



An experimental study on characteristics of hydraulic stability for stable management prepare continuous flood in Shinwol rainwater storage and drainage system

Oh, Jun Oh^a · Kim, Young Do^{b*} · Jun, Sang Mi^c

^aResearch Professor, Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

^bProfessor, Department of Environment Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

^cAdjunct Professor, Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

Paper number: 20-037

Received: 22 April 2020; Revised: 13 May 2020; Accepted: 13 May 2020

Abstract

Urban flooding due to rapid urbanization has recently become frequent. In this study, a hydraulic model experiment was conducted on Shinwol rainwater storage and drainage system constructed for the first time in South Korea to prevent urban flooding. Experiments were performed for 55 scenarios, of which 19 overflows occurred. In addition, the video analysis for the scenarios where the overflow occurred showed that the overflow occurred during the process of exhausting the pressurized air in the facility and the undular bore were moving. Results of this study, it was judge that it would be advantageous to maintain a completely drained or full-pipe condition for stable operation of the Shinwol rainwater storage and drainage system for continuous rainfall in the future. And it is necessary to additional research on the correlation for the magnitude of inflow discharge, overflow and undular bore.

Keywords: Shinwol rainwater storage and drainage system, Continuous flood, Stable management, Hydraulic stability

신월 빗물저류배수시설의 연속강우 대비 안정적 운영을 위한 수리적 안정 특성에 대한 실험 연구

오준오^a · 김영도^{b*} · 전상미^c

^a인제대학교 공과대학 토목도시공학부 연구교수, ^b인제대학교 공과대학 환경공학과 교수, ^c인제대학교 공과대학 토목도시공학부 외래교수

요 지

급격한 도시화로 인한 도시홍수가 최근 들어 자주 발생하고 있다. 본 연구에서는 도시홍수를 방어하기 위해 국내최초로 건설중인 신월 빗물저류배수시설을 대상으로 수리모형실험을 실시하였다. 총 55가지 시나리오에 대한 실험을 실시하였는데 그 중 19가지 시나리오에서 월류가 발생하였다. 또한 월류가 발생한 시나리오에 대한 비디오 분석결과, 불규칙 단파가 이동하면서 시설 내 압축공기를 배기시키는 과정에 월류가 발생하는 것으로 분석되었다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 연속강우에 대한 신월 빗물저류배수시설에 대한 안정적 운영을 위해서 완전배수 또는 만관상태를 유지하는 것이 유리할 것으로 판단되고 유입유량의 크기, 월류, 불규칙 단파간의 상관관계에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어: 신월빗물저류배수시설, 연속강우, 안정적 운영, 수리적 안정성

*Corresponding Author. Tel: +82-55-320-3252
E-mail: ydkim@inje.ac.kr (Y. D. Kim)

1. 서론

기후변화로 인해 국지성 호우가 잦아지면서 아스팔트와 시멘트로 덮힌 대도시의 배수시설이 폭우를 감당하지 못해 물이 잠기는 도시홍수(Urban flooding)현상이 최근 들어 자주 발생하고 있다. 이에 대한 근본적인 대책이 필요한 시점이며 도시홍수에 대응하기 여러 가지 홍수 방어방법들이 고안되고 있다. 우리나라 대도시의 경우 급격한 도시화로 인한 도달 시간 감소, 침투능력 부족 등으로 인한 직접유출량 증가와 도시 내 토지고도화 및 지하 매설물 과다로 인한 기존 하천 확폭 공사 및 대규모 하수관거 설치공사가 불가능한 실정이다. 이에 지하 대심도 터널에 대한 필요성이 증가함에 따라 2013년 국내에서 최초로 서울특별시 강서구 및 양천구 일대에 ‘신월 빗물저류배수시설’ 공사가 진행되고 있다(Oh, 2019).

신월 빗물저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널은 Fig. 1과 같이 역 사이펀 형태이며, 유입시설(Inlet facility), 유도터널(Induction tunnel), 본 터널(Main tunnel), 배기시설(Exhaust facility), 배수시설(Outlet facility)로 구성되어 있으며 기존 하천 또는 하수관거의 홍수를 유입시설을 통해 유도터널 또는 본 터널로 유입시켜 배수기능이 작동되기 전까지는 저류기능을 발휘한다. 지속적인 홍수유입으로 인하여 터널이 만관이 되면 배수시설을 통하여 홍수를 외부로 배수·유출시켜 홍수를 타 유역 또는 타 수계로 배제시키는데 이때 배수 방법에 따라 자연배수(Nature drainage), 유도배수(Induction drainage), 혼합배수(Mixing drainage)로 구분할 수 있다. 이러한 지하 대심도 터널은 홍수를 유입시켜 초기 개수로 흐름에서 만관 후 관수로 흐름으로 전환되며 만관상태에서 상류(Upstream)와 하류(Downstream)간의 동수경사 차에 의해 홍수를 유하시키는 역 사이펀 형식을 하고 있어 시설의 설계 및 운영이 매우 어렵다.

지하 대심도 터널과 같은 역 사이펀 형식의 구조물에서는 지하 대심도 터널 내 초기 홍수 유입 단계에서 마지막 홍수 배수 단계에 이르기까지 압축공기나 불규칙 단파(Undular bore)가 수리적 안정성을 저해시킨다. 먼저 압축공기를 살펴보면 홍수와 함께 유입된 공기들이 외부로 배기되지 못하고 터널 내에서 포집되어 압축상태가 되고 하류에서 발생한 불규칙 단파와 함께 상류로 이동한다. 이때 상류에 위치한 유입시설인 수직갱으로 배기되면서 월류가 발생하고 수직갱 맨홀뚜껑이 비산하는 사고가 발생하기도 한다. 특히 본 연구의 원형인 신월 빗물저류배수시설은 2019년 여름 임시가동을 위한 시험 가동 중 3명의 인명사고가 발생하기도 했다. 이렇듯 안전하고 안정적인 운영을 위해서는 신월 빗물저류배수시설의 홍수유입 특성에 따른 수리적 안정성 평가가 반드시 수행되어야 한다.

2. 연구 동향

신월 빗물저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널에 대한 연구는 국내보다는 국외에서 비교적 활발히 진행되고 있으며 특히 지하 대심도 터널을 도시 홍수방어구조물로 적극적으로 활용하고 있는 미국과 일본에서 많은 연구가 진행되었다. 국내의 경우 2005년부터 지하 대심도 터널에 대한 관심이 증가하였고 2000년대에는 지하 대심도 터널에서 발생하는 수리적 현상에 대한 연구보다는 지하 대심도 터널에 대한 필요성이나 지하 대심도 터널의 유입시설에 대한 연구가 많이 진행되었고 최근 2010년대에 들어 지하 대심도 터널 내 수리적 현상에 대한 연구가 진행되어 오고 있다. Oh (2019)는 홍수유입 조건에 따라 하류에서 발생하는 불규칙 단파가 신월 빗물저류 배수시설의 수리적 안정성에 미치는 영향을 수리모형실험을 통

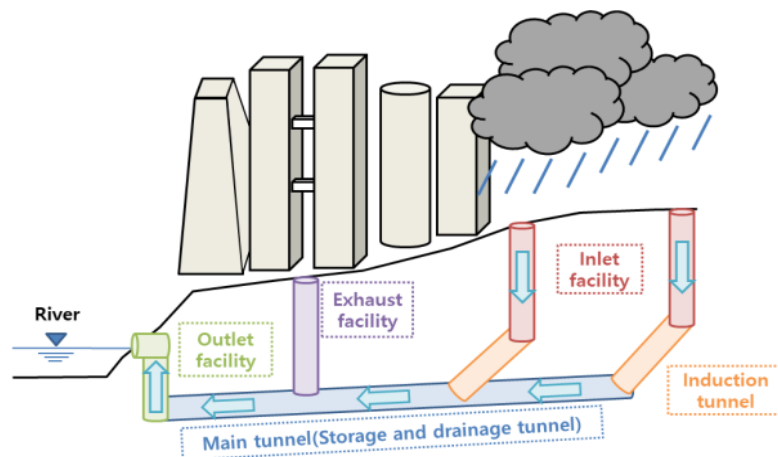


Fig. 1. Facilities of deep tunnel system (Oh *et al.*, 2020)

하여 연구하였으며 그 결과 불규칙 단파가 이동하면서 에너지를 전달하고 이때 관 내 압력 상승 및 불규칙 단파의 속도 증가분이 발생하는 것을 밝혔다. Oh *et al.* (2020)은 하류에서 발생하는 불규칙 단파에 의해 신월 빗물저류배수시설 내 압력상승의 원인을 알아보려고 하였으며 관 내 포집되어 있던 압축공기의 부피와 관 내 압력과의 관계가 있고 압축공기의 단면과 압축공기 폭발현상과의 관계를 밝히고자 하였다.

지하 대심도 터널의 수리적 현상에 대한 국·내외 연구 중 압축공기 폭발 및 공기분출과 관련한 연구가 많이 진행되었는데 그 내용을 살펴보면 Tada *et al.* (1994)은 공기가 갇혀 있는 지하 대심도 터널에서의 흐름에 대하여 연구하였으며 터널 내 압축공기를 수치해석과 수리실험을 통하여 압력수두로 계산하여 비교하였다. Sekoguchi *et al.* (1996)은 상류 수직유입

구로 이동하는 공기 덩어리의 선단 모서리가 볼록한 모양을 형성하고 아주 작은 거품들이 수직유입구 벽 근처에 모이는 경향이 있다고 밝혔다. Watanabe *et al.* (2000)은 대심도 터널과 같은 역 사이펀 구조인 하수관의 맨홀 인근에 포집된 공기덩어리가 맨홀 상류로 상승하는 메커니즘을 맨홀로 홍수유입과 함께 공기가 유입되는 경우와 홍수유입이 일어나지 않는 경우로 구분하여 수치해석을 수행하였다. Kushiyama *et al.* (2003)은 대심도 터널과 같은 역 사이펀 관로에서의 흐름을 Fig. 2와 같이 5단계로 구분하였는데 1단계는 홍수유입에 따라 대심도 터널 하류부터 만관 상태가 되며 2단계는 지속적인 홍수유입으로 인하여 하류에서 불규칙 단파가 발생하고 배기되지 못하고 터널 내 포집된 공기는 압축상태가 된다. 3단계는 불규칙 단파가 상류(Upstream)로 이동하면서 터널 내 포집되

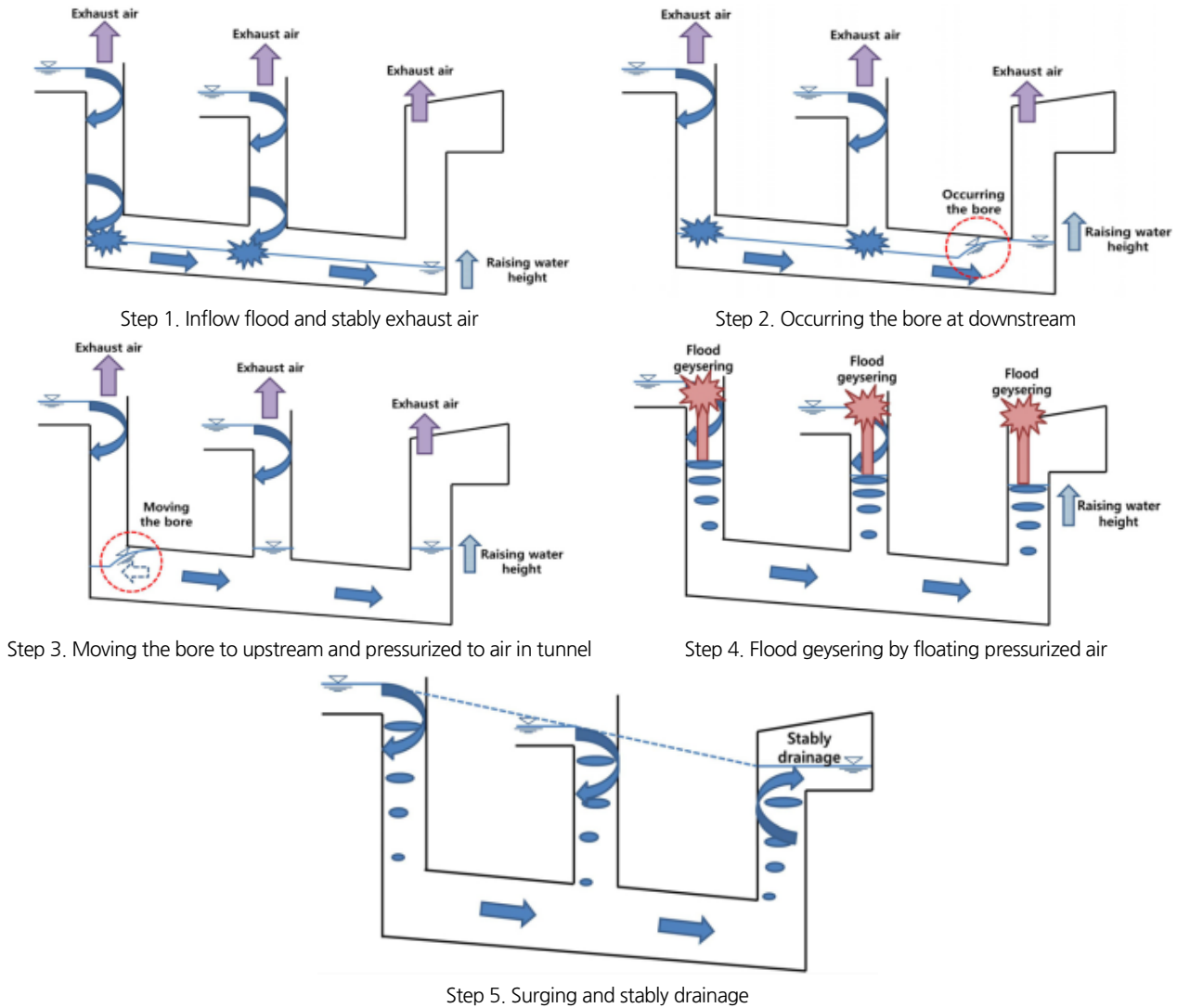


Fig. 2. Flow mechanism in deep tunnel system (Kushiyama *et al.*, 2003)

어 있던 압축공기를 상류 유입시설 또는 배기시설로 배기시키고 4단계는 3단계에서 배기되는 압축공기가 폭발하며 홍수 유입을 차단시켜 월류가 발생한다.

Mori *et al.* (2003)은 집중 강우 시 강우와 함께 유입된 공기의 물리적 거동을 수리모형실험을 통하여 연구하였으며 Vasconcelos and Wright (2005)는 수리실험을 통하여 대심도 터널 내 흐름이 개수로 흐름에서 관수로 흐름으로 전이될 때 발생하는 문제에 대하여 연구하였다. Zhao *et al.* (2006)은 와류식 유입수갱에서 공기 이동에 대하여 연구하였는데 유입수갱으로 유입되는 공기의 양은 유입수갱에서의 회전수와 상관성이 있으며 회전수가 증가함에 따라 공기양은 감소한다는 것을 밝혔다. Cho *et al.* (2017)은 지하대심도 터널의 본 터널과 같은 수평관에서의 물과 공기 이상류 거동 특성을 실험을 통하여 연구하였으며 향후 관로에서의 공기제어와 수리성능개선을 제시할 수 있을 것으로 기대하였다. Wright *et al.* (2011)은 수평관에 연결된 수직관을 통해 물이 폭발하며 외부로 방출되는 현상에 대하여 실험을 통하여 연구하였는데 이것이 관 내 서징현상과 공기배출에 의한 것이라고 밝혔으며 관 내 포집되어 있던 공기덩어리들이 물이 폭발하며 외부로 방출되는 현상의 중요한 요소라고 하였다. Guo and Song (1990)은 미국(United State of America) 일리노이주(Illinois) 시카고(Chicago)에 있는 TARP (Tunnel and reservoir plan)에서 발생하는 압축공기 폭발현상을 방지하기 위하여 서징강도를 줄이고 이를 위해 홍수 유입량 조절, 하류 저류지 이용 및 조압수조를 사용할 필요가 있다고 밝혔다. Choi and Lee (2016)은 대규모 우수관수로 내에서 발생하는 압축공기 폭발현상에 대한 영향인자를 도출하기 위하여 수치해석 및 수리실험을 실시하였는데 압축공기 폭발현상의 주요인자는 수직관과 수평관의 직경비, 유입유량인 것으로 평가하였다.

Takanishi and Abe (2006)는 역 사이펀 형식에서 공기에 의해 발생하는 문제를 다음 Fig. 3과 같은 세 가지 메커니즘으로 구분하였다. 첫 번째는 불규칙 단파에 의한 압축공기 폭발 (Explosion of pressurized air), 두 번째는 진동과 압축공기 배기(Oscillation and exhaust of pressurized air), 세 번째는 공기 부상에 의한 월류(Overflow by air surfacing)이다. 첫 번째부터 살펴보면 이는 Kushiyama *et al.* (2003)이 구분한 5단계의 흐름 중 3단계와 4단계 사이에 발생하는 현상으로 홍수와 함께 유입되어 배기되지 못하고 터널 내 잔류하던 공기가 상류에서 지속적인 홍수유입으로 하류가 만관이 되면서 포집 및 압축상태가 된다. 또한 하류에서 발생한 불규칙 단파가 포집되고 압축되어 있는 공기덩어리들을 상류로 이동시키고 상류에 위치한 유입시설 또는 환기시설로 배기되는 과정에 압축공

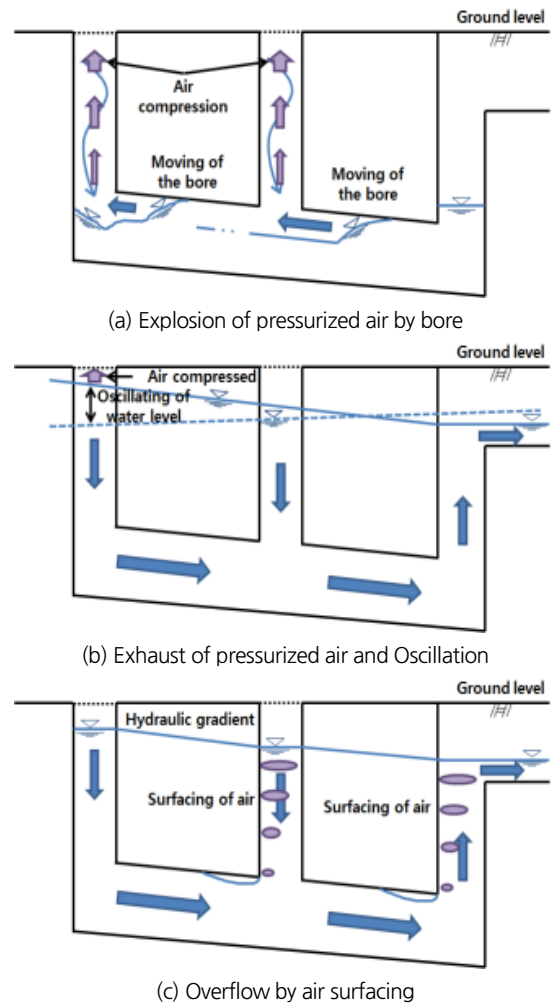


Fig. 3. Occurred problem at deep tunnel system by inlet air (Takanishi and Abe, 2006)

기 폭발현상이 발생한다. 이 때 압축공기가 배기되는 과정에서 보일의 법칙에 의해 부피가 증가하여 홍수 유입 차단이 발생한다. 두 번째는 진동과 압축공기 배기로 Kushiyama *et al.* (2003)가 구분한 5단계 흐름 중 4단계와 5단계 사이에 발생하는 현상으로 기 배기다. 이는 Kushiyama *et al.* (2003)가 구분한 역 사이펀 관로 흐름 5단계 중 5단계에 해당하는 것으로 터널 내 흐름이 초기 개수로 흐름에서 관수로 흐름으로 전환될 때 발생하는데 터널 내 에너지 안정을 위한 진동현상이 일어나고 이 때 유입시설 또는 배기시설 상부까지 상승해 있던 홍수가 진동으로 인해 월류가 발생한다. 세 번째는 공기부상에 의한 월류로 이 또한 4단계와 5단계 사이에서 발생하는데 터널 내 포집되어 있던 일부 공기덩어리들이 부상하여 배기되는 과정에서 부피가 증가하여 홍수 유입을 일시 차단하거나 공기덩어리들이 소규모 폭발하며 월류가 발생한다.

3. 수리모형실험

3.1 신월 빗물저류배수시설 개요

신월 빗물저류배수시설은 2010년 집중호우로 인명피해 및 재산피해가 발생한 서울특별시 강서구 및 양천구 일대의 홍수 방어 대책으로 수립되었는데 이 지역의 경우 주택 및 상가 밀집지역이고 지하 10.0 m 이내 얇은 지하에 매설 시설이 많아 대규모 하수관거 공사가 불가한 지역이다. 신월 빗물저류배수시설은 2013년 설계 및 착공을 시작하여 2020년 5월 완공을 앞두고 있으며 시설의 사업 개요는 Fig. 4와 같다.

본 연구에서 실시한 수리모형실험의 원형은 신월 빗물저류배수시설로 Table 1과 같이 수직유입구 3개소, 배기시설 1개소, 배수시설 1개소이며 저지유도터널을 포함한 저류배수터널의 총 길이는 약 4.5 km, 수직유입구 및 환기수직구의 직경은 5.4 m, 본 터널의 저류가능량(또는 저류배수터널 전체 부피)은 347,778 m³이다. 신월 빗물저류배수시설의 방재성능목표는 100 mm / 1 hr (서울특별시 50년 빈도 강우)이다(Oh, 2019).

3.2 수리모형실험 개요

신월 빗물 저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널 내 흐름은 초기 개수로 흐름에서 만관 후 관수로 흐름으로 전환된다. 그렇기 때문에 중력과 점성력을 모두 고려한다. 하지만 중력을 고려한 Froude 상사법칙과 점성력을 고려한 Reynolds 상사법칙을 모두 일치시키는 것이 불가능하므로 원형과 모형에서 Manning의 평균유속이 적용된다는 가정하에 조도를 조정함으로써 점성력에 대한 상사를 유지하였다. 본 연구에서 적용한 상사법칙은 Froude 상사로 이에 의한 각 물리량 환산비는 Table 2와 같다(Oh, 2019).

본 연구에서 실시한 수리모형실험의 흐름순서는 저수조 (Low water tank)에 저류되어 있는 물이 펌프를 통하여 고수조 (High water tank)로 이동하고 고수조와 실험모형(Experiment

Table 1. Design conditions for experimental data of each part (Oh, 2019)

Design Condition of each part		Data		
		Original (m)	Model (m)	
Inlet facility	Low Drop Shaft1 (LDS1)	Diameter (D)	5.4	0.11
		Height (H)	46.2	0.92
	Low Drop Shaft2 (LDS2)	Diameter (D)	5.4	0.11
		Height (H)	45.8	0.92
	High Drop Shaft (HDS)	Diameter (D)	5.4	0.11
		Height (H)	47.6	0.95
Induction Tunnel	Low Induction Tunnel	Diameter (D)	5.5	0.11
		Length (L)	887.1	17.74
	High Induction Tunnel	Diameter (D)	5.5	0.11
		Length (L)	219.9	4.40
Main Tunnel (Storage & Drainage Tunnel)		Diameter (D)	10.0	0.20
		Length (L)	3,629.7	72.59
Exhaust facility	Air Shaft (AS)	Diameter (D)	5.4	0.11
		Height (H)	42.3	0.85
Outlet facility	Outlet Shaft (OS)	Diameter (D)	7.5	0.15
		Height (H)	39.8	0.80

Table 2. Scales for each variables of Froude similarity (Oh, 2019)

Variables	Froude Similarity	Scale
Length	L_r	1/50
Area	L_r^2	1/2,500
Volume	L_r^3	1/125,000
Time	$L_r^{1/2}$	1/7.07
Velocity	$L_r^{1/2}$	1/7.07
Discharge	$L_r^{5/2}$	1/17,677
Pressure	L_r	1/50
Manning'n	$L_r^{1/6}$	1/1.92

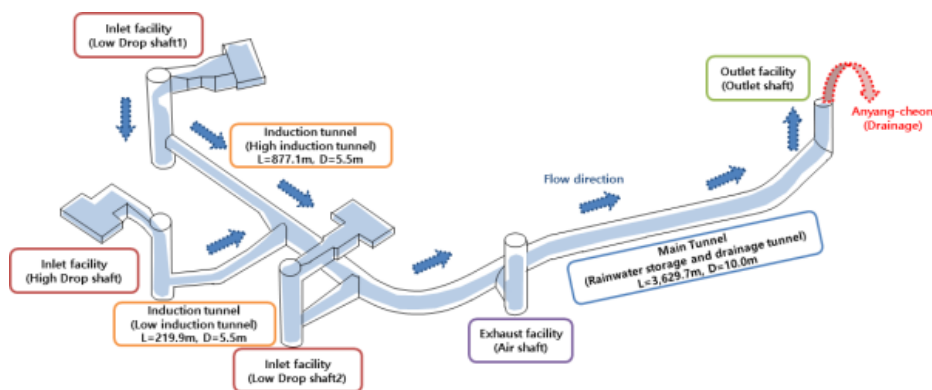


Fig. 4. Concept of Shinwol rainwater storage and drainage system (Hyundai Construction & Engineering)

model)에 연결되어 있는 유입수로(Inlet channel)를 통하여 유량이 유입되게 된다. 이 때 제어실(Control room)에서 전동 밸브(Motor valve)의 개폐율(Rate of opening)을 조작함으로써 실험유량을 실시간으로 조절한다. 유입된 실험유량은 실험 모형의 유출부(Outlet facility of experimental model), 회귀수로(Return channel)를 거쳐 저수조로 이동하고 위의 순서를 반복한다.

본 연구에서 실시한 수리모형실험의 실험유량은 다양한 홍수 시나리오를 재현하기 위하여 총 55가지로 구성하였으며 크게 유입유량(Inlet discharge)과 잔류수량(Residual amount)으로 구분할 수 있다. 유입유량은 Fig. 5와 같이 기 작성된 신월 빗물저류배수시설의 방재성능목표인 100 mm / 1 hr (서울특별시 50년 빈도 강우)수문곡선에 따라 비정상류(Unsteady flow) 조건으로 유입되고 유입유량 조건은 서울특별시 50년 빈도 홍수량의 100%, 90%(30년 빈도), 80%(20년 빈도), 70%(10년 빈도), 60%(5년 빈도)로 총 5가지 조건이다. 잔류수량 조건은 저류배수터널의 저류가능량(또는 전제 부피)을 0%~100%까지 10% 간격으로 총 11가지 조건으로 구성하였다. Table 3의 (C)는 저류가능량에 대한 유입총량(유입유량 + 잔

류수량)의 비를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 다양한 홍수 시나리오에서 신월 빗물저류배수시설의 수리적 안정성을 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 수직유입구 3개소 및 주요지점에 비디오 카메라를 설치하고 녹화된 영상은 실험종료 후 실내에서 5개 지점 카메라에 대한 물리적 시간 동기화 이후 월류 여부, 월류 유형 및 불규칙 단파 이동 특성 등을 평가하였다.

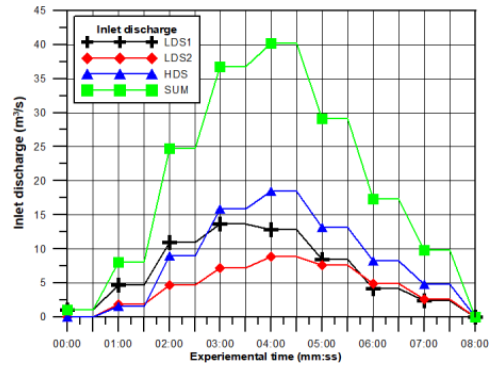


Fig. 5. Hydrograph of 50-yr. frequency of Seoul applied in this experiment (Oh, 2019)

Table 3. Experimental scenarios (Oh, 2019)

Scenario No.	Inlet discharge (A)			Residual amount (B)			(C) = [(A)+(B)]/2.78 m ³ (Ratio of total amount of storage capacity)
	Condition	No.	Total inlet amount (m ³)	Condition	No.	Total residual amount (m ³)	
P50-R0	100% of 100 mm / 1 hr (50yr. frequency of Seoul)	P50	2.78	0%	R0	0.00	1.0
P50-R10				10%	R10	0.28	1.1
P50-R20				20%	R20	0.56	1.2
P50-R30				30%	R30	0.83	1.3
P50-R40				40%	R40	1.11	1.4
P50-R50				50%	R50	1.39	1.5
P50-R60				60%	R60	1.67	1.6
P50-R70				70%	R70	1.95	1.7
P50-R80				80%	R80	2.22	1.8
P50-R90				90%	R90	2.50	1.9
P50-R100				100%	R100	2.78	2.0
P30-R0	90% of 100 mm / 1 hr (30yr. frequency of Seoul)	P30	2.50	0%	R0	0.00	0.9
P30-R10				10%	R10	0.28	1.0
P30-R20				20%	R20	0.56	1.1
P30-R30				30%	R30	0.83	1.2
P30-R40				40%	R40	1.11	1.3
P30-R50				50%	R50	1.39	1.4
P30-R60				60%	R60	1.67	1.5
P30-R70				70%	R70	1.95	1.6
P30-R80				80%	R80	2.22	1.7
P30-R90				90%	R90	2.50	1.8
P30-R100				100%	R100	2.78	1.9

Table 3. Experimental scenarios (Oh, 2019) (Continue)

Scenario No.	Inlet discharge (A)			Residual amount (B)			(C) = [(A)+(B)]/2.78 m ³ (Ratio of total amount of storage capacity)
	Condition	No.	Total inlet amount (m ³)	Condition	No.	Total residual amount (m ³)	
P20-R0	80% of 100 mm / 1 hr (20yr. frequency of Seoul)	P20	2.22	0%	R0	0.00	0.8
P20-R10				10%	R10	0.28	0.9
P20-R20				20%	R20	0.56	1.0
P20-R30				30%	R30	0.83	1.1
P20-R40				40%	R40	1.11	1.2
P20-R50				50%	R50	1.39	1.3
P20-R60				60%	R60	1.67	1.4
P20-R70				70%	R70	1.95	1.5
P20-R80				80%	R80	2.22	1.6
P20-R90				90%	R90	2.50	1.7
P20-R100				100%	R100	2.78	1.8
P10-R0				70% of 100 mm / 1 hr (10yr. frequency of Seoul)	P10	1.95	0%
P10-R10	10%	R10	0.28				0.8
P10-R20	20%	R20	0.56				0.9
P10-R30	30%	R30	0.83				1.0
P10-R40	40%	R40	1.11				1.1
P10-R50	50%	R50	1.39				1.2
P10-R60	60%	R60	1.67				1.3
P10-R70	70%	R70	1.95				1.4
P10-R80	80%	R80	2.22				1.5
P10-R90	90%	R90	2.50				1.6
P10-R100	100%	R100	2.78				1.7
P5-R0	60% of 100 mm / 1 hr (5yr. frequency of Seoul)	P5	1.67				0%
P5-R10				10%	R10	0.28	0.7
P5-R20				20%	R20	0.56	0.8
P5-R30				30%	R30	0.83	0.9
P5-R40				40%	R40	1.11	1.0
P5-R50				50%	R50	1.39	1.1
P5-R60				60%	R60	1.67	1.2
P5-R70				70%	R70	1.95	1.3
P5-R80				80%	R80	2.22	1.4
P5-R90				90%	R90	2.50	1.5
P5-R100				100%	R100	2.78	1.6

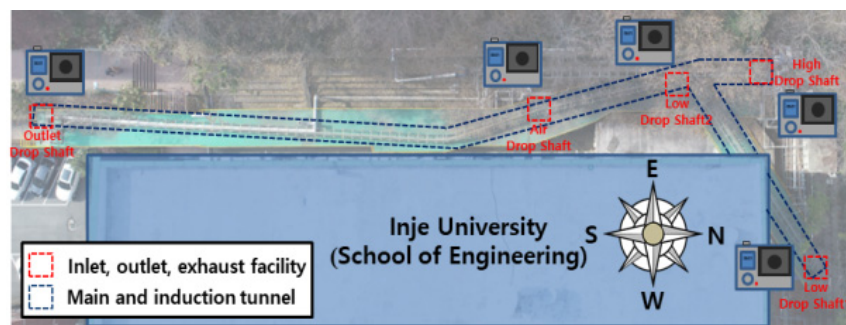


Fig. 6. Location of setup in video cameras

4. 수리모형실험 결과

본 연구에서 수행한 수리모형실험 결과는 Table 4와 같다. 여기서 비월류(Non-overflow)는 실험모형에서 월류가 발생하지 않은 경우로 이 경우 수리적 안정성이 확보된 것으로 본다. 월류(Overflow)는 실험모형에서 월류가 발생한 경우로 이 경우 신월 빗물저류배수시설의 수리적 안정성이 확보되지 않는 것으로 판단하였으며 오직저류(Only-storage)는 시나리오 유입총량(유입유량 + 잔류수량)이 저류배수터널 저류가능량 또는 부피보다 작아 배수능력이 활성화 되지 못하고 저류기능만 발휘한 경우를 의미한다. 또한 월류유형(Overflow type)은 2절에서 설명한 Takanishi and Abe가 구분한 역사이편 형식 구조물에서 공기거동과 관련하여 발생하는 세 가지 수리적 문제로 구분해보았다.

Fig. 7과 같이 녹화된 영상을 분석하니 Table 4와 같이 55가지의 실험 시나리오 중 19가지의 실험 시나리오에서 월류가 발생하여 수리적 안정성이 확보되지 못하는 것으로 분석되었다. 월류 유형을 살펴보면 월류가 발생한 19가지 실험 시나리오 중 15가지 실험 시나리오의 월류 유형이 Fig. 7(a)와 같이 불규칙 단파에 의한 압축공기 폭발인 것으로 분석되었으며 4가지 실험 시나리오가 Fig. 7(b)와 같이 진동과 압축공기 배기로 인한 월류가 발생하는 것으로 분석되었다.

본 연구의 수리모형실험 결과를 바탕으로 터널 내 잔류수별 대응 가능 강우량을 살펴보면 터널 내 잔류수량이 10% 미만

일 때는 모든 강우조건에서 안정적 저류·배수가 가능하고 터널 내 잔류수량이 10% 이상~40% 미만일 때는 30년 빈도 이하 강우조건만 안정적 저류·배수가 가능할 것으로 보인다. 터널 내 잔류수량이 40% 이상~60% 미만일 때는 10년 빈도 이하 강우조건에서만, 터널 내 잔류수량이 60% 이상~90% 미만일 때는 5년 빈도 이하 강우조건에서만 안정적 저류·배수가 가능할 것으로 판단된다. 터널 내 잔류수량이 90% 이상인 경우에는 모든 강우조건에서 안정적으로 저류·배수능력이 발휘할 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 수리모형실험 결과를 바탕으로 향후 신월 빗물저류배수시설의 연속강우 대비한 안정적 운영을 위한 방안을 작성해보았다. 터널 내 잔류수량이 0%, 90% 이상인 경우에는 강우가 시작됨에 따라 터널로 홍수유입을 실시하여 강우가 종료 될 때까지 연속적 홍수배제를 실시하고 터널 내 잔류수량이 10% 이상~90% 미만 일 때는 터널 내 잔류수량이 90%가 될 때 까지 홍수유입을 실시하고 홍수유입을 차단한다. 이후 일정시간동안 터널 내 반사파 안정화 시간을 거친 후 다시 홍수유입을 실시한다. 또한 신월 빗물저류배수시설에 설치되는 잔류수 배제 펌프의 용량을 고려한 연속강우 대비 신월 빗물저류배수시설의 잔류수 배제 운영 계획을 작성해보았다. 터널 내 잔류수량이 30% 이하일 경우 저류배수시설 운영 종료 즉시 잔류수 배제펌프 즉시 가동, 터널 내 잔류수량이 30% 초과~50% 이하일 경우 2일 이내 강우예보가 없을 때는 잔류수 배제펌프 가동, 2일 이내 강우예보가 있을 때는

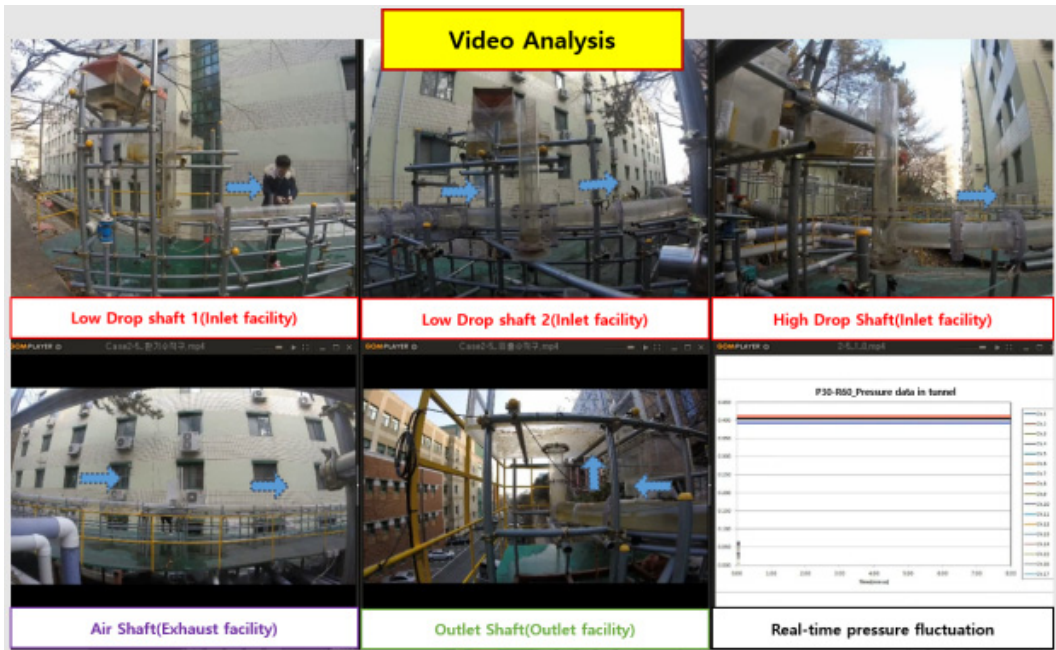


Fig. 7. Analysis of video

Table 4. Experimental results of each scenario

Scenario No.	Status of occurred overflow at each drop shaft			Time at overflow (mm:ss)	Overflow type
	Low Drop Shaft 1 (LDS1)	Low Drop Shaft 2 (LDS2)	High Drop Shaft (HDS)		
P50-R0	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	6:46	-
P50-R10	Overflow	Overflow	Non-overflow	6:13	Bore
P50-R20	Overflow	Overflow	Non-overflow	6:01	Bore
P50-R30	Overflow	Overflow	Non-overflow	5:25	Bore
P50-R40	Overflow	Overflow	Non-overflow	5:00	Bore
P50-R50	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	4:46	Bore
P50-R60	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	4:29	Bore
P50-R70	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:37	Bore
P50-R80	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:07	Bore
P50-R90	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	2:47	-
P50-R100	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	2:46	-
P30-R0	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P30-R10	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	7:00	-
P30-R20	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	6:22	-
P30-R30	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	6:08	-
P30-R40	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:44	Bore
P30-R50	Overflow	Overflow	Non-overflow	5:05	Bore
P30-R60	Overflow	Overflow	Non-overflow	5:01	Bore
P30-R70	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	4:13	Bore
P30-R80	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:44	Bore
P30-R90	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:05	-
P30-R100	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	2:47	-
P20-R0	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P20-R10	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P20-R20	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	7:08	-
P20-R30	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	6:33	-
P20-R40	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:59	-
P20-R50	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:19	Oscillation
P20-R60	Overflow	No Clearance	Non-overflow	5:00	Bore
P20-R70	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	4:18	Oscillation
P20-R80	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:54	-
P20-R90	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:25	-
P20-R100	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:13	-
P10-R0	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P10-R10	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P10-R20	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P10-R30	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P10-R40	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	6:47	-
P10-R50	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:22	-
P10-R60	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:17	Oscillation
P10-R70	Overflow	Overflow	Non-overflow	4:29	Bore
P10-R80	Overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:43	Oscillation
P10-R90	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:25	-
P10-R100	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	2:51	-
P5-R0	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P5-R10	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P5-R20	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P5-R30	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P5-R40	Only storage	Only storage	Only storage	-	-
P5-R50	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:43	-
P5-R60	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	5:39	-
P5-R70	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	4:27	-
P5-R80	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:55	-
P5-R90	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:44	-
P5-R100	Non-overflow	Non-overflow	Non-overflow	3:04	-

잔류수 배수펌프 대기, 터널 내 잔류수량이 50% 초과~80% 이하일 경우 3일 이내 강우예보가 없을 때는 잔류수 배제펌프 가동, 3일 이내 강우예보가 있을 때는 잔류수 배수펌프 대기, 터널 내 잔류수량이 80% 초과일 경우 4일 이내 강우예보가 없을 때는 잔류수 배제펌프 가동, 4일 이내 강우예보가 있을 때는 잔류수 배수펌프 대기로 한다면 연속강우에 대비한 안정적 시설 운영이 가능 할 것으로 판단된다.

월류가 발생한 시나리오들의 월류 발생 시간을 살펴보니 대부분의 약 3분 30초(실제 시간: 24분 45초)~6분 30초(실제 시간: 38분 53초) 사이에 월류가 발생하는 것으로 분석되었는데 이는 실험 유입유량이 많은 시간인 약 3분 00초(실제시간: 21분 13초)~5분 00초(실제시간: 35분 21초)사이에 해당하

는 시간으로 월류 발생 메커니즘이 유입유량 크기와 밀접한 관계가 있다고 판단된다.

본 연구결과와 같이 신월 빗물저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널에서 수리적 안정성을 확보하기 위해서는 효과적인 압축공기 배출이 필수적이며 이를 위해서 Fig. 8과 같이 지하 저류 배수터널의 압축공기 배출구조체(특허등록번호 1020651410000)를 이용한다면 효과적인 압축공기 배제가 가능하여 수리적 안정 확보가 가능할 것으로 판단된다. 또한 향후 추가 시설 설치를 통한 월류 저감 및 수리적 안정성 확보가 아닌 정확한 월류 저감 메커니즘에 대한 연구를 위해 유입 유량-불규칙단파 특성-월류 특성간의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

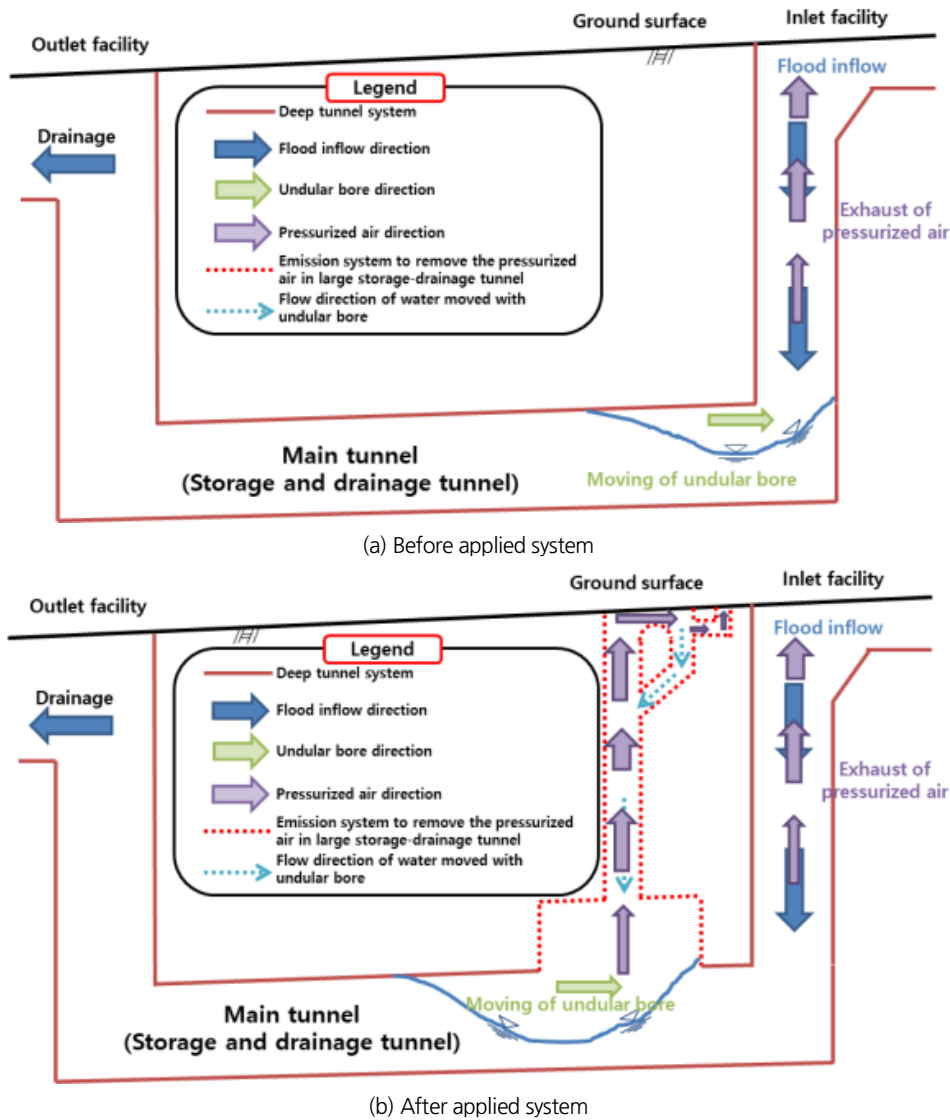


Fig. 8. Secured hydraulic stability for emission system to remove the pressurized air in large storage-drainage tunnel

5. 결론

본 연구에서는 신월 빗물저류배수시설의 수리적 안정성을 기존 연구에서 구분한 세 가지 유형으로 구분하고 홍수 유입부터 안정적 배수과정까지를 수리모형실험을 통하여 분석하였다.

- 1) 실험 결과 총 55가지 실험 시나리오 중 19가지 실험 시나리오에서 월류가 발생하여 수리적 안정성이 확보되지 못하는 것으로 분석되었다. 월류가 발생한 19가지 실험 시나리오 중 압축공기 폭발에 의한 월류가 발생한 시나리오는 15가지, 진동과 압축공기 배기로 인해 월류가 발생한 시나리오가 4가지 인 것으로 분석되었다.
- 2) P50, P30, P20, P10 시나리오에서는 저류가능량 대비 유입총량의 비가 1.3 ~ 1.5일 경우 신월 빗물저류배수시설의 수리적 안정성이 확보 되지 않는 것으로 평가 되었지만 P5 시나리오에서는 저류가능량 대비 유입총량의 비가 1.3 ~ 1.5 일 경우에도 수리적 안정성이 확보되는 것으로 평가 되었다.
- 3) 신월 빗물저류배수시설의 수리적 안정성이 확보된 안정적 운영을 위해서는 저류배수터널 내 잔류수가 없거나 만관이 되어 있는 상태를 유지하는 것이 유리할 것으로 판단된다.
- 4) 신월 빗물저류배수시설의 잔류수 배제 계획시 터널 내 잔류수가 30% 이하일 때는 배수펌프를 가동시켜 시설 내 잔류수를 모두 배제시키는 것이 유리하며 30% 이상일 때는 경우예보를 고려하여 배수펌프 가동 또는 대기를 결정하는 것이 안정적 시설 운영에 유리할 것으로 판단된다.
- 5) 월류가 발생한 시간을 살펴보니 유입유량이 많은 시간에 발생하는 것으로 보아 월류 발생이 유입유량 크기와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.
- 6) 신월 빗물저류배수시설의 안정적 운영을 위해서 유입유량의 크기, 월류, 불규칙 단파간의 상관관계에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 현대건설의 '신월빗물저류배수시설 등 방재시설 확충공사 수리모형실험 용역'의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, H.I., Lee, K.S., and Lyu, S.W. (2017). "An experimental investigation on the behavior of water-air two-phase flows in a horizontal pipe." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, pp. 75-81.
- Choi, S.H., and Lee, S.O. (2016). "The numerical simulation considering air pressure and the influence factor analysis of geyser in a stormwater tunnel with large diameter." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, pp. 133-139.
- Guo, Q., and Song, C.C.S. (1990). "Surging in urban storm drainage systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, pp. 1523-1537.
- Kushiyama, K., Kamioka, S., and Yamada, T. (2003). "Development of numerical model concerning the behavior of water and air in a long inverted siphon. A proposal of unsteady numerical model based on hydraulic experiment model." *Journal of Japan Society Hydrology and Resources*, Vol. 16, pp. 527-540.
- Mori, H., Nasu, M., Morita, H., and Matsubara, M. (2003). "A study of air mixing and discharge in rainwater sewers by hydraulic model testing." *Journal of Environmental Conservation Engineering*, Vol. 32, pp. 328-336.
- Oh, J.O. (2019). "An experimental study on the influence of undular bore on the hydraulic stability at Shinwol rainwater storage and drainage system." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, pp. 129-138.
- Oh, J.O., Park, J.H., and Jun, S.M. (2020). "An experimental study on increased pressure in Shinwol rainwater storage and drainage system by undular bore." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, pp. 303-312.
- Sekoguchi, K., Mori, K., Kaji, M., Miwa, M., Nakazatomi, M., and Shimizu, H. (1996). "Characteristics of interfacial profiles in upward and downward gas-liquid two-phase plug flow." *Heat Transfer-Japanese Research*, Vol. 25, pp. 568-579.
- Tada, A., Hosoda, T., Inoue, K., and Kitahara, M. (1994). *Fundamental characteristics of partially free surface unsteady flows in a circular conduit*. Annuals disaster prevention research institute of Kyoto university, Vol. 37, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto, Japan, pp. 475-488.
- Vasconcelos, J.G., and Wright, S.J. (2005). "Experimental investigation of surges in a stormwater storage tunnel." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp. 853-861.
- Watanabe, M., Kanda, T., Okada, M., and Kanki, K. (2000). "Pressurised-flow with masses of air at manholes in urban sewer pipe system." *Journal of Japan Society Hydrology and Resources*, Vol. 44, pp. 551-556.
- Wright, S.J., Lewis, J.W., and Vasconcelos, J.G. (2011). "Physical processes resulting in geysers in rapidly filling storm-water tunnels." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 137, pp. 199-202.
- Zhao, C.H., Zhu, D.Z., Sun, S.K., and Liu, Z.P. (2006). "Experimental study of flow in vortex drop shaft." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, pp. 61-68.