

# 유동층 방식의 밀집상과 희박상 거동을 이용한 분말형 금속 연료 정량 공급 방법

고태호\* · 윤웅섭\*\*†

## Fluidized Bed Feeding Method of the Particulate Metallic Fuel for a Variable Concentration Quality

Taeho Ko\* · Woongsup Yoon\*\*†

### 초 록

금속을 청정 에너지원으로 이용하기 위해 분말형 금속연료 연소시스템이 필요하고, 이에 대한 선행연구로 분말을 정량 공급할 수 있는 공급기를 설계·제작하였다. 유동층 방식의 분말 공급에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 피스톤 및 벤츄리관이 적용된 공급 방법을 사용하여 통제한 후, 조절 가능한 공급기 내부 압력만을 변수로 하여 중요 성능인 분말 공급량을 직접적인 중량 측정 방법으로 측정하였다. 측정 실험의 결과로부터 연소시스템에 적용할 공급기의 작동 조건을 도출할 수 있었고, 작동 조건에서 벗어난 영역에서 분말 공급기가 가지고 있는 문제점을 확인하였다.

**Key Words:** Particulate Metallic Fuel(분말형 금속 연료), Fuel Feeding Method(연료 공급 방법), Fluidized bed(유동층), Concentration(수밀도), Constant Mass Flowrate(정질유량), Dense Phase(밀집상), Dilute Phase(희박상)

### 1. 서 론

금속연료는 현재 널리 사용되고 있는 탄화수소( $C_xH_y$ ) 계열의 연료에 비해 연소 시 많은 에너지를 발생시키며, 연소 후 생성물에 있어서도 재생 가능한 금속산화물만을 배출하여 보다 친환경적인 연료로서 주목을 받고 있다[1,2,3]. 금속을 연료로 사용하는 형태(블럭, 와이어, 젤형) 중에서도 분말형 금속연료의 경우에는 확산화염 만으로도 연소가 유지됨이 실험적으로 선행 연

구되었으며 분말 공급기를 통해 지속적인 공급 및 연소 제어가 가능할 것으로 보인다[4,5,6].

분말형 금속연료의 연소 유지는 언급한 바와 같이 실험적으로 이미 구현이 되었으나 입자의 산화피막으로 인한 점화 지연, 비대칭 연소 등으로 여전히 연소 유지가 쉽지 않고, 입자 상호 작용에 의한 점화 및 연소 메커니즘도 밝혀지지 않았다[7,8]. 따라서 금속을 연료로 사용하기 위해서는 이에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 하며 이를 바탕으로 연소 유지 조건을 만족시키는 시스템 설계 기술이 필요하다. 특히 분말 연소의 특성상 유동에 의한 금속 입자의 공간 분포에 따라 연소 조건이 크게 영향을 받으므로 분포에 있어 초기 조건이 되는 분말 공급량의

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

조절이 중요한 문제가 된다[4,9].

국내에서 금속분말 연소기를 사용하는 연구로서 금속산화물 입자 재료를 합성하기 위한 연구가 활발히 이뤄졌다[10,11]. 이 연구들에서는 현재 분말을 공급하는 방법으로 가장 널리 사용되고 있는 스크류 방식의 분말 공급기를 적용하고 있다. 이 방식은 호퍼에서의 아칭(arching) 및 축유동(core flowing), 터널링(turnering), 공극의 불균일성, 체적 유량의 불규칙성과 같은 문제뿐만 아니라, 스크류를 구동시키기 위한 장치인 모터(motor)와 전원 공급원을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 금속연료가 수송 기계의 에너지원으로 적용될 경우에 스크류 공급 방식은 불안정한 공급으로 인한 연소 불안정 및 분말 공급 중단 문제는 물론, 장비의 부피 증가와 추가적인 중량이 되는 부피가 많아 적합하지 못하다.

일찍이 본 연구에서와 같이 금속연료를 에너지원화하기 위한 연구는 해외에서 활발히 이뤄졌는데, 이들 연구에서는 금속분말을 공급하는 방법으로 유동층(fluidized bed) 방식을 주로 적용하고 있다. 이 방식의 경우에는 입자의 크기나 밀도, 모양, 입자 사이의 공극 및 공급기 내부의 유동장이 일정(steady)하지 않으면 공급률이 달라지는 문제가 있다. 따라서 공급률을 일정하게 유지하기 위한 아이디어(idea)가 고안된 분말 공급 방법을 적용하였는데, Risha 등의 연구에서는 층류 분젠 버너(Bunsen Burner)에 Goroshin 등이 고안한 다져진 알루미늄 분말층을 빠른 속도의 증기로 깎아 이송시키는 공급 방식을 사용하였다[12]. Miller 등은 긴 원통형의 금속분말 연소기에 Fricke 등이 고안한 피스톤을 이용한 유동층 분말 연료 공급시스템을 적용하였다[5].

본 연구에서는 피스톤을 이용한 유동층 분말 공급 방식의 선행연구를 바탕으로 앞으로 설계될 분말형 금속 연료의 연소시스템에 적합한 분말 공급 방법을 제시하였다. 그리고 이를 제작하여 중요 성능인 분말 공급기의 공급률을 중량 측정 방법을 통해 실험적으로 측정, 일정한 공급률의 분말 공급을 구현하고자 하였다.

## 2. 분말형 금속 연료 공급 방법

### 2.1 유동층 방식의 공급기

분말형 금속 연료의 원활한 연소를 위해서는 가능한 입자의 크기가 작아야 하고 이 입자를 일정하게 공급해야만 한다[13]. 그러나 나노 크기의 금속분말은 경제성이 떨어지고 큰 반응성으로 인해 위험하므로 비교적 큰 74(200 mesh) ~ 149(100 mesh)  $\mu\text{m}$  크기의 금속분말을 대상으로 하였다. 입자의 형태에 있어서는 현상 예측이 가능한 구형(sphere)의 분말을 사용하려 하였으나 본 연구에서는 APT (Advanced Powder Technology) 제조사의 입도 90 ~ 150  $\mu\text{m}$ , 순도 99.8%의 마그네슘 분말을 사용하였다.

분말을 공급하는 방법으로 스크류 방식은 전술한 바와 같은 문제점을 가지고 있으므로 다른 방법인 유동층 공급 방식을 적용하였다. 이 방식은 선행된 연구들에서도 사용한 공급 방식으로, 분산상의 물질인 금속분말에 비활성 기체인 아르곤(Ar) 가스 또는 공기를 공급하여 유동화시켰다. 대상 분말의 크기에 대하여 Wen과 Yu의 실험적 상관관계로부터 최소 유동화 속도(minimum fluidizing velocity,  $U_{mf}$ )는 0.0039 ~ 0.0126 m/s 의 범위에 있으며 본 연구에서는 최대 1.5 ~ 2.0 LPM으로 이송가스를 공급시켜 가스의 공압속도가 0.0127 ~ 0.0170 m/s 이므로 고정층(fixed bed) 또는 확장층(incipient bed) 상태에서 밀집상의 플러그 흐름(plug flow)으로서 분말이 이송된다[14].

### 2.2 정량 공급을 위한 방법

금속분말 공급 장치의 중요 성능은 일정한 양의 입자를 안정적으로 공급하는 것이다. 본 연구에서는 단순한 형태의 유동층 공급기를 적용하여 고려해줘야 할 변수를 줄이고자 하였다. 입자의 크기와 형태, 밀도, 입자 사이의 공극률, 이송가스의 공급량, 공급기의 형상이 변수가 되며 정량 공급을 위해서는 이 변수들이 일정하게 유지되어야 한다.

동일한 분말을 사용하여 입자의 크기 및 형태,

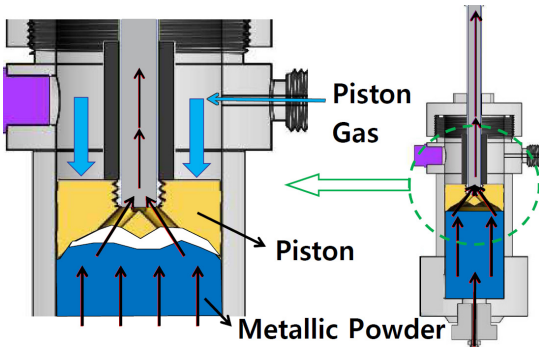


Fig. 1 Configuration of Metallic Powder Feeder(MPF)

밀도에 따른 영향을 배제할 수 있고, 유량계를 통해 이송가스의 공급량도 조절할 수 있다. 그러나 입자 사이의 공극률과 공급기 내부 형상은 분말이 공급되어 빠져나가므로 시간이 흐름에 따라 변한다. 따라서 이 변화를 막기 위하여 피스톤을 공급기에 적용하였고 이는 앞서 언급한 Fricke 등이 고안한 방법과 유사한 것이다[5]. Fig. 1을 통해 볼 수 있듯이 피스톤을 일정한 압력으로 밀어줌으로써 분말이 빠져나가 생기는 공간을 제거하는 방법이다. 이를 통해 입자 사이의 공극률과 공급기 내부 형상을 일정하게 유지시킬 수 있다. 분말은 피스톤에 뚫려 있는 유로를 통해 외부로 이송된다.

### 2.3 연소시스템 적용을 위한 방법

피스톤을 적용한 유동층 방식의 분말 공급기는 밀집상의 플러그 흐름으로 분말을 이송시켜 적은 양의 이송가스만을 필요로 하는 이점이 있다. 그러나 본 연구의 연소시스템에 적용하여 수증기 분위기의 연소기와 연결하면, 초기엔 순조로운 공급이 이뤄지나 곧 분말 공급기의 출구부분이 막혀 버리는 현상이 발생하였다. 이는 밀집상의 플러그 흐름 이송으로 분말이 가진 운동량이 작아, 출구 부분에서 응결핵이 되는 낮은 온도의 분말이 빨리 제거되지 못하고 수증기의 응결과 함께 쌓여버려 발생하는 문제이다. 따라서 응결핵이 되지 못하도록 분말의 온도를 높이는 방법과 함께 큰 운동량으로 분말이 출구부분에

서 빠르게 제거될 수 있도록 밀집상이 아닌 희

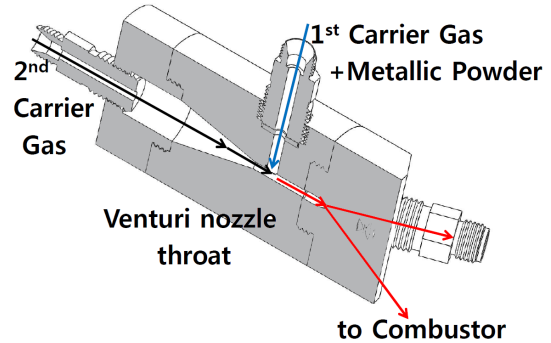


Fig. 2 Configuration of venturi tube

박상의 공급이 필요하다.

이를 위해 Fig. 2와 같이 분말 이송을 밀집상에서 희박상으로 전환시켜 줄 수 있는 장치가 설계되었다. 이때 2차 이송가스의 1차 이송가스 및 분말 공급관으로의 역류를 막기 위해 벤츄리관(venturi tube)을 이용하여 2차 이송가스의 정압이 낮은 노즐목(nozzle throat)에서 밀집상의 분말을 공급하는 방법을 적용하였다.

## 3. 정량 분말 공급 실험

### 3.1 실험 장치의 구성

전술한 방법들을 통해 분말 공급에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들을 통제하고 공급기 내부의 압력만을 조절하여 1차 이송가스의 공급량을 변화시켰다. 변화된 이송가스의 공급량은 금속분말의 공급량 변화를 유도하므로 본 연구에서는 공급기 내부 압력에 따른 분말 공급량의 변화를 측정하였다.

실험 장치의 구성은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 금속분말 공급기와 작동 유체 공급 장치 및 압력 센서(Sensys PSH model -14.223 ~ 100 psig), 0.01 초 간격으로 데이터를 수집하는 DAQ(Data Acquisition device, NI Compact DAQ 9219), 벤츄리관, 희박상으로 공급되는 분말을 포집하는 포집기(collector), 포집기 전체의 질량을 0.25 초 간격으로 실시간 측정할 수 있는 전자저울

(Shinko(VIBRA) AJ-6200E)로 이뤄져 있다.

1차 이송가스는 레귤레이터를 거쳐 불유량계에서 최대 유량이 2 LPM으로 제한되어 분말 공급기로 공급된다. 실제 1차 이송가스의 유량은 피스톤의 상부 압력( $P_{up}$ )에 의해 조절되는데 피스톤 상부 압력이 입자 사이의 공극률을 변화시키고, 이 공극률에 의해 분말 공급기 내부의 압력( $P_{down}$ )이 결정되며 이 내부 압력에 따라 1차 이송가스의 유량이 결정되기 때문이다. 이렇게 유량이 조절된 1차 이송가스는 분말 공급기에서 밀집상으로 분말을 부유시켜 피스톤에 뚫린 공급 유로를 따라 오리피스를 지나 벤츨리관에 이른다. 오리피스는 분말 공급 시 발생하는 압력 섭동을 감소시키는 역할을 한다.

공급된 금속분말은 벤츨리관에서 2차 이송가스에 의해 희박상으로 바뀌어 연소기로 공급된다. 2차 가스의 공급량은 실험적으로 알아낸 연소기 스웰 챔버에서 분말이 쌓이지 않는 조건인 50 LPM으로 불유량계로 고정하여 공급하였다. 본 연구에서는 연소기에 공급되는 분말 공급률을 측정하기 위하여 연소기 대신 포집기를 설치하였다. 포집기는 이송가스와 분말을 분리하여 분말만을 포집하는 장치로 전자저울을 이용해 실시간으로 변화하는 중량의 변화를 기록함으로써 분말 공급량을 직접적으로 측정할 수 있었다.

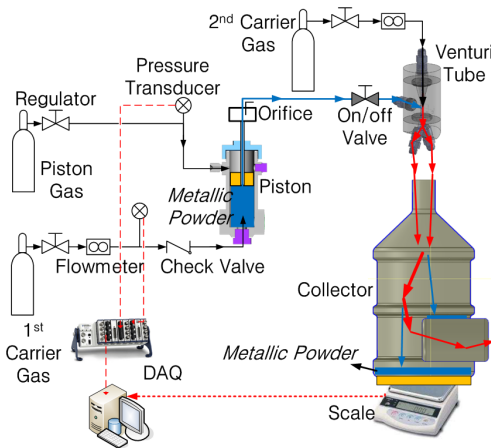


Fig. 3 Schematic of the equipment for measuring mass flowrate

### 3.2 중량 측정을 통한 공급량의 측정 결과

시간에 따라 변화하는 포집기의 질량은 희박상으로 이송된 분말 외에는 외부로부터 어떠한 질량 유입도 없으므로 온전히 분말 공급기의 공급량을 나타낸다.

피스톤 상부의 압력( $P_{up}$ )을 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 bar(gauge)로 변화시켜 가며, 각 경우에 대하여 3회 이상의 실험을 수행하였다. Fig. 4, 5, 6, 7은 각 경우의 특징이 잘 나타난 실험 결과를 보여준다. 피스톤 상부의 압력이 목표 압력( $P_{up}$ )으로 고정되고 시간에 따른 피스톤 하부 압력( $P_{down}$ )과 포집기 질량(Mass)의 변화를 알 수 있다. 전체적으로 분말의 공급량 변화가 압력 변화에 비해 2 ~ 3 초 정도 느린데, 이는 분말 공급기로부터 포집기까지의 긴 유로 저항과 전자저울 측정의 느린 반응속도로 인해 발생하는 현상이다. 또한 초기에 피스톤 상·하부의 압력을 동시에 공급하였을 때 하부 압력의 변화를 통해 분말이 정지 상태에서 비산되기까지 압력이 튀는 현상을 공통적으로 관찰할 수 있다. 이후 안정화된 하부 압력은 공급기 내부의 분말이 모두 소진되면서 분말에 의한 저항이 사라져 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 4에서 볼 수 있듯이 피스톤 상부 압력이 0.5 bar일 때가 다른 경우에 비해 고른 공급률을 가짐을 알 수 있다. 115 초경에 하부 압력이 급상승하는 것은 실험 종료를 위해 유량계를 단음으로 생기는 현상이다. Fig. 5에서부터 특이

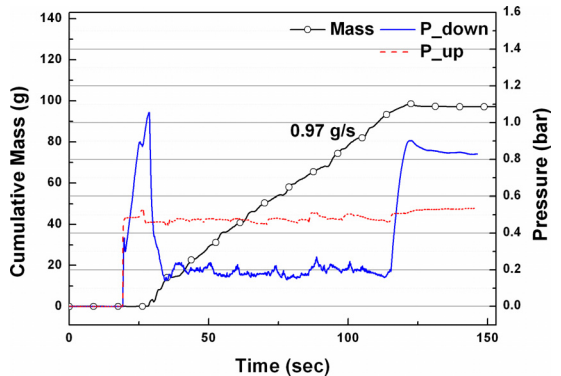


Fig. 4 History of collector mass variation at 0.48 bar upper pressure

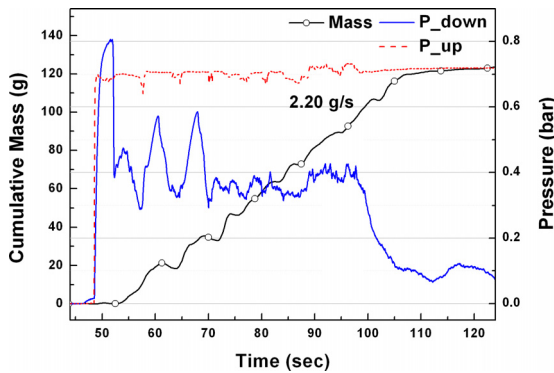


Fig. 5 History of collector mass variation at 0.71 bar upper pressure

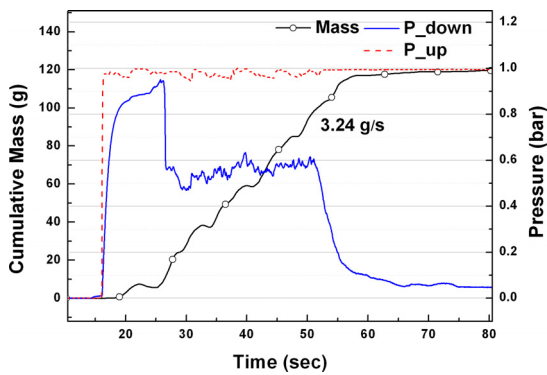


Fig. 6 History of collector mass variation at 0.98 bar upper pressure

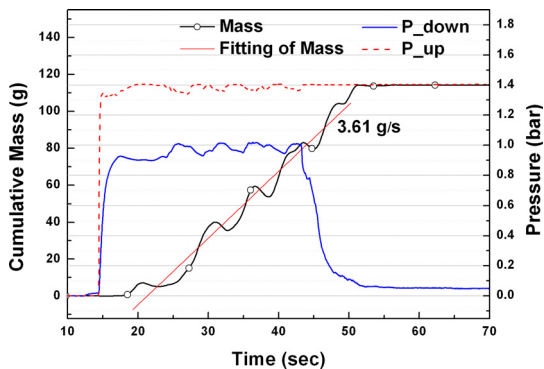


Fig. 7 History of collector mass variation at 1.39 bar upper pressure

하게도 누적 질량(cumulative mass) 측정임에도 불구하고 오히려 질량이 감소하는 영역이 나타나는 현상이 관찰된다. 이 원인을 피스톤 하부

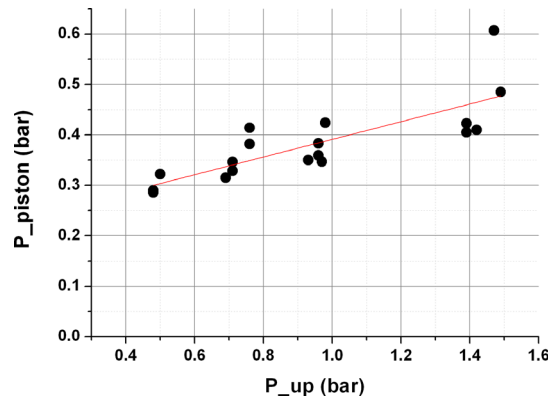


Fig. 8 History of piston pressure variation according to upper pressure

압력의 변화를 통해 유추할 수 있는데 내부 압력이 급상승한 것으로부터 공급에 지연이 발생한 것을 알 수 있다. 이 영역에서는 분말 공급이 중단되었고 실제 육안으로도 분말 공급의 중단을 확인할 수 있었다. 그렇다 하여도 질량이 일정하게 유지되지 못하고 오히려 감소한 것은 분말이 희박상으로 공급될 때 포집기에 전달된 운동량도 함께 측정되어, 분말 공급 중단과 함께 그 운동량만큼의 힘이 사라졌기 때문이다. 이 현상은 피스톤의 상부 압력이 0.7 bar이었을 때에는 초기에 나타나다가 상부 압력이 점차 증가함에 따라 공급 시간 전체 영역에 걸쳐 전파되어 두드러지게 발생하고 있다.

이러한 현상이 발생하는 원인을 긴 주기의 간격으로부터 유추할 수 있는데, 피스톤과 공급기 벽면의 마찰로 인해 피스톤 이동이 고르지 못하여 분말의 공급으로 생겨난 공급기 내부의 빈 공간을 연속적으로 제거하지 못했기 때문인 것으로 보인다. 따라서 이 문제는 피스톤과 공급기의 개선을 통해 해결할 수 있을 것이다.

$$P_{up} - P_{down} = P_{piston}$$

Figure 8은 피스톤 상부 압력이 증가함에 따라 피스톤 상·하부의 압력 차이인 피스톤이 분말에 가하는 압력( $P_{piston}$ )이 증가하고 있음을 보여 준다. 피스톤 상부 압력이 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 bar

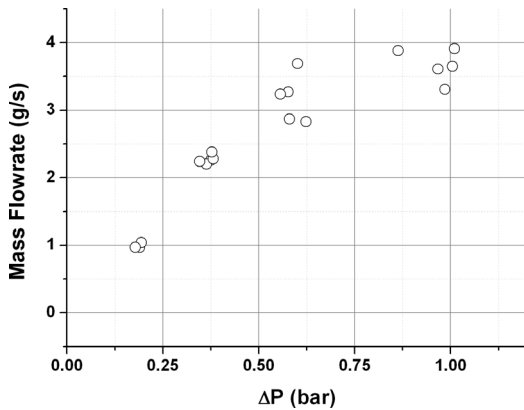


Fig. 9 History of mass flowrate variation according to differential pressure

로 증가할 때 각 측정 영역에 대해 평균 29900, 35700, 37300, 46600 Pa(gauge)의 값이 측정되었다. 이 압력은 입자 사이의 공극을 줄여 분말의 저항을 크게 만든다.

$$P_{down} - P_{atm} = \Delta P$$

Figure 9는 분말 공급에 직접적인 원동력이 되는 외기 압력( $P_{atm}$ )과 피스톤 하부 압력( $P_{down}$ )의 차인 공급기 내부 압력( $P$ )에 따른 분말 공급률의 변화를 보여 준다. 피스톤 상부 압력이 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 bar로 증가할 때 공급기 내부 압력이 각 측정 영역에 대해 평균 0.19, 0.37, 0.59, 0.97 bar(gauge)로 변하고 공급률은 평균 0.92, 2.27, 3.19, 3.67 g/s의 값이 측정되었다. 결과에서 나타나듯이 압력의 증가에 따라 공급률이 증가함을 알 수 있고, 공급기의 내부 압력이 작은 영역에서 비교적 편차가 크지 않는 공급률을 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

금속연료 연소시스템에 사용하기 위한 분말 공급 방법으로 피스톤 및 벤츨리관을 적용한 유동층 방식의 분말 공급기를 설계·제작하였다. 이는 분말 공급에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수

들을 통제하고 공급기 내부의 압력만을 조절하여 분말의 공급량을 변화시키고자 한 것이다. 이렇게 설계·제작된 공급기를 이용하여 실험을 통해 직접적으로 공급량을 측정하였다. 그 결과로부터 제작된 분말 공급기의 경우에는 낮은 피스톤 상부 압력 조건에서 비교적 재현성이 좋으면서도 고른 공급이 이뤄짐을 알 수 있었다. 따라서 이 조건에서 이뤄지는 정량 공급을 연소시스템에 적용할 수 있을 것이다. 추가적으로 피스톤의 이동이 잘 이뤄지지 않아 분말 공급 중단이 발생하는 문제를 확인하였으며, 피스톤과 공급기 벽면에 대한 설계 개선으로 이를 해결해야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2011-0026134) 및 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(UD070027AD)을 받아 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Timothy F. Miller, Jeremy L. Walter, Daniel H. Kiely, "A Next-Generation AUV Energy System Based on Aluminum-Seawater Combustion," Proceedings of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, June 2002
2. Walter Ethan Eagle, "Modeling of a High Energy Density Propulsion System Based on the Combustion of Aluminum and Steam," Thesis of Master in University of Maryland, 2007
3. Federica Franzoni, Massimo Milani, Luca Montorsi, Valeri Golovitchev, "Combined hydrogen production and power generation from aluminum combustion with water:

- Analysis of the concept" International Journal of Hydrogen Energy 35(2010) pp. 1548-1559
4. John P. Foote, John T. Lineberry, Bryan R. Thompson, Bradley C. Winkelman, "Investigation fo aluminum particle combustion for underwater propulsion applications" AIAA Paper 96-3086, July 1996
  5. 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,
  6. KO Taeho, LEE Sanghyup, KIM Hyungmin, KIM Sangmin, HAN Ho and YOON Woongsup, "Experimental Study for Flame Formation in the Magnesium Powder-Steam Swirl Combustor", IASPEP, 2011, pp.564-568
  7. I. Glassman, "METAL COMBUSTION PROCESSES," Aeronautical Engineering Laboratory, Vol. Report No. 473, 1959. pp. 43
  8. 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
  9. A. G. Egorov, E. D. Kal'nei, A. P. Shaikin, "Stabilization of the Flame of a Powdered Metal Combustible in a Turbulent Air Flow" Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 37, No. 5, 2001, pp. 516-522
  10. Sangsun Yang, Mansoo Choi, "A Flame Metal Combustion Method for Production of Nanoparticles," Powder Technology 197(2010) pp. 170-176
  11. 신승하, Peter V. Pikhitsa, 김창혁, 최만수, "금속연소법을 이용한 마그네시아 입자의 생성과 성장연구" 대한기계학회 열공학/유체공학부문 춘계학술대회, 2008, pp. 232-235
  12. 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.
  13. Taeho Ko, Hyungmin Kim, Dohyung Lee, Woongsup Yoon, "Feeding Rate Measurement of Pintle Injector Type Fuel Feeder for Metal Powder Combustor," Proceedings of the 2010 KSPE Fall Conference, November 2010, pp.405-409
  14. Martin Rhodes, "Introduction to Particle Technology 2nd Edition" WILEY, pp.211-234