

## 천장하 연기선단의 가시화

한용식\*, 김명배\*, 최준석\*, 유상필\*\*  
한국기계연구원\*, 한국에너지기술연구소\*\*

### A Visualization of Smoke Front under the Ceiling

Han, Yong-Shik\*, Kim, Myung-Bae\*, Choi, Jun-Seok\*, Yu, Sang-Pil\*\*  
KIMM\*, KERI\*\*

#### 1. 서론

화재로 인한 인명피해에 반듯이 연기에 의한 사상자가 포함된다. 이것은 화재의 전파속도에 비해 연기전파속도가 훨씬 빠르기 때문에 화재공간에서 멀리 떨어진 공간에서도 연기에 의한 인명피해를 유발시킬 수 있다는 것을 의미한다. 연기 거동의 주요변수로는 연기 전파속도, 연층 두께, 연층온도 등이 있으며, 이들은 화재 공간, 화재발열량 등과 밀접한 관계를 가지고 있다.

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 밀도유동으로 취급한 연구<sup>2</sup>와 천장에서의 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 실제 연기유동에서 나타나는 주위 공기와의 혼합 및 열손실에 따른 밀도 변화 현상들은 무시된 모델이다.

천장과의 열손실을 고려한 축대칭 연기유동 선단부의 거동에 대한 모델링 연구에서는 수평 이동거리가 상대적으로 짧고, 점성력이 무시가능한 영역을 대상으로 하였으나, 부력에 의해 상승되는 화재 Plume의 영향이 고려되지 않았으며, 밀도류 선단부의 압력분포와 속도와의 관계를 기초로 한 유입부와 선단부 이동과의 전체적인 균형을 고려하여 수식화 하였기 때문에 대공간 연기유동에는 적용이 불가능하다. 또한 벽면으로의 열손실이 일정한 것으로 가정하였기 때문에 추가적인 연구가 수행될 필요가 있는 것이다.

연기 선단에 대해 Kerosene Smoke 발생기와 Laser 평면광을 사용하여 천장면과 충돌하기 전후의 연층 형성 과정과 전파 과정에서 나타나는 주위 공기와의 상호작용을 가시화한 연구<sup>4</sup>가 국내에서도 수행되었지만 세부적인 결과는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화재에 의해 생성된 연기가 천장에 충돌된 후 확대칭으로 확산되는 연기 선단부의 거동에 대한 보다 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 상(Image)을 High speed CCD camera를 사용하여 가시화하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

화재에서 발생한 연기가 부력에 의해 상승하여 천장에 부딪힌 후 천장 아래에 연층을 형성하며 확산되는 일련의 과정을 가시화하기 위해 확대칭 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 100cc/sec이며, 버블 미터로 검정하였다. Regulator와 유량 측정용 Orifice를 통과한 질소가스는 Smoke 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 85mm로 고정하였다.

아크릴로 제작된 Nozzle의 직경은 10mm이며, 균일한 노즐 출구 속도분포를 얻기 위해 노즐 안에 Honeycomb을 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. 실험장치가 정상상태로 유지되는데 약 5분 가량 소요되었으며, 정상상태에서 대략 50℃의 온도로 유지되었다. 스모크 발생기(Smoke Generator)는 Laser Sheet로 산란광을 얻기 위해 수 $\mu$ m의 입자들을 생성시키는 장치이다. 본 실험에서는 Kerosene을 사용하여 입자를 발생시켰다. 실험에서는 Kerosene의 증발에 의한 팽창은 고려되지 않았다.

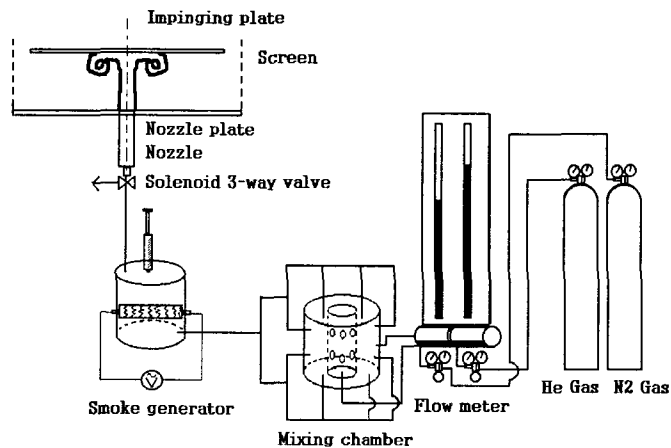


Fig. 1. 실험장치의 개략도

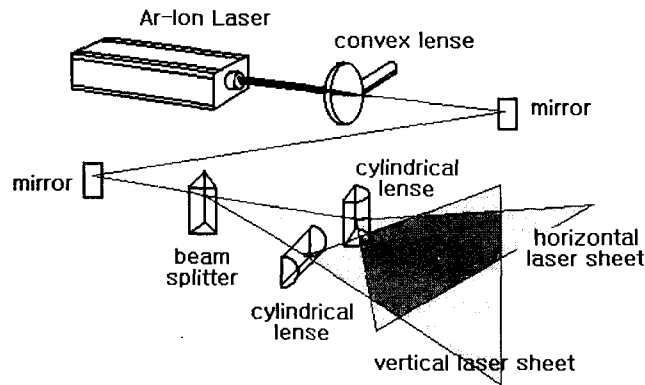


Fig. 2. 유동장 가시화 시스템의 개략도

실험에서는 Fig. 2에서 보여지는 형태의 유동장 가시화 장치가 사용되었다. Jet를 따라 거동하는 미세 Kerosene 입자가 Laser Sheet 광에 산란(scattering)되는 상(Image)으로 유동장을 가시화 하였다. 광원은 Ar-Ion Laser(최대출력 5W)로 3W의 출력을 사용하였다. 발생한 Laser를 초점거리 1.5m의 볼록렌즈를 통해 Test Section에 초점을 맞춘 다음, Cylindrical Lens를 통과시켜 Sheet Beam을 구현하였고, Sheet의 두께는 1mm정도이다. 연기선단의 3차원 형상을 고찰하기 위해 천장에 수직 평면과 수평 평면을 동시에 가시화 할 수 있는 광학계로 구성하였다. Kerosene 입자의 산란된 상은 High Speed CCD Camera에 의해 분석이 이루어진다. 이 장치에 의해 1/250초의 노출로 초당 250 Frame 씩 4.9초간의 산란된 상을 얻게된다. 전체적인 상의 관찰을 위해 Video Camera를 사용하여 노출 1/125초로 녹화하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

$N_2$ 를 초당 100cc의 유량으로 노즐로부터 85mm 떨어져 있는 천장으로 분사시켰다. 초기유속은 1.27m/s이며 노즐입구에서의 Reynolds number는 800이다.

Fig.3은 High speed CCD camera를 통해 얻은 Vertical laser sheet에 나타난 연기선단의 상들을 시간적 순서대로 나열해 놓은 것이다. Jet분사 후 0.18초에 연기선단이 천장에 충돌하게 된다. 초기에 생성된 원형모양의 Vortex ring은 천장에 충돌과 동시에 여러 개의 Large scale eddy들로 분리되어진다. 이 Vortex 붕괴현상은 Vertical laser sheet를 통한 2차원 화상으로는 관찰이 어렵지만, Fig.4의 0.54sec의 사진에서 관찰이 가능하다.

분사 후 0.26초가 경과하면, 충돌 후 Ceiling wall jet의 선단을 이루는 Vortex는 반경방향으로 1.5D에 도달하게 된다. 이 1.5D 지점을 전후로 유동에 있어서 커다란 변화가 있음을 알 수 있다. 1.5D에 도달되는 영역(영역1)에서는 Ceiling wall jet의 선단을 이루는 Vortex(이하 Primary vortex)는 직경 변화 없이 반경방향으로 확산되어간다. 반면에 1.5D를 경과한 영역에서는 Primary vortex의 순간속도가 1.5D 이전 영역의 순간속도보다 급격하게 감소하는 것을 Fig. 5로부터 알 수 있다. 또한 이 때부터는 연기선단 vortex의 직경은 7D에 도달할 때까지 계속 성장하게 된다. 바로 이 1.5D에서 7D까지의 영역(영역2)에서의 Primary vortex는 일정한 속도로 진행하면서 모양이 원형을 유지하며 지름이 일정하게 증가되는 형태로 이루어진다. 이 과정에서의 가장 큰 특징은 1.5D이전에 Vortex 붕괴현상에서 형성된 Vortex들이 Primary vortex에 Merging되는 과정을 가진다는 것이다. 천장과의 충돌에 의해 생성된 Vortex

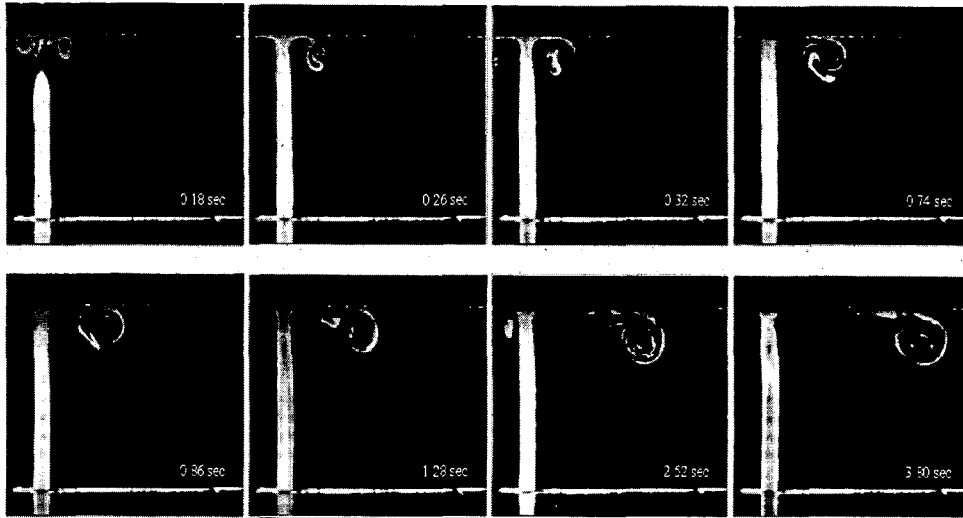


Fig. 3. 천장에 수직인 평면에서의 연기선단

(이하 Secondary vortex)들은 Primary vortex와 반대방향으로 회전하는데 Primary vortex의 원주를 따라 회전하는 복잡한 3차원적인 구조를 생성한다. 이 3차원적인 구조는 Fig.4의 수평면에 형성되는 상들에 의해 관찰되며, Primary vortex가 반경방향으로 7D까지 진행되는 동안 계속 존재하게 된다. 또한 7D까지의 범위에서는 Primary vortex가 원형을 유지하면서 빠른 각속도를 가지고 있는데, 이는 뒤이어 연속적으로 유입되는 Secondary vortex들로부터 Angular momentum을 전달받는 것으로 생각된다. 즉, Secondary vortex들은 Primary vortex가 지름이 2.6D까지 성장하면서 계속 각 운동량을 유지할 수 있도록 해주는 Momentum source가 되어주는 것으로 사료된다.

7D 이후의 Primary vortex의 거동을 또 하나의 다른 영역(영역3)으로 둘 수 있는데, 이전의 상황과는 달리 Primary vortex가 수직방향으로는 두께 변화가 관찰되지 않는 반면에, 반경방향의 직경은 계속적으로 증가되는 현상이 관찰되는데 이것은 Primary vortex의 모양이 원형에서 반경방향이 장축인 타원으로 변하는 것을 의미한다. Primary vortex의 뒤이어 연층과 공기층에 의해 형성된 경계층에서 주기적으로 발생하는 Vortex들은 Primary vortex에 Merging된다.

Fig.4는 Laser sheet을 천장 아래 7mm에 고정된 상태로 Video camera를 통해서 얻은 상을 시간적 순서로 전개해 놓은 것이다. 연기선단이 천장에 충돌하는 순간 Vortex ring이 완전원형이 아니고 끊어져서 나타나는 Vortex 붕괴현상이 관찰된다. 그 다음 Vortex ring이 진행하여, Primary vortex ring의 반지름이 1.5D 보다 커지면서, Primary vortex ring은 원형이 된다. 동시에 Primary vortex ring의 원 내부는 매우 복잡한 형상이 나타나는데, 이는 Secondary vortex가 Primary vortex와의 상호작용으로 인해 생성시킨 3차원적인 형상 때문이다. 이 형상은 임의적이지 않고, 대략 7~9 개의 Large scale eddy로 이루어져 있는 것이 보인다. Primary vortex ring이 반경방향 1.5D지점에 도달한 직후, 이 Large scale eddy는 점점 뚜렷하게 보이다가, Primary vortex ring이 Radial 방향 7D지점에 가까워지면서 이 Large scale eddy는 소멸되어진다. 그리고 나서 Primary vortex ring이 Radial 방향 7D 이후 진행하고 있는 동안 계속 보이지 않는다. 즉 Primary vortex와 Secondary vortex와의 상호작용에 의해 생성된 3차원적 구조는 영역2의 특징이며 이를 Horizontal laser sheet을 통해 확인할 수가 있다.

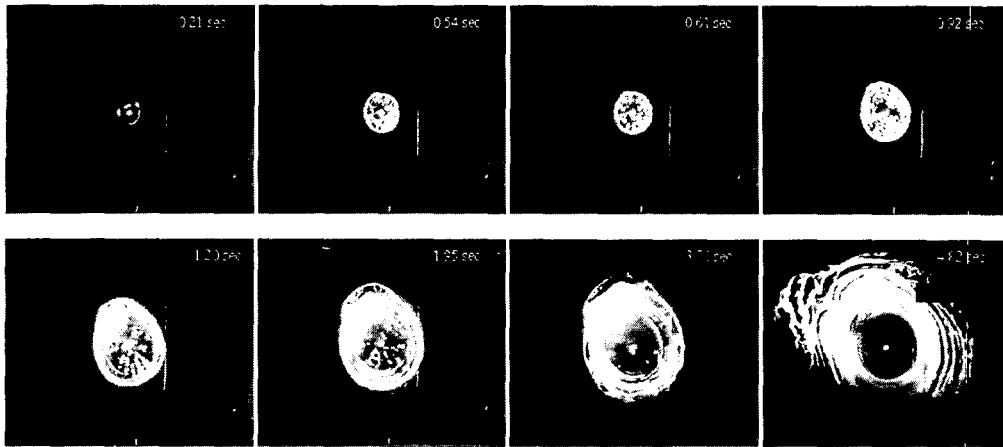


Fig. 4. 천장에 수평한 평면에서의 연기선단

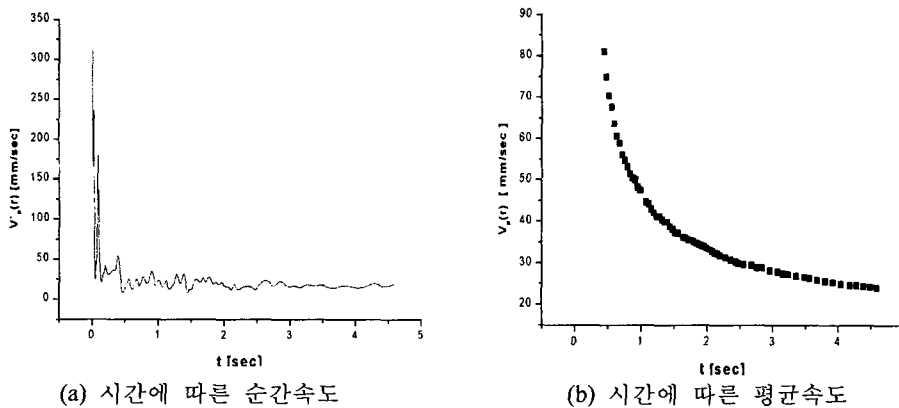


Fig. 5 천장 아래에 형성된 연기선단의 순간속도 및 평균속도

Fig.5는 천장 아래에 형성된 연기선단의 순간속도 및 평균속도를 나타낸 것이다. 연기선단의 순간속도는 High speed CCD camera의 각 frame(1/250초 간격)에 나타난 Primary vortex의 중심 위치를 추적하는 방법에 의해 얻어진 것이다. 평균속도는 제트의 정체점(Stagnation point)를 기준으로 연기선단의 위치를 도달시간으로 나눈 것이다. 여기에서 평균속도 경향은 일반적인 연기선단 거동을 나타내지만 순간속도의 경우 충돌 후 1.5D 이전에는 매우 빠른 속도를 가지다가 이 영역을 통과한 후에는 급격하게 감속되며, 이후의 위치에서는 거의 균일하게 유지되는 것을 보여주고 있다. Fig.6은 Horizontal laser sheet의 Offset을 10mm로 설치하고 High speed CCD camera로 얻은 화상을 시간순서대로 나열해 놓았다. Horizontal laser sheet의 Offset이 7mm인 Video camera화상과는 다른 점이 관찰되어지는데, 우선 충돌 후 영역2에서의 Primary vortex ring 내부에 보이는 Large scale eddy들이 보이지 않는다. 이는 실제 실험 시 육안으로는 관찰되었으나, 광량 부족으로 CCD camera에는 명확하게 보이지 않았다. 이것은, 7mm offset일 경우보다 10mm offset인 경우, Large scale eddy들이 덜 뚜렷하게 보이기 때문이다. CCD camera로 얻은 화상의 특징은 Primary vortex ring의 단면이 잘 나타나있다는 점인데, 여러 개의 동심원이 보인다. 이는 Primary vortex내부단면의 구조를 보여줌과 동시에 radial방향으로 진행해 나갈수록 Vortex ring단면의 직경이 일정하게 증가해나가는 것을 알 수가 있다.

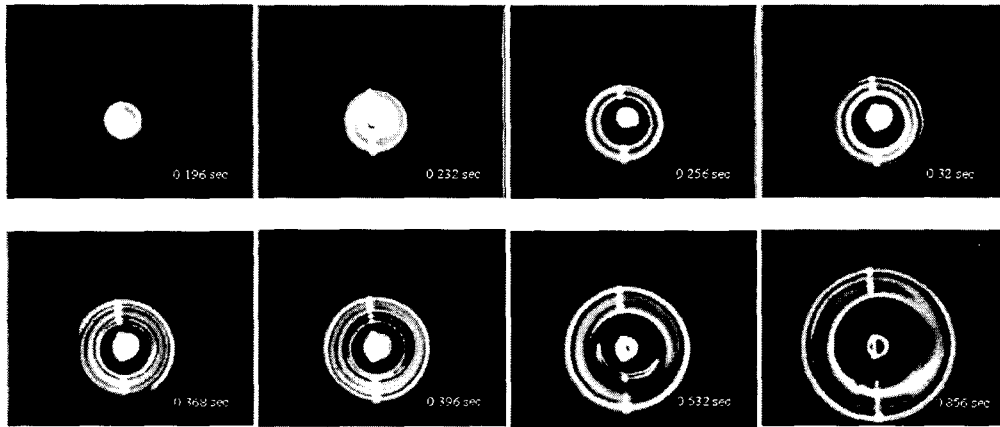


Fig. 6. 천장에 수평한 평면에서의 연기선단

#### 4. 결론

앞서의 실험결과로부터 연기선단의 거동을 나타내는 Primary vortex ring의 초기거동은 크게 3영역으로 나눌 수 있는 것을 관찰하였다. Primary vortex ring이 Stagnation point로부터 반경방향으로 1.5D까지 진행하는 영역(영역1), 1.5D로부터 생성된 Secondary eddy들과의 상호작용으로 3차원적 구조를 생성시키는 영역(영역2), 그리고 Secondary vortex들의 Merging에 의해 반경방향으로 이동해 나가는 영역(영역3), 이렇게 세 영역으로 나눌 수가 있다.

첫째 영역은 연기선단과 천장의 충돌에 의한 Vortex disintegration이 관찰된다. 이 때, Primary vortex 크기의 발달은 거의 없는 상태로 빠른 속도로 반경 방향으로 확산된다.

둘째 영역에서는 첫째 영역에서 생긴 Primary vortex의 크기가 발달하게 된다. Separation point 1.5D를 지난 Primary vortex는 그 속도가 급격히 줄어들고 동시에 충돌에 의해 형성된 Secondary vortex를 유입하면서 단면적의 직경을 증가시킨다. 이 때, Secondary vortex는 Primary vortex와의 상호작용으로 3차원적인 구조를 생성시키는 것이 관찰된다. 영역 2에서 Primary vortex는 반경방향의 순간속도를 일정하게 유지하며, 동시에 Primary vortex ring의 단면형상은 원형을 유지한다. Primary vortex ring 단면의 크기가 대략 2.6D에 이르게 되는 즈음, 반경방향으로 7D지점에 이르게 되는데, 이때는 각속도를 거의 잃을 만큼 Primary vortex ring의 단면이 충분히 발달한다. 또한 Secondary vortex들이 대부분 Primary vortex의 회전력에 의해 3차원적 구조를 생성시키지 못하고 바로 Primary vortex에 Merging되어 버린다.

7D 이후의 Primary vortex ring의 거동은 연층과 공기층에 의해 형성된 경계층에서 발생한 Vortex의 Merging에 의해 성격 이어지는 세 번째 영역으로 보여진다. 이 영역에서도 역시 Primary vortex ring의 반경방향 속도는 두 번째 영역과 같게 유지가 되지만, Primary vortex의 단면이 원형이 아닌 타원형으로 되어가면서, 점점 소멸하게 된다. Primary vortex의 뒤이어 연층과 공기층에 의해 형성된 경계층에서 주기적으로 발생하는 Vortex들은 Primary vortex에 Merging된다.

#### 참고문헌

1. R. L. Alpert, "Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-Scale Fires", Combustion Science and Technology, Vol. 11, 197-213(1975).

2. T. Matsushita, H. Fukutani and M. Matsumoto, "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, 19-24(1998).
3. T. Matsushita, H. Fukutani and M. Matsumoto, "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, 19-24(1998).
4. 한용식, 김명배, 유상필, 신현동, "천장과 충돌하는 연기의 거동에 관한 실험적 연구", 화재·소방학회 1999년도 추계학술대회 Proceedings, 22-27(1999).