

Flow 3D를 이용한 다목적 수로 터널의 마찰 손실 산정

이두한¹, 김정환², 정건희^{2*}

¹한국건설기술연구원 수자원하천연구소, ²호서대학교 토목공학과

Friction loss of multi-purpose stormwater tunnel simulated by Flow 3D

Du Han Lee¹, Jung Hwan Kim², Gunhui Chung^{2*}

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

²Department of Civil Engineering, Hoseo University.

요약 본 최근 지구의 온난화로 인하여 극한 홍수가 자주 발생하고 있으며, 기존 도시 지역의 우수배제시설 용량부족 등으로 도시홍수가 빈번하게 발생하고 있으므로, 주요 범람지역의 홍수량을 우회하거나 저류하여 홍수를 방지하기 위한 수로터널의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 교통기능과 수로기능을 동시에 갖춘 다기능 수로 터널의 설계 기준을 개발하기 위한 수리 실험 및 Flow3D를 이용한 수치모의를 수행하였다. 수치모의결과 동일한 수로 터널 구간 내 발생하는 마찰손실의 크기는 수치모의로 도출된 마찰손실이 이론적으로 계산한 마찰손실보다 더 크게 발생함을 관측하였으며, 이는 수로의 형상이 비원형인 경우에는 관의 기하학적 형상에 의한 흐름구조의 변화로 추가적인 마찰손실이 발생하는 것이 원인으로 판단된다. 마찰손실의 증가는 난류보다 층류에서 두드러졌다. 따라서 터널의 홍수량 흐름 시 마찰손실계수가 터널의 형상에 좌우되며, 실무에서 정확한 설계를 위해 방수로 터널의 형상을 주의 깊게 고려해야 한다는 결론을 내렸다. 이는 실제 방수로 터널 설계에 활용될 수 있는 기본 정보를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

Abstract The extreme floods recently are have been attributed global warming, The development of a canal tunnel to prevent floods by making a bypass or undercurrent to flood discharge in a major flooding area is required because urban flooding in heavy rainfall occurs frequently, increasing the impermeability according to lack of capacity in sewage to urbanization by the existing urban basin. In this study, a numerical simulation was performed to support design standards for a multi-purpose waterway tunnel combined road tunnel of canal tunnel. The numerical simulation showed that the size of the friction loss occurring in the tunnel section of the same channel occurred more than the theoretically calculated frictional loss derived from the numerical simulations. This is probably due to the additional frictional loss caused by the change in the flow structure due to the geometry of the pipe when the shape of the channel is non-circular. The increase in friction loss was more pronounced in the laminar flow than in the turbulent flow. Depending on the shape of the conduit, the friction loss should be adjusted for accurate flow calculations. This result can provide the basin information about the design of flood by a pass conduit.

Keywords : Flow 3D, Friction loss, Hydraulic experiment, Multi-functional stormwater tunnel, Numerical simulation

1. 서론

최근 지구의 온난화에 따른 기상이변으로 지구촌 여러 곳에서 홍수, 가뭄 등의 자연 재해가 발생하고 있다.

우리나라도 예외는 아니어서 90년대 이후부터 20세기 후반에 이르기까지 홍수로 인한 인명 및 재산 피해가 급증하고 있는 실정이다. 이 중 도심지 홍수는 심각한 인명 및 재산피해를 야기할 수 있으므로, 적극적으로 방어해

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2016년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 (15SCIP-B089409-02) 연구단 및 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원(과제번호 15AWMP-B098632-01)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Gunhui Chung(Hoseo Univ.)

Tel: +82-41-540-5794 email: gunhuic@gmail.com

Received February 24, 2017

Revised March 9, 2017

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

야 하는 자연재해 중 하나이다. 그러나 도심지는 대부분 교통체증 문제도 심각한 수준이므로, 최근 들어, 수로기능 및 도로기능, 저류기능 등의 여러 기능을 가지는 다기능 수로터널의 건설에 대한 관심이 증가하고 있다.

세계적으로 다목적 활용을 위한 터널의 시공이 다수 수행되었으며, 그 중에서도 2003년에 완공된 말레이시아의 SMART 터널은 도로와 수로 기능을 동시에 가지는 세계 최초의 터널로 알려져 있다. SMART 터널은 총 3개의 mode로 운영되며, 비가 오지 않을 때 운영 상태인 mode I에서는 도로터널만으로 활용되며, 강우가 시작되면 mode II로 운영을 하여 하부 수로로만 우수가 흐르고, 상부에는 2개 복층의 도로터널로 교통기능을 수행한다. 최종적으로 mode III가 되면, 상부의 교통터널을 모두 통제 후 전체 터널에 우수가 흘러 Kuala Lumpur 도심지의 홍수방어에 기여하도록 한다. (<http://smarttunnel.com.my/>).

Flow 3D와 수리모형실험의 결과를 비교한 연구사례로 국내에서는 정창삼(2015)이 황월류 위의 유량계수에 관련하여 수치모형 적용성 검증을 수행하였고, 강성혁(2012)이 저류지 유입부와 유출부의 흐름 발생 시 수리학적 거동 및 문제점을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 말레이시아의 SMART 터널의 mode I과 같이 터널의 하부를 수로로 상시 활용할 경우에 대한 수치모의를 Flow 3D를 이용하여 수행하였다.

관수로 흐름의 마찰손실계수 Williams and Hazen (1933)의 실험에 의한 Hazen-Williams 계수와 Colebrook and White (1937)의 마찰손실계수로 널리 알려져 있으나, 기존의 수로터널과 달리 도로터널을 수로터널로 활용할 경우에는 그 흐름 특성이 달라지므로 수리학적인 분석 또한 수반되어야 하나, 이에 대한 연구가 매우 미흡하였다. 국내에서는 Jeong(2011)이 황월류 위의 유량계수에 관련하여 수치모형 적용성 검증을 수행하였고, Kang(2012)이 저류지 유입부와 유출부의 흐름 발생 시 수리학적 거동 및 문제점을 비교 분석하여 흐름의 수리적인 특성을 FLOW 3D로 모의하고 실험결과와 비교하였다. 또한 [1]에서는 비원형단면에서의 마찰손실계수를 수리실험을 통해 원형단면에서의 마찰손실계수와 다음을 보였다. 그러므로 본 연구에서는 도로터널 단면을 수로터널로 활용할 경우 필연적으로 발생하는 비원형 단면에서의 마찰손실계수를 FLOW 3D로 모의하고 [1]의 수리실험결과와 비교하여, 원형단면에서의 마찰손실계수와 달

라지는 것을 보였다.

2. 본론

2.1 수치모의

2.1.1 다기능 터널 단면

다기능 터널 단면은 [6]에서와 같이, 서울시에서 2015년에 수행한 「지상도로 교통량 저감을 위한 기본계획용역」 보고서에 제시된 소형차 전용 구간의 복층터널 단면을 기준 단면으로 설정하였다. Fig. 1은 Seoul (2015)에서 제안한 TBM 굴착 방식의 소형차 전용 일 방향 2차로 터널로서, 내경 13.5 m, 차로 폭 6.5 m, 시설한계 높이가 3.0 m의 복층 슬래브 터널의 단면이며, Fig. 1(b)에서 알 수 있는 것과 같이 도로터널의 상부와 하부는 주로 흡기와 배기를 위한 풍도로 활용된다.

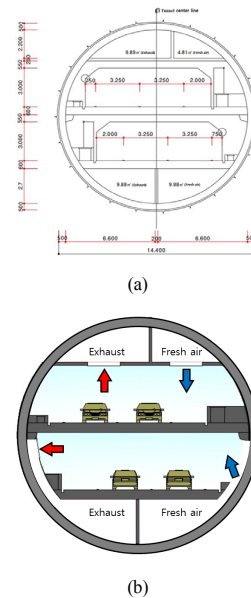


Fig. 1. Double-deck TBM tunnel example

2.1.2 유량 설정

본 연구에서는 Kim et al. (2016)과 마찬가지로 도로터널의 가장 하부에 급기와 배기터널로 사용되는 부분만을 수로터널로 이용하는 경우, 다양한 유량에 대한 마찰손실계수를 계산하였다. 총 6가지의 유량은 Table 1과 같다. Case별 유량의 크기는 [1]에서 설정한 유량을 동일하게 사용하였다.

Table 1. Discharge cases

Cases	Discharge (m^3/s)
1	56.57
2	78.67
3	100.0
4	120.0
5	135.0
6	150.0

2.2 수치모의

2.2.1 FLOW 3D

3차원 수치해석 모형인 Flow-3D는 미국의 Flow Science, Inc에서 개발한 비정상 유동 상태 모의를 위한 모형이며, 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 지배 방정식으로 사용하여 해석하고 있다. 지배방정식인 연속방정식은 Eq. (1)과 같다 (Flow Science Inc., 2015).

$$V_F \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서, V_F 는 유체의 미소체적, ρ 는 유체 밀도, u, v, w 는 각 방향의 유속, A_x, A_y, A_z 는 각 방향 미소면적이다. 유체의 난류 해석에 대해서는 혼합거리 모형, 난류 에너지 모형, $k-\epsilon$ 모형, RNG(ReNomalizedGroup)모형, LES 모형 등 5개의 모형을 사용한다. Flow 3D는 유한차분방정식으로 직육면체의 요소로 일반적인 현상을 정의할 수 있는 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) 방법을 도입한 유한체적법을 사용하고 있다. FAVOR 방법의 개념도는 아래 Fig. 2와 같으며 좌표계는 직교좌표계(x, y, z)를 사용하였으며 3차원 형상 표현을 위해 FAVOR기법을 사용하였다. 이 방법은 직육면체 요소의 각 면을 통한 유체의 출입이 일부 또는 전체가 통제 될 수 있다고 정의하는 것이다.

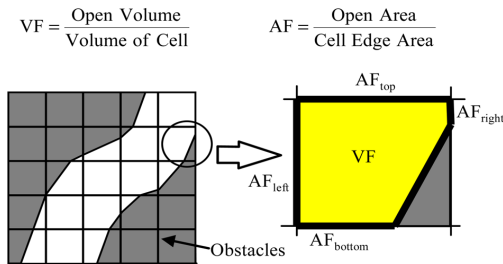


Fig. 2. Conceptual diagram using FAVOR technique

본 연구에서는 직교좌표계에서 구성된 터널모형 내 흐름 발생 시 3차원 흐름 해석을 수행하였으며, 지배방정식으로는 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였고, 난류모형으로는 Renormalized group(RNG)모형을 사용하였다.

2.2.2 수치모의 적용

본 연구에서는 말레이시아 SMART 터널의 mode I과 같이 터널의 하부를 수로로 활용할 경우 터널 내 수리적인 영향을 알아보기로 3차원 수치모형인 Flow 3D를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 수치모의에 사용된 Geometry는 설치된 Kim et al. (2016)의 결과와 비교하기 위해 아크릴재료의 마찰손실계수를 적용하였다. Flow 3D는 표면 특성 값을 Nikuradse roughness(k_s)를 사용하므로 Eq. (2)을 이용하여 Manning roughness(n)를 Nikuradse roughness(k_s)로 변환하여 적용해야 한다 (Yen, 1992).

$$k_s = \left(\frac{n}{0.0389} \right)^6 \quad (2)$$

아크릴 Manning roughness(n)는 0.009로 알려져 있으므로 Eq. (2)을 이용하여 산출된 Nikuradse roughness(k_s)는 $1.53376 \times 10^{-4}m$ 이다. Fig. 3은 구성된 Geometry를 나타낸다.

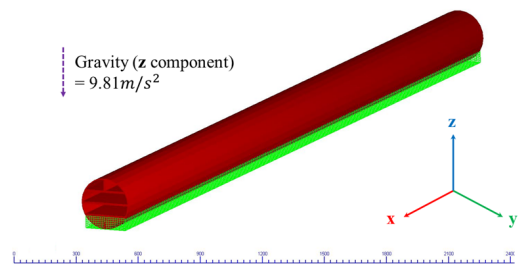


Fig. 3. Setup of geometry

수치모의 수행을 위한 Flow 3D의 격자망 형태는 직육면체 격자를 사용하였고, 터널 하부구간의 형태가 비원형이므로 해당구간의 수리적인 영향을 좀 더 정확히 관찰하기 위하여 세밀하게 격자간격을 분할하였다. 수치모의에 적용된 격자는 총 3,963,280개의 격자가 사용되었다. 수치모형에 적용된 경계조건은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Boundary applied model

Mesh boundary	Direction	Boundary Type	Input Type
Inlet detention pond	X min	Volume flow rate	Discharge & Fluid elevation
	X max	Symmetry	-
	Y min	Wall	-
	Y max	Wall	-
	Z min	Wall	-
	Z max	Symmetry	-
Tunnel	X min	Symmetry	-
	X max	Symmetry	-
	Y min	Wall	-
	Y max	Wall	-
	Z min	Wall	-
	Z max	Wall	-
Outlet detention pond	X min	Symmetry	-
	X max	Volume flow rate	Discharge & Fluid elevation
	Y min	Wall	-
	Y max	Wall	-
	Z min	Wall	-
	Z max	Wall	-

2.3 마찰손실계수 산정

우선 마찰손실의 크기를 구하기 위해 [1]의 수행방법과 동일하게 유입저류지로부터 거리 차이가 0.5m인 지점과 3.5m지점을 마찰손실산정구간으로 선정하였다. 산출방법은 Eq. (3)과 같이 베르누이방정식(Bernoulli's equation)을 이용하여 선정된 구간 양 끝의 두 개의 피에조미터 위치 사이에 발생하는 마찰손실을 산출하였다.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_L + H_m \quad (3)$$

여기서 P 는 수압, γ 는 물의 단위중량, V 는 유속, g 는 중력가속도, Z 는 관 중심선까지의 위치수두, H_m 은 미소손실수두, H_L 은 관내 마찰손실수두를 의미한다. 본 연구에서는 유입부와 유출부의 미소손실 발생 지점은 고려하지 않고, 직선 부분만을 고려하여 관 내 마찰손실이 발생하는 특성을 분석하고자 하였으므로, 미소손실항은 무시하였다. 마찰손실수두는 Eq. (4)와 같이 Darcy-Weisbach 공식을 이용하여 계산하였다.

$$H_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{4R_h} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

여기서 f 는 마찰손실계수, L 은 관의 길이, D 는 관의 직경, R_h 는 동수반경을 의미한다. 본 연구에 사용된 터널의 하부 단면은 원형이 아닌 비 원형단면이므로 동수반경을 이용하여 마찰손실수두를 계산하였다.

본 연구에서는 Hazen-Williams계수(C_{HW})를 사용하여 동일한 유입유량 발생 시 원형 관 내 마찰손실계수(f)를 추정하였다. 아크릴의 Hazen-Williams계수는 150(Williams and Hazen, 1933)으로 알려져 있으며 이를 이용하여 마찰손실계수 f 는 Eq. (5)에 의해 추정하였다.

$$f = \frac{1,060}{C_{HW}^{1.85} \times R_e^{0.15} \times D^{0.017}} \quad (5)$$

3. 결과 및 분석

본 연구는 주로 흡기·배기의 목적으로 사용되는 복층 슬래브 터널의 하부구간을 수로로 활용하는 경우, 해당 수로구간에 총 6가지의 유량을 흘려 보내 다목적 수로터널의 흐름특성을 분석하였다. 분석방법으로는 [1]의 수행결과와 Flow 3D를 이용한 수치모의결과, Hazen-Williams식에 의한 마찰손실계수 산정 등 분석방

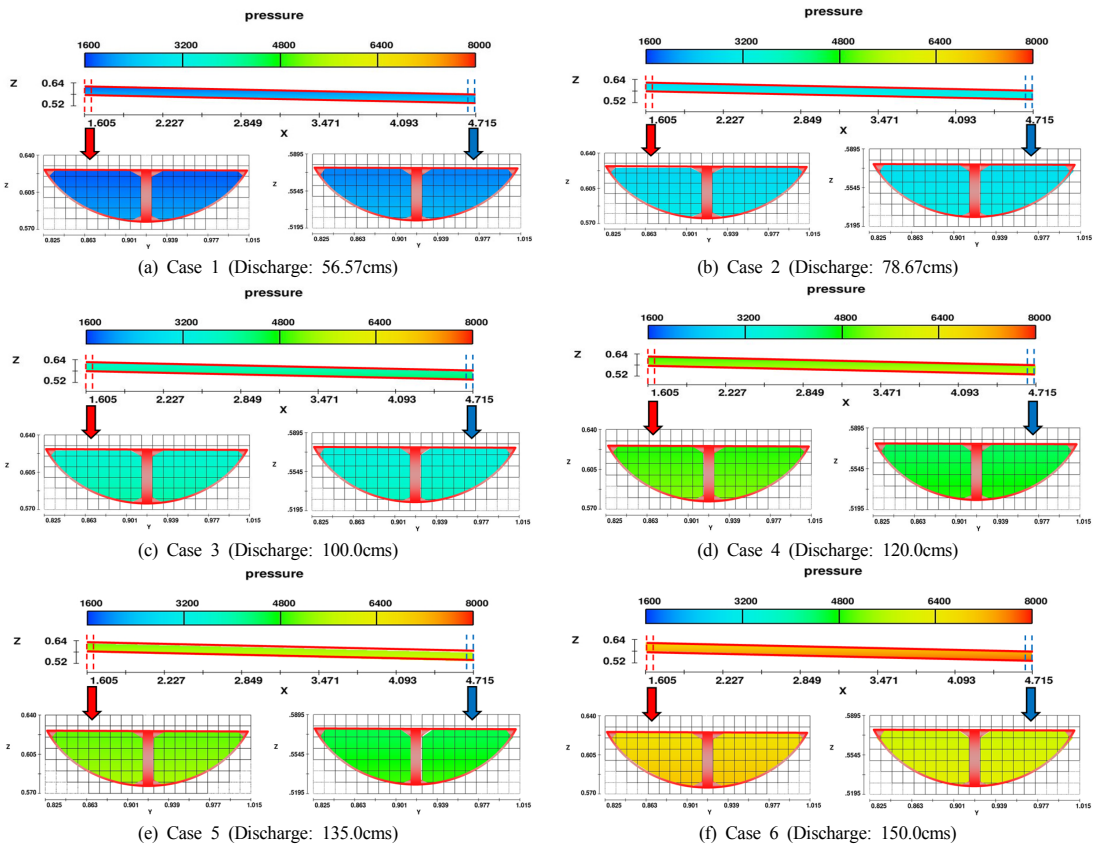


Fig. 4. Pressure value according to the 6 different discharges

법에 따른 산정된 마찰손실계수를 비교하였다. Fig. 4는 Flow 3D를 이용하여 산출한 수압을 나타낸 것이고, Fig. 5는 직선 수로에서 상하류에 흐름의 간섭이 생기는 부분을 제외한 6개의 유량 별 수두를 산출하여 도출한 동수경사선(Hydraulic Grade Line, HGL)을 나타낸 것이다. Fig. 4의 XZ평면은 수로구간 전체의 횡단면을 나타낸 것이고, YZ평면은 유입지점으로부터 0.5m떨어진 지점과 3.6m떨어진 지점의 횡단면을 나타낸 것이다. 이를 통해 유량이 커질수록 수두의 손실이 크게 발생하고, 수로 내 터널의 내벽에 작용하는 수압의 크기는 점차 증가하는 것을 알 수 있었다. 해당지점의 단면 내에서도 하부 내벽보다 상부내벽이 더 큰 수압을 받는 것으로 나타났다.

또한 [1]의 수행결과와 수치모의 그리고 이론식에 의해 산출된 동일구간에서 발생하는 에너지 손실의 차이를 Fig. 6과 같이 나타내었다. 그 결과 [1]의 결과와 FLOW-3D를 이용하여 산출한 에너지 손실의 크기는 거의 비슷하게 발생하는 것을 볼 수 있었고, 원형 관으로

가정하여 이론식으로 계산한 에너지손실의 크기는 모든 Case에서 다른 두 방법으로 도출한 에너지 손실보다 작게 나타났다. 이는 이론식에 의한 에너지손실의 크기는 다른 두 방법과 달리 수로터널 내 수리적인 영향을 모두 고려하지 못한 것이 원인으로 판단된다.

본 연구의 대상인 마찰손실계수는 Fig. 5의 산출된 수두를 적용한 Darcy-Weisbach 공식으로 계산하였다. [1]의 수행결과와 Flow 3D를 이용해 측정된 손실수두를 Eq. (2)을 이용하여 마찰손실계수를 계산하였으며 수로 단면을 원형 관으로 가정하여 Eq. (5)에 의해 산출한 마찰손실계수와 비교하였다. 각 유량별 Reynolds number와 실험으로 측정된 마찰손실계수, Flow 3D로 수치모의하여 산출된 마찰손실계수 그리고 원형 관으로 가정하여 산출된 마찰손실계수는 Table 3과 같다. 각각의 방법에 의해 산출된 마찰손실계수를 레이놀즈수의 함수로 도시하면 Fig. 7과 같다. 각 유량조건에 따라 층류, 천이류, 난류 영역으로 구분할 수 있으며 측정된 마찰계수와 산

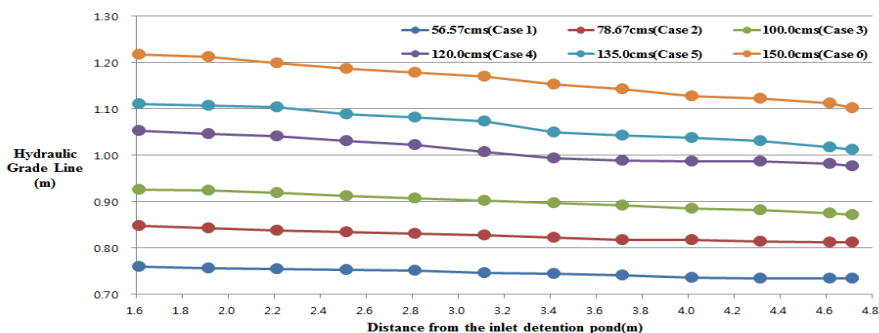


Fig. 5. Hydraulic grade line along the stormwater tunnel using FLOW-3D

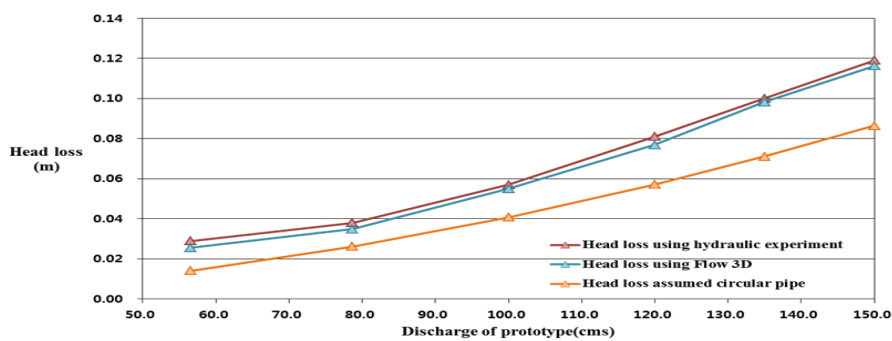


Fig. 6. Head loss compared hydraulic experiment with Flow 3D and assumed circular pipe

Table 3. Measured and calculated frictional loss coefficient in the discharge cases

Cases	Discharge of model (m^3/s)	Reynolds number	Frictional loss coefficient (Kim et al. (2016))	Frictional loss coefficient using Flow 3D	Frictional loss coefficient assumed circular pipe
1	0.00318	25,724(Laminar flow)	0.0383	0.0338	0.0228
2	0.00445	40,201(Transition flow)	0.0256	0.0235	0.0217
3	0.00566	51,132(Turbulent flow)	0.0238	0.0230	0.0209
4	0.00679	61,340(Turbulent flow)	0.0235	0.0223	0.0204
5	0.00764	68,991(Turbulent flow)	0.0229	0.0225	0.0200
6	0.00849	76,697(Turbulent flow)	0.0221	0.0216	0.0197

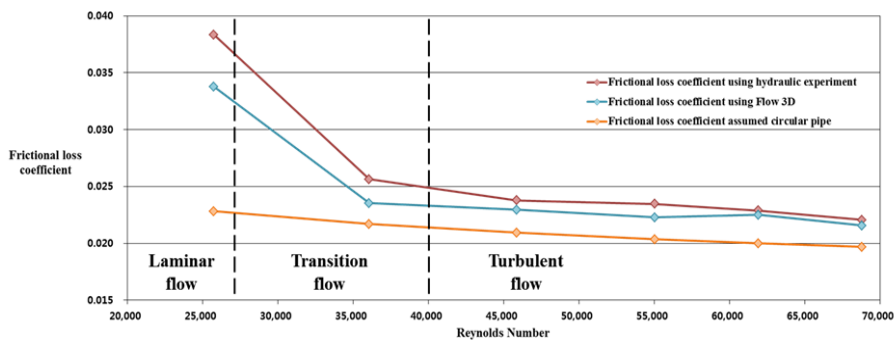


Fig. 7. Comparison of frictional loss coefficient according to the Reynolds number

출한 마찰계수의 차이를 정량적으로 확인할 수 있다. 전체적으로 수리실험으로 측정된 마찰손실계수가 크게 나타나는데 이는 수로 단면의 기하학적 형상에 의한 흐름 구조의 변화로 추가적인 마찰손실이 발생하는 것이 원인으로 판단된다. 특히 수리실험 및 수치모의로 도출된 마찰손실계수와 원형 관으로 가정하여 산출된 마찰손실계수의 차이는 층류 상태에서 최대 1.5배가 발생하며 레이놀즈수가 증가하여 천이영역에서는 다소 감소하며 완전한 난류 흐름에서는 비교적 차이가 줄어드는 경향을 보인다. 본 실험 결과는 다목적 터널 수로는 유입 유량 조건에 따라 흐름 단면의 형상이 비원형관으로 설계되며 이 경우 기존의 원형 관 마찰손실계수를 적용할 경우 설계 유량에 큰 오차가 발생할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 국내에서는 시공된 적이 없으나, 그 필요성이 증가하고 있는 도로와 수로기능을 동시에 가지는 다기능 수로터널에 대한 통수능을 수리실험 및 수치모의를 통해 검토하였다. 최근 들어 많이 적용되고 있는 TBM 터널의 단면을 적용하여 도로터널의 하부에 수로가 존재한다고 가정하여 연구를 수행하였고, 다양한 설계 유량이 흐름 때, Reynolds number에 따른 수리실험으로 측정된 마찰손실과 마찰계수를 및 수치모의 결과와 비교하였다.

그 결과, 모든 경우에서 원형 관으로 가정하여 산출된 마찰손실계수에 비해 수리모형실험이나 수치모의로 산출된 마찰손실계수가 크게 나타났으며, Reynolds number가 작아질수록 그 차이가 더 커짐을 알 수 있었다. 흐름의 종류가 층류상태인 경우에서는 약 1.5배의 차이가 측정되었다. 이는 수로의 형상이 비원형인 경우에는 관의 기하학적 형상에 의한 흐름구조의 변화로 추가적인 마찰손실이 발생하는 것이 원인으로 판단되었다. 실제 도로와 수로의 기능을 동시에 담당하는 다기능 터널을 설계할 경우에는 관의 전체를 수로로 사용하기는 어려운 경우가 많으며, 말레이시아의 SMART 터널의 mode III와 같이 전단면을 수로로 활용한다고 하더라도 중간에 슬라브가 존재하여 실제로 원형의 흐름이 나타나지는 않게 된다. 이 경우, 원형 관으로 가정한 마찰손실계수를 적용하면 설계유량의 과대 산정으로 유입부에서의 침수 또는 월류가 발생할 수 있음을 의미한다. 또한

수로터널이 도로로 이용되는 경우에는 도로 부대시설에 의한 추가적인 마찰손실 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다.

그러므로 향후 비원형단면의 단면적 변화의 영향, 전단면 흐름 상황에서 격벽의 영향, 부대 구조물의 영향 등을 고려한 종합적인 손실계수 산정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Kim, J.-H., Kwon, S.-H., Yoon, K.-S., Lee, L.-H., Chung, G.-H. Hydraulic Experiment for Friction Loss Coefficient in Non-circular Pipe, Procedia Engineering, Vol. 154, pp. 773-778, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.354>
- [2] Colebrook, C. F. and White, C. M. Experiments with fluid-friction in roughened pipes, Proc. Royal Soc. London, 161, 367-381, 1937.
DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150>
- [3] Flow Science Inc. FLOW-3D User's Manual, 2015
- [4] Jeong, C.-S. Discharge coefficient of side weir for various curvatures simulated by FLOW-3D, Korea Water Resources Association, 2011.
- [5] Kang, S.-H. A comparison of hydraulic phenomenon in inlet and outlet point in retention reservoir using FLOW-3D model and hydraulic experiment, Donga University, 2012.
- [6] Seoul General planning for reducing traffic of surface road, 2015.
- [7] Willams, G. S. and Hazen A. Hydraulic Tables, 3rd ed., rev. John Wiley, New York, 1933.
- [8] Yen, Ben Chie. Channel flow resistance: centennial of Manning's formula, Water Resources Publications, 1992.

이 두 한(Du Han Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학 원 토목공학과(공학석사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원

<관심분야>
수리학

김 정 환(Jung Hwan Kim)

[준회원]



- 2009년 2월 : 군포 용호고등학교 졸업
- 2015년 2월 : 호서대학교 토목공학과 졸업
- 2015년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 토목공학과 석사과정

<관심분야>
수문학

정 건 희(Gunhui Chung)

[정회원]



- 1998년 2월 : 고려대학교 환경공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2007년 5월 : University of Arizona, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics (Ph.D.)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>
도시수문학, 도시홍수방어, 기후변화