A1050 Al 합금 표면에 Si 분말 Paste의 도포 방식에 의한 레이저 클래딩

이 형 근^{*,†}^{*}한밭대학교 공과대학 신소재공학과

Laser Cladding by Printing Si Powder Paste on A1050 Al Alloy Surface

Hyoung-Keun Lee^{*,†}^{*}Department of Advanced Materials Engineering, HanBat National University, Daejeon, 34158, Korea[†]Corresponding author : leehk@hanbat.ac.kr

(Received November 10, 2017 ; Revised November 21, 2017 ; Accepted December 5, 2017)

Abstract

In this study, it was tried to make an Al-Si clad layer with excellent wear resistant by scanning a pulsed Nd:YAG laser beam after printing silicon powder paste on the A1050 Al alloy surface. The microstructure and wear resistant of the clad layer were investigated according to the height of the silicon powder layer and the laser output power. An innovative method of using tape as a spacer to control the height of the silicon powder layer has been attempted. All the laser clad layers had a very fine microstructure. The silicon content in the clad layer was largely dependent on the height of the silicon powder layer rather than the laser output power. The average Si contents of A (107 μm tape) and B (138 μm tape) specimens were similar to 16.8 and 14.5 wt%Si, respectively, while C (197 μm tape) specimens had an average Si content of 38.8 wt%Si. In the wear test, the average wear loss and the average friction coefficient were decreased with increasing the height of the silicon powder layer. The average wear loss of A and B specimens was similar to 6.8 and 6.2 mg, respectively. On the other hand, the average wear loss of C specimens was 3.5 mg, which indicated excellent wear resistance.

Key Words : Pulsed Nd:YAG laser, Laser cladding, A1050 Al alloy, Hyper-eutectic Al-Si alloy, Microstructure, Block-on-roll wear test, Friction coefficient

1. 서 론

과공정(hypereutectic) Al-Si 합금은 정출된 실리콘 입자에 의한 내마모성과 윤활성을 동시에 가지고 있어, 경량과 내마모성이 요구되는 산업분야에 많이 응용되고 있다¹⁾. 그러나 Al-Si 합금은 실리콘 함량이 증가할수록 내마모성은 증가하나 인성은 감소하는 단점이 있다²⁾. 따라서 인성이 큰 알루미늄 합금 표면에 내마모성이 우수한 과공정 Al-Si 합금을 클래딩(cladding)하여 사용하면 내마모성과 인성을 동시에 얻을 수 있다. 또한 Al-Si 합금의 인성을 증가시키기 위해서는 결정립 크기

(grain size)를 미세화하는 것이 매우 중요하다¹⁾.

많은 클래딩 방법들이 있으나, 여기서는 최근 들어 빠르게 성장하고 있는 레이저 클래딩 방법을 선택하였다³⁾. 특히 Al-Si 합금의 레이저 클래딩에서는 일반적으로 얻기 어려운 매우 미세한 결정립을 얻을 수 있다고 보고되었다⁴⁾. 보통 레이저 클래딩은 레이저 빔에 동축(coaxial) 혹은 측면에서 분말을 공급하고, 분말에 레이저를 조사하여 용융시켜 클래딩한다⁵⁾. 이 방법은 희석률이 작으며, 모재의 형상에 크게 영향을 받지 않는 등 많은 장점이 있다. 그러나 용착효율이 낮으며, 분말의 손실이 많으며, 다량의 미세분진이 발생하여 건강에 해롭다는 단점도 있다.

특히 분말분사 방식은 희석률이 매우 작기 때문에, 순수한 실리콘(Si) 분말을 분사하여 과공정 Al-Si 합금 클래드 층을 제작하는 것이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 순수한 실리콘(Si) 분말을 유기용제와 혼합하여 페이스트(paste)로 만든 후, 알루미늄 합금 모재 표면에 얇게 도포하고, 레이저를 조사하여 합금화하는 방법을 사용하였다. 페이스트 층의 유기용제는 150 °C 정도로 가열하여 증발시킨 후, Si 분말 도포면에 펄스형 Nd:YAG 레이저를 조사하여 모재 표면에 Al-Si 합금층을 형성시킨다. 이 방법의 장점은 분말의 손실이 거의 없으며, 클래드 층의 두께를 정밀하게 조절할 수 있으며, 미세분진의 발생이 없어 작업환경이 깨끗하다. 또한 Nd:YAG 레이저 빔의 흡수율이 알루미늄은 0.06 ~ 0.2 정도로 낮으나, 실리콘은 0.7 정도로 상당히 높기 때문에 작은 레이저 출력에 의해서도 클래딩이 가능하다⁶⁾. 단점은 희석률이 비교적 크며, 형상에 영향을 받는다는 것이다. 또한 펄스형 레이저의 특징은 한 개의 레이저 펄스가 조사되는 순간 용융되고, 펄스가 정지된 순간에는 응고한다³⁾. 따라서 냉각속도가 매우 빠르며 모재에 대한 열영향이 적다는 것이다.

2. 실험 방법

2.1 실리콘 분말 페이스트의 도포

알루미늄 합금 모재로는 상업적으로 순수한 Al 합금인 A1050을 사용하였다. A1050 모재는 25*45*2 mm의 치수로 절단하였다. 모재의 표면은 #220 사포로 연마한 후 초음파 세척하였다. 클래딩 분말로는 Aldrich 사에서 제조한 순도 99.0% 이상, 분말입도 325 mesh 이하(90% 이상이 44 μ m 이하)의 순수한 Si 분말을 사용하였다. 따라서 클래드 층은 단순히 Al-Si 조성을 가지기 때문에 해석이 비교적 간단하다.

Si 분말은 유기용제와 혼합하여 페이스트로 제작하였다. Si 페이스트를 프린팅(printing)하는 방법은 Fig. 1(a)에서 보여준다. 단단한 plastic tape를 spacer로 모재의 양쪽 끝에 부착한 후 blade를 사용하여 프린트하였다. Si 페이스트 층의 두께는 tape의 두께를 달리하여 조절할 수 있다. Tape를 사용하여 두께를 조절하는 방법은 여기서 처음으로 고안되었다. 이 방법의 장점은 screen을 특별히 제작하지 않더라도 페이스트 층의 두께를 자유롭게 조절할 수 있다는 것이다. Fig. 1(b)는 실험에서 사용한 3 종류의 plastic tape(A, B, C)의 두께를 측정된 결과를 보여준다. 두께측정은 KEYENCE사의 분해능 1 μ m를 갖는 LK-030 레이저 변위센서를 사용하였다. A tape는 107 μ m, B tape는 138 μ m, C tape

(a) Printing method of Si paste

(b) Thickness of A, B, C tape

Fig. 1 A method of printing the Si powder paste on the substrate and measurement results of the thickness of the tapes

Fig. 2 The height profile of the Si powder layer measured after evaporating the binder

는 197 μ m의 균일한 두께를 가진다.

Si 페이스트의 도포가 완료된 후 tape를 제거하고, 150 °C의 hot plate에서 약 10분간 가열하여 유기용제를 증발시켰다. Fig. 2에서는 유기용제가 제거된 후 Si 분말층의 높이를 레이저 변위센서로 측정된 결과를 보여준다. Si 분말층의 높이는 A와 B tape에 비하여 C tape에서 더욱 높았다. Si 분말층의 높이가 불균일한 것은 분말/유기용제 비율의 편차, paste층 도포과정에서의 편차, 유기용제의 불균일한 증발 등 많은 요인에 의해 발생하는 것으로 보인다.

2.2 레이저 조사에 의한 클래드 층의 형성

레이저로는 파장 1064 nm, 최대출력 400 W를 가지는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 레이저 빔은 600 μ m 직경의 광섬유로 전송하였으며, 초점거리 203 mm의 집속렌즈로 집속하였다. 초점에서 측정된 용융 spot의 직경은 약 1.2 mm를 가졌다. Si 분말층 표면에 레이저 초점을 위치시키고, 넓은 면적을 주사(scanning)하였다.

Fig. 3 Average laser power depending on the laser pulse width

Table 1 Experimental conditions for the specimens

Tape Type Power(W)	A (107 μ m)	B (138 μ m)	C (197 μ m)
1	119	199	199
2	159	240	240
3	199	282	282

* Example of the designation for a specimen
A2 specimen: A tape(107 μ m)/159 W(1.2ms)

주사선 간격은 0.5 mm로, 주사속도는 10 mm/s를 사용하였다. 주사선 사이의 겹침(overlap)은 약 58%에 해당한다. 시험편 표면의 산화방지를 위하여 Ar 보호가스를 흘렸다.

실험변수로서 tape 두께와 레이저 출력을 변화시켰다. 레이저 출력은 펄핑전압과 펄스주파수는 260 V와 60 Hz로 고정시키고, 펄스폭을 조절하여 변화시켰다. 레이저 출력은 Ophir사의 BA500 power meter로 측정하였다. Fig. 3에서는 펄스폭에 따른 레이저 출력은 보여준다.

Table 1에서는 실험에 사용된 tape 두께와 레이저 출력 조건을 보여준다. A tape에서는 레이저 출력을 119 ~ 199 W 까지 변화시켰으며, B와 C tape에서는 199 ~ 282 W로 변화시켰다. 이러한 tape의 두께범위와 레이저 출력범위는 예비실험을 통해서 선정하였다. 시험편 명칭의 표기방법은 Table 1에서 보여준다.

클래딩된 시험편들은 초음파 세척에 의해 레이저가 조사되지 않은 지역의 Si 분말들을 모두 제거하였다. 레이저 변위계를 사용하여 표면으로부터 클래드 층의 높이는 측정하였다. SEM과 EDS에 의해 횡단면에 대한 미세조직, 용융깊이와 화학성분을 분석하였다.

2.3 마모시험 방법

마모시험은 block-on-roll type의 마모시험기를 사용하였다. Fig. 4에서는 마모시험기의 개략도를 보여주

Fig. 4 Schematic diagram of wear tester

Table 2 Block-on-Roll wear test conditions

Parameter	Condition
Roll material	SKD 11, Hardness: HV226
Rotating Speed	805 rpm
Test time	180 s (Test distance: 379 m)
Test load	0.65 kg on the specimen
Lubricant	pure water

며, Table 2에서는 마모시험 조건을 보여준다. 클래드 층은 #2000의 사포로 조심스럽게 연마하여 표면요철을 제거하였다. 상대 마모재로는 직경 50 mm, 폭 7 mm의 annealing된 상태의 SKD11 강으로 제작된 roll을 사용하였다. Roll의 마찰면은 #800 diamond paper로 연마하였다. 윤활재로는 물을 사용하였다. 마모시험 동안 시험편의 표면에 0.65 kg의 수직하중을 가하였으며, 805 rpm의 roll 회전속도를 사용하였다. 이때 접촉 표면에서 마찰속도는 2.1 m/s에 해당한다. 180 초(379 m) 동안 마모시킨 후 마모손실량을 측정하였다. 마모손실량은 마모시험 전·후의 무게차이로 측정하였다. 수직하중은 마모시험 전에 load cell을 사용하여 미리 측정하였으며, 수평하중은 load cell과 data acquisition 장치를 사용하여 실시간으로 측정하였다. 마찰계수는 수평하중/수직하중으로 환산하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 Si 클래드 층의 높이 측정 결과

레이저 조사 후, 클래드 층의 높이는 tape의 종류(A, B, C)에 의해 주로 결정된다. Fig. 5에서는 대표적으로 A2, B2, C2 시험편들에 대해서 클래드 층의 높이 변화를 보여준다. A와 B 시험편에서 클래드 층의 높이는 ~16과 ~21 μ m로서 거의 비슷하였다. 반면 C 시험편에서 클래드 층의 높이는 ~51 μ m로서 상대적으로 큰 편이다. 클래드 층의 표면에는 상당한 요철이 존재하며, 위치에 따라 클래드 층의 높이가 상당히 변화하였다.

Fig. 5 Height profiles of the clad layers for A2, B2 and C2 specimen

이것은 위치에 따라 Si 함량의 변화가 일어날 수 있음을 의미한다.

3.2 클래드 층의 단면 미세조직과 성분분석

Fig. 6에서는 A 시험편들의 단면에 대한 전자현미경 사진과 EDS에 의한 성분분석 결과를 보여준다. Fig. 6(a)~Fig. 6(c)에서 보면 클래드 층은 전반적으로 불

균질하며, 2 개의 지역으로 구분되어 존재한다. 1 위치(田 1)에 해당하는 지역(H 지역)은 Si와 Al의 혼합이 일어난 지역이며, 2 위치(田 2)에 해당하는 지역(L 지역)은 Si이 거의 없는 모재와 조성이 같은 지역이다. Fig. 6(e)와 Fig. 6(f)에서 보면, L 지역과 모재 사이에는 약한 경계(화살표)가 관찰된다. 또한 Al-Si 용액이 H 지역에서 L 지역으로 선형으로 깊숙이 침투한 흔적들이 발견된다. 이러한 흔적들로 보아, L 지역은 모재가 용융·응고되었으나, Si과는 전혀 혼합이 일어나지 않은 지역으로 추정된다. 현재로서 이러한 미세조직이 발생한 원인에 대해서는 알 수 없으며, 이에 대한 추가의 연구가 요구된다. Fig. 6(a) ~ Fig. 6(c)에서 레이저 출력이 119 W에서 199 W로 증가함에 따라 평균 용융깊이(화살표까지)도 134 μm 에서 179 μm 로 증가하였다. 그러나 A 시험편들에서 H 지역의 Si 함량은 레이저 출력에는 크게 영향을 받지 않으며, 모든 A 시험편들의 H 지역에서 평균 Si 함량은 대략 16.8 wt%Si을 가진다. Fig. 6(d) ~ Fig. 6(f)에서는 2 개의 지역에 대한 확대된 사진을 보여준다. Fig. 6(d)에서는 단일 레이저 펄스에 의해 용융·응고된 지역의 경계(BL)가 뚜렷이 보인다. 이것은 1.0 ~ 1.4 ms의

Fig. 6 Microstructure and chemical analysis for the clad layers formed with A tape

짧은 레이저 펄스 동안에 매우 급속한 용융과 응고가 일어났음을 의미한다. Fig. 6(d)의 오른쪽 아래에서 일부 초정 Si 입자들이 관찰되었으나, A1 시험편은 전반적으로 매우 미세한 Al-Si 공정조직을 보여준다. A2와 A3 시험편들도 대부분 매우 미세한 Al-Si 공정조직을 가진다. Al-Si 평형상태도는 12.6 wt%Si(577 °C)에서 단 1 개의 공정반응을 가지며, Si 내에는 Al의 용해도가 거의 없는 매우 단순한 형태를 가진다. A 시험편들은 모두 과공정(hyper-eutectic) 조성임에도 불구하고, 대부분 매우 미세한 Al-Si 공정조직을 나타낸다. Al-Si계 합금에서 빠른 냉각이 일어나면, 공정반응이 Si이 많은 쪽으로 이동한다고 알려져 있다⁶⁻⁸⁾. 레이저 클래딩 과정은 매우 급격한 냉각과정이다. 따라서 공정조성이 Si이 많은 쪽으로 이동하기 때문에, 16.8 wt%Si의 과공정 조성에서도 대부분 매우 미세한 공정조직을 가지는 것으로 보인다.

Fig. 7은 B 시험편들의 단면에 대한 전자현미경 사진과 EDS에 의한 성분분석 결과를 보여준다. 역시 클래드 층은 2 개의 지역으로 구분되며, 단일 레이저 펄스에 의해 용융·응고가 일어난 경계선들이 관찰된다. 레이저 출력이 199 W에서 282 W로 증가하면, 용융

깊이는 약 179 μm 에서 213 μm 로 증가하였다. 일반적으로 동일한 tape를 사용할 때, 용융깊이가 증가하면 Si 함량이 감소하여야 하나, 여기서 측정된 Si 함량은 용융깊이에 무관하게 비슷하였다. 이것은 Si 페이스트 내에 유기용제 함량의 차이, Si 분말층 높이의 불균일성, 지역적인 조성의 불균일성과 H 지역 두께의 불균일성 등 여러 요인들로 인해 지역적으로 조성이 불균일하기 때문으로 보인다. B 시험편들의 H 지역에서 평균 Si의 함량은 약 14.5 wt%Si을 나타낸다. B 시험편은 A 시험편에 비해 Si 분말층의 높이는 크나 레이저 출력이 크기 때문에 평균적인 Si 함량이 낮은 것으로 보인다. Fig. 7(d)에서 보면 B 시험편들은 대부분 매우 미세한 Al-Si 공정조직을 나타낸다. Fig. 7(e)와 Fig. 7(f)에서 L 지역과 모재의 경계선이 비교적 뚜렷이 구분되나, H 지역과 L 지역의 경계는 넓게 존재한다. 역시 Al-Si 합금이 L 지역으로 선형으로 깊숙이 침투하여 있다.

Fig. 8에서는 C 시험편들의 단면에 대한 전자현미경 사진과 EDS에 의한 성분분석 결과를 보여준다. 역시 클래드 층은 2 개의 지역으로 구분되며, 단일 레이저 펄스에 의해 용융·응고가 일어난 경계선들이 관찰된다. 레이저 출력이 199 W에서 282 W로 증가하면, 용융

Fig. 7 Microstructure and chemical analysis for the clad layers formed with B tape

Fig. 8 Microstructure and chemical analysis for the clad layers formed with C tape

깊이는 202 μm 에서 243 μm 로 증가하였다. 같은 레이저 출력에서도 B 시험편들에 비해 C 시험편들에서 용융깊이가 증가하였다. Si는 Al에 비해 용점은 높으나 레이저 흡수율이 훨씬 크기 때문에 Al보다 쉽게 용융된다. Si 분말층의 높이가 클수록 고온의 Si 액상이 많이 형성되기 때문에 용융깊이가 증가한 것으로 보인다. C 시험편들에서는 약 38.8 wt%Si의 매우 높은 평균 Si 함량을 얻을 수 있었다. Fig. 8(d)와 Fig. 8(e)에서 보면 미세한 공정조직과 함께 상당히 많은 초정 Si 입자들이 관찰된다. 초정 Si 입자들의 분포는 위치에 따라 차이가 난다. 즉 Fig. 8(c)에서 1 위치에서 Si 함량은 40.8 wt%Si이나, 2 위치에서는 31.8 wt%Si이다. 즉 C 시험편들에서는 위치에 따라서 Si 함량이 상당히 차이가 난다.

펄스 레이저 클래딩은 1.0 ms ~ 1.8 ms의 짧은 레이저 펄스시간 내에서 급속한 가열·용융 및 응고가 일어나는 과정이다. 레이저는 표면열원으로 표면으로부터 열전달에 의해 내부가 가열된다⁹⁾. 표면의 Si 분말의 용점은 1414 $^{\circ}\text{C}$ 로 매우 높은 반면, 모재인 A1050(거의 순수한 Al)의 용점은 660 $^{\circ}\text{C}$ 로 매우 낮다. 표면의 Si

분말은 용점이 높더라도 Nd:YAG 레이저의 흡수율이 높기 때문에 순간적으로 가열되며 용융될 것이다. 순간적인 높은 온도구배로 인해 내부로 전달된 열은 저융점의 A1050 모재를 용융시킨다. 용융된 A1050 모재의 일부는 용융된 Si와 혼합되며 Al-Si 합금용액을 형성한다. 레이저 펄스가 꺼지면 고온의 Al-Si 합금용액은 표면에서부터 급격히 응고하기 시작한다. 동시에 A1050 모재로의 급격한 열전달에 의해 모재 근처에 존재하는 용융된 Al도 급속히 응고한다. 따라서 클래드 층은 Al-Si 합금지역(H 지역)과 순수한 Al 지역(L 지역)이 분리되어 존재하는 것으로 추정된다. 이러한 해석은 단순한 추정이며, 자세한 용융·응고 과정은 추가의 연구를 필요로 한다.

3.3 마모시험 결과

Fig. 9에서는 클래드 층의 마모시험 결과들을 보여준다. 참고로 A1050 Al 합금은 18 mg의 비교적 큰 마모손실을 기록하였다. Si 분말층의 높이가 같으면(즉 같은 tape 사용), 마모손실량은 레이저 출력의 변화에 큰 영향을 받지 않는다. 이것은 Si 분말층의 높이가 같

Fig. 9 Wear weight loss measured after the wear tests for all the specimens

으면, Si 함량은 레이저 출력의 변화에 큰 영향을 받지 않은 것과 일치한다. 그러나 Si 분말층의 높이(즉 tape 두께)가 변화하면 마모손실량의 차이가 명확하게 관찰되었다. 특히 199 W의 동일한 레이저 출력을 사용한 경우를 보면, Si 분말층의 높이가 증가할수록 마모손실량이 명확히 감소하였다. A3 시험편과 B1 시험편의 마모손실량은 각각 7.1 mg과 6.0 mg으로 약간의 차이가 있으나, C1 시험편의 마모손실량은 3.5 mg으로 크게 감소하였다. A 시험편들과 B 시험편들의 평균 마모손실량은 각각 6.8 mg과 6.2 mg으로 비슷하였다. A 시험편들과 B 시험편들의 H 지역에서 평균 Si 함량은 각각 16.8와 14.5 wt%Si이며, 클래드 층의 불균질성을 고려하면 비슷하다고 할 수 있다. 반면 C 시험편들의 평균 마모손실량은 3.8 mg으로 우수한 내마모 특성을 나타내었다. 역시 C 시험편들의 H 지역에서 평균 Si 함량은 38.8 wt%Si으로, Si을 다량 함유한 과공정 Al-Si 합금으로 구성되었다. 이와 유사하게 24 ~ 38 wt%Si을 함유한 과공정 Al-Si 합금을 레이저 클래딩한 연구결과에서 HV150 ~ HV177의 평균경도를 얻었으며, 내마모성이 크게 향상되었다고 보고되었다⁴⁾. 본 연구에서도 내마모성이 크게 증가한 것은 클래딩층의 경도가 증가한 때문으로 보인다.

Fig. 10와 Table 3에서는 A1050 합금과 A, B, C 시험편들에 대한 마찰계수의 측정결과들을 보여준다. A1050 합금은 평균적인 마찰계수가 약 0.69로 높으며, 마모시험 동안 마찰계수가 매우 심하게 변동하였다. 이것은 마찰동안 A1050과 SKD11 사이의 adhesion과 detach가 반복적으로 일어나기 때문으로 보인다. Si이 첨가되면 Si 입자들이 윤활작용을 하여 마찰계수가 줄어든다고 알려져 있다⁷⁾. Si이 첨가되면 마찰계수가 큰 폭으로 하락하였으며, 마찰계수 변동의 폭도 줄어들었다. A와 B 시험편들의 평균 마찰계수는 각각 0.48과 0.49

Fig. 10 Friction coefficient during wear test for A1050 and A3, B3, C3 specimen.

Table 3 Friction coefficients for all the specimens.

Friction Coefficient	A	B	C
1	0.47	0.47	0.46
2	0.49	0.48	0.44
3	0.48	0.51	0.43
Average	0.48	0.49	0.44

* Friction coefficient of A1050 Al alloy is 0.69

로 비슷하였으나, C 시험편들의 평균 마찰계수는 0.44로서 더 작았다.

4. 결 론

본 연구에서는 A1050 Al 합금 표면에 Si 분말 페이스트를 도포한 후, 펄스형 Nd:YAG 레이저를 조사하여 내마모성이 우수한 Al-Si 클래드 층을 형성하고자 하였다.

1) plastic tape를 spacer로 사용하여 Si 분말 페이스트를 프린팅하는 방법을 시도하였다. 이 방법은 Si 분말층의 높이를 값싸게, 쉽게, 자유롭게 조절할 수 있는 장점이 있다.

2) 레이저 클래드 층은 2 개의 지역으로 구분되어 존재하였다. 즉 Si과 Al이 혼합되어 Al-Si 합금으로 존재하는 지역과 순수한 A1050 합금이 용융·응고한 지역으로 구분되어 존재하였다.

3) 클래드 층의 용융깊이는 레이저 출력이 증가하면 증가하였다. 클래드 층의 Si 함량은 Si 분말층의 높이(tape의 두께)가 증가하면 증가하였다. A와 B 시험편들에서 평균 Si 함량은 각각 16.8와 14.5 wt%Si으로 비슷하며, 미세조직은 대부분 매우 미세한 Al-Si 공정조직으로 구성되었다. C 시험편들에서 평균 Si 함량은 38.8 wt%Si으로 매우 높았으며, 미세조직은 매우 미세한 Al-Si 공정조직과 다량의 초정 Si 입자들로 구성되어 있었다.

4) 마모시험에서 마모손실량과 마찰계수는 주로 Si 분말층의 높이(tape의 두께)에 영향을 받았다. A와 B 시험편들의 평균 마모손실량은 각각 6.8과 6.2 mg으로 비슷하였다. 반면 C 시험편들의 평균 마모손실량은 3.5 mg으로 우수한 내마모성을 보여주었다. A와 B 시험편들의 평균 마찰계수는 각각 0.48과 0.49로 비슷하였으나, C 시험편들의 평균 마찰계수는 0.44로서 상대적으로 낮았다.

후 기

이 논문은 2015년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음”

ORCID: Hyung-Keun Lee: <http://orcid.org/0000-0001-7606-4180>

Reference

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
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00100-2)
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, Effects of Average Power on Laser Cladding of Hypereutectic Al-Si Alloy on Al 1050 Alloy, *Journal of KWJS*, 29(2) (2011), 88-93
5. H. K. Lee, Effects of the cladding parameters on the deposition efficiency in pulsed Nd:YAG laser cladding, *Journal of Materials Processing Technology*, 202, (2008), 321-327
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.024>
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
[https://doi.org/10.1016/0956-7151\(92\)90106-O](https://doi.org/10.1016/0956-7151(92)90106-O)
7. A. Kamio, Structures and Properties of Aluminium, *Japan Institute of Light Metals*, (1991), 248-249
8. N. Apaydin and R. W. Smith, Microstructural Characterization of Rapidly Solidified Al-Si Alloys, *Materials Science and Engineering*, 98 (1988), 149-152
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90144-9)
9. J. F. Ready, LIA Handbook of Laser Materials Processing, Chapter 7 Laser-Material Interaction, *Laser Institute of America*, (2001), 167-204