

Reynolds수와 난류강도의 변화에 따른 실린더 주위 유동 박리점의 거동에 관한 실험적 연구

임용섭* · 손동기* · 이준식** · 양경수***

(1997년 1월 3일 접수)

An Experimental Study of Flow Separation Around a Circular Cylinder with Reynolds Number and Free Stream Turbulence Intensity Variations

Yongsup Leem, Dong Kee Sohn, Joon Sik Lee and Kyung Soo Yang

Key Words : Flow Separation(유동박리), Phase Difference(위상차), Reynolds Number (Reynolds수), Turbulence Intensity(난류강도), Hot Film Sensor(박막센서)

Abstract

The influences of the Reynolds number and free-stream turbulence intensity on the flow separation behavior around a circular cylinder were investigated experimentally. The range of the Reynolds number and turbulence intensity considered are 10,000~45,000 and 0.3~6.8%, respectively. Because of ineffectiveness of using time-mean value of hot-film sensor signals in determining the separation location around the cylinder, a new method using phase-difference of hot-film sensor signals with hot-wire being located in shedding vortex is suggested. The validity of the present method is confirmed by the comparison with flow visualization.

기호 설명	그리스문자
D : 실린더의 직경	ν : 동점성 계수
f : 주파수	θ : 정체점으로부터의 각도
M : 격자 크기	τ : 시간차이
R : 상관계수	τ_0 : 위상차이
Re : Reynolds 수	τ_w : 벽전단응력
St : Strouhal 수	
t : 시간	하첨자
Tu : 난류강도, $100 \times u/U$	f : 필름 센서
U : 유동 평균 속도	w : 열선 센서
u : 난동속도	
V : 출력전압	

1. 서 론

*서울대학교 기계공학과

**회원, 서울대학교 기계공학과

***회원, 인하대학교 기계공학과

주유동 중에 놓인 원형 실린더 주위의 유동 및 열전달 문제는 공학적으로 열교환기에서부터 가스

터빈 블레이드의 설계에 이르기까지 대단히 광범위한 응용분야와 관련되며 학문적으로는 유동의 정체, 경계층의 발달, 유동의 박리, 난류로의 천이 등 유체역학 및 열전달 분야에서 다루되는 기본적인 물리적 현상들을 거의 모두 포함하고 있으므로 오래 전부터 연구의 대상이 되어 왔다. 그러나, 원형 실린더 주위의 유동 및 열전달 문제가 가장 고전적인 문제들 중의 하나임에도 불구하고 아직까지 주유동의 유동특성의 변화에 따른 실린더 주위의 유동 및 열전달 현상을 정확하게 예측할 수 있는 난류모델이 없으며 예측결과를 검증할 수 있는 실험 데이터 또한 매우 부족하다. 이는 원형실린더 주위의 유동은 기하학적 형상이 2 차원이라는 점에도 불구하고 대단히 복잡하며 Reynolds수와 주유동의 난류강도, 차폐비, 형상비, 표면조도영향 등 고려해야 할 변수들이 많기 때문에 실험이나 해석 상에 어려움이 있다. 그 중에서도 Reynolds수는 유동패턴을 결정짓는 가장 중요한 변수이다. Reynolds수의 변화에 따른 유동의 패턴을 대략적으로 구분지어 보면 다음과 같다. $Re < 5$ 일 때는 박리가 없는 층류 정상 대칭유동을 보이며 $5 < Re < 40$ 일 때는 한쌍의 와류가 박리거품을 이루게 되고 $40 < Re < 150$ 일 때는 주기적인 층류 와열을 만들어 내는데 이것이 잘 알려진 Karman 와류구조이다. $150 < Re < 10^3$ 정도에서 처음으로 후류 하류에서 난류구조를 볼 수 있으며 $10^3 < Re < 10^5$ 에서는 난류로의 천이점이 후류 상류로 이동하고 보텍스 shedding은 Strouhal수가 0.2의 값을 유지하며 일정하다. Reynolds수를 더 크게 하면 보텍스 shedding은 불규칙해지고 난류로의 천이점은 박리점보다 더욱 상류로 거슬러 올라가게 되어 층류박리거품을 형성하며 재부착된 경계층이 천이를 거쳐 난류박리 ($130^\circ \sim 140^\circ$)를 보인다. 천이점이 층류박리점 (약 80°)보다 앞서게 되면 더 이상 층류박리는 발생하지 않으며 난류박리만 존재하는 형태로 유동패턴이 변해 저항계수의 급격한 감소를 가져오게 된다.

이처럼 복잡한 실린더 주위 유동에 관해 오래 전부터 여러 변수들의 종합적 영향으로부터 각 변수들의 개별적인 영향을 구별해내고자 하는 연구들이 많이 수행되어 왔다. 실린더 유동의 경계층에 대한 연구의 예를 들면 다음과 같다. Achenbach^(1,2)는 실린더 마찰계수의 변화를 기준으로 유동의 형태를 아임계(subcritical), 임계(critical), 초임계(supercritical), 극초임계(transcritical)의 4 영역으로 나

누고 표면조도, 차폐비 등의 영향에 대한 벽면 마찰력, 열전달, 벽면압력(wall base pressure) 등의 변화를 광범위하게 연구하였다. Žukauskas등⁽³⁾은 실린더 주위의 유동에 대해 차폐비, 난류강도, Reynolds수 등의 영향을 실험적 또는 이론적으로 다양하게 연구하여 많은 결과를 얻었다. West등⁽⁴⁾은 Reynolds수 $10^4 \sim 10^5$ 사이에서 차폐비와 형상비가 실린더 주위 유동에 미치는 영향에 대해 연구하였는데 차폐비가 6% 미만일 때는 마찰계수, 압력분포, Strouhal수 등에 거의 영향이 없음을 밝혔다. Lee등⁽⁵⁾은 난류강도 및 길이스케일의 변화가 물질전달계수에 미치는 영향에 대하여 연구하여 높은 난류강도에서 박리가 지연되는 현상을 관찰하였으며 아임계 영역일지라도 주유동의 난류강도가 크면 열전달계수의 분포가 초임계영역에서의 분포와 유사한 경향을 나타내는 것을 관찰하였다. Pfeil등⁽⁶⁾은 유동의 교란이 박리거품에 미치는 영향에 대해 연구하여 박리거품이 생긴 경우에는 층류박리가 100° 까지 지연됨을 보였다.

Bellhouse등⁽⁷⁾은 박막센서를 사용하여 정성적인 데이터 해석을 통해 실린더 주위 유동의 박리 및 재부착 현상에 대하여 연구하였다. 박막센서의 신호와 벽면전단응력과의 상관관계식을 구하고 층류박리의 경우 박리점은 신호의 시간평균값이 최소가 되는 위치와 대략 일치하지만 난류박리의 경우 평균값으로는 판단이 불가능하고 교란량으로 찾아야 함을 보였다. Barbi등⁽⁸⁾은 아임계 Reynolds수에서 벽면압력을 측정하여 실린더 박리점이 80° 근처임을 확인하였고 박막센서를 사용하여 벽면전단응력의 교란량이 70° 부근에서 갑자기 커짐을 확인하였다. Pucher등⁽⁹⁾은 박막센서를 이용하여 익형에서의 박리거품에 관해 연구하였는데, 센서신호의 정성적인 해석을 통해 박리점, 재부착지점을 찾고자 시도하였다.

이전의 연구결과에서 얻은 박리점의 Reynolds수에 따른 변화를 Fig. 1에 정리하였다. 기존의 연구 결과들을 살펴보면 박리점에 대한 결과가 많지 않으며 또 산포 정도도 큰 것을 알 수 있다(Fig. 1). 그리고 대개의 실험이나 계산들은 실린더 앞부분의 유동에 치중해서 수행되었고 박리점 이후의 유동 구조에 대해서는 언급된 바가 거의 없다. 이에 본 연구에서는 기존의 박리점을 구하는 방법에서 벗어난 새로운 방법으로 박리점을 찾고, 아임계 Reynolds수 영역에 대하여 층류 박리점이 주유동

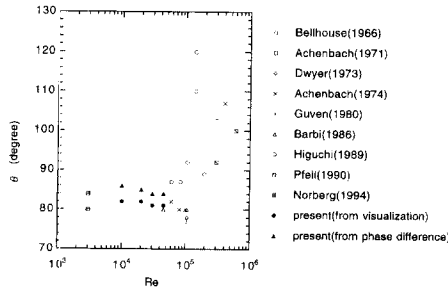


Fig. 1 Comparison of separation point results from smooth cylinder with low free-stream turbulence intensity.

의 난류강도와 Reynolds수에 따라 어떤 거동을 보이는지 알아보고 박리점 이후의 유동구조에 대해서도 고찰하였다.

2. 실험장치

실험에 사용한 풍동은 최대속도가 30 m/s인 개방형 풍동으로서 9:1의 수축노즐을 지난 풍동출구의 단면은 가로 (W) 225 mm, 세로 (H) 138 mm이다. 풍동의 유속이 10 m/s 일 때 유속의 공간 균일도는 노즐 경계층을 제외하고 0.4% 이내이며, 주유동방향 난류강도는 0.3% 이하이다. 열선유속계와 박막센서를 이용한 유동의 변동성분 측정에서 유동온도 변화에 의한 측정오차를 줄이기 위해 주유동의 온도 변화량을 0.2 °C로 유지하였다. 온도 측정에는 백금 저항온도계를 사용하였다. 주유동의 난류강도를 변화시키기 위해 격자(grid)를 제작하였다. 격자는 단면이 원형인 황동봉을 이용하여 두 가지로 제작하였는데 봉직경 (d)은 각각 2.5 mm와 5 mm이다. 봉 사이의 간격 M 은 각각 10 mm, 20 mm로서 공극율(porosity)은 0.56로 일정하다. 격자가 설치된 위치로부터 시험 실린더까지의 거리는 275 mm이다. 아크릴로 제작한 시험부의 크기는 풍동 출구 단면의 크기와 동일하고 시험 실린더의 직경 (D)은 30 mm이고 축방향으로의 길이 (l)는 138 mm로서 형상비(aspect ratio, l/D)는 4.5, 차폐비(blockage ratio, D/W)는 12%이다. 실린더의 표면에는 박막센서를 실린더의 축방향으로 접착제를 이용하여 붙였다. 박막센서는 두께 50 μ m, 길이 90 mm, 폭 3 mm의 캡톤(kepton) 기층에 니켈을 진공증착시킨 것으로 Dantec사에서 제작된 것이다. 센서에 해당하는 니켈부분은 길이가 3 mm, 폭

이 0.1 mm로서 30 mm 실린더를 기준으로 각도분해능은 실린더 원주 방향으로 0.2°이다. 실린더를 회전시켜가며 정체점으로부터 시작하여 10°간격으로 측정하고 박리점 부근이나 역류지점에서는 1°간격으로 측정을 수행하였다. 유동의 교란을 최소화하기 위해 인출선은 실린더의 안쪽을 통해 밖으로 뽑아 내었다. 실린더의 하류에는 보텍스셰딩을 관찰하기 위해 I형 열선을 설치하였다. 사용한 열선은 길이 1.5 mm, 직경 5 μ m로 형상비는 300이고 텅스텐으로 만들어 졌다. 열선은 보텍스셰딩이 가장 잘 관찰되는 곳에 위치시켰는데 대략 실린더 중심으로부터 1D 하류방향, 1D 폭방향의 위치이다. 열선과 박막센서의 냉저항은 각각 5.5 Ω 과 18 Ω 이며 과열비(over heat ratio)는 1.5로 하였다. 열선과 박막센서의 아날로그 신호는 컴퓨터에 내장되어 있는 A/D변환기(Data Translation, DT 2838)를 통해 채널당 10 kHz로 샘플링하였다.

본 실험은 4 가지의 Reynolds수와 각 Reynolds수에서 3 가지의 주유동의 난류강도에 대하여 수행하였다. 주유동의 난류강도는 격자와 Reynolds수에 따라 달라지게 되는데 각 실험경우에 대한 유동조건은 Table 1에 정리하였다.

3. 신호처리 및 해석방법

실린더 박리점은 여러 가지 방법들에 의해서 구할 수 있다. 열선을 이용해 실린더 경계층 내부에서의 속도를 측정하여 구할 수도 있고 벽면전단응력의 최소값으로 판정할 수도 있으며 오일, 연기, 수소거품을 이용한 가시화를 통하여 구하기도 한다. 또한 압력계수의 변곡점으로부터 박리점을 정하는 경우도 있다.

일반적으로 CTA (Constant Temperature Anemometer) 브리지를 통과한 박막센서의 신호는 다음과 같은 관계식에 의해 벽면전단응력으로 교정(calibration)할 수 있다.

$$\tau_w^{1/3} = a + bV^2 \quad (1)$$

여기서 τ_w 는 벽면전단응력이며 a , b 는 상수이다. 실제 위 관계식을 적용하기 위해서는 센서 부근의 유동이 2차원적이어야 하며 층류경계층이어야 하고 정상유동에서 압력구배가 없어야 한다. 또한, 열경계층의 두께보다 속도경계층의 두께가 훨씬 두꺼워야하며 수직방향속도는 주유동방향의 속

Table 1 Information of experimental conditions.

Run	Free-stream velocity U_∞ [m/s]	Turbulence intensity Tu[%]	Vortex shedding frequency f [Hz]	Reynolds No. $Re = U_\infty D / \nu$	Strouhal No. $St = fD / U_\infty$
1	5	0.3, 4.5, 7.0	35.5	10,000	0.212
2	10.1	0.3, 3.6, 5.8	69	20,000	0.205
3	15.3	0.3, 3.1, 5.3	105	30,000	0.206
4	23.2	0.3, 2.9, 4.8	158	45,000	0.204

도에 비해 무시할 만큼 작아야 한다. 또한 센서의 가열에 의한 열후류도 무시할 수 있어야 한다. 이러한 박막센서의 교정과정의 어려움으로 해서 여러 사람들의 연구대상이 되어 왔다. Alfredsson 등⁽¹⁰⁾은 박막센서를 이용하여 경계층 내부에서 벽면전단응력의 교란양을 측정하였는데 박막센서를 사용할 때 유동에 의한 열손실보다 보체로의 전도에 의한 열손실이 더 클 경우에는 정상상태 교정으로 동적인 응답을 측정하기가 어렵다는 것을 밝히고 있으며 교란량의 크기(RMS level)도 실제보다 훨씬 작게 나타난다는 것을 지적하고 있다. 특히 이러한 경우 보체의 큰 열용량으로 인해 동적응답 측정시 낮은 전압에서는 큰 손실을, 높은 전압에서는 작은 손실을 초래하므로 정상상태 보정식을 쓸 수 없게 되는 문제점이 있다는 것을 지적하였다. Cook⁽¹¹⁾은 난류경계층에서 박막센서의 응답특성에 관해 연구하였다. 벽면삽입형 박막센서를 공극(cavity)형, 기층(substrate)형의 두 종류로 만들어 실험한 결과 공극형의 동적응답특성이 더 우수함을 보였다. Davies 등⁽¹²⁾은 박막센서의 교정에 대해 연구하여 1차원 가정에 대한 수정을 제시하였다. Duffy 등⁽¹³⁾은 박막센서를 이용해 평판, 실린더, 익형에서 벽면전단응력을 측정하였는데 실린더 유동에서 정체점 부근의 경우 교정시 압력구배를 무시함으로 해서 발생하는 오차는 0.3%이하라고 밝히고 있다. Bellhouse 등⁽⁷⁾은 박막센서 응답신호의 평균값의 최소위치를 벽면전단응력이 0이 되는 지점이라 생각하여 실린더 박리점으로 추정하였다. 그러나 이는 일반적으로 알려져 있는 이윽게 Reynolds수 영역에서의 실린더 층류 박리점인 80°와는 상당한 차이를 보일 뿐만 아니라 비교대상으로 측정한 스탠튼 튜브(stanton tube)로 잰 박리점과도 5°이상 차

이 나는 것이었다. 여기에 대한 설명을 위해 비정상 박리에 관한 연구들을 살펴볼 필요가 있다. Dwyer 등⁽¹⁴⁾의 연구에 따르면 보텍스쉐딩 사이클 동안 박리점은 실린더 상에서 75°에서 85°사이에서 움직이며, 75°를 박리의 시작, 805°를 박리의 끝이라고 가정하였다. Higuchi 등⁽¹⁵⁾은 임계 Reynolds수에서 실린더 주위 유동의 3차원 구조와 비정상 박리에 대해 연구하였다. 유동방향 감지센서인 표면펜스프루브(surface fence probe)를 이용해 유동의 방향이 주유동과 같은 방향이 되는 시간과 반대방향이 되는 시간을 분율로 구해본 결과 Reynolds수 1.02×10^5 에서 82°이전은 모두 같은 방향, 92°이후는 모두 반대방향을 보이며 그 사이에서는 같은 방향이 되는 시간분율이 서서히 줄어들고 있음을 보였다. 이와 같이 실제 실린더 유동의 박리점은 어느 한 지점에 고정된 것이 아니라 10° 정도의 폭을 가지고 움직이고 있다. 그런데 실린더의 박리점 근처 어느 한 곳에 위치한 센서는 벽면전단응력의 시간평균값을 표시해 줄 뿐이다. 이런 점에서 본다면 센서신호 평균값의 최소 위치를 박리점으로 추정하는 것은 옳지 않으며 오히려 Dwyer 등⁽¹⁴⁾의 연구에서 말하는 ‘박리의 끝’으로 추정하는 것이 옳음을 알 수 있다.

본 실험에서는 장착이 용이한 벽면전단응력 측정센서인 박막센서를 이용하지만, 직접 전단응력을 측정하여 박리를 예측하는 것은 앞에서 말한 바와 같이 그 교정에 어려움이 있다. 따라서 다음에서 설명하는 바와 같이 실린더에서 보텍스쉐딩으로 인해 발생하는 유동장 변화의 위상변화를 측정하고 이를 통해 실린더 박리점 및 박리 이후의 유동구조에 대한 정보를 얻었다.

박리점 전의 층류 경계층 영역에 위치한 박막센

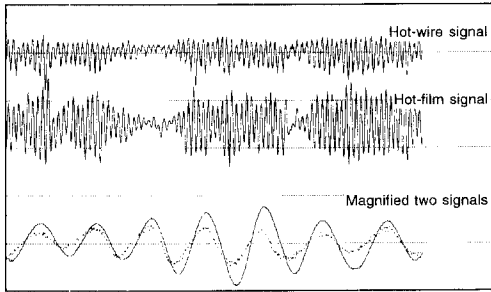


Fig. 2 Time trace of the signals from hot-film positioned in front of the boundary layer separation and hot-wire positioned in the wake region at $Re=20,000$ and $Tu=0.3\%$.

시와 후류영역에 놓인 열선으로부터 나오는 신호를 Fig. 2에 나타내었는데 사인곡선과 유사하게 진동하며 진동 주파수는 실린더의 보텍스 shedding 주파수와 동일하다는 것을 알 수 있다. 주기적인 유동의 박리로 인해 경계층 내부의 유동이 그 영향을 받게 된다. 이로 인해 실린더의 어느 한 지점에 부착된 센서로부터 나오는 신호는 주기성을 갖게 된다. 박막센서와 열선의 신호는 주파수는 같지만 그 위상에서 차이를 보인다. 따라서 이러한 위상차를 알아 보기 위하여 다음 식으로 표시되는 두 신호간의 상관계수, $R_{f,w}$ 를 구하였다.

$$R_{f,w}(\tau) = \frac{u'_f(t)u'_w(t+\tau)}{\sqrt{u'^2_f(t)}\sqrt{u'^2_w(t+\tau)}} \quad (2)$$

여기서 u'_f 는 박막센서 신호의 요동성분이고 u'_w 는 열선신호의 요동성분이다. 상관계수를 구할 때 수렴성을 검증하여 데이터의 갯수를 결정하여야 한다. 데이터 수가 적으면 상관계수값이 수렴하지 않은 값이어서 문제가 되고 필요 이상으로 많은 경우에는 계산 시간이 많이 걸리므로 비효율적이다. 수렴성 테스트를 통하여 데이터수는 128×1024 개가 가장 적합한 것으로 나타났다. 상관계수값이 최대가 되는 시간, τ_0 는 위상차이의 시간평균값이라고 볼 수 있다. 실린더상의 위치에 따라 위상차이가 달라지게 된다. 이러한 위상차이는 실린더 하류의 보텍스shedding의 영향이 상류로 전파되는 시간에 해당하는 것으로 볼 수 있다. 보텍스shedding은 실린더 유동의 경계층이 떨어져 나가 생기는 현상이므로 하류의 영향이 실린더 표면으로 전파되는 것은 실린더의 박리점을 원점으로 하여 양 방향으로 진행하리라는 것을 생각할 수 있다. 실제 상관계수를 구

하여 각도별로 비교해 보면 박리점 근처에서 위상차이의 변화량이 양의 값에서 음의 값으로 바뀌고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 지점을 실린더 유동의 박리점으로 정의하였다. 다른 방법들은 유동의 특성을 이용하여 벽전단응력이나 압력계수 등으로부터 박리점을 찾아내는 간접적인 방법을 사용하지만 본 연구에서 사용된 방법은 유동의 방향으로부터 직접 박리점을 찾아낸다는 장점을 가지고 있다. 위상차이로부터 찾아낸 박리점을 가시화를 통하여 확인하였다. 실리콘오일과 산화제이철을 이용한 유막법으로 실린더 표면 유동을 가시화하였다. 유막법은 밀려 모인 오일로 인한 유동교란을 일으킬 수 있고 또 모여든 유막들이 중력 방향으로 흘러내리는 등의 단점으로 박리점을 명확하게 구분해 내기는 힘들지만 방법이 간단하여 많이 이용되고 있다. 일반적으로 유막법에 의한 가시화는 주유동의 속도가 10 m/s 이상 될 때 사용하기 적당한 방법이라고 알려져 있다. 물체 표면의 전단응력이 유막들을 밀어내기에 충분한 정도로 커야하기 때문이다. 본 실험에서는 유막법에 의한 가시화시 일반적으로 관심을 두는 층류박리점, 박리기폭, 난류박리점 이외에도 박리 이후의 재순환 유동에 의해 생긴 것으로 추정되는 유막선들을 관찰하였으며, Reynolds수에 따른 이들의 거동도 고찰하였다. 가시화에 의해서 확인되는 유막선들의 위치와 위상차이의 증감이 바뀌는 위치들이 어느정도 범위내에서 일치하는 것을 관측할 수 있었으며 이에 따라 위상차의 변화에서부터 실린더 표면 유동을 알아볼 수 있음을 확인하였다.

4. 실험결과 및 토의

난류발생을 위한 격자를 설치하였을 경우에 주유동의 난류강도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 이 분포는 실린더를 설치하지 않았을 때의 난류강도분포이다. 실린더를 설치하였을 경우 난류강도분포는 실린더 중심으로부터 3D 상류에서부터 영향을 받게 되므로 실험조건으로는 실린더 중심으로부터 3D 상류에서의 난류강도를 표시하였으며 이는 Table 1에 정리되어 있다. 실린더 중심은 격자 1을 사용할 경우에는 $x/M=27.5$ 에 위치하고 격자 2를 사용할 경우에는 $x/M=13.75$ 에 위치한다.

박막센서로부터 나온 신호의 전형적인 형태를 시간영역과 주파수영역에 대하여 Fig. 4에 나타내었

다. 각 신호는 아래와 같은 공통적인 특성이 있음을 알 수 있다.

(1) 정체점영역(0°)에서는 보텍스 shedding에 따라서 정체점이 이동하며 유동의 방향이 바뀌게 되며, 박막센서가 경계층내에서의 유동방향을 감지하지는 못하므로 신호의 변동 성분은 shedding주파수의 2 배에 해당하는 주파수를 가지게 된다. 정체점 지역의 끝에 해당하는 3° 근처에서 2 배의 신호가 사라지고 있다.

(2) 두 번째 영역은 45° 근처로서 센서신호의 변동성분이 약해진다. 이 영역은 역압력구배가 나타나는 영역으로 주유동이 가속되며 그로 인해 교란 성분이 줄어들게 된다. 또한 이 지역은 벽면전단응력 분포에서 평탄부에 해당한다.

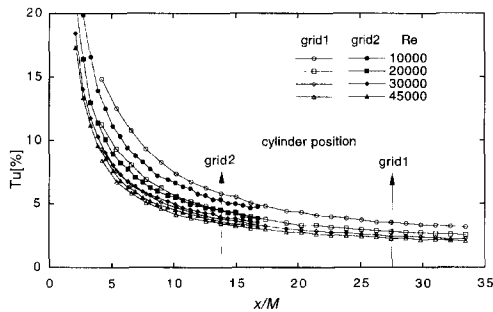
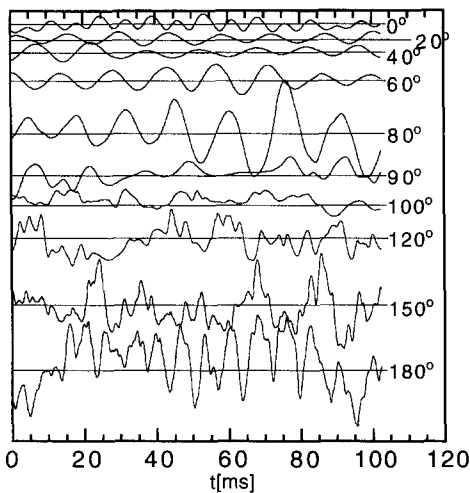
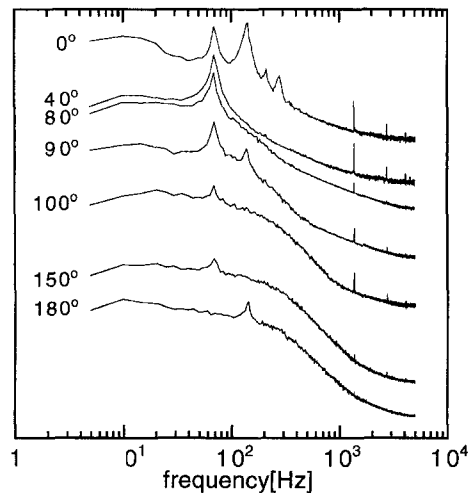


Fig. 3 Turbulence intensity profiles(—, location of cylinder center when grid 1 is used; - - -, location of cylinder center when grid 2 is used).



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 4 Variation of hot-film signal in time domain and frequency domain at Re=20,000 when grid 1 is used.

(3) 80° 근처에서는 센서신호의 교란량이 갑자기 커진다. 이 위치는 평균벽면전단응력에 강한 구배가 나타나는 곳이다. Reynolds수가 10⁵에 이를 때까지 동일한 현상이 관찰되는데 이는 이전에 발표된 보고들을 통해서도 알 수 있다.

(4) 네 번째 영역은 벽면전단응력이 0이 되는 곳으로 정체점에서의 값이 기준이 되며 대략 90° 근처이나 Reynolds수에 따라 조금씩 이동하고 있다. 이 근처에서 다시 shedding주파수의 2 배에 해당하는 주파수를 가진 신호를 볼 수 있다. 이는 실린더 유동 박리점의 주기적인 이동과 상관이 있는 것으로 보여진다.

(e) 90° 이후로는 박리된 경계층의 전형적인 높은 주파수의 교란으로 인해 주기적인 신호는 많이 약해지고 있음을 알 수 있다. 그러나 센서의 신호를 주파수 영역으로 바꿔보면 150° 이후까지도 shedding주파수의 특성이 나타남을 알 수 있다. 위 사실들은 Barbi등⁽⁸⁾의 연구와 대체로 일치하는 것이다.

교정하지 않은 박막센서의 신호도 실린더 원주방향으로의 벽면전단응력의 분포와 유사한 거동을 보인다. 대표적으로 격자 1에 대하여 Reynolds수의 변화에 따른 시간평균값과 RMS값의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 가시화 결과와 비교하였을 때 시간평균값의 최소위치가 90°~95° 정도로 나타나며 이는 가시화에서 나타난 박리점인 80°~82°와는 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 60 전후로 하여 시간평균값은 최대값을 가지며

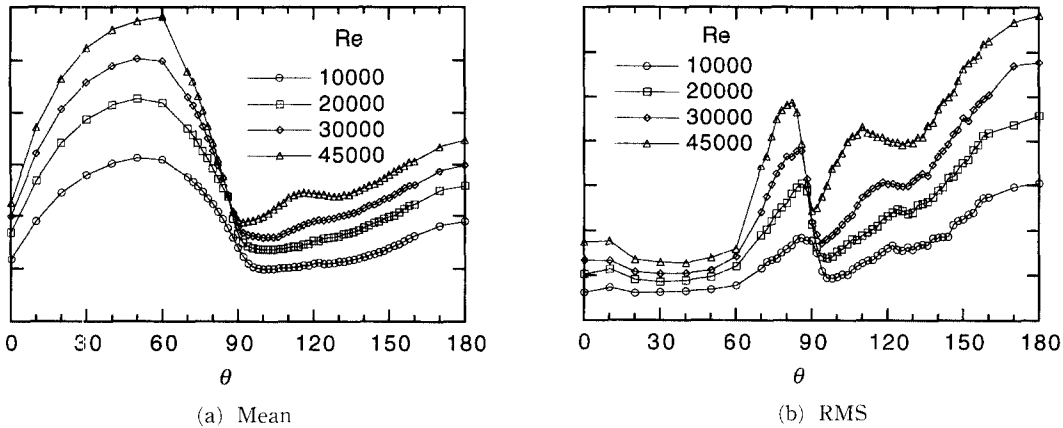


Fig. 5 Mean and RMS values of hot-film signals at Re=20,000 when grid 1 is used.

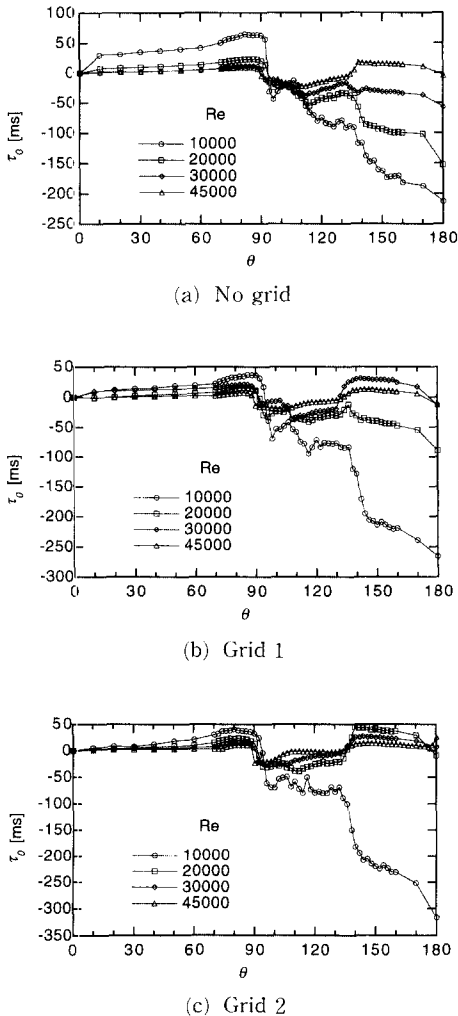


Fig. 6 Phase difference profiles around the cylinder.

여기에서부터 RMS값이 급격히 증가하게 된다.

Fig. 6에 위상차를 실린더의 원주방향을 따라 도시하였다. 이로부터 실린더의 박리점을 구하여 기존의 연구와 비교한 것을 Fig. 1에 나타내었다. 위상차이가 증가에서 감소로 변화하는 지점이 박리점에 해당한다. 박리점 부근에서는 위상차이의 변화가 매우 작게 나타나고 있다. 박리점의 상류에서의 유동은 구석유동과도 유사하여 박리점에서 유동의 속도가 매우 작기 때문에 위상차이의 변화도 작게 나타나게 된다. 본 연구에서 구한 박리점들은 어느 정도 다른 결과들과 비슷한 범위 안에 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 1에 나타낸 결과들은 낮은 난류강도에서 실린더 표면에 조도가 매우 낮은 경우에 대한 것들이다. 본 연구의 결과는 층류박리에 해당하는 Reynolds수 10,000~40,000 범위안에 있다. Reynolds수 100,000에서부터 박리점은 하류로 이동하기 시작한다.

Fig. 7에 Reynolds수의 변화와 난류강도의 변화에 따른 박리점의 위치를 표시하였다. 박리점은 80°에서 85° 사이에서 관찰되고 있다. 난류강도가 작은 경우인 격자가 없는 경우와 격자 1의 경우에는 Reynolds수가 커짐에 따라 조금씩 실린더의 정체점 쪽으로 이동하고 있으나 본 연구에서 박리점 부근에서 1° 간격으로 측정하였으므로 이 결과에서 박리점이 난류강도의 영향을 받는다고 볼 수는 없다. 주유동의 난류강도가 높은 격자 2의 경우에는 Reynolds수가 커짐에 따라서 박리점이 지연되고 있으나 그 변화량이 작다. 본 연구에서 난류강도의 변화에 대한 일정한 경향을 얻을 수가 없었던 것은 난류강도 외에 주유동의 스케일이 박리점의 이

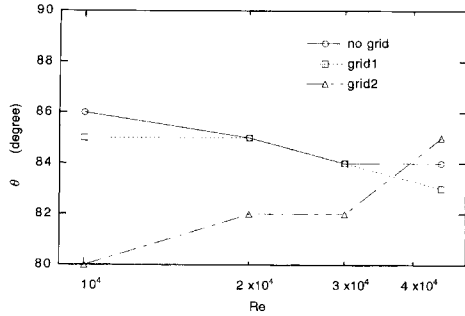


Fig. 7 The effect of free-stream turbulence on the flow separation.

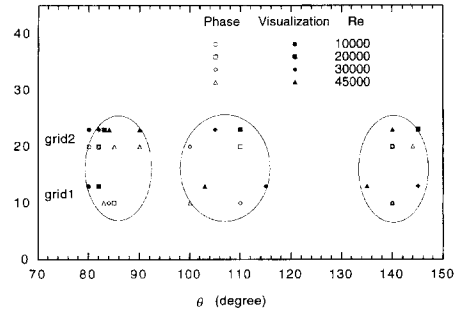


Fig. 8 Comparison of the flow reversal lines from phase difference and flow visualization.

등에 영향을 준 것 때문으로 보인다. 난류강도가 증가함에 따라 Fig. 5에서 박막센서 신호의 시간평균값이 최소가 되는 위치 또한 정체점쪽으로 이동하고 있으나 90° 이후에서 변하고 있다. 박막센서 신호의 시간평균값이 최대가 되는 위치는 Reynolds수의 증가에 따라 50° 부근에서 60° 부근으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 그에 따라 시간평균값의 감소구배는 Reynolds수가 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Reynolds수가 커짐에 따라 이 영역에서 가속이 커지게 되어 일어나는 것으로 설명될 수 있을 것이다. RMS값의 최대위치 또한 Reynolds수의 증가에 따라 실린더 정체점쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있는데 본 실험에서 추정된 박리점의 위치와 거의 비슷함을 알 수 있다. Higuchi등⁽¹⁵⁾에 의하면 경계층이 박리될 때의 비정상상태의 유동현상으로 인해 RMS값이 커지거나, 실린더 표면에서의 박리점의 이동에 의해서 RMS값이 커진다고 한다. 그러나 RMS값의 최대 위치는 측정하는 센서의 경계층내에서의 위치, 경계층의 두께에 따라 다르게 된다. Žukauskas등⁽³⁾은 열선을 이용하여 실린더 경계층내 유동의 요동성분을 실린더 원주방향을 따라 측정된 결과, 센서의 반경방향 위치가 0.02 mm~3 mm까지 변함에 따라 요동성분의 최대 위치는 90°~110°로 하류로 이동함을 관찰하였다. 박막센서 신호의 시간평균값을 보면 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 공통적으로 90°근처에서 최소값을 가진다. 난류강도가 낮은 경우는 Reynolds수에 관계없이 최소값을 가진 후 단순증가하는 경향을 보인다. 그러나 난류강도가 증가됨에 따라 최소값을 가진 이후의 변화가 달라진다. 그림에서 보는 바와 같이 격자 1의 경우 Reynolds수 45,000에서는 90°에서

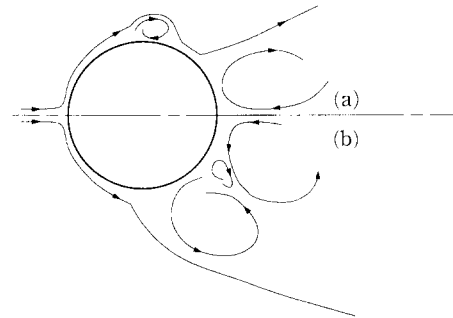


Fig. 9 Schematic description of the flow pattern.

첫번째 최소값을 가진 이후 바로 값이 다시 증가하기 시작하며 110°를 정점으로 감소하며 135° 부근에서 두번째 최소값을 가짐을 관찰할 수 있다. 격자 2의 경우에는 Reynolds수 30,000에서부터 이같은 경향을 보인다.

가시화 결과에서 보이는 선들의 위치와 위상차이의 증감이 바뀌는 위치들을 Fig. 8에 도시하였는데 앞에서 말한 후류 영역에서의 유동현상의 변화를 이를 통하여 설명할 수 있다. 가시화 결과에서 보이는 선들의 위치나 위상차이의 증감이 바뀌는 위치는 실린더 표면에서의 유동의 방향이 바뀌는 지역인데, 이러한 현상은 두 가지 형태로 설명될 수 있다. 첫째, Fig. 9의 (a)에 나타낸 바와 같이 박리된 경계층내에서 난류로의 천이가 발생하여 경계층이 재부착되면서 박리거품이 발생한 것으로 설명할 수 있다. 즉 주유동의 난류강도가 낮을 때는 박리된 경계층내에서 난류로의 천이가 발생하지 않았으나 난류강도가 높을 때에는 주유동의 큰 요동성분이 박리된 경계층내로 전달되어 경계층교란이 커져 이로 인해 경계층 안정성이 떨어지게 되고 이에 따라 난류로 천이하게 된다. 천이된 난류경계층의 증

가된 전달에너지는 경계층을 두껍게 만든다. 이렇게 두꺼워진 경계층이 실린더 표면쪽으로 계속 확대되며 마침내 재부착된다. 재부착된 난류경계층은 실린더의 하류로 계속 진행하게 되면 더 큰 역압력 구배를 겪게 되어 난류박리가 일어나게 된다. 둘째로는 Fig. 9 (b)에 보이는 바와 같이 박리점 이후의 재순환류의 강도가 커져 하나의 재순환류가 아니라 여러 개로 쪼개어진 재순환류에 의하여 이와 같은 결과를 보인다고 설명할 수 있다. 난류강도의 증가는 운동량 전달 에너지의 증가를 가져와 재순환류로의 주유동의 운동에너지 전달량을 크게 한다. 이로 인해 재순환류의 강도가 커지게 되고 이것이 어느 수준에 도달하면 붕괴가 일어난다. 가시화 결과로부터 Reynolds수의 변화와 주유동의 난류강도 변화에 따라 박리점 이후의 경계층내에서의 재순환류가 존재하며 그 위치나 크기가 변하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 이러한 위치들과 위에서 말한 평균값의 패턴이 변하는 것도 밀접한 연관을 지니고 있다는 것을 알 수 있다. Reynolds수에 따라 조금씩 차이가 있기는 하지만 주유동의 난류강도가 5%인 경우 박리점후의 두번째 라인이 Reynolds수의 증가에 따라 110° 근처에서 90° 근처로 이동하고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 고정된 Reynolds수에서 주유동의 난류강도 변화에 의해서도 동일하게 관찰된다. 세번째 라인은 Reynolds수의 증가나 난류강도의 변화에 따라 뚜렷한 경향성을 보이지는 않았다.

이상과 같은 유동현상에 대한 구체적인 설명을 위해서는 경계층의 유동방향, 재순환류들에 대한 측정이 따라야 하고 또 전체 유동장을 보여줄 수 있는 가시화 실험이 뒷받침되어야 할 것이다.

5. 결 론

- (1) 보텍스 웨딩으로 인해 발생하는 경계층내 운동성분 위상차를 이용해 박리점을 찾았으며 박막센서 신호의 시간평균값의 최소 위치로 정한 박리점보다 가시화 결과와 더 잘 일치하였다.
- (2) 낮은 난류강도에서 실린더 유동의 박리점은 Reynolds수의 증가에 따라 상류로 이동함을 관찰하였다.
- (3) 본 연구의 조건인 5% 이내 난류강도 변화에 의해서는 뚜렷한 박리점 이동경향을 발견할 수 없었다.

(4) 난류강도의 증가에 따라 박리점 이후 재순환류들은 상류로 이동함을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 1995년도 교육부 학술연구조정비(기계공학 ME 95-b-09)의 지원으로 수행된 연구결과 의 일부입니다.

참고문헌

- (1) Achenbach, E., 1971, "Influence of Surface Roughness on the Cross-Flow Around a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 46, pp. 321~335.
- (2) Achenbach, E., 1975, "Total and Local Heat Transfer from a Smooth Circular Cylinder in Cross-Flow at High Reynolds Number," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1387~1396.
- (3) ukauskas, A. and iug zda, J., 1985, *Heat Transfer of a Cylinder in Crossflow*, Hemisphere Publishing.
- (4) West, G. S. and Apelt, C. J., 1982, "The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers Between 104 and 105," *J. Fluid Mech.*, Vol. 114, pp. 361~377.
- (5) Lee, J. S., Sohn, D. K. and Lee, T. H., 1994, "Simultaneous Effects of free-Stream Turbulence Intensity and Integral Length Scale on Mass TGransfer About a Cylinder," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, pp. 225~232.
- (6) Pfeil, H. and Orth, U., 1990, "Boundary-Layer Transition on a Cylinder with and Without Separation Bubbles," *Experiments in Fluids*, Vol. 10, pp. 23~32.
- (7) Bellhouse, B. J. and Schultz, D. L., 1966, "Determination of Mean and Dynamic Skin Friction, Separation and Transition in Low-Speed Flow with a Thin-Film Heated Element," *J. Fluid Mech.*, Vol. 24, pp. 379~400.
- (8) Barbi, C., Favier, D. P., Maresca, C. A. and Telionis, D. P., 1986, "Vortex Shedding and Lock-on of a Circular Cylinder in Oscillatory Flow,"

- J. Fluid Mech.*, Vol. 170, pp. 527~544.
- (9) Pucher, P. and Ghil, R., 1987, "Experimental Study of Boundary Layer Separation with Heated Thin-Film Sensors," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 303~309.
- (10) Alfredsson, P. H. and Johansson, A. V., 1988, "The Fluctuating Wall-Shear Stress and the Velocity Field in the Viscous Sublayer," *Phys. Fluids*, Vol. 31, pp. 1026~1033.
- (11) Cook, W. J., 1994, "Response of Hot-Element Wall Shear Stress Gauges in Unsteady Turbulent flows," *AIAA J.*, Vol. 32, pp. 1464~1471.
- (12) Davies, M. R. D. and Duffy, J. T., 1995, "A Semi-Empirical Theory for Surface Mounted Aerodynamic Wall Shear Stress Gauges," *ASME 95-GT-193*.
- (13) Duffy, J. T., Davies, M. R. D. and Hamilton, L., 1995, "The Calibration of a Surface Mounted Aerodynamic Wall Shear Stress Gauge in Laminar Flow with a Free-Stream Pressure Gradient," *ASME 95-GT-127*.
- (14) Dwyer, H. A. and MacCroskey, W. J., 1973, "Oscillating Flow Over a Cylinder at Large Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, pp. 753~767.
- (15) Higuchi, H., Kim, H. J. and Farell, C., 1989, "On Flow Separation and Reattachment Around a Circular Cylinder at Critical Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp. 149~171.
- (16) Norberg, C., 1994, "An Experimental Investigation of the Flow Around a Circular Cylinder: Influence of an Aspect Ratio," *J. Fluid Mech.*, Vol. 258, pp. 287~316.
- (17) Gven, O., Farell, C. and Patel, V. C., 1980, "Surface-Roughness Effects on the Mean Flow Past Circular Cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol. 98, pp. 673~701.