

## 경수로 원전연료용 질칼로이 지지격자체의 LASER 용접품질 평가(II)

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

송기남<sup>†</sup>\*, 윤경호\*, 이강희\*, 김수성\*, 한형준\*\*

\* 한국원자력연구소(KAERI)

\*\* 엘텍(Ltek)

**ABSTRACT** : Nuclear fuel assemblies for pressurized water reactors(PWR) are loaded in the reactor core throughout the residence time of three to five years. 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. 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, laser welding qualities of the Zircaloy spacer grid assembly welded by two welding companies, such as weld strength, weld penetration depth, and weld bead size, are examined and compared.

#### 1. 서 론

우리나라에서 원자력 발전은 전체 발전량의 40% 이상을 생산하는 기간 전력원이다. 근래에 원자력 발전과정에서 발생하는 원전수거물에 대한 저장시설 유치문제로 인하여 반핵 단체를 중심으로 한 일부 여론에서 원자력 발전의 유용성에 대한 의구심을 제기하며 대체에너지원 개발을 주장하고 있으나 전력 부존자원이 풍부하지 않은 우리나라에서 산업생산 증대 및 국민 삶의 질 향상에 절대적으로 기여하는 전력의 공급원으로서 원자력 발전은 향후에도 지속되고 더욱 증대되어야 할 것이다. 우리나라 원자력 발전량의 약 80% 이상이 가압경수로(PWR)에 의해 생산되고 있으며 PWR용 원전연료 중에 한 형태는 Fig. 1 과 같이 가로, 세로가 각각 약 200mm이고 길이가 약 4000mm인 구조물이다. 이 원전연료는 Fig. 1에서 보듯이 상단고정체 및 하단고정체, 지지격자, 안내관, 계측관 및 200여개 이상의 연료봉으로 구성되어 있고 연료봉 속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO<sub>2</sub>) 소결체(직경 약 8mm, 길이 약 10mm 정도의 원기둥형 소결체들이 두께 약 0.6mm의 피복관 속에 내장됨)가 얇은 피복관속에 내장되어 있다. PWR용 원전연

료는 보통 3~5년 동안 원자로에 장전되며 지지격자의 격자내에 삽입되어 매달려있는 연료봉 사이로(간격 약 3mm) 흐르는 1차 냉각수로 열이 전달되고 열교환기를 통하여 2차 냉각수로 열을 전달하며 궁극적으로는 2차 냉각수가 수증기화하여 터빈을 돌려서 전기를 생산한다.

한국원자력연구소(KAERI)에서는 1997. 7월 이래로 PWR 원전연료에 사용될 수 있는 지지격자

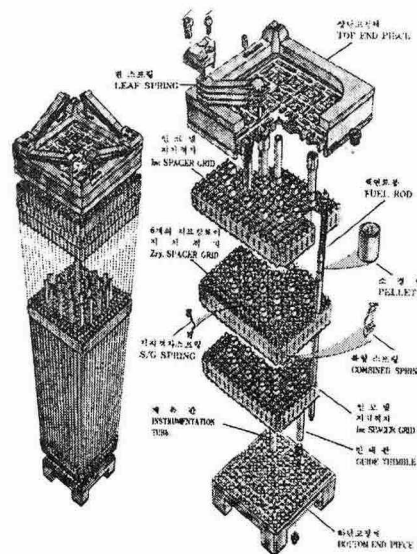


Fig. 1 Fuel assembly for PWR

고유형상을 고안(특허권의 획득이 '고유'의 본 개념임)하고 시편을 제조하여 여러 가지 성능시험을 수행하여 왔다<sup>(1)</sup>. 특히 지지격자체에서의 구조강도 특성은 지지격자체를 구성하는 격자판의 형상뿐 만아니라 격자체 용접부위의 용접특성에도 크게 영향을 받고 있다.

본 논문에서는 KAERI에서 근래까지 고안한 16종의 지지격자 고유 형상 중에서 "최적화 H형 스프링 부착 지지격자"(1997년 기본개념이 도출되어 2000년에 미국 및 대한민국 특허를 획득하였으며<sup>(2)</sup> 성능이 개선된 최적화 형상<sup>(3)</sup>도 2004년 미국 및 대한민국 특허를 획득함)에 대하여 국내 유망 LASER용접업체에서 용접한 용접품질과 상용 지지격자의 용접품질을 비교한 것이다.

## 2. 지지격자 용접

### 2.1 지지격자의 용접의 개요

Fig. 2는 지지격자를 개략적으로 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 용접한 egg-crate 형상의 구조물이다.

지지격자는 Fig. 2에서 보듯이 격자판들이 교차하는 상·하부의 교차점이 용접되고 있다. 초창기 격자판의 재질로 Inconel이 사용될 때 격자판 사이의 결합에 Brazing을 사용한 적도 있으나 근래에는 중성자 경제성 관점에서 유리한 Zircaloy로 만든 격자판이 널리 사용됨에 따라 격자판 용접에 TiG 용접, 전자빔 용접, 레이저 빔 용접 등의 특수용접법이 사용되고 있다. 용접부위에 대한 시험 및 검사로는<sup>(4)</sup> 용접부위에 대한 외관검사, 용접부 종/횡단면에 대한 미세조직검사, 부식시험후 외관검사 등을 시행하여 용접건전성의 적/부 여부를 평가하고 있다.

지지격자 용접은 노심에서 연료봉을 지지하는 연료봉 지지력과 관련이 있으며 특히 지지격자의 구조강도(횡방향 하중하에서 격자체의 좌굴 및 및 충격강도)와 밀접하게 연관되어 있다. KAERI에서는 근래에 국내의 유망 LASER 용접 전문업체를 모색하여 KAERI에서 개발한 고유 지지격자를 상용 원전연료 지지격자의 용접품질 수준으로 용접하기 위해 적절한 용접치구 및 용접공정 개발 그리고 용접변수 선정 작업을 수행하였다. 상용 원전연료 지지격자 용접변수 및 공정에 대한 정보는 단지 참고수준의 정보만을 입수하여 활용하였다.

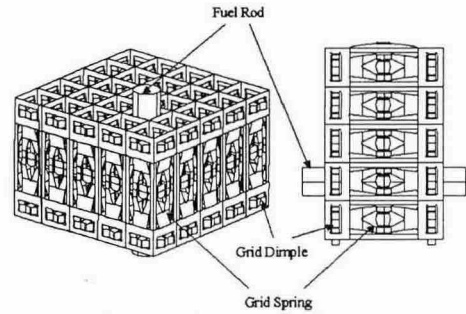


Fig. 2 Schematic View of a spacer grid

### 2.2. 용접변수의 비교

국내 유망 LASER 용접 전문업체(업체 A로 표시)의 용접조건 I~IV와 상용 원전연료 지지격자체 용접업체(업체 B로 표시)에서 사용한 용접변수를 비교한 것이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Comparison of welding parameter

Welder	A				B
	조건 I	조건 II	조건 III	조건 IV	
용접전력 (W)	411.4	416.5	413.1	442.0	430~435
에너지(J)	24.2	24.5	24.3	26.0	25.29~25.59
Pulse width (ms)	8.4	8.0	7.5	9.0	8.0
Shot count	8	7	7	7	7~8
Peak Power(kW)	3.0	3.2	3.4	3.0	N/A
Repeat(Hz)	17	17	17	17	17

### 2.3 용접부위의 용접품질 비교

#### 2.3.1. 용접비드 형상

Table 2는 업체 A의 용접조건(I~IV)으로부터 용접한 지지격자체의 용접비드 크기와 업체 B에서 용접한 지지격자체의 용접비드 크기 측정값을 지지격자판 두께(T)의 배수로 나타낸 것으로 A사의 조건 IV에서 용접한 것이 업체 B의 용접품질에 가장 근접하는 것으로 판단된다.

Table 2. Comparison of weld bead size (x T\*)

Welder	A				B
	조건 I	조건 II	조건 III	조건 IV	
지지격자(상단부)					
- 평균값	5.112	5.057	5.100	5.246	5.210
- 표준편차	0.1008	0.1127	0.0963	0.0757	0.1383
- Lower 95% 신뢰도 평균	5.060	4.999	5.050	5.206	5.167
지지격자(하단부)					
- 평균값	5.370	5.264	5.309	5.437	5.368
- 표준편차	0.1105	0.0872	0.1276	0.0970	0.2936
- Lower 95% 신뢰도 평균	5.313	5.219	5.243	5.387	5.277

\* T : 지지격자판의 두께

한편 동일한 지지격자 형상을 A사 용접조건 IV로 용접한 경우의 용접품질과 B사에서 용접한 용접품을 비교하였다. A사 용접조건 IV로 용접한 경우에 용접비드의 평균값, 표준편차, Lower 95% 신뢰도 평균은 지지격자 상단에서 각각 5.270, 0.2378, 5.183이고 지지격자 하단에서 각각 5.278, 0.1606, 5.219이었다. 이 값들을 Table 2의 B사 용접품질과 비교해보면 A사의 용접기술도 상당히 양호한 것을 알 수 있다.

2.3.2. 용접부위 조직

용접부위 조직검사는 용접부위를 절단하여 mounting하고 폴리싱하여 50배로 촬영한 뒤 용접부위의 용입깊이, 용접조직을 보기 위한 것으로 Fig. 3과 Table 3에 그 결과가 나타나 있다. Fig. 3에서 보면 업체 A의 용접은 대체적으로 교차점 정중앙에 입열되고 있음을 보여주고 있으며 업체 B의 용접품질에 근접하고 있음을 알 수 있다. 내부교차점의 용입깊이를 살펴보면 Table 3에서 보듯이 업체 A가 업체 B보다 깊게 용접되고 있어서 A사의 용접기술이 상당히 양호한 것으로 볼 수 있다.

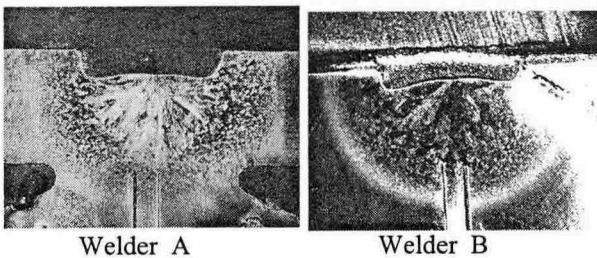


Fig. 3 Comparison of Weld penetration depth

2.3.2. 용접강도 비교

교차점 용접부위에 대한 용접강도를 평가하기 위해 지지격자 교차점 주변의 격자판을 wire cutting으로 절단하여 +형 시편을 만들어서 용접부위에 대한 peeling test를 인장시험기로 수행하였다. Peeling test 결과는 Table 3에 요약되어 있다. Table 3에서 보면 업체 A 및 B사 모두 용접부위에서 파단이 발생하지 않고 모재에서 파단이 발생함으로써 용접품질이 양호한 것으로 볼 수 있다. 특히 peeling test 결과 A사 및 B사의 용접강도가 B사의 설계요구기준보다 2배 이상 되고 있어서 용접강도는 충분히 만족하고 있음을 알 수 있었다.

Table 3. Comparison of weld penetration depth (x T\*)

용접품질 \ Welder	A	B
용입깊이		
- 상단부	4.43-4.65	3.19-3.38
- 하단부	4.33-4.52	3.34-3.49
Peeling Test		
- 파단부위	모재	모재

\* T : 지지격자판의 두께

3. 결 론

KAERI에서 지난 9년간 자체적으로 고안한 지지격자 고유 형상 중에서 제반 성능이 우수하여 산업화 가능성이 매우 높은 “최적화 H형 스프링 부착 지지격자” 형상의 지지격자체를 제조하는 작업의 일환으로 국내 유망 LASER 용접업체를 발굴하여 용접기술을 개발하고 있다. 본 연구에서는 상용 핵연료 지지격자체의 용접품질에 버금가는 용접기술을 개발하기 위해 여러 용접조건에 대하여 용접을 수행하여 용접부위에 대한 용접 품질을 조사한 후 적절한 용접조건 범위를 선정하게 되었다. 이번에 선정된 용접조건을 조금만 더 보완하면 상용 핵연료 지지격자 제조업체에 버금가는 용접품을 얻을 수 있는 용접조건과 용접기술을 개발 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 산학연 콘소시엄과제와 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 송기남, 윤경호, 강홍석, 이강희 "경수로 핵연료 지지격자의 기계/구조적 특성평가," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2005년도 학술대회 논문집.
2. K.H. Yoon et al., "Spacer Grid with H-spring for Fuel Rods for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies", US Patent 6,167,105, Dec. 26, 2000.
3. K.H. Yoon et al., "Spacer Grid for Nuclear Reactor Fuel Assemblies with Grid Springs Maintaining Conformal Contact with Fuel Rods and Enlarged Elastic Range", US Patent 6,707,872 B2, March 16, 2004.
4. I. K. Kim, "TiG Welding of Zry-4 Sheets," Specification LF-FE 114, KAERI LWR Fuel Div. (1988).