

산업용 교반기 내부 정상/비정상 유동특성해석

장재원* · 허남건**

Steady/Unsteady Flow Analysis for Industrial Mixer

J. Chang*, N. Hur**

Key Word: Steady Flow(정상상태), Unsteady Flow(비정상상태), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학), Industrial Mixer(산업용 교반기)

ABSTRACT

In the present study, steady and unsteady flow characteristics inside an industrial mixer with flat turbine type impeller are studied. For the flow analysis, STAR-CD is used with an automatic mesh generator developed in the present study. Flow results are compared to the available experimental data to show validity of the present simulation.

1. 서론

화학공업, 약품공업, 식품공업 등 산업현장에서 흔히 볼 수 있는 교반기는 두 가지 이상의 물질을 혼합하여 사용자가 원하는 물질을 만들어 주는 기계장치로써, 수십 kg의 물질부터 수십 톤까지의 물질을 혼합하는 다양한 크기를 갖고 있으며, 교반 되는 물질의 특성에 따라 임펠러의 형상 및 직경, 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. 산업용 교반기는 전동기(Motor), 임펠러, 축(Shaft), Baffle 등의 부품으로 구성되어 있으며, 교반기의 구성에 대해 Fig. 1에 나타내었다. 임펠러의 회전에 의해 발생하는 유동은 복잡한 와 구조와 함께 3차원적 유동 특성을 가진다. 최근에는 PIV(입자영상유속계)를 이용한 연구가 진행 중에 있으며, 전산유체해석기법(CFD)을 사용하여 교반기 내부의 유동을 해석하는 연구⁽¹⁾가 진행 중에 있다.

본 연구에서는 먼저 격자를 생성하는데 많은 시간이 소비되는 문제를 해결하고자 교반기 격자를 자동으로 생성하는 자동격자 생성프로그램(Auto Mesh Generator)을 제작하였다. 본 프로그램으로 생성된 격자를 사용하여 Flat Turbine Type 임펠러를 가지는 교반기에 적용하여 정상상태와 비정상상태로 해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다. 그리고 기존에 김경천과 박경현⁽²⁾이 PIV를 이용하여 측정한 실험 결과와 비교하였다. 이 경우 비정상 해석을 수행하여 정상

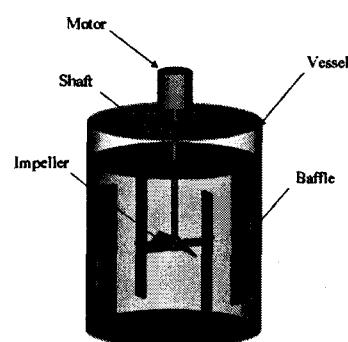


Fig. 1 Schematic Diagram of an industrial mixer

* 서강대학교 기계공학과 대학원

** 서강대학교 기계공학과

E-mail : nhur@ccs.sogang.ac.kr

상태 유동에서 명확히 예측하지 못했던 교반기 임펠러 주위의 시간에 따른 유동 발달과 같은 비정상 유동 특성을 확인하고자 한다.

2. 수치 해석

2.1 수치계산 방법 및 내용

계산 방법으로는 회전부와 정지부를 두 개의 서로 다른 영역으로 간주하여 각각 정상상태로 해석하는 방법과 이동 격자를 이용하여 실제적인 움직임을 모사하는 비정상 해석 방법이 있다. 실제 교반기의 유동은 회전하는 임펠러 때문에 비정상 상태의 유동이지만, 임펠러와 같은 속도로 회전하는 좌표계에서는 정상상태의 유동으로 간주할 수 있으므로 정상상태의 유동해석으로 박리현상 등 임펠러주위의 여러 유동현상을 해석하고 있다. 또한, 교반기 등과 같이 회전하고 있는 날개가 정지하고 있는 배플과 상대운동이 있는 경우에도 두 개의 좌표계를 각각 사용하여 날개주위의 유동 및 배플주위의 유동을 동시에 해석할 수 있다.

그러나 정상상태해석에서는 해석할 수 없는 회전부와 정지부의 상호작용을 해석하기 위해서는 반드시 비정상유동을 해석하여야 한다. 이러한 비정상 유동해석을 위해서는 시간에 따른 격자의 움직임을 모사할 수 있어야하며, 대부분 상당히 많은 계산 격자수와 아주 짧은 시간증분을 필요로 하기 때문에 대형 컴퓨터와 많은 계산 시간을 필요로 한다. 일반적인 터보기계의 설계해석에는 비정상 상태의 유동해석이 필요치 않으나, 회전부와 정지부의 상호작용에 의한 물리현상을 이해하기 위해 이러한 유동해석이 필요하다. 이와

같은 비정상 해석을 수행함으로써 정상 상태 유동에서 명확히 예측하지 못했던 교반기 임펠러 주위의 시간에 따른 유동 발달과 같은 비정상 유동 특성을 확인해 볼 수 있다.

본 연구에서는 Flat Turbine Type 임펠러를 갖는 교반기에 대해 정상, 비정상 상태를 해석하고 실험 데이터와 비교하기 위하여 김경천과 박경현⁽²⁾등이 실험에 이용한 실험 모델을 기본으로 하여 수치 해석을 수행하였으며, 교반기 전체 형상 설계도를 Fig. 2에 나타내었다. 직경(D)은 64mm이고 블레이드는 60° 간격으로 6개이며, 블레이드의 두께는 2mm이다. 혼합용기는 Baffle을 사용하지 않았으며, 직경(T)은 190mm($\approx 3D$)이며, 수면의 높이는 용기직경과 동일하게 하였다. 그리고 임펠러는 용기의 중심에 수직으로 위치하며, 임펠러의 회전 속도는 100rpm으로 하였다. 위의 내용을 바탕으로 하여 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 격자를 생성하였으며, 생성된 격자는 Fig. 3에 나타내었다. 이때 사용된 격자의 수는 192,000개이다.

정상상태해석은 MRF(Multiple Rotating Frames) Method를 사용하였다. MRF 방법은 회전에 의한 영향을 정상상태로 해석하고자 할 때 사용하는 방법으로 실제로 물체를 회전시키지 않고 실제 회전시 영향을 받는 유체격자에 Spin을 주어 계산하는 방법으로 교반기와 같이 임펠러를 자진 경우에는 임펠러와 임펠러사이의 유체격자에 Spin을 주어 계산한다. Fig. 4에는 본 연구에서 사용한 MRF격자를 나타내었으며, 안쪽에만 Spin을 주어 계산을 수행하였다.

비정상상태해석의 경우에는 ASI(Arbitrary sliding interface) 방법을 사용하여 계산을 수행하였다. ASI방법이란, 먼저 회전부와 정지부로 나누어 실제 회전부

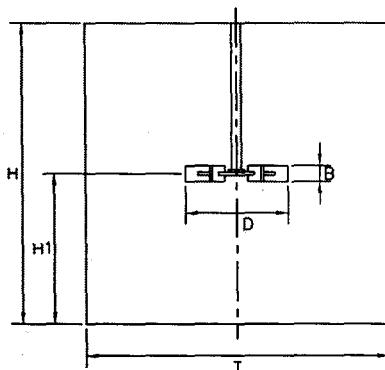


Fig. 2 Schematic of industrial Mixer

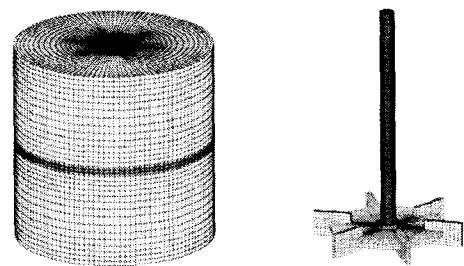


Fig. 3 Computational meshes for a mixer with flat turbine type impeller

를 회전시키면서 계산을 하는 방법이다. 그리고 회전부와 정지부의 경계부분은 Attach경계 조건을 사용하였다. Fig. 5에는 실제 계산에 사용된 격자를 나타내었으며 안쪽부분만을 회전시켜 계산을 수행하였으며, 이때 회전부와 정지부의 경계면은 임펠러의 텁과 벽면의 중간에 위치시켰다.

경계조건으로는 혼합 용기와 만나는 벽 경계 조건을 사용하였으며, 수면은 전단응력이 다른 면에 비교해 아주 작고, 입·출입이 없으므로 대칭경계조건을 사용했다. 경계조건은 Fig. 6에 나타내었다. 작동 유체로는 250K의 물을 사용하였다. 실제 작동유체는 물이 아닌 다른 유체일수 있지만 본 연구에서는 유동의 형태만을 보기 위해 물로 계산을 수행하였다. 난류 모델은 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 계산은 Star-CD를 사용하였으며, 본 연구실이 보유하고 있는 Origin 2000을 사용하였다. 계산 시간은 정상상태의 경우에는 약 14시간이, 비정상상태의 경우 한 타임스텝 당 약 5분이 소요되었다.

2.2 자동 격자 생성 프로그램

전산유체해석기법의 작업 중 격자를 생성하는 과정은 많은 시간이 소비된다. 이런 문제점을 해결하고 작업을 용이하게 하기 위해 본 연구에서는 교반기 격자를 자동으로 생성하는 프로그램을 개발하였다. 개발은 GUI환경인 Windows 2000에서 개발하여 CFD를 처음 접하는 사람도 쉽게 격자를 생성할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 사용된 Compiler는 Windows 프로그래밍에 보편적으로 사용되는 Visual C 6.0과 MFC Library를 사용하였다.

본 프로그램은 크게 두 개의 부분으로 구성되어 있으며, Fig. 7에는 본 프로그램을 나타내었다. 왼쪽 화면은 임펠러에 관한 것을, 오른쪽 화면에는 혼합 용기에 관한 설정을 할 수 있도록 하였다. 교반기에 사용되는 임펠러로는 Flat Paddle, Pitched Paddle, Pitched Turbine, Helical Ribbon, Anchor Paddle등이 있으며, 본 프로그램에서는 Flat Paddle, Pitched Paddle, Flat Turbine, Pitched Turbine 4가지 임펠러 형상을 지원한다. Fig. 8에는 사용 가능한 임펠러 형상을 나타내었다. 혼합 용기에 관한 설정에서는 Baffle을 지원하고 있다. 프로그램의 사용 방법은 먼저 본 프로그램을 실행시키면 Fig. 7과 같은 화면을

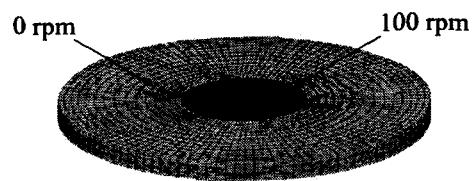


Fig. 4 Multiple Rotating Frame Method showing two regions with different rotational speed.

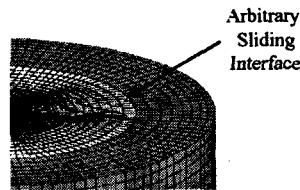


Fig. 5 ASI(Arbitrary sliding interface) Method showing interfaces where mesh sliding is taking place between two regions.

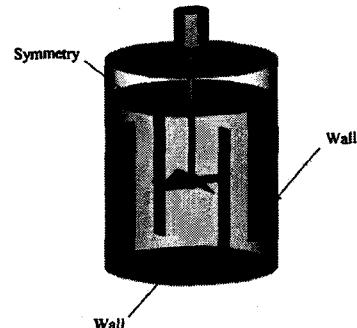


Fig. 6 Boundary Conditions for a mixer

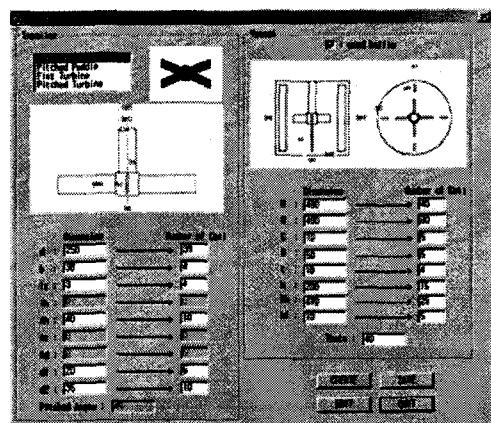


Fig. 7 Automatic Mesh Generator for a Mixer

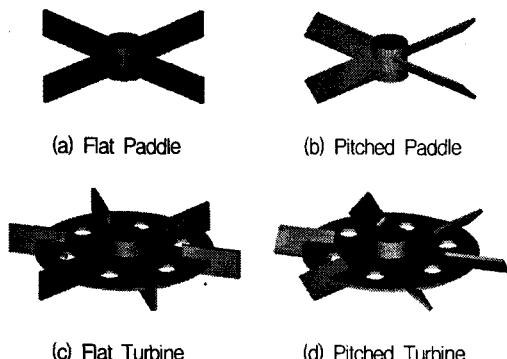


Fig. 8 Impeller Type

볼 수 있다. 여기서 먼저 임펠러의 종류를 선택하면 아래쪽의 치수와 격자 개수의 입력 창이 활성화된다. 이곳에 생성하고자 하는 임펠러의 치수를 입력한 후 사용하고자 하는 격자의 개수를 입력한다. 다음 혼합용기에서는 먼저 Baffle의 사용 여부를 결정한 후 임펠러와 마찬가지로 치수와 사용할 격자의 개수를 입력한다. 마지막으로 “Create”를 누르면 교반기 격자를 생성하기 위한 명령이 생성되게 되는데, 이것을 Star-CD 나 본 연구실에서 개발 중인 Pre-Turbo에 입력 파일로 넘겨주어 격자를 생성하도록 프로그램을 개발하였다. Fig. 4에는 실제로 본 프로그램을 사용하여 제작한 교반기 격자를 나타내었다.

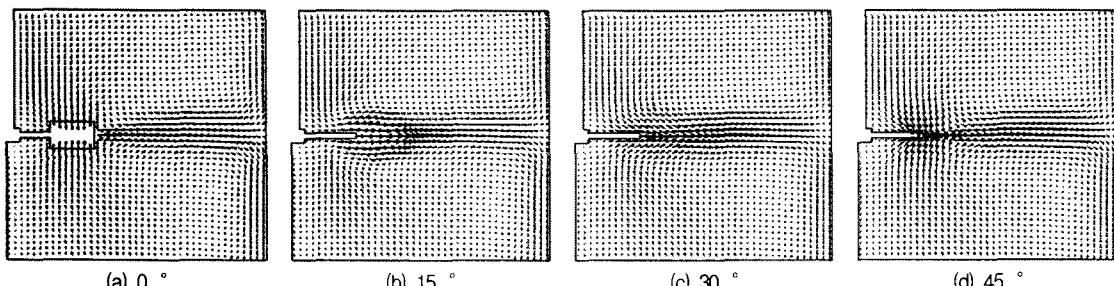


Fig. 9 Velocity vector obtained for steady analysis

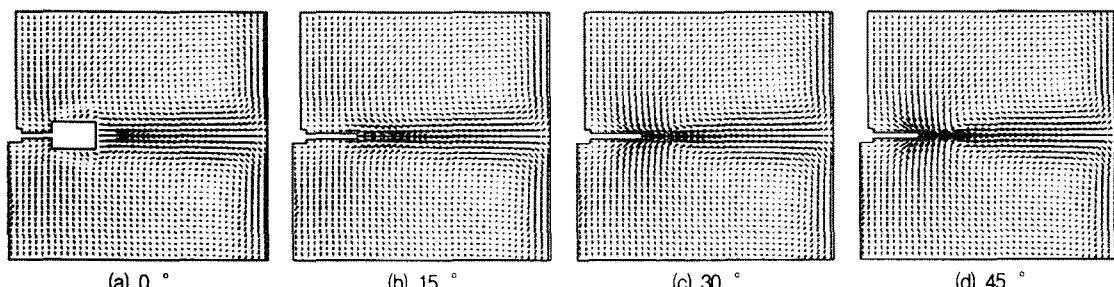


Fig. 10 Velocity vector obtained for steady results of transient analysis

3. 결과 및 토의

3.1 정상상태와 비정상상태의 비교

본 연구에서는 먼저 정상상태의 해석결과와 비정상상태의 해석결과를 비교하였다. Fig. 9에는 정상상태 일 때의 속도벡터를 나타내었다. 임펠러와 임펠러사이의 유동 형태를 보기 위해 임펠러를 기준으로 하여 (a)는 θ 방향으로 0° 일 때를, 나머지 (b), (c), (d)에는 θ 방향으로 15° 씩 증가시키면서 나타내었다. 전체적으로 모든 그림에서 기본적인 유동 형태는 임펠러 텁 부분에서 분출된 유동이 벽면까지 발달된 후, 벽면에서 위쪽과 아래쪽으로 나누어진다. 이렇게 나누어진 유동은 다시 축으로 흡입되어, 임펠러의 위쪽과 아래쪽으로 흡입된다. 이런 유동의 형태에 의해 임펠러의 위쪽과 아래쪽에서 대칭적인 형태의 와류를 볼 수 있으며, 이때 와류의 중심 또한 이 임펠러를 중심으로 위쪽과 아래쪽에 대칭적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 임펠러 주의의 유동은 (c)를 기준으로 하여 (b)의 경우에는 임펠러의 회전 방향의 앞에 있기 때문에 임펠러의 회전에 의해 발생되는 θ 방향의 유동 때문에 임펠러의 부분에서 속도벡터들이 분출되는 형태를 볼 수 있으며, (d)는 (b)와는 반대로 임펠러의 회전 방향에 뒤쪽에 위치하기 때문에 임펠러의 후류 영향에 의

해 흡입되는 형태를 볼 수 있다. (c)는 중간단계의 형태를 나타내고 있다. 이때 각각이 와류의 중심은 거의 일정한 위치에서 발생되었다. 임펠러 텁에서의 속도는 0.3606m/s가 계산되었다.

Fig. 10에는 비정상상태일 때의 속도벡터를 나타내었다. 정상상태와 비교하기 위해 정상상태와 같이 나타내었다. 시간은 3초일 때이다. 기본적인 유동 형태는 정상상태와 비슷하게 나타나고 있다. 하지만 (a)의 경우 임펠러의 주위에서 정상상태의 해석에서는 위쪽과 아래쪽에서 유입되는 유동의 형태로 나타나는 반면, 비정상상태의 경우에는 유입과 분출되는 형태가 같이 나타나고 있는데, 이것은 해석방법의 차이 때문에 발생하였다.

3.2 실험 결과의 비교

본 수치해석과 비교대상이 된 김경천과 박경현⁽²⁾의 PIV를 이용하여 측정한 실험 결과를 Fig. 11 오른쪽에 나타내었다. 수치해석 결과는 원쪽에 나타내었다. 실험에서는 Cinematic PIV 기법을 사용하여 얻어진 속도장으로 0.04초 간격으로 촬영되었다. (a)와 (b)에서는 임펠러로부터 텁 와류가 형성되고 반경 방향으로 제트가 분출된다. 그리고 임펠러의 상·하 면으로부터 유체의 강한 유입이 발생되면서 텁 와류가 밀려나게 된다. 수치해석을 통한 결과는 실험과 마찬가지로 시

간이 지남에 따라 텁 와류가 형성되고 반경 방향으로 제트가 분출되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 대류의 영향으로 와류는 점차적으로 반경 방향으로 밀려나게 된다. 실험결과 와류의 위치에는 차이가 있으나, 와류의 쌍이 밀려나는 현상이 정성적으로 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 시간에 따른 유동변화 양상은 정상해석을 통해서는 알 수 없는 결과이며 이를 통해 임펠러를 작동하기 위한 초기 토크나 전체적으로 물질들이 고르게 교반 되는 시간들을 예측 할 수 있으므로 좀더 효과적인 해석 방법이 될 수 있다. 하지만 많은 계산 시간을 요하게 되는 단점을 지니고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 교반기에 전산유체해석기법을 용이하게 적용하기 위한 교반기 격자를 자동으로 생성하는 자동 격자 생성 프로그램을 개발하였으며, 본 프로그램으로 생성된 Flat Turbine Type의 임펠러를 가지는 교반기 격자를 사용하여 내부 유동에 대해 정상해석과 비정상해석을 통해 각각의 유성 특성을 알아보았다. Flat Turbine Type에 대한 비정상 해석을 실험결과와 비교하여 교반 특성에 중요한 영향을 미치는 와류의 빨달 양상에 대해 정성적으로 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

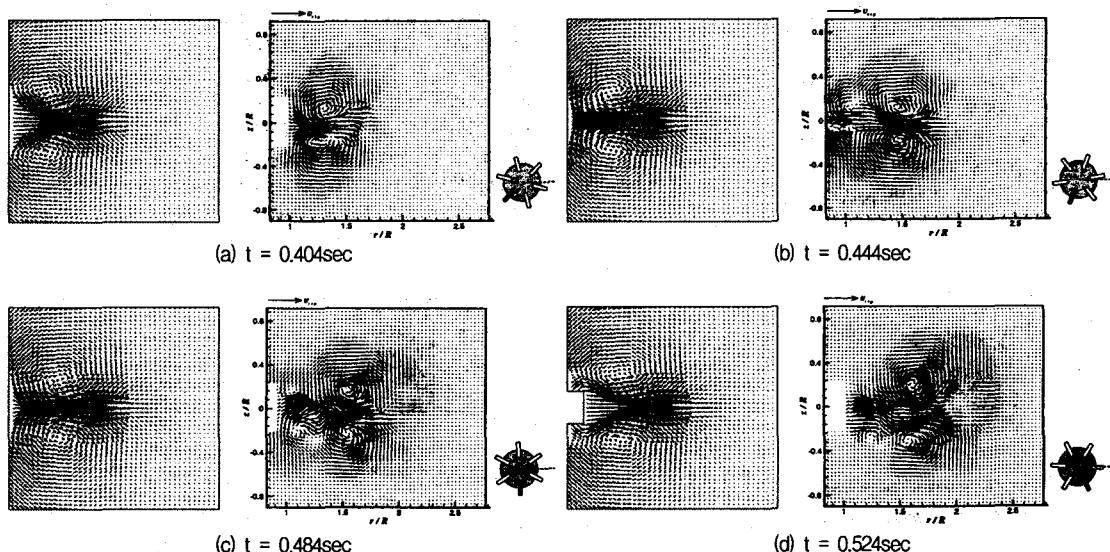


Fig. 11 Instantaneous velocity fields(0.404~0.524 sec)

후기

본 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) 장재원, 허남건, 2000, “45° Pitched Paddle 형 교반기 내부의 유동 해석,” 한국전산유체공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp.109-114
- (2) 김경천, 박경현, 2000, “고분해능 Cinematic PIV 시스템의 개발과 비정상 복잡 난류유동측정에의 응용,” 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집 E, pp.536-541
- (3) 山本一夫, 西野 宏, 1992, “攪拌技術”
- (4) Torrez, C. & Andre, C. 1998, “Power Consumption of a Rushton Turbine Mixing Viscous Newtonian and Shear-thinning Fluids : Comparison between Experimental and Numerical Results,” Chem. Eng. Tech., pp.599-604.
- (5) Torrez, C. & Andre, C., 1999, “Simulation of a Rushton Turbine Mixing Yield Stress Fluid : Application of the Metzner-Otto Concept,” Chem. Eng. Technol, pp.701-706.
- (6) Kresta, S.M. & Wood, P.E, 1993, “The mean flow field produced by a 45° pitched blade turbine : changes in the circulation pattern due to off bottom clearance,” The Canadian Journal of Chem. Eng., pp.42-53.
- (7) Kevin, J.B. & Suzanne, M.K., 2000, “Active Volume of mean circulation for stirred tanks agitated with axial Impellers,” Chem. Eng. Science., pp.1325-1335.
- (8) Costes, J. & Couderc, J.P., 2000, “Study by laser doppler anemometry of the turbulent flow induced by a rushton turbine in a stirred tank : influence of the size of the units - I. mean flow and turbulence,” Chem. Eng. Science, pp.2751-2764.
- (9) Lamberto, D.J. & Alvarez, M.M., 1999, “Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank,” Chem. Eng. Science., pp.919-942.
- (10) 김경천, 김상기, 2000, “회전교반기 내부의 유동 특성,” 대한기계학회 2000년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp.80-90.