1300 大韓機械學會論文集 第19卷 第5號, pp. 1300~1307, 1995

〈論 文〉

열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(3)
—선형열원으로부터의 난류확산—

김경천* · 정양범**

(1994년 8월 18일 접수)

A Study on the Characteristics of Cylinder Wake Placed in Thermally Stratified Flow(Ⅲ)
—Turbulent Dispersion from a Line Heat Source—

Kyung-Chun Kim and Yang-Beom Jung

Key Words: Stratified Flow(성층유동), Turbulent Heat Flux(난류 열유속), Turbulent Intensity (난류강도), Thermal Time Scale(열적시간척도)

Abstract

The effect of thermal stratification on the turbulent dispersion from a fine cylindrical heat source was experimentally examined in a wind tunnel with and without a strong temperature gradient. A 0.5 mm dia. nichrome wire was used as a line heat source. Turbulent intensities, r. m. s. value of temperature and convective heat fluxes were measured by using a hot-wire and cold-wire combination probe. The results show that the peak value and the spread of the vertical turbulent intensity for the stratified case are far lower than those in the neutral case, which indicates that the stable temperature gradient suppresses the vertical velocity component. All of the third order moments including heat fluxes measured in the stable condition have very small values than those of the neutral case. This nature suggests that the decrease of scalar fluctuations in the stably stratified flow is mainly due to the suppression of the turbulent diffusion processes by the stable stratification. A simple gradient model with a composite timescale which has a simple weighted algebraic mean between dynamic and thermal time scale yields reasonably good numerical values in comparison with the experimental data.

기 호 설 명

d	: 열원의 직경(mm)
K	: 무차원 성층변수($=N\cdot d/U$)
N	: Brunt-Väisäla frequency
Re_d	: d를 기준으로 한 Reynolds 수
U_o	: 유동방향 평균속도
T_o	: 시험부 중심에서의 온도
u, v, θ	: 흐름방향속도, 수직방향속도 및 온도 r. m. s.
$\overline{uv}, \overline{u\theta}, \overline{v\theta}$	: Reynolds 전단응력, 흐름방향 및 수직방향 열유속
T_{max}	: 최대 평균온도
T_o	: 자유유동의 평균온도
ΔT_{max}	: 최대 온도증가량($T_{max}-T_o$)
τ_3	: 혼합시간척도
τ_θ	: 열적시간척도

*정회원, 부산대학교 생산기계공학과, 기계기술연구소
**정회원, 부산대학교 기계기술연구소

τ_u : 흐름방향속도 시간척도
R : 시간척도비($=\tau_\theta/\tau_u$)

1. 서 론

난류에 의한 여러가지 스칼라량의 오염물질 확산에 대한 연구는 공학적 또는 환경적 분야에서 매우 중요한 연구과제이다. 이러한 연구에서 여러종류의 오염물질을 대표해서 비교적 발생이 용이한 국소적인 열원에서 방출되어 확산되는 열의 전달현상을 연구하는 방식을 일반적으로 채택하고 있다.

스칼라량의 거동에 대한 연구는 Taylor[1]가 이론적인 접근을 시도한 후 이론적인 면과 실험적인 면에서 많은 연구가 진행되어 왔으며, 난류 환경에서 scalar장의 소산/확산 패턴을 해석하고 예측하기 위한 이론적 접근으로 가장 일반적인 것은 gaussian puff, gaussian plume model, K-theory 및 first order closure model with the eddy diffusivity tensor K_{ij} 등이며, 이들은 대기오염원의 확산 및 소산 등에 대한 이론적 연구와 실험적 연구의 기초가 되었다. 스칼라량의 확산에 대한 실험적 연구는 고주파수 온도 변동량의 측정을 위하여 LaRue, Deaton 및 Gibson[2] 등에 의해 냉선을 이용하는 기법이 발달되면서 활발히 이루어졌으며, 이에 대한 체계적인 실험연구는 격자후류에 대한 온도변동성분의 소산과정을 연구한 Warhaft와 Lumley[3]에 의해 시작되었다고 볼 수 있다. 그 후로 Stapountzis[4] 등은 격자후류에서 열원에 매우 근접한 온도장의 양상에 대해서 실험연구하였으며 Karnik과 Tavoularis[5] 및 Chung과 Kyong[6] 등은 균일 전단류 내에서의 선형열원 후류에 대하여 실험하였다. 특히 Chung과 Kyong은 혼합시간척도를 이용한 단순구배 모델로 3차 이송항을 예측하여 실험치와 비교연구하였다. 그러나 스칼라량의 거동에 대한 대부분의 선행연구는 유체의 밀도변화가 없는 균질유동에 대하여 행하여졌으며, 오염원의 확산에 많은 영향을 미치는 성층유동내에 놓인 선형열원 후류에 대하여 성층효과를 연구한 실험은 아직 발표되지 않았다.

따라서 본 연구자들은 후류에 대한 열성층효과를 체계적으로 수행하기 위하여 온도구배 250℃/m까지의 안정된 선형온도구배를 임의로 형성시킬 수 있는 열성층풍동을 설계 및 제작하여 원주의 후류에 대한 열성층효과를 연구하여 발표한 바 있으며,[15,16] 이에 대한 후속연구로 본 연구에서는 선형열원 후류의 스칼라량 이송과정에 대한 연구를 수행하기 위하여 200℃/m의 안정된 선형온도구배를 형성시킨 후 선형열원의 후류에 대하여 열선 및 냉선 조합프로브를 이용하여 평균장은 물론 난류강도, 온도변동성분, 열유속 등 각종 난류량들을 측정하여 이 결과를 온도구배가 없는 균일유동에서의 실험결과와 비교분석하여 성층유동장이 스칼라량의 이송과정에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

스칼라량의 수송에 대한 연구의 어려움 중의 하나는 유동에는 아무런 영향을 주지 않으면서 유동장에 스칼라량을 유입시키는 것이다. 가장 간단한 방법중의 하나는 선형열원을 유동 속에 놓는 것이며, 대부분의 연구에서 이러한 선형열원으로써 얇은 백금이나 니크롬 선을 이용해 왔다. 만약 선의 물리적 존재가 속도장에 영향을 주지 않을 정도로 선이 충분히 가늘다면 이 스칼라량을 수동적인 유입량으로 볼 수 있다. 그러나 실제 실험에서는 약간의 속도 후류를 피할 수 없으며, 따라서 유동장의 교란을 최소화하기 위하여 선의 직경이 가능한 작아야 된다. 직경은 작을수록 좋지만 그러나 너무 작으면 먼 후류에서 신호 대 노이즈 비가 너무 작아지기 때문에 속도변동량과 온도변동량의 측정이 불가능해진다. Warhaft[7]는 다양한 직경의 니크롬 선으로 소산실험을 한 후 kolmogorov microscale 보다 더 작은 열원에 대한 난류소산의 특성은 거의 같다고 하였으며, 이 현상은 kolmogorov microscale과 비교하지는 않았지만 Shlien과 Corrsin[8]의 연구에서보다 일찍이 발견되었다. Raupach와 Legg 등[9]은 난류경계층에서의 상승되는 선형열원으로서 0.8 mm 직경의 니크롬 선을 사용하였으며, Chung과 Kyong 등[6]도 균일 전단류의 선형열원으로 0.8 mm의 선을 사용하였다.

본 연구에서는 직경이 0.5 mm이고 저항이 0.95Ω인 니크롬 선을 사용하였으며, 니크롬선의 가열을 위하여 자동 전압조정기로 안정된 전원을 공급하였다. Fig. 1은 시험부에 설치된 선형열원의 개념도를 나타내며, 콤팩트 열교환기 형식의 전기 전열기와 TRIAC 소자를 이용한 전력제어로 매우 안정되고 우수한 선형온도분포를 임의의 형상으로 재현할

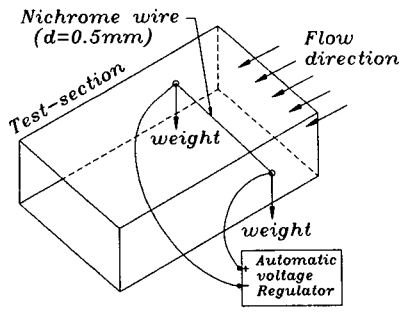

Fig. 1 Schematic of the line heat source

수 있는 열성층풍동 내에 설치하였다.

순간속도성분의 측정은 정온 열선풍속계(TSI Model 1054A)를 이용하였으며, 측정에 사용된 센서는 DANTEC 모델 55P61 X형 열선프로브를 사용하였다. 온도의 측정은 DC 브릿지형 온도측정회로[10]를 사용하였으며, 온도측정 센서는 백금선 측정부를 갖는 DANTEC 모델 55P31 I형 프로브를 이용하였다. 두 프로브의 지지는 위치조정이 가능한 장치로 이루어지며, 두 센서의 간격을 1 mm 이하로 조절하여 온도와 속도 신호를 동시에 측정하였으며, 센서의 이송은 컴퓨터 온라인으로 자동 이송되도록 하였다.

본 실험에서 설정된 선형온도구배는 200℃/m 이때 N값은 2.46이며 자유유동의 평균속도는 2.0 m/s, Re_d는 58.5 정도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균 및 난류장의 특성

유동의 수직방향에 대한 열전달은 유체입자를 수직방향으로 이동시키기 위한 난류의 정도에 직접적인 영향을 받게 된다. 열후류에서 부력의 영향이 나타나지 않는 수동적 성층유동장의 경우 열전달은 난류의 세기에 지배되며, 열유속의 소산은 수직방향 난류성분의 소산과 비슷한 비율로 진행된다. 그러나 열성층의 정도가 수직방향으로 이송되는 유체입자를 억제할 정도로 강해지면 열유속의 소산은 더욱 빠르게 진행될 것이다. 또한 성층유동장에서 운동량수송이 약할 경우 수직방향으로의 열전달 특성은 평균온도구배의 영향을 강하게 받게 된다.

Fig. 2는 $x/d=1000$인 지점에서 중립유동과 안정적으로 성층화된 유동속에 놓인 선형열원 후류에 대한 무차원 온도분포를 나타내고 있다. 선형열원으로 인한 평균온도의 변화는 중립유동의 경우 후류중심을 기준으로 거의 정규분포형상을 나타내지만, 안정적으로 성층화된 유동의 경우 평균온도의 구배가 후류의 아래에서는 증가하고 위에서는 감소하게 된다. 따라서 열전달현상은 중립유동과 성층유동에 대하여 서로 다르게 나타나게 된다.

Fig. 3은 흐름방향에 대하여 평균속도와 평균온도에 대한 후류반폭의 변화를 나타내고 있으며, $x/d=100$에서의 값은 직경 8 mm인 가열된 원주후류의 실험결과이다. 속도와 온도에 대한 후류반폭 모두 중립유동과 성층유동에서 비슷한 기울기로 증가하지만 성층유동일 경우 온도와 속도의 후류반폭이 중립유동의 결과보다 작으며, 온도의 후류영역이 속도의 후류영역보다 더 넓게 분포함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 안정적으로 성층화된 유동의 경우 후류의 수직방향 성장이 억제되기 때문으로 볼 수 있으며, 열확산이 운동량 확산보다 잘 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 $x/d=1000$에서 자유유동의 평균속도로

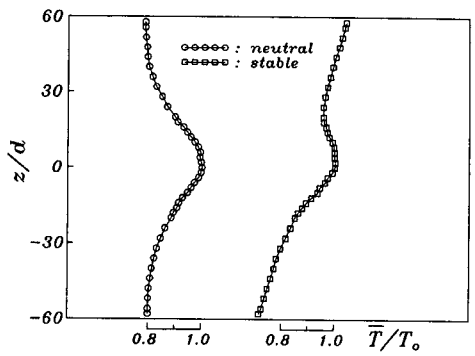

Fig. 2 Mean temperature profiles

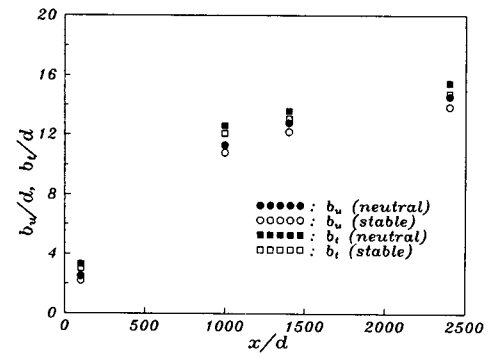

Fig. 3 Development of mean velocity and temperature half width

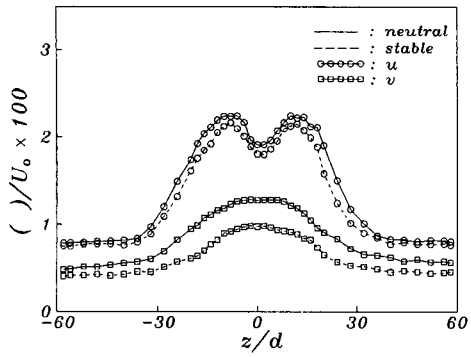

Fig. 4 Distributions of the velocity intensities

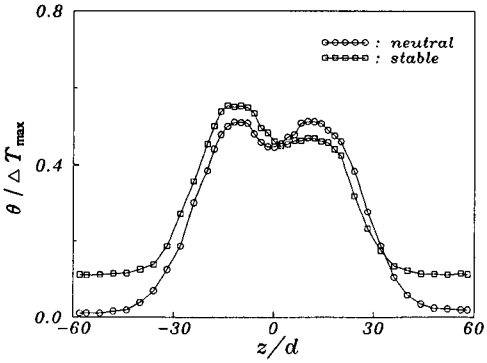

Fig. 5 Distributions of the temperature r. m. s.

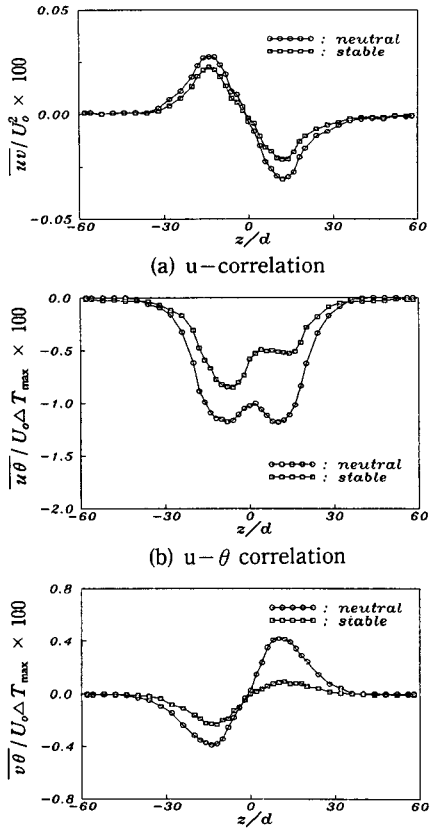

Fig. 6 Variations of the second-order correlations

무차원한 난류강도 u 및 v의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4에서 보듯이 성층유동의 경우 흐름방향 및 수직방향에 대한 난류강도의 최대치가 중립유동의 경우보다 작게 나타나며, 수직방향 난류강도가 더 많이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 성층유동과 중립유동에 대한 v/u값의 비는 0.817 정도이며, 따라서 안정화 성층유동장에서는 수직방향으로의 운동량 확산이 상당히 억제되어 중립유동에 비해 난류성분의 소산이 빠르게 진행된다고 볼 수 있으며, 이러한 현상은 이전에 연구한 원주후류에 대한 실험결과[16]에도 잘 나타났다.

Fig. 5는 $x/d=1000$에서 온도의 r. m. s.값 θ를 최대 온도증가량 ΔT_{max}로 무차원하여 나타내었다. 중립유동의 경우 후류중심을 기준으로 대칭을 이루게 되지만 성층유동의 경우 후류의 아래에서 더 큰 값을 나타내는 비대칭인 분포를 보인다. 이와같은 현상은 온도난류성분의 크기는 평균온도구배의 영향을 많이 받게됨으로 인해 성층유동의 경우 평균온도 분포에서 후류의 아래에서 온도구배가 증가하는 것과 일치한다고 볼 수 있다. 온도 r. m. s.의 최대치와 최대 온도증가량의 비를 보면 격자후류의 실험에서 Warhaft[7]의 경우 0.7 정도이고 Stapountzis et al.[4]의 경우 0.6 정도이며, 본 실험에서는 조금 낮은 값인 0.56 정도였다. 그러나 균일 전단류에서 측정한 Chung 및 Kyong[6]의 경우 0.42였으며, 따라서 이러한 차이는 열원의 직경, 평균속도 및 최대 온도 증가량 등 실험조건의 차이 때문이라 판단된다.

3.2 Reynolds 전단응력 및 열유속의 변화

Fig. 6은 Reynolds 전단응력, $\overline{uv}$, 흐름방향 열유속, $\overline{u\theta}$ 및 수직방향 열유속, $\overline{v\theta}$의 분포를 나타낸다.

$\overline{uv}$ 성분의 분포는 2차원 실린더후류에서처럼 후류중심을 기준으로 점대칭현상을 나타내고 있으며, 안정화 성층유동의 경우 그 값이 중립유동의 경우와 비교하여 상당히 작게 나타남을 볼 수 있다. 이

와 같은 현상은 난류강도의 분포로부터 쉽게 예측할 수 있다.

$\overline{u\theta}$의 분포는 쌍봉형식을 나타내면서 후류의 전 영역에서 음의 값을 갖게되며, 가열된 실린더의 먼 후류에서 실험한 Farris[11]의 결과와 일치한다. 이러한 현상은 $\overline{u\theta}$의 지배방정식에 포함되는 생성항 $-\overline{v\theta}\,dU/dy$의 변화로부터 쉽게 예측할 수 있다. 즉, 평균속도구배가 최대인 지점과 $\overline{v\theta}$가 최대인 지점부근에서 $\overline{u\theta}$의 최대값이 존재하게 된다. 성층유동의 경우 $\overline{u\theta}$의 값이 중립유동의 경우보다 작으며, 후류의 아래에서 더 큰 값을 나타내고 있다.

$\overline{v\theta}$의 분포는 후류의 윗부분에서 양의 값을 갖는 점대칭 형상을 보이며, 3차항의 수직방향 이송을 지배하는 중요한 인자인 이 값의 변화 또한 성층유동의 경우 중립유동에 비해 현저히 작아지는 것을 볼 수 있으며, 이와 같은 현상은 안정된 열성층의 영향으로 인하여 수직방향 이송이 억제되는 당연한 결과로 볼 수 있다.

한편, 최대값의 위치에서 수직방향 열플럭스와 흐름방향 열플럭스의 비는 약 3.0의 값을 나타내며, 이 값은 Monin과 Yaglom[12]의 결과와 비슷하다.

3.3 3차 스칼라 이송항

많은 공학적인 문제와 환경분야에서 열습도 또는 오염물의 확산 등을 예측하는 데 있어서 난류 열유속 $\overline{u\theta}$, $\overline{v\theta}$, 레이놀즈응력 $\overline{uv}$ 및 온도변동량 $\overline{\theta^2}$ 등과 같은 2차 모멘트의 동적 방정식(dynamic equations)에서의 난류 3차 스칼라 이송항을 모델링하는 것은 매우 중요하다. 이 문제에 대해서 많은 이론적, 실험적 연구가 행해져 왔다. Dekeyser와 Launder[13]는 비축대칭 가열제트에서 실험결과를 이용한 3차 모멘트를 예측한 바 있으며 Raupach & Legg[9]는 난류경계층 상부에 위치된 선형열원에 의한 스칼라 유입량의 확산에 대한 연구를 수행하여 3차 온도-속도의 상관관계에 관한 모델예측과 실험치를 비교 연구하였다. 위의 두 연구에서는 동적시간척도(dynamic timescale)만을 사용해서 3차 스칼라 이송모델을 제안하였으나 실험에서 측정된 3차 모멘트를 예측하는 데 있어서 많은 오차가 있는 것이 발견되었다. 이들의 모델은 순수 동적 상관관계항, $\overline{u^2v}$, $\overline{uv^2}$ 및 $\overline{v^3}$ 등은 비교적 잘 일치하였지만, 온도-속도 상관관계 $\overline{uv\theta}$, $\overline{u^2\theta}$ 및 $\overline{v\theta^2}$ 등에는 큰 오차가 있었다.

이 오차는 2차 모멘트의 공간적 이송에 있어서 매우 중요한 열변동량의 영향을 무시하였기 때문으로 볼 수 있다. Zeman과 Lumley[14]는 열적시간척도(thermal timescale) τ_θ가 중요한 역할을 하는 것을 보였고 3차 이송항에 대한 동적시간척도와 열적시간척도 τ_θ 사이에 가중치된 대수적 평균으로써 혼합시간척도(composite timescale)를 아래와 같이 제시하였다.

$$\tau_3=(9/\tau_u+2/\tau_\theta)^{-1} \tag{1}$$

3차 모멘트는 보통 단순 구배이송모델에 의해 근사되어지는데 관계식은 다음과 같다.[6]

$$\overline{uv^2}=-\tau_3\left(2\overline{v^2}\frac{\partial\overline{uv}}{\partial y}+\overline{uv}\frac{\partial\overline{v^2}}{\partial y}\right) \tag{2}$$

$$\overline{uv\theta}=-\tau_3\left(2\overline{uv}\frac{\partial\overline{v\theta}}{\partial y}+\overline{v^2}\frac{\partial\overline{u\theta}}{\partial y}\right) \tag{3}$$

$$\overline{v^2\theta}=-2\tau_3\left(\overline{v^2}\frac{\partial\overline{v\theta}}{\partial y}\right) \tag{4}$$

$$\overline{v\theta^2}=-\tau_3\left(\overline{v^2}\frac{\partial\overline{\theta^2}}{\partial y}\right) \tag{5}$$

여기서, τ_3는 3차 모멘트에 대한 적절한 혼합시간척도이다. 혼합 시간척도 τ_3는 동적시간척도 τ_u로 대체될 수도 있으며, 만약 열적시간척도 τ_θ가 $\tau_3=0.055q^2/\varepsilon$에 비례하고 다른 시간척도가 일정하다면 그러한 가정은 타당하다. 그러나 시간척도비 $R=\tau_\theta/\tau_u$의 값이 크게 변하는 경우 이 가정은 적절하지 못한 것으로 알려져 있다.

부력의 영향을 받는 공간적 이송에 대해서 Chung과 Kyong[6]은 τ_u와 τ_θ에 대하여 가중치된 대수적 평균값을 갖는 혼합시간척도 모델 τ_3를 다음과 같은 식으로 사용하였다.

$$\tau_3=Cs(\tau_u+b\tau_\theta)=Cs\tau_u(1+bR) \tag{6}$$

여기서, 상수 Cs는 등온 난류에서 흔히 사용되는 모델상수로서 보통 $Cs=0.055$의 값을 가진다. 상수 b는 난류 3차 모멘트에서 온도변동량 θ의 차수에 해당하는 값을 취한다. 이 모델은 3차 모멘트에서 θ의 차수가 높을수록 열적시간척도의 영향이 더 커진다는 사실을 감안한 것이다.

본 연구에서는 위에서 제시한 혼합시간척도를 이용한 구배이송모델을 실험데이터와 비교하였다. 모든 계산은 실험에서 측정된 2차 모멘트를 이용하였으며, 중립 유동과 안정적으로 성층화된 유동의 경우에 대해서 각각 행하였다.

Fig. 7에는 $x/d=1000$의 위치에서 3차 모멘트의

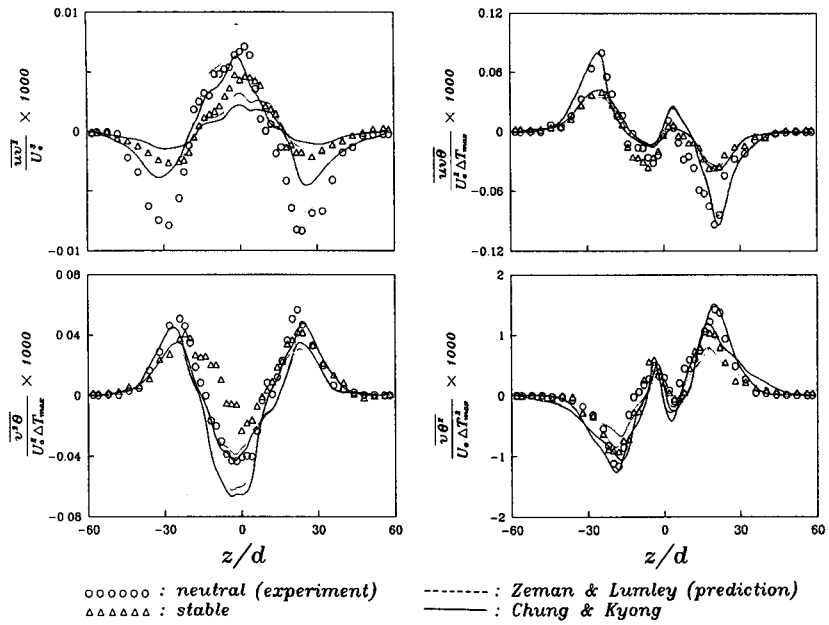

Fig. 7 Variations of the third-order correlations

예측치와 실험치를 비교하였으며, 점선은 식(1) 실선은 식(6)에 의한 예측결과를 나타낸다.

난류 운동에너지는 일반적으로 3차 모멘트에 의해 난류강도가 강한 곳으로부터 약한 곳으로 전달된다.

$\overline{v^2}$의 흐름방향 이송항인 $\overline{uv^2}$의 분포는 후류중심 부근에서 양의 최대값을 가지며, $\overline{v^2}$이 양의 값을 갖기 때문에 $\overline{uv^2}$의 부호로부터 흐름방향 속도성분의 확률밀도함수에 대한 비대칭의 정도를 평가할 수 있다. 따라서 후류중심 부근에서 흐름방향 속도성분은 양의 방향으로 더 강하게 나타남을 알 수 있다. 또한 $\overline{uv^2}$은 $\overline{uv}$성분의 수직방향 이송을 나타내며 $\overline{uv}$가 최대 인지점 부근에서 부호가 바뀌게 되며, 따라서 이 위치를 기준으로 위·아래로 에너지가 많이 전달됨을 알 수 있다.

난류 열유속 $\overline{v\theta}$의 수직방향이송을 보여주는 $\overline{v^2\theta}$에 대한 실험치와 난류모델에 의한 예측치는 후류중심을 기준으로 축대칭의 형상을 가지며 후류중심에서 음의 최대값을 이루고 주위에 양의 최대값을 가지며, $\overline{uv^2}$과 반대의 부호를 갖는다. 이러한 현상은 $\overline{u\theta}$가 후류영역에서 음의값을 갖기 때문에 나타나는 당연한 결과이다. 후류 상·하부에서 $\overline{v^2\theta}$ 값이 '0'점으로 교차하는 두 지점은 $\overline{v\theta}$의 최대값이 있는 지점과 거의 일치하며 음의 최대값이 있는 지점은 $\overline{v\theta}$의 부호가 바뀌는 지점과 거의 일치한다. 이것은 $\overline{v\theta}$의 부호가 음에서 양으로 바뀌는 곳에서 최대기울기가 있기 때문이며 이는 난류 수직변동속도에 의한 $\overline{v\theta}$의 소산이 $\overline{v\theta}$의 최대값이 있는 곳에서 활발히 일어난다는 것을 의미한다. 이와 같은 경향을 Raupach and Legg[9]와 Dekeyser and Launder[13]의 연구에서도 볼 수 있다.

$\overline{uv\theta}$의 분포, 즉 $\overline{v\theta}$의 흐름방향 이송항은 앞의 두 경우와는 다르게 점대칭의 형상을 나타내고 있으며, 이는 $\overline{v\theta}$의 분포가 점대칭으로 분포하기 때문이다. 가열된 실린더후류에 대한 Fabris[11]의 결과에서와 같이 $\overline{uv\theta}$의 값은 후류중심에서 부호가 바뀌며, 열플럭스가 최대인 지점에서 또한 부호가 바뀌고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 이 위치에서 위·아래로의 이송이 잘 이루어짐을 의미한다.

$\overline{v\theta^2}$의 분포, 즉 $\overline{\theta^2}$의 지배방정식에서 소산항으로 나타나는 온도변동량의 수직방향이송은 $\overline{uv\theta}$의 분포와 비슷한 경향을 보이며 단지 부호만이 반대일 뿐이다. 이는 u와 θ가 음의 상관관계를 갖기 때문이며, 두 개의 최고점은 온도변동량 분포에서 기울기가 최대인 점과 거의 일치한다.

전체적으로 3차 이송항의 실험결과를 보면 성층유동의 경우 그 값들이 중립유동에 비해 상당히 작

게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 난류강도의 분포에서 예측할 수 있듯이 안정화 성층유동이 수직방향으로의 운동에너지 수송을 억제하게 되며, 따라서 속도변동성분과 밀접한 관계가 있는 스칼라 이송항도 작아진다고 판단할 수 있다.

한편 단순 구배모델로 예측한 결과를 보면 $\overline{uv^2}$의 경우 후류의 수직방향 위치에 따라 예측의 정도가 서로 다르지만 전체적으로 Zeaman and Lumley 모델이 실험결과에 보다 근접한 값을 나타낸다고 볼 수 있지만 온도성분을 포함하는 3차 이송항에 대하여는 오히려 Chung and Kyong 모델이 더 정확한 값을 예측하고 있음을 볼 수 있다. 즉 온도성분이 1차항인 경우 예측의 정도가 두 경우 비슷하게 되지만 Chung and Kyong 모델이 약간 근접하게 예측하고 있으며, 특히 온도성분이 2차인 $\overline{v\theta^2}$의 경우는 예측의 정도가 상당히 차이가 나타나고 있다. 따라서 θ의 차수가 높을 수록 열적시간척도의 영향이 더 크게 작용함을 알 수 있으며 또한 성층유동의 경우에도 비교적 정확하게 예측하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

열성층풍동을 이용하여 200℃/m의 균일 성층유동장내에 선형열원을 설치하여 먼 후류에 대하여 속도 및 온도장을 측정하였으며, 중립유동에서의 결과와 비교 분석하였다. 측정센서로는 열선프로우브와 냉선프로브를 조합하여 사용하였다.

실험결과 원주후류($d=7$ mm, $x/d=100$ 이하)의 연구에서 나타난 열성층효과를 더욱 명확하게 알 수 있었다. 즉 각종 난류량들의 값이 성층유동장에서 더 작게 나타나며, 강한 안정된 성층유동장에서 난류량들의 수직방향 확산이 상당히 억제되었다.

온도와 속도에 대한 후류반폭의 변화는 중립유동과 성층유동 모두 흐름방향으로 같은 위치에서 온도의 반폭이 더 크게 나타나고 있으며, 따라서 온도의 후류영역이 속도보다 더 넓게 분포함을 알 수 있다.

중립유동의 경우에 비해 안정적으로 성층화된 유동에서는 3차 모멘트의 값이 현저히 줄어들고 있음을 볼 수 있었으며 이는 안정화 성층조건이 난류확산을 억제하고 있음을 보여주는 결정적인 증거라고 사료된다.

또한 실험에서 측정된 속도 및 열적시간척도와 2차모멘트를 이용하여 단순 구배모델로 예측하여 실험치와 비교한 결과 3차항에 포함된 θ의 차수에 따라 열적시간척도 τ_θ가 가중치된 대수적 평균값을 갖는 혼합시간척도 모델이 θ의 차수가 높은 3차 이송항을 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

(1) Taylor, G. I., 1921, "Diffusion by Continuous Movements," *Proc. London Math. Soc.* A20.

(2) LaRue, J. C., Deaton, T. and Gibson, C. H., 1975, "Measurement of High Frequency Turbulent Temperature," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 46, p. 757.

(3) Warhaft, Z. and Lumley, J. L., 1978, "An Experimental Study of The Decay of Temperature Fluctuations in Grid-Generated Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol.88, pp. 659~684.

(4) Stapountzis, H., Sawford, B. L., Hunt, J. C. R. and Britter, R. E., 1986, "Structure of the Temperaure Field Downwind of a Line Source in Grid Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 165, pp. 401~424.

(5) Karnik, U. and Tavoularis, S., 1989, "Measurements of Heat Diffusion from a Continuous Line Source in a Uniformly Sheared Trbulent Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 202, pp. 233~261.

(6) Chung, M. K. and Kyong, N. H., 1989, "Measutement of Turbulent Dispersion behind a Fine Cylindrical Heat Source in a Weakly Sheared Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 205., pp. 171~193.

(7) Warhaft, Z., 1984, "The Interference of Thermal Fields from Line Sources in Grid Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 144, pp. 363~387.

(8) Shlien, D. J. and Corrsin, S., 1974, "A Measurement of Lagrangian Velocity Autocorrelation in Approximately Isotropic Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 62, pp. 2.

(9) Raupach, M. R. and Legg, B. J., 1983, "Turbulent Dispersion From an Elevated Line Source," *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 111~137.

(10) Cho J. R. and Kim K. C., 1993, "A Simple High-Performance Cold-Wire Thermometer," *Meas. Sci. Technol.* 4, pp. 1346~1349.

(11) Fabris, G., 1983, "Third-order Conditional Transport Correlations in the Two-dimensional Turbulent Wake," *Phys. Fluids*, Vol. 26, pp. 422~427.

(12) Monin, A. S. and Yaglom, A. M., 1971, "Statistical Fluid Mechanics," Vol. 1, MIT Press.

(13) Dekeyser, I. and Launder, B. E., 1983, *A Comparision of Triple Moment Temperature-Velocity Correlations in the Asymmetric Heated Jet with Alternative Closure, Turbulent Shear Flow* 4, Springer-Verlag, pp. 102~120.

(14) Zeman, O. and Lumley, J. L., 1979, *"Buoyancy Effects in Entraining Tubulent Boundary Layer: A Second-Order Closure Study," Turbulent Shear Flow* 1, Springer-Verlag, pp. 295~306.

(15) 김경천, 정양범, 김상기, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(1)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제3호, pp. 690~700.

(16) 김경천, 정양범, 강동구, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(2)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1322~1329.