

잔류공기조건에 따른 관 내 유동의 압력변화에 관한 실험적 연구

박재곤* · 이경수** · 고주석*** · 류시완****†

An Experimental Study of Pressure Variation in Pipe Flow according to Residual Air Condition

Jaegon Park* · Kyungsu Lee** · Joo Suk Ko*** · Siwan Lyu****†

†Corresponding Author

Siwan Lyu

Tel : +82-55-213-3776

E-mail : siwan@changwon.ac.kr

Received : June 29, 2022

Revised : July 20, 2022

Accepted : July 26, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Sudden intrusion of a large amount of surface water into a flood defensive tunnel or pipeline system can compress the residual air. The compressed air may explode along with water through the inlet or air vent, resulting in hydraulic capacity degradation or safety hazards. This study aims to investigate the behavior of compressed air body in pipelines according to the residual air condition with a series of laboratory experiments measuring pressure variation. It has been found that flow characteristics and residual air conditions have a dominant influence on the magnitude and periodicity of the pressure variation. A proper measure to effectively control the residual air is required for securing the design capacity of flood defensive pipeline systems, since the peak pressure is predominantly affected by residual air conditions.

Key Words : pipeline system, residual air, compressed air, hydraulic capacity, pressure variation

1. 서론

최근 기후변화에 의한 강우양상 변화와 도시화에 따른 불투수면적 증가 등의 원인으로 도심지역 침수피해 및 발생빈도가 증가하는 추세이다. 집중호우로 인해 짧은 시간 동안 급격하게 발생하는 강우유출수를 원활하게 배제하거나 저류함으로써 도심지역 침수피해를 저감할 수 있는 다양한 대책과 방법들이 강구되고 있다. 지하에 위치하는 저류조를 통해 초기 강우유출수를 저감하는 방법은 이미 상당 기간에 걸쳐 적용됐으나, 도심지역의 높은 토지활용도에 따른 적정부지 확보 및 그에 따른 시설규모 제한 등으로 효과가 미미하여 침수피해 저감보다 초기 강우 비점오염원 저감을 통한 하천수질개선 수단으로 활용되고 있다. 이러한 지하저류조의 한계를 극복하면서 강우유출수 저류로 침수피해를 저감할 수 있는 대안으로서 기존 지하시설

물이나 공간보다 더 깊은 심도에 위치한 터널을 이용하는 방안이 대두되고 있다. 대심도터널을 홍수방어용으로 활용하는 경우 단기간에 많은 양의 지표수가 터널 내부로 유입되면서 상당량의 공기를 포획하게 된다. 그 결과 터널 내부에서는 물-공기 이상흐름이 나타나며, 일반적인 단상흐름과 비교하여 다양한 수리학적 현상이 발생한다. 터널 내부에 단시간에 많은 유량이 유입함에 따라 배출되지 못한 공기가 압축되며, 압축된 공기가 유입부 혹은 공기배출구를 통해 물과 함께 분출되는 현상(Geysering)이 발생하게 된다. 그로인해 지상부에서는 갑작스런 수충격으로 인한 인명피해 및 안전성 확보에 큰 위협이 되며, 압축된 공기로 인한 터널의 구조적 문제가 발생할 가능성도 높아진다. 최근 집중호우 및 기후변화로 인하여 국내에선 드물게 발생하던 분출현상이 점차 발생하는 빈도가 높아지고 있으며, 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

*한국수자원조사기술원 연구원 (Korea Institute of Hydrological Survey)

**한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 하천실험센터 박사후연구원(River Experiment Center, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Engineering and Building Technology)

***창원대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Changwon National University)

****창원대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Changwon National University)

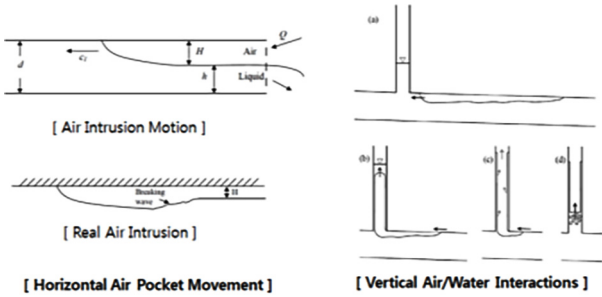


Fig. 1. Air pocket migration in pipe.

수평관 내 이상류에 흐름에 관련하여 Baker¹⁾를 시작으로 Wallis²⁾, Taitel and Dukler³⁾, Weisman⁴⁾을 포함한 연구자가 수평관 내 기체-액체 이상흐름에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 흐름구분도(flow regime map) 형식으로 제안하였다. 대부분의 연구에서는 질량흐름(mass flux), 체적흐름(volume flux), 운동량흐름(momentum flux) 등으로 흐름을 구분하였다. Christopher⁵⁾는 일반적인 단상흐름에서 층류와 난류가 벽면의 조도나 유입구 형상과 같은 수로의 물리적 특성 뿐 아니라 유체 자체의 특성을 포함하는 다양한 조건에 민감하게 영향을 받는 것처럼 다상흐름(multi-phase flow)은 더 많은 요소에 의한 영향으로 흐름거동에 대한 일반화가 어렵다고 주장하였다. Cho et 등⁶⁾은 전기전도계를 이용한 수평관 내 실험을 통해 이상류 흐름에 대하여 공기유동의 길이규모를 기준으로 흐름을 분류하였으며, Lee 등^{7,8)}은 수평관 내 이상류 흐름에 대하여 전기전도계 및 영상 분석을 통해 기포의 연직유속분포를 파악하고 기포의 길이와 빈도를 기준으로 흐름패턴을 분류하였다.

일반적으로 공기는 주변 액체보다 밀도가 낮아 공기의 부력으로 인해 기울기가 상승하며, 액체가 위로 기울어진 파이프를 통해 흐르는 경우, 공기와 액체는 모두 파이프의 기울기 위로 동일한 방향으로 흐르게 된다. 하지만 하향 경사 파이프에 물이 흐를 때 공기 이동은 어느 방향으로든 흐를 수 있으며, 기울기가 비교적 작고 액체가 충분히 큰 유속을 가지는 경우, 액체는 경사 위로 공기가 이동하는 것을 방지 할 수 있고 공기를 아래 방향으로 밀어내게 된다(Lewis⁹⁾). 수직관은 대개 터널의 환기 수단으로 설계되며, 공기가 환기됨에 따라 수직관의 압력이 초과한 상태에 있는 경우 물이 수두의 높이까지 유지되며, 포획된 공기가 수직관으로 들어감에 따라 상승하는 공기의 운동량은 액체를 상당한 거리까지 들어 올릴 수 있다. 공기의 부력에 의해 이동되는 공기와 액체의 수직 이상흐름은 공기가 수직관을 통해 방출됨에 따라 확립되며, 터널의 크기 및 환기되는 공기의 양에 따라 수직 이상 흐름 상황은 터널

내 압력을 훨씬 초과하여 물을 들어 올릴 수 있다. Lewis⁹⁾는 수직관을 포함하는 실험을 통하여 수직관 내 최대 압력을 결정하는 데 가장 영향을 미치는 변수를 확인하고, 그 결과를 단순화 된 수치 모델과 비교하였다. Choi 등¹⁰⁾은 geyser 발생의 영향인자를 도출하기 위해 공기를 고려한 1차원 수치모델을 개발하고, 갇힌 공기의 압력에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 분석 결과 관의 직경비와 유입유량이 주요인자로 도출되었으며, 공기의 압축은 다양한 영향인자의 복합적인 작용으로 인해 발생되기 때문에 다인자분석을 수행하였다. Cong 등¹¹⁾은 수직관과 일정한 수두에 연결된 수평관으로 구성된 단순 배수 시스템의 물리적 모델에 대한 실험을 수행하였다. 외부의 압력 수두가 없으면 물이 채워진 수직관에서의 공기 주머니 이동은 슬러그흐름과 유사하며, 자유 표면에 대한 공기의 상승 속도는 거의 일정하여 Taylor의 기포속도에 가까운 것으로 나타나고, 외부 압력 수두가 수평관에 적용될 때 수직관의 직경과 공기량의 차이에 의해 geyser 발생여부가 결정 되는 것으로 나타났다. 또한 Seong 등¹²⁾은 유입구의 형태에 따라 나타나는 수리학적 특성을 분석하고 새로운 형태를 제안하였다.

본 연구에서는 대심도터널 내부에서의 잔류공기 비율에 따른 공기 배제 양상을 구명하기 위하여 터널을 모형화한 관에서 실험적 연구를 수행하였다. 직경 80 mm 아크릴관으로 제작된 수평관 내부에 일정한 수두를 가지는 물을 공급하여 관 내 잔류공기가 수직관을 통해 배출되는 현상을 재현하였다. 압력센서를 이용하여 수평관 내 압력 변화 및 압축된 공기가 수직관을 통해 배출될 때 압력을 통해 관 내의 흐름특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 대심도터널 내부에서의 잔류공기 비율에 따른 공기 배제 양상을 구명하기 위하여 터널을 모형화한 관에서 실험적 연구를 수행하였다. 직경 80 mm, 길이 7.1 m의 아크릴관으로 제작된 수평관 내부에 일정한 수두를 가지는 물을 공급하여 관 내 잔류공기가 수직관을 통해 배출되는 현상을 재현하였다. 수직관의 길이는 1.3 m이며, 직경은 40 mm이다. 압력센서(GE-UNIK_5000, 범위 : 0 ~ 1 bar, 최대 측정빈도 : 3.5 kHz, 정확도 : ± 0.1%)를 이용하여 관 내 압력을 측정하였으며, 실험장치의 모습 및 제원은 Fig. 2와 Table 1과 같다. 다양한 조건에 따른 실험을 위해 수평관은 1 m 단위로 분할하여 제작하였으며, 압력센서는 한단면

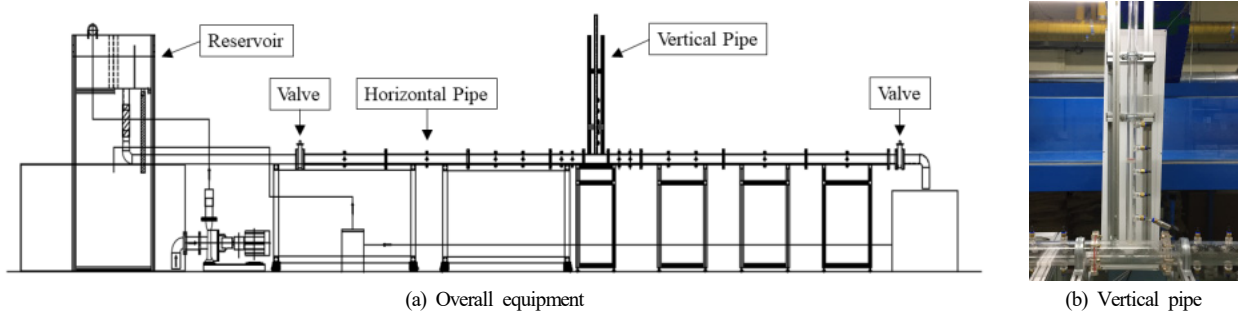


Fig. 2. Experimental equipment.

에 상·하, 측면 3개씩 부착이 가능하다.

실험은 Table 4에서 서술한 조건, 일정한 수두를 가지는 고수조의 높이(H1, H2) 및 관 내 잔류공기량에 따라(수평관의 바닥에서 물이 채워진 높이, A1, A2, A3, A4) 총 8가지 조건으로 수행하였으며, 고수조의 높이에 대한 모습은 Fig. 3과 같다. 수평관의 좌·우측 밸브를 닫아 관 내가 비어 있는 상태에서 좌측 밸브를 열어 일정 수두로 유량이 공급될 때, 관 내의 공기가 수직관을 통해 모두 배출될 때까지 실험을 실시하였다. 관 내 압력측정을 위해 3개의 센서를 사용하였으며, 수평관에 2개의 센서를 수직관 연결부의 전·후 바닥면에 부착하고, 수직관에 1개의 센서를 측면에 부착하여 총 3개의 지점에서 압력을 측정하였다.

Table 1. Experimental setup

Experimental setup	
Horizontal pipe	L= 7.1 m, D=0.08 m
Vertical shaft	L=1.3 m, D=0.04 m
Pressure transducers (GE UNIK 5000)	Range: 0~1 bar
	Accuracy: 0.1 % FS
	Frequency: 3500 Hz

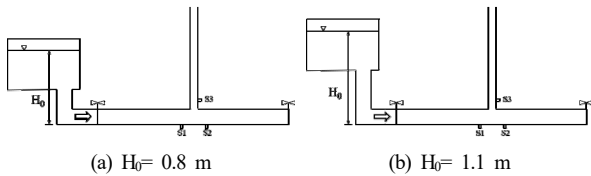


Fig. 3. Experimental condition (Reservoir elevation).

Table 2. Experimental condition

Experimental Condition	
Reservoir elevation H_0 (m)	H1, H2 (0.8, 1.1)
Residual air (%)	A1, A2, A3, A4 (100, 75, 50, 25)
Pressure sensor	S1, S2, S3

측정된 압력 신호의 첨두 분석(Peak Analysis)을 통해 첨두의 높이, 폭, 인근 첨두 값과의 거리를 확인하였다. 첨두분석 방법은 다음과 같은 순서로 진행한다. 먼저 연속되는 첨두값들 전, 후 n개보다 큰 압력값을 최대값으로 결정한다. 다음으로 연속되는 첨두값에서 평탄한 첨두를 첨두로 간주하거나 제외하고자 할 수 있다. 후자의 경우, 한 첨두와 바로 근방 첨두 간의 진폭 차이로 정의되는 최소 편위를 사용하여 첨두값을 제거한다. 다음으로 첨두의 폭은 반치전폭 값인 첨두 높이의 절반을 기준으로 사용한다. 반치전폭은 어떤 함수의 폭을 나타내는 용어로서, 그 함수의 최댓값의 절반이 되는 두 독립변수 값들의 차이로 정의된다. 반치전폭은 신호처리에서 펄스의 지속시간, 통신에서 사용되는 신호의 대역폭 등을 나타내는데 쓰인다.

측정값의 기준 높이는 하강하는 신호가 가로 기준선을 교차하는 점 사이의 거리로 첨두의 너비를 추정한다. 첨두 아래의 첨두 돌출부의 절반에 해당하는 세로거리에 기준선을 배치하고 교차점의 위치는 선형 보간으로 계산한다. Fig. 4는 신호의 첨두분석을 통해 첨두를 찾고, 첨두의 높이, 폭을 산정한 예를 나타낸 것이다.

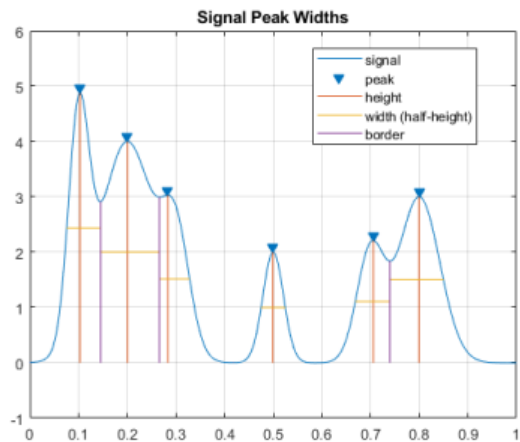


Fig. 4. Find peak pressure(Peak analysis).

3. 실험결과 및 분석

일정한 수두를 가지는 고수조에서 수평관 내로 유량이 공급 될 때, 관 내 압력변화를 알아보기 위해 2가지의 고수조 높이에 대해 관 내 잔류공기량에 따른 4가지 조건으로 실험을 수행하였다. Fig. 5는 고수조의 수두가 0.8 m(H1)일 때, 4가지 잔류공기량 변화에 따른 수평관(S1, S2)과 수직관 (S3)에서의 압력변화를 나타낸 결과이다. 수직관 연결부를 기준으로 S1은 수평관의 좌측하단, S2는 수평관의 우측하단, S3는 수직관의 측면의 압력을 나타낸 것이다. 수평관 좌측에서 유량이 공급됨에 따라 관 내의 공기 중 일부는 수직관으로

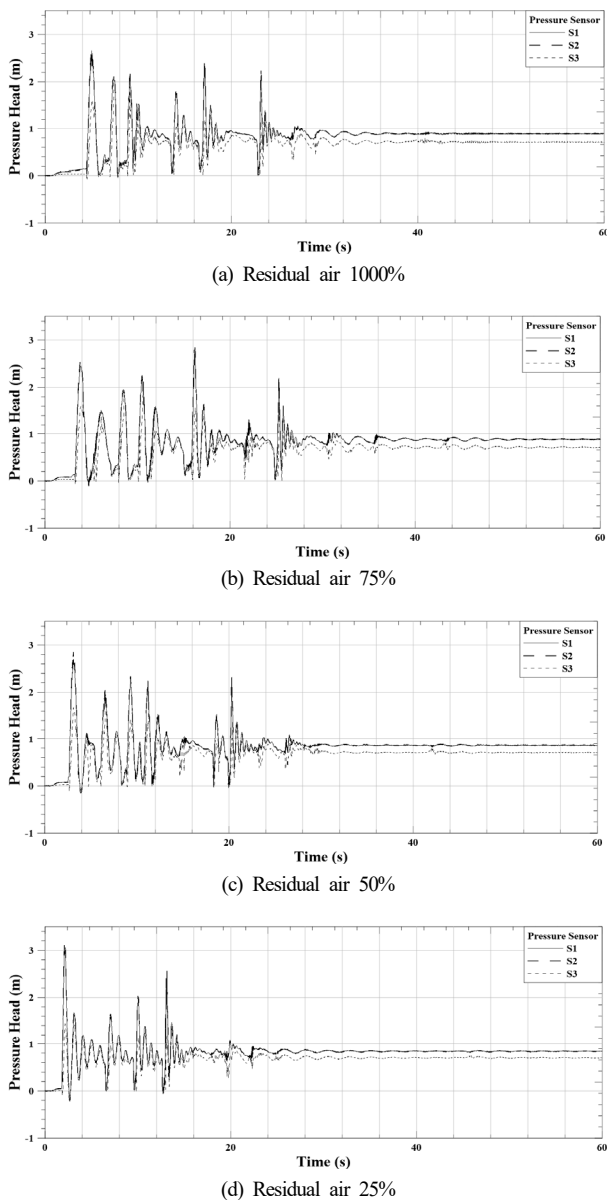


Fig. 5. Pressure variation due to residual air in pipe(H1).

배출되고 나머지는 수평관의 우측(수직관 연결부 기준)에 포획됐다. 지속되는 유량유입으로 인해 압축되었다가 수직관으로 배출되었으며, 이 때 높아진 압력으로 인해 물과 함께 폭발적으로 배출되는 분출현상(Geysering)이 발생하였다. 유입 초기에 큰 공기주머니가 배출되면서 수두차의 두 배보다 큰 압력을 발생시키는 것으로 나타났다. 이후 수평관 내의 압력은 점차적으로 감소하고 비교적 작은 기포가 배출되고, 40초 이내에 모든 기포가 빠져 나와 안정화되었다.

Fig. 6과 Table 3은 고수조의 수두가 H1, H2일 때, 잔류공기량에 따른 관 내 최대압력을 막대그래프 및 표로 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 경우 수평관이 비어 있을 때 수직관의 최대압력이 2.067 m로 가장 높게 나타났으며, 잔류공기량이 감소함에 따라 수직관의 최대압력도 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 수평관의 최대압력은 수평관이 비어 있을 때 S1은 2.657 m, S2는 2.636 m으로 가장 낮았으며, 관 내 잔류공기가 감소함에 따라 잔류공기량이 25%일 때 S1은 2.997 m, S2는 3.197 m로 증가하는 것으로 나타났고, 수직관연결부 기준 우측의 증가량이 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 6(b)의 경우 수평관이 비어 있을 때 수직관의 최대압력이 2.605 m로 가장 높게 나타났으며, 잔류공기량이 감소함에 따라 잔류공기량이 25%일 때 2.018 m로 수직관의 최대압력도 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 수평관의 최대압력은 수평관이 비어 있을 때 S1은 3.234 m, S2는 3.408 m으로 가장 낮았으며, 관 내 잔류공기가 감소함에 따라 잔류공기량이 25% 일 때 S1은 3.820 m, S2는 4.089 m로 증가하였으며, 수직관연결부 기준 우측의 증가량이 더 큰 것으로 나타났다. 고수조의 수두가 증가함에 따라 관 내 3개 지점 모두 최대압력이 H1보다 증가하였다. 관 내 잔류공기량이 감소함에 따라 수평관의 최대 압력이 증가하였으나, 반대로 수직관의 최고 압력은 감소하는 것으로 나타났다. 유입수의 수두가 증가함에 따라, 수평 및 수직관의 최고 압력은 증가하는 것으로 나타났으며, 잔류공기량이 감소함에 따라 최대 압력은 수평관(S1, S2)에서는 증가하고 수직관(S3)에서 감소하는 것으로 나타났다. 4가지의 잔류공기량 조건에서 전체적으로 최대 압력은 유입 초기에 발생하고 그 때의 최대 압력은 잔류공기량과 반비례하는 것으로 나타났다. 유입수의 수두차에 의한 최대 압력의 증가는 수두 차이 보다 큰 것으로 나타났으며, 잔류공기량이 작을 때 수두의 영향이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 7과 Table 4는 유입수의 수두 및 잔류공기량에 따른 수직관에서 발생한 침투압력 및 발생 시간을

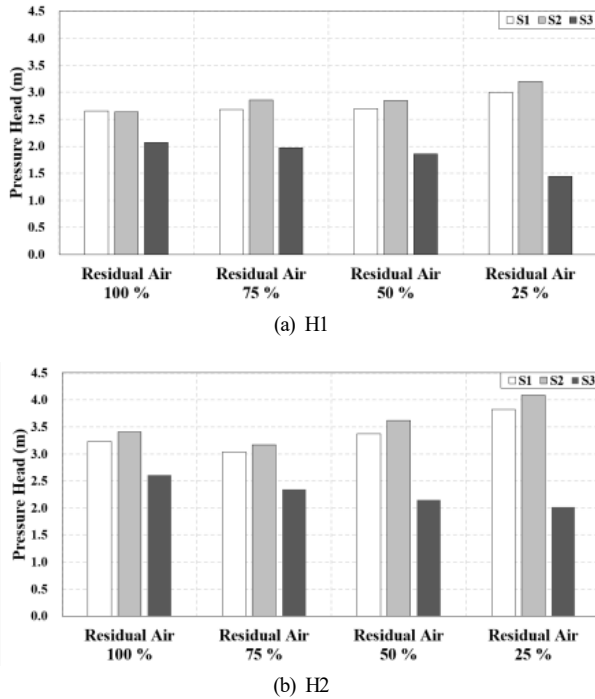


Fig. 6. Graph of peak pressure due to residual air in pipe.

Table 3. Peak pressure due to residual air in pipe

		Residual air			
		100%	75%	50%	25%
H1	S1	2.657	2.682	2.701	2.997
	S2	2.636	2.853	2.849	3.197
	S3	2.067	1.976	1.858	1.441
H2	S1	3.234	3.041	3.369	3.820
	S2	3.408	3.168	3.620	4.089
	S3	2.605	2.344	2.153	2.018

나타낸 것이다. 각 조건별 실험동안 발생하는 침두압력을 처음 발생한 침두압력, 마지막으로 발생한 침두압력, 그리고 최대 침두압력으로 총 3가지로 분류하였다. Fig. 7은 침두압력과 발생 시간의 비교를 위해 침두압력과 발생시간에 대하여 최대압력과 실험시간으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 처음 발생한 침두압력은 잔류공기량 100%(H1D1)의 경우를 제외하고, 잔류공기량의 감소에 따라 감소하였으며, 발생시간도 짧아지는 것으로 나타났으며, 유입수의 수두차이와 관계없이 같은 경향을 보였다. 마지막 발생한 침두압력은 잔류공기량 75% 경우(H1D2, H2D2)를 제외하고, 잔류공기량이 감소함에 따라 발생시간이 늘어나는 것으로 나타났다. 마지막 발생한 침두압력은 모두 30s 이내였으며, 전체 실험시간 대비 50% 안에 침두압력 발생이 종료되고 안정화되는 것으로 나타났다.

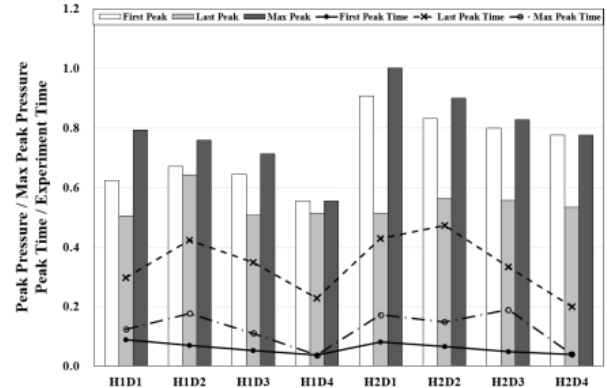


Fig. 7. Graph of peak pressure and occurrence time in vertical pipe.

Table 4. Peak pressure and occurrence time in vertical pipe

	Peak pressure (m)			Occurrence time (s)		
	First	Last	Max	First	Last	Max
H1A1	1.624	1.313	2.067	5.320	17.752	7.408
H1A2	1.747	1.674	1.976	4.136	25.312	10.624
H1A3	1.678	1.320	1.858	3.136	20.904	6.616
H1A4	1.441	1.334	1.441	2.168	13.656	2.168
H2A1	2.362	1.333	2.605	4.888	25.648	10.320
H2A2	2.162	1.465	2.344	3.984	28.352	8.912
H2A3	2.078	1.446	2.153	2.960	19.976	11.328
H2A4	2.018	1.388	2.018	2.384	11.992	2.384

최대 침두압력은 잔류공기량의 감소에 따라 크기가 감소하였으며, 유입수의 수두와 관계없이 동일한 경향을 보였다. 최대 침두압력의 발생시간은 유입초기에 발생한 처음 침두압력보다 이후에 발생하였으며, 수평관의 최대압력이 유입초기에 발생하는 것과 차이가 있는 것으로 보여진다.

4. 결론

본 연구에서는 대심도터널 내부에서의 잔류공기 비율에 따른 공기 배제 양상을 구명하기 위하여 터널을 모형화한 관에서 실험적 연구를 수행하였다. 일정한 수두를 가지는 고수조에서 수평관 내로 유량이 공급될 때, 관 내 압력변화를 알아보기 위해 2가지의 고수조 높이에 대해 관 내 잔류공기량에 따른 4가지 조건으로 실험을 수행하였다. 유량이 공급됨에 따라 관 내의 공기 중 일부는 수직관으로 배출되고 나머지는 수평관의 우측(수직관 연결부 기준)에 포획됐다. 이후 지속되는 유량유입으로 인해 압축되었다가 수직관으로 배출되었으며, 이 때 높아진 압력으로 인해 물과 함께

폭발적으로 배출되는 분출현상(Geysering)이 발생하였다. 유입수의 수두가 증가함에 따라, 수평 및 수직관의 최고 압력은 증가하는 것으로 나타났으며, 잔류공기량이 감소함에 따라 최대 압력은 수평관(S1, S2)에서는 증가하고 수직관(S3)에서 감소하는 것으로 나타났다. 4가지의 잔류공기량 조건에서 전체적으로 최대 압력은 유입 초기에 발생하고 그 때의 최대 압력은 잔류공기량과 반비례하는 것으로 나타났다. 유입수의 수두차에 의한 최대 압력의 차이는 수두 차이 보다 큰 것으로 나타났으며, 잔류공기량이 작을 때 수두의 영향이 큰 것으로 나타났다. 관 내 잔류공기량이 감소함에 따라 수평관의 최대 압력이 증가하였으나, 반대로 수직관의 최고 압력은 감소하는 것으로 나타났다. 수평관이 비어 있을 때 수직관의 최대압력이 가장 높게 나타났으며, 잔류공기량이 감소함에 따라 수직관의 최대압력도 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 수평관의 최대압력은 수평관이 비어 있을 때 가장 낮았으며, 관 내 잔류공기가 감소함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 수직관연결부 기준 우측의 증가량이 더 큰 것으로 나타났다.

유입수의 수두 및 잔류공기량에 따른 수직관에서 발생한 침투압력 및 발생 시간을 비교했다. 그 결과 처음 발생한 침투압력은 잔류공기량의 감소에 따라 감소하였으며, 발생시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 유입수의 수두차이와 관계없이 같은 경향을 보였다. 마지막 발생한 침투 압력은 일부(H1D2, H2D2)를 제외하고, 잔류공기량이 감소함에 따라 발생시간이 늘어나는 것으로 나타났다. 마지막 발생한 침투압력은 모두 30s 이내였으며, 전체 실험시간 대비 50% 안에 침투압력 발생이 종료되고 안정화되는 것으로 나타났다. 최대 침투압력은 잔류공기량의 감소에 따라 크기가 감소하였으며, 유입수의 수두와 관계없이 동일한 경향을 보였다. 최대 침투압력의 발생시간은 유입초기에 발생한 처음 침투압력보다 이후에 발생하였으며, 수평관의 최대압력이 유입초기에 발생하는 것과 차이가 있는 것으로 보여진다.

실험결과 터널 계통 전반에서의 물-공기(이상류) 거동 특성을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 대심도터널 내부 공기에 대한 효과적인 제어로 흐름의 안정화 및 그에 따른 수리성능의 개선효과를 기대할 수 있다. 향후 잔류공기 비율 외 유입유량 및 수직관의 직경 등을 고려한 실험을 통해 터널계통에서의 공기거동에 대한 주요영향인자를 파악하여 도시지역의 집중강우로 인한 수방재 대응 기술개발을 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement: This research was supported by Changwon National University in 2021~2022.

References

- 1) O. Baker, "Design of Pipelines for Simultaneous Flow of Oil and Gas", Proc., Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME., Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, 323-G, pp. 1-16, 1953.
- 2) G. B. Wallis, "One-dimensional Two-phase Flow", McGraw-Hill, New York, N.Y., pp. 288-302, 1969.
- 3) Y. Taitel and A. E. Dukler, "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-liquid Flow", AIChE Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55, 1976.
- 4) J. Weisman, "Two-phase Flow Patterns", Handbook of Fluids in Motion, N.P. Cheremisinoff, and R. Gupta(Eds.), Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor MI, pp. 409-425, 1983.
- 5) C. E. Brennen, "Fundamentals of Multiphase Flows", California Institute of Technology, Cambridge University Press 2005 ISBN 0521 848040, pp. 163-169, 2005.
- 6) H. Cho, K. Lee and S. Lyu, "An Experimental Investigation on the Behavior of Water-Air Two-phase Flows in a Horizontal Pipe", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 1, pp. 75-81, 2017.
- 7) K. Lee, H. Cho, D. S. Rhee and S. Lyu, "Experimental Investigation on the Velocity Structure and its Effect on the Flow Patterns of Air-Water Two-phase Flow in a Horizontal Pipe", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 22, Issue 9, pp. 3363-3372, 2018.
- 8) K. Lee and S. Lyu, "A Study of Enhancement of Hydraulic Performance and Flow Stabilization According to Residual Air Control", Magazine of Korea Water Resources Association-Water for Future, Edited by Y. Seo, Korea Water Resources Association, Vol. 51, No. 12, pp. 49-54, 2018.
- 9) J. W. Lewis, "A Physical Investigation of Air/Water Interactions Leading to Geyser Events in Rapid Filling Pipelines", Ph.D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, pp. 109-133, 2011.
- 10) S. Choi and S. Lee, "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, No. 2, pp. 133-139, 2016.
- 11) J. Cong, S. N. Chan and J. H. Lee, "Geyser Formation by Release of Entrapped Air from Horizontal Pipe into Vertical Shaft", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 143, No. 9, pp. 04017039-1-13, 2017.
- 12) H. J. Seong, I. H. Park and D. S. Rhee, "Study of Hydraulic Characteristics with the Shape of the Intake of an Underground Inflow Facility using Hydraulic Experiments", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 4, pp. 119-126, 2018.