

스크류형 임펠러에 의한 고점도 유체의 혼합

허성규[†], 서용권^{*}

Mixing of Highly Viscous Fluid by Using a Screw-Type Impeller

Seong Gyu Heo, Yong Kweon Suh

Abstract

본 연구는 고점도 유체의 혼합을 위한 교반기 설계의 기초연구로서 스크류 형상의 임펠러(또는 헬리컬 임펠러)를 가지는 교반기 내의 유동과 이에 따른 유체혼합 특성을 수치해석을 통해 가시화한 것이다. 이와 더불어 양호한 혼합효과를 가져다 줄 것으로 예상되는 엇갈림형 스크류 임펠러의 모델을 제안하였다. 수치해석상의 유체는 고점도의 Newton유체로 가정하였으며 임펠러의 회전속도는 6[rpm]으로 아주 작게 하여 저 레이놀즈수(약 $Re=3$)에서 혼합효과를 연구하였다. 또한 각종 설계 파라미터를 변화시켜 혼합 양상의 차이를 분석하여 설계에 반영하고자 하였다.

Key Words : Screw Impeller(엇갈림형 스크류 임펠러), Chaotic Stirring(혼돈적 교반), Mixing Characteristics(혼합특성)

1. 서 론

유체유동을 이용한 혼합의 문제는 산업 전반에 걸쳐 다양하게 적용되고 있으며 공학적으로도 매우 중요하다. 그러한 혼합을 위한 교반장치는 식품공업, 생화학공업, 금속공업, 수처리 및 환경관련 공정 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 혼합되는 물질의 특성에 따라 많은 종류의 임펠러와 교반조가 사용되고 있다.

유체혼합을 위한 교반조의 장치설계는 레이놀즈 수의 크기에 따라 판이하게 다르다. 고 레이놀즈 수의 경우에는 주로 교반기 내에서 국부적으로 와류를 생성시키고 이들의 시간적 변동을 이용한 메커니즘이 이용된다. 그러나 저 레이놀즈 수의 경우에는 와류유출(vortex shedding) 같은 현상을 기대할 수 없어 근본적으로 혼합이 잘 되지 않는 문제가 있어 그 만큼 혼합기 설계의 어려움을 내포하고 있다.

고 레이놀즈 수 유동에서의 혼합특성을 연구한 수치해석적 성과를 보면, 황과 김¹⁾은 드래프트관이 장착된 헬리컬 스크류 형상의 교반기에 대한 수치해석을 통해 유동 및 혼합을 연구하였고 하와 윤²⁾등은 대형 와 모사법을 사용하여 혼합탱크 내의 유동장 및 농도장을 동시에 해석한 바 있다. 또한 김³⁾등은 교반기 내에 다상 물질과 다

[†] 동아대학교 대학원

^{*} 동아대학교 기계공학부

E-mail : yksuh@dau.ac.kr

중 물질이 섞여있을 때 임펠러의 설치위치가 혼합과 열전달에 미치는 영향을 연구하였다.

저 레이놀즈 수 유동의 경우에는 혼돈적 교반을 이용하여 혼합효과를 정량적으로 분석하는 사례가 늘어나고 있는 추세이다. 서 등⁴⁾은 압출용 스크류의 2차원 모델에 대한 연구를 통해 스크류 채널의 깊이를 크게 하여도 탁월한 혼합효과를 기대할 수 있는 새로운 설계형태 즉 엇갈림형 스크류(staggered screw)를 제안하였으며, 혼돈동역학의 도구들을 적용함으로써 혼합효과를 정량화 할 수 있는 방법을 제안하였다. Hwang 등⁵⁾은 스크류 채널 내에 플라이트들을 주기적으로 배열하는 설계구조를 제안하고 그 혼합효과를 혼돈동역학의 개념을 영두에 둔 실험/수치해석 방법에 의해 분석하였다. 혼돈적 교반에 관한 기본원리와 연구사례 등은 Ottino⁶⁾와 서⁷⁾의 연구에 잘 나와 있다.

이에 본 연구에서는 압출기용 엇갈림형 스크류 모델에서 착안하여 이를 교반기 내 임펠러의 형상에 적용하고, 수치해석을 통해 그 결과를 확인함으로써 스크류 교반기의 설계에 있어서의 기초자료로 삼하고자 한다.

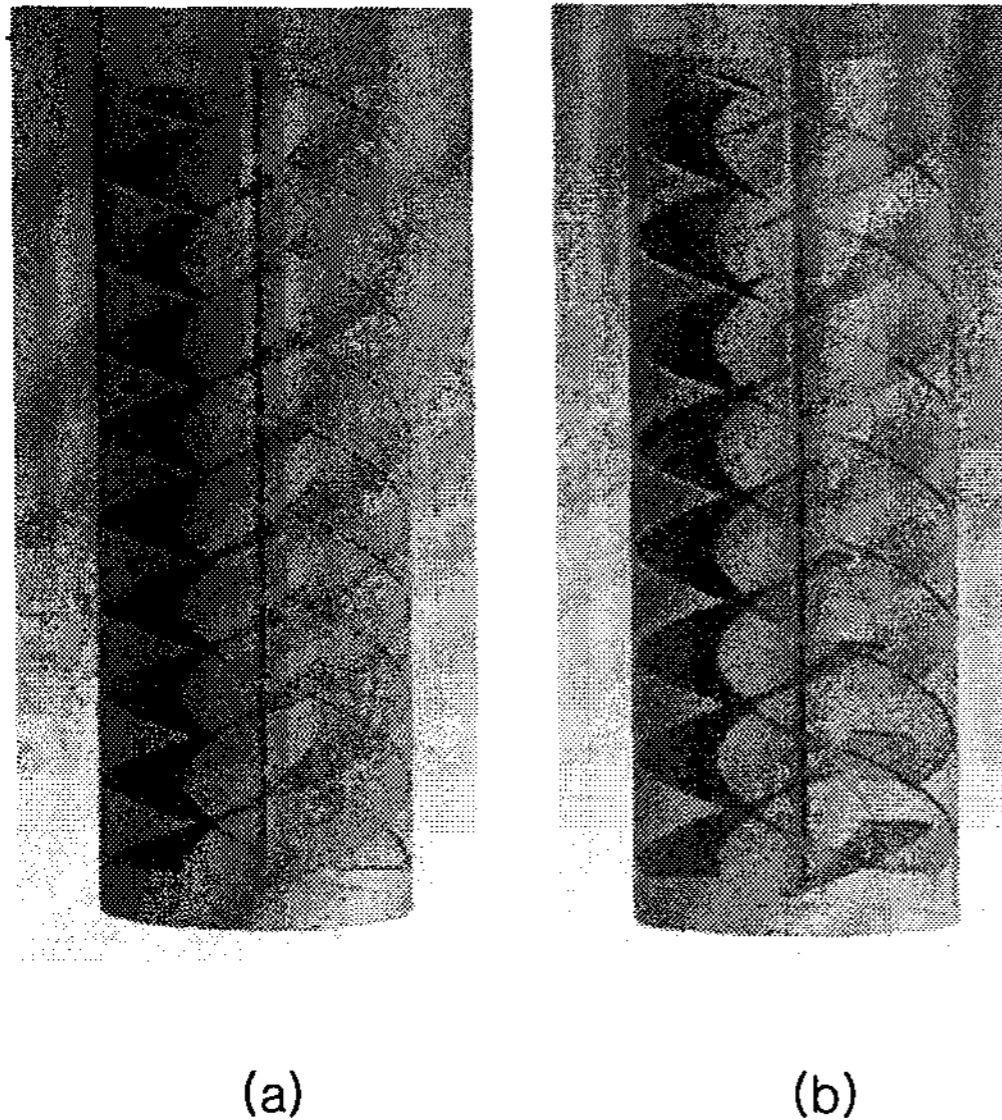


Fig. 1 The shape of screw impellers: (a) non-staggered type, (b) staggered type

2. 유동모델 및 수치해석 방법

2.1 유동모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 교반기의 3차원 형상을 나타낸 것이다. 높이가 2200[mm]인 원통의탱크 내에 외경이 800[mm]이고 내경이 400[mm]이며 높이가 2000[mm]인 스크류 모양의 임펠러가 설치되어 있다. 원통의 내경은 기본적으로 820이며, 스크류와의 간격 조정 시 변동하도록 하였다. Fig. 1(a)의 경우는 4개의 날개가 90도 간격으로 위치하여 일정한 날개사이의 틈을 이루며 휘감겨 내려오는 단순한 형상이고 Fig. 1(b)는 엇갈림형 스크류 교반기로서 7개의 임펠러의 날개가 계속해서 연결되지 않고 일정한 교대로 제거됨으로써 엇갈리게 배치되어 있는 형태이다.

Fig. 2는 엇갈림형 스크류 임펠러를 2차원으로 펼친 개략도이다. 여기서 직경 D 는 스크류의 외경이고 ϕ 는 스크류 날개가 원주방향과 이루는 각이다. 본 연구에서는 원주를 7등분으로 나누어 날개가 엇갈리게 하였으나 일반적으로 날개의 개수를 N 개로 하면 엇갈림 형상에서 날개와 날개사이의 각은 $4\pi/N$ 이 된다. 또한 날개와 날개사이의 수직거리 \overline{AC} 는

$$\overline{AC} = \frac{2\pi D}{N} \sin\phi \quad (1)$$

이고, 날개와 날개사이의 높이 차인 \overline{AB} 는

$$\overline{AB} = \frac{\pi D}{N} \sin 2\phi \quad (2)$$

이다. 스크류 날개 한 개의 원주방향 길이 \overline{ED} 는

$$\overline{ED} = \pi D \cos^2 \phi \quad (3)$$

이며 플라이트 한 개의 수직높이 \overline{AD} 는

$$\overline{AD} = \frac{\pi D}{2} \sin 2\phi \quad (4)$$

가 된다.

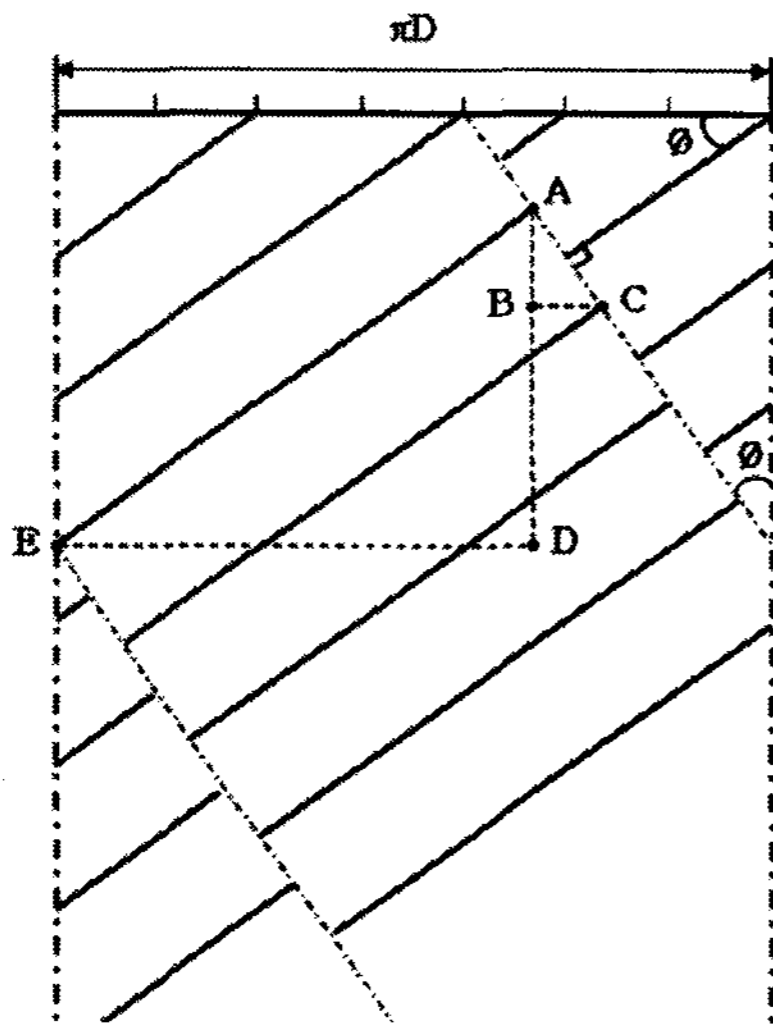


Fig. 2 Spreaded view of the staggered screw blade.

2.2 수치해석 방법

교반기내 유체는 밀도가 $1500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 이고 점성계수 μ 가 $100 \text{ [Pa}\cdot\text{s]}$ 인 뉴턴유체로 채워져 있다고 가정하였다. 임펠러의 회전속도는 6 [rpm] 로 위에서 보았을 때 시계방향으로 회전하며 상단의 표면은 평탄하며 free slip조건이 타당한 것으로 가정하였다. 그 외의 벽면에는 no slip조건을 부여하였다. 격자계의 크기는 노드 수가 약 50만개이고 요소수는 170만개이다

이때, 대표길이를 임펠러 날개의 외경인 800 [mm] 로 하고 대표속도를 날개 끝의 선속도인 0.25 [m/s] 로 하였을 때 레이놀즈수는 30이다.

3. 결과 및 검토

다음은 본 연구에서 얻는 수치해석 결과이다. 일반적인 스크류 교반기(Fig. 1(a))와 엇갈림형 스크류 교반기(Fig. 1(b))의 유동패턴은 거의 일치하므로 여기서는 엇갈림형 스크류 교반기의 결과만으로 유동특성을 분석하기로 하겠다.

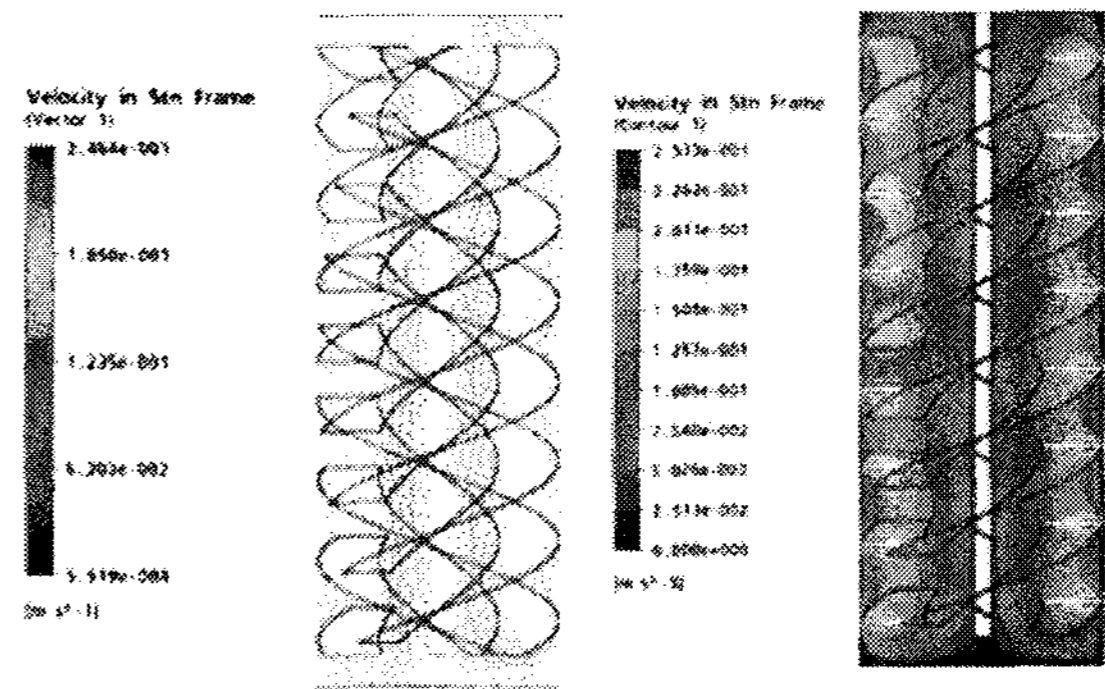


Fig. 3 Distributions of the velocity vector(left) and contour(right) at the vertical plane, for the staggered-screw mixer.

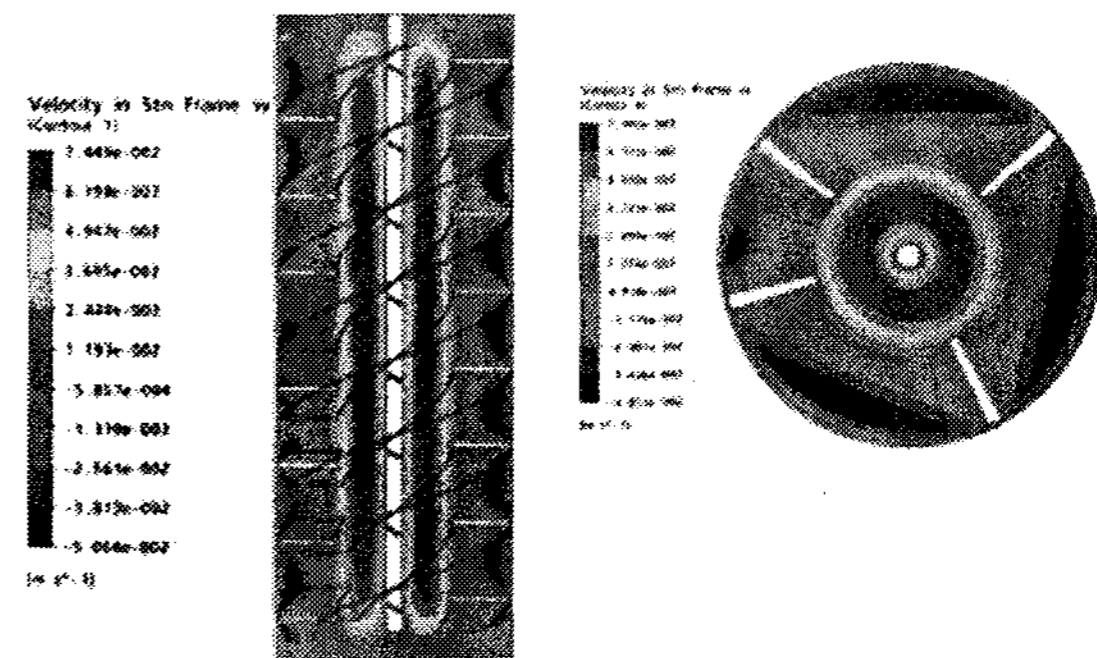


Fig. 4 Contour of the vertical-velocity component w at the horizontal and vertical planes for the staggered-screw mixer.

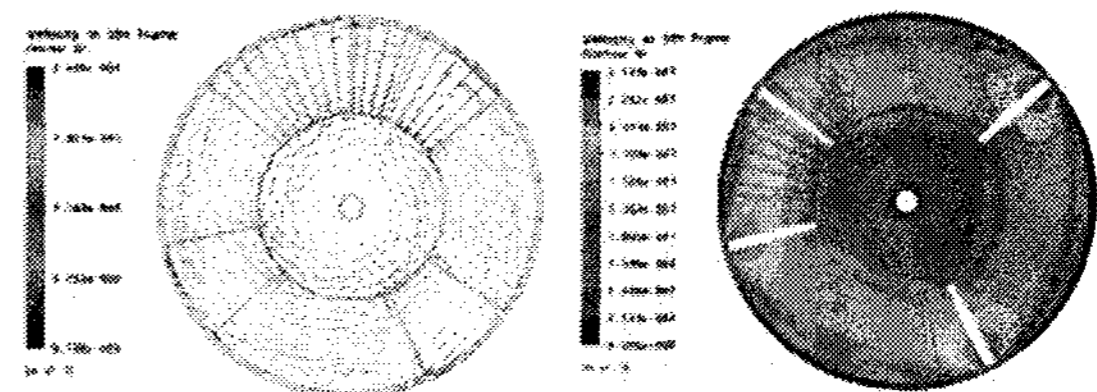
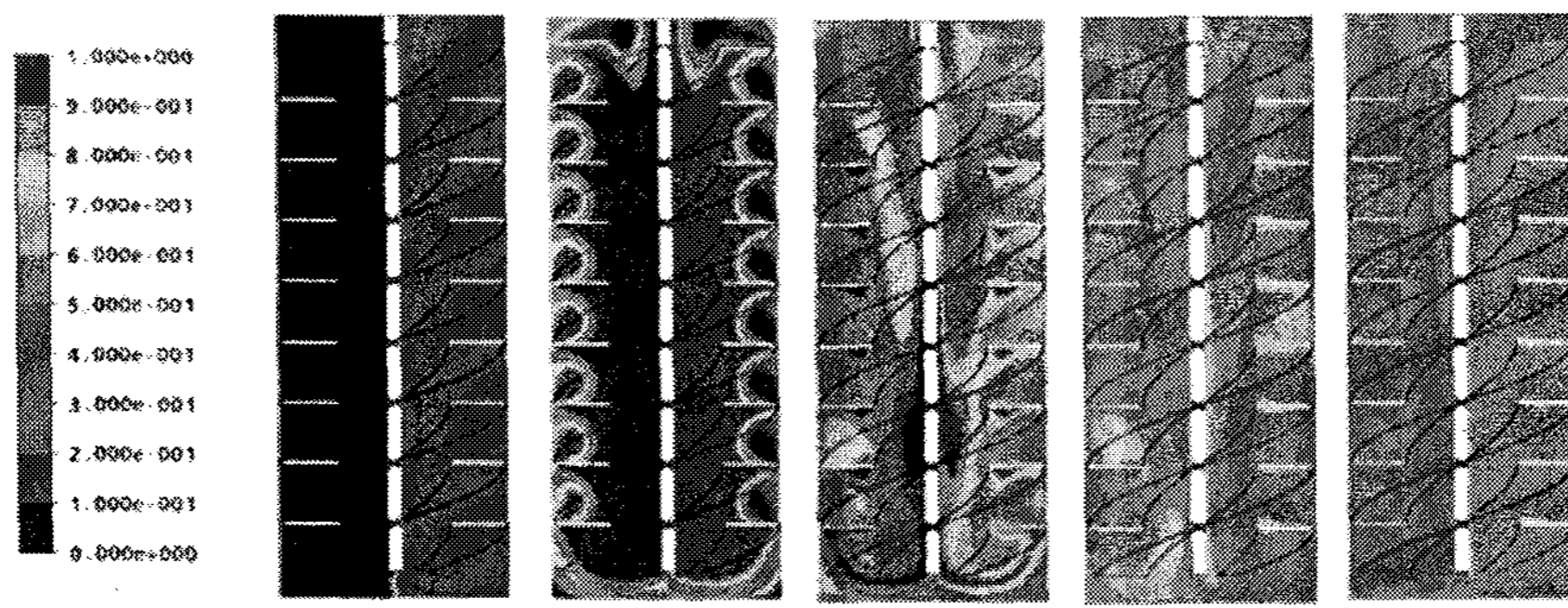
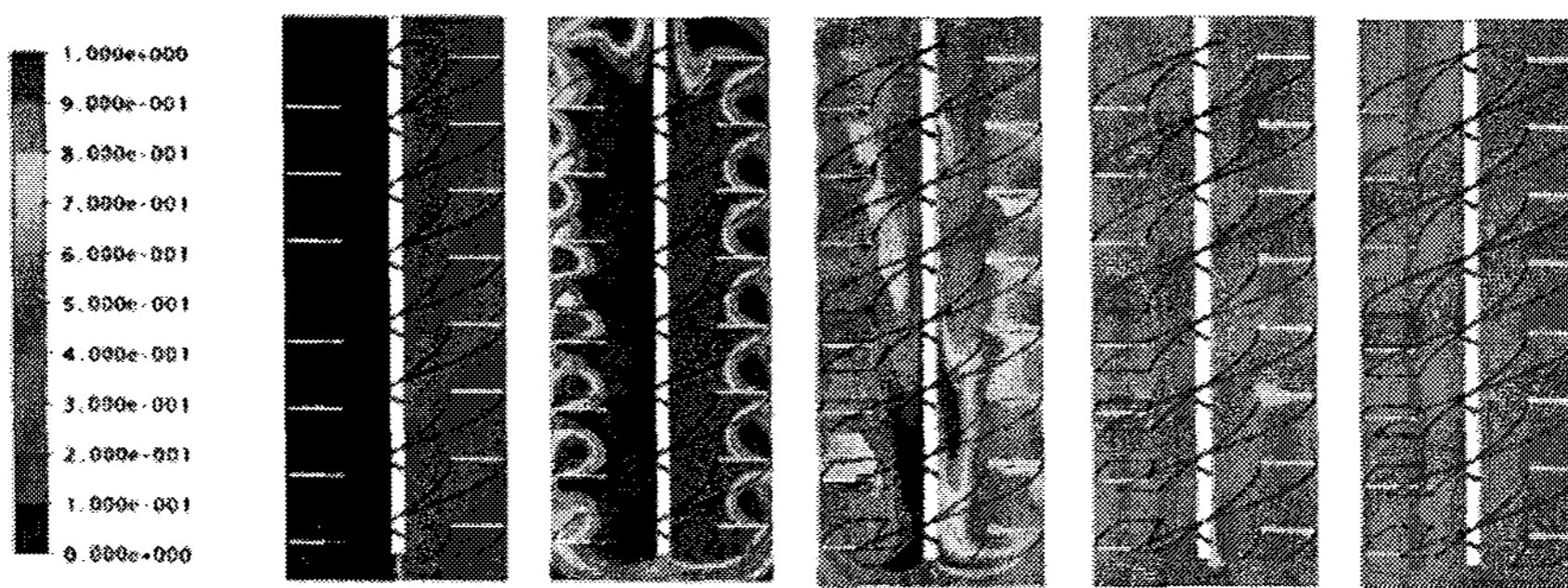


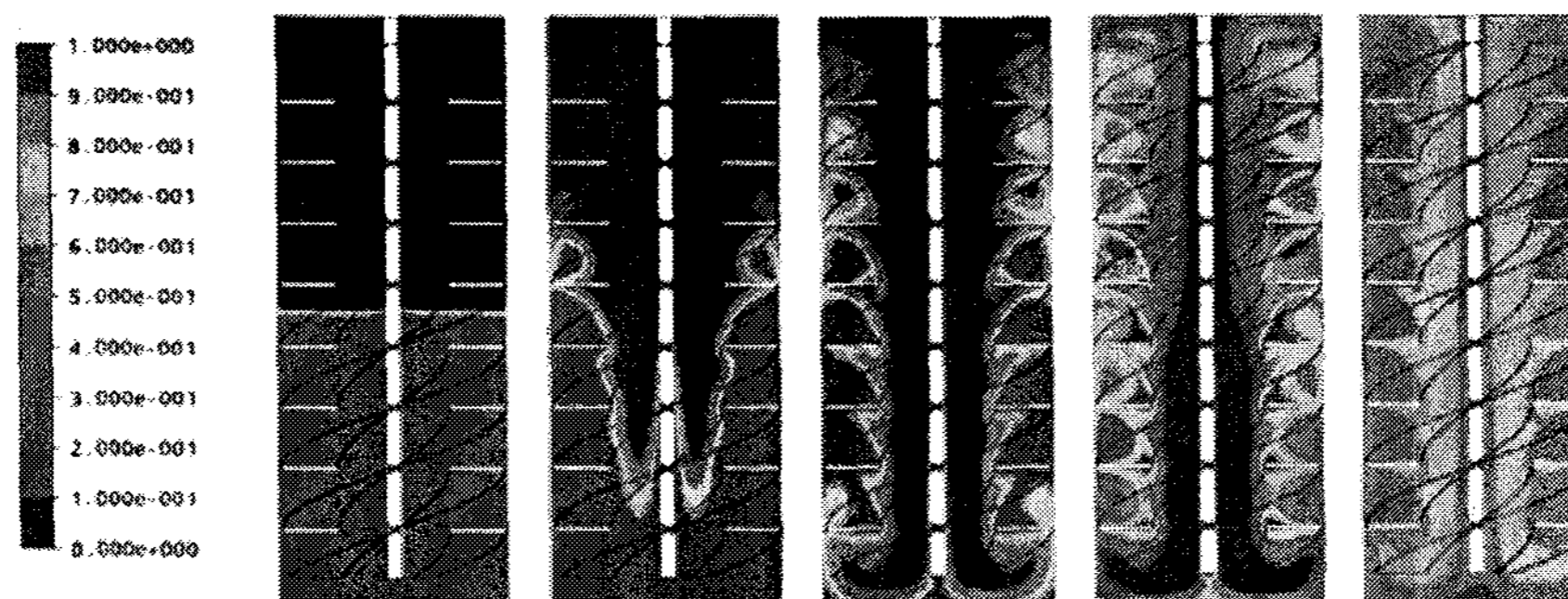
Fig. 5 Velocity vector distribution and velocity contour at the horizontal plane for the staggered-screw mixer.



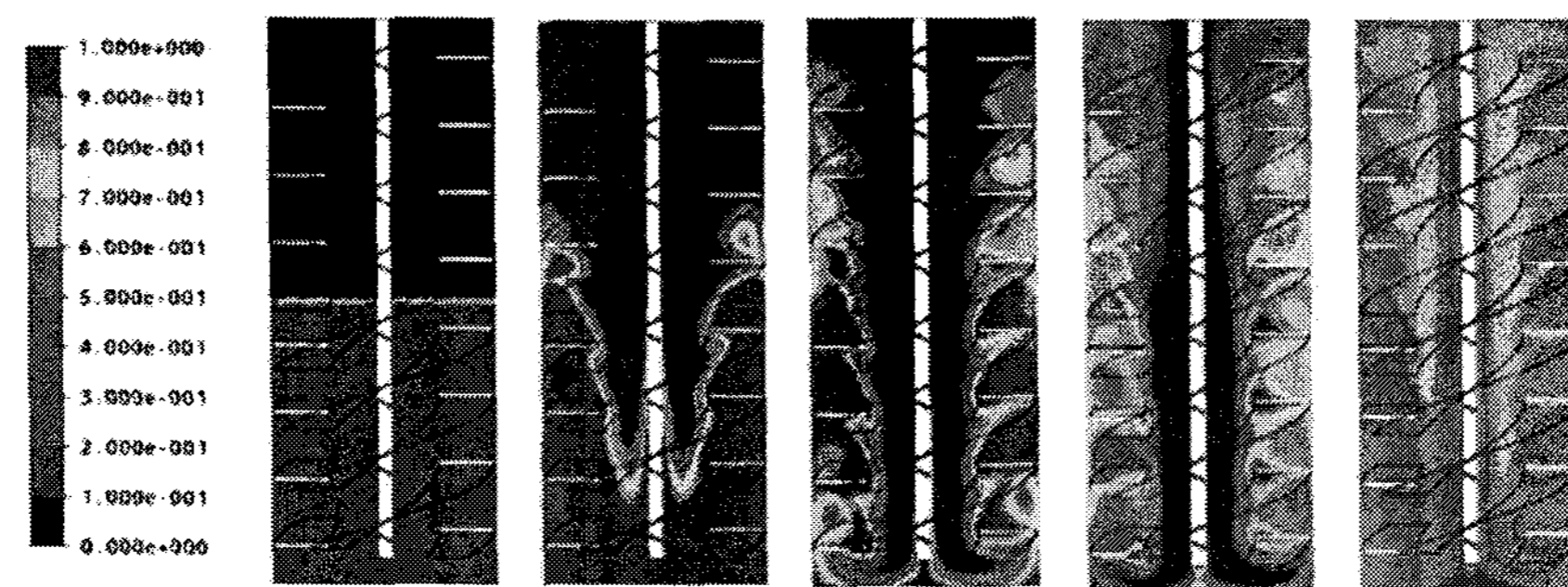
(a) non-staggered-screw mixer



(b) non-staggered-screw mixer



(c) non-staggered-screw mixer



(d) staggered-screw mixer

Fig. 6 Development of the Concentration distributions at the vertical plane for non-staggered (a), (c) and staggered (b), (d) cases. Initially concentrations are horizontally separated for (a) and (b) and vertically for (c) and (d). (time=0s,10s,30s,50s,100s)

Fig. 3은 엇갈림형 스크류 교반기내 수직단면에서의 유동을 속도 벡터(Fig. 3(a))와 등고선(Fig. 3(b))으로 나타낸 것이다. 전체적인 흐름은 축방향 회전이 강하나 스크류 날개와 벽면 사이의 상대운동에 의해 원통 측면 벽 근처 유체는 상부로 이송되며 원통의 중심에서는 하강하는 2차유동이 형성되고, 이 유동이 혼합효과 증진에 핵심 역할을 한다. Fig. 4는 축방향의 속도분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 수직 단면에서 나타낸 것이고 Fig. 4(b)는 수평단면에서 나타낸 것이다. 수치해석상의 교반기의 $\phi = 20^\circ$ 이므로 축 방향 속도는 회전속도의 $\sin 20^\circ$ 인 $0.085[m/s]$ 에 가깝다. Fig. 5는 수평 중심단면에서의 속도 벡터(Fig. 5(a))와 속도 크기 분포(Fig. 5(b))를 나타낸 것이다. 임펠러 날개 주위의 유체는 날개에 의해 빠르게 회전하는 반면 원통중심과 벽면주위의 일부 유체는 회전속도가 느린 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 농도장 분포를 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 원통의 수직단면을 경계로 농도가 1과 0인 유체가 섞이는 것이고 (c)와 (d)는 초기 농도분포가 수평 단면을 경계로 나뉜 형태이다. 그리고 (a)와 (c)는 표준 스크류 임펠러의 경우, (b)와 (D)는 엇갈림형 스크류 임펠러의 경우를 나타낸 것이다. 초기 농도분포가 수평단면을 경계로 나뉜 경우보다 수직 단면을 경계로 나뉜 경우가 더 혼합이 잘 되는 것을 알 수 있다. 이는 원주방향으로의 회전 속도가 축 방향 속도보다 상대적으로 크기 때문으로 예측된다. 또한 두 가지 임펠러의 형태가 혼합 양상은 거의 일치하나 표준 스크류 임펠러 형태에서는 축을 중심으로 대칭적으로 나타나는 반면 엇갈림형 스크류 임펠러의 경우는 다소 비대칭적인 형태를 나타낸다. 한편, 임펠러의 형태에 따라 농도장의 분포가 크게 다르지 않은 것은 수치해석 상의 확산계수가 $10^{-10}[m^2/s]$ 으로 다소 큰 영향이라 추측되며 보다 낮은 확산계수에 대한 추가 연구가 필요하다고 생각된다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수

행된 연구임(과제번호: 2005-01091)

참 고 문 헌

- 1) J. Hwang, Y. Kim, 2007, "Flow and Mixing Characteristics in an Agitator with a Draught Tube", *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 10, No. 1, pp.56 ~ 63.
- 2) H. Yoon, M. Ha, H. Chun, 2003, "Simultaneous Analysis of Concentration and Flow Fields in a Stirred Tank Using Large Eddy Simulation", *J. Mech. Sci. Tech(B)*, Vol. 27, No. 9, pp.1282 ~ 1289.
- 3) I.S. Kim, H.S. Song, S.P. Han, 2005, "The Effects of Impeller Configuration on Mixing and Heat Transfer in a Stirred Tank with a Helical Cooling Coil", *Proc. KSCFE Autumn Conference*, pp.55 ~ 59.
- 4) 서용권, 김용균, 문종춘, 1997, "압출용 스크류 모델에서의 혼돈적 교반", *대한기계학회논문집*, Vol.21, No 12, pp. 1615 ~ 1623.
- 5) Hwang, W.R., Jun, H.S. and Kwon, T.H., 2002, "Experiment on Chaotic Mixing in a Single Screw Channel", *AIChE J.*, Vol. 48, No. 8, pp. 1621 ~ 1630.
- 6) Ottino, J. M., 1990, "Mixing, Chaotic Advection, and Turbulence," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 22, pp. 207 ~ 253.
- 7) 서용권, 1996, "혼돈이론에 입각한 교반 및 혼합 해석", *대한기계학회지*, 제36권 제4호, pp. 338 ~ 350.