

천이경계층에서의 간헐도 측정에 관한 실험적 연구

임 효 재[†], 안 재 용*, 백 성 구*, 정 명 균*

호서대학교 기계공학과, *한국과학기술원 기계공학과

Experimental Study on Measuring the Intermittency in the Transitional Boundary Layer

Hyo-Jae Lim[†], Jae-Yong Ahn*, Seong-Gu Baek*, Myung-Kyoon Chung*

Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea*

(Received October 28, 2002; revision received November 15, 2002)

ABSTRACT: An experimental study was performed to investigate the turbulence intermittency measuring methods across the boundary layer in the transition region. A single type hot-wire probe was used to measure instantaneous streamwise velocities in laminar, transitional and turbulent boundary layer. To estimate wall shear stresses on the flat plate, near wall mean velocities are applied to the principle of CPM. Distribution of intermittency factor is obtained by dual-slope method and compared to the results of four methods, u' , U , TERA and M-TERA method. In these methods, M-TERA shows a good agreement in the near wall region. However, the result of M-TERA method shows that intermittency factor is underestimated in the outer part and outside of the boundary layer and the dimensional constant of M-TERA method should be changed appropriately depending on measuring point.

Key words: Transitional boundary layer(천이경계층), Intermittency(간헐도), Flat plate flow(평판유동), Hot-wire anemometer(열선 유속계), Turbomachinery(유체기계)

기 호 설 명

C : 문턱 상수
 Re_x : Reynolds 수(= $U_\infty x / \nu$)
 Re_θ : Reynolds 수(= $U_\infty \theta / \nu$)
 t : 시간 [s]
 u : 주유동 방향 요동속도 [m/s]
 U : 평균 속도 [m/s]
 x : 유동 방향 거리 [m]

y : 수직 방향 거리 [m]

그 리 스 문 자

δ : 경계층 두께 [m]
 δ^* : 배제 두께 [m]
 θ : 운동량 두께 [m]
 γ : 간헐도

상첨자

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-41-540-5802; fax: +82-41-540-5808
 E-mail address: hjlim@office.hoseo.ac.kr

' : 평균 제곱근(root mean square)
 + : 벽면 좌표계에 의한 거리
 - : 평균

하점자

∞ : 자유흐름

1. 서 론

유동장 안에 놓인 물체 주위에는 유체의 점성에 의해 외부 유동과 다른 경계층이 발달하게 된다. 이러한 경계층은 보통 층류경계층으로 시작하여 유체역학적 특성이 상이한 난류경계층으로 발달하게 된다. 층류에서 난류로의 전환이 이루어지는 경계층을 천이경계층이라 하는데, 천이영역에서는 표면 마찰계수와 열전달률 등이 연속적이면서도 급격하게 증가한다. 특히, 공조 시스템에 많이 사용되는 유체기계의 대부분은 천이영역을 포함한다. 한 예로, 송풍기 깃의 경우 경계층에서 천이영역은 깃 코드 크기의 50~80%에 달하는 것으로 확인되었다.⁽¹⁾

천이경계층에 영향을 주는 요소로는 자유유동의 난류강도, 압력구배, 표면조도, 표면곡률, 표면 열전달, 음향, 레이놀즈수 등 다양하다.⁽²⁾ 또한 평판경계층 유동과 같은 단순한 유동장의 경우에도 천이의 현상은 3차원의 매우 복잡한 유동특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 난류로 발전해 가는 천이현상을 설명하기 위한 이론적 방법이 아직 정립되지 못하고 있다.⁽³⁾ 따라서 유체기계를 설계할 때는 실험결과에 바탕을 둔 상관식을 이용하고 있다. 이러한 상관식으로는 여러 종류가 있지만 실험환경에 따라 그 결과가 산만해서 천이에 대한 보편적인 상관식은 아직 없다. 이러한 문제점의 원인 중 하나로서는 경계층에서 천이영역의 위치를 결정하는 방법이 통일되지 않았음을 들 수 있다.⁽⁴⁾ 천이영역의 시작점을 결정하는 대표적인 방법은 다음과 같다.

첫째, 외삽을 통해서 얻은 난류경계층 두께가 0이 되는 지점, 둘째, 형상계수(shape factor)가 2.6에서 벗어나기 시작하는 지점, 셋째, 속도분포가 Blasius 분포에서 벗어나기 시작하는 지점, 넷째, 간헐도(intermittency factor)가 일정한 값에 도달하는 지점, 다섯째, 난류반점(turbulent spot)이 발생하기 시작하는 지점, 마지막으로 표면 마찰계수(skin friction coefficient)가 최소가 되는 지점으로 천이영역을 결정한다.

위의 조건 중, 첫번째 조건은 경계층의 두께를

정확하게 측정하는 데 어려움이 따르고 두번째와 세번째의 경우는 층류경계층에서도 발생하기 때문에 천이경계층만의 특성으로 보기 힘들다. 마지막 세 가지의 경우는 서로 비슷한 위치를 나타내는데 난류반점의 발생지점은 실험적으로 명확히 측정하기가 어렵다. 따라서 간헐도를 측정하는 방법과 표면 마찰계수를 측정하는 방법이 천이의 영역을 결정하는 데 가장 많이 쓰이고 있다. 표면 마찰계수를 측정하는 방법의 경우 비교적 정확한 실험값을 얻을 수 있다는 장점이 있으나 표면에 마찰계수 측정을 위해 구멍을 뚫어야 한다거나 LISF(Laser Interference Skin Friction meter) 등의 장비를 사용해야 하는 이유로 실험 장치의 구현에 있어서 애로가 있다. 최근 CPM(Computational Preston Tube Method)을 이용하여 경계층의 평균 속도를 측정하는 것만으로 표면 마찰계수를 계산할 수 있는 비교적 간편한 방법이 제시되었다.⁽⁵⁾ 그러나 정확한 값을 얻기 위해서는 벽면에 아주 가까운 위치의 속도를 측정해야만 하는데 이때 벽면으로부터의 정확한 거리를 측정하는 데 오차가 포함되고 압력분포가 있는 유동장에서의 적용은 자세히 보고된 바가 없기 때문에 널리 쓰이고 있지는 않다. 따라서 간헐도의 측정은 비교적 간단하게 천이의 위치를 판단할 수 있는 방법 중 하나이다. 실제로 간헐도 측정을 통해 천이의 위치를 판단하는 방법은 여러 연구자에 의해 사용되어 왔다.^(2,4)

간헐도 측정을 통한 천이영역 결정은 주유동 방향으로 벽근처의 간헐도를 측정하는 것만으로도 가능하다. 따라서 유동 방향의 간헐도 분포의 경우 많은 실험자료가 축적되어 있고, 이를 바탕으로 해서 일반적인 간헐도 분포곡선이 제시되었다.⁽⁶⁾ 제시된 일반적인 간헐도 분포곡선을 자유유동의 난류강도와 압력구배 등의 유동조건을 바꾸어 가면서 얻은 실험결과와 비교한 결과, 조건의 변화에 크게 영향을 받지 않고 광범위한 조건에서 실험결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있다.⁽²⁾

이와는 반대로 벽면에 수직인 방향, 즉 경계층을 가로지르는 방향으로의 간헐도 분포에 대한 자료는 상대적으로 부족한 실정이다. 완전히 발달한 난류의 벽면에 수직인 방향의 간헐도 분포는 Klebanoff⁽⁶⁾에 의해 제시되었다. 그러나 천이경계층 영역에서의 간헐도 분포에 대해서는 아직 이론적으로 제안된 바가 없다. 천이경계층에서의

유동이 가지는 가장 큰 특징이 간헐적으로 난류 성분과 비난류 성분이 출현한다는 점을 고려할 때 간헐도의 측정은 천이경계층 영역의 구조를 파악하기 위해 반드시 필요하다. 특히 벽면의 조건이 매끈한 평판이 아닌 경우, 즉 볼록면(convex surface)과 오목면(concave surface), 흡수벽면(suction wall), 방출벽면(blowing wall) 등의 조건에서 간헐도의 분포를 확보함으로써 천이과정을 보다 올바르게 이해할 수 있다.⁽⁷⁾ 따라서 객관적이고 정확한 간헐도 분포를 얻는 방법이 필요하다.

본 연구는 현재까지 제시된 간헐도 측정방법을 이용하여 정확한 간헐도 분포를 얻을 수 있는지 확인하는 것을 목적으로 한다. 자유흐름의 평균 속도가 15 m/s이고 난류강도가 0.5%인 풍동실험을 수행하여 유동자료를 확보하고 고정된 기준값을 이용하여 사용하기에 편리한 4가지 간헐도 예측 알고리즘^(8, 10)을 실험결과에 적용하여 간헐도의 분포를 얻은 후 지금까지 소홀히 다루어졌던 벽면에 수직인 방향으로의 간헐도 분포를 관찰한다. 사용방법이 매우 불편함에도 불구하고 가장 일반적으로 사용되는 이중기울기법⁽⁴⁾(dual slope method)과의 비교를 통해서 간편하면서도 합리적인 간헐도 분포를 얻을 수 있는 알고리즘을 조사한다. 또한 계수들의 거동분석과 함께 천이 영역의 모형 개발자들이나 천이 유발 연구자들에게 보다 정확하고 다양한 데이터를 제공하는 것도 본 논문의 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 풍동 및 시험부

풍동은 개방순환형(open-return type)으로 제작하였다. 풍동은 전동기(motor), 송풍기(blower), 확산기(diffuser), 정류실(settling chamber), 수축기(contraction), 시험부(test section) 등으로 구성되어 있으며 Fig. 1에 나타내었다. 원심 송풍기는 5 KW, 220볼트, 교류3상 전동기로 구동되며, 전동기의 회전수는 범용 속도조절기(inverter)에 의해 원하는 회전수로 조절할 수 있게 한다. 유동박리를 방지하기 위한 최적의 조건으로 확산각을 8°로 하였다. 그리고 송풍기와 확산기 사이에는 유연한 방수포(flexible buffer)를 설치하여 송풍기의 진동이 시험부에 전달되는 것을 방지하였다. 정류실에는 폭이 5 cm인 하니콧을 사용하고 격자

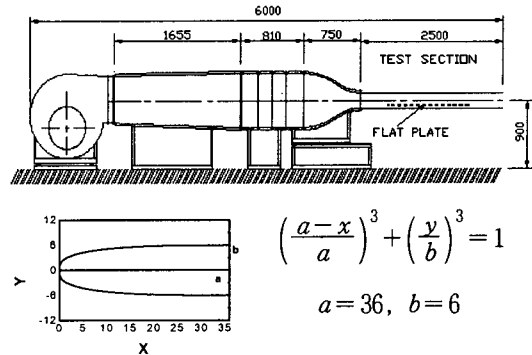


Fig. 1 Schematic diagram of wind-tunnel and leading edge of flat plate.

크기가 #60 이상인 스크린을 사용하였다. 정류실을 지난 유체는 수축부로 유입된다. 시험부는 가로 400 mm, 세로 190 mm, 길이 2,500 mm로 내부에서의 2차원 유동장이 형성되도록 설계 제작하였다. 그리고 수축부와 시험부 사이에 난류강도를 조절할 수 있도록 격자의 삽입이 가능하도록 하였다. 시험부의 윗면은 열선풍속계와 정압튜브가 이동할 수 있도록 폭 7 mm의 슬릿을 만들었다. 실험 중에는 이 슬릿으로 유출되는 유동의 영향을 없애기 위하여 측정장치가 삽입되는 부분을 제외한 나머지 공간은 막았다. 실험이 이루어진 속도인 15 m/s에서 시험부에서의 난류강도는 격자가 없을 때 약 0.5% 정도이며, 자유흐름의 평균 속도는 1% 범위 안에서 유지되었다. 유동장의 속도분포는 좌우상하 대칭으로 2차원 유동장으로 가정하기에 적합하였다. 사용된 평판은 폭 380 mm, 길이 1,200 mm, 두께 12 mm의 크기이며 알루미늄으로 제작하였다.

설치위치는 시험부의 약 2/3 지점인 바닥에서 약 60 mm, 떨어진 곳으로 시험부의 경계층 두께의 약 2배 되는 위치이다. 평판 위로는 130 mm의 공간이 있으며 이 공간에서 경계층의 유동장을 측정하게 된다. 그리고 자유흐름 유동장에서 난류강도를 최대한 줄이기 위해서 수축부에서 1,500 mm 이후에 설치하였다. 평판의 앞면은 유동박리를 막기 위하여 슈퍼-타원(super-ellipse) 형태로 가공하였다.

2.2 측정방법 및 데이터 처리

속도측정은 열선풍속계를 사용하였다. 직경 5.0

μm 의 텅스텐 열선을 사용한 I형 프로브(Dantec 55P14)를 사용하였다. 열선의 과열비(over-heat ratio)는 1.3이다.

속도의 검정은 피토판과 함께 사용하였다. 실험실의 온도변화와 열선의 산화, 부식의 영향을 줄이기 위하여 매 실험 전 속도 검정(calibration)을 하였으며, 속도 검정의 식으로는 4차의 다항식을 이용하였으며 이때 속도의 측정오차는 1% 이내이다. 그리고 사각파 테스트(square wave test)를 통한 열선의 전달주파수(cut-off frequency)는 30 kHz이다.

데이터 처리과정은 다음과 같다. 프로브에서 나온 신호는 CTA 시스템(Dantec 90N10)을 거쳐서 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 저장된다. 취득 주파수(sampling frequency)는 2 kHz로 정하고, 한점의 데이터 총 개수는 83,840개로 하였다. 열선이 벽면에 근접할 경우에 많은 문제가 발생한다. 만약 벽면의 열전도율이 유체보다 더 높은 경우에 열선 주위의 온도분포가 일정치 않아서 전도와 자연대류에 의한 영향을 보정해 주어야 한다. 본 실험에서는 위의 조건에 해당하지 않았다. 측정위치로는 열선의 물리적 두께로 인하여 $y=0.24\text{ mm}$ 이상에서부터 속도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평판경계층 속도분포의 측정

경계층의 속도측정은 스텝모터로 구동되는 이송장치를 이용하였으며, 측정위치의 최소간격은 0.06 mm이고 경계층 두께가 성장함을 고려하여 적당한 간격으로 37개의 수직 방향 위치에서 측정하였다. 주 유동 방향으로 평판의 앞전에서 150 mm부터 50 mm 간격으로 11곳의 위치에서 측정하였다. 천이의 위치는 어떤 정의를 사용하느냐에 따라 달라지는데 많은 연구자들이 표면 마찰계수가 최소가 되는 지점을 천이의 시작으로 보고 있다. 한편 표면 마찰계수가 최소가 되는 지점에서의 벽면 근처의 간헐도 값은 약 0.25인 것으로 보고되었다.⁽⁴⁾ 본 실험의 경우 이에 해당하는 벽면 근처의 간헐도 값은 앞전으로부터 250~350 mm인 구간에 위치한다. 이때 운동량 두께(momentum thickness)를 기준으로 한 레이놀즈수 Re_θ 는 각각 322, 413이고 레이놀즈수 Re 는 각

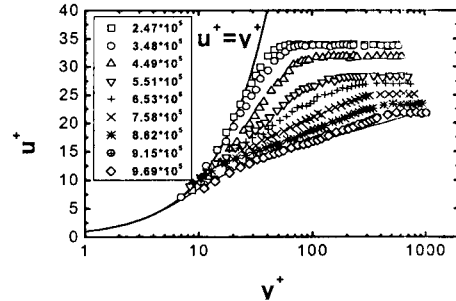


Fig. 2 Mean velocity profiles in the transitional boundary layer.

각 2.47×10^5 , 3.48×10^5 이다. Mayle⁽¹⁾이 제시한 상관식 $Re_\theta = 400(u'_\infty)^{-5/8}$ 를 적용해 볼 때 본 실험의 난류강도는 1%이므로 Re_θ 의 값이 400 정도에서 천이가 일어나야 한다. 따라서 $322 < Re_\theta < 413$ 의 구간에서 천이가 일어나는 것은 합리적인 결과임을 확인할 수 있고 또한 그 위치는 3.48×10^5 의 직전에 위치하는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 2는 경계층 내부의 무차원 평균 속도 u^+ 를 벽면수 좌표 y^+ 로 나타낸 것이다. 이때 벽면의 마찰력은 CPM⁽¹¹⁾을 이용하였다. 앞전에서의 압력구배의 영향으로 층류영역의 분포는 Blasius의 엄밀해와는 차이를 보이지만 점차 난류의 속도분포에 가까워지다가 $Re_x = 9.15 \times 10^5$ 에 이르러서 완전한 난류의 평균 속도분포에 일치한다. 이것은 간헐도값에 의해서도 확인할 수 있는데 $Re_x = 9.15 \times 10^5$ 에 이르러서야 벽면에서의 간헐도값이 0.99 이상이 되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 벽면의 간헐도값이 0.99 이상일 때를 완전히 발달한 난류로 판단한다.

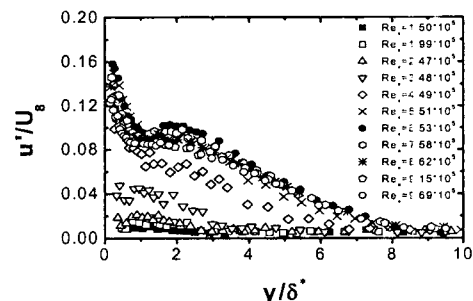


Fig. 3 Turbulent intensity of velocity fluctuation in the boundary layer.

Fig. 3은 경계층 내부의 난류강도를 자유흐름의 평균 속도로 무차원화한 값이다. 층류영역에서는 최대 요동속도값이 대략 $0.8 < y/\delta^* < 1.5$ 에 위치한다. 천이영역인 $Re_x = 3.48 \times 10^5$ 이후에는 최대 요동속도의 위치가 벽면으로 이동함과 동시에 그 값이 빠른 속도로 커지는데 $Re_x = 6.53 \times 10^5$ 일 때 $u'/U_\infty = 0.16$ 의 값을 가진 후 레이놀즈수가 커지면서 요동속도의 값은 작아진다. 이러한 현상은 Kuan and Wang⁽⁴⁾에 의해서도 보고된 바 있다.

한편 천이영역에 해당하는 $3.48 \times 10^5 < Re_x < 7.58 \times 10^5$ 의 경우 $y/\delta^* \approx 2$ 의 위치에서 작은 피크(peak)값을 갖는데 이러한 현상은 자유흐름의 난류강도가 3% 이하인 유동의 천이영역에서 발생하는 현상이다.⁽¹²⁾ 이것은 천이경계층 내부의 일정위치에 난류 반점이 간헐적으로 통과함으로써 속도가 층류값에서 난류값으로 순간적으로 갑자기 바뀌므로 생기는 불안정성에 기인한다고 주장되고 있다.⁽¹¹⁾

3.2 간헐도 측정 알고리즘의 비교

비교대상으로는 u' 방법, U 방법, TERA, M-TERA 등 4가지 방법을 선택하였다. Fig. 4는 위의 4가지 알고리즘을 통해 얻은 천이의 중간지점에서의 간헐도 분포를 나타낸 것이다.

3.2.1 u' 방법

u' 방법은 Shaw et al.⁽⁸⁾에 의해 제시되었다. 이 방법은 주유동 방향의 요동속도인 u 를 조사함수로 사용하고 그 절대값인 $|u|$ 를 판별함수, 그리고 해당위치의 u' 를 기준값으로 사용하였다.

따라서 그 식은 다음과 같다.

$$|u| > C_1 u_{rms} \quad (1)$$

이 방법을 유동장에 적용한 결과는 Fig. 4에 표시되어 있는데, 벽면 간헐도의 값이 클 경우 경계층의 바깥쪽 부분에서 잘못된 예측을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 경계층 바깥 부분에서 u' 값이 매우 작아짐에 따라 기준값이 작아지기 때문에 발생하는 현상이다.

3.2.2 U 방법

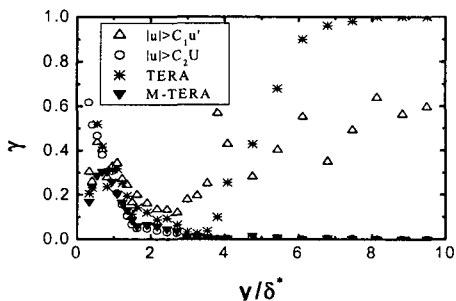
U 방법은 조사함수와 판별함수는 u' 방법과 동일하지만 해당위치의 평균 속도인 U 를 기준값으로 사용하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$|u| > C_2 U \quad (2)$$

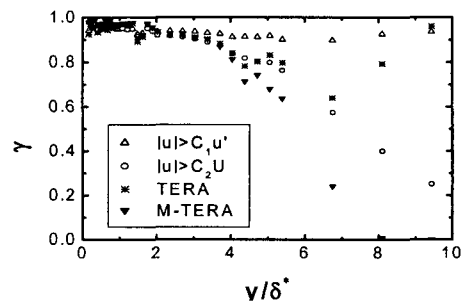
U 방법의 경우에는 벽면 간헐도의 값이 작은 영역에서, 벽면에 가까워짐에 따라 간헐도값이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다[Fig. 4(a)]. 이것은 벽면에 가까이 가게 되면 평균 유동속도 값은 경계조건의 의해 0으로 근접하기 때문인데 이에 따라 기준값은 매우 작아지면서 간헐도값이 너무 크게 예측되는 것이다. 따라서 벽면 근처에서 결정한 상수값을 그대로 사용하는 것에는 무리가 있음을 알 수 있다.

3.2.3 TERA(Turbulent Energy Recognition Algorithm) 방법

TERA 방법은 $u(\partial u / \partial t)$ 를 조사함수로 사용하고 정해진 시간간격 동안의 조사함수의 평균값을



(a) $Re_x = 3.48 \times 10^5$



(b) $Re_x = 8.62 \times 10^5$

Fig. 4 Comparison of four algorithms.

판별함수로 사용한다. 따라서 전체적인 식은 다음과 같다.

$$\left| \overline{u \frac{\partial u}{\partial t}} \right| > C_3 \left(u \frac{\partial u}{\partial t} \right), \quad (3)$$

이 방법은 Falco and Gendrich⁽⁹⁾에 의해 완전히 발달한 난류의 구조를 밝히기 위해 제안되었고 Walker and Solomon⁽¹³⁾에 의해 터보 기계에서의 간헐도 측정에 사용되었다. 이 방법은 앞서 밝힌 두 가지 방법에 비해 비선형 형태인 조사함수를 사용함으로써 난류 부분과 비난류 부분을 더욱 확실하게 구별할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이 방법을 적용해 본 결과는 Fig. 4에 표시하였는데, 경계층의 중심부 영역에서 비교적 합리적인 결과를 얻었으나 바깥 경계층 부분과 경계층 외부에서의 값이 크게 증가해가는 것을 확인할 수 있다. 이것은 $|u| > C_1 u'$ 의 경우와 마찬가지로 경계층의 바깥쪽 부분과 경계층 외부, 즉 후류(wake)에서의 유동속도값이 작아지고 그에 따라 기준값이 작아지면서 간헐도의 값이 크게 계산된다고 볼 수 있다.

3.2.4 M-TERA(Modified-Turbulent Energy Recognition Algorithm) 방법

M-TERA 방법⁽¹⁰⁾은 TERA 방법에서 사용한 조사함수와 판별함수가 난류성분과 비난류성분을 확실하게 구별할 수 있다는 장점을 고려하여 동일한 함수형태를 사용하고 있다. 그러나 기준값의 경우는 다음과 같은 새로운 형태를 제안하였다.

$$\left| \overline{u \frac{\partial u}{\partial t}} \right| > C_4 U \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)' / \left(u \frac{\partial u}{\partial t} \right), \quad (4)$$

M-TERA 방법이 다른 식들과 다른 것은 상수가 차원을 갖는다는 점이다. M-TERA 방법의 적용결과를 Fig. 4에 표시하였는데 벽면 간헐도값에 상관없이 기준값의 함수가 적절히 계산됨으로써 비교적 합리적인 거동을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 네 가지의 간헐도 측정 알고리즘 중 그 성능이 가장 좋다고 생각할 수 있다. 위에 식에서 적용한 문턱상수는 실험값과 비교하여 최적화된 값으로 $C_1=0.05$, $C_2=0.03$, $C_3=0.06$, $C_6=2.0$ 이다.

3.3 평판경계층에서의 간헐도 분포

앞 절에서 지금까지 제안된 간헐도 계산 알고리즘 중에서 M-TERA 방법이 가장 합리적인 거동을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 M-TERA 방법을 전체 유동장에 적용하여 간헐도 분포를 얻고 그 결과가 이중기울기법에 일치하는지 확인하는 작업이 필요하다. 이중기울기법은 앞절에서 언급한 대로 기준값의 변화에 따른 조사함수의 분포를 고려함으로써 합리적인 결과를 얻을 수 있기 때문에 현재 가장 많이 쓰이고 있다. 그러나 유동장 내부의 모든 위치에서 일일이 기준값을 결정해 주어야 하는 불편함이 따른다. 또한 두 개의 직선을 긋는 과정에서 연구자의 판단에 따라 약간의 오차가 포함될 소지를 가지고 있다. 반면 M-TERA 방법은 기준값을 특정 함수를 통해 결정하므로 기준값을 빠르게 결정할 수 있고 유동의 속도신호에 대해서만 기준값이 결정되므로 간편하고 객관적인 방법이다.

Fig. 5는 유동 방향으로의 벽 근처 간헐도의 분포를 나타낸 것이다. 벽 근처라고 함은 그 위치가 절대적으로 정해져 있지는 않지만 일반적으로 $y/\delta \approx 0.2$ 를 의미한다.⁽⁷⁾ Fig. 5에 실선으로 표시된 그래프는 Narasimha⁽¹⁴⁾가 제시한 보편적인 간헐도 분포이다. 그 식은 다음과 같다.

$$\gamma = 1 - \exp(-0.412 \xi^2) \quad (5)$$

여기서 $\xi = (x - x_1)/(x_{0.75} - x_{0.25})$ 이고, x_1 는 천이의 시작점, $x_{0.75}$, $x_{0.25}$ 는 간헐도의 값이 각각 0.25와 0.75인 위치이다. 이 식은 주유동 방향의 벽 근처 간헐도 분포에 있어서는 그 기준이 될 만큼 널리 인정되고 있다. Fig. 5를 관찰하면 각각의

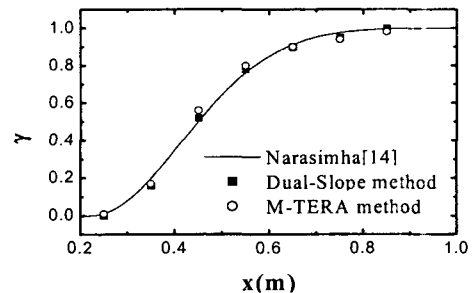


Fig. 5 Streamwise intermittency distribution.

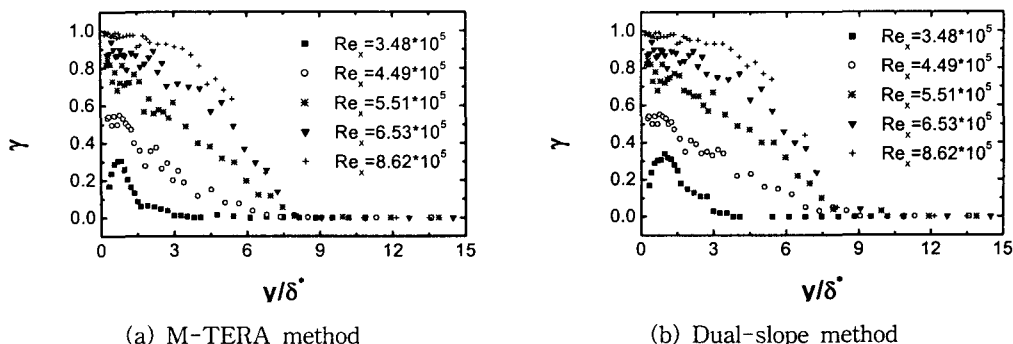


Fig. 6 Intermittency distributions.

값이 보편적인 간헐도 분포와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 보편적인 간헐도 분포와 일치한다는 것만으로 합리적인 간헐도 알고리즘이라고 볼 수는 없는데 그 이유는 대부분의 간헐도 알고리즘이 $y/\delta \approx 0.2$ 의 벽 근처 영역을 기준으로 상수를 결정하기 때문이다. M-TERA 알고리즘 역시 벽 근처 간헐도의 값을 기준으로 상수가 정

해졌기 때문에⁽¹⁰⁾ 보편적 간헐도 분포와 일치하는 것은 당연하다고 하겠다.

Fig. 6에서는 이중기울기법과 M-TERA 알고리즘을 통해 얻은 간헐도 분포를 표시하였다. 전체적인 경향은 비슷하지만 보다 자세한 비교를 위해 각각의 레이놀즈수에 대한 두 방법의 결과를 Fig. 7에 표시하였다. 벽면에서의 값은 거의 일치

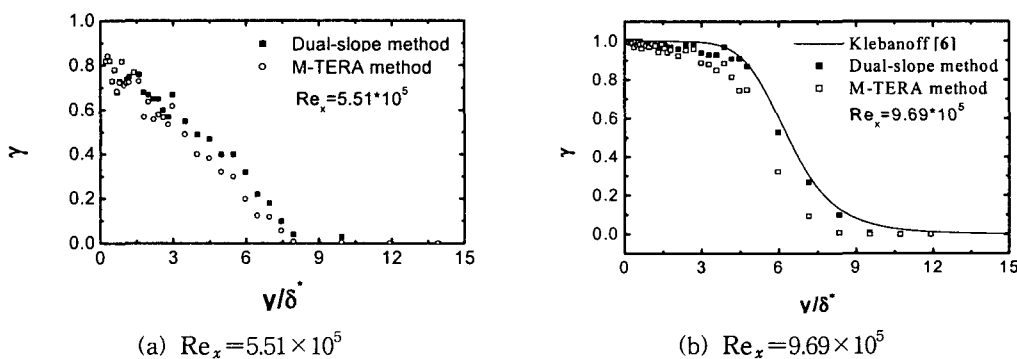


Fig. 7 Comparison between M-TERA method and dual-slop method.

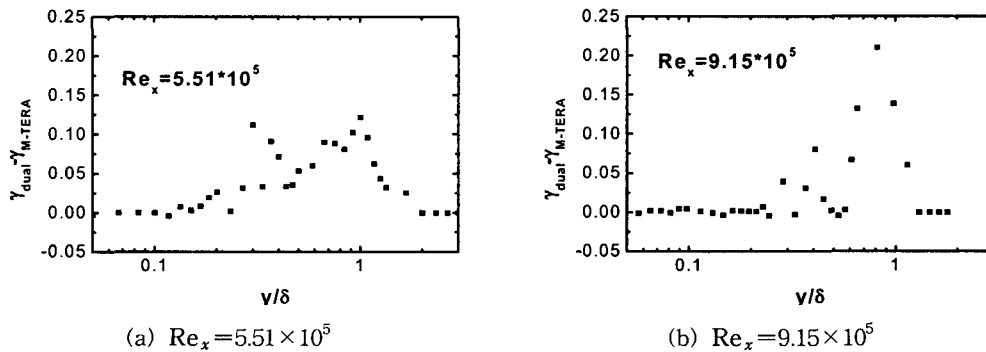


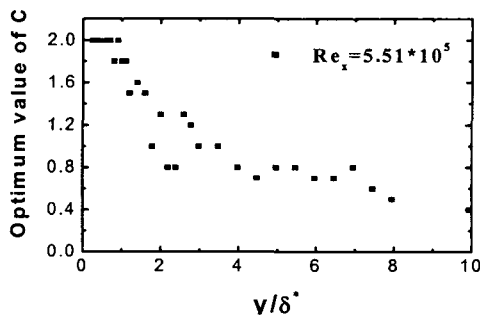
Fig. 8 Difference between M-TERA method and dual-slop method.

하고 있는데 레이놀즈수가 증가하면서 값이 일치하는 영역이 점점 넓어짐을 확인할 수 있다. 그러나 바깥 경계층 영역에서의 값은 서로 일치하지 않는데 완전히 발달한 난류의 경우에서 천이 영역보다 두 방법의 차이가 크게 나타났다. 또한 전체 영역에 걸쳐서 M-TERA 방법이 이중기울기법에 비해 간헐도값이 작게 측정되는데 두 가지 방법에 의해 측정된 간헐도값의 차이를 경계층의 두께로 무차원화하여 Fig. 8에 표시하였다. 대체로 $y/\delta \approx 0.2$ 까지는 차이가 거의 없지만 벽면에서 멀어지면서 그 차이가 커지다가 $y/\delta \approx 1$ 에서 가장 큰 차이를 나타낸다. 두 가지 방법 모두 올바른 경향을 보이기 때문에 천이경계층 영역에서의 비교만으로는 어느 한쪽이 명백하게 틀렸다고 말할 수는 없지만 완전히 발달한 난류의 경우, 경계층 바로 바깥쪽에서의 값을 비교하면 M-TERA 알고리즘에 의한 값이 실제보다 다소 작다고 생각할 수 있다. 경계층 바깥(wake region)에서도 경계층 내부의 난류 버스팅(turbulent bursting)의 발달로 인해 순간적으로 큰 에너지를 가지는 와가 지나가므로 간헐도의 값은 0이 아니다. 두 가지 방법 중 어느 것이 더 합리적인 결과를 나타내는지 보다 확실하게 확인하기 위하여 완전히 발달한 난류영역에서의 간헐도 분포를 Klebanoff⁽⁶⁾가 제시한 이론식과 비교하였다. 그 결과 이중기울기법에 의한 간헐도 분포는 이론식의 분포와 잘 일치하는 반면 M-TERA 알고리즘에 의한 간헐도 분포는 바깥 경계층 영역에서 이론값보다 작은 값을 나타내는 것을 확인하였다. 이중기울기법에 의한 간헐도 분포가 이론식의 분포와 일치한다는 것은 Chew et al.⁽⁷⁾에

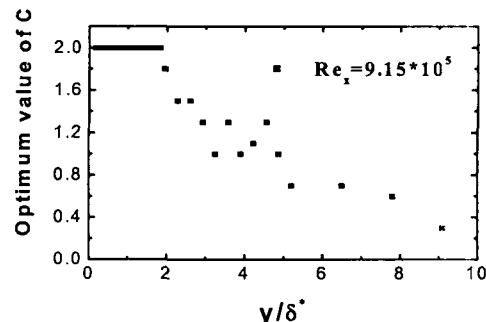
의해서도 확인된 바 있다. 이에 근거하여 천이경계층에서의 분포 역시 이중기울기법에 의한 방법이 더욱 합리적이라고 생각할 수 있다.

3.4 위치에 따른 계수의 변화

앞 절에서 천이경계층의 간헐도 분포를 얻는데는 이중기울기법이 M-TERA 방법보다 합리적인 결과를 얻는 것을 확인하였다. 그럼에도 불구하고 M-TERA 방법은 이중기울기 방법에 비해 사용하기가 편리하고 객관적이라는 장점을 가진다. 궁극적인 목표는 차원을 가지는 수인 M-TERA 방법의 계수를 무차원 상수로 전환하는 것이지만 현재로서는 실험 데이터의 양이 제한적이기 때문에 일반적인 함수형태를 찾아내는 것은 불가능하다. 그러나 M-TERA 방법으로 이중기울기법과 동일한 결과를 얻기 위해서는 계수가 어떠한 형태로 변화해야 하는지는 단편적으로나마 확인할 수 있다. Fig. 9에서 이러한 계수의 변화를 비제 두께로 무차원화하여 나타내었다. 벽면 근처에서는 기존의 계수인 2.0으로 합리적인 예측이 가능하지만 벽면에서 멀어질수록 그 값이 작아져야 함을 확인할 수 있다. 따라서 벽면에서 결정된 상수값을 경계층 전체 영역에 적용하는 방법으로는 올바른 간헐도 분포를 얻을 수 없음을 확인할 수 있다. 한편 레이놀즈수가 커질수록 M-TERA 알고리즘과 이중기울기 방법에 의한 결과가 일치하는 부분이 넓어지는 것처럼 보이는데 경계층 두께로 무차원화할 경우 두 방법에 의한 결과가 일치하는 부분은 $y/\delta \approx 0.2$ 정도로 일정하다.



(a) $Re_x = 5.51 \times 10^5$



(b) $Re_x = 9.15 \times 10^5$

Fig. 9 Optimal values of dimensional coefficient for M-TERA method.

4. 결 론

평판경계층 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 간헐도의 분포를 측정하였고 간헐도를 계산하는 알고리즘들의 성능을 비교하였다. 적용방법이 비효율적이지만 정확한 값을 예측할 수 있는 이중기울기법의 결과를 기준으로, $|u| > C_1 u'$, $|u| > C_2 U$, TERA, M-TERA 등 4가지 방법의 성능을 비교하였는데, 앞의 세 가지 방법이 벽 근처 혹은 경계층 외부에서 물리적인 현상과 상이한 값을 계산하는 데 비하여 M-TERA 방법의 경우 벽면 간헐도의 분포는 물론 천이경계층 영역 전체에서 비교적 합리적인 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 경계층의 끝부분에서는 실제 물리적인 현상을 올바르게 표현하지 못하고 실제보다 작은 값이 계산됨을 확인하였다.

또한 올바른 간헐도 분포를 얻기 위한 계수의 변화를 살펴본 결과 벽면에서 멀어질수록 계수의 값이 작아져야 한다. 따라서 벽면 간헐도값을 기준으로 설정한 상수를 경계층의 전 영역에 적용하는 방법으로는 경계층 내부의 간헐도 분포를 올바르게 얻을 수 없다는 것을 확인하였다. 따라서 M-TERA의 기준값을 결정하는 차원상수는 함수의 형태를 가져야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원(98-0020-1201-3)와 호서대학교 반도체장비국산화연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mayle, R. E., 1991, The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines, ASME, J. of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 509-536.
2. Abu-Ghannam, B. J. and Shaw, R., 1980, Natural transition of boundary layer-the effects of turbulence, pressure gradient, and flow history, J. Mech. Eng. Sci., Vol. 22, No. 5, pp. 213-228.
3. Fasihfar, A. and Johnson, M. W., 1992, An improved boundary layer transition correlation, ASME Paper No. 92-GT-245.
4. Kuan, C. L. and Wang, T., 1990, Investigation of the intermittent behavior of transitional boundary layer using a conditional averaging technique, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 3, pp. 157-173.
5. Nitsche, W., Thunker, R. and Haberland, C., 1983, A computational preston tube method, Turbulent Shear Flows, Vol. 4, pp. 261-276.
6. Klebanoff, P. S., 1955, Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, NACA Report #1247.
7. Chew, Y. T., Shah, D. A. and Wan, J., 1999, An envelope method for detection of turbulence intermittency in a transitional boundary layer, Fluid Dynamics Research, Vol. 24, pp. 7-22.
8. Shaw, R., Hardcastle, J. A., Riley, S. and Roberts, C. C., 1985, Recording and analysis of fluctuating signals using a microcomputer. Measurement, Vol. 3, No. 1, pp. 33-39.
9. Falco, R. E. and Gendrich, C. P., 1990, The turbulence burst detection algorithm of Z. Zaric. In: Kline, S. J. and Afgan, N. H. (Eds.), Near-Wall Turbulence, Zoltan Zaric Memorial Conference, Hemisphere, New York, pp. 911-931.
10. Zhang, D. H., Chew, Y. T. and Winoto, S. H., 1995, A proposed intermittency measurement method for transitional boundary layer flows, Experimental Fluids, Vol. 19, pp. 426-428.
11. Shin, S. H., Jeon, W. P. and Kang, S. H., 1998, Flow characteristics of transitional boundary layers on a flat plate under the influence of freestream turbulent intensity, KSME B, Vol. 22, No. 9, pp. 1335-1348.
12. Sohn, K. H., Reshotko, E. and Zaman, K. B. M. Q., 1991, Experimental study of boundary layer transition on a heated flat plate, FED-Vol. 14, Boundary Layer Stability and Transition to Turbulence, ASME, New York, pp. 163-172.

13. Walker, G. J. and Solomon, W. J., 1992, Turbulent intermittency measurement on an axial compressor blade, Proc. 11th Australian Fluid Mechanics Conf., Hobart, Australia, pp. 1277-1280.
14. Narasimha, R., 1957, On the distribution of intermittency in the transition region of a boundary layer, J. Aero. Sci., Vol. 24, pp. 711-712.