

공정변수에 따른 레이저표면합금층의 형상 및 성분변화에 관한 연구

崔 程 英, 李 昌 禧*

한양대학교 금속공학과, 철강공정 및 응용연구소

*충남대학교 금속응고신소재연구소

Shape and Chemical Composition of Laser Surface Alloyed Layer under Moving Laser Source

J. Y. Choi, C. H. Lee*

Hanyang university Dept. of Met.Eng.,

Research Institute of Steel Processes & Applications

*RASOM

Abstract

This study includes a basic feature of laser surface alloying for enhancing the surface properties of materials. Effects of laser processing parameters such as beam power, beam size, scanning speed on the shape and composition of alloyed layer was simulated in case of moving beam conditions (2-dimensional numerical methods). Simulated results were compared with experiments, in which the plasma coating of 80% Ni + 20% Cr deposited on the SS41 substrate was remelted with CO₂ laser with Gaussian energy distribution. Simulation and experiments revealed that the shape (dimension) and composition of laser alloyed layer were strongly dependent upon the process parameters, especially interaction time (travel speed) as compared to beam diameter, beam power and absorptivity. The shape and composition of alloyed layer varied more or less exponentially with parameters.

Keyword : laser spot alloying, severe condition, laser process parameter, simulated result.

1. 서론

레이저표면합금화는 레이저빔을 재료의 선택된 부위에 조사하여 첨가되는 재료와 모재를 용융회석시켜 재료표면에 새로운 합금층을 형성하는 표

면개질의 한 방법이다. 요구되는 조건에 따라 모재 위에 내식성, 내마모성, 내열성, 내산화성 등의 특성을 지닌 재료를 선택하여 합금화시킴으로 사용되는 모재를 바꾸지 않고도 기계적, 화학적 특성을 향상시킬 수 있으며 모재위에 새로운 합금층을 형

성하므로 모재와 합금층간에 상호 보완할 수 있는 특성을 가진다. 또한 다른 표면 개질방법과 비교하여 재료의 기계적성질을 저하시키는 열영향부가 더 좁게 나타나며, 고융점이고 취성을 가져 사용이 어려웠던 세라믹재료의 합금화가 용이하며 합금층과 모재간의 강한 결합력을 가지는 등 우수한 표면개질효과를 가지고 있다⁽¹⁻³⁾.

레이저표면합금화시 합금화 공정변수로 빔출력, 빔크기, 빔이동속도 등이 있는데 합금화 공정변수가 변화하게 되면 합금화된 영역이 변화하며, 합금화원소가 모재와 용융회석되는 정도가 달라져 성분이 변화하여 합금층의 기계적, 화학적 성질이 변하게 된다. 따라서 재료의 선택된 부위의 적절한 표면개질 효과를 얻기 위해서는 합금화 공정변수에 따른 합금층의 형상과 성분의 영향을 고려하여야 한다.

그러나 앞에서 제시한 빔출력, 빔크기, 빔이동속도 등 합금화공정변수가 다양하여 실험을 통하여 각각의 변수에 따른 형상 및 성분결과를 얻기 위해서는 상당한 경제적, 시간적 요구가 발생되어 모델링을 통한 합금층의 형상 및 성분을 예측하고자 하는 노력이 최근 시도되고 있다. 합금층의 형상에 대해서는 Chan 등에 의해 해석적인 모델^(4,5)이 제시되었으나 많은 가정을 도입하여 해석함으로써 실제경우와 차이를 보이고 있으며 합금층의 성분 예측에 관한 연구는 실험적 결과만이 제시되었을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 레이저합금화시 실제 현상에 가까운 이동열원에 대한 2차원 해석모델을 제시하여 합금화공정변수와 합금층의 형상과 성분에 대한 영향을 예측하고자 하였다. 레이저빔조사에 따른 모재내의 열전달은 전도(conduction) 외에 대류(convection)의 영향을 받는다⁽⁶⁻⁷⁾. 레이저합금화시 유동은 용융지표면에서의 온도구배에 따른 표면인장력(surface tension)의 차이에 의한 Marangoni convection에 의해 지배되며 이러한 유동과 열전도에 의해 합금층의 형상 및 합금화원소의 모재와의 회석에 의한 합금층의 성분이 결정

된다. 재료의 물성치는 온도 증감에 따라 변화하며 재료의 열전달양상이 변하여 합금층의 형상에 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 이제까지의 연구와 다르게 열물성치를 온도에 따라 변화하는 값을 취하여 실제 현상에 가까운 모델이 되도록 하였고 합금층 내부에서의 전도 및 대류를 고려하여 합금층의 형상 및 성분을 상용 FEM해석프로그램을 이용하여 예측하였다.

2. 모델링

2-1 레이저표면합금층의 성분

레이저합금화시 합금화원소의 첨가방법에는 codeposition방법과 predeposition방법이 있는데 본 연구에서 고려한 predeposition방법을 Fig. 1에 나타냈다. 미리 모재표면에 합금화원소를 predeposition하였으며 조사된 레이저빔은 predeposition된 영역에서 흡수되어 모재로 열전달 되어 모재와 용융회석응고되어 새로운 합금층을 형성하였다. 레이저표면합금화시 용융지 표면에 중심에서 반경방향으로 온도구배가 발생하며 이러한 온도구배에 의해 표면인장력의 차이가 생겨 대류(convection)가 발생한다. C.W. Drapes등의 연구결과처럼 대류에 의해 macro scale에서 합금화원소가 합금층에 균일하게 분포하기 때문에⁽⁸⁾ 합금층의 성분은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{합금화원소의 분율} = \frac{\text{predeposition된 면적}}{\text{합금화부위의 면적}} \times \text{predeposition층의 원소성분}$$

$$\text{모재원소의 분율} = 1 - \text{합금화원소의 분율}$$

합금층의 성분은 합금화 원소가 precoating된 두께와 레이저빔의 출력, 빔의 크기, 빔의 이동속도 등의 레이저합금화 공정변수에 따라서 변화하게 된다. 따라서 본모델에서는 precoating된 합금화원소의 두께를 일정하게 유지시킨후 합금화 공정변수 변화에 따른 합금층의 형상과 합금층의 성분을 상

용FEM해석프로그램인 FIDAP을 이용하여 해석하였다.

2-2 유동의 구동력

레이저 합금화시 발생하는 대류는 용융지 표면에서의 온도구배에 따른 표면 인장력의 차이로 발생하는 Marangoni convection과 밀도변화에 따른 부력(buoyancy force)에 의해 발생한다.

2-2.1 Marangoni convection

레이저빔이 조사되면 재료표면에서 용융이 발생하며 용융지 표면의 중심에서 용융지 끝으로 온도구배(thermal gradient)가 발생한다. 재료가 각각의 온도에서 다른 표면인장력을 가지므로 용융지 표면에서 표면인장력의 구배가 발생된다. 이러한 표면 인장력의 차이는 용융지 표면에서 전단응력을 발생시켜 용융부에 유동이 일어나도록 한다. 이러한 표면인장력과 전단응력과의 관계식은 다음과 같다.

$$\mu \frac{\delta V_x}{\delta y} = - \frac{\delta T}{\delta x} \frac{\delta r}{\delta T}$$

[μ : viscosity, r : surface tension, V_x : momentum component, T : temperature]

이렇게 발생한 유동은 유체 내에서의 열 및 운동량의 이동을 증가시키는 역할을 하여 합금층의 형상 및 온도분포를 변화시킨다.

2-2.2 부력(buoyancy force)

용융지 내에서 발생하는 온도구배에 따라 재료의 밀도가 변화하며 이러한 구배에 의해 용융지내부에서 유체의 이동이 발생하는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f_{density} = \rho_0 g (1 + \beta)$$

[ρ_0 : density, g : gravitational coefficient, β : compressibility]

2-3 모델

합금층의 형상은 전도 및 대류에 의해 결정되며 레이저합금화시 대류를 발생시키는 인자인 부력과 표면인장력과 열전도에 의한 용융부의 형상을 구하였다. 실제 현상에 근접하도록 열 및 물리적 물성치를 상수로 하지 않고 온도에 의존하는 함수로 나타냈다. 본 연구에 사용한 가정, 지배방정식 및 열물성치는 아래와 같다.

2-3.1 가정

본 해석에서는 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 2차원 비정상상태로 해석하였다.
- 2) Precoating층의 두께가 모재에 비해 상당히 얇기 때문에 열물성치는 모재와 같다고 하였다.
- 3) Radiation은 무시하였다.
- 4) Plum(plasma)에 의한 에너지 손실은 없다고 하였다.

2-3.2 지배방정식

Continuity equation

$$\frac{\delta u}{\delta r} + \frac{u}{r} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0$$

Momentum equation

radial component

$$\begin{aligned} & \frac{\delta u}{\delta r} + u \frac{\delta u}{\delta r} + w \frac{\delta u}{\delta z} \\ & = - \frac{1}{\rho} + \frac{\delta P}{\delta r} + \nu \left[\frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta u}{\delta r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right] \end{aligned}$$

axial component

$$\begin{aligned} & \frac{\delta w}{\delta r} + u \frac{\delta w}{\delta r} + w \frac{\delta w}{\delta z} \\ & = \frac{\delta P}{\delta z} + \nu \left[\frac{\delta^2 w}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta w}{\delta r} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right] + g\beta(T - T_0) \end{aligned}$$

Thermal Energy Conservation

$$\begin{aligned} & \frac{\delta T}{\delta r} + u \frac{\delta T}{\delta r} + w \frac{\delta T}{\delta z} \\ & = \alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] - \frac{AH}{\rho C_p} \frac{\delta f_L}{\delta t} \end{aligned}$$

2-3.3 초기조건 및 경계조건

상온에서 레이저빔을 조사하였기 때문에 초기온도는 대기온도인 298K로 설정하였으며 재료표면에서의 열경계조건은 아래와 같은 대류열경계조건으로 나타냈다.

$$\vec{q} = h_c(T - T_a)$$

[h_c : convective heat transfer coefficient, T_a : atmosphere temperature]

2-3.4 열물성치

Table. 1에 사용된 재료의 열물성치를 나타냈다. 모재의 용점온도 이하에서는 탄소강의 물성치를 사용하였으며 용점이상에서는 합금화원소가 Cr, Ni로 모재인 Fe와 용융희석시 300계 STS와 비슷하므로 300계 STS의 물성치를 사용하였다. Thermal conductivity, viscosity, specific heat을 온도에 따라 변화하는 함수로 처리하였으며 이들을 Fig. 2에 나타냈다⁽⁹⁾.

2-3.5 열유속 (heat flux)

레이저빔이 모재에 조사되는 현상을 표현하기 위하여 heat flux식을 사용하였다. Heat flux는 단위시간당 재료표면에 조사되는 에너지의 양으로 레이저빔이 Gaussian 분포를 가지므로 빔의 중심에서 빔의 반경방향으로의 heat flux의 분포를 Gaussian 분포로 나타냈다. 사용된 heat flux식은 아래와 같다.

$$\vec{q} = \frac{3\eta Q}{\pi r_b^2} e^{-\frac{3r^2}{r_b^2}}$$

η : absorptivity, Q : power, r : radial distance, r_b : beam diameter

실제적인 레이저합금화는 이동열원하에서 실행되므로 레이저빔의 이동에 따른 모재에 유입되는 열의 흐름을 표현하기 위하여 이동레이저열원인 경우 열유속(heat flux)식을 시간에 의존하는 함수로 나타냈다.

Fig. 3과 같은 Gaussian분포를 가지는 레이저빔에서 빔이 z방향으로 이동하며 그때의 이동속도가 V일 때 t시간후의 빔이 이동한 거리 $S=Vt$ 이다. $t=0$ 일 때 레이저빔이 조사되기 전이므로 열유속은 0이며 시간경과에 따라 레이저빔은 Z축방향으로 이동하게 되고 그 때 이동한 위치에서의 XZ축의 Gaussian 분포를 가지는 레이저빔이 모재에 조사된다. 따라서 Eulerian좌표에 의해 해석하고자 하는 위치에서 시간경과에 따라 이동하는 레이저빔의 열유속값을 입력하여 레이저빔의 이동을 고려하였다.

빔출력이 4kW, 빔사이즈가 6mm, 빔이동속도가 20mm/sec일 때 입력되는 열유속값을 Fig. 4에 나타냈다. $t=0$ 일 때 빔이 접근하기 전이므로 0이며 시간이 경과함에 따라서 빔의 중심방향으로 이동함에 따라 열유속값이 증가하며 $t=0.15$ 초일 때 빔의 중심에 해석영역이 위치하게 된다. 모든 이동속도범위 내에서 이와 같은 방법으로 열유속값을 입력하여 해석하였다.

2-3.6 Mesh

Fig 5 에는 본연구에서의 사용한 mesh이다. 레이저빔이 조사되는 영역의 중심에서 좌우대칭이기 때문에 중심의 우측영역을 해석하였으며 해석의 정확도를 높이기 위하여 레이저빔이 조사되는 영역의 mesh간격을 좁게하였다. 레이저빔의 조사되는 영역에서의 mesh는 가로 0.25mm 이고 세로는 0.1mm이다

3. 실험

3-1 시험재료 및 용사코팅

본 연구에 사용된 모재는 일반구조용 압연강판인 SS41로 탄소함량이 0.16%이며 주요성분은 Table 2와 같다. SS41 강판의 표면특성(내식성)을 향상시키기 위한 레이저 합금화에 앞서 합금화 원소인 80%Ni-20%Cr 파우더(size 45~105 μ m)를 사용하여 플라즈마 용사법으로 모재위에 전지(precoat)

g)하였으며 용사 공정 변수는 Table 3과 같다.

모재는 shearing machine을 이용하여 50mm(L) x 30mm(W) x 4.5mm(T)로 절단한 후 모재표면의 기름 및 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척하였다. 아세톤으로 세척한 모재표면에 잔존하는 산화물을 제거하고, 표면의 조도를 증가시켜 용사시 코팅층이 모재에 잘 접착시키기 위해(코팅-모재간의 bond strength를 증가 시키기위해) #14-30의 입도를 지닌 알루미나로 grit blasting을 하였다. Grit blasting은 표면의 산화층이 떨어져나가 보이지 않고 충분한 조도가 생길때까지 수회 분사하였으며 그 위에 최적의 공정변수를 이용한 플라즈마 용사법으로 분사하여 250 μ m 두께로 코팅하였다.

3-2 레이저표면합금화

레이저 합금화에 사용된 레이저는 연속출력과 (continuous wave), 최대출력 4kW, 횡여기 방식 (transverse flow type)의 CO₂ 레이저로 레이저빔을 원하는 빔크기를 가지기 위하여 defocus시킨 후 빔출력, 정지열원인 경우 빔유지시간, 이동열원인 경우 빔이동속도를 변화시켜 합금화하였으며 그때의 변수는 Table 4와 같다. 또한 용융지에서의 산화방지 및 plum제거를 위하여 모재표면에서 45°에서 30 l/min로 보조 Ar 가스를 공급하였다.

각 시편을 레이저표면합금화한 후 공정변수별로 시편을 채취하여 실측현미경을 이용하여 합금층의 폭과 깊이를 측정후 전체영역에서의 Fe, Ni, Cr의 성분을 EPMA로 측정후 예측한 결과와 비교하였다.

합금층의 조직특성을 알아보기 위하여 채취된 시편을 0.05 μ m Al₂O₃ suspension까지 미세 연마한 후 glycerol(3 parts HCl, 2 parts HNO₃, 3 parts glycerol)용액으로 etching 한 후 광학현미경을 이용하여 합금층의 영역을 관찰하였다. 그리고 시편의 일부를 선택하여 전면을 연마후 XRD를 이용하여 합금층의 상(phase)을 분석하였다. 이때 가속전압은 15 kV, scan rate는 2 degree/min, scan range는 20-90 degree이며 Cu target을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1 흡수율

레이저빔이 시편에 조사되면 시편의 표면상태, 온도 등에 따라 레이저빔의 흡수율이 변화하게 되어 정확한 레이저빔의 흡수율을 실험을 통하여 결정하기는 어려우나 W.M steen⁽¹⁰⁾ 등에 의하면 금속표면에 코팅층을 형성하였을때 레이저빔의 흡수율이 대략 50~70%인 것으로 보고되어 지고 있다. 따라서 본연구에서는 적절한 레이저빔의 흡수율을 결정하기 위하여 레이저빔의 흡수율이 50%인 경우와 70%인 경우의 두 모델을 해석해 본 후 실험을 통하여 얻은 용융지의 형상과 비교하여 적절한 레이저빔의 흡수율을 결정하였다. Fig. 6은 빔출력 3kW, 빔사이즈 4mm, 빔이동속도 20mm/sec일 때의 실험결과와 예측한 결과로 합금층의 폭은 흡수율이 70%인 경우 3.7mm, 50%인 경우 3.6mm로 실험결과인 3.5mm보다 크게 나왔으나 깊이에서는 흡수율이 70%일 때 0.56mm, 50%일 때 0.5mm로 실험결과인 0.63mm 보다는 작게 나왔다. 이러한 결과는 해석시 사용된 표면인장력이 본 연구에서는 300계 STS에서의 데이터를 사용하였으며 본 연구에서 사용된 조성에서의 표면인장력 데이터가 제시된다면 보다 정확한 해석이 가능하리라 사료된다. 흡수율이 50%인 경우와 70%인 경우의 합금층의 형상을 비교해보면 70%인 경우가 실험을 통하여 얻은 합금층과 더욱 비슷하므로 이후의 해석에서는 레이저빔의 흡수율을 70%하여 시편에 조사되는 것으로 하였다.

4-2 빔사이즈의 영향

Fig 7과 8은 빔사이즈가 합금층의 형상 및 성분에 미치는 영향을 보여주고 있다. 빔의 출력은 4kW이며 빔의 이동속도는 20mm/sec이다. 빔사이즈가 2mm인 경우 예측한 결과가 실험결과와 많은 차이를 보이는데 이는 레이저빔이 모재에 열전달되는 방식에서의 차이가 있는 것으로 예측되는데 빔사이즈가 작고 빔출력이 높은 경우 단위 면

적당 입열되는 에너지가 높아 중심부에서의 키홀이 형성되어 재료표면에서 열전달되는 것이 아니라 키홀표면에서 열전달이 발생되어 합금층의 깊이가 증가한 것으로 예측된다. 따라서 키홀형성에 따른 계면의 변화를 고려하여 해석하면 더욱더 정확한 예측결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

빔의 크기가 커질수록 합금층의 폭은 증가하고 있으며 조사된 레이저빔의 폭과 비슷한 크기를 보여주고 있다. 합금층의 깊이는 빔의 크기가 증가할수록 감소하고 있는데 이는 단위면적당 재료에 입열되는 에너지밀도(Energy density)가 감소하여 깊이의 감소가 발생하는 것으로 사료된다. 합금층의 성분의 경우 빔사이즈가 증가할수록 용융되는 폭이 증가하므로 합금화원소의 용융이 증가하고 용융부의 깊이가 감소하기 때문에 합금화원소인 Cr과 Ni의 성분이 증가하고 모재인 Fe의 성분은 지수함수적으로 감소하고 있다.

4-3 빔출력의 영향

Fig. 9는 빔사이즈가 4mm, 빔이동속도가 20mm/sec일 때 빔출력변화에 따른 합금층의 폭과 깊이의 변화를 보여주고 있다. 빔사이즈를 변화한 경우와 같이 예측한 결과에서의 합금층의 폭이 실험결과 보다 넓게 나타나며 깊이는 좁게 나타나고 있다. 빔의 출력이 증가할수록 단위면적당 시편에 입열되는 에너지밀도가 증가하므로 합금층의 폭과 깊이가 증가하고 있다.

Fig 10은 빔출력 증가에 따른 합금층의 성분변화를 보여주고 있다. 예측한 경우에서 합금화원소인 Ni의 함량이 실험한 경우보다 약간 크게 나타나는데 이는 예측한 경우에서의 합금층의 폭이 실험결과보다 크기 때문에 더욱 많은 합금화원소가 용융 희석되어 합금화원소의 성분이 증가하였다. 예측한 결과와 실험한 결과 모두 빔출력이 증가할수록 합금화된 영역이 커져 모재와의 희석되는 정도가 증가하여 합금화원소성분인 Ni와 Cr은 지수함수적으로 감소하고 모재인 Fe의 성분은 증가하고 있다.

4-4 빔이동속도의 영향

빔이동속도의 영향을 Fig. 11과 Fig. 12에 나타냈다. 빔출력은 4kW, 빔의 반경은 4mm이며 빔의 이동속도는 20mm/sec에서 60mm/sec까지 변화시켰다. 빔이동속도가 증가하면 레이저빔과의 반응시간(interaction time)이 감소하므로 단위면적당 시편에 입열되는 에너지밀도는 감소하게 된다. 이에 따라 합금층의 폭과 너비는 감소하며 모재와의 희석이 작아지므로 합금화원소인 Cr과 Ni의 성분은 증가하며 모재인 Fe는 감소하고 있다.

4-5 조직 및 상분석

레이저 표면합금화된 시편을 절하여 에칭한 후 시편의 단면을 관찰하였다. Fig. 13은 빔출력 3kW, 빔사이즈 4mm, 빔이동속도 20mm/sec에서의 레이저 표면합금층의 전형적인 단면조직을 보여주고 있다. 시편내부에 불연속적인 무늬를 볼 수 있는데 이는 응고시 국부적인 영역에서 열적요동(thermal fluctuation)에 의하여 성장속도(growth rate) 차이가 발생하여 solute banding이 발생하였다(11). 열적요동의 원인으로는 레이저빔의 이동에 의한 합금층내부의 대류(convection flow)조건 변화와 레이저빔조사시 형성되는 플라즈마에 의하여 재료내부의 입열조건이 변화된 것으로 사료된다.

합금화된 미세조직을 관찰해보면 cellular 조직을 보여 주고 있다. 셀의 형상이 각결정립의 방위에 따라 다르게 나타나고 있으며 셀의 성장방향이 용융지표면의 중심을 향하고 있는데 이것은 응고시 열의 전도방향의 역방향을 나타낸다. 이러한 현상은 용융지표면에서 대기로의 대류에 의한 열손실보다 모재를 통하여 열전도도에 의해 열이 주로 소모되었음을 알 수 있다(모재가 heat sink로 작용하였다)

레이저합금화된 부위의 상을 알아보기 위하여 XRD를 실시하였다. Fig. 14 에서 나타난 바와 같이 공정변수와 상관없이 XRD 분석결과 γ 상이었는데 이는 Table 5에서 나타난 전시편에서의 측정된 합금층의 성분범위가 Fig. 15 의 Fe-Cr-Ni 삼원등

온상태도에서 보는 것처럼 모두 γ 영역에 위치한 것과 잘 일치하며 급냉응고 (rapid solidification)에 의한 새로운 상이 형성되지 않았음을 알 수 있었다.

5. 결론

Predeposition 방법을 이용한 레이저표면 합금화시 합금층의 형상과 성분을 예측하고 실제실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

i. 레이저빔의 최대출력에서 빔의 이동속도가 감소하고 출력이 증가함에 따라 합금층의 폭과 깊이가 증가하였으며 빔이동속도의 영향이 출력변화의 영향보다 크게 나타났는데 이는 레이저빔과 모재와의 반응시간이 레이저표면합금층의 형상변화에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다.

ii. 단위면적당 입열되는 에너지와 빔과의 반응시간이 증가할수록 합금화 원소와 모재와의 희석이 커지므로 Cr과 Ni의 성분은 감소하며 모재인 Fe의 성분은 증가하며 지수함수적인 형태를 보여 준다.

iii. 레이저합금층의 조직관측결과 급냉응고에 의한 cellular조직이었으며 XRD분석결과 본 실험에서 사용한 전공정변수범위에서 γ 단상이었다.

참고문헌

1. P. J. E. Monson and W. M. Steen: Comparison of Laser Hardfacing with Conventional Process, Surface Engineering, 6 (1990) 185
2. Jogender Singh: The Constitution and Microstructure of Laser Surface Modified Metal, JOM, September (1992) pp.8
3. J. I. Nurminen and G. J. Bruck: Laser Cladding and Alloying for Surface Modification, Surface Modification Engineering, 2 (1989) 193-209
4. C. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen: A Two

- Dimensional Transient Model for Convection in Laser Melted Pool, Metall. Trans., 15A (1984) 2175
5. T. Chande, J. Mazumder: Composition control in Laser Surface Alloying, Metall. Trans., 14B (1983) 181
6. S. Kou, Y. H. Wang: 3D Convection in Laser Melted Pool, Metall. Trans., 17A (1991) 2265.
7. T. Chande, J. Mazumder: Composition Control in Laser Surface Alloying, Metall. Trans., 14B (1983) 181
7. J. Mazumder, W. M. Steen: Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing, J. Appl. Phys. 51 (1980) 941
8. C. W. Draper and J. M. Poate: Laser Surface Alloying, International Metals Review, 30, No2 (1985) 85
9. T. Zacharia, S. A. David, J. M. Vitek and H. G. Kraus: Computational Modeling of Stationary GTA Weld Pools and Comparison Stainless Steel 304 Experimental Result, Metallurgical Trans 22B (1991) 243
11. William M. Steen: Annual Review of Laser Processing, pp.158
10. William M. Steen: Laser Cladding, Alloying and Melting, Annual Review of Laser Processing, pp.158
11. S. A. David and J. M. Vitek: Correlation between Solidification parameters and Weld microstructures, International Materials Review, 34, No.5 (1989) 213

Table 1 Thermal properties of material

Properties	Values
Gravity	9.8 m/sec
Density	7200 kg/m ³
Viscosity	Temperature dependent
Thermal conductivity	Temperature dependent
Specific heat	Temperature dependent
Volume expansion coefficient	0.0001 /K
Surface tension coefficient	4.3 × 10 ⁻⁴ N/m · K
Liquidus temperature	1768 K

Table 2. Chemical

SS41	composition of substrate					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0.612	0.284	0.593	0.015	0.009	0.015
	Al	Nb	Ni	Cr	Mo	Ti
	0.020	<0.002	0.025	0.024	0.005	0.002

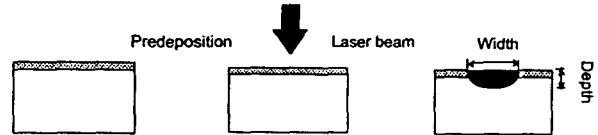


Fig.1 Schematic representation of laser surface alloying

Table 3 Spray parameter

Plasma Gas flows (SCFH)	Ar	116
	H ₂	9.5
Carrier Gas Flow (SCFH)	Ar	13.5
Powder Feed Rate (Gram/min)		144
Spray Distance (Inch)		5
Power	DC Ampere	400
	DC Voltage	63

Table 4 Parameter of laser surface alloying with moving beam condition

Beam power	2, 3, 4 kW
Beam diameter	2, 4, 6 mm
Travel speed	20, 30, 40, 50, 60 mm/sec

Table 5 Composition of laser surface alloyed layer

NO	Condition	Fe	Ni	Cr
1	P4d2t20	76.5%	18.5%	5.01%
2	P2d4t20	42.1%	47.0%	10.9%
3	P3d4t20	64.0%	28.4%	7.5%
4	P3d4t30	54.6%	36.4%	9.0%
5	P3d4t40	48.9%	40.1%	11.0%
6	P3d4t50	40.7%	48.1%	11.3%
7	P3d4t60	18.0%	66.5%	15.5%
8	P4d4t20	65.2%	27.5%	65.2%
9	P4d6t20	48.0%	41.5%	10.5%

P:power(kW), d:beam size(mm), t:travel (speed mm/sec)

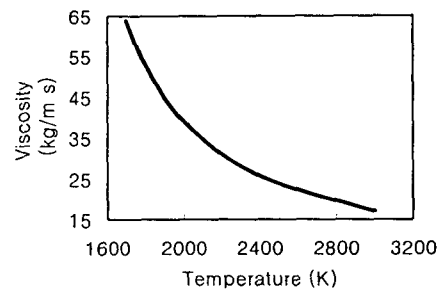
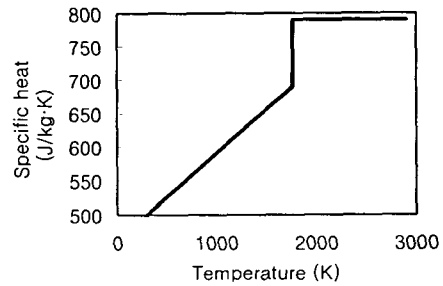
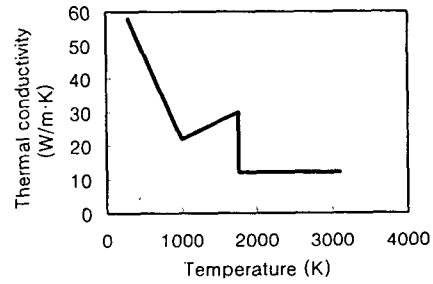


Fig. 2 Temperature dependent thermophysical properties of specimen(9)

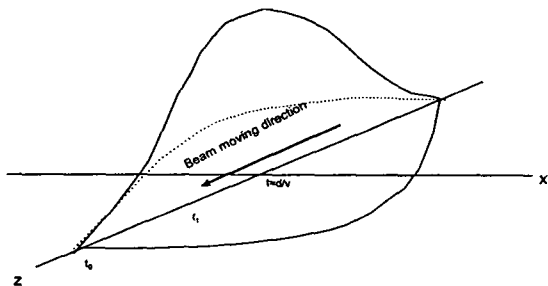


Fig. 3 Gaussian profile of laser beam for moving heat source

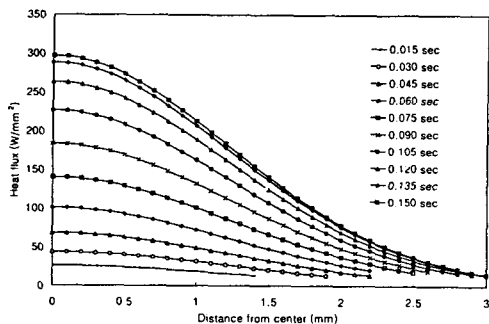


Fig. 4 Heat flux as a function of distance and time considering moving laser beam : peak power 4kW, beam size 6mm, travel speed 20mm/sec

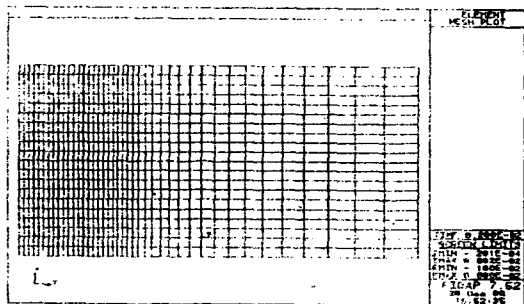
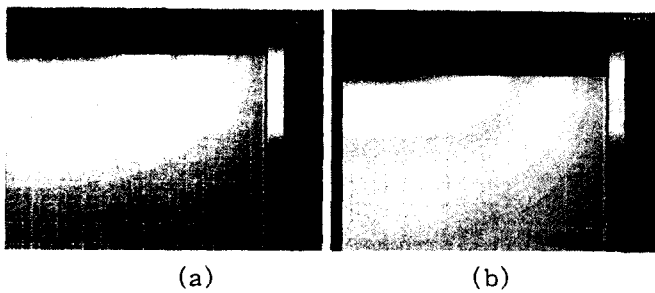
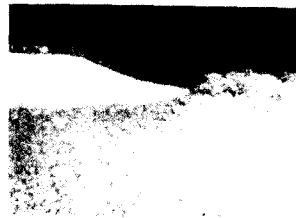


Fig. 5 An example of the mesh used



(a)

(b)



(c)

Fig. 6 Shape of laser surface alloyed region power 4kW, beam size 6mm, travel speed 20mm/sec. a) Simulation-absorptivity 50%, b) Simulation-absorptivity 70%, c) Experiment

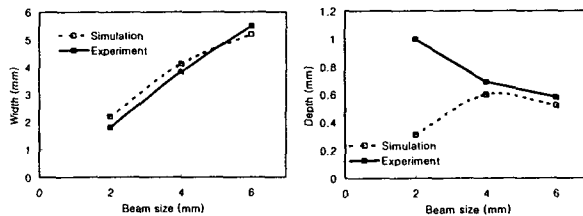


Fig. 7 Effect of beam size on shape of laser surface alloyed layer

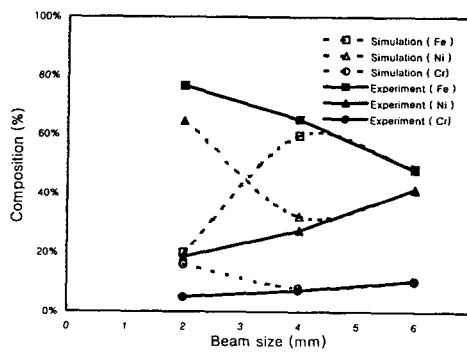


Fig. 8 Effect of beam size on composition of laser surface alloyed layer

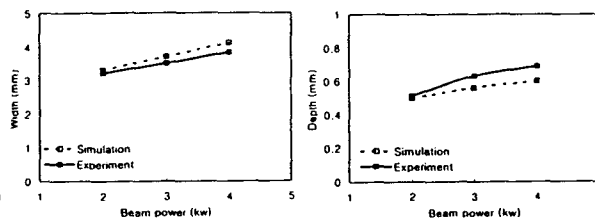


Fig. 9 Effect of beam power on shape of laser surface alloyed region

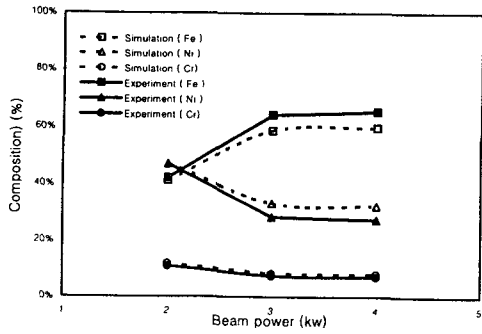


Fig. 10 Effect of beam power on composition of laser surface alloyed region



Fig. 13 Microscopic view of laser surface alloyed region

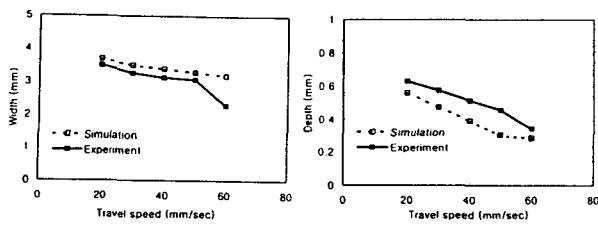


Fig. 11 Effect of travel speed on shape of laser surface alloyed region

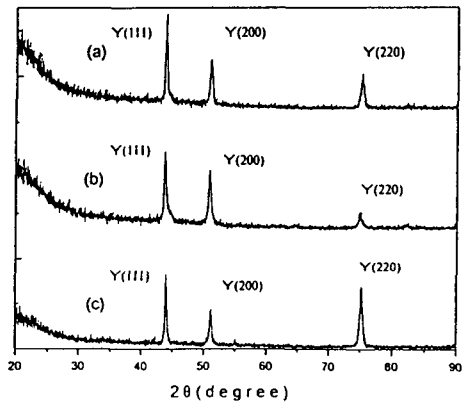


Fig. 14 XRD result of laser surface alloyed region
 a) power 4kw, beam size 4mm, travel speed 20 mm/sec,
 b) power 4kw, beam size 6mm, travel speed 20 mm/sec,
 c) power 4kw, beam size 6mm, travel speed 30 mm/sec

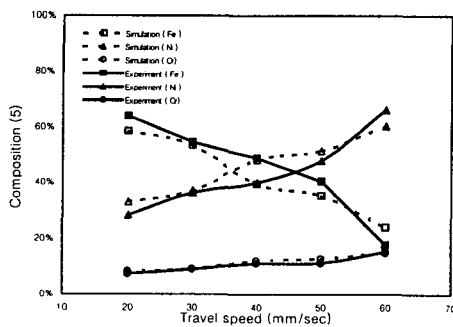


Fig. 12 Effect of travel speed on composition of laser surface alloyed region

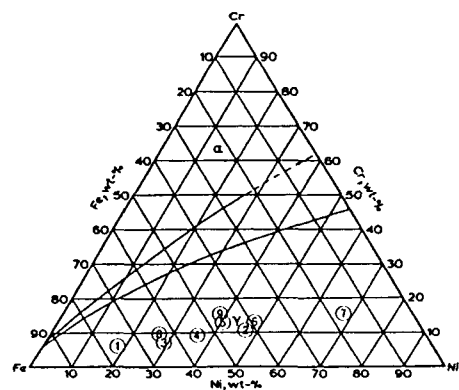


Fig. 15 Isotherm of Fe-Ni-Cr system at 1300°C