수치모형을 이용한 과부하 사각형 맨홀에서의 손실계수 산정

Estimation of Head Loss Coefficients at Surcharged Square Manhole Using Numerical Model

김정수* · 임가희** · 임창수*** · 윤세의****

Kim, Jung-Soo · Lim, Ga-Hui · Rim, Chang-Soo · Yoon, Sei-Eui

Abstract

Energy loss at manholes, often exceeding friction loss of pipes under surcharged flow, is considered as one of the major causes of inundation in urban area. Therefore, it is important to analyze the head losses at manholes, especially in case of surcharged flow. The stream characteristics were analyzed and head loss coefficients were estimated by using the computational fluid dynamics(CFD) model, FLUENT 6.3, at surcharged square manhole in this study. The CFD model was carefully assessed by comparing simulated results with the experimental ones. The study results indicate that there was good agreement between simulation model and experiment. The CFD model was proved to be capable of estimating the head loss coefficients at surcharged manholes. The head loss coefficients with variation of the ratio of manhole width(B) to inflow pipe diameter(d) and variation of the drop height at surcharged square manhole with a straight-path through were calculated using FLUENT 6.3. As the ratio of B/d increases, head loss coefficient increases. The depth and head loss coefficient at manhole were gradually increased when the drop height was more than 5cm. Therefore, the CFD model(Fluent 6.3) might be used as a tool to simulate the water depth, energy losses, and velocity distribution at surcharged square manhole.

Key words : Head loss coefficient, Surcharged manhole, CFD model, Sewer system

요 지

도시 우수 배수 시스템에서 우수 관거는 개수로 흐름 상태로 가정하여 설계되었기 때문에 맨홀에서의 에너지 손실은 일반적으로 중요하게 고려되지 않았다. 그러나 과부하흐름에서 에너지 손실은 관거의 배수능력을 저하시켜 도심지역의 침수피해를 가중시키는 요인이 된다. 그러므로 과부하 사각형 맨홀 내에서의 수두 손실을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 FLUENT 6.3 모형을 이용하여 과부하 사각형 합류맨홀에서의 흐름특성을 모의하고 맨홀 내 손실수두의 변화를 계산하여 손실계수를 산정하였다. 또한 실험결과와 수치모의 결과를 비교 및 분석하여 사각형 맨홀에서의 손실계수 산정에 FLUENT 6.3모형의 적용성을 확인하였다. 맨홀 폭(B)과 연결관경(d)의 비(B/d)에 따른 손실계수를 산정하였다. B/d가 증가할수록 사각형 합류 맨홀에서의 손실계수는 증가하였다. 중간 단차 맨홀에서 단차 변화에 따른 손실계수의 변화를 산정하였다. 단차가 5 cm이상 증가하면 맨홀 내 수심과 손실계수가 점진적으로 증가하였으므로 중간 맨홀에서의 적정 단차는 5 cm로 판단된다. 따라서 우수 관거 시스템의 여러 형태의 사각형 맨홀에서의 흐름의 변화 및 손실계수를 예측할 때, Fluent 6.3 모형은 사용 가능하리라 판단된다.

핵심용어 : 손실계수, 과부하 맨홀, CFD 모형, 우수 배수 시스템

1. 서 론

도시 지역에서 해마다 반복되는 여름철의 집중호우로 인한 홍수재해 뿐만 아니라 국지적인 집중호우로 인한 많은 피해가 발생하고 있다. 국지적인 집중호우는 하천 연안이나 유출량이 급격하게 증가하는 저지대와 하수관거의 불량 및 용량 부족지역을 중심으로 침수피해를 상습적으로 발생시키고 있

다. 도시 지역에서의 빗물은 도로 배수시설 및 우수 관거 시설에 의하여 배수된다. 우수 관거 시설은 관거, 맨홀, 우수토실, 물받이(우수, 우수, 집수반이) 및 연결관 등을 포함하는 시설들로 구성되어 있다. 맨홀은 관거의 기점, 방향, 경사 및 관경 등이 변하는 곳, 단차가 발생하는 곳, 관거가 합류하는 곳이나 관거의 유지 관리상 필요한 장소에 반드시 설치한다. 또한 흙 두께가 적은 경우, 관거 중간지점에서 원형 맨홀이

*정회원 · 부천대학 토목과 겸임교수 (E-mail : hydroguy@naver.com) (교신저자)

**경기대학교 토목공학과 석사과정

***정회원 · 경기대학교 토목공학과 부교수

****정회원 · 경기대학교 토목공학과 교수

설치되지 않은 경우나 다른 매설물 등의 관계 등으로 원형맨홀의 설치가 어려울 경우에는 직사각형 맨홀을 설치하고 있다.

우수 관거 시스템에서 유입유량이 관거의 만관 상태를 초과하거나 하류 흐름 때문에 발생하는 역류의 영향을 받는다면, 관거 시설은 과부하(surcharge) 상태인 압력흐름이 된다. 중력흐름 상태에서 맨홀의 수두 손실은 일반적으로 무시되지만, 과부하 맨홀에서의 수두 손실은 중요하며, 우수 관거 시스템의 전체 손실에 상당한 부분을 차지하게 된다. 이러한 현상은 여러 개의 맨홀을 가지는 우수 관거 시스템에서 특히 중요한 사항이 된다. 특히 1990년대부터 국지성 집중호우 및 강우량 증가에 따른 도심지 유출량의 증가는 관거 시설의 설계 용량 초과에 의한 도심지 내수 침수 피해를 빈번하게 발생시키는 원인이 되고 있다. 그러나 1998년과 2010년의 서울지역의 침수피해를 살펴보면 우수관거의 설계 강우강도를 초과하지 않은 강우가 발생하였음에도 불구하고 우수관거의 내수배제 능력 미흡으로 인한 침수피해가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 우수관로의 선형 변경 및 관로의 추가 연결 등으로 인한 관거 합류부와 맨홀 구간 등에서 발생하는 국소 손실의 영향이 축적되어 관거 시설의 배수능력을 저감시키기 때문이다. 따라서 관거 시설 내 맨홀에서의 수리적 에너지 손실에 대한 연구와 보다 구체적인 설치 기준의 제시가 요구되고 있는 실정이다. 그러므로 과부하 사각형 맨홀에서 우수 관거 시스템의 우수 배제 능력을 증가시켜 도심지의 침수를 방지하기 위한 관거시설의 적정 설계 기준이 필요하며, 합리적인 설계 기준을 제시하기 위하여 과부하 사각형 맨홀 내에서의 수두 손실을 분석할 필요가 있다.

국외에서 과부하 사각형맨홀의 손실계수 산정에 관한 연구는 1950년대부터 꾸준히 진행되어 왔다. Sangster 등(1958)은 사각형과 원형맨홀에서 2개의 유입관과 한 개의 유출관으로 구성된 합류맨홀의 실험을 실시하였으며, Marsalek(1984)은 직선관으로 연결된 정사각형 및 원형 맨홀의 기본형태와 반원형 인버트 및 U형 인버트를 설치한 형태에 대하여 실험을 실시하여 사각형 맨홀과 원형 맨홀에서의 손실계수를 제시하였다. Johnston과 Volker(1990)은 사각형 맨홀의 기본형태와 인버트 설치 형태 변화에 따른 손실계수를 산정하고 사각형 맨홀 내 손실의 저감 방안으로 인버트 설치에 대하여 제시하였다. Chanwit과 Ian(2005)은 수리모형 실험을 실시하여 직선 연결 원형맨홀과 90° 접합 원형맨홀에서의 손실계수를 산정하고, 3차원 수치모형을 적용하여 검증하였다. 또한 Zhao 등(2006)은 2개의 유입관과 1개의 유출관으로 구성된 합류맨홀에 관한 수리 실험을 실시하여 사각형 합류맨홀에서의 손실계수를 산정하고 합류맨홀에서의 손실계수 산정 실험식을 제시하였다. 반면 국내에서는 수리 실험을 실시하여 유입유량 변화 및 내부구조 변화에 따른 과부하 사각형 맨홀에서 손실계수를 산정하였다. 그러나 국내 및 국외에서 수치모형을 이용한 과부하 사각형 맨홀에서의 흐름 특성 분석에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이며, 수리모형 실험은 여러 형태의 사각형 맨홀에서의 손실계수 및 흐름상태의 측정에 있어서 물질적 및 시간적 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 수리모형 실험의 물질적, 시간적 한계를 극복하고 과부하 맨홀에서의 손실계수를 산정하기 위하여 일반적으로 3차원 유체거동의 특성분석에 많이 사용되는 FLUENT 6.3 모형을 선택하였다. FLUENT 6.3 모형을 이용하여 과부하 합류 맨홀에서의 흐름특성을 수치모의 하였으며, 맨홀 내 손실수두의 변화를 계산하여 손실계수를 산정하였다. 계산된 손실계수는 수리모형 실험을 통하여 산정된 손실계수와 비교하였다. 또한 동일한 수치모의 해석 조건을 실제 크기의 합류맨홀에 적용하여 합류맨홀의 규모 변화 및 중간맨홀의 단차 변화에 따른 손실계수를 산정하였다.

2. FLUENT 수치모형

2.1 모형의 구성

FLUENT 6.3 모형은 Fluent사에 의해 개발된 모형으로 유체역학 및 열전달, 화학반응 등의 동수역학 모델링을 위한 GUI(Graphical User Interface)를 바탕으로 하는 3차원 유한체적 수치모형이다. FLUENT는 전산유체역학 해석에 필요한 전처리(Pre-processing), 계산(Solving), 후처리(Post-processing)의 모든 작업을 할 수 있는 모형으로 전처리기인 Gambit, Tgrid와 계산 및 후처리 프로그램인 FLUENT로 구성되어 있다.

FLUENT는 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)을 사용하는 비정렬격자 계산 프로그램으로 사면체, 육면체, 프리즘, 피라미드, 다면체 격자를 지원하여 아무리 복잡한 형상이라도 문제없이 모델링을 수행하며, 모든 분야에 적용이 가능하도록 다양한 수치해석 기법을 보유하고 있다. 동수역학적 문제를 풀기 위해 자유수면 해석은 다상 유체의 거동을 해석하는 방법인 VOF(Volume of Fluid)방법을 사용한다. 이는 셀 내에서의 유체를 단위 체적당 각각의 유체 체적으로 나타내는 체적분할 방정식(volume fraction equation)을 통해 계산된다(김영한 등(2003)). 또한, 난류 모형으로 k-ε 모형, LES(Large Eddy Simulation) 등을 사용하여 하천, 하구 또는 항구와 같은 수역을 대표하는 유한체적망의 각 유체 체적에서 수위 및 유속을 계산할 수 있으며, 정장류 뿐만 아니라 부정류 상태까지 모의가 가능하다. 본 연구의 과부하 맨홀은 물과 공기가 존재하는 다상유동이 존재하고 관로 및 맨홀에서 상당한 난류 흐름이 발생한다. 따라서 과부하 맨홀에서의 유체 거동 특성 분석에 범용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램인 FLUENT 6.3 모형이 적합하다고 판단하고 모형을 선택하였다. 또한 FLUENT 6.3 모형을 이용하면 여러 형태의 합류맨홀, 단차조건 및 유량변화에 따른 손실계수 및 흐름상태의 측정에 있어서 수리 모형실험의 물질적 및 시간적 한계를 극복할 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 FLUENT 6.3 모형을 이용하여 과부하 사각형 합류맨홀에서의 흐름특성을 모의하고 맨홀 내 손실수두의 변화를 계산하여 손실계수를 산정하였다. 또한 산정된 손실계수는 수리모형 실험을 통하여 산정된 손실계수와 비교 및 검증하였으며, 연결관거 크기 변화에 따른 합류맨홀의 크기를 선정하는 합리적인 선정을 위하여 동일한 수치모의 해

석 조건을 실제 크기 합류맨홀에 적용하여 합류맨홀의 규모 변화와 중간맨홀의 단차 조건에 따른 손실계수를 산정하였다.

2.2 지배방정식

FLUENT 6.3 모형에서 사용하는 지배방정식으로 연속방정식은 식(1)과 같다(Fluent Inc, 2005).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도이고, x_i , u_i 는 각 방향으로의 거리 및 유속이며, t 는 시간이다. 운동량 방정식은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식으로 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

여기서, P 는 정수압이고, g_i 는 중력가속도이고 τ_{ij} 는 응력텐서로서 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

2.3 난류모형

FLUENT 모형에서 사용하는 난류모형 중 본 연구에서 채택한 $k-\epsilon$ 난류모형은 Navier-Stokes 방정식의 시간적분 시 발생하는 Reynolds 응력이 평균유속의 경사에 비례한다는 Boussinesq 가정에서 출발하는 모형이다. 이 모형에서 와점성 계수(μ_T)는 식(4)와 같이 정의된다.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서, C_μ 는 경험상수이며, k 및 ϵ 은 난류운동에너지 및 소산율로서 식(5)와 같은 이동방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

표 1. 난류모형에 사용된 계수

C_μ	σ_k	σ_ϵ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_{3\epsilon}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	1.0

식(5)와 식(6)에서 G_k 와 G_b 는 각각 난류운동에너지 생성항 및 부력으로 인한 난류의 생성항으로 식(7) 및 식(8)과 같이 정의된다.

$$G_k = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_T}{\rho \sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (8)$$

상기 식(5)~식(8)에서 C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 은 경험적인 상수로서, 본 연구에서는 표 1에 주어진 바와 같이 정의된다(Rodi, 1993).

3. 합류맨홀에서의 손실계수 산정

3.1 모형의 적용

과부하 합류 맨홀에서의 손실계수를 계산하기 위하여 맨홀 및 접합 관거에서의 흐름 상태를 모의하였다. 맨홀 및 접합 관거의 기하 모형의 격자망은 수치해석의 안정성 확보를 위하여 맨홀과 연결관의 합류부분에서는 사면체 격자로 구성하고 합류부분을 제외한 구간에서는 6면체 격자로 구성하였으며, 각 격자의 면은 가능한 사각형 또는 삼각형의 형태를 취하도록 하였다(그림 1).

합류맨홀에서의 손실계수 산정에 대한 FLUENT 모형의 적용성을 분석하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)상의 특 1호 맨홀(0.9m×0.9m)과 0.3m의 유입 및 유출관을 1/5로 축소 제작한 수리 실험 모형의 크기와 동일하게 폭 0.18m, 길이 0.18m로 구성하였고, 연결관의 직경은 0.06m, 직선 유입관과 측면 유입관의 길이는 1.5m, 유출관의 길이는 4.0m로 구성하였다. 또한 수리모형 실험을 실시하여 과부하 합류맨홀에서의 손실계수를 산정한 김정수 등(2010a)의 실험결과와 비교하였다(표 2). 본 연구에서는 맨홀 모형의 벽면에는 No-Slip 경계조건을 부여하였으며, 유입부에는 속도 조건, 유출부와 맨홀의 자유수면 부분의 경계에서는 대기압 조건을 부여하였다. 합류 맨홀의 손실계수 산정을 위한 수리 모형 실험 결과와 수치모의 결과를 비교하기 위하여 유입 관

그림 1. 합류맨홀의 격자망 구성

표 2. 수리실험 및 수치모의 조건

맨홀크기 (m)	연결관 직경 (m)	유입관 길이 (m)	유출관 길이 (m)	유입관 유속 (m/sec)	비고
0.18×0.18	0.06	1.5	4.0	0.53	1/5 축척

거의 유속 조건을 주 유입관의 유속과 측면 유입관의 유속은 동일하게 0.53 m/sec로 수리 모형실험의 조건과 동일하게 채택하여 수치모의를 수행하였다(김정수 등 2009).

3.2 수치모의 및 수리모형 실험 결과 비교

합류 맨홀과 연결 관거의 흐름에서 물과 공기를 모두 고려하기 위하여 다상유동에 VOF(Volume of Fluid) 방법을 적용한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 두 개의 유입관에서 유입된 흐름이 합류되면서 맨홀 출구 부분의 수심이 증가하고 맨홀 내에서 수면 요동 현상을 나타내고 있으며, 이 현상은 수리모형 실험에서도 같은 경향을 나타내고 있었다. 또한 수치모의 결과 맨홀 내 수심은 14.4 cm로 모의되어 14.2 cm의 실측 수심과 약 0.2 cm의 오차를 보이고 있으므로, 맨홀 내의 물의 요동 현상을 비교적 정확하게 모의하는 것이라 판단된다.

그림 3은 합류 맨홀에서의 유속의 변화를 벡터로 표시하여 나타내었다. 그림 3에서 직선 유입관과 측면 유입관으로부터 유입된 흐름이 맨홀 중앙부에서 합류하여 직선 흐름 방향(X 방향)의 오른쪽으로 편이 되어 유출되는 것을 알 수 있었으며, 측면 유입부의 좌·우부분과 직선 유입관과 유출관의 오른쪽 영역에서 흐름의 와 현상을 모의하였다. 이는 수리모형 실험에서 나타난 맨홀 내 흐름의 변화 양상을 비교적 정확하게 모의하는 것이라 판단된다.

(a) 전체구간(수치모의)

(b) 전체구간(수리모형 실험)

그림 2. 맨홀 내 수심 변화

(a) 수치모의 결과

(b) 수리모형 실험 결과

그림 3. 합류맨홀에서의 흐름 변화

그림 4. 압력수두의 변화(수리모형 실험 비교)

그림 4는 직선 유입 관과 유출관 사이 합류 맨홀 전·후의 모의 구간에서 압력수두의 변화를 압력 수두로 표시하고 수리 모형의 실측값과 비교하여 나타내었다. 그림 4에서 맨홀과 유출관의 접합부분에서 수두 손실을 발생시키고 있음을 알 수 있으며, 수치모의 결과와 수리 실험 결과가 약 0.5 cm 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 수리 실험시의 측정 오차를 감안한다면 맨홀 및 관거 내의 압력 변화를 비교적 정확하게 모의하고 있음을 알 수 있다. 측면 유입 관과 유출관 사이의 합류 맨홀 전·후 구간에서의 압력수두 변화는 그림 4와 동일하였다.

3.3 손실계수 산정

과부하 합류 맨홀에서의 손실계수를 산정하기 위하여 Zhao 등(2006)은 합류 맨홀 입·출구부에서의 흐름의 연속방정식과 에너지 방정식으로부터 손실수두계수를 산정하는 식(9)를 이용하여 합류 맨홀 각각의 유입관에 대한 손실계수를 산정하였다.

표 3. 손실계수 비교

손실계수	수리모형 실험(실측값)	수치모의(계산값)
K_{13}	0.74	0.74
K_{23}	0.72	0.70
K	0.73	0.72

$$K_{13} = \frac{H_1 - H_3}{V_3^2/2g}; K_{23} = \frac{H_2 - H_3}{V_3^2/2g}; K = \frac{H_L}{V_3^2/2g} \quad (9)$$

여기서, H_i 는 각 관에서의 에너지수두이며, 첨자 i 는 각 관거를 나타낸다. K_{13} 는 직선 유입관과 유출관에서의 손실계수, K_{23} 는 측면 유입관과 유출관에서의 손실계수이다. K 는 합류맨홀에서의 손실계수이다. 연속방정식과 식(9)를 이용하여 합류맨홀에서의 손실계수 K 를 식(10)과 같이 계산할 수 있다.

$$K = \frac{Q_1}{Q_3} K_{13} + \frac{Q_2}{Q_3} K_{23} \quad (10)$$

본 연구에서는 수치해석 결과에서 구한 Δh 를 식(9)와 (10)에 적용하여 손실계수를 산정하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이 수치 모형에 의해서 산정된 손실계수 값이 수리모형 실험에 의해서 산정된 손실계수 값과 거의 유사하게 산정하고 있음을 알 수 있다. 이는 Chanwit과 Ian(2005)의 연구결과와 유사하며, 우수 관거 시스템의 여러 형태의 합류 맨홀에서의 흐름의 변화 및 손실계수의 산정을 예측하는 데에 있어서 Fluent 6.3 모형은 사용 가능하리라 판단된다.

4. 합류맨홀 크기 변화에 따른 손실계수 산정

4.1 모형의 적용

합류맨홀의 크기 변화에 따른 손실계수 변화를 산정하기 위하여 연결관의 직경은 0.3 m, 직선 유입관과 측면 유입관의 길이는 7.5 m, 유출관의 길이는 20 m로 구성하였으며, 연결관 직경(d)에 따른 맨홀의 폭(B)의 변화에 따라 합류맨홀의

표 4. 수치모의 조건

구 분	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
연결관경(d, m)	0.30				
맨홀 폭(B, m)	0.45	0.60	0.90	1.20	1.80
맨홀 길이(L, m)	0.45	0.60	0.90	1.20	1.80
B/d	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0

크기를 표 4와 같이 구성하였다.

그림 5는 수치모의 조건에 따른 합류맨홀의 격자망 구성을 나타내고 있다. 유입관거의 유속 조건은 하수도시설기준(환경부, 2005)에 제시된 우수관거에서의 이상 유속(1.0 m/sec)을 채택하고, 전 절의 수치모의 조건과 동일한 조건으로 수치모의를 수행하였다(김정수 등(2010b)).

4.2 수치모의 결과 및 분석

맨홀 내에서의 수면 요동 현상과 직선 유입관과 측면 유입관으로부터 유입된 흐름이 맨홀의 중앙부에 합류하여 직선 흐름방향(X방향)의 오른쪽으로 편이되어 유출되며, 측면 유입부의 좌, 우부분과 직선 유입관과 유출관의 오른쪽 영역에서 흐름의 와 현상을 모의하여 전 절의 수치모의 결과와 거의 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 6은 합류맨홀 크기 변화에 따른 직선 유입관과 유출관 사이 합류 맨홀 전·후의 모의 구간에서 압력수두의 변화를 압력 수두로 나타내었다. 그림 6은 그림 4의 결과와 동일하게 맨홀과 유출관의 접합부분에서 수두 손실을 발생시키고 있음을 알 수 있으며, 합류 맨홀의 크기가 증가할수록 맨홀 부분에 발생하는 수두 손실의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 맨홀의 크기가 증가할수록 맨홀의 중앙부에서 합류된 유동이 직선 흐름방향의 오른쪽으로 편이 되는 현상이 크게 발생하고 맨홀 유출부에서 발생하는 와 현상이 증가되기 때문이라 판단된다. 측면 유입관과 유출관 사이의 합류 맨홀 전·후 구간에서의 압력수두 변화는 그림 6과 동일하였다.

전 절에서와 같이 수치해석 결과에서 구한 Δh 를 식(9)와

그림 5. 맨홀 크기 변화에 따른 합류맨홀의 격자망 구성

그림 6. 합류맨홀 크기 변화에 따른 압력수두의 변화

표 5. 합류맨홀 크기 변화에 따른 손실계수

B/d	손 실 계 수		
	K13	K23	K
1.5 (CASE 1)	0.68	0.63	0.65
2.0 (CASE 2)	0.74	0.70	0.72
3.0 (CASE 3)	0.81	0.81	0.81
4.0 (CASE 4)	0.96	1.00	0.98
6.0 (CASE 5)	1.07	1.12	1.09

식(10)에 적용하여 연결관경(d)과 맨홀의 폭(B)의 비(B/d)의 변화에 따른 손실계수를 산정하여 표 4에 나타내었다. 표 5에서 B/d가 증가할수록 합류맨홀에서의 손실계수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 직선 연결맨홀에서 B/d가 증가할수

그림 7. 중간 단차 맨홀의 격자망 구성

록 손실계수가 증가하는 Pedersen과 Mark(1990)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서 FLUENT 6.3 모형을 이용하여 산정된 실제 합류맨홀에서의 손실계수는 우수관거 시스템의 설계 및 평가에 사용가능하리라 판단된다.

5. 중간 단차 맨홀에서의 손실계수 산정

5.1 모형의 적용

하수도시설기준(환경부, 2005) 2.7.2절의 맨홀부속물에서 ‘상류관거의 저부와 인버트 저부에는 일정한 낙차를 두어 인버트 재질 변화에 따른 조도계수의 증가와 하수의 수위가 인버트 높이 위로 흐를 때 발생하는 수두손실을 감안하여 중간맨홀에서는 3 cm정도, 합류맨홀에서는 3~10 cm정도로 한다.’라고 규정하여 있다. 김정수 등(2008)은 수리모형 실험을 실시하여 원형 중간 맨홀에서 단차변화에 따른 손실계수를 산정

표 6. 단차변화에 따른 맨홀 내부의 흐름 특성 변화

그림 8. 단차 변화에 따른 손실계수의 변화

하였으나, 수리모형 실험 조건의 한계에 의하여 개략적인 결과를 도출하였다. 따라서 본 연구에서는 Fluent 6.3 모형을 이용하여 과부하 중간 단차 맨홀에서의 흐름특성을 수치모의하였으며, 맨홀 내 손실수두의 변화를 계산하여 손실계수를 산정하였다.

중간 단차 맨홀의 단차 변화에 따른 손실계수 변화를 수치모의하기 위하여 연결관의 직경은 0.3 m, 직선 입관과 유출관의 길이는 각각 10 m와 20 m로 구성하였다. 맨홀 모형의 크기는 실제 중간맨홀의 크기와 동일하게 폭 0.9 m, 길이 0.9 m 높이 2.0 m로 구성하였으며, 단차 맨홀 및 접합관의 격자망은 수치해석의 안정성을 확보하기 위하여 육면체 격자로 구성하였다(그림 7). 맨홀의 단차 조건은 하수도시설기준(환경부, 2005)의 적정 단차조건을 반영하여 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm의 7가지 조건을 선정하였다. 또한, 유입관의 유속 조건은 상·하류 관거의 과부하 상태를 유지하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)에 제시된 우수관거에서의 최대 유속(3.0 m/sec)을 채택하고, 전 절의 수치모의의 조건과 동일한 조건으로 수치모의를 수행하였다.

5.2 수치모의 결과 및 분석

중간 단차 맨홀과 연결 관거의 흐름에서 물과 공기를 모두 고려하기 위하여 다상유동에 VOF(Volume of Fluid) 방법을 적용한 결과를 표 6에 나타내었다. 표 6에서 알 수 있듯이 단차가 증가할수록 유입되는 유량이 맨홀의 벽면과 충돌하는 현상(jet impact)에 의하여 수직방향의 유속이 상승하며 수직방향 와를 발생시킨다. 또한 맨홀 유입 및 유출부에서는 횡방향 외에 따른 맨홀 내 흐름의 교란을 크게 발생시키며, 충돌부와 유출부에서 시수역이 발생하여 맨홀 내 흐름의 소통능력을 저하시키는 것으로 나타났다.

중간 단차 맨홀에서의 손실계수를 산정하기 위하여 Sangster 등(1958)이 제안한 맨홀 입·출구부에서 흐름의 연속방정식과 운동량 방정식으로부터 손실수두계수를 산정하는 식(11)을 이용하여 손실계수를 산정하였다.

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

여기서, Δh 는 맨홀 입·출구부의 수두차, K 는 맨홀내부의 손실계수를 이용한 과부하 사각형 맨홀에서의 손실계수 산정

실계수, V 는 관거 평균유속이다. 본 연구에서는 수치해석 결과에서 구한 Δh 를 적용하여 손실계수를 산정하였으며, 그림 8은 단차 변화에 따른 맨홀 내 수심 및 산정 손실계수의 변화이다.

수치모형의 적용 결과 단차가 5 cm 이상 증가하면 맨홀 내에서의 수심은 점진적으로 상승하였으며, 단차가 5 cm일 때, 맨홀에서의 손실계수는 0.39로 산정되어 손실계수가 가장 낮게 나타났다. 단차가 5 cm 이상 증가하면 손실계수가 0.62~0.65의 범위를 나타내고 있었으며, 단차가 1D(30 cm) 이상 증가하면 손실계수가 1.0으로 크게 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 실제 우수 관거 설계 시, 설계 최대유속 조건인 3.0 m/sec에서의 연결관과 맨홀에서의 적정 단차는 5 cm로 판단되며, 가급적 1D이하의 단차를 고려하여 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 본 연구의 모의 결과는 수치모의의 결과이므로 추후 수리실험 연구에 따른 비교 및 검토 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 FLUENT 6.3 모형을 이용하여 과부하 사각형 합류맨홀에서의 흐름특성을 모의하고 맨홀 내 손실수두의 변화를 계산하여 손실계수를 산정하였다. 또한 산정된 손실계수는 수리모형 실험을 통하여 산정된 손실계수와 비교 및 검증하였으며, 연결관거 크기 변화에 따른 합류맨홀의 크기를 선정하는 합리적인 선정을 위하여 동일한 수치모의 해석 조건을 실제 크기 합류맨홀에 적용하여 합류맨홀의 규모변화와 중간맨홀의 단차 조건에 따른 손실계수를 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수치모형의 적용 결과 맨홀 내에서의 유속변화, 수심변화 및 압력변화에 대해서는 수리모형 실험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 수치모형에 의하여 산정된 합류 맨홀에서의 손실계수 값과 수리모형 실험에 의하여 산정된 손실계수 값이 유사하므로 우수 관거 시스템의 여러 형태 중간 및 합류맨홀에서의 흐름 변화 및 손실계수 예측하는 데 있어서 FLUENT 6.3 모형은 사용 가능하리라 판단된다.
2. 동일한 수치모의 해석 조건을 실제 합류맨홀에 적용한

결과 연결관경(d)과 맨홀 폭(B)의 비(B/d)의 증가에 따라 손실계수가 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 이는 맨홀의 크기가 증가할수록 맨홀의 중앙부에서 합류된 유동이 직선 흐름방향의 오른쪽으로 편이 되는 현상이 크게 발생하고 맨홀 유출부에서 발생하는 와 현상이 증가되기 때문이라 판단된다.

3. 단차가 5 cm 이상 증가하면 맨홀 내에서의 수심은 점진적으로 상승하였으며, 단차가 5 cm일 때, 맨홀에서의 손실계수는 0.39로 산정되어 손실계수가 가장 낮게 나타났다. 단차가 5 cm 이상 증가하면 손실계수가 0.62~0.65의 범위를 나타내고 있었으며, 단차가 1D(30 cm)이상 증가하면 손실계수가 1.0으로 크게 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 실제 우수 관거 설계 시, 설계 최대유속 조건인 3.0 m/sec에서의 연결관과 맨홀에서의 적정 단차는 5 cm로 판단되며, 가급적 1D이하의 단차를 고려하여 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다.

또한, FLUENT 6.3 모형을 이용하여 산정된 합류 맨홀 및 중간 단차 맨홀에서의 손실계수는 우수관거 시스템의 설계 및 평가에 사용가능하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김영한, 오정선, 서일원 (2003) 수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석, **한국수자원학회 논문집**, 제36권, 제5호,

pp. 761-776.
 김정수, 송주일, 장석진, 윤세의 (2008) 과부하 원형맨홀에서의 손실계수 산정을 위한 실험적 연구, **한국수자원학회 논문집**, 제41권, 제3호, pp. 305-314.
 김정수, 김형민, 윤세의, 이종태 (2009) 합류맨홀에서 FLUENT 모형의 적용성분석, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 2651-2654.
 김정수, 최현수, 윤세의 (2010a) 과부하 합류맨홀에서의 손실계수 산정을 위한 실험적 연구, **한국수자원학회 논문집**, 제43권, 제5호, pp. 445-453.
 김정수, 최현수, 김형민, 윤세의 (2010b) FLUENT 모형을 이용한 합류 맨홀에서의 흐름특성 분석, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, pp. 649-653.
 환경부(2005) **하수도시설기준**.
 Chanwit, S. and Ian, G. (2005) Simulation of Energy Loss due to Changes in Pipe Direction Across a Manhole. *10th National Convention on Civil Engineering*, Thailand, 2. pp. 5-9.
 Fluent Inc. (2005) *Fluent 6.3 User's Guide*. *Fluent Inc*
 Johnston, A.J. and Volker, R.E. (1990) Head Losses at Junction Boxes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 326-341.
 Marsalek, J. (1984) Head Losses at Sewer Junction Manholes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 8, pp. 1150-1154.
 Pedersen, B. F. and Mark, O. (1990) Head Losses in Storm Sewer Manholes : Submerged Jet Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 11, pp. 1317-1328.
 Rodi, W. (1993) *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
 Sangster, W. M., Wood, H. W., Smerden, E. T. and Bossy, H. G. (1958) Pressure Changes at Storm Drain Junctions. *Engineering Experiment Station, University of Missouri*, Columbia, Bull. No. 41.
 Zhao, C. H., Zhu, D. Z., and Rajaratnam, N. (2006) Experimental Study of Surcharged Flow at Combining Sewer Junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 12, pp. 1259-1271.

◎ 논문접수일 : 11년 03월 31일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 04월 05일
 ◎ 심사완료일 : 11년 04월 26일