

均一 壓力 分布에 依한 亂流 境界層內 粘性 摩擦力의 減小化에 관한 研究

성 두 남 · 김 시 영 *

(부경대 산업대학원, * 부경대 제어기계 공학과)

제1장 서 론

경계층을 여러 가지 방법으로 교란시켜 표면 마찰력을 감소시킬 수 있는 방법에 대하여 많은 연구^{1~6)}가 수행되었다. 이 방법 중 폴리머 분사 방법은 중합체의 고분자 물질을 경계층의 내부에 혼입시켜 최대 80% 이상의 점성 마찰력을 감소시킬 수 있는 고효율의 방법이다. 그러나 폴리머 혼입에 의한 주유동의 물리적 특성을 변화시킬 우려가 있으며, 또한 고가의 폴리머 물질을 다량, 오랫동안 소비해야 하는 등의 경제적 및 장치설치에 대한 번거로운 단점의 개선이 요구된다. 그리고 표면에 유연한 물질이나 탄성체 등을 부착함으로써 상당한 점성 마찰력을 감소시킬 수 있으나 오늘날의 장치 기술로서 점성 저층의 두께 만큼의 크기나 주유동의 조건에 합당한 탄성체나 감쇄 효과를 줄 수 있는 장치의 설계 제작이 어려운 실정이다.

그 외에 장치가 간단하고 효과적인 방법으로서 물체의 표면에 미세한 기포를 분출시키는 방법이 많이 이용되고 있다^{7~9)}. 이 방법 또한 고효율의 방법이지만 실제 현장에서 사용코자 할 경우에 미소기포 분출장치에 이물질 등으로 막힐 우려가 있고 또한 미소기포 분출장치 및 압축공기 생산에 필요한 새로운 동력이 필요한 단점을 갖고 있다. 그리고 상어의 비늘 형상과 같은 Riblet 등을 물체 표면에 설치하는 방법¹⁰⁾도 많이 사용되고 있으나 이 방법은 현장에서 사용할 경우에는 이물질의 부착으로 그 기능이 감소될 우려가 있으므로 세심한 사용상의 주의가 필요하다. 그리고 경계층의 와류붕괴 장치가 사용되고 있으나 이방법도 상당한 효과가 있는 반면에 그 틈새가 매우 좁아 물체벽과 장치 사이에 이물질의 개재나 타물체와의 충돌에 의해 파괴되는 경우도 있으므로 세심한 관리가 필요하다.

이상의 방법들은 모두가 매우 효과적인 방법이지만 상기한 바와 같이 여러 가지 단점들을 갖고 있으므로 보다 편리하고 간단한 새로운 방법이 요구되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 장치가 매우 간단하며 마찰력 감소 효율이 매우 높을 것으로 예상되는 장치로서 물체 표면의 점성 마찰력을 감소시키기 위하여 대칭 물체의 표면 전체에 균일하게 미소 구멍을 분포시켜 경계층내의 저층 표면에서 주유동의 상류로부터 하류까지 균일한 압력이 분포되도록 하였다.

제2장 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 풍동장치는 Fig.1과 같다. 입구에서 흡입되는 상온의 공기는 송풍기를 거쳐 바깥으로 배출되도록 하였다. 그리고 시험부의 균일 유속은 18m/s와 24m/s 속도에서 인버터의 주파수 변환을 통하여 조절할 수 있도록 되어 있다. 시험부의 물체 표면에는 피토티 튜브를 설치하여 표면 및 경계층내의 유속을 측정할 수 있도록 장치하였다. 흐름의 영역은 크게 나누어 상류 및 흐름안내부분, 시험부분, 그리고 하류부분의 3영역으로 구성되어 있다.

Table 1과 같이 풍동의 전체길이는 9510mm이고 실험단면은 길이 650mm, 폭 650mm, 그리고 시험부 길이는 950mm이다. 시험부는 사각단면으로서 사방이 투명아크릴로 되어 있고, 시험부의 한쪽 면에 직선으로 구멍을 뚫어 피토티 튜브가 상하 연속적으로 이동하면서 계측할 수 있도록 장치하였다. 그리고 난류흐름의 교란의 감소와 균일 흐름을 유지하도록 시험부의 사각단면의 상하에 150mm의 아크릴 판을 붙였다.

송풍기의 임펠러 직경은 25000mm, 송풍량은 230m³/s, 회전수는 230rpm이다. 구동모터의 타입(type)은 원심식의 형식으로 제어 시스템은 인버터(inverter)장치로 조절할 수 있도록 하였다. 또 구동 전기 모터로 4극 220V, 57kV로 구동토록 하였다.

풍동의 실험단면은 길이 650mm, 폭 650mm, 그리고 시험부 길이는 950mm이다.

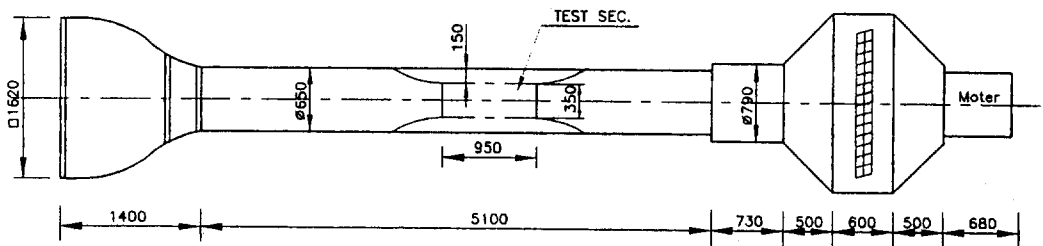


Fig. 1. Wind tunnel.

실험물체는 Fig.2와 같이 길이 5100mm이고, 작용 단면 크기 820mm, 폭 90mm인 대칭 물체의 양쪽 면에 1cm 간격으로 직경 1mm의 구멍을 뚫어 경계층 마찰력 표면의 압력을 상류나 하류 모두 압력 분포가 같도록 하였으며 속도범위는 0~40m/s 그 제한은 Table 2와 같다

Table 1. 풍동(Wind tunnel) 장치의 특징

풍동 제원		송풍기 제원	
길이	9510mm	입펠러 직경	25000mm
시험부 길이	950mm	송풍량	230m ³ /s
실험단면	650mm × 650mm	회전수	230 rpm

구동 모터	
TYPE	원심식
구동 전기 모터	4극, 220v, 57kW
제어시스템	Inverter System

Table 2. 실험물체의 특징

실험 물체	
길이	5100mm
작용 단면 크기	820mm × 90mm
실험 길이	5100 mm
속도 범위	0~40m/s

2.2 실험방법

경계층 내부의 시험체 주위의 유속 계측 영역이 완전히 난류 영역이 되도록 하기 위하여 평행부 단면을 만들고 평균 유속을 레이놀즈수 106 이상으로 하기 위하여 단면을 상하로 축소하였다. 길이 820mm, 폭 670mm인 시험편을 계측부의 중앙에 설치하고, 각 위치별로 유속을 측정하기 위하여 아크릴 판으로 되어 있는 계측부의 상하부분 중 상측면에 위치별로 폭이 10mm 되도록 슬롯(slot)을 만들었다.

각 슬롯에는 마노미터(manometer)와 튜브가 연결된 피토티 관을 계측부의 중앙에 위치시켜서 3mm 거리로 이동하면서 유속을 측정하였다. 그리고 인버터의 주파수를 변환시켜 유속을 18m/s와 24m/s로 유지하였으며 시험체 표면에서 경계층의 법선방향으로 속도를 측정하였다. 두 개의 시험편 중 하나는 미소표면에 직경 1mm의 구멍을 시험편의 상하면에 뚫어 내부압력을 연속적, 그리고 일정한 간격으로 분포시켜 계측하였다.

표면에 미소구멍이 없는 시험편으로 시험편 대칭물체의 상하면에 연속적으로 계측하였다. 점성 마찰력을 측정하기 위하여 하류방향에 위치별로, 그 위치에서 경계층의 법선 방향으로 일정 간격으로 이동하면서 유속을 피토티 튜브에 의하여 계측하였다. 그리고 하류별 위치는 (station, st.1 : X=205mm, st.2 : X=410mm, st.3 : X=615mm, st.4 : X=820mm)이다

제3장 실험결과 및 고찰

Fig.3은 X₁=205mm에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ의 값을 0.033, 0.066, 0.099, 0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.55, 0.66, 0.77, 0.88, 0.99, 1.00의 위치에서 유속 분포, u/U의 값을 각각 계측 하였다.

여기서 y는 경계층내의 법선방향 계측위치, δ는 경계층 두께, u는 점성마찰속도, U는 균일 유속도이다.

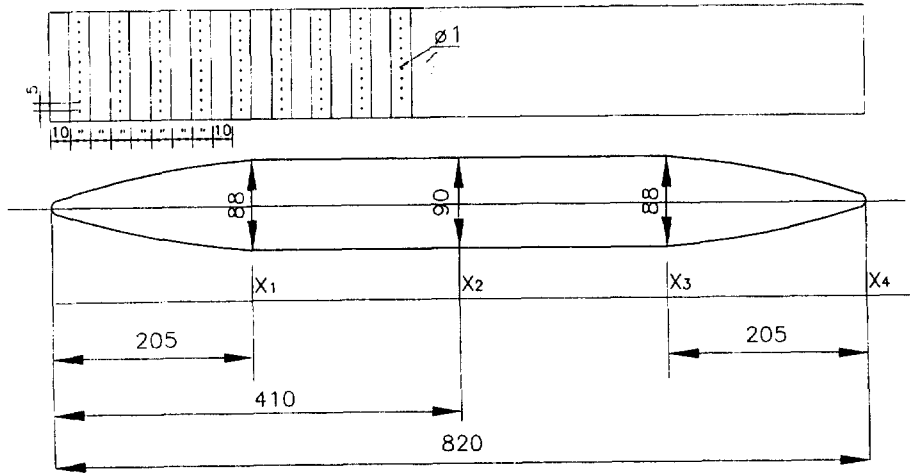


Fig. 2. Test body.

유속분포 결과는 벽면부근에서의 점성은 변하지 않기 때문에 미소 구멍의 분포가 없는 경우가 유속이 작아지게 된다. 유속은 y/δ 의 값이 0.033에서부터는 점차 증가하여 0.088에서부터 0.11에서는 미소 구멍이 있는 경우가 없는 경우보다 다소 감소된 값을 나타내었다. 또한, y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 다소 줄어들었다. 이와 같은 현상은 전후위치의 속도 분포가 하류 방향으로 이동하면서 표면의 유속이 약간 작아 표면의 점성 마찰력이 감소하기 때문이다.

Fig. 4에서는 $X_2=410\text{mm}$ 의 위치에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 0.027, 0.055, 0.081, 0.09, 0.18, 0.27, 0.36, 0.45, 0.54, 0.63, 0.72, 0.81, 0.90, 1.0의 위치에서 유속 분포, u/U 의 값을 각각 계측하였다.

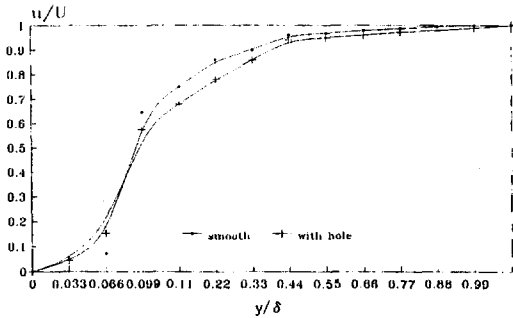


Fig. 3. Velocity distribution (18m/s, station : X= 205 mm).

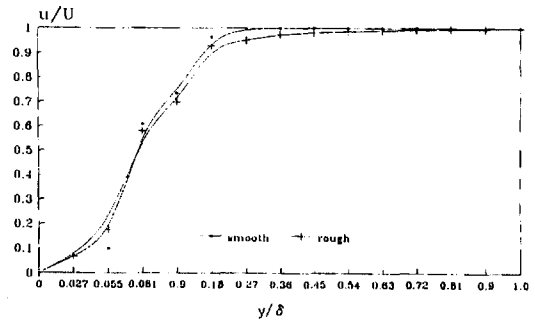


Fig. 4. Velocity distribution (18m/s, station : X= 410 mm).

유속분포 그 결과 유속은 벽면 부근에서는 변하지 않고 미소 구멍이 없는 경우가 있는 경우보다 유속의 값이 작게 나타났다. 그리고 0.055에서부터는 구멍이 없는 경우가 유속이 점점 증가하여 y/δ 의 값이 0.081에서부터는 미소구멍이 있는 경우가 y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 급격하게 줄어들었다.

이와 같은 현상은 시험체의 중간쯤에서 표면의 속도 분포가 급격하게 줄어 경계층이 발달한다는 것을 알 수 있다.

Fig.5 는 $X_s=615\text{mm}$ 에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 0.033, 0.066, 0.099, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00 의 위치에서 유속분포, u/U 의 값을 각각 계측하였다.

유속분포 결과는 벽면부근에서 미소구멍의 분포가 없는 경우가 유속의 값이 작아지게 되고 0.099에서부터 바뀌어 유속이 증가하여서 y/δ 의 값이 1.0에서는 미소구멍이 없는 경우보다도 있는 경우의 유속이 약간 낮은 값을 나타내 보이며 y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 줄어들었다.

이와 같은 현상은 전후위치의 속도 분포가 하류로 갈수록 그 영향이 미소 기포의 영향과 유속의 분포가 점점 감소함을 알 수 있다.

Fig.6에서 보는 바와 같이 $X_s=820\text{mm}$ 에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 0.042, 0.086, 0.12, 0.14, 0.28, 0.42, 0.56, 0.70, 0.84, 1.00의 위치에서 유속 분포, u/U 의 값을 각각 계측하였다. 유속분포 결과는 벽면 부근에서 미소구멍의 분포가 없는 경우가 유속의 값이 작게 나타났다. 또 0.90근방에서부터 증가하여 y/δ 의 값이 0.10의 영역에서는 미소 구멍의 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 다소 낮은 값을 나타내 보이며 y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 서서히 줄어들었다. 이와 같은 현상은 하류로 갈수록 속도 분포가 매우 완만하게 회복되고 있음을 알 수 있다.

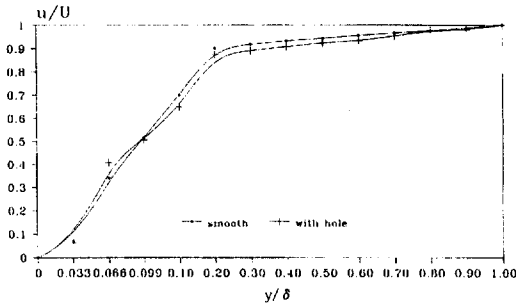


Fig. 5. Velocity distribution(18m/s, station : X= 615 mm).

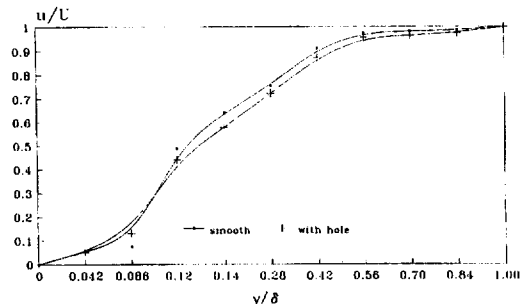


Fig. 6. Velocity distribution(18m/s, station : X= 820 mm).

Fig.7은 $X_1=205\text{mm}$ 에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 0.05, 0.10, 0.15, 0.17, 0.34, 0.51, 0.68, 0.85, 1.00의 위치에서 유속분포, u/U 의 값을 각각 계측하였다.

유속 분포의 계측 결과는 미소 구멍이 표면에 균일하게 분포된 경우가 분포되지 않은 경우에 대하여 벽면으로부터 유속의 분포가 약간 작게 나타났으며 미소 구멍이 분포되지 않은 경우가 유속이 작게 나타나 0.15에서부터 증가하여 y/δ 의 값이 1.00에서는 미소구멍의 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 다소 증가한 값을 나타내 보이며 y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 줄어들었다. 이와 같은 현상은 하류 위치로 갈수록 경계층내의 유속 속도 분포가 하류 방향으로 이동하면서 표면의 유속이 감소되게 된 이유이며 미소 구멍에 의한 영향도 법선 방향으로 멀어질수록 감소해 감을 알 수 있다.

Fig.8에서는 $X_2=410\text{mm}$ 에서 유속이 24m/s 인 경우에 대하여 경계층내의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 $0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.17, 0.34, 0.51, 0.68, 0.85, 1.00$ 의 위치로 이동해 가면서 유속 분포 u/U 의 값을 각각 측정하였다.

유속 분포의 측정 결과는 벽면 부근으로부터 미소 구멍이 없는 영역이 유속이 작아지게 되고 0.13 에서부터 증가하여 y/δ 의 값이 0.17 에서는 미소구멍의 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 훨씬 낮은 값을 나타내 보이며 y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 급격하게 줄어들었다. 그리고 법선 방향으로서는 이와 같은 현상은 중간쯤의 위치에서 표면의 속도 분포가 급격하게 줄어 0.15 근방에서 기포의 구멍이 없는 경우가 있는 경우보다도 유속의 분포가 증가하였음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 유속의 증가에 따라 하류 방향으로, 그리고 법선 방향의 경계층 외층으로 그 영향이 이동함을 알 수 있다.

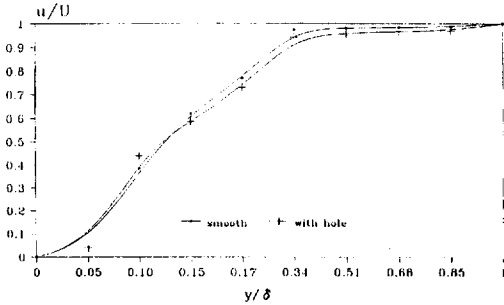


Fig. 7. Velocity distribution(24m/s, station : X=205 mm).

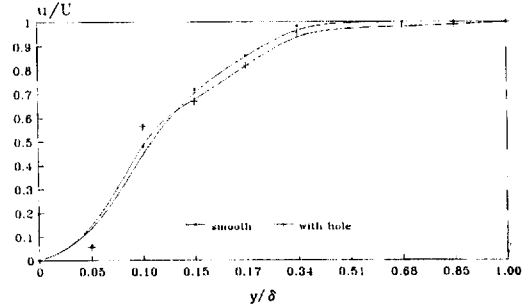


Fig. 8. Velocity distribution(24m/s, station : X=410 mm).

Fig.9에서는 $X_3=615\text{mm}$ 에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 $0, 0.038, 0.076, 0.11, 0.13, 0.26, 0.39, 0.52, 0.65, 0.78, 0.81, 1.00$ 로 이동함으로써 유속분포, 즉 u/U 의 값을 각각 측정하였다.

유속분포 결과는 벽면부근으로부터 미소구멍의 분포가 없는 경우가 있는 경우보다도 낮은 값을 보이며 0.05 에서부터 증가하여 y/δ 의 값이 1.0 에 가까워질수록 그 값이 감소해 감을 알 수 있다.

즉, 하류 방향으로 균일 압력의 분포가 하류로 이동할수록 경계층의 외층 방향으로 이동해감을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 속도 분포가 하류로 갈수록 그 영향이 감소함을 알 수 있다.

Fig.10에서는 $X_4=820\text{mm}$ 에서 경계층의 법선 방향으로 y/δ 의 값을 $0, 0.038, 0.076, 0.11, 0.13, 0.26, 0.39, 0.52, 0.65, 0.78, 0.91, 1.00$ 로 이동함으로써 유속분포, 즉 u/U 의 값을 각각 측정하였다.

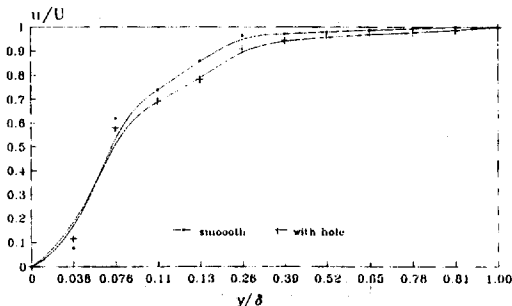


Fig. 9. Velocity distribution(24m/s, station : X=615 mm).

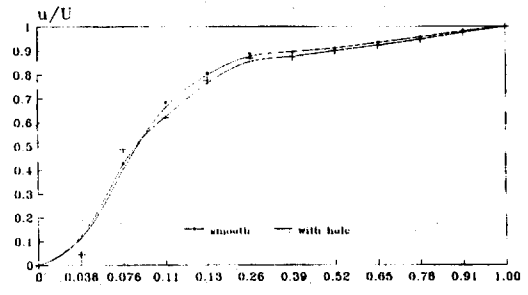


Fig. 10. Velocity distribution(24m/s, station : X=820 mm).

0.39, 0.52, 0.65, 0.78, 0.91, 1.00의 위치에서 유속 분포, u/U 의 값을 각각 계측하였다.

유속분포 결과는 벽면에서부터 미소구멍의 분포가 없는 경우가 있는 경우보다도 유속의 분포가 작아지게 되고 0.093에서부터 그 값이 증가하여 y/δ 의 값이 0.11에서는 미소 구멍의 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 낮은 값을 나타내 보이며 y/δ 의 값이 증가할수록 그 감소의 폭이 서서히 줄어들었다. 이와 같은 현상은 후연 위치로 갈수록 경계층 두께의 증가로 속도 분포가 매우 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.11에서는 유속이 18m/s인 경우에 대하여 위치($X/L=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)에서 가는 피토티 튜브를 사용하여 벽면의 점성마찰력을 계측하였고, 즉 점성 저층내에서 유속 분포가 $\frac{u}{U_\infty} = \sqrt{\frac{C_f}{2}}$ 의 식으로부터 계측하였으며 미소 구멍의 분포가 없는 경우가 있는 경우에 대하여 상류의 위치에서부터 점성 마찰력 계수인 C_f 가 약간 큰 값을 나타내 보이고 중간쯤으로부터 점점 감소하여 갔다.

그러나 구멍의 분포가 있는 경우가 없는 경우에 대하여 그 값은 약간 낮게 나타났다. 이러한 경향은 균등 압력 분포에 의하여 점성 마찰력의 감소 현상 때문임을 알 수 있다.

Fig.12에서는 유속이 24m/s인 경우에 대하여 위치($X/L=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)에서 가는 피토티 튜브를 사용하여 벽면의 점성마찰력을 계측하였다.

미소구멍의 분포가 없는 경우가 있는 경우에 대하여 상류의 위치가 하류의 위치보다도 C_f 가 약간 감소하였음을 알 수 있다. 그리고 하류로 갈수록 미소 구멍의 분포가 있는 경우가 없는 경우에 대하여 그 영향이 감소해 감을 알 수 있다. 이러한 현상은 하류의 압력 증가에 대한 미소 구멍의 크기에 영향을 받기 때문이라 판단된다.

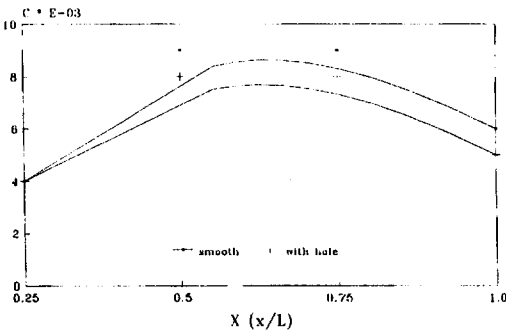


Fig. 11. Skin friction distribution(18m/s).

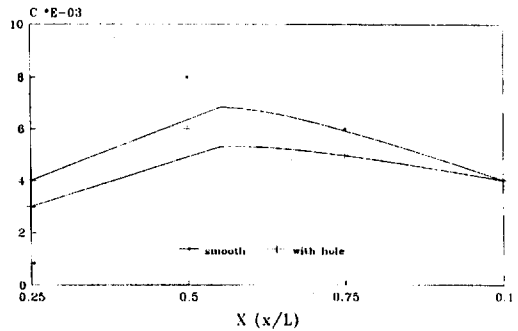


Fig. 12. Skin friction distribution(18m/s).

제4장 결 론

이상의 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 물체주위의 경계층 형성에 의한 표면 점성 마찰력을 감소시키기 위하여 균일한 압력의 표면을 유지하기 위하여 표면에 미소 구멍을 뚫어줌으로써 점성의 영향을 줄여 유속을 증가시키고 속도 기울기를

감소시킬 수 있었다.

2) 유속에서는 상류보다도 하류 방향으로 갈수록 구멍이 없는 경우보다도 구멍분포의 효과가 점점 감소함을 알 수 있었다. 그리고 균일 유속의 증가에 대하여는 그 영향이 법선 방향으로 이동해 갔다.

3) 점성 마찰력 계수는 상류로부터 점점 증가 하다가 중간 영역에서 하류로 이동할수록 감소하였고 미소 구멍의 영향도 비슷하게 나타났다. 그리고 균일 유속의 증가에 대하여는 하류로 갈수록 그 영향이 감소하였다. 이것은 압력 증가에 대하여 충분한 점성 마찰력 감소의 효과를 줄 수 없었다고 판단할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Bandyopadhyay, P.R., "Review-Mean Flow in Turbulent Boundary Layers Disturbed to Alter Skin Friction", J. Fluids Engineering, Vol. 108, pp.127-140, 1986.
2. Bogdevich, V.G. and Evseev, A.R. "Gas Saturation Effect on Near Wall Turbulence Characteristics", Proc. Second Int. Conf. on Drag Reduction, 31-Aug., Cambridge, U.K., pp. D2 : 25-37, 1977.
3. Johansson, A.V. and Alfredsson, P.H., "Recent Developments of Drag Reduction Methods for Ships", Second Intl. Symposium on Ship Viscous Resistance, pp 24 : 1 - 13, 1985.
4. Legner, H.H., "A Simple Model for Gas Bubble Drag Reduction", Phys., Fluids, Vol.27(12), pp.2788-2790, 1984.
5. Madavan, N.K., Deutsch, S. and Mercle, C.L., "Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles", Phys. Fluids, Vol.27(2), pp.356-363, 1984.
6. Madavan, N.K., Merkle, C.L. and Deutsch, S., "Numerical Investigations into the Mechanisms of Microbubble Drag Reduction", J.of Fluids Engineering, Vol.107, pp.370-377, 1985.
7. Merkle, C.L. and Deutsch, S., "Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection", Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, AIAA, Washington., pp.351-412, 1990.
8. 加藤洋治, 藤井雄作, 山口 一, 宮永 大, "高粘性流體の噴出による摩擽抵抗低減(第1報)", 日本造船學會論文集, 第168號, pp.39-50, 1991.
9. 加藤洋治, 藤井雄作, 山口 一, 宮永 大, "高粘性流體の噴出による摩擽抵抗低減(第2報)", 日本造船學會論文集, 第170號, pp.45-54, 1993.
10. Kim, S.Y. and Kato, H., "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, 1993.

A Study on the Reduction of Viscous Frictional Force with Uniform Pressure Distribution in the Turbulent Boundary Layer

Du-Nam SUNG · Si-Young KIM *

(Graduate School of Industry, PuKyong National University ; * Pukyong National University)

In this study, uniform pressure distribution with small hole on the surface of symmetric object were given to reduce the viscous frictional force. The results were as follows :

1. The velocity on upper stream were accelerated by uniform pressure distribution on symmetric objects for reducing the viscous frictional resistances.
2. The effects of the distributed small holes were reduced the viscous frictional resistances in down stream region more than upper stream due to the increasing pressure in reverse flow region.
3. The viscous skin friction on surface of symmetric objects with and without distributed small holes are effect in region of upper stream and much decreased in down stream region due to increasing of boundary layer thickness.