

멀티핀 연료제조용 원격 저항용접장치 개발

고진현 · 김수성

Development of Remote Resistance Welding Equipment for Nuclear Fuel Multi-pin Fabrication

Jin-Hyun Koh and Soo-Sung Kim

1. 서론

원자력분야에서 중수로 형태의 핵연료 멀티핀 제조는 용접공정으로 된다. 소결체(펠렛)가 장전된 피복관 양단에 봉단마개를 삽입, 원주방향으로 용접하면 연료봉이 제조되고, 이들 연료봉을 봉단 접합판(end plate)에 용접하면 멀티핀 집합체가 된다. 이렇게 조립된 멀티핀 연료집합체는 원자로에서 연소되는 동안 연료봉 용접부의 강도가 감소되거나 조사취화될 가능성이 있기 때문에 용접부의 건전성은 원전의 안전성에 직결된다고 할 수 있다. 저자들은 앞서 수행한 연료봉 제조와 핵연료 특성실험을 바탕으로 고방사선 구역인 핫셀에서 연료봉을 제조한 바가 있고, 지르칼로이-4 피복관에 펠렛을 장전하여 연료봉 제조의 마지막 공정인 봉단마개 용접을 위한 원격기술을 확립한 바 있다¹⁾. 본 보고는 멀티핀 봉단 접합판 원격용접을 위한 멀티핀 집합체의 구조 특성에 대해 기술하고, 멀티핀 집합체 제조를 위하여 개발된 원격 저항용접장치에 대하여 기술하는 것이다. 그리고 개발된 원격 RW(resistance welding)장치로 용접된 접합부를 LBW(laser beam welding)의 접합부와 비교 조사한다.

2. 용접장치 및 성능시험

2.1 멀티핀 집합의 개요

Fig. 1(a)는 연료집합체이고, Fig. 1(b)는 하나의 연료봉과 봉단 접합판의 용접부를 보여주고 있다. 집합체는 길이 500mm의 연료봉들이 일정한 간격으로 배열되어 조립된 다발형으로, 여러가지 연료봉과 이들의 상하단을 지지해주는 봉단 접합판으로 구성된다. 또한 핵연료를 포함하는 피복관으로 지르칼로이-4가 사용되고 있으며, 원자로 형태에 따라 핵연료는 이산화우라늄

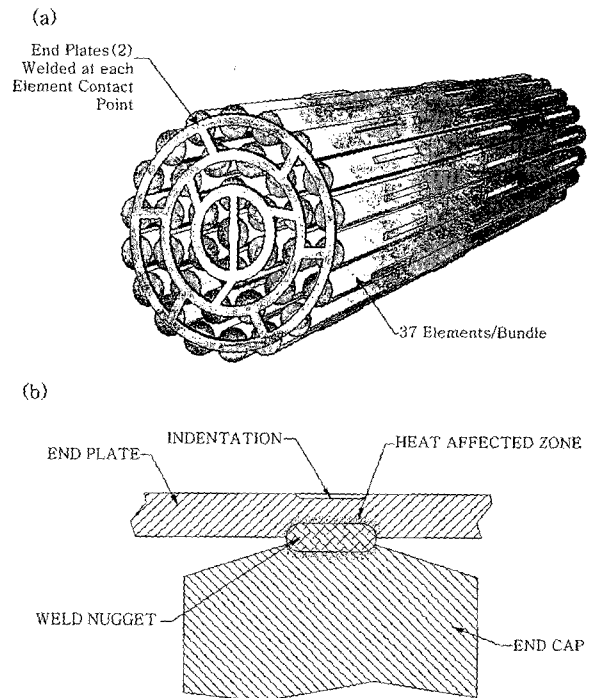


Fig. 1 (a) Fuel bundle and (b) schematic joint of end plate welding.

(UO_2) 소결체가 아닌 특수공정을 거친 고방사성 연료물질이 사용되고 있다. 멀티핀 집합체의 무게는 대략 20kg이고 그 중 대부분이 핵연료이며 나머지는 지르칼로이-4 피복관과 봉단접합판이다. 이 집합체는 수개 및 수십개의 연료봉을 치구에 배열한 후 양단에 봉단 접합판을 위치시켜 용접으로 조립된다. 각 연료봉은 지르칼로이-4 피복관에 연료 소결체가 장전되어 그 양단이 봉단마개로 밀봉되어 있다. 연료봉 사이의 간격은 연료봉 외면에 부착된 간격체에 의하여 일정하게 유지되며, 원자로에 핵연료 집합체를 장전할 때 압력관과 핵연료 집합체간에 일정한 간격을 유지하도록 집합체의 외환봉에 지지체가 부착된다. 멀티핀 집합체 조립은 이들 연료봉

의 양단과 봉단 접합판간의 접합은 RW 점용접에 의해 된다. 그리고 조립된 집합체의 구조물에 대한 품질특성으로서 연료봉의 봉단과 접합판간의 비틀림 강도와 함께 연료봉과 접합판간의 형상구조에 대한 엄격한 치수 기준이 적용되고 있다.

2.2 용접장치 및 용접부 성능시험

2.2.1 원격용접장치 개발

핫셀에서 멀티핀 연료 집합체를 제조하기 위해서는 원격용접장치 개발이 요구된다. 본 장치에는 원격조정기의 취급이 용이한 특수구조 설계가 필요하다. Fig. 2(a)와 (b) 같이 봉단 용접된 연료봉을 이용하여 일정 규격의 멀티핀 집합체를 제조하기 위해서 원격장치를 설계하고 제작하였다. 본 원격용접장치는 전원공급 장치, 용접헤드장치, 제어장치 및 봉단접합판 이송 조립장치 등의 주요 부분으로 구성된다. 구성 요소는 봉단 접합판 용접을 위한 전극부, 연료 집합체 용접순서를 제어하는 X-Y 스테이지, 연료봉들을 조립 형태로 배열한 후 용접위치로 원격 이송하는 이송 시스템(transfer system), 연료 집합체 조립 시 각 연료봉들을 집합체에서 위치에 따라 배치하기 위한 치구, 봉단 접합판을 삽입하는 원격 이송치구 그리고 연료 집합체의 RW 용접 시 산화를 방지하기 위해 고순도 Ar가스를 공급해주는 보조가스부이다.

2.2.2 저항용접부의 성능시험 평가

멀티핀 연료집합체의 제조공정은 연료봉들을 매니퓰레이터로 원격으로 삽입치구에 배열, 조립하고 그 양단을 봉단 접합판에 용접하는 것이다. 이때 용접공정은 RW, GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), LBW 그리고 EBW(Electron Beam Welding) 등이 사용될 수 있으나 연료 집합체의 이음형상에서 고려해 볼 때 용접품질이 우수한 RW 방식이 매우 양호하여 집합연료 용접법으로 채택되었다²⁾. 멀티핀 집합체는 핫셀 내에서 구성되기 때문에 장치취급의 원격화 및 자동조립이 고려되는 설계기술이 필요하다. 연료봉들을 조립치구에 장전,

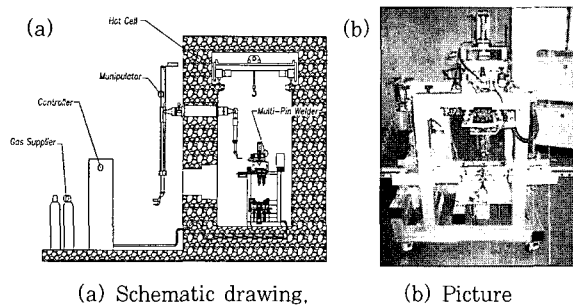


Fig. 2 Multi-pin welder for hot cell operation

집합체 이송, 봉단 접합판 삽입 및 상하단 용접을 마친 후 멀티핀 집합의 치수검사, 토크시험 및 용접부의 검사가 수행된다. 집합체에서 RW 용접이음부의 성능은 요구되는 설계 규격의 용접강도를 만족하여야 하고, 집합체 용접의 상하면 모두가 허용강도(외환봉: 12Nm, 내환봉: 9Nm)를 만족시키고, 상하면 연료봉 용접이음부의 토크강도가 95% 이상의 신뢰도를 만족시켜야 한다³⁾. 또한 품질 재현성 및 신뢰도는 2회에 걸쳐 PM(Process Monitoring) 시편의 강도에 의해 구하고 이를 실제 원격 작업전에 PM 시편에 대해 적용하였다. 그리고 핫셀 원격조정기를 이용한 용접실험은 여러번의 예비실험과 양산중인 중수로 집합체 용접에 사용되는 값을 참조하여 실험조건을 선정하였다⁴⁾. Fig. 3은 용접사이클 3에서 전류에 따른 내환봉 및 외환봉의 토크치를 나타내고 있다. 여기서 용접전류가 증가함에 따라 토크치는 대체로 증가하는 경향을 나타내고, 토크치가 낮은 외환봉의 경우 해당 가지전극이 불량인 것으로 확인되었다. Fig. 4는 용접사이클 3에서 주전극 압력에 따른 내환봉 및 외환봉의 토크치를 나타낸 것으로 12 Nm에서 14 Nm 사이에서 대체로 균일함을 보여주고 있다. Fig. 5는 용접사이클별 내환봉 및 외환봉의 상부 토크치를 나타낸 것으로

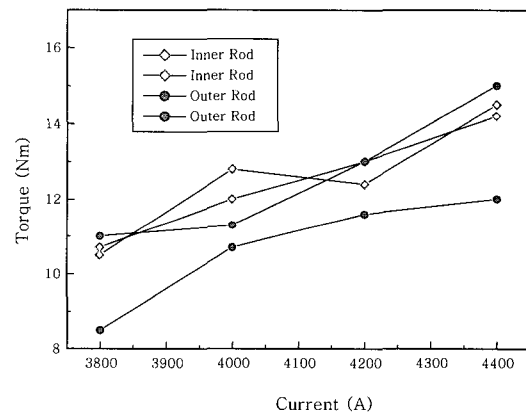


Fig. 3 Current vs. torque

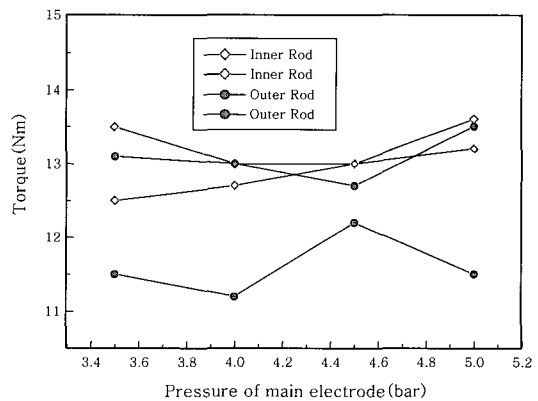


Fig. 4 Pressure vs. torque

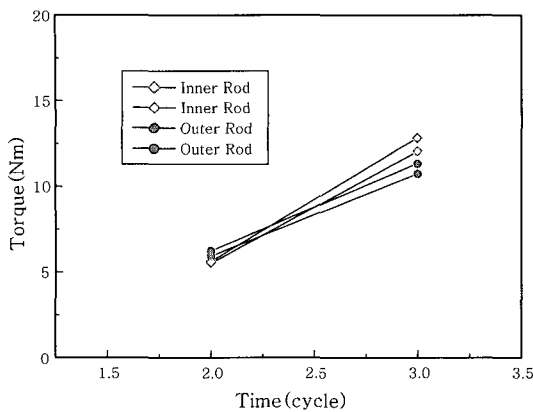


Fig. 5 Weld time vs. torque

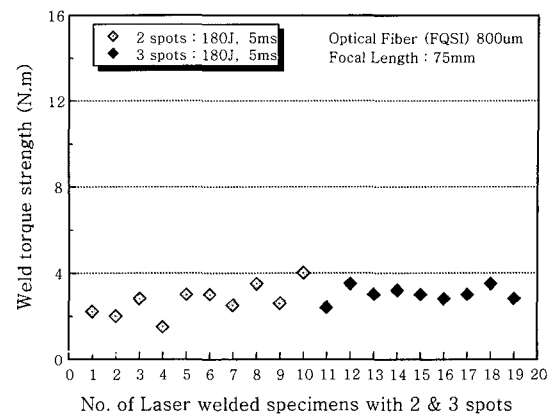


Fig. 7 No. of weld specimen vs. torque

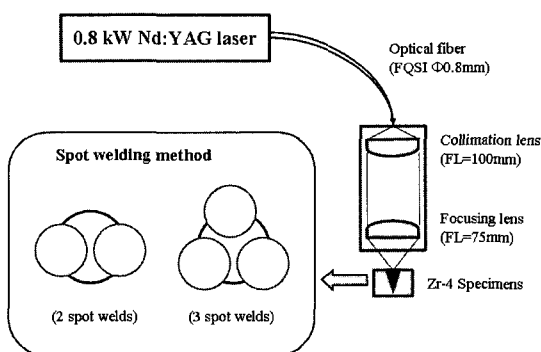


Fig. 6 Schematic illustration of LBW method

로, 용접사이클이 증가할수록 토크치도 높게 나타내는 경향을 보여주고 있다.

2.2.3 레이저용접부의 성능시험 평가

본 실험에 사용된 접합방법은 Fig. 6과 같이 지르칼로이-4 봉단접합 형태로 직경 13mm × 높이 13mm, 그리고 두께 1.65mm, 직경 2.0, 2.5mm 로 구멍가공된 판재를 준비하여 사용하였다. 지르칼로이-4 봉단 접합판에 존재하는 이물질들을 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 60°C에서 건조하였다. 광섬유를 이용한 용접실험을 위하여 원격 레이저전송이 가능한 광학커플러를 사용하였다. Fig. 6에서와 같이 레이저를 효율적으로 이용하여 가능한 용입을 최대한으로 얻기 위해서는 높은 파워밀도를 갖도록 레이저를 집속시켜 주는 광학커플러를 설계 제작하였고, 용접중에 발생하는 흠 제거 및 시편의 산화방지를 위하여 헬륨을 보호가스로 사용하였다. 이때 레이저빔 초점이 시편의 봉단 접합점 위치에 정확하게 맺히도록 CCD 카메라와 광학커플러를 사용하였다. 초점위치는 다이오드 레이저를 집광렌즈를 통하여 시편에 초점을 맺게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 가장 작은 초점을 맺

을 때 용접실험을 수행하였다. Fig. 6은 지르칼로이-4 봉단 접합판을 이용한 2 스폿 및 3 스폿 형태의 용접부를 각각 보여주고 있으며, 여기서 레이저는 800W급 펄스형 Nd:YAG 레이저와 800 μ m 구경인 FQSI 타입의 광섬유로 전송된다. 또한 지르칼로이-4 봉단접합부의 건전성은 토크시험으로 평가되었다.

여기서 사용된 토크시험은 스폿 용접시편을 이용하여 봉단 접합부를 축으로 비틀림 모멘트가 작용할 때 용접부의 비틀림 응력에 의하여 생긴 비틀림 모멘트와 크기가 같도록 역방향으로 작용하여 수행하였다. 레이저를 이용한 봉단 접합판에 대한 강도시험 결과가 Fig. 7에 나타나 있으며, 이때 측정된 접합강도는 기존의 저항용접에서의 이용한 허용한계치(9~12 Nm)보다 낮다.

3. 결 론

1) 멀티핀 연료 집합체의 제조시 연료봉 봉단과 봉단 접합판과의 용접방안으로는 RW, GTAW, LBW 및 EBW 등이 사용될 수 있으나 멀티핀 집합체의 봉단 접합판의 형상구조로 볼 때 용접품질이 우수한 RW 방식이 가장 유리할 것으로 판단된다.

2) 멀티핀 집합체 제조를 위한 봉단 접합판의 용접성을 조사하기 위하여 RW 및 스폿 LBW 실험과 강도시험을 수행하였다. 지르칼로이-4 봉단접합판의 강도시험 결과 RW의 경우는 허용한계치보다 높았으나 LBW의 경우는 대체로 낮았다. 이것은 LBW 적용시 봉단접합형상구조의 부적합 그리고 용입부족에 기인한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 양병승 외, "DUPIC 핵연료제조 및 공정기술개발", KAERI/RR-2022/99, 2000. 5

2. 석호천 외, "월성로형 핵연료 국산화 기술개발", KAERI/RR-588/86, 1986. 7
3. GE Canada Nuclear Products, "Bundle Assembly Welder

- Manual", KNFC Equipment Data Book, 1995. 4
4. 고진현 외, "중수로 핵연료 봉단마개의 저항업셋용접을 위한 용접변수," 대한용접학회지, 제7권 제2호, 1989.6. 60



- 고진현 (高震炫)
- 1952년생
- 한국기술교육대학교 신소재공학과
- 용접야금, 원자력재료, 비파괴검사
- e-mail : jhkoh@kut.ac.kr



- 김수성 (金秀成)
- 1954년생
- 한국원자력연구소 핵연료팀
- 용접공정 및 레이저용접 개발
- e-mail : sskim7@kaeri.re.kr