

침전지 유출부 구조 Remodeling을 통한 개선사례 연구

Case Study on Remodeling Outlet Structure within a Sedimentation Basin for Improving Performance

김성수 · 박노석* · 문용택 · 이선주

Seong-Su Kim · No-Suk Park* · Yong-Taik Moon · Sun-Ju Lee

한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

(2006년 10월 25일 논문 접수; 2006년 12월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study was conducted to evaluate the effect of the launder type on settling performance and hydrodynamic behavior within the two certain full-scale sedimentation basins (each flow rate/one basin; 10,000m³/d); one is the transverse typed launder(existing basin) and the other is building the finger type launder in combination with the longitudinal baffle. Comparative experimental investigations have been carried out through residual turbidity and particle concentration measurements in each effluent from two basins with the transverse and the finger type launders, respectively. From the experimental results, we could observe that turbidity removal rate in the finger type launder basin (modified basin) is about 30% higher than that in the transverse type launder basin (existing basin). Also, from the measurement of total particle concentration in each effluent, the removal efficiency was improved about 27% within modified basin compared to the existing basin. In order to explain the comparative experimental results and investigate the hydrodynamic behavior within each basin in more detail, we conducted computational fluid dynamics (CFD) simulation and verified simulation results with acoustic Doppler velocimetry (ADV) technique. From the CFD simulation, it was investigated that extreme upward flow occurs underneath of the transverse launder. On the other hand, in the case of modified basin, the upward flow, which occurred in the beneath of launder, was much less than that in the existing basins.

Key words: transverse type launder, finger type launder, CFD simulation, settling performance

주제어: transverse 형태 유출부, finger 형태 유출부, 전산유체역학 모사, 침전효율

1. 서 론

침전공정을 설계할 때 고려해야 할 중요한 사항 중의 하나가 침전지의 유입부 및 유출부의 설계이다. 침전지의 유입부에서 균형을 이루지 못한 흐름이 발생하면 단락류 또는 난류의 원인이 될 뿐 아니라 침전지역에서 전반적으로 수리적인 안정성을 상실하게 되므로 유입부에 관한 많은 수리모형실험이 실시되었고 정류벽에 대한 설계기준들이 발표되었다 (Kawamura, 1991). 반면에 단락류와 침전물의 재부상 등으로 침전효율에 영향을 미칠 수 있는 유출부에 대해서는 침전지내 물의 흐름방향에 대하여 직각으로 균일하게 유출시켜야 한다는 정도만이 제안되어 있고 라운더의 설치방법이 침전지 효율에 미치는 영향 등에 관한 연구결과는 부족한 실정이다.

침전지 유출부에 이용되는 라운더 형태에는 침전지 끝부분 벽체에서 다소 거리를 두어 물의 흐름과 직각방향으로 설치하는 직각 라운더와 길이방향으로 침전지의 1/3 정도까지 손가락 모양으로 설치하는 핑거형 라운더(finger type launder)가 있다(Kawamura, 1991). 이에 대해 Kawamura와 Lang(1986)은 침전지의 끝부분에서 물의 흐름은 표면을 향해서 상승하며 이때 플러이 동반 상승되어 라운더의 끝부분에서 유출되기 때문에 설계상의 관점에서 핑거형 라운더보다는 직각 라운더를 설치하는 것이 효율적이라고 제안하였다.

한편, 앞서 발표된 박노석 등(2005)의 논문에서 언급되었듯이 침전지내 흐름을 모사하기 위해 전산유체역학 기법을 이용하는 연구가 이미 몇몇 연구자들에 의해 수행되었으며, 특히 Matko 등(1996)은 하수처리장에 있어서 침전조 내의 수리거동을 전체적으로 검토하였다(Matko, 1996). Stovin과 Saul은 하수처리장 유량조정조에서의 침전을 모사하는데 있어서, 임계 전단항력(shear stress)을 통해 속도장을 계산함으로써 침전물의 위치를 예측할 수 있다는 것을 보였다(Stovin and Saul, 1994). 또한 이들은 속도분포를 계산함으로써 침전을 예측할 수 있다고 제안하였으며, 이러한 연구결과를 기반으로 CFX라는 상용 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 소프트웨어를 이용해서 침전지에서의 침전효율을 예측하는

모사를 하였다(Stovin and Saul, 1996).

본 연구에서는 대상으로 선정된 국내 K_정수장 침전지 2지 중 한지에 설치되어 있던 직각 라운더(transverse type launder)를 수정하여 핑거형 라운더로 개량하고 중앙 단면에 도류벽을 설치하는 공사를 2005년 12월 19일에 준공하였다. 이에 개선지를 대상으로 하는 CFD 모사와 검증 및 기존지(직각 라운더와 도류벽이 설치되어 있지 않은 지)와의 비교실험(잔류탁도 측정 및 입자계수 실험)을 수행하였다. 이에 본 연구에서는 직각 라운더형의 기존지와 핑거형 라운더의 개선지를 대상으로 비교실험을 수행하였고, 나타난 결과의 원인 규명을 위해 CFD를 이용하여 내부 유동장을 모사하였으며 이 모사결과를 ADV로 검증하였다.

2. 대상정수장 침전지 현황 및 실험방법

2.1. 침전지 현황

본 연구에서 대상으로 선정된 K_정수장의 침전지는 2지로 구성되어 있으며, Fig. 1과 같이, 기존지(우측)는 직각 라운더형의 유출부 구조를 가지며, 2005년 12월에 개선한 좌측지는 핑거형 라운더와 도류벽이 설치되어 있다. 침전지 2지의 규격은 동일하게

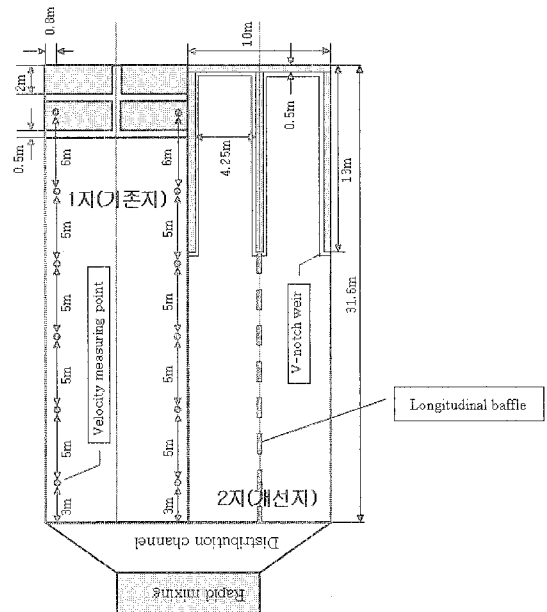


Fig. 1. 침전지 배치도.

Table 1. 기존지와 개선지의 수리 조건

구 분	기존지(1지)	개선지(2지)	적정 설계 기준값
표면 부하율(m/min)	0.022	0.022	0.015~0.03
평균 유속 (m/min)	0.174	0.174	0.4 이하
위어 부하율(m ³ /m · day)	182.5	166.7	400 이하
위어 면적(m ²)	10m × 6m	10m × 12.5m	
상승 유속 (m/min)	0.116	0.056	0.04~0.06
Reynolds number	4,908	3,398	10,000 이하
Froude number	3.8 × 10 ⁻⁷	5.6 × 10 ⁻⁷	10 ⁻⁶ 이상

Note: 적정 설계 기준값은 "상수도 시설 기준(환경부, 2004)"에서 제시한 것을 인용한 것임

width 10m, length 31.6m, height 4m, 총 용량은 지당 1,264m³이다. 기존지의 직각 라운더의 weir 총길이는 54.8m이며, 개선지의 평거형 라운더의 weir의 총길이는 60m이다. 도류벽의 재질은 HDPE(High Density Poly Ethylene)이며, 두께는 65mm, 높이는 4m로 설치되어 있다.

Table 1은 기존지와 개선지의 침전지 현황을 정리한 것이다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 Reynolds number는 기존지와 개선지 모두 기준 권장값 10,000 이하로 계산되었으나, 수류의 안정성을 결정하는 Froude number는 개선 전후에서도 권장값 1.0 × 10⁻⁶ 이상을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. Weir부의 상승 유속은 개선 전에는 0.116m/min으로 기준을 만족하지 못하였으나, 개선후 0.056m/min으로 기준을 만족하고 있다.

2.2. 침전지별 탁도 및 입자 농도 분석

기존지와 개선지의 성능을 평가하기 위해서 본 연구에서는 2006년 8월 1일 오후 5:30시부터 4일 오후 3:45분까지, 매 15분마다 연속적으로 각 침전지 유출수의 탁도와 입자농도를 측정하였다. 기존지와 개선지의 정확한 비교를 위해서 실험기간동안 각 지는 420m³/hr로 유량을 고정시켜 운전하였다. 두지의 각 유출수를 대상으로 연속적인 탁도 측정을 위해 연속 탁도계(HACH, Model 1720D)를 사용하였고, 입자농도의 측정을 위해서는 particle counter(HACH, Model 2200PCX)를 사용하였다.

2.3. 침전지내 유동장 해석

본 연구에서는 기존 침전지와 개선지의 성능 평가

결과를 자세히 설명하기 위해 전산유체역학(CFD) 및 ADV(Acoustic Doppler velocimetry) 유속 측정 기법을 이용하여 각 지의 수리거동을 모사하였다. 이에 모사결과는 두 지의 탁도 제거 효율 및 입자농도 측정결과에 대해 원인을 규명하는데 이용하고자 하였다. CFD는 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Difference Method)기법을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 대상으로 한 기존지와 개선지 수리거동에 미치는 영향을 해석하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 CFX 5.7을 사용하였다.

2.3.1. 지배방정식

유입수가 침전지 내로 유입되어 유출구를 통해서 유출되는 과정에서 유체의 물리적인 성질의 변화는 아래 연속방정식과 운동량 방정식 등의 지배방정식에 의해 설명될 수 있다.

본 모델링에서 사용되는 기본적인 식은 아래의 두 식이다.

$$\begin{aligned} & \text{연속방정식} \\ & \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \end{aligned} \quad \text{식(1)}$$

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

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

여기서, ρ 는 밀도, \vec{V} 는 속도(각 방향 속도성분), t 는 시간, P 는 압력 그리고 ν 는 동점성계수를 나타낸다.

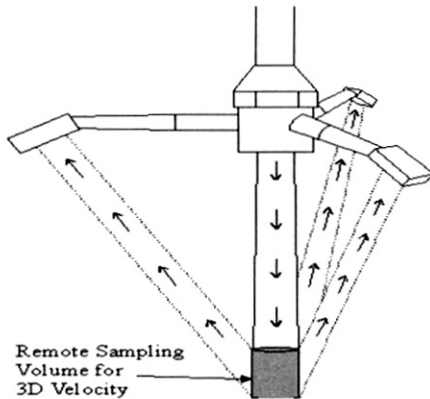


Fig. 2. ADV 측정 원리 및 장비.

2.3.2. 난류 모델링

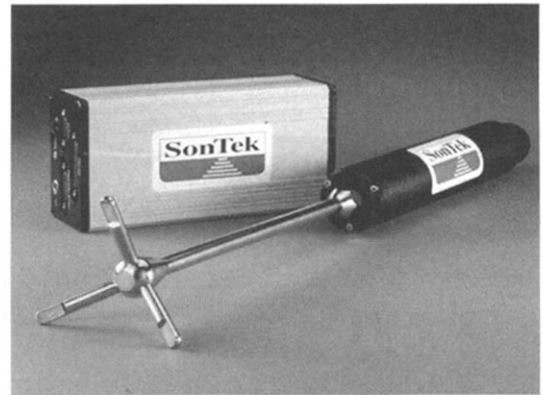
일반적으로 난류 상황에서 모멘텀의 전달을 모델링하기 위해서는 $k-\epsilon$ 모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.3.3. 경계 조건

본 연구에서는 침전지의 자유수면은 평면적이며 마찰이 없다고 가정하였다. 그 이유는 공기와 접촉하고 있는 자유 수면에서의 마찰력은 무시할 정도로 작기 때문이다. 그리고 측벽면과 바닥면 그리고 중간 정류벽의 표면은 No-Slip Condition을 적용하고, 잘 알려진 Prandtl 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다(Currie, 1993).

2.4. CFD 모사 결과 검증

상기 언급한 모사 방법으로 CFD를 이용하여 구한 수치해석 값을 검증하기 위해 K_정수장 침전지를 대상으로 지점별 유속을 ADV(Sontek 10MHz)를 사용하여 측정하였다(Fig. 2 참조). ADV는 침전지 내에서 한 지점의 x, y , 및 z 방향의 순간 유속을 측정하는 기기로 probe로부터 일정 거리(약 7cm)에 위치한 sampling volume의 유속을 음파를 사용하여 측정한다. 본 연구에서의 ADV의 사용은 단지 CFD모사결과를 검증하기 위함이라 기존침전지만을 대상으로 속도장을 실측하였다. 기존 침전지의 경우 양측 벽면에



서 약 80cm 떨어진 지점에서 흐름방향으로 3, 8, 13, 18, 23 그리고 29m 위치에서 각 위치에서 깊이 방향으로 1, 2 그리고 3m 총 36지점의 속도를 측정하였다(Fig. 1 참조).

3. 결과 및 고찰

3.1. 탁도 제거율 비교 평가

Fig. 3은 실험방법에서 언급한 대로 2006년 8월 1일 오후 5:30시부터 4일 오후 3:45분까지, 매 15분마다 연속적으로 각 침전지 유출수의 탁도를 측정한 결과이다. 실험동안 각 지로 유입되는 유량은 $420\text{m}^3/\text{hr}$ 로 고정시킨 상태에서 취득한 데이터이다. Fig. 3에서 제시한바와 같이 기존지에 비해 개선지로부터의 유출수의 탁도가 낮은 것을 알 수 있다. 실험기간동안 측정된 데이터에 의하면 기존지의 평균탁도는 0.779 NTU이었으며, 개선지의 평균탁도는 0.546NTU이었다. 약 35%의 수질 개선효과가 명확히 나타났다.

3.2. 유출수내 입자농도 비교 평가

Fig. 4는 탁도를 측정하는 동안 particle counter를 이용하여 각 크기별로 두 지로부터의 유출수내 입자농도를 측정한 결과이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이, 실험기간동안 측정된 기존지의 평균 총 입자농도는 489.50개/mL이고, 개선지의 평균 총 입자농도는 355.01개/mL로 나타났다. 이와 같은 개선지의 침전 성능의 향상은 당 정수장 여과공정(급속여과)의 평균 여과지속시간이 약 34시간이었는데, 2지의 개선 후

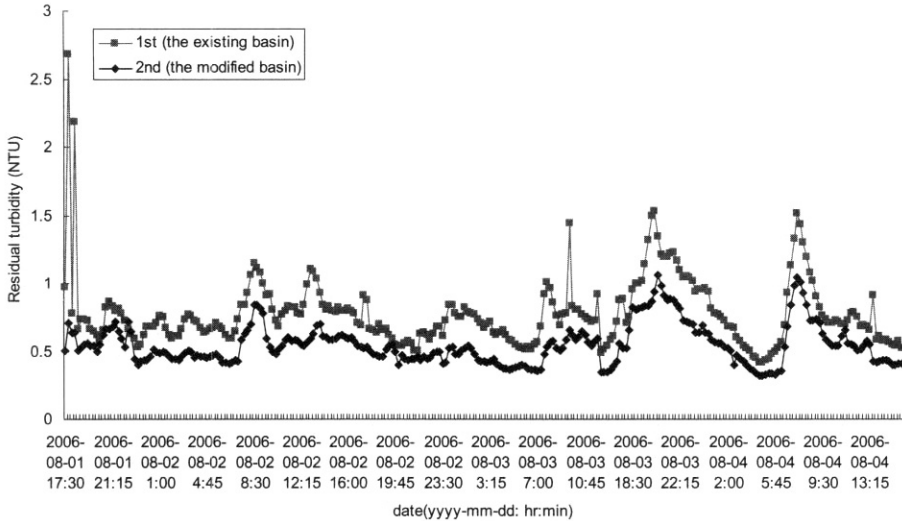


Fig. 3. 개선지와 기존지 침전 유출수 탁도 비교 (2006. 08. 01~04).

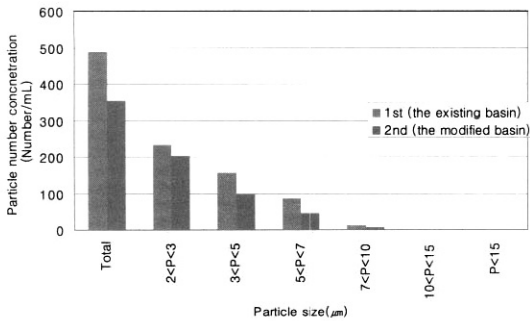


Fig. 4. 개선지와 기존지 침전 유출수 입자 농도 비교 (2006. 08. 01~04).

72시간으로 증가하였다.

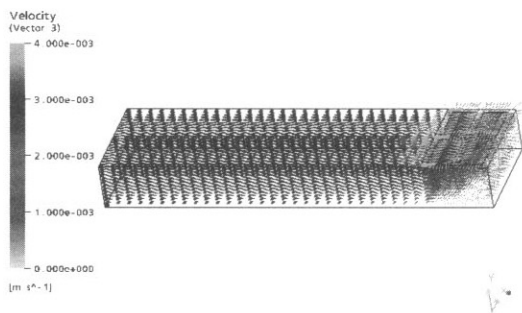
3.3. 유출수내 입자농도 비교 평가

침전지의 실제 입자 제거 효율은 지내 흐름거동과 밀도차, 중력침전, 응집 및 슬러지의 퇴적과 같은 물리적인 요인에 의해 영향을 크게 받는다(Jayanti와 Narayanan, 2004). 상기 유출부의 라운더 형식을 개선하고 도류벽을 설치한 지와 기존의 직각 라운더가 설치된 지간의 유출수내 잔류 탁도 측정과 입자 농도를 측정·비교한 결과 개선지의 성능이 좋은 것으로 나타났다. 이에 이러한 원인 분석을 위하여 본 연구에서는 CFD를 이용하여 각지의 흐름 거동을 모사하여 그 결과를 비교하고자 하였다. 다음 Fig. 5는 각지의 모사 결과를 나타내고 있다. 각 지는 동일하게

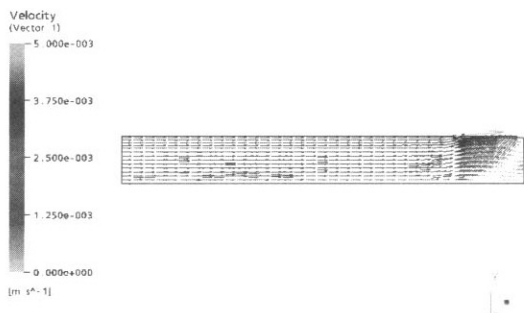
유입 유량을 설계 유량(10,000m³/일)으로 고려하여 모사한 결과이다.

Fig. 5의 기존지의 중앙측면에서의 속도장((b), (c), 그리고 (d))에서 나타나듯이, 직각 라운더 이전까지는 흐름이 안정적으로 진행되지만 첫 번째 트라프를 지나면서 급격한 상향유속이 발생하는 것으로 모사되었다. 이와 같은 라운더 하부에서 급격한 상향유속이 발생하는 것은 개수로로 진행되어 오던 안정적 흐름이 트라프로 차단되어 위어하부의 침전지내부에 압력 상승으로 인해 상향유속이 발생한 것으로 판단된다(Fig. 5(d) 참조). 즉, 안정적인 개수로 흐름으로 진행되던 흐름이 라운더 하단의 트라프를 통과하면서 국부적인 관수로 흐름으로 변환되어 압력이 증가하고 이에 부력이 발생하면서 상향유속을 가속시키는 것으로 판단된다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 라운더 설치부 면적이 권장 기준에 비해 작은 것도 급격한 상향유속을 발생시키는 원인이 된다. 또한 Fig. 5(d)에서 우측 말단에 상향류의 흐름과 대분되는 상당히 큰 영역의 사류지역이 발생하는 것이 관측되었으며, 이는 상향류가 위어를 통하여 충분히 유출되지 못하여 발생하는 현상으로 파악된다.

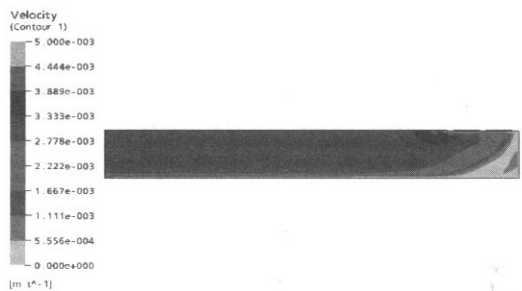
이에 반해서 기존 침전지 내에서의 유동현상과 비교하면(Fig. 5의 (e), (f), (g) 그리고 (h)), 전체 지내 유속이 느려지고 평거형 라운더 하단에서 상승 유속이 감소하였다(Fig. 5의 (d)와 (h) 비교). 또한 말단 벽면



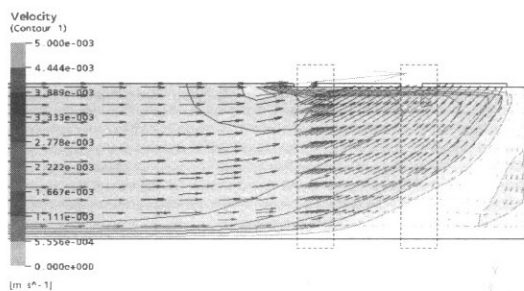
(a) 기존지 전체 유동(vector)



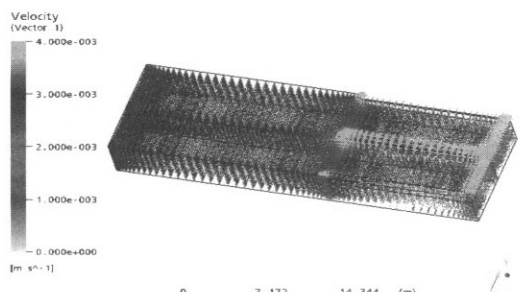
(b) 기존지 중앙 측면에서 속도장(vector)



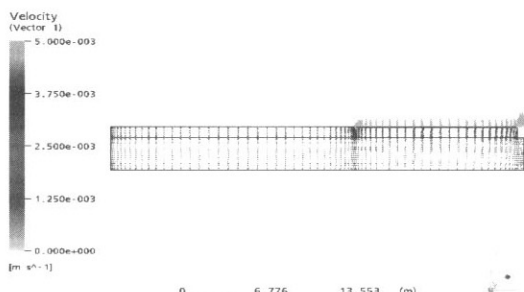
(c) 기존지 중앙 측면에서 속도장(contour)



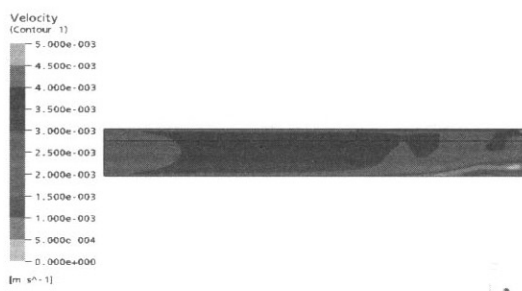
(d) 기존지 weir 유출부에서의 유동장



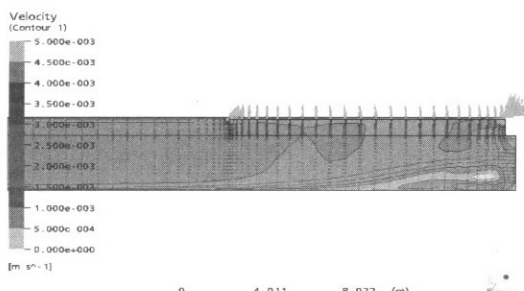
(e) 개선지 전체 유동(vector)



(f) 개선지 중앙 측면에서 속도장(vector)



(g) 개선지 도류벽에서 2.5m 측면에서의 속도장(contour)



(h) 개선지 weir 유출부에서의 유동장

Fig. 5. 기존지와 개선지의 CFD 모사 결과 비교.

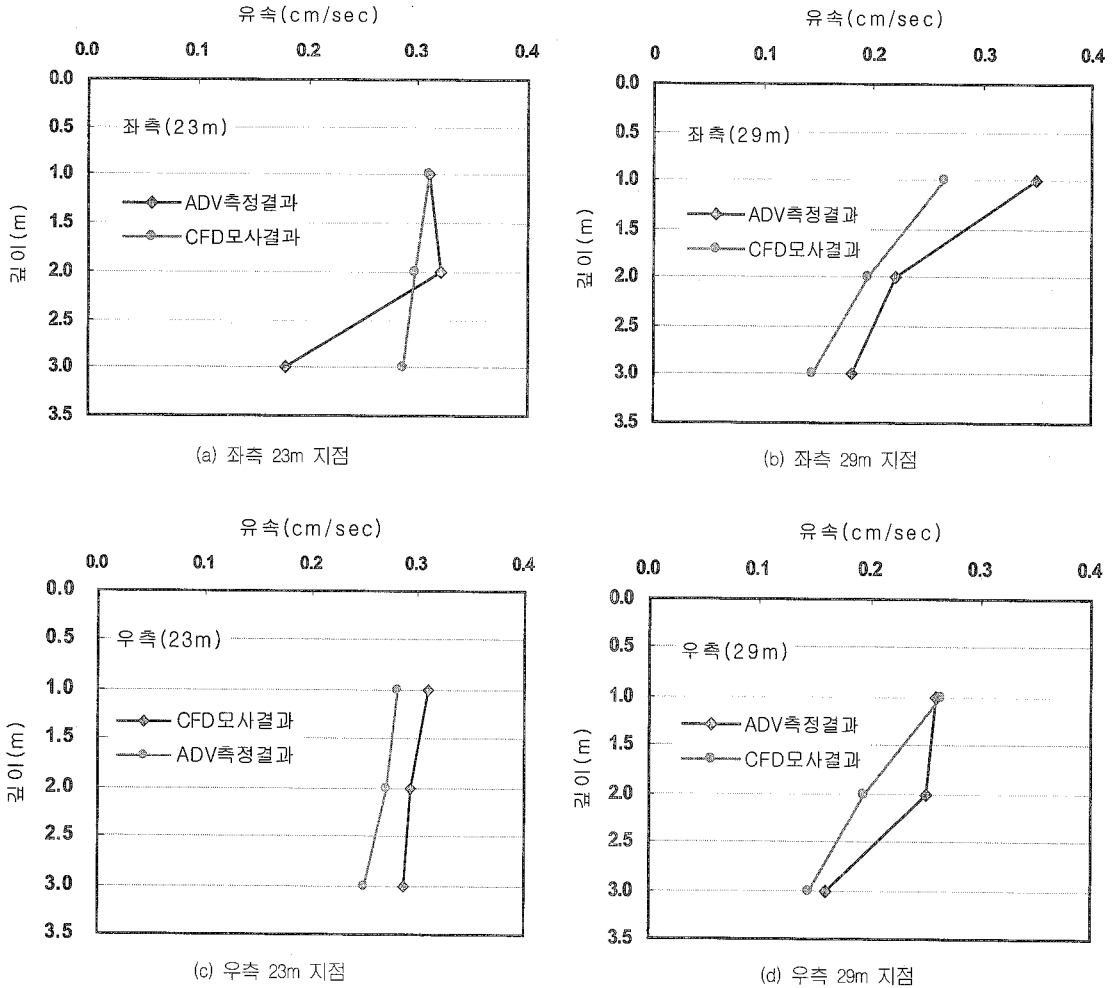


Fig. 6. CFD 모사 결과와 ADV 실측결과의 비교.

근처에서 발생되었던 사류 지역이 저감되는 것으로 모사되었다. 즉 앞서 기준지와 개선지의 침전 효율 성능 비교 평가 결과를 설명하기 위해 수행한 CFD 모사 결과로부터 지를 가로지르는 직각 라운더를 펄거형 라운더로의 구조개선을 통하여 상승유속 및 사류 지역의 저감효과를 얻을 수 있으며, 더하여 중앙 단면에 도류벽의 설치에 의해 지내 흐름의 안정성을 도모하였기에 탁도 제거 효율 및 입자 농도 제거 효율의 증진을 가져왔다.

3.4. CFD 모사 결과의 검증

상기 CFD 모사 결과를 검증하기 위해 ADV를 이용하여 기준지내 36지점의 유속을 실측하였다(Fig. 1

참조). 유속 측정 결과를 상호 비교하기 위하여 CFD 모사 결과로부터 ADV로 유속이 측정되는 지점의 유속 데이터를 읽어 CFD 모사결과와 ADV 실측결과를 비교·검토하였다. 상기 Fig. 6은 위치별(좌·우측 23m 및 29m 지점), 깊이별(1, 2, 및 3m) CFD 모사 및 ADV 실측 결과를 비교한 결과를 보여주고 있는 것으로서 CFD 모사가 ADV 실측 결과에 유사한 것을 알 수 있다. 본 검증에서 깊이 방향으로 좌·우측 23m와 29m를 선정 한 이유는 트라프 근처가 가장 유속의 변화가 심하여 이 부분의 유속을 정확하게 모사하였음을 보임으로써 모사의 신뢰성을 입증할 수 있을 것 같아서이다. 이 지점들을 제외한 지점에서 모사결과와 실측의 비교는 약 95%의 정확성을 보이고

있다.

한편 Fig. 6의 (a)의 경우 깊이 3m 지점에서 두 값에 다소 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이는 CFD 모사시 슬러지 collector를 고려하지 않고 모사하였기 때문이다. 따라서 이 경우를 제외하고는 실제 유속 경향이 잘 모사되었다고 할 수 있다. 또한 CFD의 모사 결과가 ADV 실측결과에 비해 다소 작은 값을 나타내었는데 이는 ADV 유속 실측 실험을 하는 동안 (약 3시간) 유량이 시간대 별로 변하였고, 정확한 벽면의 조도 계수를 측정하지 못하여 발생된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 침전지의 수리구조가 부적정하여 침전효율이 악화되고 있는 실제 정수장(K_정수장)내 두 침전지 중 한 지를 대상으로 유출부 구조를 평가형으로 개선하고 중앙 단면에 도류벽을 설치한 후, 기존지와 개선지간의 탁도 제거 성능 및 입자 제거능을 상호 비교·평가하였다. 또한 상기 비교 실험 결과의 원인 규명을 위해 각 지를 대상으로 CFD모사와 모사결과의 검증용 위해 ADV를 이용하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개선지와 기존지의 탁도 제거 효율 평가 결과, 기존지에 비해 개선지로부터의 유출수의 탁도가 낮은 것을 알 수 있었는데, 실험기간동안 측정된 데이터에 의하면 기존지의 평균탁도는 0.779NTU이었으며, 개선지의 평균탁도는 0.546NTU이었다. 약 35%의 수질 개선효과가 명확히 나타났다.
- 2) 실험기간동안 측정된 기존지 유출수의 평균 총입자농도는 489.50개/mL이고, 개선지 유출수의 평균 총 입자농도는 355.01개/mL로 나타났다. 이와 같

은 개선지의 침전 성능의 향상은 당 정수장 여과공정의 평균 여과지속시간이 약 34시간이었는데, 2지의 개선 후 72시간으로 증가하였다.

3) 비교·평가 실험 결과의 원인 규명을 위해 수행된 CFD모사결과로부터, 침전지내 유출부의 직각 라운더 형상은 상향유속을 증가시키고, 말단 벽면 근처에서 넓은 사류 지역이 발생시키는 것으로 관측되었다. 이에 반해서 평거형 라운더의 유출부 구조에서는 말단 벽면 근처에서 발생하는 사류지역이 저감하고, 라운더 하단에서 상승 유속이 감소하였다.

참고문헌

1. 박노석, 임재림, 이선주, 권순남, 민진희 (2005) CFD를 이용한 침전지 구조가 수리거동에 미치는 영향 평가 (II). *상하수도학회지*, 19(6), pp. 758-766.
2. 환경부 (2004) *상수도시설기준*.
3. Currie, I. G. (1993) *Fundamental mechanics of fluids*, McGraw-Hill, New York.
4. Kawamura, S. and Lang, J. (1986) Re-evaluation of Lanuders in Rectangular Sedimentation Basins, *J. WPCF*, 58(12), pp. 1124.
5. Matko, T., Fawcett, N., Sharp, A., and Stephenson, T. (1996) Recent Progress in the numerical modelling of wastewater sedimentation tanks. *Trans, IChem*, 74B, pp. 245-257.
6. Jayanti, S. and Narayanan, S. (2004) Computational Study of Particle-Eddy Interaction in Sedimentation Tanks, *ASCE, Journal of Environmental Engineering*, 130, pp. 37-49.
7. S. Kawamura (1991) *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, Inc
8. Stovin V.R. and Saul A.J. (1994) Sedimentation in Storage Tank Structures. *Water Science and Technology* 29(1-2), pp. 363-372.
9. Stovin V.R. and Saul A.J. (1996) Efficiency Prediction for Storage Chambers Using Computational Fluid Dynamics. *Water Science and Technology* 33(9), pp. 163-170.