

Nd:YAG 레이저를 이용한 비정질재료의 심(seam) 용접

이 건 상

Seam Welding of Amorphous Metal with Nd:YAG laser

K. S. LEE

국민대학교 자동차공학 전문대학원

ABSTRACT

In this paper, the possibilities and the limits of the laser seam welding were studied to utilize the advantageous properties of amorphous metal foils. For the conventional welding method, the high heat transfer makes the crystallized zone of the work material unavoidable. The laser is able to weld the amorphous metal without a crystallized zone, because heat transfer is limited within a very small restricted volume. The crystallized zone is restricted in the neighbor of welding spot and not in the melting area. This can be proved directly by the etching and indirectly by the tensile shear test, micro hardness test and bending test. The overlapping of welding bead could form the formation of wider and thicker amorphous zone.

Key Words :

Nd:YAG laser, Amorphous metal, Tensile shear test, Micro hardness test, Bending test, Element analysis

1. 서론

비정질 금속은 1960년대 초에 처음으로 제작되어 1970년대 초에 상용화된 제품이 처음으로 시장에 선을 보였다¹⁾. 오늘날 비정질 재료의 생산과 가공은 아직까지 개발이 계속되고 있는데, 이 재료의 사용이 점점 증가추세를 보이면서 재료가공을 위한 접합기술 또한 그 중요성이 증대되고 있다.

비정질 금속은 그 구조나 구성요소에 따라

새로운 특성을 갖고 있다. 예를 들면 구조나 구성성분에 따라 다르지만 매우 높은 강도, 연성, 내부식성 또는 특이한 자기적 성질을 나타낸다. 비정질 금속은 매우 유연하고 경도가 높고, 특히 인장응력에 강하다. 그러나 생산기술에 기인한 기하학적인 특성으로 인하여 비정질 금속은 재료의 두께가 매우 얇고, 재료 표면 중 한 면이 공기 중에서 자유 냉각되므로 두께의 공차가 비교적 크다는 점 등의 특성을

가지므로 기계적인 응용분야에서는 활용하기에 어려운 실정이다. 그러나 다른 한 편으로는 얇은 금속박판을 용융체로부터 직접 생산할 수 있는 생산기술의 개발로 인해 압연기술로는 가공이 불가능한 경납접 또는 연납접에 사용되는 박판을 생산해 낼 수 있다. 기계산업 분야에서 새로운 적용분야가 확대되는 것은 내마모성과 내부식성을 갖추고 경도가 높고 양호하게 결합되어 있는 비결정질 입자를 포함한 비정질 금속박판을 생산해 낼 수 있다는 데에 기인한다^{2,3)}. 또한 고품질의 용접을 가능하게 하는 기술을 개발할 수 있으면 매우 강한 구조물을 최소한의 무게로 생산할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 상용의 비정질 박판을 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 용접 가공을 통해 비정질 재료의 특성을 유지하면서 두께를 증가시키는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 본론

2.1 실험방법 및 실험재료

펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 심 용접(seam welding)은 일련의 용접점들을 서로 겹치게 하여 용접을 수행하는 것이다. 용접용 시편은 비정질 박판을 50mm 길이로 절단하여 준비하였으며, 박판 2장을 20mm의 길이로 겹치게 하여 용접하였다(Fig. 1). 비정질 박판은 박판 생산용 롤러와 접촉한 매끈하고 광택이 있는 면과 공기와 접촉한 광택이 없는 면의 두 가지 서로 다른 표면으로 구성되어 있다.

본 실험에서는 레이저 빔의 반사를 줄이기 위해 광택이 없는 면에 레이저 빔을 조사하였다. 비정질 재료는 상용으로 생산된 Cobalt base의 비정질 금속박판(Vitrovac 6025F, Vacuumschmelze GmbH)⁴⁾을 사용하였다. 이 재료는 Co69.3/Si7.9/Mo6.3/Fe3.5/Nb2.6/B10.4

(질량비)로 구성되어 있다. 이 박판은 폭 25mm, 두께 25 μ m이고, 길이는 수 백m에 달하는 롤러형태로 공급되는데 임의의 길이로 절단하여 사용할 수 있다.

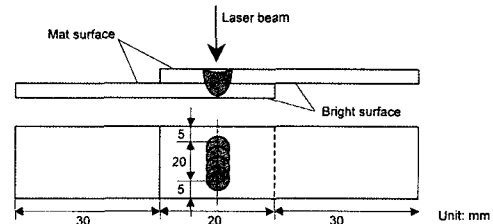


Fig. 1 Geometry of specimen for tensile shear test

용접 시 작업변수는 균열과 스패터(spatter) 발생을 최소화하도록 설정하였으며, 충분한 용접부의 발생을 추구하였다. 경우에 따라 발생할 수 있는 결정영역은 시편의 표면을 식각(etching)시켜 증명하였다. 이때 사용된 식각액은 H₂O/glacial acetic acid/nitric acid/hydrochloric acid를 부피비율 1:1:1:4로 혼합하여 사용하였으며, 시편을 식각액에 30초간 담갔다가 증류수로 세척한 후 1시간 후에 관찰하였다. 용접된 비정질 박판의 기계적 특성은 인장시험, 미세경도시험 및 굽힘시험을 통하여 고찰하였다.

펄스주파수는 30에서 70Hz까지 변화시켰으며, 이때 펄스에너지(28mJ), 펄스길이(0.1ms), 초점위치(-0.94mm) 및 이송속도(500mm/min)는 일정하게 유지하였다. 펄스길이를 0.1ms로 유지한 이유는 열영향 시간이 길어짐에 따라 용접부의 결정화 경향이 매우 급속하게 증가하기 때문에 사용된 장비(Type LAY 50K, HAAS-LASER GmbH)에서 선택 가능한 최소의 펄스길이를 선택하였기 때문이다. 육안검사에 의하면 초점위치 -0.94mm에서는 스패터의 발생이 매우 적었으며 천공효과는 발생하지 않았다. 이송속도 500mm/min에서 실험한 펄스주파수 구간에서는 표면에 용융부의

겹침이 발생하지만, 이것은 겹쳐진 두 박판의 사이에서도 항상 용융부가 겹치는 것을 의미하는 것은 아니다.

펄스주파수의 변화는 구간에너지와 겹침 정도의 변화를 의미한다. 이러한 겹침을 표현하기 위해 겹침 정도를 다음과 같이 정의하였다(Fig. 2).

$$O_g = O_L / D_w$$

이때 O_g = 겹침 정도, O_L = 겹침 길이, D_w = 용융부 직경을 의미한다.

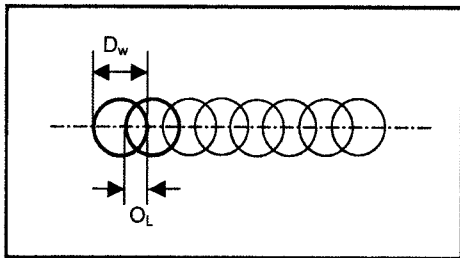


Fig. 2 Definition of overlapping grade

Table 1에서는 실험에 사용한 변수영역을 나타내고 있다. 심 용접에서는 열영향부의 결정화 가능성이 점 용접(spot welding)에서 보다 증가하는데, 이것은 에너지 공급의 시간이 길어져서 그에 따른 냉각효과가 감소하기 때문이다.

Table 1 Parameters for welding test with pulse frequency variation

Parameter	Setting value				
Pulse frequency [Hz]	30	40	50	60	70
Pulse distance [ms]	33.3	25	20	16.7	14.3
Distance energy [J/mm]	0.100	0.134	0.168	0.202	0.235
Welding point distance [mm]	0.28	0.21	0.17	0.14	0.12
Overlapping grade [%]	0	16	33	44	52
Pulse energy [J]	0.028				
Pulse duration [ms]	0.1				
Power intensity [W/cm ²]	2.1×10^5				
Feed speed [mm/min]	500				
Welding point diameter [mm]	0.25				
Defocus [mm]	-0.94				

2.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3에서는 용접비드와 열영향부를 식각시킨 표면을 나타내고 있다. 열영향부에서는 결정화된 영역을 분명하게 인식할 수 있다. 결정형성은 용접비드의 주위에서 균일한 분포를 보이고 있는데, 이는 다음 번 레이저 펄스에 의해 형성된 새로운 열영향에 의해 열전달이 지체되었기 때문이다. 그러나 용접점의 단면을 살펴보면 용접점의 내부에서는 결정영역이 전혀 발생하지 않았음을 알 수 있다(Fig. 4 참조). 펄스주파수 30Hz (Fig. 3a)에서는 용융점이 겹치지 않고 일정한 거리를 유지하여 일련의 용융점을 형성하고 있기 때문에 이 경우는 실제로는 점 용접 상태이다. 용융점의 사이 영역에서는 열영향부가 겹치게 되고 더 긴 시간 동안 열에 의해 부하를 받게 된다. 이에 따라 결정영역의 형성뿐만 아니라, 많은 미세균열이 형성되어 tensile shear force를 감소시킨다(Fig. 6 참조). 펄스주파수 40~70Hz (Fig. 3b~3e)에서는 펄스주파수가 증가함에 따라 용접점들이 겹치게 되고, 결정형성영역이 뚜렷하게 증가함을 알 수 있다. 그러나 용접점들이 겹친 바로 그곳에서는 결정형성이 발생하지 않았는데, 이는 이전 펄스에 의해 발생된 결정영역이

다음 번 펄스에 의해 다시 용융되고 급속하게 냉각되어 이미 형성된 결정이 사라진 것으로 생각된다. 따라서 용접비드 바깥쪽에서는 결정이 형성되나, 안쪽에서는 결정이 형성되지 않으므로 비교적 넓은 면적에 걸쳐 결정이 형성되지 않는 용융부를 형성시킬 수 있는 가능성이 존재한다. 펄스주파수 40Hz에서는 결정영역이 겹침영역 주위에 집중되어 있으며, 나머지 영역(용접점 둘레)에서는 좁은 띠모양의 결정영역만을 나타내고 있다. 펄스주파수가 증가함에 따라 이러한 좁은 결정영역은 두꺼워져서 결국 띠의 형태를 띤 두꺼운 결정영역을 형성하게 된다. 실험에 사용된 펄스주파수 30~70Hz 중에서 40Hz인 경우에 결정영역이 가장 적게 형성되었으며, 균열발생도 없었다.

Fig. 4에서는 펄스주파수 40 Hz 일 때의 용접점의 단면을 나타내고 있다. 용접비드의 표면과 단면에는 동일한 식각액을 사용하였다. 단면을 살펴보면 용접점 내부에서는 결정영역이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 따라서 결정형성은 시편의 표면에만 국한되는 것이며, 용접점 내부로는 결정이 성장하지 않았음을 증명하는 것이다.

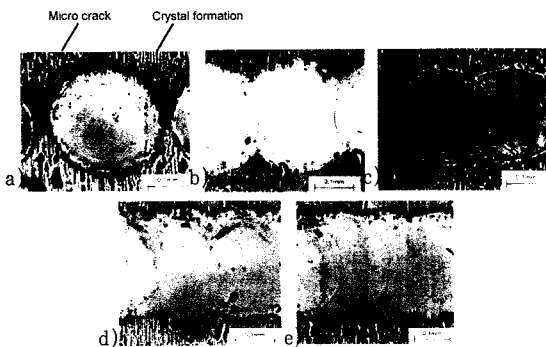


Fig. 3 Welding surface with pulse frequency variation after etching : a) 30Hz, b) 40Hz, c) 50Hz, d) 60Hz, e) 70Hz

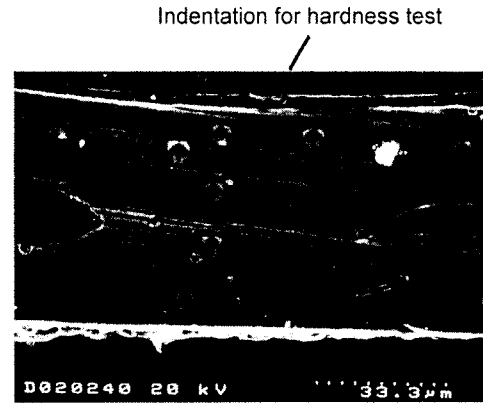


Fig. 4 Photomicrograph of welding bead cross section with pulse frequency 40Hz

Fig. 5에서는 펄스주파수 50Hz일 경우 결정영역에 분포되어 있는 성분을 분석한 line scan결과를 나타내고 있다. 분석장비의 특성상 4가지 성분(Co, Fe, Si 및 Mo)만의 분석이 가능하였으며, 열영향부, 결정형성영역 및 용융부를 분석하였다. 결정형성영역(그림에서 화살표 1과 2 사이)에는 주변의 열영향부와 용융부보다 더 많은 Si 성분이 포함되어 있다. 이는 Si가 합금성분 중에서 가장 낮은 용융온도를 가지므로 용융상태에서 가장 오랜 시간 노출되어 결정형성에 충분한 시간을 확보하게 되기 때문인 것으로 생각된다.

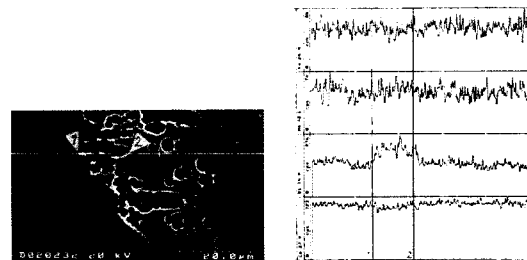


Fig. 5 SEM and element analysis of crystal forming zone (pulse frequency 50Hz)

Fig. 6에서는 tensile shear force와 펄스주파수 사이의 관계를 나타내고 있다. 펄스주파수

40Hz(접침정도=16%)에서 최대 tensile shear force는 120N에 도달하였다. 이때 결정형성은 접침 영역에 국한되어 있으므로 최대값을 나타내며, 펄스주파수가 증가함에 따라 tensile shear force는 감소되어 70Hz에서 약 20N의 최소값을 나타내고 있다. 이러한 tensile shear force의 감소한 것은 펄스주파수가 더 작은 경우(30Hz)에는 접침정도가 작고 용접점 사이에 발생한 미세균열에 의한 것이며, 펄스주파수가 더 큰 경우(50~70Hz)에는 구간에너지의 증가로 인한 결정형성의 증대에 의한 것으로 생각된다.

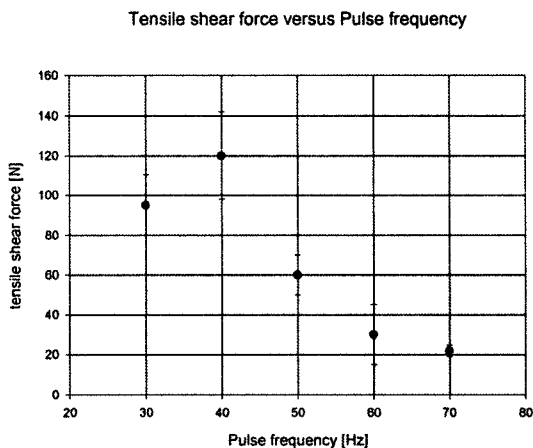


Fig. 6 Relationship between tensile shear force and pulse frequency

Fig. 7에서는 펄스주파수 40Hz일 때 tensile shear test 후의 파괴부위를 나타내고 있다. 파괴는 결정형성 부위에서 시작하여 한 방향으로는 모재 방향으로 발전하고 있으며, 다른 한 방향으로는 용접비드의 중앙부를 관통하여 발생되어 있다. 파괴가 모재 방향으로 발전한 이유는 결정형성 영역이 주변의 다른 결정형성 영역과 연결되어 있지 않기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 7에서 오른쪽 사진은 왼쪽 사진의 일부를 확대한 것이다.

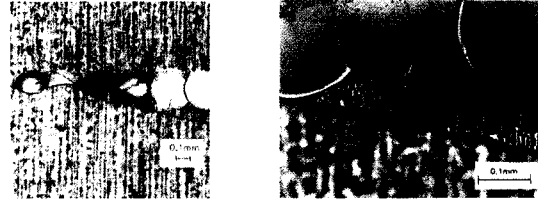


Fig. 7 Fracture zone after tensile shear test (pulse frequency 40Hz)

Fig. 8에서는 용접비드와 열영향부에서의 최소 굽힘 직경(파괴 발생 없이)을 나타내고 있다. 펄스주파수가 증가함에 따라 굽힘직경이 증가하고 있음을 알 수 있다. 실제적으로 심 용접이 이루어진 펄스주파수 40Hz에서는 1.8mm의 최소 굽힘직경을 나타내며, 70Hz에서는 2.5mm를 나타내고 있다. 용접 전의 모재를 굽힘시험한 결과 약 1mm의 최소굽힘직경을 나타내는 것을 보면, 용접 후의 시편은 상대적으로 상당히 작은 값을 보여주고 있다. 그러나 측정값의 편차는 펄스주파수가 증가함에 따라 증가하고 있는 것으로 나타나고 있는데, 이는 용접점 주변에 발생한 결정형성영역의 증가에 의한 것으로 생각된다.

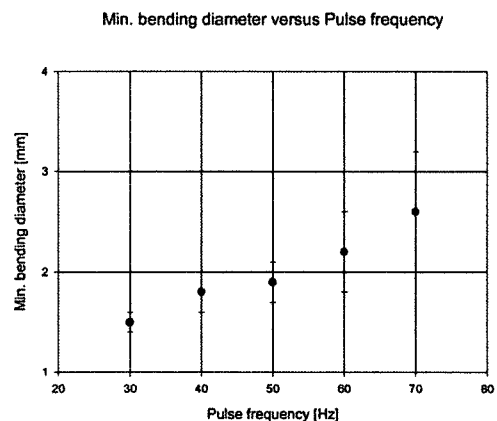


Fig. 8 Relationship between min. bending diameter and pulse frequency

Fig. 9에서는 굽힘시험 후의 파괴부위를 나타

내고 있다. 조사된 펄스주파수영역에서 모든 파괴부위는 용접비드의 중앙이 아니라 열영향부에 위치하고 있는데 이러한 사실은 용접점이 비정질임을 간접적으로 증명하고 있는 것이다.

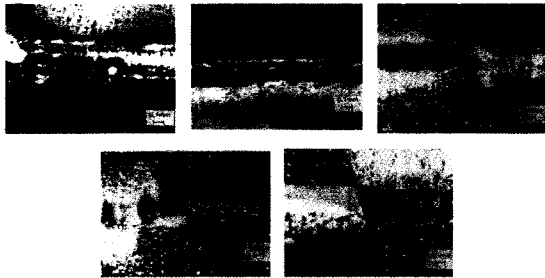


Fig. 9 Fracture zone after bending test
a) 30Hz, b) 40Hz, c) 50Hz, d) 60Hz, e) 70Hz

Fig. 10에서는 펄스주파수 40Hz일 경우의 용접비드에 대한 미세경도시험의 결과를 나타내고 있다. 측정된 모든 경도값은 800~1050 HV 0.01의 범위에 존재하는데, 이는 모재의 경도와 일치하는 값이다. 이러한 사실은 용접비드에는 결정이 형성되지 않았음을 간접적으로 증명하는 것이다.

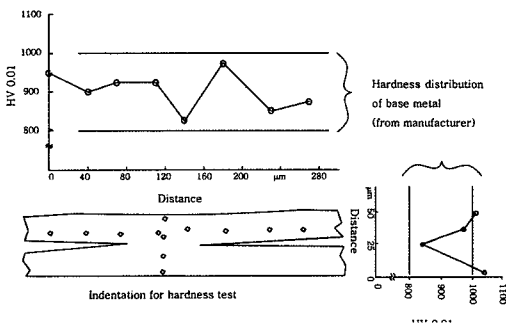


Fig. 10 Hardness distribution of welding bead with pulse frequency 40Hz

3. 결론

본 논문에서는 Nd : YAG 레이저에 의한 비정질 박판의 심 용접을 수행하였는데, 용접부위가 결정형성을 최대한 회피하면서 비정질

특성을 유지하도록 하는 것이며, 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 비정질 금속 박판 두 장(겹쳐진 두께 : 50m)을 겹치기 용접한 결과, 용융부에서는 비정질 특성이 그대로 유지되었으며, 열영향부에만 결정이 형성되었다. 이렇게 형성된 결정은 시편의 표면에만 존재하는 것으로서, 용융점의 내부에서는 발견되지 않았다.
- 2) 결정형성영역은 펄스주파수가 증가함에 따라 증가하였으며, 이러한 결정이 파괴의 시작점으로 작용하고 있다. 결정형성을 증명하기 위해 시편을 식각시켜 관찰하였으며, 결정형성영역의 성분을 분석하였다. 성분분석 결과 결정형성영역에는 주위보다 더 많은 Si 성분이 포함되어 있다. 기계적 특성을 관찰하기 위해 tensile shear test, 미세경도시험, 굽힘시험 등을 수행하였는데, 그 결과 용융부에는 결정이 형성되지 않았음이 간접적으로 증명되었다. 특히 경도시험 결과 용융부는 모재와 거의 동일한 값을 나타내고 있다.

참고문헌

1. Dorn, L., Lee, K.-S., Jafari, S., Hüner, T., Laserschweißen amorpher Metalle, 6. Internationales Kolloquium Verbindungstechnik in der Elektronik, Fellbach, DVS-Berichte 141, pp.103-106, 18. bis 20. Feb. 1992.
2. Lee, K.-S., Untersuchung des Absorptionsvorganges und der Schweißqualität beim Laserschweißen von amorpher Co-Si-Mo-Fe-B-Legierung, Dissertation, TU Berlin, 1993.
3. H.W. Schläpfer, R. Goetz, E. Bille, W. Straub, Verschleißbeständige und abrasive Glasmittel-Folien, Technische Rundschau Sulzer, pp.7-12, 1/1990.

4. N.N., Amorphe Metalle VITROVAC,
Firmenschrift, Vacuumschmelze GmbH,
Hanau.