

저항업셋 용접법을 이용한 Zr-4 End Cap 용접부의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Zr-4 End Cap
Welded Joints Using Resistance Upset Welding

한국원자력(연) : 박철주, 김형수

충남대학교 : 이영호, 강원석

1. 서론

중수로형 핵연료 제조는 이산화우라늄(UO_2)을 압분 성형한후 $1700^{\circ}C$ 의 온도에서 소결된 소결체를 내면이 흑연으로 도포된 지르칼로이-4(Zircaloy-4) 피복관 내부에 장전 한후 피복관 양단을 동일 재료로 제조된 봉단마개(end cap)로 밀봉 용접하여 핵연료봉을 만든다. 이렇게 제조된 37개의 연료봉을 조립하여 양단에 접합판(end plate)을 용접한 것이 중수로형 핵연료 집합체(fuel bundle)이며 이것이 원자로에 장전되어 연소된다. 핵연료 집합체가 원자로에서 연소되는 동안에 핵연료 피복관은 외압에 의해서 collapse 되고 핵분열에 의해 생성된 핵분열 물질로 인해 내압이 증가되므로 피복관과 봉단마개의 용접부위에서 핵분열 물질의 누출가능성이 가장 크므로 이 용접부위는 핵연료의 안전성과 직결된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 multi-cycle mode를 이용한 MCRW(multi-cycle resistance welding) 방식방식으로 모서리 부근의 미소균열을 방지하기 위하여 공압으로 하여 forging force를 가하여 용접뿔(weld flash) 모양을 원형에 가깝게 조절하고, multi-cycle로 인한 입열량(heat input)을 증가하여 용접계면에서 원자들의 상호확산으로 결정립을 성장시켜 용접계면의 용접결합(weld line)이 없도록 하였다. 그러나 아직까지도 핵연료집합체의 결함원인이 용접부에서 가장 많이 발생되고 있다. 따라서 상기 저항업셋 용접방법에 의한 봉단마개 용접의 건전성을 향상시키기 위하여 피복관 끝면을 120° 로 가공한 용접이음설계, 그에 따른 용접입열(main heat input) 및 전극 가압력이 용접부에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 용접전류의 가압시간은 30 cycle로 연속가열하여 예열하였고, 용접시간은 4 cycle, 용접후 용접부를 냉각하기 위한 유지시간은 30 cycle로 하였다. 이때 사용된 예열은 피용접재들을 원주방향으로 약간 업셋시켜 표면을 완전 밀착함으로써 균일한 접촉저항을 형성함과 동시에 질량이 상대적으로 큰 봉단마개에 발생열을

잔류시커 열균형을 유지하기 위함이크로 예열, 즉 위상지연(phase shift, %)을 40%로 일정하게 하였으며, 상기와 같이 준비된 시료에 대해 용접입열이 용접성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압력을 72 KPa(10.5 psi)로 일정하게 하고 용접입열(위상지연 phase shift, %)을 40%에서 75%까지 5% 간격으로 변화시켰고, 가압력의 변화가 용접성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용접입열을 65%로 고정하고 가압력을 62 KPa, 75 KPa 및 90 KPa로 변화시켰다.

용접에 미세한 영향을 미치는 것으로 알려진 부품세척 조건은 표면산화 및 기계가공으로 용접표면에 잔류할 수 있는 oil 및 grease 등의 잔류물을 완전히 제거할 수 있도록 우선 봉단마개를 vapor degreasing 한 다음 demi-water에 침적시켰다가 acetone으로 헹구고 60° C oven에서 건조시켰다.

각 조건으로 20개 시편을 제조하여 용접입열, 가압력의 용접인자가 용접성에 미치는 영향을 비파괴 검사 및 파괴검사에 의하여 평가하였다. 비파괴검사는 ULVAC DLMS-33 Mass Spectrometer Leak Detector를 이용하여 Helium Leak Test를 수행하여 측정된 핵연료봉에 대한 Helium 누출율이 대기중의 Helium이나 누출검사 장치에 흡착된 Helium 등에 의한 back ground 누출율보다 크면 불합격으로 판정하고 그렇지 않으면 합격으로 판정하였다. 파괴검사로는 필시험, 인장시험, 밀봉파열시험, 경도시험을 수행하였으며 weld line의 검사, 용접부 형상 및 건전용접량의 측정은 미세조직 검사를 통하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접입열(main heat input)이 봉단마개 용접부에 미치는 영향

용접기의 제어장치에서 용접입열(위상지연 phase shift, %)을 40%에서 75%까지 5% 씩 증가시켜 용접한 결과, 용접입열이 증가함에 따라 용접시 사용된 용접전류 및 소성변형량인 업셋량이 증가하였다. 이는 용접입열이 40%에서 75%로 증가함에 따라 용접중 통전되는 전류의 이용율이 3.8 KVA에서 10 KVA로 증가하였기 때문이다. 즉 용접열량, $Q = I^2Rt$ (I:전류 R:저항, t:통전시간)에서 알수 있듯이 용접입열이 증가하면 용접전류의 이용율이 증가하여 용접열량이 커지기 때문이며, 또한 동일 입력하에서 용접열량이 증가하므로써 소성변형량이 증가하였기 때문이다.

낮은 용접입열에 따른 용접부의 미세조직을 관찰한 결과 봉단마개 용접에서 나타나는 전형적인 결합형태인 weld line이 존재함을 알 수 있었다. 이와같은 현상은 낮은

용접입열로 인해, 업셋량, 즉 소성변형량이 적어 초기 용접계면에 기공들이 존재하거나, 또는 원자들의 상호확산 또는 결정립이 이동할 수 있는 용접열량이 작기때문으로 사료된다.

용접입열 60~65% 범위에서 나타나는 건전한 용접부의 각 부위의 미세조직을 관찰한 결과 용접부와 봉단마개 경계부의 미세조직은 full annealing된 원재료의 재결정화된 조직과 열 cycle 영향으로 basket-weave 조직을 나타내고 있었으며, 용접계면의 미세조직은 입자가 조대화되고 basket-weave 조직과 parallel-plate 조직이 혼합된 Widmanstätten 조직을 보이고 있었고, 피복관과 용접부의 경계부위 미세조직은 열 cycle 영향으로 인한 basket-weave 조직과 응력제거소둔(stress-relief annealing)된 조직을 볼 수 있었다.

용접입열 변화에 따른 인장시험 및 밀봉파열시험 결과, 두 시험에서 용접부의 강도는 하중방법(load mode)이 다르기 때문에 차이는 있지만 용접입열 50%까지는 강도가 급격히 증가하였고, 그 이상에서는 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 이는 용접입열 50%까지의 시편들은 큰 용접선 결함 존재로 용접계면에서 파괴가 발생하였지만 55% 이상에서 용접부가 아닌 피복관에서 파괴가 발생하였다. 이와같이 용접부가 파괴되지 않고 피복관에서 파괴된 것은 업셋 소성변형된 용접머살의 크기가 피복관 두께보다 두꺼워 하중지지 단면적이 컸기 때문이다. 이것이 저항업셋 용접부에서 weld line이 불연속적으로 존재하는 경우 용접부의 기계적 강도가 피복관보다 큰 이유이다.

3.2 전극가압력이 용접부에 미치는 영향

일정한 용접입열 65%에서 전극가압력을 62 Kpa, 76 Kpa 및 90 Kpa로 변화시켜 용접전류 및 업셋량을 조사하고 미세조직을 관찰하였다.

일정한 용접입열에서 가압력이 증가하면 용접전류는 증가하는데 이는 피용접재 사이의 저항이 감소되었기 때문이다. 또한 가압력이 증가할수록 업셋량도 62 Kpa일때 940 μm 에서 90 Kpa일때는 1095 μm 으로 증가하였다. 이 결과로 보아 가압력의 증가는 저항의 감소를 가져오나 용접전류를 증가시켜, 전체적으로 용접열량은 용접전류의 제곱에 비례하므로 용접열량이 증가하였기 때문이다.

이 현상은 용접부의 미세조직 결과에서 확인할 수 있었으며, 이 범위에서는 expulsion이나 전극과 피용접재가 접촉하는 부분에서 피용접재 표면이 용융되어 전극에 부착되는 pick up 등 용접결함은 발생하지 않았지만 가압력이 90 Kpa일때는 피복관 내부로 형성된 용접머살은 완만하지 못하였다. 이것으로 가압력의 증가가 용접전류를 증

가시켜 전체적으로 용접열량을 과대하게 증가시키므로 용접접합부의 인접금속이 크게 소성변형 되었기 때문이다. 이와같이 과대한 가압력은 용접부의 단조효과(forging effect)로 기공형성을 방지할 수 있으나, expulsion 발생 및 불규칙 형상의 용접업셋을 초래하여 균열 발생을 초래할 수 있다.