

## 3-D 전산유체를 이용한 급속혼화조 형상에 따른 난류 유동장 연구

박노석 · 김성훈 · 박희경

한국과학기술원 토목공학과

(1999년 11월 10일 접수, 2000년 4월 4일 채택)

## The Effects of Mixer Geometry on Hydraulic Turbulence : Computational Modeling

No-Suk Park · Sung-Hoon Kim · Heekyung Park

*Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology*

### ABSTRACT

The rapid mixing process has been considered as an important step in water treatment. Since the coagulant dispersion into raw water by rapid mixer can influence on the flocculation and filtration efficiency, many researchers have developed various devices and mixing methodologies. Until now, they focused attention on only coagulant dose, pH, rotating velocity and G value but overlooked the real turbulent flow and mixer geometry in rapid mixer. Therefore this paper questions the significance of turbulent flows in rapid mixer and focuses on the analysis of turbulent fluid in various mixer geometry with CFD(Computational Fluid Dynamics). The results of the jar-tests using various geometries indicate that the turbidity removal rate in a circular jar without baffle is higher than that of a circular with baffle. And the turbidity removal rate in Hudson jar is also founded to be higher than in the circular jar with baffle. The CFD simulation of velocity fields in jar demonstrates that the differences of removal rates among the various geometries are largely due to the formation of the different turbulent fluids fields with different geometries.

---

Key Words : Rapid Mixer, Turbulent Fluid, Mixer Geometry, CFD(Computational Fluid Dynamics), Coagulant Dispersion

## 요약문

지금까지 급속혼화는 정수처리 공정 중에서 매우 중요한 공정으로 인식되어 왔다. 특히, 응집제의 원수내 확산은 급속혼화 공정에 이어지는 flocculation이나 filtration 공정에 지대한 영향을 미치게 되므로 지금까지 많은 연구자들이 혼화장치의 개발이나 효율적인 혼화방식에 관해 연구를 해왔다. 그러나 선행 연구자들은 급속혼화에 있어서 중요한 변수로 응집제 주입량, pH, 임펠러의 회전속도, 그리고 G값만을 고려하였으나, 실제 응집제와 콜로이드입자와의 충돌기회에 지대한 영향을 미치는 급속혼화 공정상에서 발생하는 난류장을 간과하였다. 특히 급속혼화에서의 난류의 발생은 G값에 전적으로 의지하여 난류장의 평균값으로 혼화조내의 난류를 표현하여 왔으며, 혼화조의 형상에 따라 달라지는 난류장 해석은 연구가 미약한 실정이다. 이에 본 연구는 급속혼화에서 난류장 해석의 중요성을 인식하고 혼화조의 형상 변화에 따라 달라지는 난류장을 전산유체 프로그램을 통하여 해석하였다. 그리고 혼화조 형상을 달리하며 jar-test를 수행한 결과 배플이 없는 원형 jar의 경우가 배플이 장착된 원형 jar나 Hudson jar보다 응집제의 확산에 따른 탁도 제거효율이 좋은 것으로 나타났으며, 전산유체 프로그램을 이용하여 각각 모사한 결과 벽면효과나 사류지역의 발생 등으로 배플이 없는 원형 jar가 혼화에 효과적인 난류장이 분포되는 것으로 확인되었다. 이 결과를 통해 혼화조 형상이 응집제의 확산이나 난류장의 발생에 영향을 미치는 것으로 결론 내릴 수 있다.

주제어 : 급속혼화, 난류장, 혼화조 형상, 전산유체 해석, 응집제 확산

## 1. 서론

정수처리에 있어서 급속혼화 공정은 응집제를 공정수내에 단시간에 골고루 확산시키는 것을 목적으로 연이어지는 flocculation과 filtration의 효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 공정이다. 특히 우리나라와 같이 alum이나 염화철을 사용하는 정수처리에 있어서 그 중요성은 더욱 더 크다고 할 수 있는데, 그 이유는 그 함유물의 가수분해가 1초 이내에 발생하고 콜로이드 입자에 흡착이 거의 동시에 일어나기 때문이다. 급속 계통의 응집제의 분산은 이론적으로 1초 이내에 이루어져야 하지만, 실제 설계상에 있어서는 1~2초 내에 이루어지도록 하는 것을 권유하고 있다(Kawamura, 1991).<sup>1)</sup> 그러나 기계적 혼화를 사용하고 있는 많은 정수장에서는 2초내에 응집제를 공정수내에 골고루 확산시키는 것이 불가능하기 때문에 약 30~40% 정도 과잉으로 주입하여 콜로이드와의 충돌기회를 증가시키고 있다.

현재까지 많은 연구자들은 급속혼화에 있어서 중요한 변수로 G값, 응집제 주입량, 혼화 시간, 임펠러의 형상 등을 고려하였다. Dharmappa 등(1993)

은 최적의 coagulation-flocculation 조건에서 각 변수들의 값을 검토하였으며,<sup>2)</sup> Amirtharajah와 Mills(1982), 그리고 Johnson과 Amirtharajah(1983)는 철과 알루미늄 응집제 사용시 정량과 최적 pH조건을 연구·발표하였다.<sup>3,4)</sup> 한편 선행 연구자들 중에는 다양한 혼화 방법과 장치를 연구하기도 하였는데(Mhaisalker, 1991),<sup>5)</sup> 실제로 정수처리 공정에서 응집제, 응집 보조제, 그리고 혼화시간 및 G값 등을 결정하기 위해서는 jar-test가 사용되고 있으므로 기계적 교반을 통한 혼화가 근간이라고 할 수 있다. 최근에 Rossini(1999)는 급속혼화에서 혼화시간이 탁도 제거에 큰 영향을 미치는 것을 관찰하고 응집제의 종류, 양, G값, 그리고 혼화 시간을 총괄하여 최적 조건을 연구하였다.<sup>6)</sup> 그리고 Oldsue(1983)는 각기 다른 조건에서 최적의 G값을 실험을 통하여 찾아서 응집제의 종류와 pH에 따른 최적 G값의 관계를 규명하기도 하였다.<sup>7)</sup>

그러나 앞서 연구된 결과들은 G값이 급속혼화조내의 난류장을 충분히 표현하고 있다는 가정을 전제로 진행된 연구이며, 실제 혼화조에서의 난류장은 공급되는 에너지로 환산되는 G값뿐만 아니라 혼화

조의 형상 또한 중요한 변수로 작용하고 있다는 사실을 간과하고 있다. 특히 앞서 언급한대로 콜로이드와의 충돌기회를 증가시키기 위해 응집제를 과잉투여하는 것은 정확한 난류장의 해석이 뒷받침될 경우 그 양을 줄일 수 있어 경제적인 운전 가능성을 내포하고 있다.

따라서 본 연구는 급속혼화조의 형상에 따른 응집제 확산의 양상을 알아보고, 전산유체 프로그램을 이용하여 각각의 경우 난류장 해석을 통하여 원인을 규명하는 것을 목적으로 한다. 그 방법론으로는 여러 가지 jar의 형상에 따라 일정한 임펠러의 회전속도 하에 jar-test를 수행함으로써 에너지 소산형태에 따라 탁도 제거율을 측정하고, 실험 결과와의 비교·검토를 위해 컴퓨터 모사를 수행하여 jar의 형상이 조 내의 난류장 분포 및 응집제 확산·거동에 어떠한 영향을 미칠지 예측하고자 함이다. 그리고 각각의 경우 임펠러 회전속도에 따른 G값을 환산하여 G값의 혼화조 형상 고려 여부를 규명하고, 사류 및 벽면효과의 영향을 검토하고자 한다.

## 2. 실험방법

Jar-test는 Standard methods에서 제시한 방법을 사용하였다.<sup>9)</sup> Jar-test의 용기는 Fig. 1과 같이 세 가지 종류로 각각 4개씩 준비하였다.

Fig. 1에서 보는 세 가지 jar의 형상은 다음과 같다. 첫 번째는 배플이 장착된 원형 jar로 직경이 15cm이고, 높이 18cm, 배플 폭이 1.5cm이다. 그리고 배플은 4개가 90°로 배열되어 있으며, 재질은 아크릴이다. 두 번째는 배플이 없는 원형 jar로 직경이 15cm이고, 높이 18cm의 원형 아크릴 용기이다. 마지막으로 Hudson jar는 단면의 가로, 세로 길이가 각각 11.5cm이고, 높이가 21cm인 직육면체 용기이다.

실제 jar-test용 용기는 현재에도 많은 논란이 되고 있지만, 미국 AWWA Water treatment manual에서는 실험시 다른 조건만 동일하다면 어떠한 용기를 사용하더라도 큰 문제가 되지 않는다고 규정하고 있다.<sup>8)</sup> 본 실험에서 사용된 임펠러는 2개의 날이 수직으로 달려있는 것을 사용하였다. 임펠러 축의 반

Fig. 1. Vessels for jar-test.

지름은 3mm이고 임펠러 날개의 길이는 3.81cm이다. 시료의 양은 2ℓ로 충전하며, 블레이드의 위치는 원형 jar의 경우 바닥에서 약 7cm 정도이고 Hudson jar의 경우 약 10cm 정도의 위치에서 기계적 에너지를 공급하도록 설정하였다.

본 연구를 위한 jar-test는 Standard Methods에 따라 먼저 pH 범위 4~9사이에서 최적의 값을 결정하고, 최적 응집제 주입농도를 결정하였다. 시료로 사용한 원수는 카올린(kaolin)을 사용하여 준비하였으며, 응집제는 Alum( $Al_2(SO)_4$ )을 사용하여 jar내의 농도가 30ppm이 되도록 하였다. 응집보조제는 사용하지 않았으며, 난류가 발생되어 응집제인 알루미늄 이온과 카올린 이온의 충돌횟수를 평가하는 지표로 탁도를 사용하였다. 탁도의 단위는 NTU이며 탁도측정을 위하여 사용한 장비는 Spectrophotometer(YPM269)를 사용하였다. 다음 Table 1은 jar-test 실험시 각각의 경우 회전속도와 G값, 초기 시료의 탁도 등을 정리한 것이다.

Table 1에서 나타난 G값은 Tachometer를 이용하여 전류와 전압을 측정·환산한 값이다. 실험과정은 같은 형상의 4개의 jar에 2ℓ씩 카올린시료(초기탁도 140NTU)를 채우고 최적 응집제 주입량인 alum을 30ppm이 되게 주입한 후, 10초 동안 급속혼화한다. 이 때 각각의 혼화속도는 Table 1에서 나타난 바와 같이 125, 150, 175, 200rpm으로 맞추는데, 이것은 Rossini(1999)가 alum을 사용하여 jar-test를 수행하는 경우 최적의 회전속도가 약 100~200rpm이라고 한 것을 근거로 한 것이다.<sup>6)</sup> 급속혼화 후 에너지의 공급을 중단하고 30분 동안 정체한 상태로 두었다가 상등액을 채취하여 탁도를 측정한다.

Table 1. Jar-test matrix

Items	Rotating velocity (rpm)	G value (s <sup>-1</sup> )	Initial turbidity (NTU)	Testing conditions
① Circular baffled jar	125	81.8	140	· Rapid mix time : 10 seconds  · Coagulant dose : 30ppm
	150	100.2		
	175	119.0		
	200	131.7		
② Circular no-baffled jar	125	48.6		
	150	60.0		
	175	71.6		
	200	83.5		
③ Hudson jar	125	129.4		
	150	147.8		
	175	165.4		
	200	172.2		

### 3. 전산유체(CFD; Computational Fluid Dynamics)

#### 3.1. 지배 방정식

위 실험 결과와의 비교·검토를 위해서 본 연구에서는 jar 용기내의 유동장을 CFD로 해석하였다. CFD 프로그램으로는 영국 AEA Technology에서 개발된 CFX를 사용하였고, 버전은 4.2이다.<sup>10)</sup> CFD는 수작업이나 개인용 컴퓨터로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Differential Method)기법을 이용하여 작은 셀(cell)로 분할하여 각각의 경계조건(Boundary Condition)을 두어 해를 구하는 방법이다. 실험방법에서 언급된 Jar 내에서 샤프트(Shaft)를 통해 공급되는 에너지와 임펠러로 소산되는 에너지를 모멘텀 방정식으로 풀게되는 것이다. 본 모델링에서 사용되는 기본적인 식은 아래의 두 식이다.

연속 방정식

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

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

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

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $\vec{V}$ 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 Table 1에서 나타난 세 가지 경우의 jar형상 내의 14,800개 셀에서 해를 구하게 되는 것이다.

#### 3.2. 임펠러 모델링

임펠러 효과를 나타내는 모멘텀 원천(Source)은 임펠러와 샤프트에 작용하는 토크(Torque)의 수치로부터 도출할 수 있다. 샤프트에 작용하는 토크는 임펠러에 작용하는 반작용력(Azimuthal reaction force)에 작용거리를 곱한 값을 임펠러에 의해 유동되는 부피로 적분한 값이다. 즉,

$$T = \int_{V_s} r F_s dV \quad (3)$$

여기서  $F$ 는 임펠러에 작용하는 유체의 반작용력,  $r$ 은  $F$ 의 작용거리, 그리고  $V_s$ 는 임펠러에 의해 유동되는 부피를 나타낸 것이다. 이 값은 시간에 대해 평균한 값이며, 각각의 블레이드가 회전에 의해 발생시키는 주기적인 유동의 변화는 무시한 것이다. 그리고 임펠러에 작용되는 반작용력은 회전방향이

나 축방향에 대해 일정한 것으로 가정하여 단지 작용거리 ( $r$ )에 대해서만 비례한다고 가정하였다. 즉,

$$F = Kr \quad (4)$$

여기서,  $K$ 는 반작용력/작용거리를 나타낸 것이다. 그러므로 식 (3)에 식 (4)를 대입하여 정리하면 다음 식 (5)와 같이 정리된다.

$$T = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^3 KW dr \quad (5)$$

여기서,  $W$ 는 임펠러의 축방향 길이,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 임펠러의 반내경과 반외경을 나타낸다.  $r_2$ 는 샤프트 부분의 반지름을 일컫는다. 식 (5)을 적분하여  $K$ 값을 구하면

$$K = \frac{2T}{\pi W [r_2^4 - r_1^4]} \quad (6)$$

본 모사(Simulation)에 있어서 원형 jar의 경우와 Hudson jar의 경우 모두  $W$ 는 0.01524m,  $r_2$ 는 0.0381m, 그리고  $r_1$ 은 0.0m로 결정하였다. 따라서 이 힘은 임펠러 지역의 각각의 셀에서 원주방향 (반지름의 직각방향)으로 작용한다. 이 때 모멘텀 식은 모멘텀 방정식을 직교좌표 영역에서 나타내게 되므로 각각의 방향에 따라 다음과 같이 요소가 표현된다.

$$F_x = -\frac{F_y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (7)$$

$$F_y = \frac{F_x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (8)$$

여기서, 블레이드는 샤프트에 수직으로 설치되어 있으므로 축방향으로 작용되는 힘을  $F_z$ 라 두기로 하고 다음과 같이 표현된다.

$$F_z = -F \quad (9)$$

그러므로, Body force vector는 단위 부피당 작용하는 힘의 양을 Vector로 나타내게 되므로

$$\bar{B} = \left( \frac{F_x}{V}, \frac{F_y}{V}, \frac{F_z}{V} \right) \quad (10)$$

이 된다. 여기서,  $V$ 는 단위 셀의 부피를 나타낸다.

### 3.3. 난류 모델링

혼화조에서 발생하는 난류 발생은 임펠러 레이놀드 수와 깊은 연관이 있다. Perry는 임펠러 레이놀드 수가 10,000이상일 때 난류라고 규정하였으며, 본 연구에서는 임펠러의 레이놀드 수가 이 이상이 된다.

혼화조에서 발생하는 난류는 실제 비등방성이며, 이는 원주방향의 사류를 발생시키는 회전(rotation)에 기인한다. 그러므로 난류 상황에서 모멘텀의 전달을 모델링하기 위해서는 Reynolds-Stress 미분방정식이 사용되어야 한다. 모델화된 전달식은 난류 응력과 난류 에너지 소산 속도에 대해서 해석되며, 회전류에 대해서는 Standard  $K-\epsilon$  model보다 더 정확하다. 왜냐하면  $K-\epsilon$  model은 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하기 때문이다.<sup>14)</sup>

### 3.4. 경계조건(Boundary Condition)

본 연구에서는 Jar내 시료의 자유 수면은 평면적이며 마찰력이 없다고 가정하였다. 왜냐하면, 공기 와 접촉하고 있는 자유 수면에서의 마찰력은 무시할 정도로 작기 때문이다. 그리고 Jar용기의 벽면과 배플의 표면은 No-slip condition을 적용하고, 잘 알려진 Prandtl 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다.<sup>11)</sup>

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. Jar-test 실험 결과

카울린으로 조제한 합성원수의 초기 탁도는 140 NTU였고, 최적 pH는 7.3이었다. 다음 Table 2는 실험 방법에서 언급한 세 가지 jar의 형상을 이용한 jar-test결과를 보여주는 것이다.

Table 2. Result of experiments

Items	Rotating velocity (rpm)	G value ( $s^{-1}$ )	Residual turbidity (NTU)	Removal efficiency(%)
① Circular baffled jar	125	81.8	110	21.4
	150	100.2	100	28.6
	175	119.0	100	28.6
	200	131.7	90	35.7
② Circular no-baffled jar	125	48.6	42	70
	150	60.0	40	71.4
	175	71.6	42	70
	200	83.5	36	74.3
③ Hudson jar	125	129.4	58	58.6
	150	147.8	42	70
	175	165.4	58	58.6
	200	172.2	56	60

\* Initial turbidity = 140NTU

Table 2에서 나타나 바와 같이, 같은 회전속도 (rpm)로 급속 혼화할 때, jar의 형상에 따라 소요되는 에너지가 달라져서 G값이 다르게 나타나고 있다. Jar에 투입되는 시료의 양과 물리적 특성이 같을 경우, 에너지의 양이 G값을 변화시키는 유일한 변수가 되는데(Camp and Stein, 1943), 본 실험에서는 배플이 없는 원형 jar의 경우가 가장 에너지 소요가 적어 G값이 작게 나타나고 있으며, Hudson jar의 경우 에너지 소요가 가장 커서 G값이 크게 나타나고 있다. 이에 따른 탁도 제거율을 살펴보면 전체적으로 G값은 작으나, 배플이 없는 원형 jar의 경우가 탁도 제거율이 가장 높으며, 그 다음으로 Hudson jar, 배플이 장착된 원형 jar의 순서로 탁도가 효과적으로 제거되는 것을 알 수 있다.

다음 Fig. 2는 배플이 장착된 원형 jar에서의 실험결과로서 각 회전속도에 따른 잔류 탁도를 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 나타나듯이 네 가지 경우 탁도 제거율의 평균이 약 28%에 불과한 것은 급속혼화 이후의 완속혼화에 따른 플럭의 성장이 배제되었고, 본 연구의 범주를 심한 난류장이 발생하는 급속혼화 공정으로 한정하였기 때문에 완속혼화는 다루지 않았다. 블레이드의 회전속도가 증가할수록 잔류탁도가 낮은 것으로 나타나고 있는데, 이것은 Hanson과 Cleasby(1990)가 G값이 약  $170s^{-1}$ 이 될 때까지는

Fig. 2. The residual turbidity in the circular baffled jars.

G값이 증가할수록 잔류탁도는 감소한다고 발표한 결과<sup>12)</sup>와 일치하고 있다.

다음 Fig. 3은 배플이 없는 원형 jar에서의 실험 결과로서 각 회전속도에 따른 잔류 탁도를 나타낸 것이다.

Fig. 3에 나타나듯이 Fig. 2와 비교하였을 때, 배플이 없는 원형 jar의 경우에 높은 탁도 제거효율(약 75%)을 보이고 있다. 약간의 오차를 보이기는 하나 Fig. 2와 마찬가지로 G값이 증가하면서 탁도 제거율도 상승하고 있는 추세를 보이고 있다. 그런데 Fig. 2과 Fig. 3의 결과에서 같은 임펠러를 사용하였고, 같은 회전속도로 혼화를 하였음에도 불구하고 G값이 다르며, 배플이 없는 원형 jar의 경우 200 rpm으로 혼화하였을 때의 탁도 제거율이 배플이

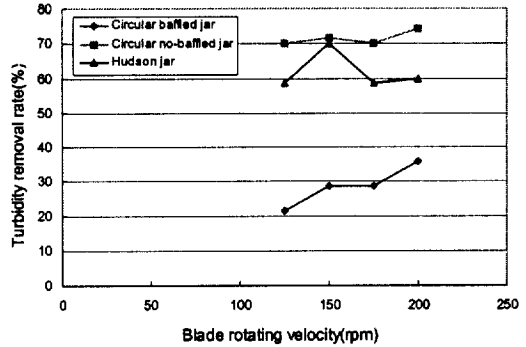


Fig. 5. The rate of turbidity removal.

Hudson jar, 그리고 마지막으로 배플이 장착된 원형 jar의 순으로 탁도 제거율이 높은 것으로 나타나고 있다. 이것은 급속혼화에서 혼화조의 형상이 다른 경우에 같은 임펠러를 사용하고, 같은 회전속도로 혼화하였을 때, G값이 다르게 나타나며, 이때 G값을 척도로 탁도 제거율을 예측한다는 것은 무리이며, G값은 혼화조의 형상을 반영하지 못하는 것으로 결론 내릴 수 있다.

#### 4.2. 전산유체를 이용한 jar내의 유동장 해석

앞의 jar-test 실험결과를 jar내의 유동장으로 설명하기 위하여 CFX를 이용하여 분석하였다. 각 jar의 경우 탁도 제거율이 가장 높은 경우를 선택하여 CFX로 유동장을 모사하였다. 다음 Fig. 6은 배플이 장착된 원형 jar의 경우 임펠러의 회전속도가 200 rpm일 때 jar내의 유동장을 모사한 것이다.

Fig. 6에 나타나듯이 배플이 장착된 원형 jar내의 유동장은 몇 가지 특징에 의해 탁도 제거율이 낮은 것으로 해석되어질 수 있다. 첫째로 평면에서 jar를 관찰하였을 때 시료와 접촉하고 있는 윤변의 길이가 커서 벽면에서 마찰로 인한 난류장이 너무 심하게 발생하고 있다. 이렇게 벽면에서 발생하는 심한 난류장은 임펠러의 회전에 의해 생긴 플릭의 씨앗을 깨트릴 수 있으며,<sup>13)</sup> 배플이 장착되면서 윤변의 길이가 길어져 그 효과가 더 크게 나타나고 있다. 특히 각 배플의 좌측에는 난류장이 벽면보다 더 심하게 나타나는 것으로 관측되는데, 이 또한 플릭의 씨앗을 깨트릴 가능성이 많은 것으로 사료된다. 둘째로 샤프트(Shaft)와 임펠러로 공급되는 에너지가 배플

Fig. 3. The residual turbidity in the circular no-baffled jars.

Fig. 4. The residual turbidity in Hudson jar.

장착된 원형 jar의 경우 200rpm으로 혼화하였을 때의 탁도 제거율보다 약 3.5배 좋은 것으로 나타났다. 이것은 급속혼화에서 G값이 jar의 형상을 고려하지 못할 뿐만 아니라, 혼화조의 형상이 달라질 경우에는 G값과 탁도제거 효율 사이의 관계가 서로 비례의 관계가 아닐 수도 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 Hudson jar에서의 실험결과로서 각 회전속도에 따른 잔류 탁도를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 나타나듯이 Hudson jar의 경우 탁도 제거율이 배플이 장착된 원형 jar의 경우보다는 높으나 배플이 없는 원형 jar의 경우보다는 낮은 것으로 나타나고 있다. 그리고 G값이 증가할수록 탁도 제거율이 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 같은 임펠러를 통하여 같은 회전속도로 급속혼화 하더라도 다른 jar형상에 비해 G값이 커서 Hanson과 Cleasby(1990)가 언급한 G값  $170s^{-1}$ 에 달하면서 탁도 제거율이 감소하는 것으로 해석된다.

다음 Fig. 5는 임펠러를 통한 에너지 공급에 있어서 같은 회전속도로 혼화할 경우 세 가지 jar의 형상에 따라 탁도 제거율을 비교한 것이다.

Fig. 5에서 나타나듯이 jar의 형상에 따라 탁도 제거율을 비교하였을 때, 배플이 없는 원형 jar,

Fig. 6. The simulation result of flow in the circular baffled jar at 200 rpm.

과 벽면에 의해서 많은 양이 소산되어 jar내 전체적인 유동장이 균일하지 못하다. 이것은 난류의 흐름이 국부적으로 심하게 발생하여 응집제의 확산이 효과적으로 일어나지 못한 것을 나타내고 있다. Fig. 6의  $Z=0.02$  위치에서의 유동장과 Fig. 7의  $Z=0.02$  위치에서의 유동장을 비교하였을 때 배플이 없는 원형 jar의 경우 임펠러로 공급되는 에너지가 도달하는 양이 배플이 장착된 원형 jar의 경우 보다 많은 것으로 관찰되고 있다.

결론적으로 실제 정수장내 급속 혼화지가 대부분 사각의 단면을 가지고 있기 때문에 수리학적 상사성을 고려하고, 난류를 더 많이 발생시켜서 응집제의 확산을 효과적으로 진행시키기 위하여 장착하는 배플의 역할은 전산유체를 통하여 유동장을 모사한 결과 에너지의 소요가 증가하고, 효과적인 난류장의 발생을 형성하지 못할 수도 있는 것으로 나타났다. 그러나, 본 실험 결과와 모사는 초기 혼화 단계인 물리적 응집제의 확산을 보기 위한 간접 지표로 탁도 제거율을 사용한 것이며, 만약 화학적 응집 dynamic이 고려된 플록 형성지(완속 혼화지)에서는 그 형상의 영향을 독립적으로 연구하여야 할 것이다.

Fig. 7은 배플이 없는 원형 jar의 경우 임펠러의 회전속도가 200rpm일 때 jar내의 유동장을 모사한 것이다.

Fig. 7에서는 Fig. 6과 비교하였을 때 전체적으로 끌고루 유동장이 형성됨을 알 수 있다. 특히 벽면에서 마찰에 의한 난류가 배플이 장착된 원형 jar보다 작으며, 임펠러에서 공급되는 에너지가 jar내에 구석구석 미치는 것을 관찰할 수가 있다. 임펠러의

Fig. 7. The simulation result of flow in the circular no-baffled jar at 200rpm.

Fig. 8. The simulation result of flow in the Hudson jar at 150rpm.

회전에 의한 난류장 영역이 배플이 장착된 원형 jar보다 크게 나타나고 있는데, 이 난류장은 응집제와 콜로이드 입자간의 충돌기회를 부여하는 역할을 하게되므로<sup>13)</sup> 플럭의 씨앗을 형성하는데 효과적이라 할 수 있다.

다음 Fig. 8은 Hudson jar의 경우 임펠러의 회전속도가 150rpm인 경우(탁도 제거율이 가장 높은 경우) jar내의 유동장을 모사한 것이다.

Fig. 8은 Fig. 6과 비슷한 양상의 유동장이 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 jar 전체의 유동장에 나타나 있듯이 벽면에서 발생되는 난류장은 Hudson jar가 배플이 장착된 원형 jar에 비해 작으며, 특히 윤변의 길이가 Hudson jar의 경우가 더 작아서 벽면과의 마찰에 의한 난류 영역 역시 작게 나타나고 있다. 그리고 Hudson jar의 경우 각 구석



Table 3. The result of simulations

Items	Flow field characteristics	Degree of coagulant dispersion
① Circular baffled jar	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Extreme turbulence occurs due to friction with the wall because this has long perimeter(wide wall contact).</li> <li>· Supplied energy through the impeller into the jar has a tendency to be dissipated by friction with the wall more than inertia in fluids, so flow field in the jar is not uniform.</li> <li>· Turbulent flow occurs locally.</li> </ul>	bad
② Circular no-baffled jar	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Flow field in the jar is uniform.</li> <li>· Energy through the jar is properly supplied to all the region.</li> </ul>	very good
③ Hudson jar	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Improper turbulence at the wall occurs in this case less than ①.</li> <li>· Dead zone is observed.</li> </ul>	good

에서 발생하는 사류 지역이 응집체의 확산을 방해할 것으로 판단되며, 다른 혼화조 형상에 비해 같은 임펠러의 회전속도로 혼화시키더라도 G값이 커져서 에너지 소모가 많음을 알 수 있다.

Table 3은 세 개의 다른 형상 jar를 이용한 jar-test시 응집체 확산 효과와 유동장 모사 결과를 정리한 것이다.

## 5. 결 론

정수 처리장 및 jar-test의 급속혼화 공정에서 혼화조 형상이 난류장 발생에 미치는 영향을 연구하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 수행한 jar-test에서과 같은 임펠러의 회전속도로 공정수를 급속 혼화할 때 혼화조의 형상에 따라 응집체의 확산과 G값이 달라지는 결과를 보였다. 이것은 급속혼화에서 G값은 급속혼화조의 형상을 고려하지 못할 뿐만 아니라 응집체 확산에 중요한 역할을 하는 난류장은 혼화조의 형상과 깊은 관련이 있음을 나타내는 것이다.
- 2) 급속혼화시 같은 임펠러의 회전속도로 공정수를 혼화할 때, G값은 Hudson jar, 배플이 장착된 원형 jar, 그리고 배플이 없는 원형 jar 순으로 나타났으며, 이것은 소모되는 에너지의 양을 비교하는 척도가 되기도 한다. 그리고 응집체의 확산과 탁도 제거율을 비교하였을 때

에는 배플이 없는 원형 jar, Hudson jar, 그리고 배플이 장착된 원형 jar의 순으로 나타났으며, 이 결과는 jar의 형상에 따른 난류장의 발생 양상에 기인한 것으로 판단된다.

- 3) Jar-test의 결과를 전산유체 프로그램으로 모사한 결과 혼화조에서 시료와 접촉하고 있는 윤변의 길이와 임펠러를 통하여 공급되는 에너지가 소산되는 위치에 따라 심한 국부적인 난류가 발생하여 플러의 씨앗을 깨트리는 것으로 해석되었다. 특히 배플이 장착된 원형 jar의 경우, 난류를 더 많이 발생시켜서 응집체의 확산을 효과적으로 진행시키기 위하여 장착되는 배플의 역할은 전산모사 결과 효과적이지 못할 뿐만 아니라 반대의 효과를 나타낼 수도 있다.
- 4) Hudson jar의 경우 윤변의 길이가 작아서 벽면과의 마찰에 의한 난류영역은 작으나, 구석에서 발생하는 사류 지역이 응집체의 확산을 방해하며, 다른 혼화조 형상에 비해 같은 임펠러의 회전속도로 혼화시키더라도 G값이 커져서 에너지 소모가 많다.

## 사 사

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

1. Kawamura, S., Integrated Design of Water Treatment Facilities, John Wiley & Sons, INC., pp. 65~71(1991).
2. Dharmappa, H. B., Verink, J., Fujiwara, O., and Vigneswaran, S., "Optimal Design of a Flocculator," *Water Research*, **27**(3), 513 ~531(1993).
3. Amirtharajah, A. and Mills, P., "Rapid mix design for alum coagulation," *Journal of American Water Works Association*, **74**(5), 210~216(1982).
4. Johnson, P. N. and Amirtharajah, A., "Ferric chloride and alum as single and dual coagulants," *Journal of American Water Works Association*, **75**(4), 232~239(1983).
5. Mhaisalker, V. A., Paramasivam, R., and Bhole, A. G., "Optimizing physical parameters of rapid mix for coagulation-flocculation of turbid water," *Water Research*, **25**(1), 43~52(1991).
6. Rossini, M., Garcia, G. G., and Galluzzo, M., "Optimization of the coagulation-flocculation treatment : Influence of rapid mix parameters," *Water Research*, **33**(8), 1817~1826(1999).
7. Oldsue, J. Y. Fluid Mixing Dynamics, McGraw-Hill Publication, pp. 449~453 (1983).
8. AWWA, Water Treatment Plant Design and Operation(1998).
9. APHA, AWWA, WEF, Standard Methods, pp. 2-8~2-9(1995).
10. Harwell, CFX Application manual, AEA Technology(1995).
11. Currie, I. G., Fundamental Mechanics of Fluids, McGraw-Hill Publication, pp. 301 ~308(1993).
12. Hanson, T. A. and Cleasby, J. L., "The effects of temperature on turbulent flocculation : fluid dynamics and chemistry," *Journal of American Water Works Association*, **82**(11), 56~73(1990).
13. 박노석, 이상형, 박회경, "3-D 전산유체를 이용한 급속혼화에서의 난류 유동장 해석," 대한상하수도학회 1999년 춘계 학술회의, 서울(1999).
14. 일본기계학회, 전산유체역학, 대영사, pp. 272 ~275(1991).