

## 다단연소사이클 엔진 적용을 위한 Ni-Cr 코팅에 관한 연구

배병현\*<sup>†</sup> · 황양진\*\* · 이규환\*\* · 이병호\* · 한영민\*\*\*  
· 김영준\* · 노용오\* · 조황래\* · 현성윤\* · 방정석\*

### Study on Ni-Cr Electro Plating Process for Staged Combustion Cycle Engine

Byung-Hyun Bae\*<sup>†</sup> · Yang-Jin Hwang\*\* · Kyu-Hwan Lee\*\* · Byong-ho Rhee\* · Yeoung-Min Han\*\*\*  
· Young-June Kim\* · Yong-Oh Noh\* · Hwang-Rae Cho\* · Seong-Yoon Hyun\* · Jeong-Suk Bang\*

#### ABSTRACT

In this paper, the process of electro Ni and electro Cr plating is studied for the purpose of thermal barrier to protect the inner wall combustion chamber. The chamber is under the environment of very high temperature and high pressure when propellants burn in there. As one of the thermal barrier coatings, Zr-based thermal spray coating has been applied to the chamber. However, peeling of coating layer can occur under such a hard condition because of the difference of thermal expansion coefficients between the ceramic and the metallic wall. We study the characteristics of Ni-Cr coating and establish its process. It is found that the thickness of over 100  $\mu\text{m}$  of Ni and Cr coating layers with the uniformity of  $\pm 10\%$  can be obtained with the used of as-developed plating bath.

#### 초 록

본 논문은 다단연소사이클 엔진의 연소실 내벽을 고온, 고압의 환경으로부터 보호하기 위한 열차폐 코팅 공정 개발에 관한 내용이다. 기존 연소기 내벽에는 열차폐 특성이 우수한 Zr 기반의 세라믹 용사코팅을 적용했지만, 세라믹의 특성상 연소실 내벽(금속)과 열팽창계수 차이로 인해 박리가 발생할 수 있다. 때문에 로켓 선진국에서는 열차폐 효과를 다소 희생 하더라도 밀착력 향상을 위하여 금속계 코팅인 Ni-Cr 도금을 적용하고 있다. 본 연구에서는 연소기에 적용 가능한 상향 순환식 유동셀을 적용한 도금조를 개발했으며, 반복적인 공정 개선을 통해 도금 두께 100 $\mu\text{m}$ 이상,  $\pm 10\%$ 의 두께 균일도를 만족하는 Ni, Cr 도금 공정조건을 확립했다.

Key Words: Staged Combustion Cycle Engine(다단연소사이클 엔진), Combustion Chamber(연소실), Electro Plating(전해도금), Ni-Cr Electro Plating(Ni-Cr 전해 도금), Thermal Barrier Coating(열차폐 코팅)

## 1. 서 론

액체로켓엔진의 연소실은 추진제가 연소될 때 연소실의 내부 온도는 수천도, 압력은 수십~수백 기압까지 상승한다. 그런 환경에서 연소실을 보호하기 위해 다양한 냉각방법(예, 재생냉각, 막냉각, 복사 냉각 등)의 적용과 함께 추가적으로 열차폐 코팅이 적용되는 것이 일반적이다.

기존의 열차폐 코팅은 NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub> 기반의 플라즈마 용사코팅이 적용되었으며, 세라믹 소재의 특성상 열차폐 효율이 우수한 장점이 있다[1]. 그러나 용사코팅은 적층방식이라, 층간의 확산정도가 약해서 열응력에 의한 균열이나 박리가 발생하기도 하며, Zr의 산소이온 차폐율이 좋지 못하여 모재가 산화될 수도 있다[2].

이와 같은 문제로 러시아, 우크라이나와 같은 로켓 선진국은 열차폐 코팅으로 세라믹 용사코팅을 사용하는 대신 Ni-Cr 도금을 적용하는 것으로 알려져 있다. Ni-Cr 도금은 세라믹 용사코팅에 비하여 열차폐 효율은 떨어지지만, 열전도도가 높아 냉각효율을 높일 수 있으며, 모재와의 금속결합으로 밀착력이 높고, 열팽창계수차이가 적은 장점이 있다[3]. 그러므로 국내에서도 세라믹 용사코팅의 대안으로 무전해 Ni도금과 전해 Cr 도금을 사용하는 것을 검토하고 있으며 이에 관한 연구가 지속되고 있다[1-4].

선행연구[3]에서는 무전해 Ni 도금의 인(P) 함량이 증가함에 따라 Ni<sub>3</sub>P 상의 양과 열차폐 효율이 증가하는 반면, 도금의 경도가 증가하기 때문에 열충격에 대한 내성이 감소될 것이라고 보고되었고, 다른 연구결과[1]에서는 P의 함량이 높을 때(인 함량 10wt% 이상) 비교적 짧은 헛수의 열충격에 의해서도 크랙과 박리가 발생했다고 보고되었다[1]. 두께가 균일한 도금이 가능한 장점이 있어서 무전해 Ni 도금에 대한 연구는 지속 되었으나[1-4], P의 함량이 열충격 내성과

열차폐율을 제어하는데 중요한 요소로 작용함에 있어 P 함량의 제어가 쉬운 전해 Ni-P 도금에 대한 연구는 부족한 실정이다[5].

본 연구에서 P 함량을 제어하기 어렵고 도금 속도가 느린 무전해 Ni-P 도금대신, 전해 Ni-P 도금의 두께 균일도를 개선하여 연소기에 적용하고자 하였다. Ni 도금의 P 함량을 중인조건(5~8 wt%)으로 선정하고 평판 시편과 노즐목 시편에 전해 Ni-P, 전해 Cr 도금 공정을 수행하였다. 평판 시편을 통해 열충격 헛수에 따른 도금층의 밀착력을 평가했다. 노즐목 시편으로 전극의 형상에 따른 도금성을 확인하고 두께를 측정하였으며 전극의 형상을 변경하면서 두께 균일도를 개선하였다.

## 2. 시험 방법

### 2.1 평판 시편 시험 방법

Ni-P, Cr 도금의 열충격 헛수에 따른 밀착력을 확인하기 위하여 지름 25 mm, 높이 10 mm의 원판 형상으로 구리합금을 가공하였으며, Fig. 1과 같은 절차로 도금을 진행 하였다. 전처리에는 연마, 수세, 탈지, 온수세, 산세, 수세의 순서로 진행되었으며, 그 조건은 Table. 1과 같다. 또한, Ni-P와 Cr 도금 조건은 Table. 2에 나타내었다. 도금 후, 도금층의 응력 제거 및 밀착력을 향상을 위하여[6] 도금된 평판 시편을 750℃의 온도 로 6시간 동안 열처리 하였다.

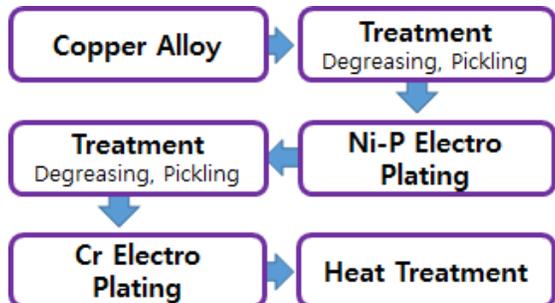


Fig. 1 Process of Electrolytic Plating

\* (주)비즈로테크

\*\* 한국기계연구원 부설 재료 연구소

\*\*\* 한국항공우주연구원

† 교신저자, E-mail: bhbae@vitzrotech.com

Table 1. Treatment Conditions

전처리 용액	조성	온도 (°C)	시간
탈지	알칼리탈지제 250~400g/L	35~55	5min
수세	증류수	15~35	1min 2~3회
산세	HNO <sub>3</sub> 250-400g/L	15~35	5min
수세	증류수	15~35	1min 2~3회

Table 2. Plating Conditions of Plate Specimen

용액 주성분		전류밀도 (A/cm <sup>2</sup> )		온도 (°C)	
Ni	Cr	Ni	Cr	Ni	Cr
Ni Sulfate	CrO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	55	80	50 ~60

열충격 시험은 600°C의 온도로 10분 가열하고 상온에서 10분 공냉 하는 것을 1사이클로 정하여 100사이클, 300사이클을 진행하였다. 도금층의 열충격 전/후의 밀착력을 평가하기 위하여 도금된 평판시편의 상, 하부에 2214 접착제(3M사)를 도포하여 Fig. 2의 (a)과같이 '인장시험 지그/ 접착제/ Cu 모재/ 전해 Ni-P/ 전해 Cr/ 접착제/ 인장시험 지그'의 구조로 배열하고 130°C의 온도로 2시간동안 열경화하였다. Fig. 2의 (b)와같이 ASTM C633 규격에 따라 접합강도를 평가하였다[7]. 인장시험에서 측정된 하중을 접착제가 붙은 면적으로 나누어 접합강도를 측정하였다.

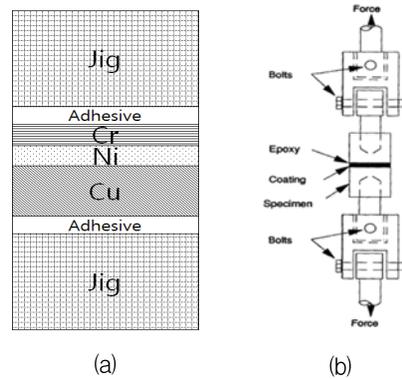


Fig. 2 Schematic of (a) Cross-sectional Specimen Structures and (b) ASTM C633

## 2.2 연소기 시편 시험 방법

구리합금 소재를 노즐목 형상으로 가공한 노즐목 시편을 준비했고, 도금 절차는 Fig. 1과 같다. 전처리, 전해 Ni-P 도금, 전처리, 전해 Cr 도금, 열처리의 과정을 통해 도금이 진행되었다. 전처리는 연마, 수세, 탈지, 온수세, 산세, 수세의 순서로 진행되었으며, 그 조건은 Table. 1과 같다. 또한, 전해 Ni-P와 Cr 도금 조건은 Table. 3에 나타내었다. 도금 후, 도금층의 응력 제거 및 밀착력을 향상을 위하여[6], 온도 500°C의 수소 분위기에서 6시간 동안 열처리 하였다.

Table 3. Plating Conditions of Nozzle Specimen

	용액 주성분		전류밀도 (A/cm <sup>2</sup> )		온도 (°C)	
	Ni	Cr	Ni	Cr	Ni	Cr
개선 전	Ni Sulfate	CrO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15	55	80	50 ~60
개선 후	Ni Sulfamate	CrO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	25	50	50 ~60

도금을 위하여 Fig. 4와 같은 상향 순환식 유동셀 도금설비를 설계·제작하였다. 연소실을 지그로 밀폐하여 용액이 채류하는 방식으로, 연소실 내부가 하나의 도금 조가 된다.

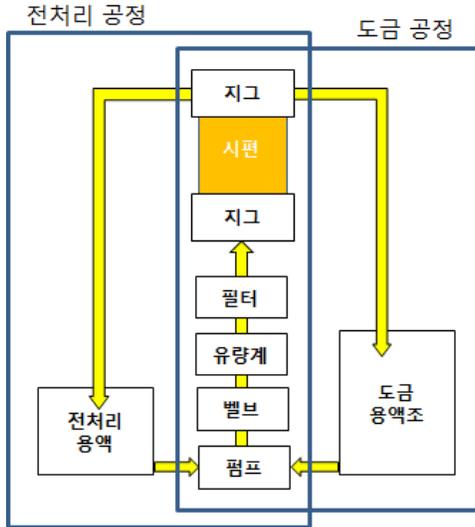


Fig. 4 Plating equipment: schematic

본 연구에서 고안된 도금 방식은 침지가 필요하지 않기 때문에 도금설비의 크기와 사용되는 용액이 최소화된다는 장점이 있고 연소실의 외부 형상에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

지그의 중앙에는 불용성 양극이 위치하며, 그 양극은 이리듐(Ir)이 코팅된 티타늄(Ti) 소재로 제작되었다. 본 연구에서 양극의 형상은 도금 품질에 주요한 요인으로 작용한다는 것이 확인되었다. 시뮬레이션을 통해 두께 균일도를 사전 분석하여 봉, 디스크, 입체 형상의 전극을 설계하고 제작하였다. 시뮬레이터는 Plating master (Elsyac사)를 사용했다. 시험을 통해 도금된 시편은 절단하여 단면분석을 통해 위치별 도금 두께를 확인 하였으며, 균일한 정도는 측정된 두께의 표준편차 값을 기준으로 하였다.

### 3 시험 결과

#### 3.1 평판 시편 결과

Fig. 3과 같이 도금층의 접합강도는 300회까지의 열충격에도 50MPa이상으로 유지되었다. ASTM C633은 가장 약한 계면에서의 접합강도

가 측정되며, 모든 시편에서 접착제 내부 또는 접착제 계면에서 박리되었기 때문에 모재와 Ni 도금층, Ni 도금층과 Cr 도금층 계면에서의 접합 강도는 그 이상으로 판단된다.

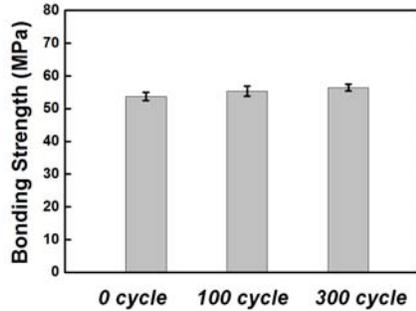


Fig. 3 Plating equipment: (a)schematic and (b)picture

#### 3.2 연소기 시편 결과

평판 시편에서 도금의 밀착력을 평가 했으며 노즐목 시편에 도금 공정을 수행하면서 도금불량이 발생했다. 그 현상을 분석하여 원인을 파악하고 해결책 세웠으며 그 내용을 Table. 3에 정리했다. Fig 6-8은 양극 형상에 따른 시뮬레이션 결과와 도금 표면 특성에 대한 그림이다.

Table. 3 Plating issue

이슈현상	원인	개선 내용
열처리 후 박리 발생	Ni 도금층 내부 응력	도금 온도 하향조정 (60℃→50℃) Ni 공급원 변경 (Sulfamate)
파우더 형태 도금	Cr 도금 중 온도 상승 현상	수냉식 칠러 장착, 전류밀도 하향조정 (30A/cm <sup>2</sup> →25A/cm <sup>2</sup> )
두께 불균일	도금면의 전류밀도 불균일	전극 형상 개선
텐드라이트	연소실 끝단 모서리의 전류 집중	전류 차폐 가스켓
검게 탄 도금	도금용액 오염 (냉각수 유입)	도금조를 내화학성 소재로 대체

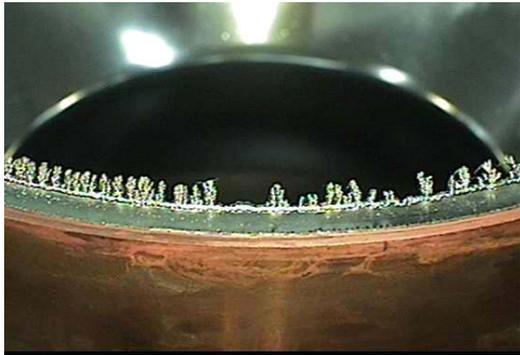


Fig. 5 Plating Defect: Dendrite

### 3.2.1. 봉상전극 도금결과

Fig 6의 (a)처럼 도금시편의 예상 도금 두께는 85~100 $\mu\text{m}$ 이며 양 끝단에서 150 $\mu\text{m}$ 이상으로 나타났다. 도금 후 외관을 관찰 했으며 Fig 6의 (b)와 같이 광택의 Ni-P, Cr 도금층이 나타났고, 용액이 흐르는 방향으로 선형 결함이 관찰 되었는데, 이는 도금반응으로 발생한 수소 기포가 연소실 내벽에서 붙어서 도금두께에 영향을 준 것으로 판단된다.

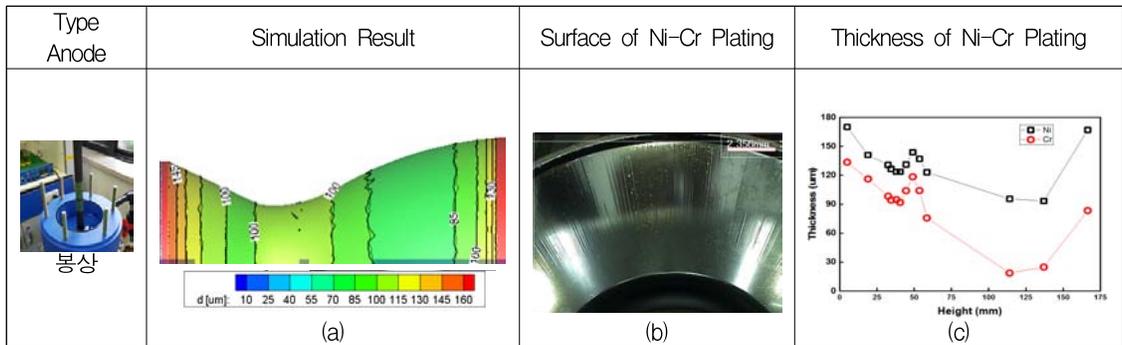


Fig. 6 Rod Type Anode: (a) Simulation Result, (b) Surface of Ni-Cr Plating and (c) Thickness of Ni-Cr Plating

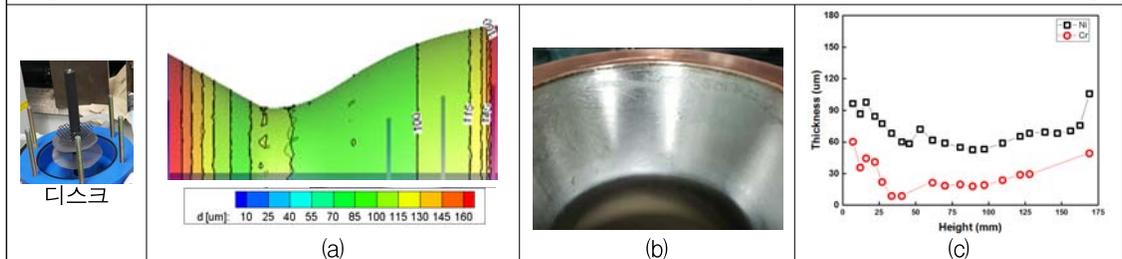


Fig. 7 Disk Type Anode: (a) Simulation Result, (b) Surface of Ni-Cr Plating and (c) Thickness of Ni-Cr Plating

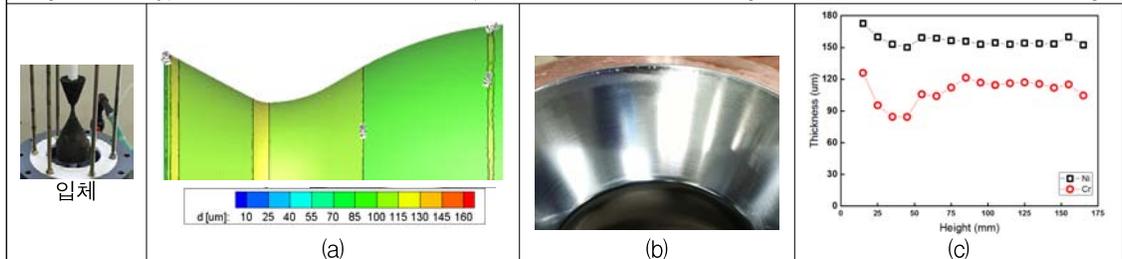


Fig. 8 3D Type Anode: (a) Simulation Result, (b) Surface of Ni-Cr Plating and (c) Thickness of Ni-Cr Plating

또한, Fig. 5와 같이 연소기의 끝단에서는 덴드라이트(dendrite)상이 성장하는 것을 관찰했으며, 시뮬레이션의 결과와 같이 연소실의 양 끝단의 모서리에 전류가 집중됨으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 부위별 두께는 Fig. 6의 (c)와같이 내경이 가장 작은 목부분과 양 끝단에서 두께가 집중되면서 다른 부위의 두께는 얇게 나타났다. 전체적인 두께의 평균과 표준편차는 Ni는  $131.3 \mu\text{m} \pm 22.3$ 이며, Cr는  $73.4 \mu\text{m} \pm 52.3$ 으로 나타났다.

### 3.2.2 디스크 전극 도금 결과

Fig 7의 (a)처럼 도금시편의 예상 도금 두께는  $100 \sim 130 \mu\text{m}$ 이며 양 끝단에서  $150 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 도금 후 외관을 관찰 했으며 Fig 7의 (b)와 같이 전체적으로 거친 Ni-P, Cr 도금층이 나타났고, 용액이 흘러내리는 듯한 형상으로 요철이 관찰됐다. 이것은 전처리용액이 지그와 시편사이에 잔류하다가 도금면을 타고 내려오면서 도금층에 영향을 준 것으로 확인 했으며, 잔류하는 용액이 없도록 지그의 형태를 바꾸어 개선하였다. 부위별 두께는 Fig. 7의 (c)와같이 양 끝단에서 두께가 집중되었고, 잔류용액에 의한 오염으로 도금 용액이 손상되어 전체적으로 얇은 도금이 나타난 것으로 판단된다. 전체적인 두께의 평균과 표준편차는 Ni 는  $71.1 \mu\text{m} \pm 14.9$ 이며, Cr는  $28.0 \mu\text{m} \pm 14.5$ 로 나타나 봉상 전극보다 균일도가 향상된 것으로 판단된다.

### 3.2.3 입체 전극 도금 결과

Fig 8의 (a)처럼 도금시편의 예상 도금 두께는  $100 \sim 115 \mu\text{m}$ 이며 양 끝단에서  $130 \mu\text{m}$ 으로 나타났다. 도금 후 외관을 관찰 했으며 Fig 8의 (b)와 같이 광택의 Ni-P, Cr 도금층이 도금됐으며, 선형결합과 덴드라이트와 같은 도금결함은 발생하지 않았다. 부위별 두께는 Fig. 8의 (c)와같이 다소 얇게 도금된 부분이 있으나, 양 끝단을 포함하여 전체적으로 균일한 두께가 나타났다. 전체적인 두께의 평균과 표준편차는 Ni는  $156.2 \mu\text{m} \pm 5.2$ 이며, Cr는  $109 \mu\text{m} \pm 12.1$  로 나타났으며 봉상 전극과 비교하여 1/4 수준으로 감소하여 도금 균일도가 개선되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 연소기 내벽에 Ni-P, Cr 도금을 열차폐 코팅으로 적용하기 위한 연구를 진행했다.

평판시편을 통해 열충격(600도씨의 10분, 공냉 10분)에 대하여 300회까지 도금층간의 접합강도를 확인했고, 접합강도가 50MPa로 유지되었다.

노즐목 시편의 시뮬레이션과 도금 실험을 통해 도금성과 두께 균일성을 향상시키기 위한 공정개선을 진행하였다.

연소실 내벽에 열차폐 코팅을 위한 침지가 필요하지 않은 도금 공정을 제안했다.

도금 결함 문제를 해결하기 위하여 시뮬레이션을 통해 전극의 형상을 개량했으며, 연소기 내부 형상을 따라 일정한 간격으로 전극이 형성되도록 설계된 입체형상의 전극을 적용했다.

공정 개선을 통해 도금결함이 없는 도금층을 확보 했으며, 도금의 두께편차가 약 1/4로 감소하여 두께 균일도가 향상되었다.

실제 연소기 적용하기 위해서는 충분한 연소 시험을 통해 열차폐율, 냉각효율 등 정량적인 데이터와 연소시험 후 박리 여부나 크랙 발생여부 등 실험적 데이터 확보가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부와 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업 과제(2014M1A3A3A03067001)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. H. R. Cho, "Development of Ni/Cr Plating Process for LRE Thrust Chamber," Korea Society of Propulsion Engineers, No. 1, Nov., 2009 .

2. 임병직, 이광진, 한영민, 최환석, "액체로켓엔진연소기에 적용하기 위한 도금방법들의반복열충격 시험결과," 제9회 우주발사체기술심포지움, pp. 107-111, 2008.
3. V. Fedorove, "The chamber cooling system of RD-170 Engine Family," AIAA-2006-4363, 42nd Joint Prop. Conf., Sacramento, CA, pp. 9-12, Jul. 2006.
4. K. J. Lee\*, B. J. Lim, J. G. Kim, Y. M. Han, H. S. Choi "Thermal Barrier Efficiency and Endurance of Ni-Cr Coating in Liquid Rocket Engine Combustor," Korea Aerospace Research Institute. Vol. 8, No. 1, pp. 138-143, Jul., 2009.
5. A. Brenner, Electrodeposition of Alloys, Academic press., Vol. 1, pp. 75, 1963.
6. G. B. Park, J. O. Park, D. B. Lee, Journal of the Korea Institute of Surface Engineering, No. 35, Feb. 2002.
7. B. G. Lim and H. S. Choi, KSPE Fall conf., Korea., pp. 805, 2011.