하천방재

Fluent 모형을 이용한 대심도 배수터널 유입부의 통수능력 분석 Analysis of Discharge Capacity for Intake Structure at Deep Underground Storm Water Tunnel Using Fluent Model

김소영* · 김정수** · 윤세의***

Kim, So Young*, Kim, Jung Soo**, Yoon, Sei Eui***

Abstract

Recently, the deep underground storm water tunnel for inundation reduction has been designed and constructed in urban areas. However, practical studies considering characteristics of domestic urban areas are insufficient. Especially, flow pattern and drainage capacity of intake structures are influenced by intake types of a drop shaft. Therefore, it is necessary to analyse flow characteristics and discharge capacity of the intake structure with change of intake types. The computational fluid dynamics (CFD) model, Fluent 6.3, was applied to investigate the flow characteristics of the drop shaft structure for various of intake types (scroll, spiral, and tangential). The Fluent model was carefully assessed by comparing simulated results with the experiment, and there was good agreement between them. The numerical simulation was carried out according to change in intake types and inlet slopes. The simulated results were showed that spiral and tangential-inlet were stably drained the rate of inflow into the drop shaft. However, the tangential-inlet was showed steady discharge capacity at intake regardless of variation of inlet slopes compared with the spiral-inlet. Therefore, the tangential-inlet was appropriate as inlet of the deep underground storm water tunnel that be able to install on narrowish underground space of urban areas.

Key words : Intake structure, Drop shaft structure, Deep underground storm water tunnel, Fluent model

요 지

최근 도심지역의 내수침수로 인한 침수피해를 저감시킬 수 있는 방안으로 대심도 배수터널의 설계 및 시공을 실시하고 있으나, 국내 도시구역의 특성을 반영한 설계 및 시공기술에 관한 연구가 부족하다. 특히 유입유량의 흐름형상과 배제효율을 결정하는 낙차공의 중요 구조인 유입부에 대한 연구결과가 미흡한 실정이다. 그러므로 유입부의 형태 변화에 따른 흐름특성 및 통수능력의 분석 연구가 필요하다. 본 연구에서 3차원 수치모형인 Fluent 6.3 모형을 이용하여 대심도 배수터널 유입부 형태 변화에 따른 흐름특성을 비교 및 분석하였다. 또한 실험결과와 수치모의 결과를 비교 및 분석하여 유입부의 흐름특성 분석에 Fluent 6.3 모형의 적용성을 확인하였다. 유입부의 형태 변화(소용돌이형, 나선식, 접선식) 및 유입구의 경사 증가에 따른 흐름특성 분석 결과 유량배제효율은 접선식 유입부와 나선식 유입부가 거의 비슷하게 모의되었으나, 접선식 유입부가 나선식 유입부 보다 유입구의 경사 변화에 관계없이 안정적인 유입부의 통수능력을 나타내고 있다. 그러므로 국내 도시구역의 협소한 지하공간을 고려한 대심도 배수터널 유입부로는 접선식 유입부가 적합하다고 판단된다.

핵심용어 : 유입부, 낙차공, 대심도 배수터널, Fluent 모형

1. 서 론

최근 기상변화에 따른 국지성 집중호우가 도심지에 자주 발

생하고 급격한 도시화의 영향으로 배수구역의 불투수층이 증가하면서 도심지역의 저지대 침수피해는 계속적으로 증가하고 있다. 이와 같은 현상은 2010~2012년도 서울시에서 설계

*경기대학교 대학원 토목공학과 공학석사(E-mail: so891121@hanmail.net)
Master of Engineering, Department of Civil Engineering, Kyonggi University

**교신저자. 정회원. 부천대학교 토목과 조교수(Tel: +82-32-610-3310, Fax: +82-32-610-3224, E-mail: hydroguy@naver.com)
Corresponding Author. Member. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Bucheon University.

***정회원. 경기대학교 토목공학과 교수
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Kyonggi University

빈도 이상의 집중호우가 연속하여 발생함에 따라 광화문, 강남 및 신월 일대에 심각한 침수피해를 야기하였다. 이와 같이 도심지의 침수피해가 빈번하게 발생하는 원인은 현재 시설기준 상의 우수배수시스템이 배수 및 저류능력에 있어서 한계에 도달되었기 때문이라고 판단된다. 따라서 서울시에서는 국지성 집중호우에 따른 침수피해를 해결하기 위해 기 설치된 관거 시설의 확장 및 신규 저류시설을 설치하여 배수 및 저류능력의 향상을 도모하고자 하였으나, 도심지의 지상과 지하 30 m이내는 교통과 상업관련시설 및 각종 지하매설물이 혼재된 상태로 관거 시설을 확장하거나 신설하기에는 공간적 한계가 있는 실정이다. 따라서 현재 지하매설물 및 교통시설로 활용되지 않는 지하 40 m 이상 깊이의 지하공간을 활용하여 대규모 저류지를 설치하는 것을 계획하고 도심부의 공간적인 제약을 적게 하고 배수용량을 대폭 향상시킬 수 있는 ‘대심도 빗물배수터널(지하방수로)’에 대한 국내 도심지의 적용성을 검토하여 상습침수지역인 신월동에 설치를 계획 중이다(Seoul Metropolitan Government, 2012).

대심도 배수터널은 유입부, 수로부, 배수부 및 토출부로 구성되어 있으며, 수로부와 배수부 및 토출부는 유입된 유입량과 외수위 변화에 따른 운영에 의해 수로부의 관경 및 펌프시설 등을 결정하는 방법을 일반적으로 채택하고 있다. 유입부는 도시 배수 유역에서 발생하는 유출량과 이를 차집하기 위한 계획 유입량에 의해 유입부 시설의 구성요소들을 설계하고 있다. 이와 같이 대심도 배수터널의 유입부는 유입흐름을 원활하게 배제하도록 설치되는 주요 구조물로 알려져 있다. 국외에서는 이러한 유입부의 중요성에 따라 유입부의 형태 및 크기에 따른 흐름변화 및 통수능력 증대 방안에 대한 수리실험과 수치해석에 관한 연구가 1940년대 이후로 지속적으로 수행되고 있다. 그러나 국내에서는 유입부에 대한 기초적인 연구만 진행되고 있어 국내 도시지역에서 유입부의 설계 시 활용할 수 있는 기술적 자료가 부족한 실정이다. 그러므로 유입부에서의 흐름개선에 관한 구체적인 연구가 필요하며, 특히 유입부의 형태 및 구조변화에 따라 유입부에서의 흐름형상과 배제효율이 달라지므로 유입부 형태에 따른 흐름특성 변화의 비교 및 분석에 관한 연구가 필요한 실정이다.

국내의 경우 Lee and Kim(2007, 2008)은 수리모형실험을 통해 나선식 유입부에 대한 수심-유량 관계를 확인하고 기존 연구자들의 수심-유량 관계와 비교 및 검토하였으며, 나선식 유입부에 종경사를 고려하여 수심-유량 관계 및 유입유량 변화에 따른 유입부 내부의 수심변화를 검토하였을 뿐 유입부 형태별 배수능력의 비교와 배수능력 개선에 관한 연구 및 국내 설계에 직접적으로 적용 가능한 연구가 부족한 실정이다. 이에 Kim *et al.*(2012, 2013)은 접선식 유입부에서 Fluent 모형의 수치모의 결과와 수리 실험 결과를 비교하여 Fluent 모형의 적용성을 소개하였으며, Fluent 모형을 이용하여 대심도 배수터널 유입부에서의 흐름특성을 분석하였다. 국외의 경우

Drioli(1947)는 처음으로 와류식 소용돌이형 유입부의 개념을 소개하였으며, Viparelli(1950)는 실험을 통해 소용돌이형 유입부로의 유입흐름이 상류흐름일 경우에 대한 수심-유량 관계를 도출하였다. Jevdjovich and Levin(1953)은 새로운 유입부 형태인 접선식 유입부를 제안하고 수리 모형실험을 통해 접선식 유입부가 기존의 나선식 유입부와 같이 공기연행을 최소화시키는 효과를 가진다는 것을 확인했다. Jain and Kennedy(1983), Jain(1984)은 수리실험을 통해 수리학적 기준을 만족하는 접선식 유입부의 설계안을 제안하였으며, 수리 실험 자료를 통해 수직 낙차부의 지름을 결정하는 방정식을 제시하였다. Jain and Ettema(1987)는 접선식 유입부에 대한 수심-유량 관계에 따른 유입부의 설계 제원(수직 낙차부, 지름, 접근수로 너비 등)을 수리모형실험을 통해 제시하였다. Kellenberger(1988)는 소용돌이형 유입부와 다르게 유입부에 유도벽을 설치하여 사류흐름에 적합한 나선식 유입부 구조를 발표하였다. Yu and Lee(2009)는 접선식 유입부에 대해 서로 다른 구조제원을 가진 15개의 유입부 모형들에 대한 수리실험을 실시하여 유입부에서의 흐름특성을 분석하고 접선식 유입부 설계를 위한 일반적인 설계안을 제공하였다.

본 연구에서는 유입부의 형태 및 구조변화에 따른 통수능력을 비교하고 수리실험의 물리적 및 시간적 한계를 극복하기 위하여 수치모형을 이용한 유입부에서의 흐름특성 분석을 수행하였다. 대심도 배수터널의 유입부에서는 물과 공기 등의 혼재된 복잡한 유동현상이 예상되므로 다상유동 해석이 가능한 3차원 유한체적 수치모형인 Fluent 6.3모형을 선택하여 흐름 해석을 실시하였다. Yu *et al.*(2009)의 수리실험 결과와 수리모형과 동일 조건의 격자망을 구성하여 모의한 수치 모의 결과를 비교 및 분석하여 대심도 배수터널 유입부에서의 흐름특성 해석에 관한 Fluent 6.3 모형의 적용성을 검증하였다. 또한 유입부의 형태 변화에 따른 유입부에서의 흐름변화를 모의하여 유입부 형태별 통수능력을 분석하였으며, 국내 도심지의 설치에 가장 적합한 유입부 형식을 선정하기 위하여 유입구 경사변화에 따른 유입부에서 통수능력의 변화를 분석하였다.

2. 와류식 유입부의 형태

대심도 배수터널에서는 고저차가 많이 나는 두 개의 하수관을 연결시키기 위해 낙차공을 사용하며, 이러한 낙차공은 유입부(inlet structure), 수직 낙차부(drop shaft), 유출부(outlet structure)로 구성된다. 낙차공의 구성 중 유입부는 유입 유량을 배수시키는 중요한 구조물이며, 특히 유입부 형태에 따라 접근수로에서의 수심이 결정되어 유입 유량의 통수능력을 평가하는 기준이 된다. 이러한 유입부의 기본형식은 낙하식, 경사로식 및 계단식이 있으며, 낙하식은 다시 돌입식과 와류식으로 나뉘어진다. 유입부의 기본형식들 중 와류식 유입부의

Fig. 1. Type of Vortex Intake.

구조는 접근수로를 통해 유입부를 통과한 물이 낙차부 벽면을 따라 아래로 내려가면서 벽면의 마찰에 의해 계속적으로 에너지가 소산되게 하는 구조이다. 또한 공기층은 낙차부의 중앙에 형성되므로 단순 낙차형 유입부에 비해 안정적인 흐름이 발생한다. 와류식 유입부는 5 m 이상의 큰 낙차에 적용 가능하며, 유입부에서의 흐름은 안정적인 사류($Fr_a < 0.7$) 또는 안정적인 사류($Fr_a > 1.5$)로 유입되어야 한다(Hager, 1999). 따라서 에너지 감쇄효과와 공기의 혼입정도를 고려했을 때, 고 낙차를 가지는 대심도 배수터널의 유입부로는 와류식 유입부가 가장 적합하다고 판단된다. 와류식 유입부의 형태는 크게 소용돌이형(scroll intake)과 나선식(spiral intake) 및 접선식(tangential intake) 유입부로 나뉜다.

소용돌이형 유입부의 구조는 유입부 바닥을 따라 유입된 유량이 360° 회전하는 동안 수직 낙차부 아래로 완전히 들어가게 하기 위해 낙하 유입구의 둘레를 따라 너비가 감소하는 나선형 모양이며(Fig. 1(a)), 유입부로 유입되는 흐름이 상류인 경우에는 나선부에서 점차 수심이 떨어진다. 반면에 사류인 경우에는 나선부에서 충격파가 발생하여 수면이 상승하게 되며, 빈번히 도수가 발생되고 이러한 도수현상은 접근수로의 수심을 상승시켜 유입부 구조물의 크기를 증가시키고 도수가 하류로 전파되면서 진동현상을 야기하여 낙차부에서 공기 핵의 질식 현상이 발생한다.

나선식 유입부는 나선의 입구에 유입흐름의 회전을 유도하는 유도벽을 설치하여 수직 낙차부 내의 공기연행을 촉진시켜 원활한 유량배제효과를 나타내는 구조이며(Fig. 1(b)), 나선식 유입부로서의 사류 흐름의 유입은 유입부의 나선부 벽면 바깥쪽에 충격파를 발생시켜 수면이 상승하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

접선식 유입부는 Fig. 1(c)와 같이 구조가 간단하여 시공이 간편하고, 상대적으로 차지하는 지하공간의 체적이 작기 때문에 보다 경제적인 시설의 구축이 가능하다는 장점이 있다. 또

한 유입구에서 물의 흐름을 회전시키는 유입구 구조로 만들어져서 유입 유량을 수직 낙차부 아래로 효과적으로 유도하고 수직갱에서의 공기 핵을 크게 유지시켜 안정적인 소용돌이 흐름이 생성된다.

3. Fluent 모형의 기본이론

3.1 모형의 구성

Fluent 6.3 모형은 Fluent사에 의해 개발된 모형으로 유체역학 및 열전달, 화학반응 등의 동수역학 모델링을 위한 GUI (graphical user interface) 환경을 바탕으로 하는 3차원 유한체적 수치모형이다. Fluent는 전산유체역학 해석에 필요한 전처리(pre-processing), 계산(solving), 후처리(post-processing)의 모든 작업을 할 수 있는 모형으로 전처리기인 Gambit, Tgrid와 계산 및 후처리 프로그램인 Fluet로 구성되어 있다.

Fluent는 유한체적법(FVM, finite volume method)을 사용하는 비정렬 격자 계산 프로그램으로서 비정렬(non-conformal) 인터페이스면이 격자가 상이하더라도 해석을 수행하며 사면체, 육면체, 프리즘, 피라미드 및 다면체 격자를 지원하여 아무리 복잡한 형상이라도 쉽고 빠르게 문제없이 모델링을 수행한다. 따라서 쉽고 빠르게 전처리 작업을 수행할 수 있어 효율성을 크게 증가시킬 수 있다. 또한 층류 및 난류, 압축성 및 비압축성, 열전달 및 화학반응이 있는 유동까지 해석을 할 수 있는 범용 소프트웨어로서 모든 분야에 적용이 가능하도록 다양한 수치해석 기법을 보유하고 있다. 동수역학 문제를 풀기 위해 자유수면 해석은 다상 유체의 거동을 해석하는 방법인 VOF(volume of fluid) 방법을 사용한다. 또한 난류 모형으로는 모형, $k-\varepsilon$ LES(large eddy simulation) 등을 사용하여 하천, 하구 또는 항구와 같은 수역을 대표하는 유한체적망의 각 유체 체적에서 수심 및 유속을 계산할 수 있으며, 정상류 뿐만 아니라 부정류 상태까지 모의가 가능하다(Kim, 2010).

3.2 지배방정식

Fluent 6.3 모형에서 사용하는 지배방정식으로 연속방정식은 식 (1)과 같다(Fluent Inc, 2005).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도이고, x_i , u_i 는 텐서로 표시된 각 방향으로의 거리 및 유속이며, t 는 시간이다. 운동량 방정식은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식으로 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

여기서, P 는 정수압이고, g 는 중력가속도이고 τ_{ij} 는 전단응력 텐서로서 식 (3) 같이 표시할 수 있다.

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Fluent 6.3 모형에서 사용하는 난류모형 중 본 연구에서 채택한 $k-\varepsilon$ 난류모형은 Navier-Stokes 방정식의 시간적분 시 발생하는 Reynolds 응력이 평균유속의 경사에 비례한다는 Boussinesq 가정에서 출발하는 모형이다. 이 난류 모형은 비등방성 난류, 즉 선회류, 곡률이 강한 유동, 회전장에서의 유동 및 부력이 있는 유동 등에서 큰 위력을 발휘한다(Myung, 2002).

4. 수치모형 검증

본 연구에서 선택한 Fluent 6.3모형이 유입부 내의 복잡한 흐름현상을 정확히 모의할 수 있는지를 확인하기 위해 수치모형의 적용성을 검증하였다. 검증 방법은 수치모형의 정확도를 판별하기 위해 수치모형으로부터 모의된 결과 값을 Yu *et al.*(2009)이 실시한 수리실험으로부터의 실측값과 비교하였다. 수치모의의 구조적 제원 및 유량조건은 수리 실험의 조건과 동일하게 하였으며, 수리 실험과 수치모의로부터 도출된 유량 변화에 따른 유입부에서의 수심변화 및 흐름형상을 비교 및 검토하였다.

4.1 수치모형 검증 조건

Yu *et al.*(2009)은 접선식 유입부의 구조 변수들(D , B , e , L , z)이 구조물 내의 흐름특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 구조 제원을 변경시키면서 수리실험을 수행하였다. 수리실험 장치의 총 높이는 6 m이며, 직사각형 단면의 접근수로, 원통형의 수직 낙차부, 정수지 및 하류 조절능력을 가진 유출탱크로 구성되어 있다. Fig. 2는 수리실험모형의 개략도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 수리 실험에서 사용된 접선식 유입부의 구조를 나타낸 것이다.

Fig. 2. Experimental Setup(Yu *et al.*, 2009).

Fig. 3. Tangential Vortex Intake: (a) Plan View; (b) Side View (Yu *et al.*, 2009).

Table 1. Experimental Conditions(Yu *et al.*, 2009)

D(mm)	B(mm)	e(mm)	L(mm)	z(mm)	Q(l/s)
124	103	28.0	271.9	136.0	4, 7

본 연구에서는 수치모의 결과의 비교를 위하여 Yu *et al.* (2009)의 수리실험 모형들 중에 수리실험 결과의 실측값이 제시되어 있는 실험 조건을 선택하였다. 수리 실험의 제원 및 조건은 Table 1과 같다. 여기서, D 는 수직 낙차부 직경, B 는 접근수로 너비, e 는 접합부에서의 유입부 너비, L 은 접근수로와 접합부 사이 단면 폭이 좁아지는 구간의 길이, z 는 접근수로와 접합부간의 낙차 높이차, Q 는 유입유량이다.

Fig. 4. Mesh of Intake Structure and Boundary Conditions.

4.2 수치모형의 적용

본 연구에서는 유입부 내의 흐름형상 및 유량배제효율 등을 검토하는 것이 목적이므로 접근수로와 유입부 및 수직 낙차부 구조만을 고려하여 수치모의를 실시하였다. 수치모의 제원 및 조건은 Table 1의 수리 실험의 제원과 동일하게 구성하였다. 접근수로와 유입부 및 수직낙차부의 기하 모형 격자망은 수리 실험 모형의 구조제원 및 배치 등을 고려하여 Fig. 4와 같이 생성하였으며, 수치해석의 안정성 확보를 위해 일정한 크기의 6면체 격자로 조밀하게 구성하였다.

Fluent 6.3에서 구성한 수치모형 조건은 점선식 유입부 내의 물(액체)과 공기(기체)를 모두 고려하기 위해 다상유동을 해석하는데 사용하는 방법인 VOF 방법을 적용하였다. 수치해석 방법으로는 비정상류(unsteady), 난류모형으로는 예측성이 뛰어나고 수치 안정성면에서 우수하여 공학적인 난류운동장 예측에 널리 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 채택하였다. 접근수로의 유입부에는 속도 유입 조건(velocity inlet)을 주어 유입유속을 적용하였고, 접근수로와 수직 낙차부의 물과 공기가 접하는 자유수면 부분의 경계와 수직 낙차부 하단의 유출부에는 압력 유출 조건(pressure outlet)을 부여하였다(Fig. 4).

4.3 수치모의 및 수리실험 결과 비교

수리실험의 유입유량이 4 l/s와 7 l/s에 대한 모의 전 구간에서의 수치모의 결과는 Fig. 5와 같으며, 수치모의 결과를 수리 실험 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. Table 2는 유입 유량 4 l/s와 7 l/s에 대한 수리실험 결과와 수치모의 결과의 유입유량에 대한 전체적인 흐름 형상을 나타내며, 여기서 경계선 아랫부분이 물, 윗부분이 공기를 나타낸다. 또한 유입 유량의 증가에 따른 Yu *et al.*(2009)의 수리실험 결과와 수치모의 결과의 흐름형상 및 수심변화를 도시하여 비교하였다(Fig. 6).

Fig. 5. Stream Figuration at Intake Structure.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 수치모의 결과 접근수로의 폭(B)이 줄어드는 유입구 구간($0 < x \leq 200$)에서는 폭의 감소에 따라서 단면적이 감소하므로 유입구의 통수능이 감소하여 수심이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이 현상은 Table 2의 수리 모형실험에서도 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 접근수로와 유입구가 연결되는 지점($x = 0$)을 기준으로 접근수로 구간($x \leq 0$)에서는 수치모의 값의 구간 평균수심이 약 1% 더 크게 모의되었지만, 유입구 구간($x > 0$)에서는 수리실험 값의 구간 평균수심이 약 1.5% 더 크게 모의되었다. 이는 유속이 증가함에 따른 수리현상을 수치모형이 모두 반영시키지 못하는 것으로 판단된다.

그러나 Table 2에서 유입구 구간에서 흐름의 오르내림 현상의 재현과 수심의 변화가 수리 실험 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 실측치와 계산치의 오차가 접근수로와 유입부의 벽면 높이 0.3 m에 대비하여 4 l/s의 경우 평균 2.0%, 7 l/s의 경우 평균 0.7%의 오차를 보였다. 또한 가장 큰 오차를 보인 구간은 유량이 4 l/s에서 유입구 구간 160 mm일 때의

Table 2. Results of Experiment and Simulation

Discharge	Experiment (Yu <i>et al.</i> , 2009)	Simulation
4 l/s
7 l/s

Fig. 6. Comparison the Depth of Experiment with Simulation.

오차는 3.8%로 수리실험결과와 거의 유사하게 모의되었다. 따라서 Fluent 6.3 모형은 수리 실험 조건에서의 유입부 내 흐름 요동현상 및 특성을 비교적 정확하게 모의한다고 판단된다. 그러므로 Fluent 6.3모형은 대심도 배수터널의 접근수로와 유입부 내의 흐름특성 및 수심 변화를 예측하는 데에 있어서 사용이 가능하다고 판단된다.

5. 유입부 형태별 흐름특성 분석

5.1 수치모의 조건

본 연구에서는 유입부 형태별 배수능력을 비교하기 위하여 Fluent 6.3모형을 이용하여 대심도 배수터널의 유입부 형태(소용돌이형, 나선식, 접선식)에 따른 흐름형상 및 수리적 특성을 분석하였다. 세 가지 형태 중에서 유입유량을 가장 효과적으로 배제하며, 도심지에 설치되는 대심도 배수터널의 조건

에 가장 적합한 유입부를 선정하고자 한다. 세 가지 유입부의 수치모의 제원(수직 낙차부 지름, 접근수로 너비 등)과 유량 조건은 동일한 값을 적용하였으며, 접근수로의 경사 변화는 고려하지 않았다(Table 3).

이 때, 유입부 형태별 수치모의 제원은 Korea Institute of Construction Technology(2007)의 값을 준용하였다. Korea Institute of Construction Technology(2007)에서는 유입부의 기본적인 제원으로 수직갱의 지름은 150 mm, 접근수로의 폭은 120 mm, 접근수로의 길이는 1.5 m로 구성하였으며, 유입부별 개별적인 구조적인 제원은 기본 제원으로 계산하여 결정하였다. 또한 수리실험 시 유입부 별 최대 실험 유량의 범

Table 3. Numerical Conditions

Type of Inlet	Slope of Inlet(%)	Discharge (l/s)
Scroll	0	20
Spiral	5	
Tangential	5

Fig. 7. Mesh of Vortex Intake Structure.

위가 약 20 l/sec로 결정하였으므로 이를 수치 모의에서의 유입 유량 조건으로 선정하였다. 유입부 형태별 접근수로와 유입부 및 수직 낙차부의 기하 모형은 유입부의 복잡한 구조 형상을 정확히 구현하기 위해 사면체와 다면체 격자로 조밀하게 구성하였다(Fig. 7). 또한 수치모형의 방법 및 경계조건은 본 연구의 4.2절에서 사용된 것과 동일하게 사용하였다.

5.2 수치모의 결과 및 분석

세 가지 형태에 대한 유량배제효율과 흐름 안정성 등을 비교 및 분석하기 위한 기준으로 접근수로에서의 평균수심과 수직 낙차부 내의 공기핵 크기를 비교하였다. Fig. 8은 유입부를 평면으로 도시하여 접근수로 구간과 공기핵의 최소 지역(throat)에 대한 개요를 나타낸 것이다. 평균수심은 접근수로에서 수심이 가장 낮은 지점과 그 지점으로부터 상·하류로 0.15 m 떨어진 두 지점에서의 수심을 선택하여 총 세 지점의 수심을 평균한 값으로 결정하였으며, 그 값이 작을수록 유입 유량을 효과적으로 배제하는 것으로 판단하였다. 공기핵은 유입유량에 혼입된 공기로 인해 수직 낙차부 내에 생성되는 일

Fig. 8. Schematic Diagram of Approach Channel and Air Core.

Table 4. Average Depth at Approach Channel with Change of Intake Types

Discharge (l/s)	Average depth(cm)		
	Scroll intake	Spiral intake	Tangential intake
20	24.6	28.3	22.7

종의 공기층을 말하며, 흐름을 원활하게 하고 공기가 외부로 쉽게 배출되게 하며, 낙차부 하단이 흐름에 의해 잠기는 것을 방지하므로 충분히 크게 모의되어야 한다. 따라서 수치모의 결과로부터 평균수심과 공기핵의 최소 크기를 계산하여 흐름 안정성 및 통수능력에 대한 비교 및 분석을 실시하였다.

5.2.1 평균수심

접근수로에서의 평균수심을 산정하기 위하여 Fig. 9와 같이 2차원 단면형상을 추출하였으며, 평균수심을 계산한 결과 Table 4와 같았다. 수치모의 결과 나선식 유입부의 평균수심이 28.3 cm로 가장 높게 나타났으며, 소용돌이형 유입부와 접선식 유입부는 각각 24.6 cm, 22.7 cm로 접선식 유입부가 가장 낮게 모의되었다. 세 형태 유입부 모두 표면의 요동현상이 거의 없었으며, 수직 낙차부가 유량에 의해 막히는 흐름 질식 현상 또한 나타나지 않았다. 따라서 접근수로에서의 평균수심을 비교한 결과 접선식 유입부가 유입유량을 수직 낙차부 하단으로 가장 빠르게 배제하는 것으로 판단된다.

5.2.2 공기핵 크기

공기핵 크기를 비교하기 위하여 Fig. 10의 모의된 결과를 이용하여 공기핵 크기가 가장 최소인 구간의 평면을 추출하고 추출된 평면을 이용하여 공기핵 크기를 계산하였으며, 이를 Table 5에 나타내었다. 수치모의 결과 나선식 유입부의 공기핵 크기가 20.7 cm²로 가장 크게 모의되었고 소용돌이형 유입부의 공기핵 크기가 12.8 cm²로 가장 작게 모의되었으며, 세 유입부의 공기핵 크기가 전반적으로 매우 작게 모의되었다. 이는 일반적으로 설치되는 대심도 배수터널의 다량의 유입 유량을 입력조건으로 선정한 결과 선정된 유입부 제원의 설계유량보다 큰 유량을 유입시켜 수치모의 하였기 때문

Fig. 9. Flow Change at Intake Structure.

Fig. 10. Change of Air Core with Change of Inlet Types.

Table 5. Minimum Size of Air Core with Change of Intake Types

Discharge (l/s)	Minimum size of air core(cm ²)		
	Scroll intake	Spiral intake	Tangential intake
20	12.8	20.7	15.0

Fig. 11. Comparison of Average Depth and Air Core Size with Change of Intake Types.

이라 판단된다.

또한 세 가지 유입부 형태에 따른 평균수심과 공기핵 크기를 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 나선식 유입부의 구간 평균수심과 공기핵 크기가 각각 28.0 cm, 20.7 cm²으로 가장 크게 모의되었다. 이는 접근수로로 유입된 유량을 수직 낙차부로 빠르게 배제시키지는 못하지만 공기핵은 가장 크고 안정적으로 형성할 수 있는 형태라는 것을 의미한다. 그러나 본 수치모의 조건(유입부 경사=5%)과 같이 유입부의 경사가 비교적 작은 경우에는 나선식 유입부의 유량 배제효율이 다른 유입부에 비해 비교적 낮은 것으로 판단된다.

소용돌이형 유입부의 경우에는 구간 평균수심이 24.6 cm로 나선식 유입부보다 3.7 cm의 큰 차이로 낮게 모의되었다. 이는 본 수치모의 조건의 유량이 Froude Number가 1보다 작게 모의되어 유입부 내로 상류흐름으로 유입되기 때문에 상류흐름에 적합한 구조로 설계된 소용돌이형 유입부가 사류흐름에 적합하도록 설계된 나선식 유입부보다 평균 수심이 낮게 나타난 것이라고 판단된다. 즉, 상류흐름으로 유량이 유입되는 경우에는 기존의 설계이론들로 인해 증명된 것처럼 소용돌이형 유입부가 나선식 유입부보다 유량을 더 빠르고 효율적으

로 배제한다는 것을 확인하였다. 그러나 실제 대심도 배수터널에서는 유입부로 유입되는 유량이 상류보다 유속이 빠른 사류흐름인 경우가 더 많을 것으로 판단된다. 따라서 소용돌이형 유입부에 사류흐름의 유량이 대량으로 들어온다면 다른 형태의 유입부에 비해 도수현상(hydraulic jump)이 잘 발생하므로 유입부에서 배수시 월류 및 흐름질식 등의 문제점들이 발생할 수 있다.

6. 유입구 경사변화에 따른 유입부의 흐름특성 분석

본 연구에서는 소용돌이형 유입부를 제외한 나머지 두 유입부 형태(나선식, 접선식)의 배수능력을 보다 면밀하게 확인하기 위하여 유입구 구조변화(유입구 경사 증가)에 따른 흐름형상 및 특성을 구체적으로 비교 및 분석하였다. 수치모의시 구조적 제원은 5.1절의 값과 동일하게 선정하고 유입부의 배수능력을 증가시키는 데에 가장 민감한 매개변수라고 판단되는 유입구 경사 조건을 변화시켜가며 수치모의 하였다. 일반적으로 나선식 유입부의 경우 유입구의 경사는 10~20%가 적당하고 30%를 초과하면 안 되며, 또한 접근수로 바닥 경사보다 크거나 같아야 한다(Hager, 1999). 따라서 본 수치모의에서는 나선식 유입부와 접선식 유입부의 접근수로의 경사 변화는 고려하지 않고 유입구 경사를 10%, 20%, 30%로 증가시키면서 유입구의 경사변화에 대한 수치모의를 실시하였다. 두 유입부의 격자망과 수치모형의 방법 및 경계조건은 본 연구의 4.2절에서 사용된 것과 동일하게 사용하였다.

6.1 접근수로의 수심변화

유입구 경사변화에 따른 접근수로의 수심변화를 분석하기 위해 Fig. 12와 같이 유입부의 2차원 단면을 추출하였으며, 추출된 단면 형상으로부터 계산한 구간 수심의 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 수치모의 결과 나선식 유입부의 경우 유입 유량이 동일할 때 유입부의 경사가 증가함에 따라 접근수로에서의 구간 평균수심이 낮아지는 것으로 나타났으며, 경사가 10%, 20%, 30%인 경우 각각 24.7 cm, 17.4 cm, 17.1 cm로 모의되었다. 여기서, 유입구 경사가 10%에서 20%로 증가할 경우에는 구간 평균수심이 29.5%정도 감소하여 유입구 경사가 없는 경우보다 있는 경우에 배수효율이 증가하고 있다. 그러나 경사가 20%에서 30%로 증가할 때는 구간 평균수심이 1.5%정도로 감소폭이 작게 나타났다. 이는 나선식 유입부의 경우 유입구 경사가 일정 이상이 되면 유입구 경사변화에 따른 배수효율의 증대효과가 급격하게 감소하는 것을 의미하므로 본 연구의 수치모의 결과를 바탕으로 유입부의 유입구 경사가 20% 정도인 나선식 유입부가 대심도 배수터널 유입부의 통수능력을 비교적 크게 증대시키는 것으로 판단된다.

접선식 유입부의 경우에도 나선식 유입부와 동일하게 유입

Fig. 12. Flow Patterns at Spiral and Tangential Intake Structure with Variation of Inlet Slope3

Fig. 13. Change of Average Depth at Approach Channel with Variation of Inlet Slope.

구의 경사가 증가할수록 접근수로에서의 평균수심이 낮아지고 있음을 보였으며, 경사가 10%일 때 평균수심이 21.8 cm로 모의되었고 경사가 증가할수록 평균수심 감소율이 각각

5.8%, 11.8%로 모의되어 경사가 20%, 30%인 경우 각각 20.5 cm, 18.2 cm로 모의되었다. 또한 경사가 30%인 경우 나선식 유입부와 평균수심 차이가 1 cm 정도로 근소하게 나타났다. 즉, 유입부 경사가 10% 정도로 낮을 경우에는 접선식 유입부의 구조가 효율적이지만, 경사가 20%, 30%와 같이 보다 클 경우에는 나선식 유입부가 보다 효율적이라 판단된다.

6.2 수직 낙차부에서의 공기핵 크기 변화

유입구 경사변화에 따른 공기핵의 크기변화는 수직 낙차부 내에 공기핵의 크기가 가장 최소인 구간의 평면을 추출하여 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 나선식 및 접선식 유입부에서 공기핵의 크기는 유입구 경사가 증가할수록 증가하는 것으로 모의되었으며, 나선식 유입부의 경우 10% 경사일 때 27.3 cm^2 이고 20%, 30%로 증가할 때 공기핵 크기 증가율이 각각 29.3%, 17.8%로 공기핵 크기가 35.3 cm^2 , 41.6 cm^2 로 계산되었다. 접선식 유입부의 경우에는

Fig. 14. Change of Minimum Size of Air Core Shape at Spiral and Tangential Intake Structure with Variation of Inlet Slope.

Fig. 15. Change of Minimum Size of Air Core at Spiral and Tangential Intake Structure with Variation of Inlet Slope.

10%경사일 때 15.4 cm^2 으로 모의되었으며, 경사가 20%, 30%로 증가할 때 공기핵 크기 증가율이 각각 4%, 10%로 공기핵 크기가 16.0 cm^2 , 17.6 cm^2 으로 계산되었다.

Fig. 15에서 나선식 유입부와 접선식 유입부 모두 유입구 경사가 증가할수록 공기핵의 규모가 증가하였으며, 나선식 유입부의 공기핵 크기가 접선식 유입부의 공기핵 크기보다 크게 모의되었고 경사가 증가할수록 그 차이는 더 증가하였다. 그러나 접선식 유입부의 공기핵 크기는 수치모의 조건의 유입유량을 모두 통수할 수 있을 정도로 산정되었다. 그러므로 수치모의 결과에서 알 수 있듯이 나선식 유입부와 접선식 유입부 모두 유입부 경사가 증가할수록 유량배제효율의 증가를 보였으며, 흐름이 안정적이고 효과적으로 유입유량을 배제하는 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 3차원 수치모형인 Fluent 6.3모형을 이용하여 대심도 배수터널의 유입부 형식에 따른 흐름특성을 비교 및 분석하였다. 이 모형의 적용성을 검토하기 위하여 접선식 유입부에 대한 수리실험 결과(Yu *et al.*(2009))와 수치모형으로부터 모의된 값을 비교하였으며, 그에 따른 오차를 검토하였다. 또한 유량배제효율이 가장 좋은 유입부를 선정하기 위하여 유입부 형태별 동일 조건(구조 제원, 경계 조건)에서의 흐름 변화에 대한 수치모의를 실시하였으며, 국내 도심지의 설치에 가장 적합한 유입부 형식을 선정하기 위하여 유입구 경사변화에 따른 유입부에서 통수능력의 변화에 대한 수치모의를 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) Yu *et al.*(2009)의 유입부에 대한 수리실험 결과와 Fluent 6.3모형으로 수치 모의한 결과를 비교하여 수치모형의 적용성을 검증한 결과 유입부 내 흐름 요동현상 및 수심 변화를 비교적 정확하게 모의하였다. 그러므로 Fluent 6.3모형은 대심도 배수터널의 접근수로와 유입부 내의 흐름특성 및 수심 변화를 예측하는 데에 있어서 사용이

가능하다고 판단된다.

- 2) 본 연구의 수치모의 조건에서 나선식 유입부의 경우 유입구 경사가 10%에서 20%로 증가할 경우에는 접근수로 구간 평균수심이 29.5%정도 감소하여 유입구 경사가 없는 경우보다 있는 경우에 배수효율이 증가하고 있다. 그러나 경사가 20%에서 30%로 증가할 때는 구간 평균수심이 1.5%정도로 감소폭이 작게 나타났다. 이와 같이 유입부의 접근수로 경사 변화에 따라 통수능력이 변화하므로 유입부를 효율적으로 사용하기 위해서는 접근수로의 적정 경사를 고려하여 설계하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 나선식 유입부와 접선식 유입부 모두 유입부 경사가 증가할수록 유량배제효율의 증가를 보였으며, 흐름이 안정적이고 효과적으로 유입유량을 배제하는 것으로 판단된다. 그러나 유입구의 경사가 저경사(10% 이하)일 경우 접근수로 구간에서 접선식 유입부의 평균수심은 나선식 유입부의 평균수심보다 비교적 작게 나타났으며, 30% 정도의 경사에서는 비교적 유사한 평균수심을 나타내고 있으므로 유입구의 경사 변화에 관계없이 안정적인 유입부의 통수능력을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 국내 도시구역의 협소한 지하공간을 고려한 대심도 배수터널 유입부로는 접선식 유입부가 적합하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Drioli, C. (1947) Su un particolare tipo di imbocco per pozzi di scarico. *LiEnergia Elettrica*, Vol. 24, No. 10, pp. 447-452 [in Italian].
- Drioli, C. (1969) Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a vortice. *LiEnergia Elettrica*, Vol. 66, No. 6, pp. 399-409 [in Italian].
- Fluent Inc. (2005) *Fluent 6.3 User's Guide*, Fluent Inc, New Hampshire, USA.
- Hager, W.H. (1999) *Wastewater Hydraulics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Jain, S.C. (1984) Tangential Vortex-inlet. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 1693-1699.
- Jain, S.C., and Ettema, R. (1987) Vortex-flow Intakes. *IAHR hydraulic structures design manual*, pp. 125-137.
- Jain, S.C. and Kennedy, J.F. (1983) Vortex-flow Drop Structures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District Inline Storage System. *Iowa Institute of Hydraulic Research*, University of Iowa.
- Jevdjovich, V. and Levin, L. (1953) Entrainment of Air in Flowing Water and Technical Problems Related with It. *Proceed-*

- ings of 5th IAHR Congress, IAHR, pp. 439-454.
- Kellenberger, M.H. (1988) Wirbelfallschicht in der Kanalisationstechnik. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*, pp. 1-367 [in German].
- Kim, J.S. (2010) An Experimental Study for Flow Improvement at Surcharged Manholes. *Doctoral Dissertation of Kyonggi University*.
- 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 Storm Water Tunnel. *Proceedings of the KWRA Conference 2012*, Korea Water Resources Association, p. 604.
- Kim, J.S., Kim, S.Y., Lee, W., and Yoon, S.E. (2013) Comparison of Stream Characteristics at Intake Structure of Deep Underground Storm Water Tunnel. *Proceedings of the Kosham Conference 2013*, Korean Society of Hazard Mitigation p. 738.
- Korea Institute of Construction Technology (2007) *Technology for Reduction of Urban Flood Damage*. Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Lee, D.S. and Kim, C.W. (2007) Consideration of the Stage-Discharge Relation in Spiral Intake. *Proceedings of the KWRA Conference 2012*, Korea Water Resources Association, pp. 894-898.
- Lee, D.S. and Kim, C.W. (2008) Investigation on the Stage-Discharge Relation in inclined Spiral Intake. *Proceedings of 34th KSCE Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2924-2927.
- Myung, H.G. (2002) *Engineering of Computational Thermo-Fluid Dynamics*. Munundang.
- Seoul Metropolitan Government (2012) *Master Plan for Design and Construction of Detention and Drainage Facilities for Damage Prevention in SinWol*.
- Viparelli, M. (1950) Su un particolare tipo di imbocco e sull'efflusso con vortice. *LiEnergia Elettrica*, Vol. 27, No. 10, pp. 610-624 [in Italian].
- Yu, D. and Lee, J.H. (2009). Hydraulics of Tangential Vortex Intake for Urban Drainage. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 3, pp. 164-174.

Received ■ February 4, 2014

Revised ■ February 11, 2014

Accepted ■ March 10, 2014