경수로용 고유 지지격자의 성능시험

송기남† · 윤경호** · 강흥석** · 김형규**

Performance Test on the KAERI Designed Spacer Grids for the Advanced PWR

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

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

Abstract

KAERI has contrived 14 kinds of spacer grid shapes of its own since 1997 and applied for Korean and US patents. To date, KAERI has obtained US and Korean patents for 6 kinds of spacer grid shapes among them. In this study, performance 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 through the mechanical/structural test and analysis. The test result has shown that the performances of the candidates are better or not worse than that of the current spacer grid.

1. 서 론

우리나라에서 가동되는 원자력 발전용량은 전체 발전용량의 약 43%에 이르며 이중 약 82%가 가압경수로(Pressurized light Water Reactor: PWR)에 의한 것이다. 그런데 우리나라의 PWR은 웨스팅하우스(W)형과 ABB-CE형 원자로로 나누어지고 있는데, W형 원자로에 14×14형, 16×16형, 17×17형 핵연료가 그리고 ABB-CE형 원자로에 16×16형 핵연료가 사용되고 있다. Fig. 1은 W형 17×17형 핵연료(가로 및 세로열에 각각 17개의 연료봉이 나열된 형상)를 나타낸 것으로 상단고정체 및 하단고정체가 각각 1개, 지지

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

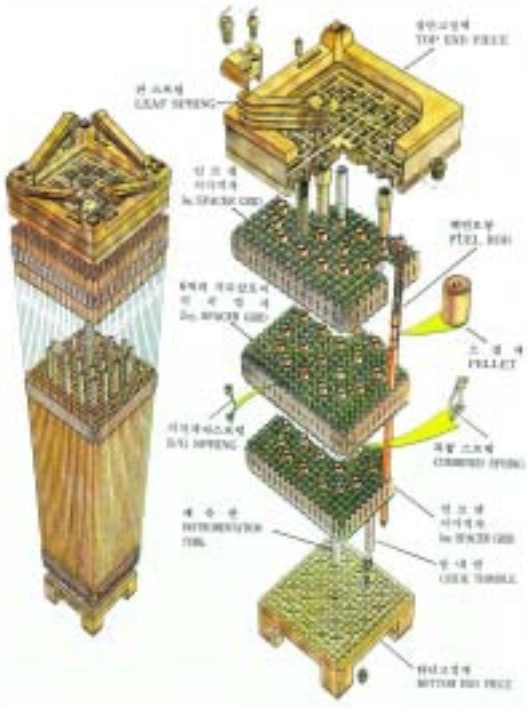

Fig. 1 Schematic drawing of a 17×17 nuclear fuel assembly for Westinghouse-type Plant.

격자 8개, 안내관 24개, 계측관 1개 등으로 구성되어 있고 연료봉속에는 핵분열에 의해 열을 생산하는 이산화우라늄(UO_2) 소결체가 얇은 피복관 속에 내장되어 있다. Fig. 2는 ABB-CE형 16x16형 핵연료 형상을 나타낸 것으로 11개의 지지격자가 사용되고 있다. 핵연료는 보통 3~5년 동안 원자로에 장전되고 있는데 지지격자의 격자(cell) 내에 삽입되어 매달려있는 핵료봉 사이의 수로(수로간격 약 3mm)로 1차 냉각수가 흐르면서 연료봉으로부터 열을 흡수하고 열교환기를 통하여 2차 냉각수 회로를 순환하는 2차 냉각수로 열을 전달하며 궁극적으로는 2차 냉각수가 수증기로 변하고 터빈을 돌려서 전기를 생산한다.

Fig. 3은 지지격자의 5×5형 부분형상을 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 지지격자 스프링과 딤플이 돌출되어 있어서 Fig. 4과 같이 격자 안으로 연료봉(Fig. 4의 9 참조)이 삽입되면 지지격자 스프링(Fig. 4의 121/122 참조)의 변형에 의한 스프링력과 강성이 매우 강한 딤플(Fig. 4의 119 참조)에서 반력에 의한 마찰력으로 연료봉을 지지하고 있는데, 격자내에서 연료봉 지지력은 원자로심내의 여러 운전환경조건들에 의해 크게 변하고 있다. 즉, 중성자 조사에 의한 응력이완(stress relaxation)으로 핵연료가 원자로에 장전된지 1년 이내에 이미 초기 스프링력의 90%이상을 잃어버릴[1] 뿐만 아니라 연료봉 직경의 변화(감소)로 인하여 연료봉 지지력이 크게 감소하고 심한 경우에는 연료봉을 제대로 지지하지 못하여 -연료봉을 지지하는 스프링의 지지력이 zero가 되거나 연료봉과 스프링사이의 간극이 발생- 연료봉이 낙하하여 하단고정체 위에 놓이게 되거나 원자로 노심내를 흐르는 냉각수(초속 5~6m/s)에 의하여 연료봉이 진동하고 연료봉 지지부에서 프레팅마멸로 파손되는 사례도 보고되고 있다.

스프링의 탄·소성 변형특성과 프레팅마멸특성, 연료봉 지지성능특성은 연료봉의 지지건전성을 평가하는데 매우 중요하며 산업현장에서는 아직까지도 실험으로부터 얻은 것을 설계에 사용하고 있다.

한국원자력연구소에서는 1997년부터 독자적으

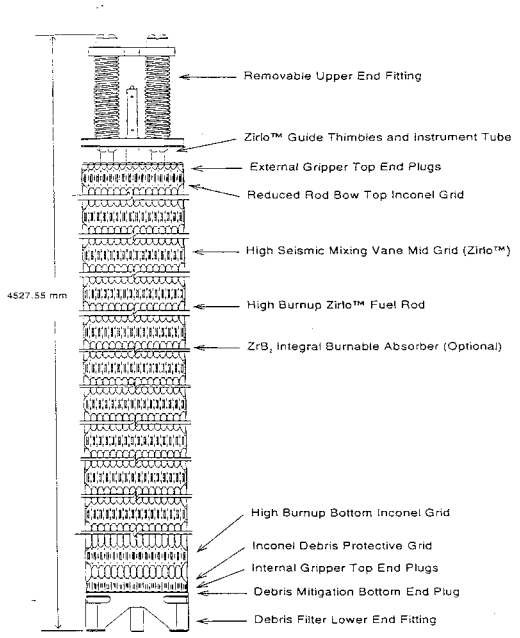

Fig. 2 Schematic drawing of a 16×16 nuclear fuel assembly for ABB-CE-type Plant.

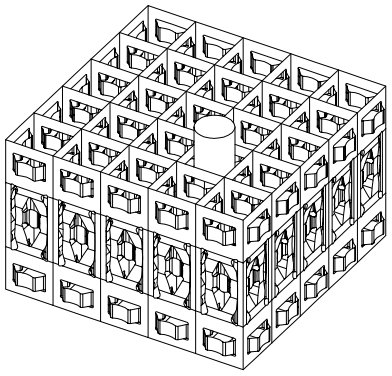

Fig. 3 Configuration of a 5×5 cell partial spacer grid.

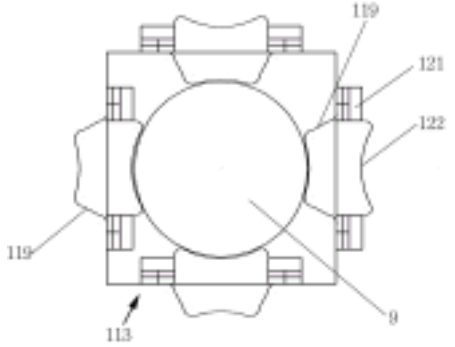

Fig. 4 Top view of grid inserting fuel rod.

로 지지격자 형상을 고안하여 14종을 국내·외에 특허출원하고 있고 2003년 2월 현재 6종의 지지격자 고유형상이 미국 및 대한민국에 특허가 등록되어 있다. 본 연구에서는 국내기술진이 고안하여 우리나라 핵연료 구조부품 개발 역사상 처음으로 2000/2001년에 미국 및 대한민국에 특허가 등록되고 근래에 상용화를 위한 상세시험을 산업체와 공동으로 수행하고 있는 2가지 형상의 고유 지지격자 즉 최적화 H형(Opt. H) 및 새이중판 노즐형(Doublet) 스프링과 산업체에서 외국의 핵연료 회사와 공동으로 개발중인 개량연료(PLUS7; 본 논문에서는 Ref. B로 표기함)에 사용될 지지격자 스프링에 대하여 스프링의 탄·소성 변형특성 및 프레팅마멸 특성시험, 연료봉 지지성능시험을 수행한 결과를 비교하고 정리한 것이다.

2. 지지격자의 기능

지지격자의 기능은 크게 기계/구조적 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있다. 지지격자의 기계/구조적 기능은 다시 지지격자의 구조적 기능과 실제로 연료봉을 지지하는 스프링 및 딤플의 기계적 기능으로 나누어진다. 지지격자의 구조적 기능은 지진이나 원자로 사고시에 핵연료에 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 기하학적으로 지지격자의 형상이 유지되어야 함이 요구됨을 의미한다. 지지격자의 기계적인 기능을 살펴보면 연료봉이 각 격자에서 스프링과 딤플에 의해 건전하게 지지되는 것이다. 만약 스프링이 연료봉을 지지하지 못하면 연료봉이 낙하하여 핵연료 하부구조물인 하단고정체 위에 놓여 있을 수도 있고 혹은 연료봉 사이의 수로를 따라 흐르는 냉각수 유동력에 기인한 유체유발진동(flow induced vibration)에 의해서 연료봉 피복관이 스프링 및 딤플과의 접촉부위에서 마모/손상되면 연료봉 내부에 축적된 핵분열 생성물이 1차 냉각수로 누출될 수 있다. 열수력적 기능을 살펴보면 지지격자를 통과한 냉각수에 난류유동을 발생시켜서 연료봉으로부터 냉각수(coolant)로의 열전달을 촉진시키는 것이다. 근래에 외국의 최신핵연료에서는 난류유동만을 더욱 촉진시키기 위한 장치를 추가로 부착하여 성능을 개선시키고 있다.

Fig. 5 Unit cell of optimized H-spring.

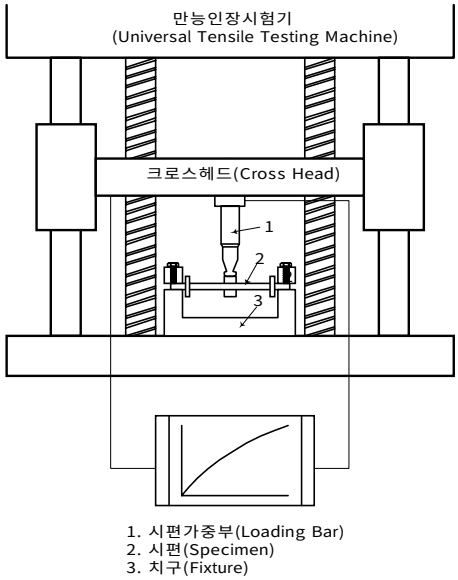

Fig. 6 Schematic drawing of tester.

이러한 기능을 갖고 있는 지지격자의 성능은 핵연료 성능과 매우 밀접하게 관련되어 있어서 외국의 핵연료 공급업자들은 새로운 핵연료를 개발하여 상품화할 때 지지격자의 개선된 성능을 주요 특징으로 강조하고 있다[(2)].

3. 지지격자 스프링의 특성시험

지지격자 스프링의 특성시험을 위하여 Fig. 5와 같이 격자체와 분리된 단일 셀 시편을 준비한다. 시편의 양 끝단(edge)을 고정한 상태에서 연료봉의 외경과 동일한 직경을 갖는 봉으로 스프

Fig. 7 Specimen fixture for the characteristic test of spacer grid spring.

Fig. 8 Test Specimen of Springs (left: Opt. H; right: Doublet)

링면에 수직방향의 변위를 가한다. Fig. 6은 시험기의 개략을 나타낸 것으로, 크로스헤드와 연결된 가중봉(loading bar)에 변위를 부여하고, 시험기에 부착된 로드셀에서 스프링의 하중 데이터를 얻어 하중-변위 선도를 작성한다.[3,4] 시편의 고정을 위한 치구는 Fig. 7과 같이 설계하였는데, 나사 체결을 이용하여 Fig. 8과 같은 시편의 양쪽 가장자리를 고정한다.

4. 스프링의 프레팅마멸시험

스프링과 연료봉 시편과의 프레팅마멸시험은 격자판 단위의 프레팅마멸시험과 격자단위의 프레팅마멸시험으로 나누어 수행하였다. 격자판 단위의 프레팅마멸시험은 Fig. 9와 같이 스프링 시편을 고정하고 연료봉 시편에 상대적 변위를 주어 수행하는 마멸시험이며 격자단위 시험은 Fig. 10과 같이 4개의 스프링 격자판으로 1개의 cell을 구성한 뒤 cell내에 삽입된 연료봉 시편을 상하로

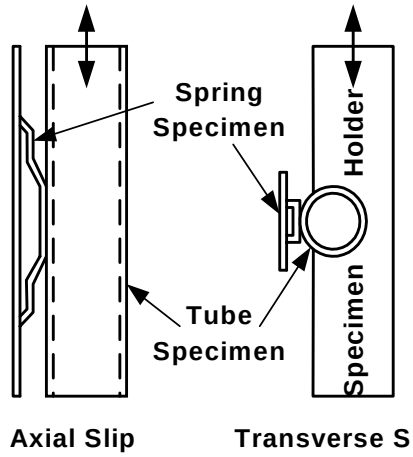

Fig. 9 Setup of strap-based fretting wear specimen

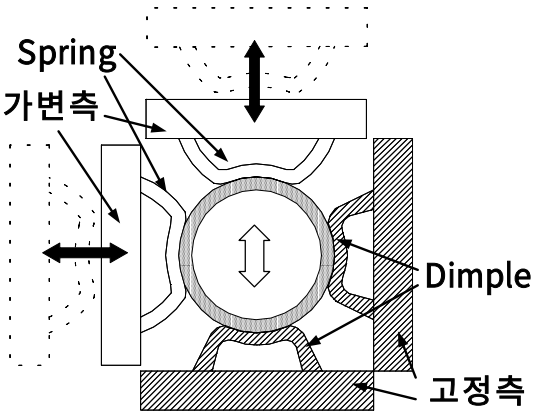

Fig. 10 Setup of fretting wear specimen

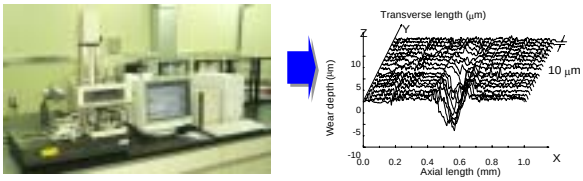

Fig. 11 Measuring the fretting wear scar

움직여서 수행하는 마멸시험이다. 상세한 시험절차는 참고문헌[5,6]에 기술되어 있다.

4.1 격자판 단위 프레팅마멸시험

격자판 단위 프레팅마멸시험은 Fig. 9와 같은 setting된 연료봉을 일정한 스프링력으로 지지한 뒤(10 N, 30 N, 50 N 등) 연료봉 시편에 상대적인 움직임(~100 μm)을 주어 10만 cycle동안 수행하였다. 시험후 마멸흔적은 Fig. 11에서와 같이

표면조도 측정기로 측정한 마멸궤적 자료를 이용하여 마멸부피를 체계적으로 계산하였다.

4.2 격자단위 프레팅마멸시험

스프링 시편은 시편 블록에 접착제로 고정시키고 완전히 굳힌 다음에 각 블록을 로드셀이 장착되어 있는 시편 고정부에 장입하여 격자체를 Fig. 10와 같이 구성한다. 연료봉 시편을 구성된 두 개의 격자체 사이에 끼워 넣어서 실제 연료봉 하나의 span을 모사하였다. 시험은 상온에서 수행하였으며 실제 원자로 내에서 연료봉과 스프링/딤플이 접촉하는 여러 가지 경우 중에서 접촉 수직하중을 받고 있는 경우와 간격이 존재하는 경우에 대해 시험을 수행하였다. 접촉 수직 하중을 받는 경우에는 수직 하중을 5 N으로 설정하였고, 연료봉과 스프링/딤플 사이의 간격이 존재하는 경우에는 간격을 0.1 mm로 정하였다. 5 N의 수직하중이 가해지는 경우에는 구성된 격자체에서 연료봉 시편과 스프링/딤플이 받는 접촉 수직 하중의 로드셀 측정값이 5 N이 될 때까지 가변 치구를 이송하여 하중을 부여하였고 스프링/딤플과 연료봉 시편의 간격이 존재하는 경우에는 먼저 just-contact상태로 조정한 후 이 상태로부터 다이얼 인디게이터를 이용하여 0.1 mm가 후퇴하도록 가변 치구 이송 놉을 돌려서 간격을 맞추었다. 연료봉 시편에 가하는 진동 주파수는 30 Hz로 하였으며 횟수는 100만 cycle로 하였다. 각 시험이 완료된 후, 두 개의 연료봉 시편에 난 마멸흔적을 현미경을 통해 전체적인 외부 형상 및 치수를 측정한 다음, 표면 거칠기 측정장비로 마멸궤적과 마멸깊이를 측정하였으며 여기에서 얻은 마멸부의 3차원 데이터로부터 마멸부피를 계산하였다. 모든 시험은 3회 반복하여 수행하였다.

5. 연료봉 지지성능시험

지지격자로 지지된 연료봉의 지지성능시험은 Fig. 12와 같이 5개의 지지격자로 지지된 연료봉에 shaker를 이용한 일정한 하중으로 가진하면서 연료봉에 부착된 가속도계와 변위계로부터 변위, 가속도를 측정하였다.[7)]

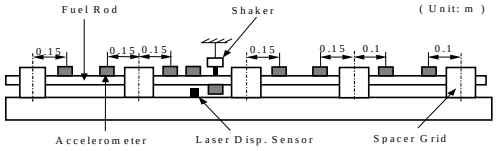

Fig. 12 Setup of fuel rod supporting test

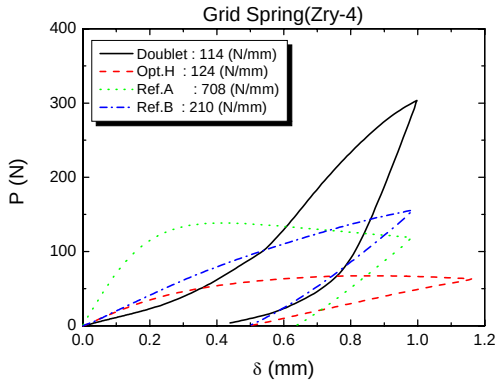

Fig. 13 Spring characteristic test result

6. 성능시험 결과

6.1 스프링 특성시험

2가지 형상의 고유 지지격자 (Opt. H형, Doublet) 스프링과 산업체에서 개발중인 개량핵연료의 지지격자(Ref. B) 및 현재 상용으로 사용중인 지지격자(Ref. A) 스프링의 스프링 특성시험결과를 비교한 것이 Fig. 13에 도시되어 있다. Fig. 13에서 보면 Opt. H형 스프링의 강성 및 최대하중은 적절하며 스프링의 탄성한계가 Ref. A 및 Ref. B 지지격자 스프링보다 커서 연료봉 지지관점에서 우수할 것으로 사료되고 있으며 Doublet 지지격자 스프링도 스프링 강성 및 탄성영역도 Ref. B보다 우수한 것으로 나타나 있다.

6.2 프레팅마멸시험

격자판 단위 프레팅마멸시험을 수행한 결과는 Fig. 14에 나타나 있는데 slip displacement가 증가됨에 따라 마멸량이 급격히 증가하는 임계진폭이 있음을 알 수 있었고, 우리 고유의 지지격자 스프링 2종(Opt. H, Doublet)의 프레팅 마멸특성

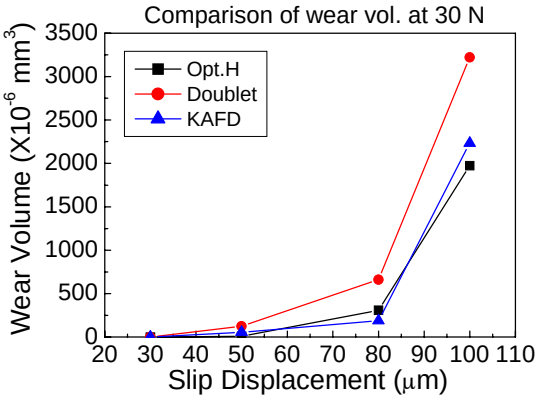

Fig. 14 Wear volume vs. slip displacement

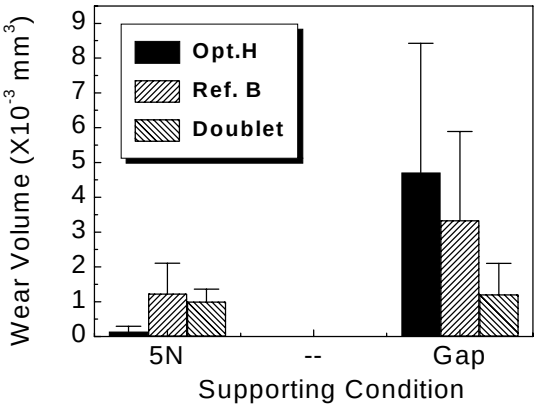

Fig. 16 Wear volume at cell-based wear test

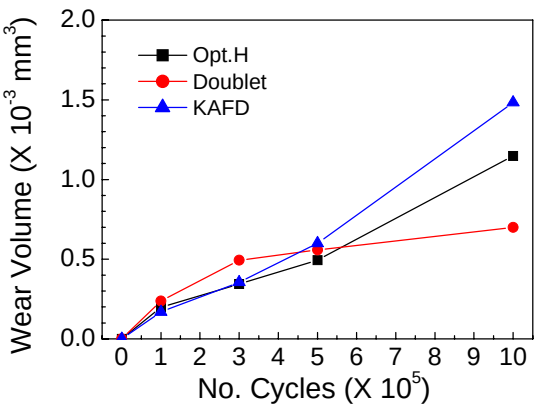

Fig. 15 Wear volume vs. No. of cycles

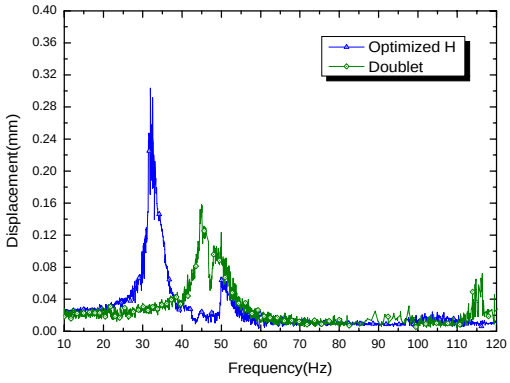

Fig. 17 Measured vibration displacement

이 최신 개량연료 지지격자(Ref. B) 스프링의 그것에 비해 우수함을 알 수 있다. 한편 임계진폭 전의 시험조건(10 N, 50μm)에서 cycle수를 증가시키면서 수행한 마멸진전거동 시험결과는 Fig. 15에 나타나 있는데 Doublet 스프링의 경우 마멸진전이 크게 증가하지 않고 있으나 최적화 H형 및 참조용 지지격자는 cycle 수가 증가함에 따라 마멸부피가 증가함을 알 수 있다.

격자 단위 프레팅마멸시험을 수행한 결과가 Fig. 16에 나타나 있는데 스프링력으로 지지되고 있는 경우 Opt. H형 스프링이 가장 좋은 마모저항성을 갖고 있으며, 간극(gap)이 존재할 경우에는 Opt. H형 및 Ref B의 마멸부피가 급격히 증가하는 반면에 Doublet에서는 마멸부피가 크게 증가하지 않음을 보이고 있다.

6.3 연료봉 지지성능시험

동일한 가진력하에서 연료봉의 진동을 측정한 결과는 Fig. 17에 나타나 있는데 Opt. H형(Ref. B도 유사함)보다 Doublet 스프링이 연료봉 지지성능이 우수함을 보여주고 있다.

6. 결 론

핵연료집합체 설계 및 설계/제조 연계경험을 바탕으로 한국원자력연구소에서 독자적으로 고안한 14종의 고유 지지격자 중에서 2003년 2월 현재 미국 및 대한민국으로부터 6종의 지지격자가 특허를 획득하였다. 고유 지지격자 형상 2종의 대한 스프링 특성시험, 프레팅마멸 특성시험, 연료봉 지지성능시험을 수행한 결과 우리가 고안한 고유 지지격자 스프링의 특성이 최신 개량연료

지지격자 스프링보다 우수한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 2002년도 원자력연구개발사업인 경수로용 신형핵연료 개발(대과제) 고성능 지지격자 구조기술 개발과제(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) 송기남, 김형규, 강흥석, 윤경호, 방제건, 1997 ,"핵연료 핵심구조부품의 개발 현황 및 연구방향, " KAERI/TR-865/97.

(3) H. K. Kim and K. H. Yoon, 2000, "Analysis of Fuel Grid Spring by Characterization Test and Finite Element Method," *Proceedings of the 8th International Conference on Nuclear Engineering, Paper # ICONE-8235.*

(4) 윤경호, 송기남, 강흥석, 정연호, 2001, "지지격자 스프링/딤플의 특성시험 및 유한요소 해석," *한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 논문번호 123.*

(5) 김형규, 윤경호, 강흥석, 송기남, 정연호, 2001, "핵연료봉 프레팅마멸의 임계진폭에 관한 실험적 연구," *한국원자력학회 2001 춘계학술발표회 논문집, 논문번호 121.*

(6) 김형규, 하재욱, 윤경호, 강흥석, 송기남, 2002, "핵연료봉 프레팅마멸에서 접촉조건의 영향에 대한 실험적 분석," *한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 논문번호 21.*

(6) H. S. Kang, K. N. Song, H. K. Kim, and K. H. Yoon, 2001, "Modal analysis of a PWR fuel rod supported by the newly designed spacer grids," *16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper # 1425.*