Al 1050 합금에 과공정 Al-Si 합금의 레이저 클래딩에서 평균출력의 영향에 대한 연구

이 형 근^{*,†}

^{*}한밭대학교 공과대학 신소재공학부 생산가공공학전공

Effects of Average Power on Laser Cladding of Hypereutectic Al-Si Alloy on Al 1050 Alloy

Hyoung-Keun Lee^{*,†}

^{*}Division of New Materials Engineering, HanBat National University, Daejeon 305-719, Korea

[†]Corresponding author : leehk@hanbat.ac.kr

(Received January 11, 2011 ; Revised February 28, 2011, Accepted April 15, 2011)

Abstract

This study produced hypereutectic Al-Si clad layer on 1050 Al alloy by a novel laser cladding method. Pure Si powder was mixed with organic binder to make fluid paste which could be screen-printed on the 1050 Al alloy plate. Pulsed Nd:YAG laser was irradiated on the Si paste layer to melt and alloy with Al substrate. Different laser power of 99 W, 179 W and 261 W, was used to see the difference of the microstructure, composition and hardness of the clad layers. When laser power of 179 W was used, the clad layer had overall Si content of 38wt% and composed of fine primary Si particles and fine eutectic phase. At laser power of 261 W, the clad layer had overall Si content of 24wt% and composed of mainly fine eutectic phase. Vickers hardness of HV176.7 and HV150.3 on the clad layer was obtained at laser power of 179 W and 261 W, respectively.

Key Words : Pulsed laser, Cladding, Hypereutectic Al-Si alloy, Microstructures, Vickers hardness

1. 서 론

과공정(hypereutectic) Al-Si 합금은 내마모성이 요구되는 곳에 많은 응용분야를 가지고 있다¹⁾. 실리콘 함량이 증가할수록 내마모성은 증가하나 인성은 감소한다²⁾. 따라서 과공정 Al-Si 합금을 알루미늄 합금에 클래딩(cladding)하여 사용하면 우수한 내마모성과 인성을 동시에 얻을 수 있다. 많은 클래딩 방법들이 있으나, 레이저 클래딩은 속도가 빠르며, 에너지 효율이 높아 최근 빠르게 보급되고 있다³⁾. 보통 레이저 클래딩은 레이저 빔에 동축(coaxial) 혹은 측면에서 분말을 공급하고, 레이저를 분말에 조사하여 용융 피복한다⁴⁾. 이 방법은 용착효율이 낮으며, 분말송급 과정에서 분말의 손실이 매우 크다. 클래드 층의 두께는 0.2-6 mm 정도

로 비교적 두껍다. 미세분말의 비산으로 인해 건강보호를 위한 설비가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 보완하기 위하여 순수한 실리콘 분말을 유기용제와 혼합하여 페이스트(paste)로 만든 후, 알루미늄 합금 모재 표면에 얇게 도포하였다. 실리콘 페이스트 도포면에 펄스형 Nd:YAG 레이저를 조사하여 과공정 Al-Si 클래드 층을 형성시키는 방법을 시도하였다. 이 방법의 장점은 분말의 손실이 거의 없으며, 클래드 층의 두께를 얇고 정밀하게 조절할 수 있다. 또한 실리콘 분말은 알루미늄 합금에 비하여 레이저 흡수율이 높기 때문에 작은 레이저 출력에 의해서도 클래딩이 가능하다. 펄스형 레이저의 장점은 펄스가 조사되는 순간 용융되고 펄스가 정지된 순간에는 냉각되어, 냉각속도가 매우 빠르며 모재에 열영향이 적다는 것이다.

2. 실험방법

2.1 실리콘 분말 페이스트의 도포

알루미늄 합금 모재로는 순수하게 실리콘 첨가의 영향만을 보기 위하여, 상업적으로 순수한 Al 1050을 사용하였다. Al 1050 모재는 $25 \times 45 \times 2$ mm의 치수로 절단하였다. 모재는 #800 사포에서 연마 후 초음파 세척하였다. 실리콘 분말은 순도 98.0% 이상의 일본 Junsei 사의 분말을 사용하였다. 평균입도는 약 $29 \mu\text{m}$ 을 가졌다.

실리콘 분말은 유기용제와 혼합하여 페이스트로 제작하였다. 실리콘 페이스트는 두께 0.1 mm의 STS 메쉬스크린(mesh screen)을 사용하여 알루미늄 합금 모재에 스크린 프린팅(screen printing)하였다. 메쉬스크린은 0.23×1.1 mm의 타원형 개구부들이 0.11 mm의 간격으로 배열되어 있다. 스크린 프린팅 방법은 Fig. 1에서 보여 준다. 실리콘 페이스트 층은 150°C 에서 10분간 건조시켰다.

2.2 레이저 조사에 의한 클래드 층의 형성

레이저 조사를 위하여 파장 1064 nm, 최대출력 400W를 가지는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 레이저 빔은 $600 \mu\text{m}$ 의 광섬유(optical fiber)로 전송하였으며, 초점거리 203 mm의 집속렌즈를 사용하여 시편 표면에 집속시켰다. M^2 , 회절, 수차를 고려하여 계산한 초점직경은 약 1.18 mm를 가진다. 레이저 빔의 강도분포를 측정된 결과 비교적 균일한 강도분포(top hat mode)를 가졌다. 시편의 표면은 산화방지를 위하여 Ar 보호가스를 흘렸다.

실험변수로는 레이저 평균출력을 변화시켰다. 레이저 평균출력은 펌핑 전압과 펄스 주파수는 고정시키고, 펄스 폭을 조절하여 변화시켰다. 상세한 레이저의 출력조건은 Table 1에 기술되어 있다. 시편 #1은 평균출력 99 W(1.7 J/pulse), 시편 #2는 179 W(3.0 J/pulse), 시편 #3는 261 W(4.4 J/pulse)를 사용하였다.

초점을 실리콘 페이스트 층 표면에 위치시키고, 레이

Fig. 1 Screen printing of Si paste on the substrate

Table 1 Laser irradiation conditions

Specimen No.	1	2	3
Pumping Voltage (V)	260		
Pulse Frequency (Hz)	60		
Pulse Width (ms)	0.9	1.3	1.7
Average Power (W)	99	179	261
Energy/pulse (J)	1.7	3.0	4.4
Intensity/pulse (kW/pulse)	1.8	2.3	2.6

Fig. 2 (a) Series of laser pulses and (b) scanning method

저를 넓은 면적에 주사(scanning)하였다. 레이저 펄스와 주사방법은 Fig. 2에서 보여 준다. 주사속도는 10 mm/s이며, 주사선 간격은 0.4 mm로 10회 주사하였다. 이때 초점에서 용융직경은 약 1.17 mm를 가졌으며, 이것은 계산에 의한 초점크기와 잘 일치하고 있다.

클래딩된 시편들은 횡단면을 절단하고, 마운팅(mounting)한 후 연마와 경면연마(polishing)하였다. 경면연마된 시편들은 표면을 부식(etching)하였으며, 주사전자현미경과 EDX에 의해 미세조직과 화학조성을 분석하였다. 과공정 Al-Si 합금의 내마모성은 경도에 의존하기 때문에 클래드 층의 미소 비커스(micro-Vickers) 경도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 클래드 층의 외관

클래딩된 시편들을 초음파 세척에 의해 레이저 조사되지 않은 지역의 실리콘 페이스트를 제거하였다. 클래

Fig. 3 Surface appearance of the laser clad layers

드 층의 외관은 Fig. 3에서 보여 준다. 시편 #1(99 W)에서는 실리콘 분말들이 용융은 되었으나, 알루미늄 모재와 접합이 일어나지 않고 원형으로 떨어져 나간 지역이 상당히 많이 존재한다. 시편 #2(179 W)와 시편 #3(261 W)에서는 균일하게 용융이 일어났으며, 균일한 표면 상태를 얻을 수 있었다. 표면을 주사전자현미경 관찰한 결과 어떠한 시편들에서도 균열은 보이지 않았다. 외관 관찰결과 시편 #1의 경우에는 실제 용융에는 부적합하였으나, 시편 #2와 #3의 경우에는 외관상으로 상당히 균일한 우수한 클래드 층을 얻을 수 있었다.

3.2 주사전자현미경 미세조직 및 EDX 분석

시편 #1(99 W, 1.7 J/pulse)의 경우에는 많은 지역에서 클래드 층이 형성되지 않았다. 이것은 Fig. 3(a)에서처럼 레이저 조사과정에서 클래드 층이 형성되지 않은 경우와 절단과 연마 과정에서 많은 클래드 층이 탈락되었기 때문으로 보인다. Fig. 4(a)에서는 시편 #1의 클래드 층이 형성된 지역에 대한 주사전자현미경 미세조직을 보여 준다. 클래드 층 내에서 위치에 따라 조성이 매우 불균일하며, 클래드 층의 두께도 고르지 못하다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 사각형의 지역을 확대한 사진이며, 표시한 3 개의 지역에 대하여 EDX 면 분석을 하였다. EDX 분석 결과는 Table 2에 수록하였다. A 지역은 단 상(single phase) 지역으로 보이며, 실리콘이 97.8%로 측정되었다. Al-Si 상태도에서 실리콘 내에 알루미늄의 용해도(최대 0.016 wt%)가 거의 없기 때문에 순수한 실리콘으로 이루어진 지역이다. 즉 주위에 용융된 알루미늄 양이 적어서 실리콘 분

Fig. 4 Microstructure of the clad layer after irradiation of 99 W, Specimen #1

Table 2 Al and Si content at the indicated locations in Fig. 4(b)

Location Element	A	B	C
Al (wt%)	2.2	80.0	26.8
Si (wt%)	97.8	20.0	73.2

말들이 용융 후 알루미늄과 혼합되지 못하고 바로 응고한 지역으로 보인다. B 지역은 실리콘과 알루미늄이 혼합되어 완전히 합금화된 지역으로, Al 80%, Si 20%로 이루어 졌다. 이 지역은 레이저에 의해 완전히 용융-혼합된 과공정 Al-Si 합금지역이다. C 지역은 큰 입자가 작은 입자들로 분리된 흔적을 보이며, 조성은 Al 26.8%, Si 73.2%로 이루어져 있다. 따라서 큰 실리콘 입자가 녹지않고 용융된 알루미늄에 의해 침식되어 작은 실리콘 입자들로 분리-응집된 지역으로 보인다. Table 3에서는 클래드 층 전체 면적에 대하여 EDX 분석한 결과를 보여 준다. 시편 #1은 Si 69.4%, Al 30.6%로서 실리콘이 훨씬 더 많이 분포하고 있다. Fig. 3(a)와 Fig. 4를 참고하면 1.7 J/pulse의 레이저 펄스에 의해서는 실리콘 입자들은 용융은 일어났으나, 용융된 알루미늄 양이 적어서, 서로 충분히 혼합되

Table 3 Al and Si content on the overall clad layers depending on laser power

Specimen Element	1 (99 W)	2 (179 W)	3 (261 W)
Al (wt%)	30.6	62.0	76.0
Si (wt%)	69.4	38.0	24.0

지 못하고 급속하게 응고한 것으로 보인다. 따라서 지역에 따라 용융-응고된 실리콘 지역, 과공정 Al-Si 합금지역, 작은 실리콘 입자들의 응집 형태를 이루는 지역 등 다양한 지역들로 구성되어 있다.

시편 #2(179 W, 3.0 J/pulse)는 전 지역에 걸쳐서 균일한 두께의 클래드 층을 형성하였다. Fig. 5(a)에서는 전반적인 단면 미세조직을 보여 준다. 클래드 층의 두께는 약 110 μm 를 가진다. 시편 #1에 비해서 미세조직은 균일하나, 각 레이저 펄스에 의해 용융-응고한 흔적을 따라 부분적으로 불균일한 지역을 가지고 있다. Fig. 5(b)는 확대된 미세조직과 EDX 점분석 위치를 보여 준다. 각 지점에 대한 EDX 분석 결과는 Table 4에서 보여 준다.

A와 D 지점은 순수한 실리콘 상이며, 실리콘 함량이 크게 차이나는 것은 주변의 영향으로 보인다. B 지점은 Al 73.1%, Si 26.6%를 가지고 있다. 이 지역에서는

Table 4 Al and Si content at the indicated location in Fig. 5(b)

Location Element	A	B	C	D
Al (wt%)	46.8	73.1	71.6	20.4
Si (wt%)	53.2	26.9	28.4	79.6

미세한 실리콘 상들이 분포하는 지역이다. C 지점은 Al 71.6%, Si 28.4%를 포함하고 있으며, 미세 공정조직으로 이루어져 있다. Table 3에서 전 클래드 층에 대한 EDX 분석결과를 보면 Al 62%, Si 38%로 구성되어 있다. 요약하면 클래드 층의 미세조직은 대략적으로 3 영역으로 구분할 수 있다. Fig. 5(b)에서 (1) 초정(proeutectic) 실리콘 상과 미세 공정조직, (2) 초정 실리콘 상이 없는 미세 공정조직, (3) 초미세 공정조직을 가지는 지역으로 구분할 수 있다. (2)와 (3) 지역은 평형 공정조성인 12.6wt% Si에 비하여 훨씬 많은 27~28wt% Si를 함유하고 있음에도 불구하고 공정조직으로 이루어져 있다. 빠른 냉각속도에서 Al-Si 합금의 공정조성은 실리콘이 많은 쪽으로 이동한다고 알려져 있으며^{5,6)}, 냉각속도가 매우 빠른 경우 30wt% Si에까지 이동한다고 알려져 있다⁷⁾. 펄스형 레이저에서는 펄스가 조사되는 순간 용융-응고하기 때문에 매우 빠른 응고속도를 가진다.

Fig. 6(a)는 시편 #3(261 W, 4.4 J/pulse)의 단면 미세조직을 보여 준다. 시편 #2보다 더 균일한 두께와 미세조직을 보여 준다. 클래드 층의 두께는 약 145 μm 를 가진다. Fig. 6(b)에서는 확대된 미세조직을 보여 준다. 시편 #2에서 많이 관찰된 초정 실리콘 상은 거의 관찰되지 않았으며, 지역에 따라 조성의 차이는 크지 않았다. Table 3의 전 클래딩 층에 대한 EDX 분석한 결과를 보면, Al 76%, Si 24%의 과공정 Al-Si 합금 조성을 보여 준다.

일반적으로 과공정 Al-Si 주조 합금의 미세조직에는 큰 초정 실리콘 입자(30 μm 이상)들이 관찰된다^{1,2,8)}. 과공정 Al-Si 합금에서 조직의 미세화는 내마모성과 기계적 성질을 향상시키는 데 매우 중요하다^{2,8)}. 미세조직 결과들을 종합적으로 검토하여 보면, 시편 #1(99 W)의 경우에는 출력이 낮아 많은 실리콘 분말들이 미처 용융되지 못하였으며, 전체적인 실리콘 함량은 매우 높으나, 미세조직이 매우 불균일하여, 클래드 층은 실용화되기 어려운 것으로 판단되었다. 시편 #2(179 W)에서는 실리콘 분말이 완전히 용융되었으며, 알루미늄 모재가 일부 용융-혼합되어 전체적으로 38%의 높은 실리콘 함량을 가졌다. 높은 실리콘 함량에도 불구하고

(a) general view

(b) magnified view

Fig. 5 Microstructure of the clad layer after irradiation of 179 W, Specimen #2

(a) general view

(b) magnified view

Fig. 6 Microstructure of the clad layer after irradiation of 261 W, Specimen #3

조정 실리콘 입자들은 $5\ \mu\text{m}$ 이하로 매우 작았다. 조정 실리콘 입자들의 매우 작은 것은 레이저 펄스에 의한 급냉 응고때문으로 판단된다. 시편 #3(261 W)에서는 출력이 높아 알루미늄 모재의 용융량이 증가하였으며, 전체적인 실리콘 함량은 24%로 낮아졌다. 그러나 여전히 일반적인 과공정 Al-Si 주물(A390 합금의 경우 17% Si 함유)에 비해서 실리콘 함량이 상당히 높으며, 이 경우에는 조정 실리콘 입자들이 거의 발견되지 않았으며, 대부분 미세 공정조직들로 구성되어 있다. 냉각 속도가 매우 빠른 경우 공정조성이 30% Si에까지 이동한다고 알려져 있으며⁷⁾, 24%의 과공정 Al-Si 클래드 층에서 조정 실리콘 함량이 적은 것은 레이저 펄스에 의한 냉각속도가 매우 빠르기 때문으로 판단된다. 결론적으로 시편 #2와 #3은 각각 38%와 24%로 다량의 실리콘을 함유하고 있으나, 매우 미세한 조직을 얻었으며, 우수한 기계적 성질을 가질 것으로 기대한다.

3.3 미소 비커스 경도 측정

시편 #1의 경우에는 클래드 층이 제대로 형성되지 않아서 Fig. 4(a)의 관심있는 지역에 대해서만 경도 측정을 하였다. 실리콘 상은 HV999.2의 평균 비커스 경도를 가졌으며, 압흔에 의한 균열이 발생하였다. 과

Fig. 7 Micro-Vickers hardness distribution across the boundary

공정 Al-Si 합금 지역은 HV 110의 경도를 가졌다.

시편 #2와 #3에 대해서는 클래드 층에서부터 모재에 까지 연속하여 경도를 측정하였다. Fig. 7에서는 그 결과를 보여 준다. 클래드 층의 두께가 얇기 때문에 Fig. 에서처럼 경사진 방향으로 경도 측정을 하였다. 시편 #2에서는 클래드 층의 평균 경도 값은 HV176.7을 나타내었다. 그러나 클래드 층 내에서 상당히 큰 편차를 보이고 있다. 이것은 미세조직의 불균일함을 그대로 반영한다. 시편 #3에서 평균 경도 값은 HV150.3을 나타내었다. 역시 클래드 층에서 상당히 큰 편차를 나타내고 있으나, 시편 #2에 비해서는 상당히 줄었다. 이것은 전체적인 시편 #3은 실리콘 함량이 24%로 줄었기 때문이다. 17wt% Si를 포함하는 대표적인 과공정 Al-Si 주물합금인 A390의 경우 열처리되지 않은 상태에서 약 HV100 정도를 가지며, T6 열처리한 경우 약 HV140의 경도 값을 가진다¹⁾. 이에 비해 시편 #2와 시편 #3에서는 응고한 그대로의 상태에서 상당히 높은 경도 값을 보여 준다. 이것은 A390에 비해 본 연구에서의 과공정 Al-Si 클래드 층의 실리콘 함량이 높기 때문이다. Al 1050 모재에서는 클래드 층과 인접한 경계 지역에서 약간의 경도 감소가 발견되었다. 이것은 열 영향에 의한 가공경화 효과의 손실 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 순수한 실리콘 분말을 유기용제와 함께 페이스트 형태로 Al 1050 합금 표면에 도포한 후, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 조사하여 과공정 Al-Si 클래드 층을 형성하고자 하였다.

평균출력 99 W에서는 균일한 과공정 Al-Si 클래드 층을 얻을 수 없었다. 179 W와 261 W에서는 균일한 두께와 미세한 조직을 가지는 과공정 Al-Si 클래드 층

을 얻을 수 있었다.

179 W에서는 Al-38wt%Si의 클래드 층을 얻었으며, 미세한 초정 실리콘 입자들과 미세한 공정조직으로 구성되어 있었다. 261 W에서는 Al-24wt%Si의 클래드 층을 얻었으며, 대부분이 미세한 공정조직으로 구성 되어 있었다.

Al-38wt%Si의 클래드 층은 HV176.7의 높은 평균 경도를 가졌으나 지역에 따라 큰 편차를 가졌다. Al-24wt%Si의 클래드 층은 HV150.3의 높은 경도를 가졌으며 편차도 줄었다.

참 고 문 헌

1. J. R. Davis : Aluminium and Aluminium Alloys, ASM International, 1993, 532-541
2. S. Tomida, K. Nakata, S. Shibata, I. Zenkouji and S. Saji : Improvement on Wear Resistance of Hyper-eutectic Al-Si Cast Alloy by Laser Surface Remelting, Surface & Coatings Technology, **169-170** (2003), 468-471
3. S. Nowothy, S. Scharek and A. Schmidt : Advanced Laser Technology Applied to Cladding and Buildup, Welding Journal, **86-5** (2007), 48-51
4. H. K. Lee : Analysis and Optimization of the Cladding Parameters for Improving Deposition Efficiency in Cladding using a Low Power Pulsed Nd:YAG Laser, Journal of KWJS, **25-4** (2007), 387-394 (in Korean)
5. A. Kamio : Structures and Properties of Aluminium, Japan Institute of Light Metals, 1991, 248-249 (in Japanese)
6. M. Pierantoni, M. Gremaud, P. Magnin, D. Stoll and W. Kurz : The Coupled Zone of Rapidly Solidified Al-Si Alloys in Laser Treatment, Acta Metall. Mater., **40-7** (1992), 1637-1644
7. N. Apaydin and R. W. Smith : Microstructural Characterization of Rapidly Solidified Al-Si Alloys, Materials Science and Engineering, **98** (1988), 149-152
8. J. Chang, I. Moon and C. Choi : Refinement of Cast Microstructure of Hypereutectic Al-Si Alloys through the Addition of Rare Earth Metals, Journal of Materials Science, **33** (1998), 5015-5023