서 레이저빔을 재료의 선택된 부위에 조사하여 첨가되는 재료와 모재를 용융희석시켜 재료표면에 새로운 합금층을 형성하는 표면개질의 한방법이다. 요구되는 조건에 따라 모재위에 내식성, 내마모성, 내열성, 내산화성등의 특성을 지닌 재료를 선택하여 합금화시킴으로서 사용되는 모재를 바꾸지 않고도 기계적, 화학적 특성을 향상시킬 수 있으며 모재위에 새로운 합금층을 형성하므로 모재와 합금층간에 상호 보완할 수 있는 특성을 지니게 된다[1,2].

이러한 레이저 spot합금화는 빔출력, 빔크기, 빔 유지시간등 합금화 공정변수 변화에 따라 합금화 원소가 모재와 용융희석되는 정도가 달라져 합금층의 성분이 변화하여 합금층의 기계적, 화학적 성질이 변화하게 된다. 따라서 재료의 선택된 부위의 적절한 표면개질 효과를 얻기 위해서는 합금화 공정변수에 따른 합금층의 형상과 성분의 영향을 고려하여야 한다. 합금층의 형상에 대해서는 Chan 등에 의해 해석적인 모델[3,4]이 제시되었으나 많은 가정을 도입하여 해석하므로써 실제 경우와 차이를 보이고 있으며 합금층의 성분예측에 관한 연구는 실험적 결과만이 제시되었을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 레이저합금화시 현상에 가까운 2차원 해석모델을 제시하여 합금화 공정변수변화에 따른 합금층의 형상과 성분에 대한 영향을 예측한 후 실험결과와 비교하였다. 열전도와 열대류에 의한 열전달을 해석하였으며, 합금층의 형상에 영향을 미치는 열물성치를 온도에 의존하는 함수로 하여 해석하여 해석의 정확도를 높였으며 각각의 공정변수에서 레이저빔을 유지하였을 때 재료표면에서 용융이 발생하는 시간과 유지시간에 따른 합금층의 형상과 성분 변화를 해석하였다.

2. 모델링

2 1 레이저표면합금층의 성분

레이저합금화시 합금화원소의 첨가방법에는 co-deposition방법과 predeposition방법이 있는데 본 연구에서 고려한 predeposition방법을 Fig. 1에 나타냈다. 미리 모재표면에 합금화원소를 전지하였으며 조사된 레이저빔은 전지된 영역의 표면에서 흡수되어 모재로 열전달되어 모재와 용융희석 응고되어 새로운 합금층을 형성하였다 레이저 표면합금화시 용융지 표면의 중심에서 반경방향으로 온도구배가 발생하며 이러한 온도구배에 의해 표면인장력의 차이가 야기되어 대류(convection)가 발생한다. C.W. Drapes 의 연구결과 처럼 대류에 의해 macro scale에서 합금화원소가 합금층에 균일하게 분포하기 때문에[5,6] 합금층의 성분은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{합금화원소의 분율} = \frac{predeposition\text{된 면적}}{\text{합금화부위의 면적}} \times predeposition\text{층의 원소성분}$$

모재원소의 분율=1−합금화원소의 분율

합금층의 성분은 합금화 원소가 precoating된 두께와 레이저빔의 출력, 빔의 크기, 빔의 이동속도 등의 레이저합금화 공정변수에 따라서 변화하게된다. 따라서 본 모델에서는 precoating된 합금화원소의 두께를 일정하게 유지시킨 후 합금화 공정변수 변화에 따른 합금층의 형상과 합금층의 성분을 상용FEM해석프로그램인 FIDAP을 이용하여 해석하였다.

2. 2. 유동의 구동력

레이저 합금화시 발생하는 대류는 용융지 표면에서의 온도구배에 따른 표면 인장력의 차이로 발

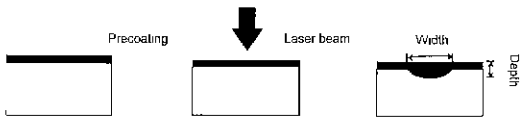


Fig. 1 Schematic representation of laser surface alloying

생하는 Marongoni 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.

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

$[\mu : viscosity,\ \gamma : surface\ tension,$
$V_x : momentum\ component,\ T : temperature]$

이렇게 발생된 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 발생되는 다음과 같은 식으로 표현된다.

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

$[\rho_0 : density,\ g : gravitational\ coefficient,$
$\beta : compressibility]$

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 하지않고 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) 물성치를 온도에 의존하는 함수로 나타내었다.
3) Precoating층의 두께가 모재에 비해 상당히 얇기 때문에 열물성치는 모재와 같다고 하였다.
4) Radiation은 무시하였다.
5) Plum(plasma)에 의한 에너지 손실은 없다고 하였다.

2. 3. 2 지배방정식

Continuity equation

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

Momentum equation

radial component

$$\frac{\delta u}{\delta\gamma} + u\frac{\delta u}{\delta\gamma} + w\frac{\delta u}{\delta z} = -\frac{1}{\rho} + \frac{\delta P}{\delta\gamma} + v\left[\frac{\delta^2 u}{\delta\gamma^2} + \frac{1}{\gamma}\frac{\delta u}{\delta\gamma} - \frac{u}{\gamma^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2}\right]$$

axial component

$$\frac{\delta w}{\delta\gamma} + u\frac{\delta w}{\delta\gamma} + w\frac{\delta w}{\delta z} = \frac{\delta P}{\delta z} + v\left[\frac{\delta^2 \omega}{\delta\gamma^2} + \frac{1}{\gamma}\frac{\delta w}{\delta\gamma} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2}\right] + g\beta(T - T_0)$$

Thermal Energy Conservation

$$\frac{\delta T}{\delta\gamma} + u\frac{\delta T}{\delta\gamma} + w\frac{\delta T}{\delta z} = \alpha\left[\frac{\delta^2 T}{\delta\gamma^2} + \frac{1}{\gamma}\frac{\delta T}{\delta\gamma} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2}\right] - \frac{\Delta H}{\rho C_p}\frac{\delta f_L}{\delta t}$$

2. 3. 3 초기조건 및 경계조건

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

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

[h_c : connective heat trasnfer coefficient, T_a : atmosphere temperature]

2. 3. 4 열물성치

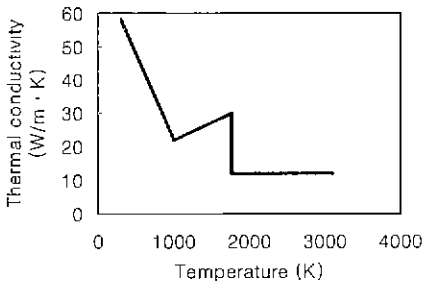
Table. 1에 사용된 재료의 열물성치를 나타냈다. 모재의 융점온도 이하에서는 탄소강의 물성치를 사용하였으며 융점이상에서는 합금화원소가 Cr, Ni로 모재인 Fe와 용융희석시 300계 STS와 비슷하므로 300계 STS의 물성치를 사용하였다. Thermal conductivity, viscosity, specific heat을 온도에 따라 변화하는 함수로 처리하였으며 이들을 Fig. 2에 나타냈다[7].

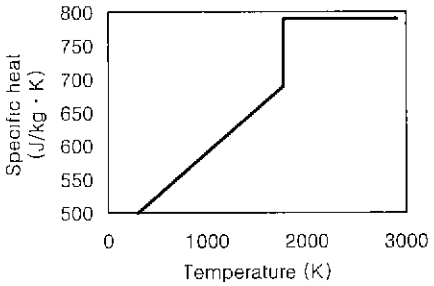
2. 3. 5 열유속(heat flux)

레이저빔이 모재에 조사되는 현상을 표현하기 위하여 heat flux식을 사용하였다. Heat flux는 단위시간당 재료표면에 조사되는 에너지의 양으로 레이저빔이 Gaussian분포를 가지므로 빔의 중심에서 빔의 반경방향으로의 heat flux의 분포를 Gaussian분포로[8,9] 나타냈다.

Table 1 Thermal properties of material

Properties	Values
Gravity	9.8 m/sec
Density	7200kg/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	1768K





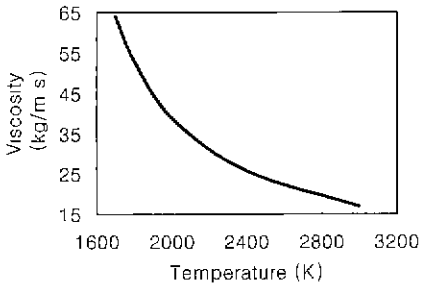


Fig 2 Temperature dependent thermophysical properties of specimen[7]

사용된 heat flux식은 아래와 같다.

$$\bar{q} = \frac{3\eta Q}{\pi\gamma_b^2} e^{\left(-\frac{\gamma^2}{\gamma_b^2}\right)}$$

[η : absorptivity, Q : power, γ : radial distance, γ_b : beam diameter]

1) 정지열원에서 출력 및 가열속도에 따른 열유속

정지된 열원하에서 Fig. 3과 같이 레이저 작동 후 최대출력에 이르는 시간이 1초일 때 최대출력

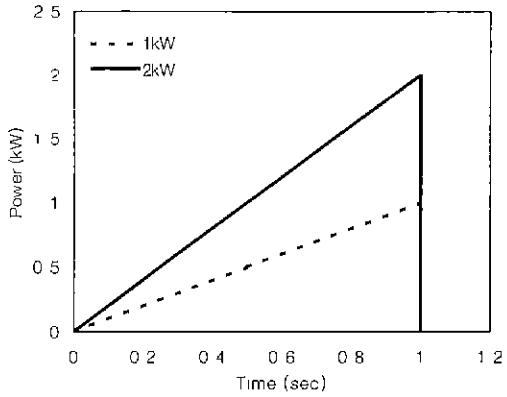


Fig 3 Power change for stationary laser beam(Ⅰ)

에 이르는 동안 빔의 흡수율과 합금화 공정변수가 재료의 합금층 형상과 성분변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 흡수율을 50%, 70%, 빔사이즈를 2㎜, 4㎜, 6㎜, 빔출력을 1kW, 2kW를 변화하였으며 그때 레이저빔이 재료표면에서 유입되는 현상을 표현하기 위하여 앞의 식에서 제시한 열유속(heat flux)식을 이용하여 Fig. 4와 같이 각각의 변수에 따른 열유속값을 재료에 유입되도록 하였다. 레이저빔은 최대출력에 도달한 순간 shut off가 되도록 하였다.

2) 유지시간에 따른 열유속

Fig. 5와 같이 최대출력하에서 레이저빔을 조사하였을 때 즉 최대출력까지 도달하는 시간은 1초

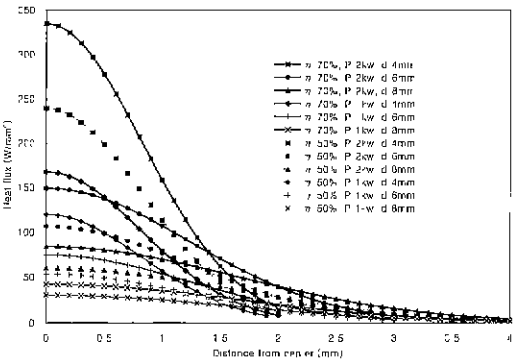


Fig 4 Heat flux for stationary laser beam(Ⅰ)

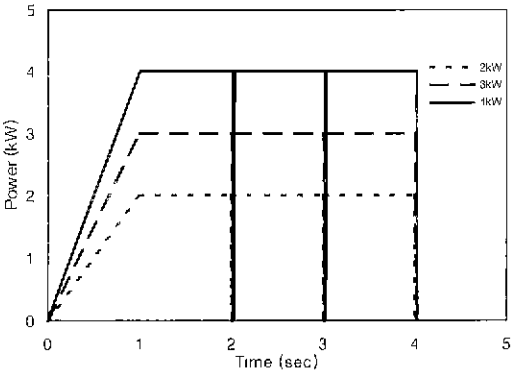


Fig 5 Power change for stationary laser beam(Ⅱ)

로 고정시킨후 최대출력에서 유지시간 변화에 따라서 합금화 공정변수가 합금층의 형상에 미치는 영향을 고려하기 위하여 빔사이즈 6㎜에서 2kW, 3kW, 4kW의 출력으로 각각 1초, 2초, 3초 유지하였을 때 합금층의 형상과 성분변화를 알아보았다. Gaussian분포를 가지는 레이저빔이 재료에 조사되었을 때 재료표면의 각각의 위치에서 입열되는 레이저빔의 분포는 앞에서 제시한 Gaussian분포에 대한 열유속식을 이용하여 Fig. 6과 같은 열유속값이 재료에 유입되도록 하였다.

3. 실 험

3. 1. 시험재료 및 용사코팅

본 연구에 사용된 모재는 일반구조용 압연강판

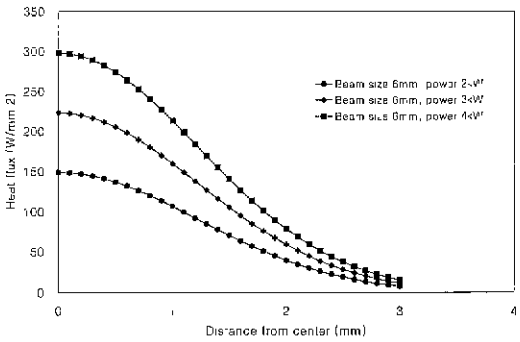


Fig 6 Heat flux for stationary laser beam(Ⅱ)

인 SS41로 탄소함량이 0.16%이며 주요성분은 Table 2와 같다. SS41 강판의 표면특성(내식성)을 향상시키기 위한 레이저 합금화에 앞서 합금화 원소인 Ni-20%Cr(43C-NS : Metco사) 파우더(size 45~105㎛)를 사용하여 플라즈마 용사법으로 모재위에 전지(precoating)하였으며 용사 공정변수는 Table 3과 같다.

모재는 shearing machine을 이용하여 50㎜(L)×30㎜(W)×4.5㎜(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 알루미나(Metco사 F type)로 Grit Blasting을 하였다. Grit blasting은 표면의 산화층이 떨어져나가 보이지 않고 충분한 조도가 생길때까지 수회 분사하였으며, 그 위에 최적의 공정변수를 이용한 플라즈마 용사법으로 분사하여 250㎛ 두께로 코팅하였다.

Table 2 Chemical composition of substrate

	Chemical composition (wt%)					
SS41	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0.162	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

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

3. 2. 레이저 spot alloying

레이저 spot alloying에 사용된 레이저는 연속출력파(continuous wave), 최대출력 4kW, 횡여기 방식(transverse flow type)의 CO_2 레이저로 레이저빔을 원하는 빔크기를 가지기 위하여 defocus시킨후 빔출력, 빔유지시간을 변화하였으며 그때의 변수는 Table 4와 같다.

또한 용융지에서의 산화방지 및 plum제거를 위하여 모재표면의 45° 방향에서 보조 Ar 가스를 30 ℓ/min으로 공급하였다.

3. 3. 합금층의 형상 및 성분측정

각 시편을 레이저 후 공정변수별로 시편을 채취하여 실측현미경을 이용하여 합금층의 폭과 깊이를 측정한후 전체영역에서의 Fe, Ni, Cr의 성분을 EPMA로 측정한 후 모델링하여 예측한 결과와 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

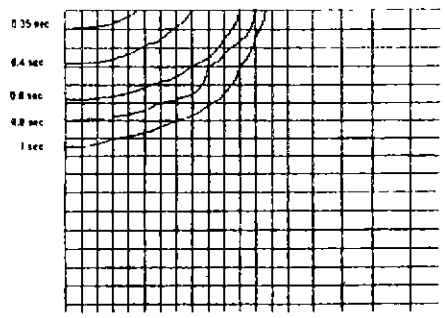
4. 1. 출력증가에 따른 영향

정적열원하에서 레이저빔이 설정된 최대출력에 이르는 동안의 합금층의 형성과 성분에 대한 흡수율과 합금화 공정변수의 영향을 고려해 보았다.

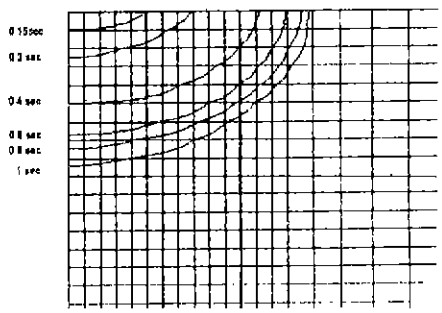
Fig. 7은 본해석을 통하여 구한 결과중 빔흡수율이 70%이고 빔사이즈가 4㎜이고 빔출력이 1kW, 2kW일 때 최고출력도달까지의 시간경과에 대한 합금층의 형상변화로 가로 mesh의 크기는 0.14㎜, 세로 mesh는 0.178㎜이다. 시간이 경과됨에 따라 레이저빔의 출력이 증가하고 재료내에 유

Table 4 Parameter of laser surface alloying with stationary beam condition

Beam power	2, 3, 4kW
Beam size	6㎜
Holding time	1, 2, 3sec



a) power 1kW



b) power 2kW

Fig 7 Laser surface aloyed region as a function of time at 4mm beam diameter, absorptivity 70%,

입되는 에너지가 증가하여 용융되는 영역이 증가한다. 출력이 1kW인 경우 0.35초후 용융이 발생하며 시간경과에 따라 용융되는 영역이 폭방향으로의 증가폭이 커지다가 0.6초후부터는 깊이방향으로의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 시간이 경과됨에 따라 레이저빔의 출력이 증가하고 재료내에 유입되는 에너지가 증가하여 용융되는 영역이 증가한다. 빔출력이 2kW인 경우 출력이 1kW일때보다 에너지 유입량이 크기 때문에 1kW의 0.35초보다는 빠른 0.15초에 재료의 용융이 발생하였다.

이러한 경향은 주어진 시간에서 다른 빔사이즈에서 합금층의 형상에서도 같은 경향을 보여주고 있다.

4.1.1 빔사이즈의 영향

Fig. 8 과 9는 빔사이즈 및 가열시간 변화에 따른 합금층의 너비, 깊이와 성분변화를 보여주고 있다. 사용된 빔의 흡수율은 70%이며 빔출력은 2kW이다. 4㎜, 6㎜, 8㎜ 빔사이즈에서 시간이 증

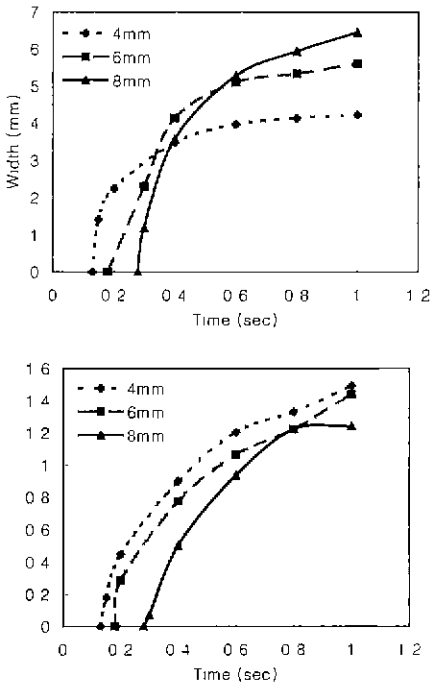


Fig 8 Effect of beam size on shape of laser alloyed layer beam power 2kW, absorptivity 70%

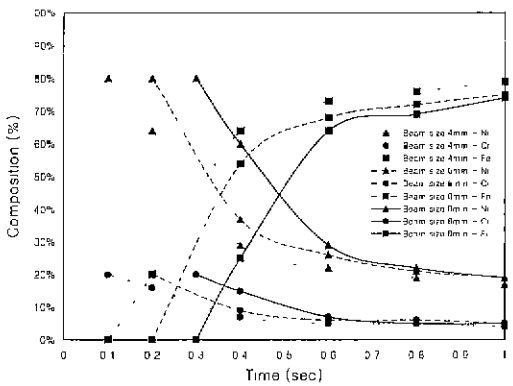


Fig. 9 Effect of beam size on composition of laser alloyed layer beam power 2kW, absorptivity 70%

가함에 따라 합금층의 폭과 너비 모두 지수함수적으로 증가하고 있다. 빔사이즈가 8㎜인 경우 시간이 짧을 때 합금층의 너비가 빔사이즈 6㎜인 경우보다 작다가 시간이 길어짐에 따라 커지는데 이는 빔사이즈가 8㎜인 경우 단위면적당 입열되는 에너지가 작아 초기에 충분한 용융이 되지 못했기 때문으로 사료된다. 그리고 1초동안 빔을 조사한 후의 합금층의 너비가 빔사이즈보다 작다. 합금화원소의 성분은 시간이 지남에 따라 유입되는 에너지가 증가하여 재료의 용융된 영역이 증가하고 합금화원소가 모재와의 희석정도가 증가하므로 합금화원소인 Ni 및 Cr의 성분은 감소하며 모재인 Fe의 성분은 증가하고 있다.

4. 1. 2 빔흡수율의 영향

Fig. 10, 11은 빔출력이 2kW이고 빔사이즈가 4㎜일 때 흡수율과 유지시간에 따른 합금층의 형상 및 성분변화를 보여주고 있다. 흡수율이 70%인 경우가 50%보다 단위면적당 입열되는 에너지가 높기 때문에 너비와 폭 모두 큰 값을 보여주고 있으나 1초경과후 합금층의 깊이는 50%와 70%에서 1.35㎜와 1.49㎜로 비슷한 크기를 보여주고 있다. 성분변화의 경우 합금층의 크기가 증가함에 따라 모재와의 희석률이 증가하여 Fe의 함량은 시간에 따라 증가하는 반면에 Ni 및 Cr은 점차적으로 감소하고 있다. 그리고 흡수율 변화에 따른 성분의 차이는 크게 나타나지 않음을 관찰할 수 있다.

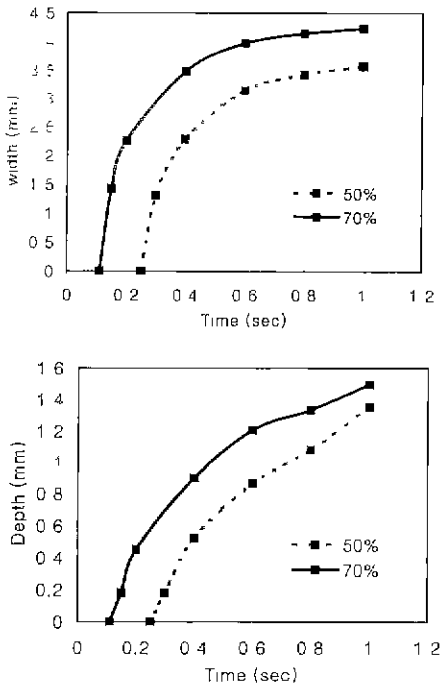


Fig 10 Effect of absorptivity on shape of laser alloyed layer beam power 2kW beam size 4㎜

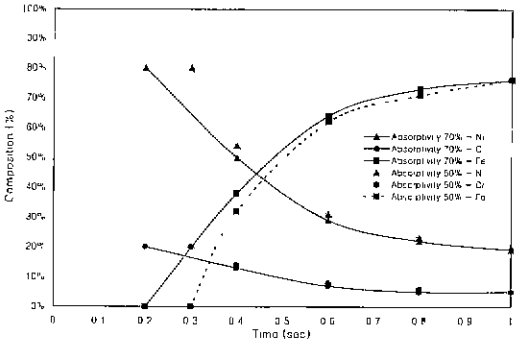


Fig 11 Effect of absorptivity on composition of laser alloyed layer beam power 2kW, beam size 4㎜

4. 1. 3 빔출력의 영향

Fig. 12, 13은 빔흡수율이 50%이고 빔사이즈가 6㎜일 때 빔의 출력변화에 따른 합금층의 형상 및 성분변화를 보여주고 있다. 빔출력이 높을수록 단위면적당 재료에 입열되는 에너지가 증가하여 합금층의 너비 및 깊이는 빔출력이 증가함에 따라 커지는 것을 볼 수 있다. 2kW의 경우 너비방향으로 증가폭이 커지다 0.6초이후 깊이 방향으로 용융의 증가폭이 커지는 것을 볼 수 있다. 합금층의 성분은 Fig. 13에서 보는 바와 같이 시간이 증가함에 따라 합금화 원소(Ni, Cr)은 지수함수적으로 감소하고 모재의 Fe 성분은 점차적으로 증가하고 있다. 그리고 흡수율의 경우와 비교해 볼 때 입열

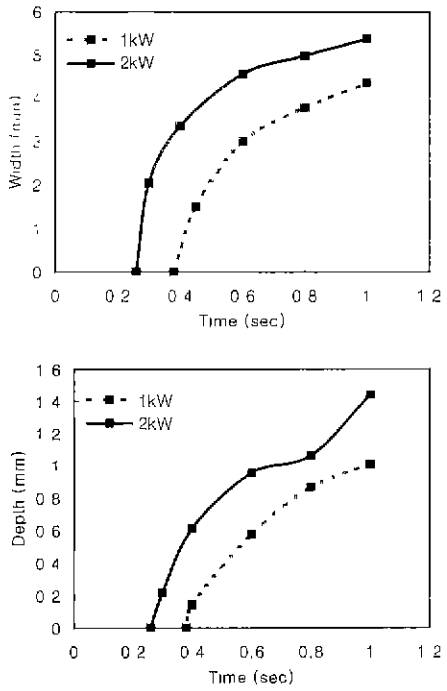


Fig. 12 Effect of beam power on shape of laser alloyed layer absorptivity 50%, beam size 6mm

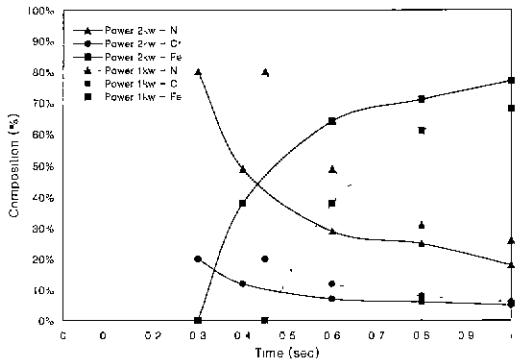


Fig 13 Effect of beam power on composition of aser alloyed layer absorptivity 50%, beam size 6mm

량 증가가 성분변화에 더 민감한 경향을 보여주고 있다.

4. 2. 유지시간의 영향

정지된 열원에서 1초동안 설정된 최대출력에 도달한 후 유지시간을 1초, 2초, 3초 변화시켰을 때 합금화 공정변수의 영향을 고려해 보았다.

4. 2. 1 빔출력의 영향

Fig 14 및 15는 정지된 레이저열원에서 빔크기가 6㎜일 때 최대출력 2kW, 3kW. 4kW에서 1초

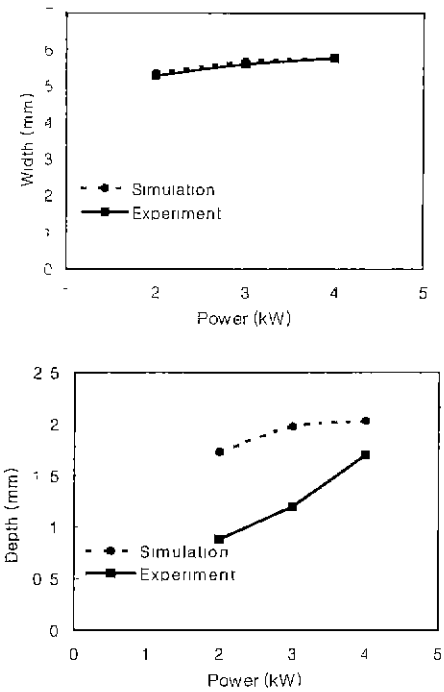


Fig 14 Effect of beam power on shape of laser surface alloyed layer

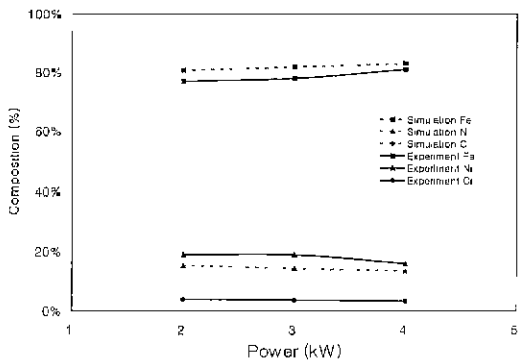


Fig 15 Effect of beam power on composition of laser surface alloyed layer

동안 유지시켰을때 빔의 출력변화에 따른 합금층의 형상 및 성분의 변화를 보여주고 있다. 예측시 흡수율을 50%로 고려하였으며 빔의 출력이 증가할수록 합금층의 폭은 예측한 경우와 실험한 경우 모두 빔사이즈인 6㎜에 가까워지고 있다. 합금층의 깊이의 경우 실험결과보다 예측한 결과가 많은 차이를 보이는데 그 이유는 모델설정시 하부에서의 열전달 조건을 대류에 의한 열전달 조건을 사용하였는데 실제 실험에서는 냉각판위에서 실험을 행하여 유지시간이 길어짐에 따라 냉각판에 의한 열전도의 영향이 크게 나타난 것으로 사료되며 또한 용융지표면에서의 대류열전달 계수를 상수로 사용하였는데 레이저빔의 출력이 클수록 용융지온도가 상승하며 이에 따른 대류열전달계수가 증가하여 대류에 의한 열손실의 양이 증가한 것으로 실험한 결과에서 작은 깊이를 가지는 것으로 사료된다. 합금층의 성분은 Fig. 15에서 보여주고 있으며 형상변화와 다르게 전 출력범위에서 성분변화는 크지 않음을 관찰할 수 있다.

4.2.2 유지시간의 영향

Fig. 16과 17은 빔크기가 6㎜일 때 최대출력인 2kW에 이른 후 1초, 2초, 3초 유지하였을 때의 합금층의 형상과 성분변화를 흡수율 50%로 하여 예측한 경우와 실험하여 얻은 결과를 보여주고 있다. 빔의 크기가 빔의 유지시간이 길어짐에 따라 합금층의 깊이의 변화가 앞에서의 빔의 출력변화보다 변화 폭이 큰 것을 관찰할 수 있는데 이는 레이저빔과의 반응시간이 합금층의 형상에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

한편 앞절의 peak power로의 가열시 시간변화에 따른 합금층의 형상데이타와 비교해 볼 때, 너비의 경우 peak출력(2kW)에 도달하였을때의 크기는 유지시간의 변화에 따라 큰 차이가 없이 사용한 빔크기를 유지하고 있으나, 깊이의 경우 너비와 다르게 peak 출력에 도달후에도 유지시간에 따라 지속적으로 증가함을 관찰할 수 있다. 예측한 경우와 실험을 통한 합금층 성분을 비교해 보면 예측한 경우 앞에서 제시한 바와 같이 본 모델에서는 재료하부에서의 냉각판을 통한 열전도와 온도증가에 따른 대류열전달계수의 변화를 고려하지 않아 모재의 용융된 영역이 커 예측한 경우의

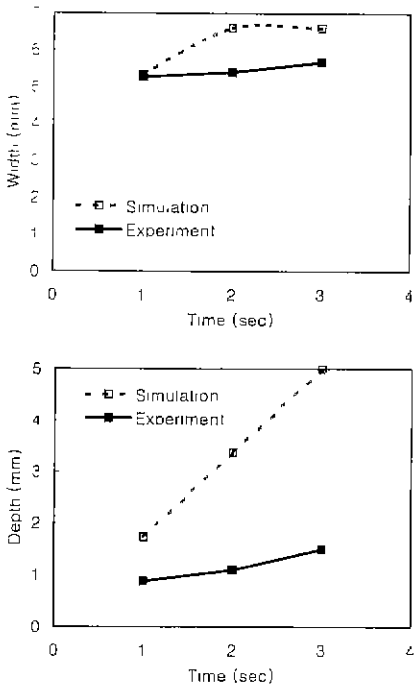


Fig 16 Effect of holding time on shape of laser surface alloyed layer

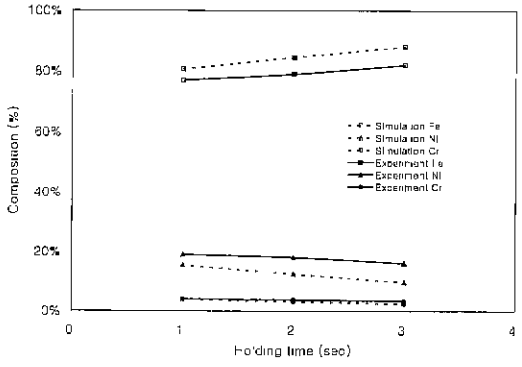


Fig 17 Effect of holding time on composition of laser surface alloyed layer

합금화 성분인 Ni과 Cr이 실험을 통해 얻은 결과보다 작게 함유된 결과가 나타났다.

4. 결 론

레이저 spot 합금층의 형상과 성분예측 및 실제 실험에 적용을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 레이저빔이 최대 출력에 이를 때 초기에는 합금층의 폭방향의 증가폭이 커지다 깊이방향으로의 증가폭이 커진다.

2) 레이저빔의 최대출력으로의 가열속도, 유지시간과 출력이 증가함에 따라 합금층의 폭과 깊이가 증가하였으며 빔유지시간 및 가열속도의 영향이 출력변화의 영향보다 크게 나타났는데 이는 레이저빔과 모재와의 반응시간이 레이저 spot합금층의 형상변화에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다.

3) 단위면적당 입열되는 에너지와 빔과의 반응시간이 증가할수록 합금화 원소와 모재와의 희석이 커지므로 Cr과 Ni의 성분은 감소하며 모재인 Fe의 성분은 증기하며 지수함수적인 형태를 보여준다.

참 고 문 헌

1. P. J. E. Monson and W. M. Steen : Surface Engineering, 6 (1990) 185
2. Jogender Singh : JOM, September (1992) 8
3. C. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen : Metall. Trans., 15A (1984) 2175
4. J. Manzumder. W. M. Steen : J. Appl. Phys. 51 (1980) 941
5. C. W. Drapes and C.A.Ewing : J. of Mater. Sci, 19 (1984) 3815
6. C. W. Draper and J. M. Poate : International Metals Review. 30 (1985) 85
7. T. Zacharia, S. A. David. J. M. Vitek and H. G. Kraus : Metallurgical Trans., 22B (1991) 243
8. P. J. Oakley : Surface Engineering Conf. 3 (1985) 67
9. T. Chande, J. Mazumder : Metall. Trans., 14B (1983) 181