

# 수리실험을 이용한 지하유입시설 유입구 형상에 따른 수리학적 특성 분석

성호제 · 박인환 · 이동섭<sup>†</sup>

한국건설기술연구원 복합재난대응연구단

(2018. 7. 20. 접수 / 2018. 8. 14. 수정 / 2018. 8. 20. 채택)

## Study of Hydraulic Characteristics with the Shape of the Intake of an Underground Inflow Facility using Hydraulic Experiments

Ho Je Seong · In Hwan Park · Dong Sop Rhee<sup>†</sup>

Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received July 20, 2018 / Revised August 14, 2018 / Accepted August 20, 2018)

**Abstract :** In recent years, as flood damage caused by heavy rains increased, the great-depth tunnel using urban underground space is emerging as a countermeasure of urban inundation. The great-depth tunnel is used to reduce urban inundation by using the underground space. The drainage efficiency of great-depth tunnel depends on the intake design, which leads to increase discharge into the underground space. The spiral intake and the tangential intake are commonly used for the inlet facility. The spiral intake creates a vortex flow along the drop shaft and reduces an energy of the flow by the wall friction. In the tangential intake, flow simply falls down into the drop shaft, and the design is simple to construct compared to the spiral intake. In the case of the spiral intake, the water level at the drop shaft entrance is risen due to the choking induced by the flowrate increase. The drainage efficiency of the tangential intake decreases because the flow is not sufficiently accelerated under low flow conditions. Therefore, to compensate disadvantages of the previously suggested intake design, the multi-stage intake was developed which can stably withdraw water even under a low flow rate below the design flow rate. The hydraulic characteristics in the multi-stage intake were analyzed by changing the flow rate to compare the drainage performance according to the intake design. From the measurements, the drainage efficiency was improved in both the low and high flow rate conditions when the multi-stage inlet was employed.

**Key Words :** underground inflow facility, hydraulic characteristics, spiral intake, tangential intake, multi-staged intake

### 1. 서론

최근 기후변화로 인한 집중호우의 발생빈도 증가와 급격한 도시화로 인한 도시지역의 불투수면적의 증가로 홍수 시 유출량 증가 및 도심지 내수배제능력의 부족으로 도심침수 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 도심지 침수피해 저감을 위해 홍수 시 지하공간 침수 해석 및 저감 시설 개발 등 도심침수 방지에 대한 관심이 높아지고 있으며<sup>9,10)</sup>, 인구와 시설이 집중되어 있는 도심지에서 경제적이고 효율적인 침수방지 대책으로 지하공간을 활용하는 대심도터널이 급부상하고 있다. 대심도터널의 지하유입시설은 유입부(approach channel)와 유입구(intake), 수직갱(drop shaft)으로 구분되며, 홍

수 시 초기 홍수량을 신속하게 배제하여 침수피해를 줄이는데 활용된다. 흐름이 지하공간으로 급격하게 유입되는 유입구의 성능에 따라 유량배제 효율에 가장 큰 영향을 받는 구조물로, 최근 대심도터널의 성능 개선을 위해 터널 내 이상류 거동에 대한 분석<sup>1)</sup> 및 다양한 유입구 형상에 대한 설계 방안이 실험적 연구와 수치해석을 통해 연구되고 있다. 지하유입시설의 유입구는 고유량의 흐름을 높은 낙차로 지하공간에 신속하게 유입시키는 구조로 가장 일반적인 유입구 형상으로는 낙하식 유입구(drop intake)와 와류식 유입구(vortex intake) 형상을 가진다<sup>6)</sup>. 낙하식 유입구는 유입부에서 흐름이 유입되면 수직으로 바로 낙하시키는 구조물로 낙하 흐름이 분산되지 않아 공기 혼입이 많고 낙하지

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dong Sop Rhee, Tel : +82-31-910-0396, E-mail : dsrhee@kict.re.kr

Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea

점에서 충격이 크게 발생한다. 와류식 유입구는 유입부에서 형성된 흐름을 수직갱 낙차부에서 와류 흐름으로 변화시키는 구조물이다. 낙차부에서의 와류 흐름은 벽 마찰에 의해 소산되어 초기 운동에너지의 일부만 남게 되고 수직갱 하단부에 이르기 전 안정적으로 소산된다<sup>3,14)</sup>. 와류식 유입구는 Drioli에 의해 처음 적용되었으며, 현재 대심도터널과 지하저류조 등 많은 분야에 적용되고 있다<sup>2)</sup>. 와류식 유입구의 대표적인 형상으로는 나선식(spiral), 접선식(tangential) 등이 있으며 각 형상에 대한 일반적 특성은 Vischer & Hager와 Jain & Ettema에 의해 제시되었다<sup>7,12)</sup>.

나선식 유입구는 수직갱 낙차부와 수직갱의 벽면 마찰을 이용해 흐름에너지를 감소시키는 주요 특징을 가지고 있으며, 현재 가장 일반적으로 많이 이용되고 있는 유입구 형상이다. 유입구 바닥의 외측 또는 중앙선을 따라 일정한 경사를 주어 사류 유입 흐름을 안정적으로 유도함으로써 유량배제 효율을 높이는 형상으로, 상류 흐름에 대해서는 일반적으로 안내벽(guiding wall)이 없는 형태가 사용되나 사류 흐름이 유입되거나 유입 유량이 많아지는 경우 수직갱 내 공기 배출을 위한 공기공동(air-core)을 효과적으로 형성시키기 위해 안내벽을 설치하게 된다. 나선식 유입구 설계 시에는 기본적으로 유입구의 형상과 수직갱을 따라 발달된 흐름의 수리학적 특성을 주요 사항으로 고려하여야 되는데, 해석상의 어려움으로 인해 수직갱 벽면을 따라 흐르는 흐름 특성은 주로 모형실험을 통해 연구되었다. Giudice & Gisonni가 상류와 사류, 모든 흐름에서 나선식 유입구를 적용할 수 있는 새로운 설계 기준을 제안하였으며, Mulligan 등은 나선식 유입구를 설계하기 위해 와류흐름에서의 유입효율에 대한 실험식을 제시하였다<sup>4,10)</sup>.

접선식 유입구는 구조가 단순하며, 나선식 유입구에 비해 크기가 작은 것이 특징이다. Jevdjevic & Levin이 처음 제안한 것으로 알려져 있으며, 다양한 실험 연구를 통해 수리학적 특징과 설계방법이 제시되었다<sup>8)</sup>. Jain & Ettema는 에너지가 보존된다는 가정 하에 접선식 유입구의 수위-유량관계를 도출하였으며, 모형실험 결과와 비교하여 적합성을 검증하였다<sup>7)</sup>. Zhao 등은 와류 흐름의 두께와 에너지 소산을 분석하기 위해 공기 유입 속도를 측정하여 접선식 유입구의 성능을 평가하였으며, Yu & Lee는 모형실험을 통해 접선식 유입구의 안정된 흐름을 보장하기 위한 설계조건을 제시하였다<sup>13,14)</sup>. 이와 같은 연구는 접선식 유입구의 설계 유량에서 안정적인 와류 형성을 유도하기 위한 것으로, 설계 유량보다 작은 유량이 유입 될 경우 수직갱 내부에서 와류가 제대로 형성되지 못하고 바로 낙하하는 흐름이 형성되

는 단점이 있다. 이 경우 흐름에너지가 소산되지 않고 수직갱 하부에서 직접적인 충격을 주어 구조물 파손 등의 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 유입유량에 변화를 주어 나선식 유입구에서 바닥경사와 안내벽 각도 변화에 따른 유입구의 수리학적 특성과 접선식 유입구의 수리학적 특성을 검토한 후, 저유량에서도 안정적인 와류 흐름이 형성될 수 있도록 기존의 단단면인 형태인 접선식 유입구 바닥을 복단면으로 변경하여 새로운 형상의 다단식 유입구를 제안하였다. 새롭게 제안된 복단면 형상의 다단식 유입구의 수리학적 특성을 분석하고 나선식 유입구와 접선식 유입구와 비교하여 유입구 형상에 따른 수리학적 성능을 검토하였다.

## 2. 유입구 형상의 이론적 배경

### 2.1 나선식 유입구(spiral intake)

나선식 유입구는 유입 흐름이 낙차부와 수직갱 벽면을 따라 나선형으로 흐르는 구조물로 벽면의 마찰을 이용하여 흐름에너지를 소산시키는 것이 주요 특징이다. 기존의 낙하식 유입구와 비교하였을 때 흐름 유입이 안정적이며 공기가 쉽게 배출되기 때문에 일반적인 낙하식 유입구에 비해 유량배제에 유리하다. 나선식 유입구는 5~10 m 이상의 높은 낙차에 적용 가능하며 유입부에서의 흐름은 안정적인 상류( $Fr < 0.7$ ) 또는 안정적인 사류( $Fr > 1.5$ )로 유입되어야 한다. 나선식 유입구의 설계 시에는 기본적으로 유입구의 제원과 수직갱을 따라 발달된 흐름의 수리학적 특성, 흐름의 공기연행 특성을 고려하여야 하지만, 해석상의 어려움으로 수직갱 벽면을 따라 흐르는 흐름의 수리학적 특성과 공기연행 특성은 주로 모형실험을 통해 연구되었다<sup>12)</sup>. Hager는 Fig. 1에서와 같이 나선식 유입구의 기초 설계 이론을 확립하였다<sup>3)</sup>. Hager의 기초 설계이론으로부터 나선식 유입구에서 주요제원은 다음과 같이 결정된다.

$$R_1 = (a + R + s + d)/2, \quad e_1 = a - R_1 \quad (1)$$

$$R_2 = (2R + s + d)/2, \quad e_2 = R + s + d - R_2 \quad (2)$$

$$R_3 = (a + R + s - b)/2, \quad e_3 = a - b - R_3 \quad (3)$$

$$R_4 = R + s, \quad s_1 = a - b - R \quad (4)$$

여기서  $d$ 는 유입부와 나선부 경계면에 대응하는 반대편 나선부의 폭이며, 상기식의 적용범위는 다음과 같다.

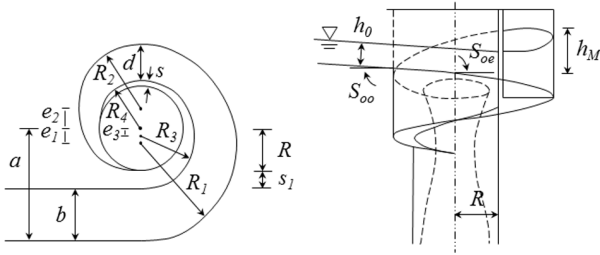


Fig. 1. Structures and main variables of spiral intake.

$$(R + s + d) \leq a \leq (3R + s) \quad (5)$$

$$0.8R \leq b \leq 2R \quad (6)$$

$$0.8R \leq d \leq 2R \quad (7)$$

나선부의 흐름방향 경사  $S_{oe}$ 는 유입부의 경사  $S_{oo}$ 보다 커야하며, 약 10~20% 정도의 경사가 적당하고 30% 경사가 상한선이다. 유입부 접근 흐름이 상류인 경우, 낙차부에서 흐름 질식현상(choking)이 발생하지 않는 최대 설계유량  $Q_M$ 은 다음과 같다.

$$Q_M = 4R^3 \left( \frac{5g}{b} \right)^{1/2} \quad (8)$$

접근 흐름이 상류인 경우, 나선부에서 수위가 점차 떨어지지만, 접근 흐름이 사류인 경우에는 나선부에서 충격파가 발생하여 수위가 상승한다. 이때 최대 수위  $h_M$ 은 다음과 같다.

$$\frac{h_M}{R_1} = \left[ \frac{\sqrt{2} Q}{(gbh_o R_1^3)^{1/2}} - \frac{1}{2} S_{oc} \right] (1.1 + 0.15 Fr_o) \quad (9)$$

## 2.2 접선식 유입구(tangential intake)

접선식 유입구는 바다 경사가 시작되는 지점에서 유입부의 폭이 점차 줄어들면서 낙차부에서 폭이 최소가 되어 자연스럽게 와류 흐름을 유도하는 형상이다. 나선식 유입구에 비해 유량배제 효율이 떨어지고 수직갱에서 흐름 질식현상이 발생할 가능성이 다소 높은 단점이 있지만, 구조가 간단해 시공이 간편하고 상대적으로 차지하는 지하공간 규모가 작기 때문에 경제성을 가지고 있다는 장점이 있다. 접선식 유입구의 주요변수는 Fig. 2와 같이 유입부의 폭  $B$ , 바닥 경사각  $\beta$ , 유입각  $\theta$ , 수직갱의 직경  $D$ 가 있다. 유입유량이 작은 경우 section 1을 기준으로 유입부 흐름과 유입구 흐름은 각각 사류 흐름과 한계류 흐름을 형성한다. 유입유량

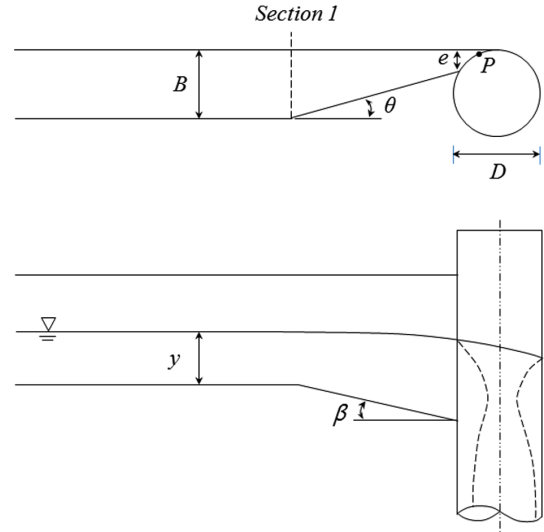


Fig. 2. Structures and main variables of tangential intake.

이 점차 커지면서 section 1은 잠기계 되고, 유입부와 유입구 내부 흐름은 모두 상류 흐름을 형성하고, 낙차부에서의 수심은 한계 수심을 형성한다. 이 때 낙차부 흐름의 비에너지( $E_j$ )는 다음과 같다.

$$E_j = \frac{3}{2} \left[ \left( \frac{Q}{e} \right)^2 \right]^{1/3} (\cos\beta)^{2/3} \quad (10)$$

여기서  $Q$ 는 유입유량이며,  $e$ 는 낙차부의 폭,  $\beta$ 는 바닥 경사각,  $g$ 는 중력가속도이다.

접합부에서의 수두 손실을 무시할 수 있다면,  $E_j$ 는 접근 수로에서의 비에너지 대하여 다음과 같은 무차원 식으로 변형된다.

$$y_* + \frac{1}{2y_*^2} = E_* \quad (11)$$

$$y_* = y/y_c \quad (12)$$

$$E_* = \frac{3}{2} (B \cos\beta / e)^{2/3} - z_* \quad (13)$$

$$z_* = z/y_c \quad (14)$$

$$y_c = \sqrt[3]{(Q/B)^2 / g} \quad (15)$$

여기서  $y$ 는 유입부의 등류 수심이며,  $y_c$ 는 유입부의 한계 수심,  $z$ 는 지점 P에서의 유입부 바닥과 수면의 높이 차를 나타낸다.

### 3. 수리실험

#### 3.1 실험장치 및 유입구 모형 제작

본 연구에서는 나선식 유입구와 접선식 유입구, 저유량에서도 와류 흐름을 유도할 수 있도록 새롭게 제안한 다단식 유입구 형상에 대해 유입유량에 따른 유입구의 수리학적 특성을 분석하고자 아크릴을 사용하여 유입부와 각 유입구 형상, 수직갱 부분을 제작하여 실험장치를 구성하였다. 유량공급을 위해 저수조와 수중펌프를 설치하였으며, 공급된 유량은 수직갱을 통해 다시 저수조로 유입되는 순환식 구조를 가지고 있다 (Fig. 3).

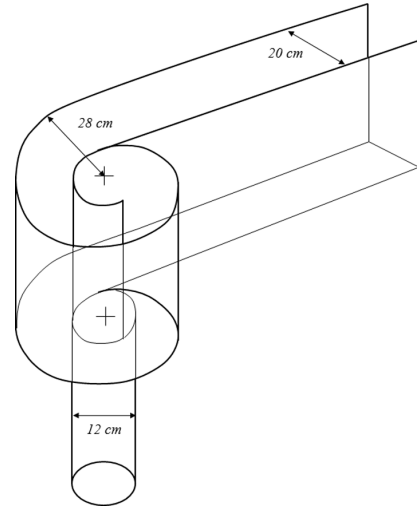


Fig. 3. Experimental model.

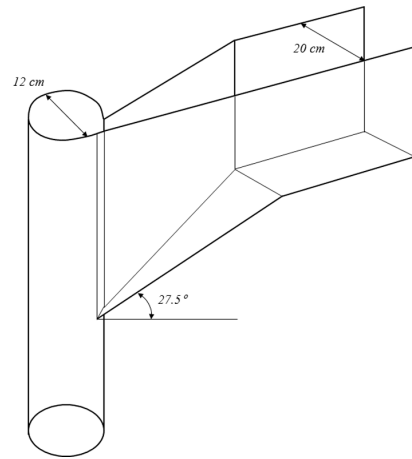
나선식 유입구는 바닥경사가 다른 4개의 모형을 제작하였으며, 각 모형은 유도벽 각도에 변화를 줄 수 있도록 설계되었다. 접선식 유입구는 바닥면이 하나의 종경사만을 가지는 1개의 모형을 제작하였으며, 다단식 유입구는 접선식 유입구와 동일하게 바닥 경사부에서 유입부 폭이 점차 좁아지며 수직갱 내 와류 흐름을 유도하는 형상을 가지고 있지만, 바닥 경사부에 각 단의 경사가 다른 3단의 계단식 바닥을 도입하여 저유량에서도 가장 낮은 단으로 와류 흐름이 유도될 수 있도록 설계하였다. 각 단은 흐름 방향 우안에서부터 첫 번째 단이 접선식 유입구와 동일한  $27.50^\circ$ , 두 번째 단이  $22.78^\circ$ , 마지막 세 번째 단이  $17.71^\circ$ 의 바닥경사를 가진다 (Fig. 4). 각 모형에 대해 유입유량과 바닥경사, 유도벽 각도의 변화에 따른 유입구에서의 수리학적 특성을 분석하기 위해 유입구 내 수위를 측정하였다.

#### 3.2 실험조건 및 측정방법

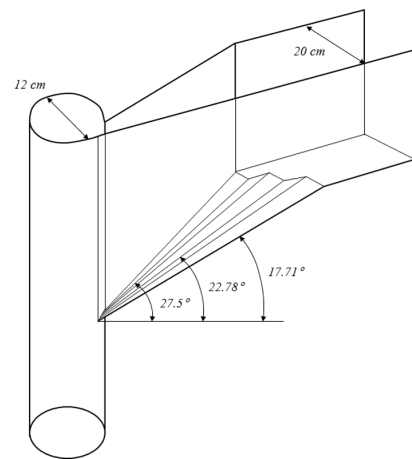
나선식 유입구는 앞 절에서 언급한 바와 같이 바닥 경사가 다른 4개의 모형에 각각 유도벽을 설치하여 바닥경사와 유입유량, 유도벽 각도 변화에 따른 유입구의 수위 변화를 측정하였으며, 접선식 유입구는 바닥 경사가 일정한 1개의 모형에 대해 유입유량 변화에 따른 유입구 수위 변화를 측정하였다. 다단식 유입구는 3개의 경사로 구성된 3단의 계단식 바닥면에 대해 유입



(a) Spiral intake



(b) Tangential intake



(c) Multi-staged intake

Fig. 4. Intake model with the shape.

유량 변화에 따른 유입구 수위 변화를 측정하였으며, 각 형상별 유입유량에 따른 수위 변화와 낙차부 최대

Table 1. Experimental conditions

Experimental condition	Spiral	Tangential	Multi-staged
Inflow flow ( $Q$ , $m^3/s$ )	0.004, 0.007, 0.010, 0.013, 0.016		
Bottom slope (%)	Longitudinal slope	27.50	Left / Center / Right
	5.0, 7.5, 10.0, 12.5		27.50 / 22.78 / 17.71
Guiding wall angle ( $^\circ$ )	0, 30, 90, 150, 210, 270		No guiding wall

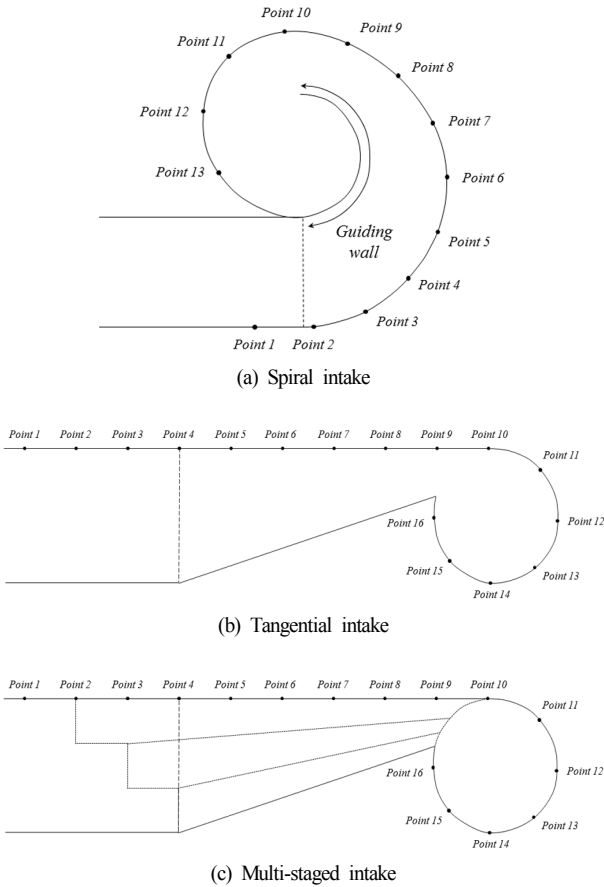


Fig. 5. Water level measurement points of intakes.

수위를 비교해 유입구 형상 변화에 따른 수리학적 특성 변화를 분석하였다. 각 유입구 형상에 따른 실험조건은 Table 1에 나타내었으며, 각 유입구 형상별 수위 측정 지점은 Fig. 5에 나타내었다.

#### 4. 실험결과

##### 4.1 나선식 유입구

바닥경사와 안내벽 각도 변화에 따른 나선식 유입구의 유입구 수리학적 특성 분석 결과, 바닥 경사가 5%

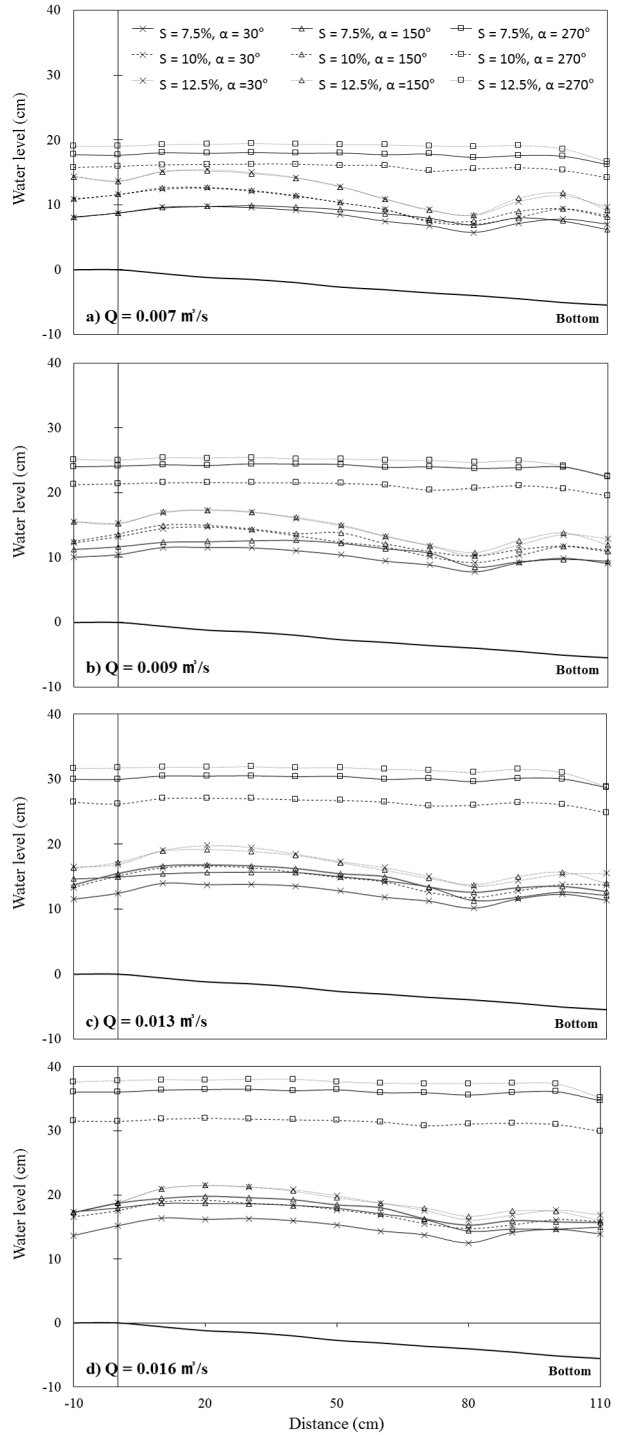


Fig. 6. Water level in the spiral intake with the bottom slope and the guiding wall angle.

에서 10%로 증가함에 따라 안내벽 각도가 210° 이하일 경우에는 유입효율이 감소해 유입구 수위가 증가하고, 안내벽 각도가 270°일 경우에는 유입효율이 증가해 유입구 수위가 감소하는 것으로 나타났다. 바닥경사가 12.5%일 경우에는 모든 조건에 대해 유입효율이 크게

감소하여 유입구 수위가 증가하는 것으로 확인되었다. 안내벽이 설치됨에 따라 낙차부의 통수가능 면적이 감소하기 때문에 유입효율이 떨어지는 것으로 판단되며, 통수가능 면적이 가장 작아지는 270° 안내벽의 경우에는 바닥경사 증가에 따른 유입흐름의 가속화로 유입이 빨라지고 유입효율이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 6에 바닥경사와 안내벽 각도에 따른 유입구 내 수위 변화 경향을 보여줄 수 있는 대표적인 실험 조건을 선택하여 그래프로 나타내었으며, 바닥경사 10%에서 모든 안내벽 각도에 대해 가장 안정된 유입효율을 보여 준다. 저유량의 유입조건에서는 안내벽 각도 변화에 따른 유입효율 변화가 없는 것으로 확인되었으며, 바닥경사가 증가할 경우 오히려 낙차부에서 정체현상이 발생하여 유입효율이 감소하는 것으로 나타났다. 고유량의 유입조건에서는 안내벽의 각도가 증가할수록 유입효율이 조금씩 감소하였지만 안내벽 각도 210°까지는 안정적인 유입 흐름을 유지하면서 안내벽 각도 270°에서 유입효율이 급격하게 감소하여 유입구 수위가 크게 상승하였다.

#### 4.2 접선식 유입구

접선식 유입구의 수리학적 특성 분석 결과, 유입구의 폭이 점차 좁아지며 통수면적이 감소하는 형상 특성으로 인해 유입유량이 증가할수록 낙차부에서 정체현상이 발생하고 수위가 상승하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에 유입유량에 따른 접선식 유입구 내 수위 변화를 나타내었으며, 유입유량이 점차 증감함에 따라 낙차부 정체구간으로 인해 수위가 상승하는 구간이 길어지다 유입유량 0.013 m³/s 부터 안정된 유입 흐름을 형성하고 유입구 경사부-낙차부 구간에서 수위가 감소하며 유입유량을 효율적으로 유출시킨다. 저유량 유입조건인 경우, 폭이 좁아지는 낙차부 구간에서 통수면적 감소로 정체현상이 발생하여 수위가 크게 상승하고 고유량 유입조건에 비해 유입효율이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

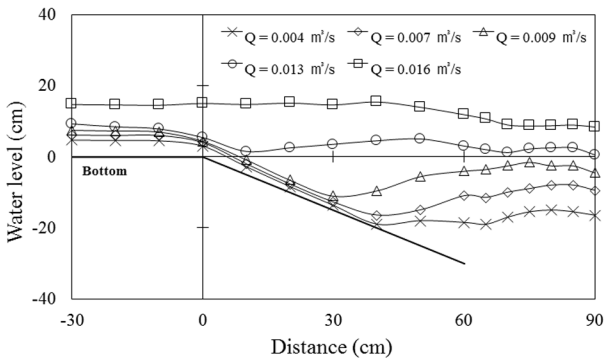


Fig. 7. Water level in the tangential intake with inflow flows.

#### 4.3 다단식 유입구

저유량 유입조건에서 접선식 유입구의 유입효율을 개선하기 위해 새로운 형상의 다단식 유입구를 제안하였으며, 다단식 유입구의 수리학적 특성 분석 결과, 저유량 조건에서 낙차부 정체현상으로 인한 수위상승 현상은 나타나지 않았다. Fig. 8은 유입유량에 따른 다단식 유입구 내 수위 변화를 나타내었으며, 저유량과 고유량 모두 좌안의 가장 낮은 단으로 흐름이 유도되어 원활한 유출 흐름이 유지되었다. 고유량의 경우, 나선식 유입구와 접선식 유입구에 비해 유입구의 수위가 크게 감소된 것을 볼 수 있으며, 이는 유입구 바닥면의 다단식 형상으로 인해 통수가능 면적이 증가하여 유입효율이 증가한 것으로 판단된다. 다단식 유입구에서 목표로 한 저유량 조건에서도 유입구 구간에서 정체현상으로 인한 수위 상승 현상이 거의 나타나지 않는 것으로 보아 저유량에서 안정적인 흐름을 유도하기 위한 설계가 잘 반영된 것으로 볼 수 있다.

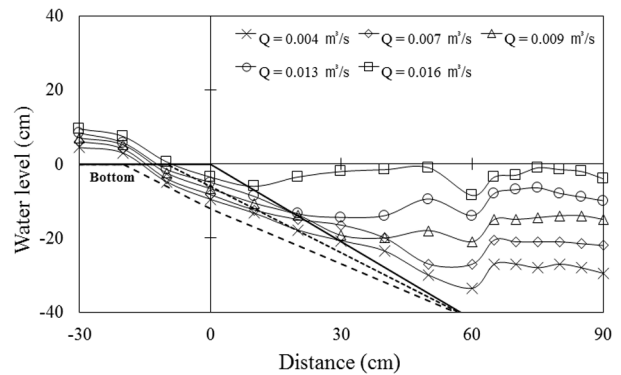


Fig. 8. Water level in the multi-stages intake with inflow flows.

#### 4.4 유입효율 비교

나선식 유입구와 접선식 유입구, 다단식 유입구의 유입구 수위 변화를 분석한 결과, 일반적으로 낙차부에서 정체현상으로 인한 수위 상승 현상이 발생하였다. 유입구 수위와 낙차부 수위 상승 폭을 비교하여 유입구 형상에 따른 유입효율을 확인하고 비교할 수 있지만, 보다 정량적으로 유입효율 성능 차이를 분석하기 위해 각 유입구 형상 별 유입유량과 수위 관계를 무차원변수를 도입하여 검토하였다. 유입유량  $q$ 는 Hager가 수직경 유입구에 대해 제시한 무차원변수  $q$ 를 도입하였으며, 수위  $y$ 는 최초 유입 수위( $h_0$ )와 낙차부 최대 상승 수위( $h_M$ )를 사용하여 다음과 같이 무차원화하였다<sup>4)</sup>.

$$q = Q \sqrt{\frac{b}{gaR^5}} \tag{16}$$

$$y = \frac{h_M}{h_0} \quad (17)$$

Fig. 9에 각 유입구 형상에 따른 무차원변수 유입유량과 수위에 대한 관계를 도시하였다. 나선식 유입구의 경우, 접선식 유입구와 다단식 유입구에 비해 유입구 바닥경사와 안내벽 각도에 따라 최초 유입 수위 대비 최대 상승 수위 변화가 크게 없는 것으로 확인되었다. 접선식 유입구와 다단식 유입구의 경우에는 최초 유입 수위 대비 최대 상승 수위가 오히려 더 낮게 나타나 유입효율이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 접선식 유입구의 저유량 조건에서 나타나는 유입구 정체현상을 해결하기 위해 새로 도입된 다단식 유입구의 유입효율 분석 결과, 유입구 수위가 급격하게 낮아지며 가장 높은 유입효율을 나타냈다.

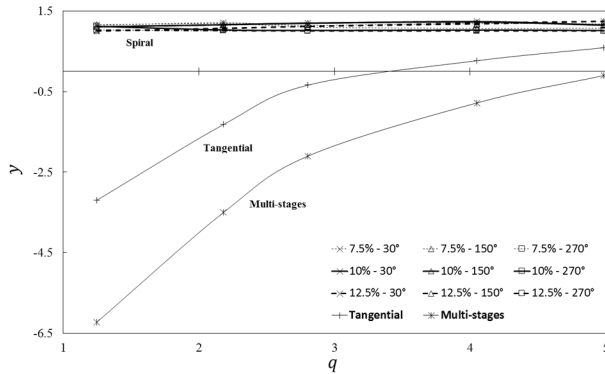


Fig. 9. Function between  $q$  and  $y$  by intake shapes.

## 5. 결론

유입구 형상에 따른 유입구의 수리학적 특성을 분석한 결과, 앞 절에서 언급한 바와 같이 나선식 유입구에서는 바닥경사가 10%를 초과할 경우 유입흐름이 과도하게 증가되어 낙차부에서 정체현상이 발생되며 유입구의 유입효율을 감소시키는 것으로 나타났다. 안내벽 각도가 210°를 초과할 경우에도 낙차부의 통수가능 면적이 급격하게 줄어들어 유입효율이 크게 감소하였다. 지하유입시설 유입구에 나선식 유입구를 적용할 경우, 바닥경사는 10% 이내, 안내벽의 각도는 210° 이내의 범위에서 고려하여야 할 것으로 판단된다. 접선식 유입구의 경우, 저유량 유입조건에서 폭이 점차 좁아지는 유입구 형상으로 인해 정체현상이 쉽게 발생하고 수위가 크게 증가하여 유입효율이 급격하게 감소한다. 유입유량이 점차 증가할수록 안정된 유입흐름을 유지하며 낙차부에서 수위가 감소하며 유입효율이 증가하

는 것으로 보아 접선식 유입구는 고유량의 지하유입시설에 적용하기 적합한 것을 판단된다.

본 연구에서는 나선식 유입구와 접선식 유입구의 수리학적 특성을 검토한 후, 고유량 유입조건에서 유입효율이 좋은 접선식 유입구의 저유량 유입효율을 개선하기 위해 유입구 바닥면 경사가 3단으로 이루어진 다단식 유입구를 새롭게 제안하였다. 새로운 유입구 형상인 다단식 유입구의 수리학적 특성을 분석한 결과, 저유량 조건에서 낙차부의 정체현상으로 인한 수위 상승 현상이 나타나지 않고 원활한 유출 흐름이 유지되는 것을 확인하였다. 다단식 바닥면으로 인한 통수가능 면적의 증가로 저유량 조건에서의 유입효율을 개선함과 동시에 고유량 조건에서도 나선식 유입구와 접선식 유입구에 비해 유입구의 수위가 현저하게 저감되어 기존 유입구 형상 대비 유입효율이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 본 연구에서 새롭게 제안된 다단식 유입구의 경우, 저유량과 고유량 조건에서 모두 적용 가능한 고효율 유입구 형상으로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

**감사의 글:** 본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진 연구개발사업의 연구비지원(17CTAP-C095650-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

- 1) 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.
- 2) C. Drioli, "Su un Particolare Tipo di Imbocco per Pozzidi Scarico", L'Energia Elettrica, Vol. 24, No. 10, pp. 447-452, 1947.
- 3) G. D. Giudice, C. Gisonni and G. Rasulo, "Design of a Scroll Vortex Inlet for Supercritical Approach Flow", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 136, Issue 10, pp. 837-841, 2010.
- 4) G. D. Giudice and C. Gisonni, "Vortex Dropshaft Retrofitting: Case of Naples City, Journal of Hydraulic Research", Vol. 49, Issue 6, pp. 804-808, 2011.
- 5) W. H. Hager, Wastewater Hydraulics, Springer, Berlin, New York, 1999.
- 6) S. C. Jain, "Tangential Vortex-inlet", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, Issue 12, pp. 1683-1699, 1984.
- 7) S. C. Jain and R. Ettema, Swirling Flow Problems at

- Intakes - Vortex-flow Intakes, IAHR Hydraulic Structures Design Manual, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 125-137, 1987.
- 8) V. Jevdjovich and L. Levin, Entrainment of Air in Flowing Water and Technical Problems Connected with it, Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention, ASCE, 1953.
  - 9) S. Kwak, K. Lee, D. S. Rhee and S. Lyu, "A Study on Application of 2-dimensional Flow Models to Inundation on underground Space System", J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 6, pp. 78-84, 2015.
  - 10) S. Mulligan, J. Casserly and R. Sherlock, "Effects of Geometry on Strong Free-surface Vortices in Subcritical Approach Flows, Journal of Hydraulic Engineering", Vol. 142, Issue 11, pp. 1-12, 2016.
  - 11) D. S. Rhee, H. J. Kim and C. G. Song, "Inundation Simulation of underground Space using Critical Dry Depth Scheme", J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 6, pp. 63-69, 2015.
  - 12) D. L. Vischer and W. H. Hager, Energy Dissipators - Vortex Drops, IAHR Hydraulic Structures Design Manual, 9, Taylor & Francis, New York, pp. 167-181, 1995.
  - 13) D. Yu and H. W. Lee, "Hydraulics of Tangential Vortex Intake for Urban Drainage", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 135, Issue 3, pp. 164-174, 2009.
  - 14) C. H. Zhao, D. Z. Zhu, S. K. Sun and Z. P. Liu, "Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft, Journal of Hydraulic Engineering", Vol. 132, Issue 1, pp. 61-68, 2006.