# 레이저 클래딩에서 중첩도가 내마모성 및 내식성에 미치는 영향

## (The effects of overlapping ratio on wear and corrosion resistance in laser cladding)

서무홍, 이재훈, 한유희, 천병선*
한국기계연구원, 충남대학교*

1 서론

레이저 클래딩은 금속표면에 내식성, 내마모성, 내피로성등을 향상시키기 위하여 클래딩 재료를 기지 상에 자동 공급하면서 레이저빔을 조사하여 50㎛~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[1)2)]. 또한 기계적 특성을 열화시키는 HAZ부분이 PTA(Plasma Transferred Arc), MIG(Metal Inert Gas Welding)에 비교하여 매우 작다.

위에 언급된 많은 장점에도 불구하고 레이저빔의 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 희석율이 최소화되어야 한다. 그러나 표면 거칠기만을 고려한 중첩도의 증가는 입열량을 증가시켜 변형 및 열 영향부의 기계적 성질을 저하시킬 뿐 아니라 생산속도에도 악영향을 미치게 된다.

Yanxiang의 중첩도에 대한 연구결과[3)]에 의하면 중첩도의 증가에 따라 표면거칠기가 진동하는 방식으로 감소한다고 하였으며, Steen은 중첩도 0.7이상에서는 Interrun porosity가 발생할 확율이 급증한다고 보고하였다[4)]. 따라서 최적의 중첩도에 대한 연구는 생산성 향상 및 클래드층의 특성을 향상시키기 위해 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 저탄소강에 내마모성 및 내식성이 우수한 재료인 Ni기 초합금을 레이저 클래딩하여 중첩도에 따른 표면거칠기와 내식성에 대한 영향을 고찰하였으며, 가장 우수한 내마모성과 내식성을 나타내는 중첩도를 판별하였다.

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 1ℓ/min으로 공급하였다. 가공 레이저는 Rofin-Sinar사의 4kW급 RS840 $CO_2$ 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 송급가스에 의하여 노즐로 이송되어 가공부위에 송급되어진다.

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.

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 마모시험장

치에 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 시편을 건조시킨 후 화학천칭을 사용하여 무게감소량을 측정하였다.

2.4 양극분극실험

중첩실험으로 얻어진 재료를 클래딩한 면이 평평하도록 중첩된 클래드층의 최저 높이(H)로 가공하였다. 가공한 시편을 30mm x 15mm 크기가 되도록 절단한 다음 클래딩한 면의 반대쪽에 지름 3mm의 동선을 점용접하였다. 이 시편을 마운팅한 후 표면을 0.3㎛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℃의 0.11M $H_2SO_4$ 용액을 사용하였으며, 용존산소의 영향을 저감하기 위해 질소를 용액에 실험중 계속해서 1ℓ/min으로 흘려주었다.

3 실험결과

3.1 중첩도에 따른 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=3.0kW, F=8.04g/min, V=0.5m/min의 조건에서 양호한 표면거칠기를 나타내는 중첩도는 0.62, 0.45, 0.21이었으며, 레이저 출력과 조사속도는 동일하고 분말공급량이 15.06g/min인 조건에서도 양호한 표면거칠기를 나타내는 중첩도는 분말공급량이 8.04g/min일 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[3]. 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.

3.2 마모실험결과

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, 이는 중첩도가 증가할수록 클래딩 층의 희석율이 감소하여 상대적으로 고용강화 효과가 큰 Cr 농도 증가에 따라 경도가 증가하였기 때문이다. 중첩도가 0.6이상 0.4~0.5와 0.3이하의 단계별로 비슷한 마모성을 나타내고 있다.

모재는 클래딩된 재료에 비하여 열악한 내마모성을 나타내고 있다. 이는 모재의 주성분인 Fe가 마모실험과정에서 주위의 산소와 결합하여 다량의 $Fe_2O_3$ 산화물을 형성한 다음 Abrasive Sand에 의해 긁혀지고 찢겨져 마모된 것으로 분석된다.

3.3 양극분극 실험결과

P=2.85kW, F=9.06g/min, V=0.7m/min의 조건에서 중첩도를 0.12~0.73으로 변화시킨 재료를 가지고 25℃의 0.11M $H_2SO_4$ 용액에서 양극분극 실험을 행하였다.

Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 중첩도가 감소할수록 임계전류밀도가 증가하였다. 중첩도(k)가 0.73, 0.62의 실험결과에 대하여 알아보면, $7.08\times10^{-5}$ , $9.54\times10^{-5}$ A/cm$^2$정도의 낮은 임계전류밀도 값을 가지나 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[5)6)] ii) 미세조직변화(입계의 균질화, 미세편석)[7)] iii) 성분변화(희석율 감소)현상이 복합적으로 발생한다.

중첩도가 0.36이하에서는 중첩도가 감소할수록 부동태 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 중첩도가 가장 낮은 k=0.12의 분극곡선에서 그 현상을 쉽게 관찰할 수 있다. 이는 중첩도가 감소할수록 희석율이 증가하고 잔류응력이 감소하여 상대적으로 성분이 미치는 영향이 증가한 결과로 분석된다. 이상과 같이 중첩도에 따른 양극분극 실험결과에서 중첩도(k)가 0.45일 때 가장 안정한 양극분극곡선을 나타내고 있다

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 | - |

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* |

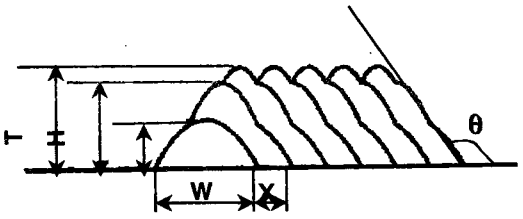


Fig. 1 The definition of overlapping test parameters; (a) Overlapping ratio(k) = (W-X)/W, (b) Overlapping angle = $\theta$, (c) Turbulence = (T-H)/h (d) $\Delta$ H=T-H.

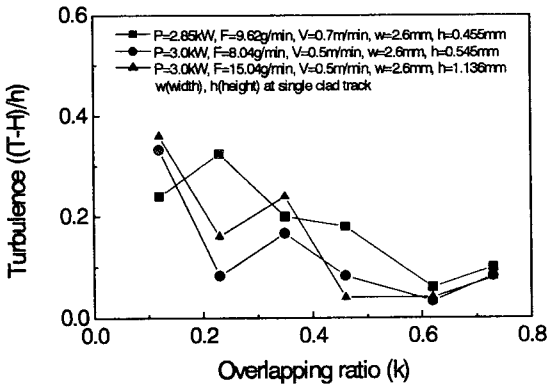


Fig. 2 Variation of turbulence as a function of overlapping ratio in laser cladding of Ni-base superalloy on low carbon steel.

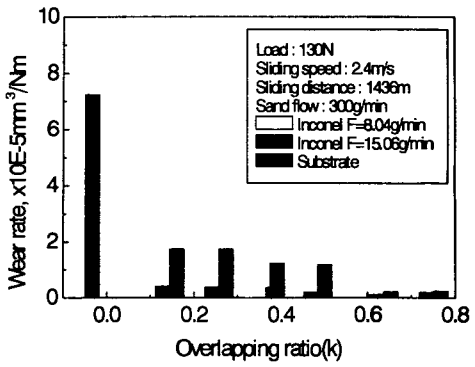


Fig. 3 Results of rubber wheel abrasion test.

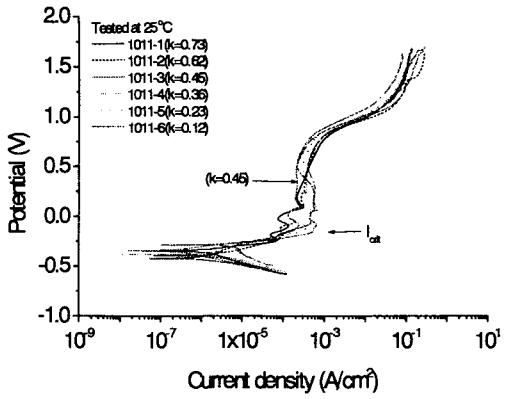


Fig. 4 Polarization curves for C-1~6 in the solution of 0.11M $H_2SO_4$ at 25℃.

4 결론

일반구조용 탄소강 재료에 내마모성 및 내식성을 향상시킬 목적으로 SS41을 모재로 하여 표면에 Ni기 초합금분말을 레이저 클래딩하였다. 클래딩 공정에서 필수적인 중첩도가 표면 특성에 미치는 영향을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1. 중첩도가 증가할수록 표면거칠기는 진동하는 방식으로 감소하였다.
2. 중첩도 증가에 따른 표면거칠기는 임계중첩도(k=0.62)를 기점으로 감소하다가 증가하는 것으로 나타났다.
3. 중첩도가 증가할수록 내마모성이 증가하였다.
4. 중첩도가 0.45일 때 가장 좋은 우수한 부식 저항성을 보였다.
5. 높은 중첩도에서는 중첩부에 내재된 인장응력이 부식 저항성을 감소시키는 원인이 되었으며, 낮은 중첩도에서는 클래드층에 희석된 Fe 농도 증가에 의하여 부식 저항성이 감소한 것으로 사료된다.

5 참고문헌

1. V. W. Weerasinghe, W. M. Steen, in Proc. 1st Int. Conf. on Laser manufacturing, 13 Nov. Brighton, U.K., 1983, p.125-132.
2. J. M. Pelletier, M. C. Sahour, M. Pilloz, A. B. Vannes, J. Material Science, 28, 1993, p.5184-5188.
3. Y. Li, J. Ma, Surface Coating Technology. 90, 1997, p.1-5.
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, 1986, p.226-234.
5. 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, 1986, p.435-450.
6. M. Pilloz, J. M. Pelletier, Journal of Materials Science, vol. 27, 1992, p.1240-1244.
7. K. G. Watkins, Z. Liu, M. McMahon, R. Vila, M.G.S. Ferreira, Materials Science and Engineering, A252, 1998, p.292-300.