

경수로 원전연료용 질칼로이 지지격자체의 LASER 용접품질 평가(III)

Welding Quality Evaluation on the LASER Welding Parts of the Zircaloy Spacer Grid Assembly for PWR Fuel Assembly(III)

송기남[†]*, 윤경호*, 이강희*, 김수성*, 한형준**

* 한국원자력연구소(KAERI)

** 엘텍(Ltek)

ABSTRACT : A spacer grid assembly, which is an interconnected array of slotted grid straps and is welded at the intersections to form an egg crate structure, is one of the main structural components of the nuclear fuel assembly for pressurized water reactors(PWRs). The spacer grid assembly is structurally required to have enough buckling strength under various kinds of lateral loads acting on the nuclear fuel assembly so as to keep the nuclear fuel assembly straight. To meet this requirement, it is necessary to weld the welding parts carefully and precisely. In this study, a series of welding tests were carried out to find an optimum welding condition. After examining and analyzing the specimens welded from the welding conditions, a recommendable laser welding condition was selected for the KAERI designed Zircaloy spacer grid assembly.

1. 서 론

우리나라 원자력 발전량의 약 80% 이상이 가압경수로(PWR)에 의해 생산되고 있는데 PWR용 원전연료 중에 한 형태는 Fig. 1과 같이 가로, 세로가 각각 약 200mm이고 길이가 약 4000mm인 구조물이다. 이 원전연료는 Fig. 1에서 보듯이 상단고정체, 하단고정체, 지지격자, 안내관, 계측관 및 200여개 이상의 연료봉으로 구성되어 있고 연료봉 속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO₂) 소결체(직경 약 8mm, 길이 약 10mm 정도의 원기둥 형상임)가 두께 약 0.6mm의 Zircaloy 피복관 속에 내장되어 있다.

지지격자는 연료봉이 정해진 위치에 있도록 견전하게 지지하면서 원전연료 집합체 측면으로부터 가해지는 외부하중으로부터 연료봉을 보호하는 핵심 구조물이며 충분한 횡방향 충격강도를 갖도록 설계하고 제조(용접)하는 것이 필요하다. 지지격자 횡방향 충격강도 요구조건은 지지격자가 횡방향 설계하중하에서의 변형량이 설계한도 이내로 변형되는 것으로 이를 만족할 경우 구조조건은 원자로 긴급정시에 안내관 속으로 제어봉의 삽입이 방해받지 않게 되고 원자로 안전성(사고시에 원자로 긴급정지)을 보증할 수 있다. 지지격자의 충격강도는 주로 지지격자를 구성하는 격자판의 포괄적인(generic) 형상에 영향을 받고 있으나 격자판의 교차점 부위에서 용접품질에도 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾

지지격자 용접은 원자로 노심에서 연료봉을 지

지하는 연료봉 지지력 뿐 만 아니라 지지격자의 구조강도(횡방향 하중하에서 격자체의 좌굴 및 및 충격강도)와 밀접하게 연관되어 있다. KAERI에서는 근래에 국내 유망 LASER 용접 전문업체를 물색하여 KAERI에서 개발한 고유 지지격자를 상용 원전연료 지지격자의 용접품질 수준으로 용접하기 위해 적절한 용접치구 및 용접공정 개발 그리고 용접변수 선정 작업을 수행하였다.^{2,3)}

본 논문은 Nd-Yag LASER 용접기의 용접변수들의 조합을 변화시켜 가면서 용접품질(용접비드 크기, 용입깊이, 용접부 변색 및 spatter 발생 유무 등)을 향상시킬 수 있는 용접조건을 찾는 방법으로 수행한 연구결과를 요약한 것이다.

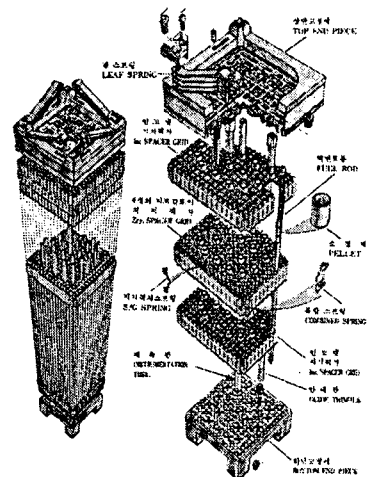


Fig. 1 Fuel assembly for PWR

2. 지지격자 용접

2.1 지지격자의 용접의 개요

Fig. 2는 피복관이 삽입된 지지격자의 형상을 나타낸 것이며 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 용접한 egg-crate 형상의 구조물이다. 1990년대 후반까지 격자판의 재질로 Inconel이 사용될 때 격자판 사이의 접합에 Brazing이 사용된 적도 있으나⁴⁾ 근래에는 중성자 경제성 관점에서 유리한 Zircaloy로 만든 격자판이 널리 사용됨에 따라 TiG 용접, 전자빔 용접, 레이저빔 용접 등의 특수용접법이 사용되고 있다. 근래에 국내·외의 지지격자 제조업체에서는 상용 지지격자 제조시에 용접비드 크기를 작게 하면서 용입깊이를 증가시키기 위해 전자빔 용접이나 레이저빔 용접 방법이 널리 사용되고 있는 추세인데 이는 용접비드 크기를 작게 하면 연료봉 사이로 흐르는 냉각수의 수력저항을 감소시킬 수 있는 장점이 있고 용입깊이를 증가시키면 지지격자의 충격강도를 증강시키는 장점이 있기 때문이다.

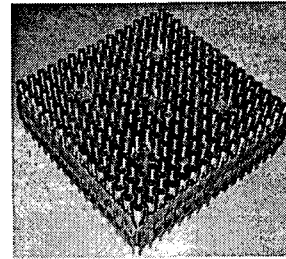


Fig. 2 Spacer grid inserted with fuel cladding

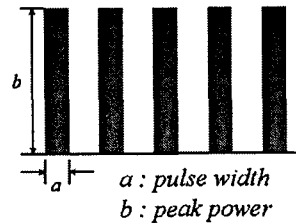


Fig. 3 Welding parameters

2.2. 용접변수 조합의 조정

2.2.1 초기 용접조건 설정 및 용접결과

상용 지지격자 제조업체(업체 B로 표시)와 비견되는 용접품질을 얻기 위해 국내 유망 Nd-Yag LASER 용접 전문업체(업체 A로 표시)에서 용접변수들의 조합을 변형시켜가면서 용접을 수행하였다. 업체 B의 용접조건은 대외비 사항이어서 정확한 값을 알 수 없고 개략적으로 얻은 정보를 참조하여 업체 A의 초기 용접조건을 설정하여 용접하고 용접품질을 검사하였다.^{2,3)}

2.2.2 1차 용접조건 설정 및 용접결과

초기 용접조건으로 용접한 지지격자 충격강도 시험을 수행한 결과 기대한 만큼의 충격강도를 갖지 않는 것으로 보이고 있어 교차점부위의 용입깊이를 증가시키고 용접비드 크기를 조정할 필요성이 제기되었다. 단위 pulse 당 에너지는 그대로 유지하면서 peak power와 pulse width(Fig. 3 참조)를 변화시키는 15개 용접조건에 대하여 용접을 시행한 후 용접품질을 검사하였다. Fig. 4는 peak power 변화에 따른 용접비드 크기 및 용입깊이(통계적으로 처리한 95% 하한 신뢰도 평균값)를 나타낸 것이다. 용접비드 크기는 peak power가 증가할수록 점차 증가하다가 포화되는 경향을 보이고 있으나 전반적으로 상용 지지격자에 비해 크음을 알 수 있고, 용입깊이는 계속 증가하는 경향을 보이고 있다.

2.2.3 2차 용접조건 설정 및 용접결과

1차 용접조건으로 용접한 지지격자의 용접품질을 검토한 결과를 참고하여 용입깊이를 더 증가

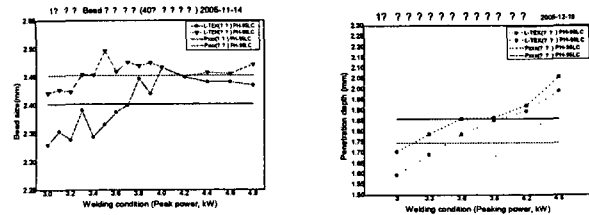


Fig. 4 Variation of weld bead size and weld penetration depth for 1st weld conditions

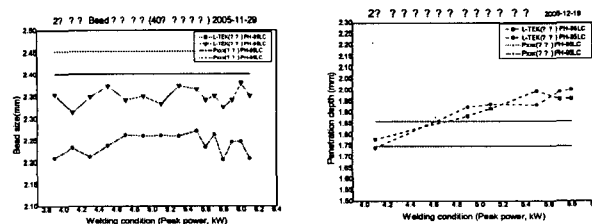


Fig. 5 Variation of weld bead size and weld penetration depth for 2nd weld conditions

시키기 위한 용접을 수행하였다. 이를 위해 단위 pulse 당 에너지를 1차 용접시와 동일하게 유지하면서 peak power와 pulse width를 변화시키는 추가 15개 용접조건에 대하여 용접을 시행한 후 용접품질을 검사하였다. Fig. 는 peak power 변화에 따른 용접비드 크기 및 용입깊이를 나타낸 것으로 용접비드 크기는 peak power가 증가할수록 거의 일정한 크기를 갖는 경향을 보이고 있으며 전반적으로 상용 지지격자에 비해 약 9% 정도 작음을 보이고 있는 반면 용입깊이는 계속 증가하는 경향을 보이고 있으나 용접부 변색 및 spatter 발생빈도도 증가함이 관찰되었다.

2.2.4 3차 용접조건 설정 및 용접결과

2차 용접조건으로 용접한 지지격자의 용접품질을 검토한 결과를 참고하여 4가지 용접조건을 선정하여 용접품질을 조사하였다. Table 1은 4가지 용접조건에서 용접비드 크기를 나타낸 것으로 spatter 발생빈도가 작고 용접비드 크기도 상용 지지격자에 비해 양호한 조건 IV를 KAERI 고안 지지격자에 대한 최종용접조건으로 결정하였다.

2.3 최종용접조건의 용접품질 비교

2.3.1 용접비드 형상

Table 1은 업체 A와 업체 B에서 용접한 지지격자의 용접비드 크기의 측정값을 지지격자판 두께(T)의 배수로 나타낸 것이다. Table 1에서 보면 A사의 용접비드 크기가 B사의 그것보다 약 5% 정도 작았고 용접비드 크기의 표준편차도 A사가 B사보다 작아서 A사가 보다 더 균일하게 용접하고 있음을 알 수 있다. A사의 용접비드 크기가 작고 균일하기 때문에 수력학적 관점에서 원전연료의 수력저항을 작게 하여 유리할 것으로 판단된다.

Table 1. Weld bead size(x T*)

Welder Parameter	A				B
	조건 I	조건 II	조건 III	조건 IV	
지지격자(상단부)					
- 평균값	5.217	5.242	4.928	4.898	5.152
- 표준편차	0.153	0.130	0.132	0.145	0.1368
- Lower 95% 신뢰도 평균	5.177	5.211	4.894	4.861	5.110
지지격자(하단부)					
- 평균값	5.288	5.841	5.241	5.102	5.308
- 표준편차	0.115	0.120	0.087	0.183	0.2904
- Lower 95% 신뢰도 평균	5.285	5.813	5.219	5.055	5.218

* T : 지지격자판의 두께

2.3.2 용접부위 조직

용접부위 조직검사는 용입깊이, 용접조직을 관찰하기 위한 것으로 Table 2에 그 결과가 나타나 있다. 내부교차점의 용입깊이를 살펴보면 Table 2에서 보듯이 업체 A가 업체 B보다 약 7% 깊게 용접되고 있어서 A사의 용접기술이 더 좋은 것으로 볼 수 있다.

2.3.3 용접강도 비교

교차점 용접부위에 대한 용접강도를 평가하기 용접부위를 포함한 +형 시편을 만들어서 용접부위에 대한 peeling test를 수행하였다. peeling test 결과는 Table 2에 요약되어 있다. Table 2에서 보면 업체 A 및 업체 B사 모두 용접부위에서 파단이 발생하지 않고 모재에서 파단이 발생함으로써 용접품질이 모두 양호한 것으로 볼 수 있다. 특히 용접강도는 A, B사 모두 B사의 설계요구기준보다 2.5배 이상 되고 있어서 용접부의 용접강도는 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of weld penetration depth (x T*)

용접품질 \ Welder	A	B
용입깊이	3.988	3.718
- 상단부	4.146	3.958
- 하단부		
Peeling Test	모재	모재
- 파단부위		

* T : 지지격자판의 두께

3. 결 론

KAERI에서 지난 9년간 자체적으로 고안한 지지격자 고유 형상 중에서 제반 성능이 우수하여 산업화 가능성이 매우 높은 지지격자를 제조하는 작업의 일환으로 국내 유망 LASER 용접업체를 발굴하여 용접기술을 개발하고 있다. 본 연구에서는 상용 원전연료 지지격자의 용접품질에 버금가는 용접기술을 개발하기 위해 여러 용접조건에 대하여 용접을 수행하여 용접부위에 대한 용접품질을 조사한 후 적절한 용접조건 범위를 선정하게 되었다. 이번에 선정된 용접조건으로 용접된 지지격자의 용접품질은 상용 지지격자 제조업체에 버금가는 혹은 우수한 용접품질을 얻을 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 산학연 콘소시움과제와 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. H. N. Rhee, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual," April 1989, KAERI and CE Inc.
2. I 송기남, 윤경호, 강홍석, 이강희, 김우곤, 김수성, "경수로 원전연료용 질칼로이 지지격자체의 LASER 용접품질 평가", 대한용접학회 2005 춘계학술대회 논문집.
3. 송기남, 윤경호, 이강희, 김수성, 한형준, "경수로 원전연료용 질칼로이 지지격자체의 LASER 용접품질 평가(II)", 대한용접학회 2005 추계학술대회 논문집.
4. I. K. Kim, "Nickeling and Brazing of Spacers made of Hardenable Nickel Alloy for PWR Fuel Assemblies," LF-FE-106, KAERI LWR Fuel Div. (1988).