

## 경수로 원전연료용 지지격자의 LASER 용접품질 평가

### Welding Quality Evaluation on the LASER Welding Parts of the Spacer Grid Assembly for PWR Fuel Assembly

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

\* 한국원자력연구소

**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 spacer grid assembly welded by several 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 약 40 % 이상을 차지하는 기간 전력원이다. 근래에 우리나라는 원자력 발전과정에서 필연적으로 생기는 원전 수거물에 대한 저장시설을 어디에 건설할 것인가에 대하여 갈피를 잡지 못하고 있는 상황이며 반핵 단체를 중심으로 한 일부 여론에서는 원자력 발전의 유용성에 대한 의구심을 제기하며 대체에너지원 개발을 주장하고 있으나, 우리나라와 같이 전력 부존자원이 풍부하지 않은 나라에서 산업생산 증대 및 국민 삶의 질 향상에 절대적으로 기여하는 전력 공급원으로서 원자력 발전은 향후에도 지속되고 더욱 증대되어야 할 것이다. 우리나라 원자력 발전량의 약 80 % 이상이 가압경수로(PWR)에 의한 것이며 우리나라에서 널리 사용되는 PWR 원전연료 중 하나인 웨스팅하우스(W)형 원전연료는 Fig. 1과 같이 가로 및 세로 방향의 길이가 ~200 mm이고 축방향 길이가 ~4000 mm인 구조물이다. W형 17x17 원전연료는 Fig. 1에서 보듯이 상단고정체 및 하단고정체가 각각 1개, 지지격자 8개, 안내관 24개, 계측관 1개 그리고 연료봉 264개로 구성되어 있고 연료봉 속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO<sub>2</sub>) 소결체(직경 ~8 mm, 길이 ~10 mm 정도의 원기둥 형상임) 들이 두께 ~0.6 mm인 피복관 속에 내장되어 있다. PWR 원전연

료는 보통 3~5년 동안 원자로에 장전되며 지지격자에 삽입되어 매달려 있는 연료봉속의 소결체에서 발생된 열이 연료봉 사이의 수로(간격 ~3 mm)를 따라 흐르는 1차 냉각수로 전달되고, 열교환기를 통해 2차 냉각수로 열을 전달하여 궁극적으로는 수증기로변한 2차 냉각수가 터빈을 돌려서 전기를 생산한다<sup>(1)</sup>.

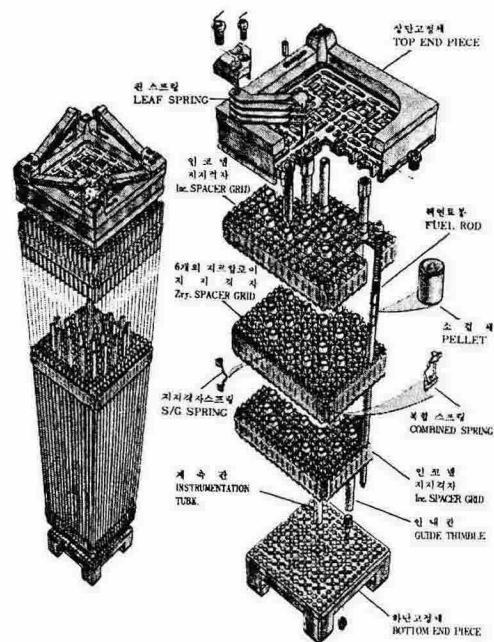


Fig. 1 Fuel assembly for Westinghouse-type plant.

한국원자력연구소(KAERI)에서는 1997년 7월 이래로 PWR 원전연료에 사용될 수 있는 지지격자 고유형상을 고안(특허권의 획득이 '고유'의 기본개념임)하고 시편을 제조하여 여러 가지 성능 시험을 수행하여 왔다. 특히 지지격자에서의 구조강도 특성은 지지격자를 구성하는 격자판의 형상뿐 만아니라 격자체 용접부위의 용접특성에도 크게 영향을 받고 있다.

본 논문에서는 KAERI에서 근래까지 고안한 16종의 지지격자 고유 형상 중에서 일차적으로 차세대 핵연료에 사용가능성이 매우 높은 "최적화 H형 스프링 부착 지지격자"(1997년 기본개념이 도출되어 2000년에 미국 및 대한민국 특허를 획득하였으며 성능이 개선된 최적화 형상<sup>(2)</sup>도 2004년 미국 및 대한민국 특허를 획득하였음)에 대하여 국내 2개의 LASER용접업체(이하 업체 A, B)에서 용접한 시편의 용접품질과 국내 핵연료전문생산업체(이하 업체 C)에서 용접한 양산용 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 용접(예전에는 Brazing 하였음)한 달걀바구니(egg crate) 형상의 구조물이다.

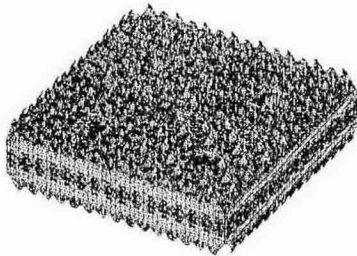


Fig. 2 Spacer grid assembly.

지지격자는 Fig. 1에서 보듯이 연료봉을 지지하는 구조물로서 격자판들이 교차하는 상·하부의 교차점이 용접되고 있다(Fig. 2참조). 초창기 격자판의 재질로 Inconel이 사용될 때 격자판 사이의 결합에 Brazing을 사용한 적도 있으나 근래에

는 중성자 경제성 관점에서 유리한 Zircaloy 계열로 만든 격자판이 널리 사용됨에 따라 격자판 용접에 TiG 용접, 전자빔 용접, 레이저 빔 용접 등의 특수용접법이 사용되고 있다. 용접부위에 대한 시험 및 검사로는<sup>(3)</sup> 용접부위에 대한 외관 검사, 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 충격강도)와 밀접하게 연관되어 있다. KAERI에서는 그동안 개발된 지지격자 시편의 용접을 업체 A에 의뢰하여 용접을 수행하여 왔으나 용접품질의 일관성이 유지되지 않음으로 인하여 근래에 업체 B를 물색하였고 상기 두 업체에서의 용접품질을 비교하기 위해 업체 C에서 생산한 상용 지지격자의 용접품질과 비교하였다. 비교한 용접품질로는 용접부위의 외관검사(20배 사진)에서 용접비드 크기 및 외관상태를 단면조직검사(50배 사진)에서는 용입깊이를 그리고 용접부위의 용접강도 등이다.

### 2.2. 용접변수의 비교

업체 A, B, C에서 지지격자체 LASER용접에 사용한 용접 파라미터를 비교한 것이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Comparison of welding parameter

Welder Parameter	A	B	C
용접전력 (W)	75	411.4	430~435
에너지 (J)	15	24.2	25.29~25.59
Pulse width (ms)	3.0	8.4	8.0
Shot count	N/A	6~7	7~8

### 2.3 용접부위의 용접품질 비교

#### 2.3.1. 용접비드 형상

Fig. 3은 지지격자 교차점(cross-point)에서의 용접비드 형상을 20배로 촬영한 사진이고 Table 2에서는 용접비드의 크기를 비교하였다. Fig. 3에서 보면 업체 A에서 용접한 용접비드 형상으로 용접비드가 교차점 정중앙에서 대체적으로 벗어나고 있으며 업체 B와 업체 C에서 용접한 용접비드 형상은 용접비드가 교차점 정중앙을 중심으로 분포하고 있다. Table 2에서 보면 용접비드의 크기가 업체 A→업체 B→업체 C의 순으로 커지고 있다. 업체 B의 용접변수 및 용접공정을 조

금 더 개선하면 업체 C의 용접비드 크기를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

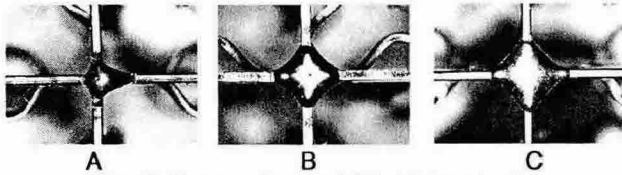


Fig. 3 Comparison of Weld bead size

### 2.3.2. 용접부위 조직

용접부위 조직검사는 용접부위를 절단하여 mounting하고 폴리싱하여 50배로 촬영한 뒤 용접부위의 용입깊이, 용접조직을 보기 위한 것으로 Fig. 4와 Table 2에 그 결과가 나타나 있다. Fig. 4에서 보면 업체 A의 용접은 2.3.1절에서 논의했던 바와 같이 대체적으로 교차점 정중앙에 입열되지 않았음을 보여주고 있고 업체 B의 용접은 대체적으로 교차점 정중앙에 입열되고 있음을 보여주고 있으나 업체 C의 용접품질에 근접하기 위해서는 용접을 조금 더 정밀하게 수행할 필요가 있다고 보여진다. 내부교차점의 용입깊이를 살펴보면 Table 2에서 보듯이 업체 A→업체 B→업체 C의 순으로 용입깊이가 커지고 있다. 업체 B의 용접변수 및 용접공정을 조금 더 개선하면 업체 C 정도의 용입깊이를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

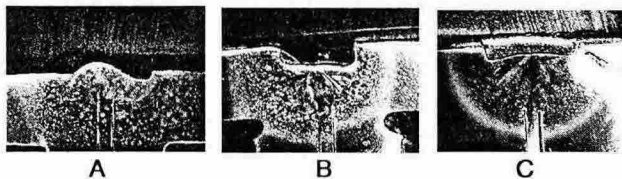


Fig. 4 Comparison of Weld penetration

### 2.3.2. 용접부위 조직

용접강도 평가로는 용접부위를 절단하여 시편을 제작한 뒤 peeling test를 수행하였다. Table 2는 각 업체별 용접부위에 대한 용접강도를 나타내고 있다. Table 2에서 보면 업체 A의 용접강도는 외부격자판 용접부위는 대체적으로 만족스러우나 내부격자점 용접부위에서 강도가 상당히 작음을 보이고 있는 반면, 업체 B의 외부격자판 용접부위에서 용접강도는 만족스럽고 또한 내부격자점 용접부위에서 강도도 업체 C의 값에 근접하고 있어서 용접변수 및 용접공정을 조금 더 개선하면 업체 C 정도의 용접강도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

용접품질	업체 A	업체 B	업체 C
용접비드 크기 (x t* : 교차점)	3.32	4.34~4.83	5.34~5.59
용입깊이 (x t)			
- 내부교차점	2.36	3.84	4.04
- 외부교차점	~1.00	0.37	0.36
용접강도(kN)			
- 내부교차점	0.46	2.20	2.53
- 외부교차점	2.21	2.32	2.05

Table 2. Comparison of welding qualities

\* t : 격자판의 두께

## 3. 결 론

한국원자력연구소에서 지난 8년간 자체적으로 고안한 지지격자 고유 형상 중에서 제반 성능이 우수하고 산업화 가능성이 매우 높은 "최적화 H형 스프링 부착 지지격자"의 지지격자는 LASER 용접으로 제조될 예정이다. 국내의 용접업체에서 용접한 지지격자 시편의 용접부위의 용접품질을 비교한 결과 품질제어가 우수한 업체 C에서 제조한 지지격자의 용접부위가 가장 우수하였고 업체 B에서 제조한 시편도 용접품질이 우수하였다. 반면에 그동안 고유 지지격자의 지지격자 용접을 수행하였던 업체 A는 용접품질이 다소 떨어지는 것으로 밝혀졌다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 송기남, 윤경호, 강홍석, "경수로용 원전연료집합체에서의 용접부위 및 건전성 시험", 대한용접학회 2003년도 춘계학술대회 논문집.
2. 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.
3. I. K. Kim, "TiG Welding of Zry-4 Sheets," Specification LF-FE 114, KAERI LWR Fuel Div. (1988).