

〈논 문〉

He-Ne 레이저를 이용한 표면전단응력 측정에 관한 연구

최 승 호* · 이 열**

(1997년 1월 16일 접수)

Skin Friction Measurements Using He-Ne Laser

Seung-Ho Choi and Yeol Lee

Key Words : Laser Interferometer (레이저 간섭계), Skin Friction Measurement (표면마찰력 측정), Oil-Film (오일막), Boundary-Layer (경계층), Surface-Mounted Obstacle (표면부착장애물), Separation (박리), Reattachment (재부착)

Abstract

An experimental study of the skin friction measurement in a turbulent boundary-layer has been carried out. The skin friction measurements are made using the laser interferometer skin friction (LISF) meter, which optically detects the rate of thinning of an oil applied to the test surface. This technique produces reliable skin friction data over a wide range of flow situations up to 3-dimensional complicated flows with separation, where traditional skin friction measurement techniques are not applicable. The present measured data in a turbulent boundary-layer on a flat plate using the LISF technique shows a good comparison with the result from the previous velocity profile techniques, which proves the validity of the present technique. An extensive error analysis is carried out for the present technique yielding an uncertainty of about $\pm 8\%$, which makes them suitable for CFD code validation purposes. Finally the measurements of the skin friction in a separated region after a surface-mounted obstacle are also presented.

1. 서 론

유동장내에 있는 물체의 표면에 나타나는 마찰력을 정확히 예측하거나 측정하는 것은 유체공학이나 항공공학에 있어 중요한 문제 중의 하나이다.

실험적으로 표면전단응력을 정확히 측정하기 위하여 그 동안 여러 가지 방법들이 사용되어 왔다. 표면전단응력을 측정센서를 이용하여 직접 측정하는 방법으로 Floating element balance method가 있으며, 간접적으로 측정하는 방법에는 경계층내

벽법칙(the law of the wall)에 근거를 두고 있는 Preston tube method⁽¹⁾와 Clauser plot method,⁽²⁾ Karman 적분관계식에 기반을 둔 방법^(3,4) 등이 자주 사용되어 왔다. 그러나, 이러한 측정방법들은 경계층구조를 파악하기 위해 유동장내에 측정장치가 놓이게 되는 경우 측정장치 자체의 영향으로 측정오차가 커지게 되는 단점을 가지고 있다. 직접적인 측정방법인 Floating element balance method 경우도 마찬가지로 측정장치의 구조적 제약에 의해 다양한 실험구성이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

Tanner⁽⁵⁾에 의해 처음 고안되어, Monson,⁽⁶⁾ Westphal⁽⁷⁾ 등에 의해 수정되고 보완된 레이저간섭계(laser interferometry)를 이용한 표면전단응력

*한국항공대학교 대학원

**회원, 한국항공대학교 항공기계공학과

측정법(Laser Interferometry Skin Friction meter, LISF)은 광학원리를 이용한 준 직접적 방법이며, 비침입적 방법(nonintrusive method)으로서 표면 전단응력을 측정하고자 하는 유동장 내부의 측정점 부근에는 센서역할을 하는 층류저층(laminar sub-layer)보다 얇은 오일 막(oil-film) 외에는 유동장에 영향을 미치는 어떠한 장치도 존재하지 않게 되므로, 난류유동이나 박리, 혹은 충격과 등을 포함하는 복잡한 3차원 유동에까지 적은 오차로 표면전단응력을 측정할 수 있는 진보된 계측법이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

따라서 본 연구의 목적은 간단한 He-Ne 레이저와 일반적인 광학기기를 이용하여 LISF 장치를 직접 구성하고 이러한 장치를 이용하여 측정된 데이터의 신뢰도를 평가한 후, 궁극적으로 박리가 포함된 복잡한 유동장에 대해 표면전단응력 분포를 직접 측정하는데 있다.

이러한 목적을 위해 본 연구에서는 평판 위에 형성된 난류경계층내에서의 임의의 지점에서 LISF 장치를 이용하여 표면전단응력을 측정한 후, 동일 지점에서의 경계층 속도분포를 열선풍속계(hot-wire anemometer)를 이용하여 측정하고 이를 속도분포법(velocity profile method)에 대입하여 표면전단응력을 계산한 뒤, 두 값을 서로 비교함으로써 본 연구에서 구성한 LISF 장치의 정확도를 검증하였다.

평판표면에 부착된 사각단면 장애물 유동은 전향계단유동(forward-faced step-flow)과 후향계단유동(backward-faced step-flow)이 혼합된 유동으로 그 동안 여기에 관한 많은 실험적, 혹은 수치적 연구가 진행되어 왔다.⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 여러 가지 조건에서 나타나는 장애물 후방의 재부착길이(reattachment length), 정압분포, 난류강도등에 대해 많은 자료가 제시되어 왔으나 표면전단응력 분포를 정량적으로 정확히 측정할 경우는 많지 않다. 일반적으로 측정이 어려운 표면전단응력이나 표면열전달에 관한 정확한 실험자료는 수치계산의 난류모델 검증작업에서 절실히 요구되고 있으며, 따라서 본 연구에서는 박리가 포함된 복잡한 장애물 후방유동에서 나타나는 표면전단응력 분포를 LISF 장치를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 얻어진 이러한 장애물 후방유동에서의 표면전단응력의 크기와 분포는 이러한 유동의 물리적 현상에 대한 이해를 도울 수 있을 것이며, 수치계산에서 요구되는 난류모델의 검증작업에 유용하게 사용될 수 있다.

2. 측정 원리

Fig. 1과 같이 전단응력을 측정하고자 하는 지점에 놓여진 얇은 오일 막의 두께는 오일 표면 상부 유동으로 인한 전단력에 의해 오일이 후방으로 밀려남에 따라 시간에 따라 점차 얇아지게 된다. 여기서 사용된 오일이 뉴톤유체이고, 그 두께가 매우 얇으며, 오일의 유동이 2차원 정상유동이라고 가정하면, 점성계수(μ_0)인 오일의 간섭무늬 관측시간(t)에 따른 두께(h_0) 변화와 오일 표면에 작용하는 전단응력(τ) 사이에는 다음과 같은 선형윤활이론(linear lubrication theory)이 성립한다.⁽⁵⁾

$$h_0 = \frac{\mu_0 X}{\tau t} \tag{1}$$

여기서 x 는 오일의 앞전(leading edge)에서 측정점까지의 거리이며, Fig. 1과 같이 측정점에 놓여진 오일 막 위에 레이저 빛을 각 θ 로 입사시키면 레이저 빛의 일부는 오일 표면에서 반사되고 (빛 A), 일부는 오일을 통과하여 물체표면에서 반사된다 (빛 B). 이때 빛 A와 B는 서로 다른 경로에 의한 위상차로 서로 간섭을 일으키며, 이로 인해 시간에 따라 얇아지는 오일 막의 두께에 상응하는 광학적 신호를 생성하게 된다.

오일 내부에서의 레이저의 파장 λ_0 와 간섭무늬 수 N 의 곱과 같은 오일 막의 두께 h_0 ($h_0 = \lambda_0 \times N$), 그리고 입사각 θ 와 반사각 θ_0 의 관계($\theta_0 = \sin^{-1}(\sin \theta / n_0)$)를 이용하면 식 (1)은 전단응력에 대해 다음 식 (2)와 같이 정리된다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{X \mu_0}{h_0 t} = \frac{X \mu_0}{\lambda_0 N t} \\ &= \frac{2 n_0 \cos \theta_0 X \mu_0}{\lambda_0 N t} \end{aligned} \tag{2}$$

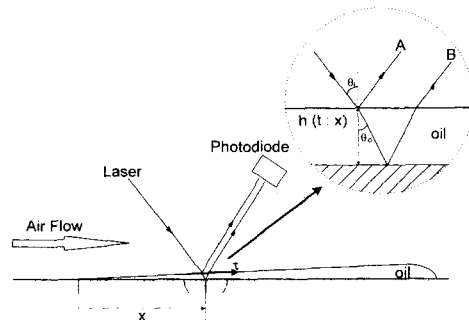


Fig. 1 Laser interference in the oil-film

이때, n_0 는 오일의 굴절률이다.

3. 실험 장치

3.1 풍동과 시험부

본 실험에 사용된 풍동은 개방송출형으로, 시험부 (test section)는 12 mm 두께의 투명 아크릴로 제작되었고 시험부의 폭과 높이는 각각 250 mm이며 길이는 1200 mm 이다. 시험부의 윗면은 레이저 빛이 통과될 수 있도록 10 mm 두께의 강화유리판으로 제작되었다. 시험부에서의 자유유동(freestream)의 최대유속은 상온(20°C)에서 17 m/s이며, 시험부내 유속은 송풍기의 흡입유량을 조절하여 변화시킬 수 있도록 설계되어 있다.

3.2 평판제작

LISF 장치의 검증을 위하여 수행된 평판실험에서 사용된 평판은 12 mm 두께의 아크릴로 폭 250 mm, 길이 1000 mm로 제작되었으며, 평판유동에서의 전형적인 경계층을 얻기 위해 앞전은 날카롭게 가공되었다. 측정점이 위치하게 되는 평판의 중앙부에는 오일을 통과한 레이저 빛이 잘 반사될 수 있도록 스테인리스스틸 판이 삽입되었다. (Fig. 2 참조) 이때 측정점에서 레이저 빛의 불필요한 산란을 막기 위해 평판에 장착된 스테인리스스틸 판은 전동샌더를 이용하여 표면처리 되었다. 표면처리에는 사포를 800번, 1000번, 1200번의 순서대로 약 30분씩 사용하였고, 그 후에 3M사의 2000번, 3000번의 액상연마제(polisher)를 도포한 부직포를 이용하여 표면처리를 마무리 시켰다. 이러한 표면처

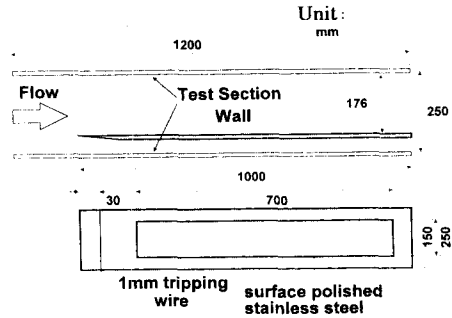
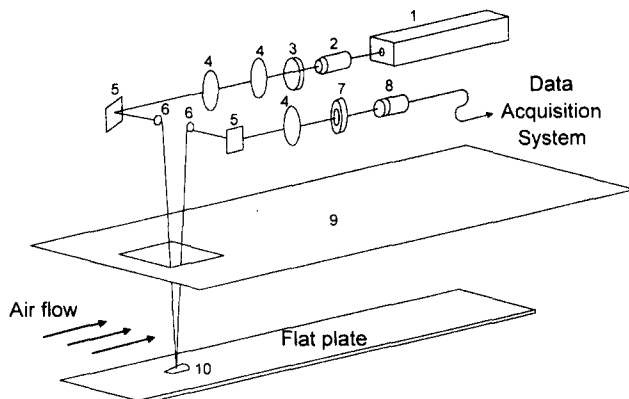


Fig. 2 Configuration of the flat plate

리는 레이저 빛을 이용하는 본 실험에서 매우 중요한 부분 중의 하나이며, 최종 마무리된 표면은 작은 흠이 없는 거울과 같이 깨끗하여야 한다. 측정 위치인 평판 앞전으로부터 300 mm 되는 지점에서 완전 발달된 난류경계층이 생성되도록 평판 앞전으로부터 30 mm 지점에 1 mm 직경의 tripping wire를 설치하였다. 제작된 평판의 형상과 제원은 Fig. 2와 같다.

3.3 LISF 장치

LISF 장치는 레이저간섭계와 자료획득장치로 구성된다. 레이저간섭계는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 여러 광학기기들로 구성되어 있는데, 각각의 광학기기들을 자석받침(magnetic base)을 이용하여 쉽게 배열, 고정할 수 있도록 2 mm 두께의 철판으로 된 광학보드(optical board, 길이 1200 mm×폭 600 mm×두께 2 mm)를 제작하였다. 광학보드의 앞쪽 중앙에는 레이저 빛이 통과될 수 있도록 160



1. He-Ne laser
2. 20X Objective lens
3. 50% Neutral density filter
4. Convex lens
- 5., 6. Mirror
7. 632.8 nm filter
8. Photodiode
9. Optical board
10. Oil

Fig. 3 Setup of the LISF meter

mm×150 mm 크기의 창이 뚫어져 있다. 시험부내 측정위치를 바꿀 때는 광학보드만 전후로 이동되며, 광학보드 받침대는 풍동시험부와 직접 접촉하지 않도록 하여 풍동의 진동이 광학기기에 전달되지 않도록 하였다.

간섭계의 광원으로 쓰인 레이저는 NEC사의 632.8 nm의 파장을 갖는 He-Ne 레이저로 최대 출력은 30mW이다. 레이저로 부터 나온 빛이 평판 위 측정점에서 작은 크기의 beam spot을 형성하도록 20배 대물렌즈를 빔확대기 (beam expander)로 사용한 후, 볼록렌즈를 collimator로 사용하여 빛을 평행하게 만들어준 다음에 다시 또 하나의 볼록렌즈를 이용하여 평판 위 측정점에 초점을 맞추었다. 측정점에 형성된 초점에서 레이저의 에너지가 집중되어 측정점에 위치한 오일이 국부적으로 가열되어 오일의 물성치(특히 점도)가 변화되는 것을 막기 위하여 50% neutral density filter를 사용하여 레이저 빛의 강도를 감소시켜주었다. (Fig. 3 참조)

레이저 빛을 시험부내 측정점으로 보내거나 측정점에서 반사된 빛을 광센서 (silicon PIN type photodiode)로 보낼 때에는 반사면에 보호유리가 덮여져 있지 않은 광학거울을 사용하였다. 반사거울을 통과한 빛은 광센서의 수광부 전체에 조사되도록 렌즈를 이용하여 빛의 직경을 조절하였으며, 또 광센서 수광부 전면에는 He-Ne 레이저와 같은 파장역 (bandwidth)을 가지는 632.8 nm filter를 사용하여 레이저 이외의 빛에 의한 잡음발생을 최소화하였다. 이리하여 측정점에서 간섭을 일으킨 빛의 신호는 광센서를 통하여 전압으로 변화되고, 이러한 신호는 BNC cable connector를 통하여 우선 직류 증폭되고 low pass filter를 이용해 고주파의 잡음이 제거된 후 다시 직류 증폭되었다. 이러한 신호는 최종적으로 자료획득장치인 디지털 오실로스코프와 연결되게 된다.

3.4 열선풍속계

LISF 장치를 이용하여 얻어진 측정값을 검증하기 위해 열선풍속계를 이용하여 평판 위 동일지점에서 경계층내의 속도분포를 측정하였다. 실험에 사용한 열선 probe는 과열비가 1.5인 텅스텐 열선을 사용한 I형이며, 열선은 Kanomax model 1010 CTA를 이용하여 열선과 케이블의 저항 값을 보정하였고, Kanomax model 1013 linearizer를 이용하

여 피토판과 미소 압력계를 사용하여 측정된 유속과 전압의 관계를 선형화 하였다. 열선의 전압은 Kanomax model 1008 DC voltmeter를 통해 측정하고 측정된 신호는 12-bit A/D 변환기를 사용하여 컴퓨터에 저장하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 Silicon oil의 점성값 측정

LISF 장치에서 측정점 표면 위에 놓이게 되는 오일은 DOW CORNING사의 Silicone 200 Fluids를 사용하였다. 이 오일은 표면장력과 열에 의한 기화성이 작아 LISF 실험에 적합하다고 보고되고 있다.⁽⁶⁾ 사용하는 오일의 점성에 따라 유동에 따른 오일 막 두께변화의 정도가 달라지게 되고 임의 시간내에 측정되는 유효한 간섭무늬 수가 달라지므로, 측정하고자 하는 유동장에 따라 적합한 오일을 선택하여야 한다. 즉, 임의의 유동에 대하여 점성이 지나치게 큰 오일을 사용하면 간섭신호를 얻는데 많은 시간이 소요되며, 반면에 점성이 너무 작은 오일을 사용하면 간섭신호가 발생하기도 전에 오일이 모두 후방으로 밀려나가 버릴 수 있기 때문이다. 따라서 본 실험에서는 기준온도에서 동점성계수가 100 cS와 10 cS인 오일을 각각 1:0, 5:3, 1:1, 3:5, 0:1의 비율로 혼합하여 5개의 서로 다른 점성을 갖는 오일을 만들어 각각의 실험에 적합한 오일을 선택하여 사용하였다. 본 실험에서 새롭게 제조된 오일의 점성은 digital viscometer를 이용하여 직접 측정되었으며,⁽¹⁵⁾ 각각의 온도에서 측정된 서로 다른 오일의 점성계수가 Fig. 4에 나타나 있다. 이러한 측정에서 실험에 사용된 오일의

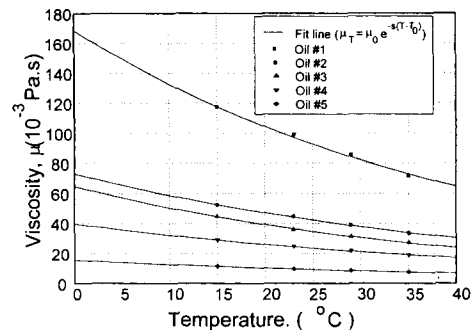


Fig. 4 Variation of the viscosity of the silicone oil vs. temperature

온도에 따른 점성계수의 변화가 적지 않으며, 평판의 온도와 그에 따른 정확한 오일의 점성계수의 측정이 본 실험결과의 정확도에 큰 영향을 미칠 수 있다.

4.2 열선풍속계를 이용한 경계층내 속도분포 측정

LISF에서 전단응력을 측정한 동일 위치인 평판 앞전으로부터 300 mm 되는 지점에서의 경계층내 속도분포를 열선풍속계를 이용하여 측정하였다. 이 지점은 후에 평판 위에 설치되는 장애물의 앞으로서 리가 위치하는 지점으로, 이 곳에서의 경계층 유동 특성은 장애물 주변 유동에 기준이 되므로 기준 경계층이라 한다. 열선 probe를 평판의 바닥으로부터 수직방향으로 1mm 간격으로 이동시켜가며 경계층 밖까지 유속을 측정하였다.

위와 같은 방법으로 얻어진 결과를 무차원 속도 분포로 Fig. 5에 나타내었으며, 이를 이용하여 얻어진 경계층 매개변수는 Table 1과 같다. Fig. 5에서 열선을 이용하여 측정된 속도분포는 실선으로 나타낸 7승근 법칙(7th power law)을 잘 따르고 있어 측정위치에서 tripping wire를 통한 전형적인 난류경계층이 형성되어 있음을 알 수 있다.

4.3 평판 위의 표면마찰계수 계산

평판 위 표면마찰계수를 LISF 방법을 이용하여 측정하고, 동일지점에서 측정된 경계층내 속도분포로부터 Clauser-plot⁽²⁾ 및 기존의 실험식⁽³⁾을 사용

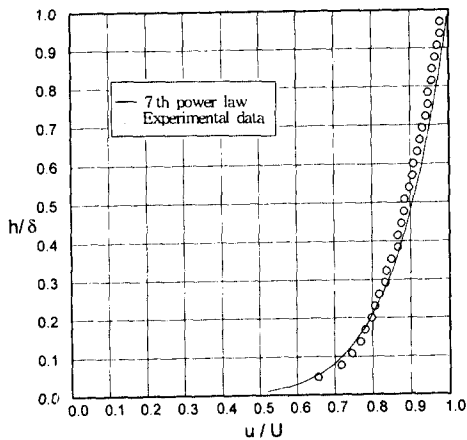


Fig. 5 Velocity profile in the turbulent boundary layer on flat plate

Table 1 Parameters of the boundary layer

Boundary layer thickness	δ	34 mm
Displacement thickness	δ^*	3.7 mm
Momentum thickness	θ	3.1 mm
Shape factor	H	1.2
Reynolds number based on the momentum thickness	Re_θ	3615

하여 표면마찰계수를 구한 후 각 측정값들을 서로 비교하여 보았다.

●LISF LISF 실험에서 광센서를 통해 얻어진 전형적인 신호는 smoothing된 후 Fig. 6과 같이 나타난다.

실험에서 얻어진 LISF 간섭무늬 기록으로부터 표면마찰계수를 얻기 위하여 구해야 할 값은 오일 내부의 간섭무늬수 N과 간섭무늬 관측시간 t의 곱인 Nt 값이다. (식 (2)참조) 본 실험에서는 이러한 Nt 값을 구하기 위해 Wideman 등⁽⁹⁾이 제안한 다음과 같은 해석방법을 사용하였다. 전단응력이 시간에 대해 일정하고 오일의 온도가 변하지 않는다면 식 (2)으로부터 상수 C_1 을 다음 식 (3)과 같이 정의 할 수 있다.

$$C_1 = \frac{1}{Nt} = \frac{\tau\lambda_0}{2n_0\mu_0x\cos\theta_0} \quad (3)$$

광센서를 통하여 얻어진 간섭무늬 기록에서 임의의 peak을 선택하여 기준 간섭무늬(reference fringe)로 설정하고 기준 간섭무늬수를 N_0 , 그때의 관측시간을 t_0 라고 설정한다. (Fig. 6 참조) 이때 설정된 N_0 와 그때의 관측시간 t_0 의 실제 수치는 알 수 없으므로, 이렇게 설정한 기준 간섭무늬 peak

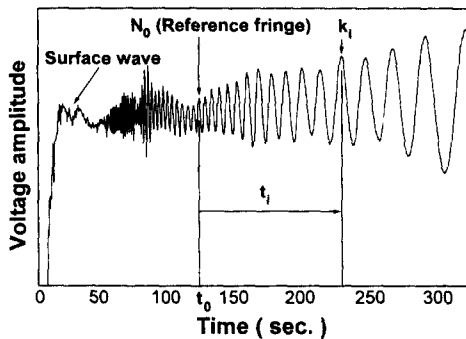


Fig. 6 Fringe signal from the photodiode

이후의 간섭무늬 peak에 대해 기준 간섭무늬로부터의 증가된 관측시간 t_1 와 증가된 간섭무늬수 N_1 를 이용하면 임의의 peak에 대해 실제의 N 과 t 값은 다음의 관계식 (4)을 만족한다.

$$N_0 t_0 = N t = \frac{1}{C_f} \quad (4)$$

여기서,

$$N = N_0 - N_1, \quad t = t_0 + t_1 \quad (5)$$

이며 이때 $C_2 \equiv t_0/N_0$, $C_3 \equiv 1/N_0$ 를 정의하고, 기준 간섭무늬 이후에 나타난 각각의 간섭무늬 peak에서 얻어진 $1/t_1$ 에 대한 $1/N_1$ 값을 Fig. 7과 같이 나타낸 후 각 점들을 최소자승법으로 curve-fitting하여 C_2 와 C_3 을 구하면 $C_f (=C_3^2/C_2)$ 이 얻어지며, 다음과 같이 진단응력, τ 와 표면마찰계수, C_f 를 구하게 된다.

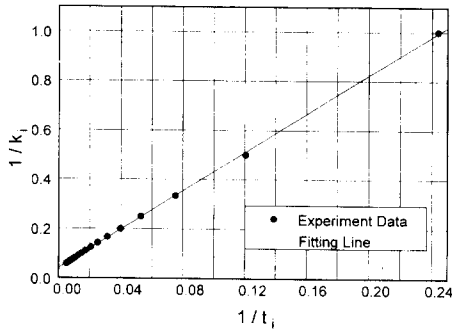


Fig. 7 Curve fitting of the incremental fringe number vs. time

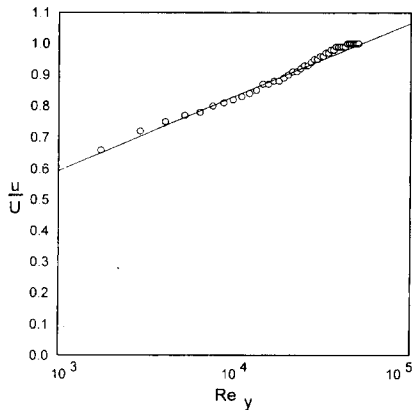


Fig. 8 Clauser-plot using the velocity profile of the turbulent boundary layer

$$\tau = \frac{2n_0 \mu_0 x \cos \theta_0}{\lambda_0} C_f \quad (6)$$

$$C_f = \frac{2\tau}{\rho_\infty U_\infty^2} \quad (7)$$

● **Clauser plot** Clauser⁽²⁾는 경계층내 벽법칙을 이용하여 평판 위 경계층내 속도분포로부터 표면마찰계수를 얻는 방법을 제안한 바 있다. 이 방법은 $Re_y (=yU_\infty/\nu)$ 에 대해 경계층내 속도분포를 임의의 여러 C_f 에 대해 도식하고, 실제 실험에서 얻어진 속도분포의 경향을 비교하여 C_f 값을 찾는 방법이며, 본 실험에서의 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 여기서 y 는 평판위 수직방향 거리, U_∞ 는 자유유속, 그리고 ν 는 유체의 동점성계수를 나타낸다.

● **기존 실험식** Ludweig과 Tillmann,⁽³⁾ 그리고 Coles⁽³⁾은 Karman 적분관계식에 포함되어 있는 경계층 매개변수 θ (momentum thickness), H (shape factor), C_f 사이에 대수적 관계식이 성립함을 실험을 통해 밝혀 내었으며, 다음 식 (8) 및 (9)와 같은 실험식을 제시한 바 있다.

$$C_f \approx 0.246 Re_y^{0.268} 10^{-0.678 H} \quad (8)$$

$$C_f \approx \frac{0.288 e^{-137H}}{(\log Re_\theta)^{1.753+0.283H}} \quad (9)$$

위의 실험식에 Table 1과 같이 계측된 경계층 매개변수를 대입하여 표면마찰계수 값을 각각 계산할 수 있다. 위와 같이 평판 앞전으로부터 거리가 300 mm인 지점에서의 표면마찰계수를 LISF 장치와 속도분포법을 이용하여 계측한 각각의 결과가 Table 2에 비교되어 있다. 여기에서 본 실험의 LISF 장치를 이용한 측정결과가 기존의 방법들과 비교하여 잘 맞고 있음을 알 수 있으며, 이로써 본 연구의 LISF 장치의 구성 및 그 측정결과가 정확함을 검증할 수 있다.

Table 2 Comparison of the C_f values

Method	C_f	Reported Accuracy	% difference with LISF meter value
LISF meter	0.0037	$\pm 8\%$.
Clauser-plot	0.0036	.	2.7
Ludweig-Tillmann	0.0042	$\pm 10\%$	13.5
Coles	0.0039	$\pm 3\%$	5.4

4.4 측정오차 분석(uncertainty analysis)

본 연구에서 얻어진 표면전단응력 측정결과의 불확실성은 식 (6)에 나타난 각 항들의 불확실성을 각각 평가하여 RSSM(Root Sum Square Combination) 방법으로 계산할 수 있다. 식 (6)에 나타난 항들 중에서 최종 측정오차를 계산하기 위해 고려된 항들은 μ_0 , C_1 , x 등이며, 각 항의 측정오차가 Table 3에 나타나 있다. 이 중 C_1 값이 최종 측정오차에 가장 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있으며 아울러 계산된 표면전단응력의 최종 불확실성은 약 $\pm 7\%$ 로 나타났다. 또 동일측정지점에서 10회 반복하여 측정된 표면전단응력의 반복성(repeatability)은 약 $\pm 8\%$ 로 나타나, 본 연구의 불확실성 해석결과가 타당함을 알 수 있다.

4.5 장애물 후방 유동에서의 표면 전단응력 측정

평판 위에 설치된 장애물 후방에서 나타나는 유동의 특성에 관계되는 요인으로는 레이놀즈수, 종횡비(aspect ratio), 봉쇄율(blockage ratio) 등 여러 가지가 있으나,^(11~14) 본 연구에서는 장애물의 종횡비 변화에 따른 장애물 후방의 전단응력분포의 변화에 초점을 두었다.

실험에 사용된 평판 위 2차원 장애물은 Fig. 9와 같이 사각단면을 가지고 있으며, 장애물의 높이, H 는 30 mm로 일정하며(봉쇄율=0.17), 장애물의 폭, W 는 높이 H 의 정수 배인 모형을 사용하여 장애물의 종횡비가 1부터 6까지 변화되도록 하였다.

잉크선 유막법⁽¹⁶⁾을 이용한 표면유선가시화(surface flow visualization) 실험을 통해 얻어진 재부착길이 측정결과가 Fig. 10에 나타나 있으며, 이에 따르면 종횡비가 4 미만일 경우에는 종횡비 증가에 따라 재부착길이, L_R 이 감소되었고(Fig. 9의 (a)), 종횡비가 4보다 클 때는 재부착길이 가 일정하게 유지되었다.(Fig. 9의 (b))

본 실험에서 표면전단응력의 측정은 장애물 후방

재부착점 이후의 재발달 경계층영역에 대해서 이루어졌으며, 이때 서로 다른 종횡비에 대해 측정된 표면마찰계수의 분포가 Fig. 11에 나타나 있다. Fig. 11에서 나타난 x_R 은 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 재부착점 이후의 축방향 거리를 장애물의 높이 H 로 무차원화 한 것이다. 여기서 표면마찰계수는 모든 종횡비에 대하여 재부착점으로 부터 하류 방향으로 비교적 급격히 증가하다 그 증가폭이 점차 작아져 일정한 값으로 접근해 가는 경향을 알

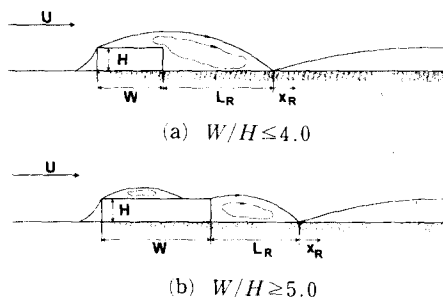


Fig. 9 The geometry of the surface-mounted obstacle

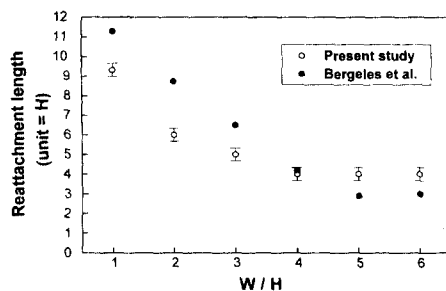


Fig. 10 The variation of reattachment length vs. aspect ratio of the obstacle

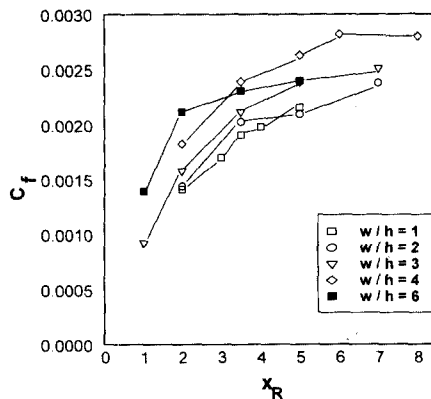


Fig. 11 Distribution of C_f after the reattachment in the obstacle-flow

Table 3 The uncertainty of the variables

Oil refractive index, n_0	$\pm 0.2\%$
Oil viscosity, μ_0	$\pm 4\%$
Distance from oil leading-edge, x	$\pm 2\%$
$C_1 = 1/Nt$	$\pm 6\%$

수 있다. 아울러 중횡비 증가에 따라 표면마찰계수의 크기도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 중횡비가 6인 경우 재부착점 이후의 표면마찰계수의 증가가 다른 경우에 비하여 상대적으로 완만하게 나타나며 이러한 경향은 다른 실험결과(Antoniou,⁽¹¹⁾ Bergeles⁽¹⁷⁾)에서도 찾아 볼 수 있다.

4.6 LISF 장치를 이용한 측정값과 수치해석 결과 비교

본 연구에서는 장애물의 중횡비가 3인 경우에 장애물 후방 재순환 영역(recirculating region)에서의 표면마찰계수도 측정되었으며, 그때 얻어진 실험결과를 상용코드인 FLUENT (v. 4.2)를 사용하여 얻어진 수치계산 결과와 비교하여 보았다.

수치계산에서 사용된 계산격자(120×40 (x방향×y방향))는 preBFC를 이용하여 2차원 유동에 대하여 장애물의 앞모서리 전방 100 mm 지점부터 평판의 끝까지 생성시켰으며, 시험부의 윗면, 평판과 평판에 부착된 장애물 표면에서 no-slip 조건 및 단열조건을 만족하도록 설정하였다. 유동의 속도변화가 심한 장애물의 모서리 주위, 평판 및 시험부 윗면 주위에는 격자를 밀집시켜 생성시켰다. 입구 경계조건으로는 열선을 이용, 직접 측정된 속도분포를 이용하였으며, 평판의 끝 부분인 격자의 출구에서는 Neumann 조건이 만족되도록 하였다. 아울러 k-ε 모델이 난류모델로 사용되었다.

이러한 수치해석과 LISF 측정에서 얻어진 전단응력분포가 Fig. 12에 비교되어 있다. 여기에서 수치계산결과는 재부착각이를 실험결과보다 작게 예측하고 있으며, 하류부근의 표면마찰계수는 비교적 잘 맞고 있지만, 재부착점 부근에서는 수치해석결과와 실험결과 사이에 많은 차이가 보이고 있다. 이러한 차이는 일반적으로 작은 봉쇄율(본 연구의 경우 봉쇄율=0.17)에서 나타나는 장애물 후방유동

은 그 유동의 특성이 유동장의 압력구배보다 turbulent diffusion에 의한 영향이 크므로 수치계산상의 어려움이 나타난다고 보고된 바⁽¹⁴⁾ 이미 어느 정도 예측된 결과이며, 이러한 이유등으로 본 연구에서 얻어진 장애물 후방에서의 표면전단응력 측정결과는 수치해석의 난류모델 검증에 위한 중요한 데이터베이스가 될 수 있다.^(18~19)

5. 결론

본 연구에서는 상용제품화 되어 있지 않은 LISF 장치를 일반 광학기기를 이용, 직접 구성하고 이를 평판 위 난류유동 및 장애물 주위유동에 적용하여 표면전단응력을 측정하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻어 내었다.

(1) LISF 장치의 구성과 운영에서 광학기기들의 배치 및 정렬, 측정점의 표면처리와 정확한 오일의 점성계수 측정이 최종 표면전단응력의 정확도에 큰 영향을 미칠을 알 수 있었다.

(2) LISF 장치를 통하여 평판 위 난류경계층내 임의 지점에서 측정된 표면마찰계수는 기존의 경계층내 속도분포법을 통해 얻어진 값들과 비교하여 큰 차이를 나타내지 않았으며, 불확실성 해석을 통해 약 ±8%의 측정오차율이 얻어졌다.

(3) LISF 장치를 이용하여 장애물 후방유동에서 중횡비 변화에 따른 재발달 경계층영역에서의 표면전단응력 분포가 측정되었으며 기존의 연구결과와 유사한 경향을 얻었다. 아울러 상용코드 FLUENT를 이용하여 계산된 수치해석결과와 LISF 장치를 이용한 측정에서 나타난 장애물후방에서의 표면전단응력분포는 서로 전체적인 경향은 유사하지만 재부착점 부근에서 상대적으로 큰 차이를 나타내었다.

후 기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Nitsche, W., Thunker, R. and Harberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method," *Turbulent Shear Flow*, Vol. 4, pp. 261~276.

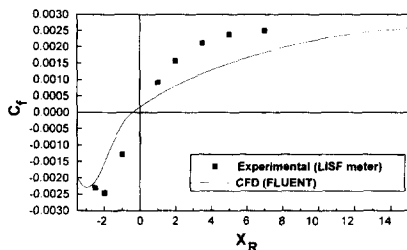


Fig. 12 Comparison of C_f between the experimental data and the numerical calculation

- (2) Clauser, F. H., 1956, "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients," *J. Aero. Sci.*, Vol. 21, pp. 91~108.
- (3) White, F. M., 1974, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, pp. 493~520.
- (4) Acharya, M. and Escudier, M. P., 1983, "Measurements of the Wall Shear Stress in Boundary Layer Flows," *Turbulent Shear Flow*, Vol. 4, pp. 277~236.
- (5) Tanner, L. H. and Blows, L. G., 1976, "A Study of the Motion of Oil Films on Surfaces in Air Flow, with Application to the Measurement of Skin Friction," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 9, No. 3, pp. 194~202.
- (6) Morson, D. J. and Higuchi, H., 1981, "Skin Friction Measurement by a Double Laser Beam Interferometer Technique," *AIAA Journal*, Vol. 19, No. 6, pp. 739~744.
- (7) Westphal, R. V., Bachalo, W. D. and Houser, M. H., 1986, "Improved Skin Friction Interferometer," *NASA TM-88216*.
- (8) Kim, K. S., Lee, Y., Alvi, F. S., Settle, G. S. and Horstman, C. C., 1991, "Skin-Friction Measurements and Computational Comparison of Swept Shock/Boundary-Layer Interactions," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 10, pp. 1643~1650.
- (9) Wideman, J. K., Brown, J. L., Miles, J. B. and Özcan, O., 1995, "Skin Friction Measurements in 3-Dimensional, Supersonic Shock Wave/Boundary Layer Interaction," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 5, pp. 805~811.
- (10) 남궁호웅, 1995, "레이저간섭계를 이용한 표면마찰력 측정에 관한 연구," 한국과학기술원 석사학위논문.
- (11) Antoniou, J. and Bergeles, G., 1988, "Development of the Flow Behind Surface Mounted Two-Dimensional Prisms," *ASME Journal of Fluid Engineering*, Vol. 110, pp. 127~133.
- (12) Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T. A., Baker, R. S., 1994, "Turbulent Flow Past a Surface Mounted Two-Dimensional Rib," *ASME Journal of Fluid Engineering*, Vol. 116, pp. 238~246.
- (13) Castro, I. P., 1981, "Measurements in Shear Layer Separating from Surface Mounted Bluff Bodies," *J. Wind Eng. and Ind. Aero.*, Vol. 7, p. 253.
- (14) Durst, F. and Rastogi, A. K., 1980, "Turbulent Flow over Two-Dimensional Fences," *Turbulent Shear Flows II*, Springer Verlag, pp. 218~232.
- (15) Holman, J. P., 1994, *Experimental Methods For Engineers*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 400~407.
- (16) Langston, L. S. and Boyle, M. T., 1982, "A New Surface-Streamline Flow Visualization Technique," *J. Fluid Mech.*, Vol. 125, pp. 53~57.
- (17) Bergeles, G. and Athanassiadis, N., 1983, "The Flow Past a Surface Mounted Obstacle," *Trans. ASME.*, Vol. 105, pp. 461~463.
- (18) 명현국, 1996, "표면에 부착된 장애물 주위의 난류전단유동에 대한 수치해석," 대한기계학회논문집, 제 20권, 제 8호, pp. 2593~2600.
- (19) Lien, F. S. and Leschzier, M. A., 1994, "Assessment of Turbulence-Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure for Flow Over a Backward-Facing Step," *Computers Fluids*, Vol. 23, No. 8, pp. 983~1004.