

## 부력제트의 주위공기 유입효과 및 등온기체 모델링 Jet Entrainment Effect in Buoyant Jet and Iso-Thermal Fire Modeling

이의주

Eui-Ju Lee

부경대학교 안전공학부  
(2009. 10. 16. 접수/2009. 12. 11. 채택)

### 요 약

아세톤 LIF와 Rayleigh 산란법 등 두 가지 레이저 측정 기법을 이용하여 Re수가 1,000 미만의 부력제트 노즐근처에서의 공기 유입을 실험적으로 조사하였다. 아세톤 LIF 실험결과 전체적인 혼합기구는 경계면에서의 불안정성에 의한 거대외구조로 판단되고, Re 수가 커질수록 유입되는 시점이 상류로 이동하며 그 양 또한 증가되었다. 또한 Rayleigh 산란법 결과는 상류에서도 혼합이 제트의 내부까지 이루어지고, 노즐에서 분사방향으로 진행할수록 주위공기의 유입이 제트 내부로 진행되고 있음을 알 수 있다. 이 실험 결과로서 기존 등온기체모델에서 제트의 주위공기 유입을 고려하여야 한다는 사실을 입증할 수 있다. 또한, 이상적 플룸식에서 복사열손실을 0.35로 고려하였을 경우에 기존의 연기량 및 온도 예측과 근사한 결과를 얻을 수 있으며, 주위공기 유입효과를 고려하여 보다 간단하면서도 정확한 등온기체 모델링 방법을 얻을 수 있다.

### ABSTRACT

Acetone LIF and Rayleigh scattering measurements were performed to identify the entrainment of ambient air in the buoyant jet qualitatively. The air entrainment near nozzle exit was enhanced with increasing both an axial distance and Reynolds number. The results supported that the air entrainment had to be considered in isothermal model for the development of its accuracy. Also, this paper provided an isothermal model based on the ideal plume, of which radiative heat loss fraction was assumed to 0.35 and the entrainment of isothermal jet was considered. This simple model could be used in compartment or semi-enclosure fires such as tunnel, and it is more reliable because of introducing entrainment effect in isothermal jet.

**Key words :** Acetone LIF (laser-induced fluorescence), Rayleigh scattering, Isothermal fire model

### 1. 서 론

터널을 포함한 천장이 있는 밀폐공간 또는 반밀폐공간에서의 화재연구를 위해서 물리적 모델을 기반으로 하는 실험적 방법과 수치적 방법이 최근 많이 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 실험적 방법으로서 가장 좋은 방법은 실험이나 실제 크기의 모형을 제작하여 실험을 수행하는 것이지만, 실험여건이나 비용 때문에 많은 제약이 있으므로 일반적으로 축소모형을 이용하여 연구를 수행

하고 있다. 또한 화재의 수치적 연구방법은 크게 최근 20년간 컴퓨터의 발달과 더불어 유동장과 연소 모델의 꾸준한 개발을 통해 현상에 근사한 수치해석 결과를 보여주고 있지만, 실제 설계에 전적으로 도입하기에는 검증 및 모델의 확실성에서 부족하므로 실험적 모델링 결과를 이용하는 것이 현재의 상황에서는 보다 적합하다. 공학적 관점에서 많은 문제들은 축소모형 실험 방법론을 통하여 적용되고 있는데 이는 축소 스케일의 결과로부터 실제 스케일의 현상을 예측하기 위해서이다. 이러한 모델의 전제조건은 모델이 실제상황을 상사(similarity)할 수 있어야 한다는 것으로서, 두 개의

E-mail: ejlee@pknu.ac.kr

시스템에서 같은 상황이나 조건 등을 얻을 수 있는 직접적인 관계(correlation)가 존재하여야 한다. 유체에 관한 모델의 스케일링은 많은 경우에 잘 알려진 무차원 변수(dimensionless group)를 수단으로서 이루어지고 있다. 이와 같은 모델방법은 화재연구에서도 그대로 적용할 수 있는데, 화재시 작용될 수 있는 부력, 관성력, 점성력 등에 관한 많은 무차원 변수를 만족하여야 하지만 이는 불가능하고 일반적으로 두가지 모델링 방법인 압력(pressure) 모델링과 Fr 수 모델링이 가능하다. Fr 수 모델링은 점성력이 상대적으로 미미한 경우에 적용할 수 있는데, 일반적인 화재는 난류의 현상이므로 모델링과 부력이 중요한 인자가 되고 점성력은 무시할 만한 상황에서는 사용가능하다. 그러나 Fr 수 모델링은 유체의 점성력이 우세해질 경우에는 적용될 수 없고, 층류조건이나 화염전파와 같은 천이과정에서는 다른 스케일링 법칙을 찾아야 할 것이다. 압력 모델링은 층류와 난류의 모든 조건에서 적용할 수 있고 독립적으로 Fr 수와 Re 수를 동시에 만족할 수 있는 장점이 있지만, 매우 큰 압력하에서 수행되어야 하므로 터널과 같이 축소모형 자체가 상대적으로 크고 출입구가 대기로 열려있는 모형에서는 적합하지 않아 반밀폐공간의 연구에서는 주로 Fr 수 보존의 모델링을 사용하고 있다.

화재연구에서 주로 이용하는 축소모형 실험방법은 기본적으로 Fr 수를 보존으로 하며, 사용하는 화원의 종류에 따라 열적 모델(thermal model), 등온기체 모델(isothermal model) 그리고 수력학적 모델(hydraulic model)로 분류할 수 있다.<sup>2)</sup> 이 3가지의 모델은 각각의

장단점과 제한조건(limitation)을 고려하여 목적에 맞는 방법을 선택하는 것이 최선이라고 판단된다. 이 중에서 등온기체모델은 이전에 주로 연기의 퍼짐 등 주로 정성적인 연구에서 사용되어 왔지만 Magret & Vauquelin<sup>3)</sup>에 의해 실제화원을 대체해 사용되는 제트의 유량과 농도를 결정하는 방법의 개발을 통해 정량적인 연구방법으로 사용되고 있다.<sup>4-6)</sup> 하지만 이 모델에서는 천장면에서의 유량을 풀화염 플룸과 비교하여 결정된 뒤 축소스케일에 맞추어 제트에서 분출하여, 궁극적으로는 제트가 발달하여 천장면에 도달하는 동안 발생하는 주위공기의 유입(entrainment)에 대한 고려가 이루어 지지 않았다. 이후 보다 정확한 등온기체모델에서의 연기유량산정을 위하여 제트에서의 공기 유입을 적용하였으나 Re 수가 초기부터 난류가 아닌 작은 범위 내에서 노즐근처 공기 유입이 타당한지에 대한 실험적 검토는 이루어지지 않았다.<sup>7)</sup>

본 연구에서는 먼저 등온기체모델에서 사용되는 조성인 헬륨/공기 혼합기체의 제트를 이용하여 난류가 아닌 부력이 지배하는 속도영역에서 출구 근처(near field)에서의 주위공기 유입이 발생하는지를 아세톤 LIF(laser-induced fluorescence)와 Rayleigh 산란을 이용하여 실험적으로 알아보았다. 또한 기존의 등온기체모델링을 보다 간단히 모델링할 수 있는 방법론을 제시하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 등온기체모델에서 사용되는 조성인

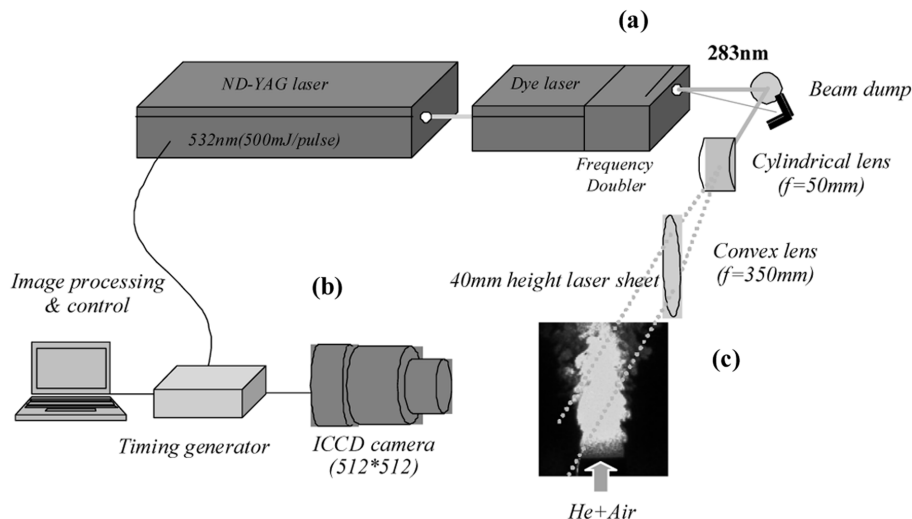


Figure 1. Schematics diagram of Acetone LIF. (a) Laser and optics (b) detector system, (c) isothermal jet.

He/Air 혼합기 제트를 이용하여 난류가 아닌 속도범위에서 부력에 의한 공기유입을 실험적으로 조사하였다. 제트의 경계면에서 유입특성을 관찰하기 위해 Figure 1과 같이 아세톤 LIF를 이용하였고, 제트가 하류방향에 따라 유입효과를 살펴보기 위해 Rayleigh scattering을 이용하였다.

아세톤 LIF 실험은 먼저 Figure 1(a)에서 알 수 있듯이 펌프광(pumping laser)으로 532nm의 second harmonic ND-YAG 레이저(500mJ, max)를 사용하고 염료 레이저(Dye laser)와 주파수 증배기에 의해 OH의 Q16 라인( $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi^+$ ,  $\lambda = 283.01\text{nm}$ )으로 입사 레이저의 파장을 조정하였다. 이렇게 조정된 레이저는 원통형 렌즈(cylindrical lens,  $f = 50\text{mm}$ )와 볼록렌즈(convex lens,  $f = 500\text{mm}$ )를 사용하여 시험 부에 40mm의 평행인 레이저 면(laser sheet)을 만들었다. 얻어진 LIF 신호는 Figure 1(b)에서와 같이 신호에 맞는 간섭 필터( $450\text{nm} \pm 10\text{nm}$ )를 거친 후  $512 \times 512$  ICCD 카메라(100ns gate)를 이용하여 값을 얻었다. 그리고, Fig. 1(c)와 같이 버너는  $d = 14.5\text{mm}$  내径의 테이퍼 가공된 파이프를 제작하였고, 각각 MFC로 제어된 헬륨과 공기를 아세톤 증기와 혼합하여 50l/min으로 분출하였다. 또한 Rayleigh Scattering 실험에서는 ND-YAG 레이저를 라인으로 사용하여 노즐출구에서 노즐 직경의 2, 3, 4배 하류위치에서 분자산란 신호를 ICCD를 이용하여 측정하였다.

### 3. 실험결과

헬륨/공기의 비율을 변화시켜가며 얻은 제트의 아세톤 LIF 이미지를 Figure 2에 도시하였다. 일반적인 Re 수가 10,000 이상인 난류제트에서는 노즐 출구 근처에서 강한 유입이 발생한다고 알려져 있지만,<sup>8,9)</sup> 층류제트 조건에서 주위공기 유입에 대해서는 연구가 수행되

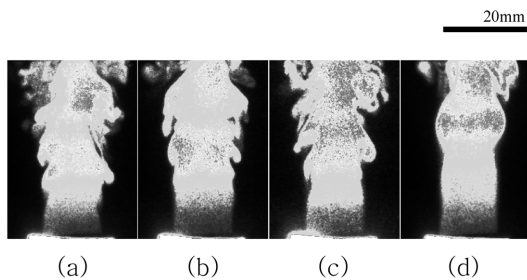


Figure 2. Acetone LIF images of isothermal jets with various He/air compositions. (a) He/air = 2 : 8, Re = 986, (b) He/air = 4 : 6, Re = 773, (c) He/air = 6 : 4, Re = 557, (d) He/air = 8 : 2, Re = 349.

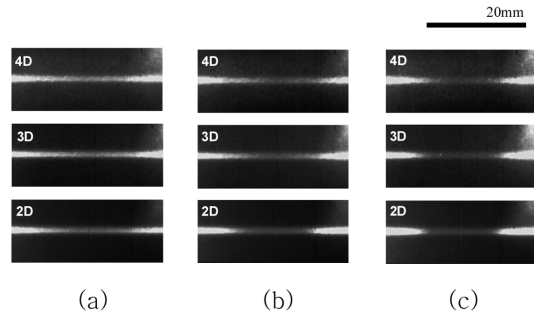


Figure 3. Rayleigh scattering images of isothermal jets with various height above jet exit. (a) He/air = 4 : 6, Re = 773, (b) He/air = 6 : 4, Re = 557, (c) He/air = 8 : 2, Re = 349.

지 않았다. Figure 2에서 보면 같은 유속조건이지만 제트에서 헬륨의 농도가 높은 경우에는 점성계수는 큰 변화가 없지만 혼합기의 밀도가 작아지므로 상대적으로 낮은 Re 수를 얻을 수 있다. 모든 경우에 Re 수가 1,000 미만으로서 출구 조건에서는 층류로 분출되는 부력제트의 상류(near field)에서 주변공기와의 혼합이 관찰되었고, 매우 작은 Re 수인 Figure 1(d) 경우에도 노즐 직경의 2배 이상에서는 유입이 관찰된다. 전체적인 혼합기구는 경계면에서의 불안정성에 의한 거대와구조로 판단되고, Re 수가 커질수록 유입되는 시점이 상류로 이동하며 그 양 또한 증가된다.

Figure 3은 Rayleigh scattering을 이용하여 노즐 출구 부근에서의 공기유입 정도를 평가하였다. 이미지에서 밝은 부분은 레이저 산란이 큰 부분이다. 헬륨의 산란 단면적(cross section area)이 공기보다 매우 작다는 사실을 이용하면, 공기의 분율이 커질수록 밝은 색을 얻을 수 있다. 모든 이미지에서 하류에서 보다 높은 산란신호를 얻을 수 있었고, 이는 비록 노즐 출구부근에서도 하류로 갈수록 많은 주변 공기가 유입됨을 의미한다. 또한 Figure 3(a)와 (c)를 비교하면, 상대적으로 높은 Re 수인 (a)의 4d 높이에서는 제트의 중심부까지 산란신호가 강하게 검출되므로 이는 혼합이 제트의 내부까지 이루어졌음을 의미한다. 하지만 작은 Re 수인 (c)의 경우에는 4d 위치에서 중심부까지는 공기의 유입이 이루어지지 않지만, 강한 산란신호의 폭이 점차로 줄어들고 있으므로 주위공기의 유입이 제트 내부로 진행되고 있음을 알 수 있다.

Figure 2와 Figure 3의 실험결과로부터 부력제트의 경우에도 노즐근처의 상류에서도 주변공기의 유입이 활발히 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 등온기체 모델에서 부력의 효과를 얻기 위해 사용되는 밀도가

낮은 유체제트에서도 주위공기의 유입을 고려해야 한다는 사실<sup>7)</sup>을 명확하게 하였고 모델링에서의 전체유량산정에 적용할 수 있다.

#### 4. 등온기체 모델링

등온기체 모델은 화원을 공기보다 가벼운 기체(일반적으로 헬륨)를 사용하여 고온의 연기를 모사하고 혼합되는 정도로서 연기의 거동을 볼 수 있다. 하지만 같은 온도의 두 기체를 사용하기 때문에 벽 등과의 복사 및 대류 열전달과 연기 온도는 모델링할 수 없으며, 연기 관점의 문제에 사용되고 있다. 특히, 본 방법으로는 화재 자체에 대한 연구가 불가능하므로 실제 상황에서는 연소온도는 기화되는 연료의 질량유량과 밀접한 관련이 있지만 모델에서는 이 두 변수가 서로 독립적이므로 이에 대한 관계식을 설정하는 것이 중요한 문제라 할 수 있다. Megret and Vauquelin의 연구<sup>3)</sup>에서는 헵탄(Heptane) 폴화재의 이론적 관계식을 전개하여 화재에서 생성되는 연기의 유량과 온도를 전체발열량에 대해 얻었고, 이 모델을 이용하여 다양한 터널화재 문제에 적용하였다.<sup>4,6)</sup> 하지만, Megret and Vauquelin의 연기유량과 온도의 산정은 여러 가지 수치적 계산이 필요하고, 가연물이 다양한 화재의 상황에서는 부합하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험적으로 증명된 모델제트의 공기유입을 고려한 보다 간단한 등온기체 모델을 제시한다.

화재에 의한 연기를 모사하기 위해서는 먼저 발열량에 따른 플룸(plume)의 유량과 온도를 결정해야 한다. 화재 플룸에 관해서는 여러 다양한 이론이 존재하지만, 등온기체모델에서는 평균값만이 사용되므로 물리량의 분포가 일정한(top-hat profile) 이상적 플룸(ideal plume) 식 또는 Zukoski 플룸식을 사용하는 것이 편리하다.<sup>1)</sup> 즉, 식 (1)과 (2)로 높이 H(m)인 공간에서의 천장위치에서의 연기의 질량유량,  $\dot{m}_p$  (kg/s)와 온도 T를 구할 수 있다.

$$\dot{m}_p = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} H^{5/3} \quad (1)$$

$$\Delta T = 13.74 \dot{Q}_c^{2/3} H^{-5/3} \quad (2)$$

여기서  $\dot{Q}_c$  (kW)는 전체 열방출율 중에서 플룸의 온도 상승에 기여한 대류항의 크기로 복사열손실을 분율을 제외한 열량이고,  $\dot{Q}_c = (1 - \chi_{rad}) \dot{Q}$ 로 표현할 수 있다. 이 때 복사열전달 손실율,  $\chi_{rad}$ 는 일반적으로 0.6~0.8의 범위를 가지고 있고, 화재환경에 따라 변하는 변수이다. 하지만 기존의 모델링 결과<sup>3)</sup>와 PIARC에서 권고된

값<sup>10)</sup>과 비교하면 의 값을 취했을 때 일치되는 결과를 얻을 수 있다. 또한 화원의 직경은 가장 대표적인 헵탄 폴화재를 가정하면 식 (3)과 같다.

$$\dot{Q} = \frac{\pi}{4} D^2 \dot{m} \Delta H_c \quad (3)$$

일반적으로는 팬직경에 대한 의존성을 고려해야 하지만 보통의 화재문제에서는 큰 발열량을 보이므로 직경이 크므로 생략이 가능하다. 위의 식들로부터 실제화재에서 천장(ceiling)에서의 유량, 온도 그리고 화원의 크기를 결정할 수 있다.

축소모델에서는 길이 축소율,  $\alpha$ 에서 Fr 수가 보존되도록 상사하면 모델에서의 유량은  $\alpha^{5/2}$ 배로 결정되고 버너직경은  $\alpha$ 배, 그리고 온도는 보존되어야 한다. 그러나 등온기체모델에서는 연기의 온도를 화재시 발생하는 고온의 공기(연기)와 모델에서 상온의 혼합된 기체(헬륨 + 공기)가 같은 부력을 가져야 한다는 가정에서 이상기체 상태방정식을 이용하면 온도상승을 밀도로 표현할 수 있다. 이와 같이 얻은 축소모델 천장에서의 부피유량과 밀도를 각각  $\dot{V}_c$ ,  $\rho_c$ 로 결정할 수 있다.

기존의 계산된 천장에서의 유체유량과 유체밀도를 모델의 화원제트에 적용하는 경우 앞의 실험에서 증명된바와 같이 제트가 천장까지 이동하는 동안 주위공기의 유입이 이루어지므로, 유입효과를 고려하여야 보다 정확한 모델로서 사용될 것이다. 이와 같은 모델링은 기존연구<sup>7)</sup>에서 제시된 질량유입율(mass entrainment rate), K를 도입하여 식 (4)~(6)으로 표현할 수 있다.

$$\rho_c = \rho_{air} \frac{\chi_{o,air} + \gamma(1 - \chi_{o,air}) + K[(1 - \gamma)\chi_{o,air} + \gamma]^{1/2} \bar{h}}{1 + K[(1 - \gamma)\chi_{o,air} + \gamma]^{1/2} \bar{h}} \quad (4)$$

$$\rho_0 = (\rho_{air} - \rho_{He})\chi_{o,air} + \rho_{He} \quad (5)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_o + \dot{V}_e = \dot{V}_o [1 + K(\rho_o/\rho_{air})^{1/2} \bar{h}] \quad (6)$$

위 식에서  $\gamma = \rho_{He}/\rho_{air}$ 이고,  $\bar{h}$ 는 축소모형에서의 천장 높이를 나타내고, 하첨자 “o”와 “e”는 각각 축소모형에서의 연기제트 출구조건과 천장까지 발달되면서 유입되는 양을 나타낸다. 즉, 식 (4)에서 제트출구에서의 공기 부피분율인  $\chi_{o,air}$ 를 결정한 후 식 (5)에서 구한  $\rho_o$ 로부터 식 (6)을 이용해 모델의 제트분출유량인  $\dot{V}_o$ 를 구할 수 있으므로, 최종적으로 주위공기 유입을 고려한 모델의 제트유량 및 가스조성을 구할 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. LIF 실험을 통해 전체적인 혼합기구는 경계면에서의 불안정성에 의한 거대와구조로 판단되고,  $Re$  수가 커질수록 유입되는 시점이 상류로 이동하며 그 양 또한 증가된다.

2. Rayleigh 산란법결과로서 상류에서도 제트의 중심부까지 산란신호가 강하게 검출되어 혼합이 제트의 내부까지 이루어지고, 노즐에서 분사방향으로 진행할수록 주위공기의 유입이 제트 내부로 진행되고 있음을 알 수 있다.

3. LIF와 Rayleigh 산란법 등 두가지 레이저 측정 기법을 이용하여  $Re$ 수가 1,000 미만의 부력제트 노즐근처(near field)에서의 공기 유입을 실험적으로 확인하였다. 이 실험결과는 기존 등온기체모델에서 제트의 주위공기 유입을 고려하여야 한다<sup>7)</sup>는 사실을 입증한다.

4. 이상적 플룸(ideal plume)식에서 복사열손실을 0.35로 고려하였을 경우에 Megret and Vauquelin의 모델<sup>3)</sup>과 근사한 결과를 얻을 수 있으며, 앞에서 실험적으로 검증된 주위공기 유입효과를 고려하여 보다 간단하면서 정확한 등온기체 모델링 기법을 얻을 수 있다.

### 참고문헌

1. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Son, New York(1998).
2. Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC

- Committee on Road Tunnels(1999).
3. O. Megret and O. Vauquelin, "A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics", Fire safety Journal, Vol.34, pp.393-401(2000).
4. O. Vauquelin and O. Megret, "Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel", Fire Safety Journal, Vol.37, pp.525-533(2002).
5. O. Vauquelin and D. Telle, "Definition and Experimental Evaluation of the Smoke "Confinement Velocity" in a Tunnel Fires", Fire Safety Journal, Vol.40, pp.320-330(2005).
6. O. Vauquelin and Y. Wu, "Influence of Tunnel width on Longitudinal Smoke Control", Fire Safety Journal, Vol.41, pp.420-426(2006).
7. E.J. Lee, K.C. Oh, and J. Park, "Jet Entrainment Effect on Fire-induced Flow in Isothermal Model Applied to Reduced-scale Tunnel", Fire Safety Journal, Vol.44, pp.435-438(2009).
8. F. Ricou and D. Spalding, "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", J. Fluid Mech., Vol.11, pp.21-32(1961).
9. D. Liepmann and M. Gharib, "The Role of Streamwise Vorticity in the Near-field Entrainment of Round Jets", J. Fluid Mech., Vol.245, pp.643-668(1992).
10. D. Lacroix, "The New PIARC Report on Fire and Smoke Control in Road Tunnels", Third International conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France, pp. 185-197(1998).