

레이저빔에 의한 계면경사 Ni-Cr/Steel 재료 제조에 관한 연구

김재현, 김도훈

연세대학교 공과대학 재료공학부

A study on the Fabrication of Graded-Boundary Ni-Cr/Steel Material by Laser Beam

J. H. Kim, T. H. Kim

ABSTRACT

For a development purpose of thick metal / metal Graded-Boundary Materials(GBM), a basic research on the fabrication of Ni-Cr/Steel GBM was carried out by a laser beam and its mechanical properties and thermal characteristics were investigated. In order to produce a compositionally graded boundary region between substrate steel and added Ni-Cr alloy, a series of surface alloying treatments was performed with a high power CO₂ laser beam.

Ni-Cr sheet was placed on a low carbon steel plate(0.18%C), and then a CO₂ laser beam was irradiated on the surface to produce a homogeneous alloyed layer. On this first surface-alloyed layer, another Ni-Cr sheet was placed and then the CO₂ laser beam was irradiated again to produce second surface-alloyed layer. Sequential repetitions of laser surface alloying treatment 4 times resulted in a graded-boundary region with the thickness of about 1.4mm. Simultaneous concentration profiles of different kinds of alloying elements(Ni and Cr) showed from 42%Ni, 45%Cr and 13%Fe on surface region to 0%Ni, 0%Cr and 99%Fe in substrate region. Also a thermal conductivity gradient resulted in graded-region and its value changed from 0.03cal/cm s° C in surface region to 0.1cal/cm s° C in substrate region. Microstructural observation showed that any visible root porosities and solidification shrinkage cracks were not formed in graded region between alloyed layer and substrate region during rapid cooling.

keywords : Ni-Cr/Steel material, graded-boundary material, surface-alloying treatment, laser beam, homogeneous alloyed layer, thermal conductivity gradient, concentration gradient

1. 서론

현대 산업사회의 재료 개발은 복합화를 기본 개념으로 하여 광범위한 물성의 실현과 응용이 가능하도록 하는 재료, 새로운 물리적 및 화학적 성질을 갖는 재료, 새로운 고기능성재료의 개발에 노력을 기울이고 있다. 복합 재료는 여러 가지 재료를 거시적으로 혼합한 조성의 집합체로, 각 재료가 가진 특성을 상호 보완적으로 이용하여 단독 재료로는 실현할 수 없었던 특성을 가능하게 하였다. 이들 다성분계 재료들의 조성변화를 보면 Fig. 1과 같이 3가지 범주로 나누어 생각할 수 있으며, 대부분의 공업용 금속재료는 (a)와 (c)에 속한다. (a)경우는 두 성분 사이의 계면에서 조성이 급격히 변하는 경우로서 금속 복합재료, 표면

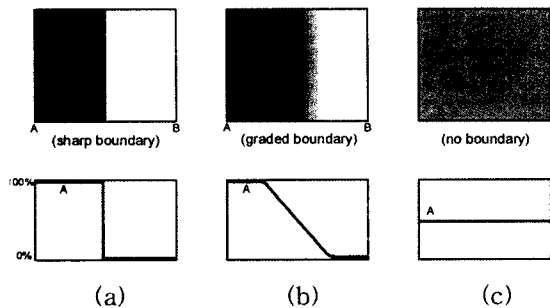


Fig. 1 Three kinds of concentration changes in multimaterial system (a) sharp boundary, (b) graded boundary, (c) no boundary

피복재료 등에서 볼 수 있다. 그리고 (c)경우는 각종 합금에서 찾아 볼 수 있는 것으로서 두 성분이 서로 고용된 재료로서 계면에서 조성의 변화가 없다. 그러나 (b)경우는 두 성분 사이의 계면에서 조성의 경사가 이루어진 경우로서 고온의 내열성이 요구되는 세라믹/금속 경사기능재료에서 찾아 볼 수 있다.

계면경사재료(Graded Boundary Materials)는 경사기능재료와 같은 개념으로 일반적으로 내

열성은 떨어지나 기계적인 성질이 양호한 금속과 기계적 성질은 뒤지나 내열성이 우수한 세라믹으로 물성이 서서히 변화도록 하는 조성을 갖는 재료에서 응용되었다.^{1~3)}

계면경사재료는 기능이 다른 재료들 간의 조성을 연속적으로 변화시켜 복합기능을 가지도록 한 것으로, 단일 재료에선 얻지 못하는 여러 가지 기능을 동시에 만족시키도록 하는 재료이다. 이러한 계면경사재료에 대한 개념은 열응력을 완화시키는 내열재료에서 시도되었으며, 활용할 수 있는 분야는 매우 광범위하다.⁴⁾ 만일 재료의 계면에서 급격한 조성변화가 존재하는 경우라면 Fig. 2의 (a)와 같이 고온 열싸이클시 두 재료의 열적 성질의 차이로 인하여 계면에서 급격한 응력집중이 발생한다. 그러나 (b)와 같이 계면경사재료의 경우에는 열적 성질이 급변하는 계면이 존재하지 않기 때문에 고온 열싸이클에서 열응력 또는 잔류응력이 발생하기는 하나 그것이 응력집중으로 나타나지 않고 전체적으로 이완되므로 바람직한 결과를 가져온다.⁵⁾

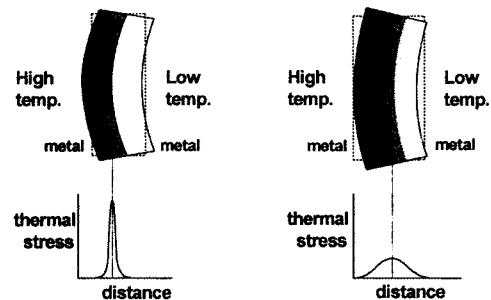


Fig. 1 Three kinds of concentration changes in multimaterial system

Fig. 2 Relaxation of thermal stress in the boundary region of materials (a) sharp boundary material, (b) graded boundary material

계면경사 재료를 제조하는 방법에는 분말야금 방법, CVD, PVD, Plasma Spraying, SHS(Self-propagating High temperature

Synthesis) 등이 있으나 가장 널리 쓰이는 방법은 분말야금방법이다.^{6~11)} 계면경사재료에 대한 연구의 대부분은 세라믹과 금속 사이의 재료로서, 내열성은 세라믹이 담당하고 냉각 특성과 기계적 강도는 금속이 담당하도록 그들의 중간구역을 경사화 시켜 열응력을 완화하는 것이다. 이러한 세라믹/금속 계면경사재료는 일반적으로 분말야금법에 의해 제조되므로, 계면경사화 시킬 원재료를 장시간 열처리로 내에서 소결 시켜 제조한다. 그리고 이러한 재료는 일반적으로 외부응력이 크지 않고, 냉각수에 의한 강제적인 냉각방법을 채택하지 않는 경우에 사용된다. 그러나 외부응력이 크거나, 부품의 온도를 강하시키기 위하여 강제적인 냉각방법을 사용하여야 하는 경우에는 그 재료의 열전도도가 중요하므로 금속과 금속 사이의 계면경사재료가 바람직하다. 예를 들면 금속/금속 계면경사재료로서는 핵융합로의 프라즈마 대향기기인 내부 구조물을 W/Cu계면경사재료로서 제조한 보고가 있다.⁵⁾

에너지 산업에서는 효율향상을 위하여 장비의 작동온도를 높여야 하므로 내식성, 내산화성 및 내열성을 갖춘 고온내열재료의 개발이 필요하다. Ni-Cr강은 내산화성, 내식성 및 고온강도가 크므로 고온에서 응력이 가하여지는 경우에 구조재료로서 우선적으로 사용되며, 대형의 부품인 경우에 이러한 Ni초합금은 비용이 많이 든다. 만일 조건이 허락하면 일반탄소강에 Ni-Cr의 초합금을 계면경사화 시켜 혹독한 환경에 Ni-Cr층이 접하게 하고 외부층에 일반탄소강이 오도록 하면 급격한 고온 열싸이클 하에서도 계면구역에서 응력의 집중을 방지할 수 있어 재료비를 경감시킬 수 있다. 이러한 계면경사재료를 제조하는 방법은 원칙적으로 복합적인 기능을 가진 신재료개발의 한 방법으로 구하기 힘든 전략금속의 부족에 대처하고, 고가금속의 절약이라는 견지에서 바

람직하다. 일반탄소강 위에 Ni-Cr 합금을 계면경사화 시키기 위해서는 집중된 열원이 필요하며, 이러한 열원은 고출력 레이저빔에 의하여 가능하다. 레이저빔을 집속시키면 다른 어떤 열원보다도 큰 에너지 밀도를 얻을 수 있으며 조사된 구역의 국부적인 용융이 가능할 뿐만 아니라, 용융두께 및 조성의 조절이 비교적 용이하다. 그리고 열영향을 받는 구역이 적고 용융점이 높은 금속의 표면합금화가 가능하다.¹²⁾

지금까지 레이저빔에 의한 금속/금속 계면경사재료(GBM)에 대한 연구는 Inconel 690/Steel13), Ni/Steel14), Cr/Steel15) GBM에 대해 수행되었다. Inconel 690/Steel GBM과 Ni/Steel GBM은 오스테나이트/페라이트 구조로 이루어져 있어 레이저가공 특성에 의해 용융구역에 기포와 균열이 형성되었다. Cr/Steel GBM은 Cr이 BCC이며 Cr-Fe합금도 Cr의 함량에 관계없이 페라이트 구조이므로 전체적으로 기포나 균열이 없는 양호한 합금층이 형성되었다. 그러나 이들 연구는 철강재에 하나의 합금원소 즉 Ni 또는 Cr만을 계면경사화 시켰으나, 일반적으로 내열성재료에서는 Ni과 Cr이 동시에 사용된다. 따라서 본 연구에서는 레이저빔에 의한 표면합금화 방법을 이용하여 두 가지 금속 즉, Ni과 Cr의 조성을 동시에 표면에서 기지방향으로 연속적으로 변화시킨 계면경사재료에 관한 기초연구를 수행하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 기지재료로는 일반구조용 탄소강(SM20C)이며, 표면 합금화 재료로는 Arc Melting하여 제조된 Ni-Cr합금을 두께 0.4mm로 wire cutting한 판재를 사용하였다. 기지재료(SM20C)와 합금화 시편(Ni-Cr판재)의 화학적 조성을 알아보기 위하여 습식방법으로 분석하였으며, 그 결과는 Table. 1에 나

타내었다. 탄소강 시편의 크기는 90×70mm 이고 두께는 16mm이며, Ni-Cr판재의 크기는 50×50mm이고 두께는 0.4mm이다.

Table 1 Chemical compositions of Ni-Cr alloy and substrate steel

	Mn	Si	C	Ni	Cu	S	P	Cr	Fe
NI-Cr	0.01	0.03	0.02	47.6	-	-	0.02	52.2	0.09
SM20C	1.04	0.22	0.18	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	bal

실험에 사용된 시편은 레이저빔 조사시 다중 반사율과 흡수능을 동일하게 하기 위하여 Emery paper #100으로 표면을 약간 연마한 후 아세톤과 에탄올로 초음파 세척하였다.

탄소강 위에 Ni-Cr판재를 올려놓고 판재의 이동이 없도록 판재의 양측을 지그로 고정시킨 후, 양호한 합금층을 얻기 위하여 aspect ratio(용융깊이/용융폭)가 1 이내로 되는 조건으로 레이저빔을 조사하였다. 이러한 최적의 조건을 얻기 위하여 본 실험 전에 레이저출력, 초점위치, 주사속도 등을 변화시켜 예비실험을 수행하였다. 그 결과 얻어진 조건은 CO₂ 레이저출력이 4 kW, 조사속도는 2600 mm/min, Defocusing은 -3 mm이었으며, Shielding Gas는 Ar을 사용하였으며, 유량은 40 CFH로 각 pass당 레이저빔을 50% 중첩 조사하여 표면합금화 시켰다. Fig. 3은 레이저빔에 의한 계면경사 Ni-Cr/Steel 재료제조 개략적인 모식도와 합금층을 나타내었다. 레이저빔을 첫 번째 Ni-Cr판재에 조사하여 표면합금화 시키면 표면에 용융층의 형성으로 인하여 약간의 굴곡이 발생한다. 그러므로 표면의 평평도를 유지시키기 위하여 표면을 약간 연마하였고, 그 위에 또 하나의 Ni-Cr판재를 밀착시킨 후 다시 레이저빔을 중첩시켜 조사하여 두 번째 층을 형성하였다.

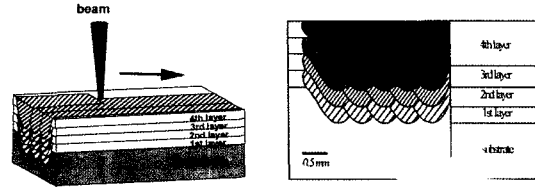


Fig. 3 Schematic diagram of laser beam irradiation on Ni-Cr sheet in order to make grade boundary Ni-Cr/Steel material

이후 같은 방법을 4차례까지 반복하여 계면경사층을 형성시켰다.

이와 같이 형성된 계면경사층에 대하여 WDS분석을 수행하여 표면에서 깊이 방향으로 Ni, Cr 및 Fe의 조성을 측정하였다. 그리고 광학현미경과 전자현미경(SEM, TEM)을 이용하여 조직을 검사하였고, X선회절실험(XRD)을 통하여 각 부분의 상을 분석하였다.

또한 빅커스경도(Vickers Hardness) 시험을 통하여 각 구역의 미소경도를 측정하였다. 그리고 계면경사재료의 열적 특성을 측정하기 위하여 레이저 섬광법(Laser Flash Method)¹⁶⁾을 이용하여 열전도도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 레이저빔에 의하여 제조된 계면경사 Ni-Cr/Steel 재료의 단면사진으로 레이저빔 한 패스당 비드폭은 약 2mm 이었고, 각 패스당 1mm 간격으로 표면 용융부가 약 50%정도 중첩되게 조사하였다. 그림의 좌측상단을 보면 용융되지 않은 4개 층의 Ni-Cr판재를 볼 수 있으며, 우측에는 계면경사 합금층의 단면을 거시적으로 볼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 계면경사화 된 구역에서 양호한 합금층이 형성된 것을 알 수 있으며 이때 형성된 합금층의 두께는 약 2.7mm 이었다. 그리고 급속한 용융 및 응고에 의한 용리균열과 기공의

발생은 관찰되지 않았다.



Fig. 4 Cross-section of graded boundary Ni-Cr/Steel material

Fig. 5는 레이저빔에 의하여 제조된 계면경사 Ni-Cr/Steel 재료의 표면으로부터 모재 내부까지 깊이에 따른 Ni, Cr 및 Fe의 함량을 WDS 분석한 결과이다. 표면에서 깊이 방향으로 Ni는 42%에서 연속적으로 감소하여 약 2.6mm 깊이에서 0%에 도달하였고, Cr은 43%에서 연속적으로 감소하여 약 2.6mm 깊이에서 0%에, Fe는 15%에서 점진적으로 증가하여 약 2.6mm 깊이에서 99%에 도달하였다. 여기

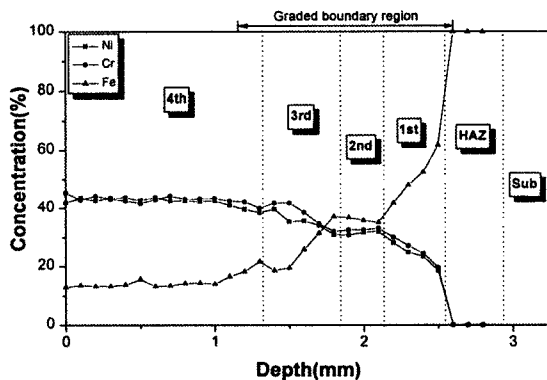


Fig. 5 Concentration profiles of Ni, Cr and Fe in graded boundary

에서 각층의 조직사진은 나타내지 않았으나 Ni함량이 20% 이상으로 오스테나이트 조직이

있으며, 이것은 뒤에 보여주는 XRD 결과에서도 증명된다. 계면경사화된 합금층의 영역은 4층 하단부에서 1층까지인 표면으로부터 깊이 1.2mm에서 2.6mm 이었으며, Ni과 Cr의 조성 분포를보면 Cr의 조성이 Ni보다 약간 크다. 이것은 Ni과 Cr을 50%와 50%로 제조하려고 하였으나, Table. 1에서 보여주는 바와 같이 Cr의 함량이 52.2%로 Ni의 함량, 47.6%보다 약간 많기 때문이다. 그러나 Ni과 Cr 두 성분 모두 공통적으로 조성경사 경향을 보여주고 있으며, 특히 Fe를 관찰하여 보면 국부적으로 조성의 변화가 연속적이지 않고 약간 계단식으로 변화된 것을 볼 수 있다. 그 이유는 탄소강 위에 Ni-Cr관재를 올려놓고 고출력 레이저빔을 조사하면 표면합금화 된 구역에서는 용융 금속의 강렬한 교반작용에 의하여 합금원소들의 조성이 거의 일정한 값을 가지게 된다. 그러나 첫 번째 합금층이 형성된 후 두 번째, 세 번째, 네 번째 합금층이 계속하여 형성됨에 따라 용융구역 에서는 Ni과 Cr의 조성은 계속해서 축적되므로 증가되고, 반면에 Fe의 조성은 상대적으로 감소된다. 이렇게 하여 매 합금층마다 일정한 조성으로 되어 전반적으로 계단식의 조성변화를 보여주고 있어야 하는 것이다. 그리고 가장 양호한 합금층을 형성시키기 위하여 레이저빔 각 패스당 50%정도 중첩되게 조사하였으나, 만약 중첩도가 크지 않은 경우(<50%)에는 레이저빔 중심부에서 벗어난 구역에서 국부적으로 합금원소들의 불균일한 조성분포를 주게되어 바람직하지 못한 결과를 가져오기도 한다.

각 합금층의 상(phase)을 알아보기 위해 XRD분석을 실시하였다. Fig. 6(a)는 합금재료인 Ni-Cr의 XRD분석결과로 Ni이 FCC이고, Cr이 BCC이기 때문에 α , γ peak가 함께 존재하고 있는 것이 관찰되었다. 기지는 Fig. 6(b)에서 보듯이 α -상으로 이루어져 있었다. 레

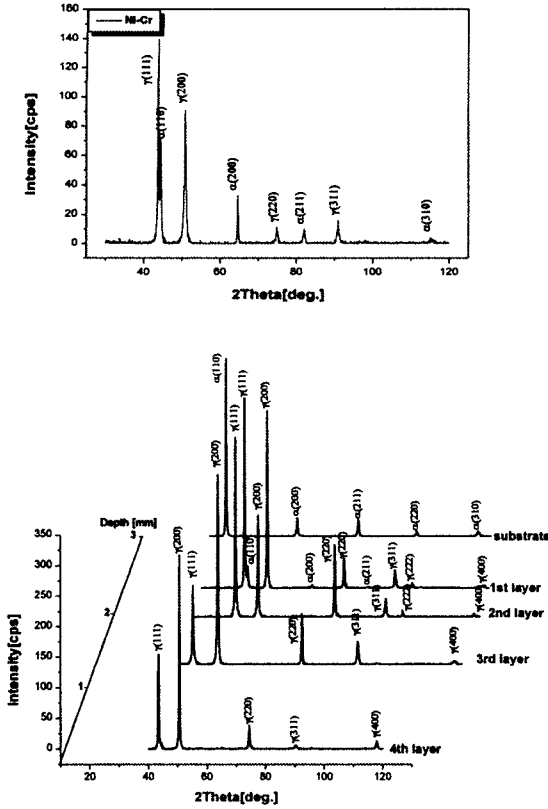


Fig. 6 XRD analysis of graded boundary region (a)Ni-Cr, (b) laser beam irradiated graded layers

이저빔에 의하여 제조된 계면경사재료의 1층에서는 γ 상에 α 상이 약간 나타났으나, 2층부터는 관찰되지 않았고 γ 상만이 관찰되었다. 이는 2층, 3층, 4층에서 Ni의 함량이 30% 이상이기 때문에 γ 상만이 관찰되었다.

Fig. 7은 레이저빔에 의해 제조된 계면경사 Ni-Cr/Steel 재료의 미소경도 측정결과로 4th, 3rd, 2nd, 1st 층에서는 약 210Hv로 일정한 경도를 보이다가 열영향구역(HAZ)에서 280Hv로 증가한 후 모재에서 약 170Hv를 보인다. Fig. 5에 보면 1st 층의 Ni과 Cr은 각각 22% 내외이며, 4th 층의 Ni과 Cr은 각각 40% 내외로 조성의 차이는 크나 경도는 거의 비슷하다. 이것은 여기에 그림으로 나타내지는 않았

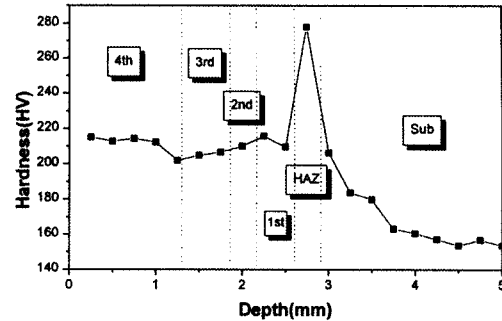


Fig. 7 Microhardness of graded boundary Ni-Cr/Steel material

으나 철강에서 Ni과 Cr의 조성에 따른 조직을 나타내는 Schaeffler's diagram에 의하면 Ni의 조성이 약 20% 이상인 경우에는 오스테나이트로 나타난다. 그러므로 위의 두 경우 모두 오스테나이트조직에 해당하여 경도가 비슷하게 나타난 것으로 생각된다. 그러나 일반적인 오스테나이트조직 보다 경도가 높은 것은 급냉에 따른 입자미세화와 많은 Cr함량에 의한 고용강화 등에 기인한 것으로 생각된다. 그리고 HAZ부위에서 경도값이 상승한 이유는 HAZ가 급냉시 오스테나이트로부터 페라이트로 변태하지 못하고 국부적으로 마르텐사이트 변태가 이루어지기 때문이다. 그러나 그 경도값은 같은 탄소함량의 일반적인 마르텐사이트 조직의 경도인 약 400Hv보다 상대적으로 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 여러 층의 합금층 형성을 위하여 연속적으로 반복 조사시킨 레이저빔에 의하여 템퍼링 되어 연화되기 때문으로 생각되며¹⁷⁾, 이를 확인하기 위하여 HAZ부의 조직을 투과 전자현미경(TEM)으로 조직사진을 찍어 보았다.

Fig. 8은 레이저빔에 의하여 제조된 Ni-Cr/Steel 재료의 HAZ부 TEM조직사진으로 HAZ는 lath 마르텐사이트조직으로 이루어져 있으며, 각 lath들은 일정한 방향으로 평행배열을 하고 있으며, 또한 각 lath내에는 전위들이

높은 밀도로 뒤엉켜 있는 것을 볼 수 있다. HAZ는 마르텐사이트 변태시 부피팽창으로 인하여 압축응력이 발생하게 된다.



Fig. 8 TEM Microstructure of the HAZ

HAZ는 lath 마르텐사이트조직으로 이루어져 있으며, 각 lath들은 일정한 방향으로 평행배열을 하고 있으며, 또한 각 lath내에는 전위들이 높은 밀도로 뒤엉켜 있는 것을 볼 수 있다. HAZ는 마르텐사이트 변태시 부피팽창으로 인하여 압축응력이 발생하게 된다.

이 압축응력은 급냉시 모재와 합금층 사이의 경계에서 발생하는 균열의 형성을 줄여 주며, 그 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 균열이 발생하지 않았다.

Fig. 9는 레이저빔에 의하여 제조된 Ni-Cr/Steel 재료의 열전도도 측정결과로서 4th, 3rd, 2nd 층에서는 약 0.03cal/cm s°C의 거의 일정한 값을 보이다가 1st 층, HAZ로 갈수록 증가하여 모재에서 약 0.1cal/cm s°C 이었다.

시편은 두께 1mm로서 wire cutting하여 제조하였으며, wire 직경이 0.2mm이므로 각 시

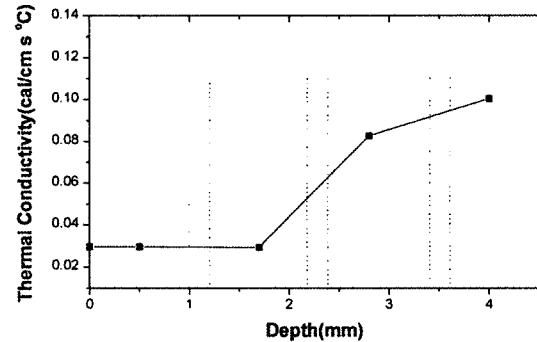


Fig. 9 Thermal conductivities of graded boundary Ni-Cr/Steel material

편의 위치를 그림에서 점선으로 나타내었다. 4th, 3rd, 2nd 층에서의 열전도도가 1st 층, HAZ, 모재에서의 열전도도보다 작은 이유는 4th, 3rd, 2nd 층이 γ 상으로 이루어졌기 때문이다. 일반적으로 γ 상의 열팽창계수가 α 상의 열팽창계수보다 커서 γ 상의 열전도도가 α 상의 열전도도보다 작다고 보고되고 있다.¹⁸⁾ 열팽창계수에 미치는 영향으로는 결정구조에 관련이 있음은 물론 재료의 성분에도 크게 좌우된다. 여기서 각층은 먼저 기술한 바와 같이 오스테나이트로 구성되어 있어 열전도도가 페라이트인 기지조직보다 작다. 그러나 같은 오스테나이트 구역이라도 4th 층은 2nd, 1st 층 보다 Ni과 Cr의 함량이 크므로 조성의 차이로 인하여 열전도도가 작다. 그러므로 전체적으로 표면에서 깊이 방향으로 열전도도가 서서히 증가하고 있음을 그림을 통해서 알 수 있으며, 연속적인 열전도도 변화로 인하여 국부적인 열응력 집중을 완화시킬 수 있을 것이다.

Fig. 10은 레이저빔에 의해 제조된 계면경사 재료의 4층을 광학현미경과 전자현미경(SEM) 조직사진으로 전형적 급속응고 조직인 세포-수지상(cellular-dendrite) 조직을 보여주고 있다. 그리고 각 세포-수지상 형상이 방향성을 가지고 있으며, 이것은 급속한 냉각으로 인하여 냉각방향에 따라 각 결정립의 방위가 다르

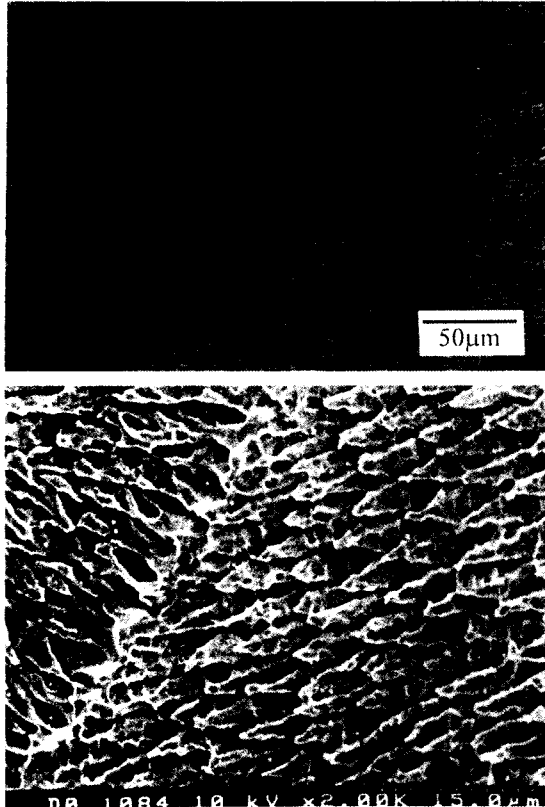


Fig. 10 Microstructures of 4th alloyed layer by optical microscopy and SEM
(a) optical microscopy, (b) SEM

게 나타나기 때문이다. 그리고 만일 각 합금층의 두께를 작게 하면서 합금층의 수를 증가시키면 조성의 변화를 더욱 점진적이고 연속적으로 변화시킬 수 있고, 더욱 양호한 계면경사 재료를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결론

1. 집중된 열원인 고출력 레이저빔에 의한 표면합금화 방법을 이용하여 계면경사 Ni-Cr/Steel 재료를 성공적으로 제조하였으며, 계면경사구역의 각 층에서 Ni과 Cr 금 속이 모두 균일하게 분포되었다. 전체적으로 균열이나 기포가 없는 양호한 합금층이 형성되었으며 계면경사화된 합금층의 두께는 약

1.4mm 이었다.

2. 표면에서 깊이 방향으로 Ni, Cr 및 Fe의 조성은 Ni의 경우 42%에서 0%, Cr은 43%에서 0%, Fe는 15%에서 99%로 연속적으로 변화하였다. 열전도도는 4층에서 0.03cal/cm s°C로 부터 내부로 갈수록 증가하여 모재에서는 0.1cal/cm s°C을 보였다. 따라서 표면으로부터 깊이방향으로의 조성변화와 열전도도가 연속적으로 변화한 것으로 보아 국부적인 열응력 집중을 완화 시킬수 있을 것으로 사료된다.
3. 레이저빔에 의하여 제조된 계면경사층의 조직은 전형적 급속응고 조직인 세포-수지상 조직이었으며, 냉각방향에 따라 각 결정립의 형상이 다르게 나타나고 있다.

참고문헌

1. N. Nakahashi, M. Shirokane and H. Taheda, Surface, Vol.24, pp.595, 1986.
2. J. M. Howe, Inter. Mater. Rev., Vol.38, pp.233, 1993.
3. P. Czubarow, D. Seyferth, J. of Mat. Sci., Vol.32, pp.2121-2130, 1997.
4. 김도훈, 제5회 재료물성심포지움, 대한금속학회, Vol. 17, 1991.
5. Y. Itoh, M. Takahashi, H. Kashiwara, H. Takano, N. Tachikawa and S. Adachi, Nuclear Engineering (Japan), Vol.37, pp.59, 1991.
6. K. Atarashiya, K. Kurokawa and N. Tadao, Ceram. Eng. Sci., Proc. 13, pp.400, 1992.
7. R. G. Ford, Mater. Process. Rep., Vol.7, pp.1, 1992.
8. S. Sampath and H. Herman, J. Met., Vol.45, pp.42, 1993.
9. I. M. Shepard, American Ceramic Society

- Bulletin, Vol.71, pp.617, 1992.
10. Z. A. Munir and J. B. Holt, "Combustion and Plasma Synthesis of High Temperature Materials" VCH Publishers, Inc., New York, 1990.
 11. S. E. Niedzialek, G. C. Stangle and Y. Kaieda, J. Mater., Res. 8, pp.2026, 1993.
 12. 김도훈, "레이저 가공학", 경문사(서울), pp.145-254, 1996.
 13. 김도훈, 정재훈, 대한금속학회지, Vol.35, No.4, pp.509-514, 1997.
 14. 안재모, 김도훈, 한국레이저 가공학회지, Vol.2, No.1, pp.22-29, 1999.
 15. 노재윤, "레이저빔과 전자빔에 의한 계면경사 Cr/Steel재료 제조에 관한 연구" 연세대학교 석사학위논문, 1999.
 16. W. J. Parker, R. J. Jenkins, J. Appl. Phys., Vol.32, No.9, pp.1679-1684, 1961.
 17. 김동훈 역, "금속상변태"(D. A. Porter, K. E. Easterling), 반도출판사(서울), pp.520-522, 1990.
 18. Zhang Li, G. Fontana, J. Mat. Proc. Tech., Vol.74, pp.174-182, 1998.