

과부하 맨홀의 손실계수를 고려한 도시지역 침수해석

Inundation Analysis in Urban Area Considering of Head Loss Coefficients at Surcharged Manholes

이 원* / 김 정 수** / 윤 세 의***

Lee, Won / Kim, Jung Soo / Yoon, Sei Eui

Abstract

In general, XP-SWMM regards manholes as nodes, so it can not consider local head loss in surcharged manhole depending on shape and size of the manhole. That might be a reason why XP-SWMM underestimates inundated-area compared with reality. Therefore, it is necessary to study how we put the local head loss in surcharged manhole in order to simulate storm drain system with XP-SWMM. In this study, average head loss coefficients at circular and square manhole were estimated as 0.61 and 0.68 respectively through hydraulic experiments with various discharges. The estimated average head loss coefficients were put into XP-SWMM as inflow and outflow energy loss of nodes to simulate inundation area of Gunja basin. Simulated results show that not only overflow discharge amount but inundated-area increased considering the head loss coefficients. Also, inundation area with considering head loss coefficients was matched as much as 58% on real inundation area. That was more than simulated results without considering head loss coefficients as much as 18 %. Considering energy loss in surcharged manholes increases an accuracy of simulation. Therefore, the averaged head loss coefficients of this study could be used to simulate storm drain system. It was expected that the study results will be utilized as basic data for establishing the identification of the inundation risk area.

Keywords : storm drain system, inundation area, head loss coefficient, surcharged manhole

요 지

일반적으로 XP-SWMM은 맨홀을 하나의 절점으로 간주하여 절점의 형상과 크기에 따른 국부손실의 영향을 고려하지 못하기 때문에 침수면적을 과소 산정한다. 그러므로 과부하 맨홀 내에서의 손실계수를 고려한 해석 방안 및 손실계수의 적용에 따른 침수해석에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 유량변화 및 맨홀 형상 변화에 따른 수리실험을 실시하여, 과부하 맨홀(원형, 사각형)에서의 손실계수를 각각 0.61과 0.68로 산정하였다. 또한 XP-SWMM을 이용하여 군자배수분구를 대상으로 산정된 손실계수의 적용 유무에 따른 침수면적의 변화특성을 분석하였다. 분석 결과 손실계수를 적용하면 침수면적이 3.5ha 증가하는 것으로 나타났다. 이는 손실계수 적용에 따라서 맨홀에서의 월류량이 증가하기 때문이다. 대상유역에 손실계수를 적용하였을 경우 실제 침수면적과의 일치율은 약 58%로 나타났으며, 손실계수를 고려하지 않았을 경우의 일치율은 약 40%로 나타났다. 그러므로 과부하 맨홀에서의 손실계수를 고려한 2차원 침수해석의 결과는 도시지역의 침수 위험지역을 정확하게 파악하기 위한 기초적인 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 배수시스템, 침수면적, 손실계수, 과부하맨홀

* 승우엔지니어링 사원 (e-mail: leewon86@nate.com)

Employee, Room 205, Seongji Starwith, 38, Heungan-daero 427beon-gil, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, Korea

** 교신저자, 부천대학교 토목과 조교수 (e-mail: hydroguy@naver.com, Tel: 82-32-610-3310)

Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bucheon Univ., Bucheon 420-735, Korea

*** 경기대학교 토목공학과 교수 (e-mail: syoon@kyonggi.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Suwon 443-760, Korea

1. 서 론

급격한 도시화와 산업화에 의해 고도로 개발된 도시지역은 불투수지역의 증대 및 표면조도의 감소에 따라 도시홍수량의 도달시간을 감소시키고 침투유출량을 증가시켜 도시지역의 침수피해를 증가시키는 요인이 되고 있다. 또한 기존 관거 시설의 설계빈도를 상회하는 집중호우가 반복적으로 발생함에 따라 기 설치된 관거시설의 저류 및 배제능력을 급격하게 저하시켜 외수범람에 의한 침수피해보다 내수침수에 따른 침수피해가 증가하고 있다. 이와 같은 내수침수 피해를 저감하기 위한 대책으로 관거시설의 설계빈도를 상향시키거나 우수유출 저감시설의 설치 및 대심도 빗물저류시설의 계획 등의 많은 도시침수 저감 대책이 세워지고 있다. 그러나 기 설치된 관거의 배수능력을 정확하게 판단하고 적재적소에 유출저감 시설을 설치하기 위한 평가방법은 미흡한 실정이며, 특히 기존의 모든 관거시설은 개수로 상태로 계획하고 설계되어 과부하 관거 유출에 대한 고려 및 과부하 관거시설의 흐름변화에 대한 연구가 미미한 상황이다. 그러므로 현재 관거시설의 배수능력 평가 및 저류시설의 적절한 설계와 시공을 위하여 과부하상태를 고려한 도시유출 현상을 비교적 정확하게 모의하고 보다 실제적인 도시침수 분석에 따른 내수침수 대책이 필요한 실정이다.

현재 국내에서는 도시유출 및 침수 분석에 관하여 널리 사용되는 모형들 중에서 표면유출 및 관거의 흐름해석과 2차원 침수해석이 가능한 XP-SWMM 모형이 많이 사용되고 있다. EPA SWMM 엔진 기반의 XP-SWMM 모형은 도시지역의 하수 및 우수관망 해석과 침수모의가 가능한 해석 프로그램으로 XP-SWMM 2010 버전부터 TUFLOW 엔진의 도입으로 1차원과 2차원 분석을 동시에 수행할 수 있다. 그러나 XP-SWMM 모형은 맨홀을 하나의 절점(node)으로 간주하여 절점의 형상과 크기에 따른 흐름변화와 절점 내의 에너지 손실변화를 직접적으로 고려할 수 없으므로 관거의 경사에 의한 관거 유출해석 시에 손실계수를 절점으로 입력하는 형태를 권장하고 있다(XP Solution, 2013). 이에 따른 도시지역 배수시스템의 설계 및 관거 능력 평가를 위하여 XP-SWMM 모형의 침수모의를 실시할 경우 과부하 맨홀에 손실계수의 적용 시와 미적용 시에 침수 범위의 차이가 상이함에도 불구하고 일반적으로 맨홀의 손실계수를 알 수 없기 때문에 손실계수를 고려하지 않고 관로의 조도계수 등을 이용하여 모형을 검증하고 있다. 이와 같이 국내에서 일반적으로 사용되는 XP-SWMM 모형 뿐 아니라 기존에 개발된 도시유출 관거 해석 모형들

은 맨홀의 크기 및 형상 등을 반영하지 못하여 맨홀 설치에 따른 국부손실의 영향을 고려하지 못하고 있으며, 손실계수의 적용에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 그러므로 XP-SWMM 모형을 통한 침수 면적 분석 등을 보다 실제적으로 추정하기 위하여 관거해석으로 부터 월류량 산정에 있어서 과부하 맨홀 등에서 발생하는 에너지 손실을 고려할 수 있는 도시지역의 내수침수 해석에 대한 구체적인 연구 및 맨홀 등의 관거시설을 고려한 내수침수 해석의 기준이 필요하다.

SWMM 모형을 이용한 도시지역에서의 침수해석에 관련한 연구를 살펴보면, Hsu et al. (2000)은 SWMM 모형을 이용하여 관망의 절점에서 잉여수에 의해 발생하는 침수에 대하여 모의하였으며, Phillips et al. (2005)은 도시지역 배수시스템의 2차원 침수해석을 위하여 XP-SWMM 모형과 TUFLOW 엔진의 연계를 통하여 도시 침수해석에 관한 2차원 침수해석의 적용성을 증명하였다. Smith et al. (2006)은 도시지역에서의 홍수에 의한 침수구역을 소유역별로 분할하여 모의하고 배수구역을 구역별로 결정하였으며, Rangarajan et al. (2008)은 미국 버지니아의 대상유역에 XP-SWMM과 TUFLOW 엔진의 연계를 통한 2차원 홍수해석의 효과를 입증하였다. 국내에서는 Choi et al. (2004)이 XP-SWMM을 활용하여 인천교 매립지 주변의 침수개선을 위하여 우수지 수위와 관내 역류 등의 현상을 고려하면서 대안을 설정하여 해석함으로써 침수 개선의 대안을 제시하였다. Beak et al. (2005)은 XP-SWMM에 의한 관로해석과 수리모형 실험비교에서 일반적인 개수로 흐름에 의한 해석이 아닌 관로의 만수에 따른 관수로의 흐름 지배를 받는 경우 해석의 정확성을 검증하기 위해 수리학적 거동 특성을 수리모형 실험과 수치모의를 이용하여 비교하였다. Lee et al. (2006)은 SWMM 모형과 DEM기반 침수해석 모형과의 연계모형을 개발 및 적용함으로써 배수시스템의 용량을 초과한 강우가 발생하거나 외수위 상승으로 인한 배수불량시 발생하는 월류 유량에 대하여 시간별 침수심 및 침수범위를 계산하였다. Lee and Yeon (2008)은 XP-SWMM 모형을 이용하여 도시지역의 침수심 및 침수면적을 모의하고 주요 시간대별 건물의 영향에 따른 침수범위 분석을 하였다. Kim et al. (2010)은 SWMM 모형을 통하여 유출해석 및 월류량을 계산에 따른 2차원 침수해석을 실시하여 지하저류조의 설치에 따른 침수저감효과에 관한 연구를 수행하였으며, Ahn et al. (2014)은 경사에 따른 노면류의 유입효율을 고려할 수 있는 1차원 우수관망 레이어를 추가하는 유역중첩법을 고안하고 적용하여 분지형 도시유역(사당천유역)

의 노면류를 고려한 침수모의를 실시하였다. 이와 같이 국내외 많은 연구에서 도시 지역의 침수모의를 보다 실제적으로 분석하기 위하여 연구하고 있으나, 기존의 도시 지역의 유출 및 침수해석 시에 관거시설이 과부하가 됨에 따른 에너지 손실의 적용 방안이나 과부하 관거흐름에서 맨홀의 크기 및 형상의 변화에 따른 에너지 손실이 통수 능력에 미치는 영향에 대한 분석 연구가 미진한 실정이며, 특히 침수해석에서 과부하 관거시설(맨홀)의 손실계수 적용에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 과부하 맨홀에서 발생하는 손실 계수를 수리실험을 통하여 산정하고 산정된 손실계수를 도시 지역 침수모의에 직접 적용하였다. 과부하 관거에서의 손실계수 적용은 일차적으로 XP-SWMM의 유출 해석을 통하여 과부하 관거를 추정하고 추정된 과부하 관거에 산정 손실계수를 적용하여 재유출해석을 실시하였다. 재유출해석 결과를 이용하여 2차원 침수해석을 실시하였으며, 모의된 대상 지역의 침수범위는 Seoul Safety Nuri (2013)에서 제시된 침수범위도와 비교하였다. 대상 도시 지역의 실제 침수면적과 모의된 침수면적을 비교 분석함으로써 XP-SWMM 모형의 2차원 침수해석에서 보다 합리적인 침수 범위를 산정 및 손실계수의 적용성을 검토하였다.

2. 중간맨홀에서의 손실계수 산정

2.1 맨홀의 손실

일반적으로 맨홀에서의 과부하는 맨홀과 연결된 연결관의 관경 높이에서부터 맨홀을 월류하지 않는 맨홀 상단고까지 관거 유량이 만관 상태로 흐름이 지속되는 현상이며, 본 연구에서는 유입관과 유출관이 만관이 되어 맨홀의 수심이 연결관의 관경보다 상승할 때부터 과부하 상태의 시점으로 가정하였다. 이와 같은 과부하 상태의 맨홀 내부에 와류 흐름의 영향으로 수면이 요동치는 현상에 의해 손실이 발생한다(Kim, 2010). 과부하 맨홀에서의 손실계수를 산정하기 위하여 Sangster et al. (1958)은 맨홀 입·출구부에서의 흐름의 연속방정식과 운동량 방정식으로부터 손실수두계수를 산정하는 Eq. (1)을 제안하였으며, Eq. (1)은 이후 Marsalek (1984), Bo Pederson and Mark (1990), Shinji and Tetsuya (1998) 등에 의하여 맨홀 내부의 손실계수 산정에 사용되었다.

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

여기서, Δh 는 맨홀 입·출구부의 수두차, K 는 맨홀내부의 손실계수, V 는 관거 평균유속이다(Fig. 1).

2.2 수리실험

XP-SWMM 모형에 과부하 맨홀에서의 손실계수 적용을 위해서는 수리실험을 통한 실측 손실계수의 산정이 필요하다. 본 연구에서는 과부하 맨홀의 손실계수 산정을 위하여 우수배수관거에 주로 사용되는 원형과 사각형 맨홀을 대상으로 수리모형 실험을 실시하였다. 맨홀은 하수도시설기준(Ministry of environment, 2011)에서 제시된 표준(원형) 1호 맨홀과 특(사각형) 1호 맨홀의 제원을 선정하여 1/5로 축소모형을 제작하였으며, 맨홀과 연결되는 연결관거도 1/5로 축소하여 수리실험 모형을 제작하였다(Fig. 2).

Fig. 2와 같이 맨홀과 접합하는 유입 및 유출관의 길이는 450 cm로 하였으며, 맨홀과 접합된 관에 30 cm 간격으로 액주계를 설치하여 관거 내의 압력 변화를 측정하였다. 특히, 맨홀과 접합된 유입·유출관의 전후에는 10 cm 간격으로 액주계를 설치하여 보다 정확한 압력 변화를 측정하였다. 유출관거의 하류단에는 폭 90 cm, 넓이 80 cm, 높이 70 cm의 차집통을 설치하여 실험유량을 측정하였다. 유량 변화에 따른 손실계수의 변화를 측정하고 평균손실계수를 산정하기 위하여 실험 유량은 0.001~0.003 m³/sec

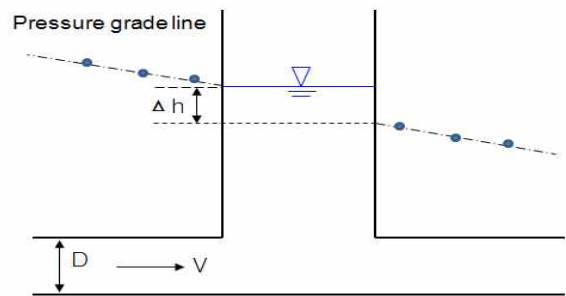


Fig. 1. Head Loss at Manhole (Kim et al., 2008)



Fig. 2. View of Experimental Apparatus

로 변화시켰다. 실험유량의 산정 기준은 하수도시설기준 (Ministry of environment, 2011)에 제시된 우수관거에서의 이상유속(1.0 m/sec)일 때의 유량을 최소유량으로 선정하고, 맨홀의 상판 높이인 2.0m를 월류하지 않는 유량을 최대유량으로 선정하였으며, 선정된 유량에 Froude 상사법칙을 적용하여 1/5 축소 수리모형에서의 최소유량과 최대유량으로 계산하였다(Table 1).

2.3 손실계수 산정

과부하 맨홀에서의 손실수두 값(Δh)과 유입유량으로부터 계산된 관평균 유속을 식 (1)에 적용하여 맨홀 수심(h)과 유입관경(D)의 비(h/D) 변화에 따른 맨홀에서의 손실계수를 산정하였으며, 유입량 변화에 따라 산정된 중간맨

홀에서의 손실계수 변화는 Fig. 3과 같다.

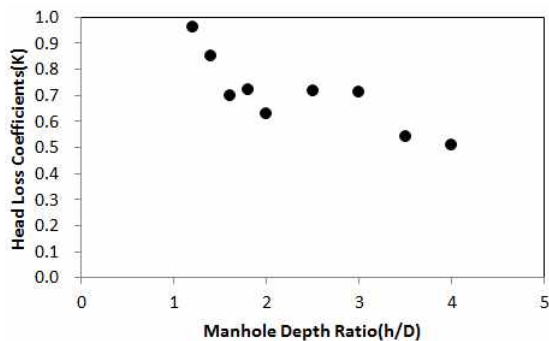
중간 맨홀에서의 평균 손실계수를 산정하기 위하여 실측된 손실수두(Δh)와 속도수두와의 관계로 Fig. 4와 같이 나타내었으며, Fig. 4에서 원형 및 사각형 중간 맨홀에서의 평균 손실계수를 각 회귀선의 경사로 산정된다. 산정된 평균 손실계수는 원형 맨홀에서 0.61, 사각형 맨홀에서 0.68로 각각 계산되었다.

3. 내수침수해석에서의 손실계수 적용

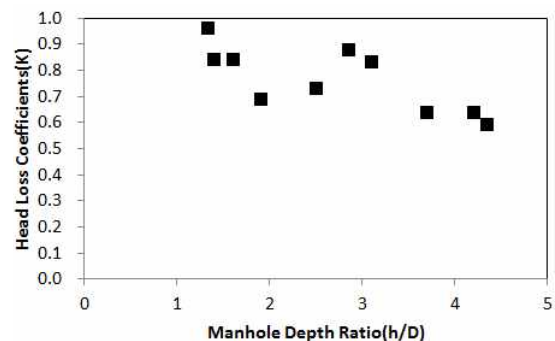
일반적으로 내수침수해석 시에 사용되는 XP-SWMM의 2차원 침수해석에서는 과부하 관거에서 발생하는 관거 시설물에 대한 소손실을 고려하지 않고 침수모의를 수행

Table 1. Experimental Conditions of Batch Reactor Operation

Manhloe Shape	Manhole Size (mm)	Pipe Diameter (mm)	Up/Downstream Length (cm)	Discharge (m ³ /sec)	Flow
Square	180×180	60	450	0.001~0.003	Steady
Circular	180				

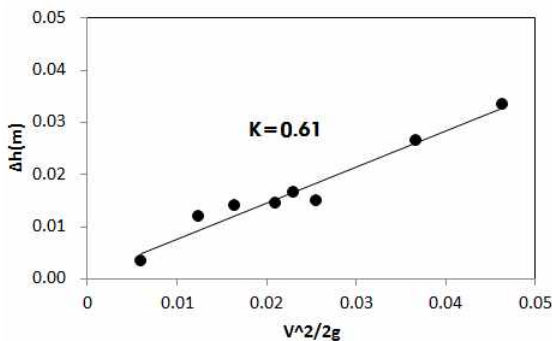


(a) Circular Manhole

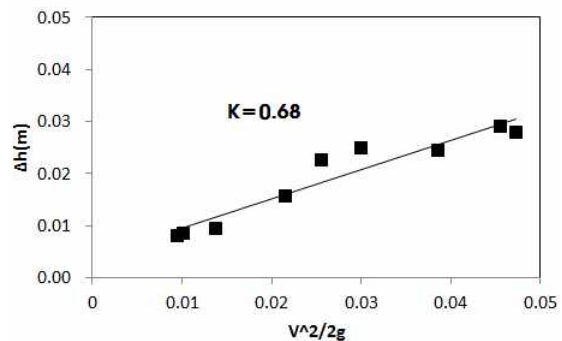


(b) Square Manhole

Fig. 3. Relationship between Head Loss Coefficient (K) and Manhole Depth Ratio (h/D)



(a) Circular Manhole



(b) Square Manhole

Fig. 4. Relationship between Head Loss (Δh) and Velocity Head ($V^2/2g$)

하고 있다. 그러나 현재 XP-SWMM 모형을 통한 도시구역의 침수범위 분석을 실시 할 경우에 과부하 관거 시설인 맨홀에서의 손실계수의 적용과 미 적용시의 침수범위의 차이가 크에도 불구하고 맨홀의 손실계수를 알 수 없기 때문에 손실계수를 고려하지 않고 관로의 조도계수 등을 이용하여 모형을 검증하고 있는 실정이다. 이와 같이 XP-SWMM 모형을 이용하여 도시지역의 관거 성능 및 침수영향 평가를 할 경우 과부하 맨홀에 손실계수를 적용하면 과부하 맨홀뿐만 아니라 주변 맨홀에도 영향을 주어 과부하가 추가로 발생하며, 기존의 과부하 맨홀 중 일부는 수두가 상승해 월류가 발생하는 것으로 모의된다. 이는 도시구역의 기존 관거의 배수능력 및 침수 발생 여부 평가 시 과부하 맨홀에서의 손실계수 적용 여부에 따라 평가 결과가 상이할 수 있음을 의미한다. 그러므로 빈도별 내수침수 해석을 통한 내수재해위험지구 선정 및 예방대책을 제시하고 있는 풍수해저감종합계획 및 우수저류조 설치 사업 등에서의 침수해석에서는 과부하 맨홀에서의 에너지 손실을 고려한 내수침수해석이 필요하다.

일반적으로 XP-SWMM에서는 맨홀을 하나의 노드로 간주하여 관망을 구성하므로 맨홀 구조물 자체에서 발생하는 손실을 반영할 수 없다. 이에 본 연구에서는 노드 전후의 과부하 관거의 입구와 출구 손실계수로 적용함으로써 맨홀의 손실계수를 대체하는 방법을 선택하였다.

또한 손실계수를 입구손실에 적용한 경우와 출구손실에 적용한 경우, 입구손실과 출구손실을 각각 동일하게 나누어 적용한 경우 모두 동일한 모의결과를 보였다. 따라서 입구손실과 출구손실에 나누어 고려하는 것이 보다 합리적이라고 판단하였다. 손실계수를 고려한 침수분석의 절차는 Fig. 5와 같다. 손실계수를 적용한 침수범위 모의절차는 일반적으로 실무에서 활용하는 XP-SWMM의 2차원 침수모의의 방법과 동일하다. 그러나 1차적으로 유

출해석을 시행한 뒤 모의된 결과 내에 링크 단면도를 확인하여 과부하 관거를 추정하고, 추정된 과부하 관거에 대하여 손실계수를 적용하여 2차원 침수범위 분석을 시행하는 절차가 추가된다.

4. 침수범위 분석 시 손실계수의 영향 분석

4.1 XP-SWMM 모형의 매개변수 보정

본 연구에서는 과부하 맨홀의 손실계수를 적용하여 내수침수해석을 실시하기 위하여 서울시 광진구의 군자배수분구를 선택하였다. 군자배수분구는 군자역을 중심으로 하여 한강으로 유출되는 배수분구로 유역면적은 199 ha이고, 2010년 군자역을 중심으로 19.2 ha의 면적이 침수된 이력을 가지고 있다. 또한, 유출량을 실측한 자료가 있기 때문에 실측치와 모의치의 비교가 가능하다고 판단되어 대상유역으로 선정하였다.

XP-SWMM 모형의 1차원 관망구성을 위하여 서울특별시로부터 제공받은 군자 배수유역의 관망자료와 수치지도를 이용하였다. 본 연구를 위해 199 ha의 면적인 배수유역을 46개의 소유역으로 나누었으며, 47개의 노드와 46개의 링크로 구성하였다(Fig. 6). XP-SWMM 모형에서 2차원 침수범위를 분석하기 위하여 군자배수분구를 중심으로 한 1:5,000 축척의 수치지도를 통해 작성한 DTM(Digital Terrain Model)을 이용하여 지표면 자료를 구축하였다. 대상 유역의 수치지도로부터 표고값 속성을 가지고 있는 등고선(7111, 7112)과 표고점(7113) 레이어를 선택하여 Shape 파일을 생성한 후 TIN(Triangular Irregular Network)을 구축하고 XP-SWMM 상에서 DTM으로 변환하여 지형자료를 구축하였다. 격자는 1.5×1.5 m 크기의 셀, 약 10,000여개로 구성하여 DTM의 범위에 맞게 적용하였다.

XP-SWMM 모형의 보정은 서울시 상수도연구원에서 군자 배수유역을 대상으로 최종 배출구 지점(MH47)에 유량계를 설치하여 실측한 유출량 자료를 활용하였다. 군자배수구역 관망의 최하단 방류구 지점에서 실측된 Fig. 7의 2010년 6월 12일 강우사상의 유출량을 이용하여 XP-SWMM 모형의 보정을 수행하였다.

Fig. 8은 보정에 따른 2010년 6월 12일 강우에 대한 대상지역인 군자 배수유역의 최종 방류구 지점(MH47)의 실측수문곡선과 모의수문곡선의 비교 결과를 나타내고 있다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 실측된 침투 유출량은 2.1 m³/sec이며, 모의된 침투 유출량은 2.3 m³/sec로 실측 침투유량과 모의 침투유량의 상대오차가 약 10% 정도의 양

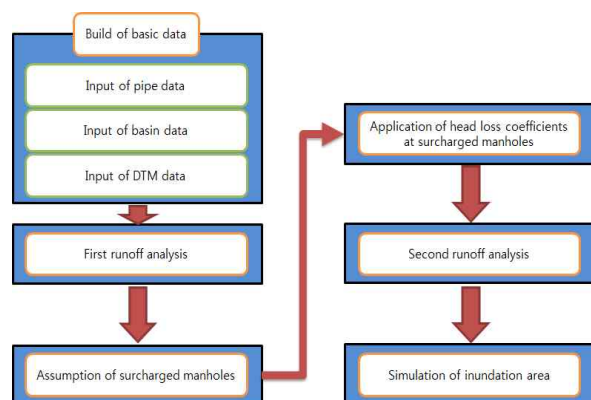


Fig. 5. Flowchart of Inundation Area Simulation

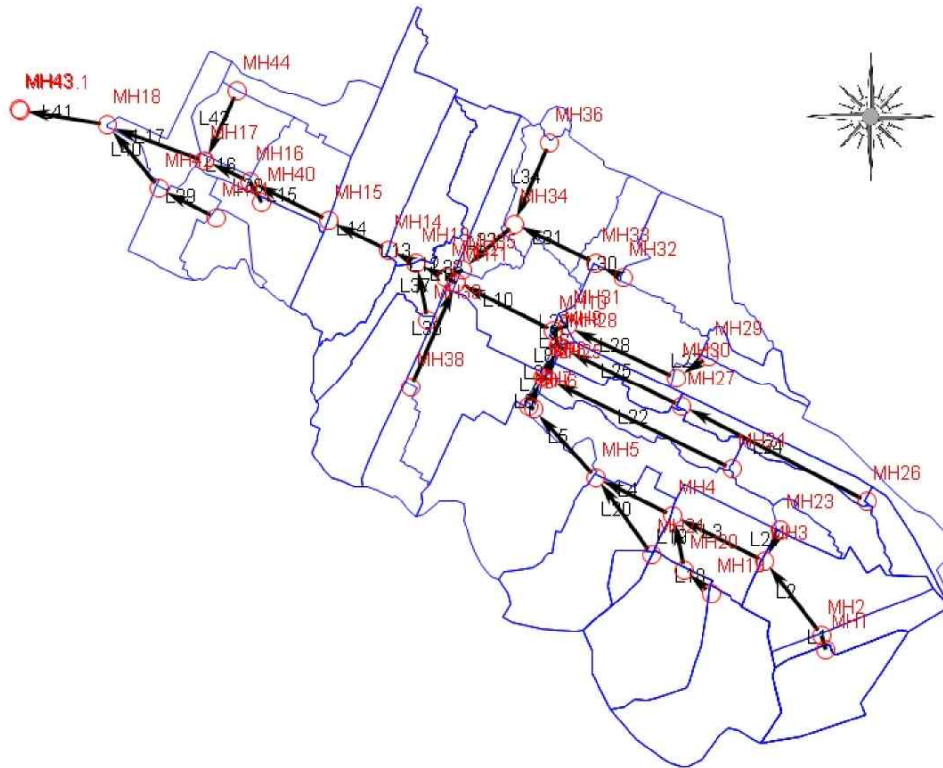


Fig. 6. Drainage System of Gunja Basin

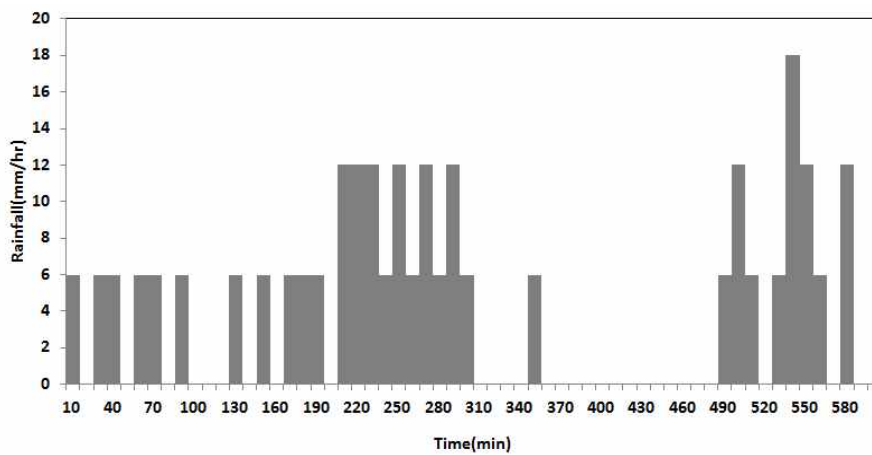


Fig. 7. Hyetograph at Seoul AWS (2010. 6. 12)

호한 오차를 보이고 있으며, 보정 강우사상에 대한 유출 수문곡선으로서 모의치가 실측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. Table 2는 보정사상인 2010년 6월 12일 사상을 이용하여 XP-SWMM 모형의 주요매개변수에 대한 보정결과를 나타낸 것이다. 여기서, SWMM 모형의 매개변수는 지형학적 인자와 수문학적 인자로 구분되며, 지형학적 인자는 1/1,000 지형도와 GIS를 활용하였으므로 측량오차의 범위를 고려하여 오차범위를 $\pm 5\%$ 로 설정하

였으며, 수문학적 인자는 사용자의 주관적인 판단과 동일 재질에 따른 범위가 크므로 수정 범위를 해당 변수의 하한값에서 상한값까지 활용하였다.

4.2 손실계수 적용 유무에 따른 침수범위 분석

도시 유출 모형을 이용하여 도시지역의 침수범위를 분석할 경우 과부하 맨홀에 손실계수를 적용하면 과부하 맨홀뿐만 아니라 주변 맨홀에도 영향을 주어 과부하가 추가

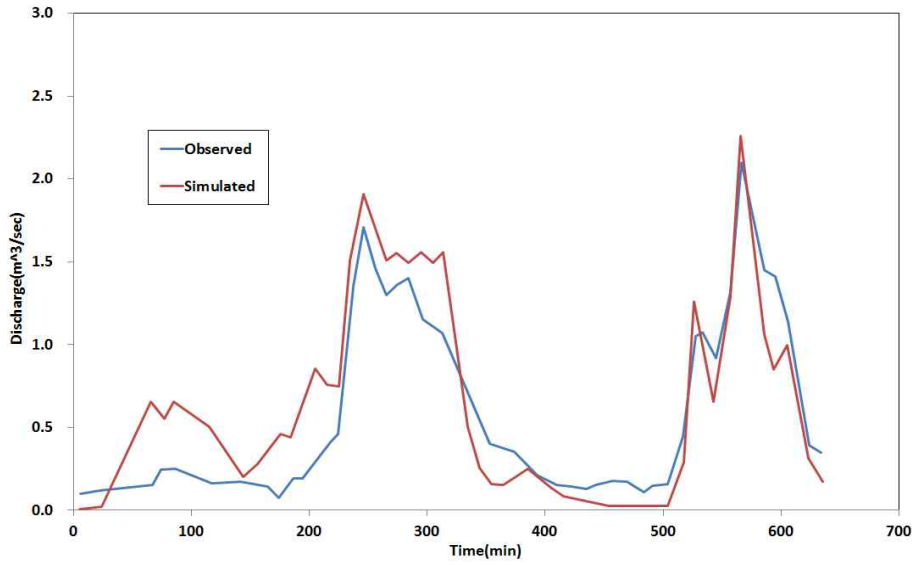


Fig. 8. Comparison of Observed Discharge and Simulated Discharge

Table 2. Correction Results of Major Parameters

Parameters	Variable identifier	Initial value	Correction value	Correction Range
x1	Manning roughness of impervious area	0.013	0.015	0.013~0.035
x2	Depression storage of impervious area(mm)	35	50	13~80
x3	Ultimate infiltration rate(Horton's)(mm/hr)	5	10	3.8~11.4
x4	Infiltration decay rate(Horton's)(1/sec)	0.0005	0.0005	0.0005
x5	Sub-catchment width(m)	25.0~1184.24	25.0~1207.24	±5%
x6	Percent impervious area(%)	16.4~100	16.4~100	±5%
x7	Sub-catchment slope	0.002~0.108	0.002~0.108	±5%

로 발생하여 기존 과부하 맨홀 중 일부의 월류에 따른 침수범위가 보다 증대되는 것으로 모의된다. 이와 같이 손실계수 적용 유무에 따른 실제 침수범위와의 비교를 위하여 Fig. 9의 2010년 9월 21일 대상구역에 침수피해를 입힌 집중호우의 실제 강우를 이용하여 유출분석 및 침수분석을 실시하였다.

Fig. 9의 강우사상은 지속기간 12시간의 총 강우량 260.5 mm의 강우로 100~200년 정도의 재현기간을 가지는 강우였으며, 이 강우는 2010년 당시 수도권을 중심으로 광화문 사거리, 강서구 화곡동, 양천구 신월동, 관악구 사당사거리 등에 심각한 침수피해를 남겼다. XP-SWMM으로 모의된 침수범위와 군자 배수구역의 실제 침수범위의 변화를 분석하기 위하여 Seoul Safety Nuri (2013)에서 제공하는 2010년 9월 21일 강우사상에 따른 실제 침수범위를

선택하여 비교하였다(Fig. 10).

Fig. 11(a)는 2010년 9월 21일 강우사상에 따른 XP-SWMM으로 모의된 침수 범위와 실제 침수 범위를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 11(a)에서 군자역을 중심으로 하는 침수범위의 형태는 비슷하게 나타나지만, 침수면적은 7.6 ha로 모의되어 실측된 침수면적 19.2 ha와 비교하였을 경우 침수범위가 과소 산정되는 것으로 판단되며, 이를 실측 침수범위와 모의 침수범위의 침수면적의 일치율은 약 40% 정도로 나타났다.

손실계수의 적용에 따른 침수범위의 변화를 모의하기 위하여 과부하 관거의 입구손실과 출구손실에 손실계수를 적용함으로써 맨홀의 손실계수를 대체하는 방법을 선택하였다. 이는 XP-SWMM 내에서 맨홀은 한 개의 절점으로 처리되어 맨홀 내에서의 에너지 손실을 고려할 수

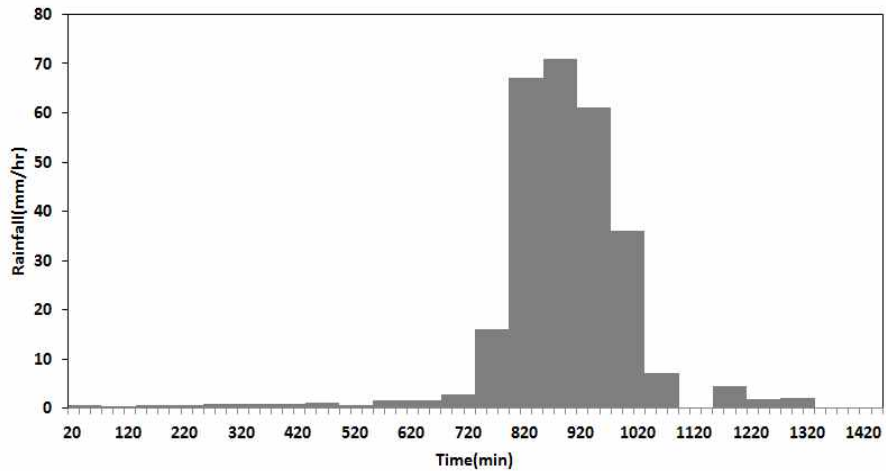


Fig. 9. Hyetograph at Seoul AWS (2010. 9. 21)



Fig. 10. Observed Inundation Area of Gunja Drainage Basin (2010, Seoul Safety Nuri (2013))

없기 때문이다. 과부하 맨홀에 손실계수를 적용하기 위하여 1차적으로 모의한 XP-SWMM 결과에서 링크의 동적 단면도를 확인하여 과부하 관거를 추정하였으며, 추정된 과부하 관거의 노드를 동적 흐름 해석으로 입구/출구 손실의 에너지 손실계수를 입력하였다. 군자배수분구의 모의 관망도에서 맨홀은 모두 원형 맨홀이 설치되어 있으므로 3.2절에서 산정한 과부하 원형 맨홀의 평균손실계수인 0.61을 입구손실에 0.31, 출구손실에 0.30으로 적용하여 침수범위를 재산정 하였으며 결과는 Fig. 11(b)와 같다.

손실계수 0.61을 적용한 결과 Fig. 11(b)와 같이 군자역을 중심으로 하는 침수범위의 형태를 비교적 유사하게 나

타내고 있으며, 침수면적은 11.1 ha로 모의되어 실측된 침수면적 19.2ha와 비교하였을 경우 약 58%의 일치율을 보였다. 손실계수를 고려하지 않은 경우의 침수면적인 7.6 ha와 비교하면, 실측 침수면적의 일치율이 약 18% 이상 증가하는 것으로 나타났다(Table 3). 그러므로 과부하 맨홀에서 손실계수를 고려하지 않고 XP-SWMM 모형으로 예측한 침수범위는 실제 침수범위와 큰 차이를 나타내고 손실계수를 적용하여 예측하면 실제 침수범위에 보다 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 실무에서 XP-SWMM 모형을 이용하여 도시구역의 침수범위 등을 계산할 경우 과부하 맨홀의 손실계수의 적용성 및

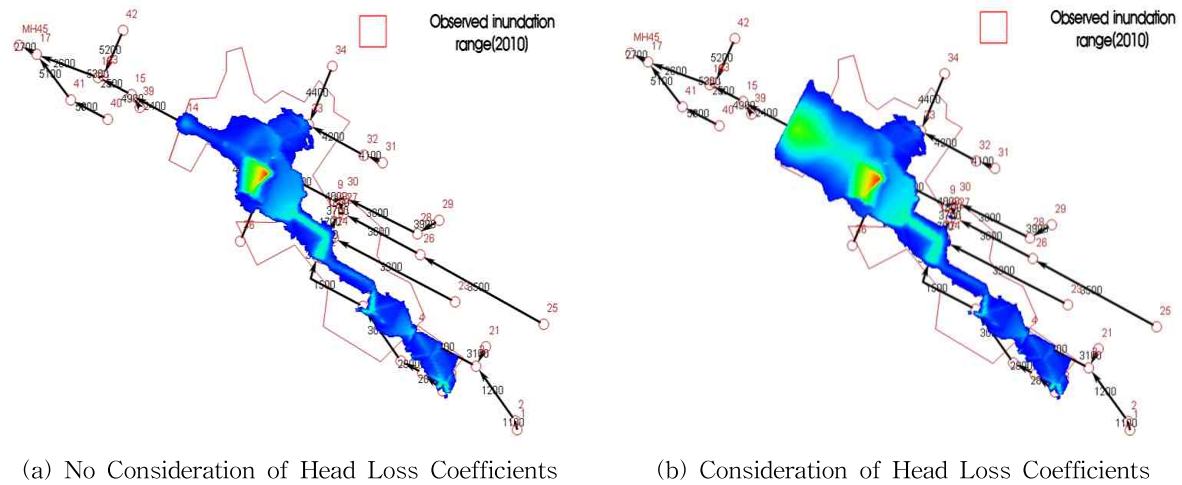


Fig. 11. Comparison of Observed and Simulated Inundation Area

Table 3. Change of Inundation Area by Application of Head Loss Coefficients

Head Loss Coefficients	Number of Flooded Cells	Simulated Area (ha)	Observed Area (ha)	Rate of Concordance (%)
without-Consideration	1901	7.6	19.2	39.6
with Consideration	2664	11.1	19.2	57.8

필요성을 확인하였으며, XP-SWMM을 통하여 도시구역의 침수범위 분석을 실시할 경우 손실계수를 적용함에 따라 보다 실제적인 침수범위의 분석이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 도시 구역의 유출 및 침수해석 시에 과부하 맨홀에서 에너지 손실의 적용 및 손실계수 적용에 따른 침수면적의 변화를 분석하기 위하여 원형 및 사각형 맨홀에서의 평균 손실계수를 수리 실험을 통하여 산정하였다. 산정된 손실계수를 XP-SWMM의 과부하 맨홀에 적용하여 군자배수구역의 침수면적을 모의하고 이를 실제 침수면적과 비교하였다. 또한 과부하 맨홀에서의 에너지 손실이 도시지역 침수범위의 모의에 미치는 영향 및 적용성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 유입유량 및 맨홀의 형상의 변화가 가능한 수리실험을 실시하여 맨홀 수심과 유입관경의 변화에 따른 맨홀에서의 손실계수를 산정하였으며, 실제 손실수두와 속도수두의 관계를 이용하여 과부하 중간(원형 및 사각형) 맨홀의 평균 손실계수를 각각 0.61과 0.68로 산정하였다.

- 2) XP-SWMM 모형에서 과부하 맨홀에서 발생하는 손실의 적용 방안 및 과부하 관거 시설에 손실계수를 적용하여 도시지역의 2차원 침수범위 분석을 위한 모의 절차를 제안하였으며, 군자 배수구역을 대상으로 적용한 결과 과부하 맨홀에서의 손실계수를 고려한 경우와 손실계수를 고려하지 않은 경우와의 침수면적을 비교하면, 고려한 경우가 침수면적의 일치율이 약 18% 이상 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 과부하 맨홀에서 손실계수를 고려하지 않고 XP-SWMM 모형으로 예측한 침수범위는 실측치와 큰 차이를 보이고 있으나, 과부하 맨홀의 손실계수를 적용하면 실제 침수범위에 보다 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 실무에서 XP-SWMM 모형을 이용하여 도시구역의 침수범위 등을 계산할 경우 과부하 맨홀의 손실계수의 적용성 및 필요성을 확인하였다.
- 4) XP-SWMM에서의 손실계수 적용은 과부하 맨홀의 개수와 형태, 유역경사 및 단차의 유무 등과 같은 지역적 요인과 XP-SWMM의 관망에서 직경이 큰 간선 배수관만을 적용하거나, 지선 배수관까지 적용하는가에 따라 다른 결과를 보이는 것으로 판단되어 이에 따른 향후 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, J.H., Cho, W.C., and Jung, J.H. (2014). "Flood Simulation for Basin-Shaped Urban Watershed Considering Surface Flow." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 3, pp. 841-847 (in Korean).
- Beak, H.S., Gang, Y.B., Choi, S.K., and Choi, H.K. (2005). "A Comparative Study of XP-SWMM and Hydraulic Model Experiment." Proceedings of KSCE Conference 2005, KSCE, pp. 2760-2763(in Korean).
- Bo Pedersen, F., and Mark, O. (1990). "Head Losses in Storm Sewer Manholes : Submerged Jet Theory." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 11, pp. 1317-1328.
- Choi, G.W., Lee, H.S., Han, M.S., and Lee, B.J. (2004). "Study on Reduction of Flooding Area Using XP-SWMM at Inundation Region in the Reclaimed Land near the Incheon Bridge." Proceedings of the KWRA Conference 2004, KWRA, pp. 500-505(in Korean).
- Hsu, M.H., Chen, S.H., and Chang, T.J. (2000). "Inundation Simulation for Urban Drainage Basin with Storm Sewer System." *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 234, No. 1-2, pp. 21-37.
- Kim, J.S. (2010). "An Experimental Study for Flow Improvement at Surcharged Manholes." Doctoral Dissertation of Kyonggi University.
- Kim, J.S., Song, J.I., and Yoon, S.E. (2008). "An Experimental Study for Drainage Capacity Increment at Surcharged Square Manholes." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 22, No. 6, pp. 619-625(in Korean).
- Kim, Y.J., Han, G.Y., and Cho, W.H. (2010). "Analysis on the Effects of Flood Damage Mitigation according to Installation of Underground Storage Facility." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 1B, pp. 41-51(in Korean).
- Lee, C.H., Han, K.Y., and Choi, K.H. (2006). "DEM Based Urban Inundation Analysis Model Linked with SWMM." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39 No. 5, pp. 441-452(in Korean).
- Lee, J.H., and Yeon, K.S. (2008). "Flood Inundation Analysis using XP-SWMM Model in Urban Area." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 8 No. 5, pp. 155-161(in Korean).
- Marsalek, J. (1984). "Head losses at sewer junction manholes." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 8, pp. 1150-1154.
- Ministry of environment. (2011). Design Criteria of Sewerage.
- Phillips, B.C., Yu, S., Thompson, G.R., and Silva, N. de. (2005). "1D and 2D Modelling of Urban Drainage Systems using XP-SWMM and TUFLOW." 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, August 2005, pp. 21-26.
- Rangarajan, S., Takamatsu, M., and Grey, G. (2008). "An Integrated Modelling approach to Stormwater Management." World Environmental and Water Resources Congress 2008 Ahupua'a, pp. 1-7
- Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerden, E.T., and Bossy, H.G. (1958). "Pressure changes at storm drain junctions." Bulletin. No. 41, Engineering Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia.
- Seoul Safety Nuri. (2013). http://safecity.seoul.go.kr:8070/scmyn_cf/map/cfMap.do
- Shinji, A., and Tetsuya, K. (1998). "Manhole profiles for energy loss reduction." Proceedings of HydraStorm 98, Third International Conference on Stormwater Management, Adelaide, pp. 235-240.
- Smith, J., Phillips, B.C., and Yu, S. (2006). "Modelling Overland Flows and Drainage Augmentations in Dubbo." 46th Floodplain Management Authorities Conference, Lismore, March 2006, pp. 1-14.
- XP Solution. (2013). XP SWMM 2013 User Manual.

paper number : 14-114

Received : 19 November 2014

Revised : 15 January 2015 / 20 January 2015

Accepted : 20 January 2015