

## 연기선단의 전파속도 모델에 관한 연구

### Modeling of the Velocity of the Ceiling Jet Front

김명배 · 한용식

Myung-Bae Kim · Yong-Shik Han

한국기계연구원 환경설비연구부  
(2001. 06. 12. 접수/2001. 06. 20. 채택)

#### 요 약

복도나 터널과 같이 특정한 방향성을 가지는 공간에서는 천장아래에 형성되는 연기선단의 정상해석이 학술적인 면에서나 실용적인 면에서도 매우 중요하다. 본 연구는 2차원 축대칭 천장제트 선단의 전파속도를 모델화하기 위하여 상사해석 및 차원해석을 수행하였다. 그 결과 전파속도가 거리에 반비례하는 모델을 제안하였으며, 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다. 실험에서는 질소와 헬륨의 혼합가스를 원형 천장에 노즐로 분출시켜 화재로 인한 연기를 구현하였으며 속도측정을 위하여 레이저와 고속카메라를 이용한 가시화 기법이 사용되었다.

#### ABSTRACT

Decays of the ceiling jet front velocity under a circular ceiling are investigated. To simulate the ceiling jet in fires He and N<sub>2</sub> gas were injected from a nozzle to the center of the ceiling. The jet fronts in the form of turbulent eddies were traced by a high-speed camera system. The instantaneous locations of the front were obtained from visual readings of visualized front, and the radial velocity was calculated from the information of the time and the location with respect to the front. The similarity and dimensional analysis were also carried out to reveal the relationship between the velocity decay and the radial distance. It was shown that the radial velocity of the front was inversely proportional to the radial distance in the fully developed region from the experimental results and the theoretical analysis.

**Keywords :** Ceiling jet, Front, Velocity decay, Similarity, Dimensional analysis

### 1. 서 론

다구획(Multicompartiment)의 공간에서 연기의 이동 및 구획내 연층하강 현상은 2층존모델(Two-layer zonal model)에 의하여 성공적으로 해석되어 왔으며 그 타당성도 많은 실험에 의하여 입증되었다. 터널이나 복도 같이 한쪽방향으로 길이가 긴 공간구조에서는 연기선단의 전파, 연기와 천장과의 마찰 및 열손실, 연기와 공기의 혼합 등이 중요한 물리적 현상이기 때문에 존모델의 적용이 어려운 것은 주지의 사실이다.

최근 들어 활발해지고 있는 전산유체해석 기법을 이용하는 Field 모델은 상기의 물리적 현상을 다룰 수 있어 정확도 측면에서는 유용할 수 있지만 계산과정이 매

우 복잡하고 계산시간도 상대적으로 매우 길어 광범위하게 사용되기 어려운 현실이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 해당 구획을 다수의 작은 영역으로 나누어 접근하는 연구도<sup>1)</sup> 보고되고 있지만 근본적으로는 존모델에 기본을 두고있어 분명한 한계를 가지고 있다. 다른 시도로서는 여러 가지 실험과 해석적인 방법을 동원하여 연기선단의 전파속도 및 연기의 온도의 공간분포를 제안하는 보다 직접적인 연구들도 보고되고 있다.<sup>2-5)</sup>

Hinkley는<sup>6)</sup> 복도형태의 공간에서 천장아래 연기선단의 전파과정을 실험에 근거한 Froude 상사와 연기와 화염의 에너지 관계를 이용한 해석적인 방법을 이용하여 연기선단 전파속도의 공간분포를 지수함수로 제안하였다. He<sup>4)</sup>는 Kim<sup>2)</sup>의 실험결과를 이용하여 Hinkley 모델의 타당성을 검증하였다. 동일한 형태의 공간에서 연기온도의 공간분포도 지수함수를 이용하여 표현할

† E-mail: mbkim@mailgw.kimm.re.kr

수 있음이 여러 연구에서 입증되었다. Emmons<sup>7)</sup>는 공간에 대한 1차원 보존방정식을 이용 연기선단의 속도, 온도, 두께의 일반적 관계를 해석적으로 구하였으나, 정성적으로 일치할 뿐 정량적으로는 차이가 많은 결과를 얻었으며, 속도, 온도, 두께의 공간분포 등 완전한 해는 구할 수 없었다.

본 연구에서는 연기선단 전파속도의 정식화를 위해서 실험적인 방법을 사용하지 않고 해석적인 방법을 이용 속도를 모델화 시키기 위한 시도가 추구되었다. 천장하 연기선단의 흐름을 2차원 난류벽면제트(Turbulent wall jet)로 모사 하여 상사해석(Similarity analysis)과 차원해석(Dimensional analysis)을 이용 전파속도의 공간분포를 제안하고 실험결과와 비교하였다. 상사해석 자체가 벽면제트의 완전발달영역(Fully-developed region)에서 성립하는 것이므로, 화원의 근처에서는 실험결과와 공간분포 모델이 일치하지 않았으나, 화원의 하류에서는 비교적 잘 일치하였다.

## 2. 연기선단 속도측정

### 2.1 실험장치

천장아래의 연기선단 전파를 모사하기 위하여 축대칭 벽면제트 유동장을 이용하였다. 연기대신에 질소와 헬륨가스의 혼합체를 원형노즐로부터 분사하여 원형천장에 충돌시키면 2차원 축대칭 벽면제트가 얻어진다. 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Regulator와 유량측정용 오리피스를 통과한 질소와 헬륨가스는 혼합실(Mixing chamber)에서 균일하게 혼합되어 입자발생기를 거쳐 3방향 솔레노이드밸브를 통해 노즐로 유입되어 천장을 향해 분사된다. 입자발생기는 소량의

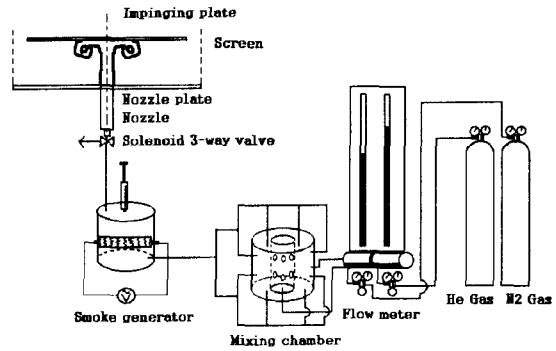


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

등유를 연소시켜 얻어지며 유동장의 가시화에 필요한 입자를 얻기 위한 장치이다.

천장은 노즐 직경의 30배 이상인 원판이며, 가시화를 위해 투명 아크릴 재질로 제작되었다. 부력에 의한 정확한 연기 선단의 이동을 관찰하기 위해 천장과 노즐지지판이 평행하게 설치되었고 노즐로부터의 흐름은 천장과 수직이 되도록 하였다. Nozzle로부터 천장까지의 높이는 85 mm로 고정하였다. 아크릴로 제작된 노즐의 외경은 10 mm이며, 균일한 노즐 출구 속도분포를 얻기 위해 노즐 안에 honeycomb을 설치하였다. 3방향 솔레노이드 밸브를 설치하여 실험 초기에는 입자와 혼합유체를 관심영역 밖으로 배출시킨 후, 노즐에 설치된 열전대의 온도가 일정하게 유지되었을 때, 밸브를 전환하여 혼합유체와 입자가 천장면으로 향하도록 분사시켰다.

유동장의 가시화는 천장충돌후 형성되는 제트선단의 속도측정을 위한 것으로, Ar-ion laser를 이용한 평면광을 노즐 중심축을 포함하면서 천장면에 수직이 되도록

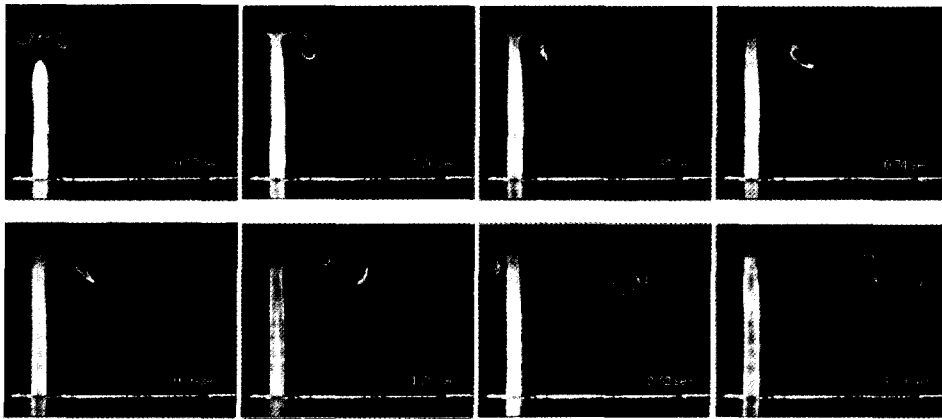


Fig. 2. Propagation of the ceiling jet front.

표 1. 혼합기체의 조건

	혼합기체	노즐출구 속도 (m/s)
Case1	질소	0.232
Case2	질소	0.464
Case3	헬륨	0.232
Case4	헬륨	0.464
Case5	질소 80%/헬륨 20%	0.232
Case6	질소 60%/헬륨 40%	0.232
Case7	질소 80%/헬륨 20%	0.464
Case8	질소 60%/헬륨 40%	0.464

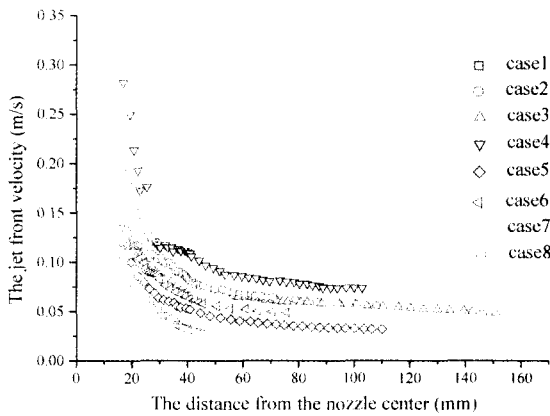


Fig. 3. The jet front velocity.

록 배치하여 제트선단의 전파과정이 가시화되도록 하였다. 제트선단의 가시화된 흐름은 고속 CCD 카메라에 의하여 250 Frames/sec의 속도로 기록되어 선단의 속도측정에 이용된다.

2.2 측정방법 및 측정결과

고속 CCD 카메라에 의하여 기록된 제트선단의 전파과정이 가시화되어 Fig. 2와 같이 보여진다. 노즐로부터 분사개시 후 0.18초에 원형제트가 천장과 충돌하게 된다. 충돌 후에도 와환(Vortex ring)구조가 유지되면서 하류로 전파된다. 전파되는 와환의 중심위치를 시간변화에 따라 추적하여 제트선단의 속도를 측정하였으며, 임의 순간에서의 선단속도는 천장충돌 후 경과된 시간과 노즐 중심속도로부터 와환의 중심까지의 반경방향 거리를 이용하여 계산된다.

선단의 전파에 미치는 운동량과 부력의 영향을 파악하기 위하여 표 1과 같이 8가지 조건의 혼합기체를 이용하였다. 각 측정조건에서의 제트선단 속도는 Fig. 3과 같다.

3. 상사해석 및 차원해석

원형 천장아래에서 전파되는 2차원 축대칭 제트선단의 속도모델 정식화를 위하여 Fig. 2와 같이 전 질의 실험결과로부터 얻은 와환의 이동과정을 Fig. 4와 같은 좌표계에서 난류벽면제트로 묘사한다. 노즐 중심속도로부터 반경방향으로의 거리 증가에 따른 와환의 크기 증가와 와환 중심의 위치변화는 벽면제트에서의 폭의 증가와 대표속도 위치의 변화로 판단하여 상기 묘사의 타당성을 가정한다.

2차원 난류벽면제트의 지배방정식은 다음과 같다.<sup>8)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial r}(\rho ru) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho rv) = 0 \tag{1}$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial r} + \rho v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \tag{2}$$

여기에서  $\rho$ 는 제트의 밀도로 일정하다고 가정하며,  $r$ 과  $z$ 는 각각 반경방향, 노즐의 축방향이며,  $u$ 와  $v$ 는 각 방향의 난류 속도성분이고  $\tau$ 는 난류전단응력이다. 다음과 같은 상사변수를 도입하여 제트의 완전발달영역에서 상사법칙이 이루어지는 것은 잘 알려져 있다.<sup>8)</sup>

$$\eta = \frac{z}{b(r)} \tag{3}$$

여기에서  $b$ 는 제트의 반폭(Half width)의 길이 척도이다. 속도와 전단응력의 상사는 다음과 같이 이루어진다.

$$\frac{u}{u_m} = f(\eta) \tag{4}$$

$$\frac{\tau}{\rho u_m^2} = g(\eta) \tag{5}$$

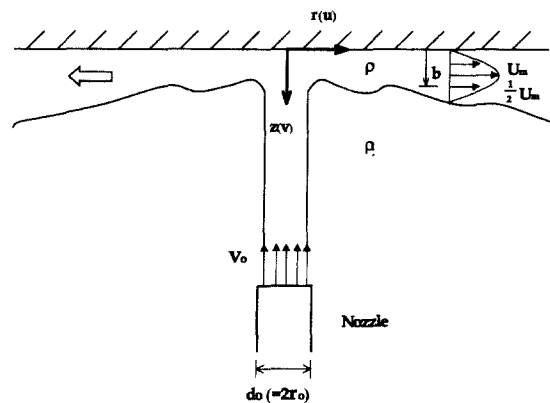


Fig. 4. Propagation of the axisymmetrical ceiling jet.

여기에서  $u_m$ 은 반경방향의 대표속도의 척도이며 반경 방향만의 함수이다.

식 (3)~(5)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음식 (6)으로 표현된다.

$$g' = \frac{bu'_m}{u_m}(f^2 - fF) + b'(f \int_0^r \eta f d\eta - \eta ff) - \frac{b}{r} f F \quad (6)$$

여기에서  $F = \int_0^r f d\eta$ . 따라서 식 (6)으로부터 반쪽의 척도인  $b$ 는  $r$ 에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$b \sim r \quad (7)$$

속도  $u_m$ 에 대한 처리를 위하여 운동량 방정식(2)의 양변에  $r$ 을 곱하여 다음과 같이 적분한다.

$$\int_0^\infty \rho u r \frac{\partial u}{\partial r} dz + \int_0^\infty \rho v r \frac{\partial u}{\partial z} dz = \int_0^\infty r \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \quad (8)$$

식 (8)을 정리해서 식 (9)를 얻는다.

$$\frac{d}{dr} \int_0^\infty \rho b r u_m^2 b d\eta = -r \tau_w \quad (9)$$

여기에서  $t_w = \rho u_m^2 g(0)$ 이며 천장면에서의 전단응력이다. 식 (9)를 다시 정리하면 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dr} (\rho b r u_m^2) \int_0^\infty f^2 d\eta = -\rho r u_m^2 g(0) \quad (10)$$

식 (10)은  $r$ 의 차원에 관한 한 항등식이므로 대표속도성분의 반경방향에 관한 정보를 얻을 수 없다. 따라서 천장면에서의 전단응력을 무시할 수 있다고 가정하면<sup>8)</sup> 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$u_m \sim \frac{1}{r} \quad (11)$$

$u_m$ 에 대한 구체적인 표현을 얻기 위하여 차원해석을 다음과 같이 수행한다.  $u_m$ 은 노즐로부터 분사되는 유체의 운동량  $M_0$ ,  $\rho$ ,  $r_\infty$ ,  $r$ 의 함수로 가정할 수 있으므로,

$$u_m = f_1(M_0, \rho, r_\infty, r) \quad (12)$$

여기에서  $M_0 = \rho(\pi r_0^2) V_0^2$ . 따라서

$$u_m = C m_0^\alpha \rho^\beta r_\infty^\gamma r^\delta. \quad (13)$$

밀도가 증가할수록 속도는 감소해야 하므로  $\beta$ 는 음수이다.  $\pi$ 정리를 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$u_m = C \sqrt{\pi r_0^2 V_0^2} \left(\frac{\rho_\infty}{\rho}\right)^{n-\frac{1}{2}} \frac{1}{r} \quad (14)$$

여기에서  $n$ 은  $-\beta$ 이다. 식 (14)와 같이 차원해석을 통해서도 제트선단의 대표속도는 반경방향에 반비례하는 사실을 확인할 수 있다. 최종적으로 제트의 가상원점(Virtual origin)을 고려하면 식 (14)는 다음 식으로 표현된다.

$$u_m = C \sqrt{\pi r_0^2 V_0^2} \left(\frac{\rho_\infty}{\rho}\right)^{n-\frac{1}{2}} \frac{1}{r+r_v} \quad (15)$$

여기에서  $r_0$ 는 노즐내부반경,  $V_0$ 는 노즐출구속도,  $r_v$ 는 상수이다.

실험조건 및 결과를 대입하여 각 실험조건에 대한 계수  $C$ 와  $r_v$ 를 구하기 위하여 식 (15)를 다음과 같이 변형한다.

$$\frac{1}{u_m} = \frac{1}{C} r + \frac{r_v}{C} \quad (16)$$

여기에서는 식 (15)에서  $n=1$ 을 가정하였다. 최소자승법을 이용 1차원 회귀분석(Regression analysis)을 수행한 결과를 표 2에 제시한다. 이 결과를 그래프로 나

표 2. 최소자승법을 이용한 속도모델 계수의 계산결과

실험조건	$r_v$ (mm)	$C'$ (mm · m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_0$ (m/s)	$C$
CASE1	-8.149	1.042	1.138	0.232	0.552
CASE2	28.11	3.407	1.138	0.464	0.902
CASE3	229.5	18.56	0.162	0.232	3.708
CASE4	198.2	21.78	0.162	0.464	2.176
CASE5	145.3	7.971	0.943	0.232	3.843
CASE6	171.9	12.08	0.748	0.232	5.186
CASE7	114.7	9.943	0.943	0.464	2.397
CASE8	172.4	15.61	0.748	0.464	3.351

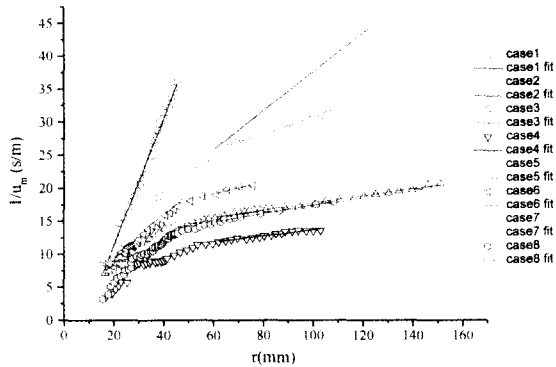


Fig. 5. Linear regression of the jet front velocity.

타낸 것이 Fig. 5이며, Fig. 3의 종축만을 변형한 것과 식(16)에 의한 fitting결과가 Fig. 5에 실선으로 표시되었다. CASE1의 경우만 전체 영역에서 fitting하였고 나머지의 경우는 제트의 완전발달영역으로 판단되는 부분에서만 fitting을 수행하였다. 표 2로부터 상사해석의 결과를 선단의 전파속도모델로 활용한 것이 완벽하지는 않은 것을 알 수 있다. 이것은 벽면 마찰 무시, 주위 유체와의 혼합에 의한 밀도변화 무시 등 앞으로 개선해야 할 부분에 의한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 복도 또는 터널과 같이 특정 방향으로 길이가 긴 공간에서 전파되는 천장제트(Ceiling jet)의 선단속도모델을 연구하였다. 천장제트는 천장아래에서 분사되는 노즐로부터의 흐름이 천장과 충돌한 후 형성되는 2차원 축대칭 난류 벽면제트로 묘사되었다. 레이저 평면광을 이용한 제트의 가시화를 통하여 뚜렷한 와환구조를 관찰하였으며 와환의 이동정상으로부터 하류방향으로의 제트폭의 증가를 유추할 수 있었다. 와환 중심부의 순간위치를 고속카메라에 의해 추적하여 선단속도를 계산하였다. 벽면제트에 대한 상사해석과 차원해석을 통하여 선단의 전파속도는 반경방향에 반비례하는 사실을 확인하였다. 천장면에서의 유체의 마찰과 주위유체와의 혼합에 의한 밀도변화는 무시하였다.

실험에서 측정된 자료를 해석적인 방법에 근거한 선단속도모델과 비교하기 위하여 최소자승법을 이용하여 1차원 회귀분석을 수행하였다. 대부분의 실험조건에서 제트의 완전발달영역이라고 판단되는 영역에서만 fitting을 실행하였으며 상사 및 차원해석의 결과와 완전히 일치하지는 않았지만 가능성은 충분히 입증하였다. 따라서 기존의 지수함수모델에 더하여 새로운 모델을 제안할 수 있었으며, 다만 밀도변화를 고려한 보다 정교한 모델의 개발이 본 모델의 완전성을 더해줄 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

1. Chow, W.K., "Multi-cell Concept for Simulating Fires in Big Enclosures Using a Zone Model", J Fire Sci, Vol. 14(3), pp.186-198(1996).
2. Kim, M.B., Han, Y.S. and Yoon, M.O., "Laser-assisted Visualization and Measurement of Corridor Smoke Spread", Fire Safety Journal, Vol. 31, pp 239-251(1998).
3. Kim, M.B. and Han, Y.S., "Tracking of the Smoke Front Under a Ceiling by a Laser Sheet and Thermocouples", Fire Safety Journal, Vol. 34, pp.287-295(2000).
4. He, Y., "Smoke Temperature and Velocity Decays Along Corridors", Fire Safety Journal, Vol. 33, pp.71-74(1999).
5. Delichatsios, M.A., "The Flow of Fire Gases Under a Beamed Ceiling", Combust Flame, Vol. 43, pp.1-10(1981).
6. Hinkley, P.L., "The Flow of Hot Gases Along an Enclosed Shopping Mall. A Tentative Theory", Fire Research Note No.807, Fire Research Station (1970).
7. Emmons, H.W., "The Ceiling Jet in Fires", The Third International Symposium, Fire Safety Science, pp.249-260(1991).
8. Rajaratnam, N., "Turbulent Jets", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp.223-226(1976).