

〈論 文〉

## 원형실린더 후류내의 가동형 와류분할판에 의한 항력 감소효과

박 운 진\*

(1992년 10월 13일 접수)

### Drag Reduction Effect by a Self-Adjustable Splitter Plate on the Flow over a Circular Cylinder

Woon-Jean Park

**Key Words :** 2-D Wake(이차원 후류), Splitter Plate(와류분할판), Drag Reduction(항력 저감), Flow Visualization(유동가시화), How-wire Measurement(열선유속측정)

#### Abstract

The drag reduction effect of a freely-rotatable splitter plate was experimentally investigated in the 2-D wake behind a circular cylinder. By arranging the splitter plate to be aperted with a certain gap from the cylinder, the splitter plate was able to be aligned itself automatically to the flow direction in the tested range of  $6.2 \times 10^3 < Re < 2.1 \times 10^4$ . As a result, it was proven that the self-adjustable splitter plate always reduced effectively the drag imposed on the body against any arbitrary flow directions. In a specific range of Reynolds numbers, the drag reduction effect was dependent not only on the length of the splitter plate but also on the gap distance between the plate and the trailing edge of the body. For a splitter plate with a specific length, there existed a unique optimum range of gap distance to obtain successfully the drag reduction effect, however, the optimum range of gap distance was dependent on Reynolds number.

#### 기 호 설 명

$C_d$ : 항력계수	$Re$ : 레이놀즈수
$D$ : 실린더 모델 직경	$U$ : $x$ 축방향의 평균속도
$E$ : 후단거리, $E = G + L$	$U_o$ : 자유흐름 속도
$F$ : 항력	$U_c$ : 중심선속도
$f$ : 주파수	$u'$ : $x$ 축방향의 요동속도
$f_h$ : 후류 와동회림 주파수	$x, y$ : 좌표축
$G$ : 간격	$\theta$ : 운동량두께
$G_c$ : 임계간격	$\phi$ : 편향각
$L$ : 분할판 길이	
$St$ : Strouhal수	

#### 1. 서 론

\*정회원, 한국기술교육대학 동력기계공학과

체유동이 있을 경우 또는 물체가 실제 유체 속에서 이동할 때 물체의 후방에는 후류(wake)가 발생하게 되고 이로 인하여 정지상태의 물체는 항력(drag)을 받게 되며 이동 중인 물체는 자신의 운동 에너지 또는 추력의 손실을 입게 된다. 특히 이차원 원형실린더를 가로질러 비교적 높은 레이놀즈수의 범위를 갖는 난류유동이 있을 경우엔 원형실린더 물체의 후방에 난류후류(turbulent wake)가 발생하는데 이는 유동 진행축선상으로부터 후류의 경계 영역쪽으로 일정거리 떨어진 상·하방에 교대로 나타나는 매우 강한 와동의 흐름으로 특성지워지며(Kármán형 와류) 따라서 물체 후방의 유동장은 운동량의 결손상태를 이루게 되어 유체 속의 물체에는 때때로 과도한 항력과 유체유동에 기인한 진동(flow induced vibration)이 발생할 수 있다. 이러한 비유선형 물체(bluff body)의 후류유동장에 있어서 운동량 결손에 따른 항력을 단순하고도 효율적인 방법으로 감소시키기 위한 연구의 효시로서 Roshko<sup>(1)</sup>는 Kármán형 와류의 상호작용을 억제함으로써 항력을 저감시킬 수 있으며 이의 한가지 방안으로 물체의 후단부 중앙선에 유동방향에 평행하게 와류분할판(splitter plate)을 고정 부착하여 이의 효과를 실증하였다. Roshko 이후 지금까지 와류분할판의 항력저감효과에 대한 많은 연구가 진행되어오고 있으며,<sup>(2-11)</sup> 특히 최근들어 군사,<sup>(4)</sup> 항공우주<sup>(8)</sup> 및 해양<sup>(9)</sup> 등의 다양한 응용분야에 걸쳐 분할판의 항력저감효과가 연구되고 있다.

그러나 유체유동의 방향이 일정치 않거나 예측하기 어려운 경우엔 원형실린더 후단부에 고정 부착된 분할판은 유체유동방향의 변화에 따라서 어떤 경우엔 오히려 항력의 증가를 초래할 수도 있으므로 소기의 항력저감효과를 기대할 수가 없게 된다. 따라서 효과적으로 항력을 감소시키기 위하여서는 와류분할판이 항상 유체유동방향에 따라 스스로 정렬하도록 가동형 분할판을 설계할 필요가 있다. 이러한 목적으로 최근에 Cimballa et al.<sup>(12)</sup>이 가동형 분할판의 효과를 실험한 결과, 분할판이 유체유동 방향에 평행하게 정렬하는 대신 유동진행축선상의 상·하방으로 일정한 편향각을 갖는 위치에서 평형상태를 이루는 예기치 못한 특이한 결과를 관찰하였다. 이 편향각은 실험범위인  $5 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^4$  내에서는 레이놀즈수에 무관하고 분할판 길이에 따라 특정값을 가지며 특히 비교적 짧은 분할판 ( $L/D < 2$ )의 경우엔 큰 편향각으로 인하여 소기의 항

력저감효과를 얻을 수 없었다.

가동형 분할판의 이러한 특이한 거동을 이해하기 위해 Xu et al.<sup>(13,14)</sup>이 수치해석적 방법으로 매우 낮은 레이놀즈수 범위인  $Re < 150$ 의 경우를 연구한 결과 임계 레이놀즈수 이상에서는 원형실린더 후방에 압력과 점성력에 의한 불안정한 모멘트(unstable moment)가 형성되고 이것이 분할판에 작용하여 분할판이 편향각을 가지게 되며 레이놀즈수의 증가에 따라 편향각이 증가됨을 보였다. 뒤이어 Cimballa와 Garg<sup>(15)</sup>는 비교적 높은 레이놀즈수 범위인  $5 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^4$ 에서 실린더의 박리된 근접후류에 있어서도 시간으로 평균한 평균유동으로 볼 때는 낮은 레이놀즈수에서의 정상박리기포(steady separation bubble)와 유사한 현상이 나타나며 이 때의 불안정한 모멘트가 분할판에 작용함으로써 편향각을 갖게되며, 또한 이 때의 편향각이 레이놀즈수에 무관한 이유로서 비교적 높은 레이놀즈수 범위에서는 불안정한 모멘트가 점성력 보다는 주로 압력에 의하여 형성된다는 것을 실증하였다.

따라서 유체유동방향을 예측하기 어려운 경우의 항력저감을 목적으로 설치할 가동형 분할판은 위에 언급된 편향각을 갖지 않으면서 자유흐름방향에 정렬되도록 하여야 하며 이를 위하여 본 연구에서는 가동형 분할판을 실린더 후단부로부터 일정간격 이격시켜 설치하여, 실린더 바로 후방의 압력에 의한 불안정한 모멘트가 분할판에 직접 작용하지 않도록 하되 와동의 상호 작용은 계속 억제할 수 있도록 설계된 가동형 분할판을 이용하여 이의 항력저감효과를 풍동실험을 통하여 조사하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

본 실험은 가동형 분할판이 부착된 이차원 원형실린더를 이용하여 개방형 흡입식 풍동에서 수행되었다. 풍동의 흡입측 수축비는 7:1이고 시험부는  $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 의 정사각형 단면을 가지며 풍동 내의 자유흐름속도는 1~15 m/s이었다. 후류 운동장의 평균속도 및 난류강도 측정에 이용한 열선 유속 측정 장치(hot-wire anemometry)로는 TSI사의 IFA-100 유속측정기와 곧은형의 단선 텅스텐 열선을 사용하였고, 이 장치의 속도 교정은 실제 실험 조건하의 풍동 내에서 in-situ calibration을 실시하였다. 수치자료획득 장치로서는 MetraByte사의 DAS16F A/D 변환기와 32 bit 마이크로프로세서

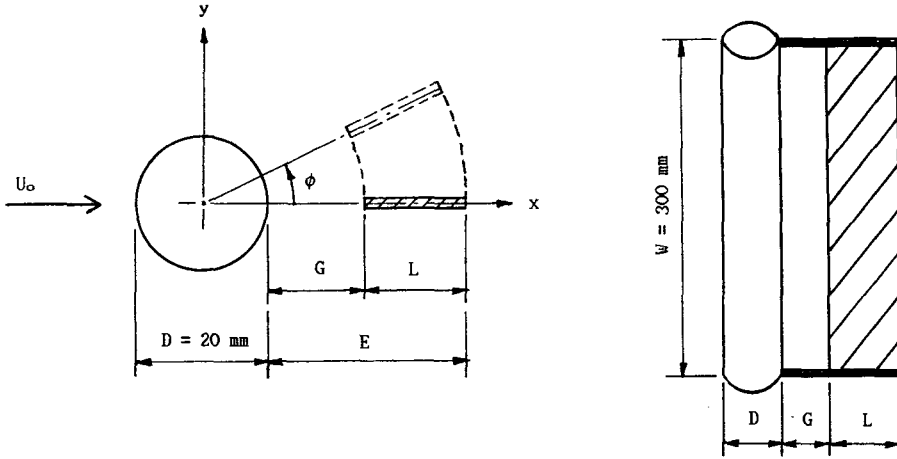


Fig. 1 A cylinder/self-adjustable splitter plate model

를 이용하였다. 연기선기법 (smoke-wire technique)을 도입한 유동가시화 실험에서는 직경 0.13 mm의 니크롬세선을 연기선으로 사용하여 streak-line을 발생시켰다.

본 실험에 이용된 실린더/분할판 결합은 자유흐름에 대해 항상 법선방향으로 설치된 실린더의 길이방향축에 대해 자유로이 회전할 수 있도록 하였다(Fig. 1). 여기서 특기할 점은 원형실린더의 양단 중심에 볼 베어링을 끼워 실린더를 풍동 벽면에 고정시키고, 실린더 양단으로부터 지지판으로 연결된 분할판이 실린더 후단부로부터 일정 간격 떨어진 위치에서 자유롭게 회전하도록 설계한 것이다. 실린더를 수평 및 수직 양방향으로 설치하여 실험함으로써 중력이 관찰될 현상에 어떤 영향을 미치지 않도록 배려하였다.

원형실린더의 외경은 20 mm로써 모델의 중형비는 약 1:15이고 분할판은 길이가 각각  $L/D = 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0$  및  $3.0$ 인 6가지를 준비하였다. 분할판 길이,  $L/D$ , 및 실린더 후단부로부터 분할판까지 이겨진 간격,  $G/D$ ,에 따른 유동장의 변화를 알아보기 위해 우선 각각의 분할판 길이에 대하여 분할판이 유동방향에 스스로 평행하게 정렬되기 시작하는 최소 간격을 측정하였다. 분할판이 자유흐름방향에 정렬된 이후, 점차 간격을 증가시키면서 그 때의 유동장의 평균속도단면 및 난류강도단면을 측정하여 항력저감효과를 조사하였다. 실린더 직경을 기준으로한 레이놀즈수  $Re = 6.2 \times 10^3$  및  $Re = 2.1 \times 10^4$ 의 두가지 경우에 있어서

특정 길이의 분할판을 이용, 간격의 변화에 따른 중심선상의 평균속도 및 난류강도의 변화를 측정하였으며 또한 유동축방향의 난류속도성분으로 FFT를 수행하여 후류의 와동홀림 주파수(vortex shedding frequency)의 변화추이를 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

임의의 유동방향에 대하여, 실린더 후단부에 설치된 와류분할판이 항상 효율적인 항력저감효과를 갖도록 하기 위하여서는 무엇보다도 우선 가동형 분할판이 스스로 자유흐름방향에 평행하게 정렬하

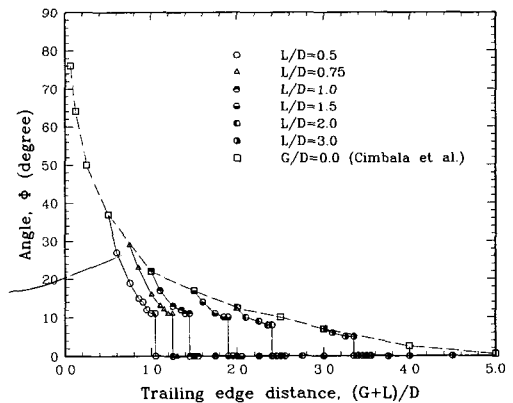


Fig. 2 Variation of stable splitter plate angle vs. normalized trailing edge distance at  $Re = 2.1 \times 10^4$

도록 하여야 한다. 이를 위해서 실린더 바로 후방에 형성되는 압력에 의한 불안정한 모멘트가 분할판에 직접 작용하지 못하도록 분할판을 실린더 후단부로부터 일정간격 이격시켜 설치하여  $Re=2.1 \times 10^4$ 에서 실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 횡축은 원형실린더의 직경으로 규정된 후단거리(normalized trailing edge distance),  $E/D=(G+L)/D$ , 이고 종축은 분할판의 편향각,  $\phi$  (degree), 을 나타낸다. 여기서  $G/D=0$ 의 경우는 분할판을 실린더에 간격없이 부착한 경우로서 그 결과는 Cimballa et al.<sup>(12)</sup>의 결과와 일치한다. 즉,  $G/D=0$ 의 경우  $L/D=1$ 일 때 편향각은 약  $22^\circ$ 가 되고  $L/D$ 가 증가함에 따라 편향각이 점차 감소되다가  $L/D=5$  이상에서는 거의  $0^\circ$ 가 됨을 보이고 있다.  $G/D>0$ 인 경우(즉, 간격을 띄워 분할판을 설치), 특정 길이의 분할판에 있어서 이격 간격,  $G/D$ , 을 증가시키에 따라 점차 편향각이 감소하다가 일정간격 이상 이격시에는 갑자기 편향각이  $0^\circ$ 가 되는 특이한 양상을 볼 수 있다. 또한 동일한

후단거리를 기준할 때  $G/D>0$ 인 경우가  $G/D=0$ 인 경우보다 항상 편향각이 작아지는 경향을 보인다.  $L/D$ 가 작을수록 이 경향이 두드러지며  $L/D=3$  이상에서는 두 경우가 거의 같아진다. 분할판이 자유흐름방향에 평행하게 되는 최소간격을 임계간격,  $G_c/D$ , 으로 정의할 때 이 값은  $0.5 \leq L/D \leq 3$ 에 대해 약  $0.55 \geq G_c/D \geq 0.35$ 의 범위에 있으며  $L/D$ 가 짧을수록 커진다.

Fig. 3은 특정 길이의 분할판에 있어서의 편향각과 레이놀즈수의 관계를 살펴보기 위하여  $Re=6.2 \times 10^3$ 에서 위의 실험을 반복한 결과를 나타낸다. 여기서 특정 길이의 분할판에 대하여 후단거리에 따른 편향각의 변화는 레이놀즈수에 크게 의존하고 따라서 편향각이  $0^\circ$ 가 되는 임계간격도 레이놀즈수에 크게 의존함을 알 수 있다. 즉, Fig. 3(a)는  $L/D=1$ 의 경우로서 임계간격,  $G_c/D$ , 은  $Re=2.1 \times 10^4$ 일 때 0.45에서  $Re=6.2 \times 10^3$  일 때 1.25로 레이놀즈수가 감소함에 따라 크게 증가함을 볼 수 있다. Fig. 3(b)에 보인  $L/D=1.5$ 의 경우도

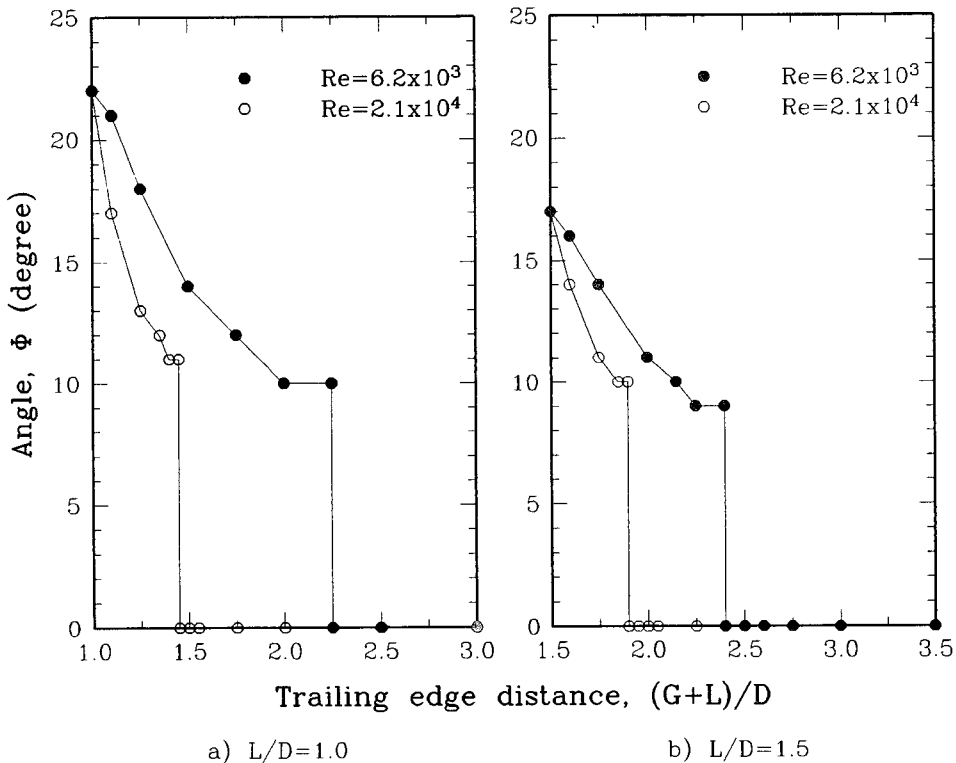


Fig. 3 Variation of stable splitter plate angle vs. normalized trailing edge distance at  $Re=6.2 \times 10^3$  and  $2.1 \times 10^4$

Fig. 3(a)와 동일한 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 간격없이 설치된 분할판의 경우에 있어서 동일한 후단거리 (즉, 동일한 분할판길이)에 따른 편향각은 레이놀즈수에 무관했던 결과<sup>(12)</sup>와 대조적인 것이다. 이로써 실린더 후방의 압력에 의한 불안정한 모멘트의 작용지역은 레이놀즈수의 증가에 따라 좁아짐을 알 수 있으며, 따라서 레이놀즈수가 증가할수록 가동형 분할판이 스스로 자유흐름방향에 평행하게 정렬되도록 하는데 필요한 최소 이격거리인 임계간격이 짧아지게 된다.

Fig. 4는 우선 고정형 분할판과 가동형 분할판의 효과를 정성적으로 살펴보기 위하여 연기선기법에 의한 실린더 후류유동장의 유동가시화 결과를 정지사진으로 보인 것이다. 가시화실험은  $Re=6.2 \times 10^3$  에서 수행하였으며 연기선은 실린더의 전방  $x/D=2$ 인 곳에 설치하였다. Fig. 4(a)는 분할판을 부착하지 않은 경우로서 원형실린더의 근접후류 구간 (near wake region)인  $0 < x/D < 12$  에서 매우 강한 전형적인 Kármán형 와류를 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 길이가  $L/D=2$  인 분할판을 실린더에 고정 부착한 경우로서 분할판이 없는 경우인 Fig. 4(a)의 후류와 비교할 때 물체 후방의 와동 형성지역 (vortex formation region)이 길어지고 와동의 강도도 상당히 약해졌음을 볼 수 있다. Fig. 4(c)는 길이가  $L/D=2$  인 분할판을 실린더에 자유로이 회전할 수 있도록 부착한 가동형 분할판의 경우로서 분할판은 자유흐름 방향으로부터 일정 각도 기울어져 평형상태에 있음을 볼 수 있다. 이때의 와류패턴은 동일한 길이의 고정형 분할판 경우인 Fig. 4(b)보다는 분할판이 없는 경우인 Fig. 4(a)에 보다 가깝고, 다만 와동의 강도는 분할판이 없는 경우보다 다소 약해짐을 볼 수 있다. 이 결과는 Cimbala et al.<sup>(12)</sup>의 실험과 일치하며 따라서 원형 실린더 후류에 의한 항력을 감소시킬 목적으로 설치한 단순한 형태의 가동형 분할판으로는 그 효과가 미흡함을 인지할 수 있다.

Fig. 5는 위와 동일한 유동가시화 실험조건에서  $L/D=1.5$  인 분할판을 실린더에 일정 간격을 띄워 설치한 실험 결과이다. Fig. 5(a)의 경우는 간격을  $G/D=0.5$  로 하고 강제로 분할판을 자유흐름에 평행하게 정렬시켰을 경우로서 Fig. 4(a)와 비교시 다소 와동의 강도는 감소되었으나 동일한 분할판 후단거리를 갖는 Fig. 4(b)의 경우 (즉,  $(G+L)/D=2$ ) 보다는 여전히 강한 와동을 볼 수 있

다. Fig. 5(b)는 분할판을 하류쪽으로 이동시켜 간격이 임계간격이상이 되도록 하여 후단거리가  $(G+L)/D=3$  인 경우로서 이때는 분할판이 스스로 자유흐름 방향에 평행하게 정렬되었다. 이 경우의 와동형성시기는 매우 지연 되었을 뿐만 아니라 그 강도도 상당히 약해져서 Fig. 4(b)의 고정형 분할판 보다는 항력저감효과가 증대됨을 인지할 수 있다. Fig. 5(c)는 후단거리  $(G+L)/D=5$ 가 되도록 분할판을 보다 더 하류쪽으로 이동시켰을 경우로서  $0 < x/D < 3.5$  구간 내에서 실린더의 하방 박리점으로부터 흘러나온 와동과 상방 박리점에서 흘러나온 와동의 상호작용을 허용함으로써 형성된 와류가 다시 분할판을 거치게 되어 이차유동을 야기시키고 그 결과 형성된 후류유동장에 의한 항력이 분할판이 없을 경우보다 오히려 증가되는 양상을 보이고 있다. 여기서 실린더 바로 후방인  $0 < x/D < 3.5$  구간에서의 유동패턴은 Fig. 4(a)의 해당 구간에서의 패턴과 동일하나 분할판을 거친 후인  $x/D > 5$ 에서의 유동패턴은 단순 실린더 후류의 거의 규칙적인 와동 흐름 양상에서 벗어나는 매우 불규칙한 형태로 바뀔 수 있다.

이러한 유동가시화 실험의 결과로써, 특정한 레이놀즈수 범위에서 가동형 분할판의 항력저감효과는 분할판의 길이 뿐만 아니라 분할판과 실린더 사이의 간격에도 크게 좌우되며 또한 일정 길이의 가동형 분할판을 설치함에 있어서 최대의 항력감소효과를 얻을 수 있는 분할판의 최적설치범위가 존재함을 인지할 수 있었다. 가동형 분할판으로 얻어진 위의 결과는 실린더 후단부로부터 일정거리 떨어진 위치에 고정형 분할판을 설치하여 이에 따른 유동가시화를 수행한 Nelson<sup>(7)</sup>과 Igarashi<sup>(10)</sup>의 결과와도 일치한다.

간격을 띄워 설치한 가동형 분할판에 의한 후류유동장의 특성을 정량적으로 살펴보기 위하여 유동가시화 실험에서와 같은  $Re=6.2 \times 10^3$  에서 열선유속측정 실험을 수행하였다. 길이가  $L/D=1.5$ 인 분할판을 이용하여 이 분할판이 스스로 자유흐름방향에 평행하게 정렬되는 임계간격 이상의 간격인  $G/D=1.5, 2$  및  $3.5$ 의 간격을 띄운 후에 각각의 경우에 대한 평균속도단면 (mean velocity profile) 및 난류강도단면 (turbulence intensity profile)을  $x/D=10$ 에서 측정하고 그 결과들을 분할판이 부착되지 않은 단순 원형실린더의 경우 (즉,  $L/D=0$ )와 비교하여 각각 Fig. 6 및 Fig. 7에 보였다.

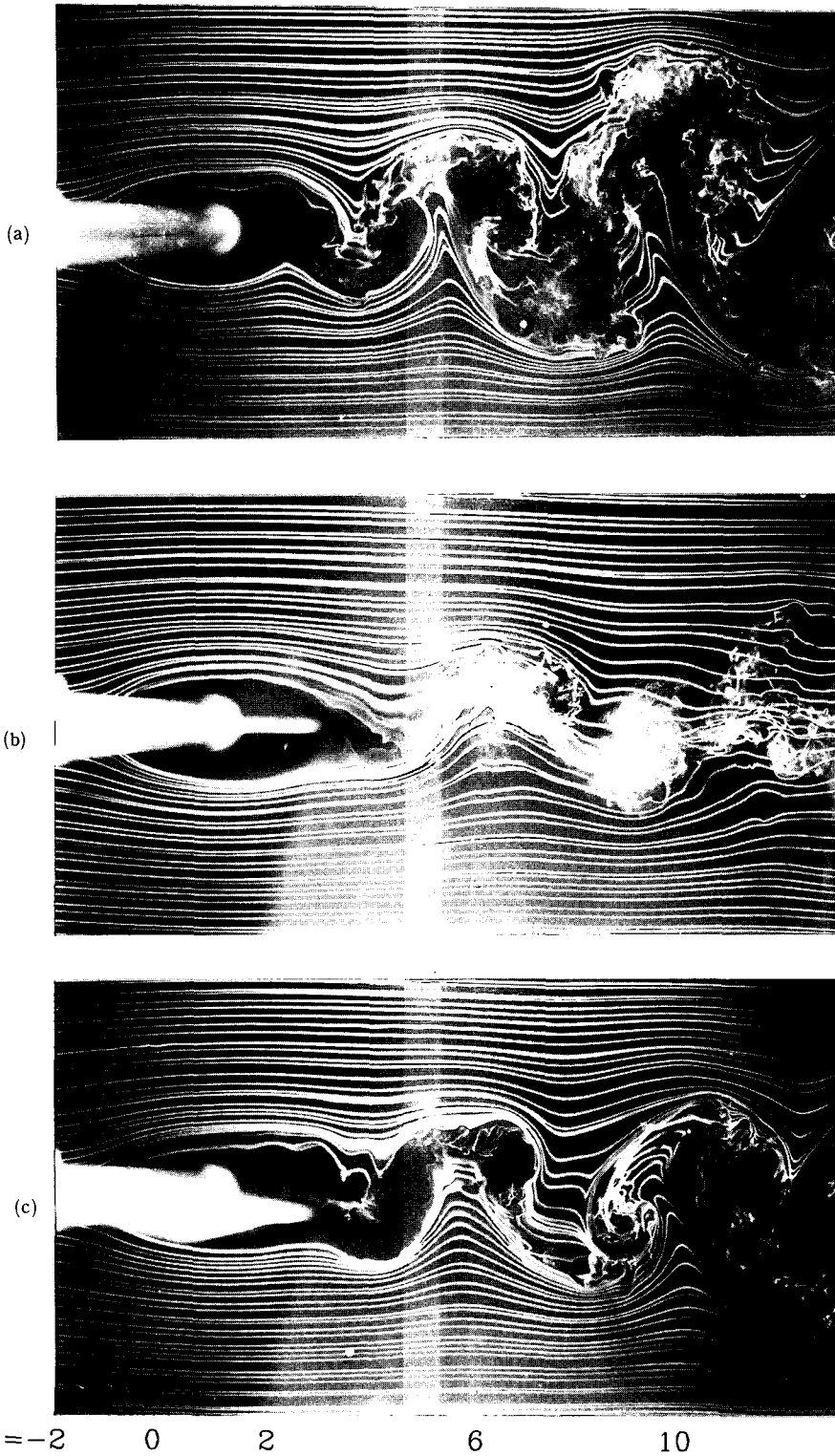


Fig. 4 Flow visualization of wake patterns at  $Re = 6.2 \times 10^3$ , smoke-wire at  $x/D = -2$ : a)  $L/D = 0$  (no plate), b)  $L/D = 2$  (fixed plate) and c)  $L/D = 2$  (loose plate)

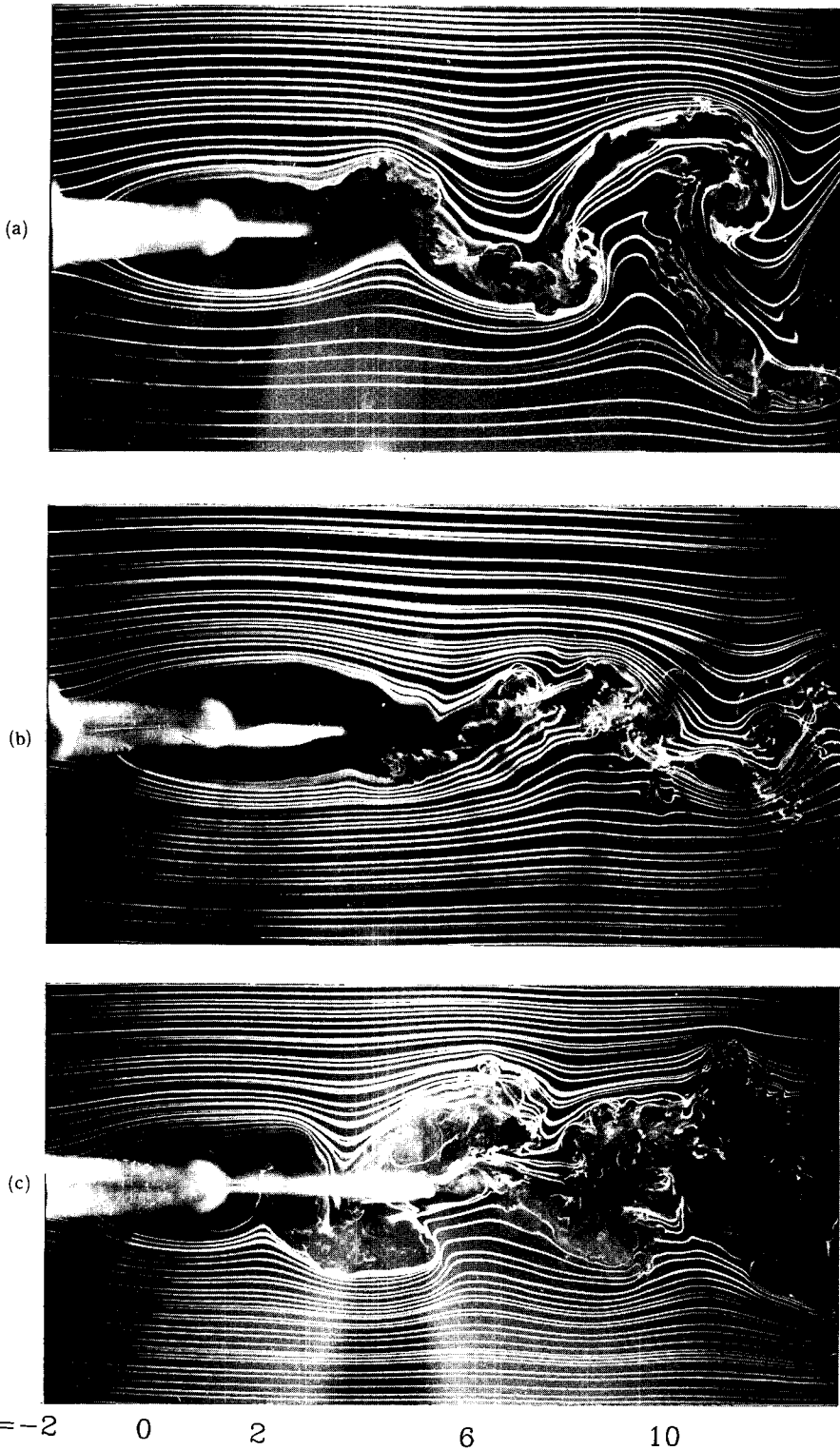


Fig. 5 Flow visualization of wake patterns with a splitter plate of  $L/D=1.5$  at  $Re=6.2 \times 10^3$ : a)  $G/D=0.5$  (fixed), b)  $G/D=1.5$  (loose) and c)  $G/D=3.5$  (loose)

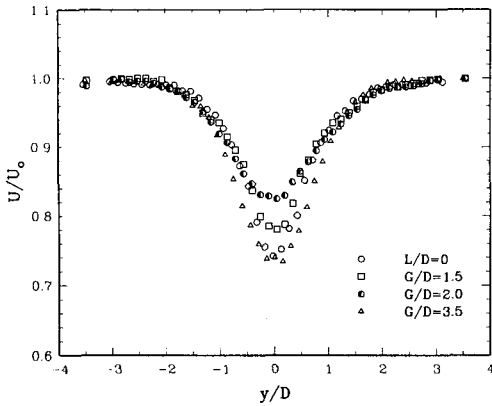


Fig. 6 Normalized mean velocity profiles for various gap distances with  $L/D=1.5$  at  $Re=6.2 \times 10^3$  and at  $x/D=10$

Fig. 6에 보인 모든 경우의 평균속도단면들은 예상대로 전형적인 후류의 평균속도분포인 Gaussian 곡선 형태를 보이고 있다. 분할판을 설치하지 않은 경우 (즉,  $L/D=0$ )의 중심선속도,  $U_c/U_0$ , 가 약 0.742 인 것과 비교할 때  $G/D=1.5$  및 2의 경우의 중심선속도는 각각 0.780 및 0.824 로  $G/D$ 가 증가함에 따라 점차 중심선속도 결손이 완화되다가  $G/D=3.5$  에서는 0.737 로 오히려 중심선속도의 결손이 심화됨을 알 수 있으며 이는 Fig. 5에 보인 유동가시화 결과로부터 예측된 바와 같다.

위의 평균속도측정 결과로부터 각 후류 운동량 결손에 따른 항력의 증감을 정량화하기 위하여 이차원 후류유동장의 특성을 나타내는 한가지 파라미터로서 유동장의 운동량두께 (momentum thickness)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta/D = \int_{-\infty}^{\infty} U/U_0(1-U/U_0) d(y/D) \quad (1)$$

여기서  $U$ 는 평균속도,  $U_0$ 는 자유흐름속도,  $\theta$ 는 운동량두께이다. 무차원화된 운동량두께,  $\theta/D$ ,는 먼 후방 후류 (far wake)에 있어서 유동진행축방향에 따라 불변하는 값을 가진다. 한편 후류를 발생시키는 물체의 항력계수,  $C_d$ ,는 다음과 같이 정의된다.

$$F = C_d \cdot 1/2 \rho U_0^2 D \quad (2)$$

여기서  $F$ 는 이차원 물체의 단위깊이당 항력,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $D$ 는 물체의 전면 높이를 나타낸다. 후류 유동장의 단위부피당 정미 운동량 결손은 걸

극 물체에 미치는 항력이므로 위의 (1)과 (2)의 정의로부터 항력계수와 운동량두께의 관계는

$$C_d = 2 \theta/D \quad (3)$$

가 되며  $10^3 < Re < 3 \times 10^5$ 의 범위에서 원형실린더 후류의  $\theta/D$ 는 약 0.5임이 알려져 있다.<sup>(16)</sup>

Fig. 6에 보인 평균속도단면들을 이용하여 식(1)의 수치적분을 수행함으로써 각각의 후류에 대한 운동량두께를 계산할 수 있으며 그 계산결과를 Table 1에 보였다.

여기서 우선  $L/D=0$ 의 경우 운동량두께가 0.329로서 예상된 값인 0.5 보다 낮게 측정된 것은 평균속도단면의 측정 위치  $x/D=10$ 이 아직 먼 후방 후류 영역 (far wake region)에 미치지 못한 근접 후류영역인 때문이며 따라서 각각의 후류유동장에 대한 불변치로서의 운동량두께를 기준으로 직접 비교할 수는 없으나 상대적인 항력저감효과는 비교가능하다. 즉,  $G/D=1.5$  및 2의 경우 운동량 두께는 각각 0.322 및 0.313으로 분할판이 없는 경우보다 낮은 값을 가지나  $G/D=3.5$ 의 경우는 0.391로 오히려 운동량두께가 증가하여 항력이 증가함을 알 수 있다. 한편, Tennekes와 Lumley<sup>(16)</sup>에 의하면 원형 실린더 후류의 평균속도단면이 self-similar profile을 갖는 먼 후방 후류 영역에 도달하기 위해서는 물체후방으로 실린더직경의 최소한 80배 거리만큼 유동이 진행되어야 함이 알려져 있으며, 이는 본 연구에 사용된 풍동의 측정 실험범위를 넘어서는 것으로 먼 후방 후류영역에 대한 검토는 논의에 포함하지 않았다.

Fig. 7은 유동진행축방향의 난류속도성분,  $u'$ ,을 기준으로한 난류강도단면을 나타낸 것이다. 그림에서 일정 간격을 띄워 분할판을 설치한 경우들과 분할판을 부착하지 않은 경우를 비교할 때 전자의 경

Table 1 Momentum thickness ( $\theta/D$ )

splitter plate length ( $L/D$ )	gap distance ( $G/D$ )	trailing edge distance ( $E/D$ )	momentum thickness ( $\theta/D$ )
0	0	0	0.329
1.5	1.5	3.0	0.322
1.5	2.0	3.5	0.313
1.5	3.5	5.0	0.391



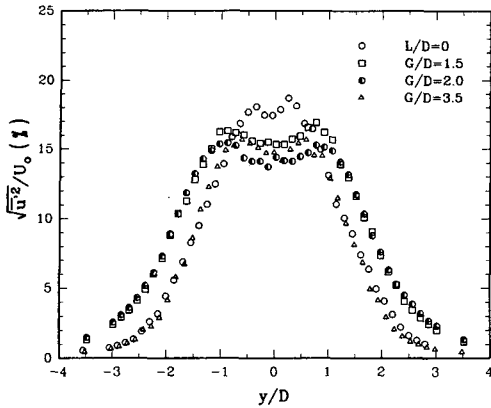


Fig. 7 Axial turbulence intensity profiles for various gap distances with  $L/D=1.5$  at  $Re=6.2 \times 10^3$  and at  $x/D=10$

우가 후자의 경우보다 중심선 부근의 난류강도 값이 낮아지고 최대난류강도가 중심선으로부터 보다 멀리 떨어진 지점에 나타나고 있음을 볼 수 있다.

또한 분할판의 설치 간격이  $G/D=1.5$ 에서 2.0으로 증가함에 따라 중심선 부근에서의 최대난류강도는 점차 감소하나  $y/D \geq 1.0$ 인 후류의 외각지역에서의 난류강도는 분할판이 없는 경우보다 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다.  $G/D=3.5$ 일 때 중심선 부근의 난류강도는  $G/D=2$ 일 때보다 다시 약간 증가하나  $y/D \geq 1$ 인 외각지역에서는 분할판이 없을 경우와 같아짐을 볼 수 있다. 이로써 특정 길이의 분할판을 간격을 띄워 설치할 경우 이 간격에 따라 후류 유동장의 난류구조와 특성이 변화됨을 알 수 있다.

전반적으로 볼 때 Fig. 6에 보인 후류 유동장의 평균속도단면들은 가우스형 곡선의 분포양상을 띄고 있으며, Fig. 7의 난류강도단면들도 서로 유사한 형태의 곡선분포를 이루고 있다. 따라서 특정 길이의 분할판에 있어서  $G/D$ 의 점진적 변화에 따른 유동장 특성의 세부변화를 검토하기 위해서는 후류 유동장의 중심선상 평균속도와 난류강도를 유동장의 대표값으로 측정하여 비교함으로써 그 추이

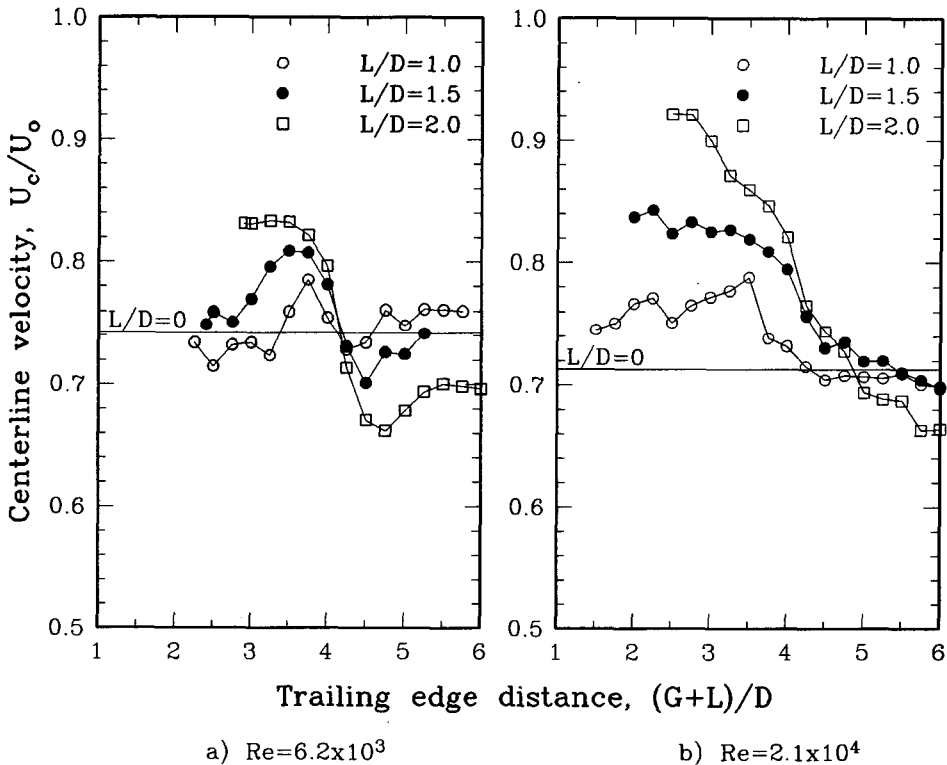


Fig. 8 Variation of centerline velocity vs. normalized trailing edge distance at  $x/D=10$

를 파악할 수 있다.

위의 검토 결과를 토대로 Fig. 8에는 분할판길이  $L/D=1, 1.5$  및 2에 대해 후단거리의 변화에 따른 중심선속도의 변화를 측정된 결과를 나타내었다. 이 때 속도측정은 열선 속도측정센서를  $x/D=10$ 의 위치에서 후류의 중심선상 (즉,  $y/D=0$ )에 고정시킨 후  $Re=6.2 \times 10^3$  및  $Re=2.1 \times 10^4$ 의 조건에서 실시하였다.

Fig. 8(a)는  $Re=6.2 \times 10^3$ 의 경우로서 분할판이 스스로 자유흐름방향에 정렬된 이후부터 후단거리를 점차 증가시키면서 측정된 중심선 평균속도를 나타낸다.  $L/D=1$ 의 경우 중심선 평균속도,  $U_c/U_0$ 는 후단거리가  $E/D \leq 3.5$ 일 때 분할판이 없는 경우 ( $L/D=0$ )와 거의 같은 값을 갖다가 그 후 점차 증가하여 약  $E/D=3.75$ 일 때 0.785로 최대치를 나타내며 다시  $E/D=4.5$ 까지 감소하다가 그 이후엔 분할판이 없는 경우의 값으로 회복되는 변화를 보이고 있다. 따라서  $3.5 < E/D < 4.0$  사이에서 분할판 설치에 따른 항력감소 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.  $L/D=1.5$ 의 경우엔  $L/D=1$ 의 경우보다 항력감소효과를 나타내는 후단거리의 영역이  $2.75 < E/D < 4.0$ 으로 넓어지고 약  $E/D=3.5$ 에서  $U_c/U_0$ 의 최대치도 0.808로 증가된다.  $L/D=2$ 의 경우는  $U_c/U_0$ 가 임계간격,  $G_c/D$ , 을 바로 넘어선  $E/D=3.25$  근처에서 최대값을 가지며  $E/D=4.75$  까지 감소하다가 그 이후엔 다시 다소 회복되지만  $E/D=4.25$  이후엔 오히려  $L/D=0$ 의 경우보다 항력이 증가됨을 보인다. 따라서  $Re=6.2 \times 10^3$ 의 경우 약  $E/D \leq 4$ 에서의 분할판이 길수록 항력감소효과가 크지만 그 이상에서는 오히려 항력증가효과가 커지면 또한 분할판이 길수록  $U_c/U_0$ 의 최대값이 임계간격에 보다 근접한 곳에서 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는  $Re=2.1 \times 10^4$ 의 경우로서,  $L/D=1$ 일 때  $U_c/U_0$ 는  $E/D \leq 4.5$ 일 때 분할판이 없는 경우보다 큰 값을 가지며 약  $E/D=3.5$  일 때 최대치인 0.788을 나타내며  $E/D=4.5$  이상에서는 분할판이 없는 경우와 같은 값을 나타낸다.  $L/D=1.5$ 의 경우엔  $E/D \leq 5$ 에서  $L/D=1$ 의 경우보다  $U_c/U_0$ 의 값이 커지고 임계간격 근처인  $E/D=2.25$ 에서 최대값을 나타내고 있다.  $L/D=2$ 의 경우는 임계간격을 바로 넘어선  $E/D=2.5$ 에서  $U_c/U_0$ 가 최대값을 갖고 그 이후엔 계속 감소하여  $E/D=5$  이후엔 오히려  $L/D=0$ 의 경우보다 항력이

증가됨을 보인다. 따라서  $L/D$ 에 따른 상대적인 항력저감효과 및  $L/D$ 에 따른  $U_c/U_0$ 의 최대값이 나타나는 후단거리의 관계등은 Fig. 8(a)에 보인 낮은 레이놀즈수의 경우와 동일한 추이를 보인다.

이로써  $L/D$ 가 증가할수록 항력감소효과와 최대치가 증가하며 특정 길이의 분할판에 대하여 항력저감효과를 보이는 후단거리의 범위가 존재하고, 특정 레이놀즈수에 있어서 후단거리가 일정치를 넘어선 경우에 분할판의 항력저감효과는 사라지며 오히려 분할판상에 형성되는 이차적인 경계층유동 때문에 유동장의 운동량결손은 오히려 증가됨을 알 수 있다. 또한 실험한 레이놀즈수 범위 내에서 특정  $L/D$ 에 대하여 레이놀즈수가 증가할수록 항력저감효과는 증대되며 항력저감효과의 최대치가 임계간격에 보다 가까운 곳에 나타나고 항력저감효과를 보이는  $E/D$ 의 범위도 넓어짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8의 실험조건과 동일한 조건에서 후단거리 변화에 따른 중심선상의 난류강도의 변화를 측정된 것이다. Fig. 9(a)에서는  $Re=6.2 \times 10^3$ 의 경우로서 분할판의 길이에 관계없이  $E/D$ 가 임계간격을 넘어선 이후에 난류강도는 점차 감소되어  $E/D=3.75$  일 때 최소값을 가지며 그 이후 다소 증가하여 거의 일정한 값으로 유지됨을 볼 수 있으며 이는 앞의 Fig. 7에 보인 대표적인 후류 유동장에 대한 실험치와 잘 일치하는 것이다. 동일한 후단거리에서의 중심선 난류강도는 분할판길이가 길수록 다소 낮아지는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 9(a)에 보인  $Re=2.1 \times 10^4$ 의 경우에도 분할판의 길이에 관계없이  $E/D=3.5$ 일 때 중심선 난류강도가 최소값을 갖는 등  $Re=6.2 \times 10^3$ 의 경우와 거의 같은 경향을 보인다. 전반적으로 볼 때 분할판이 없는 경우보다 가동형 분할판을 설치했을 경우엔 중심선상의 난류강도가 낮아지는 경향이 있으며 레이놀즈수가 증가할수록 난류강도의 최소치가 나타나는 후단거리가 짧아지는 경향이 있으나 중심선 평균속도의 변화와 비교할 때 중심선 난류강도의 변화는 분할판의 길이나 레이놀즈수에 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 특히 Fig. 8의 중심선 평균속도와 함께 검토할 때 대략 최소 중심선 난류강도가 측정된 후단거리에서 중심선 평균속도도 극대값을 갖는 경향을 볼 수 있다. 즉, 가동형 분할판을 적정위치에 설치할 경우 후류내 와동의 상호작용을 효율적으로 억제할 수 있어서 중심선의 속도결손 뿐만 아니라 난류의 강도도 효과적으로 감

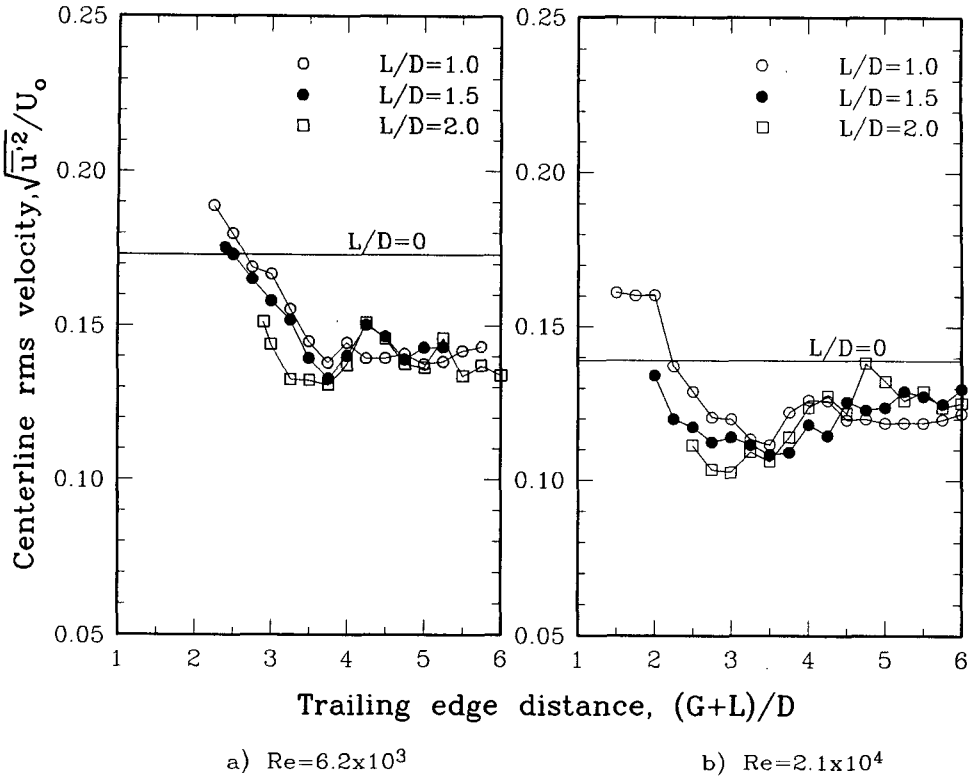


Fig. 9 Variation of centerline axial turbulence intensity vs. normalized trailing edge distance at  $x/D=10$

소시킬 수 있다.

가동형 분할판을 설치한 경우에 형성되는 난류후류의 고유 와동홀림 주파수(vortex shedding frequency)를 조사하기 위하여  $Re=6.2 \times 10^3$ 에서 측정된 유동축방향의 난류속도성분,  $u'$ , 을 기준으로 FFT를 수행하여 그 결과를 Fig. 10에 요약하였다. 열선 유속측정센서를  $x/D=10$ ,  $y/D=0.38$ 되는 곳에 설치한 뒤에 분할판의 길이가  $L/D=1$ , 1.5 및 2인 경우에 대하여 후단거리를 변화시켜가면서 이에 따른 와동홀림 주파수의 변화를 알아보았다. Fig. 10에 보인  $L/D=1$ 의 경우, 후단거리가  $E/D=2.5$ 일 때 와동홀림 주파수는  $f=35.8$  Hz로 분할판이 없는 단순 원형실린더 경우의  $f_k=46$  Hz에 비해 매우 낮아졌으며 그 이후  $E/D=4.0$ 에서  $f=28.3$  Hz 까지 점진적으로 낮아지다가  $E/D=4.5$ 에서는 갑자기  $f=43.3$  Hz로 불연속적으로 뛰어 높아진 뒤에 다시 점차적으로 증가하여 분할판이 없는 경우의 고유주파수인  $f_k=46$  Hz에 접근하였다. Fig. 10(b)에 보인  $L/D=1.5$ 의 경우도 전반

적인 경향은  $L/D=1$ 의 경우와 유사하나 고유주파수가  $E/D=2.5$ 에서 31.3 Hz로부터  $E/D=4.5$ 에서 24 Hz로 보다 크게 낮아졌음을 알 수 있다. Fig. 10(c)의  $L/D=2$ 인 경우에  $E/D=4.5$ 까지는 후류홀림 주파수가 앞의 두 경우와 유사하게 낮아졌으나  $E/D=5$  이상에서는 특정한 고유주파수를 확인하기 어려웠으며 이는 비교적 긴 ( $L/D=2$  이상) 분할판의 경우는 일정거리 이상의 후단거리에서 실린더 바로 후방에 와동의 상호작용으로 형성된 후류가 다시 비교적 긴 분할판 위를 거치게됨에 따른 이차유동으로 유동장의 특성이 매우 복잡해지고 따라서 다양한 주파수 스펙트럼을 형성하기 때문이라고 믿어진다. 이상의 결과는 Fig. 5에 보인 유동가시화 결과 및 Fig. 8(a)에 보인 열선 유속측정 결과와 잘 일치한다.

위에서 측정된 후류 유동장의 주파수 스펙트럼에서 고조파(harmonics)를 무시하고 주 주파수만을 기준하여 각각의 분할판길이에 대하여 후단거리에 따른 Strouhal수의 변화를 Fig. 11에 나타내었다.

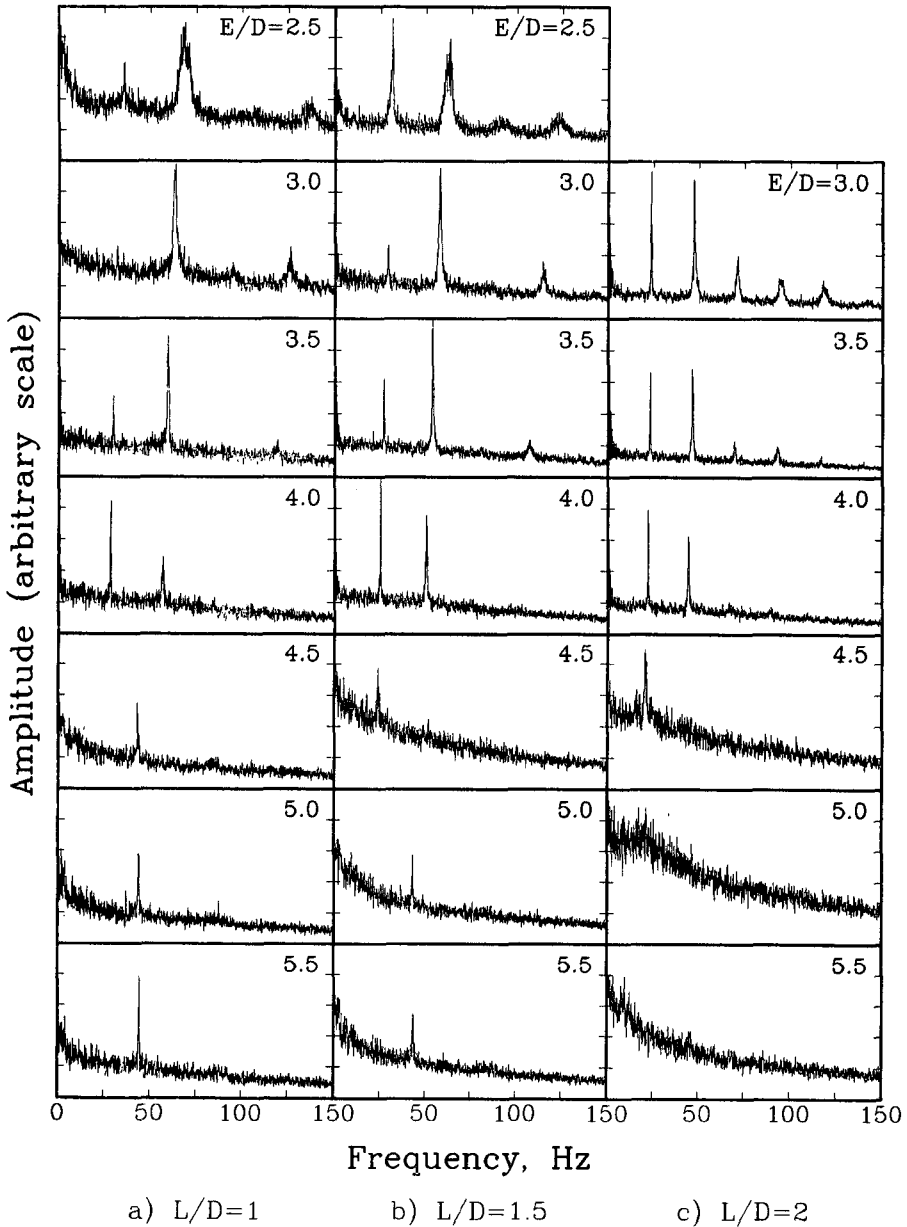


Fig. 10 Frequency spectra of wakes with various splitter plate lengths and trailing edge distances at  $x/D=10$ ,  $y/D=0.38$  and at  $Re=6.2 \times 10^3$

Strouhal수는 고유주파수를 무차원화한 수로서 다음과 같이 정의된다.

$$St = fD / U_0 \quad (4)$$

여기서  $f$ 는 유동의 고유주파수,  $D$ 는 실린더 직경이고  $U_0$ 는 자유흐름속도이다. 그림에서 선으로 연

결되지 않은 점들은 분할판을 임계간격보다 실린더에 근접하여 설치한 경우로 주어진 후단거리에서 강제로 분할판을 자유흐름방향에 정렬시켰을 때의 Strouhal수를 참고적으로 표시한 것이다. 분할판 길이가  $L/D=1$ 의 경우 Strouhal수는 후단거리가  $E/D=4$ 까지는 점차 감소하다가  $E/D=4.5$ 에서는

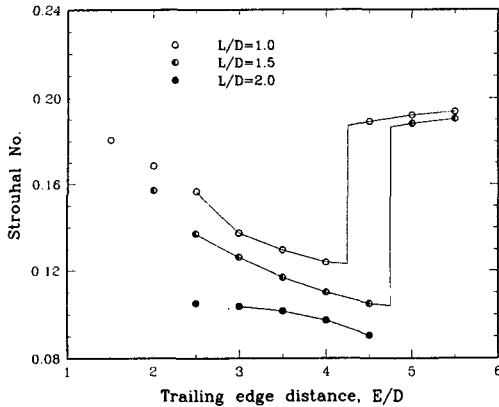


Fig. 11 Variation of Strouhal number vs. normalized trailing edge distance

갑자기 점프하며, 이런 경향은  $L/D=1.5$ 의 경우도 유사하다. 비교적 긴 분할판의 경우인  $L/D=2$ 에서는 후단거리의 증가에 따라 Strouhal수가 서서히 감소하다가  $E/D=4.5$  이상에서는 더 이상 고유주파수가 존재하지 않음을 보이고 있다. 또한 동일한 후단거리를 기준할 때 분할판의 길이가 길수록 Strouhal수가 작아지며 따라서 항력저감효과도 커짐을 알 수 있다. 이상의 결과는 간격없이 설치한 가동형 분할판의 경우<sup>(15)</sup>에서 분할판길이의 증가(즉, 후단거리의 증가)에 따라 Strouhal수가 단조롭게 감소했던 것과 비교할 때 매우 대조적인 것이지만 고정형 분할판을 간격을 두고 설치한 경우<sup>(16)</sup>의 실험결과와는 동일한 경향을 보이는 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비교적 높은 레이놀즈수 범위인  $6.2 \times 10^3 < Re < 2.1 \times 10^4$ 에서 원형실린더의 후단부에 가동형 와류분할판을 설치할 때 후류유동장의 특성변화를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 가동형 분할판을 후류발생 물체 후단으로부터 간격을 띄워 설치할 경우 간격이 없이 설치한 단순 가동형 분할판의 경우에서 불가피하게 나타나는 분할판의 편향각을 감소 시킬 수 있으며, 더우기 분할판을 임계간격 이상 이격시켜 설치할 경우 엔 임의의 유동방향에 대하여 항상 분할판이 스스로 유체유동방향에 평행하게 정렬될 수 있으며 이로써 비교적 짧은 분할판( $L/D < 2$ )으로도 유체유동방향에 관계없이 효율적인 항력저감효과를 얻을

수 있음을 실증하였다.

(2) 특정한 레이놀즈수 범위에서 물체로부터 임계간격 이상을 띄워 설치한 가동형 분할판의 항력저감효과는 분할판의 길이 뿐만 아니라 분할판의 후단거리에 크게 좌우되며 일정 길이의 가동형 분할판에 대하여 효율적인 항력저감효과를 얻을 수 있는 분할판의 최적 후단거리 범위가 존재하며 이 범위는 레이놀즈수에 의존된다.

#### 후 기

본 연구는 1991년도 교육부지원 학술진흥재단의 지방대육성과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었다.

#### 참고문헌

- (1) Roshko, A., 1953, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," NACA TN 2913.
- (2) Bearman, P. W., 1965, "Investigation of the Flow Behind a Two-Dimensional Model with a Blunt Trailing Edge and Fitted with Splitter Plates," J. Fluid Mech., Vol. 21, pp. 241~255.
- (3) Gerrard, J. H., 1966, "The Mechanics of the Formation Region of Vortices Behind Bluff Bodies," J. Fluid Mech., Vol. 25, Part 2, pp. 401~413.
- (4) Sallet, D. W., 1967, "A Splitter plate for the Prevention of Vortex Shedding Behind Finite Circular Cylinders in Uniform Cross Flow," NORTR 69-31.
- (5) Apelt, C. J., West, G. S. and Szweczyk, A., 1973, "The Effects of Wake Splitter Plates on the Flow Past a Circular Cylinder in the Range  $10^4 < R < 5 \times 10^4$ ," J. Fluid Mech. Vol. 61, pp. 187~198.
- (6) Apelt, C. J. and West, G. S., 1975, "The Effects of Wake Splitter Plates on Bluff-Body Flow in the Range  $10^4 < R < 5 \times 10^4$ . Part 2," J. Fluid Mech. Vol. 71, pp. 145~160.
- (7) Nelson, R. C., 1979, "The Influence of a Wake Splitter Plate on the Aerodynamic Characteristics of a Two-Dimensional Cylinder," Israel Journal of Technology Vol. 17, pp. 131~138.

- (8) Nelson, R. C. and Mouch, T. N., 1979, "Cylinder/Splitter-Plate Data Illustrating High Support Interference," *J. Spacecraft*, Vol. 16, pp. 126~128.
- (9) Every, M. J., King, R. and Weaver, D. S., 1982, "Vortex-Excited Vibrations of cylinders and Cables and Their Suppression," *Ocean Engineering*, Vol. 9, pp. 135~157.
- (10) Igarashi, T., 1982, "Investigation on the Flow Behind a Circular Cylinder with a Wake Splitter Plate," *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, pp. 528~535.
- (11) Mori, Y., Hijikata, K. and Nobuhara, T., 1986, "A Fundamental Study of Symmetrical Vortex Generation Behind a Cylinder by Wake Heating or by Splitter Plate or Mesh," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 1193~1201.
- (12) Cimbala, J. M., Garg, S. and Park, W. J., 1988, "The Effect of a Non-Rigidly-Mounted Splitter Plate on the Flow over a Circular Cylinder," *Bull. Am. Phys. Soc.*, Vol. 33, p. 2249.
- (13) Xu, J. C., Sen, M. and Gad-el-Hak, M., 1990, "Low-Reynolds Number Flow Over a Rotatable Cylinder-Splitter Plate Body," *Physics of Fluids A*, Vol. 2, No. 11, pp. 1925~1927.
- (14) Xu, J. C., Sen, M. and Gad-el-Hak, M., 1991, "Bifurcation Analysis of Flow over a Rotatable Cylinder with a Splitter Plate," *AIAA Paper* 91-1738.
- (15) Cimbala, J. M. and Garg, S., 1991, "Flow in the Wake of a Freely Rotatable Cylinder with Splitter Plate," *AIAA J.*, Vol. 29, pp. 1001~1003.
- (16) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1972, "A First Course in Turbulence," *MIT Press*, pp. 104~115.