실측데이터와 수치해석모형을 이용한 급경사지 하수도 맨홀 안정성 분석

Stability Analysis of Steep-Sloped Sewer Manhole Using Observation Data and Numerical Analysis Model

이정민*

Lee, Jungmin*

Abstract

Sewage design standards published 37 years ago impose a maximum sewage flow rate of 3.0 m/s for steep slopes. As such, this does not reflect the rapid development of design techniques and construction materials used in sewage pipes and manholes; however, this results in problems such as reduced business value, due to excessive construction costs and increased maintenance costs. Therefore, this study aims to rationally minimize the excessive installation of manholes on steep slope sites, by performing a stability analysis on both sewers and manholes through a calculation of the real flow rate using the leakage monitoring and urban leakage model. According to most international standards, various criteria are applied based on the type of storm water pipeline (material, construction method, size, etc.) and the implemented protection measures of the storm water pipeline (anchoring, deformation, and corrosion prevention measures). Additionally, the maximum flow rate for storm water pipeline is found to lie between 4.5 and 6.0 m/s. In particular, a comparison of the monitoring results with the simulated flow rate of the storm water management model (SWMM) shows that approximately 30% of rainfall flows into the storm water pipelines in areas with steep slopes. Based on the results of the field model experiment as well as the analysis of the effects of the manhole section on the leakage to the steep slope sewer, it has been determined that the magnitude of the impact pressure gradually increases with both the flow rate and slope.

Key words : Numerical Analysis Model, Observation Data, Manhole, Field Experiment

요 지

하수도 설계기준은 37년 전에 발간되어 하수관로 및 맨홀부 등의 설계 기술 및 건설 재료의 비약적인 발전을 반영하지 못하고 있음에도 급경사지에서 최대유속 3.0 m/s 기준을 강제하고 있어 맨홀 추가 설치에 따른 공사비 과다로 인한 사업성 저하와 유지관리비용 증가 등 많은 문제점이 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 급경사지 하수관로에 대해 유출모니터링과 도시유출모형을 통한 급경사지 하수관로의 실유속의 산정을 통해 하수관로 및 맨홀부의 안정성 분석을 수행하고 급경사지에 과다하게 설치되는 맨홀을 합리적으로 최소화하는 근거를 제시하였다. 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 있으며 우수관의 최대 유속 기준이 대부분 4.5 m/s ~ 6.0 m/s이다. 특히 모니터링 결과와 SWMM 모형의 모의 유속을 비교를 통해 급경사지 지역에서는 강우량의 30% 정도가 우수관으로 유입되는 것으로 분석되었다. 현장모의실험 결과를 이용한 수치해석모형의 구축 및 급경사지 하수관로 유출에 따른 맨홀부 영향 분석 결과 충격압의 크기는 유량과 경사가 증가함에 따라 점차 증가하였다.

핵심용어 : 수치해석모형, 실측데이터, 맨홀, 현장모의실험

*교신저자, 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(Tel: +82-42-866-8464, Fax: +82-42-866-8431, E-mail: andrew4502@lh.or.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Construction and Technology Research, Land & Housing Institute

1. 서 론

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. 관로시설 설계기준(ME, 2017)에 따르면 우수관로는 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 맨홀과손 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. 설계기준에 의거하여 사업지구에서는 급경사지의 경우 최대유속 3.0 m/s 기준을 부합하기 위하여 맨홀설치를 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 37년 전의 하수도 설계기준(MOC, 1980)으로 하수관로 및 맨홀부 등의 설계 기술 및 건설 재료의 비약적인 발전을 반영하지 못하고 있는 실정으로 설계기준의 개선이 필요하다.

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. 과거에는 우수관로 내의 유속을 산정하는 기술이 등류계산 방식이었으나 현재는 기술의 발달로 수리학적 동역학과 추적을 계산하는 수준으로 발전하였다. 미국환경청(EPA)에서 개발한 Storm Water Management Model (SWMM) 모형은 도시유출해석 모형으로 관망의 정밀한 구성 및 수리학적 동역과 추적이 가능한 모형으로 우수관로의 실제 자연현상을 엄밀하게 해석할 수 있는 단계에 이르렀다. 따라서 본 연구에서는 급경사지 하수관로에 대해 유출모니터링과 도시유출모형을 통한 급경사지 하수관로의 실유

속의 산정을 통해 하수관로 및 맨홀부의 안정성 분석을 수행하고 급경사지에 과다하게 설치되는 맨홀을 합리적으로 최소화하는 근거를 제시하고자 한다.

2. 국·내외 우수관거 최대유속 설계 기준 현황

우리나라의 우수 관거에 대한 최대 유속의 설계 기준은 ME (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(LH, 2010). Table 1은 국외의 우수관에 대한 최대 유속 기준을 요약하여 나타낸 표로서 우수관의 최대 유속 기준은 국가와 지역에 따라 상이한 기준을 가지나 대체로 3.0 ~ 4.5 m/s의 범위인 것으로 조사되었다. 특히, 일본과 미국의 Michigan 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 만만 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. 미국 텍사스 주 City of Weatherford (2007)에서는 우수관의 재질에 따라 최대 허용 속도를 제한한다. 콘크리트 우수관의 최대 허용 속도는 10 ft/s (3.65 m/s), 콘크리트 암거(culvert), 금속 재질의 주름진 관(Corrugated Metal Pipe, CMP), 고밀도 폴리 에틸렌 관(High-Density Polyethylene (HDPE) Pipe)의 최대 속도는 15 ft/s (4.57 m/s)로 제시하였다. 노스캐롤라이나(North Carolina)주의 우수관 설계 기준 North Carolina (2008)에서는 최대 유속 기준을 직접적으로 제시하기 보다는 설계 유속이 특정 값을 초과하는 경우에 대한 조치 계획을 제시하고 있다. 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 유속이 6.10 m/s를 초과하더라도 관의 안전에 문제가 되지 않을 것으로 판단한 것이다. 워싱턴 주에서는 급경사지에 대한 우수관의 설계 기준을 제시하고 있다. 워싱턴 주의 Santa Clara County (2007), Clark County (2009), City of Tukwila (2010), King County (2016)에서는 우수관의 최대 유속 기준을 제시하고 있으며 Table 2는 Clark County (2009)에서 제시하고 있는 급경사지 급경사지에 대한 관거 종류별 최대 허용 유속으로 금속 재질의

Table 1. Maximum Flow Rate Standard for Stormwater Pipelines from Foreign Countries (Korea Land & Housing Corporation, 2010)

Country (Reference)		Maximum flow rate	Remarks
Japan	Sewerage Handbook (1987)	3.0 m/s	In the case of open channel and clean water : Possible up to 12.2 m/s
	Sewage Facility Planning · Design Guidelines and Commentary (2001)	3.0 m/s	
U.S.A	Wastewater Engineering: Collection and pumping of wastewater	None	Not specified
	Florida State	Corrugated steel pipe: 3.0 m/s Hume pipe: 3.6 m/s	
	Iowa State	4.5 m/s	
	South Carolaina State	Storm water pipe: 3.6 m/s culvert: 4.5 m/s	
	Michigun State	3.0 m/s	
	City of Rohnert Park	None	Maximum slope: 10%
Canada	Region of Peel	3.5 m/s	
	City of Oshawa	4.0 m/s	
	City of Edmonton	3.0 m/s	
Europe (UK)	BS EN 752-4 (Europe standard)	None	Not specified
Australia	Queensland Urban Drainage Manual (2007)	Partial flow: 7.0 m/s Full flow: 6.0 m/s	Recommended maximum flow rate Partial flow: 4.7 m/s Full flow: 4.0 m/s

Table 2. Maximum Permissible Flow Rate for Steep Slope Per Type of Conduit (Clark County, 2009)

Type of Pipe Material	Maximum flow rate	Maximum Slope Allowed	Maximum Velocity Allowed
CMP, Sprital 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 (Flanged joints required)	20% (1 anchor per pipe section)	None	None
HDPE (Butt-fused joints required)	40% (1 anchor per 100 L.F. of pipe)	None	None

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 허용되나 수로 경사가 20%를 넘으면 100 ft (30 m)당 우수관을 고정시킬 수 있는 앵커(pipe anchor)를 설치해야 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 허용되나 50 ft (15 m)당 관을 고정할 수 있는 앵커를 설치해야하며 주철(ductile iron)관과 Solid Wall Poly Ethylene (SWPE)관은 설치할 수 있는 최대의 수로 경사와 최대 유속에 대한 기준은 없으나 우수관의 연결을 flanged joint 또는 butt-fused joint를 통해 관거의 접합부에서 강도가 저하되는 문제를 해결하도록 하고 있다.

캐나다는 Ministry of the Environment (2003), City of Toronto (2014), City of London (2018)에서 우수관의 최대 유속 기준을 대체로 6.0 m/s로 제시하고 있다. 온타리오 주에서는(Ministry of the Environment, 2003) 우수관의 최대 허용 속도를 6.0m/s인 것으로만 기술하고 있을 뿐 어떠한 부연 설명도 없다. 토론토시(City of Toronto, 2014)에서는 온타리오 주와 동일하게 우수관의 최대 허용 속도를 6.0 m/s로 제시하고 있으며 3.0 m/s를 초과하는 경우 관의 변형, 세굴(scouring), 부식, 도수(hydraulic jump)에 대하여 보호할 수 있는 설계 요소를 추가하도록 제시하고 있다. 런던시(City of London, 2018)에서는 우수관의 직경에 따라 최대 유속 기준을 구분하고 있다. 우수관의 직경이 300~825 mm인 경우에는 4.5 m/s, 직경이 900 mm 이상일 때는 6.0 m/s로 제한하고 있다. Table 3은 캐나다 주요 지역의 우수관에 대한 최대 유속 기준을

Table 3. Canada's Maximum Flow Rate Standards for Stormwater Pipelines

Region	Maximum flow rate standard	Remark
Ontario State	6.0 m/s	No elements other than the maximum flow rate criteria
City of Toronto	6.0 m/s	In case of exceeding 3.0m/s, countermeasures against pipe deformation, scour, corrosion and water
City of London	300 ~ 825 mm: 4.5 m/s Up to 900 mm: 6.0 m/s	Classification according to diameter of storm water pipe

정리한 것이다. 홍콩의 Drainage Services Department (2013)에서는 우수관의 최대 허용 유속을 3.0 m/s로 제시하고 있으나 연속적이고 매끄러우며 내구성이 있는 내마모성의 관(예: 주철관) 또는 내부 라이닝이 된 관이나 모든 접합부, 굴곡부, 맨홀 또는 기타 부속 장치가 적절한 부식 방지 조치로 설계된 경우에는 6.0 m/s까지 허용한다. 즉, 홍콩에서는 관의 불연속 구간(접합부)없이 연속적으로 설치되면서 부식과 충격에 대한 저항성을 높일 경우 허용 최대 유속의 기준을 크게 완화하였다.

국외의 여러 사례 조사로부터 우수관에 대한 최대 유속 기준이 국가 또는 지역별로 다양하게 존재하나 공통된 특징을 가지고 있는 것으로 파악된다. 우수관의 종류(재질, 공법, 크기 등)와 우수관의 보호 조치(앵커 설치, 변형 및 부식 방지조치)의 반영에 따라 다양한 기준을 적용하여 우수관의 최대 유속 기준을 4.5 m/s~6.0 m/s로 제시하고 있다. 또한, 급경사 지역의 우수관은 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. 따라서 급경사 지역의 노면 경사가 크지 않을 경우 우수관에 대한 설계 기준을 일괄 적용하기 보다는 기술적인 보완책을 두어 적용하는 것이 필요할 것이다.

3. 도시유출모형을 이용한 하수관로 유출모의

3.1 유출 모니터링

본 연구에서는 실제 유출 양상을 파악하기 위하여 청주 동남지구 택지개발 사업지구를 모니터링 지점으로 선정하였다. 청주 동남지구는 급경사지 지역으로 하수관로내 최대 유속 발생이 가능하며 단차접합 및 계단접합을 사용한 하수관로가 설치되어 있다. Fig. 1은 모니터링 대상 지점이다. 도로부 강우유출수의 유입 외 건설현장, 산지 외부 유입 1지점과 도로부 강우유출수의 유입 2지점을 선정 후 1지점에 해당하는 UJ-2000관과 2지점에 해당하는 UJ-2100관에 대해 2018년 6월부터 9월까지 유출 모니터링을 실행하였다. 1지

점(도로부 유출수+건설현장 및 산지 외부유입수)과 2지점(도로부 유출수)의 실 유속 모니터링 측정 결과는 Table 4이며 Fig. 2는 8월30일 모니터링한 결과이다.

Fig. 1. Monitoring Area

Table 4. Flow Rate Monitoring Results

Period	Total cumulative rainfall (mm)	Maximum flow rate (m/s)	
		Site 1	Site 2
06.26~27	62	-	1.700
07.01~06	243.9	1.895	1.740
07.09~10	23.1	1.980	1.201
07.28	57.5	1.415	1.193
08.23~28	139.7	1.932	1.862
08.30~09.01	103	1.925	1.740

Fig. 2. Monitoring Results (2018.08.30 ~ 09.01)

3.2 우수수리계산서와 SWMM 모의 결과 비교

다양한 유역의 토지이용 속성의 적용이 가능하고 관망에서 배수의 영향을 모의할 수 있는 2차원 모형인 SWMM 모형을 이용하여 모니터링 대상 지점의 하수관로 유출을 모의하여 청주 동남지구의 설계도서의 하수관거 우수수리계산서의 유속과 비교하였다. 우수수리계산서의 유출모의 방법은 구배를 미리 설정하여 만관유속을 맞추고 이후에 관저고를 설정하는데 낙차공의 적용 오류로 설정된 구배와

Table 5. Comparison Between Monitoring and SWMM Model Results

Pipe name	Pipe slope (%)	Flow rate (m/s)	
		Calculated hydraulic	Result of SWMM modeling
UE-1900	1.50	2.95	3.07
UE-1800	3.76	4.66	4.43
UE-1700	3.81	4.70	4.54
UE-1600	3.70	5.06	4.76
UE-1500	4.00	5.26	5.20
UE-1450	4.53	4.07	4.38
UE-1440	4.07	4.38	4.34
UE-1430	1.50	2.95	3.14
UE-1420	1.20	2.88	3.66
UE-1410	6.66	6.79	6.19
UE-1422	4.81	3.93	2.74
UE-1421	4.86	3.95	3.17
UE-1413	4.77	3.92	2.63
UE-1412	4.70	3.89	3.29
UE-1411	4.04	3.60	3.72
UE-14121	0.52	1.30	0.52
UE-1510	0.52	1.39	1.59
UE-1400	3.12	7.70	4.53

다른 값을 가지게 된다. 이는 결국 계산상의 유속이 허용 최대유속 기준 3.0 m/s를 초과하는 유속으로 산정되게 된다. 급경 검토 결과 관로의 만관유속은 최대 6.79 m/s로 산정되었다. Table 5는 우수수리계산서와 SWMM 모형의 결과값 비교한 것으로 SWMM 모형을 이용하여 청주 동남지구의 우수관거 유출모의 결과 우수수리계산서와 유사한 유속의 분포를 가지나 SWMM 모형의 결과값이 다소 작게 모의되었다. 이는 단순 Manning 공식만을 적용한 값과 맨홀의 낙차공의 영향을 함께 고려하는 SWMM 모형의 분석적 차이이다.

3.3 모니터링 자료를 이용한 하수관로 내 우수유입비율 산정

하수관거의 설계에 있어 해당 유역의 강우유출수는 모두 관거로 유입되며 관거의 구매와 관경 결정에서 기준이 되는 유속의 흐름은 만관흐름이라는 가정을 가지나 급경사지에서는 경사로 인한 강우유출수의 대부분은 지표흐름으로 급경사지 시작부 인근 유역에서 하수관거로 유입되는 강우유출수는 현저히 적다. 따라서 급경사지 하수관로 설계시 우수유입비율을 적용한 설계를 강우량 또는 관거 최대유속의 기준의 제시가 필요하며, 이는 급경사지의 과도한 맨홀 추가를 방지하여 사업성을 향상시키는 결과로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 모니터링을 통해 실측된 급경사지 하수관거 유속과 SWMM 모형 모의결과 비교를 통해 급경사지 구간에 실제로 하수관거로 유입되는 강우유출수의 유입비율에 대하여 분석하였다. Table 4 유속 모니터링 결과와 같이 2018년 6월 26~27일에 발생한 62 mm의 강우에 대해 SWMM 모형을 이용하여 유속을 분석한 결과 측정값은 최대 1.7 m/s로 측정된 반면 SWMM 모형은 2.5 m/s로 모의되었다. 이러한 결과 차이의 원인은 해당 유역에서 발생하는 모든 유출수는 맨홀을 통해 관거로 유입하는 조건인 SWMM 모형 결과와 실제 강우유출수 중 일부만 유입된 하수관거에서 실측한 모니터링 값의 차이로 판단된다. 강우량, 지형의 경사, 도로의 단면 등을 고려하여 정확한 강우유출수의 하수관거 유입비율은 산정하기 어려움에 따라 본 연구에서는 개략적인 비율을 검토하기 위하여 SWMM 모형 내에 적용된 강우 자료를 일관적으로 비율을 줄여나가면서 유속을 비교한 결과 62 mm 강우의 30%를 SWMM 모형에 적용하였을 때 측정된 유속 1.7 m/s로 일치하였다. Fig. 3은 강우의 100% 유입적용 시 SWMM 모형과 모니터링 결과를 비교한 것이며 Fig. 4는 강우의 30% 유입적용 시 SWMM 모형과 모니터링 결과를 비교한 것이다.

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

설계에서 하수관거의 최대유속 3.0 m/s의 기준에 적용되는 기본 식은 Manning 공식으로 만관 유속을 가정하고 하수관로의 구매를 결정한다.

Fig. 3. Comparison Between Monitoring Results and SWMM Model for 100% Inflow of Rainfall

Fig. 4. Comparison Between Monitoring Results and SWMM Model for 30% Inflow of Rainfall

수리계산서에서는 전술한 바와 같이 잘못된 낙차고의 적용으로 처음 Manning 공식으로 설정된 구매와는 다르게 관거가 구성되며 이는 우수중단면도에서 도면작업을 통해 해당 경사를 고려하여 추가 맨홀부와 관거를 조정하여 제시하고 있다. 이에 연구대상지구 내 모니터링 지점인 급경사지 유역의 우수수리계산서와 우수중단면도의 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. Table 6은 맨홀 추가 여부 및 홍수량 적용 비율에 따른 관거 내 유속 모의결과로 맨홀의 추가에도 홍수량 적용시 기준 최대유속 3.0 m/s를 초과하는 관거가 발생하는 것으로 분석되었다. 하지만 급경사지의 표면유출 양상을 고려하여 관거 내 유입 홍수량이 30%로 가정하였을 때 맨홀의 추가 구성시 기준 최대유속을 만족하는 것으로 나타났으며 현재 관거 설계시 표면 경사에 따른 강우유출수의 관거 유입양상을 고려하지 않는 관계로 과대 설계되고 있다고 판단된다.

Table 6. Simulation Results of Flow Rate Within Conduits According to Addition of Manhole and Flood Rate

Pipe name (Calculated hydraulic)	Flow rate (m/s)		Pipe name (Rainfall longitudinal cross section)	Flow rate (m/s)	
	Flood discharge 100%	Flood discharge 30%		Flood discharge 100%	Flood discharge 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

3.5 급경사지 상류부 유역의 U형 측구 적용에 대한 하수관로 유속 분석

작은 도로 유역에서 발생하는 강우가 급경사를 통해 해당 관로로 유입되는 비율이 적다는 점을 고려하여 급경사지의 유입 초기부 관거를 U형 측구로 대체하였을 경우에 대한 맨홀의 구성 및 관거의 유속분석을 수행하였다. 실제 시공된 하수관거를 대상으로 상류부 유역의 관거 2개(UJ-2300, UJ-2200)를 차례로 U형 측구로 대체했을 때 관거 내 유속을 SWMM 모형을 이용하여 분석하였으며, 홍수량 100%와 30%를 적용하였다. Table 7은 홍수량 100% 적용 시 분석 결과로 상류부 관거 UJ-2300관 1개를 U형 측구로 대체했을 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 대체하는 것은 수리수문학적으로 가능한 것으로 분석되었다.

Table 7. Simulated Flow Velocity of Conduits According to U-shaped Side of the Upstream Part of the Steep Slope (100% flood discharge)

Pipe name	Flow rate (m/s)		
	Existing	U-shaped gutter application (UJ-2300)	U-shaped gutter application (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	U-shaped gutter
UJ-2200-2	2.45	2.47	
UJ-2300-1	2.02	U-shaped gutter	
UJ-2300-2	2.02		

급경사지 구간의 경사로 인한 강우시 강우유출수의 양상은 대부분 지표흐름이며 약 30%의 강우유출수만 하수관거로 유입한다는 가정 하에 홍수량의 30%만 적용하여 SWMM 모형을 분석한 결과가 Table 8이다. 상류부 관거 UJ-2300관 1개를 U형 측구로 대체했을 때 후속 하류부 관거인 UJ-2200-2

관은 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 0.04 m/s 증가하는 것으로 모의되었다. 기존 관망에 따른 SWMM 모형의 유속 결과값 중 UJ-2000관부터 최대유속 기준을 상회하는 구간에 대해 U형 측구의 적용의 영향은 미미하며 상류부 구간의 하수관거 UJ-2300관과 UJ-2200관을 U형 측구로 대체하는 것은 수리수문학적으로 가능한 것으로 분석되었다.

Table 8. Simulated Flow Velocity of Conduits According to U-shaped Side of the Upstream Part of the Steep Slope (30% flood discharge)

Pipe name	Flow rate (m/s)		
	Existing	U-shaped gutter application (UJ-2300)	U-shaped gutter application (UJ-2300, 2200)
UJ-1900-1	2.78	2.78	2.78
UJ-1900-2	2.41	2.41	2.46
UJ-2000-1	2.13	2.13	2.16
UJ-2000-2	2.23	2.22	2.27
UJ-2000-3	2.19	2.19	2.27
UJ-2010	2.37	2.37	2.37
UJ-2100-1	1.94	1.94	1.97
UJ-2100-2	1.94	1.94	1.99
UJ-2100-3	1.94	1.94	1.98
UJ-2200-1	1.72	1.72	U-shaped gutter
UJ-2200-2	1.72	1.72	
UJ-2300-1	1.41	U-shaped gutter	
UJ-2300-2	1.41		

4. 급경사지 하수관로 맨홀 안정성 분석

4.1 현장모의실험을 통한 하수관로 내 유속에 따른 맨홀부 수충격력 측정

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(ME, 2017)에서 우수관의 최대 유속 기준을 3.0 m/s으로 제시하고 있으며 ‘최소비용 우수관망 설계를 위한 관내 최대유속기준 타당성 검토에 관한 연구(LH, 2018)’에서 수행한 맨홀의 수충격력 시험 결과에 따르면 맨홀 규격에서 발생하는 수충격력은 맨홀의 지중보다 훨씬 작아 안전한 것으로 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장에 시공된 하수관거를 대상으로 맨홀부 수충격력 실험을 수행하여 수치해석모형의 기초자료로 활용하였다.

맨홀의 수충격력 실험은 경상남도 산청군 산청읍 고모리 1177번지 일원에 시공된 하수관거를 대상으로 실수차를 통해 유속(1.45~1.95 m/s)과 유량(0.0785~0.1421 m³/s)을 설정하고 대상 맨홀에 로드셀을 설치하여 수충격 하중을 측정하는 방법으로 실험을 실시하였다. Table 9는 맨홀부 수충격력 실험결과로서 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.

Table 9. Experimental Results of Manhole Impact Force by Flow Velocity and Flow Rate

Flow velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /s)	Manhole impact force (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

4.2 수치해석모형(FLOW-3D)을 이용한 유출에 따른 맨홀부 영향 분석

4.2.1 모형의 구축 및 경계조건

본 연구에서 하수관로의 유량에 따른 유속 및 충격압 분포 특성을 알아보기 위해 FLOW-3D 수치해석모형을 이용하여 하수관로의 유출 및 맨홀부 수충격력을 모의하여 분석하였다. 하수관거의 길이는 10 m, 관거의 직경은 0.45 m, 격자망의 간격은 하수관거 내의 유량에 따른 유속 분포 특성 등을 예측하기 위하여 격자망 하나당 20 mm의 크기로 하여 격자망 수는 2,292,500개로 구성하였다. 흐름장의 수치 해석을 위한 경계조건(boundary condition)으로 Y축은 유입(inflow)과 유출(outflow), X축은 단면의 특성상 대칭조건(symmetry)으로 하였으며 Z축의 바닥은 벽면(wall), 상부는 대기압(pressure)이 작용하도록 하였다. 난류확산의 해석은 Renormalized Group (RNG)모형을 사용하였으며 중력(Gravity)은 Z방향에서 -9.81 m/sec²이 작용하도록 설정하였다. 수로에서의 흐름은 밀도류의 영향을 고려하지 않으므로 유체의 밀도는 1,000 kg/m³으로 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. 유입 유량은 현장모의실험과 동일하게 하였으며

Fig. 5는 맨홀부의 유속 및 충격압 분포를 측정하기 위한 단면 위치로 A-A' line에서 유량에 따른 하수관거 내의 유속 분포를 B-B'에서 유량 조건에 따른 충격압 분포 특성 분석을 수행하였다.

Fig. 5. Analysis Sections

4.2.2 유량에 따른 관로 내 유속 분석

유속의 흐름은 관거내 위치에 관계없이 전반적으로 일정한 흐름 양상을 보였으며 관거를 지나 맨홀부로 유출되면서 유속의 크기가 증가하는 결과를 보였다. Fig. 6은 유량이 Q = 0.0785 m³/sec일 때 하수관거 해석 결과로 동일 시간이 경과한 시점에서 하부 맨홀부에 유입된 물의 양을 살펴보면 유량이 작은 조건에서는 바닥부분에 고이는 수준에 그쳤으나 유량이 증가할수록 하부 맨홀부에 유입된 물의 양이 많아지고 하부 맨홀부까지 도달되는 시간이 빨라지는 경향을 보였다. Fig. 7은 A-A' line에서 유량에 따른 하수관거 내의 유속 분포를 나타낸 것으로 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.

Fig. 6. Sewer Analysis Results (Q = 0.0785 m³/sec)

Fig. 7. Flow Velocity Distribution by Flow Rate (A-A' line)

4.2.3 유량에 따른 맨홀부 충격압 분석

Fig. 8은 해석 단면 B-B'에서 유량 조건에 따른 충격압 분포 특성을 나타낸다. 충격압의 크기는 유량이 증가함에 따라 그 값이 커지는 경향을 보였다. 유량 조건이 $0.0785 \text{ m}^3/\text{sec}$ 일 때에는 약 $7,124 \text{ Pa}$ 의 크기를 보였으며, $0.1421 \text{ m}^3/\text{sec}$ 일 때에는 약 $12,145 \text{ Pa}$ 의 크기를 보였다. 또한 최대 충격압의 작용 위치는 유량이 증가함에 따라 더 먼 곳에서 그 값이 나타났다. 유량 조건이 $0.0785 \text{ m}^3/\text{sec}$ 일 때에는 유출부에서 약 0.65 m 떨어진 지점에서 최대 충격압이 발생하였으나, 유량 조건이 $0.1421 \text{ m}^3/\text{sec}$ 일 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.

Fig. 8. Characteristic of Impact Pressure Distribution for Manhole (B-B' line)

4.3 경사에 따른 도로부 맨홀의 우수 유입 특성 분석

일반적으로 급경사지 도로부의 경우 강우시 지표면을

통한 유출이 증가되고 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 수치모형을 이용하여 급경사지의 경사(1° , 3° , 3.95° , 5° 및 7°)에 따른 우수의 맨홀 유입 특성을 분석하였다. Fig. 9는 경사지 도로부 경계조건을 나타낸 것이다.

Figs. 10~14는 경사 조건(1° , 3° , 3.95° , 5° 및 7°)에 따른 수치해석 결과로서 도로부에 유출되는 우수의 유속 분포는 경사가 올라갈수록 증가하였으며, 우수의 속도에 의해 맨홀에 유입되지 않고 일부 우수는 월류되는 현상을 보였다. Fig. 15는 경사 조건과 맨홀 유입 비율과의 관계를 나타낸 것으로 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.

Fig. 9. Boundary Condition for Roadside Slope

Fig. 10. Result for 1° Gradient Analysis of Roadway

Fig. 11. Result for 3° Gradient Analysis of Roadway

Fig. 12. Result for 3.95° Gradient Analysis of Roadway

Fig. 13. Result for 5° Gradient Analysis of Roadway

Fig. 14. Result for 7° Gradient Analysis of Roadway

Fig. 15. Comparison Between Roadway Slope and Manhole Inflow Rate

5. 결론

현재 국내의 관거설계 기준에서 제시하고 있는 하수관거 최대 유속 3.0 m/s에 대한 개선의 필요성에 대한 연구를 진행하였다. 국외의 설계 기준 검토와 청주동남지구의 우수 수리계산서를 검토하여 현재 하수관거 설계의 문제점을 분석하였으며 유출모니터링과 SWMM 모형의 모의 결과를 비교분석하여 급경사지의 경사로 인해 강우유출수의 전체가 관거로 유입되지 않는 흐름 양상을 정량적으로 제시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 우수관의 최대 허용 유속 기준과 관련하여 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.
- (2) 연구대상지구의 급경사지 구간에 대해 설계시 작성된 수리계산서와 우수종단면도 상의 구배설정 및 맨홀 및 관거의 추가 과정에 대해 검토하고 SWMM 모형과 비교 분석한 결과 단순 Manning 공식을 사용한 관거 설계프로그램인 MAKESW와 SWMM 모형에 유속의 차이가 발생하였으며 전반적으로는 SWMM 모형이 맨홀의 낙차 공 등을 고려하기에 유속을 작게 모의하는 것으로 분석되었다. 하류부로 갈수록 SWMM 모형에서는 설계에서 제시하는 유속값 보다 큰 값이 모의되었으며 최대유속 기준 3.0 m/s를 초과하는 구간도 발생하였다.

- (3) 모니터링 결과와 SWMM 모의 유속을 비교한 결과 측정값이 모형 결과보다 작은 것으로 분석되었다. 이는 SWMM 모형은 해당구역에서 발생하는 모든 강우유출수가 맨홀로 유입되는 조건으로 유속을 계산하나 실제 급경사지 구간의 강우유출수 흐름은 지표면 흐름이 대부분으로 관거로 모든 우수가 유입되지 않기 때문인 것으로 판단되어 2018년 6월 28일에 발생한 강우사상을 대표로 분석한 결과 강우량의 30%를 적용하였을 때 실측 유속과 유사하게 모의되었다.
- (4) 모니터링 지점 구간에 대해 상류부 관거 2구간을 U형 측구로 대체하여 분석한 결과 하류부 관거의 유속 영향은 미비한 것으로 분석되어 상류부 유역면적이 작으면 U형 측구로 대체하는 기준 마련의 필요성을 제시하였다. 급경사지에서 하수관거로 유입되는 강우 유출수의 비율은 후속되는 연구를 통해 경사, 강우, 도로단면에 대한 지속적인 분석이 필요하다.
- (5) 하수관로의 유량에 따른 하수관거 유출부의 유속 분포를 살펴보면, 유량이 증가함에 따라 유속의 최대값이 유량이 0.0785 m³/sec일 때 2.0 m/sec에서 유량이 0.1421 m³/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 m³/sec일 때에는 약 7,124Pa에서 0.1421 m³/sec일 때 약 12,145Pa로 점차 증가하였다. 최대 충격압의 위치는 유량이 증가할수록 유출부를 기준으로 더 멀리 작용하였다.
- (6) 경사가 증가함에 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.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었습니다 (과제번호 19NSPS-B149833-02).

References

- City of London. (2018). *Design specifications & requirements manual*. The Corporation of the City of London, Canada, pp. 5-4.
- City of Toronto. (2014). *Design criteria for sewers and water mains*. 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.
- Japan Sewage Works Association. (1987). *Japan sewerage handbook*.
- King County. (2016). *Surface water design manual*. Department of Natural Resources and Parks, King County, Washington, USA, p. 4-9.
- Korea Land & Housing Corporation (LH). (2010). *A study on the feasibility study of the maximum flow rate criterion for the design of the minimum cost superior pipe network*.
- Korea Land & Housing Corporation (LH). (2018). *Civil engineering design guidelines*.
- Ministry of Construction (MOC). (1980). *Sewer design standards*.
- Ministry of Environment (ME). (2017). *Pipeline design standard*.
- Ministry of the Environment. (2003). *Stormwater management planning and design manual*. Queen's Printer for Ontario, Ontario, Canada, pp. 4-107.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017). *Establishment of disaster prevention performance targets by region • Operating standards*.
- North Carolina. (2008). *Minimum design criteria for the permitting of gravity sewers*. Department of Environment and Natural Resources, North Carolina, USA, p. 4.
- Queensland Government. (2007). *Queensland urban drainage manual*.
- Santa Clara County. (2007). *Drainage manual*. Department of Planning and Development Services, Santa Clara County, California, USA, pp. 44-45.

Received	July 31, 2019
Revised	August 2, 2019
Accepted	August 14, 2019