난류 경계층의 표면 마찰력 감소화

김 시 영
(부산수산대학교)

기호설명

A^+ : 완충(damping) 계수
B : 식(2)의 절편
C_f/C_{fo} : 마찰력 감소비(미소기포 분출 유/무)
l : 난류 혼합 길이
Q : 미소기포 분출량(cm^3/s)
u^+ : u/uo
U : 주유속(m/s)
S : 다공질 평판 면적(mm^2)
u_o : $(\tau_w/\rho)^{1/2}$
v_w^+ : 미소 기포 분출 속도
y : 경계층 두께방향거리
y^+ : $u_o y/\nu$
x : 유동 방향 좌표
τ_w : 벽면 전단 응력
κ : von Karman 상수(≒0.41)
ρ_e : 액체 밀도
ν_e : 액체 점성 계수
ν : 동점성계수
τ^+ : τ/τ_w
ϕ : 기포 비율

첨 자

$+$: 무차원 표시
l : 액체

1. 서 론

운동하는 물체에 작용하는 점성항력 감소를 위한 연구는 유체역학분야 연구에 아주 중요하다. 점성 항력은 압력항력과 마찰항력으로 나눌 수 있으며 압력항력의 저감은 경계층의 박리제어에 의하여 가능하며, 마찰항력의 저감은 난류천이의 제어에 의하여 이루어 질 수 있다. 점성 마찰항력, 즉 점성 마찰력 감소를 위하여는 경계층의 제어 방법[1-7]이 있으며, 최근에는 난류 경계층내의 점성계수 변화를 이용한 방법으로 미소기포 분출을 이용한 점성 마찰력 감소에 관한 연구[8-14]도 많이 보고되었다. 그리고 미소 기포분출을 이용한 자료를 보면 그 기구가 간단하고, 항력 감소 화를 최고 86%까지 달성할 수 있으므로 매우 효과적인 방법으로 인정되고 있다. 그러나 미소기포 분출에 의한 방법은 마찰력 감소에 효과적인 반면에 그 난류 유동장의 유동구조는 매우 복잡하다. 실험적으로는 다공질 파이프를 이용한 Doi의 보고[8], 평판의 점성항력 감소비율을 구한 Tokunaga의 보고[9], 구소련 Thermophysics 연구소의 과학자인 Bogdevich 등의 보고[10], 미국의 Pensilvenia 대학의 Madavan 등의 보고[11-14], 그리고 Mercle 의 보고[12]가 있다. 이들 대부분의 실험은 미소 기포의 유량만을 변화 시키면서 유동에 혼입 되도록 하였으므로 점성 마찰력 감소를 위한 최적의 방법은 아니다. 그리고 수치계산 연구로 가장 최근에, 그리고 가장 유효하게 인용되는 자료는 Lenger의 연구 결과[13]와 Madavan의 연구 결과[14]이다. 그런데 Lenger의 식은 미소기포가 분출되어 혼입된 영역의 기포분포(void ratio 또는 concentration)를 임으로 지정된 위치에 최고 기포분포값을 가정하고 있으므로 그 결과는 실험치와 많은 오차를 보이고 있으며, Madavan식 또한 물리적으로 합당치 않은 압력 일정의 가정하에서 구해진 van Driest의 댐핑 함수에 의한 기 - 액 혼합비율양과, 임의로 가정한 농도를 가정한 위치에서 계산하였으므로 실험치와의 비

교에서 오차를 보이고 있다. 그러므로 아직도 기-액의 혼합 특성을 충분히 고려하거나 최적의 분출 위치를 규명하지 못하였으며, 압력의 변화도 고려하지 않았다. 즉 기-액의 혼합특성을 충분히 뒷받침 할만한 적합한 정도 높은 수치 계산식의 모델링이 보고 되어 있지 않다고 생각된다. 왜냐하면 그 난류구조가 다량의 미소 기포를 다공질 표면을 통하여 주유동에 혼입시켜 점성 마찰력을 감소시키므로 이 구조를 해석하기 위하여는 미소기포 혼합 영역의 국소 레이놀즈수 또는 그 혼합 유동특성을 규명하고, 유동 난류영역을 적합하게 해석하지 않으면 안되기 때문이다. 그러므로 기포 분출에 의한 기-액 혼합 특성의 합당한 고려와, 기포를 분출시킬 최적의 영역을 어떻게 구할것인가가 매우 중요하다. 그러나 경계층내에서 벽면근처 점성저층의 끝단으로부터 압력이 크게 증가하면서 천이하여 난류가 시작되는 점에서 그 값이 최대로 되므로 이 압력을 크게 낮출 수 있다면 벽면 근처에 발생되는 점성 마찰력 저감에 기여할 것으로 생각되므로 이에 적합한 제어가 이루어지면 천이의 끝 영역에서 속도를 증가시킬 수 있다. 그리고 점성계수가 다른 물질을 경계층내에 분출시키면 그 주위 영역의 유동 특성이 변화한다. 그리고 당연 벽법칙의 기본 모델인 대수법칙이 성립하여야 한다는 것은 Granville 등의 해석결과[15-16]에서도 잘 알 수 있다. 그리고, 미소 기포를 경계층내에 분출시키면 기-액의 혼합된 유효점성 계수가 증가하여 댐핑영향에 의한 난류혼합 길이가 감소하게 되고, 이 주위 영역의 난류 레이놀즈수와 운동량 전달(momentum transfer)양이 감소하여 마찰 항력이 감소하므로 현재까지 보고된 식들은 이러한 물리량을 합당하게 고려하지 않았다. 분출되는 미소기포에 의한 기-액 혼합 유효 점성과 밀도 변화는 유동장내의 압력변화 및 van Driest의 감쇄량에 영향을 주게 되며, 또 그영역의 유동특성은 난류속도 분포 기본 모델인 대수법칙의 물리적 근거를 만족해야 하므로 이점에 대한 상세한 고찰이 필요하다. 그러므로 여태까지 사용된 혼합장 길이 및 댐핑 함수의 식이 기-액 혼합영역에서 물리적인 타당성이 결여되어 있으므로 이에 합당한 규명이 되면 실험결과 값에 더욱 근접할 수 있는 이론적 근거가 마련된다고 생각된다.

그러므로 본 논문에서는 이상의 배경에 의하여 기-액 혼합 비율에 의하여 혼합특성을 van Driest의 댐핑계수에 고려해 넣고, 압력 변화에 의한 영향을 고려하여 이 식에 의하여 구해진 혼합 길이가 레이놀즈 응력값에 변화를 주도록 하고, 미소기포는 본논문에서 새로이 정의하는 완충층에 분사되도록 하여 그 부근 영역의 유동장 특성이 미소 기포의 혼합 영향을 받도록 하였다. 그리고 미소기포가 분출되는 완충영역은 점성 저층의 층류로부터 천이하여 난류로 되면서 급격히 압력이 증가하므로 속도는 감소하게 된다. 이러한 배경에서 완충층의 정의는 대수법칙을 미분한 그속도 기울기값이 음의 값을 갖는 영역으로 하였다. 본연구의 실험으로는 미소 기포가 가정된 비율만큼 TE형(TE : 동경대학 공학부) 캐비테이션. 터널의 시험부에 고정된 다공질 평판을 통하여 분출되도록 하고, 미소 기포는 공기 압축기로부터 유량및 압력 레귤레어터(regulator)를 통하여 일정하게, 그리고 해석적으로 구한 완충층의 영역에 실험적으로 가능한 이 영역에 미소 기포가 분출되도록 하여 그 영역의 흐름을 제어하며, 경계층내의 속도 및 압력 분포가 측정될 수 있도록 실험 장치를 설계 및 실험을 수행하였다. 그리하여 본계산과 보고된 계산값[14], 그리고 여기서 행한 실험결과 값을 각각 비교 검토하고, 점성 마찰력 감소화가 달성되는 경향을 조사하였다.

2. 해석 배경

2.1 마찰력 저감개념

다공질 표면에 의하여 분출되는 미소 기포가 난류 경계층내에 층상으로 혼합된 상태로서 존재할때 에 경계층내의 평균류에 의한 전단응력 는 다음 식(15)과 같다.

$$\tau = \mu \frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{y}} - \rho \overline{u}' \overline{u}' \qquad (1)$$

여기서 기호 -와 1는 시간 평균과, 변동 성분을 나타낸다. 그리고, $\rho u' v'$는 레이놀즈 응력이다. 그런데 운동량 교환은 레이놀즈 응력값이 대부분이기 때문에 점성에 의한 값은 무시할 수 있을 정도로 작은 값이다. 그리고 점성 저층에서는 레이놀즈 응력에 의한 운동량 교환이 급격히 감소하므로 벽면 근방에서 속도 기울기가 급격히 증가한다. 그러므로 점성 마찰력 저감을 위한 난류모델로서 혼합 길이를 선택하고, 미소 기포의 분출에 의한 주위 영역의 유효 점성계수변화를 van Driest 의 댐핑 계수에 고려해 넣어서, 이로 인하여 완충층의 압력을 낮추어 주므로서 그 속도 기울기를 변화시켜 점성 마찰력을

감소 시킬 수 있다.

2.2 속도분포 특성[15,16]

난류 경계층내의 속도분포로서 대수 법칙식 (2)은 그 속도분포가 벽근처에서 뿐만 아니라 난류박리가 일어나는 영역까지 이용할 수 있다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa}\ln(y^+) + B \tag{2}$$

그리고 Prandtl의 혼합 길이(l^+)에 의하여 전단응력(τ^+)은 다음과 같다.

$$\tau^+ = \frac{du^+}{dy^+} + l^{+2}\left(\frac{du^+}{dy^+}\right)^2 \tag{3}$$

그러므로 경계층내의 속도분포 기울기는 식(3)으로부터 근의 공식에 의하여 다음과 같이 무차원으로 쓸수 있다.

$$\frac{du^+}{dy^+} = \frac{2\tau^+}{1+\sqrt{1+(2l^+)^2\tau^+}} \tag{4}$$

그리고 식 (4)에 의하여 속도 기울기는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\kappa = \frac{du^+}{d(\ln y^+)} = \frac{2\kappa\tau^+ y^+}{1+\sqrt{1+(2l^+)^2\tau^+}} \tag{5}$$

여기서 대수법칙이 성립하는 영역에서는 $\kappa du^+/d(lny^+) \fallingdotseq 1$이 되고, 벽근처의 층류 영역에서는 $\kappa du^+/d(lny^+) \fallingdotseq \kappa\tau^+ y^+$이 된다. 대수 법칙을 따르는 속도분포 영역에서 절편의 값은 항상 그 유동 특성의 변화에 관계없이 일정하게 계산되므로 어느 난류영역에서나 그 값을 만족하여야 한다.

2.3 기-액 혼합을 고려한 댐핑계수 및 압력 기울기

van Driest 의 댐핑 계수식은 압력이 일정한 경우는 적합하게 사용되나 다른 변화 요인에 의하여 유동장내 압력의 변화가 있으면 잘 맞지 않는다. 또 점성저층의 영역이 아닌 벽으로부터 떨어진 완충층 외부영역 처럼 벽으로부터 거리가 멀어지면 층류영향은 거의 없어지고 난류 영역만 남게 되므로 $\tau^+ \fallingdotseq \tau_t/\tau_w$가 성립하게 된다. 그러므로 식(3)과 식(2)의 미분으로 부터 혼합길이, $l^+ = \sqrt{\tau^+}\kappa y^+$가 되고 댐핑 계수 D^+를 함께 쓰면 다음의 식이 된다.

$$l+ = \sqrt{\tau^+}\kappa y^+ D^+ \tag{6}$$

그리고 댐핑 계수식은 식(7)과 같다. 여기서 변수 y는 경계층 두께 방향으로의 변수이므로 기-액 혼합특성은 A 에 의하여 그 특성을 변화시켜야 한다.

$$D^+ = 1 - \mathrm{Exp}(-y/A) \tag{7}$$

그리고 식(7)에서 A는 댐핑계수(damping factor)이고, y 는 경계층 두께방향의 거리이고 이 두식을 무차원으로 표시하면 식(8),(9) 와 같이 쓸 수 있고, 이식들로부터 y/A를 구할 수 있다.

$$A^+ = Au_o/\nu = A(\tau_w/\rho)/\nu \tag{8}$$

$$y^+ = yu_o/\nu = y(\tau_w/\rho)/\nu \tag{9}$$

식 (8)에서 댐핑 계수 A+ 를 계산할 때에 압력 기울기가 없거나, 경계층 내에서 유체 특성의 변화가 없는 경우는 A를 26으로 계산한다. 그러나 본논문에서 관심을 갖고 있는 경우는 미소 기포분출에 의한 경계층내의 유체 혼합특성과 그것에 따른 압력 변화를 고려해야 하므로 그 특성 변화를 A^+에 고려해 넣는다. 그러므로 식(8)에서는 유체 물성치를 혼합된 물성치로 하고 식(9)에서는 벽면의 점성저층인 영역에서는 액체만이 존재하므로 그 때의 값을 액체인 경우의 ρ_l 과 ν_l를 각각 대입하여 식(8), (9)로부터 다음 식을 구한다.

$$y/A = (y^+/A^+)(\mu_l/\mu)(\rho/\rho_l)^{0.5} \tag{10}$$

그리고 혼합 기포비율 ϕ에 의하여 기-액 혼합된 점성계수와 밀도는 식(8)에 Einstein(17)에 의하여

실험식으로 구한 $\mu = \mu_l(1+2.5\phi)$와 $\rho = \rho_l(1-\phi) + \rho_g\phi$를 이용 한다. 그리고 미소 기포 분출에 의한 압력변화를 댐핑 계수 A에 고려하기 위하여 다음의 식[19,20]을 이용하였다.

$$A = 26\mathrm{E}_{xp}(-5.9v_w^+) \tag{11}$$

2.4 완충층의 정의

벽면 근처의 층류 저층으로부터 천이를 시작하여 y 방향으로 완전히 난류로 변화한다면 점성 저층의 끝단으로부터 압력이 급격히 증가하여 난류가 완전히 시작되는 위치에서 그 압력이 최대로 되어 다시 감소 하게 된다. 그

러므로 대수 법칙에 의한 속도 분포의 그 기울기 값이 음인 영역을 천이층으로 볼 수 있으므로 식(5)의 값에 의하여 그 영역을 구할 수 있고 이 영역에 미소기포 분출로서 그 혼합 특성에 의하여 속도 분포에 변화를 줄 수 있다.

2.5 계산 코드 수정

여기서 혼합특성을 고려한 계산결과 값을 Madavan[14]의 계산값과 본 실험치의 비교를 위하여 그가 사용한 경계층 계산 프로그램 코드 NASA-TM-2458[15]를 수정하였다. 그 계산 프로그램에 기-액 혼합 특성을 식(10), 압력 변화의 특성을 식(11)에 의하여 변화를 주었으며, 2.4에 의하여 정의되는 영역에서 그 값이 고려되도록 계산코드를 수정하였다. 계산 코드 수정 방법은 NASA-TM-2458 코드 중 D2401 주 코드내의 SUB TURBULENT의 DAMP 변수에 식(10)과 (11)에 의하여 수정된 식이 완충층(buffer layer) 영역에서만 계산되도록 IF 문을 써서 계산하였다. 그렇게 하면 그가 고려치 않은 기-액 혼합 특성및 압력 기울기 영향, 그리고 그가 임의의 영역에 미소 기포를 분사한 경우와 잘 비교가 될 수 있다.

3. 실험 분석

3.1 실험 장치

본 실험은 동경대학 공학부의 캐비 테이션.터널을 사용하였다. 분출 기포로서는 상온의 공기를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 시험부 단면은 높이가 120mm, 폭이 50mm, 그리고 측정부 길이는 350mm이다. 측정 시험부는 사각 단면으로 사방에 투명유리로 되어 있고, 아랫벽면에 다공질 표면(60 m또는 15μm , 길이 45mm, 폭 35mm)을 설치하여 미소 기포가 분출 되도록 하여 실험을 행하였다. 난류 촉진 장치(stimulator)로 5mm의 철사(wire)를 시험구간의 입구에 설치 하였고, 기포분출 다공질 평판은 벽면으로부터 20mm 높게설치하여 레이져 유속계(LDV)로서 계측이 용이하도록 하였으며, 이 영향에 의한 속도 변동율은 ±2% 이내였다. 그리고 하류쪽으로 유속측정을 위한 미소 압력계를 위치(Station, Fig.에서 st.1~5로 표시, st.1 : x=175mm, st.2 : x=195mm, st.3 : x=215mm, st.4 : x=235mm, st.5 : x=255mm) 별로 설치하였다. 그리고 이들 계측값들을 얻기 위한 측정 자료처리 시스템 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치에서 미소기포 분출할 수 있는 평판부분은 분리가

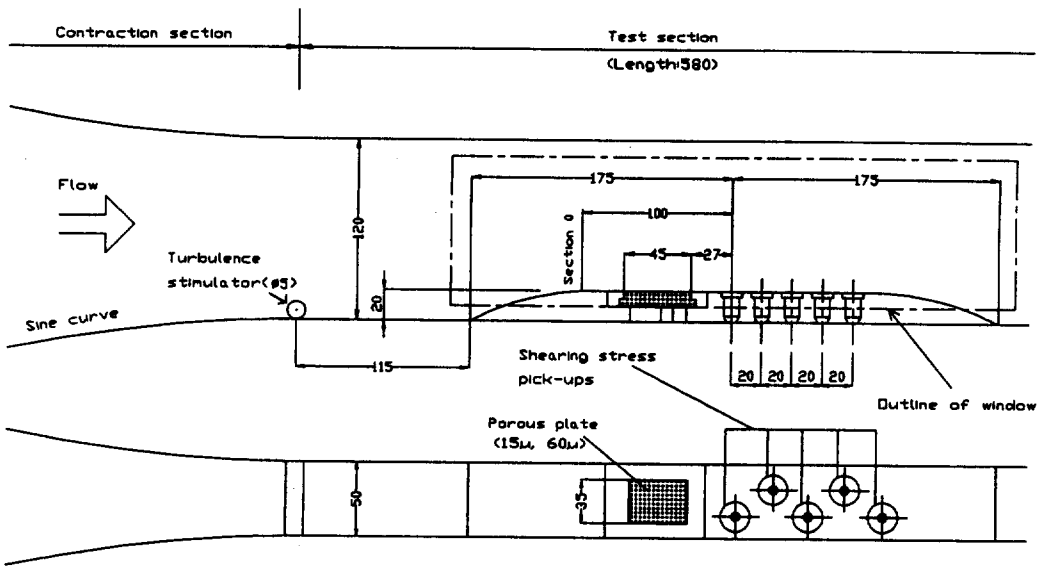

Fig. 1 Experimental device

가능토록 하여 다공질 평판의 교환이 가능하도록 하였다. 그리고 흐름의 하류에는 5개의 유속 측정을 위한 미소 압력계를 설치하였으며, 유속 검정을 위하여 윗면에는 레이저 유속계에 의한 유속 측정이 가능토록 하였다. 미소 압력계는 상류로부터 하류로 엇갈리게 설치하여 20mm간격으로 압력의 교란 영향이 없도록 하였으며, 순서대로 위치 1~5(Station 1~5)의 번호를 붙였다.

3.2 실험 방법

전단응력측정을 위한 압력 측정면은 직경 5mm이며 정격 용량은 1g, 응답 주파수는 30Hz이다. 그리고 보정(calibration)도 실시하였다. 본실험에서는 상온의 공기를 Fig. 2에서와 같이 압축기(compressor)를 이용하여 압력을 단계별로 높여줄 수 있도록 하였고, 측정시 일정시간 동안 정상 분출이 가능하도록 하였다. 그리고 분출되는 공기와 터널 내부에 흐르는 수온의 특성변화도 별도의 장치로서 검정하였다. 본 실험에서 미소 압력계에 의한 유속을 레이저 유속계로서 검정하였다. 기포 분출이 없거나, 있는 경우 자유 흐름 속도를 8m/s, 10m/s, 12m/s로 하여 각각 실험을 실시하였으며, 경계층내의 속도 분포 측정은 각위치(st.1~st.5)에서 평판의 난류 경계층 영역에 자주 사용되는 다음 식 (9)를 이용하여 구하고 이로부터 마찰력 계수값을 구하였다.

$$u^+ = 2.5\, ln(y^+) + 5.5 \qquad (9)$$

그리고 유속 측정을 위하여 미소 압력계의 설치에 의한 형상 영향, 센서(sensor)부분의 이물질 부착, 센서에 의한 진동, 계측 전압 변동, 실험 중의 측정값의 변동 오차, 센서와 주위의 높이에 의한 영향, 주유속, 그리고 기포 분출의 유속 측정 오차 등은 레이저 유속계에 의한 계측값과의 비교 검정[7]에서 약간 높게 나타났으며, 이값의 편차는 1~2% 이내이므로 무시할수 있었다.

4. 결과 및 고찰

실험 결과의 분석은 평판 상류에 설치되어 있는 5mm의 철사에 의하여 만들어진 난류상태에서 기포분출이 없는 경우와, 기포 분출이 있는 경우로 각각 나누어서 주유속 및 기포 분출 유속의 변화에 따라 그 혼합 속도분포를

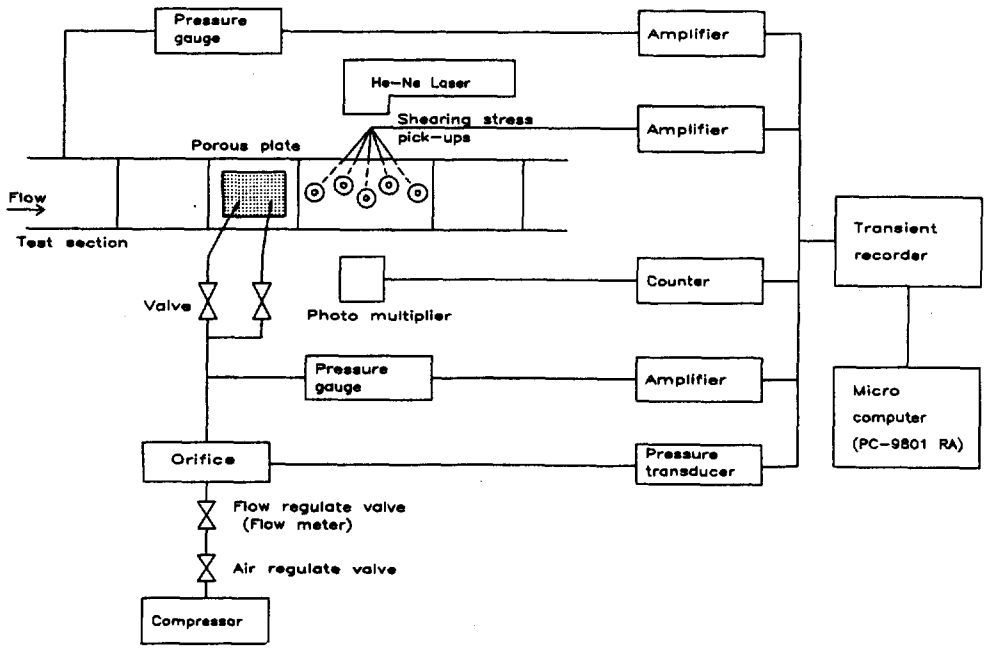

Fig. 2 Schematic of flow loop

하류 방향에 위치별(st.1~st.5)로 계측하고, 이용하여 그 점성 마찰력의 감소 비율을 비교하였다.

먼저 Fig.3은 난류 상태에서 미소 기포가 없고, 유속이 12m/s 인 경우에 하류 방향의 위치 1(st.1)에서 y 방향으로 유속 기울기를 비교한 것이다. 천이가 일어나기 시작하는 점(y+=10부근)까지는 세 경우 모두 비슷한 값의 경향을 보이나, 그 이상 벽면으로부터 거리가 멀어질수록 본계산과 van Driest[16]의 결과는 비슷한 경향을 보이고, 또 대수 법칙이 성립하는 위치부근에서 상수 1의 값에 수렴해 가는것을 보인다. 그러나 Madavan[14]의 값은 y+ 의 값이 20에서부터 점점 증가 하여 100 근처에서 크게 발산해 가므로 대수법칙을 잘 수용하고 있지 못함을 알 수 있다. 그러므로 미소기포의 혼합에 의한 그 특성이 본계산 및 실험의 비교에서 잘 고려되고 있음을 알 수 있다.

Fig.4는 미소기포 분출이 없는경우에 속도 분포 경향을 위치 1(st.1)에서 각각 비교한 것이다. Spadling[14]에 의한 결과와 Madavan[14]의 결과값은 벽면으로부터 ln (y+)의 값이 2 까지는 비슷한 값을 보이며, 본계산의 결과는 실험의 전구간을 통하여 실험값과 일치함을 보이고 있다. 실험과 본계산 결과는 압력 및 혼합특성 변화에 따른 특성도 잘 수용하고 있으며 Madavan[14]과 Spadling[14]의 계산결과 값은 천이 영역부근(ln(y+)의 값이 2)에서 그 값을 잘 수용하지 못함을 알 수 있다.

Fig. 5는 주유속이 8m/s, 난류유동, 그리고 다공질 평판이 60 μm일 때에 위치별(st.1~5)로 미소기포 분출 증가에 따라 점성 마찰력 감소비를 나타낸 것이다. 위치별로 유속이 다르므로 어느 위치에서 그 감소비가 우수하다고 말할 수 없으나, 위치 1(st.1)에서 보면 무차원 미소기포 분출량이 0.9 부근에서 그 감소비가 최소값을 보이며 미소 기포 분출량 증가에 따라 그 값이 점점 증가해 가는 경향을 보이고 있다. 그리고 위치 3(st.3)에서 감소비가 더욱 크게 나타 났으며, 그 경향은 위치 1(st.1) 에서와 같은 경향을 나타내었으며 그값은 뒤에 기술하는 계산값과의 비교에서도 잘 알 수 있다.

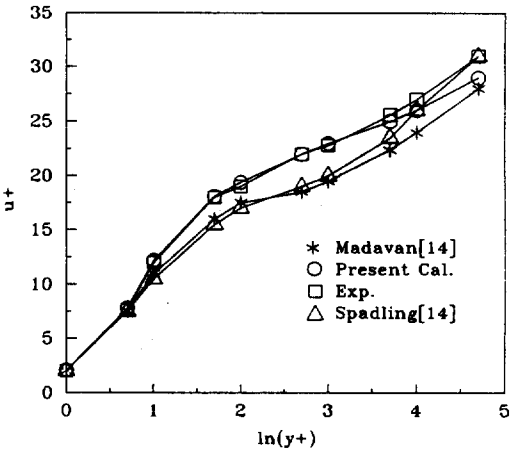

Fig. 4 Comparisons of velocity profiles with formulas and experiments(st.1)

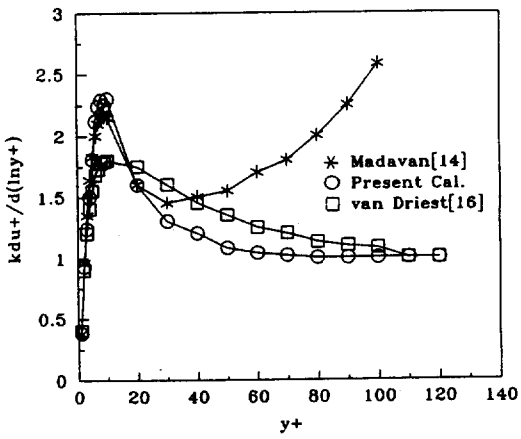

Fig. 3 Comparisons of slop kdu+/d(lny+) with normal distance y+(st.1)

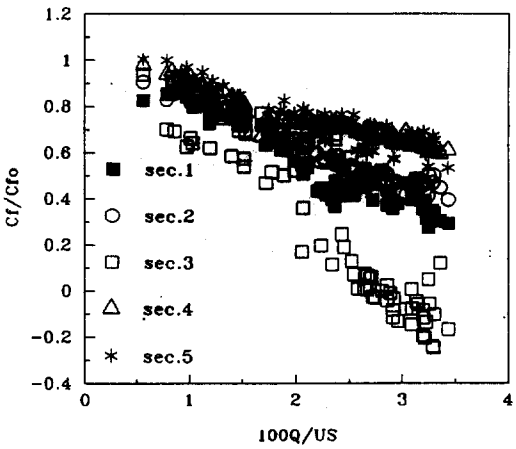

Fig. 5 Skin friction as a function of injection rate(8m/s, with sti, and 60μm)

Fig. 6은 유속이 12m/s, 난류 유동, 다공질 표면이 60 m인 경우에 그 점성 마찰력 감소비를 위치별로 비교한 것이다. 위치 1(st.1)에서 보면 미소 기포 분출량이 0.5 부근에서 최소값을 보이며 미소 기포량이 증가할수록 감소비가 더욱 증가해감을 알 수 있으며, 그값이 2.5 부근에서 최대값을 나타내었다.

Fig. 7은 유속이 8m/s, 난류 유동, 다공질 평판이 15 m인 경우에 점성 마찰력 감소비를 위치별로 나타낸것이다. 위치1 에서 보면 무차원 미소기포 분출량 0.7 부근에서 최소 감소 비율을 보이며 미소기포 분출량의 증가에 따라 그 값은 점점 증가해서 3.6 부근에서 그값이 최대값을 나타내었다. 그리고 Fig. 6에서와 비교하여 기포 분출유량 5.5 부근에서 약 80%(Fig.에서 0.2) 까지 감소 하였다.

Fig. 8은 유속 10m/s, 난류상태, 다공질 표면 15 m인 경우의 점성 마찰력 감소비 경향을 나타내 보인다. 미소기포 분출량이 0.6 부근에서 최소값을 보이며 그분출량이 증가할수록 감소비율도 점점 증가해가는 경향을 볼 수 있다. 특히 이조건에서는 미소 기포비율이 1.6과 2.8 사이에서 약 60%(Fig.에서 0.4) 까지 감소하는 효과를 볼 수 있었다.

Fig. 9에서 보면 미소기포 분출유량이 2.0 부근을 전후

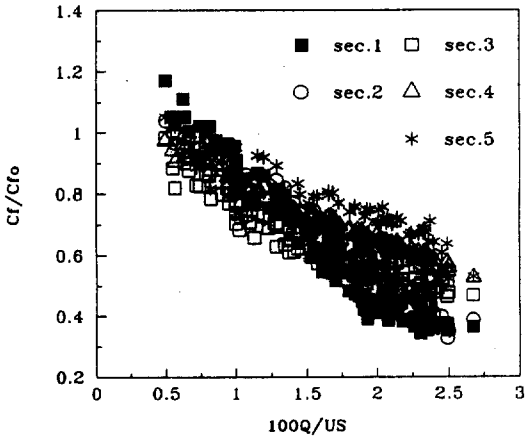

Fig. 6 Skin friction as a function of injection rate (12m/s, with sti, and 60μm)

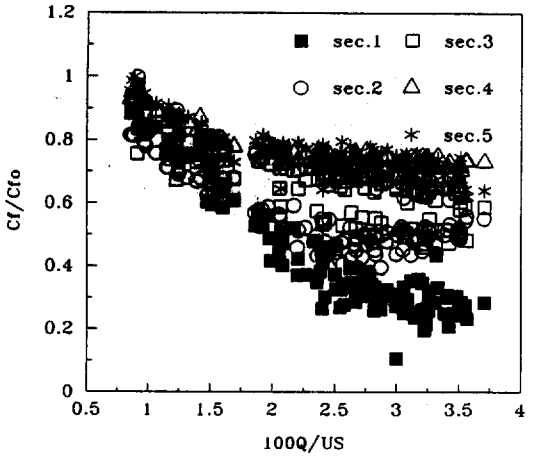

Fig. 7 Skin friction as a function of injection rate (8m/s, with sti, and 15μm)

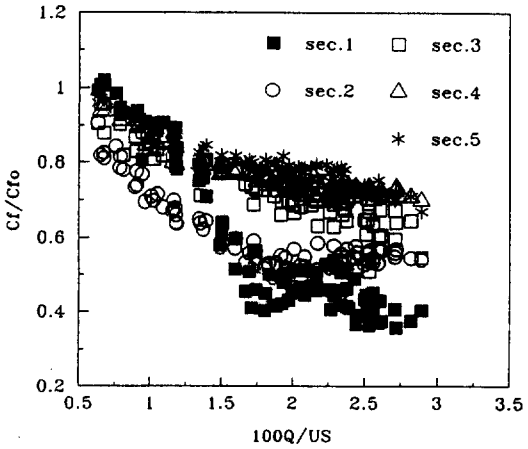

Fig. 8 Skin friction as a function of injection rate (10m/s, with sti, and 15μm)

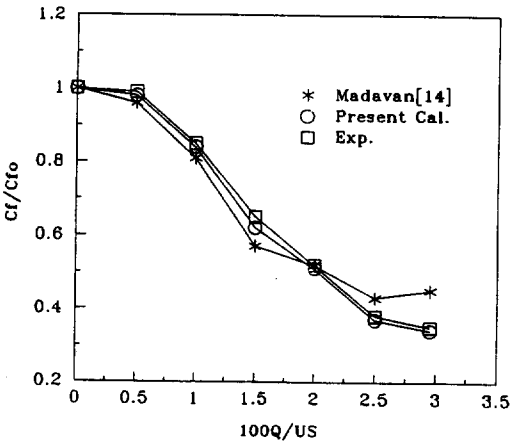

Fig. 9 Drag reduction ratio(st. 1, 12m/s)

하여 본계산과 실험치는 거의 비슷한 값으로 기포량 증가에 따라 점성 마찰력 감소비가 증대해 가는 경향을 보이나 Madavan[14]의 계산 결과는 실험치와 비교하여 2.0 이전에서는 낮은 값을, 그 이후에서는 과대의 값을 나타내 보이고 있다. Madavan[14]의 경우는 미소기포 분출양이 2.0 이상에서는 난류 계산이 본계산보다는 정성적이지 못함을 알 수 있다. 이는 압력 기울기및 기-액 혼합 특성의 영향이 기포 분출 유량이 증가할수록 더욱 증가함을 알 수 잇다. Fig. 10 에서는 Madavan[14]의 계산 결과가 본계산의 값보다도 실험치와의 비교에서 더욱 낮은 결과값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 유량의 증가에 대하여 그 편차도 증가함을 알 수 있으며 이는 계산정도가 본연구의 계산보다도 떨어짐을 알 수 있으며 본계산의 정도가 높아졌음을 알 수 있다.

Fig. 11~13의 대체적인 경향은 Madavan[14]의 계산결과가 본계산보다도 실험치와 비교하여 더욱 큰 값의 작은 값을 나타내 보이고 있으며 미소 기포의 유량 증가에 따라서 더욱 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 잇다. 이는 미소 기포분출의 유량증가에 따른 혼합 특성의 증가, 그리고 난류 확산의 증가가 있음을 알수 있으며, 본계산에서 미소기포에 의한 혼합특성 및 압력 변화 특성이 고려됨으로써 정도 높은 계산을 얻을 수 있었다.

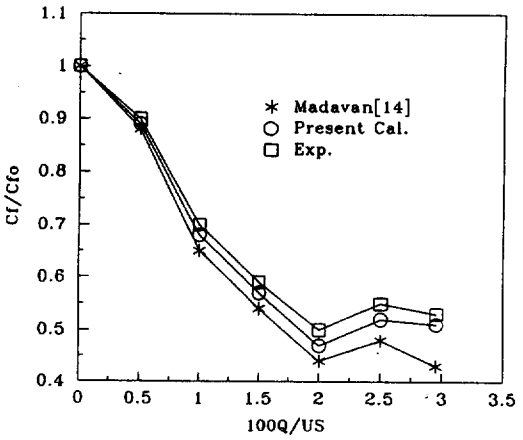

Fig. 10 Drag reduction ratio(st. 2, 12m/s)

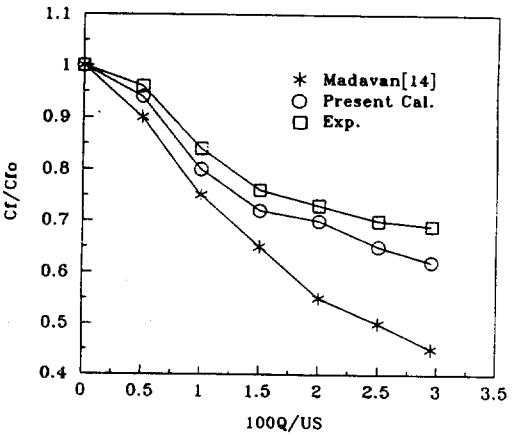

Fig. 12 Drag reduction ratio(st. 4, 12m/s)

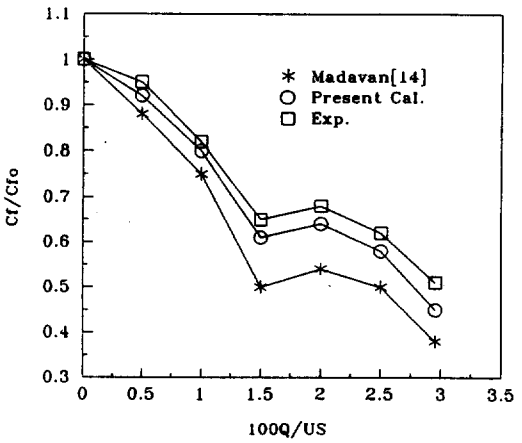

Fig. 11 Drag reduction ratio(st. 3, 12m/s)

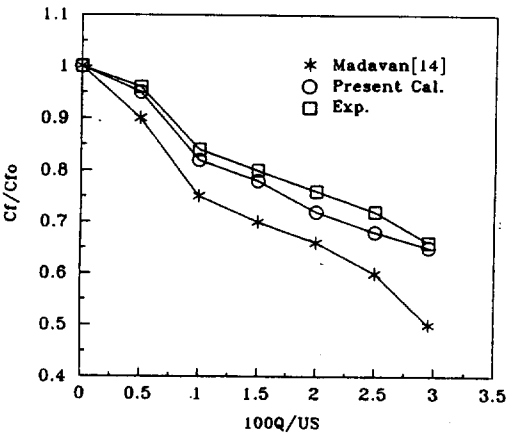

Fig. 13 Drag reduction ratio(st. 5, 12m/s)

5. 결 론

미소 기포 분출에 의한 점성 마찰력 감소화를 위하여 벽법칙의 계산 방안을 개선하고, 다공질 표면을 통하여 미소 기포를 분출시켜 점성 마찰력 감소비율을 구한 실험값과의 비교검토에서 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Madavan[14]의 계산 방법에 미소기포 혼합특성과 압력 변화를 고려함으로써 실험치에 접근하는 정도 높은 계산결과를 얻었다.

(2) 경계층의 두께 방향으로 미소 기포 위치를 미리 가정하는 것 보다도 완충층(buffer layer)을 정의 하여 계산 및 실험으로 이 영역에 미소기포를 분출시킴으로써 점성 마찰력의 감소효과가 더욱 증대 되었음을 알 수 있었다.

(3) 다공질 표면의 위치로부터 하류로 이동할수록, 그리고 미소기포유량이 증가할수록 점성 마찰력의 감소비율이 대체적으로 개선되고, 하류로 갈수록 미소 기포에 의한 난류확산 및 압력 기울기의 변화가 실험치와의 비교에서 현저히 나타나므로 이러한 현상의 규명이 필요하다.

후 기

본 논문은 '1991~2년도 교육부 지원 한국학술진흥재단(KRF)의 자유공모(지방대 육성) 학술연구 조성비'에 의하여 본연구가 이루어졌으며 동 재단에 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

1) Johansson, A.V., 1985, "Recents Developments of Drag Reduction Methods for Ships," SSPA Symposium Proceedings, pp. 24 : 1~13.

2) Bandyopadhyay, P.R., 1986, "Review - Mean Flow in Turbulent Boundary Layers Disturbed to Alter Skin Friction," J. Fluids Engineering, Vol. 108, pp. 127~140.

3) The Royal Aeronautical Society, 1987, "Turbulent Drag Reduction by Passive Means," International Confrence for Drag Reduction, Vol. I, II, Sep. London, U.K.

4) Choi, K.S., 1990, "Drag Reduction by Riblet for Marine Application," RINA, Vol. 132, pp. 269~282.

5) Hoyt, J.W., 1991, "Negative Roughness and Polymer Drag Reduction," Experiments in Fluids, Vol.11, pp.142~146.

6) Wallace, J.M., 1991, "Viscous Drag Reduction Using Streamwise - Aligned Riblets," AIAA, Vol. 30, pp. 1119~1122.

7) Kato, H., 1991, "Frictional Drag Reduction by Injecting High - Viscosity Fluid," J. of Soc. Naval Arch., Japan, Vol.168, pp. 39~50.

8) Doi, Y., 1991, "Frictional Drag Reduction by Microbubbles," J. of Soc. Naval Arch., Japan, Vol.170, pp.55~63.

9) Tokunaga, K., 1987, "Reduction of Frictional Resistance of a Flat Plate by Microbubbles," W - J Soc. Naval Arch., No. 73, pp. 79~83.

10) Bogdevich, V.G., 1977, "Gas Saturation Effect on Near Wall Turbulence Characteristics," Proc. Second Int. Conf. Drag Reduction, Aug. 31 - Aug., Cranfield, U.K., pp. D2 - 25~37.

11) Madavan, N.K., Deutsch S. and Merkle C.L., 1984, "Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles," Phys. Fluids, Vol. 27, pp. 356~363.

12) Mercle, C.L., 1985, "Drag Reduction by Microbubbles : Current research Status," Paper No. AIAA - 85 - 0537, pp. 199~215.

13) Legner, H.L., 1984, "A Simple Model for Gas Bubble Drag Reduction," Phys., Fluids, Vol. 27, pp. 2788~2790.

14) Madavan, N.K., Mercle, C.L. and Deutsch, S., 1985, "Numerical Investigation into the Mechanisms of Microbubble Drag reduction," J. of Fluid Engineering, Vol. pp. 370~377.

15) Granville, P.S., 1989, "A Modified Van Driest Formula for the Mixing Length of Turbulent Boundary Layers in Pressure Gradients," J. of Fluids Engineering, Vol. 111, pp. 94~97.

16) Granville, P.S., 1990, "A Near - Wall Eddy Viscosity Formula for Turbulent Boundary

Layers in Pressure Gradients Suitable for Momentum, Heat, or Mass Transfer," J. of Fluids Engineering, Vol. 112, pp. 240~243.

17) Hapel, J., 1965, "Low Reynolds Number Hydrodynamics," Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp. 438~443.

18) Price,J.M., and Harris, J.E., 1972,"Computer Program for Solving Compressible Boundary Layer Equations of a Perfect Gas," NASA TM X-2458, Apr., pp. 29~75.

19) Tuncer Cebeci, 1970, " Behavior of Turbulent Flow near a Porous Wall with Pressure Gradient," AIAA Journal, Vol.8, No.12, pp. 2152~2156.

20) Tuncer Cebeci and Smith, A.M.O, 1974, "Analysis of Turbulent Boundary Layers", Academic Press, pp. 217~221.

Reduction of Skin Friction Force for Turbulent Boundary Layer

Si-Young Kim

(National Fisheries University of Pusan)

This paper presents a new concept to reduce turbulent frictional drag by injecting micro-bubble into buffer layer of turbulent boundary layer on flat plate. The buffer layer of boundary was specified by minus velocity gradient of law of the wall. When the buffer layer region of turbulent boundary layer is filled with micro-bubble of air and viscous of the region is kept low, the velocity profile in the region should be changed substantially. Then the Reynolds stress in the buffer layer region becomes less, which guide to higher velocity gradient there. It results in reduction of velocity gradient at the viscous sublayer, which gives the reduction of shear stress at the wall.