

〈論 文〉

열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(4) — 가열량의 변화에 따른 원주후류에 대하여 —

김경천* · 정양범**

(1994년 10월 31일 접수)

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

— On the Cylinder Wake with Various Heating Rates —

Kyung Chun Kim and Yang Beom Jung

Key Words : Heated Cylinder(가열된 원주), Stratified Flow(성층유동), Heat Flux(열유속), Cylinder Wake(원주후류), Turbulent Intensity(난류강도), Phase Average(위상 평균), Coherent Structure(응집구조)

Abstract

The effects of thermal stratification on the flow past a heated circular cylinder with various heating rates were examined in a wind tunnel. Turbulent intensities, r. m. s. values of temperature and turbulent convective heat flux distributions in the cylinder wakes with and without thermal stratification were measured by using a hot-wire and cold-wire combination probe. The phase averaging method was also used to estimate coherent contributions to the turbulent flow field in the near wake. The results show that the scalar mixing process is very different according to the mean temperature fields especially in the upper part of the wake. The coherent structure of the temperature field makes a large contribution to the time mean value like velocity components. However, the coherency of the temperature fluctuation is very different with the change of mean temperature fields, though the velocity coherent motions are quite similar in all experimental conditions.

기 호 설 명

| | |
|--------------------------------|--|
| A, B, T_w : 보정상수 | Q : 순간변동성분 |
| d : 원주직경 (mm) | $\langle Q \rangle$: 위상평균 값 |
| $E(F)$: 에너지스펙트럼 | \bar{Q} : 시간평균 값 |
| F : 주파수 | T_o : 유동의 대표온도 |
| f_s : 와류유출 주파수 | U_o : 유동의 대표속도 |
| N : Brunt-Väisälä frequency | u, v, θ : 흐름방향, 수직방향 속도 및 온도 r.m.s. |
| Re : 레이놀즈수 (Reynolds number) | $\overline{u\theta}, \overline{v\theta}$: 흐름방향 및 수직방향 열유속 |
| | Ux_i : X_i 에 대한 불확실성 |
| | v_f : 기준신호 (reference signal) |
| | t : 시간 |

*정회원, 부산대학교 생산기계공학과, 기계기술연구소

**정회원, 부산대학교 기계기술연구소

| | |
|---------------------|---------|
| T_s | : 주기 |
| x, y, z | : 직교좌표계 |
| φ | : 위상 |
| $\langle \rangle$ | : 위상평균 |
| $\bar{}$ | : 시간평균 |

1. 서 론

후류에 대한 연구는 다단 터보기계의 익렬, 열교환기의 관군 및 복수의 구조물 등에서 상류측 물체의 난류후류가 하류측 물체에 미치는 유체력의 변화나 오염물질의 확산범위 등과 관련되어 공학적인 문제 뿐만 아니라 환경문제로서도 중요한 연구과제가 되어왔다. 특히 2차원 원주후류의 구조는 와류유출로 인하여 규칙성이 강한 응집구조의 특성을 가지며, 순간속도성분의 변화는 거의 사인파 형상을 나타내게 된다. 이러한 유동특성을 해석하기 위하여 많은 연구자들은 위상평균기법을 이용하여 와류유출의 주기 및 와류중심의 간격 등 와류구조를 규명하였다.⁽¹⁻³⁾ 또한 원주후류의 와류유출 특성은 자유유동의 변화나 원주 주위의 조그만 교란에 의하여 변화하게 되며, 이러한 특성으로 인해 원주 주위에 제어봉을 설치하거나 원주를 진동시켜서 유출되는 와류를 제어하는 연구도 진행되어 왔으며, 특히 Lecordier 등⁽⁴⁾은 낮은 레이놀즈수에서 원주를 가열하여 와류유출을 제어하는 연구를 하였다.

한편 스칼라량의 확산에 대한 연구는 현대 산업사회의 환경오염문제나 해양에서의 소규모 전달과정 및 화학반응에서 화학종들의 혼합과정 등을 다룰 때 아주 중요한 과제이며, 특히 유체가 성층화되면 관성 및 점성력은 물론 중력의 영향도 작용하게 되므로 스칼라량의 확산과정은 더욱 복잡한 양상으로 나타난다. 실험실에서 가장 쉽게 발생시킬 수 있는 스칼라량의 거동으로는 유동에 온도변화를 주는 것이며, 몇몇 연구자들은 후류의 유입과정과 난류 비난류역의 경계를 규명하고 스칼라량의 전달 과정을 이해하기 위하여 가열된 실린더후류의 유동특성을 연구하였다.⁽⁵⁻⁸⁾ Fabris⁽⁵⁾는 실린더의 가열을 약하게 하여 먼 후류에 대한 실험을 하였으며, Antonia와 Browne⁽⁶⁾은 실린더후류의 자기보존 영역에서 열유속을 측정하였다. Ferre와 Giralt⁽⁷⁾은 가열된 실린더후류에 대한 유입과정을 중점적으로 연구하였으며, 특히 최근에 Matsumura와

Antonia⁽⁸⁾는 조건부추출기법(conditional sampling technique)을 이용하여 가열된 실린더후류의 운동량 및 열전달현상에 대한 실험연구를 하였다. 그러나 이들의 실험에서는 모두 측정지점에서의 온도 증가량이 1°C 이하로 실린더의 가열을 약하게 하였으며, 부력의 효과는 무시되었다.

또한 물체를 지나는 공기의 열성층효과에 대한 연구는 산업폐수와 같은 오염원에 의해 야기되는 인간 거주영역이나 3차원 지형주위의 환경적 효과를 평가하기 위해 아주 중요하며, 물체를 지나는 성층유동의 후류에 대하여는 몇몇 실험가들이 원주나 구에 대한 연구논문을 발표하였다.⁽⁹⁻¹²⁾ Lin과 Pao⁽⁹⁾는 원주를 지나는 성층유동에 대하여 연구하였으며, Boyer 등⁽¹⁰⁾은 광범위한 내부 Froude 수와 레이놀즈수에 대하여 수평원주를 지나는 선형적으로 성층화된 유체의 균일유동에 대하여 연구하였다. Ohya와 Nakamura⁽¹¹⁾는 유동가시화와 와류유출 주파수 측정기법을 이용하여 원주의 근접후류에 대한 실험연구를 하였다. 특히 최근에 Kim 등⁽¹²⁾은 온도구배가 200°C/m인 강한 성층유동장 내의 원주후류에 대하여 연구하였다.

그러나 스칼라량의 수송과정을 연구하기 위한 지금까지의 실험연구는 가열된 실린더후류에 대한 스칼라량의 확산이나 실린더후류의 성층효과에 대한 실험이 따로 이루어졌으며, 두 현상을 동시에 고려하는 실험연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시간평균과 위상평균기법을 이용하여 중립유동장 뿐만 아니라 온도구배가 105°C/m인 성층유동장 내에서 원주의 가열량을 변화하면서 원주후류에 대하여 속도와 온도신호를 동시에 측정하여 후류의 유동특성을 비교, 분석하고 이에 대한 열성층 효과를 규명하고자 한다.

2. 실험조건 및 측정방법

본 실험에서는 콤팩트 열교환기 형식의 전기전열기와 TRIAC 소자로 제어되는 온도구배 발생기를 내장한 풍동을 사용하여 105°C/m($N=1.8$)의 선형 온도구배를 형성시킨 안정된 성층유동장과 중립유동장($N=0.0$) 내에서 원주의 가열량을 변화하면서 원주후류에 대한 실험을 하였다. 풍동의 제원에 대한 상세한 사항은 이전의 연구논문⁽¹³⁾에 잘 설명되어 있으며, 원주의 가열은 원주 내부에 60Ω의 열선을 내장하여 자동전압 조정기로 안정된 전압을

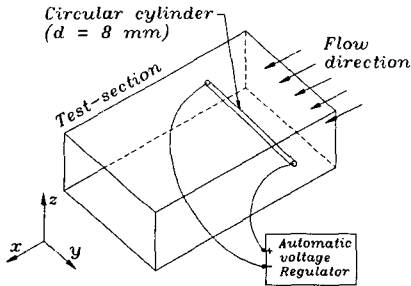


Fig. 1 Schematic of the heating system of circular cylinder

공급하는 방법으로 하였다. 가열량은 0, 15, 60, 135 및 240W로 하였으며, 이하의 내용에서는 가열의 정도에 따라 차례로 case1, case2, case3, case4 및 case5로 표기하겠으며, case 1은 실린더의 가열이 없는 경우를 나타낸다. Fig. 1은 열성층 풍동의 시험부에 설치된 가열원주의 개념도와 직교 좌표계를 나타낸다. 실험에 사용된 원주의 직경은 8 mm이며, 흐름방향의 측정위치는 $x/d=8.0$ 으로 하였다. 열성층이 없을 경우(neutral)의 자유흐름 평균속도는 2.3 m/sec 이며, 이때 평균속도의 측정은 1 파스칼의 측정범위에서 약 2%의 오차범위를 갖는 FC012 마이크로마노메터를 이용하였다.

순간속도성분의 측정은 정온 열선풍속계(TSI 2-CH, Model 1054A)를 이용하였고, 측정센서는 DANTEC Model 55P61 X형 열선 프로브를 사용하였다. 순간온도성분의 측정은 DC 브릿지형 온도 측정회로⁽¹⁴⁾를 사용하였으며, 온도측정 센서는 DANTEC Model 55P31 I형 프로브를 이용하였다. 이 두 프로브의 지지는 위치조정이 가능한 장치로 이루어지며, 두 센서 사이의 간격을 1 mm 이하로 조절하여 측정하였으며, 센서이송은 컴퓨터 온라인으로 자동이송되도록 하였다. X형 프로브의 신호는 정온 열선풍속계에 의해 검출되어 D6000 범용 파형분석기(data precision, model 601 universal waveform analyzer) 내의 연산기를 통하여 디지털 신호로 전환된 뒤 GPIB 카드로 D6000과 연결된 컴퓨터의 하드디스크에 저장된다. 또한 I형 프로브의 신호는 온도 측정회로와 D6000을 통하여 컴퓨터 하드디스크에 기록된다. 각 측정지점에 대한 자료의 추출간격은 100 μ s로 하였으며, 1회 측정당 4096개의 자료를 20번씩 측정하여 ensemble 평균을 취하였다. 각종 난류신호의 분석은 오프라인 프로그램으로 수행되었다.

온도가 변화하는 유동장에서 난류유동현상을 분석하기 위하여는 온도와 속도를 동시에 측정해야 하며, 또한 온도가 변화하여도 정확하게 속도를 측정할 수 있는 보정방법이 필요하다. 본 실험에서 센서의 보정은 온도의 변화에도 열선과 유동장 사이의 열전달현상을 잘 표현해 주는 수정된 King의 법칙을 이용하였으며,⁽¹⁵⁾ 이에 대한 결과는 아래 식으로 표현된다.

$$E^2 = (T_w - T)(AT_f^{0.84} + BV^n) \quad (1)$$

$$T_f = (T_w + T)/w$$

여기서, E 는 열선프로브의 출력전압, A, B, T_w 는 보정에 의해 구해지는 상수이며, 지수 n 은 보통 0.45를 사용한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균 및 난류특성의 변화

Fig. 2는 중립유동과 성층유동장 내에서 원주후류에 대한 평균온도분포 형상의 변화를 나타내고 있다. 중립유동의 경우 가열된 원주후류의 평균온도 분포형상은 가우스분포와 비슷하게 나타남을 볼 수 있다. 성층유동에서는 원주를 가열하지 않을 경우 후류중심을 기준으로 윗부분은 열 결손이 생기고 아랫부분에서는 이와 반대의 현상이 나타나며 거의 S자 형상을 보이지만 원주의 가열로 인한 추가의 열이 공급되면 평균온도를 증가시키게 되어 후류 중심을 기준으로 아래에서는 S자 형상을 더욱 확대시키지만 윗부분에서는 S자 형상을 소멸시키게 되어 후류의 윗부분 가장자리 부근에 국소 등온영역을 형성하게 된다. 따라서 이러한 평균온도형상의 변화는 뒤에서 다룰 후류의 열유속변화 등에 많은 영향을 주게 된다.

Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5는 각각 중립유동과 성층유동에서 흐름방향 및 수직방향 속도성분의 난류강도 변화와 온도 r.m.s. 값의 변화를 보여 준다. 속도성분에 대한 난류강도의 변화는 근접후류에서는 강한 응집구조(coherent structure)가 유동장을 지배하기 때문에 온도장의 변화에 거의 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 전체 난류성분에 대해 응집구조가 차지하는 비율은 흐름방향 속도성분의 경우 약 55%, 수직방향 속도성분의 경우 약 75% 정도로서 수직방향 속도성분의 응집구조가 더 강함을 알 수 있다.

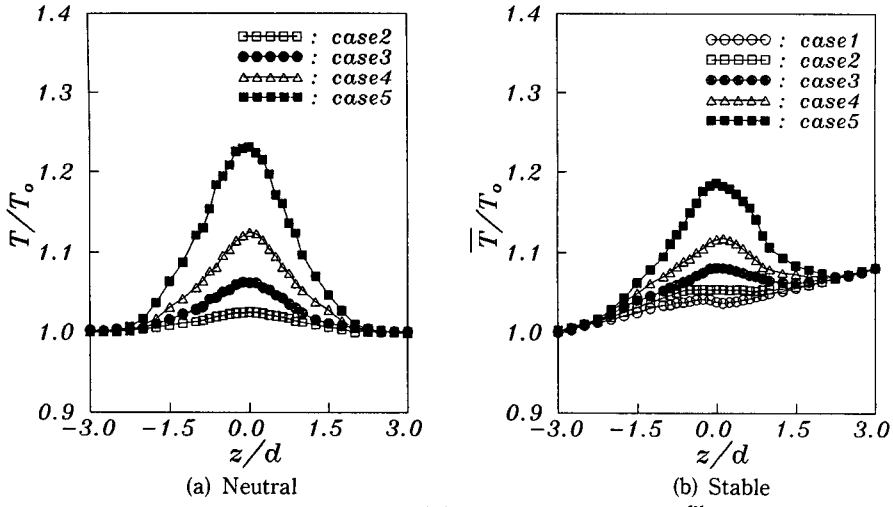


Fig. 2 Distributions of the mean temperature profiles

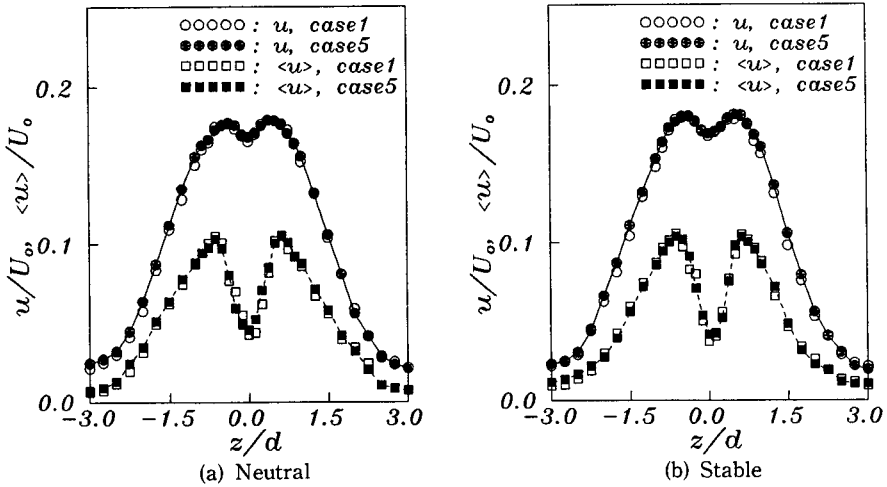


Fig. 3 Distributions of the streamwise turbulent intensities

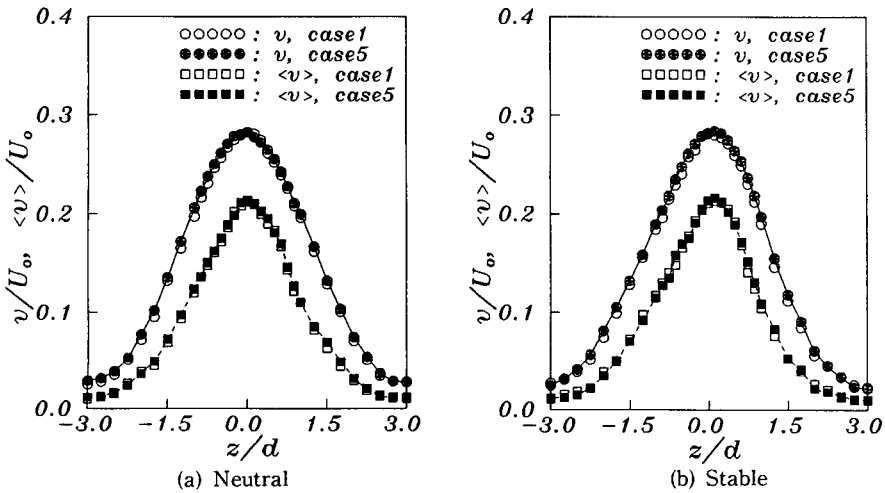


Fig. 4 Distributions of the vertical turbulent intensities

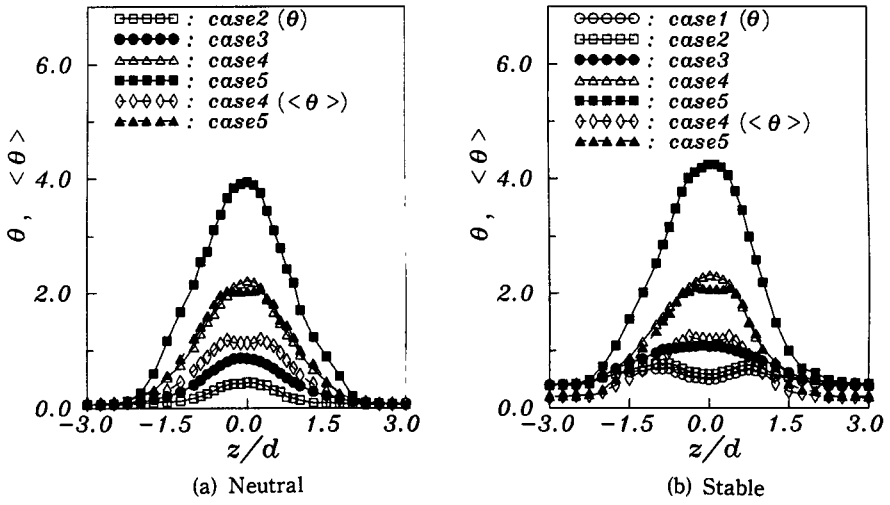


Fig. 5 Distributions of the temperature r.m.s

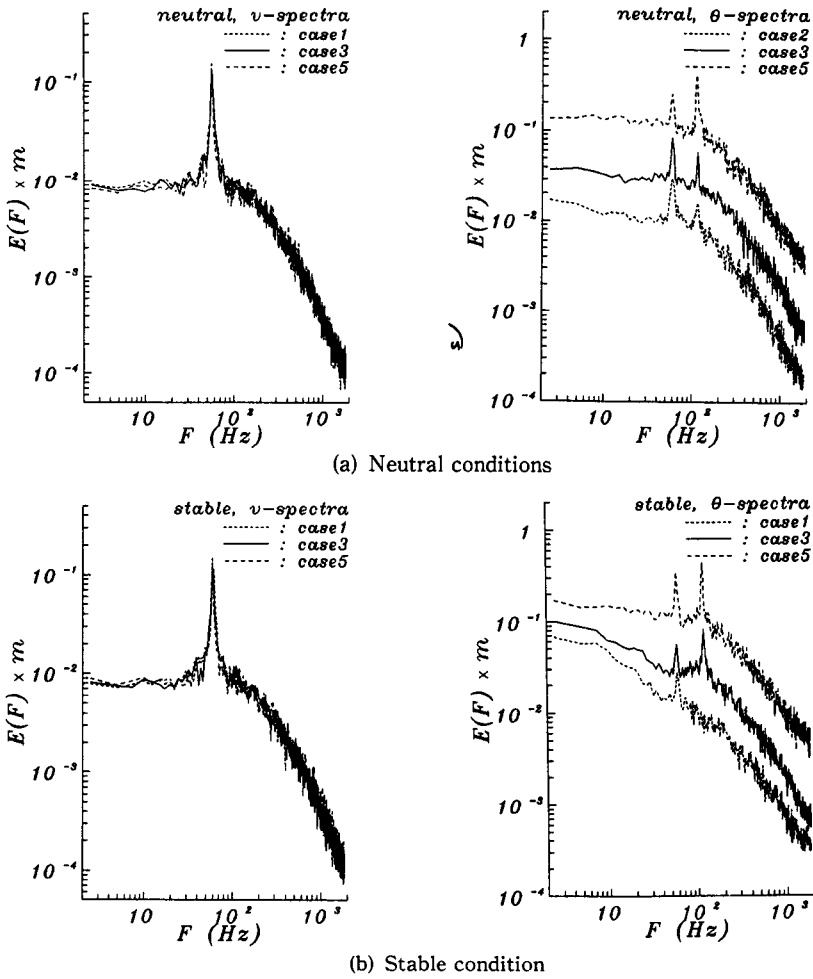


Fig. 6 Distributions of the energy spectra

온도 r.m.s. 값의 변화는 중립유동의 경우 후류 중심에서 최대값을 갖고 대칭형상을 나타내며 가열량의 증가와 함께 온도변동량의 크기도 증가한다. 그러나 성충유동에서는 원주를 가열하지 않을 경우 후류중심을 기준으로 쌍봉을 이루게 된다. 이러한 현상은 가열량이 적을 경우에도 나타나지만 가열량이 증가하면 후류중심에서 최대값을 갖는 중립유동의 경우와 비슷하게 분포한다. 일반적으로 후류영역에서 온도 r.m.s. 값의 크기는 유동의 난류성분 영향도 받지만 혼합되는 유체의 평균온도구배 영향을 더 많이 받게 된다. 따라서 이와같은 현상은 평균온도 분포에서도 보았듯이 성충유동에서 가열량의 변화에 따라 후류의 열거동이 서로 다르게 나타나기 때문으로 볼 수 있다. 온도변동성분의 경우 응집구조는 후류중심 부근에서 비슷한 세기로 분포하며, 전체 난류성분에 대하여 응집구조가 차지하는 비율은 약 52% 정도이며, 속도성분보다는 작지만 응집구조가 강하게 존재함을 알 수 있다.

이와같은 난류량의 변화는 에너지스펙트럼을 통하여도 잘 알 수 있다. Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)는 후류중심에서 수직방향 속도성분과 온도신호에 대한 스펙트럼의 변화를 나타내고 있다. 수직방향 속도성분의 경우 온도장의 변화에 관계없이 거의 비슷한 분포를 보이고 있지만 온도신호의 경우 가열량이 증가할수록 스펙트럼의 크기도 증가함을 알 수 있으며, 이러한 결과는 난류강도의 변화와 일치하고 있다.

한편 STROUHAL 수는 원주의 가열량에 관계

없이 일정한 값(약 0.21)을 보이고 있으며, 이러한 결과는 본 실험의 레이놀즈수(약 1000) 범위에서는 원주의 가열에 의해서는 와류유출이 제어되지 않음을 나타낸다. 원주의 가열에 의한 와류유출의 제어는 Lecordier 등⁽⁴⁾의 연구결과에 잘 나와 있으며, 그들은 레이놀즈수가 80 이하일 경우 가열량의 정도에 따라 와류유출을 억제할 수 있다고 하였다. 가열된 원주후류의 경우 온도스펙트럼의 피크치는 두 곳에 나타남을 볼 수 있으며, 이와 관련된 설명은 뒤에 나오는 위상평균 부분에서 다루질 것이다.

3.2 열유속의 변화

난류유동장에서 대류 열전달은 아래식으로 표현된다.

$$q_i = \rho c_p \overline{u_i \theta} \tag{2}$$

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

$$\frac{q_x}{\rho c_p} = \overline{u \theta} \tag{3}$$

$$\frac{q_z}{\rho c_p} = \overline{v \theta} \tag{4}$$

열유속의 정도는 온도와 속도 난류성분의 크기 뿐만 아니라 이들의 위상관계에 따라 달라지게 됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 흐름방향 열유속 $\overline{u \theta}$ 의 분포를 나타낸

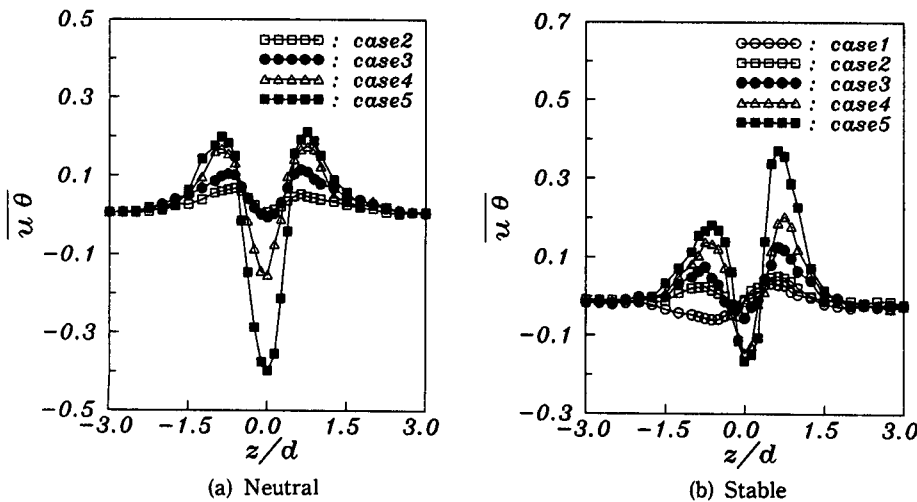


Fig. 7 Distributions of $\overline{u \theta}$ correlations

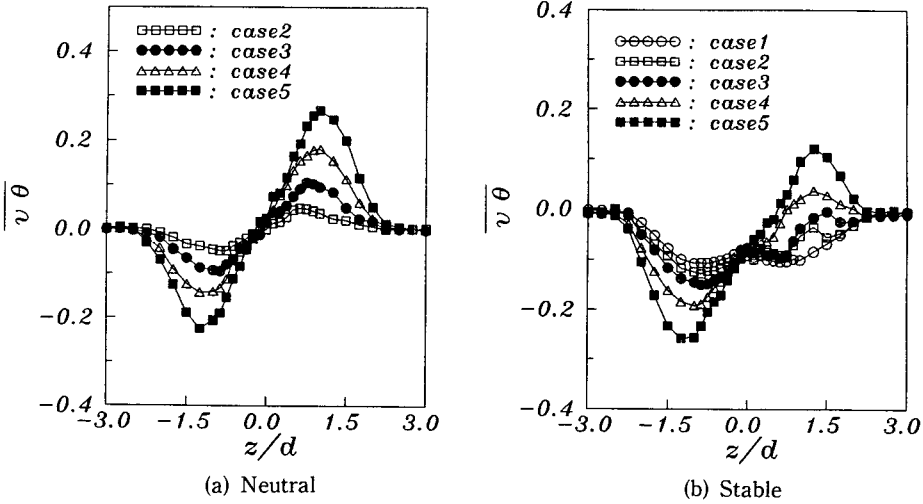


Fig. 8 Distributions of $\overline{u\theta}$ correlations

다. 중립유동의 경우 $\overline{u\theta}$ 의 분포는 후류중심을 기준으로 거의 대칭형상을 보이며, 후류 위, 아래의 와류중심 부근에 양의 최대값이 존재하고 후류중심에 음의 최대값이 존재한다. 이러한 현상은 Matsumura와 Antonia⁽⁸⁾의 연구 결과에도 잘 나타나 있으며, 그들의 연구결과에 의하면 근접후류와 먼 후류의 중간영역에서는 흐름방향 열유속의 변화가 심하게 발생하며 하류로 갈수록 후류의 위,아래에 존재하는 양의 최대값이 소멸되고 결국 먼 후류에서는 후류의 위,아래에 음의 쌍봉을 갖는다고 하였다. 한편 이와같은 열유속의 변화는 성층유동장에서는 아주 다르게 나타나게 된다. 성층유동에서 $\overline{u\theta}$ 의 분포는 원주를 가열하지 않았을 경우 후류의 윗부분에서는 다운공기가 유입되고 후류의 아랫부분에서는 찬공기가 유입되므로 후류중심을 기준으로 점대칭형상을 나타내게 된다. 그러나 성층유동장에서 원주를 가열한 경우 중립유동의 경우와 비슷한 형태를 보이지만 후류의 윗부분에서 더 큰 값을 갖는 비대칭형상을 보인다.

Fig. 8은 수직방향 열유속 $\overline{v\theta}$ 의 분포를 나타낸다. 중립유동의 경우 $\overline{v\theta}$ 의 분포는 후류 중심을 기준으로 부호가 바뀌는 점대칭형상을 보이며, 후류 중심에서 수직방향으로 멀어질수록 난류성분에 의한 열유속이 증가하여 그 양상이 레이놀즈 전단응력의 분포와 비슷하다. 이러한 현상은 원주의 가열로 인하여 후류중심으로부터 열이 상하로 전달되고 있음을 나타내며, 열원이 유동의 중심에 있기 때문

에 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 그러나 성층유동장의 경우 $\overline{v\theta}$ 의 분포는 평균온도장의 변화에 따라 다르게 나타나며, 특히 후류의 윗부분에서 그 차이가 심하게 발생한다. 원주를 가열하지 않았을 경우 후류의 위,아래에서 수직방향 속도변동과 온도변동의 위상관계는 180도의 편차를 갖게되며, 따라서 음의 쌍봉을 이루면서 후류 전영역에서 음의 값을 갖게 되지만, 원주를 가열하게 되면 후류의 윗부분에서 열유속의 변화가 많이 발생한다. 즉 원주의 가열량이 증가할수록 후류의 윗부분에서 양의 방향으로의 열유속이 증가하게 되어 결국 중립유동에서처럼 양의 최대값을 갖는 점대칭 형상을 보인다. 이러한 현상은 성층유동장에서 가열된 원주후류의 경우 $\overline{v\theta}$ 의 분포는 후류의 아랫부분에서는 유동의 중심에서 열을 받아 음의 방향으로 열전달을 더욱 증가시키지는 결과로 나타나지만, 후류의 윗부분에서는 자유유동의 온도구배로 인하여 위에서 아래로 발생하는 열전달과 실린더의 가열로 인하여 후류중심으로부터 위로의 열전달이 서로 상쇄되어지는 양상을 나타내게 되며, 따라서 자유유동의 성층화 정도와 원주의 가열로 인한 온도장의 정도에 따라 열유속의 부호가 다르게 된다고 볼 수 있다.

3.3 위상평균에 의한 속도 및 온도성분의 변화

주기적 성질이 강하게 존재하는 난류 전단흐름에서는 대규모 응집구조가 혼합, 유입 및 열전달에 크게 영향을 주게 되며, 이러한 응집구조의 영향을

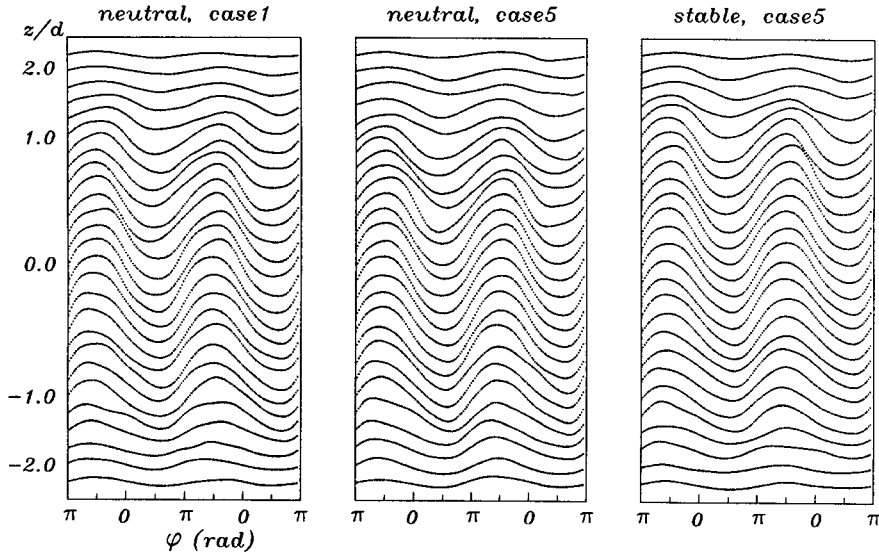


Fig. 9 Distributions of phase averaged velocity

평가하기 위하여는 위상평균법이 유리하다. 따라서 후류에 대한 속도장의 특성을 분석하기 위하여 위상평균법으로 후류구조를 연구한 예는 많이 있다.^(1~3) 그러나 이 방법을 온도장에 적용한 예는 몇몇 연구에 불과하다.^(7,8) 본 연구에서는 원주의 가열량 변화에 따른 열후류의 응집구조 변화를 연구하기 위하여 위상평균법으로 분석하였다. 위상평균을 위한 기준신호(reference signal)로는 수직방향 속도신호를 이용하였으며, 위상 φ 는 아래와같이 계산된다.

$$\varphi = \pi \left(\frac{t - t_{1,i}}{t_{2,i} - t_{1,i}} \right) \quad (t_1 \leq t \leq t_{2,i}) \quad (5)$$

$$\varphi = \pi \left(\frac{t - t_{2,i}}{t_{1,i} - t_{2,i}} \right) + \pi, \quad (t_{2,i} \leq t \leq t_{1,i}) \quad (6)$$

여기서, $t_{1,i}$ 및 $t_{2,i}$ 는 각각 $v_f=0$ 이고 $dv_f/dt > 0$ 인 순간과 $v_f=0$ 이고 $dv_f/dt < 0$ 인 순간을 나타내며, v_f 는 디지털 필터를 거친 기준신호를 나타낸다. $t_2 - t_1 = \frac{1}{2} T_s$ ($T_s \equiv f_s^{-1}$ 즉, 평균 와류유출주파수의 절반이 되는 값으로 이 간격을 36등분하여 위상평균을 하였으며, 위상평균에 이용된 전체 주기는 400 정도이다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 각각 주기성이 강한 근접후류에서 수직방향 속도성분과 온도에 대한 위상평균을 나타내고 있다. 위상평균에 의한 속도성분의 분포는 온도장이 변화하여도 비슷하게 나타나고 있으며, 따라서 주기성이 강한 근접후류에서 속도의 응집구조는 온도장의 영향을 거의 받지 않음을 알 수

있다. 그러나 열후류의 응집구조는 평균온도의 분포형상에 따라 다르게 나타난다. 즉 성층유동 내의 가열되지 않은 원주후류의 경우 위상평균에 의한 온도변동의 주기는 속도변동의 주기와 같으며 위상은 수직방향 속도성분과 180도의 편차를 갖고 후류의 넓은 영역에서 비슷한 분포를 나타내게 된다. 그러나 가열된 실린더후류의 경우 성층유동과 중립유동 모두 후류중심 부근에서는 주파수가 두배로 늘어나고 있음을 볼 수 있으며, 그 범위는 가열량이 클수록 증가하게 된다. 이러한 현상은 온도의 스펙트럼분포에 잘 나타남을 볼 수 있다. Fig. 11은 후류영역에서 온도신호에 대한 스펙트럼의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 성층유동에서 원주를 가열하지 않았을 경우 최대주파수가 하나만 존재하지만 가열원주의 후류에서는 성층유동 및 중립유동 모두 후류중심 부근에서 피크주파수가 두곳에 나타남을 볼 수 있다. 이와같은 현상은 근접후류에서는 유동의 강한 응집구조로 인하여 소규모 혼합(small-scale mixing)이 잘 이루어지지 않게 되고 외부에서 유입된 유체와 가열된 내부의 유체가 각각 덩어리 형태를 유지하며, 이러한 응집구조의 전후 사이에 온도차이가 크게 존재함을 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 온도구조는 낮은 레이놀즈수 ($Re=98$) 에서 실험한 Mi와 Antonia⁽¹⁶⁾의 결과에도 나타나며, 그들은 이러한 온도구조의 형성은 와류중심 부근, 즉 후류중심 및

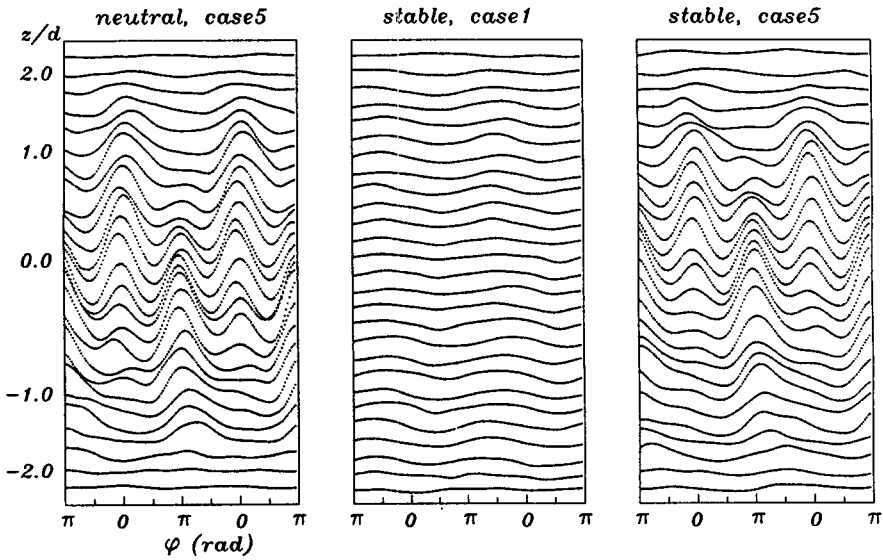


Fig. 10 Distributions of phase averaged temperature

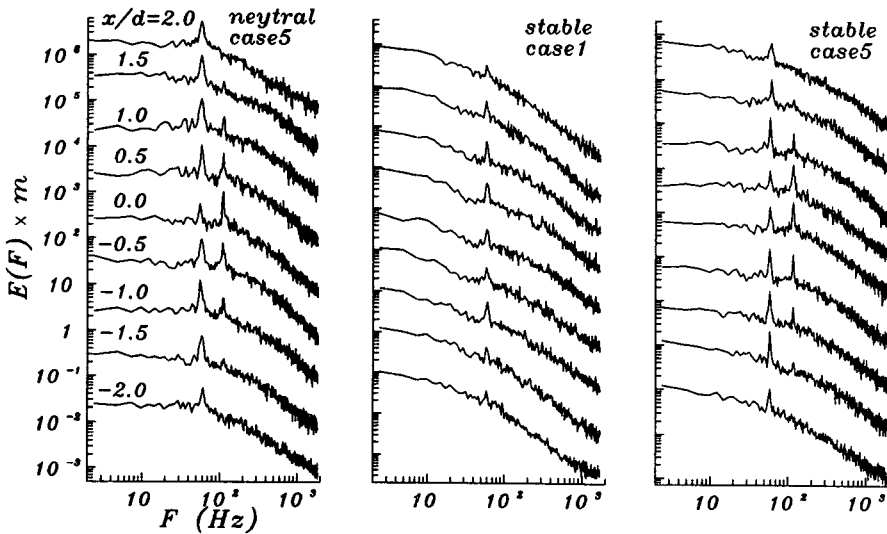


Fig. 11 Distributions of temperature spectra along vertical direction

부분의 경우 위상이 0인 위치에서 최대온도지점이 형성되고 그 중간, 즉 위상이 π 인 위치에 나타나는 또 하나의 주기는 엇갈려 나타나는 반대방향 와류의 영향을 받기 때문이라 하였다.

3.4 불확실성 해석

난류 측정값들 즉 난류강도 및 열유속 등에 대한 불확실성의 추정(uncertainty analysis)은 아래와 같은 방법으로 하였다. 결과 R 는 K 개의 독립변수

X_i 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$R = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \tag{7}$$

여기서, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ 는 각각 불확실성을 포함하는 변수들이다. 각각의 독립변수에 대한 불확실성이 추정되어지면 결과에 대한 전 불확실성 (total uncertainty)은 아래의 식으로 주어진다.

$$U_R = [(\frac{\partial R}{\partial X_1} U_{X_1})^2 + \frac{\partial R}{\partial X_2} U_{X_2})^2 + \dots]$$

Table 1 Uncertainty interval

| $\frac{U_u}{U} \times 100(\%)$ | $\frac{U_v}{U} \times 100(\%)$ | $\frac{U_\theta}{T} \times 100(\%)$ | $\frac{U_{u\theta}}{UT} \times 100(\%)$ | $\frac{U_{v\theta}}{UT} \times 100(\%)$ |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| 3.28 | 3.32 | 2.14 | 3.92 | 2.95 |

$$+ \left. \frac{\partial R}{\partial X_k} U_{X_k} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

여기서, U_{X_i} 는 측정된 변수 X_i 의 불확실성이다. 일반적으로 95%의 신뢰도 범위에서 불확실성을 계산하는 경우가 많으며^(17,18) 본 해석에서도 이 범위를 선택 하였다. 열유속에 대한 불확실성은 식(8)을 이용하여 후류의 전 영역에서 계산하였으며 불확실성의 범위가 최대인 지점은 와류중심 부근이었다. Table 1에는 불확실성이 최대가 되는 값을 나타내었다.

4. 결 론

교정된 열선프로브와 냉선프로브를 이용하여 온도구배가 있을 경우와 없을 경우 원주의 가열량을 변화하면서 원주후류에서의 속도 및 온도 난류성분, 열유속 등을 측정, 분석하였으며, 위상평균법으로 근접후류에 대한 온도의 응집구조를 분석하였다. 이 결과 근접후류에서는 강한 응집구조가 유동장을 지배하기 때문에 유동장은 온도장의 변화에 거의 영향을 받지 않는다. 그러나 중립유동과 성층유동에 대하여 가열된 실린더 후류의 열 거동 양상은 완전히 다르게 나타난다. 즉 중립유동의 경우 온도 난류성분 및 열유속 등의 분포는 후류중심을 기준으로 거의 대칭현상을 나타내며 가열량이 증가할수록 큰 값을 나타낸다. 그러나 성층유동에서는 특히 열유속의 경우 강한 비대칭을 보이며, 가열량의 차이에 따라 그 분포양상이 다르게 나타난다. 또한 온도성분도 응집구조가 강하게 존재함을 알 수 있으며, 열응집구조의 유출주파수는 와류유출주파수의 두배가 된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Davies, J. R., 1976, "A Comparison of the Wake Structure of a Stationary and Oscillating Bluff Body," *J. Fluid Mech.*, Vol. 75, pp. 209~231.
- (2) Boisson, H. C., Chassaing, P. and Ha Minh, H., 1983, "Conditional Analysis of Intermittency in the Near Wake of a Circular Cylinder," *Phys. Fluid*, Vol. 26, pp. 653~658.
- (3) Kiya, M. and Matsumura, M., 1985, "Turbulence Structure in Intermediate Wake of a Circular Cylinder," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, pp. 2617~2623.
- (4) Lecordier, J. C., Hamma, L. and Paranthoen, P., 1991, "The Control of Vortex Shedding Behind Heated Circular Cylinders at Low Reynolds Numbers," *Experiments in Fluids*, Vol. 10, pp. 224~229.
- (5) Fabris, G., 1979, "Conditional Sampling Study of the Turbulent Wake of a Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, pp. 673~709.
- (6) Antonia, R. A. and Browne, L. W. B., 1986, "Heat Transport in a Turbulent Plane Wake," *J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 1585~1592.
- (7) Ferre, J. A. and Giralt, 1989, "Some Topological Features of the Entrainment Process in a Heated Turbulent Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 198, pp. 65~78.
- (8) Matsumura, M. and Antonia, R. A., 1993, "Momentum and Heat Transport in the Turbulent Intermediate Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 250, pp. 651~668.
- (9) Lin, J. T. and Pao, Y. H., 1979, "Wakes in Stratified Fluids," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 11, pp. 317~338.

- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 김경천, 정양범, 강동구, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(2)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1322~1329.
- (13) 김경천, 정양범, 김상기, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(1)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제3호, pp. 690~700.
- (14) Cho J. R. and Kim, K. C. 1993, "A Simple High-Performance Cold-Wire Thermometer," *Meas. Sci. Technol.*, 4, pp. 1346~1349.
- (15) Lienhard V, J. H. and Van Atta, C. W, 1990, "The Decay of Turbulence in Thermally Stratified Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 210, pp. 57~112.
- (16) Mi, J. and Antonia, R. A., 1994, "Temperature Distribution Within Vortices in the Wake of a Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37., pp. 1048~1050.
- (17) Yavuzkurt, S., 1984, "A guide to uncertainty Analysis of Hot-Wire Data," *J. Fluids Engineering*, Vol. 106, pp. 181~186.
- (18) Moffat, R. J., 1982, "Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis," *Transactions of the ASME*, Vol. 104, pp. 250~260.