

'95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Laser를 이용한 Alloy 600 재료표면 합금성분 조절

신진국*, 서정훈, 국일현, 강석중*, 김정수
한국원자력연구소
*한국과학기술원

요 약

Alloy 600 표면에 레이저 빔을 이용하여 Ni, Cr 혼합분말 및 순수 Cr 분말로 표면합금층을 만들었다. 표면 합금층은 모재와 정합계면을 이루고 있으며 레이저 표면용융 시편에서와 같이 크게 면선단 응고부와 셀룰라 응고부로 나눌 수 있고, 모재에는 레이저 처리과정에서 생긴 수십 μm 두께의 열영향 부위가 존재하였다. 그리고 합금층 내부에는 레이저 표면 용융된 시편과 달리 구형의 커다란 기공(pores)이 존재하였다. 레이저 표면 합금층에서 합금원소의 조성 분포를 조사하기 위해 레이저 처리된 시편에 대해 WDX 분석을 하였고, 합금층 내부에 Ni, Cr, Fe 원소의 조성 분포는 매우 균일하였다.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 전열관으로 사용하고 있는 Alloy 600 재료는 원자력발전소 가동조건 하에서 장시간 사용함에 따라 여러 가지 부식(IGA/IGSCC, PWSCC, pitting, denting, fretting, wastage 등)손상이 발생하여 발전소가 불시정지하는 등으로 인한 가동률 저하 및 원전의 안전성과 건전성 유지에 문제가 되고있다. 현재 가장 문제가 되는 부식손상으로는 2차측에서 발생하는 intergranular attack/intergranular stress corrosion cracking(IGA/IGSCC)과 1차측에서 발생하는 primary water stress corrosion cracking (PWSCC)이다.^[1-3] 이러한 부식손상이 주로 일어나는 부위는 tubesheet 상단 확관전이 부분, tubesheet 내부 확관부위, tube support plate 부위(denting에 의한), 및 U-bend 부위이다. 현재 이러한 손상에 대한 대처방안으로는 수질개선 또는 관막음(plugging) 및 슬리빙(sleeving)등이 있는데, 슬리빙도 가동중 bulging이 발생하여 결국 관막음하게 된다. 따라서 가동년수가 증가함에 따라 관막음된 전열관이 증가하여, 결국 증기발생기를 교체하게 되는데, 그 비용은 증기발생기 1기당 1억불 이상 소요된다. 따라서, 증기발생기의 수명을 연장시키기 위하여는 균열로 손상된 전열관을 보수하여 계속 사용할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 균열로 손상된 전열관을 보수하거나 증기발생기 제조시 전열관의 특정부위를 처리하여 균열발생을 억제시키는 방법으로 레이저 빔을 이용한 재료표면 합금화 기술을 개발 중에 있다. 현재까지 알려진 바로는 Alloy 690 재료가 Alloy 600 보다 내부식성(특히 응력부식균열에

대한)이 월등히 우수한 것으로 나타나고 있다. 따라서, 본연구는 Alloy 600의 표면을 레이저 빔으로 Alloy 690과 같은 조성으로 만들어 손상된 전열관을 보수하거나 새로운 Alloy 600 전열관 수명을 향상시키는 목적이다.

2. 실험방법

본 연구에서는 두께가 1.6 mm인 인코넬 600 판재를 시편으로 사용하였다. 이 재료의 화학조성을 Table 1에 정리 요약하였다. 시편은 70 × 35 mm²의 크기로 절단하여 사용하였다.

Table 1 Chemical Composition of Inconel 600 Alloy.

Element	Ni	Cr	Fe	Co	Mo	Cu	Mn	Ti	Si	Al	C	S
Chemical Composition (wt%)	Bal.	15.72	7.51	0.38	0.25	0.22	0.17	0.17	0.15	0.12	350 ppm	20 ppm

레이저 합금화는 먼저 as-received 상태의 시편표면을 sand-blasting하여 거칠게 한 다음 플라즈마 용사(plasma spray)로 코팅(coating)하였다. 플라즈마 코팅시 피막두께 조절이 쉽지 않아 코팅 후 측정된 피막두께가 계획한 두께와 매우 상이하였으며, 두께의 균일성도 매우 좋지 않았다. 코팅 후 측정된 피막의 평균두께를 Table 2에 나타내었다. 합금화에 사용한 분말은 순수 Cr 분말과 Ni/Cr (=1/1) 혼합분말로 Cr 분말 및 혼합분말의 평균입도는 각각 25.3 μm 및 20.6 μm이었다. 사용한 레이저는 Rofin-Sinar사의 RS840 CO₂로 연속파 빔의 최대출력이 4 kW였다. 사용한 레이저 출력은 750, 1000 및 1300 W로, 각 출력에서 scan speed를 변화시키며 인코넬 시편표면을 용융시켰다.

Table 2 The Measured Thickness of the Plasma-sprayed Layer.

Specimen	The planned thickness of the plasma-coated surface layer	The measured, average thickness of the plasma-coated surface layer
B1 (Pure Cr)	50 μm	44 μm
B2 (Pure Cr)	100 μm	61 μm
B3 (Ni:Cr = 50:50)	80 μm	155 μm
B4 (Ni:Cr = 50:50)	160 μm	249 μm

합금화처리된 시편을 절단하여 합금화 깊이를 측정하고 성분을 WDX로 분석하였으며, 미세조직을 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 플라즈마 용사된 시편의 미세조직

Fig. 1은 플라즈마 용사된 B1(pure Cr)과 B3(Ni:Cr=50:50) 시편의 미세조직 사진이다. 코팅층과 모재가 만나는 결합면이 심한 요철을 이루고 있고, 코팅층이 모재로부터 떨어져 있는 부분이 존재하며 코팅층 내부에서도 많은 기공들이 존재하고 있다. 특히 Fig. 1(b)에서 보는 것처럼 니켈/크롬 코팅층에는 구형의 금속 입자가 관찰되고 있는데, 이 입자는 플라즈마 용사과정에서 용융되지 못한 크롬 분말이 코팅층에 잔존하는 것으로 생각된다. 플라즈마 용사과정에서 니켈과 크롬 분말은 플라즈마 건에서 각각 용융되어 지름 10 μm 정도의 용융 방울(melt droplet)이 되며, 이것이 고속으로 시편을 향하여 날아가 모재 표면에 응고 접촉되어 표면 코팅층을 만들게 된다. 그러나 크롬의 용융점은 1890 $^{\circ}\text{C}$ 로 니켈의 1455 $^{\circ}\text{C}$ 보다 높고, 실제 플라즈마 건에서 이 정도의 온도 차이를 무시할 만 하다고 하여도 분말의 크기에 따른 용융정도가 다르므로 큰 입자로 존재하던 크롬 분말이 완전 용융되지 않고 다른 멜트(melt)와 함께 시편 표면으로 날아가 코팅층을 형성할 가능성이 있다.

3.2 레이저 합금화된 시편의 미세조직

플라즈마 코팅층을 갖고 있는 시편표면에 레이저 빔을 조사하여 표면 합금화처리를 한 시편들의 미세조직은 전형적인 반실린더 형의 용고 트랙(track)을 갖고 있으며, 이 트랙의 깊이와 폭은 레이저빔의 출력에 따라 증가하고 시편의 이송속도(scan rate)에 따라 감소하는 경향을 보였다. Fig. 2는 155 μm 두께의 니켈/크롬 코팅층을 갖고 있는 B3 시편을 100 cm/min의 속도로 이송시키면서 코팅층 표면에 1 KW의 레이저 빔을 조사시켜 얻은 미세조직 사진이다. 레이저 표면 용융된 시편^[4]과 달리 합금층 내부에 구형의 커다란 기공(pores)이 존재하였으며, 이 사진에서는 명확히 관찰되지 않지만 미세한 기공들도 관찰되었다. 그리고 합금층 내부의 기공률은 레이저 출력과 시편의 이송속도와 무관하였다. 이러한 기공들은 레이저 처리전에 기체(알루미늄이나 혹은 공기)가 플라즈마 코팅층 내부와, 코팅층과 모재사이의 결합면에 있던 기공에 갇혀있다가 레이저 조사에 의해 순간적으로 일어나는 용융 응고과정에서 외부로 빠져나가지 못하고 합금층 내부에 잔존한 것으로 생각된다. Fig. 3은 44 μm 두께를 가진 순수 Cr 코팅층을 갖고 있는 B1 시편을 laser 출력 750 W에서 100 cm/min.으로 합금화시킨 시편의 미세조직이다. 이 사진에서 보면 표면 합금층은 모재와 정합계면(coherent interface)을 이루고 있으며, 레이저 표면용융 시편에서와 같이 합금층을 크게 면선단 응고부(plane-front solidified layer)와 셀룰라 응고부(cellular solidified layer)로 나눌 수 있고, 모재에는 레이저 처리과정에서 생긴 수십 μm 두께의 열영향 부위(HAZ)가 관찰된다.

3.3. 합금원소의 분포

레이저 표면 합금층에서 합금원소의 조성 분포를 조사하기 위해 레이저 처리된 시편에 대해 WDX 분석을 하였다. Fig. 4는 B1 시편을 1 kW에서 200 cm/min.으로, 그리고 Fig. 5는 B4 시편을 1.3 kW에서 200 cm/min.으로 합금화처리한 시편의 표면 합금층에서 측정된 Ni, Cr, Fe 원소의 조성 분석 결과를 그린 그래프들이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 합금층 내부에서 Ni, Cr, Fe 원소의 조성은 매우 균일하였다. 그리고 합금층 내부에 Co, Mo, Si, Cu, Al, Ti 등의 미소 원소들도 측정되었으며, 이것은 레이저 처리과정에서 용융된 모재로부터 나온 것이다. 금속표면에 레이저빔을 조사시켜 표면을 용융시킬 때, 표면층에 매우 큰 온도구배(temperature gradient)가 생기므로 인해 용융된 부위(melt)에 격렬한 대류(convection) 현상이 일어나게 된다. 이러한 대류현상으로 인해 충분한 물질이동이 순간적으로 일어나며 레이저 표면 합금층 내에서 합금원소의 균일한 조성분포가 얻어지는 것이다.

합금화 처리된 시편의 부식특성, 기계적 특성 및 TEM/EDX을 이용한 미세조직 관찰 및 분석은 현재 진행중에 있다.

4. 요약

합금화처리를 한 시편들은 전형적인 반실린더 형의 용고 트랙(track)을 갖고 있으며, 이 트랙의 깊이와 폭은 레이저 표면용융처리된 시편에서와 같이 레이저빔의 출력에 비례하고 시편의 이송속도에 반비례하는 경향을 보였다. 그리고 미세조직은 표면 합금층과 모재로 이루어져 있다. 표면 합금층은 모재와 정합계면을 이루고 있으며 레이저 표면용융 시편에서와 같이 크게 면선단 용고부와 셀룰라 용고부로 나눌 수 있고, 모재에는 레이저 처리과정에서 생긴 수십 μm 두께의 열영향 부위가 존재하였다. 그리고 합금층 내부에는 레이저 표면 용융된 시편과 달리 구형의 커다란 기공(pores)이 존재하였다. 레이저 표면 합금층에서 합금원소의 조성 분포를 조사하기 위해 레이저 처리된 시편에 대해 WDX 분석을 하였고, 합금층 내부에 Ni, Cr, Fe 원소의 조성 분포는 매우 균일하였다.

참 고 문 헌

1. H. Takamatsu, Nuclear Engineering International, Jan. (1991) p26.
2. 고리원자력 1호기 증기발생기 세관 손상원인조사, 최종보고서 1989, 한국원자력연구소.
3. Steam Generator Process Report, Steam Generator Reliability Project, EPRI, Oct. 1992.
4. J.S. Kim, J.H. Suh, and I.H. Kuk, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Vol2, Seoul, Korea, Oct. 1994, p565.

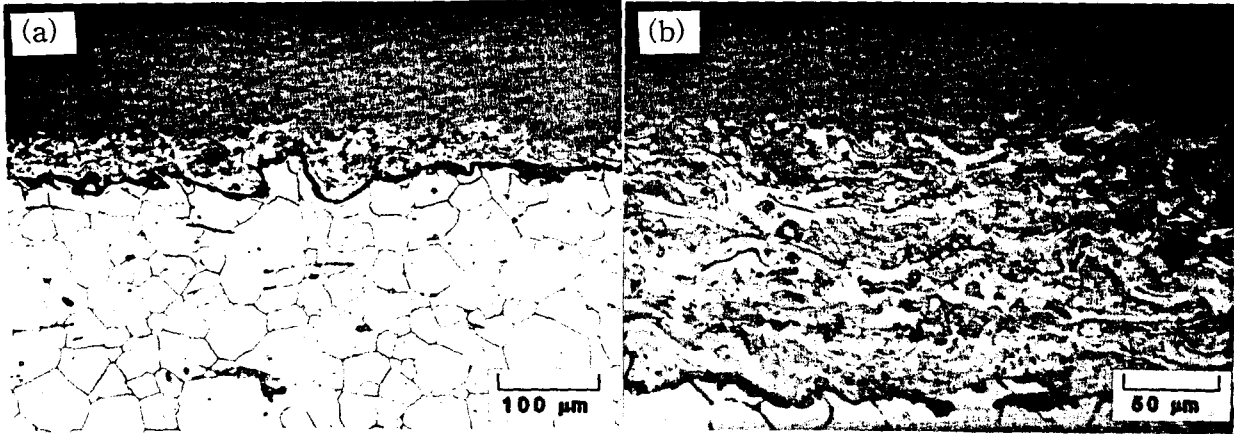
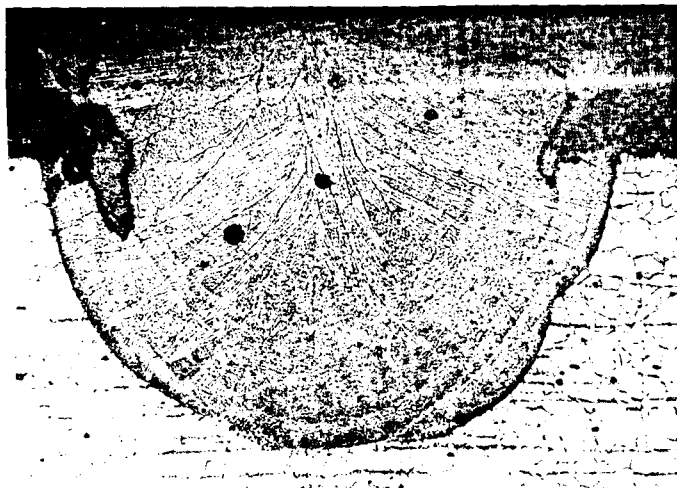


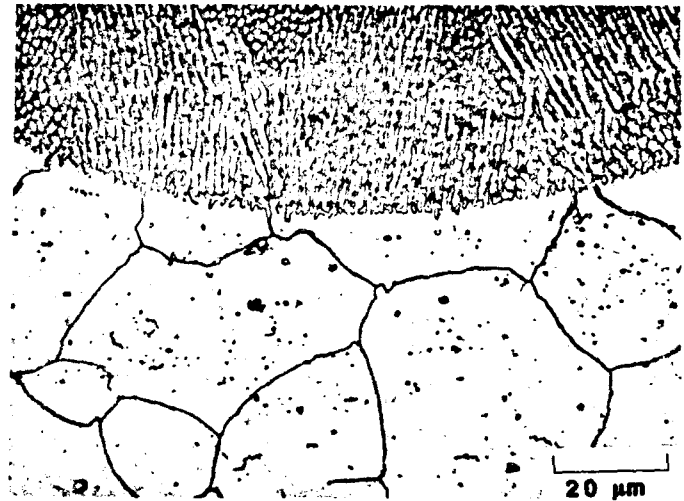
Fig. 1 Optical micrographs of the plasma-sprayed specimens with (a) 44 μm thickness of Cr-coated (B1) and (b) 155 μm thickness of Ni/Cr (B3) layers, respectively.



150 μm

Fig. 2 Optical micrograph of the B3 specimen, laser-surface-alloyed at 1 KW and 100 cm/min.

Fig. 3 Optical micrograph showing both plane-front and cellular solidification layers observed in B1 specimen, laser-surface-alloyed at 750W and 100 cm/min.



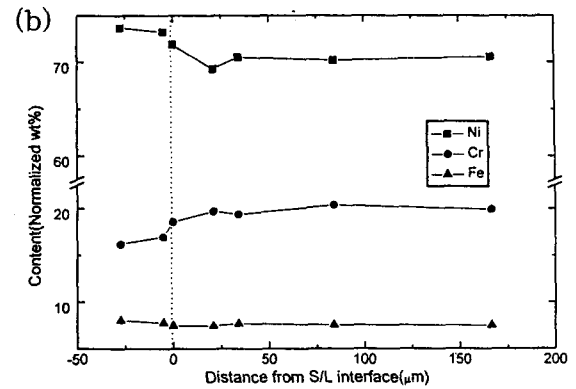
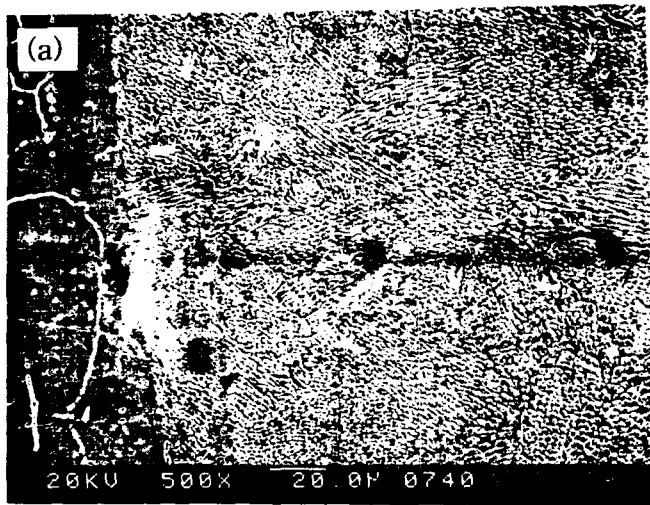


Fig. 4 SEM micrograph, (a) of B1 specimen with 44 μm thickness of Cr-coated layer, laser-surface-alloyed at 1 KW and 200 cm/min, and (b) compositional variation with distance from S/L interface.

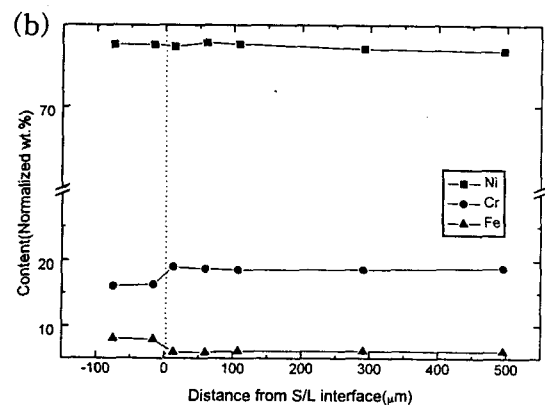
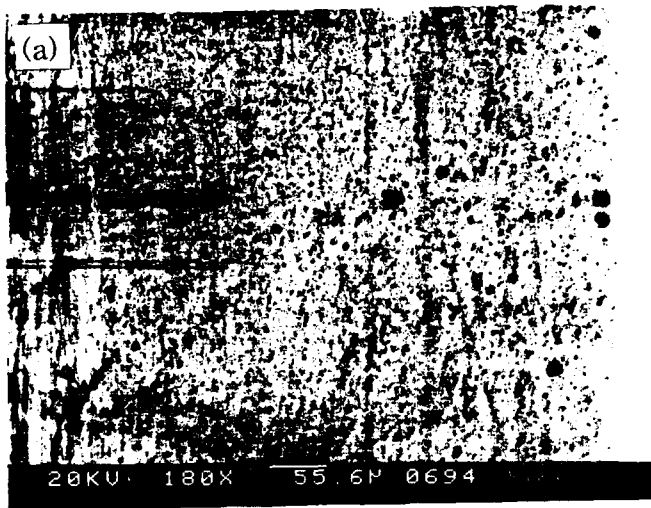


Fig. 5 SEM micrograph, (a) of B4 specimen with 249 μm thickness of Ni/Cr-coated layer, laser-surface-alloyed at 1.3 KW and 200 cm/min, and (b) compositional variation with distance from S/L interface.