

액체로켓엔진 연소기용 니켈/크롬 코팅의 공정 개발

조황래* · 방정석** · 이병호*** · 이광진**** · 임병직**** · 한영민**** · 최환석****

Development of Ni/Cr Plating Process for LRE Thrust Chamber

Hwang-Rae Cho* · Jeong-Suk Bang** · Byung-Ho Rhee*** · Kwang-Jin Lee****
Byoungjik Lim**** · Yeoung-Min Han**** · Hwan-Seok Choi****

ABSTRACT

A Ni/Cr plating process has been developed for applying to inner wall of liquid rocket engine(LRE) thrust chamber. Ni plating conditions were selected through thermal shock test and endurance verification of the plating layers was performed through hot firing test of a subscale thrust chamber with Ni/Cr plating. Test results showed that a crack or separation of the plating layers was not found. Judging from the results, Ni/Cr plating could be applied to LRE thrust chamber as a substitute of air plasma sprayed ceramic coating which is presently being used.

초 록

액체로켓엔진 연소기의 내벽에 사용하기 위한 니켈/크롬 도금 공정 개발을 수행하였다. 열충격 시험을 통해 니켈 도금 조건을 선별하였고 니켈/크롬 도금이 수행된 축소형 연소기의 연소시험을 통해 도금 층의 내구성 검증을 수행하였다. 시험결과 도금 층의 균열 및 박리는 발견되지 않았고, 이 결과로부터 현재 사용중인 대기 플라즈마 용사된 세라믹 코팅의 대안으로 니켈/크롬 도금을 액체로켓엔진 연소기에 사용할 수 있으리라 사료된다.

Key Words: Ni(니켈), Cr(크롬), Plating(도금), Thrust Chamber(연소기), Hot firing Test(연소시험), Thermal Shock Test(열충격 시험), Air Plasma Spray(대기 플라즈마 용사)

1. 서 론

액체로켓엔진 연소기의 내벽에 수행되는 코팅은 연소기의 열적 내구성뿐만 아니라 고온산화 및 고온부식 방지의 기능까지 필요하기 때문에 적용방식이 까다롭다. 특히 수축, 팽창부로 형성된 연소실 노즐부는 균일한 코팅 두께를 얻기 힘들고 모재와 코팅 층간의 높은 밀착력을 유지하기가 어렵다. 일반적으로 가스터빈 엔진의 블

* (주) 비즈로테크 특수사업부 우주항공팀
** (주) 비즈로테크 특수사업부 우주항공팀장
*** (주) 비즈로테크 대표이사
**** 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: ppsmurf@vitzrotech.com
lkj@kari.re.kr

레이드 및 베인 그리고 연소기에 사용하고 있는 코팅 방식은 대기 플라즈마 스프레이 기술을 이용한 열차폐 코팅으로 NiCrAlY의 bonding layer 위에 ZrO₂의 top layer를 입히는 이중 코팅 방식을 활용한다[1]. 최근에는 HVOF(high velocity oxygen fuel), LPPS(low pressure plasma spraying), EB-PVD(electron beam physical vapor deposition)의 기법들을 사용하여 코팅 층의 밀착력을 향상시키고 있다[2]. 그러나 이러한 방법들은 코팅 장비 및 적용 장치의 비용이 고가이고 연소실 노즐부와 같은 형상을 가지는 모재에 균일한 코팅 층을 입히기가 어렵다. 일부 우주발사체 선진국의 경우 위와 같은 세라믹 코팅 대신 니켈/크롬을 활용한 금속도금을 사용하고 있는데 이 코팅은 세라믹 코팅에 비해 열차폐 성능은 떨어지지만 모재와의 밀착력이 높고, 산화 및 부식방지의 기능이 우수하며, 비용이 저렴한 장점을 가지고 있다[3]. 또한 이것은 코팅 후 연마작업이 가능해 연소실 내부형상을 설계조건 대로 유지할 수 있는 특징을 지니고 있다.

그동안 국내에서 개발된 액체로켓엔진 연소기의 경우 대기 플라즈마 스프레이 기술을 사용한 NiCrAlY/ZrO₂의 세라믹 코팅을 적용해 오고 있으나, 위에서 제시한 니켈/크롬을 이용한 안정된 도금 공정이 개발된다면 세라믹 코팅의 단점을 보완하여 코팅의 내구성을 향상시킬 수 있는 대체 코팅으로 사용할 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 액체로켓엔진 연소기에 사용할 수 있는 니켈/크롬 코팅 공정을 확립하고 축소형 시체에 적용하여 내구성에 대한 평가를 수행하였다.

2. 니켈/크롬 도금 공정개발

니켈/크롬 도금은 니켈을 bonding Layer로, 크롬을 top Layer로 사용하는 multi-layer 도금이다. 이 도금 방식은 금속재질로 이루어져 결합력이 강하고 NiCrAlY/ZrO₂ 세라믹 코팅에 비해 모재와 코팅 층간의 열팽창 특성에 따른 균열

발생 가능성이 적고, 크롬의 경도가 높으므로 물리적 또는 기계적 손상의 가능성도 적다. 니켈/크롬 도금의 사용 가능성을 점검하기 위해 먼저 평판 시체를 제작하여 도금 후 열충격 시험을 수행하였고 이 후 축소형 노즐 시편을 제작하여 수축, 팽창부로 구성된 노즐 형상에 대한 도금 가능성을 확인하고 연소시험을 통해 니켈/크롬 도금의 내구성을 평가하였다.

먼저 평판 시체를 이용한 니켈/크롬의 도금 공정은 Fig. 1과 같이 정하였고 도금에 사용된 모재는 실물형 연소기에 사용되고 있는 소재와 동일한 것을 사용하였다. Fig. 1의 첫 번째 열처리는 실물형 연소기의 브레이징 조건을 모사하기 위한 것이고 두 번째와 세 번째에 수행된 열처리는 열확산에 의한 기계적 특성을 향상시키기 위함이다.

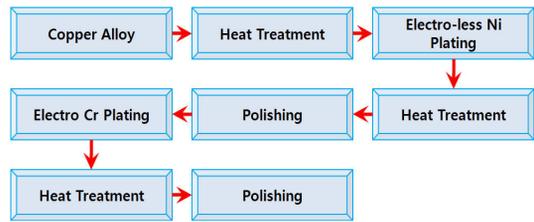


Fig. 1. Ni/Cr Plating Process

2.1 니켈 도금

본 연구에 사용된 니켈 도금은 일반적인 전해 도금이 아닌 무전해 도금 방식을 사용하였다. 무전해 도금의 특징은 전해 도금에 비해 형상에 관계없이 제품 각부의 도금 층 두께가 일정하며 pin hole이 거의 없고 높은 경도와 내식성 및 내마모성이 우수한 특징을 가지고 있으나 전해도금에 비해 비용이 다소 고가이다[4]. 본 연구에 사용된 무전해 니켈 도금은 차아인산나트륨을 환원제로 사용하는 방식으로 도금 공정은 Fig. 2와 같다. 무전해 니켈 도금의 성능에 영향을 줄 수 있는 변수는 모재의 특성, 도금액의 온도, 액 조성, 도금 후의 열처리 온도와 시간 등이 있으나, 본 연구에서는 도금액에 함유된 인의 함유량과 도금 후 열처리 시간을 변수로 시험을 수행하였다.

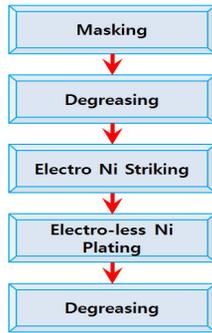


Fig. 2. Electroless Ni Plating Process

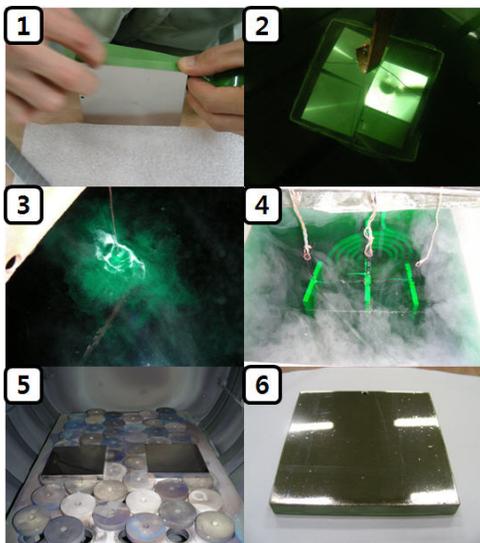


Fig. 3. Electroless Ni Plating

Figure 2와 같은 공정에 따라 진행한 평판 시제의 니켈 도금을 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3의 ①은 도금이 필요 없는 부분을 차폐시키는 작업을, ②는 탈지 작업을, ③은 구리합금 등과 같이 도금 피복력이 떨어지는 재질을 도금하기 위해 적용하는 니켈 striking 작업을, ④는 무전해 니켈 도금으로 도금액은 인의 함유량에 따라 Table 1과 같이 저인, 중인, 고인으로 분류되며 목표로 하는 도금 층의 두께는 인의 함유량에 관계없이 $150\mu\text{m}$ 로 하였다. Fig. 3의 ⑤는 무전해 니켈 도금 후 열처리 작업으로 열처리 조건은 750°C 온도에서 2시간, 6시간, 12시간으로 구분하여 수행하였다.

Table 1. Content of phosphorous in plating solution

구분	P 함유량
저인	1~3%
중인	5~8%
고인	10~12%

2.2 크롬 도금

전해 크롬 도금은 크롬산 또는 황산을 이용하여 제품 표면에 크롬 도금 층을 형성시키는 것으로 산업체에서 일반적으로 적용하고 있는 공정을 적용하였다. Fig. 4는 이 도금 공정으로 목표로 하는 크롬 도금 층의 두께는 $100\mu\text{m}$ 이다.

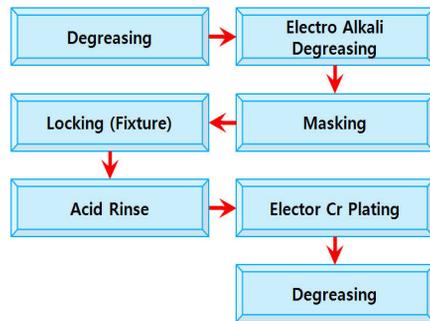


Fig. 4. Electro Cr Plating Process

2.3 열충격 시험

평판 시제에 수행한 니켈/크롬 도금의 내구성을 평가하기 위해 열충격 시험을 수행하였다. 이 시험은 도금 층의 박리 현상을 분석하여 고온 내구성에 대한 특성을 평가하는 방법으로 사용되고 있다[5~6]. 본 연구에서는 600°C 가열로에서 10분간 유지한 후 $0\sim 5^\circ\text{C}$ 욕조에서 시제를 수냉시키는 방식으로 진행하였으며 시험결과 모재로부터 도금 층이 완전 박리되는 현상이 발생한 조건은 없었으나 내부 균열과 같은 갈라짐 현상이 고인 조건의 평판 시제에서 발생하였다.

Figure 5는 세라믹 코팅 시제와 니켈/크롬 도금 후 6시간 열처리한 시제를 가지고 41회의 열충격 시험을 수행한 후 도금 층의 상태를 나타낸 것이다. 열처리 시간에 따른 변화는 같은 도금액을 사용한 조건에서 큰 차이를 보이지는 않았으며 대기 플라즈마 스프레이 기술을 적용한 NiCrAlY의 코팅은 24회부터 박리 현상이 발생

하여 41회 시험 후에는 거의 모든 코팅 층이 박리되었고 NiCrAlY/ZrO₂를 수행한 multi-layer 코팅에서는 고인 니켈/크롬 도금처럼 내부 균열과 같은 현상이 관찰되었으나 모재로부터 코팅 층이 박리되는 현상은 발생하지 않았다. Fig. 6은 니켈/크롬 도금 후 6시간 열처리한 시제를 가지고 110회 열충격 시험 후 촬영한 시제의 모습으로 저인 도금액을 사용한 시제에 비해 중인 시제에서 보다 선명하게 모서리 부분이 갈라지는 현상을 보였으나 박리 현상은 발생하지 않았다. 특히 니켈/크롬 도금 시제의 열충격 시험결과 모재의 변형이 크게 나타났음에도 불구하고 도금 층이 모재로부터 박리되지 않은 것은 니켈

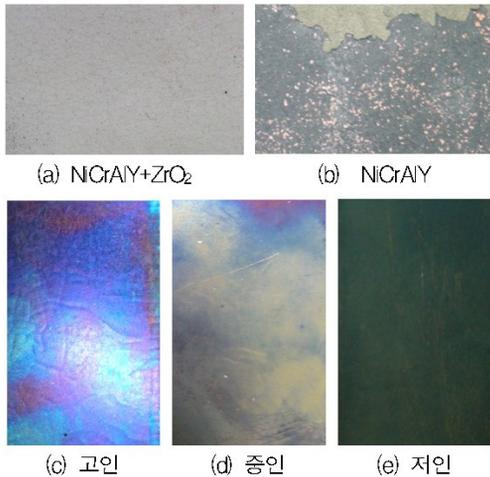


Fig. 5. State of coating layer after 41 times thermal shock test

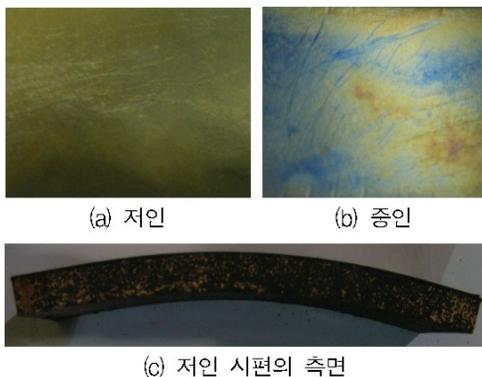


Fig. 6. State of coating layer after 110 times thermal shock test



Fig. 7. State of coating layer after 120 times thermal shock test

크롬 도금의 높은 밀착력 때문인 것으로 사료된다. Fig. 7은 증인 평판 시제의 120회 열충격 시험 후 모습으로 열처리 시간에 따라 도금 층의 변화가 있음을 알 수 있다. 2시간 열처리를 수행한 시제에서 모서리 부분의 갈라짐과 뜨는 현상은 6시간과 12시간 열처리 시제에 비해 크게 발생하였음을 보여준다.

3. 축소형 연소기에 적용한 니켈 /크롬 도금

평판시제의 열충격 시험결과를 바탕으로 축소형 연소기의 노즐부에 선정한 니켈 도금 방법은 저인과 증인 도금액을 사용하고 6시간 열처리를 수행하는 조건이다. 고인 도금액은 Fig. 5에서 처럼 열충격 시험 중 균열이 관찰되었기 때문에 본 시험에서 제외하였고 열처리 시간은 Fig. 7의 결과를 토대로 6시간을 선정하였다. 저인 도금액을 사용한 축소형 노즐의 니켈/크롬 도금 과정은 Fig. 8과 같으며 증인 도금액을 사용한 공정도 도금 조건을 제외하고는 Fig. 8과 같은 절차

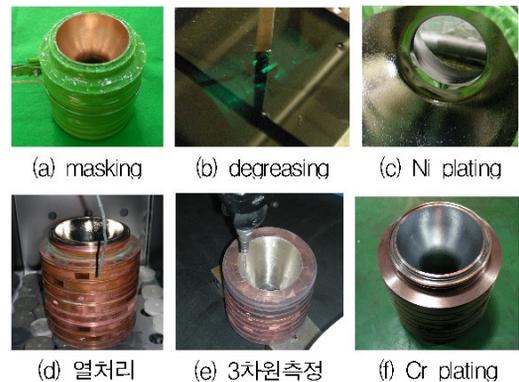


Fig. 8 Ni/Cr plating in subscale nozzle

로 수행되었다. 목표로 한 니켈/크롬 도금의 두께는 평판 시제와 같은 $150\mu\text{m}$ 와 $100\mu\text{m}$ 이고 도금된 노즐은 8개의 물냉각 채널을 가지고 있어 구획별 열유속을 측정할 수 있도록 하였다. 이 노즐은 19개의 분사기로 구성된 헤드부와 물냉각 채널이 가능한 실린더부에 결합되어 최대 연소 시간 40초, 누적시간 50초 동안 연소시험이 수행되었다. 연소시험에 사용된 축소형 연소기의 개략도는 Fig. 9와 같으며 시험결과 니켈/크롬 도금 층의 균열 또는 박리 현상은 발생하지 않았다. 도금이 수행된 노즐의 시험 전 모습을 Fig. 10 (a)와 (b)에, 연소시험 수행 후 모습을 Fig. 10 (c)와 (d)에 나타내었다.

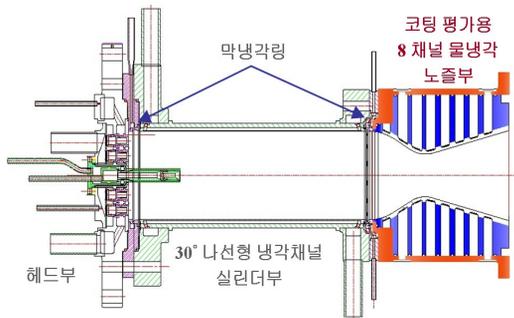


Fig. 9. Schematic of subscale thrust chamber

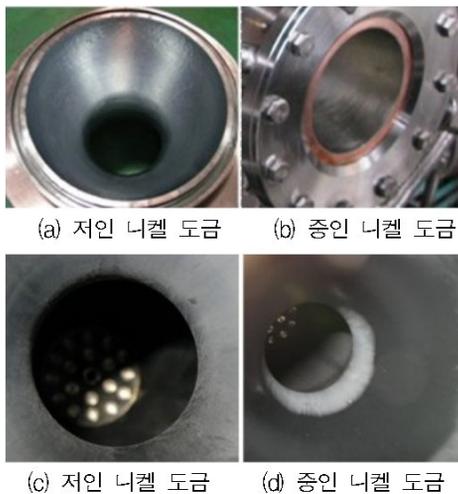


Fig. 10. State of coating layer after hot firing test

4. 맺 음 말

액체로켓엔진 연소기의 내벽에 사용하기 위한 니켈/크롬 도금 공정개발을 수행하였다. 열충격 시험을 통해 니켈 도금 조건을 선별하였고 축소형 연소기의 노즐에 니켈/크롬 도금을 적용하여 내구성 검증시험을 수행하였다. 누적시간 50초 동안 도금 층의 균열 및 박리현상은 없었고 이 결과로부터 실물형 연소기의 내벽 코팅에 니켈/크롬 도금을 사용하여 내식성과 내마모성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이것은 현재 대기 플라즈마 스프레이 기법을 이용한 세라믹 코팅의 대안으로 모재와의 열팽창률 차이에 의한 코팅 층의 균열과 박리 발생 가능성을 현저히 줄이 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박기범외 2인, "NiCrAlY/ZrO₂-Y₂O₃ 복합코팅의 산화에 따른 조직관찰", 한국표면공학회지, Vol. 15 No. 2, Apr. 2002
2. 이구현외 2인, "항공기부품의 용사코팅기술", 기계와 재료, 제15권 1호, 2003
3. V. Fedorove외 6인 "The chamber cooling system of RD-170 Engine Family," AIAA-2006-4363, 42nd Joint Prop. Conf., Sacramento, CA, July, 9-12, 2006.
4. 지태구, 여운관, "무전해 니켈도금에 대하여 (I, II)", 한국표면공학회지, Vol. 15 No. 1, 1982
5. 박영규외 7인, "HIP 처리가 플라즈마 용사된 열차폐 코팅층의 접착강도와 고온특성에 미치는 영향", 한국재료학회지, Vol. 10 No. 4, 2000
6. 김병희, 서동수, "플라즈마 용사된 ZrO₂ 단열 코팅층의 특성 및 열처리에 따른 접합강도변화", 한국재료학회지, Vol. 8 No. 6, 1998