

표면온도 및 조도분포가 있는 경우 난류경계층의 완충층 거동에 관한 연구

정 동 빈 · 김 시 영

부경대학교

(1999년 2월 15일 접수)

A Study on the Behavior of Buffer Layer in Turbulent Boundary Layer with Variation of Surface Temperature and Roughness

Dong-Bin Jung and Si-Young Kim

Pukyung National University

(Received February 15, 1999)

Abstract

In this paper, the wind tunnel test was carried to investigate the behavior of buffer layer in turbulent boundary layer with variation of surface temperature and roughness. The results were as follows ;

1. The velocity in turbulent boundary layer was increased when the roughness height within viscous sublayer thickness was increased.
2. When the surface temperature was increased, the density of air was decreased and the velocity in turbulent boundary layer was increased. Thus, the thickness of turbulent boundary layer was decreased.
3. When the roughness height and surface temperature was increased simultaneously, the thickness of turbulent boundary layer was decreased.
4. The decrement of the thickness of turbulent boundary layer was more effected by the increment of the roughness height rather than the increment of surface temperature.
5. In this study, it was found that the condition of the highest velocity in turbulent boundary layer was the temperature 333K and roughness #100.

기호설명

U : 균일유속도 (m/s)

u^* : 점성마찰속도($u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$)

y : 경계층 내의 법선 방향 위치

u' : X 방향의 유속 변동분

u' : Y 방향의 유속 변동분

δ : 경계층 두께

η : y/δ

ν : 동점성계수

ρ : 밀도

τ : 벽면 전단응력

서 론

경계층이란 유체의 유동에서 고체표면 부근에 점성의 영향이 나타나서 생성되는 얇은 층을 말한다. 유체유동의 유형상은 층류유동과 난류유동으로 분류할 수 있으며, 유체의 유동이 층류인가 난류인가 하는 문제는 유체가 갖는 관성력과 점성력의 상대적 크기에 의하여 결정된다.

점성력에 비하여 관성력이 상대적으로 큰 난류유동에서의 경계층 이론은 해양, 항공, 우주산업 분야에서 연구가 되어오고 있는데, 그 원인은 유체가 물체 주위를 운동할 때 고체 부근에서 생성되는 고체표면과 유체와의 마찰층인 경계층이 발생하기 때문이다. 이것은 유체의 운동에너지를 소산시키는 주요 원인이 되므로 경계층의 두께가 얇아져야만 물체표면의 흐름이 마찰저항을 적게 받아 보다 적은 에너지로 효율적인 유체의 유동이나 물체의 이동이 가능하다. 이러한 이유로 비행기 몸체와 날개의 표면에 나타나는 공기의 유동이나 선박 및 잠수함의 표면에 나타나는 해수의 유동, 그리고 열교환기 내부의 파이프 유동 등 다양한 산업분야에서 경계층의 두께를 줄이는 연구가 많이 진행되어 왔다.

경계층의 발달을 억제시키는 많은 연구들 중에는 고체표면에 미소 기포를 분출하는 방법과 다른 종류의 기체를 분사시키는 방법²⁾ 등 여러 가지가 있다. 특히, 표면거칠기 변화라든가 폐열을 이용하여 고체표면의 온도를 변화시키는 방법은 설비적인 면이나 경제적인 면에서 매우 효율적이면서도 편리하여 많은 관심과 연구의 대상이 되어왔다.

본 연구에서는 경계층의 발달을 감소시키기 위하여 열판을 제작하여 표면온도를 293K, 333K, 373K로 변화시키고 동시에 열판의 표면이 매끄러운 것과 거칠기가 #100과 #50인 사포를 이용하여 열판표면에 거칠기의 변화를 주었다. 그래서 난류유동에서의 속도분포특성을 계측하여, 표면온도와 거칠기의 두 가지 변수가 경계층의 발달에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다. 또한 가장 효율적으로 경계층의 발달을 감소시킬 수 있는 표면온도 조건과 표면거칠기 조건에 관해 검토하였다.

이론적 배경

경계층의 개념은 1904년 독일의 항공력 학자인 Ludwig Prandtl에 의해 제창되었다. Prandtl의 실험으로부터, 충분히 큰 Reynolds수의 유동에서 고체벽 근방에 유체 자체 점성의 대소에 관계없이, 관성효과에 버금가는 점성효과가 크게 작용하는 얇은 층인 경계층이 존재한다는 것을 밝혀냈다. 이것은 고체 경계면에 인접한, 점성효과가 현저하게 나타나는 영역인 경계층이 Fig. 1과 같이 나타나는데, 특히 이 층에서 난류경계층이 얇아져야만 유동의 흐름이 좋아져서 산업분야에서 활용도가 높아진다.

본 실험에서는 산업분야에 유용한 난류영역에서 표면거칠기 변화와 표면온도 변화를 주었을 때, 경계층의 변화를 측정하여 가장 효율적인 유동의 상태를 연구하는 것이다. 따라서 난류영역은 Reynolds수가 4000이상이므로 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{5 \times 0.6}{1.51 \times 10^{-5}} = 198675$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{8 \times 0.6}{1.51 \times 10^{-5}} = 317881$$

여기서 V 는 유속, ν 는 동점성계수, L 은 입구길이를 나타낸다.

따라서, 유속이 5m/s와 8m/s는 모두 위치가 0.6m인 곳이 난류영역임을 알 수 있다.

표면거칠기를 주었을 때 난류경계층의 변화와 표면온도를 올렸을 때 난류경계층의 변화는 다음과 같은 조건으로 볼 수 있다.

표면거칠기의 증가로 경계층의 두께를 감소시킬 수 있는 조건은 점성저층 이내에서 표면거칠기를 증가시키는 것이며 다음 식과 같다.

$$Y^+ > K^+$$

$$\text{여기서, } Y^+ = \frac{y u_*^{*3}}{\nu}$$

$$K^+ = \frac{k u_*^{*4}}{\nu}$$

보통 점성저층의 두께는 0.2mm에서 0.3mm 이

내이므로 사포의 거칠기 #100은 표면거칠기의 두께가 0.15mm에서 0.2mm이고, #50은 0.3mm에서 0.4mm이므로 표면거칠기 변수는 이것을 사용하여 실험하였다.

완전전개 난류유동에서 평판벽면에 평행한 유동방향 좌표를 x 축, 평판벽면에 수직인 좌표를 y 축으로 선택하면 전단응력과 시간평균속도 사이의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \rho \bar{u}'v'$$

여기서 \bar{u} 는 x 방향의 속도 u 의 평균시간이고, u' , v' 는 각각 x 및 y 방향 속도의 난동성분이다¹⁾. μ 는 벽면에서 층류영역으로 0이 되고 본 실험의 영역인 난류영역에서의 $\tau_{yx} = -\rho \bar{u}'v'$ 가 된다. 전단응력(τ_{yx})은 온도가 상승하면 공기의 밀도(ρ)는 감소하고 $\bar{u}'v'$ 는 $Y^+ > K^+$ 을 만족하는 표면거칠기가 있을 때 감소한다. 따라서 평판 온도가 상승하고 거칠기가 존재하면 이 두 가지 변수가 상승적으로 작용하여 경계층의 두께가 감소한다.

점성저층에 존재하는 유속 u^* 는

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{|\bar{u}'v'|}^{(3)}$$

이며, 표면거칠기가 주어지면 $|\bar{u}'v'|$ 가 감소하므로 u^* 는 감소한다. 이것은 윤활작용에 의한 경계층 두께의 감소를 가져온다.

실험 장치 및 방법

1. 실험장치

본 실험은 균일한 유속을 가진 공기를 평판 위로 유동시키기 위하여 풍동(Wind tunnel)을 이용하였고, 평판의 표면온도를 변화시키기 위해서 열선을 매설시킨 열판과 표면조도를 변화시키기 위해 사포를 이용하였다.

풍동장치를 나타내며 개략도는 Fig. 1과 같은 구조의 흡입형 풍동이다. 구성은 자연스럽게 공기가 흡입될 수 있도록 sine 곡선로 설계된 공기 흡입구 부분과 균일한 유속을 가진 공기가 지나는 덕트 부분, 그리고 인버터의 주파수변환을 이용하

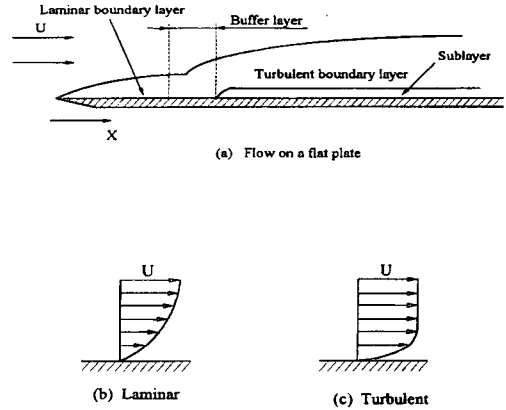
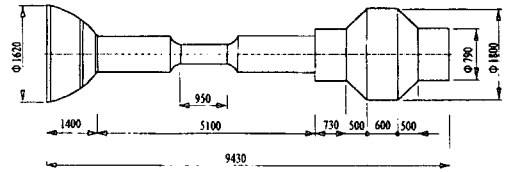


Fig. 1. Distribution of velocity.



Duct spec		Duct fan spec		Motor spec	
Length	9510mm	Diameter	2500mm	Type	Centrifugal
T-Length	950mm	Blast capacity	230m ³ /s	Motor	4P 220.57KV
T-Section	650 × 350	RPM	230	Control	Inverter

Fig. 2. Wind tunnel.

여 모터의 회전속도를 조절함으로써 유속을 변화시킬 수 있도록 된 송풍기로 되어있다.

시험부(Test section) 단면에서 난류의 평균속도분포를 계측하기 위하여 외경이 1.60mm인 스테인레스로 제작된 피토티 튜브(pitot tube)를 사용하였다. 피토티 튜브를 열판 표면으로부터 일정한 거리만큼 유동 방향에 대한 법선 방향으로 이동시키기 위하여 두 좌표로 이동 가능한 이송장치를 부착하여 실험하였다.

풍동장치의 시험부는 Fig. 2와 같은 구조로 되어있다. 풍동 시험부의 크기는 350mm(높이) × 650mm(폭) × 950mm(길이)로 제작되어 있지만, 보다 균일한 유속을 얻기 위하여 두께 10mm의 아크릴 판을 이용하여 시험부의 폭을 230mm로 축소하여 350mm(높이) × 230mm(폭) × 950mm(길이)의 크기로 조정하였다. 또한 시험부에 열판을

설치하여 표면온도를 변화시킴과 동시에 사포를 이용하여 표면조도의 변화를 줄 수 있도록 장치를 구성하였다.

Fig. 3의 ①과 같이 열판지지대 모두는 상하조절이 가능하도록 제작하여 수평계를 통해 열판의 수평을 조절할 수 있도록 하였다. Fig. 3의 ②와 같이 열이 발생하지 않는 부분은 150℃정도의 열에도 견딜 수 있는 열경화성수지 판을 사용하여 열판과의 접촉부분이 고열에 견딜 수 있도록 하였고, 그 열이 다른 부분으로 전달되지 않도록 하였다. 매끄러운 표면가공을 위해 자동 평면연삭기로 열판을 Fig. 3의 ③과 같이 300mm(길이) 200mm(폭)로 가공하였다. 표면조도를 변화시키기 위해 3mm의 두께를 가진 평판 위에 각각 #100과 #50인 사포를 예폭시 접착제로 접착하여 열판에 부착하였다. 설치 위치는 시험부 단면의 높이와 폭에서 중앙인 위치에 설치하였다. 열판의 열 발생은 열선이 매설되어 있는 소형 열판 4개를 철판 사이에 내장시켜 열을 발생시켰다. 열판의 온도조절은 온도센서인 열전쌍(thermocouple)과 마그네틱 스위치(magnetic switch)를 이용하였다. 설정온도에 이르면 전기를 차단하여 온도가 올라가지 못하도록 하였고, 온도가 내려가면 다시 전기를 공급

하여 일정온도가 유지되도록 하였다. 송풍기의 회전으로 인해 발생하는 진동이 시험부 바닥에 전달되는 것을 차단하기 위하여 풍동 시험부의 바닥에 고무판을 부착하였다.

2 실험 방법

공기의 밀도는 대기의 온도변화에 따라 달라지므로 하루 중 기온이 가장 높은 정오 이후나 기온차가 심한 일몰 시간대를 피해 실험을 함으로써 기온변화에 의한 유속의 변화를 가능한 최소화하였다.

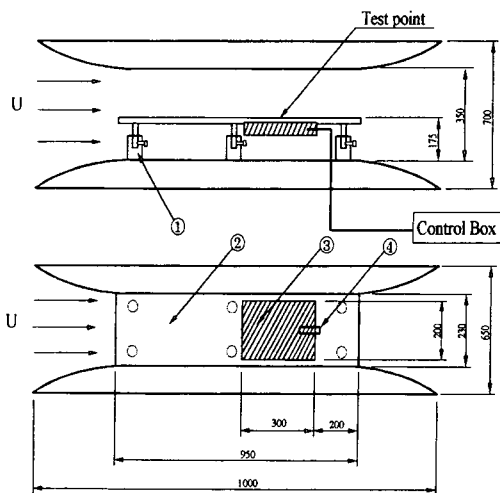
일정한 유속을 유지하기 위해서 풍동장치의 인버터나 모터에 일정한 전기를 공급할 수 있도록 건물 내부에 전력을 많이 소모하는 작동 기기들을 중지시킨 뒤 실험을 하였다.

상은 293K에서의 실험을 하기 위해 열판을 가열하지 않고 계측을 시작하였다. 계측기구는 피토티브를 마노메터(manometer)에 연결하여 두 좌표로 이송이 가능한 이송장치를 이용해서 1mm씩 유속의 흐름에 대한 법선 방향으로 이송시키면서 유속을 계측하였다. 균일유속 = U 가 나타난 뒤에도 일정한 높이인 30mm까지 계측을 계속해서 하였다. 측정 위치는 열판 중앙부의 표면에서 1mm씩 증가시켜 30mm까지 유속의 흐름 방향에 대한 법선 방향으로 올리면서 측정하였다.

균일유속은 5m/s와 8m/s로 하여 경계층 내부의 유속을 차례로 계측하였다. 상온 293K일 때의 유속의 계측이 끝나면 열판의 열을 마그네틱 스위치에 연결된 온도계로 333K까지 올리고 디지털 온도계로 열판의 중앙부분과 모서리 부분의 온도를 측정하여 온도가 일정하게 유지되는지 확인하였다. 균일유속이 5m/s와 8m/s인 경우에 경계층 내부의 유속분포를 계측하였다. 같은 방법으로 373K까지 온도를 올려서 5m/s와 8m/s일 경우, 경계층 내부의 유속을 각각 계측하였다.

매끄러운 표면의 실험이 끝나면, 다시 상온 293K에서 #100인 사포를 부착한 철판을 열판에 부착하여 균일유속을 5m/s와 8m/s로 했을 때 경계층 내부의 유속분포를 차례대로 계측하고, 온도를 333K와 온도 373K에서 계측하였다.

#50인 사포를 부착한 철판도 열판에 부착하여,



① Adjusting level leg	③ Heated plate
② Thermoset plastic	④ Thermocouple

Fig. 3. Test section of experimental object.

온도가 293K일 때의 균일유속 5m/s와 8m/s일 경우에 경계층 내의 유속을 측정하였다. 그리고 온도를 333K와 온도 373K에서 다시 균일유속을 5m/s와 8m/s일 때의 경계층 내의 속도분포를 측정하여 실험을 하였다.

결과 및 고찰

1. 유속이 5m/s일 때의 표면온도와 표면거칠기 변화에 따른 속도분포

Fig. 4는 균일유속이 5m/s이고 열판의 표면온도가 상온 293K인 경우에 표면이 매끄러운 경우, 사포의 거칠기가 #100, 그리고 #50인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 한 지점에서의 속도분포곡선은 같은 온도조건에서 표면

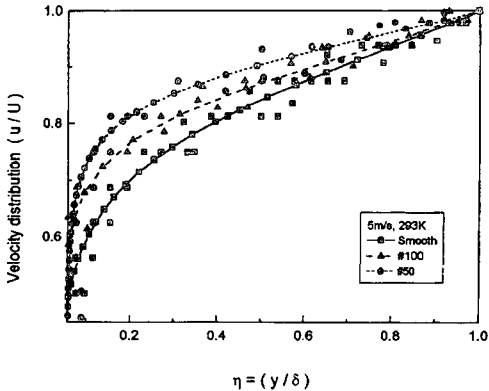


Fig. 4. Velocity distribution (5m/s, 293K).

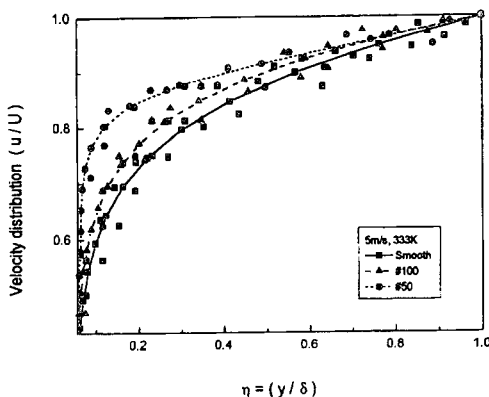


Fig. 5. Velocity distribution (5m/s, 333K).

거칠기의 증가에 의한 일정한 형태의 유속분포의 증가가 있었다. 이러한 현상은 점성저층 내에서의 표면거칠기의 증가로 인한 유속의 증가를 촉진함을 알 수 있다.

Fig. 5는 균일유속이 5m/s이고 열판의 표면온도가 333K인 경우에 표면이 매끄러운 경우, 사포의 거칠기가 #100, 그리고 #50인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면거칠기가 매끄러운 경우에는 0.73이고, 표면거칠기가 #100으로 증가했을 때 0.77이다. 그리고 표면거칠기 #50으로 증가시켰을 때 0.85로 증가하여 온도를 상승시켜도 표면거칠기의 증가로 인해 유속분포가 증가하였다. 특히, x 축 위치 0.7부터 표면거칠기 #100의 온도분포곡선이 표면거칠기 #50에 일치하였다. 따라서, Fig. 5에서는 다른 속도분포곡선보다도 표면온도가 333K일 때 표면거칠기가 #100인 경우에 천이 구역에 영향을 가장 많이 받아서 유속의 증가폭이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 균일유속이 5m/s이고 열판의 표면온도가 373K인 경우에 표면이 매끄러운 경우, 사포의 거칠기가 #100, 그리고 #50인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면거칠기가 매끄러운 경우는 0.75이고, 표면거칠기가 #100으로 증가했을 때

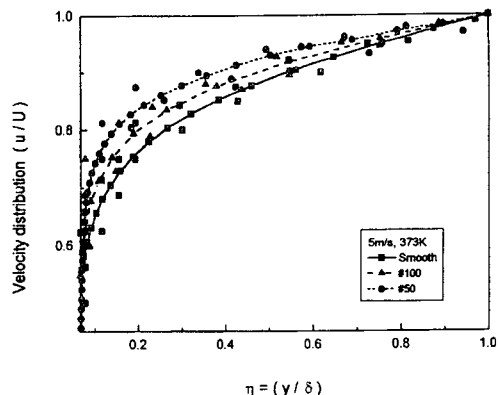


Fig. 6. Velocity distribution (5m/s, 373K).

0.8이다. 표면거칠기가 #50으로 증가했을 때 0.85로 0.05씩 일정하게 증가함으로써 온도가 상승해도 표면거칠기의 증가에 의한 유속분포의 증가가 있었다. 따라서, 표면거칠기 증가와 더불어 온도 증가도 유속의 증가를 계속해서 촉진하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 균일유속이 5m/s이고 열판의 표면이 매끄러운 경우에 대하여 표면온도분포를 293K, 333K, 그리고 373K인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서 온도변화에 따른 속도분포곡선의 증가치를 한 지점에서 보면 x축 위치 0.2에서 y축으로 표면온도가 293K인 경우에 0.7, 표면온도가 333K로 증가했을 때는 0.73이고, 온도가 373K로 증가했을 때는 0.76으로 증가하였다. 온도가 가장 높은 373K인 경우가 가장 빠르게 나타났으며 293K인 경우가 경계층 내의 속도분포가 가장 느리게 나타났다. 이러한 결과로, 열의 증가에 의한 점성저층 영역부근의 밀도의 감소로 점성저층유속(u^*)이 감소하였다. 그래서 이 부근에서 유체가 점성저층과 천이구역의 밀도 차이로 인해 서로 미끄러지는 윤활작용과 같은 효과를 가져와서 천이영역에 영향을 미치기 때문에, 유속의 증가가 나타나고 있다고 생각된다. 특히, 온도가 333K인 경우에는 x축 위치가 0.1까지는 293K보다 느리다가 그 이후부터 빨라져서 0.8부터는 373K의 속도분포에 가까워지는데 이러한 점으로 볼 때, Fig. 7의 다른 속도분포곡선보다는 천이영역에 영향을 더욱 많이 받아서 가장 큰 속

도 증가폭을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 균일유속이 5m/s이고 열판 표면의 거칠기가 사포 #100인 경우에 대해서 온도분포를 293K, 333K, 그리고 373K를 줄 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 표면온도의 증가에 의한 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x축 위치 0.2에서 보면, y축으로 표면온도가 293K인 경우에 0.75이고, 표면거칠기가 #100으로 증가했을 때 0.77이고 표면거칠기가 #50으로 증가했을 때 0.8로 증가함으로써 온도가 373K인 경우가 가장 빠르게 나타났으며 293K인 경우가 경계층 내의 속도분포가 가장 느리게 나타났다. 온도가 333K인 경우에는 x축 위치가 0.2까지는 293K보다 느리다가 그 이후부터 빨라지다가 0.7부터는 표면거칠기가 #50과 일치하는데 이것은 333K의 속도분포곡선의 증가폭이 Fig. 8에서 가장 크고 또한, 앞의 Fig. 7과 비교하였을 때 교란점이 유속의 증가로 인해서 x축으로 0.1, y축으로 0.1정도 이동하였고 0.1정도 빨리 373K의 속도분포곡선에 일치하였다. 이것은 속도증가폭이 Fig. 7의 333K보다도 크며, Fig. 8의 373K와 비슷한 효과를 보였다. 따라서, 온도와 거칠기의 상호작용에 의해서 유속의 증가를 더욱 촉진함을 알 수 있다.

Fig. 9는 균일유속이 5m/s이고 열판의 표면의 거칠기가 사포 50#인 경우에 대하여 온도분포를 293K, 333K, 그리고 373K인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서도 표

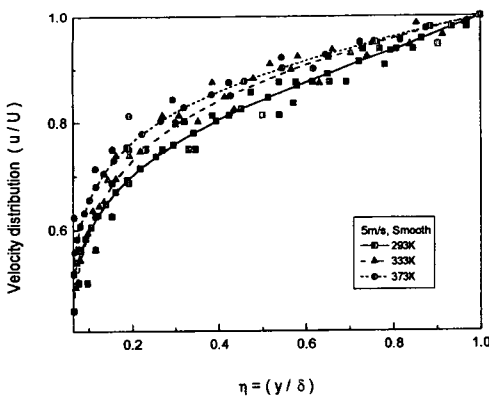


Fig. 7. Velocity distribution (5m/s, Smooth).

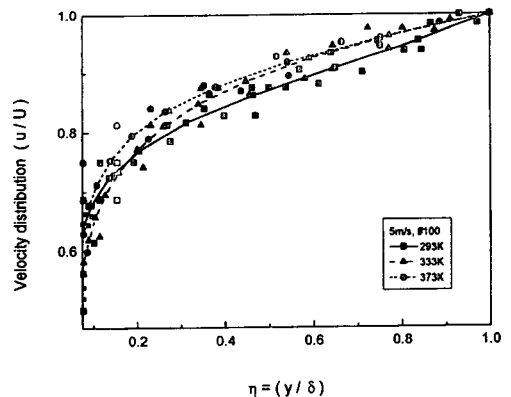


Fig. 8. Velocity distribution (5m/s, #100).

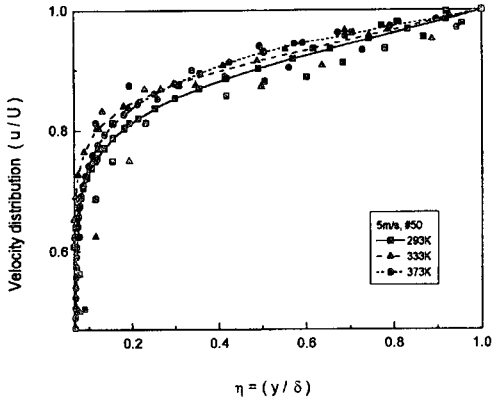


Fig. 9. Velocity distribution (5m/s, #50).

면온도의 증가에 의한 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면온도가 293K인 경우에 0.8이고, 표면온도가 333K로 증가했을 때 0.84로 증가하였다. 그러나 373K로 증가시켰을 때 0.83으로 감소함으로써 거칠기의 증가로 교란이 일어났다. x 축 위치 0.3이후부터는 373K인 경우가 가장 유속이 빠르게 나타났고 293K가 가장 느리게 나타났다. 그리고 333K인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포가 x 축 위치 0.3까지는 Fig. 8과는 달리 373K보다 유속이 빠르게 나타났다가 그 이후부터 감소하였는데 이것은 속도의 증가폭이 거칠기가 더욱 증가함에 따라 Fig. 8보다 감소함을 알 수 있다.

이상에서 유속이 5m/s이고 표면거칠기와 온도 변화를 변수로 주었을 때 대체로 두 가지 변수 모두 유속분포의 증가를 가져왔으며 온도가 333K일 때의 속도분포곡선의 증가폭이 비교적 크게 나타났고 온도가 333K이고 거칠기가 #100일 때 속도분포곡선의 증가폭이 가장 크게 나타났다.

2. 유속이 8m/s일 때의 표면온도와 표면거칠기 변화에 따른 속도분포

Fig. 10은 균일유속이 8m/s이고 열판의 표면온도가 293K인 경우에 표면이 매끄러운 경우, 사포의 거칠기가 100#, 그리고 50#인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 표면거칠기 증가에 따른 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면거칠

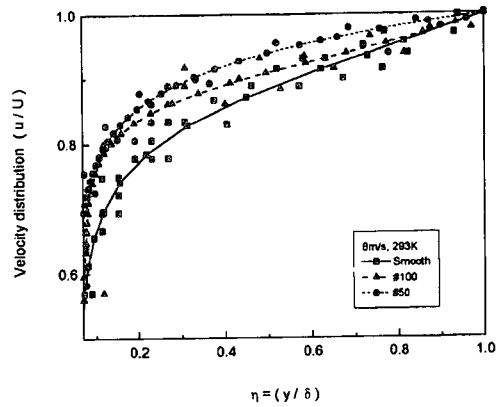


Fig. 10. Velocity distribution (8m/s, 293K).

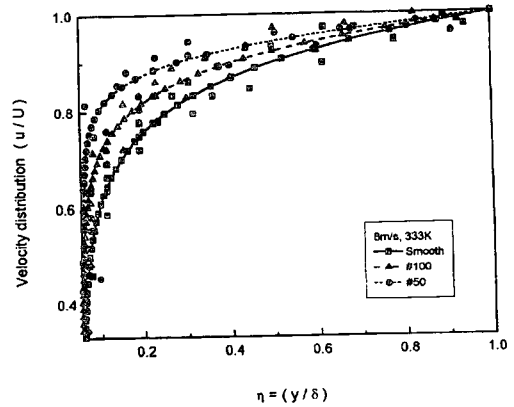


Fig. 11. Velocity distribution (8m/s, 333K).

기가 매끄러운 경우에 0.77이고, 거칠기가 #100으로 증가했을 때 0.84, 그리고 #50으로 증가했을 때 0.85로 증가했다. 그러므로 평균유속을 올리더라도, 표면거칠기를 증가 시켜보면 유속의 분포가 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, x 축 위치 0.16까지는 표면거칠기 #100의 속도분포곡선이 표면거칠기 #50에 가까워져서 큰 증가치를 보였으나, 0.8부터는 표면이 매끄러운 경우의 속도분포곡선에 가까워지는 것으로 보아서 속도분포곡선의 증가폭이 가장 적음을 알 수 있다.

Fig. 11은 균일유속이 8m/s이고 열판의 표면온도가 333K인 경우에 표면이 매끄러운 경우, 사포의 거칠기가 100#, 그리고 50#인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서, 표면거칠기의 증가에 따른 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로

로 표면거칠기가 매끄러운 경우에 0.75이고, 거칠기가 #100으로 증가했을 때 0.8, 그리고 #50으로 증가했을 때 0.86으로 증가함으로써 표면거칠기의 증가에 따라 유속분포의 증가가 있었고, Fig. 10과 비교하면 온도의 증가가 일정한 형태의 유속분포의 증가를 가져옴을 알 수 있다.

Fig. 12는 균일유속이 8m/s이고 열판의 표면온도가 373K인 경우에 표면이 매끄러운 경우, 사포의 거칠기가 100#, 그리고 50#인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서도, 표면거칠기 증가에 따른 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면이 매끄러운 경우에 0.83이고, 표면거칠기가 #100으로 증가했을 때 0.86, 그리고 #50일 때 0.89로 증가함으로써 표면거칠기의 증가에 따라 유속의 증가가 있었고 일정한 형태의 유속분포의 증가를 가져옴을 알 수 있다.

Fig. 13은 균일유속이 8m/s이고 열판의 표면이 매끄러운 경우에 대하여 온도분포를 293K, 333K, 그리고 373K인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서는 표면온도의 증가에 의한 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치는 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면온도가 293K인 경우에 0.74이고, 표면온도가 333K로 증가했을 때 0.75, 373K로 증가시켰을 때 0.83으로 증가함으로써 온도변화에 따른 속도분포는 온도가 가장 높은 373K인 경우가 가장 빠르게 나타났으며, 293K인 경우가 경계층 내의 속도분포가 가장 느리게 나타

났다. 이러한 이유는 표면온도의 증가에 의한 점성저층 영역부근의 밀도의 감소로 천이영역과의 밀도차이에 의한 윤향작용으로 천이영역에 영향을 주었기 때문에 유속분포의 증가가 나타나고 있다고 생각된다. 특히, 온도가 333K인 경우에는 X 축 위치가 0.3까지는 293K보다 느리다가 그 이후부터 빨라져서 0.7부터는 373K의 속도분포에 일치하는데 이러한 점으로 볼 때, 일정한 형태로 증가하는 다른 속도분포곡선에 비해 온도 333K의 속도분포곡선이 천이영역의 영향을 많이 받아서 유속이 8m/s이고 표면이 매끄러운 경우에는 가장 큰 유속 증가 폭을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 균일유속이 8m/s이고 열판의 표면거칠기가 #100일 경우에 대하여 온도분포를 293K, 333K, 그리고 373K인 경우에 대하여 경계층 내의

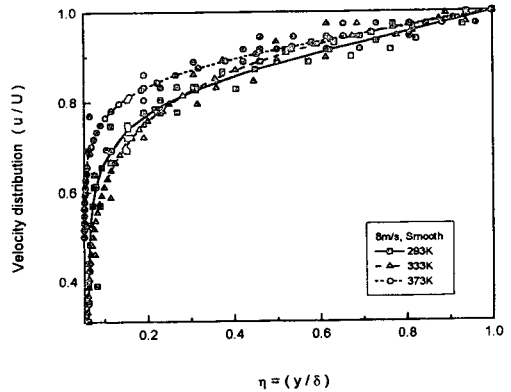


Fig. 13. Velocity distribution (8m/s, Smooth).

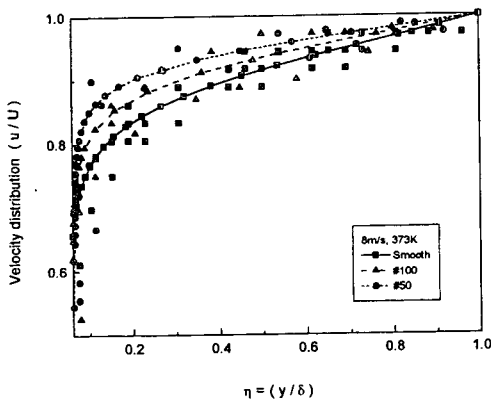


Fig. 12. Velocity distribution (8m/s, 373K).

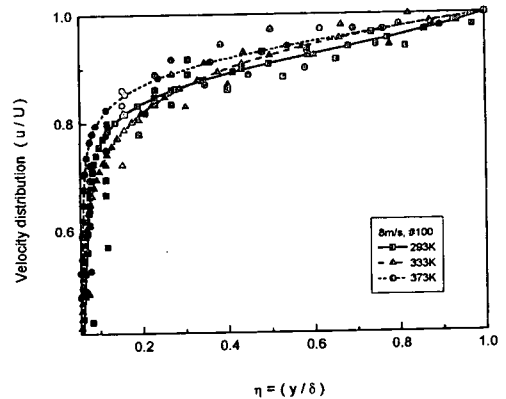


Fig. 14. Velocity distribution (8m/s, #100).

유속분포를 나타낸 것이다. 여기서도 표면온도의 증가에 의한 한 지점에서의 속도분포곡선의 증가치를 x 축 위치 0.2에서 보면, y 축으로 표면온도가 293K인 경우에 0.81이고, 표면온도가 333K로 증가시켰을 때 0.84, 373K로 증가했을 때 0.86으로 증가함으로써 온도변화에 따른 속도분포는 온도가 가장 높은 373K인 경우가 가장 빠르게 나타났으며 293K인 경우가 경계층 내의 속도분포가 가장 느리게 나타났다. 열판의 표면온도의 증가가 점성저층의 유속을 감소시키고 천이영역을 이동시켜서 속도분포곡선이 증가하였으며 x 축 위치가 0.3까지는 온도 333K의 속도분포곡선이 293K보다 느리게 나타났지만 x 축 위치가 0.7부터 373K에 일치하므로 Fig. 14에서는 333K의 속도분포의 증가폭이 가장 크다. 그러나 Fig. 13의 온도 333K와 비교해 보면 속도분포의 증가폭이 차이가 대체적으로 적게 나타난다.

Fig. 15는 균일유속이 8m/s이고 열판의 표면거칠기가 #50일 경우에 대하여 온도분포를 293K, 333K, 그리고 373K인 경우에 대하여 경계층 내의 유속분포를 나타낸 것이다. 여기서 보듯이 온도변화에 따른 속도분포는 온도가 가장 높은 373K인 경우가 가장 빠르게 나타났으며, 293K인 경우가 경계층 내의 속도분포가 가장 느리게 나타났다. 이것은 표면거칠기를 증가시켜도 표면온도의 증가에 의한 유속의 증가로 인하여 일정한 형태의 유속분포의 증가를 가져옴을 알 수 있다.

이상에서 유속이 8m/s이고 거칠기와 온도변화

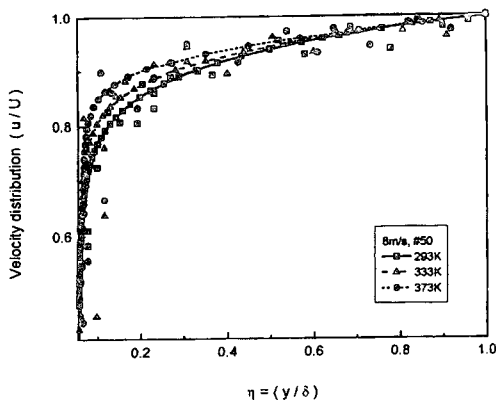


Fig. 15. Velocity distribution (8m/s, #50).

를 변수로 주었을 때 두 가지 변수 모두 유속분포의 증가를 가져왔으며 온도가 333K일 때의 속도분포곡선의 증가폭이 비교적 크게 나타났고 온도가 333K이고 표면거칠기가 매끄러울 때와 #100일 때 속도분포곡선의 증가폭이 비교적 가장 크게 나타났다.

결론

이상의 실험에서 균일유속이 5m/s와 8m/s이고, 표면온도변화가 293K, 333K, 373K일 때 표면이 매끄러운 경우와 표면거칠기가 #100와 #50을 주었을 때 경계층 내의 유속분포계층의 실험으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 점성저층의 두께 보다 작은 조도 범위 내에서 표면거칠기를 증가시켰을 때 난류영역의 경계층 내의 유속이 증가하였다.

2. 표면온도가 증가하면 공기의 밀도(ρ)가 낮아지면서 경계층 내의 유속이 증가함으로 경계층의 두께가 감소하였다.

3. 난류영역에서 점성저층의 두께보다 작은 표면거칠기를 주고 열판에 온도를 상승시키면 서로의 상승작용으로 인하여 경계층 내의 유속은 증가하고 경계층의 두께는 표면거칠기와 표면온도변화를 각각 줄 때 보다도 더욱 감소하였다.

4. 균일속도가 증가할수록 경계층 내의 유속의 증가폭이 감소하였고, 온도변화의 영향으로 인한 경계층 두께의 감소보다는 표면거칠기변화에 의한 경계층 두께의 감소가 다소 크게 나타났다.

5. 가장 효율적인 경계층 내의 유속의 증가폭을 나타내는 조건은 표면온도가 333K, 조도가 #100일 때이다.

참고문헌

- 1) 손병진 · 맹주성 · 이상환(1992) : 詳說 流體力學, 회중당, p.195, p.604, p.707.
- 2) Schlichting, H.(1979) : Boundary-Layer Theory, McGRAW-WILL, pp.378~382, p.505.
- 3) Joseph, A. (1984) : Foundations of Boundary Layer Theory for Momentum, Heat, and Mass

- Transfer", Prentice-Hall, INC., p.146.
- 4) White, F.M.(1991) : Viscous Fluid Flow, McGRAW-HILL, p.426.
 - 5) Snijders, A.K. Koppius, A.M. and Nieuwvelt, C. (1983) : "An Experimental Determination of the Turbulent Prandtl Number in the Inner Boundary Layer for Air Flow over a Flat Plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, No. 3, pp.425~431.
 - 6) Walsh, M. J.(1982) : "Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets", AIAA J., pp.82~169.
 - 7) Walsh, M. J.(1983) : "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique", AIAA J., Vol. 21, pp.485~486.
 - 8) Pulles, C. J. A., Prasad, K. K., and Nieuwstadt, F. T. M.(1989) : "Turbulent Measurements over Longitudinal Micro-Grooved Surfaces", Appl. Scientific research, Vol. 46, pp.197~208.
 - 9) Walsh, M. J.(1990) : "Riblets, Viscous Drag Reduction in Boundary Layer", Progress in Astro. and Aero., Vol. 123, pp.203~261.
 - 10) Bacher, E. V. and Smith, C. R.(1985) : "A Combined Visualization-Anemometry Study of the Turbulent Drag Reducing Mechanisms of Triangular Micro-Groove Surface Modifications", AIAA J., pp.85~0548.
 - 11) Nakao, S.(1990) : "Turbulent Boundary Layer Developing on Drag Reducing Rivet", Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 39, pp.303~308.
 - 12) Liu, K. N., Christodoulou, C., Riccius, O., and Joseph, D. D.(1989) : "Drag Reduetion in pipes Lined with Riblets", IUTAM Symposium Structure of turbulence and Drag Reduction, pp.545~551.
 - 13) 성상모, 김시영(1996) : "表面 거칠기가 曲面상의 亂流 境界層에 미치는 影響에 關한 研究", 수산해양 교육연구, 제8권, 제2호, pp.206~214.
 - 14) 성두남, 김시영(1997) : "均一壓力 分布에 依한 亂流 境界層內 粘性 摩擦力의 減少化에 關한 研究", 수산해양교육연구, 제9권, 제1호, pp.40~47.
 - 15) Nakao, S.(1991) : "Application of V Shape Riblets to Pipe Flows", Journal of Fluids Engineering, Vol. 113, pp.587-590.
 - 16) Kim, S. Y. and Kato, H.(1993) : "Frictional Drag Reduction by Injecting Microbubble into Buffer Layer of Turbulent Boundary Layer", Proc. Second Japan-Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, 28~30 June, Osaka, Japan, pp. 257~292.