



## An experimental study on increased pressure in Shinwol rainwater storage and drainage system by undular bore

Oh, Jun Oh<sup>a</sup> · Park, Jae Hyeon<sup>b\*</sup> · Jun, Sang Mi<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Research Professor, Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

<sup>b</sup>Professor, Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

<sup>c</sup>Adjunct Professor, Department of Civil and Urban Engineering, Inje University, Gimhae, Korea

Paper number: 20-017

Received: 26 February 2020; Revised: 26 March 2020; Accepted: 26 March 2020

### Abstract

An underground deep tunnel system is a facility in form of a reverse siphon for an under flood defense structure. In this study, the 'Shinwol rainwater storage and drainage system', which is under construction for the first time in South Korea, in order to confirm the effects of undular bore and pressurized air on the hydraulic stability of the facility in various flood scenarios a hydraulic model experiment was performed. As a result of this study, it was analyzed that the undular bore generated downstream pushed the pressurized air collected in the facility while moving upstream, and the pressure inside the pipe increased at this time. It was analyzed that the pressure during the passage of the undular bore was greater than the sum of the static pressure and dynamic pressure at the time and overflow occurred when the cross-sectional size of the pressurized air was more than 40% of the cross sectional area of the tunnel. It is determined that this is correlated with the volume of pressurized air collected in the facility, and it is determined that it is necessary to study the relationship between velocity of undular bore and the volume of pressurized air in the future.

**Keywords:** Shinwol rainwater storage and drainage system, Undular bore, Increased pressure

## 불규칙 단파에 의한 신월 빗물저류배수시설 내 압력상승에 관한 실험 연구

오준오<sup>a</sup> · 박재현<sup>b\*</sup> · 전상미<sup>c</sup>

<sup>a</sup>인제대학교 공과대학 토목도시공학부 연구교수, <sup>b</sup>인제대학교 공과대학 토목도시공학부 교수, <sup>c</sup>인제대학교 공과대학 토목도시공학부 외래교수

### 요 지

지하 대심도 터널은 도시 홍수방어구조물로 역 사이펀 형태의 시설물이다. 본 연구에서는 국내 최초로 건설중인 '신월 빗물저류배수시설'을 대상으로 다양한 홍수시나리오에서 불규칙 단파와 압축공기가 시설의 수리적 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 본 연구 결과 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 시설 내 포집되어 있던 압축공기를 상류로 밀어내고 이 때 관내 압력이 상승하는 것으로 분석되었다. 또한 불규칙 단파가 통과할 때의 압력이 당시 정압력과 동압력의 합보다 큰 것으로 분석되었으며 압축공기 단면의 크기가 터널 단면적의 40% 이상인 경우 월류가 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 시설 내 포집되어 있는 압축공기의 부피와 상관이 있는 것으로 판단되며 향후 불규칙 단파 속도와 압축공기 부피와의 관계에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 신월빗물저류배수시설, 불규칙 단파, 압력상승

\*Corresponding Author. Tel: +82-55-320-3725  
E-mail: jh-park@inje.ac.kr (J. H. Park)

### 1. 서론

최근 기후변화 및 도시의 발달로 강우 특성 및 홍수 양상이 과거와는 다르게 발생하고 있다. 최근 강우 특성 및 홍수 양상을 살펴보면 단시간 집중 호우와 같은 강우 특성과 도시화로 인한 도달시간 감소와 침투능력 부족으로 대도시에서 도시 홍수가 빈번히 발생하고 있고 이로 인한 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 이러한 도시 홍수를 방어하기 위하여 여러 가지 방법들이 있는데 미국, 일본, 싱가포르와 같은 나라들에서는 지하 대심도 터널 또는 지하 저류배수터널을 이용하여 홍수를 방어하고 있다. 대도시에 인구가 집중되어 있는 우리나라에서는 지하 대심도 터널 또는 지하 저류배수시설에 대한 관심 및 필요성이 2000년 중반부터 증가하였고 2013년에 국내에서 처음으로 서울특별시 강서구와 양천구 일대에 ‘신월 빗물저류배수시설’이 착공을 시작하여 2020년 05월 준공을 앞두고 있다(Oh, 2019).

신월 빗물저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널은 하천 하도 내 홍수를 지하 대심도 터널로 분류 또는 분기시켜 해양, 호수 및 타 하천으로 방류하는 것이 대부분이지만 신월 빗물저류배수터널의 경우 서울특별시 강서구 및 양천구 일대의 우수 관거 내 우수를 지하 대심도 터널로 유입시켜 타 하천, 안양천으로 홍수를 직접 배제시키는 것이 특징이다.

지하 대심도 터널은 Fig. 1과 같이 유입시설(Inlet facility), 유도터널(Induction tunnel), 본 터널(Main tunnel), 환기시설(Exhaust facility), 배수시설(Outlet facility)로 구분할 수 있으며 지하 대심도 터널의 기능 및 활용도에 따라 배수시설은 자연배수(Natural drainage), 유도배수(Induction drainage), 자연배수와 유도배수 혼합시설(Mixing drainage)로 구분할 수 있다.

자연배수의 경우 터널 내 흐름이 초기 개수로 흐름에서 관수로 흐름으로 전환될 때 역 사이펀이 작동하여 배수 시설로 자

연 배수되는 것을 말하며 유도 배수는 펌프와 같이 추가 시설을 이용한 것을 말한다. 혼합시설은 자연배수가 가능한 배수 시설과 펌프장을 혼합으로 이용하는 배수시설을 의미한다.

신월 빗물저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널은 역 사이펀(Inverted siphon) 구조로 홍수가 유입되면서 터널 내 흐름이 초기 개수로 흐름에서 만관 후 관수로 흐름으로 전이된다. 이때 터널 내 압축공기, 불규칙 단파로 인한 시설 계획 및 운영이 매우 어려운데 본 연구에서는 다양한 홍수시나리오에서 압축공기와 불규칙 단파가 신월 빗물저류배수시설에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수리모형실험을 수행하였으며 특히 관 내 압축공기가 시설의 수리적 안정성에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였다.

### 2. 연구 동향

신월 빗물저류배수시설과 같은 지하 대심도 터널에 대한 연구는 국내보다는 국외에서 비교적 활발히 진행되었고 국내에서는 최근 들어 연구가 활발해지고 있는 실정이다. 특히 미국과 일본에서는 과거부터 현재 까지 지하 대심도 터널에 대한 공기 이동 특성 등 수리적 현상과 수직유입구 형식에 따른 유입특성에 대한 연구가 활발히 이루어 졌으며 국내에서는 2000년대에는 지하 대심도 터널의 필요성과 유입시설에 대한 연구가 많이 진행되었으며 2010년대에 들어 지하 대심도 터널 내 수리적 현상에 대한 연구가 진행되고 있다.

Vasconcelos and Wright (2005)은 수리실험을 통하여 지하 대심도 터널 내 흐름이 개수로 흐름에 관수로 흐름으로 전이될 때 발생하는 문제에 대하여 연구하였는데 관 내부에 포집되어 있는 공기가 관 내 홍수 흐름에 영향을 미치며 상류 수직 유입구 쪽으로 이동하는 압축된 단파는 관 내부를 가득 채우

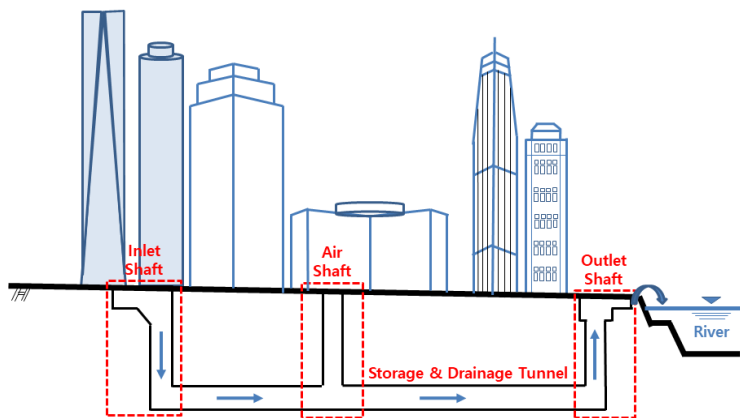


Fig. 1. Facilities of deep tunnel system (Oh, 2018)

고 압력수두를 상시키며 서징강도를 극대화시킴을 밝혔다.

Takanishi and Abe (2006)는 지하 대심도 터널과 같은 역사 이편 형태의 관로에서의 공기거동과 관련하여 발생하는 수리적 문제를 세 가지로 구분하였는데 여기서의 수리적 문제의 결과는 수직유입구 또는 환기시설에서의 월류이다. Park *et al.* (2017)은 신월 빗물저류배수시설의 수직유입구 설계 시 고려해야 할 지배유량에 대한 평가를 실시하였으며 그 결과 지배유량식의 변수 및 각 인자들의 기여도 조정이 불가피함을 주장하였다. 지하 대심도 터널 내에서 포집되어 있는 공기덩어리가 상

류수직경으로 배기되는 과정에 대한 연구가 전 세계적으로 거의 없는데 Wang and Vasconcelos (2018)은 CFD모형을 이용하여 지하 대심도 터널 내 공기덩어리들이 형성되는 과정과 공기덩어리들이 배기되는 일련의 과정에 대하여 연구하였다. Oh (2019)는 신월 빗물저류배수시설을 대상으로 수리모형실험을 수행하였으며 그 결과 Fig. 2와 같이 하류에서 발생할 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 에너지를 전달하고 이때 관내 압력 상승 및 불규칙 단파의 속도 증가분이 발생함을 밝혔다.

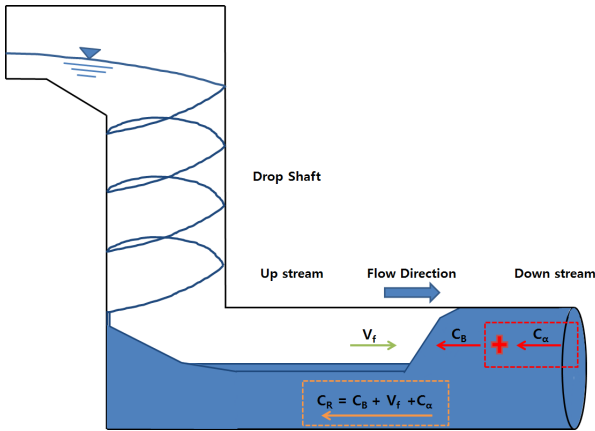


Fig. 2. Concept of CR (Celerity of resultant) (Oh, 2019)

### 3. 수리모형실험

#### 3.1 신월 빗물저류배수시설 개요

본 연구에서 수행한 수리모형실험의 원형인 신월 빗물저류배수시설은 2010년 집중호우로 침수피해가 발생한 서울특별시 강서구 및 양천구 일대에 계획 및 설치되었으며 2020년 현재 완공을 앞두고 있다. 신월 빗물저류배수시설이 설치된 서울특별시 강서구 및 양천구 일대의 경우 주택 및 상가 밀집지역이고 지하 매설시설(통신, 전기, 가스 등)들로 인한 대규모 우수관거 확충공사가 불가하여 지하 대심도 터널이 지역의 홍수방어대책으로 사용되었다. 신월 빗물저류배수시설의 사업개요는 Fig. 3과 같다.

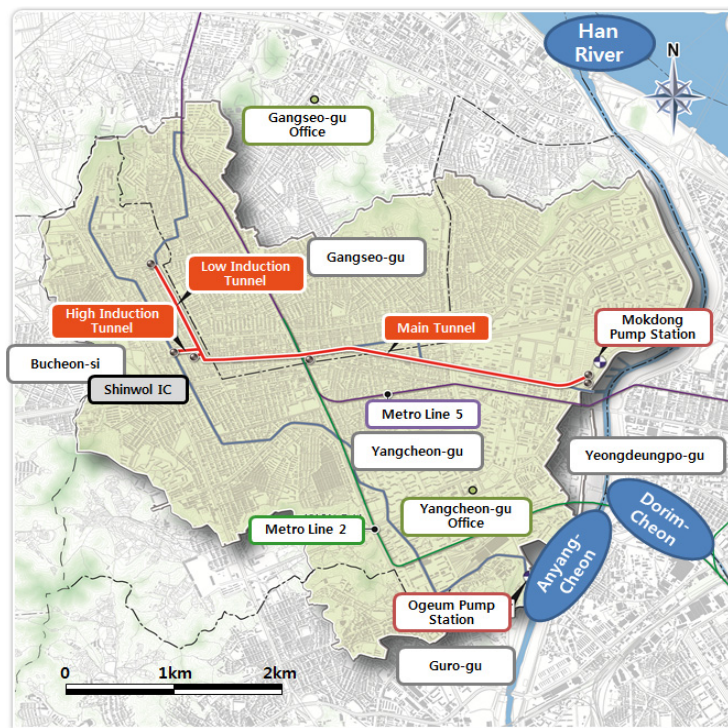


Fig. 3. Concept of construction for shinwol rainwater storage and drainage system (Hyundai Construction & Engineering)

본 연구에서 수행한 수리모형실험의 원형인 신월 빗물저류배수시설의 상세 재원은 Table 1 및 Fig. 4와 같이 유입시설인 수직유입구(Inlet shaft)가 3개소, 환기시설인 공기수직구(Air shaft)가 1개소, 배수시설인 유출수직구(Outlet shaft)가 1개소이며 신월 빗물저류배수시설의 배수시설은 혼합시설로 구성되어 있으나 본 연구에서는 자연배수시설에 대해서만 평가하였다. 또한 신월 빗물저류배수시설의 총 길이는 유도터널과 본 터널을 합한 약 4.5 km이고, 수직유입구 및 환기수직구 직경은 5.4 m, 본 터널의 저류가능량(또는 저류배수터널 전체 부피)은 347,778 m<sup>3</sup>이며 신월 빗물저류배수시설의 방재 성능목표는 100 mm/1hr (서울특별시 50년 빈도 강우)이다.

### 3.2 수리모형실험 개요

본 연구의 신월 빗물저류배수시설의 흐름은 초기 개수로 흐름에서 만관 후 관수로 흐름으로 전환되기 때문에 중력, 점성력을 모두 고려해야 한다. 하지만 중력을 고려한 Froude 상사법칙과 점성력을 고려한 Reynolds 상사법칙을 모두 일치시키는 것이 불가능하므로 원형과 모형에서 Manning의 평균 유속이 적용된다는 가정하에 조도를 조정함으로써 점성력에 대한 상사를 유지하였다. 본 연구에서 적용한 축척은 1/50이며 모형은 정상모형을 제작하였으며 Froude 상사법칙에 의한 각 물리량 환산비는 Table 2와 같다.

Table 1. Design conditions for each part of Sinwol rainwater storage & drainage system

| Design Condition                        |                       | Data         |           |       |
|---|-----------------------|--------------|-----------|-------|
|   |                       | Original (m) | Model (m) |       |
| 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 |
| Inlet facility                          | Inlet Shaft1 (LDS1)   | Diameter (D) | 5.4       | 0.11  |
|   |                       | Height (H)   | 46.2      | 0.92  |
|   | Inlet Shaft2 (LDS2)   | Diameter (D) | 5.4       | 0.11  |
|   |                       | Height (H)   | 45.8      | 0.92  |
|   | Inlet Shaft3 (HDS)    | Diameter (D) | 5.4       | 0.11  |
|   |                       | Height (H)   | 47.6      | 0.95  |
| Exhaust facility                        | Air Shaft             | Diameter (D) | 5.4       | 0.11  |
|   |                       | Height (H)   | 42.3      | 0.85  |
| Outlet facility                         | Outlet shaft          | Diameter (D) | 7.5       | 0.15  |
|   |                       | Height (H)   | 39.8      | 0.80  |

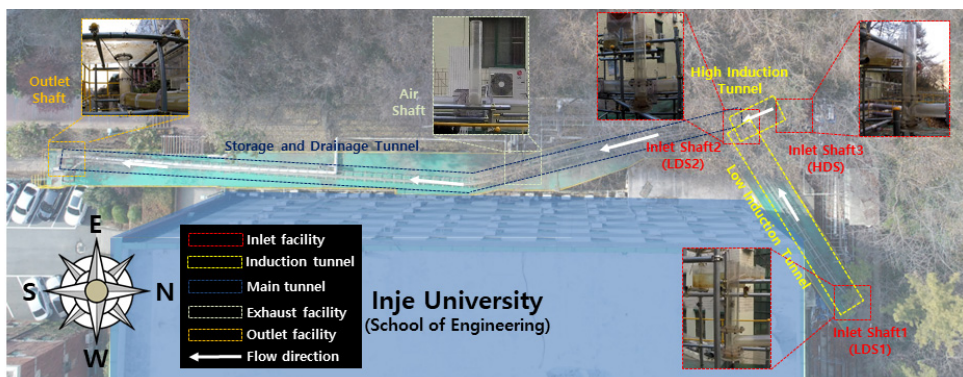


Fig. 4. 0.11 Experimental model setup



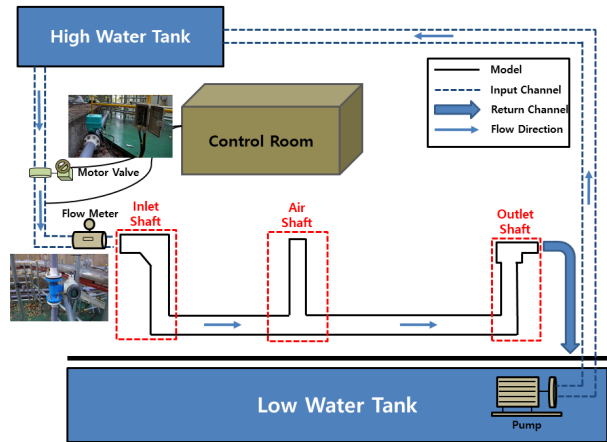
**Table 2.** Scales for each variables of froude similarity (Oh, 2019)

| 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    |

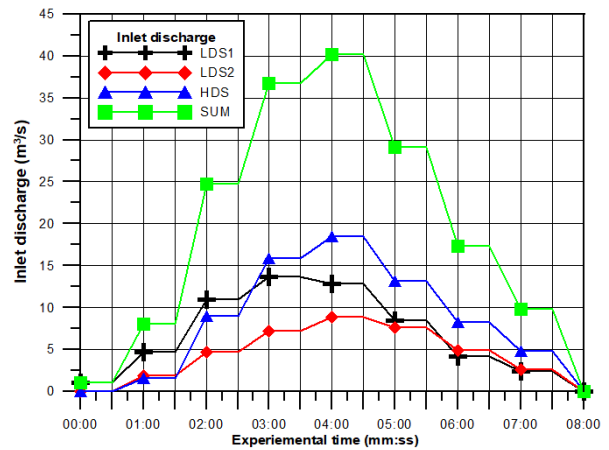
**3.3 실험방법 및 실험조건**

본 연구에서 수행한 수리모형실험의 흐름구조는 Fig. 5에 서와 같이 저수조(Low water tank)에 저류되어 있는 물을 펌프를 이용하여 고수조(High water tank)로 보내고 제어실(Control room)에 설치되어 있는 전동밸브(Motor valve) 조절기를 이용하여 각 수직유입구에 물을 공급한다. 수직유입구로 유입된 물은 유도터널, 본 터널, 유출수직구를 통과하여 회귀수로 를 통해 저수조로 다시 유입되는 순환구조를 가지고 있다.

본 연구에서 실험모형은 Table 2의 축척에 따라 폴리카보 네이트(Poly-carbonate)를 이용하여 제작하였다. 또한 모형 의 조도계수를 평가하기 위하여 합류부, 곡선부, 유출부 등 주 요 지점에 압력계를 설치하고 각 압력측정 지점 거리와 측정 압력을 이용하여 수두경사를 산정하였다. 그 결과 모형의 조 도 계수가 0.0086으로 평가되어 원형의 조도계수인 0.0080 과 비교하여 다소 높게 산정되었다. 조도계수를 고려하여 왜 곡모형을 이용할 경우 관경축척 1/50, 길이축척 1/71을 적용 하여야 하나 왜곡모형의 경우 수리특성, 관 내 공기연행에 대 한 영향평가가 미흡할 것으로 판단되어 정상모형을 적용하 였다(Oh, 2019). 본 연구의 수리모형실험조건 또는 실험 시 나리오는 다양한 홍수시나리오를 재현하기 위하여 Table 3 과 같이 크게 두 가지로 유입유량(Inlet discharge)과 잔류수량 (Residual amount in tunnel)조건으로 구분하였다. 유입유량 조건은 신월 빗물저류배수시설의 방재성능 목표인 서울특 별시 50년 빈도 홍수량(P50), 50년 빈도 홍수량의 90%(P30), 50년 빈도 홍수량의 80%(P20), 50년 빈도 홍수량의 70% (P10), 50년 빈도 홍수량의 60%(P5)으로 5가지, 잔류수량 조 건은 신월 빗물저류배수시설의 저류가능량 대비 0%~100% 까지 10%씩 증가시켜 총 11가지이며 유입유량과 잔류수량 조건을 혼합시킨 55가지 시나리오에 대한 실험을 수행하였 다. 또한 각 실험은 Fig. 6과 같이 기 작성된 수문곡선에 따라 1분 간격으로 수직유입구의 유입유량을 변화시켜 비정상류 (Unsteady)조건으로 실험을 수행하였다(Oh, 2019).



**Fig. 5.** System of flow cycle in experimental



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

본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 다양한 홍수시나리 오에서 압축공기와 불규칙 단파가 신월 빗물저류배수시설 에 미치는 영향을 알아보려고 하였으며 특히 시설 내 수리적 안정성(Hydraulic stability) 확보가 가장 어려운 지지수직구 1에서의 실시간 압력과 불규칙 단파 이동 특성을 위압수두계 (Piezometer)와 비디오 카메라를 이용하여 측정하였다. 측정 된 실시간 압력과 촬영된 비디오를 바탕으로 하류에서 발생 한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 압축공기를 이동시키고 지 지수직구1로 급배기시키기 과정을 대상으로 분석하였다.

**4. 수리모형실험 결과**

본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 다양한 홍수시나리 오에서 압축공기와 불규칙 단파가 신월 빗물저류배수시설에

**Table 3.** Experimental scenarios for inlet flow rate and residual amount in tunnel (Oh, 2019)

| Scenario No. | Inlet flow amount (A)                           |      |   | Residual amount in tunnel (B) |     |                                | (A)+(B)/2.78 m <sup>3</sup><br>(Ratio of total amount of storage capacity) |
|--------------|---|------|---|-------------------------------|-----|--------------------------------|--|
|              | Condition                                       | No.  | Total inlet flow amount (m <sup>3</sup> ) | Condition                     | No. | Total amount (m <sup>3</sup> ) |  |
| P50-R0       | 100% of 100mm/1hr<br>(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 100mm/1hr<br>(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                           |     |                                |  |
| P20-R0       | 80% of 100mm/1hr<br>(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 100mm/1hr<br>(10yr. 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 100mm/1hr<br>(5yr. 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                           |     |                                |  |

Table 4. Analysis and comparison results of pressure

| Scenario No. | ① P <sub>total</sub><br>(KPa) | ② P <sub>static</sub><br>(KPa) | ③ P <sub>dynamic</sub><br>(KPa) | ④ P <sub>air</sub> (KPa)<br>(④=①-②-③) | Ratio of pressure<br>(④P <sub>air</sub> /①P <sub>total</sub> ) | Hydraulic stability secured or not |
|--------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| P50-R0       | 0.05960                       | 0.01961                        | 0.00409                         | 0.03589                               | 0.602  | H.S. secured                       |
| P50-R10      | 0.06760                       | 0.01961                        | 0.00310                         | 0.04489                               | 0.664  | H.S. not secured                   |
| P50-R20      | 0.07320                       | 0.01961                        | 0.00728                         | 0.04631                               | 0.633  | H.S. not secured                   |
| P50-R30      | 0.09280                       | 0.01961                        | 0.00639                         | 0.06679                               | 0.720  | H.S. not secured                   |
| P50-R40      | 0.10280                       | 0.01961                        | 0.00568                         | 0.07751                               | 0.754  | H.S. not secured                   |
| P50-R50      | 0.10880                       | 0.01961                        | 0.00836                         | 0.08083                               | 0.743  | H.S. not secured                   |
| P50-R60      | 0.11240                       | 0.01961                        | 0.00728                         | 0.08551                               | 0.761  | H.S. not secured                   |
| P50-R70      | 0.09480                       | 0.01961                        | 0.00506                         | 0.07013                               | 0.740  | H.S. not secured                   |
| P50-R80      | 0.06960                       | 0.01961                        | 0.00371                         | 0.04627                               | 0.665  | H.S. not secured                   |
| P50-R90      | 0.06360                       | 0.01961                        | 0.00339                         | 0.04060                               | 0.638  | H.S. secured                       |
| P50-R100     | 0.04400                       | 0.01961                        | 0.00262                         | 0.02177                               | 0.495  | H.S. secured                       |
| P30-R0       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P30-R10      | 0.01080                       | 0.00981                        | 0.00371                         | -0.00272                              | -0.252   | H.S. secured                       |
| P30-R20      | 0.01520                       | 0.01373                        | 0.00339                         | -0.00191                              | -0.126   | H.S. secured                       |
| P30-R30      | 0.00880                       | 0.00785                        | 0.00371                         | -0.00276                              | -0.314   | H.S. secured                       |
| P30-R40      | 0.09680                       | 0.01961                        | 0.00409                         | 0.07309                               | 0.755  | H.S. not secured                   |
| P30-R50      | 0.10080                       | 0.01961                        | 0.00454                         | 0.07665                               | 0.760  | H.S. not secured                   |
| P30-R60      | 0.12640                       | 0.01961                        | 0.00506                         | 0.10173                               | 0.805  | H.S. not secured                   |
| P30-R70      | 0.11880                       | 0.01961                        | 0.00567                         | 0.09352                               | 0.787  | H.S. not secured                   |
| P30-R80      | 0.13280                       | 0.01961                        | 0.00506                         | 0.10813                               | 0.814  | H.S. not secured                   |
| P30-R90      | 0.01520                       | 0.01471                        | 0.00567                         | -0.00518                              | -0.341   | H.S. secured                       |
| P30-R100     | 0.01560                       | 0.01569                        | 0.00639                         | -0.00648                              | -0.416   | H.S. secured                       |
| P20-R0       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P20-R10      | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P20-R20      | 0.00880                       | 0.00785                        | 0.00065                         | 0.00030                               | 0.034  | H.S. secured                       |
| P20-R30      | 0.01240                       | 0.01177                        | 0.00182                         | -0.00119                              | -0.096   | H.S. secured                       |
| P20-R40      | 0.01640                       | 0.01569                        | 0.00409                         | -0.00338                              | -0.206   | H.S. secured                       |
| P20-R50      | 0.09680                       | 0.01961                        | 0.00639                         | 0.07079                               | 0.731  | H.S. not secured                   |
| P20-R60      | 0.06960                       | 0.01961                        | 0.00506                         | 0.04493                               | 0.646  | H.S. not secured                   |
| P20-R70      | 0.06560                       | 0.01961                        | 0.00567                         | 0.04032                               | 0.615  | H.S. not secured                   |
| P20-R80      | 0.01640                       | 0.01569                        | 0.00409                         | -0.00338                              | -0.206   | H.S. secured                       |
| P20-R90      | 0.01600                       | 0.01177                        | 0.00371                         | 0.00052                               | 0.032  | H.S. secured                       |
| P20-R100     | 0.02440                       | 0.01471                        | 0.00339                         | 0.00630                               | 0.258  | H.S. secured                       |
| P10-R0       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P10-R10      | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P10-R20      | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P10-R30      | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P10-R40      | 0.03160                       | 0.01667                        | 0.00371                         | 0.01121                               | 0.355  | H.S. secured                       |
| P10-R50      | 0.03600                       | 0.01961                        | 0.00409                         | 0.01229                               | 0.341  | H.S. secured                       |
| P10-R60      | 0.08800                       | 0.01961                        | 0.00284                         | 0.06555                               | 0.745  | H.S. not secured                   |
| P10-R70      | 0.11200                       | 0.01961                        | 0.00567                         | 0.08672                               | 0.774  | H.S. not secured                   |
| P10-R80      | 0.07560                       | 0.01961                        | 0.00224                         | 0.05374                               | 0.711  | H.S. not secured                   |
| P10-R90      | 0.03400                       | 0.01373                        | 0.00409                         | 0.01618                               | 0.476  | H.S. secured                       |
| P10-R100     | 0.01520                       | 0.01177                        | 0.00284                         | 0.00059                               | 0.039  | H.S. secured                       |
| P5-R0        | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P5-R10       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P5-R20       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P5-R30       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P5-R40       | -                             | -                              | -                               | -                                     | -  | Only storage                       |
| P5-R50       | 0.01080                       | 0.01079                        | 0.00409                         | -0.00408                              | -0.378   | H.S. secured                       |
| P5-R60       | 0.01240                       | 0.01177                        | 0.00371                         | -0.00308                              | -0.249   | H.S. secured                       |
| P5-R70       | 0.02160                       | 0.01569                        | 0.00371                         | 0.00220                               | 0.102  | H.S. secured                       |
| P5-R80       | 0.01800                       | 0.01373                        | 0.00339                         | 0.00089                               | 0.049  | H.S. secured                       |
| P5-R90       | 0.01680                       | 0.01569                        | 0.00371                         | -0.00260                              | -0.155   | H.S. secured                       |
| P5-R100      | 0.01840                       | 0.01667                        | 0.00409                         | -0.00236                              | -0.129   | H.S. secured                       |

미치는 영향을 알아보고자 하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 수리적 안정성 확보 여부(Hydraulic stability secured or not)는 수직유입구 3개소, 공기수직구 1개소 중 1개소라도 월류가 발생하면 시설의 수리적 안정성이 확보 되지 않는 것으로 평가하였으며 본 연구에서 수리적 안정성이 확보 되지 못한 시나리오의 경우 모두 수직유입구 1개소(LDS1)에서 월류가 발생하였다. 신월 빗물저류배수시설의 저류가능량보다 시나리오의 유입총량(유입유량 + 잔류수량)이 작은 경우는 배수기능이 작동되지 못하고 저류기능만 작동하여 오직 저류(Only storage)로 표현하였다.

본 연구에서 수행한 수리모형실험 결과 지속적인 홍수유입으로 하류부터 만관이 된 후 홍수와 함께 유입된 공기가 배기되지 못하고 시설 내에서 압축상태(Pressurized air)가 된다. 그리고 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 시설 내 포집되어 있던 압축공기를 상류로 이동시키고 상류로 이동한 압축공기는 상류 수직유입구에서 급배기되는 과정에 압축공기 폭발과 그로 인한 수직유입구 질식으로 인한 홍수유입 차단 및 월류가 발생하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 하류에서 상류로 이동하는 첫 번째 불규칙 단파가 저지수직구 1 근처 위압수두계를 지나갈 때 압력을 비교, 분석 하였다.

이 때 위압수두계로 측정된 압력(Total pressure)값은 Table 4의 2번째 Column ( $P_{total}$ )과 같으며 불규칙 단파와 압축공기에 의한 공기압력(압축공기압력)을 분석하기 위하여 정압력(Static pressure, 수위에 의한 압력)값과 동압력(Dynamic pressure, 유속에 의한 압력)값을 제거하였다. 여기서 동압력에 사용된 유속은 Fig. 3의  $C_R$  (Celerity of resultant)값이다. 그 결과 위압수두계로 측정된 압력값이 정압력과 동압력의 합보다 크게 측정되었으며 압축공기압력(Table 4의 5번째 Column ( $P_{air}$ ))와 위압수두계로 측정된 압력을 비교한 결과는 Table 4의 6번째 Column (Ratio of pressure)과 같다.

각 시나리오별 저지수직구1근처에서의 압축공기압력을 살펴보면 Fig. 7(a)와 같으며 월류가 발생하지 않은 시나리오의 압축공기압력은 Fig. 7(b)와 같으며 월류가 발생한 시나리오의 압축공기압력은 Fig. 7(c)와 같다. Fig. 8과 같이 저지수직구1에서의 압축공기 압력이 0.04 KPa 이상인 경우 저지수직구1에서 월류가 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 각 시나리오별 압축공기 압력과 위압수두계로 측정된 압력의 비를 살펴본 결과 Fig. 8(a)와 같으며 월류가 발생하지 않은 시나리오와 월류가 발생한 시나리오에서의 압축공기 압력과 위압수두계로 측정된 압력의 비는 각각 Figs. 8(b) and 8(c)와 같다. Fig. 8과 같이 압축공기의 압력과 위압수두계로 측정된 압력의 비가 0.6 이상인 경우 수직유입구에서 월류가 발생하여 시

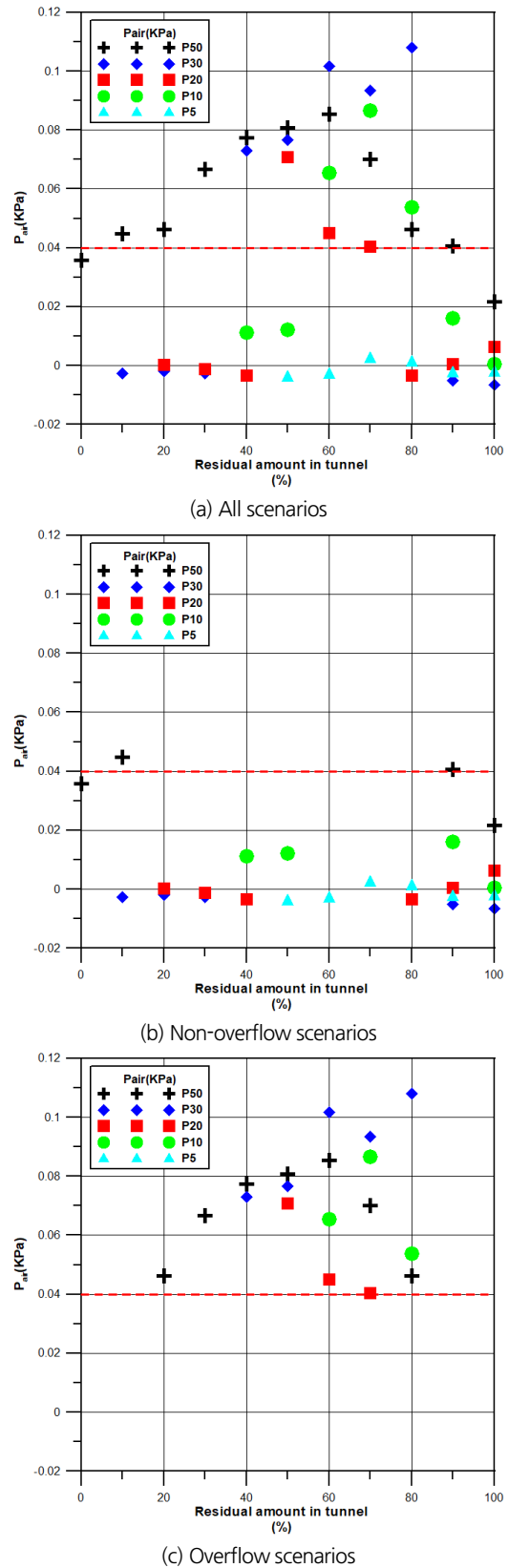


Fig. 7.  $P_{air}$  at LDS1 of each scenario



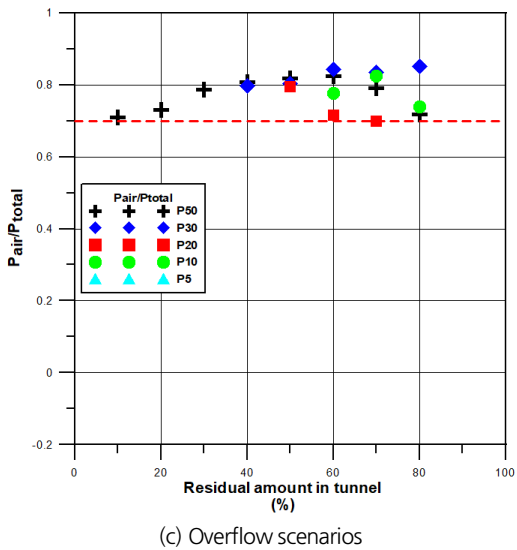
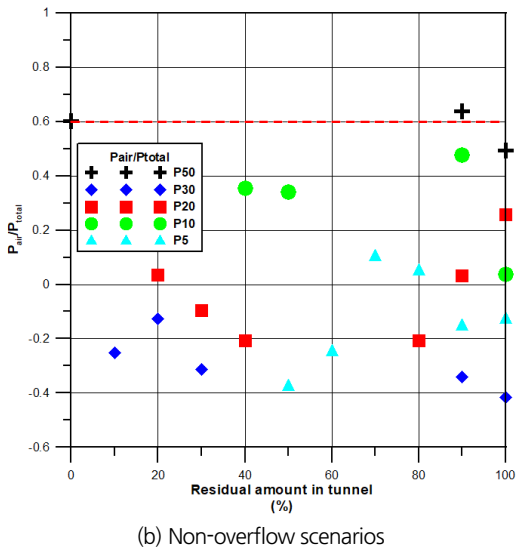
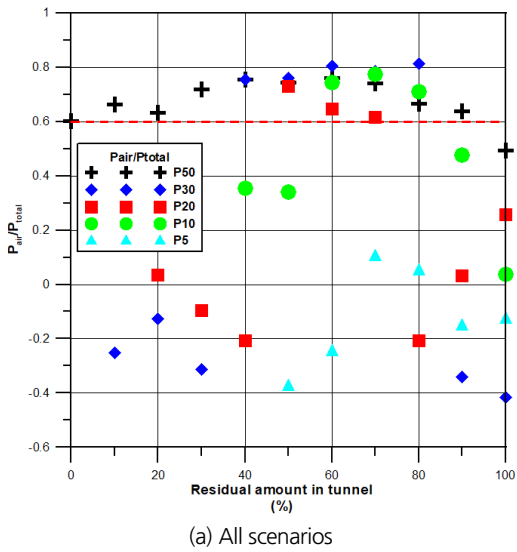
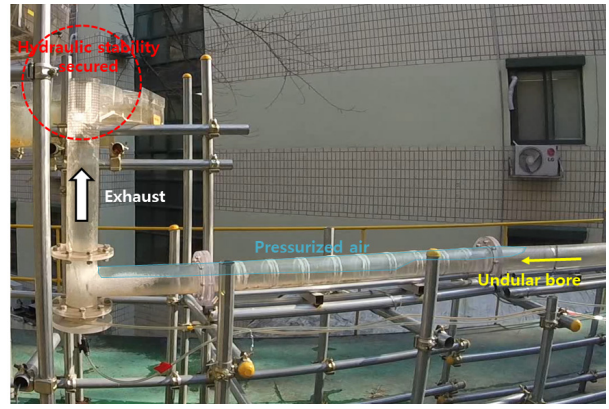


Fig. 8. Ratio of  $P_{air}/P_{total}$  at LDS1 of each scenario



(a) Volume of pressurized air at Non overflow scenario



(b) Volume of pressurized air at overflow scenario

Fig. 9. Volume of pressurized air for occurred overflow or not

설의 수리적 안정성이 확보되지 못하는 것으로 분석되었는데 이는 불규칙 단파의 속도 증가와 더불어 시설 내 배기되지 못하고 포집되어 있는 압축공기의 부피와 관련이 있는 것으로 판단된다. 이에 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동할 때 Fig. 9와 같이 저지수직구1 주변에서 압축공기 크기와 월류와의 관계를 살펴보았는데 압축공기 단면이 터널 단면적의 40% 이상이면 월류가 발생하는 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 급배기 되는 압축공기만을 배기시키는 구조물이 추가된다면 시설의 수리적 안정성 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

위의 결과를 압축공기가 시설의 수리적 안정성에 영향을 미치며 향후 신월 빛물저류배수시설의 안정적인 운영을 위해서는 압축공기 부피와 불규칙 단파 속도와의 상관관계에 대한 연구, 불규칙 단파, 압축공기, 유입유량과 수리적 안정성의 상관관계에 대한 연구, 유입유량에 의한 유입속도와 불규칙 단파 속도의 상관관계에 대한 추가연구 등이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 신월 빗물저류배수시설을 대상으로 다양한 홍수시나리오(유입유량 조건, 잔류수량 조건)에서 시설 내 발생하는 불규칙 단파와 압축공기가 수리적 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다.

- 1) 본 연구에서 수행한 다양한 홍수유입 조건에 따른 수리모형실험 결과 지속적인 홍수유입으로 하류부터 만관이 된 후 홍수와 함께 유입된 공기가 배기 되지 못하고 시설 내 압축상태가 된다. 그리고 하류에서 발생한 불규칙 단파가 상류로 이동하면서 시설 내 압축공기를 상류로 이동시켜 배기시키는 과정에 압축공기 폭발과 그로 인한 수직유입 구 질식으로 인한 홍수유입 차단 및 월류가 발생한다.
- 2) 상류로 이동하는 불규칙 단파는 가장 상류에 위치한 저지수직구1로 항상 이동하며 이 때 저지수직구1 도달전 지점에서 위압수두계와 비디오 카메라를 통한 압력측정 및 단파속도를 측정하였다. 그 결과 불규칙 단파 속도는 이론에 의한 단파속도보다 컸으며 시설 내 압력 또한 시설의 정압력과 동압력을 합한 값보다 크게 측정되었다.
- 3) 압축공기 압력은 고정 지점에서 측정된 압력에서 정압력과 동압력을 뺀 값으로 압축공기 압력의 크기가 0.04 KPa 이상인 경우 저지수직구1에서 월류가 발생하는 것으로 분석되었으며 고정지점에서 위압수두계로 측정된 압력(전체 압력)에 대한 압축공기 압력의 비를 살펴보니 0.6 이상인 경우 수직유입구에서 월류가 발생하여 수리적 안정성이 확보되지 못하는 것으로 분석되었다.
- 4) 또한 불규칙 단파가 상류로 이동할 때 저지수직구1 근처에서의 압축공기의 크기와 월류와의 상관관계를 살펴본 결과 압축공기 단면이 터널 단면적의 40%이상인 경우 수리적 안정성이 확보되지 못하고 월류가 발생하는 것으로 분석되었다.
- 5) 향후 신월 빗물저류배수시설의 안정적인 운영을 위해서는 압축공기 부피와 불규칙 단파 속도와의 상관관계에 대한 연구, 불규칙단파, 압축공기, 유입유량과 수리적 안정성의 상관관계에 대한 연구, 유입유량에 의한 유입속도와 불규칙 단파 속도의 상관관계에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

- Oh, J.O. (2018). *An experimental study on characteristics of hydraulic of deep tunnel system for variable flood inflow scenarios*. Ph. D. dissertation, Inje University, Korea, pp. 17-20.
- 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. 50, pp. 129-138.
- 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 association*, Vol. 50, pp. 129-138.
- Takanishi, S., and Abe, Y. (2006). “Hydraulic behavior analysis of underground river to pressurized considering pressure in tunnel.” *Construction consultants association ; Kinki branch 39th research presentation*, Osaka, Japan, pp. 107-112.
- 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.
- Wang, J., and Vasconcelos, J.G. (2018), “Geyser episodes created by the release of a sequence of discrete air pocket in vertical shafts.” *World environmental and water resources congress 2018*, Minneapolis, M.N., U.S., pp. 1-10.