

研究論文

Zircaloy-4의 플라즈마아크용접에서 용접변수가 비이드형상에 미치는 영향

고진현* · 김수성** · 양명승*** · 이영호****

A Study on Effects of Parameters on Beads by Plasma Arc Welding for Zircaloy-4

J. H. Koh*, S. S. Kim**, M. S. Yang*** and Y. H. Lee****

Key Words : Zircaloy-4, 플라즈마아크용접 (Plasma Arc Welding), 플라즈마 가스 (Plasma Gas), 보호가스 (Shielding Gas), 입열량 (Heat Input), 언더컷 (Undercut), 바스켓위브 (basketweave), 위드만스태턴 (Widmanstatten), 미소가공 (microvoid coalescence), 덩플 (dimple), 의사취성파괴 (quasi-cleavage fracture)

Abstract

A study was undertaken to determine the influence of welding variables such as shielding and plasma gases, torch standoff, travel speed and heat input, etc. on the quality of plasma arc welds in Zircaloy-4 sheet, 2mm thick. Effect of shielding gases and their flow rates on the mechanical properties of Zircaloy-4 welds by plasma arc welding were determined in terms of tensile, hardness and bend tests. The microstructure and fracture surface of Zircaloy-4 welds were investigated by optical and scanning electron microscopies. In addition, the causes of porosity and undercut in plasma arc welds of Zircaloy-4 were also investigated.

Zircaloy-4 weld bead width and depth by helium shielding gas showed a wider and deeper than those by argon. It was found that Zircaloy-4 welds with shielding gas of helium did exhibit a little smoother and uniform weld beads than those with shielding gas of argon. It was also found that the optimum gas flow rates for Zircaloy-4 welding were 0.45 l/min for plasma gas

* 1997년 5월 7일 접수

* 정회원, 한국기술교육대학교

** 정회원, 한국원자력연구소

*** 비회원, 한국원자력연구소

**** 정회원, 충남대학교 기계공학과

with Ar and 4.5-6 l/min for shielding gas with He. In addition, there was no big difference in the microstructure and fracture surface of the weld metals made by either Ar shielding gas or He shielding gas.

1. 서 론

Zr 합금의 용접에 대한 연구는 주로 핵연료 제조와 화학공업 분야에서 수행되고 있다. 핵연료 제조시 용접의 중요성은 결함이 없는 건전한 용접부를 얻어함이 필수적이기 때문이다. 이것은 핵연료가 예상된 기간 동안 원자로 내에서 연소될 때 발생하는 핵분열 생성물(fission products)이 용접결함을 통해 외부로 누출됨이 없어야 하기 때문이다. 따라서 신뢰성 있고 안전한 핵연료를 제조하기 위해서는 건전한 용접부를 얻을 수 있는 용접법의 선택과 용접기술 개발의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다.

현재 핵연료 제조에 상용되거나 또는 연구중인 용접법을 조사해 보면 용접으로는 가스 텅스텐 아크용접^{1,2)} (Gas tungsten arc welding (GTAW) 또는 Tungsten inert gas (TIG)), 레이저 빔 용접 (Electron beam welding, LBW)³⁾, 플라즈마 아크 용접 (Plasma arc welding, PAW) 등이고, 고상 용접으로는 저항업셋버트 (Resistance upset butt)⁴⁾ 용접과 확산압접 및 브레이징⁵⁾ 등이 있다. 이상의 각 용접법을 이용하여 핵연료 피복재료인 Zircaloy-4를 용접할 때는 각각의 특성상 장점과 단점이 있으므로 핵연료 설계와 제조회사에 따라 사용하는 용접법도 다르다. 또 새로운 핵연료의 개발에 따라 용접이음설계 및 용접부품의 치수변경과 용접부가 가져야 할 요구조건이 달라지기 때문에 최적 용접법의 선택이란 쉬운일이 아니다. 따라서 기존의 핵연료 성능을 향상할 뿐 아니라 새로운 핵연료 개발을 위해 Zircaloy-4의 플라즈마 용접특성 및 용접기술에 대한 연구가 필요하다. 이 분야의 연구는 수행된 것으로 보고는 되고 있지만 발표된 연구 결과는 드물다.

플라즈마는 고에너지 상태에서 이온화 기체로서 전도성이 있는 "제 4상태의 물질"이라 하며 PAW는 1960년대 로켓 케이스 용접에 사용된 후 우주항공 분야에 많이 이용되고 있다⁶⁾. PAW는 특수형태

의 GTAW라 할 수 있는데 수축노즐 (constricting nozzle)로 전류밀도를 증가시켜 고에너지 밀도를 얻을 수 있어 종래에 어려웠던 금속의 절단뿐 아니라 금속 및 비금속의 용사에는 물론 미사일 케이스 용접, 배관용접 및 지르코늄, 티타늄 등의 용접에도 이용되고 있다.

PAW는 흔히 GTAW와 비교되는데 비소모성 전극, 저입열량 및 불활성 가스를 보호가스로 사용하는 점에서는 유사하나 Fig. 1과 같이 플라즈마 아크토치에서는 전극이 수축노즐로부터 후퇴되어 있고 플라즈마 가스가 노즐에 있는 작은 구멍을 통해 흘러 플라즈마 아크를 발생한다. 전극을 통해 흐르는 전류는 플라즈마 가스 또는 오리피스 (orifice) 가스에 의해 전류 전도성의 고도로 전하된 이온화 플라즈마를 생성한다. 이 수축노즐 주위에는 외부 가스 노즐을 통해 보호가스 (shielding gas)가 흐른다. 이와같은 장치 때문에 PAW는 GTAW와 특성상 분명히 구별된다. 즉 아크가 좁고 방향성이 강하기 때문에 깊은 용입과 좁은 열영향부의 용접이 가능하다.

본 연구에서는 키홀 모드 용접 (keyhole mode welding)을 이용할 수 있는 일종의 고에너지 밀도 (high energy density) 용접법으로도 분류가 가능한 플라즈마 아크 용접법에서 플라즈마 가스 (plasma gas) 및 보호가스 (shielding gas)에 대하여 지금까지 연구된 결과들을 통하여 조사하고 또 이 용접법

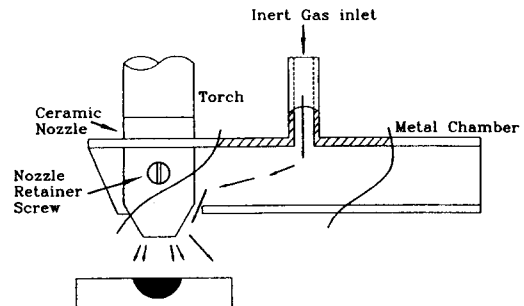


Fig 1. Schematic of trailing shield for Zircaloy-4 welding

을 이용한 핵연료 피복재인 Zircaloy-4를 위한 용접 기술을 개발하기 위하여 용접변수에 따른 입열량과 플라즈마 및 보호가스가 Zircaloy-4 용접에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 용접가스의 영향

핵연료 피복재인 Zircaloy-4 판재를 PAW할 때 플라즈마 가스 및 보호가스 등이 용접에 미치는 영향에 대한 연구보고는 거의 없다. 따라서 지금까지 강재 등 기타 금속용접의 연구결과를 알아본다. 적절한 플라즈마와 보호가스 및 이들 유량의 선택이 성공적인 용접에 중요함은 의심 할 여지가 없다. 이들 가스의 선택과 조합은 특히 용접 비드폭 (bead width), 용접부 형상, 용접속도 및 용접결함 등에 영향을 미치고 또 플라즈마 용접에서는 이들 가스의 영향은 상호연관되기 때문이다.

2.1 플라즈마 가스 영향

플라즈마 가스는 플라즈마 제트를 통해 용접결과에 직접영향을 미친다. 순수 Ar이 가장 많이 이용되며 신뢰성있는 플라즈마 가스이다. Ar은 완전 불활성 가스이나 열전도도 계수가 낮기 때문에 불룩하고 불균일한 용접비드를 형성한다.⁷⁾ 또 플라즈마 가스 유량이 너무 낮으면 전극손상과 불완전 용입을 초래하고 지나치게 높으면 용접부에 기공 (porosity)과 언더컷 (undercut)을 발생할 수 있다.⁸⁾

Larue⁹⁾ 등에 의하면 두께 3-4mm의 강판재를 맞대기 용접할 때 플라즈마 및 보호가스 모두를 Ar으로 사용하였더니 균일한 용입과 비드형상을 얻기가 불가능했다고 보고하고 있다. 기타 연구자들도 Ar에 수소(약 5% 이하)를 혼합하거나 Ar에 CO₂가스를 혼합하여 플라즈마 가스로 사용하였더니 Ar보다 용접비드가 더욱 평활하고 매끈하고 언더컷이 작았다고 한다.^{10,11)} 그러나 플라즈마 가스에 있는 수소량은 용접금속의 전체 수소량에 가장 큰 영향을 미친다.¹²⁾ 이와같이 강재의 플라즈마 용접시 수소의 혼합이 용접부에 나쁜 영향을 미칠 수 있듯이 수소와 친화력이 있어 지르코늄 수화물^{13,14)}을 잘 생성하는 Zircaloy-4의 용접시 플라즈마 가스에 수소를 혼합하여 사용하는 것은 가능한 한 피하여

야 할 것이다.

또 Ar은 He과 비교하여 이온화 포텐셜이 낮아 플라즈마 발생이 용이하고 또 안정된 아크를 유지할 수 있다고 알려져 있기 때문에 플라즈마 가스로 Ar를 사용하는 것이 물리적 특성^{8,15)}으로나 경제적으로도 유리하다고 본다.

2.2 보호가스

보호가스는 플라즈마의 전류전도에 기여하고 용융금속을 보호하는 것 이외에 플라즈마 스트림(plasma stream)을 통해 용접부에 침투하기 때문에 그 물리적 성질에 따라 아크와 용접부의 성질에 영향을 미친다. PAW에서 보호가스는 플라즈마 가스와는 달리 용융부와는 직접 접촉하지 않기 때문에 용접품질에 미치는 영향은 플라즈마 가스 만큼 크지는 않지만 역시 무시할 수는 없다. 강재의 용접시 사용가능한 보호가스로는 Ar, Ar-H₂, Ar-CO₂와 Ar-O₂ 혼합 등이지만 Ar이 가장 신뢰할 만한 보호가스로 알려져 있다.¹⁰⁾

Al 합금용접에서 He은 판재의 산화물의 청정에도움을 주지 못하나 Ar은 청정효과가 있고⁸⁾ 또 He은 Ar에 비하여 이온화 퍼텐셜이 높고 아크 안정성이 낮다고 알려져 있고 또 He은 저밀도이기 때문에 Ar에 비해 더 큰 가스유량이 요구된다.

3. 실험 방법

3.1 재료

본 실험에 사용된 Zircaloy-4는 두께 2mm 판재로 중수로형 핵연료에서 방향지지체 (bearing pad)용으로 실험목적에 따라 두 가지로 절단하여 사용하였다. 인장시험용으로 30x150x2mm와 굽힘시험용으로 100x150x2mm 크기로 절단하였다.

3.2 용접장비 및 시편용접

실험에 사용된 플라즈마 아크 용접 시스템은 Fig. 2와 같이 250DC 전원 (power supply), 제어 콘솔 (control console), 냉각장치와 가스 공급 실린더로 구성된다. 용접토치는 직류 정극성 이행형

(DCSP transferred mode)으로 직경 2.5mm의 텅스텐 전극이 노즐로부터 3.2mm 후퇴(setback)되어 전극 끝에서 발생된 플라즈마 아크가 직경 1.57mm의 노즐구멍(nozzle orifice)을 통해 수축집중된다.

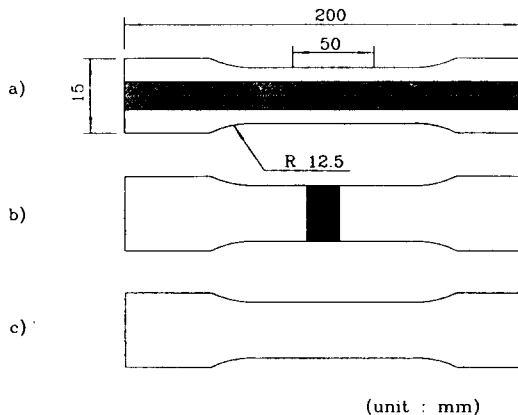


Fig. 2 Tensile specimens (a) longitudinal bead-on-plate weld, (b) transverse bead-on-plate and (c) base metal.

용접중 용융부를 대기 중의 공기로부터 보호하기 위하여 Fig. 3의 트레일링 쉴드(trailing shield) 장치를 설계 제작하여 사용하였다. 트레일링 쉴드는 용융금속의 응고시 용접부와 용접열에 의해 영향을 받는 인접 금속의 표면온도가 500°C 이하로 냉각될 때까지 불활성 가스를 흘러주어 보호하기 위한 것이다.

본 실험은 용접변수에 따른 용접 입열량과 보호 가스 및 플라즈마 가스의 유량변화가 용접에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 용접 입열량은 용접속도 또는 전류, 전압을 조합하여 변화시켰고 보호 가스는 Ar 또는 He을 사용하였고 플라즈마 가스로는 Ar을 사용하여 용접시편 중앙으로 제살용접(autogeneous weld)인 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접을 하였다. 먼저 Table 1은 Zircaloy-4 판재의 용접시 플라즈마 가스로 사용된 Ar의 유량이 모재 용접에 미치는 영향과 최적량의 Ar 유량을 조사하기 위하여 사용한 용접조건으로 유량만을 0.15~1.5 l/min 범위에서 변화시켰다. 그리고 본 실험에서 사용된 기타 용접조건은 Table 2와 같다.

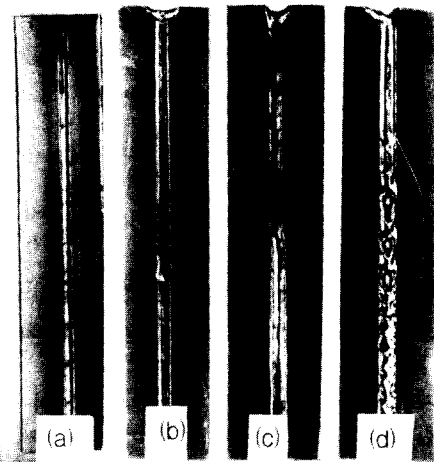


Fig. 3 Weld beads made with different flow rates of plasma gas (l/min). (a) 0.15, (b) 0.45, (c) 0.6 and (d) 1.

Table 1. Welding parameters to investigate the effect of plasma gas flow for Zircaloy-4 sheets with plasma arc welding

Travel speed (mm/min) : 320,
Welding current (A) : 45
Shielding gas, He (l/min) : 10,
Welding voltage (V) : 20
Plasma gas, Ar (l/min) : 0.15, 0.3, 0.45 0.6, 1, 1.5

Table 2. Welding parameters to investigate the effect of shielding gas flow rates for Zircaloy-4 with plasma arc welding

Shielding gas flow rate (l/min) : Ar 2-20* He 2-20*
Plasma gas flow rate (l/min) : Ar 0.45
Torch standoff (mm) : 3 (3-8)*
Electrode setback (mm) : 3.2
Thoriated tungsten electrode (mm) : ϕ 2.5
Welding current (A) : 45-60*
Welding voltage (V) : 19-26*
Travel speed (mm/min) : 320

* changeable in accordance with the experimental purposes.

3.3 기계적 시험을 위한 시편시험

3.3.1 인장시험

모재와 용접부의 기계적 성질 및 이음효율(joint efficiency)을 비교하기 위하여 Zircaloy-4 시트를 압연방향과 평행하게 시트 중앙으로 비드 온 플레이트 용접한 후 용접비드가 압연방향과 평행인 종방향(longitudinal direction) 인장시편과 용접비드가 압연방향에 수직인 횡방향(transverse direction) 인장시편과 모재의 인장시편을 CNC 가공기로 제작하였다. 인장시편의 게이지 길이는 50mm였고 인장시험시 크로스 헤드의 속도는 5mm/min였다.

3.3.2 경도시험

용접시편을 용접비드에 대해 횡방향으로 절단, 마운팅하고 미세하게 연마한 후 시편 표면으로부터 1mm 거리에서 표면과 평행하게 모재에서 용접부로 비커스 경도시험(하중 500g)을 0.5mm 간격으로 수행하여 용융부와 열영향부의 경도를 측정하고 동시에 열영향부 폭을 측정하였다.

3.3.4 굽힘시험

폭 150mm×길이 200mm×두께 2mm의 크기로 Zircaloy-4 판재를 압연방향과 수직으로 중앙을 통해 비드 온 플레이트 용접으로 용접한 후 시편 오른쪽과 왼쪽 가장자리로부터 25mm 이상을 절단한 후 30mm 간격으로 절단하여 굽힘시험 시편을 준비하였다. 준비된 시편은 용접부를 평탄하게 연삭한 후 굽힘시험 지그(guide bend test jig)에서 굽힘시험을 수행하였다. 굽힘시험은 표면굽힘(face bend)과 이면굽힘(root bend) 시험으로 수행되었다.

3.3.5 용접결함 및 미세조직 검사

용접비드 외부에 발생하는 결함 즉, 언더컷(undercut), 기공(porosity) 및 균열 등을 육안으로 검사한 후 용접시편을 절단, 마운팅, 연삭 및 미세 연마한 후 HNO₃, HF, H₂O 용액에 부식한 후 광학 현미경으로 용접금속 및 열영향부의 미세조직을 조사하였다. 또 파단된 인장시편을 사용하여 주사전자 현미경으로 파단면을 보호가스의 관점에서 조사하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 플라즈마 및 보호가스의 영향

PAW가 GTAW와 비교하여 여러 가지 점에서 다르지만 그중 하나가 플라즈마 가스와 보호가스 모두를 Ar으로 사용하거나 또는 플라즈마 가스로는 Ar을 보호가스로는 He을 사용할 수 있고 또 용접 재료에 따라 기타 가스를 혼합하여 사용할 수 있는 것이다.

플라즈마 가스로 Ar을 선택하였는데 이는 He과 비교하여 이온화 퍼텐셜이 낮아 아크발생이 용이하기 때문이다. 이 Ar을 사용하여 유량을 변화시키면서 용접한 결과 유량이 낮을 때(0.15 l/min)는 Zircaloy-4 모재에서 용융이 발생하지 않았고 유량을 0.30 l/min로 용접하였더니 용접비드의 폭과 형상은 균일하였으나 언더컷이 발생하였고 유량이 0.45 l/min으로 용접하였을 때 비드모양과 폭이 균일함은 물론 언더컷 발생도 훨씬 줄어들었다. 그러나 유량을 0.6 l/min로 증가했을 때 기공은 물론 언더컷도 발생하였고 유량을 더욱 증가하여 1 l/min로 용접하였을 때는 용접부에 다량의 기공이 발생하는 등 이미 앞에서 언급되었듯이 강재의 PAW경우와 같은 경향을 보였다. 따라서 플라즈마 가스로 Ar을 사용하여 두께 2mm의 Zircaloy-4 시트를 용접한 결과 적합한 플라즈마 가스유량은 0.45 l/min로 결정되었다.

본 실험에서는 보호가스가 Zircaloy-4의 용접에 미치는 영향을 조사하기 위하여 플라즈마 가스로는 Ar을 보호가스로는 Ar 또는 He을 사용하여 유량을 변화시키면서 이들이 용접비드폭과 형상에 미치는 영향을 조사한 결과 Fig. 4와 같이 He경우가 Ar경우보다 용접비드폭이 더 넓었으나 유량 8 l/min 이상에서는 용접비드폭이 거의 증가하지 않았다. 또 Fig. 5와 같이 He 경우가 Ar 경우보다 열영향부도 더 컸다. 이것은 He과 Ar을 물리적 특성으로 비교할 때 He이 Ar보다 열전도도가 상당히 크기 때문에 용접시 아크열이 모재로 잘 전달되므로 용융풀(molten pool)이 컸고 또 용융금속이 응고중 횡방향으로 잘 퍼져 Fig. 6과 같이 Ar 용접비드 보다 더욱 균일한 용접비드를 형성한 것으로 사료된다.

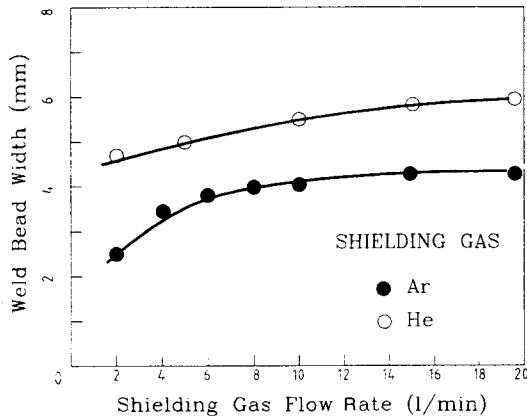


Fig. 4 Weld bead width as a function of shielding gas flow rate of Ar and He.

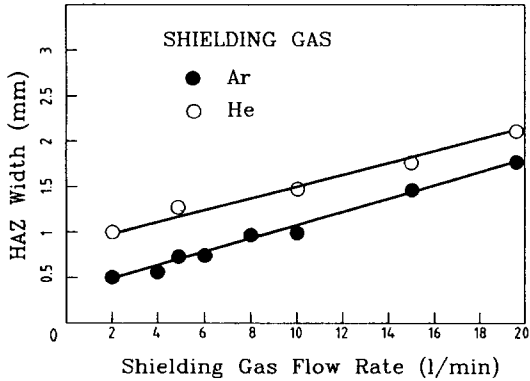


Fig. 5 Effect of shielding gas on the HAZ width of welds made with Ar and He shielding welding.

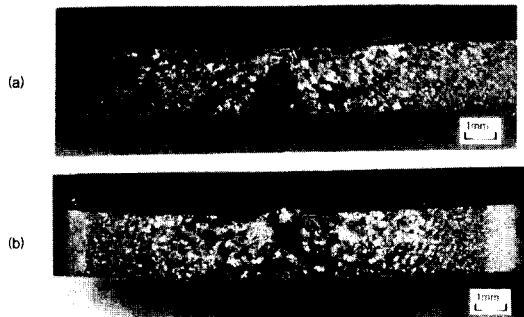


Fig. 6 Comparison of welded joints made with different shielding gases of (a) He, and (b) Ar.

Ar 용접비드에서는 He 용접비드와 비교하여 용융금속의 체적이 작아 용고속도가 다소 빠르기 때문에 파형이 균일하지 못하고 또 용융금속이 용고중 충분히 유동하지 못하여 용접비드가 중앙으로 불룩하게 물리는 경향이 있어 Fig. 7과 같이 언더컷을 형성하고 있다. 이 언더컷은 Ar 가스 유량을 변화시켜도 완전히 제거할 수가 없었다. 따라서 Zircaloy-4를 PAW시 Ar을 보호가스로 사용하면 언더컷 발생을 피하기 어렵다. 이에 비해 He 경우 유량 2 l/min 이하를 제외하고는 대체로 균일한 파형의 비드가 형성되었는데 이것은 용융금속이 용고중 잘 유동되어 용접축에서 횡방향으로 잘 퍼졌기 때문으로 사료된다. 그러나 He 경우 유량 4.5-6 l/min 범위에서 언더컷 발생이 가장 적었다.

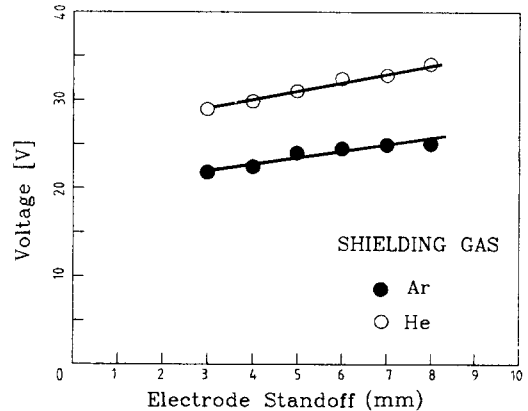


Fig. 7 Voltage change in Zircaloy-4 welds with plasma arc welding as a function of electrode standoff distance.

4.2 입열량의 영향

두께 2mm의 Zircaloy-4의 플라즈마 아크용접에서 용접속도를 일정하게 유지하고 전압 및 전류만을 변화시켜 입열량을 변화시켜 용접부를 조사한 결과 입열량 2.2kj/cm 이상에서는 Fig. 8과 같이 이면 비드가 나타나기 시작하였고, 입열량 2.4kj/cm 이상에서는 용접결합인 큰 기공이 발생하기 시작하였으며 입열량 3.0kj/cm에서는 절단되었다.

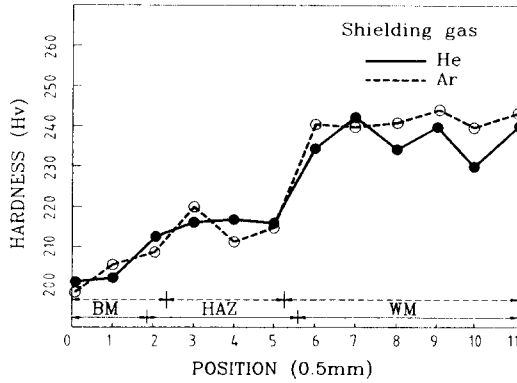


Fig. 8 A typical hardness profile of plasma arc welded Zircaloy-4 specimen with different shielding gases.

4.3 보호가스와 전극 스탠드오프와의 관계

Fig. 9는 보호가스 유량과 노즐과 모재 사이 거리인 전극 스탠드오프 (electrode standoff) 거리와의 관계를 보여주고 있다. Ar과 He 두 보호가스 모두에서 이 거리가 3-8mm 범위로 증가함에 따라 전압이 증가함을 보여주고 있으며 Ar보다 He 경우가 더욱 크게 증가하고 있다. 이것으로부터 동일 전극 스탠드오프 거리에서 He경우가 Ar 경우 보다 물론 열전도도가 크지만 높은 전압 때문에 입열량이 더 클것으로 예상된다. 이것은 다음의 입열량을 구하는 식으로부터 알 수 있다.

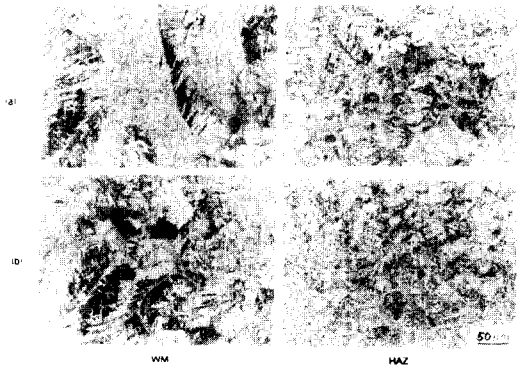


Fig. 9 Microstructure of weld metal and heat affected zone with different shielding gases of (a) He, and (b) Ar

$$H = 60EI/V$$

여기서 H : 입열량(J/mm), E : 전압(V), I : 전류(A) 와 V : 용접속도(mm/min)이다. 두 보호가스로 용접시 전류가 43V로 동일하여도 전압이 변했기 때문에 He일 때가 Ar일 때보다 입열량이 더 컸던 것이다. 보호가스가 He일 경우 전극 스탠드오프 거리가 2mm 이하에서는 Fig. 10과 같이 기공이 발생하였고 8mm이상에서는 아크 불안정하였기 때문에 용접품질이 불량하였다.

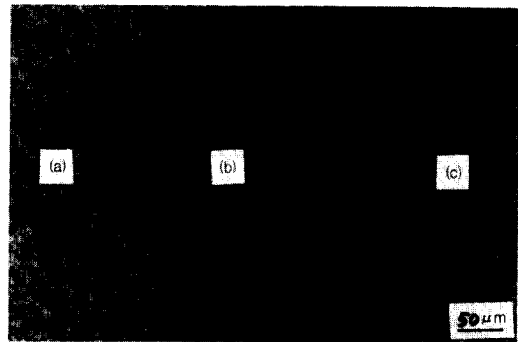


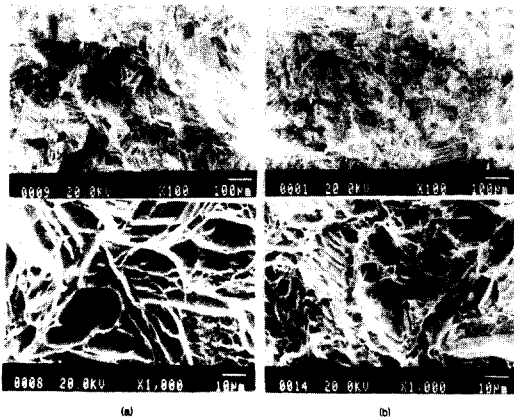
Fig. 10 Heat-affected zone microstructure of Zircaloy-4. (a) grain-refined region, (b) partial grain-refined region and (c) base metal

4.4 기계적 시험

Table 3은 Zircaloy-4의 플라즈마 아크 용접부와 모재의 인장시험결과이다. 종방향 및 횡방향 모두에서 용접부의 인장강도 및 항복강도는 모재의 인장 및 항복강도 보다 상당히 높았으나 연신율은 상당히 낮다. 또 한 입열량에서 보호가스만 다르게 하여 제작된 종방향 Zircaloy-4 플라즈마 아크 용접부의 인장성질을 비교한 것으로 이음효율을 계산하였다. He 및 Ar 보호가스에 의한 용접부의 이음효율은 136%와 121%로 He 경우가 더 높았다. 이것은 용접 비드폭이 더 넓은 등 용접금속량이 더 많았기 때문으로 생각된다. Fig. 11은 용접시편의 경도시험결과로 열영향부 크기를 결정하기 위한 것으로 동시에 용접부, 열영향부 및 모재의 대표적인 경도치를 비교하여 주고 있다.

Table 3. Tensile properties of base metal and plasma arc welds of Zircaloy-4

Specimen	yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Shielding gas
Base metal	27.2	33.7	21.8	25	-
Transverse weld	31.5	37.2	7.2	17	Ar
Transverse weld	32.8	40	7	16	He
Longitudinal weld	35	41	13.5	18.8	Ar
Longitudinal weld	38	46	10.0	18	He

**Fig. 11** Fractographs of Zircaloy-4 plasma arc welds made by shielding gases of (a) He and (b) Ar.

Ar과 He을 보호가스로 사용하여 제작된 용접시편 모두 Fig. 12(a)와 같이 표면굽힘시험에서는 양호하였다. 그러나 Ar 보호가스에 의한 용접시편의 이면굽힘시험에서는 모두 파괴되었다(Fig. 12(b)). 보호가스 He인 경우 이면굽힘시험에서 보호가스 유량 3-4.5 l/min범위에서 용접된 이면굽힘시험 시편에서는 균열발생 뿐 아니라 파괴도 발생되지 않았다. 그러나 이 범위밖의 보호가스 유량조건에서는 파괴가 발생되었다. 따라서 플라즈마 아크 용접으로 핵연료 피복재인 Zircaloy-4를 용접하기 위해서는 언더컷 발생을 피할 수 있는 용접기술이 확립되어야 함이 우선과제일 것으로 생각된다. 이는 핵연료가 원자로내에서 장기간 연소중 언더컷이 요드유발 응력부식균열 (iodine induced stress corrosion cracking)을 발생시킬 수 있는 장소가 될 수 있기 때문이다.

4.5 미세조직 및 파단면 검사

Fig. 13은 Zircaloy-4의 플라즈마 아크 용접에서 보호가스에 따른 용접부와 열영향부의 미세조직이다. 두 보호가스에서 용접부는 모두 전형적인 주상정(columnar) 조직을 보여주고 있고 주상정내에서는 마치 페라이트강의 용접부에 아시클러 페라이트가 형성되듯이 α -판상들이 상호 연결되는 바스켓위브(basketweave) 조직으로 구성되고 있고 열영향부는 빠른 냉각속도에 의해 β 입자내 α 상들이 서로 평행한 침상의 Widmanstätten α 조직이 형성되고 있다¹⁷⁾. 두 보호가스 차이에 따른 용접부 및 열영향부에서의 미세조직에는 큰 차이는 없으나 보호가스 He 경우의 용접부의 주상정 조직이 Ar경우에서 보다 더 크다.

Fig. 14는 보호가스에 따른 Zircaloy-4 용접부를 굽힘시험에 의해 파괴된 시편의 파단면의 주사전자현미경 사진으로 Fig. 14(a)는 He인 경우로 용접 파단면은 용접 미세조직인 바스켓위브 조직에서 α -판상을 따라 파괴가 발생된 것으로 입내파괴와 작은 딩플(dimples)들과 작은 양이지만 의사취성파면(quasi-cleavage facets)도 보인다. Fig. 14(b)는 보호가스 Ar인 경우의 굽힘하중에서 파괴된 시편의 파단면으로 He 경우와 같이 α -판상을 따라 입내파괴가 압도적이며 Fig. 14(a)와 같이 딩플과 일부 의사취성파면도 관찰되지만 연성파괴(ductile fracture)라 할 수 있다.

5. 결 론

핵연료 재료인 Zircaloy-4 판재의 PAW에서 플라즈마 가스 및 Ar과 He에 의한 보호가스와 입열량

이 용접에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 플라즈마 가스로 Ar을 사용하여 유량이 0.45 l/min일 때 적당량의 용융금속과 응고속도 때문에 용접비드 형상 및 폭이 균일하였다.

2) He 보호가스인 경우 Ar과 비교하여 용접비드, 용접부 및 열영향부가 조금 컸다. 또 보호가스가 Ar인 경우 용접비드가 볼록하고 언더컷이 발생하였으나 He인 경우 가스유량이 4.5-6 l/min 범위에서 평활하고 언더컷이 없는 용접비드를 얻었다.

3) He, Ar보호가스 모두에서 전극 스탠드오프 거리가 증가함에 따라 전압이 증가하였는데 He경우가 Ar경우보다 전압이 더 높았다.

4) 보호가스에 따라 용접부의 미세조직은 basketweave 조직을 포함하는 주상정 조직과 열영향부에서는 Widmanstätten α 조직을 가졌으나 보호가스에 따라 조직의 크기에는 큰 차이가 없었다.

참 고 문 헌

1. L. E. Mills: Zircaloy Welding Techniques Developed for Plutonium Program UO₂ Fuel Elements Fabrication, *Welding Journal*, Vol. 40, No. 2, Feb. 1961, pp. 141-151.
2. J. J. Vagi, R. L. Koppenhofer and D. C. Martin: Methods of End Capping Zirconium-Clad Reactor Pins, *Welding Journal*, Vol. 38, No. 2, Feb. 1959, pp. 78-84.
3. V. Ram, G. Kohn and A. Stern: CO₂ Laser Beam Weldability of Zircaloy-2, *Welding Journal*, July 1986, pp. 33-37.
4. J. H. Koh, J. W. Lee and S. H. Jung: The Effect of Weld Line on the Mechanical Strengths and its Elimination Process in the Zr-4 Resistance Upset Welds, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 23 No. 1, March 1991, pp. 1-11.
5. J. H. Koh and H. S. Kim: A Study on the Zircaloy-4 Brazing with Beryllium Filler Metal for the Nuclear Fuel, *Journal of the Korean Welding Society*, 11(4), Dec. 1993, pp. 177-185.
6. C. W. Chang and J. Szekeley: Plasma Applications in Metal Processing: *Journal of Metals*, Feb. 1982, pp. 57-63.
7. R. Hou, D. M. Evans, J. C. McClure, A. C. Nunes and G. Garcia: Shielding Gas and Heat Transfer Efficiency in Plasma Arc Welding, *Welding Journal*, Oct. 1996, pp. 305-310.
8. W. R. Reichelt, J. W. Evancho and M. G. Hoy: Effects of Shielding Gas on Gas Metal Arc Welding Aluminum, *Welding Journal*, May 1980, pp. 147s-155s.
9. J. P. Larue and M. Thomsen: Plasma Welding of Carbon Steels, *Proceedings of the International Conference on Joining of Metals*, Helsingor, Denmark, Ingenior Hojskolen Helsingor Teknikum, 1981, pp. 28-35.
10. K. E. Nielsen: Plasma Welding of Unalloyed Steel, *Proceedings of the International Conference on Joining of Metals*, Helsingor, Denmark, Ingenior Hojskolen Helsingor Teknikum, Helsingor, 1984, pp. 107-113.
11. D. Lavigne, P. Van der Hawe and M. Maksymowicz: Automatic Plasma Arc Welding, *Joining and Materials*, July 1988, pp. 19-25.
12. J. K. Martikainen and T. J. I. Moiso: Investigation of the Effect of Welding Parameter on Weld Quality of Plasma Arc Keyhole Welding of Structural Steels, *Welding Journal*, July 1973, pp. 229s-340s.
13. D. G. Hardy and N. A. Graham: The Performance, Strength and Corrosion Resistance of Brazed Joints on CANDU Fuel Bundles, *Trans. ANS*, 1974, p. 19.
14. J. K. Dawson, U. C. Baugh and J. F. White: Observation on the Early Stages of Oxidation of Zirconium and Zircaloy-2, *Electrochem. Technol.* 4, 1966, p. 137.
15. K. Hiraoka, A. Okada and Inagaki: Effects of Helium Gas on Arc Characteristic in Gas Tungsten Arc Welding, *Transactions of National Research Institute for Metals*, 20(2), 1986, pp. 37-43.
16. C. J. Allum, B. E. Pinfold and J. H. Nixon: Some Effects of Shielding Gas Flow on Argon-tungsten Arcs Operating in High Pressure (1 to 14 Bars abs.) Environments, *Welding Journal*, July 1980, pp. 199-207.
17. R. A. Holt: The Beta to Alpha Phase Transformation in Zircaloy-4, *Journal of Nuclear Material*, 35(1970), pp. 322-334.