



## CFD를 이용한 농축조 슬러지의 유출흐름특성 해석

### Analysis of the sludge thickening characteristics in the thickener using CFD Model

박노석\* · 문용택 · 김병균 · 김홍석

No-Suk Park\* · Yong-Taik Moon · Byung-Goon Kim · Hong-Suck Kim

K-water, K-water 연구원

(2011년 8월 10일 접수 ; 2011년 10월 12일 수정 ; 2011년 10월 14일 채택)

#### Abstract

The residual treatment facilities in WTP(water treatment plant) play an important role in solid-liquid separation. At present, it is difficult to solve problems related with thickening and dewatering of WTP sludge, and discharging waste water to river. The quantity of residuals generated from water treatment plants depends upon the raw water quality, dosage of chemicals used, performance of the treatment process, method of sludge removal, efficiency of sedimentation, and backwashing frequency. Sludge production by the physical separation of SS(Suspended Solid) occurs under quiescent conditions in the primary clarifier, where SSs are allowed to settle and to consolidate on the clarifier bottom. Raw primary sludge results when the settled solids are hydraulically removed from the tank. In this study, Drawing characteristics of the sludge thickening in the thickener of Water Treatment Plants was simulated by Using CFD(Computational Fluid Dynamics).

**Key words** : WTP, residuals, thickener, CFD

**주제어** : 정수장, 슬러지, 농축조, 전산유체역학

#### 1. 서론

수리흐름에 지배를 받는 농축조내의 수리 거동을 조사하기 위해 B1정수장내 설치 운영 중에 있는 실규모 농축조를 대상으로 CFD해석을 수행하였다. 또한, 기존 수리구조에서 발생하는 농축슬러지의 배출문제(Rabbit hole 및 배출 슬러지의 농도 균일화 등)를 해결하기 위해 개선된 수리구조를 근간으로 한 개선 농축조를 제시하고자 하였다.

Shilton과 Harrison(2003)과 Clark 등(1999)은 유입 및 유출부의 위치가 단락류에 영향을 주지만, 도류벽이 설

치된 경우에는 그 영향이 작다고 발표하였다(Shilton et al., 2003; Clark et al., 1999). 또한 신은허 등(2005)의 연구에서는 장방형 정수지에서 형상비(Shape factor, 정수지의 가로 길이/세로 길이)를 정의하여 이 값이 증가할수록 T10/T값이 증가함을 발표하였다. 이러한 반응조 대부분의 도류벽은 측면 벽에 수직으로 설치됨에 따라 면과 면이 만나는 구석은 흐름에 의한 사류지역(dead zone) 및 정체구역이 발생한다. 이제까지 도류벽이 설치된 우류식 반응조에서 발생하는 사류의 특성 분포에 관한 연구는 몇몇 연구자에 의해 수행되어 왔다(이승재, 2007; Wang &

\* Corresponding author Tel:+82-42-870-7525, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: nspark@kwater.or.kr(Park, N.)

Roger 1998; Hannoun et al., 1998). 그 중에서 Hannoun 등(1998)은 사류지역을 흐름의 반대 방향으로 흐르는 흐름으로 정의하였고 이승재(2007)는 이러한 정의에 따라 실제 유류식 정수지내의 사류지역을 추적자 실험을 통해 측정하고 CFD를 이용하여 분석하였다.

이미 약 150년 전부터 유명한 Navier-Stokes식은 널리 알려져 오고 있었으나, Navier-Stokes식을 직접 풀어 유동을 해석할 수 있는 경우는 매우 단순한 물체 주위의 유동에 한정하고, 경계 조건이 매우 간단한 경우에만 가능하며, 대부분의 실제 공학문제에서는 Navier-Stokes식을 직접 해석적으로 풀어 유동현상을 이해한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 본 연구의 대상이 되는 농축조와 같이 2상의 복잡한 유동장이 중요한 인자의 경우 실험과 병행하여 유체의 거동을 컴퓨터로 해석하고 그 결과를 실험으로 검증하는 전산유체의 적용은 그 범위가 더욱 확대되리라 예상된다.

## 2. 실험방법

B1정수장 농축조내 수리거동을 파악하고 개선안을 제시하기 위해 전산유체역학 모사기법을 이용하였다. 이를 위해 연속방정식, 운동량 방정식 및 난류 모델을 이용하였다. 현재 B1정수장에 설치되어 있는 농축조의 개요도는 Fig. 1와 같으며 각각의 Geometry를 표시하였다.

본 모델링에서 사용되는 기본적인 지배 방정식은 아래의 두 식이다.

연속방정식

$$\nabla \cdot \rho \bar{V} = 0 \quad (1)$$

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{V} + F \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $\bar{V}$ 는 속도(각 방향 속도성분),  $t$ 는

시간,  $P$ 는 압력 그리고  $\nu$ 는 동점성계수를 나타낸다.

식(1), (2)의 연속 방정식과 모멘텀 방정식이 그리드(grid)로 분할된 관(pipe) 내의 45만개의 셀에서 해를 구하게 되는 것이다.

일반적으로 난류 상황에서 모멘텀의 전달을 모델링하기 위해서는  $k-\epsilon$  모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard  $k-\epsilon$  모델의 발전형태인 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

대상이 되는 농축조에서 상부의 공기와 접촉하고 있는 면은 마찰이 없는 것으로 가정하여 Symmetry로 지정하였으며, 측면 벽을 포함한 물과 접촉하는 면은 No-Slip Condition을 적용하고, 잘 알려진 Prandtle 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Pre-Process

CFD의 모사는 크게 전처리 작업을 수행하는 Pre-Process, 컴퓨터를 근간으로 행렬을 풀어 해를 구하는 Solving, 그리고 마지막으로 구한 해를 Visualization해주는 Post-Process로 구분할 수 있다. 이에 본 절에서는 농축조를 CFD 모사하기 위한 Pre-Process 작업을 설명하고자 한다. Fig. 2는 B1정수장 농축조에 Mesh 작업(Cell 또는 Grid라 불리는 작은 영역으로 쪼개는 것)을 수행한 것을 보여준다.

본 CFD 모사에서는 4면체(Tetrahedron) 모양의 그리드를 이용하여 Mesh 작업을 수행하였다. 2000년대 초반까지 대부분의 CFD해석에는 6면체(Hexahedron) 모양의 그리드만이 적용되어 왔으나, 무리한 6면체 분할로 해의 정확성이 떨어져 최근 4면체 모양의 그리드를 주로 이용하고 있다. 또한 유속이 빠르거나 구조가 복잡한 부분 및 유입부/

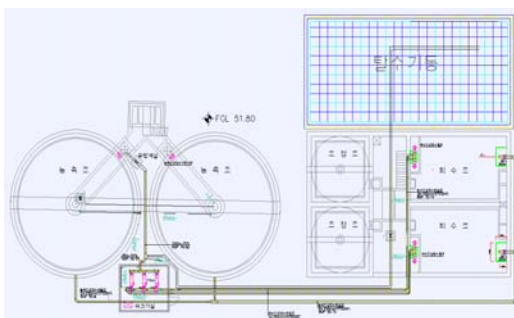


Fig. 1 Thickener overview of B1 water treatment plant

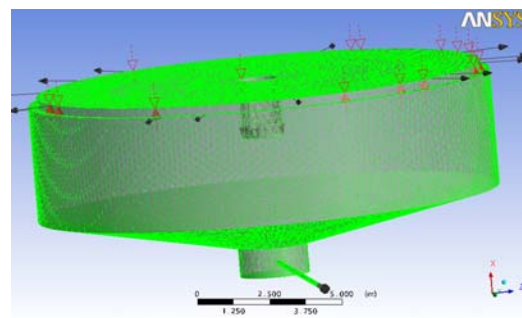


Fig. 2 Mesh operation of thickener hydraulic structure (Case located in the center of the sludge outlet)

유출부에는 "Inflation"라는 기능을 이용하여 "Sub layer"를 줌으로써 해의 정확도를 높일 수 있다.

본 연구에서 다루는 농축조 또한 고액분리의 공정 중 하나이다. 이에 슬러지 주변을 흐르는 유체의 거동은 직접적으로 슬러지의 농축에 영향을 주게 될 것으로 판단된다. 본 모사에서는 유입부와 유출부 모든 벽면(wall)에 3단의 sub layer를 추가하였다.

또한 본 연구에서는 원통형 고액분리 공정에서 흐름을 지배하는 "코리올리 효과(지구자전에 따라 발생하는 유체 편향력)"의 이용을 극대화하는 개선안 제시를 위해 슬러지 배출구를 중심선에서 왼쪽 또는 오른쪽에 편향시키는 수리구조를 모사하였다. 각각의 왼쪽과 오른쪽에 슬러지 배출구를 편향시킨 Mesh 작업은 Fig. 3와 Fig. 4에 도시하였다.

모사시 유입 유량은 현재 B1정수장 농축조 유입유량은 100m<sup>3</sup>/hr로 고정시켜 모사하였다.

### 3.2 Solving Process

본 연구에 사용된 상용화 CFX 11.0은 완전한 implicit code에서 해를 구하므로 정확성 면에서 explicit code보다 앞서 있다.

본 해석에서는 반복계산(Iteration) 횟수를 200번으

로 제한하였다. 상기 Fig. 6에서 나타냈듯이 Solver Control에서 각각의 Variable Values가 1.0e-003으로 지정하였다.

### 3.3 모사 결과 및 토의

다음 Fig. 5, 6 및 Fig. 7은 유입구 측에 물과 물성치가 같은 입자 20개를 유입시킨 경우 물의 흐름에 따라 입자가 움직이는 궤적(streamline)을 나타낸 것이다. 각각의 입자는 중앙 유입구를 통해 유출구로 모두 빠져나가는 것을 가정한 streamline이다.

Fig. 5, 6 및 Fig. 7에서 나타나듯이, 세 가지 경우를 비교할 때, 슬러지 배출구를 오른쪽으로 편향 시킨 경우 streamline의 궤적이 가장 짧은 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 그 다음으로 기존 슬러지 배출구 구조(중앙에 슬러지 배출구가 설치된 경우)에서 streamline 궤적이 길며, streamline이 가장 길게 나타나는 경우는 슬러지 배출구가 왼쪽으로 편향된 경우이다. 재미있는 현상은 Fig. 5와 6의 경우(슬러지 배출구가 중앙 및 왼쪽으로 편향된 경우에는 슬러지 배출구가 있는 면이 그 반대편 보다 길게

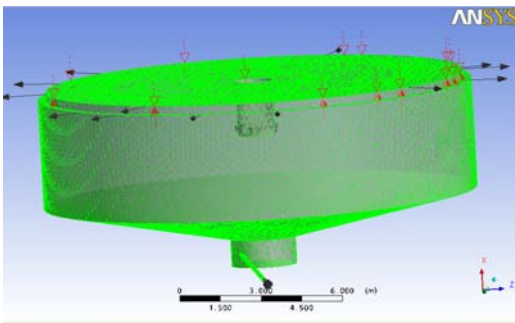


Fig. 3 Case deflected to the left of the sludge outlet

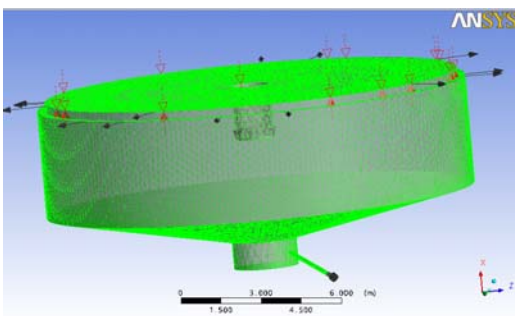


Fig. 4 Case deflected to the right of the sludge outlet

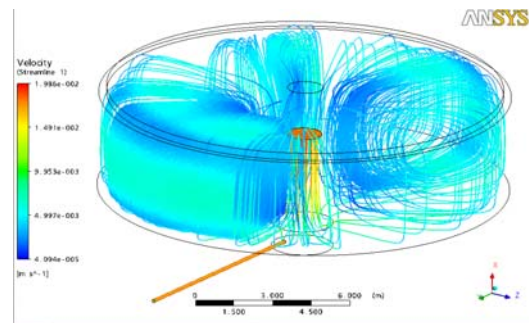


Fig. 5 streamline of the sludge in thickener hydraulic structure

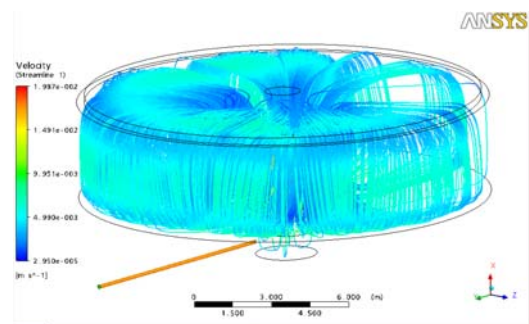


Fig. 6 Streamline in thickener hydraulic structure deflected to the left of the sludge outlet

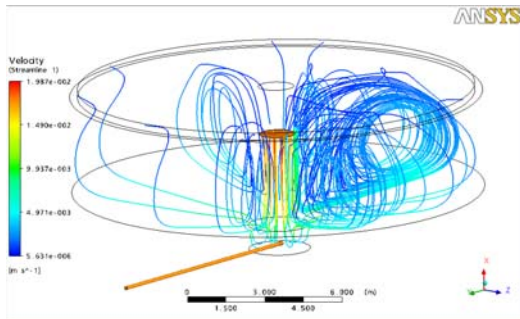


Fig. 7 Streamline in thickener hydraulic structure deflected to the right of the sludge outlet

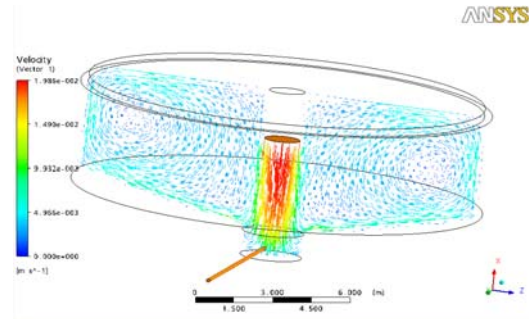


Fig. 8 Velocity vector in thickener hydraulic structure(Side vector)

나타나는 것이 관측되나, Fig. 7의 경우(슬러지 배출구가 오른쪽으로 편향된 경우에는 슬러지 배출구가 있는 면에서 오히려 streamline이 길게 나타나는 것을 볼 수 있다. 판단컨대, 이와 같은 현상은 유속이 느린 흐름이 지구상에서 적도 선상 이외 북반구나 남반구에 존재하는 경우 지구자전에 의해 발생하는 편향력(코리올리 효과)의 영향을 받는 것으로 사료된다. 코리올리 효과는 북반구에서는 유체의 흐름방향으로부터 왼쪽(반시계방향)으로 편향되고, 남반구에서는 흐름방향으로부터 오른쪽(시계방향)으로 편향되는 현상이다.

즉, streamline의 궤적이 짧은 것은 유입되는 물이 농축조의 전체공간에 충분한 시간동안 체류되지 못하고 국지적으로 발생하는 빠른 흐름에 의해 유출되는 것을 의미하며, 궤적 자체의 형상도 일정하지 않아 효율적인 농축을 기대하기 어렵다고 할 수 있다. 이에 농축조의 수리구조에서 배출구의 위치는 북반구에서는 중심선에서 왼쪽으로 편향되어야 할 것이다.

다음 상기 세 가지 경우에 대해 Fig. 8은 측면에서 관측한 평면상의 유속분포를 나타낸 것이다.

상기 Fig. 8, 9 및 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 슬러지 배출구가 중앙 및 왼쪽에 위치한 경우와 대분되게 오른쪽으로 편향된 경우에는 농축조 전반에 유속이 낮은 사류지역(dead zone)이 넓게 분포하는 것(빨간 dot-line으로 표시된 영역)으로 나타났다. 침전이 주된 기작으로 일어나는 공간에서 사류지역의 분포는 전체 용적에서 사류 지역을 제외한 유효 용적(effective volume)의 공간을 감소시키는 이유가 된다. 이는 그림 streamline 모사 결과와 원인이 일치하며 슬러지 배출구의 위치가 농축조 전반 수리거동에 영향을 미침을 알 수 있다.

다음 Fig. 11, 12 및 Fig. 13은 바닥에서 약 2.5m 경사진 원판이 시작되는 부분에서의 유속분포를 도시한 것이다.

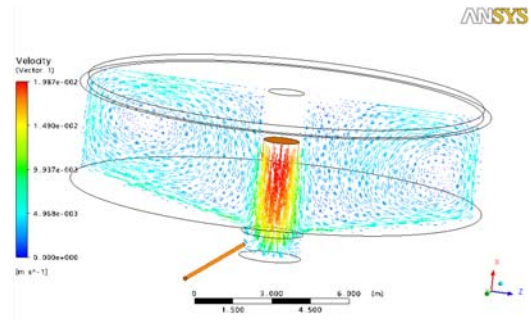


Fig. 9 Velocity vector in thickener hydraulic structure deflected to the left of the sludge outlet

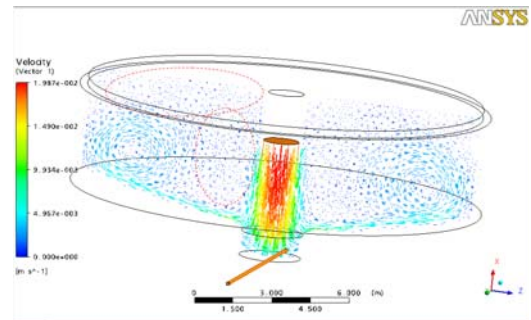


Fig. 10 Velocity vector in thickener hydraulic structure deflected to the right of the sludge outlet

상기 세 그림에서도 진한 파란색 영역(낮은 유속)의 분포면적이 슬러지 배출구가 오른쪽에 편향된 경우가 가장 넓은 것으로 나타나고 있다. 이는 그림에서 나타난 벡터의 화살표가 중앙을 지시하고 있어 호퍼쪽으로 슬러지가 이동하는 모멘텀을 직접적으로 나타내는 것인데, 상기 중앙 및 왼쪽에 슬러지 배출구를 위치시킨 경우와 비교하여 작은 것을 알 수 있다.

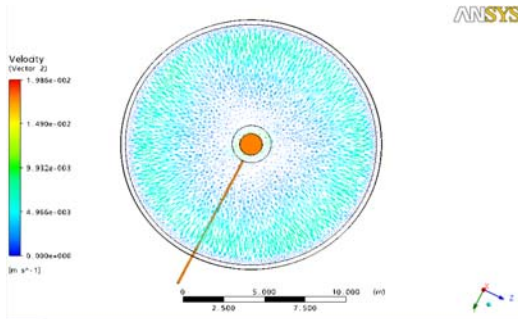
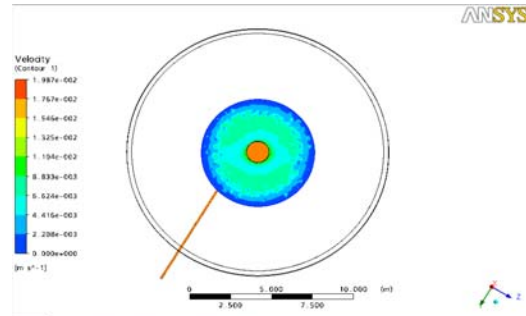


Fig. 11 Plane vector in the point on the floor height of about 2.5m in thickener hydraulic structure



(a) Case deflected to the left

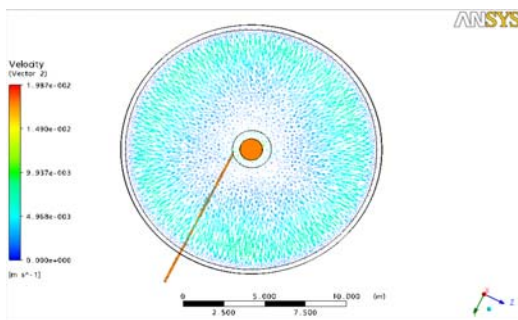
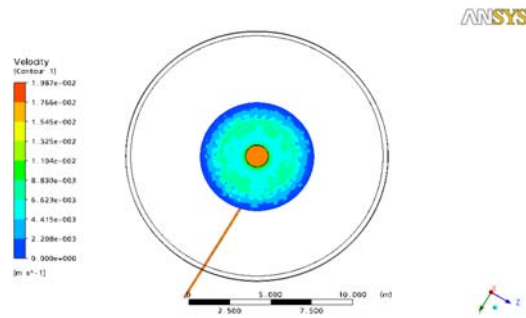


Fig. 12 Velocity vector in thickener hydraulic structure deflected to the left (Plane vector in the point on the floor height of about 2.5m)



(b) Case deflected to the left

Fig. 14 Velocity distribution of the hopper(contour)

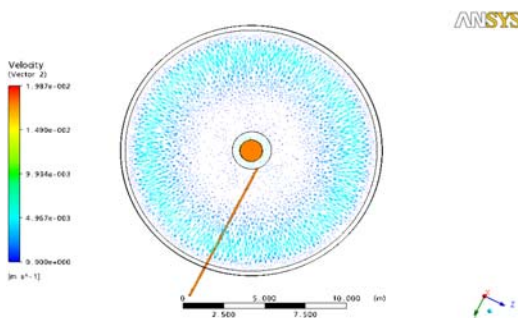


Fig. 13 Velocity vector in thickener hydraulic structure deflected to the right(Plane vector in the point on the floor height of about 2.5m)

다음 Fig. 14는 바닥에서 1m정도 되는 위치(호퍼)에서의 유속을 contour로 나타내 비교한 것이다.

상기 Fig. 14에서 호퍼부분이 유속분포에서 초록색깔의 분포가 (a)왼쪽으로 편향시킨 경우에서 더 넓은 분포를 가짐을 알 수 있다. 수치적으로 해결하면 (a)의 경우는 34%

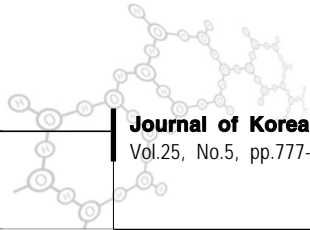
를 차지하고 (b)의 경우에는 18%를 차지하고 있다. 이는 호퍼내에서 Rabbit hole을 방지하기 위한 충분한 모멘텀이 (a)의 경우에 더 높게 분포하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

전산유체역학을 이용한 정수장 농축조내 농축슬러지의 유출특성에 대해 모의를 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 농축조 내부의 수리거동을 CFD로 해석한 결과, 슬러지 배출구의 위치는 농축조 내부 전체의 수리거동에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었으며, 기존에 배출구가 수직선상에서 중앙에 위치한 경우보다 왼쪽으로 편향된 경우가 원할한 슬러지 배출이 예상된다.

2. 그러나 본 연구에서는 직접적으로 실험을 통한 검증이 아직 되지 아니하여 이는 추가적으로 실험을 통해 검증이 수반되어야 할 것으로 사료된다.



## 참고문헌

- Clark. M.M., Ducoste J. and Burns C.(1999) Improving Clearwell Design for CT Compliance, AWWARF and AWWA
- Hannoun I.A., Bouls F. and List J. (1998) "Using hydraulic modeling to optimize contact time", Journal of AWWA, Vol. 90, No.8, pp.77-87
- Shilton A. and Harrison J. (2003) "Development of guidelines for improved hydraulic design of waste stabilization ponds" Water Science and Technology, Vol.48, No.2, pp.173-180
- 신은허, 김성훈, 박희경, 안재찬, 최 재호, 최영준, (2005) "정수지의 형상과 유입유량이 T10에 미치는 영향연구" 상하수도학회지, Vol.19, No.6, pp.819-826.
- 이승재, 신은허, 김성훈, 박희경, (2007) "정수지내 사류비역이 수리학적 효율에 미치는 영향 연구" 상하수도학회지, Vol.21, No.2, pp.177-185.