

열적으로 성층화된 횡단류에 분출된 제트의 난류확산 거동 (II)

김삼기* · 김경천**
(1999년 4월 20일 접수)

Turbulent Dispersion Behavior of a Jet issued into Thermally Stratified Cross Flows (II)

Sang Ki Kim and Kyung Chun Kim

Key Words: Jet(제트), Turbulent Dispersion(난류확산), Thermally Stratified Cross Flow(열성층 횡단류), Stability Parameter(안정성 계수), Restratification(재성층화)

Abstract

The turbulent fluctuations of temperature and two components of velocity have been measured with hot- and cold-wires in the Thermally Stratified Wind Tunnel(TSWT). Using the fin-tube heat exchanger type heaters and the neural network control algorithm, both stable ($dT/dz = 109.4 \text{ }^\circ\text{C}$) and unstable ($dT/dz = -49.1 \text{ }^\circ\text{C}$) stratifications were realized. An ambient air jet was issued normally into the cross flow($U_\infty = 1.0 \text{ m/s}$) from a round nozzle($d = 6 \text{ mm}$) flushed at the bottom wall of the wind tunnel with the velocity ratio of $5.8(U_{jet}/U_\infty)$. The characteristics of turbulent dispersion in the cross flow jet are found to change drastically depending on the thermal stratification. Especially, in the unstable condition, the vertical velocity fluctuation increases very rapidly at downstream of jet. The fluctuation velocity spectra and velocity-temperature cospectra along the jet centerline were obtained and compared. In the case of stable stratification, the heat flux cospectra changes its sign from a certain point at the far field because of the restratification phenomenon. It is inferred that the main reason in the difference between the vertical heat fluxes is caused by the different length scales of the large eddy motions. The turbulent kinetic energy and scalar dissipation rates were estimated using partially non-isotropic and isotropic turbulent approximation. In the unstable case, the turbulent energy dissipation decreases more rapidly with the downstream distance than in the stable case.

기호설명

- d : 제트직경
- E_k, E_p : 수직난류운동에너지 및 위치에너지
- E_T, E_s : 냉선온도계 및 정온유속계 출력전압
- g : 중력가속도
- k_l : 웨이브수
- l_t : Thermal(overtuning) scale
- N : Brunt-Väisälä 주파수

- Re : Reynolds 수
- S : 안정성계수
- T_0 : 자유유동 평균온도
- U, T : 국소속도 및 온도
- U_0 : 횡단류 평균속도
- U_{jet}, T_{jet} : 제트 분출속도 및 온도
- u', w' : 유동방향 및 수직방향 r.m.s. 속도
- x, y, z : 직교좌표계

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 열 및 물질전달 연구실

그리스문자

- α : 분출속도비
- ε, χ : 에너지 및 스칼라 소산
- θ' : r.m.s. 온도

1. 서론

횡단류에 수직으로 분출되는 제트유동은 그 유동의 복잡성으로 인해 수십년 동안 많은 공학자들의 연구대상이 되어왔다. 또한 그 응용대상은 이륙과정에서의 V/STOL 비행기나 가스터빈 연소기 및 혼합공정들 등 공학적 분야 뿐만 아니라 냉각탑 및 굴뚝연기의 확산과 같은 환경적 측면에서도 그 적용사례를 다양하게 볼 수 있다. 본 연구는 후자의 사례와 밀접한 관계가 있으며, 이러한 유동의 경우 제트하류의 온도분포, 제트로부터 횡단류로 투입되는 유해물질의 농도분포, 또는 제트의 물리적 제적 등이 주요 설계변수들이다.

이러한 설계변수들에 대한 주요 영향인자로서 횡단류와 제트의 속도비, 제트의 출구직경에 대한 횡단류의 레이놀즈수, 제트의 출구온도 등을 들 수 있으며 본 연구에서는 여기에 횡단류의 열성층형태를 추가하고자 한다. 왜냐하면 이러한 유동은 주로 대기경계층 내에 존재하며, 대기경계층은 태양복사열 및 대기의 상태에 따라 다양한 온도구배를 형성하고 있기 때문이다. 이러한 열적 성층구조는 유동장 내의 스칼라 확산 뿐만 아니라 유동장의 난류구조에 대해서도 지대한 영향을 미치게 된다. 김정천 등⁽¹⁾은 안정된 열성층구조가 원주후류의 난류구조에 능동적으로 작용함을 보였으며, 본 연구의 전편⁽²⁾에서는 유동가시화기법을 이용하여 횡단류의 열적 성층구조의 형태가 제트의 발달과정에 있어 어떠한 영향을 미치는지에 대해 정성적으로 규명한 바 있다.

굴뚝에서 분출된 제트의 난류확산에 대한 예측 및 평가를 위해 그 동안 여러 가지 변수들에 대한 광범위한 현장에서의 관찰연구들과 여러가지 반경험적인 이론들을 조합하여 많은 연기발전공식들⁽³⁾과 연기확산모델들⁽⁴⁾이 도출되었다. 그러나 이러한 공식 및 모델들은 수학적 가정 및 제한된 실험데이터로부터 유도됨으로 인해 아직 신뢰성 있는 결과를 제공하지 못하고 있으며, 특히 유동이 열적으로 성층화되어 있을 경우 제트 내의 정확한 난류구조를 규명하지 못하고 있는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 전편⁽²⁾의 유동가시화 및 평균유동장 측정에 의한 시도를 토대로 하여 제

트의 중심제적에 따른 난류 특성치들의 발전형태 및 난류 스펙트럼분석을 수행함으로써 열성층 형태에 따른 제트구조 및 난류확산 메커니즘을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 사용된 좌표계는 제트노즐을 중심으로하여 유동방향을 x , 수평방향을 y , 그리고 바닥면으로부터 수직방향을 z 로 하였다. 저속 개방형의 열성층풍동(thermally stratified wind tunnel)이 실험에 사용되었으며, 시험부의 크기는 높이 300mm, 넓이 800mm, 길이 2,200mm이다. 수축부의 상류에 위치한 온도구배발생기는 Fin-Rod 형 점퍼트 열교환기로서 SSR(solid state relay) 전력소자를 이용한 전력제어장치를 통해 제어된다. 제트가 분출되는 파이프는 시험부 바닥의 폭방향으로 중간에 수축부로부터 하류방향으로 200 mm 인 지점에 위치시켰다. 제트의 직경(d)은 6 mm이고 노즐의 출구는 시험부의 바닥과 같은 높이이며 바닥으로부터 수직방향으로 분출된다.

유동장의 난류측정은 X형 열선(Dantec 55P61) 및 I형 냉선(Dantec 55P31)을 조합하여 이용하였으며 두 센서간의 간격은 약 1 mm 이내로 평행하게 조합하였다. 프로브로부터의 난류속도 및 온도데이터는 각각 TSI사의 4채널 정온열선풍속계(IFA300) 및 실험실 자체제작된 DC 브릿지형 정전류 냉선온도계⁽⁵⁾를 거쳐 범용 A/D 변환기(WIN30DS) 및 개인용컴퓨터에 획득, 저장되었다.

측정은 Fig. 1에서 보는바와 같이 각 열성층조건에 대해 제트의 중심제적을 따라가면서 수행되었다. 하류방향으로 측정점은 제트출구로부터 $50d$ 간격으로 다섯개의 지점들이 선택되었다. 데이터 획득주파수는 5kHz, 1회 측정당 데이터수는 8,192개였으며, ensemble 평균을 위해 각 측정점에 대해 100회의 데이터 획득이 수행되었다. 측정데이터의 불확실도(uncertainty)를 평가하기 위해 $x/d = 50$ 에서 ensemble 평균에 대한 각 측정치들의 표준편차를 Table 1에 나타내었다. 평균속도(U) 및 평균온도(T)에 대한 불확실도는 신뢰도 98%에 대해 안정조건에의 경우 약 1% 이내, 불안정조건에의 경우는 약 2% 이내로서 안정조건에 비해 다소 높게 나타났다.

Table 1 Measurement uncertainties for each property at $x/d = 50$.

Condition	σ_U	σ_T	σ_w	σ_w	$\sigma_{\theta'}$	$\sigma_{w\theta}$
Stable	0.0045	0.1154	0.0032	0.0025	0.0649	0.0016
Unstable	0.0109	0.3338	0.0039	0.0035	0.1390	0.0021

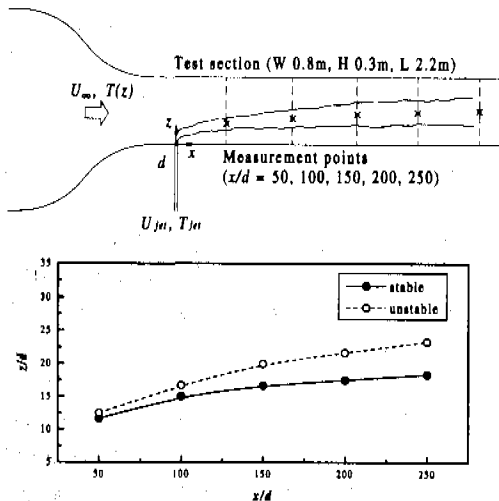


Fig. 1 The schematic of experimental setup and the measurement points for stratification conditions.

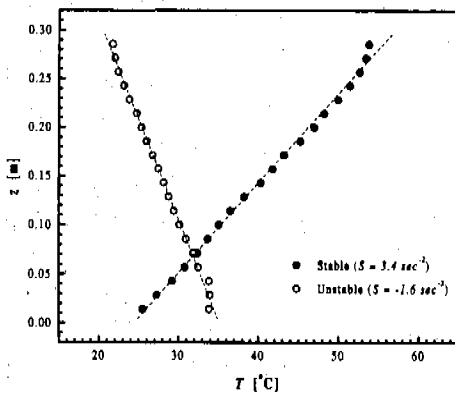


Fig. 2 Crossflow thermal stratification conditions.

실험조건은 본 논문의 전편과 마찬가지로 횡단류의 속도(U_0)는 균일유동으로서 약 1.0 m/s이며 평균난류강도는 약 1% 이내였다. 분출속도비($\alpha = U_{jet}/U_0$)는 5.8로 일정하게 유지되었으며 이때 제트의 출구온도(T_{jet})는 약 20 °C 였다. 제트직경

에 대한 횡단류의 레이놀즈수(Re_d)는 약 400, 제트 파이프내의 레이놀즈수(Re_{jet})는 약 2,300이다.

횡단류의 열성층조건은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가장 기본적인 선형성층구조인 안정(stable, $S = 3.4 \text{ sec}^2$) 및 불안정(unstable, $S = -1.6 \text{ sec}^2$)조건을 적용하였다. 여기서 S는 안정성계수(stability parameter, $S = N^2 = (g/T_0 \cdot dT/dz)$), N은 Brunt-Väisälä 주파수이다.

Brunt-Väisälä 주파수는 성층유동내의 입자 운동방정식으로부터 유도된 것으로서 공기입자가 그 평형상태로부터 부력장에 의해 변위되어 진동하는 주파수를 나타낸다. 따라서 안정성계수는 유체의 안정성과 성층화 강도에 대한 중요한 지표가 되는 매개변수이다.⁽³⁾

3. 열선 및 냉선 교정

열성층화된 유동장에서 난류유동현상을 분석하기 위해서는 속도와 온도를 동시에 측정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 요구속도 및 온도의 조절 및 유지가 가능한 수직 제트 형태의 특수 열선-냉선 교정 장치를 사용하였다. Fig. 3은 냉선 및 열선의 교정결과를 나타낸다.

난류의 온도성분 측정은 자체 제작된 DC 브릿지형 정전류 냉선온도계에 의해 이루어지며, 출력전압 E_T 와 센서온도 T_w (= 유동온도 T)의 관계식은 아래식과 같이 선형식으로 이루어지며 100 μA 의 미세전류로 작동되기 때문에 유동속도와 무관하다.

$$E_T = GIR_0\alpha(T_w - T_0) \quad (1)$$

여기서, G는 게인, I는 냉선전류, R_0 와 α 는 각각 기준온도 T_0 에서 냉선의 저항 및 온도상수이다. 그림에서 보는바와 같이 광범위한 온도범위에 대해 선형적인 응답을 잘 나타내고 있다.

유동속도에 대한 열선의 응답은 열선과 주위유체와의 열전달 관계식으로부터 얻을 수 있다. 이에 대한 최초의 관계식은 King에 의해 정립되었으며, 그 결과가 여러 유동조건에 대해 결함은 있지만 근본개념은 변함없이 사용되고 있다. Lienhard와 Van Atta(1990)⁽⁶⁾는 수정된 King의 법칙을 이용하여 광범위한 온도범위에서의 열선교정식을 아래식과 같이 유도하였다.

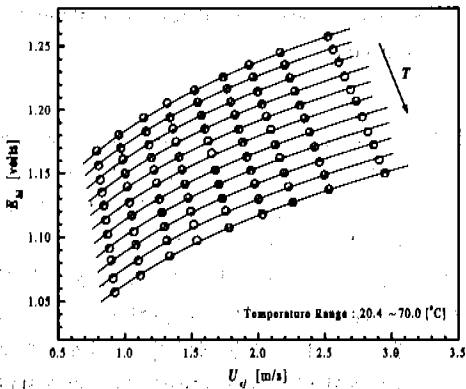
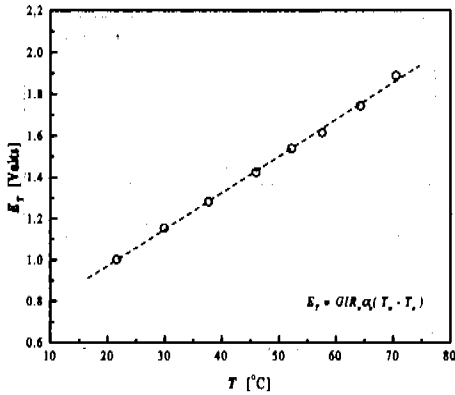


Fig. 3 The results of sensor calibration. (upper : cold-wire, lower : hot-wire)

$$E_b^2 = (T_w - T)(A(T_w + T)^{0.84} + BU^n) \quad (2)$$

여기서, A, B, T_w 는 교정에 의해 구해지는 상수이며, 지수 n 은 0.45를 사용하였다. E_b 는 열선의 출력전압이며 U 와 T 는 각각 교정시 유동속도 및 온도를 나타낸다. 본 연구에서의 열선에 대한 교정은 Lienhard와 Van Atta의 교정식과 Lookup 테이블 방식을 혼합하여 사용하였으며, 김경천 등⁽⁷⁾ 이와 유사한 방법으로 원주후류의 난류 측정에 적용한 바 있다. 교정유속은 0 ~ 3. m/s, 유입각은 $\pm 45^\circ$, 온도는 상온 ~ 70°C 범위에 대해서 수행하였다. 그림에서 보는바와 같이 측정치와 교정식이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 난류 확산 특성

열성층 온도구배형태에 따른 제트 내의 난류확

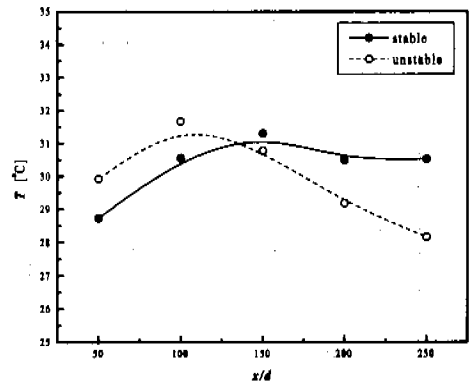
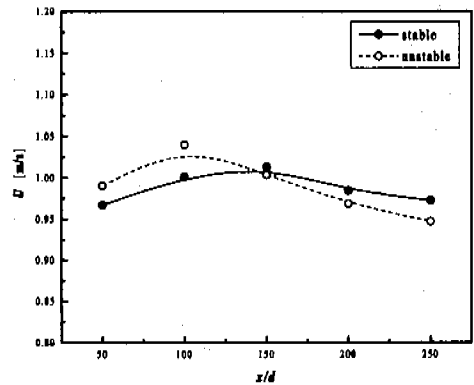


Fig. 4 The distribution of mean properties of flow along the jet trajectory. (upper : streamwise mean velocity, lower : flow mean temperature)

산특성을 살펴보기 위하여, 열성층 온도구배의 가장 기본형태인 안정 및 불안정 조건에 대하여 난류측정이 수행되었다. 실험방법에서 보여진 바와 같이 측정점들은 제트 중심궤적을 따라 선택되었다. 제트 중심궤적은 최대속도 지점으로서 제트 내부의 난류구조를 대표할 수 있는 곳이며, 또한 유동의 대칭지점으로서 X형 열선을 이용한 유속 측정시 그 측정오차를 최소화시킬 수 있는 지점으로 판단될 수 있다.

Fig. 4는 안정 및 불안정 조건에 대해서 유동하류 위치에 따른 유동방향 평균속도 및 평균온도의 변화를 나타낸다. 제트 출구로부터 유동이 상부로 발달하면서 $x/d = 100$ 부근까지는 유속이 다소 증가하다가 그 이후로는 제트의 확산에 의해 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 열성층조건에 대해서는 제트의 초기발달영역과 먼 후류영

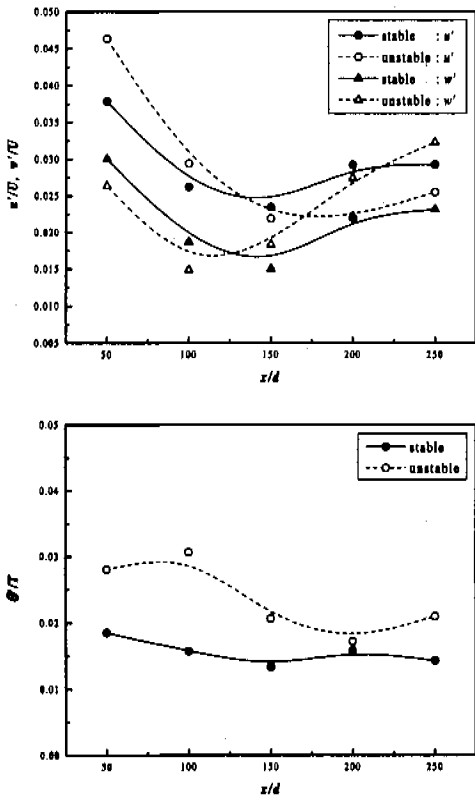


Fig. 5 The distribution of r.m.s. properties of flow along the jet trajectory. (upper : r.m.s. velocity, lower : r.m.s. temperature)

역에서 서로 상반되는 경향을 보이는데 이것은 제트 내부의 온도변화와 밀접한 관련이 있다. 제트 중심궤적에 대한 온도분포는 횡단류의 수직 온도분포에 지배된다. 즉, 약 20 °C의 일정온도의 제트가 성층유동장으로 분출되기 때문에 안정조건인 경우 초기에는 제트가 횡단류 하부의 저온영역에서 상부의 고온영역으로 발달하기 때문에 횡단류와의 혼합에 의해 그 온도가 점차 상승하다가 그 이후로는 제트궤적의 발달이 억제되어 거의 일정하게 유지되고 있다. 반면, 불안정조건인 경우에는 축정구간 전체에 걸쳐 제트가 횡단류 하부의 고온영역에서 상부의 저온영역으로 발달하고 있으며, 초기발달시에는 상온의 제트가 횡단류 하부의 고온유체를 유입하여 그 온도가 증가하나 제트궤적이 상부로 발달하면서 다시 감소하는 경향을 보이게 된다.

유동이 강하게 성층화되면 유동 내부에는 강한

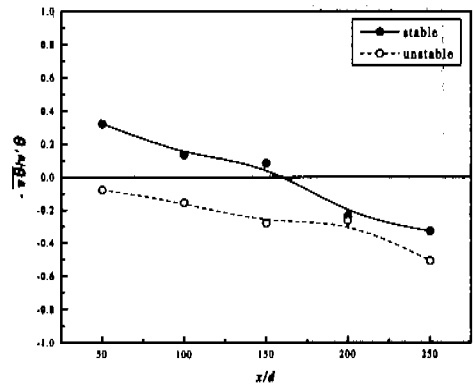


Fig. 6 The vertical heat flux distribution along the jet trajectory.

부력장이 형성되며 이것은 난류유동장의 형성에 직접적으로 관여한다. 따라서 제트 내부의 난류 특성치들은 이러한 횡단류의 부력장과 제트의 혼합과정에 의해 특징지어질 수 있다.

Fig. 5는 제트 내의 난류의 속도 및 온도변동성분의 변화를 나타낸 것이다. 속도변동성분은 전체적으로 제트 자체의 운동에너지가 지배적으로 작용하는 초기영역(약 $x/d < 150$)에서는 감소하다가 그 이후 영역에서는 횡단류의 부력장이 지배적으로 작용하여 그 값이 증가 또는 유지하는 경향을 보이고 있다. 그러나 열성층의 조건에 따라 그 결과는 상반되게 나타나고 있다. 부력장이 지배적으로 작용하는 하부영역에서, u' 는 안정조건인 경우 난류에디들 유동방향으로 신장시키는 작용에 의해 불안정조건에 비해 크게 나타나며, w' 는 그 반대의 현상을 보인다. 특히 불안정조건인 경우 온도변동성분에 대해서도 유동장 전영역에 걸쳐 안정조건에 비해 크게 나타나고 있다. 이것은 열성층에 의해 형성된 부력장이 난류 확산에 있어서 능동적으로 작용함을 증명하는 것이며, 특히 오염물질과 같은 스칼라 확산에 대해서 매우 중요하게 고려되어야 한다.

Fig. 6은 속도-온도 상관관계 ($-w\theta'/(w'\theta)$)로서 제트 내에서 수직방향의 난류 열유속(turbulent heat flux)의 변화를 나타낸다. 그림에서 양(+)의 값은 중력방향의 열유속, 음(-)의 값은 그 반대를 의미한다. 일반적으로 유동이 안정적으로 열성층화되면 부력에 의해 유체입자의 수직방향으로의 운동을 억제하며 열유속은 중력방향으로 형성된

다. 따라서 유동이 하류로 가면서 수직 난류운동 에너지가 감소시키며 난류 열유속 또한 감소하게 된다. 그러나 어느 시점이 되면 열유속이 음으로 떨어져 역온도구배(counter-gradient)의 열유속이 형성되며, 하류로 가면서 이러한 현상은 반복된다. 이것은 재성층화(restratification) 과정으로 설명되어지는데, 수직운동에너지와 위치에너지의 상호변환작용으로서 난류혼합에 의해 변위된 유체입자가 다시 그 평형상태로 되돌아가는 과정이 반복되면서 발생하는 것이다. Lienhard와 Van Atta(1990)⁽⁶⁾는 격자난류를 이용하여 이러한 현상을 보고하였으며, 유동방향의 거리를 유속과 성층화강도로 조합하여 무차원시간($xN/2U\pi$)으로 변환하였을 때 약 0.5 ~ 0.6 사이에서 재성층화가 발생함을 보였다. 본실험의 경우 제트 내의 강한 혼합작용에 의해 무차원시간이 약 0.3에서 재성층화가 관찰되고 있으며, 균일난류장에 비해 약 2배 빨리 발생하고 있다.

반면 불안정조건에 대해서는 제트가 하류로 발달하면서 중력 반대방향의 열유속이 계속해서 커지는 현상을 보이고 있다. 이것은 제트 내의 혼합과정에 의해 발달된 수직난류운동에너지가 강한 부력장에 의해 더욱 촉진됨으로써 변위된 유체입자가 그 평형상태로 되돌아가지 못하고 더욱 발산하는 현상으로 설명될 수 있다.

Fig. 7은 제트 중심제적에 따른 각 열성층조건에서의 수직난류운동에너지와 위치에너지의 비율 나타낸다. 성층유동장에서 각각의 에너지는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_k = \frac{1}{2} \rho_0 \overline{w^2}, \quad E_p = \frac{1}{2} \rho_0 N^2 l_i^2 \quad (3)$$

여기서, $l_i (= \theta / (dT/dz))$ 는 overturning scale로서 평균온도구배를 거슬러 유체입자를 운반함으로써 형성되는 온도변동에 의한 실질적인 난류 와의 길이차원을 의미한다. 따라서 위치에너지(E_p)는 성층유동장에서 유체입자가 부력을 받아 변위함으로써 가지는 에너지를 나타내는 것이다.

그림에서 보는 바와 같이, 안정조건인 경우 유동하류로 가면서 에너지비가 감소하다가 재성층화가 발생하는 시점($x/d > 150$)에서 다시 커지고 있다. 이것은 재성층화시 운동에너지의 위치에너지로의 변환을 증명하는 것이다. 반면, 불안정조건인 경우 열성층강도는 안정조건에 비해 상대적으로 작으나 그 불안정한 온도구배에 의해 l_i 가 상대적으로 크게 나타남으로써 유동초기에는 운동에너지와 위치에너지가 거의 같게 나타나고 있으며, 하류로 가면서 강한 부력장에 의해 운동에너지가 급격히 커지고 있다.

4.2 스펙트럼 분석

제트 내의 난류구조를 파악하기 위하여 각 열성층조건에 대해 제트의 중심제적을 따라 제트출구로부터 하류위치에 따른 스펙트럼을 분석하였다.

Fig. 8은 수직속도성분(w)에 대한 각 열성층조건에서의 스펙트럼을 나타낸다. 여기서 k_x 는 웨이브수로서 $2\pi f/U_0$ 로 정의된다. 그림에서 보는바와 같이 제트가 유동하류로 갈수록 두 열성층 조건에 대해 소규모와(small scale eddy)의 에너지는 줄어들며 대규모와(large scale eddy)의 에너지는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 제트출구의 초기영역에서 형성된 교에너지의 소규모와들이 제트하류로 가면서 혼합 또는 서로 융합되어 점차 대규모와들로 발전되어가고 있음을 의미한다. 그러나 와의 크기와 변화정도에 있어서 두 열성층조건은 명확한 차이를 나타내고 있다.

안정조건인 경우 안정된 온도구배로 인해 수직방향의 난류확산이 억제되어 수직방향으로의 와의 발달 또한 억제되고 있음을 볼 수 있다. 반면 불안정조건인 경우에는 하류로 가면서 소규모와의 에너지는 급격하게 줄면서 대규모와의 에너지가 상대적으로 급격히 증가함을 볼 수 있다.

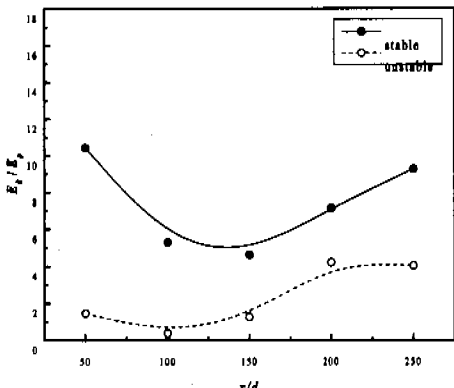


Fig. 7 Changes in turbulent energy ratio along the jet trajectory.

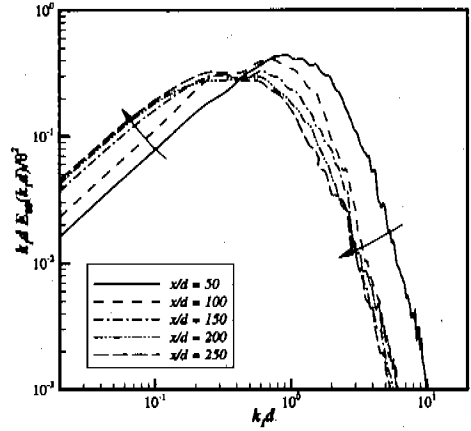
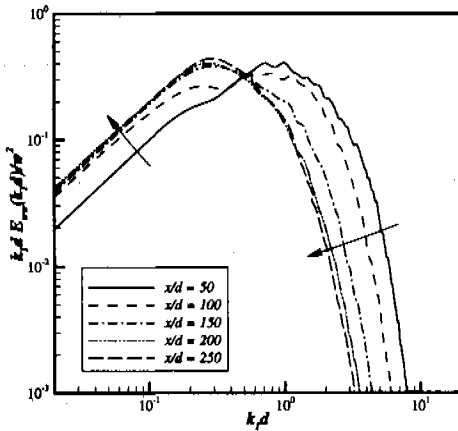
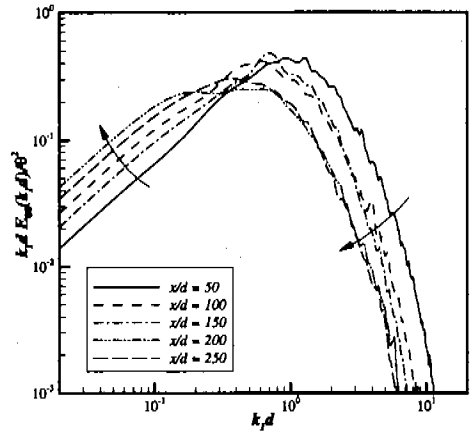
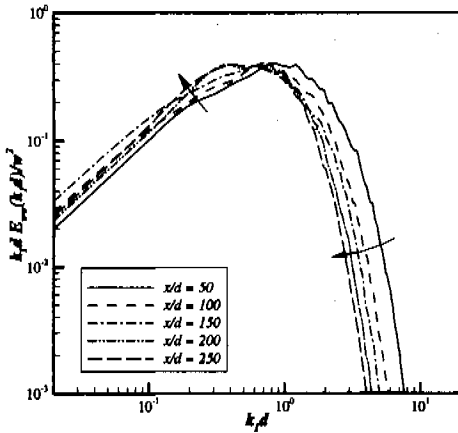


Fig. 8 Vertical velocity spectra along the downstream of jet. (upper : stable, lower : unstable)

Fig. 9 Temperature spectra along the downstream of jet. (upper : stable, lower : unstable)

이것은 불안정 온도구배로 인한 강한 부력장에 의해 수직방향의 난류확산이 증가하고 있음을 증명하는 것이다. 따라서 에너지보유와(energy containing eddy)의 크기가 불안정인 경우 안정조건에 비해 하류로 가면서 급격히 커지고 있으며, 특히 제트의 운동량이 약해지는 $x/d = 100$ 이상 의 먼후류영역에서 더욱 뚜렷이 나타나고 있다.

Fig. 9는 두 조건에 대한 온도스펙트럼을 나타낸다. 온도스펙트럼의 경우 방향성이 없는 스칼라값이므로 속도스펙트럼에 비해 그 차이가 뚜렷하지는 않으나 소규모와에 대해서는 불안정인 경우 보다 빠른 에너지 감소를 나타내고 있다.

한편, 성층조건 하에서 제트의 난류구조의 변화는 수직속도성분과 온도성분의 상관관계인 Cospectra ($Co_{w\theta}$)의 변화를 관찰함으로써 더욱 분명히 규명할 수 있다(Fig. 10)

$Co_{w\theta}$ 는 $\overline{w\theta}$ 와 마찬가지로 수직방향의 열전달을 의미하며, 곡선의 수직축은 주어진 웨이브수에서 존재하는 수직열전달량에 직접적으로 비례한다. 따라서 $-Co_{w\theta}$ 의 양(+)의 값은 중력방향의 열이송을, 음(-)의 값은 중력반대방향의 열이송을 나타낸다.

안정조건인 경우 초기의 상부에서 하부로의 열전달량은 점성과 분자간의 전도(conductivity)로 인해 유동이 진행될수록 감소하고 있다. $x/d = 150$ 이상에서는 대규모와의 열이송이 거의 소멸될 뿐만 아니라 스펙트럼의 부호 변화가 발견된다. 이것은 열이 저온부에서 고온부로 이동하는 역구배(counter-gradient) 이송현상으로서 재성층화(restratification)라 부른다. 재성층화는 강한부력에 의해 대규모와가 찌그러들어 부서짐으로써 유체 입자들이 밀도구배에 대해 그들의 평형상태로 음

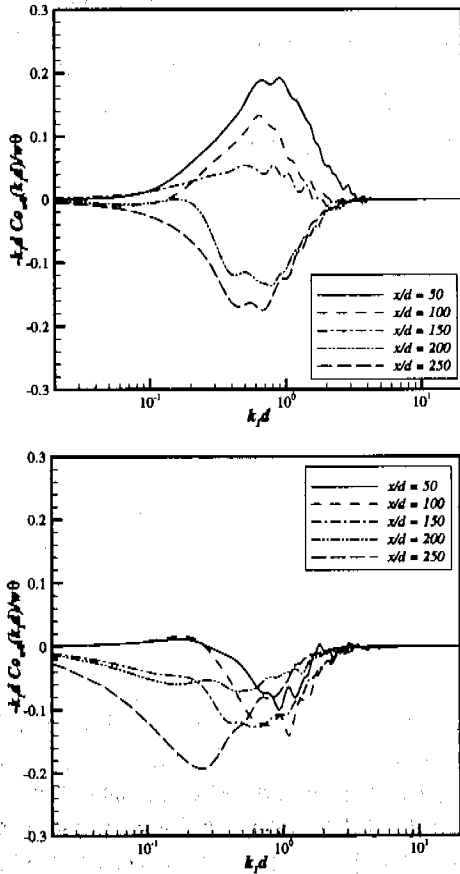


Fig. 10 Cospectra of vertical velocity and temperature along the downstream of jet. (upper : stable, lower : unstable)

직이게되고 이러한 현상이 뜨거운 와는 위로, 차가운 와는 아래로 형성됨으로써 역구배 이송현상이 발생하게 되는 것이다. Lienhard와 Van Atta는 안정된 열성층유동 내의 격자난류(grid turbulence)의 소멸과정에서 이와 유사한 현상을 발견하였으며, 이러한 재성층화가 특정크기의 대규모와에서 이루어진다고 보고하였다.⁽⁶⁾ 그러나 본 연구에서는 거의 모든 크기의 와에 대해 재성층화가 이루어지고 있는데 이것은 격자난류와 달리 제트 내의 반전와류쌍(counter-rotating vortex pair)에 의한 상대적으로 활발한 혼합과정에 기인한 것으로 사료된다. 반면, 불안정조건의 경우에는 안정조건에 비해 매우 다른 스펙트럼을 보이고 있다. 소규모와에 대해서는 전유동장에 걸쳐 상부로의 열이송

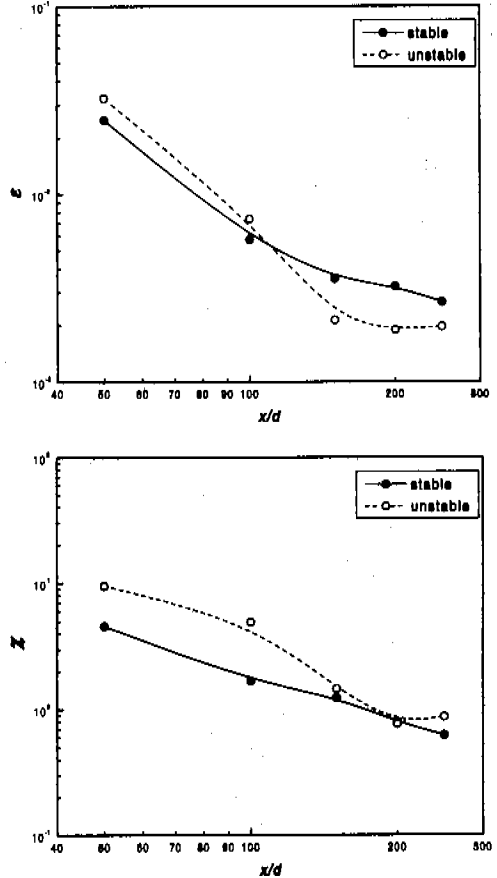


Fig. 11 The dissipation rates vs. downstream location of jet center. (upper : kinetic energy dissipation rates, lower : scalar dissipation rates)

이 유지되고 있는데 반해 대규모와에서는 초기에 오히려 아랫방향의 열이송을 보이고 있다. 이것은 제트출구에서 제트가 분출될 때 불안정 온도구배로 인해 하부의 고온유체를 유입함으로써 초기영역에서는 마치 역구배 열이송의 현상을 다소 보이다가 부력장이 강하게 발전하면서 $x/d > 100$ 에서는 모든 크기의 와에 대해서 상부로의 강한 열이송을 나타내는 것으로 판단된다.

4.3 에너지 및 스칼라 소산율

Fig. 11은 속도구배 및 온도구배 스펙트럼들 ($k^2 E_{uu}(k_1)$, $k^2 E_{ww}(k_1)$, $k^2 E_{\theta\theta}(k_1)$)을 유동방향의 각 측정지점에서 웨이브수에 대해 적분하여 구한 에너지 및 스칼라 소산율을 나타낸다. ϵ 에 대해

서는 부분적인 비동방성 근사를 이용한 Stillinger(1981)⁽⁹⁾의 식을 적용하였으며, x 에 대해서는 동방성난류를 적용하였다.(식 (4) 참조)

$$\begin{aligned} \epsilon &= \nu \left[10 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{5}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right], \\ x &= 6\alpha \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

에너지소산율은 두 성층조건에 대해 제트의 초기발달영역($x/d < 100$)에서는 급격히 떨어지고 있으며 먼후류로 가면서 그 감소율이 작아지고 있다. 특히 불안정의 경우, $x/d = 100$ 을 넘어서면서 안정조건에 비해 급격히 떨어지고 있는데 이것은 불안정 성층구조에 의한 난류의 소산이 억제되고 있음을 의미한다.

스칼라소산율은 제트유동장 내외 온도장이 비동방성이기 때문에 실제 x 값에 비해 하향예측을 초래할 수 있다. 에너지소산율과 반대로 스칼라소산율은 불안정조건외의 경우 안정조건에 비해 대규모와의 성장이 촉진됨으로써 유동장 전체에 걸쳐 소산율이 크게 나타나고 있다.

5. 결 론

안정 및 불안정 열성층조건에 대해서 제트의 중심케적에 따른 난류 특성치들의 발전형태 및 난류 스펙트럼분석을 수행하였다.

(1) 난류변동성분의 발전형태로부터, 제트유동에 대해 열성층형태는 $x/d > 100$ 인 영역에 대해서 강하게 작용함을 알 수 있었다.

(2) 안정조건인 경우 제트의 하류로 가면서 수직난류운동이 억제되어가는 현상을 보였으며 제트 내외 유동혼합에 의해 빠른 재성층화가 일어나면서 수직난류운동이 다시 증가하는 경향을 보였다. 반면, 불안정조건외의 경우 수직난류운동이 매우 활발하며, 특히 열성층강도가 안정조건에 비해 약함에도 불구하고 유동전반에 걸쳐 온도변동성분 및 위치에너지가 매우 크게 나타났다. 이것은 오염물질과 같은 스칼라 확산에 있어 매우 유리하게 작용됨을 의미하는 것이다.

(3) 제트의 중심케적에 따른 난류속정치에 대한 스펙트럼분석으로부터, 불안정조건인 경우 안정조건에 비해 보다 큰 대규모의 와가 난류구조를

지배하고 있으며 유동이 발달하면서 에너지보유와(energy containing eddy)의 변화가 급격히 일어나고 있음을 볼 수 있었다. 특히 수직난류열유속 스펙트럼으로부터 안정조건외의 경우 재성층화현상이 일반 격자난류에 비해 촉진되고 있음을 볼 수 있었으며 불안정인 경우 강한 부력장에 의해 하류로 가면서 대규모의 열와(thermal eddy)가 형성됨을 볼 수 있었다.

(4) 불안정조건외의 경우 안정조건에 비해 난류에너지소산은 억제되는 반면 스칼라소산은 매우 활성화됨을 볼 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 지원 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 김정천, 정양범, 김상기, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(1)," 대한기계학회논문집, 제18권 제3호, pp. 690~700.
- (2) 김정천, 김상기, 1999, "열적으로 성층화된 횡단류에 분출된 제트의 난류확산 거동(I)," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제2호, pp. 218~225.
- (3) Briggs, G. A. 1975, "Plume Rise Predictions," *In Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses*, American Meteorological Society, Boston, MO., pp. 59~111.
- (4) Nieuwstadt, F. T. M., 1992, "A Large-eddy Simulation of a Line Source in a Convective Atmospheric Boundary Layer-2. Dynamics of a Buoyant Line Source," *Atmos. Environ.*, Vol. 26A, pp. 497~503.
- (5) Cho, J. R. and Kim, K. C., 1993, "A Simple High-Performance Cold-Wire Thermometer," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 4, pp. 1346~1349.
- (6) Lienhard, J. H. and Van Atta, C. W., 1990, "The Decay of Turbulence in Thermally Stratified Flow," *J. Fluids Mech.*, Vol. 210, pp. 57~112.
- (7) 김정천, 정양범, 김상기, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(2)," 대한

기계학회논문집, 제18권 제5호, pp. 1322~1329.

- (8) Stilling, D. C., Helland, K. N. and Van Atta, C. W., 1983, "Experiments on the Transition of

Homogeneous Turbulence to Internal Waves in a Stratified Fluid," *J. Fluids Mech.*, Vol. 131, pp. 91~122.