

〈論 文〉

CPM을 이용한 평판위 천이경계층에서 벽 마찰응력의 계측

전우평* · 강신형**

(1994년 6월 22일 접수)

Measurement of Wall Shear Stress in Transitional Boundary Layer on a Flat Plate Using Computational Preston Tube Method

Woo-Pyung Jeon and Shin-Hyoung Kang

Key Words : Transitional Boundary Layer(천이경계층), Wall Shear Stress(벽 전단응력), CPM, Displacement Factor(유효 거리계수), Intermittency(간헐도) Computational Preston Tube Method(CPM)

Abstract

A CPM (computational preston tube method) was developed to measure wall shear stress in a transitional boundary layer on a flat plate using Preston tubes. Correlation for the displacement factor of Preston tubes was improved for a CPM to be used in the transitional boundary layer. The distribution of skin-friction coefficient was reasonably predicted in the uniform free stream of 3.1% turbulence intensity. Reasonable and accurate estimation of displacement factor of Preston tubes was found to be of crucial importance for the CPM, especially in the laminar boundary layer. The mean velocity profiles of the boundary layer on the plate were also measured and presented.

기 호 설 명

C	: 벽법칙의 상수	y_{eff}	: 유효거리 (= $Kd/2$)
C_f	: 벽 마찰계수	γ	: 간헐도
d	: 프레스톤 튜브의 직경	γ_0	: 벽 간헐도
K	: 유효 거리계수	ν	: 유체의 동점성계수
K_{accel}	: 가속 매개변수	θ	: 운동량 두께
K_1, K_2, K_3	: 벽법칙의 매개변수	ρ	: 유체의 밀도
q	: 계측된 동압	τ_w	: 벽 마찰응력
U	: 평판에 평행한 성분의 평균속도		
U_∞	: 자유유동 평균속도		
u	: 평면에 평행한 속도성분		
u_τ	: 벽 마찰속도		
x, y	: 평면 고정좌표		

1. 서 론

가스터빈, 압축기 등 여러가지 터보기계의 날개 위에 형성되는 경계층 예측은 이들의 설계과정에서 중요하다. 날개 위의 유동에는 앞날에서의 유동박리, 재부착, 경계층의 천이, 비평형 난류 경계층의 형성, 경계층의 박리 등 복잡한 현상이 포함되어 있다. 특히 터보기계의 날개는 강한 난류유동 내에

*서울대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 서울대학교 기계공학과

서 작동하는 경우가 대부분이기 때문에 다양한 외부 유동조건에서 발생하는 천이과정의 예측은 점차 중요한 문제가 되고 있다. 경계층 천이현상은 날개의 유체역학적 성능 그 자체에 큰 영향을 미치며, 고온 가스 내에서 작동하는 터빈 날개에서의 온도 분포에 큰 영향을 미친다. 우선적으로 응용적인 면에서는 천이경계층의 범위, 즉 천이의 시작점과 종료점의 정확한 예측은 설계시 날개형상 및 날개 냉각 시스템 개발에 중요한 요소이다. 이같은 이유로 여러가지 효과를 고려한 천이경계층에 관한 연구가 최근까지 진행되고 있으며, 이들의 예측을 위한 적절한 난류모델링에 관한 연구도 많이 행해지고 있다.

최근 Narasimha와 Dey,⁽¹⁾ Mayle,⁽²⁾ Walker⁽³⁾ 등은 이 분야의 연구현황을 정리 소개한 바 있다. 자유유동의 난류강도가 작을 때에는 경계층은 소위 자연천이(natural transition) 과정으로 진행되며, 이는 선형 안정성이론을 이용하여 연구되었다. 1951년 Emmons⁽⁴⁾ 이후 자연천이과정 중 2차원 T-S 파동이 생략된 소위 바이패스천이(by pass transition)라는 새로운 형태의 천이과정이 보고되었으며, 이때 간헐도(intermittency)가 매우 중요한 인자로 고려되어야 한다고 알려져 있다. 실제 터보기계 날개위의 천이과정은 비정상 자유유동의 난류강도 뿐만 아니라, 날개 위에서의 압력 구배, 표면조도, 날개의 표면곡률, 진동 및 소음, 경계층박리 등의 많은 인자에 의하여 영향을 받는다. 따라서 이러한 여러가지 교란이 있는 자유유동 하에서의 천이경계층에 대한 연구는 현재까지 진행되고 있다.⁽²⁾ 한편 최근에 Savill⁽⁶⁾을 중심으로 한 소위 ERCOFTAC Special Interest Group들이 기존의 몇몇 난류모델을 천이경계층에 적용한 바 있다. 그들의 연구에 의하면 기존의 어떠한 난류모델도 천이경계층의 거동을 정확히 예측하지는 못하였다. 따라서 천이과정을 예측할 수 있는 난류이론의 개발은 매우 어렵고, 특히 공학적으로 활용할 수 있는 난류모델에 대한 연구는 아직도 미흡한 실정이다.

관련된 연구의 어려운 점은 천이과정 자체가 복잡한 현상을 수반할 뿐 아니라, 천이경계층의 예측에 관한 연구에 활용할 수 있는 실험자료가 충분치 못하다는 점이다. 본 연구에서는 천이경계층에서의 평균속도 분포와 벽 마찰계수의 계측방법의 개발에 주된 관심을 두었다. 특히 벽 마찰계수는 천이경계

층에서 가장 중요한 데이터가 되는데 본 연구에서는 다양한 분위기에서 쉽게 사용할 수 있는 방법의 하나인 CPM(computational preston method)을 천이경계층에 적합하도록 개선하는데 관심을 두었다. 천이경계층 유동에서 벽 전단응력을 구할 때 완전 발달된 난류유동의 벽법칙에 근거를 둔 프레스톤 튜브법은 적당치 않다. [본 연구에서는 최근에 Nitsche 등⁽⁶⁾에 의해 제안된 CPM을 이용하여 벽 마찰계수를 구하였다. 최근에 강신형 등⁽⁷⁾은 완전히 발달된 난류 파이프 유동에 이 방법을 이용하여 그 유효성을 검증하였으며, 또한 영 압력구배에서 급격한 조도변화(rough to smooth)를 수반하는 경계층 실험⁽⁸⁾에 CPM을 적용하여 합리적인 결과를 얻은 바 있다. 여기서는 층류 및 천이경계층에서 합리적인 프레스톤 튜브의 유효 거리계수 경험식을 제시하여 Nitsche 등⁽⁶⁾의 CPM을 개선하였고 이를 이용하여 기존의 천이경계층 실험결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 이러한 연구는 일정한 난류강도의 자유유동 하에서 평판위 천이경계층의 평균속도 및 벽 전단응력의 계측을 통해 연구하였다.

2. CPM의 원리

벽 마찰계수를 계측하는 기존의 프레스톤 튜브법은 벽면에서 피토투브로 계측한 전압 q 와 벽 마찰응력 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 직경, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 동점성계수이다. 따라서 이 방법은 완전발달된 평형 난류경계층에서만 사용할 수 있다. 그러나 Nitsche 등⁽⁶⁾에 의하여 제시된 CPM은 벽면근처 난류경계층에서 임의의 상사법칙이 존재할 것이라는 가정하에서 고안된 방법이다. 만약 평형 난류경계층에서와 같이 난류경계층의 벽법칙을 이미 알고 있고 벽법칙이 유효한 어느 특정한 위치에서 속도를 계측한다면 벽면 전단응력을 예측할 수 있게 된다. 다시 말하면 벽법칙을 이미 알고 있다면 위 검정곡선식을 계산으로 구할 수 있게 된다. 프레스톤 튜브에 계측된 동압에 해당하는 속도

가 실제로 벽에서 어느 위치에서의 속도에 해당하는 것이냐는 유효거리 $y_{eff}(=Kd/2)$ 를 정확히 알아야 한다. 여기서, 유효 거리계수(displacement factor) K 는 벽근처에서 벽면효과와 급격한 속도 구배를 고려한 양이다. Nitsche 등⁽⁶⁾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 강신형 등⁽⁷⁾의 연구에서는

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2(1+K_3y^+) dy^+}{1+[1+4(K_1y^+)^2(1+K_3y^+)(1-\exp(-y^+\sqrt{1+K_3y^+}/K_2))]^{0.5}} \quad (2)$$

여기서, K_1 은 von Karman상수, K_2 는 van Driest 상수, K_3 는 압력구배의 효과를 나타내는 매개변수이다. 평형 난류경계층의 벽법칙에서는 $K_1=0.4$, $K_2=26$, $K_3=0$ 으로 알려져 있고 완전히 발달된 난류경계층에 적용될 수 있다. 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 측정함으로써 벽법칙이 존재하는 벽면 근처 몇 위치에서 속도를 측정할 수 있다면 매개변수 K_1 , K_2 , K_3 와 벽 전단응력을 결정할 수 있게 된다. 이 방법은 강신형 등^(7,8)의 연구에서 그 유효성이 보고된 바 있다.

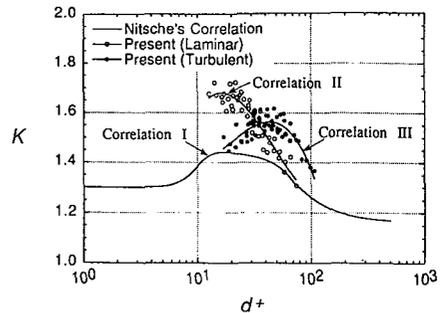
식(2)는 난류경계층 내층의 벽함수를 기본 형태로 한 것이기 때문에 층류 및 난류 유동특성이 공존하는 천이경계층에서 적용될 수 있는지는 알려져 있지 않다. 천이경계층 내의 유동특성을 나타내는 중요한 변수 중의 하나는 간헐도이다. Dhawan and Narasimha⁽¹⁰⁾는 천이경계층에서 시간평균된 벽 마찰계수, C_f 가 층류 벽 마찰계수, C_{fL} 와 난류 벽 마찰계수, C_{fT} 의 조합인 다음 식으로 나타낼 수 있다고 보고한 바 있다.

$$C_f = (1-\beta)C_{fL} + \beta C_{fT} \quad (3)$$

여기서, β 는 천이영역에서 단순히 발달한 층류와 난류 경계층에서의 마찰계수에 대한 비중을 나타내는 양이겠으나, 벽 근처에서의 간헐도와 유사한 값이라고 생각되어 왔다. 실제로 간헐도의 개념을 사용하는 경우에는 Mayle과 Paxson⁽¹¹⁾에 제시된 바에 의하면, 천이유동내의 평균속도는 난류부분의 평균속도, u_t 와 난류가 아닌 부분의 평균값, u_{nl} 로

벽 마찰계수가 알려진 완전발달된 난류 파이프 유동 및 평판 층류경계층 유동에서, 제작된 프레스톤 튜브의 K 를 역으로 구하여 층류와 난류에서 보다 합리적인 관계식을 제시하였다. 이에 관한 관계식을 Fig. 1에 정리하여 나타내었다.

CPM에서는 실제 경계층에 영향을 줄수 있는 조건을 고려한 3가지의 매개변수를 이용한 다음의 벽법칙(Szablewski⁽⁹⁾)을 사용하였다.



$$K = A_0 + A_1(\log_{10} d^+) + A_2(\log_{10} d^+)^2 + A_3(\log_{10} d^+)^3$$

Coefficients of correlation I

d^+	A_0	A_1	A_2	A_3
1~3.55	1.3	0	0	0
3.55~10.55	1.034	1.316	-2.175	1.207
10.55~28.0	-2.591	9.023	-6.685	1.637
28.0~70.5	4.664	-6.591	4.527	-1.049
70.5~500	5.221	-4.43	1.625	-0.2

Coefficients of correlation II

d^+	A_0	A_1	A_2	A_3
12.6~74.4	-2.560	8.636	-5.590	1.115

Coefficients of correlation III

d^+	A_0	A_1	A_2	A_3
17.1~107.5	3.022	-4.390	3.731	-0.973

Correlation IV

$$K = (1-\gamma_0)K_{laminar} + \gamma_0 K_{turbulent}, (\gamma_0 = K_1/\chi)$$

Fig. 1 Correlations of displacement factor of preston tubes in laminar and turbulent boundary layers

다음과 같이 된다.

$$u = (1 - \gamma) u_{nl} + \gamma u_t \quad (4)$$

그러나 천이영역에서 물리적인 간헐도의 개념을 도입한 벽법칙에 대해서는 아직 보고된 바 없다. Sohn과 Reshotko⁽¹²⁾는 실험적 연구를 통해 평판 천이경계층에서 층류 및 난류부분 평균속도는 각각 Blasius분포 및 난류 벽법칙과 상당히 차이가 있음을 보고하였다. 그러나 아직 이러한 문제에 대해서는 잘 알려진 바가 없다. 본 연구에서는 식(2)로 나타낸 벽법칙의 속도분포군이 천이경계층에서도 유효하다고 가정하였다. 여기에 대하여 본문에서 검토 토의하였다. 이상에서 설명한 CPM의 처리과정은 다음과 같다.

- (1) 다른 직경의 프레스턴 튜브로 벽면에서 동압 계측
- (2) 벽 전단응력과 매개변수를 가정하여 임의의 벽법칙 식(식(2)) 결정
- (3) Fig. 1의 유효 거리계수 경험식으로 각 튜브의 y_{eff} 결정
- (4) 식(2)를 적분하여 구한 계산속도와 측정된 속도의 비교
- (5) 전단응력을 보정하여, 수렴될 때까지 (2)~(4) 과정 반복
- (6) (2)~(4) 과정을 통하여 구한 각 튜브의 전단응력 비교
- (7) 식(2)의 매개변수 보정하여, 수렴될 때까지 (2)~(6)과정 반복

본 연구의 CPM계산에서는 과정(4)에서 계산속도와 측정속도의 오차가 0.1%, 과정(6)에서 각 튜브로 예측한 벽 전단응력들의 오차가 0.1% 될 때까지 수렴시켰다.

3. 실험장치 및 방법

균일유동 중에 있는 평판위 천이경계층의 특성을 연구하기 위해 저속형, 흡입 개방식 풍동을 설계 제작 하였다. 이 풍동은 공기필터, 안정실, 흡입구 및 수축부, 시험부 및 송풍기로 이루어 졌다. 시험부는 12 mm 두께의 아크릴로 제작하였고, 단면은 300 mm×400 mm인 직사각형이며, 시험부의 길이는 1.7 m이다. 프로브 이송을 위해 시험부 옆면 중앙에 폭 10 mm의 슬롯을 두었다. 풍속은 인버터에 의해 전동기의 회전수를 연속적으로 변화시켜

조절하였다. 시험부 내의 최고풍속은 35 m/s이다. 시험부내의 평균 유동의 균일도는 풍속이 10 m/s 및 20 m/s에서 0.5% 이하였으며, 난류강도는 실험속도 14 m/s에서 3.1%이었다. 시험부 내에서 축방향 프로브의 이송은 수동 이송장치로 수행 하였다. 평판에 대하여 수직방향의 이송은 PC에 의해 제어되는 스테핑 모터 및 선형 이송장치에 의해 수행하였다. 이때 디지털 펄스 하나당 이송거리는 0.0021 mm이다.

평판은 12 mm 두께의 두랄루민으로 제작하였으며 폭은 280 mm, 길이는 1 m이다. (Fig. 2) 자중에 의한 휨을 방지하기 위하여 평판을 시험부에 수직으로 설치하였다. 평판의 중심에서 폭방향 상 하 양쪽으로 50 mm 되는 위치에 앞날에서 $x = 2, 3, 4, 7, 10, 20, 40, 60, 80, 100$ cm의 위치에 지름 1 mm의 정압구멍을 총 20개를 두어 정압을 계측하였다. 평판 앞날에서 앞날 형상으로 발생될 수 있는 압력 구배는 이상적인 평판에 대한 결과와 가깝게 실험이 수행될 수 있도록 가능한 작아야 한다. 본 연구에서는 이 점을 고려하여 앞날 제작 전에 여러가지 앞날 형상에 대해 패널방법을 이용하여 비점성유동 해석을 수행하고 압력의 분포를 검토하였다. 그 결과 앞날의 형상은 곡률반경 211 mm의 원호로 하였고 $x = 50$ mm 위치에서 평판에 접하게 하였다.

평판 앞날에서부터 발생하는 층류, 천이, 난류경계층의 평균속도를 정확히 계측하는 것은 매우 중요하다. 특히 실험풍속 $U_{\infty} = 14$ m/s에서 앞날 층류경계층의 최고 두께가 약 1.5 mm인데 이러한 얇은 전단층을 계측하기 위해서는 특별히 제작된 전압

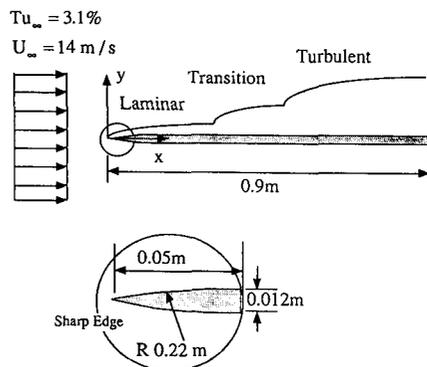


Fig. 2 Configuration of a flat plate in the uniform flow

튜브가 필요하다.

실험에서는 외경 0.45 mm의 주사 바늘을 이용, 두께 0.2 mm되는 직사각형 단면의 전압튜브를 제작하여 경계층내의 속도분포를 계측하였다. 한편 벽면 전단응력 측정용으로 여러가지 크기(0.45~2 mm)의 프레스톤 튜브를 제작하였다. 튜브에서의 압력은 디지털 마노미터로 계측되며, 출력되는 아날로그신호는 A/D변환기가 내장되어 있는 오실로스코프(Lecroy 9410)를 통해 최종적으로 컴퓨터에 입력된다. 평균속도 계측시에는 10초 동안 10000개의 데이터를 취하고 평균하여 한 측정점에서의 평균값으로 하였으며, 프레스톤 튜브를 사용하여 벽면 동압을 계측할 때는 30초 동안 30000개의 데이터를 취하여 평균하였다.

4. 결과 및 검토

평판의 설치와 유동의 2차원성을 확인하기 위해서 계측한 정압분포를 Fig. 3에 나타내었다. 위, 아래 압력구멍의 압력계수가 $x=0.2\text{ m}$ 이후 잘 일치하는 것으로 보아 2차원 경계층 유동이 잘 형성됨을 확인할 수 있다. 자유유동이 앞날에서 $x=0.04\text{ m}$ 까지 급격한 순압력 구배를 보이다가 이후 $x=0.2\text{ m}$ 까지 역압력 구배를 보이는 경향이 비점성으로 예측한 결과와 일치한다. 그러나 압력이 하류로 갈수록 비점성 유동의 해석결과 보다 점차 멀어짐을 볼 수 있는데 이는 풍동 시험부 좌우면 및 평판경계층 성장에 따른 시험부 중심 유동의 가속에 기인하며, 자유유동 속도의 측정을 통해 $x=0.2\text{ m}$ 이후 거의 선형적으로 속도가 가속됨을 확인할 수 있다. 자유유동 속도가 주어진 매끈한 평판

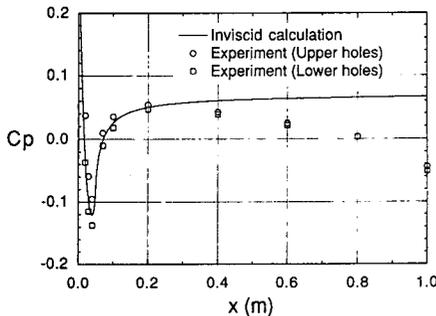


Fig. 3 Static pressure coefficients on the flat plate in the uniform flow ($U_\infty=13.89\text{ m/s}$, $P_\infty=-125.6\text{ pa}$)

경계층 유동에서 천이의 시작 위치와 천이길이는 주로 자유유동 난류강도와 압력구배에 의해 결정된다고 알려져 있다. 특히 이 두 효과가 동시에 작용될 때 경계층의 천이 특성이 최근까지 꾸준히 연구되고 있다. (Mayle⁽²⁾) 본 실험에서도 약 3.1%의 난류강도와 평판 앞날 형상 및 풍동의 구조에 따른 압력구배가 동시에 측정하고자 하는 경계층에 작용하고 있다. 보통 압력구배는 가속 매개변수 $K_{acel} (= (\nu/U_\infty^2) dU_\infty/dx)$ 의 수치로 그 크기를 나타내는데, 역 압력구배의 경우 이 변수는 음수가 된다. 본 실험의 측정범위 ($x=0.05\text{ m}\sim 0.90\text{ m}$)에서는 이 값의 범위가 $-1.58\times 10^{-6}\sim 0.04\times 10^{-6}$ 인데, 난류강도 3%이상의 경우 이 정도의 압력구배 영향은 무시되어 평판에서의 현상과 큰 차이가 없음을 가정할 수 있다. ⁽²⁾ 즉 본 실험의 평판에 형성되는 천이경계층의 시작점과 천이길이가 난류강도 3.1%이며 영 압력구배하의 천이 경계층의 그것과 일치함을 예상할 수 있다.

앞에서 설명한 0.2 mm 두께로 납작하게 제작된 전압튜브를 사용하여 앞날 곡률이 끝나는 $x=0.05\text{ m}$ 에서 $x=0.90\text{ m}$ 까지 총 16단면의 속도 분포를 계측하였다. 그 결과의 일부를 Blasius 변수로 표현하여 Fig. 4에 나타내었다. 속도계측시 정압은 압력구멍에서의 값을 사용하였는데, 이는 경계층 내에서는 평판 수직방향으로 압력구배가 없다는 경계층 이론에 근거 하였다. 압력구멍이 없는 위치의 정압은 $x=0.2\text{ m}$ 이전에서는 비점성 계산의 결과를 사용했으며, 그 이후 하류에서는 실험치를 내삽하여 사용하였다. 프로브는 평판 수직방향으로 비등간격(첫 간격 0.1 mm)으로 이송하였으며 각 위치의 경계층 두께 및 특성을 충분히 고려하여 계측 간격을 조절하였다. 그림에서 실선은 계측된 압력

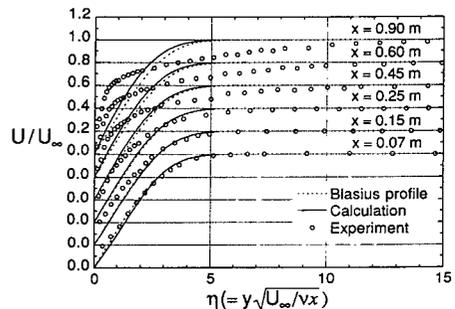


Fig. 4 Non-dimensional velocity profiles on the flat plate in the blasius coordinates

구배를 고려하여 층류경계층 방정식을 유한 차분법을 이용하여 수치해석한 결과로 점선으로 나타내어 비교한 Blasius 속도분포보다는 실제 예측된 속도 분포에 가깝다. 상류 $x=0.07$ m까지는 수치해와 잘 일치하는 안정된 층류 분포를 보인다. 이후 경계층은 내층부터 서서히 천이 과정을 보이다가 하류로 가면서 외층까지 천이상이 전파되어 마지막 단면에서는 완전 발달된 난류계층의 형태가 나타난다. 즉 $x=0.90$ m의 속도분포는 벽 근처에서 급격한 구배를 보이다가 이후 완만한 분포를 보이는 전형적인 난류경계층의 모습이다.

이러한 변화를 자세히 검토하기 위해 속도분포를 이용하여 배제두께, 운동량두께, 형상계수 등 적분 매개 변수를 계산하였다. 상류의 배제두께와 운동량두께는 층류 수치해와 일치하다가 하류로 감에 따라 난류경계층의 분포와 동일한 변화율을 보이며 성장하였다(관련된 그림은 생략) Fig. 5에 나타난 형상계수는 상류에서 층류의 값, 2.59에서 점차 감소하여 하류에서는 완전 발달된 난류경계층의 값, 1.4로 근접한다. 예측된 형상계수는 Roach과 Brierley(Savill⁶)의 실험값과 잘 일치하였다. 그러나 난류강도 2.4%의 Sohn과 Reshotko¹²의 결과와는 다소 차이를 보이는데 이는 난류강도가 본 실험치 3.1%보다 작음에 따른 천이의 지연에 기인한다. (Fig. 10)

천이과정에서의 벽면 전단응력은 경계층 구조 파악에 있어서 매우 중요한 뿐만 아니라 이론 및 수치계산의 결과와 비교할 수 있는 민감한 양이다. 앞에서 소개했듯이 본 실험에서는 최근에 개발된 CPM을 이용, 벽면 전단응력을 예측하였다. 사용된 프레스턴 튜브는 3가지로 지름은 각각 0.50, 1.07, 1.49 mm이다. 이 튜브들로 예측한 벽면 위

에서 동압에 해당하는 속도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 경계층 천이가 내층에서부터 일어남을 고려하면 상대적으로 가장 작은 튜브의 동압이 CPM계산에서 중요하다. 그림에서도 가장 작은 튜브인 $d=0.50$ mm의 벽면 위 속도분포가 평판 천이 양상을 확연히 보여주고 있다. Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 데이터를 이용하여 일반적인 프레스턴 방법으로 구한 벽 마찰계수의 분포이다. 사용된 벽법칙은 van Driest 모델과 $u^+ = y^+$ 이며, 이때 유효 거리 계수, K 는 Fig. 1의 난류 파이프 유동의 상관 관계식(상관식 III)과 층류경계층 유동의 상관 관계식(상관식 II)을 각각 사용하였다. van Driest 모델의 경우 완전히 발달되었다고 생각되는 난류 유동 지역에서는 사용된 튜브의 크기에 관계없이 기존의 경험식(White¹³)과 잘 일치한다. 즉 평판 하류의 경계층은 알려진 벽법칙이 잘 성립하는 완전 발달된 난류경계층이라고 예상할 수 있다. $u^+ = y^+$ 의 식을 사용한 층류 유동구역에서는 사용된 튜브의 직경이 작을수록 층류경계층 수치해와 잘 일치함을 볼 수

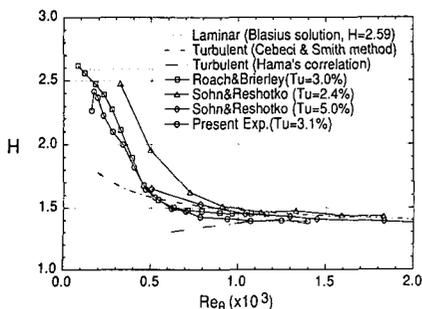


Fig. 5 Distribution of the shape factor compared with other results in a uniform flow

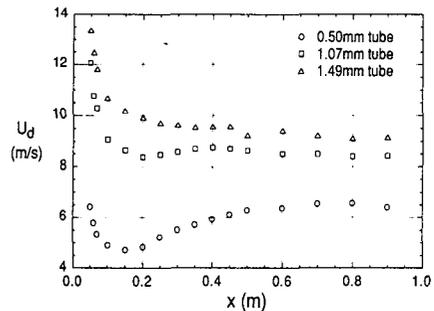


Fig. 6 Variation of near-wall velocity measured by preston tubes

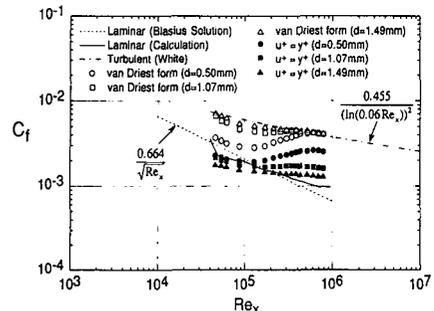


Fig. 7 Skin friction coefficients on the flat plate in the uniform flow measured by the conventional preston tube method

있다. 이는 층류인 경우 위의 가정과 같이 속도가 y 에 대해 선형적으로 변화하는 지역이 매우 작기 때문에 얇은 경계층에 비해 상대적으로 튜브의 크기에 민감하기 때문이다. 따라서 프레스톤 튜브방법을 이용하여 벽 전단응력을 구할 때는 경계층두께에 따른 튜브 크기의 선정에 주의해야 한다. 천이 지역에서는 같은 레이놀즈수, 즉 같은 위치에서 마찰계수는 튜브 크기에 따라 산란이 심함을 볼 수 있으며 값 자체도 기존의 천이이론을 고려할 때 합리적이지 않다. 이는 프레스톤 튜브방법의 원리를 고려할 때 당연한 결과이다.

벽법칙인 식(2)를 사용하여 CPM으로 구한 벽 마찰계수는 천이현상을 합리적으로 보여주고 있다. Fig. 8에는 여러가지의 유효 거리계수 관계식의 사용에 따른 결과를 비교하고 있다. CPM계산 결과 Nitsche의 유효 거리계수 식인 상관식 I과 상관식 III을 사용할 경우에는 예측된 벽 전단응력 값은 서로 일치하였으며, 난류지역에서는 경험식에 의한 마찰계수와도 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 그러나 층류 구역근처에서는 예측한 압력구배를 고려하여 계산한 마찰계수보다 상당히 높게 예측되었다. 따라서 상관식 I과 상관식 III은 층류 구역에서는 사용하기가 어렵다고 생각된다. 한편 층류 평균유동에서 구한 상관식 II를 사용한 경우에 층류지역에서는 벽 마찰계수가 계산된 결과와 잘 일치하여 실험방법의 합리성을 확인할 수 있었으나, 난류구역에서는 예상치 보다 상당히 낮게 예측되었다. 이에 본 연구에서는 천이구역을 포함한 모든 경계층에서 간헐도를 고려한 상관식 IV를 사용하기로 하였다. 간헐도의 값은 알 수 없으나 본 연구에서는 매개변수 K_1 값과 von Karman상수 0.4의 비로 하

였다. 그 결과 예측된 마찰계수는 층류 및 난류구역에서는 예상되는 결과와 일치하면서도 천이구역에서는 합리적으로 변하고 있음을 Fig. 8에서 알 수 있다. 이하 본 연구에선 상관식 IV를 사용하였다.

3가지 튜브의 조합에 의하여 예측된 마찰계수를 Fig. 9에 나타내었다. 큰 산란이 없이 특정한 위치에서 일정한 값을 나타내는 것으로 보아 CPM의 합리성을 확인할 수 있었다. 특히 평판 앞날 근처에서의 마찰계수는 계산 결과와 잘 일치하며, $x = 0.07\text{ m}$ (천이 시작점) 이후 서서히 증가하여 $x = 0.80\text{ m}$ (천이 종료점)에서 완전 발달된 난류경계층과 근접하며 최대치를 보인 후 하류로 갈수록 매우 서서히 감소한다. 난류구역에서 예측된 평균속도를 알려진 대수 벽법칙과 비교하여 구한 벽 마찰계수(Clauser⁽¹⁴⁾)와 비교해 보면 CPM으로 구한 난류구역의 벽 전단응력이 합리적임을 재차 확인할 수 있었다. 그러나 천이구역에서는 비교할 만한 신빙성 있는 자료가 없기에 평판 경계층에서 운동량방정식, $C_f = 2 \cdot d\theta/dx$ 의 관계를 이용하여 천이지역 안에서의 벽 전단응력을 예측하여 비교하였다. 얇은 경계층에서 정확한 운동량 두께의 예측과 이양의 미분량 산출의 어려움을 고려할때 천이 지역에서 CPM에 의한 결과가 비교적 합리적임을 알 수 있다. 이러한 사실은 본 실험의 결과를 기존의 결과와 비교한 Fig. 10에서도 알 수 있다. Sohn과 Reshotko⁽¹²⁾는 운동량 정리를, Roach과 Brierley(Savill⁽⁵⁾)은 직접적인 방법으로 각각 벽 마찰계수를 구하였다. Roach의 결과와 비교하면 천이 시작점은 잘 일치하였지만 천이 끝점은 본 실험의 결과가 많이 낮고 있다. 천이과정에서 Fig. 5와 같이

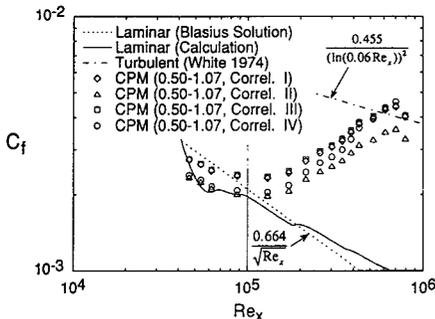


Fig. 8 Skin friction coefficients measured by CPM in the uniform flow with correlation of K (Tu=3.1%)

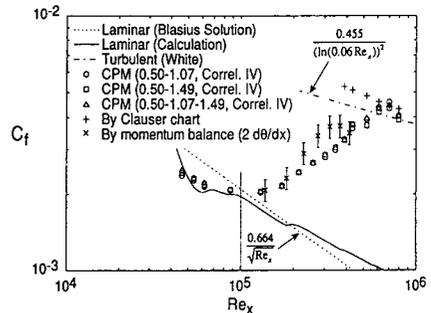


Fig. 9 Skin friction coefficients on the flat plate in the uniform flow measured by CPM with various tubes (Tu=3.1%)

두 실험의 형상계수 분포가 일치함에도 불구하고 벽 마찰계수 분포가 다르다는 사실은 형상계수가 경계층 내층 및 외층의 거동을 나타내는 적분량인데 비해 벽 마찰계수는 내층의 현상에 의해서 주로 영향을 받는 국소양임을 간접적으로 설명해 주고 있다. 한편 Sohn과 Reshotko⁽¹²⁾의 난류강도 2.4%, 5.0%에서의 결과를 고려하면 본 실험치의 유효성을 부분적으로 알 수 있다.

이상에 CPM을 이용하여 마찰계수를 구하는 과정에서 압력구배가 천이과정 중의 경계층 내층에 미치는 영향은 매우 작다고 보고, $K_3=0.0$ 로 하고 K_1 또는 K_2 를 매개변수로 사용하였는데, 어느것을 매개변수로 하든지 거의 동일한 결과를 얻었다. 그 과정에서 구해진 매개변수 K_1 의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 층류에서 천이를 거쳐 난류경계층으로 변하는 과정에서의 값들이 합리적이다. 즉 층류에서 K_1 값은 영이나 천이를 거치면서 난류경계층에서의 von Karman상수 0.4로 근접한다. 본 연구에서 측정된 C_f 가 합리적이라고 가정하면, 실험시 평판의 경계층두께와 여러 프레스톤 튜브 직경의

범위(y_{eff}) 내에서 매개변수를 포함한 식(2)의 여러 벽법칙 군들이 천이경계층의 벽 전단응력 예측에 합리적이라는 것을 알 수 있다. 또한 천이경계층의 수치계산을 위한 난류모델에서 von Karman상수나 van Driest상수를 간헐도의 적절한 함수로 가정하는 것이 가능할 수 있음을 예상할 수 있다.

최근 Mayle⁽²⁾은 가스터빈 내에서의 날개 주위의 천이 현상을 종합적으로 검토하면서 기존의 많은 평판 천이경계층 연구 데이터를 종합하였다. 천이 시작점과 천이 길이에 대한 본 연구결과와의 비교가 Fig. 12, Fig. 13에 나타나 있다. 그림에 나타난 본 실험의 난류 강도는 3.1%, 벽면 마찰계수로부터 예측한 천이 시작점은 $x=0.07$ m, 천이의 종료점은 $x=0.80$ m이다. Fig. 12는 자유유동의 난류강도에 따른 천이가 시작되는 경계층의 운동량 레이놀즈수를 나타낸 것으로 기존 실험데이터들의 산란을 고려할 때 본 데이터($Re_{\theta t}=182$)는 합리적이다. 또한 Fig. 13을 보면 천이 종료점의 레이놀즈수

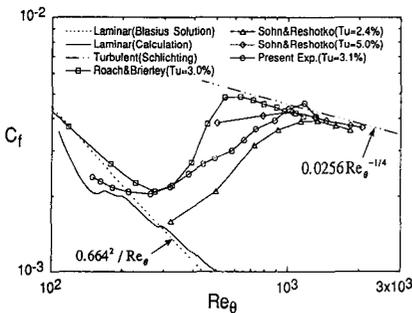


Fig. 10 Skin friction coefficients compared with other results in the uniform flow

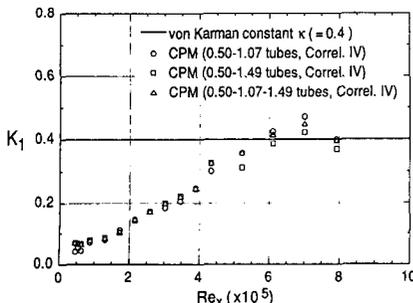


Fig. 11 Variation of the free-parameter K_1 on the flat plate in the uniform flow with tubes

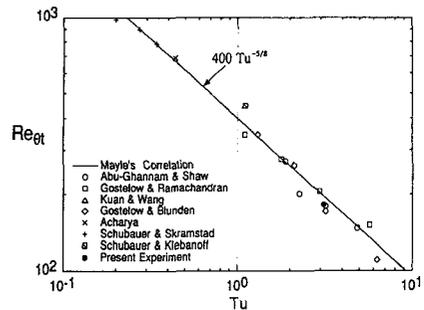


Fig. 12 Onset of transition on the flat plate in the uniform flow. (Starting point=0.07 m, End point=0.80 m)

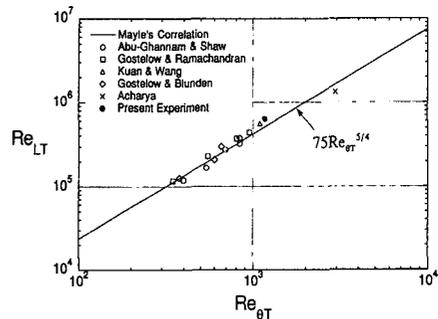


Fig. 13 Length of transition on the flat plate in the uniform flow. (Starting point=0.07 m, End point=0.80 m)

(Re_{or}), 천이길이 레이놀즈수(Re_{LT})도 각각 1171, 639,000으로 Mayle이 제시한 상관식에 잘 일치하여 본 연구의 실험데이터의 합리성을 확인할 수 있었다.

한편 Emmons⁽⁴⁾의 이론에 근거한 Dhawan and Narasimha⁽¹⁰⁾의 결과에 의하면 천이경계층에서 벽 간헐도와 특정한 천이위치 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\gamma_0 = 1 - \exp[-\bar{n}\sigma(Re_x - Re_{xt})^2], \quad (x \geq x_t) \quad (5)$$

여기서, Re_{xt} 는 앞날에서 천이 시작점까지를 특성 길이로한 레이놀즈수이며 σ 와 \bar{n} 는 각각 Emmons' dimensionless spot propagation parameter 와 dimensionless spot production parameter 를 의미한다. 이 식에 천이시점과 종료점, $\gamma_0=0.99$ 를 대입하면 소위 spot production rate($\bar{n}\sigma$)를 구할수 있으며, 본 실험의 경우 이 값은 2.44×10^{-11} 이다. 이 값을 다시 식(5)에 적용하면 Narasimha 함수의 벽면 간헐도분포를 구할 수 있다. Fig. 14에는 천이지역에서 벽 마찰계수를 식(3)에 적용하여 구한 β 의 값과 앞서 매개변수 K_1 값과 von Karman 상수 0.4의 비, γ_0 를 비교하고 있다. 벽면 마찰계수에 기본을 둔 β 는 Narasimha 분포와 비교해 볼 때 비교적 일치한다. Sohn과 Reshotko⁽¹²⁾의 연구에서 평판 천이경계층에서 조건계측법에 의한 난류 유동의 평균속도 분포는 일반 벽법칙과 다소 다르고 비난류 유동의 평균속도는 Blasius 분포와 상당히 다르다고 보고하였다. 그러나 벽면에서 최고 간헐도는 마찰계수에 기본을 둔 간헐도의 값과 상당히 다르다. 이러한 결과를 종합할 때 간헐도의 기본 개념들이 공학적인 응용성을 고려하여 새로이 정립되어야 하겠다.

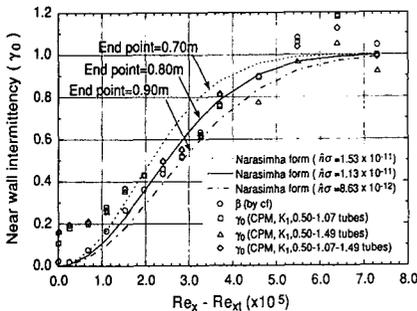
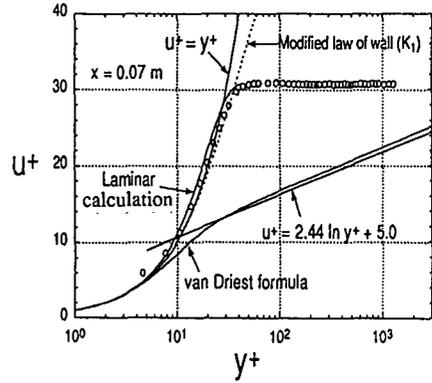
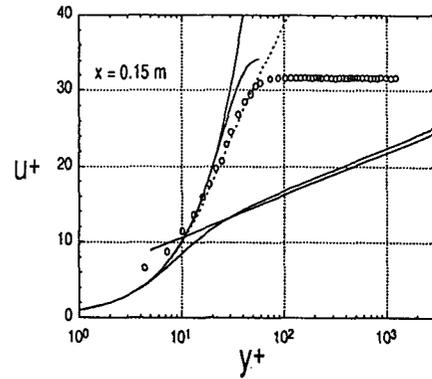


Fig. 14 Distribution of near-wall intermittency estimated by CPM, (Starting point=0.07 m)

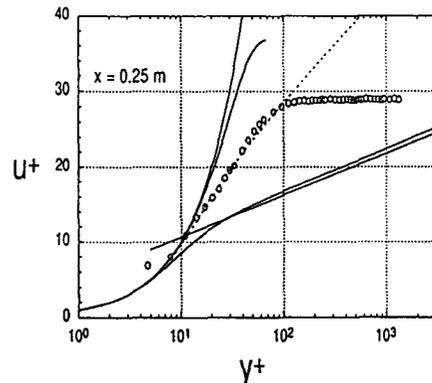
Fig. 15에서는 평판 위 몇몇 위치에서 벽 근처의 무차원 속도분포를 나타낸 것인데 전형적인 유동 천이 현상을 보여주고 있다. 층류 수치해와 잘 일치하는 평판 상류의 층류경계층은 하류로 가면서 내층부터 천이되어 결국 완전발달된 난류경계층으로 변화됨을 볼 수 있다. 한편 평판위에 형성된 모



(a)

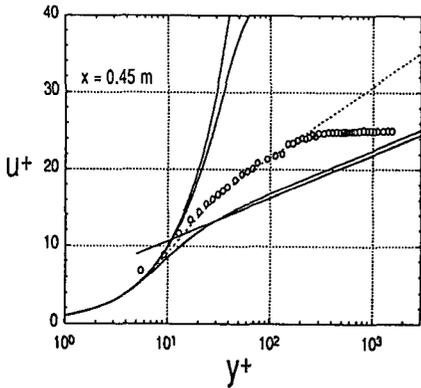


(b)

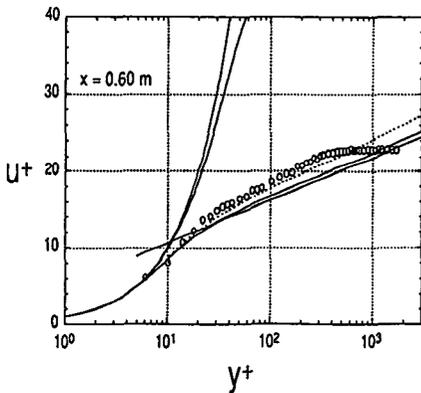


(c)

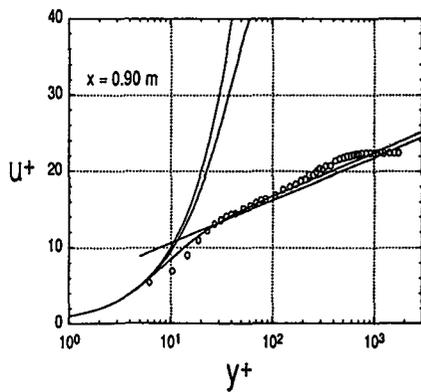
Fig. 15 Continued



(d)



(e)



(f)

Fig. 15 Non-dimensional velocity profiles on the flat plate in the uniform flow

든 경계층의(층류, 천이, 난류경계층) 속도 분포가 CPM으로 예측한 여러 수정된 벽법칙 식들과 벽면 동압 계측시 사용된 프레스톤 튜브의 직경 범위 내

에서 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 난류경계층이 완전 발달된 마지막 위치 $x=0.90\text{ m}$ 에서는 CPM으로 예측된 벽법칙들이 van Driest 등의 벽법칙들과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

서로 다른 크기의 프레스톤 튜브를 이용한 CPM을 활용하여 평판 위에 형성되는 천이경계층의 벽 마찰계수를 측정하였다. 연구의 결과를 다음과 같이 정리한다.

(1) 자유유동의 난류강도가 3.1%인 균일 유동중에 놓인 평판 위의 천이경계층내의 속도분포는 합리적으로 예측되었고, 이는 앞으로 이론 및 수치해석적 연구에서 활용될 수 있다.

(2) 벽법칙 식(2)를 사용하는 CPM은 평판위 천이경계층에서 사용될 수 있으며, 벽 마찰계수를 합리적으로 예측하였다. 다만 프레스톤 튜브의 유효거리계수를 합리적으로 추정함이 중요하고, 특히 층류경계층 영역에서는 더욱 그러하다. 이를 위해서 본 연구에서는 천이경계층에 적합한 새로운 관계식을 제시하였다.

후 기

본 연구는 1993년도 서울대학교 터보동력기계연구센터의 연구사업으로 수행되었음을 밝히며, 관계자 여러분에게 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Narasimha, R. and Dey, J., 1989, "Transition-Zone Models for 2-Dimensional Boundary Layers: A Review," *Sadhana*, 14, pp. 518~523.
- (2) Mayle, R. E., 1991, "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines," *ASME, Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 509~537.
- (3) Walker, G. J., 1993, "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines: A Discussion," *ASME, Journal of Turbomachinery*, Vol. 115, pp. 207~217.
- (4) Emmons, H. W., 1951, "The Laminar-Turbulent Transition in A Boundary Layer-Part

- I.," *J. Aero. Sci.*, Vol. 18, pp. 490~498.
- (5) Savill, A. M., 1993, "Further Progress in the Turbulence Modelling of by-pass Transition," *Proceeding of Second International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, pp. 583~592.
- (6) Nitsche, W., Thunker, R. and Haberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method," *Turbulent Shear Flows*, Vol. 4, pp. 261~276.
- (7) 강신형, 윤민수, 전우평, 1994, "프레스톤 튜브를 이용한 벽면 전단응력 측정을 위한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제7호, pp. 1873~1880.
- (8) 강신형, 이정민, 전우평, 유정열, 1992, "급격한 조도의 변화가 있는 평판 난류경계층에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제11호, pp. 2349~2357.
- (9) Szablewski, W., 1969, "Turbulente Grenzschichten in Ablosenahe," *Z., Angrew. Math.*, Vol. 49, pp. 215.
- (10) Dhawan, S. and Narasimha, R., 1958, "Some Properties of Boundary Layer Flow during Transition from Laminar to Turbulent Motion," *J. Fluid Mech.*, Vol. 3, pp. 418~436.
- (11) Mayle, R. E. and Paxson, D. E., 1989, "A New Look at Wake Flow," Ph. D. Thesis, Rensselaer Poly. Inst.
- (12) Sohn, K. H. and Reshotko, E., 1991, "Experimental Study of Boundary Layer Transition with Elevated Freestream Turbulence on a Heated Flat Plate," *NASA CR 187068*.
- (13) White, F. M., 1974, *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill, U. S. A.
- (14) Clauser, F. H., 1954, "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients," *J. Aeronaut. Sci.* 2, pp. 91~108.