

## 평판하 연기선단의 가시화 A Visualization of Smoke Front under a Horizontal Plate

한용식<sup>†</sup> · 김명배\* · 오광철\*\* · 유상필\*\*\*

Yong-Shik Han<sup>†</sup> · Myung-Bae Kim\* · Kwang-Cheul Oh\*\* · Sang-Pil Yu\*\*\*

한국기계연구원 환경설비연구부  
\*한국기계연구원 환경설비연구부  
\*\*한국과학기술원  
\*\*\*한국에너지연구소

(2001. 01. 09 접수/2001. 01. 31 채택)

### 요 약

수평 평판과 충돌하는 제트에 의해 생성되는 연기유동을 관찰하기 위해 질소가스에 kerosene 연기입자를 띄워 유동장을 가시화하였다. 광원으로는 아르곤-이온 레이저 평면광이 사용되었다. Kerosene smoke의 산란 광에 의한 수직평면 상(image)과 수평평면 상을 고속 CCD 카메라와 비디오 카메라로 녹화하였으며, 얻어진 영상으로부터 연기선단의 순간속도 및 평균속도를 측정하였다.

### ABSTRACT

The flow induced by a vertically impinging circular jet under a horizontal plate is investigated by visualization technique, using kerosene smoke in nitrogen gas to visualize the vortex flow and impinging flow. The light source was the sheet beam of Ar-Ion laser. The vertical and horizontal images scattering of kerosene smoke were recorded by the high speed CCD camera and the video camera. The instantaneous velocity of the vortex and the mean velocity of the smoke front were measured from the acquired images.

**Keywords :** Visualization, Smoke, Ceiling, Impinging jet, Laser sheet

## 1. 서 론

화재에서 생성된 연기는 부력 때문에 수직방향으로 상승하며 천장과 충돌 후에 천장제트(ceiling jet)를 형성하면서 화재공간과는 멀리 떨어진 다른 공간으로 이동한다. 건물에 설치되어 있는 대부분의 화재 감지기 및 화재진압설비는 천장근처에 설치되어 있기 때문에 화재로부터 생성된 뜨거운 연기유동에 의해 작동되도록 설치되어 있는 열감지기, 연기감지기 및 스프링클러의 응답특성은 천장아래를 흘러가는 연기유동과 직접적인 관계를 가지며, 건물 화재안전의 기초를 제공한다.

실제 화재에서는 가연물이 다양할 뿐만 아니라 화원에서 발생하는 연기 plume의 주기적인 Vortex 운동 등이 존재하기 때문에 연기 거동 현상이 매우 복잡하다.

이 때문에 연기유동에 대한 자료가 매우 부족한 실정이며, 공학적 이용 측면에서 간단한 이론적 모델들이 사용되고 있다. 대표적인 예로써 일층 및 이층 zone model에 기초한 예측들이 많이 수행되었지만, 구획 내부에서 연기가 순간적으로 확산된다는 균일화를 가정하고 있기 때문에 화재 초기 연기 선단부의 위치를 고려해야 하는 아트륨, 긴 복도 및 터널 등의 넓은 천장을 가지는 공간에서는 실제 현상과 큰 차이가 존재하게 된다.

실험적 연구들은 천장에 충돌된 이후의 축대칭 연기유동에 대한 해석이 대부분이다. 초기 연구인 Alpert의 연구<sup>1)</sup>에서는 화재 plume 내의 연기속도 및 온도분포가 Gaussian 분포를 가지며, 천장에 충돌한 후에는 Gaussian 분포의 반쪽 분포를 가진다고 가정한 후 정상상태의 연층형상 및 온도분포에 대한 해석을 수행하였다.

최근에는 천장에서의 연기거동을 축대칭 밀도유동으

<sup>†</sup> E-mail: yshan@kimm.re.kr

로 취급한 연구<sup>2)</sup>와 천장에서 열전달을 고려한 연구<sup>3)</sup>가 수행되었다. 연기거동을 밀도유동으로 취급한 연구에 있어서는 유동장의 밀도 변화가 없다는 가정을 도입하여 축대칭으로 확대하는 연기 선단부 이동 현상을 정식화를 하였으며, 유동과정에서 밀도변화가 작은 것으로 볼 수 있는 순수와 염수를 이용한 모형실험에 의해 수식의 타당성을 검증하였다. 그러나 이 모델은 실제 연기유동에서 나타나는 주위 공기와의 혼합 및 열손실에 따른 밀도 변화 현상들은 무시되었다. 천장과 열손실을 고려한 축대칭 연기유동 선단부의 거동에 대한 모델링 연구에서는 수평 이동거리가 상대적으로 짧고, 점성력을 무시할 수 있는 영역을 대상으로 하였으나, 부력에 의해 상승되는 화재 plume의 영향이 고려되지 않았으며, 밀도류 선단부의 압력분포와 속도와의 관계를 기초로 한 유입부와 선단부 이동과의 전체적인 균형을 고려하여 정식화하였기 때문에 대공간 연기유동에는 적용이 불가능하다. 또한 벽면으로의 열손실이 일정한 것으로 가정하였기 때문에 추가적인 연구가 수행될 필요가 있는 것이다. 실제 가솔린 pool 화재의 실험에서는 연기선단이 와(vortex) 구조를 가지는 것이 관찰되고 있지만<sup>4)</sup> 이들에 대한 연구는 전무한 실정에 있다.

Laser 평면광(sheet beam)을 사용하여 수직으로 상승하는 kerosene smoke 원형제트 유동장에서 천장면과 충돌하기 전후의 연층 형성 과정과 전과 과정에서 나타나는 주위 공기와의 상호작용을 가시화한 연구<sup>5)</sup>가 국내에서도 수행되었지만 세부적인 결과는 부족하였다. 또한 실제 pool 화재에서는 주기적인 유동이 존재하는 것이 알려져 있지만<sup>6)</sup> 주기적인 유동이 천장아래에 형성되는 연기유동에 어떤 영향을 주는지에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 화재의 주기적인 유동과 천장제트의 상관관계를 연구하기 위한 사전 연구로써 천장과 충돌 후 축대칭으로 확산되는 연기 선단부의 거동에 대한 자세한 자료를 얻기 위한 연구를 수행하였다. 연기를 모사하기 위해서 천장과 충돌하는 제트 유동장을 형성하였으며, 연기선단 내부의 유동현상을 구명하기 위해 kerosene smoke의 산란광에 의한 수직평면 상(image)과 수평평면 상을 고속 CCD 카메라를 사용하여 가시화하였으며, 얻어진 상으로부터 연기선단 순간 유속 및 평균유속을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

화재에서 발생된 연기가 부력에 의해 상승하여 천장

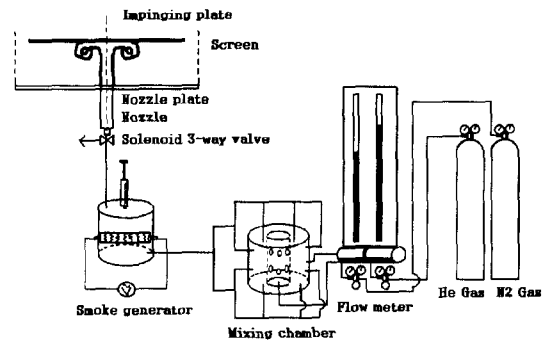


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

에 부딪힌 후 천장 아래에 연층을 형성하며 확산되는 일련의 과정을 가시화하기 위해 축대칭 원형제트를 이용한 실험장치를 구성하였으며, Fig. 1은 실험 장치의 개략도이다.

본 실험에서는 부력에 따른 연기 선단 유동을 관찰하기 위해 분사되는 유체로 공기와 비슷한 물성을 갖는 순수 질소를 사용하였다. 분출되는 질소 유량은 100 cc/sec이며, 버블 미터로 검정하였다. Regulator와 유량 측정용 오리피스를 통과한 질소가스는 연기 발생기와 3방향 솔레노이드 밸브를 통해 분사 노즐에서 test section으로 분사된다.

천장은 노즐 직경의 30배 이상인 원판형이며, 가시화를 위해 투명 아크릴 재질로 제작되었다. 부력에 의한 정확한 연기 선단의 이동을 관찰하기 위해 천장이 수평으로 설치되었고, Nozzle로부터 천장까지의 높이는 85 mm로 고정하였다.

아크릴로 제작된 노즐의 직경은 10 mm이며, 균일한 노즐 출구 속도분포를 얻기 위해 노즐 안에 honeycomb를 설치하였다. 3방향 솔레노이드 밸브를 설치하여 실험 초기에는 연기를 바깥으로 배출시킨 후, 노즐에 설치된 K-type 열전대의 온도가 일정하게 유지되었을 때, 밸브를 전환하여 연기를 천장면으로 향하게 분사시켰다. 연기 발생기는 laser 평면광에서 산란광을 얻기 위해 수 $\mu$ m의 입자들을 생성시키는 장치이다. 본 실험에서는 kerosene을 사용하여 입자를 발생시켰다. 실험에서는 kerosene의 증발에 의한 팽창은 고려되지 않았다.

실험에서는 Fig. 2에서 보여지는 형태의 유동장 가시화 장치가 사용되었다. 제트를 따라 거동하는 미세 kerosene 입자가 laser 평면광에 산란(scattering)되는 상으로 유동장을 가시화하였다. 광원은 Ar-Ion laser (최대출력 5 W)로 3 W의 출력을 사용하였다. 발생한 laser를 초점거리 1.5 m의 볼록렌즈를 통해 test section

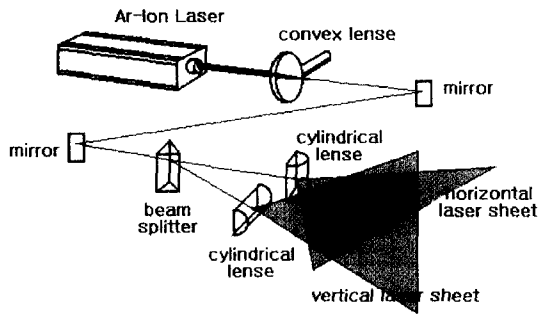


Fig. 2. Schematic of visualization system.

에 초점을 맞춘 다음, cylindrical 렌즈를 통과시켜 평면광을 구현하였고, sheet의 두께는 대략 1 mm 정도이다. 연기선단의 3차원 형상을 고찰하기 위해 천장에 수직 평면과 수평 평면을 동시에 가시화시킬 수 있는 광학계로 구성하였다. kerosene 입자의 산란된 상은 고속 CCD 카메라에 의해 분석이 이루어진다. 이 장치에 의해 1/250초의 노출로 초당 250 프레임(frame) 씩 4.9초간의 산란된 상을 얻게된다. 전체적인 상의 관찰을 위해 비디오 카메라를 사용하여 노출 1/125초로 녹화하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 고속 CCD 카메라를 통해 수직 평면광에 산란된 연기선단의 상들을 시간적 순서대로 나열해 놓은 것이다. 제트 분사 후 0.18초에 연기선단이 천장에 충돌하게 된다. 충돌 전에 생성된 원형모양의 vortex ring은 천장과 충돌 시에 여러 개의 large scale eddy들로 분리된다. Fig. 3의 0.26 sec의 위치는 중심으로부터 1.5D의 반경인데, 이 위치에 도달되는 동안 천장 제트는 primary vortex의 직경 변화없이 반경방향

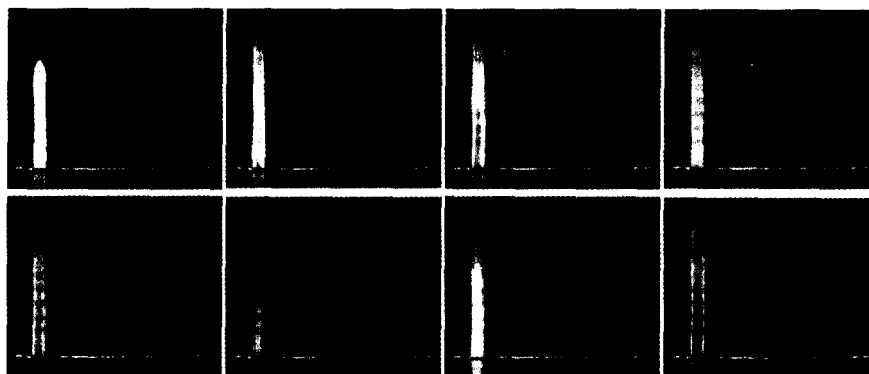
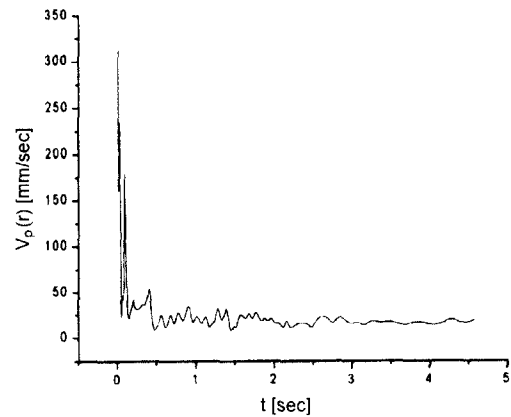
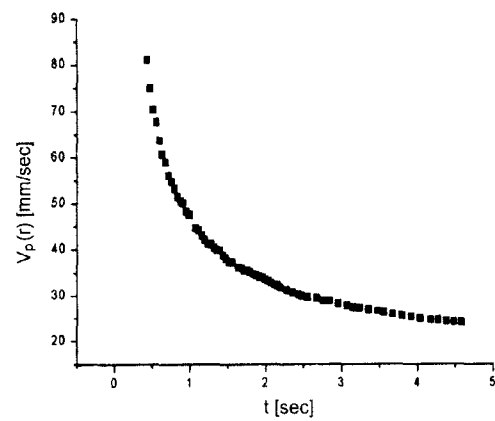


Fig. 3. Vertical view of smoke front under the ceiling.



(a) Instantaneous velocity



(b) Mean velocity

Fig. 4. Velocity of smoke front under the ceiling with time.

으로 확산된다. 반면에 1.5D를 경과한 영역에서는 primary vortex의 직경이 급격하게 증가되는 것이 관찰된다. 이 영역이 실제 연기유동에서 연충두께가 성

장되는 과정에 해당된다.

Primary vortex의 크기 성장에 따라 순간속도가 급격하게 감소되는 것을 Fig. 4의 순간속도 그림으로부터 알 수 있다. 이 위치에서는 천장 제트와 정지 유체 사이의 점성 때문에 primary vortex에서 secondary vortex가 생성된다. Fig. 3의 0.26 sec 그림에서 primary vortex의 후류에 보이는 날개 단면모양이 secondary vortex이다. Primary vortex는 직경은 7D(2.52 sec)에 도달될 때까지 계속 성장하며, 대략 2.6D의 값을 가지는 것을 그림으로부터 확인할 수 있다. 반경방향으로 1.5D와 7D사이의 영역에서 일어나는 연기선단 거동의 가장 큰 특징은 primary vortex와 secondary vortex의 상호작용이 존재한다는 것이다. 천장을 따라 반경방향으로 진행되는 primary vortex와 정지한 유체사이에는 속도구배가 존재하기 때문에 경계면에서는 유체의 점성 때문에 primary vortex 회전방향과 반대인 secondary vortex가 생성된다. Primary vortex는 천장 제트의 유동에 의해 천장을 따라 이동하지만, secondary vortex는 diffusion에 의해 primary vortex에 흡수된다. 점성효과에 의해 생성되는 secondary vortex가 복잡한 3차원적인 구조를 가지는 것을 Fig. 5의 수평면에 형성되는 상들에 의해 관찰할 수 있으며, primary vortex가 반경방향으로 7D까지 진행하는 동안 계속 존재하고 있음을 알 수 있다.

반경방향으로 7D 이후의 primary vortex의 거동을 또 하나의 다른 영역으로 구분할 수 있는데, 이전 영역과는 달리 primary vortex의 수직방향 두께에는 변화가 없지만 반경방향으로의 직경이 계속적으로 증가하여 반경방향이 장축인 타원형상으로 primary vortex의 형상이 변화된다. Primary vortex 선단 부분에서는 천장제트에 의해 지속적인 운동량이 공급되지만 vortex의 중심부분은 체적팽창에 따라 운동량 감소가 일어나게 되어 vortex의 선단부분과 중심부분에 속도차가 존

재하게 되어 결국 primary vortex는 타원형상을 유지하게 되는 것으로 유추된다.

천장을 따라 흐르는 천장제트와 공기의 경계면에서 경계층이 발달되지만 계속적으로 primary vortex에 merging되는 것이 관찰된다. 이러한 현상은 연기선단과 primary vortex의 상호작용에 의한 결과로 유추된다. 즉 천장 제트가 primary vortex에 비해 빠른 유속을 가지고 있지만 primary vortex의 선회에 의해 선단이 천장으로부터 박리되어 primary vortex에 계속적으로 유입되는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 천장 아래 형성된 연기선단의 순간속도 및 평균속도를 나타낸 것이다. 순간속도는 고속 CCD 카메라의 각 frame(1/250초 간격)에 나타난 primary vortex의 중심 위치를 추적하는 방법에 의해 얻어진 것이며, 평균속도는 상승제트의 천장과의 충돌 위치( $r=0$ )를 기준으로 연기선단(smoke front)의 위치를 도달시 간으로 나눈 것이다. Primary vortex의 위치에 따른 순간속도는 1.5D이전 영역에서는 매우 빠른 속도를 가지다가 이 영역을 통과한 후에는 급격하게 감소된 후 거의 일정한 값을 가지는 것을 보여주고 있다.

Fig. 5는 수평 laser 평면광을 천장 아래 7 mm 위치에 고정된 후 비디오 카메라를 통해서 얻은 연기유동장의 상(image)을 시간적 순서로 전개해 놓은 것이다.

연기선단은 시간이 경과함에 따라 원형을 이루면서 반경방향으로 확산하며, 대략 1.5D의 반경부터 연기선단의 후류 즉, 원형 내부에 secondary vortex가 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 연기선단이 대략 7D에 도달될 때까지 관찰되며, secondary vortex가 primary vortex에 완전히 유입된 후에는 연층이 7 mm보다 얇은 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 primary vortex가 천장과 충돌한 후 반경방향으로 전파되어 갈 때 vortex의 평면구조를 관찰하기 위해 천장아래 10 mm 떨어진 위치에 laser sheet

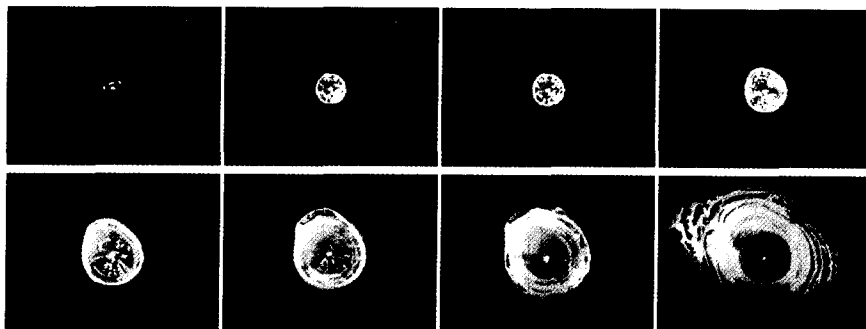


Fig. 5. Visualization of smoke front in the horizontal plane under the 7 mm of the ceiling.

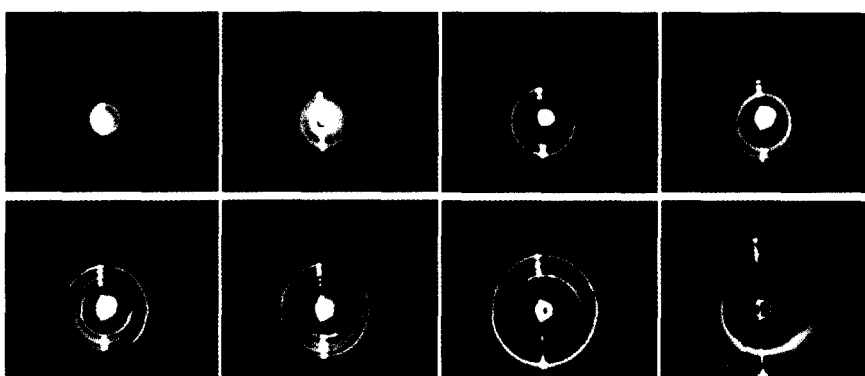


Fig. 6. Visualization of smoke front in the horizontal plane under 10 mm of the ceiling.

를 위치시키고 고속 CCD 카메라를 사용하여 가시화한 것이다. 그림에서 여러 개의 동심원이 관찰되고 있는데, Fig. 3의 primary vortex에서 kerosene smoke가 존재하는 부분은 흰색으로 표시되며, 공기가 존재하는 부분은 검정색으로 표시된다. 그림에서 알 수 있듯이 충돌 후 연기선단은 원형의 vortex ring을 형성한 후 점차 vortex의 diffusion에 의해 체적을 증가시키면서 반경방향으로 진행하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 관찰된 secondary vortex가 여기에서는 관찰되지 않고 있는데, Fig. 3에 비해 천장으로부터 더 먼 위치에 laser sheet의 위치가 존재하기 때문이다.

#### 4. 결 론

천장아래에 형성되는 연기선단 거동을 크게 3영역으로 나눌 수 있는 것을 관찰하였다. Primary vortex ring이 충돌한 후 반경방향으로 1.5D까지의 영역(영역 1), 1.5D로부터 생성된 secondary vortex들이 존재하는 영역(영역 2), 및 primary vortex가 일정한 속도를 가지고 반경방향으로 이동해 나가는 영역(영역 3)의 세 영역으로 나눌 수가 있다.

1. 영역에서는 연기 선단과 천장의 충돌에 의한 Vortex disintegration이 관찰되며, vortex는 빠른 순간 속도를 가진다.

2. 영역에서는 첫째 영역에서 생긴 primary vortex가 성장하며, 초기에는 primary vortex와 정지 유체의 경계면에서 3차원 구조를 가진 secondary vortex가 생성된다. 또한 primary vortex ring이 성장하면서 순간 속도가 급격하게 감소한 후 일정한 순간속도를 가지며, vortex ring의 형상은 원형을 유지한다. 이 영역의 후반에서는 secondary vortex가 primary vortex에 merging되어 사라진다. Primary vortex ring 단면의

크기가 대략 2.6D에 이르게 되는 반경방향으로 7D지점에 이르게 되면 선회를 거의 잃을만큼 primary vortex ring의 단면이 충분히 발달한다. 또한 secondary vortex들은 대부분 primary vortex의 선회에 의해 3차원적 구조를 생성시키지 못하고 primary vortex에 merging된다.

7D 이후 영역에서는 반경방향 평균속도가 일정하게 유지된다. Primary vortex의 단면이 원형이 아닌 타원형으로 되어가면서, 점점 소멸하게 된다. 연층과 공기층의 경계에서 형성된 작은 vortex들이 primary vortex에 merging된다.

#### 기호설명

D : 원형제트 내부 직경 ( = 9.7mm)

#### 참고문헌

1. Alpert R.L., "Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-Scale Fires", Combustion Science and Technology, Vol. 11, pp.197-213(1975).
2. Kim M.B., Han Y.S., "Tracking of the smoke front under a ceiling by a laser sheet and thermocoupls", Fire Safety Journal, Vol. 34, pp.287-295(2000).
3. Matsushita T., Fukutani H. and Matsumoto M., "Mathematical Model and Experiments of Axisymmetric Spread of Smoke Front under Ceiling (Part I) Axisymmetric Spread of Density Flow Front with Constant Density", Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering Vol. 48, No. 1, pp.19-24(1998).
4. Matsushita T., Fukutani H. and Matsumoto M., "Mathematical Model and Experiments of Axisymmetric Spread of Smoke Front under

- Ceiling (Part II) Axisymmetric Spread of Density Flow Front with Changing Temperature”, Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering Vol. 48; No. 2, pp.19-24(1998).
5. 한용식, 김명배, 유상필, 신현동, “천장과 충돌하는 연기의 거동에 관한 실험적 연구”, 화재소방학회 1999년도 추계 학술대회 Proceedings, pp22-27(1999).
  6. Hamins A., Yang J.C., Kashiwagi T., “An Experimental Investigation of the Pulsation Frequency of Flames”, 24-th Combustion Symposium, pp.1695-1702(1992).