

경수원전연료용 신형 지지격자 개발 및 성능평가 현황(I)

Development and Performance Evaluation Status of the Advanced Spacer Grid
Assembly for the PWR Fuel Assembly(I)

송기남, 윤경호, 강홍석, 이강희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

지지격자는 가압 경수로용 원전연료집합체를 구성하는 구조부품 중에서 백미로 볼 수 있는 부품이다. 한국원자력연구소에서는 경수로용 원전연료집합체 기계설계 및 열수력설계 경험을 바탕으로 하고 외국의 최신 개량원전연료에 대한 특징과 특허자료를 면밀히 검토하여 근래까지 16종의 지지격자 고유형상을 독자적으로 고안하였고 이중 11종의 형상이 한국, 일본 그리고 미국으로부터 특허를 획득하였다. 본 논문에서는 한국원자력연구소에서 고안한 여러 지지격자 형상 중에서 국내·외적으로 독창성이 뛰어나고 성능이 우수하여 향후 수출용 차세대 원전연료에 사용이 유망한 지지격자 고유형상 2종에 대한 특징과 기계/구조적 성능평가 현황을 기술하였다.

Abstract

The spacer grid is one of the structural core components of nuclear fuel assemblies for pressurized light water reactors. Based on the mechanical and thermo-hydraulic design experience and scrutinizing the design features of foreign advanced nuclear fuel and foreign patents of the spacer grid, 16 kinds of spacer grid candidates have been conceptually derived and have been applied for domestic and foreign patents since 1997 by KAERI. To date, KAERI has obtained US, Japan, and ROK patents for 11 kinds of spacer grid shapes among them. In this paper main features and mechanical/structural performance evaluation status on the two leading candidates of the KAERI designed spacer grids are described.

1. 서론

우리나라에서 원자력 발전은 우리나라 총 발전설비의 약 30%, 총 발전량의 약 40% 이상을 차지하는 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 원자력발전의 80% 이상이 가압경수로(PWR)에 의한 것이며 그림 1은 PWR용 원전연료집합체의 전형적인 형상을 나타낸 것이다. 그림 1에서 보면 원전연료 상·하단부에 상단고정체 및 하단고정체가 각 1개씩(핵연료 vendor에 따라 구조가 차이가 있음), 원전연료 중간부에 8~11개의 지지격자체, 여러 개의 안내관 및 1개의 계측관 등으로 구성된 골격체와 지지격자 스프링 및 덤플에 의해 지지되고 있는 다수의 연료봉으로 구성되어 있다. 지지격자체는 원전연료집합체의 여러 구조부품 중에서 국산화가 달성될 경우 수입대체효과가 가장 커서(원전연료집합체 전체 구조부품비의 약 80% 해당) 국내생산 대상 일순위로 지목될 수 있으나 형상이 복잡하고 관련된 설계/제조기술 및 개발기술의 확보가 어려워 우리나라의 원전연료기술자립을 목표로 원전연료부품의 국내생산 사업을 시작한 1989년 이래로 가장 늦게 국내생산(1990년대 후반에 국내 라이선스 생산을 시작) 대상으로 선정된 부품이다.

그림 2는 지지격자체를 개략적으로 나타낸 것인데 지지격자체는 홈이 있는 격자판-스프링 및 덤플이 돌출되어 있음-들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점을 용접한 egg-crate 형상의 구조물이다. 지지격자체의 격자(cell)안으로 연료봉이 삽입되면 변형된 지지격자 스프링의 스프링력으로 연료봉을 지지하게 되는데(정확한 표현으로는 스프링력에 의한 마찰력으로 연료봉을 지지함), 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 덤플 부위)에서 연료봉이 프레팅 마모(그림 3 참조)되어 심한 경우에는

연료봉이 천공되고 방사능 물질이 1차 냉각수로 누출될 수도 있다.

한국원자력연구소에서는 1997년부터 독자적인 지지격자 형상을 고안하여 지지격자 고유형상 16종을 국내·외에 특허출원하였고 2004년 4월 현재 11종의 지지격자 고유형상이 일본, 미국 그리고 대한민국으로부터 특허를 획득하였으며 나머지 5종은 미국, 유럽 연합, 중국 및 대한민국에서 특허심사 중에 있다. 본 연구에서는 한국원자력연구소의 기술진이 고안하여 우리나라 원전연료 구조부품 개발 역사상 처음으로 2000년에 미국으로부터 특허를 획득한 개념을 근거로 성능이 향상되도록 최적설계된 지지격자 형상 2종(최적화 H형 스프링 부착 지지격자 및 새이중관 노즐형 지지격자)의 주요 특징과 기계/구조적 성능평가 현황을 정리한 것이다.

2. 지지격자의 기능

지지격자의 기능은 크게 기계/구조적 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있다. 지지격자의 기계적인 기능은 연료봉을 각 격자에서 스프링과 덤플에 의해 건전하게 지지하는 것이다. 만약 스프링이 연료봉을 제대로 지지하지 못하면 연료봉이 낙하하여 원전 연료 하부구조물인 하단고정체 위에 놓이고 노심내를 흐르는 냉각수의 유동력에 의해 쉽게 흔들릴 수 있고 또한 냉각수 유동력에 기인한 유체유발진동에 의해서 연료봉(피복관)이 스프링 및 덤플과의 접촉부위에서 마멸/손상되어 피복관이 천공되면 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 정지시켜야 할 경우에 제어봉이 안내관속으로 삽입될 수 있도록 지지격자의 기하학적 형상이 유지되어야 함을 의미한다. 열수력적 기능으로는 지지격자를 통과한 냉각수에 난류유동을 발생시켜서 UO_2 소결체가 들어있는 연료봉으로부터 1차 냉각수로의 열전달을 촉진시키는 것이다. 근래의 원전연료에서는 난류유동만을 더욱 촉진시키기 위하여 혼합날개(mixing vane)를 지지격자 상단부에 부착하여 성능을 개선시키고 있으나 이것은 연료봉의 유체유발진동을 심화시킬 수도 있다.

3. 차세대 핵연료용 고유 지지격자의 주요특징 및 성능평가 현황

3.1 개요

1997년부터 KAERI에서 독창적으로 고안한 지지격자 형상(총 16종)들 중에서 기준

핵연료에 사용된 지지격자보다 성능이 우수하며 국내·외에서 산업재산권 확보가 유망한 고유 지지격자 2종의 주요 특징과 성능평가 현황을 살펴보면 다음과 같다. 객관적인 성능평가를 위해 현재 상용으로 사용중이거나 상용으로 개발중인 개량원전연료 지지격자(참조용 지지격자)에 대해서도 수행하였다.

3.2 최적화 H형(Opt. H형) 지지격자의 주요특징

종래의 대다수 지지격자에서 지지격자 스프링 및 덤플은 점 접촉이나 작은 선 접촉의 비등각(non-conformal) 접촉으로 연료봉을 지지하고 있었다. 이에 비하여 KAERI에서 1997년 중반에 고안하여 1997년 12월에 특허출원하고 2000년과 2001년에 미국 및 대한민국특허를 획득한 “H형 스프링 부착 지지격자” [2, 3]는 지지격자 스프링 및 덤플이 연료봉을 감싸는 형태인 등각(conformal)의 면접촉형상(contoured contact shape)이 되도록 고안된 획기적인 형상이다. 연료봉과 지지격자 스프링 및 덤플의 접촉을 면접촉형상이 되게 함으로서 접촉면적이 넓어지게 되고 지지격자 스프링 및 덤플 접촉부와 연료봉 접촉부에서 접촉응력의 첨두치(peak value) 크기가 크게 감소될 수 있으며 연료봉을 넓은 면적으로 지지함으로서 유체유발진동에 의해 연료봉이 축방향 및 횡방향으로의 미소한 흔들림으로 인한 연료봉과 지지부 간의 상대운동을 감소시켜 연료봉의 프레팅마멸 손상 가능성을 억제할 수 있다. 또한 종래의 지지격자는 외부에서 작용하는 임의의 방향으로부터의 하중에 불안정한 지지 구조를 이루고 있어(점접촉 및 작은 선접촉) 연료봉을 건전하게 지지하지 못할 가능성이 있는데 비해 H형 스프링은 스프링 지지점에서 반력을 분산시킬 수 있는 이중 아치(arch) 형상의 다리를 갖도록 하여 안정적으로 연료봉을 지지하도록 하였다. 또한 스프링의 탄성 거동 허용범위를 확장시켜 원자로의 운전 중에 변화하는 지지조건에서도 연료봉을 건전하게 지지하도록 고안되었다. 최적화 H형 스프링 부착 지지격자는 “H형 스프링부착 지지격자”의 기본 개념에 근간을 두고 성능을 개량하기 위해 형상을 개선한 것으로 초기 H형 스프링의 탄성변형한계를 더욱 확장시키며 연료봉 장입후에 스프링이 변형되어 스프링과 연료봉간의 접촉형상이 변하고 접촉면적이 감소하는 것을 억제하기 위해 호몰로지 기법과 최적설계기법을 이용하여 H형 스프링 지지부와 접촉부 형상에 대한 형상최적설계를 수행하여 얻은 형상이다. 그림 4의 왼쪽 시편은 최적화 H형 스프링의 형상을 나타낸 것으로 근래에 미국특허를 획득하였고[4] 대한민국의 특허는 심사중에 있다. 한편 최적화 H형 스프링 부착 지지격자에는 유동혼합장치인 하이브리드 날개가 부착되어 있는데 이는 이전에 KAERI가 미국특허를 받은 회전유동날개 [5]를 개량한 것으로 일본으로부터 특허를 획득하였으며[6] 미국에서는 특허 심사중에

있다. 하이브리드 날개는 4개의 날개가 지지격자의 격자점에 위치하고 있는데, 형상은 격자로부터 위로 솟아난 사다리형 지지대의 경사진 측면에 붙어 있고 회전유동과 횡방향 유동이 발생할 수 있도록 굽어져 있다.

3.3 새이중판(Doublet 형) 노즐형 지지격자의 주요 특징

지금까지 개발된 지지격자의 냉각재 혼합기능은 지지격자체의 상부에 “혼합날개” 혹은 “베인”이라 부르는 냉각재 혼합용 날개를 부착하여 종방향으로 흐르는 냉각재에 횡방향 흐름을 부가적으로 갖게 함으로서 냉각재 채널(channel: 수로)간 혹은 낮은 온도 구역과 높은 온도 구역의 냉각재가 섞이게 하는 방법(웨스팅하우스사에서 선도함)과 지지격자관을 두 겹으로 만들고 관과 관 사이에 공간을 형성시켜서 유로 통로를 만들되 이 통로의 입구와 출구를 길이 방향으로 기울여서 통로를 통과한 냉각재가 기울어진 각도만큼 회전하는 회전유동을 만들어 열전달을 향상시키는 방법(SPC사에서 선도함)이 있다. 그런데 혼합날개를 이용한 지지격자체는 냉각재를 섞어서 원자로의 열 효율을 높이는 장점이 있지만 냉각재를 섞기 위해 발생시킨 횡방향 유동에 의하여 연료봉이 지지격자내에서 흔들리는 이른바 유체유발진동현상을 유발하게 된다. 냉각재의 횡방향 유동으로 야기된 유체유발진동은 연료봉과 격자 수로 사이에 빠르고 주기적인 간섭을 발생시키고 결국은 연료봉과 지지격자체와의 접촉부위(스프링 혹은 덤플)에서 연료봉이 손상될 수 있는 이른바 유체유발진동에 의한 연료봉 프레팅마멸 손상의 원인이 될 수도 있다. 결국 혼합날개의 작용이 강력할수록 냉각재의 혼합력이 강력하여져서 원자로의 열효율을 높이는 장점이 있는 반면에 이에 비례하여 연료봉의 진동 진폭도 커지고 이에 따라 연료봉의 손상 발생 가능성도 증가할 수 있다. 한편 SPC사의 개념인 이중판 구조에 의한 유로통로형 혼합기는 원전연료집합체내 낮은 온도 구역과 높은 온도 구역에 있는 냉각재를 섞기 때문에 원자로내 전체적인 열효율을 증가시켜서 연료봉이 국부적으로 과열되어 발생하는 핵 비등 이탈 등을 방지하는 역할을 제공하고 선접촉으로 지지된 연료봉의 진동이 작게 발생함으로써 유체유발진동에 의한 연료봉 프레팅마멸 손상을 발생시킬 우려가 적다. 그러나 노즐단면적의 차이가 크지 않고 노즐방향만을 바꿔주기 때문에 냉각수 혼합능력을 향상시킬 필요가 있다.

이러한 단점을 극복하고자 고안된 것이 이중판 노즐형 냉각재 혼합 지지격자[7, 8]로서 원리상으로는 SPC사의 HTP 지지격자와 유사하다. 이중판 노즐형 지지격자의 원리는 낮은 온도 영역의 냉각재를 끌어다가 높은 온도 영역 쪽으로 노즐과 같이 빠르게 분사시키거나, 혹은 반대로 높은 온도 영역의 냉각재를 끌어다가 낮은 온도 영역으로 빠른 속도로 분사시키는 방법으로 원전연료집합체내 냉각재를 섞어서 전체적인 열효율을 향상

시키게 된다. 또한 연료봉을 지지하는 중앙부위의 단면적이 입구/출구 노즐의 단면적보다 크게 설계됨으로서 노즐을 통해 흐르는 유체의 정압(static pressure)이 노즐 입구나 출구부위보다 중앙부위에서 더 커지게 되어(베르누이 정리) 궁극적으로 노즐속으로 유체가 흐를 때 스프링을 연료봉쪽으로 더 밀어내게 되어서 유동력에 의한 스프링력의 추가적인 보강(self-recovery)을 이루게 하는 것이 특징으로 2000년에 우리나라 원전연료 구조부품 개발 역사상 처음으로 미국으로부터 특허를 획득하였다[7]. 그런데 이 지지격자는 스프링 강성이 너무 커 완화시킬 필요가 있어서 스프링의 중앙에 홈(slot)을 두는 형상으로 개량되었고(2003년 대한민국 및 미국특허 획득[9,10]) 다시 스프링 양편에 slot을 두는 형상으로 최종설계변경(최적설계 포함)된 것이다. 그림 4의 오른쪽 시편은 새이중판(Doublet형) 노즐형 지지격자 스프링의 형상을 나타낸 것으로 현재 미국 및 대한민국에서 특허심사 중에 있다.

3.4 지지격자 스프링의 하중-변위특성 시험 및 해석

KAERI에서 고안한 지지격자 2종과 참조용 지지격자 2종의 격자판 시편을 지르칼로이-4로 제조하여 지지격자 스프링의 하중 대 변위 선도를 얻기 위한 F- δ 특성시험을 수행하였다. 지지격자 스프링의 하중-변위특성시험용 시편가공은 wire-cutting기를 사용하여 격자판에서 스프링과 덤플이 포함된 1개 cell 크기로 절단하였고 지지격자 형상별로 각각 10개의 시편에 대하여 만능인장시험기와 스프링 시편의 좌·우 양 에지(edge)부를 고정하기 위한 치구를 이용하여 하중-변위특성시험을 수행한 결과 최적화 H형 및 새이중판 스프링의 강성이 권장범위인 150 ± 50 N 에 있고 참조용 지지격자에 비해 강성과 탄성영역한계 그리고 소성변형량 등에서 우세한 것으로 알려졌다[11].

3.5 지지격자의 연료봉 지지/진동 특성 해석 및 시험

그림 1에서 보듯이 연료봉은 여러 개의 지지격자에 의해 지지되고 있는데 다점 지지 연료봉의 모달 파라미터(고유진동수, 진동모드)는 연료봉을 지지하는 지지격자의 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 지지격자의 연료봉 지지/진동특성을 규명하기 위해 5x5형 새이중판 부분격자체 5개로 지지된 시험연료봉의 진동시험을 그림 5와 같은 시험장치에서 수행하였다. 시험결과는 참고문헌 11에 기술되어 있다. 또한 5개의 5x5형 부분격자체(최적화 H형 스프링 부착 부분격자체 및 새이중판 부분격자체)를 사용한 5x5형 부분집합체에 대한 진동시험을 수행한 결과가 Table 1에 나타나 있다[12]. 한편 본 과제에서는 5x5형 부분집합체에 대한 유체유발진동 특성을 파악할 수 있는 시험 Loop를 구축하여 고

유 지지격자 2종(최적화 H형 스프링 부착 지지격자 및 새이중판 지지격자)의 5x5형 부분 집합체에 대한 유체유발진동시험을 수행하고 있으며 아울러 외국의 상용 시험 Loop에서도 본 과제에서 개발한 고유 지지격자 2종으로 제작한 부분집합체에 대한 유체유발진동 시험을 2004년 4월 말경에 수행할 예정이다.

3.6 지지격자 충격특성 해석 및 시험

16x16형 새이중판 지지격자에 대한 충격특성 해석을 수행하였다[13]. 해석결과 충격강도는 약 18.9 kN 정도인 것으로 나타났다. 그림 6은 충격강도에서에서 지지격자체의 변형된 형상을 보여주고 있다.

16x16형 최적화 H형 스프링 부착 지지격자에 대한 충격특성 해석을 수행하였는데 해석결과 충격강도는 약 19.2 kN 정도인 것으로 나타났다. 또한 최적화 H형 스프링 부착 지지격자체(16x16형)에 대한 충격특성시험이 수행중에 있다.

3.7 프레팅마멸 특성 시험

냉각수 유동에 의해 연료봉이 지지격자 지지부와 상대운동을 하게 될 때 지지격자 지지부와 접촉하는 연료봉 표면에는 프레팅마멸이 발생할 수 있다. 지지격자 스프링과 연료봉이 접촉된 상태와 간극이 있는 상태에서 최적화 H형 스프링 및 새이중판 스프링 그리고 참조용 지지격자 2종의 스프링에 대해 상온, 공기 중에서 프레팅마멸 특성시험을 수행하였다[11].

한편 2004년 2월 말에 외국의 프레팅마멸 전문시험기관인 캐나다 AECL에서 최적화 H형 스프링에 대한 프레팅 마멸시험을 수행하였는데 시험결과는 곧 입수될 예정이다.

3. 결 언

1980년대부터 1996년말까지의 원전연료집합체 기계설계경험을 바탕으로 하고 외국의 새로운 원전연료 특징 및 특허자료들을 면밀히 검토하여 특허분쟁이 되지 않을 것으로 기대되는 경수로용 신형원전연료의 지지격자 고유형상 16종을 고안하였고 고안된 지지격자 고유형상에 대한 기계/구조적 성능비교시험을 거치고 성능을 개선하면서 확정된 신형 원전연료용 지지격자 고유형상 2종에 대한 주요 특징과 기계/구조적 성능평가 현황을 기술하였다. 현재 주요 상세시험의 대부분이 수행되었고 외국의 전문시험기관에서도 상용화대비 시험을 수행하고 있는데 상용으로 사용중이거나 상용으로 개발중인 지지격자에 비하여 신형 원전연료용 고유 지지격자 최종형상의 성능이 우수하거나 비견할 정도임

을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업중 “경수로용신형핵연료개발” (대과제) “고성능지지격자구조기술개발” (세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) 송기남외 4인, “핵연료 핵심구조부품의 개발 현황 및 연구방향,” KAERI/TR-865/97, 한국원자력연구소 (1997).
- (2) K. H Yoon *et al.*, "Spacer Grid with H-spring for Fuel Rods for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Patent 6,167,105 (2000).
- (3) 윤경호외 7인, “프레팅마모 억제를 위한 H형 스프링이 부착된 지지격자체,” 대한민국 특허 제0318233호 (2001).
- (4) K. H Yoon *et al.*, “Spacer grid for nuclear fuel assemblies with grid springs maintaining conformal contact with fuel rods and enlarged elastic range,” US Patent 6,707,872 (2004).
- (5) T. H. Chun *et al.*, "Fuel Assembly Spacer Grid with swirl Deflectors and hydraulic Pressure Springs," US Patent 6,236,702 B1(2001).
- (6) T. H. Chun *et al.*, “복합 유동혼합장치를 가진 핵연료 집합체 지지격자,” 일본 특허 제3463998호(2003).
- (7) H. S Kang *et al.*, "Grid with Nozzle-type Coolant Deflecting Channels for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Patent 6,130,927 (2000).
- (8) 강홍석외 7인, “원자로의 핵연료집합체 이중관노즐형 냉각재 혼합 지지격자,” 대한민국 특허 제0265027호. (2000).
- (9) 강홍석외 7인, “핵연료집합체의 이중관 냉각재 혼합 지지격자,” 대한민국 특허 제 0415149호. (2003).
- (10) H. S Kang *et al.*, "Double Strip Mixing Grid for Nuclear Reactor Fuel Assemblies," US Patent 6,650,723 (2003).
- (11) 송기남 외 3인, “신형 원전연료용 지지격자에 대한 기계/구조적 특성 해석 및 시험,” 2003 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(2003).

(12) 강홍석외 4인, “최적화 H형 지지격자로 구성된 5x5 부분연료집합체의 진동해석 및 시험,” 2004 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(2004).

(13) K. T. Park et al., Impact Analysis of a Fuel Model Doublet0type Spacer Grid in the Fuel Assembly of a PWR," ICONE12-49292(2004).

Table 1 Natural Frequency of 5x5 Partial Fuel Assembly (Hz)

Spacer Grid Mode	New Doublet	Optimized H spring
1	6.4	6.3
2	15.2	15.0
3	24.0	24.5

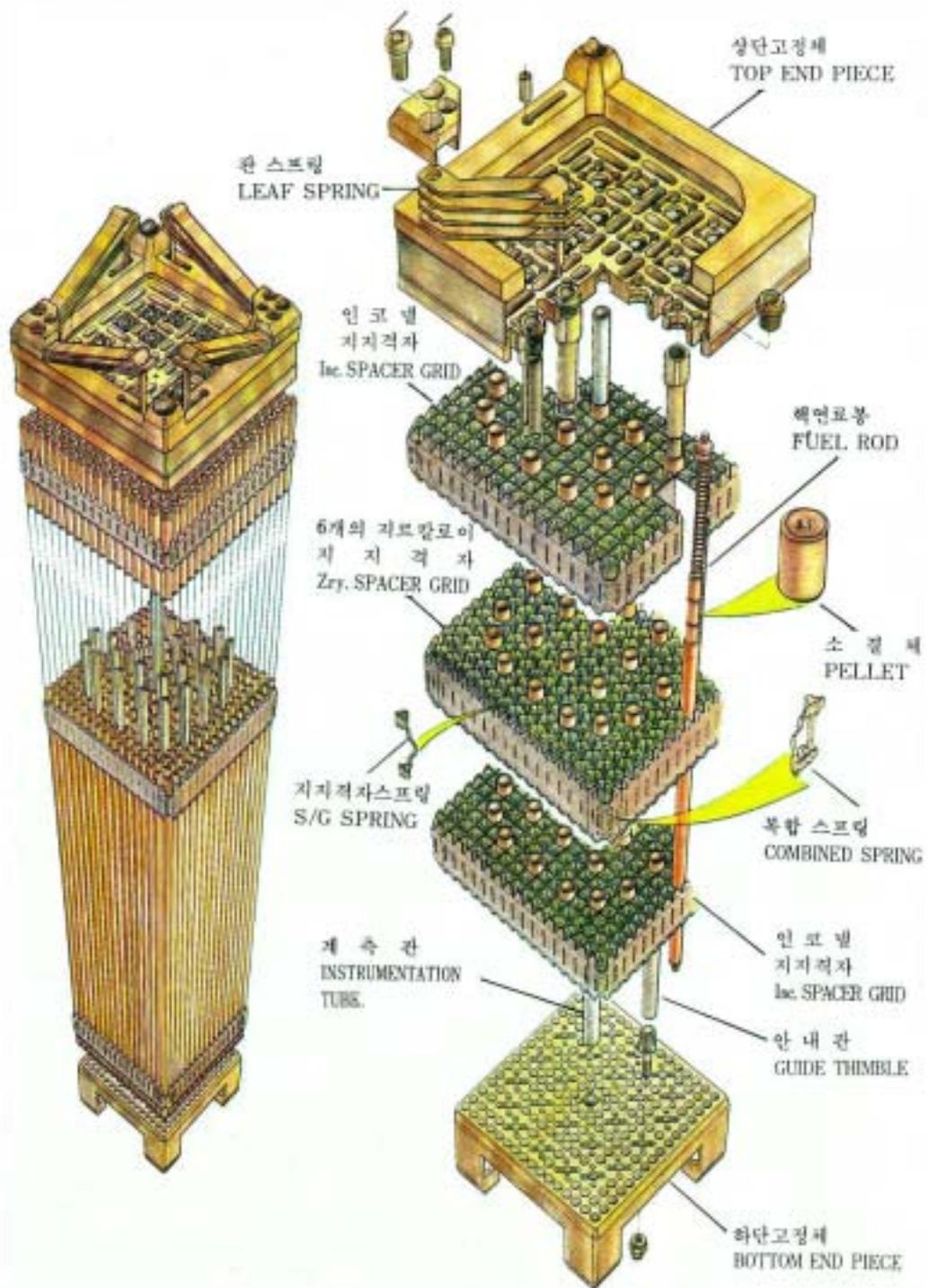


그림 1. PWR용 원전연료집합체 개략도

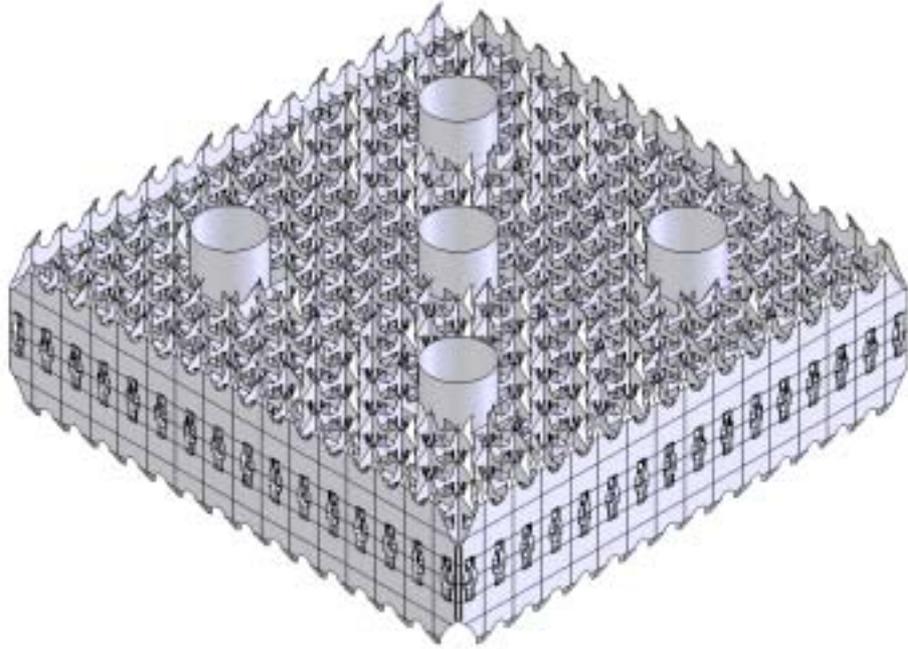


그림 2 지지격자 형상 개략도

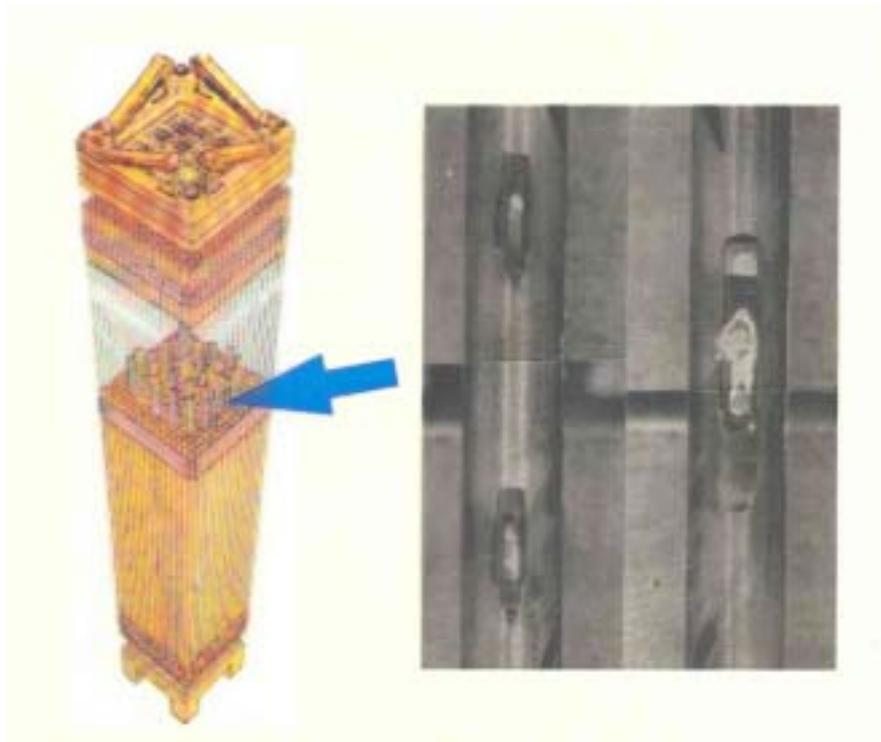


그림 3 연료봉에서 프레팅 마모 흔적

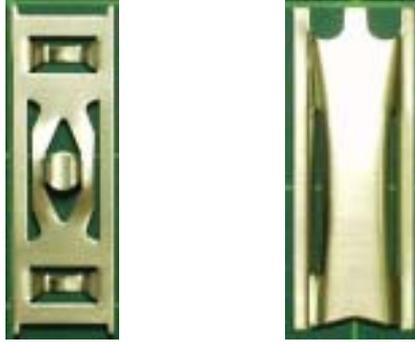


그림 4 KAERI가 고안한 지지격자 스프링(왼편: Opt. H; 오른쪽: Doublet)

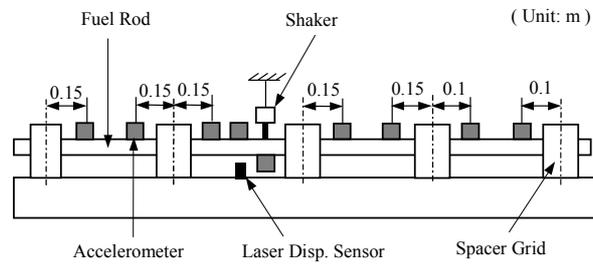


그림 5 지지격자로 지지된 연료봉의 진동특성 시험장치

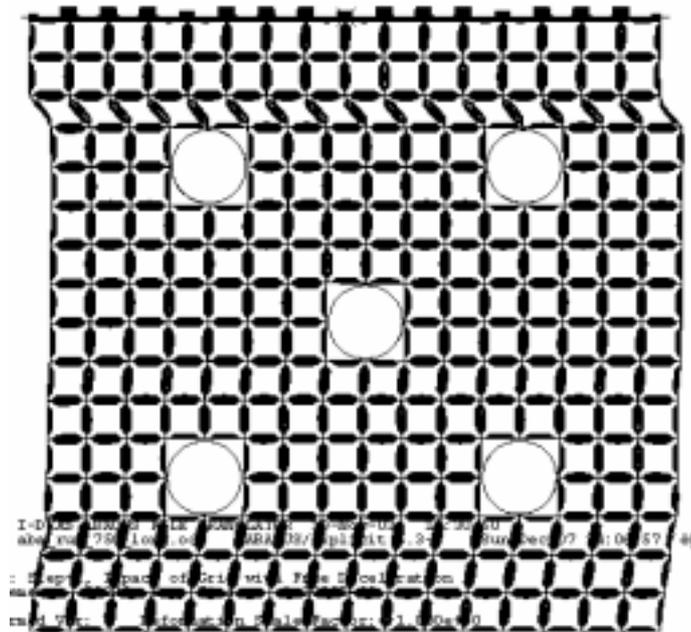


그림 6 충격강도에서 변형된 지지격자 형상