

## 대형 와 모사를 사용한 혼합 탱크 내의 농도장과 유동장의 동시 해석

윤현식\*, 하만영†, 전호환\*

(2003년 2월 22 접수, 2003년 6월 16 심사완료)

### Simultaneous Analysis of Concentration and Flow Fields in A Stirred Tank Using Large Eddy Simulation

Hyun Sik Yoon, Man Yeong Ha and Ho Hwan Chun

**Key Words :** Stirred Tank(교반기), Mixing(혼합), Turbulence(난류), Large Eddy Simulation(대형 와 모사), Scalar Transport(스칼라 이송)

#### Abstract

Transport of a scalar quantity, such as chemical concentration or temperature, is important in many engineering applications and environmental flows. Here we report on results obtained from the large eddy simulations of flow and concentration fields inside the tank performed using a spectral multi-domain technique. The computations were driven by specifying the impeller-induced flow at the blade tip radius (Yoon *et al.*<sup>(1)</sup>). This study focused on the concentration development at different molecular diffusivities in a stirred tank operated under turbulent conditions. The main objective of the work presented here is to study the large-scale mixing structure at different molecular diffusivities in a stirred tank by using the large eddy simulation. The time sequence of concentration and flow fields shows the flow dependency of the concentration development. The presence of spatial inhomogenieties is detailed by observing the time variation of local concentration at different positions.

#### 1. 서 론

혼합 탱크는 열 및 물질 전달과 혼합을 위해서 산업 현장에서 가장 많이 사용되어지는 장치중의 하나이다. 온도나 화학적 농도와 같은 스칼라 양의 이송은 공학 및 환경 분야에서 매우 중요하다. 이러한 혼합 현상에 대한 정확한 예측은 혼합물의 균질화, 성층화 방지, 부유 입자의 침전, 열 및 질량 전달 및 화학적 반응의 향상 등을 위하여 필요하다.

혼합 탱크 내에서의 혼합은 대규모 유동 (bulk flow) 및 이에 근거한 와류 확산에 의한 거시적

혼합(macro mixing)과 분자 확산에 의한 미시적 혼합 (micro mixing)에 의하여 일어난다. 임펠러 날개 (impeller blade)가 회전할 때 날개 뒷부분에서 형성되어 반경 및 회전 방향으로 이동하는 쌍으로 된 팁 와 (trailing tip vortex pairs)의 존재는 탱크 내의 유동과 혼합에 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 쌍으로 된 팁 와는 탱크 내부에 국소적으로 큰 농도 구배를 가지는 영역을 만든다. 이러한 영역의 존재는 혼합 및 반응 공정에 의하여 생성물을 만들 때 악영향을 미친다.

여러 조건의 변화에 따른 혼합 탱크 내에서의 농도장의 변화에 따른 실험적 연구가 Distelhoff *et al.*,<sup>(2)</sup> Guillard *et al.*<sup>(3)</sup>과 Kim *et al.*<sup>(4)</sup>에 의해서 이루어졌다. Brucato *et al.*<sup>(5)</sup>은 CFD 해석을 통하여 2 개의 화학반응을 고려한 3 차원 유동 및 농도장 해석을

\* 부산대학교 첨단조선공학센터

† 책임저자, 회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : myha@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2440 FAX : (051)512-9835

통하여  $Cr^{++}$  농도장의 분포를 계산하였다. Brucato *et al.*<sup>(5)</sup>은 탱크내에서 “macro- and micro-mixing” 현상에 관하여 수행된 많은 연구들의 문헌을 그들의 논문에 수록해 놓았다. Lane *et al.*<sup>(6)</sup>은 CFD 해석을 통하여 Rushton turbine 에서의 가스와 액체의 mixing 현상을 해석하고, 그들의 계산 결과를 실험과 비교하였다. 탱크 내에서 유동 패턴 및 국소 기포 (bubble)의 크기 분포에 대한 그들의 계산 결과는 실험 결과를 정성적으로는 잘 재현한다. 그러나 정량적으로는 실험 결과와 많은 차이를 보여주고 있다.

본 연구에서는 완전히 발달된 난류 유동 하에서 작동하는 혼합 탱크 내에서 무차원 분자 확산 계수 값을 변화시킬 때 혼합 탱크 내부에서 농도장의 분포와 이들의 상세한 구조를 조사하였다. 시간의 변화에 따른 유동장 및 농도장의 분포를 동시에 해석 함으로써, 유동장이 농도장의 분포 및 변화에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 탱크 내부 여러 위치에서 농도의 시간에 따른 변화에 대한 관찰을 함으로써 공간에서 혼합의 비균질성의 존재 여부를 확인하였다.  $Re_m = 4000$  일 때 본 계산에 의하여 구한 유동장 계산 결과는 stereoscopic PIV 데이터와 비교되었으며, 현재의 계산 결과는 PIV 데이터를 전체적으로 잘 나타내었다 (Yoon *et al.*<sup>(7)</sup>).  $Re_m = 4000$  일 때 탱크의 중앙 단면 ( $z=0$ )에서 현재의 LES 방법<sup>(7)</sup>을 사용하여 회전 및 반경 방향의 변화에 따라 계산한 시간 평균한 반경방향 속도 ( $\langle u_r \rangle$ )는 Sharp *et al.*<sup>(8)</sup>의 PIV 실험 결과와 잘 일치하였다. 또한 모든  $\theta$ - 방향에서  $\langle u_r \rangle$ 의 최대값 크기 및 위치에 대한 현재의 LES 계산 결과는 PIV 실험 결과와 잘 일치하였다.

2. 지배방정식

임펠러의 회전에 의하여 혼합 탱크 내부에 형성되는 유동 및 농도장의 분포를 계산하기 위하여 대형 와 모사법을 사용하여 계산을 수행하였다. 아래의 격자 필터 되어진 연속 방정식, 운동량 보존 방정식 (Navier-Stokes equation) 및 농도 보존 방정식이 본 계산의 지배방정식으로 사용되어졌다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{C}) = D_s \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \tag{3}$$

여기서  $\bar{u}_i$  및  $\bar{C}$ 는 격자 필터링으로 얻어진 대형 스케일의 유동 및 농도를 나타낸다. 식 (2) 및 (3)에서  $\tau_{ij}$  및  $q_j$ 는 subgrid 스케일 유동 및 농도장이 대형 스케일 (resolved scale) 유동에 미치는 영향을 나타내며, 다음과 같이 표현되어진다.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j, \quad q_j = \overline{C u_j} - \bar{C} \bar{u}_j \tag{4}$$

식 (2)에서  $Re$ 는 레이놀즈 (Reynolds) 수를 나타내며, 식 (3)의  $D_s (=1/ReSc)$ 는 레이놀즈 및 슈미트 (Schmidt) 수의 조합인 확산 계수를

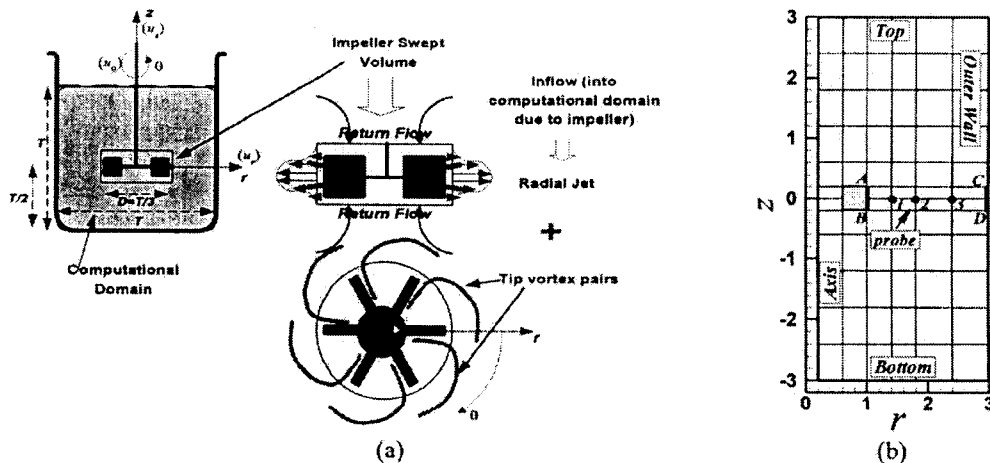


Fig. 1 (a) Schematic of the stirred tank with a typical six blade Rushton impeller. The plan view shown at the bottom on the right is viewed up from under the tank. (b) The computational geometry for spectral multi-domain methodology in  $r-z$  plane. Position of 3 sampling points at  $\theta = 30^\circ$  plane

나타낸다. Subgrid stress scale tensor  $\tau_{ij}$  와 subgrid diffusivity  $q_j$  는 Germano *et al.*<sup>(9)</sup>이 제안한 dynamic model 을 사용하여 구한다. 농도장에 대한 이 dynamic procedure 은 Akselvoll and Moin<sup>(10)</sup>에 의해 사용되어졌고, 이를 통해 얻은 계산결과는 실험결과와 잘 일치함을 보여주었다.

### 3. 수치해석 방법

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 혼합 탱크의 형상을 나타낸다. 작동 유체로서 물이 채워진 탱크의 직경 및 높이 ( $T$ )는 50.8mm 이다. 6 개의 날개가 장착된 Rushton 임펠러는 탱크의 중앙에 위치한다. 임펠러의 직경은  $D=T/3$  이고 높이는  $0.4D$  이다.

본 계산에서는 형상의 주기성에 근거하여  $\theta$  - 방향의 1/6 을 계산 영역으로 설정하였고, 그들의 경계에 주기 조건을 부여하였다. 또한 회전 좌표계를 도입하였고, 지배방정식 (1)을 회전좌표

계에 맞게 수정하였다. 주기 조건이 사용되어진  $\theta$  -방향으로는 푸리에 전개 (Fourier expansion)를, 그리고 각각의  $r-z$  면에 대해서는 스펙트럴 다영역 (spectral multi-domain) 방법을 사용하였다. 무차원화를 위한 특성 길이 및 특성 속도로서 각각 임펠러 반경 ( $D/2$ ) 및 임펠러 날개 팁 (impeller blade tip) 속도 ( $\pi ND$ )가 사용되어졌다. 여기서  $N$  은 rps 으로 날개의 회전 속도를 나타낸다.  $(1/2\pi N)$  및  $(\rho(\pi ND)^2)$ 은 무차원화를 위한 시간과 압력의 특성치를 나타낸다.  $Re_m (= ND^2/\nu = 2Re/\pi)$  는 레이놀즈 수를 나타내며,  $Re_m = 4000, 16000$  및  $64000$  이 본 계산에서 사용되어졌다. 회전 방향으로 32 개의 격자점을 사용하였다. Fig. 1(b)에 보여 준 것처럼  $r-z$  면은 72 개의 부 영역 (sub-domain)으로 이루어졌고, 각각의 부 영역에  $13 \times 13$  개의 격자점을 사용하였다. Fig. 1(b)는 또한 각 경계에서 정의된 경계 조건들을 보여주고 있다. 현재의

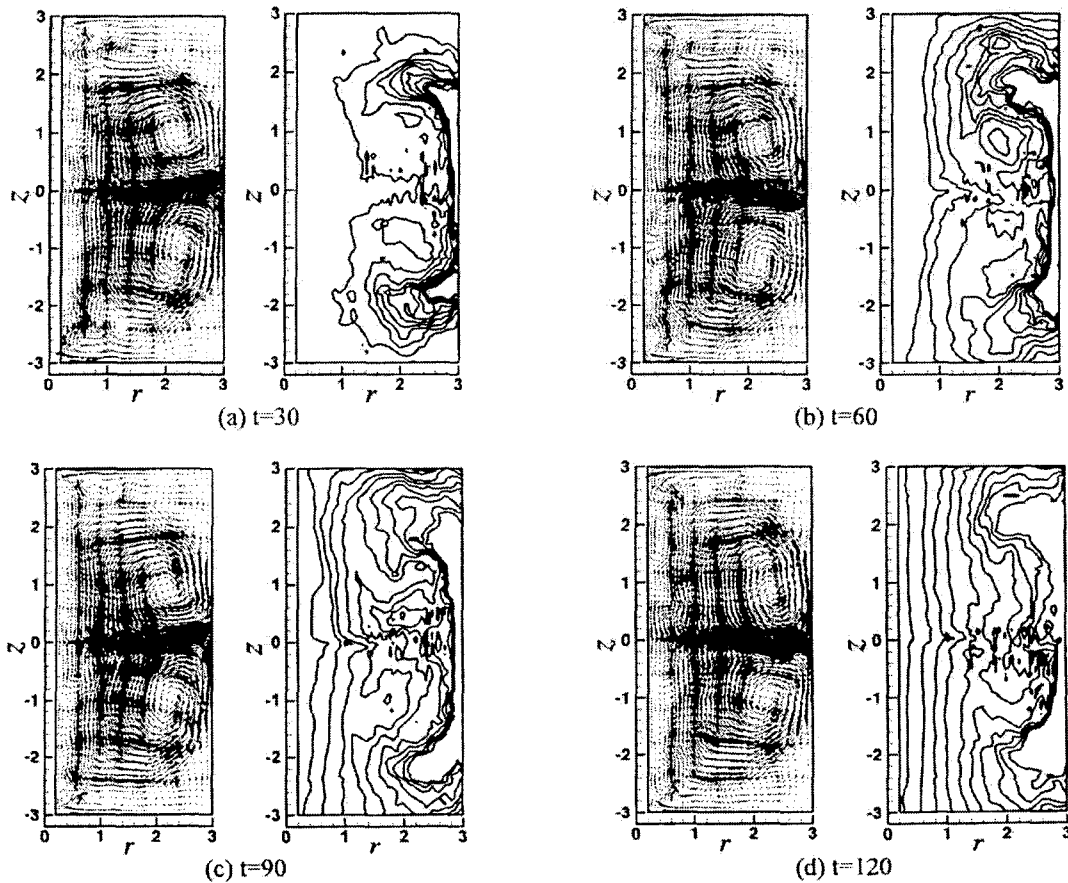


Fig. 2 Sequence of 4 frames, each separated by 30 nondimensional time unit, showing the  $\theta$ - averaged instantaneous flow and corresponding concentration fields at  $D_S = 1.6 \times 10^{-4}$ . Contour levels: 0.01 to 0.1 at steps of 0.01

연구에서는 고정된 격자를 사용하여 계산을 수행하였다. 임펠러가 회전할 때 임펠러의 회전에 의하여 야기되는 유동을 경계조건으로 지정하기 위하여, Yoon *et al.*<sup>(1)</sup>의 이론 모델이 Fig. 1(b)의 AB로 표시된 부분이  $\theta$ -방향 회전할 때 그리는 곡면에 경계조건으로 지정되어졌다. 현재의 연구에서는 고정된 격자를 사용하여 계산을 수행하였다. Yoon *et al.*<sup>(1)</sup>, Yoon *et al.*<sup>(11)</sup> 및 Yoon<sup>(12)</sup>에 의하여 구해진 이론 모델에 의하여 계산되어진 각 유동 성분의 값이 Fig. 1(b)의 AB로 표시된 부분이  $\theta$ -방향으로 회전할 때 (즉 임펠러가 회전할 때) 임펠러 팁이 그리는 곡면에 경계조건으로 지정되어졌다. 이 이론 모델은 PIV 실험 데이터에 근거하여 유도되었으며 이때 이론 계산 및 실험에 사용되어진 레이놀즈 수의 범위는  $4,000 \leq Re_m \leq 78,000$ 이다. 이 경계 조건은 Yoon<sup>(12)</sup>에 의하여 설명되어진 것처럼 임펠러가 회전할 때 임펠러의 회전에 의하여 야기되는 유동을 잘 재현한다. 유입 농도 조건은 Fig. 1(b)에 CD로 표시된 부분이  $\theta$  방향으로 회전할 때 그리는 곡면에 전체 계산시간에 걸쳐 "C=1"의 일정한

농도를 지정하였다. 혼합 탱크의 각 벽면들에서 농도 경계 조건으로서 Neumann 경계 조건이 지정되어졌다. 본 연구에서 무차원 확산 계수  $D_S$ 는  $1/Re Sc$  혹은  $2/\pi Re_m$ 로 정의되어진다. 본 계산에서는  $Sc=1$ 로 고정하였다. 그러므로 세 개의 서로 다른 레이놀즈 수  $Re_m=4000, 16000$  및  $64000$ 에 대응하는 식 (3)의 무차원 확산 계수  $D_S$ 의 값은 각각  $1.6 \times 10^{-4}$ ,  $4.3 \times 10^{-5}$  및  $1.1 \times 10^{-5}$ 이다. 각각의 부 영역에서는 체비셰프 전개 (Chebyshev expansion)를 사용하였으며, 이로 인하여 격자점은 비균일 Gauss-Lobatto 점들로 이루어진다. 시간 적분을 위하여 시간 분할법 (time split scheme)이 사용되어졌다. 대류 항에 대하여는 3차 Adams-Bashforth scheme 이 그리고 점성항에 대하여는 Crank-Nicholson scheme 이 사용되어졌다. Dynamic LES 모델을 위하여 회전방향으로 sharp cutoff 필터가 그리고 반경 및 축 방향으로 box-averaged 필터가 적용되어졌다. 본 계산에서 CFL 수는  $\Delta t \cdot (|u/\Delta x|)_{\max}$ 로 정의되며 계산을 수행하면서 이 값을 체크하였다. 이러한

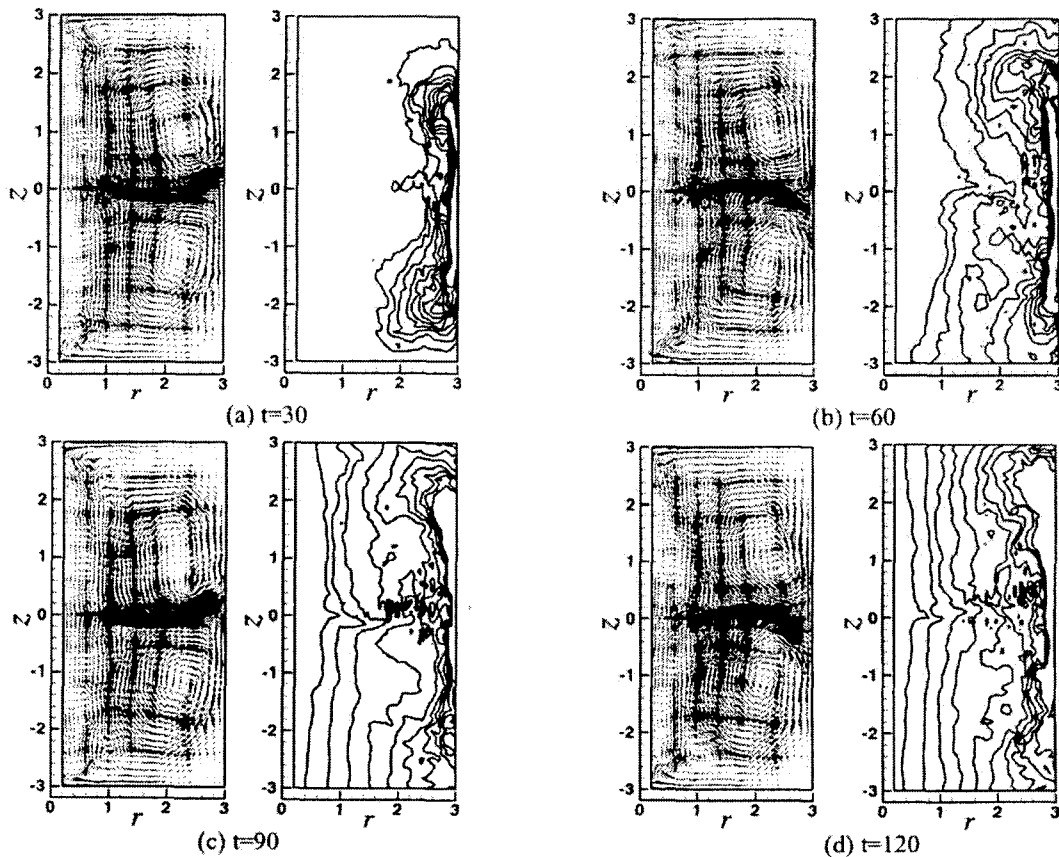


Fig. 3 Sequence of 4 frames, each separated by 30 nondimensional time unit, showing the  $\theta$ -averaged instantaneous flow and corresponding concentration fields at  $D_S = 4.3 \times 10^{-5}$ . Contour levels: 0.01 to 0.1 at steps of 0.01

과정을 통하여 본 계산에서는  $\Delta t$  가 0.001 로 고정되었다. 완전히 발달되어진 유동으로부터 해석에 사용되어진 time step 수는 120,000 이다. 이것은 무차원 시간 단위로는 120 무차원 시간에 그리고 임펠러가 19 번 회전한 시간에 해당한다.

4. 결과 및 해석

Fig. 2 는  $Re_m = 4000$  이고  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$  일 때 원주 방향 ( $\theta$ )에 따라서 평균한 순간 유동장 및 이에 대응하는 농도장의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 여기서 각 프레임 사이의 무차원 시간 간격은 30 이고, 이것은 임펠러의 회전수로 나타내면 임펠러의 4.8 회전에 해당한다. Fig. 2 의 농도 값은 최저 0.01 부터 최대 0.1 까지 0.01 의 간격을 사용하여 나타내었다. Fig 2(a)는  $t=30$  의 무차원 시간이 경과한 후의 농도장의 분포를 나타내며, 이들 농도 분포는 탱크의 상부 및 하부 단면에 존재하는 두개의 큰 순환 유동을 따라서

대류에 의하여 이송 되어진다. 탱크의 내부에 존재하는 큰 스케일의 링 와동과 바깥 벽면 사이에서 형성되는 전단층을 따라서 농도장이 조밀하게 분포하게 된다. 또한 탱크의 상부 및 하부의 오른쪽 모서리에 형성되는 작은 크기의 2 차 와동과 탱크 내부에 존재하는 큰 스케일의 링 와동 사이에 형성되는 전단층을 따라서 농도장이 조밀하게 분포하게 된다. 탱크 내부에 형성되는 큰 스케일의 링 와동의 중심 근처에서는 혼합이 잘 일어나지 않는다는 것을 Fig. 2(a)에서 관찰할 수 있다. 또한 임펠러 회전에 의하여 형성되는 제트 유동이 지배적인 탱크의 중앙 단면 ( $z = 0$ )를 따라서도 유체의 혼합은 잘 이루어지지 않는다. Fig. 2(b)는  $t=60$  의 무차원 시간이 경과한 후의 농도장의 분포를 나타낸다. 무차원 시간  $t=60$  에서의 유동장과 농도장의 분포는 무차원 시간  $t=30$  에서의 분포들과 전체적으로 유사하다. 그러나 탱크의 바깥 벽 근처에서 중앙 단면 ( $z=0$ ) 주위에서 상하로 진동하는 임펠러 제트의 진동 방향이 무차원 시간  $t=30$  및 60 에서 서로

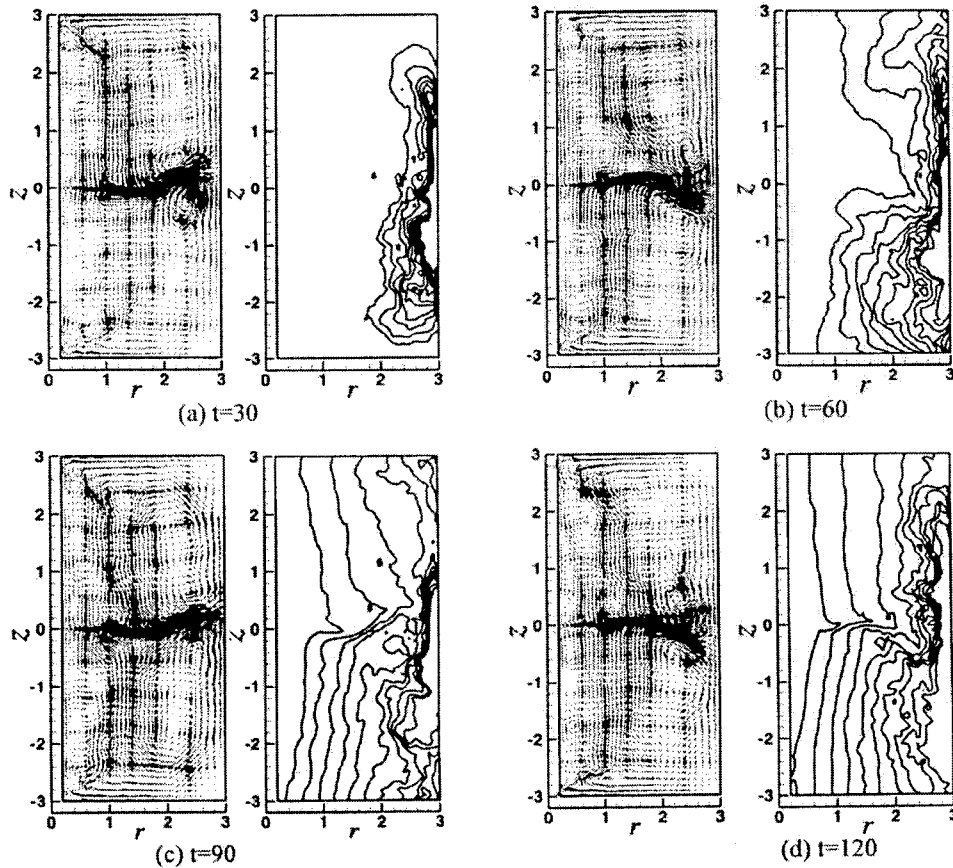


Fig. 4 Sequence of 4 frames, each separated by 30 nondimensional time unit, showing the  $\theta$ - averaged instantaneous flow and corresponding concentration fields at  $D_s = 1.1 \times 10^{-5}$ . Contour levels: 0.01 to 0.1 at steps of 0.01

다르다. 이로 인하여 무차원 시간  $t=60$  일 때  $t=30$  에 비하여 저 농도의 유체가 중앙 단면에 대하여 아래 쪽으로 치우쳐 분포하게 된다. 무차원 시간  $t=60$  에서 여전히 혼합 되지 않은 유체가 탱크 내부에 형성되는 큰 스케일의 링 와동의 중심 근처에 존재하게 된다. Fig. 2(c)는  $t=90$  의 무차원 시간이 경과한 후의 농도장의 분포를 나타낸다. 무차원 시간  $t=90$  에서는  $C=0.01$  이상인 유체가 임펠러의 축과 큰 스케일의 링 와동의 중심 근처까지 대류 및 확산에 의해 퍼져나가는 것을 관찰할 수 있다. 무차원 시간  $t=90$  에서는 디스크의 상부 및 하부 벽면에서 새로운 혼합층이 생성되어진다. Fig. 2(d)는  $t=120$  의 무차원 시간이 경과한 후의 농도장의 분포를 나타낸다. 무차원 시간  $t=120$  일 때 중앙 단면의 작은 혼합층을 제외하고  $r \approx 1.4$  부터 임펠러 축까지 농도가 단조 감소하고 있다. 무차원 시간  $t=120$  의 이전 시간에 전단층들을 따라 존재하던 조밀한 농도장의 분포가 무차원 시간  $t=120$  에서는 사라져 거의 존재하지 않는다.

Fig. 3 은  $Re_m = 16000$  이고  $D_s = 4.3 \times 10^{-5}$  일 때 원주 방향 ( $\theta$ )에 따라서 평균한 순간 유동장 및 이에 대응하는 농도장의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다.  $Re_m$  이 4000 에서 16000 으로 증가함에 따라서 탱크의 상부 및 하부 오른쪽 모서리에 존재하는 이차 와동들의 크기가 작아진다. 이것은 레이놀즈 수가 증가함에 따라서 탱크의 바깥 벽면을 따라 관성력이 증가하기 때문이다. 그러므로 무차원 시간  $t=30$  일 때  $C=0.01$  이상인 유체가 주로 탱크의 바깥 벽면의 상부 및 하부 쪽에 분포하고, 탱크 내부의 큰 스케일의 링 와동을 따라 탱크 바깥 벽면으로부터 탱크 내부로 약간 기울어진다. Fig. 3(b)에서 보여준 것처럼 비활성 영역인 중앙 단면 ( $z=0$ ) 근처와 큰 스케일 링 와동 중심 근처에서 저농도의 유체가 존재한다. 무차원 시간  $t=120$  일 때 Fig. 3(d)에 보여준 것처럼  $D_s = 4.3 \times 10^{-5}$  일 때 큰 스케일 링 와동 중심 근처에서의 농도 구배는  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$  인 경우와 다르게 국부적으로 고 농도의 구배가 존재한다.

Fig. 4 은  $Re_m = 64000$  이고  $D_s = 1.1 \times 10^{-5}$  일 때 원주 방향 ( $\theta$ )에 따라서 평균한 순간 유동장 및 이에 대응하는 농도장의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다.  $Re_m = 64000$  일 때 중앙 단면 주위로 임펠러 제트의 상하 진동은  $Re_m = 4000$  및 16000 인 경우에 비하여 훨씬 크다. 그러므로 낮은 레이놀즈 수에서 존재하는 큰 스케일의 와동은 여러 개의 작은 와동들로 나누어지는 것을 Fig. 4 에서 관찰할 수 있다. 또한  $Re_m = 64000$  에서는  $Re_m = 4000$  및 16000 인 경우에 비하여 관성력의

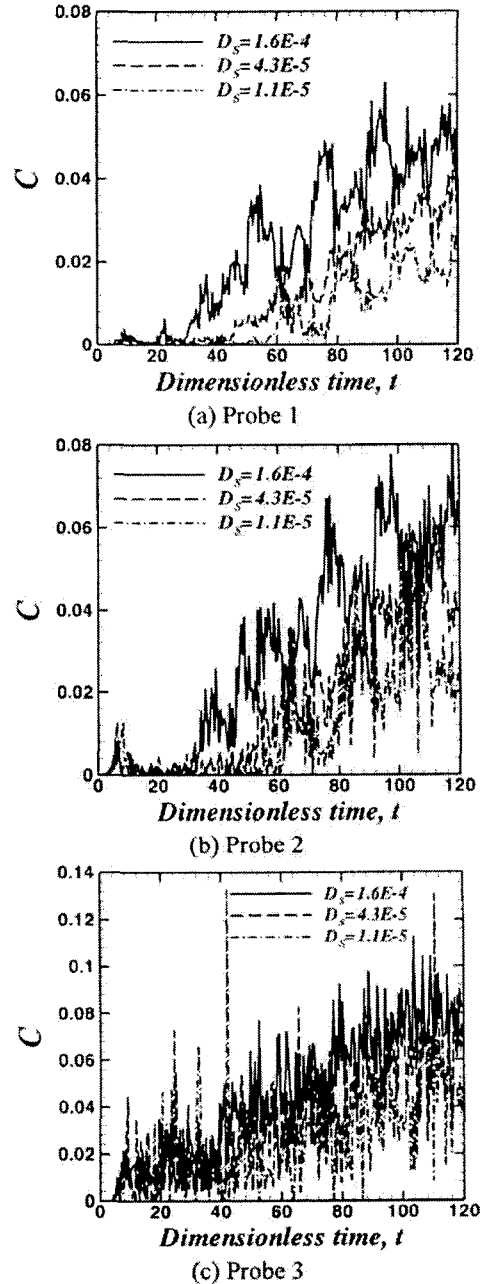


Fig. 5 The time histories of concentration at three different locations as marked in fig. 1

증가로 인하여 탱크의 바깥 벽면을 따라 축 방향 유동이 탱크 상부 및 하부 벽면까지 닿는다. 이러한 유동의 특성에 의하여  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$  및  $4.3 \times 10^{-5}$  일 때 큰 스케일의 링 와동의 중심 근처에서 존재하는 비혼합 영역(unmixed region)이  $D_s = 1.1 \times 10^{-5}$  에서는 관찰되지 않는다.

Fig. 5 는 Fig. 1(b)에 표시된 세 위치 (probe 1=  $(r, z, \theta) = (1.4, 0, 30^\circ)$ , probe 2=  $(1.8, 0, 30^\circ)$ , probe

$3=(2.4, 0, 30^\circ)$ 에서 농도(C)의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 임펠러 제트가 농도의 혼합에 미치는 영향을 조사하기 위해 이 세 개의 probe 들을 중앙 단면 ( $z=0$ )에 위치시켰다. probe 3 에서 농도값은 probe 가 CD 경계면에 근접한 관계로 모든  $D_s$  에 대하여 가장 높은 값을 가지면서 시간에 따라 변한다. Fig. 5(c)에서 알 수 있는 것처럼 probe 3에서는 작은 스케일의 변동이 지배적이다. Fig. 5(b)에 보여준 probe 2에서는 작은 스케일과 큰 스케일의 변동이 동시에 관찰되어진다. Fig. 5(a)에서 알 수 있는 것처럼 임펠러의 날개 팁에 가장 가까운 probe 1에서는 큰 스케일의 변동이 지배적이다. Yoon *et al.*<sup>(7)</sup>은 Sharp *et al.*<sup>(8)</sup>의 PIV 실험에서 얻은 순간 속도장의 분석을 통하여, 임펠러 제트 유동이 탱크의 중앙 단면 ( $z=0$ )를 기준으로 상하로 진동하는 것을 관찰하였다. 그러므로 임펠러 제트의 특정 진동 주파수가 존재 할 것으로 예상 할 수 있으나, Sharp *et al.*<sup>(8)</sup>의 phase-lock 방법을 사용한 PIV 실험 결과로부터는 시간의 함수로써 진동 주파수를 찾을 수가 없다. 또한 임펠러 근처에서의 유동은 임펠러 회전에 의한 주기성에 영향을 받는다는 것이 기존의 연구 결과에서 알려져있다.<sup>(12)</sup> Fig. 2~4 의 순간 유동 및 농도장의 분포로부터 탱크의 중앙 단면 ( $z=0$ ) 부근에서는 순간 농도장의 분포는 유동에 의하여 크게 좌우되는 것을 알 수 있다. 위의 결과로부터 probe 1 의 낮은 주파수에 해당하는 이러한 큰 스케일의 변동은 임펠러

제트의 진동 주파수와 밀접한 관계를 가질 것이라고 예측 할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 임펠러 제트의 특정 진동 주파수 값과 임펠러 근처에서 농도의 낮은 주파수와와의 상호 관계에 대한 상세한 연구는 현재 이루어지지 않았고, 향후 보완 연구가 필요한 부분이다. 서로 다른 probe 에서 농도값의 시간에 따른 변화에 대한 이러한 계산 결과들로부터 탱크 내부 농도장 분포에 대규모 비 균질성(inhomogenities)이 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 은  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$ ,  $4.3 \times 10^{-5}$  및  $1.1 \times 10^{-5}$  일 때 시간 및 원주 방향 ( $\theta$ )에 대하여 평균한 농도장의  $r-z$  평면에서의 분포를 보여주고 있다.  $D_s$  값이 감소함에 따라서 큰 스케일의 와동의 중심 근처에 존재하는 저 농도 영역이 사라진다. 또한,  $D_s$  값이 감소하고  $Re_m$  이 증가함에 탱크 내부의 농도가 균일하게 분포한다.

본 연구에서 사용한 확산계수 ( $D_s$ )의 정의로부터 임펠러의 회전 속도가 느리면  $D_s$  값이 커지고 확산에 의한 혼합이 지배적이다. 순간 및 평균 농도장의 contour 의 분포에서 알 수 있는 것처럼  $D_s$  가 작을수록 같은 값의 농도가 더 넓은 영역에 걸쳐 분포한다. 이것은 확산에 의해서 농도 분포가 더 빠르게 퍼져나가기 때문이다. 그러나 임펠러의 회전 속도가 증가하면  $D_s$  값이 작아지므로 농도의 혼합에 대류에 의한 영향이 증가한다. 따라서,  $D_s = 1.1 \times 10^{-5}$  이고

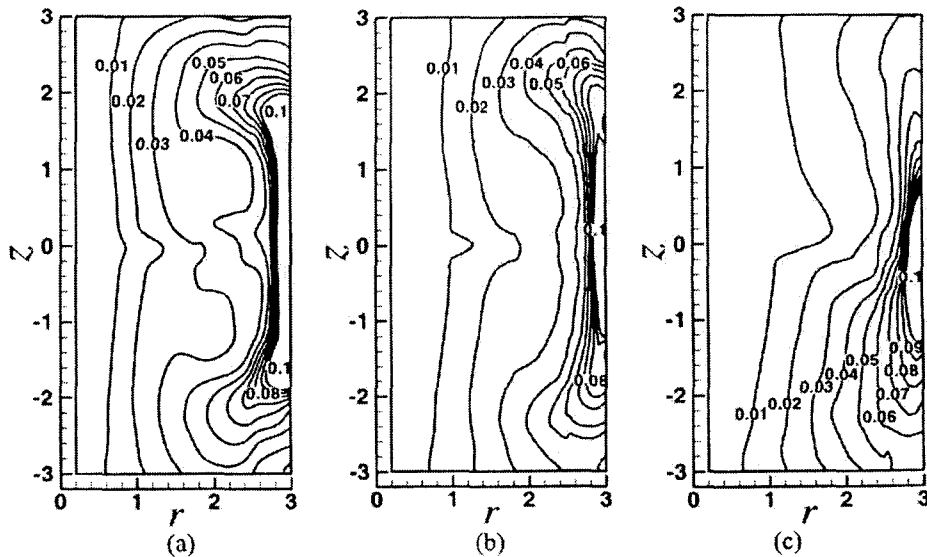


Fig. 6 Time and  $\theta$ -averaged concentration fields at (a)  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$ , (b)  $D_s = 4.3 \times 10^{-5}$  and (c)  $D_s = 1.1 \times 10^{-5}$  in  $r-z$  plane

$Re_m = 64000$  이면, 레이놀즈 수의 증가에 의하여 작은 스케일의 유동이 발달하고 이로 인하여 저 레이놀즈 수에서 존재하는 큰 스케일의 와동이 여러 개의 작은 와동으로 나누어진다. 또한 관성력의 증가로 인하여 탱크의 바깥 벽면을 따라 축 방향 유동이 탱크 상부 및 하부 벽면까지 닿는다. 이러한 유동의 특성으로 인하여 확산계수가  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$  및  $4.3 \times 10^{-5}$ 의 상대적으로 큰 값을 가지면 탱크 내부에 큰 스케일의 링 와동이 형성되고 이러한 링 와동의 중심 근처에 비혼합 영역 (unmixed region)이 존재하게 된다. 그러나 확산 계수의 값이  $D_s = 1.1 \times 10^{-5}$ 로 감소하면 비혼합 영역이 존재하지 않고 농도는 탱크의 바깥 벽면을 따라 균일하게 분포한다.

5. 결 론

혼합 탱크 내의 유동장 및 농도장을 동시에 해석하기 위해서 대형 와 모사법을 사용하여 계산을 수행하였다. 복잡한 형상을 고려하기 위하여 multi-domain 기법이 사용되어졌다. 정확한 수치 해석 결과를 얻기 위해 spectral method 을 사용하여 계산을 수행하였다. 계산 시간의 단축을 위해 병렬처리 기법(Open\_mp)을 이용하였다.

$Re_m = 4000, 16000$  및  $64000$ 에 대응하는 확산계수 계수  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}, 4.3 \times 10^{-5}$  및  $1.1 \times 10^{-5}$ 을 사용하였다.  $D_s = 1.6 \times 10^{-4}$ 와  $4.3 \times 10^{-5}$ 에서는 큰 스케일의 와동의 중심 근처에서 큰 구배의 순간 및 평균 농도장이 존재한다. 임펠러 제트는 혼합되지 않은 유체를 혼합된 유체의 유동 영역으로 이송시키는 중요한 역할을 한다.

임펠러의 회전 속도가 느릴 때는 확산에 의한 혼합이 지배적이며, 회전 속도가 증가하면 대류에 의한 혼합의 영향이 증가되어지는 전형적인 혼합 형태가 관찰되어졌다.

여러 다른 위치에서 농도의 시간에 따른 변화를 관찰을 통하여 농도장 분포에는 대규모 비균질성이 존재하는 것을 알 수 있다. 임펠러 근처에서는 저 주파수의 변동이 지배적이고, 일정 농도가 유입되는 탱크의 바깥 벽면 근처에서는 높은 주파수의 변동이 지배적이다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음. (KRF-2001-041-E00015)

참고문헌

- (1) Yoon, H.S., Sharp, K.V., Hill, D. F., Adrian, R. J., Balachandar, S., Ha, M.Y. and Kar, K., 2001, "Integrated experimental and computational approach to simulation of flow in a stirred tank," *Chem. Engng Sci*, Vol. 56, pp. 6635~6649
- (2) Distelhoff, M. F. W. and Marquis, A. J., 1998, "An LIF line scan system for the measurement of scalar concentration in a continuously operated stirred tank," *Exp. Fluids*, Vol. 25, pp. 77~88
- (3) Guillard, F., Tragardh, C. and Fuchs, L., 2000, "A study of turbulent mixing in a turbine-agitated tank using a fluorescence technique," *Exp. Fluids*, Vol. 28, pp. 225~235
- (4) Kim, K. C., Jeong, E. H., Kim, S. K. and Adrian, R. J., 2001, "A study on the turbulent mixing characteristics in a Rushton turbine reactor by PIV and PLIF," *4<sup>th</sup> Int. Symp. on PIV*, Germany, pp 1~12
- (5) Brucato, A., Ciofalo, M., Grisafi, F. and Tocco, R., 2000, "On the simulation of stirred tank reactors via computational fluid dynamics," *Chem. Engng Sci*, Vol. 55, pp. 291~302
- (6) Lane, G. L., Schwarz, M. P. and Evans, G. M., 2002, "Predicting gas-liquid flow in a mechanically stirred tank," *Appl. Math. Modelling*, Vol. 26, pp. 223~235
- (7) Yoon, H. S., Balachandar, S., Ha, M. Y. and Kar, K., 2002, "Large Eddy Simulation of Flow in a Stirred Tank," *ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 125, pp. 486~499
- (8) Sharp, K. V., Kim, K. S. and Adrian, R. J., 1998, "A study of vorticity and dissipation around a Rushton turbine using particle image velocimetry," *Proc. 9<sup>th</sup> Int'l Symp. Applications Lasers to Fluid Mechanics*, Lisbon, July 13~16, pp. 14.1.1~10
- (9) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., 1991, "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluids*, A3, No. 3, pp. 1760~1765
- (10) Akselvoll, K. and Moin, P., 1996, "Large-eddy simulation of turbulent confined coannular jets," *J. Fluid Mech.*, 315, pp. 5387~411
- (11) Yoon, H.S., Hill, D. F., Adrian, R. J., Balachandar, S., Ha, M.Y. and Kar, K., 2003, "Scaling of flow in a stirred tank with Rushton turbines; Part I - Mean flow and the jet and tip vortex components," Submitted to *AIChE J.*
- (12) Yoon, H.S., 2003, "Large eddy simulation of turbulent flow and scalar mixing in a stirred tank," Ph.D. thesis, Pusan National University, South Korea
- (13) Van, Riet, K. and Smith, J. M., 1975, "The trailing vortex system produced by Rushton turbine agitators," *Chem. Engng Sci*, Vol. 30, pp. 1093~1105