



## Experimental study of the air emission effect in the tangential and the multi-stage spiral inlet

Seong, Hoje<sup>a</sup> · Rhee, Dong Sop<sup>b</sup> · Park, Inhwan<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Research Specialist, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>b</sup>Research Fellow, Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>c</sup>Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 19-005

Received: 10 January 2019; Revised: 15 February 2019; Accepted: 15 February 2019

### Abstract

Recently, urban inundation was frequently occurred due to the intensive rainfall exceeding marginal capacity of the flood control facility. Furthermore, needs for the underground storage facilities to mitigate urban flood are increasing according to rapidly accelerating urbanization. Thus, in this study, drainage efficiency in drain tunnel connecting to underground storage was investigated from the air-core measurements in the drop shaft against two types of inlet structure. In case of the spiral inlet, the multi-stage structure is introduced at the bottom of the inlet to improve the vortex induction effect at low inflow discharge (multi-stage spiral inlet). The average cross-sectional area of the air-core in the multi-stage spiral inlet is 10% larger than the tangential inlet, and show the highly air emission effect and the highly inflow efficiency at the high inflow discharge. In case of the tangential inlets, the air emission effect decreased after exceeding the maximum inflow discharge, which is required to maintain the inherent performance of the tangential inlet. From the measurements, the empirical formula for the cross-sectional area of the air-core according to locations inside the drop shaft was proposed in order to provide the experimental data available for the inlet model used in experiments.

**Keywords:** Tangential inlet, Multi-stage spiral inlet, Air emission effect, Air-core

## 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 공기 배출 효과에 관한 실험적 연구

성호제<sup>a</sup> · 이동섭<sup>b</sup> · 박인환<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 복합재난대응연구단 연구위원,

<sup>c</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

### 요 지

급격한 기상변화로 인한 극한 강우와 집중폭우의 발생빈도 증가로 기존 수방시설의 한계 용량을 초과해 도심지 침수피해가 빈번하게 발생하고 있다. 최근 도시화 추세가 급격하게 빨라지면서 수방시설 등 사회기반시설에 대한 지하공간 개발의 필요성이 증가하고 있으며, 지하공간을 활용한 지하방수로와 지하저류지 기술이 급부상하고 있다. 본 연구에서는 지하유입시설의 대표적 형상인 접선식 유입구와 나선식 유입구에 대한 공기 배출 효과를 분석하기 위해 유입유량 변화에 따른 수직갱 내부 공기공동(air-core)의 형상 크기를 예측했다. 나선식 유입구의 경우, 저유량 유입조건에서 와류 유도 효과를 개선하기 위해 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입했다. 수직갱 내부 공기공동의 전체적인 평균 단면적의 경우, 다단식 나선 유입구가 접선식 유입구보다 10% 정도 크게 나타나 고유량 유입조건에서 높은 공기 배출 효과와 유입효율을 나타냈다. 접선식 유입구의 경우, 유입구가 가지는 고유 성능을 유지할 수 있는 최대 유량 조건을 초과하면서 공기 배출 효과가 감소하기 시작했다. 또한, 실험에서 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형에 활용 가능한 기초자료를 제공하기 위해 수직갱 내부 위치에 따른 공기공동 단면적에 대한 실험식(empirical formula)을 제시했다.

**핵심용어:** 접선식 유입구, 다단식 나선 유입구, 공기 배출 효과, 공기공동

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0617

E-mail: inhwanpark@kict.re.kr (I. Park)

## 1. 서론

최근 급격한 기상변화로 인한 극한 강우와 집중폭우의 발생빈도가 전 세계적으로 급격히 증가하고 있다. 이러한 강우 사상의 갑작스러운 증가는 산업화와 도시화로 인한 도심지의 불투수 면적 증가와 함께, 기존 수방시설의 한계 용량을 초과해 내수 배제 용량 부족으로 인한 도심지 침수피해를 일으킨다. 일반적으로 도시 지역의 침수피해를 방지하기 위해서는 제방을 쌓아 물길을 돌리거나 하천 주변 또는 도시 인근 지역에 저류 공간을 조성한 뒤 많은 양의 초기 홍수량을 일시에 저류시켜 도시로 유입되는 홍수량을 인위적으로 감소시키는 방법을 사용한다(DSD, 2003). 하지만 최근 도시의 인구 밀도 증가와 도시화 추세가 급격하게 빨라지면서 가용부지의 고갈과 높은 지가 상승으로 인해 수방시설 등 사회기반시설에 대한 부지 활용이 어려워지고 있다. 이러한 사회적 환경 변화와 도시화 추세에 맞추어 도심 토지 이용의 고도화를 통한 지하공간 개발의 필요성이 증가하고 있으며, 지하공간을 활용한 도심 수방시설의 개발 수요도 크게 늘어날 것으로 예상된다.

침수피해 방지를 위한 지하시설은 토지 활용에 대한 부담을 줄이고, 폭우 발생 시 홍수량을 초기에 배제해 도시 지역의 침수피해를 줄이는데 큰 효과가 있다. 지하공간을 활용한 도심 수방시설의 구조적 방안으로 지하방수로와 지하저류기 기술이 급부상하고 있다. 지하공간을 활용한 수방시설의 경우, 많은 양의 홍수량을 지하로 유입시키기 위해 유입부와 수직갱(drop shaft)으로 구성된 지하유입구를 사용하고 있으며, 지하유입구의 수리학적 검토 및 설계를 통한 유입효율 개선은 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 사용되고 있는 지하유입구 형상은 낙하식(plunge flow)과 와류식(vortex flow)으로 구분된다(Jain, 1984). 낙하식 유입구는 유입 흐름이 수직갱을 통해 유출되는 통로 역할만을 가지며, 와류식 유입구는 유입 흐름을 안정적으로 배출하고자 와류 흐름을 유도하고, 수직갱 벽면을 따라 발생하는 벽 마찰로 흐름 에너지를 소산시키는 역할을 한다. 최근에는 낙하식 유입구보다 에너지 소산과 구조적 안전성이 우수한 와류식 유입구가 주로 사용되고 있다(Jain and Ettema, 1987; Vischer and Hager, 1995).

와류식 유입구는 Drioli (1947)에 의해 처음으로 제안되었으며, 대표적인 형상으로는 접선식(tangential)과 나선식(spiral) 유입구가 있다. 접선식 유입구는 Jevdjevic and Levin (1953)이 처음으로 제안했으며, 유입부 바닥면에 경사를 도입해 유입 흐름을 상류( $Fr < 1$ )에서 하류( $Fr > 1$ )로 가속시켜 유입효율을 높이는 형상이다. 나선식 유입구에 비해 크기가 작고 구조가 단순하지만, 유입유량이 설계 유량보다 작으면 와류 흐름이 제대로 형성되지 못하는 단점이 있다.

Jain and Ettema (1987)는 접선식 유입구의 설계 제원을 검토하고 수위-유량 관계를 도출했으며, 접선식 유입구의 효과적인 성능 확보를 위해서는 수직갱 단면적을 기준으로 공기공동의 단면적이 최소 25% 이상 되어야 한다고 제안했다. Zhao *et al.* (2006)은 접선식 유입구의 수직갱 내부 흐름 두께와 공기 유입특성을 분석해 유입구 성능을 평가했으며, Yu and Lee (2009)는 Jain and Ettema (1987)의 연구를 기초로 수리실험을 통해 안정된 흐름을 보장하기 위한 접선식 유입구의 설계조건을 제시했다. 나선식 유입구는 유입부에 나선 구조를 도입해 접선식 유입구보다 안정된 와류 흐름 및 수직갱 내부 공기공동 형성을 유도하고, 수직갱 벽면을 따라 발생하는 벽 마찰로 흐름 에너지를 소산시키는 형상이다(Jain and Ettema, 1987; Vischer and Hager, 1995). 나선식 유입구의 경우, 기본적으로 유입구의 형상과 유입부와 수직갱을 따라 형성되는 유입 흐름의 수리학적 특성 중요하게 고려해야 한다. Quick (1990)은 나선식 유입구의 효율적인 설계조건을 찾기 위해 수위-유량관계에 대한 연구를 수행했으며, Giudice and Gisonni (2011)는 상류 및 하류 조건에서 적용 가능한 나선식 유입구의 새로운 설계 기준을 제안했다. Mulligan *et al.* (2016)은 와류 흐름에 대한 나선식 유입구의 유입효율과 관련된 실험식을 제시했다.

지하유입구의 성능 목표는 유입부 수위 변화가 크지 않은 안정적인 유입 흐름의 형성과 한 번에 많은 양의 유량을 배출할 수 있는 고용량 유입효율을 달성하는 것이다. 지하유입구의 성능을 평가할 경우, 다음 두 가지를 중요하게 고려해야 한다. 첫째는 유입조건에 따른 유입부 흐름 특성의 변화, 둘째는 수직갱 내 질식(choking) 방지를 위한 공기공동의 형성이다. 지하유입구에 관한 기존 연구의 경우, 유입조건에 따른 유입부 흐름 특성 분석과 유입효율 개선을 위한 설계조건을 중심으로 수행되었다. 지하유입구로 흐름이 유입될 때 수직갱 내부에 발생하는 공기공동은 공기의 유입 및 배출 통로 역할을 하며 유입구 유입효율 변화에 매우 중요한 부분이다. 공기공동이 적절하게 발생하지 않을 경우, 수직갱 내부 공기의 유입 및 배출 통로가 막히는 질식 현상이 나타나게 되고 배제 유량의 감소와 유입구 범람 등 시설 운영에 위험성이 동반된다. 특히, 수직갱과 같이 높은 낙차 조건을 가진 지하유입구의 경우, 설계 시 수직갱 내부 공기공동을 통한 공기의 유입과 배출을 중요하게 고려해야 한다(Zhao *et al.*, 2006). 국내에서는 Park *et al.* (2016)이 지하유입구의 유입효율 감소와 공기공동 소멸에 관한 관계를 검토했으며, Oh *et al.* (2016)이 수직갱 내 공기 배출 감소로 인한 수리학적 위험성에 대해 언급했다. 본 연구에서는 Jain and Ettema (1987)와 Yu and Lee (2009)의 연구를

기초로 기존 접선식 유입구와 지하유입구의 성능 개선을 목적으로 새롭게 개발한 다단식 나선 유입구의 유입유량 변화에 따른 수직갱 내부 공기공동의 형상 크기를 계측했다. 다단식 나선 유입구는 나선식 유입구 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입해 저유량 유입조건에서 감소하던 와류 유도 효과를 개선한 형상이다. 유입유량에 따른 공기공동 형상을 기초로 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 공기 배출 효과를 비교·분석했으며, 실험에 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형에 적용 가능한 공기공동 단면적에 관한 실험식 (empirical formula)을 제안했다.

## 2. 기본이론

### 2.1 접선식 유입구

접선식 유입구는 유입부 바닥면에 경사를 도입해 유입 흐름을 상류에서 사류로 가속시켜 유입효율을 높이는 형상이다. 경사구간의 유입구 폭이 축소되면서 자연스럽게 와류 흐름을 유도하지만, 통수단면의 축소로 인해 질식 현상이 발생할 가능성이 크다(Fig. 1).

Jain (1984)이 접선식 유입구에 대한 기본이론을 처음으로 확립한 후, Yu and Lee (2009)가 실험적 연구를 통해 기본이론을 보완했다. 상류 흐름을 사류로 가속시키는 주요 성능을 유지할 수 있는 최대 유량을 흐름 제어점 유량(control shift discharge,  $Q_c$ )이라고 하며 Eq. (1)과 같이 정의한다.

$$Q_c = \frac{\sqrt{g}b(2h/3)^{1.5}}{(\cos^{2/3}\beta - (b/B)^{2/3})^{1.5}} \quad (1)$$

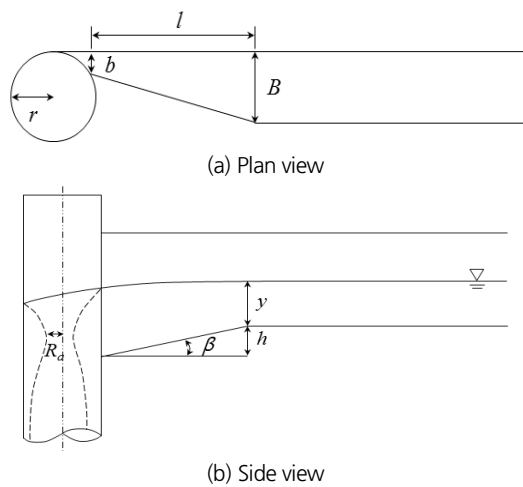


Fig. 1. Descriptions of the tangential inlet

여기서,  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $b$ 는 접합부의 폭( $m$ ),  $h$ 는 유입부와 접합부의 수직 높이 차이( $m$ ),  $\beta$ 는 낙차부의 바닥 경사( $^\circ$ ),  $B$ 는 유입부의 폭( $m$ )이다.

### 2.2 나선식 유입구

나선식 유입구는 유입구의 나선형 구조를 이용해 안정된 와류 흐름을 유도하고, 수직갱 내부 관 벽을 따라 와류 흐름을 유지하며 공기공동을 형성한다. 공기공동의 형상과 공기의 유입 및 배출이 안정적이기 때문에 유량 배출에 유리하다 (Fig. 2).

나선식 유입구의 기본이론은 Hager (1999)가 처음으로 확립했으며, 접근 흐름이 상류인 경우, 수직갱에서 질식 현상이 발생하지 않는 최대 설계 유량( $Q_m$ )은 Eq. (2)와 같이 정의한다.

$$Q_m = 4r^3 \left( \frac{5g}{B} \right)^{0.5} \quad (2)$$

여기서,  $r$ 은 수직갱의 반지름( $m$ )이다.

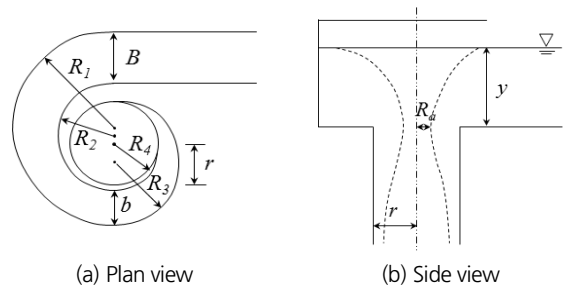


Fig. 2. Descriptions of the spiral inlet

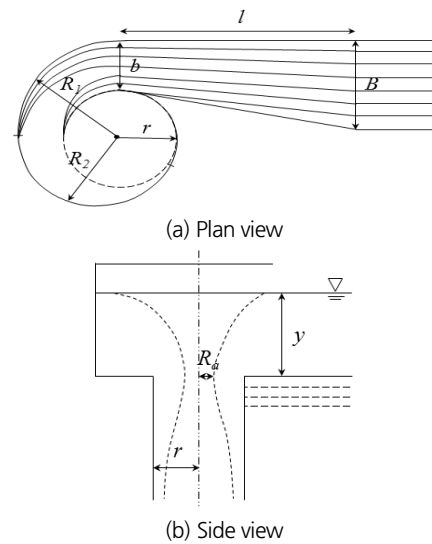


Fig. 3. Descriptions of the multi-stage spiral inlet

본 연구에서는 저유량 유입조건에서 와류 유도 효과가 감소되는 현상을 개선하기 위해 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입한 다단식 나선 유입구를 적용했다(Fig. 3).

**2.3 차원해석**

유입구의 공기 배출 효과는 수직갱 내부 공기공동 형상의 크기 변화를 통해 평가할 수 있다. 공기공동 형상에 영향을 미치는 주요변수는 유입유량과 유입부 폭, 수직갱의 반지름 등 다양한 유입구 설계조건이다. 차원해석은 이렇듯 다양한 변수들이 연관된 물리적 현상의 주요변수를 예측하고 무차원변수를 이용한 실험결과와 실험식을 도출하는데 유용하다(Szirtes, 2007). 본 연구에서는 실험에 사용된 유입구 모형에 적용 가능한 공기공동 형상과 유량 관계에 대한 실험식을 도출하고자 Buckingham이 공식화한 Buckingham  $\pi$  이론을 사용해 차원해석을 수행했다. 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 공기공동 형상( $A_a$ )에 관한 수리학적 매개변수를 Eqs. (3) and (4)와 같이 추정했다.

$$f\left(Re, Fr, \frac{y}{B}, \frac{b}{B}, \frac{l}{B}, \frac{r}{B}, \frac{h}{B}, \frac{z}{B}, \frac{A_a}{B^2}\right) = 0 \quad (3)$$

$$f\left(Re, Fr, \frac{y}{B}, \frac{b}{B}, \frac{l}{B}, \frac{r}{B}, \frac{R_1}{B}, \frac{R_2}{B}, \frac{z}{B}, \frac{A_a}{B^2}\right) = 0 \quad (4)$$

여기서,  $z$ 는 공기공동 형상의 발생 위치(m),  $A_a$ 는 수직갱 내부에 형성되는 공기공동의 단면적( $m^2$ )이다.

실험에서 사용된 유입구 형상은 설계조건에 변화를 주지 않았고, 점성의 효과가 작은 개수로 흐름이기 때문에 공기공동 형상과 유량 관계에 대한 매개변수를 Eq. (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$f\left(Fr, \frac{z}{B}, \frac{A_a}{B^2}\right) = 0 \quad (5)$$

**3. 수리실험**

유입구 형상에 따른 공기 배출 효과를 분석하기 위해 길이 4.0 m, 폭 0.2 m의 직선 개수로와 높이 2.7 m, 직경 0.12 m의 수직관으로 구성된 지하유입구 실험장치를 제작하고 수직갱 내부의 공기공동 형상을 계측했다(Fig. 4). 펌프와 디지털 유량계(F401, 오차범위:  $\pm 0.5\%$ )를 사용해 유입유량을 제어하

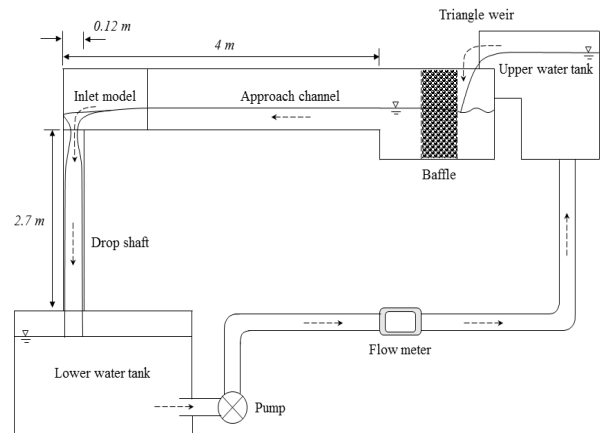
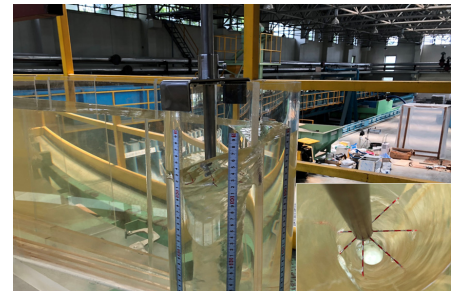
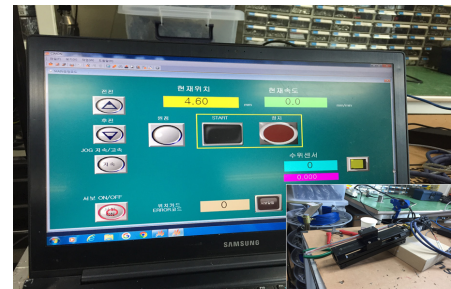


Fig. 4. Outlines of the experiment channel



(a) Direct measuring instrument



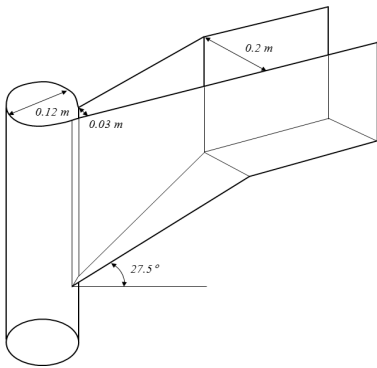
(b) Automatic measuring system of the electrical conductivity

Fig. 5. Measuring instruments for the air-core size

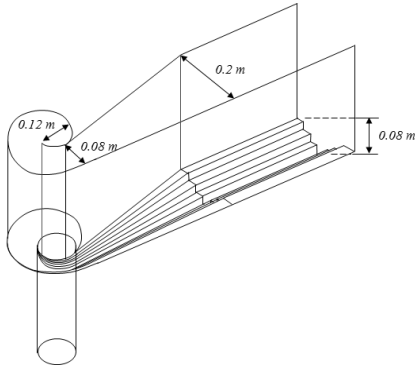
고, 고수조에 삼각위어를 설치해 목표 유량을 재확인했다. 공기공동 형상은 자체적으로 제작한 수벽측정장비와 전기전도도 자동 측정 시스템을 사용해 계측했다(Fig. 5).

**3.1 지하유입구 모형 제작**

지하유입구 형상에 따른 수직갱 내부 공기 배출 효과를 비교·분석하기 위해 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 접선식 유입구와 나선식 유입구의 실험모형을 제작해 수리실험을 수행했다(Fig. 6). 접선식 유입구는 유입부 바닥면에 경사를 도입해 유입 흐름을 상류에서 사류 흐름으로 가속시켜 유입효



(a) Tangential inlet



(b) Multi-stage spiral inlet

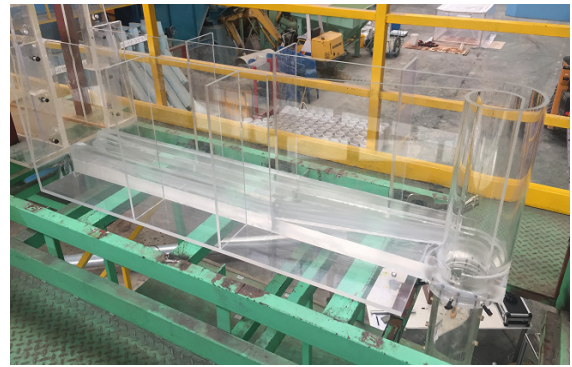


Fig. 6. Experimental model of inlet structures

을 높이는 형상이다. 나선식 유입구는 선행 연구를 통해 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입해 저유량 유입조건에서 감소되던 와류 유도 효과를 개선한 다단식 나선 유입구를 사용했다(Seong *et al.*, 2018). 지하유입구 모형의 제작은 Jain (1984)이 제시한 접선식 유입구 기초 설계이론의 기본 모형( $r = 0.12 \text{ m}$ ,  $B = 0.2 \text{ m}$ ,  $b = 0.03 \text{ m}$ ,  $\beta = 27.5^\circ$  등)을 참고해 제작했다.

### 3.2 실험조건 및 방법

지하유입구 모형에서 범람이 발생하지 않는 최대 유량(위어고 0.15 m)을 기준으로 위어고 0.02 m 간격으로 총 5가지 유입유량 조건(Table 1)에 대한 실험을 수행했으며, 유입유량 변화에 따라 발생하는 수직관 내부 공기공동의 형상 크기를 측정했다. 유량변동으로 인한 오차를 최소화하기 위해 유입유량을 설정하고 5분 이상 안정화한 후, 고수조에 설치된 삼각위어의 위어고를 측정해 목표 유량공급을 재확인했다. 수직관 내부 공기공동의 형상 크기는 유입구 낙차부와 수직관이 만나는 접합부를 기준으로 상부 0.3 m 구간과 하부 0.24 m 구간, 총 0.54 m 구간에 대해 0.06 m 간격으로 측정했다(Fig. 7). 상부 0.3 m 구간의 경우, 유입유량 조건에 따라 미세측 구간이 존재한다.

Table 1. Experimental conditions

Inflow	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
Discharge (m <sup>3</sup> /s)	0.0040	0.0065	0.0094	0.0127	0.0163
Weir height (m)	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13

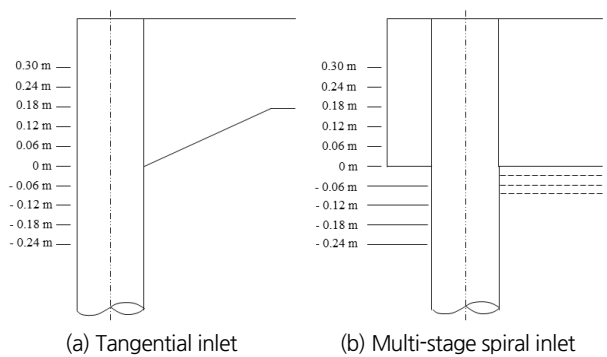


Fig. 7. Air-core size measurement points in the drop shaft

시간에 따라 변화하는 공기공동의 형상을 정량적으로 표현하기 위해 수직관의 한 단면을 기준으로 Fig. 8(a)와 같이 일정 간격으로 총 8지점의 수벽 두께를 5회 측정해 평균값을 사용했다. 지하유입구 모형의 구조적 특성으로 인해 유입구



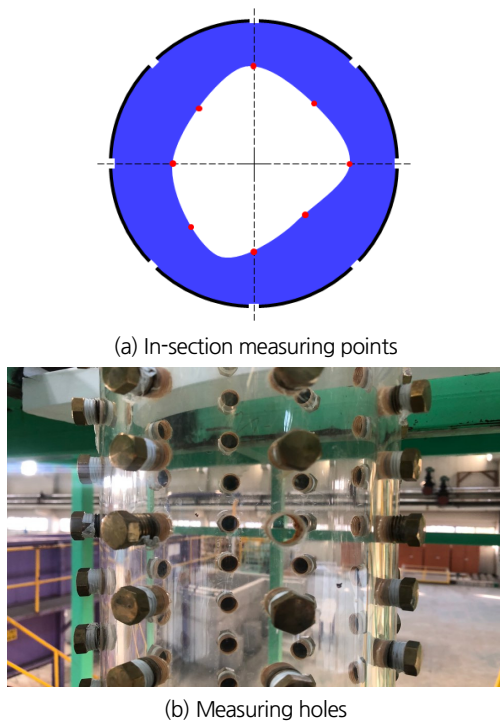


Fig. 8. Measuring points to investigate the air-core size

낙차부와 수직관 접합부를 기준으로 상부 0.3 m 구간은 수벽 측정장비(Fig. 5(a))를 이용해 직접 계측했으며, 하부 0.24 m 구간은 벽면의 작은 구멍(Fig. 8(b))을 통해 전기전도도 자동 측정 시스템(Fig. 5(b))을 사용해 계측했다.

### 4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 점선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 유입유량에 따른 수직관 내부 공기 배출 효과를 분석했다. 유입유량 변화에 따른 수직관 내부 수벽 두께를 측정해 구간별 공기공동의 형상 변화와 공기 배출 효과를 검토했으며, 유입유량 조건과 수직관 내부 위치에 따른 공기공동의 단면적 결과를 기초로 본 연구에서 사용한 지하유입구 모형에 적용 가능한 실험식을 함께 제안했다.

#### 4.1 공기공동 형상 변화

수직관 내부의 공기공동은 공기의 유입과 배출 통로로 이용되어 지하유입구의 질식 현상을 방지하고 유입효율 개선에 중요한 역할을 한다. 점선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 공기 배출 효과를 비교 분석하기 위해 수리실험을 통해 수직관 내부 공기공동의 형상을 계측하고 단면적 변화를 분석했

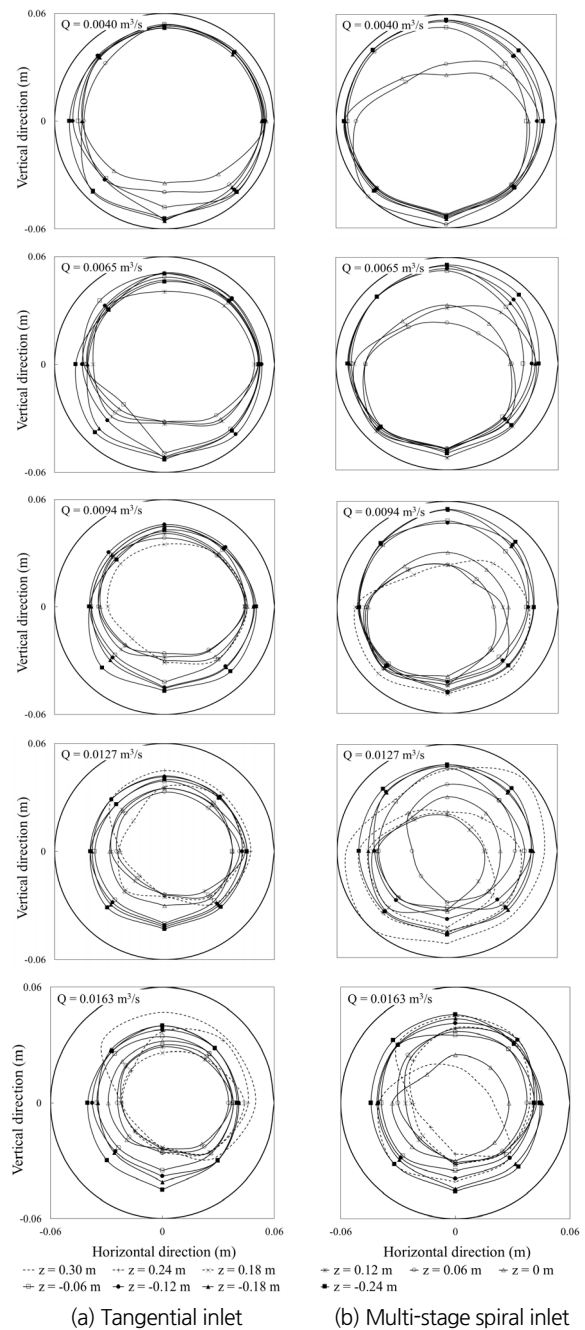


Fig. 9. Shape of the air-core according to the inflow discharge

다. 유입구 형상 별 공기공동의 형상 변화를 비교할 수 있도록 유입유량에 따른 공기공동의 형상을 Fig. 9에 나타냈다. 동일한 유입유량 조건에서 다단식 나선 유입구의 공기공동 형상이 점선식 유입구의 공기공동 형상보다 크게 계측되었다. 공기공동 형상 변화에 따른 공기 배출 효과를 보다 정량적으로 분석하기 위해 공기공동의 단면적( $A_a$ ) 변화를 수직관의 단면적( $A_d$ )과의 비율인 무차원변수( $A_a/A_d$ )로 나타냈다(Fig. 10).

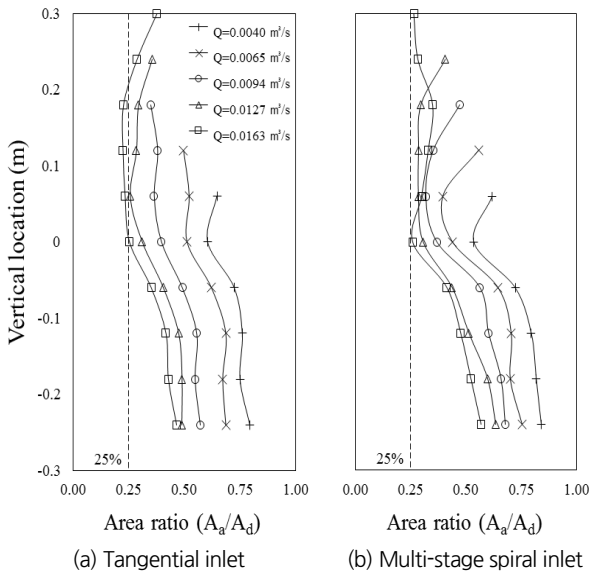


Fig. 10. Variations of  $A_a/A_d$  against the vertical location in the drop shaft

Jain and Ettema (1987)는 지하유입구 질식 방지를 위해 수직 갱 내부 공기공동의 단면적이 수직갱 단면적을 기준으로 최소 25% 이상 되어야 한다고 제안했다. 접선식 유입구의 경우, 유입유량 0.0163 m<sup>3</sup>/s에서 공기공동의 단면적이 수직갱 단면적 기준 25% 이하로 작아지면서 공기 배출 효과가 감소하기 시작한다. Jain (1984)이 제안한 유입효율 감소에 대한 최대 유량 검토를 위해 실험에서 사용된 접선식 유입구 모형의 흐름 제어점 유량( $Q_c$ )을 계산했으며, 최대 유입유량 조건인 0.0163 m<sup>3</sup>/s에서 흐름 제어점 유량 0.0133 m<sup>3</sup>/s를 초과해 유입구가 가지는 성능이 급격하게 감소하고 공기 배출 효과와 유입효율이 크게 저감되었다. 다단식 나선 유입구에서는 전체적으로 공기공동의 단면적이 접선식 유입구보다 크게 나타나며, 모든 유입유량 조건에서 공기공동 단면적의 비율이 수직갱 단면적 기준 25% 이상이다. 특히, 유입유량 0.0163 m<sup>3</sup>/s에서 수직갱 상부 공기공동의 단면적이 접선식에 비해 크게 증가하며, 고 유량 유입조건에서 공기 배출 효과가 개선되어 질식 위험성이 크게 감소했다. 다단식 나선 유입구의 경우, 본 연구를 통해 새롭게 개발한 유입구 형상으로 최대 유량 조건에 대한 이론식이 없어 나선식 유입구에서 사용되는 최대 설계유량( $Q_m$ )을 이용해 유입유량 조건을 검토했다. 기존 나선식 유입구에 대한 이론식으로 계산한 최대 설계 유량은 0.0135 m<sup>3</sup>/s로 실험 유량이 최대 설계 유량을 초과하였지만, 유입효율이 안정적으로 유지되는 것으로 보아 다단식 구조가 도입됨으로 인해 나선식 유입구의 유입효율이 향상된 것으로 판단된다. 공기공동 최소 단면적( $A_{am}$ )의 경우, 저유량 유입조건에서 다단식 나

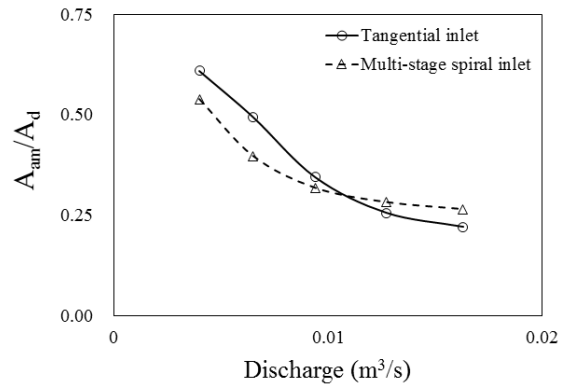


Fig. 11. Comparisons of  $A_{am}/A_d$  according to inlet structures

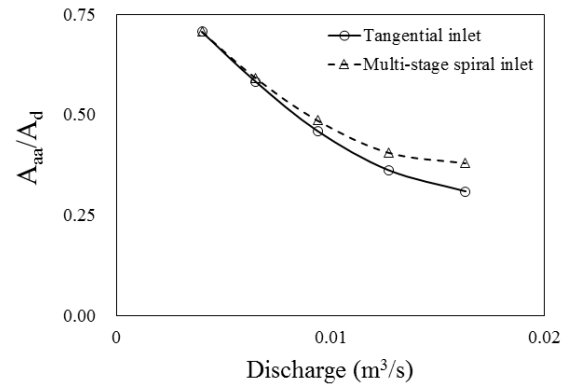


Fig. 12. Comparisons of  $A_{aa}/A_d$  according to inlet structures

선 유입구가 접선식 유입구보다 평균 13% 감소하지만, 유량이 증가할수록 접선식 유입구보다 최대 20% 증가한다(Fig. 11). 전체 평균 단면적( $A_{aa}$ )은 10% 정도 확대되어 고유량 유입조건에서 접선식 유입구보다 공기 배출 효과 및 유입효율이 높은 것으로 확인된다(Fig. 12).

#### 4.2 공기공동 면적과 유량과의 관계

본 연구에서 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형을 적용한다는 가정 아래 유입유량에 따른 수직갱 내부 위치별 공기공동 형상을 예측하기 위한 경험식을 도출했다. 유입유량과 공기공동의 발생 위치, 공기공동의 단면적에 관한 경험식 산정을 위해 유입유량을 Froude 수( $Fr$ )로 무차원화하고 공기공동의 발생 위치( $z$ )와 공기공동의 단면적( $A_a$ )을 유입부 폭 ( $B$ )으로 무차원화했다. 접선식 유입구의 경우, 주요 성능이 급격하게 저감되는 흐름 제어점 유량( $Q_c$ ) 이상의 최대유량 조건은 제외했다. 접선식 유입구의 공기공동 면적에 대한 경험식( $A_{at}$ )은 Eq. (6)과 같으며, 다단식 나선 유입구의 공기공동 면적에 대한 경험식( $A_{am}$ )은 Eq. (7)과 같다.

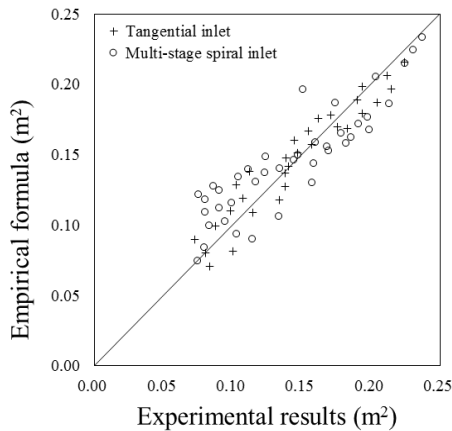


Fig. 13. Comparison of the empirical formula results and the measurements

$$A_{at} = B^2 \left( 0.42 - 0.38 Fr - 0.03 \frac{z}{B} \right), \tag{6}$$

in  $Q < 0.0133 m^3/s (= Q_c)$

$$A_{am} = B^2 \left( 0.07 + 0.38 Fr - 0.03 \frac{z}{B} \right) \tag{7}$$

Eq. (6)과 Eq. (7)을 이용한 계산값과 측정값을 비교한 결과, 접선식 유입구에서 실험 계측 결과를 기준으로  $\pm 8.4\%$  오차 범위 안에서 유사한 경향을 나타냈으며, 다단식 나선 유입구에서는  $\pm 15.7\%$  오차 범위 안에서 유사한 경향을 나타냈다 (Fig. 13). 도출된 경험식은 본 연구에서 사용된 유입구 형상에 적용 가능하다는 한계점이 있으며, 접선식 유입구의 경우 흐름 제어점 유량과 자유 배수 유량 조건을 함께 고려해야 한다. 다단식 나선 유입구에서는 나선식 구조로 인해 와류 흐름이 강하게 발생하는 유입구 낙차부와 수직관이 만나는 접합부 부근에서 오차가 가장 크게 나타났다.

### 5. 결론

지하공간을 활용한 수방시설에서 지하유입구로 가장 많이 사용되고 있는 와류식 유입구의 대표적 형상인 접선식 유입구와 나선식 유입구에 대한 공기 배출 효과를 분석했다. 나선식 유입구의 경우, 저유량 유입조건에서 와류 흐름 유도 효과가 감소하며, 이를 개선하기 위해 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입한 다단식 나선 유입구를 사용했다. 공기 배출 효과 분석을 위해 유입유량에 따라 발생하는 수직갱 내부 수벽 두께를 계측하고 공기공동의 형상 및 크기를 분석했다. 공

기공동의 최소 단면적( $A_{am}$ )은 저유량 유입조건에서 다단식 나선 유입구가 접선식 유입구보다 평균 13% 작게 나타났지만, 고유량 유입조건에서는 최대 20% 크게 나타났다. 전체적인 평균 단면적( $A_{aa}$ )은 다단식 나선 유입구가 접선식 유입구보다 10% 정도 크게 나타나 고유량 유입조건에서 접선식 유입구보다 높은 공기 배출 효과와 유입효율을 나타냈다. 유입구가 가지는 고유 성능을 유지할 수 있는 최대유량 조건을 검토한 결과, 접선식 유입구는 실험 유량이 최대유량 조건을 초과하면서 공기 배출 효과가 감소하기 시작했지만, 다단식 나선 유입구는 모든 실험 유량에서 안정적인 공기 배출 효과를 나타냈다. 고유량 유입시설에 활용할 경우, 다단식 나선 유입구가 접선식 유입구보다 질식 위험성이 낮고, 유입효율 개선에 효과적이다. 또한, 본 연구에서 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형에 적용 가능한 유입유량-공기공동 단면적에 관한 실험식을 도출해 동일한 모형을 사용하거나 유사 모형을 사용할 경우 활용 가능한 기초자료를 제공했다. 지하 유입시설의 공기공동 연구는 현재까지 구체적인 기본이론이 확립되지 않은 상태이며, 공기공동의 형성 및 소멸에 따른 유입효율 변동과 유입구 범람 등 잠재적 위험성을 내포하고 있어 공기공동 발생 메커니즘과 유입효율에 대한 영향 분석 연구는 매우 중요한 부분이다. 계측이 어려운 지하유입시설의 구조적 특징과 함께 다양한 설계조건을 반영한 실험적 연구에는 물질적/시간적 한계가 있기에, 본 연구를 비롯해 향후 공기공동 연구 분야의 수치해석적 방법 적용을 위한 실험적 검증 자료의 확보가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구개발사업의 연구비지원(17CTAP-C095650-03)에 의해 수행되었습니다.

### References

Drainage Services Department (DSD). (2003). *Stormwater drainage master plan study in northern Hong Kong Island - Executive summary*. The Government of Hong Kong Special Administrative Region, Drainage Services Department, Hong Kong.

Drioli, C. (1947). "Su un particolare tipo di imbocco per pozzidi scarico." *L'Energia Elettrica*, Vol. 24, No. 10, pp. 447-452.

Giudice, G. D., and Gissoni, C. (2011). "Vortex dropshaft retrofitting: case of Naples city (Italy)." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 6, pp. 804-808.



- Hager, W. H. (1999). *Wastewater Hydraulics*. Springer, Berlin, New York, USA.
- Jain, S. C. (1984). "Tangential vortex-inlet." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 12, pp. 1683-1699.
- Jain, S. C., and Ettema, R. (1987). *Swirling flow problems at intakes - Vortex-flow intakes*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 125-137.
- Jevdjovich, V., and Levin, L. (1953). "Entrainment of air in flowing water and technical problems connected with it." *Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention*, ASCE.
- Mulligan, S., Casserly, J., and Sherlock, R. (2016). "Effects of geometry on strong free-surface vortices in subcritical approach flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142, No. 11, 04016051.
- Oh, J. O., Park, J. H., Park, C. K., and Jun, S. M. (2016). "Hydraulic stability evaluation for deep tunnel on continuous precipitation." *Proceedings of Korea Water Resources Association*, Daejeon, Korea, p. 99.
- Park, S. W., Kim, H. J., and Rhee, D. S. (2016). "Hydraulic analysis of air-core patterns with various discharge and improving inlet part of the underground bypass model." *Proceedings of Korea Water Resources Association*, Daejeon, Korea, p. 369.
- Quick, M. (1990). "Analysis of spiral vortex and vertical slot vortex drop shafts." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 309-325.
- Seong, H., Park, I., and Rhee, D. S. (2018). "Study of hydraulic characteristics with the shape of the intake of an underground inflow facility using hydraulic experiments", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 33, No. 4, pp. 119-126.
- Szirtes, T. (2007). *Applied dimensional analysis and modeling*. Elsevier, Burlington, Massachusetts, USA.
- Vischer, D. L., and Hager, W. H. (1995). *Energy dissipators - Vortex drops*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, Taylor & Francis, New York, USA, pp. 167-181.
- Yu, D., and Lee, H. W. (2009). "Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 3, pp. 164-174.
- Zhao, C. H., Zhu, D. Z., ASCE, M., Sun, S. K., and Liu, Z. P. (2006). "Experimental study of flow in a vortex drop shaft." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 1, pp. 61-68.