

〈論 文〉

## 열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(2)

(Part 2. 성층후류의 난류유동특성)

김경천\* · 정양범\*\* · 강동구\*\*\*

(1993년 11월 29일 접수)

### A Study on the Characteristics of Cylinder Wake Placed in Thermally Stratified Flow (II)

(Part II. Turbulent Characteristics of Stratified Wake)

Kyung Chun Kim, Yang Beom Jung and Dong Koo Kang

**Key Words :** Stratified Flow(성층유동), Cylinder Wake(원주후류), Turbulent Heat Flux(난류 열유속), Strouhal Number(스트로할수), Turbulent Intensity(난류강도)

#### Abstract

The effect of thermal stratification on the stratified flow past a circular cylinder was examined in a wind tunnel. Turbulent intensities, the rms values of temperature and turbulent convective heat flux as well as the velocity and temperature profiles in the cylinder wake with a strong thermal gradient of 200°C/m were measured by using a hot-wire and cold-wire combination probe. It is found that the temperature field affects as an active contaminant, so that the vertical growth of vortical structure is suppressed and the strouhal number decreases with increasing the extent of stratification. And also, the wake structure can not sustain their symmetricity about the wake centerline and vertical turbulent motion dissipates faster than that of the neutral case when such a strong thermal gradient is superimposed. It is evident that the turbulent mixing in the upper half section is stronger than that of the lower half of the wake in a stably stratified flow because the turbulent intensities and convective heat flux in the upper half section are larger than those of the lower half of the wake.

#### 기 호 설 명

$A, B, T_w$  : 교정상수

$C(\tau)$  : 상관계수 (correlation coefficient)

$d$  : 원주직경 (mm)

$f$  : 외류유출 주파수

$K$  : 무차원 성층파라미터

$N$  : Brunt-Väisälä frequency

$R$  : Timescale ratio

$Re$  : 레이놀즈수

$St$  : Strouhal수

$T_m$  : 평균온도

$T_o$  : 대표온도

$T_u, T_v, T_\theta$  : 흐름방향, 수직방향 및 온도 적분시간

$U_o$  : 유동의 대표속도

$u, v, \theta$  : 흐름방향, 수직방향 및 온도 rms

$\overline{uv}$  : Reynolds 전단응력

$\overline{u\theta}, \overline{v\theta}$  : 흐름방향 및 수직방향 열유속

\*정회원, 부산대학교 생산기계공학과

\*\*정회원, 부산대학교 대학원 생산기계공학과

\*\*\* (주)현대중공업 환경연구소

$x, y, z$  : 직교좌표계  
 $\tau$  : 지연시간

### 1. 서 론

유체가 성층화되면 관성 및 점성력은 물론 중력의 영향도 작용하게 되므로 성층유체 속에서의 유동현상은 중립상태와는 아주 다르게 나타난다. 특히 안정된 대기에서는 지상에서 수직방향으로의 유동확산이 제한되어 오염물질의 농도가 지표층에서 높은 값을 유지함으로써 인해 심각한 공해문제를 유발시킬 수 있다. 따라서 각종 유동장에서의 성층효과를 규명하는 것은 환경문제나 해양공학 등에서 중요한 과제이며, 많은 연구자들이 성층유동장 내에서의 유동현상에 대한 실험을 해오고 있다.

연구의 형태로는 성층유동을 형성하는 방법에 따라 크게 소금물의 농도차를 이용한 수동(water-tunnel) 실험과 기체가열식으로 온도구배를 형성한 풍동실험으로 분류될 수 있다. 그러나 강한 성층효과를 규명하기 위한 지금까지의 실험은 주로 소금물의 농도차를 이용한 수동실험이 대부분이며,<sup>(1,2)</sup> 온도구배를 이용한 풍동실험은 부력의 영향이 무시될 수 있을 정도의 아주 약한 온도구배에 대해 실험이 되어왔다.<sup>(3,4)</sup> 이는 강한 성층유동을 형성시키기 위하여 소금물의 농도차를 이용하는 것이 기체가열식에 의한 방법보다 쉽기 때문이다.

극히 최근에 Lienhard and Van Atta 등<sup>(5)</sup>은 열교환기를 이용하여 200°C/m까지의 온도구배를 형성할 수 있는 풍동을 제작하여 격자후류의 난류소산과정을 실험한 바 있다.

한편 성층효과를 연구하기 위한 실험은 실험실에서 비교적 쉽게 형성시킬 수 있는 격자후류의 난류소산과정이 대부분이며, 단순한 물체후류의 유동특성은 Lin과 Pao,<sup>(6)</sup> Boyer et al.,<sup>(7)</sup> Ohya and Nakamura<sup>(8)</sup> 등에 의해 연구되었다. 그러나 성층유동장 내에서의 물체후류에 대한 종래의 실험은 주로 가시화 및 와류유출 주파수의 측정 등을 통한 정성적인 결과가 대부분이며,<sup>(6-9)</sup> 유동장 및 온도장에 대한 난류특성에 대한 연구결과는 미흡하다. 또한 기체가열식에 의한 강한 열성층 유동장에서의 원주후류에 대한 연구결과는 아직 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구진은 강한 열성층 유동장내의 후류특성에 대한 연구를 체계적으로 수행하기 위하여

250°C/m까지의 온도구배를 형성시킬 수 있는 풍동을 제작하여 열성층이 원주후류의 유동특성에 미치는 효과에 대한 실험을 계속하고 있으며, 풍동제작과 평균유동장에 대한 실험결과를 발표한 바 있다.<sup>(10,11)</sup> 본 연구는 이에 대한 후속연구로 강한 성층 유동장에서의 실린더 후류에 대하여 열선 및 냉선 조합프로브를 사용하여 흐름 및 수직방향 난류강도, 온도 변동성분 및 열유속 등 각종 난류량들을 측정 분석하여 성층유동장이 물체후류에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

### 2. 측정 및 데이터처리

본 실험에서는 열교환기 형태의 온도구배 발생기를 내장한 풍동을 사용하여 200°C/m의 강한 선형 온도구배를 형성시킨 안정된 성층유동장 내에서의 원형실린더 후류에 대한 실험을 하였다. 열성층풍동의 상세한 설계도 및 특성은 김상기의 석사논문<sup>(12)</sup>에 나와있다. Fig. 1은 열성층풍동의 시험부와 유동의 개념도를 나타낸다. 난류특성을 구하는 실험에 사용한 원주의 직경은 7 mm이며, 흐름방향의 측정위치는  $x/d=10, 20, 40, 70, 100$ 로 하였다. 열성층이 있을 경우 무차원 성층파라미터의 변화에 대한 Strouhal수의 변화를 관찰하는 실험에는 직경 5.25, 12.7, 25.7 mm의 실린더를 사용하였다. 열성층이 없을 경우(neutral)의 자유흐름 속도는 2.0 m/sec로 하였으며 흐름방향 및 수직방향의 난류강도는 각각 0.8, 0.5% 정도이다. 열성층이 안정적으로 형성되었을 경우(stable)의 흐름방향 및 수직방향의 난류강도는 각각 1.2, 0.4%, 온도의 rms 값은 0.4°C 정도이다. 순간속도성분의 측정은 정온 열선풍속계(TSI 2-CH system Model 1054A)를 이용하였고, 측정센서는 직경 4 m 텡스텐선으로 1 mm의 측정부를 갖는 DANTEC Model 55P61 X형 열선 프로브를 사용하였다. 온도의 측정은 본 연구진에 의해 개발된 DC 브릿지형 온도

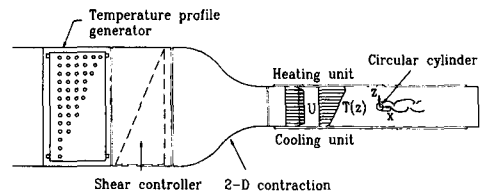


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

측정회로를 사용하였으며, (13) 온도측정 센서는 길이가 0.5 mm이고 직경 1mm의 백금선 측정부를 갖는 DANTEC Model 55P31 I형 프로브를 이용하였다. 이 두 프로브의 지지는 위치조정이 가능한 장치로 이루어지며, 두 센서 사이의 간격이 1mm 이하로 조절하여 측정하였으며, 센서 이송은 컴퓨터 온라인으로 자동이송되도록 하였다. X형 프로브의 신호는 정온 열선풍속계에 의해 검출되어 D6000 범용 파형분석기(Data Precision사의 Model 601 Universal Waveform Analyzer) 내의 연산기를 통하여 디지털(digital)신호로 전환된 뒤 GPIB카드로 D6000과 연결된 컴퓨터의 하드디스크에 저장된다. 또한 I형 프로브의 신호는 온도측정회로와 D6000을 통하여 컴퓨터 하드디스크에 기록된다. 각 측정지점에 대한 자료의 추출간격은 100 μs이고, 1회 측정당 4096개의 자료를 10번씩 측정하여 ensemble 평균을 취하였다. 각종 난류신호의 분석은 오프라인 프로그램에 의해 수행하였다.

### 3. 센서 교정방법

열성증화된 유동장에서 난류유동현상을 분석하기 위하여는 온도와 속도를 동시에 측정해야 한다. 속도는 열선과 주위의 열전달을 이용하여 측정하게 되며, 열전달율은 유동의 순간속도와 온도의 변화에 따라 달라진다. 따라서 속도를 측정할 수 있는 교정식은 열선과 주위의 속도 및 온도에 따른 열전달율의 변화를 이용하여 얻을 수 있다. 이에 대한 최초의 관계식은 King에 의해 정립되었으며, 이 결과가 여러 유동조건에 따라 결함은 있지만 근본 개념은 변함없이 사용되고 있다. 본 실험에서도 King의 법칙에 의한 X형 열선 프로브의 교정방법으로는 신뢰성있는 데이터를 획득할 수 없으며, 온도가 변화하여도 정확하게 속도를 측정할 수 있는 교정방법이 필요하다. 따라서 본 실험에서의 교정은 온도의 변화에도 열선과 유동장사이의 열전달현상을 잘 표현해 주는 수정된 King의 법칙을 이용하였으며, (5) 이때 열선표면에서의 열전달은 강제대류에 의해 발생하고 열선풍속계의 브릿지전압, 공기의 속도 및 온도 사이의 함수관계는 에너지 평형 관계를 이용하였다. 이에 대한 결과는 아래식으로 표현된다.

$$E^2 = (T_w - T)(AT_w^{0.84} + BV^n)$$

$$T_f = (T_w + T)/2 \tag{1}$$

여기서,  $A, B, T_w$ 는 교정에 의해 구해지는 값이며, 지수  $n$ 은 보통 0.45를 사용한다. 본 실험에서는 X형 열선 프로브에 의해 흐름방향 및 수직방향의 속도성분을 동시에 측정해야 되며, 식(1)을 X형 프로브에 대해 나타내면 아래와 같다.

$$E_1^2 = \overline{A_1} + \overline{B_1} V^{0.45} \tag{2}$$

$$E_2^2 = \overline{A_2} + \overline{B_2} V^{0.45} \tag{3}$$

여기서,

$$\overline{A_1} = A_1(T_{w1} + T)^{0.84}(T_{w1} - T)$$

$$\overline{B_1} = B_1(T_{w1} - T)$$

$$\overline{A_2} = A_2(T_{w2} + T)^{0.84}(T_{w2} - T)$$

$$\overline{B_2} = B_2(T_{w2} - T)$$

$E_1, E_2$  : 브릿지 출력전압

$V$  : 속도

$A_1, A_2, B_1, B_2, T_{w1}, T_{w2}$  : 교정상수

이다. 센서의 교정을 위하여 온도와 속도의 변화가 가능한 소형 제트풍동을 제작하였으며, 온도와 속도를 여러 범위로 변화하면서 측정된 결과를 이용하여 최소자승법(least square method)으로 교정상수를 구하였다. 실제로 구한 예는 Table 1과 같으며, 측정치와 교정에 의한 결과는 Fig. 2에 나타

Table 1 Typical calibration constants

$A_1$	0.0005072	$A_2$	0.0004593
$B_1$	0.0179882	$B_2$	0.0175538
$T_{w1}$	197.0	$T_{w2}$	192.0

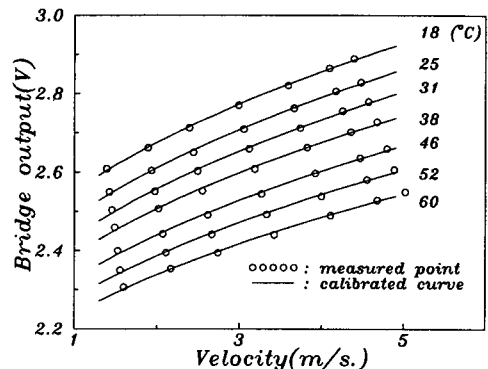


Fig. 2 Compare of measured points and calibrated curves

내었으며 잘 일치하고 있다. 또한 온도측정용 I형 프르브의 교정은 출력전압  $E_T$ 와 cold-wire 온도 변화 사이의 응답특성이 아래식과 같이 선형으로 변하기 때문에 교정이 비교적 쉽다.

$$E_T = G I R_o \alpha_o (T_w - T_o) \quad (4)$$

여기서,  $G$ 는 회로증폭도,  $I$ 는 cold-wire 전류,  $R_o$ 와  $\alpha_o$ 는 각각 온도  $T_o$ 에서 cold-wire의 저항 및 온도상수이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 와류유출 주파수 특성

와류유출(vortex shedding)현상은 물체후류 유동의 기본적인 특징이며, 성층유동장 내에서의 와류구조는 중립유동에서의 그것과 달라지게 된다. Fig. 3은 중립유동과 안정된 성층유동장에서 실린더의 직경을 변화하면서 Strouhal수( $=fd/U$ )를 비교하였다. 성층유동의 경우는 Brunt-Vaisala 주파수  $N$ 값을 2.46으로 일정하게 유지하였다. 그림에서 알 수 있듯이 중립유동의 경우 실린더직경의 변화와 관계없이 Strouhal수는 거의 일정하지만, 성층유동장내에서는 실린더직경이 증가할 수록 Strouhal수가 감소하고 있다. 즉, 성층화된 조건이 일정한 상태에서 실린더 직경의 증가는 무차원 성층파라미터  $K(=Nd/U)$ 의 증가를 의미하며, 따라서 성층화가 강할수록 와류유출의 빈도가 감소함을 나타낸다. 한편 Ohya와 Nakanura<sup>(8)</sup>는 밀도성층동에서 유동 가시화실험을 통하여  $K$ 가 증가 할수록 Strouhal수가 감소하였고,  $K$ 가 임계값(약 0.513) 근처에서 와류구조가 갑자기 변한다고 발표한 바 있으나, 본 실험에서는  $K$ 값을 그정도로 높일 수가 없어서 이에 대한 결과는 얻을 수 없었다.

##### 4.2 난류유동장의 특성

Boyer 등은 소금물의 농도차를 이용한 밀도성층유동장에서 Reynolds수와 Froude수( $=1/K$ )의 관계에 따라 실린더 후류에 대한 유동형태의 영역을 분류한 바 있다.<sup>(7)</sup> 본 실험에서는 Reynolds수 및 Froude수가 각각 900, 130 정도로 이들의 실험영역을 벗어나지만 와류유출 주파수 특성 및 유동 가시화의 결과로 볼 때 난류 대칭유동장으로 분류할 수 있다. Fig. 4, 5는 각각 중립유동과 성층유동에서의 흐름방향( $u$ ) 및 수직방향( $v$ ) 난류강도를 나

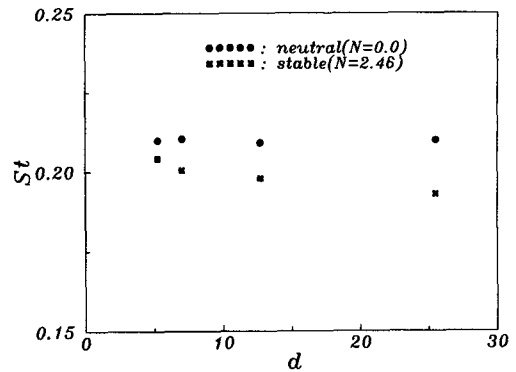


Fig. 3 Compare of the strouhal numbers

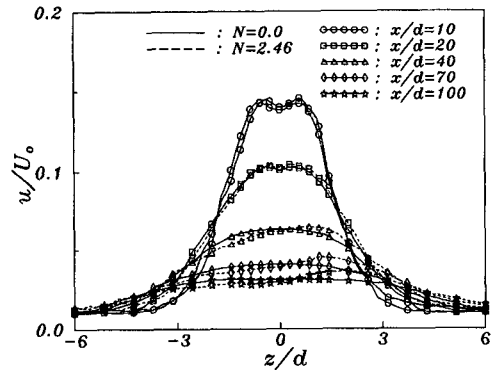


Fig. 4 Streamwise turbulent intensity profiles

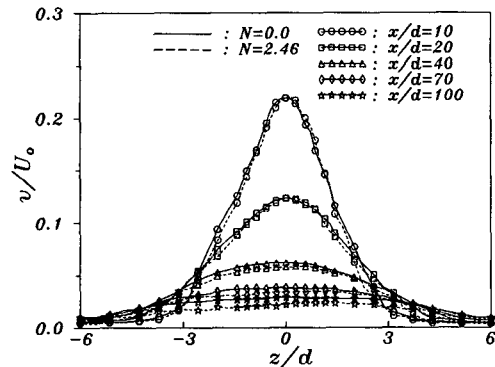


Fig. 5 Vertical turbulent intensity profiles

타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 성층유동과 중립유동에서의  $u$  및  $v$  난류강도의 변화는 비교적 근접 후류에서는 큰 차이를 발견할 수 없다. 그러나 하류로 갈수록 안정화 성층유동에서의  $u$  성분 값은 중립유동과 비교할 때 후류중심을 기준으로 윗부분의 난류강도가 증가하고 아랫부분의 난류강

도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이런 현상은 후류중심 윗부분의 온도장이 높음으로 인해 점성효과가 강해짐으로써 아랫부분보다 혼합현상도 활발하게 진행된다고 볼 수 있다. 또한  $v$ 성분의 경우 하류로 갈수록 전체적으로 성층유동에서의 난류강도가 중립유동에 비해 현저히 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 또한 흐름방향에 대하여 난류강도의 소산과정을 보면  $u$ 성분의 경우 중립유동과 성층유동에서 비교적 비슷하게 진행되고 있으나, 성층유동의 경우 후류중심을 기준으로 비대칭현상을 보이고 있다. 그러나  $v$ 성분의 경우 성층유동에서의 난류강도가 더 빠르게 소산되고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상으로 볼 때 후류의 수직방향 성장이 안정화 성층유동에서 상당히 억제됨을 알 수 있으며, 반면 흐름방향 성분은 후류의 윗부분에서 더 많이 신장된다고 판단할 수 있다. Fig. 6은 Reynolds 전단응력  $\overline{uw}$ 의 분포를 나타내고 있다. 중립유동의 경우는 종래의 연구결과에서와 같이 후류중심을 기준으로 상하 거의 점대칭 형상을 나타낸다. 그러나 안정화 성층유동에서는 위아래에서 크기의 변화가 생기며, 윗부분에서는 증가하고 아랫부분에서는 감소한다. 이러한 결과는 난류강도의 변화로부터 예측되어질 수 있으며, 후류 윗부분에서의 혼합이 아랫부분보다 더 활발히 진행되고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 성층유동에서 온도의 rms 값을 나타내고 있으며, 후류의 전영역에서 위, 아래부분이 서로 다른 특성을 보이고 있다. 전체적으로 온도 난류성분의 흐름방향에 대한 소산과정은 속도성분의 소산과정과 아주 다르게 나타나며 하류에서도 난류성분이 줄어들지 않는다. 또한 후류의 윗부분이 아래보다 온도 난류성분이 크게 나타나 속도성분에서

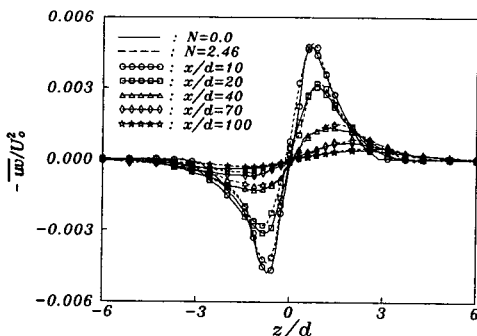


Fig. 6 Reynolds shear stress profiles

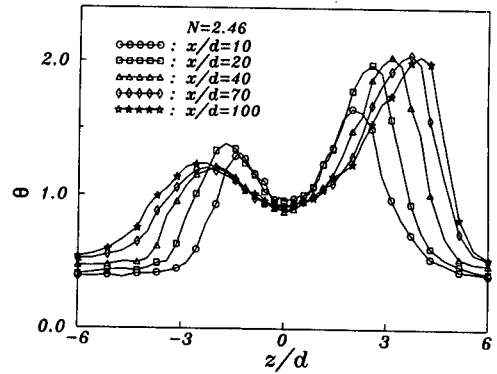


Fig. 7 Variation of the temperature rms profiles

와 같이 비대칭현상을 보이고 있으며, 이 결과는 온도변동성분이 상하가 거의 대칭적으로 증가하게 되는 수동적 성층유동장(passively stratified field)에서의 후류의 결과와는 매우 다르다. (3) 이와 같은 현상은 강한 안정화 성층유동일 경우 먼 후류로 갈수록 속도변동성분은 상당히 감소하지만 자유유동의 안정된 열성층은 장애물에 의해 근본적으로 변화하지 않고 하류에서 다시 성층을 형성하게 되며, 이때 오히려 안정된 온도구배가 난류의 수직방향의 확산을 감소시키는 등 속도장에 능동적으로 작용한다고 볼 수 있다.

### 4.3 난류 열유속의 특성

난류유동장에서 대류열전달은 아래식으로 표현된다.

$$q_i = \rho c_p \overline{u_i \theta} \tag{5}$$

여기서  $c_p, \rho$ 는 각각 정압비열 및 국소밀도이다. 흐름방향과 수직방향에 대한 대류 열유속은 측정에 의해 직접 얻을 수 있으며, 속도-온도 상관관계로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{q_x}{\rho c_p} = \overline{u\theta} \tag{6}$$

$$\frac{q_z}{\rho c_p} = \overline{v\theta} \tag{7}$$

열유속의 크기는 온도와 속도의 난류성분 크기 뿐만 아니라 이들의 위상(phase)관계에 따라 달라지게 된다. Fig. 8, 9는 각각  $\overline{u\theta}$  및  $\overline{v\theta}$ 의 분포를 나타낸다.  $\overline{u\theta}$ 의 경우 후류중심을 기준으로 부호가 바뀌게 되지만  $\overline{v\theta}$ 의 경우 후류의 아래, 위 모두 다음의 값을 나타낸다. 일반적으로 원형 실린더후

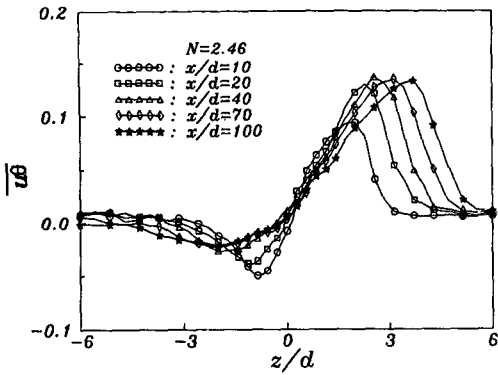


Fig. 8 Variation of the streamwise turbulent heat flux  $\overline{u\theta}$

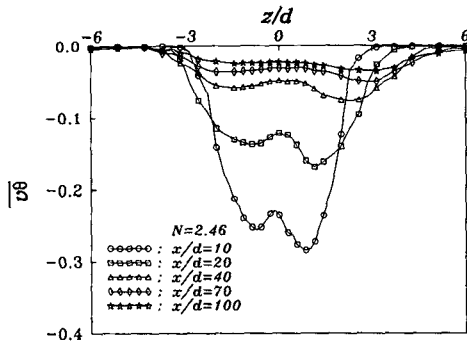


Fig. 9 Variation of the vertical turbulent heat flux  $\overline{v\theta}$

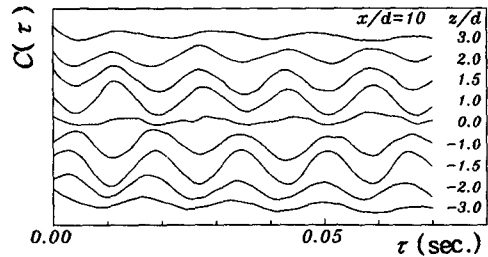
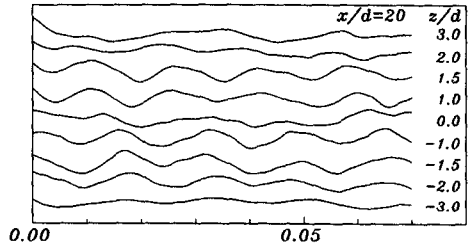
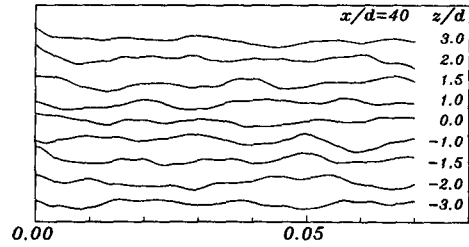


Fig. 10 Variation of the  $u-\theta$  correlation coefficient

류에서 흐름방향 속도성분은 후류중심을 기준으로 상하 180도의 위상차를 갖고 있으며, 수직방향의 속도성분은 윗부분과 아랫부분의 위상이 같다. 따라서 온도변동성분의 위상은 후류의 위, 아래에서 위상이 같음을 알 수 있으며, 또한 수직방향 속도 변동성분과 180도의 위상차가 있음을 알 수 있다. 즉 물리적으로 해석하면 안정된 성층유동에서 임의의 위치에서  $v$ 속도성분이 음의 방향으로 이동하면 따뜻한 공기가 음의 방향으로 이동하게 되므로 온도는 증가하게 된다. 또한 수직방향 성분의 절대값이 흐름방향 성분보다 상당히 크게 나타나 성층유동에서 물체후류의 경우에도 상하로의 열전달이 아주 잘 진행됨을 알 수 있으며, 두 값 모두 후류 윗부분의 절대값이 아래보다 크게되어 속도 및 온도 변동성분의 결과와 일치함을 볼 수 있다.

난류성분의 크기에 관계없이 유동장에서의 속도-온도 위상차에 의한 열전달 매카니즘을 알아보기 위하여 속도-온도 상관계수(correlation coefficient)

분포를 구해 보았다. Fig. 10, 11은 각각 흐름방향 및 수직방향의 속도변동성분과 온도변동성분의 상관계수분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 속도성분과 온도성분의 위상관계를 잘 관찰 할 수 있다. 비교적 근접 후류영역에서는 강한 코히어런트 구조의 영향으로 수직방향 뿐만 아니라 흐름방향의 속도와 온도변동성분의 관계가 주기적으로 잘 형성됨을 볼 수 있으며, 하류로 갈수록 주기가 약해짐을 알 수 있다. 즉 비교적 근접후류에서는 와류구조가 강하게 형성되기 때문에 수직방향의 속도 성분은 물론 흐름방향 속도성분도 강한 규칙성을 갖고 혼합됨을 알 수 있다.

4.4 적분시간의 변화

Fig. 12는 흐름방향 및 수직방향 속도성분에 대하여  $z/d=1.0$ 의 위치에서 적분시간의 변화를 나타내고 있다. 적분시간은 자기상관계수를 구하여 이 값이 최초로 0이 되는 시간까지 적분하여 구한

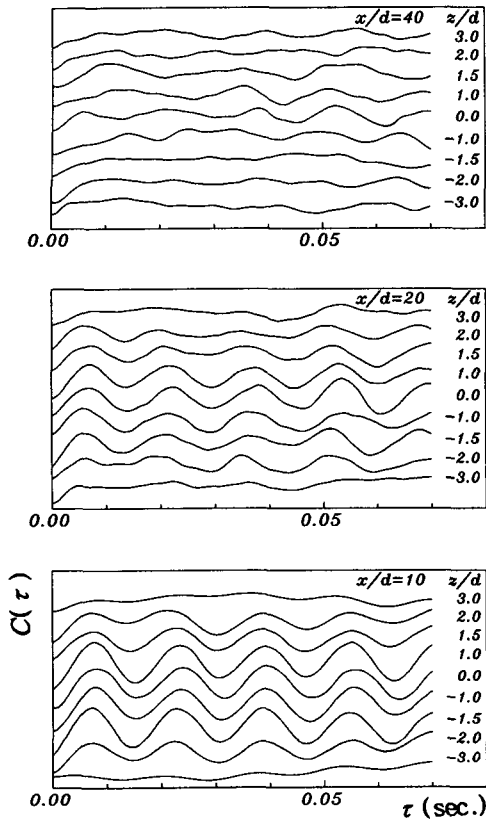


Fig. 11 Variation of the v-θ correlation coefficient

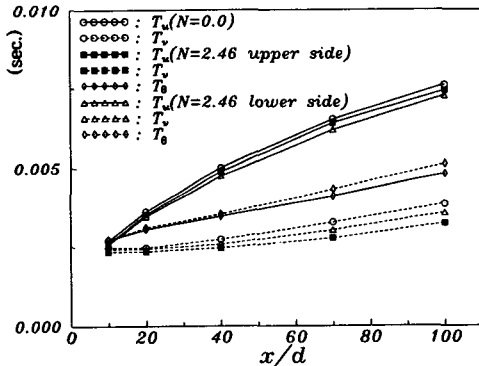


Fig. 12 Variation of the integral timescale

것이다. 그림에서 알 수 있듯이 성층유동에서 속도 성분의 경우 적분시간도 후류중심을 기준으로 비대칭 현상을 보이고 있다. 즉 후류중심 윗부분에서는  $u$  성분의 경우 아래보다 큰 값을 나타내며,  $v$  성분의 경우는 이와 반대이다. 이와 같은 현상은 후류 구조가 강한 안정화 성층의 영향으로 인하여 수직

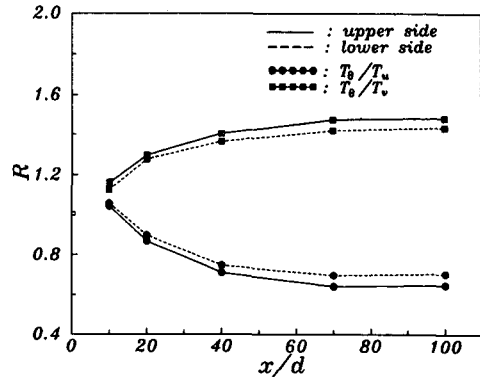


Fig. 13 Variation of the temperature and velocity timescale ratio

방향으로의 성장이 억제되면서 흐름방향으로 더 많이 신장되어지기 때문에 판단된다. 또한 중립유동과 비교하여 성층유동에서의 적분시간이 작아지는 것은 온도의 증가로 인하여 속도가 증가하기 때문으로 판단된다. Fig. 13은 같은 위치에서 온도와 속도성분에 대한 적분시간의 비를 나타내고 있다. 온도와 속도성분의 적분시간비의 변화도 후류중심을 기준으로하여 비대칭현상을 보이고 있다. 온도와  $u$  속도성분의 비는 하류로 갈수록 감소하다가 거의 일정하게 유지되며, 온도와  $v$  속도성분의 비는 반대현상을 나타내고 있다. 즉 비교적 근접후류에서는 온도성분의 적분시간이  $u$  속도성분보다 느리게 성장하다가 하류로 갈수록 성장하는 비율이 비슷하게 되어 그 값이 후류중심의 상하 각각 0.65, 0.7정도 된다. 또한 온도와  $v$  속도성분의 경우 이와는 반대현상을 보이고 있으며, 비교적 먼 후류에서는 그 값이 후류중심의 상하 각각 1.48, 1.43정도로 유지되고 있다.

### 5. 결론

컴팩트 열교환기 형식의 전기 전열기와 TRIAC 소자를 이용한 전력제어로 매우 안정되고 우수한 선형 온도분포를 임의의 형상으로 재현할 수 있는 강력한 열성층 풍동을 이용하여 온도구배 200°C/m의 열성층유동장에서 2차원 원주후류에 대한 정량적인 실험을 하였다. 교정된 열선 프로브와 냉선 프로브를 사용하여 온도구배가 있을 때와 없을 때에 대한 원주후류에서의 속도 및 온도 난류성분, 열유속 그리고 적분시간 등을 측정·분석하였으며,

이 결과 유동의 온도구배가 'active contaminant'로서 작용함이 발견되었다. 즉 강한 안정된 성층유동에서 원주후류의 구조는 후류중심에 대해 대칭성을 유지하지 못함을 볼 수 있으며, 난류량들의 값이 후류의 윗부분에서 더 크게된다. 이것은 안정적으로 성층화된 유동에 있어서 후류의 윗부분에서의 난류혼합이 아래부분보다 더 강함을 의미한다. 또한 열성층효과가 강할수록 Strouhal수는 줄어들게 되며, 먼 후류로 갈수록 수직방향의 확산이 상당히 억제되는 경향을 보인다. 적분시간의 변화는 흐름 방향에 대하여 온도에 대한 적분시간의 증가는 비교적 근접후류에서는  $u$ 속도성분의 적분시간 증가보다 적고  $v$ 속도성분의 적분시간보다는 크게 나타난다. 그러나 먼 후류로 갈수록 온도 및 속도에 대한 적분시간의 증가율은 비슷하게 유지된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Stillinger, D. C., Head, M. J., Helland, K. N. and Van Atta, C. W., 1983, "A Closed-Loop Gravity Driven Water Channel for Density-Stratified Shear Flows," *J. Fluid Mech.*, 131, pp. 73~89.
- (2) Itsweire, E. C., Helland, K. N. and Van Atta, 1986, "The evolution of grid-generated turbulence in a stably stratified fluid," *J. Fluid Mech.*, Vol. 162, pp. 299~338.
- (3) Alexopoulos, C. C. and Keffer, J. F., 1971, "Turbulent Wake in a Passively Stratified Field," *Physics of Fluids*, Vol. 14, pp. 216~224.
- (4) Sirivat, A. and Warhaft, Z., 1982, "The effect of a passive cross-stream temperature gradient on the evolution of temperature variance and heat flux in grid turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 128, pp. 323~346
- (5) Lienhard, V, J. H. and C. W. Van Atta, 1990, "The Decay of Turbulence in Thermally Stratified Flow," *J. Fluid Mech.*, 210, pp. 57~112.
- (6) Lin, J. T. and Pao, Y. H., 1979, "Wakes in Stratified Fluids," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 11, pp. 317~338.
- (7) Boyer, D. L., Davies, P. A., Fernando, H. J.S. and Zhang, X., 1989, "Linearly Stratified Flow past a Horizontal Circular Cylinder," *Phil. Trans. R. Soc. London Ser. A*, Vol. 328, pp. 501~528.
- (8) Ohya, Y. and Nakamura, Y., 1990, "Near Wakes of a Circular Cylinder in Stratified Flows," *Phys. Fluids A*, Vol. 2, No.4, pp. 481~483.
- (9) Honji, H., 1988, "Vortex motions in stratified wake flows," *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 3, pp. 425~430.
- (10) Kim, K. C. and Kim, S. K. 1992, "Wake Structure Behind a Circular Cylinder Placed in Thermally Stratified Uniform Flows," *Proceedings of 2nd KSME/JSME Thermal Engineering Conference*, Japan, Vol. 2, pp. 2~48.
- (11) Kim, K. C., 1993, "Measurements of Flow Field in a Two-Dimensional Turbulent Stratified Wake Flow," *The 5th International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurement*, Paris, France, pp. 737~744.
- (12) 김상기, 1992, "균일 열성층류 속에 놓인 원주의 후류구조에 관한 연구," 부산대학교 생산기계공학과 공학석사 학위논문.
- (13) J. R. Cho & K. C. Kim, 1993, *A Simple High-Performance Cold-Wire Thermometer*, Measurement Science and Technology, in Press.