

국소 거칠기와 난류 경계층과의 상호작용

문 칠 진

부산수산대학교 대학원
(1991년 4월 30일 접수)

Interaction of Local Roughness and Turbulent Boundary Layer

Chul-jin MOON

National Fisheries University of Pusan, Graduate School

(Received April 30, 1991)

An interaction of turbulent boundary layer and local roughness effects was evaluated to investigate the shear frictional coefficient in diffuser. Clauser roughness function was applied to Kármán's integral equation for governing equation. The roughness of overall and local diffuser surfaces were calculated using Cole's wall and wake law and Clauser's roughness function for turbulent boundary layer characteristics. The calculating results were compared with the experimental results of other paper. It shows some significant improvements for shear frictional coefficient. Computer code was then used to confirm the behavior of local frictional coefficient along with diffuser roughness surface for some reduction of shear flow stress.

서 론

서로 상대 속도가 존재하는 유동 유체와 고정 고체의 경계면에는 상대속도에 의한 마찰로 전단응력이 존재하며 이것은 에너지 소모의 큰 원인이 된다. 이러한 현상은 주로 선체의 표면이나, 각종 유체가 흐르는 관로, 그리고 각종 유체기계, 터보기계 또는 디퓨저 등에서도 볼 수 있다. 거칠기의 정도가 큰 경우 대개의 유동은 난류가 되고, 또 이와 복합된 현상의 난류 경계층은 대단히 복잡한 유동이 된다. 본 연구에서는 이와같은 현상의 하나로 표면 거칠기(또는 국소 거칠기)와 난류 경계층이 상호 작용하여 일어나는 유동현상의 하나인 디퓨저의 닥트를 선정 하고, 압력이 팽창해가는 디퓨저 표면 출구 방향으로 표면 거칠기 영향을 난류 경계층과 관련하여 해석하였다. 디퓨저에서는 출구쪽으로 폭이 넓어져 속도가 감소해

가는 역압력 구배 현상이 있다. 그리고, 압력팽창의 원할함을 위하여는 다른 요인을 제거하는 방안도 있으나 닥트 표면의 점성 마찰속도와 거칠기 영향을 줄이는 것도 대단히 중요하다.

이러한 문제를 다루기 위하여 주류 방향의 흐름 지배 방정식으로는 Kármán의 적분 방정식(1985)을 이용하여 정밀도 높게 점성 마찰 속도를 구하기 위하여 Clauser(1954)의 미소한 거칠기의 영향을 고려하여 보았다. 그리고 그 결과를 기존의 적분법(1969)의 계산 및 실험(1965)의 결과치와 비교하여 계산정도가 향상됐음을 알 수 있었다.

그리고 다른 평판의 실험 자료에서 시도된 국소 거칠기 분포에 의한 표면 마찰력 감소를 위한 방안을 본 디퓨저에 응용해 보았다.

그 방안은 Cole의 Wall과 Wake 법칙(1956)과 Clauser의 거칠기 함수 식을 이용하여 적당한 위치

(1982)에 적합한 거칠기가 분포된 경우와 국소적으로 거칠기가 분포된 경우에 대하여 난류 경계층 특성을 비교하여 보았다. 그 결과 국소마찰 계수 분포에 의하여 디퓨저에서도 거칠기 분포가 있는 표면 점성 마찰 속도의 마찰계수를 어느 정도 감소시킬수 있다.

해석방법

1. 지배 방정식

본 해석을 위하여 사용된 디퓨저의 좌표계는 Fig. 1과 같다. x방향으로 유동하면서 압력이 팽창해 나간다. 본 좌표계의 유동장 해석을 위하여 사용된 Kármán(1969)의 적분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\delta_2}{dx} + (2 + He) \frac{\delta_2}{U} \frac{dU}{dx} = \frac{C_f}{2} \quad (1)$$

여기서 δ_2 는 운동량 두께, H_e 는 형상계수 ($H_e = (\delta - \delta_1) / \delta_2$)이고, U 는 경계층 외단 속도이다. 그리고, 위식을 풀기위하여 다음과 같은 Ludwig-Tillman의 방정식(1985) C_f 식

$$C_f = 0.246 \times 10^{-0.678H} R_{e\theta}^{-0.268} \quad (2)$$

과 다음의 Head의 Entrainment 방정식(1969)을 이용하였다.

$$E = \frac{d}{dx} (UH_e\delta_2) = 0.0306U(H_e - 3)^{-0.653} \quad (3)$$

여기서, $R_{e\theta}$ 는 운동량 두께에 의한 레이놀즈 수이다.

그리고

$$H_e = 1.535(H - 0.7)^{-2.715} + 3.3 \quad (4)$$

이고, 여기서 H 는 형상계수 ($= \delta_1 / \delta_2$)이다.

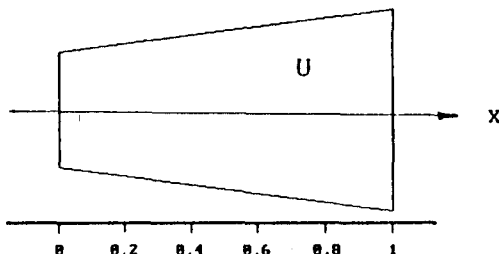


Fig. 1 Geometry of diffuser and coordinate system

2. 거칠기 함수식

Co'e의 Wall과 Wake 법칙(1956)에 표면 거칠기에 의한 속도 변동을 포함 시키면 표면의 점성 마찰에 의한 전단 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{U}{u_0} = 2.44 \ln \left(\frac{y u_0}{\nu} \right) + 5.0 + 2.44 \Pi [2 - \omega(\eta)] - \frac{\Delta U}{u_0} \quad (5)$$

여기서 $u_0 = \sqrt{\tau_0 / \rho}$; 벽면 마찰 속도, Π ; Cole's Wake 강도변수, $\omega(\eta) = 2\eta^2(3 - 2\eta) - \Pi^{-1}(1 - 3\eta + 2\eta^2)$ (1982), ν : 유체동점성 계수이다.

식(5)으로부터 일반적인 형상 계수식(1982)을 구하면,

$$H = 1 - \sqrt{\frac{C_f}{2} \frac{I_1}{I_2}} \quad (6)$$

이된다. 여기서 $C_f = 2\tau_0 / \rho U_\infty$; 벽마찰계수, $I_1 = 2.44(\Pi + 0.983)$, $I_2 = 5.95(1.486\Pi^2 + 3.176\Pi + 2.009)(\Pi + 0.983)^{-1}$, 그리고 U_∞ : 경계층 밖의 자유 유동속도 이다. 그리고 Clauser의 거칠기 함수식으로서 거친표면(r) 및 매끄러운 표면(s)과의 관계는

$$\sqrt{\frac{2}{C_{fs}}} - \sqrt{\frac{2}{C_{fr}}} = \frac{\Delta U}{u_0} \quad (7)$$

이다, 여기서 $\Delta H = H_s - H_r$, 이므로 표면거칠기에 의한 형상계수의 증가량을 구하기 위하여 $\omega = \sqrt{C_f/2}$ 의 관계를 쓰면,

$$\frac{1}{\omega_s} - \frac{1}{\omega_r} = \frac{\Delta U}{u_0} \quad (8)$$

가 되므로 식(8)은 다음과 같이 다시 쓸수 있다.

$$\omega_s - \omega_r = -\frac{\Delta U}{u_0} (\omega_s \cdot \omega_r) \quad (9)$$

그러므로, 형상 부가 계수의 식은 다음과 같이 표현 할수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta H &= \left(\sqrt{\frac{C_{fr}}{2}} - \sqrt{\frac{C_{fs}}{2}} \right) \frac{I_1}{I_2} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{u_0} \right) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \sqrt{C_{fs} \cdot C_{fr}} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)을 식(2)에 포함 시켜 그영향을 계산할수 있다. 또 미소한 거칠기를 고려할때는 다음과 같은 Clauser식을 이용할수 있다. 이식은 Okuno-Lewkowicz(1987)가 함수식의 값을 하기 위하여 균일 모

래 입자를 도포시킨 경우의 파이프관마찰 실험을 통하여 다음의 식을 구하였다.

$$\frac{\Delta U}{u_0} = 2.44 \ln\left(\frac{hu_0}{\nu}\right) + B_1 \quad (11)$$

여기서 B_1 는 표면 거칠기의 실험상수이고 실험 결과에 의하여 1.225이며 h 는 표면 거칠기의 평균 높이를 표시한다.

계산 결과 및 검토

이상의 수식으로부터 먼저 미소 거칠기 영향을 고려한 적분 방정식과 Ludwig-Tillman(1985) 그리고 Head Entrainment의 식(1969)으로 부터 난류 경계층의 특성을 계산하고, 이를 Dvorak의 기존의 적분법(1969)의 계산결과 및 Scottron & Power의 실험결과(1965)와 비교하였다.

Fig. 2에서는 계산결과중 운동량 두께를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와같이 Dvorak(1969)의 계산결과는 Scottron & Power의 실험결과(1965) 보다는 x 의 값이 0.6 이후의 영역에서 대체로 과소 평가된 결과를 나타내 보이나, 반면에 본미소 거칠기를 고려한 경우의 계산은 실험치보다도 x 의 값이 0.6과 0.7이후의 영역에서는 오히려 실험치에 거의 일치하는 경향을 보인다. 특히 본 계산의 값이 원래의 적분법보다 넓은 영역에서 더 개선된 좋은 경향을 나타내 보인다고 볼수 있다.

Fig. 3에서는 형상계수의 값들을 비교한 것이다. 여기서는 x 의 값이 0.6이하에서는 본 계산이 실험치에 거의 일치하는 경향을 나타내 보이고, 그 이외의 영역에서는 Dvorak의 방법과 마찬가지로 정성적으로 비슷한 경향을 나타내 보인다. 여기서도 기존의 계산치보다 더 나은 결과를 나타내 보인다고 생각된다.

Fig. 4에서는 마찰력 계수의 값들을 각각의 경우에 대하여 비교한 것이다. 여기서도 x 의 값이 0.5이후의 영역에서는 Dvorak의 계산 결과와 대체로 같은 경향을 보이나, 오히려 개선전의 적분법보다도 실험치에 접근해 있는 경향을 보인다. 그리고, x 값이 0.5보다 작은 영역에서는 실험치에 아주 잘 일치하는 좋은 결과를 나타내 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 다음은 본 계산의 방법에 의하여 디퓨저 전체 표면에 거칠기가 균일하게 분포된 경우와 국소 거칠기 분포에 의한 경우를 각각 비교 하였다. 전체분포의 경우는 전체적으로 거칠기 영향이 10% 정도 증가한 경우이

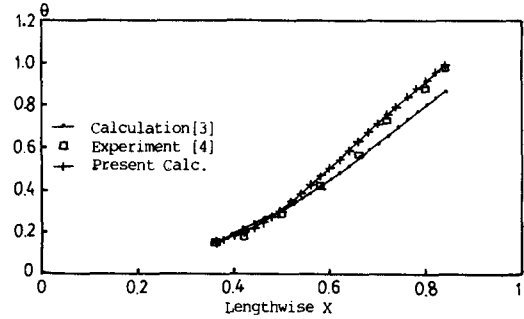


Fig. 2. Moment thickness.

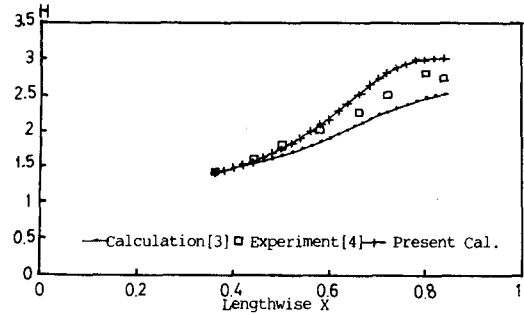


Fig. 3. Shape factor.

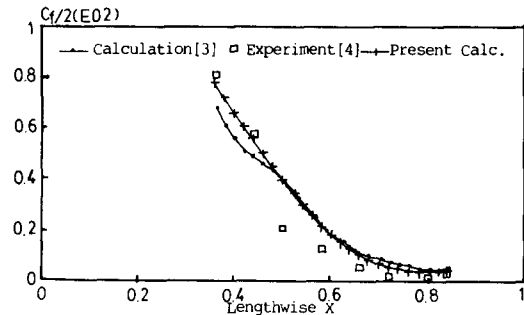


Fig. 4. Frictional coefficient.

고, 국소 거칠기의 경우는 Andreopoulos(1982)등의 평판실험의 결과에 의하면, 거칠기의 평균 높이를 경계층 두께의 0.03% 정도로 주고, 분포의 길이는 경계층 두께의 3배를 선단으로부터 약 50%의 위치에 주었다. 이렇게 함으로서 난류 경계층과의 상호 작용에 의하여 마찰력 계수를 줄일수 있었다. 여기서 이러한 근거를 본 디퓨저에 응용하기 위하여 x 의 거리가 48~52%되는 위치에 경계층 두께의 0.0225%에 상당하는 거칠기를 주었다.

그 결과를 먼저 Fig. 5에서는 운동량 두께를 균일 분포의 거칠기가 있는 경우와 국소 거칠기가 분포된

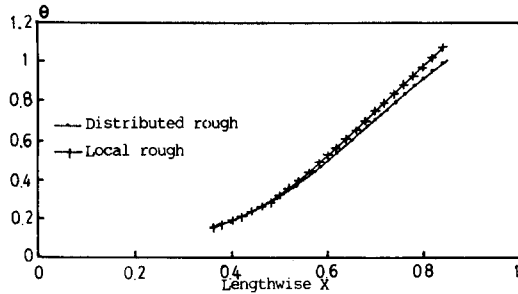


Fig. 5. Moment thickness with local roughness.

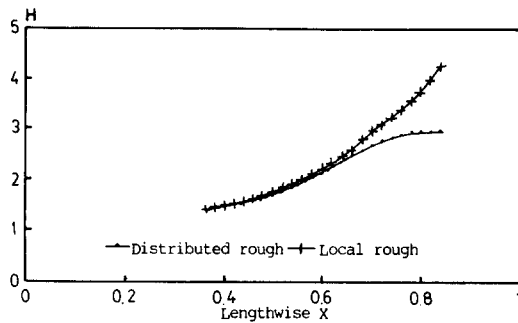


Fig. 6. Shape factor with local roughness.

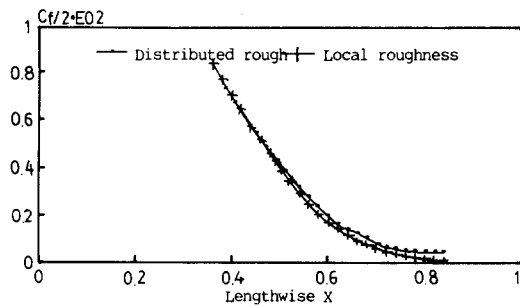


Fig. 7. Frictional coefficient with local roughness.

경우를 각각 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 x 가 약 50% 이후의 영역에서는 운동량 두께가 점점 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 다른 역압력 구배를 가지는 경우의 마찰력 증가에 의한 운동량 두께 감소 현상과는 대조적인 현상이다.

Fig. 6에서는 형상계수를 각각 비교한 것이다. 이 경우도 국소 거칠기 분포에 의한 형상계수의 값이 약 50% 이후의 영역에서는 크게 증가해 가는 현상을 볼 수 있다. 이는 국소 거칠기에 의하여 난류가 촉진됨을 알 수 있고 경계층내의 점성 마찰 속도의 가속 현상을 볼 수 있다.

Fig. 7에서는 표면의 마찰력 계수를 비교한 것이

다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 x 가 50% 이후의 영역에서는 마찰력 계수가 균일하게 분포된 경우 보다도 감소해 감을 볼 수 있어 국소 거칠기에 의한 마찰력 감소가 어느정도 이루어짐을 알 수 있다.

그리고 효율 증가를 위한 보다 개량된 계산 방법과, 최적위치 및 거칠기 두께는 앞으로 연구 되어야 할 부분이다.

요 약

이상의 결과를 정리 하면 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) Kármán의 적분 방정식에 미소 거칠기 영향을 고려 함으로서 디퓨져 닥트 표면의 경계층 계산에 응용한 결과 모멘트 적분법 및 실험치와의 비교에서 개선된 결과임이 확인되었다.

(2) 국소 거칠기의 효과를 주는 방법으로는 Cole의 벽 및 와 법칙에 Clauser의 거칠기 함수와, 압력 기울기를 고려한 부가 형상계수 값으로 적분 방정식에 응용할 수 있다.

(3) 국소 거칠기 분포에 의하여 경계층 특성을 교란시켜 표면 마찰력 계수를 줄일 수 있어 마찰력 손실을 줄일 수 있는 방안이 제시 되었다.

참고문헌

- 1) J.S.M.E.(1985): Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Corona, 281-287.
- 2) F.H. Clauser(1954): Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradient. J. of Aero. Society(21), 91-108.
- 3) F.A. Dvorak(1969): Calculation of Turbulent Boundary Layers on Rough Surface in Pressure Gradient. J. of AIAA, September, 1752-1759.
- 4) V.E. Scottron and J.L. Power(1965): The Influence of Pressure Gradient on the Turbulent Boundary Layer over a Rough Surface. Navy Dept. David Taylor Model Basin, Rept. 2115.
- 5) D.E. Coles(1956): The Law of the Wake in the

- Turbulent Boundary layer. J. of Fluid Mechanics(1), 191-226.
- 6) J. Anderopoulos and D.H. Wood(1982): The Response of Turbulent Boundary Layer to a Short Length of Surface Roughness. J. of Fluid Mechanics(118), 143-164.
- 7) A.K. Lewkowicz(1982): An Improved Universal Wake Function for Turbulent Boundary Layers and Some of It's Consequence. Z. Flugwisse Weltraumforsh(6), Heft 4, 261-266.
- 8) T.K. Okuno and A.K. Lewkowicz(1987): Wind Tunnel Tests on an Artificially Roughened Ship-hull Model. R.I.N.A.(129), 161-170.