한국원자력연구소에서 개발한 가압경수로용 핵연료 지지격자의 기계/구조적 성능 해석 및 시험

송기남†·윤경호*·강흥석*·최명환*

Mechanical/Structural Performance Analysis and Test on the KAERI Designed Spacer Grids for the PWR

K-N Song, K-H Yoon and H-S Kang

Key Words: Fuel Assembly(핵연료집합체), Spacer Grid Spring(지지격자 스프링), Fuel Rod(연료봉), Spacer Grid(지지격자), Characteristic Curve(특성곡선)

Abstract

KAERI has contrived 15 kinds of spacer grid shapes of its own since 1997 and applied for domestic and foreign patents. To date, KAERI has obtained US and ROK patents for 6 kinds of spacer grid shapes among them and the others are under review in USA, EC, China, and ROK. In this study, mechanical/structural performance analysis and test on two spacer grid shapes that are assumed to be the most effective candidates for the spacer grid of the next generation nuclear fuel in Korea was carried out. The result has shown that the performances of the candidates are better or not worse than those of the current spacer grid.

1. 서 론

우리나라에서 원자력에 의한 발전량은 전체 발전량의 약 40 % 이상에 이르는 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 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 것으로 우리나라에서 널리 사용되는 가압경수로용 원전연료 중에 하나인 웨스팅하우스형 원전연료는 Fig. 1과 같이 가로, 세로가 각각 약 200 ㎜이고 길이가 약 4000 ㎜인 구조물이다. 이 원전연료는 Fig. 1에서 보듯이 상단고정체 및 하단고정체가 각각 1개, 지지격자 8개, 안내관 24개, 계측관 1개 등으로 구성되어 있고 연료봉 속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO_2) 소결체(직경 약 8 ㎜, 길이 약 10 ㎜ 정도의 원기둥형 소결체 들이 두께 약 0.6 ㎜의 피복관 속에 내장됨)가 얇은 피복관속에 내장되어 있다. 경수로용 원전연료는 보통 3~5년 동안 원자로에 장전되며 지지격자의 격자(cell)내에 삽입되어 매달려있는 연료봉 사이로(간격 약 3㎜) 흐르는 1차 냉각수로 열이 전달되고 열교환기를 통하여 2차 냉각수 회로를 순환하는 2차 냉각수로 열을 전달하며 궁극적으로는 2차 냉각수가 수증기화하여 터빈을 돌려서 전기를 생산한다.

† 한국원자력연구소(KAERI)
E-mail : knsong@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2254 FAX : (042)863-0565
* 한국원자력연구소

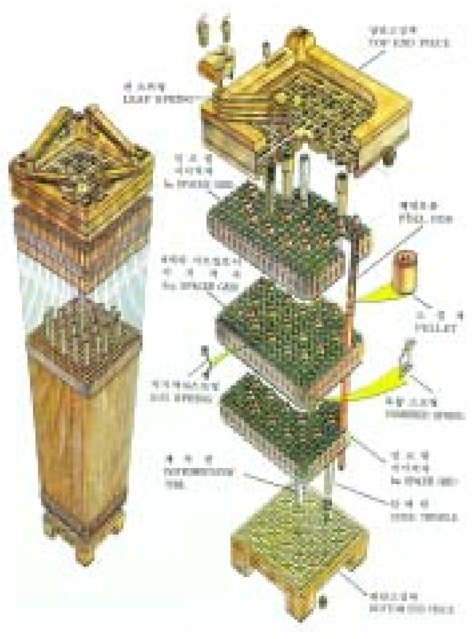

Fig. 1 Fuel Assembly for Westinghouse-type Plant.

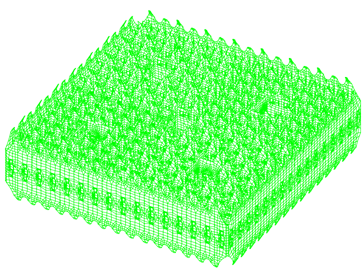

Fig. 2 Spacer Grid Assembly.

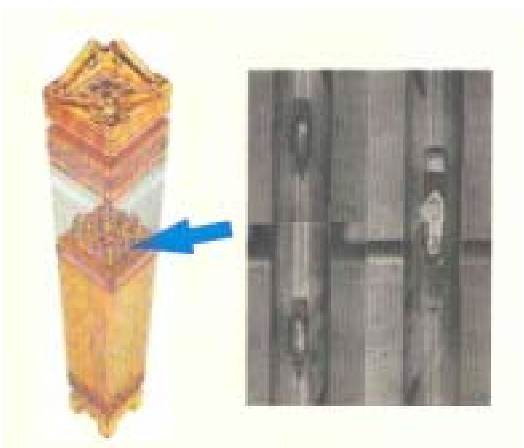

Fig. 3 Fretting Wear Scar at Fuel Rod.

Fig. 2는 지지격자를 개략적으로 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 용접한 달걀바구니(egg-crate) 형상의 구조물이다. 지지격자의 각 격자에는 stamping으로 형성된 판형의 스프링과 딤플이 돌출되어 있어서 격자 안으로 연료봉이 삽입되면 스프링의 변형에 의한 스프링력의 마찰력으로 연료봉을 지지하고 있는데, 원자로 운전 중에 격자의 연료봉 지지력은 원자로심내의 여러 운전환경조건들에 의해 초기 지지력에 비해 크게 감소하고 있다. 즉, 중성자 조사에 의한 stress relaxation(응력이완)과 연료봉 직경의 변화(감소)로 인하여 원전연료가 원자로에 장전된 지 1년 이내에 이미 초기 스프링력의 90 % 이상을 잃어버려서[1] 연료봉 지지력이 크게 감소하는데 심한 경우에는 연료봉을 제대로 지지하지 못하여 -연료봉을 지지하는 스프링의 지지력이 zero가 되거나 연료봉과 스프링 사이에서 간극이 발생- 연료봉이 낙하하여 하단고정체 위에 놓이게 되거나 원자로 노심내를 흐르는 1차 냉각수(초속 5~8m/s)에 의하여 연료봉이 진동함으로서 연료봉 지지부(스프링 및 딤플부위)에서 연료봉이 프레팅 마모(Fig. 3 참조)되어 심한 경우에는 연료봉이 천공되고 방사능 물질이 1차 냉각수로 누출될 수도 있다.

한국원자력연구소에서는 1997년부터 독자적으로 지지격자 형상을 고안하여 15종을 국내·외에특허출원하고 있고 2003년 9월 현재 6종의 지지격자 고유형상이 미국 및 대한민국에 특허가 등록되어 있으며 8종은 미국, 유럽연합, 중국 및 대한민국에서 특허심사중에 있다. 본 연구에서는 한국원자력연구소의 기술진이 고안하여 우리나라 원전연료 구조부품 개발 역사상 처음으로 2000/2001년에 미국 및 대한민국에 특허가 등록되고 근래에 상용화를 위한 상세시험을 국내 원전연료 산업체와 공동으로 수행하고 있는 2가지 형상의 지지격자, 즉 최적화 H형(Opt. H) 및 새이중판 노즐형(Doublet) 지지격자에 대하여 기계/구조적 특성(스프링의 탄·소성 변형특성, 지지격자로 지지된 연료봉 및 집합체의 진동특성, 지지격자 충격특성)을 해석하고 시험한 결과를 정리한 것이며 결과 평가의 객관성을 유지하기 위해 현재 국내 발전소에 사용되고 있는 상용 지지격자 및 국내 원전연료 산업체가 외국의 원전연료 산업체와

공동으로 개발하여 원자력발전소에서 연소시험중인 최신 개량연료 지지격자에 대한 결과와도 비교하였다.

2. 지지격자의 기능

지지격자의 기능은 크게 기계/구조적 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있다. 지지격자의 기계적인 기능을 살펴보면 연료봉이 각 격자에서 스프링과 딤플에 의해 건전하게 지지되는 것이다. 만약 스프링이 연료봉을 지지하지 못하면 연료봉이 낙하하여 원전연료 하부구조물인 하단고정체 위에 놓여서 냉각수 유동에 의해 쉽게 흔들릴 수 있고 연료봉 사이의 수로를 따라 흐르는 냉각수 유동력에 기인한 유체유발진동에 의해서 연료봉이 스프링 및 딤플과의 접촉부위에서 마멸/손상되면 연료봉 내부에 축적된 핵분열 생성물이 1차 냉각수로 누출될 수 있다. 지지격자의 구조적 기능은 지진이나 원자로 사고시에 원전연료에 가해지는 횡방향 하중이 직접적으로 연료봉에 전달되지 않도록 연료봉을 보호하면서 횡방향 하중하에서도 구조물의 형상이 크게 변형되지 않을 만큼 충분한 구조강도를 갖추어야 한다. 이것은 원자로를 긴급히 정지시켜야할 경우에 제어봉이 안내관속으로 삽입될 수 있도록 지지격자의 기하학적 형상이 유지되어야 함을 의미한다. 열수력적 기능을 살펴보면 지지격자를 통과한 냉각수에 난류유동을 발생시켜서 UO_2 소결체가 들어있는 연료봉으로부터 1차 냉각수로의 열전달을 촉진시키는 것이다. 근래의 원전연료에서는 난류유동만을 더욱 촉진시키기 위하여 Fig. 5와 같은 혼합날개(mixing vane)를 지지격자 상단부에 추가로 부착하여 성능을 개선시키고 있으나 연료봉의 유체유발진동을 심화시킬 수도 있다.

3. 지지격자 스프링의 탄소성 변형특성

Fig. 5와 같은 고유 지지격자 스프링 2종에 대한 탄소성 변형특성 시험과 해석을 수행하였다. Fig. 5의 좌측시편은 스프링 및 딤플이 연료봉과 등각의 면 접촉형상(conformal contact shape)이 되도록 개발된 지지격자(Opt. H형)에 사용되는 것으로서 원자로내에서 연료봉을 안정적으로 지지할 뿐만 아니라 연료봉과의 접촉부위에서 첨두

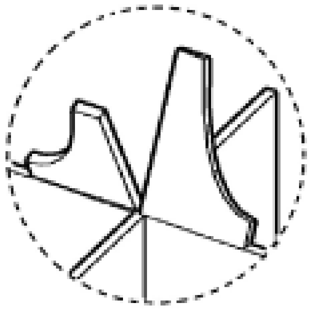

Fig. 4 Mixing Vane.

Fig. 5 Test Specimen of KAERI Designed Springs(left: Opt. H; right: Doublet).

응력의 크기를 프레팅마멸에 의해 연료봉이 손상될 가능성을 크게 줄이는 것이 주요 특징이다(2000/2001년에 대한민국 및 미국 특허를 획득함.) 또한 Fig. 5에서 우측시편은 Doublet 지지격자의 스프링 형상을 나타낸 것으로(2000년에 대한민국 및 미국 특허를 획득한 지지격자) 냉각수 유동에 의한 스프링력의 자체복원(self-recovery)과 연료봉과의 접촉길이(혹은 면적)을 길게(넓게) 하여 연료봉을 안정적으로 지지하며 프레팅마멸에 의한 연료봉의 손상가능성을 크게 줄이는 것이 주요 특징이다.

한국원자력연구소에서 독창적으로 개발하여 대한민국 및 미국에 특허권을 갖고 있는 2가지 형상의 고유 지지격자 스프링과 국내 원전연료 산업체에서 외국 원전연료회사와 공동으로 개발하여 원자로에서 시험 연소중인 최신 개량원전연료의 지지격자(Ref. B) 및 현재 상용으로 사용중인 원전연료의 지지격자(Ref. A) 스프링의 스프링 탄소성 특성시험결과를 비교한 것이 Fig. 6에 도시되어 있다. 연료봉을 건전하게 지지하기 위해 스프링 강성은 150±50 N가 권장되고 있는데 Fig. 6에서 보면 Opt. H형 지지격자 및 Doublet 지지

격자의 스프링의 강성은 적절한 것으로 나타났으며 또한 스프링의 탄성한계 및 1.0 ㎜ 까지 변형시킨 후 얻은 소성변형량을 비교해보면 Opt. H형 및 Doublet 스프링이 Ref. A와 Ref. B 스프링보다 우수한 것으로 나타났다. Fig. 7과 8은 고유지지격자 스프링 2종의 유한요소모델을 나타낸 것이고 Fig. 9와 10은 탄소성 변형특성 해석결과를 나타낸 것으로 해석결과가 시험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.[2)]

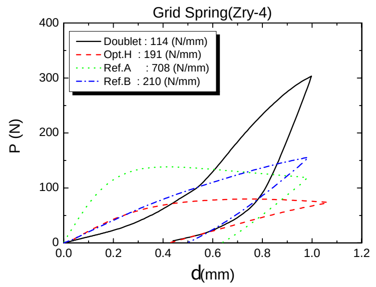

Fig. 6 Spring Characteristic Test Result.

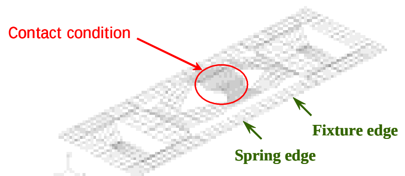

Fig. 7 FE Model of Opt. H-type Spring.

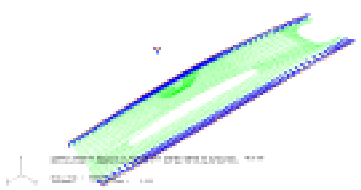

Fig. 8 FE Model of Doublet Spring.

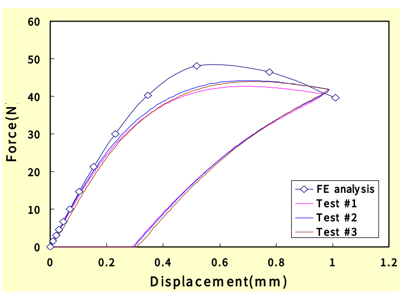

Fig. 9 Spring Characteristic Analysis Result (Opt. H-type Spring).

4. 연료봉 및 집합체 진동특성

Fig. 11은 5개의 5x5형 지지격자로 지지된 연료봉의 진동시험장치를 나타낸 것으로 shaker로 가진하여 가속도와 변위를 측정하는 지지격자의 연료봉 진동특성시험을 수행하였다. Table 1은 Fig. 11의 시험장치를 유한요소해석으로 얻은 결과를 시험결과와 비교한 것으로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 12는 5x5형 지지격자 5개로 지지된 부분집합체 다발의 진동특성 해석하기 위한 유한요소모델과 해석결과를

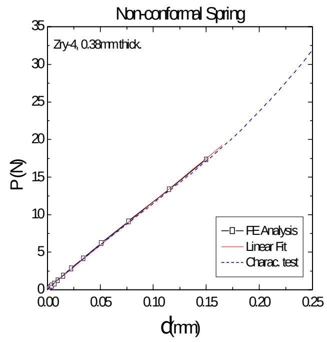

Fig. 10 Spring Characteristic Analysis Result (Doublet Spring).

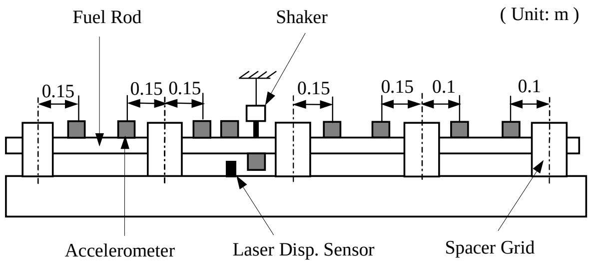

Fig. 11 Fuel Rod Vibration Test Set-up.

Table 1 Natural Frequency of Fuel Rod

Spacer Grid	Mode #	Test	Analysis	차이(%)*	MAC
Opt. H	1	31.02	38.21	23.2	0.910
	2	44.57	44.63	0.1	0.934
	3	48.65	53.07	9.1	0.917
	4	97.95	81.64	-23.5	0.603
	5	103.56	121.0	16.8	0.803
Double t	1	44.58	30.73	-31.1	0.911
	2	46.81	37.99	-2.5	0.719
	3	49.66	47.98	-3.4	0.927
	4			-	-
	5	110.9	109.5	-1.34	0.740

* 차이(%): (Analysis-Test)/Test * 100

나타낸 것으로 부분집합체 모델에서 연료봉의 진동모드와 집합체의 진동모드를 분리할 수 있었고 이 해석 결과는 곧 수행될 부분집합체에 대한 진동특성시험결과와 비교할 것이다. Fig. 13은 지지격자의 자유진동 특성에 대하여 시험 및 해석에서 얻은 결과를 보여주고 있는데 해석에서 얻은 지지격자의 기본진동수 및 모드형상이 시험에서 얻은 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.[3]

5. 지지격자 충격특성

5x5형 Doublet 지지격자에 대한 충격특성 시험과 해석을 수행하였다. Fig. 14와 같은 유한요소모델과 Fig. 15와 같은 하중 및 경계조건을 적용하여 시험과 해석을 수행하였다. Table 2는 시험 및 해석에 의한 결과를 비교한 것으로 충격강도를 비교적 잘 예측하고 있으나 충격속도는 20 % 정도의 오차를 보이고 있다.[4]

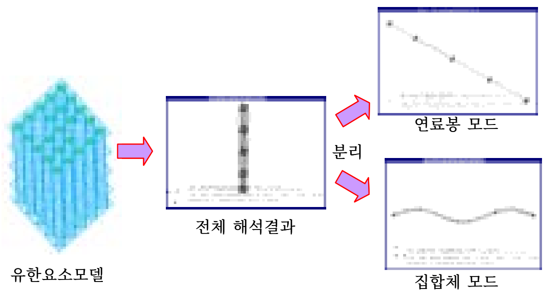

Fig. 12 Fuel Assembly Vibration Analysis.

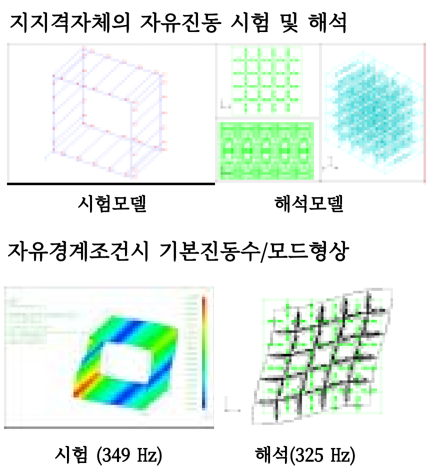

Fig. 13 Spacer Grid Free Vibration Result.

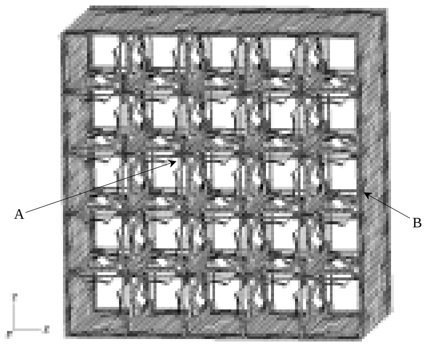

Fig. 14 FE Model of 5x5-type Spacer Grid.

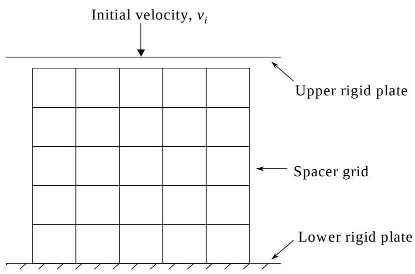

Fig. 15 Loading/Boundary Condition for Impact Analysis.

Table 2 Impact Result between Test & Analysis

Parameters	Test	Analysis	차이(%)*
Critical acceleration (m/s^2)	402.0	361.8	-10.0
Critical velocity (m/s)	0.64	0.50	-21.8
Critical force (N)	9445	9008	-4.6
Duration time ($msec$)	9	6	N/A

* 차이(%): (Analysis-Test)/Test * 100

5. 결 론

한국원자력연구소에서 독자적으로 고안하여 차기 국산 원전연료용 지지격자 후보로 강력히 부상하고 있는 지지격자 형상 2종에 대한 기계/구조적 특성해석 및 시험을 수행하여 해석모델의 유용성을 보였다. 또한 이 지지격자들의 특성이 현재 국내 원전연료 산업체가 외국의 원전연료

회사와 공동으로 개발하여 상용화 준비중인 최신 개량연료의 지지격자에 비해 전반적으로 우수한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업인 경수로용 신형핵연료 개발(대과제) 고성능지지격자개발과제(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Kreyns P. H. and Burkart M. W., 1968, "Radiation-enhanced Relaxation in Zircaloy-4 and Zr/2.5 wt % Nb/0.5 wt % Cu Alloys," *J. of Nuclear Materials*, Vol.26, pp. 87 ~ 104.

(2) 윤경호, 송기남, 강흥석, 김형규, 정연호, 2003, "비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 접촉 거동 해석," 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집.

(3) 최명환, 송기남, 윤경호, 김형규, 강흥석, 2003, "최적화 H형 지지격자체(5x5)의 자유진동 특성," 한국원자력학회 춘계학술대회논문집.

(4) 윤경호, 허성필, 강흥석, 김형규, 송기남, 2002, "측면충격하중 상태에서 격자 구조물의 좌굴거동 해석모델 개선," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 57-64, 논문번호 KSME 02MF069.