

알루미늄 분말 점화용 고밀도 스팀 플라즈마 제트 온도장 및 방출 스펙트럼 측정

이상협^a · 임지환^a · 이도형^b · 윤용섭^{a,*}

Temperature Field and Emission Spectrum Measurement of High Energy Density Steam Plasma Jet for Aluminum Powder Ignition

Sanghyup Lee^a · Jihwan Lim^a · Dohyung Lee^b · Woongsup Yoon^{a,*}

^aSchool of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

^bAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

ABSTRACT

In this study, DC (Direct current) type steam plasma igniter is developed for effective ignition of high-energy density metal aluminum and gas temperature is measured by emission spectrum of OH radical. Because of the ultra-high gas temperature, the DC plasma jet is measured by Boltzmann plot method which is the non-contact optical technique and spectrum comparison-analysis. And both methods were applied to experiment after accurate verification. As a result, we could identify that plasma jet temperature is 2900 K ~ 5800 K in the 30 mm range from the nozzle tip.

초 록

본 연구에서 고에너지 금속 알루미늄의 효과적인 점화를 위해 개발한 직류 방식의 스팀 플라즈마 점화기 가스온도를 OH radical의 방출 스펙트럼을 사용하여 측정하였다. 플라즈마 제트온도는 초고온이므로 비접촉식 광학 계측 방법인 볼츠만 기울기법과 스펙트럼 비교 분석법을 이용하여 측정하였으며 각각의 방법은 정밀하게 검증 후 실험에 적용되었다. 플라즈마 점화기의 노즐 팁으로부터 30 mm 범위에서의 제트온도 측정결과 두 방법 모두 알루미늄의 점화온도(≈ 2400 K) 이상의 2900 K ~ 5800 K 를 확인할 수 있었다.

Key Words: Steam Plasma Igniter(스팀 플라즈마 점화기), High Temperature Measurement(고온측정법), Emission Spectroscopy(방출분광법), Aluminum Ignition(알루미늄 점화)

Received 2 June 2013 / Revised 3 January 2014 / Accepted 11 January 2014
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 30-31, 부산 해운대 한화리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

고에너지 금속 알루미늄 분말은 Fig. 1에 제시

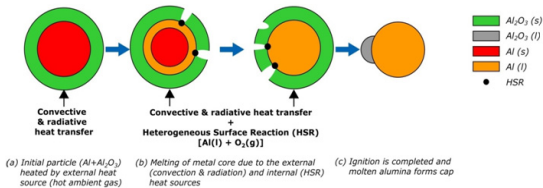


Fig. 1 Schematic of the aluminum particle ignition[1].

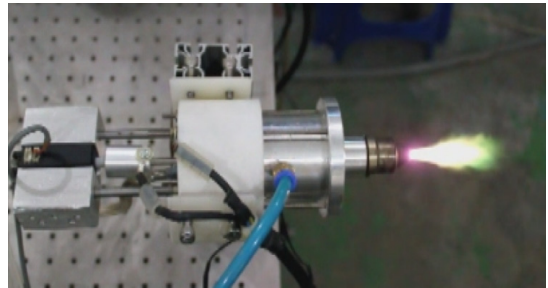


Fig. 2 Photograph of steam plasma igniter.

한바와 같이 높은 용융점(≈ 2400 K)을 가진 산화피막의 점화방해 메커니즘으로 인해 점화가 용이하지 않으므로 효과적인 점화 및 연소를 위해서는 단시간에 고온의 열적 공간을 형성할 수 있는 고밀도의 점화원이 필요하다[1].

스팀 플라즈마는 기존의 탄화수소 계열[2], 수소[3-4], 레이저 점화원[5-10]과 다르게 짧은 시간에 안정적으로 알루미늄 산화피막 용융점 이상의 열적 공간을 형성할 수 있을 뿐만 아니라 스팀을 작동가스로 사용하므로 친환경적이며 경제적인 금속 분말 점화원이다[11-12].

본 연구에서는 금속 알루미늄 균입자 연소시스템 적용을 위해 기 개발한 스팀 플라즈마 점화기(Fig. 2)의 제트온도 분석 연구로서 연소실 내부 점화기 장착부에서 입자가 공급되는 부분까지 제트의 온도 측정을 시도하였다. 입자 공급 위치는 원활한 점화를 위해서는 산화피막의 용융점 이상의 온도를 가지고 있어야만 하므로 본 연구를 통해 연소기 설계를 위한 점화기 위치 및 방향을 결정하는데 기본 정보를 제공 할 수 있게 된다.

직류 방식의 플라즈마 제트는 1000 K 이상의 초고온[13]이므로 열전대, 저항온도계 방법을 사용해서는 정확한 제트 온도 측정이 불가능하다. 또한 엔탈피 프루브[13]와 랑뮈어(Langmuir) 탐침[13,14]은 플라즈마 제트 내부로 측정부를 삽입하는 방법으로서 제트에 교란을 발생하므로 신뢰성 있는 측정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 비접촉식 광학 측정기법인 볼츠만 기울기법[13,15]과 스펙트럼 비교법[16]을 분석하여 제시하였으며, 스팀 플라즈마 점화기 제트온도 측정실험에 적용하였다. 두 기법 모두 OH 분자

의 방출 스펙트럼을 이용한 방법으로서 정밀하게 보정 후 실험에 적용되었다. 또한 측정값의 신뢰성을 높이기 위해 금속 분말이 공급되는 노즐 팁으로부터 0 ~ 30 mm 범위에서 반복 실험하여 데이터를 획득하였고 결과를 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치: 방출 스펙트럼 측정

본 연구에서 사용한 스팀 플라즈마 점화원은 국소 열평형(Locally Thermal Equilibrium) 플라즈마로서 온도 측정방법은 방출 분광법 (Optical Emission Spectroscopy)을 사용하였다. 방출 분광법은 단색분광기(Monochrometer)와 CCD 검출기(Detector)를 사용하여 특정 파장의 빛 강도를 측정하는 방법으로서, 본 연구에서는 Fig. 3에 제시한 바와 같이 Princeton의 SP-2558 분광기와 PIXIS 256BR 검출기를 사용하였다. 또한 내부 150/1200/2400 groove를 갖는 고분해능 및 광대역 측정이 가능한 세 종류의 격자를 사용하였으며 집광을 위해 Oceanoptics의 UV-74 Collimator를 적용하여 실험을 수행하였다. 온도 측정에 사용한 화학종은 OH 로서 분자의 회전 온도(Rotational temperature)가 제트의 가스온도와 유사하다고 알려져 있다[16]. 따라서 OH 밴드의 A-X 방출 스펙트럼을 측정 후 볼츠만 기울기법과 스펙트럼 비교법을 적용하여 플라즈마 제트의 가스온도를 도출하였다.

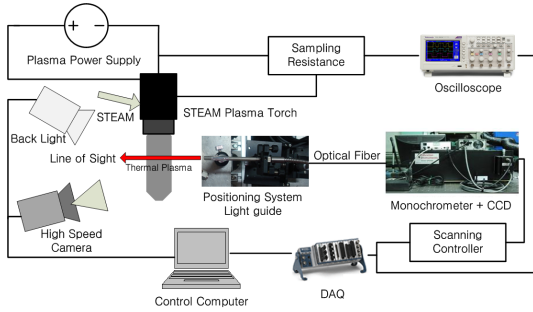


Fig. 3 Schematic diagram of the experiment setup.

2.2 볼츠만 기울기법

볼츠만 기울기법은 특정 파장의 빛 강도를 측정하여 온도를 구하는 방법으로서 플라즈마 제트의 정확한 온도측정을 위해서는 특정 파장선의 선택이 중요하다. 특정 파장의 조건은 상위 에너지 준위 차이가 크고, 천이확률, 방출선 정보가 정확해야 하며, 각 방출선의 파장 차이가 측정 장비의 분해능보다 커서 각 분광선의 강도가 측정 가능할 만큼 민감해야 한다[13,15]. 본 연구에서 사용한 특성 방출선은 OH(0-0)의 Q1 Branch이며 Eq. 1에 제시하였듯이 특정 방출선을 선택한 후 각각의 파장별 빛 강도를 측정하여 국부적인 방출선 값으로 변환하고 국부적인 방출선 값과 각각의 분광선의 천이확률, 상위 에너지의 통계가중치 등을 볼츠만 기울기법에 대입해 온도를 산출한다.

$$\ln\left(\frac{\epsilon_{qp}}{\nu_{qp}A_{qp}g_{qp}}\right) = -\frac{E_q}{kT} + K \quad (1)$$

여기서 ϵ_{qp} 는 국부적 방출도, ν_{qp} 는 방출되는 양자에너지의 주파수, A_{qp} 는 천이확률, g_{qp} 는 상위 에너지의 통계가중치, K 는 상수 값을 의미한다.

2.3 스펙트럼 비교법

스펙트럼 비교법은 볼츠만 기울기법과 다르게 고분해능의 분광기를 사용하지 않아도 측정 가능한 방법이다[16]. 원리는 OH 분자의 A-X 스펙트럼을 이용하는데 n 준위에서 m 준위로 천이

할 때 발생하는 빛 강도세기 I_{nm} 은 Eq. 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{nm} = N_n A_{nm} h \nu_{nm} \quad (2)$$

여기서 h 는 플랑크상수, ν_{nm} 은 천이주파수, A_{nm} 은 자발천이확률, N_n 은 초기상태의 입자밀도를 나타내며 열역학적 평형과 볼츠만법칙을 이용하면 N_n 은 온도 T 의 함수로 표현된다.

$$N_n = \frac{N_0 g_n}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \quad (3)$$

위의 Eq. 3에서 k 는 볼츠만상수, $Z(T)$ 는 분배 함수, N_0 는 입자밀도를 나타낸다. 또한 g_n 과 E_n 은 통계가중치와 n 준위에서의 에너지 값을 나타내며, Eq. 2와 Eq. 3으로부터 I_{nm} 은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{nm} = \frac{K_{nm}}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \quad (4)$$

여기서 $K_{nm} = N_0 A_{nm} g_n \nu_{nm}$ 은 n 에서 m 준위로 천이 할 때의 상수 값이며 I_{nmref} 는 주어진 참고 온도 3000 K에서의[17] 빛 강도이다.

$$I_{nm} = I_{nmref} \frac{Z(T_{ref})}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_n(T_{ref} - T)}{T_{ref}T}\right) \quad (5)$$

위의 Eq. 5에서 주목할 점은 $Z(T_{ref}) / Z(T)$ 는 특정 온도에서 변하지 않는 상수 값이므로 빛 강도세기의 절대 값을 고려하지 않아도 된다는 점이다. 본 연구에서 사용한 OH 밴드는 Dieke와 Crosswhite[17]에 의해 연구가 완료되어 모든 참고 값이 공개되어있다. 또한 방출 분광 계측에서 중요한 점은 측정 장비인 스펙트로메터의 장치 값(Instrumental broadening)을 정확하게 도출하는 것이다. 본 연구에서는 수은 램프와 Princeton의 Intellical[18]을 이용하여 단파장에 대하여 장치값을 확인하였다. 장치함수는 파장에

따라 Gaussian 분포를 가지므로[16] 아래 Eq. 6 과 같이 표현된다.

$$G(\lambda_0) = \frac{2}{\Delta \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{(\Delta/2)^2}\right) \quad (6)$$

Δ 는 장치값을 나타내며 λ_0 에서 측정된 최고 빛 강도 세기를 의미한다(Full width at 1/e).

$$S(\lambda) = \sum_{i=1}^N I_i \delta(\lambda - \lambda_i) \quad (7)$$

$$B(\lambda) = \int_0^\infty G(\lambda) \left(\sum_{i=1}^N I_i \delta(\lambda - \lambda_i) \right) d\lambda = \sum_{i=1}^N I_i G(\lambda_i) \quad (8)$$

$S(\lambda)$ 는 λ_i Dirac impulse 를 의미하며 I_i 는 Eq. 5에서 제시하였다. $B(\lambda)$ 는 OH 분자 밴드의 Corresponding broadened를 나타내며, 장치함수와 $S(\lambda)$ 의 컨볼루션 곱(Convolution product)으로 표현된다.

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 4와 5는 스팀 플라즈마 점화기의 방출 스펙트럼을 측정한 결과이다. 제시한바와 같이 306 ~ 310 nm 의 강한 OH band 신호를 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 볼츠만 기울기법과 스펙트럼 비교분석을 시도하였다.

Fig. 6은 볼츠만 기울기법을 사용하여 노즐 팁으로부터 10 mm의 위치에서 가스온도를 측정된 결과를 나타내었다. 스팀 플라즈마 점화기의 작동 조건은 220V, 9.5A이며 노즐직경은 3.5 mm 를 사용하였다. 측정결과 약 4200 K의 가스온도를 확인할 수 있었으며 각각의 위치 별로 반복 측정하여 결과의 신뢰성을 확보하였다. 이와 비교 하기위해 스펙트럼 비교법을 이용하여 스팀 플라즈마 제트 온도를 측정하였다. Fig. 7에 제시하였듯이 온도를 알고 있는 발머램프를 사용하여 OH의 A-X 밴드 스펙트럼을 측정하였고 LIFBASE[19]를 사용하여 정밀하게 검증을 수행

하였다. 검증결과 본 연구에서 사용한 방법과 기존의 참고 스펙트럼이 잘 일치하는 것을 확인하였다.

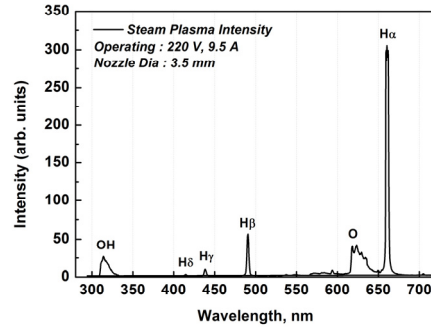


Fig. 4 Steam plasma igniter emission spectrum : 300 ~ 700 nm.

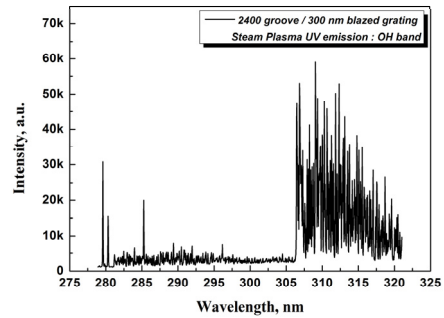


Fig. 5 Steam plasma igniter emission spectrum.

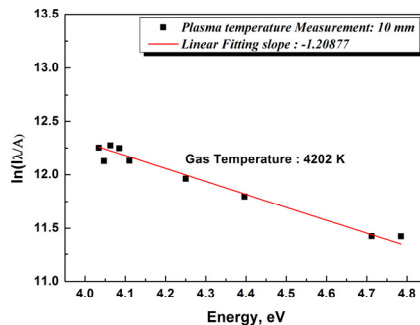


Fig. 6 Temperature measurement: using boltzmann plot method (10 mm apart from nozzle tip).

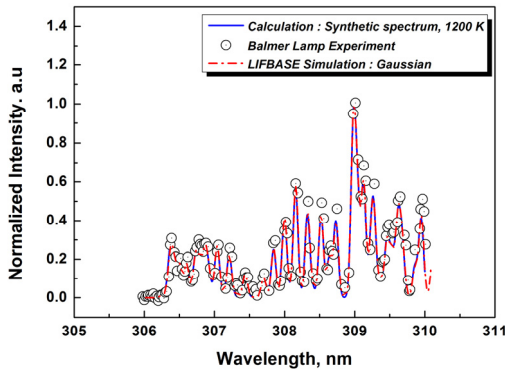


Fig. 7 Spectrum comparison analysis method : verification test.

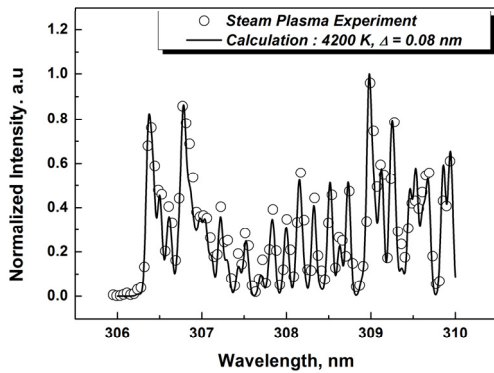


Fig. 8 Temperature measurement: using spectrum comparison analysis method (10 mm apart from nozzle tip).

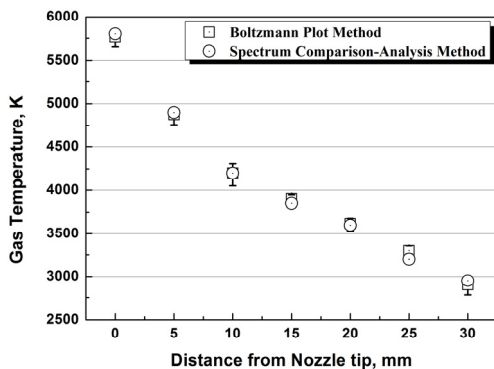


Fig. 9 Result of steam plasma gas temperature.

Fig. 8은 스펙트럼 비교법을 사용하여 노즐 팁으로부터 10 mm의 위치에서 분석한 결과이다. 측정결과 4200 K의 스팀 플라즈마 점화기 제트 온도를 확인할 수 있었다.

볼츠만 기울기법과 스펙트럼 비교법을 사용하여 스팀 플라즈마 제트의 가스온도 측정결과를 비교하였다. Fig. 9에서 제시한바와 같이 노즐 팁에서는 약 5800 K, 노즐 팁으로부터 30 mm 위치에서 약 2900 K를 확인하였으며, 두 방법 모두 유사한 온도 측정 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 입자가 공급되는 영역인 노즐 팁으로부터 30 mm 범위에서 알루미늄 점화온도(≈ 2400 K) 이상의 제트 온도를 갖는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고에너지 금속 알루미늄의 효과적인 점화를 위해 개발한 직류 방식의 스팀 플라즈마 점화기 가스 온도를 OH radical의 A-X 방출 밴드를 사용하여 측정하였다. 직류 플라즈마 제트의 온도는 초고온이므로 일반적인 열전대, 저항온도계, 엔탈피 프루브와 같은 접촉식 방법으로는 측정이 불가능하므로 비접촉식 광학 계측방법인 볼츠만 기울기법과 스펙트럼 비교분석법을 이용하여 측정하였다. 각각의 방법은 기존의 선행연구를 참고하여 본 연구에 적합하게 변형하였으며, 정밀하게 검증 후 실험에 적용되었다. 제트온도 측정결과 금속 분말이 공급되는 플라즈마 점화기의 노즐 팁으로부터 30 mm 범위에서의 제트온도는 알루미늄의 점화온도 이상의 2900 K ~ 5800 K를 확인할 수 있었으며, 볼츠만 기울기법과 스펙트럼 비교분석법 온도 측정결과를 비교하였을 때 두 방법 모두 잘 일치함을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 두 가지의 초고온 측정법은 OH radical이 발생하는 화염온도 및 로켓 플룸 온도 계측과 같은 분야에서 활용 될 것으로 기대되며 파장 측정 분해능 향상을 통해 다양한 고온화염 계측 분야에 적용 가능 할 것이다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2010-0023481)을 받아 수행된 것임.

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약 번호 UD110095CD)

References

1. Yang, H.S. and Lim, J.H., "Simplified Modeling of an Aluminum Particle Combustion," *KSAS-JSASS*, 2008.
2. Bartlett, R., "Estimating aluminium particle combustion kinetics," *Combustion and Flame*, Vol. 6, pp. 227-234, 1963.
3. Miller, T.F. "Comparison of Simulation and Experiment in a Linear Al - Stream Combustor," in *36th JANNAF Combustion Meeting*. 1999.
4. Olsen, S. and M. Beckstead, "Burn Time Measurements of Single Aluminum Particles in Steam and CO₂ Mixtures," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 12. No. 4, pp. 662-671, 1996.
5. Dreizin, E.L., "Experimental Study Of Aluminum Particle Flame Evolution in Normal and Micro-gravity," *Combustion and Flame*, Vol. 116., No. 3, pp. 323-333., 1998.
6. Bucher P., "Aluminum Particle Gas-phase Flame Structure," NASA Report, 1997.
7. Bucher, P., "Condensed - phase Species Distributions About Al Particles Reacting in Various Oxidizers," *Combustion and Flame*, Vol. 117. No. 1-2, pp. 351-361, 1999.
8. Drew, C., "Metal Particle Combustion Progress Report," Naval Weapons Center, NWCTP4435, 1968.
9. Prentice, J., "Aluminum Droplet Combustion: Rates and Mechanisms in Wet and Dry Oxidizers," Naval Weapons Center China Lack Calif, 1974.
10. Prentice, J. and K. Krauetle, "Metal particle combustion progress report," Naval Weapons Center, China Lake, Calif., USA, 1968.
11. Lee, S.H., Ko, T.H., and Yoon, W.S., "Development of Bimodal Steam Plasma for High Density Metal Particle Ignition," *The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*. 2012.
12. Lee, S.H. and Yoon, W.S., "Experimental Investigation of Steam Plasma Characteristics for High Energy Density Metal Powder Ignition Using Optical Emission Spectroscopy Method," *The Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, 2012.
13. Fauchais, P., Coudert, J.F., and Vardelle, M., *Diagnostics in Thermal Plasma processing in Plasma Diagnostics*, Ed. by Auciello, O. and Flamm, D.L., Vol. 1, Academic Press, N.Y., pp. 349-446, 1989.
14. Fauchais, P., Coudert, J.F., and Vardelle, M., *Diagnostics in Thermal Plasma processing in Plasma Diagnostics*, Ed. by Auciello, O. and Flamm, D.L., Vol. 1, Academic Press, N.Y., pp. 113-181, 1989.
15. Lee, S.H., Lim, J.H., and Yoon, W.S., "Ignition Characteristics of Aluminum Metal Powder Fuel with Thermal Plasma," *The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, 2011.
16. Charles de Izarra., "UV OH Spectrum used as a Molecular Pyrometer," *Journal of Physics. D : Applied. Physics*, Vol. 30, pp. 1697-1704, 2000.
17. Dieke, G.H. and Crosswhite, H.M., "The Ultraviolet Bands of OH(Fundamental Data)," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. Vol. 2, pp. 97-199, 1961.

18. "Princeton Instrument User Manual," from <http://www.princetoninstruments.com/cms/index.php/library/48-application-a-tech-notes-sorted-by-product/software>
19. Luque, J. and Crosley, D.R., "LIFBase Database and Spectral Simulation Program (Version 1.0)," SRI International, Report. MP 96-001, 1996.