

〈論 文〉

메쉬 스크린 후류의 난류유동 특성에 관한 실험적 연구

강신형* · 이현구** · 전우평**

(1990년 8월 8일 접수)

An Experimental Study on Turbulent Characteristics in the Wake of Mesh-Screens

S. H. Kang, H. K. Lee and W. P. Jeon

Key Words : Wire-Mesh Screen(와이어 메쉬 스크린), Turbulent Wake(난류 후류), Shear Layer(전단 유동층)

Abstract

Mean flows and Reynolds stresses through circular and elliptic wire-mesh screens in the wind tunnel are measured by using the hot-wire system, and flow structures are investigated. Flow in the core of the wake are nearly uniform and the shear layer is developed along the edge of the screen. The turbulent kinetic energy in the core decreases at the fast rate. However turbulence components are not in local equilibrium in the shear layer. The shear layer of the circular screen develops outward according to the radial mean motion. On the other hand, 3-dimensional transverse mean motion was turned to the main mechanism for the elliptic shape of the wake to be circular at the downstream.

기 호 설 명

b	: 전단층의 경계	r_e	: 전단층의 외부경계
Δb	: 전단층의 두께(= $r_e - r_c$)	r_o	: 원형 스크린의 반경
C_2, C_μ	: $k-\epsilon$ 난류모델의 상수	r_{eq}	: 타원형 스크린의 등가 반경 (= $\{r_a r_o\}^{1/2}$)
dA	: 스크린의 요소면적	U, V, W	: x, y, z 방향의 평균속도
H_o	: 풍동의 반폭	u, v, w	: x, y, z 방향의 요동속도
K	: 스크린의 저항계수	x, y, z	: 메쉬에 고정된 좌표계
k	: 난류운동 에너지	α	: 스크린의 굴절계수
l_m	: 난류 혼합길이	ϵ	: 운동에너지의 소산율
l_c	: 소산률 길이	ρ	: 유체의 밀도
n	: 기울기	ν	: 유체의 동점성계수
p	: 정압	ν_t	: 유동의 와점도
r_a	: 타원형 스크린의 장반경		
r_o	: 타원형 스크린의 단반경		
r_c	: 전단층의 내부경계		

1. 서 론

유동의 속도분포 및 난류 특성치를 제어하는 일은 유체공학적으로 기본적이고 중요한 문제이다.

*정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

**서울대학교 대학원

건물이나 구조물을 풍동에서 실험할 때는 실제 존재하는 고도에 따른 속도 및 난류강도의 분포를 재현해야 한다. 또한 선미 후류에서 프로펠러의 비정상 특성 및 캐비테이션 발생에 관한 연구 등에는 특정한 속도분포의 발생이 수반되어야 한다. 따라서 요구되는 평균속도 및 난류량 분포를 효율적으로 발생시키는 장치가 필요하는데, 이를 위하여 주로 스크린이 많이 이용되고 있다. 스크린은 유동에 있어 압력을 강하시키면서 유동의 방향을 바꿔주는 유체역학적인 불연속면으로 생각할 수 있다. 1978년 Livesey와 Laws⁽¹⁾는 스크린 유동에 관련된 연구 현황에 대해 요약한 바 있다. 스크린 유동에 관한 연구는 1947년 Taylor와 Batchelor⁽²⁾에 의해 처음 시도되었고, 1950년대 Owen과 Zienkiewicz⁽³⁾, Elder⁽⁴⁾ 등에 의해서 주로 하류에서 평균속도 예측에 대한 연구가 이루어졌다. 그 후 McCarthy⁽⁵⁾, Koo와 James⁽⁶⁾ 등도 관련된 연구를 하였다. Owen과 Zienkiewicz는 가는 막대를 스크린으로 이용하여 저항계수분포를 주어 이때의 하류유동에서 스크린의 저항계수와 하류 속도분포와의 관계를 구하였고, Elder는 형상을 가진 스크린 하류의 2차원 유동을 공식화하고 해석하였다. McCarthy는 Elder의 운동방정식을 3차원으로 확대 적용하였고, 스크린 저항계수의 변화에 대한 제한을 없애 일반화시켰다. Koo와 James는 스크린이 2차원 채널에 부분적으로 설치된 경우의 유동을 다루었다.

그러나 이러한 연구들은 스크린의 상류와 하류에서는 비점성 유동으로 가정하였고, 단지 스크린을 통과할 때만 점성을 고려하였으며, 주로 스크린 하류에서 평균속도 분포의 형상과 그 예측에 관심을 두었다. 따라서, 실제 풍동이나 캐비테이션 터널에서 요구되는 임의의 속도분포를 발생하기 위하여 스크린을 효과적으로 설계하는 문제나, 선체 후류와 같이 속도의 변화가 심한 경우를 모사하는 경우, 또는 스크린이 대단히 조밀하여 하류에서 역류가 발생하는 경우⁽⁷⁾ 등에는 비점성이론을 적용할 수가 없다. 또 프로펠러의 성능이나 캐비테이션의 발생에 대한 연구에서는 스크린을 이용하여 하류에서 원하는 속도분포를 재현하더라도 하류가면서 점성의 확산작용으로 평균속도분포는 변하게 되고 난류강도도 다르게 된다. 더구나 실험 도중 프로펠러와 스크린의 상호작용이 상당히 크며, 이들의 관계를 적절히 예측해야 한다.

최근 전우평⁽⁷⁾, 강신형 등^(8,9)은 $k-\epsilon$ 난류 모델을

이용하여 스크린 후류의 점성유동을 수치해석적으로 시뮬레이션 하는 연구를 수행하여, 평균속도 분포는 합리적으로 시뮬레이션됨을 보였다. 그러나 아직 이 분야의 실험 자료가 빈약하고, 실제 현상도 복잡하여 해석적으로 난류특성을 파악하지는 못하였다. 본 연구에서는 몇가지 단순한 스크린의 형상에 대하여 후류의 난류 특성치들을 예측하여, 실제 현상을 파악하고 자료를 확보하여 앞으로의 연구에 활용하고자 하였다. 본 논문에서는 원형 스크린과 타원형 스크린을 기본 형상으로 택하여, 저항계수를 변화시키면서, 후류유동장에서 평균속도 분포, 난류 운동에너지, 난류 전단응력을 열선 풍속계로 측정하였다. 원형 스크린의 경우에는 주로 스크린의 모서리에서 발달하는 전단층의 확산과정을 연구하였고, 타원형 스크린의 경우에는 평균속도 분포가 하류로 가면서 원형 후류로 발전되어가는 과정을 연구하였다.

2. 스크린을 지나는 유동의 특성

본 논문에서는 스크린을 Fig. 1에서와 같이 균일 유동에 수직하도록 풍동의 중앙에 설치하였고, 스크린 요소를 지나는 유동을 개략적으로 Fig. 2에 나타내었다. 스크린을 통과하면 유선은 국소적으로

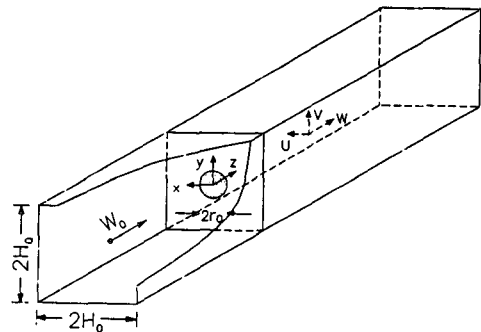


Fig. 1 Alignment of the screen in the wind tunnel and the coordinate system

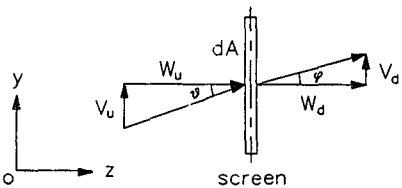


Fig. 2 Refraction of velocity on the $y-z$ plane of a screen element

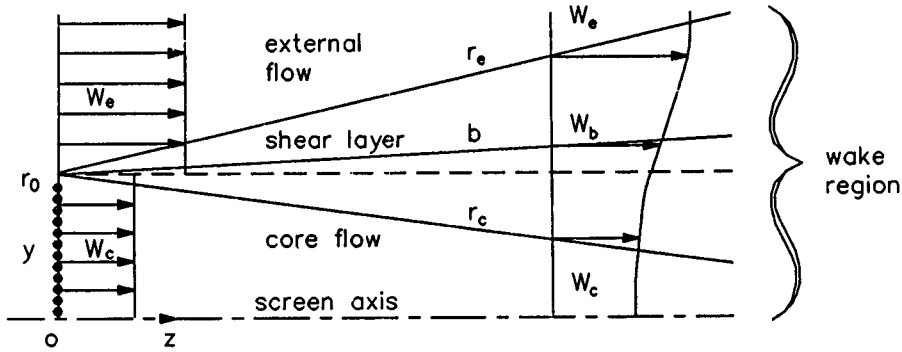


Fig. 3 Definitions of the compound shear layer

굴절되고 정압은 감소한다. 이러한 특성을 두가지 무차원 변수, 굴절계수 (refraction coefficient)와 저항계수 (resistance coefficient)로 나타낸다. 굴절계수는 유체가 스크린을 통과할 때 스크린에 접하는 방향으로 저항을 받게되고, 이에 따라서 수직방향, 즉 x, y 방향의 속도에 불연속이 발생한다. 이를 고려하기 위해서 굴절계수를 스크린의 하류와 상류에서 스크린에 평행한 속도 성분의 비로 정의하고, 저항계수 K 는 스크린의 상하류에서의 무차원화된 압력 강하량으로 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = \left\{ \frac{U_d^2 + V_d^2}{U_u^2 + V_u^2} \right\}^{1/2}, K = \frac{P_u - P_d}{1/2 \rho W_s^2} \quad (1)$$

여기서 하첨자 u, d 는 스크린의 바로 상류 및 하류에서의 값을 각각 나타내고 W_s 는 스크린 면에 수직인 통과속도이다. 굴절계수와 저항계수는 스크린의 형상과 레이놀즈수에 의해 주어진다⁽²⁾. 스크린의 면 상류에서는 균일유동이므로 압력이 일정하다. 그러나 스크린 바로 앞에서는 압력이 증가하고, 바로 뒤에서는 급히 감소한다. 즉 스크린 면을 지나며 압력은 불연속적이 되고, 먼 하류로 가면서 압력은 회복되어 일정한 수준이 된다. 저항계수는 상, 하류의 정압차를 스크린을 지나는 동압으로 무차원화시킨 계수이다. 유동속도 역시 스크린 면에서 급히 감소하여 하류에서는 거의 일정해진다^(8,9). 스크린이 유동단면에 전부 채워있는 경우 하류 평균속도 분포는 스크린의 저항계수와 굴절계수로 부터 쉽게 예측할 수 있다.

난류유동의 관점에서 보면 스크린 바로 하류에서는 스크린의 와이어 메쉬에 의해서 난류운동에너지가 발생한다. 이때 난류의 특성 길이는 스크린의 형상과 레이놀즈 수에 의해서 정해진다. 그러나 스

크린 후류는 비교적 균일할 평균속도 분포를 보이기 때문에 하류로 가면서 난류 운동 에너지의 생성량은 매우 적으며, 점성에 의한 에너지의 소산이 일어나 난류 운동에너지는 계속 감소하게 된다. 이러한 과정을 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하는 경우에는 다음의 관계가 성립된다.

$$\rho W \frac{dk}{dz} = -\rho \epsilon, \rho W \frac{d\epsilon}{dz} = -\rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

이때 K 가 z^{-n} 에 비례하여 감소한다면 C_2 는 $(n+1)/n$ 이 된다. 표준 $k-\epsilon$ 모델에서 $C_2=1.92$ 이므로 n 은 1.09에 해당한다. 그러나 스크린이 유동장에 부분적으로 설치되어 있으면 Fig. 3에서와 같이 스크린의 경계에서는 평균속도가 심하게 변하고, 하류를 따라서 전단층이 형성된다. 이러한 유동의 구조는 균일유동에 적은 속도로 분사되는 제트의 구조와 유사하다. Fig. 3에서 W_e 는 균일유동 속도이고 W_c 는 코어의 속도이다. 전단층과 외부유동과의 경계는 r_e 이고, 전단층과 코어와의 경계는 r_c 이다. 그리고 b 는 속도가 $(W_e - W_c)/2$ 되는 위치이다. 따라서 전단층의 두께 Δb 는 $r_e - r_c$ 이다. 전단층의 안쪽은 거의 균일한 유동이며 제트의 코어와 유사하므로 코어라 하면, 스크린에 의한 후류영역은 전단층과 코어로 구성 된다. 2차원 전단층의 경우 b 는 속도가 느린쪽으로 치우치며 그 기울기는 속도비 W_e/W_c 에 의해 달라진다. 제트에 의한 원형 전단층의 경우는 W_e 가 W_c 보다 일반적으로 작다. 이 경우 b 는 속도가 느린 외부유동 쪽으로 치우치나 속도비가 작은 경우에는 속도가 빠른 안쪽으로 치우친다. 이와 같은 전단층의 속도분포는 cosine함수로 적절하게 근사할 수 있다⁽¹⁰⁾. 본 논문에서도 실험데이터의 원활한 처리를 위하여 다음과 같이 전단층을 근사하였다.

$$\frac{W - W_c}{W_e - W_c} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \pi \left\{ \frac{r - r_c}{r_e - r_c} \right\} \right] \quad (3)$$

실험데이터로부터 전단층의 경계를 구하기가 어려우므로, 위 식이 예측된 속도분포를 전체적으로 잘 나타낼 수 있도록 r_e, r_c 를 정하였다. 이와 같이 전단층의 속도분포를 근사하면 실험 데이터로부터 자료의 처리를 용이하게 할 수 있다.

전단층에서는 어떠한 구조로 발달되느냐에 기본적인 관심이 있으나, 여기서는 전단층 내의 전단응력을 나타내는 난류모델들의 정당성을 확인하는데 관심을 두었다. 전단층 내에서 난류 와점도는 예측된 레이놀즈 응력과 평균속도 구배를 사용하여 다음 관계에서 구할 수 있다.

$$\overline{vw} = -\nu_t \frac{\partial W}{\partial y} \quad (4)$$

여기서 평균속도의 구배는 예측된 데이터를 식 (3)을 이용하여 근사한후 식 (3)을 미분하여 구하였다. 한편 표준형 $k-\epsilon$ 모델에서 특성길이는 다음의 관계가 있다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} = l_c k^{1/2} \quad (5)$$

한편 혼합거리 모델에서 혼합거리에 해당하는 특성 길이는 다음 관계에서 구한다.

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial W}{\partial y} \right| \quad (6)$$

이와 같은 특성길이는 수치해석시 채택되는 난류모델의 타당성을 검증할 수 있는 자료가 된다. 보통 자유 전단층의 혼합거리는 전단층의 두께에 비례한다고 생각하는 것이 보편적이다⁽¹⁰⁾.

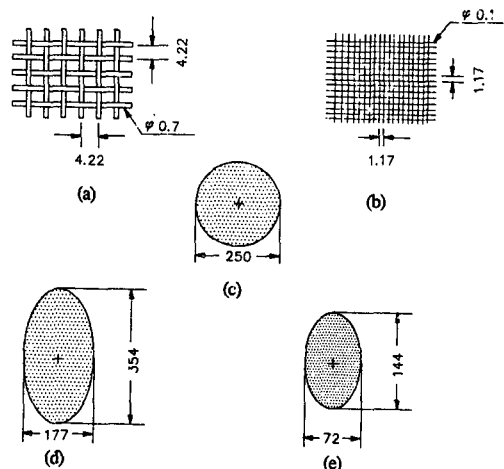
3. 실험 장치 및 방법

실험장치는 풍동, 스크린, 계측기기 및 자료처리 장치 등으로 이루어졌다. 실험에 사용된 풍동은 최고속도 60m/s인 폐쇄 순환식 철제 풍동이며 시험부 크기는 0.9m×0.9m×3.6m이다. 실험에서는 Fig. 4(a), (b)의 두가지 메쉬를 사용하였다. 전단층의 발달과정을 주로 연구하기 위하여 원형 스크린을 사용하였고, 저항계수를 변화시키기 위해 Fig. 4(a)의 한장 및 (a), (b)메쉬 두장을 겹쳐 사용하였다. 점성에 의해서 스크린에 의해 모사된 유동이 하류를 따라서 어떻게 변하는가를 관찰하기 위해서 장축과 단축의 비가 2:1인 타원형 스크린을 사용하였고, 마찬가지로 한장 및 두장겹친 메쉬

를 사용하였다. 사용된 모델의 형상과 크기는 Fig. 4에 나타내었다.

모델의 저항계수는 별도의 덕트형 풍동에서 계측하였으며, 계측된 저항계수 값은 한장짜리 기본 메쉬 (Fig. 4의 (a))의 경우 0.53이고, 두장 겹친 경우는 1.62이다⁽¹¹⁾. 한편 본 모델과 같은 메쉬 스크린인 경우 α 는 저항계수와와의 간단한 경험식⁽²⁾으로 얻을 수 있다. 이로 부터 계산된 α 는 기본 메쉬인 경우 0.89, 두장 겹친 경우는 0.68 이다. 모델은 기본 유동에 미치는 교란을 최소화 하면서 풍동 단면의 중심에 설치하기 위해 풍동단면의 대각선 방향으로 0.6mm 피아노선을 이용하여 고정하였고, 계측이 이루어지는 평면이 와이어의 중앙이 되도록 하여 와이어의 후류가 계측에 영향을 미치지 않도록 하였다. 설치된 모형과 좌표계는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 모델은 풍동 단면의 중심에 상류 균일유동에 직각이 되도록 설치하였으며, 유속은 20m/s로 고정하였다.

실험에서는 스크린의 저항계수가 충분히 작아 역류가 생기지 않고 주유동이 지배적이므로, 열선 프로브(DANTEC 55P61)를 유동방향을 중심으로 90° 돌려가며 측정하였다. 한편 한 측정점에서 평균량 및 난류량등의 최종 데이터는 100 μ sec의 간격으로



(a) coarse wire-mesh
 (b) fine wire-mesh
 (c) single and 2folded circular screen
 (d) single elliptic screen
 (e) 2folded elliptic screen

Fig. 4 Configurations of the wire-mesh screens

100번 받아들이 평균을 취하여 구하였다. 본 연구에서는 스크린 하류에서 전체 유동을 거시적으로 관찰하기 위해 원형 및 타원형 한장 짜리 스크린의 경우에는 풍동 단면의 한 쪽에 해당하는 하류 ($z/2H_0=1.0$)까지 7개의 위치에서 측정하였다. $z/2H_0=1.0$ 은 보통 프로펠러의 성능실험이 행해지는 곳이다. 이 두가지 모델은 반경방향(타원형 스크린의 경우에는 장, 단축방향)으로 등간격으로 측정하였다. 두장 겹친 원형 스크린의 경우에는 하류로 $z/2H_0=1.667$ 까지 9단면에서 측정하였다. 반경 방향으로 전단층의 자세한 측정을 위하여 스크린 모서리 위치에서 조밀한 간격으로 측정하였다. 한편 모델의 Blocking비(스크린 면적과 풍동 시험부 면적의 비)는 Fig. 4의 (c), (d)의 경우 0.06, (e)의 경우 0.003이다. 따라서 본 실험에서 모델에 의한 Blockage효과는 거의 무시할 수 있다. 또한 실험에 이용된 풍동이 시험부 입구에서 출구까지 점차

로 정사각형 단면적이 커지는 특징을 가지고 있기 때문에 벽에 의한 Blockage효과 역시 무시할 수 있다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 원형 스크린의 경우

원형 스크린의 하류 속도분포는 Fig. 5에 나타내었다. 3절에서 설명한 바와 같이 코어유동과 스크린의 모서리를 기준으로 형성되는 전단층을 명확하게 관찰할 수 있다. 스크린의 바로 하류에서는 강한 난류강도에 의해서 계측된 평균속도 분포에 약간의 산란이 있다. 전체적으로 코어에서의 유동은 균일할 속도분포를 보이고, $z/2H_0=1.0$ 근처에서 거의 일정한 값을 보인다. 한장의 스크린에서는 코어의 무차원 속도가 0.8 정도이고 두장의 스크린에서는 0.6 정도이다. 한편 전단층은 스크린의 모서

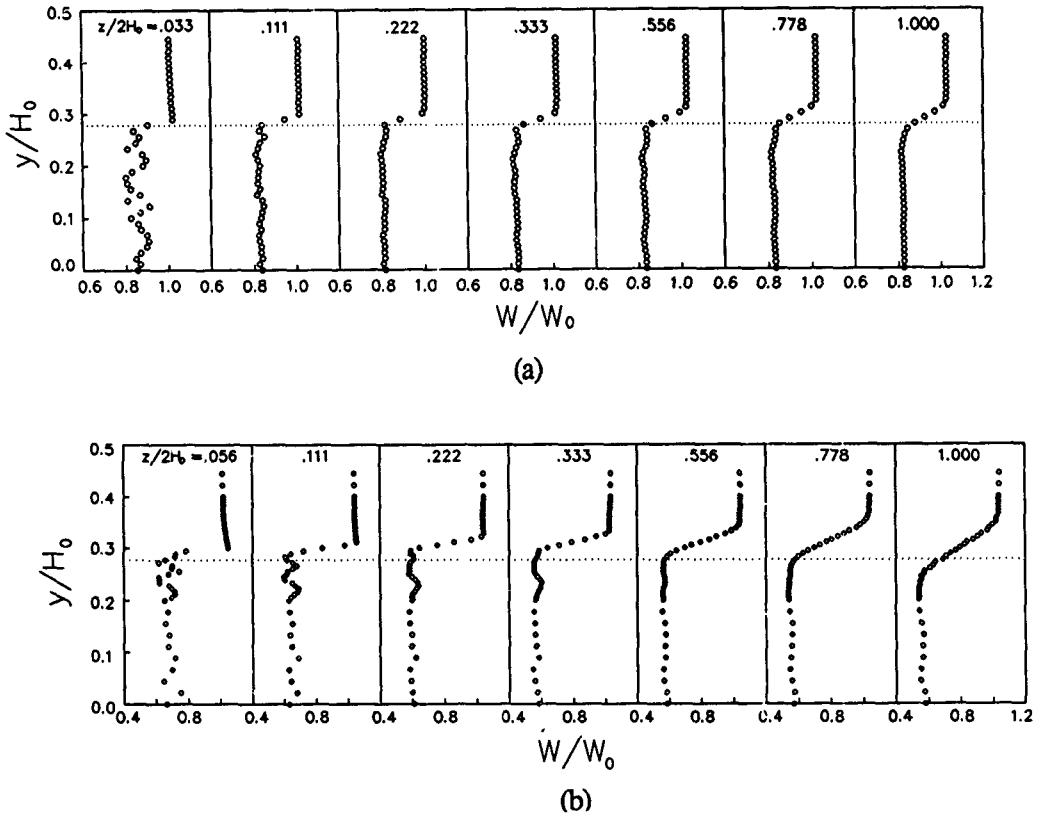


Fig. 5 Longitudinal mean velocity profiles in the wake of the circular screen(A dotted line indicates the position of the screen-edge);(a) single screen, (b) 2 folded screen

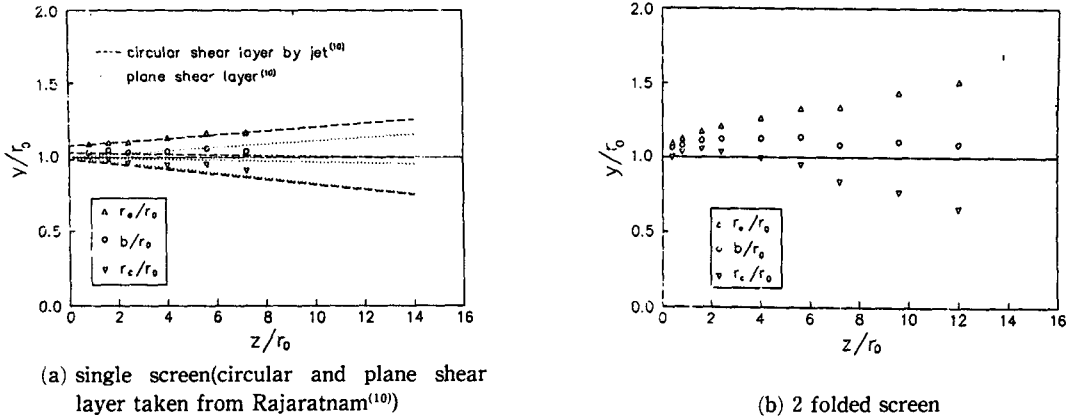


Fig. 6 Growth of the shear layer

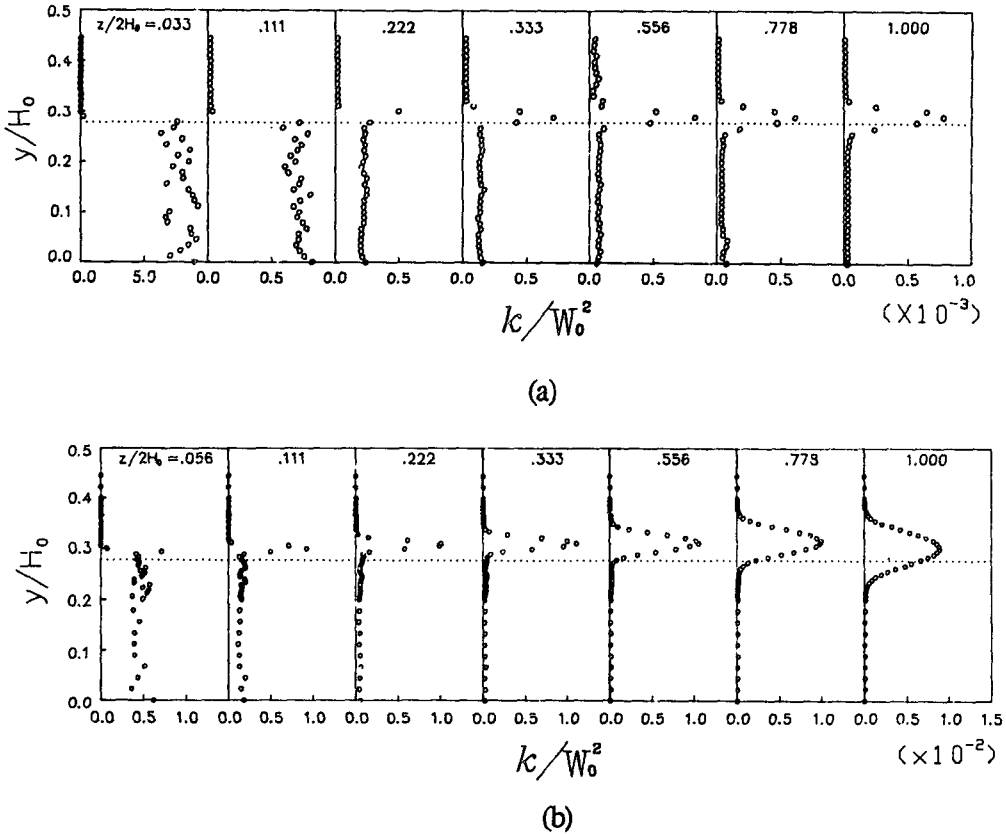


Fig. 7 Turbulent kinetic energy profiles in the wake of the circular screen(A dotted line indicates the position of the screen-edge);(a) single screen, (b) 2 folded screen

리를 중심으로 약간 바깥쪽으로 형성된다. 두장 걸친 경우는 스크린의 저항계수가 한장인 경우보다 커서 코어와 외부 유동의 속도 차가 크기 때문에

전단층이 두껍게 형성된다. 두가지 원형 스크린에 대한 전단층의 발달과정을 Fig. 6에 나타내었다. 한장인 경우는 얇은 전단층이 속도가 빠른 바깥쪽

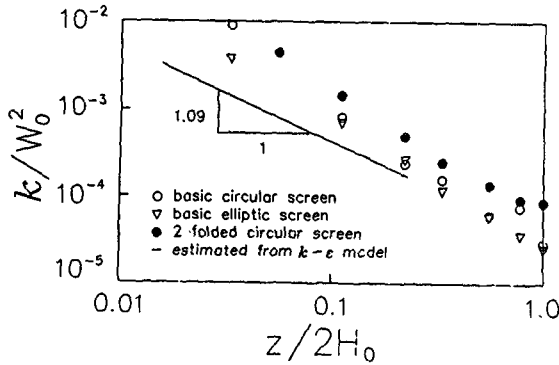


Fig. 8 Variations of turbulent kinetic energy along the axis of the screens

으로 치우쳐 성장함을 알 수 있다. 제트에 의한 평면 전단층이나 원형 전단층의 발달⁽¹⁰⁾과 비교해보면 전단층의 두께는 비슷하나, 제트의 경우 전단층은 속도가 빠른 안쪽으로 전단층이 두껍게 성장하는 반면 스크린유동의 경우에는 스크린 모서리를

중심으로 전단층이 바깥쪽으로 두껍게 성장한다. Fig. 6(a)에서는 동일한 속도 차이에 의한 2차원 자유전단층의 형성과정과 비교하였다. Fig. 6(b)에서 두장 겹친 경우에는 전단층이 뚜렷하게 바깥쪽으로 성장하고 있으며 특히 스크린에 근접한 후류에서는 전단층의 내부 경계도 스크린 모서리 보다 바깥쪽에 형성된다. 이것은 근접 후류에서 형성되는 역압력구배 및 스크린 하류에서 형성되는 반경 방향의 평균속도성분에 의한 결과라고 생각된다.

난류 운동에너지의 분포는 Fig. 7에 나타내었다. 스크린의 근접 후류에서는 스크린에서 발생한 강한 난류강도가 나타난다. 이러한 난류강도는 코어에서는 하류로 가면서 급히 감소한다. 한편 전단층에서는 평균속도의 구배로 인해 난류 에너지가 생성된다. 하류로 갈에 따라 생성 난류에너지는 점차로 증가하다가 일정한 수준을 유지한다. 또한 두장 겹친 스크린의 경우가 한장의 경우 보다 큰 속도 구배를 발생시키므로 생성 난류에너지도 큼을 알 수

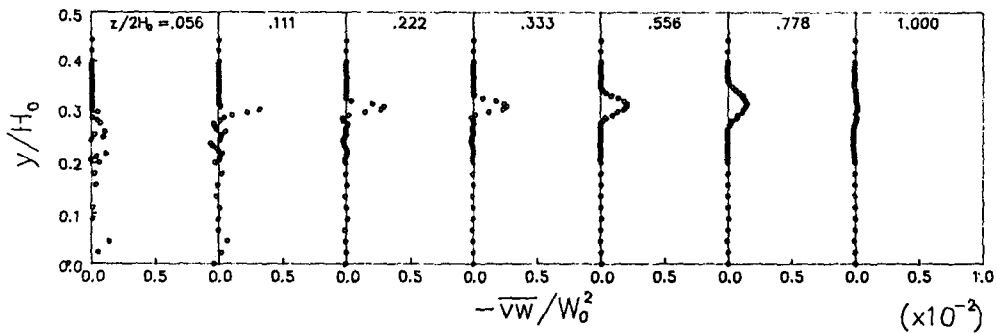


Fig. 9 Reynolds stress profiles in the wake of the 2-folded screen

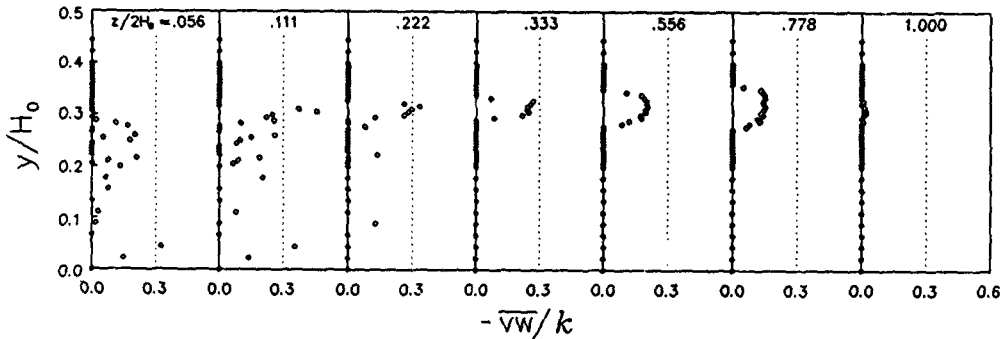


Fig. 10 Distributions of Reynolds stress relative to turbulent kinetic energy in the wake of the 2-folded circular screen

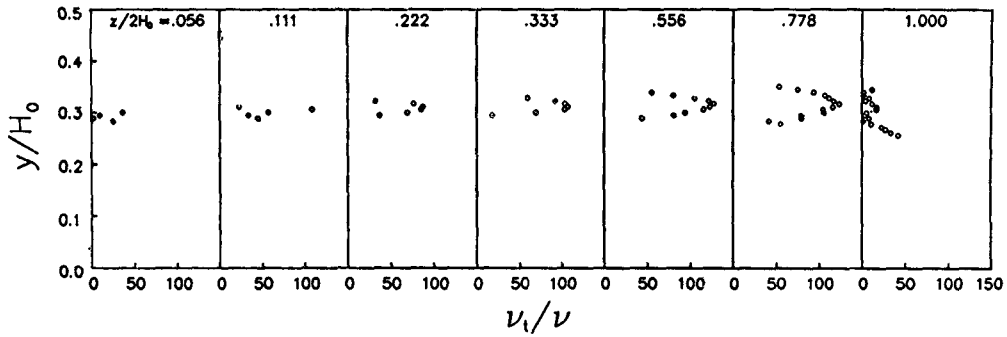


Fig. 11 Turbulent eddy viscosity profiles in the wake of the 2 folded circular screen

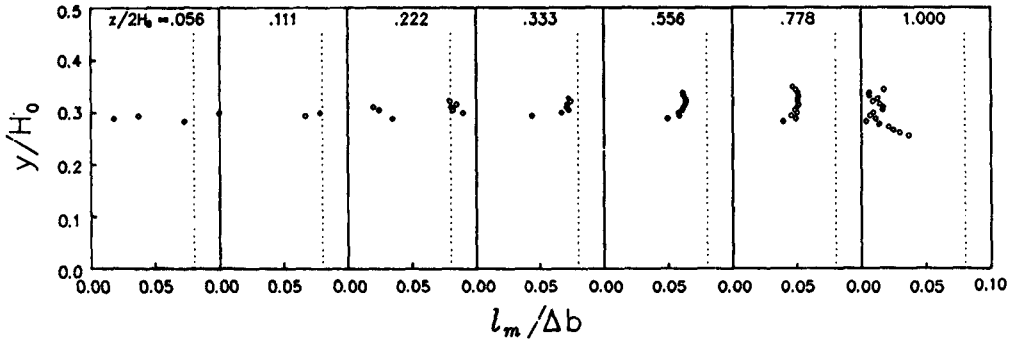


Fig. 12 Mixing length profiles in the wake of the 2 folded circular screen

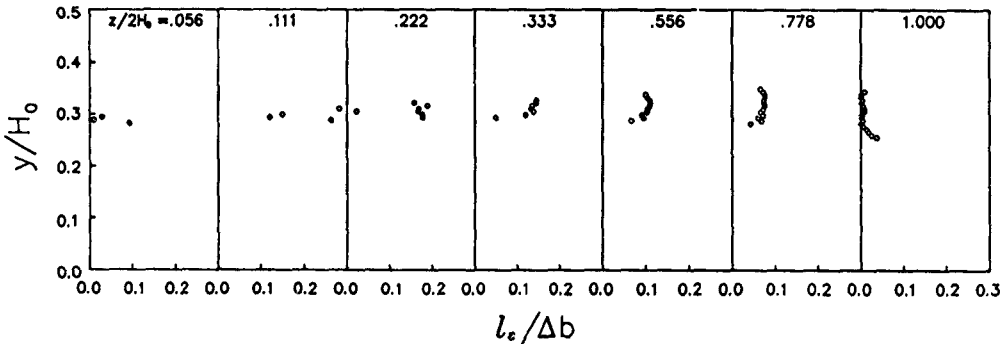


Fig. 13 Dissipation length profiles in the wake of the 2 folded circular screen

있다. 전단층의 내부 경계가 스크린의 중심 축과 만나지 않는 한 코어에서 난류 운동에너지는 하류로 갈수록 감소한다. Fig. 8에 스크린의 중심 축을 따른 코어의 난류에너지를 식 (2)를 이용하여 표준 $k-\epsilon$ 모델에서의 변화와 함께 비교하여 나타내었다. 후류 전개영역이 아니라고 볼 수 있는 40

mesh 후방($z/2H_0=0.2$ 이후)에서 스크린이 한장인 경우, 기울기 $n=1.52$ 였고, 두장 접친 경우는 $n=1.62$ 였다. 두 경우 모두 표준 $k-\epsilon$ 모델에서 추정된 1.09보다 큰 값으로 난류에너지는 급히 감소하고 있다. 이런 결과로 보아 코어에서는 단순한 그리드 난류특성 외에 코어 내의 유동에 의한 영향이 있음

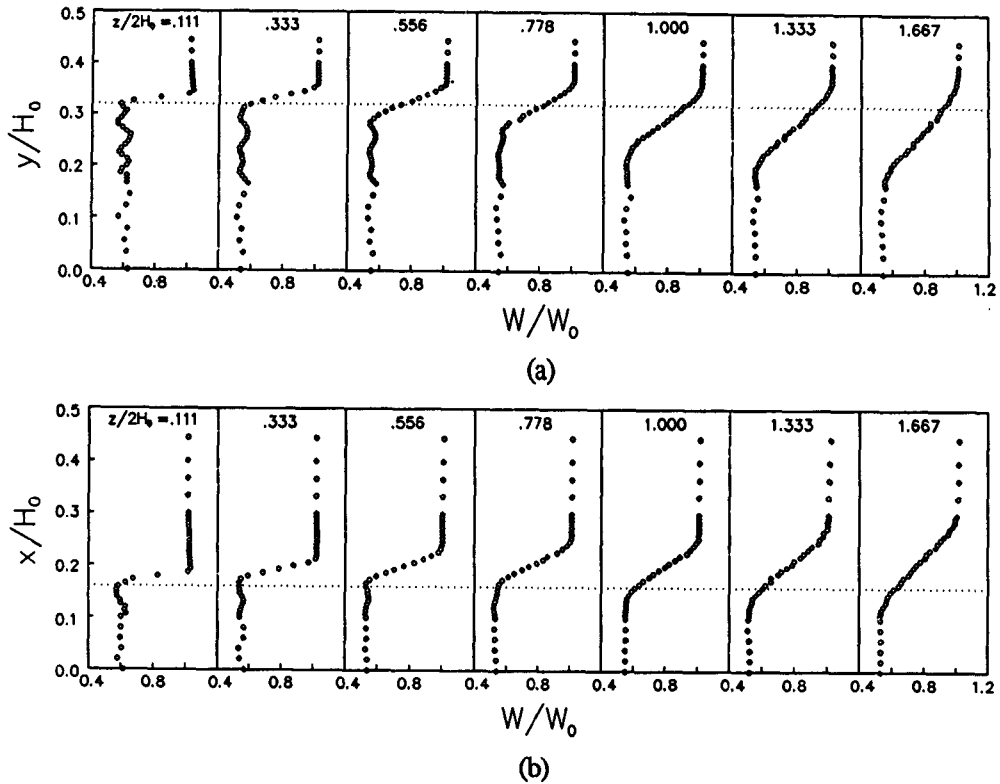


Fig. 14 Lognitudinal mean velocity profiles in the wake of the 2 : 1 elliptic screen(A dotted line indicates the position of the screen-edge);(a) $y-z$ plane, (b) $x-z$ plane

을 알 수 있다.

두장의 메쉬 스크린에서 측정된 레이놀즈 응력은 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 나타내지는 않았으나 법선 응력의 세 성분은 전체적으로 거의 등방성을 이루고 있다. 다만, 주방향의 응력이 다른 성분보다 약간 크다. 전단응력은 전단층 내에서 속도구배가 최대인 위치에서 최고치를 보이나, $z/2H_0=1.0$ 이후에서는 매우 적다. 앞서 전단층의 발달과정과 코어의 난류특성에서 살펴 보았듯이 전단층의 난류특성이 중요한 문제이므로, 실험에서 측정된 속도 분포, 난류 운동에너지 및 난류 전단응력으로 부터 전단층에서의 난류특성을 검토하였다.

평균 경계층 내부와 같이 난류 운동에너지의 생성과 소산이 균형을 이루는 국소 평형영역에서는 전단응력과 난류 운동에너지의 비가 $0.3^{(12)}$ 임이 알려져 있다. 앞서 난류 운동에너지의 분포로 부터 전단층에서는 하류에서도 난류 운동에너지는 일정한 수준으로 남아있어 이에 대해 검토하였다. 난류 전단응력과 난류 운동에너지의 비는 Fig. 10에 나

타내었다. 실험에서는 하류로 가면서 $z/2H_0=0.556$ 이후에는 그 비가 0.3에 채 못미치고 있음을 알 수 있다. 이는 전단층의 이론적 시뮬레이션을 위해서 표준 $k-\epsilon$ 모델은 다소 비합리적임을 말한다. 전단층 내에서 와점성계수 분포는 Fig. 11과 같다. 동점성계수에 비해 약 100배 정도의 크기를

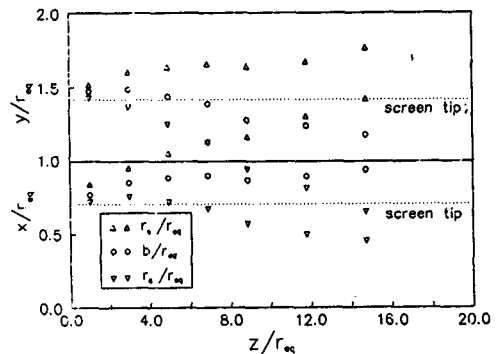


Fig. 15 Growth of the 2 : 1 elliptic shear layer

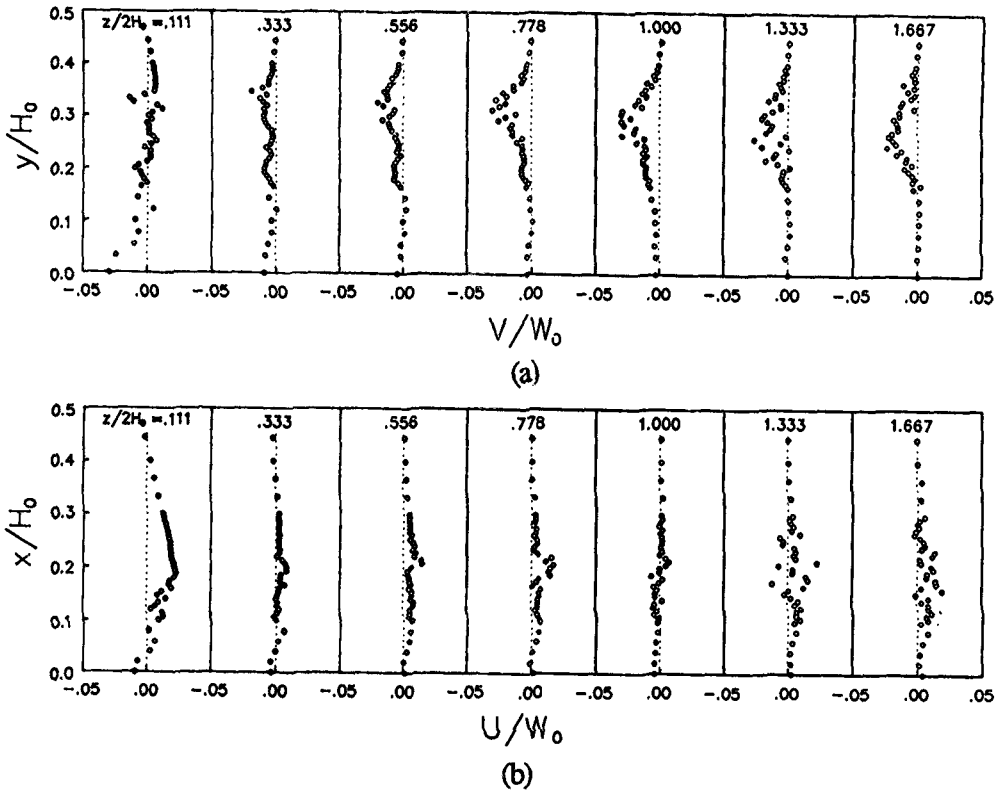


Fig. 16 Transverse velocity profiles in the wake of the 2 : 1 elliptic screen; (a) $y-z$ plane, (b) $x-z$ plane

갖는다. 와점성계수는 식 (3)을 이용한 평균속도의 기울기와 전단응력으로 부터 구하였다. 이는 난류 레이놀즈 수가 약 1000의 크기로서 단순히 난류 레이놀즈 수가 적기 때문이 아니다. 와점성계수로부터 전단층에서 난류 혼합길이를 구하였고 그 분포는 Fig. 12와 같다. 일반적으로 전단층에서 난류 혼합길이가 전단층 두께는 비례한다고 가정하여왔다⁽¹⁰⁾. 균일한 유동에 평행으로 분사되는 원형제트에 의한 복합 전단층에서 그 비는 0.08인데, 본 논문의 실험에서는 $z/2H_0=0.333$ 까지는 그 비가 0.08과 일치하지만 그 하류에서는 난류 혼합길이가 작아져 그 비가 0.08에 못 미치고 있다. 이는 혼합 거리 모델에 의해서 본 유동을 시뮬레이션 하기 위해서는 이러한 경험계수를 적절히 조절해야함을 나타낸다. 와점성계수와 난류 운동에너지로부터 구한 소산 길이척도의 분포는 Fig. 13과 같다. 경향은 혼합길이 분포와 비슷하게 나타난다. 본 논문에서는 난류운동 에너지의 소산율은 측정하지 못하였으므로 여기서는 참고자료로서만 나타내었다. 그러나 앞으로 수치해석적 연구에서 활용될 수 있겠다.

4.2 타원형 스크린의 경우

타원형 스크린의 하류에서 평균속도 분포와 난류치들을 원형 스크린의 경우와 같은 방법으로 측정하였다. 메쉬의 종류와 이에 따른 난류 특성치들의 거동은 원형 스크린의 경우와 동일하므로 본 논문에서는 나타내지 않았다. 여기서는 주로 평균 속도 분포가 스크린의 바로 뒤에서 하류를 따라가면서 어떠한 양상으로 변하는가에 관심을 두었다. 두장의 메쉬로 이루어진 스크린의 경우 장축과 단축을 포함하는 평면에서 측정을 하였고 Fig. 14에 그 평균속도 분포를 나타내었다. 속도분포 형상은 원형 스크린의 경우와 비슷하며 전단층의 두께도 비슷하다. 또 전체적인 난류특성도 원형 스크린의 경우와 같았다. 그러나 전단층의 발달 과정이 장, 단축을 따라 서로 상이한 경향을 보인다.

단축을 따라서는 스크린의 모서리를 기준으로 원형 스크린의 경우보다 더 바깥쪽으로 성장하며 장축을 따라서는 더 안쪽으로 성장하고 있다. 이러한 전단층의 발달과정을 Fig. 15에서 요약하여 나타내었다. 전단층의 중심 b 는 장축을 따라서는

z방향으로 음의 기울기를 갖고 단축을 따라서는 양의 기울기를 이루고 있다. 이러한 과정으로 전단층의 경계가 하류로 가면서 하나의 형태로 되어 큰 원형 전단층으로 되어감을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 14에서 알 수 있듯이 장축을 따라서는 스크린 모서리를 중심으로 안쪽으로 단축을 따라서는 스크린 모서리를 중심으로 바깥쪽으로 평균유동이 이루어짐을 예상할 수 있고, 이에 의하여 타원형 등속도 선이 하류에서 원형 등속도 선으로 변한다. 이러한 현상은 스크린 바로 하류에서는 역압력 구배에 의해서 영향을 받기는 하지만 전반적으로 코어유동 내에서 이루어지는 평면유동에 의해서 영향을 받기 때문이라고 생각된다. Fig. 16에는 장축과 단축면에서 측정된 수직속도 성분을 나타내었다. 장축면의 전단층 내에서는 크기가 작기는 하나 내부로 평균유동이 이루어지고, 반면 단축면에서는 외부로 유동이 이루어지고 있다. 이러한 속도성분은 매우 작은 양이므로 측정된 결과에 상당한 데이터 산란이 나타나지만, 그 경향은 뚜렷하게 관찰할 수 있다.

5. 결 론

풍동 내에 원형 및 타원형 형상의 스크린을 설치하고 열선 유속계에 의하여 하류에서 평균속도 및 난류량을 측정하고 그 난류유동 특성에 대하여 고찰하였다. 이러한 실험적 연구 결과를 다음과 같이 요약한다.

(1) 스크린 후류의 평균속도는 스크린축을 따라 점차 감소하며, 풍동 단면의 한쪽에 해당하는 하류에서 일정한 값에 이른다. 스크린 모서리를 따라서는 복합 전단유동이 형성되고, 난류 운동에너지는 전단층에서 최고치를 나타낸다. 반면, 스크린 축을 따라 코어에서 난류 운동에너지는 매우 빠르게 감소한다.

(2) 원형 스크린의 경우 전단층은 스크린 모서리를 중심으로 바깥쪽으로 두껍게 성장한다. 이는 코어에서의 압력구배에 의한 영향, 스크린 형상에 의해 유도되는 반경방향의 평균운동의 영향이다.

(3) 전단층 내에서는 복잡한 난류특성을 보여 난류 운동에너지의 생성 및 소산율이 국소평형을 이루고 있지 않고 난류 혼합 길이도 제트나 평면 자유 전단층의 경우와는 다른 분포를 보인다.

(4) 타원형 스크린을 지나는 유동은 장축면의 전단층 내에서 크기가 작기는 하나 안쪽으로 향하는 유동이 이루어지며, 반면 단축면에서는 바깥쪽으로 향하는 유동이 이루어지고 있다. 이러한 3차원 유동이 타원형 전단층을 하류에서 원형 후류로 변화시키는 주된 메카니즘이다.

참 고 문 헌

- (1) Laws, E. M. and Livesey, J. L. 1978, "Flow through Screens", *Ann. Rev. of Fluid Mechanics*, Vol. 10, pp. 247~266.
- (2) Taylor, G. I. and Batchelor, G. K., 1949, "The Effect of a Gauze on Small Disturbances in a Uniform Stream", *Quarterly J. of Mech. and App. Math.*, Vol. 2, pp. 1~29.
- (3) Owen, P. R. and Zienkiwicz, H. K., 1957, "The Production of Uniform Flow in a Wind Tunnel", *J. F. M.*, Vol. 2, pp. 521~531.
- (4) Elder, J. W., 1959, "Steady Flow through Non-Uniform Gauze of Arbitrary Shape", *J. F. M.*, Vol. 5, pp. 355~363.
- (5) McCarthy, J. H., 1964, "Steady Flow Past Non-Uniform Wire Grids", *J. F. M.*, Vol. 19, pp. 491~512.
- (6) Koo, J. K. and James, D. F., 1973, "Fluid Flow around and through a Screen", *J. F. M.*, Vol. 60, pp. 513~538.
- (7) 전우평, 1987, "스크린 하류 2차원 난류유동의 시뮬레이션," 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- (8) 강신형, 전우평, 1988, "균일유동에 수직인 2차원 스크린 후류의 점성유동에 관한 수치해석적 연구, 대한기계학회논문집, 제12권, 제3호, pp. 590~598.
- (9) Kang, S. H., Lee, H. S., Jeon, W. P., and Lee, C. H., 1989, "Viscous Flow through Screens normal to the Uniform Stream", *KSME J.*, Vol. 3, No. 2, pp. 146~152.
- (10) Rajaratnam, N., 1976, "Turbulent Jets", *Elsevier Sci. Pub. Co.*, New York.
- (11) 이현구, 1990, "메쉬-스크린 후류의 난류유동 특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- (12) Bradshaw, P., Ferriss, D. H. and Atwell, N. P., 1967, "Calculation of Boundary Layer Development Using the Turbulent Energy Equation", *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 593~616.