관망 축소모형의 개발 및 검증

Development and Verification of a Pipe Network Scale Model

김동준* · 유다해** · 최경민*** · 이정호****

Kim, Dong Jun*, Yu, Da Hae**, Choi, Gyung Min***, and Lee, Jung Ho****

Abstract

The main function of a water supply and storm sewer pipe network is to properly maintain planned flow rates, water pressure, and water depth within pipes. This can be simulated with a numerical analysis model. In general, model experiments are required to verify and correct the accuracy of numerical analysis models, but due to the nature of complex facilities, scale model experiments and related studies are very limited. Therefore, this study aimed to develop a kit capable of general-purpose scale model experiments for water and sewage networks, and verified the applicability of the developed model through simple experiments. A set of model experimental parts, including manhole parts, pipe connections, and venturi meters for pipe network implementation and measurement, was manufactured with a three-dimensional printer (Stratasys F170). The angle, height difference, and slope of the pipe could be adjusted. A pipe connection cap was developed to implement all commercial circular pipes with a diameter of 300 mm to 1,200 mm based on 1/50 scale. A transparent acrylic pipe was used. EPANET analysis indicated that the scale model experiment of the water supply network, with 13 manholes, 18 pipelines, and 5 venturi meters had a flow error of about 13% in the total pipeline and about 8% in the venturi meter measurement value. In addition, a scale model of the storm sewer pipe network was developed to determine the change in water depth according to the connection angle of the pipe. Results of simulations in FLUENT showed a similar trend in water depth change.

Key words : Water Supply Network, Storm Sewer Network, Scale Model, EPANET, FLUENT

요 지

상하수관망은 계획된 유량 및 수압, 관내 수심 등이 적정히 유지되는지가 주요 관심사이며, 이를 모의 해석하는 방법은 수치해석 모형을 이용하는 것이 절대적인 현실이다. 일반적으로 수치해석 모형의 정확도를 검증하고 보정하기 위해서는 모형실험이 필요하나 복잡한 복합 시설물이라는 그 특성상 축소모형 실험 및 관련 연구는 매우 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구에서는 상하수도관망에 대하여 범용적 축소모형 실험이 가능한 실험용 모형 키트를 개발하고자 하였으며, 간단한 실험을 통하여 그 적용성을 검증하였다. 관망 구현 및 계측을 위한 맨홀부품, 관 연결부, 벤츄리미터, 유량조절용 스프레이헤드 등을 포함한 모형실험 부품세트(상하수도관망키트)는 3D 프린터(Stratasys F170)로 제작되었다. 또한 연결관의 연결 각도와 단차, 관로 경사를 조절할 수 있으며, 축척 1/50을 기준으로 $\varnothing 300$ mm~ $\varnothing 1,200$ mm의 모든 상업용 원형 관경을 구현할 수 있도록 관 연결캡을 개발하였고, 관로는 투명 아크릴관을 이용하였다. 이를 이용한 축소모형 실험에서는 맨홀 13개, 관로 18개, 벤츄리미터 5개로 이루어진 상하수도 축소모형 실험을 시행한 결과, EPANET을 통한 해석 결과와 전체 관로에서는 약 17%, 벤츄리미터 계측값에서는 약 10%의 유량 오차가 나타났다. 또한 우수관망 축소모형 실험은 관거의 연결 각도에 따른 수심 변동에 대하여 시행되었으며, 이를 FLUENT로 모의한 결과 매우 유사한 수위 변동 경향을 나타내었다.

핵심용어 : 상하수관망, 우수관망, 축소모형, EPANET, FLUENT

*정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: junhydro@gmail.com)

Member, Master Course Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

**정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: dahae9095@gmail.com)

Member, Master Course Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

***정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: withckm@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

****교신저자, 정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-42-821-1612, Fax: +82-42-821-1589, E-mail: leejh@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

1. 서 론

상하수도관망은 가장 기본적인 시설물로 도심지 및 지역 사회를 구성하고 유지하는 근간이 되며, 이러한 시설물의 상시적인 계측과 유지관리는 도시민의 기본적인 삶의 유지 및 편의를 위해 필수적이다. 상수도 시설의 주요 구성물인 수도관은 지하 매설물이기 때문에 최초 시공 후에는 실제 관로 내에 흐르는 수돗물의 수압, 수량 등이 적정선을 유지하고 있는지 실측하기가 매우 어려운 현실이다. 다만, 설계 단계에서 수치해석모형을 이용하여 전체 관로 내에 수돗물의 흐름에 대한 수압 및 수량 등을 분석하고 이를 설계 및 시공에 반영하고 있으나, 실제 해당 관로 각각에 분석된 흐름이 진행되는 지에 대해서는 불확실성이 내포될 수밖에 없다. 우수관망의 경우 향후 기후변화와 도심지 침수피해의 발생 위험을 분석하고 이에 대한 재해대책을 중·장기적으로 수립하고자 노력이 다양하게 이루어지고 있으며, 이를 위해서는 도심지 침수상황에 대한 정확한 모의가 기반 되어야 하며, 현재 학계 및 산업체에서는 다양한 수치해석 모형을 이용하여 하수관망에서의 수리해석 및 침수모의를 수행하고 있으며, 이를 통한 재해 방어대책을 수립하고 있다. 일반적인 수치모형의 정확도를 향상시키고 신뢰성이 있는 모의결과를 획득하기 위해서는 실제 현장에서의 실측 및 축소모형 실험 등이 병행되어야 한다. 그러나 상하수도관망의 경우 개별 단위의 시설물이 아닌 매우 복잡하고 거대한 구조물의 연결 고리 형태라는 특수성과 지하매설물이라는 난해함으로 인하여 실측이 매우 어려우며, 그렇기에 축소모형을 통한 부분적인 실험과 계측을 통해 특이점을 포착하고 이를 수치해석 모형에 적용하는 것이 바람직하다.

모형실험에 대한 연구에 있어서 국내의 경우 Lee et al. (2012)이 상습침수 지역에 대하여 유출량을 분석하고 침수의 영향이 큰 특정건물의 저류조 설치 유무에 따른 침수 발생 양상에 대한 수리모형 실험을 실시한 바가 있으며, Kim and Lee (2018)는 실규모 수리모형 실험을 통하여 침수 계단에서의 유속과 수심 자료를 이용하여 대피 안정성에 대하여 분석한 바 있다. 또한 Lee et al. (2018)은 수제 하류에서 발생하는 이차류 흐름 및 수제 설치로 인한 흐름의 혼합 패턴 및 수위 변화 양상을 분석하기 위한 개수로 실험을 실시한 바 있으며, Ryou et al. (2021)은 실내 수로 모형실험을 통해 토석류의 흐름 특성 중 유속, 흐름 깊이, Froude 수, 흐름저항계수를 산정하고 수로 경사에 따른 토석류 발생 양상에 대하여 분석한 바 있다. 그러나 이상의 연구들은 실제 수로 내에서의 흐름 양상에 대한 실험 및 분석이 주된 관점이 아니었으며, 근래 수로를 대상으로 한 모형실험에 있어서 Choi et al. (2021)은 급류지역에서의 수로관 인명사고 발생피해를 저감시키고자 하는 목적으로 실제 사고 발생 현장에 대한 축소모형을 제작하여 다양한 조건에 따른 유속을 측정하고 이에 따른 위험성을 분석한 바가 있다. 또한

Park et al. (2017)은 우수배제를 위해 설계된 분기수로에서 발생하는 에너지손실을 계산하기 위한 손실계수의 경험식을 산정하기 위해 수리모형 실험을 수행하였으며, 유입수로와 유출수로에서 압력수두와 속도수두를 측정하여 분기수로에서 발생하는 에너지 손실을 분석한 바 있다.

국외의 경우 수로 관련 모형실험은 주로 실측치와 CFD 모델 분석결과와의 비교 형태가 대표적이며, 이와 관련하여 Ho et al. (2007)은 3×3 규모의 상수관망 축소모형에 대한 실측값과 CFD 모델의 결과를 비교 분석한 연구가 있었으며, Grbčić et al. (2019)은 상수관 축소모형을 이용하여 관에 대한 T자 접합 실험 및 CFD 모델 결과를 비교 분석 연구를 진행하였다. 이외에도 Fathy et al. (2020)의 경우에는 우수관거에서의 상습적인 관내 폐색에 따른 우수배제 능력의 저감에 있어서 관 축소모형을 이용하여 관 폐색률에 따른 관거의 배제 효율성에 관하여 연구한 바가 있다.

기존의 대부분의 연구들은 특정한 사건 및 문제점이 발생된 구간과 구조물 등에 대하여 이를 실물 및 축소모형으로 구현하고, 이에 대한 문제 발생의 재현과 수치해석을 통한 검증으로 이어지고 있다. 본 연구에서는 설치와 분해가 가능하며, 다양한 관망 구성을 재현하며, 상수도 및 하수도에 범용적으로 적용할 수 있는 관망 구성품들을 개발하고자 하였다. 또한 상하수도관망에 대한 축소모형실험을 진행할 수 있도록 적정한 실험기술 및 실험장치를 개발하였으며, 이를 통해 다양한 관망 구성의 적용성과 계측된 결과의 신뢰성을 기초적으로 검증하고자 하였다. 축소모형 구성품들의 제작은 모형 제작의 편의성과 비용 절감을 고려하여 3D 프린터를 이용하였으며, 제작된 구성품들을 이용하여 상수도 관망 및 우수 관망의 축소모형 실험을 진행하였다. 상수도 관망의 축소모형실험의 경우 폐합관로 내에서의 유량 및 수압에 대한 측정이 이루어졌으며, 이에 대해서는 EPANET을 통해 비교 검증하였다. 또한 우수 관망의 축소모형실험의 경우 하나의 맨홀을 중심으로 유입관로와 유출관로의 배열 각도 변화에 따른 맨홀 내 수심 변화에 대하여 실험하였으며, 이에 대해서는 FLUENT를 통해 비교 검증하였다.

2. 관망 축소모형의 개발

관망 축소모형의 구성품 제작을 위해 본 연구에서 사용한 3D 프린터는 큐비콘사의 싱글플러스(3DP-310F)모델로 해당 모델은 밀폐형 구조와 대류 순환 기능이 있어 베드, 노즐의 온도 및 내부 대류온도까지 일정하게 유지를 시켜줄 수 있고 재료와 환경에 제한을 받지 않고 안정적인 출력을 할 수 있다. 3D 프린터의 주재료로 ABS-A100 필라멘트를 사용하였는데 해당 필라멘트는 흔히 쓰이는 플라스틱 제품으로 다양한 분야에 사용되며 점착성이 우수하고 유해물질이 거의 없어 인체에 안전한 재료이다. 하지만 수축성이

있어 큰 조형물이나 형상의 차이에 따라 프린팅 시 균열이나 휨 현상이 발생할 수 있는 단점이 있다. 본 연구에서는 관망 부속품에 해당하는 맨홀 조각, 관거 연결고리 등과 유량 측정장치로 벤추리미터를 3D 프린터를 통하여 제작하였다.

2.1 관망 부속품의 설계 및 제작

맨홀을 축소모형으로 제작할 때 중요한 요소는 유입구와 유출구의 연결 각도, 맨홀과의 단차 그리고 유입(출)관의 경사각이 있다. 이에 대한 제원은 다양하며 맨홀 키트는 범용성을 가져야한다. 본 연구는 이를 고려하여 맨홀 키트를 제작하였다. 본 연구는 유입구와 유출구의 연결 각도 조절을 위하여 10°, 15°, 30°, 60°, 90°의 5개 제원으로 구성하였다. 또한, 관의 단차를 고려하여 조절이 가능하도록 부품을 10 mm, 20 mm, 30 mm, 60 mm로 제작하였다. Figs. 1과 2는 맨홀 부품들에 대한 도안을 나타내고 있으며, Fig. 3은 이에 대한 제작 부품 및 연결된 맨홀 모형 실물을 나타내고 있다. 특히 Fig. 2에서처럼 맨홀에 연결된 유입(출)관의 경사를 조절하기 위하여 맨홀의 유출부와 유입부의 위치에 연결부품을 제작하였다.

Fig. 1. Manhole Components

Fig. 2. Slope Control Part

Fig. 3. Manhole Model

관거의 경우 3D 프린터의 출력 길이에 제한이 있어 아크릴 관으로 대체하였다. 시중에 판매중인 아크릴관의 직경은 5 mm~1,000 mm이며, 하수관거의 제원은 300~650 mm까지 50 mm 단위로 증가하며 700 mm~1,200 mm까지는 100 mm 단위로 증가하여 총 14가지의 관경을 기준으로 아크릴관 내경에 맞추어 축척비를 1/50으로 산정하였으며, 이를 통해 6~24 mm의 아크릴관이 사용되었다. Fig. 4는 맨홀 구성품에 아크릴관을 연결한 상태를 나타내며, Table 1은 축척비 1/50에서의 관거 실제제원과 축척을 적용한 제원을 나타낸다.

2.2 유량 측정 장치

축척모형에서는 Fig. 5와 같이 펌프를 통하여 상부 수조 내에 물을 공급하여 일정 수두를 형성시키도록 유지한 상태에서 밸브를 열어 고무호스를 통하여 축소관망 유입구로 물이 공급되도록 실험장치를 계획하였다. 여기서 수조로부터 공급되는 물의 양을 측정하기 위하여 순간유량계를 사용하였으며, 고무호스로 순간유량계의 유입과 유출구에 연결된 형태로 손쉽게 측정이 가능하다. 축소모형실험에 사용된

Fig. 4. Connection of Acrylic Pipe

Fig. 5. Water Supply System and Flowmeter

Table 1. Data Observed in Scale Model Experiment

Case	Total Head in T1 (H) (cm)	Flow in P ₁ (Q _{in}) (CMH)	Water level observed in piezometer of venturi meter (h ₁ , h ₂) (cm)					Flow in T2 (Q _{out}) (CMH)
			V1	V2	V3	V4	V5	
Case1	209.5	0.372	h ₁ = 45.5 h ₂ = 24.6 △h = 20.9	h ₁ = 51.0 h ₂ = 15.9 △h = 35.1	h ₁ = 51.7 h ₂ = 41.7 △h = 10.0	h ₁ = 47.0 h ₂ = 4.5 △h = 42.5	h ₁ = 17.0 h ₂ = 14.6 △h = 2.4	0.276
Case2	207.0	0.372	h ₁ = 35.8 h ₂ = 15.1 △h = 20.7	h ₁ = 51.1 h ₂ = 16.0 △h = 35.1	h ₁ = 51.9 h ₂ = 41.5 △h = 10.4	h ₁ = 46.3 h ₂ = 4.0 △h = 42.3	h ₁ = 16.5 h ₂ = 14.1 △h = 2.4	0.276
Case3	206.7	0.363	h ₁ = 36.8 h ₂ = 16.6 △h = 20.4	h ₁ = 43.0 h ₂ = 7.8 △h = 35.2	h ₁ = 52.5 h ₂ = 42.2 △h = 10.3	h ₁ = 46.7 h ₂ = 3.2 △h = 43.5	h ₁ = 16.3 h ₂ = 13.9 △h = 2.4	0.275

Fig. 6. Venturi Meter

순간유량계는 최대 2.0 GPM의 유량까지 계측이 가능하다. 또한 상수관망의 모의실험을 위해서는 폐합관로 내 관저의 유량을 측정하는 장치가 필요하며, 본 연구에서는 축소모형 규격에 맞는 벤추리미터를 3D 프린터로 제작하였다. Fig. 6은 벤추리미터의 도안 및 제작품을 나타낸다.

3. 관망 축소모형 실험

3.1 상수관망 축소모형 실험

본 연구에서 개발된 축소모형 실험 기자재를 이용하여 간단한 폐합회로 상수관망을 구성하였다. 구성된 관망은 1개의 물 공급 수조, 13개의 절점과 19개의 관저로 구성되어 있으며, 관로별 유량 계측을 위하여 5개의 주요 구간에 3D 프린터로 제작된 벤추리미터를 설치하였다. 또한 물 공급 수조로부터의 유입량은 관유량계를 통하여 계측하였으며, 최종 유출 유량은 직사각형 수조(L = 31 cm, W = 12 cm)를 통하여 계측하였다. 모형실험을 위해 구성된 관망 및 이에 대한 구성도는 Figs. 7 및 8과 같으며, Figs. 9~11과 같이 13개 절점의 높이를 달리한 총 3가지 케이스에 대하여 관내 계측 유량(observed data)과 EPANET을 통해 해석된 관로 유량(analyzed data)을 비교 분석하였다. 각 케이스별 5개의 벤추리미터에서 계측된 데이터는 Table 1에 나타내었다.

이에 대하여 절점별 높이(위치수두)를 달리 한 3개 케이스에 대한 관망 제원과 벤추리미터를 통해 계측된 유량 및 이를 통한 각 관로의 유량 계측치를 EPANET의 해석 유량과

Fig. 7. Scale Model for Water Supply Network

Fig. 8. Schematic Water Supply Network

비교한 결과는 Table 2와 같다. 시점부와 종점부에서 계측된 유량에 있어서 약 0.1 CMH의 차이를 나타내는데, 이는 실험 과정에서 각 맨홀별로 발생한 누수량에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 EPANET 상에서의 수치해석 모형에서는 이를 각 맨홀에서의 수요량으로 적용하였다. 그 결과 각 관로별 해석 유량이 계측된 유량과 비슷한 경향을 나타내었다.

분석결과 관망 모형실험에 의한 관로별 계측 유량과 EPANET을 통한 해석 유량간에는 전체 관로에대해서는 15.8~17.8%의 유량 오차를 나타낸 반면, 벤추리미터에 의하여 직접 계측된 5개 관로에 대해서는 10% 내외의 비교적 높은 정확도를 나타내었다. 이러한 결과는 제작된 관망 축소모형이 상수

Table 2. Flow Rate Observed in Scale Model and Flow Rate Analyzed in EPANET

Pipe	Pipe diameter (mm)	Pipe length (cm)	Flow rate in Case1		Flow rate in Case2		Flow rate in Case3	
			Observed Q_{obs} (CMH)	Analyzed Q_{sim} (CMH)	Observed Q_{obs} (CMH)	Analyzed Q_{sim} (CMH)	Observed Q_{obs} (CMH)	Analyzed Q_{sim} (CMH)
P1	24	50	0.372	0.370	0.372	0.370	0.363	0.360
P2	24	50	0.364	0.360	0.364	0.360	0.356	0.350
*P3	9	45	0.118	0.170	0.118	0.170	0.118	0.170
P4	9	45	0.071	0.080	0.072	0.080	0.071	0.080
P5	9	45	0.238	0.180	0.238	0.180	0.230	0.170
P6-1	9	45	0.039	0.090	0.038	0.090	0.040	0.090
P6-2	9	45	0.139	0.080	0.140	0.080	0.134	0.070
*P7-1	9	45	0.063	0.070	0.064	0.070	0.064	0.070
P7-2	9	45	0.075	0.060	0.073	0.060	0.075	0.060
*P8	9	100	0.091	0.090	0.091	0.090	0.089	0.090
P9-1	9	100	0.095	0.100	0.096	0.100	0.091	0.100
P9-2	9	45	0.083	0.090	0.083	0.090	0.082	0.080
*P10-1	9	100	0.130	0.120	0.129	0.120	0.131	0.120
P10-2	9	45	0.097	0.110	0.098	0.110	0.095	0.110
P11	9	90	0.073	0.070	0.073	0.070	0.071	0.060
*P12-1	24	90	0.219	0.220	0.219	0.220	0.219	0.220
P12-2	9	45	0.065	0.060	0.065	0.060	0.063	0.060
P13	24	35	0.276	0.270	0.276	0.270	0.275	0.270
Average error rate in all pipes (%)			-	16.1	-	15.8	-	17.8
Average error rate in V1~V5 (*) (%)			-	10.1	-	9.6	-	9.9

Fig. 9. Observed and Analyzed Flow Rates (Case1)

Fig. 10. Observed and Analyzed Flow Rates (Case2)

Fig. 11. Observed and Analyzed Flow Rates (Case3)

관망의 부분적 해석에 있어서 충분히 활용 가능한 신뢰성을 나타내고 있다는 것을 나타내며, 다만 구성된 모형 기자재에서 발생하는 부분 누수들에 의하여 나타나는 오차에 있어서는 향후 모형 구성품들의 수밀성 향상에 대한 보완 연구의 필요성을 나타내고 있다.

3.2 우수관망 축소모형 실험

본 연구에서 제작된 관망 구성품을 우수관망에 대한 축소 모형실험에 적용해 보았으며, 이번 실험에서 주요하게 살펴보고자 한 것은 연결 관로의 각도에 따른 수심 변동에 대한 것이다. 지난 2010년 광화문 침수사례에서 언급된 침수원인 중 하나로 관로의 연결각도가 급격히 이루어진 구간에서 수심 상승에 따른 침수 발생이 제시된 바 있다. 반면 기존의 우수관로 및 침수 현상에 대한 수치해석 측면에서는 주로 SWMM을 사용하고 있는데, 이러한 2차원 해석 프로그램에서는 관로의 꺾임 구조를 직접적으로 구현할 수 없으며, 따라서 그에 따른 수심 상승을 모의할 수 없다.

본 연구에서는 하나의 맨홀을 중심으로 유입관로와 유출 관로간의 연결 각도를 90° , 135° , 180° 의 세 가지 케이스에 대하여 축소모형실험을 진행하였으며, 수치해석 모형을 통한 검증은 대표적인 3차원 모델인 ANSYS-FLUENT를 이용하였다. Fig. 12와 같이 관거의 일정 경사를 유지하기 위해 각 맨홀의 바닥면으로부터의 높이는 가장 낮은 맨홀(1st stage)이 5 cm이며, 중간 맨홀(2nd stage)은 10 cm, 가장 높은 맨홀(3rd stage)은 15 cm에 해당한다. 이때 유입 유량은 10-20 LPM으로 2.5 LPM씩 증가시켰으며, 중간 맨홀을 중심으로 유입 관로와 유출 관로간의 꺾임 정도에 따른 맨홀 내 수심 변화에 대하여 관측하였다. 또한 이에 대하여 FLUENT를 이용한 관로 구성은 Fig. 13과 같이 축소모형의 노드와 링크의 내경을 같도록 설계하였으며, 링크의 길이는 1 m (1,000 mm)로 설정하였고 수심 측정을 위한中间的 맨홀 노드의 높이는 충분한 여유고를 확보하기 위하여 500 mm로 구성하였다. 격자는 ANSYS-WORKBENCH 내부 격자형성 모델을 활용하였고 적용된 상세 경계조건은 Table 3과 같다.

본 연구에서는 난류유동의 해석을 위해 현재까지 가장 범용적인 난류모델인 Launder and Spalding (1974)의 Standard k- ϵ 모델을 사용하였으며, 난류모델은 기본적으로 난류전단 응력과 유동 특성간의 선형 함수 관계를 가정한 Boussinesq 가정에 기반하며 Fluent 모형에서는 Reynolds stress 항을 분자점성에 의해 발생하는 전단응력과 같이 그 응력의 크기를 평균속도의 변형률(속도구배)에 비례한다고 가정한 다음의 Boussinesq 모델을 사용(Schmitt, 2007)하였다.

유입유량 20 LPM에 대한 FLUENT 해석 결과는 Fig. 14와 같으며, 이에 대한 구체적인 수치와 변화 그래프는 Table 4 및 Fig. 15에 나타내었다.

FLUETN를 통한 해석 결과에서는 각 유입유량에 대하여 관로 연결 각도가 90° 인 경우 수심이 가장 높게 형성되었으

(a) Structure of storm sewer pipe network

(b) Scale model of storm sewer pipe network

Fig. 12. Overview of Storm Sewer Pipe Network

Fig. 13. Structure of Pipe Network in FLUENT

Table 3. Boundary Conditions for FLUENT Analysis

Classification	Boundary conditions
Multiphase flow	■ Air-Water
Fluid Models	<ul style="list-style-type: none"> ■ Standard free surface model ■ Turbulent flow ■ k-Epsilon model ■ Scalable wall function
Fluid Pair Models	<ul style="list-style-type: none"> ■ Surface tension coefficient : 0.072 N/m ■ Continuum surface force Model ■ Primary fluid : Water ■ Free surface interphase transfer
Inlet Conditions	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bulk mass flow rate ■ Inlet volume fraction
Outlet Conditions	<ul style="list-style-type: none"> ■ Opening Pres. and Dim ■ Opening volume fraction
Wall Conditions	■ No slip wall
Convergence	■ 0.001

며, 그다음으로 135° 와 180° 순으로 낮아지는 것으로 나타났다. 특히, 직선관로인 180° 의 경우에 비하여 90° 인 경우는

Fig. 14. Results of FLUENT (20 LPM)

Table 4. Water Depth Analyzed in FLUENT

Flow (LPM)	Angle		
	90°	135°	180°
10.0	4.18	3.67	2.02
12.5	4.58	4.07	2.22
15.0	5.09	4.66	3.03
17.5	5.96	5.04	3.20
20.0	7.49	5.83	3.37

Fig. 15. Water Depth Analyzed in FLUENT

모든 유입유량에 대하여 평균 198%의 수심 상승에 해당하며, 135°는 170%의 수심 상승을 나타내었다. 이는 직선관로에 비하여 관로의 꺾임 현상이 심할수록 수심 변화에 매우 민감하게 작용할 수 있음을 의미한다.

이에 대한 축소모형실험을 통한 관측 결과는 Table 5 및 Fig. 16과 같다. 실험 결과는 FLUENT의 해석 결과와

Table 5. Water Depth Observed in Scale Model

Flow (LPM)	Angle		
	90°	135°	180°
10.0	4.5	3.5	2.7
12.5	4.8	3.3	4.7
15.0	6.6	4.5	5.5
17.5	8.0	4.5	4.5
20.0	7.0	5.5	5.1

Fig. 16. Water Depth Observed in Scale Model

같이 관로 연결각도가 90°인 경우 수심이 가장 높게 나타나는 것으로 관측되었다. 그러나 유입유량 12.5~17.5 LPM 구간에서 135°와 180°인 경우의 수심 측정치가 FLUNET와 달리 역전되거나 동일하게 나타나는 현상이 관측되었다. 이러한 현상에 대한 원인에 대해서는 향후 정밀한 추가 연구를 통해서 규명해야 할 것을 판단되며, 다만 해당 유입유량에 대하여 관로 내 흐름이 일부 구간에서 압력류의 흐름과 자유수면 흐름 상태가 반복적으로 교차되는 현상이 나타났으며 이에 따른 영향이 발생하였을 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고 연결각도 180°에 비하여 90°인 경우 모든 유량 구간에서 평균적으로 약 141%의 수심 증가를 나타내고 있는 것으로 확인되었다.

4. 결론 및 고찰

상하수도관망에 대한 해석은 주로 수치해석 모델을 이용한 연구가 주를 이루고 있으며, 모형실험의 경우 특정 현상에 초점을 맞추어 그에 맞는 일회성 구조물을 형상화하여 진행하고 실험 종료 후에는 폐기되는 경우가 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 범용성 및 신뢰성을 갖는 상하수도관망 모형 키트를 제작하고 이에 대한 기초적인 검증을 진행하였다.

본 연구에서 제작된 관망 모형키트는 그 구성품을 이용하여 다양한 형태의 상하수도 관망 구조를 조립하여 형상화할 수 있으며, 세부적으로는 다양한 상업용 관경, 관 경사, 연결 관의 각도, 맨홀의 높낮이 등을 조정할 수 있도록 구성되었다.

아울러 제작된 모형 구성품을 이용하여 간략한 폐합회로의 상수도 관망에 대하여 모형실험을 진행한 결과 EPANET을 통한 수치해석 결과와 유사한 유량 패턴을 나타내는 것으로 확인되었다. 다만, 관로 구성품의 연결부위에서의 누수가 발생되어 유량 절대치에 대한 오차가 발생되나 이를 보정한 각 관로의 유량 패턴에 있어서는 모형키트의 신뢰성을 확보 할만 하다고 판단된다. 또한 우수관망을 형성화한 모형실험에서는 유입관과 유출관의 연결 각도에 따른 맨홀 내 수심 변화에 대하여 분석되었으며, 이를 FLUENT 모형을 통한 수치해석 결과와 비교 검토하였다. 그 결과 연결 각도 180°에 해당하는 직선관로에 비하여 연결 각도 90°의 경우 맨홀 내 수위가 수치해석의 경우 약 98%, 모형실험의 경우 약 41% 상승하는 것으로 나타났다. 직선관로에 비하여 직각으로 꺾인 관로에 있어서 수위 상승이 현격히 이루어지는 것에 있어서는 동일한 결과를 나타내었으나 수심 상승의 정도 및 연결 각도 135°에 대한 수심 역전 현상 등에 대해서는 추가 실험을 통한 면밀한 해석이 필요한 것으로 분석되었다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 개발된 관망 축소모형 실험키트는 상하수관망의 특성상 구성의 복잡성과 일회성 등에 의하여 축소모형 실험이 매우 제한적인 현실에 비추어 향후 관련분야 실험 연구의 접근성을 높여줄 것으로 기대된다. 또한 상하수도공학의 전공지식을 가르치는 교육기관에서 관망의 구조적 설명과 현상적 이해에 효과적인 교보재로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 다만, 현재의 관망 구성품은 수밀성 개선이 필요하며, 예측된 결과의 정확도를 향상시키기 위한 추후 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서의 유량의 정확도 검토뿐만 아니라 압력에 대한 계측 실험과 이에 관한 연구가 추가되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

References

- Choi, S.W., Choi, A.Y., and Han, D.H. (2021). Analysis of risks associated with water pipes in rapid flow waterways through waterway modeling experiments. *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 51-58.
- Fathy, I., Abdel-Aal, G.M., Fahmy, M.R., Fathy, A., and Zelenáková, M. (2020). The negative impact of blockage on storm water drainage network. *Water*, Vol. 12, No. 7, 1974.
- Grbčić, L., Kranjčević, L., Lučin, I., and Čarija, Z. (2019). Experimental and numerical investigation of mixing phenomena in double-tee junctions. *Water*, Vol. 11, No. 6, 1198.
- Ho, C.K., Choi, C.Y., and McKenna, S.A. (2007). Evaluation of complete and incomplete mixing models in water distribution pipe network simulations. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*, pp. 1-12.
- Kim, M.H., and Lee, D.H. (2018). A study on safety at stairs flow using the real-scale hydraulic model experiment. *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 5, No. 4, pp. 210-218.
- Lauder, B.E., and Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289.
- Lee, J.Y., Jeon, J.S., Kim, Y.K., and Kang, S.K. (2018). Flume experiments for studying the effects of submergence on three-dimensional flow structure around a spur dike. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 2, pp. 109-120.
- Lee, N.E., Jeon, B.H., Shin, D.S., and Jo, D.J. (2012). Flooding trend analysis according to the installation of the Underground storage tank through Hydraulic Model Experiment. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers 2012 Convention*, pp. 1778-1781.
- Park, I.H., Seong, H.J., Kim, H.J., and Rhee, D.S. (2017). Estimation of head loss coefficient empirical formulas using model experimental results in a 90° angle dividing channel junction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 6, pp. 989-999.
- Ryou, K.H., Chang, H.J., and Lee, H.J. (2021). A study on the flow characteristics of debris flow using small-scaled laboratory test. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 22, No. 4, pp. 235-245.
- Schmitt, F.G. (2007). About boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: Historical remarks and a direct evaluation of its validity. *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 335, No. 9-10, pp. 617-627.

Received	January 20, 2022
Revised	January 20, 2022
Accepted	February 3, 2022