

### A-3 천장과 충돌하는 연기의 거동에 관한 실험적 연구

한용식\*, 김명배\*, 유상필\*\*, 신현동\*\*  
\* 한국기계연구원, \*\* 한국과학기술원

#### An Experimental Study about Characteristics of Smoke Impinging Ceiling

Han, Yong-Shik, Kim, Myung-Bae, Yu, Sang-Pil, Shin, Hyun-Dong  
\* KIMM, \*\* KAIST

#### 1. 서론

연기 전파 속도, Smoke barrier 설계 및 화재 감지기의 작동과 밀접한 관계가 있는 천장하 연기거동을 명확하게 규명하기 위해서는 연기와 천장과의 충돌과정, 충돌 직후의 연층 형성과정 및 진행속도, 벽면과의 열전달, 주변공기와의 혼합 등에 대한 연구가 필수적이다.

실제 화재에서는 가연물이 다양할 뿐만 아니라 화원에서 발생하는 연기 Plume의 주기적인 Vortex 운동 등이 존재하기때문에 연기 거동 현상이 매우 복잡하다. 이 때문에 연기유동에 대한 자료가 매우 부족한 실정이며, 공학적 이용의 측면에서는 간단한 이론적 모델들이 사용되고 있다. 대표적인 예로써 일층 및 이층 Zone Model에 기초한 예측들이 많이 수행되었지만, 구획 내부에서 연기가 순간으로 확산된다는 균일화를 가정하고 있기 때문에 아트リューム, 긴 복도 및 터널 등의 넓은 천장을 가지는 공간에서 화재 초기 연기 선단부의 위치를 고려해야 될 경우에는 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 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 현상에 관한 정식화를 하였으며, 유동과정에서의 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.

그러므로 본 연구의 최종적인 목표는 화재에 의해 생성된 연기가 천장에 충돌된 후 축대칭으로 확산되는 연기선단부의 위치를 예측하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 Kerosene Smoke발생기와 Laser 평면광을 사용하여 천장면과 충돌하기 전후의 연층 형성 과정과 전파 과정에서 나타나는 주위 공기와의 상호작용을 가시화하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

화재에서 발생된 연기가 부력에 의해 상승하여 천장에 부딪힌 후 천장 아래에 연층을 형성하며 흘러가는 일련의 과정을 관찰하기 위해 축대칭 원형체트를 이용한 실험장치를 구성하였으며, Fig. 1은 실험 장치의 개략도이다.

본 실험에서는 부력에 따른 연기 선단 유동을 관찰하기 위해 분사되는 유체로 공기와 비슷한 물성을 갖는 순수 질소( $N_2$  100%)와 질소와 헬륨( $N_2$  60% : He 40%)의 혼합기체를 사용하였다. 가스 유량은 150cc/sec이며, 버블 미터로 검정하였다. 질소( $N_2$ )와 헬륨의 큰 밀도차로 인해 혼합이 잘 이루어지지 않기 때문에 별도의 Mixing Chamber를 제작하여 사용하였다. Mixing Chamber를 통과한 가스는 스모크 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, Nozzle로부터의 높이를 변경할 수 있게 만들었다.

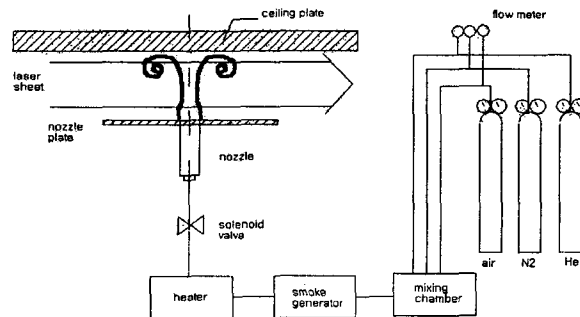


Fig. 1 실험장치의 개략도

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 절환하여 연기를 천장면으로 향하게 분사시켰다. 본 실험장치에서 온도가 일정하게 유지되는데 약 5분 가량 소요되었으며, 정상상태에서 대략 50°C의 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 Fig. 2에서 보여지는 형태의 유동장 가시화 장치가 사용되었다. Jet를 따라 거동하는 미세 Kerosene 입자가 Laser Sheet 광에 산란(scattering)되

는 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. Video Camera를 이용하여 산란된 상을 기록한 후 Image processing을 하였다. 각 Frame은 1/30초 간격으로 녹화되며, 노출은 1/250초로 설정하였다.

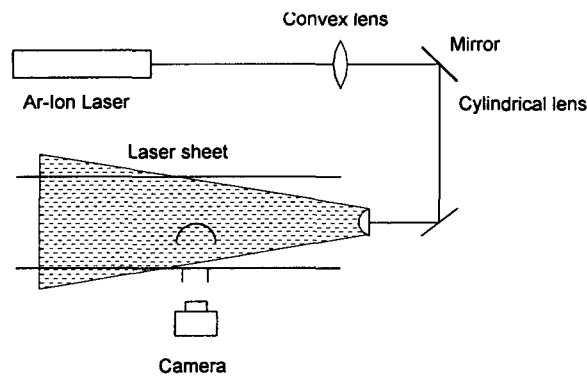


Fig. 2 유동장 가시화 시스템의 개략도

화재실험에 있어서 주위의 조건에 따라 공기 유입이 영향을 받게 된다. 본 실험의 경우 화원이 바닥에 있는 경우를 모사하였기 때문에 무한 바닥면을 가정한 원형판을 정확한 수평이 유지되도록 설치하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3는 Jet 출구로부터 분출된 연기가 축방향으로 상승하다가 천장과 충돌한 후 Ceiling Jet을 생성, 전개되어 가는 일련의 과정들을 가시화한 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 연기선단은 수직방향으로 상승할수록 크기가 성장되는데 이는 주변 공기의 유입에 의한 것으로 알려져 있다. 상승하는 연기선단의 유동형태는 화재강도가 커짐에 따라 층류유동에서 난류유동으로 바뀌게 되며, 본 실험 조건의 유동은 층류 유동인 것을 사진으로부터 알 수 있다

또한 천장과 충돌 전에 연기선단 Eddy의 형상이 충돌 후에도 그대로 유지된 것을 관찰할 수 있다. 반경방향으로의 급격한 체적 팽창에 의해 선단 Eddy의 크기는 작아지게 되지만 형태가 그대로 보존되기 때문에 충돌 전의 유동 조건이 충돌 후의 유동조건에 매우 큰 영향을 미치게 되는 것을 직접적으로 알 수 있다. 따라서 천장면과 충돌 후에 전개되는 연기 거동을 모델링하기 위해서는 충돌 전의 유동 조건을 반드시 고려해야 한다는 사실을 알 수 있다. 또한 지금까지 사용되어진 충돌 직후의 연기 유속을 단형분포로 가정한 연기선단 모델링은 실제상황과는 차이가 있음이 관찰된다.

Fig. 4는 연기 조성을 질소 100%의 조건으로 분사하여 선단 Eddy가 지나간 후에 형성되는 연층의 가시화 결과이다. 천장과 충돌된 연기는 연층 두께가 가장 얇은 수력도약(Hydraulic jump)의 영역을 지난 후에 점차 두꺼운 연층을 형성하

게 된다. 또한 연기선단 Eddy 후류에서는 공기와 연층의 경계면에서 작은 Eddy 들이 주기적으로 형성되면서 연층을 두껍게 하는 것이 관찰된다. 이 이유는 연기와 주변 공기의 혼합에 의해 연층이 냉각되면서 가지고 있는 부력을 상실하게 됨에 따라 생겨나는 유동의 불안정성에 기인하는 것으로 생각되어진다. 이러한 사실은 Fig. 5와의 비교에 의해 설명되어진다. Fig. 5는 질소 60%와 헬륨 40%의 혼합기체에 의해 형성된 연층 사진이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 부력이 큰 경우에는 Fig. 4에서 관찰되어지는 연기선단 Eddy 후류에서의 주기적인 작은 Eddy들의 생성이 관찰되지 않고 있다. 따라서 실제 화재에서 화재 강도에 따라 발생하는 연기의 온도차에 따라 천장 하에 형성되는 연층의 거동이 달라지게 된다는 사실을 추론할 수 있다.

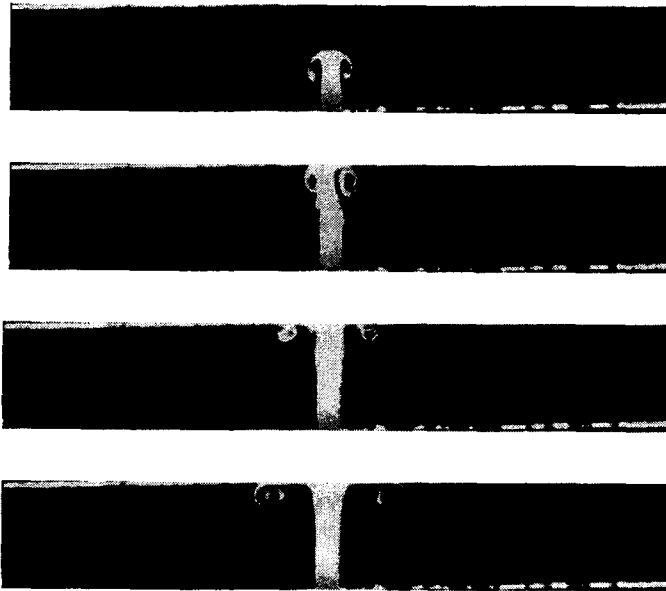


Fig. 3 천장과 충돌하는 연기선단

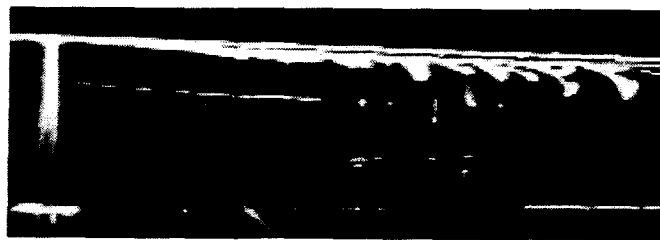


Fig. 4 N<sub>2</sub> 100%에 대한 연기선단 후류 가시화

Fig. 6은 천장과 충돌된 후에 형성되는 연기선단 Eddy의 시간에 따른 위치 분석으로부터 얻어진 반경방향으로의 유속을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 질소 100%의 경우 천장과 충돌 후 천장을 따라 진행하면서 속도가 감소된

다. 반면에 질소 60%와 헬륨 40%의 경우에는 천장 면과 충돌 후에도 부력의 영향 때문에 계속적으로 가속되고 있는 것을 보여준다. 이러한 사실로부터 화원의 화재 강도에 따라 천장아래에 형성되는 연기선단의 속도에도 영향이 있음을 알 수 있다.

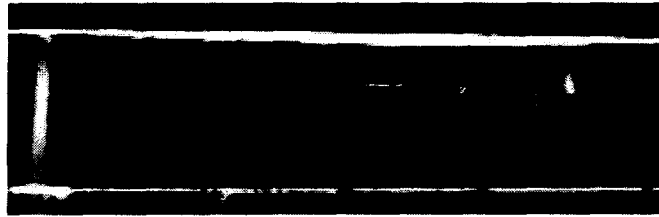


Fig. 5 N<sub>2</sub> 60%: He 40%에 대한 연기선단 후류 가시화

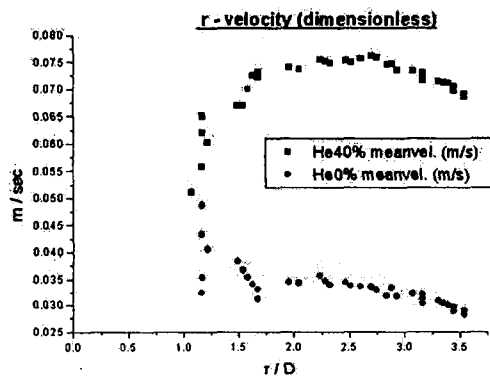


Fig.6 연기선단 속도

일반적으로 Pool 화재 화원의 Plume에서는 주기적인 운동이 존재하며, 이 운동에 의해 대량의 주변 공기를 유입시켜 연기를 형성하는 것으로 알려져 있다.<sup>4</sup> 지금까지의 연구에 있어서는 이 주기적인 운동이 천장 아래에 형성되는 연층에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 알려져 있지 않다. Fig. 7은 질소 100%의 제트에 주기적인 가진(Pulsating)을 주면서 천장 아래에 형성되는 연층을 가시화한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 4에서 보는 것과는 전혀 다른 연층 형성 과정을 보여주고 있으며, 연층 두께 또한 상당히 두꺼운 것을 볼 수 있다. 이미 언급하였지만 Fig. 4의 연기선단은 천장과 충돌 된 후에도 충돌전의 Eddy 형상을 유지하면서 전파되어진다. 이에 반해 주기적인 운동이 존재하는 경우, 앞의 Eddy가 수력도약의 영역을 지나면서 속도가 급격하게 느려지게 되고 이때 속도가 상대적으로 빠른 두 번째 Eddy가 앞선 Eddy에 도달하게 되면서 주변의 공기를 대량으로 유입하게 된다. 이와 같은 과정이 반복되면서 연층이 급격하게 두꺼워지는 것으로 생각된다. 즉, 연기 Plume에 주기적인 운동이 존재할 경우, 주기적인 운동에 의해 생성되어지는 Eddy들의 상호작용에 의해 연층이 급격하게 두꺼워지기 때문에 연층 거동 Model에서는 이들 Eddy들의 영향이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

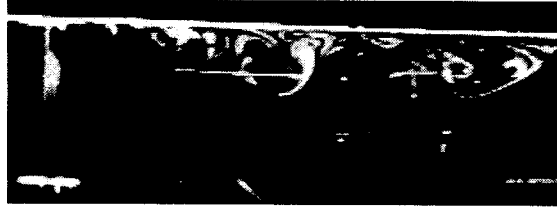


Fig. 7 Plume의 주기적인 운동에 의해 천장 아래에 형성된 연층 구조

#### 4. 결론

화재에서 발생된 연기 Plume은 천장과 충돌한 후 천장하에 연층을 형성시키면서 축대칭으로 확대되어 간다. 이 때 형성되는 연층은 연기 전파 속도, Smoke barrier 설계 및 화재 감지기의 작동과 밀접한 관계가 있기 때문에 연기선단의 특성을 파악하는 것은 화재 공학적인 측면에서 대단히 중요하다. 본 연구에서는 천장아래에서 축대칭으로 확산되어 가는 연기 선단부의 거동을 파악하기 위해 Kerosene Smoke발생기와 Laser 평면광 기법을 사용한 연층 가시화로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천장과의 충돌 전후의 연기선단 Eddy의 형상이 그대로 유지되기 때문에 충돌 후 연기선단을 모델링할 경우에는 충돌 전 유동 조건을 반드시 고려해야 한다.
2. 연층 두께 및 연기선단 속도는 화재하중과 밀접한 관계가 있다.
3. 연기 Plume에 주기적인 운동이 존재할 경우, 주기적인 운동에 의해 생성되어지는 Eddy들의 상호작용에 의해 연층이 급격하게 두꺼워진다. 따라서 연층 거동 Model에서는 이들 Eddy들의 영향이 고려되어야 한다.

#### 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. A. Hamins, M. E. Yang and T. Kashwagi, " An Experimental Investigation of the Pulsation Frequency of Flames", 24th Symposium on Combustion, 1695-1702(1992)