

가압경수로 핵연료 지지격자의 기계/구조적 시험장치 구축

송기남*, 윤경호*, 강홍석*, 김형규*,

Set-up of Mechanical/Structural Test Facilities on the Spacer Grid of the PLWR Fuel

Kee-Nam Song*, K-H Yoon*, H-S Kang*, H-K Kim*

Key Words : Nuclear Fuel Rod(핵연료봉), Nuclear Fuel Assembly(핵연료집합체), Fretting Wear(프레팅 마멸), Spacer Grid(지지격자: S. G.)

ABSTRACT

Design requirements for the nuclear fuel assembly grid of the pressurized light water reactor(PLWR) are scrutinized from the mechanical/structural point of view. As a result of the scrutiny, mechanical/structural test facilities on the spacer grid of the PLWR Fuel are set up in KAERI to find out their mechanical/structural performance.

1. 서론

가압경수로(Pressurized Light Water Reactor: PLWR)용 핵연료집합체는 Fig. 1과 같이 상단고정체, 하단고정체, 지지격자, 안내관, 계측관 등으로 구성된 골격체 구조물과 핵연료봉에 의해 에너지를 생산하는 이산화 우라늄(UO₂) 소결체가 얇은 지르칼로이 관속에 내장된 다수의 핵연료봉으로 구성되어 있고 핵연료봉은 Fig. 1에서 보듯이 보통 7~11개의 지지격자체에 의해 지지되고 있다. 지지격자의 격자(Cell)내에 삽입된 핵연료봉들은 격자판에 형성된 지지격자 스프링 및 덤플의 스프링력 및 반력에 의해 지지되어 수직으로 매달려있다. 매달려있는 핵연료봉 사이의 간격(수로간격 약 3mm)으로 1차 냉각수가 흐르면서 고온의 핵연료봉으로부터 열을 흡수하고 있다. 1차 냉각수는 방사능에 오염될 수 있으므로 폐회로(Closed Loop)를 따라 흐르며 열교환기를 통하여 2차 냉각수로 열을 전달하고 궁극적으로는 2차 냉각수가 터빈을 돌려서 전기를 생산하고 있다.

Fig. 2는 5x5형 부분 지지격자 시편 형상을 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있고 지지격자 스프링 및 덤플이 형성되어 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판 교차점

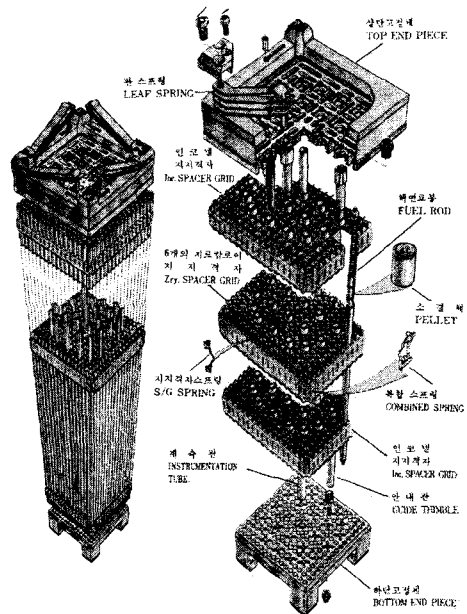


Fig. 1 Fuel Assembly

* 한국원자력연구소

을 용접하여 달걀바구니(egg-crate) 형상을 한 구조물이다. 지지격자체의 각 격자판에 stamping으로 형성된 지지격자 스프링과 덩플은 격자 안으로 삽입된 핵연료봉이 원자로심내의 횡방향 및 축방향의 정위치에 있도록 스프링력(반력) 및 마찰력으로 지지하고 있다.

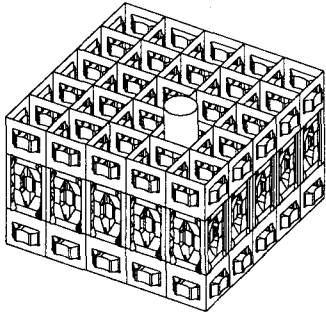


Fig. 2 Spacer Grid (5x5 array)

본 논문에서는 지지격자체의 기계/구조적 특성을 실험적으로 규명하기 위해서 그동안 한국 원자력연구소에서 구축한 시험장치를 소개하고 기술한 것이다.

2. 본론

2.1. 지지격자체의 기능

가압경수로용 핵연료집합체에 사용되고 있는 지지격자체의 기능은 크게 기계/구조적 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있다. 지지격자체의 기계/구조적 기능은 다시 지지격자체의 구조적 기능과 핵연료봉을 지지하고 있는 지지격자 스프링 및 덩플의 기계적 기능으로 나뉘어진다. 지지격자체의 구조적 기능은 지진이나 원자로 사고시에 핵연료집합체에 가해지는 횡방향 하중이 직접적으로 핵연료봉에 전달되지 않도록 핵연료봉을 보호하면서 횡방향 설계하중하에서도 지지격자체 구조물의 형상이 유지되어 원자로를 긴급히 정지시켜야할 경우에도 안내관으로 제어봉이 삽입될 수 있도록 기하학적 형상이 유지되어야 하는 것이다. 전자는 횡하중이 지지격자체 측면

에 직접 전달되도록 하여 핵연료봉의 손상을 방지하는 것이며 후자는 횡방향 설계하중하에서 격자체의 기하학적 형상이 변하지 않을 만큼 지지격자체가 충분한 구조강도(정적 좌굴강도, 동적 충격강도)를 갖는 것이 요구되는 것이다. 지지격자체의 기계적인 기능을 살펴보면 핵연료 수명기간(보통 3~5년)동안 핵연료봉이 지지격자 스프링과 덩플에 의해 건전하게 지지되어야 하는 것이다. 핵연료가 원자로심내에 장전되어 연소되는 동안 중성자 조사(Neutron Irradiation)에 의한 스프링력의 이완, 핵연료봉 직경의 변화 등으로 인하여 스프링력이 초기 스프링력보다 크게 감소하고 있다. 만약 스프링이 핵연료봉을 건전하게 지지하지 못하면 핵연료봉이 자중에 의해 낙하하여 핵연료집합체 하부구조물인 하단고정체 위에 언쳐있을 수도 있고 혹은 핵연료봉 사이의 수로를 따라 흐르는 냉각수 유동력에 기인한 핵연료봉의 유체유발진동(Fluid Induced Vibration)에 의해서 핵연료봉 피복관이 스프링 및 덩플과의 접촉부위에서 마모/손상되어 핵연료봉 내부에 축적된 핵분열 생성물이 1차 냉각수로 누출되어 1차 냉각수를 오염시킬 수 있다. 열수력적 기능을 살펴보면 지지격자체를 통과한 냉각수에 난류유동을 발생시켜서 핵연료봉으로부터 냉각수의 열전달을 촉진시키는 것이다. 이러한 기능을 갖고 있는 지지격자체의 성능은 핵연료 성능과 매우 밀접하게 관련되어 있어서 외국의 핵연료 공급업자들은 신연료를 개발하여 상품화할 때 지지격자체의 개선된 성능을 강조하고 있다[1].

2.2. 지지격자체의 기계/구조적 설계요구사항

- 지지격자체는 원자로 운전조건하에서 핵연료봉을 횡방향 및 축방향의 정위치에 있도록 지지하여야 하며 또한 핵연료 수명 동안 핵연료봉에 기계적 손상이 유발되지 않도록 지지해야 한다.
- 핵연료집합체 측면으로부터의 횡하중으로부터 핵연료봉을 보호하고 지진이나 원자로 사고시에 원자로 긴급정지가 저해되지 않도록 지지격자체는 충분한 충격강도를 가져야 한다.

2.3. 지지격자의 기계/구조적 시험시설

2.3.1 스프링 및 덩플의 F- δ 특성시험시설

격자에 삽입된 핵연료봉은 격자판에 형성된 스프링과 덩플에 의해 지지되고 있는데 스프링력은

원자로 운전중에 열팽창, 중성자 조사에 의한 격자치수 및 핵연료봉 직경변화, 물성치 변화, 응력 이완(Stress Relaxation) 등으로 인하여 초기 스프링력의 8%미만으로 급격히 감소하고 있어서 지지격자 스프링의 지지특성(특히 F- δ 특성곡선)을 파악하는 것은 지지격자체 설계/분석에서 운전시에 핵연료봉 지지능력을 평가하는데 매우 중요한 자료가 된다.

지지격자 스프링 및 덤플의 F- δ 특성시험은 만능 인장시험기에서 수행한다. Fig. 3은 시험장치의 개략도를 나타낸 것이고 Fig. 4는 INSTRON 4504를 이용한 시험장치를 나타낸 것이다. 지지격자 스프링 및 덤플의 F- δ 특성시험용 시편가공은 wire-cutting기를 사용하여 격자판에서 스프링과 덤플이 포함된 1개 cell 크기로 절단하고 시편의 좌·우 양 에지(edge)부를 고정하기 위해 Fig. 5와 같은 치구를 제작하여 F- δ 특성시험에 사용한다[2].

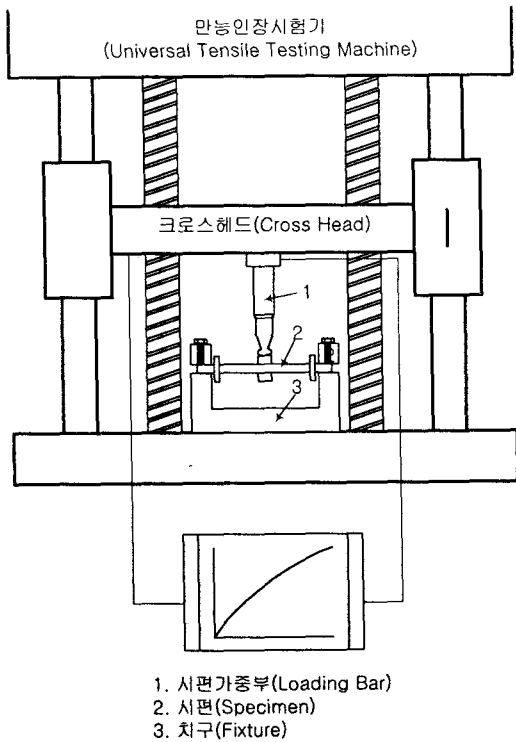


Fig. 3 Schematic Diagram of the Spacer Grid Spring/Dimple Characteristic Test Facility

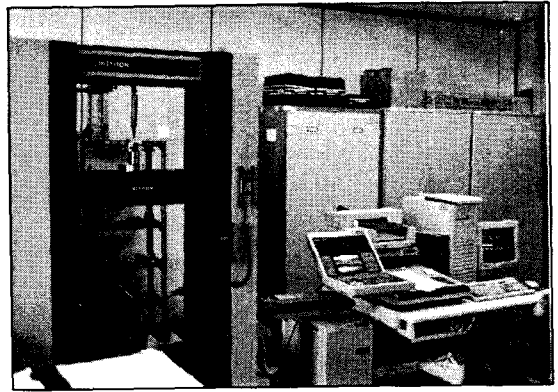


Fig. 3 Universal Tensile Tester

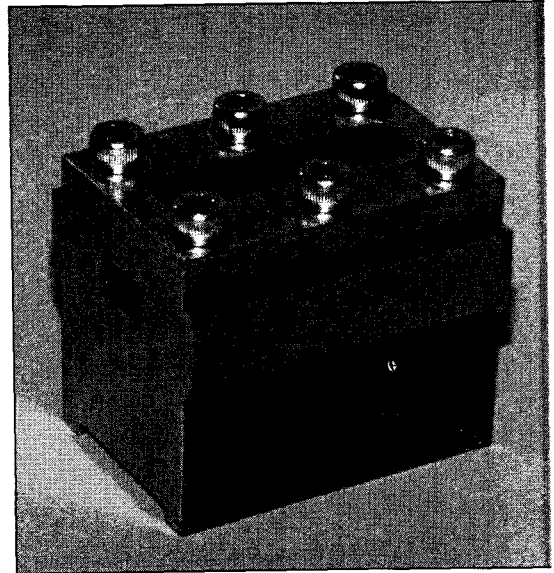


Fig. 5 Specimen Fixture

2.3.2 지지격자 스프링의 피로특성시험시설

핵연료봉을 지지하고 있는 지지격자 스프링은 원자로심내에서 변화하는 운전조건(냉각수 흐름에 의한 연료봉의 유체유발진동)에 의해서 반복하중을 받고 있는데 이러한 반복하중에 의해서 스프링 굴곡부 또는 격자판으로부터 스프링이 돌출되기 시작하는 부분 등 응력이 상대적으로 높은 곳에서 균열이 발생하여 스프링이 파단됨으로서 스프링이 제 기능을 수행하지 못할 수도 있다. 핵연료봉의 1차 고유 진동수는 30Hz부근으로

알려져 있는데 일반적인 기계 재료시험용 인장/피로시험기대신에 Fig. 6과 같은 피로시험장치를 고안하여 설치하였고[3] 이 시험장치로부터 스프링의 피로손상 여부를 평가한다.

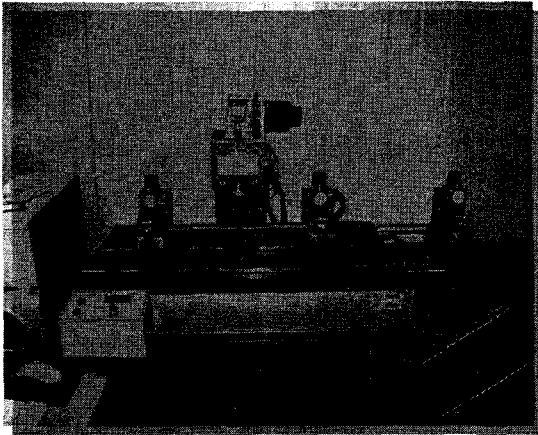


Fig. 6 Fatigue/Fretting Tester

2.3.3 격자체에 대한 정적 좌굴 특성시험시설

핵연료집합체 구조해석모델에서의 입력자료로서 지지격자체의 정적 좌굴특성(좌굴강성도, 임계 좌굴하중, 좌굴모드)에 대한 자료가 필요하다. 지지격자체의 정적 좌굴특성을 생산하기 위해 Fig. 3의 만능인장시험기를 이용하여 Fig. 7과 같이 시험을 수행한다[4].

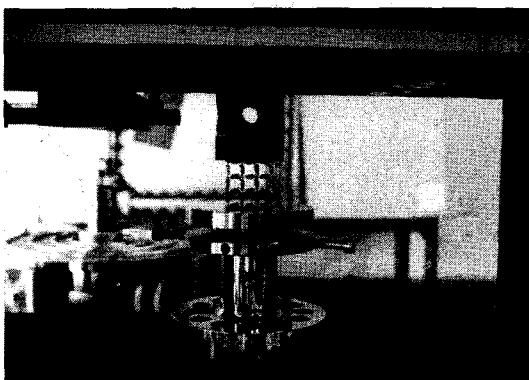


Fig. 7 Static Buckling Tester

2.3.4 격자체에 대한 동적 충격특성시험시설
지진이나 원자로 사고시에 핵연료집합체는 이

위한 핵연료집합체와 충돌하거나 혹은 원자로 벽면과 부딪칠 수 있다. 이 경우 지지격자체는 측면으로부터 충격하중을 받게 된다. 측면으로부터의 충격하중으로부터 핵연료봉을 보호하고 또한 원자로 긴급냉각을 위한 기하학적 구조를 유지하기 위해 지지격자체는 충분한 충격강도를 갖추어야 한다. 지지격자체의 동적 충격특성(충격 임계하중, 시간에 따른 충격하중 이력)을 실험에서 얻기 위해 Fig. 8의 낙하식 충격시험기와 Fig. 9의 진자식 충격시험기를 고안하여 설치하였다[5].

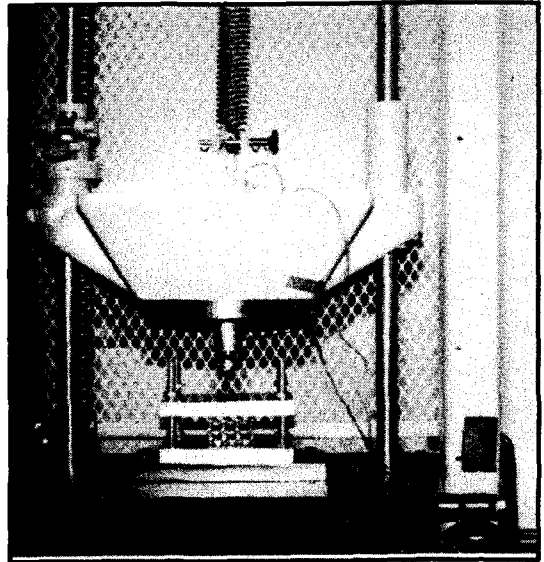


Fig. 8 Drop Type Impact Tester

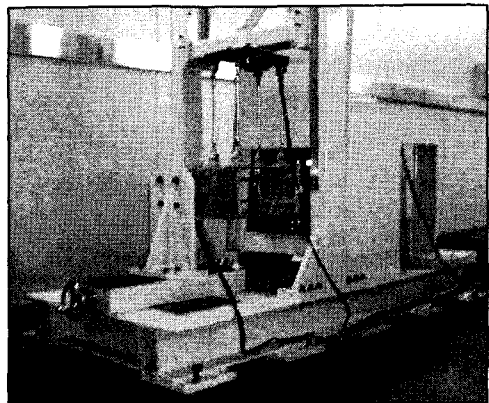


Fig. 9 Pendulum Type Impact Tester

2.3.5 핵연료봉 지지/진동시험시설

Fig. 1에서 보듯이 핵연료봉은 여러 개의 지지격자체에 의해 지지되고 있는데 다점 지지 연료봉의 모달 파라미터(고유진동수, 진동모드)는 핵연료봉을 지지하는 지지격자체의 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 지지격자의 연료봉 지지/진동특성을 규명하기 위해 Fig. 9의 시험장치로부터 진동시험을 수행한다[6].

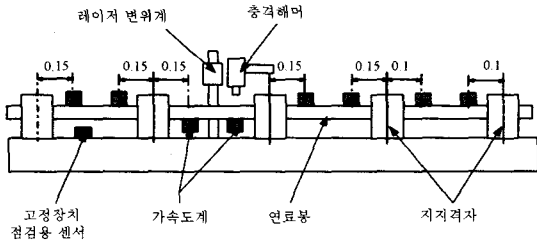


Fig. 9 Schematic Diagram of the Vibration Tester

Feed back control되는 shaker를 이용하여 지지격자체로 지지된 시험 연료봉의 진동시험을 수행하였다. 핵연료봉의 동적 특성 파악을 위하여 모달 파라미터를 추출하기 위한 통상적인 진동시험을 수행함과 동시에 주어진 임의의 가진력에서 발생하는 연료봉의 최대 진동진폭을 측정하였다.

지지격자체의 핵연료봉 지지성능시험은 주어진 동일한 가진력에서 연료봉의 진동을 억제하는 정도를 파악하기 위한 시험이다.

2.3.6 프레팅마멸 특성시험시설

냉각수 유동에 의해 핵연료봉이 지지격자 지지부와 상대운동을 하게 될 때 지지격자 지지부와 접촉하는 핵연료봉 표면에는 마모가 발생할 수 있다.

지지격자 스프링과 핵연료봉이 접촉된 상태에서 프레팅마멸 시험을 수행할 수 있는 시험장치(Fig. 10 참조)를 고안하여 설치하고 Fig. 11의 측정장비를 이용하여 마멸시험을 수행한다[7].

한편 격자내에 핵연료봉이 삽입된 삽입된 상태에서 마멸시험을 수행하기 위해 Fig. 6과 같은 시험장치를 고안하여 구축하였다[3].

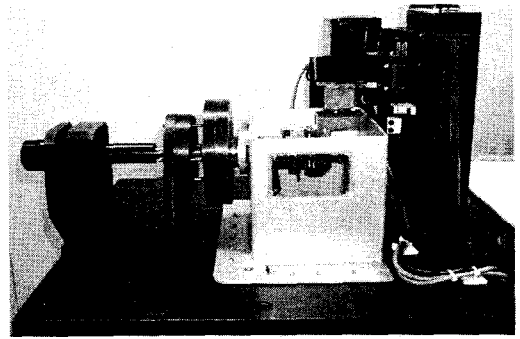


Fig. 10 Fretting Wear Tester

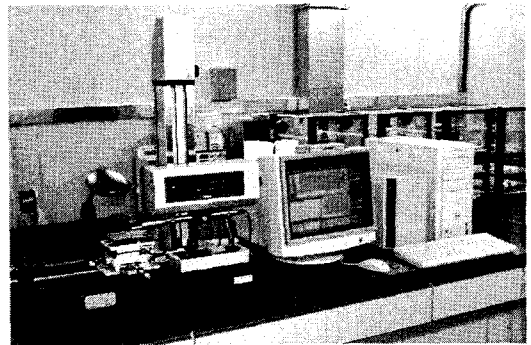


Fig. 11 Surface Roughness Tester

3. 결론

가압경수로용 핵연료집합체의 핵심구조부품인 지지격자체에 있어서 기계/구조적인 관점에서 요구되는 특성을 면밀히 검토하고 지지격자체의 기계/구조적 특성을 실험적으로 규명하기 위한 시험장치를 한국원자력연구소에 구축하였다. 이 시험장치를 이용하여 한국원자력연구소에서 고안한 지지격자체의 기계/구조적 특성과 상용으로 사용되는 지지격자체의 기계/구조적 특성을 실험적으로 규명하는데 이용될 수 있다.

후기

본 연구는 과기부의 원자력연구 개발사업중 고성능지지격자구조기술개발과제에서 수행되었음.

참고문헌

- (1) 송기남외 4인, 1997, “핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향,” KAERI/TR-865/97, 한국원자력연구소.
- (2) 윤경호외 3인, 2001, “지지격자 스프링/딴플의 기계적 특성시험 및 유한요소해석,” KAERI/TR-1763 /2001, 한국원자력연구소.
- (3) 김형규외 3인, “지지격자 스프링 피로 및 셸단위의 연료봉 프레팅마멸 시험을 위한 장치개발,” KAERI/TR-1827/2001, 한국원자력연구소.
- (4) 정연호, 송기남외 18인, 2000, “경수로용 신형 핵연료개발-핵연료성능평가 및 열수력성능향상 기술개발,” KAERI/RR-1890/98, 한국원자력연구소.
- (5) 윤경호외 3인, 2000, “측면 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴거동해석,” KAERI/TR-1569/00, 한국원자력연구소.
- (6) 강홍석외 4인, 2001, “진동시험에 의한 지지격자체의 지지성능 분석,” KAERI/TR-1738/2001, 한국원자력연구소.
- (7) 김형규외 5인, 2001, “프레팅마멸 시험장비 개발,” KAERI/TR-1570/2000, 한국원자력연구소.