

Fluent 모형을 이용한 합류 맨홀에서의 흐름특성 분석

Analysis of Stream Characteristics at Combine Junction Manhole Using Fluent Model

김정수*, 최현수**, 김형민***, 윤세의****

Jung Soo Kim, Hyun Soo Chio, Hyung Min Kim, Sei Eui Yoon

요 지

일반적으로 계획 또는 설계 단계에서 수행되고 있는 관거 시설의 수리계산에는 연결관 내에서의 마찰손실만을 감안하여 수행하고 있으며, 맨홀에서의 에너지 손실은 고려되지 않는 실정이다. 그러나 연결관 내부와 맨홀의 내부는 여러 가지 수리학적 조건이 다르므로 에너지 손실이 발생하게 된다. 더욱이 직선으로 연결된 중간맨홀보다 두 개의 유입관과 한 개의 유출관으로 구성된 합류맨홀은 연결 구조상 유수교란에 의한 에너지 손실이 커질 것으로 예상됨에도 불구하고 현재 실무에서 우수 배수시설의 설계 시 직선 연결맨홀과 합류맨홀의 손실을 구별하지 않고 사용하고 있는 실정이다. 그러므로 합류맨홀에서 우수 관거 시스템의 우수 배제 능력을 증가시켜 도심지의 침수를 방지하기 위한 관거시설의 적정 설계 기준이 필요하며, 합리적인 설계 기준을 제시하기 위하여 합류 맨홀 내에서의 수두 손실을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 수리 모형 실험의 물질적, 시간적 한계를 극복하기 위하여 일반적으로 3차원 유체거동의 특성분석에 많이 사용되는 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 합류맨홀에 적용하여 실제 합류맨홀의 규모 변화에 따른 손실계수를 산정하였다. 수치모형의 적용 결과 맨홀 내에서의 유속변화, 수심변화 및 압력변화에 대해서는 수리모형 실험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 수치모형에 의하여 산정된 합류 맨홀에서의 손실계수 값과 수리모형에 의하여 산정된 손실계수 값이 거의 유사하게 나타났다. 또한 동일한 수치모의 해석 조건을 실제 합류맨홀에 적용하여 합류맨홀의 규모 변화에 따른 손실계수를 산정하였으며, 산정된 손실계수는 우수관거 시스템의 설계 및 평가에 사용가능하리라 판단된다.

핵심용어 : 합류맨홀, 손실계수, Fluent 모형, 우수 관거 시스템

1. 서 론

일반적으로 우수 배수시스템에서의 흐름은 중력의 지배를 받게 되므로 개수로 흐름과 같이 간주된다. 그러나 유입유량이 증가하여 관거가 만관이 되거나 하류부에서 흐름의 제한 등에 의해 역류의 영향을 받는다면 우수 배수시스템의 맨홀은 과부하(surcharge) 상태의 압력흐름이 된다. 개수로 흐름 상태에서 맨홀의 에너지 손실은 일반적으로 무시되지만, 과부하 맨홀에서의 에너지 손실은 중요하며, 우수 배수시스템의 전체 에너지 손실에 중요한 부분을 차지하게 된다. 이러한 현상은 여러 개의 맨홀을 가지는 우수 배수시스템에서 특히 중요한 사항이 된다. 현재 계획 또는 설계 단계에서 수행되고 있는 관거 시설의 수리계산에는 연결관 내에서의 마찰손실만을 감안하여 수행하고 있으며, 맨홀에서의 에너지 손실은 고려되지 않는 실정이다. 그러나 연결관 내부와 맨홀의 내부는 여러 가지 수리학적 조건이 다르므로 에너지 손실이 발생하게 된다. 더욱이 직선으로 연결된 중간맨홀보다 두 개의 유입관과 한 개의 유출관으로 구성된 합류맨홀은 연결 구조상 유수

* 정회원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail : hydroguy@naver.com
** 정회원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 · E-mail : rheoh@nate.com
*** 비회원 · 경기대학교 기계시스템디자인공학부 교수 · E-mail : pius@kyonggi.ac.kr
**** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 교수 · E-mail : syoon@kyonggi.ac.kr

교란에 의한 에너지 손실이 커질 것으로 예상되에도 불구하고 현재 실무에서 우수 배수시설의 설계 시 직선 연결맨홀과 합류맨홀의 손실을 구별하지 않고 사용하고 있는 실정이다. 그러므로 합류맨홀에서 우수 관거 시스템의 우수 배제 능력을 증가시켜 도심지의 침수를 방지하기 위한 관거시설의 적정 설계 기준이 필요하며, 합리적인 설계 기준을 제시하기 위하여 합류 맨홀 내에서의 수두 손실을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 수리 모형 실험의 물질적, 시간적 한계를 극복하기 위하여 일반적으로 3차원 유체거동의 특성분석에 많이 사용되는 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 합류맨홀에 적용하여 실제 합류 맨홀의 규모 변화에 따른 손실계수를 산정하였다.

2. Fluent 수치모형

2.1 지배방정식

과부하 원형 맨홀에서의 손실계수를 계산하기 위하여 범용 CFD 프로그램인 Fluent 6.3 모형을 선택하여 흐름을 모의하였다. Fluent 6.3 모형에서 사용하는 지배방정식으로 연속방정식은 다음과 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 다음과 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 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

2.2 모형의 적용

과부하 합류 맨홀에서의 손실계수를 계산하기 위하여 맨홀 및 접합 관거에서의 흐름 상태를 모의하였다. 3차원 모형을 적용하였고, 맨홀 내의 다상유동을 고려하기 위하여 VOF(Volume of Fluid) Scheme을 적용하였으며, 수치해석 방법으로는 비정상류, 1st order implicit method를 사용하였다. Fluent에서의 난류 흐름을 계산하는 방법에는 난류 운동에너지 k 와 난류 에너지 소산율 ϵ 의 전달 방정식을 도입한 $k-\epsilon$ 난류 모형을 채택하였다. 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.

합류맨홀에서의 손실계수 산정에 대한 Fluent 모형의 적용성을 분석하기 위하여 하수도시설기준(2005)상의 특 1호 맨홀(0.9m×0.9m)과 0.3m의 유, 출입관을 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 4m로 구성하여 실험결과와 비교하였다. 또한 실제 크기 합류맨홀의 규모 변화에 따른 손실계수의 변화를 산정하기 위하여 연결관의 직경은 0.3m, 직선 유입관과 측면 유입관의 길이는 7.5m, 유출관의 길이는 20m로 구성하였으며, 연결관 직경(d)에 따른 맨홀의 폭(B)의 변화에 따라 합류맨홀의 크기를 표 1과 같이 구성하였다.

본 연구에서는 맨홀 모형의 벽면에는 Wall(No-Slip) 경계조건을 부여하였으며, 유입부에는 속도 조건, 유

출부와 맨홀의 자유수면 부분의 경계에서는 대기압 조건을 부여하였다. 합류 맨홀의 손실계수 산정을 위한 수리모형 실험결과와 수치모의 결과를 비교하기 위하여 유입 관거의 유속 조건을 주 유입관의 유속과 측면 유입관의 유속은 동일하게 0.53m/sec로 수리 모형 실험의 조건과 동일하게 채택하여 수치모의를 수행하였다. 또한 실제 크기 합류맨홀의 손실계수를 산정하기 위하여 유입관거의 유속 조건은 하수도시설기준(2005)에 제시된 우수관거에서의 이상 유속(1.0m/sec)을 채택하여 수치모의를 수행하였다.

표 2. 수치모의 조건

구 분	수리실험	CASE A	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
연결관경(d, cm)	6	6	30				
맨홀 폭(B, cm)	18	18	45	60	90	120	180
맨홀 길이(L, cm)	18	18	45	60	90	120	180
B/d	3.0	3.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0
유속조건(m/sec)	0.53	0.53	1.00				

3. 수치모의 결과

3.1 수리실험결과와의 비교

합류 맨홀과 연결 관거의 흐름을 물과 공기를 모두 고려하는 다상유동에 VOF 기법과 $k-\epsilon$ 난류 모형을 적용한 결과 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 19.5cm로 모의되어 20.0cm의 실측 수심과 약 0.5cm의 오차를 보이고 있으므로, 맨홀 내의 물의 요동 현상을 비교적 정확하게 모의하는 것이라 판단된다. 그림 1은 직선 유입관과 유출관 사이 합류 맨홀 전, 후의 모의 구간에서 압력수두의 변화를 압력 수두로 표시하고 수리 모형의 실측값과 비교하여 나타내었다. 그림 1에서와 같이 맨홀과 유출관의 접합부분에서 수두 손실을 발생시키고 있음을 알 수 있으며, 수치모의 결과와 수리 실험 결과가 약 5% 정도의 오차를 보이고 있으므로 맨홀 및 관거 내의 압력 변화를 비교적 정확하게 모의하고 있음을 알 수 있다. 측면 유입관과 유출관 사이의 합류 맨홀 전, 후 구간에서의 압력수두 변화는 그림 1과 동일하였다.

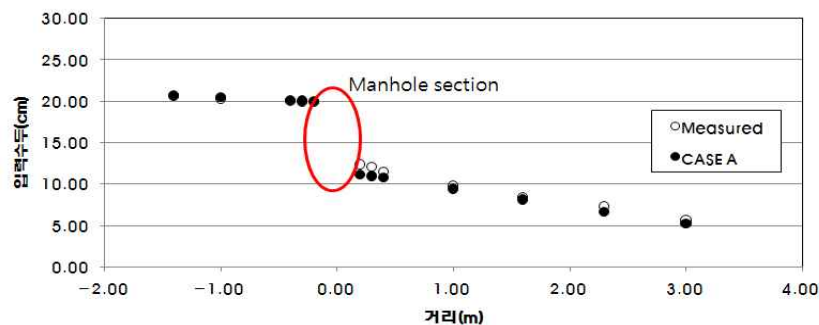


그림 1. 압력수두의 변화(수리모형실험 결과 비교)

과부하 합류 맨홀에서의 손실계수를 산정하기 위하여 Zhao 등(2006)은 합류 맨홀 입·출구부에서의 흐름의 연속방정식과 에너지 방정식으로부터 손실수두계수를 산정하는 식 (4)를 이용하여 합류 맨홀 각각의 유입관에 대한 손실계수를 산정하였다.

$$K_{13} = \frac{H_1 - H_3}{V_3^2/2g}; \quad K_{23} = \frac{H_2 - H_3}{V_3^2/2g}; \quad K = \frac{H_L}{V_3^2/2g} \quad (4)$$

여기서, H_i 는 각 관에서의 에너지수두이며, 첨자 i 는 각 관거를 나타낸다. K_{13} 는 직선 유입관과 유출관에

서의 손실계수, K_{23} 는 측면 유입관과 유출관에서의 손실계수이다. K 는 합류맨홀에서의 손실계수이다. 연속 방정식과 식 (4)를 이용하여 합류맨홀에서의 손실계수 K 를 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$K = \frac{Q_1}{Q_3} K_{13} + \frac{Q_2}{Q_3} K_{23} \quad (5)$$

본 연구에서는 수치해석 결과에서 구한 Δh 를 식 (4)와 (5)에 적용하여 손실계수를 산정하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있듯이 수치 모형에 의해서 산정된 손실계수 값이 수리모형 실험에 의해서 산정된 손실계수 값과 거의 유사하게 산정하고 있음을 알 수 있다. 이는 Chanwit, S. and Ian, G. (2002)의 연구결과와 유사하며, 우수 관거 시스템의 여러 형태의 합류 맨홀에서의 흐름의 변화 및 손실계수의 산정을 예측하는 데 있어서 Fluent 6.3 모형은 사용 가능하리라 판단된다.

표 2. 손실계수 비교

손실계수	실측값 (Laboratory)	계산값 (CASE A)
K_{13}	0.74	0.74
K_{23}	0.72	0.70
K	0.73	0.72

3.2 실제 합류맨홀에서의 손실계수 산정

실제 합류맨홀 규모 변화에 따른 손실계수 변화를 산정하기 위하여 유입관거의 유속 조건은 하수도시설 기준(2005)에 제시된 우수관거에서의 이상 유속(1.0m/sec)을 채택하고, 전 절의 수치모의 조건과 동일한 조건으로 수치모의를 수행하였다. 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 2는 실제 합류맨홀의 크기 변화에 따른 직선 유입관과 유출관 사이 합류 맨홀 전, 후의 모의 구간에서 압력수두의 변화를 압력 수두로 나타내었다. 그림 2는 그림 1의 결과와 동일하게 맨홀과 유출관의 접합부에서 수두 손실을 발생시키고 있음을 알 수 있으며, 합류 맨홀의 크기가 증가할수록 맨홀부분에 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 2와 동일하였다.

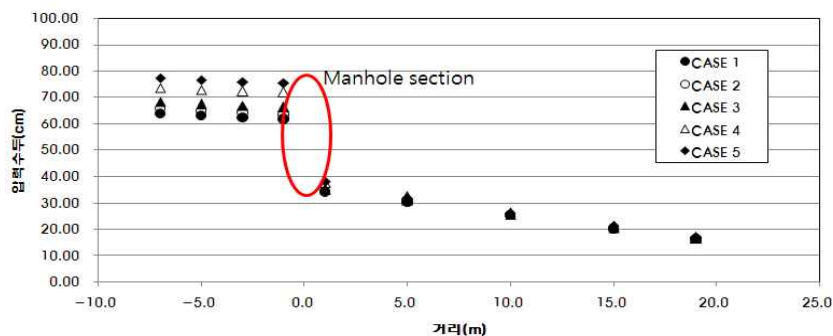


그림 2. 압력수두의 변화(실제 합류맨홀의 수치모의)

전 절에서와 같이 수치해석 결과에서 구한 Δh 를 식 (4)와 (5)에 적용하여 연결관경(d)과 맨홀의 폭(B)의 비(B/d)의 변화에 따른 손실계수를 산정하여 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이 B/d가 증가할수록 합류맨홀에서의 손실계수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 직선 연결맨홀에서 B/d가 증가할수록 손실계

수가 증가하는 Bo Pedersen and Mark(1990)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내고 있으므로, Fluent 6.3 모형을 이용하여 산정된 실제 합류맨홀에서의 손실계수는 우수관거 시스템의 설계 및 평가에 사용가능하리라 판단된다.

표 3. 맨홀 규모 변화에 따른 손실계수

손실계수	K_{13}	K_{23}	K
CASE 1	0.68	0.63	0.65
CASE 2	0.74	0.70	0.72
CASE 3	0.81	0.81	0.81
CASE 4	0.96	1.00	0.98
CASE 5	1.07	1.12	1.09

4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 유입관과 하나의 유출관으로 구성된 과부하 합류 맨홀에서의 손실계수를 계산하기 위하여 Fluent 6.3 모형을 적용하여 산정한 손실계수와 수리 모형 실험결과에 의해서 산정된 손실계수와 비교하였다. 또한 Fluent 6.3 모형을 이용하여 실제 합류맨홀의 규모 변화에 따른 손실계수를 산정하였다. 맨홀 내의 다상유동을 고려하기 위하여 VOF(Volume of Fluid) 기법을 적용하였으며, 수치해석 방법으로는 비정상류, 1st order implicit method를 사용하였다. Fluent에서의 난류 흐름을 계산하는 방법에는 난류 운동에너지 k 와 난류 에너지 소산율 ϵ 의 전달 방정식을 도입한 $k-\epsilon$ 난류 모형을 채택하였다.

수치모형의 적용 결과 맨홀 내에서의 유속변화, 수심변화 및 압력변화에 대해서는 수리모형 실험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 수치모형에 의하여 산정된 합류 맨홀에서의 손실계수 값과 수리모형에 의하여 산정된 손실계수 값이 거의 유사한 결과를 나타내었다. 또한 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 판단되며, 직선 연결맨홀에서 B/d가 증가할수록 손실계수가 증가하는 Bo Pedersen and Mark(1990)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내고 있으므로, Fluent 6.3 모형을 이용하여 산정된 실제 합류맨홀에서의 손실계수는 우수관거 시스템의 설계 및 평가에 사용가능하리라 판단된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 환경부 (2005). 하수도시설기준.
2. Bo Pedersen, F., and Mark, O. (1990). Head losses in storm sewer manholes : submerged jet theory, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(11), pp. 1317-1328.
3. Chanwit, Saiyudthong and Ian, Guymer. (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.
4. Fluent Inc. (2005). Fluent 6.3 User's Guide, Fluent Inc, New Hampshire, USA.
5. 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.