

〈論 文〉

평판 위에 부착된 실린더 주위의 말굽와류 시스템에 관한 실험적 연구

양준모* · 유정열**

(1992년 5월 7일 접수)

Experimental Study on the Horseshoe Vortex Systems Around Surface-Mounted Obstacles

Joon-Mo Yang and Jung Yul Yoo

Key Words : Secondary Flow Loss(2차유동 손실), Horseshoe Vortex(말굽와류), Leading-Edge Shape(선단형상)

Abstract

An experimental study has been performed to investigate the horseshoe vortex system formed around cylindrical obstacles mounted vertically on the surface over which a boundary layer is formed. To measure the mean velocity of the flow field, a five-hole Pitot tube has been used. In addition, surface static pressure measurements and surface flow visualization were also performed. From the five-hole probe measurements, vorticity distribution was deduced numerically and the streamwise velocity distribution was also examined. To consider the effect of the leading-edge shape on the formation of the horseshoe vortex, a qualitative comparison was made between the three-dimensional flows around a circular cylinder and a wedge-type cylinder. The five-hole probe measurements showed a single primary vortex which exists immediately upstream of the obstacles, and endwall flow visualization showed the existence of a corner vortex. As the vortex passes around the obstacle, the vortex strength is reduced and the vortex core moves radially outward. Due to this horseshoe vortex, the fluid momentum is found to decrease along the streamwise direction. Since the horseshoe vortex formed around a wedge-type cylinder has weaker strength and is confined to a narrower region than that around a circular cylinder, the possibility that the secondary flow loss due to the horseshoe vortex can be reduced through a change of the leading-edge shape is proposed.

1. 서 론

수평 평판 위의 2차원 경계층이 그 평판에 수직으로 부착되어 있는 실린더를 만나면, 실린더 주위

에서는 3차원 유동이 발생하는데, 이는 2차원 경계층과 실린더에 의해 생기는 역압력구배(adverse pressure gradient)의 상호작용에 기인한다. 즉, 경계층을 벗어난 지역의 유체는 실린더에 의하여 생기는 역압력구배를 충분히 이겨낼 수 있는 운동량(momentum)을 가지고 있어서 2차원 무한 실린더에서와 같은 유동의 경향을 나타내는 반면, 경계

*정회원, 서울대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 서울대학교 기계공학과

층 내에서는 상대적으로 작은 운동량을 가진 유체가 이 역압력구배를 극복하지 못하고, 박리(separation)를 일으키므로, 실린더의 상류지역 평판 부근에서는 역류(reverse flow)가 발생하며, 이 역류는 실린더의 주위로 퍼져 나가면서, 주위 유체와의 상호작용에 의하여 와류(vortex)를 형성한다. 이 와류가 퍼져 나가는 형상이 말굽과 같으므로, 이 와류를 말굽와류(horseshoe vortex)라 부른다. 일반적으로 이러한 말굽와류는 실린더의 선단 앞에서 2개^(1,2) 또는 4개^(3,4)의 와류를 발생시키고 있는 것으로 알려지고 있는데, Pierce와 Tree⁽²⁾는 실린더의 지름을 기준으로 한 레이놀즈수, Re_D 가 10^6 보다 작은 경우 2개, 10^6 보다 큰 경우 4개의 와류가 발생하게 되는 것이 일반적임을 밝히고 있다.

이러한 말굽와류현상은 익형 및 익렬 선단에서의 끝벽유동(endwall flow), 다리 교각에서의 유동, 평원 위에서 있는 건물 주위의 유동 등과 같이 흔히 관찰될 수 있는 유체역학의 현상일 뿐만 아니라, 원형 실린더 주위의 열 및 물질전달 현상^(5,6)과도 연관되어 오래전부터 많은 연구의 대상이 되어왔다. Eckerle과 Langston⁽¹⁾은 이러한 말굽와류의 형성과정을 표면유동가시화, 표면정압측정, 와류시스템의 평균속도 및 압력 측정을 통하여 상세히 고찰하였으며, Eckerle과 Awad⁽⁷⁾는 입구 경계층의 두께, 형상, 및 레이놀즈수 등과 같은 입구조건(inlet condition)들이 말굽와류에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 말굽와류는 평판에 부착된 실린더의 형상에 의하여서도 많은 영향을 받으므로 지금까지의 여러 연구들은 평판에 부착된 실린더로서 단일의 원형 실린더를 사용하는 이외에도,^(1,3) 단일의 사각형 실린더를 이용하기도 하였다.^(8,9) 한편, Boyle과 Langston⁽¹⁰⁾은 비대칭의 3차원 유동현상을 파악하기 위하여 두 개의 원형실린더를 유동방향에 수직으로 나란히 설치하여, 실린더 사이의 간격에 따른 영향을 고찰하였다.

말굽와류로 대표되는 이러한 3차원 유동현상은 필연적으로 주유동에 대한 2차 유동(secondary flow)의 형태로 발생됨으로, 유동손실을 유발하게 되고, 따라서 이 유동손실을 줄이기 위한 연구가 필요하다. 그런데, 이는 평판 경계층이 존재하는 이상 피할 수 없는 현상이며, 다만 실린더의 기하학적 형상을 변화시켜서, 실린더의 존재로 인하여 생기는 역압력구배를 억제시킴으로써 유동손실을 감소시킬 수 있다고 생각된다. Moore와 Ransmayr⁽¹¹⁾에 의

하여 가스터어빈 익렬 실험에서 제시된 쐐기형상의 익렬 선단은 이러한 2차 유동에 의한 손실을 줄일 수 있는 가능성을 제시한다. 또한, 최근에 Shin과 Pierce⁽¹²⁾는 선단필릿(leading edge fillet)이 익형 주위 및 후류에서의 와류시스템에 미치는 영향에 관하여 유동가시화 및 유동측정실험을 수행하였다.

본 연구의 목적은 말굽와류에 대한 전반적인 사항을 고찰하는 한편, 실린더의 기하학적 형상이 말굽와류에 미치는 영향을 정성적으로 고찰하는 데 있다. 그러므로 본 실험에서는 먼저 경계층이 형성되어 있는 평판에 원형 실린더를 설치하여, 말굽와류에 의한 3차원 유동현상을 고찰하고, 또한 동일한 평판에 쐐기형상의 실린더를 설치하여, 그 주위에서 발생하는 3차원 유동현상과 원형 실린더 주위에서 일어나는 3차원 유동현상과의 정성적인 비교를 통하여, 말굽와류에 의한 3차원 유동손실을 줄일 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 풍동은 폐순환회로의 Göttingen형 철제 풍동으로 시험부의 크기가 900 mm×900 mm×3600 mm이며, 최대속도 60 m/s까지 연속 조절이 가능하다. 또한, 유속 40 m/s에서의 비균일도는 0.3%, 난류강도는 0.2% 이내이다. 경계층을 형성하기 위해서는 시험부 내에 별도의 지면판을 설치하였는데, 이는 아크릴판으로 제작되어 지면판이 시험부 전체에 걸쳐서 설치되도록 하고, C형강으로 지지되었다. 그리고 지면판의 선단으로부터 2400 mm인 지점에 실린더가 Bolt로 부착될 수 있도록 하였다.

평판에 부착한 실린더로는 일반적으로 기존의 많은 연구의 대상이었던 원형의 것과, 선단형상이 말굽와류에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 이에 비하여 무딘정도(bluntness)를 줄여서 보다 뾰족한 선단(sharp leading edge)을 가지는 쐐기형의 것을 채택하였다. Fig. 1(a), (b)는 이들의 크기와 형상을 나타낸다. 원형 실린더는 외경 158 mm, 내경 148 mm, 높이 300 mm의 아크릴 원통으로 제작하였으며, 쐐기형 실린더는 동일한 규격의 원통면에 접하는 두개의 평면이 각도가 90°인 쐐기면을 형성하도록 제작하였다. 실린더의 윗부분은 유동의 누설을 방지하기 위하여 두께 10 mm의 아크릴판으로

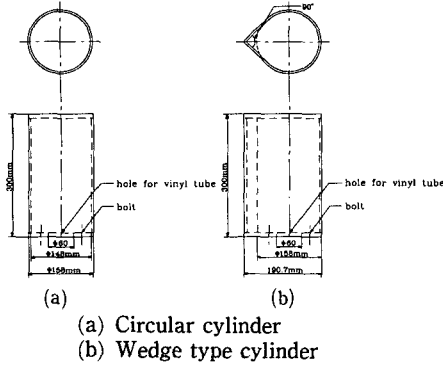


Fig. 1 Size and shape of the test model

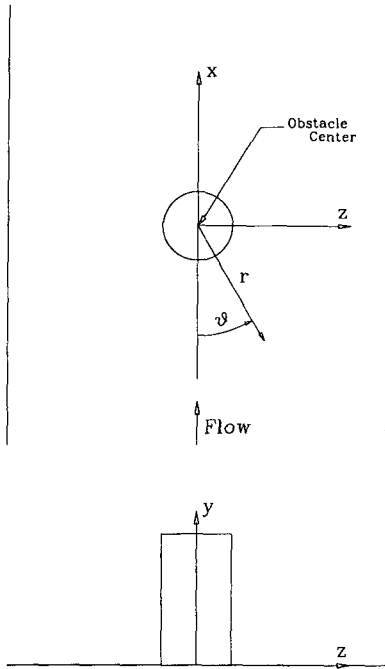


Fig. 2 Coordinate systems

막았으며, 실린더의 아랫부분에는 지면판과 Bolt로 연결될 수 있도록 15° 간격으로 뚫어진 Bolt구멍들과, 실린더 표면 정압 측정을 위한 비닐관이 통과할 수 있는 구멍이 있다.

평판의 크기와 설치방법, 실린더의 설치방법 등에 대한 자세한 내용이 참고문헌(13)에 설명되어 있다.

2.2 측정기기 및 측정장치

본 실험에서는 3차원 평균 유동의 측정을 위하여

Vortex사 제품인 구형(spherical type)의 5공 피토관을 사용하였는데, 이것은 측정부의 직경이 6mm이고, 각각의 구멍이 중앙의 구멍을 기준으로 각각 40°의 각도를 이루고 있다. 5공 피토관의 각각의 구멍에서 얻어지는 압력은 하나의 계수형 압력계(digital manometer)에서 받아들여야 하므로, 이를 위하여 본 실험에서는 5개의 신호중 하나만을 선별하여 받아들여지게 하는 scani-valve형식의 solenoid valve를 제작하여 사용하였다. 또한, 정압 측정에서 얻어진 압력신호는 48J4-1 scani-valve를 사용하여 그중에서 필요한 하나만의 신호를 받아들일 수 있도록 하였다. 5공 피토관과 정압 구멍을 통한 압력 신호는 YEW TYPE 2654 digital manometer로 받아들이고, 이 곳에서 나오는 전압 신호를 Hewlett-Packard 3457A Multimeter로 받아들여서 100~200회의 측정 평균값을 얻어 IEEE-488 interface card를 사용하여 IBM PC/AT computer에서 받아들이도록 하였다.

2.3 측정방법 및 측정범위

본 실험에서는, Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이, x축을 주유동방향(streamwise direction), y축을 수직방향(vertical direction), z축을 풍동 폭방향(transverse direction)으로 하는 직교 좌표계와, 본 실험에서의 주요 관심대상인 말굽와류(horseshoe vortex)가 형성되어 나가는 형상을 고려하기 위한 원통 좌표계를 겸용하였다.⁽¹⁾ 좌표계의 원점은 설치된 실린더의 중심축에 놓여지도록 하였다.

또한, 본 연구에서 취급하는 유동현상이 x축을 중심으로 대칭임을 감안하여, 측정은 $z > 0$ 인 영역에 한정하였는데,⁽¹⁾ 유동가시화 및 정압분포 측정을 통하여 풍동의 중심면에 대한 유동의 대칭성을 확인할 수 있었다. 수직방향으로는 유체가 실린더의 윗부분을 넘어가는 효과에 의한 영향을 고려하여야 하는데, 실린더 벽면에서의 정압측정 결과, $y = 200$ mm 이상이 되는 지점에서 정압이 떨어지는 현상을 볼 수 있었으므로, $y = 150$ mm 이하의 부분으로 측정범위를 제한하였다.

표면정압의 측정을 위해서 평판과 실린더에 정압구멍을 뚫었다. 평판의 경우, 될수록 적은 수의 구멍으로 넓은 범위의 정압을 측정할 수 있도록 하기 위하여, 평판의 일부를 회전시킬 수 있는 지름 760 mm의 큰 원판으로 대체하고, 이 원판의 임의의 반지름을 따라 5 mm 혹은 10 mm간격의 정압구멍

을 뚫어, 여러 회전각도에서 정압측정이 가능하도록 하였다.⁽¹¹⁾ 이 정압구멍들에는 직경 1mm인 stainless관을 심고, 이것을 비닐관에 연결하여 풍동 바깥에 설치된 scani-valve를 통하여 자료처리 장치에 연결되도록 하였다. 평판에서의 정압측정에 의한 결과는 다음과 같은 압력 계수로 나타내었다.

$$C_p = \frac{p - p_s}{\rho_1 - p_s} \quad (1)$$

여기서, p 는 압력구멍으로부터 얻어진 압력신호이고, p_1 와 p_s 는 각각 풍동 시험부 입구 부분에서의 전압(total pressure)와 정압(static pressure)이다.

평판 유동의 가시화를 위해서, Langston과 Boyle⁽¹⁴⁾이 제안한 방법을 따라서 평판 위에 트레팔지를 깔고, 그 위에 휘발성이 약한 탄소분말, 파라핀유, 올레인산의 혼합액을 규정된 위치에 한 방울씩 떨어뜨리고 나서, 풍동을 약 5분간 가동한 후에 이 혼합액이 흘러간 경로를 관찰하였다.

5공 피토관을 이용하여, Fig. 3에 나타난 바와 같이, $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 인 단면에서의 평균유동을 측정하였는데, 각 단면에서의 측정범위는, 반경방향으로는 실린더의 표면 부근($r=84\text{ mm}, r/D=0.53$)에서 $r=200\text{ mm}$ 까지, 그리고 수직방향으로는 평판

부근($y=6\text{ mm}, y/D=0.038$)에서 $y=80\text{ mm}$ 까지로 하였다. 여기서, 5공 피토관을 평판이나 실린더의 표면에 아주 가까이 위치시킬 경우, 5공 피토관에서 받아들이는 압력신호는 평판의 영향으로 큰 오차를 보이기 때문에 이 부근에서의 측정은 무의미하다.⁽¹⁵⁾ 실제로 본 실험에서도 평판 가까운 부분과 실린더 벽면 부근에서의 5공 피토관 측정은, 5공 피토관의 존재로 인한 유동의 변화가 심하여 큰 오차를 보임을 알 수 있었다.

각 단면에서 600~800개의 규정된 지점에서 평균 유동을 측정하였는데, 하나의 고정된 r 의 위치에서 이송 장치를 이용하여 y 를 변화시켜가며 측정하고 난 다음, 다른 r 의 위치에서 동일한 방식으로 측정하는 절차를 채택하였다. 한 지점에서 5공 피토관의 각각의 구멍을 통하여 얻어진 신호는 100회 측정치의 평균치를 구하여 처리하였다.

피토관에 의한 측정결과를 이용하여, $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 인 단면에 수직방향의 와도를 다음과 같은 정의에 의하여 계산하였다.

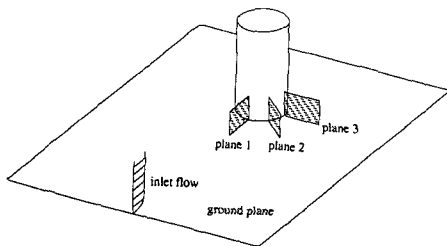
$$\Omega = \frac{\partial v_r}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial r} \quad (2)$$

여기서, v_r 은 각 단면에서의 r 방향 속도성분이고, v_y 는 y 방향 속도성분으로서, 윗 식의 차분식에, 5공 피토관을 이용하여 구한 각 지점에서의 속도성분들을 대입하여 각각의 와도를 계산하였는데, 차분은 전방차분(forward difference)과 후방차분(backward difference)의 평균을 이용하였으며, 평판, 실린더 표면 등의 경계에서는 적절히 전방차분 또는 후방차분만을 사용하였다.⁽¹⁶⁾

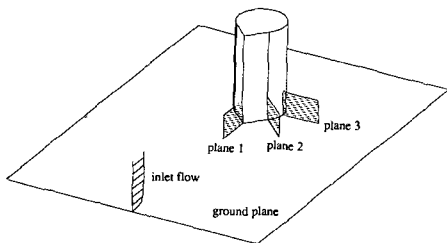
3. 실험결과 및 검토

3.1 실험조건

실험은 자유유동속도 23.26 m/s에서 수행하였으며, 이 때 실린더의 지름 158 mm를 기준으로 한 레이놀즈수는 $Re_D = 2.33 \times 10^5$ 이다. 또한, 실린더를 설치하지 않았을 때 실린더의 선단이 놓여질 위치에서 경계층의 두께는 $\delta = 50.39\text{ mm}$, 배제두께(displacement thickness)는 $\delta_1 = 12.28\text{ mm}$, 운동량 두께(momentum thickness)는 $\delta = 7.35\text{ mm}$ 이며, 형상계수(shape factor)는 $H = 1.67$ 이다. 또한, 운동량두께에 대한 레이놀즈수는 $Re_{\delta_2} = 1.0824 \times 10^4$ 이다.



(a) Circular cylinder



(b) Wedge type cylinder

Fig. 3 5-hole Pitot tube measurement planes: plane 1, 0-deg plane(plane of symmetry); plane 2, 45-deg plane; plane 3, 90-deg plane

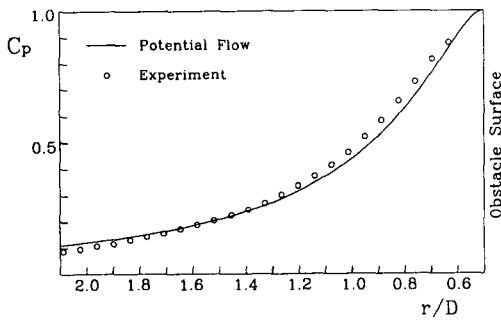
3.2 정압분포

대칭면에서는 경계층을 벗어난 지역인 $y/D=0.95$ 에서와 평판에서의 정압을 측정하여, 포텐셜유동의 경우와 비교하였다. 원형 실린더 주위의 포텐셜유동에 대하여는 일반적으로 알려진 해석해(analytic solution)를 사용하였으며, 썩기형 실린더 주위의 포텐셜유동에 대하여는 간단한 수치계산을 통하여 그 해를 얻었다. 모든 길이는 실린더의 직경을 기준으로 하여 무차원화하였다.

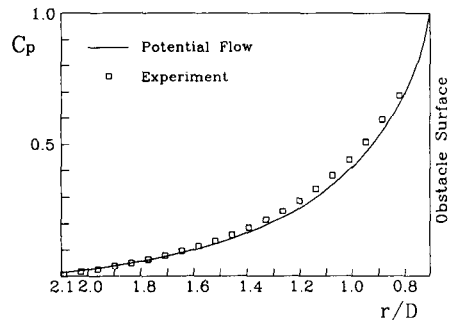
Fig. 4는 실린더가 설치되었을 경우, 대칭면에서의 정압분포를 Eckerle과 Langston⁽¹⁾의 결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 4(a)에서와 같이, 경계층을 벗어난 지역에서는 포텐셜유동에서와 같은 경향의 정압분포를 보이고 있음을 알 수 있으나, Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 평판 정압분포는 이와는 다른 경향을 나타내고 있다. 즉, 박리영역(separation region) 이전에서는 실린더가 존재함으로 인한 정압의 증가가 포텐셜유동에서의 정압분포와 같은 경향으로 일어나고 있으나, 그 이후의 정압은 어느 정도의 최소값까지 감소하다가 다시 급격히

증가하고 있다. 이는 이러한 기하학적 형상 주위에서 일어나는 3차원 유동현상의 특징을 잘 설명하고 있는데, 일반적으로 이 최소값이 되는 부분이 발생되고 있는 와류의 중심이라고 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 이 와류의 중심은 $r/D=0.83$, 즉 실린더의 선단으로부터 약 52 mm부근에서 나타나고 있다. 또한, 정압분포가 포텐셜유동과 달라지기 시작하는 $r/D=1.05$, 즉 실린더의 선단으로부터 87 mm인 부근이 안장점(saddle point)이 된다.⁽¹⁾ Eckerle과 Langston⁽¹⁾의 결과와 비교하였을 때, 그림에서 나타난 바와 같이, 입구조건이 다르므로 인하여 정량적인 비교는 할 수 없었으나 정성적으로는 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 경계층의 두께, 운동량두께(momentum thickness) 등과 입구조건은 형성되는 말굽와류의 크기에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있는데, 본 실험에서 나타난 말굽와류는 Eckerle과 Langston의 실험에서보다 강하고 크게 형성된다.

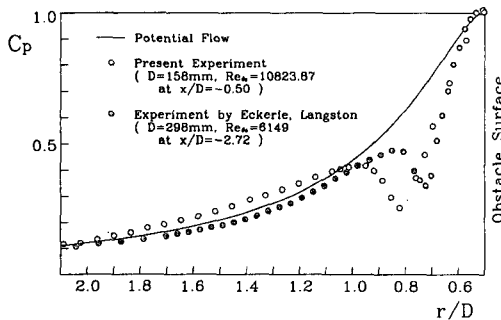
Fig. 5는 썩기형 실린더 상류의 대칭면에서의 정압분포를 보여준다. 경계층을 벗어난 영역에서는



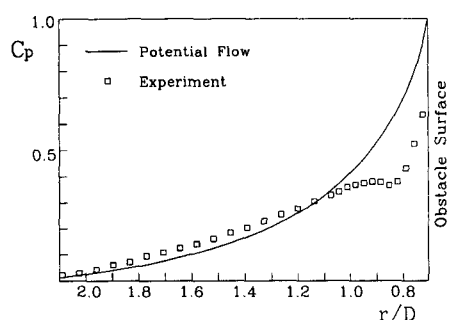
(a) $y/D=0.95$



(a) $y/D=0.95$



(b) $y/D=0$ (endwall)



(b) $y/D=0$ (endwall)

Fig. 4 Static pressure distributions on the plane of symmetry for circular cylinder

Fig. 5 Static pressure distribution on the plane of symmetry for wedge type cylinder

역시 포텐셜유동과 같은 경향의 정압분포를 나타내나, 평판 정압분포는 와류의 중심이 $r/D=0.86$, 즉 선단으로부터 약 24mm 부근에 아주 약하게 존재하고 있으며, 안장점은 $r/D=1.1$, 즉 실린더의 선단으로부터 약 62mm 부근에 위치하고 있음을 보여준다. 따라서, 뿔기형상의 실린더의 경우, 대칭면에서의 경계층의 박리가 원형 실린더의 경우보다 약하게 일어난다는 사실을 알 수 있다.

한편, 평판에서의 등정압선을 Fig. 6과 Fig. 7에 각각의 기하학적 형상에 대하여, 포텐셜유동의 경우와 비교하여 나타내었다. 실제로, 경계층을 벗어난 지역에서의 유동은, Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이, 포텐셜유동으로 잘 설명됨이 알려져 있기 때문에,⁽¹⁷⁾ 이는 경계층을 벗어난 지역의 정압분포와의 비교라고도 볼 수 있다. 우선, Fig. 6의 원형 실린더 주위의 등정압선들을 고찰한다. 박리영역을 벗어난 지역에서는 포텐셜유동에서와 동일한 분포를 보여주는 반면에, 박리영역 내에서는 $r/D=0.8$ 부근에서의 정압이 $\theta=60^\circ$ 까지 상대적으로

로 작게 나타나고 있는데, 이는 말굽와류 중심의 이동 경로를 나타내는 것으로 생각된다. 그러나, $\theta=60^\circ$ 를 넘어가면 이 부근이라도 포텐셜유동과 거의 비슷한 정압분포가 나타나는데, 이는 이 지역에서 전체적인 유동이 가속되면서 말굽와류가 크게 약화됨을 의미한다.

다음으로 Fig. 7의 뿔기형 실린더의 경우를 고찰한다. 여기서도 원형 실린더의 경우와 거의 비슷한 경향이 나타나고 있으나, 박리영역 내에서의 정압과 포텐셜유동에서의 정압의 차이가 실린더의 경우보다 상대적으로 작음을 알 수 있다. 따라서, 좀더 예리한 형상의 실린더가 설치되었을 경우 말굽와류에 의한 3차원의 유동이 크게 약화되리라는 사실을 예측할 수 있다.

3.3 평판유동의 가시화

Fig. 8의 유동가시화 실험결과는 실린더 선단의 앞부분에서 역류가 발생하고 있음을 잘 나타내고 있다. 또한, 실린더 주위에는 말굽모양과 같은 진

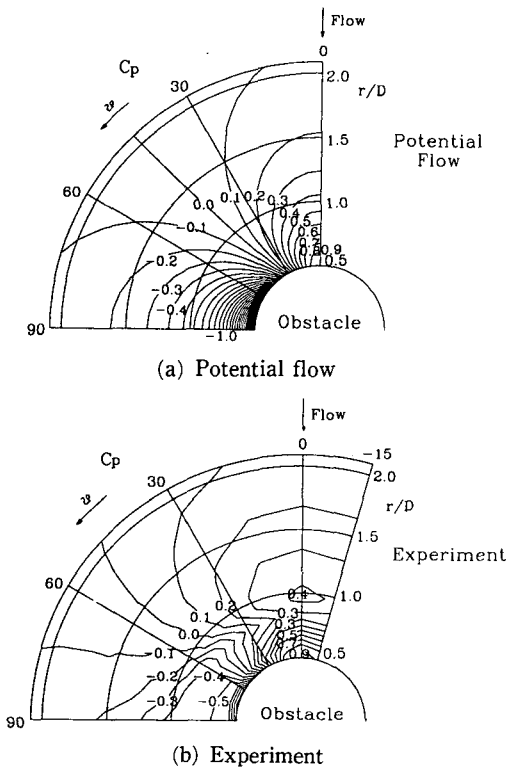


Fig. 6 Endwall static pressure contours for circular cylinder

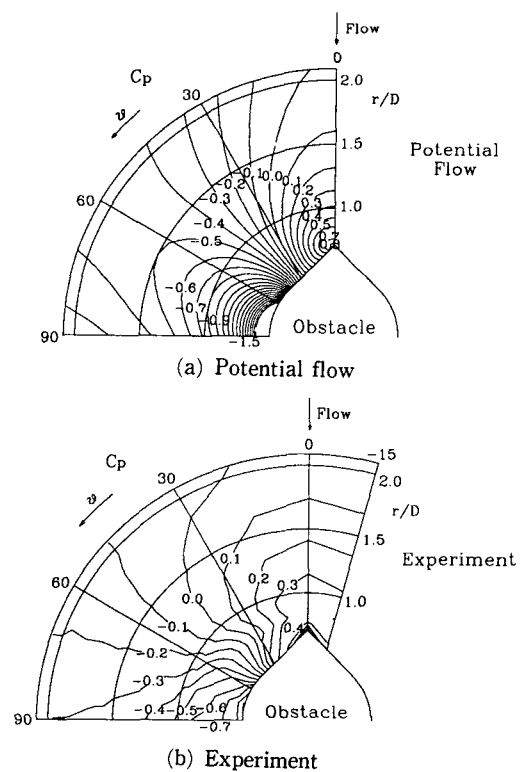
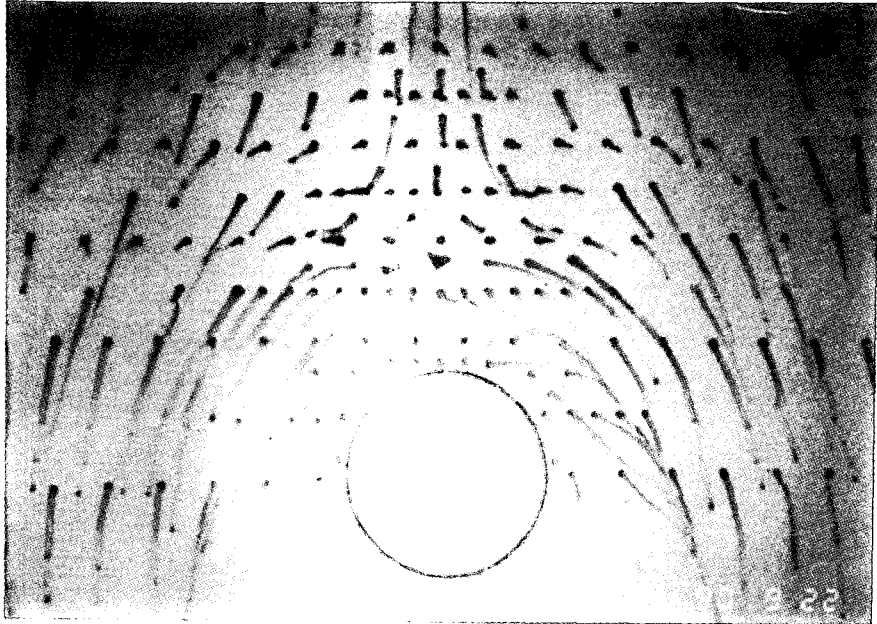
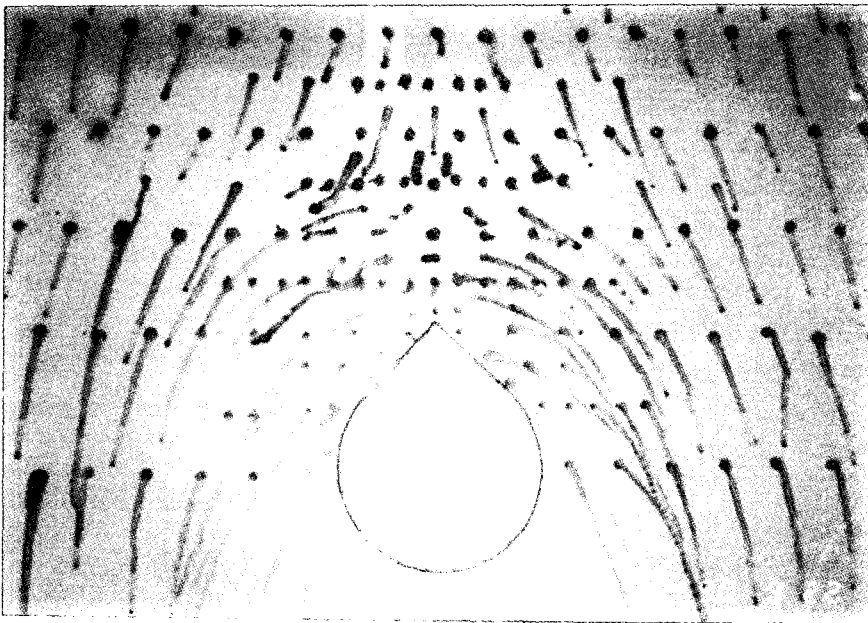


Fig. 7 Endwall static pressure contours for wedge type cylinder



(a) Circular cylinder



(b) Wedge type cylinder

Fig. 8 Flow visualization pattern on the endwall

한 포물선의 형상이 보여지는데, 이는 말굽와류 중심의 이동 경로에 해당한다.⁽¹⁶⁾ 원형 실린더의 경우, 선단 앞 55 mm부근에서, 췌기형 실린더의 경우, 선단 앞 25 mm부근에서 와류가 발생하여 양

옆으로 퍼져 나가고 있으며, 특히 이 말굽와류의 중심이 계속 반경방향으로 퍼져나감을 잘 나타내고 있다. 이는 Fig. 4, Fig. 5에서의 정압 분포에서 나타난 결과와 잘 일치하고 있다.

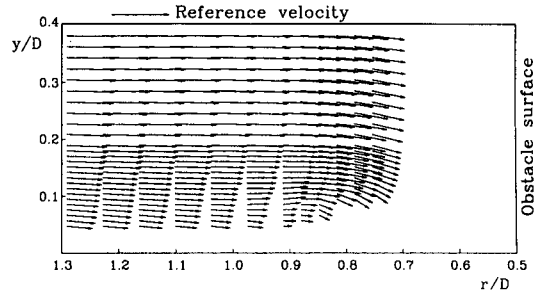
또한, 실린더의 표면 아주 가까운 부분에서는 유액이 실린더를 향하여 빨리 들어가는 모습을 볼 수 있는데, 이를 통하여 실린더 벽면과 평판이 만나는 아주 좁은 영역에서 모서리와류(corner vortex)가 존재한다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 Eckerle 과 Langston⁽¹⁾의 말굽와류 형성에 대한 설명에 의하여 뒷받침된다.

한편, 이 말굽와류가 발생하는 박리영역의 바깥 부분은 포텐셜유동에서의 유선과 같은 경향을 보여 준다. 그러나, 본 가시화실험에서는 안장점의 위치가 뚜렷이 나타나지 않고 있는데, 이는 이 근처에서 전단응력이 약함으로 인하여 유체가 혼합액을 충분히 밀어낼 수 없었기 때문이라고 생각된다. 단지, 거의 정체되어 있는 것으로 보이는 혼합액 방울들로부터 안장점의 대략적인 위치를 추정할 수 있을 뿐이다.

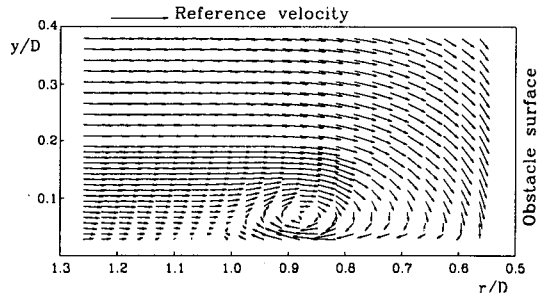
추가적으로, 본 실험에서는 평판유동의 가시화를 통하여, 유동이 그 경향에 있어서 좌우 대칭임을 확인할 수 있어, 유동의 측정영역을 이 중 한쪽 영역으로 국한시켜도 된다는 사실을 뒷받침하고 있다.

3.4 5공 피토크관을 이용한 유동의 측정

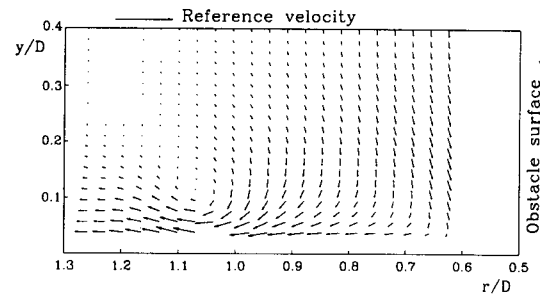
5공 피토크관에 의한 측정은 Fig. 3에 나타난 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 인 단면에서 수행하였는데, 원형 실린더 주위의 유동에 대하여는 Fig. 9, 쉐기형 실린더 주위의 유동에 대하여는 Fig. 10에 각각의 단면에서의 속도벡터로 나타내었다. 여기서, 기준속도(reference velocity)는 입구에서의 자유유동속도로 하고, 이를 근거로 모든 속도벡터를 무차원화하였다. 대칭면($\theta = 0^\circ$)에서는, 피토크관 측정부의 직경이 역류 영역의 길이 척도와 거의 비슷하기 때문에, 피토크관을 거꾸로 설치하여도 역류영역의 속도벡터를 구할 수 없었으며, 또한 평판과 실린더의 표면 근처에서는 피토크관에 의한 측정의 오차가 크므로 실험자료를 표시하지 않고 공백으로 남겨두었다. 원형 실린더 주위의 유동에 대하여는 Fig. 9(a)에 나타난 속도벡터만을 보더라도 대칭면에서 박리가 일어나고 있음을 예상할 수 있다. 한편, 대칭면에서 발생한 경계층의 박리는 $\theta = 45^\circ$ 인 평면에서 강력한 와류로 변하여 존재하고 있음이 Fig. 9(b)에 잘 나타나 있는데, 와류의 중심은 $r/D = 0.863, y/D = 0.068$ 부근에 존재한다. 일반적으로 이 말굽와류는 $\theta = 5^\circ \sim 25^\circ$ 사이에서 완전한 와류로 형성됨이



(a) Plane of symmetry



(b) 45-deg plane



(c) 90-deg plane

Fig. 9 Velocity vectors for circular cylinder

알려져 있다.⁽¹⁾ Fig. 9(c)의 $\theta = 90^\circ$ 인 평면에서는 Fig. 6의 정압분포에서도 설명될 수 있듯이 유동의 가속효과에 의하여 강한 주유동 방향의 운동량이 발생하여, 말굽와류가 크게 약화되어 있음을 볼 수 있다. 여기서 와류의 중심은 $r/D = 1.068, y/D = 0.116$ 부근에 존재하고 있어, 45° 단면에서보다 와류의 중심이 반경방향으로 더욱 퍼져나가면서 평판으로부터 약간씩 멀어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(a), (b), (c)는 쉐기형 실린더 주위의 말굽와류의 형성을 보여주는데, 전체적으로 원형 실린더의 경우와 거의 비슷한 경향을 보이나, 보다 좁은 영역에서 약한 말굽와류가 발생하고 있다. 특히, Fig. 10(a)의 대칭면 속도벡터는 피토크관으로

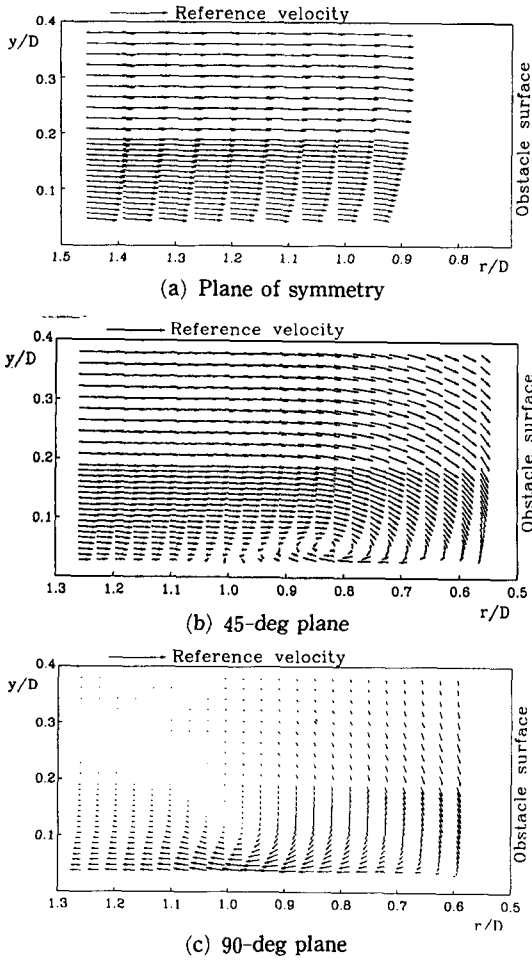


Fig. 10 Velocity vectors for wedge type cylinder

측정 가능한 영역내에서 와류 발생의 가능성을 거의 볼 수 없었다. 따라서, 이 경우 더 안쪽의 작은 영역에서 경계층의 박리가 일어나고 있을 것으로 예상된다. 와류의 중심은, 45° 단면에서는 $r/D=0.834$, $y/D=0.055$ 부근에, 90° 단면에서는 $r/D=0.995$, $y/D=0.121$ 부근에 존재하고 있어, 원형 실린더의 경우에서와 같이 반경방향으로 퍼져 나가면서 벽면으로부터 약간씩 멀어지고 있다. 다만, 원형 실린더의 경우에 비하여 더 좁은 폭으로 퍼져나간다고 할 수 있다.

전체적으로 볼 때, 각각의 기하학적 형상 주위에서 나타나는 말굽와류는 경계층두께 정도의 아주 작은 영역에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 평판유동의 가시화를 통하여 볼 수 있었던 모서리 와류는 5공 피토판을 이용한 측정에서는 확인할 수

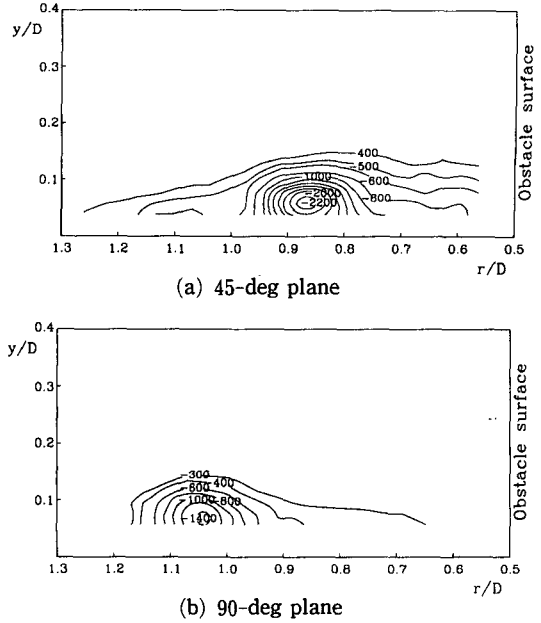


Fig. 11 Vorticity distribution around circular cylinder

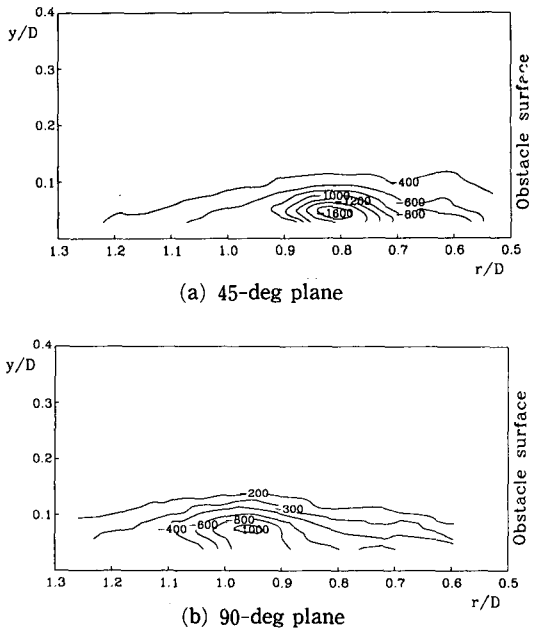


Fig. 12 Vorticity distribution around wedge type cylinder

없었다.

Fig. 11(a), (b)에는 원형 실린더의 경우, Fig. 12(a), (b)에는 쐐기형 실린더의 경우의, 45° 단면과 90° 단면에서의 와도분포를 나타내었다. 45° 단

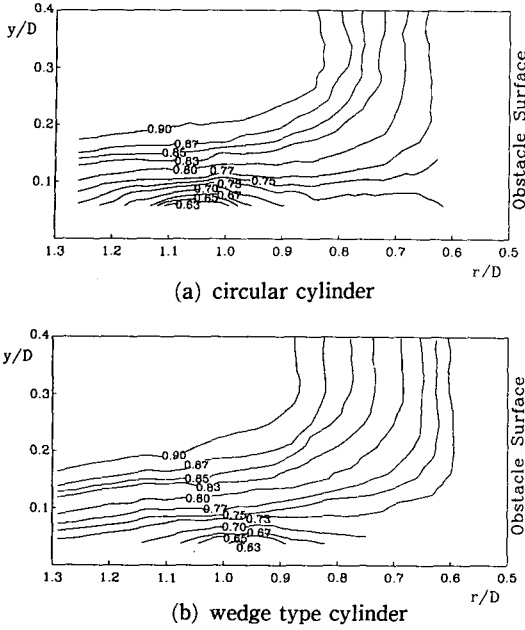


Fig. 13 Streamwise velocity distribution on 90-deg plane

면에서는, 두 형상에 대하여 모두 강한 와도가 나타나는데, 이는 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)의 속도벡터에서 나타나는 강한 와류에 기인한다. 쐐기형 실린더의 경우에 와도가 더 좁은 영역에 분포되어 있으며 강도도 더 작은 것으로 나타나고 있다. 90° 단면에서는 Fig. 11(b)와 Fig. 12(b)에서 볼 수 있듯이, 45° 단면에서보다 전체적으로 와도의 크기가 작아짐을 볼 수 있는데, 이는 속도벡터에서 볼 수 있듯이 말굽와류가 확산되면서 약화된다는 사실을 뒷받침해 준다.

90° 단면에서의 주유동방향(x방향) 속도성분의 분포를, 포텐셜유동에서의 주유동방향 속도성분을 기준으로 무차원화하여, Fig. 13(a), (b)에 각각의 기하학적 형상에 대하여 제시하였다. 그 결과, 3차원 유동에 의하여 말굽와류 부근과 실린더의 평판 부근에서 상대적으로 약한 주유동방향의 운동량이 나타나고 있음을 알 수 있는데, 특히 말굽와류의 밑부분에서 약한 주유동방향 운동량이 나타난다.

4. 결 론

본 논문에서는 경계층이 형성되어 있는 평판에 수직으로 부착된 실린더 주위에서 발생하는 말굽와

류의 특성을 파악하고, 실린더의 선단 형상이 이 말굽와류의 형성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 원형 실린더와 쐐기형 실린더 주위의 3차원 유동 현상에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 유동장의 평균속도를 측정하기 위하여는 5공 피토판을 사용하였으며, 벽면 정압측정과 평판 유동가시화를 수행하였다. 또한, 5공 피토판에 의한 측정으로부터 와도를 수치적으로 계산하였고, 주유동방향 속도성분의 분포를 고찰하였다. 본 실험을 통하여 얻은 주요결론들은 다음과 같다.

(1) 본 실험에서는, 입구 경계층과 실린더의 존재로 인한 역압력 구배에 의하여 하나의 큰 말굽와류가 생김을 알 수 있었고, 거기에 수반하여 아주 작은 영역에서 모서리와류가 나타남을 확인할 수 있었다.

(2) 말굽와류는 형성된 이후 강한 와류로서 존재하다가 그 강도가 점점 약화되며, 반경방향으로 퍼져 나간다. 또한, 말굽와류의 발생으로 인하여 와류의 중심 부근과 실린더 평판 부근의 주유동방향 운동량은 감소한다.

(3) 쐐기형 실린더의 경우, 원형 실린더의 경우보다 말굽와류의 강도는 더 약하며, 확산 범위는 더 좁음을 알 수 있다. 따라서, 선단이 더 예리한 실린더를 사용할 경우, 말굽와류에 의해서 생기는 3차원 유동에 의한 손실을 크게 줄일 수 있을 것으로 예측된다.

(4) 입구 경계층에 의하여 형성되는 말굽와류는 실린더의 크기에 비하여 상대적으로 작은 영역에서 발생한다. 따라서, 보다 정밀한 측정을 위하여는 실린더의 크기에 비하여 아주 작은 측정 기구를 사용하여야 할 것이다. 특히 벽면 가까이에서의 더욱 정밀한 측정을 위해서는 더욱 작은 측정 기구나 유동의 교란을 주지 않는 LDV 등을 이용한 측정이 요구된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단기술연구과제 및 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으므로 이에 심심한 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

(1) Eckerle, W. A. and Langston, L. S., 1987,

- "Horseshoe Vortex Formation Around a Cylinder," *Trans. ASME, Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 278~285.
- (2) Pierce, F.J. and Tree, I.K., 1990, "The Mean Flow Structure on the Symmetry Plane of a Turbulent Junction Vortex," *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 112, pp. 16~22.
- (3) Dargahi, B., 1989, "The Turbulent Flow Field around a Circular Cylinder," *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 1~12.
- (4) Ishii, J. and Honami, S., 1986, "A Three-Dimensional Turbulent Detached Flow with a Horseshoe Vortex," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 125~130.
- (5) Sparrow, E. M., Stahl, T. J. and Traub, P., 1984, "Heat Transfer Adjacent to the Attached End of a Cylinder in Crossflow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No.2, pp. 233~242.
- (6) Goldstein, R. J. and Karni, J., 1984, "The Effect of a Wall Boundary Layer on Local Mass Transfer from a Cylinder in Crossflow," *Trans. ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 260~267.
- (7) Eckerle, W.A. and Awad, J.K. 1991, "Effect of Freestream Velocity on the Three-Dimensional Separated Flow Region in front of a Cylinder," *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 113, pp. 37~44.
- (8) Lai, K. Y. M. and Makomaski, A. H., 1989, "Three-Dimensional Flow Pattern Upstream of a Surface-Mounted Rectangular Obstruction," *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 449~456.
- (9) Castro, I. P. and Robins, A. G., 1977, "The Flow around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 79, Part 2, pp. 307~335.
- (10) Boyle, M. T. and Langston, L. S., 1989, "Asymmetrical Boundary Layer Separation at the Base of a Two Cylinder Geometry," *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 443~448.
- (11) Moore, J. and Ransmayr, A., 1984, "Flow in a Turbine Cascade: Part I-Losses and Leading-Edge Effects," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 400~408.
- (12) Shin, J. and Pierce, F.J., 1990, "Influence of Leading Edge Fillets on a Turbulent Junction Vortex," *Proceedings of the Second KSME-JSME Fluids Engineering Conference*, Volume 1, pp. 374~380.
- (13) 양준모, 1991, "평판에 부착된 물체주위의 말굽와류현상에 관한 실험적 연구", 서울대학교 공학석사 학위논문.
- (14) Langston, L. S. and Boyle, M. T., 1982, "A New Surface-Streamline Flow-Visualization Technique," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 125, pp. 53~57.
- (15) Goldstein, R.J., 1983, "Fluids Mechanics Measurements," Hemisphere Publishing Co., pp. 67~73.
- (16) Pierce, F. J. and Harsh, M.D., 1988, "The Mean Flow Structure around and within a Turbulent Junction or Horseshoe Vortex-Part II: The Separated and Junction Vortex Flow," *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 415~423.
- (17) Moore, J. and Forlini, T.J., 1984, "A Horseshoe Vortex in a Duct," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 668~676.