한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp.82~87.

경수로 핵연료집합체 진동의 실험적 고찰

An Experimental Study on PWR Nuclear Fuel Assembly Vibration

장 영 기*·김 규 태**·조 규 종***

Young Ki Jang, Kyu Tae Kim and Kyu Zong Cho

Key Words : Nuclear Fuel Assembly Vibration (핵연료집합체 진동), Hydraulic Test Facility (수력시험설비), Inductive Displacement Transducer (유도변위변환기), Linear Variable Differential Transformer ( )

ABSTRACT

Nuclear fuel with a big slenderness ratio is susceptible to flow-induced vibration under very severe conditions of high temperature, high flow and exposure to irradiation in nuclear reactor. The fuel assembly should, therefore, be designed to escape any resonance due to the vibration during the reactor operation, in particular, in case of the design changes. In addition, the amplitudes due to the grid vibration, the fuel rod vibration and the fuel assembly vibration should be minimized to reduce the grid-to-rod fretting wear. Fuel assembly vibration tests in air at room temperature and in water at high temperature have been performed to investigate fuel vibration behaviors. The frequency and damping during the test in air have been compared to those in water. Through the hydraulic test, the advanced assembly has been evaluated not to be susceptible to any resonance. In addition, the test data from the tests can be used to make fuel model and to evaluate grid-to-rod fretting wear.

1. 서 론

핵연료집합체 (이하 "집합체") 는 원자로내에서 핵분열 결과 발생하는 열을 냉각재에 전달하는 핵연료봉과 이를 지지함으로써 구조적 기능을 수행하는 골격체로 구성되어 있다. 골격체는 원자로내의 구조물과 간섭을 이루는 상하단고정체와 제어봉/계측봉을 안내하기 위한 안내관/계측관 그리고 핵연료봉을 일정한 배열을 유지할 수 있도록 지지하기 위한 지지격자로 구성되어 있다. Fig. 1 은 한국표준원전용으로 개발한 개량 핵연료집합체를 보이고 있다. 직경이 약 10 mm 이하이고 길이가 4 m 이상인 핵연료봉뿐만 아니라 폭이 약 20 cm 이고 길이가 약 4.5 m 인 집합체는 고온 및 고속의 냉각재 분위기 속에서 진동을 받기 쉽다. 원자로내에서 유체에 의해 발생되는 진동으로는 저주파수대에 발생하는 집합체 진동, 중주파수대의 핵연료봉진동, 고주파수대의 지지격자판의 진동등을 들 수 있다[1]. 그러므로 핵연료는 원자로내에서 정상운전시 공진이 발생하지 않아야 하며, 진동에 의해 발생할 수 있는 마멸을 최소화하기 위해서는 핵연료봉 진동 및 지지격자의 진동뿐만 아니라 집합체의 진동 또한 낮게 유지되어야 한다.

핵연료봉은 지지격자 스프링과 미끄럼이 허용되면서 지지되고 있으므로 집합체는 매우 비선형 거동을 보이고 있다. 그러므로 핵연료의 성능을 평가하기 위해서는 실험에서 얻은 특성을 모사하도록 해석적인 모델을 만든 후 외력을 가함으로써 핵연료의 거동을 분석하고 있다. 본 연구에서는 집합체의 공진여부를 평가할 뿐 아니라 지지격자와 핵연료봉사이의 마멸성능 평가를 위한 기초자료 생산 및 집합체 해석모델 작성을 위해 수행한 집합체의 진동실험에 대해 고찰하고자 한다. 현재 한국표준원전에 공급하고 있는 핵연료에 비해 경제성 및 안전성을 향상시키기 위하여 개발한 개량핵연료에 대해 수행한 상온대기 및 고온수력 실험을 토대로 경수로용 핵연료집합체의 진동 거동에 대해 살펴보고자 한다.

* KEPCO Nuclear Fuel Co., Ltd.
E-mail : ykjang@knfc.co.kr
Tel : (042) 868-1882, Fax : (042) 868-1889

** KEPCO Nuclear Fuel Co., Ltd.

*** Chonnam National University

2. 상온 대기중 집합체 진동실험

2.1 대기중 진동실험 장치

상온 대기중에서 수행한 집합체의 강제진동실험 및 자유진동실험을 통하여 집합체의 고유진동수, 모드형상 및 구조적 모드감쇠비를 구할 수 있다. 이들은 원자로온도 및 냉각재의 영향을 고려한 후 지진/냉각재 상실사고를 모사하기 위한 집합체 모델생성을 위해 사용된다. 집합체를 시험대에 수직으로 세우고 핵연료를 지지하는 상하부 하드웨어는 원자로내의 조건과 유사하도록 제작하여 설치한다. 상하단고정체 및 각 지지격자위치에 LVDT 를 설치하여 변위를 측정한다. 강제진동 실험시에는 쉐이커를 집합체 중심부의 지지격자 위

치에 설치하고 하중을 부가함으로써 고유진동수 및 모드형상을 구한다. 반응도가 작은 모드에서의 고유진동수를 찾기 위해서 쉐이커를 이웃한 지지격자로 이동하여 시험을 수행한다. Fig. 2 는 집합체의 강제진동시험 장치를 보인다. 강제진동시험 후 중심부의 지지격자위치에 설치한 LVDT 를 제외한 모든 LVDT 를 제거하고 쉐이커 대신 수력펌프에 의해 구동되는 실린더를 설치하여 이를 이용하여 초기변위를 가한다. 원하는 초기변위를 가한 후 자유진동이 발생하도록 갑자기 제거함으로써 집합체 진동의 시간응답을 구할 수 있는데 이를 이용하여 고유진동수 및 모드감쇠비를 구한다.

2.2 대기중 진동 실험

강제 진동실험동안 쉐이커를 이용하여 조화하중을 가하며 15 ~ 25 분동안 2 Hz 에서 50 ~ 100 Hz 까지 대수 Sweep 또는 균일 Sweep 실험을 수행하였다[2]. 쉐이커의 입력과 LVDT 의 출력은 디지털 테이프에 저장하였고 스펙트럼 분석기를 이용하여 분석하였다. 또한 쉐이커의 하중을 변화시켜가며 실험을 수행함으로써 변위에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보았다.

Sweep 실험을 통해 얻은 고유진동수에 맞추어 진동시험을 수행함으로써 그 진동수에서의 모드형상을 구하였다.

강제진동실험동안 집합체의 기계적 모드감쇠비는 각 실험의 반응 스펙트럼 응답으로부터 첨두진폭법에 의해 얻었다.

자유진동실험동안 집합체 중앙에 변형을 가한 다음 갑자기 제거함으로써 중앙부의 변위를 추적하였다. 이를 분석하여 1 차 모드에 대한 고유진동수를 구하였으며 모드감쇠비는 대수감소법을 이용하여 구하였다.

3. 고온 수중 집합체 진동실험

3.1 수중 진동실험 장치

유체에 의한 집합체의 진동을 고찰하기 위하여 미국 웨스팅하우스사가 보유하고 있는 수력시험설비를 이용하였다. Fig. 3 은 이 실험설비의 개략도를 보이고 있는데, 유체는 펌프에 의해 가열되어 열교환기를 통해 일정한 온도로 유지되면서 시험부내의 집합체 하부로 들어가 집합체를 통과한 후 상부로 나와 순환하게 된다. 압력은 121 °C 에서 증기가 발생하지 않도록 유지한다. 유체에 의한 집합체의 거동은 비접촉식 유도변위변환기 (이하 변환기)와 가속도계를 삽입한 계측봉을 이용하였다. 계측봉에 장전할 2 축 가속도계는 변환기와 같은 높이에 위치시키고 핵연료봉과 진동거동이 유사하도록 상하부에 텅스텐으로 채워 제작한다.

집합체를 포함하고 있는 하우징의 지지격자 위치에 변환기를 설치하고, 집합체의 지지격자 위치에 목표물을 부착하였다. 유체에 의해 집합체가 움직일 때 발생하는 변위차를 진폭으로 변환함으로써 유체에 의한 집합체의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다.

변환기를 이용하여 얻은 집합체의 거동을 확인하기 위하여 변환기와 동일한 높이에 2 축 가속도계가 장착되도록 Fig. 4 와 같은 계측봉을 제작하여 실험연료봉 위치에 삽입하였다. 집합체 진동시 가속도계에서 얻은 신호를 2 회 적분함으로써 변위를 구하여 비교하였다.

3.2 수중 진동 실험

유체에 의한 집합체의 진동거동을 고찰하기 위하여 펌프를 이용하여 냉각수를 121 °C 로 가열한 후 약 6~7 분에 걸쳐 181.7 m^3/hr(800 GPM)에서 시작하여 최대 유량인 554.2 m^3/hr (2440 GPM)에 도달할 때까지 Sweep 시험을 수행하였다[3]. 이는 한국표준형원전 최적유량의 117%에 해당하므로 이 집합체가 원자로내에서 공진이 발생하는지를 확인하는데 충분하리라 생각된다.

Sweep 시험을 완료한 후 정상유동실험을 수행하였다. 이 실험에서는 181.7 m^3/hr 에서 시작하여 11.4 m^3/hr (50 GPM) 간격으로 554.2 m^3/hr 에 도달할 때까지 증가시키며 수행하였다. 각 실험동안 자료는 변위모드 및 가속도모드로 저장되고 스펙트럼 분석기를 이용하여 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 대기중 집합체 진동시험

Fig. 5 는 대기중에서 수행한 Sweep 진동시험의 대표적인 결과로써 여섯번째 지지격자 위치에 쉐이커를 설치하고 20 lb 의 Sine 하중을 가하였을 때 그 지지격자에서의 최대변위가 발생하기 때문에 이를 통하여 집합체의 고유진동수를 구할 수 있다. 여섯번째 지지격자위치에 쉐이커를 설치하였을때는 짝수모드의 진폭이 낮게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 다섯번째 지지격자위치로 쉐이커를

이동 설치하여 같은 실험을 반복하였다. 이 때 짝수모드의 진폭이 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 6 은 하중 또는 변위에 따른 진동수 변화를 보이고 있는데, 하중 또는 변위가 클수록 고유 진동수는 감소함을 보이고 있다.

Sweep 시험을 통하여 각 모드에서의 고유진동수를 구한 다음 그 고유진동수에 맞추어 진동시험을 수행함으로써 모드 형상를 구할 수 있는데 Fig. 7 은 대표적인 정규화된 모드형상을 보이고 있다. 이때 위상은 Visicorder 응답을 이용하여 확인할 수 있다. Fig. 8 은 첨두진폭법에 의해 변위에 대한 각 모드에서의 감쇠를 나타냈는데 집합체의 구조적 모드감쇠비는 변위가 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

집합체 중앙에 변위를 가한 후 갑자기 제거하였을 때의 자유진동으로 인한 시간 응답을 얻을 수 있는데 이들로부터 집합체의 1 차모드에 대한 진동수 및 모드감쇠비를 구할 수 있다. 자유진동실험에서 얻은 고유진동수 역시 변위가 클 때 감소하는 것을 볼 수 있었으며, 강제진동에서보다 약간 낮은 값을 얻었다. 강제진동시험에서와 같이 변위의 증가에 따라 모드감쇠비 역시 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 유사한 값을 얻을 수 있었다 (Fig. 9).

4.2 집합체 수중 진동실험

Fig. 10 는 181.7 m^3/hr 에서 554.2 m^3/hr 에 도달할 때까지의 Sweep 시험의 대표적인 3 차원 Waterfall 그림으로 8 번째 지지격자에 부착된 변환기를 통해 얻은 그림이다. 이 그림으로부터 낮은 유량에서 다소 불안정이 일어나는 것을 볼 수 있으며 정상적인 원자로 운전 유량에서는 공진이 일어나지 않고 안정함을 볼 수 있다.

181.7 m^3/hr 에서 시작하여 554.2 m^3/hr 에 도달할 때까지 11.4 m^3/hr 씩 증가시키면서 수행한 정상유동시험은 Fig. 11 에 보인다. 이는 Fig. 10 에서와 유사하게 낮은 유량에서 상대적으로 다소 진폭이 클 뿐 운전유량에서는 안정됨을 볼 수 있다. 여기서 총체평균제곱근은 신호처리 분석기를 이용하여 0 Hz ~ 100 Hz 에 대해 변환기의 주파수응답 스펙트럼에서 얻어진다. 이와 같이 얻은 총체평균제곱근으로 나타낸 진폭은 시간 응답이나 Fig. 12 의 케적그림의 더블피크 진폭의 약 20% 에 해당된다. 변환기에서 얻은 신호로부터 스팩트럼 분석을 통하여 고유진동수를 찾을 수 있는데, 이는 대기중에서 얻은 고유진동수에 비해 약 20% 감소하였다.

5. 결 론

핵연료집합체의 대기중 진동실험 및 수력진동실험을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 집합체의 수력시험을 통하여 개량 핵연료집합체는 운전유량에서 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

(2) 대기중 집합체 강제진동 및 자유진동실험에서 얻은 진동수는 변위가 커짐에 따라 감소하며 모드감쇠비는 증가함을 볼 수 있는데, 이는 변위가 클 때 핵연료봉과 지지격자사이에 미끄럼 발생으로 기인됨을 알 수 있다,

(3) 121 °C 의 수력실험을 통하여 얻은 진동수는 유체의 부가질량등으로 인하여 대기중에서 얻은 진동수에 비해 약 20% 감소함을 볼 수 있었다.

(4) 혼합난류에 의한 핵연료집합체의 더블피크 진폭은 스펙트럼분석기를 통하여 얻은 총체평균제곱근의 약 4.5 ~ 6.5 배 큰 것으로 나타났다. 이는 조화함수의 경우에 비해 약 2 배 큰 것으로 나타났다.

후 기

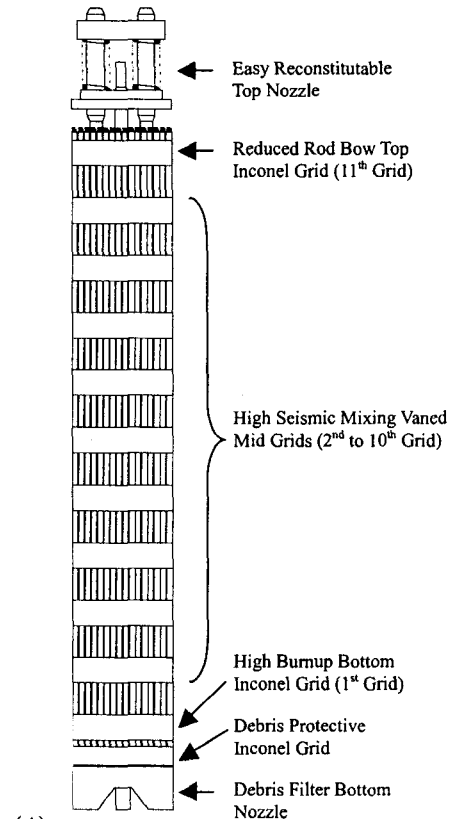
본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 한국표준원전용 개량핵연료 노내검증시험 및 평가기술개발 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Y. K. Jang et al, 2003, "An Experimental Study on the Vibrations and Grid-to-Rod Fretting Wear in PWR Fuel", Proceedings for the Korean Nuclear Spring Meeting.

(2) Y. K. Jang, 2002, "16x16 KAFD Fuel Assembly Mechanical Test Report – Final Verification Test", KNFC/Westinghouse Joint Development Product.

(3) Y. K. Jang, 2001, "FACTS Fuel Assembly Vibration Test Report – 16x16 KAFD", KNFC/Westinghouse Joint Development Product.



(4)

Fig. 1 Advanced Nuclear Fuel Assembly

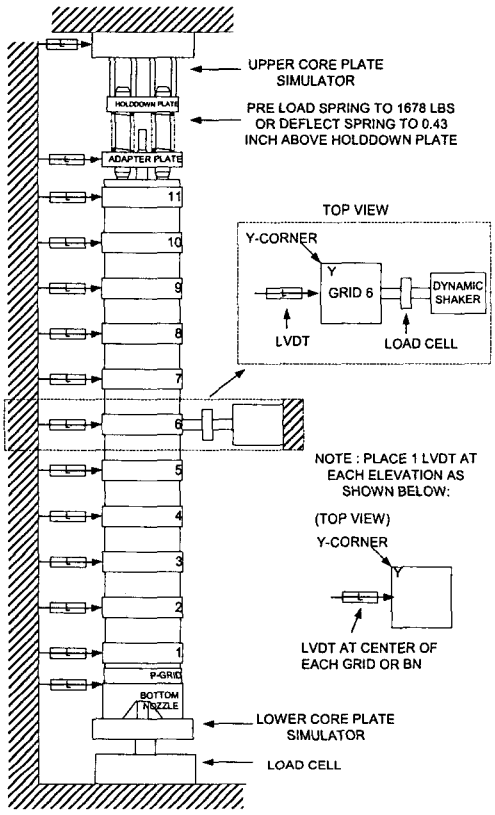


Fig. 2 Fuel Assembly Forced Vibration Test Arrangement

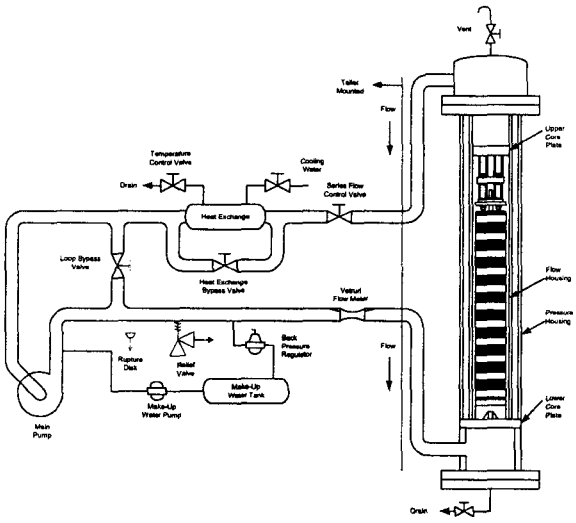


Fig. 3 Hydraulic Loop Flow Diagram

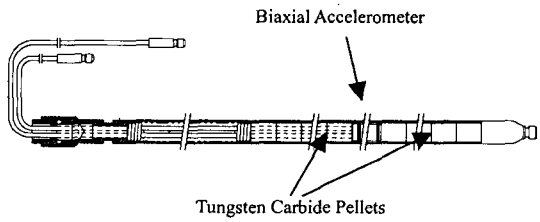


Fig. 4 Instrumented Rod Assembly

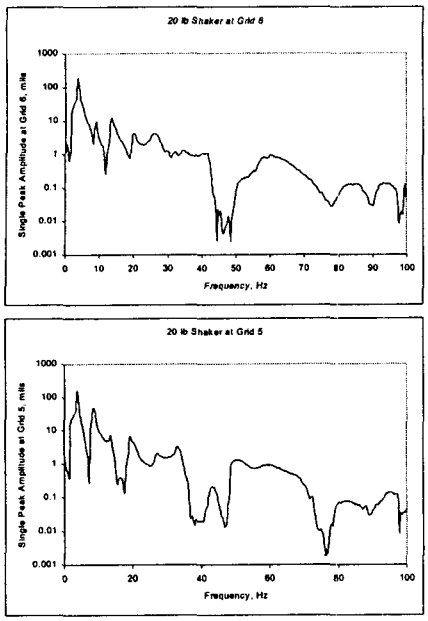


Fig. 5 Typical Spectrum Analyzer Traces During Fuel Assembly Forced Vibration

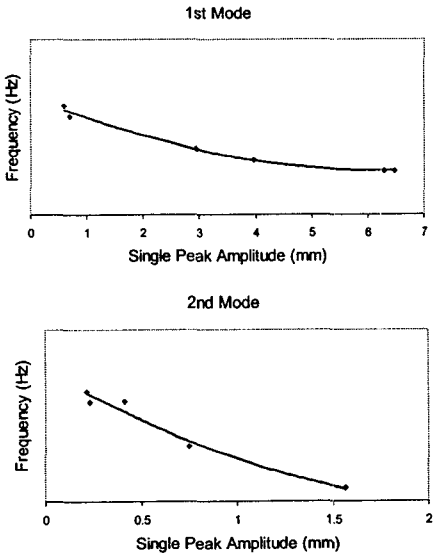


Fig. 6 Natural Frequencies for 1st and 2nd Mode vs. Single Peak Amplitude During Fuel Assembly Forced Vibration

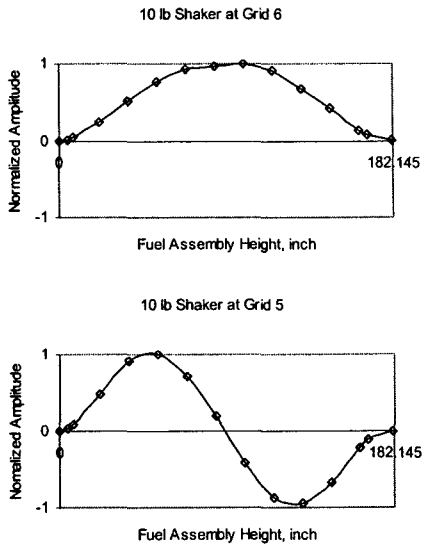


Fig. 7 Normalized Mode Shapes for 1st and 2nd Modes During Fuel Assembly Forced Vibration

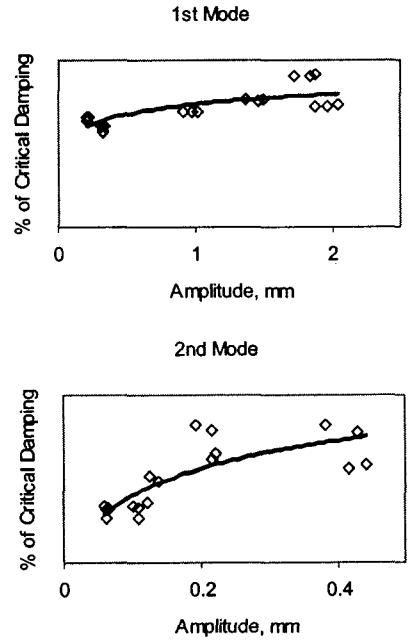


Fig. 8 Damping for 1st and 2nd Modes During Fuel Assembly Forced Vibration

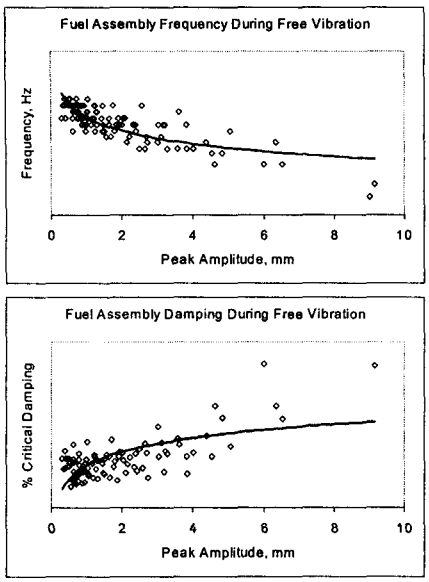


Fig. 9 Natural Frequency and Damping vs. Grid 6 Peak Amplitude for Fundamental Mode During Fuel Assembly Free Vibration

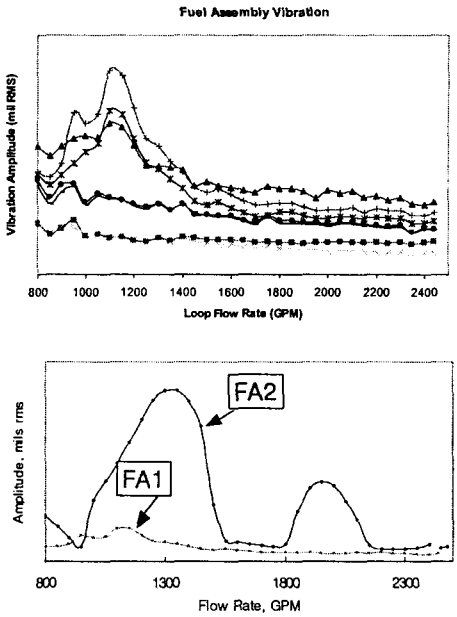


Fig. 11 Fuel Assembly Vibration Amplitude vs. Flow Rate During Fuel Assembly Hydraulic Test

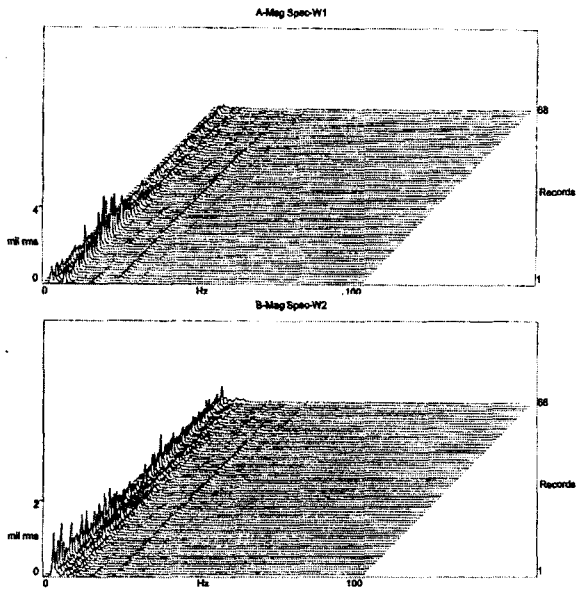


Fig. 10 Displacement Transducer Waterfall Plots at Grid 8 During Fuel Assembly Hydraulic Test

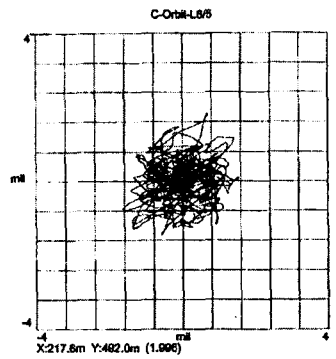


Fig. 12 Displacement Transducer Orbit Motion Plot at Grid 8 at 2200 GPM During Fuel Assembly Hydraulic Test