

신형 핵연료용 지지격자 후보에 대한 기계적 특성시험

Mechanical Test on the Spacer Grid Candidates for the Advanced LWR Fuel

송기남, 윤경호, 강홍석, 김형규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

지지격자는 가압 경수로용 핵연료집합체를 구성하는 여러 구조부품 중에서 백미로 볼 수 있는 부품이다. 핵연료집합체 기계설계 및 열수력설계 경험을 바탕으로 하고 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 14종의 지지격자 고유형상을 독자적으로 고안하였다. 본 논문에서는 신형 핵연료용 지지격자 최종후보들에 대한 성능시험결과를 기술하고 토의하였다.

Abstract

The spacer grid is one of the structural components of nuclear fuel assemblies for pressurized light water reactors. Based mechanical/thermal-hydraulic design experience and scrutinizing the design features of foreign advanced nuclear fuel and foreign patents of the spacer grid, 14 kinds of spacer grid candidates have been conceptually derived and have applied for patents since 1997. In this paper mechanical test results on the leading candidates for the advanced LWR fuel are described and discussed.

1. 서론

가압 경수로용 핵연료집합체는 그림 1과 같이 핵연료 상·하단부에 상단고정체 및 하단고정체가 각 1개씩, 핵연료 중간부에 7~11개의 지지격자체가 그리고 여러 개의 안내관 그리고 1개의 계측관 등으로 구성된 골격체와 지지격자체 격자내의 스프링 및 덤플에 의해 지지되고 있는 다수의 연료봉으로 구성되어 있다. 지지격자체는 핵연료집합체의 여러 구조부품 중에서 국산화가 달성될 경우 수입대체효과가 가장 커서(핵연료집합체 전체 구조부품비의 약 80 % 해당) 국산화 대상 일순위로 지목될 수 있으나 형상이 복잡하고 관련된 설계/제조기술 및 개발기술의 확보가 어려워서 핵연료기술자립을 목표로 핵연료부품 국산화사업을 시작한 1989년 이래로 가장 늦게 국산화(1990년대 후반에 국내 라이선스 생산시작) 대상으로 선정된 부품이다.

지지격자의 기능은 크게 기계/구조적인 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있는데, 전자의 기능은 지지격자의 일차적 기능으로서 핵연료 수명기간 내내 원자로심내의 운전조건하에서 연료봉이 종방향 및 횡방향의 정위치에 있도록 건전하게 지지하면서 냉각수 수로를 형성해주고, 또한 핵연료집합체 측면에 가해지는 여러 하중으로부터 연료봉을 보호하면서 비상시에 원자로의 긴급 냉각구조를 유지할 수 있도록 충분한 구조적 강도를 갖는 것이며, 후자의 기능은 이차적 기능으로서 연료봉내의 이산화우라늄(UO_2) 소결체로부터 발생된 열을 효과적으로 냉각수로 전달하기 위해 연료봉 수로를 따라 흐르는 냉각수에 난류를 유발시키고 혼합하는 것이다. 근래에 냉각수 혼합성능을 증진시키기 위해 핵연료집합체 상단에 유동혼합기를 별도로 부착하고 있는 추세이다. 이러한 기능을 갖고 있는 지지격자는 핵연료 성능과 매우 밀접하게 관련되어 있어서 외국의 핵연료 vendor들은 새로운 연료 개발 및 상용화시에 핵연료 건전성 및 열적 성능을 향상시킨 새로운 지지격자 형상을 제시하여 신연료의 주요 특징으로 주창하고 있다.

외국의 핵연료 vendor들이 신연료 개발시에 지지격자 형상을 개량한 사례들을 살펴보면 다음과 같다[1, 2]. 냉각성능 개선과 관련된 사항으로, 초창기에는 지지격자체 상단부에서 냉각수의 혼합에 특별한 고려가 없던 평범한 지지격자체를 사용하다가 냉각성능 향상에 대한 요구를 수용하기 위해 지지격자체 상부에서 냉각수의 혼합을 촉진시키려는 시도가 추진되었다. 외국의 대다수 핵연료 vendor들은 지지격자체 상단에 혼합날개를 부착하여 냉각수의 혼합을 촉진시키려 하였는데 혼합날개의 형상 및 부착위치는 핵연료 회사별로 다를 수 있다. 기계적 요인에 의한 연료봉의 손상요인을 감소시키려는 시도로는 단순히 연료봉을 지지하는 기능으로 있던 지지격자 스프링과 덤플의 형상을 변경하여 연료봉과의 접촉면적이 증가하도록 하여 접촉면에서 연료봉의 국부응력 침투치가 감소할

수 있도록 하거나 지지격자 스프링과 지지격자판 기저부의 가공방법을 다르게 하여 중성자 조사(Neutron Irradiation)에 따른 조사 성장량(Irradiation Growth)의 차이로 인하여 지지격자 스프링이 연료봉을 지속적으로 지지할 수 있도록 하여 연료봉의 손상요인을 줄이려 하는 등의 개선이 시도되고 있다.

그 동안에 국내에 축적된 지지격자체 개발기술을 살펴보면 1986년에 한국원자력연구소(KAERI)와 Siemens/KWU사가 핵연료를 공동설계한 이래 근래에는 국가출연연구소인 KAERI와 산업체인 한전원전연료주식회사(KNFC)에서 각기 수행하고 있다. KNFC는 1998년에 W형 VANTAGE5H 연료의 지지격자를 국내 라이선스 생산하고 있으며 1999년 4월부터는 국내에 있는 표준원전용 개량핵연료(PLUS7TM)를, 2001년 8월부터는 국내에 있는 W형 발전소용 개량핵연료(NGF)를 BNFL-W사와 공동으로 개발하고 있는데 2002년 3월에 PLUS7TM연료 시범집합체를 제작하여 2006년까지 노내에서 연소 시험중에 있다. 그런데 공동설계의 효과는 지지격자를 비롯한 핵연료부품에 대한 통상설계 및 제조관련 기술을 공고화하여 1999년말 시점에서 외국과 비견할 정도로 크게 성장한 면이 있으나 지지격자를 독자적으로 고안하고 설계/분석하는 개발기술은 크게 확보하지 못한 면이 있었으며 공동연구는 공동설계보다 진일보하여 개발기술을 어느 정도 확보할 수 있는 여건이 되고 있으나 개발된 결과물에 대한 기술소유권을 완전히 확보하지 못하는 면이 있을 수 있다. 한편 KAERI에서는 1986년 이래의 핵연료 기계설계 경험 및 설계/제조 연계 경험을 바탕으로 하고 1997년부터 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 기계/구조적 및 열수력적 성능관점에서 성능향상이 예상되는 독자적인 지지격자 모형 14종을 고안하여 국내·외에 각각 14건의 특허를 출원하였는데 핵연료 구조부품으로는 우리나라에서 처음으로 미국특허를 획득한 2000년 이후에 2003년도 3월 현재 6종의 지지격자 고유형상에 대하여 미국특허 6건[3~8], 국내특허 6건[9~14], 국내실용신안 2건[15, 16]이 등록되어서 우리가 고안한 지지격자 형상의 독창성이 점차적으로 국내·외에서 인정을 받고 있다.

본 논문에서는 KAERI에서 고안한 14종의 고유 지지격자 형상 중에서 기계/구조적 관점에서 성능이 우수하고 산업재산권 확보가 유력시되어 선정된 신형 핵연료용 고유 지지격자 최종형상 2종에 대한 기계적 성능시험결과를 기술하고 분석/평가한 것이다.

2. 지지격자 최종형상에 대한 기계적 성능시험

2.1 개요

1997년부터 KAERI에서 독창적으로 고안한 14종의 지지격자 형상들 중에서 기계/

구조적으로 중요한 지지격자 형상 5종(H형 스프링 부착 지지격자, 회전유동형 날개 부착 지지격자, 바가지형(Dipper) 지지격자, 이중판 노즐형 지지격자, 다중 스프링 지지격자 등)과 현재 상용으로 사용중이거나(Ref. A로 표기) 상용으로 개발중인 개량핵연료(Ref. B로 표기) 지지격자에 대하여 기계/구조적 특성시험(스프링의 F- δ 특성시험, 격자체의 정적 좌굴 및 충격 특성시험, 연료봉 지지/진동 특성시험, 프레팅마멸 특성시험 등)을 수행하여 기계/구조적 성능이 우수하고 국내·외 특허권 취득이 가능할 것으로 판단되는 고유 지지격자 최종형상 2종(최적화 H형 스프링 부착 지지격자, 세이중판 노즐형 지지격자)을 선정하였다. 본 논문의 시험결과는 최적화 H형 스프링 부착 지지격자(Opt. H로 표기), 세이중판 노즐형 지지격자(Doublet로 표기)와 Ref. A 및 Ref. B와의 기계적 성능시험결과를 비교하고 분석한 것이다.

2.2 최적화 H형(Opt. H형) 지지격자

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 대한민국 특허가 등록된 “H형 스프링이 부착된 지지격자”[2, 8]는 지지격자 스프링 및 덤플이 연료봉을 감싸는 형태의 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 면적에서 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) 건전한 지지상태를 상실할 가능성이 있는데 비해 H형 스프링은 스프링 지지점에서의 반력을 분산시킬 수 있는 이중 아치(arch) 형상의 다리를 갖도록 하여 안정적인 연료봉의 지지를 기하고 스프링의 탄성 거동 허용범위를 확장시켜 원자로의 운전 중 변화하는 지지조건에서도 핵연료집합체의 수명기간 동안 건전한 연료봉의 지지를 가능케 하기 위한 것이다. 최적화 H형 스프링 부착 지지격자는 이러한 H형 스프링부착 지지격자에 근간을 두고 성능을 개량하기 위해 형상을 개선한 것으로 초기 H형 스프링의 탄성변형한계를 확장시키며 연료봉 장입후에 스프링이 변형되어 스프링과 연료봉간의 접촉형상이 변하고 접촉면

적이 감소하는 것을 억제하기 위해 호몰로지 기법과 최적설계기법을 이용하여 H형 스프링 지지부와 접촉부 형상에 대한 형상최적설계를 수행하여 확정된 것이다. 그림 2는 최적화 H형 스프링의 형상을 나타낸 것이다.

2.3 세이중판(Doublet형) 노즐형 지지격자

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 지지격자판을 두 겹으로 만들고 판과 판 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 유체유발진동(Fluid Induced Vibration: FIV) 현상을 유발하게 된다. 냉각재의 횡방향 유동으로 야기된 유체유발진동은 연료봉과 격자 수로 사이에 빠르고 주기적인 간섭을 발생시키고 결국은 연료봉과 지지격자체와의 접촉부위(스프링 혹은 딥플)에서 연료봉이 손상될 수 있는 이른바 유체유발진동에 의한 연료봉 프레팅마멸 손상원인이 될 수도 있다. 결국 혼합날개의 작용이 강력할 수록 냉각재의 혼합력이 강력하여져서 원자로의 열효율을 높이는 장점이 있는 반면에 이에 비례하여 연료봉의 진동 진폭도 커지고 이에 따라 핵연료봉의 손상 발생 가능성도 증가할 수 있다. 한편 SPC사의 개념인 이중판 구조에 의한 유로통로형 혼합기는 핵연료집합체내 낮은 온도 구역과 높은 온도 구역에 있는 냉각재를 섞기 때문에 원자로내 전체적인 열효율을 증가시켜서 핵연료봉이 국부적으로 과열되어 발생하는 핵 비등 이탈 등을 방지하는 역할을 제공하고 선접촉으로 지지된 연료봉의 진동이 작게 발생함으로써 유체유발진동에 의한 핵연료봉 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[4, 10]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 빠

른 속도로 분사시키는 방법으로 핵연료집합체내 냉각재를 섞어서 전체적인 열효율을 향상시키게 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 보강을 이루게 하는 것이 특징으로 2000년에 우리나라 핵연료 구조부품 개발 역사상 처음으로 미국특허를 획득하였다. 그런데 이 이중관 노즐형 지지격자는 스프링의 강성이 너무 커서 완화시킬 필요가 있어서 스프링 양편에 slot을 두는 형상으로 설계 변경(최적설계 포함)한 것이다. 그림 3은 새이중관 노즐형 지지격자 스프링의 형상을 나타낸 것이며 국내 및 미국에 특허를 출원하였다.

2.4 지지격자 스프링의 F- δ 특성 시험

고유 지지격자 최종후보 2종과 참조용 지지격자 2종의 격자판 시편을 지르칼로이-4로 제조하여 지지격자 스프링의 하중 대 변위 선도를 얻기 위한 F- δ 특성시험을 수행하였다. 지지격자 스프링의 F- δ 특성시험용 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 치구[17]를 이용하여 F- δ 특성시험을 수행하였다. 그림 4는 지지격자 스프링에서의 하중 대 변위 선도를 나타낸 것이다. 그림 4의 스프링 특성시험결과를 보면 Doublet 및 Opt. H형 스프링이 참조용 지지격자(Ref. A 및 Ref. B)에 비해 강성과 탄성영역한계 그리고 소성변형량 등에서 우세한 것으로 나타나 있다. 따라서 Opt. H형 및 Doublet형 스프링은 참조용 지지격자의 스프링보다 성능이 우수하거나 비견할 만하다고 사료된다.

2.5 지지격자의 핵연료봉 지지/진동 특성 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 진동시험과 유한요소모델을 이용한 진동해석을 수행하였다. feed back control되는 shaker를 이용한 시험장치[17]로 부분격자체로 지지된 시험연료봉의 진동시험을 수행하였다. 연료봉의 동적 특성 파악을 위하여 모달 파라미터를 추출하기 위한 통상적인 진동시험을 수행함과 동시에 주어진 임의의 가진력에서 발생하는 연료봉의 최대 진동진폭을 측정하였다.

그림 5는 가진력 0.75 N 하에서 연료봉의 진동변위를 나타낸 것으로 Doublet형 지지격자 스프링의 연료봉 지지성능이 다소 우수하며 Opt. H형과 Ref. B는 유사한 것으로 나타나 있다.

2.6 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 상태에서 프레팅마멸 시험을 수행할 수 있는 시험장치와 측정장비[17]를 이용하여 Opt. H형, Doublet형 및 참조용 지지격자의 스프링에 대하여 상온, 공기 중에서 프레팅마멸 특성시험을 수행하였다.

프레팅마멸 특성시험은 세 가지 관점에서 수행하였다. 첫째, 일정한 접촉력이 작용한 상태에서 미끄럼 진폭을 증가시킬 때 마멸특성과 둘째, 연료봉이 격자내에 장입된 상태를 모사하기 위해 지지력으로 지지되거나 간극이 발생할 경우에 대한 마멸특성 셋째, 일정한 시험조건에서 프레팅 사이클 수가 증가함에 따라 마멸특성 등을 분석하였다.

첫 번째 관점의 실험으로서 10 N, 30 N, 50 N의 접촉력이 작용하는 경우에 미끄럼 진폭이 30~100 μm 까지 변할 때에 연료봉에서의 프레팅마멸특성 결과가 그림 6에 나타나 있다. 그림 6에서 보듯이 10 N과 30 N으로 지지되고 있는 경우에 미끄럼 진폭이 증가함에 따라 마멸부피가 급격히 증가하는 영역(임계진폭으로 칭함)이 존재하고 있음을 발견하였고 아울러 본 과제에서 고안한 신형 지지격자 최종형상의 마멸저항성이 참조용 지지격자보다 백중우세한 것을 알 수 있다. 한편 50 N으로 지지된 상태에서는 임계진폭이 관찰되지 않았다.

두 번째 관점의 실험으로서 연료봉을 격자내에서 5 N으로 지지하고 있거나 스프링이 연료봉 지지력을 잃어버려서 간극(0.1 mm)이 존재할 경우에 연료봉에서의 마멸특성 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림 7에서 보듯이 연료봉이 지지되고 있을 때(5 N의 지지력) Opt. H형 스프링이 마멸특성에서 가장 우수하였고 간극이 존재하는 경우에는 Doublet형 스프링이 가장 우수하였다. 한편 Opt. H형 및 참조용 지지격자는 간극이 존재할 경우에 마모부피가 크게 증가했으나 Doublet형에서는 마모부피가 거의 일정하였다.

세 번째 관점의 실험으로서 임계진폭전의 일정한 시험조건(10 N의 지지력, 50 μm 의 미끄럼 변위)에서 프레팅 사이클 수를 증가시킴에 따라 마멸진전거동 특성이 그림 8에 나타나 있다. 그림 8에서 보듯이 Doublet형 스프링의 마멸진전거동특성이 가장 우수하며 Opt. H형 스프링의 경우도 우수한 것으로 나타났다.

3. 결론

핵연료집합체 기계설계경험을 바탕으로 하고 외국의 새로운 핵연료 특징 및 특허 자료들을 면밀히 검토하여 특허분쟁이 되지 않을 것으로 기대되는 경수로용 신형핵연료의 고유모형 지지격자 형상 14종을 고안하였고 고안된 고유 지지격자 형상에 대한 기계/구조적 성능비교시험을 거치고 성능을 개선하여 확정된 신형 핵연료용 고유 지지격자 최종형상 2종에 대한 기계적 특성시험을 수행한 결과, 상용으로 사용중이거나 상용으로 개발중인 지지격자에 비하여 신형 핵연료용 고유 지지격자 최종형상의 성능이 우수하거나 비견할 정도임을 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, 한국원자력 연구소 (1997).
- (2) 송기남외 6인, “신형핵연료 지지격자 형상개발 및 성능평가 현황,” 2002추계 원자력 학술대회 논문집, 논문번호 110.
- (3) 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).
- (4) 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).
- (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) K. H. Yoon *et al.*, “Spacer Grid with Multi-springs and Dimple Vanes for Nuclear Fuel Assemblies,” US Patent 6,278,759 B1 (2001)
- (7) H. S. Kang *et al.*, “Nuclear Fuel Spacer Grid with Dipper Vanes,” US Patent 6,421,407 (2002).

- (8) D. S. Oh *et al.*, "Duct-type Spacer Grid with Swirl Flow Vanes for Nuclear Fuel Assemblies," US Patent 6,393,087 B1 (2002)
- (9) 윤경호외 7인, "프레팅마모 억제를 위한 H형 스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허 제0318233호 (2001).
- (10) 강홍석외 7인, "원자로의 핵연료집합체 이중판노즐형 냉각재 혼합 지지격자," 대한민국 특허 제0265027호. (2000).
- (11) 전태현외 8인, "회전유동발생장치를 가진 핵연료집합체 지지격자," 대한민국 특허 제0287278호 (2001).
- (12) 강홍석외 7인, "핵연료집합체의 바가지형 혼합날개 지지격자," 대한민국 특허 제 0287278호 (2002).
- (13) 오동석외 7인, "회전유동발생날개가 부착된 덕트형 핵연료 지지격자," 대한민국 특허 제0330355호 (2002).
- (14) 윤경호외 7인, "냉각수 혼합을 위한 덩플형 베인과 다중스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국 특허 제0330358호 (2002).
- (15) 윤경호외 7인, "연료봉 접촉면적 및 스프링 탄성영역을 확장하는 스프링이 부착된 지지격자체," 대한민국실용신안 제0248744호 (2001).
- (16) 김대호외 8인, "입술형 다목적 핵연료 지지격자체," 대한민국실용신안 제0269662호 (2002).
- (17) 송기남외 3인, "경수로 핵연료 지지격자의 기계/구조적 실험 및 해석," 2001 KSME 충청지부 춘계학술대회, pp.37-44.

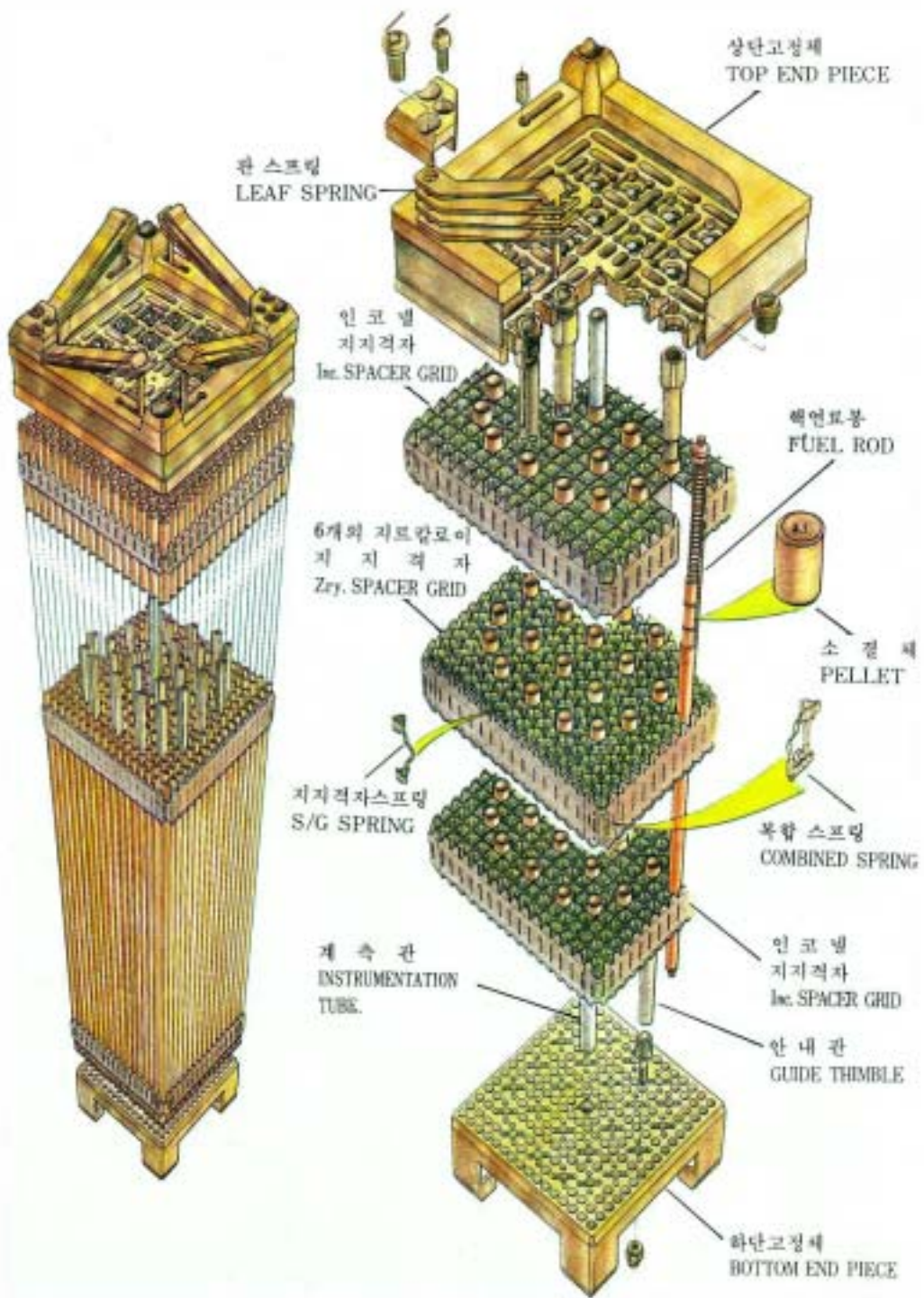


그림 1. 17x17형 핵연료집합체 개략도



그림 2. 최적화 H형 지지격자의 스프링판 형상



그림 3. 개선조건에 최적화

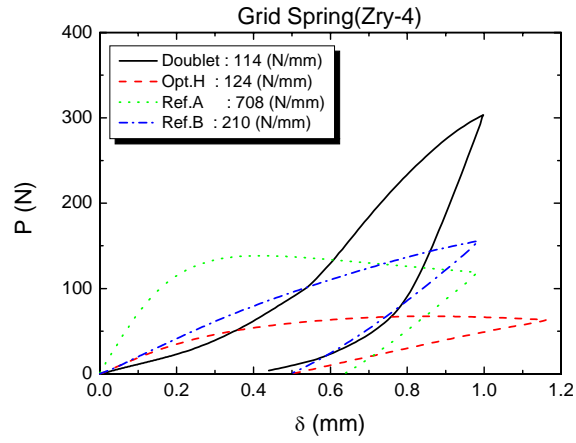


그림 4. 지지격자 스프링의 특성곡선

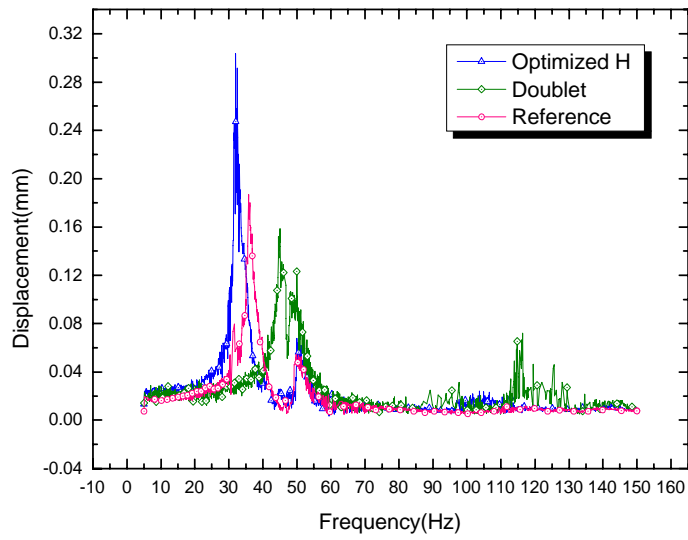


그림 5. 최적화 H형과 새이중판 노즐형 지지격자로 지지된 연료봉의 측정된 진동변위

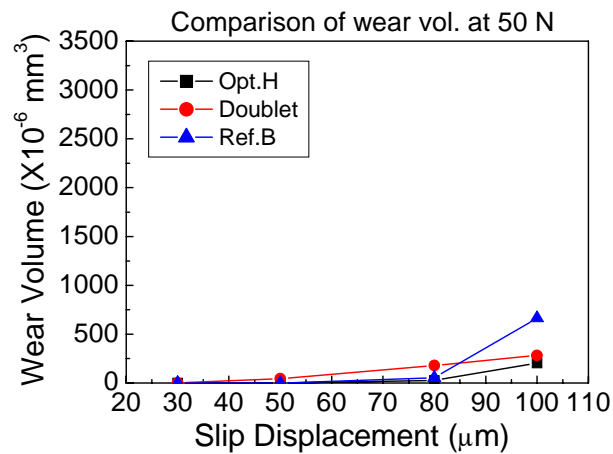
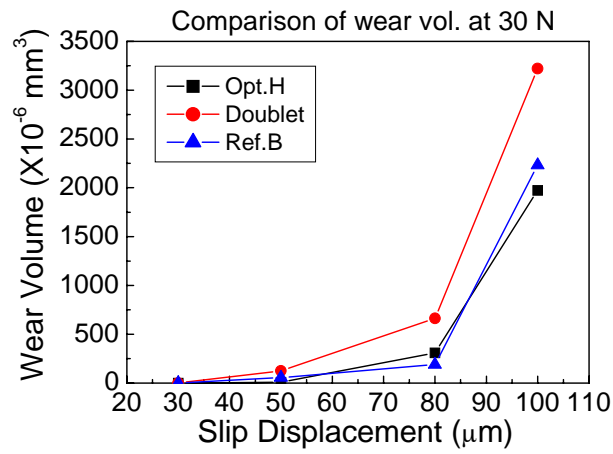
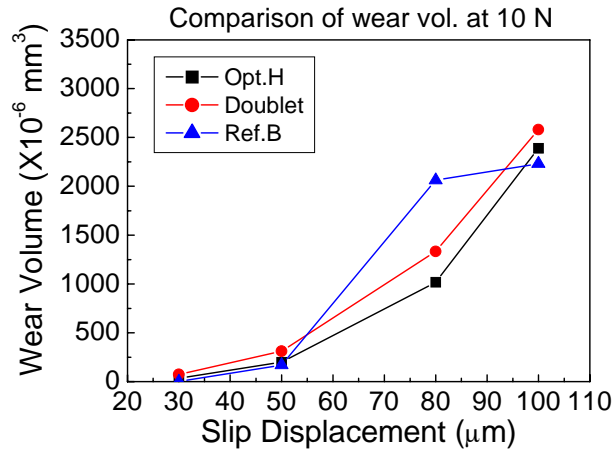


그림 6. 각 지지격자 스프링 형상 별 마멸부피

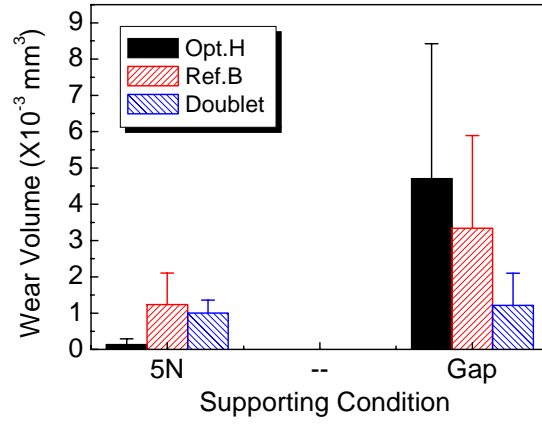


그림 7. 지지조건에 따른 마멸량 변화

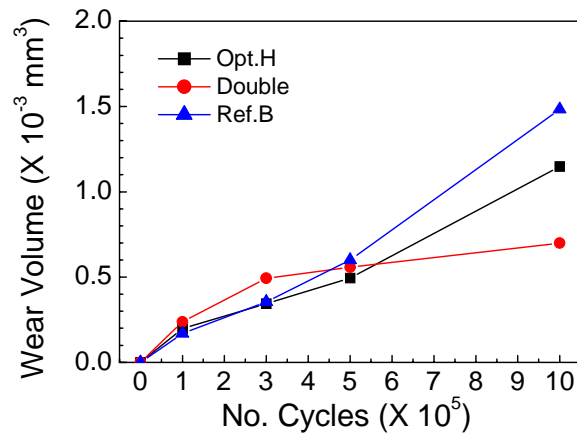


그림 8. 사이클 증가에 따른 마멸량 변화