

# 전기전도계를 이용한 관 내 이상류 거동에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on the Behavior of Two-phase Flow in Pipes Using Electrical Conductivity Meter

이경수\*, 조한일\*\*, 류시완\*\*\*, 이동섭\*\*\*\*

Kyungsu Lee, Hanil Cho, Siwan Lyu, Dong Sop Rhee

### 요 지

최근 기후변화의 영향과 급격한 도시화로 인한 하천 저류능력의 감소 및 부적절한 하수시설의 설계로 도시유역의 홍수 위험성이 증가하면서 적극적인 구조물적 홍수방어대책으로 대심도터널의 활용에 대한 필요성이 대두되고 있다. 일본을 비롯한 외국에서는 대심도터널의 활용이 적극적으로 고려되고 있으며 실제 설치 및 운영 사례 또한 증가하고 있다. 그러나 국내에서는 아직까지 홍수방어용 대심도터널의 설치 및 운영된 사례가 없고 설계 및 시공과 관련한 기준 및 연구가 미미한 실정이다. 본 연구에서는 대심도터널 내부에서의 이상흐름 거동특성을 구명하기 위하여 터널을 모형화한 수평관에서 실험적 연구를 수행하였다. 직경 100 mm 투명 아크릴관으로 제작된 수평관 내부를 흐르는 물에 공기를 주입하여 기포를 발생시키고 전기전도계를 이용하여 유속변화에 따른 관에서의 물-공기 혼합 이상흐름의 거동특성에 대해 살펴보았다. 실험결과 터널 계통 전반에서의 물-공기(이상류) 거동 특성을 파악할 수 있었다. 이를 통해 대심도터널 내부 공기에 대한 효과적인 제어로 흐름의 안정화 및 그에 따른 수리성능의 개선효과를 기대할 수 있으며, 도시지역의 집중강우로 인한 수방재 대응 기술개발을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 대심도터널, 물-공기 이상흐름, 전기전도계, 유속

### 1. 서론

최근 기후변화의 영향과 급격한 도시화로 인한 하천 저류능력의 감소 및 부적절한 하수시설의 설계로 도시유역의 홍수 위험성이 증가하면서 적극적인 구조물적 홍수방어대책으로 대심도터널의 활용에 대한 필요성이 대두되고 있다. 대심도터널은 하도와 더불어 침투홍수량을 분담함으로써 잠재적인 홍수피해의 가능성을 저감시킬 수 있으며, 저류시설 설치를 위한 지상공간의 확보가 불필요하고 설계방법에 따라 도시경관을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 이로 인해 일본을 비롯한 외국에서는 대심도터널의 활용이 적극적으로 고려되고 있으며 실제 설치 및 운영 사례 또한 증가하고 있다. 그러나 국내에서는 아직까지 홍수방어용 대심도터널의 설치 및 운영된 사례가 없고 설계 및 시공과 관련한 기준 및 연구가 미미한 실정이다.

대심도터널은 짧은 시간 동안 터널 내부로 대규모 유량이 유입되는 특성으로 인해 초기 유입 시 다양한 수리학적 현상이 발생하며, 유동 내부에 기체가 공존함으로써 일반적인 단상(single phase)흐름과 구별되는 물-공기 이상(two-phase)흐름을 나타낸다. 이상흐름은 유체의 물리적 특성, 유로형상 등의 다양한 요인들에 의해 특성이 달라지고 기체와 액체 간의 상호작용으로 인한

\* 정회원 · 창원대학교 친환경플랜트FEED공학과정 박사과정 · E-mail : kidhan@changwon.ac.kr

\*\* 정회원 · 창원대학교 친환경플랜트FEED공학과정 석사과정 · E-mail : johani188@nate.com

\*\*\* 정회원 · 창원대학교 토목환경화학공융합공학과 교수 · E-mail : siwan@changwon.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 · E-mail : dsrhee@kict.re.kr

경계면에서의 형상 변화 및 전달 현상이 매우 복잡한 특징을 가지므로, 이를 고려한 터널 내 통수능 및 공기유동에 대한 구멍이 요구되는 바이다.

이상유동은 기체와 액체의 밀도, 점도 등의 물성치와 유동방향, 조건 및 유로의 형상에 따라 유동의 형태가 달라진다. 그 뿐만 아니라 두 상 간의 상호작용으로 인하여 상 경계면에서의 형상 변화 및 전달 현상이 매우 복잡한데, 한정된 몇몇의 경우를 제외하면 지배방정식을 기반으로 한 순수한 수식만으로 전반적인 이상 유동 관련 변수를 정량화하기는 불가능하다. 따라서 이상유동 현상의 좀 더 정확한 해석을 하기 위해서는 이론적 해석과 더불어 많은 실험적 연구를 통한 고찰이 병행되어야 한다(이상용 외, 1999).

본 연구에서는 대심도터널 내부에서의 이상흐름 거동특성을 구명하기 위하여 터널을 모형화한 수평관에서 실험적 연구를 수행하였다. 직경 100 mm 투명 아크릴관으로 제작된 수평관 내부를 흐르는 물에 공기를 주입하여 기포를 발생시키고 전기전도도를 이용한 Two-phase meter (KANOMAX System 7931)를 통해 유속변화에 따른 관에서의 물-공기 혼합 이상흐름의 거동특성에 대해 살펴보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 수평 이상유동

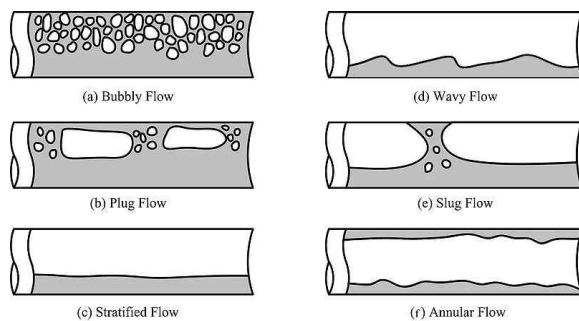


그림 1 수평관 내 이상류 유동 특성

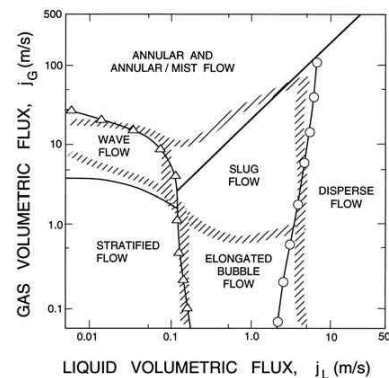


그림 2 수평관 내 이상류의 유동영역지도 (Mandhane et al. 1974)

수평유동에서는 중력이 반경 방향으로 작용하므로 유동이 중심축에 대하여 비대칭 형태를 가지며 상대적으로 밀도가 큰 액체는 아래쪽으로 쳐져서 흐르는 경향을 보인다. 이러한 수평 이상유동의 기본 양식으로는 기포흐름(bubbly flow), 플러그흐름(plug flow), 성층흐름(stratified flow), 슬러그흐름(slug flow), 환상흐름(annular flow) 등이 있으며 각 유동의 거동 특성은 그림 1과 2에 도시된 바와 같다. 기포흐름은 연속적인 액상에 작은 기포가 분산된 형태이다. 부력의 영향에 의해서 기포들은 수평관 상부에 더 많이 분포한 상태로 흐르게 되는데, 액체의 유량이 증가할수록 관 단면 전체에 균일하게 분포하는 경향을 보인다. 플러그흐름은 기포류가 느려지게 되면 기포들 간의 병합에 의해서 긴 형태의 기포플러그가 형성되며, 이 기포는 관 윗부분을 따라서 흐르게 된다. 성층흐름은 기체와 액체가 모두 느린 속도로 수평관 내를 흐를 때 나타나며, 특히 기체와 액체 간의 상대속도가 작기 때문에 두 유체의 경계면은 부드러운 형태를 가진다. 슬러그흐름은 외형상 플러그흐름과 유사하나 빠른 속도의 기체에 의해서 발생한다는 점에서 구분된다. 마지막으로 환상흐름은 빠른 속도의 기체가 관 중심 부분을 흐르고, 상대적으로 느린 액체는 관 벽을 따라서 액막의 형태를 가지고 같은 방향으로 흐른다. 이때 중력에 의해 관 상부는 항상 액막으로 덮여있

는 것은 아니며 관 하부에서는 좀 더 두꺼운 액막을 형성하게 된다(최성환, 2014).

## 2.2 기포율(Void Fraction)

유로 내의 한 지점에서 국부적인 기포율(local void fraction)은 전체 측정시간 동안 기포 통과시간의 비율로 정의할 수 있다. 즉,  $f(t)$ 을 기포의 통과 시 1, 액체의 통과 시 0으로 정의되는 함수라 하고, 전체 측정시간을  $T$ 라고 하면 국부 기포율은 다음과 같이 정의된다(Kocamustafaogullari & Wang, 1991).

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1)$$

## 2.3 Two-phase Flow Meter 측정원리

기체와 액체의 전기적 저항 특성 차를 측정하는 two-phase flow meter는 흐름 내 상 분포를 연구하기 위해 필요한 기기로 국부 기포율을 측정에 이용된다. 측정용 탐침(probe)은 액체에 접촉하면 폐쇄회로가 되고, 공기에 접촉하면 회로가 열려서 전기가 흐르지 않음으로써 흐름 내에서의 공기와 물을 구분할 수 있다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험 장치

수평관 내의 이상류 거동특성 연구를 위해 그림 3과 4에 도시된 바와 같은 실험장치를 제작하였다. 실험장치의 관로는 내경 100 mm의 원형관으로 계측구간은 투명아크릴로 기타 부분은 PVC로 제작되었다. 실험장치 관로 구간은 6개 모듈로 구분·제작하여 실험조건 및 측정방법에 따라 각 부분을 목적에 맞게 교체할 수 있도록 하였으며, 전체 연장은 약 7 m이다. 실험장치는 순환관로형식으로 유량공급을 위하여 400리터 용량의 수조 2개를 병렬로 연결하였으며, 흐름발생을 위한 펌프(WILO PSV -1080B, 1750 rpm)를 설치하였다. 실험유량을 적절히 조절하기 위하여 토출량 조절이 가능한 인버터펌프와 전환관로(bypass pipe)를 설치하였다. 유량계측을 위한 전자유량계와 기포 발생을 위한 공기발생장치를 연결하였다. 수평관 내를 흐르는 기포율 측정은 전기전도계(KANOMAX System 7931)를 이용하였으며, 특정 지점에서의 기포율 측정을 위한 전용 이송장치를 설계·제작하여 설치하였다(그림 5).

### 3.2 실험 방법

유량조건을 달리하고 동일한 공기량을 주입하였을 때 이상류 거동 특성을 살펴보기 위해 표 1에 제시된 바와 같은 조건에 대하여 실험을 수행하였다. 각 실험조건에 대해서 단면 내 중심선을 기준으로 연직방향으로 상(H1, H2, H3, H4), 중(M), 하(L1, L2)로 구분하여 총 7개 지점에서 국부 기포율을 측정하였다(그림 6). 전기전도계를 이용해 측정된 전기신호는 필터링 및 신호처리 과정을 거쳐 기포율을 산정하였으며, 초당 950 Hz로 촬영된 영상에 대한 영상처리분석을 통해 기포 이동속도를 측정하였다.

표 1 실험 조건

Type	Water Rate (m <sup>3</sup> /sec × 10 <sup>-2</sup> )	Air Rate (m <sup>3</sup> /sec × 10 <sup>-6</sup> )
Case 1	1.00	0.83
Case 2	1.25	
Case 3	1.50	
Case 4	1.75	

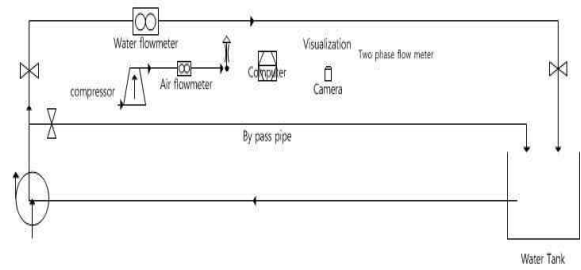


그림 3 실험 장치 모식도



그림 4 실험 장치 전경

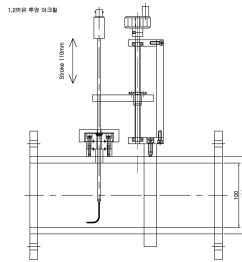


그림 5 Traverse 장치

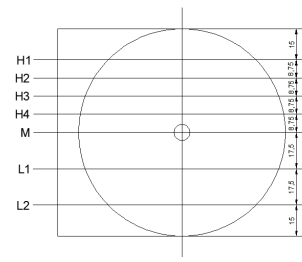


그림 6 Probe 측정위치

#### 4. 결론

실험결과 터널 계통 전반에서의 물-공기(이상류) 거동 특성을 파악할 수 있었다. Case 1의 경우 부력에 의해 기포가 관 상부에 존재함에 따라 H2 지점부터는 기포분율이 0에 가까운 값을 나타내었으며, 동일한 양의 공기를 주입하였을 때 유속이 증가함에 따라 최대 기포율을 나타내는 지점 (y/D)이 낮아졌다. 최대유속이 2 m/s를 초과한 Case 4의 경우 기포분율이 약 0.5의 값을 가지며, 관 상부뿐만 아니라 중심부인 M지점에서 기포분율이 0.2로 나타났다. 이를 통해 대심도터널 내부의 물-공기 이상류의 거동 특성에 대해 살펴 볼 수 있었으며, 향후 다양한 유량 조건의 실험 및 지상과 연결되는 수직갱을 포함한 실험을 통해 터널 내 흐름의 안정화 및 그에 따른 수리성능의 개선을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

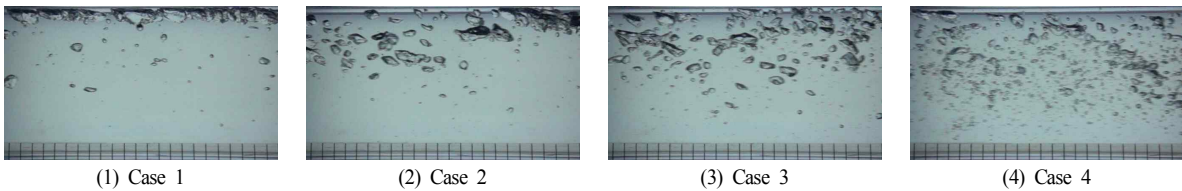


그림 7 수평관 내 이상류 거동 특성

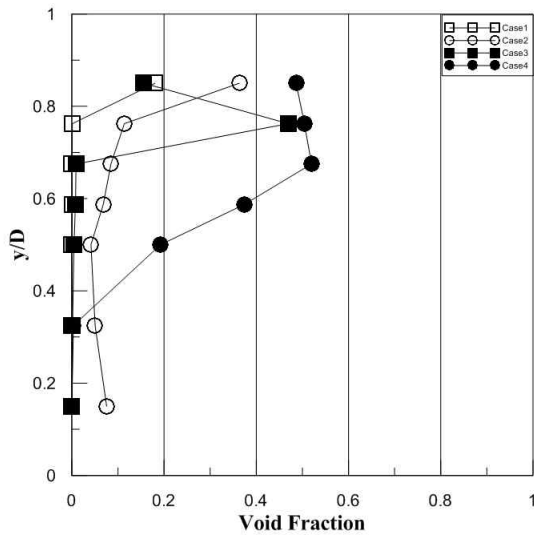


그림 8 연직위치에 따른 기포분율

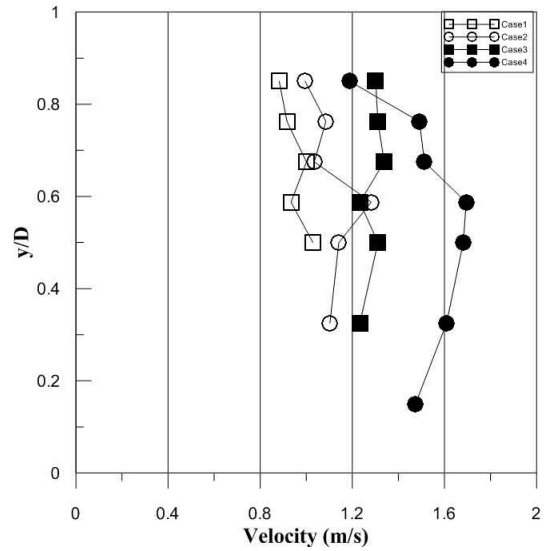


그림 9 연직위치에 따른 기포 속도

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구개발사업의 연구비지원(15CTAP-C095386-01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. 이상용 외 (1999), “이상유동 열전달”, 대영사.
2. 최성환 (2014), “기체 액체 이젝터 시스템의 설치방향에 따른 수력학적 특성 및 물질전달에 관한 연구.” 석사학위논문, 부산대학교 기계공학부.
3. Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K.A. (1974), “A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes.” *Int. J. Multiphase Flow*, 1, 537-553.
4. G. Kocamustafaogullari & Z. Wang (1991), “An Experimental Study On Local Interfacial Parameters In a Horizontal Bubbly Two-phase Flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, 17, No. 5, pp.553-572.