

# 수직 패들형 및 하이드로 포일형 응집기 특성의 전산유체역학 해석

신 증 현,<sup>1</sup> 장 세 명,<sup>\*2</sup> 조 용<sup>3</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 일반대학원 기계공학과  
<sup>2</sup>군산대학교 기계자동차조선해양공학부  
<sup>3</sup>한국수자원공사 K-water연구원

## CFD ANALYSIS ON THE CHARACTERISTICS FOR FLOCCULATORS OF VERTICAL PADDLE AND HYDRO-FOIL TYPE

J.H. Shin,<sup>1</sup> S.M. Chang<sup>\*2</sup> and Y. Cho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University  
<sup>2</sup>School of Mechanical, Automotive, Naval Architecture, and Ocean Eng., Kunsan National University  
<sup>3</sup>K-Water Institute, Korea Water Resources Corporation

*In the water purification plant, the mixture of water and chemical from the mixing basin enters the flocculation basin. The rotating flocculators are generally used for the efficient flocculation of dregs. In this paper, the performance of flocculators of a vertical paddle type, widely used in the typical flocculation basins, and a hydro-foil type, recently disseminated in the field, are compared with each other by use of the numerical method. Also the characteristics and the efficiency are analyzed with CFD techniques. The strain rate and the eddy viscosity are compared for two types to predict the mixing efficiency, and the maximum speed and its location are pursued from the computed data. The hydrofoil type shows that the eddy viscosity is enhanced 1.66 to 3.03 times larger than that of vertical paddle type, and also produced 1.87 to 1.95 times larger flocs for each stage. However, the rapid rotation of hydrofoil may chop the floc to small size due to the higher turbulence intensity. From the result of computation, the strong and weak points of each type have been analyzed for the decision making.*

**Key Words :** 응집지(Flocculation Basin), 응집기(Flocculator), 하이드로 포일(Hydro-foil), 패들(Paddle), 플럭(Floc)

### 1. 서 론

통상의 정수장 시스템의 설비에서, 혼합지(mixing basin)에서 생성된 화학물과의 혼합수는 응집지(flocculation basin)로 진입하게 된다. 여러 단(stage)으로 나누어진 각 응집지들을 거치면서 느리게 회전하는 응집기(flocculator)가 혼합수 내의 노폐물들을 작은 덩어리로 응집시키게 되는데, 이는 효율적인 플록(floc)의 형성을 위해 필수불가결한 공정이다.

응집기의 경우 다양한 형태를 가지고 있다. 크게 축 방향으로 수평축, 수직축으로 나눌 수 있으며, 날개의 형태로는

크게 임펠러형과 패들형 등으로 분류할 수 있다. 과거의 연구 동향을 살펴보면 내부 유동 특성을 정량적으로 파악하기 위한 여러 종류의 임펠러 모델에 대한 개별 수치 해석 연구 [1-4]가 비교적 활발하게 행해져 왔지만, 서로의 유동특성을 정성적 혹은 정량적으로 비교한 연구는 아직까지 전무하다.

본 연구에서는 기존에 널리 사용되고 있는 수직 패들(vertical paddle)형 응집기와 최근 개량형으로 현장에 보급되고 있는 하이드로포일(hydro-foil)형 응집기의 성능을 서로 비교하고, 그 효율과 특성을 분석하기로 한다. 실제 운용되고 있는 응집기의 각 단별 회전 속도와 응집지의 기하학적 형상을 바탕으로 유도되는 유동장의 형태와 속도 분포를 분석한다. 또한 전단 변형률(shear strain rate)과 난류 와동 점성(eddy viscosity)을 서로 비교하여 혼합의 효율을 추정하고, 유동장 내에서 최대 속도의 위치 등을 추적하며, 이를 바탕으로 각 형식의 특성과 장단점을 분석한다.

Received: March 31, 2016, Revised: August 5, 2016,

Accepted: August 5, 2016.

\* Corresponding author, E-mail: smchang@kunsan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2016.21.3.024>

© KSCFE 2016

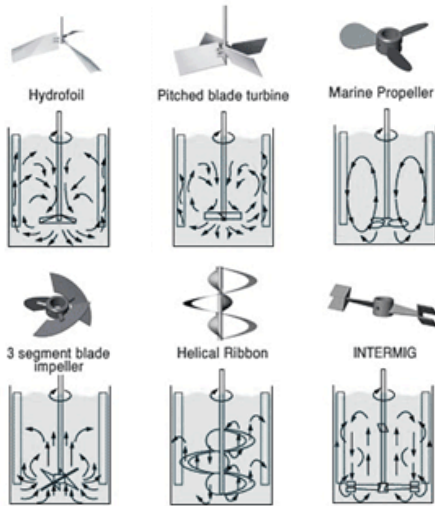


Fig. 1 Types of flocculation mixers[5]

이러한 방법론을 추후 다양한 회전 기계를 포함하는 상수도 설비에 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 그동안 주로 실험에 의존해 왔던 많은 분석 기술들을 전산유체역학(CFD) 기술로 대체하거나 초기 설계 과정에서의 시행착오 시간을 줄여줄 것으로 예상된다. 그러나 아직도 현장에서는 직접 정량적 수치를 확인할 수 있는 실측 데이터를 더 선호하고, 전산유체역학에 대한 몰이해로 인하여 기술 보급의 장애 요인으로 작용하기도 한다. 본 연구에서는 전산유체역학 기술의 신뢰성 확보를 목표로 기존의 정량적 실험 데이터가 미처 밝혀지지 못했던 유동장 내부 물리 현상들에 대한 정성적 분석을 수행하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 지배 방정식과 난류모델

본 연구에서는 지배방정식으로 3차원 Navier- Stokes 방정식에 비압축성 유동 가정을 부여하여 사용한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \tag{2}$$

여기에서,  $\mathbf{V}$ 는 속도벡터,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\mu$ 는 점성 계수를 나타낸다. 이 외의 계산 영역은 복잡한 3차원 회전 유동과 난류 후류 효과를 다루어야 하기 때문에  $k-\omega$  SST

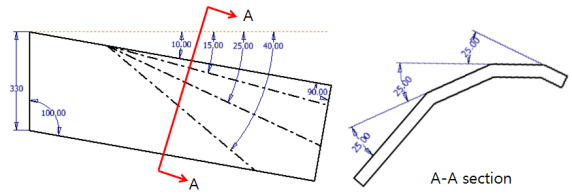
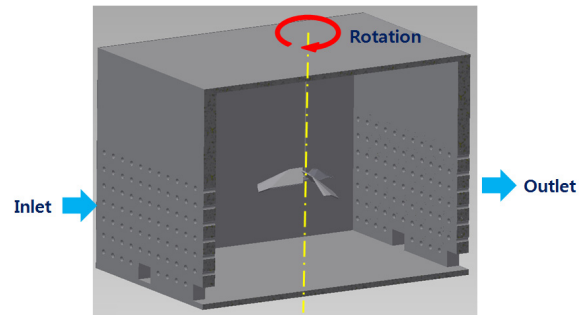
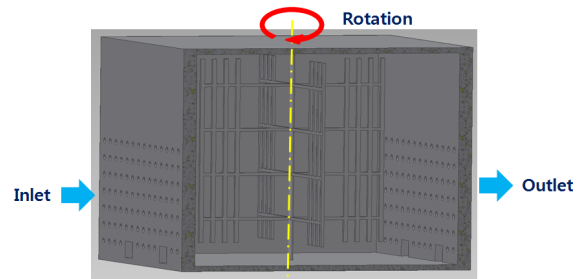


Fig. 2 Hydro-foil blade model



(a) Hydro-foil type



(b) Vertical paddle type

Fig. 3 Flocculation basins

난류 모델을 사용하였다[6]. 상용 코드인 ANSYS-CFX를 사용하여 정상 상태 해석을 수행하였다.

### 2.2 포일형과 패들형 응집기 모델링

포일형은 Fig. 1과 같이 다양한 형상을 가지고 있다. 그중에 하이드로포일의 형상을 기본으로 하였으며, 날개 형상은 제작사의 도면을 바탕으로 Fig. 2와 같이 각 부분이 25°씩의 각도를 가지고 3단으로 접어지게 모델링을 하였다. 응집기 내부에 설치된 하이드로포일과 수직 패들형의 수치 계산을 위한 형상 모델은 그림 Fig. 3와 같다. 응집기의 기하학적 형상은 일반적인 형상으로 모델링 하였으며 크기는  $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ 이다. 하이드로포일형은 정방형 평면의 응집지의 한 변 크기의 36%로 포일 직경을 설정하였으며, 수직 패들형은 70%의 크기로 패들 끝단 직경을 설정하였다.

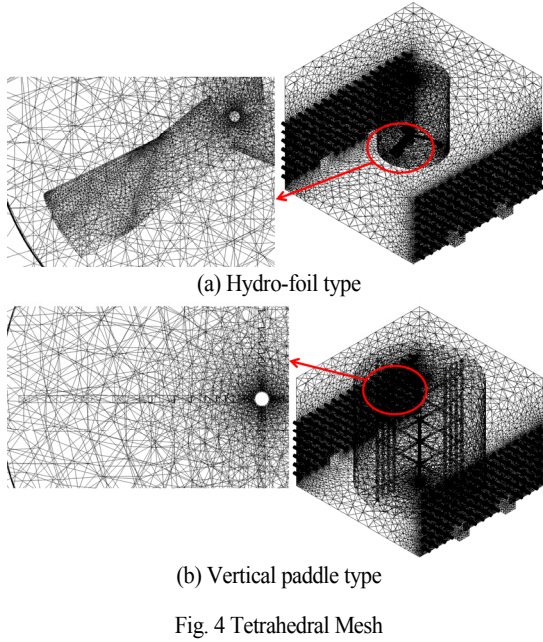


Fig. 4 Tetrahedral Mesh

2.3 격자생성과 경계조건

격자는 Fig. 4와 같이 하이드로포일형은 2,761,397개, 수직 패들형은 2,314,950개의 사면체 격자로 생성하였다. 응집지 중앙의 회전부에는 조밀한 격자를 생성하여 계산의 정확도를 높였다. 최대 잔차(residual)가  $10^{-5}$ 가 될 때까지 각 경계조건에 대하여 식 (1), (2)를 정상 상태까지 수렴시킨다. 각 계산에서 4,920회와 2,827회에서 수렴하였으며, CPU i5(쿼드코어)를 장착한 PC에서 28 시간 이내에 계산 결과를 도출할 수 있었다. 이를 위해서 Shin et al.[7] 과 같은 수렴 테스트를 실시하였다.

응집지는 원통형의 중앙부 회전 영역과 나머지의 고정 격자 영역으로 구성된다. 이들의 경계에서는 유체역학의 보존법칙들이 성립하도록 미끄럼 경계조건(slip boundary condition)을 준다. 이 외의 경계조건은 Table 1과 같다. 입구와 출구를 제외한 모든 부분은 Wall 경계조건을 주었으며, 이러한 경우 중력의 영향을 무시할 수 있기 때문에 중력 가속도를 고려하지 않았다. Foil type과 paddle type은 회전의 반경크기가 다르기 때문에 회전수는 모터사양의 정격조건과 G(속도 경사)값

Table 1 Boundary conditions

<b>Inlet</b>	Volumetric flow rate : 0.069 m <sup>3</sup> /s		
<b>Outlet</b>	Ambient pressure : 0 Pa		
<b>Rotation</b>		Hydro-foil type	Paddle type
	1st stage	15 rpm	4 rpm
	2nd stage	11 rpm	1.6 rpm
	3rd stage	7 rpm	1 rpm
<b>Wall</b>	No-slip condition (smooth)		

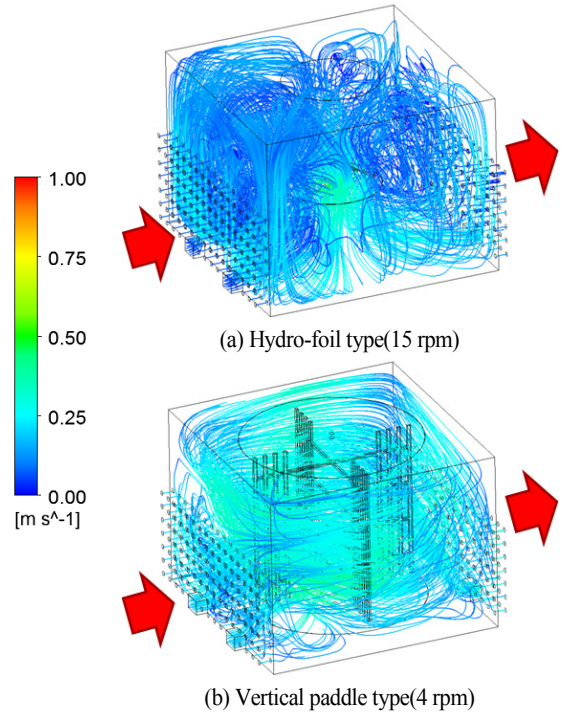


Fig. 5 Velocity and streamlines

을 참조하여 설정하였다. 응집지에서 교반강도 기준을 나타내는 속도 경사 G값을 각 stage에서 같은 값을 가지도록 RPM을 설정하였다[8,9].

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \tag{3}$$

여기에서 P는 구동 모터의 동력, V는 응집지의 부피를 의미한다. 따라서 G 값은 평균 전단 변형률에 해당하는  $\gamma$ 와 같은 차원의 물리량이다.

$$\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} \tag{4}$$

여기에서 (u, v, w)는 3차원 속도 성분을 나타낸다.

3. 결과 및 토의

3.1 Hydro-foil type과 vertical paddle type 비교

Table 1에서 1단의 결과 데이터를 비교, 분석해 보기로 한다. Fig. 5의 유선 분포를 살펴보면, (a) 하이드로포일형에서는

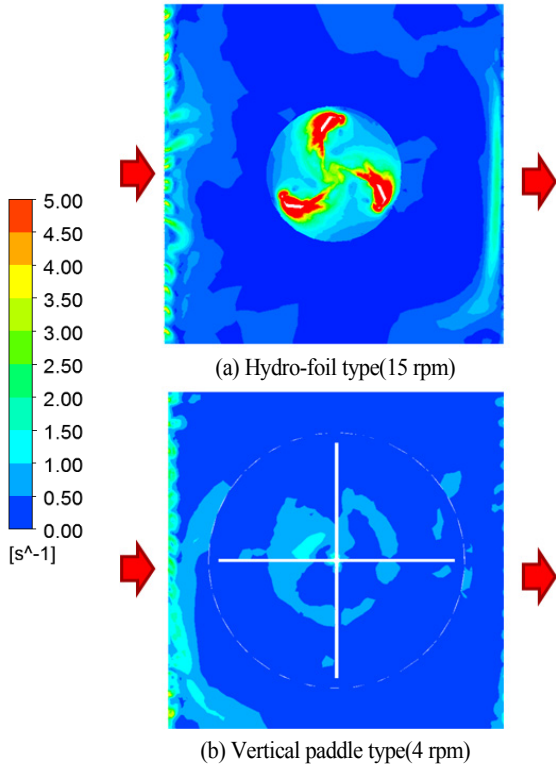


Fig. 6 Shear strain rate contours

복잡한 3차원 와류 구조를 형성하는 것을 관찰할 수 있다. 비교적 빠른 속도로 회전하는 원통 주변에는 유동 불안정성 (instability)에 의한 2차 유동(secondary flow)이 발생한다[10]. Fig. 2-3에서 캠버(camber) 형상의 영향으로 응집기 블레이드에는 윗방향의 추력이 발생하며, 중심 축에서 아래 방향으로 유도되는 강한 후류가 발생하고, 이것이 2차 유동을 발생시키는 주요 원인이 된다. Fig 5(b) 수직 패들형은 하이드로포일형보다는 회전축 방향으로 비교적 분명한 2차원의 대외류 구조를 형성하면서 훨씬 더 균일한 속도 분포를 갖는 것을 볼 수 있다. 균일도 지수는 0과 1사이의 값을 갖는데 1에 가까울수록 속도분포가 균일하다는 것을 의미한다[11]. 균일도 지수는 수직 패들형이 0.64로 균일도가 높았고 하이드로포일형은 0.25로 균일도가 낮았다. 따라서 하이드로포일의 복잡한 3차원적 와류 구조에 의해 수직 패들형보다 유체가 잘 섞이기 때문에 난류 강도가 커지고 응집이 더 잘 일어날 것으로 기대되었다.

Fig 6는 식 (4)의 전단 변형률(shear strain rate)을 비교한 그림이다. 뉴턴유체(Newtonian fluid)는 전단 변형률과 고체 벽면의 전단응력이 비례한다. 하이드로포일형에서 전단 변형률이 수직 패들형보다 최대 영역이 넓은 것을 확인할 수 있다.

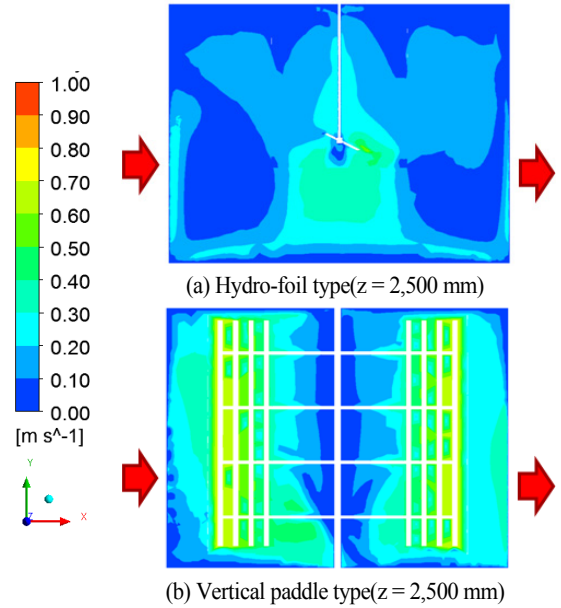


Fig. 7 Velocity contours, vertical section(center)

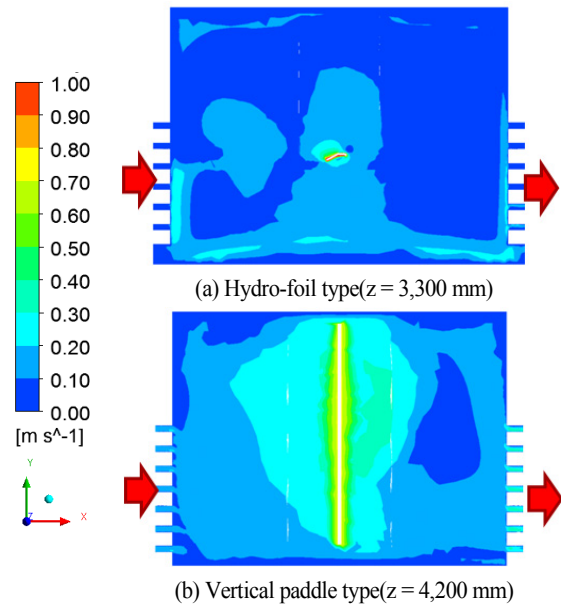


Fig. 8 Velocity contours, vertical section (floculator's tip)

따라서 블레이드에 의해 유체 입자에 가해지는 전단응력은 하이드로포일이 월등히 크다고 판단할 수 있다.

Fig 7에서는 응집기 측면 중심부의 속도를 비교 할 수 있다. 중심부만을 보았을 때에는 전체적인 유동장 영역에서 수직 패들형이 빠른 유속 영역을 나타내는 것을 볼 수 있다.

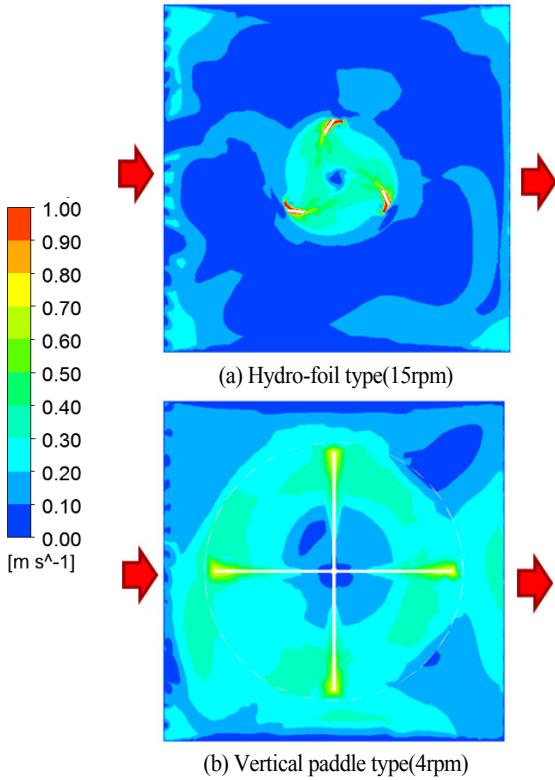


Fig. 9 Velocity contours, horizontal section

Fig. 8의 각 응집기 날개의 끝 부분에서 비교한 그림을 보면, 수직 패들형의 경우 속도가 빠른 영역이 넓게 보이지만, 하이드로포일의 날개 끝 주위 부분에서 1 m/s 이상의 빠른 속도가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 높이  $y = 1,600$  mm 수평 단면에서의 Fig. 9을 보면 더욱 확실히 비교할 수 있는데, 수직 패들형은 하이드로포일형보다 전체 적인 영역에서 속도가 높지만 포일 주변에서의 속도가 빠른 영역이 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면에 패들 주변에서는 속도가 0.7 ~ 0.8 m/s로 느린 것을 알 수 있다.

Table 2 Volume integrated eddy viscosity(kg m<sup>2</sup>/s)

	Hydro-foil type	Vertical paddle type
1st stage	57.0	34.4
2nd stage	40.2	15.4
3rd stage	32.4	10.7

Table 3 Max eddy viscosity(Pa s)

	Hydro-foil type	Vertical paddle type
1st stage	0.53	1.49
2nd stage	0.38	0.73
3rd stage	0.33	0.59

Table 2-3에서 와점성(eddy viscosity)을 부피에 대해 적분한 값과 최대 와점성 값을 비교해 보면, 이러한 유동 특성을 이해할 수 있다. 전체 계산 영역에 대해 적분된 값은 하이드로포일형이 확연하게 더 크다. 그러나 국지적으로 나타나는 최대 와점성은 수직 패들형이 더 큰 것을 알 수 있다.

와점성( $\mu_t$ )은 난류 전단 응력( $\tau_{ij}$ ) 또는 Reynolds 평균 응력에 대하여 다음과 같이 정의된다[12].

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

여기에서  $i, j$ 는 공간적 방향을 나타내는 지시자이며,  $U$ 는 시간 평균 속도 성분,  $u'$ 는 난류에 의한 미소 교란(small perturbation) 속도를 의미하며,  $k$ 는 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)이다. 따라서 와점성이 커지면, 난류 강도가 커진다고 볼 수 있다.

따라서 Table 3에서 패들형의 국지 난류 강도가 더 큰 것처럼 보이지만, Table 2와 같이 전체 유동장의 평균 와점성을 비교해 보면 포일형이 더 큰 것을 알 수 있었다.

Table 4를 통해 최고 속도를 비교해 보면 패들형보다 포일형에서 약 3 ~ 4배 빠른 것을 알 수 있다. 회전체의 속도가 빠르면 전기 믹서와 비슷한 효과로 응집 되어져 나오는 플러크가 잘게 갈려서 쪼개질 것으로 예상되었다. 즉, 빠르게 회전하는 하이드로포일의 블레이드가 마치 믹서의 칼날과 비슷한 역할을 하게 되는 것이다.

### 3.2 실험과 수치해석 결과 비교

각 단별로 출구에서 관측된 시료를 바탕으로 1분 동안 각 플러크 크기별 분포 데이터로부터 플러크의 개수(Fig. 10)와 가중 평균된 직경(Fig. 11)을 각각 그래프로 그려 보았다.

Fig. 10에서 각 단별 플러크의 수와 체적 적분된 난류 와점성의 크기를 비교할 수 있다. 와점성이 클수록(또는 전역적인 난류 강도가 클수록) 혼합이 증대되면서 응집이 잘 되어 플러크의 생성이 많이 이루어지는 것으로 보인다. 수직 패들형보다 하이드로포일형이 플러크의 수 측면에서는 더 많은 것으로 실험 데이터 역시 확인된다.

그렇지만 Fig. 11에서 각 단별 플러크의 평균 크기를 비교해 보면 이와 상반된 결과가 나타난다. 패들형의 평균 플러크 크기

Table 4 Maximum velocity(m/s)

	Hydro-foil type	Vertical paddle type
1st stage	1.68	0.51
2nd stage	1.28	0.33
3rd stage	1.05	0.29

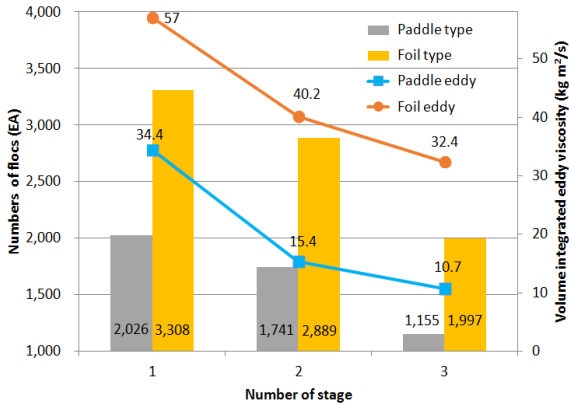


Fig. 10 Number of Floccs vs. Volume Integrated Eddy Viscosity

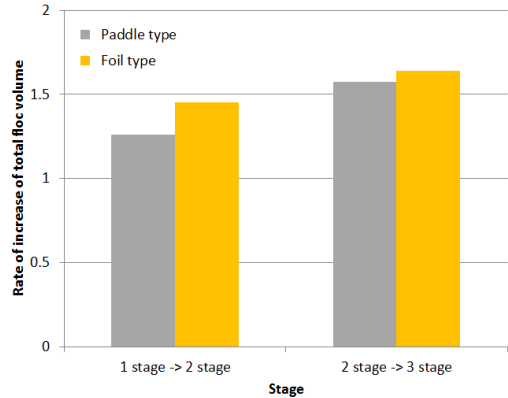


Fig. 12 Rate of increase of total flocc volume

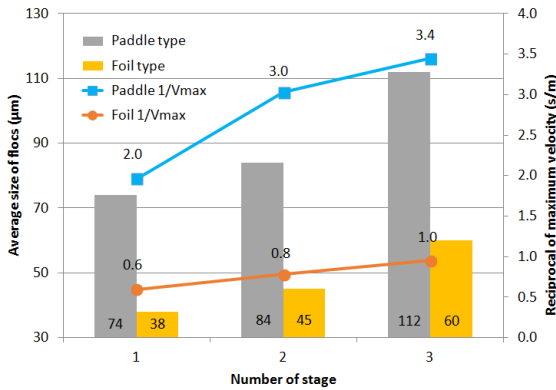


Fig. 11 Weight Average size of Floccs vs. Reciprocal of Maximum Field Velocity

가 더 크다. 현재 계산된 데이터로부터 최대 속도의 역수를 취한 값을 이러한 실험값과 비교할 수 있다. 생성된 플록의 평균 크기는 약 40 ~ 50 µm 차이가 난다. 이것은 하이드로포일형의 최대 속도가 플록을 잘게 쪼개는 효과를 낸다는 것을 알 수 있다.

비교로 제시한 플록 수량 및 크기에 대한 실험 결과는 각 단을 통과한 처리 수에 포함된 플록의 물리적 특성으로, 2-3 단의 플록의 수량과 크기는 새롭게 생성되는 플록이 아닌 이미 생성된 플록의 특성 변화이다. Fig. 12와 같이 총 플록 부피 증가량의 폭을 서로 비교하면 15% 이내에서 일치하는 경향을 보인다.

상수도 정수장 응집지에서 현재 사용되는 응집기의 형태들 중에서 하이드로포일 방식과 수직 패들형 두 가지의 효과를 비교하였다. 이를 위하여 회전 기계를 위한 원통형 미끄럼 계산 영역을 사용하였다. 즉, 내부의 회전 원통 영역과 바깥의 고정 격자 영역 사이의 경계면에서 유체역학의 보존법칙을

만족시켜 원활한 데이터 교환이 가능하도록 한다. 유동은 다공 정류벽으로 분리된 1부터 3단까지의 격자를 지나면서 교반 장치의 회전에 의해 용해된 약품과 반응하여 응집 플록을 형성하게 된다.

패들의 크기가 하이드로포일보다 훨씬 더 회전 반경이 크기 때문에, 회전 속도는 반대로 하이드로포일이 커야한다. 현장에서 모터의 정격 회전수와 속도 경사(G값)를 확인하여 이를 바탕으로 계산 조건을 비교하였다. 계산 결과 유선의 모습은 하이드로포일에서 훨씬 3차원적 구조를 보여준다. 즉 Taylor 불안정성에 의해 회전축에 수직 회전 방향으로 2차 대와동이 형성되어 더 골고루 섞어주는 효과가 있다. 속도의 최댓값은 하이드로포일의 경우가 특히 회전 교반기와 가까운 부분에서 더 컸다. 전단 변형률 또한 월등하게 크기 때문에 난류 혼합 강도의 효율도 증가한다고 볼 수 있지만, 큰 전단 응력으로 인하여 일부 생성된 플록을 잘게 파쇄하는 영향이 있을 것으로 우려된다.

Table 5에서 하이드로포일형이 패들형보다 1단에서 1.66배, 2단에서 2.61배, 3단에서 3.03배로 전체적으로 큰 와점성을 가지고 있음을 보였다. 평균 플록의 크기는 수직 패들형이 1.95배, 1.87배, 1.87배로 더욱 크지만, 총 플록 부피 증가율을 비교해보면 하이드로포일형이 패들형보다 1.15배, 1.04배 더 높은 증가율을 보였다.

Table 5 Advantage and disadvantage

		Stage		
		1	2	3
Volume integrated eddy viscosity	hydro foil / vertical paddle	1.66	2.61	3.03
Average size of flocc	vertical paddle / hydro foil	1.95	1.87	1.87
Rate of increase of total flocc volume	hydro foil /	1.15		1.04
	vertical paddle			

## 4. 결 론

본 연구에서는 기존에 널리 사용되고 있는 수직 패들형 응집기와 최근 개량형으로 현장에 보급되고 있는 하이드로포일형 응집기의 성능을 서로 비교하고, 그 효율과 특성을 분석하기로 했다. 실제 운용되고 있는 응집기의 각 단별 회전 속도와 응집지의 기하학적 형상을 바탕으로 유도되는 유동장의 형태와 속도 분포를 분석하였다. 또한 전단 변형률과 난류 와동 점성을 서로 비교하여 혼합의 효율을 추정하고, 유동장 내에서 최대 속도의 위치 등을 추적하였다. 주어진 수치 모델에 대하여, 하이드로포일형은 각 단에서 패들형에 비해 1.66 ~ 3.03배의 와점성을 가지면서 난류 강도가 증가했으며, 평균 플록의 크기는 수직 패들형이 1.87 ~ 1.95배 더 커서 각각 장단점이 있는 것으로 파악되었다.

현재 국내의 각 정수장에서는 기존의 패들형 응집기를 하이드로포일형으로 교체하고 있다. 본 연구 결과, 하이드로포일형이 전반적으로 난류 강도와 혼합을 증가시킨다는 사실을 확인하였다. 그러나 하이드로포일 주변의 불균일한 속도 분포와 난류에 의한 전단 변형률 증가가 플록을 잘게 쪼개는 부작용을 가져올 수 있다는 사실도 밝혔다. 그러나 현재의 결과는 어디까지나 지금 통용되고 있는 응집기 방식들에 대해 특정한 예를 비교한 것이므로 성급한 일반화의 오류는 피해야 할 것이며, 앞으로 후속 연구를 통하여 보다 플록의 응집을 효과적으로 시키는 하이드로포일 블레이드 형태의 설계라는 새로운 과제를 제안하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 한국수자원기술(주)이 지원하는 “전산유체역학 프로그램을 활용한 흐름특성 해석평가” 과제의 일부분으로 수행되었으며, 일부 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지인력양성사업(No.20144030200590)의 지원을 받았습니다. 저자들은 이에 감사드립니다.

## Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2016 Spring Annual meeting, Yeosu, May 26-27, 2016.

## References

- [1] 1991, King, R., "Fluid Mechanics of Mixing : Modelling, Operations and Experimental Techniques," *Kluwer Academic Publishers*.
- [2] 2003, Yang, C.J., Choi, M.S. and Lee, Y.H., "A Study on the Flow Characteristics of Mixer by Impeller Type," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol.27, No.7, pp.899-906.
- [3] 2014, Im, H.N., Lee, H.W. and Choi, J.H., "Agitation Performance Study of 2-shafts Agitator Rotate Direction in the Mud Tank Based on CFD," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.28, No.2, pp.111-118.
- [4] 2003, Kim, D.K., Bae, S.T. and Park, J.H., "Study on the Industrial Agitator's Impeller Shape Analysis using CFD and Reverse Engineering," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol.11, No.5, pp.359-364.
- [5] 2013, The mixing, <http://www.mixing.kr/sub01/sub0102.html>.
- [6] 2006, Kim, D.H., "Turbulence model of ANSYS-CFX," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting 2006*, pp.153-156.
- [7] 2015, Shin, J.H., Chang, S.M. and Moon, B.Y., "Numerical Study on the Side-Wind Aerodynamic Forces of Cambered 3-D Thin-Plate Rigid-Body Model," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.43, No.2, pp.97-108.
- [8] 2005, DICER, "Water Treatment Facilities Designed and Evaluated for Improvement of Flocculation Basin in Water Treatment Facilities (1)," *DICER TechInfo Part II*, Vol.4, No.5, pp.182-189.
- [9] 2005, DICER, "Designed and Evaluated for Improvement of Flocculation Basin in Water Treatment Facilities (2)," *DICER TechInfo Part II*, Vol.4, No.5, pp.190-197.
- [10] 1961, Taylor, E.S., "Film Notes on Secondary Flow," *National Committee for Fluid Mechanics Films*, Massachusetts Institute of Technology.
- [11] 1993, Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. and Rammoser, D., "Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Predictions," *SAE 930780*.
- [12] 2006, Wilcox, D.C., "Turbulence Modeling for CFD," *DCW Industries*, La Canada, California.