

## 경수원전연료용 신형 지지격자 개발 및 기계/구조적 성능평가 현황(II)

송기남 a, 윤경호, 강홍석, 이강희

a 한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150, knsong@kaeri.re.kr

### 1. 서 론

지지격자는 가압경수로(PWR)용 원전연료집합체를 구성 하는 구조부품 중에서 백미로 볼 수 있는 부품이다. 한국 원자력연구소(KAERI)에서는 PWR 용 원전연료집합체에 대한 다년간의 설계경험을 바탕으로 하고 외국의 최신 개량 원전연료에 대한 특징과 특허자료를 면밀히 검토하여 근래까지 총 16 종의 지지격자 고유형상을 독자적으로 고안하였고 이중 14 종의 형상이 대한민국, 일본, 미국 등으로부터 특허 등록되었다. 본 논문에서는 KAERI 에서 고안한 여러 지지격자 형상 중에서 독창성이 뛰어나서 선진 외국회사와 특허분쟁에 휘말릴 가능성이 매우 낮고 성능이 우수하여 향후 우리나라의 수출용 차세대 원전 연료에 사용이 유망할 것으로 사료되는 지지격자 후보형상 2 종에 대한 특징과 기계/구조적 성능평가 현황에 대하여 기술하였다.

### 2. 차세대 핵연료용 고유 지지격자의 주요특징 및 성능평가 현황

KAERI 및 한수원(주)에서 특허권을 갖고 있는 지지격자 후보형상 2 종에 대한 주요 특징과 성능평가 현황을 살펴보면 다음과 같다. 아울러 성능평가의 객관성을 유지하기 위해 현재 상용으로 사용하고 있거나 상용으로 개발중인 개량원전 연료의 지지격자(참조용 지지격자)에 대해서도 수행하였다.

#### 2.1 복합유동날개가 부착된 면접촉 스프링 지지격자

종래의 대다수 지지격자에서 연료봉을 지지하는 지지격자 스프링 및 덤플과 연료봉간의 접촉은 비등각(non-conformal)의 점접촉(엄밀히 말하면 좁은 영역의 면 접촉)이 주류를 이루었다. 본 과제에서는 1997 년말에 지지격자 스프링 및 덤플의 연료봉 접촉부위 형상이 연료봉 외면의 곡률반경과 같으며 연료봉과 스프링 접촉 면을 지지하는 스프링 지지부(다리)가 이중 아치인 스프링 (전반적으로 H 형상과 유사한 형상)을 고안하여 2000 및 2001 년에 미국 및 대한민국에서 특허 등록되었다[1]. 한편 연료봉 지지성능을 향상시키도록 형상이 최적 설계된 최적화 H 형 스프링을 추가로 고안하였는데 2004 년에 미국 및 대한민국에서 특허 등록되었다[2]. 최적화 H 형 스프링의 주요 특징은 연료봉 장입후에도 연료봉과 스프링의 접촉이 면접촉을 유지하도록 하는 데 있다. 즉, 연료봉 장입후에도 연료봉과 접촉하는 스프링 접촉부위는 변형이 발생하지 않고 스프링의 다리에서만 변형이 발생하도록 하는 것으로서 호모로지 기법을 이용한 최적설계를 수행하여 스프링 형상을 도출하였다[3]. 따라서 연료봉의 안정적 지지로 인한 연료봉의 유체유발진동(FIV) 경향을 감소시키고 연료봉의 프레팅 마멸에 대한 저항성을 획기적으로 증가시키게 되었다. 한편 지지격자 상부에서 냉각수의 난

류가 형성되도록 하는 장치를 부착하여 열전달을 향상시키는 방법이 1980 년도 중반부터 선진 외국회사에서 처음 도입한 이래 근래에는 이러한 장치의 사용이 일반화 되고 있다. 본 과제에서는 선진 외국회사들이 특허소유권을 갖고 있는 난류발생장치 형상을 면밀히 검토한 뒤 선진 외국회사의 난류발생장치 형상들과 차별화된 고유 장치 형상(복합유동장치라 칭함)을 고안하여 2003 년 및 2004 년에 일본, 대한민국, 미국 등으로부터 특허를 획득하였다[4]. 본 과제에서는 국내·외적으로 특허권을 소유하고 있는 상기 2 종의 특징을 결합하여(포괄적 면접촉 형상의 H 형 스프링 및 덤플 + 복합유동날개 형상) 우리나라의 수출용 차세대 원전연료의 지지격자 후보 I 형으로 제안하고 이에 대한 성능평가를 수행하고 있다. 근래에 국내 우수한 특허사무소는 지지격자 후보형상 I 형의 특허청구사항을 면밀히 검토한 뒤 지지격자 후보형상 I 형은 외국의 선진기술로부터 독립적이라는 의견을 제시하고 있다.

#### 2.2 측면 절개형 이중판 노즐형 지지격자

얇은 판 두 개를 겹쳐서 한 개의 판으로 만들고 그 안에 형성된 노즐로 유입된 일부의 냉각수가 지지격자 상부에서 냉각수의 난류형성에 기여하는 개념이 1980 년대 후반에 미국의 SPC 사(현재는 Framatome-ANP 로 병합)에서 처음 도입되었다. 본 과제에서는 1997 년에 독자적인 이중판 노즐형 지지격자를 고안하여 2000 년에 미국 및 대한민국에서 특허를 획득하였으며[5] 성능을 향상시키는 형상으로 개량한 "측면 절개형 이중판 노즐형 지지 격자"를 고안하여 2004 년에 미국으로부터 특허를 획득하였다[6]. 본 과제에서는 국내·외적으로 특허권을 소유하고 있는 측면 절개형 이중판 노즐형 지지격자 형상(부가적으로 지지격자 상단에 난류유동장치를 부착할 수도 있음)을 우리나라의 수출용 차세대 원전연료의 지지격자 후보형상 II 형으로 제안하고 이에 대한 성능평가를 수행하고 있다. 근래에 국내 우수한 특허사무소는 지지격자 후보형상 II 형의 특허청구사항을 면밀히 검토한 뒤 지지격자 후보형상 II 형은 외국의 선진기술로부터 독립적이라는 의견을 제시하고 있다.

#### 2.3 지지격자 스프링 및 덤플의 특성평가

고유 지지격자 후보형상 2 종과 참조용 지지격자 2 종의 격자판 시편을 Zircaloy-4 로 제조하여 지지격자 스프링의 F-8 특성시험을 수행한 결과 지지격자 후보형상 I 형 및 II 형의 스프링 강성이 권장범위 내에 있고 참조용 지지 격자에 비해 스프링의 강성, 탄성영역한계, 소성변형량 등에서 우세한 것으로 알려졌다[7]. 한편 근래에 격자체 단위에서 스프링 및 덤플의 특성을 시험할 수 있는 치구를 제작하여 지지격자 후보형상 I 형과 참조용 지지격자에 대하여 시험을 수행하고 있다.

2.4 지지격자 연료봉 지지/진동 특성평가

여러 격자에 의해 지지되고 있는 다점 지지 연료봉의 모달 파라미터(고유 진동수, 진동 모드)를 파악하는 시험과 5 개의 5x5 형 격자체로 제작된 5x5 형 부분 집합체에 대한 공기중, 수중 진동시험을 수행하였으며[7] 부분집합체에 대한 FIV 특성을 파악할 수 있는 시험 Loop 를 구축하여 지지격자 후보형상 I 형 및 II 형과 상용으로 개발중인 지지격자(참조용 지지격자)에 대한 FIV 시험을 수행하고 있다. 한편 근래에 외국 핵연료회사의 상용 시험 Loop 에서도 본 과제에서 개발한 지지격자 후보형상 I 형 및 II 형으로 제작한 부분집합체에 대한 FIV 시험을 수행하였는데 후보형상 II 형은 진동특성이 매우 우수한 반면 후보형상 I 형은 참조용 지지격자의 진동특성에 비견할 만하나 첨두 진폭(peak amplitude)의 발생위치가 원전운전영역 가까이로 이동한 것으로 보고되고 있다[8]. 이 사항은 본 과제에서 구축한 FIV 시험 Loop 를 이용하여 확인시험을 수행할 계획이다.

2.5 프레팅 마멸특성 평가

냉각수 유동에 의해 연료봉이 지지격자 지지부와 상대 운동을 하게 될 때 지지격자 지지부와 접촉하는 연료봉 표면에는 프레팅 마멸이 발생할 수 있다. 지지격자 스프링과 연료봉이 접촉된 상태와 간극이 있는 상태에서 지지격자 후보형상 I 형, II 형 및 참조용 지지격자 2 종의 스프링에 대해 상온, 공기 중에서 프레팅 마멸 특성시험을 수행하였다[7]. 한편 근래에 외국의 프레팅 마멸 전문시험 기관인 캐나다 AECL 에서 지지격자 후보형상 I 형에 대한 프레팅 마멸시험을 수행하였는데 결과는 표 1 에서 보듯이 참조용 지지격자에 비해 매우 양호한 것으로 나타났다.

Table 1. Wear Test Results

	후보형상 I형	참조용 지지격자
Average Fuel Rod Wear Coefficient ( x 10 <sup>-15</sup> Pa <sup>-1</sup> )		
at Spring	113	496
at Dimple	171	780
Maximum Fuel Rod Wear Mark Depth (µm)		
at Spring	17-18	27-44
at Dimple	14-19	28-64

2.5 지지격자체의 충격특성 평가

지지격자 후보형상 I 및 II 형에 대한 전모델(Full array) 충격특성 해석을 수행하였다[7]. 또한 지지격자 후보형상 I 형 및 참조형 지지격자에 대한 상온 및 고온 충격시험도 수행중에 있다.

3. 결론

KAERI 에서는 다년간의 원전연료집합체 설계 경험을 바탕으로 하고 외국의 새로운 원전연료 특징과 특허 자료들을 면밀히 검토하여 외국회사와 특허분쟁에 휘말리지 않을 것으로 기대되는 PWR 용 지지격자 고유형상 총 16 종을 고안하였고 근래까지 14 종의 지지격자 고유형상이 국내·외로부터 특허를 획득하였다. 현재 기존 원전연료에 사용된 지지격자보다 성능이 우수하며 국내·외에서 산업재산권 확보가 유망한 고유 지지격자 후보형상 2 종에 대한 중요 상세시험의 대부분이 국내·외에서 수행되었는데 시험결과를 살펴보면 상용으로 사용중이거나 상용으로 개발중인 지지격자의 성능에 비해 본 과제에서 고안한 지지격자 후보들의 성능이 우수하거나 비견할 정도임을 확인하였다.

4. 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업 중 “경수로용신형핵연료개발”(대과제) “고성능지지격자 개발”(세부 과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] K. H. Yoon et al., Spacer Grid with H-spring for Fuel Rods for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies, US Patent 6167105, 2000.  
 [2] K. H. Yoon et al., Spacer Grid for Uniform Conformal Contact with Fuel Rod and to Extend the Elastic Range of the Grid Spring, US Patent 6707872, 2004.  
 [3] K. H. Yoon et al., Shape Optimization of the H-shape Spacer Grid Spring Structure, J. of KNS, Vol. 33, No. 5, pp.547-555, October, 2001.  
 [4] T. H. Chun et al., Spacer Grid with Hybrid Flow Mixing Device for Nuclear Fuel Assembly, Japan Patent 3463998, 2003.  
 [5] H. S. Kang et al., Grid with Nozzle-type Coolant Deflecting Channels for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies, US Patent 6130927, 2000.  
 [6] H. S. Kang et al., Side-slotted Nozzle Type Double Sheet Spacer Grid for Nuclear Fuel Assemblies, US Patent 6744843 B2, 2004.  
 [7] 송기남 외 3 인, 경수원전연료용 신형 지지격자 개발 및 성능평가 현황(I), 2004 춘계 원자력학회 논문집.  
 [8] 김용환, 해외출장결과보고자료, 2004.  
 [9] 윤경호, 해외출장보고서, KAERI/OT-1277/2004.