

< 논문 >

회전하는 원형단면 실린더 주위의 난류유동 물질전달에 대한 직접수치모사 (I) - 높은 Schmidt 수에 대하여 -

황 종 연* · 양 경 수†

(2005년 2월 17일 접수, 2005년 6월 8일 심사완료)

Direct Numerical Simulation of Mass Transfer in Turbulent Flow Around a Rotating Circular Cylinder (I) - At $Sc=1670$ -

Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Direct Numerical Simulation(직접수치모사), Correlation(상관관계), Concentration rms
(평균 농도 섭동량)

Abstract

In this paper, an investigation on high-Schmidt number ($Sc=1670$) mass transfer in turbulent flow around a rotating circular cylinder is carried out by Direct Numerical Simulation. The concentration field is computed for three different values of low Reynolds number, namely 161, 348 and 623 based on the cylinder radius and friction velocity. Statistical study reveals that the thickness of Nernst diffusive layer is very small compared with that of viscous sub-layer in the case of high Sc mass transfer. Strong correlation of concentration field with streamwise and vertical velocity components is observed. However, that is not the case with the spanwise velocity component. Instantaneous concentration visualization reveals that the length scale of concentration fluctuation typically decreases as Reynolds number increases. Statistical correlation between Sherwood number and Reynolds number is consistent with other experiments currently available.

1. 서 론

고체면에서 난류유동에 의한 물질전달 혹은 열전달에 대한 연구는 공학적인 응용 측면의 중요성 때문에 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔다. 대부분의 연구는 주로 실험에 의하여

레이놀즈 수(Re)나 혹은 모멘텀 확산계수에 대한 농도 확산계수의 비로 정의되는 Schmidt 수 (Sc)의 변화에 따른 평균 질량 전달률을 측정하는데 초점이 맞추어졌다. 일반적으로 높은 Sc 인 경우 물질전달 계수는 $Sc^{-2/3}$ 의존성을 갖게 되며 이 사실은 Kader와 Yaglom⁽¹⁾의 논문에서 재확인 되었다. 또한 그들은 Sc 에 따른 물질전달 계수의 변화에 대한 식을 산출하였다. Kader⁽²⁾는 완전 발달된 난류 경계층에서 온도 혹은 물질 전달과 같은 스칼라 전달에 대하여 기존의 실험결과를 종합하는 작업을 수행하였다. 다양한 Sc 혹은 Pr (프란틀 수)에 대한 방대한 실험자료를 이용하여 고체면으로부터 수직방향의

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : ksyang@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7322 FAX : (032)863-3997
* 회원, 인하대학교 기계기술공동연구소

높이에 따른 스칼라량의 분포를 관찰하였으며 그에 대한 관계식을 유도하였다. 그러나 이러한 실험적 연구를 통하여 난류유동과 물질전달의 상관관계에 대한 명확한 이해를 얻기는 매우 어렵다. 왜냐하면 난류유동장 특유의 3차원적 불규칙성 뿐만 아니라 Sc 가 증가할 경우 스칼라 경계층 두께가 감소하기 때문이다. 만일 Sc 가 매우 크다면 이러한 문제는 더욱 심각해지며 스칼라 장의 길이규모는 난류 유동장의 길이 규모보다 매우 작은 길이규모를 갖게 된다. 따라서 실험적 연구로는 이렇게 다른 정도의 길이규모를 동시에 다루어 그 유동 및 스칼라의 구조를 명확히 파악하기가 불가능해진다.

그러나 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 물질전달과 결부된 난류유동에 대한 전산해석적 연구가 진행되어 난류-스칼라 상관 메커니즘이 점차로 밝혀지기 시작하였다.^(3,4) 특히 Calmet과 Magnaudet⁽³⁾는 평판 사이 난류유동에서 높은 Sc 에 대한 Large Eddy Simulation (LES)를 수행하여 실험과 엄밀하게 비교하였으며 유동장과 물질전달과의 상관관계를 밝혀내었다. Chung과 Sung⁽⁴⁾은 Direct Numerical Simulation (DNS)를 이용하여 동심환형관 내의 난류 유동장에서 열전달에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 회전하는 원형단면 실린더 주위의 난류유동장에서 $Sc=1670$ 인 경우에 대한 물질전달에 대한 연구를 DNS 방법으로 수행하였다. 이는 침식-부식문제를 해결하기 위한 회전하는 기계류의 단순화된 모델로서 매우 기본적인 중요한 형상이다. Yang 등⁽⁵⁾은 부식 문제와 연관 지어서 계단이 부착된 회전하는 실린더 주위의 유동에 대한 전산해석과 실험적 연구를 동시에 수행하였다. Hwang과 Yang⁽⁶⁾은 본 연구의 선행 연구로서 서로 다른 각속도로 회전하는 원형단면 실린더 주위의 난류유동장에 대한 DNS를 수행하였다.

한편 Eisenberg 등⁽⁷⁾의 실험에 의하면 본 연구와 동일한 형상의 난류유동에서 물질전달계수와 관련된 무차원 수인 Sherwood 수(Sh)는 $Re^{0.7}Sc^{0.356}$ 에 비례하며 이는 최근 Bremhorst에 의하여 수행된 실험에 의하여 확인되었다.⁽⁸⁾ 하지만 본 연구에서와 같이 매우 높은 Sc 에 대한 난류유동에서 유동장과 스칼라장의 연관성 및 스칼라 장에 대한 구조를 상세히 다룬 연구는 저자가

아는 한 전무하다. 본 연구에서는 난류 유동장에서 각 방향의 속도성분과 스칼라량의 상관관계를 규명하는데 초점을 맞추었고 실린더의 회전에 따른 효과에 대해서도 고찰하였다. 또한 유동장과 결부된 스칼라 장에 대한 가시화를 통하여 스칼라 섭동의 공간적인 구조를 관찰하였다. 본 연구의 목적은 차후 침식-부식과 관련하여 회전 기계류 주위에 생성되는 난류-스칼라장의 상관관계를 규명하려고 하는 연구자에게 기본적인 데이터 및 물리적 이해를 제공하는데 있다.

2. 연구방법

2.1 지배방정식과 수치해석법

본 연구에서는 일정한 각속도 (Ω)로 회전하는 좌표계에서 계산이 수행되었다. 이럴 경우 Coriolis 힘과 원심력 (centrifugal force)이 모멘텀 방정식에 부가적으로 생성되며 이중 원심력은 보존되므로 모멘텀 방정식의 압력항에 포함 되어질 수 있다. 지배방정식은 연속 방정식 및 비압축성 모멘텀 방정식과 몰농도 (molar concentration)가 종속변수인 스칼라 방정식으로 다음과 같이 표시 되어진다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - 2\Omega \times \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}c) = D\nabla^2 c \quad (3)$$

여기서 u, ρ, ν, c 는 유체의 속도, 밀도, 동점성계수, 몰농도를 각각 의미하며 식 (2)의 맨 마지막 항은 Coriolis 힘을 나타내고 식 (3)의 D 는 물질 확산계수를 의미한다. 공간에서의 차분법으로서는 유동방정식의 경우 2차의 정확도를 갖는 중앙차분법(Central Difference Scheme, CDS)이 사용되었다. 반면 스칼라 방정식의 경우 upwind방법 중의 하나인 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)^(9,10)을 대류항에 적용하였다. 시간에서의 적분은 혼합적인 형태로서 비선형 항들 및 교차 확산항들은 3차 정확도의 Runge-Kutta

Table 1 Flow parameters(SI unit)

case	rpm	u^*	c^*	δ_N	K	Re^*_R
1	200	0.019	6.8×10^{-4}	5.4×10^{-5}	1.3×10^{-5}	161
2	500	0.040	6.1×10^{-4}	2.8×10^{-5}	2.5×10^{-5}	348
3	1000	0.072	5.7×10^{-4}	1.7×10^{-5}	4.1×10^{-5}	623

방법으로 명시적 적분되었고, 점성항들은 Crank-Nicolson 방법으로 묵시적으로 적분이 수행되었다. 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리하기 위해서 Fractional Step 기법⁽¹¹⁾이 사용되었으며 수치 해석 알고리즘 기법에 대한 상세한 사항들은 Rosenfeld 등⁽¹¹⁾의 논문을 참고하기 바란다.

2.2 유동 파라미터 및 경계조건

본 연구에서는 $Sc=1670$ 인 매우 높은 Sc 에서 실린더가 200, 500, 1000 rpm으로 회전하는 세 경우에 대해서 DNS가 수행 되었다. 여기서 실린더의 반경(R_i)은 0.01m이고 원형 형상인 계산영역의 바깥 경계 반경(R_o)은 0.07m이다. 횡방향의 크기 (W)는 rpm=200과 rpm=500의 경우는 0.024m이고 rpm=1000인 경우는 0.012m로서 선행연구와 동일하다.⁽⁶⁾ 사용된 격자점 수는 격자세분화 연구에 의하여 결정되었으며 주유동, 수직, 횡방향으로 각각 $128 \times 96 \times 256$ 이 사용되었다.

본 연구의 경계조건으로는 실린더의 표면에서는 속도의 경우 점착조건이, 물농도를 의미하는 스칼라량도 0으로 설정하였다. 균질한 방향인 횡방향으로는 주기조건이 적용되었다. 계산영역의 바깥경계의 경계조건으로서 속도장은 미끄러짐 (slip) 조건을 고안하여 적용하였고,^(5,6) 농도는 1로 설정하였다. Table 1은 본 연구에서 수행된 모든 경우에 대한 유동 파라미터들을 보여준다. 여기서 u^* 는 마찰속도(friction velocity)를 c^* 는 마찰농도(friction concentration)를 각각 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$c^* = \frac{D}{u^*} \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (4)$$

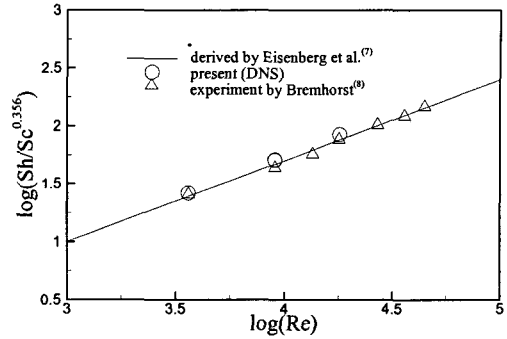


Fig. 1 Correlation for mass transfer

여기서 C 는 평균 농도이다.

δ_N 와 K 는 각각 Nernst 확산층 두께와 물질전달 계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_N = \Delta c / \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (5)$$

$$K = \frac{D}{\Delta c} \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{D}{\delta_N} \quad (6)$$

여기서 Δc 는 바깥 경계에서의 농도와 안쪽 실린더에서의 농도의 차이이다. 그리고 Re^*_R 은 마찰 속도와 반경으로 정의된 레이놀즈수를 의미한다. Table 1에서 보듯이 rpm이 증가할수록 δ_N 은 감소하며 상대적으로 K 는 증가함을 확인할 수 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 평균 유동장 및 스칼라장

유동장 내의 속도의 초기조건으로부터 계산 시작 후 난류 유동장이 발달하여 통계적으로 정상 상태에 도달 한 후 스칼라량의 계산이 시작되었다. 스칼라량의 초기조건으로서 모든 계산영역의 내부에서의 물농도를 0으로 설정하였다. 스칼라장이 발달하여 통계적인 정상상태에 이른 후 평균 물리량들을 구하기 위하여 유동장 및 스칼라장의 샘플링이 동시에 수행되었다. 샘플링 개수로 공간적으로 균질한 방향인 주 유동 방향과 횡방향으로 약 3만 여개, 그리고 시간적으로 50개로서 도합 160만개의 샘플링 개수가 사용되었다. Fig. 1은 본 연구에서 수행된 세 경우에 대해서

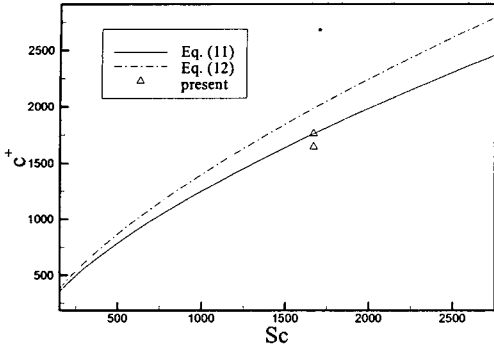


Fig. 2 Asymptotic boundary value of C^+

회전 속도와 물질전달의 통계 처리된 상관관계를 보여준다. 여기서 삼각형 심볼은 Bremhorst⁽⁸⁾에 의하여 수행된 실험결과이고 실선은 Eisenberg 등⁽⁷⁾에 의한 실험결과로부터 산출된 식으로 다음과 같다.

$$Sh = 0.079 Re^{0.70} Sc^{0.356} \quad (7)$$

여기서 Re 는 실린더의 회전 선속도와 직경의 길이로 정의되었고 $Sh = 2KR/D$ 이다. 본 연구의 결과가 실험이나 식 (7)과 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

평균 농도분포에 대한 보다 정확한 비교를 위하여 계산 영역의 바깥 경계에서 점근적인 농도 값을 관찰해 볼 필요가 있다. 우선 높은 Sc 를 갖는 관유동의 경우 벽단위로 표시된 물질 전달계수(K^+)는 다음과 같은 관계식을 만족시킨다.⁽¹⁾

$$K^+ = K/u^* = 0.08 Sc^{-2/3}, \text{ for high } Sc \quad (8)$$

또한 Kader⁽²⁾에 의하면 관유동에서 벽단위로 표시된 평균 농도(C^+)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C^+ = \frac{C}{c^*} = 2.12 \ln y^+ + (3.85 Sc^{1/3} - 1.3)^2 + 2.12 \ln Sc, \text{ for } 6 \times 10^{-3} < Sc < 40 \times 10^3 \quad (9)$$

바깥 경계에서 $C=1$ 이고 식 (4)와 식 (8), 식 (9)

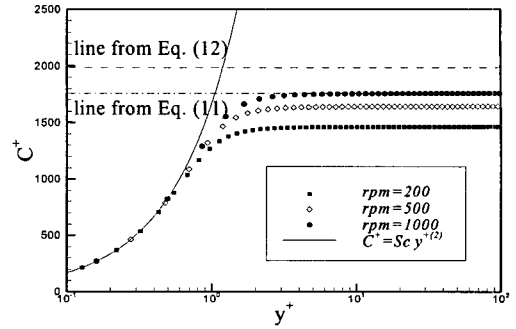


Fig. 3 Mean concentration in the wall region, $Sc=1670$

를 적용하면 다음과 같은 부등식이 성립된다.

$$C^+ = \frac{C}{c^*} = \left[\frac{D}{u^*} \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R} \right]^{-1} = (0.08 Sc^{-2/3})^{-1} \geq (3.85 Sc^{1/3} - 1.3)^2 + 2.12 \ln Sc \quad (10)$$

여기서 부등식의 왼쪽항과 오른쪽 항으로 정의된 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

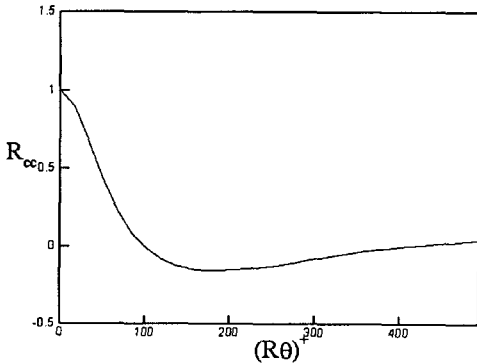
$$C^+ = (0.08 Sc^{-2/3})^{-1} \quad (11)$$

$$\widehat{C}^+ = (3.85 Sc^{1/3} - 1.3)^2 + 2.12 \ln Sc \quad (12)$$

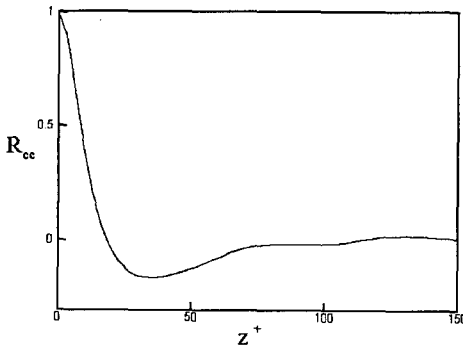
이며 $C^+ \geq \widehat{C}^+$ 이다.

Fig. 2는 바깥 경계에서의 C^+ 의 값을 Sc 에 따라서 나타낸 것이다. 여기서 실선은 식 (11)을 의미하고 일점쇄선은 식 (12)를 표현한 것이며 심볼은 본 연구의 결과이다. 본 연구의 결과는 식 (11)을 비교적 잘 만족시키고 있지만 식 (11)과 (12)는 식 (10)의 부등식과 비교해 보면 모순되는 결과를 보이고 있다. 특히 이 차이는 Sc 가 커짐에 따라 더욱 증가하고 있다. Fig. 3은 세 경우의 rpm에 대해서 실린더에서 수직방향으로의 벽좌표(y^+)에 대한 평균 농도장(C^+)의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 실선은 y 에 따라 농도분포가 선형적인 확산층(diffusive sub-layer) 내에서 다음과 같은 법칙을 따른다.⁽²⁾

$$C^+ = Sc y^+ \quad (13)$$



(a) Streamwise



(b) Spanwise

Fig. 4 Two-point correlation coefficient for concentration at $y^+=1.0$, rpm=500, $Sc=1670$

즉 마치 난류유동장에서 점성저층에서 속도분포가 벽좌표에 따라 선형적인 것처럼 농도 분포 역시 확산저층 내에서 벽좌표에 따라 선형적인 분포를 보인다. 그림에서와 같이 확산저층 내에서는 모든 경우의 rpm에서 식 (13)을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 1의 δ_N 을 참조하면 Nernst 확산층 두께는 벽좌표로 약 1정도에 해당하며 Fig. 3을 관찰하면 뚜렷이 확인된다. 본 연구와 같은 높은 Sc 의 경우 $y^+=1.0$ 을 지나면서 모든 rpm에서 거의 일정한 분포를 보이고 있으며 이는 평판유동의 경우에도 확인되었다.⁽³⁾ 바깥 경계에서 점근적인 값은 rpm=500과 1000의 경우 식 (11)을 잘 만족시키고 있으나 rpm=200의 경우는 다소 작게 예측되고 있다. 그 이유는 선행연구⁽⁶⁾에서 언급했듯이 rpm=200의 경우는 매우 낮

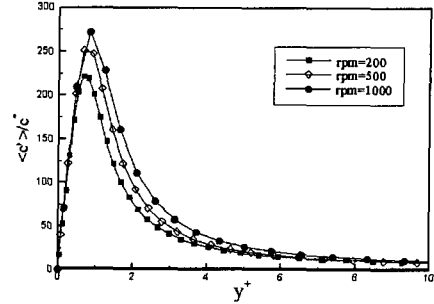


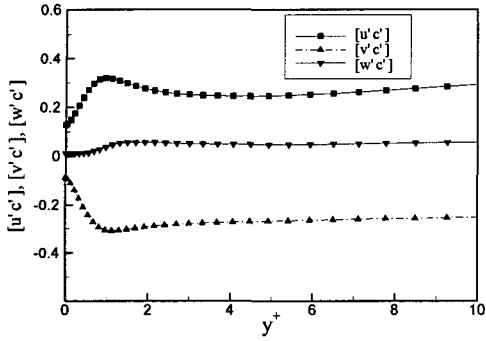
Fig. 5 Concentration rms in the wall region at $Sc=1670$

은 Re 에 해당하기 때문인 것으로 판단된다.

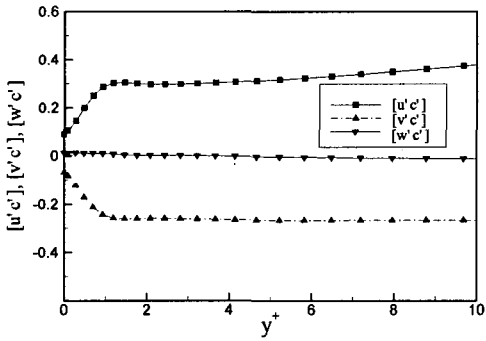
Fig. 4는 rpm=500인 경우 $y^+=1.0$ 지점에서 주유동 방향 [Fig. 4(a)]과 횡방향 [Fig. 4(b)]으로의 두 지점 상관관계계수(two point correlation coefficient) 들을 각각 보여준다. Fig 4(a)를 살펴보면 상관계수가 벽좌표 약 350 (회전각 60° 에 해당) 이내에서 0으로 수렴하고 있으며 이는 선행연구⁽⁶⁾에서 관찰한 속도 상관계수의 경우와 매우 유사하다. 또한 Fig. 4(b)를 보면 횡방향 벽좌표 80 이내에서 상관계수가 0으로 수렴하며 이는 횡방향 계산 영역 크기의 약 9%에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 회전방향과 횡방향으로 생성될 수 있는 농도장의 가장 긴 장파장을 포함할 수 있고 이는 본 연구의 계산 영역이 충분히 크게 설정 되었음을 의미한다.

Fig. 5는 세 경우의 rpm에 대하여 y^+ 에 따른 농도 rms ($\langle \rangle$ 로 표시)값을 c^* 로 무차원하여 보여 준 것이다. 세 경우 모두 Nernst 확산층 두께에 해당하는 $y^+ = 1$ 근처에서 최대값을 보이고 있다. 이는 주유동방향의 속도성분의 경우 점성저층과 완충역의 경계에 해당하는 $y^+ = 10$ 근처에서 최대가 되는 것과 흡사하다.⁽¹²⁾

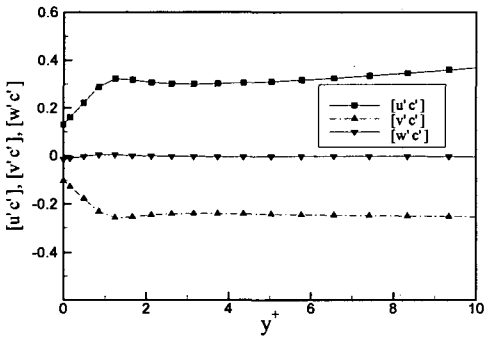
Fig. 6은 각 rpm에 대해 벽좌표에 따라서 각방향의 속도성분-농도 상관관계를 나타낸 것이다. 각 성분의 상관 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 각각의 속도 rms (root mean square) 와 농도 rms로 정규화 (normalization) 시켜서 표시하였다. 여기서 u' , v' , w' 는 각각 회전방향, 수직방향, 횡방향의 섭동 속도성분을 의미한다. 가령 정규화된 회전방향의 상관식은 다음과 같이 표현될 수 있다.



(a) rpm=200



(b) rpm=500

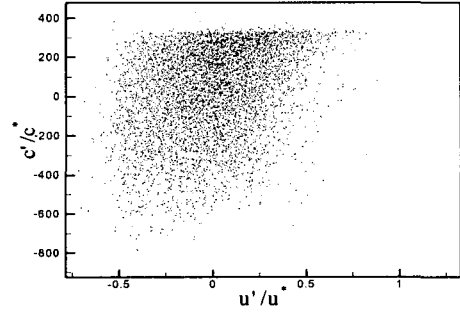


(c) rpm=1000

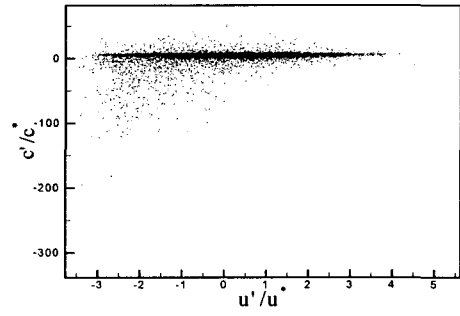
Fig. 6 Normalized correlation between velocity and concentration fluctuations in the wall region, Sc=1670

$$[u'c'] = \overline{u'c'} / \langle u' \rangle \langle c' \rangle \quad (14)$$

여기서 뒀첨자 $\bar{\quad}$ 표시는 평균을 의미한다. 따라



(a) y+=1.0



(b) y+=5.0

Fig. 7 Correlation between u' and c' in the wall region, rpm=500, Sc=1670

서 정규화된 상관값의 절대값의 크기는 0~1 사이에 존재하게 되며 1일 경우에는 완전한 상관의 의미하며 0일 경우에는 상관이 전혀 없음을 의미한다. Fig. 6을 보면 $[u'c']$ 와 $[v'c']$ 의 절대값은 Nernst 확산층 두께 외부에서는 대체로 일정하지만 Nernst 확산층 내부에서는 벽으로 갈수록 점차로 작아지고 있으며 그 크기는 두 경우 매우 비슷하다. 부호를 살펴보면 $[u'c']$ 는 양의 부호를 갖고 $[v'c']$ 는 음의 부호를 갖는다. 이는 C의 기울기가 수직방향으로 양의 부호를 갖기 때문에 순간적으로 v' 이 양일 경우 c' 은 음을 갖게 되는 경우가 많기 때문에 통계적인 $[v'c']$ 는 음이 되고 $[u'v']$ 는 음의 상관 관계를 갖게 되므로 $[u'c']$ 는 $[v'c']$ 와 반대로 양의 부호를 갖게 된다. 또한 $[w'c']$ 는 거의 0에 가까우며 이는 횡방향의 속도 섭동성분과 농도섭동은 상관관계가 거의 없음을 의미한다. 또한 이러한 모든 경향은 세 경우의 rpm에서 매우 유사하게 관찰 된다. 속도섭동-농

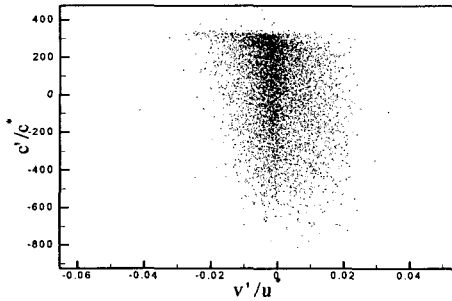
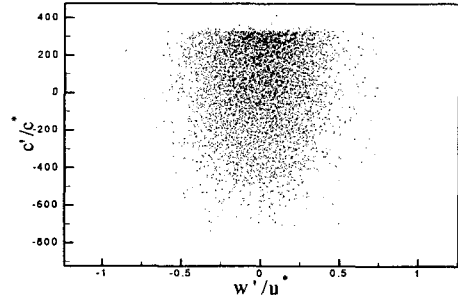
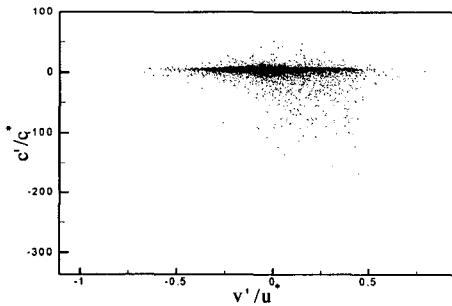
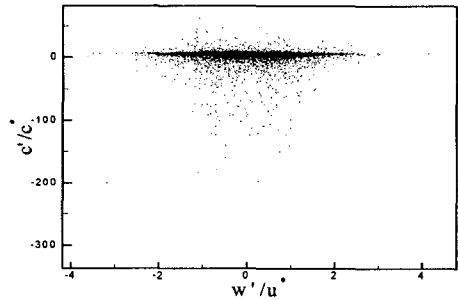
(a) $y^+=1.0$ (a) $y^+=1.0$ (b) $y^+=5.0$ (b) $y^+=5.0$

Fig. 8 Correlation between v' and c' in the wall region, rpm=500, $Sc=1670$

Fig. 9 Correlation between w' and c' in the wall region, rpm=500, $Sc=1670$

도섭동의 상관관계를 더욱 자세히 관찰하고자 속도섭동-농도섭동의 분포도를 각 성분별로 Fig. 7, 8, 9에 나타내었다. Fig. 7은 주유동방향의 속도섭동성분과 농도섭동의 분포도이며 Fig. 7(a)는 $y^+ = 1$ 로서 Nernst 확산층 두께 근처에 해당하며 Fig. 7(b)는 $y^+ = 5$ 로서 C' 는 거의 일정하며 점성저층 영역에 해당한다. 두 경우 모두 전체적으로 양의 상관관계를 보이고 있으며 $y^+ = 5$ 인 지점에서 c' 의 값은 0에 가까운 양의 값에 상당한 많은 빈도를 보이고 있다. 이러한 현상은 Sc 가 매우 크며 Nernst 확산층 외부에서 발견되었다.

Fig. 8은 수직방향의 속도섭동성분과 농도섭동의 분포도이며 음의 상관관계를 보이고 있고 Fig. 9는 횡방향의 속도섭동성분과 농도섭동의 분포도로서 상호간에 상관성이 거의 없음이 뚜렷이 관찰된다.

3.2 순간 스칼라장

Fig. 10은 $y^+=5$ 에서 순간적인 농도 섭동의 음

의 값의 등고선을 회전방향의 길이 좌표 (S)와 횡방향 좌표(z)평면에서 각각의 rpm에 대해서 보여준다. 이 지점은 점성저층이면서 Nernst 확산층의 외부영역에 해당된다. rpm이 증가함에 따라 공간적인 길이규모는 전형적으로 감소하고 있다. 또한 회전방향으로의 유맥(streak)이 뚜렷이 관찰된다. 또한 대부분의 영역은 양의 값을 가지며 음의 값은 매우 간헐적으로 존재하게 됨을 알 수 있다. [Fig. 7, 8, 9의 (b)를 참조]

Fig. 11은 각각의 rpm에 대해서 농도 섭동의 등고선을 횡방향과 수직방향의 벽좌표에서 보여준다. 여기서 실선은 양의 값을, 점선은 음의 값을 나타낸다. 벽좌표로 표시될 경우 농도의 길이 규모가 세경우가 비슷하며 이는 실제의 길이규모는 rpm이 클수록 감소함을 의미한다. 또한 Nernst 확산층 근처에서 매우 활발한 섭동이 관찰된다. 한편 Nernst 확산층 내부에서는 양의 값과 음의 값이 순차적으로 고르게 분포하지만 의

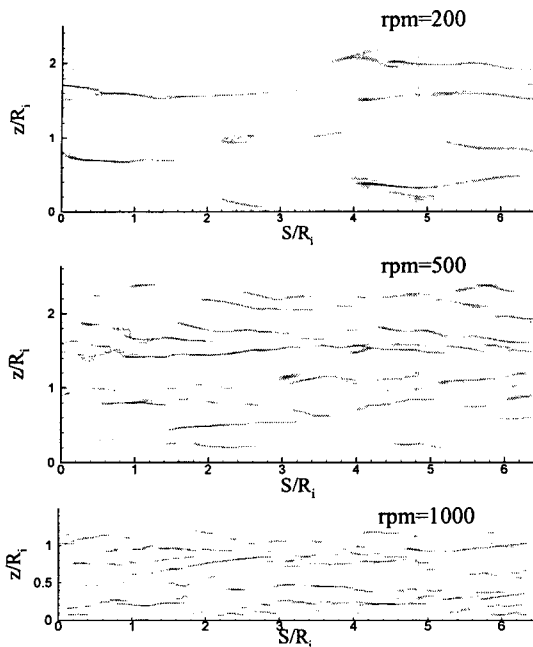


Fig. 10 Instantaneous negative c' contours in the S - z plane at $y^+=5.0$

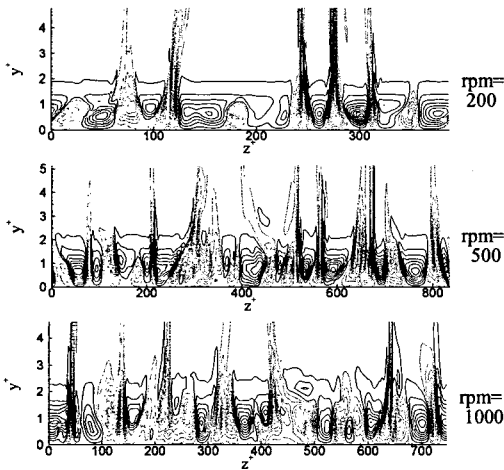


Fig. 11 Instantaneous c' contours in a y - z plane

부에서는 음의 값이 간헐적으로 파열되고 있다. 이는 Fig. 7, 8, 9의 (b)에서 관찰된 농도 섭동이 0에 가까운 양의 값에 매우 많은 빈도를 보인다는 사실을 설명하는 중요한 단서가 된다. 이에 대해서는 Sc 가 작은 경우와 비교하여 probability density function을 도입하여 설명할 필요가 있으며 이에 대해서는 본 논문의 후속논문인 part (2)

에서 심도있게 다루어진다.

4. 결론

본 연구에서는 DNS 방법을 이용하여 회전하는 원형단면 실린더 주위에서의 난류유동에서 매우 높은 Schmidt 수 ($Sc=1670$)인 경우에 대해서 물질 전달에 대한 전산 해석적 연구를 수행하였다. Sc 가 매우 높은 경우 벽 근처의 Nernst 확산층 두께가 매우 작아짐이 확인되었다. 실린더의 회전 속도가 증가함에 따라 Sherwood 수 (Sh)도 증가함이 확인되었고 정량적으로 다른 실험치들과 매우 잘 일치되었다.

속도분포-농도의 상관관계에 대한 해석 결과 회전방향과 실린더로부터 수직방향의 섭동속도 성분은 농도섭동과 매우 큰 상관성이 있는 반면에 횡방향의 섭동 속도 성분은 농도 섭동과 상관성이 거의 없음이 밝혀졌다. 높은 Sc 인 경우 Nernst 확산층은 점성저층 내부에 존재하게 되며 이 경우 Nernst 확산층 외부와 점성저층 내부에서는 0에 가까운 양의 농도 섭동이 많은 빈도를 보이며 음의 농도 섭동은 매우 간헐적으로 발생하였다. 순간적인 농도 섭동을 관찰한 결과 실린더의 회전 속도가 증가함에 따라 농도 섭동의 길이규모는 작아지는 현상을 보이며 Nernst 확산층 내부에서 매우 활발한 농도 섭동이 관찰되었다.

본 연구의 결과는 향후 높은 Sc 에서 물질 전달과 관련된 침식-부식 문제를 해결하기 위하여 회전 기계류에 대한 해석을 할 경우 요긴하게 활용될 것으로 전망된다.

후기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Kader, B. A. and Yaglom, A. M., 1972, "Heat and Mass Transfer Laws for Fully Turbulent Wall Flows," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, No. 9, pp. 2329~2351.
- (2) Kader, B. A., 1981, "Temperature and Concentration Profiles in Fully Turbulent Boundary

- Layers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, No. 9, pp. 1541~1544.
- (3) Calmet, I. and Magnaudet, J., 1997, "Large-Eddy Simulation of High-Schmidt Number Mass Transfer in a Turbulent Channel Flow," *Physics of Fluids*, Vol. 9, No. 2, pp. 438~455.
- (4) Chung, S. Y. and Sung, H. J., 2003, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Concentric Annular Pipe Flow, Part 2 : Heat Transfer," *J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 24, pp. 399~411.
- (5) Yang, K. S., Hwang, J. Y., Bremhorst, K. and Nestic, S., 2003, "Numerical Investigation of Turbulent Flow Around a Rotating Stepped Cylinder for Corrosion Study," *The Canadian J. Chemical Eng.*, Vol. 81, No. 1, pp. 26~36.
- (6) Hwang, J. Y. and Yang, K. S., 2005, "DNS of Turbulent Flow Around a Rotating Circular Cylinder at Low Reynolds Number," *Trans. of the KSME(B)*, submitted.
- (7) Eisenberg, M., Tobias, C. W. and Wilke, C. R., 1954, *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, Vol. 51, No. 1.
- (8) Bremhorst, K., "A Continued Study on the Electrochemical Deposition of Cupric Ions for the Determination of Mass Transfer Rates to a Stepped Rotating Cylinder Electrode," personal communication.
- (9) Leonard, B. P., 1979, "A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," *Comp. Meth. in Applied Mech. and Eng.*, Vol. 19, pp. 59~98.
- (10) Leonard, B. P., 1988, "Simple High-Accuracy Resolution Program for Convective Modelling of Discontinuity," *Int. J. for Num. Meth. in Fluids.*, Vol. 8, pp. 1291~1318.
- (11) Rosenfeld, M., Kwak, D. and Vinokur, M., 1994, "A Fractional Step Solution Method for the Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations in Generalized Coordinate Systems," *J. Computational Physics*, Vol. 94, pp. 102~137.
- (12) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, "Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 133~166.