

나선식 유입구 수위-유량 관계 검토

Consideration of the Stage-Discharge Relation in Spiral Intake

이동섭*, 김창완**
Dong Sop Rhee, Chang Wan Kim

요 지

지하방수로는 도시의 지하에 대규모 수로 터널을 시공하여, 도시 지역에 발생한 집중 호우를 초기에 배제하여 제내지 침수 피해를 줄이는 목적으로 사용되는 대표적인 구조적 홍수 피해 경감 대책이다. 효과적으로 침수 피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 특히 지하에 설치되어 토지 수용에 대한 부담이 줄어들기 때문에 일본 등지에서 최근 주요 홍수 방어 대책으로 활용되고 있다. 지하방수로 유입부는 크게 접근수로, 유입구, 수직 쟁도(vertical shaft)로 구분되며, 접근 수로를 통하여 유입된 흐름은 유입구를 통하여 가속된 후 수직 쟁도로 유입되게 된다. 따라서 지하방수로의 배제 능력을 평가하기 위해서는 유입구에서의 유량 및 흐름 특성을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다. 나선식 유입구(spiral intake)는 지하방수로 유입구 중 가장 일반적으로 사용되는 형식으로 일반적으로 접근수로 수위를 측정하여 유입량을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 수리 모형 실험을 통하여 나선식 유입구에 대한 수위-유입량 관계를 검토하였다. 평탄한 입구를 가지는 안내벽이 있는 형식의 나선식 유입구 모형을 이용하여 수위-유입량 관계를 검토하였다. 또한 측정된 수위 및 유입량을 바탕으로 기존 연구자들이 제시한 안내벽이 없는 형식의 나선식 유입구에 대한 수위-유입량 관계와 비교 검토하였다. 결과 안내벽이 있는 형식의 나선식 유입구는 안내벽이 없는 경우에 비하여 유량 배제 효율이 떨어지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 나선식 유입구, 유입량, 수위-유량 관계

1. 서 론

지하방수로는 도시의 지하에 대규모 수로 터널을 시공하여, 도시 지역에 발생한 집중 호우를 초기에 배제하여 제내지 침수 피해를 줄이는 목적으로 사용되는 대표적인 구조적 홍수 피해 경감 대책이다. 효과적으로 침수 피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 특히 지하에 설치되어 토지 수용에 대한 부담이 줄어들기 때문에 일본 등지에서 최근 주요 홍수 방어 대책으로 활용되고 있다. 지하방수로 유입부는 크게 접근수로, 유입구, 수직 쟁도(vertical shaft)로 구분되며, 접근 수로를 통하여 유입된 흐름은 유입구를 통하여 가속된 후 수직 쟁도로 유입되게 된다. 따라서 지하방수로의 배제 능력을 평가하기 위해서는 유입구에서의 유량 및 흐름 특성을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다. 나선식 유입구(spiral intake)는 지하방수로 유입구 중 가장 일반적으로 사용되는 형식으로 일반적으로 접근수로 수위를 측정하여 유입량을 예측할 수 있다.

2. 이론적 배경

와류식 유입구(vortex intake)는 흐름이 수직 쟁도(vertical shaft) 벽면을 따라 나선형으로 흐르는 수직 구조물로 벽면의 마찰을 이용하여 흐름의 에너지를 소산시키는 것이 주요 특징으로, 지하 방수로 유입부에 적용되는 형태는 나선식 유입구와 접선식 유입구(tangential-type intake, vertical-slot-type intake)이다. 그 중에서도

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 E-mail : dsrhee@kict.re.kr
** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원 E-mail : cwkim@kict.re.kr

나선식 유입구가 일반적으로 많이 이용되고 있다. 이러한 와류식 유입구는 기존의 낙차 구조물과 비교하였을 때 흐름이 안정적이며 수직 쟁도에 공기 공동(air core)이 형성되어 공기가 쉽게 외부로 배출되기 때문에 와류식 유입구를 시공하기에 대상 지점의 지형학적, 지질학적 조건이 적당하다면 여수로식 급경사 낙차 구조물이나 일반적인 낙차 구조물에 비해 초과 홍수량 배제에 보다 유리한 것으로 알려져 있다. 와류식 유입구 설계 시에는 기본적으로 유입구(vortex shaft inlet) 제원, 수직 쟁도 축을 따라 발달된 흐름의 수리학적 특성, 흐름의 공기 연행(aeration) 특성을 주요 사항으로 고려하여야 하는 것으로 알려져 있으며, 해석상의 어려움으로 인하여 수직 쟁도 벽면을 따라 흐르는 흐름의 수리학적 특성과 공기 연행 흐름으로서의 특성은 주로 수리 모형 실험을 통하여 연구되었다(Vischer와 Hager, 1995).

그림 1에 상류(subcritical) 유입 흐름을 가지는 나선식 유입부의 일반 형태를 표시 하였다(Hager, 1985). 그림 1의 나선식 유입구는 안내벽(guiding wall)이 없는 형태로, 그림에서 b 는 상류 유입수로의 폭이고, a 는 수직 쟁도 중앙축과 유입수로 중방향 중심선 사이의 거리이며, R 은 수직 쟁도의 반지름이다. 와류 형성부(Vortex Chamber)의 바닥 경사는 접근 수로의 경사와 일반적으로 동일하며, 수로 바닥면에 대한 수두가 일정하므로 유사 등류(pseudo-uniform) 흐름이 발생한다.

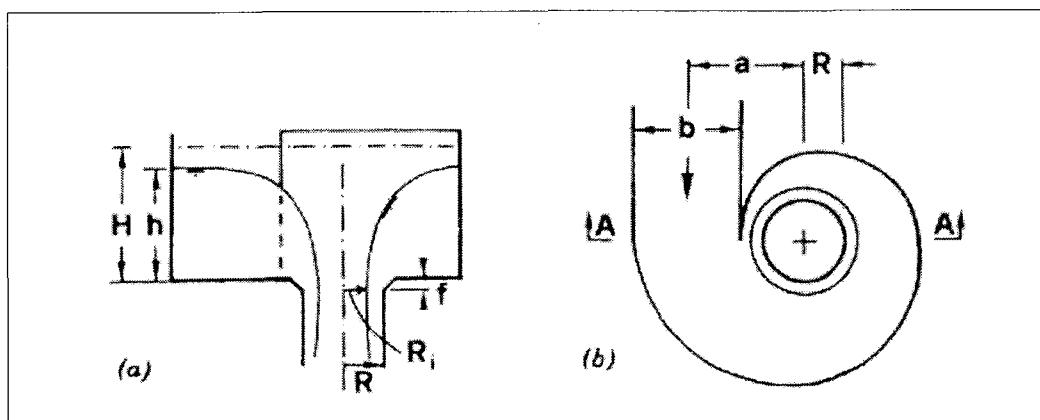


그림 1. 나선식 유입구 개념도(Hager, 1985)

수직 쟁도는 내부에 자유 흐름을 가지는 구조물로 수직 쟁도 중앙에 충분히 큰 공기 공동(air core)이 형성되어 야만 하는데, 이러한 공기 공동은 수직 쟁도 하단이 흐름에 의해 질식(choke)되는 것을 방지하는 역할을 한다. 개수로 흐름과 유사하게, 고정된 상류 수심에 대해서는 한계 흐름 조건에 대해서 유량이 최대가 된다. 유량은 접근수로에서의 수두 $H = h + V^2/2g$ 에 대하여 유일한 관계식으로 표현할 수 있으며, h 는 유입부 수위(그림 1 참조)이며, V 는 접근수로의 평균 유속이다. 이러한 흐름 특성은 먼저 Pica(1970)에 의해서 자세히 검토되었는데,

$$Q = \frac{\pi R^2 \sqrt{2g(h+f)}}{\sqrt{\frac{1}{\mu^2} - \left(\frac{\pi R^2}{bh}\right)}} \quad (1)$$

$$\mu = 0.95 - \chi \quad (2)$$

$$h = \frac{\pi a R}{b} \mu_0 \quad (3)$$

$$\mu_0 = \frac{3}{2} \frac{1-\chi^2}{1-\chi^3} \frac{\mu}{\sqrt{1 - \frac{\mu^2}{(1-\chi^2)^2}}} \quad (4)$$

여기에서 g 는 중력가속도이며, μ 는 유량계수, μ_0 는 보조 매개변수, $\chi = R_i/R$ 로, R_i 는 수직 갱도 내부에 형성된 공기 공동의 반지름이다. 또한 한계류가 형성이 되는 단면의 위치는 유입부 바닥을 기준으로 아래 방향으로 f 만큼 떨어진 지점이 된다(그림 1 참조). 그러나 보통 설계 목적으로는 R_i 와 f 를 특정지어서 그 수치를 결정할 수 없기 때문에 Hager(1985)는 안내벽이 없는 형태의 나선식 유입구에 대하여 다음과 같은 수위 유량 관계를 제시하였다.

$$q = \frac{\pi \sqrt{2} y}{\sqrt{\frac{1}{\mu^2} - \left(\frac{\pi}{y} \frac{R}{a}\right)^2}} \quad (5)$$

여기에서 $y = \frac{bh}{aR}$, $q = \frac{Q\sqrt{b}}{\sqrt{gaR^5}}$, $\mu = 0.95 - \left[1 - \left(\frac{2y}{9\pi}\right)^{2/3}\right]^2$ 이다.

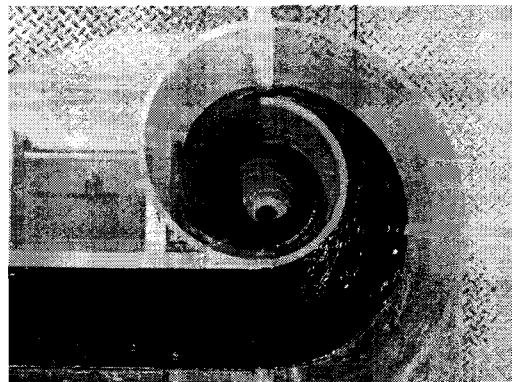


그림 2. 나선식 유입구 모형

3. 실험 시설 및 실험 조건

본 연구에서 사용된 나선식 유입구 모형은 그림 2와 같이 안내벽(guiding wall)이 있는 형태이다. 기존 연구자들은 대부분 상류(subcritical) 유입 조건에 대하여 안내벽이 없는 형태의 나선식 유입구를 대상으로 연구하였지만, 안내벽이 있는 경우 흐름의 회전을 유도하여 수직 갱도 내에서 공기 공동의 형성을 촉진하여 원활한 유량 배제에 도움이 되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 수행된 실험 조건 및 모형 제원은 표 1과 같다.

표 1. 실험 조건 및 모형 제원

실험 변수	실험 조건
유입량(Q , m^3/s)	0.002 ~ 0.024
접근수로 폭(b , cm)	20
a (cm)	20
수직 갱도 반경(R , cm)	10

4. 실험 결과

실험 결과 측정된 유입부 수위를 이용하여 실제 유입량에 대한 수위-유량 관계와 식 5에 의해서 예측된 유입량에 수위-유량 관계를 비교하였다. 안내벽이 없는 형태의 나선식 유입구에 대하여 개발된 식 5에 의해서 예측된 유량은 동일한 무차원 수위 y 에 대하여 배제 유량이 보다 큰 것으로 나타났다. 실험 결과 유입시점을 기준으로 180°의 안내벽이 설치될 경우 배제 유량은 안내벽이 없는 형태에 비하여 최대 60% 이하인 것으로 나타났다. 따라서 안내벽은 흐름의 안정화 및 간도 내 공기 공동 형성에 기여하여 수직 간도의 질식(choke)을 방지하여 배제 효율을 높이는 역할을 하는 것으로 알려져 있으나, 질식이 발생하지 않는 경우 유량 배제 효율은 동일한 제원의 유입구에 대하여 안내벽이 없을 경우가 더 좋은 것으로 나타났다.

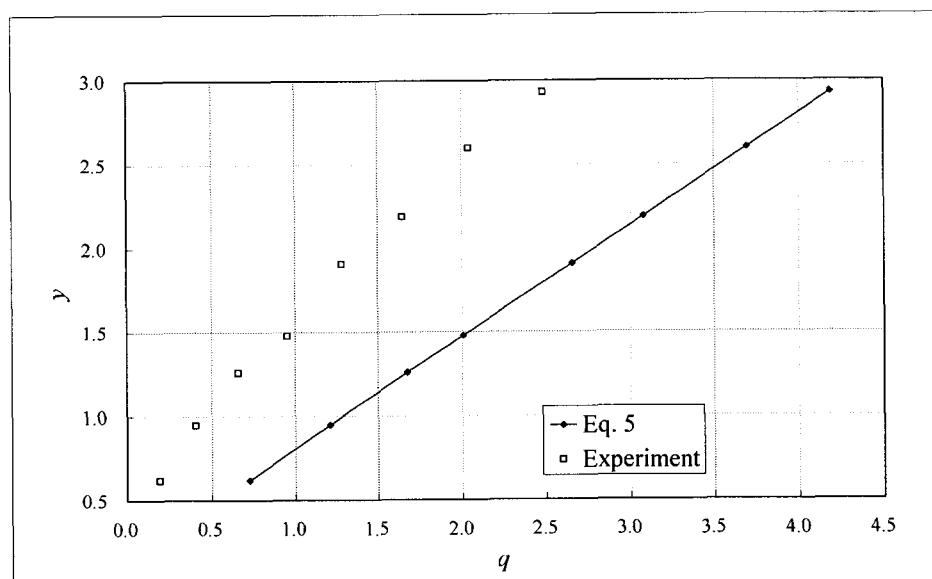


그림 3. 실제 유입량과 예측 유입량(식 5) 비교

5. 결 론

본 연구에서는 나선식 유입구의 수위-유입량 관계를 수리 실험을 통하여 검토하였다. 나선식 유입구에서는 안내벽은 흐름 안정화와 수직 간도 내 공기 공동 형성에 도움을 주고 간도 내 질식을 방지하기 때문에 일반적으로 사용하는 것을 추천하나, 간도 내 질식이 발생하지 않는 경우 안내벽이 없는 경우가 더 좋은 것으로 나타났다. 따라서 이후 연구에서는 나선식 유입구 유입수로 및 수직 간도 제원 등을 다양화하여 간도 내 질식 발생 여부를 확인하고, 안내벽 설치 각도를 다양화 하여 질식 방지 효과 및 유량 배제 효율에 대한 비교 실험이 필요한 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

1. Hager, W.H. (1985). "Head-discharge relation for vortex shaft." *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Vol 111, No 6. pp. 1015-1020.
2. Pica, M. (1970). "Vortex shafts." *L'Energia Elettrica*, Vol. 47, No. 4, pp. 217-234.
3. Vischer, D.H., Hager, W.H.(Ed.) (1995). *Energy Dissipators*, Hydraulic structures design manual, No. 9, IAHR, Taylor & Francis, New York.