

3차원 수치모의에 의한 복단면 형상의 접선식 와류 유입구 수리 특성 분석

이두한¹, 이동섭^{1*}, 김명환¹
¹한국건설기술연구원 하천해안연구실

Hydraulic Performance Analysis of Tangential Vortex Intakes with Compound Section by Three-Dimensional Numerical Simulation

Du Han Lee¹, Dong Sop Rhee^{1*} and Myounghwan Kim¹

¹River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

요 약 최근 국내에서 도심지 홍수로 인한 피해 발생이 증가하면서 차집된 다량의 강우를 일시에 배출할 수 있는 와류 유입구에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 중 접선식 유입구는 구조가 단순하고 크기가 작아 적용성이 높으나 설계 유량보다 작은 유량에 대해서 와류가 형성되지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 보완하여 새롭게 제안된 2가지 종류의 복단면형 접선식 와류 유입구의 수리 특성을 3차원 수치모의를 통해서 분석하였다. 기존에 제시된 한계 수심 이론과 자유 배수 조건 이론을 이용하여 복단면 형상의 접선식 와류 유입구의 특성을 흐름 상태, 수면형, 수심-유량 관계, 공기 기동 면적비 측면에서 분석하였다. 종합적인 수리 특성 분석 결과 완경사형 복단면 접선식 유입구가 최적으로 판단되나 설계 유량이 작은 경우에는 급경사형 복단면도 가용한 것으로 나타났다.

Abstract Recently the interest about the vortex intakes are rapidly increased because of its performance to drain a plenty of collected storm water at a time. The tangential intake a kind of vortex intakes is very applicable because this type is very simple and little against other types, but it has a big weakness that the vortex flow is not been rarely created below the design discharge. In this study, the characteristics of a tangential intake and two kinds of a newly suggested compound section type intake are analyzed by the 3D numerical modeling based on theories about the control shift and free drainage condition. The analysis focused on the flow condition, flow surface formation, depth-discharge relation, area ratio of air core. Based on this study, the mild-sloped compound section type intake is the optimal, but steep-sloped compound section type is also the optional for the small design discharge.

Key Words : Tangential vortex intake, compound section, Three-dimensional numerical simulation, Depth-discharge relation, Area ratio of air core

1. 서론

기후 변화에 의한 집중 호우의 빈번한 발생으로 국내에서도 호우시 도심지 침수 방지에 대한 관심이 높아지고 있다. 인구와 시설이 집중되어 있는 도심지에서 경제적이고 효율적인 침수 방지 대책 중의 하나는 강우를 차

집하여 지하 공간에 저류하거나 지하 공간을 통해서 배출하는 것이다. 이를 위해서는 차집된 다량의 강우 유출을 일시에 지하로 운반하기 위한 유입구조물의 수리설계 기술이 필요하다.

지하 유입구조물은 고유량의 유수를 고낙차로 지하로 안전하게 유입시킬 수 있는 구조여야 하므로 일반적으로

“본 논문은 한국건설기술연구원의 2014년 연구과제인 ‘도심지 홍수 예방(Smart Flood) 연구 개발’의 지원으로 수행됨”

*Corresponding Author : Dong Sop Rhee(Korea Institute of Construction Technology)

Tel: +82-31-910-0396 email: dsrhee@kict.re.kr

Received December 9, 2013 Revised January 6, 2014 Accepted January 9, 2014

와류 유입구(vortex intake)의 형상을 가진다. 와류 유입구는 접근 수로에서 형성된 접근 흐름을 유입구 구조물에 의해 낙차부에서 와류 흐름으로 변화시키는 구조물이다. 낙차부에서의 회전 흐름은 벽 마찰에 의해서 소산되어 아래로 내려갈수록 점차 수직 흐름에 가까워진다. 이 때 낙차부 내에서의 흐름은 코안다 효과(Coanda effect)로 인하여 낙차부 구조물 전체에 걸쳐서 벽면과 유착하며 벽 마찰이 지속적으로 작용한다. 따라서 초기 운동에너지의 일부만 남게 되며 나머지 에너지는 방류구 구조물에 이르기 전에 안정적으로 소산된다.

와류 유입구는 Drioli(1947)[1]에 의해 처음 수리구조물로 적용되었으며, 이후에 Laushey와 Mavis(1953)[2]가 하수관망에서 도입하였으며, 현재 많은 분야에 적용되고 있다. 이태리의 Curbans에 설계된 와류 낙차공의 경우에는 높이 170m이며 낙차부의 직경이 7.3 m에 이른다(Drioli, 1969)[3]. 와류 유입구의 대표 형태로는 소용돌이식(scroll), 나선식(spiral), 접선식(tangential) 등이 있으며 각 형태에 대한 일반적 특성은 이미 제시되어 있다[4,5].

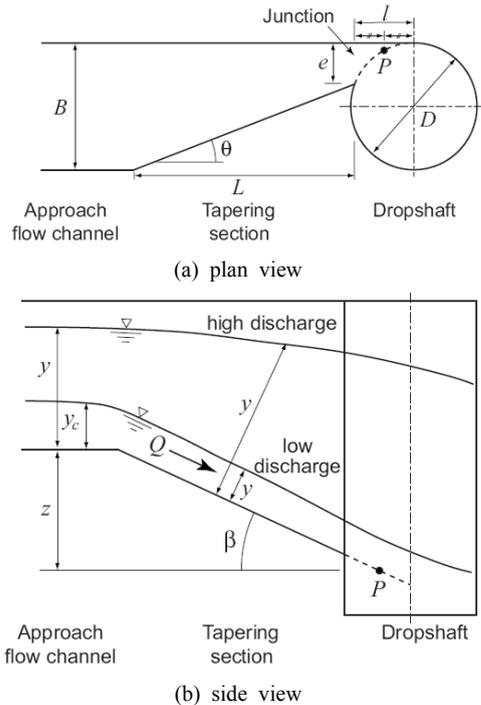
이 중 접선식 유입구는 구조가 단순하며 크기가 작은 것이 특징이다. 접선식 유입구는 Jevdjovich와 Levin(1953)[6]이 처음 제안한 것으로 알려져 있으며, 다양한 실험 연구를 통해서 수리적 특징과 최적 설계법이 제시되었다. Jain과 Kennedy(1983)[7]는 광범위한 문헌검토와 수리 모형 실험을 수행하였다. Jain과 Ettema(1987)[5]는 에너지가 보존된다고 가정하여 접선식 유입구의 수위-유량 관계를 도출하였으며 이 결과를 실험과 비교하여 적합성을 검증하였다. 접선식 유입구의 최적 형상(수직경의 지름, 접근 수로 폭, 유입 수로 바닥 각도 및 경사 등)도 실험을 통해 제시되었다. 또한 공기 기둥의 최소 면적비도 경험적 방법을 통해 25%로 제시되었다(Jain과 Ettema 1987). 접선식 유입구의 안정된 흐름을 보장하기 위한 설계 조건도 이론 및 실험을 통해 제시되었다[8].

이상의 연구는 설계 유량에서 안정적인 와류 형성을 유도하기 위한 것이나, 설계 유량보다 작은 유량이 유입될 경우에는 수직경 내부에서 와류가 제대로 형성되지 못하고 곧바로 낙하하는 흐름이 형성되는 단점이 있다. 이 경우에는 에너지가 소산되지 않고 수직경에 직접적인 충격을 주어 구조물 파손 등의 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 기존의 단단면 형태인 유입구를 복단면으로 처리하여 설계 유량 이하의 저유량에서도 안정적인 와류가 형성되는 새로운 접선식 유입구를 제안하였다[9].

본 연구에서는 새롭게 제안된 복단면 형상을 갖는 나선형 유입구의 수리적 특성을 분석하기 위하여 3차원 동수역학 모형을 이용하여 모의하였다. 수리적 특성은 기존의 접선식 유입구 이론을 바탕으로 수면형 변화 특성, 수

심-유량 관계, 그리고 공기 기둥 면적비 등에 대해서 검토하였다.

2. 접선식 유입구의 수리 이론



[Fig. 1] Tangential vortex intake[8]

접선식 유입구는 Fig. 1과 같은 구조를 가지며 접근수로(approach flow channel), 점축단면(tapering section), 수직경(drop shaft)의 세 부분으로 구성된다. 유입구의 기하학적 형상과 유량이 주어지면 접근수로에서의 수심은 이론적으로 계산이 가능하다. 여기에는 한계 수심 조건에 의한 접근법과 자유 배수 조건(free drainage condition)에 의한 접근법의 두 가지 이론적 접근 방법이 있다.

2.1 한계점 이동

유입구의 흐름 상태는 저유량 흐름과 고유량 흐름으로 나눌 수 있다. 저유량 흐름은 점축단면 전체에서 사류가 형성되고 접근 수로에서 한계 수심이 형성되는 흐름이다. 고유량 흐름은 접합부(junction)에서 한계류가 형성되고 접근수로와 점축수로에서는 상류가 형성되는 흐름이다. 여기에서 한계수심이 형성되는 지점을 흐름 제어점이라고 하며 유량의 증가에 따라 흐름 제어점은 접근수로에

서 접합부로 이동한다[8].

저유량 흐름에서는 한계 수심이 접근 수로의 끝단에서 발생하므로 접근수로에서의 수심-유량 관계는 한계수심 방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$y = y_{ca} = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{B}\right)^2 \frac{1}{g}} \quad (1)$$

여기서 y 는 접근 수로의 수심, y_{ca} 는 접근수로의 한계수심, Q 는 유량, B 는 접근수로 폭, g 는 중력 가속도 등을 나타낸다.

고유량 흐름에서는 접합부에서 한계수심이 발생한다고 가정할 수 있으므로 접합부에서 수심-유량 관계는 한계수심 방정식에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$y_{cj} = \sqrt[3]{\left(\frac{Q}{e}\right)^2 \frac{1}{g \cos \beta}} \quad (2)$$

여기서 y_{cj} 는 접합부의 한계수심, e 는 접합부에서의 유입폭, β 는 점착단면의 바닥경사 등을 나타낸다.

유량 증가에 의한 저유량 흐름에서 고유량 흐름으로의 변화가 순조롭게 이뤄진다고 가정(smooth transition)하면 접근 수로와 접합부에서 동시에 한계흐름이 형성될 수 있는데 이 때의 유량을 한계점 이동 유량(control shift discharge) Q_c 라고 정의한다. 한계점 이동 유량은 접근수로와 접합부의 비에너지 식에서 유도할 수 있으며 다음과 같이 표현된다[8].

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

한계점 이동 유량 이상으로 유량이 증가하면 접근수로와 접합부 모두에서 상류가 발생함을 의미하며 이는 유량 배제 효율이 급격히 떨어짐을 나타낸다.

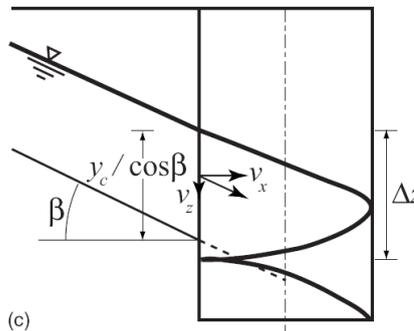
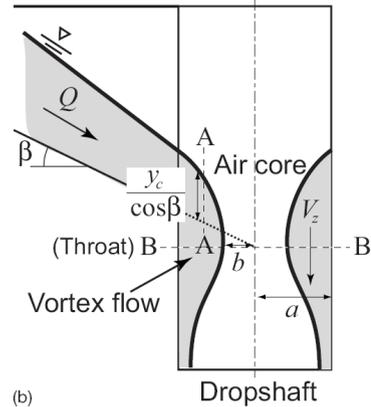
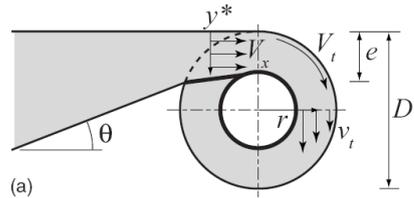
2.2 자유 배수 조건

위에서 언급한 한계 수심 조건에 의한 접근법은 점착 단면까지의 흐름을 1차원으로 가정하며 접합부에서 한계 수심이 형성된다고 가정한다. 그러나 유량이 한계점 이동 유량 이하인 경우에도 접합부를 지나서 수직갱으로 진입한 와류 흐름이 접합부의 흐름에 영향을 주어 점착단면에서의 흐름정체 및 도수를 발생시키기도 한다. 이와 같

은 현상을 고려한 접근법이 자유 배수 조건에 의한 해석이다[Fig. 2].

자유 배수란 접합부에서 수직갱으로 진입한 흐름이 수직갱 내에서 첫 번째 360° 회전 이후 접합부의 흐름에 영향을 주지 않는 상태를 의미한다. 이와 같은 조건은 접합부로 진입한 흐름의 수위와 이 첫 번째 360° 회전 이후 수위 차(Δz)가 접합부의 한계 수심 보다 큰 경우 만족된다.

$$\Delta z > \frac{y_{cj}}{\cos \beta} \quad (4)$$



[Fig. 2] Flow at junction: (a) plan view; (b) side view; and (c) perspective view[8]

식 (4)의 조건으로부터 회전 흐름을 자유 비회전 와류

로 가정하고 회전류의 x 방향 유속(v_x) 및 z 방향 유속(v_z)이 일정하다고 가정하며 다음 식 (5)와 같이 자유 배수 유량을 구할 수 있다[8]. 공급 유량이 자유 배수 유량 이하이면 접합부에서 흐름 정체가 발생하지 않으나 그 이상이면 접합부에서 수직갱의 와류로 인한 흐름 정체가 발생한다.

$$Q_f = \left(\frac{\pi D}{1-e/D} \tan \beta \right)^{3/2} \sqrt{g e \cos^2 \beta} \quad (5)$$

자유 배수 유량(Q_f)이 한계점 이동 유량(Q_c) 보다 작은 경우에는 접합부에서의 흐름 정체로 점축 단면에서도수가 발생하여 점축 단면에서 불안정한 흐름이 형성된다. 그러므로 점축 단면에서의 안정적인 흐름 상태 확보를 위해서 다음과 같은 조건이 필요하다.

$$Q_f > Q_c \quad (6)$$

2.3 공기 기둥의 면적

수직갱에서의 공기 기둥은 공기의 안정적인 배출에 의해 와류 낙차 흐름이 안정적으로 형성되기 위해서 필요하다. 공기 기둥 면적비(λ)는 수직갱의 단면적에 대한 공기 기둥의 단면적의 비율로 다음과 같이 표현한다.

$$\lambda = b^2 / a^2 \quad (7)$$

여기서 a 는 수직갱의 반지름이며, b 는 공기 기둥의 반지름이다(Fig. 2 (b) 참조). 공기 기둥의 반지름은 공기 기둥의 면적이 최소가 되는 지점에서 산정하며 이론적으로는 점축 단면의 연장선이 수직갱의 중심선에 만나는 스로트(throat) 지점에서 형성된다고 가정한다(Fig. 2 (b) 참조).

접합점에서 자유 와류 조건(free vortex)을 가정하고 스로트 지점에서 최소 공기 단면이 형성된다고 가정하면 공기 기둥 면적비(λ)는 유량과 접선식 유입구의 형상에 대해서 다음과 같은 관계를 가진다[8].

$$\sqrt{\frac{(1-\lambda)^3}{2\lambda^2}} = 4 \left(\frac{Q^2 e}{g \pi^3 D^6 \cos^4 \beta} \right)^{1/3} \frac{1}{1-e/D} = F_a \quad (8)$$

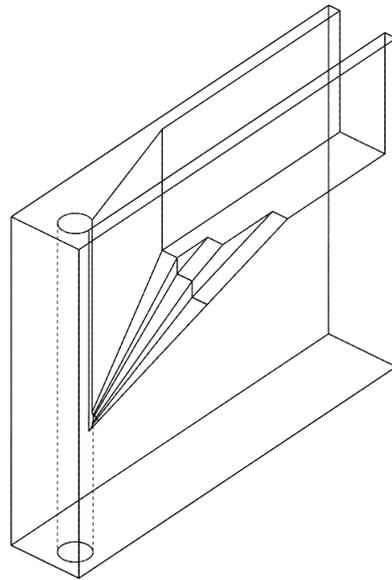
여기서 F_a 는 접선식 유입구의 무차원 흐름 변수이다. 공기 기둥 면적비는 경험적으로 0.25를 한계값으로 하며

이 경우 F_a 는 1.84를 한계값으로 갖는다.

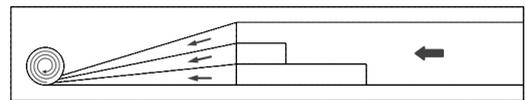
3. 모의 대상 및 수치모형

3.1 모의 대상

저유량에서도 수직갱에서 안정적인 와류 형성을 보장하기 위하여 Fig. 3과 같은 복단면 형상의 접선식 와류 유입구를 제안하였다. 새로 제안된 유입구는 저유량에 대응하기 위한 기존의 접선식 유입구의 점축단면 및 접근 수로를 다단형식으로 구성하였다. 저유량에서는 외측의 완경사 수로로만 유량이 집중되어 수직갱의 외측으로 배제되어 안정적인 와류 형성이 가능하다.



(a) Perspective view

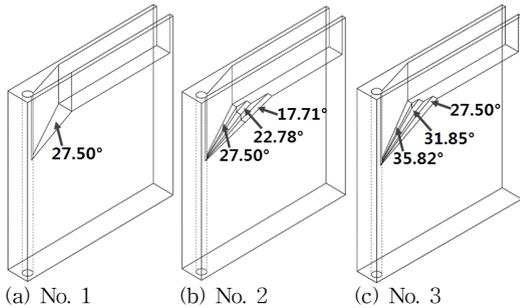


(b) plan view

[Fig. 3] Tangential vortex intake with compound section

모의 대상 구조물은 제안된 유입구의 수리 특성을 분석하기 위하여 기존 접선식 유입구 1개 형상과 복단면 부의 바닥 경사가 상이한 2개 형상 등 총 3개 형상이다(Fig. 4). 접선식 유입구 형상 인자는 수직갱 직경(D) 120 mm, 접근 수로 폭(B) 200 mm, 접합부 유입구 폭(e) 30 mm,

접근수로 연장(L) 560 mm, 접근수로와 접합부의 낙차고(z) 307 mm, 점축 단면의 바닥 경사(β) 27.5°, 점축 단면 측면 경사(θ) 16.8° 등이다. 복단면 접선식 유입구는 접선식 유입구 형상을 기본으로 점축 단면 및 접근수로 일부의 형상과 바닥 경사를 변경한 것으로 바닥 경사는 Table 1과 같다.



[Fig. 4] Shapes of intakes

[Table 1] Bottom slopes of intakes models

No.	Shapes	Bottom slopes in tapering section		
		Inner channel	Center channel	Outer channel
1	Basic tangential	27.50°		
2	Tangential with compound	17.71°	22.78°	27.50°
3	Tangential with compound	27.50°	31.85°	35.82°

3.2 수치 모형

본 연구에서는 3차원 동수역학 모형으로 상용 모형인 FLOW3D 모형을 적용하였는데 연속방정식과 x 방향 운동량 방정식은 각각 다음과 같다[10].

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 V_F 는 흐름 체적비(fractional volume open to flow), c 는 음속, t 는 시간, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의

유속, p 는 압력, A_i 는 흐름 면적비(fractional area open to flow), ρ 는 유체의 밀도, u_i 는 i 방향 유속 등을 나타내며 f_i 는 점성항으로 다음과 같이 정의된다[10].

$$f_i = \left\{ wsx_i - \left[\frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{ix}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{iy}) + (A_z \tau_{iz}) \right] \right\} \frac{1}{\rho V_F} \quad (11)$$

여기서 wsx_i 는 벽전단응력으로 벽 부근의 벽 유속분포 법칙(law of the wall velocity profile)에 의해 모의되며, $\tau_{ix}, \tau_{iy}, \tau_{iz}$ 등은 각각 ix, iy, iz 에 작용하는 전단응력을 나타낸다. 운동량 방정식에 적용되는 난류모형은 RNG(Renormalization Group method) $k-\epsilon$ 모형(Yakhot와 Orszag, 1986)을 적용하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 흐름 상태

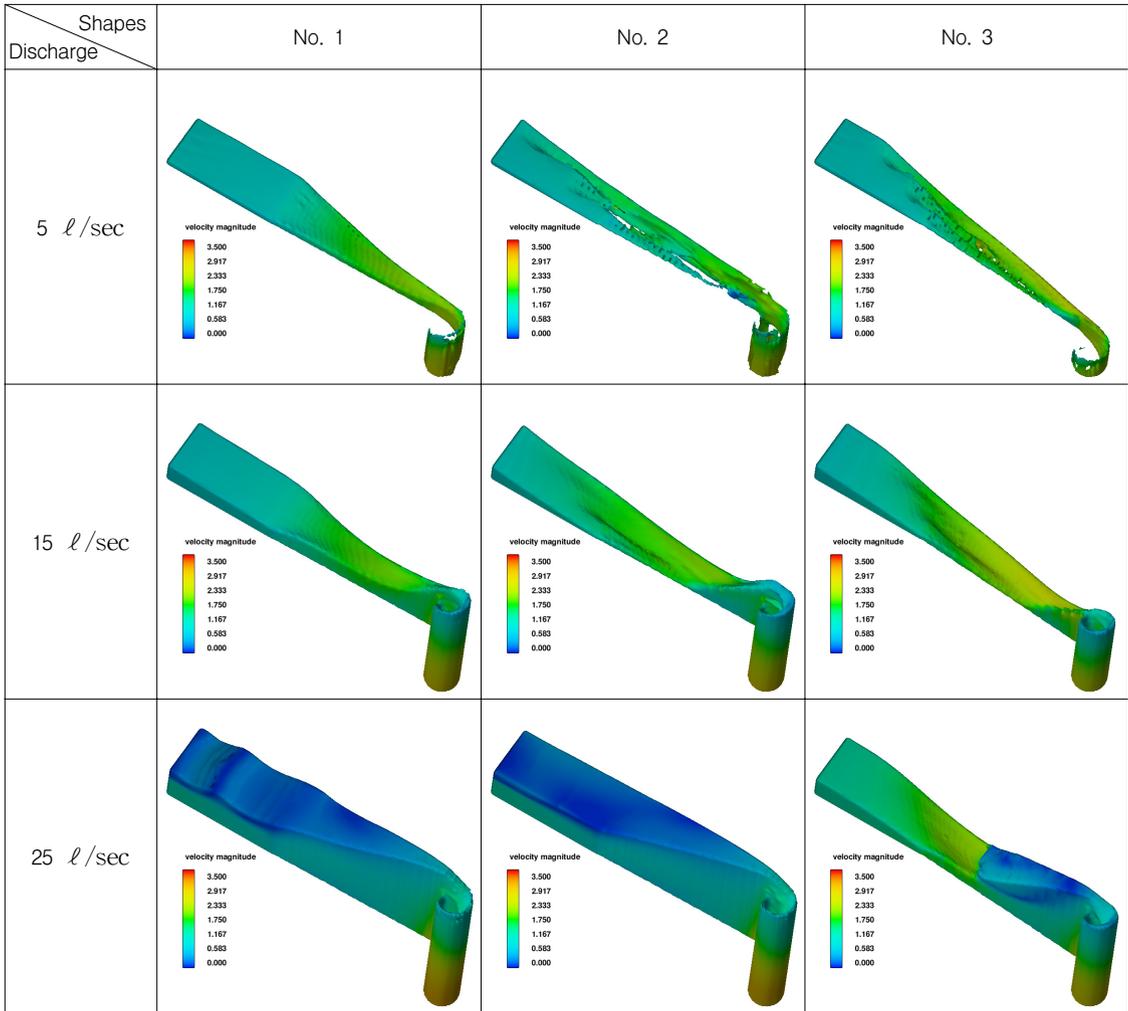
앞에서 제시된 3개 형상의 유입구에 대하여 3차원 수치모의를 수행하였다. 모의 유량은 최소 유량 5 l/sec부터 최대 유량 30 l/sec까지 6개 조건에 대해서 수행하여 총 18개 케이스에 대하여 모의를 수행하였다. 모의 결과 중 형태별 3개 대표 유량에 대한 결과는 Fig. 5와 같다.

모의 대상 접선식 유입구의 형상에 대한 Q_c 와 Q_f 를 계산하면 각각 15.2 l/sec과 5.1 l/sec이다. 즉, 한계 수심 및 자유 배수 이론에 의하면 모의 대상 최소 유량인 5 l/sec 부근부터 접합부 흐름 정체가 발생하며 15.2 l/sec 이상부터 점축단면 및 접근수로에서 상류가 형성된다.

3차원 수치모의 결과도 이와 유사하게 나타나는데 유량 5 l/sec에서는 3가지 형상 모두에서 점축단면에서 사류가 형성되며 접합부에서 수면 상승이 없이 안정적인 배수를 보여주는데 이는 접합부에서 흐름 정체 없음 나타낸다.

접선식 기본형인 No. 1의 경우 10 l/sec, 15 l/sec에서는 점축 단면에서는 사류가 형성되고 접합부 직상류에서 흐름 정체에 의한 도수가 발생한다. 유량 20 l/sec 이상에는 점축단면에서 상류가 형성되어 앞에서 소개한 이론에 의한 거동에 부합하는 특성을 보인다.

접선식 기본형으로 완경사 복단면을 구성한 No. 2의 경우에는 No. 1과 동일한 특성을 나타내는데 저유량(10 l/sec, 15 l/sec)에서는 점축단면에서 사류가 형성되고 접합부에서 도수가 발생하는데 도수 후 수심이 No. 1에



[Fig. 5] Results of numerical simulations

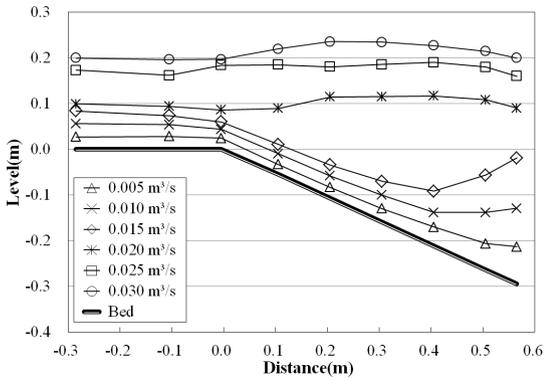
비해서 다소 높게 형성된다. 고유량(20 ℓ /sec, 25 ℓ /sec, 30 ℓ /sec)에서도 No. 1과 마찬가지로 점축 단면에서 사류가 형성된다.

접선식 기본형에 급경사 복단면을 구성한 No. 3의 경우에는 다소 다른 양상을 나타내는데 점축단면에서 상류가 형성되는 저유량이 20 ℓ /sec으로 증가하며 25 ℓ /sec에서도 점축 단면에서 완전한 상류가 형성되지 않고 접합부의 흐름 정체에 의한 도수 영역이 점축 단면의 중앙부까지 확대된다. 유량 30 ℓ /sec에서 점축단면에서 완전한 상류가 형성되는데 이 때의 수위는 수직경에서 공기 기둥이 형성되지 않으면서, No. 1과 No. 2에 비해서 상당한 고수위를 나타낸다. 이와 같은 No. 3의 특징은 점축 단면의 바닥경사가 급한 것이 원인으로 판단된다.

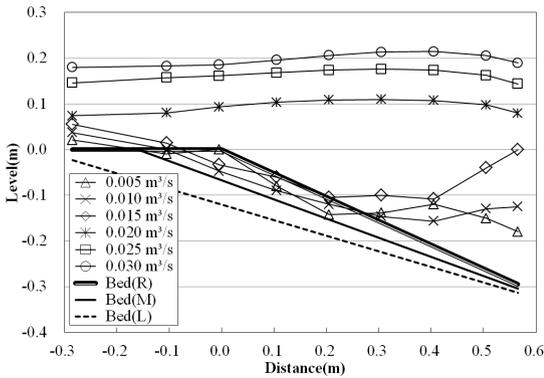
4.2 수면형

3개 형상의 유입구에 대하여 종단방향으로 수로의 중앙부를 따라 유량별 수위를 도시하면 Fig. 6과 같으며 전체적인 수위 양상은 앞의 흐름 상태에서 언급한 것과 동일한 경향을 나타낸다.

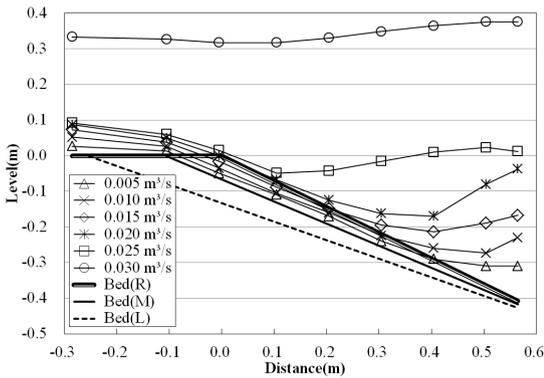
No. 1의 경우에는 유량 15 ℓ /sec 이하에서 점축단면에서의 사류 형성과 접합부 직상의 도수를 확인할 수 있는데, 특히 유량 15 ℓ /sec에서 도수를 명확하게 확인할 수 있다. 유량 20 ℓ /sec 이상에서는 한계점 이동으로 점축 단면에서 사류가 형성되어 안정적으로 배수 흐름이 형성되는 것을 확인할 수 있다.



(a) Model No. 1



(b) Model No. 2



(c) Model No. 3

[Fig. 6] Water surface profile along channel center

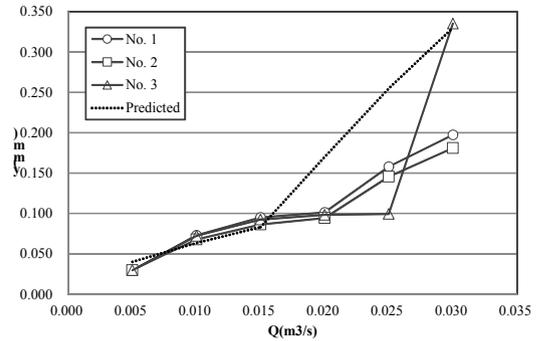
No. 2의 경우에는 전체적인 경향은 No. 1과 유사하나, 계단부의 표고가 낮은 지점에서 낮은 수위를 형성하지만 접합부 직상류에서는 No. 1과 유사한 수위를 나타낸다.

No. 3의 경우에는 No. 1과 No. 2와 다른 경향을 나타낸다. 최대 유량인 30 l/sec만 고유량 상태의 수면형을 나타내며 나머지 유량에서는 점축 단면에서 사류가 발생하는 저유량 수면 형태를 나타내고 있다. 점축 단면 및

접합부 직상류의 수위는 세 가지 형상 중에서 가장 낮은 값을 나타내고 있으나 최대 유량인 30 l/sec에서는 나머지 두 개의 형상에 비해 10cm 이상의 고수위를 나타낸다. 즉, 최대 유량을 제외한 나머지 경우에서는 동일 유량에서 저수위를 형성하여 가장 우수한 효율을 나타내지만 특정 유량 이상에서는 수위가 급격히 상승하는 거동을 나타낸다.

4.3 수심-유량 관계

수치모의 결과에 대한 접근 수로의 수심과 유량 관계를 도시하면 Fig. 7과 같다. 여기서 예측값(predicted)은 앞에서 소개한 한계점 이동 이론에 의해 계산한 값을 나타낸다.



[Fig. 7] Depth-discharge relations

접선식 기본형(No. 1)과 예측값을 비교하면 저유량 상태에서는 유사한 양상을 나타내지만 Q_f 이상에서는 큰 오차를 나타내고 있다. Yu와 Lee(2009)[8]의 연구에서도 Q_f 이하에서는 한계 수심에 의한 수심-유량 관계가 실험과 예측값이 유사하게 나타나나 Q_f 이상의 유량에서는 큰 오차를 나타내고 있다. 즉, 한계 수심에 의한 한계점 이동 이론은 1차원 가정과 자유 배수 조건에 대한 미고려로 Q_f 이상의 유량에서는 수심-유량 관계가 부정확함을 나타낸다.

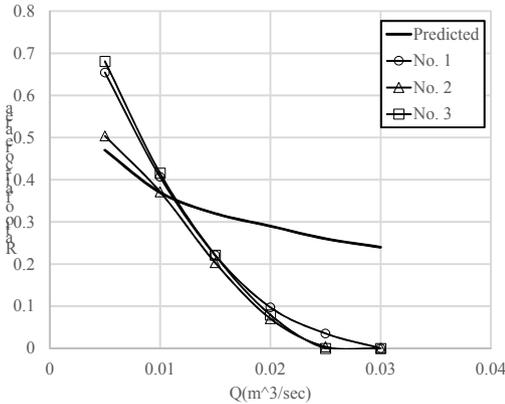
Fig. 7에서 접선식 기본형과 복단면형의 수심-유량 관계의 특성을 비교할 수 있는데, 완경사 복단면형(No. 2)은 접선식 기본형(No. 1)과 유사한 양상을 나타내고 있다. 반면에 급경사 복단면형(No. 3)은 상이한 경향을 나타내는데 유량 0.025 l/sec까지 저유량 상태의 수심-유량 관계를 나타내며 최고 유량에서 급격한 수심 상승을 나타내고 있다.

이상의 수심-유량 관계에 의해 형상별 효율을 평가하면, 전체적인 효율은 완경사 복단면형이 다소 우수하며,

급경사 복단면형은 특정 유량 이하에서는 우수한 효율을 나타내나 그 이상의 유량에서 효율이 크게 떨어진다.

4.4 공기 기둥 면적비

수치모의 결과에서 수직갱에 형성되는 면적비를 유량에 대해서 도시하면 Fig. 8과 같다. 예측값은 자유 와류 가정에 의한 식 (8)에 의한 값을 나타낸다.



[Fig. 8] Relation of air core area ratio and discharge

수치 모의 결과의 공기 기둥 면적비는 수직갱에서 형성되는 공기 기둥의 면적이 최소가 되는 지점에서 산정하였다. 이론식에 의한 예측값은 유량이 증가함에 따라 공기 기둥의 면적비 감소율은 감소하는 경향을 나타내지만, 본 연구의 수치 모의 결과는 3가지 형상 모두 유량 증가에 따라 공기 기둥 면적비 감소율이 동일하게 나타난다.

Yu와 Lee(2009)[8]의 연구에 의하면 유량이 Q_f 이하이면 예측값에 비해서 공기 기둥 면적비가 높게 나타나고 유량이 Q_f 보다 큰 경우에는 공기 기둥 면적비가 예측값에 비해서 다소 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타낸다. 본 연구의 수치모의 결과도 이와 유사하게 나타나는데, 3가지 형상에서 모두 Q_f 이상의 고유량에서 공기 기둥 면적비가 예측값에 비해서 크게 낮은 값을 나타낸다.

각 형상 별 특성을 분석하면, No. 1의 경우에는 저유량에서 다소 낮은 면적비를 나타내나 고유량에서 3가지 형상 중에서 가장 높은 면적비를 나타낸다. No. 2의 경우에는 저유량에서 낮은 면적비를 나타내고 고유량에서도 낮은 면적비를 나타낸다. No. 3는 저유량에서는 높은 면적비를 나타내며 고유량에서는 낮은 면적비를 나타낸다. 종합적인 관점에서는 고유량에서 다소 높은 면적비를 나타내는 No. 1이 공기 면적비 성능에서는 다소 우수하다고 할 수 있지만, $\lambda = 0.25$ 기준에서 평가한다면 3가지

형상 모두 공기 면적비 측면에서는 유사하다고 할 수 있다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 저유량에서의 안정적 와류 형성을 유도하는 복단면 점선식 유입구의 수리 특성을 분석하기 위하여 3차원 수치모의를 수행하였다. 수리 특성 분석은 기존 점선식 이론에 의해 흐름 상태, 수면형, 수심-유량 관계, 공기 기둥 면적비 등에 대해서 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 흐름 상태의 특성을 분석하기 위한 한계점 이동 이론과 자유 배수 조건 이론에 의한 Q_c 와 Q_f 는 수치모의 결과의 흐름 상태와 부합되는 양상을 보여주었다. 즉, 점선식 와류 유입구의 기본설계인자로 유효함을 확인할 수 있었다.
- 2) 수치모의 결과의 수면형도 자유 배수 조건 이론과 부합되는 양상을 나타내어 흐름 상태의 특징을 파악하는 데 중요한 인자임을 확인할 수 있다. 그러나 자유 배수 조건이 수직갱의 회전류를 고려하긴 하지만 1차원적 고려라는 한계와 점축단면의 단면 축소에 따른 수리 현상을 충분히 고려하지 못하는 것으로 판단된다. 즉, 접합부 직상류에서의 수위 상승을 접합부의 흐름정체로 인한 도수인지 단면 축소 효과에 의한 수위 상승인지를 명확하게 구별하기 어렵다는 문제가 있다. 특히, 실험이나 수치모의에서 수직갱 내부에서 회전에 의한 수면형을 명확히 구분하여 Δz 을 정량화하는 것이 어려우므로 접합부 직상류의 수위 상승을 원인을 설명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 수심-유량 관계는 한계 수심 가정에 의해서만 예측이 가능한데 이 경우에는 유량이 Q_f 이상인 경우에는 매우 부정확해짐을 확인할 수 있었다. $Q > Q_f$ 인 경우에는 앞서서도 지적한 것 같이 수위 상승의 원인을 명확히 설명하기 어렵고 수위 상승의 정도도 예측하기 어렵다. 이 경우에는 실험 또는 수치모의를 통해 흐름의 3차원적 특성을 고려한 분석이 필요한 것으로 판단된다.
- 4) $Q > Q_f$ 인 경우에는 공기 기둥 면적비의 경우에도 이론적 예측값이 크게 부정확해짐을 확인할 수 있었다.

이상의 특성에 대한 분석에 의하면 완경사형 복단면 점선식 유입구(No. 2)가 흐름 특성에서 기존 점선식과 유

사한 특징을 보이고, 수심-유량 관계에서 효율성이 높으며, 공기 기동 면적비 측면에서도 유사한 특성을 보이므로 종합적으로 최적안으로 판단된다. 다만, 특정 유량 이하의 설계 유량을 고려한다면 급경사형 복단면 접선식 유입구(No. 3)가 보다 효율적일 수도 있다. 즉, 수위-유량 관계를 검토하여 급격한 수위 상승이 발생하는 구간 이하로 설계 유량을 설정하면 적용이 유리할 수 있다.

References

- [1] Drioli, C., Su un particolare tipo di imbocco per pozzi di scarico. L'Energia Elettrica, 24(10), 447-452, 1947 [in Italian].
- [2] Laushey, L. M., and Mavis, F. T., "Air Entrained by Water Flowing down Vertical Shafts, ", Proc. Minnesota Internat. Hyd. Conv. ,Internat. Assoc. for Hyd. Res., pp. 483-487, 1953.
- [3] Drioli, C., Esperienze su installation con pozzo di scarico a vortice. L'Energia Elettrica, 46(6), 399-409. 1969.
- [4] Vischer, D. L., and Hager, W. H., "Vortex drops." in Energy dissipaters, IAHR hydraulic structures design manual 9, D. L. Vischer and W. H. Hager, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 167 - 181, 1995.
- [5] Jain, S. C., and Ettema, R., "Vortex-flow intakes.", Swirling flow problems at intakes, IAHR hydraulic structures design manual, J. Knauss, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 125 - 137, 1987.
- [6] Jevdjevich, V., and Levin, L., "Entrainment of air in flowing water and technical problems connected with it.", Proc., Minnesota International Hydraulics Convention, ASCE, St. Anthony Falls Hydralic Lab., 1953.
- [7] Jain, S. C., and Kennedy, J. F., "Vortex-flow drop structures for the Milwaukee metropolitan sewerage district inline storage system.", Rep. No. IIHR Rep. No. 264, Iowa Institute of Hydraulic Research, The Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa, 1983.
- [8] Yu, D. and Lee, H. W., "Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 135, No. 3, pp. 164-174, 2009.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(164\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(164))
- [9] Korea Institute of Construction Technology, Multiple-stage basement-inlet, Korean Patent, 10-2013-0116085, 2013.
- [10] Hirt CW and Nichols BD., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", J.

Comput. Phys., 39(1), 201 - 225, 1981.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)

이 두 한(Du-Han Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학원 토목공학과(공학석사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원

<관심분야>
수리학, 전산유체

이 동 섭(Dong Sop Rhee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2000년 1월 ~ 2002년 12월 : (주)금호엔지니어링 대리
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>
토목공학, 수공학

김 명 환(Myounghwan Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경원대학교 공과대학 화학공학과 (화학공학학사)
- 2003년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원
- 2010년 8월 : 연세대학교 공과대학원 토목환경공학과 (수공학석사)

<관심분야>
하천수리학, 수리실험