

Zircaloy-4 박판의 Nd-YAG 레이저빔 Butt 용접을 위한 공정변수의 영향
A Study on Effects of Parameter for the Butt Welding of Zircaloy-4 Sheets Using
Nd:YAG Laser Beam

황용화*, 김수성*, 양명승*, 민덕기*, 고진현**

* 한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

** 한국기술교육대학교

충남 천안시 병천면 가진리 307

요약

평균출력 550W급 Nd:YAG laser를 이용하여 Zircaloy-4 합금간의 레이저 용접에서 용접열로 인한 빔과워, 용접속도, 펄스폭, 빔초점 등의 용접공정변수들이 용접에 미치는 영향을 관찰하고 적절한 용접조건을 도출하고자 하였다. 1.39mm와 2.0mm 동종두께의 Butt 용접된 시편을 광학현미경 및 주사현미경(SEM)으로 파단면의 재료특성과 용접부위의 조직을 관찰하였고, 제살(autogeneous) 및 butt 용접된 두 용접부의 용접특성, 용접비드, 용입폭, 형상비를 비교한 결과 비슷한 양상을 보였다. Butt 용접에서 재료 사이의 간격(gap)과 용접선의 정렬이 매우 중요하였으며, 용입비와 인장강도는 크게 변하지 않았다.

Abstract

An investigation was conducted to determine the influence of the welding variables such as beam power, travel speed, pulse duration and defocusing on the laser beam weldability of Zircaloy-4 sheets with a pulsed Nd:YAG laser of 550W average beam power. Based on the butt-welded and bead-on-plate welded specimens of 1.39mm and 2.0mm thick Zircaloy-4 sheets, the welding characteristics of two different welds were compared in terms of penetration and aspect(D/W) ratio of the weld bead, bead cross section, weld strength and microstructure and mechanical properties. Fracture surface and microstructure of laser butt welded Zircaloy-4 test specimens were examined by optical and scanning electron microscopies. It was found that the tight gap between sheets was important to make sound welds like the bead-on-plate weld. The effects of welding variables on the aspect ratio and strength of butt-welded specimens were similar with those of bead-on-plate welds as long as the tight gap was kept.

1. 서론

Zircaloy-4합금은 타 금속에 비해 열중성자 흡수 단면적이 적고(0.18barns), 방사선 조사후 및 고온에서도 우수한 탄성계수와 열팽창계수가 작아 기계적, 물리적 성질을 유지한다. 또 수냉 원자로의 고온 수증기 및 방사선 조사 분위기에서 강한 내식성과 내마모성을 가지고 있다. 이 때문에 지르코늄 합금이 가장 많이 사용되고 있는 분야는 경수로 및 중수로형 핵연료 피복관과 원자로 구조재의 지지격자 소재로 널리 이용되고 있다. 핵연료 부품으로는 end cap, grid, space pad(간격체), bearing pad(지지체) 등이 있고, 이 부품들의 접합방법으로는 TIG, 저항용접, 브레

이징, laser 등이 이용되고 있다. 레이저 용접은 고파워밀도로 레이저빔을 집광하기 때문에 비드의 용입이 깊고 용접폭이 좁으며 용접속도가 빠르다. 또 열에 의한 열영향부가 좁아 변질층이 적고 레이저빔을 다른 거리에 위치한 곳으로 전송이 가능하다. 따라서 이 용접법은 자동화 될 수 있기 때문에 대량생산과 정밀용접이 요구되는 분야에서 레이저 용접이 적용될 수 있도록 다양한 연구가 진행되고 있다^{1,2)}. 현재 경수로용 핵연료봉 지지격자 등에는 Nd-YAG laser 용접이 상용화되어 있고, 핵연료제조에 확대 가능성을 알아보기 위해 end cap을 butt joint 하기 위한 기초조사로 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 레이저용접장치

본 실험에서 사용한 장비는 평균출력 550W급 Lumonics사의 JK701H 펄스형(pulsed) Nd:YAG 레이저 용접 시스템으로 레이저 발진기는 연속발진형(continuous wave, CW)와 pulse mode를 모두 사용할 수 있는 장치이다. 실험을 위해 사용한 Zircaloy-4 합금은 압연 및 어닐링 처리된 1.39mm와 2.0mm 두 종류의 동종두께로 압연방향으로 시편의 크기를 폭 30mm × 길이 240mm로 절단하여 챔브 내의 이상적인 용접조건(산소(O₂) 7ppm이하, cell온도 615℃내외, 습도 100ppm이하)에서 맞대기용접(butt welding)과 bead-on-plate 용접을 실시하였다. 용접시 발생할 수 있는 변형을 최소로 줄이기 위해 피용접물의 가장자리에 하중이 가하도록 응용된 지그를 이송 고정구에 설치하여 박판 재료를 고정하였다.

2.2 시편제작 및 실험방법

레이저 빔 용접변수의 영향을 조사하기 위하여 용접헤드에서 발생하는 빔의 초점은 시편표면에 집중시켜 레이저의 출력(Table.1), 용접속도(Table.2), 펄스폭(Table.3), 빔초점(defocusing), 보호가스 등을 변화시켜 같은 조건에서 용접된 두 시편(butt, bead-on-plate)의 용접형상, 표면상태, 용접폭과 초점깊이 등 용접공정변수들이 용접에 미치는 영향을 관찰하였다. 시편은 모재와 용접부의 인장강도를 비교하기 위해 ASTM E82-87a의 규격으로 가공하였다. 또 용접단면에 대한 기계적 특성과 미세조직을 관찰하여 Zircaloy-4 판재의 최적 용접 조건을 구하는데 그 목적이 있다

Table 1. 빔파위에 의한 영향

Beam Power	이동속도	보호가스
100-250W	200mm	150ℓ/min

Table 2. 용접속도에 의한 영향

Beam Power	이동속도	보호가스
150W	100-350mm	150ℓ/min

Table 3. 펄스폭에 의한 영향

Beam Power	이동속도	pulse폭
200W	200mm	2.5-7.5ms

3. 결과 및 고찰

3.1 용접변수에 따른 용입특성의 영향

3.1.1 laser beam power의 변화에 의한 영향

레이저의 출력에너지는 용입깊이에 영향을 미치는 중요한 인자로 출력 파형을 연속발진형(CW)으로 설정하여, 레이저빔 파워에 따른 용입깊이의 형상을 조사하였다. Zircaloy-4의 Nd:YAG 용접에서 빔 초점위치는 시료표면에 고정하고 pulse width 7.5ms, pulse frequency 13.5Hz, 이동속도를 일정하게 유지하면서 Table 1과 같이 출력을 변화시켰다. Fig. 1에서 Zircaloy-4 판재의 맞대기와 비드 온 플레이트 용접에서는 빔출력이 증가하면 두 이음형태에서 용입깊이와 폭에 미치는 영향으로 빔출력 200W까지는 거의 선형적으로 증가하였고, 그 이상에서는 용입깊이와 폭의 증가가 둔화되었다. 용접부의 형상비(Fig. 2)는 빔파워 175W까지는 완만히 증가하다가 300W까지 증가하면 형상비는 급격히 감소하였다. 이것은 빔파워를 175W이상으로 증가함에 따라 용접비드폭의 크기보다 용입깊이가 크게 증가함을 의미한다. 따라서 레이저의 출력 증가는 재료표면에 더 많은 에너지를 공급하고, 재료표면으로부터 내부로 열 전달(heat flow)이 상승하여 용접부의 깊이는 증대된 것으로 생각된다.

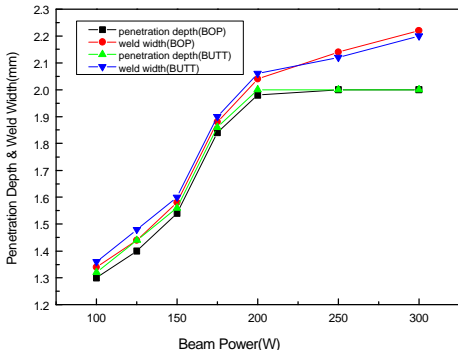


Fig.1 Effect of the beam power on Weld Bead.

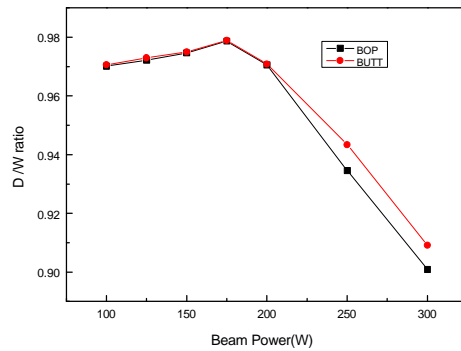
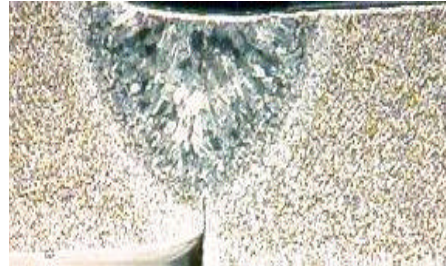


Fig.2 Depth/width ratio of welds with beam power.

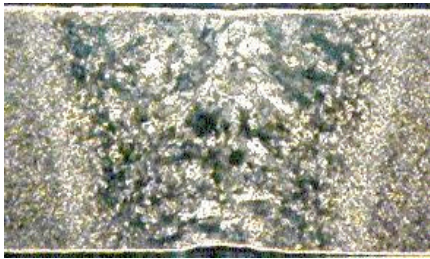
Fig 3 a)와 b)는 125W 출력에서 비드 온 플레이트와 맞대기 용접으로 빔출력의 부족으로 재료의 중간부분까지만 용융이 되었을 뿐, 입열 에너지가 전체적으로 전달되지 않았음을 볼 수 있다. 1.39t 판재는 36J(평균출력 150W, 용접속도 250mm)의 입열량에서 이면비드가 나타나기 시작하였고, 45J(평균출력 150W, 용접속도 200mm) 부근에서 용입 특성이 우수하였으며 용접부의 깊이와 비드의 폭 (Fig. 3(c), (d))이 비슷하게 넓어졌다. 2.0t의 경우는 48J(평균출력 200W, 용접속도 250mm)의 입열량에서 이면비드가 형성되고, 60J(평균출력 200W, 용접속도를 200 mm)에서 완전한 용입이 일어났다. 또 빔 파워가 높을수록 용입깊이와 비드폭(aspect ratio)의 비가 커지고, 과도한 금속증발로 인한 spattering 현상과 비드 표면이 거칠게 나타났다. Butt 용접에서 재료간의 틈이 생긴 경우는 틈새로 인한 열손실이 발생하여 용접상부에 수축작용이 일어나 침강되므로^{3,4)} 재료 사이의 간격(gap) 선정이 매우 중요한 요인으로 작용하고, 용접선의 정렬이 중요하였다.



(a) 빔 출력 125W (BOP)



(b) 빔 출력 125W (BUTT)



(c) 빔 출력 150W (BOP)



(d) 빔 출력 150W (BUTT)

Fig. 3 Cross-section of laser weld depth and width between butt joint and bead on plate.

그림(Fig. 3(c), (d))에서 보면 용융부 외각의 흰색을 띠는 부분이 용융부와 모재의 경계를 나타내는 열영향부(HAZ)로 다른 용접부(TIG나 PAW)에서 나타나는 열영향부 보다 크기가 훨씬 작다. 이것은 가열용융영역이 넓고 냉각속도 범위($10 \sim 10^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{sec}$)가 느린 TIG용접과 비교하여 레이저 빔 용접은 고에너지 밀도용접으로 가열용융영역이 좁고 냉각속도가 $10^2 \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{sec}$ 범위로 상당히 빠르기 때문이다⁵⁾.

3.1.2 용접속도 변화에 의한 영향

레이저 용접시 용접속도(Table 2)는 입열에너지와 깊은 관계가 있다. 용접속도가 증가하면 레이저빔과 재료표면과의 상호 반응시간이 줄어들어 재료표면에 흡수되는 에너지의 양이 적어진다. 용접속도(Fig. 4)의 증가에 따라 용입깊이와 폭의 크기가 비슷하게 줄어드는 양상을 띄고 있다.

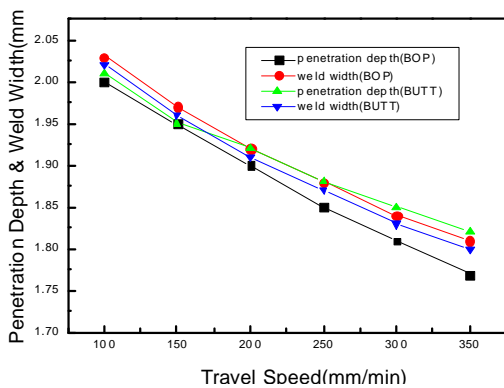


Fig. 4 Effect of the travel speed on weld bead. (penetration depth & weld width)

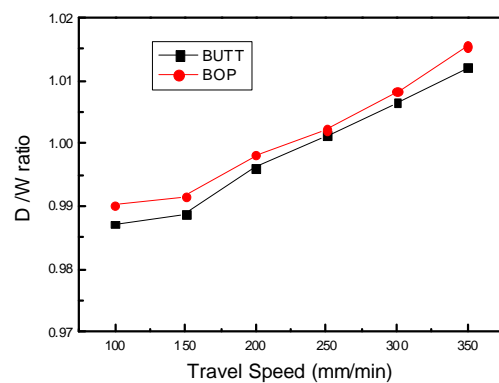


Fig. 5 Aspect ratio vs travel speed

Fig. 6(a)는 용접속도 변화에 따른 용입형상을 나타낸다. 이동속도가 느린 경우는 조사된 에너지가 모재표면을 용융 및 기화시키기에 충분하다. 따라서 빔 출력이 증가될 경우 맞대기용접의 경우는 완전 용입되는 용접부의 폭은 균일하게 형성되어 상부폭과 하부폭의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. Fig. 6(b)는 BOP 용접으로 이동속도(100~350mm/min)를 증가시켰을 때, 용입깊이의 변화와 함께 용입폭이 상대적으로 쉼기모양의 역삼각형 모양으로 좁아져 있는 것을 볼 수 있다. 이는 용접비드의 폭이 용입깊이 보다도 더 감소되었기 때문으로, BOP 용접부에서 전형적으로 나타나는 현상이다. 동일조건에서 BOP와 Butt 용접부의 용입깊이와 폭을 비교한 결과 거의 무시할 정도의 차이를 보였고, BOP 용접부의 모양은 상부 덧살이 약간 볼록하게 나온 형상이지만, Butt 용접에서는 덧살이 거의 형성되지 않았다. 또 용접부의 형상비는 시험장비, 시험방법 및 재료의 특성 등에 따라 시험결과에 차이가 있는 것으로 사료된다.

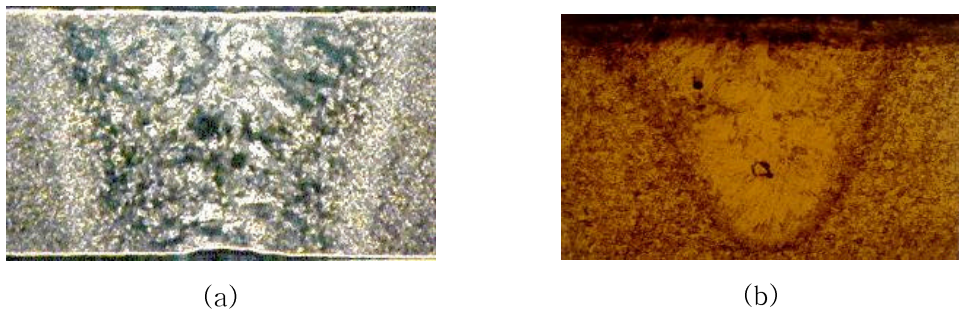


Fig. 6 Cross-section of penetration depth and weld width with welding speeds
 (a)150 mm/min in butt welding (b) 300 mm/min in BOP welding

3.1.3 펄스폭(pulse duration) 변화에 의한 영향

Table 3의 방법으로 펄스폭의 변화에 따른 펄스에너지와 접합강도를 조사하였다. 같은 출력에서 펄스폭 2.5ms와 7.5ms로 용접한 판재를 비교해보면, 펄스폭(Fig 8, 9)이 길어질수록 용입깊이와 비드의 폭도 증가하였다. pulse폭이 짧은 (2.5ms) 용접부는 레이저빔에 의해 흡수된 열이 판재 내부에까지 용이하게 전달되지 않아 용접표면층 일부만 증발하게 되고, 따라서 용융부의 감소로 판재간의 접합면적이 작아졌다. 또 펄스폭이 짧은 BOP 용접의 경우는 용접중앙부에 큰 기공이 발생할 수 있었다. 용융부의 접합강도는 펄스폭 (2.5ms-9ms)이 서서히 커짐(Fig. 7)에 따라 열이 재료표면에서 밀면까지 골고루 전달되어 증가하였고, 9ms 이상에서는 용입깊이와 폭이 7.5ms 수준으로 유지되는 것으로 사료된다. 첨두출력(2KW)을 유지한 상태에서 펄스폭을 변화시킬 때 시험범위 내에서는 펄스폭의 증가에 비례하여 펄스에너지도 증가(Fig. 10)함을 알 수 있었다. 또 펄스모드(pulse mode) 용접에서는 펄스폭이 5ms까지는 비드 깊이가 급속한 증가를 보이고, 5ms에서 20ms까지는 포화(saturation) 상태로 되어 펄스폭과 파워밀도의 증가에 따라 용입깊이와 폭의 면적이 점점 크게 형성되었다^{6,7)}.

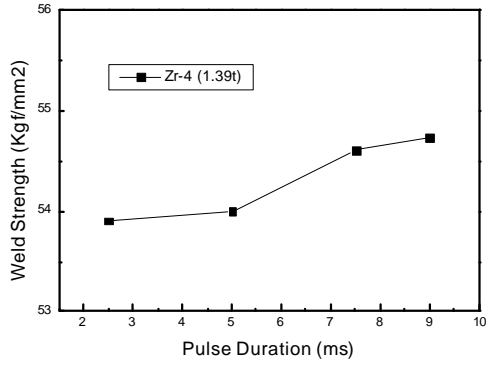


Fig. 7 The effect of pulse duration on the weld strength

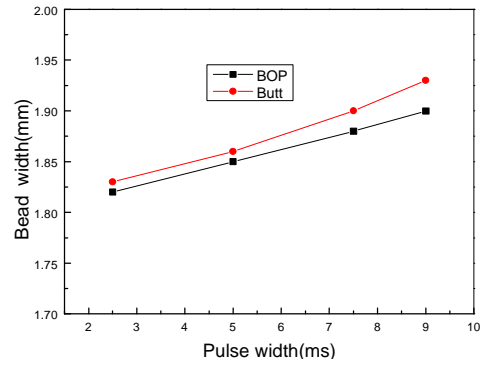


Fig. 8 The effect of pulse width on bead width

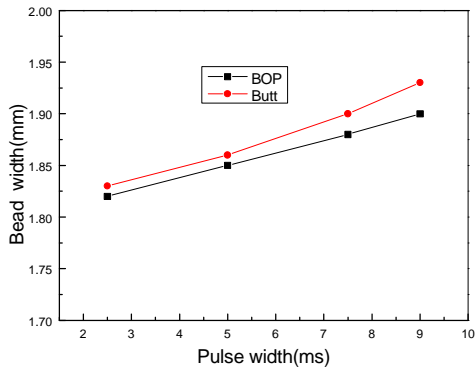


Fig. 9 The effect of pulse width on bead width

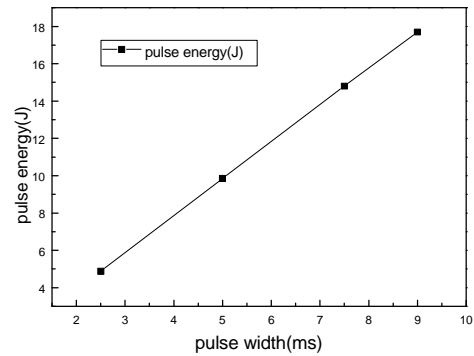


Fig. 10 The effect of pulse width on laser pulse energy

3.1.4 빔초점(defocusing) 변화에 의한 영향

레이저 출력을 60J(평균출력 200W, pulse폭 7.5ms, pulse frequency 13.5Hz, 이동 속도 200mm)상태에서 초점이 재료표면을 기준(0)으로 물체표면 윗 방향(positive defocusing)을 +로, 재료 내부(negative defocusing) 방향을 -로 정하여 +3에서 -3까지 변화시켜 보았다. 광학계의 특성상 기준점에서 상·하 같은 거리에 있는 레이저빔의 세기는 동일하여야 하나, 2mm 두께 이상의 재료에서는 빔 초점이 표면 아래에 위치하는 것이 용입 깊이 및 폭 모두가 증가함을 보여 -방향(negative defocusing)에서 대체로 용입특성이 우수하게 나타난다고 하였다⁸⁾. 이와 같이 최적 빔 초점 위치는 시편의 두께와 사용레이저 빔 출력에 따라 다르다. 본 실험에서는 2.0mm 두께의 재료 표면의 0.5mm 아래에 집속된 빔용접에서 최대 용입 깊이와 폭을 보인 것으로 최적 빔 초점 위치로 볼 수 있다. 또 적정량의 보호가스 공급으로 산화를 방지하고, 렌즈와 재료사이의 거리를 가능한 범위로 멀리하여 스패터(splatter)로 인한 렌즈의 손상과 빔의 특성 저하를 방지할 필요가 있었다. 빔 초점을 +3에 위치(Fig. 11(a)) 했을 때, 용접폭은 넓게 퍼져 있는 반면, 용접깊이는 상대적으로 줄어들어 완전 용접되지 않았음을 볼 수 있다. 이것은 keyhole 이 충분히 형성하지 못한 상태에서 용접이 진행되어 용입 깊이가 크게 낮아졌기 때문이다. Fig. 11(b)는 시편을 완전 용입하기 위해서 초점을 크게 하여 출력을 상승한 결과, 용접폭이 넓어져 있음을 볼 수 있다. 핵연료봉 지지격자의 레이저용접에는 주로 cross(+) 면의 접합에 레이저빔 spot을 물체 표면에서 약 2.5mm 넓게 집속하도록 고정된 상태로 실험 한 결과 약 2mm의 두께

까지는 용융면적의 변화가 없었다.

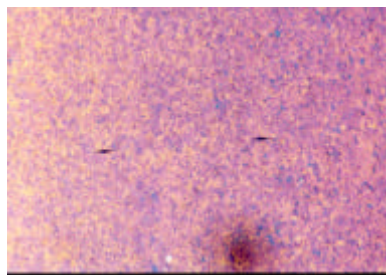


Fig. 11 Effect of defocusing on the weld formation

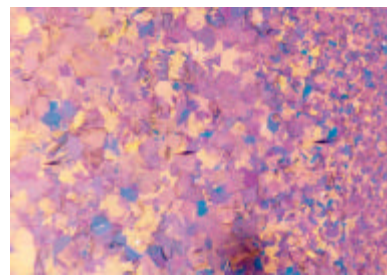
3.2 미세조직과 기계적시험

3.2.1 미세조직시험

Fig. 12는 일정한 용접출력(빔파워 200W, 용접속도 200 m/min, Ar가스 150ℓ/분)에서 비드 단면을 100배로 촬영한 모재부 및 용접부의 조직을 나타낸다. (b)와 (c)의 HAZ부는 α 와 $\alpha + \beta$ 영역으로 가열되었다가 냉각되므로 β 입자내 α 상들이 서로 평행한 침상의 Widmanstätten α 조직과 α -기지조직이 공존하는 입자 미세화 영역으로 형성되어 용접부 보다 경도값이 낮았던 것으로 사료된다. 용접부((d))는 액상영역으로 가열, 냉각되었던 용접선을 중심으로부터 β 상을 통해 냉각되므로 조대한 주상정(columnar)이 생기고 β 입자 내의 많은 면(plane)들로부터 α 상(α -plate)들이 불규칙하게 형성하여 상호 연결되는 바스켓위브(basketweave) 미세조직이 형성되었다^{9,10}. 펄스모드의 레이저는 CW에 비해 용접부의 열 사이클이 복잡하고, 용융부의 온도경사에 의한 응고과정에 차이가 생기므로 기공과 응고 균열이 자주 발생하는 반면에 CW에서는 이런 기공과 균열이 거의 발생되지 않았다.



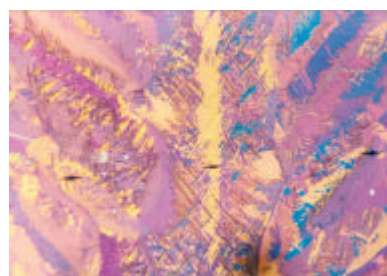
(a) Base Metal



(b) Base metal+ HAZ



(c) HAZ+ WM



(D) WM

Fig. 12 Microstructure of Laser Beam welded Zr-4 specimens (X100)

Fig. 13 a)는 Zircaloy-4 용접부를 상온인장시험에 의해 파단된 시험편의 양상을 주사현미경(SEM)으로 관찰하였다. 주요 파단 원인은 미세기공(microvoid)이 생긴 합금에 과부하 인장하중(overload)이 작용되었기 때문이다. 파단면은 구조가 작고 움푹 패인 요철이 생기며, 미세기공이 합체(coalescence)된 양상으로 나타난다. 컵 모양으로 함몰(cuplike depression)된 부분을 딩플(dimple)이라 부르고, 이 딩플은 용접 후 빠른 냉각으로 응고조직 과정에서 입자크기가 작아 미세한 기공들이 모여 있다. 이는 전형적인 연성 파괴의 양상으로 나타나고, 이때 fracture mode를 dimple rupture라 한다. Fig. 13 (b), (c), (d)는 딩플을 저배율 및 고배율로 촬영한 사진으로 용접금속내의 미세조직에서 나타나는 섬유질 구조(fiber structure)를 보이며, 주상정 조직(columnar structure)을 나타내고 있다. Zircaloy-4에 함유된 가장 낮은 비등점을 갖는 원소는 Sn으로 용접시 증발에 따른 손실을 조사하기 위해 EPMA로 성분분석을 한 결과, Sn이 Zircaloy-4의 표준성분 범위인 1.20~1.70% 범위로 유지되었다.

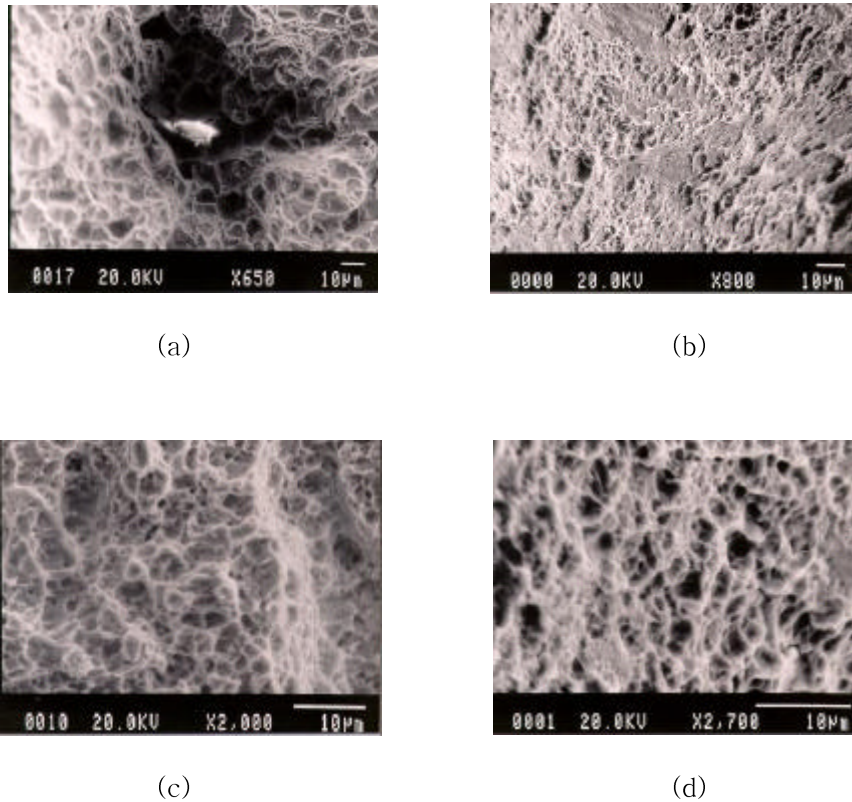


fig. 13 SEM fractographies of rupture by tensile test of Laser Beam welded Zr-4 specimens.

3.2.2 기계적성질

입열량의 증가는 용접부의 냉각속도가 감소하게 되고 조대한 입자의 미세조직이 증가한다. 이로서 시험편의 인장 및 항복강도는 감소한다. 반면, 입열량이 줄어들면 냉각속도가 증가하여 경성의 마르텐사이트형의 미세조직이 늘어나고 따라서 경도가 증가하는 것으로 사료된다. Zircaloy-4 합금의 용접부와 모재의 인장시험(Fig. 14)결과로 최대파열 연신율의 평균치 23%, 평균 항복강도 42Kgf/mm², 평균 인장강도는 54Kgf/mm²로 나타났다. 인장강도는 모재의 52.6kgf/mm²에 비하여 용접시험편은 52-55kgf/mm²로 약간 증가하였지만, 연신율은 모재의 32%에 비해 용접시험편은

20~25%로 약간 감소하였다. 비교적 넓은 범위의 용접 공정 변수들에 대하여 시편의 인장강도는 크게 변하지 않았다고 보여진다. 또 횡방향으로 용접된 인장시편은 열영향부 및 모재부에서 파괴된 것으로 봐서 용접성이 대단히 양호한 것으로 판단된다. 용접부의 경도분포는 Fig.15와 같이 대략 모재 160~190Hv, 열영향부 200~220Hv, 용접부 230~250Hv로 분포되었다.

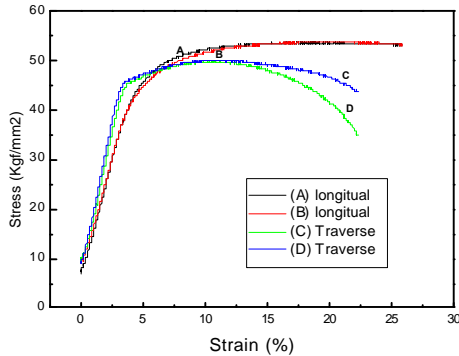


Fig. 14 Stress-strain curve of LB welded specimens.

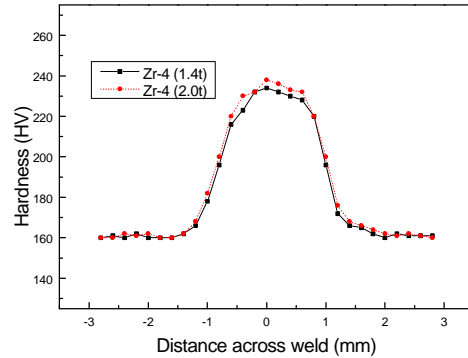


Fig. 15 Microhardness distribution across Zircaloy-4 welds.

4. 결론

- 1) Butt 용접에서 재료간의 간격(gap)이 벌어진 경우, 틈새로 인한 열손실이 발생하여 용접상부의 수축작용으로 침강되므로 용접재료 사이의 간격(gap) 선정이 매우 중요한 요인으로 작용하고, 용접선의 정렬도 중요하였다.
- 2) 동일조건에서 BOP와 Butt용접부의 용입깊이와 폭을 비교한 결과 거의 무시할 정도의 차이를 보였고, BOP 용접부의 모양은 상부 덧살이 약간 불룩하게 나온 형상이지만, Butt 용접에서는 덧살이 거의 형성되지 않았다.
- 3) 용접부의 미세조직은 바스켓위브 조직을 포함하는 주상정 조직을 이루고 열영향부에서는 Widmanstätten 조직이 형성되었다.
- 4) 맞대기 용접부의 용입비와 인장강도를 조사하여 본 결과 비교적 넓은 범위의 용접 공정 변수들에 대하여 용접부 인장강도는 크게 변하지 않았다.

참고문헌

1. B. Lustman, "Zirconium Technology - Twenty Years of Evolution", ASTM STP 681 (1979), p.5-18
2. L. Lunde and K. Videm, "Effect of Material and Environmental Variables on Localized Corrosion of Zirconium Alloys," ASTM STP 681, p.40-59
3. R. Akhter, W.M. Steen, and K.G Watkins : Welding of Zinc-Coated Steel with a Laser and Properties of the weldment, J. of Laser Appl. Vol.3 No.2(1991) p.9-20.

4. William M. steen., Laser Material Processing., Speinger-Verlag., p.122-124.
5. J. A. Greenwood, British Welding Journal, 8(1961), p316
6. Katayama, Takemoto, Matsunawa., Effect of Pulse Sharp on Melting Characteristics in Pulsed Laser Spot Welding., ICALEO (1995) p.846-855.
7. Matsunawa, Katayama, Ikeda, Nishizawa., Effect of Pulse Sharping on Defect Reduction in Pulsed Laser Welding., ICALEO(1992), p.547-556.
8. M.PASTOR, H.ZHAO,R.P.MARTUKANITZ and T.DEBROY. Porosity, Underfill and Magnesium Lose during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plate of Aluminum Alloy 5182 and 5754., welding research supplement June (1999) P.207s-216s.
9. 고진현., 핵연료 피복재 Zircaloy -4의 용접성 연구., 한국원자력연구소, KAERI/CM-218/97
10. A. A. Bryukhanov et al: Avt Svarka (1985), p.17-19.