2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국표준형 개량핵연료 중간 지지격자 고주파 진동 특성

High Frequency Vibration Characteristics of Advanced Fuel Assembly (PLUS 7) Mid Grid

김용환, 장영기, 권정택, 김규태, 김재원
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

한국표준형에 사용되고 있는 경수로용 핵연료 성능을 개량하기 위하여 개량핵연료(PLUS7)를 개발하였다. PLUS7 개량핵연료의 성능을 검증하기 위하여 PLUS7 연료에 대해 열적, 수력적, 기계적 시험 등의 광범위한 노외실증 시험을 수행하였으며, 그 결과 기존연료에 비해 열적 성능향상, 고연소 성능향상, 중성자 경제성 향상, 집합체 내진 성능 향상, 프레팅마모 저지 성능 향상, 이물질 여과 성능향상 및 연료의 생산성 향상 등 크게 7가지 성능이 향상된 것으로 평가되었다. 본 논문에서는 프레팅마모 성능과 관련된 개량핵연료 중간지지격자 설계 및 지지격자판의 고주파 진동 특성 시험에 대해서 기술하였으며, 5x5 시편을 제작하여 유동시험을 수행한 결과 개량핵연료의 지지격자판의 고주파 진동 특성이 매우 우수한 것으로 평가 되었다.

Abstract

An advanced fuel assembly (PLUS 7) for Korea Standard Nuclear Plants was developed to enhance in reactor performance. This PLUS7 fuel assembly was reviewed the reactor performance for all structural components and conducted various out of pile test. The PLUS 7 fuel have seven outstanding benefits against the current STD fuel, which include thermal margin increase, high burnup capability, neutron economy enhancement, seismic resistance improvement, reduced fretting wear susceptibility, enhanced debris filtering efficiency and

increased fuel productivity. This paper described mid grid design and high frequency vibration (HFV) characteristics which related with fretting wear failure. 5x5 PLUS 7 mid grid VISTA loop test shows very good HFV performance. It will be reduced fretting wear failure susceptibility with conformal spring and dimple design.

1. 서 론

한국표준원전에 사용되고있는 경수로용 핵연료는 1980년대 미국에서 개발된 핵연료로서 영광3,4호기 건설 시 국내에 도입된 핵연료서 핵연료 보증연소도 43,000 MWD/MTU(batch연소도)로서 효율적인 장주기운전 및 원전의 운전성과 안전성 향상을 위해서는 핵연료의 열적 성능 향상을 위하여 핵연료 개발이 시급한 실정이었다. 따라서 한전원자력연료(주)는 이러한 기존핵연료의 성능향상의 시급성을 감안하여 50,000 MWD/MTU (batch연소도)이상의 연소도 및 기존연료 대비 10%이상의 열적 성능 향상을 목표로 개량핵연료 개발을 추진하였다. 또한 개발된 핵연료의 내진성능 향상을 위해 기존연료보다 지지격자의 좌굴강도를 현저하게 증가(4,500 lb 이상) 시킬 목표로 개발을 착수하였다.

또한 개량핵연료 지지격자는 이러한 열적 성능 향상 및 좌굴 강도의 향상 뿐 아니라 집합체의 진동 감소, 기존연료와의 수력적 양립성, 그리고 제조비용의 감소 등 그리고 약 20종의 지지격자 설계기준을 동시에 만족하여야 하는 등 각종 설계변수는 서로 연계되어 있다.

본 연구에서는 이러한 여러 가지의 설계 변수 및 설계목표를 충족시켜가는 과정 중 지지격자의 설계와 핵연료집합체, 핵연료봉 진동 및 연료봉 마모손상 특히 핵연료 지지격자판의 고주파 진동 등의 관점에 대해서 논의 하고자 한다.

2. 본 론

가. 중간 지지격자 설계 및 Modal 해석

개발 착수 초창기에 참조 지지격자설계로서 기존 국내에서 사용하고 있는 17x17 핵연료의 대각선형 스프링 지지격자를 고려하였으나, 지지격자 스프링에 의한 수력적 Unbalance 작용력과 고주파 진동 특성 때문에 개량핵연료 지지격자 후보모형에서 제외하였다. 그러나 대각선 스프링의 지지격자가 기존 국내 및 미국의 발전소에서 광범위하게 핵연료가 연소 되고 있는 점을 고려하여 후보모형의 평가시 비교 대상으로 사용하였다.

개발 초창기에 지지격자 후보모형으로 10여종의 지지격자 개념을 후보설계로 평가하였으나 수력적 하중 및 모멘트 평형, 압력강하 증가 정도, 좌굴강도의 만족여부, 그리고 열적성능의 만족도, 기타 핵연료 개발 성능목표 만족도 및 제조성을 고려하여 평가, Trade-Off한 결과 다이아몬드형 스프링 및 면접촉(Conformal Contact) 형 지지격자 설계를 주후보(후보모형 7 및 8)로 선정하고 설계 최적화 작업을 수행하였다. 후보모형 7 및 8 중 지지격자판의 창(window) 의 크기 지지격자 스프링의 접촉부의 크기 및 접촉 형태에 따라서 다시 구체적으로 최종 5종의 후보를 정하고 각 개념에 대한 FEM 해석 및 Modal 해석을 수행하였다. 그림 1은 중간 지지격자판의 후보모형 중 8-1-d-2에 대한 Mode Shape을 보여 주고 있으며 표 1은 각 후보별 Modal Frequency를 보여주고 있다.

나. 유동시험 수행

VISTA(Vibration Investigation of Small-scale Test Assembly) 유동시험 목적은 PLUS7 개량핵연료의 후보모형 및 최종설계에 대해서

- 개량핵연료 지지격자판의 원자로 유동영역에서 HFV(High Frequency Vibration) 특성 파악
- 지지격자의 Cell Size, Vane 유무, 스프링 Window 유무, Strap Chamfer 및 Spring Coin, Internal Intersection 용접 유무에 따른 고주파 진동 특성 파악
- LASER Vibrometer에 의한 Slot의 상하 방향, 외부 Strap Dimple/Spring Forming, 내부 및 외부 스프랩의 유동장 차이에 의한 진동 특성

비교를 목적으로 여러가지 시편 및 시험조건을 조합하여 광범위한 유동시험을 수행하였다.

Test Bundle 제작

시험용 시편은 후보모형 각 5종(최종 시험시는 최종설계 모형 1종)에 그림 2에 보인 바와 같이 국내에서 지지격자판을 Stamping 하고 Westinghouse사의 상용 LASER 용접시설을 이용하여 5x5 지지격자체를 제작 하였다. 시험용 Test Bundle은 그림 3에서 보인 바와 같이 9.5 mm 핵연료봉과 Accelerometer 등을 이용하여 Test Bundle을 조립하였다.

유동시험 장치 및 진동 신호 계측

유동시험기의 유량은 Variable Frequency Pump drive의 Remote dial에 의해서 조정되며 유속은 10ft/s에서 25ft/s까지 1ft/s간격으로 유랑을 조절해 가며 시험을 수행하였다. 유동시험장치의 전체적인 구조도 및 Flow Diagram은 그림 4와 같다.

지지격자판의 진동계측은 여러 가지 독립적인 방법에 의해서 측정되고 각기 다른 상호 계측방법에 의해서 진동 주파수의 일치여부를 검증하였다. 첫째로 마이크로폰을 이용한 진동소음을 측정하여 각주파수대역별로 분석하였다. 둘째는 LASER Vibrometer를 이용하여 각 지지격자위치를 바꿔가면서 지지격자 판의 각 위치별 진동 Frequency 및 진폭을 직접 계측하는 방법이다. 본 논문에서는 이 Vibrometer로 측정한 진동특성을 주로 논의하고자 한다. 셋째는 Test Bundle에 장착한 25개의 연료봉 중에서 중앙에 장착한 Accelerometer에서 측정된 x-, y- 방향의 진동 신호를 분석하여 주파수 및 진폭을 Vibrometer와 비교하는 것이다. 마지막으로 Flow Housing외벽의 4번 지지격자 위치에 장착한 두개의 Housing Accelerometer에서 계측된 진동정보를 이용하여 Housing 자체의 진동과 지지격자의 진동신호를 주파수 대역별로 분석하는 방법을 사용하였다. 그림 5는 지지격자판의 고주파 진동을 측정한 4번 지지격자 중앙 평면에서의 진동 측정용 각 센서의 위치를 보여주고 있다.

다. 후보모형 유동시험결과 분석

1 차로 후보모형 5종에 대해서 여러 가지 조합으로 약 10 ft/s에서 25ft/s 까지 유동시험을 수행한 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 국내 및 외국에서 광범위하게 사용하고 있는 17x17 V5H에 비해서 상대적으로 작은 진동 특성을 나타났으나 유속이 약 18ft/s이상에서 약간의 진동이 존재하는 것을 관찰하였다. 진폭이 V5H 보다는 작기는 하지만 원자로 운전영역(17.2 ft/s) 부근에서 약간의 진동이 있음으로 가

능한 원자로 운전 영역에서 진동을 피하기 위한 설계 수정을 수행키로 하였다. 후보모형의 보다 상세한 지지격자판 고주파 진동특성을 파악하기 위해서 그림 7에서 보는 바와 같이 지지격자 위치(Location) 별 진동 Frequency 및 Amplitude를 상세하게 측정하여 나갔으며, Vane의 유무, 셀 사이즈별, Window 크기별, Slot 방향 별, 그리고 중간 부분의 용접 여부별 및 기타 진동 감소를 위한 여러 가지 대안 들에 대해서 보다 체계적이고 광범위한 VISTA Test를 수행하였다. 여기서는 그 중에서 지지격자 Cell Size 별 지지격자판의 고주파 진동 민감도 시험결과를 그림 8과 같이 대표적으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 지지격자 스프링과 연료봉간의 Gap 의 크기나 스프링의 변위에 따라서는 미미한 차이는 있으나 고주파 진동 특성 자체는 크게 바뀌지 않음을 알 수 있다. 그리고 지지격자 Vane의 유무 및 스프링 Window유무 및 크기에 따른 민감도 시험을 수행 한 결과 이들의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 고주파 진동이 지지격자판 자체의 진동임을 간접적으로 설명하여 준다. 따라서 PLUS 7 후보모형의 운전영역 부근에서 발생하는 미미한 진동을 제거하고자 후보모형의 고주파 진동 시험결과를 토대로 설계 수정 작업을 착수하였다.

라 최종설계 및 시험결과 분석

후보모형에 대한 다양한 VISTA 시험결과를 바탕으로 고주파 진동은 지지격자판 자체의 진동임을 파악하고 지지격자판의 진동 Frequency를 유동시험 결과에서 나타난 유체유동 가진 Frequency로부터 멀리 벗어나게 하기 위해서 여러가지 설계 조합을 변경하는 노력을 하였다. 대표적으로 지지격자 좌굴강도 향상을 위해서 후보모형에는 있었던 중간의 Internal Intersection Welding을 제거하여 지지격자판의 Frequency를 낮추고 스프링의 폭을 증가 시키고 좌굴강도 목표를 맞추기 위해서 지지격자 폭을 당초 1.5 인치에서 1.62인치로 증가 시키고 스프링 Window를 감소시켜서 지지격자 좌굴 Bearing Width를 약 30 % 향상 시켰다. 그리고 이러한 설계 모형에 대해 Modal 해석을 수행한 결과 1차 Modal Frequency(In Air)가 당초 후보모형의 약 4,000 Hz 에서 1,300 Hz로 감소하였다.

1차 후보모형 중 Internal Intersection 용접만을 제거 하였을 때가 Modal 해석 결과 약 1,200 Hz였는데 이때 후보모형의 VISTA Scoping Test에서 진동이 매우 작게 나타나서 설계 변경된 지지격자판이 고주파 특성이 좋을 것이라 판단, 최종설계를

확정하고 PLUS 7 최종설계 Test Bundle를 제조 하였다. 최종설계도 후보모형과 동일하게 지지격자판은 국내의 지지격자판 제조 협력 업체인 ㈜ 진영정기의 Stamping 시설을 이용하고 5x5 지지격자 Bundle을 Westinghouse사의 양산시설을 이용 양산과 동일한 품질관리 절차를 거처서 제작하고 후보모형 제작 시와 동일한 방법으로 VISTA용 Test Bundle을 제작하였다.

최종설계에 대한 VISTA Test를 수행한 결과를 그림 9에 나타내었다, 그림 9는 또한 최종설계에 대한 지지격자판의 Configuration을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 PLUS 7 최종설계는 고주파 진동 특성이 기존의 17x17 V5H 및 OFA 연료에 비해 매우 작을 뿐 아니라 개량핵연료의 운전영역의 유속인 (16.2 ft/s ~ 18.9ft/s)의 전영역에서 아주 작은 Background 진동만을 나타내 원자로 운전 시 고주파 진동 특성이 다른 설계에 비해 매우 우수 할 것으로 평가 되었다.

3. 결 론

전술한 바와 같이 PLUS 7 핵연료는 지지격자 혼합날개 및 지지격자 스프링/딤플 설계를 수력적으로 Balance을 이루도록 설계하여 집합체 진동이 매우 작고 지지격자판의 고주파 진통 특성이 매우 우수하여, 내마모성 향상을 위한 지지격자 스프링 및 딤플의 면 접촉 스프링 설계와 함께 연료봉 내 프레팅 마모 성능이 매우 우수한 것으로 나타났다. 그림 10은 PLUS 7 개량핵연료의 집합체 진동 시험결과이며, 본 논문에서는 언급하지 않았으나 500 시간 장기 내구성 시험결과 PLUS 7 핵연료봉의 프레팅마모량이 매우 작아서 PLUS 7 개량핵연료의 진동특성의 양호함과 지지격자 면접촉 설계의 연료봉 내마모성이 우수함이 입증되었다.

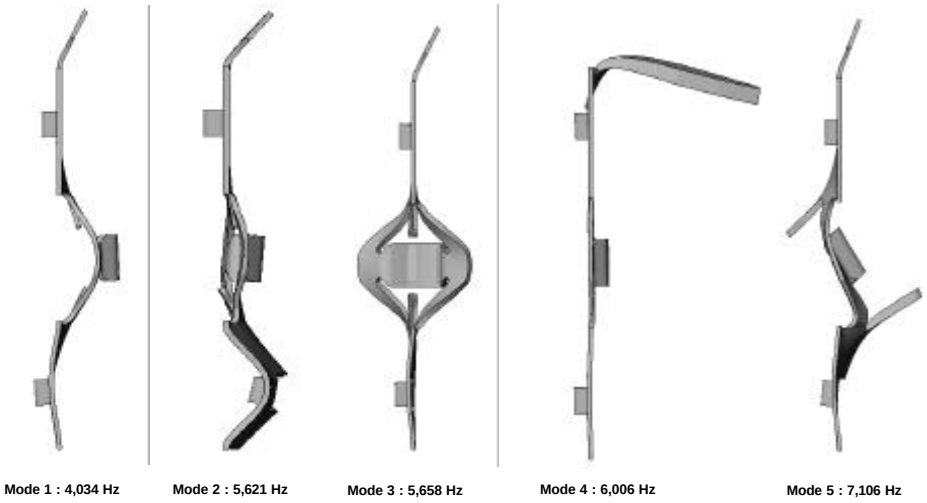

그림 1. Mid Grid Strap Vibration Mode Shape

표 1. 각 후보모형별 Modal Frequency 해석 결과 (In Air)

단위 : Hz

Concept	Model	R -V-Frq *)	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
1	7-1	1.96	4,714.8	5,646.1	5,994.0	6,018.4	10,276.0
2	7-1-a-40	1.75	4,196.0	5,603.9	5,747.1	6,005.5	10,018.0
3	8-1	1.96	4,699.0	5,672.2	5,990.2	5,998.4	10,245.0
4	8-c-4	1.62	3,893.4	4,513.8	5,531.1	5,733.6	6,007.1
5	8-1-d-2	1.68	4,033.8	5,621.1	5,658.3	6,005.9	7,106.4
Ref	V5H	1.20	2,886.7	5,531.3	6,068.0	7,598.2	10,779.0

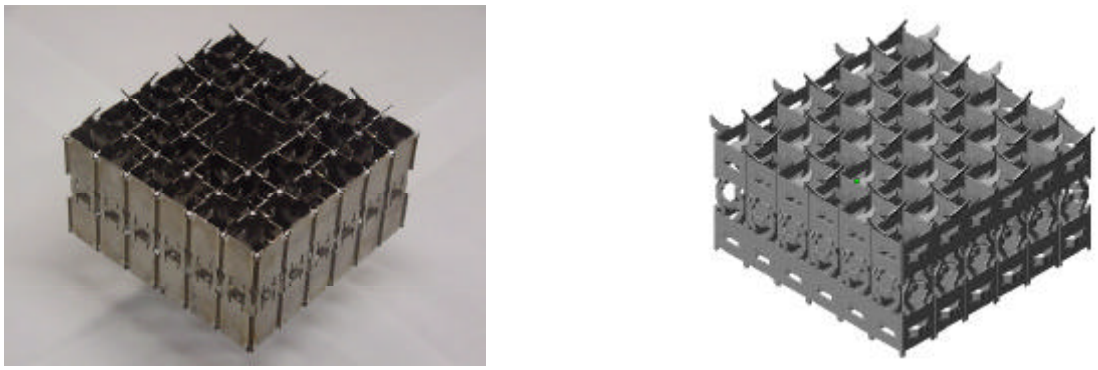

그림 2. VISTA 고주파진동시험을 위한 PLUS 7 지지격자체 모형

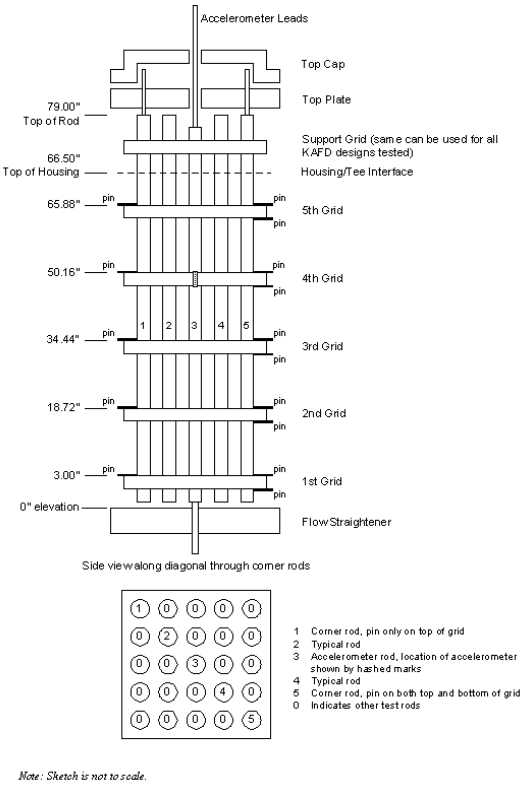

그림 3. VISTA 고주파진동시험용 Test Bundle 구성도

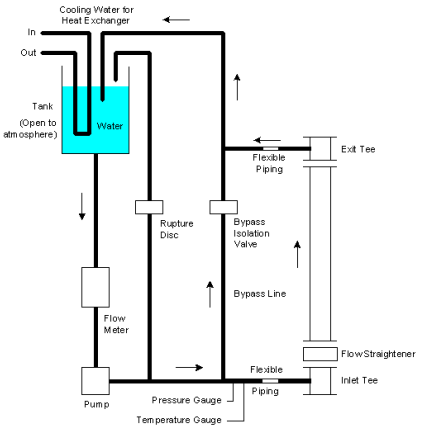

그림 4. VISTA LOOP FLOW Diagram

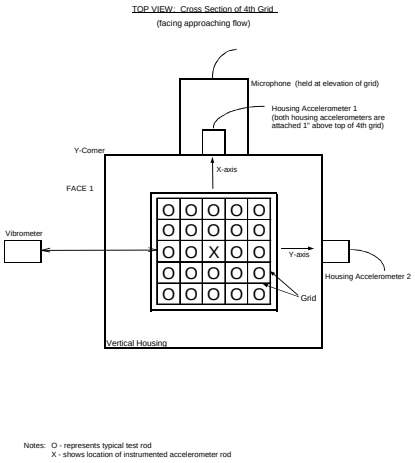

그림 5. 진동 측정용 센서의 위치

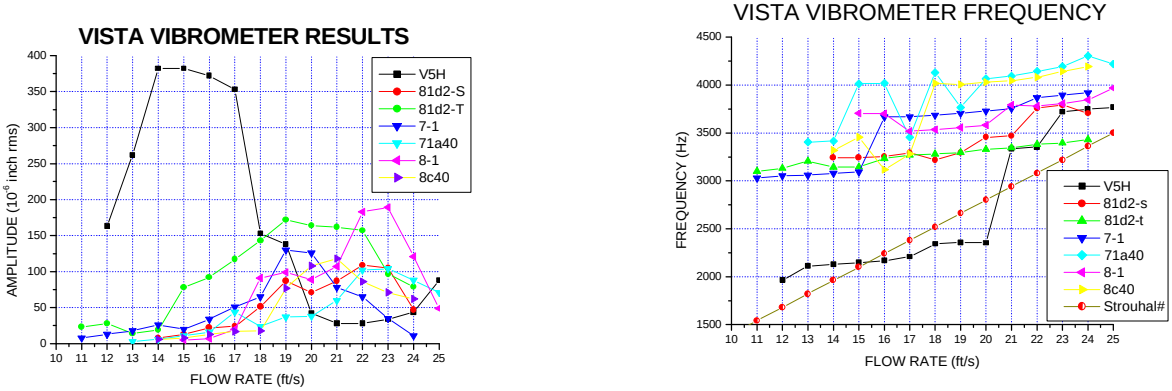

그림 6. 후보모형 VISTA VIBROMETER TEST 결과

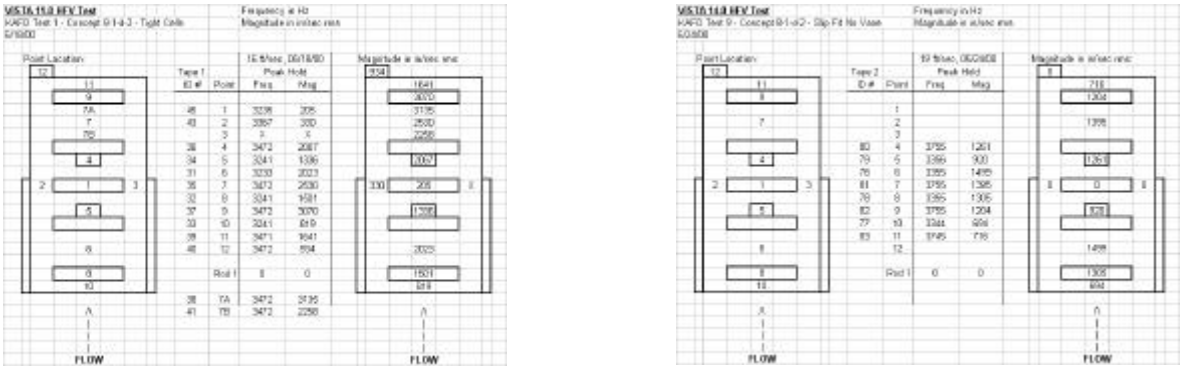

그림 7. VIBROMETER를 이용한 지지격자판 위치별 진동특성 결과

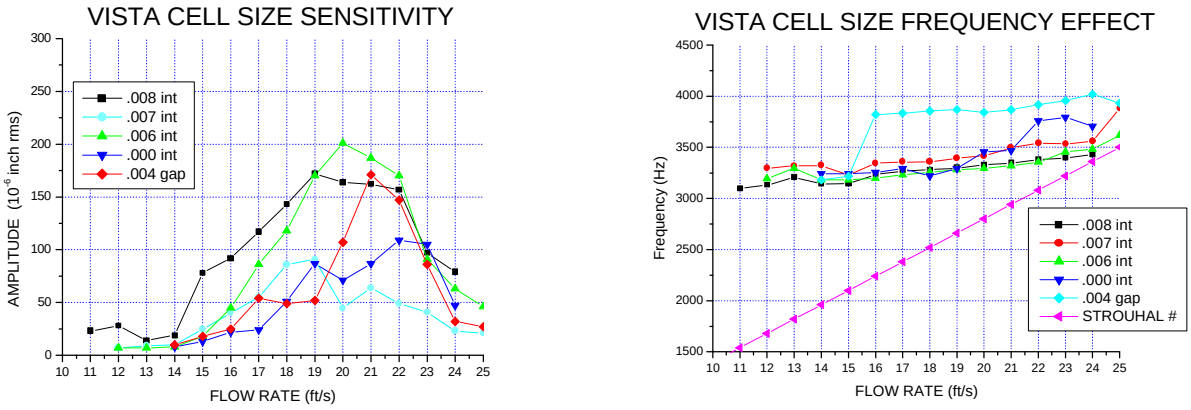

그림 8. 연료봉/지지격자간 Gap별 진동 민감도 시험 결과

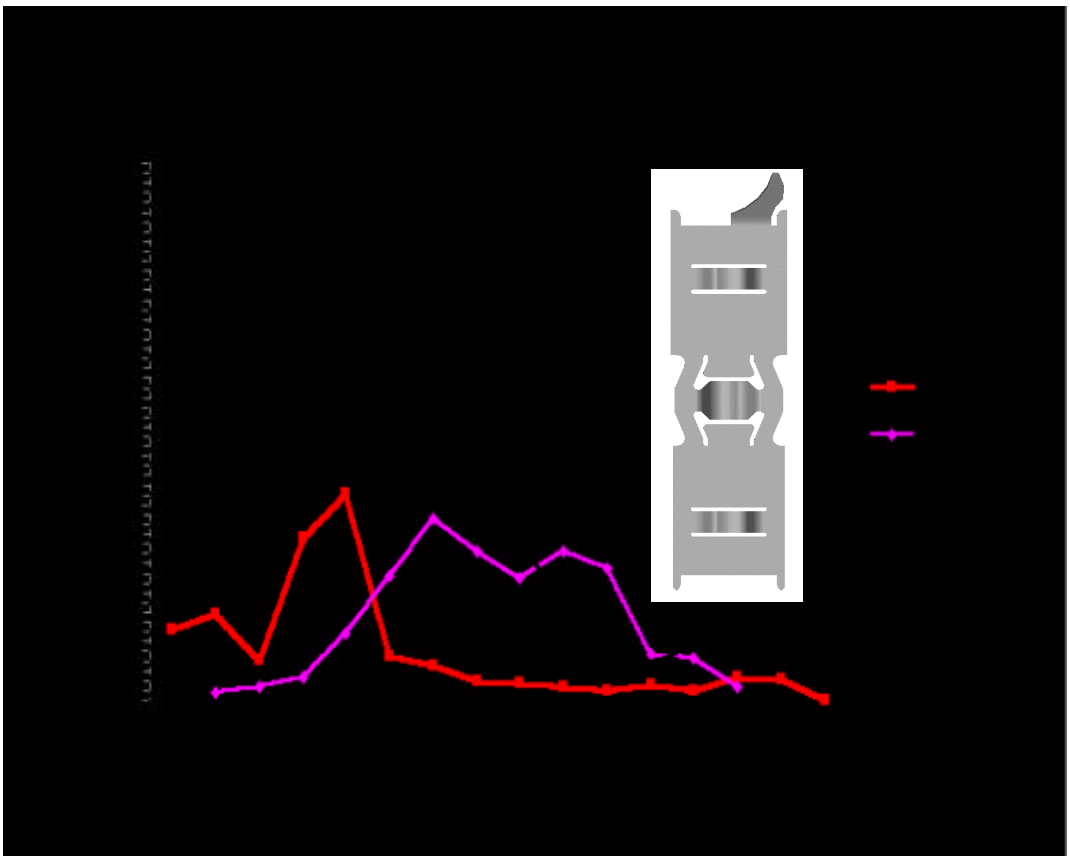

그림 9. PLUS 7 최종설계 지지격자판 고주파 진동시험결과

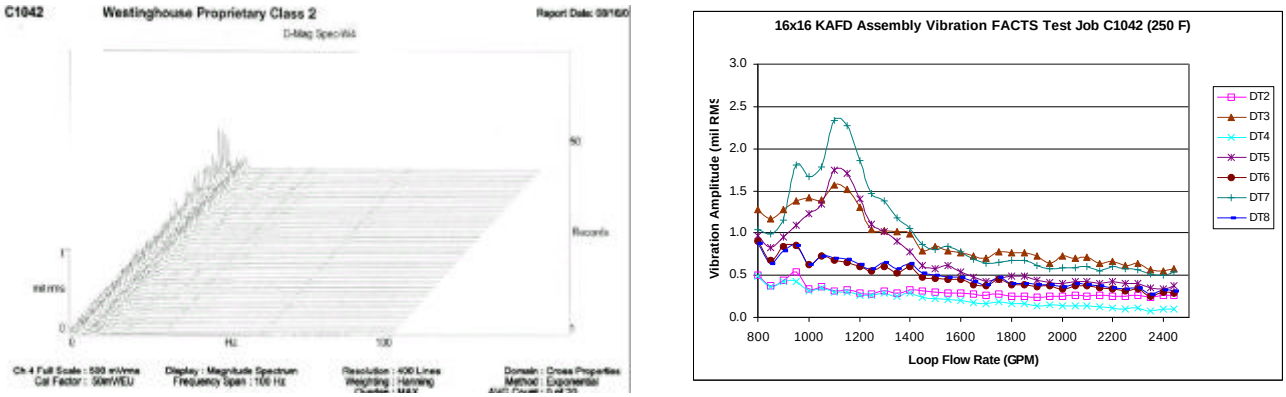

그림 10. PLUS 7 최종설계 집합체 진동시험결과