

< 논문 >

후향 계단이 부착된 회전하는 실린더 주위 난류 물질전달  
- 유동유발 부식 -

윤 동 혁\* · 양 경 수†

(2007년 6월 14일 접수, 2007년 7월 31일 심사완료)

Turbulent Mass Transfer Around a Rotating Stepped Cylinder  
- Flow-Induced Corrosion -

Dong-Hyeog Yoon and Kyung-Soo Yang

**Key Words:** Direct Numerical Simulation(직접수치모사), Turbulent Mass Transfer(난류 물질전달), Corrosion(부식), Erosion(침식)

Abstract

Direct Numerical Simulation was carried out to predict mass transfer in turbulent flow around a rotating stepped cylinder. This investigation is a follow-up study of DNS of turbulent flow in Nestic et al. [Corrosion, Vol. 56, No. 10, pp. 1005 - 1014] The original motivation of this work stemmed from the efforts to design a simple device which can generate flows of high turbulence intensity at low cost for corrosion researchers. Two cases were considered;  $Sc=1$  and  $10$  both at  $Re=335$ . Here,  $Sc$  and  $Re$  stand for Schmidt number and Reynolds number, respectively, based on the step height and the surface speed of the cylinder upstream of the step. Main focus was placed on the correlation between turbulence and mass transfer. The spatio-temporal evolution of concentration field is discussed. The numerical results are qualitatively compared with those of the experiment conducted with a similar flow configuration.

기호설명

$c$  : 농도  
 $C$  : 평균 농도  
 $c'$  : 섭동 농도  
 $c^*$  : 마찰 농도  
 $D$  : 물질 확산 계수  
 $\vec{f}$  : 운동량 부가  
 $F$  : 농도 부가  
 $h$  : 계단 높이  
 $J$  : 벽전단응력 섭동크기  
 $k_m$  : 물질전달계수

$p$  : 순간 압력과 구심 포텐셜의 합  
 $r$  : 실린더 표면에서 수직 방향의 거리  
 $Re$  : Reynolds 수( $=U_0 h/\nu$ )  
 $s$  : 계단에서 실린더 표면에 따른 좌표  
 $Sc$  : Schmidt 수( $=\nu/D$ )  
 $Sh$  : Sherwood 수( $=k_m h/D$ )  
 $T$  : 벽전단응력의 크기  
 $\vec{u}$  : 속도벡터  
 $u^*$  : 마찰속도  
 $U_0$  : 계단 상류의 전속도  
 $z$  : 횡방향 좌표  
 $\delta_c^+$  : 확산저층 두께(벽단위)  
 $\delta_u^+$  : 점성저층 두께(벽단위)  
 $\nu$  : 동점성 계수  
 $\Omega$  : 회전 각속도

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과  
 E-mail : ksyang@inha.ac.kr  
 TEL : (032)860-7322 FAX : (032)868-1716  
 \* 회원, 인하대학교 대학원

## 1. 서 론

유동 박리와 재 부착이 이루어지는 복잡한 난류 유동은 여러 산업기기 전반에서 많이 발생되어 진다. 이러한 유동은 열 및 물질 전달의 메커니즘과 관련되어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 특히 녹(rust)과 관련된 현상으로, 물질전달에 의한 녹의 생성과 전달의 문제는 기계 및 화학 공정등 여러 산업 전반에서 시급히 해결해야 할 중요한 문제중 하나이다. 금속의 산화에 의하여 생성된 녹(rust)은 그 자신이 보호막의 역할을 하여 금속을 보호한다. 하지만 이러한 보호막은 침식(erosion)과 용해(dissolution)의 두 가지 메커니즘으로 인해 점점 얇아진다. 이와 같은 작용들에 의하여 파이프 금속이 유동에 노출되게 되면 다시 산화에 의한 보호막의 형성, 침식과 용해에 의한 보호막의 유실을 반복하게 되어 마침내는 파이프의 천공 및 균열을 야기할 수 있다. 자연적으로 진행되는 이런 유동유발 부식현상(flow-induced corrosion)은 배관 시스템에 막대한 경제적인 손실을 일으키며, 만약 파이프의 천공 및 균열이 원자로나 맹독성 화학 공정의 배관 시스템에서 발생한다면 매우 심각한 인명 피해도 발생할 수 있다.

난류(turbulence)는 침식에서 직접적으로 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 용해된 녹이 주유동으로 이송됨을 촉진하는 간접적인 역할도 한다. 특히 배관 중에서 fitting이나 밸브, 또는 용접된 부분 주위등과 같이 유동의 박리와 재부착에 의해 수반되는 높은 난류 강도가 유지되는 곳에서 심한 부식이 관찰된다.<sup>(1-3)</sup> 따라서 부식은 난류와 밀접한 관계를 가지고 있으며 따라서 난류와 물질전달 사이의 상관관계의 규명은 유동유발 부식문제 해결을 위한 핵심이라고 할 수 있다.

난류 물질전달을 실험적으로 연구하기 위해서는 손쉽게 제어 가능한 난류 유동장을 구축하는 것이 바람직하다. 기존 실험에서는 단순한 회전하는 원형단면 실린더 주위에서 수용액 내의 전해질의 전기 화학적 반응을 이용한 방법이 많이 이루어 졌다. 그러나 최근 Nesic 등<sup>(4)</sup>은 원형단면 실린더에 두 개의 후향 계단을 원주방향으로 주기적으로 부착하고 실린더를 회전하여 유동의 박리와 재부착에 의한 높은 난류강도가 경제적으로 용이하게 구현 될 수 있음을 제안하였다.

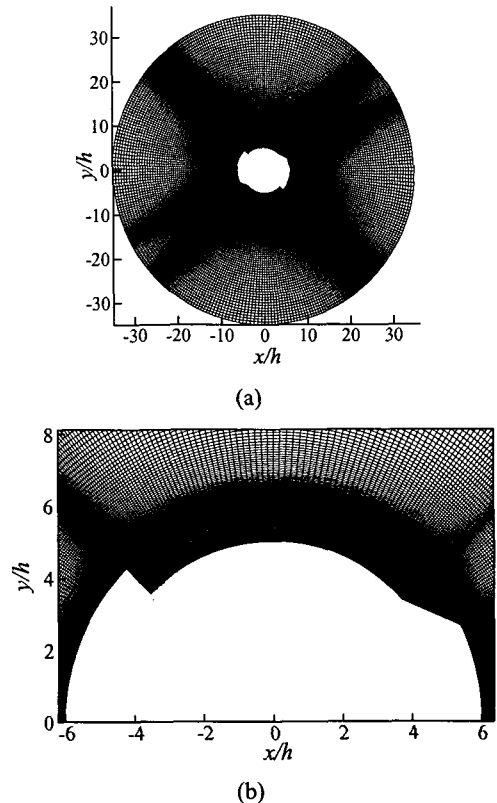


Fig. 1 Cylinder cross-section and grid system; (a) total view, (b) magnified view

실용적 응용 유동에서 물질 전달은 대부분  $Sc$ 가 1000 이상의 높은 수에서 발생하지만 이를 DNS(Direct Numerical Simulation)를 사용하여 해상하기는 현재 컴퓨터 사양으로는 거의 불가능하다.  $Sc$ 가 증가하게 되면 벽근처에 존재하는 확산 저층(diffusive sublayer)의 두께가 점성저층(viscous sublayer)의 두께보다 작아지며 확산 저층의 두께는  $Sc^{-1/3}$ 에 비례하게 된다. 따라서  $Sc \sim O(10^3)$  정도의 물질 전달을 DNS로 계산하려면 유동장의 DNS에서 필요한 격자점 수보다 10배가 필요하다. 이렇게 과도한 격자점 수를 사용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 다른 연구자들에 의한 (다른 유동현상에 대한) 열 및 물질 전달 DNS<sup>(5,6)</sup>에서도  $Sc$ (or  $Pr$ )  $\leq 10$ 의 유동만이 수행되어 왔다. 또한  $Sc$ 가 1에서 10으로 증가할 때 물질전달의 변화 양상은 매우 급격하고 그 이상의  $Sc$  수로 증가할 때의 물질 전달 양상과 유사하기 때문에  $Sc=10$ 으로 계산된 본 연구의 결과는 의미가 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 유동유발 부식의 핵심 메커니즘인 난류 물질전달의 특성을 규명하기 위하여 Nesic 등<sup>(4)</sup>이 실험에서 사용한 실린더와 유사한 단면을 갖는 후향 계단이 부착된 회전하는 실린더(Fig. 1)주위의 난류 물질전달을 직접수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS)를 사용하여  $Sc=1$ 과 10의 두 가지 경우에 대하여 전산 해석하였다. Nesic 등<sup>(4)</sup>은  $Fe(CN)_6^{3+}$ 의 용해액속에 계단이 부착된 원형단면 electrode를 사용하여 실험을 수행하였다. 하지만 실험에서 사용된 물질의  $Sc$ 는 1224로 상당히 높기 때문에 확산저층의 두께가 매우 얇고, 또한 현재로서는 회전하는 실린더의 확산저층 내에서의 유동장 및 농도장을 실험적으로 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 DNS를 이용한 본 연구의 결과는 물질전달 해석을 위한 정확한 데이터를 제공하게 될 것이다. 이는 난류유동이 관련된 물질전달에 대해서 기본적인 물리적 이해를 제공하게 되며 다른 종류의 스칼라장이 관련된 복잡한 형상의 회전하는 기계류의 난류유동 문제에도 기초자료로 활용될 수 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 지배 방정식과 수치해석법

본 연구에서의 계산은 일정한 각속도( $\Omega$ )로 회전하는 좌표계에서 수행되었다. 두 개의 후향 계단의 형상을 구현하기 위해 가상경계법이 사용되었으며 지배방정식은 비압축성 연속 방정식 및 모멘텀 방정식과 스칼라 방정식으로 다음과 같다.

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

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

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

여기서  $\vec{u}$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $c$ ,  $D$ 는 유체의 속도벡터, 밀도, 동점성계수, 몰농도, 물질확산계수를 각각 의미하며 식 (2)의  $2\vec{\Omega} \times \vec{u}$ 는 Coriolis 힘을 나타낸다. 구심력(centripetal force)은 보존되기(conservative) 때문에 압력 항에 포함될 수 있고 속도장의 결정에는 영향을 주지 않는다. 따라서 식 (2)의  $p$ 는 압

력뿐만 아니라 구심 포텐셜까지 포함한다. 식 (2)와 (3)에서 마지막 항들은 가상 경계법을 위한 항으로  $\vec{f}$ 와  $F$ 는 각각 운동량 부가와 농도 부가를 의미한다. 가상경계법에 대한 자세한 수치적 기법은 Balaras<sup>(7)</sup>와 Kim and Choi<sup>(8)</sup>의 논문을 참조하기 바란다.

위의 지배방정식들은 원통좌표계에서 유한 체적법을 사용하여 차분되었다. 공간에서의 차분은 유동 방정식의 경우 2차 정확도를 갖는 중앙 차분법(Central Difference Scheme)이 사용되었으며 스칼라 방정식의 경우 점성항은 중앙 차분법, 대류항은 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)을 적용하였다. 시간에서의 적분은 혼합 기법으로서 대류항은 3차 정확도의 Runge-Kutta방법으로 명시적 적분되었고, 점성항은 Crank-Nicolson 방법으로 묵시적으로 적분이 수행되었다. 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리하기 위해서 Fractional Step 기법이 사용되었다. 본 코드는 Akselvoll and Moin<sup>(9)</sup>의 논문에 기술된 수치해석 기법을 참고하여 제작되었다.

### 2.2 파라미터 및 경계조건

본 연구에서는 실린더가 2000rpm으로 회전하는 경우에 대하여  $Sc=1$ , 10 인 경우에 대한 난류 물질 전달의 DNS를 수행하였다. 이 회전 속도에서  $Re$ 수는 계단의 상류 표면속도( $U_0$ )와 계단 높이( $h$ )를 기준으로 335이다. 계산 도메인의 바깥 경계는 회전 중심으로부터 0.07m 떨어진 곳에 위치하였으며 실린더의 반경은 0.01m 이고 계단의 높이는 0.002m이다[Fig. 1(a)]. 횡방향의 크기는 0.036m이다.

본 연구에 사용된 경계조건은 유동장의 경우 전체 실린더 표면에서는 점착조건(no-slip)을 사용하였으며 바깥 경계에서는 미끄러짐(slip) 조건<sup>(10)</sup>을 사용하였다. 횡방향으로는 주기조건을 적용하였다. 농도장의 경우 원형단면 실린더 부분의 표면에서는 농도가 0인 조건을 사용하였으며 계단을 포함한 그 이외의 표면에서는 불침투성 조건( $\partial c / \partial n = 0$ )을 사용하였다. 바깥 경계에서는 농도를 1로 설정하였고, 횡방향으로는 주기조건을 적용하였다.

사용된 격자수는 유동장의 DNS에 대한 선행 연구<sup>(10)</sup>를 기초로 하여 결정하였다.  $Sc=1$ 의 경우에는 Reynolds 유사성(analogy)이 성립하기 때문에

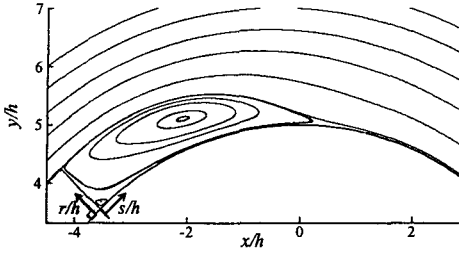


Fig. 2 Mean flow field near the step,  $Re=335$ ; Streamlines

기존연구의 격자 규모를 그대로 사용할 수 있으나  $Sc=10$ 의 경우에는 물질전달의 길이 규모를 고려하여 더 많은 격자점을 사용하여야 한다. 물질 확산저층(diffusive sublayer,  $\delta_c^+$ )과 점성저층(viscous sublayer,  $\delta_u^+$ )은 일반적으로 다음식과 같은 관계를 가진다.

$$\delta_c^+ = Sc^{-1/3} \delta_u^+ \quad (4)$$

또한 난류 물질전달의 길이규모인 Batchelor 길이 규모는, 난류 유동장의 길이 규모인 Kolmogorov 길이 규모보다  $1/Sc^{1/2}$ 의 작은 규모를 가진다. 따라서 본 연구에서는 물질 전달이 일어나지 않는 계단 상류는 기존 격자크기와 비슷한 격자를 사용하였으며, 난류 물질 전달이 활발하게 발생하는 계단 후류에서 보다 많은 격자를 사용하였다. 본 연구에 사용된 격자수는 회전방향, 수직방향, 그리고 횡방향으로 각각  $528 \times 208 \times 128$ 개의 격자가 사용되었으며 이는 선행 연구<sup>(10)</sup>의 3배 이상 많은 격자수이다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 평균 유동장 및 스칼라장

난류 유동장이 발달하고 통계적으로 정상상태에 이르게 되면 통계처리를 위한 유동장의 샘플링이 시작되었다. 본 연구에서는 시간적으로는  $\Delta t \approx 0.1h/U_0$  간격으로 650개의 3차원 순간 유동장을 취합하고, 공간적으로 균질한 방향인 횡방향과 회전방향 형상의 대칭성을 이용하여 통계처리 하였다. 도합 166,400개의 평면 유동장 개수가 사용되었다.

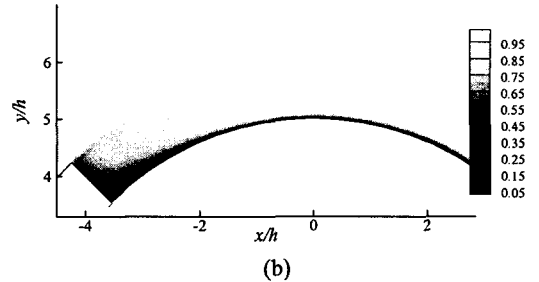
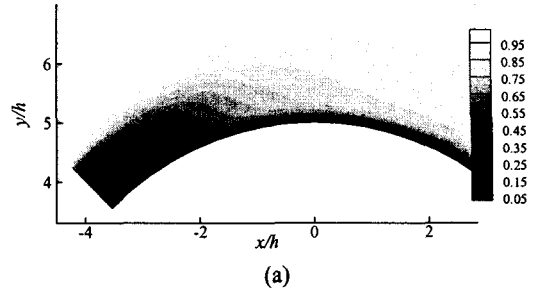


Fig. 3 Mean concentration field,  $Re=335$ ; (a)  $Sc=1$ , (b)  $Sc=10$

Fig. 2는 계단 주위에서의 평균 유동장을 보여준다. 주 재순환 구역이 존재하고 코너에서 이차적(secondary) 유동도 존재한다. 주 재순환유동의 재부착 지점은 계단의 구석에서 시작하여 실린더 표면을 따라가는 좌표축( $s$ )를 설정하였을 때,  $s/h=4.5$ 인 지점에 위치한다.

Fig. 3은  $Sc=1, 10$ 인 경우 계단 근처에서 평균 농도장을 보여준다. 농도 구배가 실린더 벽에서 큰 것을 관찰할 수 있으며 계단에서는 불침투성 조건으로 인해 농도구배가 0인 것을 확인할 수 있다. 또한  $Sc$ 가 10으로 커지면서 벽에서의 농도 구배는 더욱 심해지는 것을 알 수 있다. 이는 식 (4)와 동일한 결과이다.

Fig. 4는  $Sc=1$ 과 10인 경우, 각각의 위치에서 벽좌표로 표시한 평균 농도 분포를 보여준다. 여기서  $c^+$ 와  $r^+$ 는 각각  $c^+ = C/c^*$ ,  $r^+ = ru^*/\nu$  로 정의 되었으며,  $u^*$ 는 마찰속도(friction velocity)를 의미한다. 마찰속도와 유사하게 마찰농도(friction concentration,  $c^*$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$c^* = \frac{D}{u} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=0} \quad (5)$$

여기서  $C$ 는 평균 농도를 의미한다. 물질 확산이 이루어지는 물질 확산저층 내에서는 식 (6)과 같은

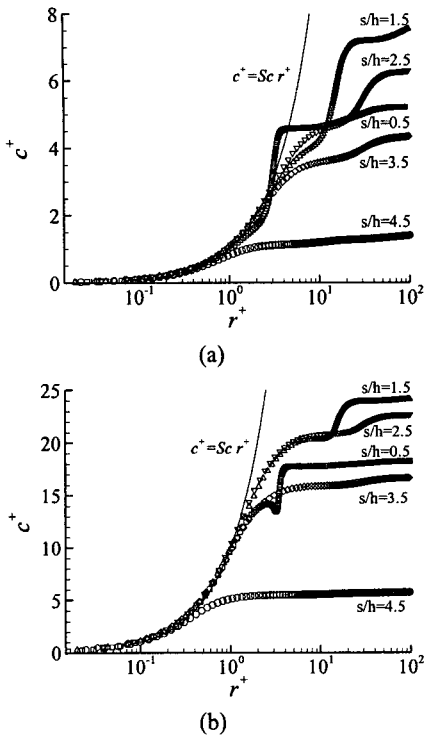


Fig 4 Mean concentration in wall units,  $Re=335$  (a)  $Sc=1$ , (b)  $Sc=10$

선형 법칙을 따른다.

$$c^+ = Sc r^+ \quad (6)$$

즉 난류 유동장에서 점성저층이 벽좌표를 따라 선형적인 속도 분포를 보이는 것과 같이 농도 분포도 확산저층 내에서 벽좌표를 따라 선형적인 농도 분포를 보인다.<sup>(11)</sup> Fig. 4의 모든 영역에서 확산저층의 두께는 위치에 따라 차이가 있을 지라도 각 확산저층 내에서는 선형적인 농도 분포를 유지하는 것을 확인 할 수 있다. 또한  $Sc$ 가 10인 경우가 1인 경우보다 얇은 확산저층을 유지하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 각각의  $Sc$ 에서 위치에 따른 농도 rms ( $\langle \cdot \rangle$  기호 사용) 분포를 나타낸다.  $s/h=0.5$ 인 경우, 즉 계단과 가까운 위치에서는 계단 모서리에서 유동 박리의 영향으로  $r/h=1$  근처에서 비교적 큰 값을 가진다. 이러한 유동 박리 영향은  $s/h$ 가 증가함에 따라 점차 사라지게 되며,  $Sc$ 가 10인 경우가 1인 경우보다 모서리의 영향권이 작다. 또

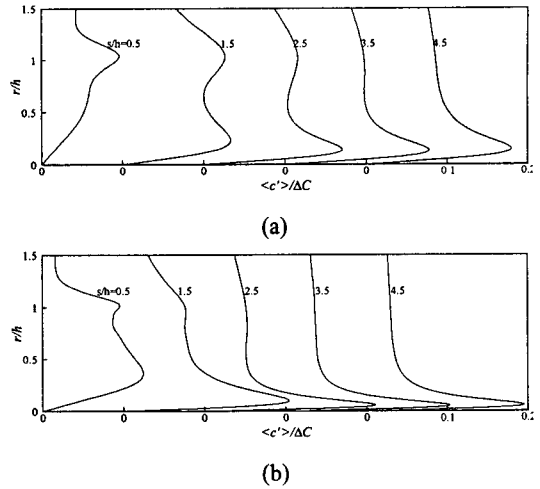


Fig. 5 Concentration rms,  $Re=335$ ; (a)  $Sc=1$ , (b)  $Sc=10$

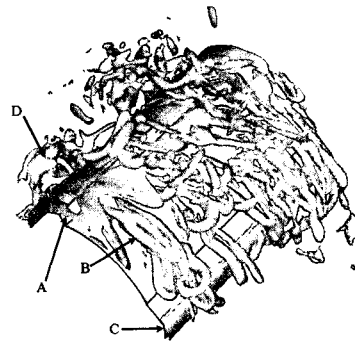


Fig. 6 Instantaneous vortical structure near the step ( $Q^{(13)}=0.15$ )

한  $Sc=10$ 의 경우 농도 섭동의 최대값이 발생하는  $r/h$  지점이  $Sc=1$ 보다 낮아졌음을 확인 할 수 있다. 이는 물질 확산이 이루어지는 Nernst층의 두께는  $Sc$ 가 커짐에 따라 작아지기 때문이다.<sup>(12)</sup>

### 3.2 순간 유동장 및 스칼라장

Fig. 6은 한 순간에서  $Q$ (the second invariant of velocity gradient tensor)<sup>(13)</sup>의 등고면으로 나타낸 3차원 와류구조를 보여준다. Fig. 6의 A부분에서 계단에 의한 전단층이 발생하며 이에 의해 발생된 와류가 후류로 가면서 B부분에서의 와류를 형성하게 된다. C부분은 계단이 시작되는 부분으로 전단층이 다시 형성되는 것을 알 수 있다. D부분은 안쪽 실린더로부터  $r/h$ 가 약 4~8정도인 곳에서 발생하는 와류로 원심력에 의해 밀려난 와류로 보인다.  $r/h$ 가 증가함에 따라 와류 구조는 점

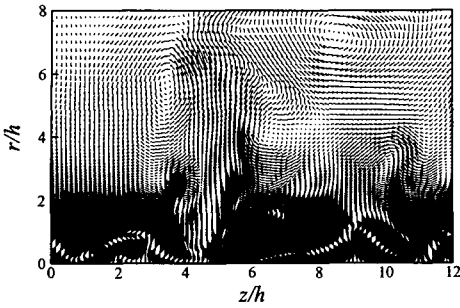


Fig. 7 Instantaneous velocity vectors at  $s/h=3.5$

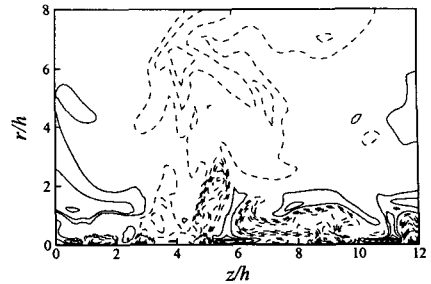
차 사라지는 것을 관측 할 수 있다.

Fig. 7은  $s/h=3.5$ 인 지점에서  $r$ - $z$ 평면에서의 속도 벡터를 나타낸다.  $r/h \leq 1$ 인 구역은 재순환에 의한 비교적 크기가 작은 와류가 발생하는 부분이며,  $1 \leq r/h \leq 4$ 에서는 Fig. 6의 B부분에 해당하는 와류로 계단에서 발생한 전단층이 후류로 진행하면서 생기는 와류 영역이다.  $4 \leq r/h \leq 8$ 은 Fig. 6의 D부분의 와류가 발생하는 지점에 해당한다. 또한  $r/h$ 가 증가함에 따라 발생하는 와류의 스케일이 커짐을 확인할 수 있다.

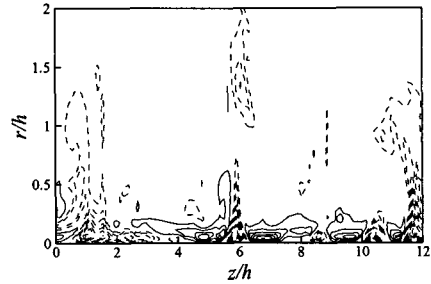
Fig. 8은  $s/h=3.5$ 인 지점의  $r$ - $z$ 평면에서 각각의  $Sc$ 에 대한 농도 섭동을 나타낸다. 점선은 음의 값을 실선은 양의 값을 각각 나타내었다.  $Sc=1$ 인 경우 레이놀즈 유사성(analogy)이 성립하기 때문에 유동장과 농도장의 분포가 유사한 구조를 가진다. Fig. 8(a)에서  $Sc=1$ 에 대한 순간 농도섭동을 살펴보면,  $Sc=1$ 인 경우 벽 근처에서는 작은 스케일의 와류로 인해 농도장의 길이 규모가 매우 작은 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 6에서 B와 D에 해당하는 와류들도 농도 섭동에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8(b)에서  $Sc=10$ 인 경우 Fig. 6의 D와류는 농도 섭동에 거의 영향을 미치지 않으며 오직 벽에서의 작은 와류와 Fig. 6의 B와류의 영향을 받음을 확인할 수 있다. 또한 확산저층의 두께가  $Sc=1$ 인 경우에 비해  $Sc=10$ 인 경우가 급격하게 작아졌음을 확인 할 수 있으며, 두 경우 모두 확산저층에서 매우 활발한 섭동이 관측된다. 확산저층에서는 농도 섭동이 양의 값과 음의 값을 가지고 분포하며 농도 섭동의 최대 값과 최소값이 확산저층 내에 존재한다.

3.3 물질 전달과 난류 유동장의 관계

난류에서 물질 전달에 영향을 미치는 요소에 대한 다양한 주장이 제기되고 있다. Nestic 등<sup>(3)</sup>은



(a)



(b)

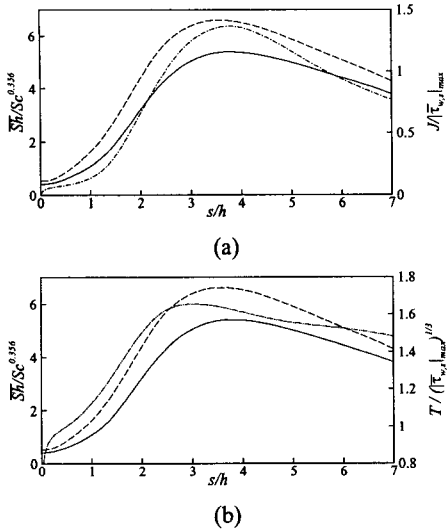
Fig. 8 Instantaneous  $c'$  contours in the  $r$ - $z$  plane at  $s/h=3.5$ ,  $Re=335$ ; (a)  $Sc=1$ , (b)  $Sc=10$

난류물질 전달에서 가장 중요하게 영향을 주는 요인은 난류강도라고 주장하였다. 또한 그들은 갑자기 확장되는 관내 유동에서 재부착 지점 근방에 심각한 부식이 발견됨을 보고한 바 있다. Yang 등<sup>(10)</sup>은 물질전달이 벽전단응력 섭동 크기(rms of wall-shear stress fluctuation)와 관련이 있다고 주장하였다. Bremhorst 등<sup>(14)</sup>은 벽전단응력( $\tau_w$ )의 크기가 물질전달과 밀접한 관계가 있으며,  $k_m \propto T$ 의 관계가 있다고 하였다. 여기서  $T = (\sqrt{\tau_w^2})^{1/3} = (\sqrt{\tau_{w,s}^2 + \tau_{w,z}^2})^{1/3}$ 이며,  $k_m$ 은 식 (7)로 계산되는 물질전달계수를 나타낸다.

$$k_m = \frac{D}{\Delta C} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right) \tag{7}$$

여기서  $\Delta C$ 는 실린더 표면과 바깥 경계의 농도 차이를 나타낸다.  $\tau_{w,s}$ 와  $\tau_{w,z}$ 는 회전방향과 횡방향의 순간 벽전단응력 성분이며 overbar는 시간 평균을 나타낸다. 또한 벽전단응력 섭동크기  $J$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$J = \sqrt{\tau_w'^2} = \sqrt{\tau_{w,s}'^2 + \tau_{w,z}'^2} \tag{8}$$



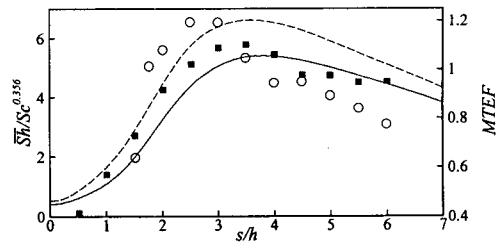
**Fig. 9** Distribution of averaged Sherwood number with (a) rms of wall-shear stress fluctuation and (b) magnitude of total wall-shear-stress :   
 —, averaged Sherwood number for Sc=1; - - - - -, averaged Sherwood number for Sc=10; ·····,  $J/|\tau_{w,s}|_{max}$ ; ·····,  $T/(\tau_{w,s}|_{max})^{1/3}$

여기서  $\tau'_{w,s}$ 와  $\tau'_{w,z}$ 는 회전방향 섭동성분과 횡방향 섭동성분을 각각 의미한다.

본 연구에서는 벽전단응력, 벽전단응력의 섭동과 물질전달의 상관관계를 확인하기 위해 평균된 Sherwood수와 벽전단응력 크기( $T$ ), 벽전단응력 섭동크기( $J$ )를 Fig. 9에 나타내었다. 물질전달에 관한 Sherwood 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = \frac{k_m h}{D} \quad (9)$$

Bremhorst 등<sup>(14)</sup>과 Yang 등<sup>(10)</sup>의 결과와 같이 벽전단응력크기( $T$ )와 섭동크기( $J$ )는 물질전달과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 또한 물질전달의 최대점은 재부착 지점( $s/h=4.5$ )이 아니라 재부착 지점보다 안쪽( $s/h=3.5$ )에서 발생하는 것을 관측할 수 있다. Eisenberg<sup>(12)</sup>의 실험 결과에 의하면 계단이 부착되지 않은 회전하는 원형단면 실린더의 경우  $Sh$ 는  $Sc^{0.356}$ 에 비례한다. Fig. 9를 살펴보면, 계단이 부착된 회전하는 실린더의 물질전달은  $Sc$ 가 1에서 10으로 증가하면  $Sh/Sc^{0.356}$  값이 더 커짐



**Fig. 10** Distribution of averaged Sherwood number along with the mass-transfer measurements:   
 —, averaged Sherwood number for Sc=1; - - - - -, averaged Sherwood number for Sc=10; ■, MTEF at Re=243, Sc=1224; ○, MTEF at Re=463, Sc=1224.

을 확인할 수 있다. 특히  $2 \leq s/h \leq 5$  영역에서는  $Sh/Sc^{0.356}$  값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 물질 전달이 계단이 없는 경우보다  $Sc$ 의 변화에 큰 폭으로 변화한다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 Yang 등<sup>(10)</sup> 실험결과와 본 연구의 결과를 비교한 그림이다. 실험은  $Sc=1,224$ 에서  $Re=243$ 과  $463$ 에서 수행하였으며, 계단이 없는 회전하는 원형단면 실린더의 물질전달 계수( $k_m, RCE$ )로 normalize 한 결과이다.(MTEF: Mass Transfer Enhancement Factor,  $=k_m/k_{m,RCE}$ ) Bremhorst<sup>(15)</sup>의 실험에 의하면  $s/h$ 에 따른 물질전달계수의 분포는  $Sc$ 의 변화에 따라 크게 변하지 않으며,  $Sc$ 가 크게 증가하면 물질전달의 최대점이 계단쪽으로 약간 이동한다고 하였다.  $Re=335$ 에서 수행한 본 연구의 결과가 실험과 정성적으로 일치 하는 것을 알 수 있다. 또한 높은  $Sc$ 에서 수행된 실험에서 측정된 물질전달의 최대점이 계단쪽으로 좀 더 치우쳐 있는 것이 확인 된다. 이는 본 연구에서 벽전단응력의 크기[Fig. 9(b)]와 유사하며, 높은  $Sc$ 에 대한 Bremhorst<sup>(15)</sup>의 실험과 같은 결과이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유동유발 부식의 핵심 메커니즘인 난류 물질전달의 특성을 규명하기 위하여, 난류 물질전달 연구용으로 최근 개발된 후향 계단이 부착된 회전하는 실린더 주위에서의 난류 물질전달에 관하여 DNS기법을 사용해 전산해석적 연구를 수행하였다.  $Sc=1$ 에서 10으로 증가하면

물질 확산이 발생하는 벽 근처에서 확산저층의 두께가 감소하고 Sherwood수가 증가함을 보였다. 또한 물질 확산저층 내에서 매우 활발한 농도 섭동을 관측할 수 있었으며,  $Sc=1$ 인 경우 벽에서 멀어짐에 따라 농도 섭동이 완만하게 변하는 반면,  $Sc=10$ 인 경우 급격하게 0으로 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다.

난류와 물질전달의 상관관계에 대한 해석결과, 물질전달은 난류 강도뿐만 아니라 벽전단응력 크기와 벽전단응력 섭동크기와도 매우 큰 상관관계를 이루고 있음을 확인하였다. 또한 본 계산결과는  $Sc$ 의 범위는 다르지만 현존하는 물질전달 실험결과와도 정성적으로 잘 일치하였다.

본 연구의 결과는 유동유발 부식의 주 메커니즘인 난류 물질전달에 대한 bench-marking 자료를 제공한다.

## 후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2005-041-D00122) 또한 이 연구의 주요 계산은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 무상으로 제공한 슈퍼 컴퓨팅 자원을 이용하여 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Postlethwaite, J., Dobbin, M. H., and Bergevin, K., 1986, "The Role of Oxygen Mass Transfer in the Erosion-Corrosion of Slurry Pipelines," *Corrosion*, Vol. 42, pp. 514-521.
- (2) Mahato, B. K., Voora, S. K., and Shemilt, L. W., 1968, "Stell Pipe Corrosion Under Flow Conditions -I. An Isothermal Correlation for a Mass Transfer Model," *Corros. Sci.*, Vol. 8, pp. 173-193.
- (3) Nestic, S. and Postlethwaite, J., 1990, "Relationship Between the Structure of Disturbed Flow and Erosion-Corrosion," *Corrosion*, Vol. 46, No. 11, pp. 874-880.
- (4) Nestic, S., Bienkowski, J., Bremhorst, K. and Yang, K.-S., 2000, "Testing for Erosion-Corrosion Under Disturbed Flow Conditions using a Rotating Cylinder with a Stepped Surface," *Corrosion*, Vol. 56, pp. 1005-1014.
- (5) Kim, J. and Moin, P., 1989, "Transport of Passive Scalars in a Turbulent Channel Flow," *Turbulent Shear Flow*, Vol. 6, pp. 85-96.
- (6) Li, B., Liu, N. and Lu, X., 2006, "Direct Numerical Simulation of Wall-normal Rotating Turbulent Channel Flow with Heat Transfer," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 49, pp. 1162-1175.
- (7) Balaras, E., 2004, "Modeling Complex Boundaries using an External Force Field on Fixed Cartesian Grids in Large-eddy Simulations," *Computers & Fluids*, Vol. 33, pp. 375-404.
- (8) Kim, J. and Choi, H., 2004, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulation of Heat Transfer in Complex Geometries," *KSME Int. J.*, Vol. 18, pp. 1026-1035.
- (9) Akselvoll, K. and Moin, P., 1995, "Large-eddy Simulation of Turbulent Confined Coannular Jets and Turbulent Flow over a Backward-facing Step," *Report TF-64, Thermosciences Div., Dept. Mech. Eng., Standford University.*
- (10) 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 Journal of Chemical Engineering*, Vol. 81, No. 1, pp. 26-36.
- (11) 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.
- (12) Eisenberg, M., Tobias, C. W. and Wilke, C. R., 1954, "Mass Transfer at Rotating Cylinders," *Chem. Eng. Progress Symp. Series*, Vol. 51, No. 1, pp. 1-16.
- (13) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69-94.
- (14) Bremhorst, K., Kear, G., Keating, A.J. and Huang, S.-H., 2005, "Patch and Whole of Surface Mass-Transfer Rate Measurements on a Stepped Rotating Cylinder Electrode," *Corrosion*, Vol. 61, No. 10, pp. 968-975.
- (15) Bremhorst, K., 2006, *Personal Communication.*