

자유표면을 고려한 교반기 내부의 비정상 유동해석

안 익 진,¹ 송 애 경,¹ 허 남 건²

TRANSIENT FLOW SIMULATION OF A MIXER WITH FREE SURFACE

Ickjin Ahn,¹ Aekyung Song¹ and Nahmkeon Hur²

In the present study, a numerical analysis of transient mixer flow is performed considering free surface formation. The flow patterns and free surface shape in a mixers formed by flat paddle and pitched paddle impellers are predicted. In a flat paddle mixer, two flow circulation regions are formed due to strong radial flow, whereas one large circulation is formed in a pitched paddle mixer due to axial downward flow. These differences affect the free surface evolution and shape. It is seen from the results that a flat paddle mixer gives deeper free surface at center region than a pitched paddle mixer. The free surface of 8-blades-flat-paddle mixer is also simulated to compare with the available experimental and simulation results. The present computational results agree reasonably well with the experimental data.

Key Words : 자유표면(Free surface), 와류(Vortex), VOF방법(Volume of Fluid Method), MRF(Multiple Rotating Reference Frames), 유동형태(Flow pattern), 비정상 해석(Transient Simulation)

1. 서 론

화학공업, 약품공업, 식품공업 등 산업현장에서 흔히 볼 수 있는 교반기는 두 가지 이상의 물질을 혼합하여 사용자가 원하는 물질을 만들어 주는 기계장치로써 수십 그램의 물질부터 수십 톤까지의 물질을 혼합하는 다양한 크기를 갖고 있으며, 교반 되는 물질의 특성에 따라 임펠러의 형상 및 크기가 다른 교반기가 존재한다. 산업용 교반기가 좋은 교반 성능을 갖기 위해서는 교반기 내부 유동이 정체점 없이 모든 영역에서 원활히 혼합될 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 이러한 교반기의 임펠러 회전에 의해 발생하는 유동은 복잡한 와류(vortex) 구조와 함께 3차원적 유동 특성을 가진다.

최근에는 PIV(입자영상유속계)를 이용한 연구와 더불어 전산유체해석 기법(CFD)을 사용하여 교반기 내부의 유동을 해석하는 연구가 진행 되어오고 있다. 장재원과 허남건[1]은 Flat 터빈 타입 임펠러를 갖는 교반기의 정상상태, 비정상상태

수치해석을 통해 교반기 내부의 유동특성을 연구하였으며 박경현과 김경천[2]은 PIV 실험을 통해 임펠러 주위의 유동 특성 및 임펠러 주위의 순환 와류 형성의 특성을 가시화 하여 연구하였다. Ciofalo[3]은 실험을 통해 배플이 없는 경우 벽면에서의 높은 마찰과 낮은 교반 회전에 의해 자유표면의 와류 유동이 억제됨을 검증하였으며 Smit[4]는 자유표면의 와류 유동이 작동 유체의 거품 형성을 줄이고 작동 유체 표면에 떠 있는 입자들의 교반에 효과적임을 보여주었다. 이와 같이 지금까지 자유표면에서 와류 형상을 고려한 연구는 실험적 연구에 집중되었지만 그러나 이는 시간과 규모 면에서 비용의 소모가 크다는 단점을 지녔다. 또한, 실험을 통한 연구는 교반기 내부의 국소적인 유동을 현상 파악하는데 있어 한계를 가지고 있다. 따라서 최근에는 수치해석을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으며 컴퓨터의 발달로 인해 적은 비용과 시간으로 효율적인 교반기 유동 특성 연구를 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 자유표면의 변화 경로를 VOF(Volume of Fluid)방법으로 추적하면서 비정상 상태에서의 자유표면 와류 거동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 먼저 flat paddle 교반기와 pitched paddle 교반기에 대한 유동 해석을 통하여 임펠러 타입에 따른 유동 특성을 수치해석하였으며, 기존에 알려진 실험 및 수치해석 결과와 비교하여 본 연구에서의 해석 방법에 대한 신뢰성을 검토하였다.

접수일: 2005년 11월 4일, 심사완료일: 2006년 10월 13일.

1 서강대학교 대학원

2 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

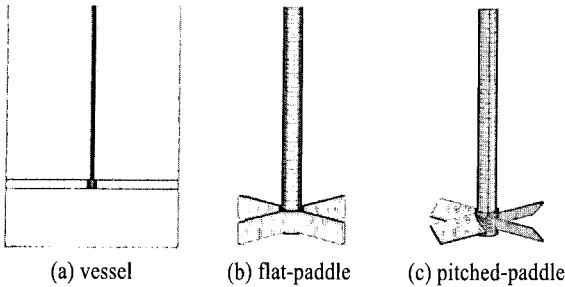


Fig. 1 Computational meshes for a mixer with flat-paddle and pitched-paddle type impeller.

2. 수치해석

2.1 수치해석 격자 및 경계조건

본 연구에서는 반경방향 임펠러인 Flat-paddle과 축 방향 임펠러인 45°-pitched-paddle에 대하여 상용해석 프로그램 STAR-CD를 이용한 수치해석을 수행하였다. 계산 격자의 생성은 본 연구실에서 개발 중인 산업용 교반기 전처리 프로그램을 사용하여 생성하였으며 형상과 제원은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 수치해석 경계조건은 벽 경계조건과 대칭 경계조건을 사용하였다. 혼합 용기와 만나는 면은 벽 경계 조건을 사용하였고 단순 공기면은 대칭경계조건을 사용하였는데, 이는 전단응력이 다른 면에 비해 아주 작고, 입·출입이 없기 때문이다. 작동유체로는 293K의 물을 사용하였다. 실제 작동 유체는 물이 아닌 다른 유체일 수 있지만 본 연구에서는 유동의 형태와 자유표면의 형상 변화만을 고려했기 때문에 물로 계산을 수행하였다. 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.2 수치해석 방법

자유표면에서의 와류 현상을 해석하기 위해서 시간에 따른 자유표면의 거동을 추적하는 방법으로서 VOF(Volume Of Fluid) 방법을 사용하였다. 다른 유체가 접하는 면, 즉 자유표면에서의 유동은 움직이는 경계를 가진 유동에 속하는 것으로서 그 경계의 위치는 초기 시간에 대해서만 알 수 있고 분

석하기 어렵다. 본 연구에서도 물과 공기사이의 자유표면에서의 변화와 이에 따른 유동현상을 고찰하는 것이 목적이기 때문에 시간에 따른 자유표면에 변화를 고려해야 한다. VOF 방법은 해석 격자 상태를 나타내는 변수 F 를 정의하고 이 유체 셀의 상태가 기준 유체로 딱 차여있을 때는 1의 값을 가지고 유체가 없을 때는 0의 값을 가지도록 설정한다. 따라서 셀에서의 F 의 평균값은 유체에 의해 차지하는 셀의 부피비율을 나타낼 수 있으며, 0과 1사이의 F 값을 가지는 셀들은 자유표면을 가지게 된다.

$$F(x,t) = \frac{\text{volume of fluid}}{\text{volume of cell}} \quad (1)$$

셀의 상태를 나타내는 스칼라 값인 변수 F 를 체적 비율이라 하고, 레이놀즈 수송 이론에 적용시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (uF) = 0 \quad (2)$$

각 셀에 대해 위 식을 질량, 운동량 보존 방정식과 동시에 풀어줌으로서 자유표면을 묘사할 수 있게 된다. 교반기내에 회전하는 유동현상은 다중회전좌표계 방법을 사용하여 계산하였다. 다중회전좌표계 방법은 회전에 의한 영향을 해석하고자 할 때 사용하는 방법으로 실제로 물체를 회전 시키지 않고 실제 회전에 영향을 받는 유체격자의 좌표계를 고려하여 계산하는 방법으로 교반기와 같이 임펠러를 가진 경우에는 임펠러와 임펠러 사이의 유체격자에 회전을 주어 계산 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Flat-paddle 교반기 유동 특성

본 연구에서는 먼저 Flat-paddle 임펠러를 갖는 교반기에서 교반 회전수 450rpm인 경우 시간 변화에 따른 유동 해석 결과를 비교하였다. Fig. 2는 Flat-paddle의 내부 유동 패턴, 자유표면의 변화 모양을 임펠러 정면에서 자른 단면을 나타낸 것이다. 반경방향 임펠러인 Flat-paddle의 유동 형태는 임펠러 블레이드 팁 부분에서 반경방향으로 분출된 유동이 탱크 벽면까지 발달된 후 벽면에서 위쪽과 아래쪽으로 나누어진다. 이렇게 나누어진 유동은 다시 임펠러의 회전축에 위 아래로 흡입되면서 임펠러를 중심으로 대칭되는 두개의 순환 영역을 형성하게 된다[5]. 이렇게 생성된 순환영역은 시간이 지나면서 임펠러에서 발생하는 회전력에 의해 자유표면까지 큰 순환영역을 만들며 유동이 발달되며, 이때 이 순환 영역의 중심은 거의 일정한 위치에서 발생한다.

Table 1 Specification of flat and pitched paddle type mixer

Tank diameter	0.18m	Impeller diameter	0.06m
Tank height	0.25m	Shaft diameter	0.008m
Liquid height	0.18m	Blade width	0.009m
boss diameter	0.01m	Height of impeller from bottom	0.06m

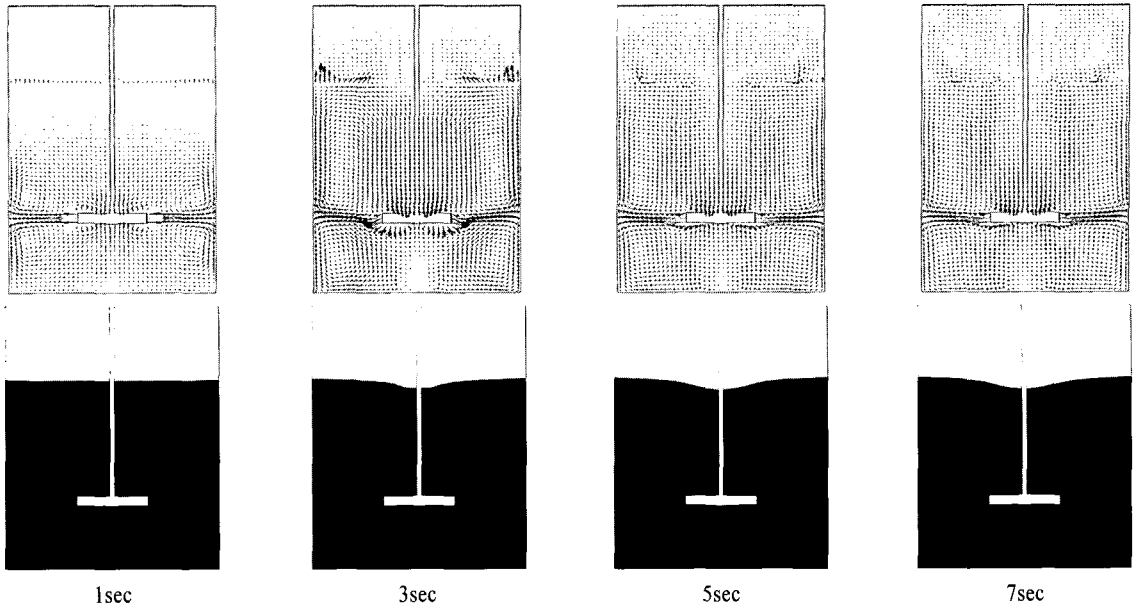


Fig. 2 Velocity vector and free surface in the flat-paddle type mixer

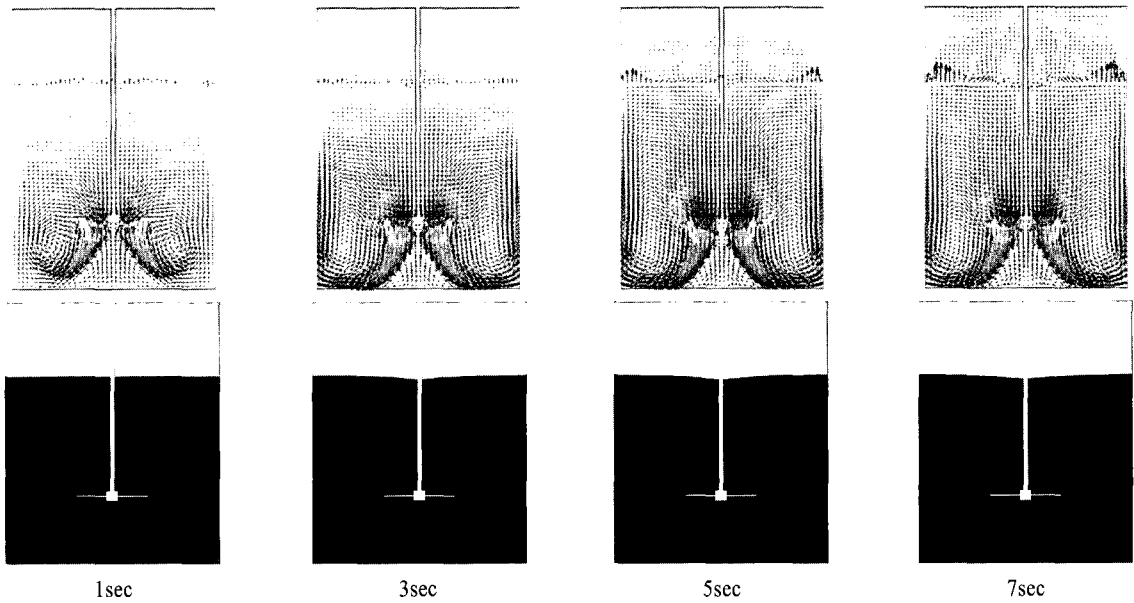
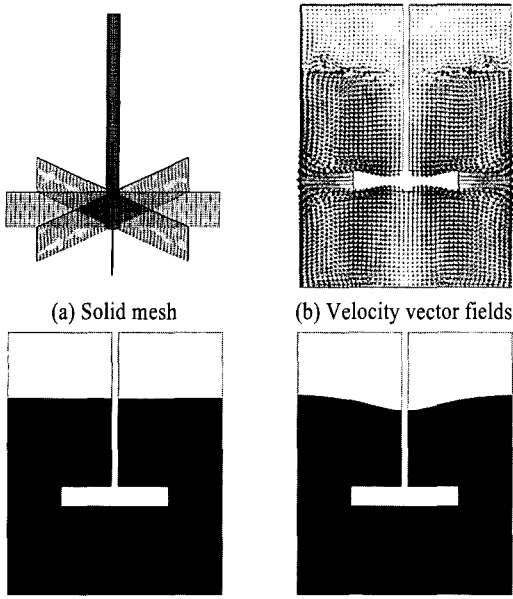


Fig. 3 Velocity vector and free surface in the pitched-paddle type mixer

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 자유표면의 와류 형성도 교반기 바로 형성되는 것이 아니라 유동의 성장이 있을 후 발생하는 것을 알 수 있다. 와류의 지배를 받는 영역에서는 즉 임펠러 블레이드의 안쪽에서 유동은 점성 마찰에 의해서 유체가 강제처럼 회전하게 되고 자유표면의 거동 양상도 포물선 형태로 변화한다.

3.2 Pitched-paddle 교반기 유동 특성

임펠러의 교반 회전수 450rpm 경우 Pitched-paddle 임펠러를 갖는 교반기의 시간 변화에 따른 내부 유동 형상 변화와 자유표면의 거동 형성 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 축 방향 임펠러인 Pitched-paddle의 유동 형성 과정은 임펠러가 회전하면서 유체가 임펠러 블레이드 위쪽에서 아래로 분출되어 임



(a) Solid mesh (b) Velocity vector fields
(c) Free surface shape at 1sec (d) Free surface shape at 6sec
Fig. 4 Computational Results of 8-blades-flat-paddle type mixer

펠러 하단 부분에서 와류를 발생시키면서 교반기 탱크 바닥까지 유동이 성장되고 다시 벽면을 타고 자유표면 영역까지 유동이 발달하면서 임펠러 중심으로 흡입되는 하나의 순환영역을 이룬다. 이때 순환 영역의 중심이 블레이드 주위에서 교반기 탱크 바닥으로 이동한다. Flat-paddle 임펠러의 경우 전체적으로 고른 속도 분포를 가지고 있는 반면에 Pitched-paddle 임펠러는 블레이드 아래쪽에 삼각형 형태의 속도 정체 영역을 형성하면서 Flat-paddle 임펠러에 비해 고른 속도 분포를 갖지는 못한다. 이렇게 유동이 발달하는 과정에서 탱크의 바닥까지 내려가고 다시 올라오는 과정을 이루기 때문에 그 시간만큼 자유표면에서의 와류형성도 같은 교반 회전수에서의 반경 방향 임펠러 Flat-paddle에 비해 늦게 형성되며 와류의 중심의 깊이도 낮게 형성된다.

3.3 8-blades-flat-paddle 교반기 유동 특성 해석 및 비교

본 연구의 수치해석의 타당성을 비교하기 위해서 Nagata[6]의 실험 및 Ciofalo[3]의 수치해석과 동일한 조건의 8-blades-

Table 2 Specification of 8-blades-flat-paddle impeller type mixer

Tank diameter	0.6m	Impeller diameter	0.3m
Tank height	0.8m	Shaft diameter	0.016m
Liquid height	0.6m	Blade width	0.06m
boss diameter	0.02m	Height of impeller from bottom	0.3m

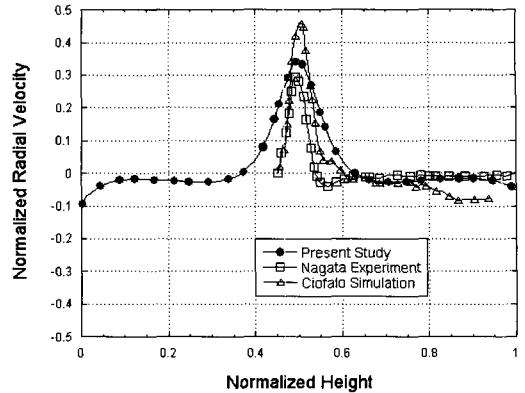


Fig. 5 Normalized radial velocity profiles of 8-blades-flat-paddle (r=0.2m from the rotating axis)

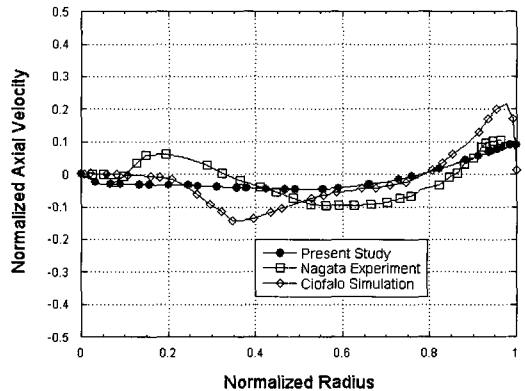


Fig. 6 Normalized axis velocity profiles of 8-blades-flat-paddle (z=0.45m from the bottom)

flat-paddle 임펠러에 대해 수치해석을 수행하였다. 교반 회전수는 72rpm으로 임펠러 제원은 Table 2에 나타내었다. Fig. 4는 8-blades-flat-paddle의 고체 격자 형상과 교반기 내부의 전체적인 유동 형상을 보여주고 있다. 8-blades-flat-paddle의 유동형성 과정은 Flat-paddle 임펠러의 유동형성 과정은 유사하며 반경방향 임펠러의 유동 특징처럼 임펠러를 중심으로 상하에 큰 두개의 순환영역이 형성된다.

Fig. 4의 (c), (d)는 시간 변화에 따른 자유표면 형상 변화이다. 작은 회전수에 비해 와류의 거동 양상이 크게 예측된다. 이것은 교반 회전수는 작지만 유체를 회전시켜주는 블레이드의 면적이 크기 때문에 낮은 교반 회전수에서도 유동형성이 빠르게 진행되면서 자유표면의 와류의 형성도 빠르게 형성되기 때문이다.

Fig. 5는 축 방향 높이 변화에 따른 반경방향으로 분출되는 속도 값을 $U_{ip} = \omega D/2$ 의 속도 값으로 무차원화 한 결과이다. 알려진 바와 같이 임펠러의 블레이드가 위치한 부분에서

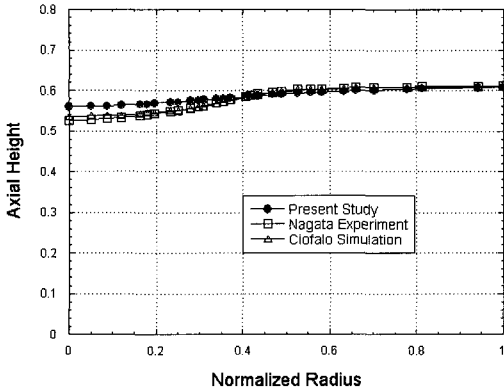


Fig. 7 Axial height (Free surface) of 8-blades-flat-paddle

반경방향의 속도 값이 크게 나타나고 있다. 이것은 블레이드에서 작동 유체를 반경 방향으로 강하게 밀어 내고 있기 때문이다. 블레이드 부분을 제외한 부분에서는 대체로 일정한 값을 나타내며 자유표면과 교반기 바닥 근처에서는 유동방향이 반대로 나타난다. Nagata의 실험 결과와 비교해보면 전체적인 유동 분포는 정성적으로 일치하는 경향을 보이고 있다. 그리고 블레이드의 상단 부분에서의 해석 결과는 Ciofalo의 수치해석의 결과보다 Nagata의 실험의 결과와 유사하다.

Fig. 6은 반지름 변화에 따른 축 방향의 속도의 분포를 나타내고 있다. 임펠러의 블레이드 안쪽 영역($r < 0.5$)에서는 경향성이 불일치하는 결과를 보이지만 자유 와류 영역 임펠러 팁 부분에서 탱크 벽까지($r > 0.5$)의 속도 분포의 정성적인 결과는 유사하다. 와류의 영역에서는 블레이드 안쪽으로 흡입되는 유동이 강하기 때문에 축 방향의 속도 분포가 반대된다.

Fig. 7은 반지름 변화에 따른 자유표면의 분포를 나타내었다. 자유표면의 최대 변화의 깊이 값에 차이는 있으나 자유표면의 분포의 경향성은 유사하다. 이것은 회전하는 유체의 영역에서 발생시키는 회전 모멘텀의 차이로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있는 교반기 중 배플이 없는 Flat-paddle, Pitched-paddle 임펠러의 자유표

면의 거동양상과 내부 유동 특성에 대하여 수치해석 하였다. 반경방향 유동을 강하게 생성하는 Flat-paddle 임펠러가 축방향의 유동을 주 유동으로 하는 Pitched-paddle 임펠러보다 자유표면의 와류 발달을 빠르게 형성시키며 이는 반경방향 임펠러가 유동의 분포를 빠르게 형성시키는 특성을 가지고 있기 때문이다. 그리고 수치해석의 타당성을 검토 비교하기 위해서 8-blades-flat-paddle에 대하여 수치해석을 하였으며 해석 결과는 실험결과와 비교하여 정성적으로 일치하는 경향성을 보여주었다. 향후 본 해석 방법 및 결과들은 교반기 유동 해석에 있어 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 (주)하도의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 장재원, 허남진, 2001, "산업용 교반기 내부 정상/비정상 유동특성 해석," *유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp. 460-465.
- [2] 박경현, 김경천, 2001, "러쉬톤 교반기의 초기 비정상 유동특성," *대한 기계학회 논문집*, pp.1543-1551.
- [3] Ciofalo, M., Brucato, A., Grisafi, F. and Torraca, N., 1996, "Turbulent Flow in Closed and Free surface Unbaffled Tanks Stirred by Radial Impellers," *Chemical Engineering Science*, Vol.51, pp.3557-3573.
- [4] Smit, L. and Daring, J., 1999, "Vortex geometry in stirred vessels," *Proceedings of the 7th European Congress on Mixing*, part11, pp.633-639.
- [5] Aubin, J., Fletcher, D.F. and Xuereb, C., 2004, "Modeling Turbulent Flow in Stirred Tanks with CFD: The Influence of the Modeling Approach, Turbulence Model and Numerical Scheme," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.28, pp.431-445.
- [6] Nagata, S., 1975, *Mixing: Principle and Applications*, Wiley, New York.