

## 표면에 계단이 부착된 회전하는 실린더 주위 난류유동의 전산해석

양경수\* · 황종연\*\* · 김영완\*\*

(2000년 3월 17일 접수)

### Numerical Study of Turbulent Flow Around a Rotating Cylinder with Surface Roughness

Kyung-Soo Yang, Jong-Yeon Hwang and Young-Wan Kim

**Key Words:** Direct Numerical Simulation(직접수치모사), Corrosion(부식), Erosion(침식), Reattachment(재부착), Turbulence Intensity(난류강도)

#### Abstract

Erosion-corrosion in a pipe system often occurs at fittings, valves, and weld beads where flow separation and reattachment yield high turbulence intensity. Thus identifying their correlations would be the first step towards resolving the erosion-corrosion problems associated with industrial applications. Bremhorst of the Univ. of Queensland, Australia, proposed that a rotating cylinder with surface roughness (two backward-facing steps periodically mounted on a circular cylinder) be an economical and tractable tool which can generate extreme flow conditions for erosion-corrosion study. In this work, DNS has been carried out for turbulent flows around the same rotating cylinder as his experimental apparatus. Our result shows that a region of intense turbulence intensity and high wall-shear stress fluctuation is formed along the cylinder surface in the recirculating region behind the step, where high mass-transfer capacity is also experimentally observed. Since corrosion is mass-transfer controlled, our finding sheds light on the direction of future corrosion research.

#### 1. 서 론

기계 및 화학공정의 배관내 유동에서 종종 발생되는 부식의 문제는 안정성이나 경제성으로 볼때 시급히 해결해야할 중요한 문제 중의 하나이다. 파이프와 유동이 접하는 면에서 파이프 금속의 산화에 의하여 생성된 녹(rust)은 그 자신이 보호

막의 역할을 하여 금속을 보호한다. 하지만 이러한 보호막은 침식(erosion)과 용해(dissolution)의 두 가지 메커니즘으로 인해 점점 얇아진다. 침식이란 (1) 난류나 벽전단응력(wall-shear stress)등에 의한 기계적인 요인, (2) 물유동내의 기포나 기계 유동내의 작은 액적(droplet)에 의한 보호막에의 충돌, (3) cavitation 등의 원인으로 보호막이 얇아지는 현상을 말하며, 용해란 화학적 메커니즘으로서 녹의 유동으로의 질량전달(mass transfer)에 의하여 보호막이 유실되는 현상을 일컫는다. 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

\* 회원, 인하대학교 기계·항공·자동차 공학부

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7322 FAX : (032)868-1716

\*\* 인하대학교 대학원

수 있다. 자연적으로 진행되는 이런 부식현상은 배관 시스템에 막대한 경제적인 손실을 일으키며, 만약 파이프의 천공 및 균열이 원자로나 핵독성 화학공정의 배관 시스템에서 발생한다면 매우 심각한 인명 피해도 발생할 수 있다.

난류는 침식에서 직접적으로 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 용해된 녹이 주유동으로 이송됨을 촉진하는 간접적인 역할도 한다. 특히 배관 중에서도 fitting이나 밸브, 또는 용접된 부분주위등과 같이 유동의 박리와 재부착에 의해 수반되는 높은 난류강도가 유지되는 곳에서 심한 부식이 관찰된다.<sup>(1-3)</sup> 따라서 부식은 유동의 난류와 밀접한 관계를 갖고 있으며 이의 상관관계의 규명은 부식문제 해결을 위한 첫 단계라고 할 수 있다.

난류와 부식의 상관관계를 실험적으로 연구하기 위하여 여러가지 유동장을 이용한 방법들이 고려되어 왔지만, 잘 정의된 유체역학적 조건을 만족하는 유동을 실험실에서 손쉽게 구현하기란 쉽지 않다.<sup>(4)</sup> 완전히 발달된 관내유동이나 후향계단유동, 그리고 impinging jet 같은 유동은 가장 잘 정의된 조건을 만족시키는 유동중에 속하지만, 부식과 관련된 전기화학적 수단이 사용되는 복잡한 실험을 수행하기에는 유동제어면에서 매우 어렵고 비경제적이다. 이런 문제점들을 극복하기 위해 Bremhorst는 원형단면 실린더에 두 개의 후향계단을 원주방향으로 주기적으로 부착한 실린더를 회전하여 유동의 박리와 재부착에 의한 높은 난류강도가 경제적으로 용이하게 구현될 수 있음을 제안하였다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 Bremhorst가 실험에서 사용한 실린더와 동일한 단면을 갖는 회전하는 실린더(Fig. 1) 주위의 난류유동을 직접 수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS)를 사용하여 전산해석하였다. 본 연구는 두 가지의 목적을 갖고 수행되었다. 첫째는 후향계단이 부착된 회전하는 실린더가 부식의 연구에 적합한 높은 난류강도의 유동을 경제적이고 용이하게 제공할 수 있는지를 전산해석적인 면에서 고찰하는 것이고, 둘째는 본 유동과 기존의 후향계단유동과의 차이점을 유체역학적인 면에서 규명하고 복잡한 형상에서의 난류유동에 관심이 있는 난류모형 개발자나 전산 코드개발자에게 유용하게 사용될 수 있는 유동자료의 데이터 베이스를 구축하는 것이다.

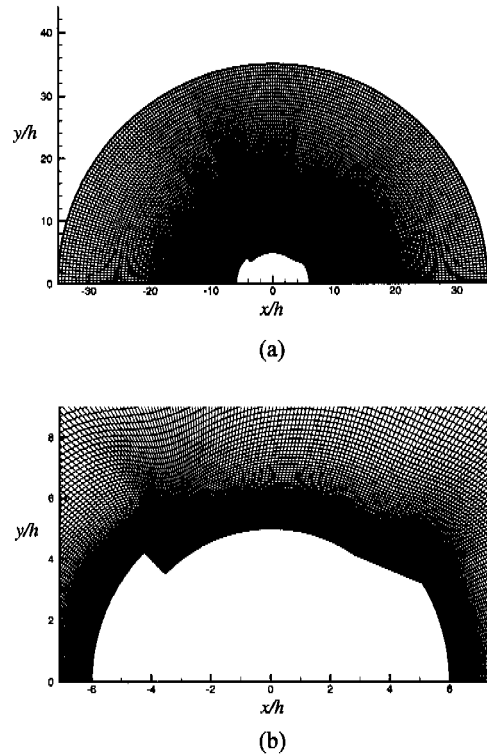


Fig. 1 Cylinder cross-section and grid system employed; (a) total view, (b) magnified view

## 2. 수식전개 및 수치해석법

본 연구에서의 유동장의 계산은 일정한 각속도 ( $\Omega$ )로 회전하는 좌표계에서 수행되었다. 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 비압축성 모멘텀방정식이다.

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

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

여기서  $\mathbf{u}$ ,  $\rho$ ,  $\nu$  는 유체의 속도, 밀도, 동점성계수를 각각 의미하며, 식 (2)의 맨 마지막 항은 Coriolis힘을 나타낸다. 구심력(centripetal force)은

보존되기(conservative) 때문에 압력항에 포함될 수 있고 속도장의 결정에는 영향을 주지 않는다.<sup>(6)</sup> 따라서 식 (2)의  $p$ 는 압력뿐만 아니라 구심 포텐셜까지 포함한다.

위의 지배방정식들은 일반좌표계에서 유한체적법을 사용하여 차분되었다. 공간에서의 차분은 2차의 정확도를 갖으며, 시간에서의 적분은 혼합 기법으로서, 비선형항들 및 교차확산항들(cross diffusion terms)은 3차 정확도의 Runge-Kutta 기법으로 explicit하게, 다른 항들은 Crank-Nicolson 기법으로 implicit하게 적분되었다. 연속방정식과 모멘텀방정식을 decouple하기 위해서는 Fractional Step 기법<sup>(7)</sup>이 사용되었다. 본 코드에 사용된 수치해석 기법의 상세한 사항들은 Rosenfeld 등<sup>(7)</sup>의 논문을 참고하기 바란다. 또한 본 논문의 모든 변수들은 실험치와의 직접비교가 용이하도록 SI 단위계의 차원을 갖는 양으로 나타내었다.

### 3. 파라미터의 선택

본 연구에서는 계단이 부착된 실린더(Fig. 1)가 공기중에서 2,000rpm으로 회전하는 경우에 대해 DNS가 수행되었다. 실린더의 단면은 Bremhorst의 실험에서 사용된 실린더의 중앙단면과 동일하며 단직경은 0.02m, 장직경은 0.024m이고 계단의 높이( $h$ )는 0.002m이다. 계단은 회전축에 대칭으로 부착되었으며 횡방향(축방향)은 균질(homogeneous)하다고 가정하였다. 계산영역의 바깥 경계는 실린더의 회전중심으로부터 장직경의 약 2.9배(0.07m)이며 계산영역의 횡방향 크기( $W$ )는 장직경(0.024m)과 같다. Figure 1은 실린더 반쪽 단면 및 사용된 격자계를 보여준다. Fig. 1(a)는 전체 계산영역을 그리고 Fig. 1(b)는 실린더 주위를 확대하여 그린 그림이다. 사용된 격자계는 Body-fitted O-격자계로서 본 연구에서 고려하는 실린더 형상에 가장 적합하며, 계단주위 및 모든 고체면 근처에 더 많은 격자점을 배치하였다. 사용된 격자점의 수는 격자세분화연구(grid-refinement study)에 의해 결정되었으며 주유동, 수직, 그리고 횡방향으로 각각  $224 \times 128 \times 80$  이 사용되었다. 계단의 상류방향으로 벽면을 따라 계단으로부터 3  $h$  떨어진 지점에서의 마찰속도(friction velocity)를 기준으로 계산된 벽단위로의 격자간격은 실린더

원주방향으로는  $\Delta^+_{\min} = 0.0174$ ,  $\Delta^+_{\max} = 3.18$ , 실린더 표면에 수직방향으로는  $\Delta^+_{\min} = 0.0086$ ,  $\Delta^+_{\max} = 0.67$ , 그리고 횡방향( $z$ )으로는  $\Delta z^+ = 4.7$ 이다.

### 4. 초기 유동조건 및 경계조건

실린더와 함께 반시계방향으로 회전하는 좌표계에서 보면 실린더는 정지해 있고 바깥 경계가 시계방향으로 회전하는 것으로 인식될 것이다. 따라서 정지된 대기 중에서 실린더가 갑자기 회전하기 시작하면 회전하는 좌표계에서 볼 때의 유동장내 임의의 위치에서의 유동속도는 그 지점과 회전축까지의 거리에 회전 각속도( $\Omega = 209.4$  rad/sec)를 곱한 값이 될 것이고 여기에 rms 값이 실린더 표면의 속도의 약 0.1% 정도인 random 교란을 더하여 초기 유동장을 구성하였다. Random 교란은 유동장을 최단 시간내에 천이과정 bypass하여 self-sustain되는 난류유동장을 얻기 위함이고 이러한 교란은 초기 조건에서만 적용되었다.

경계조건으로는 실린더 표면에서는 no-slip 조건이, 균질한 방향인 횡방향으로는 주기 조건이 적용되었다. 실린더 단면의 형상이 완전히 축대칭이므로 유동장은 절반만을 고려하였고 주유동방향으로는 주기조건을 적용하였다. 계산영역의 바깥경계는 반지름이  $r_0$ 인 원형으로서 이 곳에서의 경계조건은 특별한 주의를 요한다. 만약 이곳에 크기가  $\Omega r_0$ 인 일정한 접선방향 속도를 적용한다면 이는 바깥 경계면이 실린더의 회전에 전혀 영향을 받지 않을 정도로 실린더에서 멀리 떨어진 곳에 위치하는 경우에 해당된다. 따라서 이러한 상황을 구현하려면 계산영역이 방대해져야 하고, 또한 본 유동에서의 유일한 유동유발요인인 바깥경계의 회전에 의한 모멘텀전달을 정확히 해상하기 위해서는 우리의 주 관심대상이 아닌 이 구역에 많은 격자점을 분포시켜야 한다. 이는 상당부분의 계산자원이 낭비됨을 의미하며, 이러한 낭비적 요소를 줄이기 위해 바깥 경계면에서는 다음과같은 경계조건이 고안되어 적용되었다.

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial n} = \Omega, \quad v_r = 0, \quad \frac{\partial v_z}{\partial n} = 0.$$

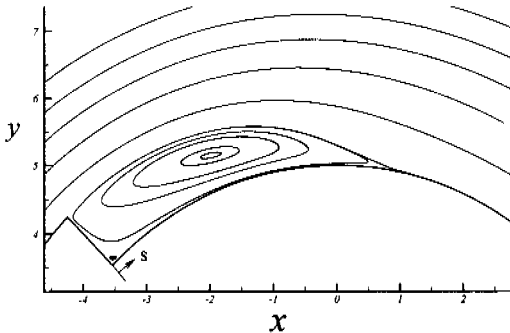


Fig. 2 Mean flow field near the step; streamlines.

여기서  $v_\theta$ ,  $v_r$ ,  $v_z$ 는 각각 바깥 경계면에서의 접선방향, 수직방향, 횡방향으로의 속도 성분을 각각 나타내며,  $n$ 은 바깥 경계면에 국부적으로 수직인 방향을 의미한다. 이 경계조건을 적용하면 상당히 작은 계산영역을 택하더라도 우리의 주 관심대상인 실린더에 가까운 주위의 유동장에는 큰 영향을 주지 않는다. 더욱이 바깥 경계면에서 접선방향 속도성분의 구배가 전산해석 중에 계산되는 것이 아니고 엄밀하게 구현되기 때문에 이 부근에서 격자점을 집중시킬 필요가 없으며 이는 CPU시간의 상당한 절약을 의미한다.

## 5. 결과 및 토론

### 5.1 평균 유동장

초기 유동장에서부터 수치계산이 시작되어 난류 유동장이 발달하고 통계적으로 정상상태(Statistically-steady state)에 이르게 되면 통계처리를 위한 유동장의 샘플링이 시작되었다. 약 7번의 실린더 회전에 해당되는 시간동안 160개의 3차원 순간 유동장이 샘플되었고, 평균유동장은 횡방향 및 시간에 대하여 평균하여 구하였다.

Figure 2는 계단주위에서의 평균유동장의 유선 그림이다. 종래의 후향계단유동과 같이 계단 하류쪽에 주 재순환구역이 존재하고 코너에는 이차적(secondary) 유동도 존재한다. 주 재순환구역의 재부착지점은 코너를 원점으로 하여 계단 하류방향으로 실린더 표면을 따라가는 좌표축( $s$ )을 설정하였을 때  $h$ 의 4.9배 되는 지점, 즉

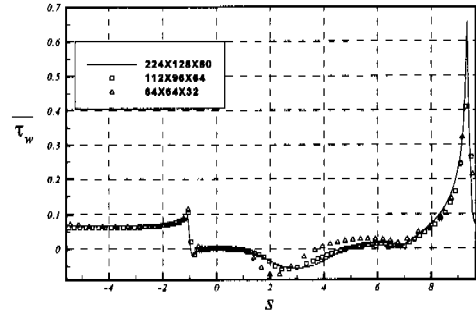


Fig. 3 Distribution of the mean wall-shear stress.

$s=4.9$ 인 지점에 위치한다. 여기서  $s$ 는  $h$ 에 대한 비를 의미한다.

세 가지 다른 해상도로 구한 실린더 표면에서의 평균벽전단응력(mean wall-shear stress,  $\overline{\tau_w}$ )의 분포를 Fig. 3에 제시하였다. 재부착지점에서는 벽전단응력이 없으므로  $\overline{\tau_w}=0$ 인 지점에 해당된다. 가장 성긴 격자계( $64 \times 64 \times 32$ )로 계산된 결과는 나머지 두 격자계( $112 \times 96 \times 64$ ,  $224 \times 128 \times 80$ )로 구한 결과에 비해 재부착지점의 위치 및  $\overline{\tau_w}$ 의 분포면에서 상당한 차이를 보여주고 있다. 벽전단응력은 해상도에 매우 민감한 물리량이므로 Fig. 3으로부터 본 연구에서 사용된 최대 해상도( $224 \times 128 \times 80$ )이상의 해상도로는 결과에 있어 큰 차이가 없을 것임을 예측할 수 있다. 주 재순환구역에서의  $\overline{\tau_w}$ 의 크기가 가장 큰 곳은  $s=3$ 에, 재부착지점은  $s=4.9$ 에 위치함을 알 수 있다.  $s=6.9$  이후의 구역은 슬리브부분에 해당하며(Fig. 1(b)),  $s=9.3$ 에서의 최대 전단응력이 발생하는 지점은 끝이 날카로운 부분(Fig. 1(b))에 해당된다.

Figure 4는 계단주위에서의 전체난류섭동(rms of total turbulent fluctuation,  $I = \sqrt{\overline{u'_i u'_i}}/3$ , 여기서  $u'_i$ 는 각방향의 속도섭동, 그리고 overbar는 시간 및 횡방향으로의 평균을 의미한다.)을 보여준다. 실린더 표면을 따라 주 재순환구역에 걸쳐 광범위하게  $I$ 가 실린더 표면에 수직방향으

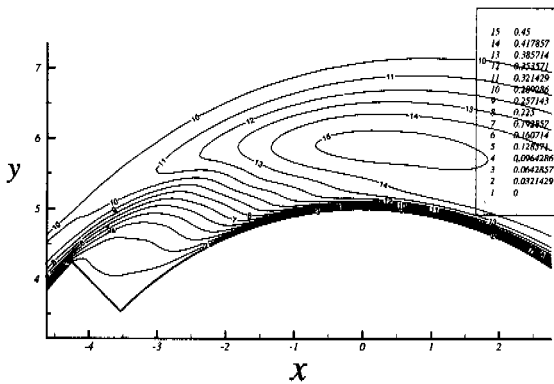


Fig. 4 Distribution of the mean total turbulent fluctuation near the step.

로 급격한 구배를 이루고 있음이 관찰된다.  $I$ 의 최대값은  $s=4.9$ 인 지점(재부착지점)에서 실린더 표면에 수직방향으로 약  $h$  만큼 떨어진 지점에 위치한다. 이 지점은 주 재순환구역의 재부착지점에 매우 가까우며, 이와같은 사실은 Nesic<sup>(3)</sup> 등의 관찰과 일치한다. 그들은 난류에서, 물질전달에 기인되는 부식현상에 가장 중요한 영향을 주는 요인은 평균벽전단응력이 아니라 국부적인 실린더 표면근처에서의 난류강도라고 주장하였고, 또한 유동방향으로 갑자기 확장되는 관내 유동의 경우, 재부착지점 근방에서 심각한 부식이 발견됨을 보고하였다. 하지만 본 연구결과에 의하면 벽전단응력섭동(rms of wall-shear stress fluctuation,  $J=\sqrt{\tau_w'^2}$ ) 도 물질전달과 상당히 관련이 있음을 알 수 있다. 벽전단응력섭동은  $s$  및  $z$ 방향 성분이 모두 고려되었다. 즉

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

여기서  $\tau_{w,s}'$ 는 벽전단응력의 원주방향 섭동성분,  $\tau_{w,z}'$ 는 벽전단응력의 횡방향 섭동성분을 나타낸다. Figure 5는 본 연구에서 계산된 실린더 표면근처에서의 벽전단응력의 섭동분포(좌측 종축, 실선)와 Bienkowski<sup>(8)</sup>가 측정된 물질전달 capacity(우측 종축, 부호)를 나타낸다. Equivalent RPM이란 계단이 있는 실린더에서의 값을 계단이 없는 원형단면 실린더에서의 값으로 표준화한 양

으로 Equivalent RPM이 2,000 보다 클 때는 원형 단면 실린더의 경우보다 큰 물질전달 capacity를 의미하고, 2,000 보다 작을 때는 그 반대를 의미한다. Figure 5에서 나타난 두 물리량은 차원이 다르므로 직접비교는 할 수 없지만,  $s$ 에 따르는 물질전달의 경향 및 최대 물질전달이 일어나는 구간은 비교가 가능하다. 실험치의 경우 사각형으로 표시된 부분은 error bar를 나타내고 원으로 표시된 값은 대표적인 측정값들을 나타낸다. Figure 5에서 제시된 결과를 보면 벽전단응력섭동의 분포와 잘 일치하고, 따라서 전체난류섭동 뿐만 아니라 벽전단응력섭동도 물질전달, 즉 부식에 상당한 영향을 줄 수 있는 물리량임을 알 수 있다.

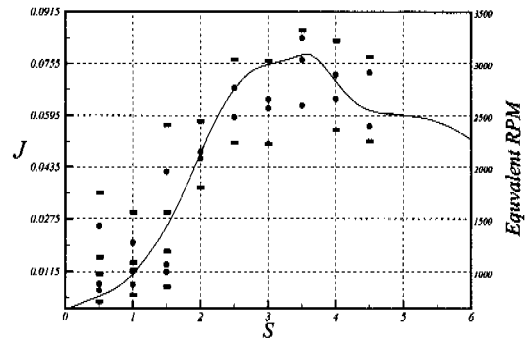
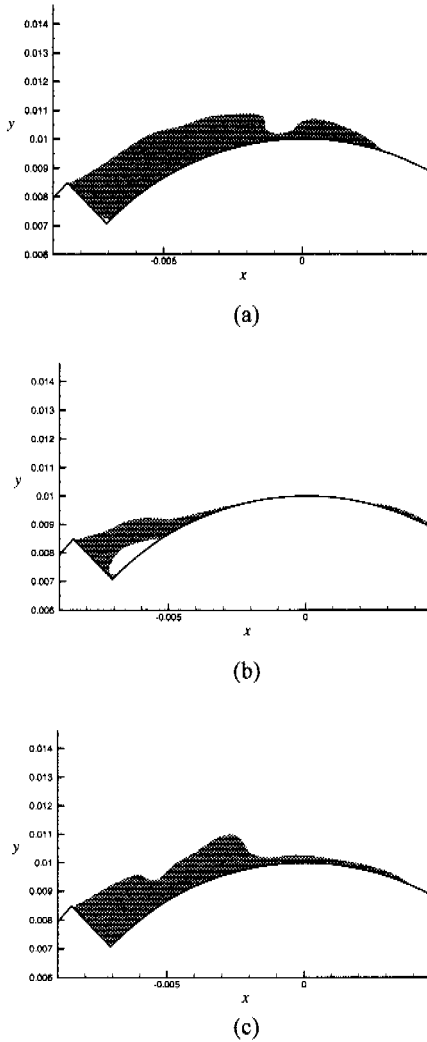


Fig. 5 Distribution of the wall-shear stress fluctuation along with that of mass-transfer capacity measured by Bienkowski.<sup>(8)</sup>

### 5.2 순간 유동장

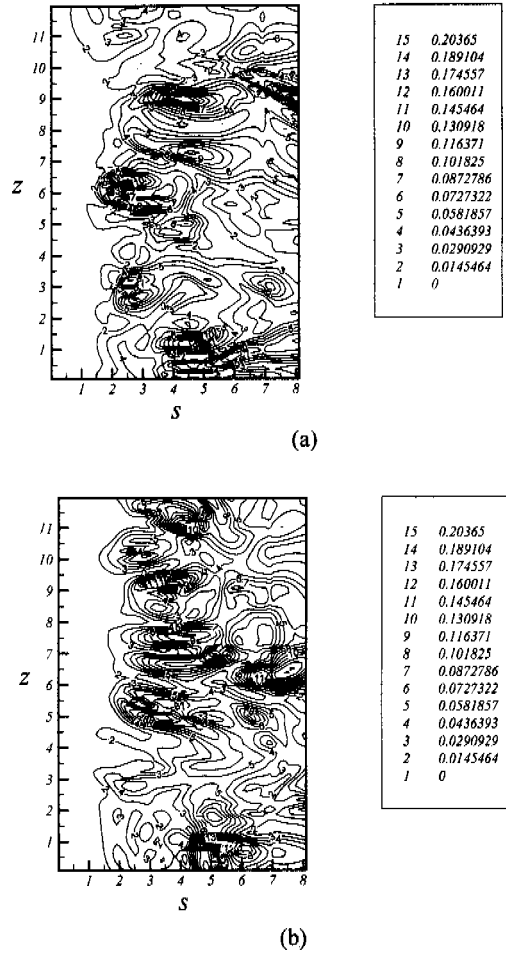
Figure 6은 주 재순환구역에서 주 유동방향과 반대방향의 순간속도를 갖는 구역을 나타낸다. Fig. 6(a)와 6(b)는 같은 시각에서 횡방향 계산영역의 절반 만큼 떨어져 있는 두 단면에서의 상황이고, 6(a)와 6(c)는 같은 단면이나 6(c)가 6(a)보다 실린더의 2.7회전에 해당하는 시간만큼 나중의 상황이다. Figure 6은 난류유동에서의 3차원 비정상(unsteady)성을 잘 보여주며, 특히 우리의 주 관심 대상인  $s=3$ 와  $s=6$ 사이에서 공간이나 시간적으로 매우 격렬한 유동장의 변화가 있음을 알 수 있다. 따라서 주 재순환구역의 순간 재부착지점은 실린더 표면을 따라 약  $3h$ 까지의 편차로



**Fig. 6** Regions of instantaneous reversed flow; (a)  $z = z_1, t = t_1$ , (b)  $z = z_1 + W/2, t = t_1$ , (c)  $z = z_1, t = t_1 + 2.7T$  where  $T$  is the period of the cylinder rotation.

매우 심하게 움직이며, 이는 실험으로 측정된 물질전달 capacity가 최고점부근에서 상당히 완만한 분포를 이루는 사실을 잘 설명한다.(Fig. 5)

Figure 7(a)와 7(b)는 Fig. 6(a)와 6(c)에 각각 대응되는 시각에서의 그림으로서 실린더 표면에서 벽전단응력의 순간값에서 평균값을 뺀 섭동성분 크기의 contour 그림이다.  $s = 3.5$ 와  $s = 5$  사이에서 벽전단응력의 변화가 큼을 알 수 있다. 이는

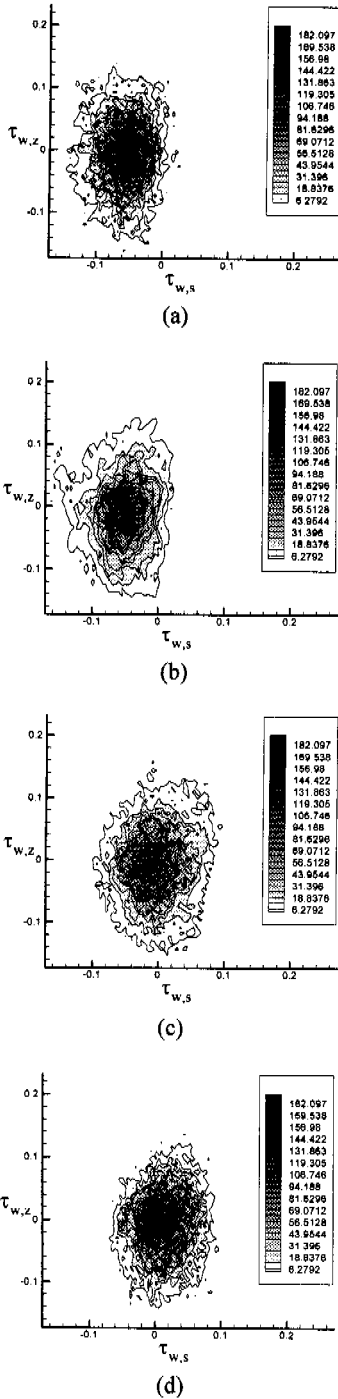


**Fig. 7** Magnitude Contours of instantaneous fluctuation of the wall-shear stress  $\sqrt{\tau_{w,s}^2 + \tau_{w,z}^2}$  on the cylinder surface behind the step; (a)  $t = t_1$ , (b)  $t = t_1 + 2.7T$ .

벽전단응력의 rms 섭동성분이 이 구역에서 크다는(Fig. 5) 5.1절에서의 관찰과 일치된다. 또한 순간적인 벽전단응력의 최대 크기가 최대평균벽전단응력의 4~5배에 달하며 국부적이고 간헐적으로 발생함을 알 수 있다.

### 5.3 난류 통계

특정한  $s$ 에서의  $\tau_{w,s}$ 와  $\tau_{w,z}$ 의 통계적 분포



**Fig. 8** Probability density function of  $\tau_{w,s}$  and  $\tau_{w,z}$ :  
 (a)  $s=2.9$ , (b)  $s=3.5$ , (c)  $s=4.9$ , (d)  $s=6.1$ .

를 다음과 같이 정의 되는 확률밀도함수 (probability density function, *pdf*)로 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

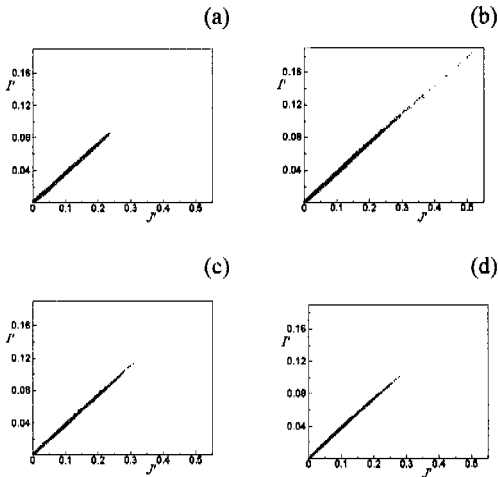
$$pdf(u, v) \Delta u \Delta v = \frac{n}{(N \times N_z)} \quad (3)$$

$$pdf(u, v) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} pdf(u, v) du dv = 1$$

여기서  $u, v$ 는 *pdf*로 나타내고자 하는 물리량, 즉  $\tau_{w,s}$ 와  $\tau_{w,z}$ 를 각각 나타내며  $N$ 은 7번의 실린더 회전에 해당되는 시간동안의 샘플링 개수이고  $N_z$ 는 각각의 순간 유동장에 대한 횡방향 샘플링 개수이며 이는 횡방향의 격자수와 같다.  $n$ 은  $u$ 와  $u + \Delta u, v$ 와  $v + \Delta v$  사이에 해당되는 샘플링 개수이다. Figure 8 (a), (b), (c), (d)는 각각  $s=2.9, 3.5, 4.9, 6.1$ 에서 순간 벽전단응력의  $s$  방향성분( $\tau_{w,s}$ )과  $z$ 방향성분( $\tau_{w,z}$ )의 *pdf*를 보여주며 이 지점들은 각각 재순환구역내 평균 벽전단응력이 최대인 지점, 벽전단응력의 rms섭동성분의 크기가 최대인 지점, 재부착지점, 재부착지점으로부터 주유동 방향으로 1.2  $h$  떨어진 지점을 나타낸다. 이 그림들을 보면 모든 경우 대체적으로 상하 좌우 대칭적 분포를 보이고 있다. 이는  $\tau_{w,s}$ 와  $\tau_{w,z}$ 가 별로 상관을 가지고 있지 않는(weakly correlated) 물리량임을 의미한다. 이 외에도 Fig. 8은 우리에게 몇가지 정보를 제공하고 있다.

모든 경우  $\tau_{w,z}=0$ 인 축에 대칭적인 *pdf*분포를 보인다. 즉 벽전단응력의  $z$ 방향성분의 평균치  $\overline{\tau_{w,z}}$ 는 거의 0가 된다. 또한 *pdf*분포가 대체적으로  $\tau_{w,z}$ 축을 장축으로 하는 타원형태를 이루는데 이는  $z$ 방향 평균 섭동성분이  $s$ 방향 평균 섭동성분보다 더 큼을 나타낸다. 그리고 Fig. 8 (b)와 (c)의 경우의 *pdf*분포가 다른 두 경우보다 중심으로부터 더 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 가령, Fig. 8 (a)와 (d)의 경우의 *pdf*분포는 중심에 많이 집중되어 있다. 이는 최대 rms벽전단응력섭동이 일어나는 영역을 제시해 주는 Fig. 5의 결과를 재확인 시켜준다.

앞의 5.1절에서 부식에 영향을 주는 물리량은



**Fig. 9** Distribution of wall-shear stress fluctuation ( $J$ ) and turbulent fluctuation ( $\Gamma$ ) at  $y=0.006h$ , where  $\Gamma = \sqrt{u'v'}/\sqrt{3}$  and  $J = \sqrt{\tau_{w,s}^2 + \tau_{w,z}^2}$ , (a)  $s=2.9$ , (b)  $s=3.5$ , (c)  $s=4.9$ , (d)  $s=6.1$ .

전체난류섭동과 벽전단응력섭동임을 제시하였는데 두 물리량의 상관관계를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 Fig. 8에서와 마찬가지로  $N \times N_z$ 개 샘플링 개수가 사용되었다. Figure 9의 (a), (b), (c), (d)는 각각 Fig. 8에서의 (a), (b), (c), (d)와 같은 지점이며 벽 전단응력의 rms섭동성분의 크기가 최대인 지점(Fig. 9 (b))부근에서 다른 경우보다 더 길게 분포함을 볼 수 있으며 이는 순간 섭동치가 매우 큰 경우가 있음을 뜻한다. 모든 경우 대체적으로 두 물리량은 서로 비례하고 있다. 즉 난류섭동과 벽전단응력섭동은 상관(correlation)이 있음을 알 수 있고 이는 5.1절의 결과를 뒷받침해주고 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 회전축에 대칭으로 후향계단이 부착된 회전하는 실린더 주위 난류유동의 DNS를 수행하였다. 계단 후방에 재 순환구역이 형성되며 이 구역의 실린더 표면 근처에서 강한 평균난류섭동 및 그것의 급격한 구배가 관찰되었다. 또한 실린더 표면을 따라 계단으로부터 3에서 5 계단높이에 이르는 광범위한 구역에서 강한 벽전단응력섭동이 존재하였다. 이러한 구역은 실험적으

로 최대의 물질전달 capacity가 관찰되는 구역과 일치하며 또한 부식은 물질전달에 의해 제어되기 때문에 난류섭동이나 벽전단응력섭동과 같은 난류성분이 부식을 촉진시킬 수 있음이 확인되었다. 또한 유체역학적인 관점에서 볼 때 후향계단이 부착된 회전하는 실린더는 부식연구에 필요한 난류섭동이 강한 유동을 경제적으로 손쉽게 얻을 수 있음이 본 연구를 통하여 확인되었다.

### 후기

본 연구는 1999년도 인하대학교 교수연구진흥비의 지원을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 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, "Steel 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) Silverman, D. C., 1988, "Rotating Cylinder Electrode - Geometry Relationships for Prediction of Velocity-Sensitive Corrosion," *Corrosion-NACE*, Vol. 44, No. 1, pp. 42~49.
- (5) Bremhorst, K., 1997, *Personal Communication*.
- (6) Lezius, D. K., and Johnston, J. P., 1976, *J. Fluid Mech.*, Vol. 77, pp. 153.
- (7) Rosenfeld, M., Kwak, D., and Vinokur, M., 1994, "A Fractional Step Solution Method for the Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations in Generalized Coordinate Systems," *Journal of Computational Physics*, Vol. 94, pp. 102~137.
- (8) Bienkowski, J., 1998, *Personal Communication*.
- (9) Tennekes, H., and Lumley, J.L. 1972, "A First Course in Turbulence." The MIT Press.