

# CFD를 이용한 플록큐레이터 회전방향에 따른 플록형성지 유동 평가

조영만<sup>†</sup> · 유수전 · 노재순 · 김택준\* · 김창원\*\*

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · \*부산시 · \*\*부산대학교 환경공학과

(2009년 2월 11일 접수, 2009년 5월 28일 채택)

## Evaluation of the Effect of Flocculator Rotation Direction in Flocculation Basin on Hydrodynamic Behavior using CFD

Youngman Cho<sup>†</sup> · Soojeon Yoo · Jaesoon Roh · taekjun Kim\* · Changwon Kim\*\*

Water Quality Research of Busan Water Authority · \*Busan Metropolitan City

\*\*Department of Environment Engineering, Pusan National University

**ABSTRACT** : With time, the stable management of turbidity is becoming more important in the water treatment process. So optimization of flocculation is important for the improvement of the sedimentation efficiency. we evaluated the hydrodynamic behavior in the rotation direction (clock-wise, counterclock-wise) of the flocculator in the flocculation basin using Computational Fluid Dynamics (CFD). The results of the CFD simulation, in cases where flocculators rotate in a clockwise direction, a stronger flow is formed near the surface of the water where the rotating direction and current of flow correspond. The variance and standard deviation of the flux are about 8.5 and 2.9 respectively. In contrast, in the case of a counterclockwise direction, a stronger flow is formed near the bottom of the basin. The variance and standard deviation of the flux are about 5.3 and 2.3, respectively. The effluent flux is affected more by the third flocculator spin than the first and second flocculator spins. The third flocculator spinning in the counterclockwise direction is better for the uniform flow of the sedimentation basin than the third flocculator spinning in the clockwise direction.

**Key Words** : CFD (Computational Fluid Dynamics), Flocculator, Clock-wise

**요약** : 정수처리공정에서 안정적인 탁도 관리가 날이 갈수록 중요해지고 있다. 따라서 침전 효율 향상을 위한 플록형성 공정의 최적화는 매우 중요하다. 우리는 전산유체역학적 방법을 이용하여 플록큐레이터의 회전방향(시계방향, 반시계방향)에 따른 플록형성지 내 유동특성을 평가하였다. 평가 결과, 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 경우는 플록큐레이터 회전방향과 수류 흐름이 일치하는 수표면 쪽에서 유동이 강해지고 유출량의 분산 및 표준편차는 각각 8.5, 2.9로 나타났다. 반면에 플록큐레이터가 반시계방향으로 회전하는 경우는 플록큐레이터 회전방향과 수류 흐름이 일치하는 바닥 쪽에서 유동이 강해지고 유출량의 분산 및 표준편차는 각각 5.3, 2.3으로 나타났다. 또한 플록형성지 유출량은 1,2단 플록큐레이터 회전방향보다는 3단 플록큐레이터의 회전방향에 의해 주로 영향을 받으며 3단 플록큐레이터가 반시계방향으로 회전하는 경우가 시계방향으로 회전하는 경우보다 유출량의 편차가 적기 때문에 침전지의 균등한 흐름을 위해 유리하다.

**주제어** : 전산유체역학, 플록큐레이터, 시계방향

### 1. 서론

플록형성공정은 급속혼화 이후 형성된 플록을 크게 성장시켜 침전효율을 높이기 위한 공정이다. 플록을 크게 성장시키기 위해서는 플록형성지 내 균등한 흐름과 적절한 교반강도를 유지해주어야 하며, 이와 같은 목적을 달성하기 위해 플록형성지는 일반적으로 3단으로 구분되어 있고 교반강도는 점감식 그리고 플록큐레이터는 시계방향과 반시계방향 등의 조합으로 운영되고 있다. 하지만 이와 같은 구조에도 불구하고 실제 플록형성지내 유동은 단락류(Short circuit), 사영역(Dead space) 형성 등의 요인으로 인해 불균

일한 유동 특성을 보이고 이와 같은 불균일한 유동은 후속공정인 침전공정의 효율에 큰 영향을 미친다.<sup>1)</sup>

플록형성지 후속 공정인 침전은 재래식 정수공정에서 수처리 비중이 가장 높은 중요한 공정이다. 침전 공정은 침전지 유출입부의 기하학적 형상은 물론 처리수의 수온, 탁도 등과 같은 물리적 특성 그리고 외부 기상 등 여러 인자에 의해 영향을 받는 매우 복잡한 공정이다.<sup>2)</sup> 이와 같은 복잡한 영향 인자 중에서 침전 효율에 가장 큰 영향을 주는 인자는 침전지 유입 동에너지와 바람인데 외부조건인 바람의 영향을 무시한다면 침전 효율은 침전지로 유입되는 유입 동에너지에 의해서 결정된다고 말할 수 있다.<sup>3)</sup> 즉 장방향침전지 내에 특별한 구조물이 없다면, 플록형성지에서 유출된 수류는 그대로 침전지 내 주 흐름을 형성하면서 침전효율을 결정하기 때문이다. 이와 같은 침전지 유입

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: cho1221@busan.go.kr

Tel: 051-669-4622

Fax: 055-323-4719

동에너지는 플록형성지의 격벽 형태와 침전지 유입구 형상, 그리고 플록큐레이터의 회전방향 등이 주요 영향 인자들과 있다고 말할 수 있다.

즉 플록형성지 내 주 흐름이 플록큐레이터 회전방향과 일치하는 영역에는 수류와 플록큐레이터의 회전력이 중첩되면서 유동이 강해지고 반대로 수류와 플록큐레이터의 회전 방향이 교차하는 부분에서는 에너지가 서로 상쇄되면서 유동이 약해질 수밖에 없기 때문에 이와 같은 유동변화에 의해 침전지내 유입 동에너지가 영향을 받는다는 것은 지극히 당연한 것이다. 이와 같이 플록큐레이터의 회전방향은 침전지 유입 동에너지에 영향을 미치는 중요한 인자 중에 하나임에도 불구하고 지금까지 플록큐레이터의 회전방향에 따른 플록형성지내 유동특성과 침전지 유입 동에너지에 미치는 영향 등을 평가한 연구가 거의 전무한 실정이다.

현재 상수도 설계기준에 플록큐레이터의 회전방향에 대한 지침은 없으며, 국내 대부분의 정수장에서 플록큐레이터 운전은 정수장 운영자의 임의적인 판단에 따라 운영되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 플록큐레이터의 회전방향에 따른 플록형성지내 유동 특성을 평가하고 동시에 침전지 내로 가장 균등한 유입이 가능한 플록큐레이터 1,2,3단의 회전방향 조합을 결정하고자 하였다.

## 2. 실험방법

본 연구의 대상공정은 낙동강 수계 G 정수장으로 시설 용량은 일일 20만톤 규모이며 장방형침전지는 8지가 운영되고 있다. Table 1은 대상 플록형성지의 제원을 나타낸다. 플록형성지 1,2,3단의 교반강도 G값은 다음의 식 (1), (2) 두 식으로 계산하였다.<sup>4)</sup>

$$G = \sqrt{P / \mu V} \tag{1}$$

$$P = C_D A \rho v^3 / 2 \tag{2}$$

여기서 G는 속도경사(1/second), P는 교반 동력(N-m/s),  $\mu$ 는 물의 점도, V는 플록형성지 부피,  $C_D$ 는 패들 넓이와 깊이의 비(1.5), A는 패들 면적,  $\rho$ 는 물의 밀도, v는 물과 패들의 상대속도(m/s)를 각각 나타낸다. G정수장 내 모든 플록형성지는 Table 1과 같은 조건으로 운영되고 있으며 CFD 진단 역시 이와 같은 조건으로 해석하였다.

플록형성지 격벽 형태는 1,2, 유출격벽 모두 정류벽 형태이며 플록형성지의 운전 조건(교반강도, 유량 등)은 바꾸지 않고 플록큐레이터의 회전방향만을 바꾸어가면서 플록형성지의 유동 특성을 CFD 수치해석적 기법으로 평가하였다.

플록큐레이터의 회전방향은 Table 2와 같이 8가지로 조합해서 해석을 수행하였으며, 플록큐레이터 회전방향과 추

적자실험 채수지점(P/C)은 Fig. 1과 같다. CFD 해석 결과를 검증하기 위해 연구 대상 실제 플록형성지(Case 5)를 대상으로 수행한 추적자 실험과 CFD를 이용하여 수행한 추적자 시뮬레이션의 해석 결과를 비교하였다. 추적자 실험에 사용한 추적 실험 물질은 불화나트륨(NaF)이며, 불화나트륨 1.5 kg을 10리터 물에 녹인 후 유입구 3개 지점에 순간 투입하고, 유출구와 가까운 플록형성지 중간 지점(P/C)에서 채수한 다음 채수한 시료의 불소이온 농도를 이온크로마토그래피를 이용하여 분석하였다.

실제 정수장에서 추적자 물질을 투입하여 유출농도를 확인하는 실험은 많은 인력과 시간이 소요되며,<sup>5)</sup> 실제 정수과정 생산 중에서 이루어져야 하기 때문에 추적 물질 선정 및 투입에도 많은 제약이 따르기 마련이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 실제 추적자 실험의 단점을 해소하기 위해, 전산유체역학(CFD)적 방법을 이용하여 각 Case별 추적자 시뮬레이션을 수행하였고, 그에 따른 유동특성을 평가하였다. 전산유체역학을 이용한 농도물질 추적은 유동장에 추적물질을 일정량 투입한 후 출구에서 유출농도를 수집한다는 점에서 실제 공정에서 수행한 추적자 실험과 크게 다르지 않으며, 이 때 추적자 물질의 유출농도 수집은 정류벽 유출 전체 단면을 상중하로 구분하여 각 구간별로 유출되는 농도를 평가하였다.

Table 1. Operating parameters of Flocculation basin

items	operation parameter
size	W12 m×L13.2 m×H4.5 m
HRT	50 min
flocculator	paddle wheels on horizontal shafts(3step)
G value (1/second)	1step 40, 2step 20, 3step 10

Table 2. Experimental Schedule to find the optimum rotational direction

Case #	rotation direction (CCW : Counter Clockwise, CW : Clockwise)			
	Floc. #1	Flic. #2	Floc. #3	
1	CW	CW	CW	
2	CW	CCW	CW	
3	CCW	CW	CW	
4	CCW	CCW	CW	
5	CW	CW	CCW	Current
6	CW	CCW	CCW	
7	CCW	CW	CCW	
8	CCW	CCW	CCW	

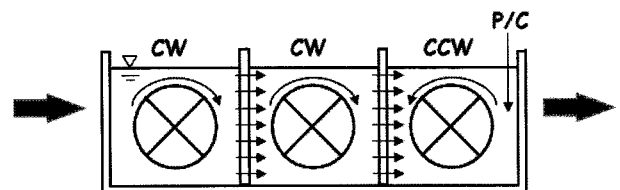


Fig. 1. Rotation direction of horizontal flocculator.

CFD는 수작업으로 해석이 어려운 공정을 FDM (Finite Difference Method) 기법을 이용하여 해석 대상 공정 모형을 작은 셀로 분할한 뒤 각각 경계조건을 주고 해를 구하는 방법이다.<sup>6,7)</sup> 최근에는 컴퓨터 성능의 눈부신 발전에 힘입어 CFD 해석 결과에 대한 신뢰도가 급격히 높아짐에 따라 점차 일반 실험을 대체하는 수준까지 발전하고 있다.<sup>8)</sup> 본 연구에서도 플록큐레이터의 회전방향에 따른 유동 특성을 평가하기 위해, 상용 CFD 프로그램인 Fluent 6.3와 Gambit 2.4를 사용하였다.

유입수가 플럭형성지 내로 유입되어 유출구를 통해서 유출되는 과정에서 발생하는 유체의 물리적 성질의 변화는 연속방정식과 운동량 방정식 등의 지배방정식에 의해 설명될 수 있으며, 본 연구에서는 기본적으로 연속방정식, 모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation) 등을 사용하였다. 난류 거동을 모사하기 위해서는 Realizable k-ε 모델을 사용하였으며, Steady-state 상태로 해석하였다. 본 연구에서는 바람, 플록 침전, 슬러지 수집기 등의 영향이 없다고 가정하고 순수한 수류 흐름만을 평가하였으며 플럭형성지 크기를 축소하지 않고 실제 크기(Full scale)로 해석을 하였다.

경계조건은 침전지의 자유수면은 평면적이며 마찰이 없다고 가정하였는데, 그 이유는 공기와 접촉하고 있는 자유수면에서의 마찰력은 무시할 정도로 작기 때문이다. 그리고 측벽면과 바닥면은 No-Slip Condition을 적용하고, 유체의 점성에 의한 표면 박리 현상이 발생한다는 가정을 적용하였다.

CFD 소프트웨어를 이용한 농도 추적 시뮬레이션 기법은 species transport 방법을 활용하였으며 추적물질은 유동장 해석에 사용된 유체와 물성치가 동일한 물을 5초 동안 유입시킨 후, 출구로 유출되는 농도를 그래프로 그렸다. 유출 데이터의 경우는 시뮬레이션 시 0.5초 간격으로 유출농도를 계산하여 유출지점에서 데이터를 수집하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 추적자 실험과 해석값 비교

CFD 시뮬레이션 해석 결과의 신뢰도를 확인하기 위해 플럭형성지(Case 5)의 현장 실증 실험과 시뮬레이션 해석 결과를 비교하였다(Fig. 2). 비교 결과 실험값과 시뮬레이션 값이 유출 초기에는 매우 근사하게 일치하였으나 정점을 지난 이후에는 실험값이 시뮬레이션 값보다 긴 시간동안 유출되는 것으로 나타났으며 편차는  $t/t_0$  값이 0.7에서 2.0까지  $C/C_0$  값이 0.05에서 0.24까지 편차가 발생하였으며  $t/t_0$  값 1.2에서  $C/C_0$  값이 2.24로 가장 큰 오차를 나타내었다. 이와 같은 오차는 불화나트륨 용액을 투입하는 과정 등 실험오차와 CFD 계산과정에서 발생할 수 있는 모델인자의 오차에서 비롯된 것으로 추정할 수 있으며 이런 오차는 많은 반복실험을 통해 실험오차를 줄이는 방법 등을 통해서 줄일 수 있다. 하지만 실험값과 CFD 해석 값의 유

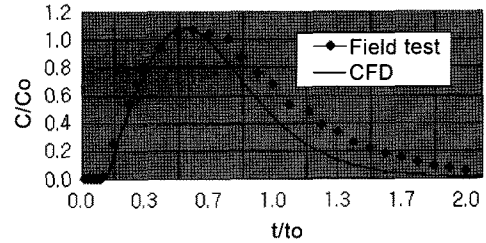


Fig. 2. Comparison of CFD simulation and experimental data ( $t_0$  is HRT,  $C$  is effluent concentration, and  $C_0$  is total concentration(total amount of the influent species or trace/volume of flocculation basin).

출농도의 경향이 유사하고, 정점에서의 농도 값이 거의 일치하는 것으로 보아 시뮬레이션 해석 결과에 대해 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 플럭형성지를 대상으로 현장 추적자 실험과 CFD를 이용한 추적자 시뮬레이션을 병행하여 유사한 결과를 얻은 선행 연구 사례<sup>9~12)</sup> 등을 볼 때도 전산유체 해석 결과에 대한 평가는 충분히 신뢰성을 갖는다고 볼 수 있다.

### 4.2. Case별 벡터 유동 특성

Fig. 3은 Case 1,8,2,7의 단면 벡터를 나타낸 그림이다. 4가지 경우 모두 플록큐레이터 회전속도가 1단에서 가장 크고 2단 3단으로 갈수록 작아지는데, 이는 그림에 나타나 있는 속도벡터 분포에서 확인할 수 있다. 3개의 플록큐레이터가 모두 시계방향으로 회전하는 Case 1의 속도벡터 분포를 보면(Fig. 3(a)), 플록큐레이터의 회전방향과 수류 흐름 방향이 일치하는 위쪽으로 속도벡터가 강해지는 것을 확인할 수 있다. 반면 플록큐레이터의 회전방향과 수류 흐름 방향이 서로 반대인 바닥 쪽에서는 위쪽보다 상대적으로 속도벡터가 약한 것을 확인할 수 있는데, 이는 플록큐레이터 1,2,3단이 모두 시계 방향으로 회전할 경우 1단에서 위쪽으로 강하게 형성된 속도벡터가 2단, 3단을 지나며 더욱 가속화되어 수면 쪽에서 강한 속도흐름이 형성되기 때문이다.

Fig. 3(b)는 모두 반시계방향으로 회전하는 경우로 시계 방향으로 회전하는 Fig. 3(a)와는 반대로 플록큐레이터 회전 방향이 수류방향과 일치하는 바닥 쪽에서 강한 속도벡터가 형성되고 수류흐름 방향과 서로 반대인 위쪽에서 벡터가 약하게 형성된 것을 확인할 수 있다. 따라서 플록큐레이터가 반시계방향으로 회전하는 경우는 바닥 쪽에서 흐름이 보다 강하게 형성된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(c)와 (d)는 시계 방향과 반시계 방향이 서로 교차로 회전하는 경우이다. Fig. 3(c)는 Case2의 유동해석 결과를 나타낸 것으로 플록큐레이터가 시계-반시계-시계 방향으로 회전하고 있기 때문에, 1단에서 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하면서 위쪽으로 강한 속도벡터가 형성되지만 2단에서 반시계 방향으로 회전하는 플록큐레이터에 의해 흐름방향이 바뀌면서 수면 쪽에 형성된 강한 속도벡터가 상쇄되고 흐름방향과 일치하는 바닥 쪽에서 속도

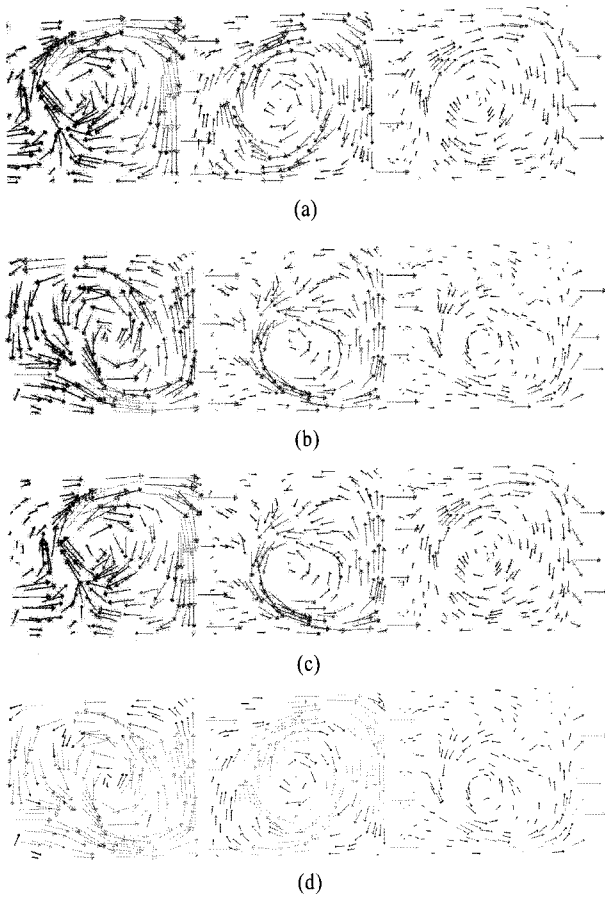


Fig. 3. The velocity vector at the Case #1(a), #8(b), #2(c), #7(d).

벡터가 강해지는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 또한 플록큐레이터가 반시계-시계-반시계 방향으로 회전하는 Case 7의 유동해석 결과를 나타내는 Fig. 3(d) 역시 전술한 Case 2와 같이 1,2,3단의 플록큐레이터 회전방향에 따라 속도 벡터가 서로 상쇄되면서 모두 반시계 방향으로 회전할 때 보다는 유동 특성이 약해진다는 것을 알 수 있다.

### 4.3. case별 유출 농도 특성

플록큐레이터의 회전 방향에 따른 수류변화 해석을 위해 1,2,3단 플록큐레이터의 회전방향을 Table 2에 나타낸 것과 같이 구성하여 전산유체역학적 시뮬레이션을 통해 유출농도를 추적하였다. Fig. 4(a)는 1,2,3단의 플록큐레이터가 모두 시계방향으로 회전하는 경우(case 1)와 모두 반시계방향으로 회전하는 경우(Case 8)의 유출농도 특성을 나타낸 것으로, Case 1은 Case 8에 비해 초기 유출시간이 조금 늦은 반면 최고 정점 농도는 더 높게 나타났다. 일반적으로 이상적인 초기 유출시간이 이론적 체류시간에 가깝고 포물선 정점 농도가 높을수록 이상적인 흐름에 근접한다고 할 수 있는데 Case1, 8을 비교할 때 그 차가 크지 않기 때문에 이결과로 Case 1이 Case 8보다 유리하다고 판단하기는 어려울 것으로 보인다.

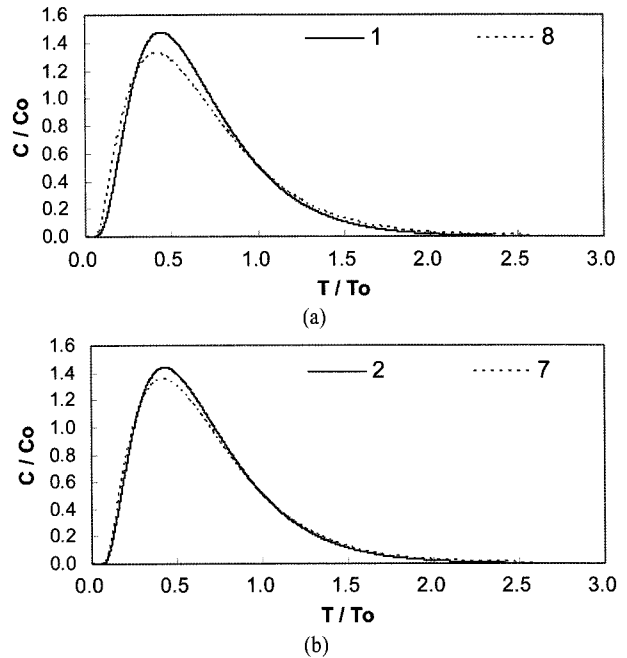


Fig. 4. The outlet concentration at the Case #1, #8(a), Case #2, #7(b).

Fig. 4(b)는 Case 2와 Case 7의 유출농도를 비교한 그림이다. Case 2는 플록큐레이터 1,2,3단 방향이 시계-반시계-시계인 경우이고 Case 7은 반시계-시계-반시계인 경우이다. Case 2와 Case 7의 정점에서의 농도 값 차이는 Case 1과 Case 8의 정점 농도 값 차이에 비해 작은 것을 확인할 수 있는데, 이는 Case 2의 경우 반시계 방향으로 회전하는 2단의 플록큐레이터에 의해 1단에서 넘어온 시계 방

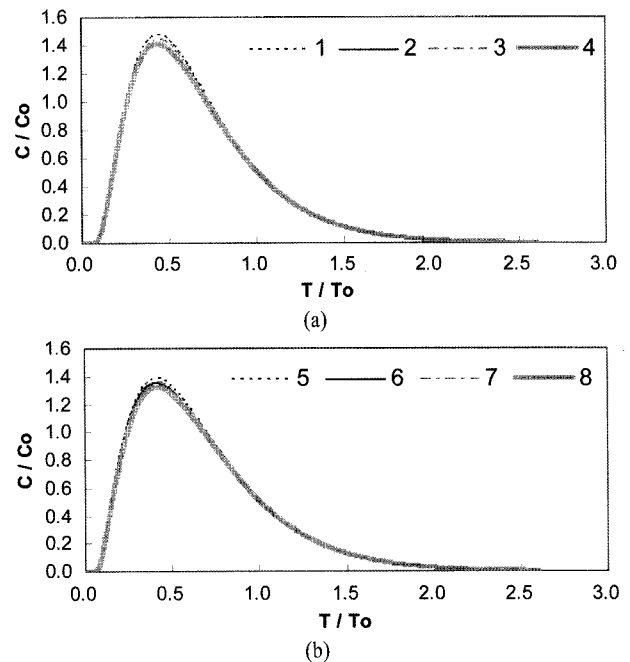


Fig. 5. The outlet concentration at the Case #1,2,3,4(a), Case# 4,5,6,7(b).

향 유동특성이 상쇄되었기 때문이라고 볼 수 있다. 마찬가지로 Case 7의 경우에도 1단의 플록큐레이터에 의해 형성된 반시계 방향의 유동특성이 시계방향으로 회전하는 2단 플록큐레이터의 영향을 받아 정점에서의 농도 값이 약간 상승하면서 Case 2와의 정점에서의 농도 값 차이가 줄어든 것으로 판단 할 수 있다. 즉 시계방향과 반시계 방향이 교차로 회전할 경우 벡터 방향이 서로 상쇄되면서 유출 농도차가 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a)는 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 Case 1,2,3,4의 유출농도를 나타낸 그래프이고, Fig. 5(b)는 3단 플록큐레이터의 회전방향이 반시계방향인 Case 5,6,7,8의 유출농도 그래프이다. 이 그래프를 통해 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 경우가 반시계방향으로 회전하는 경우에 비해 초기 유출시간이 조금 늦고 포물선 정점에서의 농도가 상대적으로 높은 것을 알 수 있다.

또한, 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 4개 Case의 유출패턴이 유사한 경향을 보이며(Fig. 5(a)), 마찬가지로 3단 플록큐레이터가 반시계방향으로 회전하는 4

개 Case의 유출패턴이 유사한 것으로 미루어볼 때(Fig. 5(b)), 플록큐레이터의 1,2,3단 회전방향이 서로 교차하면서 조합될 경우에 플록형성지 전체 유동은 마지막 3단 플록큐레이터 회전방향에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 8개 Case별로 유출구를 상중하 영역으로 구분하여 각 영역별 유출농도를 그린 그림이다. 플록큐레이터 3단이 시계방향으로 회전하는 Case 1,2,3,4의 경우는 초기 유출시간이 중간이나 아래쪽에 비해 상부에서 상대적으로 빨리 나타났고 포물선 정점을 지난 후에는 아래쪽이 위쪽보다 유출농도가 조금 더 높게 나타났다.

3단 플록큐레이터가 반시계방향으로 회전하는 Case 5,6,7,8의 경우는 시계방향으로 회전하는 경우와 반대로 초기 유출시간이 중간이나 위쪽에 비해 하부에서 빨리 나타났고 포물선 정점을 지난 후에는 위쪽의 농도가 아래쪽 농도보다 높게 나타났다. 이와 같이 플록큐레이터 회전방향에 따라 위쪽과 아래쪽의 유출시간과 농도가 다르게 나타난 것은 Fig. 3의 속도벡터 그림에서 전술한 것과 같이 플록큐레이터 회전방향과 수류 흐름방향의 일치, 교차 등

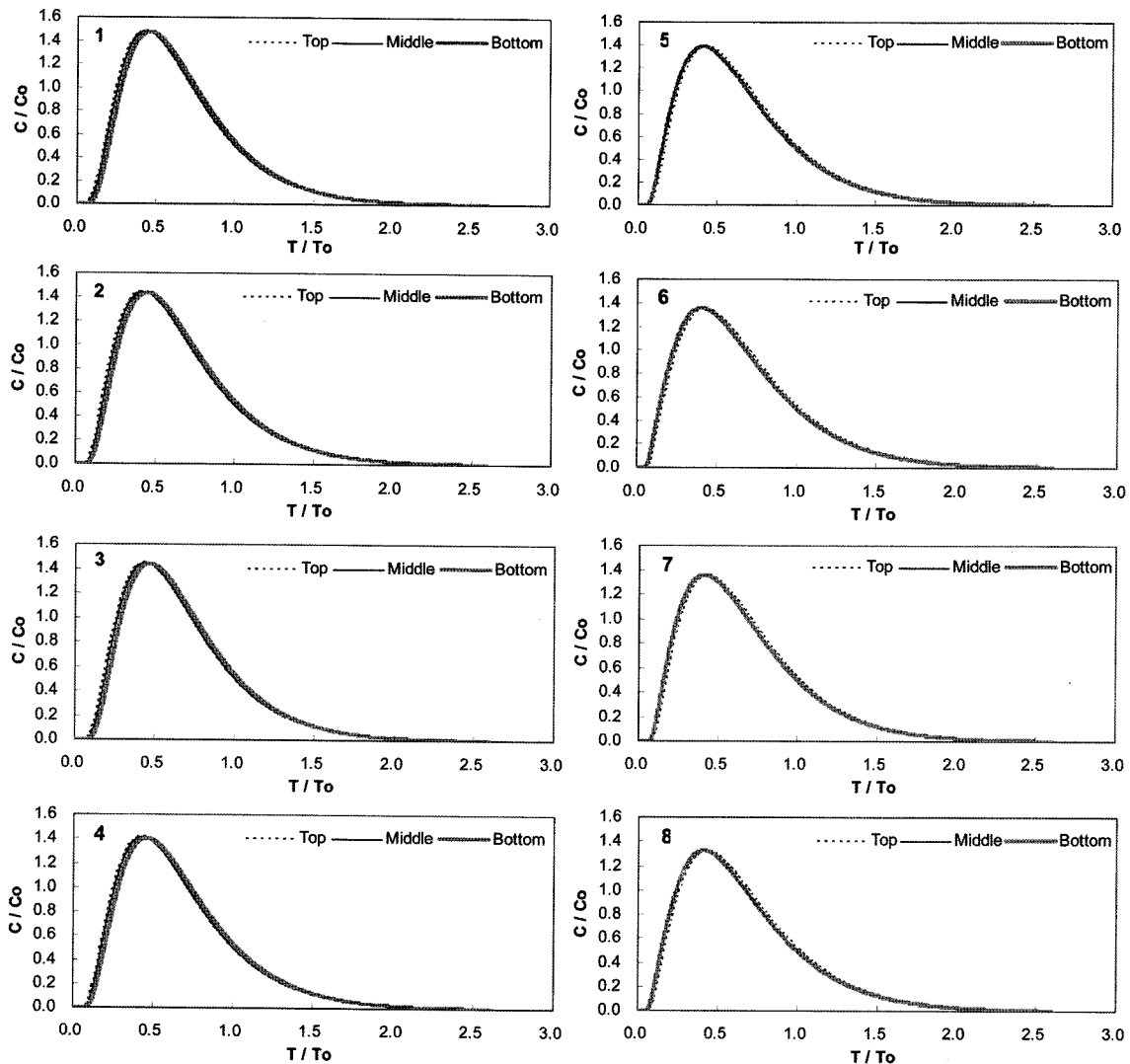


Fig. 6. The outlet concentration at the top, middle, bottom..

**Table 3.** Outlet flux(%) at the top, middle, bottom

Case	1	2	3	4	5	6	7	8
Top	30.6	31.0	30.6	31.0	33.3	33.3	33.3	33.2
Middle	32.0	31.6	32.0	31.6	30.6	30.5	30.4	30.6
Bottom	37.4	37.4	37.2	37.4	36.1	36.2	36.3	36.2
Variance	8.46	8.49	8.46	8.49	5.33	5.26	5.33	5.26
Standard deviation	2.91	2.91	2.91	2.91	2.31	2.29	2.31	2.29

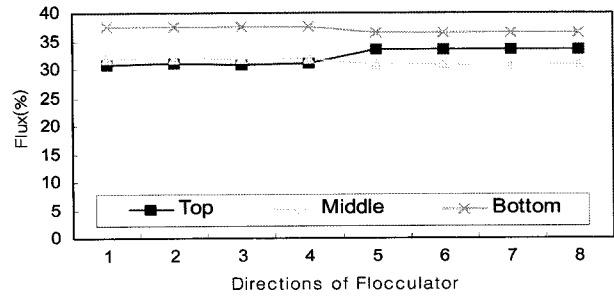
에 의해 가속 및 상쇄가 일어나기 때문이다. 또한 이와 같은 유출 농도의 차이는 정류벽에 의한 정류 효과가 완벽할 수 없다는 점을 보여준다.

Table 3은 각 Case별 상중하 영역별 유출량을 비교한 표이다. 가장 특징적인 점은 모든 Case에서 아래쪽 유출량이 상대적으로 위쪽과 중간보다 많다는 점이다. 이와 같이 바닥쪽에서 유출량이 많은 원인은 플록큐레이터의 회전과 수류 흐름, 그리고 플록형성지의 구조에 기인한 것으로 판단된다. 또한 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 Case 1,2,3,4와 반시계방향으로 회전하는 Case 5,6,7,8 간의 유출량분포 특징이 명확히 구분되어 플록형성지 전체 유동이 마지막 플록큐레이터에 의해 많은 영향을 받는다는 사실을 다시한번 확인할 수 있다.

바닥쪽에서 유출량이 많은 원인은 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 Case 1,2,3,4의 경우 수면쪽에서는 플록큐레이터 회전방향과 수류 흐름 방향이 일치하면서 흐름이 가속화되고 이 수류가 정류벽에 부딪치면서 바닥 쪽으로 분산되는데, 이 때 바닥쪽으로 분산된 수류는 반대방향으로 흐르는 수류흐름과 서로 강하게 충돌한 후 재차 플록형성지 바닥과 부딪히고 나서 바로 유출구로 빠져나가게 되는 것이다. 즉 수면 쪽의 강한 유속이 정류벽과 부딪히고 아래쪽으로 분산된 후 바닥 쪽 유출구로 빠져나가면서 하부의 유출량이 많아진다고 볼 수 있다.

반시계방향으로 회전하는 Case 5,6,7,8의 경우는 시계방향과 반대로 아래쪽에서 보다 강한 흐름이 형성된다. 이 바닥쪽 흐름이 정류벽에 부딪치면서 위쪽인 수면부로 분산되지만 수면 쪽은 자유수면이기 때문에 바닥에서 충돌하는 경우와 달리 정류벽으로 바로 유출되지 않고 흐름을 따라 계속 이동하게 된다. 따라서 위쪽과 중간 영역보다 바닥 영역으로 유출량이 많아지게 되는 것이다.

Fig. 7은 Case별 상중하 유출량을 나타낸 그래프이다. Case 1,2,3,4는 상부와 중간 영역에서의 유출량은 거의 같



**Fig. 7.** Outlet flux(%) at the top, middle, bottom as Case.

으며, 바닥쪽에서 유출량이 월등히 높게 나타난 반면에 Case 5,6,7,8의 경우에도 아래쪽 유출량이 가장 크긴 하지만 상부에서의 유출량이 Case 1,2,3,4에 비해 증가하였고 중간 영역에서의 유출량은 Case 1,2,3,4와 큰 차이가 없었다. 따라서 3단 플록큐레이터가 반시계 방향으로 회전하는 Case 5,6,7,8의 경우는 상부와 하부에서의 유출량이 상대적으로 많았으며, 중간 영역에서의 유출량이 가장 적게 나타났다. 이와 같은 결과를 토대로 각 영역별 유출량의 편차를 비교해 보면 Case 1,2,3,4의 분산은 약 8.5, 표준편차는 2.9로 Case 5,6,7,8 분산 5.3, 표준편차 2.3보다 높게 나타났다. 즉, 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하고 있는 Case 1,2,3,4의 경우는 Case 5,6,7,8에 비해 상중하 영역별 유출량의 편차가 크기 때문에 유출량의 균등성이 떨어진다고 판단된다.

Table 4는 각 Case별로 유동특성을 평가하기 위해 관류 흐름(plug flow) 평가 지수인 Morill index와 Modal index 그리고, 단락류(Short circuiting) index 등의 유동 특성을 평가한 표이다. 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 Case 1,2,3,4의 경우 초기 유출시간을 나타내는 T<sub>10</sub>은 약 14분대 근처였고, 이 중 Case2가 13.7분으로 가장 빨랐으며, 가장 늦은 것은 Case3으로 14.5분이었다. 최고농도 유출시간인 T<sub>90</sub>은 대체로 약57분대로 비슷한 경향을 보였다. Morill index 값은 Case 3이 3.94로 가장 작았고 Case 4는 4.12로 가장 높은 값을 나타내었다. Modal index 값은 0.44로 거의 일치하였고 Short circuiting index 값은 약 0.26으로 차이가 미미하였다. 따라서 Case 1,2,3,4의 경우 수류의 혼합도와 단락류 평가 지수는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3단 플록큐레이터가 반시계방향으로 회전하는 Case 5,6,7,8의 경우 T<sub>10</sub>은 약 13분대로 큰 차이가 없었으나 Case 1,2,3,4의 경우보다 약 1분 정도 빠른 것으로 나타났다. 또한

**Table 4.** The index of case

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	remark
T10 (min)	14.20	13.72	14.50	14.07	13.02	12.57	13.30	12.90	
T90 (min)	56.67	57.57	57.13	57.98	58.57	59.37	59.03	59.77	
Morill	3.99	4.20	3.94	4.12	4.50	4.72	4.44	4.63	Plug flow=1, CSTR>>1, (T <sub>90</sub> /T <sub>10</sub> )
Modal	0.44	0.43	0.44	0.44	0.41	0.41	0.42	0.42	Plug flow=1, (TP/T)
Short circuiting	0.25	0.27	0.25	0.26	0.29	0.29	0.29	0.29	Short circuiting<<1, (T <sub>10</sub> /T)

$T_{90}$ 은 대체로 약 59분으로 Case 1,2,3,4 보다 약 2분 정도 큰 값을 보였다. Morill index 값은 4.44에서 4.72로 큰 차이를 보이지 않았고, Modal index 값도 마찬가지로 0.41에서 0.42로 거의 같은 값을 보였다. 단락류 평가 지수인 Short circuiting index 값은 0.29로 나타났다.

이와 같은 결과로 미루어 볼 때 플록형성지 3단 플록큐레이터가 시계방향으로 회전하는 Case 1,2,3,4의 Index 값이 서로 거의 유사하고 반시계방향으로 회전하는 Case 5,6,7,8의 Index 평가 지수의 차이가 크지 않는다는 것은 플록형성지 유동특성이 3단 플록큐레이터의 회전방향에 의해 가장 큰 영향을 받는다는 것을 다시한번 확인할 수 있었다.

따라서 회전방향에 따른 수류 평가에 있어서 유출구 영역별 유출량을 도식화한 Fig. 7을 보면 상중하 유출구별 유출량의 편차가 작은 Case를 확실하게 구별할 수 있다. 즉, 플록큐레이터의 회전방향 구성에 있어서 수류흐름이 가장 뚜렷한 차이를 보이는 3단 플록큐레이터의 회전방향에 따라 시계방향인 Case 1,2,3,4와 반시계방향인 Case 5,6,7,8로 구분할 수 있는데, 앞서 언급한 상중하 유출구별 유출량 분포를 통해 반시계방향인 Case 5,6,7,8의 경우가 보다 유리한 것으로 평가할 수 있으며 이 경우의 각 Case 별 차이는 거의 없는 것을 알 수 있다. 즉 1,2단의 회전방향과는 상관없이 플록큐레이터 3단의 회전방향이 반시계방향인 경우가 시계방향 회전보다 상중하 유출량의 편차가 3.1%, 표준편차로는 약 0.6 감소되기 때문에 침전지 내로 보다 균등한 수류를 형성함으로써 침전효율 향상에 기여할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

플록형성지 플록큐레이터 회전방향에 따른 유동특성을 CFD를 이용, 수리해석적 방법으로 진단 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플록큐레이터 회전방향이 시계방향인 경우는 플록형성지 내에서 수류방향과 일치하는 수면쪽으로 강한 수류가 형성되고 반시계방향인 경우는 바닥쪽에서 보다 강한 수류가 형성된다.
- 2) 유출구의 유출농도는 1,2,3단 회전방향이 모두 시계방향인 경우가 모두 반시계방향인 경우보다 초기 유출시간이 조금 지연되고 최고정점에서의 농도도 약간 높게 나타났다.
- 3) 플록큐레이터 3단이 시계방향으로 회전하는 경우 Morill index 값은 4.0~4.1범위였고 반시계방향으로 회전하는 경우는 4.5~4.7범위로 나타났으며 Modal index, Short circuiting index 값은 모든 경우에 큰 차이가 없었다.

4) 유출구의 상중하 유출량 편차는 1,2단의 회전방향과는 상관없이 3단 플록큐레이터의 회전방향에 의해 영향을 받으며, 3단 회전방향이 시계방향인 경우 표준편차는 약 2.9이었고 반시계방향으로 회전하는 경우는 약 2.3으로 반시계방향으로 회전하는 경우가 상중하 유출량의 편차가 작은 값을 나타냈다.

## 참고문헌

1. 김혜숙, 신미수, 장동순, 정성희, 장동효, "유입구 및 정류벽 최적설계에 의한 최종 침전지 성능 개선 연구," 대한환경공학회지, 27(2), 177~183(2005).
2. 박세진, 박노석, 임재립, 김선규, 김석구, 문용택, 방기용, "CFD를 이용한 침전지 구조가 수리 거동에 미치는 영향 평가," 대한상하수도학회지, 20(5), 667~676(2006).
3. 윤재용, 변석중, 이상덕, 김정현, 권순범, "추적자 실험에 의한 정수장 침전지내 구조물의 수리학적 영향 평가에 관한 연구," 한국수처리기술학회, 7(1), 11~22(1999).
4. Reynolds, T. D., Richards, P. A., "Unit operations and processes in environmental engineering," PWs Publishing Company, New York, 181~198(1996).
5. Krebs, P., "Influence of inlet and outlet configuration on the flow in secondary clarifiers," *Water Sci. Technol.*, 31(2), 181~191(1995).
6. Cao, Z., Wiley, D. E., Fane, A. G., "CFD simulations of net-type turbulence promoters in a narrow channel," *J. Membr. Sci.*, 185, 157~176(2001).
7. Cockx, A., Do-quang, Z., Line, A. & Roustan, M., "Use of computational fluid dynamics for simulating hydrodynamics and mass transfer in industrial ozonation towers," *Chem. Eng. Sci.*, 54(21), 5085~5090(1999).
8. Panneerselvam, R., Savithri, S., Surender, G. D., "CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid fluidised bed reactor," *Chem. Eng. Sci.*, 64(6), 1119~1135(2009).
9. Mazzolani, G., Pirozzi, F., and d'Antoni, G., "A generalized settling approach in the numerical modeling of sedimentation tanks," *Water Sci. Technol.*, 38(3), 95~102(1998).
10. Ekama, G. A., Barnard, J. L., Krebs, P., and McCorkquofale, J. A., "Secondary settling tanks: theory, modelling, design and operation," *JAWQ*, 173~175(1997).
11. Dupont, R., Dahl, C., "A one-dimensional model for a secondary settling tank including density current and short-circuiting," *Water Sci. Technol.*, 31(2), 215~224(1995).
12. Bishop, M. M., Morgan, J. M., Comwell, B., and Jamison, D. K., "Improving the Disinfection time of water plant clear well," *AWWA*, 85(3), 68~75(1993).