

순티타늄판의 Nd:YAG 레이저 용접성에 관한 연구(III)

- 에지 용접 특성 -

김종도^{*,†} · 길병래^{*} · 광명섭^{**} · 송무근^{***}

^{*}한국해양대학교 기관시스템공학부

^{**}대우조선해양(주) 산업기술연구소

^{***}한국해양대학교 대학원

A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(III)

- Weld Properties of Edge Welding -

Jong-Do Kim^{*,†}, Byung-Lea Kil^{*}, Myung-Sub Kwak^{**} and Moo-Keun Song^{***}

^{*}Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{**}Industrial Application R&D Institute, DSME. Co., LTD., Okpo 656-714, Korea

^{***}Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received October 27, 2009 ; Revised November 17, 2009 ; Accepted November 23, 2009)

Abstract

Titanium and titanium alloy can be reproduced immediately even if oxide films(TiO₂) break apart in sea water. Therefore, since titanium demonstrates large specific strength and outstanding resistance to stress corrosion cracking, crevice corrosion, pitting and microbiologically influenced corrosion in sea water environment, it has been widely applied to heat exchanger for ships. In particular, with excellent elongation, pure titanium may be deemed as optimal material for production of heat exchanger plate which is used with wrinkles formed for efficient heat exchange.

Conventional plate type heat exchanger prevented leakage of liquid through insertion of gasket between plates and mechanical tightening by bolts and nuts, but in high temperature and high pressure environment, gasket deterioration and leakage occur, so heat exchanger for LPG re-liquefaction device etc do not use gasket but weld heat exchanger plate for use. On the other hand, since welded plate cannot be separated, it is important to obtain high quality reliable welds. In addition, for better workability and production performance, lasers that can obtain weldment with large aspect ratio and demonstrate fast welding speed even in atmospheric condition not in vacuum condition are used in producing products.

So far, 1st report and 2nd report compared and analyzed embrittlement degrees by bead colors of weldment through quantitative analysis of oxygen and nitrogen and measurement of hardness as fundamental experiment for the evaluation of titanium laser welding, and evaluated the welding performance and mechanical properties of butt welding.

This study welded specimens in various conditions by using laser and GTA welding machine to apply edge welding to heat exchanger, and evaluated the mechanical strength through tensile stress test. As a result of tensile test, laser weldment demonstrated tensile strength 4 times higher than GTA welds, and porosity could be controlled by increasing and decreasing slope of laser power at overlap area.

Key Words : Pure titanium, GTAW, Edge welding, Slope up, Slope down

1. 서 론

티타늄 및 티타늄 합금은 해수환경에서 응력부식균열(stress corrosion cracking), 틈부식(crevice corrosion), 공식(pitting) 및 미생물부식(microbiologically influenced corrosion)¹⁻⁵⁾에 대한 저항성이 탁월하고 비강도⁶⁻⁷⁾가 크기 때문에 선박용 열교환기로 많이 사용되어왔다. 특히 순티타늄은 연신률이 좋아서 효율적인 열교환을 위해서 주름을 포밍(forming)하여 사용하고 있는 판형 열교환기의 전열판 제작에는 최적의 재료라고 할 수 있다.

기존에는 판과 판사이에 개스킷을 삽입하고 볼트와 너트에 의한 기계적 체결로 해수의 누설을 방지했으나 고온 및 고압의 환경에서는 개스킷이 열화하여 누설이 발생하므로 LPG 재액화 장치용 열교환기 등에서는 개스킷을 사용하지 않고 열교환판을 용접하여 사용하고 있다. 한번 용접한 판은 분리가 불가능하기 때문에 고품질의 신뢰성있는 용접부를 얻는 것이 중요하다. 또한 제품의 생산에 있어서 작업성 및 생산성도 중요하기 때문에 진공이 아닌 대기 중에서도 어스펙트비(aspect ratio)가 큰 용접부를 얻을 수 있고 용접속도가 빠른 레이저를 사용하여 제품을 생산하고 있다.

지금까지 1보⁸⁾와 2보⁹⁾에서는 티타늄의 레이저 용접성 평가를 위한 기초 실험으로서 용접부의 비드 색깔에 따른 취화 정도를 산소·질소 정량 분석과 경도 측정을 통하여 비교·분석하고 맞대기 용접에 대한 용접성 및 기계적 특성을 평가하였다.

본 연구에서는 열교환기에 에지 용접을 적용하기 위하여 레이저 및 GTA 용접기를 이용하여 다양한 조건에서 용접하고 인장 시험을 통하여 기계적 강도를 평가하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에 사용한 재료는 두께 0.8mm, 순도 99.9%의 공업용 순티타늄으로 항복강도는 255MPa, 인장강도는 325MPa이다.

2.2 실험 장치 및 방법

실험에는 가우시안빔 모드의 1kW CW Nd:YAG 레이저와 GMA 용접기를 사용하였다. GMA 용접기는 PANASONIC社 YC-300TRG 모델이고 용가재(filler wire)는 모재를 약 1mm의 폭으로 절취하여 사용하였다. 레이저의 집광광학계 헤드는 CNC의 Z축을 따라

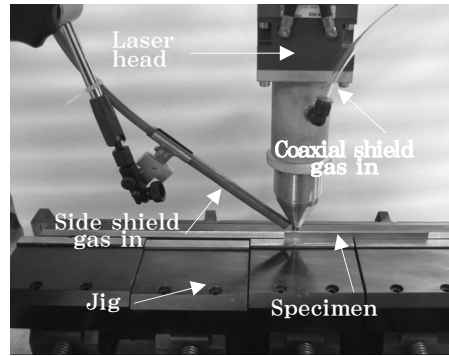


Fig. 1 Experimental setup for edge welding

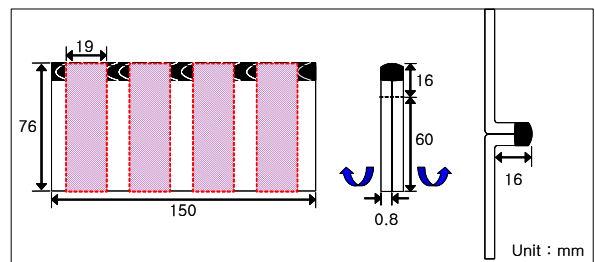


Fig. 2 Illustration of tensile strength test specimen

이동하고 시험편은 X-Y 테이블위에서 이송된다. 레이저 용접시의 모습을 Fig. 1에 나타낸다.

실험조건을 정하기 위한 기초실험에서 Ar를 사용하여 동축실드가스 유량(Q_{cs})을 25 l/min으로 흘렸을 때 비드가 완전히 산화되었다. 따라서 사이드실드 노즐을 추가로 설치하여 용접부를 실험하였다. 이 때, 실험노즐의 각도와 유량이 용접부의 기공형성에 매우 중요한 역할을 하기 때문에 여러번의 실험을 거쳐서 사이드 실드 노즐 유량(Q_{ss}) 15 l/min, 각도 45°, 동축실드가스 유량을 15 l/min으로 하여 실험을 진행하였다.

에지 용접부 인장 시험의 경우에는 특별한 규정이 없기 용접부로부터 16mm 아래에서 직각으로 굽혀서 임의로 인장 시험편을 제작하였다. 인장시험편의 규격을 Fig. 2에 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저의 비초점에 따른 특성

집광광학계의 비초점거리 변화에 따른 비드 천이를 알아보기 위하여 두께 0.8mm의 판을 1장 사용하여 비초점거리를 변화시키면서 용입깊이를 측정하였다. 완전 용입이 되지 않도록 레이저 조사조건을 선정하였고 용접부의 실험은 기초실험에서 얻어진 결과를 바탕으로 Ar를 사용하여 동축실드는 25 l/min, 이면실드는 10 l/min으로 하였다. 이 때의 전면비드폭(front bead

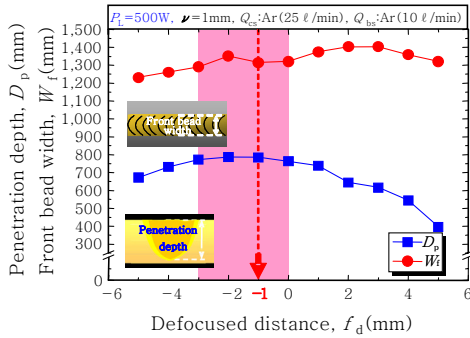


Fig. 3 Penetration properties with defocused distance

width)과 용입깊이(penetration depth)를 Fig. 3에 나타낸다.

모든 용접조건에서 열전도형 용접이 일어났고 황금색의 건전한 전면비드를 얻었으며 용접부는 주상정의 조대한 조직을 나타내었다. 비초점거리에 따른 용입 특성을 살펴보면 초점을 기준으로 비초점거리가 플러스(+)로 이동함에 따라 용입깊이는 점점 얕아지고 전면비드 폭은 넓어졌다가 좁아졌고, 비초점거리가 마이너스(-)로 이동함에 따라 비드폭은 점점 넓어지고 용입깊이는 감소하였는데 비초점거리가 플러스일때 보다는 기울기가 크지 않았다. 이것은 비초점거리가 마이너스로 이동할 때에는 초점이 재료 안쪽에 맺히게 되고 레이저가 재료 안쪽에서 집광된 이후에 발산하는 형태를 취하기 때문이다.

비초점거리 -3mm에서 0사이의 구간이 용입이 깊고 비초점거리가 멀어질수록 용입깊이가 감소하고 있다. 용입이 가장 깊고 비드폭이 좁으며 초점이 재료 안쪽에 맺히기 때문에 플라즈마에 의한 레이저빔 손실이 가장 적을 것으로 판단되는 비초점거리 -1mm를 적절한 용접조건으로 정하고 이후의 실험에서는 비초점거리를 -1mm로 고정하였다.

3.2 레이저의 에지 용접 특성

3.2.1 용접 속도에 따른 용입 특성

레이저 출력(P_L)을 950W로 하고 용입 길이(penetration length)가 가장 길고 건전한 비드를 형성하는 용접속도(v)를 선정하기 위하여 실험을 진행하였다.

Fig. 4에 용접 속도에 따른 용입 특성을 나타낸다. 용접속도가 빨라짐에 따라 입열이 감소하기 때문에 용접속도의 증가에 따라서 용입이 점진적으로 감소했다. 또한 비드 색깔도 용접속도 2.7m/min에서는 분홍색, 3.0 ~ 3.3m/min에서는 옅은 청색, 3.5m/min에서는 황금색과 갈색이 섞여 있었고 3.7m/min에서는 황금색을 나타내었다. 열교환기에 적용시 최대 10bar의

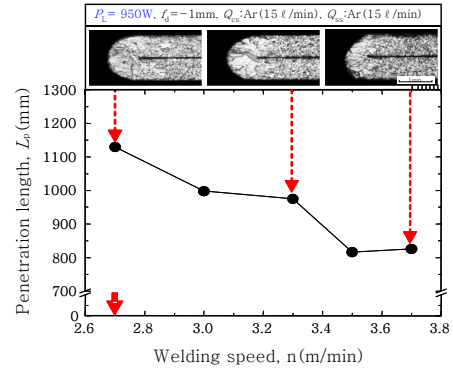


Fig. 4 Penetration properties with welding speed

압력을 견뎌야 하기 때문에 용입 길이가 가장 길고 생산성 측면에서 용접속도가 빠른 2.7m/min이 적절한 용접속도라고 생각된다.

3.2.2 간극(gap)에 따른 용접성

시험편 사이에 간극이 조금이라도 있으면 용접시 플라즈마가 이 간극을 따라 흔들리므로 용접 비드가 건전하지 못하게 된다. 더욱이 다른 용접열원에 비해 스폿 사이즈가 극히 작은 레이저 용접에서는 스폿사이즈 이상으로 간극이 벌어지면 레이저빔이 간극사이로 빠져나가므로 용접이 되지 않기 때문에 용접부의 간극조정이 매우 중요하다.

단차(misalignment)의 경우에도 일부분만 용융되고 일부분은 모재가 용융되지 않고 그대로 남아있을 수 있기 때문에 가능한 단차가 생기지 않도록 지그로 모재를 잘 고정하여야 한다. 그러나 아무리 주의하여도 경우에 따라서 간극 및 단차가 발생할 수 있으므로 이에 대한 검토를 행하였다.

실제 열교환판 용접시 지그의 정도가 좋지 않을 경우 및 지그에 열교환판이 어긋나게 고정되었을 경우를 고려하여 에지용접의 경우에 간극과 단차를 두어 용접을 하였다. 인서트(insert) 금속으로는 STS304 박판을 사용하였다. 레이저 스폿의 위치는 간극의 영향을 알아볼 때에는 간극의 정중앙에, 단차 실험시에는 모재가 맞닿는 면으로 하여 간극 및 단차가 없을 때와 동일한 방법으로 용접하였다.

레이저 출력 950W, 용접속도 2.7m/min일 때 간극에 따른 용접특성을 Fig. 5에 나타낸다. 판사이의 간극이 넓어짐에 따라 0.3mm까지는 상부 모재가 모두 용융되었는데 0.35mm에서 부터는 일부분이 용융되지 않았고, 스폿사이즈가 0.65mm이므로 0.4mm에서는 빔의 대부분이 간극사이로 빠져서 용접이 되지 않았다. 또한 간극 0.1 ~ 0.3mm에서 마이크로 기공이 관찰되었다. 용입깊이가 0.2mm를 기준으로 이보다 느린 속

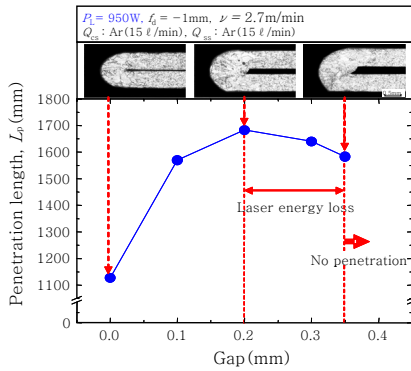


Fig. 5 Penetration properties with gap

도에서는 용액이 간극사이로 쳐지기 때문에 용입깊이가 증가하고, 빠른 속도에서는 반대로 간극의 영향으로 가우시안빔에서 에너지 밀도가 가장 높은 가운데 부분의 빔이 새기 때문에 에너지가 손실되어 용입깊이가 감소한다.

간극이 존재할 때 스폿사이즈의 1/2까지, 시험편 두께의 2/5까지 용접이 가능한 것을 확인하였고 간극이 없는 경우가 가장 이상적이나, 부득이하게 간극을 두어야 할 경우에는 용입깊이를 고려해서 최대 허용한도를 0.2mm로 하는 것이 적당하다고 판단된다.

3.2.3 단차에 따른 용접 특성

두 판을 간극이 없이 평행하게 한 다음, 판 하나는 고정하고 다른 하나의 판을 일정간격으로 아래쪽으로 내리면서 단차가 용접성에 미치는 영향을 관찰하였고 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 단차가 0 ~ 0.6mm에서는 청색 계통의 비드 색깔을 가지는 건전한 비드가 얻어졌고, 0.8mm 이상에서는 단차에 의해서 모재 끝단이 용융되지 않은 황금색과 갈색이 섞여있는 비드가 얻어졌다. 단면을 살펴보면 단차가 커짐에 따라 한쪽이 용융되지 않은 것이 명확하게 관찰가능하였다.

용입깊이는 단차가 0.2mm일 때 조금 증가하다가 단차가 커짐에 따라 선형적으로 감소하였으며 1.2mm에

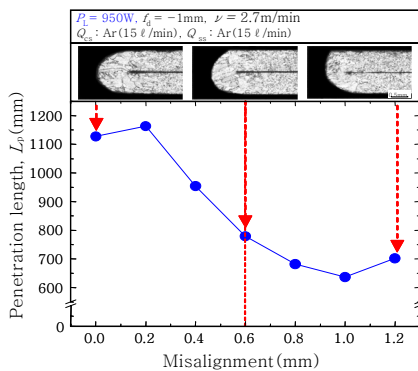


Fig. 6 Penetration properties with misalignment

서 다시 조금 증가하는, 0.6mm를 기준으로 좌우, 상하가 대칭적인 양상을 나타내었다. 또한 단차가 커짐에 따라 아래쪽으로 내려간 판의 HAZ 길이가 조금 더 길어졌는데 이것은 단차의 길이만큼 모재가 아래쪽으로 내려가기 때문에 처음에 용융될 모재가 줄어들어서 입열이 미세하게나마 증가했기 때문이라고 생각된다.

용입깊이와 용접부의 형상만을 고려하면 최대 0.6mm까지 단차를 허용해도 될것으로 판단되나 열교환기의 사용압력을 고려한다면 압력 테스트 등의 추가적인 실험으로 허용한도를 정해야 할 것으로 생각된다.

3.2.4 슬로업 및 다운(Slope up & down)에 따른 용접성

용접부의 시·종단이 만날때에는 이 부분에서 결함이 가장 많이 발생하고 사용 중에 균열 등이 가장 많이 발생한다. 따라서 이들 중첩부에 대한 검토를 위하여 용접부의 시·종단이 겹치게 용접하였다.

용접 시작점에서 레이저 출력의 슬로업 업을 하지 않았을 경우에 HAZ 가까이 기공이 다량 발견되었고 비드 중첩부에 그 기공이 그대로 남아 있었다. 그러나 슬로업 다운 구간에서는 기공이 관찰되지 않았기 때문에 용접 초기에 생성된 기공이 모재가 예열이 되지 않아서 용융금속 외부로 빠져나갈 충분한 시간이 없었을 것이라고 판단된다. 따라서 용접초기에 슬로업 업 구간을 두어 용입을 서서히 깊게 하여 기공의 생성을 최소화 하고 기공이 생성되더라도 중첩시에 기공이 빠져나갈 수 있도록 하는 방법을 모색하였다.

기초실험에서 슬로업 업 구간을 3mm, 950W로 중첩되는 부분을 10mm, 슬로업 다운 구간은 2mm로 하였을 때 비드 외관상으로는 건전한 비드가 형성되었으나 종단면 관찰시 슬로업 업과 슬로업 다운시에 용융계면을 따라 기공이 다수 분포하였고 비드 중첩부에서도 기공이 남아있었기 때문에 일정한 출력을 유지한 후 슬로업 업을 하는 방법으로 재실험을 하였으며 그 결과는 Fig. 7에 나타낸다. 이 때의 슬로업 업과 슬로업 다운 구간은 Fig. 7(a)와 동일하며 슬로업 업 구간에서 출력을 650W와 750W로 유지하다가 950W로 올리는 방법을 채택하였다. 이 경우는 비드 외관이 건전한 뿐만 아니라 슬로업 업과 슬로업 다운 구간 및 비드 중첩부에서도 기공이 거의 발견되지 않았다.

추가로 슬로업 업 구간과 비드 중첩부의 길이를 좀 더 길게 하여 각각 5mm와 12mm로 하여 실험을 하였을 때에는 용입깊이가 일정하게 나오지 않았는데 이것은 사용한 레이저가 긴 구간의 슬로업 업과 슬로업 다운시에 출력이 일정하게 나오지 않기 때문으로 생각된다.

예지용접에서는 열전도가 깊이방향으로만 일어나기

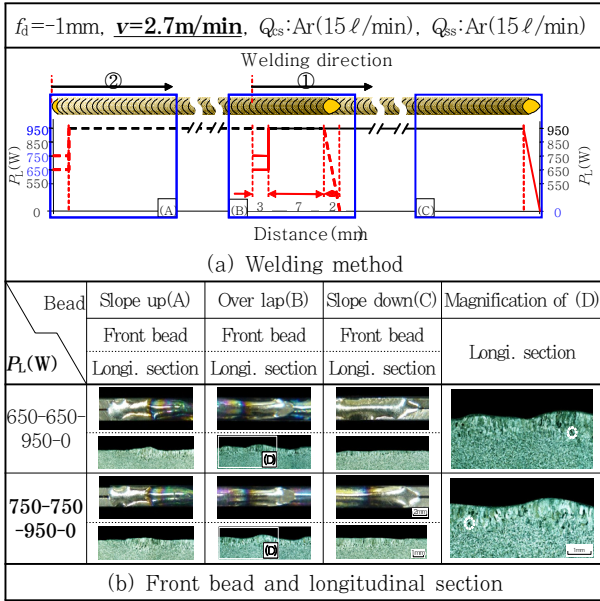


Fig. 7 Welding properties with slope up & down

때문에 이와 같이 출력에 매우 민감한 경향을 나타낸다고 판단되고 다른 형상의 용접보다도 섬세한 파워의 조절이 필요하다.

3.2.5 인장 강도 평가

에지용접의 경우 용입깊이가 가장 긴 경우인 용접속도 2.7m/min에서는 인장강도가 가장 크고 연성파면을 나타내었는데, 이보다 빠른 속도에서는 Fig. 8에서와 같이 연성 파면내에 취성파면이 섞여있는 형태를 나타내었고 인장강도도 용접속도의 증가와 함께 급격하게 감소하였다. 변형-응력 곡선에서 인장시험 초기에 그래프 모양이 조금씩 꺾이는 것은 90°로 꺾여있던 시험편이 펴지면서 그래프에 영향을 미친 것이다.

3.3 GTAW의 에지 용접 특성

레이저 용접부와의 기계적 특성을 비교하기 위하여 기존 열교환관의 에지 용접에 적용하고 있는 GTA 용접부의 단면 및 인장 강도를 살펴보았다.

용접부는 Ar 가스를 사용하여 실드하였고 가스 압력은 토치실드(P_{ts})와 이면실드(P_{bs}) 모두 15kgf/cm²이다. 용접 비드는 은백색이고 용입깊이는 약 750 μm 로 1kW CW 레이저의 최적 용접조건에서의 약 1100 μm 보다는 얇은 용입이 얻어졌고 HAZ는 Fig. 9와 같이 레이저 용접의 2배 이상 넓었다.

Fig. 9의 조건에서 용접한 4개의 시험편에 대하여 인장시험을 실시한 결과 Fig. 10과 같이 시험편 마다 편차는 있었으나 평균한 결과 약 50N/mm²로 레이저 용접시 2.7m/min에서 얻어진 값보다 약 4배 작았다.

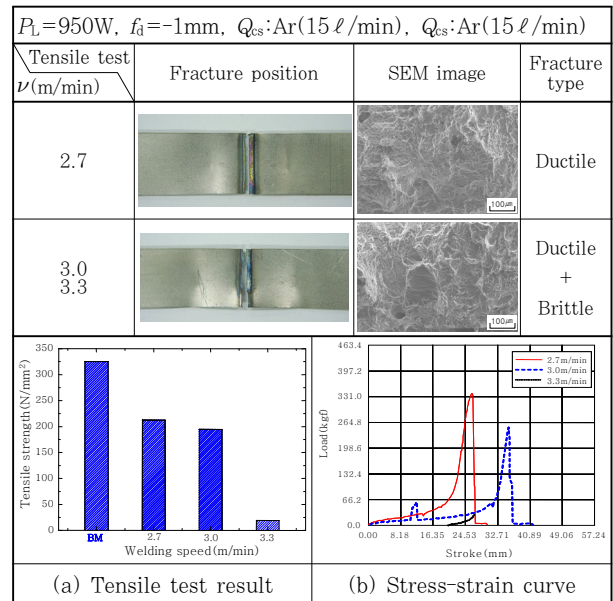


Fig. 8 Tensile test of edge welds for titanium

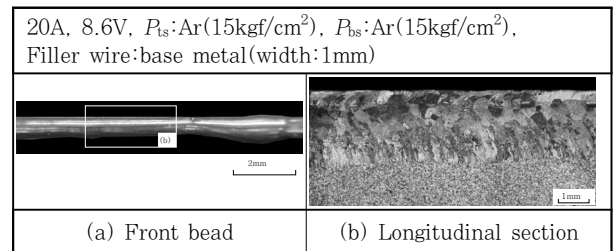


Fig. 9 Front bead and longitudinal section of GTA welds

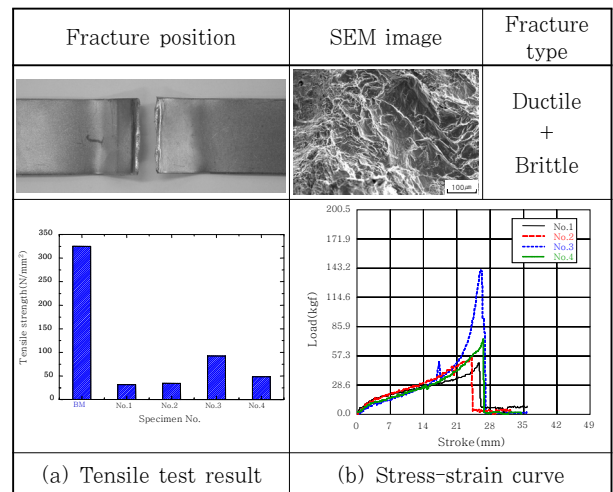


Fig. 10 Tensile stress test results of edge weldment for titanium by GTAW

또한 연성 및 취성 파면이 섞여 있어 전체적으로 레이저 용접부보다 좋지 않은 특성을 나타내었다.

4. 결 론

1kW CW YAG 레이저와 300A GTA 용접기를 사용하여 0.8mm의 순티타늄판을 에지 용접한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 에지용접에서는 열전도가 깊이방향으로만 일어나기 때문에 다른 형상의 경우 보다도 용접시 섬세한 파워의 조절이 필요하다.

2) 레이저를 이용하여 950W, 2.7m/min에서 에지 용접을 하였을 경우에 최대 허용 간극은 0.2mm, 단차는 0.6mm로 판단된다.

3) 용접 시·종단의 중첩부에서 레이저 출력의 슬롯업·다운을 이용하여 기공의 형성을 제어할 수 있었다.

4) 레이저 용접부의 용입 길이가 GTA 용접부 보다 약 1.4배 길었고 HAZ도 2배 이상 작았다.

5) 인장시험 실시결과, 레이저 용접부는 211N/mm², GTA 용접부에서는 약 50N/mm²로 레이저 용접부가 4배 정도 인장강도가 높았다.

후 기

1) 본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업(과제 번호:10027454)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

2) 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음. “(NIPA-2009-C1090-0903-0007)”

참 고 문 헌

1. John A. Mountford : Titanium-properties, advantages and applications solving the corrosion problems in marine service, CORROSION 2002, NACE International, Paper #02170
2. S. Lathabai, B. L. Jarvis and K. J. Barton : Comparison of Keyhole and Conventional Gas Tungsten Arc Welds in Commercially Pure Titanium, Materials Science and Engineering, A299(2001), 81-93
3. R. R. Wang, DDS, MSD, G. E. Welsch and PhD : Joining Titanium Materials With Tungsten Inert Gas Welding, Laser Welding, and Infrared Brazing, The Journal of Prosthetic Dentistry, 1995, 521-530
4. Takeshi Shinoda, Kenichi Matsunaga, Motoei Shinohara : Laser Welding of Titanium Alloy, The Japan Institute of Light Metals, 28-2(1990), 49-56 (in Japanese)
5. 下平 三郎 : 腐食・防食の材料科學, アグネ技術センタ, 1995
6. S. Lathabai, B. L. Jarvis and K. J. Barton : Comparison of Keyhole and Conventional Gas Tungsten Arc Welds in Commercially Pure Titanium, Materials Science and Engineering A299, 81-93 (2001)
7. Zhang Li, S. L. Gobbi, I. Norris, S. Zolotovskiy, K. H. Richter : Laser Welding Techniques for Titanium Alloy Sheet, Journal of Processing Technology, 65(1997), 203-208
8. Jong Do Kim, Myung Sub Kwak, Chang Soo Kim : A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(I) - Weld Properties with Shield Conditions -, Journal of KWS, 27-5(2009), 55-61 (in Korean)
9. Jong Do Kim, Myung Sub Kwak, Moo Keun Song, Seung-Ha Park : A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(II) - Welding Properties of Butt Welding -, 27-6(2009), 74-79