

**研究論文**

# 극저온 환경하에서 레이저 용접된 비결정질 재료의 특성에 관한 연구

이 건 상\*

## Investigation of the Properties of Laser-Welded Amorphous Metal in a Deep Frozen Environment

K. S. Lee\*

**Key Words** : Laser Beam Welding (레이저빔 용접), Nd:YAG Laser (Nd:YAG 레이저), Amorphous Metal (비결정질 금속), Deep Frozen Environment (극저온 환경), Welding Process Parameter (용접변수)

### Abstract

For the conventional welding method, the high heat transfer makes the crystallization of the work material unavoidable. Whereas the laser is able to weld the amorphous metal without a crystallized zone, because heat transfer is limited within a very small restricted volume. In this paper, the possibilities and the limits of the laser welding in a deep frozen environment by liquid nitrogen were studied to utilize the advantageous properties of amorphous metal foils. The author investigated, after laser welding in a deep frozen environment with a solid state laser (Nd:YAG-laser), the achievable strengths and the influences of the laser beam parameters on the strengths.

### 1. 서 론

비결정질 금속은 그의 구조나 구성요소로 인하여 사용자에게 유리한 특성의 조합을 갖고 있다. 예를 들면 구조나 구성성분에 따라 다르지만 매우 높은 강도, 연성, 내부식성 또는 특이한 자기적 성

질을 나타낸다. 비결정질 금속은 유연하고 매우 경도가 높고, 특히 인장응력에 강하다. 그러므로 처음에는 무엇보다도 기계적인 응용에 대하여 연구를 하였다. 그러나 생산기술에 기인한 기하학적 특성으로 인하여 비결정질 금속은 기계적인 응용분야에서 아직까지 돌파구를 찾지 못하고 있는 실정이다. 여기서 기하학적 특성이란 재료의 두께

\* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

가 매우 얇고, 재료표면 중 한 면이 공기 중에서 자유냉각되므로 두께의 공차가 비교적 크다(예를 들어 본 연구에 사용된 재료의 경우, 두께 약 25  $\mu\text{m}$  일 때 두께 편차는 최대  $\pm 5 \mu\text{m}$ 에 이른다)는 점 등이다. 그러나 다른 한 편으로는 얇은 금속박판을 용융체로부터 직접 생산할 수 있으므로, 압연기술로는 가공이 불가능한 경납접 또는 연납접에 사용되는 박판을 생산해 낼 수 있다. 또한 매우 우수한 연자성거동을 소유하면서도 내마모성이 요구되는 기계적 분야 등에서 그 적용이 활발히 진행되고 있다. 이러한 요구를 만족시키는 합금들은 대략 Fe-Ni-Co 성분이 70~85%, 그리고 Si-B-P 성분이 15~30%의 구성으로 되어있다. 여기서 Fe, Ni, Co는 자기적 성질을 유지하는 성분으로 작용하고, Si, B, P는 비결정질 구조를 안정시키는 역할을 담당하고 있다<sup>1)</sup>.

오늘날 비결정질 금속은 자기적인 분야에 가장 흔히 사용되고 있는데, 이는 일반 금속재료들이 자기적으로는 연성이지만 기계적으로는 취성인데 반하여 "자기적으로는 연성이고 기계적으로는 강하며 또한 소성변형이 가능한" 독특한 특성 때문인 것이다<sup>1)</sup>.

그러나 비결정질 합금은 높은 냉각 속도가 요구되는 제한된 생산 조건으로 인하여 특정한 형태(예를 들어 박판, 가는 선 또는 분말)로만 생산이 가능하다. 비결정질 금속이 갖고 있는 유리한 특성을 복잡한 구조물에 더욱 잘 활용할 수 있기 위해서는, 이 재료의 생산조건을 향상시키는 연구와 함께, 제조기술의 한 분야인 접합 가능성에 대한 연구도 진행되어야 한다.

예를 들어 고품질의 용접을 가능하게 하는 기술을 개발할 수 있으면 매우 강한 구조물을 최소한의 무게로 생산할 수 있게 된다. Fig. 1은 이러한 비결정질 금속 박판을 이용한 관(管)의 단면과 별집모양의 단면을 보여주고 있다<sup>1)</sup>. 또한 비결정질 금속박판은 인장력을 측정하는 센서에는 사용되고 있으나, 압축력을 지탱할 수 없으므로 압축력을 측정하는 센서로는 사용될 수 없다. 그러나 큰 두께를 가진 비결정질 재료를 생산할 수 있으면, 압축력을 측정하는 센서에도 사용될 수 있다.

재료의 합금조성에 따라 다르나, 본 연구에서 사용된 Cobalt base 합금의 경우에는, 실온 환경에서 100  $\mu\text{m}$  이하의 두께에서는 결정구조의 생성없

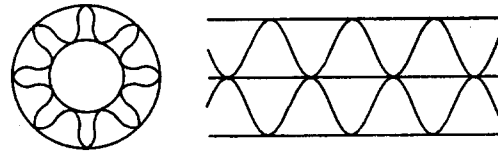


Fig. 1 비결정질 금속 박판을 이용한 관(管)의 단면과 별집모양의 단면

이 용접이 가능하다는 것이 증명되었으나, 두께 100  $\mu\text{m}$  이상의 비결정질 재료를 용접할 경우에는 용접 가공 후 재료의 용접부위에 결정구조가 생성되는데 이는 피할 수 없는 일이다<sup>2)</sup>. 따라서 이러한 결정구조의 생성을 회피하거나 (또는 최소한도) 감소시키기 위해서 극저온환경에서의 레이저 용접가공을 연구하였다.

비결정질 금속재료의 접합시에는 접합가공 중에 발생하는 열에 의해 모재의 특성이 바뀔 수 있다는 점에 주의하여야 한다. 재결정온도 영역에서는 모재의 비결정질 상태가 결정구조로 변화하기 때문에, 모재가 갖고 있던 유리한 특성들을 잃어버릴 수 있다. 따라서 비결정질 합금을 접합할 때에는 비결정질 상태의 유리한 특성들을 그대로 유지시킬 수 있는 특정한 방법이 필요하게 된다<sup>2)</sup>.

이에 적합한 접합방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 그 하나는 접합시에도 모재의 온도가 재결정온도 이하로 유지될 수 있는 방법이다. 이러한 방법으로는 접촉제에 의한 이음, 납접, 상온압접, 폭발용접 및 초음파용접 등을 들 수 있다. 박판을 겹쳐서 접착이음시킬 때에는 적절한 접착제와 공정을 사용하면 우수한 전단인장강도를 얻을 수 있으나, 박판을 서로 벗기는 형태로 분리시킬 때에는 매우 약한 결합강도를 갖게 된다<sup>3)</sup>.

비결정질 금속박판은 납접에 의해서도 접합할 수 있는데, 이 경우에는 결정구조의 생성을 피하기 위해 주로 연납을 사용하게 되므로, 특히 고온에서의 강도가 매우 약한 결합이 발생하게 된다<sup>2)</sup>. 상온압접은 접합되는 두 재료의 강력한 소성변형에 의해 이루어지는데, 여기서 두 재료는 거의 원자간 거리까지 가깝게 되고, 이에 따라 금속결합을 형성하게 된다. 이 방법의 전제조건은 재료가 매우 우수한 소성변형성을 가져야 한다는 것이다. 그렇지 못할 경우에는 충분한 접합이 이루어지기 전에 이

미 균열이 발생할 수 있다는 것이다<sup>4)</sup>. 폭발용접에서는 용접할 두 재료가 매우 고속(200~500 m/s)으로 원자간 간격까지 가깝게 된다. 비결정질 금속박판은 매우 고압 하에서 소성변형을 겪을 수 있으므로, 박판 사이에는 매우 강한 접합이 형성된다. 그러나 용접시에 발생하는 높은 기계적 하중에 의한 찢어짐을 방지하기 위해서는, 용접 가능한 재료의 면적은 약 200 mm<sup>2</sup>으로 제한되게 된다. 초음파용접의 문제점은 용접 시에 발생하는 열을 충분히 신속하게 방출시키기가 어렵다는 것이다<sup>3)</sup>. 그 외에도 용접 중 재료에 발생하는 높은 기계적 하중에 의한 균열발생의 가능성이 존재한다. 또 다른 단점으로는 transducer의 마모가 매우 크다는 것을 들 수 있다<sup>2)</sup>.

또 다른 하나의 접합방법은 접합시 모재의 온도가 재결정온도 이상으로 상승하더라도, 발생한 열을 신속히 방출시켜 결정구조의 생성을 억제하는 것이다. 여기에는 저항용접, 레이저빔 용접, 전자빔 용법 등을 들 수 있다. 저항용접에서는 용접부 위만을 제한적으로 용융시킬 수 있다. 용접시간이 0.4 ms부터 1.4 ms 사이(합금조성에 따라 달라짐)에서는 결정구조가 형성되지 않았다. 그러나 용접 시간을 길게 하면 결정구조가 생성된다. 이 방법의 문제점으로는 weld nugget 형성의 반복성이 매우 불량하다<sup>3, 5, 6)</sup>는 것과 전극의 소모가 매우 크다는 것을 들 수 있다.

앞서 언급한 접합방법들과는 반대로, 용융에 의한 접합방법에서는 겹치기용접 뿐만 아니라 맞대기용접도 가능하다. 그러나 비결정질 금속재료의 용융접합에는 용접부위에 다시 비결정질상태가 형성되기 위해서는 용접부위가 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> K/s의 속도(비결정질 상태가 형성되기 위한 임계 냉각속도로써 합금의 조성에 따라 달라짐)로 냉각되어야 한다는 전제가 존재한다. 또한 재결정온도 이상으로 가열되는 열영향부(HAZ)는 위의 조건에 상응하는 속도로 가열 및 냉각되어야 한다. 그런데 바로 이 열영향부는 일반적으로 용융부보다 가열 및 냉각 속도가 작기 때문에 결정구조 생성의 위험이 존재하는 곳이다. 위와 같은 높은 가열 및 냉각속도를 얻을 수 있는 용융접합방법의 수는 매우 적는데, 이와 같은 접합방법으로는 특히 전자빔 용접과 레이저빔 용접을 들 수 있다<sup>2)</sup>.

레이저빔 용접은 전자빔 용접에 비해, 특히 박

판가공에 있어 생산성과 경제성에서 우월한 특징을 지니고 있다. 그 이유는 무엇보다도 레이저빔 용접에는 진공실이 필요하지 않다는 데에 있다. 레이저빔 가공에서는 짧은 pulse duration 또는 빠른 용접속도에 의해서, 비결정질 구조를 생성시키거나 보존하는 데에 필수적인 충분히 높은 냉각속도를 발생시킬 수 있다. 또한 두 개의 롤러를 사용하여 두 개의 박판 사이에 시임(seam) 용접을 연속적으로 수행할 수도 있다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치 및 재료

비결정질 금속재료의 용접에 사용된 장치는 액체질소를 사용하여 극저온 환경을 유지할 수 있는 Teflon 용기와, 용접시에 재료를 고정시킬 수 있는 고정장치로 구성되어 있다 (Fig. 2).

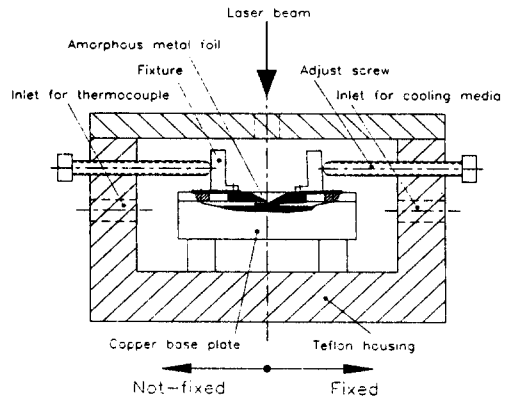


Fig. 2 비결정질 금속박판의 레이저빔 용접을 위한 실험장치

실험에 사용된 레이저 장비는 Nd:YAG laser system (Type LAY 50K, HAAS-LASER GmbH) 과 3축 CNC table (Type unipos-s 800f, Manfred Föhrenbach GmbH) 이다. CNC table의 위치 및 반복정밀도는 1 μm 이하이다. 사용된 레이저의 사양 중에서 중요한 것으로는 파장 1.064 μm, 작업렌즈의 초점거리 100 mm, 초점위치에서의 빔의 직경 약

50  $\mu\text{m}$ , pulse duration 0.1 ms ~ 10 ms, pulse frequency 최대 300 Hz, 평균출력 최대 50 W 등을 들 수 있다.

실험용 재료로는 상용으로 구입할 수 있는 Cobalt base의 비결정질 합금 박판(Vitrovac 6025 F, Vacuumschmelze GmbH)을 사용하였다. 이 재료의 조성은 Co69.3/ Si7.9/ Mo6.3/ Fe3.5/ Nb2.6/ B10.4 wt%로 되어 있으며, 이 박판의 폭은 25 mm이고, 두께는 25  $\mu\text{m}$ 이다. 길이는 melt spinning process에 의해 생산되어 수 십 m 이상에 이르므로, 필요한 크기로 절단하여 사용할 수 있다. 사용된 재료의 주요 특성으로는 탄성계수 약 150 kN/mm<sup>2</sup>, 인장강도 1,500~2,000 N/mm<sup>2</sup>, 비커스 경도 HV<sub>0.2</sub> 800~1,000, 재결정온도 210 $^{\circ}\text{C}$  등을 들 수 있다<sup>7)</sup>. 상용의 비결정질 합금은 이 외에도 Nickel base와 Iron base가 있는데, 이것들은 Cobalt base보다 일반적으로 더 큰 임계 냉각속도를 갖고 있으며, 예비실험을 통하여서도 비결정질 상태의 유지가 매우 어렵다는 것이 입증되었으므로 임계 냉각속도에 덜 민감한 재료를 실험재료로 선택하였다.

## 2.2 용접실험

실온 환경에서의 용접시 결정구조 생성의 가부를 결정하는 조건으로는 두께 100  $\mu\text{m}$ 를 들 수 있다. 즉 재료의 두께가 100  $\mu\text{m}$  이상이 되면 결정구조의 생성은 피할 수 없다<sup>2)</sup>. 4개의 비결정질 금속 박판(두께 100  $\mu\text{m}$ )을 실온 환경하에서, 그리고 liquid nitrogen에 의한 극저온 환경 하에서 점용접 실험을 수행하였다. 여기서 극저온 환경이라 함은 용접 재료의 온도를 약 -140 $^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지함을 의미한다. Liquid nitrogen의 이론적 온도는 이보다 훨씬 낮으나, liquid nitrogen을 Teflon 용기에 주입하고 나면 빠른 속도로 기화되어 주변으로 방출되므로 이론적인 liquid nitrogen의 온도를 유지할 수는 없었으나, 실험시의 용접부위의 주변온도는 -130 $^{\circ}\text{C}$ 에서 -150 $^{\circ}\text{C}$  사이로 유지될 수 있었다. 용접 재료와 Teflon 용기 내부의 온도는 Thermocouple을 사용하여 실험시의 온도 변화를 지속적으로 감시하였다. 용접 조건으로 극저온 환경을 사용한 이유는 용접시에 가해진 레이저 빔에 의하여 발생된 열이 가급적 빠른 속도로 주변 환경

으로 방출되도록 하기 위함이었다.

용접 조건을 최적화(결정구조의 발생 억제)하기 위하여, 재료가 열영향을 가급적 적게 받도록 짧은 pulse duration과 적은 pulse energy를 갖는 레이저빔 변수를 선정하였다. 레이저빔 변수 중에서 laser power intensity와 laser pulse duration은 용접 가공된 점의 결합 강도에 결정적인 영향을 준다. 여기서 laser power intensity는 다시 초점위치와 laser energy에 의해 변화한다. 이러한 영향 인자들이 두께 25  $\mu\text{m}$ 의 비결정질 금속 박판의 겹치기용 접에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 발생된 결정구조는 용접 부위를 부식시켜서 확인하였고, weld nugget의 결합 강도는 전단인장시험을 통하여 조사하였다. 전단인장시험에서는 겹치기용접된 4개의 금속박판을 가장 위의, 가운데의, 그리고 가장 아래의 weld nugget에 대하여 전단인장력을 측정하였다 (Fig. 3). 전단인장시험에 의한 파괴면은 부식시켜 광학현미경을 사용하여 관찰하였다. 결정구조 생성을 확인하기 위하여 결정구조 영역만을 선택적으로 부식시킬 수 있는 부식액을 사용하였다. 사용된 부식액으로는 H<sub>2</sub>O/glacial acetic acid/nitric acid/hydrochloric acid를 부피 비율 1:1:1:4로 혼합하여 사용하였다. 시편을 이 부식액에 30초간 담갔다가 증류수로 세척한 후, 1시간 후에 관찰하였다.

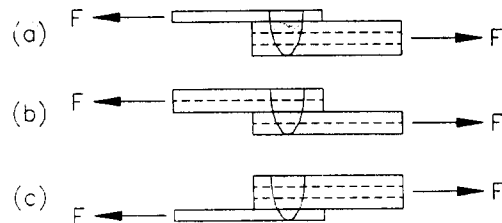


Fig. 3 전단인장시험시의 세 가지 시험 종류;  
(a) 가장 위, (b) 중간, (c) 가장 아래

## 3 실험결과 및 고찰

실온 환경하의 용접에서는 pulse energy는 80 mJ, pulse duration은 0.11 ms(사용된 레이저 시스템의 최소 pulse duration은 0.1 ms)로 일정하게 유지하고, 초점위치는 -0.9 mm에서 -0.75 mm까지

변화시켰다. 여기서 음(negative)의 초점위치는 레이저 빔의 초점위치가 용접재료의 표면 아래에 위치함을 의미한다. 초점위치 < -0.9 mm인 영역에서는 박판들이 모두 완전하게 용접되지는 못하였으며, 초점위치 > -0.75 mm인 영역에서는 매우 다량의 spatter가 발생하여 용접표면에 깊은 구멍이 생성되었다. 이렇게 용접표면에 깊은 구멍이 발생하는 경우에는 가장 위에 위치한 박판이 그 아래의 박판들과 제대로 결합되지 못하거나, 결합된 경우에도 매우 약한 결합강도를 나타내게 된다.

Fig. 4에서는 실온 환경하에서 용접된 박판을 전단인장시험한 결과, 초점위치에 따른 전단인장력을 보여주고 있다. 전체 실험영역에 걸쳐서 가장 위의 박판이 가장 큰 전단인장력을, 가장 아래의 박판이 가장 작은 전단인장력을 나타내고 있다. 그 이유는 레이저 빔이 그것의 기하학적 형상에 의해, 가장 위의 박판에는 최대의 결합면적을, 가장 아래의 박판에는 최소의 결합면적을 생성시키기 때문이다. 용융점의 크기는 전단인장시험을 수행하기 전에 측정하였는데, 가장 위에 위치한 박판에서의 용융점은 약 0.39 mm의 지름을 나타냈으며, 결정구조는 용접부위로부터 약 0.03 mm의 폭에 걸쳐 형성되었다.

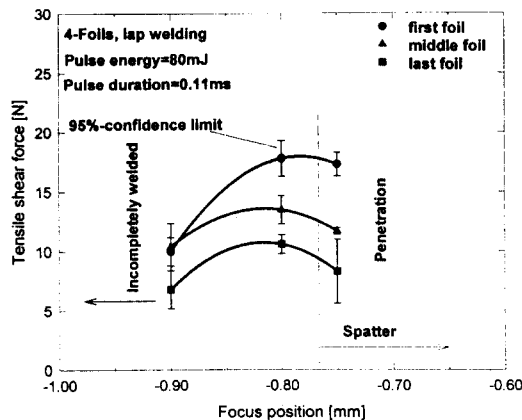


Fig. 4 실온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장시험시 초점위치와 전단방법에 따른 전단인장력의 변화

위와 동일한 레이저빔 변수를 사용하여 극저온 환경하에서의 용접 실험을 수행하였다. 이때에는

실온 환경과는 전혀 다른 양상의 용융체 유동 및 응고현상이 존재함을 유추할 수 있다. 이러한 유추는 용접 후에 용접부위를 관찰하고, 단면을 관찰함으로써 가능하였다. 박판 4장의 두께 (100 μm)로는 용융체의 유동현상을 관찰하기 어려우므로, 용융체의 유동현상을 관찰하기 위하여 40장의 박판을 겹쳐서 용접한 후, 용접부의 단면을 관찰하였다. 여기서는 실온 환경하에서 용접실험을 수행하였는데, 그 이유 중 하나는 실온 환경이나 극저온 환경에서의 용접시 용융체 유동현상은 유사할 것(응고 현상이 아님)이기 때문이다. 또 다른 이유는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 weld nugget의 내부에 미세한 결정구조가 형성되어 응고된 것을 볼 수 있어서, 용융체의 유동상황을 예측할 수 있기 때문이다. 이러한 미세한 결정구조의 생성은 다음과 같이 설명될 수 있다: 레이저빔이 첫번째 박판에 투사되면 첫번째 박판에서 재료의 용융이 일어나고 그 중 일부는 기화되어 구멍이 생기게 되고, 레이저빔은 그 다음 박판으로 전달되어 재료의 용융이 일어나게 된다. 여기서도 용융부위의 일부에서는 기화가 발생하여 급속증기압력에 의하여 용융체의 일부는 그 위의 박판쪽으로 밀려 올라가게 되거나 박판들 사이의 틈새로 밀려나게 된다. 이러한 과정에서 공기와 접하고 있는 용융체의 표면에서는 냉각현상이 일어나면서 미세한 결정구조가 형성되게 되며, 아래쪽에서 밀려 올라오는 용융체에 의해 계속적인 유동현상을 겪게 된다. 이러한 과정이 반복되어 Fig. 5에서 보는 바와 같은 미세한 결정구조의 모습을 볼 수 있으며, 이를 통하여 재료의 용융체가 weld nugget 내부에서 어떻게 움직이는지를 추측할 수 있게 된다. 그런데 극저온 환경하에서라면 용융체가 가장 위에 존재하는 박판의 표면으로 밀려 올라와서 그곳에서 급속히 냉각되어 형성된 구멍을 다시 메우지 못하게 되어, 결합력을 감소시키게 된다.

Fig. 5에서는 그 단면사진의 일부를 보이고 있다. Weld nugget의 내부에서는 용융체의 유동현상을 확인할 수 있는 응고현상을 볼 수 있다. 이러한 관찰을 통하여 다음의 내용들을 유추할 수 있다: 실온 환경하에서의 용접시에는 레이저빔의 작용시 생성된 구멍은 후에 용융체에 의해 다시 메꾸어지는 반면, 극저온 환경하에서의 용융체는 용접시 발생한 급속증기의 압력에 의해 측면(박판사이의

틈새)이나 금속박판의 위로 밀려나고, 밀려난 그곳에서 빠른 속도로 냉각되어 응고된다. 이러한 현상 때문에 용융시 발생된 구멍은 용융체에 의해 다시 메워지는 것이 아니라, 깊은 구멍 모양을 형성하며 응고된다. 이 경우에 박판과 박판 사이의 결합은 생성된 구멍 주위에 링 형태로 용융체가 응고하여 이루어진다. 극단적인 경우에는 가장 위의 박판에는 완전한 구멍이 형성되고, 그 아래의 박판들과도 결합되지 않는 상황에 이르게 되었다. 따라서 극저온 상태에서의 용접시에는 일반적으로 예상할 수 있는 것과는 다르게, 실온 환경과 비교하여 매우 적은 양의 pulse energy만을 사용하여야 용접이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 즉 극저온 환경하에서는 실온 환경과 동일한 pulse energy를 사용하면 용접이 이루어지는 것이 아니라, 천공현상이 발생하는 경향을 보이고 있다. 4개의 비결정질 금속박판을 용접하는 데에는 46 mJ의 pulse energy만을 사용하여 용접을 성공적으로 수행할 수 있었다. 물론 이 경우의 초점위치는 앞서 언급한 실온 환경과는 달라졌다. 즉 더 작은 초점위치를 선택하였다.



Fig. 5 용접시 weld nugget내에서의 용융체의 유동 현상을 관찰하기 위하여, 40장의 박판을 겹치기 용접한 용접부 단면 사진의 일부

Fig. 6에서는 극저온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장시험 결과, 초점거리에 따른 전단인장력을 표현하고 있다. 이 경우에는 가운데에 위치한 박판이 가장 큰 전단인장력을, 가장 위에 위치한 박판이 가장 작은 전단인장력을 지니고 있다는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 가장 위에 위치한 박판에서는 spatter 발생과 극저온 환경하에서의 용융체의 특수한 유동 및 급속응고 현상 때문에 매우 작은 면적에서만 결합이 이루어졌다는 것으로 이해할 수 있다. 가운데에 위치한 박판에서는 대부분 넓은 면적에서 결합이 이루어졌다. 따라서 여기에서의 전단인장력은 위와 아래의 박판과 비교하여 약 2배의 전단인장력을 나타내고 있다.

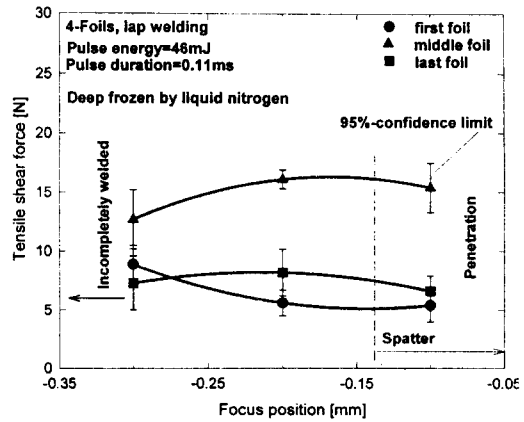


Fig. 6 극저온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장 시험시 초점위치와 전단방법에 따른 전단인장력의 변화

가장 위에 위치한 박판에서의 용융점은 약 0.33 mm의 지름을 나타냈으며, 결정구조는 용접부위로부터 약 0.005 mm의 폭에 걸쳐 형성되었다. 그러나 여기서 형성된 결정구조층은 박판의 표면에만 국한된 것이었으며, 박판내부에는 형성되지 않았는데, 이것은 단면을 부식시켜 광학현미경을 사용하여 조사한 결과 확인할 수 있었다. 따라서 여기서 형성된 결정구조는 용접결합부의 결합력에는 무관하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 6에서의 전단인장력의 변화를 보면, 극저온 환경하에서는 초점위치에 따른 전단인장력의 변화가 실온 환경하에서의 그것보다 크지 않다는

것을 알 수 있다. 이러한 현상은 극저온 환경하에서는 모재가 갖고 있던 원래의 비결정질 특성을 용접 후에도 그대로 유지하고 있다는 사실을 보여주고 있다. 그러나 전체적으로 보아 전단인장력의 향상은 발생하지 않았다. 그 이유는 극저온 환경하에서는 실온 환경에서 보다 현저히 적은 에너지만을 사용하여 상대적으로 결합면적이 줄어들었기 때문이다. 그러나 결합면적을 고려하면, 단위면적 당의 전단인장력(즉, 전단인장응력)은 실온 환경하에서의 용접 및 시험결과와 비교하면 현저히 증가(약 65%) 되었음을 알 수 있다<sup>2)</sup>.

또한 Fig. 4와 6의 두 가지 경우를 비교하여 보면, 극저온 환경하에서는 가운데에 위치한 박판의 결합력이 가장 위나 아래의 경우보다 상당히 크다(최대 약 7~10 N)는 것을 알 수 있다. 반면에 실온 환경하에서 용접된 경우에는 그 차이가 최대 약 5~7 N에 달한다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 극저온 환경하에서는 발생된 용융체가 spatter의 형태로 주변으로 방출되었고 용융체가 밖으로 밀려나온 상태에서 급속히 응고되어 형성된 구멍을 다시 메우지 못하였거나, 가장 아래에 위치한 재료까지 충분한 열이 전달되지 못하고 도중에 주변으로 발산되었기 때문이다. 각각의 박판들의 초점위치에 따른 전단인장력의 변화를 보면, 극저온 환경하(최대 약 4 N)에서는 실온 환경하(최대 약 7 N)에 비해 초점위치에 따른 전단인장력의 변화가 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 극저온 환경에서는 동일한 pulse energy와 pulse duration을 유지할 경우에는, 초점위치에 따른 전단인장력이 실온 환경하에서의 그것에 비해 덜 민감하다는 것을 의미한다.

Fig. 7에서는 전단인장시험을 하여 발생한 여러 가지의 파괴양상을 보여주고 있다. 실온 환경하에서 용접된 결합부위의 파괴면에서는 대부분 결정구조가 형성된 영역으로부터 시작되어 모재로 전파되는 파괴선을 보여주고 있다. 이에 반해 극저온 환경하에서 용접된 결합부위의 파괴면에서는 이와 같은 파괴선이 형성되지 않았다. 오히려 결합부위의 주변에 나타난, 전단인장 시험시에 형성된 변형선을 확인할 수 있었다. 이러한 모양의 변형선은 용접가공하지 않은 원래 상태의 비결정질 금속박판을 인장시험할 때 발생하는 변형선과 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서 극저온 환경하

에서 용접가공한 결합부위는 원래 상태의 비결정질 금속박판의 특성을 그대로 유지하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 결정구조가 형성된 부분과 링형태의 홈을 볼 수 있는데, 이 홈은 가장 위의 박판에서 생성된 용융체와 구멍 내부에서 생성된 용융체의 응고시간의 차이로 인하여 형성된 것으로 추측된다. 그런데 전단인장시험시 파괴의 시작점은 결정구조 생성부위가 아니라, 용융체가 모재에 응고되어 생성된 기하학적 불연속면이다. 이곳에서 미세한 결정구조가 형성된 것을 볼 수 있으며, 응력집중에 의하여 파괴가 시작된다.

기하학적 불연속면      용융부위      형성된 결정구조 영역

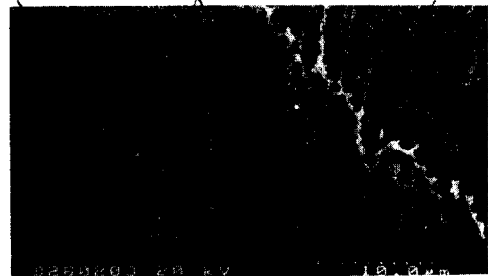


Fig. 8 용접부위에 형성된 결정구조 및 기하학적 불연속면 (SEM); pulse energy = 80 mJ; power intensity =  $7.1 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>; pulse duration = 0.11 ms; 초점위치=-0.8 mm

Fig. 9와 10에서는 실온 환경과 극저온 환경에서 용접된 박판의 전단인장시험시 pulse energy에 따른 전단인장력의 변화를 나타내고 있다. 이 실험에서는 각각 pulse duration과 초점위치를 일정하게 유지하고, pulse energy를 변화시키면서 용접한 것이다. 극저온 환경에서 용접된 경우, 특이한 점은 가운데에 위치한 박판의 결합력이 가장 위나 아래의 그것보다 상당히 크다(최대 약 7~10 N)는 점이다. 또한 가운데나 가장 아래에 위치한 박판의, pulse energy에 따른 결합력의 변화가 실온 환경에서의 경우보다 매우 크다. 반면에 실온 환경하에서 용접된 경우에는 가장 위에 위치한 박판의 전단인장력이 가장 크고, 다른 것과의 차이는 최대 약 5~7 N에 달한다. 그 이유는 극저온 환경하에서는 레이저빔의 강한 에너지에 의해 가장 위에 위치한

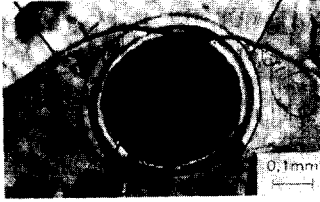



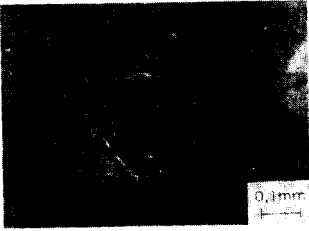
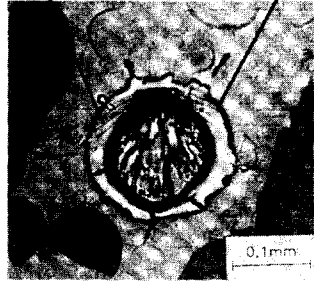
	a) 실온 환경하에서의 용접	b) 극저온 환경하에서의 용접
가장 위의 박판	<p>모재로 확장된 파괴선    형성된 결정구조 영역</p>  <p>접합부위의 파괴면 모서리</p>	<p>변형선    형성된 결정구조 영역</p> 
가운데의 박판	<p>접합부위의 파괴면 모서리</p> 	<p>변형선</p> 
가장 아래의 박판	<p>모재로 확장된 파괴선    형성된 결정구조 영역</p> 	<p>변형선    형성된 결정구조 영역</p> 

Fig. 7 전단인장시험에 의한 파괴양상

pulse energy = 80 mJ; power intensity =  $7.1 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>; pulse duration = 0.11 ms; 초점위치 = -0.8 mm  
 pulse energy = 46 mJ; power intensity =  $2.5 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>; pulse duration = 0.11 ms; 초점위치 = -0.2 mm

재료로부터 형성된 용융체가 밖으로 밀려나와 주위의 극저온에 의해 급속히 응고되어 열의 손실이

발생하고 형성된 구멍을 다시 메우지 못하므로, 가장 위의 박판에는 충분한 결합이 이루어지지 않



으며, 가장 아래에 위치한 박판에는 열전달이 충분히 일어나지 않기 때문이다. 극저온 환경하에서의 이러한 특성은, 특히 가운데 박판에서의 용접 품질이 실온 환경하에서보다 pulse energy의 변화에 훨씬 더 민감하다는 것을 의미한다.

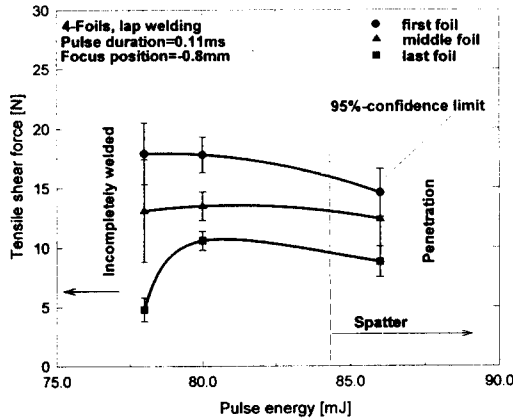


Fig. 9 실온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장시험시 pulse energy와 전단방법에 따른 전단인장력의 변화

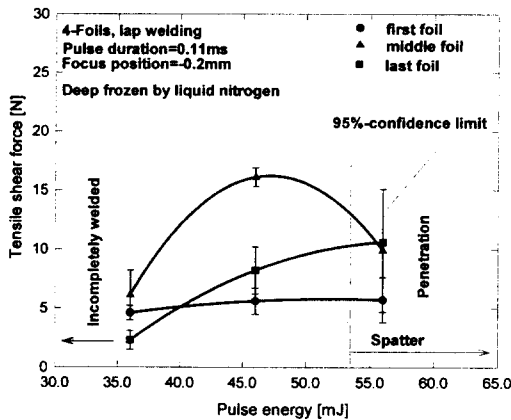


Fig. 10 극저온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장시험시 pulse energy와 전단방법에 따른 전단인장력의 변화

Fig. 11과 12에서는 pulse energy와 초점위치를 일정하게 유지하고, pulse duration을 변화시키면서, 즉 power intensity를 변화시키면서 용접한 박

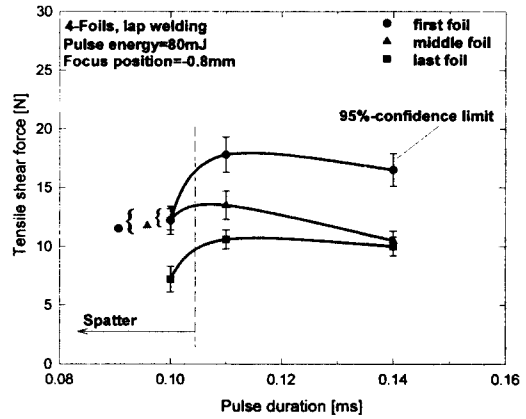


Fig. 11 실온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장시험시 pulse duration과 전단방법에 따른 전단인장력의 변화

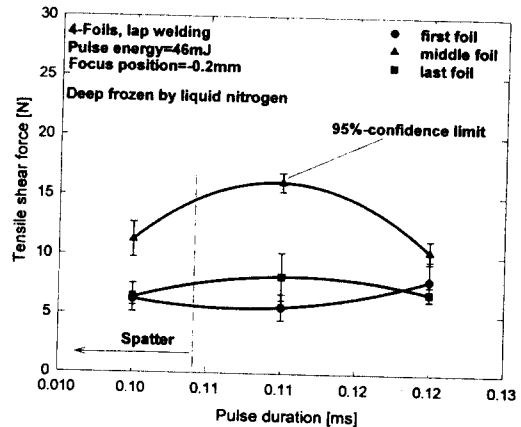


Fig. 12 극저온 환경하에서 용접된 박판의 전단인장시험시 pulse duration과 전단방법에 따른 전단인장력의 변화

판을 전단인장시험한 결과를 나타내고 있다. 앞의 경우와 마찬가지로 극저온 환경하에서는 가운데에 위치한 박판의 결합력이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 또한 결합력의 변화도 실온 환경하의 경우에 비해 훨씬 크다(최대 약 10 N)는 것을 알 수 있다. 이러한 현상의 이유는 앞서 언급한 내용과 유사하다. 이 경우에도 pulse energy를 변화시키면서 용접한 경우와 마찬가지로, 극저온 환경하에서는, 특히 가운데 박판에서의 용접품질은 실온 환경에

서의 경우보다 pulse duration에 훨씬 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

5개 이상의 금속박판(두께 > 125  $\mu\text{m}$ )을 겹치기 용접하였을 경우에는 박판들 사이에 완전한 결합이 형성되지 않았다. 그 이유는 두께가 증가함에 따라 pulse energy의 증가도 필수적인데, 용접시 이로 인한 spatter가 증가하고, 금속증기압에 의해 밖으로 밀려나온 용융체가 박판의 표면에서 급속히 응고되므로 박판들 사이의 결합이 불가능하여 졌기 때문이다. 따라서 극저온 환경하에서의 용접 가능성은 최대 100  $\mu\text{m}$ 로 한정되었다<sup>9)</sup>.

#### 4. 결 론

(1) 본 논문에서는 극저온 환경하에서의 비결정질 합금박판의 레이저빔 용접에 관하여 연구하였다. 이 때 용접 시의 용융체 유동현상은 실온에서의 그것과는 매우 다른 모습을 보여주었다. 용융체는 실온에서보다 훨씬 빠른 속도로 냉각, 응고되므로, 실온에서보다 훨씬 작은 에너지(약 60%)만으로도 용접이 가능하였다. 또한 결합력에 영향을 줄 수 있는 결정구조의 생성이 억제되므로, 용융부위는 모재와 동일한 비결정질 특성을 유지할 수 있었다. 전단인장시험시의 접합부위의 특성으로는 실온 환경하에서의 용접 시에 발생하는 파괴선이 나타나지 않았고, 모재의 소성변형 시에 발생하는 변형선이 발생하였다. 이는 비결정질 금속의 용접 시에 가장 문제가 되는 열영향부에 결정구조가 생성되기는 하였으나 표면에만 국한되어 존재하는 것이므로, 용접부위는 비결정질 구조를 그대로 유지하고 있다는 것을 반영하는 것이다. 전단인장력은 실온 환경과 비교하여 큰 차이를 보이지 않으나, 단위면적 당의 전단인장력(즉, 전단인장응력)을 비교하여 보면, 현저한 증가(약 65%)를 보이고 있음을 알 수 있다.

(2) 세 가지 레이저빔 변수, 즉 초점위치, pulse energy 및 pulse duration의 각각을 변화시키면서 용접가공하여, 결합력의 변화를 조사한 결과를 보면, 극저온 환경하에서는 초점위치에 따른 전단인장력의 변화가 실온 환경에 비해 작으나(즉

덜 민감하다), pulse energy와 pulse duration의 변화에 따른 전단인장력의 변화는, 특히 가운데 박판에서의 변화는 실온 환경에 비해 크다(즉 더 민감하다)는 것을 알 수 있다.

(3) 결정구조의 생성 없이 용접할 수 있는 최대 두께는 100  $\mu\text{m}$ 로 한정되었다. 그 이상의 두께에서는 spatter의 증가 및 재료표면으로 밀려나온 용융체의 급속한 응고로 인하여, 생성된 구멍이 다시 메워지지 않으므로, 박판들 사이의 결합력이 현저히 감소함을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 이 건상 : "Nd:YAG Laser를 이용한 비결정질 재료의 용접", 한국자동차공학회 1995년도 추계학술대회, Vol. I, pp.34-40.
2. Lee, K. S. : "Untersuchung des Apsoptionsvorganges und der Schweißqualität beim Laserschweißen von amorpher Co-Si-Mo-Fe-B-Legierung", Dissertation, TU Berlin, 1993.
3. Kreye, H. : "Verbindungstechnik von metallischen Gläsern", BMFT Forschungsbericht 01 ZD 086, pp.1-44.
4. Hammerschmidt, M.; Kreye, H. : "Fügeverfahren für metallische Gläser", Fügen von Keramik, Glas + Metall, Vorträge des gleichnamigen Intern. Kolloquiums in Baden-Baden vom 3. bis 5. Dez. 1980, DVS-Berichte Band 66, pp.23-28.
5. Fukushima, S.; Kasugai, T. : "Spot welding of Fe-Si-B amorphous metal foil", Welding International 4(1990)6, pp.430-436.
6. Hock, St.; Emmerich, K. : "Joining of and with Metallic Glasses", Fügen von Glas Keramik und Metall: 2. Internationales Kolloquium Bad Nauheim 27.-28.3.1985, pp.177-187.
7. N.N. : "Amorphe Metalle VITROVAC", Firmenschrift, Vakuumschmelze GmbH.