

# 전선 매연 생성 특성 연구를 위한 광산란법-광소멸법의 비교

조상문 · 이민정 · 김남일<sup>†</sup>

중앙대학교 기계공학부

(2008. 7. 11. 접수 / 2008. 11. 27. 채택)

## Comparison between a Light-Scattering and a Light-Extinction Methods for the Study on Soot Yielding Characteristics of an Electric Cable Fire

Sang Moon Cho · Min Jung Lee · Nam Il Kim<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received July 11, 2008 / Accepted November 27, 2008)

**Abstract** : Significant portion of the fire accident is caused by some troubles in electric circuits. To prevent the fire induced by those electric trouble, some indications of electric fire need to be suitably detected at the first stage of the fire development. With this background, the characteristics of soot yielding of electric cables have been investigated using a light extinction method. In this study, a light scattering method was compared with the light extinction method. A slot-type premixed-flame combustor was traversed to burn three types of electric cables by compulsion, then the mass decrease rate and the soot densities were measured. According to the experimental results, the light scattering method is preferred to the light extinction method when the soot yield ratio is relatively small. Thus the former method is more suitable to detect the occurrence of an electric fire in a power distributor box.

**Key Words** : electricity cable fire, fire properties, property measurement, smoke density, extinction method

### 1. 서론

오늘날 국민의 생활수준 향상과 더불어 에너지 소비가 급속히 증가하고 있다. 그 결과 전기의 사용량 또한 늘어나면서 전기로 인한 화재 역시 지속적으로 증가하는 추세이다. 특히 가정용 옥내배선이나 소규모 분배전반에서 일어나는 화재의 경우, 초기에는 그 규모가 크지 않으나 방치되어 시간이 지날 경우 큰 화재로 변질 가능성이 높다. 이로 인해 최근 소규모 화재 발생 시 요구되는 초기 예측 모델과 그것을 예방, 진압하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전기 화재를 초기에 감지하는 방법에는 전기적 신호 특성을 분석하는 방안을 포함한 여러 가지가 있는데, 그 중 한 가지 방법으로 보다 직접적으로 화재의 위험을 판단하는 것이 도선 연소 시 발생하는 매연을 측정하는 방법이다. 이 경우 화재 예측뿐만 아니라 화재 시 인명 피해의 직접적인 원인이 되

는 매연의 특성을 지속적으로 감지할 수 있어서 어 화재의 규모와 예상 피해 정도를 가늠하는데 도움을 줄 수 있으며, 적절한 진압 전략 및 시스템을 구축함에도 용이할 것으로 기대된다.

화재 시 발생하는 매연을 측정하는 대표적인 방법에는 매연가스를 통과하는 광신호의 강도 감소를 측정하는 광소멸법(light extinction method, 이하 LEM)이 있으며, 이러한 방법을 이용하는 미국 국립 기술 표준원(NIST)의 대표적인 매연 농도 측정 장치<sup>1)</sup>를 Fig. 1에 나타내었다. 이러한 LEM 방법은 비교적 정확하고 널리 이용되고 있지만 화원이 소규모이거나 본격적인 화재 발생 이전 단계에 해당하는 조건에서는 발생 매연이 상대적으로 작아서 화재신호의 크기가 화재 이전의 조건에서 발생하는 신호에 비해 상대적으로 작은 특징을 가지고 있다. 따라서 화재 초기 대응 기술의 향상을 위해서 혹은 실험실 규모의 화재 초기 기술 개발을 위해서는 소규모 연소 시 발생하는 매연량을 측정하는 방법에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 소규모 전기화재 해석에 요구되는 주요 물성을 실험적으로 구하는 방안이 대

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
nikim@cau.ac.kr

한 기초연구의 일환으로서 전기화재의 주요 발화원인 도선의 연소 과정에서 발생하는 매연의 농도를 실험적으로 구하는 방안에 대한 기초연구를 수행하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 레이저광을 지나는 매연입자들의 산란(Mie-scattering) 강도를 측정하여 그 농도를 구하는 광산란법(light scattering method, 이하 LSM)을 새로이 적용하였다. 기존의 LEM 방법에 의한 측정은 수광부를 별도로 두고 레이저 파워의 감소를 측정하여야 한다는 점에서 레이저 산란 및 요소 장치의 배열에 민감하게 반응하게 된다. 이에 반해 레이저 산란기법은 보다 간단하게 측정이 가능하고 높은 파워의 레이저를 사용할 경우 매연이 지나는 단면에서의 유동형태 및 분포정도를 육안으로 확인이 가능하다. 더불어 PIV기법을 통해 속도장 역시 계산 가능한 장점이 있어 본 실험에서는 기존의 LEM에 LSM을 병행하는 형태로 실험을 진행하였다. 그리고 최종적으로는 두 방법의 결과 값을 비교함으로써 LSM 방법에 대한 유용성을 판단해보고자 한다.

### 2.1. 실험 장치

도선의 경우 가연 물질이기는 하지만 일반적으로 가연성이 낮은 피복을 사용하고 있기 때문에 자체적인 화염의 유지 및 전파는 어렵다. 다시 말해서 피복의 연소에 의해 발생하는 열량은 도선 자체를 점화온도까지 충분히 가열할 수 있는 열량을 만족시키지 못한다. 따라서 인위적인 열을 추가로 가해주면서 연소 환경을 유지할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 등속 직선운동하는 슬롯형태의 버너 위에 도선을 두고 일정한 속도로 태우는 방법을 사용하였으며 이때 나오는 매연을 광학 장치로 측정하는 방식을 취하였다. 전체적인 실험장치의 개요는 Fig. 1과 같다. 슬롯버너에는 메탄-공기 예혼합 가스가 사용되었으며 실험 전반에 걸쳐 당량비 0.9, 노즐 출구에서의 속도를 0.4m/s로 동일하게 유지하였다. 전선이 타면서 나오는 연소가스 및 매연 입자들은 팬을 이용해 덕트 외부로 나가도록 유도하였으며 덕트 내부에 매쉬와 교반기(stirrer)를 두어 덕트 단면 방향으로 매연이 고르게 형성될 수 있도록 하였다. 매연 농도를 측정할 광학 장치로는 헬륨-네온 레이저(파장 632nm)가 사용되었고 광신호를 받

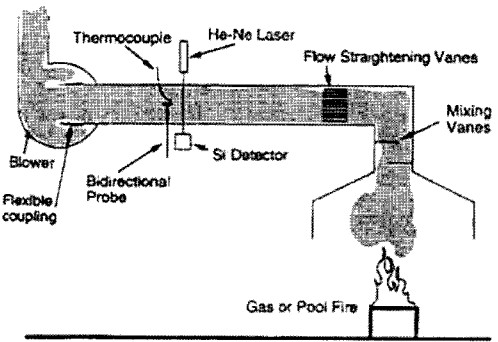


Fig. 1. Overall schematic of the smoke concentration meter and etc.(from NIST report<sup>8)</sup>).

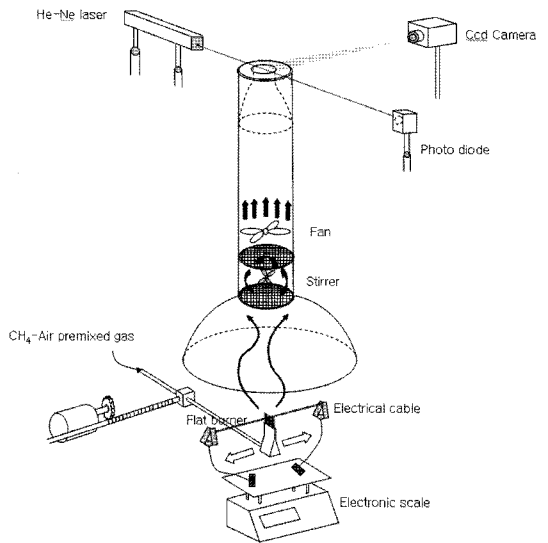


Fig. 2. Experimental apparatus for measurement of smoke density.

는 수광부로 포토 다이오드가 쓰였다. 또한 레이저 방향에 수직인 방향으로 일반 CCD 카메라를 두어 산란 이미지를 동시에 취득할 수 있도록 하였다.

Table 1. Test Samples for measurement of smoke density

KSC 3302 (600V PVC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전도체(1개, 외경 1.6mm)</li> <li>- 절연체(PVC) 두께 : 0.8mm</li> <li>- 총 직경 : 3mm, 무게 : 27g/m</li> </ul>
KSC 3328 (600V HIV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전도체(7개, 외경 1mm)</li> <li>- 절연체(내열 PVC) 두께 : 1.1mm</li> <li>- 총 직경 : 5mm, 무게 : 70g/m</li> </ul>
KSC 3323 (600V PVC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전도체(7개, 외경 1mm)</li> <li>- 절연체(PVC) 두께 : 2.5mm</li> <li>- 총 직경 : 8mm, 무게 : 115g/m</li> </ul>

실험에 쓰인 도선은 가정용 옥내 배선으로 많이 쓰이는 PVC 제품군이 선택되었다. 본 실험에서는 LEM 방법과 LSM 방법의 비교가 주된 목적이므로 도선의 상세한 물성은 비중있게 다루지 않는다. 다만 이중 3mm, 8mm 도선의 경우 피복이 일반 PVC이며 5mm 제품의 경우 내열 PVC(Heat Resistant PVC, HIV)이다. 대표적인 도선에 대한 보다 자세한 사항을 Table 1에 정리하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 질량 변화량 측정

슬롯 버너는 70mm/min의 속도로 움직인다. 실험에서 얻어진 데이터는 1분 동안 측정된 값이며 실제 전선이 타는 부분은 전선의 종류에 무관하게 길이 70mm를 크게 벗어나지 않는다.

Fig. 3은 실험 진행 중의 임의의 시간에 취득한 직접 사진이다. 전선은 슬롯 버너의 출구로부터 35mm 정도의 위치에 고정되었다. 도선의 직경이 3mm, 8mm의 경우에는 같은 피복 재질이므로 탈 때의 휘염 발생 정도가 육안 관찰에 의해서도 도선의 두께에 정성적으로 비례하여 나타나지만 5mm 피복의 경우에는 내열성을 갖기 때문에 같은 가열량 조건에서 상대적으로 적은 휘염 발생을 보이고 있다. Fig. 4는 실제 질량 감소량을 시간에 따라 도시한 것으로 3mm, 5mm 제품군은 비슷한 비율로 타는 반면 8mm, 3mm×2 경우는 상대적으로 각각 1.5배, 2.1배 정도 더 많은 양이 연소되는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 세 경우 모두 비교적 일정한 비율로 질량이 감소하므로 실험에 이용된 버너가 도선의 질량 감소율에 따른 매연의 발생량을 정량화 하는데 적합한 형태임을 알 수 있다.

질량 감소량은 매연량 뿐만 아니라 도선이 탈 때 발생하는 연소가스를 포함하므로 실제 발생하는 매연량은 이보다 더 작은 값을 가질 것이다. 이처럼 화원 물질의 단위 질량 감소에 대해 매연이 생성되

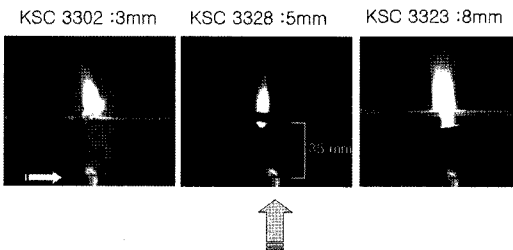


Fig. 3. Photographs of burning test samples.

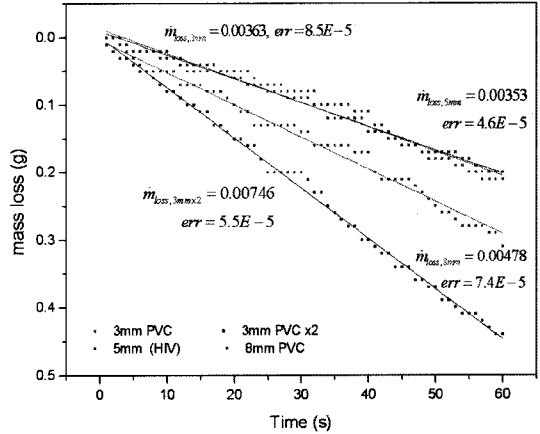


Fig. 4. Mass loss of test samples according to the elapsed time.

는 정도를 매연생성율(soot yield ratio)이라고 하며, 이러한 값은 매연 생성을 수치 해석하는 가장 기본적인 모델에 요구된다. 이에 대한 정확한 값의 산출은 보다 엄밀한 실험을 통해 다양한 조건에서 구해될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 전기화재 초기의 매연 농도 특성의 효과적 파악을 위한 방법으로 LEM과 LSM을 비교하는 것에 주안점을 두었다. 지금까지의 실험 결과는 이러한 실험 방법이 다양한 도선의 연소율을 제어하는데 적합함을 보이고 있다.

#### 3.2. Light Extinction Method

Fig. 5는 레이저 수광부에서의 신호값을 시간에 따라 도시한 것이다. 실험에서 얻어진 데이터는 포토 다이오드 신호값의 안정화를 위해 수광부가 레이저 광에 노출되고 충분한 시간이 경과된 후 측정된 값들이다. 또한 도선의 점화 이후에 매연의 생성은 실험 덕트를 통해 측정부에 도달하는데 시간

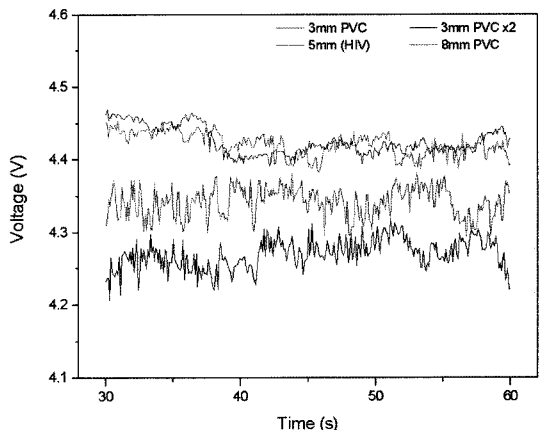


Fig. 5. Detected signals by the photo diode.

이 요구되므로 비교적 일정한 매연 밀도를 얻기 위해 점화 이후 30초가 경과한 조건에 대해 데이터 처리를 수행하였다.

검은색 실선이 매연이 발생하지 않을 때의 다이오드 신호이며 이를 기준으로 도선의 두께가 증가함에 따라 수신된 레이저 강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 다만 내열 피복을 사용한 5mm 제품의 경우 3mm 제품과 비슷한 신호 감소 정도를 보인다.

레이저 강도 감소량과 매연 농도는 아래와 같이 Bouguer's Law와 관련된 식으로 표현되어지는 것으로 알려져 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma_s M_s L) \quad (1)$$

사용된 다이오드의 내부 저항과 레이저 출력부에서의 강도는 일정하므로 수광부에서의 레이저 강도를 다이오드 전압 신호값으로 대체하면 위식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{V^2}{V_0^2} = \exp(-\sigma_s M_s L) \quad (2)$$

여기서  $V_0$ 는 매연이 발생하지 않을 때 수광부로부터의 신호이며  $M_s$ 는 매연의 농도( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $L$ 은 매연이 지나가는 영역의 길이(0.04m)를 뜻한다.  $\sigma_s$ (특정 소멸 계수)는 실험에 의해 얻어지는 값으로 Mulholland와 Croarkin<sup>6)</sup>은 이값을 632nm 파장대 영역에서  $8.7\text{m}^2/\text{g}$ 으로 제시하였다. 이는 7가지의 연구에서 얻어진 계수들의 평균값으로써 이들 중 Georgia Tech에서는 PVC에 대한 계수 값으로  $9\text{m}^2/\text{g}$ 를 사용하였다. 여기서는 Georgia Tech의 값을 이용하여 매연

의 농도를 계산하였고 Fig. 6은 이 값을 시간에 따라 도시한 것이다. 각 제품에 따른 매연 농도값 차이는 질량 감소율의 그것과 비슷한 경향을 가지나 신호 대 잡음비가 커서 오차 정도를 무시하기가 힘들다.

### 3.3. Light Scattering Method

매연이 레이저 라인을 지날 경우 산란광이 발생하는데 산란광의 강도는 매연 입자의 크기나 분포 농도에 따라 달라진다. 본 실험에서는 이러한 산란광을 RGB 형태로 받은 후 이 중 Red 값의 상대적 크기를 이용하여 매연의 농도를 측정 하는 방법을 적용하였다. CCD 카메라에 찍힌 영상 중 매연이 레이저에 노출된 부분만을 따로 편집한 후, 매 초당 이미지 전체면적에서의 평균 Red값을 계산하였다. Fig. 7은 이를 시간에 따라 도시한 것으로 도표 내 사진에서 보듯이 매연의 발생 정도를 육안으로도 확인이 가능하다. 매연이 발생하지 않을 때의 산란광은 나타나지 않았으며, Red값 역시 0에 근접했다. 3mm 도선과 5mm 도선의 편차값은 앞서의 결과와 마찬가지로 경향을 보였고 8mm, 3mm×2도선의 경우 확연히 구분되는 큰 값이 나타났다. 네 경우 모두 매연 강도에 따른 신호값의 크기 차이가 명확히 드러났다.

LEM과는 달리 신호대비 잡음의 크기도 상대적으로 작고 매연정도에 따른 신호값 변화폭도 커서 본 실험과 비슷한 스케일의 매연 측정에선 이러한 방법이 보다 유용한 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 매연 발생량이 많아지면 산란 이미지의 국부적인 영상 강도가 포화되기 때문에 광범위한 변화를 보이는 매연 강도 측정에서는 그

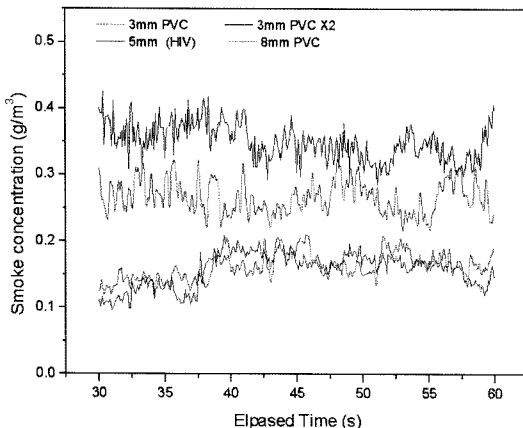


Fig. 6. Smoke concentration versus time.

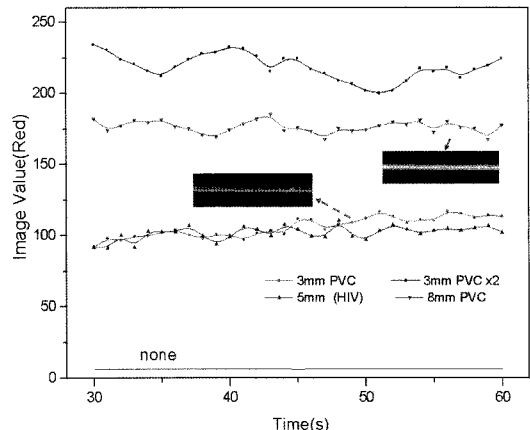


Fig. 7. Image value calculated by LSM.

측정폭이 제한되는 단점이 있다. 또한 CCD 카메라의 초점거리와 밝기 설정, 노출 이미지픽셀 크기에 따라 신호값이 달라지므로 차후 환경값에 대한 신호강도 변화를 정량화 할 필요가 있다.

**3.4. LSM vs. LEM**

일반적으로 광산란 신호는 PIV 등 유동 가시화에 유용하게 이용되고 있지만 본 연구에서처럼 입자의 분포정도를 측정하는 예로는 흔히 사용되지 않았다. 그렇기 때문에 LSM을 이용해 얻은 신호값을 매연 농도로 환산하기 위해서는 실험에 병행되어진 LEM 방법으로부터 얻은 신호값을 이용하여 둘 사이의 관계식을 얻을 필요가 있다.

LSM과 LEM 신호값의 상관정도를 알아보기 위해 각 신호값의 편차 정도를 이용하여 다음과 같은 상대 계수를 도입하였다.

$$r_{signal} = \frac{-\ln(V^2/V_0^2)}{I_v - I_{v_0}} \quad (3)$$

여기서  $I_v$ 은  $I_{v_0}$  각각 매연이 있을 때와 없을 때의 LSM 신호값이다.

Fig. 8(a)는  $r_{signal}$ 값을 도시한 것이다. 시간에 따라 변동값이 보이지만 세 경우다 비슷한 크기의 값을 가지고 있다. (b)는 계수 r의 시간평균값을 질량 감소율에 따라 나타낸 것으로 많이 타든 적게 타든 크기의 변화가 거의 없다. 이 두 결과로 미루어 볼 때, 본 실험스케일에서는 LSM의 신호값이 매연의 농도값과 비례한다는 것을 알 수 있다. 즉,

$$I_v - I_{v_0} \propto -\ln(V^2/V_0^2) = rM_s \quad (4)$$

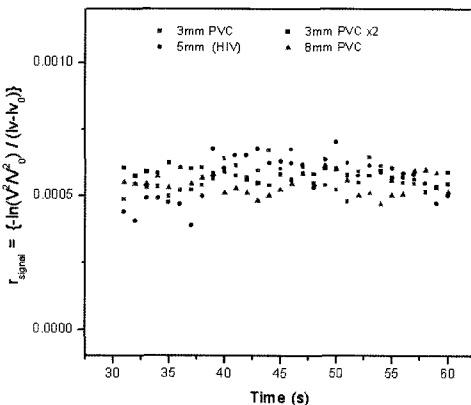


Fig. 8. Relative Coefficient (a) versus time (b) with the mass loss rate.

이 된다. 실험전반에 걸쳐 LSM 신호값을 매연의 농도로 변환하기 위해 평균 계수값( $r_{avg} = 0.00056$ )을 구하였고 이 값은  $\pm 5.4E-5$  정도의 오차를 가진다.

매연의 발생률은 매연 농도값에 덕트 출구에서의 평균 유속( $V_{m,exit}$ )과 단면적( $A_{exit}$ )을 곱해줌으로써 구할 수 있다. 이중 매연농도를 상대 계수와 LSM 신호값으로 대체하면 매연 발생률은 다음과 같은 방법으로 얻어 진다.

$$m_s = M_s A_{exit} V_{m,exit} = \frac{r_{avg} (I_v - I_{v_0})}{\sigma_s L} A_{exit} V_{exit} \quad (5)$$

실험에서  $A_{exit}$ 는  $0.0013m^2$ 이며  $V_{m,exit}$ 는  $0.3m/s$ 로 유지 되었다.

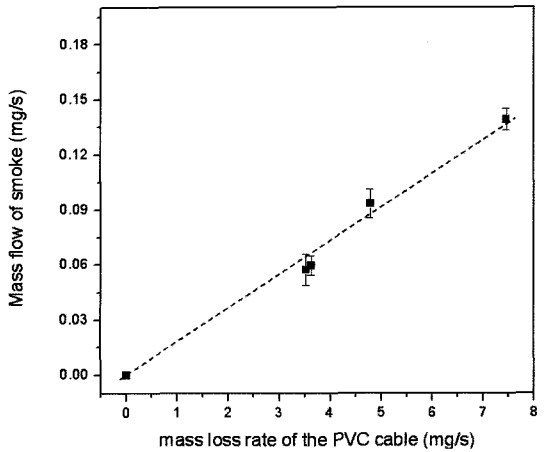
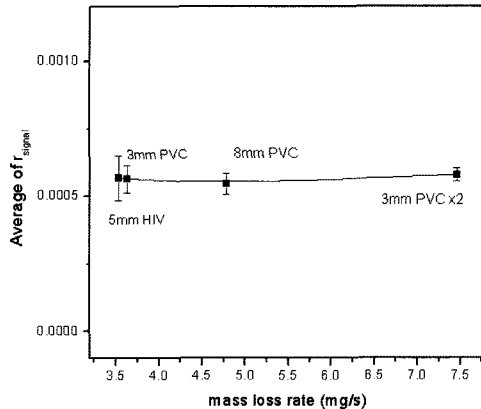


Fig. 9. Smoke generation rate with the mass loss rate for the PVC cable.



마지막으로 도선의 질량 감소율에 대한 매연 발생률을 구해보았으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 질량 감소율, 즉 연소생성물의 생성률이 증가할수록 매연 발생률 또한 비례하여 증가하고 있다. 그리고 연소생성물중 매연이 차지하는 비율은 실험 전반에 걸쳐 1.6~2.5% 사이로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 화재 시 발생하는 매연량 측정을 위해 레이저 산란광을 이용하는 방법을 새로이 적용하였다. 그리고 기존의 광소멸법을 병행함으로써 두 신호값을 비교해 보고 새로운 방법에 대한 유용성을 판단해 보았다. 그 결과 규모가 작거나 화원의 질량감소 대비 매연 발생량이 작은 화재실험의 경우 광산란법이 보다 적합한 형태임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 본 실험과 같은 소규모 화재시의 매연량 측정에 유용하게 적용될 수 있으며, 나아가 초기 화재의 감지 및 진압 시스템을 구축하는데 있어서도 도움이 될 것으로 판단된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호 : 2007-M-CC23-P-06-1-000).

#### 참고문헌

- 1) V. Babrauskas, “Ignition Handbook”, FSP & SFPE, 2003.
- 2) D.A. Crowl and J.F. Louvarl, “Chemical Process Safety : fundamentals with applications”, Englewood Cliffs, New York, Prentice-Hall, 1990.
- 3) Newman JS, “Principle for fire detection”, Fire Technology, Vol. 2-2, pp. 116~127, 1988.
- 4) Newman JS, “Prediction of Fire Detector Response”, Fire Safety Journal, 12, pp. 205~211, 1987.
- 5) Mulholland GW. and Johnsson EL. et al. “Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter”, Fire and Materials, 24, pp. 231~243, 2000.
- 6) Mulholland GW. Croarkin, “Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke”, Fire and Materials, 24, pp. 227~230, 2000.