

Fe계 벌크 비정질 합금을 이용한 레이저 용접층의 파손 거동

임병철¹, 김대환¹, 박상흡^{2*}

¹공주대학교 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Failure Behavior of Laser Cladding Layer used by Fe-based Bulk Metallic Glass

Byung-Chul Lim¹, Dae-Hwan Kim¹, Sang-Heup Park^{2*}

¹Division of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

요 약 본 연구에서는 가스아토마이저로 제조된 Fe계 벌크비정질 합금 분말을 이용하여 제작된 시험편에 레이저 육성용접을 하였고, 인장시험과 경도시험의 실시 및 미세조직을 관찰하여 육성용접 층의 파괴거동을 분석하였다. 인장시험 결과 육성용접층은 탄성변형 후 바로 파괴가 일어났고, 모재는 소성변형 후 파괴가 일어났다. 육성용접층과 모재의 실제 최대인장강도는 각각 955.9MPa과 220.4MPa이다. 육성용접층과 모재의 미소경도는 각각 485.5±21과 197.4±14 이었고, 육성용접층은 매우 높은 경도를 갖는다. 모재는 조대한 결정립을 갖는 미세 구조를 나타내었다. 인장시험 후 파단면을 고분해능주사전자현미경으로 관찰한 결과 육성용접층과 모재의 파괴형태는 각각 취성파괴와 연성파괴를 나타내었다.

Abstract In this study, Fe-based bulk amorphous alloy powder manufactured using gas atomization fabrication was used for laser welding. the fracture behavior of welding layer were analyzed. Tensile test results show that the destruction occurred immediately after the elastic deformation, After plastic deformation of the substrate, the destruction occurred. The actual maximum tensile strength of the welding layer and the substrate are 959.9MPa and 220.4MPa. welding layer were each 485.5±21 and 197.4±21 to the substrate and the actual microhardness, The welding layer has very high hardness. The welding layer showed a very weak fine acicular structure. The base material was shown in the micro structure appear a coarse grain. SEM observations of the fracture after the tensile test. Fracture morphology of the base metal and the welding layer showed ductile fracture and brittle fracture, respectively.

Keywords : Bulk metallic glass, Amorphous, Fe-base alloys, Microstructure

1. 서론

레이저 적용분야의 급격한 증가와 레이저 시스템의 비용감소로 인해, 레이저를 이용한 재료공정은 다양한 산업분야에서 중요성이 증가되고 있다. 자동차, 항공우주, 발전설비, 해양, 방위산업 외에 다른 많은 분야에서 용접, 절단, 표면경화 등에 대해 폭넓게 레이저 기술이 적용되고 있는 중이다. 레이저 기술의 적용분야 중에서, 금속코팅, 고가의 부품수리, 시제품등 심지어 소량생산

과 같은 재료공정을 위한 다양한 잠재성 때문에 최근 몇 년 동안 상당한 관심을 받고 있다.[1-2] 레이저 가공 기술은 고밀도의 열원을 이용한 가공법으로 표면처리 시 입열량이 적어 열영향부가 작고 열변형이 적다는 장점을 가지고 있다.[3-5] 레이저 육성용접은 기저금속 표면에 내마모성, 내식성 및 내열성 등 필요한 성질을 부여하기 위하여 이중금속을 표면사에 부가하면서 레이저 빔을 이용하여 두 재질을 용융시켜 접합하는 공정기술이다.[6-7] 레이저 육성용접은 고밀도의 에너지를 집속시

*Corresponding Author : Sang-Heup Park(Kongju Univ.)

Tel: +82-41-521-9283 email: weldpark@kongju.ac.kr

Received June 3, 2015

Revised August 27, 2015

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

키프로 국부적인 가열이 가능하여 시편 가열부의 온도를 매우 효과적으로 제어할 수 있다. 뿐만 아니라, 입열량이 적고 접합특성이 매우 우수하며 기존의 용사코팅이나 박막코팅의 우수한 특성만을 지닌 접합기술이다. 본 연구에서는 가스아토마이저로 제조된 Fe계 벌크비정질 합금 분말을 이용하여 레이저 육성용접을 하였고, 육성용접층의 파괴거동을 분석하였다.

2. 실험방법

가스아토마이저를 이용하여 Fe계 비정질 합금 분말의 제조하였다. 제조된 분말을 이용하여 레이저 육성용접(Laser cladding)공정으로 인장시험편을 제작하였다. 제작된 시험편을 이용하여 인장시험 및 경도시험을 실시하였고, 미세조직을 관찰하여 Fe계 비정질 합금으로 제조된 육성용접층의 파괴 거동을 분석하였다. 인장시험을 수행하기 위하여 모재는 STS316L을 사용하였고, Fig.1 과 같이 KS 0801에 의거하여 인장시험편을 가공하였다. 시험편의 직경이 19.5mm(단면적 298.5mm²)의 환봉을 19.0mm로 가공한 후 레이저 장비를 이용하여 표면 육성용접을 하였고, 용접 공정 변수는 Table 1에 나타내었다. 육성용접 후 직경이 22.0mm(단면적 208.12mm²)로 인장 시험편 규격에 맞춰 연마가공 하였다. 인장강도 측정 은 만능시험기(SHIMADZU(社), Model:AG-X)를 이용하여 변위 3mm/min로 시험하였다. 경도특성을 알아보기 위하여 시험편의 단면을 비커스경도기(Motutoyo(社), Model:HK-54)를 이용하였고, 하중은 300g으로 측정하였다. 시험편의 미세조직을 평가하기 위하여 광학현미경과 고분해능 주사전자현미경(Field-Electron Scanning Emission Microscope, FE-SEM)을 이용하여 분석하였다.

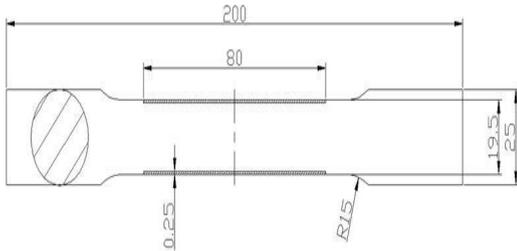


Fig. 1. The specimen of tensile strength

Table 1. Welding conditions for this study

position	Flat
P Set	800.0W
P Aet	800.9W
U Aet	75.7V
I Set	30.6A
Current	60A
Wavelength	910nm~940nm
Lathe feed rate(mm/rev)	3
spindle speeds rotational(rpm)	10
wire feed rate(mm/min)	200

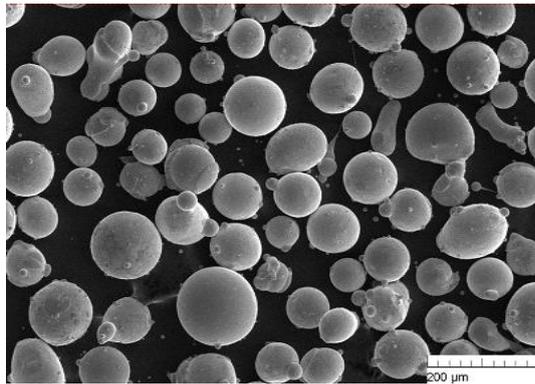


Fig. 2. FESEM image of Fe-base bulk metallic glass powders.

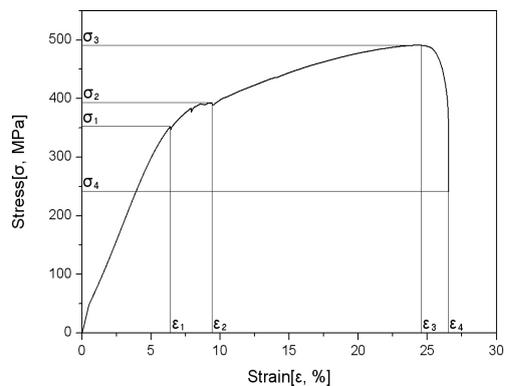


Fig. 3. Typical strain-stress curve of tensile test sample



Fig. 4. Photo of tensile test sample

Table 2. Mechanical properties

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
Tensile strength [Mpa]	352	392.8	491.3	363.2

(a) Tensile strength

	Overlay	Substrate
Hardness[Hv]	485.5 ± 21	197.4 ± 14

(b) Vickers hardness

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 사용된 Fe계 비정질 합금 분말은 고분해능 주사전자현미경으로 분석하였다. Fig. 2는 제조한 분말의 외형과 표면조직을 나타내며, 일반적으로 큰 분말 주위에 아주 작은 분말들이 용착된 소위 위성분말(satellite powder)을 발견할 수 있고, 대부분의 분말이 완전한 구형을 나타내었고, 분말의 크기는 약 70 μ m이었다. 이러한 구형의 입자는 유동성이 매우 좋기 때문에 레이저 용접용으로 적합하다. Fig. 3은 Fe계 비정질 육성용접층의 전형적인 변형률-응력(strain-stress)곡선이다. Fig. 3에 나타나듯이 변형률이 초기 ϵ_0 에서 ϵ_1 으로 증가함에 따라 응력은 선형적으로 증가하였다. 훅의 법칙(Hook's law)에 의하면 응력은 변형이 일어남에 따라 선형적으로 증가되는 것을 탄성변형이라고 정의하였다. 변형률이 ϵ_1 에서 ϵ_2 로 증가함에 따라 인장강도의 증가와 감소가 수차례 일어나는 것을 관찰되었다. 이것은 Fe계

비정질 육성용접층이 파괴가 일어나는데, 시험편 전체에서 파괴가 일어나는 현상을 나타내는 것이다. Fig. 4는 인장시험 후 시험편의 사진을 나타내었다. 그림에 나타나듯이 시험편 전체에서 Fe계 비정질 육성용접층이 파괴가 일어난 것을 알 수 있었고, 이러한 결과와 변형률-응력곡선 결과는 서로 부합된 결과를 나타내었다. 일반적으로 재료가 파괴에 이르기까지 큰 소성변형(plastic deformation)을 동반함이 없이, 균열이 발생하여 그 균열이 상당한 속도로 전파하여 불안정 파괴(unstable fracture)를 일으키는 형식을 취성파괴(brittle fracture)라고 한다. 이론적으로 가장 잘 알려진 취성파괴는 유리의 파괴가 대표적이다. Fe계 비정질 합금의 경우 유리와 비슷한 비정질 결정구조를 갖고 있기 때문에 Fig. 4에 나타난 것과 같이 취성파괴가 일어난 것이다. Fig. 3에서 변형률이 ϵ_2 에서 ϵ_4 로 변형률이 증가함에 따라 응력은 선형적으로 증가하지 않았다. 이것은 모재인 STS316L 스테인리스 스틸의 소성 변형이 일어나는 구역이라고 할 수 있다. STS316L 스테인리스강의 결정구조는 오스테나이트(austenite) 구조로 면심입방결정(FCC)으로 알려져 있다. 면심입방결정구조는 슬립계(slip system)가 많은 결정구조이므로, 소성변형이 잘 일어난다. 따라서 모재의 경우는 변형률이 매우 크게 나타내었다. 이러한 변형률이 큰 재료의 경우 연성파괴(ductile fracture)가 일어난다. Table 2는 모재와 육성용접층의 기계적 특성을 나타낸 것이다. 모재인 STS316L 스테인리스강과 육성용접층인 Fe 비정질 합금층의 미세경도를 측정된 결과 각각 485.5 \pm 21, 197.4 \pm 14 이었다. Fe계 비정질 합금층과 STS316L의 공칭최대인장강도 각각 σ_1 과 σ_3 이다. 하지만 인장시험편은 Fe계 비정질 합금층과 STS316L의 이중층(double layer)로 이루어져 있기 때문에 실질적으로 모재와 코팅층의 최대인장응력을 계산하여야 한다. 육성용접 후의 실질적인 육성용접층과 모재의 단면적은 각각 109.9mm², 188.6mm²로 나타났다. 실질적인 Fe계 비정질 합금층과 STS316L의 진응력을 각각 σ_c 와 σ_s 라고 하면 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_c = \sigma_1 \times \frac{A_{total}}{A_c} \quad (1)$$

$$\sigma_s = (\sigma_3 - \sigma_1) \times \frac{A_{total}}{A_s} \quad (2)$$

여기서 Ac는 육성용접층의 단면적이고, As는 모재의 단면적이다. 따라서 육성용접층과 모재의 최대인장강도는 955.9Mpa과 220.4Mpa이었다. Fe계 비정질 합금의 경우 매우 높은 경도와 인장강도를 갖기 때문에 취성파괴가 일어났고, STS316L의 경우 비교적 낮은 경도와 인장강도로 인하여 연성파괴가 일어난 것이다. 인장시험편의 단면을 광학현미경으로 관찰한 것을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 Fe계 비정질 합금층의 미세조직을 나타낸 것이다. 육성용접층의 미세구조는 침상구조를 나타내었다. 침상 형태는 조직 전체적으로 나타내었고, 크기는 일정하지 않은 형태이다. 침상구조는 매우 높은 취성(brittle)을 나타내는 구조이다. 모재는 오스테나이트 스테인리스강의 전형적인 미세구조로 조대한 결정립 크기를 나타내었다. 조대한 결정립을 갖는 재료는 미세한 결정립을 갖는 재료보다 결정입계(grain boundary)가 적기 때문에 소성변형이 잘 일어난다. 육성용접층과 모재는 확연히 다른 미세구조를 나타내었고, 미세구조 또한 취성파괴 및 연성파괴에 기여하였다. 인장시험편의 파괴의 형태를 관찰하기 위하여 고분해능주사전자현미경으로 관찰하였다. Fig. 6은 인장시험 후 시험편의 파단면을 나타낸 것이다. Fig. 6(a) 육성용접층은 전형적인 취성파괴 형태로 나타났고, Fig. 6(b) 모재부의 인장파단면은 연성파괴형태인 경사파괴(Slant fracture)현상이 나타났다.

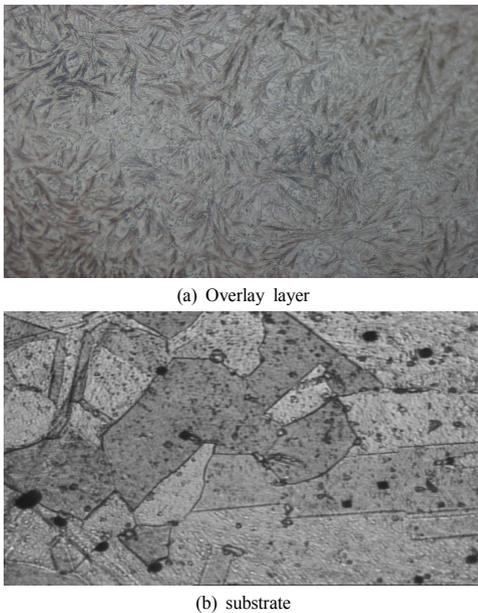


Fig. 5. Microstructures of tensile test specimen

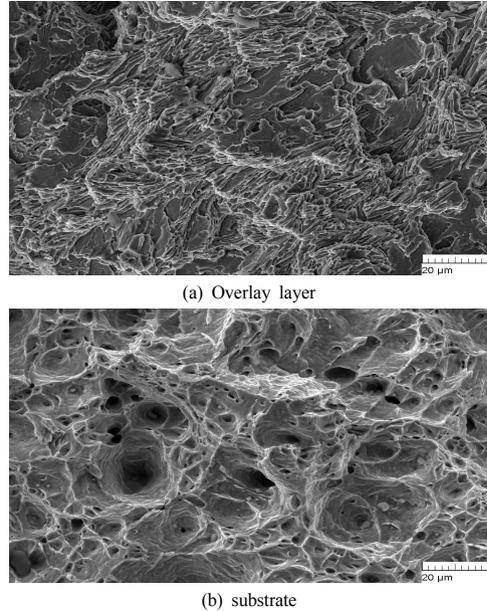


Fig. 6. FESEM images of fracture after tensile test

4. 결론

본 연구에서는 가스아토마이저로 제조된 Fe계 벌크비정질 합금 분말을 이용하여 레이저 육성용접을 하였고, 육성용접 층의 파괴거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인장시험 결과 육성용접층은 탄성변형 후 바로 파괴가 일어났고, 모재는 소성변형 후 파괴가 일어났다. 육성용접층과 모재의 실제 최대인장강도는 각각 955.9MPa과 220.4MPa 이다.
- 2) 육성용접층과 모재의 미소경도는 각각 485.5 ± 21 과 197.4 ± 14 이었고, 육성용접층은 매우 높은 경도를 갖는다.
- 3) 육성용접층의 침상구조로 매우 취약한 미세구조를 나타내었고, 모재는 결정립의 크기는 조대한 결정립을 갖는 미세구조를 나타내었다.
- 4) 인장시험후 파단면을 고분해능주사전자현미경으로 관찰한 결과 육성용접층과 모재의 파괴형태는 각각 취성파괴와 연성파괴를 나타내었다.

References

- [1] Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour Stephen Corbin : Laser Cladding, CRC PRESS LLC, (2005), 1-5.
- [2] Namhyun Kang and Yeongon Yoo : Laser Cladding Technology in Overlay welding, Journal of KWJS, 25-1,7-8, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2007.25.1.007>
- [3] Jahoon Lee, Moohong Suh and Yuhie Han : Laser Cladding, Journal of KWS, 18-2 (2000), 154-162.
- [4] Jaedo Kim et al., : Wire Nd:YAG Laser Cladding for Repair of Parts in Nuclear Power Plant, Journal of KSME, 99F181 (1999), 1057-1062.
- [5] H. I. Kim et al : The Evaluation of Mechanical Properties for Manual Overlay Welding and Laser Cladding, Journal of KSPE, 07A249 (2007), 387-388.
- [6] C. W. Kim and H. G. Suk : Welding Technology Department, Journal of the Korean Institute of Surface Engineering, 27-6 (1994), 359-367
- [7] Guofang Zhou : Mathematical Modeling and Experimental Validation of Diode Laser Cladding with Wire Feeding, (2005), 9-25.

임 병 철(Byung-Chul Lim)

[준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 공주대학교 일반 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>

육성용접, 아크용접

김 대 환(Dae-Hwan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한밭대학교 금속공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 충남대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>

용접시공 및 용접 자동화, 육성용접

박 상 흡(Sang-Huep Park)

[정회원]



- 1984년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 단국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

용접시공 및 용접 자동화, 비파괴 검사