

Nd-YAG 레이저를 이용한 Zircaloy-4 판재의 맞대기 용접에 관한 연구

A Study on the Butt Welding of Zircaloy-4 Sheets Using Nd:YAG Laser

황 용 화*, 고 진 현**

* 한국원자력연구소 조사후시험시설
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

** 한국기술교육대학교 신소재공학과
충남 천안시 병천면 가전리 307번지

ABSTRACT Laser beam weldability of Zircaloy-4 was investigated using a pulsed Nd:YAG laser of 550W average power. Mechanical properties and microstructure of laser butt welded Zircaloy-4 test specimens were examined. The influence of laser generated during laser welding was analyzed and optimum laser welding parameters were investigated.

1. 서 론

Zircaloy-4는 타 금속에 비해 중성자 흡수 단면적이 적고, 방사선 조사후 및 고온에서도 우수한 기계적, 물리적 성질과 내식성을 유지하고 냉각제에 강한 내식성, 내마모성을 가지기 때문에 경수로 및 중수로형 핵연료 피복관 및 구조재의 지지격자 소재로 널리 이용되고 있다. 이들 부품으로는 end cap, grid, spacer pad(간격체), bearing pad(지지체) 등이 있다. 접합방법으로는 end cap은 저항용접¹⁻³⁾, 간격체와 지지체 등은 베릴륨 용가재를 사용한 브레이징⁴⁾을 사용하고 있다. 고에너지밀도를 이용한 레이저 용접은 타 용접법보다 용입깊이가 깊고 용접속도가 크며, 열에 의한 열영향부가 좁아 변질층이 적고 기계적, 금속학적 특성으로 정밀용접 분야에 많이 이용되고 있다. 현재 경수로용 핵연료봉 지지격자의 제작은 laser로 용접되고 있는 등 핵연료제조에 확대적용 가능성을 알아보기 위해 end cap을 butt joint 하기 위한 기초조사로 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 레이저용접장치

본 실험에서 사용한 장비는 평균출력 550W급 Lumonics사의 JK701H 펄스형(pulsed) Nd:YAG 레이저 용접 시스템으로 용접헤드, 전원 콘트롤 및 냉각장치로 구성되어 있고 레이저 발진기는 연속출력파(continuous wave)와 pulse mode를 사용할 수 있다. 용접 실험을 위해 사용한 Zircaloy-4 판재는 압연 및 어닐링 처리된 2mm의 동중두께 판재으로 압연방향으로 시편의 크기를 폭 30mm×길이 240mm로 절단하여 챔브 내의 이상적인 용접조건(산소(O₂) 7ppm이하, cell온도 615℃내외, 습도 100ppm이하)에서 맞대기 용접(butt welding)과 bead-on-plate 용접을 하였다. 용접시 발생할 수 있는 변형을 최소로 줄이기 위해 피용접물의 가장자리에 하중이 가하도록 응용된 지그를 이송 고정구에 설치하여 용접재료를 고정하였다.

2.2 시편제작 및 실험방법

용접헤드에서 발생하는 빔의 초점은 시편표면에 집속시켜 레이저의 출력(Table.1), pulse duration, 용접속도, defocusing, 보호가스를 변화하여 시편의 표면상태, 용접폭과 초점깊이 등 용접공정변수들이 용접에 미치는 영향을 관찰하였고 시편은 ASTM E82-87a의 규격으로 가공하여 모재와 용접시편과의 인장강도를 비교하고 또 용접단면을 절단하여 기계적 특성과 미세조직을 관찰하여 Zircaloy-4 판재의 최적 용접 조건을 구하는데 그 목적이 있다

Table 1. 빔파위에 의한 영향

Beam Power	이송속도	보호가스
100,125,150,175,200W	200mm	150 l /min

3. 결과 및 고찰

3.1 용접변수에 따른 용입특성의 영향

(1) beam power와 용접속도 변화에 의한 영향

기기장치에서 레이저빔은 출력파형의 조정과 출력의 크기 정도가 변수로 작용되나, 출력특성은 임의로 변화시킬 수 없다. 레이저의 출력에너지는 용입깊이에 영향을 미치는 중요한 인자로 출력 파형을 연속파(CW)로 유지한 상태에서 출력에 따른 영향을 조사하였다. Fig.1은 빔의 초점이 재료표면을 0으로 할 때 용입 깊이에 가해지는 출력에너지의 증가에 비례하여 용입과 비드폭의 비가 커짐을 알 수 있고, 박판에서의 형상비(폭/깊이비), spattering 현상과 비드 상태는 펄스에너지에 관계없이 비슷한 경향을 나타내었다.

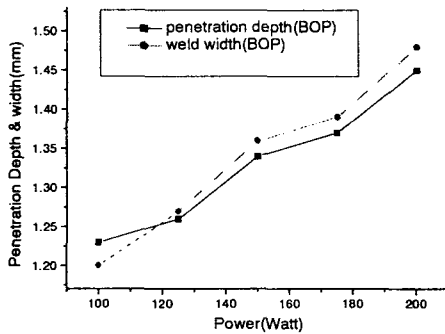


Fig.1 Effect of the welding variables (power, Penetration depth & weld width) on Weld Bead.

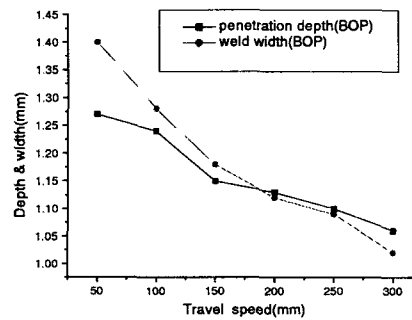


Fig.2 Depth and width of welds with travel speeds.

500W급 레이저용접기로 박판을 용접할 경우 출력에너지가 200W, pulse width 7.5ms, pulse frequency 13.5Hz, 보호가스(Ar) 150 l/min, 이송속도 200mm 부근에서 용입 특성이 우수하게 나타났으며, 용접부의 깊이와 비드의 폭비가 1에 가까웠고 그 이상에서는 용접비드폭 보다 용입깊이가 더 깊었다.

(2) 용접속도 변화에 의한 영향

용접속도의 증가는 용융지에서 용융형성과 크기의 변화를 가져오기 때문에, 레이저 용융지에서 키홀의 증발반력은 이송속도를 늦게하면 단위 면적당 빔 에너지 전달량이 증가하기 때문에 레이저빔과 용접재료가 충분히 반응할 수 있어 용접재료 표면의 온도가 상승하여 비등점에 도달하고 그 증발 반력에 의해 재료의 깊이방향으로 넓고 큰 홈이 생기는(drop out) key-hole이 형성되는 결과를 가져와 비드폭은 넓어진다. 따라서 용접속도는 입열량과 깊은 관계를 가지며 일반적으로 속도가 증가하면 용입깊이는 감소한다.⁵⁾

Fig.3은 용접속도 변화에 따른 용입형상을 나타내고 용접속도가 (50mm/min~300mm/min)으로 증가하면 용입깊이의 변화와 함께 용입폭이 상대적으로 좁아지고 있음을 알 수 있으나 완전 용입되는 용접부의 폭은 균일하게 형성되어 상부폭과 하부폭이 완만히 나타났다. 그러나 피용접물의 표면에서 전도되는 열로 속도가 증가할수록 용입깊이는 감소하고 용입깊이의 감소에 비해 용접비드 폭의 감소가 더욱 크기 때문에 하부 폭이 썩기모양으로 좁아졌다.

(3) defocusing 변화에 의한 영향

Zircaloy-4 판재를 평균출력 200W, pulse폭 7.5ms, pulse frequency 13.5Hz, 이송속도 200mm로 고정하고 defocusing 량을 +3에서 -3까지 변화시켜 보았다. Fig.3(a)는 defocusing 량을 +3에 위치했을 때 용접폭은 넓게 퍼져 있는 반면 용접깊이는 상대적으로 줄어들어 완전 용접되지 않음을 보여준다. Fig.3(b)는 같은 spot을 크게 하고 용접빔을 표면에 위치상태에서 시편을 완전 용입하기 위해

서는 출력의 상승이 요구되고 그 결과 용접폭이 넓어져 있음을 볼 수 있다. 핵연료봉 지지격자의 경우에는 주로 cross(+) 면의 접합에 레이저빔 spot을 물체 표면에서 약 2.5mm 넓게 집속하도록 고정된 상태에서 실험 한 결과 약 4mm의 두께까지는 용융면적의 변화가 없음을 알 수 있었다. 맞대기 용접에서는 비드의 모양이 사다리꼴로 나타나고 BOP 용접부는 둥근 삼각형을 취한다.

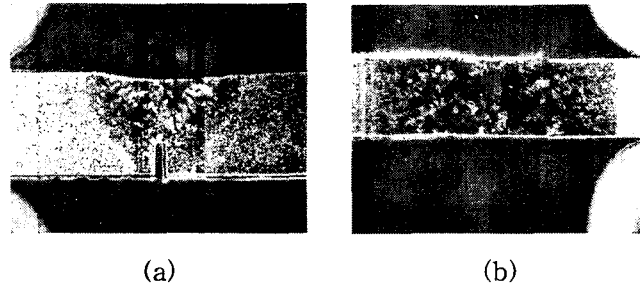


Fig.3 Effect of defocusing on the weld formation

4. 미세조직과 기계적시험

4.1 용접시편의 미세조직분석

용접부에서 용접부 형상의 변화를 다양하게 하여 그에 따른 용접형성빈도, 위치를 관찰하고 Fig.4에서 보는바와 같이 Zircaloy-4의 용접부는 액상영역으로 가열, 냉각되었던 용접선을 중심으로부터 β 상을 통해 냉각되므로 조대한 주상정(columnar)이 생기고 β 입자 내에 α 상이 상호 연결되는 바스켓위브(basketweave) 미세조직이 형성된다. HAZ부는 β 입자내 α 상들이 서로 평행한 침상의 Widmanstätten α 조직과 용접열사이클에 의해 입자 미세화 영역으로 형성되어 있다.⁶⁻⁷⁾

α 와 $\alpha + \beta$ 영역으로 가열되었다가 냉각되므로 Widmanstätten 조직과 α -기지조직이 공존하는 미세조직이 된다. 용접부는 국부적으로 액상영역으로 가열, 냉각되었던 용융부와 β 와 $\alpha + \beta$ 영역으로 가열, 냉각되었던 열영향부 사이의 미세조직은 다르게 나타났다. Fig.4(a)와 (b)처럼 열영향부내에서 입자 미세화 및 부분 입자 미세화된 영역 때문에 열영향부의 경도값이 용접부 보다 낮았던 것으로 사료된다.

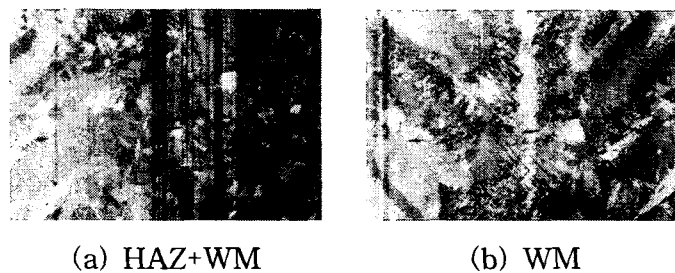


Fig.4 Microstructure of laser Beam welded Zr-4 specimens

4.2 기계적성질

입열량이 증가함에 따라 용접부의 냉각속도가 감소하여 조대한 입자의 미세조직이 증가하였기 때문에 용접시편의 인장 및 항복강도는 감소하는 반면, 입열량이 감소함에 따라 냉각속도가 증가하여 경성의 마르텐사이트형의 미세조직이 증가하였기 때문에 강도가 증가하는 것으로 사료된다. Ar을 보호가스로 사용하여 용접된 시편에서는 언더컷이 발생되었으나 균열은 발견되지 않았다.

4.3 인장시험 및 경도시험

Zircaloy-4 용접부와 모재의 인장시험결과로 종방향 및 횡방향의 용접시편에서 용접부의 인장강도

및 항복강도는 모재의 인장 및 항복강도와 비슷한 수치를 보이고 연신율은 낮았다. 또 용접시편의 인장시험에서 횡방향으로 용접된 시편은 열영향부 및 모재부에서 파괴되었다. 용접부의 경도변화를 조사하기 위해 미세 조직 검사에 사용되었던 레이저용접시편을 micro vickers 경도계로 용접비드를 중심으로 하는 횡단면을 모재에서 용접부 순으로 경도값을 구하였다. 용접부의 경도분포는 대략 용접부 230-250Hv, 열영향부 210-220Hv, 모재 190-210Hv로 분포되어 있다

3. 결 론

1) 프로세서용 레이저 용접장치로 연구용 장치와는 달리 Beam Power 200W, pulse frequency 13.5Hz, pulse width 7.5ms를 고정하고 보호가스 (Ar)의 유량을 변화시켜본 결과 20 l/min 이하에서는 용접부에서 산화가 발생하였고 60-200 l/min 사이에서는 정상적인 용접부위를 보여주었다.

2) 레이저 출력에너지를 상승시킬 때 용접부의 깊이 뿐만 아니라 비드의 폭도 넓어지고 있었다

3) 맞대기 용접에서는 피용접물 틈새로 열손실이 발생하고 용접진행 방향으로 용접열에 의해 gap 간격이 벌어지는 변형과 휨이 생기는 등 틈새발생으로 많은 변수가 발생할 수 있었다.

참고문헌

1. R.E BEAL and Z.P. SAPERSTEIN., Develplment of Brazing Filler Metals for Zircaloy., welding research supplement. p.275s-291s., July. 1971.
2. P. M.Bartle, LIM, Aweldl., Introduction to diffusion bonding., metal construction and British welding Journal. p.241-243., May. 1969.
3. 이정원., 중수로 핵연료 봉단마개의 저항업셋 용접을 위한 용접변수., KWS Vol.7.No.2, Jun.,1989
4. 고진현., 베릴륨 용가재를 사용한 핵연료피복재 지르칼로이-4 브레이징에 대한 연구., KWS Vol.11.No.4, Dec.,1993
5. William M.Steen.,Laser Material Processing., p.122.
6. 고진현., 핵연료 피복재 Zircaloy -4의 용접성 연구., 한국원자력연구소, KAERI/CM-218/97
7. A. A. Bryukhanov et al: Avt Svarka 1985(11), p.17-19