



성 흥 계 | 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, 교수 | e-mail : hgsung@kau.ac.kr
 윤 시 경 | 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과, 대학원 | e-mail : smile8620@kau.ac.kr

화석연료의 과다 사용으로 인한 에너지 고갈과 환경오염 문제는 청정 고 에너지인 알루미늄 등의 금속 입자가 대안이 될 수 있다. 그 중에서도 나노 크기의 알루미늄은 일반적으로 사용하는 마이크로 크기의 알루미늄보다 낮은 점화온도와 높은 반응률로 그 효율성이 매우 높다.

지금까지 인류는 화석연료를 산업동력의 에너지원으로 사용하였고 현재도 사용 중이지만 머지않아 화석연료는 고갈될 것으로 보인다. 수 년 전 미국의 과학 주간지 '사이언스'가 "석유 위기가 다가오고 있다"라는 제목의 특집을 통해 석유 고갈 전망에 대하여 자세히 소개했다. 주로 지질학자들이 작성한 이 보고서들은 공통적으로 현재의 저유가 시대가 2000년 이후 머지않아 끝날 것이며, 중동의 존도가 '70년대 오일 쇼크 때문에 더욱 높아져 이들 국가의 세계석유시장 지배가 한층 강화될 가능성이 있음을 시사했다. 그리고 현재 여러 정황들이 그 예측을 뒷받침하고 있다.

이와 더불어 화석연료를 사용함으로써 야기되는 환경문제도 심상치 않다. 한 방송매체에서 "북극의 눈물"이라는 다큐멘터리를 통해 지구온난화의 심각성을 고발한 적이 있다. 이 글을 준비하는 오늘에도 2-3일이면 한반도 면적에 해당하는 북극의 빙하가 줄고 있다고 미항공우주국(NASA)에서 경고한다. 이는 대부분 온실가스를 배출하는 연료를 사용함으로써 야기된 결과이다. 많은 학자들에 의해 배기가스에 포함된 NOx, CO2 등의 온실가스를 감소시키는 기술이 연구되고 있지만, 온실가스에 대한 근본적인 해결책의 미흡과 산업발달에 의해 더 많은 에너지원이 소요되어야 하는 현실적인 요구와 맞물려서, 근원적인 대책 수립(즉, 환경오염물질을 배출하는 원료의 사용을 극도로 제한하는 등)에는 매우 미흡한 실정이다. 이러한 시점에서 새로운 청정 에너지원의 연구 및 개발은 선택이 아닌 필수

라고 하겠다.

금속 연료

청정에너지

오늘날 인류는 지구온난화라는 심각한 문제에 직면해 있다. 인류의 거주공간인 지구의 지표 부근 대기와 해양의 평균 온도가 지난 수십 년간 지속적으로 상승했으며, 앞으로도 꾸준히 상승할 것으로 과학자들은 예측하고 있다. 국제적 노력에 부응해 각국은 하이브리드 자동차 개발, 탄소세 부과, 탄소배출권 거래제 등 온실가스 배출량을 감축하기 위한 노력을 경주하고 있다. 우리 정부도 기후변화에 대응하기 위한 계획 수립과 녹색산업 육성방안 마련 등 지구온난화에 적극 대응하고 있다.

이러한 시점에서 화학반응을 통해 수소와 무독성 금속 산화물(알루미늄의 경우 알루미늄(Al₂O₃), 마그네슘의 경우 마그네시아(MgO))를 생성하는 금속의 연소 반응은 매우 바람직한 에너지원이 될 수 있다. 알루미늄(Al)과 마그네슘(Mg)은 보편성(가격), 발열량, 점화 특성이 상대적으

표 1 여러 가지 연료의 반응열

반응	반응열
$C_3H_8 + 5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 18.8N_2$	-2.3 (KJ/g)
$C_3H_8 + 5(O_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	-10 (KJ/g)
$Al(s) + 1.5H_2O(l) \rightarrow 0.5Al_2O_3(s) + 1.5H_2(g)$	-15 (KJ/g)
$Mg(s) + H_2O(l) \rightarrow MgO(s) + H_2(g)$	-13 (KJ/g)

로 우수하기 때문에 고체 로켓 추진제의 첨가물로 오랜 시간 이용되어 왔다. 알루미늄과 마그네슘 가운데, 점화 특성은 마그네슘이 우수하지만, 마그네슘의 낮은 증기압으로 인한 안전상의 이유와 성능 측면에서 유리한 알루미늄이 보다 널리 이용되어 왔다. 더불어 알루미늄과 마그네슘의 수반응 후 생성되는 수소는 산업현장에서 연료전지를 통해 재활용하여 에너지 효율을 높일 수도 있다.

고에너지 밀도

금속 분말의 수반응(물과 반응)은 발열반응이며 일반적으로 사용하는 탄화수소 계열의 연료보다 더욱 많은 열을 발생한다(표 1 참조). 이러한 특성 때문에 금속연료와 물 또는 다른 산화제(공기, 이산화탄소 등)와의 반응은 고 에너지원을 필요로 하는 폭발물이나 추진시스템에 사용되어 왔다. 금속 중에서도 알루미늄의 반응이 반응열 측면에서 가장 우수하다.(표 1)

나노 금속입자의 유용성

현재 과학계는 나노 열풍의 도가니라고 해도 과언이 아니다. 1959년 미국 캘리포니아 공대 대학원 물리학회 연례 모임에서, 노벨 물리학상 수상자인 리처드 파인만(Richard Feynman)에 의해 처음으로 나노 과학이 언급된 이후 1983년 스위스에서 주사형 터널링 현미경(scanning tunneling microscope)이 개발되면서 나노 기

술은 더 이상 공상과학에 그치지 않고 현실화되기 시작했다. 이후 매년 나노 관련 논문이 매우 활발하게 발표되고 있고, 많은 연구개발 비용이 나노 관련 산업에 투자되고 있다. 이러한 열풍에 힘입어 추진 및 연소 분야에서도 나노 크기 입자의 연소(그림 1)에 관심을 갖기 시작했다. 아직 나노 입자의 연소에 대한 연구는 미비하고 초기 단계에 있지만, 그렇기 때문에 이 분야에 대한 향후 연구 발전 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

확산 연소와 화학반응속도 연소

지금까지 연구된 바에 의하면 나노 크기의 입자와 마이크로 크기의 입자의 연소 메커니즘은 매우 다른 것으로 보고되고 있다(그림 2). 연소가 입자 표면에서 일어난다고 가정하고 반응률을 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{m}_R'' = Y_{Ox,\infty} \left(\frac{k \frac{\rho D}{R}}{k + \frac{\rho D}{R}} \right)$$

(k = 화학반응계수, D = 질량확산계수)

이때, 확산에 의해 지배되는 마이크로 입자의 반응은 화학반응속도가 산화제의 확산율보다 빠르기 때문에($k \ll \frac{\rho D}{R}$) 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{m}_R'' = Y_{Ox,\infty} \frac{\rho D}{R}$$

반대로 나노 입자의 반응은 화학반응속도에 의해 지배되는 반응이다. 이 경우, $k \gg \frac{\rho D}{R}$ 이며 반응률은 입자크기와 무관하게 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_R'' = k Y_{Ox,\infty}$$

연소 성능 비교

마이크로 입자는 연소 시간이 오래 걸리고 높은 점화 온도가 요구된다. 따라서 금속 입자의 반응률을 증가(점화 온도 감소, 반응 시간 감소)시켜 금속 입자의 사용 및 적용 범위의 확대뿐만 아니라 이를 통한

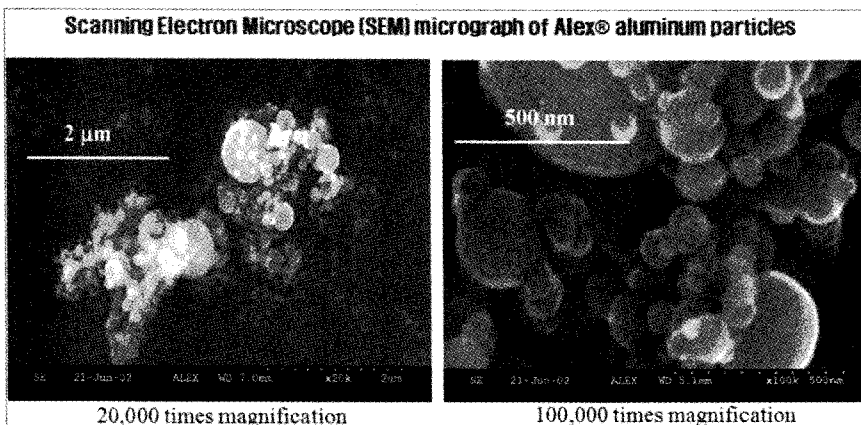


그림 1 나노 크기 입자⁽¹⁾

연소 시스템에 적용할 수 있는 안정화 방법을 찾아야 한다. 나노 입자는 이러한 문제에 대한 대안으로 제시될 수 있다. 나노 입자는 짧은 점화 지연 시간, 연소 시간 감소, 더욱 완벽한 연소, 높은 표면적 등의 특징으로 인해 마이

크로 입자에 비해 우수한 점이 많다(그림 3, 4 참조). 하지만 현재는 나노 금속 입자의 연소현상에 대한 이해는 아직 정확한 연소 모델도 없을 정도로 기초 수준이다. 마이크로 입자의 연소 연구와 같이 연소율 측정이 우선 이루어져야

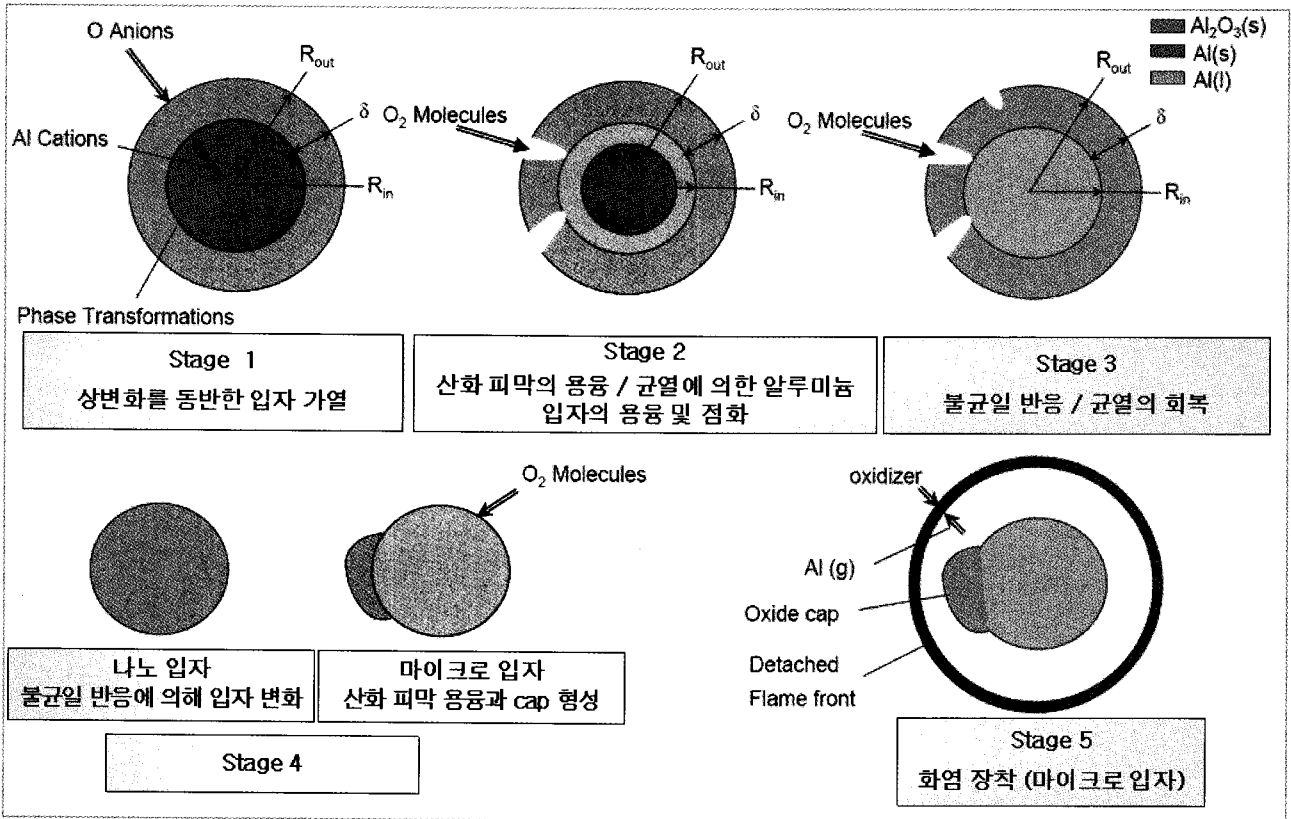


그림 2 알루미늄 마이크로 입자와 나노 입자의 연소 과정⁽²⁾

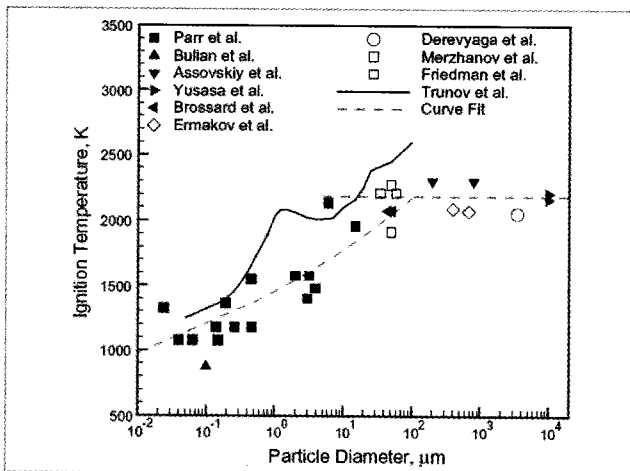


그림 3 알루미늄 입자 크기에 따른 점화 온도⁽³⁾

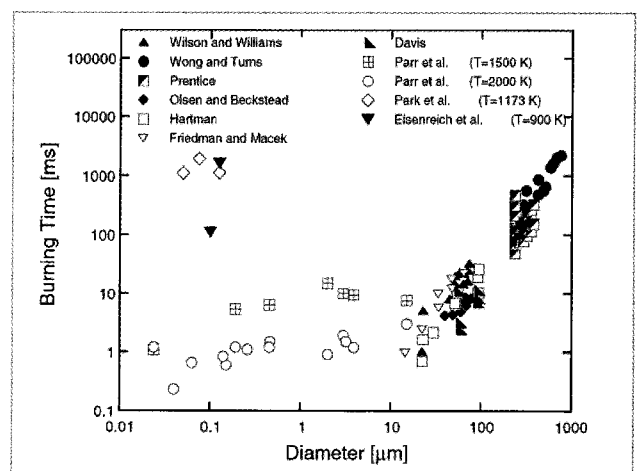


그림 4 알루미늄 입자 크기에 따른 연소 시간⁽³⁾

하지만, 나노 크기의 단일 입자는 입자의 크기가 너무 작아서 단일입자의 연소 속도 측정은 거의 불가능하다. 따라서 나노 입자의 연소 실험은 단일 입자의 연소 실험 대신 나노 입자와 산화제의 혼합물의 연소로 대체하여 연구 중이다.

그림 5는 나노(50nm)와 마이크로 알루미늄(3.2 μ m)의 혼합물이 공기와 연소 반응을 해석한 결과이다. 나노 알루미늄

의 함량을 20%에서 80%로 증가시키면 연소속도는 약 3배가 증가하고 화염두께는 약 1/2로 얇아짐을 확인할 수 있다. 이는 연소속도와 화염온도를 조절할 수 있음을 의미하는 것으로서, 공학적 응용 가능성을 보여주는 것이다.

각종 산화제에 따른 연소 특성

현재 나노 및 마이크로 크기의 알루미늄과 마그네슘의 연소 연구를 위하여 다양한 산화제 및 연소 조건의 연소 실험을 세계 우수 대학 및 연구기관에서 수행 중이다.

그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 산화제의 종류에 따라 화염특성이 다르게 나타난다. 그림 6은 메탄과 알루미늄 그리고 알루미늄의 산화제에 따른 화염 구조를 보여주고 있다. 일반적으로 사용하는 화석연료인 메탄과 달리, 알루미늄은 공기와 반응 시 붉은색 계열의 화염이 나타나며, 산화제가 물인 경우 화염의 밝기는 약해지고 화염 확산이 증가함을 확인할 수 있다.

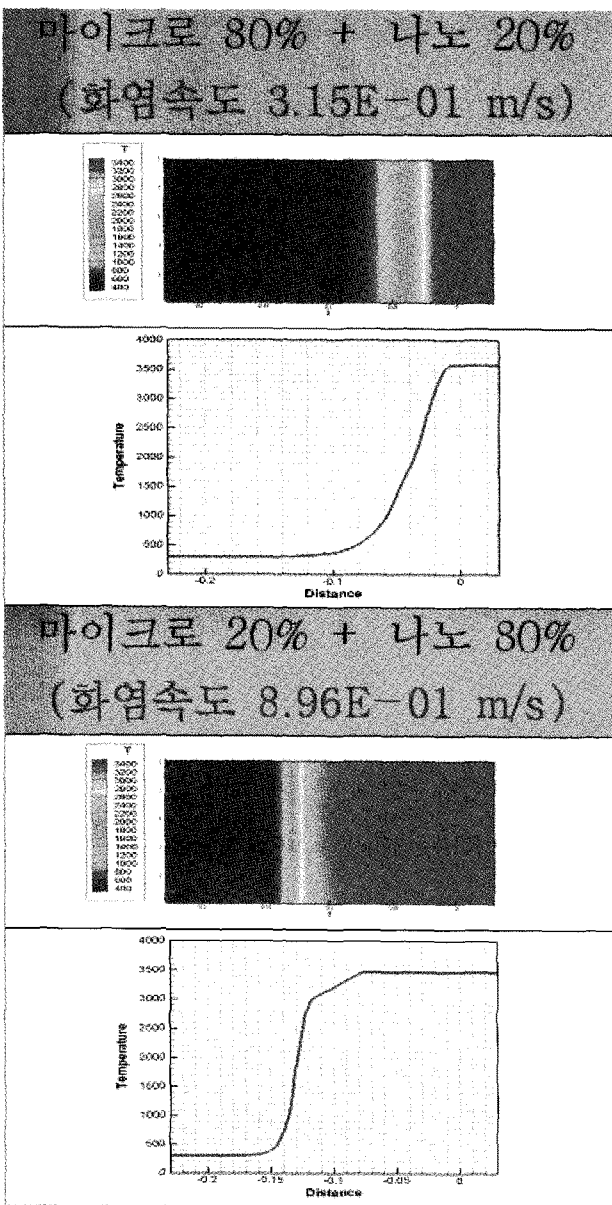


그림 5 동일 시간에서 측정된 화염구조 및 연소 속도 모사 결과 ($\phi=0.85$, 본연구팀의 연구결과)

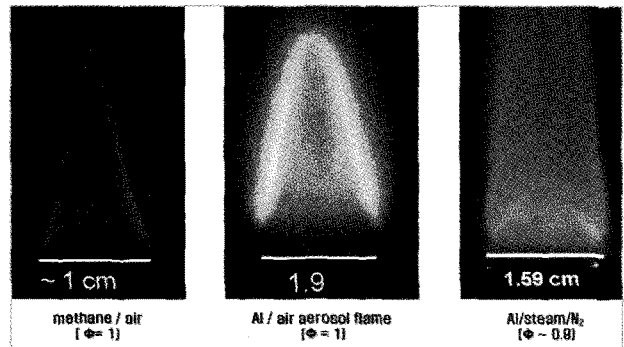


그림 6 다양한 산화제에서 알루미늄 화염 구조 및 색깔⁽⁴⁾

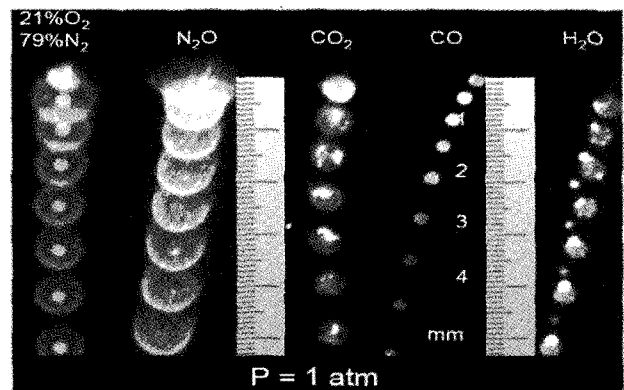


그림 7 다양한 산화제에서 알루미늄 연소($d=200\mu$ m at 1 atm)⁽⁴⁾

그림 7에서 산화제가 N_2O 인 경우 화염이 입자 반지름의 몇 배 떨어진 곳에 위치하는 반면, CO_2 인 경우 입자 표면 근처에 화염이 형성되었고 CO 인 경우 화염이 형성되지 않았다. 또한 물과의 반응에서는 입자의 균열이 뚜렷이 관찰되었다.

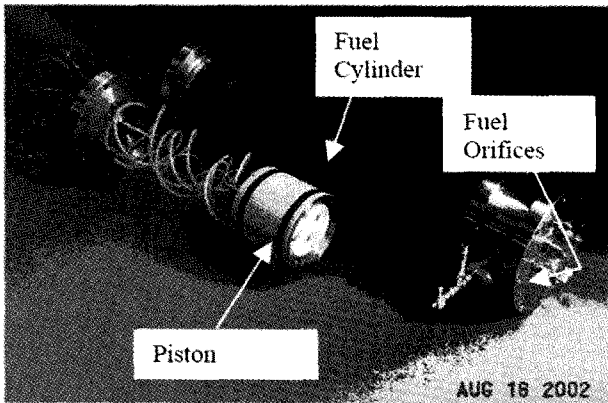


그림 8 나노 유체(Mg)를 이용한 연소실험장치⁽⁶⁾

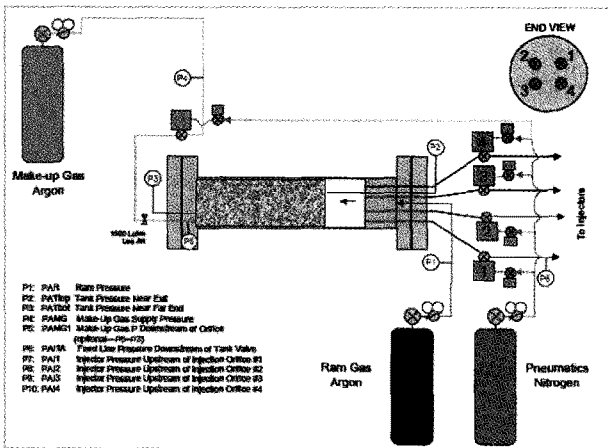


그림 9 나노 유체를 이용한 연소속도 측정장치⁽⁶⁾

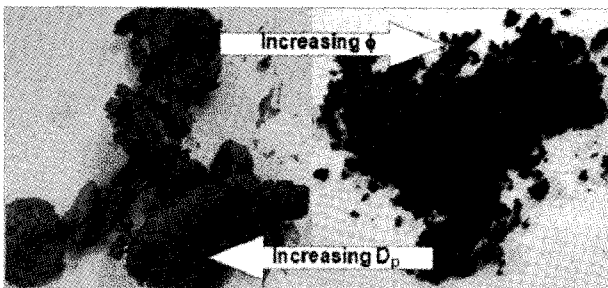


그림 10 당량비와 입자 크기에 따른 형상⁽⁶⁾

나노 금속 입자의 적용 방법

나노 유체

나노 유체는 나노 입자들이 유체 내에 아주 낮은 농도로 분포되어 있다. 나노 유체는 나노 입자가 포함되어 있지 않는 일반 유체보다 열전도율이 높고 확산, 복사열, 이온 전달이 우수해 각광 받고 있다. 이와 더불어 나노 입자들은 매우 작고 유체 속에 소량만 첨가되어 있기 때문에 점성, 밀도 등의 영향이 미비하며 분산 안정성이 우수하다. 마이크로 입자들은 유체에 첨가했을 때 쉽게 침전되는 반면, 나노 유체들은 작은 질량, 표면적 크기 때문에 상당히 오랜 시간동안 유체에 부상할 수 있으므로 장시간 고른 입자 분포도를 유지할 수 있는 장점이 있다.

젤

입자 함유율이 높은 젤 타입의 연료는 우주추진과 방위 산업에서 큰 관심을 받고 있다. 젤 타입은 액체 추진제와 고체 추진제의 장점을 가지고 있는 연료형태이다.

그림 10은 나노 알루미늄과 물의 혼합물이 젤 형태로 제조된 것이다. 당량비를 줄이거나 입자 크기를 증가시키면 젤(결착한 점토) 형태가 되고 반대의 경우 분말 형태가 된다.

테르밋

테르밋(Thermites) 반응은 일반적으로 금속과 금속 또는 비금속 산화물 간의 반응을 의미한다. 이 반응은 높은

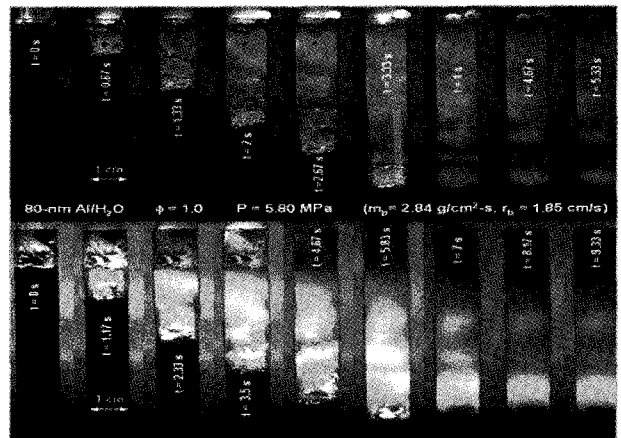


그림 11 젤타입 nAl + H₂O의 연소⁽⁷⁾

반응열로 인해 스스로 반응을 지속할 수 있으며, 일반적으로 열전도에 의한 반응이라고 알려져 있다.

TNT와 니트로글리세린과 같은 대부분의 고체 에너지 물질은 동일한 물질로 이루어져 있다. 이러한 물질을 단일 분자 에너지 물질이라고 하는데, 이 물질을 구성하는 분자는 탄소와 산소의 결합으로 이루어져 있으며 이러한 특징 때문에 외부의 산소 첨가 없이 연소될 수 있다. 이런 물질의 연소는 화학반응속도에 의해 지배되는 반응이며 매우 높은 폭발성을 가지고 있다. 반면 단일 분자 물질과는 달리 테르밋은 연료와 산화제 입자의 혼합물이므로 크기는 일반적으로 1~100 μ m이다. 제작에서부터 연료 입자와 산화제 입자가 분리되어 있기 때문에 연소는 확산에 의해 지배된다.

나노 입자를 이용한 나노 테르밋에 대한 연구는 1990년대 Los Alamos National Laboratory(LANL)에서 처음 시작하였다. 이 연구에서 LANL은 20~50nm의 분말 형태의 Al과 MoO₃혼합물이 일반적인(마이크로 입자) 분말 형태의 테르밋보다 반응속도가 약 1,000배 정도 빠르다는 것을 확인하였다. 이는 각각의 반응물 사이의 확산 거리가

줄어들기 때문이다. 또, 이 연구에서 주목할 만한 것은 Al과 MoO₃의 이온혼합물의 반응 엔탈피가 TNT보다 약 12% 큰 -1.12kcal/g이라는 것이다.

적용 사례

나노 금속 입자의 특성을 공학적 물리량으로 표현할 수 있고 연소반응을 제어할 수 있는 기술이 개발된다면 그 적용 분야는 매우 다양하다. 그중 산업용과 군사용의 대표적 적용 가능 사례 두 가지를 소개한다.

산업 발전기

높은 에너지 함유량과 안전성이 우수한 금속 연료는 산업 현장에서 사용할 수 있을 것이다. 현재 자연 에너지(풍력, 수력 등)를 이용한 발전기를 제외한 대부분의 발전기는 화석연료(화력 발전)를 사용한다. 그림 12는 금속연료(알루미늄)를 산업 발전기에 적용 한 시스템의 구상도이다. 알루미늄 금속 연료의 연소반응을 통하여 발생하는 에너지는 터빈의 구동 에너지로 사용하고, 생성물의 수소를

연료전지의 작동매체로 사용한다. 이는 에너지 사용 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 환경에 유해한 배출물이 없으므로 청정 환경을 유지할 수 있다. 더욱이 화석연료를 대신하여 금속 연료를 사용하므로 온실가스 배출의 걱정을 줄일 수 있다.

초공동 비행체

그림 13은 초공동을 이용한 차세대 초고속 수중 비행체의 모형도이다. 일반적인 수중 비행체와는 다르게 직접 물과 접촉하지 않고

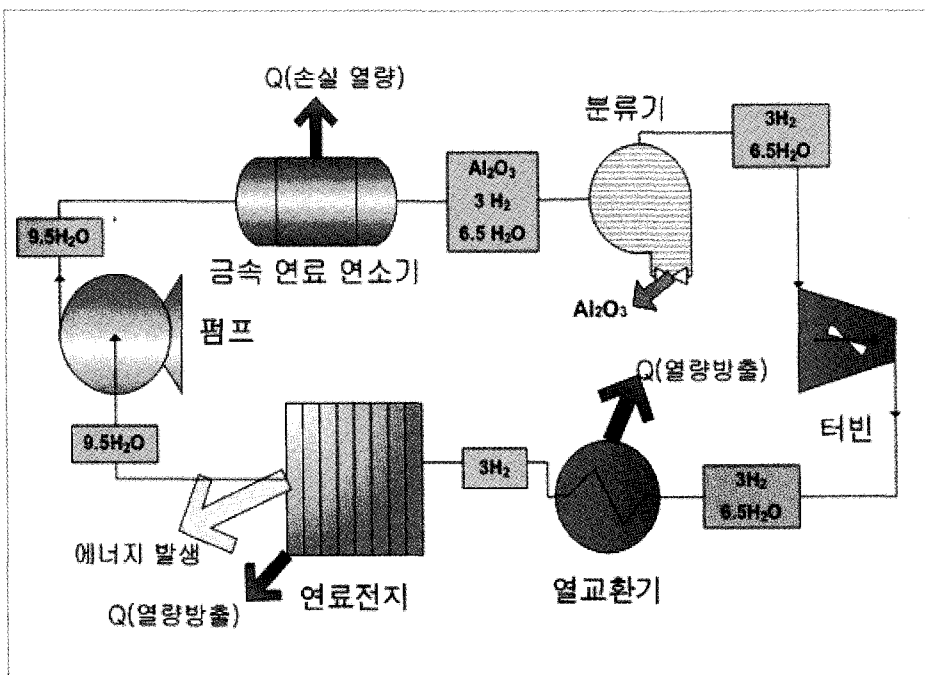


그림 12 금속 연료를 이용한 산업 발전기

기포를 발생시켜 운동체가 수중을 운행함에도 불구하고 기포 속을 운행하기 때문에 항력이 획기적으로 감소하여 초고속으로(300km/h~720km/h) 주행이 가능하다. 또, 운행 중 포집한 해수와 금속연료(알루미늄, 마그네슘 등)를 반응시켜 에너지를 얻을 수 있다. 해수를 운행 중에 포집하는 것은 공기흡입식 엔진과 같이 산화제를 비행체에 직접 탑재하지 않고 운행 중에 포집하여 추진력을 발생시키기 때문에 무게도 크게 줄일 수 있다. 이 시스템은 현재 러시아와 독일 등에서 실용화 중이며 미국도 이에 대응하여 현재 연구 중이다.

참고자료

(1) <http://www.ae.gatech.edu/people/vigor.yang/>
 (2) Puneesh Puril and Vigor Yang, "Thermo-Mechanical Behavior of Nano Aluminum Particles with Oxide Layers". 2008-938, 2008.
 (3) Richard A. Yetter, Grant Risha, Steven F. Son, "Metal particle combustion and nanotechnology". Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 1819-1838.
 (4) P. Bucher, R. A. Yetter, F. L. Dryer, T. P. Parr, and D. M. Hanson-Parr "Flame Structure of Aluminum Particle Combustion in O₂, CO₂, and

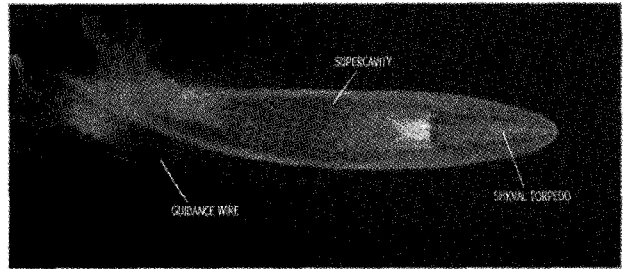


그림 13 초공동 비행체의 운행 모형도

N₂O Oxidizers," The Combustion Institute, 2421-2429, 1998.
 (5) Miller, T.F., Herr, J.D., "Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water," AIAA 2004-4037, 2004.
 (6) Risha, G.A., Son, S.F., Yetter, R.A., Yang, V., and Tappan, B.C. (2007) "Combustion of nanoaluminum and liquid water", Proc. Combust. Instit., 31, 2029-2036.
 (7) G.A. Risha, J.L. Sabourin, S.F. Son, B.C. Tappan, V. Yang, R.A. Yetter, "Combustion and conversion efficiency of nanoaluminum, water mixtures", Combust. Sci. Technol. 180 (2008) 2127-2142.

기계용어해설

상미그 용접(MIG Welding)

용접 와이어 자체가 소모전극이 되어 용착되는 방식으로, 불활성 가스 속에서 이루어지는 이너트 가스 아크 용접의 일종.

마일포스트(Milepost)

선박의 해상속력 시운전에서 속력을 결정하는 기준이 되는 것으로, 일정한 간격을 두고 세워진 표주.

단면계수(單面係數; Modulus of Section)

보의 중립축에서 외표면까지의 길이로 단면의 중립축에 관한 단면 2차 모멘트의 값을 나눈 단면계수를 Z, 단면에 작용하는 휨 모멘트를 M, 외표면의 최대 휨 응력을 σ 라 하면 $\sigma=M/Z$ 의 관계가 있는 것.