

# 내마모성 향상을 위한 레이저 비정질 재료(Co-free) hardfacing에 관한 연구

Study on the laser hardfacing of amorphous material(Co-free) on  
stainless steels to improve their wear resistance.

한국원자력연구소 **우성식, 서정훈, 김정수**  
충남대학교 금속공학과 **홍순의**

## I. 서론

원자력발전소 1차 계통의 원자로 내부와 증기 발생기의 1차측을 고온 고압의 냉각수가 순환하고 있고, 이 냉각수의 순환을 조절하기 위하여 펌프, 밸브 등의 각종 부품이 장착되어 있다. 이러한 부품들에서 주로 발생하는 문제는 고온 고압 하에서의 빠른 유속으로 인해 재료의 내구성 한계, 즉 마모, 침부식, 또는 부식피로 등의 특성한계에 기인한다. 이러한 부품들에 사용되는 재료는 1차측 가동조건 하에서 내구성이 우수해야 하기 때문에 높은 강도와 인성을 갖는 Co계 합금(주로 Stellite 6 합금)을 많이 사용하고 있다. 그런데 이러한 1차계통 구조재에 있는 Co 원소는 마모 및 침부식 등에 의해 1차 계통 냉각수로 유입되고, 노심에서 중성자 조사로 인해 방사화된 후 증기 발생기의 수실 등에 퇴적되어 방사선량을 증가시킨다. 1차측의 방사선량이 증가되면 원전 작업 종사자의 방사선 피폭선량이 증가하여 작업능률의 감소나 보수 기간의 연장 등으로 인해 인체적 문제뿐만 아니라 경제적인 손실이 크다.

원전 선진국에서는 Co의 생성원을 근원적으로 제거하여 1차 계통의 방사선량을 획기적으로 감소시킬 목적으로 Co reduction program을 중점적으로 추진해 왔다. 특히, Co의 주 생성원인 각종 밸브의 경면재료를 Co계 Stellite 합금 대신 저 Co 또는 Co-free 재질로 대체하기 위한 대체재료의 연구를 집중하고 있다. 그러나 밸브 경면의 제작 및 보수뿐만 아니라 경면재료의 물성과 품질에 큰 영향을 주는 경면공정에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 1차 계통 부품의 내마모/내침부식성의 향상과 방사선량 저감화를 목적으로 Fe-Cr-B계 비정질 합금의 레이저 클래딩 기술을 개발하고, TIG 용접방법으로 제작된 Stellite 6합금과 함께 물성평가 연구를 수행하였다. 이와 함께 EPRI에서 Stellite 6의 대체합금으로 가장 우수한 것으로 권고되고 있는 Fe계 NOREM 02와 Ni계 Deloro 50 합금, 그리고 국내에서 개발된 Fe계 HIREX 10합금에 대한 레이저 클래딩 기술을 개발하여, 물성 비교 평가를 수행하였다.

## II. 실험방법

본 연구에서는 3.5 kW PRC CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였고, 광학시스템을 조합하여 3 X 3 mm<sup>2</sup>의 크기를 갖고 top-hat 형태의 에너지 분포를 갖는 레이저빔을 만들어 실험에 사용하였다. 그리고 클래딩에는 본 연구팀에서 자체개발한 분말공급시스템과 lateral-type의 분말공급 노즐을 이용하였다.

클래딩 재료는 분말형태의 Armacor M, NOREM 02, Deloro 50, HIREX 10 합금이었고, 기판은 SUS 316과 mild steel을 100 X 50 X 20mm<sup>3</sup>의 크기로 기계가공을 하여 실험에 사용하였다. 비교시편은 Stellite 6와 Armacor M을 TIG 용접하여 준비하였고, 용접과정에서 균열생성을 억제하기 위하여 기판을 예열하였다. 이렇게 준비된 시편을 광학현미경, SEM/WDX, TEM/EDAX을 이용하여 미세조직 및 상분석을 하였고, 미세경도, block-on-block 방식의 미끄럼 마모시험 등의 물성시험을 수행하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. Armacor M 클래딩 비드의 기하학적 형상과 모재의 dilution에 대한 공정변수의 영향

클래딩 비드의 높이는 specific energy density,  $E(\text{J}/\text{mm}^2)$ 이 증가함에 따라 분말공급밀도,  $G(\text{powder density, g}/\text{dm}^3)$  혹은 이송속도에 무관하게 거의 선형적으로 증가한다. 분말공급량이 일정할 때, 비드의 높이는 레이저 출력에 따라 선형적으로 증가하며, 시편의 이송속도가 증가하면(혹은 분말공급밀도가 감소하면) 클래딩 비드의 높이는 감소한다.

Specific energy density의 어떤 임계값 이상에서 클래딩 폭은 분말공급밀도에 무관하게 대략 2.6 mm로 일정하고, 임계치 이하에서는 specific energy density가 감소함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보였다.

모재의 dilution depth는 specific energy density 등의 공정변수에 무관하게 20 - 50  $\mu\text{m}$ 로 거의 일정하며, 모재의 dilution이 극히 적었다. 반면에 TIG 용성용접으로 제작된 Stellite 6와 Armacor M 경면시편의 경우에는 dilution depth가 대략 1 - 2 mm 였다.

상기의 실험을 통해 2개의 클래딩 조건을 선정하고, 클래딩 비드의 overlapping factor, X가 클래딩 층의 두께 및 미세조직에 미치는 영향을 연구하였다. TIG 용접 시편과 달리, 클래딩 층의 외관이 매우 수려하고, 모재의 뒤틀림이 거의 없었다. 그리고 클래딩 층과 모재의 계면이 거의 직선 형태로 용융접합 상태가 매우 우수하였다. Overlapping factor가 증가함에 따라 클래딩 층의 높이가 증가하고, 표면의 평활도가 크게 증가하는 경향을 보였다.

NOREM 02, Deloro 50, HIREX 10 합금도 상기와 유사한 실험을 통해 레이저 클래딩 공정조건을 선정하였다. Ni계 합금인 Deloro 50 경면시편의 경우에는 다른 Fe계 합금의 클래딩 층이 회색빛인 것과 달리, 금속 광택을 띄는 빛나는 클래딩층을 얻을 수 있었다.

#### 2. TIG 용성용접 및 레이저 클래딩한 Armacor M 시편의 미세조직 및 상분석

용성용접법으로 제작한 경면합금에서는 침상형태의 borides가 Fe-Cr 기지상에 분포되어 있는 미세조직을 보이며, 이들의 부피분율이 크지 않았다. 그리고 borides상은  $\text{Cr}_2\text{B}$ 와  $\text{Cr}_{1.65}\text{Fe}_{0.35}\text{B}_{0.96}$ 이었다.

레이저 클래딩으로 제작한 Armacor M의 시편은 매우 다른 미세조직을 보였다. 기지상은 BBC 결정구조를 갖는 Fe-Cr 고용체로 침입형 원자인 Si원소와 역시 침입형 원자인 B이 소량 고용되어 있었다. 기지상에는 판상 형태를 갖는 5  $\mu\text{m}$  크기의 미세한  $\text{Cr}_{1.4}\text{Fe}_{0.6}\text{B}$ 상이 시편 전체에 걸쳐 균일하게 분포되어 있고, 국부적으로  $\text{Cr}_{1.12}\text{Fe}_{0.88}\text{B}$  형태의 borides 상들이 모여 마치 구형태를 이루는 영역이 존재하였다. 그리고 borides 상 내부에는 적층 결합으로 판단되는 결합이 존재하였다. 석출된 borides 상의 부피분율은 용접 시편에 비해 엄청나게 크게 증가되었다.

클래딩 시편을 길이와 수직 방향으로 절단하여 WDX를 이용하여 표면깊이 변화에 따른 각 합금원소의 농도변화를 측정하였고, 합금원소의 농도가 매우 균일하고, 모재의 dilution이 매우 적음을 알 수 있었다.

#### 3. 미세 경도

동일한 Armacor M 합금일 경우라도, 레이저 클래딩한 시편의 표면경도가 대략 1113 Hv로, TIG용접한 시편(474 Hv)에 비해 표면경도가 대략 2배 이상 증가하였다. 이러한 현상은 Armacor M의 경화기구로 설명할 수 있다. TIG 용성용접한 시편에서는 표면에 응력이나 마찰력에 의해 Fe-Cr 기지상이 수  $\mu\text{m}$  깊이로 비정질 상으로 변태되는 "metamorphic transformation"이 유일한 경화기구이지만, 레이저 클래딩한 시편은 metamorphic transformation 외에 미세한 borides상에 의한 분산강화 기구를 갖고 있기 때문이다. 일반 금속재료에서 마모 저항성을 나타내는 Archard식으로부터 용접한 시편에 비해 레이저 클래딩한

시편이 우수한 마모 저항성을 보일 것으로 예측할 수 있다.

그리고 각 경면시편에서 코팅층 내부의 경도 변화를 측정하였고, 모든 클래딩 시편에서 코팅층 전반에 걸쳐 균일한 경도값을 보였다.

#### 4. 미끄럼 마모시험

15 ksi의 접촉하중에서 block-on-block 방식의 미끄럼 마모시험을 수행하였고, 사용된 분위기는 상온 및 300℃ 대기중, 상온 수중이었다.

##### [상온 대기 분위기의 마모시험 및 마모거동]

Deloro 50을 제외한 모든 시편이 우수한 마모 저항성과 마찰계수를 보였고, 특히 레이저 클래딩한 Armacor M과 HIREX 10 시편이 가장 적은 마모 손실량을 보였다. Deloro 50의 경우 83.55 mg의 가장 많은 마모 손실량을 보였고, 상온 대기 분위기에서 마모 저항성이 크게 떨어짐을 알 수 있었다. Deloro 50의 마모시편은 고정시편과 이송시편의 asperities가 서로 bonding된 다음 떨어져 나가 큰 debris를 형성시키는 응착마모(adhesive wear)가 주요 마모 손상기구이며, 그 외에 다른 시편에서는 모두 micro-ploughing에 의한 직선 형태의 스크래치가 관찰되었는데, 이는 마모기구가 연삭마모(abrasive wear)임을 보여주는 것이다.

##### [300℃ 대기 분위기의 마모시험 및 마모거동]

TIG 용접한 Armacor M과 레이저 클래딩한 Deloro 50 합금을 제외한 모든 시편이 Stellite에 비해 우수한 마모 저항성을 보였다. 특히 레이저 클래딩한 Armacor M과 HIREX 10 시편이 가장 적은 마모 손실량을 보였다. TIG 용접한 Armacor M 시편은 상온과 달리 마모 손실량이 크게 증가되었는데, 이는 고온에서 metamorphic transformation이 억제되었기 때문이다. 반면에 레이저 클래딩한 Armacor M 시편은 온도와 무관하게 대기 분위기에서 가장 우수한 마모 저항성을 보였는데, 이는 경화기구가 metamorphic transformation 외에 borides에 의한 석출경화기구를 갖고 있기 때문이다. 그리고 Deloro 50 합금의 경우 고온에서 오히려 마모 손실량이 상온에 비해 크게 감소하였는데, 그 원인은 마모 표면에서 oxidative wear 현상이 일어났기 때문이다. TIG 용접한 Armacor M과 레이저 클래딩한 Deloro 50 시편은 응착마모가, 그리고 다른 시편에서는 연삭마모가 주요 마모 손상기구임을 알 수 있었다.

##### [상온 수중 분위기]

모든 시편의 마모 저항성이 우수하였으며, 특히 레이저 클래딩한 Armacor M과 HIREX 10 합금이 가장 적은 마모 손실량을 보였고, 모든 시편에서 연삭마모거동이 관찰되었다.

#### IV. 결론

본 연구에서 원전 1차 계통에 사용되는 주요 부품재료의 내구성을 향상시키고 1차 계통 방사선량 저감화를 목적으로 Co-free 비정질 합금의 레이저 클래딩기술을 평가했으며, 공정변수가 레이저 클래딩 비드에 미치는 영향을 연구함으로써, Fe-Cr-B계 비정질 재료의 물성과 품질에 큰 영향을 미치는 경면 공정이 미세조직 및 마모특성에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 EPRI의 연구결과 Stellite 6의 대체합금으로 성능이 가장 우수하다고 권고되고 있는 Fe계 NOREM 02 합금과 Ni계 Deloro 50 합금, 그리고 Alloy-TiC사에서 개발한 HIREX 10 합금에 대한 레이저 클래딩하여, Fe-Cr-B계 비정질 합금 및 Stellite 합금과 함께 마모특성을 비교 평가를 수행한 결과 비정질 합금인 Armacor M과 HIREX 10 합금이 가장 우수한 마모 저항성을 보였고, TIG 용접보다 레이저 클래딩으로 제작된 시편의 마모 저항성이 우수하였다.

## V. 참고문헌

1. C.J. Wood, "Maintenance of Recent Techniques for LWR Radiation-Field Control," EPRI-4505-SR, March 1986
2. 김주학 외, "ALARA를 위한 NSSS 밸브경면의 코발트 저감기술," KAERI/AR-404/95, 99
3. 한정호 외, "원전 1차계통 방사선량 저감화를 위한 코발트합금 대체연구," KAERI/RR-1584/95/, 1996.
4. 김선진 외, "신형원자로 방사선량 저감을 위한 1차 계통 재질 특성평가," KEPRI 보고서 (source is not known) p.158.
5. H.W. Jin et al., "Microstructure and Amorphization induced by Friction Work in Fe-Cr-B Alloy Thermal Spray Coatings," Surface and Coatings Technology, 113 (1999) p.103
6. H.W. Jin et al. "Microstructure and Wear-Resistance of Fe-Cr-B Base Metamorphic Alloys," Metals and Materials, 3 (1997) p.60.

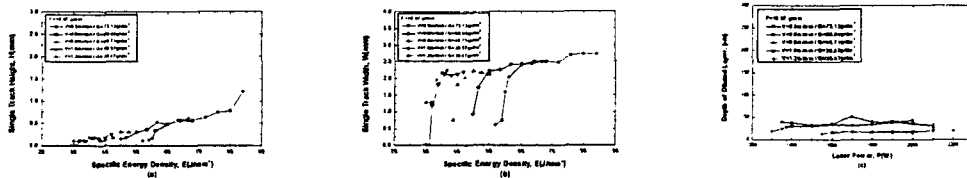


Fig. 1 Variation of the measured (a) height, (b) width, and (c) dilution depth of Armacor M single track with specific energy density and laser power.

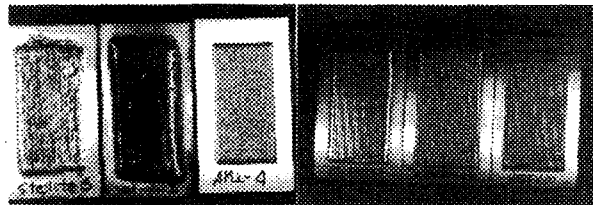


Fig. 2 Appearance of the TIG welded (a)Stellite 6, (b)Armacor M, and (c) the laser-cladded Armacor M, (d)Deloro 50, (e)NOREM 02, and HIREX 10 specimens.



Fig. 3 Optical micrograph of cross-sectional microstructure of single clad of Armacor M

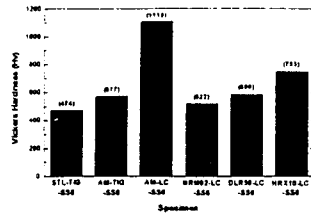


Fig. 4 Micro-hardness result obtained in the surface of the STL-TIG-SS6, AM-TIG-SS6, AM-LC-SS6, NRM02-LC-SS6, DLR50-LC-SS6, HRX10-LC-SS6.

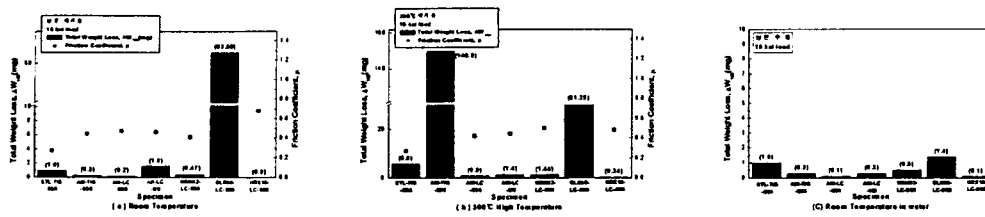


Fig. 5 Total weight loss and friction coefficient of the STL-TIG-SS6, AM-TIG-SS6, AM-LC-SS6, AM-LC-MS, NRM02-LC-SS6, DLR50-LC-SS6, and HRX10-LC-SS6 specimens measured by sliding wear test at 15ksi load in air.