Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.4.009>

비전해 방법을 이용한 니켈 코팅 알루미늄 분말 제조 및 열물성 평가

이상협^a · 임지환^a · 노관영^a · 윤웅섭^{a,*}

Fabrication and Thermophysical Properties of Nickel-coated Aluminum Powder by Electroless Plating

Sanghyup Lee^a · Jihwan Lim^a · Kwanyoung Noh^a · Woongsup Yoon^{a,*}

^aSchool of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

*Corresponding author. E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

ABSTRACT

In this study, in order to improve the ignitability of high energy aluminum powder, natural oxide films (alumina) were chemically removed, and instead nickel coat was applied. We used an electroless plating for nickel coating and confirmed quantitatively and qualitatively a time-dependent degree of nickel coating through analysis of surface by SEM/EDS. We also conducted element analysis by XRD and thermal properties by TGA/DSC in air oxidizer environment. These results explained the ignition enhancement mechanism of the nickel-coated aluminum powder in air. The difference between coated and un-coated aluminum powder, the effectiveness of coated powder has better ignitability.

초 록

본 연구에서는 고에너지 알루미늄 분말의 점화성 향상을 위해 자연상태 알루미늄 산화막을 화학적으로 제거하고 니켈 코팅을 수행하였다. 니켈 코팅은 무전해 방법을 사용하였으며 SEM/EDS에 의한 표면 분석을 통해 시간에 따른 니켈 코팅 정도를 정성·정량적으로 확인하였다. 또한 XRD에 의한 화학종 분석과 TGA/DSC를 이용한 공기 환경 내에서의 열물성 분석을 수행하였고 이를 통해 공기 산화제 분위기에서의 니켈 코팅 된 알루미늄 분말의 점화촉진 메커니즘을 설명하였다. 이러한 결과를 통해 니켈 코팅 된 알루미늄이 코팅 되지 않은 알루미늄보다 좋은 점화성을 갖는 것을 정성적으로 확인하였다.

Key Words: Nickel Coated Aluminum Particle(니켈 코팅 된 알루미늄 입자), TGA(열중량분석), DSC(시차주사열량계), Electroless Plating(무전해 코팅), Al Ignition(알루미늄 점화)

Received 6 June 2014 / Revised 3 July 2014 / Accepted 10 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 춘계학술대회(2014. 5. 29-30, 서울대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

알루미늄은 고에너지 밀도를 갖는 금속 연료

로서 다양한 분야에서 활용 가치가 높으나 약 2300 K의 높은 용점을 갖는 산화막으로 피복되어 있어 접화가 용이하지 않고, 연소 반응시 알루미늄 분말을 응집하게 하여 연소효율을 감소시킨다[1]. 이를 해결하기 위해 해외에서는 많은 연구가 수행되어 왔으나 대부분 군사용 목적으로 활용되는 기술 특성상 기술보안을 위해 공개되어있지 않으며, 국내에서는 연구 초기 단계로서 제한적인 곳에서만 이뤄졌는데, 이 또한 미크론 크기의 알루미늄 표면에 반응성이 좋은 나노 크기의 알루미늄을 증착하는 방법으로서 산화에 취약하며 안전성과 경제성에 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 고에너지 알루미늄의 점화성 향상을 위해 많은 연구에서 보고하였듯이 입자 표면 코팅을 통한 점화촉진에 주목하였다. 일부 선행 연구에서는 탄소[2], 구리[3], 철[4-6], 그라파이트[7], 테프론[8] 등과 같이 다양한 물질을 코팅 재료로 사용하였으나 대부분은 니켈을 표면 코팅 재료로 사용하였다[9-11]. 그 이유는 니켈의 다양한 장점 때문이며 구체적으로 다음과 같다. 니켈과 알루미늄 사이의 자가 증식 고온합성(SHS)에 의한 소결반응을 통해 니켈-알루미늄 이드 합금이 생성되는데, 알루미늄의 녹는점 약 900 K에서 엔탈피 차이에 의한 금속 원자간의 결합이 이루어져 열이 발생하게 되고, 이러한 에너지로 인해 점화가 촉진된다[11]. 또한 니켈 산화막 코팅의 물리화학적 특징으로 인하여 자연 상태 알루미늄의 산화막인 알루미늄과 달리 다공 형태로 인한 열출입이 용이하고 높은 부식저항력으로 인해 초기 점화 및 연소 반응시 알루미늄의 열화에 의한 산화를 방지한다[12]. 추가적으로 니켈의 용해점은 약 1728 K 이고 알루미늄의 용해점은 약 933 K 로서 니켈 코팅을 통해

고온 환경에서 열·물리적 보호성을 갖는 동시에 알루미늄의 용해점 약 2300 K보다는 낮아 점화성이 좋고, 알루미늄 표면 위에 니켈로 코팅할 경우 연소 도중 미연 된 알루미늄이 응집되어 연소를 방해하는 효과가 줄어든다는 연구 결과가 보고되었다[11]. 따라서 본 연구에서는 알루미늄의 점화촉진 방법으로 니켈 코팅을 선정하였고 이에 관한 연구를 진행하였다.

니켈 코팅 된 알루미늄을 연구하는 다양한 그룹에서는 대부분 Technion Israel Institute of Technology의 Rosenband[6] 분말을 사용하였다. 그러나 이 분말은 평균 입도가 9, 32 μm 로 한정되어 있고 균일한 코팅이 이뤄져 있지 않으며 니켈 함량도 5% wt. 로 제한적이다. 또한 소수의 연구자들에게만 공유되고 입자 제조방법도 공개되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 다양한 니켈 함량을 가진 알루미늄 분말을 무전해 방법으로 제조하였고, XRD(X-ray Diffraction) 화학종 분석을 수행하여 코팅 여부를 검증하였다 또한 SEM(Scanning Electron Microscopy)과 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 표면 분석 기법을 활용하여 시간에 따른 니켈 코팅 정도를 정성·정량적으로 확인하였으며, TGA(Thermogravimetric Analysis)와 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 열물성 분석기법을 활용하여 니켈 함량에 따른 점화촉진 메커니즘을 비교·분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 알루미늄 분말의 무전해 코팅 방법

본 연구에서 사용한 알루미늄 분말은 순도 99.9%의 구형 분말이며 평균입도는 약 18 μm

Fig. 1 Electroless plating method : pre-treatment process and nickel plating.

Fig. 2 Pure aluminum particle size distribution.

Fig. 3 Pure aluminum particle : after etching.

(마이크로메탈)이다. Fig. 1은 전체 코팅 과정을 나타낸 모식도이고 Fig. 2와 3은 표면이 제거된 알루미늄의 입도 분석과 SEM 촬영 결과이다. 제시한 바와 같이 니켈 코팅 된 알루미늄 분말을 제조하기 위해서는 입자 표면세척 과정과 자연 산화막 제거과정(Etching)이 필요하고 이를 위해 크롬산(CrO_3 , Sigma - Aldrich), 인산(H_3PO_4 , Sigma - Aldrich), 3차 증류수 혼합액을 이용하여 약 323 K에서 10분간 교반하였다. 또한 재산화 방지를 위해 353 K에서 24시간 진공건조 후, 진공 데시케이터를 이용하여 항온항습을 유지하였다.

본 연구에서 사용한 무전해 코팅은 Table 1에서 제시한 바와 같이 붕수-디메탈아민 착물이 포함된 코팅 용액을 사용하는 방법으로 코팅 온도 조건은 338 K이다. 니켈 코팅 질 및 두께를 균일하게 하기위해 진탕 항온수조를 사용하여 100

Table 1. Electroless coating solvent.

Composition	CAS No.
Nickel Sulfate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	7786-81-4
Ammonium Hydroxide	1336-21-6
Glycin	56-40-6
Citric Acid	77-92-9
Borane dimethylamine complex	74-94-2
Distilled Water	7732-18-5

rpm으로 교반하였고 P.I.D(Proportional Integral Derivative) 제어를 사용하여 일정한 온도 조건을 유지하였다. 실험은 3, 6, 9, 12, 24시간 수행하였고 각 조건에 따른 표면 분석과 열물성 분석을 수행하였다.

2.2 니켈 코팅 된 알루미늄 분석 방법

니켈 코팅 된 알루미늄 분말의 표면 분석을 SEM/EDS(JEOL, JCM6000), XRD(RIGAKU, Ultima IV), ICP-OES(Perkinelmer, OPTIMA 8300)을 이용하여 분석하였다. 시간에 따른 코팅 정도를 SEM 이미지 분석을 통해 정성적으로 확인하였고, XRD 분석을 통해 검증하였다. 코팅 된 니켈의 질량분율을 EDS 분석 및 ZAF 보정 기법[13]을 사용하여 측정하였고, ICP-OES 방법을 사용하여 확인하였다.

열물성 분석은 TGA/DSC(TA Instruments, SDT-Q600)를 이용하였다. 실험은 각 시편당 약 40 mg을 사용하였고, 승온은 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 진행하였다. 분석 온도 범위는 300 ~ 1750 K이며 산화제는 99.9%의 고순도 공기를 사용하였고, 공급 유량은 100 ml/min이다.

3. 실험 결과 및 분석

니켈 코팅 된 알루미늄의 SEM 이미지를 Fig. 4에 나타내었다. 제시한 바와 같이 니켈 코팅

Fig. 4 SEM image of nickel coated aluminum particles: magnification (a) x2700, (b) x5000 (9 hour coating condition).

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of nickel-coated aluminum(a) and pure aluminum(b).

층이 산화막이 제거된 알루미늄 표면위에 피복되었음을 확인 할 수 있었다. 또한 코팅 시간에 따른 SEM 이미지 분석을 통해 교반 시간이 증가할수록 니켈층의 두께가 성장함을 가시적으로 관찰하였다.

본 연구에서 니켈 검출을 위해 사용한 방법은 XRD 방법으로서, 특정한 입사각을 갖는 X선을

Fig. 6 EDS results of nickel weight percent of aluminum powder according to plating time.

Fig. 7 EDS and ICP-OES results of nickel weight percent of aluminum powder according to plating time.

조사하여 회절 되는 스펙트럼의 강도를 측정하여 원소를 검출한다. 이렇게 발생하는 특정한 스펙트럼의 패턴 비교를 위해 사용한 데이터베이스는 JCPDS[14]이며 PCPDFWIN[15]을 기반으로 분석하였다. Fig. 5는 자연상태 알루미늄과 9시간 코팅된 알루미늄의 XRD 패턴 분석 결과이다. 산화막이 제거된 순수 알루미늄과 비교하였을 때 코팅된 알루미늄에서 니켈 고유의 X-ray 회절 패턴이 관찰되었고 이를 통해 알루미늄 분말 표면에 니켈이 코팅되었음을 확인하였다.

알려진 바와 같이 니켈과 알루미늄의 소결반응은 1:1 합금 반응이고, 50% 이상의 니켈 코팅

Fig. 8 TGA/DSC results of nickel powder.

함량에서는 오히려 점화성이 감소된다는 연구가 보고 되었으므로[16], SHS 반응을 이용한 알루미늄의 점화촉진을 위해서는 니켈 함량 50% 이하의 범위를 사용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 약 50% 이하의 니켈 코팅 함량 범위에서 실험을 수행하였다. Fig. 6은 시간에 따른 니켈 함량을 나타낸 EDS 분석 그래프이다. 제시한 바와 같이 교반 시간이 길어질수록 코팅 된 니켈의 함량이 증가하는 것을 확인하였다.

EDS 분석을 통한 니켈 함량 측정법은 코팅 된 입자의 표면관찰 방법으로 많은 선행 연구에서 코팅 물질의 함량을 측정하기 위해 사용되고 있으나[17-19], 본 연구에서는 정량 분석이 가능한 ICP-OES 방법을 사용하여 EDS 결과와 비교 검증하였고, Fig. 7에 나타내었다. 데이터 비교 결과 ICP-OES가 약 2 ~ 5% 니켈 함량이 높게 측정되었으나 이는 분말시료의 샘플링 및 EDS 표면 분석의 오차로 추정 된다. 그러나 두 방법 모두 오차 범위 내에서 코팅 시간에 따른 니켈 함량이 유사함을 확인할 수 있었다.

니켈 코팅 된 알루미늄의 점화 거동 파악을 위해 300 K ~ 1750 K 까지 TGA와 DSC 분석을 공기 산화제 분위기에서 수행하였다. Fig. 8은 순도 99.9%의 니켈(2.2 ~ 3.0 μm , Alfa-Aesar)의 중량 변화와 열출입을 보여주는 그래프이다. 제시한 바와 같이 순수 니켈은 약 600 ~ 1100 K 구간에서 점진적인 발열 반응이 발생하는데 이러한 현상은 니켈과 산소가 결합하면서 산화니켈(Nickel Oxide, NiO)이 생성됨에 따른 생성열

Fig. 9 XRD result of nickel powder(NiO) after TGA/DSC experiments.

Fig. 10 TGA/DSC results of pure aluminum powder.

($\Delta H_{f,298}^{\circ} = -239.7 \text{ KJ/mol}$) 때문이다[20]. 이는 Fig. 9의 순수 니켈의 XRD 분석 결과에서 확인할 수 있다.

Fig. 10은 산화막 제거 알루미늄의 TGA와 DSC 분석 결과이다. 제시한 바와 같이 초기 900 K 미만에서 소량의 질량 감소를 확인하였는데, 이는 코팅 용액 내부에 첨가되어 있는 Citric Acid에 의한 효과로 알려져 있다[21]. 또한 약 1750 K 범위의 공기 산화제 환경에서 약 13%의 질량 증가를 관찰하였고, 이를 정확하게 판단하기 위해서 아르곤 환경에서 동일한 실험을 반복하였다. 그 결과 아르곤 환경에서 질량 증가는 약 1% 내외를 확인하였으며, 이를 통해 순수 알루미늄의 공기 산화제 환경에서의 질량 증가는 표면 열화에 의한 알루미나 생성에 기인한 것임

Fig. 11 TGA curves of pure aluminum and nickel coated aluminum powder according to the plating time.

Fig. 12 DSC curves of pure aluminum and nickel coated aluminum powder according to the plating time.

을 알 수 있었다. 또한 약 900 K에서 강한 흡열 반응을 확인 할 수 있는데 이는 알루미늄의 용융에 의한 효과이며, 약 1100 K ~ 1300 K에서 강한 발열반응은 열화에 의해 생성된 표면 산화알루미늄의 Alpha 상태로의 상변화에 의한 것임을 확인할 수 있었다[21].

Fig. 11은 시간에 따른 니켈 코팅 된 알루미늄의 TGA 분석 결과 그래프이다. 제시한바와 같이 코팅 시간이 증가할수록 전체 질량이 빠르게 늘어났음을 확인할 수 있었는데, 이는 NiO 생성 반응 및 금속간의 소결 합금 반응을 통한 공기 산화제와의 빠른반응을 의미한다. 또한 코팅 시간이 증가할수록 약 1250 K 구간에서 산화막의

Fig. 13 SEM image of nickel coated aluminum particles(9 hour) after TGA/DSC.

Fig. 14 XRD pattern of nickel coated aluminum powder after TGA/DSC.

상변화 구간이 짧아지는 경향을 확인하였는데, 이는 니켈 코팅 함량 증가에 따른 금속간 반응이 촉진되어, 이 에너지로 인한 alpha 상태의 산화막 상변화 시간이 감소하였음을 의미한다. 이러한 현상은 표면에 생성된 알루미늄과 NiO의 반응에 의해 발생한다고 알려져 있다[16].

Fig. 12의 순수 알루미늄과 니켈 코팅 시간에 따른 알루미늄의 DSC 결과를 비교하면 약 600 K에서 NiO 생성열에 의한 발열을 확인할 수 있으며, 약 900 K에서 금속간 반응에 의한 강한 발열 반응을 관찰할 수 있다. 이는 선행문헌에서 제시한 경향과 일치하며[10] 이러한 반응열이 코팅 된 알루미늄의 점화를 촉진하게 된다.

Fig. 13은 열물성 분석이 끝난 시편의 SEM 분석 사진이다. 제시한바와 같이 알루미늄 Hollow 구조를 발견하였으며 이는 많은 선행연구에서 제시하였듯이[22-24] 점화에 의한 현상으로 알려져 있다. 또한 EDS 분석결과 Hollow 안쪽과 바깥쪽 모두 강한 Al, O, Ni를 확인하였으며, 이는 코팅 된 입자표면의 NiO 층이 내부로 침투 및 용융 된 알루미늄과 반응하였음을 의미한다. Fig. 14는 XRD 분석 결과를 나타내었는데 산화막의 최종 상태인 $\text{Alpha-Al}_2\text{O}_3$ 와 NiO를 확인하였으며, 금속간의 반응에 의한 NiAl_3 , NiAl_2O_4 , NiAl , Ni_2Al_3 , Ni_3Al 을 확인 할 수 있었다. 즉 본 연구를 통해 알루미늄의 점화온도를 명확하게 찾은 것은 불가능했지만 니켈 코팅 된 알루미늄은 순수 알루미늄의 점화온도 약 2400 K 이하에서 반응하는 것을 확인하였다. 이는 NiO의 발열 반응 및 많은 금속간의 반응에 의한 합성열에 의한 현상이며 선행 문헌[9-11,16]의 경향과 일치함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고에너지 알루미늄 분말의 점화성 향상을 위해 자연상태 알루미늄 산화막을 크롬산과 인산 혼합액을 사용하여 화학적으로 제거하고 니켈 코팅을 수행하였다. 니켈 코팅은 진탕항온수조를 이용하여 무전해 도금 방법을 사용하였으며 SEM/EDS에 의한 표면 분석을 통해 시간에 따른 니켈 코팅정도를 정성·정량적으로 확인하였다. 니켈 코팅은 XRD 화학종 분석을 통해 검증하였으며, 코팅 시간이 증가할수록 니켈 코팅 된 알루미늄의 니켈 질량분율이 선형적으로 증가함을 확인하였다. 추가적으로 ICP-OES

방법을 사용하여 EDS 와 ZAF 보정 기법을 검증하여, 두 방법 모두 결과값이 잘 일치함을 확인하였다.

TGA/DSC를 이용한 공기 환경 내에서의 열물성 분석을 수행하였고 이를 통해 공기 산화제 분위기에서의 니켈 코팅 된 알루미늄 분말의 점화촉진을 확인하였다. 니켈 코팅 된 알루미늄의 TGA 분석을 통해 코팅 시간이 증가할수록 전체 질량이 빠르게 늘어났음을 확인할 수 있었는데, 이는 NiO 생성 반응 및 금속간의 소결 합금 반응을 통한 공기 산화제와의 빠른반응을 의미한다. 또한 코팅 시간이 증가할수록 산화막의 상변화 시간이 짧아지는 경향을 확인하였는데, 이는 니켈 코팅 함량 증가에 따른 금속간 반응이 촉진되어 발생한다. 순수 알루미늄과 니켈 코팅 시간에 따른 알루미늄의 DSC 결과를 비교하면 약 600 K에서 NiO 생성열에 의한 발열을 확인할 수 있으며, 약 900 K에서 금속간 반응에 의한 강한 발열 반응을 관찰할 수 있다. 이러한 반응열이 코팅 된 알루미늄의 점화촉진을 유도하게 된다.

본 연구에서의 니켈 코팅 된 알루미늄 제조 방법 및 열물성 분석을 통한 점화촉진 메커니즘 분석 결과는 알루미늄을 사용하는 고체 추진기관 및 열 기화 폭탄과 같은 군수 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대되며, 향후 알루미늄 분말의 입도, 도금액 성질에 따른 니켈 코팅의 물성, 니켈 함량, 다양한 산화제 조건에 따른 연구를 추가적으로 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 방위사업청 및 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD110095CD, UD130038GD)

References

1. Yang, H.S., "Combustion Dynamics of

- High-energy-density Metallic Fuel : Modeling and Detailed Parametric Investigation on an Isolated Aluminum and Magnesium Particle Burning," Doctoral Thesis in Yonsei University, 2010.
2. Ermoline, A., Schoenitz, M., Dreizin, E. and Yao, N., "Production of Carbon-coated Aluminium Nanopowders in Pulsed Microarc Discharge," *Nanotechnology*, Vol. 13, No. 5, pp. 638-644, 2002.
 3. Breiter, A., Mal'tsev, V. and Popov, E., "Means of Modifying Metallic Fuel in Condensed Systems," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 26, No. 1, pp. 86-92, 1990.
 4. Andrzejak, T.A., Shafirovich, E. and Varma, A., "Ignition of Iron-coated and Nickel-coated Aluminum Particles under Normal-and Reduced-gravity Conditions," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 4, pp. 805-813, 2008.
 5. Shafirovich, E. and Varma, A., "Metal-CO₂ Propulsion for Mars Missions: Current Status and Opportunities," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 3, pp. 385-394, 2008.
 6. Rosenband, V. and Gany, A., "High-reactivity Aluminum Powders," *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, Vol. 10, No. 1, pp. 42-52, 2010.
 7. Pai, B.C. and Rohatgi, P.K., "Production of cast Aluminium-graphite Particle Composites Using a Pellet Method," *Journal of Materials Science*, Vol. 13, No. 2, pp. 329-335, 1978.
 8. Sarkar, D.K., Farzaneh, M. and Paynter, R.W., "Superhydrophobic Properties of Ultrathin Rf-sputtered Teflon Films Coated Etched Aluminum Surfaces," *Materials Letters*, Vol. 62, No. 8, pp. 1226-1229, 2008.
 9. Andrzejak, T.A., Shafirovich, E. and Varma, A., "Ignition Mechanism of Nickel-coated Aluminum Particles," *Combustion and Flame*, Vol. 150, No. 1, pp. 60-70, 2007.
 10. Shafirovich, E., Bocanegra, P., Chauveau, C., Gökalp, I., Goldshleger, U., Rosenband, V. and Gany, A., "Ignition of Single Nickel-coated Aluminum Particles," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2055-2062, 2005.
 11. Vummidi, S.L., Aly, Y., Schoenitz, M. and Dreizin, E.L., "Characterization of Fine Nickel-coated Powder as Potential Fuel Additive," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 3, pp. 454-460, 2010.
 12. Lim, J.H., "Studies on Ignition Phenomenon of Aluminum Particle by Surface Modification and Assessments of Combustion Characteristics on High-energy-density Metallic Fuel," Doctoral Thesis in Yonsei University, 2014.
 13. Bastin, G.F., Heijligers, H.J.M. and VanLoo, F.J.J., "The Performance of the Modified Φ (ρz) Approach as Compared to the Love and Scott, Ruste and Standard ZAF Correction Procedures in Quantitative Electron Probe Microanalysis," *Scanning*, Vol. 6, No. 1, pp. 58-68, 1984.
 14. McMurdie, H.F., Morris, M.C., Evans, E.H., Paretzkin, B., WongNg, W., Ettlinger, L. and Hubbard, C.R., "Standard X-ray Diffraction Powder Patterns from the JCPDS Research Associateship," *Powder Diffraction*, Vol. 1, No. 2, pp. 64-77, 1986.
 15. Files, JCPDS Powder Diffraction. "PCPDFWIN Software," Joint Committee on Powder Diffraction Standards-international Centre for Diffraction Data, Swarthmore, U.S.A., 1996.
 16. Morsi, K., "Review: Reaction Synthesis Processing of Ni-Al Intermetallic Materials," *Materials Science and Engineering: A*, Vol.

- 299, No. 1, pp. 1-15, 2001.
17. Kumar, M.A., Ramesh, C.A. and Vijaya, A., "Synthesis and Characterization of Electroless Ni-P Coated Graphite Particles," *Bulletin of Materials Science*, Vol. 31, No. 5, pp. 819-824, 2008.
18. Park, O.K. and Kang, Y.S., "Preparation and Characterization of Silica-coated TiO₂ Nanoparticle," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 257, No. 1, pp. 261-265, 2005.
19. Müller, C., Sarret, M. and Benballa, M., "ZnNi/SiC Composites Obtained from an Alkaline Bath," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 162, No. 1, pp. 49-53, 2003.
20. Glassman, I., *Combustion*, 4th ed., Academic press., New York, N.Y., U.S.A., 2008.
21. Hahma, A., Gany, A. and Palovuori, K., "Combustion of Activated Aluminum," *Combustion and Flame*, Vol. 145, No. 3, pp. 464-480, 2006.
22. Brandstadt, K., Frost, D.L. and Kozinski, J. A., "Preignition Characteristics of Nano-and Micrometer-scale Aluminum Particles in Al - CO₂ Oxidation Systems," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, No. 2, pp. 1913-1919, 2009.
23. Bucher, P., Yetter, R.A., Dryer, F.L., Vicenzi, E.P., Parr, T.P. and Hanson-Parr, D.M., "Condensed-phase Species Distributions about Al Particles Reacting in Various Oxidizers," *Combustion and Flame*, Vol. 117, No. 1, pp. 351-361, 1999.
24. Bartlett, R.W., OngJr, J.N., FassellJr, W.M. and Papp, C.A., "Estimating Aluminium Particle Combustion Kinetics," *Combustion and Flame*, Vol. 7, pp. 227-234, 1963.