

# 레이저 Remelting 처리된 Co 기지 하드페이싱 합금의 미세조직 특성

한원진 · 김우성

두산중공업(주) 기술연구원 용접기술연구팀

## The Microstructure Characteristics of Laser Remelted Cobalt-Based Hardfacing Alloys

Won Jin Han and Woo Sung Kim

Doosan Heavy Industries & Construction

### Abstract

Laser remelting of surface of cobalt-based hardfacing alloy can eliminate impurities and cracks and improve the wear resistance. In this present study, Stellite #6 and #21 harfacing alloys were remelted by a 3kW CO<sub>2</sub> laser. Hardness distribution and microstructures in the laser remelted zone was investigated. Our results showed that in proper laser parameters laser remelted surface of hardfacing alloy had more refined microstructure and more increased micro-hardness than the base material.

**Key Words :** Laser remelting, Hardfacing, Stellite, Cobalt based alloy, Turbine valve

## 1. 서 론

Co 기지 하드페이싱 합금은 Co의 고용체(Solid solution) 기지에 경한 탄화물 입자로 구성되어 있어서 내마모성과 내부식

성이 요구되는 부품에 널리 사용되고 있다. 일례로서 높은 내마모성이 요구되는 대용량 원자력 및 화력 발전소의 터빈 밸브류

Seat 및 Disc 부위에는 Stellite #6 및 Stellite #21로서 하드페이싱 되고 있다<sup>1,2)</sup>.

대표적인 Co 기지 하드페이싱 합금은 Co-Cr-W-C로서 Cr과 W을 가진 Co 기지 내에 16~17vol%를 가진  $M_7C_3$  형태의 탄화물이 분산 분포된 공정합금(Eutectic alloy)이다. 이러한 합금 중 대표적인 것이 Stellite #6 및 Stellite #21이다. 이 합금의 미세조직에서 밝은 색을 띄는 공정상 기지는 FCC(Face Centered Cubic) 구조를 가지며 어두운 색을 띄는 석출상들은 대부분  $M_7C_3$ 의 탄화물로서 Hexagonal의 결정구조를 가진다. 이러한 탄화물은 주로 수지상정 기지 사이에 형성되며 마모에 대한 저항은 주로 이 탄화물이 담당하게 되며, 부식 및 고온 정도의 유지는 공정 기지에 의해 결정된다<sup>3)</sup>.

레이저 Remelting 기술은 레이저 빔을 이용한 금속 표면 개질 기술의 하나로서 고출력의 에너지 밀도가 높은 레이저 빔을 고속으로 금속 표면에 조사하므로써 금속 표면 조직을 미세화하여 금속 표면을 경화하는 기술이다. 레이저 Remelting 기술의 장점은 높은 에너지 밀도의 레이저 빔을 사용하기 때문에 경화 깊이의 제어가 용이하며, 국부적인 가열이 가능하므로 제품 형상에 크게 제약을 받지 않고 적용할 수 있다<sup>4)</sup>.

레이저 Remelting 기술의 핵심은 높은 에너지 밀도의 레이저 빔 열원을 이용하여 레이저 빔을 고속으로 표면에 주사하기 때문에 금속의 표면이 급가열되어 용융된 후 표면의 자체 급냉(Self-quenching)이 발생하는 것이다. 이를 통해서 금속 표면의 경화가 가능하게 된다.

레이저 Remelting 기술은 주로 주철의 표면 구조결합의 보수, 자동차 등의 Camshafts의 내마모성 향상, 구상흑연주철 가이드 레일의 표면경화, Al-Si 주조 합금의 내마모성 향상, TiAl6V4 합금의 표면경

화, 오스테나이트 스테인레스강의 국부 부식(피팅, 입간부식) 저항성 향상, 항공기 블레이드 코팅층의 밀도 증가와 계면 접합 강도의 향상 등에 응용되고 있다<sup>5)</sup>.

통상 밸브류의 Stellite 합금 하드페이싱 공정으로서 아크 용융 용접 방식인 산소 아세틸렌 용접, TIG 용접, 플라즈마 아크 용접 등이 주로 적용되고 있다. 하지만 아크 용융 용접에 의한 Stellite의 하드페이싱을 위해서는 정교한 예열 및 후열이 필요하며 용접 후 표면에 미세 균열 등의 결함이 쉽게 발생한다. 실제로 최근 발전소 현장에서 약 1년 정도 사용된 밸브의 Stellite 하드페이싱 표면(특히 Seat부)에서 다량의 균열이 발생된 경우도 있다.

레이저 Remelting 기술을 Stellite 하드페이싱 표면에 적용한다면 아크 용접에 의해 조대화된 결정립과 수지상을 미세하게 함으로써 내마모성 및 내부식성을 향상시킬 수 있으며, 표면의 미세 균열 또한 제거할 수 있다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 일반 아크 용접으로 제작된 밸브류의 Stellite 하드페이싱 부의 결함 제거 및 표면 경화 특성 향상을 목적으로 실제 제품과 동일한 사양의 Stellite 하드페이싱 모재에 레이저 Remelting 시험을 실시하고 레이저 빔 parameter의 변화에 따른 레이저 Remelting 처리 전, 후의 미세조직 특성을 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 시험 재료

본 실험에 사용된 Stellite 하드페이싱 소재의 화학조성을 아래 Table 1에 나타내었다. Stellite #6 및 #21은 발전용 밸브류의 하드페이싱용 소재로서 적용되고 있다.

Table 1 The chemical compositions of Stellite #6, #21 hardfacing materials

Alloy	Composition(wt%)								
	C	Si	Fe	Cr	W	B	Ni	Mn	Co
#6	1.2	1.0	2.0	29.0	4.5		2.0	-	bal
#21	0.25	0.75	1.5	27.0	-	Max 0.07	2.75	5.5	bal

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 시편준비 및 시험변수

아래 Fig.1은 레이저 Remelting 시험을 위해 실 제품에 적용되고 있는 분말 플라즈마 아크 Stellite 하드페이싱 공정으로 제작한 시편 형상이다. Fig.2는 시험에 이용한 레이저 시스템 및 레이저헤드의 사진으로서, 레이저 시스템은 최대 출력 3kW 급의 PLC-3000 CO<sub>2</sub> Laser system이며, defocusing은 하지 않은 상태에서 spot size는 약 3mm 정도 였다. 레이저 헤드는 수직축에 대해 10 기울어져 있다. 본 시험에서는 레이저 Remelting 깊이가 일정하도록 비드와 비드 사이가 약 1/3 겹치도록 시험하였다.

레이저Remelting 전 모든 시편은 Grade 600 SiC emery 페이퍼를 이용하여 연마하고 아세톤으로 초음파 세척하여 준비하였다. 또한 레이저 빔의 흡수율을 증가시키기 위해 흑색 에나멜 페인트를 시편 표면에 코팅하였다.

레이저 Remelting 시험 조건은 레이저 출력 0.5~2kW, 이송 속도 300~1200mm/min으로 하였으며, 보호가스로서 Ar 가스를 사용하였다.

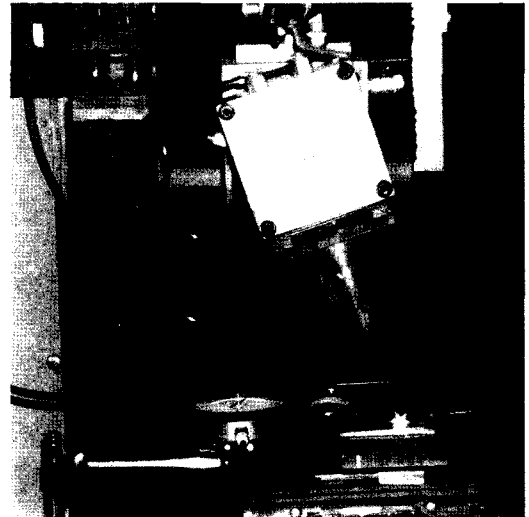


Fig. 2 CO<sub>2</sub> Laser remelting system of stellite harfacing specimens

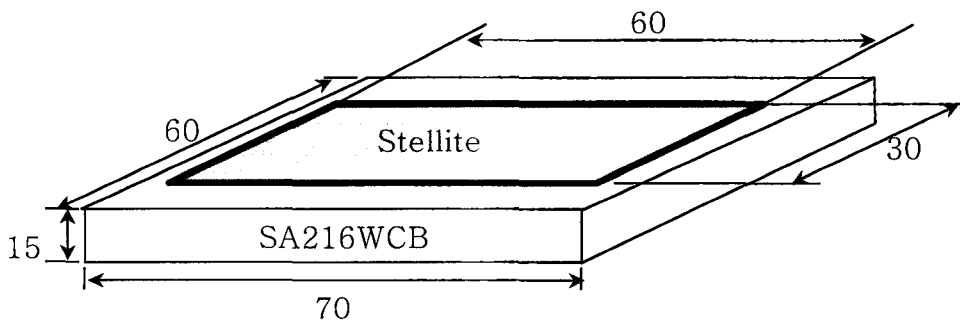


Fig. 1 Schematic diagram of stellite harfacing specimen

### 2.2.1 조직 시험 및 미세경도

각 조건에 대해서 Microvision 광학 현미경 시스템을 이용하여 레이저 Remelting 깊이를 측정하였으며, SEM(주사전자현미경)을 이용하여 레이저 Remelting 조건에 따른 레이저 Remelting 부, HAZ 부 및 모재의 조직을 비교하고 수지상 및 결정립의 미세화 정도를 관찰하였다. 또한 EDS를 이용해서 레이저 Remelting으로 인한 원소의 재배열 정도와 탄화물의 조성을 분석하였다.

레이저 Remelting 부, HAZ 부 및 모재부에 대해서 비커스 미세경도 시험을 표면으로부터 0.1mm 간격으로 측정하였으며, 이때 하중은 200g으로 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 레이저 Remelting 부표면형상 및 깊이 변화

Fig.3은 Stellite #6 하드페이싱부 표면의 레이저 Remelting 처리 후의 표면 형상으로서 레이저 Remelting 처리에 의해 얻어지는 표면 비드 형상은 굴곡이 심하지 않았으며, 하나의 비드 크기는 1~2mm 정도로서 미세하였으며 표면 산화는 거의 발생하지 않았다.

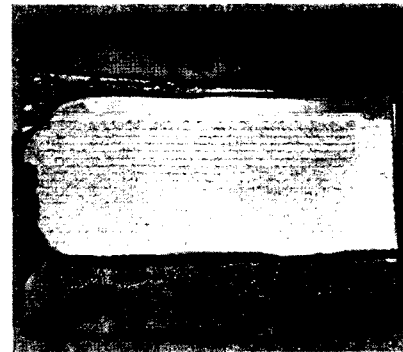
Fig.4 및 Fig.5는 레이저 출력 변화에 따른 Stellite #6 및 Stellite #21의 레이저 Remelting 부의 단면형상의 변화를 보여주는 광학현미경 사진이며, Fig. 6의 (a) 및 (b)는 Stellite #6 및 Stellite #21의 레이저 출력 및 레이저 빔 이송 속도에 따른 레이저 Remelting 층의 깊이를 보여주는 그래프이다.

Stellite #6의 경우 레이저 빔 이송속도 보다는 레이저 출력 증가에 따라서 레이저 Remelting 깊이는 보다 더 깊어 지며, 특히

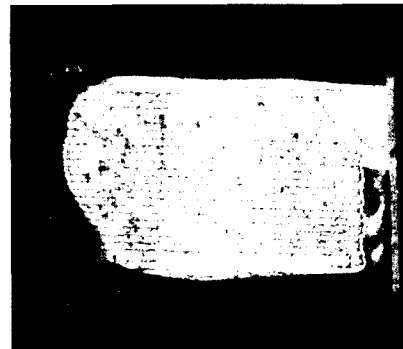
레이저 출력 1500W 이상에서 급격한 증가를 관찰할 수 있다. 레이저 빔 이송속도 증가에 따른 레이저 Remelting 깊이의 변화는 그리 크지 않으나 2000W, 1200mm/min에서 변화의 폭이 큰 것으로 관찰 되었다.

또한 Fig.3에서 볼 수 있는 바와 같이 레이저 출력의 증가에 따라 레이저 Remelting 깊이는 증가하게 되며, 아울러서 Remelting 깊이는 보다 더 일정하게 됨을 볼 수 있다.

본 실험에서 얻은 Stellite #6의 최대 레이저 Remelting 깊이는 2000W, 300mm/min에서 0.84mm 였으며, 500W에서는 0.17~0.22mm, 1000W에서는 0.26~0.33mm, 1500W에서는 0.31~0.36, 2000W에서는 0.44~0.84의 값을 나타내었다. 또한 Stellite #21의 경우, 레이저 Remelting 깊



(a) 1kW, 600mm/min



(b) 2kW, 600mm/min

Fig. 3 Shape of surface of stellite hardfacing specimens after laser remelting(Stellite #6)

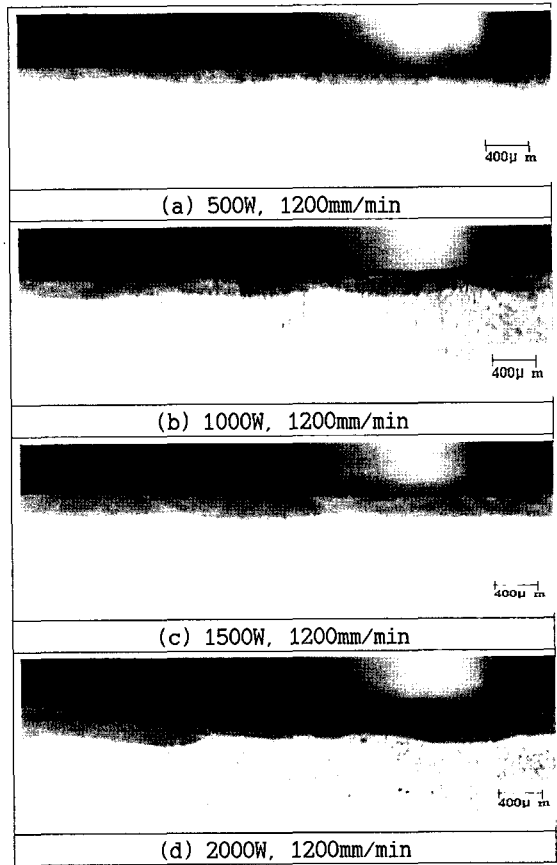
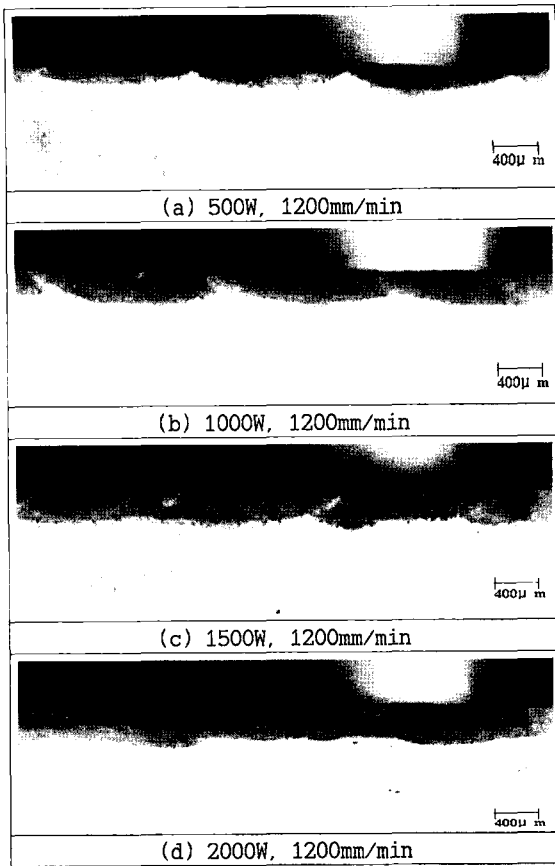


Fig. 4 Effect of laser power on depths of surface remelting layers of Stellite #6 hardfacing specimens

Fig. 5 Effect of laser power on depths of surface remelting layers of Stellite #21 hardfacing specimens

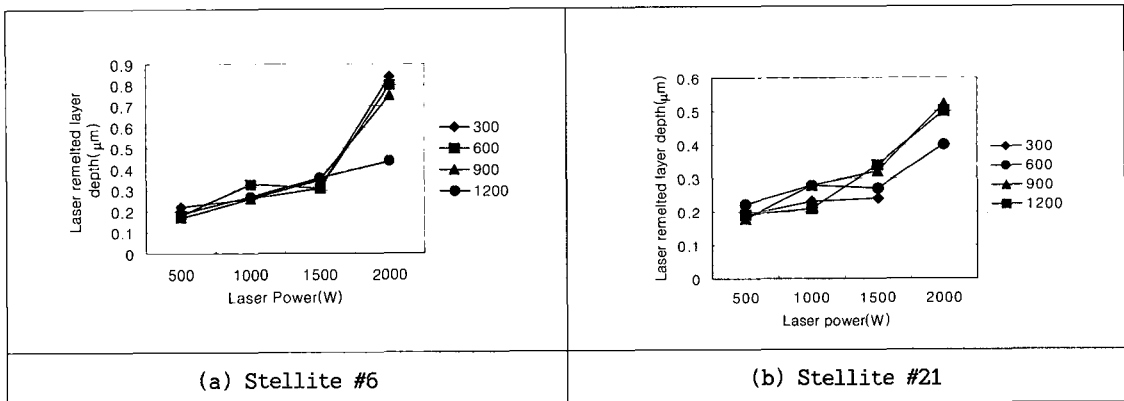


Fig. 6 Variations of depths of surface remelting layers of Stellite #6 and #21 hardfacing specimens according to laser power and speeds

이의 최대값은 2000W, 900mm/min에서 0.52mm 로서 Stellite #6과 비교했을 때 조금 낮은 값을 나타내었다. 이러한 용입깊이의 차이에 대한 원인은 여러가지가 있을 수 있으나 기본적으로 두 합금 사이의 물성치 즉, 레이저 용접에서 가장 중요한 열전도도 및 빛의 반사능에서의 차이 때문인 것으로 추정된다<sup>3)</sup>.

### 3.2 레이저 Remelting층의 미세경도 시험

아래 Fig.7은 레이저 빔 출력 변화에 따른 Stellite #6 및 #21의 레이저 Remelting 처리 후 표면에서부터 레이저 Remelting 층과 모재 사이의 경계부분까지의 비커스 미세경도 값의 변화를 보여주는 그래프이다.

Fig.7에서 볼 수 있는 바와 같이 표면에서부터 모재와의 경계 부위로 갈수록 경도 값은 감소함을 알 수 있으며, 각 조건별로 표면에서의 미세경도 값을 비교해 보았을 때 레이저 출력의 증가에 대해 미세경도 값은 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

Stellite #6의 레이저 Remelting 부에서의 미세경도 값은 약 500~600Hv 범위로서

Stellite #6모재의 평균 미세경도를 약 450Hv로 보았을 때 약 22~33% 범위의 미세경도 값이 증가하는 결과를 보였다. 레이저 출력 1500W, 용접속도 900mm/min에서 최대 미세 경도 값, 약 633Hv를 나타내었다. 또한 Stellite #21의 경우, 가장 높은 미세경도 값은 1500W, 900mm/min에서 497Hv 였으며, Remelting 층의 평균 표면 미세경도 값을 약 450~480Hv로 보았을 때, Stellite #21 하드페이싱 표면의 평균 미세경도 값, 약 360Hv 보다 약 25~33% 범위 만큼 증가하는 것으로 나타났다.

레이저 Remelting 처리된 조직의 경도 값이 모재의 그것 보다 증가되는 원인은 높은 출력의 레이저 빔을 빠른 속도로 표면에 조사하여 모재 표면을 Remelting 할 경우 발생하는 "self-quenching effect"에 의한 수지상의 미세화 및 M7C3 혹은 M23C6 등과 같은 모재에 존재하는 탄화물들이 빠른 용해 및 응고로 인해 미처 용융되지 못하고 조대화된 침상 형태의 탄화물이 존재하기 때문인 것으로 보고되고 있다<sup>7,9)</sup>. 따라서 본 연구에서 관찰된 두 합금간의 경도값의 차이는 수지상의 미세화 정도와 탄화물의 조대화 정도에 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

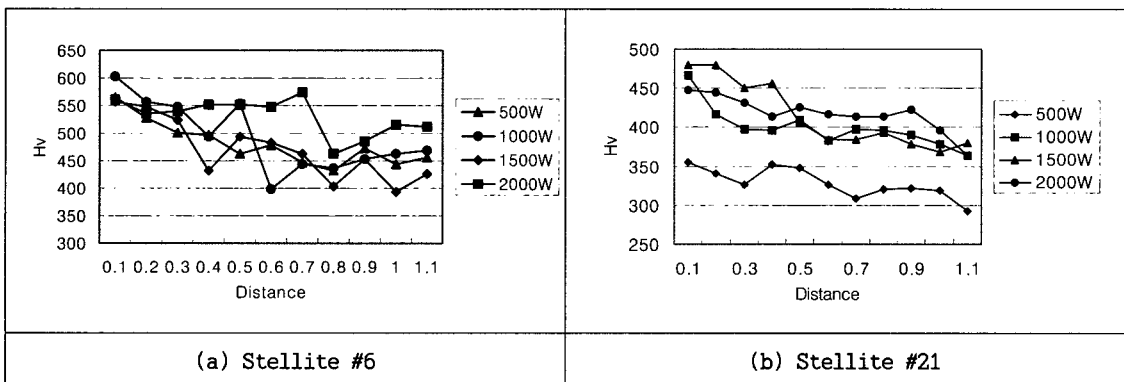


Fig. 7 Micro vickers hardness values of surface remelting layers of Stellite #6 and #21 hardfacing specimens

### 3.2 레이저 Remelting층의 미세조직 특성

아래 Fig.8은 Stellite #6 하드페이싱 표면을 레이저 Remelting 처리 하였을 경우의 전형적인 미세 조직을 보여주는 SEM 미세 조직 사진이다.

Fig.8 (A)에서 볼 수 있듯이 Stellite #6 하드페이싱 영역은 전형적인 PTA 용접 조직인 조대한 수지상 조직을 가지며, 레이저 Remelting 영역은 훨씬 더 미세한 수지상 조직을 나타내고 있다. Fig.8의 (B), (C) 및 (D)에서 볼 수 있듯이 Stellite #6와 경계 영역이며 Remelting 된 후 응고가 시작되는 Root(C)에서는 미세한 수지상의 전형적인 Epitaxial 성장을 하고, 계속해서 Center(B)에서는 Epitaxial 성장에서 차츰 Cellular dendrite 조직으로 변하여 Surface(A)에서는 Equiaxed 수지상 조직을 나타내고 있다<sup>6)</sup>. 또한 Fig.8의 (E)에서 볼 수 있는 바와 같이 첫번째 레이저 Remelting 영역과 두번째 레이저 Remelting 영역이 겹치는 영역(D)의 경우에도 첫번째 비드의 루트로부터 두번째 비드의 수지상이 Epitaxial 성장을 하는 것을 볼 수 있다.

이러한 레이저 Remelting 부의 미세조직의 변화는 레이저 Remelting 후의 응고 과정에서 용융 Pool의 온도구배(G)와 결정 조직의 성장속도(R)의 비(ratio)가 각 응고 구역에 따라서 차이가 나기 때문이다. G/R의 비는 Root에서 최대값을 가지며 표면으로 갈수록 값이 떨어지고 표면에서 최소값을 가진다. 따라서 Root에서 일정한 방향성을 가지고 Epitaxial 성장을 하던 수지상이 표면으로 갈수록 무질서 하게 미세한 결정으로 변하게 된다<sup>6)</sup>.

레이저 Remelting 후의 높은 냉각속도로 인한 결정조직의 미세화 및 탄화물의 존재가 미세경도 값 증가의 직접적인 원인이 되는 것으로 알려져 있는 바<sup>7,8)</sup>, 본 연구

에서는 Fig.9 및 Fig.10에 나타난 바와 같이 Stellite #6 모재에 대한 레이저 Remelting 시험 후 Remelting 영역 및 모재에 대한 SEM 조직 및 EDS 성분분석을 통해 고찰하였다. Fig.9의 (B) 및 (C)에서 볼 수 있는 바와 같이 레이저 Remelting 영역 및 Stellite #6 모재의 primary dendrite arm spacing은 각각 약 2 $\mu$ m 및 약 18 $\mu$ m으로서 레이저 Remelting 처리 후 결정 조직이 약 89% 정도로 미세화 된 것을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig.11에서 볼 수 있는 바와 같이 Stellite #21의 경우에도 레이저 Remelting 부 및 모재의 primary dendrite arm spacing은 각각 3 $\mu$ m 및 20 $\mu$ m였으며, 이러한 결과로부터 레이저 Remelting 처리 후 결정 조직은 85% 정도로 미세화 되는 것을 알 수 있다.

Fig.10은 Fig.9의 사진상에 표시한 바와 같이 레이저 Remelting 영역의 수지상(B) 및 수지상 사이의 탄화물(A) 및 모재 영역의 수지상(D) 및 수지상 사이의 탄화물(C)에 대한 EDS 결과로서, 레이저 Remelting 영역의 미세화된 수지상 사이에는 Remelting 과정에서 용해되지 못한 탄화물과 응고과정에서 재 석출된 탄화물이 미세분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 탄화물은 Cr rich의 M7C3 탄화물인 것으로 추정된다<sup>1,9)</sup>. Fig.12에서 볼 수 있는 바와 같이 Stellite #21에서도 유사한 결과를 나타내었다.

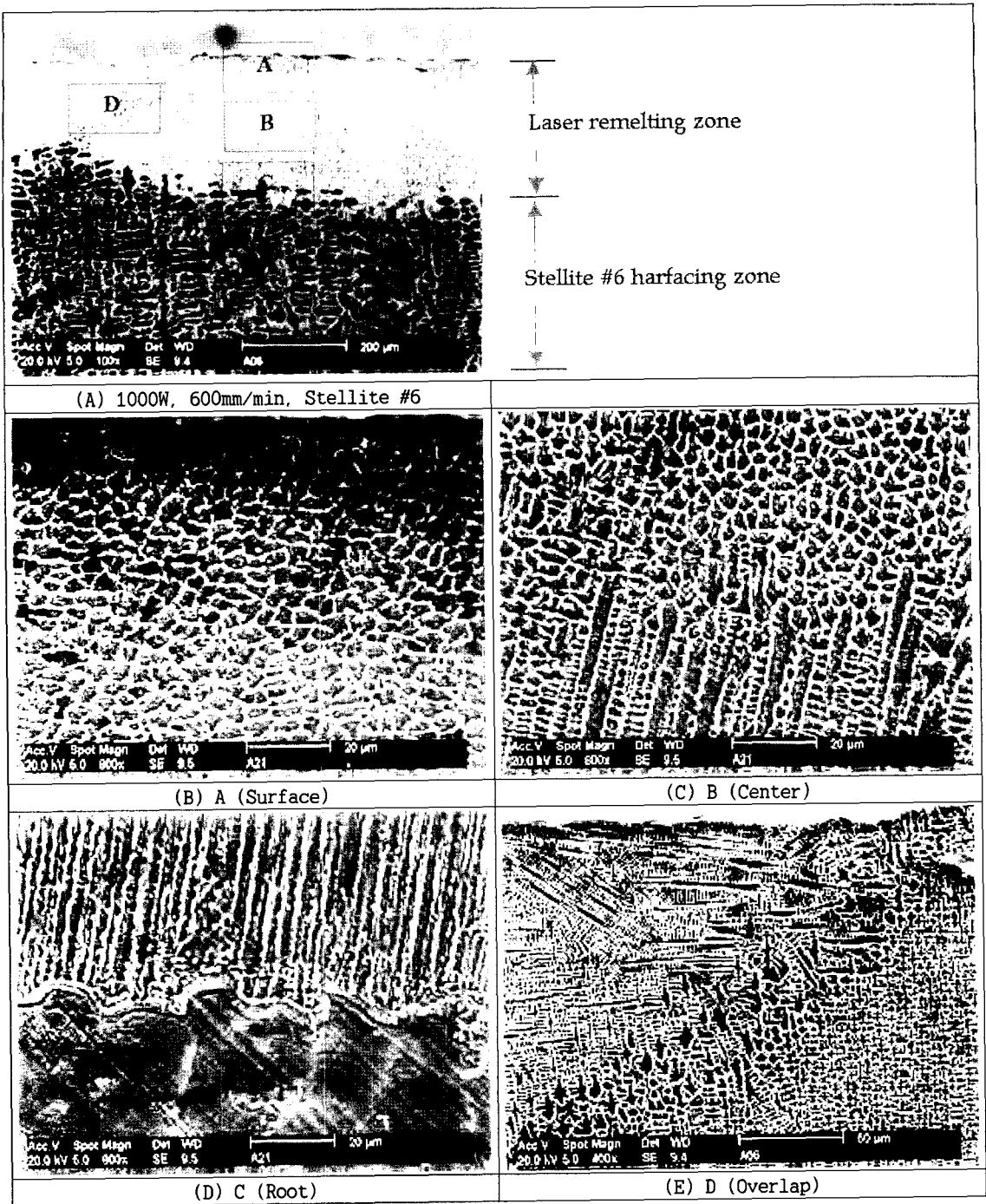


Fig. 8 Microstructures of surface remelting layers of Stellite #6 hardfacing specimens



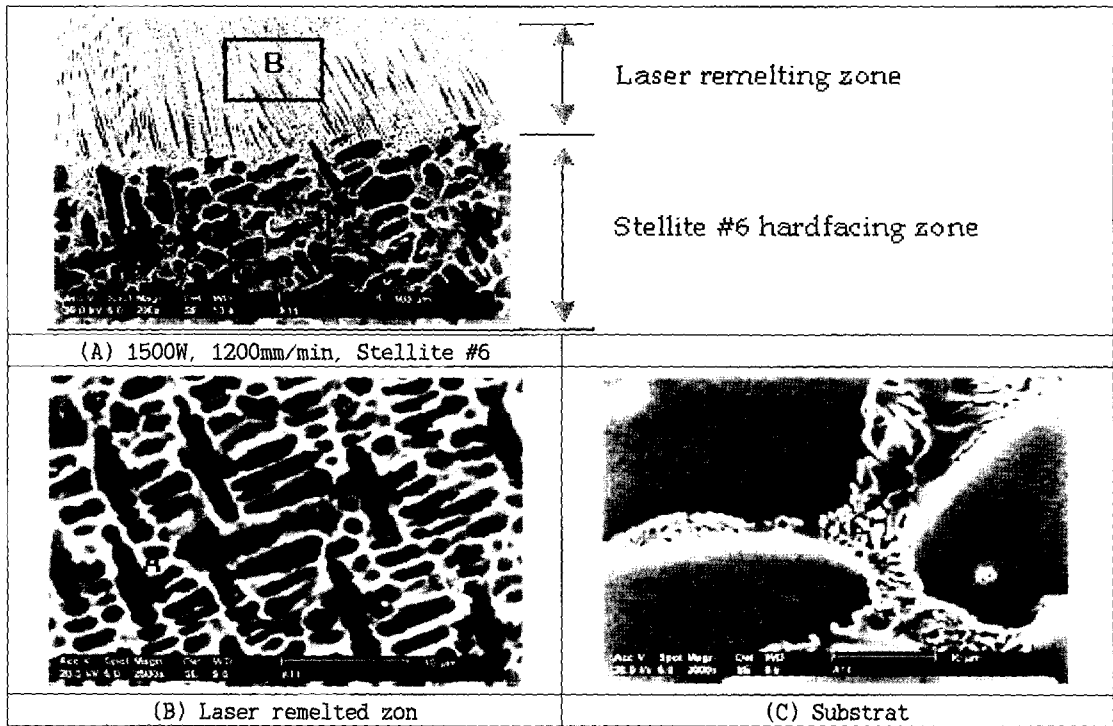


Fig. 9 SEM micrographs of laser-remelted zone and substrate (Stellite #6)

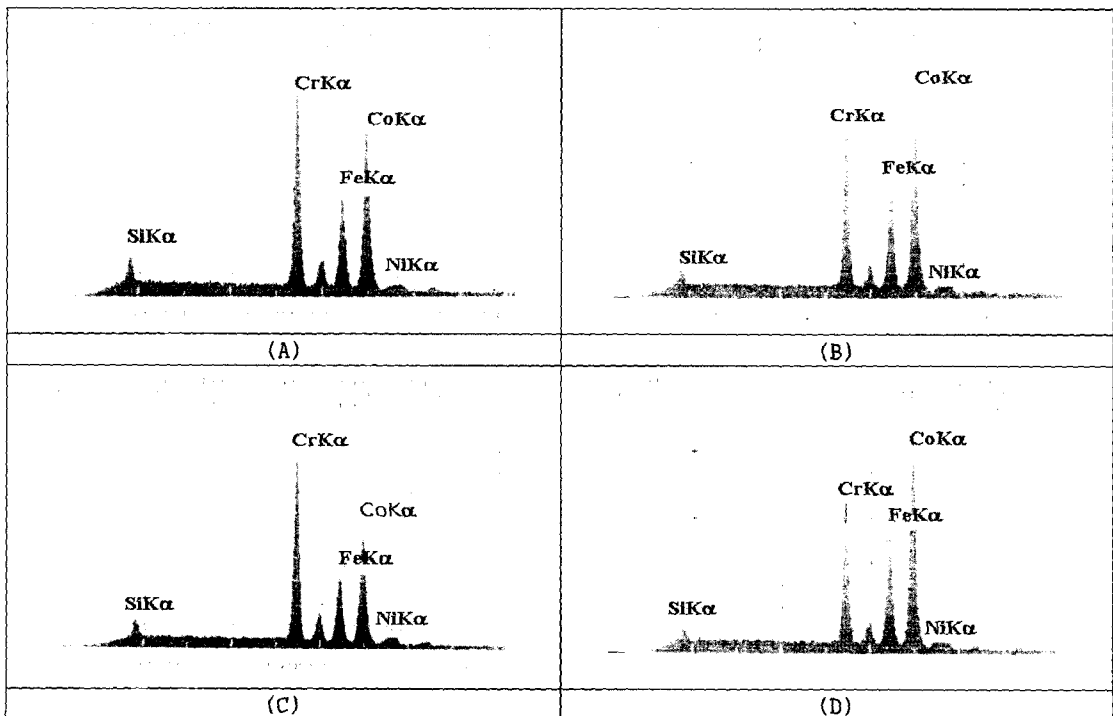


Fig. 10 EDS analyses of dendrites and carbides of laser-remelted zone and substrate (Stellite#6)

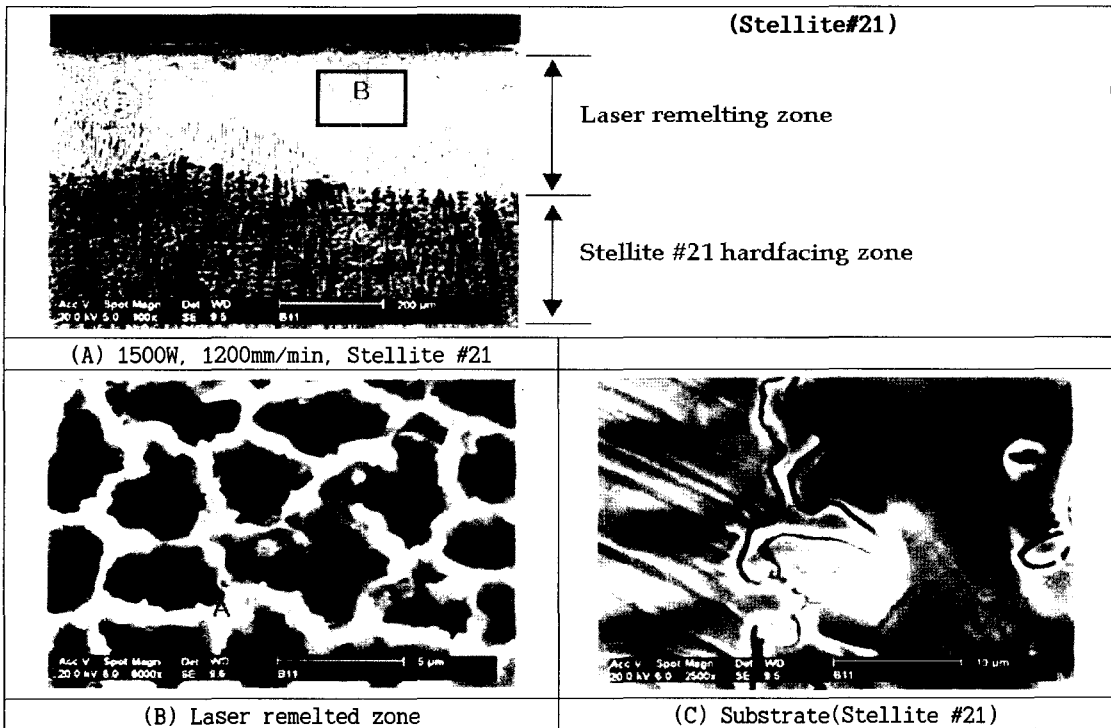


Fig. 11 SEM micrographs of laser-remelted zone and substrate (Stellite #21)

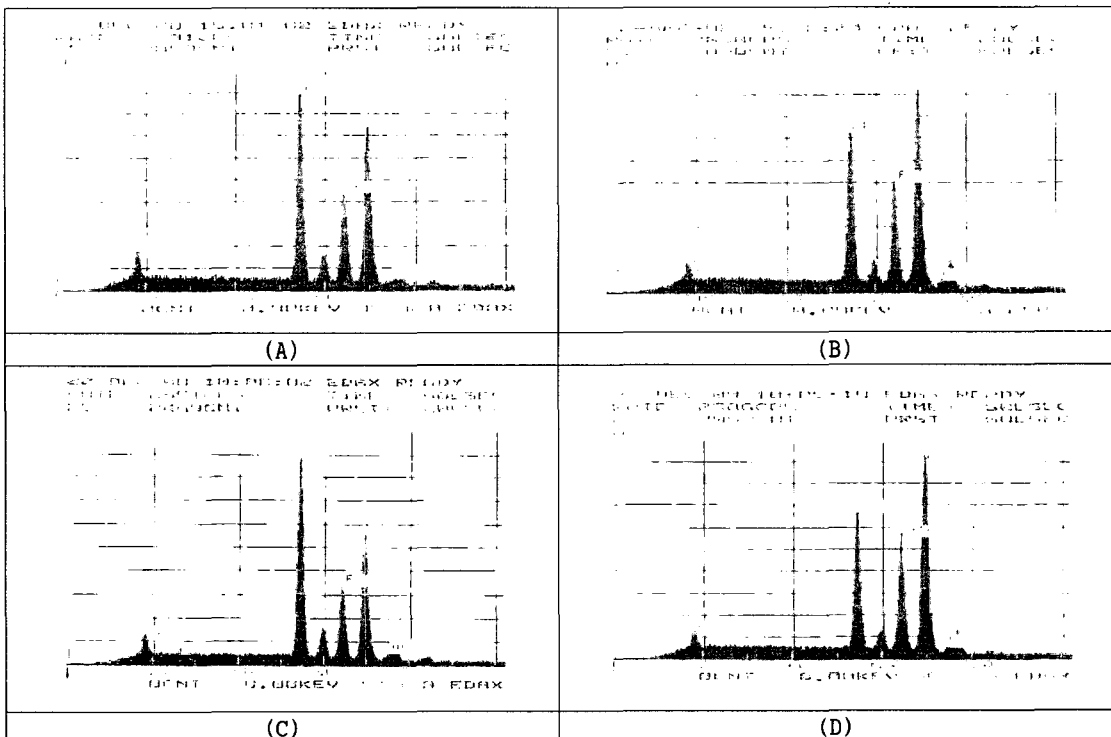


Fig. 12 EDS analyses of dendrites and carbides of laser-remelted zone and substrate

## 4. 결 론

본 연구에서는 화력 및 원자력 벨브의 Stellite 하드페이싱 부의 표면 경도를 향상시킬 수 있고, 표면 균열을 보수할 수 있는 레이저 Remelting 기술 개발의 일환으로서 Stellite #6 및 Stellite #21 hardfacing 모재에 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 표면 Remelting 시험을 실시하였고, 이의 결과 Stellite #6 및 Stellite #21 두 가지 경우 모두 내부결함이 없고 모재에 비해 85% 이상 미세화된 수지상 조직을 얻을 수 있었으며, 미세경도가 모재에 비해서 약 30% 이상 향상됨을 볼 수 있었다. 또한 미세 경도가 향상되는 원인은 수지상 조직의 미세화 및 탄화물의 미세분포에 있는 것으로 나타났다. 아래는 시험 결과에 대한 요약이다.

- (1) Stellite #6의 최대 레이저 Remelting 깊이는 2000W, 300mm/min에서 0.84mm이며, Stellite #21에서는 2000W, 900mm/min에서 0.52mm이다.
- (2) Stellite #6의 레이저 Remelting 부에서의 표면 비커스 미세경도 값은 약 500~600Hv 범위로서 모재보다 약 22~33% 증가하였고, 최대값은 레이저 출력 1500W, 용접속도 900mm/min에서 약 633Hv였다. Stellite #21에서 가장 높은 미세경도 값은 1500W, 900mm/min에서 497Hv였으며, 1000W 이상에서 약 450~480Hv 범위로서 약 25~33% 범위의 미세경도 값의 증가를 보였다.
- (3) Stellite #6의 레이저 Remelting 부 및 모재의 primary dendrite arm spacing은 각각 2 $\mu$ m 및 18 $\mu$ m으로서 레이저 Remelting 처리 후 결정 조직이 약 89% 정도로 미세화 되었다. Stellite #21의 레이저 Remelting 부 및 모재의 primary dendrite arm spacing은 각각 3 $\mu$ m 및 20 $\mu$ m였으며, 이러한 결과로부터 레이저 Remelting 처리 후 결정 조직은

85% 정도로 미세화 되는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. S.Atamert, H.K.D.H. Bhadeshia, "Comparison of the microstructures and abrasive wear properties of stellite hardfacing alloys", Metallurgical Transactions A, Vol. 24, June, 1989, p.1037-1054
2. M.C.Jeng, L.Y.Yan, J.L.Doong, "Wear behavior of cobalt-based alloys in laser surface cladding", Surface and Coating Technology, 48, 1991, p.225-231
3. C.T.Sims, N.S.Stoloff, "Superalloys II", John Wiley & Sons, 1987
4. John F. Ready, "LIA Handbook of Laser Materials Processing", 2001, p.263-298
5. B.L.Mordike, "Applications of Laser Surface Remelting", ECLAT'96, 1996, p.253-264
6. Sindo Kou, "Welding Metallurgy", John Wiley & Sons, Inc., 1987, p.129-141
7. A.Tiziani, et.al, "Laser Stellite Coatings on Austenitic Stainless Steels", Material Science and Engineering, 88, 1987, p.171-175
8. H.M.Wang, H.W.Bergman, "Annealing laser-melted ductile iron by pulsed Nd:YAG laser radiation", Materials Science and Engineering A 196, 1995, p.171-176
9. S.C.Agarwal, H.Ocken, "The microstructure and galling wear of a laser-melted cobalt-base hardfacing alloy", Wear, 140, 1990, p.223-233