.04813	3.93	0.30	7.00		7.00	7.30	0.26	0.79	147.31	0.084
UE-1421	13	-	10	0.013	0.16	0.11	0.04861	3.95	0.29	7.00	7.30	7.30	7.59	0.17	0.79	147.31	0.055
UE-1413	14	-	15	0.013	0.16	0.11	0.04773	3.92	0.27	7.00		7.00	7.27	0.23	0.79	147.31	0.074
UE-1412	15	-	16	0.013	0.16	0.11	0.04700	3.89	0.32	7.00	7.27	7.27	7.59	0.27	0.79	147.31	0.087
UE-1411	16	-	11	0.013	0.16	0.11	0.04036	3.60	0.34	7.00	7.59	7.59	7.92	0.31	0.79	147.31	0.100
UE-14121	17	-	15	0.013	0.16	0.11	0.00524	1.30	0.15	7.00		7.00	7.15	0.01	0.79	147.31	0.004
UE-1510	18	-	5	0.013	0.20	0.13	0.00519	1.39	0.16	7.00		7.00	7.16	0.55	0.79	147.31	0.178
UE-1400	6	-	OUT	0.015	2.70	0.53	0.03117	7.70	0.16	7.00	15.43	15.43	15.59	0.17	0.79	147.31	0.055

[그림 4-6] 연구대상지구 설계 우수수리계산서 검토

우수수리계산서상의 관저고로 다시 경사를 산정하면 만관유속을 맞추기 위하여 설정된 구배보다 큰 값을 가지게 된다. 재설정된 구배를 이용하여 Manning 공식을 적용하여 유속을 산정하였다. 그 결과 3.0 m/s의 최대유속 기준을 초과하는 유속들이 산정되었으며, 최대 6.79 m/s까지 모의되었다.

우수수리계산서상의 관거 설계만을 보면 구배를 미리 설정하여 만관유속을 맞추고 이후에 관저고를 설정하는데 낙차공의 적용 오류로 설정된 구배와 다른 값을 가지게 된다. 이는 결국 계산상의 유속이 허용 최대유속 기준 3.0 m/s을 초과하는 유속으로 산정되게 된다. 하지만 설계의 흐름 상 EXCEL에서는 구배와 허용최대 유속이 기준에 부합하는 것처럼 보이는 실정으로 설계프로그램의 보완이 필요하다.

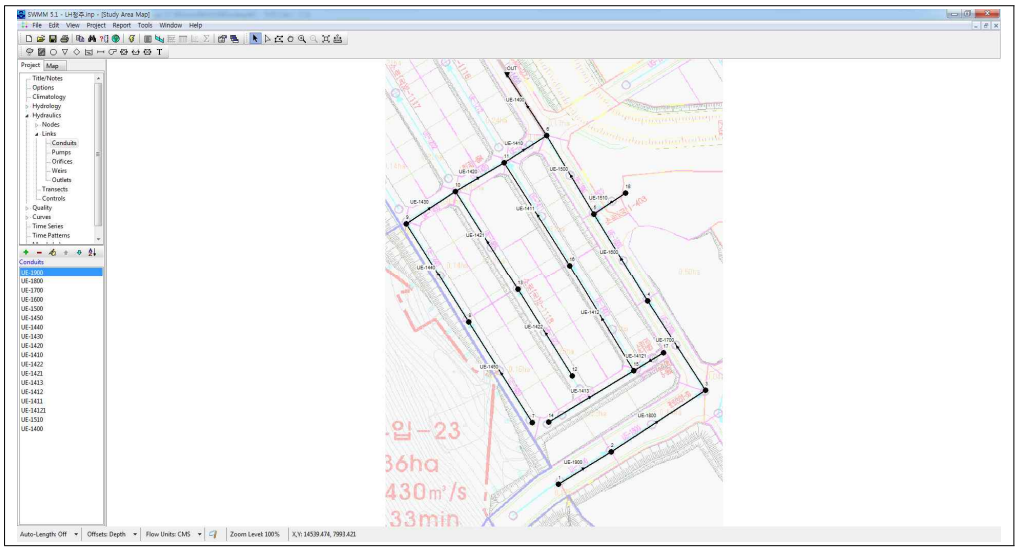
우수수리계산서(금회)

관거 경로					관내 흐름 시간					강우의 지속기간				홍수량			
관거 번호	연결 번호			조도계수	관단면적	동수반경	관거 경사	관내 유속	관거 내 흐름 시간	자체 유역 유입시간	상류 우수거 흐름시간	시점까지의 도달시간	종점까지의 도달시간	면적	유출 계수	강우강도	홍수량
	시점		종점		(m^2)	(m)	(fraction)	(m/s)	(min)	(min)	(min)	(min)	(min)	(ha)	(C)	(mm/hr)	Q(m^3/S)
UE-1900	1	-	2	0.013	0.38	0.18	0.01500	2.95	0.40	14.19		14.19	14.59	1.88	0.79	147.31	0.608
UE-1800	2	-	3	0.013	0.38	0.18	0.03756	4.66	0.24	7.00	14.59	14.59	14.82	0.14	0.79	147.31	0.045
UE-1700	3	-	4	0.013	0.38	0.18	0.03808	4.70	0.23	7.00	14.82	14.82	15.05	0.09	0.79	147.31	0.029
UE-1600	4	-	5	0.013	0.50	0.20	0.03701	5.06	0.20	7.00	15.05	15.05	15.26	0.50	0.79	147.31	0.162
UE-1500	5	-	6	0.013	0.50	0.20	0.04002	5.26	0.17	7.00	15.26	15.26	15.43	0.08	0.79	147.31	0.026
UE-1450	7	-	8	0.013	0.20	0.13	0.04533	4.09	0.29	14.33		14.33	14.62	1.59	0.79	147.31	0.514
UE-1440	8	-	9	0.013	0.28	0.15	0.04071	4.38	0.26	7.00	14.62	14.62	14.88	0.14	0.79	147.31	0.045
UE-1430	9	-	10	0.013	0.38	0.18	0.01500	2.95	0.20	7.00	14.88	14.88	15.08	0.03	0.79	147.31	0.010
UE-1420	10	-	11	0.013	0.50	0.20	0.01200	2.88	0.20	7.00	15.08	15.08	15.28	0.03	0.79	147.31	0.010
UE-1410	11	-	6	0.013	0.50	0.20	0.06655	6.79	0.07	7.00	15.28	15.28	15.35	0.02	0.79	147.31	0.007
UE-1422	12	-	13	0.013	0.16	0.11	0.04813	3.93	0.30	7.00		7.00	7.30	0.26	0.79	147.31	0.084
UE-1421	13	-	10	0.013	0.16	0.11	0.04861	3.95	0.29	7.00	7.30	7.30	7.59	0.17	0.79	147.31	0.055
UE-1413	14	-	15	0.013	0.16	0.11	0.04773	3.92	0.27	7.00		7.00	7.27	0.23	0.79	147.31	0.074
UE-1412	15	-	16	0.013	0.16	0.11	0.04700	3.89	0.32	7.00	7.27	7.27	7.59	0.27	0.79	147.31	0.087
UE-1411	16	-	11	0.013	0.16	0.11	0.04036	3.60	0.34	7.00	7.59	7.59	7.92	0.31	0.79	147.31	0.100
UE-14121	17	-	15	0.013	0.16	0.11	0.00524	1.30	0.15	7.00		7.00	7.15	0.01	0.79	147.31	0.004
UE-1510	18	-	5	0.013	0.20	0.13	0.00519	1.39	0.16	7.00		7.00	7.16	0.55	0.79	147.31	0.178
UE-1400	6	-	OUT	0.015	2.70	0.53	0.03117	7.70	0.16	7.00	15.43	15.43	15.59	0.17	0.79	147.31	0.055

[그림 4-7] 우수수리계산서(수정)에 대한 관내 유속 산정

4.2.2 대상지구에 대한 도시유출모형 모의(동남지구 E유역)

실제 하수관로 설계에서 사용되는 EXCEL 기반 프로그램과 SWMM 모형의 결과를 비교하기 위하여 동남지구 E 유역의 설계상 우수수리계산서를 SWMM 모형으로 구현하여 분석하였다.



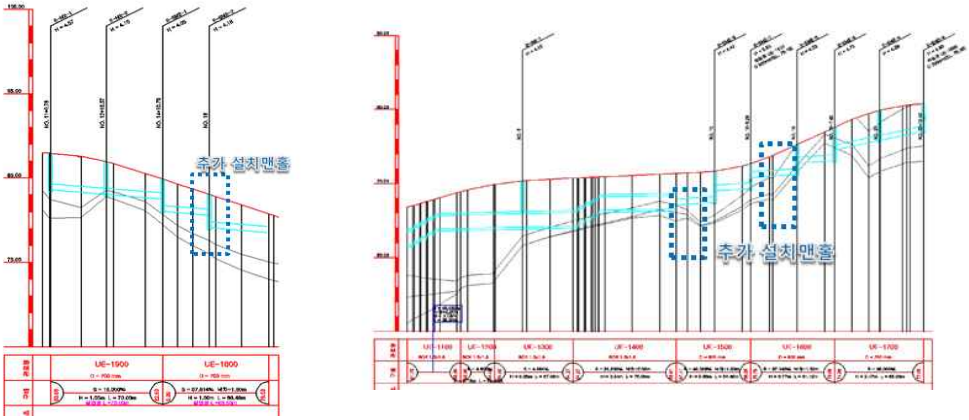
[그림 4-8] 청주 동남지구 E유역 SWMM 모형 구축

SWMM 모형 모의 결과 EXCEL 기반 프로그램과 유사한 유속의 분포를 가지나, SWMM 모형의 결과값이 다소 작게 모의되었다. 이는 단순 Manning 공식만을 적용한 값과 맨홀의 낙차공의 영향을 함께 고려하는 SWMM 모형의 분석적 차이라고 판단된다.

[표 4-3] 대상유역 관거에 대한 우수수리계산서(수정)와 SWMM 모형 결과값 비교

관거명	맨홀 번호			관거 경사(%)	유속(m/s)	
	시점		종점		수리계산서(수정)	SWMM 모형결과
UE-1900	1	-	2	1.50	2.95	3.07
UE-1800	2	-	3	3.76	4.66	4.43
UE-1700	3	-	4	3.81	4.70	4.54
UE-1600	4	-	5	3.70	5.06	4.76
UE-1500	5	-	6	4.00	5.26	5.20
UE-1450	7	-	8	4.53	4.07	4.38
UE-1440	8	-	9	4.07	4.38	4.34
UE-1430	9	-	10	1.50	2.95	3.14
UE-1420	10	-	11	1.20	2.88	3.66
UE-1410	11	-	6	6.66	6.79	6.19
UE-1422	12	-	13	4.81	3.93	2.74
UE-1421	13	-	10	4.86	3.95	3.17
UE-1413	14	-	15	4.77	3.92	2.63
UE-1412	15	-	16	4.70	3.89	3.29
UE-1411	16	-	11	4.04	3.60	3.72
UE-14121	17	-	15	0.52	1.30	0.52
UE-1510	18	-	5	0.52	1.39	1.59
UE-1400	6	-	OUT	3.12	7.70	4.53

설계의 절차를 살펴보면 우수수리계산서로 심의를 통과하면 도면을 작성하는 단계로 이어진다. 이때 관로를 구체적으로 구현하는 도면은 우수종단면도이다. 우수종단면도는 수리계산서를 기반으로 작성하게 되면 CAD 프로그램을 사용한다. 이 때 우수수리계산서상의 잘못 적용된 관구배를 수정하게 된다. 우수종단면도에서 관경별 구배를 제대로 적용하여 도면을 작성할 때, 우수수리계산서상의 잘못된 구배를 바로잡기 위하여 맨홀을 추가적으로 계획하게 된다. 맨홀이 추가 적용되면 기존의 관거는 2개 이상으로 분리되지만 관거의 번호는 수리계산서상의 관거 하나로 적용된다. 처음 우수수리계산서부터 제대로 된 구배를 적용하면 되는데 잘못 적용된 구배를 도면에서 보완한다는 점은 설계과정에서 조치가 필요한 부분이다.



[그림 4-9] 우수종단면도에서 추가되는 맨홀 및 하수관거

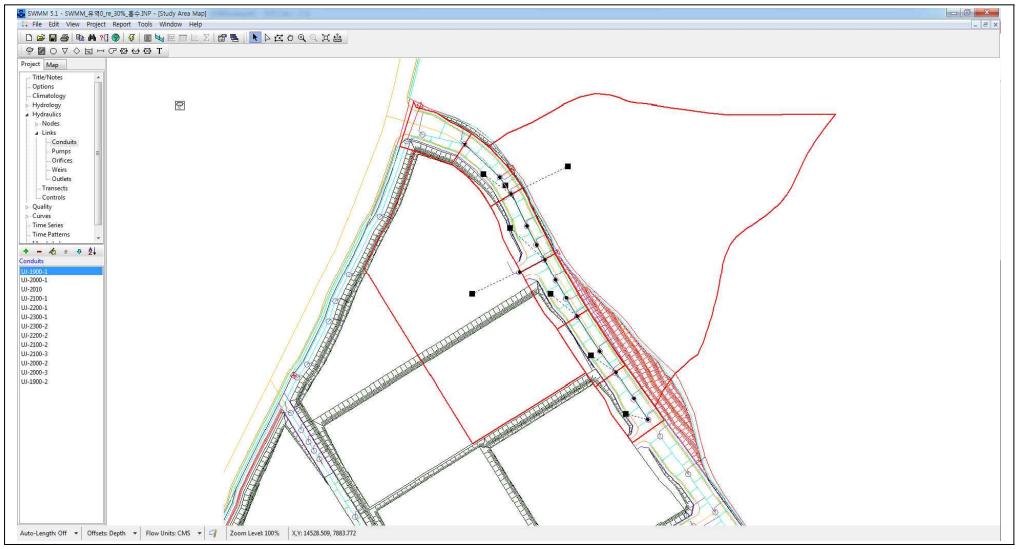
4.3 실유속 측정자료를 이용한 하수관로 내 우수유입비율 산정

본 연구의 공간적인 범위는 급경사지 구간에 한정적이며 급경사지 이후의 완경사 부분은 기존 설계방법에 대한 이견은 없다. 하수관거의 설계에 있어 해당 유역의 강우유출수는 모두 관거로 유입되며, 관거의 구배와 관경 결정에서 기준이 되는 유속의 흐름은 만관흐름이라는 가정을 가진다. 일반적인 평경사를 가지는 유역에서는 적절한 가정이다. 하지만 급경사지에서는 경사로 인한 강우유출수의 흐름은 대부분 지표흐름을 가지며, 이로 인한 급경사지 시작부 인근 유역에서 하수관거로 유입되는 강우유출수는 현저히 적을 것이다. 이는 급경사지에 한해서는 우수유입비율을 적용한 설계를 강우량 또는 관거 최대유속의 기준의 제시가 필요하며, 이는 급경사지의 과도한 맨홀 추가를 방지하여 사업성을 향상시키는 결과로 이어질 수 있다. 이에 본 절에서는 모니터링을 통해 실측된 급경사지 하수관거 유속과 SWMM 모형의 결과값의 비교를 통해 급경사지 구간에 실제로 하수관거로 유입되는 강우유출수의 유입비율을 개략적으로 검토하고자 한다.

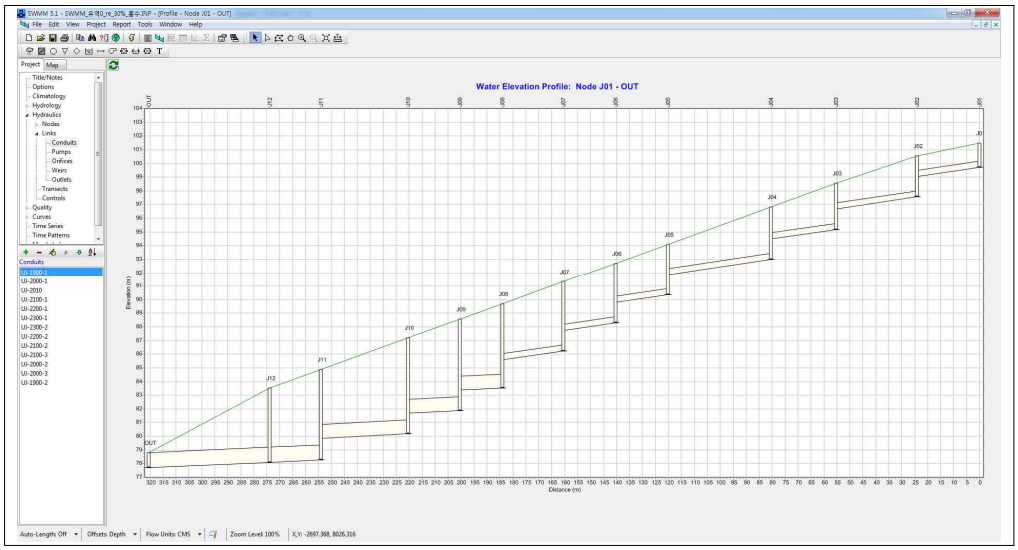
[그림 4-10] 급경사지 구간의 유출 양상

4.3.1 대상지구에 대한 도시유출모형 구축(모니터링 지점)

본 연구의 대상지구인 청주 동남지구에서 현업과 협의를 통해 시공된 급경사지 도로부에 대해 모니터링을 수행하였다. 모니터링을 수행한 급경사지 구간에 대해 수리계산서가 아닌 우수종단면도를 이용하여 실제 적용된 관거를 그대로 SWMM 모형으로 구축하였다. 기상자료는 모니터링 기간 동안의 청주관측소의 시계열 강우자료를 이용하였으며, 유역입력매개변수인 각 유역별 면적, 지반고, 경사, 불투수면적율은 배수유역도와 토지이용도를 이용하였다. 그리고 SWMM 모형 내 침투식은 Horton 식을 적용하였으며, 대상지구의 토양도를 이용하였다.



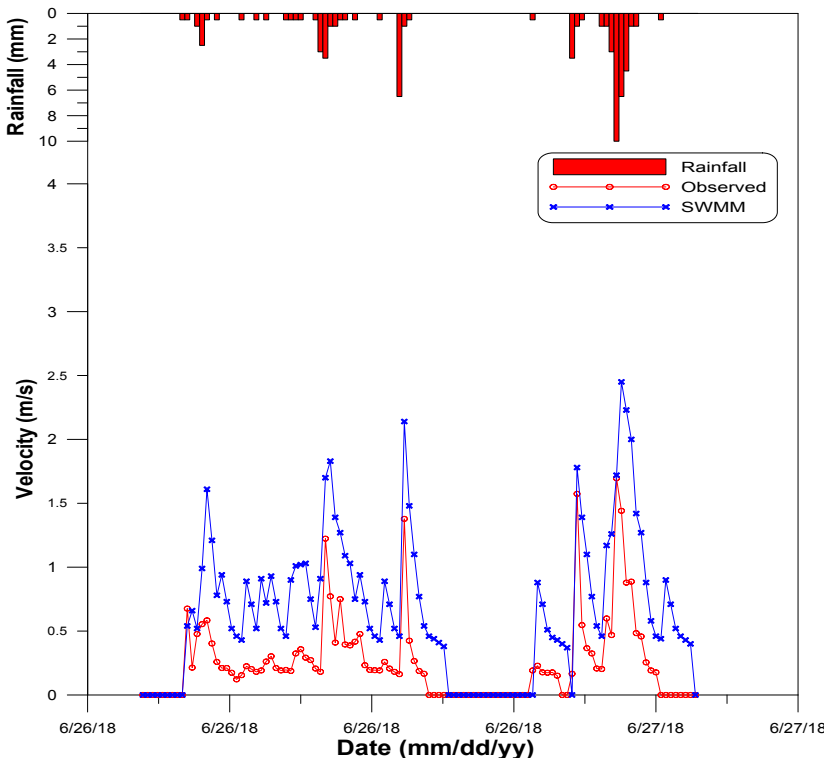
[그림 4-11] 모니터링 지점 유역에 대한 SWMM 모형 구축



[그림 4-12] 우수종단면도를 이용한 SWMM 모형의 관망 구성

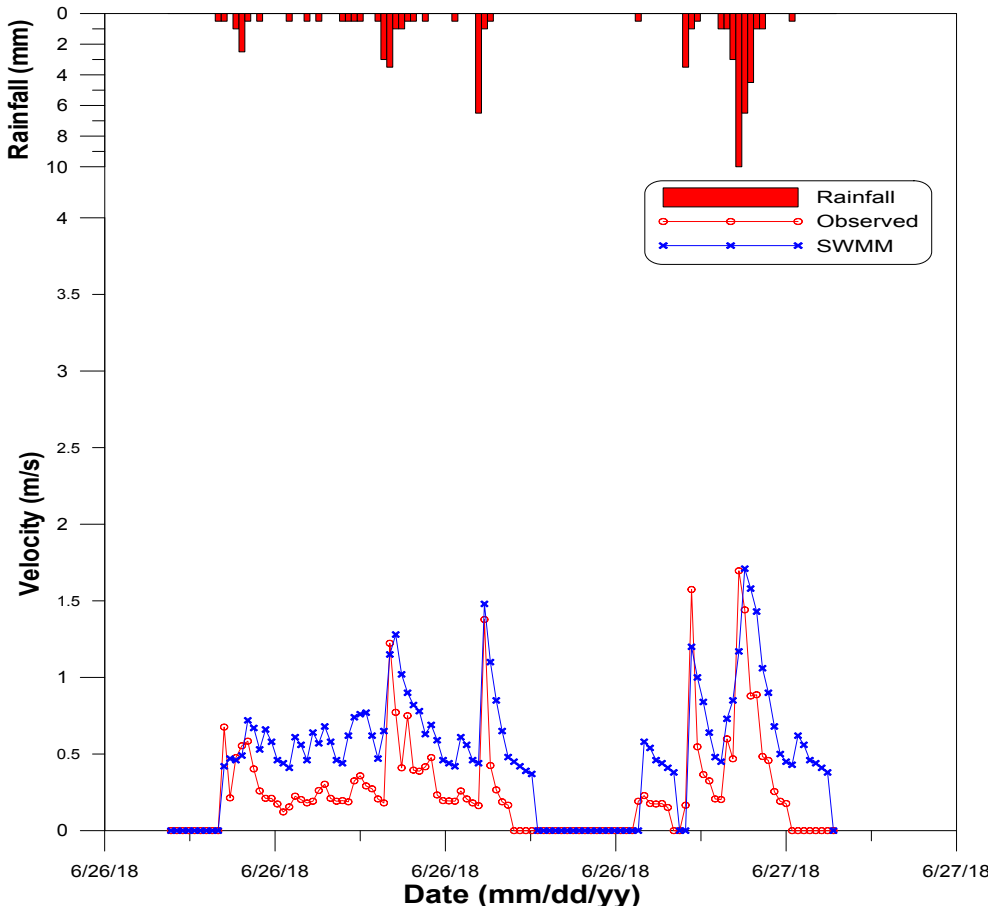
4.3.2 유출모형을 이용한 하수관로 내 강우유입수 유입비율 산정

구축된 SWMM 모형을 이용하여 모니터링 수행지점 관거인 UJ-2100관에 대한 유속을 검토하였다. 2018년 6월 26~27일에 발생한 62 mm의 강우에 대해 SWMM 모형을 이용하여 유속을 분석한 결과, 측정값은 최대 1.7 m/s로 측정된 반면, SWMM 모형값은 2.5 m/s로 모의 되었다. 일반적으로 SWMM 모형의 신뢰성을 높이기 위하여 실측값에 대해 보정을 수행하게 된다. 하지만 금회 수행한 모니터링과 SWMM 모형모의의 결과값은 객관적인 매개변수가 주어진 모형에서 관로의 조도계수나 유역폭 등의 보정으로 좁혀질 수 없는 차이로 나타났다. 이러한 결과 차이의 원인은 해당 유역에서 발생하는 모든 유출수는 맨홀을 통해 관거로 유입하는 조건인 SWMM 모형값과 실제 강우유출수 중 일부만 유입된 하수관거에서 실측한 모니터링 값의 차이로 판단된다.



[그림 4-13] 강우의 100% 유입적용 시 SWMM 모형 결과값과 측정값의 비교

강우량, 지형의 경사, 도로의 단면 등을 고려하여 정확한 강우유출수의 하수관거 유입비율은 산정하기 어렵다. 다양한 조건에서 많은 자료로 검토를 해야할 부분으로 본 연구 이 후 후속 연구에서 지속적으로 해당부분은 연구할 계획에 있다. 본 연구에서는 개략적인 비율을 검토하기 위하여 SWMM 모형 내에 적용된 강우 자료를 일관적으로 비율을 줄여나가면서 유속을 비교하여 보았다. 그 결과 2018년 6월 26~27일에 발생한 62 mm의 강우를 30%로 적용하여 SWMM 모형을 모의하였을 때 UJ-2100관 유속이 측정값과 일치하는 1.7 m/s로 모의되었다.



[그림 4-14] 강우의 30% 유입적용 시 SWMM 모형 결과값과 측정값의 비교

하나의 강우사상으로만 비교를 하였기에 모니터링과 SWMM 모형의 유속 비교로 도출된 30% 강우의 적용은 충분한 근거가 부족하다. 하지만 급경사지에 대한 수리수문분석에서 유역 내 모든 강우를 관거로 유입하여 적용하는 모형을 그대로 적용하기에는 문제가 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구는 1단계 연구로 2단계 연구가 계획 중에 있으며, 2단계 연구에서는 경사별, 강우별 도로단면에 따른 강우유출수의 하수관거 유입비율을 보다 구체적으로 연구하고자 한다. 본 1단계 연구에서는 우선적으로 연구대상지구 실제 관거의 흐름양상에 대해 SWMM 모형과 모니터링 측정값으로 유추된 강우의 30% 적용을 가정하여 사업지구의 관로 추가여부에 따른 흐름모의와 급경사지 상류부 유역의 U형 측구 대체에 대해 분석하고자 한다.

4.4 급경사지 내 맨홀 및 관로의 추가 여부에 따른 하수관로 유속 분석

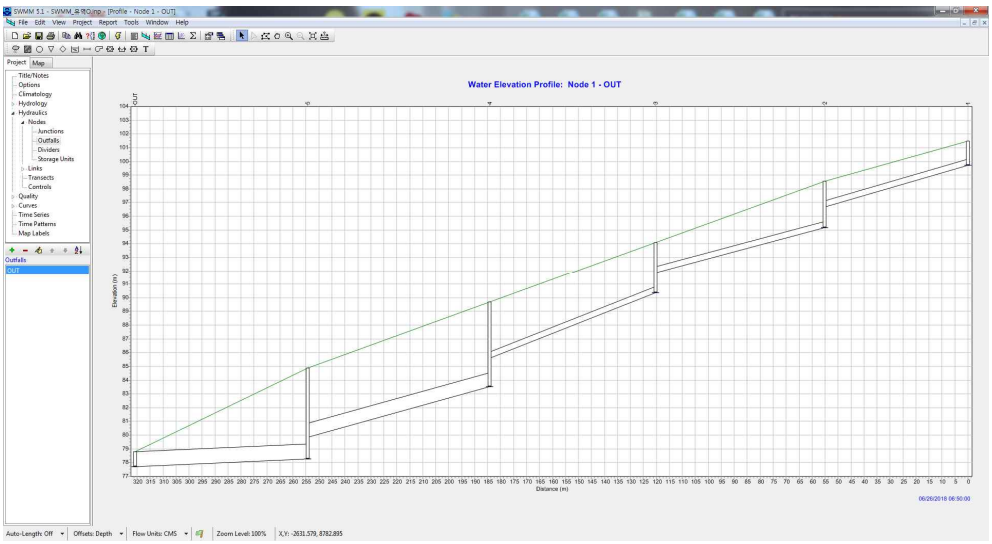
기존 하수관거 내 유속 산정은 MAKESW 등 간략한 유속 산정 공식을 이용한 유속 계산 방법을 적용하여 왔으나 실제 관망에 대한 정밀한 유속을 분석하는데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 SWMM 모형을 이용하여 정밀한 관거를 구성하고 관거 내 유속을 분석하고자 한다. 그리고 기존 설계에 반영되었던 유속과 비교함으로써 기존 설계 방법에 대한 타당성을 평가하고 나아가 설계를 위한 모형의 발전에 따른 설계개선을 위한 자료 축적에 기여하고자 한다.

설계에서 하수관거의 최대유속 3.0 m/s의 제한적 기준에 적용되는 기본 식은 Manning 공식으로 만관유속을 가정하고 하수관로의 구배를 결정한다. 수리계산서에서는 전술한 바와 같이 잘못된 낙차고의 적용으로 처음 Manning 공식으로 설정된 구배와는 다르게 관거가 구성되며, 이는 우수종단면도에서 도면작업을 통해 해당 경사를 고려하여 추가 맨홀부와 관거를 조정하여 제시하고 있다.

이에 연구대상지구 내 모니터링 지점인 급경사지유역의 우수수리계산서와 우수종단면도의 관로 구성에 대해 SWMM 모형을 구축하고 맨홀 및 관로의 추가 여부에 따른 하수관로 유속분석을 수행하였다. 또한, 모니터링의 유속 측정값을 기준으로 강우량의 30%가 우수관거로 유입된다는 가정 하에 홍수량의 30%를 적용하여 맨홀 및 관거의 추가 유무에 대한 유속 분석을 수행하였다.

연구대상 유역의 맨홀 및 관로의 추가 전(우수수리계산서)과 추가 후(우수종단면도)의 관망 구성은 [그림 4-15]와 같다. 우수종단면도를 근거로 구축한 SWMM 모형의 관망은 4.3.1절에서 다룬 모형을 적용하였으며, 맨홀 및 관로의 추가 이전인 수리계산서 상의 관로 정보를 통해 구축한 SWMM 모형의 관망 구성은 [그림 4-16]과 같다.

[그림 4-15] 맨홀 추가 전후의 관망 구성(청주 동남지구)



[그림 4-16] 수리계산서상의 맨홀 추가부 구성 전 관망 구성(청주 동남지구)

우수종단면도상의 구배는 MAKESW 프로그램 내 관로 설계에 있어 적용되는 Manning 공식을 통해 최대 유속 기준 3.0 m/s를 충족시키는 구배를 설정하여 적용하였다. 이에 Manning 공식과 SWMM 모형의 결과값의 비교를 위하여 본 절에서는 우수수리계산서에서 산정한 홍수량을 적용하였으며, 모니터링의 유속 측정값을 기준으로 강우량의 30%가 우수관거로 유입된다는 가정 하에 홍수량의 30%를 적용하여 관로의 유속 양상을 분석하였다.

[표 4-4] 맨홀 추가 여부 및 홍수량 적용 비율에 따른 관거 내 유속 모의결과

관거명 (수리계산서)	관거 유속(m/s)		관거명 (우수종단면도)	관거 유속(m/s)	
	홍수량 100%	홍수량 30%		홍수량 100%	홍수량 30%
UJ-1900	3.29	2.33	UJ-1900-1	3.84	2.78
			UJ-1900-2	3.36	2.41
UJ-2000	5.39	3.66	UJ-2000-1	3.16	2.13
			UJ-2000-2	3.45	2.23
UJ-2010	3.35	2.37	UJ-2000-3	3.53	2.19
			UJ-2010	3.35	2.37
UJ-2100	3.89	2.75	UJ-2100-1	2.74	1.94
			UJ-2100-2	2.76	1.94
UJ-2200	3.02	2.13	UJ-2100-3	2.77	1.94
			UJ-2200-1	2.44	1.72
UJ-2300	2.55	1.79	UJ-2200-2	2.45	1.72
			UJ-2300-1	2.02	1.41
			UJ-2300-2	2.02	1.41

분석결과 맨홀의 추가에도 홍수량 적용시 기준 최대유속 3.0 m/s를 초과하는 관거가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 MAKESW와 SWMM 모형 적용의 차이에 따른 분석적 차이로 보여지며, 보다 정밀한 분석 모형인 SWMM 모형 적용 시에는 기준에 부합하지 않는 관거 구성으로 판단된다. 하지만 급경사지의 표면유출 양상을 고려하

여 관거 내 유입 홍수량이 30%로 가정하였을 때 맨홀의 추가 구성시 기준 최대유속을 만족하는 것으로 나타났으며, 맨홀의 추가 구성 전의 경우에도 UJ-2000 관거를 제외한 관거는 기준에 부합하는 것으로 나타났다. 외부유역의 유입을 고려하는 UJ-2000 관거의 경우에도 U형 측구와 집수정을 통한 강우유출수의 분산을 고려한다면 기준에 부합할 수 있을 것으로 판단된다.

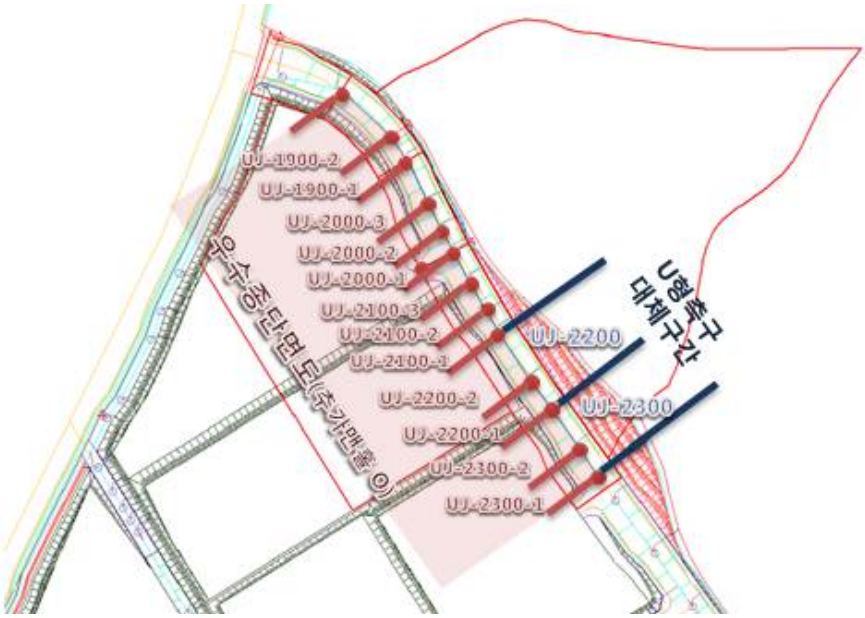
현재 관거설계에서 제시하는 최대유속의 경우 지표면 경사에 따른 강우유출수의 관거 유입양상을 고려하지 않는 관계로 실무에서 맨홀의 추가 설치가 불가피한 상황이다. 따라서, 본 연구의 후속 과제를 통해 도출하고자 하는 강우-경사별 강우유출수의 관거 유입양상 적용한다면 불합리한 맨홀의 추가 설치를 줄일 수 있을 것으로 보여진다. 또한, 급경사지의 경우 유입초기 부분의 맨홀 및 관거는 실질적으로 외부유입이 없을 경우 관거로 유입되는 강우유출수가 작기 때문에 U형관거로 대체가 가능할 것으로 보여진다.

실제 청주 동남지구 현장 사업소에서 현업에 종사하는 설계 업체와 회의를 진행한 결과, 초기 우수관의 유역이 작으면 하수관로를 설치하는 것보다 측구를 통해서 유출수를 유도하는 방법이 효율적이며, 급경사지에서는 관거를 설치하게 되면 맨홀의 추가가 필연적으로 발생하며 이로 인한 성토깊이, 맨홀깊이 증가로 시공성도 떨어지고 유지관리가 어렵다는 의견이 대부분이었다. 결국 3.0 m/s은 최대 유속 기준은 급경사지에서는 시공의 어려움을 가져오는 기준이다.

4.5 급경사지 상류부 유역의 U형 측구 적용에 대한 하수관로 유속 분석

연구대상지구의 급경사지 도로부의 초기 유수관 유역을 포함한 상류부 유역은 도로에만 해당하는 유역면적을 가지고 있다. 즉, 강우발생 시 도로에서 발생하는 강우유출수를 처리하기 위하여 하수관거가 계획되어 있는 것이다. 작은 도로 유역에서 발생하는 강우가 급경사를 통해 해당 관로로 유입되는 비율이 적다는 점을 고려한다면 관로 및 맨홀의 심도를 1 m 이상을 추가로 부담하게 되는 급경사지 상류부 하수관거의 적용을 개선할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 기존 설계 프로그램인 MAKESW에서 급경사지의 유입초기부 관거를 U형 측구로 대체하였을 경우에 대한 맨홀의 구성 및 관거의 유속분석을 수행하고자 한다.

수행방법은 우수종단면도상 즉, 실제 시공된 하수관거를 대상으로 상류부 유역의 관거 2개(UJ-2300, UJ-2200)를 차례로 U형 측구로 대처했을 때 관거 내 유속을 SWMM 모형을 이용하여 분석하였으며, 홍수량 100%와 30%를 적용하였다.



[그림 4-17] 급경사지 상류부 유역 관거의 U형 측구 대체(안)

홍수량 100% 적용 시 분석 결과, 상류부 관거 UJ-2300관 1개를 U형 측구로 대처했을 때 후속 하류부 관거인 UJ-2200-2관은 기존 2.45 m/s에서 2.47 m/s로 조금 증가하였으며, 상류부 관거 UJ-2300관과 UJ-2200관을 U형 측구로 대체하였을 때는 후속 하류부 관거인 UJ-2100-3관은 기존 2.77 m/s에서 최대 유속 기준 3.0 m/s를 상회하는 3.05 m/s로 모의되었다. 기존 관망에 따른 SWMM 모형의 유속 결과값 중 UJ-2000관부터 최대유속 기준을 상회하는 구간에 대해 U형 측구의 적용의 영향은 미미하며, UJ-2300관을 U형 측구로 대처하는 것은 수리수문학적으로 가능한 것으로 분석되었다. UJ-2300관과 UJ-2200관을 U형 측구로 대체하는 것도 후속 하류부 관에서 0.5 m/s 초과 유속에 대한 대응책만 마련한다면 적용가능성은 충분할 것으로 보여진다.

[표 4-5] 급경사지 상류부 관거의 U형 측구로 대처에 따른 관거 유속 모의결과(홍수량 100%)

관거명 (우수종단면도)	관거 유속(m/s)		
	기존	U형 측구 적용 (UJ-2300)	U형 측구 적용 (UJ-2300, 2200)
UJ-1900-1	3.84	3.84	3.84
UJ-1900-2	3.36	3.37	3.40
UJ-2000-1	3.16	3.15	3.16
UJ-2000-2	3.45	3.43	3.46
UJ-2000-3	3.53	3.49	3.64
UJ-2010	3.35	3.35	3.35
UJ-2100-1	2.74	2.77	2.87
UJ-2100-2	2.76	2.81	2.99
UJ-2100-3	2.77	2.84	3.05
UJ-2200-1	2.44	2.49	U형 측구
UJ-2200-2	2.45	2.47	
UJ-2300-1	2.02	U형 측구	
UJ-2300-2	2.02		

본 연구에서 가정한 급경사지 구간의 경사로 인한 강우시 강우유출수의 양상은 대

부분 지표흐름이며, 약 30%의 강우유출수만 하수관거로 유입한다는 가정 하에 홍수량의 30%만 적용하여 SWMM 모형을 분석한 결과, 결과, 상류부 관거 UJ-2300관 1개를 U형 측구로 대처했을 때 후속 하류부 관거인 UJ-2200-2관은 기존 1.72 m/s에서 변화가 없었으며, 상류부 관거 UJ-2300관과 UJ-2200관을 U형 측구로 대체하였을 때는 후속 하류부 관거인 UJ-2100-3관은 기존 1.94 m/s에서 1.98 m/s로 0.4 m/s 증가하는 것으로 모의되었다. 기존 관망에 따른 SWMM 모형의 유속 결과값 중 UJ-2000관부터 최대유속 기준을 상회하는 구간에 대해 U형 측구의 적용의 영향은 미비하며, 상류부 구간의 하수관거 UJ-2300관과 UJ-2200관을 U형 측구로 대처하는 것은 수리수문학적으로 가능한 것으로 분석되었다.

[표 4-6] 급경사지 상류부 관거의 U형 측구로 대처에 따른 관거 유속 모의결과(홍수량 30%)

<table>
<tr><th rowspan="2">관거명
(우수종단면도)</th><th colspan="3">관거 유속(m/s)</th></tr>
<tr><th>기존</th><th>U형 측구 적용
(UJ-2300)</th><th>U형 측구 적용
(UJ-2300, 2200)</th></tr>
<tr><td>UJ-1900-1</td><td>2.78</td><td>2.78</td><td>2.78</td></tr>
<tr><td>UJ-1900-2</td><td>2.41</td><td>2.41</td><td>2.46</td></tr>
<tr><td>UJ-2000-1</td><td>2.13</td><td>2.13</td><td>2.16</td></tr>
<tr><td>UJ-2000-2</td><td>2.23</td><td>2.22</td><td>2.27</td></tr>
<tr><td>UJ-2000-3</td><td>2.19</td><td>2.19</td><td>2.27</td></tr>
<tr><td>UJ-2010</td><td>2.37</td><td>2.37</td><td>2.37</td></tr>
<tr><td>UJ-2100-1</td><td>1.94</td><td>1.94</td><td>1.97</td></tr>
<tr><td>UJ-2100-2</td><td>1.94</td><td>1.94</td><td>1.99</td></tr>
<tr><td>UJ-2100-3</td><td>1.94</td><td>1.94</td><td>1.98</td></tr>
<tr><td>UJ-2200-1</td><td>1.72</td><td>1.72</td><td rowspan="4">U형 측구</td></tr>
<tr><td>UJ-2200-2</td><td>1.72</td><td>1.72</td></tr>
<tr><td>UJ-2300-1</td><td>1.41</td><td rowspan="2">U형 측구</td></tr>
<tr><td>UJ-2300-2</td><td>1.41</td></tr>
</table>

제 5 장
현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정

LAND & HOUSING INSTITUTE

제5장 현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정[3)]

5.1 맨홀부의 구조적 안정성 분석을 위한 수충격력 실험 개요

강우로 인하여 강우유출수가 하수관거로 유입하고 이송되는 과정에서 관로 내부와 관로를 연결하는 맨홀부에서는 우수로 인한 충격력이 발생하게 된다. 이러한 충격력은 하수관로 및 맨홀부의 내용연수의 감소 및 안정성과 직관되는 문제로 국내에서는 관로설계 기준(환경부, 2017)에서 우수관의 최대 유속 기준을 3.0 m/s으로 제시하고 있다. 최대 유속 기준은 서론에서 언급한 바와 같이 1980년 이후로 개선없이 적용되고 있으며, 관거 및 맨홀부의 재료나 실험, 현장적용 사례를 통해 정해진 것이 아니다. 또한 토목 재료와 시공의 기술은 과거에 비해 월등히 향상되어 오고 있으며, 관내 유속 저감장치 적용 기술의 발달은 일괄적인 유속 기준의 제한에 문제점으로 제시되고 있다.

과거 토지주택연구원에서는 '최소비용 우수관망 설계를 위한 관내 최대유속기준 타당성 검토에 관한 연구'를 2010년에 수행한 바 있다. 해당 연구에서는 한국건설기술연구원의 옥외하천시험실에서 관거 내 유속에 따른 맨홀의 수충격력 시험을 수행하였다. 1호 맨홀, 흄관 300 및 관경사 8%로 제작된 시험장치를 이용하여 최대 4.5 m/s, 유량 0.311 m^3/s에서 평균 수충격력을 측정하였으며, 162 kgf로 측정된 값은 1호 맨홀 자체의 하중 3.7 ton보다 훨씬 작은 값으로 수충격력을 통한 맨홀과 관 연결부의 이완 가능성은 전혀 없다고 나타내고 있다. 또한, 맨홀 내벽의 곡률특성 및 유체의 중력가속도에 대한 합력 등의 영향으로 맨홀의 수충격력은 운동량 방정식을 통한 맨홀 내 이론적인 수충격력 계산보다 약 1.3배 높게 모의되었으며, 관경별로 유량을 증가함에 따라 최대유속 4.5 m/s 발생 시의 수충격력을 상기 실험치의 1.3배를 적용하여 산출한 결과 모든 케이스의 맨홀 규격에서 발생하는 수충격력은 맨홀의 자중보다 훨씬 작은 안전한 결과를 나타내었다.

---

3) 본 장의 내용은 위탁용역의 결과물을 바탕으로 재정리하여 작성함

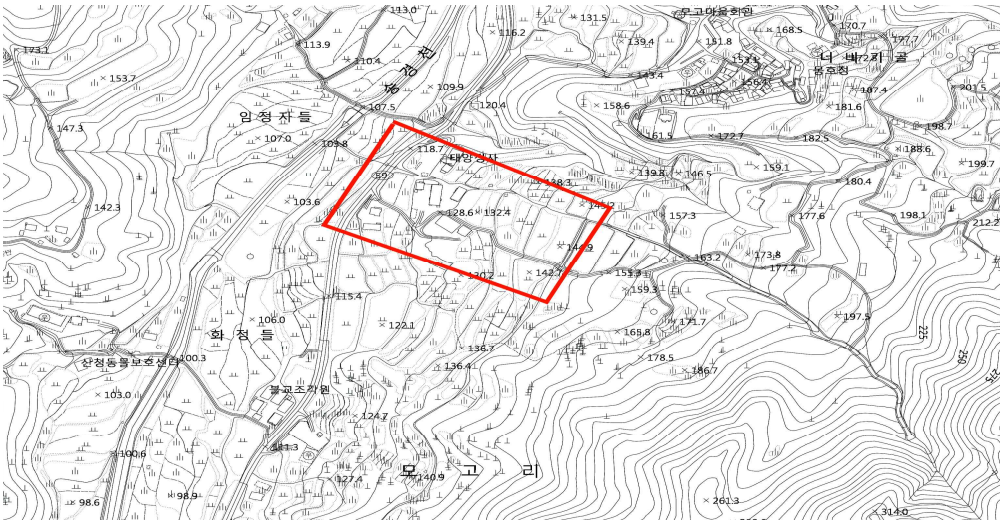
[그림 5-1] 맨홀 내 내충격성 실험(토지주택연구원, 2010)

결론적으로 강우유출수의 관거내 흐름은 맨홀의 구조적인 안정성에 영향이 없는 것으로 판단되나, 본 연구의 최종적인 목표인 지침 개정을 위해서는 다양한 연구 결과의 자료 축적이 필요하다. 이에 본 연구에서는 실제 현장에 시공된 하수관거를 대상으로 맨홀부 수충격력 실험을 수행하고자 한다. 또한, 현장모의실험을 통한 수충격력 실험의 결과는 수치해석프로그램을 통해 재현하는 기초자료로도 활용하여 보다 다양한 조건에서 수충격력 예측 분석에 기여하고자 한다.

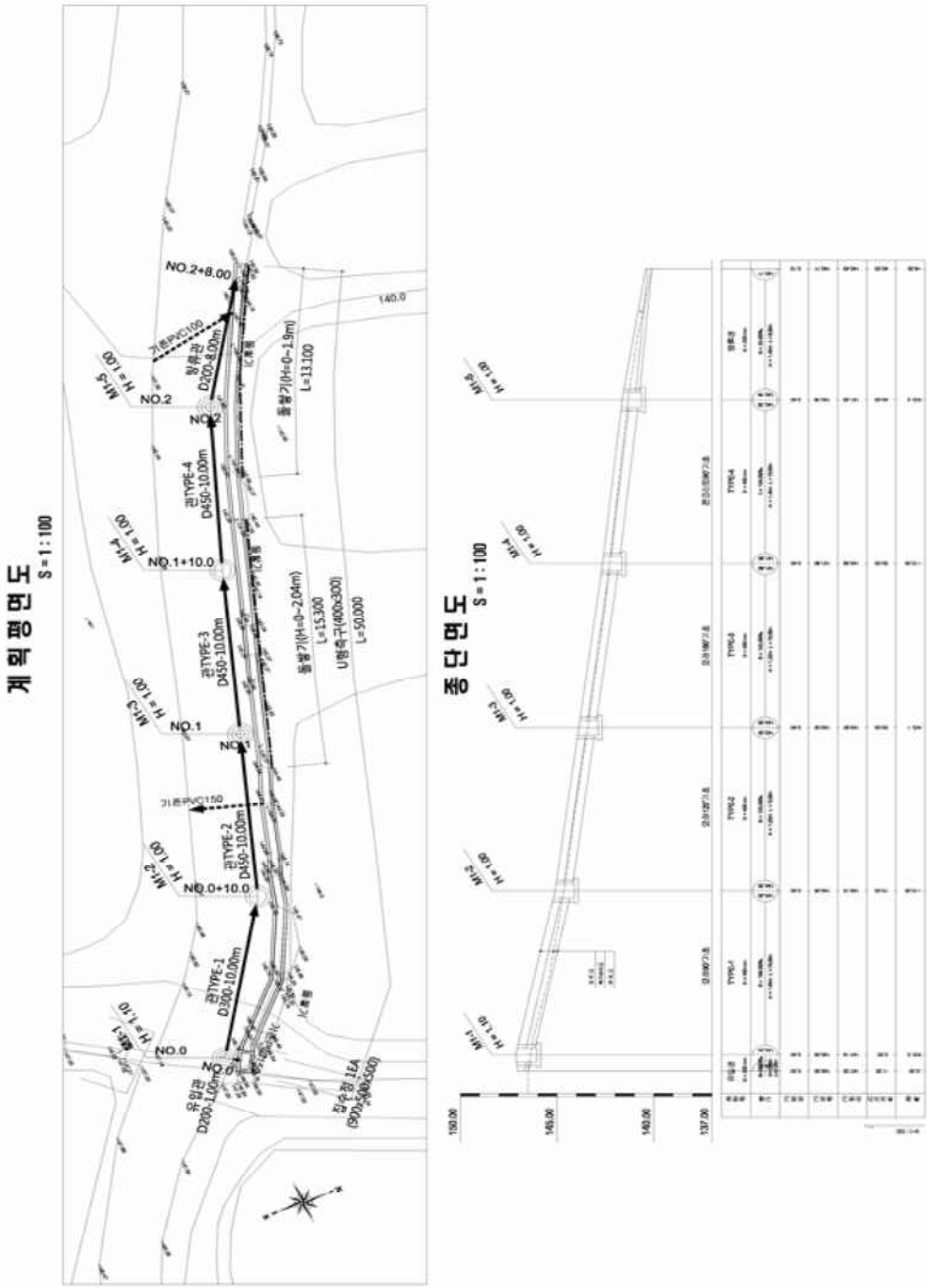
5.2 맨홀부 수충격력 실험을 위한 연구대상 지구 선정

수충격성 실험은 우수관을 통해서 토출되는 유출에너지가 맨홀 내부벽체에 전달하는 수충격력을 측정하여 맨홀의 지지력에 영향을 미치는지를 알아보기 위한 실험으로 본 연구에서는 맨홀의 내충격성 실험(수충격력 실험)을 위하여 [그림 5-2]와 같이 경상남도 산청군 산청읍 고모리 1177번지 일원에 하수관거 시공 지점을 연구대상지구로 선정하였다.

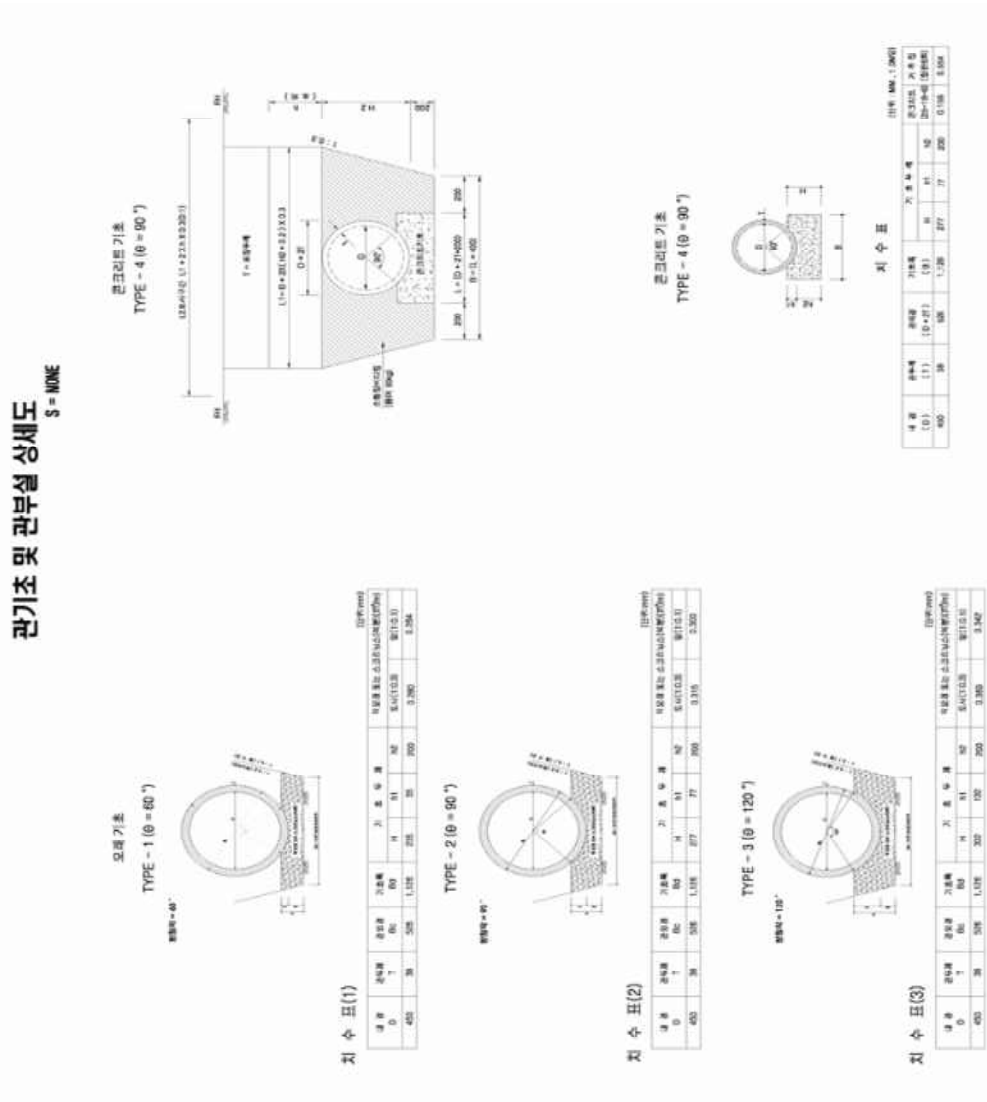
연구대상지구 내 설치된 하수관거의 계획 평면도, 종단면도, 적용된 시설물의 제원은 [그림 5-3]부터 [그림 5-6]과 같다.



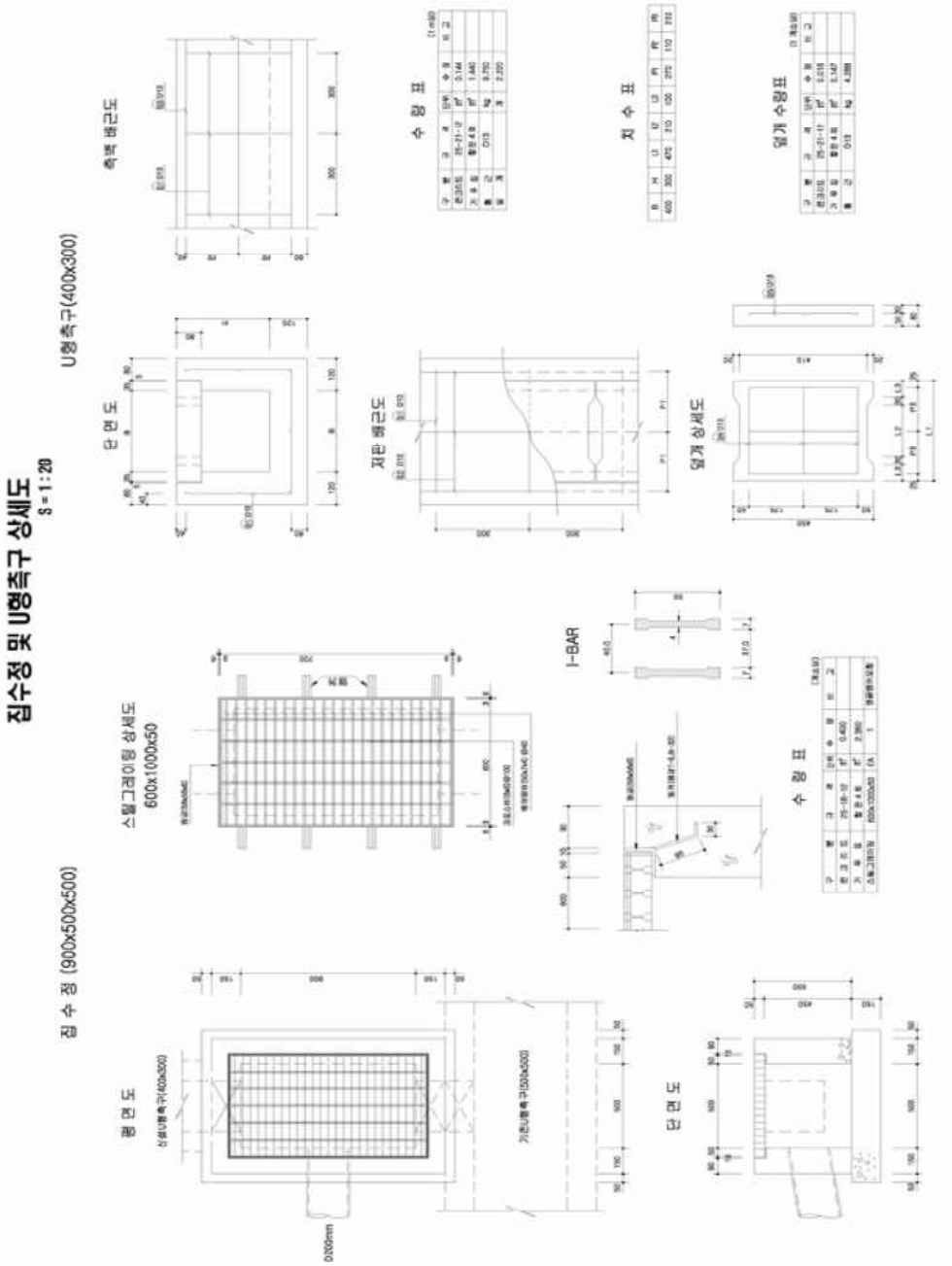
[그림 5-2] 맨홀부 수충격력 실험을 위한 연구대상지구



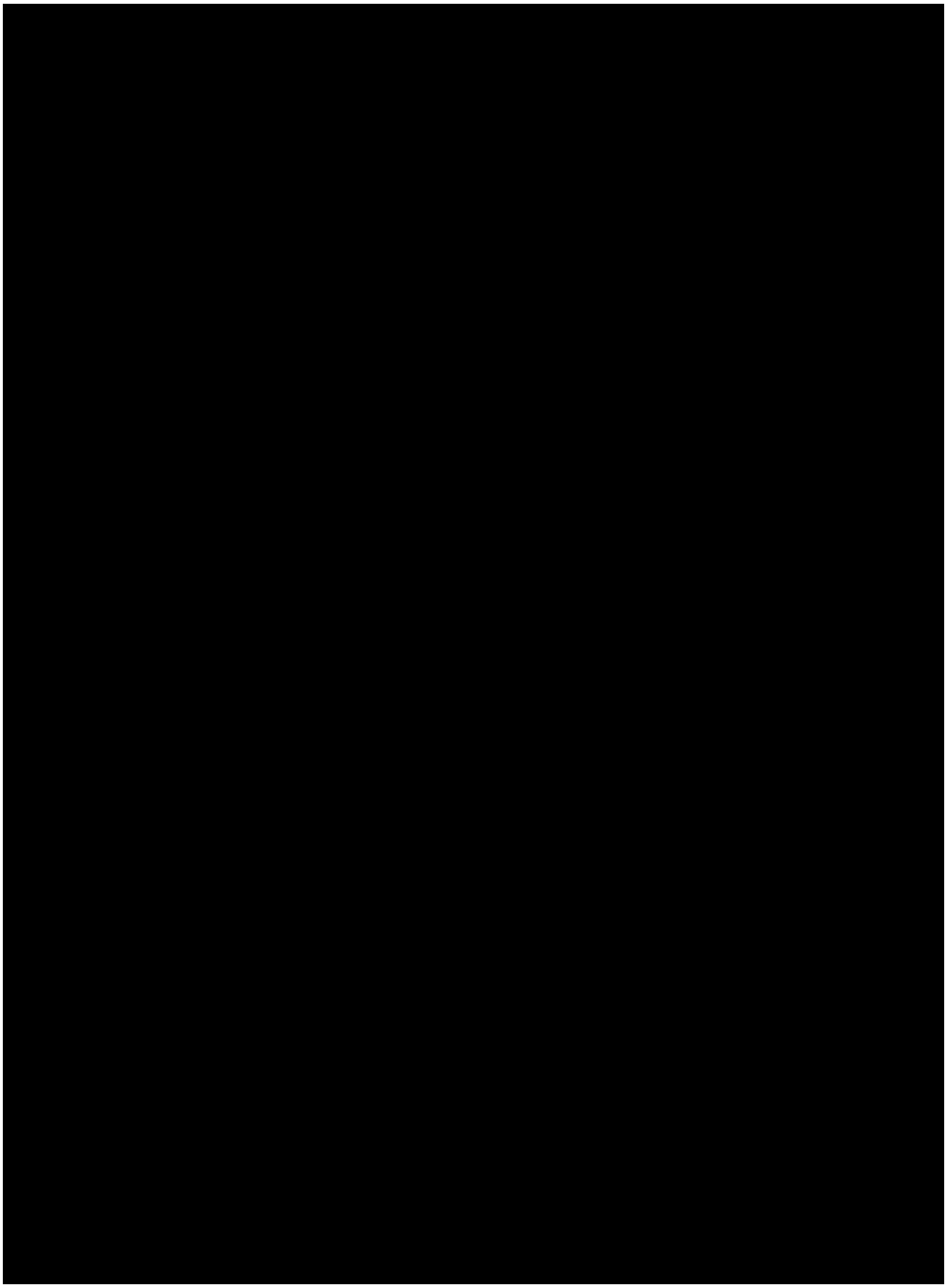
[그림 5-3] 계획평면도 및 종단면도



[그림 5-4] 관기초 및 관부설 상세도



[그림 5-5] 집수정 및 U형 측구 상세도



[그림 5-6] 원형 1호 맨홀 상세도

5.3 맨홀부 수충격력 측정을 위한 현장모의실험

실제 강우로 인한 유속 조건은 만족하기 어렵기 때문에 맨홀부 수충격력 실험방법은 Type2 관거에서 살수차를 통해 유속과 유량을 설정하고 살수된 물을 통해 m1-3 맨홀에서 수충격력을 측정하였다.

[그림 5-7] 맨홀부 수충격력 실험 수행

본 연구에서는 맨홀벽체에 전달되는 수충격량을 측정하기 위하여 맨홀 벽체에 [그림 5-7]과 같이 로드셀을 설치하여 수충격 하중을 읽는 방식을 적용하였다. 실험결과, 유속 1.45 m/s~1.95 m/s의 범위에서 측정하였으며 유속에 따른 유량은 0.0785 m^3/s~0.1421 m^3/s의 범위로 나타났다. 본 실험에서 최대유속으로 나타난 1.95 m/s에서는 수충격력이 32 kgf로 나타났다. 이는 1호 맨홀 자체의 하중 3.7 ton에 비해 약 1% 정도에 해당하는 값으로 수충격력이 맨홀에 주는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

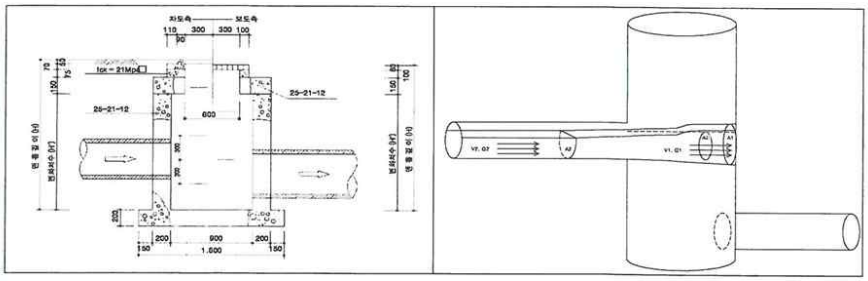
[표 5-1] 유속, 유량별 맨홀부 수충격력 실험 결과

유속 (m/s)	유량 (m^3/s)	수충격력(kgf)
1.45	0.0785	13
1.48	0.0824	14
1.51	0.0924	16
1.58	0.0942	17
1.59	0.0984	18
1.62	0.0994	20
1.87	0.1177	25
1.92	0.1325	29
1.95	0.1421	32

금회 수행된 맨홀부 수충격력 현장모의실험에 대한 평가를 위하여 전문가에게 자문을 통한 검토 의견서를 요청했다. 검토 결과는 강우유출수에 의한 맨홀부에 가해지는 수충격력은 영향이 미미하며, 구조적 문제는 발생하지 않는다는 내용과 이음과 접합부에서 주로 문제가 발생하기에 시공적인 부분에서 검토가 필요하다는 의견이 있었다.

수충격 실험 검토 의견서

1. 도면



2. 사진

3. 수충격력

유속	유량	수충격력	유속	유량	수충격력	유속	유량	수충격력
1.45	0.0785	13	1.48	0.0824	14	1.51	0.0924	16
1.58	0.0942	17	1.59	0.0984	18	1.62	0.0994	20
1.87	0.1177	25	1.92	0.1325	29	1.95	0.1421	32

4. 검토의견

박종섭	김성찬
수충격이 맨홀의 강도에 미치는 영향은 지극히 적어 맨홀 자체의 구조적 문제가 없는 것으로 사려됨	장기적인 수충격으로 인한 문제 이외의 구조적 문제가 없는 것으로 보임. 하지만 주로 맨홀의 경우 접합부의 문제를 고려하여 이음이나 접합부의 구조적 보강이 필요함
상명대학교 사회시스템공학과 교수 박종섭 (인)	코비코리아 구조기술사 김성찬 (인)

[그림 5-8] 자문을 통한 맨홀부 수충격력 실험 검토의견서

제 6 장
현장모의실험 결과를 이용한 수치해석 모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석

LAND HOUSING INSTITUTE

제6장 현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석[4)]

6.1 수치해석모형(FLOW-3D)의 개요

6.1.1 지배방정식

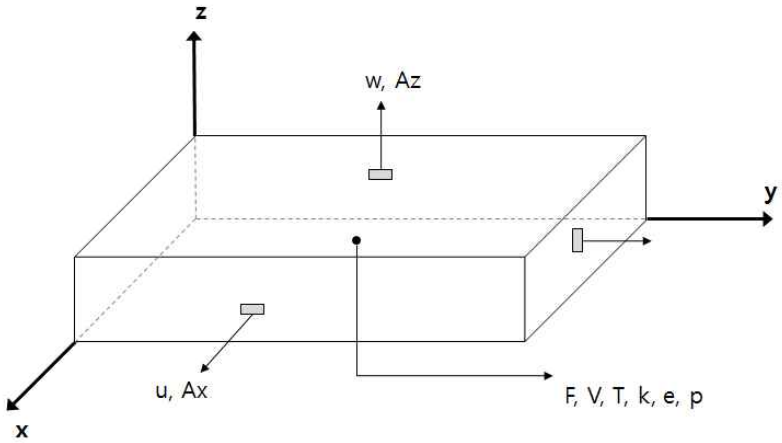
본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램인 FLOW-3D는 Flow Science, Inc에서 개발한 상용 프로그램으로, 난류, shallow water, scalar 등 유동해석 뿐만 아니라 주조, 잉크젯 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 기본적으로 비정상 유동상태이며 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법(finite difference method, FDM)과 유한체적법(finite volume method, FVM)을 사용하여 유체 흐름을 해석한다. 또한 난류 흐름을 해석하기 위해 혼합 길이 모형(mixing length model), 난류 에너지 모형(turbulence energy model), $k-\varepsilon$ 모형, RNG(renormalized group) 모형 등 5가지의 모형을 적용하며 자유수면표연기법인 VOF(volume of fluid) 방정식을 사용하고 있다.

격자의 구성은 사각형 비등방 고정격자법을 이용하며 2차원 및 3차원 구조물의 형상 구현을 위해 CAD, Solid-Edge 및 데이터 형식의 파일 등을 지원한다. 또한 격자망 내의 구조물의 형상을 보다 정확하게 표현하기 위해 FAVOR(Fractional Area/Volume Ratio) 기법을 각 방정식에 적용하고 있다. 이 기법을 사용함으로 인해 격자망과 구조물의 형태를 서로 분리하여 처리할 수 있으므로 보다 편리하고 간단하게 수치모의를 진행할 수 있다.

FLOW-3D는 범용 패키지 프로그램 최초로 퇴적세굴모델(sediment scour model)을 지원하고 있다. 이 모델은 3차원 흐름 분석에서 퇴사(packed sediment)와 부유사(suspended sediment)의 양상을 예측하며 기본적으로 drifting, advection, bed-load transport 및 entrainment 등 4가지의 매커니즘으로 구성되어 있으며 이

4) 본 장의 내용은 위탁용역의 결과물을 바탕으로 재정리하여 작성함

송-확산 방정식에 의해 퇴적 세굴을 모의하는 것이 아니라 밀도차를 고려한 침전 속도와 전단력에 의한 침식 속도를 계산한다. FLOW-3D에서의 지배방정식은 직사각형 격자에 유한차분 근사를 사용하였으며, 각각의 변수들은 [그림 6-1]과 같이 위치한다. 속도는 셀 표면에 위치하고 다른 변수들은 셀의 중앙에 위치한다. 곡선의 장애물, 벽체의 경계 및 다른 형상들은 면적비와 흐름에 대한 격자의 체적비로 정의된다. 지배방정식을 수치적으로 푸는데 사용되는 유한차분 격자체계는 폭, 너비, 높이에 대한 직사각형 격자들로 구성된다.



[그림 6-1] 유한체적방법 도해

본 모형에서 사용한 질량에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$V_F\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(uA_x\rho)+R\frac{\partial}{\partial y}(vA_y\rho)+\frac{\partial}{\partial z}(wA_z\rho)+\zeta\frac{\rho uA_x}{x}=R_{DIF}+R_{SOR}$$

(6.1)

여기서, VF는 유체의 요소 체적(volume fraction), ρ는 유체의 밀도(density), A_x, A_y, A_z는 각 방향에 대한 면적비(Friction area), RDIF는 난류 확산항, RSOR은 질량 생성/소멸(mass source/sink)항, u, v, w는 각각 x, y, z 방향의 순간 속도

성분(instantaneous velocity), R과 ζ는 원통형 좌표계(cylindrical coordinate)의 경우 사용하는 상수를 각각 나타낸다. 식 (6.1)에서 난류확산항은 식 (6.2)와 같이 표현 될 수 있다.

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}\left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_\rho Az \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) \tag{6.2}$$

여기서, v_ρ는 $c_\rho \mu/\rho$로 표현될 수 있으며, μ는 운동량확산 계수, c_ρ는 난류에 대한 상수이다.

난류 확산의 형태는 불균질 밀도를 가지는 유체의 난류 혼합과정에 민감하게 나타난다. 또한, 식 (6.1)을 직교좌표계(cartesian coordinate)에서의 비압축성 유체로 가정하면 연속방정식은 아래 식 (6.3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \tag{6.3}$$

운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 몇 개의 항이 추가 된 것으로 아래 식 (6.4)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}u + F_x + G_x \tag{6.4a}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}v + F_y + G_y \tag{6.4b}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left\{uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}w + F_y + G_z \tag{6.4c}$$

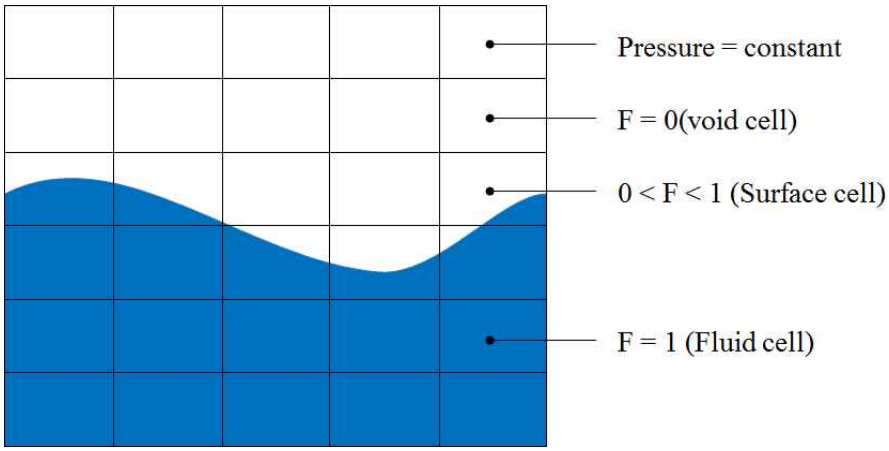
여기서, F_x, F_y, F_z과 G_x, G_y, G_z는 각각 x, y, z 방향의 점성력(viscous force)과 중력(gravity)을 나타낸다. 또한 RSOR(Accelerations Caused by Mass Injection at Zero Velocity)은 기체와 접하는 액체 표면의 형상을 VOF(Volume of fluid)의

함수를 통해 얻을 수 있다.

6.1.2 자유수면 표현기법 (Volume of Fluid method, VOF)

유동 현상을 정확하게 정의하기 위해서는 유동이 포함된 시스템에서 유체 입자의 위치와 시간에 따른 속도와 가속도를 정확하게 기술하는 방법이 중요하다. 불규칙한 유체의 운동에 대한 기술은 유체 입자 위치의 변화율로 입자의 운동을 기술하는 라그랑지 기술법(largrangian method)보다는, 고정된 점(x0, y0, z0)을 사용하는 오일러 기술법(eulerian method)을 사용하는 VOF 방법을 통해 간단히 이루어질 수 있다. FLOW-3D에서 사용되는 VOF 방법은 정확한 압력 및 운동학적 경계 조건을 상이 경계면(sharp interface)에서 적용하고 있으며, 유한 차분시 경계면의 번짐을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체사이의 운동을 기술할 수 있다. 이때 유체와 공기일 경우에는 보통 자유 표면으로 가정한다. VOF 방법에서 경사와 곡선은 이웃하는 각 cell의 요소 체적을 이용하여 계산된다.

VOF 방법의 기본 개념은 [그림 6-2]에 나타난 바와 같다. 여기서 F는 단위 체적 내에 포함되어 있는 기체와 액체와의 체적비를 나타낸다. 자유 표면을 포함하고 있는 비압축성 유체의 경우, F는 유체가 점유하는 체적비를 의미하는 것으로 다시 말해 F=1인 경우 단위 체적 격자내에 유체로만 채워져 있다는 것으며, F=0인 경우 진공상태로 공간에 균일한 압력이 작용되고 유체가 없는 빈 공간을 의미한다.



[그림 6-2] VOF 방법의 개념

FLOW-3D에서 사용하는 VOF 방법의 지배 방정식은 식 (6.5)와 식 (6.6)과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u)+\frac{\partial}{\partial y}(FA_y v)+\frac{\partial}{\partial z}(FA_z w)\right]=F_{DIF}+F_{SOR} \qquad (6.5)$$

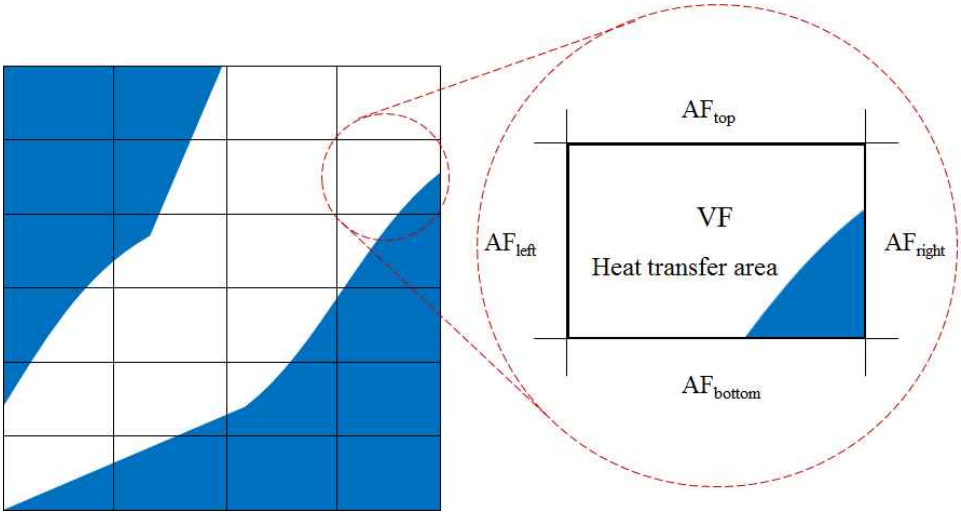
$$F_{DIF}=\frac{1}{V_F}\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(u_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(u_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(u_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}\right)\right\} \qquad (6.6)$$

여기서, $v_F = C_F \mu/\rho$로 확산계수(diffusion coefficient)이며, 상수 C_F는 turbulent schmidt 수의 역수이다. 위 확산항은 서로 다른 유체간에 난류 혼합(turbulent mixing)이 발생하는 경우에 적용된다. 또한 F_{SOR}은 연속 방정식과 운동량 방정식의 R_{SOR}에 해당하며, 유체의 질량생성으로 인해 변화되는 해당 유체의 시간에 따른 체적 변화율을 의미한다.

6.1.3 FAVOR 방법

FAVOR 방법은 기본적으로 유한차분법으로 구성되어 있어, 공간좌표 상의 각종 변수를 계산할 때 효율적인 자료 처리가 가능하여 전체 계산시간을 단축시킬 수 있다. 일반적으로 곡선형 경계표면의 표현 방법에는 두 가지가 있다. 격자 요소를 특정 형상에 일치시키는 것으로 body fitted 격자라고 하며, 일반적으로 육면체의 형태를 취한다. 다른 방법은 직각 요소를 유지하면서 내부의 경계면을 정의하는 것으로 FLOW-3D에서 적용하는 FAVOR 방법이다. 경계면은 하나의 격자와 그 위치가 기록됨으로써 격자의 변형을 통해서가 아니라 격자의 체적비와 면적비의 항으로써 표현이 가능하며 변형된 격자 기법처럼 수치적으로 근사한 결과를 산출할 수 있다.

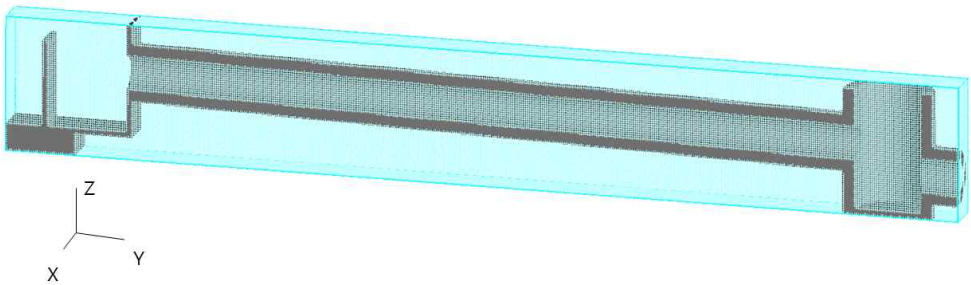
[그림 6-3]에 FAVOR 방법의 개념을 나타낸다. 직육면체 요소의 각 면을 통한 유체의 출입이 전체 또는 일부가 통제될 수 있다고 정의한다. 이로써 하나의 직육면체 요소에 유동물질이 차지하는 부피 및 이 매체가 통과하는 면적을 정의할 수 있다. 따라서 직사각형 격자는 구조물 격자가 국부 영역에서 정도를 높이기 위해 변형될 수 없다는 단점이 있으나, 이 요소 내 통과 면적에 대한 질량, 에너지 및 에너지 플럭스(flux)식을 유한체적으로 적분하여 물체주위의 유동을 기술할 수 있다. 이를 통해 BFC(Boundary fitted coordinate) 좌표 변환을 하지 않은 FDM(Finite difference method) 사용시 발생하는 문제 중 하나인 계단형 격자로 인한 결과의 오차를 보완할 수 있다.



[그림 6-3] FAVOR 방법의 개념

6.2 하수관로 수치해석 경계조건 및 제원

[그림 6-4]는 하수관거의 격자망(mesh)을 나타낸다. 수치 모델에서는 x, y, z를 축으로 하는 직교좌표계를 사용하였으며, Y 축을 흐름 방향으로 하여 하수관거를 모델링하였다. 하수관거의 길이는 10 m이며, 관거의 직경은 0.45 m이다. 격자망의 간격은 하수관거 내의 유량에 따른 유속 분포 특성 등을 예측하기 위하여 격자망 하나당 20mm의 크기로 하였으며, 경사 조건에 따라 격자망 수는 1,555,625~2,292500개로 구성하였다. 계산 영역의 크기는 유체의 유입 방향을 기준으로 하수관거 초기 맨홀부 좌측면(0, 0, 0)을 기준으로 X축은 0mm에서 500mm, Y축은 0mm에서 23,500mm, Z축은 0mm에서 4,100mm이다.



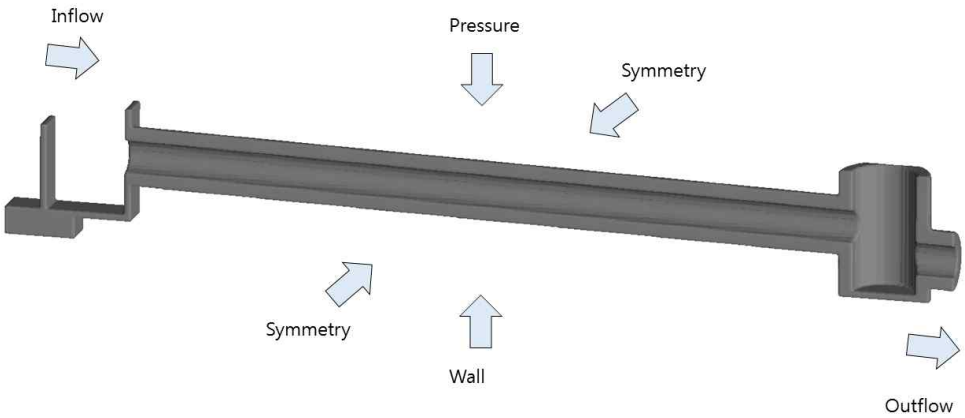
[그림 6-4] 하수관거 격자망(mesh) 구성

[그림 6-5]는 흐름장의 수치 해석을 위한 경계조건(boundary condition)을 나타낸다. Y축을 중심으로 유입(inflow)과 유출(outflow)이 있으며, X축 방향은 단면의 특성상 대칭조건(symmetry)으로 하였다. Z축의 바닥은 벽면(wall), 상부는 대기압(pressure)이 작용하도록 하였다.

또한 본 연구의 난류확산의 해석은 RND(renormalized group)모형을 사용하였으며, 중력(gravity)은 Z 방향에서 -9.81 m/sec^{2}이 작용하도록 설정하였다. 수로에서의 흐름은 밀도류의 영향을 고려하지 않으므로 유체의 밀도는 1,000 kg/m^{3}으로 하였다. 모의 시간은 30초로 하여 상부 맨홀부를 통해 유입된 유체가 하수관거를 흐른

후 하부 맨홀을 통과하여 관거를 통해 유출되는 과정을 보았으며, 0.1초 간격으로 저장하여 계산된 유체 형상을 확인하였다.

본 연구에서 하수관로의 유량 및 경사에 따른 유속 및 충격압 분포 특성을 알아보기 위해 [표 6-1]과 같이 다양한 크기의 유량 및 경사를 적용하였다. 유입된 유량의 크기는 현장모의실험의 결과를 바탕으로 동일 모형 조건에서 각각 0.0785(Q-1), 0.0942(Q-2), 0.1177(Q-3) 및 0.1421(Q-4)로 하였다. 여기서, 유량의 단위는 m3/sec이다. 경사는 대상 지구의 종단면도를 바탕으로 1.23°, 3.23°, 5.23° 및 7.23°로 모델링하여 각각 수치해석을 수행하였다.



[그림 6-5] 하수관거 경계조건 구성

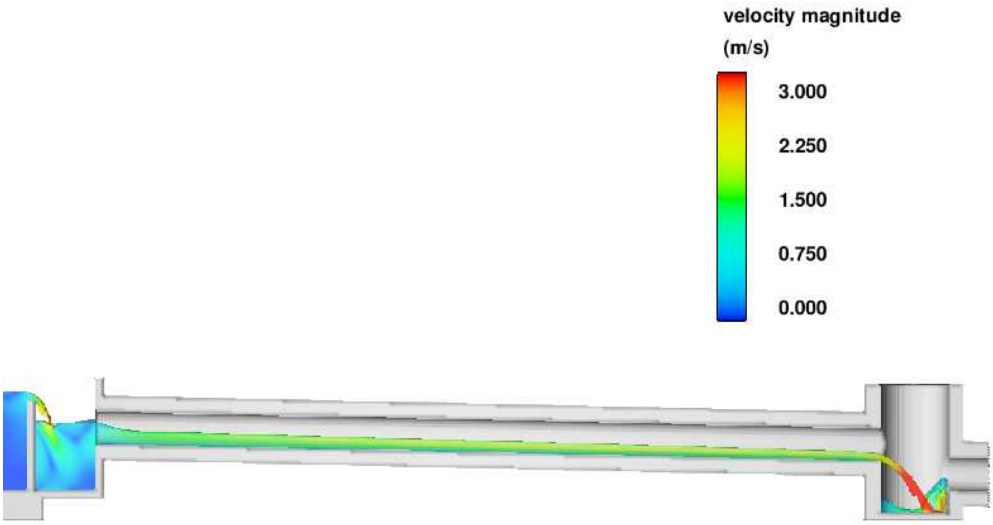
[표 6-1] 수치해석에 사용된 유량 및 경사 조건

	수치해석 조건			
유량 (m^3/sec)	0.0785	0.0942	0.1177	0.1421
관로 경사 (°)	1.23	3.23	5.23	7.23

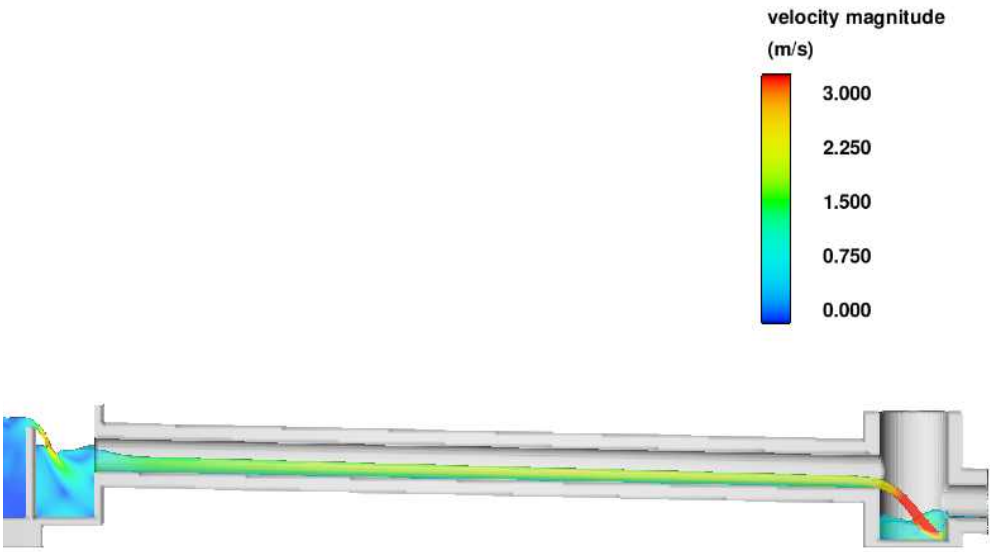
6.3 하수관로 모형 해석을 이용한 수치 해석 결과

6.3.1 유량에 따른 관로 내 유속 분석

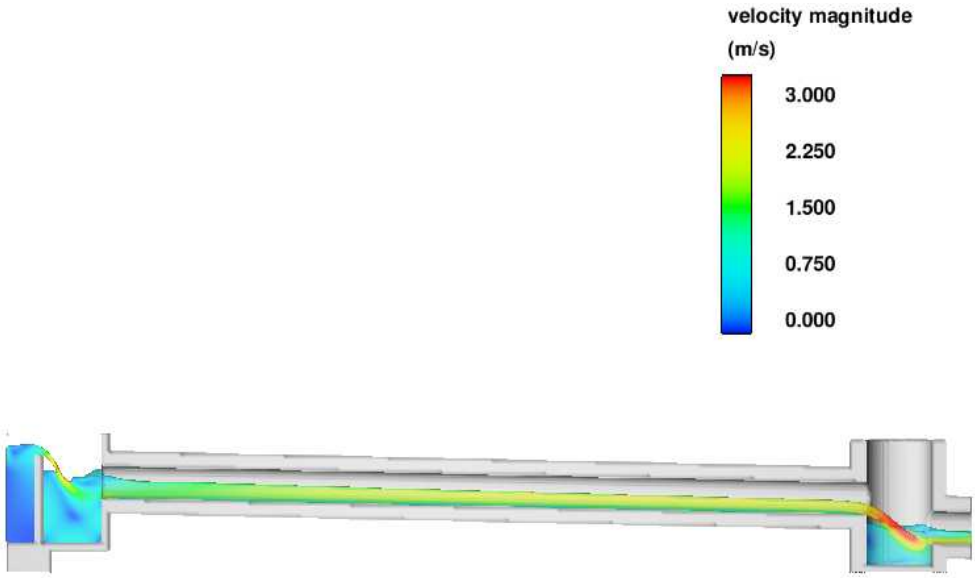
하수관로 내의 유량의 변화에 따른 유속의 변화 특성을 알아보기 위해 수치해석 모형을 설정하고 다양한 유량에 대한 수치해석을 수행하였다. [그림 6-6]~[그림 6-9]는 일정한 경사 조건(1.23°)에서 동일한 시간 경과 후 각각의 유량 조건에 따른 하수관거 전체 해석 단면을 나타내며, [그림 6-10]~[그림 6-13]은 유출부에서 맨홀부 바닥으로 유입이 될 때의 유속 벡터 단면을 나타낸다. 유속의 흐름은 관거내 위치에 관계없이 전반적으로 일정한 흐름 양상을 보였으며, 관거를 지나 맨홀부로 유출되면서 유속의 크기가 증가하는 결과를 보였다. 또한, 동일 시간이 경과한 시점에서 하부 맨홀부에 유입된 물의 양을 살펴보면 유량이 작은 조건에서는 바닥부분에 고이는 수준에 그쳤으나[그림 6-6], 유량이 증가할수록 하부 맨홀부에 유입된 물의 양이 많아지고 하부 맨홀부까지 도달되는 시간이 빨라지는 경향을 보였다. [그림 6-14]는 관거에 유입되는 유량과, 관거에 유입된 유체의 하부 맨홀부까지 도달 시간과의 관계를 나타낸다. 각 유량 조건에 따른 도달 시간은 0.0785 m^3/sec인 경우 약 9.2초 이후 바닥 부분에 도달하였으나, 유량 조건이 0.1421 m^3/sec인 경우 약 6.9초로 앞서 [그림 6-6]~[그림 6-9]에서 비교한 바와 같이 하수관거에 초기 유입된 이후 하부 맨홀부까지의 도달시간은 유량이 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보였다.



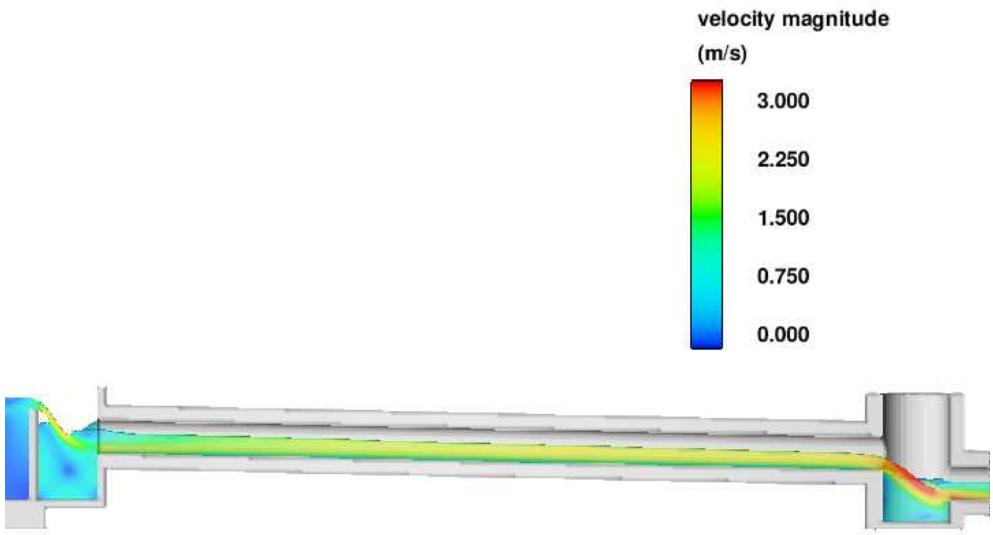
[그림 6-6] 하수관거 해석 결과(Q = 0.0785 m^3/sec)



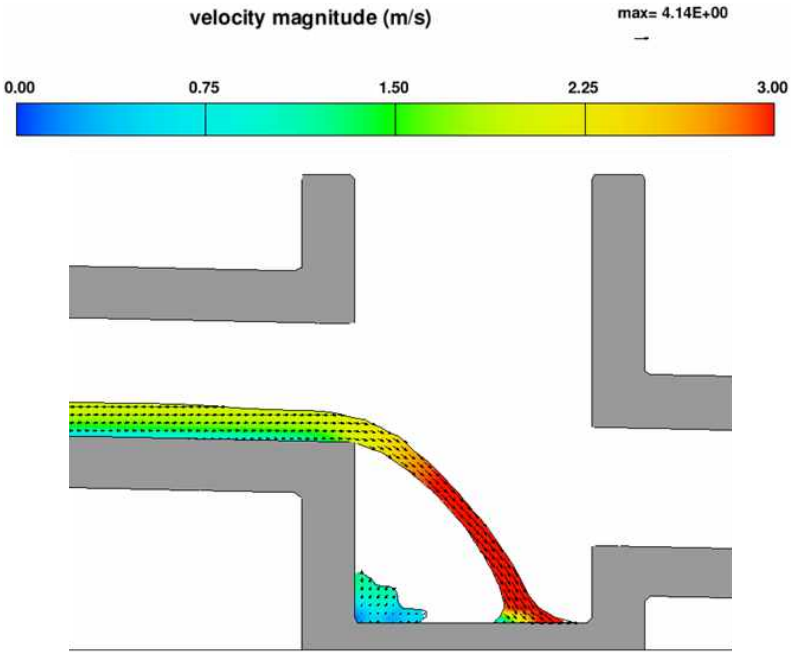
[그림 6-7] 하수관거 해석 결과(Q = 0.0942 m^3/sec)



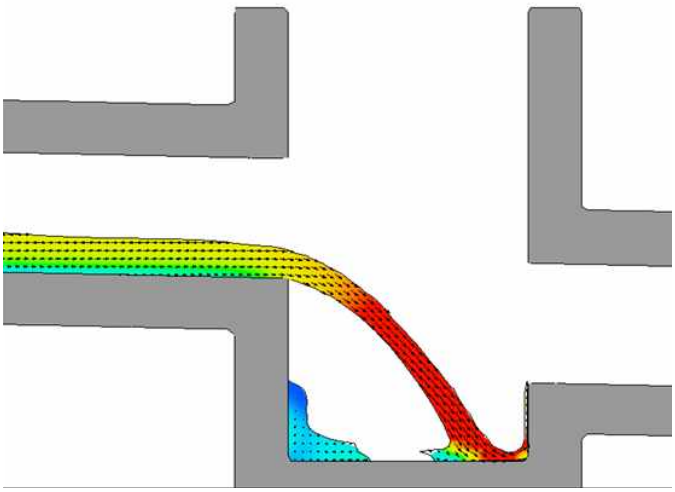
[그림 6-8] 하수관거 해석 결과(Q = 0.1177 m^3/sec)



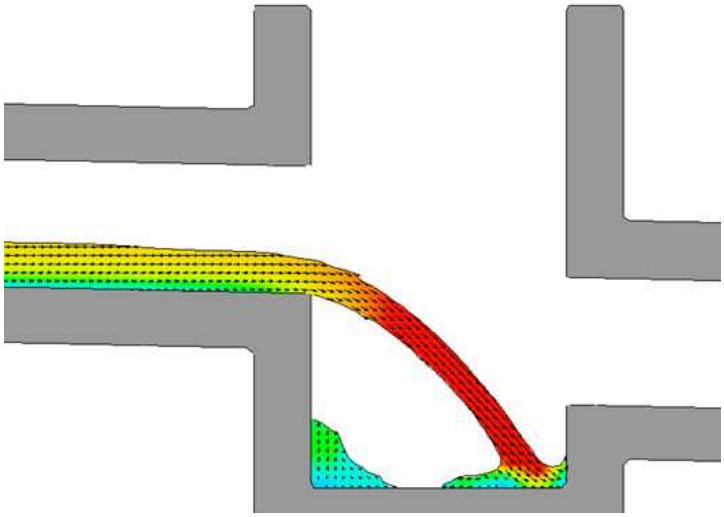
[그림 6-9] 하수관거 해석 결과(Q = 0.1421 m^3/sec)



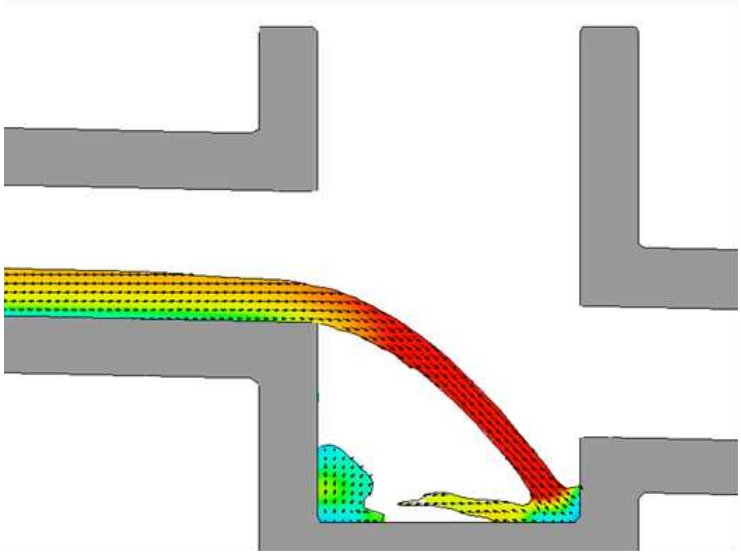
[그림 6-10] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.0785 m^3/sec)



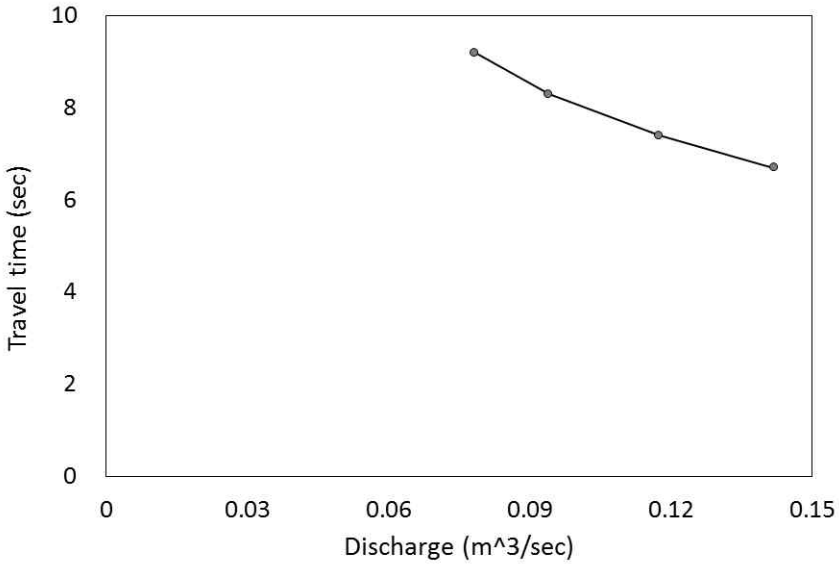
[그림 6-11] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.0942 m^3/sec)



[그림 6-12] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.1177 m^3/sec)

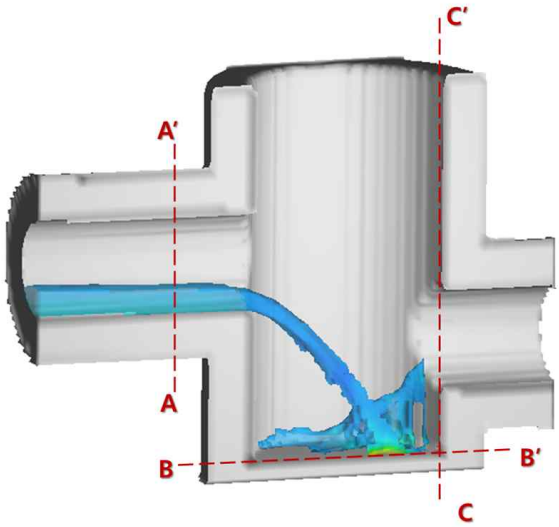


[그림 6-13] 하수관거 유출부 유속 분포 (Q = 0.1421 m^3/sec)

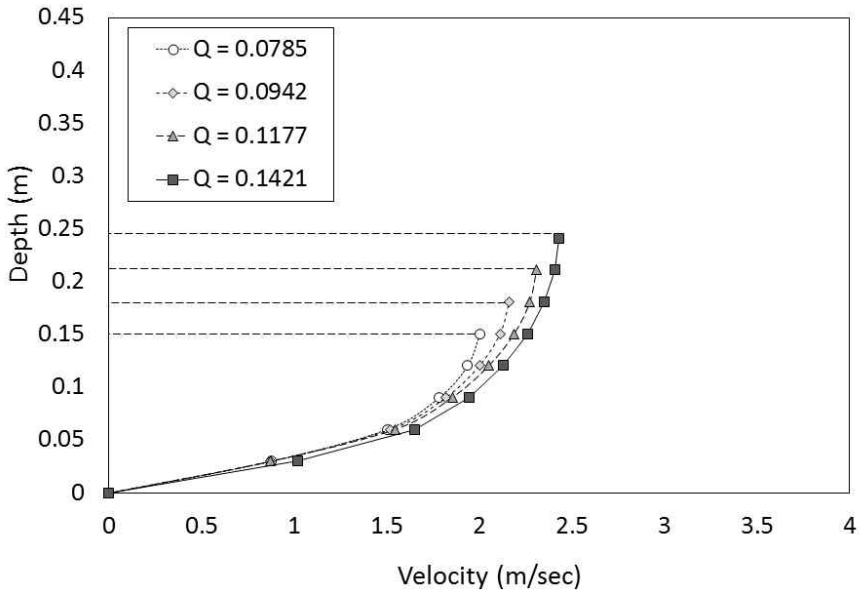


[그림 6-14] 유량 - 도달시간 관계

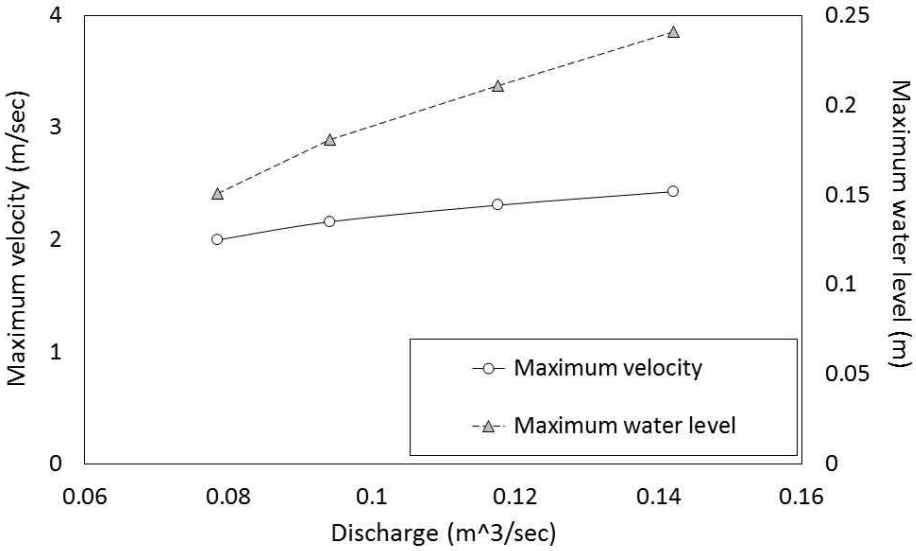
[그림 6-15]는 각 조건에 따른 하부 맨홀부의 유속 및 충격압 분포를 측정하기 위한 단면 위치를 나타낸다. [그림 6-16]은 A-A' line에서 유량에 따른 하수관거 내의 유속 분포도를 나타내며, [그림 6-17]은 유량에 따른 최대 유속 및 관거 내 최대 수심을 나타낸다. 유속의 크기는 바닥부분에서는 벽면 마찰에 의해 0에 수렴하며, 관거 바닥 부분의 유속은 유량에 관계 없이 유사하게 나타났다. 이후 유량이 증가함에 따라 유속의 최대값이 2.0 m/sec에서 2.4 m/sec로 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 관수로내 수위는 유량이 증가함에 따라 약 15 cm에서 24 cm로 점차 높아지는 것으로 나타났다.



[그림 6-15] 해석 단면



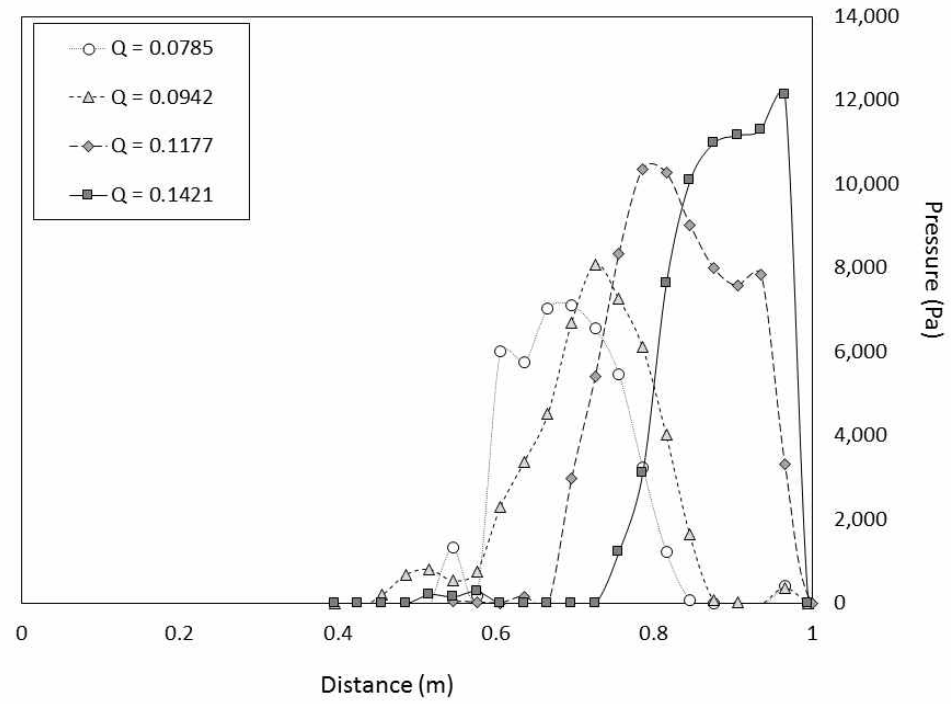
[그림 6-16] 유량에 따른 유속 분포 (A-A' line)



[그림 6-17] 유량에 따른 최대 유속 및 최대 수심

6.3.2 유량에 따른 맨홀부 충격압 분석

[그림 6-18]은 해석 단면 B-B'에서 유량 조건에 따른 충격압 분포 특성을 나타낸다. 충격압의 크기는 유량이 증가함에 따라 그 값이 커지는 경향을 보였다. 유량 조건이 0.0785 m^3/sec일 때에는 약 7,124 Pa의 크기를 보였으며, 0.1421 m^3/sec일 때에는 약 12,145 Pa의 크기를 보였다. 또한 최대 충격압의 작용 위치는 유량이 증가함에 따라 더 먼 곳에서 그 값이 나타났다. 유량 조건이 0.0785 m^3/sec일 때에는 유출부에서 약 0.65 m 떨어진 지점에서 최대 충격압이 발생하였으나, 유량 조건이 0.1421 m^3/sec일 때에는 약 0.97 m 떨어진 지점에서 최대 충격압이 발생하였다. 이는 유량이 증가함에 따라 유속의 크기가 증가하여 유출되는 물이 더 멀리 작용하여 나타난 것이며, 유량의 지속적으로 증가할 경우 맨홀부 바닥뿐만 아니라 맨홀부 벽면에 충격압이 작용할 우려가 있다.



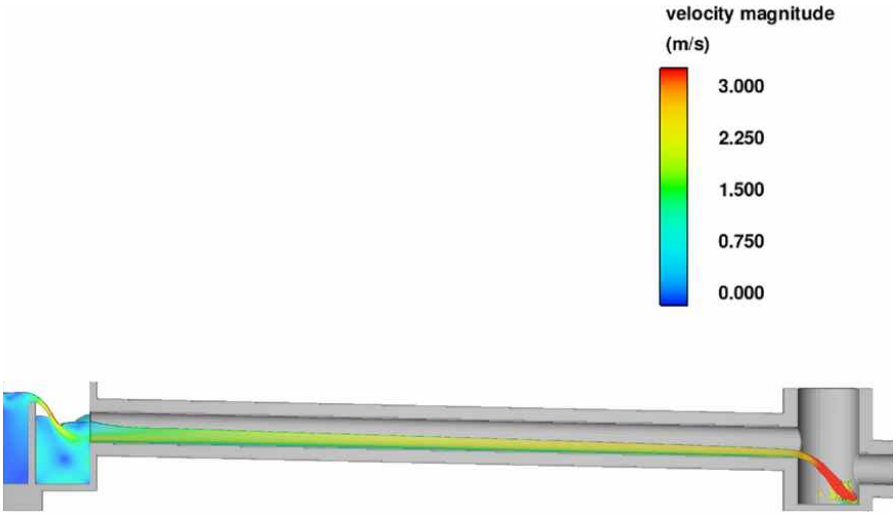
[그림 6-18] 맨홀부 충격압 분포 특성 (B-B' line)

6.3.3 하수관로 경사에 따른 관로 내 유속 분석

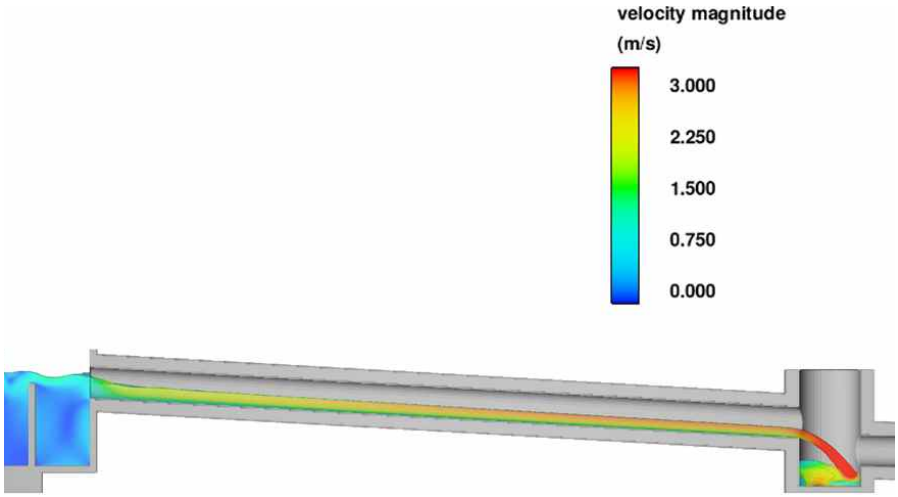
하수관로의 경사에 따른 유속 분포 특성을 알아보기 위해 다양한 경사 조건(1.23°~7.23°)에 따른 수치해석을 수행하였다. [그림 6-19]~[그림 6-22]는 일정한 유량 조건(Q=0.1177 m^3/sec)에서 각 하수관거 경사에 따른 해석 단면을 나타낸다. 경사에 따른 하수관거 내 유속 분포를 살펴보면, 낮은 경사 조건(1.23°)에서는 하수관거 내 유속의 크기가 3.0 m/sec 이하의 낮은 값을 보였으나, 경사가 높아짐에 따라 하수관거 내 최대 유속의 크기가 전체적으로 3.0 m/sec을 상회하는 결과를 보였다.

[그림 6-23]~[그림 6-26]은 하수관거에서 하부 맨홀부로 유입 될 때의 유속 벡터 단면을 나타낸다. 낮은 경사 조건에서는 유출수의 속도가 낮아 유출수의 초기 낙하시 맨홀부의 바닥에 집중적으로 영향을 미친 반면, 경사가 높아짐에 따라 유출수

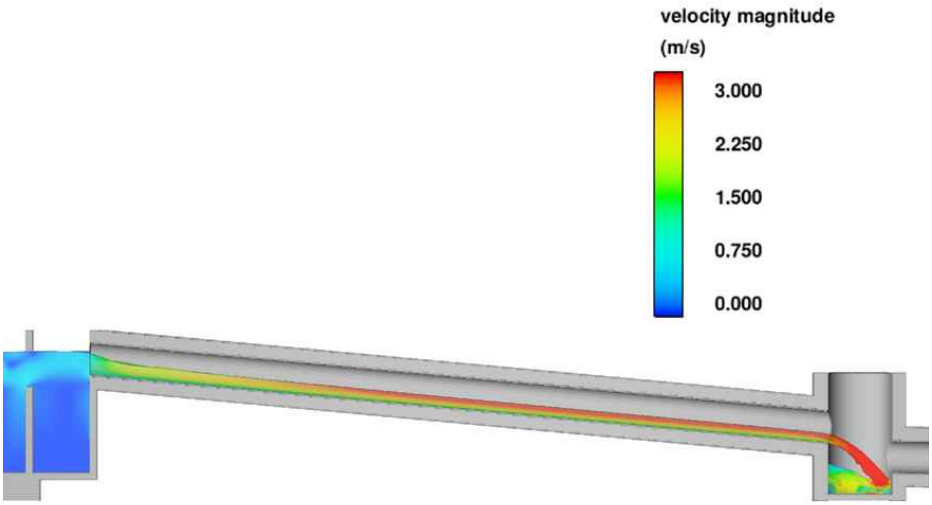
가 맨홀부의 바닥뿐만 아니라 벽면에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. [그림 6-27]은 하수관거의 경사와 유출수의 도달 시간과의 관계를 나타낸다. 각 하수관거의 경사에 따른 도달 시간은 하수관거의 경사가 1.23°인 경우 약 7.8초 가량 걸렸으며, 7.23°인 경우 약 6.3초로 나타났다.



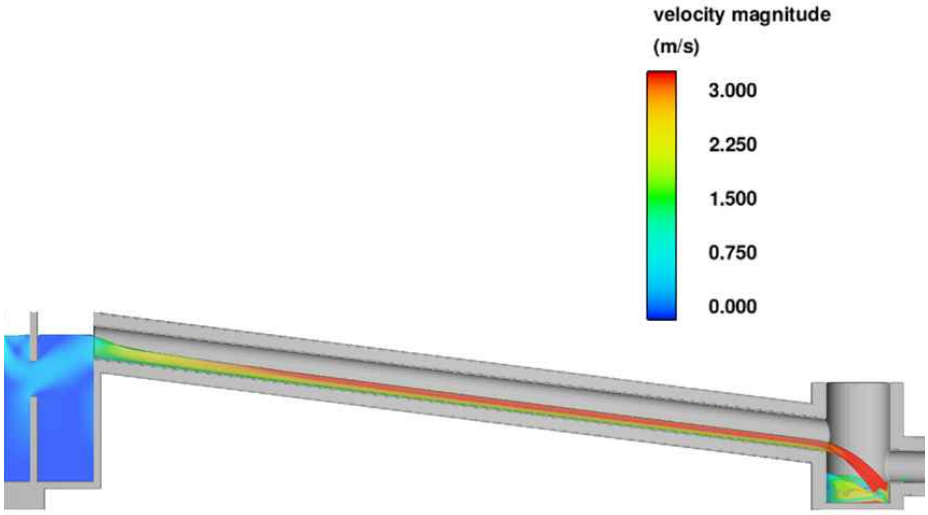
[그림 6-19] 하수관거 해석 결과(degree = 1.23°)



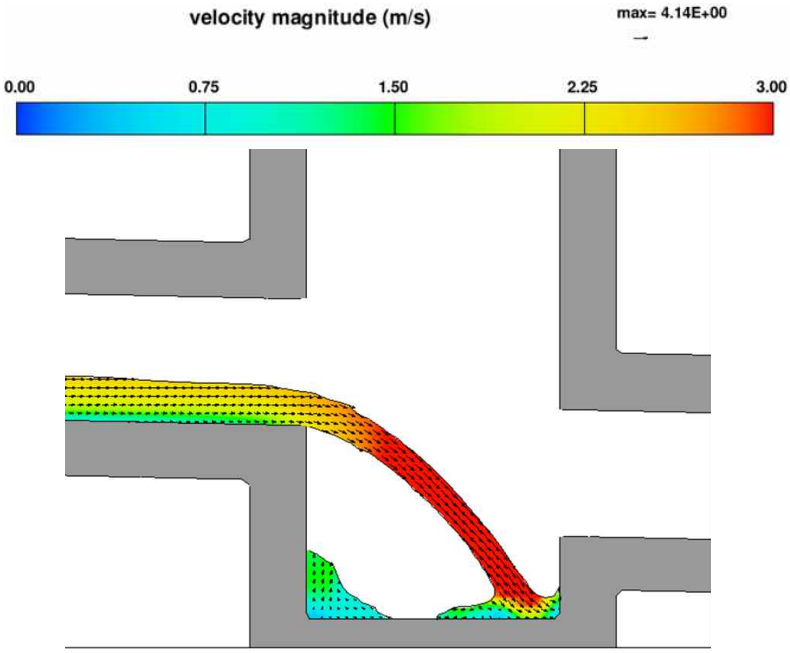
[그림 6-20] 하수관거 해석 결과(degree = 3.23°)



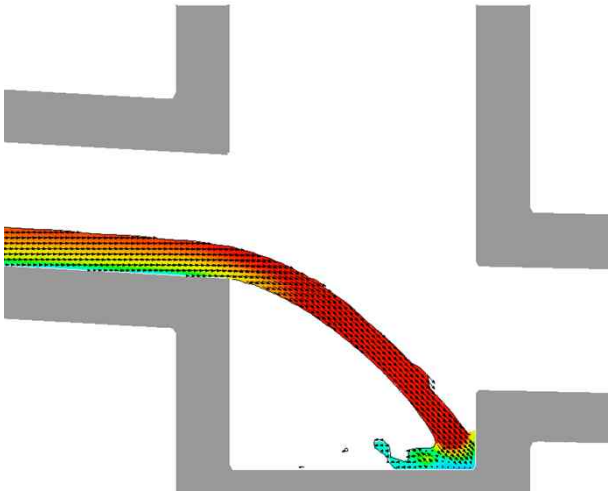
[그림 6-21] 하수관거 해석 결과(degree = 5.23°)



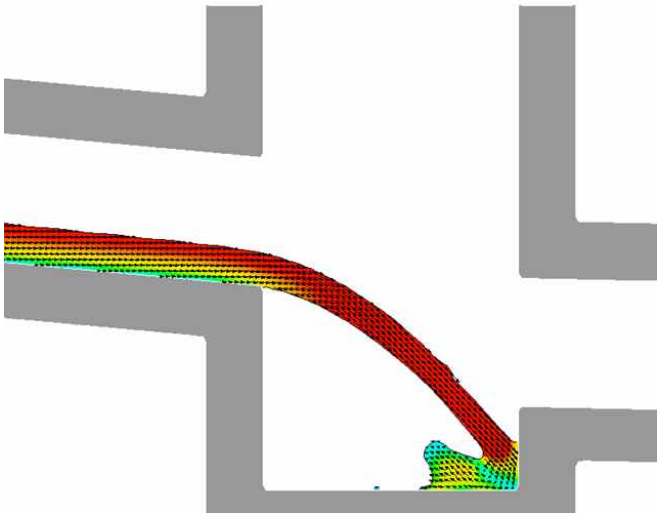
[그림 6-22] 하수관거 해석 결과(degree = 7.23°)



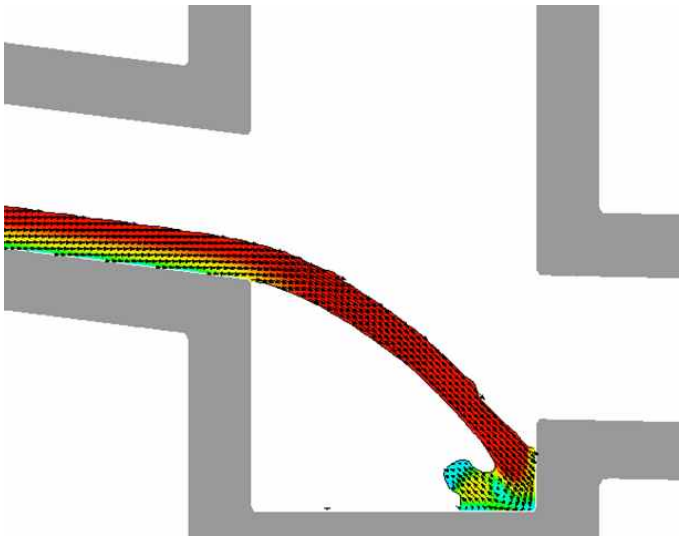
[그림 6-23] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 1.23°)



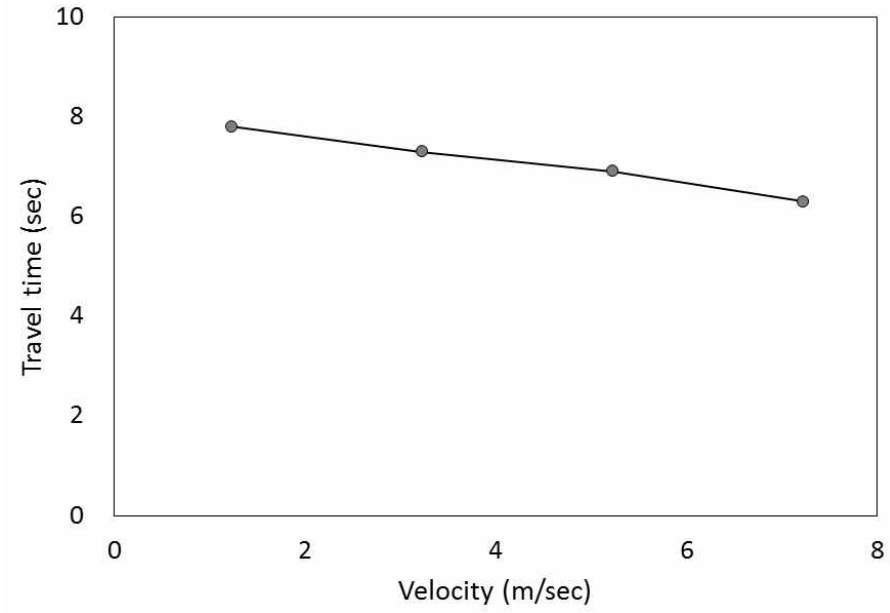
[그림 6-24] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 3.23°)



[그림 6-25] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 5.23°)

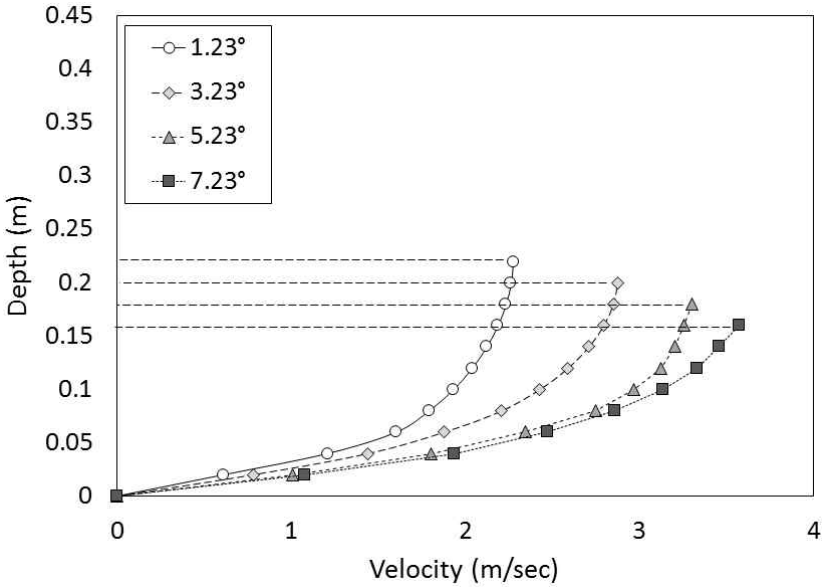


[그림 6-26] 하수관거 유출부 유속 분포 (Degree = 7.23°)

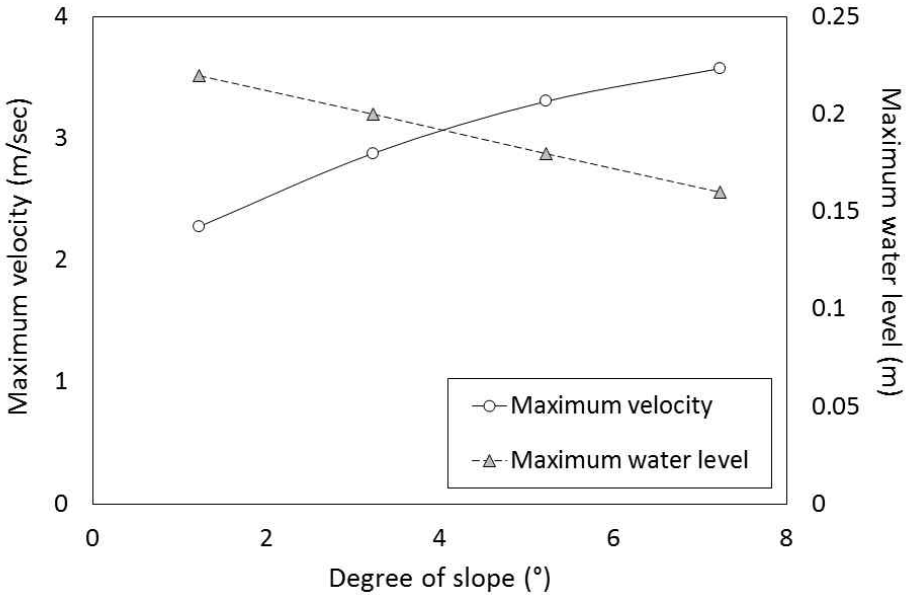


[그림 6-27] 경사 - 도달시간 관계

[그림 6-28]은 하수관거의 경사에 따른 유속 분포 특성을 나타내며, [그림 6-29]는 경사에 따른 관거 내 최대 유속 및 최대 수심을 나타낸다. 여기서, 측정된 유속 분포의 위치는 [그림 6-15]의 A-A' line이다. 하수관거의 경사에 따른 유속 분포를 살펴보면 낮은 경사에서는 수심에 따른 유속의 크기가 표면으로 갈수록 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였으나, 경사가 증가함에 따라 유속이 수렴하지 않고 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 최대 유속의 크기는 2.3 m/sec에서 3.6 m/sec으로 경사가 증가함에 따라 증가하였으나, 관거 내 수심은 22 cm에서 16 cm로 경사가 증가함에 따라 감소하였다.



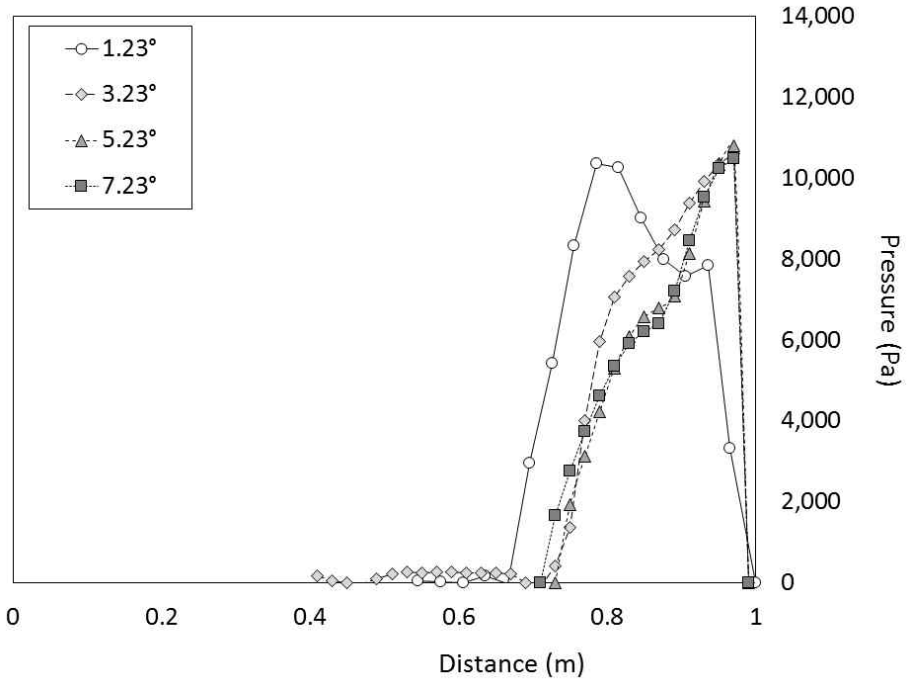
[그림 6-28] 경사에 따른 유속 분포 (A-A' line)



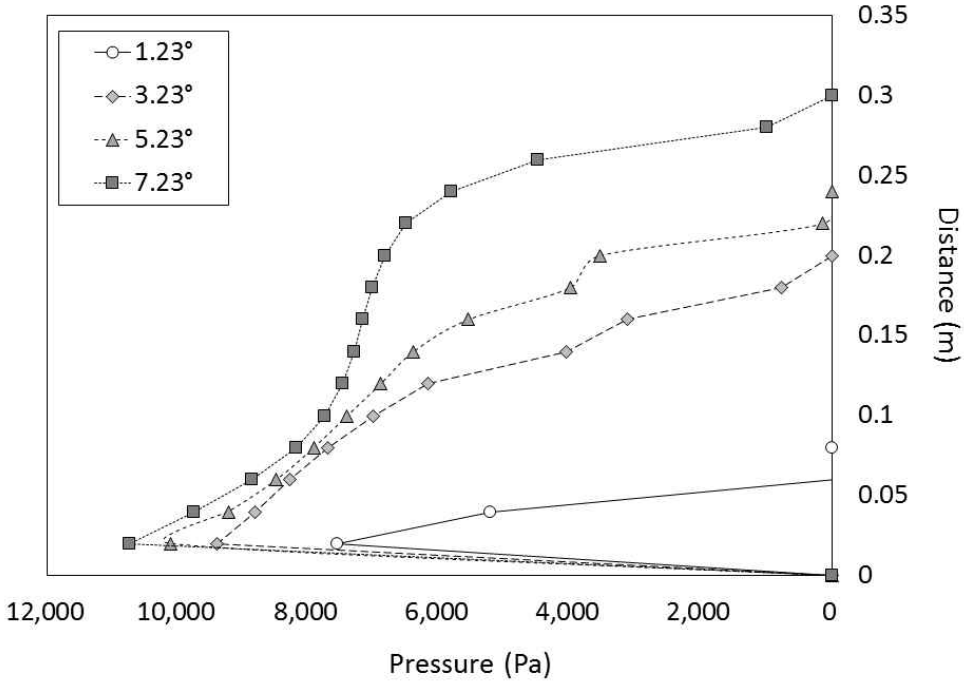
[그림 6-29] 경사에 따른 최대 유속 및 최대 수심

6.3.4 하수관로 경사에 따른 맨홀부 충격압 분석

[그림 6-30]과 [그림 6-31]은 각 경사 조건에서 하부 맨홀부의 바닥(B-B' line) 및 벽면(C-C' line)에 작용하는 충격압 분포를 각각 나타낸다. 먼저 바닥 부분의 충격압 분포를 살펴보면 [그림 6-30]과 같이 충격압이 작용하는 위치는 경사가 증가함에 따라 맨홀부의 벽면 쪽에 가까워지는 경향을 보였다. 벽면에 작용하는 충격압 분포를 살펴보면 [그림 6-31]과 같이 초기 경사 조건(1.23°)에서는 충격압 크기가 작았으나, 경사가 증가함에 따라 충격압의 크기가 대폭 증가하였으며, 분포 역시 넓은 면적에 작용하는 것으로 나타났다. 이로 인해 하수관거의 경사가 증가할수록 하부 맨홀부의 바닥뿐만 아니라 벽면에도 충격압이 작용하는 것을 알 수 있다.



[그림 6-30] 경사에 따른 충격압 분포 (B-B' line)

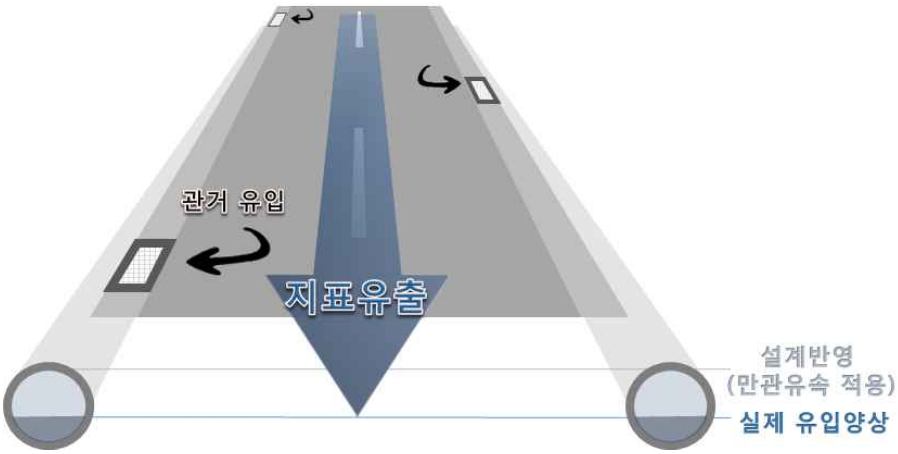


[그림 6-31] 경사에 따른 충격압 분포 (C-C' line)

6.4 경사지 도로부 강우 유출 모의

6.4.1 도로 유출부 수치해석 조건 및 제원

일반적으로 급경사지 도로부의 경우 강우시 [그림 6-32]와 같이 지표면을 통한 유출이 발생하고 일부 우수만이 맨홀에 유입되는 현상을 보인다. 따라서 급경사지 도로부의 하수관로에 유체가 만관으로 흐르지 않을 가능성이 많다. 즉 현재 설계에 반영되는 만관유속의 적용이 아니라, 실제 급경사지의 도로부 강우 유출 양상을 반영한 설계를 고려해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 급경사지의 경사에 따른 우수의 맨홀 유입 특성을 알아보았다.



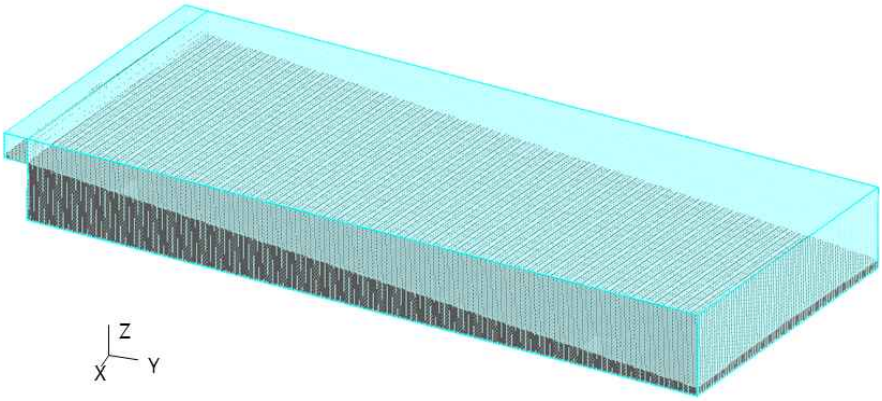
[그림 6-32] 경사지 도로부 강우 유입 양상

[그림 6-33]은 경사지 도로부의 격자망을 나타낸다. 수치 모델에 적용한 도로부는 일반적인 도로부를 기준으로 설계하였다. 수치 모델에서는 x, y, z를 축으로 하는 직교좌표계를 사용하였으며, Y 축을 흐름 방향으로 하여 경사지 도로부를 모델링하였다. [그림 6-34]는 일반적인 급경사지 도로부 제원을 나타낸다. 격자망의 크기는 75 mm의 정육면체이며, 각 경사 조건(도로부 경사 조건 : 1°~7°)에 따라 격자망 수는 1,906,824~4,584,864개로 구성하였다. 계산 영역의 크기는 유체의 유입 방향을

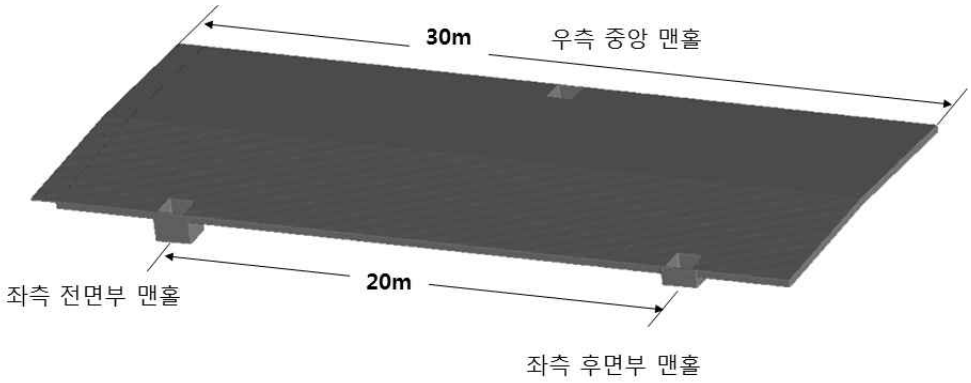
기준으로 경사지 도로부 중심점(0, 0, 0)을 기준으로 X축은 −650 mm에서 650 mm, Y축은 0 mm에서 30,000 mm, Z축은 0 mm에서 5,200mm이다.

[그림 6-35]는 흐름장의 수치 해석을 위한 경계조건(boundary condition)을 나타낸다. Y축을 중심으로 유입(inflow)과 유출(outflow)이 있으며, X축 방향은 단면의 특성상 대칭조건(symmetry)으로 하였다. Z축의 바닥은 벽면(wall), 상부는 대기압(pressure)이 작용하도록 하였다.

모의 시간은 20초로 하여 상부에서 흐르는 유체가 지표 유출 혹은 우수 맨홀로 유입되는 과정을 보았으며, 0.1초 간격으로 저장하여 계산된 유체 형상을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 급경사지 도로부의 경사 조건은 [표 6-2]와 같이 1°, 3°, 3.95°, 5° 및 7°이며, 이때 측면 경사는 원점을 기준으로 양 측 도로부를 각각 1.15°로 하였다.



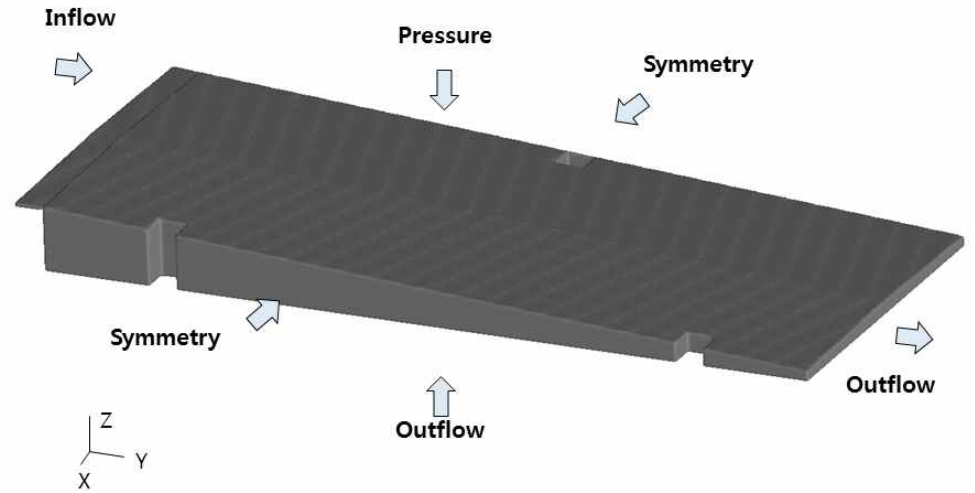
[그림 6-33] 경사지 도로부 격자망 구성



(a) 도로부 길이

(b) 도로부 측면 경사

[그림 6-34] 경사지 도로부 제원



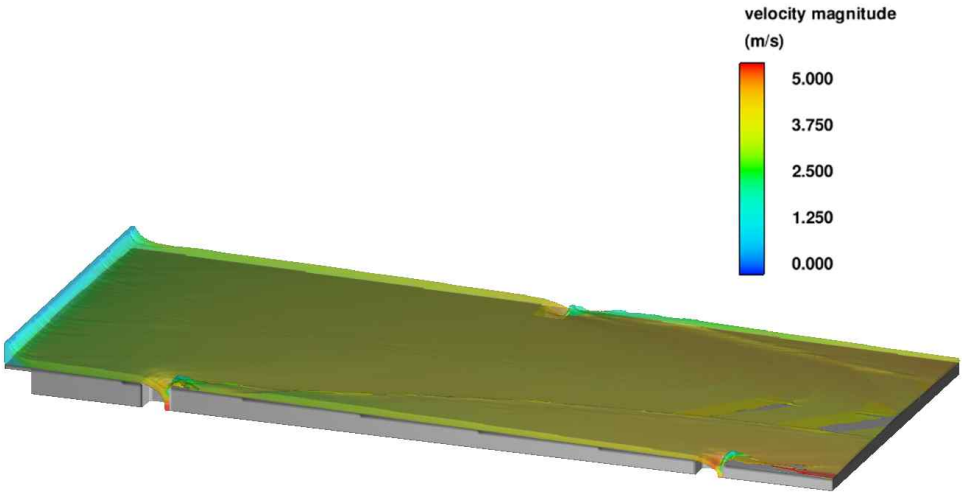
[그림 6-35] 경사지 도로부 경계조건 구성

[표 6-2] 경사지 도로부 수치해석 조건

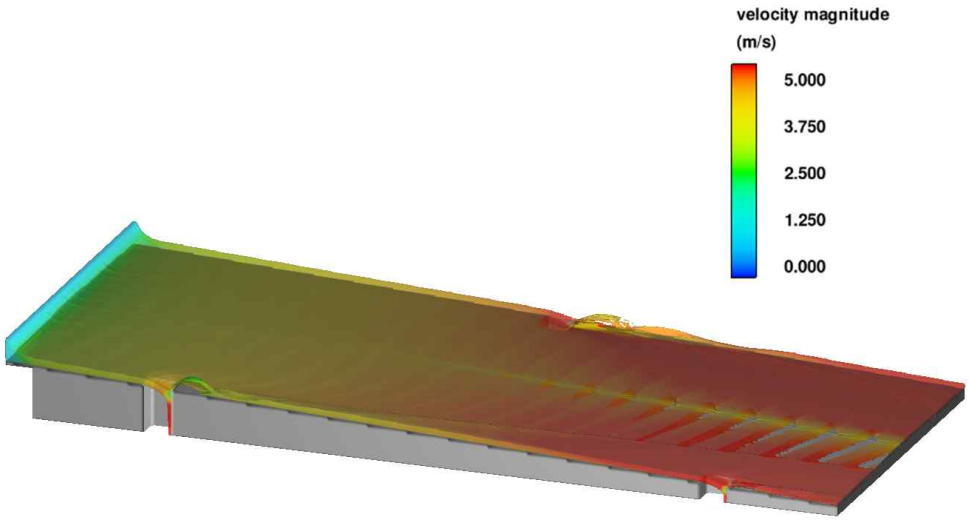
도로 종단 경사(°)					도로횡단경사 (°)
1	3	3.95	5	7	

6.4.2 도로 경사에 따른 관거 유입량 분석

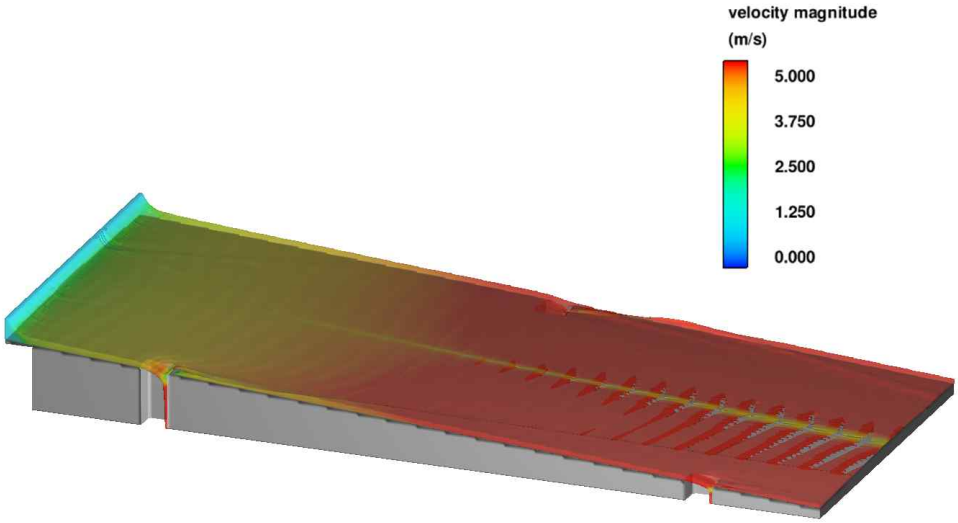
[그림 6-36]~[그림 6-40]은 각 경사 조건(1°, 3°, 3.95°, 5° 및 7°)에 따른 경사로 도로부의 수치해석 결과를 나타낸다. 도로부에 유출되는 우수의 유속 분포는 경사가 올라갈수록 증가하였으며, 우수의 속도에 의해 맨홀에 유입되지 않고 일부 우수는 월류(overflow)되는 현상을 보였다. [그림 6-41]은 경사지 도로부의 경사 조건과 맨홀 유입 비율과의 관계를 나타낸다. 맨홀의 위치는 지표수가 유출되는 지점을 기준으로 좌측 전면부, 좌측 후면부 및 우측 중앙으로 명시하였다. 우수 위치에 따른 맨홀 유입 비율은 경사가 낮은 경우 그 값의 차이를 보였으나, 경사가 증가함에 따라 맨홀 위치에 관계없이 우수 유입 비율은 유사한 값을 가지는 경향을 보였다. 또한, 경사에 따른 맨홀 유입 비율을 살펴본 결과 맨홀에 유입되는 비율은 경사가 1°인 경우 약 9.5% 이내로 나타났으며, 경사가 7°인 경우 약 5.5%로 경사가 증가함에 따라 우수 맨홀에 유입되는 비율이 점차 감소하였다. 이는 도로부 경사가 올라갈수록 우수의 유속이 증가하여 맨홀에 유입되지 않고 대부분 지표로 유출되어 나타난 결과로 판단된다. 추후 경사지 도로부의 연장 길이, 도로 단면, 맨홀 모델 및 유출량 조건 등을 고려하여 좀 더 명확한 맨홀 유입 비율을 산정할 필요가 있다.



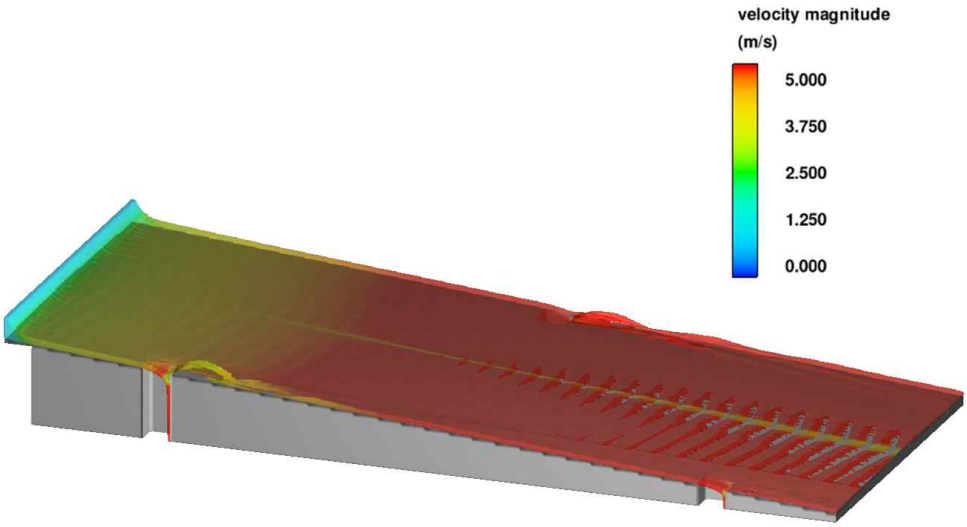
[그림 6-36] 도로부 경사도 1° 해석 결과



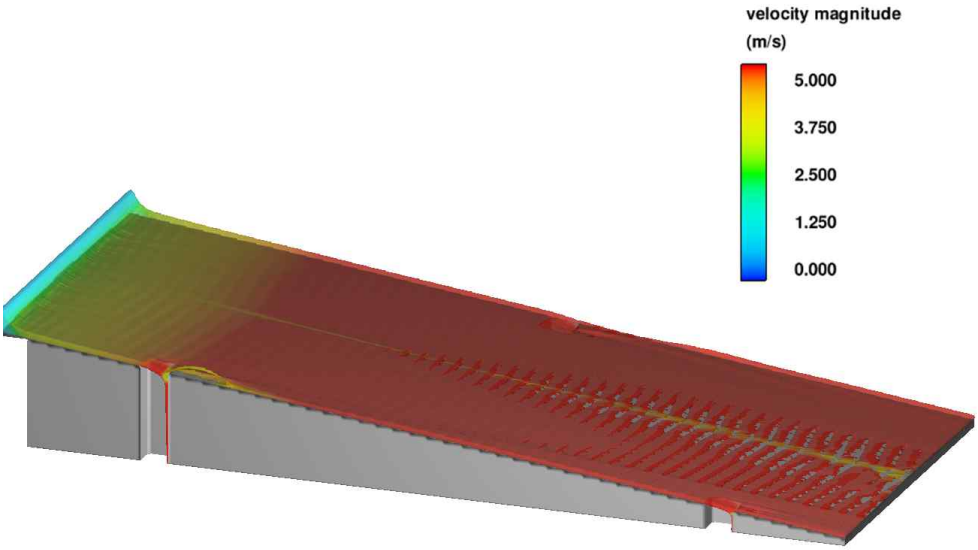
[그림 6-37] 도로부 경사도 3° 해석 결과



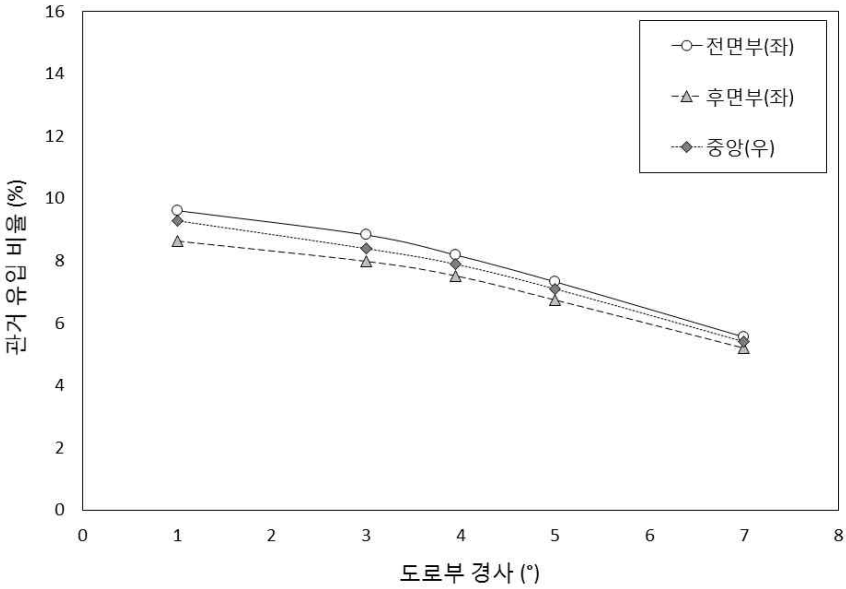
[그림 6-38] 도로부 경사도 3.95° 해석 결과



[그림 6-39] 도로부 경사도 5° 해석 결과



[그림 6-40] 도로부 경사도 7° 해석 결과



[그림 6-41] 도로부 경사에 따른 맨홀 유입 비율

6.5 요약 및 추후 연구 방향

6.5.1 요약

본 연구에서는 하수관로의 유량 및 경사에 따른 유속 및 충격압 분포 특성을 알아보기 위해 다양한 조건에 따른 하수관로를 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 또한, 경사지 도로부의 강우에 의한 우수 맨홀 유입 특성을 알아보고자 다양한 경사 조건에 따른 맨홀의 우수 유입 특성을 알아보았으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 하수관로의 유량에 따른 하수관거 유출부의 유속 분포를 살펴보면, 유량이 증가함에 따라 유속의 최대값이 유량이 0.0785 m^3/sec일 때 2.0 m/sec에서 유량이 0.1421 m^3/sec일 때 2.4 m/sec로 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 관수로 내 수위는 약 15 cm에서 약 24 cm로 유량이 증가함에 따라 관거 내 수위가 점차 높아지는 것으로 나타났다. 충격압의 크기는 유량이 증가함에 따라 0.0785 m^3/sec일 때에는 약 7,124 Pa에서 0.1421 m^3/sec일 때 약 12,145 Pa로 점차 증가하였다. 최대 충격압의 위치는 유량이 증가할수록 유출부를 기준으로 더 멀리 작용하였다.

2) 하수관로의 경사에 따른 유속 분포 특성을 살펴보면, 경사가 1.23°일 때 유속은 약 2.3 m/sec에서 경사가 7.23°일 때 약 3.6 m/sec로 경사가 높아짐에 따라 유속이 증가하였으며, 관수로 내 수위는 약 22 cm에서 약 16 cm로 점차 감소하였다. 충격압의 크기는 경사가 높아짐에 따라 증가하였으며, 최대 충격압의 위치 또한 맨홀부의 벽면에 가까워지는 경향을 보였다. 특히 맨홀부의 바닥뿐만 아니라 벽면에도 충격압이 작용하는 결과를 보였다.

3) 다양한 경사 조건에 따른 급경사지 도로부 해석 결과, 도로부에 유출되는 우수의 유속 분포는 경사가 올라갈수록 증가하였으며, 이로 인해 맨홀에 유입되지 않고 일부 우수의 경우 월류(overflow)되는 현상을 보였다. 또한 경사가 증가

함에 따라 맨홀에 유입되는 비율은 맨홀 위치에 관계없이 유사하게 나타났다. 경사가 1°인 경우 맨홀에 유입되는 우수의 비율은 약 9.5% 가량 나왔으며, 경사가 7°인 경우 약 5.5%의 비율로서, 도로부 경사가 올라감에 따라 맨홀에 유입되는 우수의 비율이 감소하는 경향을 보였다.

6.5.2 추후 연구 방향

1) 하수관로에 작용하는 유량 및 경사에 따라 관거내 우수의 유속이 증가하게 되며 이로 인해 충격압의 크기 또한 증가하게 된다. 따라서 급경사지 하수관거 내의 유속을 저감시킬 수 있는 방안을 제시하고 수치해석을 통해 이를 분석할 필요가 있다.

2) 또한, 보다 정확한 하수관로 내의 유속 분포 및 충격압을 산정하기 위해 실내 수리 모형 실험을 통해 하수관로의 유량 및 경사에 따른 유속 및 충격압을 측정하여 분석할 필요가 있으며, 수치해석 모형을 통해 실내 모의 실험과 해석 결과를 검증할 필요가 있다.

3) 본 연구에서 수행한 경사지 도로부 해석은 강우시 발생하는 도로부 지표 유출 또는 맨홀 유입 특성에 대한 기초적인 연구의 발판을 마련하기 위한 것으로서, 실제 자연 현상에 적합한 해석 결과를 얻기 위해서는 좀 더 다양한 조건에 따른 해석이 필요하다. 따라서, 설계 현장 도로의 횡/종단 단면, 강우 등에 따른 유출량 조건 등을 고려한 수치모형해석이 필요하다.

제 7 장
급경사지 하수관로 및 맨홀부에 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시

LAND & HOUSING INSTITUTE

제7장 급경사지 하수관로 및 맨홀부에 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시

한국토지주택공사의 토목 설계지침(2018)에서는 정부 부처의 지침을 우선적으로 고려하여 작성되기 때문에 관로시설 설계기준(환경부, 2017)과 같이 최대 유속기준은 3.0 m/s, 원형관 유효수심은 만관 등 기본적인 기준은 같게 구성되어 있으며 급경사지에 대한 별도의 하수관거 설계 관련 내용은 수록되어 있지 않다.

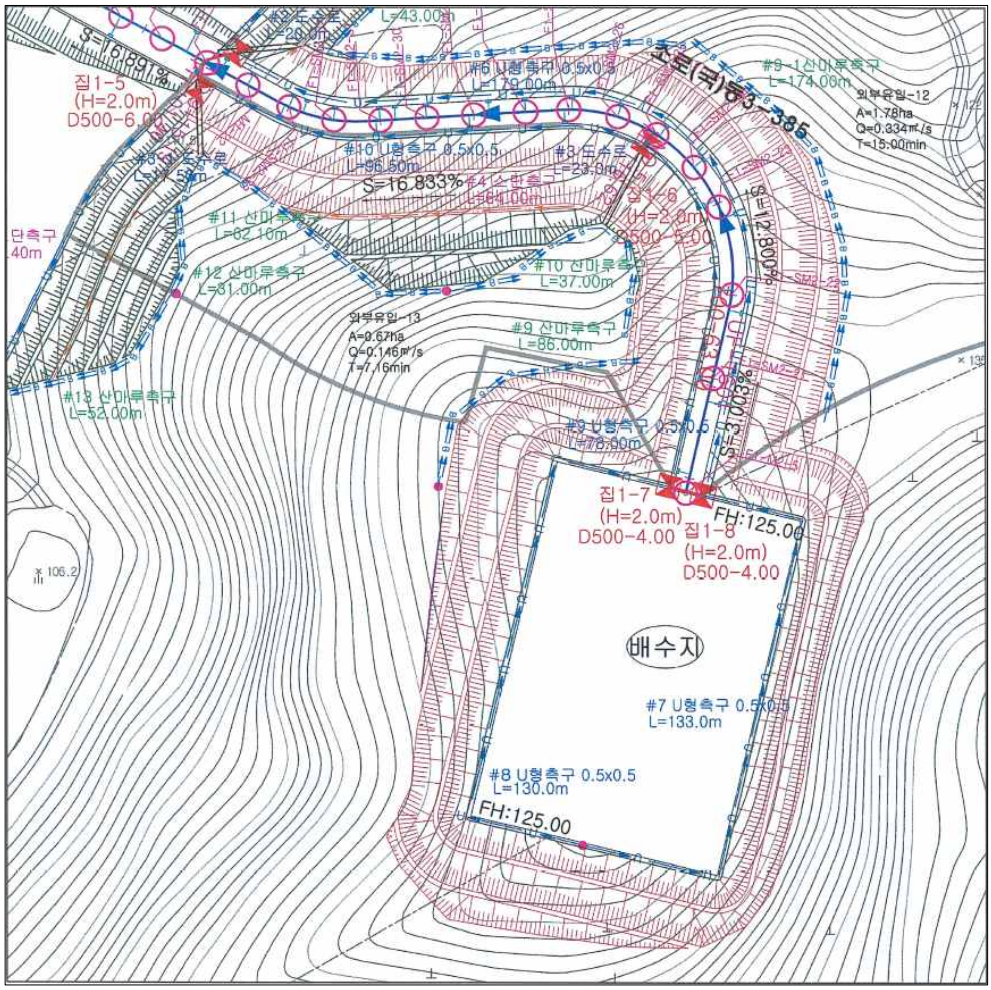
본 연구의 수행으로 도출된 급경사지의 공간적인 범위 내에서 최대 유속 기준의 상향 및 급경사지 구간의 강우유출수의 지표흐름양상을 고려한 관거 유입 비율을 고려하여 우선적으로 한국토지주택공사의 토목 설계지침 개선 방안의 수립이 가능할 것으로 판단되나, 1차년의 연구 성과만으로 적용하기에는 부족한 부분이 있기에 후속되는 과제를 통해 보완하여 구체적인 급경사지 구간의 하수관거 및 맨홀에 대한 설계 지침 개선방안을 도출하고자 한다. 아직은 구체적이지 않지만 본 연구 성과를 활용하여 연구대상지구인 청주동남지구의 배수지 진입로 내 과대하게 계획된 맨홀 및 우수관에 대해 U형 측구를 통한 우수처리 계획 변경안을 마련하였으며 관련 내용을 LH 설계 지침 개선방향 중 하나의 예로서 후술하고자 한다.

[표 7-1] 한국토지주택공사 토목 설계지침 내 하수관거의 유속 및 유효수심 기준

LH 토목 설계지침(2018)에 수록된 하수관거 관련 내용
5.3.3 관거의 유속 - 우수 및 합류암거: 0.8 ~ 3.0 m/s - 이상적 유속 : 1.0 ~ 1.8 m/s - 관경별 유속기울기 기준(Manning공식) - 관로의 기울기가 유속이 3.0 m/s일 때의 기울기 초과시 적절한 낙차공을 설치, 과도한 관벽마찰 및 하류부에서 유수가 분출하거나 맨홀이 튀는 등의 현장을 방지하여야 한다. 5.3.6 관거의 유효수심 - 원형관 : 만류 - 직사각형거 : 높이의 90%

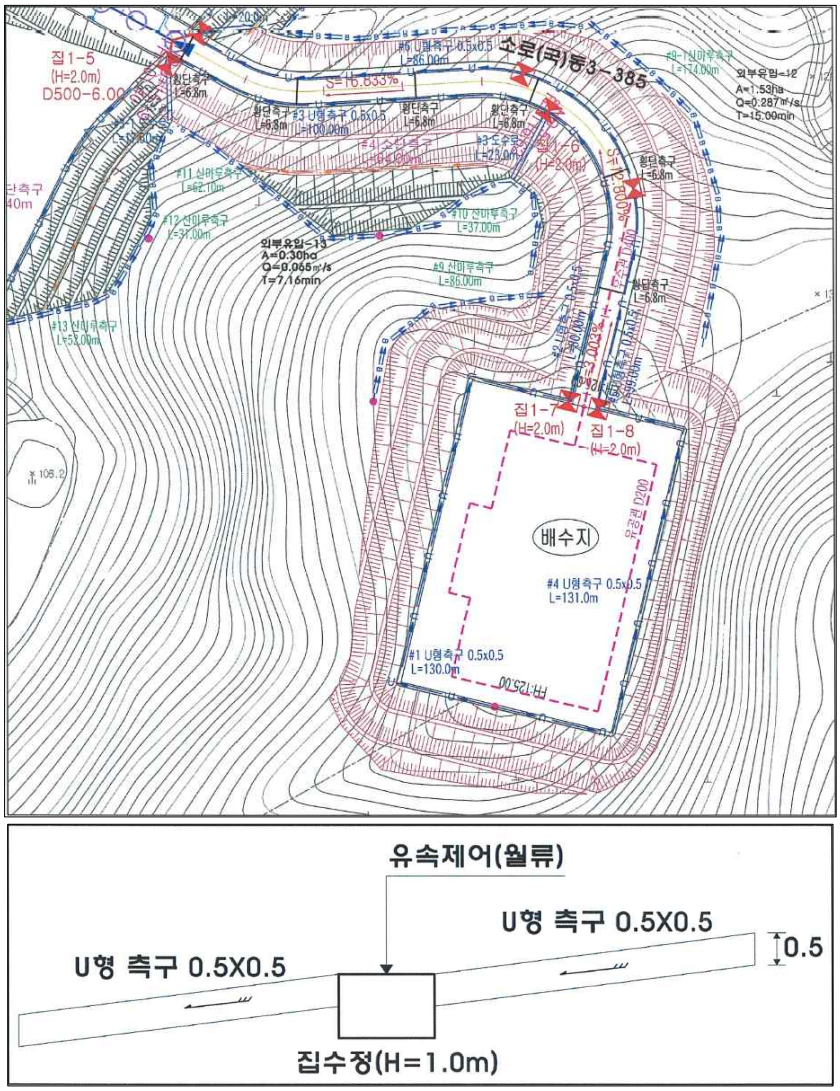
최근 들어 도시개발에 있어서 급경사지 내 개발이 증가하고 있다. 그 중 급경사지 구간의 유역은 대부분 도로부와 배수지 진입로 등으로 우수관거 시작유역을 포함한 상류 유역은 면적이 작다. 이런 유역까지 우수관을 계획하게 되면 하류부까지 관망 구성에 있어 최대 유속 기준 3.0 m/s를 만족시키기 위하여 관거의 경사 조정과 낙차공을 적용하는 단차접합으로 시공하게 된다. 이는 맨홀의 깊이와 관 매설 심도를 깊게 하는 결과로 이어져 성토량의 증가를 통한 시공 및 유지관리의 어려움을 초래하게 되는 전반적인 악영향을 가져온다.

본 연구의 결과를 일부 반영하여 연구대상지구인 청주 동남지구의 배수지 진입로의 우수처리에 대한 계획은 검토하였다. 배수지 진입로의 경우 급경사로 인하여 10 m 간격으로 맨홀이 설치되어 있으며, 배수시 유지관리를 감안하여 D700관을 계획하였다. 배수지의 경우 각 맨홀로 유입되는 강우유출수의 양은 적으나, 배수지 내 우수를 배수할 때를 고려하여 우수관거를 계획하였다. 하지만 배수시의 경우만을 고려하여 10 m 간격의 맨홀과 관거 계획에 따른 시공성은 현저히 떨어진다.



[그림 7-1] 연구대상지구 내 배수지 진입로 우수처리 계획(기존)

이에 본 연구를 통해 U형 측구의 대처를 고려하였으며 배수 시에는 배수량을 조절하고 유속의 제어를 위하여 중간 집수정을 계획하여 기존 진입도로의 우수관로 및 맨홀 계획을 변경하였다. 과다한 맨홀과 우수관거를 통한 지하구조물 계획을 변경하고 지표에서 처리하는 방안을 제시함으로써 시공성 향상 및 원가절감의 효과를 기대할 수 있다.



[그림 7-2] 연구대상지구 내 배수지 진입로 우수처리 계획(변경)

제 8 장
결 론

LAND & HOUSING INSTITUTE

제8장 결 론

현재 국내의 관거설계 기준에서 제시하고 있는 하수관거 최대 유속 3.0 m/s에 대한 개선의 필요성에 대한 연구를 진행하였다. 국외의 설계 기준 검토를 수행하여 국내의 설계기준의 개선의 필요성을 제시하였다. 청주동남지구를 본 연구의 대상지구 선정하여 우수수리계산서를 검토한 결과, 현재 하수관거의 설계의 문제점을 분석하여 우수수리계산서와 우수종단면도에서 중복적으로 검토하는 관거의 경사에 대한 내용을 수록하였다. 또한, 급경사지 구간에 시공된 도로부에 대해 유출모니터링을 수행하였으며, 도시유출모형인 SWMM 모형과 비교분석하여 급경사지의 경사로 인해 강우유출수의 전체가 관거로 유입되지 않는 흐름 양상을 제시하였다. 그리고 경남 산청군에 시공된 하수관거를 대상으로 맨홀부 수충격력 측정 현장모의실험을 수행하였으며, 수치해석모형인 FLOW-3D 모형을 이용한 수충격력 검토, 표준도로단면에 대한 경사별 강우유출수의 관거 유입양상을 분석하였다. 또한, 본 연구의 성과와 후속연구의 계획을 통해 LH 토목설계기준 개선 방향과 연구대상지구 내 급경사지 구간의 우수관거와 맨홀부의 U형 측구로 대체하는 계획을 제시하였다. 각 항목별 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

[국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준 검토]

우리나라의 우수관에 대한 설계는 지난 40년간 획일적으로 최대 허용 유속을 3.0 m/s로 고정하여 사용해왔다. 하지만 조사된 국외의 대부분의 기준에서는 우수관의 종류(재질, 공법, 크기 등)와 우수관의 보호 조치(앵커 설치, 변형 및 부식 방지 조치)의 반영에 따라 다양한 기준을 적용하고 있다. 이에 따라 우수관의 최대 유속 기준이 대부분 4.5 m/s~6.0 m/s의 범주에 있는 것으로 파악되었다. 또한, 본연구의 공간적인 범위인 급경사지와 관련한 국외의 우수관의 설계기준을 검토한 결과, 우수관에 앵커를 활용한 충격 방지, 우수관의 종류, 우수관 내 유속저감장치를 두면 최대 9.14 m/s까지 관내 유속을 허용하는 것으로 조사되었다.

[유출모니터링을 통한 급경사지 하수관로 내 실유속 측정]

연구대상지구인 청주 동남지구 내 급경사지 구간에 시공된 도로부의 하수관거를 대상으로 유속 측정 모니터링을 수행하였다. 모니터링 수행기간은 2018년 6월부터 9월까지 3개월에 걸쳐 수행하였으며, 강우시 하수관거 내 유속측정값을 제시하여 도시유출모형을 통한 유속모의의 자료로 활용하였다.

[도시유출모형을 이용한 급경사지 하수관로 유출모의 수행]

하수관거의 유속모의를 위하여 도시유출모형 중 SWMM 모형은 선정하였다. 연구대상지구의 급경사지 구간에 대해 설계시 작성된 수리계산서를 검토하였으며, 수리계산서와 우수종단면도 상의 구배설정 및 맨홀 및 관거의 추가 과정에 대해 검토하고 SWMM 모형과 비교 분석하였다. 그 결과 단순 Manning 공식을 사용한 관거 설계프로그램인 MAKESW와 SWMM 모형에 유속의 차이가 발생하였으며 전반적으로는 SWMM 모형이 맨홀의 낙차공 등을 고려하기에 작은 유속 값으로 분석하는 것으로 검토되었다. 하류부로 갈수록 상부유역의 영향을 보다 고려하는 SWMM 모형에서는 설계에서 제시하는 유속값 보다 큰 값이 모의되었으며 최대유속 기준 3.0 m/s를 초과하는 구간도 발생하였다.

유속 측정 모니터링 수행구간에 대해 SWMM 모형을 구축하고 유속을 비교한 결과, 측정값이 모형모의값에 비해 작은 값으로 나타났다. 이는 SWMM 모형은 해당유역에서 발생하는 모든 강우유출수가 맨홀로 유입되는 조건으로 발생하며 실제 급경사지 구간의 강우유출수 흐름은 지표면 흐름이 대부분으로 관거 유입비율이 적은 이유로 판단된다. 이에 2018년 6월 28일에 발생한 강우사상을 대표로 분석한 결과 강우량의 30%를 적용하였을 때, 실측값과 유사한 것으로 분석되었다.

급경사지에서 하수관거로 유입되는 강우유출수의 비율은 후속되는 연구를 통해 경사, 강우, 도로단면에 대한 지속적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 우선적으로 강우량의 30%가 유입된다는 가정으로 두고 홍수량의 30%를 적용하였을 때 하수관거의 유속 분석을 수행하였다. 그 결과 홍수량 100% 적용에서 최대유속 기준을 초과하는 구간을 포함한 모든 관거에서 최대유속기준을 만족하였다.

급경사지 구간의 경우 최초 우수관을 포함한 일부 유역에서는 U형 측구로 강우유출수를 처리하는 방안에 대한 분석을 수행하였다. 모니터링 지점 구간에 대해 상류부 관거 2구간을 U형 측구로 대처하여 분석한 결과, 하류부 관거의 유속 영향은 미비한 것으로 분석되어, 상류부 유역면적이 작으면 U형 측구로 대체하는 기준 마련의 필요성을 제시하였다.

[현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정]

본 연구수행기관인 토지주택연구원에서는 2010년 관거의 유속 및 유량에 따른 맨홀부 수충격력시험을 한국건설기술연구원에서 수행한 바 있다. 이와 관련한 자료의 축적을 위하여 본 연구에서는 경상남도 산청군 산청읍 고모리 1177번지 일원에 하수관거 시공 지점을 연구대상지구로 선정하고 살수차를 이용하여 맨홀부 수충격력 실험을 수행하였다. 실험 결과, 최대유속으로 나타난 1.95 m/s에서는 수충격력이 32 kgf로 나타났다. 이는 1호 맨홀 자체의 하중 3.7 ton에 비해 약 1% 정도에 해당하는 값으로 수충격력이 맨홀에 주는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 본 실헐과 관련하여 전문가 자문을 요청하였으며 검토의견서에서도 관거 내 흐름에 따른 맨홀부의 영향은 미미한 것으로 판단하였다.

[현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석]

현장에서 수행한 수충격력 실험을 바탕으로 하수관로를 모델링하여 수치해석을 통해 하수관로의 유량 및 경사에 따른 유속 및 충격압 분포 특성을 알아보았다. 하수관로의 유량에 따른 하수관거 유출부의 유속 분포를 살펴보면, 유량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 관수로 내 수위는 점차 높아지는 것으로 나타났다. 충격압의 크기는 유량이 증가함에 따라 점차 증가하였으며, 최대 충격압의 위치는 더 멀리 작용하였다. 하수관로의 경사에 따른 유속 분포 특성을 살펴보면, 경사가 높아짐에 따라 유속이 증가하였으며, 관수로 내 수위는 점차 감소하였다. 충격압의 크기는 경사가 높아짐에 따라 증가하였으며, 최대 충격압의 위치 또한 맨

홀부의 벽면에 가까워지는 경향을 보였다. 특히 맨홀부의 바닥뿐만 아니라 벽면에도 충격압이 작용하는 결과를 보였다. 다양한 경사 조건에 따른 급경사지 도로부 해석 결과, 도로부에 유출되는 우수의 유속 분포는 경사가 올라갈수록 증가하였으며, 이로 인해 맨홀에 유입되지 않고 일부 우수의 경우 월류(overflow)되는 현상을 보였다. 또한 경사가 증가함에 따라 맨홀에 유입되는 우수의 비율이 감소하는 경향을 보였다.

[급경사지 하수관로 및 맨홀부에ㅢ 대한 LH 설계지침 개선 방안 제시]

현재 한국토지주택공사의 토목 설계지침(2018)은 관로시설 설계기준(환경부, 2018)과 마찬가지로 최대 유속 기준과 원형관거의 경우 만관흐름이라는 기준으로 제시하고 있다. 본 연구에서 수행한 국외 우수관의 최대유속 기준과 급경사지의 강우 유출수 흐름양상 분석으로 LH 설계기준에 대한 개선 방향의 설정은 가능하였으나, 구체적인 개선방안의 제시를 위하여 후속 연구를 통해 자료의 축적과 분석을 수행하고자 한다. LH 설계 지침 개선방향 중 하나의 예로서 본 연구에서 제시한 급경사지의 최초 우수관을 포한한 상류부 유역을 U형 측구로 대체 가능하다는 결과를 이용하여 연구대상지구인 청주 동남지구 내 급경사지 구간으로 과대한 맨홀과 우수관이 계획된 배수지의 우수계획의 변경안을 제시하였다. 기존 지하구조물로 구성된 우수관과 맨홀을 U형 측구로 대체, 지표에서 처리함으로써 시공성 향상 및 원가절감의 효과를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

LAND & HOUSING INSTITUTE

참고문헌

건설부 (1980). 하수도 설계기준.

한국토지주택공사 (2010). 최소비용 우수관망 설계를 위한 관내 최대유속기준 타당성 검토에 관한 연구.

한국토지주택공사 (2018). 토목 설계지침.

행정안전부 (2017). 지역별 방재성능목표 설정·운영 기준.

환경부 (2017). 관로시설 설계기준.

City of London (2018). Design Specifications & Requirements Manual. The Corporation of the City of London, Canada, p. 5-4.

City of Toronto (2014). Design Criteria for Sewers and Watermains. 1st Revision, Canada, pp. 79-80.

City of Tukwila (2010). Infrastructure Design and Construction Standard. Fourth edition, Department of Public Work, City of Tukwila, Washington, USA.

City of Weatherford (2007). Stormwater Design Criteria Manual. Community development department, Texas, USA, pp. 19-24.

Clark County (2009). Stormwater Manual. Clark County Public Works Department, Clark County, Washington, USA, pp. 8-4-8-5.

Drainage Services Department (2013). Sewerage Manual (with Eurocodes incorporated): Key Planning Issues and Gravity Collection System. Third Edition, Hong Kong, p. 23.

King County (2016). Surface Water Design Manual. Department of Natural Resources and Parks, King County, Washington, USA, p. 4-9.

Ministry of the Environment (2003). Stormwater Management Planning and Design Manual. Queen's Printer for Ontario, Ontario, Canada, p. 4-107.

North Carolina (2008). Minimum Design Criteria for the permitting of Gravity Sewers. Department of Environment and Natural Resources, North Carolina, USA, p. 4.

Santa Clara County (2007). Drainage Manual. Department of Planning and Development Services, Santa Clara County, California, USA, pp. 44-45.

Queensland Government (2007). Queensland Urban Drainage Manual.