

## 〈論 文〉

## 자유흐름 난류강도가 후향계단유동에 미치는 영향에 대한 실험

김사량\* · 유정열\*\*

(1995년 1월 6일 접수)

An Experiment on the Effects of Free Stream Turbulence Intensity  
on the Backward-Facing Step Flow

Sa-Ryang Kim and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Backward-Facing Step Flow (후향계단유동), Free Stream Turbulence Intensity (자유흐름 난류강도), Split-Film Probe (스플릿-필름프로브), Turbulent Kinetic Energy Balance (난류운동에너지 평형), Shear Stress Balance (전단응력 평형)

## Abstract

An experimental study on the structure of a separated shear layer downstream of the backward-facing step has been performed by examining mean flow and turbulent quantities in terms of free stream turbulence. When free stream turbulence exists, the entrainment rate of the separated shear layer and the flow rate in the recirculation region are enhanced, resulting in shorter reattachment length. The production and diffusion terms in the turbulent kinetic energy balance are shown to increase more than the dissipation term does. Rapid decrease of the pressure-strain term in the shear stress balance implies the enhancement of the three-dimensional motion by free stream turbulence.

## 1. 서 론

재순환영역을 가지는 박리-재부착 난류유동장에 대한 연구는 공학응용에서 중요한 비중을 차지한다. 박리기포라고도 불리우는 이러한 재순환영역을 가지는 난류유동장은 항공기의 날개, 터보기계 내의 블레이드, 확산기, 열교환기, 연소기 등의 유동에서 흔히 관찰할 수 있으며, 그 성능에 큰 영향을 미친다. 이는 또한 각종 차량 및 항공기 등의 항력에도 결정적인 역할을 하며, 건물과 같은 지상구조물, 교량 및 고층건물과 같은 구조물의 설계에도 중요한 고려대상이 된다. 이러한 재순환 및 박리-재부착 유동을 실험적으로 관찰하기 위해서는 혼

히 후향계단을 지나는 유동으로 단순화한다.

후향계단에 영향을 미치는 인자들에 대한 지금까지의 연구중 몇가지 대표적인 것은 다음과 같다. Eaton,<sup>(1)</sup> Adams<sup>(2)</sup>는 박리경계층의 상태에 따른 유동장의 변화에 대하여 연구하였고, Adams<sup>(2)</sup>는 경계층두께와 계단 높이의 비의 변화가 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, Narayanan 등,<sup>(3)</sup> Ötügen<sup>(4)</sup>은 확대비의 영향에 대하여 연구하였고, Rothe and Johnston<sup>(5)</sup>은 회전효과가 박리전단층에 미치는 영향에 대하여 실험하였으며, Kuehn,<sup>(6)</sup> Driver and Seegmiller,<sup>(7)</sup> 라승호<sup>(8)</sup>는 역압력구배가 박리-재부착 유동장에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 최근에 Isomoto and Honami<sup>(9)</sup>는 입구유동의 벽근처에 설치된 장애물에 의해 발생된 난류강도의 영향에 대하여 연구하였는데, 이들은 박리 경계층의 벽 가까이에서의 난류강도가 후류에 큰 영향을 미친다

\*정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

\*\*정회원, 서울대학교 기계공학과

고 주장하였으며, 난류강도가 클수록 재부착길이 짧아짐을 관찰하였다. 본 연구에서는 입구의 자유흐름 난류강도가 2차원 후향계단 모형 뒤에 생기는 박리전단유동 및 재순환유동에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 하며, 이는 후향계단유동 구조를 보다 잘 이해하는데 기여할 수 있고, 특히 새로 개발되는 수치해석 기법 등을 검증하는 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

실험에 사용된 풍동은 폐쇄순환식 괴팅겐형 철제 풍동으로서 시험부의 크기는  $900 \times 900 \times 3600(\text{mm})$ 이며, 속도는 0에서 최대  $60 \text{ m/s}$ 까지 연속조절이 가능하다. 또, 풍속  $40 \text{ m/s}$ 인 경우에 균일도는  $0.3\%$ , 난류강도는  $0.2\%$  이내이다.

후향계단유동은 Fig. 1에 보여진 바와 같이 풍동의 실험부 입구의 풍동바닥에 고정시킨 아크릴로 제작된 2차원 실험모형에 의하여 발생시켰다. 이 모형은 Rothe and Johnston<sup>(6)</sup>과 Ramamurthy 등<sup>(10)</sup>이 사용하였던 모형과 유사하다. 계단의 높이는  $70 \text{ mm}$ 이며, 모형 중심부에서 유동의 2차원성을 유지하기 위해서는 종횡비가 10 이상이어야 한다고 하는데, 본 실험에서는 모형의 종횡비가 12.8로서 그 조건을 충분히 만족한다. 또한, 확대비는 1.08이다. 계단의 앞부분은 4:1 타원형이고, 계단 상류부분은 계단높이의 5배 길이의 평면부로 하여 계단 직전에서의 경계층유동이 가능한 한 평판 난류경계층에 가깝도록 하였다. 횡방향으로  $0h$ ,  $\pm 2h$ 의 3 위치에서 속도분포를 측정된 결과,  $4\%$  이내로 일치하여 유동의 2차원성이 확인되었으므로 풍동의 중앙 단면에서 모든 측정을 수행하였다.

평균속도  $16.2 \text{ m/s}$ 에서 풍동의 자유흐름 난류강도는  $0.12\%$ 이며, 자유흐름의 난류강도를 변화시키기 위하여 풍동의 수축노즐출구에 후향계단으로부터  $x = -150 \text{ cm}$ 의 위치에 지름이  $22 \text{ mm}$ 인 스텐레스 원형파이프를 사용하여  $75 \text{ mm}$  간격으로 정사각 그리드를 설치하였다. 설치된 그리드는 계단위에서  $3.4\%$ 의 자유흐름 난류강도를 발생시키며, 이 경우에 경계층을 제외한 부분에서, 평균유동의 균일도는  $1.3\%$  이내이고, 난류강도는  $5\%$  이내에서 각방향으로 균일하다. 편의상 그리드가 없는 경우를 K0, 난류강도  $3.4\%$ 인 경우를 K2라고 기호로 나타내기로 한다.

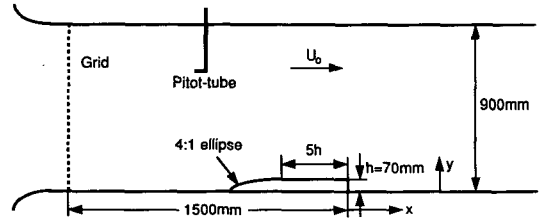


Fig. 1 Backward-facing step model placed in the wind tunnel

풍동시험부의 입구에 설치된 피토관으로 입구유속 및 기준정압을 측정하였으며, 후향계단 하류의 바닥면에 계단면으로부터  $0.5h$ 에서  $10h$ 까지  $0.5h$  간격으로 정압구멍을 설치하여 바닥면정압을 측정하였다. 압력측정에는 Validyne DP-45 압력변환기를 사용하였는데  $1.6 \text{ kHz}$ 의 샘플링주파수로  $65,535$ 개의 데이터를 받아 평균하였으며, 5회 이상불 평균을 취하였다.

DANTEC 56C Series 열선유속계를 사용하여 평균속도 및 난류량을 측정하였다. X-형 열선 프로브로 측정된 평균속도 및 난류량들은, 리니어라이저의 출력을 가감산 유닛을 통과시켜  $U$  및  $V$  성분으로 분리시킨 후, HP3567A 신호분석기로 받아들여 데이터를 컴퓨터에 저장한 후에 수치계산을 하였다. 평균속도  $U$ ,  $V$  및 난류유력  $\overline{u^2}$ ,  $-\overline{uv}$ ,  $\overline{v^2}$ , 난류 3차곱  $\overline{u^3}$ ,  $\overline{u^2v}$ ,  $\overline{uv^2}$ ,  $\overline{v^3}$ , 난류운동에너지 소산율  $\epsilon$ 을 측정하였다. 난류운동에너지 소산율을 제외한 나머지 평균량들을 구하는 데에는  $6.4 \text{ kHz}$ 의 샘플링주파수로  $32,768$ 개의 데이터를 받아들여 평균값을 구하였으며, 10번 이상불 평균을 취하였으며 1점에서 측정하는데 약 1분이 걸렸다.

난류운동에너지 소산율  $\epsilon$ 은 난류소산의 국소등방성가정을 하면 다음과 같이 에너지 스펙트럼의 2차 모멘트로 구할 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\epsilon = 15\nu \int_0^\infty k_i^2 F_{11}(k_i) dk_i \quad (1)$$

에너지 스펙트럼은 HP3567A 신호 분석기를 이용하여  $12.8 \text{ kHz}$ 까지 분석하였으며, 난류에너지 소산율은 수치적분으로 구하였다. 1점에서 측정치들 얻기 위하여는 1024개의 데이터로 이루어진 스펙트럼을 1000번 이상불 평균을 취하였으며, 2~3분 정도 시간이 걸린다. Table 1에 각 측정량에 대한 오차를 나타내었다.

스플릿-필름프로브의 분리면을 주유동방향에 평

Table 1 The estimated uncertainties of measured quantities

Measured quantities	Uncertainty estimates	Remarks
$x/h$	$\pm 0.015$	
$y/h$	$\pm 0.0007$	
$U(\text{Cross wire})$	$\pm 3\%$	$< 3 \text{ m/s}$
	$\pm 1\%$	$> 3 \text{ m/s}$
$\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{uv}(\text{Cross wire})$	$\pm 3\%$	
$\overline{u^3}, \overline{u^2v}, \overline{uv^2}, \overline{v^3}(\text{cross wire})$	$\pm 5\%$	Where the magnitudes are large
	$\pm 10\%$	Where the magnitudes are small
$U(\text{Split-film})$	$\pm 2\%$	$\theta > 60^\circ$
	$\pm 10\%$	$\theta < 60^\circ$
$C_p$	Less than 1%	
$T_u$	$\pm 3\%$	
$\delta$	$\pm 4\%$	
$\theta$	$\pm 2.5\%$	
$H$	$\pm 1.5\%$	
$C_f$	$\pm 1\%$	
$\Psi(\text{Stream function})$	$\pm 2\%$ to $\pm 8\%$	
$y_{0.9}, y_{0.1}$	$\pm 2.5\%$	
$X_R/h$	$\pm 0.2$	
$\epsilon$	$\pm 3\%$	Where the intensities are small
	$\pm 20\%$	Where the intensities are large
$U(dk/dx), V(dk/dy)$	$\pm 7\%$	
$\overline{uv}(dU/dy), (\overline{u^2} - \overline{v^2})(dV/dx)$	$\pm 7\%$	
$d(\overline{uk})/dk, d(\overline{vk})/dy$	$\pm 5\%$ to $\pm 10\%$	
$U(d\overline{uv}/dx), V(d\overline{uv}/dy)$	$\pm 7\%$	
$d(\overline{u^2v})/dx, d(\overline{uv^2})/dy$	$\pm 5\%$ to $\pm 10\%$	
$\overline{v^2}(dU/dy), \overline{u^2}(dV/dx)$	$\pm 7\%$	

행하게 놓으면 2차원 속도를 측정할 수 있으며, 수직으로 놓게되면 역류가 일어나는 유동에서 1차원 속도와 방향을 측정할 수 있으므로, 최근에는 역류가 발생하는 유동에 많이 사용되고 있다. 실험에 사용된 스플릿-필름프로브는 DANTEC 55R57 90°-프로브이다. Ra 등<sup>(12)</sup>은 Stock 등<sup>(13)</sup>의 속도검정 방법을 개량하여 넓은 범위의 속도크기와 피치각의

변화에도 사용될 수 있는 검정방법을 개발하였으며, 또한 시간평균 흐름방향을 측정할 수 있는 새로운 측정기술을 개발하였다. 본 연구에서도 Ra 등<sup>(12)</sup>의 검정법을 적용함으로써 속도검정을 수행하였다. 속도검정에는 제트노즐의 축소비가 9:1인 원형제트유동을 이용하였다.<sup>(14)</sup> 속도는 약 1 m/s에서 20 m/s까지로 변화시키면서 피치각  $-110^\circ$ 에서

110°까지를 10° 간격으로 측정하였다. 피치각의 이동에는 실험실에서 스텝모터와 감속기를 조립하여 자체제작한 2차원 회전장치를 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

박리되는 계단입구의 경계층의 상태를 알아보기 위하여 계단에서 경계층의 평균속도 및 난류강도를 X형 열선프로브를 사용하여 측정하였다. Table 2에 계단모서리에서의 박리경계층의 상태를 나타내었다.

Fig. 2에 자유흐름 난류강도의 변화에 따른 입구 경계층의 속도분포를 벽법칙과 비교하여 나타내었다. 난류경계층임을 알 수 있으며, 난류강도가 큰 경우 후류영역이 없어지는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 Blair<sup>(15)</sup>의 실험결과와 일치하는 경향을 보인다.

Fig. 3에 난류강도의 분포를 나타내었다. 경계층 내에서의 난류강도의 차이는 자유흐름에서 보다는 크지 않지만, 자유흐름 난류강도가 클수록 벽 가까이에서의 난류강도도 크다. Isomoto and Honami<sup>(9)</sup>는 이러한 벽근처에서의 난류강도의 변화가 미치는 영향이 자유흐름의 난류강도의 변화에 의한 영향보다 훨씬 크다고 하였다.

Fig. 4에 자유흐름 난류강도 0.12%, 3.4%인 경우의 압력계수를 나타내었다. 벽면정압은 계단직후로부터 감소하여 최소값에 도달하고나서, 급격히 증가하여 최대값을 가진 후 점차 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 난류강도의 변화에 대하여 압력계수의 최소값과 최대값은 거의 일치하지만, 압력이 회복되는 과정에서는 다소 차이를 보이고 있다. 자유흐름 난류강도가 큰 경우에 압력계수의 분포가 계단쪽으로 이동됨을 알 수 있다. 난류강도가 큰 경우 압력의 회복률도 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 유동장의 구조가 전체적으로 전방으로 이동됨을 의미하며, 박리전단층의 성장률이 증가함을 나타낸다. 그 결과, 자유흐름 난류강도가 큰 경우에 재부

Table 2 Inlet boundary layer parameters

	$\delta/h$	Reg	H	$U_r$	$C_r$
M0	0.54	3890	1.45	0.67	0.00332
M2	0.62	1.44	0.74	0.00407	

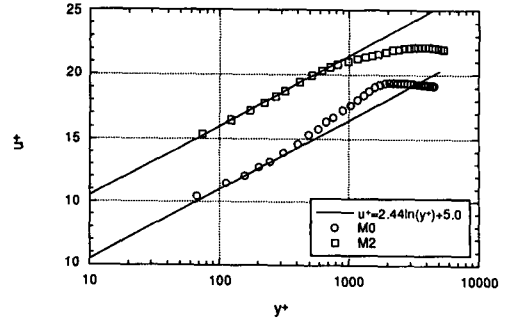


Fig. 2 Log-plot of streamwise mean velocity profile over the step corner( $x/h=0$ )

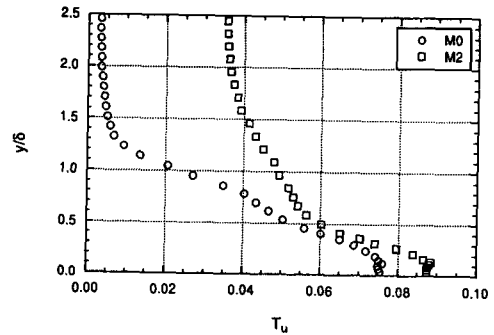


Fig. 3 Streamwise turbulence intensity profile over the step corner( $x/h=0$ )

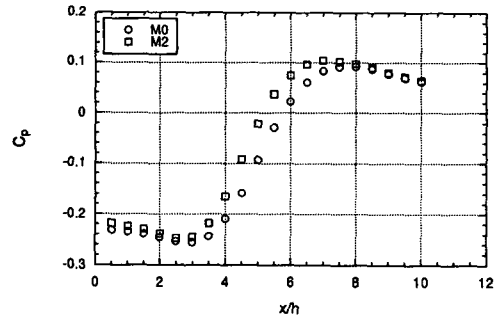


Fig. 4 Pressure coefficients

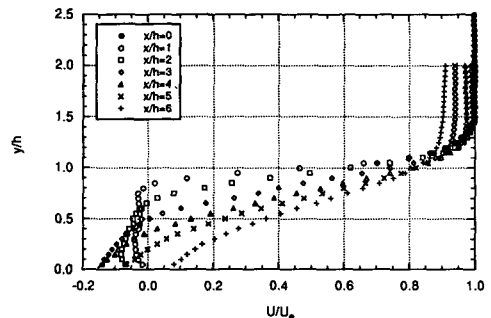


Fig. 5 Streamwise mean velocity profiles(M0, split-film probe)

착길이가 짧아짐을 알 수 있다.

Fig. 5에 M0의 경우에 스플릿-필름프로브로 측정한 각 단면에서의 속도분포를 나타내었다. 계단으로부터 박리된 후  $x/h=3$ 까지는 전단층 상부의 자유흐름의 속도분포는 거의 변화하지 않는데 비하여, 전단층 하부의 속도는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 계단 아래쪽 구석의 재순환영역으로부터의 유입은 크지만, 자유흐름으로부터 전단층 내부로의 유입은 매우 작음을 나타낸다. Isomoto and Honami<sup>(9)</sup>는 이러한 영역을  $x/h=2.5$ 까지로 분석하고, 이 영역을 "entrainment region"이라고 이름지었다.

재순환영역의 속도분포를 살펴보면, 벽으로 갈수록 역류의 속도가 증가하거나 거의 일정한 것을 볼 수 있는데, 이것은 역류의 경계층이 보통 평판의 경계층보다 매우 얇기 때문에 실험에서 경계층두께 이하로 벽 가까이까지는 측정되지 않았기 때문이다. 역류의 최대값은  $x/h=3$ 과 4 근처에서 나타나며, 그 최고 속도는 약  $-0.15U_o$ 이다. 자유흐름의 난류강도가 큰 경우 각 단면에서의 역류의 속도가 커지는 것을 관찰할 수 있으며, 그 최대값은 각각  $-U_w/U_o=0.142, 0.163$ 이다. 이는 "entrainment region"에서 전단층 하부로 유입되는 속도의 크기와 관계가 있다고 생각한다.

스플릿-필름프로브를 이용하여 구한  $U$ 의 분포로부터 다음과같이 정의되는 유동함수를 구할 수 있다.

$$\psi(y) = \frac{\int_0^y U(y') dy'}{U_o h} \quad (2)$$

위의 식을 이용하여, 자유흐름 난류강도에 따른 유

선을 그릴 수 있는데, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 각각의 유선의 형태를 관찰함으로써, 자유흐름의 난류강도가 증가함에 따라 재부착길이가 짧아짐을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 스플릿-필름프로브를 사용하여 전방흐름계수(forward-flow factor)를 측정하였으며, 재부착길이는 각각  $5.7h, 5.3h$ 로 측정되었으며, 벽면에서 조금 떨어진 위치에서 측정하였으므로 벽면에 밀착된 경우보다 약  $0.1h$  정도는 작게 측정되었다고 생각된다. 한편,  $\Psi$ 가 최소가 되는 위치는 상류로 이동하고, 난류강도의 증가에 의하여  $\Psi$ 의 최소값이 더 작아짐을 알 수 있다. 이는 난류강도의 증가에 의하여 재순환영역에서 역류하는 유량이 증가함을 의미한다. 일반적으로 역류되는 유량의 증가는 재부착길이의 감소에 영향을 주는 것으로 알려지고 있다. Yoo and Baik<sup>(16)</sup>은 열선유속계로 속도를 측정하는 경우 역류를 측정할 수 없으므로 전단층의 속도가 빠른 부분의 성장률을 비교하여 후향계단유동의 경우에 평면 혼합층보다 성장률이 빠름을 보였다. Fig. 7에 나타내었듯이 각 경우에 평면 혼합층의 성장률  $0.0421$ 에 비하여 큰  $0.0473, 0.0702$ 로서 난류강도에 따른 전단층 성장률의 증가를 관찰할 수 있다. 이러한 평균속도의 거동으로부터, 자유흐름의 난류강도가 박리전단층의 성장률을 크게하며, 재순환영역의 유량을 크게하여, 재부착길이를 작게한다는 것을 확인할 수 있다.

X-형 열선프로브를 이용하여 난류응력  $\overline{u^2}, \overline{v^2}, -\overline{uv}$ 의 분포를 측정하였으며, Fig. 8에 계단하류 각각의 위치에서 최대값의 분포를 나타내었다. 이 세 가지 난류응력들중에서 유동방향 수직응력,  $\overline{u^2}$ 이 가장 크고, 횡류방향 수직응력,  $\overline{v^2}$ 가 그 다음으

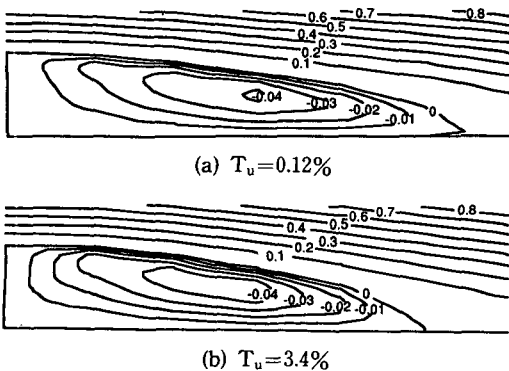


Fig. 6 Streamlines obtained by using split-film probe

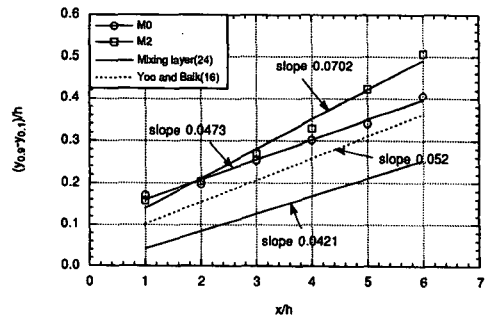


Fig. 7 Growth of the shear layer width in high velocity region

로  $\overline{u^2}$ 의 50% 정도이며, 전단응력,  $-\overline{uv}$ 가  $\overline{u^2}$ 의 30% 정도로 가장 작은 값을 갖는다. 이러한 경향은 난류구조가 비등방성임을 보이는 증거이기도 하다. 난류응력들의 최대값은 재부착영역에서 관찰되지만 실험마다 결과가 다르며, 정확한 위치는 아직 확인되지 않고 있다. 그 이유는 각각의 실험마다 실험조건이 모두 다르기 때문이라고 생각한다. 후향계단유동에서의 난류응력들은 일반적으로 평면 혼합층의 경우보다 큰 값을 가지게 되며, 유선곡률의 영향을 받아서 전단층 중심에 대하여 비대칭이

된다. 이는 벽의 존재로 인하여 재부착영역에서 발생되거나 재순환영역으로 유입되는 난류강도가 큰 와류가 다시 재순환영역을 지나 전단층으로 재유입

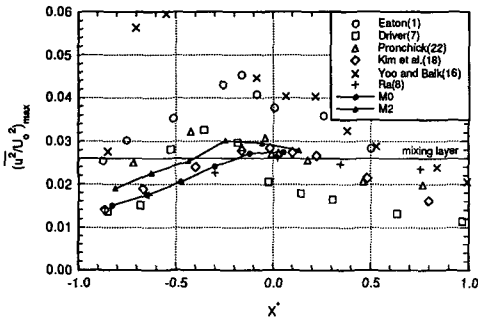


Fig. 8(a) Evolution of local maximum streamwise normal stress,  $(\overline{u^2v}/U_0^3)_{max}$

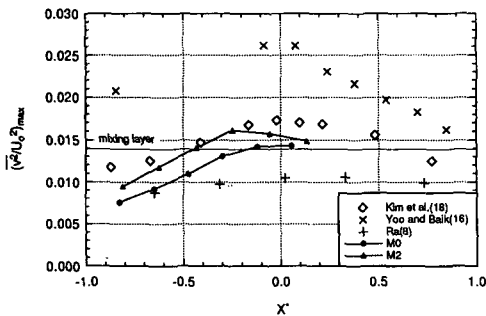


Fig. 8(b) Evolution of local maximum transverse normal stress,  $(\overline{v^2v}/U_0^3)_{max}$

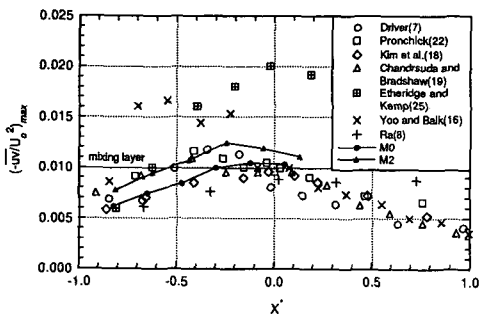


Fig. 8(c) Evolution of local maximum shear stress,  $(-\overline{uv}/U_0^3)_{max}$

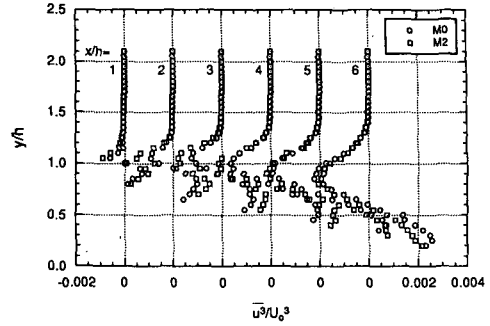


Fig. 9(a) Distribution of triple product,  $\overline{u^3}/U_0^3$

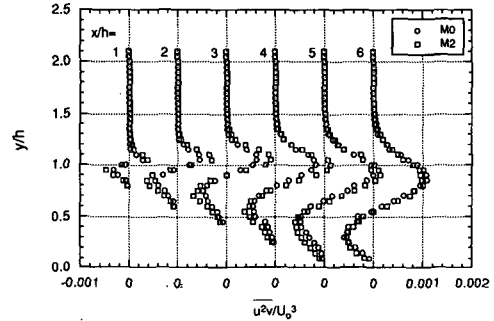


Fig. 9(b) Distribution of triple product,  $\overline{u^2v}/U_0^3$

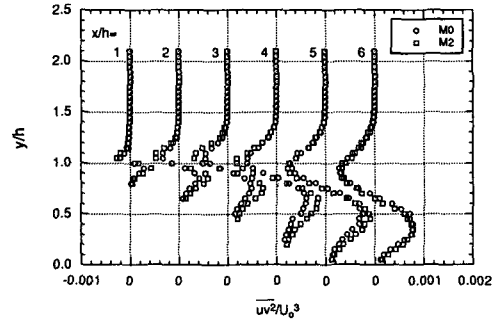


Fig. 9(c) Distribution of triple product,  $\overline{uv^2}/U_0^3$

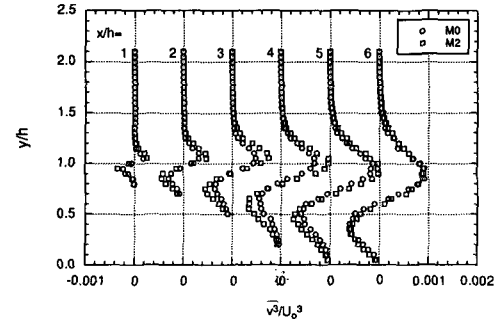


Fig. 9(d) Distribution of triple product,  $\overline{v^3}/U_0^3$

되는 'positive feedback'이 일어나기 때문이다.<sup>(16~21)</sup> Chandrsuda and Bradshaw<sup>(19)</sup>는 난류강도는 평면 혼합층보다 10~15% 증가하지만 전단응력은 비슷하다고 하였다. 자유흐름 난류강도의 증가에 따라, 각 단면에서의 난류응력들도 전반적으로 커지며, 난류응력의 최대값은 10~20% 증가하는 것을 관찰하였다.

난류3차곱(triple product)들은 난류운동에너지 및 전단응력 이송방정식에서 확산항들을 모델링하는데 이용된다. 난류3차곱의 분포는 X-형 열선프로브로 측정하였으며, Fig. 9에 나타내었다. 난류3차곱의 분포는 전단층의 중심에 대하여 역대칭형이며, 전단층의 양쪽 가장자리에서 최대 및 최소값을 가진다. 그러나, 대체로 벽쪽에서의 peak값이 자유흐름쪽보다 작으며,<sup>(22)</sup>  $\overline{uw^2}$ 와  $\overline{v^3}$ 은 하류로 가면서 벽쪽의 peak값이 자유흐름쪽의 peak값의 약 60% 정도밖에 되지 않는 것을 볼 수 있다. 난류3차곱은 주로 큰 에디들에 의해 영향을 받는다고 알려져 있다.  $\overline{u^2v}$ 의 값이 벽쪽에서 음의 값을 갖는다는 것은 큰 에디가 벽쪽으로 이동하고 있음을 나타낸다.<sup>(8,19,22)</sup> 자유흐름의 난류강도가 커지면 난류3차곱들의 값도 전반적으로 커짐을 볼 수 있으며, 따라서 난류에너지의 확산도 커짐을 추측할 수 있다. 이러한 난류3차곱들의 변화에 대한 정보는 고차상관항을 고려한 난류모델을 개발하는 경우에 활용될 수 있을 것이다.

난류운동에너지는 횡방향속도를 측정하지 않았으므로 다음의 관계<sup>(8,16,22)</sup>로부터

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) = \frac{3}{4}(\overline{u^2} + \overline{v^2}) \quad (3)$$

구하였다. 재부착영역 이전의 전단층에서는 이러한 가정과 잘 일치하지만, 재부착지점 부근으로 갈수록 전단층내의  $\overline{w^2}$ 과  $\overline{v^2}$ 은 비슷한 크기를 가지며, 재부착지점의 벽면근처에서는  $\overline{w^2}$ 이 각 방향 난류응력들 중에서 가장 큰 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 재부착영역에서는 위의 가정에 따른 난류에너지의 오차는 상당한 크기(약 30%)로 된다.<sup>(8)</sup>

난류에너지 소산율은 박리전단층의 윗 부분에서는 오차가 적었으나, 아랫부분에서는 측정시마다 최대 20% 정도의 오차를 보였다. 그러므로 한 측정점에서 여러번 측정하여 Chavenet's criterion에 따라 편차가 큰 데이터는 버리고 평균을 취하였다.

난류강도에 대한 보정은 하지 않았다. 자유흐름 난류강도가 큰 경우에 난류에너지소산율도 약간 커짐을 관찰할 수 있으나, 측정오차가 큰 것을 감안하면 다른 난류량들의 변화보다는 크지 않은 것으로 생각된다.

후향계단유동에서 자유흐름 난류강도의 변화가 이러한 각 항들에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 각각 다음과 같이 쓰여지는 난류운동에너지와 전단응력의 균형상태를 검토하였다.

난류운동에너지 균형 :

$$\underbrace{U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y}}_{\text{대류}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{uw}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{vw}{\rho} \right)}_{\text{압력확산}} + \underbrace{\frac{\partial(\overline{uk})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{vk})}{\partial y}}_{\text{난류확산}} + \underbrace{uw \frac{\partial U}{\partial y} + (\overline{u^2} - \overline{v^2}) \frac{\partial U}{\partial x}}_{\text{생성}} + \epsilon = 0 \quad \text{소산}$$

전단응력 균형 :

$$\underbrace{U \frac{\partial \overline{uw}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{uw}}{\partial y}}_{\text{대류}} + \underbrace{\overline{u^2} \frac{\partial V}{\partial x} + \overline{v^2} \frac{\partial U}{\partial y}}_{\text{생성}} + \underbrace{\frac{\partial(\overline{u^2v})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{uv^2})}{\partial y}}_{\text{난류확산}} - \underbrace{\frac{p}{\rho} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)}_{\text{압력변형률}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pv}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pu}{\rho} \right)}_{\text{압력확산}} = 0 \quad (5)$$

본 연구에서는 난류에너지 소산율항을 실험으로부터 구하였으므로 압력확산항을 난류운동에너지 방정식의 다른 항들과의 균형으로부터 구하였다.<sup>(16)</sup> 실험치에 대한 y방향 미분값은 구간 연속다항식(piecewise polynomial)을 적용한 최소자승법(least square fitting)으로 구하였으며, x방향 미분값은 중심차분을 이용하였다. Fig. 10에  $x/h=2$ 와 5에서 난류운동에너지의 균형상태를 나타내었다. 열선유속계로 측정된 결과이므로 재순환영역 내는 나타내지 않았다. 전단층의 중심부에서는 전단응력에 의하여 생성된 큰 난류에너지의 약 50%가 y방향으로 난류확산이 이루어지며 나머지는 소산되거나 유동방향으로 대류되었다. 전단층과 자유흐름과의 경계에서는 난류에너지의 생성은 급격히 줄어들었으며, y방향으로의 대류량과 난류확산량이 거의 균형을 이루었고, 약간의 압력확산량이 존재하였다.

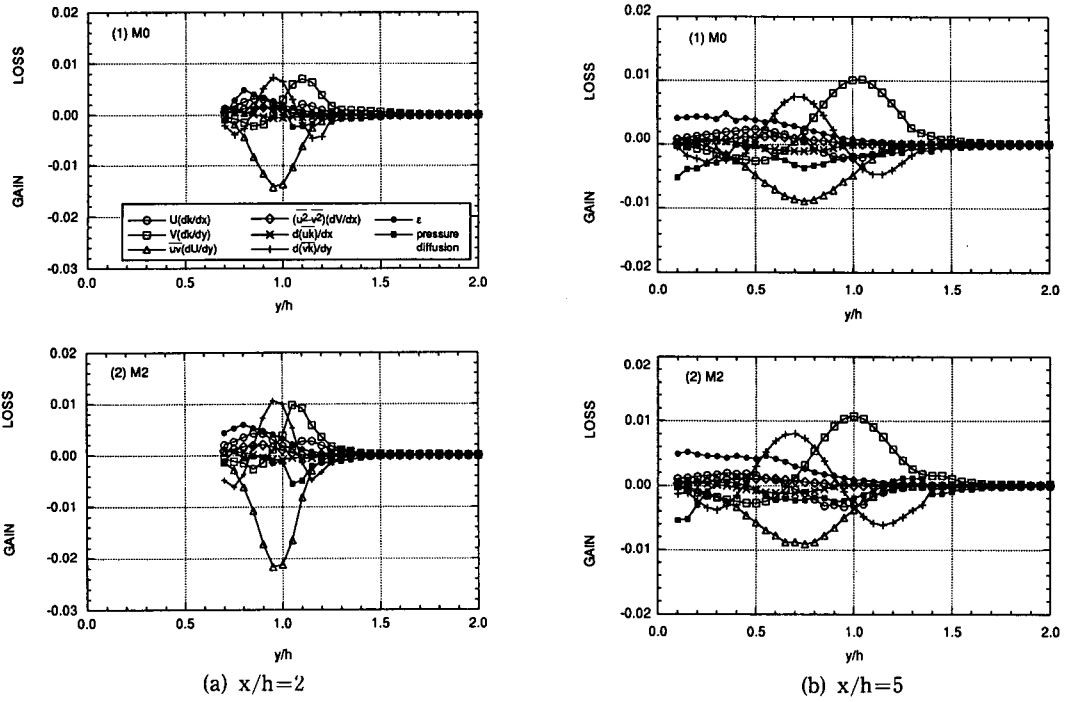


Fig. 10 Turbulent kinetic energy balance

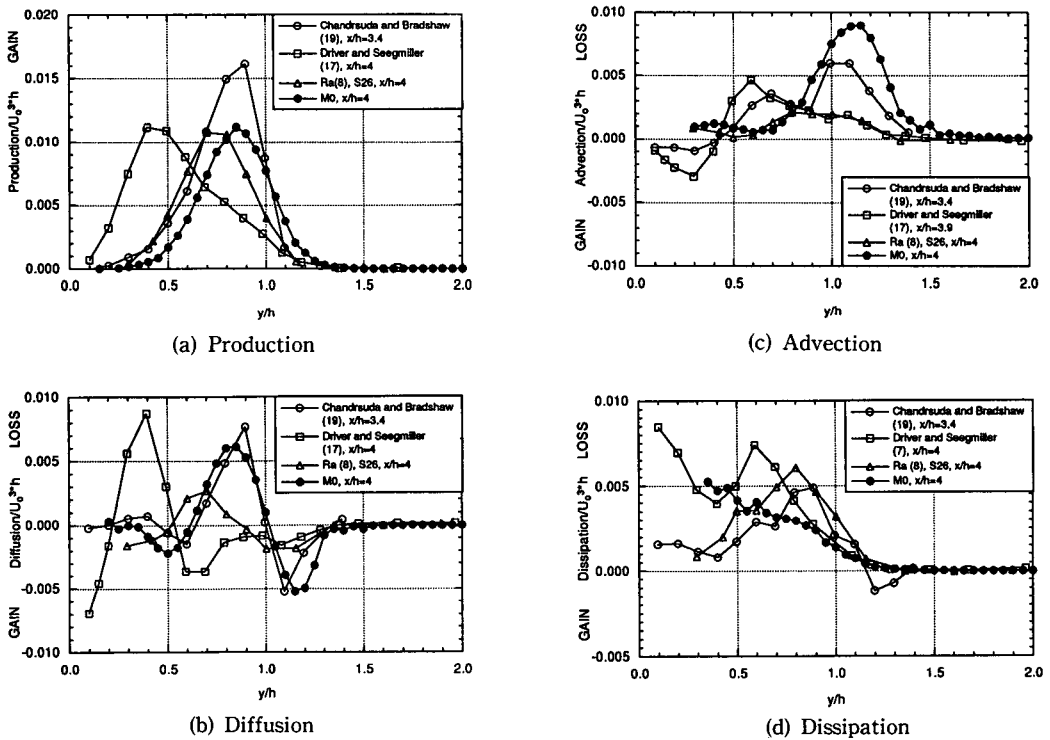


Fig. 11 Comparison of respective terms in energy balance



또한, 난류에너지 소산율은 전단층 전영역에 걸쳐서 고르게 분포하며 그 값은 난류에너지 생성이 큰 영역에서는 별로 크지 않다. 생성항이나 확산항에 비하여 난류에너지 소산율항이 작은 것은 박리 전단층에서 생성된 큰 에디가 하류로 대류되거나 또는 확산되기 이전에 소산에 관계되는 작은 에디로 잘게 쪼개지지 않았기 때문이라 생각할 수 있다.<sup>(7)</sup> 유동방향의 난류확산량 및 수직응력에 의한 난류생성량은 다른 양에 비하여 매우 작았다. 압력확산을 무시하여 난류에너지 평형관계로 얻은 난류에너지 소산율은 직접 측정된 경우보다 큰 값을 가진다.<sup>(23)</sup> 박리전단층이 벽쪽으로 많이 휘는 재부착영역에서는 유동방향 대류항 및 법선응력에 의한 생성항은 중요하다<sup>(19)</sup>고 하며,  $x/h=5$ 에서 볼 수 있는 바와 같이 재부착영역으로 다가감에 따라 점점 그 크기가 커짐을 확인할 수 있다. 자유흐름 난류강도가 크면 난류에너지 이송방정식의 전단응력에 의한 생성항,  $y$ 방향 난류확산항 및  $y$ 방향 대류항들은 전체 유동장에 걸쳐서 모두 20~30% 정도씩 증가하는 형상을 보이고 있다. 그러나 난류에너지 소산율은 다른 항들보다는 작은 비율로 증가하고, 유동방향의 확산은 거의 변화가 없다. 자유흐름 난류강도

의 증가는 난류의 생성을 증가하게 하지만 난류소산에 미치는 영향은 작은 것으로 보아 큰 에디들의 분열과정에 미치는 영향은 크지 않다고 생각된다. Fig. 11에는  $x/h=4$ 에서 측정된 생성, 확산, 대류, 소산항들을 기존의 결과들과 비교하였다.

난류에너지 균형에서 지배적인 역할을 하는 전단응력의 거동에 대하여 고찰한다. 전단응력 평형에서 대류항, 생성항, 난류확산항은 실험으로부터 구하였으며, 압력확산항은 무시하였다. 압력 변형률항은 난류에너지 균형에서와 마찬가지로 다른 항들과의 균형으로부터 구하였다.<sup>(16,19)</sup> Fig. 12에  $x/h=2$ 와 5에서, 전단응력 평형상태를 나타내었다. 전단층의 중심부에서는 생성항과,  $y$ 방향으로의 난류확산 및 압력-변형률항이 주로 평형을 이루었다. 생성항에 대한 난류확산항의 비는 50%를 넘지 않으며, 난류운동에너지 평형에서보다 작은 비중을 차지한다.<sup>(19)</sup> 자유흐름과의 경계면에서는  $y$ 방향 대류항이  $y$ 방향 난류확산항과 거의 같은 크기이다. 재부착지점에 가까이 가면서 생성항, 확산항 및 압력-변형률항은 점점 줄어들며,  $x/h=5$ 에서는 압력-변형률항과  $y$ 방향 난류확산항의 최대값이 거의 비슷하다. 그러나 유선곡률의 영향으로  $y$ 방향 대

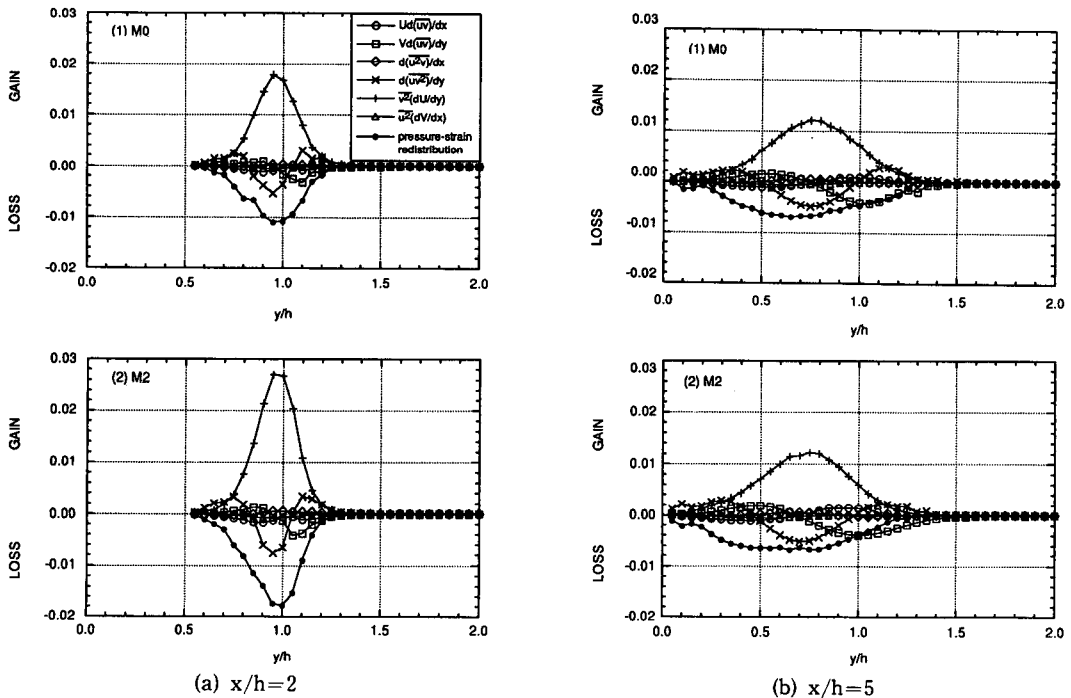


Fig. 12 Shear stress balance

류항은 점점 증가하다 다시 감소하기 시작한다. 난류강도가 커지면  $x/h=2$ 에서는 전단층 중심부에서 생성항은 약 30% 정도 커지며, 압력-변형률항은 약 50% 정도 커지는 것을 관찰할 수 있으며, 재부착영역에 다가감에 따라  $x/h=5$ 에서는 다시 거의 비슷해짐을 알 수 있다. 이것은 자유흐름 난류강도가 크면 압력-변형률항의 크기가 더 빨리 감소한다는 것을 의미하며, 이러한 압력-변형률항의 거동으로부터 박리전단층에서 발생한 횡방향 와에 의한 비등방성 난류구조가 큰 난류강도로 인하여 더 빨리 등방성 구조로 변해감을 예측할 수 있다. 그러므로 난류강도가 클수록 2차원적인 횡방향와가 더 빨리 소멸될 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

후방계단 하류의 유동에서  $Re_h=7.56 \times 10^4$ 인 조건에서 자유흐름 난류강도가 각각 0.12%, 3.4%인 경우에 대하여 실험적 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 자유흐름 난류강도가 큰 경우에 박리전단층의 성장률이 커지고, 재순환영역에서 박리기포 내의 유량은 증가하며, 재부착길이는 짧아짐을 확인하였다.
- (2) 난류에너지 평형에서 생성항,  $y$ 방향 확산항 및 대류항의 증가율에 비하여 난류에너지 소산율항의 증가율은 작으며, 이는 난류강도의 증가가 큰 에디들의 분열과정에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 나타낸다.
- (3) 전단응력 균형에서는 난류강도가 크면 박리전단층의 상류부분에서는 압력-변형률항이 증가하였다가, 다시 빠르게 감소하였다. 박리전단층에서 발생한 횡방향 와에 의한 비등방성 난류구조가, 큰 난류강도로 인하여 더 빨리 등방성 구조로 변해감을 예측할 수 있다. 그러므로 난류강도가 클수록 2차원적인 횡방향 와가 빨리 소멸될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 터보·동력기계 연구센터의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Eaton, J. K., 1980, "Turbulent Flow Reattach-

- ment: An Experimental Study of the Flow and Structure Behind a Backward-Facing Step," A Dissertation Submitted to the Dept. of Mech. Eng. of Stanford Univ. for the Degree of Ph. D.
- (2) Adams, E. W., 1984, "Experiments on the Structure of Turbulent Reattaching Flow," A Dissertation Submitted to the Dept. of Mech. Eng. of Stanford Univ. for the Degree of Ph. D.
- (3) Narayanan, M. A. B., Khadgi, Y. N. and Viswanath, P. R., 1974, "Similarities in Pressure Distribution in Separated Flow Behind Backward-Facing Steps," *Aeronautical Quarterly*, Vol. 25, pp. 305~312.
- (4) Ötügen, M. V., 1991, "Expansion Ratio Effects on the Separated Shear Layer and Reattachment Downstream of a Backward-Facing Step," *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 273~280.
- (5) Rothe, P. H. and Johnston, J. P., 1979, "Free Shear Layer Behavior in Rotating Systems," *J. Fluids Eng.*, Vol. 101, pp. 117~120.
- (6) Kuehn, D. M., 1980, "Effects of Adverse Pressure Gradient on the Incompressible Reattaching Flow Over a Rearward-Facing Step," *AIAA J.*, Vol. 18, no. 3, pp. 343~344.
- (7) Driver, D. M. and Seegmiller, H. L., 1982, "Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer Subject to an Adverse Pressure Gradient," *AIAA Paper 82-1029*.
- (8) 라승호, 1990, "흐름방향 압력구배가 후방계단 뒤 난류 재부착흐름에 미치는 영향에 대한 실험적 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원.
- (9) Isomoto, K. and Honami, S., 1989, "The Effect of Inlet Turbulence Intensity on the Reattachment Process Over a Backward-Facing Step," *J. Fluids Eng.*, Vol. 111, pp. 87~92.
- (10) Ramamurthy, A. S., Balachandar, R. and Govida Ram, H. S., 1991, "Some Characteristics of Flow Past Backward Facing Steps Including Cavitation Effects," *J. Fluids Eng.*, Vol. 113, pp. 278~284.
- (11) Champagne, F. H., 1978, "The Fine-Scale Structure of the Turbulent Velocity Field," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86, Part 1, pp. 67~108.
- (12) Ra, S. H., Chang, P. K. and Park, S. O., 1990,

- "A Modified Calibration Technique for the Split Film Sensor," *Meas. Sci. Technol.* Vol. 1, pp. 1156~1161.
- (13) Stock, D. E., Wells, M. R., Barriga, A. and Crowe, C. T., 1977, "Application of Split Film Anemometry to Low-Speed Flows with High Turbulence Intensity and Recirculation as Found in Electrostatic Precipitators," *Proc. of the Fifth Biennial Symp. on Trubulence, Dept. of Chemical Eng., Univ. of Missouri, Rolla*, pp. 117~123.
- (14) 정대한, 1994, "원형제트 유동장에서 점성소산항 측정에 관한 실험적 연구," 석사학위논문, 서울대학교, 서울.
- (15) Blair, M. F., 1983, "Influence of Free-Stream Turbulence on Turbulent Boundary Layer Heat Transfer and Mean Profile Development, Part II -Analysis of Results," *J. Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 41~47.
- (16) Yoo, J. Y. and Baik, S. J., 1992, "Redeveloping Turbulent Boundary Layer in the Backward-Facing Step Flow," *J. Fluids Eng.*, Vol. 114, pp. 522~529.
- (17) Bradshaw, P. and Wong, F. Y. F., 1972, "The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 52, Part 1, pp. 113~135.
- (18) Kim, J., Kline, S. J. and Johnston, J. P., 1980, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer : Flow Over a Backward-Facing Step," *J. Fluids Eng.*, Vol. 102, pp. 302~308.
- (19) Chandrsuda, C. and Bradshaw, P., 1981, "Turbulence Structure of a Reattaching Mixing Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 110, pp. 171~194.
- (20) 김경천, 정명균, 1985, "2차원 수직벽을 지나가는 재부착 박리전단층의 난류구조에 관한 연구 (I)," 대한기계학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 403~413.
- (21) Dianat, M. and Castro, I. P., 1991, "Turbulence in a Separated Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 226, pp. 91~123.
- (22) Pronchick, S. W., 1983, "An Experimental Investigation of the Structure of a Turbulent Reattaching Flow Behind a Backward-Facing Step," A Dissertation Submitted to the Dept. of Mech. Eng. of Stanford Univ. for the Degree of Ph. D.
- (23) Azad, R. S. and Kassab, S. Z., 1989, "New Method of Obtaining Dissipation," *Exp. in Fluids*, Vol. 7, pp. 81~87.
- (24) Pui, N. K. and Gartshore, I. S., 1979, "Measurements of the Growth Rate and Structure in Plane Turbulent Mixing Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 91, Part 1, pp. 111~130.
- (25) Etheridge, D. W. and Kemp, P. H., 1978, "Measurements of Turbulent Flow Downstream of a Rearward-Facing Step," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86, Part 3, pp. 545~566.