

미소 기포 분포의 난류 확산에 의한 점성 마찰력 저감

문 철 진* · 김 시 영

부산수산대 대학원* · 부산 수산대학교

(1993년 9월 27일 접수)

Viscous Frictional Drag Reduction by Diffusion of Injecting Micro-bubbles

Chul-Jin MOON* and Si-Young KIM

*Graduate School : National Fisheries University of Busan,

National Fisheries University of Busan

(Received September 27, 1993)

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

서 론

선박과 같은 반잠수체, 또는 잠수함과 같은 물수체 등과 같이 점성 유체중을 운동하는 물체는 접수 표면에서 점성 마찰력이 발생하며 이것은 조파; 또는 부가 항력을 포함한 전체 항력의 90% 이상을 차지한다. 이와 같은 점성 마찰항력을 감소시키기 위한 방안^{1)~15)}도 여러가지 있다. 그 방법중에서 물체의 접수 표면의 일부분으로부터 다량의 미소 기포를 분출시켜 그 마찰항력을 감소 시키는 방법

이^{8)~15)} 있다. 이 방법은 접수표면에 부착한 다공질 평판으로부터 직경 15~60 μ m 정도의 미소 기포를 적정량 분출시켜 이를 난류경계층의 점성 저층 부근에 혼입시켜서 경계층 특성을 변화 시킴으로서 마찰력 감소화를 달성 할수 있다.

미소기포 분출에 의한 점성 마찰력 감소화 방안은 효과적인 반면에 그 난류 운동장의 수치 계산, 또는 실험 조사는 감소화방법에 따라 수치 계산 및 실험 분석도 각각 다르다. 평판의 경우에 그 흐름의 상류로부터 미소 기포를 분출 시키는 경우,

가능한 점성 저층과 난류 천이층의 사이인 완충층(Buffer layer)에 분포가 될수 있다면 최대의 점성 마찰력 감소화를 달성 할수 있다. 이런 경우는 완충층을 계산하여 그영역을 구하여 이영역에 예상하는 양의 미소 기포가 분포 되도록 하고, 실험은 반복하여 이영역에 미소 기포가 분포될 수 있도록 할수 있다.

그런데 실험의 경우, 산업 현장에 응용할 경우에 미소 기포를 분출시키면 분자 확산 보다도 난류 확산이 크게 나타나며, 이것에 의하여 점성 저층에 인접한 영역의 흐름 속도를 변화시켜 점성 저층의 속도 기울기 감소에 영향을 줄수 있다. 이러한 원인은 미소기포의 분포에 의하여 그 혼합 영역에서 난류 교란이 일어나고, 난류의 강도에 의하여 확산이 촉진될 수 있다.

그러므로 미소 기포 분포에 의하여 난류 경계층내의 대규모 교란, 그리고 주유속과 미소 기포의 혼합 특성에 의한 농도 변화 등이 고려되어 지면 좀더 정도 높은 결과를 구할수 있다. 그러나 현재까지의 이 미소 기포 분출법에 의한 방법의 보고^{8)~14)}에서는 난류 확산을 고려한 예는 볼수 없고, 이 난류 교란에 의한 새로운 모델링이 필요하다고 생각하고 있다. 그래서 감소화 기구의 보다 정도 높은 해명을 위하여는 난류에 의한 난류 확산, 등의 상세한 분석이 필요하다.

그러므로 본논문에서는 평판의 상류에 분출되는 미소 기포가 흐름의 하류 방향으로 확산하여 혼합 밀도층 분포(multi-stratified flow)를 형성하는 난류영역을 해석하여야 한다고 생각되므로 경계층 내의 난류 흐름의 농도 분포를 구한후에 경계층 특성을 구하고자 하였다. 그리고 미소기포의 난류확산에 와점성계수를 고려해 넣어 유속을 재계산 하였다. 그리하여 점성 마찰력의 감소화 경향을 조사하였다.

계산 분석

1. 확산 방정식

미소 기포 분포에 의한 난류 확산의 점성 마찰

력 감소화 거동을 알기 위하여 미소 기포의 혼합 특성이 고려된 유속을 계산하였다. 계산에 사용한 미소 기포에 분출에 의한 농도 분포 C 는 상류로부터 하류 방향으로 흐름과 더불어 변화하며 그 분포는 다음과 같은 식으로 구할수 있다. 그리고 이농도 분포를 와점성계수, 즉 레이놀즈 응력과 연계시켜서 계산하도록 하기 위하여 다음의 확산 방정식⁷⁾을 이용하였다.

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} \quad (1)$$

그리고 x, y 방향의 난류 변동 성분에 의하여

$$|u'| \cong |v'| \cong l \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (2)$$

$$\overline{u'v'} \propto |u'| |v'| \cong l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|^2 \quad (3)$$

로 쓸수 있다. 난류에 의한 농도변화에 대해서도 같은 방법으로 식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$|c'| \cong l \left| \frac{d\bar{c}}{dy} \right| \quad (4)$$

$$\overline{c'v'} \propto |c'| |v'| \cong l^2 \left| \frac{d\bar{c}}{dy} \right| \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (5)$$

$-\overline{c'v'}$ 는 경계층의 외층에서 내층으로 단위길 이, 단위 시간당 이동하는 농도를 나타낸다. 그러므로 단위체적, 단위 시간당 농도의 증가량은

$$\frac{\partial}{\partial y} (-\overline{c'v'}) \quad (6)$$

로 쓸수 있다. 그러므로 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} -\overline{u'v'} &= l^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right| \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &\cong l^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = v_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 그러므로,

$$-\overline{c'v'} = v_t \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \quad (8)$$

이다. 따라서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y}(-c'v') &= \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ &= \frac{\partial v_t}{\partial y} \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) + v_t \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (9)$$

로 쓸수 있다. 그러므로,

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} (-c'v') \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} \\ = \frac{\partial v_t}{\partial y} \frac{\partial c}{\partial y} + v_t \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로 이식을 각각 무차원화 하면 다음의 농도분포에 대한 확산 방정식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c^+}{\partial t^+} + u^+ \frac{\partial c^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial c^+}{\partial y^+} \\ = \frac{\partial v_t^+}{\partial y^+} \frac{\partial c^+}{\partial y^+} + v_t^+ \frac{\partial^2 c^+}{\partial y^{+2}} \end{aligned} \quad (12)$$

2. 와점성 계수

난류 모델을 써서 미소 기포 혼합 영역의 와점성 계수를 다음과 같이 구할수 있다. 그리고 경계층의 내외층은

$$\begin{aligned} v_t^+ : (v_t^+)_{inner}, \quad 0 < y^+ \leq 500 & \quad \text{내층} \\ (v_t^+)_{outer}, \quad 500 < y^+ & \quad \text{외층} \end{aligned}$$

로서 정의하고, 내층에서

$$(v_t^+)_{inner} = l^{+2} |\omega^+| \quad (13)$$

$$|\omega^+| = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad (14)$$

가 되며, 혼합길이 l^+ 은 다음의 식으로 쓸수 있다.

$$l^+ = \kappa y^+ D^+ \quad (15)$$

그리고 댐핑 계수 D^+ 는 식(16)과 같다. 여기서 변수 y 는 경계층 두께 방향으로의 변수이므로 기액 혼합특성은 A 에 의하여 그특성을 변화시켜야 한다.

$$D^+ = 1 - \text{Exp}(-y/A) \quad (16)$$

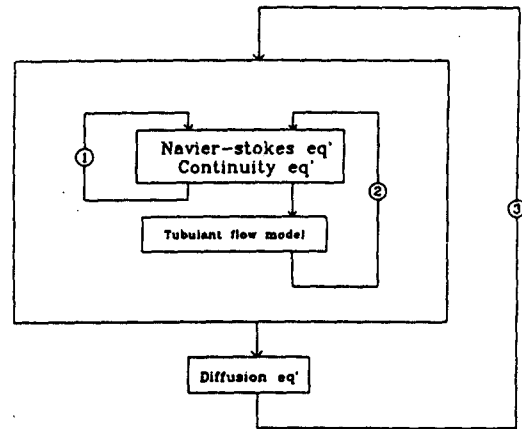
그리고 식(7)에서 A 는 댐핑계수(damping factor)로서 $A^+ v \text{Exp}(-5.8V_w)(\tau_w/\rho)^{-0.5}$ 로, y 는 $y^+ \mu_1(\tau_w/\rho_1)^{-0.5}$ 로 각각 쓸수 있다. 그러므로 식(16)의 D^+ 는 다음과 같이 혼합 특성이 고려된 식으로 쓸수 있다.

$$y/A = (y^+ / -5.8A^+ \text{Exp}) (\mu_1/\mu)(\rho/\rho_1)^{0.5} \quad (17)$$

그리고 혼합은 농도 분포 C 에 의하여 기-액 혼합된 와점성 계수와 밀도는 Einstein¹⁴⁾에 의하여 $\mu = \mu_1(1 + 2.5C)$ 와 $\rho = \rho_1(1 - C) + \rho_g C$ 로서 계산할수 있다.

확산을 고려한 계산 방법

계산은 기포 분포에 의하여 와점성이 변화하기 전 계산결과와 유속 u, v 를 써서 상류의 정해진 벽면 경계에 일정량 농도 분출량을 주어서 확산 방정식을 이용하여 이농도가 하류로 갈수록 어떤 모양으로 흘러 가면서 확산되어 가는가를 계산한다. 다음에 계산된 확산 농도 분포를 근거한 와점성 계수를 구하고 그 와점성 계수를 근거한 유속



- ① → Laminar flow calculation
- ② → Turbulent flow calculation
- ③ → Calculate on diffusion

Fig. 1. Calculation flow chart.

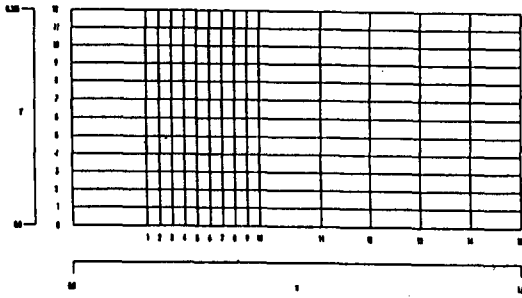


Fig. 2. Computational grid system.

분포를 다시 구하고, 이것이 수렴 할때까지 계산을 수행한다. 그리고 상류 위치의 지정된 곳에 벽면으로부터 무차원 미소 기포 분출량은 3.5로 하였다. 그리고 전체의 반복 계산 과정은 Fig. 1과 같다. 그리고 계산에서는 직교 직선좌표인 물리 공간 좌표($x-y$)를 계산 공간좌표($i-j$)로 바꾸어 미분 계산의 값으로 주도록 하였다. 그리고 계산은 전보의 계산 코드(1)를 본논문에서 계산 좌표는 Fig.2와 같다.

계산 · 결과 및 고찰

Fig. 3 레이놀즈수 1.3×10^6 일때에 하류 방향으로의 농도 확산 분포를 구한것이다. 하류 방향으로 난류 확산이 일어나며 법선방향으로도 폭넓게 분포되어 있으나 벽면 근처에 그농도가 높게 나타나 있음을 알수 있다.

Fig. 4는 위치 1(st.1)에서 경계층의 두께 방향으로 속도분포를 나타낸 것이다. 미소 기포 분포가 없는 경우와 있는 경우를 각각 비교하면 벽면에서 속도 기울기는 미소 기포가 있는 경우가 현저히 감소 하였음을 알수 있다. 그러므로 이로 인한 점성 마찰력의 감소화가 이루어 지고 있음을 알수 있다.

Fig. 5의 경우는 위치 2(st.2)에서도 벽면에서의 속도 기울기는 미소 기포가 분포된 경우가 더욱 감소 하였음을 알수 있다. Fig. 6은 위치 3(st.3), Fig. 7은 위치 4(st.4), 그리고 Fig. 8은 위치 5(st.5)에서의 속도 분포와 그 기울기를 나

타낸 것이다. 일반적인 경향은 하류로 갈수록 농도분포의 희박성으로 말미암아 벽면에서의 속도 기울기는 점점 증가하여 미소 기포의 영향이 없어짐을 알수 있다.

Fig. 9는 흐름의 하류로 이동할수록 운동량 두

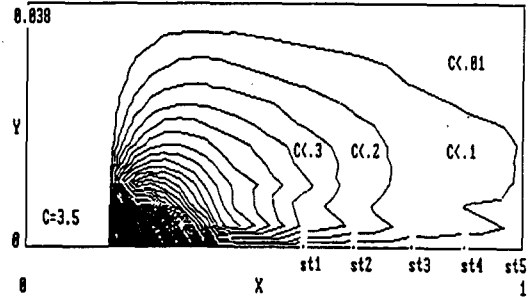


Fig. 3. Diffusion of micro-bubbles.

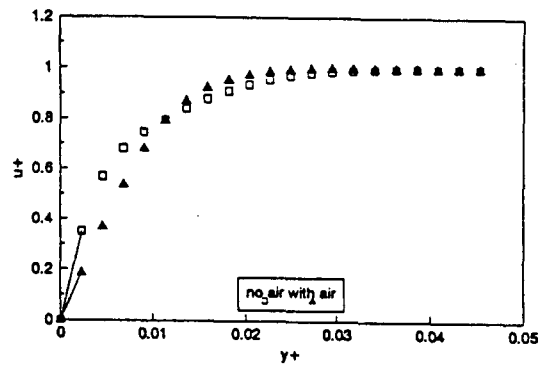


Fig. 4. Comparisons of velocity profile with normal distance $y+(st.1)$.

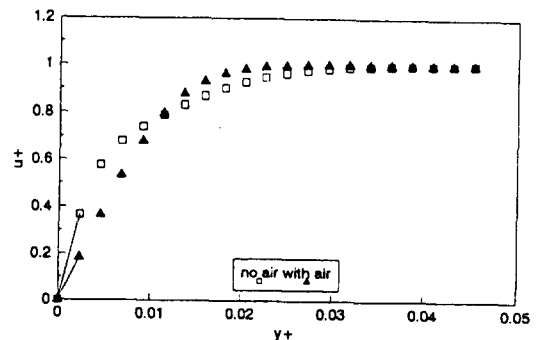


Fig. 5. Comparisons of velocity profile with normal distance $y+(st.2)$.

계의 증가 변화량을 나타낸 것이다. 미소 기포 분출이 있는 x 위치 0.2로 부터 하류로 갈수록 운동량 두께의 증가 변화는 미소 기포가 분포된 경우가 훨씬 감소해 있음을 알수 있다.

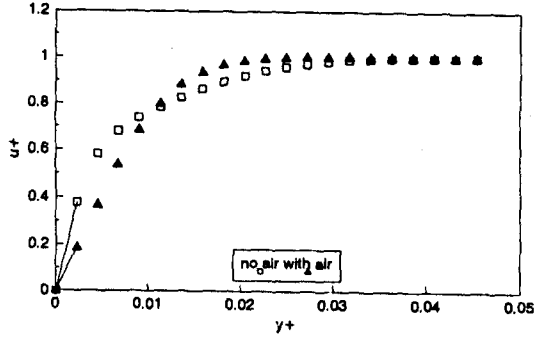


Fig. 6. Comparisons of velocity profile with normal distance $y+$ (st.3).

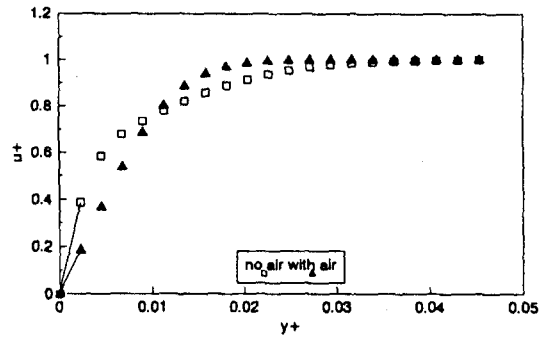


Fig. 7. Comparisons of velocity profile with normal distance $y+$ (st.4).

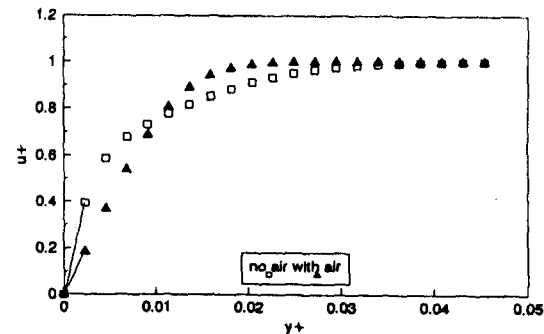


Fig. 8. Comparisons of velocity profile with normal distance $y+$ (st.5).

Fig. 10은 하류 방향으로 이동할수록 운동량 두께에 근거한 레이놀즈의 두께를 비교한 것이다. 여기서도 미소 기포의 분포에 따라 레이놀즈값 또한 훨씬 감소하고 있는 경향을 알수 있다.

Fig. 11은 미소 기포분출의 유무에 따라 하류로

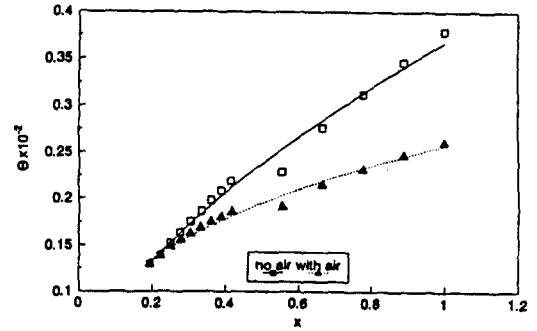


Fig. 9. Comparisons of momentum thickness.

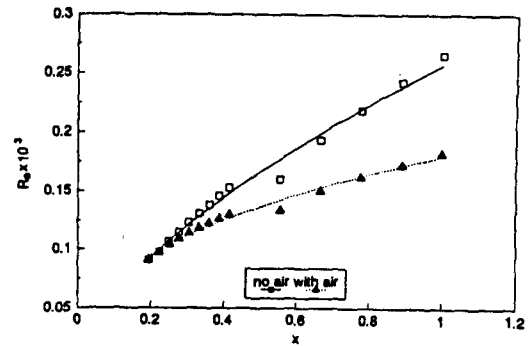


Fig. 10. Comparisons of momentum thickness based on Reynolds.

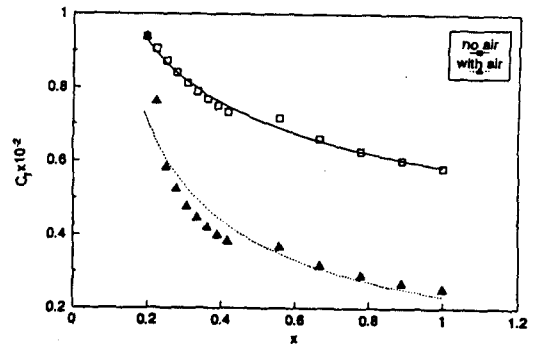


Fig. 11. Dimensionless skin friction.

가면서 벽면에서의 점성 마찰력 계수를 비교한 것이다. 미소 기포분출의 위치가 있는 상류에서 보더라도 하류로 갈수록 그 감소량이 훨씬 증가해 있으며 이는 농도 분포가 하류에서 더욱 큰 영향이 있다는 것을 알수 있다.

결 론

경계층 내에 미소 기포가 분출된 경우 난류 확산에 의한 농도분포를 구하여 유효 점성 계수를 구하여 점성 마찰력의 감소화 경향을 구한 경향은 다음과 같다.

(1) 분자 확산을 무시하고 난류 확산만을 고려한 난류 모델에 의하여 레이놀즈 응력을 와점성 계수와 연계시켜 미소 기포분포에 의하여 점성 마찰력 경향을 구한 결과 만족할만한 결과를 얻었다.

(2) 미소 기포에 분출에 의하여 점성 마찰력이 저감되는 이유는 벽면근처에서 미소 기포의 농도 분포에 의하여 속도 기울기가 감소하기 때문이다.

(3) 점성 유체 난류 경계층 내의 미소 기포 확산작용은 대단히 크고, 이로 인하여 하류로 갈수록 점성 마찰력 감소 효과가 크게 나타나고 있다.

참고문헌

- 1) Johansson, A.V(1985) : Recent Developments of Drag Reduction Methods for Ships, SSPA Symposium Proceedings, 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, 127-140.
- 3) The Royal Aeronautical Society(1987) : Turbulent Drag Reduction by Passive Means, International Conference for Drag Reduction, Vol. I, II, Sep. London, U.K.
- 4) Choi.K.S(1990) : Drag Reduction by Ri-

- blet for Marine Application, RINA, Vol. 132, 269-282.
- 5) Hoyt.J.W(1991) : Negative Roughness and Polymer Drag Reduction, Experiments in Fluids, Vol.11, 142-146.
- 6) Wallace, J.M.,(1991) : Viscous Drag Reduction Using Streamwise-Aligned Riblets, AIAA, Vol.30, 119-122.
- 7) Kato, H(1991) : Frictional Drag Reduction by Injecting High-Viscosity Fluid, J. of Soc. Naval Arch., Japan, Vol.1-68, 39~50.
- 8) Doi, Y(1991) : Frictional Drag Reduction by Microbubbles J. of Soc. Naval Arch., Japan, Vol.170, 55-63.
- 9) Tokunaga, K(1987) : Reduction of Frictional Resistance of a Flat Plate by Microbubbles W-J Soc. Naval Arch., No. 73, 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., 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, 356-363.
- 12) Merkle, C.L.,(1985) : Drag Reduction by Microbubbles Current research Status, Paper No. AIAA-85-0537, 199-215.
- 13) Legner, H.L.,(1984) : A Simple Model for Gas Bubble Drag Reduction, Phys., Fluids, Vol.27, 2788-2790.
- 14) Madavan, N.K., Merkle, C.L. and Deutsch, S.,(1985) : Numerical Investigation into the Mechanisms of Microbubble Drag reduction, J. of Fluid Engineering, 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, 94-97.