

# 레이저 클래딩 중첩도가 표면특성에 미치는 영향

## The effect of overlapping ratio on surface properties in laser cladding

한국기계연구원 레이저기술연구그룹

충남대학교 금속공학과\*

서무홍, 이제훈, 한유희, 천병선\*

### 1. 서론

레이저 클래딩은 금속표면에 내식성, 내마모성, 내피로성등을 향상시키기 위하여 클래딩 재료를 기지 상에 자동 공급하면서 레이저 빔을 조사하여 50 $\mu$ m~2mm 두께의 후막을 형성하는 기술이다. 레이저를 이용한 클래딩의 특징은 고속가공에 의한 기지의 열변형 최소, 자동화용이, 국부적 정밀가공, 급냉효과에 의한 결정립 미세화, 준안정상 생성, 균일한 미세조직 그리고 모재와 코팅층간 낮은 희석율과 제어가 용이하며 높은 접합력 등을 들 수 있다<sup>1)2)</sup>. 또한 기계적 특성을 열화시키는 HAZ부분이 PTA(Plasma Transferred Arc), MIG(Metal Inert Gas Welding)에 비교하여 매우 작다.

위에 언급된 많은 장점에도 불구하고 레이저 빔의 특성상 넓은 면적을 도포하기 위해서는 중첩이 불가피하다. 또한 후가공을 줄이기 위해서는 중첩된 표면의 표면 거칠기가 낮아야 하며, 클래드 재료의 특성을 최대한 살리기 위해서는 클래드 층에서 모재의 희석율을 최소화하여야 한다. 표면 거칠기만을 고려한 중첩도의 증가는 입열량을 증가시켜 변형 및 열 영향부의 기계적 성질을 저하시킬 뿐 아니라 생산속도에도 악영향을 미치게 된다.

Yanxiang의 중첩도에 대한 연구결과<sup>3)</sup>에 의하면 중첩도의 증가는 진동하는 방식으로 표면거칠기가 감소한다고 하였으며, Steen은 중첩도 0.7이상에서는 Interrun porosity가 발생할 확율이 급증한다고 보고하였다<sup>4)</sup>. 따라서 최적의 중첩도에 대한 연구는 생산성 향상 및 클래드 층의 특성을 향상시키기 위해 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 저탄소강에 내열내식성 및 내마모성 재료인 Ni기 초합금을 레이저 클래딩 하여 중첩도에 따른 표면거칠기와 내마모성 및 내식성에 대한 영향을 고찰하였으며, 가장 우수한 내식성을 나타내는 중첩도를 판별하고자 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 레이저 클래딩 재료 및 실험

본 실험에서는 50x200x8 mm 치수의 저탄소강(SS41)을 모재로 내열내식성 재료인 Ni기 초합금 분말을 클래딩 재료로 사용하였다. 화학 조성은 table 1과 같으며 용융 접합성을 향상시키기 위하여 B, Si을 첨가하였다. 보호가스로는 Ar을 사용하였으며 공급량은 분당 1 $\ell$ /min으로 공급하였다. 가공 레이저는 Rofin-Sinar사의 4kW급 RS840 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였다. 빔 직경은 2.6mm, 분말은 레이저 빔 2mm후방에 분사하는 방식으로 레이저 클래딩하였다. 분말공급은 회전 disk 방식으로 이 방법은 disk의 회전수를 조절하여 공급량을 조절하며, disk에 의하여 이송된 분말이 자유낙하와 송급 가스에 의하여 노즐로 이송되어 가공부위에 송급되어 진다.

Table 1 Chemical composition(wt%) of Ni-base superalloy and substrate(SS41).

Elements	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P	B
Ni-base Superalloy	3.5	15	Bal	-	-	4.3	0.075	-	-	3.1
SS41	Bal	0.075	<0.032	0.665	0.055	0.045	0.055	<0.011	<0.006	-

## 2.2 중첩실험

클래딩 기초실험을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 건전한 클래드층이 얻어진 영역에서 중첩실험을 행하였다. 중첩도가 표면특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 table 2와 같이 P=3.0kW, F=8.04~15.04g/min, V=0.5m/min(P=Power, F=Powder Feed Rate, V=Traverse Speed)와 P=2.85kW, F=9.06g/min, V=0.7m/min에서 중첩도를 0.12에서 0.73까지 변화시켰다. 중첩도와 표면거칠기 측정은 Fig. 1과 같다. 표면거칠기(Turbulence)는 클래드층의 최고 높이(T)에서 최저 높이(H)를 뺀 값을 단일 클래드층의 높이(h)로 나눈 값((T-H)/h)으로 정의하였다.

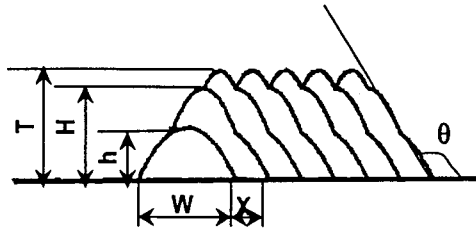


Fig. 1 The definition of overlapping test parameters; (a) Overlapping ratio( $k$ ) =  $(W-X)/W$ , (b) Overlapping angle =  $\theta$ , (c) Turbulence =  $(T-H)/h$  (d)  $\Delta H=T-H$ .

Table 2 The condition of overlapping test.

Sample No.	Power (kW)	Powder feed rate (g/min)	Traverse speed (m/min)	Overlapping ratio ( $k$ )
A	3.0	8.04	0.5	0.73 ~ 0.12
B	3.0	15.04	0.5	0.73 ~ 0.12
C	2.85	9.62	0.7	0.73 ~ 0.12

## 2.3 마모실험

레이저 클래딩 중첩실험 후 클래딩한 면의 크기를 20mm x 50mm로 가공하였다. 클래딩 표면을 균일하게 정밀 연마한 후 3분간 초음파 세척을 한 다음 건조시켜 화학천칭을 사용하여 마모시험전 시험편의 무게를 측정하였다. ASTM G-52 Procedure A의 규정에 따라서 마모시험편을 마모시험장치에 고정한 후 하중(Load) 130N, 미끄럼속도(Sliding Velocity) 2.4m/sec, 모래(AFS 50-70)공급속도(Sand Flow Rate) 300g/min를 일정하게 유지하면서 미끄럼거리(Sliding Distance) 1436~4309m로 시험하였다. 시험후 마찰면에 부착된 마모분 및 이물질을 제거하기 위하여 다시 3분간 초음파 세척을 행하였다. 세척한 시험편을 건조시킨 후 화학천칭을 사용하여 무게감소량을 측정하였다.

## 2.4 양극분극실험

중첩실험으로 얻어진 재료를 클래딩한 면이 평평하도록 중첩된 클래드층의 최저 높이(H)로 가공하였다. 가공한 시험편을 30mm x 15mm 크기가 되도록 절단한 다음 클래딩한 면의 반대

쪽에 지름 3mm의 동선을 접용접하였다. 이 시편을 마운팅한 후 표면을  $0.3\mu\text{m}$ 까지 연마하였다. 실험장비는 EG&G 263A Corrosion Measurement System을 이용하였다. 시편을 가동전극(Working Electrode)으로, 포화감홍전극을 표준전극(Reference Electrode)으로, 그리고 탄소봉을 대전극(Counter Electrode)으로 하여 부식 셀에 장착하였다. 부식용액으로는  $25^\circ\text{C}$ 의  $0.11\text{M}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$  용액을 사용하였으며, 용존산소의 영향을 저감하기 위해 질소를 용액에 실험중 계속해서  $1\text{ l/min}$ 으로 흘려주었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 표면거칠기

중첩도는 생산속도와 직접적으로 관련이 있다. 생산속도를 증가시키기 위해서는 중첩도를 최소화하는 방향으로 진행되어야 한다. 그러나 중첩도의 감소는 표면특성향상에 직접적인 영향을 미치므로 최적의 중첩도를 선택하는 것이 필수적이다. Fig. 2의 결과에서 보는 바와 같이 중첩도가 증가할수록 표면거칠기는 진동하는 방식으로 감소하는 것을 알 수 있다. 여기에서  $\Delta H$ 는 단일 클래드층의 폭(Width)과는 무관하며, 단일 클래드층의 높이(Height)와 중첩도(k)에 의존하는 것으로 분석되었다.  $P=3.0\text{kW}$ ,  $F=8.04\text{g/min}$ ,  $V=0.5\text{m/min}$ 의 조건에서 양호한 표면거칠기를 나타내는 중첩도는 0.62, 0.45, 0.21이었으며, 레이저 출력과 조사속도는 동일하고 분말 공급량이  $15.06\text{g/min}$ 인 조건에서도 양호한 표면거칠기를 나타내는 중첩도는 분말공급량이  $8.04\text{g/min}$ 일 때의 값과 동일하였다. Yanxiang은 중첩도가 감소함에 따라 표면거칠기의 변화 곡선이  $\Delta H=h(1-k)$ 와  $\Delta H=0.24h(1-k)$ 사이에서 점차 감소한다고 하였다. 본 연구에서는  $\Delta H=0.1h(1-k)$ 와  $\Delta H=0.36h(1-k)$ 사이에서 진동하는 방식으로 감소하여 유사한 결과를 나타내었으며, 중첩도가 약 0.62일 때 3가지 경우 모두에서 가장 낮은 값의 표면 거칠기를 보이고 있다. 중첩도가 증가함에 따른 표면거칠기변화는 변곡점을 갖는 곡선과 같이 표면거칠기의 감소현상이 임계 중첩도를 기점으로 증가하였다. 중첩도 0.62이상에서 표면거칠기가 오히려 증가하는 현상이 나타나는데 이는 공급되는 분말이 인접한 클래드 층의 상단 측면에 낙하되어 용융접합되므로 클래드 층이 사선방향으로 증축된 결과로 판단된다. 중첩도가 계속 증가하면 클래드 재료의 접합강도는 점차 저하되며, 중첩도가 1이 되면 사선방향으로 적층되는 클래드층 기울기가 증가하여 단을 쌓는 것과 같은 모양을 나타낼 것이다.

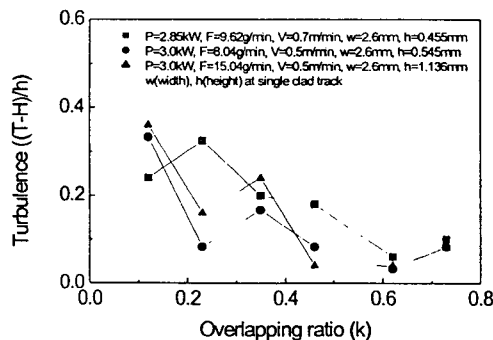


Fig. 2 Variation of turbulence as a function of overlapping ratio in laser cladding of Ni-base superalloy on low carbon steel.

### 3.2 내마모성

Fig. 3은 P=3.0kW, F=8.04, 15.06g/min, V=0.5m/min에서 중첩도에 따른 마모실험결과를 나타내고 있다. 중첩도가 증가할수록 내마모성이 증가하며 중첩도 0.62에서 가장 좋은 내마모성을 나타내고 있다, 중첩도가 0.6이상 0.4~0.5와 0.3이하의 단계별로 비슷한 마모성을 나타내고 있다.

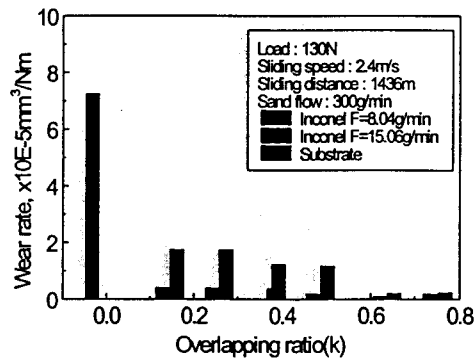


Fig. 3 Results of rubber wheel abrasion test.

내마모성과 경도는 비례관계에 있다는 것은 잘 알려진 사실이므로 경도를 분석해 보았다. 중첩도가 증가할수록 경도값이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 중첩도가 증가함에 따라 희석율이 감소하여 클래드 층 내에 모재의 Fe 농도가 감소하고 상대적으로 고용강화 효과가 큰 Cr 농도와 강화기지인  $\gamma$ Ni이 증가한 결과로 해석된다. 또한 Fe와 Cr의 전자공공(Electron Hole)의 수를 비교하여 보면 Fe와 Cr이 각각 2.66과 4.66으로 Cr이 Fe보다 약 2배가량 높다<sup>5)</sup>. 전자공공의 수가 증가하면 적층결함에너지(Stacking Fault Energy)를 감소시키게 되므로 교차슬립(Cross Slip)이 어렵게 되어 재료를 강화시키게된다<sup>6)</sup>. 따라서 Cr의 증가가 Fe의 증가에 비하여 강도증가에 많은 기여를 하게된다.

### 3.3 내식성

P=2.85kW, F=9.06g/min, V=0.7m/min의 조건에서 중첩도를 0.12~0.73으로 변화시킨 재료를 가지고 25°C의 0.11M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액에서 양극분극 실험을 행하였다.

Fig. 4, 5, 6에서 보여주는 바와 같이 중첩도가 감소할수록 임계전류밀도가 증가하였다. 중첩도(k)가 0.73, 0.62의 실험결과에 대하여 알아보면,  $7.08 \times 10^{-5}$ ,  $9.54 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup> 정도의 낮은 임계전류밀도 값을 가진다. 또한 합금에서 많이 관찰되는 2, 3차 최대전류밀도 현상이 나타나며, 3차 전류밀도 이상의 전위에서는 전위가 증가할수록 전류밀도가 계속해서 증가하는 결과를 보이고 있다. 이와 같이 중첩도가 높은 시편(k=0.73, 0.62)에서 부식 저항성이 좋지 않은 것으로 평가되었는데 이는 중첩도가 높을수록 입열량이 증가하여 레이저빔 조사 방향의 수직방향으로 형성된 조밀한 중첩영역의 잔류 인장응력이 그 원인인 것으로 사료된다. 중첩도가 증가함에 따라 i) 입열량 증가에 따른 잔류인장응력 증가 ii) 미세조직변화(입계의 조대화, 미세편석) iii) 성분변화(희석율 감소)현상이 복합적으로 발생한다. 이상과 같은 세가지 현상을 자세히 설명하면 다음과 같다.

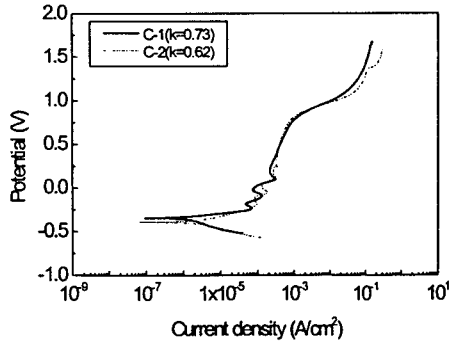


Fig. 4 Polarization curves for C-1, 2 in the solution of 0.11M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at 25°C.

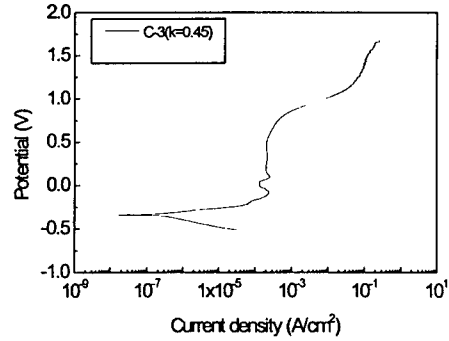


Fig. 5 Polarization curves for C-3 in the solution of 0.11M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at 25°C.

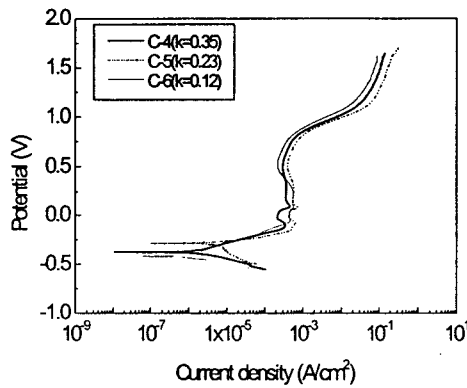


Fig. 6 Polarization curves for C-4, 5, 6 in the solution of 0.11M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at 25°C.

첫째, 중첩도가 증가할수록 입열량이 증가하여 내부 에너지가 증가하게 된다. 따라서 높은 중첩도( $k > 0.45$ )에서는 상대적으로 높은 잔류인장응력이 내재하게 되어 부식 저항성이 현저히 감소되는 것으로 사료된다<sup>7)8)</sup>. 이러한 현상은 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 3차 전류밀도 이상의 전위에서 전위가 증가할 때 전류밀도가 계속해서 증가하는 것으로 나타난다<sup>9)</sup>. Van Brussel과 De Hosson은 레이저 다중 열처리시 잔류응력은 인장응력을 나타내며, 기존에 열처리된 층의 잔류압축응력이 다음 열처리에 의해 잔류인장응력으로 변화된다고 보고하였다<sup>10)</sup>. 이렇게 증가된 잔류인장응력이 균열을 유도하며, 부식환경에 놓였을 때 응력부식을 유발하여 부식을 가속화시키는 것으로 판단된다<sup>11)</sup>.

둘째, 중첩도가 증가할수록 조직변화 즉, 입계의 균질화 및 미세편석 현상이 일어난다<sup>12)</sup>. 세립은 조립보다 입계의 면적이 넓고 따라서 입계 에너지의 총계가 크므로 불안정하다. 결정립이 작으면 입내의 면적에 비하여 입계의 면적 비율이 커진다. 또 특정 성분이 입계에 편석하는 경우에도 세립쪽이 입계의 면적이 크기 때문에 편석의 영향은 희박해진다. 이러한 이유에 의해서 세립은 조립보다 입계부식을 일으키기 어렵다<sup>13)</sup>. 그러나 레이저를 이용한 재료가공시 편석이 거의 없는 균질한 조직을 얻을 수 있다는 장점이 있어 조립쪽이 세립보다 부식 저항성이

우수하다고 할 수 있으나 그 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

셋째, 중첩도가 증가할수록 희석율이 감소하여 클래드 층에 Ni, Cr 농도가 증가하며, Fe 농도 증가가 억제된다. Fig. 7은 표면에서부터 200 $\mu\text{m}$  떨어진 거리에서 레이저 클래딩 중첩방향으로 EPMA를 통하여 수평 농도를 측정된 것이다. 중첩도가 높은 (a)는 Fe 농도에 비하여 Cr 농도가 높으나 중첩도가 낮은 (b)는 희석율이 증가함에 따라 Fe 농도가 증가하고 상대적으로 Cr 농도는 감소한 것을 보여주고 있다. 따라서 상대적으로 부식 저항성이 약한 Fe 농도가 감소함에 따라 양극분극 곡선에서 임계전류밀도 값이 증가하는 방향(우측방향)으로 이동하는 결과를 나타내고 있는데 이는 Tong의 결과<sup>14)</sup>와 일치한다. 높은 중첩도에서 내식성에 강한 Cr의 농도가 낮은 중첩도에 비해서 상대적으로 높음에도 불구하고 부식 저항성이 약한 것으로 나타나는 결과는 중첩도의 증가에 따른 잔류인장응력의 증가의 영향이 성분에 대한 영향보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

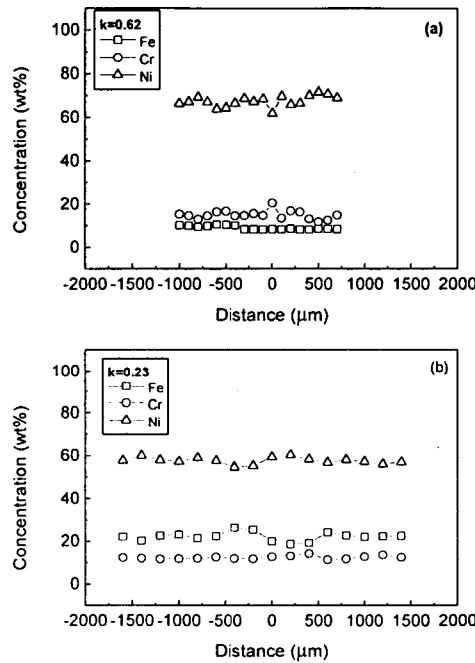


Fig. 7 Variation of element concentration of 200 $\mu\text{m}$  from the surface in laser clad layer; (a)  $k=0.62$ , (b)  $k=0.23$ .

중첩도가 0.36이하에서는 중첩도가 감소할수록 부동태 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 중첩도가 가장 낮은  $k=0.12$ 의 분극곡선에서 그 현상을 쉽게 관찰할 수 있다. 이는 낮은 중첩도에서는 성분이 미치는 영향이 증가되어 나타나는 결과로 분석된다. 이상과 같이 중첩도에 따른 양극분극 실험결과에서 중첩도( $k$ )가 0.45일 때 가장 안정한 양극분극곡선을 나타내고 있다(Fig. 5). 임계전류밀도  $2.42 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  이상에서 2차 최대전류밀도가 나타나지만 그 이후에는 안정한 분극곡선을 그리고 있다.

### 3.4 열영향부

Fig. 8은 중첩도가 증가할수록 HAZ의 길이가 감소하는 결과를 나타내고 있다. 이는 중첩도가 증가함에 따라 클래드 층의 높이가 증가하므로 모재에 입열되는 에너지의 양이 감소한 결과로 분석된다. HAZ는 기계적 특성을 열화시키며 결함을 잠재적으로 내포하고 있으므로 그 길이는 짧을수록 좋은 것으로 생각되어진다.

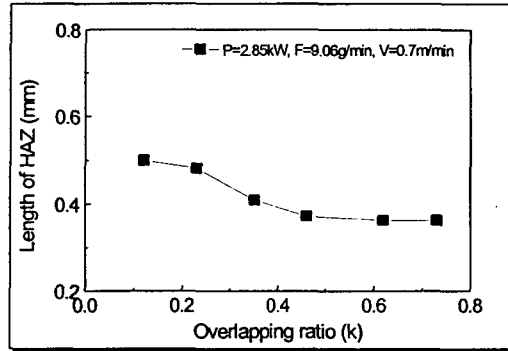


Fig. 3.8 The length of HAZ as a function of overlapping ratio(k).

### 4. 결론

저탄소강에 Ni-base 초합금을 레이저 클래딩하여 중첩도 0.75에서 0.15까지 변화시켜 표면특성과 HAZ에서의 영향을 분석하였다.

1. 중첩도를 증가할수록 표면거칠기는 진동하는 방식으로 감소하였으며 중첩도 k=0.62에서 가장 낮은 표면거칠기를 보이며, 마모실험결과에서도 가장 우수한 내마모성을 나타내었다.

2. 중첩도가 증가함에 따라 클래드층의 경도값이 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 중첩도의 증가에 따른 희석율 감소로 클래드층 내에 i) Ni-base 초합금의 강화기지인  $\gamma$  Ni과 ii) Fe보다 고용강화 효과가 큰 Cr의 농도가 증가했기 때문인 것으로 분석된다.

3. 중첩도가 0.45일 때 가장 좋은 우수한 부식 저항성을 보였다.

4. 높은 중첩도에서는 중첩부에 내재된 인장응력이 부식 저항성을 감소시키는 원인이 되었으며, 낮은 중첩도에서는 클래드층에 희석된 Fe 농도 증가에 의하여 부식 저항성이 감소한 것으로 판단된다.

5. 최적의 표면거칠기와 내식성을 나타내는 중첩도는 중첩도 0.62와 0.45사이에 존재하는 것으로 판단된다.

### 5. 참고문헌

1. V. W. Weerasinghe, W. M. Steen, in Proc. 1st Int. Conf. on Laser manufacturing, 13 Nov. Brighton, U.K., p. 125-132, (1983)
2. J. M. Pelletier, M. C. Sahour, M. Pilloz, A. B. Vannes, J. Material Science, 28, p. 5184-5188, (1993)
3. Y. Li, J. Ma, Surface Coating Technology. 90, p.1-5, (1997)

4. W. M. Steen, V. W. Veerasinghe, P. Monson, in Proc. Int. Conf. on High Powder Laser and Their Industrial Appliation, SPIE, vol. 650, 15 · 18 April. Innsbruck, Austria, p.226-234, (1986)
5. 서무홍외 3, 레이저가공학회지, Vol. 2, No. 2, p34-41, (1999).
6. 한봉희, 금속재료, 회중당, p.468.
7. C. Chabrol and A. B. Vannes, "Residual stresses induced by laser surface treatment", in Laser Surface Treatment of Metals, edited by C. D. Draper and P. Mazzoldi (Nijhoff, Dordrecht), Vol 115, p.435-450, (1986)
8. M. Pilloz, J. M. Pelletier, Journal of Materials Science, vol. 27, p.1240-1244, (1992)
9. E. Unsitalo, Current Corrosion Researchs in Scandinavia, p.239, Kemia Keskus Iiitto. r. y., H
10. B. A. Van Vrusseel, J. Th. M. De Hosson : Residual stresses in the surface layer of laser-treated steels, Materials Science and Engineering, A161, p83-89, (1993)
11. E. Ciompi, A. Lanciotti, Engineering Fracture Mechanics, 62, p.463-476, (1999)
12. K. G. Watkins, Z. Liu, M. McMahon, R. Vila, M.G.S. Ferreira, Materials Science and Engineering, A252, p.292-300, (1998)
13. 임우조외 3, 부식과 방식, 원창출판사, p.127-130.
14. Tong, H. S., American Society for Testing and Materials, p.96-109, (1981)