

< 논문 >

# 회전하는 원형단면 실린더 주위의 난류유동 물질전달에 대한 직접수치모사 (II) - Schmidt 수의 영향 -

황 증 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 (II) - Effects of Schmidt Number -

Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

**Key Words:** Direct Numerical Simulation(직접수치모사), Correlation(상관관계), Probability Density Function(pdf, 확률밀도함수), Nernst Diffusion Layer(Nernst 확산층)

### Abstract

In this paper, mass transfer in turbulent flow around a rotating circular cylinder is investigated by Direct Numerical Simulation for Schmidt numbers  $Sc=1$  and 1670. Correlation between Sherwood and Reynolds number predicted agrees well with other experimental results over both  $Sc$ . Reynolds analogy identified at  $Sc=1$  definitely causes a strong correlation between concentration fluctuation and streamwise velocity. For  $Sc=1670$ , it is found that positive small values of concentration fluctuations are observed more frequently than the case of  $Sc=1$  particularly out of the range of Nernst diffusion layer in the viscous sub-layer. This fact is fully confirmed by detailed statistical study using a probability density function of concentration fluctuations.

### 1. 서론

난류유동에 의한 물질전달 혹은 열전달에 대한 연구는 앞서 발표된 논문 (I)<sup>(1)</sup>에서 명시했듯이 공학적인 응용 측면의 중요성 때문에 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔다. 특히 물질전달에 있어서 Schmidt 수( $Sc$ )는 고체면과 유체사이에서의 물질 전달율을 결정하는 중요한

역할을 한다. 따라서 그동안  $Sc$ 의 물질전달에의 영향에 대한 많은 연구가 이루어져 물질전달에 대한 중요한 메카니즘들이 많이 밝혀졌다. 그 예로서 일반적으로 높은  $Sc$ 인 경우 물질전달 계수는  $Sc^{-2/3}$  의존성을 갖게 된다는 사실은 이미 널리 알려진 사실이다.<sup>(2-4)</sup> Kader와 Yaglom<sup>(2)</sup>은 평판 위의 난류유동장에서  $6 \times 10^{-3} < Sc$  또는  $Pr$  (Prandtl 수)  $< 10^6$  범위에 대해서 기존에 존재 하던 속도장과 온도장 분포의 실험결과들을 활용하여  $Re$  (Reynolds 수)와  $Sc$  (혹은  $Pr$ )등을 파라미터로 하여 물질 (혹은 온도) 전달 계수를 결정하는 경험식들을 개발 하였다. 특히 Kader<sup>(3)</sup>는 난류 경계층에서 다양한  $Sc$  혹은  $Pr$ 에 대한 방대한 실험자료를 이용하여 벽좌표계에서 농도

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

혹은 온도와 같은 스칼라량의 분포에 대한 관계식을 제공하였다.

본 연구에서는 궁극적으로는 침식-부식문제를 해결하기 위한 회전하는 기계류의 가장 단순화된 모델로서 매우 중요한 형상인 회전하는 원형단면 실린더 주위의 난류유동에서  $Sc$ 의 물질전달에의 영향에 대한 연구를 Direct Numerical Simulation (DNS)를 이용하여 수행하였다. 본 연구는 높은  $Sc(=1670)$ 에 대하여 이미 발표된 논문(I)<sup>(1)</sup>의 후속 논문으로서 물질전달에의  $Sc$ 의 직접적인 영향과 농도장의 분포 및 농도 섭동의 구조에 대하여 명확한 이해를 도모하고자 하는데 그 목적이 있다. 이러한 형상에 대한 실험적 연구는 이미 수행된 적이 있지만<sup>(5,6)</sup> 본 연구에서와 같이 높은  $Sc$ 와 낮은  $Sc$ 에서  $Sc$ 의 농도장에서의 영향과 유동장과의 상관관계에 대해서 그 메커니즘과 관련된 현상을 체계적으로 밝혀낸 연구는 저자가 아는 한 전무하다. 왜냐하면  $Sc$ 가 증가하면 벽 근처에 존재하는 확산저층(diffusive sublayer)의 두께가 점성저층(viscous sublayer)의 두께보다 더 작아지게 되므로 실험적 연구로는 확산 저층 근처 혹은 그 내부에서 스칼라량의 거동 및 섭동 현상에 대한 정확한 관찰이 매우 어렵기 때문이다.

한편 Calmet 등<sup>(4)</sup>은 평판 사이 난류 유동에서  $Sc$ 의 물질전달에의 영향에 대한 LES(Large Eddy Simulation)를 수행하였다. 이러한 전산해석적 연구의 도움으로 평판 사이 유동에서 물질전달 메커니즘 및 구조에 대한 한층 더 명확한 이해를 얻을 수 있었다. 그러나 더욱 정교한 통계처리의 부족으로 인하여 낮은  $Sc$ 인 경우와 비교되어 높은  $Sc$ 의 농도장의 특징 및 영향에 대해서는 아직 까지도 명확히 밝혀지지 않고 있다.

이러한 사항들을 해결하고자 본 연구에서는 난류 유동장에서 각 방향의 속도성분과 농도장의 상관관계에 있어서  $Sc$ 의 영향 및 특징을 밝혀내어 물질전달에 대하여 한층 더 명확한 이해를 도

모하였다. 풍부한 계산 자료를 이용한 통계처리를 통하여 본 연구에서 밝혀진 사실들을 정량화시키는 작업을 수행하였다. 이러한 작업의 결과는 향후 침식-부식 문제와 결부된 더욱 복잡한 회전 기계류에 대한 유동 및 물질전달 해석을 하고자 하는 연구자들에게 검증을 위한 기본적인 데이터뿐만 아니라 이러한 문제에 대한 정확한 물리적 이해를 제공하게 될 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 지배방정식과 수치해석법

본 절은 앞서 발표된 논문 (I)에서와 같다.

### 2.2 유동 파라미터 및 경계조건

본 연구에서는 실린더의 회전속도  $\text{rpm}=500$ ,  $Sc=1$ 인 경우에 대해서  $Sc=1670$ 인 경우와 비교하였으며 다른 유동 파라미터 및 경계조건은 앞서 발표된 논문 (I)에서와 같다. Table 1은 본 연구에서 수행된 경우에 대한 평균 물리량들을 보여준다.

## 3. 결과 및 토론

본 연구에서 수행한 통계처리 방식은 선행논문 (I)에서의 경우와 동일하다. Fig. 1은 본 연구에서 수행된 두 경우의 서로 다른  $Sc$ 에 대한 통계처리를 수행하여 회전 속도와 물질전달의 상관관계를 보여준다. 여기서 삼각형 심볼은 Bremhorst<sup>(5)</sup>에 의한 실험결과이고 실선은 Eisenberg 등<sup>(6)</sup>에 의한 실험결과로부터 산출된 식으로 다음과 같다. [앞서 발표된 논문(I) 참조]

Table 1 Mean flow parameters(SI unit)

case	$Sc$	$u^*$	$c^*$	$\delta_N$	$K$	$Re^*_R$
1	1	0.040	$7.4 \times 10^{-2}$	$3.9 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-3}$	349
2	1670	0.040	$6.1 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	348

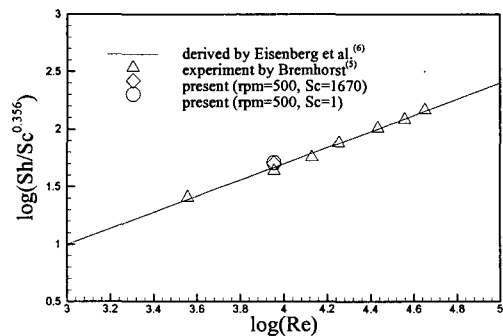


Fig. 1 Correlation for mass transfer

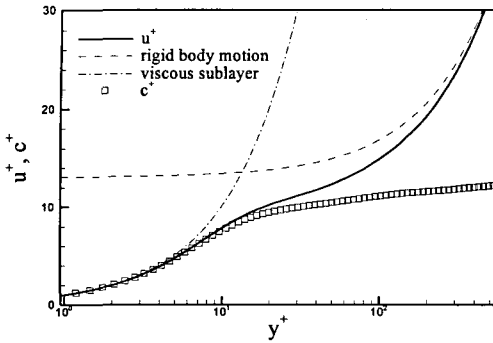


Fig. 2 Mean concentration in the wall region, rpm=500, Sc=1

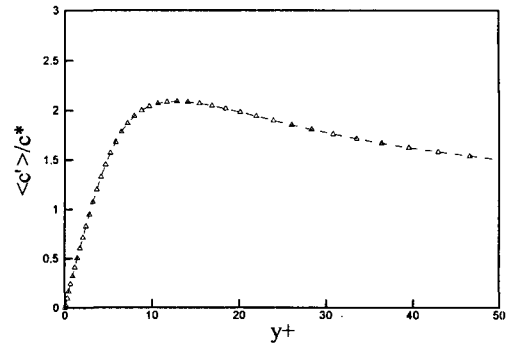


Fig. 3 Concentration rms in the wall region at rpm=500, Sc=1

$$Sh = 0.079 Re^{0.70} Sc^{0.356} \quad (1)$$

본 연구의 두 결과와 Bremhorst의 실험과 식 (1)이 일관성 있게 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 전산 해석적 연구의 정확성을 검증해주고 있다.

Fig. 2는 Sc=1인 경우에 대해서 실린더에서 수직방향으로의 벽좌표( $y^+$ )에 대한 평균 농도장( $C^+$ , 심볼로 표시)과 회전방향의 속도장( $u^+$ , 실선으로 표시)의 분포를 나타낸 것이다.  $0 < y^+ < 5$  구간에서 속도분포가 선형적인 점성저층과 농도 분포가 선형적인 확산저층이 존재하고 있으며  $y^+=12$  까지 속도장과 농도장의 분포가 거의 일치된다. 이는 Sc=1인 경우 레이놀즈 유사성(analogy)이 성립하기 때문이며 그 이후의 영역에서는 속도는 rpm=500에 해당하는 강제회전운동을, 농도는 주어진 바깥 경계조건을 점근적으로 만족시키고 있다. 또한 Sc=1인 경우 벽좌표로 무차원화 된 Nernst 확산층 두께( $\delta_N^+$ )는 약 13.4로 확인 되었으며 Sc=1670인 경우 0.97임을 상기 할 때 Sc가 작아짐에 따라 Nernst 확산층 두께는 매우 커지고 있음이 확인된다. 여기서 주의할 점은 식 (2)와 같이 정의되는 Nernst 확산층 두께는 확산저층보다 다소 크며 이 차이는 Sc가 작을 경우 두드러진다.

$$\delta_N = \Delta c / \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (2)$$

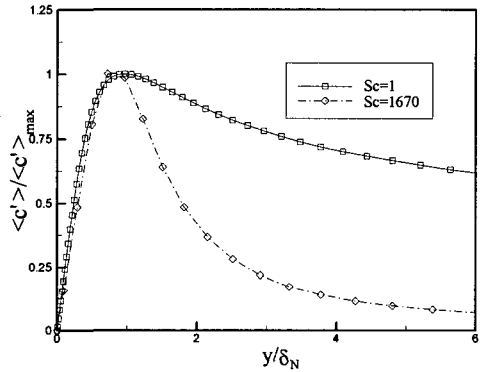


Fig. 4 Normalized concentration rms in the wall region at rpm=500

왜냐하면 Nernst 확산층 이후의 영역에서 Sc가 작은 경우는 농도가 계속적으로 증가하지만 Sc가 큰 경우는 농도가 거의 일정하기 때문이다.[논문 (I)의 Fig. 3 참조]

일반적으로 Nernst 확산층 두께와 Sc는 다음과 관계를 만족한다.<sup>(6)</sup>

$$\delta_N \sim Sc^{-0.356} \quad (3)$$

이는 식 (1)로부터 유도할 수 있다. 본 연구 결과 다음과 같은 식이 성립함이 확인되었으며 이는 식 (3)과 비교해 보면 매우 잘 일치하고 있다.

$$\delta_N^+ = 13.4 Sc^{-0.354} \quad (4)$$

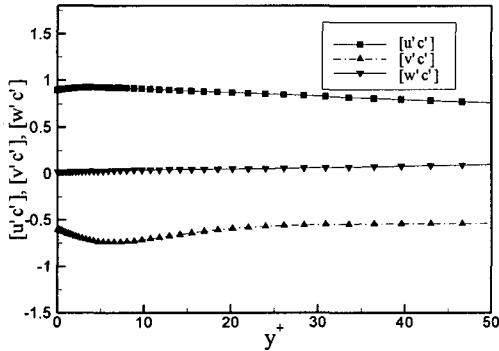
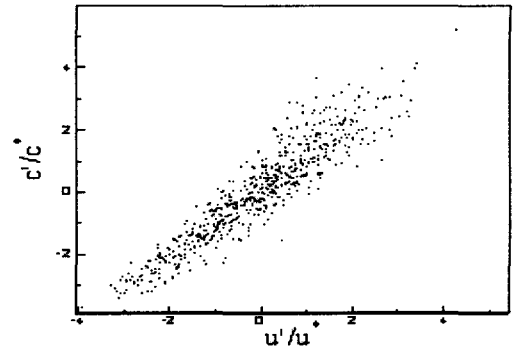


Fig. 5 Normalized correlation between velocity and concentration fluctuation in the wall region, rpm=500,  $Sc=1$

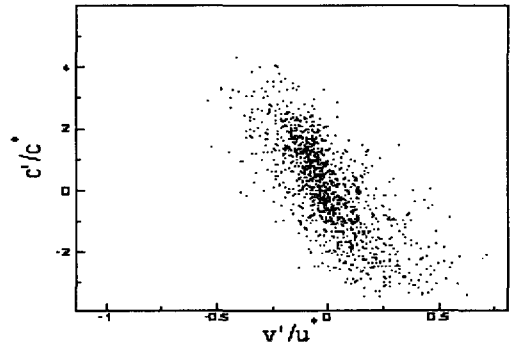
Fig. 3은  $Sc=1$ 인 경우에 대하여  $y^+$ 에 따른 농도 rms 값을  $c^*$ 로 무차원하여 보여 준 것이다. Nernst 확산층 두께에 해당하는  $y^+ = 13$  근처에서 농도의 최대값을 보이고 있다. 같은 rpm에서  $Sc=1670$ 인 경우 역시 Nernst 확산층 두께에 해당하는  $y^+ = 1$  근처에서 최대값을 보인다[논문 (I)의 Fig. 5 참조].

$Sc=1$ 인 경우와  $Sc=1670$ 인 경우에 대하여  $y$ 에 따른 농도 rms 값의 분포 형태를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 상호적인 비교를 용이하게 하기 위하여  $y$ 는  $\delta_N$ 으로  $\langle c \rangle$ 는 각 경우에 해당되는  $\langle c \rangle$ 의 최대값( $\langle c \rangle_{max}$ )으로 정규화 시켜 함께 도시하였다. 그 결과 Nernst 확산층 외부 ( $y/\delta_N > 1$ 에 해당)에서  $Sc=1670$ 인 경우 벽에서부터 멀리 떨어질수록 정규화된 농도 rms의 값이  $Sc=1$ 인 경우보다 훨씬 가파르게 감소하는 경향을 보인다. 이는 위에서 설명했듯이  $Sc$ 가 큰 경우 Nernst 확산층 외부에서 평균 농도는 거의 일정하지만  $Sc$ 가 작은 경우는  $y$ 에 따른 평균농도의 구배가 가파른 양의 값을 갖는다는 사실에서 그 원인을 찾을 수 있다. 가령 유체 입자가 수직방향으로 섭동을 할 경우 농도 구배가 클수록 농도의 섭동도 커지게 되기 때문이다. 반면에  $Sc$ 가 클 경우 Nernst 확산층 외부에서 농도구배가 매우 작아지므로 농도 섭동 역시 갑자기 감소하게 되는 것이다.

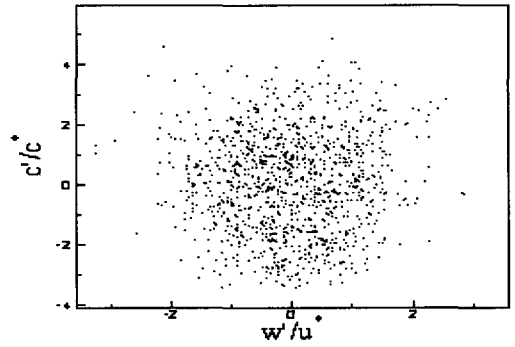
Fig. 5는 각  $Sc=1$ 인 경우 벽좌표에 따라서 각 방향의 속도성분-농도 상관관계를 나타낸 것이



(a)  $u', c'$



(b)  $v', c'$



(c)  $w', c'$

Fig. 6 Correlation between velocity and concentration fluctuation at  $y^+=5.0$ , rpm=500,  $Sc=1$

다. 앞서 발표된 논문 (I)에서와 마찬가지로 방법으로 각 성분의 상관 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 각각의 속도 rms 와 농도 rms로 정규

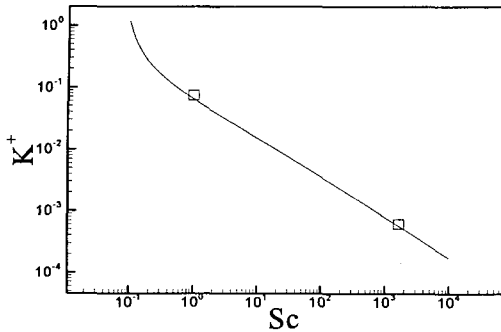


Fig. 7 Averaged mass transfer coefficient, rpm=500

화 시켜서 표시하였다. Fig. 5의  $[u'c']$ 의 값이 벽 근처에서 거의 1에 가깝다는 사실은 레이놀즈 유사성이 성립함을 의미한다. 즉  $Sc=1$ 일 경우  $u'$ 과  $c'$ 은 매우 많이 상관되고 있음을 단적으로 보여주고 있다.  $[v'c']$ 는 벽 근처에서 약  $-0.8 \sim -0.6$  정도로 상관되어 있으며 이는  $\langle u'v' \rangle$ 의 음의 상관 법칙에 기인하는 것이다. 반면에  $[w'c']$ 는  $Sc$ 가 큰 경우에서와 마찬가지로 상관관계가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 앞서 발표된 논문 (I)과 본 연구를 종합하여 고찰하면, 유동과 농도의 상관관계는 다음의 두가지 메카니즘으로 요약될 수 있으며,

- [1] 평균속도장 및 농도장의 구배에 의한 상관성
- [2] 레이놀즈 유사성에 관한 상관성

이 두가지 메카니즘은 서로 복합적으로 유동장 및 농도장의 상관관계에 영향을 미치게 된다.

속도-농도의 상관관계를 더욱 자세히 관찰하고자 Fig. 6에  $y^+=5.0$ 에서 각 방향의 속도섭동성분과 농도섭동의 분포도를 나타내었다. Fig. 6(a)는 주유동 방향의 속도섭동성분과의, Fig. 6(b)는 벽면으로부터 수직 방향의 속도섭동성분과의, Fig. 6(c)는 횡방향 속도섭동성분과의 분포도를 보여준다.  $Sc$ 가 높은 경우와 마찬가지로 주유동방향 속도섭동성분과 농도섭동은 양의 상관관계를 수직방향 속도섭동성분과 농도섭동은 음의 상관관계를 보이며 횡방향섭동성분과 농도섭동의 상관관계는 거의 없음을 뚜렷이 관찰할 수 있다. 또한  $Sc=1$ 인 경우 레이놀즈 유사성에 의하여  $Sc=1670$ 인 경우보다 상관 정도가 더욱 큼을 확인할 수 있다.

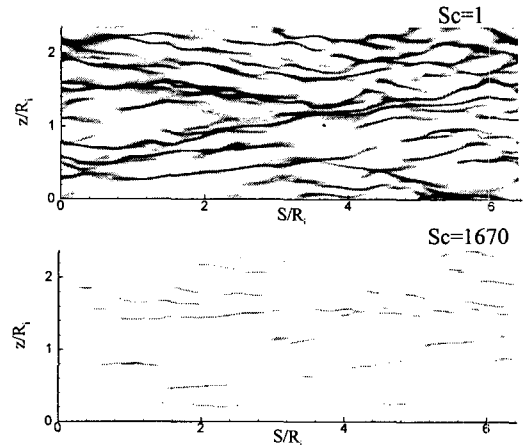


Fig. 8 Instantaneous negative  $c'$  contours in the  $x$ - $z$  plane (rpm=500,  $y^+=5$ )

한편 평판 사이의 난류유동의 경우 벽단위로 표시된 물질전달 계수( $K^+$ )는  $Sc$ 와  $Re^*$ 에 대하여 다음과 같은 식을 만족한다고 알려져 있다.<sup>(2)</sup>

$$K^+ = [2.12 \ln(Re^* Sc) + 12.5 Sc^{2/3} - 9.37]^{-1} \quad (5)$$

본 연구의 계산 결과와 식 (5)를 비교하여 나타낸 Fig. 7을 보면 흥미롭게도 그 결과가 상당히 유사하다.

Fig. 8은 각  $Sc$ 에 대하여 임의 순간의  $y^+=5$  지점에서 농도 섭동의 음의 값의 등고선을 회전방향의 길이 좌표 ( $S$ )와 횡방향 좌표( $z$ ) 평면에서 보여준다. 두 경우 모두 회전방향으로의 유맥(streak)이 관찰된다. 하지만  $Sc=1$ 인 경우 양의 값을 가지는 영역과 음의 값을 가지는 영역이 비슷한 정도로 분포하지만  $Sc=1670$ 인 경우 앞서 발표된 논문 (I)에서 관찰했듯이 대부분의 영역은 0에 가까운 양의 값을 가지며 음의 값은 그 크기는 크지만 매우 간헐적으로 분포하게 됨이 관찰된다. 이는 본 연구에서 관찰된 높은  $Sc$ 와 낮은  $Sc$ 의 중요한 차이점이다.

Fig. 9는 각  $Sc$ 에 대해서 농도 섭동의 등고선을 횡방향과 수직방향의 벽좌표에서 보여준다. 여기서 실선은 양의 값을, 점선은 음의 값을 나타낸다. 이 그림은 높은  $Sc$ 의 경우와 낮은  $Sc$ 의 경우에 대한 몇 가지 극단적인 차이점을 제시해준다. 첫째,  $Sc=1$ 인 경우의 농도 섭동 길이규모

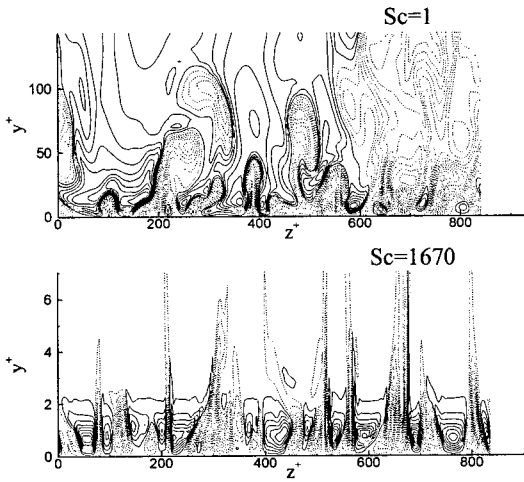


Fig. 9  $c'$  contours in a  $y$ - $z$  plane, rpm=500

가  $Sc=1670$ 인 경우보다 훨씬 크며 두 경우 모두 Nernst 확산층 근처에서 매우 활발한 섭동이 관찰된다. 둘째, 등고선 상에서 섬(island) 형태로 표시되는 농도 섭동의 극값들이 두 경우 모두 Nernst 확산층 두께 근처에서 발견된다. 이는 Fig. 4의 결과를 뒷받침해준다. 셋째,  $Sc=1$ 인 경우 벽에서 멀리 떨어질수록 농도 섭동의 절대값이 완만히 감소하는 반면에  $Sc=1670$ 인 경우  $y^+=2$ 를 지나면서 농도 섭동 값이 매우 작음을 확인할 수 있다. 이 또한 Fig. 4의 결과를 재확인해준다. 마지막으로  $Sc=1$ 인 경우는 Nernst 확산층 내부와 외부에서 농도 섭동의 양의 값과 음의 값이 고르게 분포하지만  $Sc=1670$ 인 경우 Nernst 확산층 외부에서는 음의 값이 간헐적으로 파열되고 있다. 이는 Fig. 8에서 관찰한 바와 같이  $Sc$ 가 큰 경우 농도 섭동이 0에 가까운 양의 값에 매우 많은 빈도를 보인다는 사실과 일치한다.

이 사실을 정량적으로 명확히 살펴보기 위하여 다음과 같이 정의되는 확률밀도함수(probability density function, pdf)를 도입하였다.<sup>(7)</sup>

$$pdf(c')\Delta c' = \frac{n}{N} \quad (6)$$

$$pdf(c') \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} pdf(c')dc' = 1$$

여기서  $N$ 은 본 연구의 통계처리에서 사용된 샘플링 개수이고  $n$ 은  $c'$ 와  $c'+\Delta c'$  사이에 해당

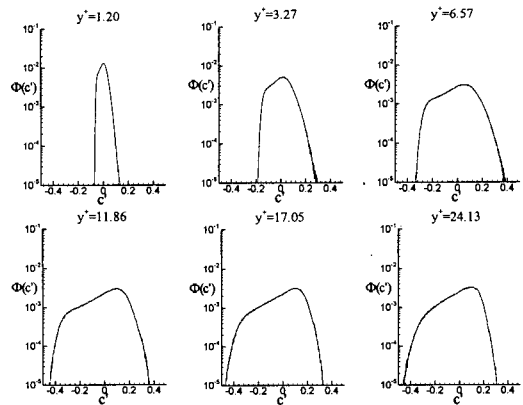


Fig. 10 Probability density function at rpm=500,  $Sc=1$  near the wall

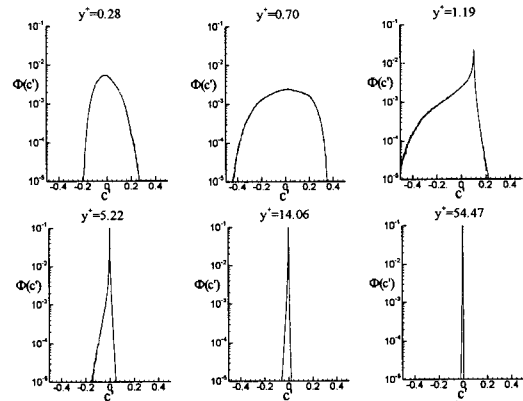


Fig. 11 Probability density function at rpm=500,  $Sc=1670$  near the wall

되는 샘플링 개수이다.  $N$ 과  $\Delta c'$ 을 다양하게 변화시켜 테스트한 결과 pdf 분포의 차이는 거의 발견되지 않았다.

Fig. 10은  $Sc=1$ 인 경우 농도섭동 pdf를 여러 지점의  $y^+$ 에서 나타낸 것이다. 이 경우의 pdf 형태는  $y^+$ 에 따라서 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만  $Sc=1670$ 인 경우의 농도섭동 pdf를 나타내는 Fig. 11을 보면  $y^+$ 가 확산층의 외부인 경우 pdf의 형태의 큰 변화가 관찰된다.  $y^+=1.19$ 인 경우의 pdf 형태를 보면 농도섭동의 분포가 갑자기 0에 가까운 양의 값에 뾰족점이 발생할 정도로 많이 몰려있다.(로그 스케일로 표시된 pdf임을 상기하기 바란다.) 동시에 양의 값보다 큰 절대값을 갖는 음의 값들이 간헐적인 빈도를 보이고 있다. 이는 Fig. 8, Fig. 9에서 관찰한 사실을 그대로 반

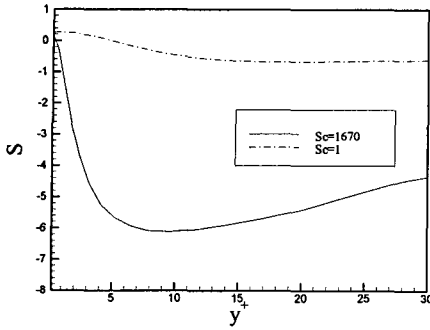


Fig. 12 Skewness at rpm=500

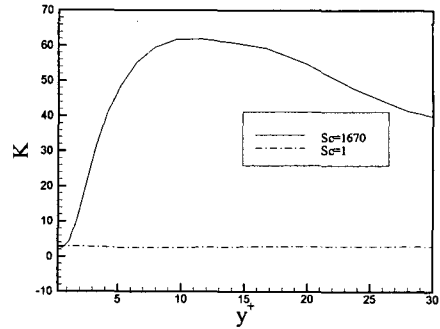


Fig. 13 Kurtosis at rpm=500

영하고 있다.  $y^+$ 가 증가함에 따라 이러한 현상이 더욱 커지고 있지만 ( $y^+=5.22$ )  $y^+$ 가 점성저층을 넘어가면서 이 현상은 점점 둔화되고 있다. ( $y^+=14.06$ ,  $y^+=54.47$ ) 즉 이러한 현상이 심하게 관찰되는 영역은 Nernst 확산층 외부와 점성저층 내부 영역임을 알 수 있으며 이 영역은  $y^+$ 에 따른 평균 농도 구배는 매우 작지만 평균 속도 구배는 매우 큰 영역으로 결론 지을 수 있다.  $Sc=1$ 인 경우는 평균 농도 구배와 평균 속도구배가 거의 일치하기 때문에 이러한 현상이 관찰되지 않은 것이다.

농도 섭동 pdf의 기하학적 분포 형태를 자세히 고찰하기 위하여 다음과 같이 비대칭성의 정도를 나타내는 비대칭도(skewness,  $S$ )와 뾰족한 정도를 나타내는 비편평도(kurtosis,  $K$ )를 정의한다.<sup>(7)</sup> 즉  $S$ 와  $K$ 의 절대값이 클수록 비대칭성과 뾰족한 정도가 증가한다.

$$S \equiv \frac{\overline{c'^3}}{\sigma^3} = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} c'^3 pdf(c') dc' \quad (7)$$

$$K \equiv \frac{\overline{c'^4}}{\sigma^4} = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{+\infty} c'^4 pdf(c') dc' \quad (8)$$

여기서 분산(variance,  $\sigma$ )은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\sigma^2 \equiv \overline{c'^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} c'^2 pdf(c') dc' \quad (9)$$

Fig. 12와 Fig. 13은  $y^+$ 에 따른  $S$ 와  $K$ 를 각각

보여준다.  $Sc=1$ 인 경우  $Sc=1670$ 인 경우에 비하여  $S$ 와  $K$ 의 절대값이 매우 작으며  $Sc=1670$ 인 경우 벽으로부터 점성저층 두께 근처까지  $S$ 와  $K$ 가 모두 증가하고 있다. 하지만 점성저층 두께를 지나면서 다시 감소하고 있으며 이 사실은 Fig. 11에서 확인한 바와 일치한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 회전하는 원형단면 실린더 주위에서의 난류유동에서 매우 높은 Schmidt 수 ( $Sc=1670$ )와 낮은 Schmidt 수( $Sc=1$ )인 경우에 대해 물질전달에 대한 비교를 DNS 방법을 이용하여 수행하였다. 벽에서의 물질 전달률의 평균값이 다른 실험치들과 매우 잘 일치되었다. 평균 농도장의 분포를 통하여  $Sc=1$ 인 경우 레이놀즈 유사도가 잘 성립함을 확인하였으며 이는 속도섭동 분포-농도섭동의 상관관계를 통하여 정량적으로 확인되었다.

높은  $Sc$ 와 낮은  $Sc$ 의 물질전달에 있어서 중요한 차이점으로서  $Sc=1670$ 인 경우 앞서 발표된 논문 (I)에서 상기했듯이 Nernst 확산층 외부와 점성저층 내부 영역에서는 0에 가까운 양의 값을 갖는 빈도가 높으며 음의 값은 그 크기는 크지만 매우 간헐적으로 분포하게 됨이 관찰되었지만  $Sc=1$ 인 경우 양의 값을 가지는 영역과 음의 값을 가지는 영역이 비슷한 정도로 분포하였다. 특히 이러한 현상이 Nernst 확산층 외부와 점성저층 내부에서 더욱 두드러짐이 농도섭동의 pdf의 해석결과 정량적으로 확인되었다.

본 연구의 결과는 향후 침식-부식 문제를 해결

하기 위하여 회전 기계류에 대한 해석을 할 경우 다양한  $Sc$ 에서 물질전달과 관련하여 귀중한 자료를 제공하게 될 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문은 2004년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-042-D00026).

### 참고문헌

- (1) Hwang, J. Y. and Yang, K. S., 2005, "Direct Numerical Simulation of Mass Transfer in Turbulent Flow Around a Rotating Circular Cylinder ( I )," *Tran. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 7, pp. 837~845.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Eisenberg, M., Tobias, C. W. and Wilke, C. R., 1954, *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, Vol. 51, No. 1.
- (7) Tennekes, H. and Lumley, J., 1972, "A First Course in Turbulence," *The MIT Press*.