

중수로 핵연료 Zr-4 피복관의 봉단용접 연구

이정원, 김수성, 박철주, 양명승, 박현수
한국원자력연구소

요 약

Hot cell에서의 활용을 전제로 한 용접기술 개발을 목적으로 가용한 용접방식의 적용 타당성 및 용접부 특성에 대해 조사, 분석하였다. 적용한 용접방식은 Upset butt저항용접, GTAW, LBW이었다. 각 용접방식에 따른 기계적 시험에 있어서 공히 용접부가 아닌 피복관 파괴로 연료봉 봉단용접부의 품질요건을 만족하였으며, 용접부 형상 및 미세경도 분석에 있어서는 열영향부가 GTAW, Upset butt저항용접, LBW의 순으로 작게 나타났다. 또, 미세조직상으로는 거의 유사한 조직의 martensitic α' 와 Widmanstätten조직이 혼합되어 있었다. 따라서 Upset butt 저항용접, GTAW, LBW 방식을 적용한 Zr-4 핵연료 피복관의 봉단용접은 가능했으며, Hot cell 적용을 고려시 LBW 용접방식이 적절하였다.

1. 서 론

중수로 핵연료 Zr-4 피복관의 봉단마개 용접은 핵연료 집합체 조립의 전 단계로서 완성된 피복관에 UO_2 소결체를 장입한 후, 같은 재질의 봉단마개(End cap)로 밀봉하는 작업으로 핵연료 조사시 핵분열물질의 누출과 직결되는 중요한 핵연료 제조기술이다[1].

따라서 핵연료의 우수한 성능을 좌우하는 봉단용접부의 용접성은 높은 수준의 용접품질과 엄격한 품질관리가 요구된다. 그 품질요건으로는 용접부의 인장강도 및 파열강도가 피복관보다 커야하며, 정상적으로 용접된 부위가 최소 피복관 두께보다 커야하며, He가스 누출이 없어야 한다[2].

이러한 용접부의 중요성 때문에 핵연료 봉단마개 용접에 대해 많은 연구가 수행되었으며[2,3], 지금까지 발전되어 온 용접방식으로는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), EBW(Electron Beam Welding), LBW(Laser Beam Welding), RW(Resistance Welding) 등이 있다. 현재 중수로 핵연료 양산 가공시설에서는 용접부의 신뢰성과 생산성을 고려해 Upset butt 저항용접 방식으로 봉단용접을 수행하고 있다. 그러나 Hot cell과 같이 협소하고 밀폐된 공간에서 원격취급기구를 사용해 실험실 규모의 봉단용접을 수행할 경우 그 용접방식은 그 특성에 맞게 개발되어야 할 것이다.

본 연구에서는 이와같이 Hot cell에서의 활용을 전제로 한 용접기술의 개발을 목적으로 Upset butt 저항용접, GTAW, LBW 방식의 적용 가능성과 최적의 용접방식 모색, 그리고 각 용접방식에 따른 용접부의 특성을 조사, 분석해 보았다.

2. 실험방법

2.1 시편준비

실험에 사용된 재료는 냉간가공후 stress-relief annealing 처리된 피복관(tube)과 full annealing 처리된 봉(bar)으로 Zr에 Sn, Fe, Cr, 등의 원소들이 소량 첨가된 Zircaloy-4 합금이다. 그 치수 및 형태는 그림 1과 같다.

2.2 용접이음부 설계

각 용접방식에 따른 용접이음 설계를 그림 1과 같이 하였다. Upset butt 저항용접의 경우 접합하고자 하는 피용접물을 상호 접촉시킨 다음, 가압과 동시에 용접전류를 흘려 이때 발생하는 저항열을 용접열원으로 이용하기 때문에 그 용접이음부 설계는 용접품질과 직결되며 매우 중요하다. 그림 1 (a)에서 보듯이 균일한 발열을 위해 봉단마개에 돌출 (leg)을 주어 봉단마개와 피복관의 상대적 질량 차로 인한 열의 불균등을 보상했으며, 봉단마개에 홈(groove)을 줌으로써 upset butt 용접에서 필연적으로 생기는 용접덧살(weld flash)을 내포할 수 있도록 했다. 그리고 피복관 끝면을 120° 로 가공하는 이유는 균일한 접촉과 균일한 발열을 위한 것이다.

그림 1 (b)는 용융 용접방식인 GTAW, LBW용 봉단용접부의 이음설계로 2 가지 형태의 봉단마개 즉, "A"-type은 봉단마개 외부에 용융용 덧살을 고려해 줌으로써 용접시 용융에 따른 재료의 손실을 보상해 주고자 했으며, "B"-type의 경우는 일반 용융용접에 사용되는 전형적인 plug 형태의 봉단마개 설계를 사용했다.

2.3 용접장치 및 방법

Upset butt 저항용접을 위해서는 Multi-cycle Resistance Welder가 사용되었다. 본 장비는 100KVA, 단상의 용접전원을 사용하고, Weltronic C-300에 의한 모든 용접sequence가 자동으로 제어되며, 용접시 진공chamber 대신 He가스 purging system에 의한 He가스 분위기에서 용접이 행해진다. 용접변수로서는 용접가압력과 용접입열을 변화시켜 용접조건에 따른 용접성을 파괴시험 및 비파괴시험으로 그 특성을 평가하였다.

GTAW을 위해서는 독일 Siemens사의 Arc Welder로서 DCSP(Direct Current Straight Polarity) Arc 발생방식이며, 전류 및 시간이 programming되어 있어 Arc의 Upslope, Weld, Downslope, 등의 변수들이 자동 조절된다. 용접전에 봉단마개를 피복관에 삽입해 회전치구에 물리고, 용접chamber 내를 진공으로 한 다음 다시 He가스를 충전시켜 He가스 분위기에서 Arc를 발생시켜 용접하였다. 용접조건으로는 시편의 회전속도와 용접전원을 변화시켜 그 용접성을 조사하였다.

LBW을 위해 Nd:YAG(Yttrium Aluminum Garnet) 레이저 용접장치가 사용되었다. 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접은 공동(key hole)을 형성하는 고출력 CW CO₂ 레이저 용접과는 달리 재료표면에서 열전도에 의해 융합하는 방법으로 박판 용접에 많이 사용된다. 용접방법은 GTAW와 동일하며, 레이저 출력 및 시편 회전속도를 변화시키면서 그 용접성을 살펴보았다.

2.4 용접부 평가

용접조건의 변화에 따른 용접성의 비교 평가를 위해 필 시험(peel test), 인장 시험(tensile test), 파열 시험(burst test), 금속조직 시험(metallography) 등이 행해졌다.

인장시험에서는 MTS 인장시험기가 사용되었으며, 크로스헤드 속도는 0.5 mm/min로 파단이 일어날 때까지 하였다. 인장시험후 파단면을 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 파열시험에서는 피복관 내부를 0.23 MPa/sec 속도의 유압으로 가압하여 시편을 파열시켰으며, 그 파단면도 주사전자 현미경으로 관찰하였다.

용접부에서의 경도분포를 보기 위해 500gr 하중에서의 knoop 미세경도와 100gr 하중에서의 micro-vickers경도를 용접된 시편 각 부위에 대해 용접 중심선에서 모재까지 연속적으로 측정하였다.

미세조직 관찰을 위해서는 용접시편을 적당히 절단한 다음, grindind, polishing, etching하여 금속현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Upset butt 저항용접

용접입열을 40%에서 75%까지 변화시키면서 용접입열에 따른 용접전류 및 길이감소량을 분석하였다. 용접입열이 증가함에 따라 용접전류도 증가하며, 길이감소량도 증가하였다. 이때 통전되는 전류는 3.8~10KA였으며, 길이감소량은 500~1050 μ m 였다. 그리고 용접입열에 따른 용접부 전전성은 입열량 증가에 따라 증가하며, 60%이상에서는 그 편차 또한 20 μ m이하로 낮게 유지되어 안정된 용접조건을 보여주었다.

용접입열에 따른 인장시험에서는 입열량 50% 이상부터는 용접부에서의 파단없이 피복관에서 파단이 일어나 용접부에서의 파단강도를 구할 수 없었다. 파열시험 또한 인장시험과 같은 경향을 보여 주었다. 그러나 입열량 50% 이하에서의 인장시험과 파열시험 용접부 파단면에서는 microvoid coalescence의 연성파괴 거동을 보여 주었다.

그림 2 (a)는 입열량 60% 경우의 미세조직시험 결과로서 β -grain전에 parallel α -plate 조직과 non-parallel α -plate조직(basketweave structure)이 혼합된 Widmanstätten 조직이 나타났다. 그림 3은 용접부에서의 경도분포를 보여 준 것으로 용접부에서의 경도가 모재보다 높음을 알 수 있다. 이는 입열량 증가에 따라 발생열이 증가하여 용접부의 냉각속도가 모재의 냉각속도보다 빨라 급냉에 따른 급냉조직 생성으로 용접부의 경도가 증가한 것으로 사료된다.

3.2 GTAW

일정 Arc 전류에서 시편의 회전속도를 4~8 rpm으로 변화시킴에 따른 용접부 형상 및 용접성에는 별 차이가 없었으며, Arc 전류 변화에 따라서는 그 용입깊이 및 열영향부의 크기가 많은 차이를 보였다. 그리고 이음부 설계 "A"의 경우 용접후 용접덧살이 남아 재가공이 고려되며, "B"의 경우는 용접면이 flat하여 외관상 "B"-type의 이음매 설계가 바람직하였다. 외관검사상 산화나 기타 결함의 흔적은 보이지 않았으며, 용접 bead폭은 Arc 전류 증가에 따라 증가하였다. 그림 4의 미세조직 결과로서는 β -grain전에 needle-

like martensitic α' 와 Widmanstätten조직이 혼합되었음을 보여준다. 그림 4는 LBW와 비교한 용접부에서의 미세경도 분포이다. 그림에서 보듯이 열영향부가 커, 용접선을 기준으로 약 3 mm까지 높은 경도 값을 보여준다.

3.3. LBW

침투출력에 따른 용접 bead형태는 그림 5와 같으며, 침투출력이 너무 높으면 bead 모양이 좋지 않으며, 과용융되어 결함 발생요인이 높다. 그리고 He가스의 flow rate와는 무관하게 penetration depth 및 bead 폭이 형성됨을 알 수 있었다. 시편의 회전속도에 따라서는 회전속도의 증가에 따라 penetration depth와 bead 폭이 감소함을 알 수 있었다. 그리고 용접 peak power 증가에 따라서는 penetration depth와 bead 폭이 증가했다. 이와 같은 경향은 용접 입열량 증가에 따른 용접부 크기의 증가와 일치하는 현상이다. 용접시의 pulse frequency 증가에 따라서는 penetration depth와 bead 폭이 감소하는 경향을 보였다. 그리고 이음부 설계에 따른 용접부 형상은 GTAW와 달리 "A"-type이 bead모양도 좋고, flat하였다. 이는 재료표면에서 laser 흡수에 따른 재료의 용융 및 비등으로 발산되는 금속증기를 보상했기 때문으로 사료된다. 그림 2 (c)의 미세조직 결과로서는 GTAW의 미세조직과 유사하게 β -grain전에 needle-like martensitic α' 와 Widmanstätten조직이 혼합되었음을 보여준다. 그림 4는 GTAW와 비교한 용접부에서의 미세경도 분포이다. 그림에서 보듯이 열영향부가 극히 작아, 용접선 근처에서만 높은 경도 값을 보여준다.

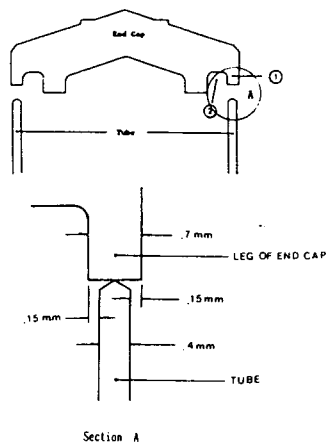
4. 결 론

Hot cell에서의 활용을 전제로 한 용접기술 개발을 목적으로 가용한 용접방식의 적용 및 용접부 특성 조사, 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

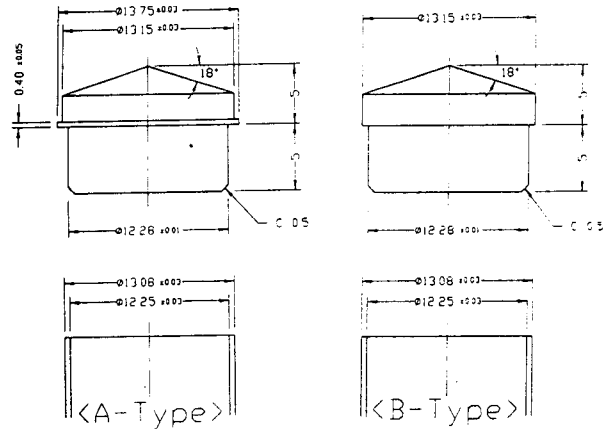
1. 각 용접방식에 따른 기계적 시험에 있어서 공히 용접부가 아닌 피복관 파괴로 연료봉 봉단용접부의 품질요건을 만족하였다.
2. 용접부 형상 및 미세경도 분석에 의하면 열영향부가 GTAW, Upset butt저항용접, LBW의 순으로 작게 나타났으며, 미세조직상으로는 거의 유사한 조직의 martensitic α' 와 Widmanstätten조직이 혼합되어 있었다.
3. Upset butt 저항용접, GTAW, LBW 방식을 적용한 Zr-4 핵연료 피복관의 봉단용접은 가능했으며, Hot cell 적용을 고려시 LBW 용접방식이 적절하였다.

5. 참고 문헌

1. P. T. Truant, "CANU Fuel Performance : Power Reactor Experience" AECL-MISC-250-3 Rev.1(1983).
2. K. T. Bates, "Resistance Welding of Zircaloy end closure Joints", AECL-2814 (1966).
3. L. E. Mills, "Zircalloy Welding Techniques Developed for Plutonium Recycle Program UO₂ Fuel Element Fabrication", HW-66178 (1960).



(a)



(b)

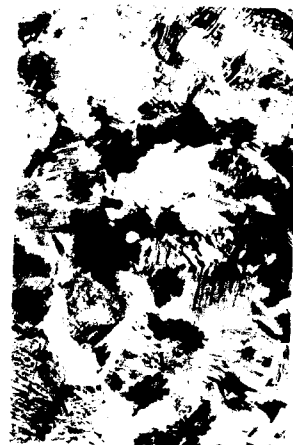
그림 1 용접 이음부 설계
(a) 저항용접, (b) 용융용접



(a)



(b)



(c)

그림 2 용접부 미세조직
(a) Upset butt RW(x500), (b) GTAW(x200), (c) LBW(x200)

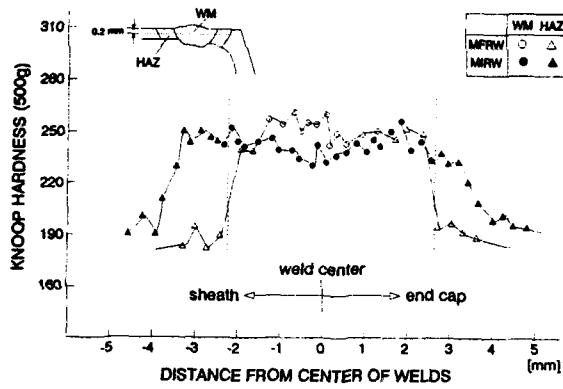


그림 3 저항용접 용접부 미세경도 분포

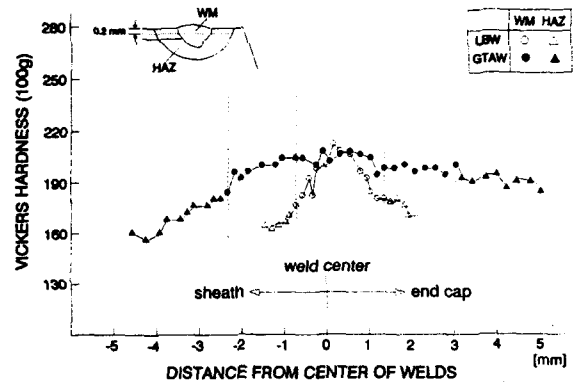


그림 4 GTAW 및 LBW 용접부의 미세경도 분포

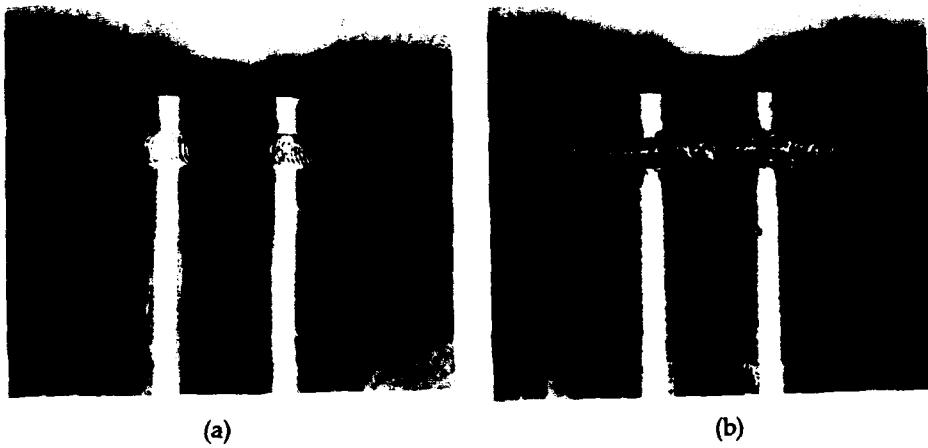


그림 5 LBW 용접부 bead 형태
(a) 침두출력 4.2kW, (b) 침두출력 6.8kW