

과부하 사각형 맨홀에서의 수리학적 상사성 분석

Analysis of Hydraulic Similarity at Surcharged Square Manhole

김정수* · 윤영노** · 한정석*** · 윤세의****

Jung Soo Kim, Young Noah Yoon, Chyung Such Han, Sei Eui Yoon

요 지

우수 관거 시스템에서 맨홀의 설치 시 연결관 내부와 맨홀의 내부는 여러 가지 수리학적 조건이 다르므로 수두손실의 발생이 필연적일 수밖에 없다. 현재 계획 또는 설계단계에서 수행되고 있는 관거 시설의 수리계산에는 연결관 내에서의 마찰손실만을 고려하여 설계를 수행하고 있으며, 맨홀에서의 수두 손실은 거의 대부분 고려되지 않고 있다. 단지 맨홀에서의 수두손실을 저감하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)상의 단차 및 인버트 규정만 있을 뿐, 우수 관거 설계에 직접적으로 필요한 적절한 맨홀의 손실계수가 제시되지 않고 있는 실정이다. 국외에서는 축소 수리 모형을 이용한 실험과 수치해석 기법 등을 이용하여 맨홀에서의 손실계수를 산정하는 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나 국내에서는 맨홀의 손실계수 산정에 관한 연구가 미흡한 실정이며, 더욱이 맨홀에서의 손실계수 산정을 위한 상사성 적용에 관한 연구는 전무한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 맨홀의 축척 변화에 따른 손실계수의 변화를 분석하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)의 특 1호(사각형) 맨홀을 각각 1/2과 1/5로 축소 제작하고, 수리실험 장치를 제작하였다. Froude 상사법칙을 적용하여 1/2의 축소 모형의 실험 조건을 1/5 축소 모형의 값으로 환산하였으며, 각 축소 모형에 대한 수리 실험을 실시하였다. 과부하된 맨홀의 손실계수를 예측하는데 Froude 상사법칙의 사용 가능성을 확인하였으며, 1/2 축소 모형과 1/5 축소 모형에서 산정된 손실계수 값이 0.45로 일치하고 있으므로 우수 관거 시스템의 맨홀 설계 시, 축소 수리 모형실험에서 산정된 손실계수의 직접적인 적용이 가능하다고 판단된다.

핵심용어 : 사각형 맨홀, 과부하흐름, Froude 상사법칙, 손실계수

1. 서 론

우수관거 시스템에서 맨홀은 관거의 기점, 방향, 경사 및 관경 등이 변하는 곳, 단차가 발생하는 곳, 관거가 합류하는 곳이나 관거의 유지 관리상 필요한 장소에 반드시 설치된다. 또한 흙 두께가 적은 경우, 관거 증가지점에서 원형 맨홀이 설치되지 않을 경우나 다른 매설물 등의 관계 등으로 원형 맨홀의 설치가 어려운 경우에는 사각형 맨홀을 설치하고 있다. 관거 시설에서 맨홀의 설치 시 연결관 내부와 맨홀의 내부는 여러 가지 수리학적 조건이 다르므로 수두손실의 발생이 필연적일 수밖에 없다. 현재 계획 또는 설계단계에서 수행되고 있는 관거 시설의 수리계산에는 연결관 내에서의 마찰손실만을 고려하여 설계를 수행하고 있으며, 맨홀에서의 수두 손실은 거의 대부분 고려되지 않고 있다. 단지 맨홀에서의 수두손실을 저감하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)상의 단차 및 인버트 규정만 있을 뿐, 우수 관거 설계에 직접적으로 필요한 적절한 맨홀의

* 정희원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail : hydroguy@naver.com
** 정희원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 · E-mail : hydro-ono@hanmail.com
*** 정희원 · 부천대학 토목과 조교수 · E-mail : jshan@bc.ac.kr
**** 정희원 · 경기대학교 토목 · 환경공학부 교수 · E-mail : syoon@kyonggi.ac.kr

손실계수가 제시되지 않고 있는 실정이다. 국외에서는 축소 수리 모형을 이용한 실험과 수치해석 기법 등을 이용하여 맨홀에서의 손실계수를 산정하는 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나 국내에서는 맨홀의 손실계수 산정에 관한 연구가 미흡한 실정이며, 더욱이 맨홀에서의 손실계수 산정을 위한 상사성 적용에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 맨홀의 축척 변화에 따른 손실계수의 변화를 분석하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)의 특 1호(사각형) 맨홀을 각각 1/2과 1/5로 축소 제작하고, 수리실험 장치를 제작하였다. Froude 상사법칙을 적용하여 1/2의 축소 모형의 실험 조건을 1/5 축소 모형의 값으로 환산하였으며, 각 축소 모형에 대한 수리 실험을 실시하였다. 축척 변화에 따라 산정된 맨홀의 손실계수를 비교하여 우수 관거 시스템의 맨홀 설계에서 모형실험에 의해 산정된 손실계수의 직접 사용 가능성을 분석하였다.

2. 기본이론

2.1 Froude 상사법칙

중력이 흐름을 지배하는 경우 모형과 원형간의 흐름의 상사성에 대하여 신뢰할 수 있는 Froude 상사법칙이 일반적이며, 원형과 모형 간에 Froude 상사율을 적용하여 수리량을 환산할 수 있다. 그러나 관수로와 맨홀이 연결되는 구간에서 Froude 상사법칙을 적용하여 물리적 현상을 정확히 파악할 수 있다는 사실을 확인하기 위하여 실험을 실시하였다.

$$F_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad (1)$$

여기서, F_r 은 Froude 수이고, r 은 원형(p)과 모형(m)의 비를 나타낸다.

2.2 맨홀의 손실계수 산정

원형 맨홀에서의 손실계수를 산정하기 위하여 Sangster et al.(1958)은 맨홀 입·출구부에서의 흐름의 연속방정식과 운동량 방정식으로부터 손실수두계수를 산정하는 식 (2)를 제안하였으며, 이 식은 이후 Marsalek(1984), Bo Pederson and Mark(1990), Shinji and Tetsuya(1998) 등에 의하여 맨홀 내부의 손실계수 산정에 사용되었다.

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

여기서, Δh 는 맨홀 입·출구부의 수두차, K 는 맨홀내부의 손실계수, V 는 관거 평균유속이다

3. 수리실험

본 연구에서는 맨홀의 축척 변화에 따른 손실계수의 변화를 분석하기 위하여 그림 1과 같이 수리실험 장치를 제작하였다. 실험 모형의 총 길이는 약 13 m 이며, 고수조, 정류용 수조, 액주계,

아크릴관로, 원형 아크릴 맨홀 및 차집통으로 구성되어있다. 원형 아크릴 맨홀 및 아크릴 관로는 하수도시설기준(환경부, 2005) 상의 특 1호 맨홀(내경 900 mm)과 직경 300 mm의 유입 및 유출관을 1/2과 1/5로 축소하여 제작하였다. 또한, 유입관로 및 유출관로의 길이를 각각 450 cm로 하였으며, 정류 흐름을 유지하도록 하였다

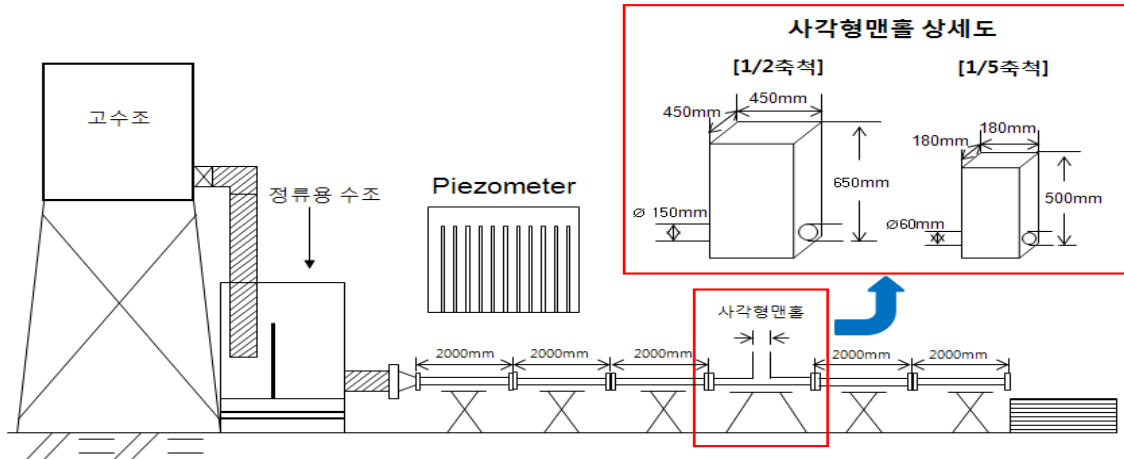


그림 1. 수리실험 장치

관거 내 에너지 수두의 변화를 측정하기 위하여 연결 관거의 하단부에 30 cm 간격으로 액주계를 설치하였으며, 사각형 맨홀의 입·출구 부에서 정확한 압력수두를 측정하기 위하여 사각형 맨홀의 전·후에 3 cm 간격으로 액주계를 설치하였다. 또한, 관거의 끝부분에는 실험유량을 측정하기 위하여 폭 90 cm, 길이 80 cm, 높이 70cm의 차집통을 설치하였으며, 액주계를 설치하여 차집통 내의 수위 변화를 측정하였다. 실험 유량을 일정하게 공급하기 위하여 지하저수조의 물을 고수조로 양정하여 일정 수위를 유지하도록 하였으며, 관내의 흐름을 정류상태로 유지하기 위하여 정류 수조(폭 120 cm, 길이 150 cm, 높이 120 cm)를 설치하였다. 1/2축소 모형에서 실험유량을 16ℓ/sec 결정하였으며, 이 때 맨홀 내부의 수심과 손실수두를 측정하였다.

맨홀의 축척 변화에 따른 손실계수의 변화를 알아보기 위하여 1/5축소 모형의 실험유량은 1/2축소 모형의 실험유량을 Froude 상사법칙을 적용하여 1.6ℓ/sec로 결정하여 맨홀 내부의 수심과 관거에 설치된 액주계를 이용하여 관로의 수두 변화량 및 사각형 맨홀 내부에서의 에너지 손실수두를 측정하였다. 수리 실험조건은 표 2와 같다.

표 2. 수리실험 조건

직사각형 맨홀의 크기 (cm×cm)	유입 및 유출관로의 길이 (cm)	실험 유량 (ℓ/sec)	접합 상태	흐름 상태
45 × 45	450	16	관저접합	정상류
18 × 18		1.6		

4. 실험결과

사각형 맨홀의 축척 변화에 따른 맨홀의 손실계수의 변화를 산정하기 위하여 1/2 축소 모형과 1/5 축소 모형에서 압력수두의 변화를 측정하였다. 그림 2는 축척변화에 따른 과부하 상태 사각형 맨홀의 수두 손실을 산정하기 위하여 실험 수로 전 구간에서의 수두변화를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 1/2 축소 모형에서의 압력 수두의 변화와 1/5 축소 모형에서의 측정된 압력 수두는 비교적 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러므로 모형 축소에 따른 유입 유량의 변화에 따라서 압력 수두의 측정값에는 차이가 나타나지만 압력 수두의 경사가 유사하게 나타나므로 모형 축척 변화에 따른 맨홀에서의 손실계수 변화에는 큰 영향을 미치지 못한다고 판단된다.

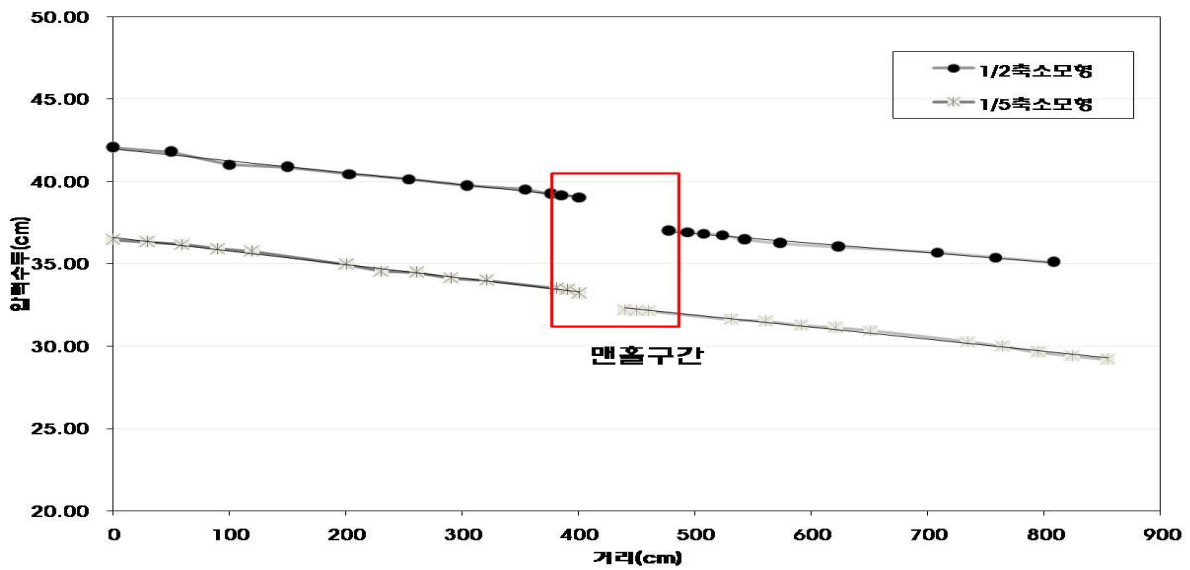


그림 2. 압력 수두의 변화

표 3. 실험 결과

축척	유입유량 (Q, l/sec)	평균유속 (V, m/sec)	맨홀 내 수심 (H, cm)	손실수두 (Δh , cm)	손실계수 (K)
1/2	16	0.9	17.6	1.85	0.45
1/5	1.6	0.56	7.9	0.7	0.45
Froude 상사 계산 결과	1.6	0.57	7.1	0.74	

표 3은 각 축척 모형실험에서 맨홀 내 수심(H), 관내 평균 유속(V) 및 맨홀에서의 손실수두 값 (Δh)과 측정된 손실수두 값과 유입유량으로부터 계산된 관 평균유속을 식 (1)에 적용하여 산정된 손실계수를 나타내고 있다. 표 3에서 알 수 있듯이 맨홀 내에서의 압력 수두의 변화량이 1/2 축소 모형에서는 1.85cm이고, 1/5 축소 모형에서는 0.7cm로 측정되었다. 1/2 축소 모형에서 측정된 압력 수두에 Froude 상사법칙을 적용하여 1/5 축소 모형으로 계산하면 0.74cm가 되므로, 1/5 축소 모형에서 측정된 압력 수두는 실험오차를 감안한다면 비교적 계산 값과 유사한 값을 나타내고 있다고 판단된다. 또한 산정된 각 축척 모형에서 산정된 손실계수 값이 0.45로 일치하는 것을 알 수

있다. 이는 수리 모형실험을 이용하여 산정된 맨홀에서의 손실계수 값을 실제 맨홀의 손실계수에 적용이 가능하다고 판단된다. 그러므로 우수 관거 시스템의 맨홀 설계 시, 축소 수리 모형실험에서 산정된 손실계수의 직접적인 적용이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 맨홀의 축척 변화에 따른 손실계수의 변화를 분석하고 과부하 사각형 맨홀의 손실계수를 예측하는데 Froude 상사법칙의 사용 가능성을 확인하기 위하여 하수도시설기준(환경부, 2005)의 특 1호(사각형) 맨홀을 각각 1/2과 1/5로 축소 제작하고, 수리실험 장치를 제작하였다. Froude 상사법칙을 적용하여 1/2의 축소 모형의 실험 조건을 1/5 축소 모형의 값으로 환산하였으며, 각 축소 모형에 대한 수리 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 관수로와 연결된 과부하 맨홀에서 Froude 상사법칙의 적용성을 확인하였다.

2. 1/2 축소 모형에서의 압력 수두의 변화와 1/5 축소 모형에서의 측정된 압력 수두는 비교적 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 모형 축소에 따른 유입 유량의 변화에 따라서 압력 수두의 측정값에는 차이가 나타나지만 압력 수두의 경향성이 유사하게 나타나므로 모형 축척 변화에 따른 맨홀에서의 손실계수 변화에는 큰 영향을 미치지 못한다고 판단된다.

3. 1/2 축소 모형과 1/5 축소 모형에서 산정된 손실계수 값이 0.45로 일치하고 있으므로 우수 관거 시스템의 맨홀 설계 시, 축소 수리 모형실험에서 산정된 손실계수의 직접적인 적용이 가능하다고 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술 혁신사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구 성과입니다.

참 고 문 헌

1. 윤세의, 김정수, 장석진, 운영노 (2007). "직사각형 맨홀의 구조 변화에 따른 에너지 손실 분석", 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 537-541.
2. 최원석, 송호면 (2002). "하수맨홀의 수리학적 특성에 관한 연구", 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집, pp. 13-16.
3. 환경부 (2006). 하수도시설기준.
4. 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.
5. Marsalek, J. (1984). "Head Losses at Sewer Junction Manholes", *Journal of hydraulic engineering*, vol. 110, No. 8, pp. 1150-1154.
6. Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerden, E.T. and Bossy, H.G. (1958). "Pressure Changes at Storm Drain Junctions", *Engineering Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia, Bull. No. 41.*
7. Takashi Sakakibari, Shuji Tanaka and Toshihiro Imaida. (1997). "Energy Loss at Surcharged Manholes-Model Experiment", *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 36, No. 8/9, pp. 65-70.