

가압경수로 핵연료 지지격자의 기계/구조적 설계 및 분석

송기남*

Design and Analyses on the Spacer Grid of the PLWR Fuel

Kee-Nam Song*

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 water reactor are reviewed from the mechanical/structural point of view. And mechanical/structural tests and numerical analyses on the various spacer grid candidates that has been uniquely designed by KAERI are carried out to find out their mechanical/structural performance. As a result, the results from the numerical analyses are good agreements with test results.

1. 서론

웨스팅하우스형 가압경수로(Pressurized Light Water Reactor: PLWR)용 핵연료집합체는 Fig. 1

과 같이 상단고정체, 하단고정체, 지지격자, 안내관, 계측관 등으로 구성된 골격체 구조물과 핵분열에 의해 에너지를 생산하는 우라늄 산화물(UO₂) 소결체가 얇은 관속에 내장된 핵연료봉으로 구성되어 있다. 지지격자 격자(Cell)내에 삽입되어 매달려있는 핵연료봉 사이의 수로(수로간격 약 3mm)로 1차 냉각수가 흐르면서 핵연료봉으로부터 열을 흡수하고 2차 냉각수 회로를 순환하는 2차 냉각수로 열을 전달하고 궁극적으로는 2차 냉각수가 터빈을 돌려서 전기를 생산하고 있다.

Fig. 2는 5x5형 부분 지지격자 시편 형상을 나타낸 것인데 지지격자는 홈이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판 교차점을 용접한 달걀바구니(egg-crate) 형상의

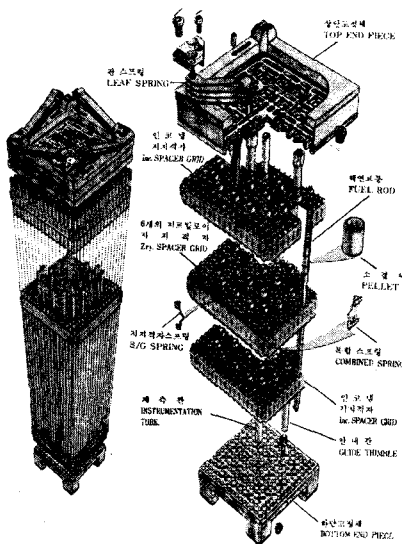


Fig. 1 Fuel Assembly

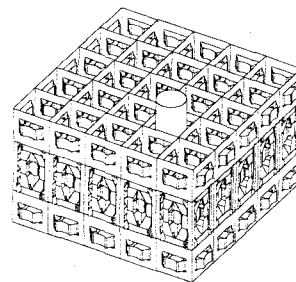


Fig. 2 Spacer Grid (5x5 array)

* 한국원자력연구소

구조물이다. 지지격자의 각 격자에는 stamping으로 형성된 스프링과 덤플이 있어서 격자 안으로 삽입된 핵연료봉을 횡방향 및 축방향의 정위치에 있도록 지지하고 있다.

본 연구에서는 우리 기술진이 독자적으로 고안한 지지격자 형상에 대하여 5x5형 부분 격자체 시편을 제작하여 수행한 기계/구조적 특성시험결과와 해석결과를 기술한 것이다.

2. 본론

2.1. 지지격자의 기능

지지격자의 기능은 크게 기계/구조적 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있다. 지지격자의 기계/구조적 기능은 다시 격자체의 구조적 기능과 연료봉을 지지하는 스프링 및 덤플의 기계적 기능으로 나뉘어진다. 지지격자의 구조적 기능은 지진이나 원자로 사고시에 핵연료집합체에 가해지는 횡방향 하중이 직접적으로 핵연료봉에 전달되지 않도록 핵연료봉을 보호하면서 횡방향 하중 하에서도 구조물의 형상이 크게 변형되지 않을 만큼 충분한 구조강도를 갖추어서 원자로를 긴급히 정지시켜야할 경우에도 안내관으로 제어봉이 삽입될 수 있도록 기하학적 형상이 유지되어야 하는 것이다. 지지격자의 기계적인 기능을 살펴보면 각 격자에서 스프링과 덤플에 의해 핵연료봉을 건전하게 지지하는 것이다. 만약 스프링이 핵연료봉을 지지하지 못하면 핵연료봉이 낙하하여 핵연료집합체 하부구조물인 하단고정체 위에 언처있을 수도 있고 혹은 핵연료봉 사이의 수로를 따라 흐르는 냉각수 유동력에 기인한 핵연료봉의 유체유발진동(Fluid Induced Vibration)에 의해서 핵연료봉 피복관이 스프링 및 덤플과의 접촉부위에서 마모/손상되어 핵연료봉 내부에 축적된 핵분열 생성물이 1차 냉각수로 누출될 수 있다. 열수력적 기능을 살펴보면 지지격자를 통과한 냉각수에 난류유동을 발생시켜서 핵연료봉으로부터 냉각수로의 열전달을 촉진시키는 것이다. 이러한 기능을 갖고 있는 지지격자의 성능은 핵연료 성능과 매우 밀접하게 관련되어 있어서 외국의 핵연료 공급업자들은 신연료를 개발하여 상품화할 때 지지격자의 개선된 성능을 강조하고 있다[1].

2.2. 지지격자의 기계/구조적 설계요구사항

- 지지격자는 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 지지격자는 충분한 충격강도를 가져야 한다.

2.3. 지지격자의 기계/구조적 설계 및 분석

2.3.1 스프링의 F- δ 특성시험 및 분석

격자에 삽입된 핵연료봉은 격자판에 형성된 스프링과 덤플에 의해 지지되고 있는데 스프링력은 원자로 운전중에 열팽창, 중성자 조사(Neutron Irradiation)에 의한 격자치수 및 핵연료봉 직경변화, 물성치 변화, 응력이완(Stress Relaxation) 등으로 인하여 초기 스프링력의 8%미만으로 급격히 감소하고 있어서 지지격자 스프링의 지지특성(특히 F- δ 특성곡선)을 파악하는 것은 지지격자 설계/분석에서 운전시에 핵연료봉의 지지능력을 평가하는데 매우 중요한 자료가 된다.

Fig. 3과 같은 고유모형 지지격자 5종의 스프링과 현재 상용으로 사용되는 지지격자 2종의 스프링에 대하여 지르칼로이-4로 시편을 제조하여 F- δ 특성시험을 수행하였다. 스프링의 F- δ 특성시험용 시편가공은 wire-cutting기를 사용하여 격자판에서 스프링과 덤플이 포함된 1개 cell 크기로 절단하였고 지지격자 형상별로 각각 10개의 시편에 대하여 만능인장시험기를 이용하여 F- δ 특성시험을 수행하였다. 또한 스프링 시편의 좌·우 양 에지(edge)부를 고정하기 위한 치구를 제작하여 F- δ 특성시험에 사용하였다. Fig. 4는 시험결과를 나타낸 것이다[2].

지지격자 스프링에 대해 시험 뿐 아니라 해석을 통해서 시험결과를 모사할 수 있는 해석방법을 정립하기 위해 상용 유한요소 해석코드(ABAQUS)를 사용하여 해석모델을 작성하고[2] 이의 해석 결과를 시험결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. Fig. 5는 Fig. 3의 좌측에서 2번째 스프링인 회전유동(Swirl)형 스프링에 대한 시험결과와 해석결과를 비교한 것인데 해석결과가 시험결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

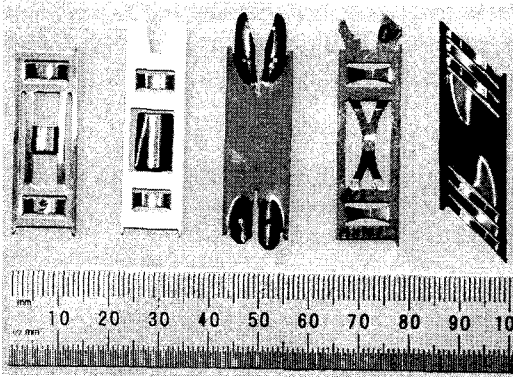


Fig. 3 Spacer grid (S. G.) spring specimen

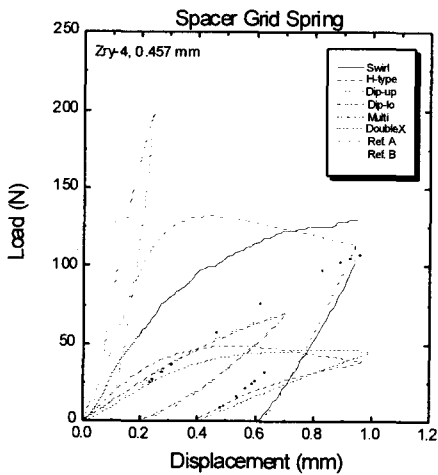


Fig. 4 Spring characteristic test result

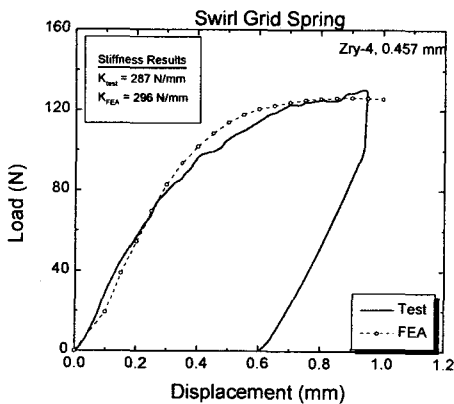


Fig. 5 Analysis result on the spring characteristics

2.3.2 격자체에 대한 정적 좌굴 특성시험 및 해석
 핵연료집합체 구조해석모델에서의 입력자료로서 지지격자의 정적 좌굴특성(좌굴강성도, 임계 좌굴하중, 좌굴모드)에 대한 자료가 필요하다. 고유모형 지지격자 4종 및 참조용 지지격자 1종에 대하여 지르칼로이-4 재질로 5×5형 부분 격자체를 제조하였고 만능인장시험기를 이용하여 정적 좌굴특성시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 지지격자 형상별로 각각 5개씩 사용하였다. 시험결과를 Fig. 6에 나타나 있다.

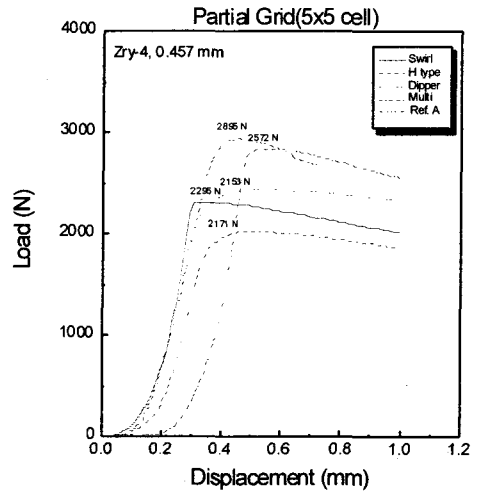


Fig. 6 Static buckling test result of the S. G.

지지격자 스프링과 마찬가지로 격자체에 대해 시험결과를 모사할 수 있는 해석모델을 정립하기 위해 도출된 후보모형 격자체에 대해 비선형 정적 좌굴해석을 위한 유한요소 모델을 작성하고 그 해석결과를 시험결과와의 비교를 통해 모델의 타당성을 검증하였다[3]. Fig. 7은 Fig. 3의 좌측에서 첫 번째 스프링 형상을 갖는 H형 스프링 부착 지지격자에 대하여 유한요소해석결과와 시험결과를 비교한 것으로 시험결과와 비교하여 볼 때 비교적 잘 일치하고 있다.

2.3.3 격자체에 대한 동적 충격특성시험 및 해석
 지진이나 원자로 사고시에 핵연료집합체는 이웃한 핵연료집합체와 충돌하거나 혹은 원자로 벽면과 부딪칠 수 있다. 이 경우 지지격자는 측면으로부터 충격하중을 받게 된다. 측면으로부터의

충격하중으로부터 핵연료봉을 보호하고 또한 원자로 긴급냉각을 위한 기하학적 구조를 유지하기 위해 지지격자는 충분한 충격강도를 갖추어야 한다. 지지격자의 동적 충격특성(충격 임계하중, 시간에 따른 충격하중 이력)은 실험과 해석을 통하여 얻는다. 고유모형 지지격자 4종 및 참조용 지지격자 1종에 대하여 지르칼로이-4 재질로 제조된 5×5형 부분 격자체를 낙하식 및 진자식 충격 특성시험을 수행하였다[4]. 시험에 사용된 시편은 지지격자 형상별로 각각 5개씩 사용하였다. Fig. 8은 동적 충격시험 결과를 나타낸 것이고 Fig. 9는 동적 충격해석을 위한 유한요소모델을 나타낸 것이다[5].

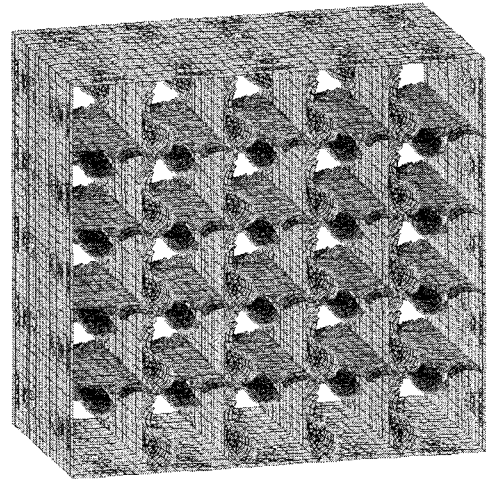


Fig. 9 Impact analysis model

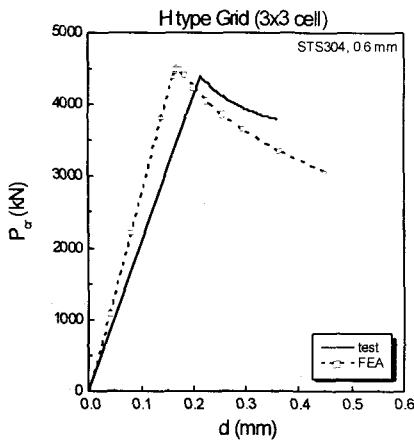


Fig. 7 Result on the static buckling analysis of the S. G.

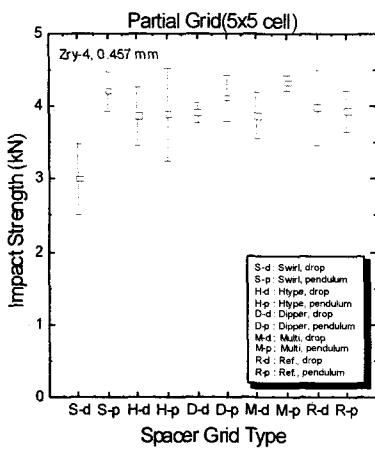


Fig. 8 Impact test result of the S. G.

2.3.4 핵연료봉 지지/진동시험 및 해석

Fig. 1에서 보듯이 핵연료봉은 여러 개의 지지격자에 의해 지지되고 있는데 다점 지지 연료봉의 모달 파라미터(고유진동수, 진동모드)는 핵연료봉을 지지하는 지지격자의 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 지지격자의 연료봉 지지/진동특성을 규명하기 위해 진동시험과 유한요소모델을 이용한 진동해석을 수행하였다[6].

Feed back control되는 shaker를 이용하여 지지격자로 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. 이러한 시험으로 얻어진 전형적인 그래프는 Fig.

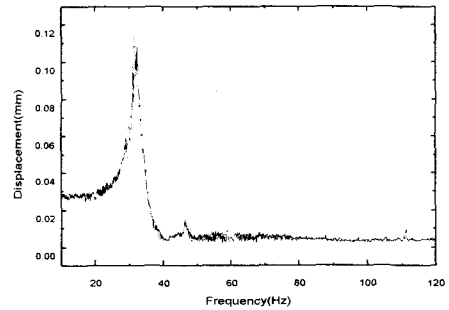


Fig. 10 Displacement in the frequency domain

10과 같다. 지지격자의 핵연료봉 지지성능시험은 주어진 동일한 가진력에서 연료봉의 진동을 억제하는 정도를 파악하기 위한 시험이다. 이러한 지지성능 시험으로 얻어진 결과를 요약하면 Table 1과 같으며 변위(Displacement)값이 작을수록 연료봉 지지성능이 좋은 것으로 볼 수 있다[7].

Table1 Vibration test result

Grid Type	변위 (mm)	1차 고유 진동수 (Hz)
H형	0.179	36.1
회전유동형	0.21	26.5
바가지형	0.028	41.4
다중 스프링	0.109	30.4
참조용 지지격자	0.198	36.0

지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 수행함과 동시에 유한요소모델에 의한 해석도 수행하였다. Matlap으로 multi-span봉의 진동해석도 수행하고, 이 결과도 시험결과와 비교하였다. Fig. 11과 12는 이론결과와 실험결과와 비교한 MAC(Modal Assurance Criteria) 그래프이다. Fig. 11은 실험결과와 유한요소해석결과가 만족할 만하게 잘 맞는 경우이며, Fig. 12는 상대적으로 잘 맞지 않는 결과를 보여주고 있다. 이 경우 향후 모델 개선이 필요하다고 판단된다.

Modal Assurance Criterion

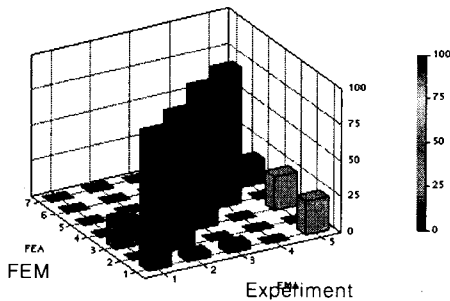


Fig. 11 MAC in case of good agreement between test and analysis

Modal Assurance Criterion

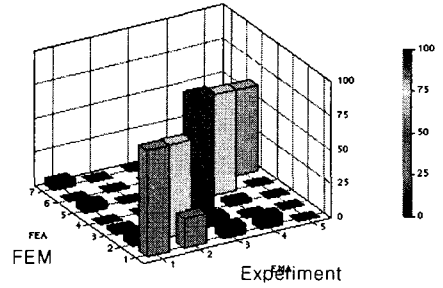


Fig. 12 MAC in case of bad agreement between test and analysis

2.3.5 프레팅마멸 특성시험 및 해석

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 시험장치와 측정장비를 이용하여 마멸시험을 수행하였다[8]. 고유모형 지지격자 스프링 5종과 참조용 지지격자 스프링 1종에 대하여 프레팅마멸 특성을 상호 비교하기 위해 시험조건을 상용 핵연료 지지격자 제조조건 및 연료봉 고유진동수를 고려하여 선정하였다. 시험조건은 수직력 $20 \pm 1N$, 미끄럼 진폭 $14 \pm 1 \mu m$, 진동수 30Hz로 설정하고 상온/공기 중에서 300,000cycle동안 시험을 수행하였다. 프레팅마멸 시험에서 얻은 마멸부위는

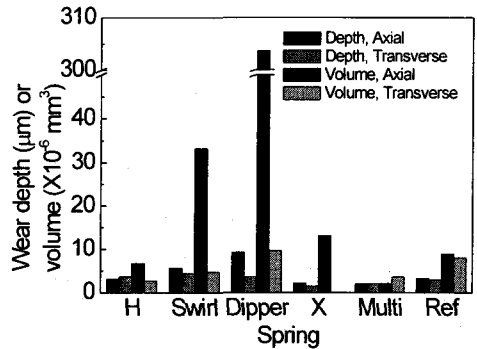
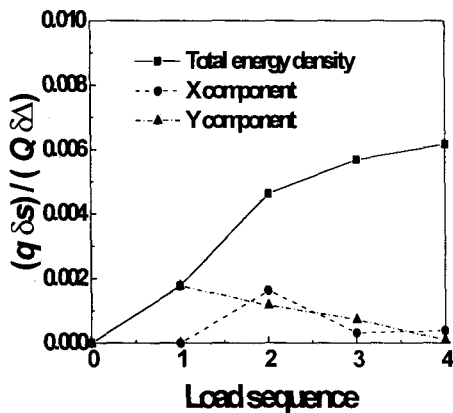


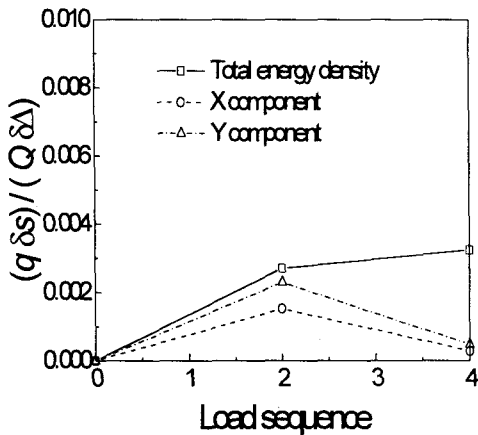
Fig. 13 Fretting wear test result

표면 거칠기 측정장비로 마멸계적과 마멸깊이를 측정한 후 신호처리 기법을 이용하여 자체 개발한 알고리즘으로 마멸량(부피)을 계산하였으며 측정현미경으로 마멸부위에 대한 전체적인 형태와 치수를 측정할 수 있다. 프레팅마멸 시험 결과는 Fig. 13에 정리되어 있다.

접촉응력, 내부응력 및 마찰에너지 방출량을 이론적으로 분석하는 작업을 수행하였다. 지지격자 스프링과 연료봉의 접촉에 의해 발생하는 접촉면에서의 접촉응력장은 Herz 응력으로 가정할 수 있다. 접촉응력장으로부터 마찰에너지 방출을 계산한 예는 Fig. 14에 나타나 있다[9].



a) rectangular load path



b) Linear load path

Fig. 14. Variation of friction energy vs. load path

3. 결론

핵연료집합체 핵심구조부품인 지지격자에 있어서 기계/구조적인 관점에서 요구되는 특성을 검토하고 한국원자력연구소에서 고안한 고유 지지격자 모형들에 대하여 원자력연구소에 구축한 시험장치를 이용하여 수행한 여러 종류의 기계/구조적 특성시험 결과와 해석결과를 분석하였다. 시험결과와 해석결과를 비교한 결과 해석모델들은 특성시험에서 얻은 결과들을 잘 모사하고 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 과기부의 원자력연구 개발사업중 고성능지지격자구조기술개발과제에서 수행되었음.

참고문헌

- (1) 송기남외 4인, 1997, "핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향," KAERI/TR-865/97, 원자력연구소.
- (2) 윤경호외 3인, 2001, "지지격자 스프링/딴플의 기계적 특성시험 및 유한요소해석," KAERI/TR-1763 /2001, 원자력연구소.
- (3) 윤경호, 송기남, 최강혁, "격자 구조물의 비선형 좌굴거동에 대한 유한요소해석," 1999년도 대한기계학회 추계학술대회 논문집A, pp. 447-451.
- (4) 정연호, 송기남외 18인, 2000, "경수로용 신형 핵연료개발-핵연료성능평가 및 열수력성능향상 기술개발," KAERI/RR-1890/98, 원자력연구소.
- (5) 윤경호외 3인, 2000, "측면 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴거동해석," KAERI/TR-1569/00, 원자력연구소.
- (6) 강홍석외 4인, 2001, "진동시험에 의한 지지격자체의 지지성능 분석," KAERI/TR-1738/2001, 원자력연구소.
- (7) 강홍석외 4인, 2001, "경수로용 핵연료집합체 지지격자로 지지된 핵연료봉의 진동해석," KAERI/TR-1753/2001, 원자력연구소.
- (8) 김형규외 5인, 2001, "프레팅마멸 시험장치 개발," KAERI/TR-1570/2000, 원자력연구소.
- (9) 김형규외 3인, 2000, "핵연료봉 프레팅마멸의 시험분석," KAERI/TR-1702/2000, 원자력연구소.