

## 주기적 연료 공급이 비예혼합 화염 특성에 미치는 영향에 관한 연구

이상협\* · 전대현\*\* · 이병준†  
(2001년 4월 10일 접수, 2001년 9월 12일 심사완료)

### The Effects of Periodic Fuel Supply on the Flame Stability and Soot Formation

Sang-Hyup Lee, Dae-Hyun Jeon and Byeong-Jun Lee

**Key Words:** LII(레이저 유도 백열법), Periodic Fuel Supply(주기적 연료 공급), Nonpremixed Flame Jet(비예혼합 제트)

#### Abstract

The effects of periodic fuel supply on the nonpremixed flame stability and soot formation were experimentally studied. A solenoid valve was used to control the period of fuel supply. The laser induced incandescence technique was used to visualize soot volume fraction profile. The flame base shape was changed significantly by the fuel supply period and partially by the fuel flowrates. The portion of bluish flame near the flame base became larger as the period increased. When the period was long, two flames coexisted within one period. It seemed that the characteristic of flame stability were repeated with 4.68m change of fuel supply line length. The soot mass measurements and soot volume fraction measurements revealed that the maximum suppression of soot by the periodic fuel supply was approximately 75%, which occurred when the fuel supply period was relatively long.

#### 1. 서론

환경문제를 유발하는 여러 가지 공해물질 중에서 매연은 가정용 보일러, 산업용 로, 항공기, 자동차, 각종 공장 등에서 여러 가지 요인에 의하여 배출되고 있으며 인체와 환경에 악영향을 끼친다.

연료와 공기가 분리된 상태에서 화염으로 공급되는 확산화염의 경우 연료의 열 분해는 연료의 구조에 따라 상이하므로, 연료의 구조가 매연의

생성이 영향을 미친다. 즉, 메탄, 프로판, 부탄 등의 알칸족 탄화수소보다 알켄족 탄화수소(에틸렌, 프로필렌, 옥텐)가, 이보다 알킨족(아세틸렌 등)이, 알킨족보다 방향족(톨루엔, 부필벤젠)이 매연을 많이 발생시킨다. 이에 비하여 연료와 산화제가 잘 섞인 상태에서 화염으로 공급되는 예혼합 화염의 경우, 매연은 고온화염면 이후에서 주로 형성되고, 연료의 구조가 매연 형성에 영향을 적게 미친다. 예혼합화염의 경우 화염의 온도가 높으면 열분해가 촉진되므로 매연의 형성이 높다.<sup>(1)</sup>

대부분 탄소로 이루어진 매연입자는 압력이 높을수록 많이 형성되며, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub> 및 불활성 기체를 연료에 첨가하면 매연의 생성이 억제되나, 철가루, 망간 및 할로겐족(특히 브롬)을 첨가하면 매연의 생성이 증가한다고 알려져 있다.<sup>(1~3)</sup> 또한 최근에 상세화학 반응을 고려한 PAH 및 매연 입자의 발생을 설명하려고 시도되

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학과

E-mail: bjlee@yu.ac.kr

TEL: (053)815-5896 FAX : (053)813-3703

었다.<sup>(7)</sup>

Smith 등<sup>(8)</sup>은 메탄 확산화염의 공진 주파수와 동기시킨 음파가진이 공급되는 관에 있는 경우에 매연의 생성이 7배 증가함을 발표하였다. Saito 등<sup>(9)</sup>은 스피커에 의하여 공기에 가진이 주어지는 경우 매연농도를 최대 90%까지 감소시킬 수 있음을 발표하였다. 그러나, 이 방법은 외부에 장치를 부가시켜야 하므로 그 적용성에 한계를 가지고 있다.

비에혼합화염에 산소를 일부 섞어줌에 따라 매연생성량이 감소할 수 있으므로, 본 연구에는 공급되는 연료와 산화제의 혼합을 증진시키는 방법으로 분출되는 연료의 공급을 제어하는 방법을 채용하였다. 이러한 방법에 의한 화염의 안정성 파악과 저감된 매연량을 정량적/정성적으로 측정하고 매연의 분포를 파악하고자 한다. 즉, 솔레노이드 밸브를 이용하여 노즐에 공급되는 연료에 주기적인 단속을 주고, 유량 및 연료 공급관 길이를 변화시킬 때 형성된 화염의 특성과 매연 생성 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

질량유량계를 사용하여 일정하게 공급되는 연료를 솔레노이드 밸브 (SMC, "ON/OFF": 2ms/3.5ms)를 사용하여 단속하였다.(Fig. 1) 솔레노이드 밸브의 전원을 제어하여 공급되는 연료의 주기와 듀티(Duty, 한 주기 내에 시간에 대한 주기의 비)를 제어하였다.

연료노즐은 내경 2.3mm, 외경 3.0mm, 길이 50.5mm인 스테인레스 관을 사용하였으며 연료는 99.9% 프로판 가스를 사용하였다. 연료 공급관은 외경 6.35mm의 플라스틱 관을 사용하였으며 각각의 관 길이는 Fig. 1에 나타내었다. 솔레노이드 밸브로부터 노즐까지의 거리는 1.56m부터 9.7m까지 1.2m 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

화염내의 매연 체적분율을 구하기 위해서 레이저 유도 백열법(Laser Induced Incandescence, LII)을 사용하였으며 이의 광학배열을 Fig. 2에 나타내었다. 레이저 유도 백열법은 고에너지밀도의 레이저에 의해 가열된 매연 입자로부터 발생하는 흑체 복사를 이용하는 것으로, 매연에 조사한 레이저에 의하여 방출된 신호는 입자의 체적

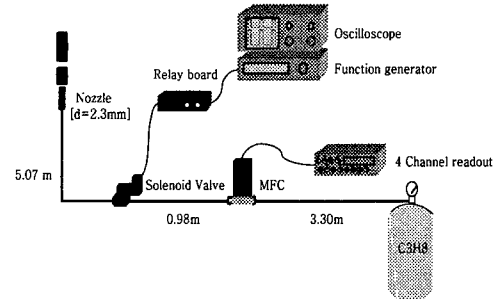


Fig. 1 Schematic of fuel supply system

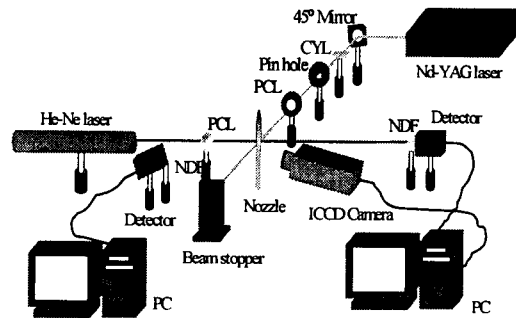


Fig. 2 Schematic experimental apparatus for optical measurements (CYL : cylindrical lens, PLC : plano-convex lens)

분율에 근사적으로 비례함이 알려져 있다.<sup>(10~13)</sup> 유동장에 영향을 주지 않고 매연의 실시간 2차원 분포를 측정할 수 있다.

Nd:YAG레이저(Continum 8000, 최대 600mJ/Pulse)의 파장532nm 광을 실린더형 렌즈(초점거리 15.7mm)를 사용하여 레이저광을 펼친 후, 볼록렌즈(planar convex lens, f=500mm, d=54mm)로 약 47mm의 평행관을 만들어 이를 측정 영역에 조사하여 2 차원 LII 신호를 발생시켰다. LII 신호 검출을 위해 400nm(FWHM 10nm)의 필터를 사용하였으며, 발생된 LII 신호는 105mm 망원렌즈를 장착한 ICCD카메라 (Oriel, Instaspec V)를 사용하여 포착하였다. 레이저(Nd:YAG)의 진행방향과 90도로 He-Ne 레이저를 위치시켜, LII신호의 보정을 위한 광감쇠법 실험을 수행하였다. He-Ne레이저광은 단면 감쇠를 위해 직경

54mm, 초점거리 500mm의 렌즈를 사용하여 화염부에 집광시켰으며 화염부를 통과하여 감쇠된 레이저광은 Neutral density(#2.0)필터를 통과시켜 포토다이오드(Hamamatsu)로 측정하였다.

듀티 25%로 고정하고 유량, 주기 및 공급관의 길이를 변수로 하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

듀티를 고정하고 주기와 유량을 변화시킬 때 변화하는 화염의 형태를 화염하단부의 청염(blue flame)과 황염(yellow flame) 경계의 모양, 노즐에 부착(attached), 부상(liftoff) 여부, 그리고 화염 하단부의 안정성(stability)에 따라 크게 5개로 대별하였다.(Fig. 3 및 Fig. 5 참조)

Type I은 유량에 상관없이 주기가 낮은 경우 나타나는 안정한 화염으로 청염과 황염의 경계가 화염 상단부 쪽으로 블록하거나, 평평한 화염이다. 80ml/min 이하의 저유량인 경우의 Type I에서 주기를 증가시키면 화염의 경계가 노즐방향으로 내려오며 경계의 상단부 방향으로 초승달 모양의 작은 화염이 생기거나, 화염 내부에 상단부 쪽으로 작은 블록한 경계면이 생기는 Type II 화염영역으로 천이한다. 80ml/min 이상의 유량에서 주기를 증가시키면 Type I과 반대로 화염 하단부로 블록한 청염과 황염의 경계면이 생기며, 이 경계면이 점차 타원의 형태로 변하고 화염의 상단부로 올라가는 Type III영역이 된다. Type IV는 유량이 일반적으로 100ml/min 이상의 경우에 생기며 청염과 황염의 경계가 화염 하단부로 블록한 긴 타원형이거나 삼각형의 형태인 화염이다. 황염을 둘러싸고 있는 청염의 영역이 다른 형태의 화염에 비하여 큰 것으로부터 이 형태의 화염이 주위 공기와의 혼합이 증가하였음을 유추할 수 있다. 이 화염은 노즐에 부착이 된 상태이며 주기가 증가하면 유량이 100ml/min보다 작을 때에도 나타난다. Type V는 다른 Type의 화염과는 달리 화염전체가 불안정하며 듀티 25%에서 유량이 크고, 주기가 길 때 나타난다. 청염과 황염의 경계도 분명하지 않으며, 화염의 위치도 매우 불규칙적이고 노즐에 부착한 경우와 부상(liftoff)하는 경우가 반복하며 쉽게 꺼진다. 주기를 더 증가시키면 노즐에서 떨어져 부상이 되었다가 소멸되는 화염이다.

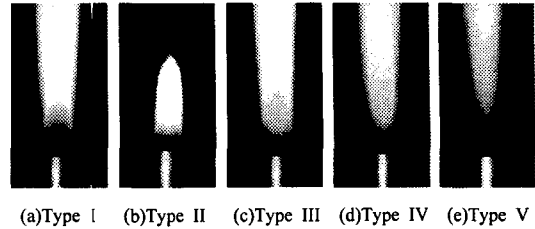


Fig. 3 Flame shapes and types

이 등.<sup>(14)</sup>의 연구와 유사하게 화염의 형상은 유량에는 거의 영향을 받지 않으며 주기와 주파수의 변화에 따라 화염 특성이 변하는 것을 볼 수 있다. Type I~V과는 달리 솔레노이드 밸브를 완전히 개방(Duty 100%)할 경우에는 매우 안정하며 Type I과 유사하다.

이와 같은 거시적인 화염의 시간에 따른 변화 과정을 관찰하기 위하여 motionscope(Redlake 5000)를 사용하여 2ms 간격으로 화염을 촬영하였다.(Fig. 4) 장치의 한계로 광도가 강한 황염영역이 주로 포착되었다. 여기서 시간은 상대적인 시간을 의미한다.

Type I 화염은 노즐에 부착된 상태에서 시간이 증가하면 18ms까지 화염의 길이가 증가함을 볼 수 있다.[Fig. 4(a)] 30ms에 화염 하단부가 하류로 밀려 올라가고, 미약한 강도의 화염이 노즐 근처에 남아 다음 주기에 분출되는 연료의 점화원으로 사용됨을 볼 수 있다.

Type II에 해당하는 화염[Fig. 4(b)]은 유량 50ml/min의 경우로 화염이 24ms까지 성장한 후, 화염 하단부의 높이는 거의 변하지 않으면서 점점 가늘어져서 황염이 소멸됨을 볼 수 있다.

Type III 화염[Fig. 4(c)]은 40ms까지 성장한 후, 화염 하단부가 하류로 밀려가면서 제 2의 연료 분출에 의하여 작은 제 2의 화염을 형성함을 볼 수 있다.

Type IV인 화염[Fig. 4(d)]은 Type III과 유사하게 화염이 2개의 영역으로 나누어져 있음을 볼 수 있다. 24ms에서부터 화염은 하류로 이동하고 있으며, 32ms에 제 2의 연료 분출에 의하여

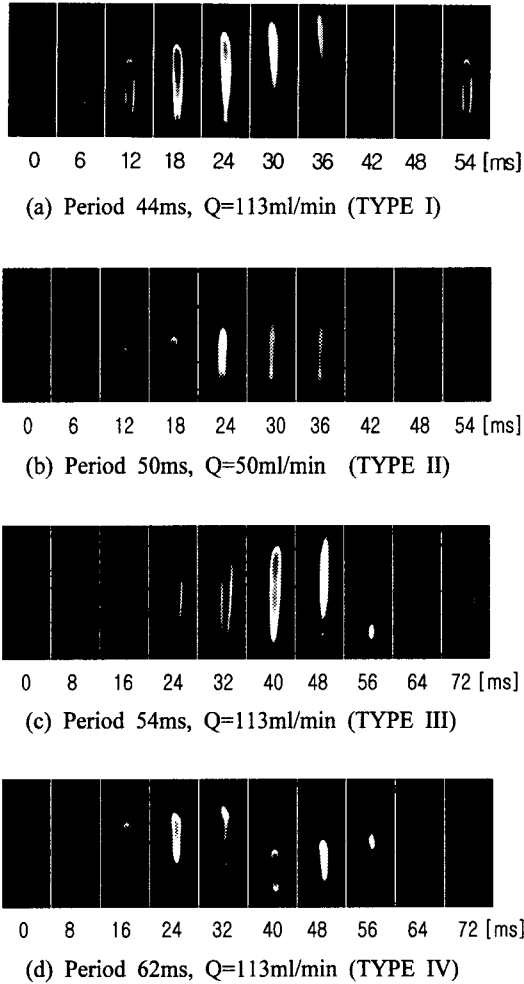


Fig 4 Time resolved flame shapes

제 2의 화염이 생성되어 성장하는 것을 볼 수 있다. 이러한 한 주기에 2개의 화염이 형성되는 것이 Type I 및 II와의 차이점이 된다.

Fig. 5는 솔레노이드 밸브에서 노즐까지의 연료 공급관 길이, 주기 및 유량변화에 따른 화염 영역의 변화를 보여준다. 화염의 형태는 동일유량에 대하여 주기 증가에 따라 Type I에서부터 II, III, IV로 변해감을 알 수 있다.

동일한 유량(예를 들면 180ml/min)에 대하여 소염이 일어나는 주기가 공급관 길이 증가에 따라 증가(5.07m까지)하다가 급격히 감소한 후 다시 증가함을 볼 수 있다. 전체적인 화염 영역의 변화도 4.68m를 주기로 유사하게 반복됨을 볼 수 있다. 즉, 공급관의 길이가 각각 1.56m와 6.24m,

2.73m와 7.41m, 3.90m와 8.58m, 5.07m와 9.75m인 경우의 화염 영역들이 유사함을 Fig. 5에서 볼 수 있다.

내연기관의 흡기밸브 개폐에 의하여 흡기관 내를 왕복하는 음파가 흡기관의 길이에 따라 충전 효율에 영향을 미치는 것과 유사하게 본 연구의 밸브 개폐에 의하여 발생한 음파가 유체의 유동과 결합되어 이러한 화염영역의 반복성을 나타낸 것으로 사료된다.

공급주기에 따라 화염의 특성과 매연 생성량이 Type I에서 III, IV로 감에 따라 감소하는 것을 관찰하였으므로, 매연 생성량의 정량적/정성적 측정을 수행하였다.

매연 생성량의 2차원 분포 측정은 LII법을 사용하여 100회 측정된 결과를 평균하였다. 레이저 광의 최대 폭이 47mm이므로 측정의 편리와 해상도를 위하여 노즐 위 25mm지점에 유동방향에 수직으로 철판을 부착하여 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 각 형태의 화염에 대한 100회 평균 LII 신호의 분포를 나타낸다. LII 신호는 매연의 체적분율에 비례하므로 Fig. 6에서 검은색에서 회색으로 갈수록 매연의 생성량이 많음을 나타낸다. 여기서 듀티 100%는 솔레노이드밸브가 항상 열려있는 경우로 연료에 주기적인 단속이 없는 경우이다. 듀티 100%인 경우에는 매연이 노즐의 중심축으로는 생성이 안되고 좌우측으로 판을 따라가며 형성되는 것을 볼 수 있다. 주기적으로 연료가 공급되는 경우에 매연은 노즐 중심축에도 형성됨을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4와 같이 화염의 크기와 화염영역이 시간에 따라 커졌다 작아졌다를 반복하는 것에 기인한다. 듀티 100%에서부터 황염의 형태가 Type I, II, III, IV로 갈수록 전체적인 매연의 체적분율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 매연 생성의 감소는 Type IV로 감에 따라 Fig. 4에서 보듯이 한 주기에 연료의 공급이 두 번(화염생성이 2회) 있게 되므로, 분출 연료 내부로 공기가 유입될 수 있는 기회가 증가하여 공기첨가량 증가에 따라 매연 생성량이 감소효과<sup>(1)</sup>를 나타낸 것으로 사료된다.

Fig. 7은 윗 판으로부터 2mm와 4mm 떨어진 지점의 매연의 반경방향 분포를 나타낸다. 레이저가 화염으로 입사하는 쪽의 신호가 레이저광이 출사하는 쪽에 비해서 신호가 큼을 볼 수 있는데, 이는 본 실험의 경우처럼 저출력의 레이저

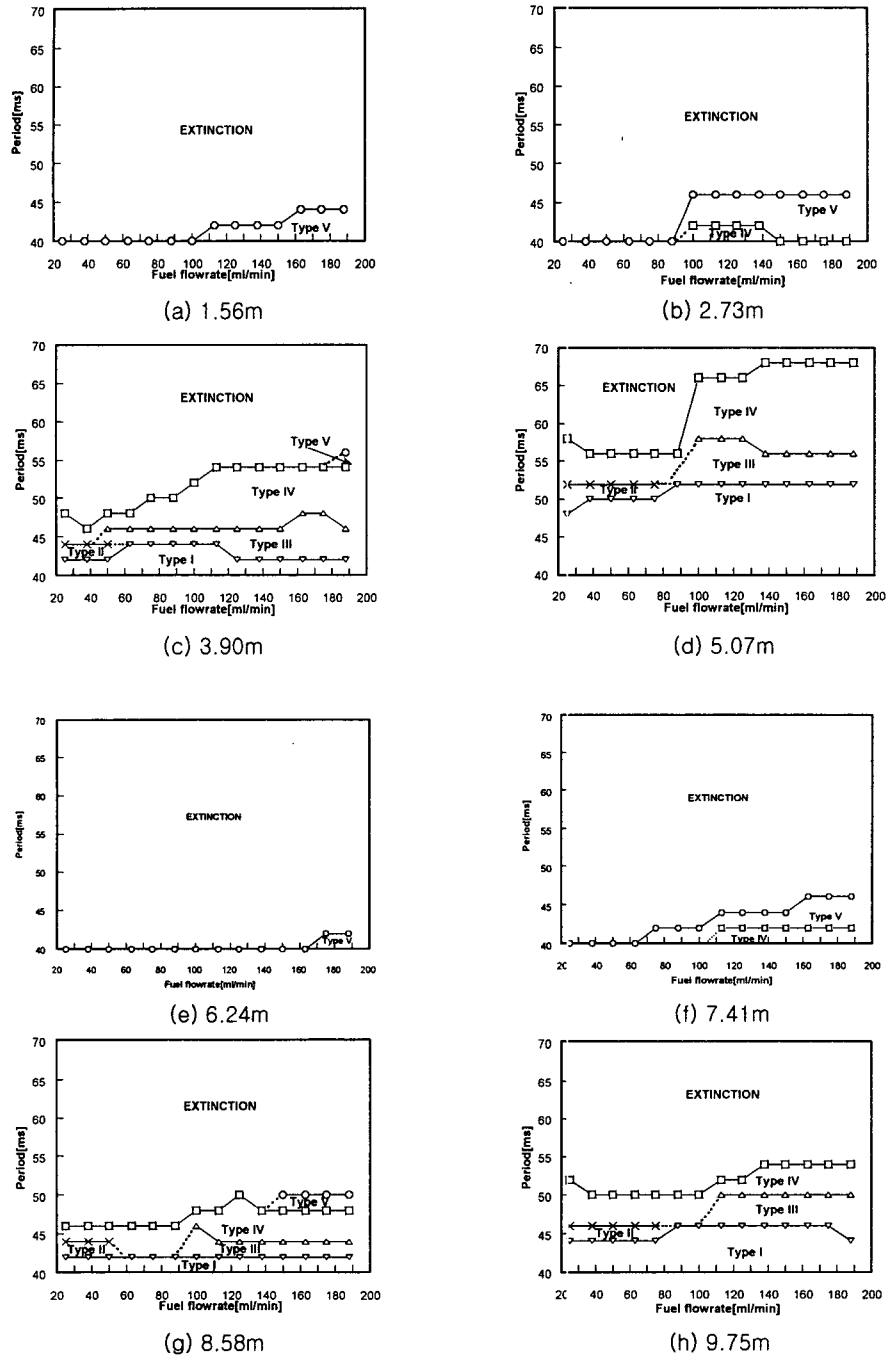


Fig. 5 The effects of fuel flowrate, period and the fuel supply line length on the flame types

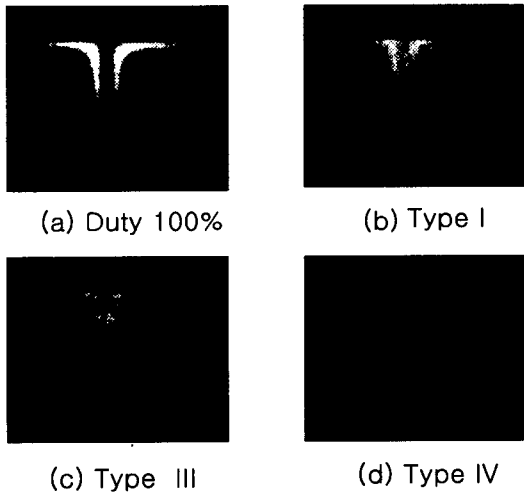
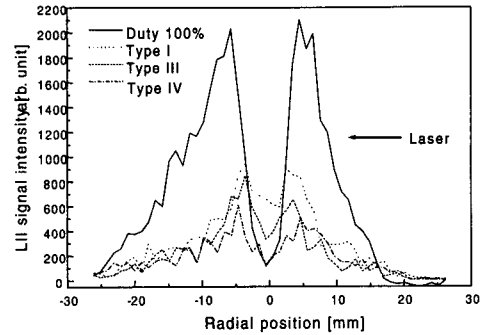


Fig. 6 The soot volume fraction profiles for fuel flowrate of 113ml/min, duty 25%

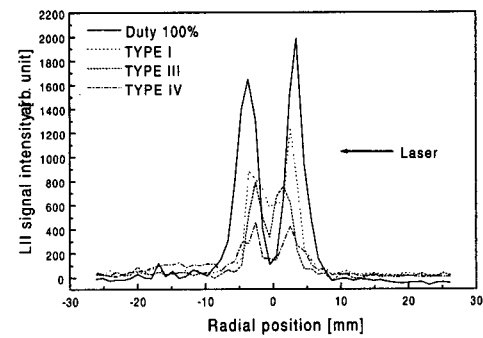
에너지를 사용하는 경우, 공급되는 레이저의 강도가 화염을 통과하면서 매연 입자에 의해 산란/흡수되어 감쇠되는 것에 기인한다. 즉, 레이저의 에너지가 화염내부 매연 입자의 기화보다는 온도상승에 기여하는 바가 크기 때문에 입구측(양의 방향)에서 매연 입자의 온도상승에 에너지를 많이 소비하므로 출구측(음의 방향) 매연 입자의 온도상승효과가 떨어져 LII 신호가 입구측에 비해서 작게 나타난다.<sup>(12)</sup> 반경방향에 대한 화염형상의 LII 신호는 duty 100%에서 Type IV로 갈수록 감소하고 있음을 볼 수 있다. Duty 100%와 Type IV의 최대값을 비교하면 2mm인 경우에는 4.2:1, 4mm인 경우에는 4.7:1로 주기적인 연료를 공급하는 경우의 매연 생성량이 줄어들음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 LII 신호 측정 시와 동일하게 연료가 분출되는 노즐 위 25mm에 마이크로 슬라이드 글라스(micro slides glass, 76×26×1mm)를 올려 놓고 5분 동안 연료를 연소시킬 때 유리에 고착된 그을음(soot)의 양을 측정된 결과를 나타낸다. 유리에 고착된 매연의 양도 Fig. 8의 경우와 유사하게 duty 100%로부터 Type II, III, IV로 갈수록 매연의 생성량이 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.

이러한 차이는 정체면에 부착되는 매연이 재연



(a)



(b)

Fig. 7 The radial profiles of LII signals for 113ml/min, duty 25% case (a)2mm, (b)4mm below the steel plate

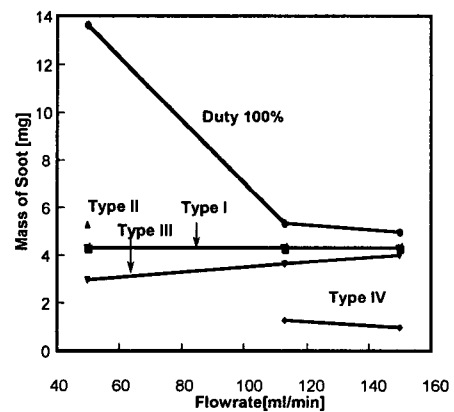


Fig. 8 Mass of soot stuck to the slide glass during 5 minutes

소되는 것과 연관이 있는 것으로 사료된다. 매연의 고착량도 duty 100%에 비하여 가짐이 있는

경우가 최대 80% 감소가 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

연료의 공급관 중간에 삽입한 슬래노이드 밸브를 이용하여 공급되는 연료를 주기적으로 제어하는 경우의 화염 안정성과 매연 생성 특성에 관한 연구를 수행하여, 주기적 연료 제어에 의하여 매연생성을 저감할 수 있음을 확인하였다.

연료 공급관 길이 변화에 따라 화염의 안정성이 주기적으로 영향을 받음을 확인하였다.

공급되는 연료의 주기가 커지는 경우에 화염은 한 주기에 두 개의 화염이 존재하며, 이 경우의 매연 생성량이 가진이 없는 경우에 비하여 최대 75%의 매연 감소 효과가 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 2000년도 연소기술연구센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Turns, S.R., 1996, *An Introduction to Combustion. Conception and Applications*, Mc Graw Hill, New York.
- (2) Puri-R Santoro-RJ Smyth-KC, 1994, "The Oxidation of Soot and Carbon-Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 97, Iss 2, p. 125.
- (3) Coppille-A Joyeux-D, 1994, "Temperature and Soot Volume Fraction in Turbulent-Diffusion Flames - Measurements of Mean and Fluctuating Values," *Combust. Flame*, Vol. 96, Iss 3, p. 275.
- (4) Haynes, B.S. and Wagner, H.G., 1981, "Soot formation," *Progress in Energy and Combustion Science*, p. 229.
- (5) Glassman, I., 1988, "Soot Formation in Combustion Processes," *Twenty-Second Symposium (international) on Combustion Science*, The Combustion Institute, Pittsburg, p. 295.
- (6) Ni, T., Gupta, S.B. and Santoro, R. J., 1994, "Suppression of Soot Formation in Ethene Laminar Diffusion Flames by Chemical Activities," *Twenty-fifth Symposium on Combustion*, Combustion Institute, pp. 585~592.
- (7) Wang, H. and Frenklach, M., 1997, *Combustion and Flame*, 110:173~221.
- (8) Kermit, C. Smyth, Joel, E. Harrington, Erik, L. Johnsson, and William M. Pitts, 1993, "Greatly Enhanced Soot Scattering in Flickering CH<sub>4</sub>/Air Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 95, pp. 229~239.
- (9) Masahiro Saito, Masayuki Sato and Akira Nishimura, 1998, "Soot Suppression by Acoustic Oscillated Combustion," *Elsevier Science Ltd*. Vol. 77, No. 9/10, pp. 973~978.
- (10) Eckbreth, A. C., 1977, "Effects of Laser-Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *J. of Applied Physics*, Vol. 48, pp. 4473~4479.
- (11) Melton, L. A., 1984, "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 2201~2208.
- (12) Ni, T., Pinson, J. A., Gupta, S. and Santoro, R. J., 1995, "2-dim Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of LII," *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 7073~7091.
- (13) 이승, 이상협, 이병준, 한재원, 2000, "레이저 유도 백열법을 이용한 화염 내부 매연 농도 측정," *대한기계학회논문집(B)*, Vol. 24 5호, pp. 725~732.
- (14) 이태원, 이동혁, 이병준, 정석호, 1992, "주기적 연료 공급에 따른 화염거동에 관한 실험적 연구," *한국자동차공학회지*, 제14권, pp. 50~60.