

평판에 고정된 유한 실린더 상면표면 주위에 형성되는 와류유동의 가시화

노성철*, 박승오**

(2000년 5월 15일 접수)

Visualization of Vortical Flow Around the Free End Surface of a Finite Circular Cylinder Mounted on a Flat Plate

Sung-Cheoul Roh and Seung-O Park

Key Words : Finite Circular Cylinder(유한 실린더), Oil Flow Visualization(유막 가시화), Laser Light Sheet Visualization(레이저 단층 가시화), Singular Point(특이점), Tornado-Like Vortex(토네이도형 와류), Flow Topology(유동 위상)

Abstract

A flow visualization study using the oil film method and the smoke-laser light sheet arrangement is carried out to investigate the three-dimensional separated flow pattern around the free end surface region of a finite circular cylinder (aspect ratios of 1.25 and 4.25) mounted on a flat plate. The experiment is performed for the cases of two Reynolds numbers: 5.92×10^3 and 1.48×10^5 . Various kinds of singular points on the free-end surface are disclosed from the oil surface flow visualization. The smoke-laser light sheet visualization, to aid in understanding the oil streak-line patterns, clearly demonstrates that a pair of tornado-like vortices marched along the downstream together with a pair of side tip vortices. A topological sketch to characterize the surface flow and the four vortices emanating from the top surface is included.

기호설명

AR	: 세장비(aspect ratio)	$AR=h/d$
d	: 실린더 지름	
h	: 실린더 높이	
Re_d	: 레이놀즈수	$Re_d=UD/\nu$
ν	: 동점성 계수	

1. 서론

평판 위에 장착된 일정 세장비(aspect ratio)를 갖는 원형 실린더 주위 유동에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 일반적으로, 일정 세장비를 갖

는 실린더 주변 유동은 동체접합부위(body-plate junction)에서의 말굽 와류(horseshoe vortex system), 후류 유동을 대표하는 Karman 형 와류홀림(Karman-type vortex shedding), 그리고 실린더 끝단으로부터 발생하는 3 차원적 박리유동구조 등 복잡한 유동 구조를 갖는다.

Farivar⁽¹⁾는 유한 실린더 근접 후류를 유동 형태가 서로 다른 2 개의 영역 즉, 유한 실린더 끝단 근처에서의 3 차원적 유동영역과 그 아래로 형성되는 2 차원적 유동영역으로 구분 하였다. 또한 와류홀림주파수(shedding frequency)가 유한 실린더 축(span) 방향으로 변화하고 있는 것을 발견하였고, 이러한 와류홀림주파수가 유한 실린더 끝단 근처에서 최소값을 갖는다는 사실을 확인하였다.

Ayoub 와 Karamcheti⁽²⁾는 유한 실린더 후류에서의 와류홀림주파수가 실린더 축 방향에 따라 다르게 되는 이유는 끝단 근처에서 존재하는 세포형상의 구조(cellular wake)가 상하로 진동하기 때문이라고 하였다. 상하로 진동하는 세포형상 구조의

* 한국항공우주산업

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과(항공우주공학 전공)

E-mail : sopark@sop1.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3713

FAX : (042)869-3710

생성과 관련하여, Fox 등⁽³⁾은 이런 구조는 유한 실린더 상면표면으로부터 형성된 와류 유동으로부터 생성된다고 하였다. 한편, Baban 와 So⁽⁴⁾는 유한 실린더에 자유유동의 횡방향(transverse direction)으로 진동하는 힘을 실린더 축 방향으로 측정하였으며, 이러한 힘이 실린더 축 방향을 따라 변화하며, 유한 실린더 끝단 부위에서 최소값을 갖는다는 사실을 보고 하였다. 그들은 이러한 가진력이 끝단 근처에서 최소값을 갖는 것이 유한 실린더 상면으로부터 발생하는 비정상 박리유동의 영향 때문이라고 언급하였다. 이러한 사실들은 유한 실린더 상면표면으로부터 생성되는 3 차원 박리유동이 유한 실린더 후류 거동을 결정하는 주요한 인자가 됨을 시사한다. 그러므로 유한 실린더 상면부 유동특성의 이해는 유한 실린더를 지나는 유동의 전체적 특성을 조명하는데 필수적인 요소가 된다.

놀랍게도 유한 실린더 상면표면으로부터 생성되는 유동 형태는 그 동안 상대적으로 적은 관심의 대상이었다. Etzold 와 Fiedler⁽⁵⁾는 유한 실린더 상면부를 지나는 3 차원적 박리 유동의 개념적 도식을 통해 하나의 와류 쌍이 유한 실린더 상면부를 지나는 거시적 유동을 형성한다고 언급하였다. 이와 관련하여, Kawamura 등⁽⁶⁾은 유한 실린더 끝단 영역 가까운 후류에서의 등속선을 계측하여, Etzold 와 Fiedler⁽⁵⁾가 언급한 와류 쌍이 실제로 존재한다는 사실을 확인하였으며, 이를 홀림 끝단 와류쌍 이라고 언급하였다. 더 나아가 Kawamura 등⁽⁶⁾은 이러한 홀림 끝단 와류쌍 외에 유한 실린더 상면표면에 한 쌍의 소용돌이 형 (swirl like) 유동 형태가 존재한다는 사실을 관찰하였다. 그들은 이러한 유동 형태를 실속영역의 사각날개에 형성되는 3 차원적 박리유동구조(Winkelmann 과 Barlow⁽⁷⁾)와 유사하다 하여 “버섯형 와류 (mushroom type vortex)” 구조라고 하였다. Roh 와 Park⁽⁸⁾은 유한 실린더 상면표면부에 존재하는 이러한 버섯형 와류가 하류로 가면서 역회전하는 한 쌍의 토네이도 형 와류(counter-rotating tornado-like vortex)와 연결된다는 것을 보였다.

그렇지만 지금까지 이러한 유한 실린더 상면표면 가까이에 존재하는 소용돌이 형 유동 형태가 어떠한 형태로 하류방향으로 발달되어 나아가는지에 대해서 자세히 언급되어지지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 유한 실린더 상면표면에 존재하는 이러한 와류의 형성, 발달, 그리고 위상적 특징(topological features)에 대하여 살펴보고자 한 것으로서 Roh 와 Park⁽⁸⁾의 연구를 더 확장한 것이다. 유막(oil film) 방법과 레이저 단층 촬영기법(laser light sheet method)이 이러한 유한 실린더 상면표면에서의 와류 형태를 가시화하는데 사용되었다. 이러한 가시화 실험을 통해서 유한 실린더 상면표면에 뿌리를 내리고 있는 와류 쌍이 유한 실린더 상면 양쪽 측면에서의 홀림 와류 쌍과 함께

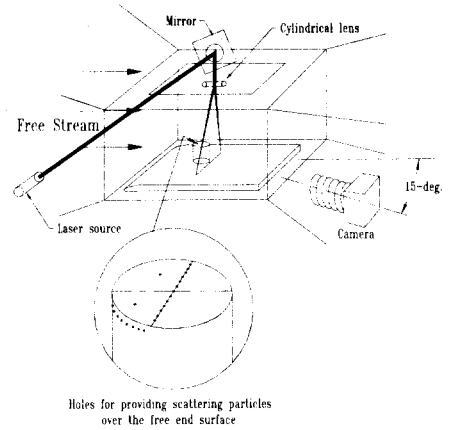


Fig. 1 Schematic of the flow configuration

하류로 흘러 간다는 사실이 확인되었다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구는 세장비가 1.25 및 4.25 인 평판에 장착된 유한 실린더에 대하여 실린더 지름을 기준으로 한 레이놀즈 수가 5.92×10^3 와 1.48×10^5 인 흐름조건에서 유한 실린더 상면표면의 유동흐름을 조사하기 위한 가시화 실험이 주된 내용을 이룬다. 먼저 유한 실린더 상면표면에서의 유막 가시화가 세장비 1.25, 레이놀즈 수 1.48×10^5 에서 수행되었고, 이로부터 유추되는 3 차원적 유동 형태의 확인을 위하여 레이저 단층 가시화가 동일한 유동조건(세장비 1.25, 레이놀즈 수 1.48×10^5)에서 수행되었다. 가시화를 통해서 확인된 유한 실린더 상면부에서의 3 차원적 유동구조가 다른 유동조건에서도 유지되는지를 관찰하기 위하여, 실린더 세장비와 레이놀즈 수를 각각 바꾸어 레이저 단층 가시화를 추가적으로 수행하였다. 레이놀즈 수 1.48×10^5 인 경우 추가적 레이저 단층 가시화는 실린더 세장비를 풍동설비 시험부 크기를 고려한 4.25 로 하여 수행되었다. 또한 소형 풍동을 사용하여, 레이놀즈 수가 5.92×10^3 이고 세장비가 각각 1.25, 4.25 인 유동조건에서 추가적 레이저 가시화가 수행되었다.

레이놀즈수 1.48×10^5 인 경우의 가시화 실험을 위하여, 시험부(test section)의 치수가 나비 1m, 높이 0.72m, 그리고 길이 1.5m 인 개방형 흡입형 아음속 풍동이 사용되었다. 레이놀즈 수 1.48×10^5 에서 난류강도는 0.5% 이하였으며, 시험부 단면에서의 평균 유속의 비 균질도는 0.25% 이하였다.

풍동 시험부 바닥에 장착 되어있는 평판(Fig. 1 참조)은 치수가 나비 0.9m, 두께 0.02m, 그리고 길이 1.2m 였다. 평판의 앞전 근처에서의 유동박리

를 방지하기 위해, 앞전 부위가 타원 형태를 갖도록 가공되었다(Narasimha 와 Prasad⁽⁹⁾). 가시화에 사용된 유한 실린더의 직경은 8cm 였으며, 길이는 10cm 이었다. 유한 실린더는 평판의 앞전으로부터 32cm 후방에 중심이 놓이도록 설치 되었다. 이곳에서 경계층 두께는 대략 5mm 로 계산되어, 실린더 상면표면의 유동흐름에 평판 경계층의 영향이 미치지 않는 형상으로 볼 수 있다.

유막 가시화 기법에서 사용된 오일은 TiO₂, Kerosene, 그리고 Oleic acid 의 혼합액이 사용되었으며, 이를 유한 실린더 상면표면에 고르게 분포하도록 분사 하였다. 유한 실린더 상면표면에서 유적(oil streak)의 궤적이 명확히 보이게 하기 위하여, Kerosene, Oleic acid 의 혼합비율을 달리하였다. 풍동 운전은 표면에서의 오일의 움직임이 더 이상 보이지 않고 일정한 유동특성을 보여줄 때까지 약 20-30 분 가량 지속되었다.

유한 실린더 상면표면에서의 유막 가시화 결과로부터 유추되는 3 차원적 유동특성을 확인하기 위해 레이저 단층 가시화가 수행되었다. 5-와트의 아르곤-이온 레이저 광원을 15mm 두께의 원통형 렌즈를 통과시켜 약 3mm 정도의 광 단층(light sheet)을 형성시켰으며, 이러한 광 단층을 유한 실린더 상면표면과 실린더 표면 밖에 수직으로 투사하였다. 레이저 단층 가시화를 위해 사용된 산란 입자로는 드라이 아이스와 물의 혼합물로부터 발생하는 연기가 사용되었다. 발생한 연기는 유한 실린더 내부의 가공된 통로를 지나 실린더 상면부로 공급되도록 하였다. 유한 실린더 상면표면과 앞전(leading edge) 부위에 1~2mm 정도의 지름을 갖는 연기 분출구들이 일정간격을 갖도록 가공되어 발생한 연기의 출구가 되도록 하였다(Fig. 1 참조). 유한 실린더 상면 앞전 부위에 일정간격을 두고 가공된 연기 배출구로부터 공급된 연기는 유한 실린더 상면 앞전을 지나는 유동의 가시화를 위한 것이었고, 실린더 상면표면에 가공된 연기 배출구로부터 공급된 연기는 상면표면위로 형성되는 박리유동의 재순환 영역에 대한 가시화를 위한 것이었다. 레이저 단층상에 나타난 2 차원적 유동형상이 비디오 카메라에 기록되었다. 풍동 밖에 설치된 카메라의 촬영각이 풍동내 자유유동 방향에 대해 약 15° 정도의 경사를 갖게 되어 광 단층상에 나타난 유동 구조가 중심 축에 정확히 대칭적으로 보이지는 않게 되었다(Fig. 1 참조).

레이놀즈 수 5.92×10^3 인 경우, 레이저 단층 가시화가 나비 0.2m, 높이 0.3m, 그리고 길이 1.5m 인 개방형 송풍형 아음속 풍동에서 수행되었다. 난류강도는 0.5% 이하 였다. 풍동 시험부 바닥에 유한 원형 실린더를 수직으로 놓고 높이를 변화시킬 수 있도록 하였다. 이 때 유한 실린더의

직경은 2cm 였으며, 높이는 세장비 1.25, 4.25 를 만족 하도록 조절 하였다. 실린더는 시험부(test section)의 앞전으로부터 14cm 하류에 위치 하였으며, 이 경우 경계층 두께는 약 4mm 이하로 계산되었다.

3. 결과 및 토의

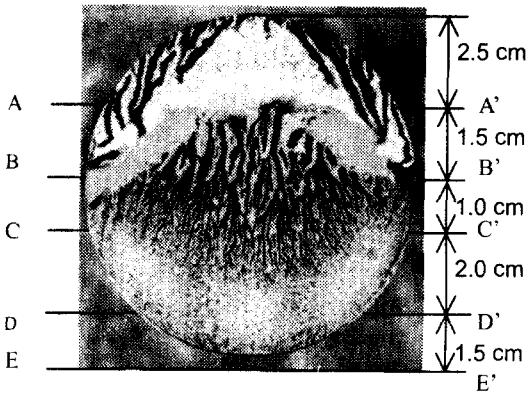
3.1 유막 가시화

유한 실린더 상면표면에서의 유동형태를 살펴보기 위해 먼저 상면표면에서의 유막 가시화를 수행하였다. 실험을 통하여 오일 혼합액의 혼합비에 따라 상면표면에 형성된 유막 형태가 동일한 유동조건에서도 매우 달라 보이게 나타나는 것이 확인되었다. Fig. 2로부터 레이놀즈 수가 1.48×10^5 이고 세장비가 1.25일 때 유한 실린더 상면표면에서의 유막 형태가 오일 혼합액의 혼합비 변화에 따라 현저한 차이를 보여준다는 사실을 알 수 있다. 실린더 상면 앞전으로부터 가까운 곳에 눈과 같은 형상이 존재함을 Fig. 2의 유막 가시화 결과를 통해서 알 수 있다.

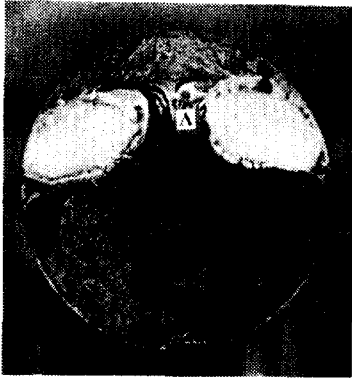
실린더 상면 유막 가시화에서 나타난 이러한 한 쌍의 눈과 같은 형상의 존재와 관련하여, Kawamura 등⁽⁶⁾은 유한 실린더 상면표면에 평행한 단면에서의 연기 가시화를 통해 유한 실린더 상면표면의 근접위치에서 소용돌이 형 유동 형태가 존재한다고 하였다. 그들은 이러한 소용돌이 형 유동구조를 “버섯형 와류”구조라고 언급하였다. 유막 가시화 실험 중 이러한 한 쌍의 눈이 계속적으로 실린더 상면 바닥에서 회전하는 것이 확인되었다. 하류방향에서 볼 때 오른쪽 눈 주위 오일 입자들이 시계 방향으로 그리고 왼쪽 눈 주위 오일 입자들이 반시계 방향으로 회전하는 것이 관찰되었다. 결과적으로 유막 가시화를 통하여 나타난 이러한 한 쌍의 눈은 특이점 관점에서 볼 때 역회전(counter-rotating)하는 나선형 노드(spiral nodes)를 나타낸다(Tobak 와 Peake⁽¹⁰⁾ 그리고 Chapman 와 Yates⁽¹¹⁾).

실린더 상면에 나타난 이러한 나선형 노드의 회전방향과 유한 실린더로 다가오는 유동의 방향을 고려할 때, 이러한 나선형 노드사이에 안장점(saddle point)이 존재해야 한다는 사실을 알 수 있다. Fig. 2(b)의 A 점은 이러한 안장점(saddle point)의 존재를 보여준다. 유막 가시화로부터 나타난 유한 실린더 상면표면에서의 나선형 노드와 안장점의 조합은 Hornung 과 Perry⁽¹²⁾의 올빼미 얼굴 구조와 유사하다.

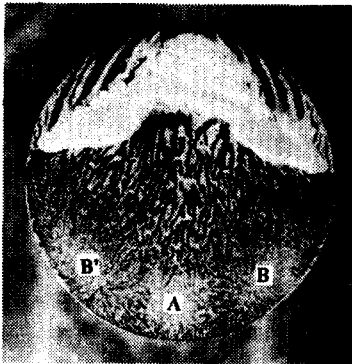
유한 실린더 상면의 끝단 가까이에 재부착 영역처럼 보이는 것이 Fig. 2(a)에서 나타난다. 그런데, Fig. 2(a)를 자세히 관찰해 보면 이러한 재부착 영역이 희미하게 3 개의 영역으로 나누어 짐을 관



(a) 20ml of TiO₂, 26ml of Kerosene, 1ml of Oleic acid



(b) 20ml of TiO₂, 55ml of Kerosene, 10ml of Oleic acid



(c) 20ml of TiO₂, 26ml of Kerosene, 12ml of Oleic acid

Fig. 2 Oil streak-line patterns on the top surface region (Flow from top to bottom)

찰할 수 있다. 이 영역을 자세히 관찰하기 위하여 오일 혼합액의 혼합비를 바꾸어 실험하였다. Fig.

2(c)를 보면 Fig. 2(a)에서 보이는 이러한 재부착 영역이 3 개의 영역으로 구분됨이 확실히 나타난다. Fig. 2(c)의 B, B'영역들로 표시된 두개 영역의 유막이 가시화 실험 중 사방으로 퍼져 나가는 것이 관찰되었고, A 영역은 쌍으로 존재하는 B, B'영역으로부터 점근적으로 다가오는 유선과 또한 직교 방향으로 퍼져나가는 유선으로부터 형성된다는 것이 관찰되었다. 사방으로 퍼져 나가는 특성을 갖는 Fig. 2(c)의 B, B' 영역은 Chapman 과 Yates⁽¹¹⁾의 연구에서 나타나는 유동의 3 차원적인 특이점 관점에서 볼 때 재부착 노드(attachment node point)로 이해된다. 또한, 유선이 한 방향으로는 점근적으로 접근하고 다른 한 방향으로는 퍼져 나가는 특성을 갖는 Fig. 2(c)의 A 영역은 3 차원적 특이점 관점에서 박리 안장점(separation saddle point)으로 이해 된다.

3.2 레이저 단층 가시화

유한 실린더 상면에 존재하는 한 쌍의 눈과 같은 형상은 상면표면 유동의 특성을 이해하는데 중요한 인자가 된다. 일반적으로 동체표면에서의 이러한 눈의 형성과 관련하여, Delery⁽¹³⁾는 3 차원적으로 토네이도 형 (tornado-like) 와류 구조가 한 쌍의 눈을 형성한다고 언급하였다.

본 절에서는 유한 실린더 상면표면에 이러한 한 쌍의 눈을 형성하는 3 차원적인 유동 형태를 확인하기 위하여 레이저 단층을 이용한 유동 가시화가 수행되었다. 먼저, 레이저 단층 가시화를 위한 유동조건은 유막 가시화 때와 같은 조건 ($Re_d = 1.48 \times 10^5$, $AR = 1.25$)에서 수행 되었다. 가시화는 Fig. 2(a)에서 표시된 5 개의 선들 (A-A', B-B', C-C', D-D', 그리고 E-E')에 입사되는 레이저 단층 평면상에 나타난 유동에 대하여 수행 되었다. 유한 실린더 상면 위의 각 레이저 단층상에 나타난 유동 형태들을 Fig. 3(a)-3(e)에 나타내었다. Fig. 3(a)는 Fig. 2(a)에서 보여주는 한 쌍의 나선형 노드를 지나는 A-A' 선에 입사 된 레이저 단층 평면상에 나타난 유동특성을 보여 준다. 한 쌍의 역회전 와류로 이해되는 두개의 밝은 점이 Fig. 3(a)를 통해서 분명하게 보인다. 결과적으로 이러한 와류가 Fig. 2(b)에서 보여주고 있는 한 쌍의 나선형 노드에 부착되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 유한 실린더 상면표면에 소용돌이 형 유동 형태가 존재한다고 언급한 Kawamura 등⁽⁶⁾의 관찰과 일치된 결과를 보여준다.

Figs. 3(b)-3(e)는 Fig. 2(a)의 B-B', C-C', D-D', 그리고 E-E' 선들에 입사되는 레이저 단층상에 나타나는 각각의 유동의 형태를 보여주며, 유한 실린더 상면표면 위로 나타난 3 차원적 와류의 하류 방향으로의 발달을 보여준다. 특히, Figs. 3(c)-3(e)로부터 유한 실린더 상면표면 위로 존재하는 한 쌍의 토네이도 형 와류와 함께 실린더 상면좌우 양

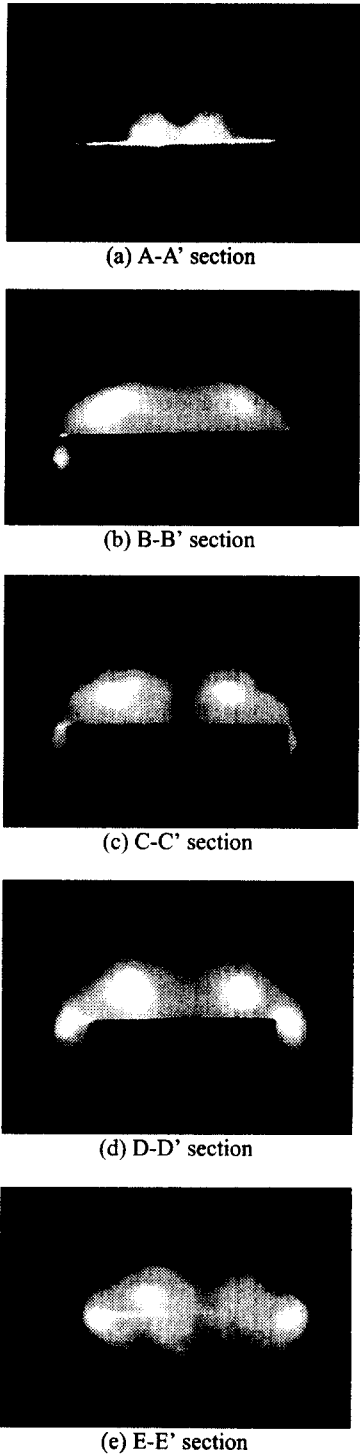


Fig. 3 Cross-sectional flow patterns for $Re_d = 1.48 \times 10^5$ at $AR = 1$

쪽으로 한 쌍의 와류가 존재하는 것이 관찰된다.

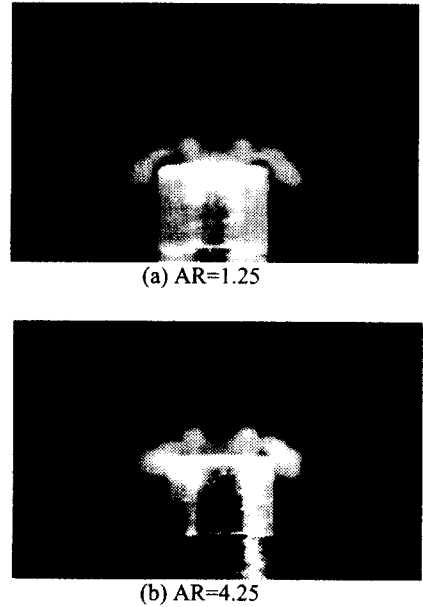


Fig. 4 Cross sectional flow patterns on D-D' section for $Re_d = 5.92 \times 10^3$

이러한 유한 실린더 상면좌우 양쪽에서 관찰되는 한 쌍의 와류의 존재는 Etzold 와 Fiedler,⁽⁵⁾ Kawamura et al.,⁽⁶⁾ 그리고 Zdravkovich et al.⁽¹⁴⁾의 연구결과에서도 발견되며, 특히 Kawamura et al.⁽⁶⁾은 이러한 한 쌍의 와류를 “홀림 끝단 와류”라고 하였다. 또한, 레이저 단층 가시화를 통해서 두개의 내부 와류구조(한 쌍의 토네이도 형 와류)가 실린더 상면의 나선형 노드를 떠날 때 갑자기 굽어지는 것이 관찰 된다. 이러한 경향은 반구주위 유동에 관한 연구 (Hsieh 와 Wang⁽¹⁵⁾)에서도 역시 찾아볼 수 있다.

Fig. 3의 레이저 단층 가시화 결과로부터 유한 실린더 상면표면 주위로 두개의 토네이도 형 와류 와 두 개의 양쪽끝단 홀림 와류(side tip trailing vortices)가 병합 (merging) 이나 상면표면으로의 재부착 없이 하류 방향으로 흘러가는 간다는 사실을 알 수 있다. 유한 실린더 상면표면 주위로 나타나는 이러한 유동구조가 작은 레이놀즈 수에서도 나타나는지를 확인하기 위하여, 레이저 단층 가시화 실험이 추가적으로 세장비 1.25, 레이놀즈수 5.92×10^3 에서 수행되었다.

Fig. 4(a)는 이러한 유동조건에서도 Fig. 3에서 보여주는 유한 실린더 상면표면 주위 유동구조가 그대로 유지 된다는 사실을 보여준다. Fig. 2에서 나타나는 유한 실린더 상면표면에 분포하는 특이 점들의 존재와 Fig. 3에서 보여주는 각각의 레이저 단층에 나타난 유동형태의 중합은 유한 실린더 상면표면 주위를 지나는 3 차원적 유동구조의 위상적 (topological) 이해를 가능하게 해준다. Fig. 5는

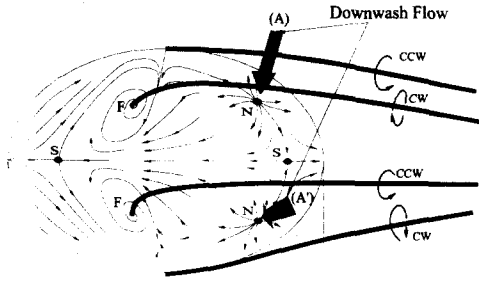


Fig. 5 Topological flow pattern over the free end

유한 실린더 상면에 나타나는 두 개의 나선형 노드로부터 유출되는 한 쌍의 토네이도 형 와류와 실린더 양 측면에서 발달하여 하류로 진행되는 한 쌍의 끝단 와류를 보여준다. 특별히 Fig. 5에서 나타나는 각 와류의 회전방향은 레이저 가시화 실험을 통해서 나타나는 와류의 회전방향과 유막 가시화시 유막의 이동경로를 통하여 나타난 한 쌍의 눈의 회전 방향을 고려하여 얻은 결과이다. 또한 Fig. 4를 통하여 토네이도 형 와류와 양쪽 끝단 와류 쌍과 같은 각각의 와류 쌍들이 서로 쌍 회전하는 것을 알 수 있다.

유한 실린더 상면표면을 지나는 3 차원적 와류 구조가 Fig. 2에서 나타나는 상면표면에서의 특이점들과 관련된다는 사실은 주목할 만하다. 실린더 상면부에 나타나는 와류의 회전방향과 실린더 상면부에서의 각각의 위치(Fig. 5)를 고려할 때 토네이도 형 와류와 양쪽 끝단 와류쌍 사이에 다운워시(down-wash flow)가 생겨 실린더 상면표면에 충돌할 것으로 것으로 생각된다. Fig. 5의 화살표(A)와 (A')는 실린더 상면을 때리는 다운워시를 보여준다. 이러한 토네이도 형 와류와 양쪽 끝단 와류쌍에 의해 유도되는 다운워시가 유막 가시화로부터 나타나는 유한 실린더 상면 끝단 근처에 존재하는 한 쌍의 부착 노드(attachment nodal points)를 생성시킨 것으로 여겨진다. 또한, 상면 후반부에 존재하는 안장점은 이러한 한 쌍의 부착 노드로부터 접근하는 흐름의 충돌로부터 조성된 것으로 보인다.

앞서 Fig. 5에서 언급한 유한 실린더 상면표면을 지나는 유동구조가 세장비가 4.25 인 경우에도 레이놀즈 수 5.92×10^3 와 1.48×10^5 에 대하여 그대로 유지됨이 확인되었는데 Fig. 4(b)와 Fig. 6은 이러한 사실을 보여준다. 결과적으로 5.92×10^3 와 1.48×10^5 와 같은 레이놀즈 수에서 세장비가 1.25, 4.25 와 같이 변화하여도 유한 실린더 상면표면을 지나는 와류 유동구조는 Fig. 5 와 같은 구조를 그대로 유지한다는 사실을 알 수 있다.

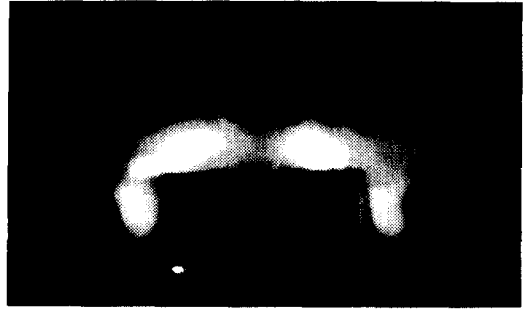


Fig. 6 Cross sectional flow patterns on D-D' section for $Re_d = 1.48 \times 10^5$ and $AR = 4.25$

4. 결론

유막 가시화 기법과 레이저 단층(laser light sheet) 가시화 기법을 사용한 실험 연구를 통하여 평판에 고정된 유한 실린더 상면표면 위로 형성되는 와류 유동구조를 조사하였다. 가시화 결과로부터 유한 실린더 상면표면에서의 유동형태는 두 개의 나선형 노드(spiral nodes)와 그 사이의 안장점(saddle point), 그리고 두 개의 부착노드(attachment nodal points)와 그 사이 박리 안장점(separation saddle point)으로 특징 지어진다라는 사실을 알았다. 더 나아가, 나선형 노드(spiral nodes)에 뿌리를 두고 하류로 흘러가는 토네이도와 비슷한 와류 쌍이 유한 실린더 상면표면 위로 병합(merging)이나 표면의 재부착 없이 양쪽 측면에서 생성되는 끝단 와류쌍(trailing tip vortex pair)과 함께 존재한다는 것이 확인되었다. 이와 같은 실험적 결과를 종합하여 유한 실린더 상면표면 위로 형성되는 유동형태를 특징 짓는 위상학적 형태(topological configuration)를 통하여 제시하였다.

참고문헌

- (1) Farivar, D., 1981, "Turbulent Uniform Flow Around Cylinders of Finite Length," *AIAA Journal*, Vol. 19, pp. 275~281.
- (2) Ayoub, A. and Karamcheti, K., 1982, "An Experiment on the Flow Past a Finite Circular Cylinder at High Subcritical and Supercritical Reynolds Numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 118, pp. 1~26.
- (3) Fox, T. A., Apelt, C. J. and West, G. S., 1993, "The Aerodynamic Disturbance Caused by the Free-Ends of a Circular Cylinder Immersed in a Uniform Flow," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 49, pp. 389~400.
- (4) Baban, F. and So, R. M. C., 1991, "Aspect Ratio Effect on Flow-Induced Forces on Circular Cylinders

- in a Cross-Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 10, pp. 313~321.
- (5) Etzold, F. and Fiedler, H., 1976, "The Near-Wake Structure of a Cantilevered Cylinder in a Cross-Flow," *Z. Flugwiss*, Vol. 24, pp.77~82.
- (6) Kawamura, T., Hiwada, M., Hibino, T., Mabuchi I. and Kumada, M., 1984, "Flow Around a Finite Circular on a Flat Plate," *Bulletin JSME*, Vol. 27, pp. 2142~2151.
- (7) Winkelmann, A. E. and Barlow, J. B., 1980, "Flowfield Model for a Rectangular Planform Wing Beyond Stall," *AIAA Journal*, Vol. 18, pp. 1006~1008.
- (8) Roh, S. C. and Park, S. H., 1998, "Flow Around the Top Surface of a Finite Circular Cylinder Mounted on a Flat Plate," *Proceedings of 4th JSME-KSME Conference*, pp. 333~336.
- (9) Narasimha, R. and Prasad, S. N., 1994, "Leading Edge Shape for Flat Plate Boundary Layer Studies," *Experiments in Fluids*, Vol. 17, pp. 358~360.
- (10) Tobak, M. and Peake, D. J., 1979, "Topology of Two-Dimensional and Three-Dimensional Separated Flows," *AIAA paper* 79~1480.
- (11) Chapman, G. T. and Yates, L. A., 1991, "Topology of Flow Separation on Three-Dimensional Bodies," *Applied Mechanics*, Rev. 44, pp. 329~345.
- (12) Hornung, H. and Perry, A. E., 1982, "Stream Surface Bifucation, Vortex Skeletons and Separation," *DFVRL IB* 222-82 A 25.
- (13) Delery, J. M., 1992, "Physics of Vortical Flows," *Journal of Aircraft*, Vol. 29, pp. 856~876.
- (14) Zdravkovich, M. M., Brand, V. P., Mathew, G. and Weston, A., 1989, "Flow Past Short Circular Cylinders with Two Free Ends," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 203, pp. 557~575.
- (15) Hsieh, T. and Wang, K. C., 1996, "Three-Dimensional Separated Flow Structure over a Cylinder with a Hemispherical Cap," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 324, pp. 83~108.