

(論 文)

프레스톤 튜브를 이용한 벽면전단응력 측정에 관한 실험적 연구

강신형* · 윤민수** · 전우평**

(1994년 3월 18일 접수)

Measurement of Wall Shear Stress Using Preston Tubes

S. H Kang, M. S. Yun and W. P. Jeon

Key Words : Wall Shear Stress(벽 전단응력), Preston Tube Method(프레스톤 튜브법), CPM, Method(CPM법)

Abstract

Fully developed turbulent flow in a circular pipe and laminar boundary layer on a flat plate were measured to develop a measuring technique of the wall shear stress using Preston tubes. New empirical formulas to estimate displacement factor of Preston tube were obtained through the present study. The displacement factor for turbulent flow was considerably different from that for the laminar flow. Measured wall shear stress was not pretty dependent on the displacement factor for Preston tubes in the inertia sublayer of turbulent boundary layer, however was considerably affected in the laminar boundary layer. Measuring error of skin friction using the CPM technique was 3% for turbulent and 5% for thin laminar boundary layers.

기 호 설 명

- A^+ : van Driest댐핑계수
- C : 벽법칙의 상수
- d : 프레스톤 튜브의 직경
- K : 유효거리계수
- K_1, K_2, K_3 : 벽법칙의 매개변수
- q : 측정된 동압
- u : 평면에 평행한 속도성분
- x, y : 평면 고정좌표
- y_{eff} : 유효거리(= $Kd/2$)
- ν : 동점성계수
- κ : von Karman상수
- ρ : 유체의 밀도
- τ_w : 벽마찰응력

1. 서 론

물체의 표면을 따라서 유체가 흐를때 물체 표면에서 전단응력은 유체공학에서 중요한 양이며, 이를 정확히 측정하려는 시도는 과거 수십년 간 꾸준히 진행되고 있다. 일반적으로 벽마찰계수를 측정하는 방법으로는 운동량장리 또는 벽법칙과 같은 유동이론을 이용한 간접적인 방법과 직접 벽 전단응력을 측정하는 방법이 있다. Brown와 Joubert,⁽¹⁾ Winter⁽²⁾는 관련된 여러가지 방법을 구체적으로 소개하면서 각각의 유효성 및 한계성을 정리한 바 있다. 운동량 적분방법은 압력구배하의 유동 또는 발달속도가 빠른 벽전단유동에 적절하지만, 경계층 내에 교란이 있으면 상대적으로 큰 오차를 보일 수 있다. 프레스톤 튜브(preston tube)법으로 대표되는 벽상사법칙을 이용한 방법은 물체 표면을 따라

*정회원, 서울대학교 기계공학과

**서울대학교 대학원 기계공학과

서 압력의 구배 또는 조도의 변화가 급격히 작용하는 일반적인 경계층 내에서는 사용하기가 어렵다고 알려져 있다. Floating element 등을 사용하여 직접 전단응력을 측정하는 방법은 벽면전단응력을 직접 측정하기 때문에 가장 물리적으로 확실한 방법이지만, 측정요소가 작아야 하고 정밀한 장치를 설계 제작함에 여러가지 어려움이 있다. 이 외에 sublayer fence 또는 열필름을 이용하는 방법, 그리고 열 및 물질전달의 유사성을 이용하는 방법 등이 있다. 최근에는 레이저빔을 사용하여 벽면 바로 위의 속도구배를 측정하여 벽전단응력을 측정하기도 한다.⁽³⁾

이러한 여러 방법 중 Preston⁽⁴⁾이 제안한 프레스톤 튜브법은 매우 간편하므로 사용하기가 쉽고 실용적이기 때문에 널리 사용되고 있다. 최근에 Nitsche 등⁽⁵⁾은 서로 다른 크기의 프레스톤 튜브를 사용하여 여러가지 경계층의 의한 벽전단응력을 합리적으로 예측할 수 있는 수치 프레스톤 튜브법(computational preston tube method: CPM법)을 제시한 바 있다. 최근 강신형 등⁽⁶⁾의 연구에서는 벽면에서 급격한 조도의 변화를 수반하는 경계층에서 이 CPM법을 적용하여 합리적인 결과를 얻은 바 있다. CPM법의 합리성과 정확성에 근본적으로 영향을 미치는 인자는 어떠한 형태건 간에 벽법칙이 존재해야 하며, 벽면 위에서 사용된 튜브에 의해서 측정된 동압이 실제로 어느 위치에서의 값이냐는 유효거리계수이다.

본 연구에서는 이 유효거리계수를 실험적으로 측정하여 CPM법의 정확성에 대한 검토를 하였다. 이를 위하여 원형 파이프내에 유동이 완전히 발달되도록 하고, 축방향으로 압력구배를 측정함으로써 쉽게 벽전단응력을 측정하고 특수제작된 여러가지 직경의 프레스톤 튜브의 유효거리를 결정하였다. 측정된 유효거리 데이터를 CPM법에 적용하여 이 방법의 유효성을 검증하였다. 한편 평판 위에서 형성되는 이상적인 Blasius 경계층내에 CPM법을 적용하여 층류경계층에서 CPM법의 실효성을 검토하였다.

2. CPM법의 원리

알려진 프레스톤 튜브법은 벽면에서 피토투브로 측정한 전압 q 와 벽마찰응력 τ_w 의 관계를 차원해석을 통해서 정리하고 실험을 통해서 다음과 같이

검정곡선을 구한 후 사용하는 방법이다.

$$q^+ = F(\tau^+); q^+ = \frac{qd^2}{4\rho\nu^2}; \tau^+ = \frac{\tau_w d^2}{4\rho\nu^2} \quad (1)$$

여기서, d 는 프레스톤 튜브의 직경이다. 따라서 이 방법은 완전발달된 평형 난류경계층에서만 사용할 수 있다. 그러나 CPM법은 벽면근처 난류경계층에서 임의의 상사법칙이 존재할 것이라는 가정하에서 고안된 방법이다. 만약 평형 난류경계층에서와 같이 난류경계층의 벽법칙을 이미 알고 있다면 벽법칙이 유효한 어느 위치에서 속도를 측정함으로써 벽면전단응력을 예측할 수 있게 된다. 다시 말하면 벽법칙을 이미 알고 있다면, 위 검정곡선식을 계산으로 구할 수 있게 된다. 실제로 중요한 것은 프레스톤 튜브에 측정된 동압에 해당하는 속도가 실제로 벽에서 어느 위치에서의 속도에 해당하는 것이냐는 유효거리 $y_{eff} (=Kd/2)$ 를 정확히 알아야 한다. 여기서, 유효거리계수(displacement factor) K 는 벽근처에서 벽면효과와 급격한 속도구배를 고려한 양이다. 이 값은 Preston,⁽⁴⁾ Patel⁽⁷⁾에 의해 구해진 검정곡선으로부터 추정할 수도 있고, 또 McMillan⁽⁸⁾에 의해 실험으로 측정되기도 하였으나 각각의 값들이 적지 않은 차이를 보이고 있다. Nitsche et al.⁽⁵⁾은 기존의 여러가지 실험자료를 이용하여 K 를 $\log e^{d^+}$ 의 함수로 나타내는 경험식을 제시하였다. 그러나 이 K 는 경계층의 특성과 프레스톤 튜브의 제작상태에 따라 바뀔 수 있다. 따라서 본 연구에서는 벽마찰계수가 알려진 완전 발달된 난류 파이프유동 및 평판 층류경계층 유동에서, 제작된 프레스톤 튜브의 K 를 역으로 구하여 추후 CPM법의 응용에 사용하도록 하였다.

Nitsche et al.⁽⁵⁾에 의하여 제시된 CPM법에서는 일반 경계층이론의 기본 원리를 만족하면서 실제 경계층에 영향을 줄 수 있는 조건을 고려한 3가지의 매개변수를 이용한 다음의 벽법칙⁽⁹⁾을 사용하였다.

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2(1+K_3 y^+)^{d^+}}{1+[1+4(K_1 y^+)^2(1+K_3 y^+)(1-\exp(-y^+ \sqrt{1+K_3 y^+}/K_2))]^{0.5}} dy^+ \quad (2)$$

여기서, K_1 은 von Karman 상수 κ , K_2 는 van Driest 상수 A^+ , K_3 는 압력구배의 효과를 나타내는 매개변수이다. 평형 난류경계층의 벽법칙에서는 $K_1 = 0.4$, $K_2 = 26$, $K_3 = 0$ 이고 완전히 발달된 난류경

계층에 적용될 수 있다. 그러나 일반적인 경우에는 이들 매개변수는 실제적인 물리적 의미는 없으나, 단지 다양한 경계층 유동에서 벽법칙이 존재하고, 이들이 식(2) 형태로 나타낼 수 있다고 가정하는 것이다. 여기서 2가지 이상의 프레스톤 튜브를 이용하여 벽면 동압을 계측함으로써 벽법칙이 존재하는 벽면근처 몇개의 위치에서 속도를 계측할 수 있다면 매개변수 K_1, K_2, K_3 과 벽 전단응력을 결정할 수 있게 된다. 이것이 CPM법의 기본 원리이다. 이상의 CPM법에 의한 전단응력 추정과정을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 다른 직경 크기의 프레스톤 튜브로 벽면에서 동압 계측
- (2) 벽전단응력 가정
- (3) 각 튜브의 유효거리 y_{eff} 결정
- (4) 계산된 속도와 측정된 속도의 비교
- (5) 전단응력을 보정하여 수렴될 때까지 (3) ~ (4) 과정 반복
- (6) 각 튜브의 전단응력 비교
- (7) 식(2)의 매개변수를 보정하고, 수렴될 때까지 (2) ~ (6) 과정 반복

3. 실험장치 및 측정방법

위에서 설명된 CPM법의 사용시 유효거리계수에 대한 불확실성이 상당히 크며, 본 연구에서 사용되는 프레스톤 튜브에 대하여 다양한 유동조건에서 이를 계측하였다. 우선 원형 파이프 내의 완전 발달된 난류유동을 얻는 장치를 제작하였다. 원관 실험장치는 송풍기, 안정실, 원형 파이프로 구성되어 있다. 사용된 원심 송풍기는 최대 압력 1000 mmAq, 최대풍량 45 m³/min이며, 정상상태의 유동을 얻기 위해 송풍기와 원관 사이에 아크릴로 제작한 안정실을 두었다. 원관은 내경 55 mm, 길이 4.1 m의 PVC파이프이며, 유동의 발달 길이를 줄이기 위하여 포물선 모양의 메쉬 스크린을 파이프 입구에 설치하였다. 발달되는 유동의 상태를 확인하기 위해서 원관 벽면에서 정압을 길이 방향으로 20 cm 간격으로 10개소에서 계측하였다. 단면에서 평균속도 분포는 $x=3.6, 3.8$ m의 두 위치에서 납작하게 제작한 두께 0.2 mm(단면은 직사각형)의 전압 튜브로 계측하였다. 프레스톤 튜브는 $x=3.8$ m에 설치하였고, 벽면동압은 직경 0.44~1.49 mm 범위의 8개의 프레스톤 튜브로 계측하였다. 평균속도는 속

도 분포를 단면에 대해 적분하여 구하였으며, 본 실험은 $4.1 \times 10^6 < Re_D < 8.4 \times 10^6$ 인 범위에서 수행하였다. 한편 원관 내의 온도를 측정하여 공기의 물성값을 정하였는데, 원관 내의 공기 온도는 $40 \pm 2^\circ\text{C}$ 였다.

층류경계층에 대한 실험은 측정부의 단면 크기가 30×40 cm인 흡입식 개방풍동에서 수행하였다. 풍동 측정부에서의 평균속도의 균일도는 20 m/s에서 0.5% 이하이고, 난류 강도는 15 m/s에서 3% 이하이다. 층류경계층 실험을 위한 평판은 각도가 3.1°인 2차원 쇄기형태로, 두랄루민으로 제작하였고 그 크기는 280×400 mm이다. 평판 앞부분은 유동의 박리가 발생하지 않도록 날카롭게 가공하였으며, 평판 위의 속도분포는 $x=5.5, 10.5$ cm인 위치에서 계측되었다.

스텝모터의 디지털 펄스 하나당 이송거리는 0.0021 mm인 1차원 이송장치가 실험에서 사용되었다. 이송장치의 조작은 개인용 컴퓨터의 8253 카드 및 A/D 변환기로 하였다. 측정된 압력은 압력 변환기(Validyne CD23)를 경유하여 A/D 변환기에서 계수형 값으로 변환되어 개인용 컴퓨터에서 처리된다. 속도 및 벽 전압측정시 20초 동안 100000개의 데이터를 계측하여 평균하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 난류유동에서 마찰계수

완전발달된 원관 유동에서 벽전단응력은 축방향 압력구배로 쉽게 예측할 수 있다. 원관내의 유동 완전발달은 압력구배의 일정화, 평균 속도분포의 동일성, 난류 특성치들의 동일성이 확인되어야 하나, 본 연구에서는 압력구배와 평균속도의 계측을 통해서 발달된 상태를 확인하였다. 일정한 체적 평균속도(31 m/s)에서 서로 다른 두 위치, $x/D=65, 70$ 에서 평균속도를 계측하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 평균속도분포가 잘 일치하는 것으로 보아 유동이 완전 발달되었음을 알 수 있고 장치가 합리적으로 설치되었음을 알 수 있었다. 완전발달된 상태는 축방향 압력분포로부터 재차 확인할 수 있다. Fig. 2는 원관 입구에서 2 m 이후의 정압분포를 보이며, 모든 레이놀즈수에서 선형적으로 변하고 있다. 레이놀즈수의 증가에 따라 압력구배는 커지고 이에 따라 벽전단응력도 커짐을 예상할 수 있었다. 계측한 압력구배로부터 구한 벽마찰계수를

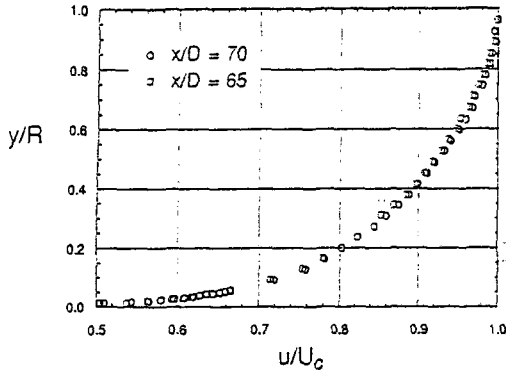


Fig. 1 Non-dimensional velocity profiles at the two different sections in the pipe

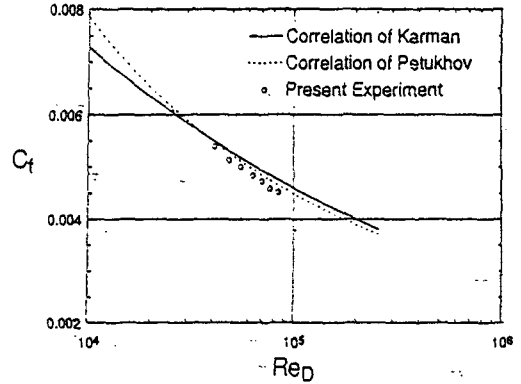


Fig. 3 Skin friction coefficients obtained by pressure gradient in the pipe flow

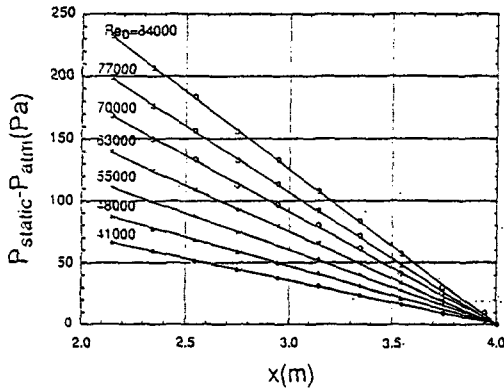


Fig. 2 Static pressure distributions along the pipe with Re_D

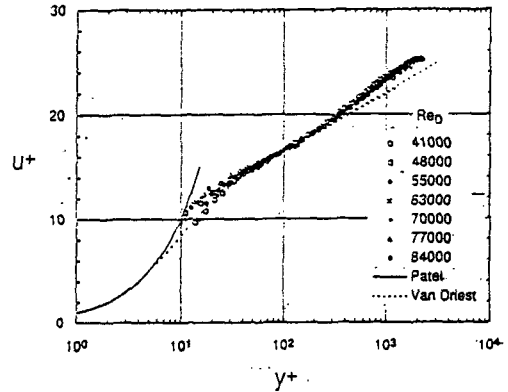


Fig. 4 Measured velocity profiles with wall unit in the pipe

Re_D 에 따라 Fig. 3에 나타내었다. Karman과 Petukhov의 경험식과 비교하여 약 5%의 오차를 보이는데 기존 실험치들의 산란도를 고려할 때 합리적인 결과이다. 벽 무차원변수로 나타낸 Fig. 4의 속도분포로부터도 유동의 완전발달 여부와 계측된 벽전단응력의 타당성을 확인할 수 있었다. 즉 모든 레이놀즈수에서 관성 저층이라고 볼 수 있는 $30 < y^+ < 250$ 의 범위에서 기존의 벽법칙과 잘 일치한다. 관성 저층의 두께는 원관 반지름의 약 15%로 기존의 난류 원관유동의 결과와 동일하다.

벽면동압은 8가지 직경 크기의 프레스톤 튜브로 7가지 경우의 레이놀즈수에 대해 계측하였다. 각 레이놀즈수의 경우 압력구배로부터 예측된 식(1)의 무차원 벽 전단응력과 프레스톤 튜브로 계측한 무차원 동압을 Fig. 5에 나타내고 기존 검증곡선과 비교하였다. 실험결과가 기존의 연구 결과와 잘 일치하는 것으로 보아 벽면동압이 잘 계측되었음을

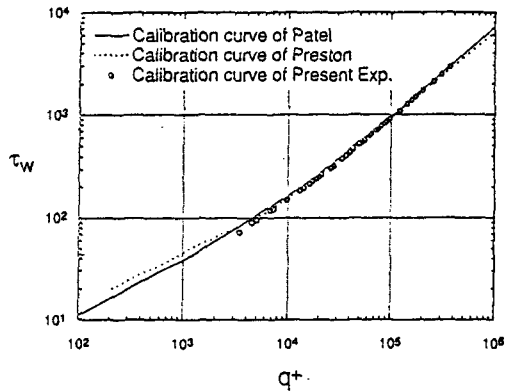


Fig. 5 Calibration curves of the conventional Preston tube method

확인할 수 있었다. 앞서서도 언급하였듯이 프레스톤 튜브로 동압을 계측할 때 유효거리는 튜브의 기하학적 중심과 일치하지 않는다. 압력구배로 추정

한 벽면 전단응력과 프레스톤 튜브로 측정한 동압과, 알려져있는 벽법칙(Fig. 4)을 이용하여 유효거리계수를 구한 후, Fig. 6에서 기존의 실험치들과 비교하였다. 본 연구에서 실험한 범위의 유효거리계수는 모두 Nitsche의 경험식에 의한 값보다는 약 15% 크게 예측되었다. 예측된 실험치를 인정하고, 이들을 활용하여 Nitsche⁽⁶⁾와 같이 유효거리계수를 $ln d^+$ 의 다항식으로 커브 피팅하면 다음과 같다.

$$K = 3.022 - 1.907(\ln d^+) + 0.704(\ln d^+)^2 - 0.080(\ln d^+)^3 \quad (3)$$

한편, 본 연구에서 d^+ 의 범위는 20~150으로 Fig. 4에서 알 수 있듯이 이는 모두 van Driest식 계열의 벽법칙이 성립하는 관성저층 구역에 있다. 따라서 벽법칙이 성립하는 지역에서 프레스톤 튜브법이 유효하다는 이론에 잘 부합된다. 일정한 직경의 튜브인 경우 레이놀즈수의 증가에 따른 벽 전단응력 τ_w 의 증가로 d^+ 는 증가하는데 본 실험의 경우 d^+ 의 범위는 0.44 mm인 튜브는 20~40, 1.07 mm인 튜브는 30~100, 1.49 mm인 튜브는 40~150이다.

식(2)의 벽법칙과 Nitsche의 경험식에 의한 유효거리계수를 사용한 결과 Fig. 7에 나타낸 바와같이 벽마찰계수가 최대 4%의 차이를 보였다. 특별히 0.44 mm 튜브로 예측한 C_f 의 변화를 보면 저 레이놀즈수 때 약 2%의 차이를 보이다가 고 레이놀즈수에서 약 4%의 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 0.44 mm의 d^+ 의 범위(20~40)에서 레이놀즈수에 따라서 Nitsche의 경

험식과 예측된 K 의 차이가 증가하기 때문이다. 이상에서 K 의 오차 또는 변화에 따른 벽 전단응력의 오차를 벽법칙식을 이용하여 정량적으로 검토하였는데 난류유동의 경우 그 오차가 그리 크지는 않았다.

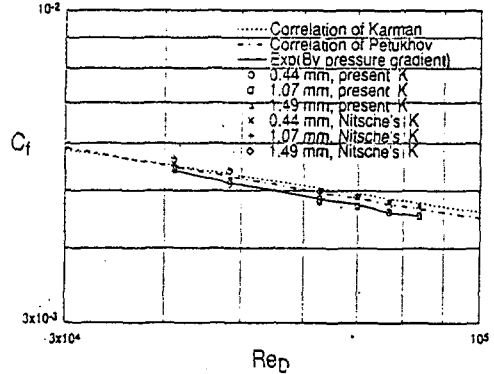


Fig. 7 Skin friction coefficients measured by Preston tube method

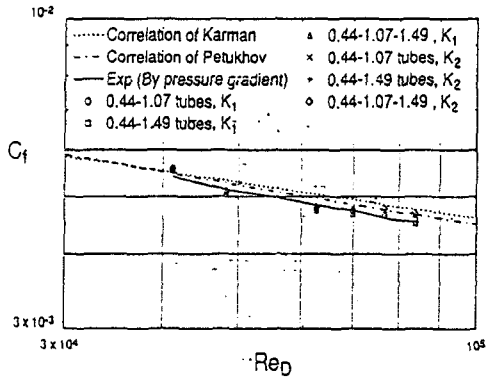


Fig. 8 Skin friction coefficients measured by CPM method using the present displacement factor

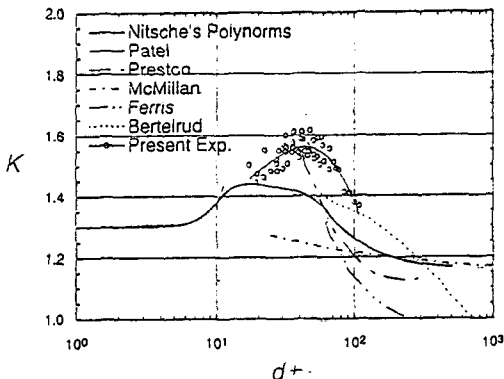


Fig. 6 Variation of displacement factors with non-dimensional diameter in the turbulent pipe flow

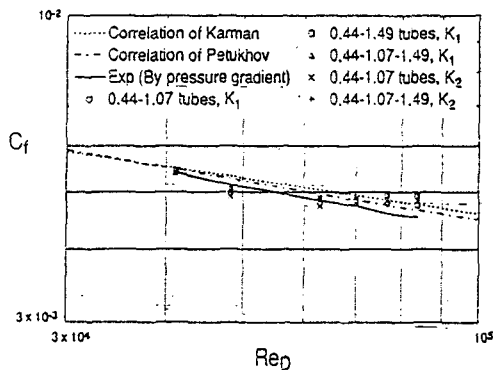


Fig. 9 Skin friction coefficients measured by CPM using Nitsche's displacement factor

이를 논리적으로 검토하기 위해서 벽법칙을 다음과 같이 단순한 대수함수로 가정한다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Kd^+) + C \quad (4)$$

이 식을 K 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$K = \frac{\nu}{u_\tau d} \exp\left[\kappa\left(\frac{u}{u_\tau} - C\right)\right] \quad (5)$$

여기서, 마찰속도의 변화량과 유효거리계수의 변화량에 대한 관계를 생각할 수 있다. 마찰속도 u_τ 에 ϵ 만큼의 변화가 있다면

$$K = \frac{\nu}{u_\tau(1+\epsilon)d} \exp\left[\kappa\left(\frac{u}{u_\tau(1+\epsilon)} - C\right)\right] \\ \approx \frac{\nu}{u_\tau d} \exp\left[\kappa\left(\frac{u}{u_\tau} - C\right)\right] \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\exp[\kappa\epsilon u/u_\tau]} \quad (6)$$

이므로 즉, 마찰속도가 ϵ 만큼 변화하면 K 값은 개략 $(1-\epsilon)/\exp[\kappa\epsilon u/u_\tau]$ 로 변화가 있음을 알 수 있다. 예를 들어 평균속도가 12.7 m/s ($ReD=41088$)인 경우, 마찰속도에 1%의 오차가 있으면 K 의 값은 8%의 오차를 가지게 되고, 벽전단응력은 2%의 오차를 가지게 된다. 만약 직경 d 의 프레스톤 튜브가 점성 저층에 위치하였다면 속도는 거의 선형적으로 변하므로 다음의 관계가 성립한다.

$$u^+ = K \cdot d^+ \quad (7)$$

따라서 이때는 유효거리계수에서 발생하는 오차가 벽면 마찰계수의 측정에 미치는 영향은 동일함을 알 수 있다. 즉, 유효거리계수에 발생하는 벽면 마찰계수의 측정오차는 튜브가 위치한 저층의 특성에 따라 크게 다를 수 있음을 알 수 있다.

한편 앞절에서 소개한 CPM법을 적용하여 벽마찰계수를 구하였다. Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 본 실험으로 구한 식(3)의 K 와 Nitsche의 경험식에 의한 K 를 이용한 결과를 나타내었다. 두 경우 모두 각각의 튜브조합에 관계없이 예측된 C_f 의 산란이 매우 작으며, Fig. 8의 결과를 검토하면 식(2)에서 매개변수 K_1 을 사용하고 K_2 를 고정하였을 때 C_f 는 약 1.5%의 오차범위에서, 매개변수 K_2 를 사용하고 K_1 을 고정하였을 때 C_f 는 3% 오차 범위에서 예측된 C_f 와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 9에서 벽마찰계수를 Nitsche의 경험식을 이용하여 구한 경우 최대 8%의 오차를 보인 반면 식(3)을 사용한 경우 3% 이하의 오차를 보이고 있다. Fig. 10과 Fig. 11에는 CPM법을 사용하는 과정에서 수

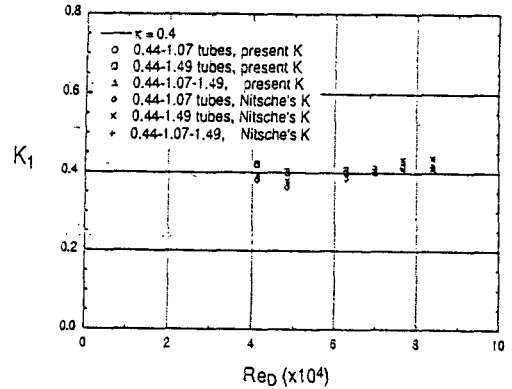


Fig. 10 Variations of free parameter K_1 for CPM

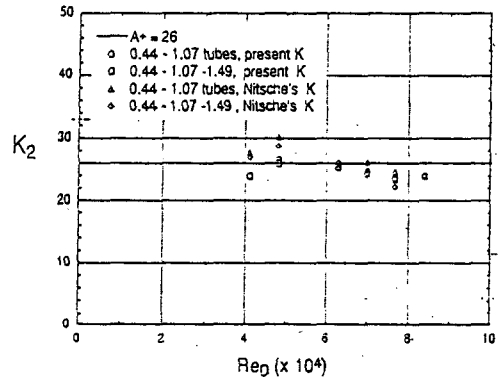


Fig. 11 Variation of free parameter K_2 for the CPM

렴된 매개변수의 값을 나타내었다. 두 매개변수 모두 완전 발달되었을 때의 값, $\kappa=0.4$, $A^+=26$ 에 근접함을 알 수 있다. 이상의 결과를 종합할 때 완전 발달된 난류 원류유동에서 CMP방법은 벽마찰계수를 최대 3%의 오차 범위에서 합리적으로 예측하였고, 튜브의 조합에 따라 서로 상당히 안정된 방법임을 알 수 있었다. 그러나 평판위의 난류경계층 등 다양한 경우에 대해서 신중히 검증되어야 할 것이다.

4.2 층류유동에서 마찰계수

층류경계층 내에서 식(2)을 이용한 CPM법의 유효성을 검증하였다. 그러나 경계층이 완전히 층류일 때는 앞서 논의된 바와같이 유효거리계수의 오차는 바로 예측되는 마찰계수의 오차가 되므로 정확한 유효거리계수의 추정이 매우 중요하다. 더구나 경계층이 완전히 층류일 때도 유효거리계수가 난류일 경우와 동일한지에 대하여 알려진 바가 없

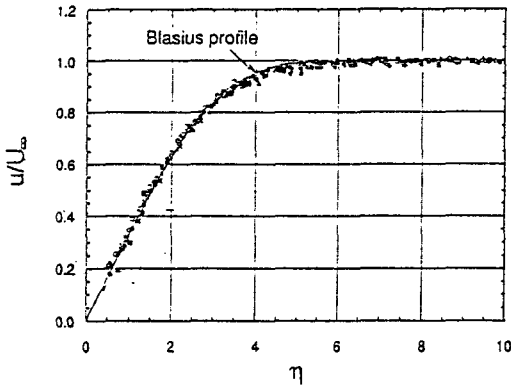


Fig. 12 Measured velocity profiles on the flat plate

다. 다만 Nitsche의 경험식에 의하면 d^+ 가 10 이하로 작으면 $K=1.3$ 으로 가정된다. 이는 난류 경계층에서 d^+ 가 매우 작은 경우, 즉 프레스톤 튜브가 점성저층에 있을 때 연구된 결과를 사용한 결과이다.

이러한 문제를 연구하기 위해서 평판위 층류경계층에서 연구를 수행하였다. 먼저 자유 유동속도를 11.2, 13.3, 17, 20.3, 23.5, 27.1 m/s 등으로 변화시키며 평판 앞날로부터 10.5 cm 떨어진 위치에서 경계층 속도분포를 측정하였다. 이때 층류경계층의 두께는 최대 약 2 mm 정도이다. 여기서 Blasius 속도분포를 재현하고 계측함에는 매우 정밀한 계측과 노력이 필요하였다. 여러가지 속도에서 계측된 속도분포를 Blasius변수로 Fig. 12에 나타내었다. 전 경우에서 Blasius 해와 약 5%의 오차범위내에서 일치함을 알 수 있다. 평판 위 경계층이 Blasius분포라고 보면 벽마찰계수는 $C_f = 0.664/Re_x^{0.5}$ 로 예측할 수 있으므로 4.1절의 과정과 같이 프레스톤 튜브 사용시 유효거리계수를 역으로 구할 수 있다. Fig. 13에는 6가지 경우의 자유유동 속도에서 0.49~1.49 mm 범위의 8개의 튜브로 측정하여 예측한 변위계수 K 를 나타내었다. 식(3)과 같이 $\ln d^+$ 의 다항식으로 커브 피팅하여 다음의 경험식을 구하였다.

$$K = -2.560 + 8.636(\ln d^+) - 5.590(\ln d^+)^2 + 1.115(\ln d^+)^3 \quad (8)$$

본 실험에서 계측한 d^+ 의 범위는 10~80이다 10 이하인 경우에는 K 의 값이 어떻게 수렴하는지는 본 연구에서 다루지 못하였으며 10 근처에서는 1.7 정도로 1.3에 비하여 상당히 크게 계측되었다. 난

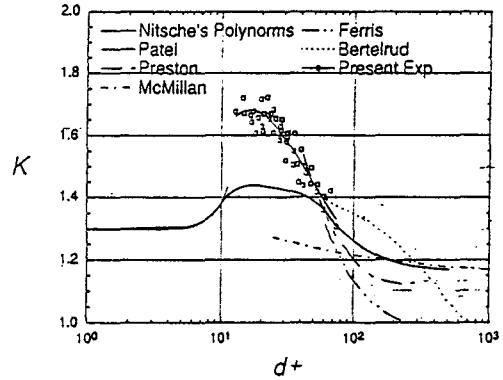


Fig. 13 Variation of displacement factors with non-dimensional diameter in the laminar flow

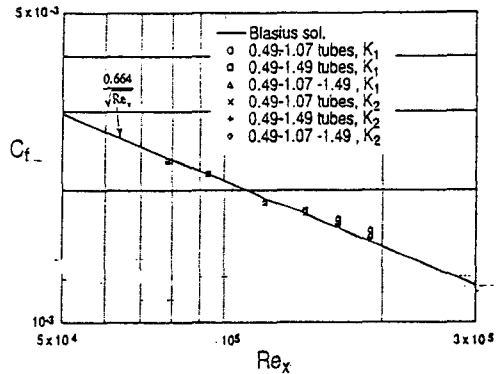


Fig. 14 Skin friction coefficients measured by CPM on the flat plate

류경계층에서의 유효거리계수에 비하여 크게 예측되는 것은 층류인 경우 경계층 내의 유동혼합이 상대적으로 적어서 프레스톤 튜브의 배제효과가 크기 때문이라고 생각한다. 층류경계층에서 프레스톤 튜브로 측정된 동압과 식(8)의 K 를 CPM법에 적용하여 벽 마찰계수를 예측하였고 이를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 8의 결과처럼 튜브들의 조합에 따른 C_f 값은 산란이 매우 작으며, 매개변수 K_1 를 사용한 C_f 값과 매개변수 K_2 를 사용한 C_f 값 모두 초대 5%의 범위내에서 Blasius해에 일치하였다.

5. 결 론

벽마찰계수를 측정하기 위한 CPM법의 정도향상을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과를 다음과 같이 요약한다.

- (1) 층류와 난류경계층에서 프레스톤 튜브의 유

효 거리계수에 대한 새로운 경험식을 제시하였다. 경계층이 완전히 층류인 경우 프레스톤 튜브의 유효거리계수는 난류경계층에서의 유효거리계수와는 상당히 차이가 있음을 확인하였다.

(2) 유효거리계수의 오차로 인한 벽전단응력의 계측 오차는 프레스톤 튜브가 경계층의 관성 저층에 위치했을 때에는 크지않으나, 점성저층에 가까이 위치하는 경우에는 커진다.

(3) CPM법을 이용하여 예측한 벽마찰계수는 난류경계층에서는 3% 이하, 층류경계층에서 5% 이하의 오차를 보인다.

후 기

본 연구는 1993년도 서울대학교 터보동력기계연구센터의 연구사업의 일부로 수행되었음을 밝히며, 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Brown, K. C. and Joubert, P. N., 1969, "The Measurement of Skin Friction in Turbulent Boundary Layers With Adverse Pressure Gradients," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 35, pp. 737.
- (2) Winter, K. G., 1977, "An Outline of the Techniques Available for the Measurement of Skin Friction in Turbulent Boudary Layers," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 19, pp. 1.
- (3) Mazumder, M. K., Wanchoo, S., McLeod, P. C., Ballard, G. S., and Mozum, S., Caraballo, N., 1981, "Skin Friction Drag Measurement by LDV," *Appl. Opt.*, Vol. 20, pp. 2832.
- (4) Preston, J. H., 1954, "The Determination of Turbulent Skin Friction by Means of Pitot Tubes," *J. Roy. Aeronaut. Soc.*, Vol. 58, pp. 109.
- (5) Nitsche, W., Thyvker, R. and Haberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method," *Turbulent Shear Flows*, Vol. 4, pp. 261~276.
- (6) 강신형, 이정민, 전우평, 유정열, 1992, "급격한 조도의 변화가 있는 평판 난류경계층." 대한기계학회논문집, 제16권 제11호.
- (7) Patel, V. C., 1965, "Calibration of the Preston Tube and Limitations on its Use in Pressure Gradients," *J. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 185.
- (8) McMillan, F. A., 1965, *Experiments on Pitot Tubes in Shear Flow*, ARCR & M 3028.
- (9) Szablewski, W., 1969, "Turbulente Drenschichten in Ablosenahe," *Z., Angrew. Math.*, Vol. 49, pp. 215.