

단일 마그네슘 입자 연소 지배인자의 민감도 해석

이상협* · 고태호* · 윤웅섭** · 양희성***

Parametric Studies on the Sensitivity of Single Isolated Aluminum Particle Combustion Modeling

Sanghyup Lee* · Taeho Ko* · Woongsup Yoon** · Heesung Yang***

ABSTRACT

A simplified analytical study for micro-sized single metal particle combustion in air was conducted in the present study. The metal particle combustion consists of two distinct reaction regimes, ignition and quasi-steady burning, and the thermo-fluidic phenomena in each stage are formulated by virtue of the conservation and transport equations. When particle temperature reaches to 1200 K, ended an ignition stage and was converted at quasi-steady combustion stage. Effects of Initial particle size, convection, ambient pressure and temperature are examined and addressed with validation.

초 록

마이크로 크기의 단일 마그네슘 입자의 연소 해석을 위해 간단하면서도 점화와 연소과정 전체를 묘사한 모델을 사용하여 각각의 주요 파라미터별 영향을 도출하는 연구를 수행하였다. 계산에 사용된 모델은 액적 연소의 경우와 유사하게 보존 및 이송 방정식들을 사용하여 묘사되었으며 입자의 온도가 1200 K에 도달하면 점화단계를 종료하고 준정상연소 단계로 전환되었다. 선행 연구를 참고하여 주요 파라미터를 선정하였으며 주요 파라미터로는 초기 입자크기, 대류 열전달의 유무, 외기 온도, 압력 등이 선정되었고, 간단한 열역학적 모델임에도 불구하고 정량적으로 실험 데이터와 유사하게 각각의 파라미터의 영향을 평가할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Magnesium Particle(마그네슘 입자), Magnesium Oxide(마그네슘 산화 피막), Ignition (점화), Quasi-steady Burning(준정상 상태연소), Ignition Delay time(점화지연), ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

*** 포항산업과학연구원 에너지자원연구본부
교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

1. 서 론

최근 화석 연료의 고갈 및 환경오염 문제로 인해 대체 에너지 분야가 활발히 연구되고 있다.

그 중에서도 고 반응성 금속 연료는 청정 연료로서 주목을 받고 있다. 특히 에너지원으로서 마그네슘은 연소열이 약 30.8 MJ/kg 으로 탄화수소 계열 연료와 비교하여 손색이 없을 뿐만 아니라 수반응시 생성물도 수소와 마그네시아 이므로 수소는 포집을 통해 활용이 가능하며 마그네시아는 쉽게 재생이 가능하다. 그러므로 금속 마그네슘 입자 연소는 청정 고에너지 원으로 활용이 가능하다는 장점이 있다.

마그네슘 연구는 1980년대 화성탐사용 추진제의 연료로서 마그네슘 입자와 CO₂ 산화제의 반응에 대한 연구가 주로 이루어졌다[1-7]. 공기나 산소를 산화제로 하는 마그네슘 입자의 연소에 대한 연구는 메커니즘을 규명하기 위해 mm단위의 매우 큰 입자를 이용한 기초 실험의 연구 형태로 진행되거나[3] 알루미늄 입자의 점화 특성을 개선하기 위한 합금용 재료로서의 연구가 이루어졌다[4]. 이와 같이 마그네슘 입자의 연소에 관한 연구, 공기나 산소와의 반응에 관한 연구는 제한적으로 수행되었다.

몇몇 연구자들에 의해 초기 입자 크기, 대류, 외기 압력과 온도 등을 주요 변수로 하여 서로 다른 실험 및 해석 조건하에서 점화 지연, 연소 시간, 연소율, 화염특성 등에 대한 영향을 파악하는 연구가 진행되었고, 점화 지연과 연소 시간에 대한 관계식이 제시되기도 하였다. 본 연구에서는 마그네슘 입자 연소에 대한 다양한 변수들의 영향을 연구하기 위해 새로이 작성한 마그네슘 입자 연소모델을 사용한 파라메트릭 연구를 수행하였고 선행 연구들과 비교하였다.

2. 단일 마그네슘 입자 연소

2.1 단일 마그네슘 입자 연소 특성

고온의 산화제 가스에 노출된 단일 마그네슘 입자는 가열, 점화, 준정상상태의 연소과정을 거치게 된다[6]. 마그네슘 입자의 연소는 산화피막의 존재로 인하여 일반적인 탄화수소 액적의 연소와 다르다[6].

초기 산화 피막의 thermal cracking 과

heterogeneous 반응(HET)에 의한 healing, 점화 단계에서의 homogeneous 반응(HOM)과 그에 따른 다공성(=비보호성) 피막의 형성, 비보호성 피막을 통한 증발 지배형 기상 연소반응, 연소생성물의 내측 확산과 다공성 피막의 성장, oxide shell 형성, 연소생성물의 외측 확산에 따른 화염 온도 고정 효과 등의 다양한 현상이 모두 산화 피막의 존재에 따른 마그네슘 연소만의 주요한 특징이라 할 수 있다.

이러한 특징을 이해하기 위해서는 마그네슘의 점화과정과 준정상 연소과정에 대한 이해가 필요하다. Fig. 1은 마그네슘 입자의 점화과정과 준정상 연소 단계를 묘사한 그림이다. 초기 마그네슘 입자는 자연적 혹은 인공적으로 형성된 산화피막에 의해 둘러싸여 있다. 초기 산화피막은 비반응성, 보호성 산화물로 구성되어 있으므로 내부 마그네슘 core 가 산화제와 접촉하는 것을 막기 때문에 점화를 위해서는 산화피막이 먼저 제거되어야 한다. 고온 외기로부터 대류 및 복사 열전달(외부열원)에 의해 입자가 가열되면 마그네슘과 마그네슘 산화물의 열팽창계수의 차이로 인해 산화피막에 mechanical stress 가 발생하게 되고, stress 가 산화물의 tensile strength 보다 커지면 피막에 crack 이 발생하게 된다[9]. Crack 이 발생한 표면 부위는 국부적으로 외부 산화제 환경에 노출되어 고상 혹은 액상의 마그네슘과 기상의 산화제 사이에서 발열반응이 발생하게 되는데 이를 'Heterogeneous Reaction (HET)'이라 한다. HET 반응에 의해 생성되는 산화물은 보호성을 가지고 있으며, 이 산화물에 의해 crack부위가 다시 메워지는 'Healing'현상이 동시에 발생하게 되므로, 마그네슘 입자의 점화과정은 cracking 과 healing 의 경쟁과정이라고 할 수 있다[9-12].

한편, mechanical stress 에 의해 형성된 crack 을 통해 외부로 분출된 마그네슘 증기가 입자 표면 근처에서 산화제 반응하는 국부적인 발열반응이 발생하게 되는데, 이를 'Homogeneous Reaction (HOM)'이라 한다. HOM 반응에 의해 생성되는 산화물은 보호성 피막 위에 새로이 비보호성 피막층을 형성하면서 서 쌓이게 되는데, 이

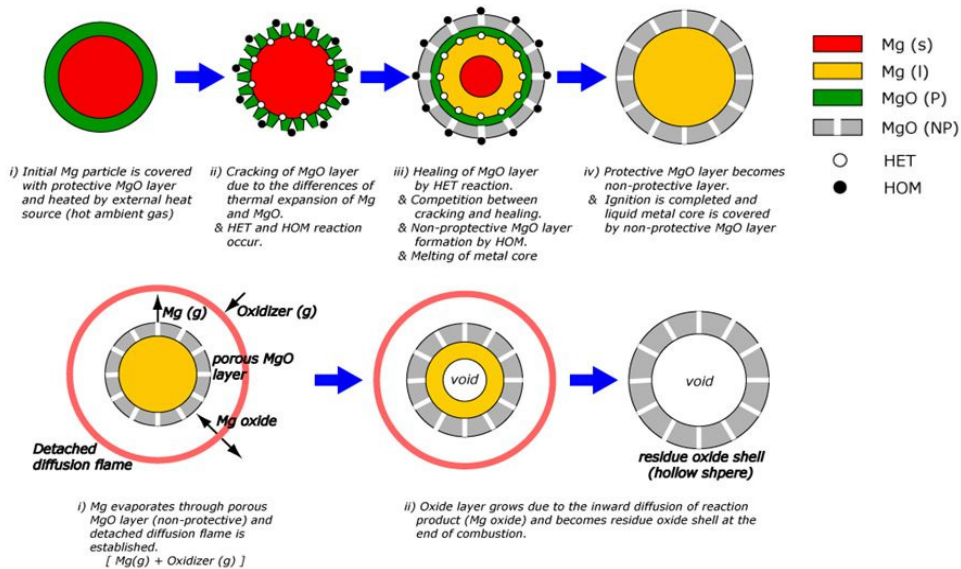


Fig. 1 Schematic for ignition stage and quasi-steady combustion stage

는 기상의 마그네슘 산화물이 급속히 냉각되어 고체 상태로 표면에 쌓이면서 다공질의 피막을 형성하는 것이다. HET 반응과 HOM 반응은 점화를 위한 추가적인 에너지원(내부열원)이 되며, 특히 HOM 반응은 입자가 가열됨에 따라 주요한 에너지 공급원이 된다[9-10,13]. 마그네슘 산화물의 녹는점(~3100K)은 마그네슘의 녹는점(~920K) 보다 높기 때문에 외부열원과 내부열원에 의해 입자가 가열되면 내부의 마그네슘이 먼저 용융되고, 입자의 온도가 높아짐에 따라 산화 피막의 보호성이 점차 사라지면서[14-15] 점화 종료 시 입자는 비보호성의 다공질 피막에 둘러싸인 상태가 된다.

준정상상태의 연소과정에는 다공성 피막을 통과한 마그네슘 증기가 외부로 확산되어 외기의 산화제와 기상으로 반응하여 표면으로부터 일정 거리만큼 떨어진 위치에 봉투화염이 형성된다[16-17]. 다공성 피막의 존재로 인해 마그네슘 입자의 연소는 증발지배형 연소가 되고[18], 피막 내부에 void 를 형성하면서 액상의 마그네슘이 소모된다[8]. 준정상상태의 연소과정 동안 반응 영역에서 생성된 기상의 마그네슘 산화물은 내측으로 확산되는데, 마그네슘 산화물의 끓는점

(~3900 K)이 매우 높아 고체 상태로 응결되면서 입자의 표면에 응착하므로 다공질 피막이 점점 두꺼워지고[19-20], 내부의 액상 마그네슘이 모두 소모되어 연소가 종료되면 최종적으로 내부가 비어있는 oxide shell (hollow sphere)이 잔여물로 남게 된다[3]. 내측으로 확산된 기상의 마그네슘 산화물은 응결하여 피막층이 되므로 액적 표면에서 반응면까지의 기상 산화물의 농도구배는 지속적으로 유지되어 반응 생성물의 내측확산 현상은 연소 종료 시까지 진행된다. 또한 생성물의 외측확산에 의한 oxide smoke 효과가 존재하며, 이로 인해 화염온도가 고정된다[18].

2.2 단일 마그네슘 입자 연소 모델

에너지원으로서의 마그네슘 입자의 활용을 모색하기 위한 기초연구로 공기를 산화제로 하는 단일 마그네슘 입자의 각 파라미터별 점화-연소에 대한 영향을 확인하였다. 연구에 사용된 모델은 작은 계산 부하를 가지면서도 점화와 연소과정 전체를 모사하고 있는데, 저자의 이전 연구에서 소개된 바와 같이 단일 알루미늄 입자 연소 모델의 기본 프레임을 사용하여[21] 점화단계

(산화 피막 제거 단계)와 준정상상태의 연소단계로 구성되었고, 마그네슘 입자의 점화 및 연소특성을 모두 반영하였다.

알려진 바와 같이 마그네슘 입자는 가열, 점화 및 연소과정 동안 입자의 온도가 300 K에서 1200 K까지 큰 폭으로 변화하므로[8] 계산의 정확도를 높이기 위해 열-물리적 물성치는 온도의 함수로 표현되는 값이 사용되었다. NIST 데이터와 Chapman - Enskog kinetic theory[29]를 사용하여 물질의 각종 물성치를 온도의 함수로 표현하였고, 데이터 부족으로 잠열 및 금속의 밀도들은 상수 값을 사용하였다. 산화제 및 외기의 종류는 알루미늄 계산시의 경우[21]와 동일하므로 물성치 데이터를 그대로 사용하였다.

단계별 모델의 구성은 다음과 같다. 점화 단계는 피막의 thermal cracking 과 HET 반응에 의한 healing 의 경쟁과정으로 모사하였고, crack 또는 pore 를 통한 마그네슘의 증발과 입자 표면 근처에서의 HOM 반응에 의한 비보호성 피막 층의 형성을 고려하였다. 고온 외기로부터의 열전달과 HET/HOM 반응에 의한 추가적인 에너지 공급에 의해 입자의 온도가 1200 K 이상이 되면 점화가 완료된다.

준정상상태의 연소 단계는 다공성 피막을 통한 증발지배형 연소를 가정하여 피막 내부의 마그네슘 액적이 void 를 형성하면서 소모됨을 표현하였고, 연소 생성물의 내측 확산에 따른 다공성 피막의 성장 및 oxide shell 잔여 입자의 형성을 모사하였다. 화염면 외측으로 확산된 산화물의 해리에 의한 화염온도 고정 효과도 모델에 포함되었다. 이를 위하여 알루미늄 연소 모델에 사용한 산화물 응착을 고려한 modified transfer number 와 복사열전달의 현실적 고려를 위해 재정의된 유효 잠열의 개념 등이 그대로 사용되었다.

선행연구 데이터가 부족하여 모델 검증을 위한 다양한 비교-검토가 이루어지지는 못했지만 입자의 온도 변화, 연소율, 산화피막의 두께, 잔여입자의 질량, 화염특성, 점화지연 등에 대한 선행연구와 유사한 결과를 예측할 수 있음을 확인하였다.

3. 단일 마그네슘 입자 연소 파라미터

단일 마그네슘 입자의 점화 및 연소에 영향을 미치는 주요 지배인자들에 의한 민감도 해석을 수행하였다. 많은 선행 연구에서 보고한 바와 같이 마그네슘 점화지연에 영향을 주는 파라미터는 초기 입자직경, 대류 열전달, 외기온도 등이며[16-17,19,22-24], 연소시간에 영향을 주는 파라미터는 초기 입자 직경과 외기 압력으로 알려져 있다[19,22,27-28]. 그러므로 본 연구에서는 입자 크기, 대류 열전달, 외기 압력 및 온도를 파라미터로 하여 각 지배인자별 점화지연과 연소시간에 대한 민감도 연구를 수행하였다. 각 인자의 변화에 따른 특성을 알아보기 위해 다른 파라미터는 고정시키고 하나의 파라미터만을 변화시키며 그 영향을 고찰하였다.(Table 1)

Table 1 Configuration for parametric investigation

	Primary parameters	Available range
Ignition delay	D_0 , convection, T_{amb}	$30 \leq D_0 \leq 200$ $1000 \leq T_{amb} \leq 2500$
Burning time	D_0 , P_{amb}	$1 \leq P_{amb} \leq 30$ $1 \leq \text{Convection} \leq 10$

3.1 초기입자 직경

초기 입자 크기의 영향을 연구하기 위해 30 ~ 200 μm 까지 입자의 크기를 변화하여 점화지연 시간의 변화를 예측하여 Fig. 2 에 나타내었다. 또한 선행 연구[26]와 비교하기 위해 외기 온도가 1538 K 인 경우에 대하여 입자 크기 별로 점화 지연시간을 비교하였다. 마그네슘 입자의 직경이 증가함에 따라 점화 지연시간은 증가하는 경향이 예측되었고 이는 해외의 연구 결과와 동일한 경향을 나타내었으나[26] 약 30%의 오차를 갖는 점화지연 시간이 예측되었다. 예상되는 오차의 원인은 다음과 같다. 마그네슘 점화에 있어서 HET 반응 보다 HOM 반응이 주요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으나[9-10, 13], Fedorov는

이러한 HOM 반응을 고려하지 않았다. 또한 Fedorov는 외기 온도의 limiting ignition temperature 개념을 통해 점화온도의 변화를 고려하고 있으나, 본 연구에서는 고정된 점화온도를 사용하고 있으므로, 오차가 발생할 수 있다.

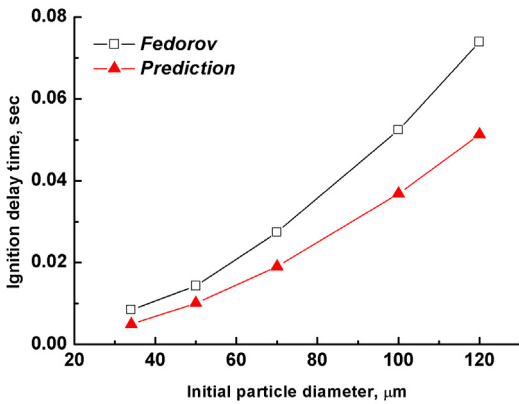


Fig. 2 Ignition delay according to the initial particle size ($T_{amb} = 1538\text{ K}$)

Figure 3은 다양한 크기 입자의 연소시간 예측치와 이전 연구결과를 비교한 것으로, 선행연구와 비교 시 외기온도의 영향을 배제하기 위하여 외기온도 1000 K, 1500 K, 2000 K의 세가지 경우에 대하여 입자 크기 별로 연소시간을 예측하였고, 입자 크기가 커질수록 연소시간이 증가함을 확인할 수 있다.

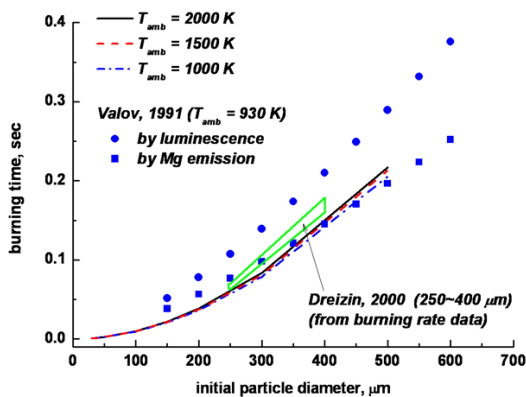


Fig. 3 Particle burning time according to the initial particle size ($T_{amb} = 1000, 1500, 2000\text{ K}$)

Valov[23]등은 마그네슘의 경우 실제로는 연소가 종료되어도 잔여 산화물 입자에서 잠시 동안 지속적으로 빛을 발하므로 정확한 연소시간 측정을 위해서는 마그네슘과 마그네슘 산화물 증기의 emission을 측정하여야 함을 주장하였다. 해석결과 Valov의 emission-연소시간 측정치와 근사한 값을 예측하였고, Dreizin[8] 등의 실험 결과와도 10%의 오차 이내의 연소시간을 예측할 수 있었다. 마그네슘의 연소시간은 입자크기에는 비례하지만 외기온도와 거의 무관하게 예측되었는데, 이는 화염이 형성되면 외기보다는 고온 화염에 의한 영향을 받기 때문이다.

3.2 대류

점화 및 연소특성에 대한 대류의 영향을 연구하기 위하여 외기 속도를 1, 5, 10 m/s로 바꾸어 가면서 해석을 수행하였다. Fig. 4에는 외기 속도에 따른 점화지연, 연소시간, 연소율의 변화를 나타내었다. 점화단계에는 Fig. 5에 제시한 바와 같이 대류 열전달에 의한 에너지공급이 80% 정도로 큰 비중을 차지하기 때문에 외기 속도에 따라 점화지연시간이 최고 21.7% 감소하였다.

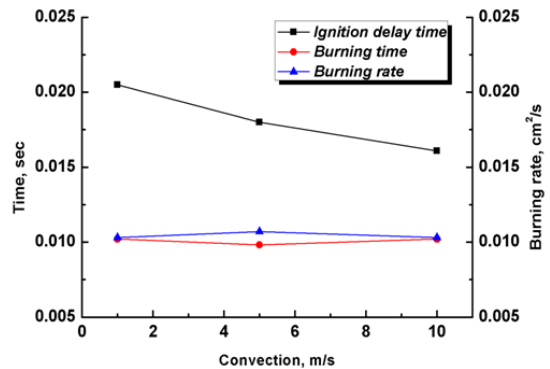


Fig. 4 Effect of convective environment

Figure 5에 제시한 바와 같이 단일 마그네슘 입자 연소는 준정상상태 연소 단계에도 복사열전달의 비중이 크지 않아 주요한 에너지 공급 메커니즘이 대류 열전달임에도 불구하고, 연소시간은 거의 변함이 없었는데, 그 이유는 다음과 같다.

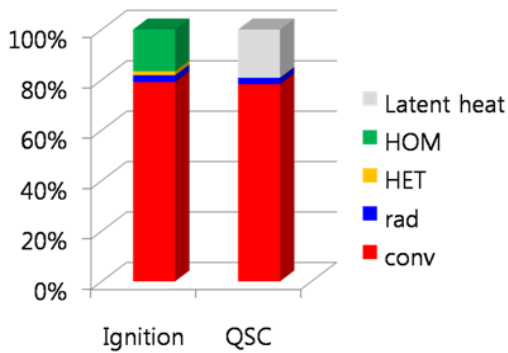


Fig. 5 Fraction of supplied energy by the type of heat transfer method in each stage

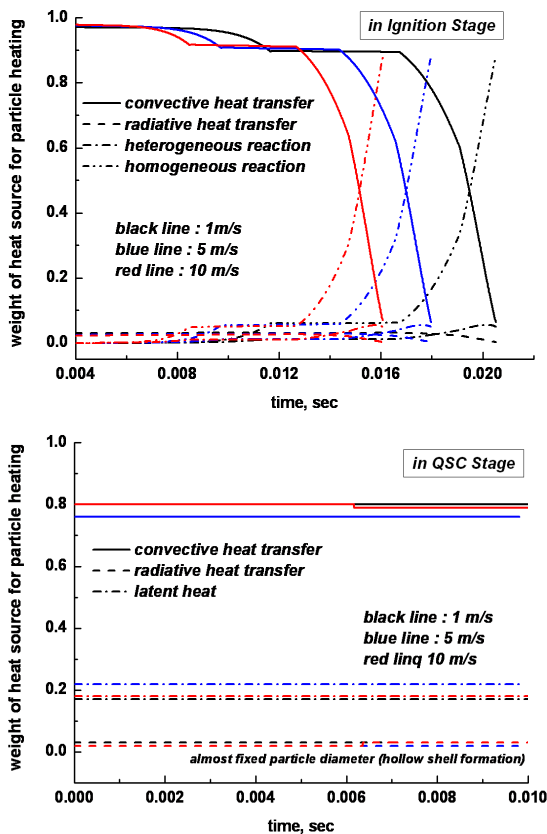


Fig. 6 Evolution of relative importance by the type of energy transfer method

마그네슘의 연소는 증발지배형 화염이 형성되고, 연소율은 개선된 Hertz-Knudsen 식을 사용하여 입자 직경, 온도, 증기압의 함수로 표현된

다. 이때, 대류의 효과를 반영하는 변수는 입자 직경과 온도가 있는데, 연소하는 동안 입자 온도는 일정하게 유지되고, oxide shell 을 형성하면서 연소하는 마그네슘의 특성상 입자 직경도 거의 일정하게 유지된다. 따라서 유속 증가에 따른 대류 열전달의 증가 효과가 연소율에 반영되지 않으며, 연소율이 거의 일정하므로 연소시간도 외기 속도와 무관하게 거의 일정하다. 단계별로 외기 속도에 따른 에너지 전달 방법 별 공급된 에너지 상대적 비중 변화를 나타낸 Fig. 6 에서도 대류에 의해 점화지연시간은 단축되지만, 준정상상태의 연소 시에는 시간이 지나도 입자의 온도와 크기가 거의 일정하게 유지되기 때문에 외기 속도와 무관하게 대류 열전달의 비율이 일정한 값으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

3.3 외기 압력

외기 압력을 1~30 atm까지 바꿔가면서 단일 마그네슘 점화 및 연소에 대한 영향을 연구하였다. Shafirovich[19], Abbud-Madrid[25] 등에 따르면 압력이 증가함에 따라 점화 지연시간은 변하지 않는다고 보고하고 있는데, 본 연구 결과도 이와 동일한 경향을 나타내었다.

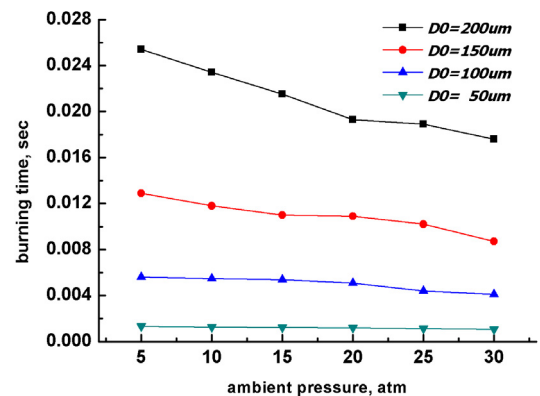


Fig. 7 Particle burning time according to the ambient pressure ($T_{amb} = 2500$ K)

반면에 마그네슘 입자의 연소시간은 압력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 알려져 있다 [19,22,27-28]. Shafirovich의 경우 산화제가 CO_2

이고, Abbud-Madrid 의 경우는 정성적 경향성만이 제시되어 있어 본 연구 결과와 직접적인 비교는 불가능하지만, Fig. 7에 제시한 바와 같이 압력이 증가함에 따라 연소시간의 감소 경향을 확인하였다. 한편, Yuasa[17] 등에 따르면 압력이 증가할수록 heat release rate가 증가하는 것으로 알려져 있는데, 이는 burning rate가 증가함을 의미한다.

Figure 8 에는 압력에 따른 화염온도와 입자 표면온도의 변화를 나타내었다. Shafirovich[19] 등에 따르면 압력이 증가할수록 연소 중 입자의 온도가 증가하고, Legrand[30]의 논문에서 제시된 Shiryayev 의 'THERMO'를 이용한 단일화염온도 계산결과 압력이 증가하면 화염온도도 증가하는 것으로 알려져 있다. 예측결과도 압력이 증가할수록 화염온도와 입자온도가 증가함을 확인하였다. 산화제에 따른 단일화염온도는 $O_2 > Air > CO_2$ 순서로 작아지는 것으로 알려져 있는데[25], 화염온도가 좀 더 낮은 값으로 예측된 것은 air를 산화제로 사용하는 본 연구와 달리 선행연구 결과는 O_2 산화제에 대한 것이기 때문이다.

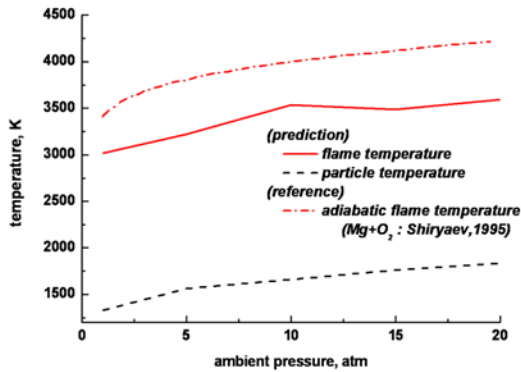


Fig. 8 Variation of flame and particle surface temperature with pressure

3.4 외기 온도

외기 온도를 1000~2500 K까지 변경하면서 그 영향을 평가하였다. 외기 온도에 따른 점화지연시간의 변화를 예측하여 Fig. 9 에 나타내었다. 외기온도가 증가할수록 점화지연시간은 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

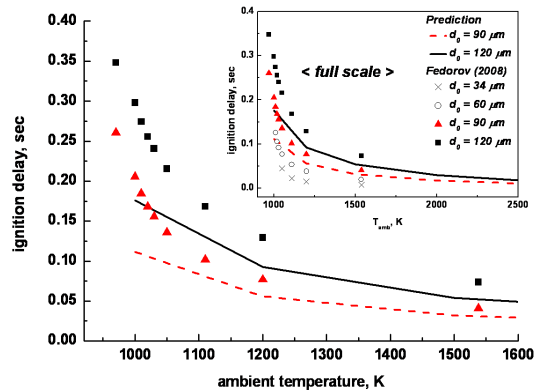


Fig. 9 Ignition delay according to the ambient temperature

선행연구[27]와 비교 시 입자크기의 영향을 배제하기 위하여 90 μm, 120 μm 의 두 가지 경우에 대하여 외기 온도 별로 점화지연시간을 예측하였는데, 해석 결과 Fedorov와 유사하게 외기 온도가 높을수록 점화지연시간은 감소함을 확인할 수 있었다.

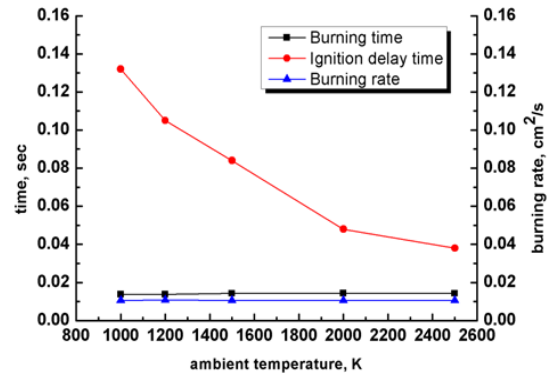


Fig. 10 Effect of ambient temperature on ignition delay time, burning time, burning rate($D_0=120 \mu m$)

Figure 10에는 외기온도에 따른 효과를 제시하였다. 준정상상태의 연소 동안에는 3000 K 이상의 고온 화염이 형성되므로 초기 외기온도와 무관하게 연소시간은 거의 일정한 것으로 예측되었다. 화염면으로부터 입자에 공급된 에너지는 마그네슘의 증발에 모두 사용되므로 입자의 온도 (T_p)는 일정하게 유지되고, 증발지배형 연소

를 모사한 Hertz-Knudsen 식에서 변수인 입자의 온도가 일정하게 유지되므로 연소율도 거의 일정한 값을 갖는다.

또한 외기 온도가 증가할수록 화염온도와 화염반경은 증가하는 것으로 예측되었다. 고온 외기일수록 점화지연 시간이 단축되면서 점화 단계에서의 마그네슘 산화물의 생성량은 감소하였고, 연소율은 일정한데 반해 총 산화물 생성량 중 deposition 되는 비율이 감소하기 때문에 연소단계에서의 마그네슘 deposition 질량이 감소하여 residue 입자의 질량도 감소하였다.

4. 결 론

단일 마그네슘 입자 연소 모델을 사용하여 주요 변수를 선정하고, 각 변수의 점화 및 연소특성에 대한 영향을 평가하기 위한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 초기 입자 크기, 대류, 외기 압력과 온도를 주요 변수로 선정하였고, 각 변수의 영향을 평가하여 선행 연구 결과와 비교·검토하였다. 마그네슘과 공기의 반응에 대한 선행 연구 데이터가 충분하지 않아 다양한 변수의 영향을 정량적으로 비교·평가하지는 못하였으나, 사용한 모델이 열역학적 이론에 근거한 deterministic 모델임에도 불구하고 현상을 잘 모사하고 있으며, 선행 연구결과와 유사한 결과를 예측함을 확인하였다.

초기 입자의 크기에 비례하여 점화지연과 연소시간은 증가하였고, 외기의 대류가 강할수록 점화지연시간이 단축되었다. 압력이 증가됨에 따라 점화지연시간은 변화가 없었으나 연소시간은 감소하였고, 고압 연소 시 입자온도와 화염온도 모두 증가하는 것으로 나타났다. 외기 온도가 증가함에 따라 점화지연시간은 크게 감소하였으나, 일단 화염이 형성되면 외기온도 보다는 화염온도의 영향을 더 크게 받기 때문에 연소율과 연소시간은 외기 온도와 무관하게 거의 일정하였다.

추후 마그네슘과 공기의 반응에 대한 데이터가 확보되면 보다 다양한 변수의 영향에 대한

검토가 가능할 것으로 예상된다. 연구에 사용된 결정모델은 이번 연구를 통해 고려된 몇 가지의 주요 변수에 대한 단순화를 통하여 마그네슘 화염 전산모사에 활용될 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Shafirovich, E.Y. and U.L. Goldshlegcr, Prospects for using co2-metal propellants in mars missions. American Astronautical Society, Scientific Technology Series, 2000(98): p. 341-350.
2. Shafirovich, E.Y., A.A. Shiryayev, and U.I. Goldshleger, Magnesium and carbon dioxide: A rocket propellant for Mars missions. Journal of Propulsion and Power, 1993. 9(2): p. 197-203.
3. Law, C.K. and F.A. Williams, Combustion of magnesium particles in oxygen-inert atmospheres. Combustion and Flame, 1974. 22(3): p. 383-405.
4. Fassel, W.M., et al., In : Summerfield M, editor. Solid Propellant Rocket Reasearch. New York: Academic press, 1960: p. 259-269.
5. Gusachenko, E.I., et al., Investigation of the condensed combustion products of magnesium powders II. dependence on particle size. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1974. 10(5): p. 588-595.
6. Gusachenko, E.I., et al., Investigation of the condensed combustion products of magnesium powders I. Dependence on

- pressure. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1974. 10(4): p. 476-482.
7. Foote, J.P. and R.J. Litchford. Powdered magnesium - Carbon dioxide combustion for mars propulsion. 2005. Tucson, AZ.
 8. Dreizin, E.L., C.H. Berman, and E.P. Vicenzi, Condensed-phase modifications in magnesium particle combustion in air. *Combustion and Flame*, 2000. 122(1-2): p. 30-42.
 9. Derevyaga, M.V., L.N. Stesik, and E.A. Fedorin, Critical conditions for the ignition of magnesium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1979. 14(6): p. 731-735.
 10. Fursov, V.P., et al., Role of the process of evaporation of volatile metals in the mechanism of their high-temperature oxidation and flaming. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1980. 16(3): p. 247-254.
 11. Gol'dshleger, U.I. and S.D. Amosov, Combustion Modes and Mechanisms of High-Temperature Oxidation of Magnesium in Oxygen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2004. 40(3): p. 275-284.
 12. Shevtsov, V.I., V.P. Fursov, and L.N. Stesik, Mechanism for combustion of isolated magnesium particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1977. 12(6): p. 758-763.
 13. Sullivan, H.F. and I. Glassman, Vapor-Phase Diffusion Flames in the Combustion of Magnesium, Calcium and Strontium. *Combustion Science and Technology*, 1971. 4(1): p. 241 - 256.
 14. Laurendeau, N.M. and I. Glassman, Ignition Temperatures of Metals in Oxygen Atmospheres. *Combustion Science and Technology*, 1971. 3(2): p. 77 - 82.
 15. Takeno, T. and S. Yuasa, Ignition of Magnesium and Magnesium-Aluminum Alloy by Impinging Hot-Air Stream. *Combustion Science and Technology*, 1980. 21(3): p. 109 - 121.
 16. Gurevich, M., V. Lydkin, and A. Stepanov, Ignition and combustion of a gas suspension of magnesium particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1970. 6(3): p. 298-303.
 17. Yuasa, S. and A. Fukuchi. Ignition and combustion of magnesium in carbon dioxide streams. in *Symposium (International) on Combustion*. 1994.
 18. Miller, T., J. Walter, and D. Kiely. A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion. 2002.
 19. Shafirovich, E.Y. and U.I. Goldshleger, The superheat phenomenon in the combustion of magnesium particles. *Combustion and Flame*, 1992. 88(3-4): p. 425-432.
 20. Khaikin, B.I., V.N. Bloshenko, and A.G. Merzhanov, On the ignition of metal particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1970. 6(4): p. 412-422.
 21. Heesung Yang and W. Yoon, Modeling of aluminum particle combustion with emphasis on the oxide effects and variable transport properties. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010. 24(4): p. 909-921.
 22. Medvedev, A.E., A.V. Fedorov, and V.M. Fomin, Mathematical modeling of metal particle ignition in the high-temperature flow behind a shock. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1982. 18(3): p. 261-265.
 23. Valov, A.E., Y.A. Kustov, and V.I. Shevtsov, Spectroscopic study of the combustion of solitary magnesium particles in air and in carbon dioxide. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1995. 30(4): p. 431-436.

24. Fedorov, A.V., Numerical and analytical study of magnesium particle ignition. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1996. 32(1): p. 64-72.
25. Abbud-Madrid, A., et al., Combustion of magnesium with carbon dioxide and carbon monoxide at low gravity. *Journal of Propulsion and Power*, 2001. 17(4): p. 852-859.
26. Fedorov, A.V. and D.A. Tropin, Mathematical model of magnesium ignition in an extended range of parameters. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2008. 44(5): p. 552-559.
27. Zenin, A., G. Kuznetsov, and V. Kolesnikov, Burning of magnesium particles under zero-gravity and convective blow conditions. *Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics*, 2008. 2(4): p. 579-588.
28. Abbud-Madrid, A., et al., Combustion of magnesium with carbon dioxide and carbon monoxide at low gravity. *Journal of Propulsion and Power*, 2001. 17(4): p. 852-859.
29. Svehla, R.A., Estimated Viscosities and Thermal Conductivities of Gases at High Temperature, in NASA TR. 1962, NASA.
30. Legrand, B., et al. Ignition and combustion of levitated magnesium particles in carbon dioxide. in 26th Symposium (International) on Combustion. 1998: COMBUSTION INSTITUTE.