

(論文)

가열된 원주후류의 열성층 영향에 대한 연구

김경천* · 정양범**

(1994년 3월 18일 접수)

A Study on the Effect of Thermal Stratification of a Heated Cylinder Wake

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 Averaged Temperature(위상평균온도)

Abstract

The effects of thermal stratification on the flow of a stratified fluid past a heated circular cylinder were examined in a wind tunnel. Turbulent intensities, rms values of temperature and turbulent convective heat flux distributions in the heated cylinder wake with and without thermal stratification were measured by using a hot-wire and cold-wire combination probe. A phase averaging method was also used to estimate coherent motion in the near wake. It is found that the vertical turbulent motion in the stably stratified flow case dissipates faster than that of the neutral case, i.e., vertical growth of vortical structure is suppressed under the strongly stratified condition. The coherent motion of temperature makes a large contribution like velocity coherent motion. However, the coherent motions of temperature fluctuation become very different with the change of experimental conditions, though the velocity coherent motions are quite similar in all experimental conditions.

기호설명

- A, B, T_w : 교정상수
- b_w, b_0 : 속도 및 온도 후류반폭(wake half width)
- $C(\tau)$: 상관계수(correlation coefficient)
- d : 원주직경(mm)
- N : Brunt-Väisälä frequency
- Re : 레이놀즈수(Reynolds number)
- $\langle T \rangle$: 위상평균온도
- \bar{T} : 시간평균온도
- T_0 : 유동의 대표온도
- U_0 : 유동의 대표속도
- u, v, θ : 흐름방향, 수직방향 및 온도 rms

- $\overline{u\theta}, \overline{v\theta}$: 흐름방향 및 수직방향 열유속
- x, y, z : 직교좌표계
- τ : 지연시간

1. 서론

후류에 대한 연구는 고층빌딩과 같은 지상 구조물의 내풍안정성과 벽면의 저항 등과 같은 유체력이나 또는 오염물질의 확산범위와 관련되어 공학적인 문제 뿐만 아니라 환경문제로서도 중요한 연구과제가 되고 있다. 특히 스칼라량의 확산에 대한 연구는 현대 산업사회의 환경오염 문제나 해양에서의 소규모 전달과정 및 화학 반응에서 화학종들의

*정회원, 부산대학교 생산기계공학과

**정회원, 부산대학교 기계기술연구소

혼합과정 등을 다룰 때 아주 중요한 과제이며, 실험실에서 가장 쉽게 발생시킬 수 있는 스칼라량의 거동으로는 유동에 온도변화를 주는 것이다. 따라서 몇몇 연구자들은 후류의 유입과정과 난류 비난류역의 경계를 규명하고 스칼라량의 전달과정을 이해하기 위하여 가열된 실린더 후류의 유동특성을 연구하였다. Fabris⁽¹⁾는 실린더의 가열을 약하게 하여 먼 후류에 대한 실험을 하였으며, Ferre와 Giralt⁽²⁾ 등은 가열된 실린더 후류에 대한 유입과정을 중점적으로 연구하였다. Antonia와 Browne⁽³⁾ 등은 실린더 후류의 자기보존 영역에서 열유속을 측정하였으며, 특히 최근에 Matsumura와 Antonia 등⁽⁴⁾은 조건부 추출기법을 이용하여 가열된 실린더 후류의 운동량 및 열전달현상에 대한 실험연구를 하였다. 그러나 이들의 실험에서는 모두 측정지점에서 온도 증가량이 1°C 이하로 실린더의 가열을 약하게 하였으며, 부력의 효과는 무시되었다.

한편 유체가 성층화되면 관성 및 점성력은 물론 중력의 영향도 작용하게 되므로 성층유체 속에서의 유동현상은 중립상태일 경우와는 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, 특히 난류유동에 의한 대류 열전달현상은 공학적 응용 범위나 실용적 측면에서의 중요성에 비추어 볼때, 열·유체 공학자들이 관심을 가지고 규명해야 할 매우 중요한 문제중 하나이다. 또한 물체를 지나는 공기의 열성층 효과에 대한 연구는 산업폐수와 같은 오염원에 의해 야기되는 인간 거주영역이나 3차원 지형주위의 환경적 효과를 평가하기 위해 아주 중요하다. 물체를 지나는 성층유동의 후류에 대하여는 몇몇 실험자들이 원주나 구에 대한 연구논문들을 발표하였다.⁽⁵⁻⁸⁾ Lin과 Pao⁽⁵⁾는 원주를 지나는 성층유동에 대하여 연구하였으며, Boyer 등⁽⁶⁾은 광범위한 내부 Froude수와 Reynolds수에 대하여 수평원주를 지나는 선형적으로 성층화된 유체의 균일유동에 대하여 연구하였다. Ohya와 Nakamura⁽⁷⁾는 유동가시화와 와류유출 주파수 측정기법을 이용하여 원주의 근접후류에 대한 실험 연구를 하였다. 특히 최근에 Kim et al 등⁽⁸⁾은 온도구배가 200°C/m인 강한 성

층유동의 실린더 후류에 대한 연구를 대한기계학회에 발표한 바 있다. 그러나 스칼라량의 수송과정을 연구하기 위한 지금까지의 실험은 가열된 실린더 후류에 대한 스칼라량의 확산이나 실린더 후류의 성층효과에 대한 실험이 따로 이루어 졌으며, 두 현상을 동시에 고려하는 실험 연구는 아직 발표된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 온도구배가 225°C/m인 강한 성층유동 내에서의 가열된 원형실린더 후류와 중립유동에서의 가열된 실린더 후류에 대한 실험을 하여 후류의 유동 특성을 비교 분석하고 이에 대한 열성층 효과를 규명하고자 한다.

2. 실험조건 및 측정방법

본 실험에서는 열교환기 형태의 온도구배 발생기를 내장한 풍동⁽⁹⁾을 사용하여 225°C/m의 강한 선형 온도구배를 형성시킨 안정된 성층유동장과 중립유동장 내에서의 가열된 원형실린더 후류에 대한 실험을 하였다. 이때 Brunt-Väisälä frequency, $N = 2.59$ 정도이며, $N = (g/T_0 \cdot dT/dz)^{1/2}$ 로 정의된다. 여기서, z 는 윗방향이 "양"인 수직좌표, g 는 중력가속도 그리고 T_0 는 시험부 중심에서의 절대온도를 나타낸다. 실린더의 가열을 위하여 실린더 내부에 60Ω의 열선을 내장하여 자동전압 조정기로 안정된 전압을 공급하였으며, 가열량은 350 W 정도로 하였다. Fig. 1은 열성층 풍동의 시험부와 유동의 개념도를 나타낸다. 실험에 사용한 원주의 직경은 8 mm이며, 흐름방향의 측정위치는 $x/d = 20, 40, 100$ 으로 하였다. 열성층이 없을 경우(neutral)의 자유흐름속도는 2.0 m/sec로 하였으며, 자유흐름에 대한 유동특성은 Fig. 2에 나타내었다. 중립유동의 경우 흐름방향 및 수직방향의 난류강도는 각각 0.8, 0.5% 정도이며, 열성층이 안정적으로 형성되었을 경우(stable)의 흐름방향 및 수직방향의 난류강도는 각각 1.2, 0.4%, 온도의 rms값은

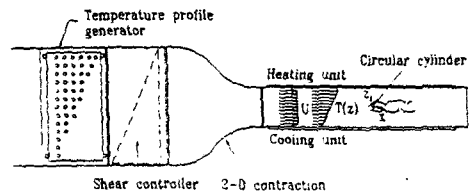


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

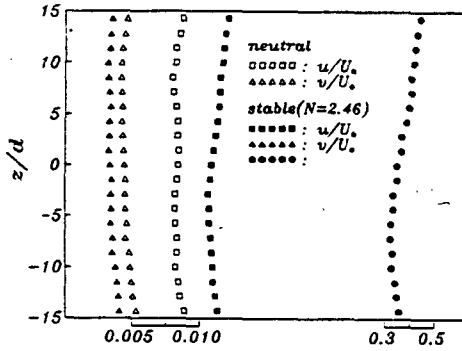


Fig. 2 Free-stream turbulent intensities and temperature rms

약 0.4°C 정도이다. 순간속도성분의 측정에는 정온 열선풍속계 (TSI 2-CH system Model 1054A)를 이용하였고, 측정센서는 DANTEC Model 55P61 X형 열선 프로브를 사용하였다. 순간온도의 측정에는 Cho와 Kim⁽¹⁰⁾에 의해 개발된 DC 브릿지형 온도 측정회로를 사용하였으며, 온도측정 센서는 DANTEC Model 55P31 I형 프로브를 이용하였다. 이 두 프로브의 지지는 위치조정이 가능한 장치로 이루어지며, 두 센서 사이의 간격이 1 mm 이하로 조절하여 측정하였으며, 센서이송은 컴퓨터 온라인으로 자동 이송되도록 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 GPIB 카드로 D6000과 연결된 컴퓨터의 하드디스크에 저장된다. 또한 I형 프로브의 신호는 온도 측정회로와 D6000을 통하여 컴퓨터 하드디스크에 기록된다. 각 측정지점에 대한 자료의 추출간격은 100 μs로 하였으며, 1회 측정당 4096개의 자료를 10번씩 측정하여 ensemble 평균을 취하였다. 각종 난류신호의 분석은 오프라인 프로그램으로 수행되었다.

열성층화된 유동장에서 난류유동현상을 분석하기 위하여는 온도와 속도를 동시에 측정해야 하며, 또한 온도가 변화하여도 정확하게 속도를 측정할 수 있는 교정방법이 필요하다. 본 실험에서 센서의 교정은 온도의 변화에도 열선과 유동장 사이의 열전달 현상을 잘 표현해 주는 수정된 King의 비침입 이용하였으며,⁽¹¹⁾ 이에 대한 결과는 아래식으로도 표현된다.

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

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

여기서, E 는 열선 프로브의 출력전압, A, B, T_w 는 교정에 의해 구해지는 값이며, 지수 n 은 보통 0.45를 사용한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균온도 및 후류반쪽의 변화

Fig. 3은 중립유동과 성층유동에 대하여 가열된 실린더 후류에 대한 평균온도 분포의 변화를 나타내고 있다. 중립유동의 경우 가열된 실린더 후류의 평균온도 형상은 가우스분포와 비슷하게 나타나며, 후류의 강한 혼합으로 인하여 후류 중심부에서 극소 등온영역이 형성됨을 볼 수 있으며, 최대 온도 증가량은 $x/d=20$ 에서 약 7.0°C 정도이다. 그러나 성층유동의 경우 실린더의 가열로 인한 후류의 온도 증가는 강한 비대칭 현상을 나타내며, 최대 온도 증가량도 $x/d=20$ 에서 약 5.5°C 정도로 중립유동의 경우보다 작아지게 된다. 이와 같은 현상은 성층유동 내에서의 가열되지 않은 원주후류에 대한 평균온도 분포형상과 비교하면 잘 설명될 수 있다. Fig. 4에서는 성층유동 내에서 가열된 원주후류와 가열되지 않은 원주후류에 대한 평균온도 분포형상을 비교하였다. 성층유동 내에서 가열되지 않은 실린더 후류의 평균온도 분포는 유동의 강한 혼합으로 인해 후류 중심을 기준으로 S자 형상을 나타내게 되며, 후류의 아래에서는 자유유동의 온도보다 증가하지만 윗부분에서는 열결손이 발생한다. 이러한 유동에 실린더의 가열로 인한 추가의 열이 공급되면 평균온도를 증가시키게 되어 후류중심을 기준으로 아래에서는 S자 형상을 더욱 확대시키지만

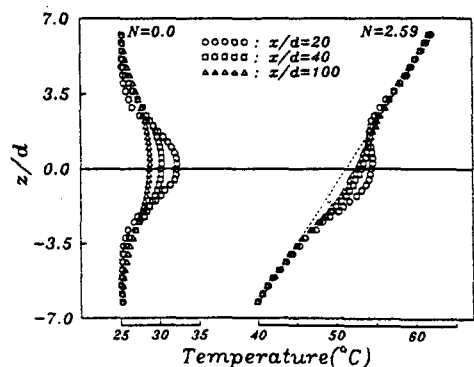


Fig. 3 Distribution of the mean temperature profiles

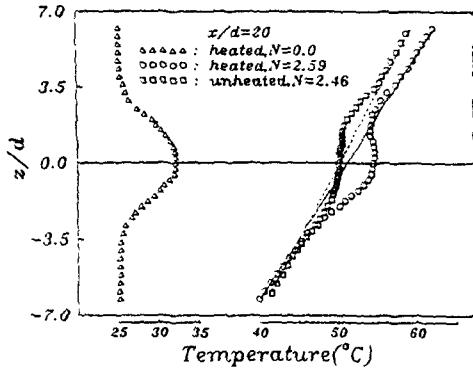


Fig. 4 Comparison of the mean temperature profiles

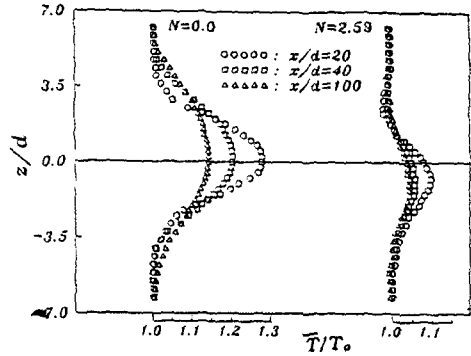


Fig. 5 Dimensionless mean temperature profiles

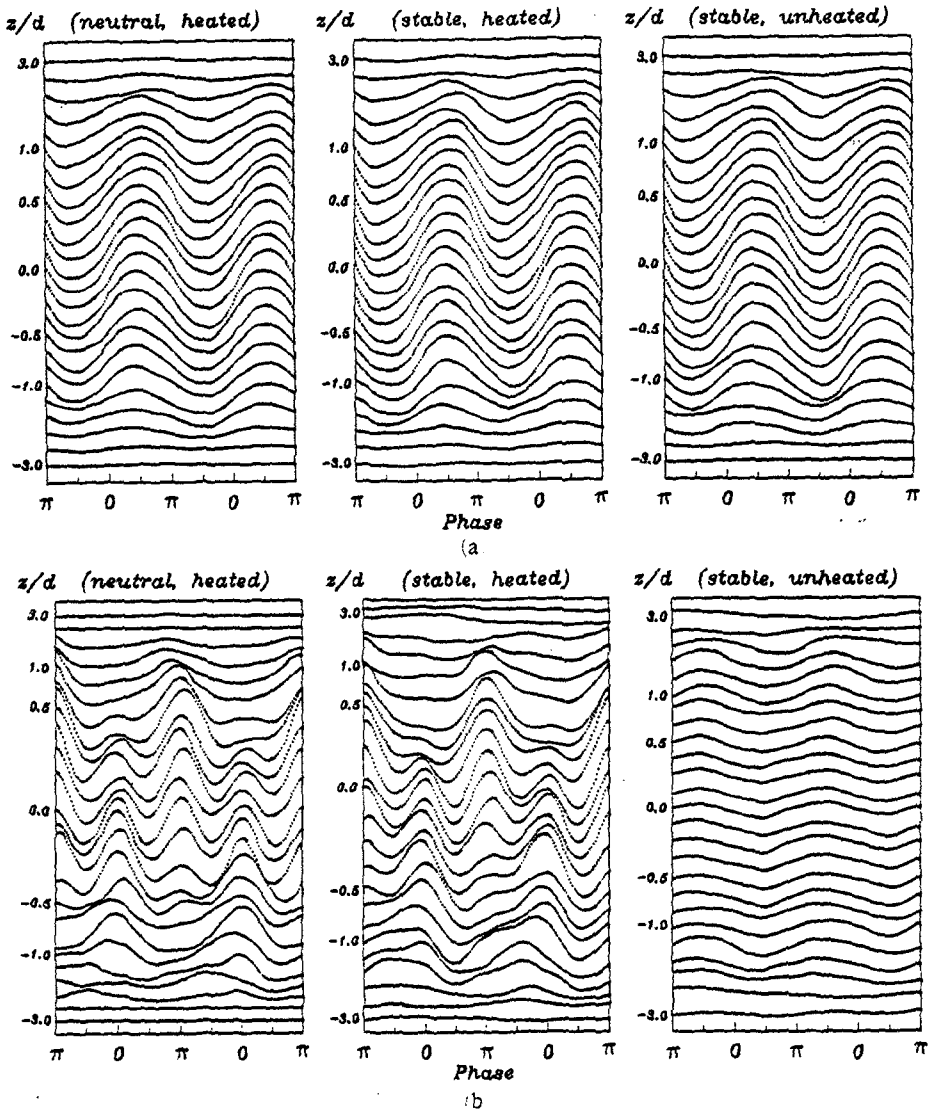


Fig. 6 (a) Distributions of phase averaged velocity
 b) Distributions of phase averaged temperature

윗부분에서는 S자 형상을 소멸시키게 되며, 하류에서는 후류의 전 영역에서 자유흐름의 온도보다 높게 분포하게 된다. 따라서 평균온도의 증가는 후류의 아래에서 더 크게 발생하게 되며, 이와 같은 현상은 Fig. 5에 잘 나타나있다. Fig. 5는 중립유동일 경우에는 자유흐름의 온도로 무차원 하였으며, 성층유동에서는 중립유동과 비교를 위하여 각 측정 지점에 대한 자유흐름의 온도로 무차원 하였다. 위에서도 설명 한 바와 같이 중립유동에서는 상하 거의 대칭을 이루지만 성층유동일 경우 비대칭 현상이 강하게 생기며 후류의 아래에서 평균온도의 증가가 크게 나타난다.

한편 주기적 성질이 강하게 존재하는 난류 전단 흐름에서는 대규모 응집구조가 혼합, 유입 및 열전달에 크게 영향을 주게되며, 이의 영향을 평가하기 위하여는 위상평균법이 유리하다. 또한 근접후류에 대한 속도장의 분석을 위상평균법으로 연구한 예는 많지만, 이 방법을 온도장에 적용한 예는 드물다. Fig. 6은 주기성이 강한 근접후류($x/d=6$)에서 수직방향 속도성분과 온도에 대한 위상평균을 나타내고 있으며, Fig. 7은 위상평균에 의한 온도 변동량 $\langle T \rangle - \bar{T}$ 에 대한 등고선을 z 와 위상의 평면에 나타내었다. 위상평균에 의한 속도성분의 분포는 온도장의 영향을 거의 받지 않지만, 성층유동 내의 가열되지 않은 실린더 후류의 경우 위상평균에 의한 온도변동의 주기는 속도변동의 주기와 같으며 위상은 수직방향 속도성분과 180도의 편차를 갖고 후류의 넓은 영역에서 비슷한 분포를 나타낸다. 그러나 가열된 실린더 후류의 경우 성층유동과 중립유동 모두 후류중심 부근에서는 주기가 두배로 늘어나고, 이러한 현상은 후류중심에서 멀어지면서 사라지게 된다. 또한 중립유동과 성층유동의 경우를 비교하면 주기가 두배로 되는 후류영역이 중립유동의 경우가 더 넓으며, 특히 성층후류의 아래부분에서는 이러한 현상이 빠르게 소멸되는 경향을 볼 수 있으며, 유동의 하류방향으로 지속되는 정도는 중립유동의 경우가 더 오래 유지될 것으로 유추될 수 있다. 따라서 가열된 실린더와 가열되지 않은 실린더 후류의 온도에 대한 응집구조는 아주 다른 형상으로 나타나게 된다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 온도도 강한 응집구조를 이루고 있음을 알 수 있으며, 가열되지 않은 실린더 후류의 경우 응집구조의 형태는 후류중심을 기준으로 거의 대칭형상을 이루며, 양과 음의 값이 차례로 나타나게 된다. 그러나

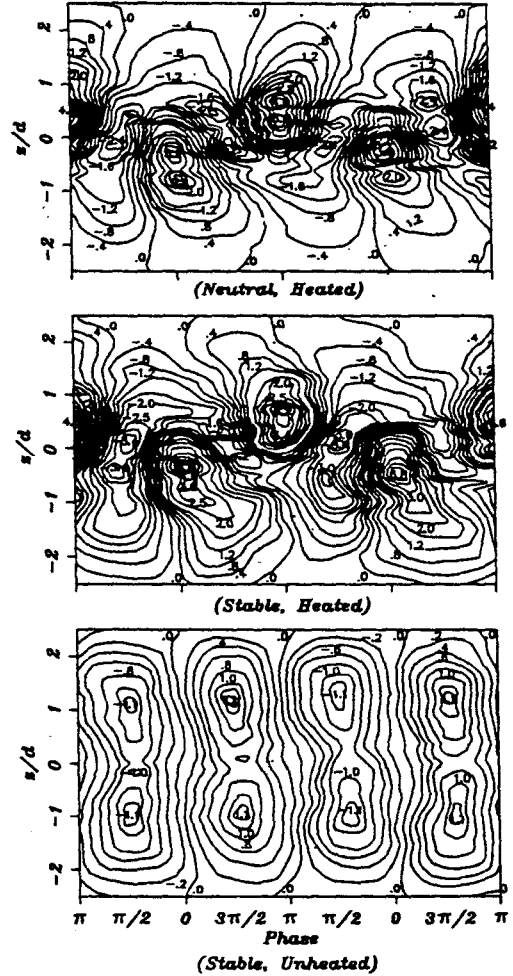


Fig. 7 Contours of phase averaged temperature fluctuations

가열된 실린더 후류의 경우 후류영역에서 온도변동이 심하게 발생하고 후류중심에 대하여 대칭형상을 이루지 않고 있으며, 후류의 위·아래로 교차되면서 나타나는 양의 핵 사이로 음의 핵이 나타나는 양상으로 된다. 이와 같은 현상은 유동의 강한 응집구조로 인하여 소규모 혼합(small scale mixing)이 잘 이루어지지 않고 유입된 유체와 가열된 내부의 유체가 각각 덩어리형태를 유지하며, 이러한 응집구조의 전후 사이에 온도차이가 크게 존재함을 의미한다.

Fig. 8은 중립유동일 경우 속도와 온도에 대한 후류반쪽의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 흐름방향에 대한 후류반쪽의 증가율은 속도와 온도에 대하여 비슷하게 나타나지만, 온도에 대

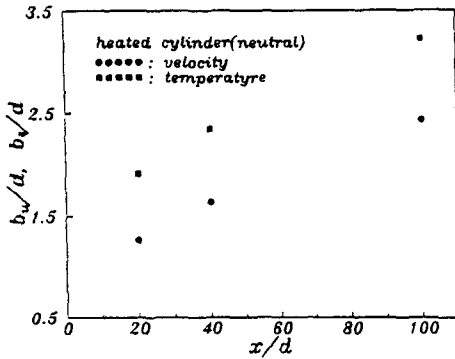


Fig. 8 Variation of wake half width

한 후류반폭이 속도의 후류반폭보다 크게 분포한다. 이와 같은 현상으로 볼 때 열확산이 운동량확산보다 더 잘 이루어진다고 볼 수 있으며, 이와 같은 현상은 난류량의 변화에서도 관찰할 수 있다.

3.2 난류특성

Fig. 9는 중립유동과 성층유동에서 흐름방향(u) 및 수직방향(v) 성분의 난류강도 변화를 보여준다. 흐름방향 성분의 난류강도는 성층유동일 경우 중립유동에 비해 더 높은 값을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 성층유동의 경우 강한 온도구배로 인해 속도가 증가하기 때문으로 판단된다. 수직방향 성분의 난류강도에서도 비교적 근접후류 영역에서는 성층유동의 경우가 약간 크게 나타나지만 하류로 갈수록 전체적으로 성층유동에서의 난류강도가 중립유동의 경우보다 적어지고 있음을 볼 수 있다. 또한 흐름방향에 대하여 난류강도의 소산과정을 보면 u 성분의 경우 중립유동과 성층유동에서 비교적 비슷하게 진행되고 있으나, v 성분의 경우 성층유동에서의 난류강도가 더 빠르게 소산되고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상으로 볼 때 안정된 성층유동이 후류의 흐름방향 성분에는 크게 영향을 주지 못하지만 후류의 수직방향 성장은 안정화 성층유동에 의해 상당히 억제되고 있음을 알 수 있다. 따라서 후류구조는 성층유동일 경우 흐름방향으로 더 많이 신장된다고 판단할 수 있다.

Fig. 10은 온도의 rms값을 비교 하고 있다. 중립유동의 경우 후류중심을 기준으로 상하 쌍봉을 이루면서 대칭형상을 나타 내지만 성층유동에서는 후류의 전 영역에서 위·아래 부분이 서로 다른 특성을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 평균온도 분포

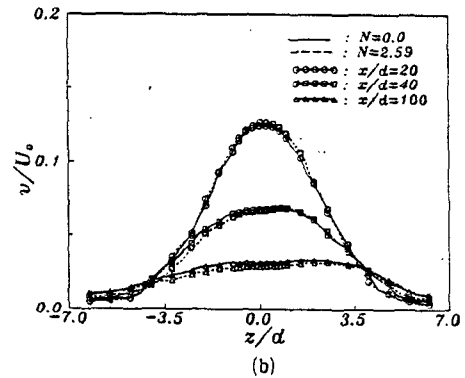
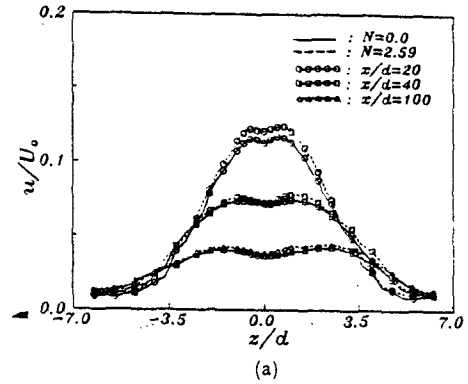


Fig. 9 Distributions of turbulent intensities

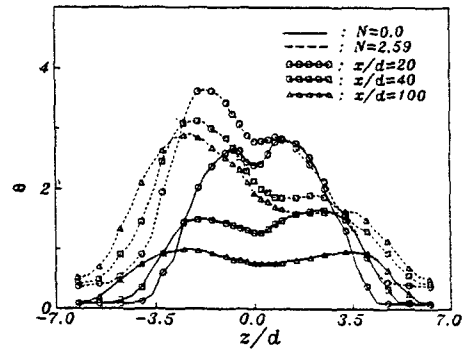


Fig. 10 Distribution of the temperature rms

에서도 보았듯이 중립유동과 성층유동에서 후류의 열 거동이 완전히 다르게 나타나기 때문이다. 일반적으로 후류영역에서 온도 rms값의 크기는 유동의 난류성분 영향도 받지만 혼합되는 유체의 평균온도 구배 영향을 더 많이 받게 된다. 성층유동에서 후류의 평균온도 분포를 보면 후류의 아래부분에서는 온도구배가 크게 되지만 윗부분에서는 아주 약한 온도구배가 형성된다. 따라서 성층유동의 후류에서

온도 rms값의 분포는 후류의 아래에서 더 크게 나타나는 강한 비대칭 현상을 보이게 된다. 또한 전체적으로 온도 난류성분의 흐름방향에 대한 소산과정은 중립유동의 경우 속도성분의 소산과정과 비슷하지만 성층유동에서는 아주 다르게 나타나며 하류에서도 난류성분이 크게 줄어들지 않는 특성을 보인다. 또한 속도변동성분과 온도변동성분의 수직방향 분포를 비교하면 온도변동성분이 수직방향으로 더 넓게 분포하고 있음을 알 수 있으며, 이와같은 현상은 후류반쪽의 변화에서 나타난 결과와 일치한다고 볼 수 있다.

3.3 열유속의 변화

난류유동장에서 대류열전달은 아래식으로 표현된다.

$$q_i = \rho c_p \overline{u_i \theta} \quad (2)$$

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

$$\frac{q_x}{\rho c_p} = \overline{u\theta} \quad (3)$$

$$\frac{q_z}{\rho c_p} = \overline{v\theta} \quad (4)$$

열유속의 정도는 온도와 속도 난류성분의 크기 뿐만 아니라 이들의 위상관계에 따라 달라지게 된다.

Fig. 11은 각각 흐름방향 성분 $\overline{u\theta}$ 및 수직방향 성분 $\overline{v\theta}$ 의 분포를 나타낸다. 중립유동의 경우 $\overline{u\theta}$ 의 변화는 x/d 의 위치에 따라 상당한 차이를 보인다. 즉, 비교적 근접후류에서는 후류중심 부근에서 $\overline{u\theta}$ 의 부호 변화가 있으며, 하류로 가면 후류 전역에서 음의 값을 나타낸다. 이와 같은 현상은 앞의 위상평면에 의한 분석에서 설명한 바와 같이 비교적 근접후류에서는 대규모 응집구조가 강하게 형성되어 조직적으로 움직이기 때문에 외부에서 유입되는 찬 공기와 내부의 더운 공기가 미처 혼합되지 못하고 흐름방향에 따라 덩어리로 존재하는 부분이 생기게 되지만, 하류로 가면서 조직적인 와의 구조가 소멸되면서 이러한 분포도 사라지기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 Matsumura와 Antonia⁽⁴⁾의 연구 결과에도 잘 나타나 있으며, 그들은 조건부 추출기법에 의해 이와 같은 현상을 연구 하였

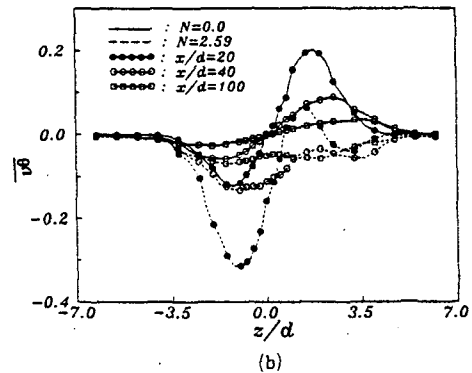
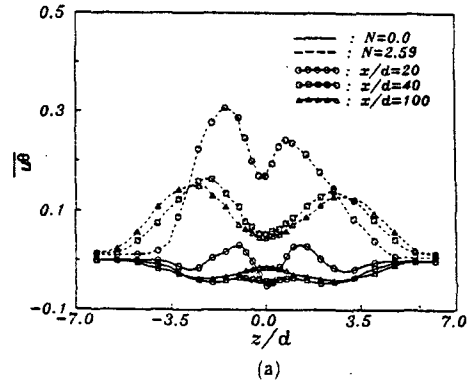


Fig. 11 Distributions of the velocity and temperature correlations

다. 그러나 성층유동에서는 쌍봉을 형성하면서 모두 양의 값을 나타내고 있으며, 그 값도 중립유동의 경우보다 상당히 크게 분포하고 있다. 한편 $\overline{v\theta}$ 의 분포는 중립유동의 경우 후류중심을 기준으로 부호가 바뀌게 되며, 그 양상이 Reynolds 전단응력의 분포와 비슷하다. 이러한 현상은 후류 중심으로부터 열이 상하로 전달되고 있음을 나타내며, 열원이 유동의 중심에 있기 때문에 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 그러나 성층유동의 경우 그 양상은 달라지게 된다. 즉, 후류의 아래부분에서는 유동의 중심에서 열을 받아 음의 방향으로 열전달을 더욱 증가시키는 결과로 나타 나지만, 후류의 위부분에서는 자유유동의 온도구배로 인하여 위에서 아래로 발생하는 열전달과 실린더의 가열로 인하여 후류중심으로부터 위로의 열전달이 서로 상쇄되어지는 양상을 나타내며, 하류에서는 성층유동의 온도구배 영향이 더 강하게 나타나 전체적으로 음의 값을 나타낸다. 이러한 현상은 무차원수인 상관계수 (correlation coefficient) 분포를 구해보면 잘 알

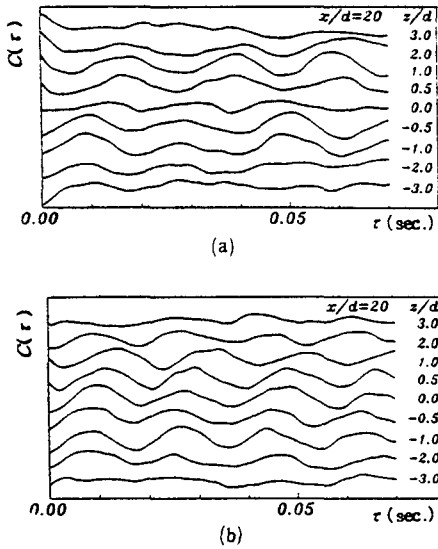


Fig. 12 Distribution of the vertical velocity and temperature correlation coefficients

수 있게 된다. Fig. 12는 $x/d=20$ 에서 구한 수직 방향의 속도변동성분과 온도변동성분의 상관계수 분포를 나타낸다. 중립유동의 경우 후류중심을 기준으로 180도의 위상차를 나타내며, 이와 같은 현상은 $\overline{v\theta}$ 의 분포에서 후류중심을 기준으로 부호가 바뀌는 현상과 일치하고 있다. 또한 성층유동의 경우 후류의 위부분에서 그 위상이 달라지게 되는 현상을 볼 수 있으며, 이 위치에서 $\overline{v\theta}$ 의 부호가 바뀌게 되는 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

교정된 열선 프로브와 냉선 프로브를 사용하여 온도구배가 있을 때와 없을 때에 대한 가열된 원주 후류에서의 속도 및 온도 난류성분, 열유속 등을 측정·분석하였으며, 위상평균법으로 근점후류에 대한 온도의 응집구조를 분석하였다. 이 결과 성층 유동에서 자유유동의 강한 온도구배로 인하여 먼 후류로 갈수록 유동의 수직방향 확산이 상당히 억제되는 경향을 보였다. 또한 속도 난류성분보다 온도 난류성분의 확산이 수직방향으로 더 넓게 분포하며, 흐름방향으로 더 오래 지속된다. 중립유동과 성층유동에 대하여 가열된 실린더 후류의 열거동 양상은 완전히 다르게 나타났다. 즉, 중립유동의 경우 후류중심을 기준으로 거의 대칭현상을 나타내지만 성층유동에서는 강한 비대칭을 나타내며,

후류의 아래부분에서는 자유유동의 온도구배가 온도 난류성분을 더 증가 시키지는 경향으로 나타나지만 후류의 위부분에서는 실린더의 가열로 인한 열의 유입이 후류의 평균온도 구배를 약화시켜 수직방향의 열전달을 억제시키는 결과로 나타났다. 또한 근점후류에서 온도성분에도 응집구조가 강하게 존재함을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Fabris, 1979, "Conditional Sampling Study of the Turbulent Wake of a Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, pp. 673~709.
- (2) Ferre, J. A., Giralt, 1989, "Some Topological Features of the Entrainment Process in a Heated Turbulent Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 198, pp. 65~78.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Lin, J. T. and Pao, Y. H., 1979, "Wakes in Stratified Fluids," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 11, pp. 317~338.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 김경천, 정양범, 강동구, 1993, "열성층 유동장에 놓인 원주후류의 유동특성에 대한 연구,"

대한기계학회, '93년 추계학술대회논문집.

- (9) 김경천, 정양범, 김상기, 1992, "열적 성층화를 고려한 지표풍의 물리적 시뮬레이션," AFERC Report
- (10) Cho, J. R. and Kim, K. C., 1993, "A Simple High-Performance Cold-Wire Thermometer," *Meas. Sci. Technol.* 4, pp. 1346~1349.
- (11) Lienhard V, J. H. and C. W. Van Atta, 1990, "The Decay of Turbulence in Thermally Stratified Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 210, pp. 57~112.