

## 음향 여기에 의한 혼합층 유동구조의 변화에 대한 연구

정 양 범

## The Study on Changes of Mixing Layer Caused by Acoustic Excitation

Y-B Jung

**Key words** : Mixing layer(혼합층), Vortex shedding frequency(와류유출 주파수), Coherent structure(응집구조), Shear stress(전단응력), Acoustic excitation(음향여기)

## Abstract

This study is concerned with evaluating the effects of acoustic excitation on the development of two stream mixing layer generated by split plate. The ratios of two velocities  $U_1$  and  $U_2$  either side of the splitter plate were such that  $U_1/U_2=1.0$  (uniform flow) or  $U_1/U_2<1.0$ (shear flow). The mixing layers were disturbed acoustically through the edge of split plate. Quantitative data were obtained with hot-wire anemometry. Flow visualization with smoke-wire was also employed for qualitative study.

The results show that the large scale structures of mixing layers are strongly affected by excitation frequency and amplitude in both uniform and shear flows. The maximum streamwise and vertical turbulent intensities of the excited flow fields are apt to be decreased as compared with those of without excitation. The flow characteristics of uniform flow are more influenced by acoustic excitation than those of shear flow.

기호설명		
$E(v)$	: 수직방향 속도변동 성분의 스펙트럼	$U_1, U_2$ : 분리판 (Split plate) 상, 하의 속도
$f_a$	: 음향 여기 주파수(Acoustic excitation frequency)	$U_a, U_{a,max}$ : 평균 및 최대 여기속도
$f_s$	: 와류유출 주파수 (Vortex shedding frequency)	$U_\infty$ : 자유유동 속도(Uniform flow : $U_\infty = U_1 = U_2$ , Shear flow : $U_\infty = (U_1 + U_2)/2$ )
		$\bar{U}$ : 평균속도
		$\vec{u}, \vec{v}$ : 흐름방향 및 수직방향 난류강도

\* 경상대학교(원고접수일 : 2000년 9월)

$\overline{uv}$	: 전단응력 (Shear stress)
$V_{out}$	: 출력전압
$x, y$	: 직교좌표계
$\delta^*$	: 배제 두께 (Displacement thickness)
$\theta$	: 운동량 두께 (Momentum thickness)

### 1. 서 론

유동의 혼합현상은 제트엔진, 연소실 등 공학의 응용분야에 흔히 나타나는 현상으로 이러한 유동장에서는 대규모 응집구조(Large scale coherent structure)가 유동 특성을 지배한다. 즉 혼합층(Mixing layer), 전단유동(Shear flow) 등에서 응집구조의 조직적인 회전운동, 와(Vortex)의 상호작용 등은 혼합 및 에너지 전달과정에 영향을 미친다. 연소실에서는 와류의 영향으로 입자 또는 분무의 혼합, 분산(Dispersion) 등이 향상된다<sup>(1)</sup>. 그러나 주기적으로 유출하는 와는 외부의 교란에 의해 구조가 쉽게 변하기 때문에 유동장을 인위적으로 제어하여 유동의 혼합, 와의 성장과정 등을 변화시킬 수 있으며, 이러한 현상을 응용하기 위하여 많은 연구가들이 연구해 오고있다. 유동장을 제어하기 위하여는 주로 초기 혼합영역을 주기적으로 교란시킨다.

혼합층 및 전단유동 등에서 응집구조에 대한 연구는 유동가시화를 통하여 많이 실행되었다<sup>(2)~(5)</sup>. Brown 등<sup>(2)</sup>은 난류 혼합층의 유동가시화를 통해 주기적인 대규모 와의 존재를 확인하였으며, Winant 등<sup>(3)</sup>은 와의 합병(Vortex pairing)이 전단류의 발달과정을 지배하는 주요 인자라 하였다. 와의 합병은 유동장에 주기가 다른 두 와가 공존할 경우 강하게 발생되며, Ho 등<sup>(4)</sup>은 초기 혼합영역에 임의의 주기적인 주파수로 유동장을 교란하면 하류로 진행하면서 서로 다른 와가 합쳐진다고 했다. 그러나 와의 합병 과정이 혼합층의 확산에 미치는 영향에 대하여는 명확히 밝혀지지 않았다.

Hernan 등<sup>(7)</sup>은 Digital image analysis를 통해 Brown 등의 연구결과를 확인하였으며, 혼합층의 확산은 와의 성장에 의해 지배된다고 하였다.

Wynanski, Marasli 등<sup>(6~9)</sup>은 Oscillating flap을 이용하여 난류 혼합층의 주기적인 교란이 와의 합병, 혼합층의 성장과정 등에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Fiedler 등<sup>(10)</sup>은 전단층의 초기 혼합영역에 음향을 여기시켜 여기주파수 및 강도의 변화에 따른 와의 형성 및 혼합과정 등을 연구하였으며, 음향 여기가 난류 에너지에도 변화를 주어 수직방향 성분은 증가시키고 흐름방향 성분은 감소시킨다고 하였다.

본 연구에서는 분리판(Split plate)에 의해 분리되어진 두 유체가 분리판 끝단에서 혼합이 이루어지는 혼합층에 대하여 가시화 및 측정 실험을 통하여 유동특성을 규명하고자 하며, 특히 분리판 끝단에 음파를 발생시켜 음향 여기가 혼합층의 유동구조에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험 모델 및 측정장치

본 실험에 사용된 풍동은 아음속 개방형 풍동으로 전체 시스템은 Fig. 1과 같다. 송풍기로 유입된 공기는 확대부와 안정실 및 수축부를 지나 시험부를 통과한 후 대기로 배출된다. 시험부의 크기는 230(W)×230(H)×1,000(L) mm이고, 시험부에서의 속도는 최대 40m/s까지 조절이 가능하며, 자유유동의 난류강도는 0.5 % 정도이다.

혼합층은 안정실 내에서부터 설치된 분리판에 의해 분리되어진 두 유동이 분리판 끝단에서 혼합되면서 형성되며, 분리판 상, 하의 속도비( $U_1/U_2$ )는 분리판 상부에 유동저항체(그물망)를 설치하여 조절하였다. 분리판의 두께는 14mm이고, 유동의 분리가 시작되는 앞단은 타원으로 제작하여 초기 와의 발생을 줄였으며, 끝의 350mm부분은 테이퍼를 형성하였다. 분리판 끝단의 두께는 2.5mm,

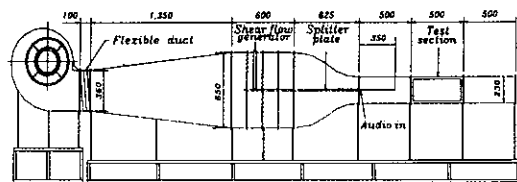


Fig. 1 Schematic of wind tunnel

테이퍼 각은 약 0.9도이며, 끝단에는 여기된 음파를 혼합층으로 주입하기 위하여 0.5mm의 슬릿을 형성하였다.

주기적인 음향 여기는 함수 발생기에서 생성된 사인파형을 Solid state amplifier가 내장된 Audio generator(Model 8010)를 거쳐서 고 출력, 저 주파수 Loudspeaker(DJ SOUND Model W 10-200)에 입력하여 음파를 발생시켜 분리판 끝단을 통하여 혼합층으로 유입되도록 하였으며, Fig 2는 음향 여기 및 분리판 끝단으로 전달되는 과정을 나타낸다.

혼합층에서의 속도장 측정은 X형 열선프로브(TSI Model 1241-T1.5)와 정온 열선풍속계(IFA 100, TSI Model 157)로 하였고, 측정지점은 분리판 끝단에서 흐름방향으로 210mm, 350mm, 510mm에서 하였다. 분리판 끝단에서의 경계층 측정은 I형 열선프로브(TSI Model 1218-T1.5)를 사용하였다. 각 측정 지점에서 신호 추출 간격은 100 $\mu$ s, 1회당 4,906개의 신호를 20번씩 획득하여 Ensemble평균으로 데이터처리 하였으며, 신호의 분석은 오프라인 프로그램으로 수행하였다. 측정 데이터에 대한 불확실성의 해석은 일반적으로 95%의 신뢰도 범위에서 계산하는 경우가 많으며<sup>11-12)</sup> 본 연구에서도 이 범위로 불확실성을 계산하였다. 본 실험의 경우 후류 중심에서의 흐름방향 평균속도, 흐름방향 및 수직방향 난류속도 성분의 rms값에 대한 최대 불확실성은 각각 자유유동 속도의 1.46%, 1.37%, 1.25%정도였다.

유동 가시화는 Large scale구조를 비교적 쉽게 관찰 할 수 있는 스모크 와이어 유동가시화법으로

하였다. 가시화를 위한 연기입자는 분리판의 끝단에서 5mm떨어진 지점에 설치된 열선에서 발생되어 혼합층으로 주입되며, 이 연기가 시험부의 상, 하부에서 주사되는 시트빔과 교차하는 지점에 카메라의 초점을 맞추어 사진 촬영을 하였다.

### 2.2 실험 조건

혼합층의 유동 특성 및 음향 여기가 혼합층의 유동 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 본 실험에서는 유속  $U_1, U_2$ 를 변화하면서 실험 하였으며, 속도의 선정은 다음과 같다.

- Case 1 :  $U_1=U_2=7\text{m/s}$
- Case 2 :  $U_1=U_2=20\text{m/s}$
- Case 3 :  $U_1=6\text{m/s}, U_2=9\text{m/s}$
- Case 4 :  $U_1=16\text{m/s}, U_2=25\text{m/s}$

Case 2, 4에 대한 분리판 끝단에서의 경계층 조건은 Table1에 나타내었다. 경계층의 배제두께( $d^*$ )와 운동량 두께( $q$ )의 계산을 위하여 속도측정이 어려운 벽면 부근의 속도는 평판에 대한 경계층 유동의 벽면법칙을 적용하여 구하였다.

음향 여기주파수( $f_a$ )는 각 속도장에서의 와류유출 주파수( $f_s$ )를 참고하여 결정하였다. 음향여기는 함수발생기의 출력을 일정하게 유지한 상태에서

Table 1. Initial boundary layer properties

		U(m/s)	$\delta^*$ (Cm)	$\theta$ (Cm)
Case 2	상부	20.0	0.56	0.0491
	하부	20.0	0.55	0.0488
Case 4	상부	16.0	0.59	0.0473
	하부	25.0	0.53	0.0434

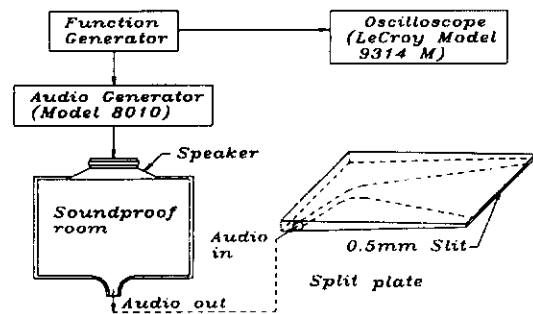


Fig. 2 Schematic of test facilities for acoustic excitation

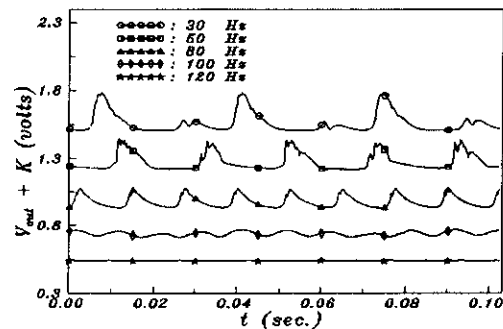


Fig. 3 Excitation velocity signals

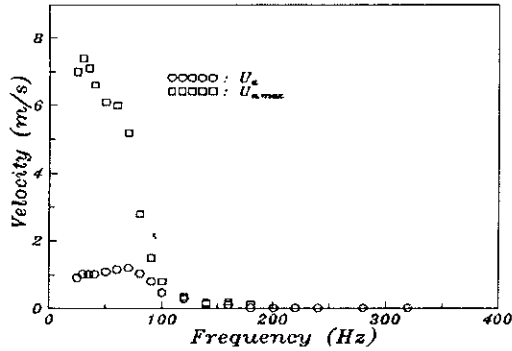


Fig. 4 Maximum and mean excitation velocity

Table 2. Frequencies of vortex shedding and acoustic excitation

	fs(Hz)	fa(Hz)		
		236	118	59
Case 1	236	236	118	59
Case 2	818	204	102	51
Case 3	252	252	126	63
Case 4	952	238	119	60

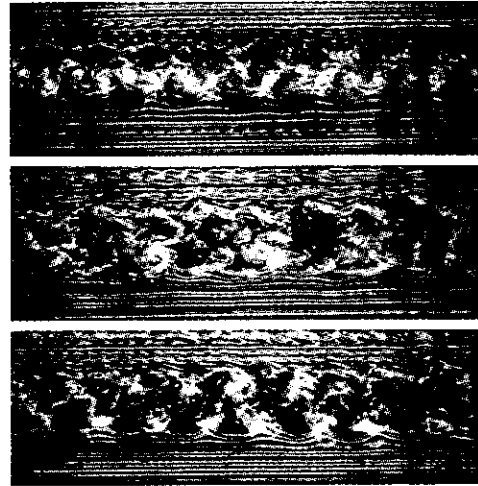
여기주파수를 변경하면서 하였다. Fig. 3은 함수 발생기의 출력을 일정하게 유지한 상태에서 여기 주파수 변화에 따른 출력전압의 변화를 나타내며, Fig. 4는 여기주파수에 따른 최대 및 평균 여기방출속도를 나타낸다. Fig.3에서 K는 여러 데이터를 같은 그래프에 나타내기 위하여 첨가한 상수이다.

그림에서 알 수 있듯이 여기주파수가 작을수록 출력전압 변화의 진폭이 크며, 여기 주파수가 120Hz를 넘으면 출력전압 변화의 진폭이 아주 작다. 최대 여기방출속도는 여기주파수가 30Hz일 경우 최대 7.5m/s정도이며, 평균 여기방출속도는 여기주파수가 약 100Hz이하에서는 약 1m/s정도이다. 실험에서 와류 유출주파수와 측정을 위하여 혼합층에 주입한 음향 여기주파수는 Table 2에 요약하였으며, 여기주파수는 와류 유출주파수의 1/2배로 하였다.

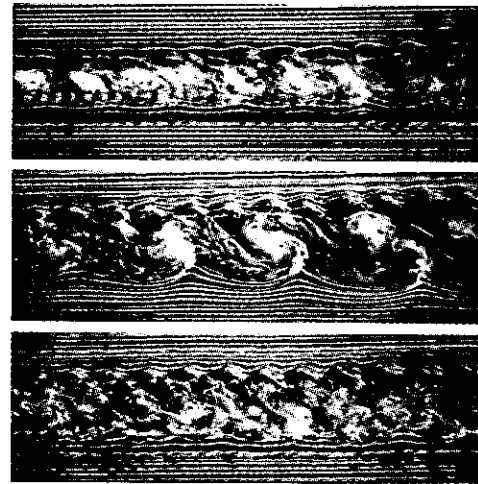
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 유동 가시화

본 연구에서는 스모크 와이어 유동 가시화법으로 혼합층을 가시화 하였다. Fig. 5 (a), (b)는 각각



(a) uniform flow( $f_a=0.0, 0.5, 1.0f_s$  from upper one)



(b) shear flow( $f_a=0.0, 0.5, 1.0f_s$  from upper one)

Fig. 5 Results of flow visualization

$U_1=U_2=3.1\text{m/s}$  (Uniform flow,  $f_s=88\text{Hz}$ ),  $U_1=2.6\text{m/s}$ ,  $U_2=3.8\text{m/s}$ (Shear flow,  $f_s=90\text{Hz}$ )에서의 가시화 결과이다. 가시화 영역은 분리판 끝단에서 흐름 방향으로 175mm~530mm범위이며 음향 여기 주파수는 와류 유출주파수의 0, 1/2, 1배이다.

Uniform flow와 Shear flow에 대한 혼합층의 유동 특성을 비교하면 Uniform flow의 경우 분리판 후류의 상하에서 속도 결손영역으로 에너지가 전달되면서 혼합되고, Shear flow인 경우 분리판 끝단에서 속도의 불연속성에 의하여 혼합이 발생하게 되며, Large vortex는 평균 속도의 구배에 의

하여 생기기 시작한다. 따라서 Uniform flow 와 Shear flow 에 대한 와의 유출형태는 근본적으로 다르며, 음파의 여기가 없으면 Shear flow인 경우 와는 후류 중심에 와가 형성되어 하류로 진행하면서 성장한다. 혼합층이 여기 되면 여기의 정도에 따라 Large vortex구조가 달라지게 된다.

Uniform flow 에서 음파의 여기 주파수가 와류 유출주파수와 같을 경우( $f_a=f_s$ ), 음향 여기로 인하여 와의 성장이 가속되어 후류의 폭이 확대 되어진다. 여기주파수가 와류 유출주파수의 1/2인 경우, 후류의 상 하에서 형성된 와가 음파의 여기로 인하여 Large scale 구조가 변하게 되어 후류 중심을 따라 Large vortex가 형성된다. Shear flow인 경우에도 가시화 사진에서 나타난 바와 같이 여기가 혼합층의 구조를 변화시키고 있음을 알 수 있다. 여기 주파수가 와류 유출 주파수와 같을 경우 Uniform flow의 결과와 비슷하게 나타나며, 여기 주파수가 와류 유출 주파수의 1/2인 경우, 여기로 인하여 새로 생성된 Large vortex구조를 선명하게 관찰 할 수 있다. 즉, 와들은 합병과정을 겪으면서 Large vortex로 되어 하류로 발달해간다고 볼 수 있다.

가시화 결과 음향 여기로 인해 혼합층의 폭이 상

당히 확대됨을 볼 수 있으며, 또 여기 주파수가 혼합층의 Large vortex 구조를 지배하고, 와의 형성 주기도 변화시킴을 알 수 있다.

Fig. 6은 앞에서 설명한 실험 조건에 대하여 후류 중심에서 측정된 수직 방향 속도 변동 성분의 스펙트럼을 나타낸다. Case1, 3에서  $f_a=1/4 f_s, 1/8 f_s$ 인 경우, 와류 유출주파수 전후에 낮은 Peak점이 나타나고 있으며, 이는 음향 여기가 와류 유출 주기를 근본적으로 변화 시키지는 못하지만 Large vortex구조에 영향을 미친다고 볼 수 있다. Case2, 4의 경우  $f_a=1/16 f_s$  일 때는 Peak주파수가 존재하지 않으며, 따라서 음향 여기가 와의 유출을 억제한다고 볼 수 있다. 전체적으로 스펙트럼 분석에서 유추할 수 있는 현상들은 가시화를 통하여 비교적 자세히 관찰할 수 있는 와의 구조 및 유출주기의 변화를 충분히 설명할 수 없다. 이러한 현상은 여기주파수에 따른 음파의 유출속도 변화를 보면, 여기 주파수가 100Hz를 넘을 경우, 최대 및 평균 유출 속도가 작아지기 때문에 이 영역에서는 음향 여기가 혼합층의 Large vortex에 그다지 영향을 주지 못하기 때문이라 여겨진다. 위의 결과로 보아 혼합층의 Large vortex는 여기 주파수 강도에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다.

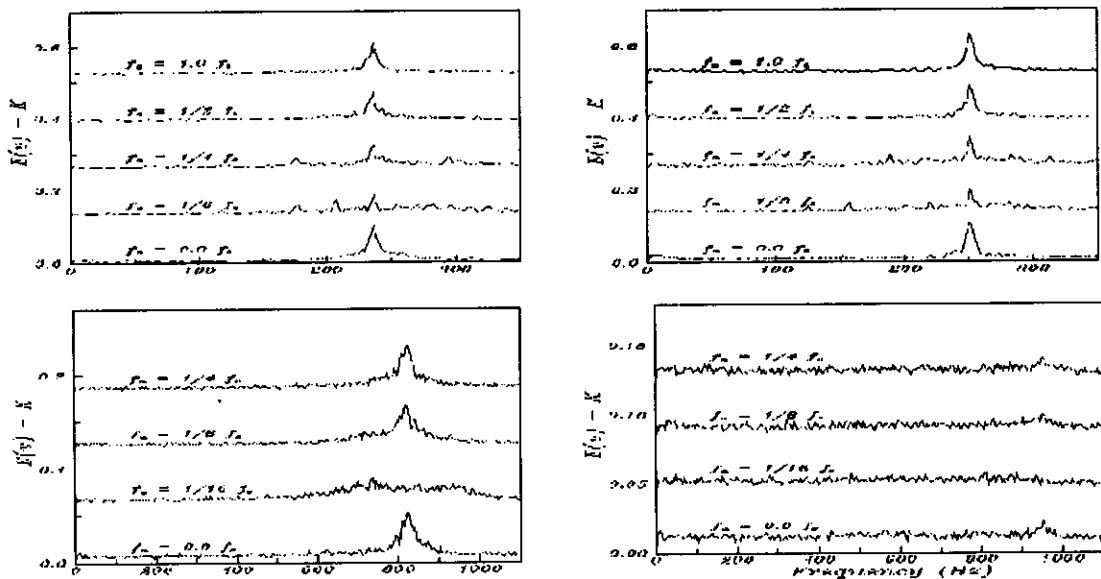


Fig. 6 Spectra of turbulent vertical velocity component

3.2 평균속도분포 및 난류특성의 변화

Fig. 7은 혼합층에서의 평균속도분포 형상을 나타내며, 세로축은 흐름방향에 대한 수직방향의 위치, 가로축은 평균속도를 무차원화한 값이며, Uniform flow에서는 국소평균속도( $\bar{U}$ )를  $U_\infty$ (로 무차원화 하였고, Shear flow에서는  $(\bar{U}-U_1)/(U_2-U_1)$ 으로 무차원화 하였다. 흐름방향의 측정 지점은 분리판의 끝단에서 210mm, 350mm, 510mm의 위치이며, 각 그림의 왼쪽으로부터 차례로 나타내었다. 또한 각 그림에서 같은 실험조건에 대한 결과를 한 그래프에 나타내기 위하여 무차원화한 값에 상수 K를 더하여 나타내었으며, 이하의 그림에 사용된 K는 같은성격을 가진다. Fig. 7에서 Case1의 경우, 후류유동에서 나타나는 일반적인 속도분포 형상은 혼합층이 여기됨으로 인해 변형된다. 특히 후류는  $f_a=1/4 f_b(=59\text{Hz})$ 로 여기되는 경우, Fig. 4에서 최대 여기방출속도가 약 6m/s로 자유 유동속도 7m/s에 근접하고 평균 여기 속도도 자유 유동속도의 약 15%정도로 비교적 높기 때문에 여기속도가 후류 중심에서의 속도 결손을 상당히 보충해 주며, 따라서 후류 속도장의 속도를 증가시키게 된다. 그러나 Case 2의 경우, 후류에 유입되는 여기 평균속도가 자유 유동속도의 약 5%이하로 낮기 때문에 음향 여기가 후류의 평

균속도분포 형상에 많은 영향을 주지 않게 된다. Shear flow에서도 혼합층의 여기가 평균 속도 분포에는 많은 영향을 주지 않으며, 이는 후류 중심에서의 Shear stress가 강하기 때문으로 판단된다.

Fig. 8, 9 및 10은 각각 x, y속도 성분의 난류강도 및 Shear stress의 변화를 나타낸다. Fig. 8에서 Case 2와 4의 경우, 여기로 인한 흐름방향 난류강도의 변화가 거의 없으며, 수직방향 난류강도 및 Shear stress도 거의 변화가 없었다. 이는 평균속도분포에서 설명한 것처럼 여기속도가 자유유동속도와 비교하여 너무 작기 때문에 난류 에너지변화에 미치는 영향이 작기 때문이라 볼 수 있다. Case 1과 3의 경우, u, v 난류 강도의 최대값은 혼합층이 여기됨으로 인해 작아진다. 이러한 현상은 여기주파수 및 강도의 변화에 따라 혼합층의 Large vortex가 영향 받는 정도가 다르고, 혼합층에서의 난류에너지 분포는 Large vortex에 상당히 의존되기 때문으로 판단되며, 본 측정 실험의 음향 여기 조건에서는 여기로 인하여 에너지 소산이 촉진된다고 볼 수 있다.

Shear stress 분포는 Uniform flow인 경우 후류 중심을 기준으로 위 아래에서 양과 음이 최대값을 나타내지만, Shear flow에서는 후류 중심에서

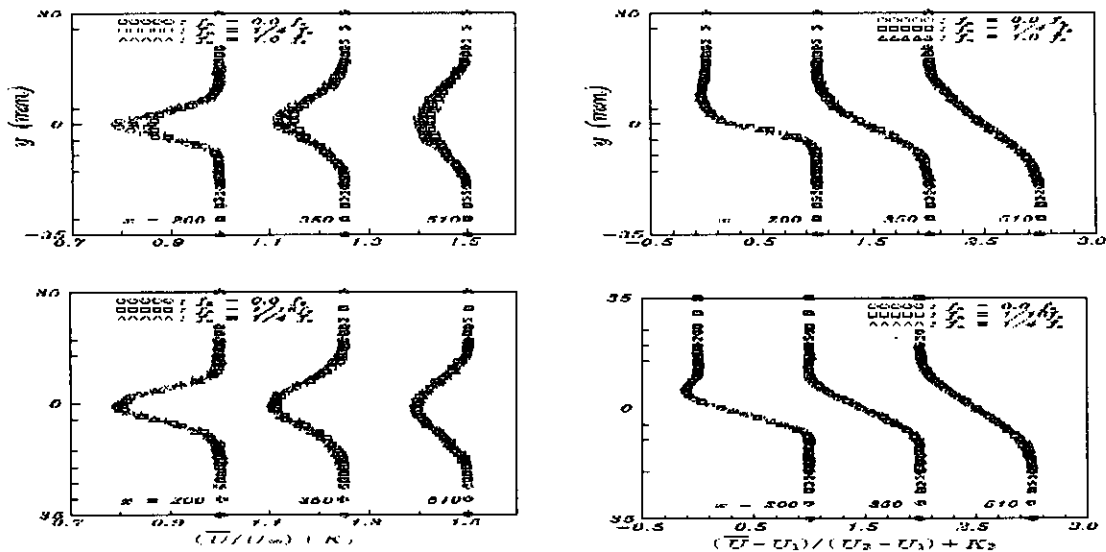


Fig. 7 Mean velocity profiles

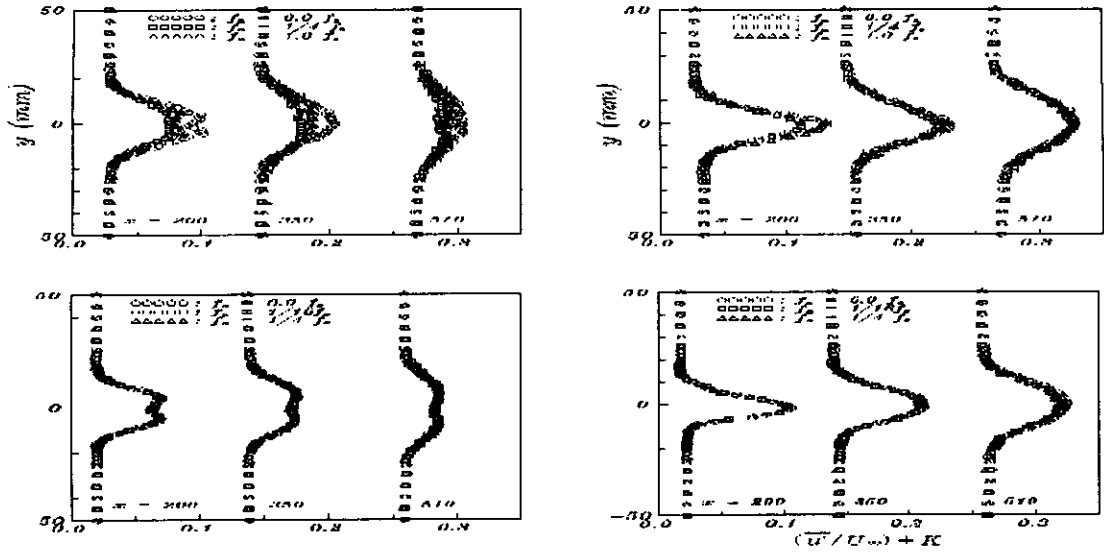


Fig. 8 Streamwise turbulent intensities

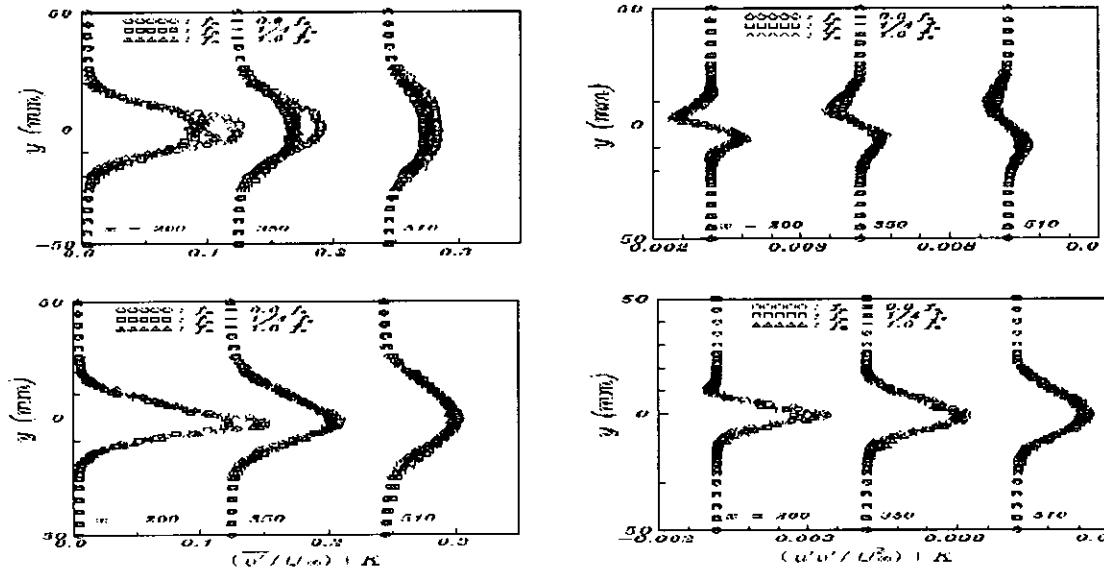


Fig. 9 Vertical turbulent intensities

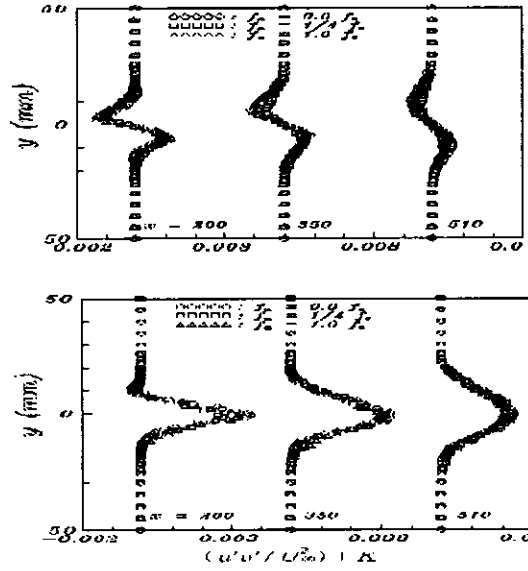


Fig. 10 Distribution of the shear stresses

양의 최대값을 갖는 형태로 된다. 이러한 현상은 와의 형성이 Uniform flow에서는 위 아래에 엇갈리면서 나타나지만 shear flow에서는 후류의 중심을 따라 형성되는 결과를 반영하며, Shear stress의 절대값이 최대가 되는 위치는 대략 와의 중심과 일치한다. Uniform flow와 Shear flow에서의 난류 에너지 소산 과정을 비교하면 Uniform flow인

경우 하류로 갈수록 평균 난류에너지가 상당히 작아지는 반면 Shear flow에서는 하류에서도 비교적 높은 값으로 유지된다. 즉 분리판의 끝단에서 흐름방향으로 510mm 떨어진 위치에서의 난류에너지는 210mm 떨어진 곳의 값과 비교하여 Uniform flow인 경우 약 40%, shear flow인 경우 약 70%이다. 이러한 현상은 Uniform flow에서는

혼합층의 초기에 난류 에너지가 생성되어 하류로 가면서 소산 되지만, Shear flow인 경우 평균속도 구배가 먼 하류까지 강하게 유지되며, 이로 인해 난류 에너지 소산이 느리게 진행되기 때문이라 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Uniform flow( $U_1=U_2$ )와 Shear flow( $U_1<U_2$ )인 경우에 대하여 분리판 끝단에서 혼합층으로 유입되는 음향 여기가 혼합층의 유동 특성에 미치는 영향에 대하여 가시화 및 측정실험을 통하여 연구 하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

Uniform flow와 Shear flow의 와류 유출 특성은 서로 다르다. 즉 Uniform flow에서는 와가 후류의 위 아래에 엇갈리면서 형성되는 반면 Shear flow의 경우 후류 중심을 따라 와가 형성된다.

난류 에너지는 Uniform flow에서는 소산이 빠르며, Shear flow인 경우 먼 후류까지 높은 값으로 유지된다. 따라서 혼합이 먼 후류까지 지속될 필요가 있을경우 Shear flow가 유리하다.

혼합층의 유동구조는 음향 여기의 주파수와 강도의 영향을 강하게 받는다. 특히 주류속도와 비교하여 여기강도가 강할 경우 유출된 와들은 합병과정을 거치면서 Large vortex로 발달하게 되며, 후류 폭도 증가하게 된다. 또 음향 여기는 Shear flow보다 Uniform flow의 유동 특성에 더 많은 영향을 주게 된다.

#### 참고문헌

- (1) Crowe, C.T., Chung, J.N. and Trout, T.R., 1988, "Particle mixing in free shear flows", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 14, PP. 171~174.
- (2) Brown, G.L., Roshko, A, 1974 "On density effects and large structure in turbulent mixing layers," J. Fluid Mech., Vol. 64, PP. 775~816.
- (3) Winant, C.D., Browand, F.K.,1974, "Vortex pairing, the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds numbers," J. Fluid Mech., Vol. 63, PP. 237~255.

- (4) Ho, C.M., Huerre, P., 1984, "Perturbed free shear layer," Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 16, PP. 365~424.
- (5) Hakuro Oguchi, Osamu Inoue, 1984, "Mixing layer produced by a screen and its dependence on initial conditions," J. Fluid Mech., Vol. 142, PP. 217~231.
- (6) Ho, C.M., Huang, L. S.,1982, "Subharmonics and vortex merging in mixing layer," J. Fluid Mech., Vol. 119, PP. 443~473.
- (7) Hernan, M.A., Jimenez, J 1982, "Computer analysis of a high speed film of the plane turbulent mixing layer," J. Fluid Mech., Vol. 119, PP. 323~345.
- (8) Wygnanski, I., Weisbrot, I 1988, " On the pairing process in an excited plane turbulent mixing layer," J. Fluid Mech., Vol.195, PP. 161~173.
- (9) Marasli, B., Champagne, F.H. and Wygnanski , I.,1992, "Effect of traveling waves on the growth of a plane turbulent wake," J. Fluid Mech., Vol. 235, PP. 511~528.
- (10) Fiedler, H.E., Menaing, P., 1985, "The plane turbulent shear layer with periodic excitation," J.Fluid Mech., Vol. 150, PP. 281~309.
- (11) Moffat, R.J., 1982, "Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis," Transactions of the ASME, Vol. 104, PP. 250~260.
- (12) Yavuzkurt, S., 1984, "A guide to un certainty analysis of Hot-Wire data," J. Fluid Engineering, Vol. 106, PP. 181~186.

#### 저 자 소 개



##### 정양범(鄭良範)

1994년 8월 부산대학교 졸업(공학박사). 한국중공업 선임연구원(1995~1998). 경상대학교 교수(수송기계공학부). 유체기계기술사, 공조냉동기계기술사 보유. 성충유동 및 유동제어 실험연구에 관심이 많음.