2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 1차계통 부품의 내마모/내침부식 특성을 향상시키기 위한 레이저 Co-free 비정질 재료 cladding 연구

Study on Co-free amorphous material cladding using a laser beam to improve the resistance of primary system parts in NPPs to wear/erosion-corrosion.

김정수, 우성식, 서정훈

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원전 1차 계통 주요 부품의 내마모성/내침부식성을 향상시키고 Co 저감화를 위하여 Co-free 비정질 재료인 ARMACOR M 분말을 레이저 빔으로 부품재료 표면에 cladding하여 cladding 층 표면의 마모/침부식 특성을 평가하였다. ARMACOR M cladding 층의 내마모/내침부식성을 비교평가하기 위하여 그 동안 Co-free 합금으로 개발되어 사용되고 있는 NOREM 02, Deloro 50 재료와 원전 초기부터 원전 1차측 주요 부품에 사용되고 있는 마모/침부식 특성이 우수한 Co-합금인 Stellite 6 재료를 TIG 육성용접하여 내마모/내침부식성을 평가하였다. 상온 및 300°C 대기 분위기와 상온 물 분위기에서 마모특성 시험결과에 의하면 레이저빔으로 cladding 한 ARMACOR M 재료의 내부식성/내침부식성이 본 연구에 사용한 모든 재료 중에서 가장 우수하였으며, 특히 ARMACOR M 재료를 TIG 육성용접한 경우보다도 우수한 특성을 보였다.

Abstract

A study on Co-free amorphous material, ARMACOR M, cladding using a laser beam has been performed to improve resistance of the primary system main parts on nuclear power plants to wear/ erosion-corrosion. The wear /erosion-corrosion properties of the ARMACOR M cladded specimens were characterized in air at room temperature and 300°C, and in air at room temperature, and compared to those of other hardfacing materials, such as Stellite 6, NOREM 02, Deloro 50, TIG-welde or laser cladded. According to the results, ARMACOR M laser-cladded specimen showed to have the highest resistance to wear/erosion-corrosion.

I. 서 론

원자력발전소의 1차측 계통은 원자로 내에서 데워진 고온.고압의 1차측 냉각수가 발전기를 가동시키는 증기를 생산하기 위하여 증기발생기 1차측을 통해 순환하고 있는데, 이 냉각수의 순환을 조절하기 위하여 각종 펌프나 밸브가 설치되어 있다. 1차측을 순환하고 있는 냉각수는 고온.고압 및 고속으로 순환을 하기 때문에 1차 계통 설비부품에서 고 내마모/내침부식성이 요구되는 부분에 고 경도를 가진 내마모성/내침부식성이 우수한 Co-기 합금 재료인 Stellite 6로 cladding되어 있다. 그러나 Co-기 합금재료를 사용할 경우 이 재료의 마모/침.부식 생성물이 노심에 퇴적되고 중성자 조사에 의하여 방사화되어 1차측의 방사선량을 증가시켜서 작업자의 방사선 피폭량을 증가시키는 주 요인으로 작용하게 된다.

원전 선진국에서는 Co 유입을 근원적으로 제거하여 1차 계통 내의 방사선량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 프로그램을 중.장기적으로 추진하여 왔다.[1,2] 특히 Co의 주 생산원인 각종 밸브의 경면(hardfacing) 재료로 사용 중인 Co-기 합금인 stellite 계통 재료를 대체할 수 있는 저 Co 또는 Co-free 합금 재료 개발에 많은 연구를 수행하여 현재는 상용화된 재료가 사용되고 있다. 그러나 밸브 경면의 제조 및 보수뿐만 아니라 경면 재료의 물성과 품질에 큰 영향을 미치는 경면공정에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

최근 미국에서는 “metamorphic transformation” 현상을 이용한 비정질 합금이 개발되어 많은 관심을 끌고 있다.[3] 이 합금은 Co를 함유하고 있지 않고 주성분이 Fe-Cr-B인 합금이다. 이 합금은 일반 비정질 합금과 달리, 결정구조를 갖는 합금으로 기본적으로 비정질 합금은 아니지만 표면에 응력이나 마찰력이 가해질 경우 metamorphic transformation 현상에 의해 수 ㎛ 깊이의 표면층이 비정질 구조로 변태가 일어난다. 그리고 비정질 변태로 인하여 합금표면의 경도 증가와 함께 내마모 및 내침부식성이 크게 향상된다.

본 연구에서는 1차 계통 부품의 내마모/내침.부식성의 향상과 방사선량 저감화를 위하여 Fe-Cr-B계 비정질 합금에 대한 레이저 cladding 연구 및 물성평가를 수행하였다. 비교평가를 위하여 비정질 합금과 Stellite 합금을 TIG 용접하여 물성평가를 수행하였으며, 또한 기존에 Stellite 대체 재료로 개발된 NOREM 02 및 Deloro 50 합금을 레이저 cladding하여 물성평가를 수행하였다.

II. 실험방법

1. 시험시편

본 연구에서 사용한 cladding 재료는 비정질 재료인 ARMACOR M, Co-기 합금재료인 Stellite 6, Fe기 합금인 NOREM 02, Ni기 합금인 Deloro 50 등으로 Table

1에 각 재료의 화학조성을 표시하였다. 모재는 원전 1차 계통의 밸브 재료로 많이 사용되는 316 스테인레스강으로 100X50X10 mm^3 또는 100X50X20 mm^3의 크기로 기계 가공하여 사용하였으나, 모재의 영향을 보기 위하여 mild carbon steel을 모재로 사용하기도 하였다. 레이저 cladding시 사용 재료는 대부분 분말을 사용하였으며, TIG 육성용접에 사용된 ARMACOR M 및 Stellite 6는 용접봉을 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of coating materials used in this study

Table 1 Alloy	Cr	Ni	Fe	Co	Mn	Mo	W	V	Si	B	C
Stellite 6 (Rod)	31.6	2.8	3.3	Bal.	0.23	-	4.4	-	4.4	-	0.8
ARMACOR M (Powder)	24.4	0.14	Bal.	-	0.12	-	-	-	0.46	2.4	0.1
ARMACOR M (Wire)	26.2	0.15	Bal.	-	1.2				0.50	3.7	0.08
NOREM 02 (Powder)	24.22	4.30	Bal.	0.01	4.08	2.13	-	-	3.19	0.002	1.28
Deloro 50 (Powder)	10.42	Bal.	2.46	-	-	-	-	-	3.90	2.11	0.44

2. 레이저 cladding 및 TIG 육성용접

사용한 레이저는 PRC Laser사의 PRC-3500 에이저 발진기를 장착한 3.5kW CO_2 레이저 시스템으로 원자력연구소에서 레이저 표면개질 용으로 개발.설치된 장치를 사용하였다. 레이저 빔 모드는 표면개질 연구에 적합한 연속 Q 모드를 사용하였으며, 가공재료 표면에 형성되는 빔 크기는 3x3.mm_2이었다. 각 사용 재료에 대한 레이저 cladding 조건은 Table 2에 요약하여 나타내었다.

Table 2 Laser cladding conditions for the cladding materials

Alloy	빔 Overlapping (%)	Powder feed rate(g/min.)	Trverse speed (m/min.)	Laser Power (W)
ARMACOR M	30	13.02	0.6	2100
NOREM 02	30	11.0	0.6	2000
Deloro 50	30	14.94	0.5	1800

Stellite 6과 ARMACOR M 합금을 실제 밸브경면 제조에 보편적으로 사용하는 TIG 육성용접 방법을 이용하여 316 스테인레스강 모재 위에 1-2 mm 두께로 육성용접하였다. Stellite 6의 경우 용접봉의 직경이 3.2 mm로 충분한 두께의 용접층을 1번의 용접으로 얻을 수 있었으나, ARMACOR M의 경우는 용접 wire의 두께가 1.6 mm로 용접을 3번 반복하여 원하는 두께를 얻을 수 있었다. 특히 ARMACOR M의 용접에서는 용접층에 균열이 발생하여 모재를 350°C까지 예열한 다음 용접을 실시하였다.

3. 미세조직 분석 및 관찰

경면층의 미세조직은 광학 현미경(OM), 주사 전자 현미경(SEM), 투과 전자 현미경(TEM)을 이용하여 관찰하였으며, 조성분석에는 SEM/WDX(Wave-dispersive X-ray Spectroscope)와 TEM/EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscope)를 이용하였다. 광학 및 SEM 관찰을 위하여 각 시편들을 에칭하였는데, Stellite 6와 ARMACOR M 합금은 증류수 100 ml와 CrO_3 10g을 혼합한 용액을, Deloro 50은 메탄올 95 ml와 질산 5 ml를 혼합한 용액을, 그리고 NOREM 02는 에탄올 100 ml, 염산 5 ml, picric 산 4g을 혼합한 용액을 사용하여 화학에칭을 하였다. TEM 시편은 cladding 층과 평행한 면의 미세조직을 관찰할 수 있도록 절단한 후, 시편의 두께가 20-30 ㎛가 되도록 연마한 다음, 직경 3 mm로 펀칭하여 구리 그리드에 부착하기 전에 아세톤에 세척한 후 이온 밀링하여 제조하였다.

4. 물성평가

Cladding 층의 vickers 미세경도는 500g의 하중을 15초간 부여하여 측정하였다. 마모시험은 block-on-block 방식의 미끄럼 마모시험을 수행하였는데, 마모시편은 27X22X6.1 mm3 크기의 고정시편과 지름이 6 mm이고 높이가 6.2 mm인 원통형태의 이송시편을 준비하였다. 마모시험 전에 마모면을 SiC 2000번 연마지를 이용하여 표준조도가 Ra로 대략 0.02 ㎛가 되도록 하였다. 이송시편의 이송속도는 원전 1차측 게이트 밸브의 평균 작동속도인 3mm/sec.로 하였으며, 이송거리는 9 mm거리를 왕복하여 sliding되도록 하였다. 마모시험은 상온 대기 중, 300 °C대기 중, 그리고 상온 수정기 분위기에서 15 ksi의 하중을 가하여 100 사이클까지 수행하였다. 그리고 고정시편과 이송시편의 무게 감소량을 측정하여 마모 손실량을 계산하였다.

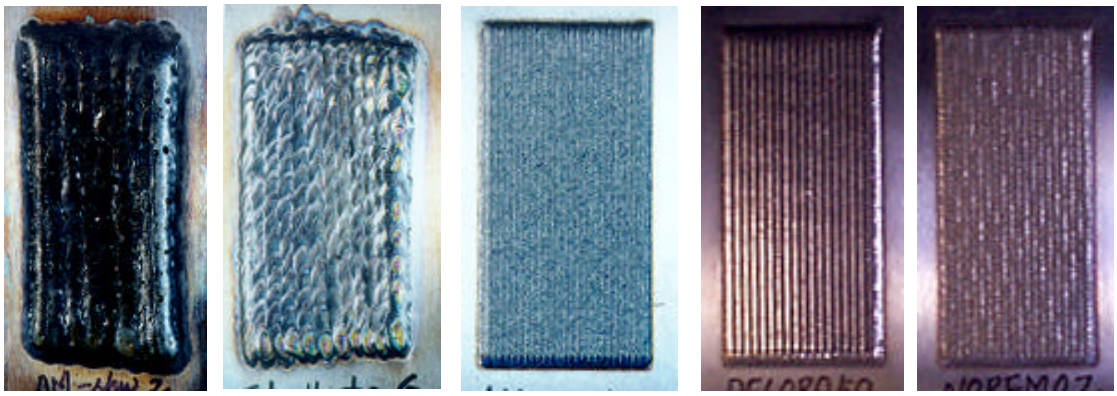
III. 실험결과 및 고찰

1. 레이저 cladding 및 TIG 육성용접

가. 경면시편의 외관

Fig. 1은 Stellite 6과 ARMACOR M을 TIG 용접한 시편의 외관을 보여주는데, TIG 용접한 시편들은 모재의 표면이 산화되어 있고, 용접비드 형상이 매우 거칠뿐만 아니라 용접과정에서 입열량이 과도하게 컷기 때문에 용접으로 인한 모재가 심하게 변형되어 있다. 그러나 레이저 cladding한 시편은 비드형상이 수려하고 모재의 뒤틀림이 거의 없었으며, 모재 표면의 산화도 거의 없었다. 이것은 레이저 빔이 고에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 순간적으로 첨가되는 재료를 용융시켜 모재표면에 cladding되고 또한 냉각 시 모재의 열전도로 급속한 응고가 일어나 작은 입열량에서도 cladding

을 할 수 있기 때문이다. 다른 재료로 레이저 cladding한 경면은 회색 빛을 가지고 있었으나, Deloro 50 합금으로 레이저 cladding한 경면표면은 밝은 금속광택을 띄었다.



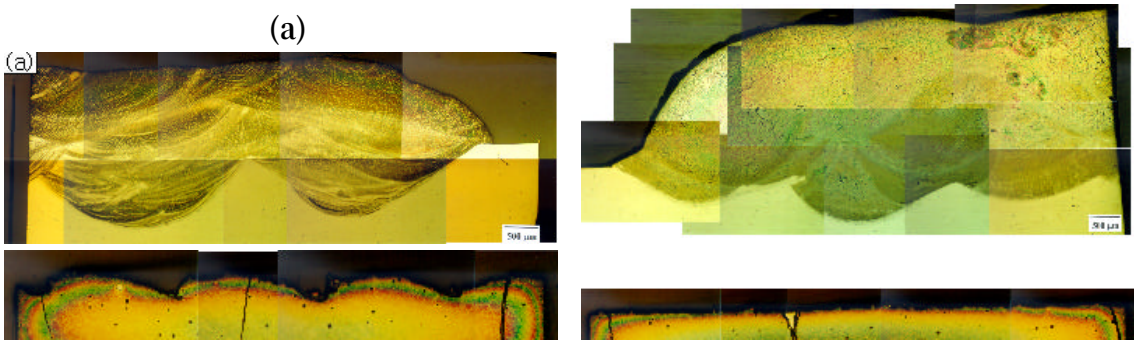
(a) (b) (c) (d) (e)

Fig. 1. Appearance of specimens TIG-welded with (a) ARMACOR M and (b) Stellite 6, and specimens laser-cladded with (c) ARMACOR M, (d) Deloro 50 and (e) NOREM 50

나. 미세조직

Fig. 2(a) 및 (b)는 Stellite 6 및 ARMACOR M 재료로 TIG 용접한 시편을 용접비드 방향에 수직하게 절단 한 면의 광학 미세조직을 보여 주는 것으로 모두 용접 재료와 모재와의 접합계면이 심하게 굴곡되어 있는데, 이는 용접과정에서 비드 사이의 간격이 비교적 넓었던 것을 나타내며, 모재가 용융과정에서 과도하게 용융되어 용접재에 혼합된 것을 알 수 있다. 실제로 측정한 dilution depth는 Stellite 6는 대략 1.2 mm, ARMACOR M은 1.7 mm로 측정되었다. 이와 같이 dilution depth가 큰 경우, 경면층의 화학조성은 실제 cladding 재료의 그것에서 크게 벗어나고 따라서 활용하려고 하는 cladding 재료가 가지고 있던 물성의 퇴화(degradation)가 일어난다.

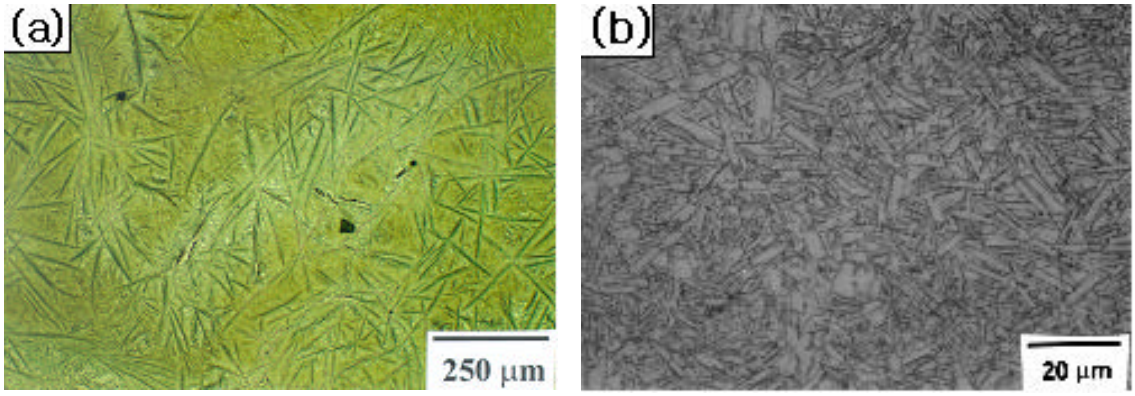
한편, TIG 육성용접의 경우 dilution depth의 증가와 경면의 거칠기 등을 보이는 반면 레이저 cladding한 경우의 미세조직은 그림 2(c) 및 (d)에서 보는 것처럼 경면층과 모재의 접합계면이 거의 직선 상태로 되어 있는데, 이것은 레이저 cladding으로 균일한 두께의 경면층을 형성시킬 수 있음을 보여 준다. 이러한 현상은 레이저 cladding에서는 dilution이 거의 일어나지 않기 때문이며, cladding층의 물성은 원 재료인 ARMACOR M이 가지고 있는 물성을 그 대로 유지하고 있을 것이다. 그리고 경면층 표면이 비드의 겹침에 의해 다소 굴곡을 보이는데(Fig. 2(c) 및 (d)), 이것은 겹침을 더욱 증가시키면 감소하여 편편한 표면을 형성시킬 수 있다.



(c) (d)

Fig. 2 Micrographs showing cross-sections of the specimens (a) TIG-welded with stellite 6 and ARMACOR M, and (c) and (d) laser-cladded with ARMACOR M

고 배율로 본 Stellite 6 합금 경면층의 미세조직은 수지상 조직을 보였으나, ARMACOR M의 경 면층 미세조직은 그림 3(a)에서 보는 것처럼 일반 용접 조직에서 관찰되는 수지상 구조가 아닌 페라이트 기지상에 얇고 긴 침상(needle-like) 형태의 석출물이 분포되어 있는 미세조직이 관찰되었다. ARMACOR M의 경우 침상 조직은 보통 Cr_2B $Cr_{1.65}Fe_{0.35}B$의 두 가지 boride로 알려져 있다. 이러한 boride의 분포는 TIG 용접한 경면층과 모재 사이 계면부위에서 크게 감소하는 것으로 관찰되고 있는데, 이러한 양상은 모재의 과도한 dilution 때문이다. 한편 레이저 cladding 한 경면층에서 관찰되는 미세조직은 그림 3(b)에서 보는 것처럼 TIG 육



(a) (b)

Fig. 3 Microstructures of ARMACOR M coats formed with (a) TIG welding and (b) laser cladding

성용접과는 달리 석출된 boride 상은 판상형태로 전 경면층에 걸쳐서 균일하게 분포되어 있으며, boride의 부피 분율도 크게 증가하였다. 석출된 boride 상의 크기는 대략 5㎛ 이하로 매우 미세하였다. 기지에 석출된 boride 상은 $Cr_{1.34}Fe_{0.66}B$ 와/또는 $Cr_{1.42}Fe_{0.58}B$로 분석되었는데, 이것은 TIG 용접의 경우보다 Fe가 10% 가량 많이 함유된 것으로 Fe 원자가 Cr 원자 위치를 더 많이 치환하고 있음을 나타낸다.

Fig. 4는 TEMdmfh 관찰한 레이저 클래딩한 ARMACOR M 경면층의 미세조직 사진이다. 코팅층에서 비정질 상은 관찰되고 있지 않있으며, Fe-Cr 기지상과 boride 모두 결정구조를 갖고 있다. Boride 상 내부에는 적층결함(stacking fault)으로 판단되는 결함이 존재한다. 이 미세조직을 TEM/WDX로 정밀하게 분석한 결과에 의하면 기지상은 대략 19.5 at%의 Cr 원소가 고용되어 있는 BCC 결정구조의

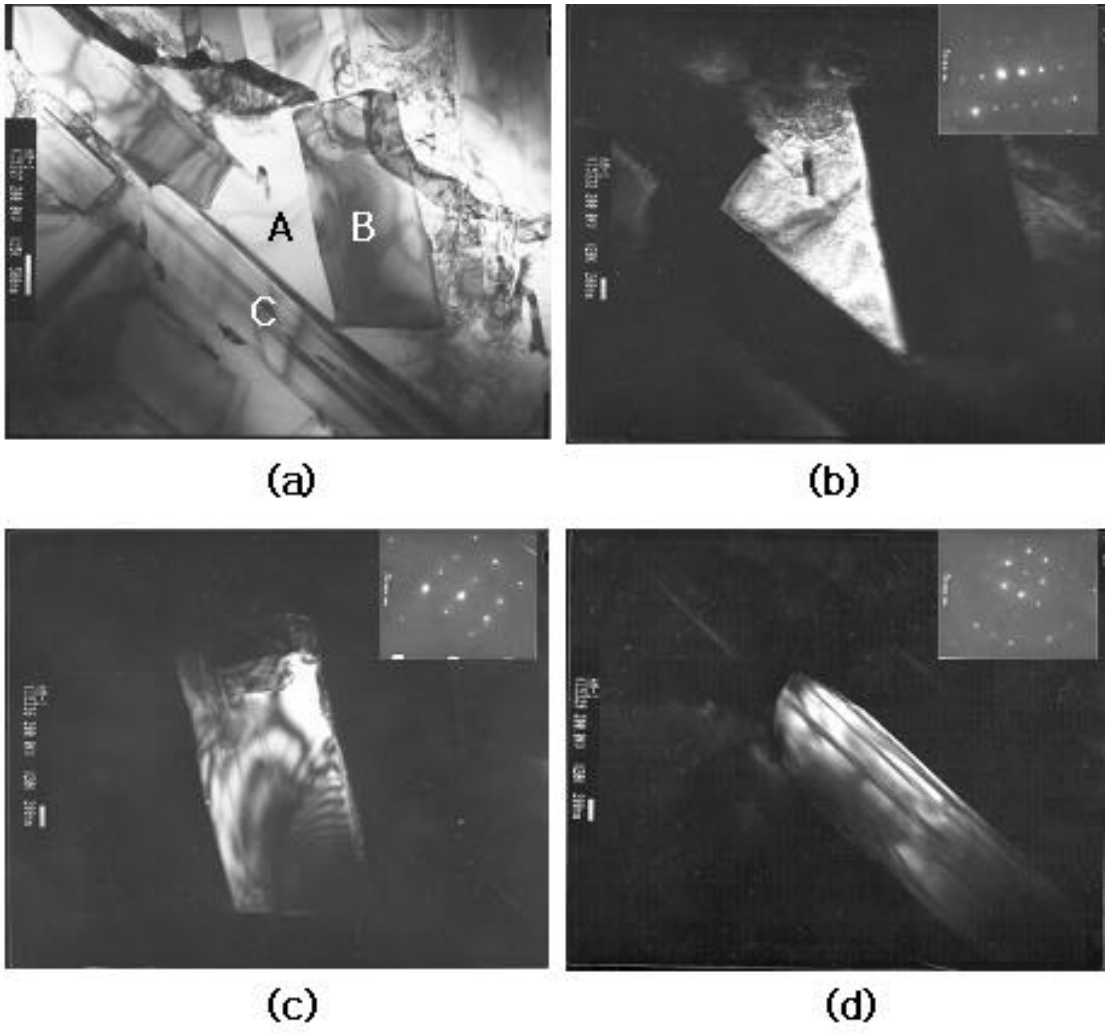


Fig. 4 (a) Bright field TEM micrograph showing microstructure of laser-cladded ARMACOR M. Dark field images and electron diffraction patterns of (b) matrix A, (c) boride B, and boride C in (a).

Fe-Cr 고용체로, 침입형 원자인 Si 원소가 11.7% 가량 함유되어 있다. Fe-Cr-B 비정질 합금인 ARMACOR M 합금은 일반 비정질 합금과는 달리, 결정구조를 갖는 합금으로 비정질 합금은 아니지만 표면층에 응력이나 마찰력이 가해지면 metamorphic 변태에 의해 수 ㎛ 깊이의 표면층이 비정질 구조로 변태된다.[3, 4-6] 현재 이러한 변태에 대한 정확한 기구는 아직 밝혀져 있지 않지만 마찰력에 의해 Fe-Cr 기지상이 비정질로 변태되는 현상은 2원계 천이합금의 기계적 합금화 과정에서 관찰되는 "고체 비정질 반응(solid state amorphization reaction)"와 유사하다고 알려져 있다.[5-10] 고체 비정질 반응 현강은 화학적 구동현상으로, 고체반응에서 비정질 변태가 일어나기 위해서는 비정질상릐 자유에너지가 결정상 보다 낮아야 한다. 일반적으로 고체 비정질 반응 현상이 일어나기 뤼해서는 어떤 임계량 이상의

elastic mismatch 또는 결함농도가 필요하고[7-10] 2원계 합금의 이론적 그리고 실험적 연구[11-12]에 따르면 고용원소의 농도가 어떤 임계값에 도달하면 결정구조를 갖는 고용체가 비정질 상에 대해 불안정해진다고 한다. ARMACOR M 합금의 경우에는 침입형 원자인 Si과 B 원소가 Fe-Cr 기지상의 metamorphic transformation에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다.

다. 경면층의 화학조성 분포

레이저 cladding한 ARMACOR M 경면층의 화학적 조성을 경면층 단면으로부터 깊이 방향으로 거리에 따른 화학 조성의 변화를 WDX로 측정하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 ARMACOR M 을 구성하고 있는 각 성분원소들의 조성이 cladding 층 전반에 걸쳐 일정하고, 화학적으로 균일함을 알 수 있다. 또한 레이저 cladding 과정에서 모재의 dilution이 거의 일어나지 않았고, 클래딩 층(ARMACOR M)과 모재(316SS)의 계면을 중심으로 화학조성이 변하는 전이구역의 깊이가 대략 100㎛ 이하인 것으로 관찰된다. 이러한 현상은 Deloro 50 합금이나 NOREM 02 합금을 레이저 cladding한 경우에도 마찬가지로 관찰되었다.

2. 물성평가

가. 미세경도

Fig. 6는 TIG 육성용접 및 레이저 cladding한 각종 경면층에서 측정한 미세경도를 서로 비교한 막대 그래프를 보여주고 있다. ARMACOR M을 레이저 cladding으로 생성한 경면층이 가장 높은 경도를 보여주고 있으며, 레이저 cladding한 Deloro 50, TIG 용접한 ARMACOR M, 레이저 cladding한 NOREM 02, TIG 용접한 Stellite 6 순으로 표면경도가 감소하고 있음을 알수 있는데, 이는 원전 밸브 경면재료로 보편적으로 사용되는 TIG 용접 Stellite 6보다 ARMACOR M 합금을 레이저로 cladding하여 사용하면 높은 경도를 같는 경면층을 얻을 수 있음을 나타낸다.

Fig ving

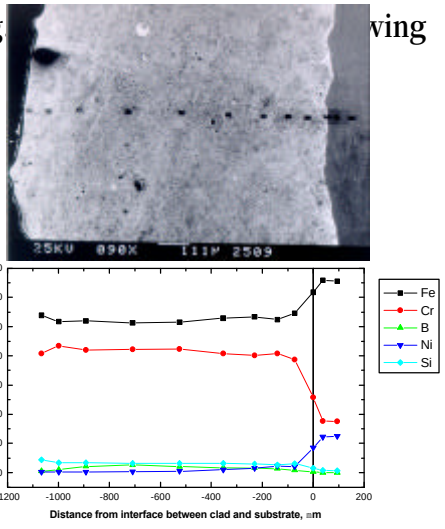
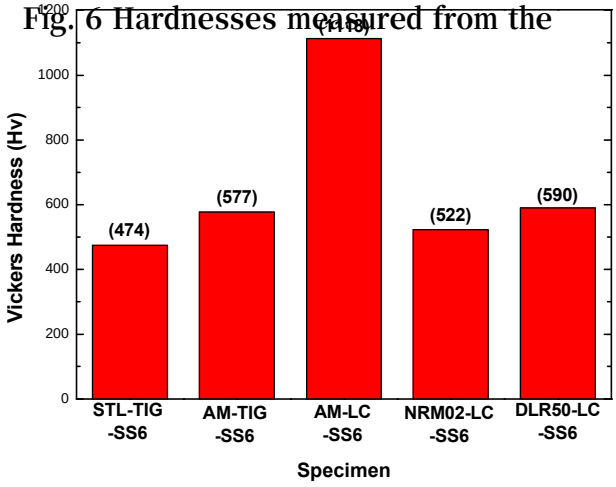


Fig. 6 Hardnesses measured from the



cladded ARMACOR M and variation In chemical compositions through the cladded layer

coats formed by TIG welding and kaser. cladding.

이 그림에서 보면 같은 ARMACOR M 재료를 사용하여 경면층을 제작하더라도 TIG 육성용접으로 제작한 경면층 보다 레이저 cladding으로 제작한 경면층의 경도가 크게 증가하고 있는데, 이는 앞 절의 미세조직 절에서 설명하였듯이 레이저로 cladding한 ARMACOR M의 시편에서 TIG 용접육성한 경우보다 dilution이 크게 감소하였고 따라서 boride 상의 분율이 크게 증가하였기 때문이다.

나. 미끄럼 마모시험

(1) 상온 및 300°C 대기 분위기에서의 마모특성

미끄럼 마모 시험은 15 ksi의 접촉 하중 하에서 상온 및 300°C 대기, 그리고 상온 수중 분위기에서 여러 종류의 시편에 대해 수행하였다. 먼저 상온 및 300°C 대기 분위기에서의 마모특성 평가시험 결과를 설명하면 다음과 같다.

Stellite 6, ARMACOR M, NOREM 02, Deloro 50 등을 TIG 육성용접 또는 레이저 cladding한 경면층의 미끄럼 마모특성을 상온에서 시험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 보면 사용 재료 중에서 ARMACOR M의 내마모성이 가장 우수하고, 또한 TIG 육성용접한 경면보다 레이저 cladding한 경면의 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 레이저 cladding 시 모재의 용융에 의한 코팅층의 dilution이 TIG 육성용접한 경우보다 무시할 만큼 매우 적기 때문으로, 표면경도 특성에서 충분히 예측되는 결과이다. 모재의 영향을 보기 위하여 316SS와 mild steel(MS)에 레이저로 ARMACOR M을 같은 조건에서 cladding한 경우, 316SS 모재를 사용한 시편이 MS 모재를 사용한 시편보다 마모 저항성이 약간 우수한 결과를 보였다. 상온 대기 중에서 마모특성은, Stellite 6을 대체하기 위하여 개발된 합금 중에 Ni-기 합금인 Deloro 50이 가장 나쁜 마모 저항성을 보였으며, Fe-기 합금인 NOREM 02은 우수한 내마모 특성을 보였다. 결론적으로 말하면 레이저로 316 SS 모재에 cladding한 ARMACOR M의 경면층이 가장 우수한 내마모 특성을 나타내었다

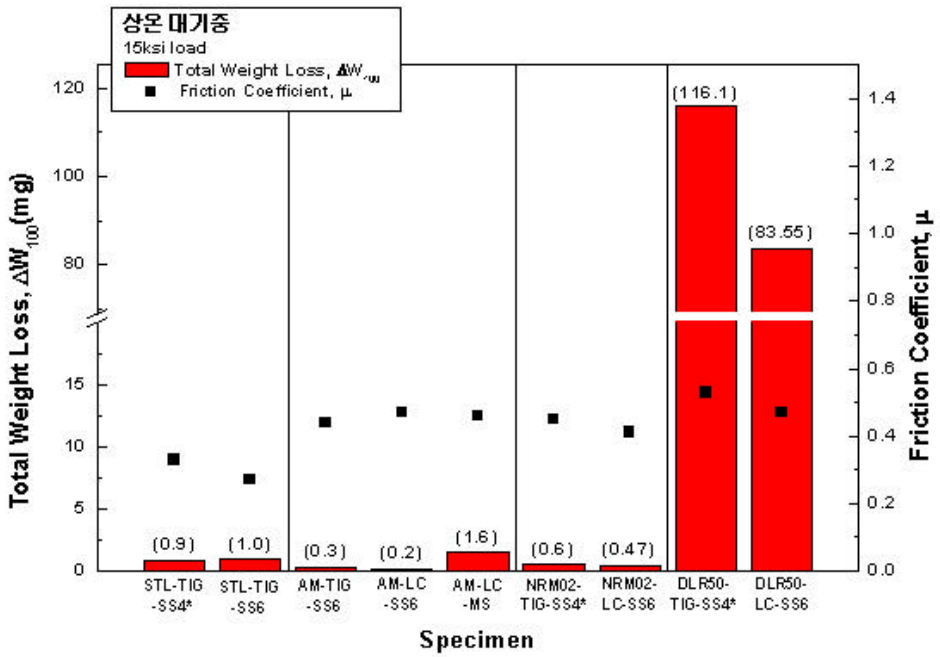


Fig. 7 Total weight losses and friction coefficients of the STL-TIG-SS4*, STL-TIG-SS6, AM-TIG-SS6, AK-LC-SS6, AM-LC-MS, NRM02-TIG-SS4*, NRM02-LC-SS6, DLR50-TIG-SS4*, and DLR50-LC-SS6 specimens, measured at room temperature(* data from ref. 13)

한편 300°C 대기 중에서 미끄럼 마모시험을 하여 얻은 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 이 시험 조건에서는 대기 중에서의 시험 결과와는 달리 316SS 모재에 ARMACOR M 재료를 TIG 육성용접한 경우가 가장 열악한 내마모 특성을 나타내고 있다. 또한 Deloro 50 재료를 316 SS 모재에 레이저 cladding한 경면은 상온 대기 중에서와 마찬가지로 나쁜 내마모 특성을 보이고 있다. Fig. 7과 8을 비교하여 보면, 대기 중에서 온도 변화가 각 시편의 마모거동에 미치는 영향을 알 수 있는데, ARMACOR M 소재를 316SS에 클래딩한 시편이 300°C의 온도에서도 상온에서와 마찬가지로 가장 우수한 내마모 특성을 보이고 있다. 반면에 ARMACOR M을 316SS 모재에 TIG용접한 시편은 고온에서 매우 나쁜 내마모 특성을 보이고 있는데, 이것은 동일한 ARMACOR M 합금을 사용하더라도 경면층을 제작하는 경면 제조공정에 따라 마모 저항성이 크게 다르며, 레이저 클래딩한 것이 TIG 용접한 것에 비하여 매우 우수한 마모 저항성을 갖고 있음을 보여주고 있다. 또한 특이한 현상은 NOREM02를 304SS에 TIG 용접한 시편의 경우 코팅층이 모재로부터 떨어져 나오는 현상이 일어났다고 보고되었다. 대체적으로 대부분의 시편들이 고온에서 상온에서보다 다소 낮은 내마모 특성을 나타내고 있다.

한편 다른 코팅재료(NOREM02 및 Deloro50)에 대해서도 레이저 cladding한 시편이 TIG 용접한 시편보다 우수한 것을 보기 위하여 같은 조건에서 시험 평가한 보고 자료(Fig. 7, 8에서 *로 표시한 것)와 비교하여 보면 레이저 클래딩한 경우가 더 우수한 내마모 특성을 보임을 알 수 있다. 이것은 내마모 특성이 다소 떨어지는 코팅 합금재료도 레이저 클래딩 공정을 적용함으로써 마모특성을 다소 향상시킬

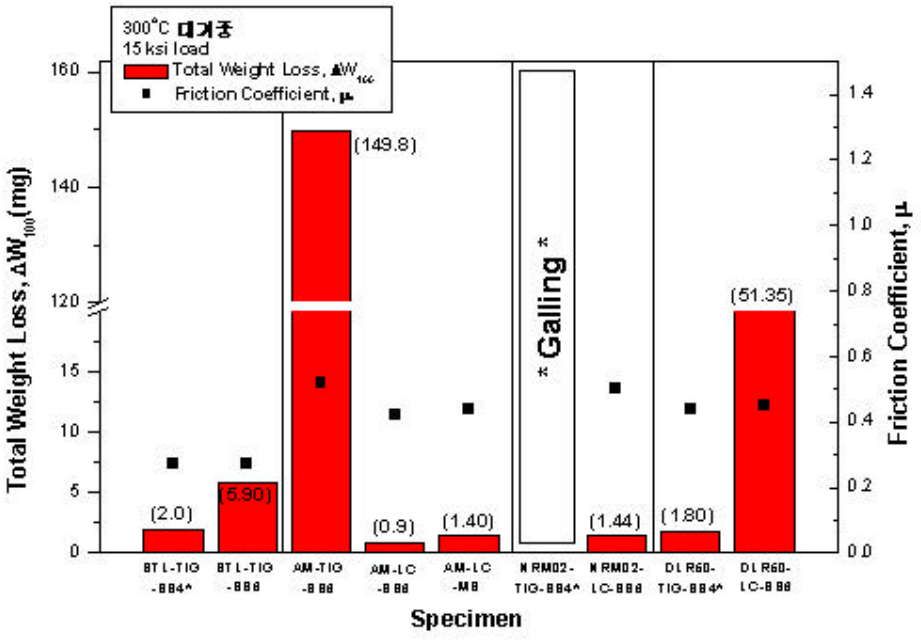


Fig. 8 Total weight losses and friction coefficients of the STL-TIG-SS4*, STL-TIG-SS6, AM-TIG-SS6, AK-LC-SS6, AM-LC-MS, NRM02-TIG-SS4*, NRM02-LC-SS6, DLR50-TIG-SS4*, and DLR50-LC-SS6 specimens, measured at 300°C(* data from ref. 13)

수 있음 보여준다.

또한 Fig. 7 및 8에 마모량과 함께 마찰계수를 표시하였는데, 보통 마찰계수 값이 작으면 마모량도 감소하는 경향을 보이다. 그런데 이 연구 stellite 6의 코팅층의 마찰계수가 ARMACOR M의 코팅층의 마찰계수보다 작음에도 불구하고 마모량은 오히려 증가하고 있다. 그리고 대기 중에서는 마찰계수가 시험온도에 크게 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다.

(2) 상온 수중에서의 마모특성

Fig. 9은 상온 물 분위기에서 15 ksi 접촉하중 하에서 미끄럼 마모시험을 통하여 얻어진 각 시편의 마모 손실량을 나타낸 그림이다. 모든 시편에서 우수한 내마모 특성을 모였다. 특히 deloro 50 재료를 316SS에 레이저로 클래딩한 시편은 상온 수중에서의 마모 저항성이 대기 중에서의 그것보다 매우 향상된 것을 볼 수 있는데, 이것은 일반적으로 수중에서는 물 분자가 두 마모시편 사이에 존재하여 직접적인 금속간 접촉을 방해하는 윤활역활을 하기 때문이다. 하지만 원자력발전소 1차측

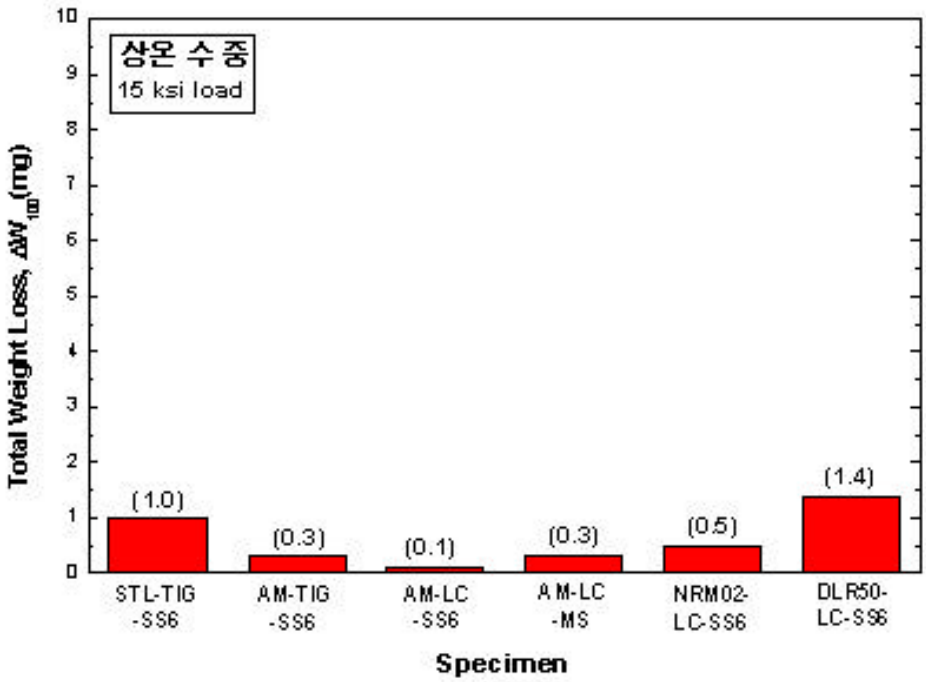


Fig. 9 Total weight losses of the STL-TIG-SS6, AM-TIG-SS6, AM-LC-SS6, AM-LC-MS, NRM02-LC-SS6, and DLR50-LC-SS6 coatings, measured in water at room temperature.

가동환경은 고온.고압의 순수(Li, B이 함유된)가 순환하고 있으므로 마모/침.부식 특성을 모사 가동조건 하에서 수행하여야 하나 가동조건을 모사할 수 잇는 시험설비가 없어 시험을 수행할 수 없었다. 차후 실험설비가 확보되면 시험을 수행할 예정이다.

결론적으로, 상온 및 300°C 대기 분위기와 물 분위기에서 15 ksi의 비교적 높은 하중 아래에서 수행한 마모시험결과(Table 3에 요약)로부터 비정질 합금인 ARMACOR M 합금을 316SS에 레이저 cladding한 시편이 가장 우수한 마모 저항성을 보였다. 특히 전반적으로 TIG 육성용접에 의해 제작된 경면층에 비하여 레이저 클래딩으로 경면 처리한 시편에서 더 우수한 마모 저항성을 나타내었다.

Table 3 Total weight losses and frictional coefficients of typical specimens

tested in air at room and 300°C, and in water at room temperature

시편종류	상온 대기중		300°C 대기중		상온 수중	
	마모손실량 DW_{100}(mg)	마찰 계수 m	마모손실량 DW_{100}(mg)	마찰 계수 m	마모손실량 DW_{100}(mg)	마찰 계수 m
STL-TIG-SS4*	0.90	0.33	2.0	0.27	-	-
STL-TIG-SS6	1.0	o.27	5.9	0.27	1.0	-
AM-TIG-SS6	0.3	0.44	149.8	0.52	0.3	-
AM-LC-SS6	0.2	0.47	0.9	0.42	0.1	-
AM-LC-MS	1.6	0.46	1.4	0.44	0.3	-
NRM02-LC-SS6	0.47	0.41	1.44	0.5	0.5	-
NRM02-LC-SS4*	0.60	0.45	Galling	Galling	-	-
DLR50-LC-SS6	83.55	0.47	51.35	0.45	1.4	-
DLR50-LC-SS4*	116.10	0.53	1.80	0.44	-	-

* KEPRI data from reference 13.

IV. 요 약*

원전 1차 계통 주요 부품설비의 내구성 향상과 1차 계통 방사선량 저감화를 위하여 신 소재로 알려진 Co-free ARMACOR M을 레이저 cladding하는 기술을 개발하였다. 이 기술개발에서 얻은 주요 내용으로는 같은 코팅 재료라도 코팅공정에 따라, 또한 기판의 재질에 따라 코팅층의 내마모 특성이 많이 변함을 알 수 있다. 즉 본 연구에 사용된 여러 코팅 재료(stellite 6, ARMACOR M, NOREM 02, Deloro 50 등)를 레이저 cladding 또는 TIG 육성용접한 코팅층 중에서 레이저로 316SS 위에cladding한 ARMACOR M 재료의 경면이 가장 우수한 내마모 특성을 보였다. 따라서 현재 내마모성 향상을 위하여 Stellite 6 또는 원전 1차측 방사선량 저감화를 위하여 개발된 재료인 NOREM 02나 Deloro 50 등의 재료를 TIG 육성용접하여 경면층을 제조하는 공정 대신에 레이저로 cladding하여 경면층을 제조하는 공정을 이용하면 수명이 훨씬 증가할 것으로 생각되며, 또한 이 기술을 이용함으로써 손상된 부품의 보수도 가능하다.

References

1. H. Ocken, “Reducing the cabalt inventory in light water reactors”, Nuclear Technology 68 (1985) p.18
2. H. Ocken, “Co Reduction Guidelines," EPRI NP-6737, March 1990.
3. US Patent No. 4725512, 1988.
4. H.J. Kim et al., "Characterization of Fe-Cr-B Based Coatings Produced by HVOF and PTA Processes," Metals and Materials, 5 (1999) p.63.
5. H.W. Jin et al., "Microstructure and Amorphization induced by Friction Work in Fe-Cr-B

방사선량 저감을 위한 1**차 계통 재질 특성 평가**, **보고서**(95ZJ16), 1999.