

역압력 구배가 존재하는 난류 경계층의 발달에 트리핑 구조물이 미치는 영향에 관한 연구

· 임 태 현*, 김 대 성**, 윤 순 현**

The effects of tripping structure on the development of turbulent boundary layer subjected to adverse pressure gradient

Taehyun Lim, Daeseong Kim, Soonhyun Yoon

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

Abstract : The effects of various tripping structures on turbulent boundary layer subjected to adverse pressure gradient were examined. The profiles are compared to zero pressure gradient and adverse pressure gradient. The increases of tripping structures of height, k are affects almost flow parameter included velocity fluctuation, skin friction coefficient and turbulent boundary thickness.

Key words: Turbulent boundary layer(난류 경계층), tripping structures(돌출부), adverse pressure gradient(역 압력 구배), zero pressure gradient(영 압력 구배), velocity fluctuation(속도 섭동), friction velocity(마찰 속도), turbulent boundary thickness(경계층 두께)

Nomenclature

- C_p wall static pressure gradient
- U_e free stream velocity
- U_{ref} inlet velocity
- k tripping structures height
- P^+ dimensionless pressure gradient parameter
 $= \nu \left(\frac{dP}{dx} \right) / \rho u_\tau^3$
- β Clauser pressure gradient parameter
 $= \frac{\delta^*}{\tau_w} \left(\frac{dP}{dx} \right)$
- u_τ friction velocity
- $\delta_{0.99}$ boundary layer thickness
- δ^* displacement thickness
- C_f friction coefficient parameter
 $= \tau_w / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$

1. 서론

난류 경계층은 완전히 이해되어져 있지 않다. 난류 경계층은 많은 공학적인 문제들을 이해하는데

근본적으로 중요하다. 그 적용범위는 자동차나 비행기와 같은 공기유동, 익형, 터빈 블레이드에서부터 액체유동에 이르기까지 다양하다.

대부분의 유동의 메커니즘은 난류 경계층의 역학적 관계에 의해 지배되므로 이러한 유동들의 원리를 이해함으로써 모델링 기법을 향상시키고, 응용에 있어서 원하는 방향으로 제어할 수 있을 것이다.

Kline(1988)은 난류 경계층 유동의 조직적 이해의 현재를 고찰하였다. 그는 평판에서의 영 압력 구배 난류 경계층의 준 부착 구조(quasi-coherent structure)와 저속영역에서 경계층이 난류의 생성과 운동량 수송에 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다.

Kim 등 (1971) 과 Corio 와 Brodkey(1969)는 난류 생성과 운동량 수송의 대부분이 "bursts 와 sweeps events" 과정에서 발생함을 밝혔다.

현재까지의 많은 연구들이 전단응력이 지배적인 점성저층(sublayer)에서는 벽법칙(Law of the wall)으로 대변되며, 중박층(buffer layer)에서는 대수법칙(Universal logarithmic law)이, 난류전단

응력이 지배적인 중심영역에서는 멱법칙 (Power-law velocity law)으로 근사됨을 확인하였다.

Yasutaka Nagano(1992)는 몇 번에 걸쳐 난류경계층 구조에서 압력 구배의 영향을 조사하여, 영압력 구배에 대한 대수법칙(Universal logarithmic law)이 역압력 구배에 대해서는 더 이상 유효하지 못함과, 벽 근처의 평균속도 섭동(r.m.s velocity fluctuation)이 벽 변수(wall parameter)로 대변할 수 없음을 밝혔다.

결론적으로 역압력 구배 하에서의 난류 경계층의 거동은 다른 양상을 보인다.

또한 Y.Dubief(1997)는 riblet surface에서 난류경계층의 속도분포를 측정하였고, R.P. Taylor등은 급격한 표면변화에서의 난류 경계층을 연구하였다. D.R.Webster 등은 역압력 구배가 가해진 난류경계층에 돌출부(bump)를 설치하여 그 영향을 조사하였다.

Tripping structure는 wire, grit, triangles등의 다양한 형태로 경계층의 발달을 촉진시키는 역할을 한다.

2차원실린더 형태의 돌출부의 높이는 난류 경계층의 천이지점에 결정적인 영향을 끼치며 높을수록 천이가 더 빨리 발생하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 역압력 구배에서 경계층 확산에 대한 영향과 더불어 또한 경계층이 발달하는 부분에 tripping structures를 설치, 그 효과를 보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 풍동 및 실험부는 각각 Fig.1과 Fig.2에 나타내었다. 풍동은 10마력 3상 전동기로 구동되는 개회로 저속형 풍동으로서 전동기의 전력 주파수를 조절하거나 원심형 송풍기의 입구 밸브를 조작하여 최종 출력 유속을 조절할 수 있도록 하였다. 풍동내에는 메쉬를 설치하여 유동의 균질성을 높였고, 각 연결부에는 고무판을 설치하여 기계적 진동을 최소화 시켰다.

실험부의 기하학적인 형상은 대략 3800mm×300mm×500mm이다.

실험부의 윗면에 유연한 판(flexible plate)을 사

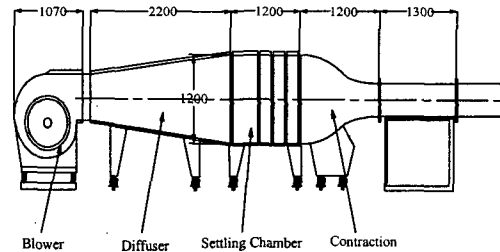


Fig. 1 Schematic of diagram wind tunnel

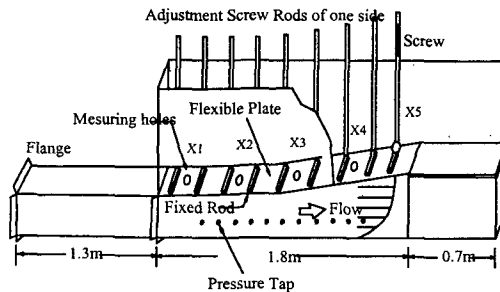


Fig. 2 Experimental apparatus

용 하였으며, 여기에 연결된 스크류 바를 회전시킴으로서 윗면의 형상을 조절할 수 있도록 하여 실험자가 원하는 압력 구배를 줄 수 있도록 하였다.

실험부의 옆면에는 실험부의 중앙에 5cm 간격으로 34개의 정압홀을 뚫고, 디지털 마노미터로 측정하였다.

Tripping structures는 2차원 실린더 형태를 사용하였으며, 지름이 각각 1.35mm, 2.40mm, 5.10mm 등을 실험부의 도입부에 설치하였으며, 각각의 경우에 대하여 영압력 구배를 포함한 5가지의 역압력 구배에 대하여, 5가지지점(Fig.2의 x-station)에 대하여 측정을 실시하였다.

Tripping structures의 크기 결정은 Kraemer가 제안한 다음과 같은 식을 따르었다.

$$\frac{U_e k}{\nu} \geq 900 \quad (1)$$

또한 비교를 위해 tripping structures가 설치되어 있지 않은 경우에도 실험을 수행하고 비교 검토 하였다. 열선의 지지대의 이송부는 3축 이송장치로서 약 0.014mm의 해상도를 갖도록 하여 설치하여 실험의 정밀성을 꾀하였다.

데이터의 취득에는 정온형 열선유속계(TSI-IFA 300 Model)를 사용하였으며 열선은 I-형을 사용

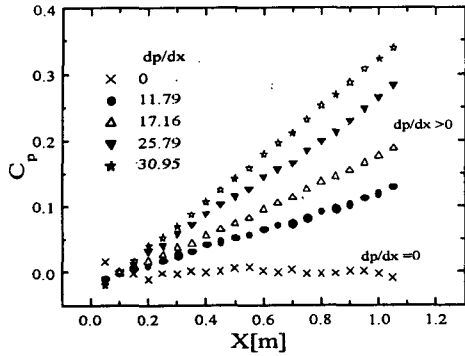
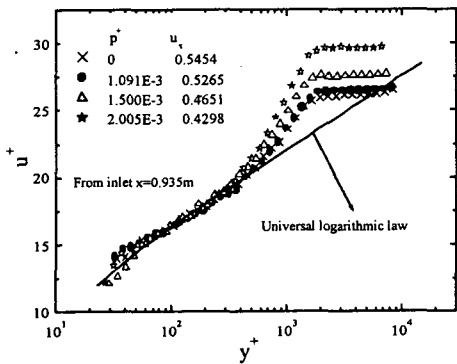
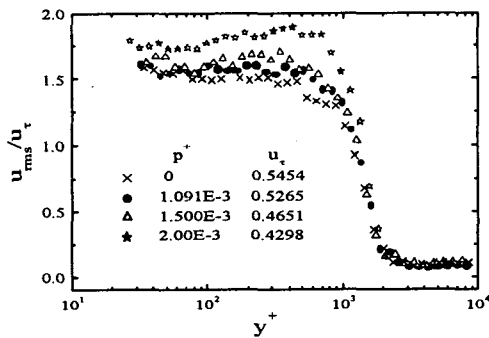


Fig. 3 Development of the pressure coefficient



(a) Mean velocity profiles



(b) Velocity fluctuation profiles

Fig. 4 Mean velocity and velocity profiles fluctuation normalized by friction velocity

하였다. 신호는 10 kHz의 추출주파수로 12 비트 아날로그-디지털 변환기에서 처리되어 컴퓨터 내의 저장장치에 기록된 후 열선교정절차를 통해 유속으로 변환하였다.

압력 구배 dC_p/dx 는 도입부로부터 마지막 측정지점까지 윗면의 유연한 면을 조작하여 모든 경우에 있어서 일정하게 유지되도록 하였다. 역 압력 구배에서의 마찰속도는 Clauser 도표법을 사용하여 결정하였다.

3. 결과 및 토의

정압 압력 분포를 Fig. 3에 나타내었다.

여기서 $C_p = (P_{static} - P_{ref}) / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$ 이다. 첫 번째 측정지점 ($x = 0.434m$)부터 마지막 측정지점 ($x = 1.105m$)까지 거의 일정한 값으로 나오도록 5가지의 압력 구배를 조절한 것이다.

가장 압력 구배가 큰 경우, 각 측정지점에 대하여 유동 변수를 tripping structures가 설치된 경우와 안된 경우에 대해 각각 표. 1 과 표. 2에 나타내었다.

Fig. 4 (a)는 평균속도를 마찰속도로 무차원화 시켜서 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)는 역 압력 구배에서는 중복층(buffer layer)영역이 대수법칙(universal logarithm law)으로 대변되는 속도분포와 잘 일치함을 보여주고 있으며 역 압력 구배가 높을수록 대수법칙에서 조금씩 벗어나고 있음을 보여준다.

이것은 역 압력 구배에서는 더 이상 대수법칙이 유효하지 못함을 뜻하며 Yasutaka Nagano⁽⁴⁻⁵⁾의 결과와 일치한다.

난류 경계층은 역 압력 구배가 클수록 마찰속도

Table. 1 Flow parameter for No-trip case

x	U_e	$\delta_{0.99}$	δ^*	u_τ	P^+	β
m	m/s	mm	mm	m/s	10^{-3}	
0.434	13.45	45.35	8.19	0.4986	3.373	0.87
0.605	13.37	52.81	10.15	0.4775	3.383	1.18
0.777	12.93	53.94	10.50	0.4431	4.804	1.39
0.935	12.67	70.37	12.80	0.4300	5.263	1.81
1.105	12.23	68.17	13.81	0.4058	6.258	2.21

Table. 2 Flow parameter for 2.40mm trip

x	U_e	$\delta_{0.99}$	δ^*	u_τ	P^+	β
m	m/s	mm	mm	m/s	10^{-3}	
0.434	14.91	48.33	7.821	0.5579	2.407	0.66
0.605	14.44	54.41	8.479	0.5498	2.515	0.74
0.777	14.18	60.42	9.972	0.5113	3.127	1.00
0.935	13.77	68.02	12.42	0.4671	4.103	1.50
1.105	13.38	77.21	14.04	0.4537	4.476	1.79

가 작아지는 것으로 알려져 있으며 실제로 실험 결과와도 일치한다.(Fig. 4 (a)) 이것은 역 압력 구배가 커질수록 전단 응력이 작아짐을 시사한다. Fig 4 (b)에서 난류강도는 역 압력 구배가 세 질수록 커지고 있음을 보여주는데 선행 연구결과와 역시 일치한다⁽⁶⁾.

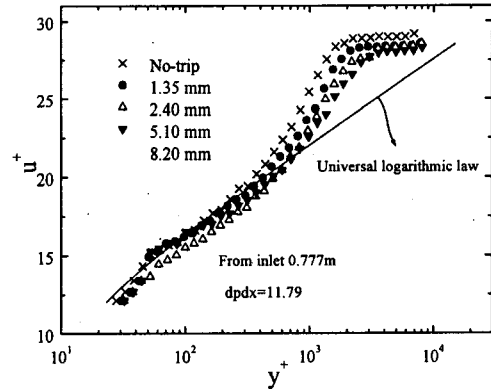
각각 동일한 압력 구배 하에서의 k 의 크기가 다른 경우에서 k 가 속도와 난류 강도에 미치는 영향을 보여주고 있는 것을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6(a)에서 tripping structures가 마찰속도를 증가시켜 대수법칙에서 아래쪽으로 편향된 곡선을 보여주고 있다. k 가 난류 경계층의 마찰속도를 증가시켜 그림과 같은 분포를 보이고 있다. 동일한 압력 구배에서는 k 가 클수록 난류 경계층의 발달을 촉진시켜 경계층 두께, δ 가 비약적으로 증가하며, 절대 난류강도도 증가한다.

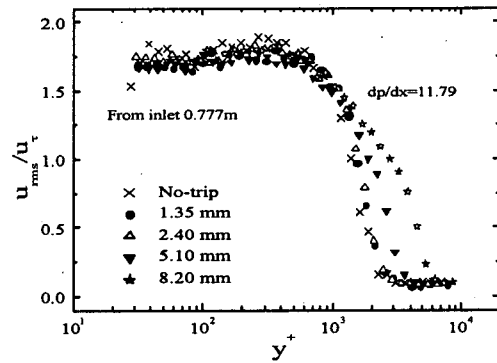
Fig. 6(b)는 k 가 클수록 마찰속도가 비약적으로 증가하기 때문에 그림에서는 낮은 부분도 보이지만 절대적인 속도 섭동의 값은 k 가 클수록 커짐을 확인하였다. 이것은 결국 tripping structures가 경계층 두께를 증가시켜 천이를 촉진시켜 난류 경계층을 발달을 촉진시키며, k 가 클수록 천이 지점이 빨리 일어난다.

가장 압력 구배가 높을 때 유동방향을 따라 표면 마찰계수를 보인 것이 Fig. 7이다. 그림에서 알 수 있듯이 하류방향으로 갈수록 낮아지고 있으며 k 가 클수록 표면 마찰계수가 뚜렷이 높아지고 있는데 k 가 커짐에 따라 마찰속도가 증가하는데 그 원인이 있다.

Fig. 8 에는 k 가 경계층 두께에 영향을 미치는 경향을 보였으며 언급한 대로 k 가 커질수록 경계층 두께가 증가하였다.



(a) Mean velocity



(b) Velocity fluctuation

Fig. 6 Mean and fluctuation profiles for same pressure gradient and different k

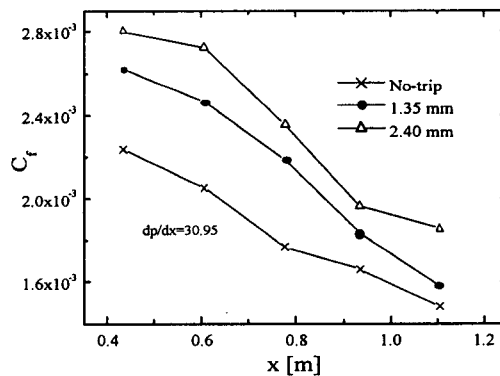


Fig. 7 Skin friction coefficient

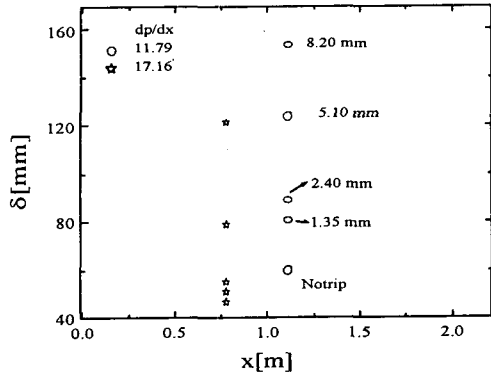


Fig. 8 Turbulent boundary layer thickness for tripping effects

4. 결론

역 압력 구배와 영 압력 구배를 가한 상태에서 난류 경계층에 tripping structures가 미치는 영향을 조사하였다. 역 압력 구배는 커질수록 속도 분포에 영향을 미쳐 대수법칙을 벗어나며 난류강도도 증가시켰다. 또한 동일한 압력 구배에서는 tripping structures의 크기 k가 난류 경계층의 발달을 상당히 촉진하였으며, 마찰속도를 증가시켜 표면 마찰계수의 상승을 유발했으며, 난류강도 등 유동 변수에 영향을 주었다.

참고문헌

[1] Y. Dubief, L. Djennidi, and R. A. Antonio, "The measurement of δ in a turbulent boundary layer over a riblet surface", International Journal of Heat and Fluid Flow 18, pp.183-187, 1997.
 [2] D. R. Webster, D. B DeGraaff and J. K. Eaton, "Turbulence characteristic of a boundary layer over a two-dimensional bump", Journal of Fluid Mechanics, vol.320, pp. 53-69, 1996.
 [3] Hermann Schlichting, "Boundary layer theory", 1979.
 [4] Miodrag Olijaca and James Sucec, "Prediction of transpired turbulent boundary layers with arbitrary pressure gradient", Transactions of the ASME, vol.119, 1997.

[5] Yasutaka Nagano, Toshihiro Tsuji and Tomoya Houra, International Journal of Heat and Fluid Flow 19, pp.563-572, 1998.
 [6] Y. Nagano, M Tagawa and T.Tsuji, "Effects of adverse pressure gradients on mean flows and turbulence statistics in a boundary layer", Eighth symposium on turbulent shear flows, 1991.
 [7] D. A. Spence, "The development of turbulent boundary layers", The Aeronautical Research Council, No.14, pp. 162-, 1951.
 [8] R. P. Taylor, J. K. Taylor, M. H. Hosni and H. W. Coleman, "Relaxation of the turbulent boundary layer after an abrupt change from rough to smooth wall", Journal of Fluids Engineering, vol.115, pp.379-382, 1993.
 [9] Philippe R. Spalart and Jonathan H. Watmuff, "Experimental and numerical study of a turbulent boundary layer with pressure gradients", Journal Fluids Mechanics, vol.249, pp. 337-371, 1993.
 [10] H. H. Fernholz, "The effects of a favourable pressure gradient and of Reynolds number on a an incompressible axisymmetric turbulent boundary layer. Part 1 The turbulent boundary layer", Journal Fluids Mechanics, vol.359, pp. 329-338, 1998.
 [11] D. Warnack and H. H. Fernholz, "The effects of a favourable pressure gradient and of Reynolds number on a an incompressible axisymmetric turbulent boundary layer. Part 2. The turbulent boundary layer", Journal Fluids Mechanics, vol.359, pp. 357-381, 1998.
 [12] Jack B. White and William G. Tiederman, "The effect of adverse pressure gradient on turbulent burst structure in low-Reynolds number equilibrium boundary layers", Purdue university West Lafayette, Indiana 47907, Report PME-FM-90-2. 1990.
 [13] Joseph A. Schetz, "Boundary layer analysis", 1993.

응력이 지배적인 중심영역에서는 멱법칙 (Power-law velocity law)으로 근사됨을 확인하였다.

Yasutaka Nagano(1992)는 몇 번에 걸쳐 난류경계층 구조에서 압력 구배의 영향을 조사하여, 영압력 구배에 대한 대수법칙(Universal logarithmic law)이 역 압력 구배에 대해서는 더 이상 유효하지 못함과, 벽 근처의 평균속도 섭동(r.m.s velocity fluctuation)이 벽 변수(wall parameter)로 대변할 수 없음을 밝혔다.

결론적으로 역 압력 구배 하에서의 난류 경계층의 거동은 다른 양상을 보인다.

또한 Y.Dubief(1997)는 riblet surface에서 난류경계층의 속도분포를 측정하였고, R.P. Taylor등은 급격한 표면변화에서의 난류 경계층을 연구하였다. D.R.Webster 등은 역 압력 구배가 가해진 난류경계층에 돌출부(bump)를 설치하여 그 영향을 조사하였다.

Tripping structure는 wire, grit, triangles등의 다양한 형태로 경계층의 발달을 촉진시키는 역할을 한다.

2차원실린더 형태의 돌출부의 높이는 난류 경계층의 천이지점에 결정적인 영향을 끼치며 높을수록 천이가 더 빨리 발생하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 역 압력 구배에서 경계층 확산에 대한 영향과 더불어 또한 경계층이 발달하는 부분에 tripping structures를 설치, 그 효과를 보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 풍동 및 실험부는 각각 Fig.1과 Fig.2에 나타내었다. 풍동은 10마력 3상 전동기로 구동되는 개회로 저속형 풍동으로서 전동기의 전력 주파수를 조절하거나 원심형 송풍기의 입구 밸브를 조작하여 최종 출구 유속을 조절할 수 있도록 하였다. 풍동내에는 메쉬를 설치하여 유동의 균질성을 높였고, 각 연결부에는 고무판을 설치하여 기계적 진동을 최소화 시켰다.

실험부의 기하학적인 형상은 대략 3800mm×300mm×500mm이다.

실험부의 윗면에 유연한 판(flexible plate)을 사

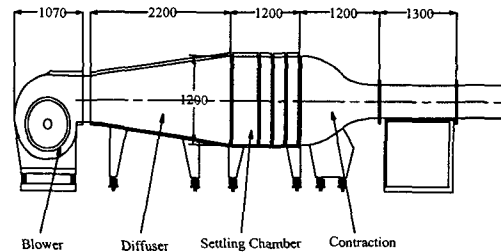


Fig. 1 Schematic of diagram wind tunnel

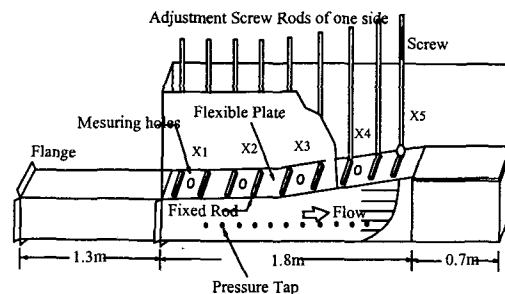


Fig. 2 Experimental apparatus

용 하였으며, 여기에 연결된 스크류 바를 회전시킴으로써 윗면의 형상을 조절할 수 있도록 하여 실험자가 원하는 압력 구배를 줄 수 있도록 하였다.

실험부의 옆면에는 실험부의 중앙에 5cm 간격으로 34개의 정압홀을 뚫고, 디지털 마노미터로 측정하였다.

Tripping structures는 2차원 실린더 형태를 사용하였으며, 지름이 각각 1.35mm, 2.40mm, 5.10mm 등을 실험부의 도입부에 설치하였으며, 각각의 경우에 대하여 영 압력 구배를 포함한 5가지의 역 압력 구배에 대하여, 5가지지점(Fig.2의 x-station)에 대하여 측정을 실시하였다.

Tripping structures의 크기 결정은 Kraemer가 제안한 다음과 같은 식을 따르었다.

$$\frac{U_e k}{\nu} \geq 900 \quad (1)$$

또한 비교를 위해 tripping structures가 설치되어 있지 않은 경우에도 실험을 수행하고 비교 검토 하였다. 열선의 지지대의 이송부는 3축 이송장치로서 약 0.014mm의 해상도를 갖도록 하여 설치하여 실험의 정밀성을 꾀하였다.

데이터의 취득에는 정온형 열선유속계(TSI-IFA 300 Model)를 사용하였으며 열선은 I-형을 사용

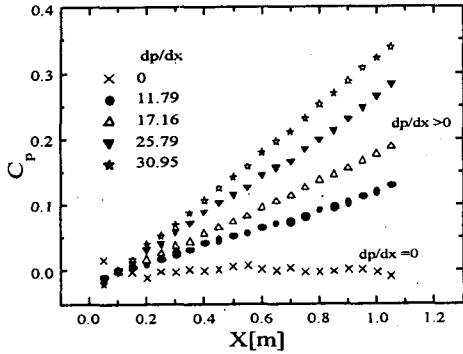
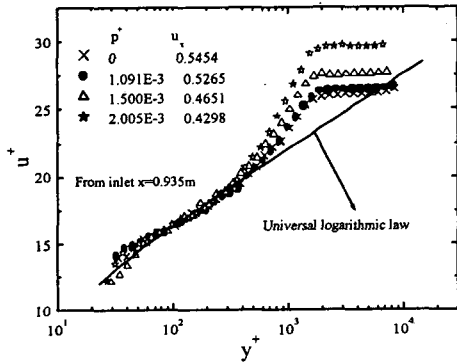
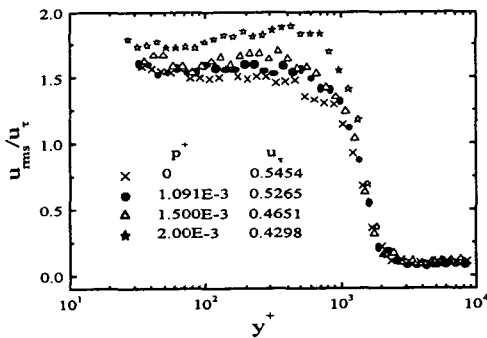


Fig. 3 Development of the pressure coefficient



(a) Mean velocity profiles



(b) Velocity fluctuation profiles

Fig. 4 Mean velocity and velocity profiles fluctuation normalized by friction velocity

하였다. 신호는 10 kHz의 추출주파수로 12 비트 아날로그-디지털 변환기에서 처리되어 컴퓨터 내의 저장장치에 기록된 후 열선교정절차를 통해 유속으로 변환하였다.

압력 구배 dC_p/dx 는 도입부로부터 마지막 측정지점까지 윗면의 유연한 면을 조작하여 모든 경우에 있어서 일정하게 유지되도록 하였다. 역 압력 구배에서의 마찰속도는 Clauser 도표법을 사용하여 결정하였다.

3. 결과 및 토의

정압 압력 분포를 Fig. 3에 나타내었다.

여기서 $C_p = (P_{static} - P_{ref}) / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$ 이다. 첫 번째 측정지점 ($x=0.434m$)부터 마지막 측정지점 ($x=1.105m$)까지 거의 일정한 값으로 나오도록 5가지의 압력 구배를 조절한 것이다.

가장 압력 구배가 큰 경우, 각 측정지점에 대하여 유동 변수를 tripping structures가 설치된 경우와 안된 경우에 대해 각각 표. 1 과 표. 2에 나타내었다.

Fig. 4 (a)는 평균속도를 마찰속도로 무차원화 시켜서 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)는 영 압력 구배에서는 중복층(buffer layer)영역이 대수법칙(universal logarithm law)으로 대변되는 속도분포와 잘 일치함을 보여주고 있으며 역 압력 구배가 높을수록 대수법칙에서 조금씩 벗어나고 있음을 보여준다.

이것은 역 압력 구배에서는 더 이상 대수법칙이 유효하지 못함을 뜻하며 Yasutaka Nagano⁽⁴⁻⁵⁾의 결과와 일치한다.

난류 경계층은 역 압력 구배가 클수록 마찰속도

Table. 1 Flow parameter for No-trip case

x	U_e	$\delta_{0.99}$	δ^*	u_τ	P^+	β
m	m/s	mm	mm	m/s	10^{-3}	
0.434	13.45	45.35	8.19	0.4986	3.373	0.87
0.605	13.37	52.81	10.15	0.4775	3.383	1.18
0.777	12.93	53.94	10.50	0.4431	4.804	1.39
0.935	12.67	70.37	12.80	0.4300	5.263	1.81
1.105	12.23	68.17	13.81	0.4058	6.258	2.21

Table. 2 Flow parameter for 2.40mm trip

x	U_e	$\delta_{0.99}$	δ^*	u_τ	P^+	β
m	m/s	mm	mm	m/s	10^{-3}	
0.434	14.91	48.33	7.821	0.5579	2.407	0.66
0.605	14.44	54.41	8.479	0.5498	2.515	0.74
0.777	14.18	60.42	9.972	0.5113	3.127	1.00
0.935	13.77	68.02	12.42	0.4671	4.103	1.50
1.105	13.38	77.21	14.04	0.4537	4.476	1.79

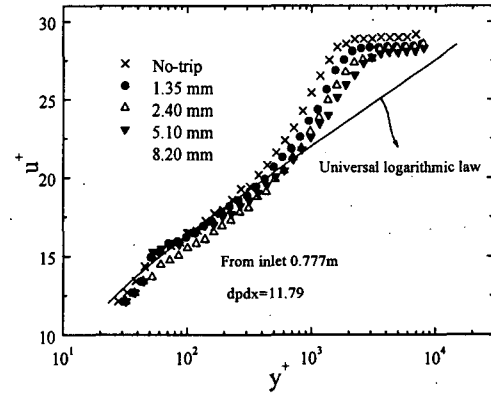
가 작아지는 것으로 알려져 있으며 실제로 실험 결과와도 일치한다.(Fig. 4 (a)) 이것은 역 압력 구배가 커질수록 전단 응력이 작아짐을 시사한다. Fig 4 (b)에서 난류강도는 역 압력 구배가 세 질수록 커지고 있음을 보여주는데 선행 연구결과와 역시 일치한다⁽⁶⁾.

각각 동일한 압력 구배 하에서의 k 의 크기가 다른 경우에서 k 가 속도와 난류 강도에 미치는 영향을 보여주고 있는 것을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 tripping structures가 마찰속도를 증가시켜 대수법칙에서 아래쪽으로 편향된 곡선을 보여주고 있다. k 가 난류 경계층의 마찰속도를 증가시켜 그림과 같은 분포를 보이고 있다. 동일한 압력 구배에서는 k 가 클수록 난류 경계층의 발달을 촉진시켜 경계층 두께, δ 가 비약적으로 증가하며, 절대 난류강도도 증가한다.

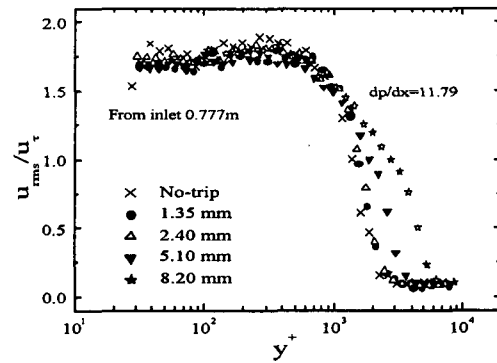
Fig. 6(b)는 k 가 클수록 마찰속도가 비약적으로 증가하기 때문에 그림에서는 낮은 부분도 보이지만 절대적인 속도 섭동의 값은 k 가 클수록 커짐을 확인하였다. 이것은 결국 tripping structures가 경계층 두께를 증가시켜 천이를 촉진시켜 난류 경계층을 발달을 촉진시키며, k 가 클수록 천이 지점이 빨리 일어난다.

가장 압력 구배가 높을 때 유동방향을 따라 표면 마찰계수를 보인 것이 Fig. 7이다. 그림에서 알 수 있듯이 하류방향으로 갈수록 낮아지고 있으며 k 가 클수록 표면 마찰계수가 뚜렷이 높아지고 있는데 k 가 커짐에 따라 마찰속도가 증가하는데 그 원인이 있다.

Fig. 8 에는 k 가 경계층 두께에 영향을 미치는 경향을 보았으며 언급한 대로 k 가 커질수록 경계층 두께가 증가하였다.



(a) Mean velocity



(b) Velocity fluctuation

Fig. 6 Mean and fluctuation profiles for same pressure gradient and different k

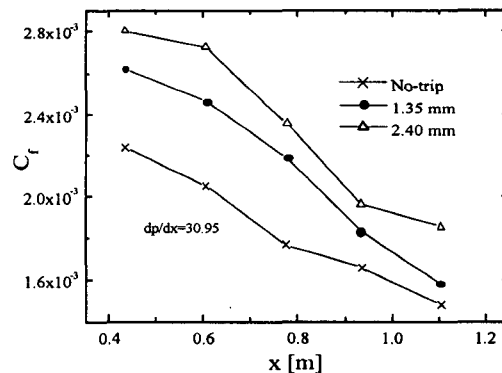


Fig. 7 Skin friction coefficient

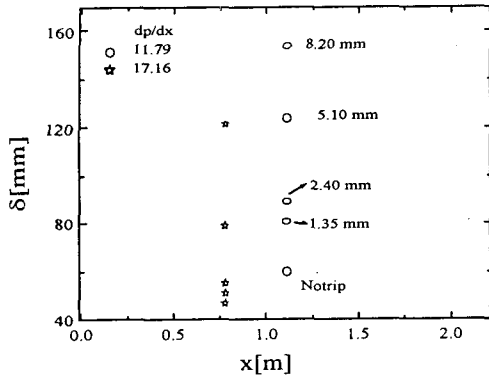


Fig. 8 Turbulent boundary layer thickness for tripping effects

4. 결론

역 압력 구배와 영 압력 구배를 가한 상태에서 난류 경계층에 tripping structures가 미치는 영향을 조사하였다. 역 압력 구배는 커질수록 속도 분포에 영향을 미쳐 대수법칙을 벗어나며 난류강도도 증가시켰다. 또한 동일한 압력 구배에서는 tripping structures의 크기 k 가 난류 경계층의 발달을 상당히 촉진하였으며, 마찰속도를 증가시켜 표면 마찰계수의 상승을 유발했으며, 난류강도 등 유동 변수에 영향을 주었다.

참고문헌

[1] Y. Dubief, L. Djennidi, and R. A. Antonio, "The measurement of δ in a turbulent boundary layer over a riblet surface", International Journal of Heat and Fluid Flow 18, pp.183-187., 1997.
 [2] D. R. Webster, D. B DeGraaff and J. K. Eaton, "Turbulence characteristic of a boundary layer over a two-dimensional bump", Journal of Fluid Mechanics, vol.320, pp. 53-69., 1996.
 [3] Hermann Schlichting, "Boundary layer theory", 1979.
 [4] Miodrag Olijaca and James Sucec, "Prediction of transpired turbulent boundary layers with arbitrary pressure gradient", Transactions of the ASME, vol.119, 1997.

[5] Yasutaka Nagano, Toshihiro Tsuji and Tomoya Houra, International Journal of Heat and FLuid Flow 19, pp.563-572, 1998.

[6] Y. Nagano, M Tagawa and T.Tsuji, "Effects of adverse pressure gradients on mean flows and turbulence statistics in a boundary layer", Eighth symposium on turbulent shear flows, 1991.

[7] D. A. Spence, "The development of turbulent boundary layers", The Aeronautical Research Council, No.14, pp. 162-, 1951.

[8] R. P. Taylor, J. K. Taylor, M. H. Hosni and H. W. Coleman, "Relaxation of the turbulent boundary layer after an abrupt change from rough to smooth wall", Journal of Fluids Engineering, vol.115, pp.379-382, 1993.

[9] Philippe R. Spalart and Jonathan H. Watmuff, "Experimetal and numerical study of a turbulent boundary layer with pressure gradients", Journal Fluids Mechanics, vol.249, pp. 337-371, 1993.

[10] H. H. Fernholz, "The effects of a favourable pressure gradient and of Reynolds number on a an incompressible axisymmetric turbulent boundary layer. Part 1 The turbulent boundary layer", Journal Fluids Mechanics, vol.359, pp. 329-338, 1998.

[11] D. Warnack and H. H. Fernholz, "The effects of a favourable pressure gradient and of Reynolds number on a an incompressible axisymmetric turbulent boundary layer. Part 2. The turbulent boundary layer", Journal Fluids Mechanics, vol.359, pp. 357-381, 1998.

[12]. Jack B. White and William G. Tiederman, "The effect of adverse pressure gradient on turbulent burst structure in low-Reynolds number equilibrium boundary layers", Purdue university West Lafayette, Indiana 47907, Report PME-FM-90-2. 1990.

[13] Joseph A. Schetz, "Boundary layer analysis", 1993.