

OES 방법을 이용한 고에너지 금속 분말 점화용 스팀 플라즈마 특성에 관한 실험적 고찰

이상협* · 고태호* · 윤웅섭**†

Experimental Investigation of Steam Plasma Characteristics for High Energy Density Metal Powder Ignition Using Optical Emission Spectroscopy Method

Sanghyup Lee* · Taeho Ko* · Woongsup Yoon**†

ABSTRACT

High Energy density metal powder has high melting point of oxide film. By this, the ignition source that can make a thermal effect of high-temperature during short time is needed to overcome ignition disturbance mechanism by oxide film. So effective ignition does not occurred with hydrocarbon ignitor, H₂-O₂ ignitor, high power laser. But steam plasma can be generate about 5000 K temperature field in short order. Because a steam plasma uses steam as the working gas, it is environmental-friendly and economical. Therefore in this study, we analyze steam plasma temperature field and radical species with optical emission spectroscopy method in order to apply steam plasma ignitor to metal combustion system and cloud particle ignition was identified in visual.

초 록

고에너지 금속 분말은 높은 용융점을 가진 산화피막의 점화방해 효과로 인해 점화가 용이하지 않다. 따라서 점화를 위해서는 단시간에 높은 온도의 열적 공간을 형성할 수 있는 점화원이 필요하며 스팀 플라즈마 점화원은 탄화수소 계열의 점화원, 수소-산소 점화원, 레이저 점화원과 다르게 짧은 시간에 안정적으로 5,000 K 이상의 열적 공간을 형성할 수 있다. 또한 스팀을 작동가스로 사용하므로 친환경적이며 경제적이다. 따라서 본 연구는 스팀 플라즈마 점화기를 연소 시스템에 적용하기 위한 기초 연구로서 방출 분광법을 사용하여 플라즈마의 온도 분포 및 화학종을 분석하였으며, 연소 시스템에 적용하여 금속 분말의 점화를 가시적으로 확인하였다.

Key Words: Steam Plasma(스팀 플라즈마), Aluminum Ignition(알루미늄 점화), Optical Emission Spectroscopy(광학 방출 분광법)

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과 교수

교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

고에너지 금속 분말은 환경적, 경제적 이점에도 불구하고 일반적인 연료원으로 널리 사용되지 못하고 있는데, 그 이유는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 금속 분말의 점화 반응이 산화 피막의 높은 용융점에 의한 점화 방해 효과로 인해 원활히 발생하지 못하기 때문이다[1-2]. 따라서 금속 분말의 점화는 산화피막의 점화 방해를 제거하는 방법으로 이루어진다.

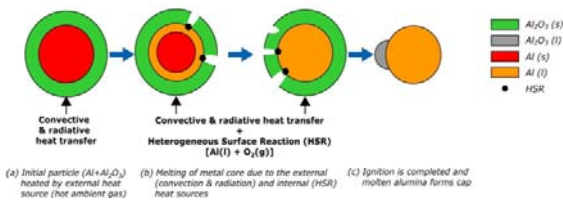


Fig. 1 Schematic of the Aluminum particle ignition[4].

산화피막에 의한 점화 방해 메커니즘을 극복하기 위해서는 짧은 시간에 고온의 열적인 효과를 낼 수 있는 점화원이 필요하며, 이러한 점화원 연구는 1960년대부터 다양하게 수행되어 왔다. 대표적 연구로서 Dreizin[3], Bucher[4-5], Drew[6], Prentice[7-8] 등은 고출력의 Laser를 이용하여 점화를 시도하였으나, 대부분 단일 입자에 대한 연구로서 시스템 적용을 위한 군입자 연소에는 적합하지 않다. 또한 Bartlett[9]은 메탄 점화원을 사용하였으나 지속연소에 실패하였고, Miller[10]는 수소-공기 화염을 사용하였지만 시동시 장시간에 걸친 예열이 필요하므로 에너지 효율 측면에서 적합하지 않다. Olsen[11]과 Beckstead[11]는 수소-이산화탄소 화염을 사용하였으나 점화 효율이 좋지 않았고 Risha[12]는 수소-산소 화염을 사용하여 점화를 시도했으나 안정성 측면에서 시스템 적용에 불리하다. 그러나 스팀 플라즈마 점화원은 짧은 시간에 안정적으로 5,000 K 이상의 열적 공간을 형성할 수 있을 뿐만 아니라 물을 작동가스로 사용하므로 오염 물질이 발생하지 않는 점화원이다.

본 연구에서는 스팀 플라즈마를 연소 시스템에 점화기로 적용하기 위해 방출 분광법을 사용하여 플라즈마의 온도 분포 및 화학종을 분석하

였으며, 연소 시스템에 적용하여 금속분말의 점화를 가시적으로 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 스팀 플라즈마

본 연구에 사용된 플라즈마 점화기는 물을 작동 가스로 하는 직류 열 플라즈마이다. 작동원리는 Fig. 2에 제시한 바와 같이 외부로부터 공급된 물이 본체 내부 펠트에 저장되고 아크가 점화되면 전기 에너지에 의해 스팀이 발생하게 된다. 이렇게 생성된 스팀은 스월 유동 방식으로 아크 발생부인 음극과 양극사이로 공급되고 고온의 스팀 플라즈마 제트가 발생하게 된다.

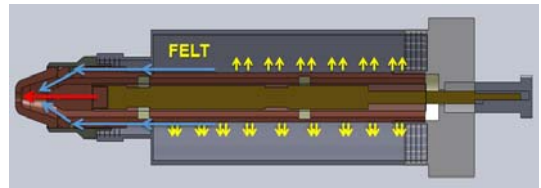


Fig. 2 Schematic of Steam plasma torch

Figure 3은 상용 평형 계산 코드인 STANJAN과 CEA를 사용하여 작동 가스 스팀의 온도에 따른 물분율을 계산한 결과이다.

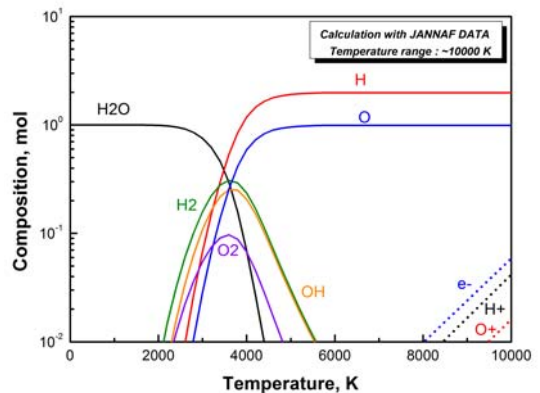


Fig. 3 Working gas (Steam) : Molecular fraction according to temperature (~10000 K)

스팀 플라즈마는 약 5000 K에서 H, OH, O의 반응성 좋은 화학종으로 해리되며 국소적인 고온 영역을 벗어나면 대부분 H₂O로 재결합되어 금속 분말 점화 시 추가적인 산화제의 역할을 하게 된다. 이와 같이 스팀 플라즈마는 단시간의 고온의 열적 환경을 조성할 수 있을 뿐만 아니라 환경오염이 없으며, 반응성이 좋은 점화원이다.

2.2 광학 방출 분광법

본 연구에서 사용한 스팀 플라즈마 토치는 국소 열평형(Locally Thermal Equilibrium) 플라즈마로서 온도 측정 방법은 방출분광법 (Optical Emission Spectroscopy)[13]을 사용하였다. 방출분광법은 단색분광기(Monochromator)와 광전자 증배관(Photomultiplier Tube)을 사용하여 특정 파장의 빛 강도를 측정하여 온도를 구하는 방법으로서 정확한 온도 측정을 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. 온도 산출 방법은 특정 방출선을 선택한 후 각각의 파장별 빛 강도를 측정하여 국부적인 방출선 값으로 변환하고 국부적인 방출선 값과 각각의 분광선의 천이확률, 상위에너지의 통계가중치 등을 Eq. 1의 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 상위에너지의 통계가중치 값을 의미한다.

2.3 실험 장치 및 방법

스팀 플라즈마 토치의 아크 전압 및 전류, 온도 측정을 위해 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였으며, Table 1에 실험 조건을 제시하였

다. 스펙트로메터는 Princeton의 SP-2558을 사용하였으며 CCD는 ACTON의 PIXIS-256BR을 사용하여 플라즈마 제트 온도 측정 실험을 수행하였다.

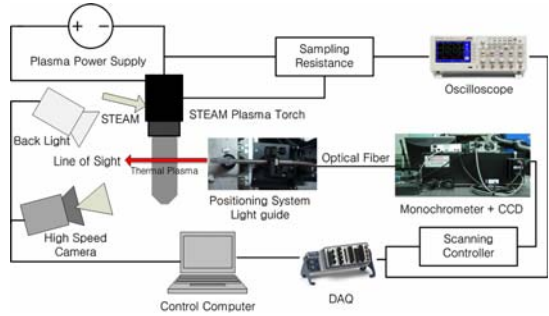


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1. Experiment Condition

작동조건	상세사항
아크전압	200 V
아크전류	9.6 A
물 공급량	0.25 Liter/hour
소비전력	~3.5 kW
노즐 직경	2 mm(Cu)

플라즈마 제트의 온도 측정은 Fig. 5와 같이 Z축 방향으로 중심에서 5mm 간격으로 측정하였으며 제트의 두께가 매우 얇아 아벨 역변환을 수행할 수 없었다. 따라서 Optical Fiber에서 측정된 빛은 각각의 Z축 점에서의 직선 빛 강도의 합으로 표현되며, 이는 각 점에서 가장 온도가 높은 곳을 의미한다.



Fig. 5 Measurement directions of the Plasma temperature

3. 실험 결과 및 분석

3.1 스팀 플라즈마 작동 특징

Figure 6은 시간에 따른 스팀 플라즈마의 아크 전압과 전류를 측정된 그래프이다. 제시한 바와 같이 토치의 작동은 크게 4가지로 구분할 수 있는데, 첫째 방전이 일어나기 전, 둘째 음극과 양극이 접촉하여 방전 개시 단계, 셋째 스팀 증발량 증가에 따른 아크 접동 단계, 넷째 플라즈마 아크 안정단계이다. 작동 원리는 초기 아크 방전에 의해 발생한 전기에너지가 열에너지로 전환되어 내부에 물을 스팀으로 상변화 시킨다. 발생된 스팀은 와류 공급관을 통해 아크점으로 공급되어 플라즈마 제트가 발생하게 된다. 아크 접동 단계는 스팀 증발량 증가에 따른 아크 불안정에 의한 효과이며, 증발량이 일정해지면 아크는 안정화 된다.

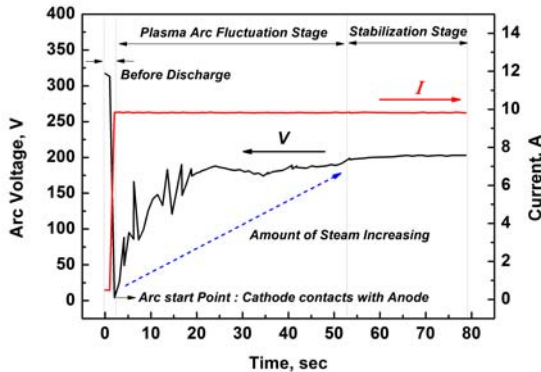


Fig. 6 Temporal evolution of the arc voltage V and current I for different periods

3.2 화학종 측정 결과

스펙트로메터를 사용하여 스팀 플라즈마 작동 시 발생하는 화학종을 측정하였다. Fig 7은 300 nm ~ 700 nm의 방출 스펙트럼을 측정된 결과이다. 제시한 바와 같이 정상 상태의 스팀 플라즈마 작동 시 발생하는 OH, H, O 화학종 발생을 확인하였으며, Fig 3의 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

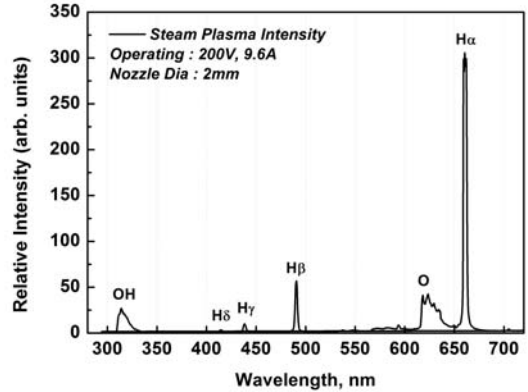


Fig. 7 Optical emission spectrum of the steam plasma torch (at z=0; Nozzle tip)

3.3 온도장 측정 결과

금속 분말 연소 시스템에 플라즈마 점화기를 적용 시에는 플라즈마 제트가 정상 상태이어야만 한다. 따라서 플라즈마 제트의 온도 측정 실험은 아크가 안정된 조건에서 수행되었다. 전술하였듯이 광학 방출 분광법과 볼츠만 기울기법을 이용 시에는 방출선 선택이 중요하다. Fig. 7에서 확인하였듯이 H Line 이 강한 광학 방출을 가지고 있으므로 이를 사용하기로 한다. Table. 2는 선택한 방출선의 분광 데이터이다.

Table 2. Spectroscopic data of the Hydrogen Balmer series (Reference by NIST)

Peak	λ (nm)	E_q (eV)	Transition	A_{qpqp} ($10^8 s^{-1}$)
H $_{\alpha}$	656.28	12.0875	3p \rightarrow 2s	4.4101e ⁻⁰¹
H $_{\beta}$	486.13	12.7485	4p \rightarrow 2s	8.4193e ⁻⁰²
H $_{\gamma}$	434.04	13.0545	5p \rightarrow 2s	2.5304e ⁻⁰²
H $_{\delta}$	410.18	13.2207	6p \rightarrow 2s	9.7320e ⁻⁰³

Figure 8은 노즐팁으로부터 0, 5, 10 mm 에서의 온도 측정 결과이다. 제시한바와 같이 노즐팁에서 Z 축 방향으로 진행할수록 거리에 따라 플라즈마의 온도가 급격히 감소하는 경향을 확인하였다. 고에너지 금속 분말 점화를 위해서는 산화피막의 녹는점보다 높은 온도장을 형성해야만 하는데, 스팀 플라즈마 점화기는 노즐팁으로부터

10 mm 범위에서 약 4100 ~ 5700 K의 온도장을 형성함으로 이를 만족한다.

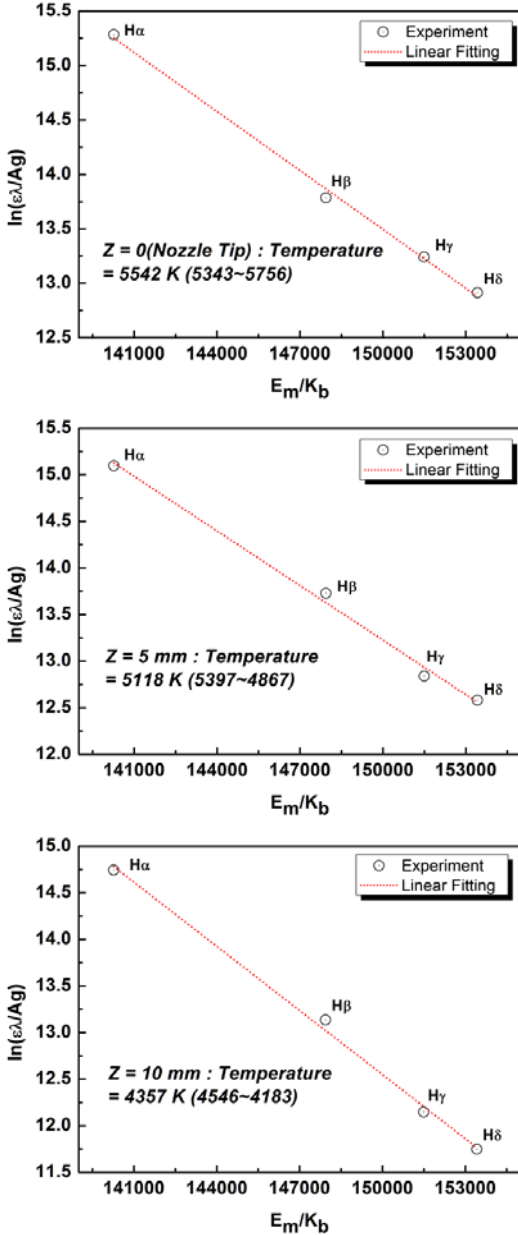


Fig. 8 Typical Boltzmann Plot for Hydrogen Balmer series lines at Z=0, 5, 10 mm

3.4 점화 실험 결과

스팀 플라즈마 토치를 사용하여 고에너지 금속 마그네슘 분말의 균입자 점화 실험을 수행하였다. 실험은 이전의 연구[14-15]와 동일한 연소 장치 및 실험 조건에서 수행되었으며 Fig 9 에 제시한 바와 같이 탄화수소 계열 점화원과 달리 균입자 점화가 가능함을 가시적으로 확인하였다.

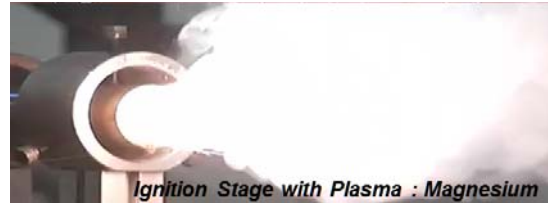


Fig. 9 Metal powder Ignition with Steam plasma torch

4. 결론

고에너지 금속 분말은 많은 장점에도 불구하고 널리 사용되지 못하는데, 그 이유는 점화의 어려움 때문이다. 따라서 효과적인 점화를 위해서는 단시간의 고온의 열적 효과를 낼 수 있는 점화원이 필요하므로 본 연구에서는 친환경적이며 안정적인 스팀 플라즈마를 사용하였다.

스팀 플라즈마는 총 4단계의 작동 단계를 가지고 있다. 우선 방전이 일어나기 전 단계, 둘째 음극과 양극이 접촉하여 방전 개시 단계, 셋째 스팀 증발량 증가에 따른 아크 섭동 단계, 마지막으로 플라즈마 아크 안정단계이다. 금속 분말 점화를 위해서는 스팀 증발량이 일정하여 플라즈마 제트 섭동이 적은 아크 안정 단계를 사용하여 실험을 수행하였다.

스펙트로메터를 사용하여 스팀 플라즈마 작동 시 발생하는 화학종을 측정하였다. 측정 범위는 300nm ~ 700 nm를 측정하였고 반응성이 좋은 H, O, OH 화학종을 확인 할 수 있었으며, 이는 STANJAN과 CEA를 이용한 계산 결과와 일치함을 확인하였다.

스팀 플라즈마를 연소시스템에 적용하기 위해 노즐팁으로부터 Z축 방향으로 0, 5, 10 mm의

온도를 방출 분광법을 사용하여 측정하였다. 측정결과 약 4100 ~ 5700 K 의 온도 범위를 확인할 수 있었으며, 이를 연소시스템에 적용하여 마그네슘 군입자 점화를 가시적으로 확인 하였다. 차후 연소 시스템을 개선하여 알루미늄 군입자 점화 실험도 수행 할 계획이다.

후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2011-0026134)을 받아 수행된 것임.

참 고 문 헌

- Sanghyup Lee. and Woongsup Yoon, "Combustion of Nano-scale Aluminum and Liquid Water for Pressure Sensitivity," KSPE Spring Conference, 2010.
- Heesung, Yang. and Jihwan, Lim, "Simplified Modeling of an Aluminum Particle Combustion," KSAS-JSASS 2008.
- Dreizin, E.L., Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and micro-gravity. *Combustion and Flame*, 1998. 116(3): p. 323-333.
- Bucher, P., et al., Aluminum particle gas-phase flame structure. NASA, 1997.
- Bucher, P., et al., Condensed-phase species distributions about Al particles reacting in various oxidizers. *Combustion and Flame*, 1999. 117(1-2): p. 351-361.
- Drew, C., et al., Metal Particle Combustion Progress Report. Naval Weapons Center, NWCTP4435, 1968.
- Prentice, J., Aluminum Droplet Combustion: Rates and Mechanisms in Wet and Dry Oxidizers. 1974, NAVAL WEAPONS CENTER CHINA LAKE CALIF.
- Prentice, J. and K. Krauetle, Metal particle combustion progress report. Naval Weapons Center, China Lake, Calif., USA, 1968
- Bartlett, R., et al., Estimating aluminium particle combustion kinetics. *Combustion and Flame*, 1963. 7: p. 227-234.
- Miller, T.F. Comparison of Simulation and Experiment in a Linear Al-Stream Combustor. in 36th JANNAF Combustion Meeting. 1999. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
- Richter, G. Paul and Smith, Timothy D, "Ablative Material Testing for Low-Pressure, Low-Cost Rocket Engines," NASA TM 107041, October 1995
- Timothy F. Miller, John D. Herr, "Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water" 40th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2004-4037, July 2004.
- P. Fauchais, J.F. Coudert and M. Vardelle, "Diagnostics in Thermal Plasma processing", in Plasma Diagnostics, Ed. by O. Auciello and D. L. Flamm, Vol. 1, (Academic Press, N.Y.,1989),pp.349-446.
- Taeho Ko, Sanghyup Lee and Woongsup Yoon, "Combustion of Magnesium Powder with Steam in Swirl Combustor," KSPE Spring Conference, 2011.
- Taeho Ko, Sanghyup Lee and Woongsup Yoon, "Experimental Study on Steam-Magnesium Powder Flame Formation in the Swirl Combustor," Asian Joint Conference Propulsion and Power, 2012.