

## 플라즈마 용사에 의해 표면개질 한 초합금의 고온부식거동

조수행, 임중호, 허진목, 서중석, 정기정, 박성원  
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

[nshcho1@kaeri.re.kr](mailto:nshcho1@kaeri.re.kr)

## 1. 서론

산화물 사용후핵연료의 금속전환공정은 고온 용융염 LiCl-Li<sub>2</sub>O계에서 우라늄산화물을 전해환원하는 공정으로 음극에서 우라늄메탈로 환원되며, 양극에서 산소가 발생된다. 이러한 전해환원공정은 650℃ 이상의 고온에서 부식성이 강한 용융염상에서 이루어지고, 산소가 발생되어 용융염 취급장치는 가혹한 부식환경에 놓이게 됨으로 이에 적합한 용융염 취급장치 재료개발이 매우 중요하다. 본 연구에서는 산소가 발생하는 고온 LiCl-Li<sub>2</sub>O 용융염계 분위기에서 항공기의 엔진이나 발전용 가스터빈 엔진의 고온 부품으로 사용되는 Ni기 고온용 재료로서 우수한 기계적 성질 및 내부식성을 지닌 초내열합금으로 알려진 Inconel 713LC에 세라믹산화물로 표면개질 한 재료의 부식거동을 고찰하여 용융염부식억제형 재료개발에 필요한 자료를 도출하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용한 실험재료는 70 mm(L) × 15 mm(W) × 2 mm(T)(mm)의 크기의 Inconel 713LC를 사용하여 bond coating 과 Aluminizing 처리한 후 세라믹을 top coating하였으며, 코팅 재료의 화학 조성 및 사양을 Table 1에 나타내었다. 부식실험은 부식환경온도; 675℃, 부식시간; 216시간, Li<sub>2</sub>O 농도; 3wt%, 혼합가스 농도; Ar-10%O<sub>2</sub> 분위기하에서, 혼합용융염 LiCl-Li<sub>2</sub>O를 MgO 도가니에 넣고 아르곤 분위기에서 가열하였으며, 용융염의 온도가 675℃에 도달하면 시편을 용융염에 침지시킨 후 용융염 중에 알루미늄아 튜브(6φ)를 통해 혼합가스를 공급하였다. 주어진 부식반응시간에 도달하면 시편을 용융염으로부터 분리시킨 후 아르곤 분위기에서 로냉하였다. 실험 종료 후 부식된 시편을 증류수에서 세척하여 용융염을 제거한 다음 건조로에서 24시간 이상 건조한 다음 무게변화를 측정하였다. 부식생성물의 분석, 미세조직 관찰을 위해 XRD, SEM과 EDS를 사용하여 분석하였다.

Table 1. Characteristics of coating materials and substrate.

Layer	Product	Compositions(%)	Process	Thickness
Top coat	METCO. 204NS	ZrO <sub>2</sub> -8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	APS	200 ~ 250μm
	METCO. 210NS-1	ZrO <sub>2</sub> -24MgO		
	METCO Co.	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -50Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Bond Coat	AMDRY Co. 365-1	Ni-23Co-17Cr-13Al-0.5Y	APS	100 ~ 150μm
	AMDRY Co. 962	Ni-22Cr-17Cr-13Al-1.0Y		
Substrate	Inco. Co	Ni:74.0, Cr:11.57, Fe:0.1, Al:6.05, Nb:1.95, Mo:4.15	Rolled & Heat treated	2mm

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에 bond coating-NiCrAlY, top coating-YSZ MgO-ZrO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>으로 표면개질 한 시편의 실험 후의 사진을 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 top coating으로 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 적용한 경우 bond coating/ceramic coating interface에서 failure가 발생하였으나, top coating으로 YSZ 및 MgO-ZrO<sub>2</sub>를 적용한 경우 코팅층의 failure가 발생하지 않고 매우 양호한 표면 형상을 유지하고 있었다.

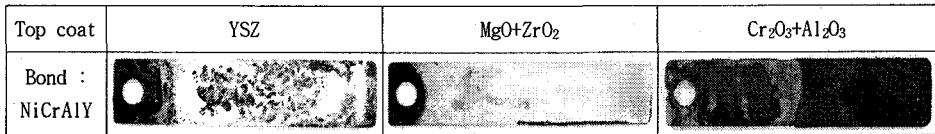


Fig. 1. Photographs of modified Inconel 713LC corroded at 675°C for 216 hrs (bond coat-NiCrAlY & Aluminizing, top coat-YSZ, MgO-ZrO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

YSZ의 시편의 모서리에서 균열현상이 발견되었는데, 이 현상은 세라믹 재질인 top coat와 금속인 bond coat의 열팽창계수의 차이로 응력이 집중되어 두개의 코팅층 계면에서 소위 "buckling delamination"이 일어났기 때문이다. Top coat가 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>인 경우 박리현상이 뚜렷하게 나타난 현상도 이러한 이유에서 기인된 것으로 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 열팽창계수가 매우 작아 thermal cycle의 조건에서 효과적인 보호피막의 역할을 기대하기 어렵다고 할 수 있다. 한편, ZrO<sub>2</sub>는 열전달계수가 낮고 열팽창계수가 금속과 유사하여 고온에서 열응력을 감소시켜 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 top coat로 적용한 경우 보다 내구성 및 기지금속과 접착력 강화로 인해 표면이 매우 양호한 것으로 생각된다. Fig. 2에 bond coating-NiCrAlY, top coating-YSZ로 한 시편의 실험 후 절단면 사진과 원소분포를 나타내었다. Top coat와 bond coat계면에 미세한 crack 또는 void들이 관찰되나 bond coat의 구성원소들의 확산이나 내부부식이 관찰되지 않는 것으로 보아 세라믹의 표면 코팅은 부식매체에 대하여 효과적인 보호장벽역할을 한 것으로 판단된다.



Fig. 2. Cross-sectional SEM image and elemental distribution of modified Inconel 713LC corroded at 675°C for 216 hrs (bond coat-NiCrAlY & aluminizing, top coat-YSZ).

4. 결론

초내열 합금인 Inconel 713LC의 표면에 NiCrAlY 또는 NiCoCrAlY를 bond 코팅한 후 top 코팅으로 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>인 경우 bond 코팅과 top 코팅 계면에 failure가 발생, YSZ 및 MgO-ZrO<sub>2</sub>인 경우 매우 양호한 표면형상을 나타내었다. Top coat인 세라믹은 내부식성 개선에 우수한 효과를 나타내었으며, 아울러 기판재질인 금속과 열팽창계수가 유사하고 열전달계수가 작은 ZrO<sub>2</sub>를 함유한 YSZ 및 MgO-ZrO<sub>2</sub>가 내부식성 향상에 더욱 효과적인 것으로 나타났다.