한국소음진동공학회 2009년 추계학술대회논문집, pp.305~306

실린더 관 삽입형 진동 측정센서 개발 : 성능시험 및 교정

Sensor Development for Cylindrical Tube Vibration : Performance Testing and Calibration

이강희†·강흥석*·이영호*·오동석*·김형규*

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Young-Ho Lee, Dong-Seok Oh

1. 서 론

노 내 핵연료의 동특성과 동적거동을 이해하는 것은 핵연료의 성능을 개량하거나 손상을 분석하는데 필요하다. 핵연료는 핵분열 물질인 우라늄이 장입된 가느다란 관을 여러 개의 지지격자체로 묶어 조립된 사각 봉다발의 구조를 갖으며, 봉과 봉사이의 부수로 유동영역으로 고온 고압의 냉각재가 빠르게 유동하여 핵연료에서 발생된 열을 2차 측 증기발생계통으로 전달한다. 이러한 냉각재의 축방향 유동에 의하여 노 내 핵연료는 주로 난류기인 유동유발진동을 하게 되며, 작은 진동이지만 핵연료 수명동안 지속되면 피복관 표면에 프레팅 마멸과 같은 치명적인 손상을 발생시킬 수 있다.

한국원자력연구원은 지식경제부의 연구비 지원을 받아 핵연료 열수력 및 유동유발진동 성능시험시설(PLUTO : Performance Test Facility for Fuel Assembly Hydraulics and Vibrations)을 구축하였다. PLUTO는 천이노심에서 이웃하는 두 다발 실물크기의 핵연료를 대상으로 수력적 양립성과 내구성을 종합적으로 평가하는 시험시설(핵연료 사용인허가용 데이터 수집)이며, 정상 및 과도조건에서 시험 집합체와 구성 연료봉의 유동유발 진동을 정량적으로 측정하게 된다.

한편, 고온 고압의 원자로 열수력 조건에서 시험되는 핵연료 봉의 유동유발 진동을 측정하기 위한 진동센서는 크기 및 성능과 가격 면에서 여러 가지 제한사항을 갖고 있다. 기존의 압전 세라믹 재료를 이용한 상용센서는 성능 관점에서 고온 및 고압환경의 적용에 한계성을 갖으며(극한 환경용으로 개발된 진동센서는 환경절연을 위하여 몸집이 크다), 외국에서 생산되는 일부 가용한 센서도 비평화적 핵활동과 군사적인 도용을 의심받아, 수입/수출이 자유롭지 못하고, 수입 가능하더라도 성능에 비하여 크게 고가이다. 아울러, 압전형 가속도 센서는 자체적인 기능의 한계로 인하여 핵연료 봉과 같은 세장비가 큰 유연 구조물의 저주파 진동을 효과적으로 측정하기 어려운 단점을 갖는다.

† 이강희; 한국원자력연구원
E-mail : leekh@kaeri.re.kr
Tel : (042)868-2298, Fax : (042) 863-0565

* 한국원자력연구원, 선진핵연료기술개발부

본 논문은 고온 고압의 원자로 열수력 조건에서 시험될 핵연료 봉의 횡방향 유동유발 진동을 저비용으로 효율적으로 측정하기 위한 진동센서에 관한 것으로, 고온 적용에 대한 상용 압전형 가속도계가 갖는 한계를 극복하고, 고압조건에 따른 엄격한 밀봉개념을 적용하여, 핵연료 봉 내부로 삽입시킨 후, 핵연료 봉의 저주파수 대역의 횡방향 진동응답을 효과적으로 측정하기 위한 “저비용-고성능-삽입형-진동센서”에 관한 것이다. 센서의 기본구조에 대해 기술하고, 계측요소를 제작하여 간단한 성능시험과 교정을 수행하였으며, 그 결과에 관해 기술한다.

2. 진동센서 기본구조

2.1 측정환경 및 요건

원자로 열수력 조건에 놓인 시험용 핵연료 다발에서 특정 연료봉의 횡방향 진동을 측정하기 위하여, 봉 내부로 삽입되는 진동센서의 측정환경 및 요건은 아래와 같다.

- 냉각재 분위기(설계기준) : 250 °C, 0.4 MPa로 가압된 순수
- 내경 8.3 mm 이하의 튜브 내부로 삽입 가능한 구조
- 진동 측정부 압력차폐 및 수밀유지
- 연료봉 내부와 하우징의 압력경계를 지나 시험용기 밖으로 신호선이 인출 가능한 구조.

2.2 기본구조

개발된 진동센서는 8.3 mm 내경을 갖는 압력 관의 내부로 삽입가능토록, 실린더 형태의 하우징에 끝단 혹은 중심질량을 갖는 외팔보 혹은 양단고정 보와 고온용 스트레인게이지(strain gauge)로 구성된 복수의 계측요소(sensing element)를 설치하고 밀봉하여, 2축 혹은 다축으로 실린더형 구조물의 진동을 측정하는데, 진동변위의 측정은 “끝단질량 혹은 중심질량의 관성력 발생-보 굽힘 변형-스트레인 센서의 저항 변화-관성력 추정”의 원리를 이용하고 있다. 신호변환을 위하여 half bridge로 구성된 스트레인게이지의 3가닥 출력 단자는 압력관을 통하여 연료봉과 시험용기 외부로 인출되고, 계측요소 및 센서하우징, 봉단 마개를 통과할 때 1차, 2차의 엄격한 밀봉(압력차폐 및 수밀) 개념이 적용된다.

3. 성능시험

3.1 계측요소 제작

그림 1와 같이, 끝단 질량을 갖는 외팔보의 고정부 가까이(최대 변형예상 위치)에 고온용 스트레인게이지를 부착한 시험용 계측요소를 제작하였다. 두 개의 strain gauge를 보의 상/하면에 부착하고, half bridge를 구성하여, 보의 진동과 변형에 따른 스트레인게이지 변형율 응답을 보의 고정부에 대한 진동응답으로 환산하였다.

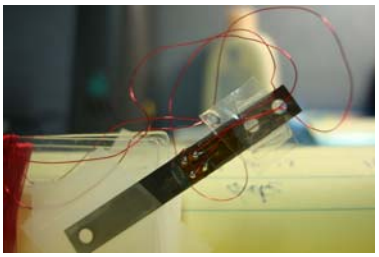

그림 1. 계측요소 제작.

3.2 예비성능시험

계측요소의 예비 성능시험에 이용된 가속도 센서 간이교정기(hand calibrator)의 가진 주파수와 크기는 각각 정현파 159.2 Hz 및 1 g (9.8 m/s^2)으로 고정되어 있다. 이것을 센서 고정부의 가진 변위로 환산하면, 대략 half peak기준 10 ㎛에 해당한다. 그림 2에서 LDV로 측정한 계측요소 끝단의 기준 진동변위는 -10~10 ㎛로 측정되고 있으며, 계측요소의 스트레인게이지로부터 측정된 전압신호 역시 기준 값과 유사한 시간이력과 동일한 위상을 나타내고 있다. 다만, 가진기가 정지된 이후의 기저신호에서 일정한 크기의 잡음신호가 포함되어 있음을 알 수 있다.

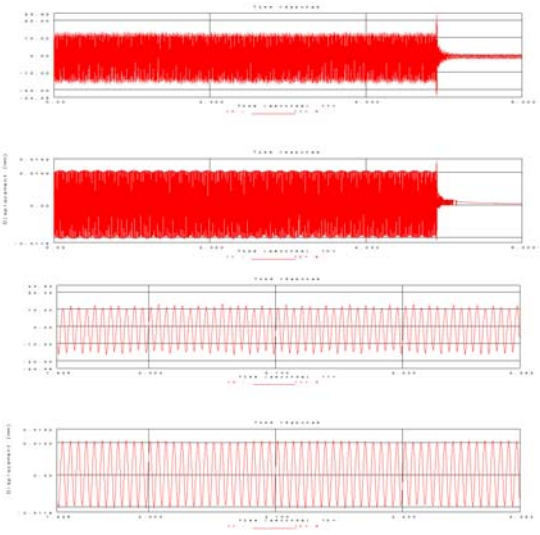

그림 2. 기준(하) 및 계측(상)신호의 시간응답.

그림 3는 정현파 가진 응답에 해당하는 부분을 포리에 변환(Fourier Transform)하여 얻은 기준신호와 계측신호는 응답스펙트럼을 나타낸다. 기준신호와 계측신호의 두 응답 스펙트럼은 잡음성분을 제외하고, 일치하며, 계측신호에 포함된 잡음은 전원노이즈(60 Hz)와 조화성분(180, 300, 420 Hz)임을 알 수 있다.

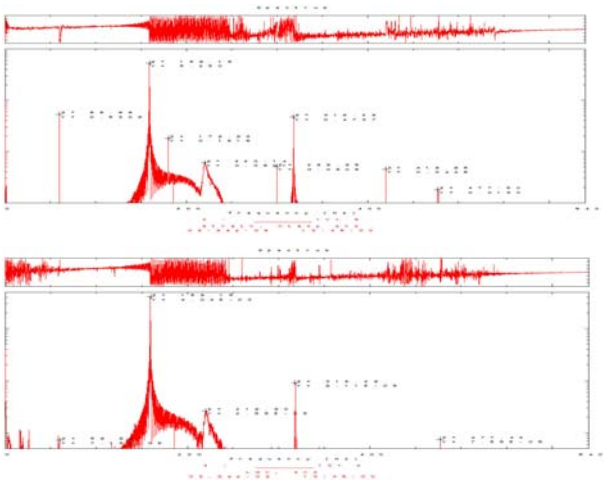

그림 3. 기준 및 계측신호 응답스펙트럼.

3.3 간이교정

계측요소로부터 측정된 전압신호를 기준신호의 진동변위에 대응되는 값으로 환산하기 위해, 계측신호에 포함된 잡음신호를 적절히 필터링(filtering)할 필요성이 있다. 필터링된 신호를 근거로 기준신호와 1:1로 비교하여, 회귀방정식의 비례상수를 결정할 수 있었다. 교정오차는 +/- 5 % 미만으로 추정된다.

4. 결론 및 요약

원자로 열수력 시험조건에서 핵연료봉의 횡방향 진동을 측정할 수 있는 저비용 진동센서의 기본구조에 대해 기술하고, 계측요소를 제작하여 간단한 성능시험과 교정을 수행하였으며, 그 결과에 관해 기술하였다. 향후, 시험봉 내부 압력 차폐를 위한 하우징 및 연결단자의 설계와 이에 대한 성능시험이 필요하며, 실제 시험에 적용하기 이전에 상용센서와의 성능비교 및 충분한 검증작업이 요망된다.

후 기

이 논문은 지식경제부의 재원으로 시행하는 전력기반조성사업센터의 전력산업연구개발사업으로 지원받았습니다.(연구과제 코드:R-2005-1-391)