

신형 지지격자에 대한 기계/구조적 성능비교시험

Mechanical/Structural Screening Test on the New Spacer Grid Candidates

송기남

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요약

핵연료집합체 기계설계 경험을 바탕으로 하고 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 여러 종의 지지격자 고유형상을 고안하였다. 고안된 지지격자 형상들에 대한 기계/구조적 성능을 비교하기 위해 스프링 격자판 및 5x5형 격자체를 제조하여 격자 스프링의 F- δ 특성시험, 격자체 좌굴 및 충격특성시험, 연료봉 지지/진동특성시험 그리고 프레팅마멸 특성시험 등의 기계/구조적 특성시험을 수행하였다. 성능비교시험결과를 분석하여 기계/구조적 성능이 우수한 지지격자 형상을 선정하였다.

Abstract

Based on the fuel assembly mechanical design experience and the review results on the foreign advanced nuclear fuel and the foreign patents of the spacer grid, various kinds of spacer grid candidates are derived. In order to compare the mechanical/structural performance of the derived candidates, some mechanical/structural screening tests, such as, F- δ characteristic test and fretting wear test on the spacer grid springs, buckling/impact characteristic test on the 5x5 array partial spacer grid assemblies, and fuel rod support/vibration characteristic test, are performed. As a result of the screening test on the spacer grid candidates, a leading candidate of the spacer grids is selected.

1. 서론

경수로용 핵연료집합체는 그림 1과 같이 상·하단고정체 각 1개, 8~11개의 지지격자체, 다수(4~24개)의 안내관 그리고 1개의 계측관 등으로 구성된 골격체와 지지격자체 격자내의 스프링 및 덤플에 의해 지지되고 있는 다수(179~264개)의 연료봉으로 구성되어 있다. 지지격자체의 기능은 기계/구조적인 기능과 열수력적 기능으로 나누어지고 있는데, 전자의 기능은 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 연료봉내의 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 신연료 개발 및 상용화시에 핵연료 건전성 및 열적 성능을 향상시킨 새로운 지지격자 형상을 제시하여 신연료의 특징으로 주창하고 있다.

외국의 핵연료 vendor들이 신연료 개발시에 지지격자 형상을 개량한 사례들을 살펴보면 다음과 같다. 냉각성능 개선과 관련된 사항으로, 초창기에는 지지격자체 상단부에서 냉각수의 혼합에 특별한 고려가 없던 평범한 지지격자체를 사용하다가 냉각성능 향상에 대한 요구를 수용하기 위해 지지격자체 윗부분에서 냉각수의 혼합을 촉진시키려는 시도가 추진되었다. W(웨스팅하우스)사 및 ABB-CE사, Siemens/KWU 사 등은 지지격자체 상단에 혼합날개를 부착하여 냉각수의 혼합을 촉진시키려 하였는데 혼합날개의 형상 및 부착위치는 핵연료 회사별로 다를 수 있다. W사는 근래에 VANTAGE5H연료에서 발견된 연료봉의 프레팅마멸 손상에 대한 대책으로 그리드 스프링에서 'window'를 없애고 혼합날개의 길이를 증가시키며 weld cutout을 작게 하며 혼합날개의 형상을 개선한 Performance+연료형 지지격자를 채택하여 연료봉의 진동진폭을 크게 감소시키며 DNB여유도를 증가시킨 것으로 보고되고 있다.[1] 또한 핵연료집합체 상반부의 지지격자들 사이에 냉각수 혼합을 촉진시키는 중간 혼합격자(Intermediate flow Mixers; IFM)가 1983년 W사의 VANTAGE 5 연료에 도입된 이래 근래에는 여러 핵연료 회사의 최신 핵연료에 IFM이 사용되고 있다. 한편 SPC사는 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 프레팅마멸을 경감시킬 수 있도록 하였다.[2] 연료봉의

기계적 손상을 감소시키려는 시도로는 단순히 연료봉을 지지하는 기능으로 있던 지지격자 스프링과 덤플의 형상을 변경하여 연료봉과의 접촉면적이 증가하도록 하여 접촉면에서 연료봉의 국부 침투 응력치가 감소할 수 있도록 하거나[1, 2, 3, 4] 지지격자 스프링과 지지격자판 기저부의 가공방법을 다르게 하여 중성자 조사에 따른 조사 성장량의 차이로 인하여 지지격자 스프링이 연료봉을 지속적으로 지지할 수 있도록 하여 연료봉의 프레팅마멸 손상을 줄이려하는 등[3]의 개선이 시도되고 있다.

그 동안에 국내에 축적된 지지격자체 개발기술을 살펴보면 1986년에 KAERI와 Siemens/KWU사가 공동 설계한 KOFA(KOrean Fuel Assembly) 연료가 1989년부터 국내의 W형 발전소에 공급된 이래 KAERI와 ABB-CE사가 공동 설계한 핵연료가 1994년부터 국내의 ABB-CE형 발전소에 공급되고 있다. 또한 1998년부터 KNFC에서는 W사와 함께 W사의 개량연료인 VANTAGE5H연료 부품을 국내에서 제조하여 국내의 W형 발전소에 공급하고 있으며 1999년부터는 국내에 있는 ABB-CE형 발전소에 공급할 표준원전용 핵연료를 공동으로 설계/제조하고 있다. 그러나 이러한 공동설계는 지지격자를 비롯한 핵연료부품에 대한 통상설계 및 제조관련 기술을 공고화하여 1999년말 시점에서 외국과 비견할 정도로 크게 성장한 반면이 있으나 지지격자를 독자적으로 고안하고 설계/분석하는 개발기술은 크게 확보하지 못한 면이 있었다. 그런데 KAERI에서는 1986년 이래의 핵연료 기계설계 경험 및 설계/제조연계 경험을 바탕으로하고 1997년부터 외국의 최신 개량핵연료에 대한 특징과 국외 특허자료를 면밀히 검토하여 기계/구조적 및 열적 성능관점에서 성능향상이 예상되며 독창적인 형상의 지지격자 고유 모형 10종을 고안하여 국내·외에 각각 10건의 특허를 출원하였는데 2000년도에는 선출원한 지지격자 고유모형 3종이 핵연료 구조부품으로는 우리 나라에서 처음으로 미국특허등록 3건을 획득하고 국내특허등록 3건도 등록되어서 우리가 고안한 지지격자 형상의 독창성을 국내·외적으로 인정을 받고 있다.

본 논문에서는 KAERI에서 고안한 5종의 고유모형 지지격자와 현재 상용으로 사용되고 있는 지지격자에 대하여 스프링 시편 및 5x5형 부분 격자체 시편을 제조하여 성능 비교시험을 수행하고 시험결과를 분석하여 정리한 것이다.

2. 지지격자 고유 후보모형에 대한 성능비교시험 및 평가

2.1 개요

본 논문에서는 그림 2에서 보는바와 같이 H형 스프링 부착 지지격자, 회전유동형(Swirl) 날개 부착 지지격자, 바가지형(Dipper) 지지격자, X형 스프링 부착 지지격자, 다

중스프링(Multi) 지지격자 등과 같은 고유 형상의 지지격자들과 참조용 지지격자에 대하여 스프링의 F- δ 특성시험, 격자체의 정적좌굴 및 동적충격 특성시험, 연료봉 지지/진동 특성시험 그리고 프레팅마멸 특성시험을 수행하고 그 결과를 비교 분석한 것이다.

2.2 지지격자 스프링의 F- δ 특성 비교시험

고유모형 지지격자 5종의 스프링과 참조용 지지격자 2종의 스프링에 대하여 지르칼로이-4로 시편을 제조하여 하중 대 변위 선도를 얻기 위한 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. 지지격자 스프링은 연료봉의 삽입에 의한 초기 변위 및 핵연료 수명말에 요구되는 잔류 스프링력 등을 고려하여 초기변위 0.3 mm에 초기 스프링력 40 N을 만족하고 스프링의 탄성변위가 약 0.4 mm까지는 유지되어야 한다는 것을 설계 가이드라인으로 설정하고 있는데 그림 3에서 보듯이 바가지형 지지격자, H형 스프링 부착 지지격자 그리고 X형 스프링 부착 지지격자 등에서 설계 가이드라인에 근접하는 것으로 나타났으며 참조용 지지격자보다 설계 가이드라인을 더 근접하는 것으로 나타났다.[5]

2.3 부분 격자체 시편에 대한 정적 좌굴특성 비교시험

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. 격자체의 정적 좌굴특성시험은 요구되는 최소 임계 좌굴강도에 대한 설계기준이 없어서 상용으로 사용되고 있는 참조용 격자체에 대한 시험결과와 비교하여 성능을 평가하였다. 시험결과를 그림 4에서 살펴보면 현재의 고유모형 부분 격자체의 임계 좌굴강도는 참조용 격자체에 비해 11.2~25.6% 정도 작은 값을 나타내고 있으나 고유모형 격자체의 높이(35mm)가 참조용 격자체의 그것(38.1mm)에 비하여 약 8% 작은 것을 고려하면 35mm 높이인 경우의 참조용 지지격자의 좌굴강도는 약 2663N 정도가 될 것으로 예상된다. 고유모형 4종의 정적 좌굴강도가 모두 참조용 지지격자의 그것에 비해 약간 작은 값을 보이고 있으나 용접 방법 개선, 형상개선 등을 통하여 어느 정도 해결될 수 있다고 판단된다.

2.4 부분 격자체 시편에 대한 동적 충격특성 비교시험

고유모형 지지격자 4종 및 참조용 지지격자 1종에 대하여 지르칼로이-4 재질로 제조된 5×5형 부분 격자체를 낙하식 및 진자식 충격특성시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 지지격자 형상별로 각각 5개씩 사용하였다. 지지격자 개발에서 성능목표치인 “0.3g 지진하중에 견디는 고강도 지지격자”의 요구조건은 동적 충격강도에 관한 것이다. 동적 충격시험 결과를 살펴보면 그림 5에서 보듯이 고유모형 지지격자의 임계 충격강도가 낙하식과 진자식 충격시험 모두에서 참조용 격자체의 그것과 유사하였으며 고유모형 격자체의 높이가 참조용 격자체의 그것에 비하여 약 8% 작은 것을 고려하면 고유모형 4종의 높이가 참조용 지지격자의 그것과 같게 할 경우 고유모형 4종의 동적 충격강도는 참조용 지지격자에 비해 충분히 여유가 있을 것으로 판단된다.[6]

2.5 지지격자의 핵연료봉 지지성능 비교시험

Feed back control되는 shaker를 이용하여 지지격자로 지지된 시험 연료봉의 진동시험을 수행하였다. 핵연료봉의 동적 특성 파악을 위하여 모달 파라미터(고유진동수 및 고유모드 등)를 추출하기 위한 통상적인 진동시험을 수행함과 동시에 주어진 임의의 가진력에서 발생하는 연료봉의 최대 진동진폭을 측정하였다. 이러한 시험으로 얻어진 전형적인 그래프는 그림 6과 같다. 지지격자체의 핵연료봉 지지성능시험은 주어진 동일한 가진력에서 연료봉의 진동을 억제하는 정도를 파악하기 위한 시험이다. 이러한 지지성능 시험으로 얻어진 결과를 요약하면 표 1과 같으며 변위(Displacement)값이 작을수록 연료봉 지지성능이 좋은 것으로 볼 수 있다. 표 1을 살펴보면 고유모형 4종 중에서 회전유동형을 제외한 나머지 고유모형 3종(바가지형 지지격자, 다중스프링 부착 지지격자, H형 스프링 부착 지지격자 등의 순서로)이 참조용 지지격자보다 연료봉 지지성능이 좋음을 알 수 있다.[7]

2.6 프레팅마멸 특성 비교시험

고유모형 지지격자 스프링 5종과 참조용 지지격자 스프링 1종에 대하여 프레팅마멸 특성을 상호 비교하는 것이 목적이어서 시험조건을 상용 핵연료 지지격자 제조조건 및 연료봉 고유진동수를 고려하여 수직력 $20 \pm 1\text{N}$, 미끄럼 진폭 $14 \pm 1 \mu\text{m}$, 진동수 30Hz로 설정하고 상온/공기 중에서 300,000cycle동안 시험을 수행하였다. 프레팅마멸 특성시험에서는 연료봉 시편과 지지격자 스프링 상호 간의 축 방향 및 횡 방향의 미끄럼이 있을 때를 구분하고, 또 연료봉 시편에 접촉하는 부분의 스프링 형상이 오목, 볼록 또는 편평할

때 각각의 경우에 따른 마멸의 정도를 분석하였다. 프레팅마멸 시험에서 얻은 마멸부위는 표면 거칠기 측정장비로 마멸궤적과 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 그림 7에 정리되어 있으며 그림 7에서 보면 다중스프링 부착 지지격자, H형 스프링 부착 지지격자, X형 스프링 부착 지지격자 등의 순서로 참조용 지지격자에 비해 프레팅마멸 성능이 우수하며 회전유동날개 부착 지지격자 및 바가지형 지지격자는 불리한 것으로 나타났다.[8]

2.7 산업재산권 확보

특성비교시험에 사용된 5종의 고유 형상 지지격자 중에서 H형 스프링 부착 지지격자와 회전유동형 날개부착 지지격자가 미국 및 대한민국에 특허등록이 되었고 나머지 형상들은 특허심사중에 있다.

2.8 종합평가

기계/구조적 특성비교시험 결과와 산업재산권 확보가능성을 고려할 때 H형 스프링 부착 지지격자가 우리 고유의 지지격자로 유력한 것으로 판단된다. 특히 스프링 성능을 향상시킬 수 있도록 형상최적화 기법으로 스프링 형상을 개량하고 부가적으로 냉각성능효과를 향상시키기 위해 회전유동날개를 부착하면 우리 고유의 지지격자가 신핵연료의 특징으로 제시될 수 있다.

3. 결론

핵연료집합체 기계설계경험을 바탕으로 하고 외국의 새로운 핵연료 특징 및 특허자료들을 면밀히 검토하여 특허분쟁이 되지 않을 것으로 기대되는 경수로용 핵연료의 고유모형 지지격자 형상 여러 종을 고안하였고 고안된 고유 지지격자 형상 5종에 대하여 스프링 시편 및 5x5형 부분 격자체 시편을 제조하여 고유 후보모형들의 기계/구조적 성능비교시험을 수행하였다. 성능비교시험결과를 분석한 결과 전반적으로 H형 스프링 부착 지지격자가 기계/구조적 성능이 우수할 뿐만 아니라 산업재산권 확보도 유리하여서 스프링 형상을 보완하고 냉각성능효과를 증대되도록 혼합날개를 부착하면 신연료의 특징으로 제시될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. *Fuel Presentation to KNFC*, Westinghouse Presentation Material, 1996.
2. R. B. Stout et al., "Presentation to KAERI on Siemens Fuel Group and the HTP Fuel Design," 1995.
3. *TURBO and Korea*, ABB-CE Presentation Material, 1996.
4. S. Abeta et al., "Design and Performance of Mitsubishi PWR Fuel for Increased Reliability," Proceedings of the 1997 International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, March 2-6, 1997, pp. 309-317.
5. 윤경호 외 3인, "지지격자 스프링/딴플의 기계적 특성시험 및 유한요소해석," KAERI/TR-1763/2001, 한국원자력연구소, 2001.
6. 윤경호 외 3인, "측면 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴거동 해석," KAERI/TR-1569/2000, 한국원자력연구소, 2000.
7. 강홍석 외 4인, "진동시험에 의한 지지격자체의 지지성능분석", KAERI/TR-1738/2001, 한국원자력연구소, 2001.
8. 김형규 외 3인, "핵연료봉 프레팅마멸의 시험분석", KAERI/TR-1702/2000, 한국원자력연구소, 2000.

표 1 후보 지지격자의 지지성능 시험결과

NO.	Grid Type	Displacement (mm)	1st Natural Frequency(Hz)
1	H	0.179	36.1
2	회전유동형	0.21	26.5
3	바가지형	0.028	41.4
4	다중 스프링	0.109	30.4
5	참조 지지격자	0.198	36.0

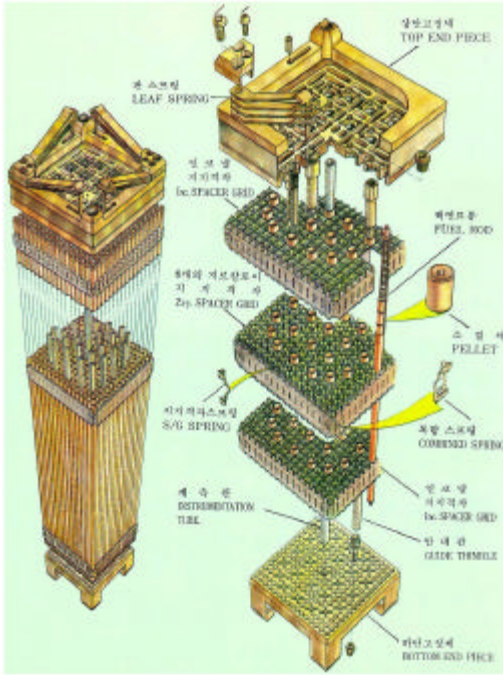


그림 1 핵연료집합체 개략도

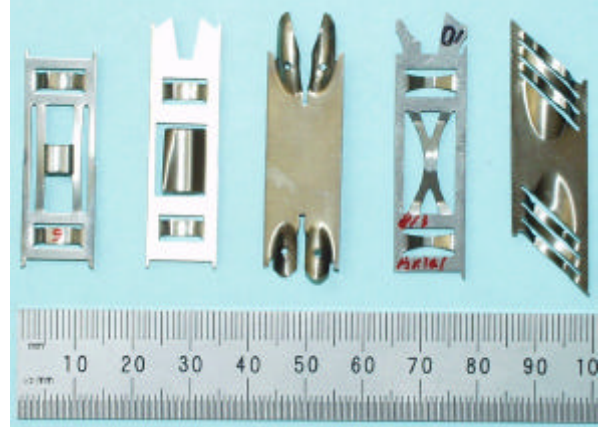


그림 2 고유 후보모형들의 스프링 시편

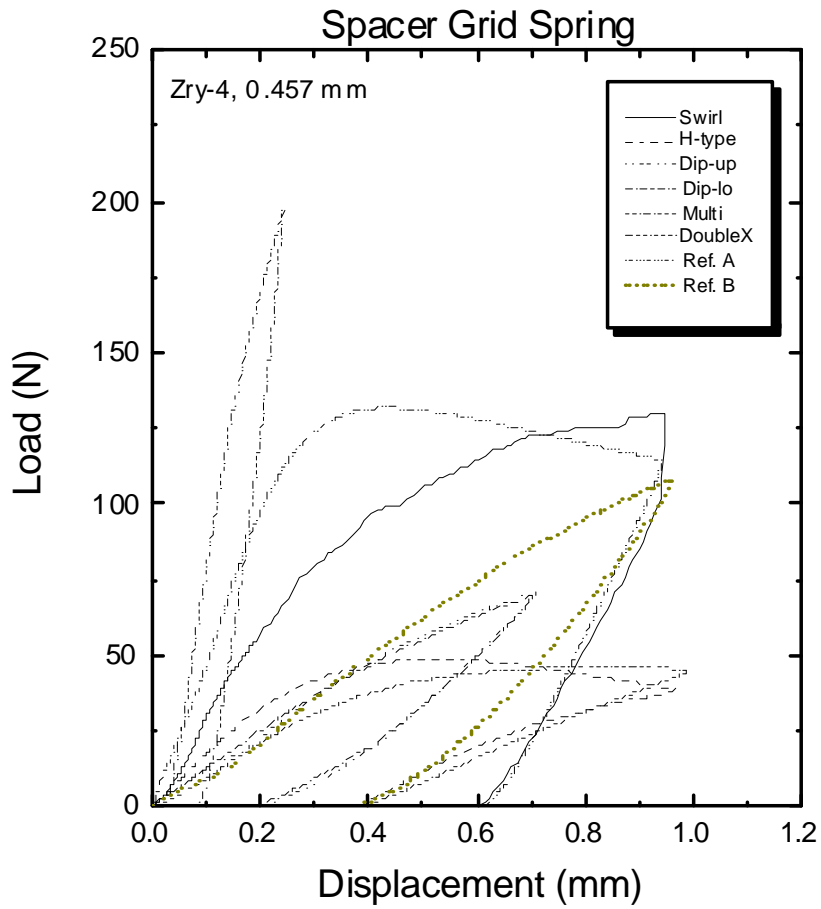


그림 3 후보모형 지지격자 스프링의 특성시험 결과

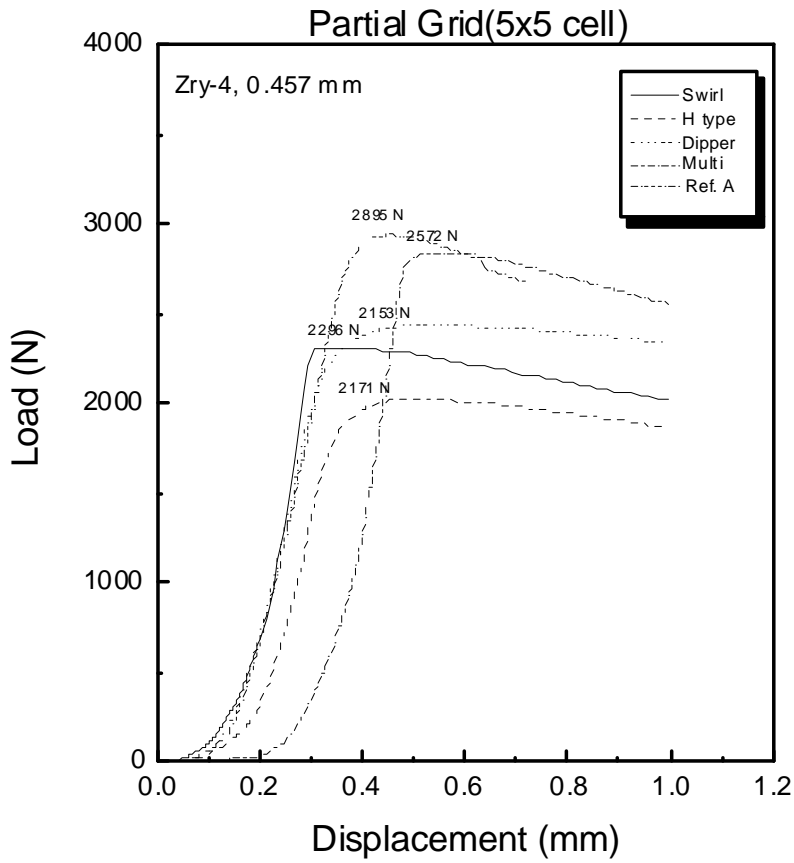


그림 4 후보모형 부분 격자체에 대한 정적 좌굴시험 결과

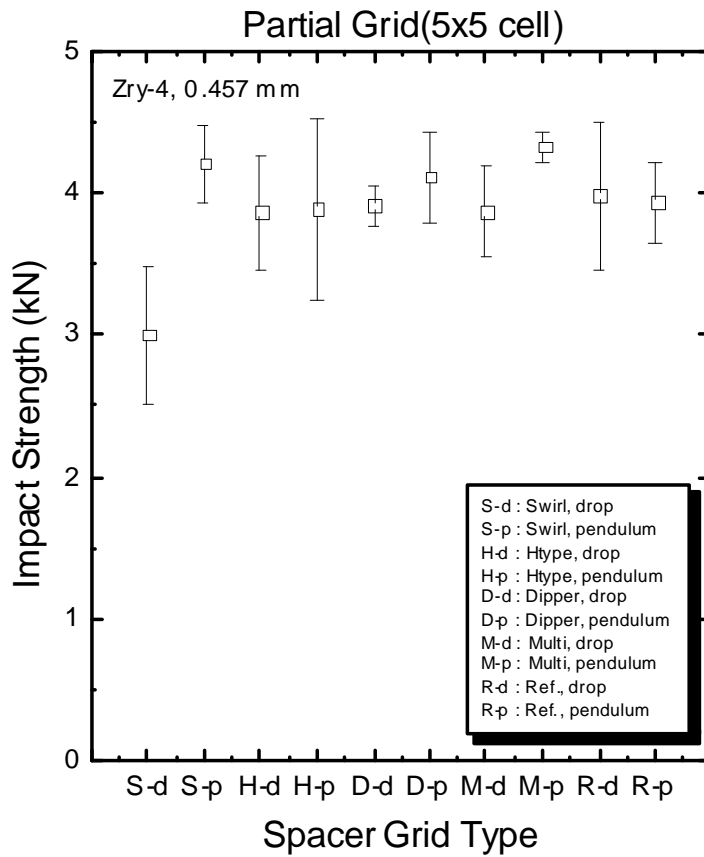


그림 5 후보모형 부분 격자체의 충격시험 결과

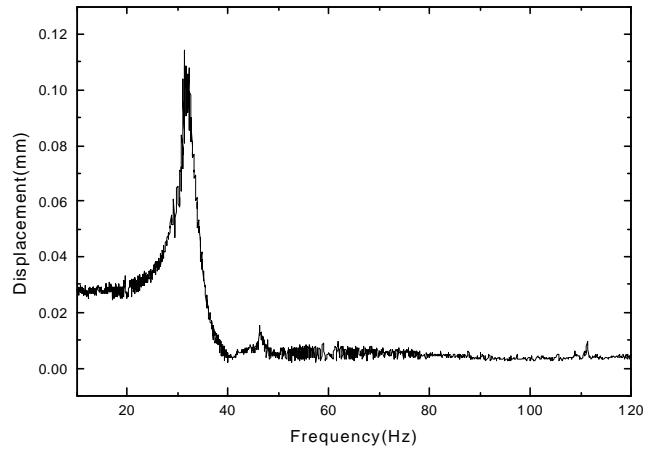


그림 6 주파수 영역으로 변환된 진동 변위

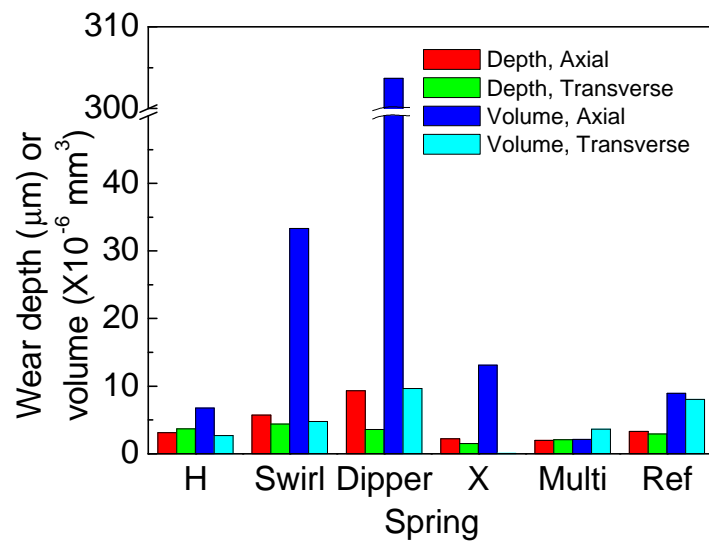


그림 7 각 스프링의 프레팅마멸 시험결과