

CFD를 이용한 침전지 구조가 수리거동에 미치는 영향 평가(II): 트라프의 영향 중심으로

Evaluation of the Effect of Sedimentation Basin Structure on Hydrodynamic Behavior Using CFD (II): The Effect of Trough

박노석* · 임재림 · 이선주 · 권순범 · 민진희

No-Suk Park* · Jae-Lim Lim · Sun-Ju Lee · Soon-Bum Kwon · Jin-Hui Min

한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도연구소

(2005년 8월 26일 논문 접수; 2005년 12월 12일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study was conducted to evaluate the effect of the transverse troughs on hydrodynamic behavior within the a certain full-scale sedimentation basin (flow rate/one basin; 10,000m³/d) using CFD simulation and ADV technique. In order to verify the CFD simulation, we measured the factual velocity at 36 points in the full-scale sedimentation basin, whose outlet structure is inadequate, with ADV technique. Both the CFD simulation and the ADV measurement results were in good accordance with each other. From the CFD simulation results of the existing basin, it was investigated that extreme upward flow occurs in the near of two transverse troughs. It was suspected that since the transverse troughs converted the open channel flow into the local closed pipe flow, the increased pressure in this local closed pipe flow region made the extreme upward flow. For solving this problems, it was suggested to modify transverse-typed launder into finger-typed launder and to install a longitudinal baffle in the center in this study. The CFD simulation results of all suggested amendments told us that the extreme upward flow, had occurred especially in the beneath of transverse troughs, was much less in the case of finger typed launder basin than that in the existing basin. Also, it was predicted that installing a longitudinal baffle made the fully developed flow which is more effective for sedimentation.

Key words: Sedimentation basin, CFD simulation, transverse-typed launder, local closed pipe flow, extreme upward flow

주제어: 침전지, 전산유체역학 모사, 격자형라운더, 관수로흐름, 상향흐름

1. 서 론

침전공정을 설계할 때 고려해야할 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 안전성을 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 직각라운더와 길이방향으로 침전지의 1/3 정도까지 손가락 모양으로 설치하는 핑거형라운더(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 핑거형라운더보다는 직각라운더를 설치하는 것이 효율적이라고 제안하였다.

한편, 앞서 발표된 박세진 등(2005)의 논문에서 언급되었듯이 침전지내 흐름을 모사하기 위해 전산유체역학 기법을 이용하는 연구가 이미 몇몇 연구자들에 의해 수행되었으며, 특히 Matko 등(1996)은 하수처리에서 침전조 내의 수리거동을 전체적으로 검토하였다(Matko, 1996). Stovin과 Saul은 하수처리장 유량조정조에서의 침전을 모사하는데 있어서, 임계전단항력(shear stress)을 통해 속도분포를 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 연구의 궁극적인 목적은 라운더 설치형태가 침전효율에 미치는 영향을 평가하는 것으로서 흐름방향의 직각 라운더가 격자형(격자형라운더)으로 설치되어 있는 K_정수장 침전지를 대상으로 운영현황, 수리구조 검토, ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용한 실제 유속측정 및 CFD 모사를 통하여 침전지의 문제점을 우선적으로 파악한 후 핑거형라운더 구조에 대한 CFD 모사를 실시하여 침전효율을 비교평가하고자 하였다. 아울러 CFD 모사를 통해 도류벽 설치효과도 동시에 평가하여 침전지 개선방안을 제시하고자 하였다.

2. 대상정수장 침전지 현황 및 실험방법

2.1. 침전지 현황

본 연구에서 대상으로 선정한 K_정수장의 침전지는 2지로 구성되어 있으며, 각 지는 Wire Rope Type의 슬러지 collector가 1지당 2대로 1구동 방식으로 설치되어 간헐 운전되고 있다. 침전 슬러지는 수동 조작에 의해 배출수 처리시설로 이송되고 있으며, 침전지 세부구조 및 설비 현황은 다음 Table 1과 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 K_정수장 침전지의 유출부의 구조는 흐름방향으로 직각라운더가 이중으로 설치되어 있는 격자형으로 되어 있다.

다음 Table 2는 K_정수장 침전지 설계유량에 대하여 침전지 규격 및 운전조건을 근거로 계산된 침전지 수리조건과 일반적으로 제시되고 있는 적정 설계 기준값을 나타내고 있다.

K_정수장 유입원수의 평상시 탁도는 3NTU 이하로 안정적인 수질을 나타내고 있으나 때때로 강우시 유입원수의 탁도가 약 5NTU까지 증가하는 경우가

Table 1. K_정수장 침전지 구조 및 설비현황

규격	W10m × L31.6m × H4m × 2지 = 2,528 m ³		
체류시간	3.03시간(설계유량: 20,000 m ³ /일)		
슬러지 collector	형 식	Wire Rope Type(수중대차식) 1지 2대로 1구동	
	규 격	스크레이퍼 규격: W4.8m × H0.5m	
	동 력	3kW 주행거리 약 28m	

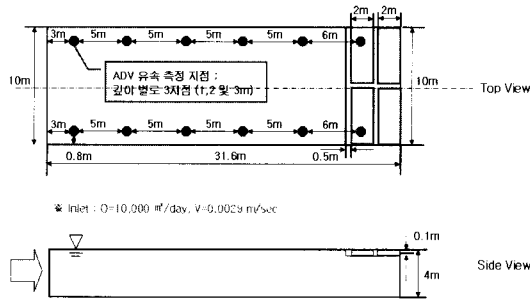


Fig. 1. K_정수장 침전지 구조 및 ADV 유속측정지점.

있으며, 침전수의 탁도가 원수보다 높은 경우가 발생되기도 하였다. 즉, 침전지내 수류 흐름이 불안정하여 침전되었던 플록이 재부상하는 현상이 종종 발생하는 것으로 추측된다.

2.2. 침전지내 유동장 해석

본 연구에서는 전산유체역학(CFD) 및 ADV 유속 측정 기법을 이용하여 기존 침전지내 유동장을 모사·해석하여 문제점을 면밀히 조사하고, 추후 제안될 개선방안을 모사하여 지내 흐름의 양상 및 안정성을 예측·평가하고자 하였다.

CFD는 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FVM(Finite Volume Method)과 같은 유한차분화 기법 등을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 침전지의 흐름거동을 해석하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 CFX-5.71을 사용하였다. 자세한 CFD 모사방법은 저자가 앞서 발표한 논문(박세진 등, 2005)에 수록되어 있다.

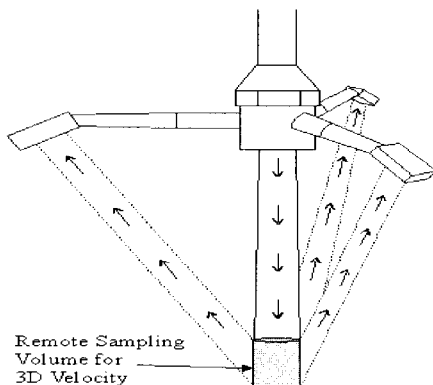


Fig. 2. ADV 측정 원리 및 장비.

Table 2. K_정수장 침전지의 수리조건

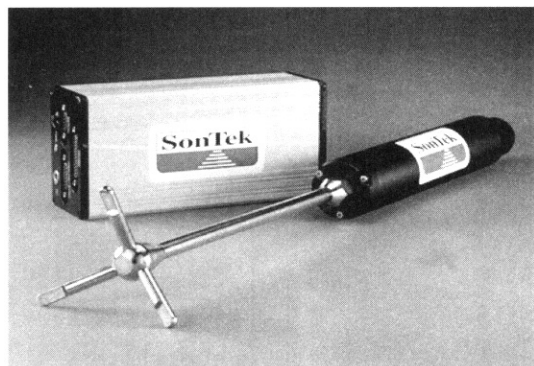
구 분	설계 유량 (20,000m ³ /일)	적정 설계 기준값
L/W ratio	3.16	4~8
W/H ratio	2.5	3~6
L/H ratio	7.9	15 이상
v(cm/min)	29	40 이하
R(m)	2.2	
Reynold 수(Re)	4,870	10,000 이하
Froude 수(Fr)	3.9 10 ⁻⁷	1 10 ⁻⁶ 이상
표면 부하율(m ³ /m ² ·일)	31.6	15~49
위어 부하율(m ³ /m ² ·일)	138	248
상승유속(m ³ /m ² ·일)	166	58.6~87.9

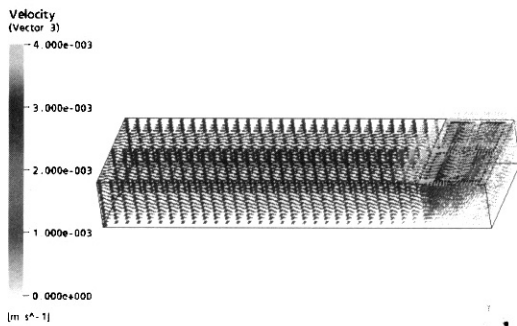
상기 언급한 모사 방법으로 CFD를 이용하여 구한 수치해석 값을 검증하기 위해 K_정수장 침전지를 대상으로 지점별 유속을 ADV(Sontek 10MHz)를 사용하여 측정하였다(Fig. 1 참조). ADV는 침전지 내에서 한 지점의 x, y, 및 z 방향의 순간 유속을 측정하는 기기로 probe로부터 일정 거리(약 7cm)에 위치한 sampling volume의 유속을 음파를 사용하여 측정한다. K_정수장 침전지의 경우 양측 벽면에서 약 80cm 떨어진 지점에서 흐름방향으로 3, 8, 13, 18, 23 그리고 29m 위치에서 각 위치에서 깊이 방향으로 1, 2 그리고 3m 총 36지점의 속도를 측정하였다(Fig. 2).

3. 결과 및 고찰

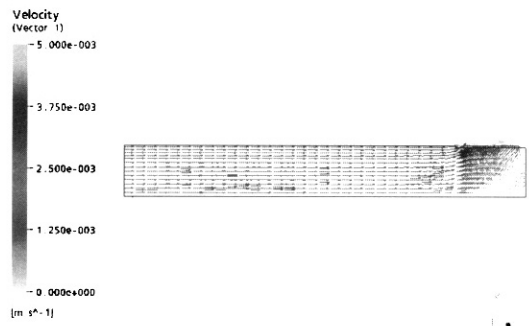
3.1. 침전지 수리구조 평가

침전지의 실제 입자 제거 효율은 지내 흐름거동과 밀도차, 중력침전, 응집 및 슬러지의 퇴적과 같은 물

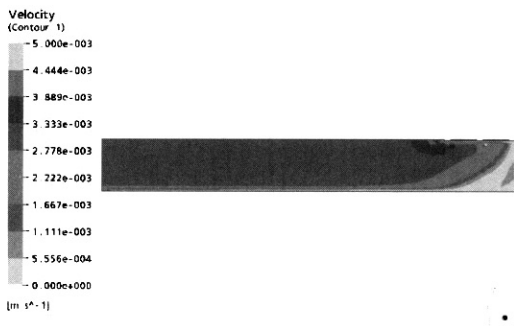




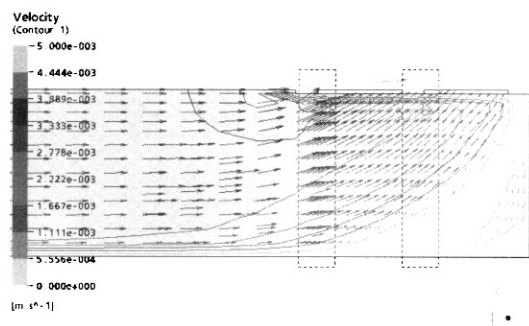
(a) 전체 유동 (벡터)



(b) 중앙 측면에서 속도장(벡터)



(c) 중앙 측면에서 속도(등고선)



(d) 위어 유출부에서의 유동장

Fig. 3. K_정수장 침전지내 유동 현상(유량 10,000m³/일).

리적인 요인에 의해 영향을 크게 받는다(Jayanti와 Narayanan, 2004). 이러한 침전지의 효율을 지배하는 근본적인 변수는 장폭비, 수리부하률, 월류부하율, Reynolds 수 또는 Froude 수 등으로 평가되는 수리구조의 적정성이라고 볼 수 있다(김정현 등, 2005, Nandana & Mavendra, 1997).

수온 0°C에서 Re 500일 경우 층류로, Re 2,000일 경우 난류로 구분하고 있다. 침전지 설계시 적용하고 있는 Re 및 Fr에 대해서 Kawamura는 각각 2,000 이하, 1×10^{-5} 이상을 권장하고 있고 일부 문헌에서는 각각 15,000~18,000, 1×10^{-5} 이상을 적용하는 사례도 보고된 바 있다. 또한 한국수자원공사 발간하는 「원수수질특성에 따른 수처리 설비 및 공정관리 최적화 방안」에서는 각각 10,000 이하, 1×10^{-6} 이상을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 한국수자원공사 연구결과를 기준으로 하였으며, 검토결과 Reynolds 수는 4,870으로 기준(10,000 이하)에 어느 정도 적합

하게 설계되었으나, Froude 수는 3.9×10^{-7} 로 기준인 1×10^{-6} 보다 작아 흐름의 불안정 요소로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 침전지 위어부하율은 138m³/m·일로 설계기준을 만족하고 있으나, 위어 하부 상승유속이 166m/일로 계산되어 기준(58.6~87.9m/일)에 비해 상당히 높은 것으로 평가된다 (Table 2).

현재 K_정수장의 경우 설계수량과 실첨두수량이 거의 일치한다. 따라서 설계유량 20,000m³/일을 기준으로 침전지 규격을 평가한 결과 침전지 길이와 폭의 비 및 높이의 비가 각각 3.16 및 2.5로 권장기준에 부적합한 것으로 나타났다(Table 2).

3.2. CFD 모사를 통한 침전지 유동장 해석

3.2.1. 격자형라운드 구조 K_정수장 침전지의 유동장 해석

다음 Fig. 3은 K_정수장 침전지를 대상으로 운전유

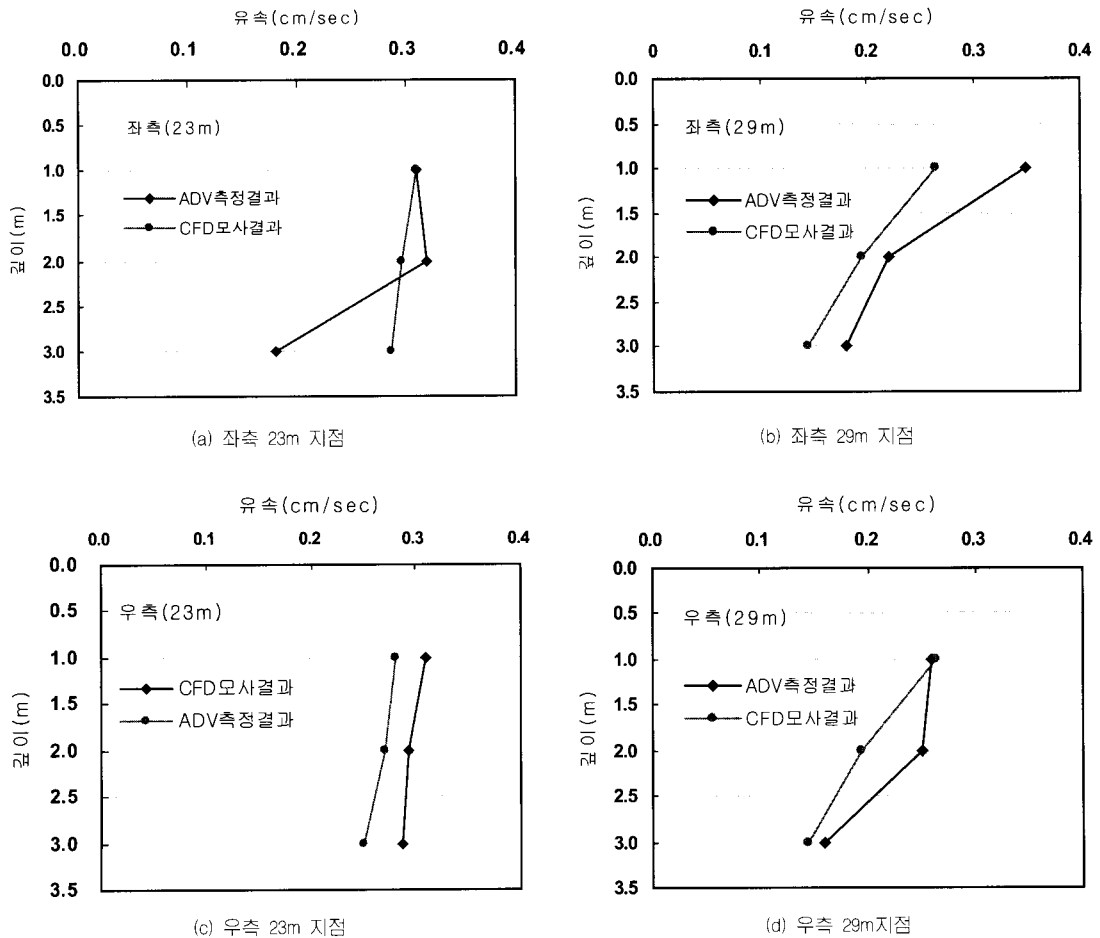


Fig. 4. CFD 모사결과와 ADV 실측결과 비교.

량 10,000m³/일 경우의 지내 유동장을 가시화한 것이다.

Fig. 3 중앙 측면에서의 속도장(Fig. 3 (b), (c), 그리고 (d))에서 위어 유출부 이전까지는 흐름이 안정적으로 진행하지만 첫 번째 라운더를 지나면서 급격한 상향유속이 발생하는 것으로 조사되었다. 이와 같이 위어 하부에서 급격한 상향유속이 발생하는 것은 개수로로 진행되어 오던 안정적 흐름이 트라프로 차단되어 위어하부의 침전지내부에 압력 상승으로 인해 상향유속이 발생한 것으로 판단된다(Fig. 3 (d)(빨간 박스 부분)). 즉, 안정적인 개수로 흐름으로 진행되던 흐름이 라운더 하단의 트라프를 통과하면서 국부적인 관수로 흐름으로 변화되어 압력이 증가하고 이에 부력이 발생하면서 상향유속을 가중시키는 것으로

판단된다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 라운더 설치부 면적이 권장 기준에 비해 작은 것도 급격한 상향유속을 발생시키는 원인이 된다.

또한 Fig. 3 (d)에서 우측 말단에 상향류의 흐름과 대분되는 상당히 큰 영역의 사류지역이 발생하는 것이 관측되었으며, 이는 상향류가 위어를 통하여 충분히 유출되지 못하여 발생하는 현상으로 파악된다.

3.2.2. ADV를 이용한 CFD 모사 결과의 검증

상기 CFD 모사 결과를 검증하기 위해 ADV 유속 측정 결과를 상호 비교하기 위하여 CFD 모사 결과로부터 ADV로 유속이 측정되는 지점(Fig. 1 참조)의 유속 데이터를 읽어 CFD 모사결과와 ADV 실측결과를 비교·검토하였다. 다음 Fig. 4는 위치별(좌·우

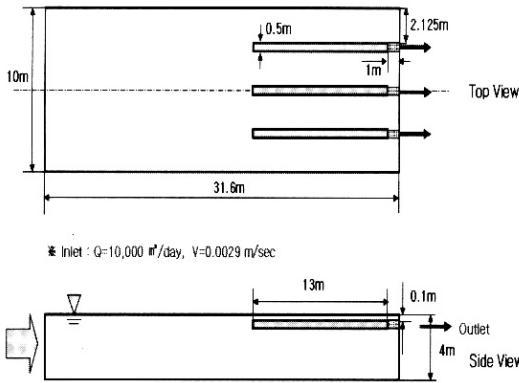


Fig. 5. K_정수장 침전지 유출부 구조변경(핑거형 라운더).

측 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 길이 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. 4 (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 나타내

었는데 이는 ADV 유속 실측 실험을 하는 동안(약 3 시간) 유량이 시간대 별로 변화였고, 정확한 벽면의 조도 계수를 측정하지 못하여 발생된 것으로 판단된다.

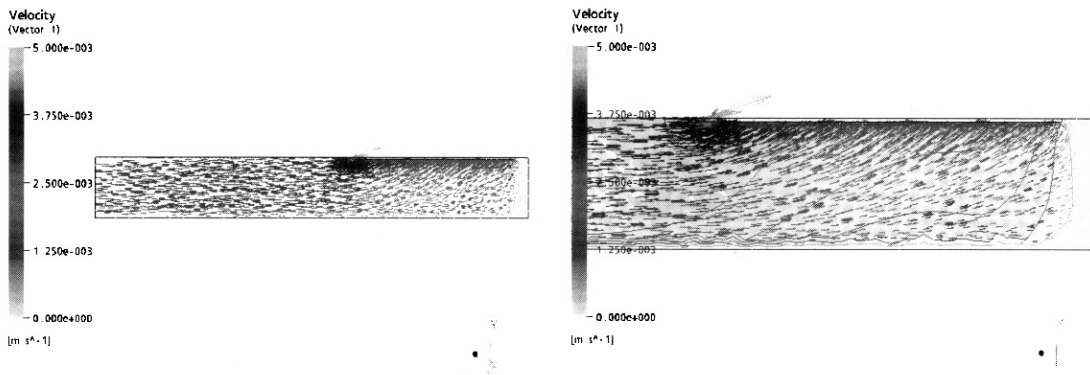
3.2.3. 핑거형라운더 구조 침전지의 유동장 해석

위어 설치부의 면적이 너무 작아서 위어 하부상승 유속이 약 160m³/m² · 일 이상으로 기준을 만족시키지 못하고 있어 플록 부상이 우려되는 K_정수장의 침전지 유출부의 격자형라운더 구조를 핑거형라운더 구조로 변경(Fig. 5)시 유동장을 CFD 모사를 통하여 평가하였다. 이때 침전지 말단 벽면에서 발생하는 상향류에 편승하는 플록의 월류를 방지하기 위해 말단 벽에서 1m는 월류가 일어나지 못하도록 하였다

우선적으로 핑거형라운더가 설치되는 경우 상승유속을 계산한 결과 76.9m³/m² · 일로 계산되어 기존 침전지 라운더 구조에서와 달리 적정 기준인 58.6~87.9m³/m² · 일을 만족할 수 있다.

다음 Fig. 6은 핑거형 라운더 구조로 개조 할 경우 침전지내 유동 현상을 CFD로 모사한 것을 보여주고 있다.

상기 CFD 모사결과와 Fig. 3 기존 침전지내 유동장을 비교하면, 지내 전체적인 유동장에서 유속의 변화는 없으나, 위어 유출부 및 하단에서의 유동장에서는 사류 형성이 거의 없고(도류벽 설치시 보다 없는 것으로 예측됨), 상승유속이 감소할 것으로 예측된다. 특히 Fig. 3 (d)와 비교할 때, 라운더를 지나면서 발생하는 빠른 상향 유속이 상당히 감소될 것으로 판단



(a) 중앙측면에서 속도 (벡터)

(b) 위어 유출부에서의 유동장

Fig. 6. Finger type의 위어구조 설치시 침전지내 유동 현상 (유량 10,000m³/일).

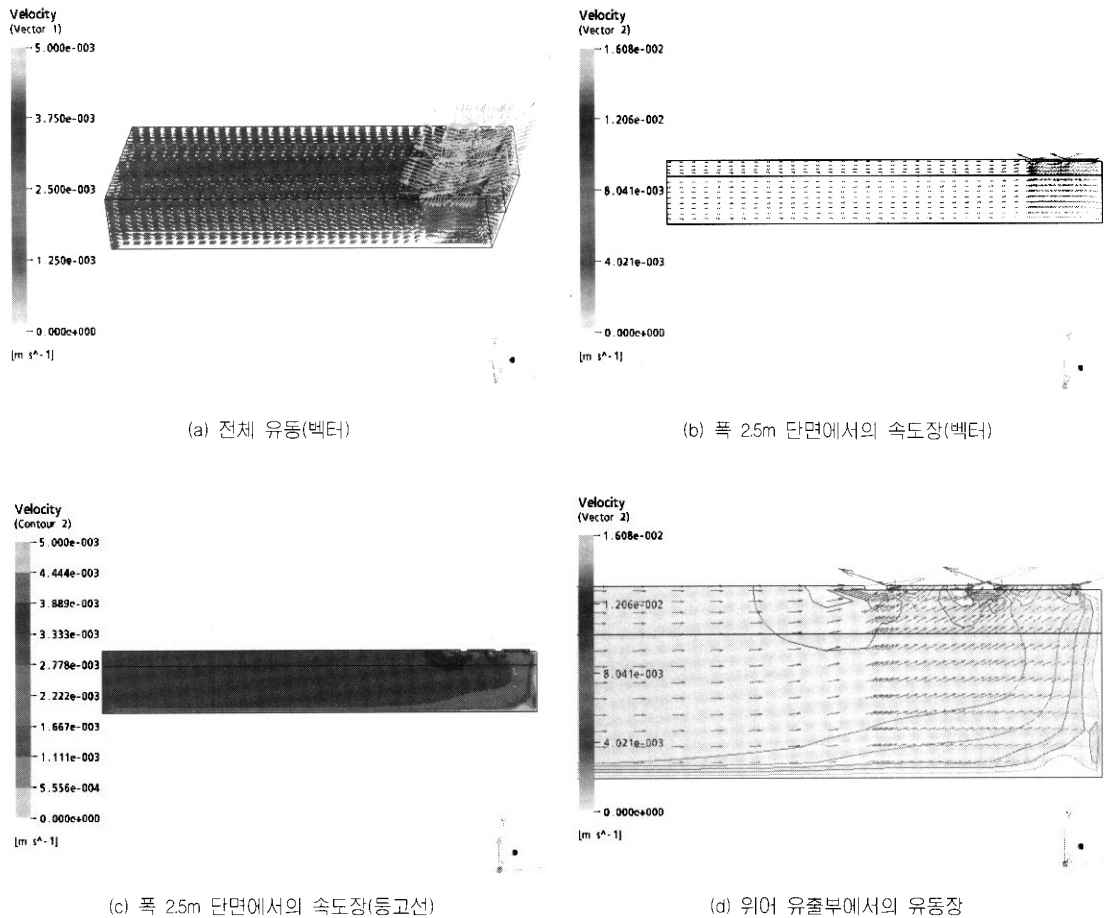


Fig. 7. 기존 침전지에 도류벽 설치시 침전지내 유동 현상(유량 10,000m³/일).

된다.

3.2.4. 유동장 해석을 통한 도류벽 설치효과 평가

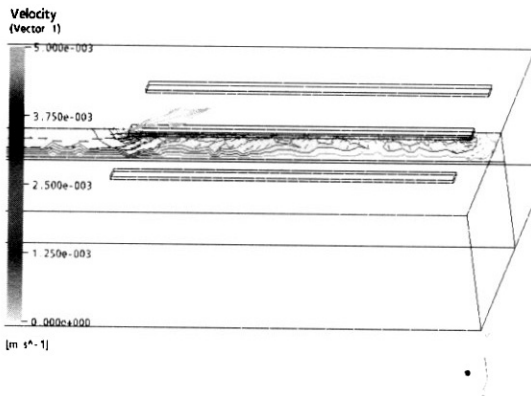
현재 K 정수장의 당면문제 중의 하나는 지내 Froude 수가 너무 작아 침전지 유입수의 모멘텀에 의해 지내 체류수가 밀려서 흘러감에 따라 불안정한 흐름이 우려되는 점이다. 이에 슬러지 collector의 운전을 고려하여 중앙 단면에 높이 3m의 도류벽 설치효과를 CFD를 이용하여 평가하였다.

다음 Fig. 7은 유출부가 격자형라운더 구조로 되어 있는 기존 침전지에 도류벽을 설치하는 경우의 지내 흐름을 CFD로 모사한 결과이다.

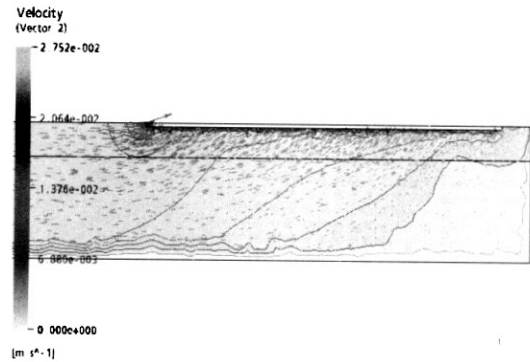
상기 CFD 모사결과와 Fig. 3의 기존 침전지내 유동장을 비교하면, (a) 지내 전체적인 유동장에서 유속이 느리고(약 0.003m/sec에서 0.0025m/sec로),

(c) 및 (d) 위어 유출부에서의 유동장에서는 도류벽 미설치시 보다 사류 형성지역이 작고 상승유속이 감소할 것으로 예측된다. 특히 (d) 위어 유출부에서의 유동장을 세밀히 관찰해보면 라운더를 지나면서 발생하는 빠른 상향 유속이 상당히 감소될 것으로 판단된다.

결론적으로 기존 침전지에 도류벽을 설치할 경우 Froude 수의 증가로 지내 흐름을 안정시킬 수 있으며, 라운더의 구조를 평저형으로 변경할 경우에는 기존의 격자형라운더 구조로 인해 발생되었던 상승유속을 감소시키고, 라운더 하부에 발생하던 사류를 방지할 수 있는 것으로 예측되었다. 따라서 이 두 가지 방법을 병용하는 경우를 대상으로 지내 수리흐름을 CFD로 모사하였다. 다음 Fig. 8은 도류벽 설치와 라운더 구조개선을 동시에 수행할 경우 침전지내 유동



(a) 3차원 중앙 단면에서의 유동장



(b) 위어 유출부에서의 유동장

Fig. 8. 도류벽 설치와 Finger type의 위어 구조로 변경시 침전지내 유동 현상(유량 10,000m³/일).

장을 모사한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 8을 Fig. 3의 기존 침전지 내에서의 유동현상과 비교하면, 전체 지내 유속이 느려지고, 위어 유출부 하단에서 상승 유속이 상당히 감소하였으며, 말단 벽면 부근에 발생되었던 사류 지역이 저감되는 것으로 예측되었다. 즉 예측한 대로 도류벽 설치시 확보할 수 있는 지내 흐름의 안정성과 위어 구조개선을 통하여 얻을 수 있는 상승유속 및 사류 지역의 저감 효과를 동시에 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 침전지의 수리구조가 부적정하여 침전효율이 악화되고 있는 실제 정수장(K_정수장)을 대상으로 유동장 해석을 통한 기존 침전지의 문제점과 개선방안을 도출하고자 CFD를 이용한 흐름모사를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) K_정수장 침전지에 설치되어 있는 흐름방향의 직각라운드 구조는 부분적인 관수로 흐름을 발생시키고 이로 인하여 위어 하단부에 난류흐름이 생성되어 침전효율 저하를 초래할 수 있다. 그러나 흐름 방향에 직각으로 설치되어 있는 격자형라운드 구조를 평거형 라운드 구조로 교체 설치할 경우 상승유속을 감소시키고 하부에 발생하는 사류를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 라운드 설치부의 면적을 증가시켜 흐름의 안정성을 도모하여 궁극적으로 침전지 효율을 향상시

킬 수 있다는 것이 CFD 모사결과 입증되었다.

2) CFD 모사결과 K_정수장 침전지와 같이 수리구조가 부적정하여 발생하는 지내 흐름의 불안정성으로 인한 침전 효율저하는 침전지 중앙에 위어하단부까지 도류벽을 설치하여 Froude수를 제고시키므로써 흐름의 안정성을 도모할 것으로 예측된다.

참고문헌

김정현, 배철호, 박노석, 문용택, 이선주, 권순범, 안효원 (2005) 정수장 최적화를 위한 성능제한인자 평가에 관한 연구. *상하수도학회지*, 19(1), pp. 78-91.

환경부 (2002) 상수도시설기준.

Chao, J.L. and Trussel, R.R. (1980) Hydraulic Design of Flow Distribution Channels. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 106, pp. 321-333.

Currie, I.G. (1993) *Fundamental mechanics of fluids*, McGraw-Hill, New York.

Kawamura, S. and Lang, J. (1986) Re-evaluation of Lanuders in Rectangular Sedimentation Basins. *J. WPCF*, 58(12), pp. 1124.

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.

Nandana Vittal and Mavendra Singh Raghav (1997) Design of Single-Chamber Settling Basins. *ASCE, Journal of Environmental Engineering*, 123(10), pp. 469-471.

Prabhata K.Swamee and Aditya Tyagi (1996) Design of Class-I Sedimentation Tanks. *ASCE, Journal of Environmental*

- Engineering*, **122**(1), pp.71-73.
- Jayanti, S. and Narayanan, S. (2004) Computational Study of Particle-Eddy Interaction in Sedimentation Tanks, *ASCE, Journal of Environmental Engineering*, **130**, pp.37-49.
- S. Kawamura, (1991) *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Wiley & Sons, Inc.
- Stovin V.R. and Saul A.J. (1994) Sedimentation in Storage Tank Structures. *Water Science and Technology*, **29**(1-2), pp. 363-372.
- 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.