

## 경수로 원전연료용 지르칼로이 지지격자체의 성능 및 용접품질 분석

### Performance and Welding Quality Analysis for the Zircaloy Spacer Grid Assembly of PWR Fuel

송기남<sup>†</sup>\*, 이수범\*, 김용완\*, 김수성\*, 한형준\*\*

\* 한국원자력연구원(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. And also, the spacer grid assembly is hydraulically required to have less hydraulic resistance of coolant. To meet this requirement, it is necessary to weld the welding parts carefully and precisely. In this study, weld qualities such as, weld bead size and spatter manufactured by various welders were compared and analyzed. And performance parameters such as impact strength of spacer grid and hydraulic resistance of coolant were also compared and analyzed. Comparison results show that the weld qualities could be improved by selecting the optimal welding condition and also improving the welding technique.

## 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(UO<sub>2</sub>) 소결체(직경 약 8mm, 길이 약 10mm 정도의 원기둥 형상입)가 두께 약 0.6mm의 Zircaloy 피복관 속에 내장되어 있다.

기계/구조적으로 지지격자는 연료봉을 정해진 위치에 있도록 견전하게 지지하면서 원전연료 집합체 측면으로부터 가해지는 외부하중으로부터 연료봉을 보호하는 기능을 갖는 핵심 구조물로서 충분한 횡방향 충격강도를 갖도록 설계하고 제조(용접)하는 것이 필요하다. 지지격자 횡방향 충격강도 요구조건은 횡방향 설계하중하에서 지지격자 변형량이 설계한도 이내로 변형되는 것으로 이를 만족할 경우 원자로 긴급정시시에 안내관 속으로 제어봉의 삽입이 방해받지 않게 되어 원자로의 안전성(사고시에 원자로 긴급정시)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.<sup>1)</sup> 또한 지지격자는 수력적으로 원자로심내를 흐르는 냉각수의 수력저항이 낮도록 설계/제조되어야 원자로 압력펌프(보통 발전 용량의 3%의 전력 사용)의 부하를 줄일 수 있어서 발전 경제성을 높일 수 있다.

지지격자 용접은 원자로 노심에서 연료봉을 지지하는 연료봉 지지력 뿐만 아니라 지지격자의 충격강도 및 냉각수 수력저항과 밀접하게 연관되어 있다. 한국원자력연구원(KAERI)에서는 근래에 국내 유망 LASER 용접 업체를 모색하여 KAERI에서 개발한 고유 지지격자를 상용 원전연료 지지격자의 용접품질 수준으로 용접하기 위해 적절한 용접치구 및 용접공정 개발 그리고 용접변수 선정 작업을 수행하였다.<sup>2)</sup>

본 논문은 여러 핵연료 공급회사에서 제조한 지지격자와 국내 용접 업체에서 용접한 지지격자 시제품의 성능과 용접품질을 비교하고 분석한 것이며 용접변수를 최적화하고 용접기술 및 용접공정을 개선하면 지지격자의 성능과 용접품질을 현재 상용 지지격자의 그것보다 월등히 개선시킬 수 있음을 시사하고 있다.

## 2. 지지격자 용접

### 2.1 지지격자의 용접의 개요

Fig. 2는 지지격자의 형상을 나타낸 것이며 흠이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 레이저빔 용접한

egg-crate 형상의 구조물이다. 격자판의 재질로 Inconel이 사용되던 1990년대 후반까지 격자판 사이의 접합에 Brazing이 사용된 적도 있으나 근래에는 중성자 경제성 관점에서 유리한 Zircaloy로 만든 격자판이 널리 사용됨에 따라 TiG 용접, 전자빔 용접(EBW), 레이저빔 용접(LBW) 등의 특수용접법이 사용되고 있다. 근래에 국내·외의 지지격자 제조업체에서는 상용 지지격자 제조시에 용접비드 크기를 작게 하면서 용입깊이를 증가시키기 위해 EBW나 LBW 방법이 널리 사용되고 있는 추세인데 이는 용접비드 크기를 작게 하면 연료봉 사이로 흐르는 냉각수의 수력저항을 감소시킬 수 있는 장점이 있고 용입깊이를 증가시키면 지지격자의 충격강도를 증가시키는 장점이 있기 때문이다.

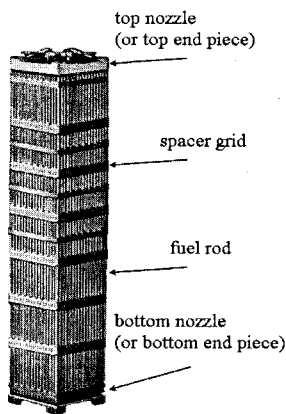


Fig. 1 Fuel assembly for PWR

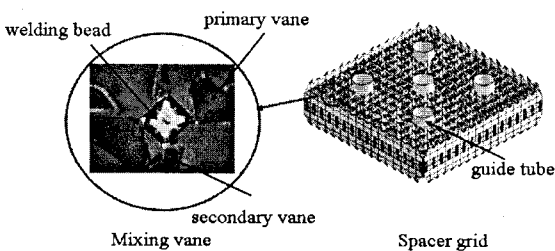


Fig. 2 Spacer grid and mixing vanes

## 2.2. 용접품질 및 성능 분석

### 2.2.1 상용 지지격자 용접품질

EBW로 제조된 지지격자의 용접품질에서 용접비드 크기 및 spatter 발생 유무 등을 조사/분석하였다.<sup>3)</sup> Fig. 3은 EBW으로 제조된 지지격자 상단 및 하단의 용접비드 형상을 나타낸 것으로 용접비드의 형상이 전체적으로 마름모 형상을 보이고 있으나 용접부 주위에서 spatter 발생이 있고 또한 용접비드가 격자판 교차부의 정 중심에 형성되지 못하고 있음(misalignment; 부정렬)이 발견되고 있다. spatter 발생은 용접조건을 최적화하면 개선될 여지가 있고, 부정렬은 지지격자 용접용 치구 설계시에 주의를 기울이면 개선될 것으로 보인다. 표 1에는 용접비드의 여러 위치에

대하여 정밀 사진 촬영하여 용접비드 크기를 측정하고 95% 하한 신뢰도로 평가한 용접비드 크기(격자판 두께 대비), 표준편차, 용접비드가 수로 단면적을 가리는 비드 순 면적의 크기를 나타낸 것이다.



Fig. 3 Weld bead shapes of EBW(spot) for upper(Left) and lower side(Right) by KWU

LBW로 제조된 최첨단 상용 지지격자의 용접 품질에서 용접비드 크기 및 spatter 발생 유무 등을 조사/분석하였다.<sup>3)</sup> Fig. 4는 LBW로 제조된 지지격자 상단 및 하단의 용접비드 형상을 나타낸 것으로 용접비드의 형상이 전체적으로 마름모 형상을 어느 정도 유지하고 있으나 약간의 spatter 발생이 있고 부정렬이 약간 발견되고 있다. spatter 발생은 용접조건을 최적화하면 개선될 여지가 있고, 부정렬은 지지격자 용접용 치구 설계시에 주의를 기울이면 개선될 것으로 보인다. 표 1에는 용접비드의 여러 위치에 대하여 정밀 사진 촬영하여 용접비드 크기를 측정하고 95% 하한 신뢰도로 평가한 용접비드 크기, 표준편차 및 용접비드가 수로 단면적을 가리는 비드 순 면적을 나타낸 것이다.

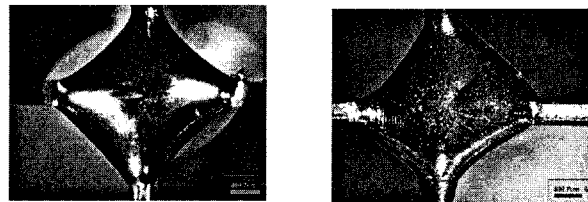


Fig. 4 Weld bead shapes of LBW(spot) for upper(Left) and lower side(Right) by W

### 2.2.2 국내 LBW 전문업체의 지지격자 시제품 용접품질

국내 LBW 전문업체에서 LBW으로 제조된 지지격자 시제품의 용접품질에서 용접비드 크기, spatter 발생 유무 등을 조사/분석하였다.<sup>3)</sup> Fig. 5는 격자판 교차부를 각각 레이저빔 용접으로 spot 용접한 경우에 제조된 지지격자 상단 및 하단의 용접비드 형상을 나타낸 것으로 용접비드의 형상이 전체적으로 거의 완전한 마름모 형상을 유지하고 있으며 spatter 발생도 거의 없으며 부정렬도 상당히 작은 빈도로 발견되고 있다. 용접부 변색 및 spatter 발생은 용접조건을 최적화하면 개선될 여지가 있고, 부정렬은 지지격자 용접용 치구 설계시에 주의를 기울여야 할 것으로 보인다. Fig. 6은 격자판 교차부를 각각 LBW로

spot 가용접(Tag-welding) 한 뒤 격자판 연결부의 모서리를 따라 시임용접(seam welding)한 경우에 제조된 지지격자 상단 및 하단의 용접비드 형상을 나타낸 것으로 용접비드의 형상은 전체적으로 마름모 형상에서 벗어나고 있으나 격자판 내부에서는 상당히 양호한 결합을 하고 있으며 spatter 발생은 거의 없고 부정렬도 상당히 작은 빈도로 발견되고 있다. 교차부 가용접으로 인하여 용접비드 형상이 균일하지 않으나 가용접시 용접변수 선정에 주의를 기울이던가 아니면 굳이 가용접을 하지 않도록 용접치구를 개선하면 용접비드 형상의 왜곡은 개선될 수 있을 것으로 보여진다. 표 1에서는 용접비드의 여러 위치에 대하여 정밀 사진 촬영하여 용접비드 크기를 측정하고 95% 하한 신뢰도로 평가한 용접비드 크기, 표준편차 및 용접비드가 수로 단면적을 가리는 비드 순 면적을 나타낸 것이다.

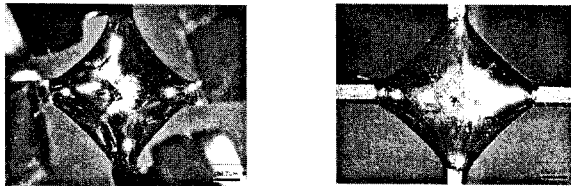


Fig. 5 Weld bead shapes of LBW(spot) for upper(Left) and lower side(Right) by LTEK

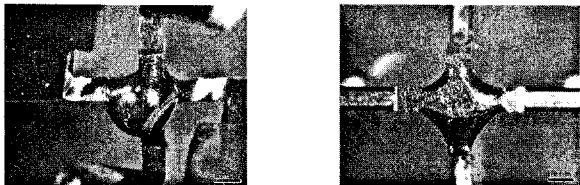


Fig. 6 Weld bead shapes of LBW(Tag-w) for upper(Left) and lower side(Right) by LTEK

표 1에서 보면 교차점 가용접 후 시임 용접한 경우에 용접비드 크기와 비드 순 면적이 크게 감소하여 수력적 저항성이 크게 감소할 것으로 보이며 용접비드 크기와 비드 순 면적을 비교해보면 국내 레이저 용접 전문업체의 용접품질이 상용 지지격자의 용접품질보다 우수함을 보여주고 있다.

### 2.2.3 지지격자체 성능 분석

지지격자체 충격강도 시험결과와 수력저항 정도(압력손실계수)<sup>9)</sup>가 표 2에 나타나 있다. 표 2에서 보면 국내에서 개발한 지지격자체 형상이 충격강도관점에서 최첨단 상용 지지격자에 비해 취약할 수 있음에도 불구하고 용접공정과 격자형상을 개선함으로써<sup>4)</sup> 최첨단 상용 제품의 충격강도와 비견함을 볼 수 있으며 가용접한 뒤 격자판 연결부의 모서리를 따라 시임 용접한 경우에 충격강도가 크게 증가하고 있다. 수력저항 정도를 보면 국내에서 용접공정을 최적화하여 제조한 제

품의 수력저항이 최첨단 상용 제품의 그것보다 약 7% 이상 작음을 보여주고 있고 이것은 표 1에서와 같이 지지격자 교차점에서의 용접비드 크기가 작음에 크게 기인하고 있음을 나타낸다.

Table 1. Comparison of weld quality

製品名	部位	용접비드 크기(mm)	표준 편차	비드 순 면적(mm <sup>2</sup> )	용접방법
FOCUS	上部	1.473	0.040	0.727	EBW(spot-w)
	下部	1.531	0.041	0.822	
P7	上部	2.228	0.092	2.804	LBW(spot-w)
	下部	2.188	0.127	2.726	
KAERI -spot	上部	1.903	0.049	1.754	LBW(spot-w)
	下部	2.091	0.069	2.254	
KAERI -Tack	上部	1.112	0.029	0.246	LBW(Tack-w)
	下部	1.063	0.029	0.221	

Table 2. Comparison of Performance

製品名	충격강도*	압력손실 계수*	용접방법
FOCUS	1.126	N/A**	EBW(spot welding)
P7	1.000	1.000	LBW(spot welding)
	0.977	0.932	LBW(spot welding)
KAERI	1.359	0.942	LBW(7.3mm Line welding)
	1.619	0.942	LBW(13.3mm Line welding)

\* Ratio of Impact Strength based on that of P7

\*\* N/A: Not Available

### 3. 결 론

1. 국외 지지격자 상용 제조업체에서 제조한 지지격자와 본 연구에서 발굴한 국내 LBW 전문업체에서 제조한 지지격자의 용접품질과 성능을 비교/분석한 결과 국내 LBW 전문업체의 용접기술이 매우 우수함을 알 수 있었다.
2. 교차점 가용접 및 교차부 시임용접을 한 경우에 용접비드 크기, 비드 순 면적이 크게 감소하여서 이 용접방법은 지지격자의 충격강도 제고 및 냉각수 수력적 저항 감소와 관련하여 매우 유리한 용접기술로 보인다.

### 참고문헌

1. H-N. Rhee, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual," April 1989, KAERI/CE Inc.
2. 송기남, 윤경호, 이강희, 김수성, 한형준, "경수로 원전연료용 질칼로이 지지격자체의 LASER 용접품질 평가(III)", KWS 2006 춘계학술대회 논문집.
3. 송기남, 김수성, 한형준, "경수로 원전연료용 질칼로이 지지격자체의 LASER 용접품질 분석", KWS 2006 춘계학술대회 논문집.
4. S.H. Lee, J.Y. Kim, and K.N. Song, "Design Improvement of an OPT-H Type Nuclear Fuel Rode Support Grid by Using an Axiomatic Design and an Optimization," JMST Vol. 21, 1191-1195, 2007.
5. 송기남외 16인, "고성능지지격자개발 최종보고서", KAERI/RR-2736/2006, 2007, 한국원자력연구원.