

신형 지지격자에 대한 기계/구조적 상세 특성시험 및 해석

Detailed Mechanical/Structural Test and Analysis on the Spacer Grid

Candidates for the Advanced LWR Fuel

송기남, 윤경호, 강홍석, 김형규, 정연호

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. 기계/구조적 관점에서 중요한 5종의 지지격자 형상들에 대한 기계/구조적 성능비교시험을 통하여 성능을 비교/평가한 뒤 성능이 우수하고 산업재산권 확보가 유력시되는 지지격자 형상 2종을 유력후보로 선정하고 시편을 제작하여 상세 성능시험과 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 상세 성능시험과 해석결과를 기술하고 토의하였다.

Abstract

The spacer grid is one of the structural components of the nuclear fuel assemblies for the pressurized light water reactors. Based on the nuclear fuel assembly mechanical/thermal-hydraulic design experience and scrutinizing the design features on the foreign advanced nuclear fuel and the foreign patents of the spacer grid, 14 kinds of spacer grid candidates have been conceptually derived and applied for the patents since 1997. Through the screening test on the 5 candidates of the spacer grids, 2 leading candidates have been selected for detailed test from the mechanical/structural point of view. In this paper detailed test and analysis results on the leading candidates are discussed.

## 1. 서론

가압 경수로용 핵연료집합체는 그림 1과 같이 핵연료 상·하단에 상단고정체 및 하단고정체가 각 1개, 핵연료 중간에 7~11개의 지지격자체, 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 국산화 대상 일순위로 지목될 수 있으나 형상이 복잡하고 관련된 제조 및 개발기술의 확보가 어려워서 핵연료기술자립을 목표로 핵연료 국산화사업을 시작한 1989년 이래로 가장 늦게 국산화 대상으로 선정된 부품이다.

지지격자의 기능은 크게 기계/구조적인 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있는데, 전자의 기능은 핵연료 수명기간 내내 원자로심내의 운전조건하에서 연료봉이 종방향 및 횡방향의 정위치에 있도록 견견하게 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 연료봉내의 이산화우라늄( $UO_2$ ) 소결체로부터 발생된 열을 효과적으로 냉각수로 전달하기 위해 연료봉 수로를 따라 흐르는 냉각수에 난류를 유발시키고 혼합하는 것이다. 이러한 기능을 갖고 있는 지지격자는 핵연료 성능과 매우 밀접하게 관련되어 있어서 외국의 핵연료 vendor들은 새로운 연료 개발 및 상용화시에 핵연료 견견성 및 열적 성능을 향상시킨 새로운 지지격자 형상을 제시하여 신연료의 특징으로 주창하고 있다.

외국의 핵연료 vendor들이 신연료 개발시에 지지격자 형상을 개량한 사례들을 살펴보면 다음과 같다[1]. 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. 또한 핵연료집합체 상반부의 지지격자들 사이에 냉각수 혼합을 촉진시키는 중간 혼합격자(Intermediate Flow Mixers; IFM)가 1983년 웨스팅하우스(W)사의 VANTAGE 5 연료에 도입된 이래 근래에는 여러 핵연료 회사의 최신 핵연료에 IFM이 사용되고 있다. 한편 SPC(Siemens Power Corporation)사는 두 개의 얇은 지지격자판 사이에 노즐형 수로가 형성될 수 있도록 고안한 HTP 지지격자를 도입하여 냉각수의 혼합을 촉진시키고 있으며 아울러 연료봉 지지면적을 증대시켜서 연료봉 진동 및 프레팅마

멸에 의한 연료봉의 손상요인을 경감시킬 수 있도록 하였다. 기계적 요인에 의한 연료봉의 손상요인을 감소시키려는 시도로는 단순히 연료봉을 지지하는 기능으로 있던 지지격자 스프링과 덤플의 형상을 변경하여 연료봉과의 접촉면적이 증가하도록 하여 접촉면에서 연료봉의 국부응력 첨두치가 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 공동 설계한 KOFA(KOrean Fuel Assembly) 핵연료가 1989년부터 국내의 W형 발전소(고리 2호기)에 처음으로 공급된 이래 KAERI와 ABB-CE사가 공동 설계한 핵연료가 1994년부터 국내의 ABB-CE형 발전소(영광 3,4호기)에 공급되었다. 또한 1999년부터 한전 원전연료주식회사(KNFC)에서는 W사와 함께 W사의 개량연료인 VANTAGE 5H연료 부품을 국내에서 제조하여 국내의 W형 발전소에 공급하고 있으며 1999년 4월부터는 국내에 있는 ABB-CE형 발전소용 개량핵연료를, 2001년 8월부터는 국내에 있는 W형 발전소용 개량핵연료를 W사와 공동으로 개발하고 있는데 2002년 3월 현재 ABB-CE형 발전소용 개량핵연료(KAPD 혹은 PLUS7로 지칭)의 시범집합체를 제작 중에 있다. 그런데 공동설계의 효과는 지지격자를 비롯한 핵연료 부품에 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. 그런데 KAERI에서는 1986년 이래의 핵연료 기계설계 경험 및 설계/제조연계 경험을 바탕으로 하고 1997년부터 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 기계/구조적 및 열수력적 성능 관점에서 성능향상이 예상되는 독자적인 지지격자 모형 14종을 고안하여 국내·외에 각각 14건의 특허를 출원하였는데 2002년도 3월 현재 4종의 지지격자 고유형상에 대하여 핵연료 구조부품으로는 우리 나라에서 처음으로 미국특허 4건[2,3,4,5], 국내특허 4건[6,7,8], 국내실용신안 1건[9]이 등록되어서 우리가 고안한 지지격자 형상의 독창성이 점차적으로 국내·외에서 인정을 받고 있다.

본 논문에서는 KAERI에서 고안한 14종의 지지격자 형상 중에서 기계/구조적 관점에서 중요한 지지격자 형상 5종에 대한 기계/구조적 관점의 성능비교시험[10]을 거쳐서 선정된 2종의 지지격자 최종 유력형상에 대하여 수행한 기계/구조적 상세 성능시험 및 해

석결과를 분석/평가하고 기술한 것이다.

## 2. 지지격자 최종 유력후보에 대한 기계/구조적 상세 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(V5H) 상용으로 개발중인(KAPD) 지지격자에 대하여 기계/구조적 특성시험(스프링의 F- $\delta$  특성시험, 격자체의 정적 좌굴 특성시험, 연료봉 지지/진동 특성시험, 프레팅마멸 특성시험 등)을 수행하여 기계/구조적 성능이 우수하고 국내·외 특허권 취득이 가능할 것으로 판단되는 지지격자 최종 유력후보 형상 2종(최적화 H형 스프링 부착 지지격자, 새이중판 노즐형 지지격자)을 선정하였다. 그림 2와 3은 각각 최적화 H형(Opt. H형) 및 새이중판 노즐형(Doublet형) 지지격자의 스프링 형상을 나타낸 것이다.

### 2.2 지지격자 스프링의 F- $\delta$ 특성 시험

최종 유력후보 지지격자 2종과 참조용 지지격자 2종(V5H형 지지격자, KAPD 지지격자)의 격자판 시편을 지르칼로이-4로 제조하여 지지격자 스프링 및 덤플의 하중 대 변위 선도를 얻기 위한 F- $\delta$  특성시험을 수행하였다. 지지격자 스프링 및 덤플의 F- $\delta$  특성 시험용 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[11] 이용하여 F- $\delta$  특성 시험을 수행하였다. 그림 4와 5는 각각 지지격자 스프링 및 덤플에서의 하중 대 변위 선도를 나타낸 것이다. 그림 4의 스프링 특성시험결과를 보면 Doublet 및 Opt. H형 스프링이 상용으로 사용되고 있는 스프링에 비해 탄성영역이 크고 소성변형도 적게 발생하고 있음을 확인하였다. 또한 그림 5의 덤플 특성시험결과를 살펴보면 Opt. H형 및 KAPD형 덤플은 V5H에 비하여 연하고 소성변형이 작게 발생함을 보여주고 있다. 따라서 Opt. H형 및 Doublet형 스프링은 참조용 지지격자의 스프링보다 성능이 우수하거나 비견할 만하다고 사료된다.

## 23 부분격자체 시편에 대한 정적 좌굴 특성 시험

최종 유력후보 지지격자 2종과 참조용 지지격자 2종(V5H형 지지격자, KAPD 지지격자)의 5x5형 부분격자체를 제조하여 만능인장시험기를 이용한 정적 좌굴 특성시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 지지격자 형상별로 각각 5개씩 사용하였다. 핵연료집합체 구조해석모델에서의 입력자료로서 지지격자의 정적 좌굴 특성(좌굴강성도, 임계 좌굴하중, 좌굴모드)에 대한 자료가 필요하다. 부분격자체의 정적 좌굴특성 시험결과를 살펴보면(그림 6참조) 현재의 Doublet형 부분격자체의 임계 좌굴강도는 참조용 부분격자체(V5H 및 KAPD)에 비해 16.1 % 정도 큰 값을 나타내고 있으나 Opt. H형 부분격자체는 참조용 부분격자체보다 약 18 % 정도 작은 것으로 나타났다. 그러나 이는 Opt. H형 부분격자체에 적합한 외부격자판을 제조하기 위한 금형이 없어 형상이 다른 격자체용 외부격자판을 사용하여 부분격자체를 조립하고 용접하였는데 내부격자판과 외부격자판 간의 치수와 구조차이로 내부/외부격자판 사이에서 용접이 불량하게 되어 구조물의 기계적 강도를 저하시킨 것으로 추정된다. 이러한 추정을 검증하기 위해 Opt. H형 부분격자체 제조용 외부격자판을 제조하여 부분격자체를 제작하고 있는데 곧 시험을 수행할 계획이다.

## 24 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 관련되어있다. 지지격자의 연료봉 지지/진동특성을 규명하기 위해 진동시험과 유한요소모델을 이용한 진동해석을 수행하였다. Feed back control되는 shaker를 이용한 시험장치[11]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. 지지격자체의 연료봉 지지성능시험은 주어진 동일한 가진력에서 연료봉의 진동을 억제하는 정도를 파악하기 위한 시험이다.

지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 수행함과 동시에 유한요소모델에 의한 해석도 수행하였다. Matlap으로 multi-span봉의 진동해석도 수행하고, 해석결과와 시험결과를 비교하였다. 그림 7 및 8은 각각 Opt. H형 및 Doublet형 스프링으로 지지된 연료봉의 수중에서의 진동특성에 대한 이론결과와 실험결과 모드형상을 비교한 MAC(Modal Assurance Criteria) 그래프이다. 그림 7과 8에서 보듯이 Opt. H형 및 Doublet형 모두에서 해석 결과가 만족할 만하게 잘 맞음을 보여주고 있다.

## 2.5 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[11]를 이용하여 Opt. H형, Doublet형, KAPD형 스프링에 대하여 상온, 공기 중에서 프레팅마멸 특성시험을 수행하였다.

시험조건으로는 스프링과 피복관 시편 사이의 접촉력을 10, 30N, 미끄럼 변위는 10, 30, 50, 80 $\mu m$ 으로 하였으며 미끄럼 반복진동수는 30Hz, 반복 횟수는 10만회(Cycle)로 하였다. 각각의 조건에 대한 이유로는 접촉력의 경우, 핵연료집합체 설계에서 지지격자 스프링의 일반적인 하중범위 내의 값으로 하였으며 미끄럼 변위는 프레팅으로 정의할 수 있는 값으로서 연료봉 사이에 충돌이 발생하지 않는 범위의 값으로 설정하였고 여러 가지 값으로 한 이유는 부분미끄럼에서 전미끄럼으로 천이되는 변위값을 추출하기 위한 목적이었다. 또 진동수는 연료봉의 진동해석으로부터 1차 고유진동수에 근사한 값으로 설정하였다. 마멸 깊이와 마멸부피에 대해 상호 비교 분석하였으며 그 결과는 그림 8~11에 나타나 있다.

그림 8~11에서 보면 하중이 작을수록, 또 미끄럼 변위가 증가할 수록 마멸이 증가하는 타당한 결과를 볼 수 있다. 30N에서는 30 $\mu m$ 까지는 마멸이 관찰되지 않았다. 마멸량의 비교에서는 일반적으로 마멸 결과의 분산정도를 고려할 때 비교한 스프링 상호 간에 뚜렷한 차이가 있다고 판단되지 않아 Opt. H형 및 Doublet형 스프링의 프레팅마멸 저항성이 상용으로 개발중인 참조용 스프링(KAPD)에 비해 낮지 않다고 결론을 내릴 수 있다. 오히려, 50 $\mu m$ 이하의 작은 미끄럼 변위에서는 Opt. H형 스프링이 다른 두 종류의 스프링에 비해 마멸저항성이 다소 우세한 것으로 볼 수 있다.

## 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 형상 중에서 기계/구조적 관점에서 중요한 지지격자 형상 5종에 대하여 스프링 시편 및 5x5형 부분격자체 시편을 제조하여 수행한 기계/구조적 성능비교시험을 통해 기계/구조적 성능이 우수할 뿐만 아니라 산업재산권 확보도 유리할 것으로 판단되는 지지격자 최종 유력후보 2종의

형상을 확정하였다. 확정된 최종 유력후보 지지격자 형상에 대한 기계/구조적 특성시험을 수행한 결과, 상용으로 사용중이거나 상용으로 개발중인 지지격자에 비하여 최종 유력후보 지지격자의 기계/구조적 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) 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) 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).
- (4) T. H. Chun *et al.*, “Fuel Assembly Spacer Grid with Swirl Deflectors and Hydraulic Pressure Springs,” US Patent 6,236,702 B1 (2001).
- (5) K. H. Yoon *et al.*, “Spacer Grid with Multi-springs and Dimple Vanes for Nuclear Fuel Assemblies,” US Patent 6,278,759 B1 (2001)
- (6) 윤경호외 7인, “프레팅마모 억제를 위한 H형 스프링이 부착된 지지격자체,” 대한민국 특허 제0318233호 (2001).
- (7) 강홍석외 7인, “원자로의 핵연료집합체 이증판노즐형 냉각재 혼합 지지격자,” 대한민국 특허 제0265027호. (2000).
- (8) 권태현외 8인, 회전유동발생장치를 가진 핵연료집합체 지지격자,” 대한민국 특허 제 0287278호 (2001).
- (9) 윤경호외 7인, “연료봉 접촉면적 및 스프링 탄성영역을 확장하는 스프링이 부착된 지지격자체,” 대한민국실용신안 제0248744호 (2001).

(10) 송기남, "신형 지지격자에 대한 기계/구조적 성능비교시험," 2001 원자력학회 춘계학술발표회 논문집.

(11) 송기남외 3인, "경수로 핵연료 지지격자의 기계/구조적 실험 및 해석," 2001 KSME 충청지부 춘계학술대회, pp.37-44.



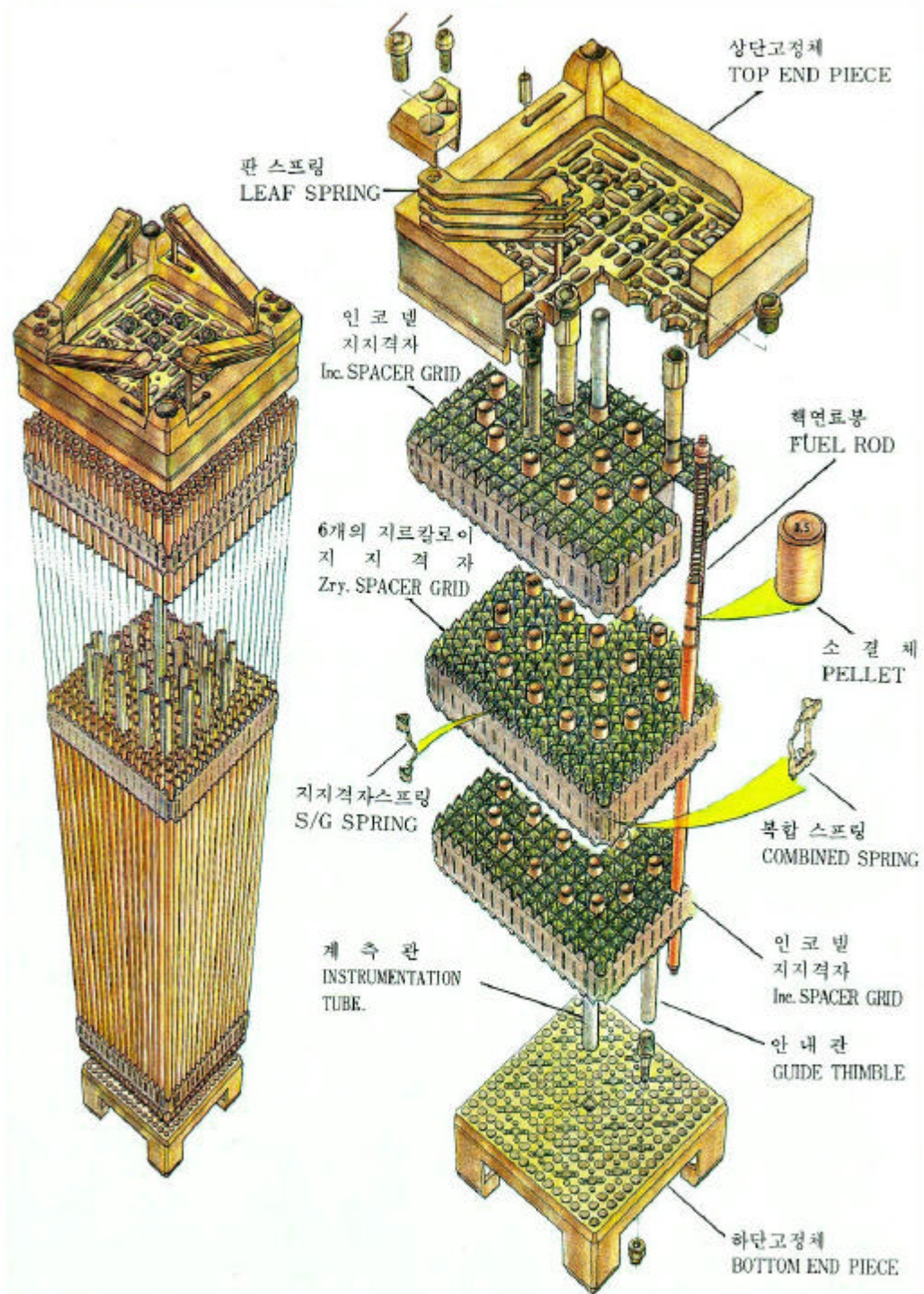


그림 1 17x17형 핵연료집합체 개략도



그림 2 최적화 H형 지지격자의 스프링판 형상



그림 3 새이중판 노즐형 지지격자의 스프링판 형상

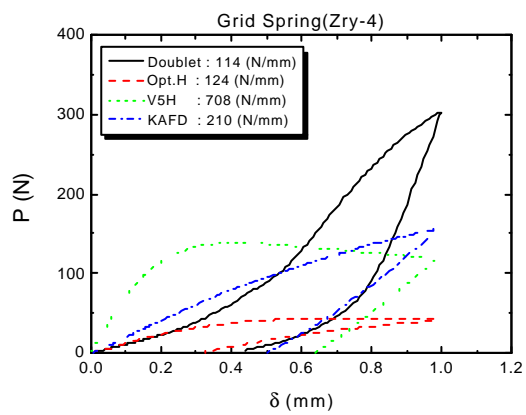


그림 5 스프링의 하중-변위 선도

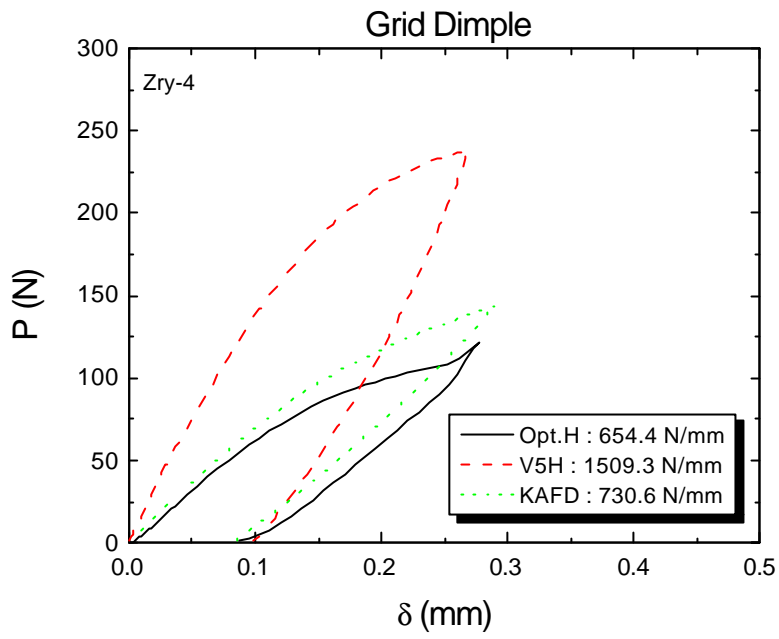


그림 6 지지격자 뒀플의 하중-변위 선도

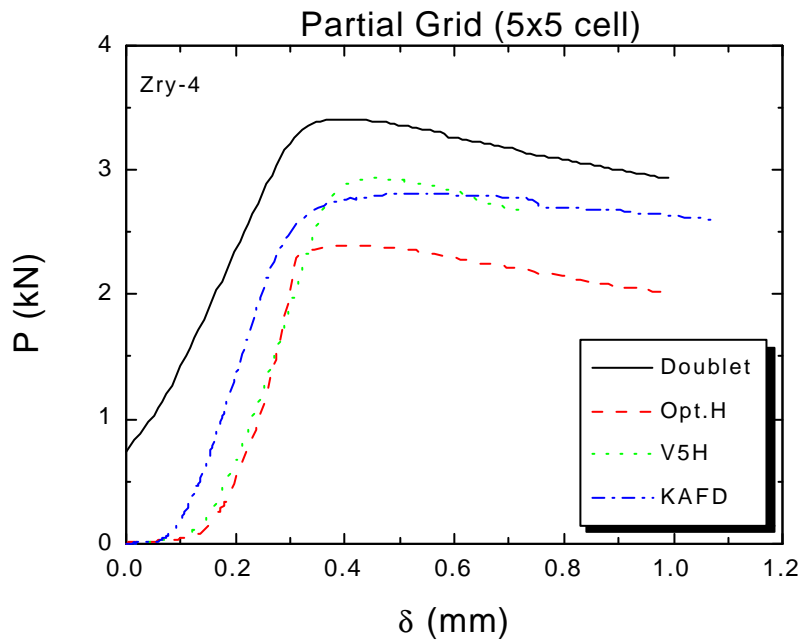


그림 7 부분집합체의 하중-변위 선도특성곡선

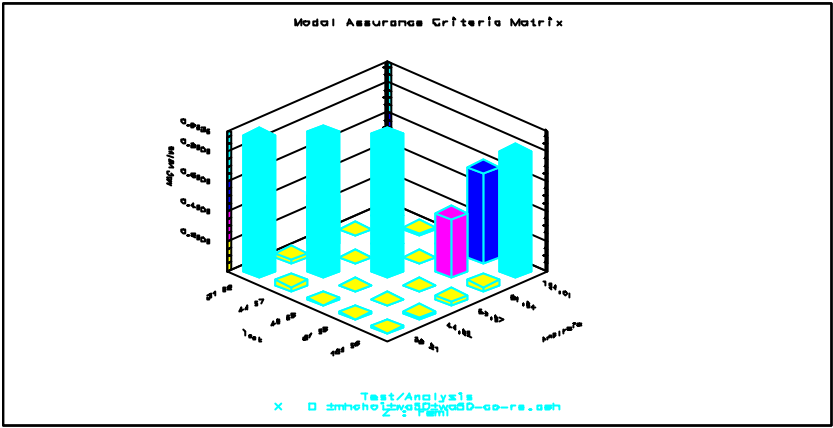


그림 7 MAC graph for Opt. H-type grid

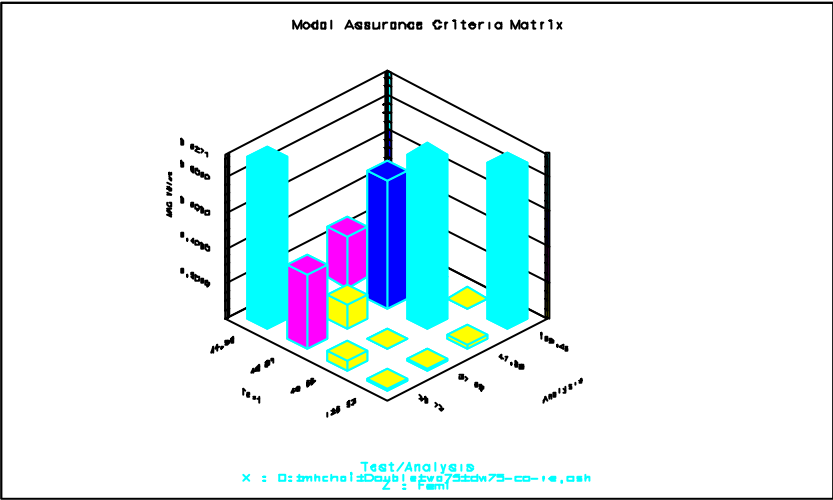


그림 8 MAC graph for Doublet-type grid

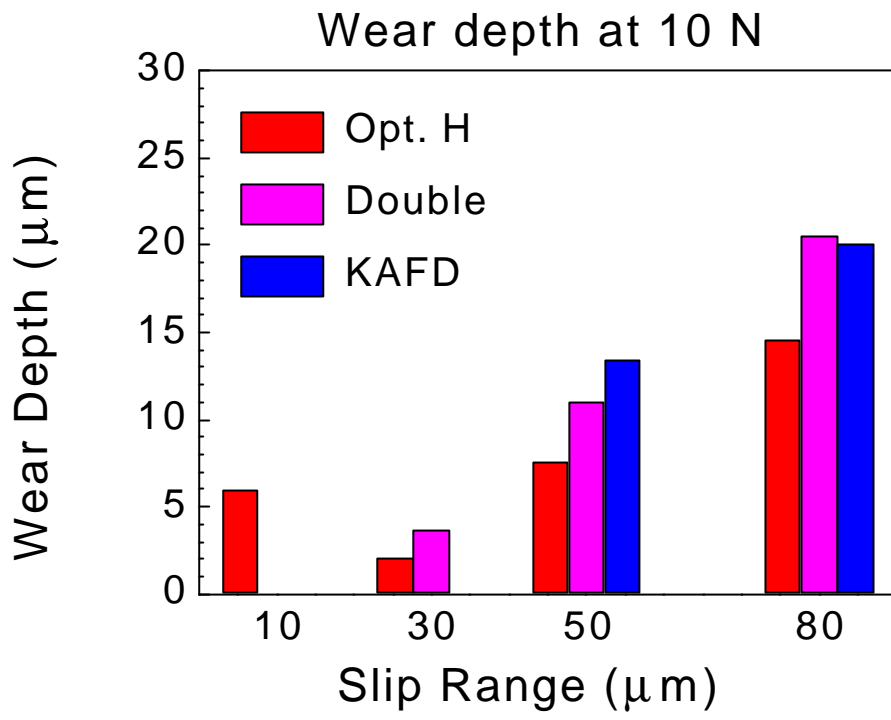


그림 8 Wear depth at 10N

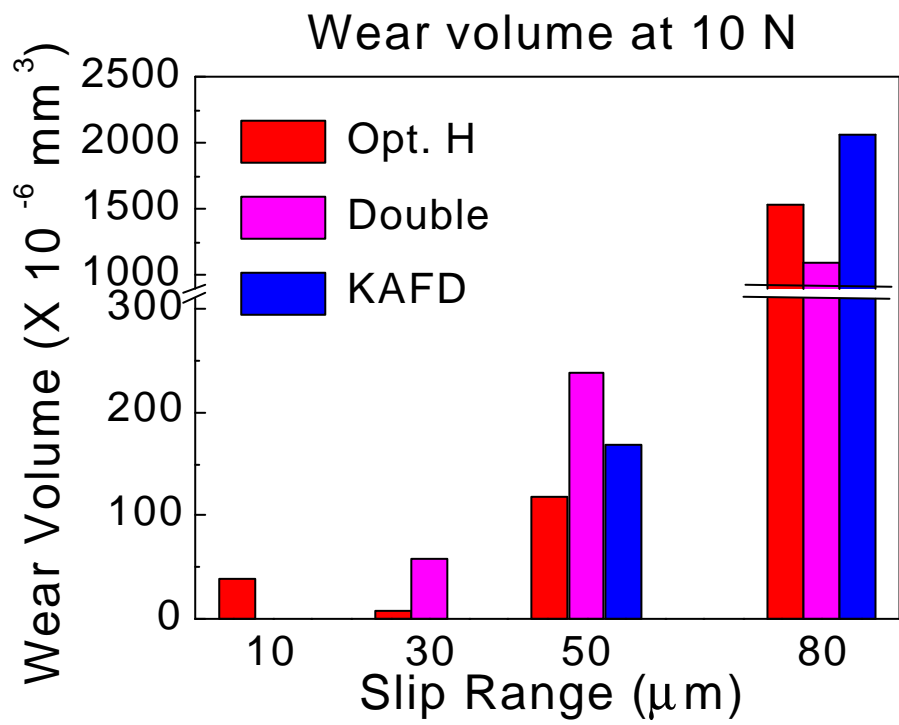


그림 9 Wear volume at 10N

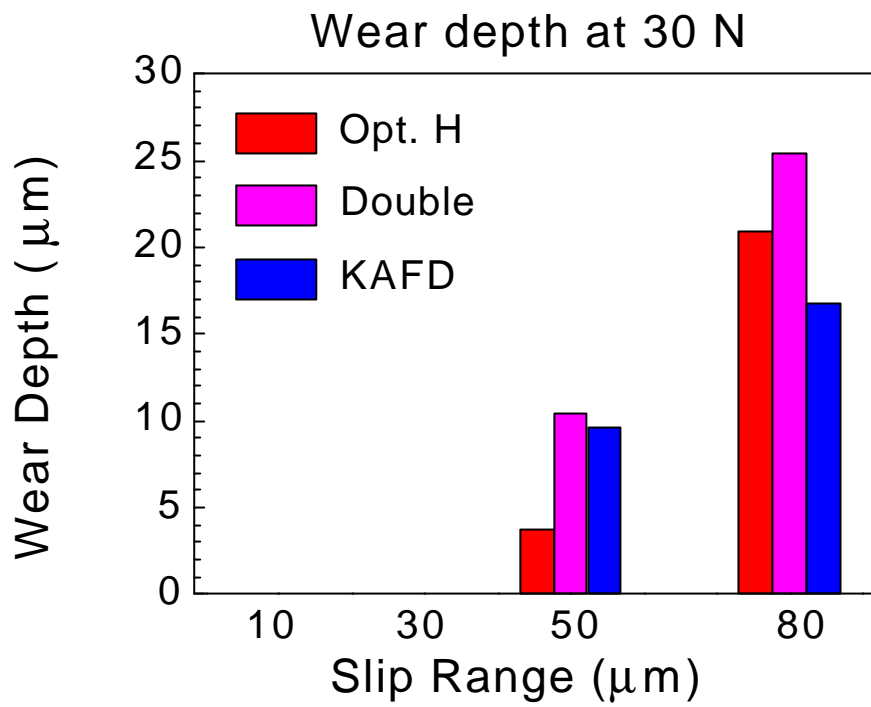


그림 10 Wear depth at 30N

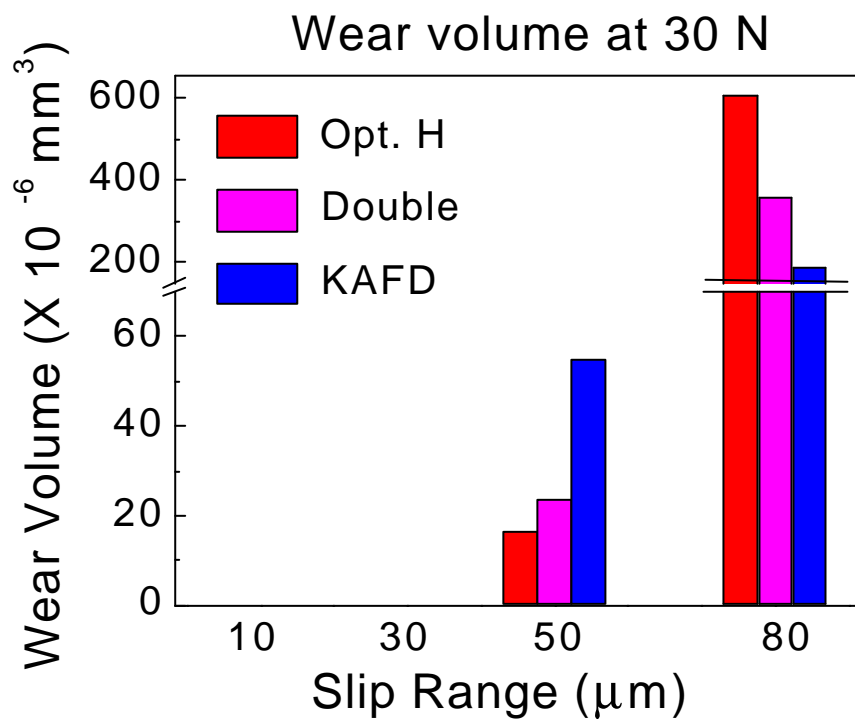


그림 11 Wear volume at 30N