

# 핵연료 멀티핀 제조용 원격 저항용접기술 개발

## Development of remote RW technology for fuel multi-pin fabrication

김수성<sup>†</sup>\*, 구대서\*, 이정원\*, 박근일\*, 조대식\*\*

\* 한국원자력연구소

\*\* 대덕시스템

**ABSTRACT** : An analysis of a multi-pin remote welding for a DUPIC fuel fabrication was made to establish the optimum welding processes in a hot cell environment. An initial investigation for hands-on fabrication outside the hot cell was performed, and the constraints of a hot cell welding were considered. Preliminary welding performances to improve the RW process were also examined. The RW process was determined to be the best in a hot cell environment for joining the end plate to the end caps. This paper presents an outline of the developed RW machine for a DUPIC fuel fabrication and compares the characteristics of a Zr-4 end plate welding by using electrical resistance and LB methods. The weld nuggets of RW specimens and torque strengths of resistant and LB welded zones were also investigated.

### 1. 서 론

원자력분야의 핵연료 멀티핀 용접은 연료봉 피복관과 봉단마개를 원주방향으로 용접한 후 제조된 연료봉들을 조립한 것이 멀티핀 집합으로 이루어지며, 이러한 집합이 원자로에 연소되는 동안 각 연료봉의 접합강도가 떨어질 가능성이 있기 때문에 용접부의 건전성은 원전의 안전성에 직결된다고 할 수 있다. 그동안 연료봉 제조와 핵연료 특성실험을 바탕으로 고방사선 구역인 핫셀에서 연료봉을 제조한 바가 있으며, 또한 지르칼로이-4 피복관에 펠렛을 장전하여 연료봉 제조의 마지막 공정인 봉단마개 용접을 할 수 있는 원격기술이 마련되었다.<sup>[1]</sup> 본 논문은 멀티핀 용접을 위한 전초적인 단계로서 사용후 핵연료를 이용한 원격 제조기술 개발을 위하여 멀티핀 집합 개념 및 용접성을 조사하였고, 멀티핀 집합을 위한 구조 특성에 대해서도 기술하였다. 그리고 멀티핀 집합 제조시 RW 방식과 실제로 양산중인 중수로 다발의 봉단접합판을 이용한 용접기술에 대해서도 분석하였다.<sup>[2]</sup> 따라서 본 연구에서는 핫셀과 같이 밀폐된 지역에서 원격용접이 가능한 방법을 권장하기 위하여 RW 및 LBW를 이용한 접합 강도시험을 비교 분석하였고, 사용후 핵연료를 이용한 멀티핀 집합과 조사시험용 집합체를 제조할 수 있는 기초자료를 제시하였다. 향후 핵연료 멀티핀 집합의 제조를 위한 원격 RW장치 및 용접개발에 기초가 될 것이다.

### 2. 용접장치 및 실험결과

#### 2.1 멀티핀 집합 개요

멀티핀 집합은 Fig. 1과 같은 이음형상인 핵연료 다발과 유사한 개념을 가지고 있으며, 길이 500mm의 연료봉들이 일정한 간격으로 배열되어 조립된 다발형 집합으로, 여러가지 연료봉과 이들의 양단을 지지해주는 2개의 봉단접합판으로 된다. 또한 구성된 피복관은 지르칼로이-4를 사용하며, 핵연료는 천연 UO<sub>2</sub>가 아닌 특수공정을 거친 사용후 핵연료 물질을 사용하며, 멀티핀 집합의 무게는 대략 20kg이며 그 중 대부분 핵연료이고 나머지가 지르칼로이-4 연료봉과 봉단접합판이다. 이 집합은 수개 및 수십개의 연료봉이 2개의 봉단접합판에 일정한 배열로 조립, 용접되어 있으며 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 부착되어 있다. 멀티핀 집합 조립은 이들 연료봉의 양단과 봉단접합판간의 점용접에 의해 이루어지며, 이때 접합은 RW를 이용한 용접방법이 이용되고 있다. 그리고 조립된 집합의 구조물에 대한 품질특성으로서 연료봉의 봉단과 접합판간의 비틀림 강도와 함께 연료봉과 접합판간의 형상구조에 대한 엄격한 치수기준이 적용되고 있다.

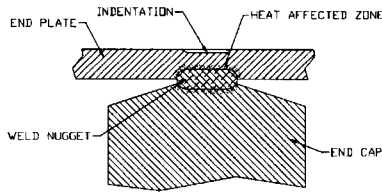


Fig. 1 Schematic joint of end plate welding.

2.2. 멀티핀 용접특성 조사

2.2.1 원격용접장치 개발

멀티핀 집합의 원격용접장치는 핫셀에서 연료 다발을 제조하는데 사용된다. 본 장치는 원격조정기로 취급이 용이하도록 특수구조를 가진 설계가 필요하다. Fig. 2와 같이 봉단마개 용접된 연료봉을 이용하여 일정규격의 멀티핀 집합으로 제조하기 위해서 원격 용접장치를 특수 설계하여 제작하였다. 본 원격장치의 주요 구성은 저항용접을 이용한 전원공급 장치, 용접헤드장치, 제어장치 및 봉단접합판 이송 조립장치를 들 수 있으며, 각 구성에 대한 요소는 봉단접합판 용접을 위한 전극부, 집합연료 용접순서를 제어하는 X-Y stage, 집합연료의 조립형태로 구성된후 용접위치까지 원격으로 이송해주는 transfer system, 완성된 연료봉을 집합체내 정위치 되도록 하고 또한 집합연료 형태로 구성해주는 조립치구, 봉단접합판을 삽입해주는 원격 이송치구 그리고 집합연료 RW에서 산화를 방지하기 위한 고순도 Ar가스를 공급해 주는 보조가스부이다.

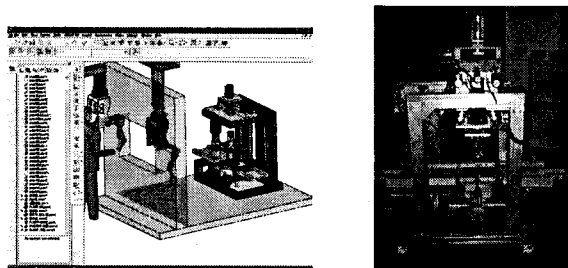


Fig. 2 Multi-pin welder for hot cell operation.

2.2.2 RW를 이용한 토크강도 성능검사

멀티핀 집합의 제조공정은 핵연료 연료봉들을 원격으로 설계된 삽입치구에 일정한 배열로 조립하여 그 양단을 봉단접합판에 용접하는 것이다. 이때 용접공정은 RW, GTAW, LBW 그리고 EBW 등으로 사용될 수 있으나 집합연료의 이음형상에서 고려해 볼 때 용접품질이 우수한 RW 방식이 매우 양호하여 집합연료 용접법으로 채택되었다. 멀티핀 집합이 핫셀 내에서 이루어지기 때문에 이에 대한 장치취급의 원격화 및 자동조

립이 고려된 설계기술이 필요하다. Fig. 2와 같이 연료봉의 조립치구 장전, 다발 이송, 봉단접합판 삽입 및 상하단 용접이 마친 후 멀티핀 집합의 치수검사, 토크시험 및 용접부위 검사가 수행된다. 본 연구에서는 먼저 RW를 이용한 집합의 성능요건에서 나타나듯이 용접강도가 설계 규격내에 있어야 하고, 집합용접의 상하단 모두가 허용강도(외환봉: 12Nm, 내환봉: 9Nm)를 만족시키고, 상하단 연료봉 각각의 토크강도가 95% 이상의 신뢰도로 만족시키야 한다. 또한 품질 재현성 및 신뢰도로 2번에 걸친 PM시험의 강도에 의해 구하고 이를 실제 원격 작업전에 PM시험에 대해 적용하기로 하였다. 그리고 핫셀 원격조정기를 이용한 용접실험은 여러번의 예비실험과 양산 중인 중수로 다발용접에 사용되는 값을 참조하여 실험조건을 선정하였다. Fig.3은 용접사이클 3에서 전류에 따른 내환봉 및 외환봉의 토크치를 나타낸 것이다. 여기서 용접전류가 증가함에 따라 토크치는 대체로 증가하는 경향을 나타내었고, 토크치가 낮은 외환봉의 경우 해당 가지전극이 불량인 것으로 확인되었다. Fig. 4는 용접사이클 3에서 주전극 압력에 따른 내환봉 및 외환봉의 토크치를 나타낸 것으로 12에서 14 사이에서 대체로 균일하게 보여주었다. Fig. 5는 용접사이클별 내환봉 및 외환봉의 상부 토크치를 나타낸 것으로, 용접사이클이 증가할수록 토크치도 높게 나타내는 경향을 보여주었다.

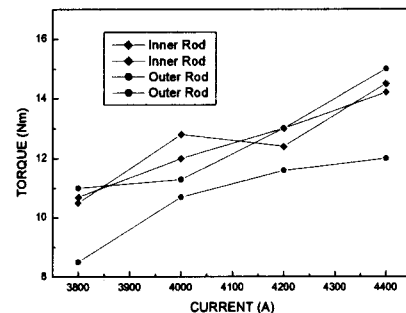


Fig. 3 Current vs. torque.

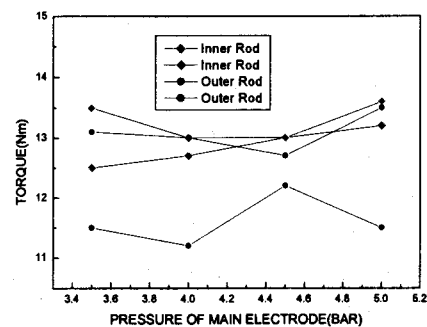


Fig. 4 Pressure vs. torque.

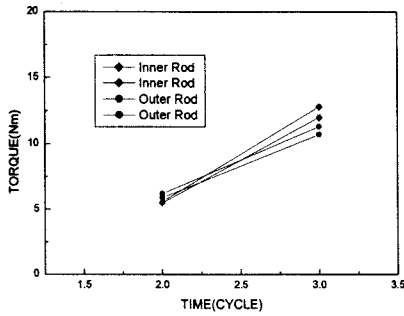


Fig. 5 Weld time vs. torque.

2.2.3 LBW를 이용한 토크강도 성능검사

본 실험에 사용된 접합방법은 Fig. 6과 같이 지르칼로이-4 봉단접합 형태의 직경 13mm × 높이 13mm, 그리고 두께 1.65mm, 직경 2.0, 2.5mm 로 구멍가공된 판재로 준비하여 사용되었다. 지르칼로이-4 봉단접합판에 존재하는 이물질 제거하기 위하여 아세톤 용액에 30분간 담구어 세척한 다음 건조기에 의해 60°C로 건조시켰다. 광섬유를 이용한 용접실험을 위하여 원격 레이저전송이 가능한 광학커플러가 필요하다. Fig. 6 에서와 같이 레이저를 효율적으로 이용하여 가능한 용입을 최대로 얻기 위해서는 높은 파워밀도를 갖도록 레이저를 집속시켜 주는 광학커플러를 설계 제작하였고, 용접중에 발생하는 흠 제거 및 시편의 산화방지를 위하여 보호가스인 헬륨을 사용하였다. 이때 레이저빔 초점이 시편의 봉단 접합점 위치에 정확하게 맺히도록 CCD 카메라와 광학커플러를 사용하였다. 초점위치는 다이오드레이저를 집광렌즈로 통하여 시편에 초점이 맺히게 한 다음 CCD 카메라의 모니터에 의해 가장 작은 초점이 될 때 용접실험을 수행하였다. Fig. 6과 같은 지르칼로이-4 봉단접합판을 이용한 2 spot 및 3 spot 형태의 용접부를 각각 보여주고 있으며, 여기서 레이저는 800W급 펄스형 Nd:YAG 레이저와 800 $\mu$ m 구경인 FQSI type의 광섬유로 전송된다. 또한 지르칼로이-4 봉단접합부의 건전성을 조사하기 위하여 기계적인 방법인 토크시험을 수행하였다. 여기서 사용된

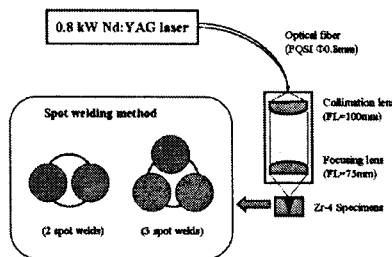


Fig. 6 Schematic illustration of LBW method.

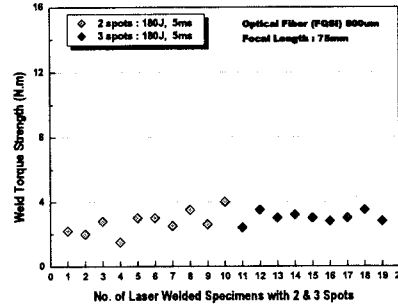


Fig. 7 No. of weld specimen vs. torque.

토크시험은 spot 용접시편을 이용하여 봉단접합부를 축으로 비틀림 모멘트가 작용할 때 용접부의 비틀림 응력에 의하여 생긴 비틀림 모멘트와 크기가 같도록 역방향으로 작용하여 수행하도록 하였다. 레이저를 이용한 봉단접합판에 대한 강도시험 결과가 Fig. 7에 나타나 있으며, 이때 측정된 접합강도는 기존의 저항용접을 이용한 허용한계치(9~12 Nm)보다 낮게 나타났다.

3. 결 론

1. 멀티핀 집합의 봉단접합판 용접방안으로는 RW, GTAW, LBW 및 EBW 등이 사용될 수 있으나 멀티핀 집합의 봉단접합판 형상구조에서 볼 때 용접품질이 우수한 RW 방식이 가장 유리할 것으로 판단된다.
2. 멀티핀 집합의 봉단접합판 용접성을 조사하기 위하여 RW 및 spot LBW 실험과 강도시험이 수행되었다. 지르칼로이-4 봉단접합판의 강도시험결과는 RW의 경우는 허용한계치보다 높게 나타났으나, 반면에 LBW의 경우는 낮게 나타났으며, 이것은 봉단접합 형상구조의 부적합 그리고 용입부족 등에 기인되는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 양명승 등, "DUPIC 핵연료제조 및 공정기술개발", KAERI/RR-2022/99, 2000. 5
2. 석호천 등, "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