

## 교반탱크에서 베플 형상의 영향에 관한 수치 해석적 연구

염상훈<sup>1,†</sup> · 이석순<sup>2\*</sup><sup>1</sup>FMI<sup>2</sup>국립경상대학교 대학원 기계항공공학부, ERI

## A Numerical Analysis on Effect of Baffles in a Stirred Vessel

Sang Hoon Yeum<sup>1,†</sup>, Seok Soon Lee<sup>2\*</sup><sup>1</sup>FMI<sup>2</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang Nat'l Univ.

## Abstract

The flow characteristics in a stirred tank are very useful in a wide variety of industrial applications. Generally, the flow pattern, power consumption and mixing time in stirred vessels depend not only on the design of the impeller, but also on the tanks' geometry and internal structure. In this study, the analysis of an unstable and unsteady complicated flow characteristics generated by the interaction between the baffle shape and impeller were performed using the ANSYS FLUENT LES Turbulence Model. The study compared the predictions of CFD with the interaction between two types of rotating impellers (axial and radial flows) and the shapes of three baffles. The results of the comparison verified that the design model showed a relatively efficient trend in the mixing flow fields and characteristics around the impeller and baffles during agitation.

## 초 록

교반기에서의 유동 특성은 광범위한 산업 분야에서 매우 유용하다. 일반적으로 교반되는 용기에서의 유동 패턴, 전력 소비 및 혼합 시간은 임펠러의 설계뿐만 아니라 용기 형상 및 내부 구조에 달려 있다. 본 연구에서는 베플 형상과 임펠러의 상호 작용에 의해 생성되는 불안정하고 비정상상태의 복잡한 유동 특성 분석을 ANSYS FLUENT LES 난류 모델을 사용하여 수행하였다. Axial Flow 와 Radial Flow 두 가지 타입의 회전 임펠러와 3가지 베플의 형상 사이의 상호 작용과 영향을 전산유체역학(CFD)으로 예측 비교함으로써 교반 시 임펠러와 베플 주변에서의 유동 특성과 혼합 유동장에서 상대적으로 효율적인 경향을 보이는 설계 모델을 검증할 수 있었다.

**Key Words** : Baffle(방해판), Stirred Vessel(교반기), MRF(Multiple Reference Frames), LES(Large Eddy Simulation), RSM(Reynolds Stress Model), Turbulent Flow(난류), CFD(전산유체역학)

## 1. 서 론

일반적으로 산업분야에서 다양하게 활용되고 있는 교반(혼합)은 1950년대 학문으로써 기초가 세워진 이후 점차 발전하여 Uhl 과 Gray(1996)[1] 그리고 Nagata(1975)[2]에 의해 연구결과에 있어 절정에

이르게 된다. 이후 지난 30 여 년에 동안 수많은 공학 설계 원칙이 정립되었으며, 많은 연구자의 노력과 기술의 발달로 요구되는 공정 목표를 위한 교반(혼합) 장비의 설계가 가능해졌다.[3]

교반은 정밀 화학, 석유 화학, 생명 공학, 고분자 가공분야 뿐 만 아니라 화장품 및 소비재, 음식, 식수 및 폐수 처리 기타 등등 매우 다양한 산업분야에서 핵심적인 역할을 수행한다. 특히 수십 그램의 물질부터 수십 톤까지의 물질을 혼합, 분산, 반응, 분리하는 다양한 교반 공정은 유동의 정체점이 없도록 설계

Received: Sep. 29, 2017 Revised: Oct. 25, 2018 Accepted: Jan. 15, 2019

† Corresponding Author

Tel: +82-55-772-7622, E-mail: sh.yeum@gnu.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

되어야 하고 균일하게 혼합되어야 한다.[3][4]

허남건[5]은 비정상 상태에서 베플의 형상에 따른 교체입자 분포를 수치 해석적 연구로 수행하여 교반 특징과 유동 특징에 미치는 영향을 분석하였다. Nienow[6]는 전산수치해석을 통하여 임펠러의 형상과 교반 성능과의 관계와 유동계수의 특성을 분석하였다. 김동주와 김경진[7]은 ANSYS FLUENT의 전산수치 해석을 이용, 대용량 교반기의 유동해석을 수행하여 임펠러의 형상에 따른 유동 특성의 차이뿐만 아니라 유체 점성 특성의 변화도 고찰하였다. 또한 차재호와 윤성호[8]는 교반기 내의 임펠러의 회전에 따른 유동 특성효과를 고려하기 위해 MRF 기법을 적용하여 전산 유체해석을 수행하였다. 또한 최영욱과 허남건[9] 등은 교반기 내 터빈 임펠러의 형태에 따른 수치 해석적 연구를 통해 교반 성과와 효율 결과를 고찰하였다. 김미진과 박균영[10]은 ANSYS CFX를 응용하여 미분 방정식의 이산화(discretization) 방법으로 교반기 내의 유체 흐름을 분석하였고, 김동균과 박재현[11] 등은 임펠러의 형상을 역설계기법을 적용하여 형상데이터를 획득한 후 CFD 해석방법에 적용하여 유동특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 베플 형상과 임펠러의 상호 작용에 의해 생성되는 비정상 상태의 유동 특성 분석을  $k - \epsilon$  표준 및 난류 모델을 이용한 기존의 연구와는 달리 ANSYS FLUENT LES 난류 모델을 사용하여 수행하였으며, LES의 장점인 혼합유동장을 형성하는 대형 와류와 설계되어진 베플과 임펠러 경계에서 발생하는 작은 유동 입자들의 세밀한 거동을 분석할 수 있었다.

전처리 프로세서로 ANSYS CFD/CFX-Pre V16을 사용하였고 FLUENT V16을 Solver로 시뮬레이션을 수행하였으며 후처리기인 ANSYS CFD-Post로 유동 패턴과 특성을 분석하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석모델

Figure 1에 본 연구에서 수행하고자 하는 교반 탱크의 기본 구조와 구성 요소들을 나타내었으며, Table 1은 연구에 적용된 교반기의 주요 설계 표준 치수이다.[12]

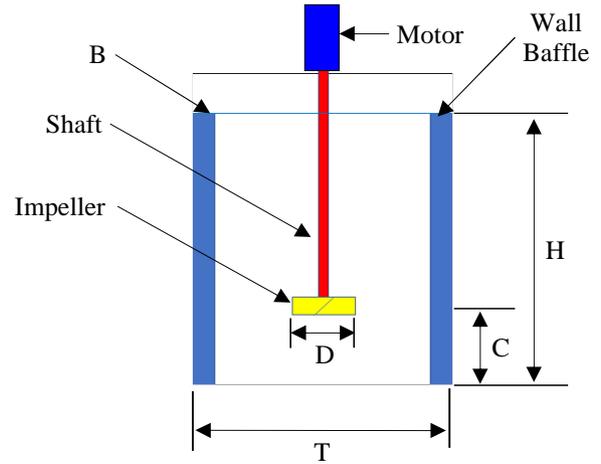


Fig. 1 Schematic of mixing system

Table 1 Dimensions for mixing equipment

Description	Dimensions	mm
Liquid Height	$H \approx T$	300
Tank Diameter	T	300
Impeller Clearance	$C = 1/6 \text{ to } 1/2 T$	100
Impeller Diameter	$D = 1/4 \text{ to } 1/2 T$	100
Impeller Blade Width	$W = 1/4 \text{ to } 1/6 D$	20
Wall Baffle Width	$B = 1/10 \text{ to } 1/12 T$	30

본 연구에서 유동패턴을 비교 분석하고자 하는 용기 구조(단면)의 종류는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 네 가지이다. (a)는 베플이 적용되지 않은 경우이며 (b)는 가장 일반적이고 전형적인 형상으로서 평판(plate)구조이다. (c)는 베플 형상에 수직방향으로 직사각형의 홈

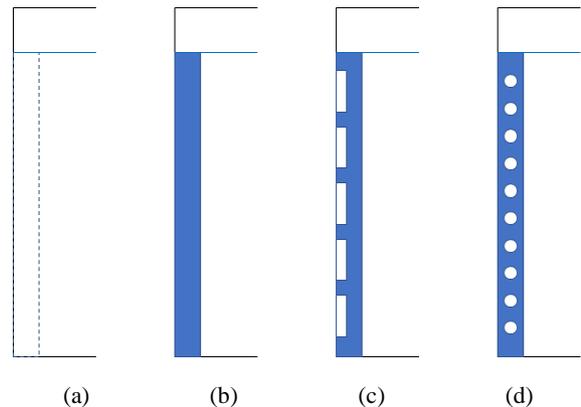


Fig. 2 Baffle shapes for CFD

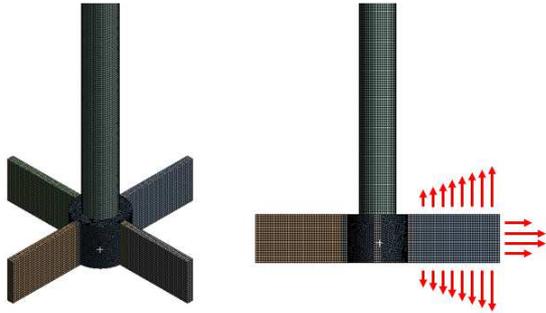


Fig. 3 Geometry of Radial flow impeller

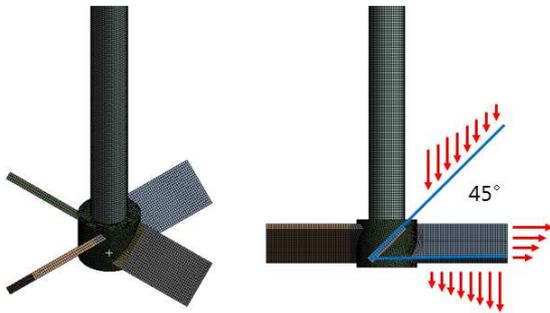


Fig. 4 Geometry of Axial flow impeller

을 길게 5개 절단(전체 면적의 약 30%)한 모델이며 (d)는 수직으로 원형 홀을 10개 가공(전체 면적의 약 30%)한 베플의 형상이다. (c), (d) 형상은 일반 형상 (b)와 유동패턴과 특성을 비교하기 위해 설계되어진 모델이다. (b), (c), (d)의 베플 형상을  $90^\circ$  각도로 4개를 용기에 적용하여 각각 해석을 수행하였다.

본 연구에서 전산유체역학을 통해 (a)와 (b), (c), (d) 형상의 베플과 함께 비교 분석하고자 하는 임펠러는 Fig. 3의 방사형과 Fig. 4 축류형이다. 두 임펠러의 모든 치수는 동일하게 적용하였으며 축류형의 경우 블레이드의 각도를  $45^\circ$  로 결정하였다.

Fig. 5-1은 토출되는 유동의 속도 프로파일을 검출하기 위한 개략도이다. 임펠러의 무게 중심이  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$ 이다.  $V_v$ 는 수직 속도 프로파일 기준으로서 임펠러 하단에서 유체 체적 높이의 90%에 도달하는 지점까지의 수직 높이이다.  $H_v$ 는 수평 속도 프로파일을 검출하기 위한 기준으로서 임펠러 하단( $z=-12$  mm)의 샤프트에서 베플까지의  $x$ 축 수평 거리이다. 그리고 2 mm의  $G_{ab}$ 은 임펠러와 측정 지점과의  $x$ 축,  $z$ 축 공차이다.

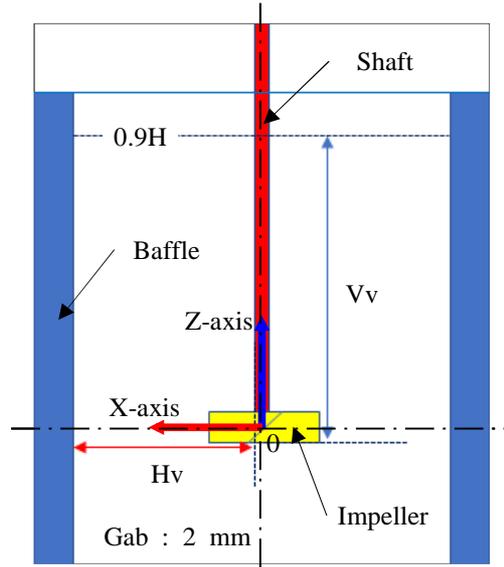


Fig. 5-1 Schematic of mixing vessel

## 2.2 해석기법 및 경계조건

교반기, 특히 베플이 있는 교반기 내부의 유동 해석에 있어서 평균화는 종종 난류의 지배 방정식의 해를 단순화하기 위해 사용되지만, 방정식에 의해 정확히 계산되지 않은 유동의 스케일을 근사화하기 위한 해석 모델링이 필요하다.

난류 모델 중 일반적인  $k - \epsilon$  표준 모델은 수렴성이 좋고 자원이 적게 드는 장점 때문에 일반적으로 많이 이용되고 있다. LES와 DNS는 높은 자원의 필요성과 고려해야 할 수렴성의 단점은 있지만 난류 유동을 보다 정확히 예측할 수 있는 장점이 있다.[3,13,14]

본 연구에서는 베플의 특수한 형상에서 발생할 수 있는 소용돌이(와류) 유동의 경향 분석이 주된 목적이므로, 교반기와 같이 복잡한 비정상 난류 유동장에서 높은 Reynolds 수와 작은 관성입자의 거동 예측에 유리한 LES 모델 접근법이 보다 적합할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 LES를 사용하여 교반기 내부 유동의 난류를 분석하였다. LES는 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하여 난류 변동을 공간적으로 구성된 격자의 크기로 필터링하고 계산을 한다. 모델로부터 서브그리드 규모의 와류에서 난류를 분석하기 위해서는 RSM 및 시간 평균 Navier-Stokes 방정식을 이용하는  $k - \epsilon$  표준 혹은 SST  $k - \omega$  난류 모델보다 상당히 많은 자원을 필요로 한다.

### 2.3 지배방정식

본 연구 이후에 다루고자 하는 것은 가수연료에 대한 다상유동의 교반이다. 하지만 이에 앞서 본 논문에서는 혼합 특성을 비교하고자 임의로 설계되어진 베플과 임펠러의 상호 작용과 영향, 교반 시 생성되는 유동장의 패턴과 특성의 예측이 주요한 목적이므로 등온상태의 물로 가정하여 수행하였다.

해석을 위한 3차원 비압축성 점성 유체의 지배방정식인 Navier-Stokes 연속방정식은 식 (1)로 나타낼 수 있으며, 각각의 좌표 방향(x, y, z)에 대한 운동량 방정식은 식 (2),(3),(4)로 나타낼 수 있다.

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

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla u \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

$u, v, w$ 는 각 방향별 속도성분,  $t$ 는 시간  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 는 점성계수이다.[14,15]

### 2.3 수치해석

Fig. 5-2에 나타낸 것처럼 해석수행을 위해 먼저 유동계산 영역을 회전영역(rotational domain)과 정지영역(stationary domain)으로 나누고 좌표계가 임펠러와 함께 회전하는 MRF(multiple reference frame) 접근법과 SST k- $\omega$  모델을 사용하여 정상상태의 유동 분석을 하였다. 이후 비정상상태의 유동 계산은 SM(sliding mesh)기법과 Smagorinsky-Lilly의 subgrid-scale 모델로 하여 수행하였다.[13,14]

슬라이딩 메쉬는 임펠러 회전영역 주변의 메쉬가 전체 유동장의 메쉬 경계와 분리되어, 해석을 수행하는 동안 물리적으로 회전하게 되고 임펠러의 회전은 데이터를 교환할 수 있도록 설정된 두 영역 사이의 grid interface interactive로 주변이 회전하기 때문에

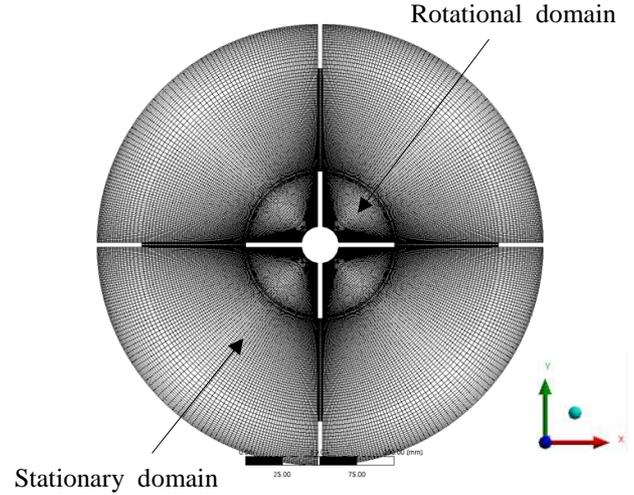


Fig. 5-2 Computational model on xy plane(z=0)

사실적으로 모델링되며 상호 작용에 대해 시간적으로 정확한 시뮬레이션이 가능하게 된다.

다중 참조 프레임(MRF)의 경우 프레임 모션 기법(frame motion methods)을 사용하게 되며 LES는 메쉬 모션 기법(mesh motion methods)을 사용한다. solution methods에서 momentum과 transient formulation은 각각 bounded central differencing과 bounded second order implicit를 적용하여 수행하였다.

교반기의 유동영역을 회전영역(rotational domain)과 정지영역(stationary domain)으로 decomposition 하고 Tet와 Hex Hybrid로 격자를 구성하였으며 3 가지 격자 밀도로 수렴성 테스트를 하였다. 식 (5), (6)은 무차원벽거리(y+)와 마찰 속도에 대한 식이다. 식 (7), (8)을 통해 벽전단응력과 표면마찰계수를 계산할 수 있다. 식 (9)는 교반기의 레이놀즈수이다. 여기서  $\rho, \mu$ 는 밀도와 점도  $n, d$ 는 임펠러 회전수와 지름이다.

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}, \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (5), (6)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2, \quad C_f = 0.079 Re_d^{-0.25} \quad (7), (8)$$

$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu} = \frac{n d^2}{\nu} \quad (9)$$

높은 레이놀즈수와 교반 난류의 특성을 고려하여  $y+$ 는 25 ~ 45로 계산되었으며 계산된 격자수는 약 320만개 정도이며 타임 스텝은 0.001, 해석은 9.6초 동안 수행하였다. 유체의 밀도와 동점도, 토출능력 계산을 기준 Reynolds 수는  $3.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^5$  이다.

표면 변형이 중요한 이슈인 경우 자유표면 다중 위상 모델을 사용해야하나 교반기의 유체 표면의 경우 대부분 마찰이 없고 공기와 점성 전단력은 무시될 수 있으므로 대칭조건으로 모델링하였고, 교반기의 외벽은 no-slip wall 조건을 적용하였다. 임펠러 z축 방향으로 중력가속도 조건을 고려하였으며, 작동 유체는 임펠러 및 교반에 의한 유동 특성만을 비교 분석함이 목적이므로 등온상태(20 °C)의 물로 가정하였다.

본 연구에서는 유동 패턴의 특성 비교가 목적이므로 4가지 케이스에 대해 전력 소비를 동일하다고 가정하였으며 임펠러의 회전속도는 유동 패턴과 특성의 비교를 위해 500 rpm으로 모두 동일하게 적용하였다.

2.4 해석 결과 검토

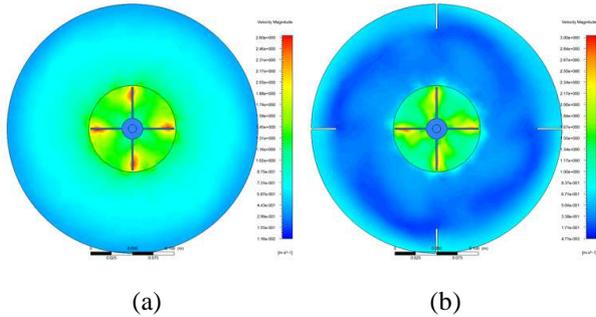


Fig. 6-1 Contours of velocity magnitude with radial flow impeller and baffle (a)(b)

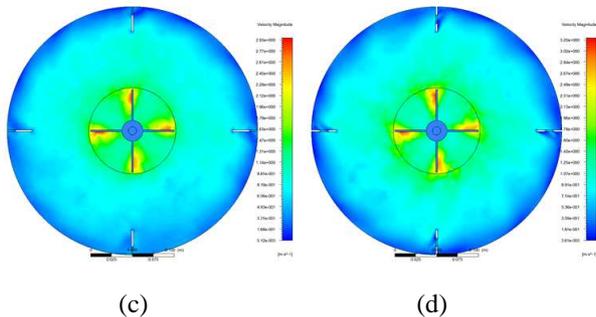


Fig. 6-2 Contours of velocity magnitude with radial flow impeller and baffle (c)(d)

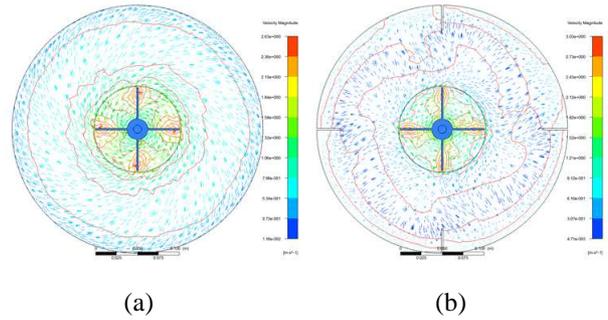


Fig. 7-1 Velocity vector field with radial flow impeller and baffle (a)(b)

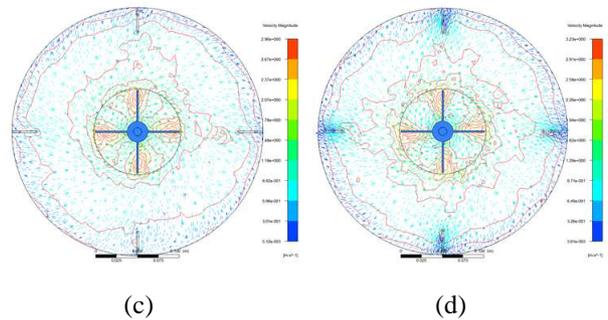


Fig. 7-2 Velocity vector field with radial flow impeller and baffle (c)(d)

Fig. 6, 7은 방사형의 임펠러를 Fig. 2에서 설명한 베플 형상 4 종류와 각각 해석을 수행하였을 때, 임펠러 블레이드의 회전운동에 영향을 가장 많이 받는 수평 단면인 xy plane(z=0)에서 Fig. 6-1, 2는 속도 크기 분포이며 Fig. 7-1, 2는 속도장을 벡터화한 결과이다.

Fig. 6과 7의 (a)는 베플을 적용하지 않았을 때 임펠러만의 회전운동에 의한 유동 경향이다. 그림에서 처럼 베플에 의한 저항이 없는 관계로 임펠러의 회전운동에 의해 토출된 유동은 와류가 전혀 없이 임펠러의 중심 x=0, y=0을 중심축으로 하여 혼합 유동 영역 전체에 고른 유동 혼합 패턴을 나타내었다.

Fig. 6과 7에서 (b)는 평판(plate)구조의 베플 형상이다. 임펠러의 회전운동에 의해 베플 근처로 도달된 유동은 순간적으로 방해받으며 저하된 속도로 베플 둘레를 통과하게 되고 다시 교반기 외벽을 따라서 차츰 상승된 속도로 이동하게 된다. 이 시뮬레이션에서의 특징은 임펠러 주변에서 유동의 속도가 가장 크고 혼합 유동장에 비해 베플을 통과하여 교반기 외벽을 따라 운동하는 유동의 속도가 좀 더 크다는 것이다.

Fig. 6, 7의 (c)는 베플 형상에 수직방향으로 직사각형의 홈을 길게 5개 절단(베플 전체 면적의 약 30 % 정도)하여 유체의 흐름이 일부는 방해를 받지만 절단된 부분을 통과하는 유체의 분산효과를 유도하기 위해 설계된 모델이다.

(d)는 형상에 수직방향으로 원형 홈 10개 가공(베플 전체 면적의 30 % 정도)하여 베플의 저항을 받은 일부 유체가 가공되어진 원형 형상을 통과하면서 혼합에 영향을 주는 특성을 분석하고자 설계되어 졌다.

(c)와 (d)의 시뮬레이션의 유동의 공통점은 임펠러 주변의 유체와 혼합 유동장의 유체의 속도의 편차가 교반기 외벽에서의 속도에 비해 적다는 것이다. 특히 (d)의 경향은 그 특징이 두드러진다.

Fig. 8-1, 2는 방사형의 임펠러를 각각의 베플 형상에 따른 속도크기 분포 및 유동 패턴 결과이다. 임펠러 블레이드의 회전운동과 베플과의 상호작용에 의한 영향을 가장 많이 받는 블레이드와 베플의 수직 단면 즉,  $zx$  plane( $y=0$ )을 슬라이스 하여 결과를 추출하였다.

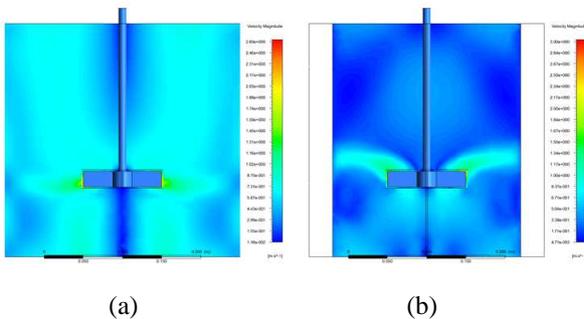


Fig. 8-1 Contours of velocity magnitude with radial flow impeller and baffle (a)(b)

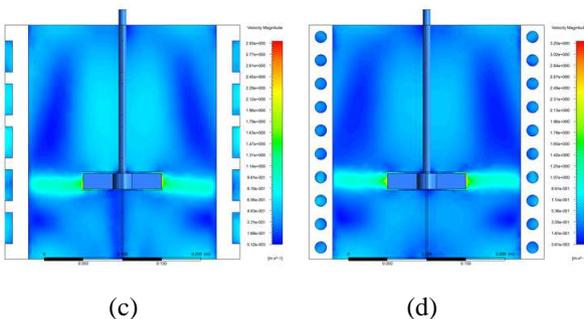


Fig. 8-2 Contours of velocity magnitude with radial flow impeller and baffle (c)(d)

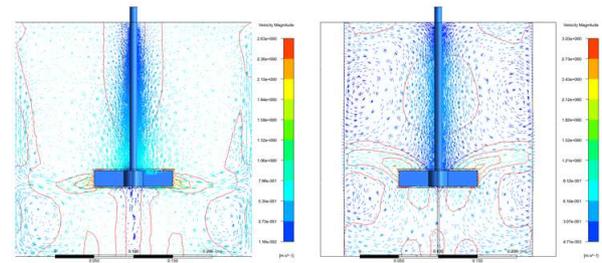


Fig. 9-1 Velocity vector field with radial flow impeller and baffle (a)(b)

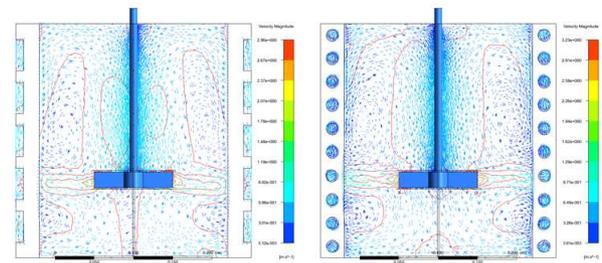


Fig. 9-2 Velocity vector field with radial flow impeller and baffle (c)(d)

Fig. 9-1, 2는 방사형의 임펠러를 Fig. 2의 (a) ~ (d) 베플을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였을 때 임펠러 블레이드와 베플의 수직 단면인  $zx$  plane( $y=0$ )에서의 속도장을 벡터화한 결과이다.

Fig. 8과 9의 (a)는 베플이 없는 경우로서 결과에서 나타난 것처럼 임펠러의 회전운동에 의한 유동은 교반기 외벽에 부딪치면서 상부로 회전하는 와류와 하부로 회전하는 두 개의 와류로 분리되는 전형적인 유동의 경향을 나타냈다. 하지만 와류에 의해 상부로 이동된 유동은 샤프트를 따라 내려가면서 혼합유동을 형성시켜야 되는데 (b), (c), (d)에 비해 상대적으로 약한 특성을 보였다.

Fig. 8과 9의 (b)는 평판 형상의 베플이 있는 경우이다. 방사형 임펠러의 수평 토출 유동으로 인해 (a)의 결과와 유사하게 임펠러를 중심으로 상부와 하부로 와류가 형성되는 경향을 보인다. 하지만 이 경우 (a), (c), (d)의 하부에서 형성되는 것보다 조금 더 큰 와류를 형성하는 것이 특징이다.

혼합 성능의 비교 검증을 위해 임의로 설계되어진

(c)와 (d)는 임펠러로부터 방사된 유동이 베플의 저항으로 인해 전체 유동의 속도 저하되지만, 가공 홈을 따라 발달한 나머지 유동은 작고 복잡한 난류를 일으키면서 다시 성장하는 유동 경향을 보였다.

(d)의 경우 상, 하부에서의 유동 모두 (c)보다, 특히 원형으로 가공된 홈 주변을 통과할 때 유동의 일부 vortex들이 혼합유동장으로 성장하면서 이동하여 혼합에 영향을 주는 분산 특성을 보였다. 교반에 있어서 분산이란 혼합에 상당한 영향을 주는 요소이다. (c), (d)의 분산 유동 특성이 (b)보다 혼합에 효율적임을 예측할 수 있었다.

Fig. 10-1, 2는 축류형의 임펠러를 Fig. 2의 베플 형상 (a) ~ (d) 적용에 따른 속도크기 분포 및 유동경향 결과이다. 축류형 임펠러의 경우 방사형 임펠러와는 달리 임펠러 상부의 유동을 흡입하여 하부로 강력하게 이동시켜 혼합을 위한 커다란 와류를 생성시키는 것이 큰 특징이다. 하부로 분사된 유동은 교반기 바닥과 접촉하면서 좌우로 이동을 하고 다시 교반기 외벽에 저항을 받아 방사형 보다 커다란 하나의 와류로 혼합유동장을 형성한다.

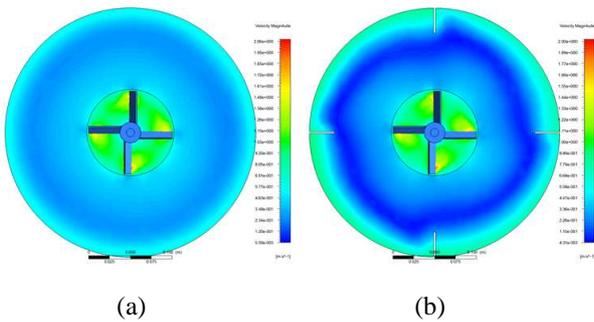


Fig. 10-1 Contours of velocity magnitude with axial flow impeller and baffle (a)(b)

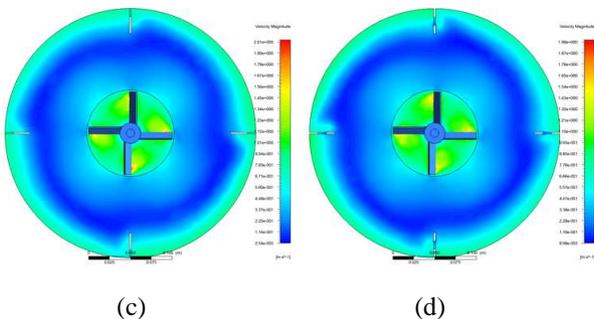


Fig. 10-2 Contours of velocity magnitude with axial flow impeller and baffle (c)(d)

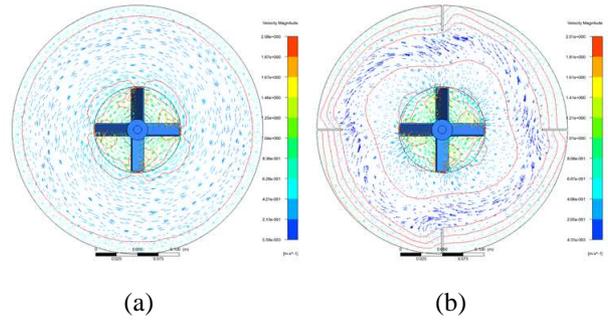


Fig. 11-1 Velocity vector field with axial flow impeller and baffle (a)(b)

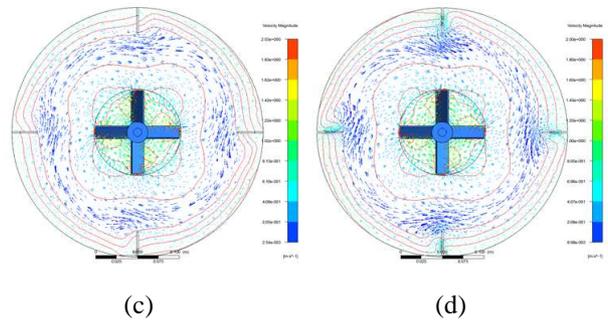


Fig. 11-2 Velocity vector field with axial flow impeller and baffle (c)(d)

Fig. 10, 11의 결과에서 나타나 있듯이 (a)의 경우 유동을 방해하는 베플이 없는 물리적인 특성으로 인해 (b), (c), (d)의 케이스에 비교하여 유동이 전체 유동장에서 편차가 없이 다소 빠르게 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 베플이 없는 방사형 임펠러에 비해서 평균유속은 20% 정도 느렸다.

축류형 임펠러를 적용한 시뮬레이션 결과 전반적인 유동패턴과 특성은 다음과 같다.

첫째, 방사형 임펠러와 비교했을 때, 회전영역 (rotational domain)에서 토출된 유동이 벽을 타고 상부로 이동하는 평균유속은 10 % 정도 느린 경향을 보였지만 다시 샤프트를 타고 상부 표면에서 하부로의 흡입 유동은 상대적으로 20% 정도 빠르게 나타났다.

둘째, 축류형 임펠러의 유동은 스크류 형태로 회전하면서 토출된다. (c), (d)의 가공된 홈을 통과하는 유체는 작고 많은 난류들을 생성시키고 생성된 난류의 대부분은 혼합 유동장으로 이동한다.

셋째, (a)는 혼합 유동장이 제대로 형성되지 않았고 (b), (c), (d)의 경우 혼합 유동장 패턴을 만들었으며 (c)의 평균 유속이 (b)보다 5 % 정도 높았다.

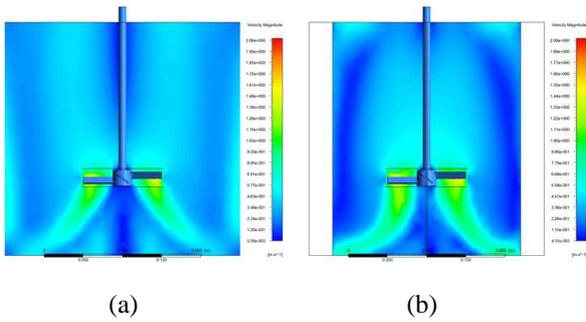


Fig. 12-1 Contours of velocity magnitude with axial flow impeller and baffle (a)(b)

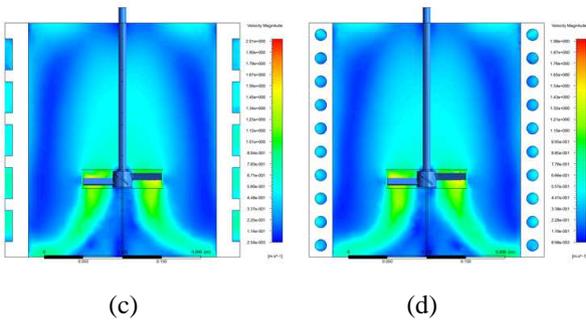


Fig. 12-2 Contours of velocity magnitude with axial flow impeller and baffle (c)(d)

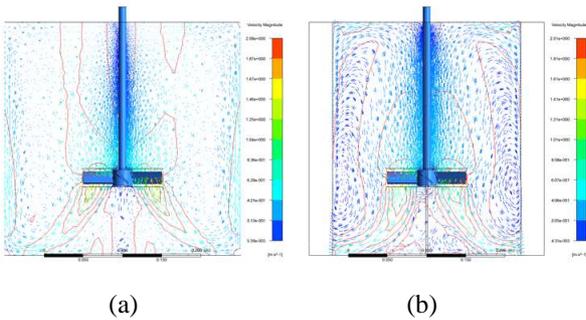


Fig. 13-1 Velocity vector field with axial flow impeller and baffle (a)(b)

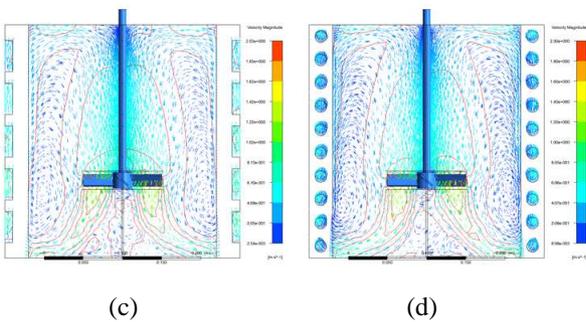


Fig. 13-2 Velocity vector field with radial flow impeller and baffle (c)(d)

Fig. 12-1, 2는 수직 단면인  $zx$  plane( $y=0$ )에서 추출한 속도크기 분포와 경향으로 축류형 임펠러를 적용한 결과이다. Fig. 13-1, 2는 속도장을 벡터화한 것으로 축류형 임펠러와 4 종류의 베플을 적용하였을 때 수직 단면  $zx$  plane( $y=0$ )에서의 결과이다.

(b), (c), (d) 세 가지 시뮬레이션의 경우, 임펠러로부터 토출되어 하부에서 스크류(꼬임)형태로 발달된 유동은 베플의 저항을 받아 유동의 경향이 바뀌거나 분리되면서 와류들을 형성시키는 것이 큰 특징이다. 또한 (b)는 (c), (d)보다 많은 유동이 베플을 타고 상부로 올라가면서 커다란 와류를 형성시켰지만 (c), (d)의 유동은 가공 홈에 의해 상승하는 부분과 가공 홈에 의해 분리되어지는 특성을 보였다.

(b), (c), (d) 유사한 유동 경향을 보였지만 (b)에서의 상승 유동의 평균 유속에 비해 10 % 정도 높았고 상부에서 샤프트를 타고 다시 임펠러로 복귀하는 유속은 10 % 정도 낮았다.

Fig. 14 ~ 17에서 임펠러의 회전 운동에 의해 발생된 유동의 수평과 수직 속도 프로파일 결과를 비교하여 유동 형태와 특성을 구체적으로 확인하였다.

Fig. 14는 방사형 임펠러 주변에서 수평으로 토출되는 유량의 속도 프로파일로서 토출유동의 특성을 비교한 것이다. (b)형상을 적용하였을 때 임펠러 주변에서의 토출속도가 가장 높으며 베플이 없는 (a)는 베플의 유동저항이 없기 때문에 용기 벽에 도달하기 전의 유동 속도가 가장 높다. 하지만 (c)모델의 경우 임펠러 토출 시부터 베플에 도달할 때까지 유동의 속도는 급격한 편차가 없다.

Fig. 15는 축류형 임펠러 주변에서 수평으로 토출되는 속도 프로파일이다. (a), (b), (c), (d) 모두 임펠러

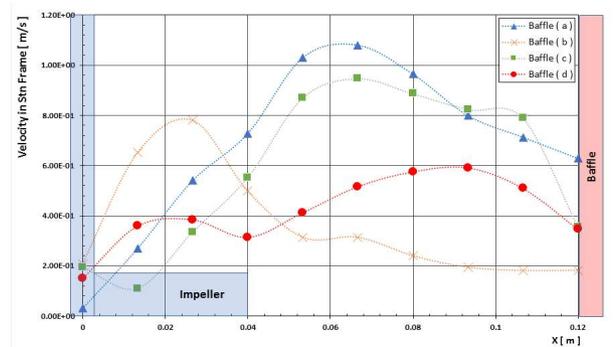


Fig. 14 Hv with radial impeller and baffles

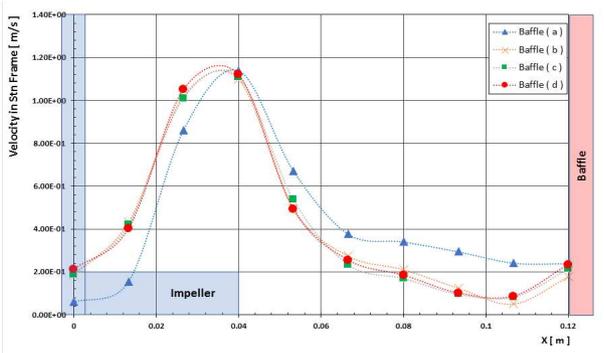


Fig. 15 Hv with axial impeller and baffles

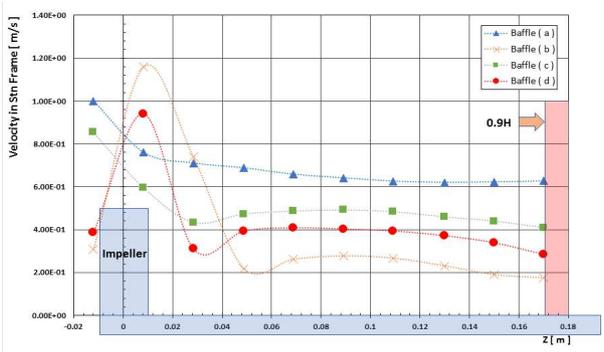


Fig. 16 Vv with radial impeller and baffles

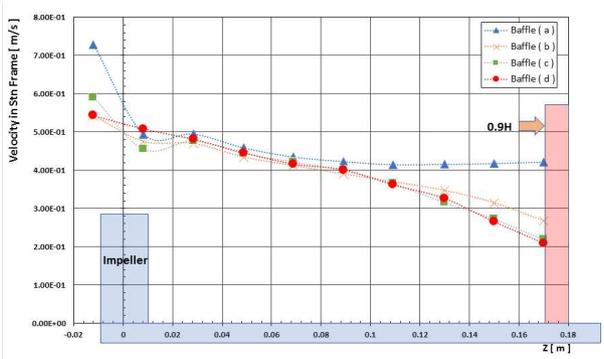


Fig. 17 Vv with axial impeller and baffles

끝단에서의 토출되는 유동의 속도가 가장 높게 나타났으며 베플에 도달하면서 점차 유사한 경사로 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 방사형 임펠러 주변에서 토출된 유동이 유체 체적의 90% 높이에 도달하기까지의 속도 프로파일 특성이다. (a)와 (c)의 경우 임펠러 하단에서 토출된 유동은 속도가 급격히 높아졌다가 완만하게 감소하는 경향을 보였으며 (b)와 (d)는 임펠러 상단에서 최대 토출특성을 보였다가 급격히 감소하여 거의 속도의 경사가 없이 상부까지 도달한다.

Fig. 17은 축류형 임펠러 주변에서 토출된 유동이 유체 체적 높이의 90%에 도달하기까지의 유동 특성이다. (a), (b), (c), (d) 네 가지 모두 임펠러 하부에서 토출되는 유동의 속도가 가장 높았으며 모두 완만한 수준으로 감소하는 경향을 보인다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 교반기 주요 설계 변수 중 하나인 베플 형상 (a), (b), (c), (d) 4 종류와 방사형과 축류형 표준 임펠러 2종이 교반 시 상호 작용에 의해 생성되는 불안정하고 비정상상태의 복잡한 유동 특성을 ANSYS FLUENT LES 난류 모델을 사용하여 수행하였다.

LES의 장점인 혼합유동장을 형성하는 대형 와류와 설계되어진 베플과 임펠러 경계에서 발생하는 작은 유동 입자들의 세밀한 거동을 분석할 수 있었으며 베플 모델에 대한 유동 경향과 특성을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 전체적으로 베플 형상에 의해 유동의 방해가 받지 않은 케이스 (a)의 경우가 부분적인 유동장에서의 상대적인 순환속도가 높았다.
- (2) 방사형 임펠러는 (b)베플의 조합에서 하부방향의 와류가 가장 크게 증대되는 유동형태가 나타났다.
- (3) 임펠러에서 토출되는 유동 속도는 축류형 임펠러보다 방사형 임펠러에서 베플의 영향이 현저하게 작용하는 경향을 보였다.
- (4) (b)는 베플에 저항을 받은 일부 유동이 베플과 용기벽 사이에 작은 와류들을 형성시켰으며 이 유동들은 더 이상 혼합유동장으로 진행하지 않았다. 하지만 (c), (d)는 혼합되지 않는 미소 와류를 형성시키지 않았다.
- (5) 베플 (b)보다 베플 (c),(d)의 형상에서 작용되어지는 가장 큰 유동특성은 분산효과이다. 설계된 베플 단면을 통과하면서 생성된 유동의 분리와 분산 효과는 혼합에 중요한 요소로서 상대적으로 혼합에 유리한 결과를 예측할 수 있었다.
- (6) 이러한 베플과 임펠러의 형상에 따른 유동양상의 분석 결과는 대형 교반기 설계에 대한 기초 자료로서 유용하게 활용되어질 것으로 사료된다.

## References

- [1] V. W. Uhl and J. B. Gray (Eds.), "Mixing: Theory and Practice," Vol. III, Academic Press, New York (1986)
- [2] S. Nagata, M. Nishicawa, A. Inoue and Y. Okamoto "Turbulence in non-baffled mixing vessel," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 8, No. 3, pp. 243-248, June 1975.
- [3] Edward, L. Paul., Victor, A. Aiemo-Obeng., and Suanne, M. Kresta., 2004, "Handbook of Industrial Mixing Science and Practice," A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [4] C. Kim, S. Yong, C. Won, and N. Hur, "Transient Simulation of Solid/Liquid Two-Phase Flow in a Stirred Tank," *Proc. of The 5<sup>th</sup> National Conference on Fluids Engineering*, Cheju, Korea, pp. 236-239, March 2008.
- [5] C. Kim, C. Won, and N. Hur, "Transient Simulation of Solid Particle Distribution with Baffles Design Parameters in a Stirred Tank," *Proc. of Conference on Korean Society for Computational Fluids Engineering*, pp. 171-175, March 2008.
- [6] Nienow, A, W., "On Impeller Circulation and Mixing Effectiveness in the Turbulent Flow Regime," *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, Issue. 15, pp. 2557-2565. 1997.
- [7] D. Kim, and K. Kim, "Computational Flow Analysis of a Large Scale Mixer for Nanopowder Dispersion in Coating Liquid," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 12, No. 3, September, 2013.
- [8] J. Cha, S. and S. Yoon, "Flow Characteristics of Agitator for Manufacturing Microcapsules," *Proc. of Korean Society for Precision Engineering*, Yeosu, Korea, pp. 507-508, Oct, 2016.
- [9] Y. Choi, J. Choi, D. Kim, and N. Hur, "A Numerical Analysis on Mixing Performance for Various Types of Turbine Impeller in a Stirred Vessel," *Korean Society for Fluid Machinery*, Vol. 16, No. 1, pp. 47-55, 2013.
- [10] M. Kim, K. Lee, and K. Park, "Analysis of Fluid Flows in a Stirred Tank Using Computational Fluid Dynamics," *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 16, No. 3, pp. 337-341, 2010.
- [11] D. Kim, S. Bae, and J. Park, "Study on the Industrial Agitator's Impeller Shape Analysis Using CFD and Reverse Engineering," *Korean Society of Computational Design and Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 359-364, 2006.
- [12] "Fluid and Gas Dispersion in Agitated Tanks," Macgraw-Hill, 1991.
- [13] ANSYS CFX Solver Manual 2009
- [14] ANSYS FLUENT/CFD Manual 2016
- [15] Yeong-Taek. Lim and Moon-sang. Kim, "Extension of Incompressible Flow Solver Algorithm to Analyze Compressible Flow field" *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 20-27, 2008