

# 열적으로 성층화된 횡단류에 분출된 제트의 난류확산 거동( I )

김경천\* · 김상기\*\*  
(1998년 7월 8일 접수)

## Turbulent Dispersion Behavior of a Jet Issued into Thermally Stratified Cross Flows( I )

Kyung Chun Kim and Sang Ki Kim

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

### Abstract

Flow visualization study has been conducted to simulate the turbulent dispersion behavior of a crossflow jet physically under the conditions of various thermal stratification in a wind tunnel. A smoke jet with the constant ratio of the jet to freestream velocity is injected normally to the cross flow of the thermally stratified wind tunnel(TSWT) for flow visualization. The typical natures of the smoke dispersion under different thermal stratifications such as neutral, weakly stable, strongly stable, weakly unstable, strongly unstable and inversion layer are successfully reproduced in the TSWT. The instantaneous velocity and temperature fluctuations are measured by using a cold and hot-wire combination probe. The time averaged dispersion behaviors, the centerline trajectories, the spreading angles and the virtual origins of the cross jet are deduced from the edge detected images with respect to the stability parameter. All the general characteristics of the turbulent dispersion behavior reveal that the definitely different dispersion mechanisms are inherent in both stable and unstable conditions. It is conjectured that the turbulent statistics obtained in the various stability conditions quantitatively demonstrate the vertical scalar flux plays a key role in the turbulent dispersion behavior.

### 기호설명

- $d$  : 제트노즐의 출구직경
- $g$  : 중력가속도
- $L_0$  : 제트의 가상원점
- $N$  : Brunt-Vaisala 주파수
- $S$  : 안정성 계수
- $T_{upper}$  : 역전층유동의 상부온도
- $T_{lower}$  : 역전층유동의 하부온도
- $T, T_0$  : 유동의 국소온도 및 평균온도
- $U$  : 유동방향 국소속도

$u', w'$  : 유동방향 및 수직방향 난류섭동성분  
 $x, y, z$  : 직교좌표계

### 그리스문자

- $\alpha$  : 분출속도비
- $\theta_{1,2,3}$  : 제트의 수직퍼짐각도
- $\theta'$  : 유동의 온도섭동성분

### 1. 서론

인간 생활 영역 및 많은 생산설비들은 대기경계층 내에 존재하며, 그것들로부터 배출된 대기오염물질들은 직접적으로 대기경계층으로 방출되어 사라질 때까지 이송, 확산, 변형된다. 대기경계층은 성층유체의 대표적인 예로서 태양복사열

\* 회원, 부산대학교 기계공학부  
\*\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

의 정도에 따라 높이에 대해 다양한 온도구배를 형성하고 있으며, 이러한 열적 성층구조는 대기 경계층에서의 스칼라 확산에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 이들 오염물질의 방출로 인해 수반되는 여러 문제들은 그 확산 형태에 따라 방출원과 가까운 지역뿐만 아니라 먼 거리에서도 발생할 수 있으며, 이러한 대기 배출물들의 대표적인 형태인 굴뚝 연기의 확산은 환경적, 공학적 측면에서 중요한 주제이다.

굴뚝으로부터 분출되는 오염물질의 기본적인 유동형태는 횡단류(cross flow)에 대한 제트(jet)의 형태를 가진다. 횡단류에 수직으로 분출되는 단일 원형제트인 경우는 공학적으로 많이 연구되고 있는 대상이다<sup>(1-4)</sup>. 이와 같은 연구는 이륙과정에서의 V/STOL 비행기나 가스터빈의 연소기 혼합과정(mixing process)과 같은 직접적으로 제트를 이용한 시스템들의 연구 분야에 적용될 수 있으며, 주로 균일등온유동에서 제트 출구로부터 근접영역에 대한 제트 발전과정에서의 와(vortex)의 성장형태, 제트의 평균속도/온도분포, 그리고 횡단류와 제트의 운동량비에 따른 제트궤적(jet trajectory) 등의 연구들이 수행되었다.

또한 풍공학(wind engineering)에서는 이러한 주제물 굴뚝 이외에도 냉각탑의 확산, 통풍기, 자동차 배출구와 관련시켜 다루고 있다. 특히, 굴뚝에서 분출된 제트의 난류확산에 대한 예측 및 평가를 위해 그 동안 여러 가지 변수들에 대한 광범위한 현장에서의 관찰연구들과 여러가지 반경험적인 이론들을 조합하여 많은 연기발전공식(plume rise formulae)들이 도출되어 왔으며, Briggs<sup>(5,6)</sup>는 이러한 공식들을 전체적으로 조합하여 유용한 공식들을 만들었다. 그러나 유동이 열적으로 성층화되어 있을 때에 대한 연기의 거동에 대한 정확한 정보 및 실험자료들이 아직 미비한 상태이며 그 자세한 메커니즘이 아직 알려지지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 실제 대기경계층에서 형성될 수 있는 다양한 수직 온도구배 형태들을 풍동에서 실현하고 유동가시화(flow visualization) 방법을 이용하여 유동장에 수직으로 분사된 연기 제트의 거시적 거동 양상을 관찰하였다. 또한 열선-냉선 조합프로브(hot- & cold-wire combination probe)를 이용한 유동장 난류측정 및 전체 유동장에 대한 순간 및 연속적인 화상들

에 대한 화상분석을 통하여 열성층화 강도와 형태에 따른 제트의 난류구조 및 확산특성을 비교하였다.

## 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. 저속의 개방형의 열성층풍동(thermally stratified wind tunnel)<sup>(7)</sup>이 실험에 사용되었으며, 시험부의 크기는 높이 300 mm, 넓이 800 mm, 길이 2,200 mm이다. 수축부의 상류에 위치한 온도구배발생기는 Fin-Rod형 컴팩트 열교환기로서 SSR(solid state relay) 전력소자를 이용한 전력제어장치를 통해 제어된다. 연기가 분출되는 노즐은 시험부 바닥의 폭방향으로 중간에 수축부로부터 하류방향으로 200 mm인 지점에 위치시켰다. 제트노즐의 직경( $d$ )은 6 mm이고 노즐의 출구는 시험부의 바닥과 같은 높이이며 바닥으로부터 수직방향으로 분출된다. 유동가시화를 위한 연기는 혼합용기에서 연기 발생기(SAFEX, F2001+)로부터의 연기와 공기압축기로부터의 공기를 섞어서 만들어지며, 노즐 출구에서의 연기의 분출속도는 일정압력조절기 및 유량계를 이용하여 일정하게 유지시켰다. 유동가시화를 위한 광원으로서는 4 watt, Ar-Ion 레이저가 사용되었으며, 원통렌즈를 이용하여 시험부의 출구에서 유동 상류 방향으로 수직 평면광을 조명하였다. 순간적인 연기의 화상은 CCD 카메라(Sony, CCD-V5000)를 사용하여 1/125 초의 셔터속도로 획득하였으며 고해상도 화상처리보드(Samsung, FARA MVB-02)를 통해 컴퓨터에 저장되었다.

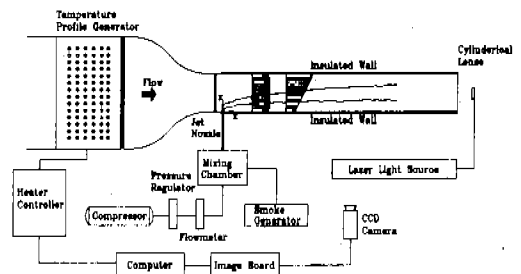


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

유동장의 난류측정은 X형 열선(Dantec 55P61) 및 I형 냉선(Dantec 55P31)을 조합하여 이용하였으며 프로우브로부터의 난류속도 및 온도데이터는 각각 정온열선풍속계(IFA300) 및 DC 브릿지형 정전류 냉선온도계를 거쳐 범용 A/D 변환기(WIN30DS) 및 개인용컴퓨터에 획득, 저장되었다. 열선의 유동속도 및 유입각에 대한 교정(calibration)은 0 ~ 3 m/s, ±45° 의 범위에서 수행되었으며, 열선 및 냉선의 유동온도에 대한 교정은 상온 ~ 70℃ 범위에 대해서 김정천 등<sup>(8)</sup>이 제안한 광범위 온도교정방법을 이용하였다.

3. 실험조건

다양한 열성층 조건하에서 연기의 확산거동을 지배하는 대표적인 인자들은 횡단류속도, 분출속도비(efflux velocity ratio), 제트직경, 성층화계수 등이다. 횡단류 속도는 모든 실험조건에 대해 1.0 m/s 로 세팅되었으며 평균난류강도는 약 1% 이 내였다. 분출속도비( $\alpha$ , 제트분출속도/횡단류속도)는 5.8로 고정되었으며 이때 연기제트의 제트출구온도는 약 20℃ 였다. 일반적으로 분출속도비의 변화에 따른 여러 연구들이 수행되었으나, 본 연구에서는 연기거동에 대한 다양한 열성층의 효과에 그 주안점이 있으므로 일정 분출속도비를 적용하였으며, 이것은 주어진 횡단류의 평균유속과 중립(neutral) 열성층조건에 대해 연기의 궤적이 시험부의 중심을 지나는 조건이다.

본 연구에서 횡단류의 열성층조건은 Table 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 여섯 가지의 서로 다른 온도구배조건들이 적용되었다. 이러한 조건들은 일반적으로 실제 대기경계층에서 가장 기본적으로 형성되는 온도구배의 형태들이다. 여기서 수식어 '약한' 및 '강한'은 편의상 상대적인 성층화 정도를 나타내기 위한 것이며,  $S$ 는 안정성계수(stability parameter,  $S = N^2 = (g/T_0 \cdot dT/dz)$ ),  $N$ 은 Brunt-Vaisala 주파수이다. Brunt-Vaisala 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. 따라서,  $S > 0$ 는 유체가 안정(stable) 상태를 나타내며,  $S < 0$ 는 불안정(unstable) 상태를

나타낸다.

Table 1 Experimental conditions.

Stratification condition	$dT/dz$ [°C/m]	$S$ [sec <sup>-2</sup> ]
Neutral	0 ( $T = 18.0$ °C)	0
Weakly stable	87	2.78
Strongly stable	212	6.34
Weakly unstable	-55	-1.78
Strongly unstable	-72	-2.31
Inversion layer	$T_{upper} = 49$ °C $T_{lower} = 24$ °C	-

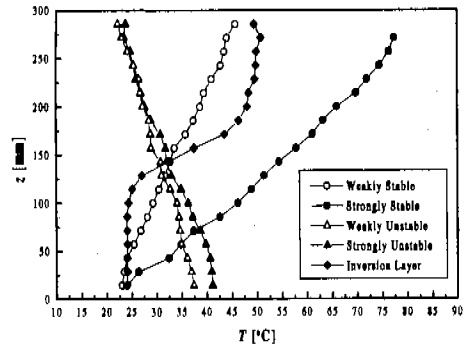


Fig. 2 Mean vertical temperature profiles at the entrance of test section.

4. 결과 및 고찰

4.1 제트 거동 특성

열성층화된 유동에서 난류는 일반적인 기계적 난류(mechanical turbulence)와 유동의 열적 구성에 따른 열적 난류(thermal turbulence)의 조합으로써 이루어진다. 특히 높이에 따른 온도의 변화는 유동의 안정성에 크게 영향을 미치며 그 분포양상에 따라 난류의 확산은 크게 달라진다. 일반적으로 안정적으로 성층화된 유동( $S > 0$ ) 내에서는 수직방향으로의 유체 입자 운동이 아르키메데스 힘에 의해 방해되며, 이것은 난류를 억제시키며 유동을 층류화시킬 수 있다. 반면, 불안정 성층유동( $S < 0$ )에서는 수직방향으로의 유체 입자 운동이 아르키메데스 힘에 의해 가속되어 난류가 증가된다<sup>(9)</sup>.

여섯 개의 서로 다른 열성층조건에서 얻어진 제트의 거동 양상들이 Fig. 3 (a) ~ Fig. 3 (f)에 나와있다. 획득된 원래의 화상들에 대해서 그 화

상정보들을 0에서 255까지의 화상강도(image intensity) 값들로 변환한 후 그 강도의 크기에 따라 나타내면 윤곽검출화상(edge detected image)을 얻을 수 있다. 여기서 화상강도는 연기의 농도에 상응한다. 윤곽검출화상은 조명의 상태, 피사체와 카메라와의 거리 등 화상강도와 농도의 교정(calibration)이 어렵기 때문에 절대적인 농도분포를 나타내지는 못하지만 각 화상 내에서 상대적인 농도분포를 보여줄 수 있으며, 또한 제트의 전체적인 윤곽 및 제트 내의 난류 에디들의 구성을 더욱 뚜렷이 보여주고 있으며 각 열성층 조건에 따라 독특한 특징들을 보여주고 있다. 따라서 이로부터 제트의 난류구조에 관찰 주안점을 두고자 한다.

Fig. 3 (a)는 중립조건에서의 결과로서 전형적인 횡단면 제트의 거동을 보여주고 있다. 자유유동의 큰 운동량에 의해 굽어진 제트유동은 제트의 중심축적으로부터 원뿔형상으로 퍼져 나가고 있으며, 작은 크기(small scale)의 기계적 난류가 지배적으로 작용하여 크고 작은 난류 에디들이 제트 내에 고르게 분포하고 있다.

Fig. 3 (b)와 Fig. 3 (c)는 약한안정과 강한안정 조건에서의 제트 거동으로서, 기계적 난류물 억제시키는 안정적인 온도구배로 인하여 제트의 수직방향 상승 및 확산폭이 중립조건에 비해 제한되고 있으며 안정화 강도가 커지면서 더욱 심화되고 있음을 볼 수 있다. 또한 윤곽검출화상에서 보는 바와 같이 제트 내의 에디들의 형상도 열성층이 안정화될수록 수직방향으로 억제되어 유동 방향으로 신장(stretching)되고 있다.

Fig. 3 (d)와 Fig. 3 (e)는 불안정한 열성층 조건에서의 제트 거동을 나타낸다. 유동 내에 불안정한 온도구배가 형성되면 자연대류(natural convection)에 의한 부력(buoyancy)이 발생하여 열적 난류가 증가되며 제트의 확산은 수직방향으로 활발해진다. 유동의 열적인 불안정도가 더욱 커지게 되면 Fig. 3 (e)에서 보는 바와 같이 대규모(large scale)의 열에디(thermal eddy)가 형성되어 제트의 거동이 상하로 크게 진동하게 되며 수직방향의 확산은 더욱 활발해진다. 특히 하류방향의 특정지점에서 유동의 불안정성으로 인해 제트가 급격히 상승하는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 3 (f)는 역전층 조건에서의 제트거동으로서

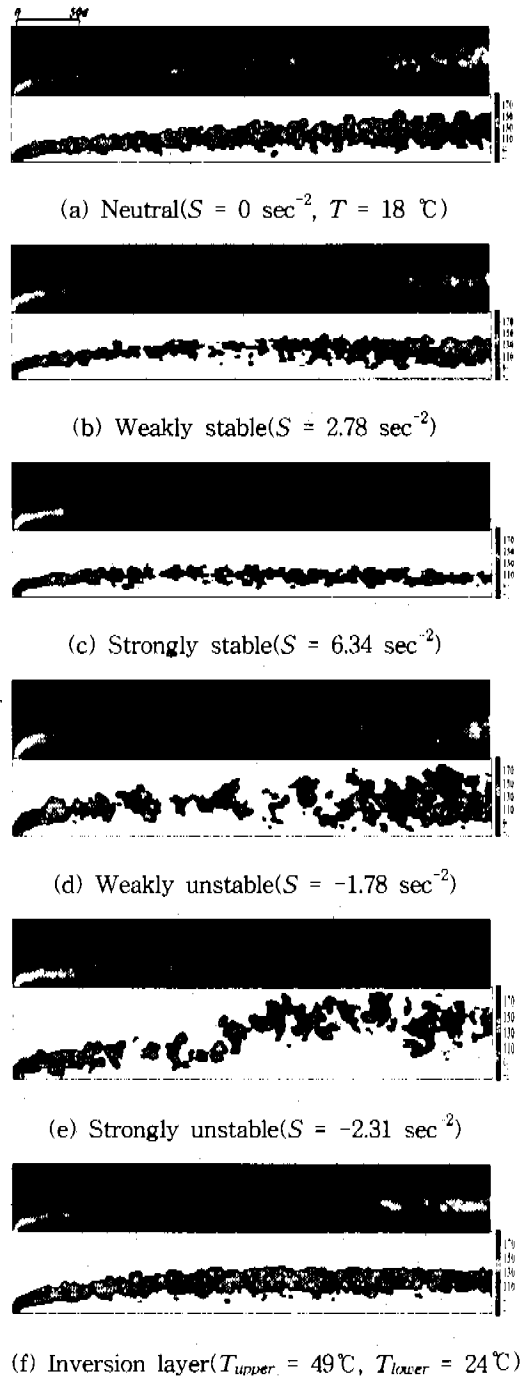


Fig. 3 The dispersion behaviors of jet under various stratification conditions (upper : original image, lower : edge detected image).

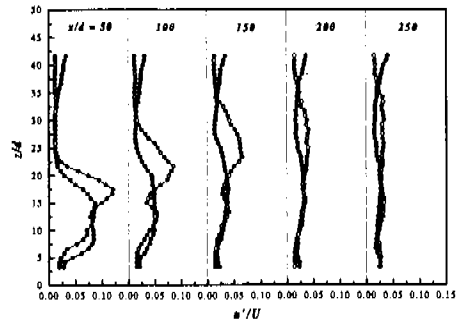
안정된 온도층이 유동의 상·하부에 급격하게 구성됨으로써 제트의 상부로의 발전은 그 경계면 이하로 억제되어 일정한 높이를 유지하고 있으며 에디들의 구성도 그 경계면에서 매우 날카롭게 형성되고 있음을 볼 수 있다. 반면 하부로의 확산은 유동이 진행됨에 따라 중립조건에서와 유사하게 발달하고 있음을 볼 수 있다.

이상의 가시화 결과들에 대한 정성적 고찰로부터 횡단면의 열성층 형태에 따라 제트의 거동 양상 및 난류구조의 형성이 다양하게 이루어짐을 알 수 있으며, 이것은 이와 유사한 열성층 유동이 대기정계층 내에 형성될 경우 열성층 형태가 오염원으로부터 배출된 오염물질의 거동 및 확산에 직접적으로 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

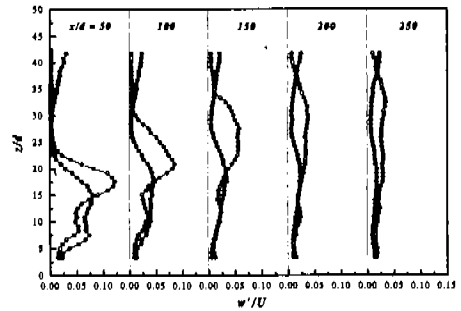
4.2 제트 확산 특성

열성층 온도구배형태에 따른 제트 내의 난류확산특성을 살펴보기 위하여 열성층 온도구배의 가장 기본형태인 안정 및 불안정 조건에 대하여 난류특성이 수행되었다. Fig. 4는 약한안정 및 약한불안정 조건에 대해서 유동하류 위치에 따른 난류특성치들의 비교를 나타낸다.

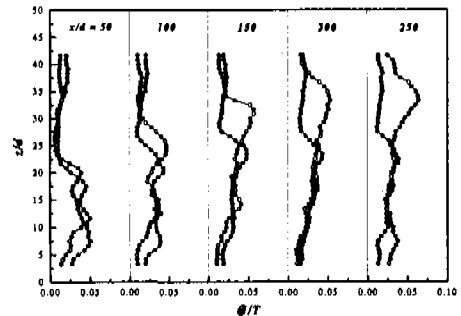
Fig. 4(a), (b), (c)는 제트 내의 수평방향, 수직방향의 난류강도 및 온도섭동성분의 분포를 나타낸 것으로서, 그림에서 보는바와 같이 제트가 발전하면서 주류와 직접적으로 간섭을 일으키는 제트의 상부경계 영역에서 유입이 활발해짐으로써 난류특성치들이 대체로 크게 나타나고 있다. 약한안정의 경우 앞서 가시화결과에서도 나타낸바와 같이  $x/d \geq 100$ 에서 이미 제트가 수평으로 꺾여 그 중심높이를 거의 일정하게 유지하고 있으며 그 확산폭도 하류로 가면서 거의 일정하게 유지하고 있음을 볼 수 있다. 반면 약한불안정의 경우 제트의 아래, 위 경계에서 불안정한 주류 공기를 유입함으로써 제트 내에서 혼합(mixing)이 활발하게 이루어져 난류강도가 상대적으로 크게 나타나며 그 확산폭도 아래, 위로 크게 퍼지고 있다. 특히 약한불안정의 경우 속도 및 온도 섭동성분의 분포가 제트 위 경계에 치중되어 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 가시화 결과에서도 나타나듯이 불안정의 경우 주류의 불안정성에 의해 제트가 전체적으로 상부로의 발전이 크고 그 확산폭이 커짐으로써 제트상부 경계에서 주류와의 간섭이 계속해서 크게 이루어지고



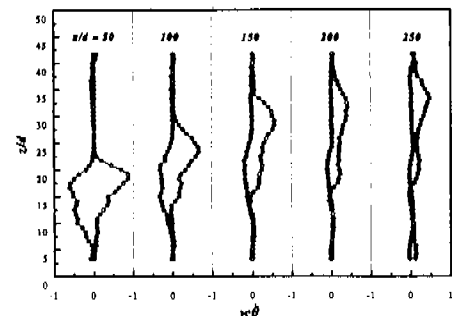
(a) Streamwise turbulent intensity profiles



(b) Vertical turbulent intensity profiles



(c) Temperature rms profiles



(d) Vertical turbulent heat flux

Fig. 4 The turbulent dispersion characteristics of jet under stratified flows (●: weakly stable, ○: weakly unstable).

있음을 입증하는 것이다. 특히 Fig. 4(d)는 속도-온도 상관관계로서 제트 내에서 수직방향의 난류 열유속(turbulent heat flux)을 나타낸다. 동온의 제트가 열적으로 성층화된 횡단류에 분출되면 주위 유체의 유입 및 대류열전달에 의해 제트 내외 온도재분포가 이루어진다. 약한안정인 경우 상부의 고온유체와 하부의 저온유체의 유입으로 인해 제트 내에서 난류 열유속이 아랫방향으로 형성되어 제트가 하류로 발전하면서 그 정도가 약해져가는 반면 약한불안정의 경우 하부의 고온유체와 상부의 저온유체로 인해 제트 내부에서도 불안정한 온도구배가 형성되어 난류 열유속이 윗방향으로 형성되며 제트 내부의 난류혼합이 활발히 이루어져 먼하류에 까지 그 영향이 유지되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 주류의 열성층분포의 형태가 제트 내부의 혼합 및 제트 확산 형태를 결정짓는데 직접적으로 관여하고 있음을 보여준다.

일반적으로 수직 분출 제트의 관련 연구들이 있어서 제트의 궤적(jet trajectory)은 주류와 제트의 상관관계를 결정짓는 중요한 정보를 나타낸다. 특히 본 연구와 같이 대기경계층 내의 굴곡 분출 유동에 응용되어질 경우 제트궤적은 대기의 조건에 따른 오염물질의 확산경로 예측에 적용될 수 있다.

Fig. 5는 각 열성층 조건들에 대해 하류의 위치에 따른 제트 궤적을 나타낸 것이다. 일반적으로 제트 궤적은 제트 대칭면에서 속도의 최대점의 궤적으로써 나타내지만, 본 연구에서는 유동가시화로부터 얻어진 윤곽검출화상으로부터 상·하부 윤곽의 중심점으로 취하였으며 각 조건에 대해 시간에 따라 무작위로 추출된 10장의 화상들을 앙상블 평균(ensemble average)을 취하였다. 제트의 포텐셜 코어(potential core) 영역의 끝에서 제트는 횡단류의 방향으로 매우 강하게 굽게 되며, 이 영역은 최대 굴곡영역이 된다. 굽어진 제트는 유동의 하류방향으로 대류하면서 수평 또는 수직방향으로 확산되며 열성층화 강도에 강한 영향을 받게된다. 그림에서 보는 바와 같이  $x/d$ 가 약 100 이하인 영역에서는 열성층 조건들에 대한 차이가 작게 나타나고 있는데 이것은 제트 유동의 관성력이 지배적으로 작용하기 때문으로 판단된다. 그러나  $x/d$ 가 약 100 이상의 먼하류 영역에서는 열성층 조건들에 대해서 제트 중심궤적의 형태가 매우 큰 차이를 나타내고 있다.

즉, 열성층이 안정화될수록 연기의 중심궤적은 낮아지고 있으며, 불안정화될수록 높아지고 있다. 이것은 먼하류 영역에서는 제트의 확산에 의해 그 관성력이 주류에 비해 상대적으로 약해지면서 주류의 수직온도구배에 의한 유체의 안정성이 제트의 확산경로에 대해 지배적으로 작용함을 보여준다.

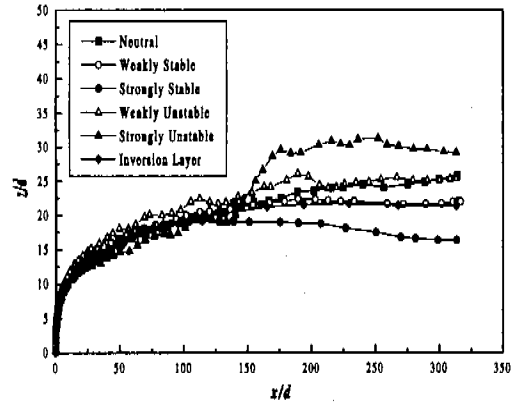


Fig. 5 The time average trajectories of jet centerline under various stratified flow.

Fig. 6은 각 조건에 대한 제트의 중심궤적을 식 (1)에 나타난 멱급수 함수로 근사한 것이다.

$$z/d = 0.975 \alpha^{0.9} (x/d)^{0.333} \quad (1)$$

이 식은 Bradbury<sup>(10)</sup>가 제안한 제트궤적 방정식으로서 중립조건에 대해서  $x/d < 100$ 에서 적용된다. 또한 Kamotani와 Greber<sup>(2)</sup>는 완전 발달된 난류 유동인 경우 횡단류와 제트궤적에 대한 레이놀즈 수는 평균속도분포와 제트궤적에 영향을 주지 못한다는 것을 보였다. 즉, 평균속도분포와 제트궤적은 운동량 유속비(momentum flux ratio)와 유동하류방향의 표준화된 위치에만 좌우된다는 것이다. 따라서 그림에서 보는바와 같이 본 실험결과는  $x/d < 100$  영역에서 위 식과 잘일치하고 있으며 먼하류 영역에서 중립 및 불안정 조건에 대해 전체적으로 아래로 치우치는 것은 시험부의 상부 벽면에 의한 제트 발전의 억제 효과로 사료된다.

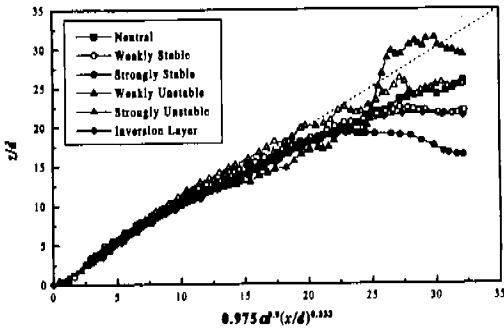


Fig. 6 The power law fitting of the jet centerline trajectories.

제트의 장시간 평균된 확산특성을 예측하기 위하여 수직퍼짐각도(vertical spreading angle),  $\theta$  와 가상원점(virtual origin),  $L_0$ 를 Fig. 7에 나타낸바와 같이 정의한다.

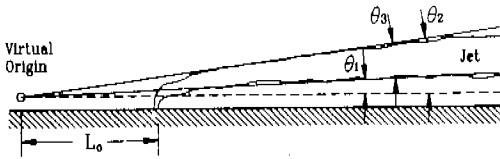
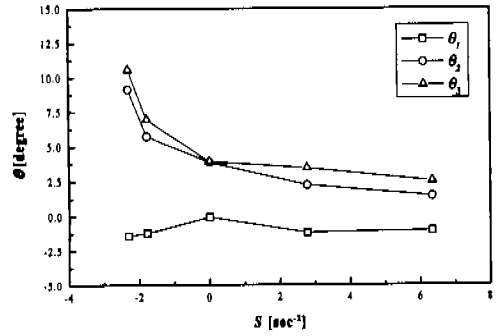
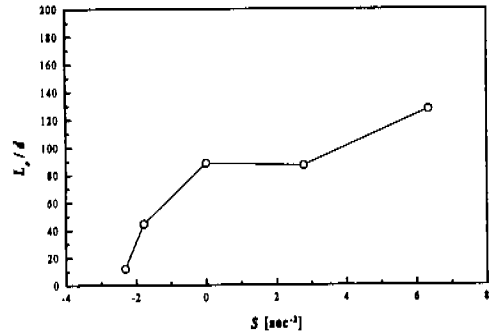


Fig. 7 Definition sketch of the jet spreading angles and the virtual origin.

수직퍼짐각도와 가상원점으로부터 전체적인 시간평균 제트 확산의 특성을 구할 수 있다. 각 조건에 대한 수직퍼짐각도 및 가상원점은 제트의 중심궤적을 구할 때와 마찬가지로 10장의 화상들에 대해 앙상블 평균하였다. Fig. 8은 유동의 안정성계수에 따른 제트의 수직퍼짐각도와 가상원점의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 안정성계수가 증가함에 따라 제트의 상대퍼짐각도,  $\theta_3$ 는 감소하고 있으며 가상원점은 증가하고 있다. 특이할 점은 안정 영역( $S > 0$ )에서 그 변화가 완만한데 비해 불안정 영역( $S < 0$ )에서는 그 변화가 매우 급격하게 나타나고 있다. 따라서 이것은 오염 확산 측면에서 볼 때 전통적인 정규분포 근사는 일반적인 확산모델로서 채택될 수 없음을 뒷받침해주고 있다.



(a) Jet spreading angles



(b) Virtual origin

Fig. 8 Vertical spreading angles and virtual origin distribution as a function of stability parameter.

### 5. 결론

실제 대기경계층에서 형성될 수 있는 열성층 유동의 다양한 형태가 풍동에서 실현되었으며, 이로써 앞으로의 열성층유동의 난류확산 메카니즘 연구를 진행시킬 수 있는 토대를 마련하였다.

제트의 거동에 대한 순간적인 화상들로부터 열성층이 안정화될수록 수직방향의 확산이 억제되며 불안정화될수록 촉진되는 현상을 관찰할 수 있었으며, 그로 인해 제트 내의 에디들의 형성양상도 다양하게 나타났다. 특히 불안정조건외 경우 하류로 갈수록 제트가 사인파 형상으로 진동하는 현상이 관찰되었으며 강한 불안정외 경우에서 제트가 수직방향으로 급격히 도약하는 현상을 볼 수 있었다. 이것은 주류에 대한 관성력과 부

력의 평형이 깨지면서 발생하는 현상으로 사료된다.

안정 및 불안정 조건에 대해서 유동하류 위치에 따른 난류특성치들이 측정되었다. 제트의 상부경계에서 주류와의 직접적인 간섭에 의해 유입이 활발하여 난류특성치들이 크게 나타났다. 불안정 조건의 경우 안정 조건에 비해 난류특성치들이 상대적으로 크고 그 확산폭도 아래, 위로 크게 나타났으며, 제트 내의 난류열유속 또한 윗 방향으로 형성되면서 먼하류에 까지 확산이 활발히 이루어짐이 관찰되었다.

제트 궤적은  $x/d$ 가 100 이하인 상류영역에서는 주유동의 열성층의 영향을 크게 받지 않았으며 그 이상의 하류 영역에서는 열성층 조건에 따라 다양하게 나타났다. 그리고 유동의 안정성계수에 따른 수직피침각도와 가상원점의 변화로부터 불안정 조건에서의 제트의 수직확산율과 안정 조건에서의 수직확산율이 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

### 참고문헌

(1) Margason, R. J., 1993, "Fifty Years of Jet in Crossflow Research," *Proc. N.A.T.O. A.G.A.R.D. Conf. CP-534*, pp. 1.1~1.4.  
 (2) Kamotani, Y. and Greber, I., 1972, "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross

Flow," *AIAA Jr.*, Vol. 10, No. 11, pp. 1425~1429.  
 (3) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 138, pp. 93~127.  
 (4) Fric, T. F. and Roshko, A., 1994, "Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1~47.  
 (5) Briggs, G. A., 1975, Plume Rise Predictions, in *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses*(Edited by Haugen, D. A.), pp. 59~111.  
 (6) Briggs, G. A., 1984, Plume Rise and Buoyancy Effects, in *Atmospheric Science and Power Production*(Edited by Randerson, D.), U.S. Department of Energy DOE/TIC-27601, pp. 327~366.  
 (7) 김정천, 정양범, 김상기, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(1)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제3호, pp. 690~700.  
 (8) 김정천, 정양범, 강동구, 1994, "열성층유동장에 놓인 원주후류의 특성에 대한 연구(2)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1322~1329.  
 (9) Sorbjan, Z., 1989, *Structure of the Atmospheric Boundary Layer*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 3~8.  
 (10) Bradbury, L. J. S., 1981, "Some Aspects of Jet Dynamics and Their Implications for VTOL Research," *Proc. N.A.T.O. A.G.A.R.D. Conf. CP-308*, pp. 1.1~1.2.