



An experimental investigation of flow characteristics in the tangential and the multi-stage spiral inlets

Seong, Hoje^a · Rhee, Dong Sop^b · Park, Inhwan^{c*}

^aResearch Specialist, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^bResearch Fellow, Multi Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^cSenior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 19-001

Received: 2 January 2019; Revised: 14 February 2019; Accepted: 14 February 2019

Abstract

The vulnerability of urban disasters is increased with the rapid urbanization and industrialization, and the extreme rainfall event is increased due to the global climate change. Urban inundation is also increased due to the extreme rainfall event beyond the capacity limit of facility for the damage prevention. The underground detention vault and the underground drain tunnel are rapidly being utilized to prevent urban inundation. Therefore, the hydraulic review and design analysis of the inlet of the underground facility are important. In this study, the water level of the approach flow according to the inflow discharge is measured and the flow characteristic of the inlet (tangential and spiral) is analyzed. For the spiral inlet, the multi-stage is introduced at the bottom of the inlet to improve the inducing vortex flow at low discharge conditions. In case of the tangential inlet, the discharging efficiency is decreased rapidly with hydraulic jump in the high flow discharge. The rising ratio of the water level in the multi-stage spiral inlet is higher than the tangential inlet, but the stable discharging efficiency is maintained at low and high discharge conditions. And the empirical formula of water level-flow discharge is derived in order to utilize inlets used in this study.

Keywords: Underground drain tunnel, Tangential inlet, Multi-stage spiral inlet, Flow characteristic

접선식 및 다단식 나선 유입구 흐름 특성의 실험적 연구

성호제^a · 이동섭^b · 박인환^{c*}

^a한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원, ^b한국건설기술연구원 복합재난대응연구단 연구위원,

^c한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

요 지

급격한 도시화와 산업화로 도심 재난 취약성이 증가하고, 전 세계적인 기후변화로 인한 극한 강우사상의 발생빈도가 증가하고 있다. 기존 방재시설의 용량한계를 넘어서는 극한 강우사상의 발생으로 도심 지역의 침수피해 또한 증가하고 있다. 도심 침수피해를 예방하기 위해 지하공간을 활용한 지하저류 시설과 지하배수터널 활용이 급부상하고 있으며, 강우가 유입되는 지하유입구에 대한 수리학적 검토를 통한 성능 분석이 중요하다. 본 연구에서는 지하 유입구로 활용되고 있는 접선식(tangential) 유입구와 나선식(spiral) 유입구에 대해 유입유량 변화에 따른 유입부 수위를 예측하고 흐름 특성 변화를 분석했다. 나선식 유입구의 경우, 저유량 조건에서의 와류 유도 효과를 개선하기 위해 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입했다. 접선식 유입구에서는 고유량 유입조건 아래 도수(hydraulic jump)가 발생하며 유량 배제 효과가 급격하게 감소했다. 다단식 나선(multi-stage) 유입구의 경우, 접선식 유입구보다 유입유량 증가에 따른 수위 상승률은 높지만 저유량 및 고유량 유입조건에 대해 안정적인 유량 배제 효과를 유지했다. 또한, 실험에서 사용된 유입구 모형이 활용될 수 있도록 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형에 대한 수위-유량 관계 실험식(empirical formula)을 제시했다.

핵심용어: 지하배수터널, 접선식 유입구, 다단식 나선 유입구, 흐름 특성

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

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

1. 서론

급격한 도시화와 산업화로 인한 난개발로 도심 재난 취약성이 증가하고, 전 세계적인 기후변화로 인해 극한 강우사상의 발생빈도가 증가하고 있다. 도심 지역의 경우 재해 예방을 위한 방재시설의 설계기준을 새롭게 개선하고 있지만, 시설의 용량 한계를 넘어선 극한 강우사상 발생으로 인한 배수능력 부족으로 침수피해가 증가하고 있다. 이처럼 인구 밀도가 높은 도심 지역에서 침수피해를 방지할 수 있는 가장 효과적인 방법은 집중폭우로 발생하는 많은 양의 강우를 일시에 저장하거나 배출하는 것이다. 이러한 방법은 기존 배수 시스템의 개선 작업보다 경제적 효과가 훨씬 높게 나타난다(DSD, 2003). 일시에 많은 양의 강우를 저장하거나 배출하는 방법으로는 지하공간을 활용한 지하저류시설과 지하배수터널 기술이 급부상하고 있다. 지상에서 지하로 많은 양의 물을 이동시키기 위해 유입부와 수직갱(drop shaft)으로 구성된 지하유입구를 사용하고 있으며, 강우 유출수의 효율적 배수를 위한 지하유입구의 수리학적 검토 및 설계는 매우 중요한 부분이다. 지하유입구의 일반적인 형상은 낙하식(plunge flow) 유입구와 와류식(vortex flow) 유입구로 구분된다(Jain, 1984). 낙하식 유입구에서 유입부는 유입 흐름을 수직갱으로 유도하는 역할을 하며 수직갱은 물이 배출되는 통로 역할을 한다. 와류식 유입구에서 유입부는 유입 흐름을 안정적으로 배출하고자 와류 흐름 발생을 유도하며 물이 수직갱 벽을 따라 흘러내려 가며 벽 마찰로 인해 흐름이 가진 에너지가 소산되도록 한다. 와류식 유입구는 Drioli (1947)에 의해 처음으로 제안되었으며 일반적으로 낙하식 유입구보다 에너지 소산 및 유입 성능이 우수한 것으로 알려져 있다.

와류식 유입구의 대표적인 형상으로는 접선식(tangential)과 나선식(spiral) 유입구가 있으며 현재 지하저류조와 지하터널 등 많은 분야에서 활용되고 있다(Jain and Ettema, 1987; Vischer and Hager, 1995). 접선식 유입구는 유입부 바닥면에 경사를 도입해 유입 흐름을 가속시키고 유입효율을 높이는 형상으로 나선식 유입구보다 구조가 단순하고 크기가 작다. 접선식 유입구는 Jevdjevic and Levin (1953)이 처음으로 제안했으며, 다양한 실험적 연구를 통해 수리학적 특성과 설계 방법을 제안했다. 유입유량이 설계 유량보다 작을 경우, 와류 흐름이 유입구에서 제대로 형성되지 못한 채 수직갱을 통해 유출되는 단점이 있으며, 유입구에서 안정적인 와류 흐름 형성을 유도하기 위한 다양한 연구가 수행됐다. Jain and Ettema (1987)는 에너지가 보존된다는 가정 아래에서 접선식 유입구의 수위-유량 관계를 도출했으며, Zhao *et al.* (2006)은 상대적으로 짧은 유입부를 가진 접선식 유입구의 흐름 특성을 분석

해 유입 성능을 평가했다. Lee *et al.* (2006)이 수행한 연구에 따르면 특정 유입조건에서 유입구 도수(hydraulic jump)가 발생하고 수위가 급격하게 높아지는 범람(overflow) 문제가 발생할 수 있다는 것을 확인했다. Yu and Lee (2009)는 모형실험을 통해 접선식 유입구의 안정된 흐름을 유지하기 위한 설계조건을 제시했으며, Kim *et al.* (2012)은 수치해석을 이용해 접선식 유입구의 흐름 특성을 분석했다. 도심도터널을 활용한 신월빛물저류배수시설이 국내(양천구 신월동)에 시공됨에 따라 Park *et al.* (2017)은 모형실험을 통해 지하유입시설에 적용될 접선식 유입구에 대한 유입특성을 분석했다. 나선식 유입구는 낙차부의 나선 구조로 인해 접선식 유입구보다 유입부 구간에서 안정된 와류 흐름을 유도하고, 수직갱으로 유입된 흐름 또한 관 벽을 따라 수벽을 이루며 와류 형태로 유출된다(Jain and Ettema, 1987; Vischer and Hager, 1995). 나선식 유입구의 설계 시에는 기본적으로 유입구의 형상과 수직갱을 따라 형성된 흐름의 수리학적 특성을 주요 사항으로 고려해야 한다. Quick (1990)은 나선식 유입구에 대한 효율적인 설계조건을 찾기 위해 수위-유량 관계에 대한 연구를 수행했으며, Rhee and Kim (2007)은 모형실험을 통해 나선식 유입구의 수위-유량 관계를 검토했다. Giudice and Gisonni (2011)는 상류와사류, 모든 흐름에서 나선식 유입구를 적용할 수 있는 새로운 설계기준을 제안했으며, Mulligan *et al.* (2016)은 나선식 유입구에 대한 와류 흐름에서 유입효율에 대한 실험식을 제시했다.

지하유입구의 주요 성능은 최소한의 수위 증가로 최대한의 유량배제를 달성하는 것으로, 지하유입구의 성능을 평가할 경우 고려해야 할 중요한 요소는 유입부 수위에 따른 흐름 특성 변화이다. 본 연구에서는 와류식 유입구의 대표적 형상인 접선식 유입구와 나선식 유입구에 대한 성능 평가를 위해 유입유량 변화에 따른 유입부 수위 변화를 분석했다. 나선식 유입구의 경우, 저유량 유입조건에서 와류 유도 효과가 저감되는 부분을 개선하기 위해 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입한 다단식 나선(multi-stage spiral) 유입구를 사용했다. 또한, 수위 계측 결과를 기초로 실험에 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형에 적용 가능한 수위-유량 관계에 대한 실험식(empirical formula)을 도출했다.

2. 기본이론

2.1 접선식 유입구

접선식 유입구는 유입부 바닥면에 경사를 도입해 유입 흐름을 가속시키고 유입효율을 높이는 형상으로, 바닥 경사가

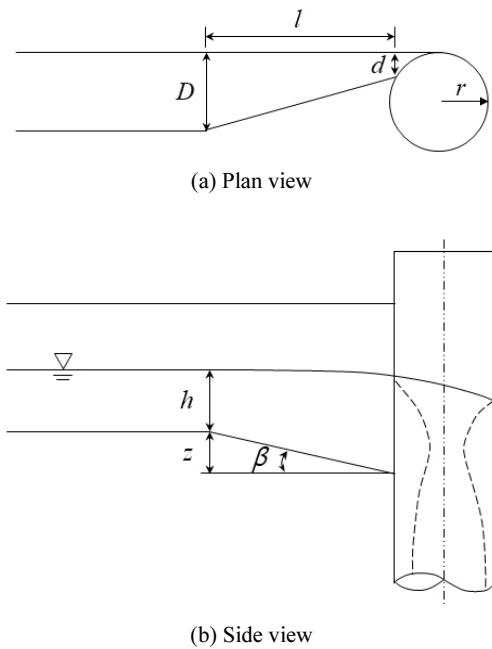


Fig. 1. Tangential inlet

시작되는 지점에서 낙차부 구간의 유입부 폭이 축소되면서 자연스럽게 와류 흐름을 유도한다(Fig. 1). 나선식 유입구에 비해 유량배제 효과가 낮고 낙차부 통수단면의 축소로 질식(choking) 현상이 발생할 가능성이 다소 높지만, 규모가 작고 구조가 간단해 시공성과 경제성이 높다.

접선식 유입구에 대한 기초 설계이론은 Jain (1984)이 처음으로 확립했으며, Yu and Lee (2009)가 실험적 연구를 통해 보완했다. 접선식 유입구에서 한계수심(critical depth)이 형성되는 지점을 흐름 제어점(control shift)이라고 하며, 유입유량이 증가함에 따라 유입부에서 낙차부와 수직갱이 만나는 접합부로 이동된다. 유입유량이 저유량 조건에서 고유량 조건으로 순조롭게 변화된다고 가정하면 유입부와 접합부에서 한계흐름이 동시에 형성될 수 있고, 이때의 유량을 흐름 제어점 유량(control shift discharge)으로 정의할 수 있다. 흐름 제어점 유량(Q_c)은 유입부와 접합부의 비에너지 식으로 유도할 수 있으며, Eq. (1)과 같다.

$$Q_c = \frac{\sqrt{g} d (2z/3)^{3/2}}{(\cos^{2/3} \beta - (d/D)^{2/3})^{3/2}} \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도(m/s^2), d 는 접합부의 폭(m), z 는 유입부와 접합부의 수직 높이 차이(m), β 는 낙차부의 바닥경사($^\circ$), D 는 유입부의 폭(m)이다.

유입유량이 흐름 제어점 유량 이상으로 유입되면 유입부

와 낙차부 구간에서 모두 상류 흐름이 발생하며, 유량배제 효과가 급격하게 감소한다. 접선식 유입구의 설계 제원에 따라 유입유량이 흐름 제어점 유량 이하인 경우에도 도수 현상으로 인한 흐름 정체 현상이 발생할 수 있으며, 이때 기준이 되는 유량을 자유 배수 유량(free drainage discharge)으로 정의하며 Eq. (2)와 같다. 일반적으로 접선식 유입구의 안정적인 성능 확보를 위해서는 자유 배수 유량을 기준으로 유입구 제원을 설계한다.

$$Q_f = \left(\tan \beta \frac{2\pi r}{1 - d/2r} \right)^{1.5} \sqrt{g} d \cos^2 \beta \quad (2)$$

여기서, Q_f 는 자유 배수 유량(m^3/s), r 는 수직갱의 반지름(m)이다.

2.2 나선식 유입구

나선식 유입구는 낙차부의 나선 구조로 유입구에서 안정된 와류 흐름을 유도하고, 수직갱으로 유입된 흐름이 관 벽을 따라 흐르며 안정된 공기공동을 형성한다. 흐름 유입과 공기의 유입 및 배출이 안정적이기 때문에 유량배제에 유리하며, 현재 일반적인 유입구 형상으로 가장 많이 사용되고 있다(Fig. 2).

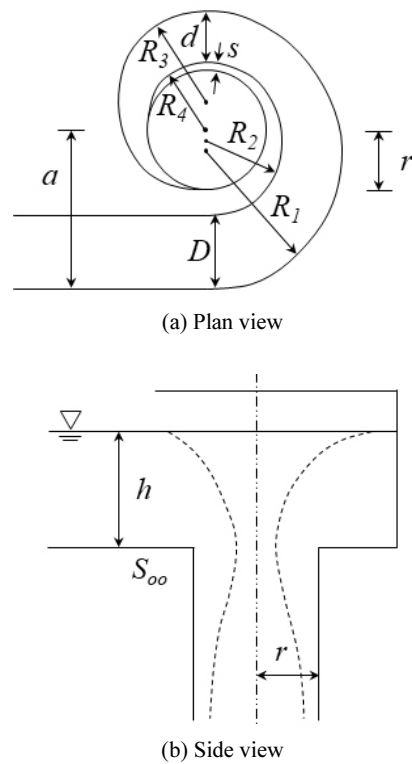


Fig. 2. Spiral inlet

Hager (1999)는 나선식 유입구의 기초 설계이론을 처음으로 확립했으며, 나선식 유입구에 대한 주요제원을 다음과 같이 정의했다.

$$R_1 = (a + r + s + d) / 2 \tag{3}$$

$$R_2 = (a + r + s - D) / 2 \tag{4}$$

$$R_3 = (2r + s + d) / 2 \tag{5}$$

$$R_4 = r + s \tag{6}$$

여기서, R_1 과 R_2 는 유입 지점의 외측/내측 나선 구조의 반지름(m), R_3 와 R_4 는 유출 지점의 외측/내측 나선 구조의 반지름(m), a 는 유입부 외측에서 수직갱 중심까지의 거리(m), s 는 안내벽의 두께(m), d 는 유출 지점의 폭(m), D 는 유입부의 폭(m)이다.

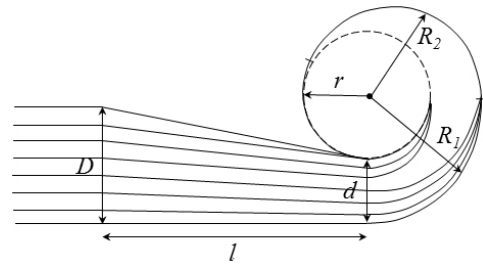
유입부 접근 흐름이 상류인 경우, 낙차부에서 질식 현상이 발생하지 않는 최대 설계유량(Q_M)은 Eq. (7)과 같다.

$$Q_M = 4r^3 \left(\frac{5g}{D} \right)^{1/2} \tag{7}$$

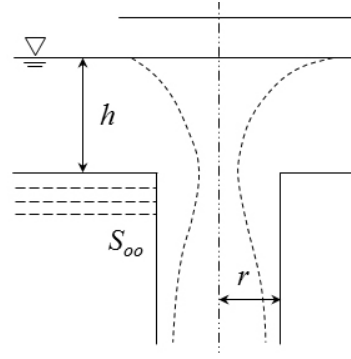
2.3 차원해석

유입구의 유입 성능은 유입부 수위 변화를 통해 평가할 수 있다. 유입부 수위에 영향을 미치는 주요변수는 유입유량, 또는 유입부의 폭과 낙차부의 폭, 수직갱 반지름 등 유입구 형상과 관련된 다양한 설계 제원이다. 차원해석은 이러한 다양한 변수들이 관련된 물리적 현상의 주요변수를 예측하는 방법으로 무차원변수를 이용한 체계적인 실험수행과 함께 실험을 통해 얻은 결과를 실험식으로 도출할 수 있다(Szirtes, 2007). 차원해석의 방법은 Rayleigh가 제안한 Rayleigh 차원법과 Buckingham이 공식화한 Buckingham π 이론으로 구분된다. 이 두 가지 방법은 과정의 차이가 있지만 대부분 동일한 결과를 보여준다.

본 연구에서는 실험에 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 형상에 적용 가능한 수위-유량 관계에 대한 실험식을 도출하고자 Buckingham π 이론을 사용해 차원해석을 수행했다. 접선식 유입구(Fig. 1)와 다단식 나선 유입구(Fig. 3)의 수리학적 매개변수는 각각 Eqs. (8) and (9)와 같이 추정했다.



(a) Plan view



(b) Side view

Fig. 3. Multi-stage spiral inlet

$$f \left(Re, Fr, \frac{D}{h}, \frac{d}{h}, \frac{l}{h}, \frac{z}{h}, \frac{r}{h} \right) = 0 \tag{8}$$

$$f \left(Re, Fr, \frac{D}{h}, \frac{l}{h}, \frac{r}{h}, \frac{R_1}{h}, \frac{R_2}{h} \right) = 0 \tag{9}$$

차원해석을 통해 추정된 수리학적 매개변수 중, 실험에 사용된 유입구 형상에서는 개수로 흐름으로 인해 점성의 효과가 작아 Reynolds 수(Re)의 영향을 제외했으며, 유입구 형상을 결정하는 설계 제원중 낙차부 폭(d)과 유입구 단면 축소부의 길이(l), 유입부와 접합부의 수직 높이 차이(z), 수직갱 반지름(r), 외측 나선 구조의 반지름(R_1, R_2)에 변화를 주지 않았기에 관련 매개변수의 영향도 모두 제외했다. 따라서, 유입유량 변화에 따른 흐름 조건(Fr)과 Froude 수가 결정되는 접근수로 폭(D/h)의 영향을 고려해 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 수위-유량 관계에 대한 매개변수를 Eq. (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$f \left(Fr, \frac{D}{h} \right) = 0 \tag{10}$$

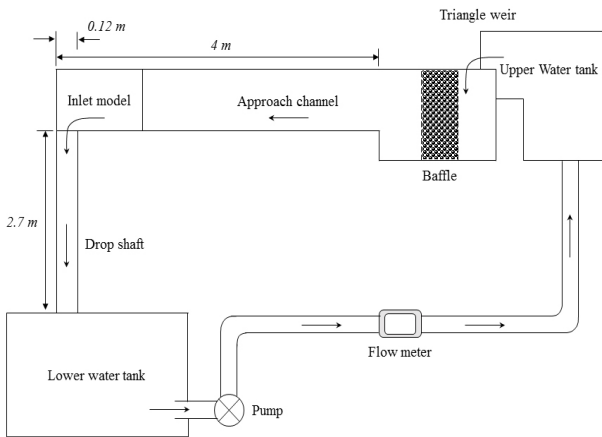


Fig. 4. Experiment channel

3. 수리실험

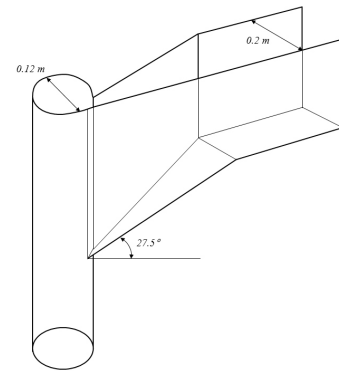
길이 4.0 m, 폭 0.2 m인 직선 개수로와 높이 2.7 m, 직경 0.12 m인 수직관을 제작해 유입부와 수직관을 재현한 지하유입시설 실험장치를 제작했다(Fig. 4). 수로 내 안정된 흐름 유입을 위해 유량이 유입되는 고수조에 정류벽을 설치했으며, 유입 유량은 전자기식유량계(F401, 오차범위: $\pm 0.5\%$)와 고수조에 설치된 삼각위어를 사용하여 제어했다. 유입부 흐름 특성 분석을 위한 수로 내 수위는 용량식 파고계(CH-601, 오차범위: $\pm 0.3\%$)를 사용해 계측했다.

3.1 지하유입구 모형

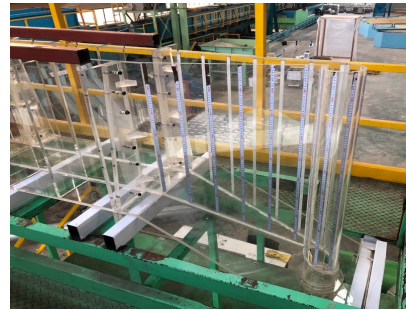
지하유입구 형상 변화에 따른 유입부 흐름 특성을 분석하기 위해 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구 모형을 제작했다. 접선식 유입구는 유입구 바닥면에 경사를 주어 유입 흐름을 가속시키고 유입효율을 높이는 형상으로, 바닥면 경사는 Jain (1984)이 제시한 접선식 유입구의 기초 설계이론을 따라 기본 경사로 제시된 27.5° 로 제작했다(Fig. 5). 다단식 나선 유입구는 나선식 유입구의 유입부 바닥면에 계단형 다단식 구조를 도입해 저유량 유입조건에서의 유입 흐름을 가속시키고 유입효율을 높이는 형상이다(Fig. 6).

3.2 실험조건 및 방법

실험은 유입유량 변화에 따라 발생하는 유입부 수위의 변화를 계측했다. 총 5가지 유입유량 조건에 대해 실험을 수행했으며(Table 1), 초기 유량 변동으로 인한 오차를 최소화하기 위해 유량 제어 후 5분간의 안정화 시간을 두었다. 유입 흐름이 안정화된 이후 고수조 삼각위어의 위어고 확인을 통해 목표 실험유량 공급을 재확인했다. 유입부 수위는 수로 폭이 좁아

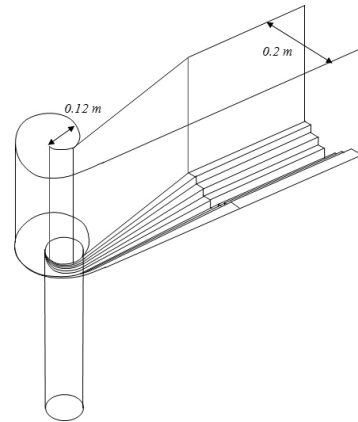


(a) Model design

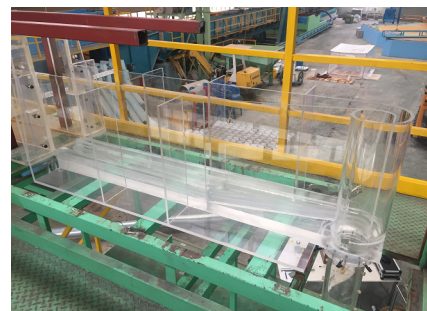


(b) Model shape

Fig. 5. Tangential inlet model



(a) Model design



(b) Model shape

Fig. 6. Multi-stage spiral inlet model

Table 1. Inflow conditions

Inflow conditions	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Discharge (m^3/s)	0.0040	0.0065	0.0094	0.0127	0.0163
Weir height (m)	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13

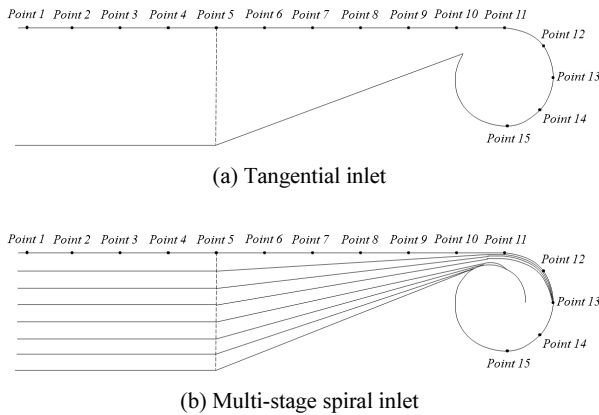


Fig. 7. Measuring points of the water level

지는 유입구 시작점을 기준으로 유입부 방향 0.4 m 구간과 수직관 방향 0.8 m 구간, 총 1.2 m 구간에 대해 0.1 m 간격으로 계측했다(Fig. 7).

4. 실험결과 및 분석

4.1 유입부 흐름 특성

본 연구에서는 지하유입시설의 유입유량 변화에 따른 유입구 수위를 계측해 유입 흐름 특성 변화를 분석했다. 접선식 유입구의 경우, 낙차부 유입 흐름의 가속(사류 흐름)을 통한 유입효율 상승이 목적이며, 유입유량 0.0127 m^3/s (Case 4)까지 사류 흐름을 형성하며 접선식 유입구의 성능을 유지했다. 유입유량 0.0163 m^3/s (Case 5)에서 유입구 전체 흐름이 사류 흐름으로 변화되고 급격한 수위 상승과 함께 유입효율이 급감했다(Figs. 8~10). 실험에 사용된 접선식 유입구 모형의 설계 제원으로 흐름 제어점 유량(Q_c)을 계산한 결과, Case 5에서 흐름 제어점 유량(0.0133 m^3/s)을 초과해 낙차부에서 도수 현상이 발생하고 흐름 정체 현상으로 인한 수위 상승과 함께 유입효율이 급격하게 감소하는 것을 확인했다.

다단식 나선 유입구의 경우, 유입부와 낙차부의 유입 흐름이 모두 사류 흐름으로 유입되며, 유입유량 변화에 따른 수위 변동과 유입효율 변화가 크게 나타나지 않았다(Figs. 9 and 10). 유입구 형상에 따른 유입구 수위 변화를 비교하기 위

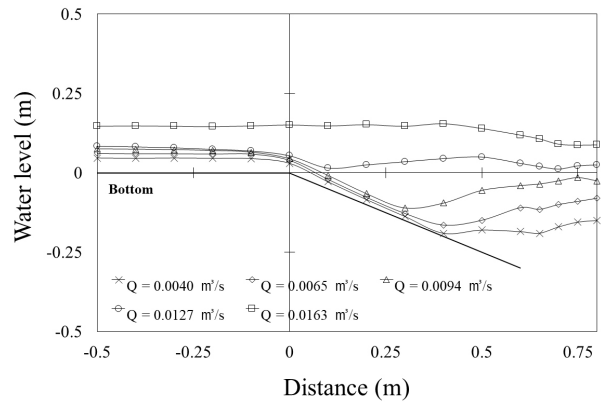


Fig. 8. Water level with the inflow discharge of the tangential inlet

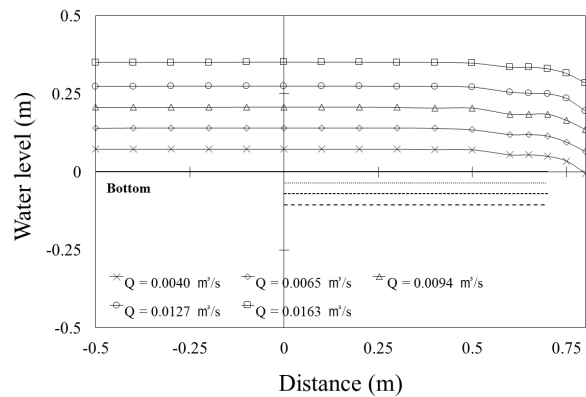


Fig. 9. Water level with the inflow discharge of the multi-stage spiral inlet

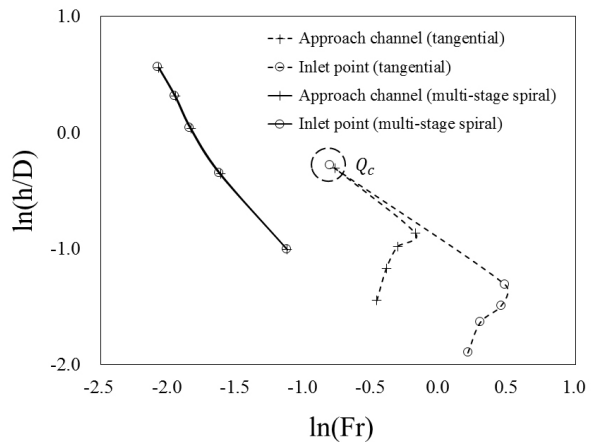


Fig. 10. Relationship between Froude number (Fr) and water level ratio (h/D)

해 Fig. 11과 같이 유입유량 증가에 따른 유입구 수위 상승 비율 ($h_{Q_{n+1}}/h_{Q_n}$)을 비교했다. 유입구 수위 상승 비율을 계산하기 위해 Fig. 7의 수위 측정 지점 중 유입구 폭이 축소되기 시작하는 Point 5(낙차부 시작점)의 유입유량 증가에 따른 수위 변화

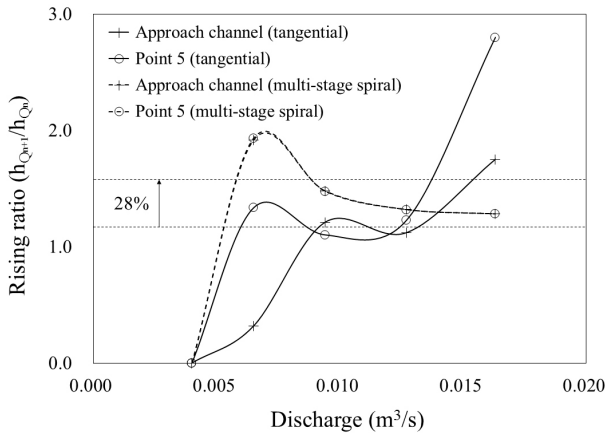


Fig. 11. Rising ratio of the water level with the inflow discharge

측정값($h_{Q_n}, h_{Q_{n+1}}$)을 이용했다. 여기서, Q_1 은 $0.0040 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_2 는 $0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_3 는 $0.0094 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_4 는 $0.0127 \text{ m}^3/\text{s}$, Q_5 는 $0.0163 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 그 결과, 다단식 나선 유입구가 유입구 흐름 안정화에 높은 효과를 가지고 있지만, 유입유량 증가에 따른 유입구 수위 상승 비율은 접선식 유입구보다 평균 28% 높게 나타났다. 다단식 나선 유입구는 접선식 유입구에 비해 유입유량 증가에 따른 수위 상승 비율은 높지만 동일 유입유량 조건에서 유입효율에 큰 변동 없이 안정적인 유입 흐름을 형성했다.

4.2 수위-유량 관계

실험에서 사용된 유입구 형상을 적용하는 것을 가정해 유입유량에 따른 유입구 수위 변화를 예측하기 위한 수위-유량 관계에 대한 실험식을 도출했다. 수위-유량 실험식 산정을 위해 Eq. (10)과 같이 유입유량을 Froude 수(Fr)로 무차원화하고 유입부 수위 계측값을 유입부 폭으로 무차원화(D/h)했다. 무차원변수에 대한 상관관계를 확인한 결과, 접선식 유입구에서 흐름 제어점 유량(Q_c)을 초과하며 발생하는 도수 구간을 제외하고 선형적 관계에 있는 것으로 나타났다(Fig. 10). 유입구 형상 별 수위-유량 관계에 대한 실험식은 다중선형회귀분석 방법을 이용해 실험식의 계수를 결정했다. 접선식 유입구의 수위-유량 관계 실험식은 Eq. (11)과 같으며, 접근수로 흐름 조건(Fr)에 따른 유입구 수위(h_{tg})를 예측하고 유입구 벽면의 높이를 결정할 수 있다. 본 연구에서 사용한 접선식 유입구 형상 조건에 관한 흐름 제어점 유량이 존재하기에 유입유량 범위가 제한적이다. 다단식 나선 유입구의 수위-유량 관계 실험식은 Eq. (12)와 같으며, 최대 유입유량 조건에 따른

유입구 벽면 높이를 결정하기 위한 유입구 수위(h_{mss}) 예측이 가능하다.

$$h_{tg} = 1/(61.6 - 25.46 Fr), \quad Q < 0.0133 \text{ m}^3/\text{s} (= Q_c) \quad (11)$$

$$h_{mss} = -1/(3.94 - 54.77 Fr) \quad (12)$$

실험식의 계산 결과와 실험결과로부터 Froude 수에 따른 수위를 비교한 결과, 접선식 유입구에서 흐름 제어점 유량이 초과되어 도수가 발생하는 구간을 제외하고 실험값 기준으로 $\pm 6.6\%$ 오차범위 안에서 유사한 경향을 나타냈다. 본 연구에서 도출된 경험식은 실험에 사용된 유입구 형상과 동일한 모형에 대해서만 적용 가능하다는 한계점이 있으며, 접선식 유입구의 경우 흐름 제어점 유량과 자유 배수 유량 조건을 고려해 적용 가능한 한계 유량 조건을 함께 고려해야 한다.

5. 결론

국내의 경우, 신월빛물저류배수시설 도입 당시 Park *et al.* (2017)이 수행한 접선식 유입구의 지배유량 이론식 민감도 분석 연구 외에는 지하유입시설에 관한 연구가 전무한 실정이다. 본 연구에서는 지하유입시설의 설계 및 성능 검토에 관한 연구 활성화를 위해 지하유입시설로 가장 많이 사용되고 있는 와류식 유입구의 대표적 형상인 접선식 유입구와 나선식 유입구에 대한 흐름 특성 및 유입 성능을 분석했다. 나선식 유입구의 경우, 저유량 조건에서 와류 흐름 유도 효과를 개선하기 위해 계단형 다단식 구조를 유입부 바닥면에 도입한 다단식 나선 유입구를 사용했다. 유입구 유입 성능 분석을 위해 유입부 수위를 계측하고 유입 흐름 특성을 검토했으며, 접선식 유입구의 경우, Park *et al.* (2017)의 연구와 동일하게 고유량 유입 조건에서 흐름 제어점 유량을 초과하며 도수가 발생, 유량 배제 효과가 급격하게 감소했다. 다단식 나선 유입구의 경우, 접선식 유입구보다 유입유량 증가에 따른 수위 상승률은 높지만 모든 유입유량 조건(저유량 및 고유량)에 대해 안정적인 유입 흐름을 형성하며 유량 배제 효과를 유지했다. 고효율 유입시설에 활용할 경우, 다단식 나선 유입구가 접선식 유입구보다 효과적이다. 또한, 실험에서 사용된 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구에 대한 수위-유량 관계 실험식을 도출해 동일한 모형을 사용할 경우와 일부 설계 제원이 변경된 모형의 실험 결과와 비교할 경우 활용 가능한 기초정보를 확인할 수 있도록 했다. 수리모형실험을 이용한 흐름 특성 분석 과정은 유입구

형상의 설계조건(수로 폭 등) 변화를 다양하게 반영할 수 없는 물질적/시간적 한계를 가지기에, 향후 연구에서는 본 연구결과를 검증자료로 활용해 수치모형의 적용성을 확인하고 유입구 형상의 설계조건 변화에 따른 흐름 특성 변동을 분석하고자 한다.

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 Gisonni, 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.
- Jevdjevich, 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.
- Kim, J. S., Kim, S. Y., Choi, T. S., and Yoon, S. E. (2012). "Analysis of stream characteristics at tangential intake structure of deep underground strom water tunnel." *Proceedings of Korea Water Resources Association*, Gangwon-do, Korea, pp. 604.
- Lee, J. H. W., Yu, D., and Choi, D. K. W. (2006). "Physical hydraulic model tests for Lai Chi Kok transfer scheme - Intake structures." *Croucher Laboratory of Environmental Hydraulics*, The University of Hong Kong, Hong Kong.
- 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, p. 04016051.
- 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, No. 2, pp. 129-138.
- Quick, M. (1990). "Analysis of spiral vortex and vertical slot vortex drop shafts." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 309-325.
- Rhee, D. S., and Kim, C. W. (2007). "Consideration of the stage-discharge relation in spiral intake." *Proceedings of Korea Water Resources Association*, Gangwon-do, Korea, pp. 894-898.
- 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.