

금속분말 연소기를 위한 핀틀인젝터형 연료 공급 장치의 입자 분사량 측정

고태호* · 김형민* · 이도형** · 윤웅섭*

Feeding Rate Measurement of Pintle Injector Type Fuel Feeder for Metal Powder Combustor

Taeho Ko* · Hyungmin Kim* · Do Hyung Lee** · Woongsup Yoon*

초 록

금속분말을 청정 에너지원으로 이용하기 위해 금속분말 소형 연소기의 구현이 필요하다. 이를 위한 선행연구로 연료 공급 시스템인 핀틀인젝터형(pintle injector type) 금속분말 공급장치의 중요 성능인 분사량을 실험적으로 측정하였다. 분사량 측정 시험에 앞서 간단한 금속분말 공급 시험으로 확인된 문제점을 장치의 변경을 통해 해결하였다. 측정 시험의 결과, 연료 공급 장치에 이송 가스 압력이 상승함에 따라 많은 질유량의 금속분말이 분사되었고 압력에 따른 정량적 분사량을 확인하였다. 이송 가스와 금속분말의 혼합 성능을 개선하여 균일한 분사를 하고자 이송 가스를 25 Hz로 가진 하여 공급하였고 가진이 없는 경우의 실험결과와 비교하였다.

Key Words: Metal Powder Feeder(금속분말 공급장치), Metal Powder Combustor(금속분말 연소기), Fuel Feeding System(연료 공급 시스템), Pintle Injector(핀틀 인젝터), Feeding Rate(공급율)

1. 서 론

현재 사용되고 있는 탄화수소(CxHy) 계열의 연료는 그 매장량이나 환경오염의 측면에서 큰 문제점을 가지고 있다. 이에 대한 근본적인 대안으로 여러 청정에너지가 대두되고 있으며 그 중에서도 금속분말을 에너지원으로 사용하려는 많은 시도가 이뤄지고 있다.

금속분말을 이용하여 대량의 에너지를 얻기

위해서는 금속분말을 연소시켜야 한다. 그러나 입자의 산화 피막으로 인한 점화 지연, 비대칭 연소 등으로 액체 연료보다 복잡한 연소 과정을 거치는 까닭에 금속분말의 연소가 어렵다. 이는 1960년대 금속의 연소가 기체 상태에서 일어남을 인식한 Glassman 등의 연구로부터 시작하여 최근 Yang 등의 단일 알루미늄 입자 연소를 위한 단순화된 모델 연구에 이르기까지 수행된 수많은 실험을 바탕으로 한 연구들로부터 밝혀진 사실이다[1, 2]. 따라서 금속분말을 에너지원화하기 위해서는 점화지연시간의 단축과 더불어 안정적으로 연소가 유지될 수 있는 금속분말 연소기 시스템이 필요하다.

* 연세대학교 기계공학과

** 국방과학연구소

교신저자, E-mail: wsoon@yonsei.ac.kr

일찍이 금속분말을 이용한 추진 시스템이나 에너지 발전 시스템으로의 가능성을 알아보기 위해 금속분말 연소기 시스템 연구가 활발히 이뤄졌다. Miller 등은 점화지연시간을 단축시키기 위해 많은 에너지를 내는 수소-산소 화염을 점화원으로 사용하였고 700 K의 증기를 산화제로 하여 산화제를 20% 과잉 공급하였다. 안정적인 연소 유지를 위해 Fricke 등이 고안한 피스톤을 이용한 유동층(fluidized bed) 분말 연료 공급 시스템을 사용하였고 0.91 m에 이르는 연소실을 설계하였다[3]. 그러나 Miller 등의 연구에서 구현한 연소기 시스템은 많은 슬래그(slag) 처리 문제와 긴 연소실로 인한 활용 제한의 한계가 있다. Risha 등의 연구에서는 점화지연시간을 단축하기 위해 수소-공기 화염을 점화원으로 사용하였고 정상 연소가 이뤄지면 점화원을 제거하였다. 예혼합 금속입자·증기 혼합물의 연소율 측정이 용이한 층류 분젠 버너(Bunsen Burner) 형태의 연소기를 이용하였고, 안정적인 연소 유지를 위해 Goroshin 등이 고안한 다져진 알루미늄 분말층을 빠른 속도의 증기로 깎아 이송시키는 유동층 분말 공급 방식을 사용하였다[4]. 이러한 금속분말 연소기 시스템은 아직 시작품 개발 단계로 증기 응축 방지를 위한 장비 가열 문제와 증기를 발생시키기 위한 추가적인 에너지원 문제, 장시간에 걸친 금속분말연료 공급이 불가능하다는 한계가 있다.

국내에서는 금속분말 연소기를 이용한 연구가 양 등에 의해 진행되었는데 50~100 μm 크기의 마그네슘(Mg) 분말을 연소시켜 그 부산물로 고온 크기의 테라스 구조를 갖는 마그네시아 입자를 합성하는 연구를 수행하였다[5]. 점화 및 안정적인 연소를 유지하기 위해 수소-산소 확산 화염을 지속적으로 사용하였고 스크류 분말공급장치로 일정한 양의 금속분말을 주입하여 이송 가스(carrier gas)로 공급하였다. 그러나 이는 금속분말을 에너지원이나 추진동력원으로 이용한 연소기가 아니라, 또 다른 재료의 합성을 위한 가공 공정이라는 한계가 있다.

본 연구에서는 금속분말을 청정 에너지원으로 실현하고자, 그 기술적 접근으로서 금속분말 소

형 연소기 시스템을 구현하려 한다. 금속분말 연소기 시스템은 연료 및 산화제 공급 시스템과 점화 시스템, 연소실, 반응물 처리 시스템과 같은 하위 시스템으로 이뤄진다. 본 논문에서는 연소기 시스템 구현을 위한 선행연구로 국방과학연구소와의 협력으로 확보한 연료 공급 장치인 핀틀인젝터형 금속분말 공급장치를 시험하여 장치의 중요 성능인 분사량을 실험적으로 측정하였다.

2. 금속분말 공급장치의 중요 성능

금속분말 공급장치(Metal Powder Feeder, MPF)를 구현하는 데 있어 중요한 성능은 일정한 양을 균일하게 공급하는 것이다. 일반적인 열기관에 사용되는 정형화된 액체나 기체 연료 공급 장치와는 달리, 금속분말 공급장치는 요구 성능에 따른 별도의 장치설계가 필요하다.

원활한 연소를 위해서는 금속분말이 충분한 양의 산화제와 가능한 한 넓은 면적을 통해 접촉해야 한다. 따라서 각각의 입자가 연소하기에 충분한 산화제를 공급 받을 수 있을 만큼 떨어져 있으면서도 연소로 발생된 에너지가 상부로 전파될 수 있는 가까운 간격으로 분포되어 있어야 하며, 그 크기는 작을수록 좋다. 작은 크기의 입자는 연소적인 측면 외에도 스톱스 수(stokes number)가 작아 기체와 같은 거동을 보이므로 이송 가스를 이용해 공급할 경우에 난류에 의한 균일한 분포를 구현할 수 있는 이점이 있다. 그러나 매우 작은 나노 크기의 금속분말은 kg 당 수 십만원 정도로 경제성이 떨어질 뿐만 아니라 수분과의 접촉으로 발화가 일어나는 안전성 문제가 있으므로 본 연구에서는 kg 당 수 만원 정도에 구입 가능한 저렴하면서도 크지 않는 수십 마이크로미터 크기의 금속분말을 대상으로 한다.

일정량의 분말 공급을 위해 핀틀인젝터를 이용하여 밸브의 개도를 일정하게 유지함으로써 핀틀인젝터를 통과하는 이송 가스의 유속에 반비례하는 양의 금속분말을 공급할 수 있다. 이와

같은 조건들을 고려하여 본 연구에서는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 이송 가스를 이용한 유동층 방식의 핀틀인젝터형 금속분말 공급장치를 대상으로 그 분사량에 대하여 시험하였다.

금속분말 공급장치의 주입구(①)로 이송 가스인 아르곤(Ar)이 주입되고 장치 내부의 압력이 상승한다. 핀틀인젝터(②)를 닫고 있던 용수철(③)의 탄성에너지보다 압력에너지가 커지는 순간, 닫혀 있던 핀틀인젝터가 개방되어 이송 가스가 배출되며 금속분말도 가스에 실려 배출된다.

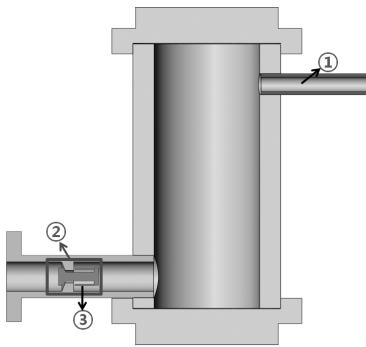


Fig. 1 Configuration of Metal Powder Feeder(MPF)

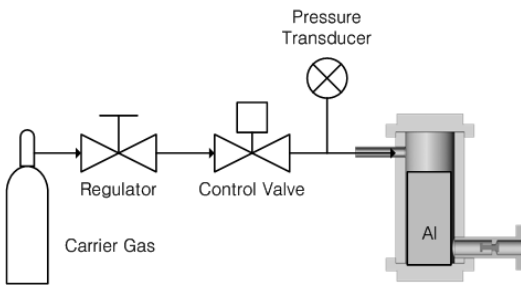


Fig. 2 Schematic of fuel feeding system

3. 연료 공급 시스템의 문제점과 개선

금속분말 공급장치와 이송 가스, 레귤레이터, 제어밸브를 이용하여 Fig. 2와 같이 연료 공급 시스템을 구성하고 금속분말 공급장치를 시험하였다. 70 μm 크기의 알루미늄(Al) 분말을 사용하여 시험을 수행했으며 이송 가스는 레귤레이터와 제어 밸브를 거쳐 금속분말 공급장치에 이

르고 핀틀인젝터가 개방되면 금속분말과 함께 배출된다.

시험 결과, 금속분말을 충전하지 않았을 때보다 충전하였을 때 약 5 bar 정도 더 높은 압력에서 인젝터가 개방되었다. 이는 금속분말이 핀틀인젝터가 작동하는데 있어 쉐기와 같은 역할을 하여, 저항으로 작용하였기 때문으로 여겨진다. 또한 초기 개방 시에 매우 많은 양의 금속분말이 배출되는 문제점이 나타났고 이후 급격하게 분말 분사 유량이 줄어드는 문제점이 관찰되었다. 이는 중력 및 금속분말 공급장치 내의 유동문제에 여겨지는데 이송 가스가 금속분말을 효과적으로 비산시키지 못하고 미량의 이송 가스에 많은 금속분말이 실려 배출되기 때문으로 생각된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 초기 작동 시 핀틀인젝터 작동 영역 내에 금속분말이 존재하지 않아야 하며 공급장치 내부에서 금속분말이 충분히 비산되어 이송 가스와 비교적 균일하게 혼합되어야 한다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 이송 가스를 하부 측면에서 공급하고 핀틀인젝터를 상부 측면에 배치하였다. 또한 금속분말의 배출량을 줄이기 위해 핀틀인젝터의 용수철도 약 $2.6 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ 정도의 작은 스프링상수(spring constant)를 가진 것으로 교체하였다.

다시 시험을 수행하였고 초기에 매우 많은 양의 분말이 배출되는 현상이 거의 사라졌지만, 초반에 다량이 분사되다가 시간이 경과할수록 그 양이 줄어드는 문제는 해결하지 못했다. 작은 스프링 상수의 용수철을 적용하여 0.5 bar에도 핀틀인젝터가 개방되었다. 전반적으로 문제점들이 현저히 줄어들음을 확인하였다.

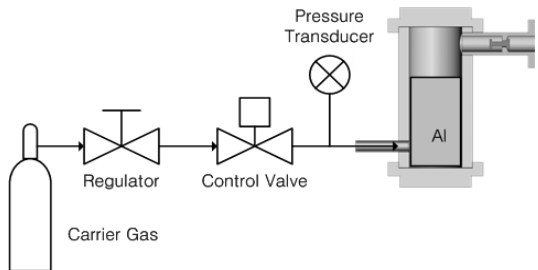


Fig. 3 Schematic of improved fuel feeding system

4. 연료 공급 시스템의 분사량 측정

금속분말 공급장치의 분사량을 측정하기 위하여 Fig.4와 같이 실험장치를 구성하였다. 이송 가스의 공급장치 가압 압력이 레귤레이터에 의해 각각 1, 2, 3 bar로 조절되었고, 핀틀인젝터가 개방되어 15~25 μm 크기의 구상 알루미늄 입자가 배출됨에 따라 공급장치(MPF)의 질량이 줄어든다. 이를 최소눈금 0.5 g의 저울로 초기의 공급장치 질량을 영점으로 하여 분말이 배출됨에 따라 초기 질량으로부터 줄어든 질량(reduced mass)을 측정해 연료 공급 시스템의 단위시간당 분사량을 산출하였다. 이때 측정시간은 공급장치의 부피가 일정하므로 Fig. 5와 같이 일정 압력에서 작동시간이 길어지면 분사량이 줄어들기 때문에 비교적 짧은 시간인 40 ± 10 초로 제한하였다.

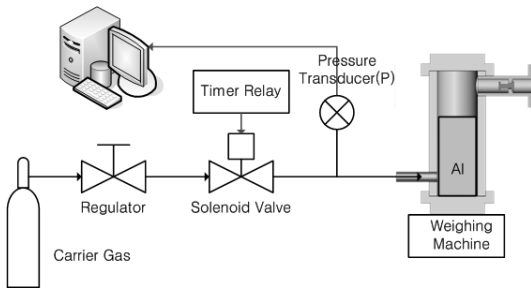


Fig. 4 Schematic of fuel feeding system for measuring feeding rate

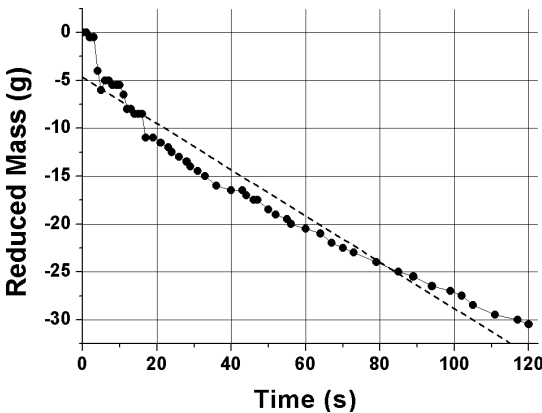


Fig. 5 History of MPF mass variation at the injection pressure from 3 bar

실험 결과는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 공급 압력이 높아짐에 따라 분사량이 커졌다. 1 bar일 때 평균 약 3.5 g/min 정도의 질유량을 보였고 2 bar일 때 약 4.6 g/min, 3 bar일 때 약 5.5 g/min이 측정되었다. 분사되는 분말의 형상을 관찰해 볼 때 분사 속도가 균일하지 못했고 이는 금속분말 공급 장치 내부에서의 유체 유동과 비산된 분말사이의 상호작용으로 인한 현상으로 보인다.

이러한 불균일한 공급 속도 현상을 해결해 보고자 타이머 릴레이와 솔레노이드 밸브를 이용하여 이송 가스에 25 Hz로 약한 섭동을 주었다.

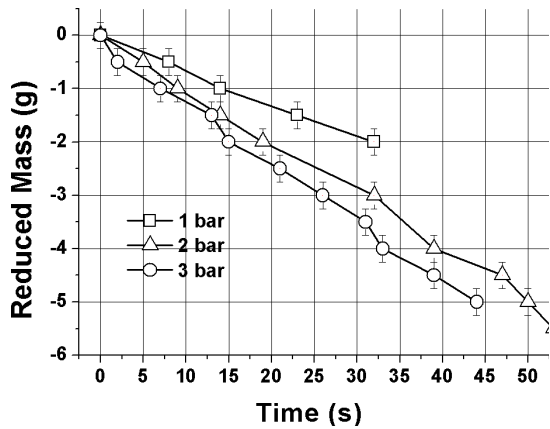


Fig. 7 History of MPF mass variation according to upper pressure with carrier gas vibration

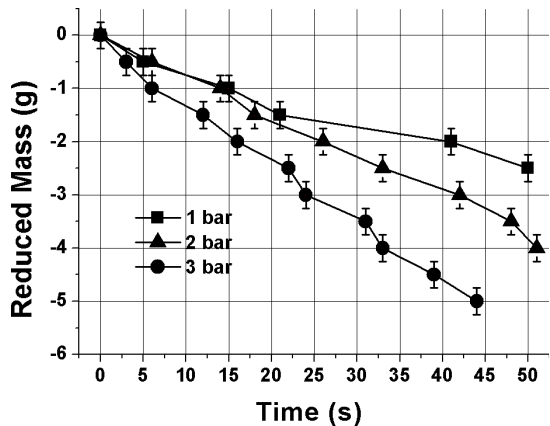


Fig. 6 History of MPF mass variation according to upper pressure without carrier gas vibration

그 결과 1 bar일 때 평균 약 3.9 g/min 정도의 질유량을 보였고 2 bar일 때 약 6.2 g/min, 3 bar일 때 약 6.8 g/min이 측정되었다. Fig. 7과 같이 시간에 따라 질량이 감소하였고 섭동이 없었을 때보다는 질유량이 10~30% 정도 크고 더 선형적이면서도 안정적으로 변화하였다.

5. 결 론

금속분말 소형 연소기 시스템 구현을 위한 선행연구로 연료 공급 시스템인 핀틀인젝터형 금속분말 공급장치를 확보하고 시험하여, 장치의 중요 성능인 공급량을 실험적으로 측정하였다. 시험 결과 연료 공급 장치에 이송 가스 압력이 상승함에 따라 많은 질유량의 금속분말이 공급되었으며, 균일한 분사 속도를 도출하고자 이송 가스를 25 Hz로 가진하자 질유량이 10~30% 상승하였고 더 선형적이면서도 안정적인 질량 감소가 일어났다.

본 핀틀인젝터형 금속분말 공급장치의 경우 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 비교적 고압(3 bar)에서 작동시킬 경우, 동일 가압 조건에서도 시간에 따라 분사율이 크게 달라지므로 이에 대한 추가적인 시험이 필요하다. 이는 분말이 비산되는 공간이 일정해서 생기는 문제로 여겨지며, 이를 해결하기 위해서는 분사된 입자의 부피만큼 공간을 줄일 수 있는 피스톤 형태의 공급 장치 고안이 추가되어야 할 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서는 낮은 질유량의 범위에서 실험이 이뤄질 계획이므로 큰 문제가 되지는 않는다.

향후 연구에서는 1~2 bar 조건에서 금속분말을 공급하고 증기와 연소를 유도하고자 한다. 금속분말 연소기 시스템의 연소는 시스템 내에서의 유체 유동과 연소과정이 열분해 및 기체의 확산·혼합·연소, 난류, 대류, 복사열전달, 시간에 따라 변화하는 화학종의 생성·해리 즉, 방대한 물리적 또는 화학적 현상들의 상호작용으로 이뤄지는 현상이다. 이러한 현상의 모든 파라미터를 각기 고려하기란 불가능하므로 본 연구에서는 이 파라미터들이 포함된 실험적인 구현을 통

해 접근하고자 한다. 따라서 본 시험 결과를 바탕으로 산화제 공급 시스템의 성능을 제안하고 에너지 보존 방정식으로부터 연소실에 대한 개념 설계 및 연소실 제작을 수행할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD070027AD)

참 고 문 헌

1. I. Glassman, "METAL COMBUSTION PROCESSES," Aeronautical Engineering Laboratory, Vol. Report No. 473, 1959. pp. 43
2. J.L. Heesung Yang, Kyungmoo Kim, Woongsup Yoon, "Simplified model for Single Aluminum Particle Combustion," 47th AIAA Aerospace Science Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2009, pp. 1-9
3. 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
4. Grant A. Risha, Ying Huang, Richard A. Yetter, Vigor Yang, "Combustion of Aluminum Particles with Steam and Liquid Water," 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2006-1154, January 2006
5. Sangsun Yang, Mansoo Choi, "A Flame Metal Combustion Method for Production of Nanoparticles," Powder Technology 197(2010) pp. 170-176