

과부하 맨홀의 손실계수를 고려한 흐름의 수치모형

김경범* · 김정수** · 윤세의***

Kim, Kyong Beom* · Kim, Jung Soo** · Yoon, Sei Eui***

A Numerical Modeling of Surcharged Manhole Flow with the Consideration of the Energy Loss Coefficient

ABSTRACT

Urban drainage systems are generally designed as open channel flow. The system, however, shows a partially surcharged flow in its body, especially at junctions or manholes. Thus, a special case of this condition needs to be explained as pressurized flow condition for designing the sewer system. This study considered the surcharged manhole flows during an unexpected rainfall event or an excess of design frequency. Overflows from surcharged manholes and urban flooding can occur from the effect of surcharged flows. Thus, sewer systems should be designed with the concept of open channel flow and pressurized flow. Also, energy losses in a manhole need to be considered. The aim of this study is to develop the numerical model which can evaluate the effect of the energy losses at the manhole. The numerical model was verified and compared with hydraulic model and SWMM. The results showed that the water depth of numerical model was in good agreement with hydraulic model at the each manhole. However, the SWMM underestimated the water depth because that model ignored the energy losses at manholes. Thus, the developed numerical model in this study could be a useful tool for the assessment of a conveyance of urban drainage system.

Keywords : Energy loss, Surcharged manhole, Urban drainage, Surge Tank

초 록

일반적으로 도시배수 시스템은 개수로 흐름으로 설계 된다. 그러나 설계빈도를 초과하는 강우발생 시 배수 시스템의 합류부 또는 맨홀 등에서 부분적인 과부하 흐름이 발생되고 있다. 그러므로 이와 같은 과부하 흐름에 의해 발생하는 배수 시스템에서의 압력흐름에 대한 연구의 필요성이 제기 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 설계빈도를 초과 하는 강우사상 그리고 예측할 수 없는 집중호우 시 맨홀에서의 과부하 흐름에 관한 연구를 수행 하였다. 배수 시스템에서의 압력흐름의 문제점은 과부하 맨홀로부터의 월류량에 의한 도시홍수 발생이다. 그러므로 배수 시스템은 개수로 흐름으로 설계 되어야 할 뿐만 아니라 과부하 흐름 발생 시 맨홀내의 에너지 손실을 고려한 압력흐름의 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 과부하 맨홀의 에너지 손실을 고려하여 압력흐름을 해석 할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 수치모형을 검증하기 위하여 수리모형실험 결과와 비교·검증하였고, 도시유출해석에 가장 널리 이용되는 SWMM의 결과와도 비교하였다. SWMM은 맨홀 내의 에너지 손실을 적절히 반영하지 못함으로써 맨홀 수심을 과소 산정하는 결과를 보인 반면, 본 연구 모형은 수리모형실험결과와 잘 일치하였다.

검색어 : 손실계수, 과부하 맨홀, 조압수조, 도시배수

* 정희원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료 (kyoungbeom.kim@gmail.com)

** 부천대학교 토목과 교수 (hydroguy@naver.com)

*** 정희원 · 교신저자 · 경기대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyonggi University, Professor · syyoon@kyonggi.ac.kr)

Received August 20 2012, Revised October 15 2012, Accepted February 5 2013

1. 서론

도시화된 지역 또는 도시화가 진행 중인 지역에서 기후 변화로 인한 국지적인 집중 호우가 빈번히 발생하고 있으며, 이로 인한 급격한 유출량의 증가와 도시배수 시스템의 통수불량 및 용량 부족으로 도심지의 침수 피해가 발생하고 있다. 도시지역에서의 우수는 도로 배수시설 및 우수 관거 시설에 의하여 배수되며, 우수 관거 시설은 관거, 맨홀, 우수토실, 물받이 및 연결관 등을 포함하고 있다(M.E, 2005). 그러나 도시배수 시스템의 관거 시설 계획 또는 설계 단계의 수리계산에서는 관거 내의 마찰손실만을 고려하고 있으며, 맨홀 등의 구조물 설치에 따라 발생하는 에너지 손실은 반영하지 않고 있다. 따라서 맨홀에서의 에너지 손실에 의한 맨홀 내의 수두손실에 따라 관거의 통수능력이 저하되는 현상을 발생시킨다(Kim 등, 2008).

도시배수 시스템의 설계 용량을 초과하는 유입 유량, 하류흐름의 저체에 의한 역류현상(backwater), 부유물에 의한 흐름의 방해, 외수위 상승에 따른 영향을 받을 시 관거는 만관을 초과하는 과부하(surcharge)상태의 압력흐름이 된다. 개수로 흐름의 맨홀 내 수두손실은 일반적으로 무시 되지만 과부하 흐름에 의한 맨홀 내 수두손실은 관거의 통수능력에 중요한 요소이다. 최근 발생하는 도시 침수 피해는 설계 강우강도를 초과하지 않은 강우에도 발생하고 있으며, 이는 관거 합류부와 맨홀 등에서 발생하는 과부하 흐름에 의한 국부손실의 영향이 배수 시스템의 배수 능력을 저하시키기 때문이다. 따라서 관거 시설 내 맨홀에서의 에너지 손실에 대한 연구와 보다 구체적인 설치 기준의 제시가 요구되고 있는 실정이다.

국내 실무에서 도시배수 시스템의 유출해석에 널리 사용되는 모형들 중에서 압력흐름을 모의 할 수 있는 모형으로는 SWMM과 MOUSE 등이 있다. 그러나 이들 모형은 맨홀을 하나의 절점으로 간주하므로 절점의 형상과 크기 그리고 절점 내의 에너지 손실 변화를 고려할 수 없으며, 단지 관거의 경사에 의해 유출해석을 하고 해석된 유출량을 절점으로 입력하는 형태만을 취하고 있다. 또한 절점으로부터의 과부하량 산정은 입력된 지반고와 절점에 연결된 입·출구 관의 동수경사선의 차이를 과부하 율류량으로 산정하므로 이들 모형에서 과부하 흐름의 발생은 연산오차를 발생시키고 있다(Lee, 2005). 따라서 배수 시스템 내 맨홀에서의 수리학적 에너지 손실을 고려한 배수 시설의 설치에 대한 기준이 제시되어야 하며, 침수 피해를 방지하기 위한 배수 시설의 합리적인 평가와 유지관리 측면에서 맨홀 내 수두 손실의 특성을 모의할 수 있는 모형의 개발이 필요하다.

도시배수 시스템과 도시홍수의 상호작용을 모의하기 위한 모형 개발은 도시가 팽창되고 개발됨에 따라 지속적인 중요한 과제로 대두 되고 있으며, 이와 같은 일련의 상호작용에 대하여 1차원 모형을 중심으로 개발되고 있다(Djordjevic 등, 1999). 그러나

이러한 1차원 모형들은 홍수 시 배수 시스템 또는 하천과의 접속부에 대한 복잡한 흐름을 설명하기에 부족한 점(Weber 등, 2001)이 있음에도 불구하고 도시배수 시스템의 계획, 설계의 간편성과 빠른 계산속도 등의 장점을 가지고 있어 지속적인 관심을 받고 있다. 그러므로 맨홀 합류부에 대한 수리학적 거동을 이해하고 조사하는 방법으로는 1차원 수치모형이 효과적이다(Hager, 1992). 그러나 기 개발된 도시유출 관거 해석 모형들은 압력흐름의 계산에서 구조물 설치에 따른 구조물의 크기 및 형상 등을 반영하지 못하므로써 맨홀 설치에 따른 국부손실의 영향을 배제하여 개발되었다.

Gan과 Riffat(2000)는 실험적 연구의 제한 즉, 모든 흐름조건에 따른 합류부에서의 측정의 어려움과 소요시간, 합류부와 연결된 여러 구조물의 설치에 따른 어려움을 수치해석 방법을 통하여 T자형 합류부에서의 에너지 손실을 고려한 흐름 해석을 수행하였다. Zhao 등(2008)은 90° 합류맨홀에서 맨홀의 형태와 크기가 에너지 손실을 결정하는 중요한 요소임을 확인 하였으며, 수치모형은 배수 시스템의 설계 및 최적화 그리고 합류부에서의 과부하 흐름에 대한 수리학적 거동을 잘 모의할 수 있음을 발표하였다. 한편 Merlein(2000)은 중간 맨홀의 손실계수를 산정함과 동시에 맨홀 내부에 천공판(cover plate)을 설치하여 과부하 상태에서 유량증가에 따른 맨홀 내의 흐름이 천공판을 통과 하면서 간섭이 감소하여 맨홀의 수심이 감소함을 수치모형을 통하여 확인하였다. 국외에서는 맨홀 내 손실의 영향을 반영하여 수리 실험 및 수치 모형의 개발을 실시하고 있으나 국내에서는 최근 손실계수 산정에 관한 실험적 연구만 진행되고 있을 뿐 국부손실을 고려한 과부하 관거 흐름해석에 대한 연구가 미미한 실정이다.

본 연구에서는 관거 시설의 구조물 설치에 의해 발생하는 국부손실의 영향을 고려하여 관거 시설에서의 흐름해석이 가능한 수치모형을 개발하였다. Surge Tank 이론을 적용하여 개발된 수치모형은 과부하 맨홀의 수심을 계산할 수 있도록 하였다. 또한 맨홀의 부정류 조건에서 손실계수를 산정한 Merlein(2000) 및 본 연구에서 실시한 실험 결과와 수치모의 결과를 비교·검증하여 모형의 적용 성을 확인하였다.

2. 기본이론

2.1 Surge Tank 기본 방정식

France(1977)는 에너지 손실을 고려한 surge tank 에서의 수심을 산정하기 위하여 예측자-수정자 방법(predictor-corrector method)의 수치모형을 연구하였다. Surge tank의 수리학적 거동은 과부하 맨홀의 흐름과 유사하며 수치해석 방법은 같다. 따라서 시간과 공간에서 변화하는 부정류 흐름인 도시배수 시스템에서의 흐름을 수학적으로 나타내면 상미분방정식 형태의 연속방정식과 운동량방

정식으로 표현 할 수 있다. Wylie와 Streeter(1978) 그리고 Chaydhry (1987)는 연속방정식을 Eq. (1)과 같이 제시 하였다.

$$Qdt = A_M(dh) \tag{1}$$

여기서, h 는 저류조의 수심이고 A_M 은 저류조의 단면적이다. 미소시간 dt 에서 저류조 또는 맨홀의 수체적의 변화로 수표면과 관의 출구에서의 연속방정식은 Fig. 1에서 시간 t_1 에서 t_2 로 흐름이 변화할 때 임의의 시간 t 에서 저류조 내의 체적의 변화를 연속방정식으로 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 만약 저류조로의 유입유량을 Q_0 , 저류조를 빠져 나가는 유량을 Q_{out} 이라 하면 Eq. (2)와 같이 연속방정식을 다시 나타낼 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_0 - Q_{out}}{A_M} \tag{2}$$

운동량방정식은 Fig. 1에서 저류조의 출구부, 맨홀의 유입부와 연결된 관의 길이 L , 관경 D , 단면적 A_p 그리고 관거 유속 v 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\rho A_p L) \frac{dv}{dt} = (p_1 - p_2) A_p - \frac{f}{8} \rho v |v| \pi DL \tag{3}$$

여기서, f 는 마찰손실계수, p_1 과 p_2 는 관의 압력이고 ρ 는 물의 밀도이다. 따라서 Eq. (3)을 $\rho A_p g$ 로 나누어 주고 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} - f \frac{L}{D} \frac{v|v|}{2g} \tag{4}$$

관의 양끝과 접하는 저류조와 맨홀에서의 압력의 변화를 수심으로 나타낼 수 있으며, 수심을 각각 h_1 과 h_2 라 하면 Eq. (4)는 다음과 같은 운동량방정식으로 정리할 수 있다.

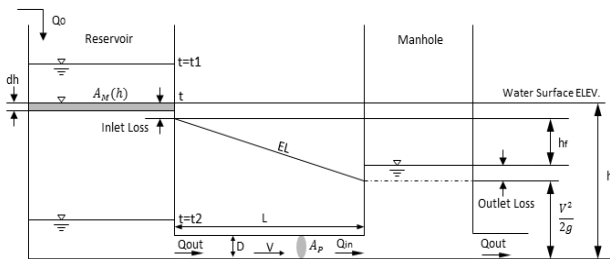


Fig. 1. Energy Loss of Reservoir and Manhole under Unsteady Flow

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{L} (h_1 - h_2 - \Delta h_f) \tag{5}$$

여기서, Δh_f 는 마찰에 의한 수두손실이며, g 는 중력가속도이다.

2.2 맨홀의 손실

맨홀에서의 에너지 수두손실 ΔE 에 대하여 Sangster 등(1958)은 Fig. 1에서와 같이 맨홀내의 입구 그리고 출구손실 고려하여 Eq. (6)과 같이 제안하였다.

$$\Delta E = K \frac{V^2}{2g} \tag{6}$$

여기서, V 는 관거의 평균유속, g 는 중력가속도를 나타내며 K 는 맨홀에서의 손실계수 이다.

과부하 맨홀의 흐름은 압력에 의해 지배되며, 맨홀의 총 수두는 압력수두와 속도수두로 나타낼 수 있다. 따라서 질량과 운동량의 평형을 고려한 맨홀에서의 에너지 손실은 입구와 출구손실의 합과 같다. 이와 같은 맨홀내의 손실은 압력경사로 설명 할 수 있으며, 손실에 의한 맨홀의 수심은 입구손실과는 달리 출구손실의 운동에너지 손실을 잃지 않음으로 부(-)의 값을 가지게 된다.

3. 수치모형 개발

관거 시설의 구조물 설치에 따른 국부손실의 영향을 고려하여 관거의 흐름해석을 하기 위해서는 관거 시설의 과부하 흐름 조건을 고려하여야 한다. 맨홀에서의 과부하 흐름은 Fig. 2에서와 같이 연결관의 관정높이에서부터 맨홀을 월류하지 않는 맨홀 상단고까지의 높이로 간주하였다. 따라서 유입관과 유출관이 만관이 되어 맨홀의 수심이 연결관의 관정보다 상승할 때부터 과부하 흐름의 시점으로 하였다.

따라서 과부하 흐름에서 맨홀에 연결된 유입 및 유출관은 압력에

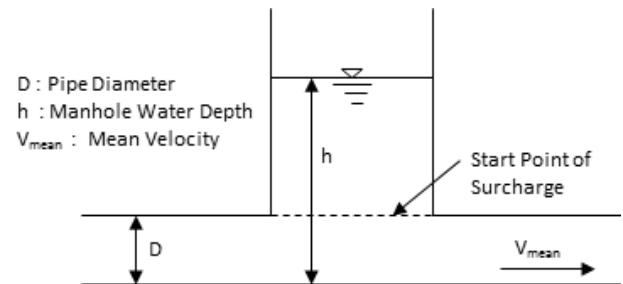


Fig. 2. Surcharged Flow in Manhole

의해 흐름이 지배된다. 압력 관에서의 시간증분(Δt)동안 변화하는 부정류 흐름을 수치모의 하기 위하여 Eq. (2)와 Eq. (5)의 상미분방정식과 계산의 수렴 속도를 높이기 위하여 Runga-Kutta 4th order를 이용하여 초기경계 값을 가정한다.

다음으로 예측자-수정자 방법을 이용하여 맨홀의 수심과 관에서의 유량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$h_i(t + \Delta t) = h_i(t) + \frac{\Delta t}{2A_M} [Q_{i-1}(t) - Q_i(t) + Q_{i-1}(t + \Delta t) - Q_i(t + \Delta t)] \quad (7)$$

$$Q_i(t + \Delta t) = Q_i(t) + \frac{g A_{P_i}}{2l_i} [h_i(t) - h_{i+1}(t) + h_i(t + \Delta t) - h_{i+1}(t) - 2\Delta E_i] \quad (8)$$

여기서, A_{P_i} 는 i 번째 맨홀의 출구부에 연결된 관의 단면적, l_i 는 관의 길이를 나타내며, Q_{i-1} 은 i 번째 맨홀의 유입유량, Q_i 는 i 번째 맨홀의 유출관로에서의 유량 그리고 h_i 는 i 번째 맨홀의 수심, h_{i+1} 은 i 번째 맨홀의 유출관로의 유량 Q_i 와 연결된 다음 맨홀의 수심을 나타낸다. 즉, h_{i+1} 의 유입유량은 관로 l_i 의 유량 Q_i 가 된다. 따라서 기지의 $h_i(t)$ 와 $Q_i(t)$ 로부터 Eqs. (7), (8)을 이용하여 미지의 $h_i(t + \Delta t)$ 그리고 $Q_i(t + \Delta t)$ 를 반복 계산하여 연속적인 해를 구하였다.

Merlein(2000)의 연구에서는 맨홀 형상에 따른 손실계수의 선택을 고려하지 않고 있으나, 본 연구의 수치모형은 맨홀의 형상에 따른 맨홀의 단면적과 손실계수를 선택하게 하였다. 또한 관 마찰 손실을 계산하기 위하여 Darcy-Weisbach식을 이용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 개발한 수치계산의 흐름도이며 $i = 1$ 부터 n 개의 맨홀을 가지고 있다면 모형은 다음 순서를 통하여 계산된다.

1. 시간 $t=0$ 에서의 i 번째 맨홀에서의 수심($h_i(t)$)와 유량($Q_i(t)$)을 초기 값으로 한다.
2. 맨홀의 형상에 따른 각각의 맨홀 단면적을 구한다.
3. 상류조건으로부터 시간의 증가($t+\Delta t$)에 따른 유량($Q_{i-1}(t+\Delta t)$)을 구한다.
4. Runge-Kutta 4th order method를 이용하여 양함수인 예측자 수심($h_i(t+\Delta t)$)을 가정한다.
5. Darcy-Weisbach식을 이용하여 관마찰 손실을 계산한다.
6. 음함수인 수정자 Eq. (7)과 Eq. (8)을 이용하여 하류단의 경계조건 수심($h_n(t+\Delta t)$)에 수렴할 때까지 반복계산을 수행하여 유량($Q_i(t+\Delta t)$)을 구한다.
7. $h_i(t) = h_i(t+\Delta t)$ 그리고 $Q_i(t) = Q_i(t+\Delta t)$ 로 update 시킨다.

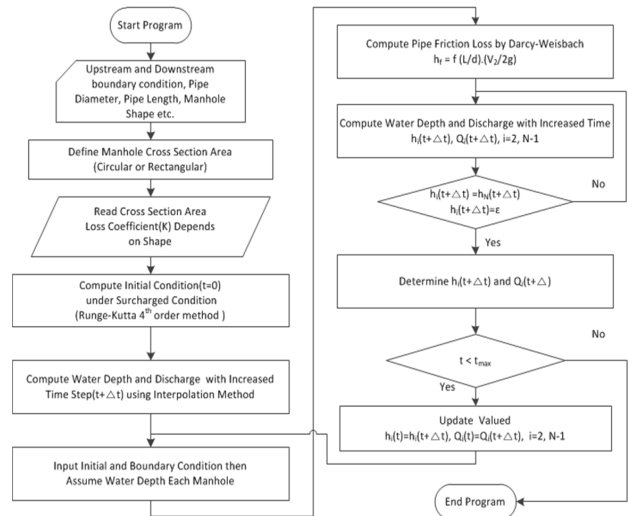


Fig. 3. Computational Design and Process

4. 수치모형의 검증과 비교

4.1 Merlein의 실험결과를 통한 모형검증

Merlein(2000)은 과부하 맨홀에서 손실계수의 변화에 따른 수심의 변화를 연구하기 위하여 surge tank 모형을 이용하였으며 비교적 양호한 결과를 발표하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 수치모형의 검증을 위하여 유입 유량이 시간에 따라 변화하는 부정류 실험으로부터 산정된 Merlein의 연속 맨홀 손실계수를 본 연구에서 개발한 수치모형에 적용하였다. Merlein이 수행한 수리실험의 조건과 실험장치의 제원은 Table 1과 같으며, 입·출구 손실은 각각 0.3과 -0.05를 사용하였다. 이때 상·하류 경계조건은 Fig. 4와 같다.

상·하류 저류조와 3개의 맨홀로 구성되어진 Merlein의 수리실험모형은 저류조와 맨홀 그리고 맨홀과 맨홀이 직경 242mm의 내부 관으로 연결되어 있고, 에너지 손실은 관에서의 마찰에 의한 손실과 맨홀의 입·출구에서의 에너지 손실로 각각 나누어 적용하였으며, 에너지 손실은 상류 저류조 수표면과 에너지선의 관계로 Fig. 1에 나타내었다. 20.0 l/sec ~ 74.0 l/sec의 유입유량을 상류 경계조건으로 하고, 하류 경계조건은 0.385m ~ 0.485m의 수심으로 하였다.

Fig. 5는 입구손실 0.3과 출구손실 -0.05값에 따라 맨홀에서 발생하는 손실계수를 0.25로 결정된 값을 본 연구의 수치모형에 적용하여 계산한 각 맨홀에서의 수심 값과 Merlein의 수리 실험 모형에서 실측된 수심을 각각의 맨홀에 대하여 비교하였다. 맨홀의 수심은 수치모형의 수심이 Merlein의 수심보다 약간 큰 값을 보이고 있으나, 비교 결과 맨홀 내 수심이 상승하여 침투수심까지의 변화는 비교적 잘 모의 하고 있으며 수심의 하강부에서는 실험값

Table 1. Conditions of Laboratory Work (Merlein, 2000)

Type	Inlet Res.	Manhole 1	Manhole 2	Manhole 3	Outlet Res.
Shape	Rectangular	Circular	Circular	Circular	Rectangular
Size	0.8×1.0(m)	1.0(m)	1.0(m)	1.2(m)	0.8×0.72(m)
Pipe Length	4.6(m)	8.35(m)	7.0(m)	5.3(m)	-
Pipe Diameter	0.242(m)				-
Loss Coefficient	Inlet Loss		Outlet Loss		-
	0.3		-0.05		-

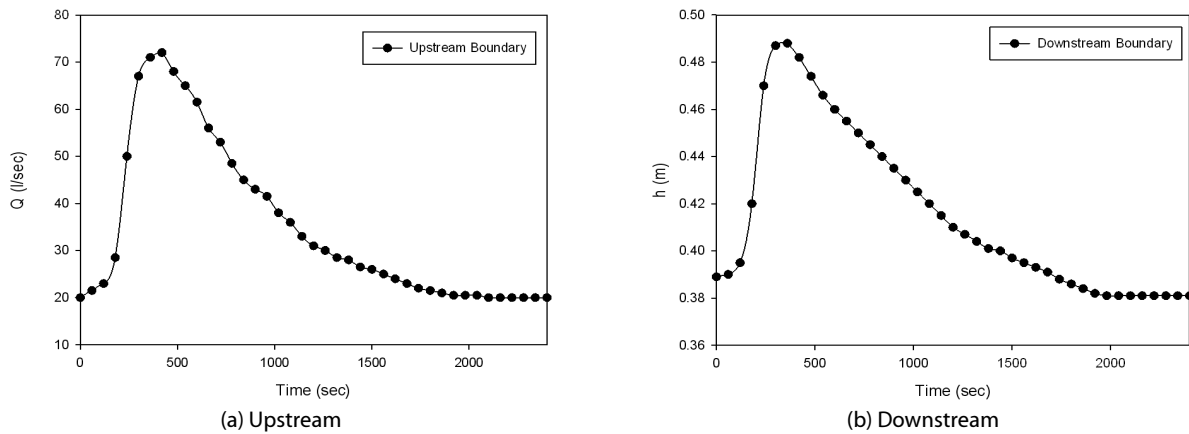


Fig. 4. Boundary Conditions (Merlein, 2000)

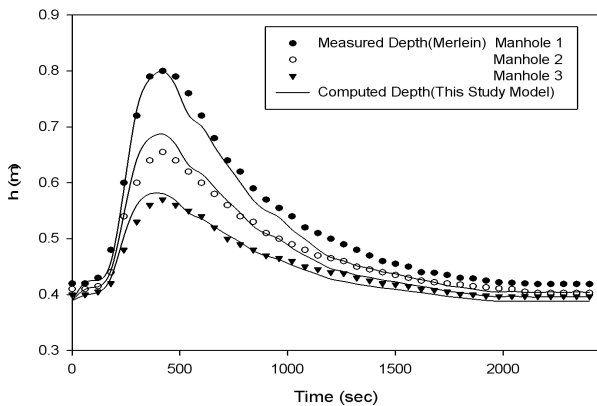


Fig. 5. Comparison of Measured Depth (Merlein, 2000) with Computed Result (This Study Model)

보다 약간 작게 산정되고 있음을 알 수 있다. 이는 수심에 따라 상이한 손실계수를 반영 하지 못하고 하나의 결정된 손실계수 값을 모형에 적용한 결과로 판단된다.

4.2 수리모형실험과의 모형비교

본 연구에서 개발된 수치모형을 국내 실정에 맞게 적용하기 위해서는 국내 설계 기준이 반영된 수리 모형실험 결과에 의해 산정된 손실계수와 연속 맨홀에서의 흐름특성분석 결과가 필요하

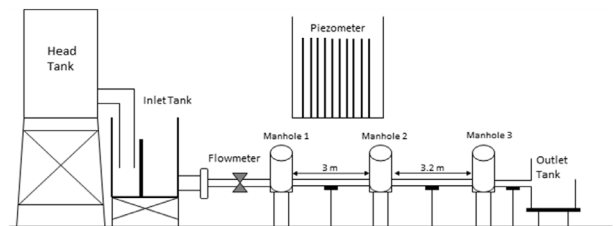


Fig. 6. Sketch of Laboratory Work (This Study)

다. 따라서 Fig. 6과 같은 수리모형실험 장치를 제작하여 수리실험을 실시하였으며, 실시된 실험조건을 반영하여 수치모형의 검증을 실시하였다. 고수조는 지하 탱크로부터 원활한 유량을 공급받아 정류수조로 안정된 유량을 공급하게 하였고, 원형 아크릴 맨홀은 하수도시설기준(환경부, 2005)의 표준 1호 맨홀을 1:5의 축척으로 제작하였다. 과부하 연속맨홀의 에너지 손실을 측정하기 위하여 30cm 간격으로 관거에 액주계를 설치하였고, 특히 원형 맨홀의 입·출구에는 보다 정확한 입력수두의 변화를 측정하기 위하여 3cm 간격으로 액주계를 설치하였다.

실험조건으로 실험유량은 0.88 l/sec~2.48 l/sec의 유량을 5분 간격으로 측정하였다. 원형 맨홀은 지름 180mm, 연결관경은 60mm로 제작하였으며, 맨홀간의 거리는 각각 3.0m, 3.2m, 2.6m로 접합하고 관거와 관저접합방식으로 연결하여 각각의 맨홀에서의 수심

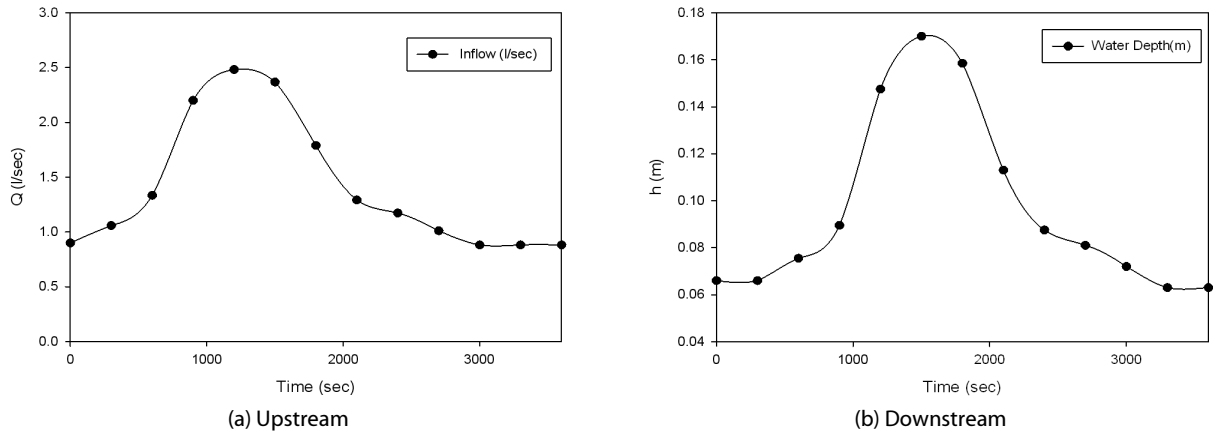


Fig. 7. Boundary Conditions (This Laboratory Work)

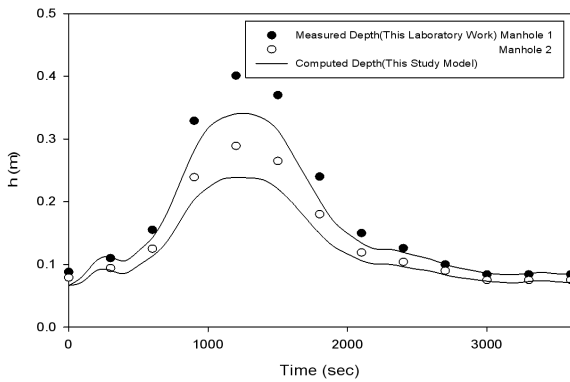


Fig. 8. Comparison of Measured Depth and Computed Depth without Loss Coefficient

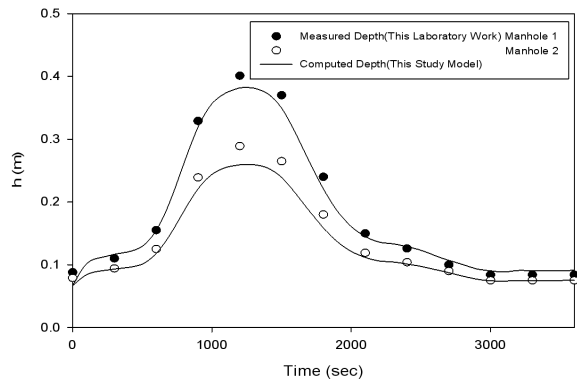


Fig. 9. Comparison of Measured Depth and Computed Depth with Loss Coefficient

과 손실계수를 산정하였다.

유입부와 출구부의 압력수두의 변화를 Eq. (6)을 이용하여 각각의 시간간격에 대한 손실계수 값을 산정함에 있어, 맨홀의 손실계수는 시간에 따라 변화하는 부정류 흐름에 의하여 유량의 증가와 감소에 따른 맨홀 수심의 상승부와 하강부의 손실계수가 상이함을 보였다. 따라서 맨홀의 손실계수는 수치모형에 적용하기 위하여 맨홀의 수두에 대한 속도수두 회귀식의 경사를 이용하여 산정된 평균손실계수 0.53을 적용하였다. 수리실험의 경계조건은 Fig. 7에 나타내었으며, 상류단의 경계조건은 5분 간격으로 측정된 유입 유량 그리고 하류단 경계조건은 하류 맨홀의 수심을 측정하였다.

본 연구에서 측정된 각 맨홀에서의 수심 변화 값과 수치모형에서 손실계수를 고려하였을 때와 고려하지 않을 때의 맨홀에서 수심 변화의 계산 값은 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 손실계수를 고려하지 않은 과부하 맨홀의 침투수심은 수치모형에서 계산된 결과가 수리실험모형의 실측값 보다 약 14.85%~17.63% 낮음을 알 수 있다. 이는 맨홀 내의 에너지 손실을 고려하지 않음으로 인하여 속도수두의 영향을 반영하지 못한 결과이다.

평균손실계수를 적용한 과부하 맨홀의 수심은 Fig. 9에서 나타나고 있다. 시간에 따라 변화하는 유량에 대한 맨홀의 손실계수 산정에 있어서, 유량의 증가에 따른 맨홀의 수심이 상승할 때와 하강할 때의 손실계수의 범위가 크므로 평균손실계수를 적용함에 있어서 침투수심이 약 4.1%~9.8% 정도 과소평가됨을 보이고 있으며 맨홀 내의 수심과 침투수심의 형태는 비교적 잘 일치함을 보이고 있다. 따라서 과부하 흐름 상태에서 관거 흐름을 해석할 경우 맨홀 등의 국부손실의 반영 여부는 중요하며 이러한 국부손실의 반영을 통한 관거 해석이 필요하다. 그러므로 본 연구에서 개발된 수치모형은 맨홀에서 손실계수를 고려한 맨홀의 수심 변화의 예측이 가능하므로 도시배수 시스템의 평가와 운영에 상당한 활용 가능성이 있다고 판단된다.

4.3 SWMM과의 모의결과비교

도시구역에서 수리구조물을 포함하는 배수 시스템의 관로 내 수심 변화와 배수 영향을 고려할 수 있고, 단일 강우나 연속 강우사상으로 인해 발생하는 유출량, 오염물질의 지표면 및 지표하

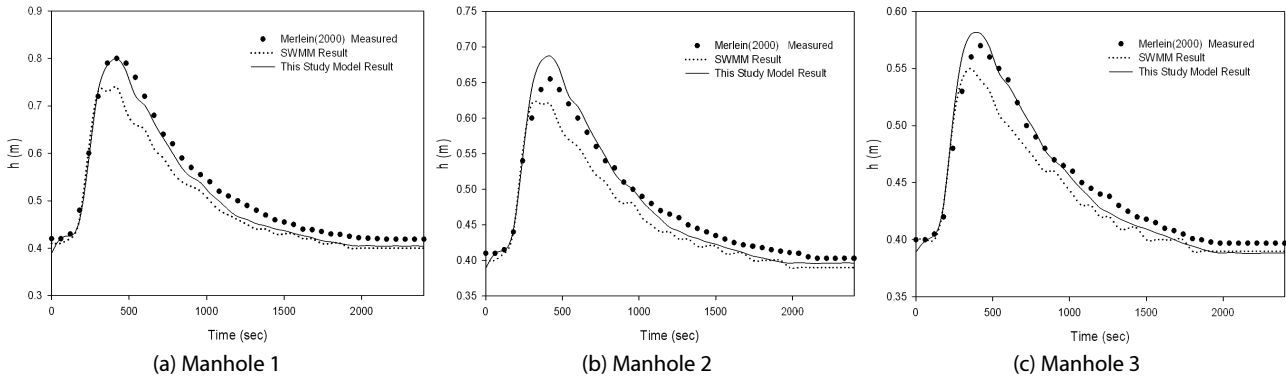


Fig. 10. Comparison of Water Depth among Merlein(2000) Experiment, SWMM and This Study Model

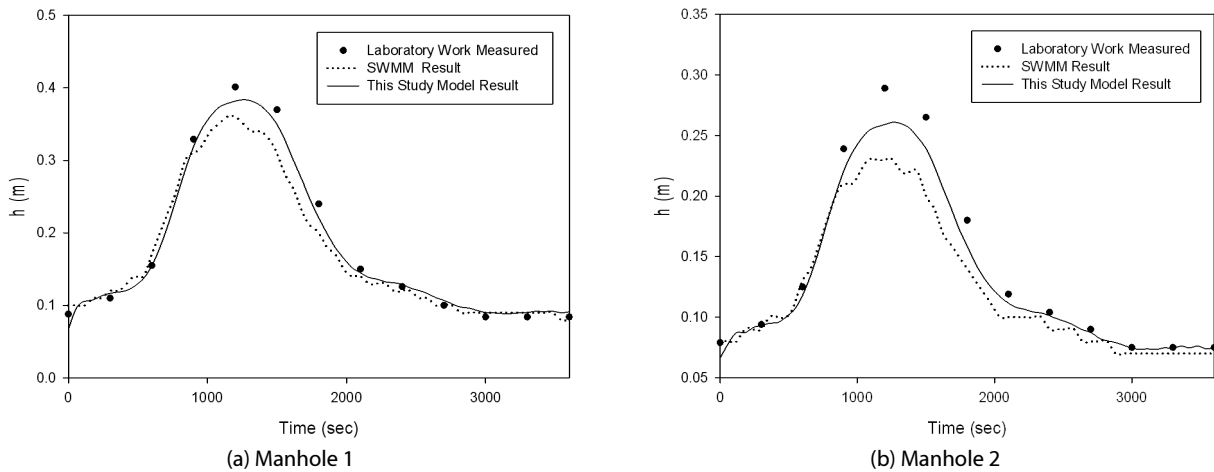


Fig. 11. Comparison of Water Depth among This Laboratory Work, SWMM and This Study Model

Table 2. Comparison of Peak Value as Measured by Laboratory Work, Computed by SWMM and Evaluated by This Study Model

Type	Manhole	Measured	SWMM	Study Model
Peak Time(sec)	1	1200	1080	1200
	2	1200	1080	1200
Peak Depth(m)	1	0.401	0.36	0.384
	2	0.289	0.23	0.284
Comparison	1	-	+120(sec)/-0.041(m)	0(sec)/-0.014(m)
	2	-	+120(sec)/-0.059(m)	0(sec)/-0.028(m)

흐름, 저류량 산정 및 배수시스템에서의 유출량추적 등을 종합적으로 모의 할 수 있는(Rossman, 2010), US EPA SWMM 5.0과 Merlien(2000)의 수리실험에서 측정된 맨홀 수심을 Fig. 10에 비교 하였으며, 본 연구의 수치모형 결과와의 비교는 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있듯이 맨홀에서의 에너지 손실을 고려할 경우, 유속의 감소는 맨홀 내 수심의 증가로 나타남을 알 수 있으며, 손실계수를 고려한 침투수심의 도달시간은 SWMM이

본 연구의 계산 값과 Merlein의 실험 값 보다 대략 120초 빠름을 알 수 있다. 또한 본 연구의 실측치에 대한 침투시간은 SWMM의 결과가 실험 치와 연구모형보다 약 120초 정도 빠르게 나타내고 있으며, 침투수심은 약 0.041m~0.059m 과소 산정됨을 표 2에 나타내었다. 이는 SWMM에 의한 관저흐름해석 시 맨홀을 단순한 노드(node)로 간주 하여 노드(맨홀)의 형상과 크기를 반영하지 못하기 때문이라 판단된다.

그러나 본 연구모형은 Eq. (7)에서 각각의 맨홀 수심을 구함에

있어 맨홀의 형상과 크기를 고려 할 수 있어 보다 실측치에 가깝게 모의 할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 결과는 과부하 맨홀의 수심 산정 시 손실계수를 고려하지 않을 경우 맨홀 내 수심이 과소평가되어 맨홀로부터의 과부하 월류량 산정과 관거의 배수 능력 및 침수 발생 여부 평가 시에 상이한 결과를 보일 수 있음을 나타내고 있다. 그러므로 과부하 맨홀의 에너지 손실에 의한 수심의 변화를 해석할 때와 과부하 맨홀로부터의 월류량에 의한 침수수심과 침수면적 산정 시 맨홀의 형상과 크기 등을 반영할 수 있는 수치모형이 필요하므로 본 연구에서 개발된 모형은 보다 실제적인 도심의 침수범위 예측에 사용 가능하다 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 관거 시설의 구조물 설치에 의해 발생하는 국부손실의 영향을 고려하여 관거 시설에서의 흐름해석이 가능한 수치모형을 개발하였다. Surge Tank 이론을 적용하여 개발된 수치모형은 과부하 연속맨홀의 수심을 계산할 수 있도록 하였다. 또한 연속맨홀의 부정류 조건에서 손실계수를 산정한 Merlein(2000)의 결과와 본 연구에서 실시한 실험 및 수치모의 결과를 비교·검증하여 모형의 적용성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 개발된 수치모형의 적용성을 판단하기 위하여 Merlein의 실험값과 비교한 결과 맨홀의 수심은 수치모형의 수심이 Merlein의 수심보다 약간 큼을 보이고 있으나, 맨홀 내 수심이 상승하여 침두수심까지의 변화는 비교적 잘 모의 하고 있으며 수심의 하강부에서는 실험값 보다 약간 작게 산정되었다.
- (2) 맨홀 수두에 대한 속도수두 회귀식의 경사를 이용한 평균손실계수를 반영할 경우 과부하 맨홀의 수심 변화의 양상은 본 연구의 수리실험 결과와 전반적으로 일치하였으나, 침두수심은 약 4.1%~9.8%의 오차를 보였다. 이는 수심변화에 따른 손실계수를 적용하지 못한 결과로 판단되므로 향후 수심변화에 따른 손실계수의 적용이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 도시유출 해석 시 실무에 광범위하게 이용되는 SWMM은 맨홀의 크기 및 형상을 고려하지 못하므로 맨홀에서 침두수심의 도달시간이 본 연구의 계산결과 및 실험결과에 비해 빠르게 나타내었다. 그러나 본 연구의 수치모형은 맨홀에서의 국부손실 고려할 수 있으므로 도시 관거 흐름해석에 보다 정밀한 결과를 도출할 수 있다. 따라서 도시배수 시스템의 합리적인 평가에 있어 본 연구에서 제시한 수치모형이 사용 가능하다 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Chaudhary, M. H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Co., Yew York, U.S.A.
- Djordjevic, S., Prodanovic, D., Maksimovic, C. (1999). "An approach to simulation of dual drainage." *Water science and technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 95-103.
- France, P. W. (1977). "A comparison between experimental and numerical investigations of the motion of the water surface in a model surge tank." *Advances in water resources*, Vol. 1, No. 1, pp. 49-51.
- Gan, G, Riffat, S. B. (2000). "Numerical determination of energy losses at duct junctions." *Applied Energy*, Vol. 67, pp. 331- 340.
- Hager, W. H. (1992). "Discussion of Dividing flow in open channels." *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 4, pp. 634-637.
- Kim, J. S., Song, J. I and Yoon, S. E (2008). "An Experimental Study for Drainage Capacity Increment at Surcharged Square Manholes." *Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 22, No. 6, pp. 619-625 (in Korean).
- Lee, J. T. (2005). *Analysis of Urban Runoff Model for Practical Issues and Applied Examples*, Report R&D/03 C01-01, Urban Flood Disaster Management Research Center, Seoul, Korea (in Korean).
- Merlein, J. (2000). "Flow in submerged sewers with manholes." *Urban Water*. Vol. 2, pp. 251-255.
- Ministry of Environment (2005). *Sewage Design and Construction Manual* (in Korean).
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual version 5.0*. U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>.
- Weber, L., Schumate, E. D., Mawer, N. (2001). "Experiments on flow at a 90° open-channel junction." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 340-350.
- Wylie, E. B., Streeter, L. (1978). *Fluid Transients*. Mc Graw Hill, New York, U.S.A.
- Zhao, C. H., Zhu, D. Z., Rajaratnam, N. (2008). "Computational and experimental study of surcharged flow at a 90° combining sewer junction." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 6, pp. 688-700.