J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 52, No. 5 (2019), pp. 313-323
doi: 10.3741/JKWRA.2019.52.5.313
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

An experimental study on the influence of undular bore on the hydraulic stability at Shinwol rainwater storage and drainage system

Oh, Jun Oh[a]*

[a]Researcher, Construction Technology and Research Center, Inje University, Gimhae, Korea

Paper number: 18-050
Received: 23 July 2018; Revised: 18 March 2019; Accepted: 18 March 2019

Abstract

Deep Tunnel system is a large-scale urban flood control facility installed underground in order to reinforce the lack of drainage systems in developed cities. In a structure like a deep tunnel system, the undular bore generated in the downstream causes a problem in the hydraulic stability of the tunnel. In this study, to investigate the influence of the undular bore on the hydraulic stability at the "Shinwol rainwater storage and drainage system", under construction for the first time in the country, a hydraulic model experiment was conducted on various flooding inflow scenarios. As a result of the hydraulic model experiment carried out in this study, the undular bore generated downstream is trapped in the pipe while moving to upstream, pushes the compressed air. It is judged that overflow occurred by choking the vertical drop shaft in the process when this compressed air is being exhaust through the upstream vertical drop shaft and blocking flood inflow. In addition, the analysis of velocity of undular bore shows that the undular bore transfers energy, and at this time, the pressure rose in the pipe and the velocity increment occurred of the undular bore. Further studies are needed to predict the size and velocity of undular bore, which plays an important role in the hydraulic stability of the tunnel in the deep tunnel system.

Keywords: Deep tunnel system, Undular bore, Compressed air, Hydraulic stability

불규칙 단파가 신월저류배수시설의 수리적 안정성에 미치는 영향에 대한 실험 연구

오준오[a]*

[a]인제대학교 건설기술연구소 연구원

요 지

대심도 터널은 기 개발된 도시의 부족한 배수관망 능력을 보강하기 위하여 지하에 설치하는 대규모 도시홍수 배제 시설물로 역 사이펀 관로 형태를 하고 있는 시설물이다. 대심도 터널과 같은 구조에서는 하류에서 발생한 불규칙 단파에 의하여 터널의 수리적 안정성에 문제가 발생한다. 본 연구에서는 국내 최초로 건설 중인 '신월 빗물저류배수시설'의 수리적 안정성에 불규칙 단파가 미치는 영향을 알아보기 위하여 다양한 홍수유입 시나리오에 대하여 수리모형실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 수리모형실험 결과 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 관 내 포집되어 압축상태인 공기덩어리를 밀어내는데, 이 공기덩어리가 상류 수직유입구를 통하여 급배기 되는 과정에 수직유입구를 질식시키고 홍수유입을 차단하여 월류가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 불규칙 단파의 이동속도를 분석한 결과 불규칙 단파가 이동하면서 에너지를 전달하고 이때 관 내 압력 상승 및 불규칙 단파의 속도 증가분이 발생하는 것으로 판단된다. 대심도 터널의 수리적 안정성에 중요한 역할을 하는 불규칙 단파의 크기 및 속도 예측을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어: 대심도 터널, 불규칙 단파, 압축공기, 수리적 안정성

***Corresponding Author.** Tel: +82-55-327-3725
E-mail: symm_oh@naver.com (J. O. Oh)

© 2019 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

최근의 기후 변화가 홍수의 특성과 피해 양상을 과거와는 다르게 변화시키고 있을 뿐 아니라 급격한 도시화로 인하여 기존 하천유역의 저류능력이 감소하였다(Kim and Lee, 2005). 이러한 한계를 극복하기 위하여 이미 외국에서는 대심도 터널을 활용한 홍수재해 관리방안이 오래전부터 활용되어 왔는데, 특히 미국, 홍콩, 일본에서 지하공간을 이용한 대심도 터널을 홍수 방어 구조물로 적극적으로 활용하고 있다.

국내의 경우 대도시 지역에서 홍수피해가 증가함에 따라 지하공간을 활용한 홍수 방어 구조물에 대한 관심이 증가하여 2005년 목감천 방수로 및 도림천 지하방수로 건설 사업의 예비타당성 및 경제성 분석이 완료되어 설치가 검토되었으며, 2013년부터는 국내 최초로 서울시 강서구 및 양천구 일대의 홍수를 안양천으로 직접 배제시키는 '신월 빗물저류배수시설 등 방재시설 확충공사 사업'이 진행되고 있다(Park *et al.*, 2017).

'신월 빗물저류배수시설'과 같은 대심도 터널은 Fig. 1과 같이 크게 유입시설(Inlet facility), 유도터널(Induction tunnel), 본 터널(Main tunnel), 배기시설(Exhaust facility), 배수시설(Outlet facility)로 구분하고 있으며 본류 하도의 홍수를 지하터널로 유입시켜 해양, 호수 및 타 하천으로 방류하는 시설이다.

'신월 빗물저류배수시설'과 같은 대심도 터널은 역 사이펀 구조로 내부가 만관되면서 수직구(Shaft) 수위를 상승시켜 관수로 상태에서 홍수를 유하시키는 방식을 하고 있다. 이런 시설은 초기 개수로 상태에서 만관 후 관수로 상태로 전이 될 때 시설 내 압축공기 배출로 인한 시설 계획이 매우 어렵다. 하지만 이런 압축공기 배출에 중요한 역할을 하는 것이 불규칙 단파(Bore)이다.

본 연구에서는 다양한 홍수 시나리오(유입유량 조건, 터널 내 잔류수량 조건)에 따라 시설 내에서 발생한 불규칙 단파가 신월 빗물저류배수시설에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수리모형실험을 실시하였다.

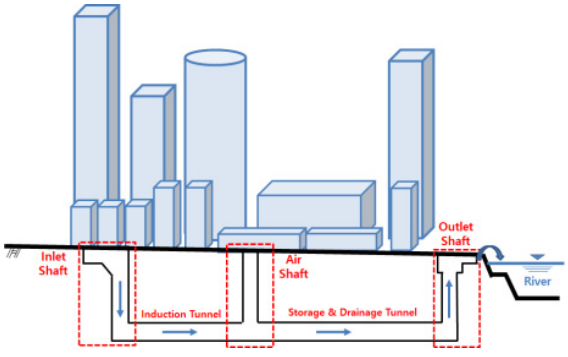


Fig. 1. Facilities of deep tunnel system

2. 연구동향 및 이론적 배경

2.1 연구동향

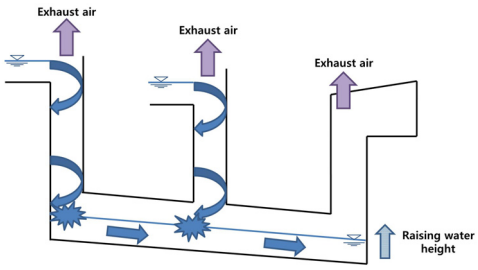
'신월 빗물저류배수시설'과 같은 지하 대심도 터널에 대한 연구는 국내보다 국외에서 비교적 활발히 연구되고 있으며 지하 대심도 터널을 도시 홍수방어구조물로 적극적으로 활용하고 있는 미국과 일본에서 많은 연구가 진행되었다. 국내의 경우 2005년 김창완과 이동섭이 대심도 터널의 필요성과 일본 지하 대심도 터널에 대한 소개이후 대심도 터널에 대한 관심이 증가하였다. 국내에서는 대심도 터널 내 홍수 및 공기 거동에 관한 연구 보다는 대심도 터널에 대한 필요성, 대심도 터널의 유입시설에 관한 연구가 비교적 많이 진행되었다.

Peregrine (1966)은 등류상태에서 불규칙 단파의 크기 증가의 물리적 설명과 유한 차분법을 이용한 수치해석을 통하여 불규칙 단파 크기 증가에 대한 연구를 하였다. Tada *et al.* (1994)은 공기가 갇혀 있는 지하 대심도 터널에서의 흐름에 대하여 연구하였으며 터널 내 압축공기를 수치해석과 수리실험을 통하여 압력수두로 계산하여 비교하였다. Sukegawa *et al.* (1999)은 상류 수직유입구로 이동하는 공기 덩어리의 선단 모서리가 볼록한 모양을 형성하고 아주 작은 거품들이 수직유입구 벽 근처에 모이는 경향이 있다고 밝혔다. Watanabe *et al.* (2000)은 도시 하수관 시스템 내 다량의 공기가 포함된 우수유출 수치해석모델 제안을 위해서 수리실험과 수치해석모델을 사용하여 연구하였다. Kushiyama *et al.* (2003)은 대심도 터널과 같은 역 사이펀 관로의 합류지점에서 비정상류 해석과 관 내 공기 거동을 함께 해석할 수 있는 수치해석 모델을 구축하였다. Vasconcelos and Wright (2005)은 수리실험을 통하여 대심도 터널 내 흐름이 개수로 흐름에서 관수로 흐름으로 전이될 때 발생하는 문제에 대하여 연구하였는데 관 내부에 포집되어 있는 공기가 관 내 홍수 흐름에 영향을 미치며 상류 수직유입구 쪽으로 이동하는 압축된 단파는 관 내부를 가득 채우고 압력수두를 상승시키며 서징강도를 극대화시킴을 밝혔다.

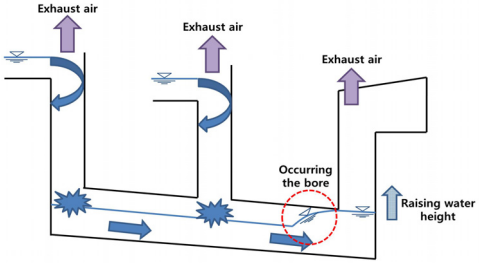
2.2 이론적 배경

Kushiyama *et al.* (2003)에 따르면 대심도 터널과 같은 역 사이펀 관로에서의 흐름은 초기 개수로 흐름에서 지속적인 홍수유입에 의하여 관수로 흐름으로 전이된다. 이런 대심도 터널의 흐름은 Fig. 2와 같이 크게 5단계 순서로 구분할 수 있으며 1단계 홍수 유입 단계에서는 홍수유입에 따라 대심도 터널 내 수위가 상승하며 지속적인 홍수유입에 의하여 하류부터 만관상태가 된다. 이때의 흐름은 개수로 흐름이며 대심도 터널의 저류기능과 배수기능 중 저류 기능만 발휘한다. 2단계는 불규

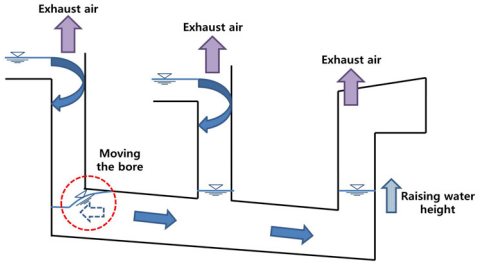
칙 단파 발생 단계로 대심도 터널의 하류부터 만관이 되고 상류에서 지속적인 홍수 유입으로 불규칙 단파가 발생하여 상류(upstream)로 이동한다. 3단계는 불규칙 단파 이동 단계로 하



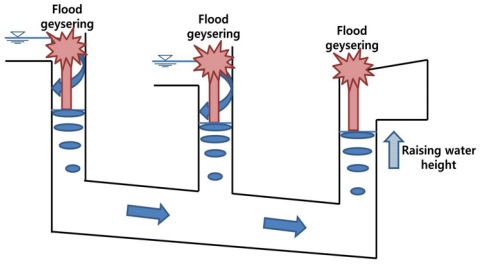
Step 1. Inflow flood and stably exhaust air



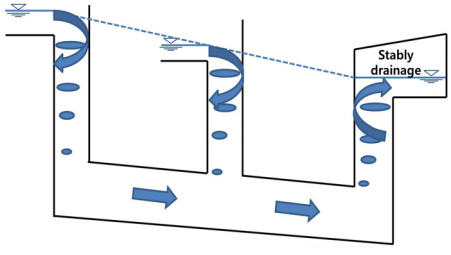
Step 2. Occurring the bore at downstream



Step 3. Moving the bore to upstream and pressurized to air in tunnel



Step 4. Flood geysering by floating pressurized air



Step 5. Surging and stably drainage

Fig. 2. Flow mechanism in deep tunnel system

류에서 발생한 불규칙 단파가 상류(upstream)로 이동하며 홍수와 함께 유입된 공기들은 포집되어 공기덩어리를 이루게 된다. 이때 공기덩어리들은 상류에서 지속적으로 유입되는 홍수와 하류에서 상류로 밀려올라오는 불규칙 단파에 의하여 압축을 받아 압축공기(pressurized air)가 된다. 4단계는 관내 공기 분출 및 배수시작 단계로 상류로 이동하는 불규칙 단파가 관 내 압축공기를 피스톤처럼 밀어내며 만약 대심도 터널의 관 내 압력이 안정화 되지 않았으면 압축공기는 배기시설 또는 상류에 위치한 수직 유입구로 급배기되는 과정에서 압축공기 폭발로 인한 수직구 질식과 수직 유입구에서의 월류(geysering)가 발생한다. 이때 흐름은 개수로 흐름에서 관수로 흐름으로 전이되어 하류 유출부에서 배수(drainage)가 시작된다. 4단계는 대심도 터널 내 수리적 안정성이 불규칙 단파에 의해 저해되어 대심도 터널의 저류기능에서 배수기능으로 원활하게 기능전환이 일어나지 않았을 경우 발생한다. 만약 불규칙 단파에 의한 수리적 안정성이 저해되지 않고 확보되었다면 4단계의 압축공기 폭발 및 수직 유입구에서의 월류는 발생하지 않는다. 마지막 5단계는 안정적 홍수 배수 단계로 하류 유출부에서 배수가 시작되면 관 내 흐름 및 에너지 안정을 위한 서징(surging)이 발생하고 이로 인한 월류가 발생하기도 한다. 하지만 수 초 내로 에너지가 안정화 되고 관 내 잔류하고 있는 공기덩어리를 배기시키고 유출부에서는 안정적으로 배수가 된다.

일반적으로 흐름이 있는 영역에서 이론적인 불규칙 단파(Bore)의 속도(C_{RP})는 Fig. 3과 같은 개념으로 불규칙 단파의 전파속도(C_B)와 상류 수직 유입구에서 유입되는 홍수에 의한 흐름 유속(V_f)의 벡터합으로 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{RP} = C_B + V_f \tag{1}$$

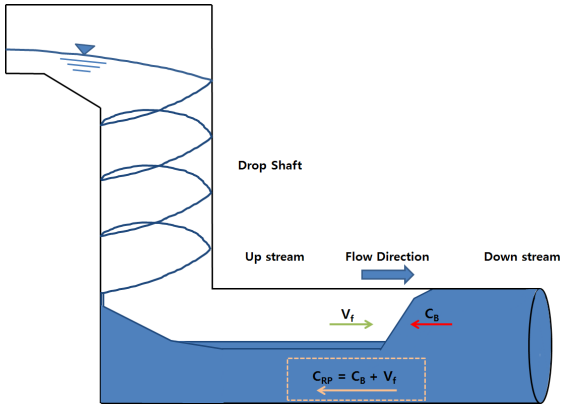


Fig. 3. Concept of CRP (Celerity of bore by principle)

본 연구에서는 불규칙 단파가 대심도 터널의 수리적 안정성에 어떠한 영향을 미치는 지를 알아보기 위하여 수리모형실험을 실시하였고 실험에서 취득한 영상을 분석하여 불규칙 단파의 전파속도가 Eq. (1)과 같은지를 확인하였다.

3. 수리모형실험

3.1 신월 빗물저류배수시설 개요

본 연구의 원형 모델인 '신월 빗물저류배수시설'은 2010년 침수피해가 발생한 서울특별시 강서구 및 양천구 일대에 주택 및 상가가 밀집되어 관거의 대규모 확충 공사가 불가한 지역으로 '신월 빗물저류배수시설'이 침수피해 해결 대책으로 계획되었으며, 사업 개요는 Fig. 4와 같다.

신월 빗물저류배수시설은 서울특별시 강서구 및 양천구 일대 유역에 설치 시공 중에 있으며, 총길이 약 4.5 km, 수직유입구 및 환기수직구 직경은 5.4 m, 주 관로인 저류배수터널의 직경은 10.0 m, 저류배수터널의 저류가능량은 347,778 m^3이며 이는 '신월 빗물저류배수시설'의 방재성능목표인 100 mm /1 hr(서울특별시 50년 빈도 강우)의 총량이다.

3.2 수리모형실험 개요

본 연구에서 수행한 수리모형실험은 원형인 신월 빗물저류배수시설에 개수로 흐름의 지배력인 중력을 고려하여 Froude 상사법칙을 사용하였고 점성력과 관련한 Reynolds 수를 동시에 일치시키는 것은 불가능하므로 원형과 모형에서 Manning의 평균유속이 적용된다는 가정하에 조도를 조정함으로서 점성력의 상사를 유지하였으며 축척 1/50의 정상모형으로 제작하였다. Froude 상사법칙에 의한 수리량 환산비는 Table 1과 같다.

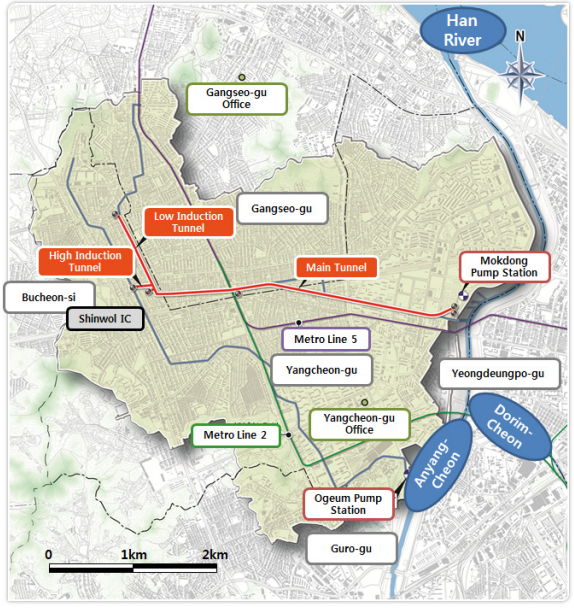


Fig. 4. Concept of construction for shinwol rainwater storage and drainage system (Hyundai Construction & Engineering)

3.3 실험조건 및 실험방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 크게 저수조, 고수조, 그리고 실험수로로 구성되어 있다. 실험모형에 공급되는 유량은 고수조로부터 유입되며, 유입유량은 유량계를 설치하여 크기를 측정하였다. 공급수로를 통하여 공급된 유량은 실험모형의 유출부를 지나 저수조로 흘러가게 되며 Fig. 5는 실험수로의 개념도를 나타내고 있다.

본 연구에서 이용한 수리모형은 설계도면을 분석하여 모형에 필요한 요소를 도출하고 축척에 맞게 아크릴로 제작하였으며 수리모형의 설계조건은 Table 2와 같다. 또한 모형의 조도계수를 평가하기 위하여 합류부, 곡선부, 유출부 등 주요 지

Table 1. Scales for each variables of froude similarity

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

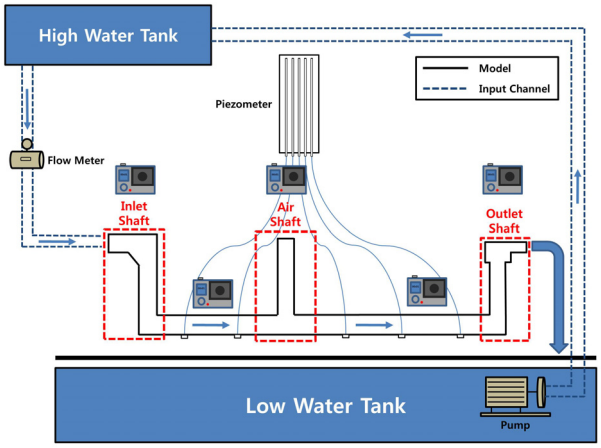


Fig. 5. System of discharge cycle in hydraulic model experiment

Table 2. Design conditions for experiments of each part

Design Condition		Data	
		Original (m)	Model (m)
Induction Tunnel	Diameter (D)	887.1	17.74
	Length (L)	5.5	0.11
Main Tunnel (Storage & Drainage Tunnel)	Diameter (D)	10.0	0.20
	Length (L)	3,629.7	72.59
Inlet Shaft1 (LDS1)	Diameter (D)	5.4	0.11
	Height (H)	46.2	0.92
Inlet Shaft3 (LDS2)	Diameter (D)	5.4	0.11
	Height (H)	45.8	0.92
Inlet Shaft2 (HDS)	Diameter (D)	5.4	0.11
	Height (H)	47.6	0.95
Air Shaft	Diameter (D)	5.4	0.11
	Height (H)	42.3	0.85
Outlet shaft	Diameter (D)	7.5	0.15
	Height (H)	39.8	0.80

점에 압력계를 설치하고 각 압력측정 지점 거리와 측정 압력을 이용하여 수두경사를 산정하였다. 그 결과 모형의 조도계수가 0.0086으로 평가되었으며 원형의 조도계수0.0080과 비교하여 다소 높게 산정되었다. 조도계수를 고려하여 왜곡모형을 이용할 경우, 관경축척 1/50, 길이축척 1/71을 적용하여야 하나 왜곡모형의 경우 수리특성, 공기연행에 관한 영향평가가 미흡할 것으로 판단되어 정상모형을 적용하였다.

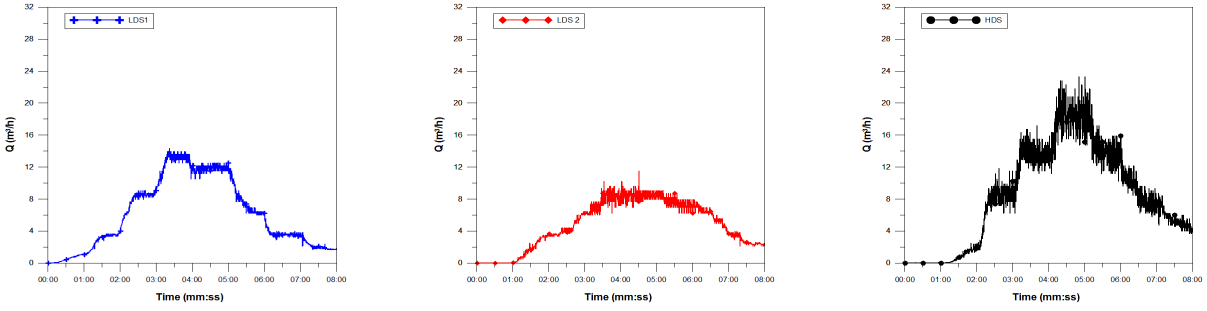
본 연구의 실험 시나리오는 Table 3과 같이 유입유량 조건 5가지, 터널 내 초기 잔류수 조건 11가지로 총 55가지 홍수유입 시나리오에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 유입유량 조건은 방재성능목표 총량(서울시 50년 빈도)에서 각각 10%씩 감소시켜 구분하였으며 터널 내 초기 잔류수 조건은 저류가능량(터널 총 부피)의 0% ~ 100%까지 10%씩 증가시켜 구분하였다. 각 실험은 Fig. 6과 같이 기 작성된 수문곡선에 따라 1분 간격으로 수직유입구 유입량을 변화시키면서 비정상류(Unsteady)상태로 실험을 진행하였다.

Table 3. Experimental scenarios for inlet discharge and residual amount in tunnel

Case No.	Inlet discharge (A)			Residual amount in tunnel (B)			(A)+(B)/2.78 m^3 (Total amount of storage)
	Condition	No.	Total amount (m^3)	Condition	No.	Total amount (m^3)	
P50-R0	100% of 100 mm /1 hr (50 yr. 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 (30 yr. 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 for inlet discharge and residual amount in tunnel (continue)

Case No.	Inlet discharge (A)			Residual amount in tunnel (B)			(A)+(B)/2.78 m^3 (Total amount of storage)
	Condition	No.	Total amount (m^3)	Condition	No.	Total amount (m^3)	
P20-R0	80% of 100 mm /1 hr (20 yr. 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 (10 yr. frequency of Seoul)	P10	1.95	0%	R0	0.00	0.7
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 (5 yr. frequency of Seoul)	P5	1.67	0%	R0	0.00	0.6
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



(a) LDS1 (b) LDS2 (c) HDS

Fig. 6. Hydrograph of 50-yr. frequency of Seoul

본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 '신월 빗물저류배수시설'에 다양한 홍수유입 시나리오에 따른 불규칙 단파에 의한 시설물의 수리적 안정성을 평가하기 위하여 수직구 3개소 및 주요지점에 비디오 카메라를 설치하고 월류 여부 불규칙 단파의 이동속도를 평가하였다. 또한 Fig. 7과 같이 저류배수터널 10개 지점에 위압수두계(Piezometer)를 설치하여 불규칙 단파가 이동할 때 관 내 압력변화를 분석하였다.

4. 수리모형실험 결과

본 연구에서 대심도 터널의 다양한 홍수 유입시나리오별 관 내 불규칙 단파에 의한 대심도 터널의 수리적 안정성을 평가하기 위하여 수직구 3개소 중 1개소에서라도 월류가 발생하면 시설의 수리적 안정성이 확보되지 않는 것으로 구분하였으며 취득한 영상 분석을 의한 불규칙 단파 속도 및 월류 발생 여부 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 (+)와 (-)는 방향을

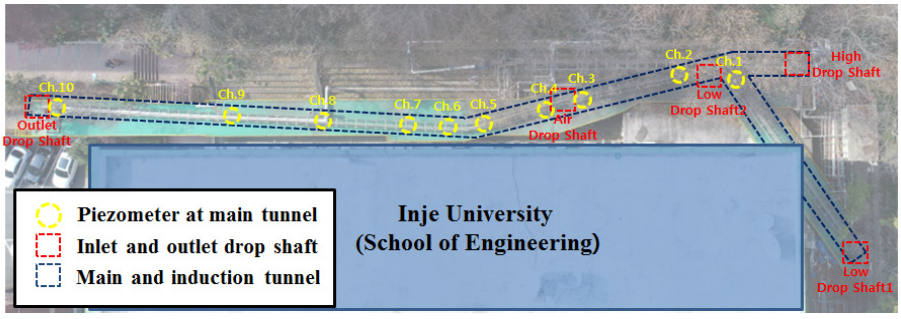


Fig. 7. Location of setup in piezometers

Table 4. Analysis and comparison results of celerity of bores

Case No.	V_f (m/s)	C_B (m/s)	C_{RP} (m/s)	C_{RO} (m/s)	C_α (m/s)	C_{RP}/C_{RO}	Hydraulic stability secured or not
P50-R0	0.108	0.963	0.855	0.905	0.050	0.94	H·S secured
P50-R10	0.110	0.955	0.846	0.787	**-0.059**	1.07	H·S not secured
P50-R20	0.113	0.940	0.826	1.207	0.380	0.68	H·S not secured
P50-R30	0.340	0.767	0.427	1.131	0.704	0.38	H·S not secured
P50-R40	0.247	0.900	0.653	1.006	0.353	0.65	H·S not secured
P50-R50	0.408	0.858	0.450	1.293	0.873	0.35	H·S not secured
P50-R60	0.408	0.858	0.450	1.207	0.757	0.37	H·S not secured
P50-R70	0.538	0.767	0.229	1.006	0.776	0.23	H·S not secured
P50-R80	0.717	0.664	**-0.053**	0.862	0.915	0.06	H·S not secured
P50-R90	0.430	0.858	0.427	0.823	0.395	0.52	H·S secured
P50-R100	0.717	0.664	**-0.053**	0.724	0.777	0.07	H·S secured
P30-R0	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P30-R10	0.102	0.940	0.838	0.862	0.024	0.97	H·S secured
P30-R20	0.087	1.015	0.928	0.823	**-0.105**	1.13	H·S secured
P30-R30	0.222	0.900	0.677	0.862	0.185	0.79	H·S secured
P30-R40	0.322	0.748	0.426	0.905	0.479	0.47	H·S not secured
P30-R50	0.459	0.767	0.309	0.953	0.644	0.32	H·S not secured
P30-R60	0.524	0.718	0.194	1.006	0.812	0.19	H·S not secured
P30-R70	0.645	0.664	0.019	1.065	1.046	0.02	H·S not secured
P30-R80	0.553	0.718	0.164	1.006	0.841	0.16	H·S not secured
P30-R90	0.323	0.940	0.617	1.065	0.448	0.58	H·S secured
P30-R100	0.317	0.947	0.630	1.131	0.501	0.56	H·S secured

Table 4. Analysis and comparison results of celerity of bores (continue)

Case No.	V_f (m/s)	C_B (m/s)	C_{RP} (m/s)	C_{RO} (m/s)	C_α (m/s)	C_{RP}/C_{RO}	Hydraulic stability secured or not
P20-R0	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P20-R10	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P20-R20	0.272	0.542	0.271	0.362	0.091	0.75	H·S secured
P20-R30	0.362	0.664	0.302	0.603	0.301	0.50	H·S secured
P20-R40	0.242	0.814	0.572	0.905	0.333	0.63	H·S secured
P20-R50	0.296	0.900	0.603	1.131	0.528	0.53	H·S not secured
P20-R60	0.362	0.814	0.451	1.006	0.554	0.45	H·S not secured
P20-R70	0.430	0.767	0.337	1.065	0.728	0.32	H·S not secured
P20-R80	0.344	0.858	0.514	0.905	0.391	0.57	H·S secured
P20-R90	0.430	0.767	0.337	0.862	0.525	0.39	H·S secured
P20-R100	0.382	0.814	0.431	0.823	0.391	0.52	H·S secured
P10-R0	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P10-R10	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P10-R20	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P10-R30	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P10-R40	0.190	0.858	0.668	0.862	0.194	0.77	H·S secured
P10-R50	0.220	0.978	0.758	0.905	0.147	0.84	H·S secured
P10-R60	0.238	0.940	0.702	0.754	0.052	0.93	H·S not secured
P10-R70	0.301	0.858	0.557	1.065	0.508	0.52	H·S not secured
P10-R80	0.301	0.858	0.557	0.670	0.114	0.83	H·S not secured
P10-R90	0.251	0.940	0.689	0.905	0.216	0.76	H·S secured
P10-R100	0.377	0.767	0.391	0.754	0.363	0.52	H·S secured
P5-R0	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P5-R10	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P5-R20	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P5-R30	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P5-R40	-	-	-	-	-	-	Non drainage
P5-R50	0.068	0.940	0.872	0.905	0.033	0.96	H·S secured
P5-R60	0.163	0.858	0.695	0.862	0.167	0.81	H·S secured
P5-R70	0.181	0.814	0.633	0.862	0.229	0.73	H·S secured
P5-R80	0.245	0.858	0.613	0.823	0.210	0.75	H·S secured
P5-R90	0.222	0.900	0.677	0.862	0.185	0.79	H·S secured
P5-R100	0.453	0.940	0.487	0.905	0.418	0.54	H·S secured

의미하여 (+)는 하류에서 상류 방향, (-)는 상류에서 하류 방향을 의미한다.

본 연구에서 수행한 수리모형실험 결과 시설의 수리적 안정성이 확보되지 못하여 월류가 발생하는 실험 시라리오에서는 대부분 수직유입구 1개소(저지수직구1)에서 Fig. 8과 같이 월류가 발생하였으며 앞 2.2절에서 설명한 바와 같이 지속적인 홍수유입으로 인하여 하류부터 만관이 되기 시작하고 홍수와 함께 유입된 공기가 압축 받게 된다. 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 시설 내 포집되어 있던 압축공기를 상류 수직유입구로 급배기시키는 과정에 압축공기 폭발 및 수직유입구 질식으로 인한 홍수유입 차단으로 인한 월류가 발생하는 것으로 분석되었다.

그리고 설치된 비디오카메라에 의해 취득된 영상과 저류배수터널 10개 지점에 설치한 위압수두계로 측정된 시설 내

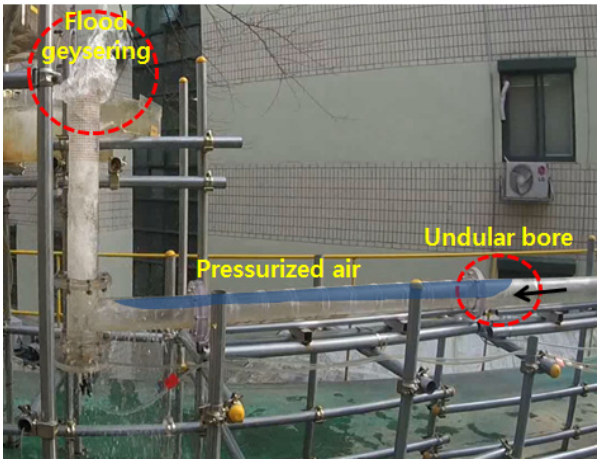


Fig. 8. Movement of the bore to upstream

압력변화를 분석해보았는데 영상분석을 통한 불규칙 단파 속도(C_{RO})와 일반적으로 흐름이 있는 영역에서 불규칙 단파 속도(C_{RP})와 비교한 결과 Fig. 9와 같이 대부분의 실험 시나리오에서 영상분석을 통한 불규칙 단파 속도(C_{RO})가 더 큰 것으로 분석되었다. 또한 Table 4와 같이 일반적으로 흐름이 있는 영역에서 불규칙 단파 속도와 영상분석을 통한 불규칙 단파 속도의 차, 즉 불규칙 단파의 속도 증가분(C_{α})이 발생하는 것으로 분석되었다.

그 원인을 알아보기 위하여 상류(Upstream)로 이동하는 불규칙 단파가 유도터널(Induction tunnel)과 저류배수터널(Main tunnel, Storage and drainage tunnel)의 합류부(Junction)를 통과할 때 합류부에서의 압력을 분석해 보았다. 그 결과 Fig. 10과 같이 그 크기 0.2 MPa 이상일 경우 상류로 이동하는 불규칙 단파에 의하여 유도터널 내 포집되어 있던 압축공기가 급배기 되면서 압축공기 폭발 현상이 발생하고 이로 인한 수직유입구에서의 월류가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 비디오 카메라로 취득한 영상으로 합류부의 수위변화를 살펴본 결과 불규칙 단파가 통과할 때 수위가 상승하였다가 하강하는 것으로 분석되었으며 합류부 인근에 포집되어 있던 공기덩어리의 부피는 감소하였다가 증가하는 것으로 분석되었다. 이

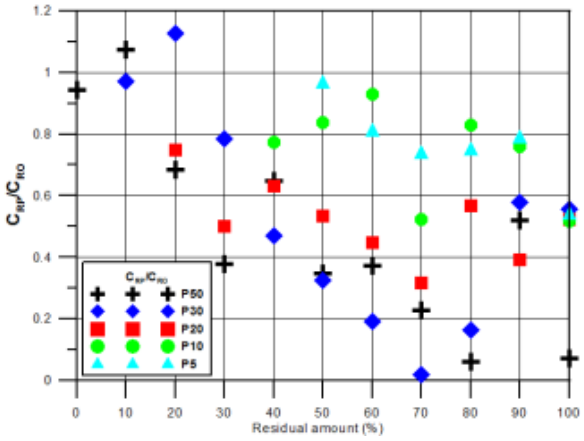
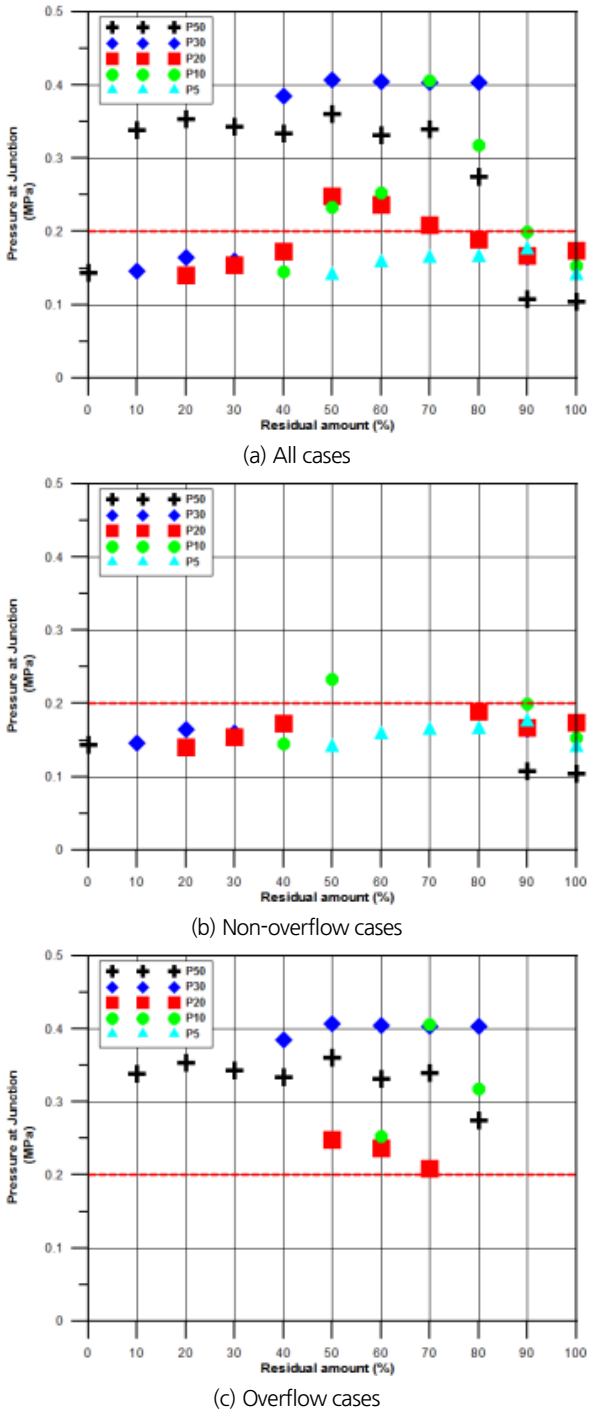


Fig. 9. Ratio of C_{RP}/C_{RO}



(a) All cases

(b) Non-overflow cases

(c) Overflow cases

Fig. 10. Pressure at Junction of each scenario

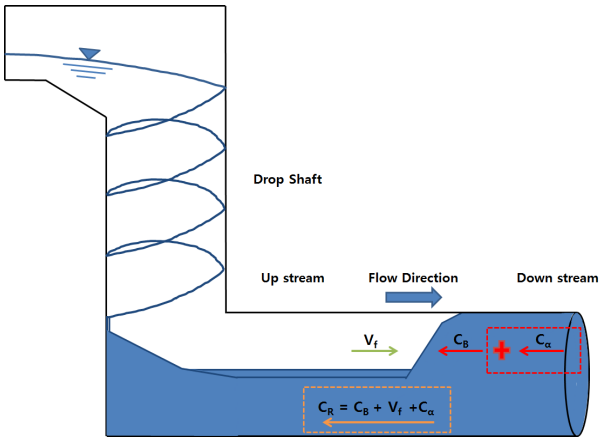


Fig. 11. Concept of C_R (Celerity of resultant)

는 불규칙 단파가 이동할 때 전달된 에너지에 의하여 압력이 상승하고 보일의 법칙(Boyle's law)에 의해 공기덩어리의 부피가 감소하는 것으로 판단된다.

위의 결과들을 바탕으로 불규칙 단파의 이동특성과 월류가 발생하는 메커니즘을 다음과 같이 정리하였다. 초기 개수로 흐름에서 지속적인 홍수유입으로 인하여 하류부터 만관이 되면서 관수로 흐름으로 전환된다. 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 에너지를 전달하고 이로 인한 급격한 압력변화가 불규칙 단파의 속도 증가분(C_α)을 발생시키는 것으로 판단되며 대심도 터널 내 하류에서 발생하여 상류로 이동하는 불규칙 단파(C_R) 속도에 대한 수정식을 Fig. 11 and Eq. (2)와 같이 제안하였다.

$$C_R = C_B + V_f + C_\alpha \tag{2}$$

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 홍수 시나리오(유입유량 조건, 터널 내 잔류수량 조건)에 따라 시설 내에서 발생한 불규칙 단파(Bore)가 '신월 빗물저류배수시설'에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수리모형실험을 실시하였고 수리모형실험 결과를 바탕으로 불규칙 단파의 이동속도가 증가한 원인에 대하여 분석하였다.

본 연구에서는 흐름이 있는 영역에서 일반적인 불규칙 단파의 속도(C_R)에 대한 수정식을 제안하였다.

1) 본 연구에서 다양한 홍수유입 조건에 대한 수리모형실험을 수행한 결과 대부분의 실험 시나리오에서 영상분석을 통한 불규칙 단파 속도(C_{RO})가 일반적으로 흐름이 있는 영역에서의 불규칙 단파 속도(C_{RP})보다 더 큰 것으로 분석되었으며 불규칙 단파의 속도 증가분(C_α)이 발생하는 것으로 분석되었다.
2) 그 원인을 알아보기 위하여 상류로 이동하는 불규칙 단파가 유도터널(Induction tunnel)과 저류배수터널(Storage and drainage tunnel)의 합류부를 통과할 때 압력을 분석해 보니 0.2 MPa 이상일 경우 상류 수직유입구에서 월류가 발생하는 것으로 분석되었고 합류부의 수위변화를 살펴보니 불규칙 단파가 합류부를 통과할 때 수위가 일시적으로 상승하였다가 감소하고 합류부 인근 공기덩어리의 부피는 감소하였다가 증가하는 것으로 분석되었다.
3) 본 연구에서 수행한 수리모형실험 결과 불규칙 단파가 이동하면서 에너지를 전달하고 이로 인한 압력변화가 불규칙 단파의 속도 증가분을 발생시키는 것으로 판단되며 본 연구결과를 바탕으로 대심도 터널 내에서의 불규칙 단파의 이동속도에 대한 수정식을 제안하였다.
4) 대심도 터널 내 불규칙 단파의 이동속도 예측을 위한 불규칙 단파의 이동속도, 크기, 유입유량의 크기, 터널 내 압력변화 등 수리학적 요소들간의 상관관계에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

Kim, C. W., and Lee, D. S. (2005). "Necessity of bypass for flood damage reduction in urban area." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 53, pp. 43-49.

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, No. 5, pp. 527-540.

Park, S. H., Oh, J. O., Park, J. H., and Park C. K. (2017). "A study on vertical inlet of inflow characteristics of the Shinwol rainwater storage & drainage system by design condition." *Journal of Korea Water Resources*, Vol. 50, No. 2, pp. 129-138.

Peregrine, D. H. (1966). "Calculations of the development of an undular bore." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, No. 2, pp. 321-330.

Sukegawa, N., Umeda, H., Mito, T., and Goto, M. (1999). "Numerical analysis of flow in underground diversion channel with enclosed pressurized air." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 635, pp. 41-48.

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, 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, No. 10, 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.