

'98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## CANFLEX 연료봉 다발의 수중 진동특성

박진석, 정장환, 김복득

한국원자력연구소

### 요 약

CANFLEX 연료봉 다발의 3000 시간 내구성 시험 기간 동안 속도센서를 사용하여 압력관 내부에 장전된 연료봉 다발의 진동을 측정하였다. 압력관 내부에 장전된 연료봉의 진동측정은 고온, 고압, 그리고 공간적 제약 때문에 가속도계나 스트레인 게이지 같은 접촉센서로는 측정할 수 없다. 비접촉 센서를 사용하면 이러한 난점을 해결하고 압력관 내부에 장전된 연료봉 다발의 진동을 측정할 수 있다. 속도센서는 비접촉 센서로서 가우스(gauss)의 크기를 감지하여 전압을 출력하는 센서이지만, 측정거리, 주파수, 그리고 속도와 가우스가 비선형이기 때문에 교정을 한 후에 사용하여야 한다. 본 논문에는 속도센서의 교정방법과 압력관 내부에 고온, 고압의 유체가 흐를 때 발생하는 연료봉 다발의 진동특성을 구하였다.

### 1. 서론

압력관 내에 장전된 연료다발은 유동유인진동이 생기며 그 진동형태는 연료다발 자체의 진동(집합체 진동), 연료다발 로킹(연료다발이 좌우로 움직이는 진동형태), 그리고 연료다발을 구성하고 있는 43 개의 연료봉 자체의 진동(연료봉 진동)으로 구분할 수 있다. 압력관 내부의 고온, 고압 조건에서 발생하는 연료다발은 외부와 완전히 격리되어 있기 때문에 가속도계(accelerometer) 혹은 스트레인 게이지(strain gauge)와 같은 접촉 센서로 연료다발의 진동신호를 수집할 수 없다. 가속도계는 압력관 내부에 장착할 공간이 없으며, 가속도계에 있는 선(line)의 밀폐가 어렵다. 그리고 스트레인 게이지는 높은 온도에서 사용할 수 있는 것을 구하기 어렵고 가속도계와 같이 선의 처리가 어렵다. 이러한 난점을 극복할 수 있는 비접촉 센서인 마그네틱 센서(magnetic sensor)를 사용하면 압력관 내의 고온, 고압, 공간제약, 그리고 선 처리 문제들이 해결되기 때문에 연료다발의 진동신호를 측정할 수 있다. 그러나 마그네틱 센서는 진동신호 크기와 센서의 출력전압 관계가 선형이 아니다. 그러므로 측정영역의 범위 내에서 이들의 관계가 선형이 되는 상수를 구하기 위한 교정을 하여야 하며, 이 상수를 교정상수라고 한다. CANFLEX 연료집합체 진동을 측정하기 위해서 속도센서(3030HTB : Electro 회사에서 제작)를 사용하였다. 속도센서는 진동물체에서 감지되는 가우스(gauss)의 변화를 전

압의 변화로 출력하는 마그네틱 센서의 일종이다. 가우스는 측정물체와의 거리, 속도, 주파수에 따라 비선형으로 변한다. 그러므로 측정하고자 하는 조건(거리, 속도, 주파수)에 맞는 범위에서 교정상수를 구한 후 사용하여야 한다. AECL에서는 마그네틱 센서를 교정한 경험과 필요한 계측기, 각종 장비들을 보유하고 있기 때문에 이곳에서 CANFLEX 연료집합체 진동측정용 속도센서를 교정하였다. 본 보고서에는 속도센서의 교정방법, 교정절차를 자세히 설명하였으며 교정상수(calibration constant)를 사용하여 압력관 내부에 장전된 연료다발의 진동을 측정 및 분석하였다.

## 2. 속도센서의 교정

속도센서의 교정에 필요한 장비로는 가진기(shaker), 가우스 미터(gauss meter), 기준 가속도계(reference accelerometer), 신호분석기(signal analyser), 속도센서, 그리고 고정 및 이송장치로 구성된다(사진 1). 가진기에 기준가속도계를 고정하고 그 연장선에 알루미늄 막대를 연결하고 알루미늄 막대의 끝(사진 1에서 가속도계가 고정된 반대편)에 마그네트를 부착한다. 알루미늄 막대를 연결하는 이유는 가진기의 자계가 교정하고자 하는 속도센서의 자계에 영향을 주지 않기 위한 조치이다. 그리고 알루미늄 막대에는 마그네트가 들어갈 만큼의 크기인 구멍을 내고 그 속에 마그네트를 넣어 부착한다. 이 때 왁스(wax)를 사용하여 마그네트를 부착한다. 속도센서는 아래와 위쪽으로 움직일 수 있고 좌우로도 움직일 수 있는 장치에 고정시킨 후 필요에 따라서 좌·우의 위치를 조정할 수 있도록 하였다(사진 2(a), 사진 2(b)). CANFLEX 연료집합체는 압력관 내부에 장전되기 때문에 사진 2(c)와 같이 압력관의 두께와 재질이 같은 조각 밑에 마그네트가 위치하도록 측정장치를 구상한 후 속도센서를 마그네트의 바로 위쪽에 움직이지 않게 고정한다. 교정에 사용된 속도센서의 구조와 원리는 그림 1과 같으며, 자속(magnetic flux)의 변화로 도체에 유도되는 기전력(electromotive force) 원리를 이용한 것이다. 속도센서를 고정시킨 후에 마그네트가 부착된 물체의 움직임으로 자속의 변화에 따라 출력되는 전압은 다음 식과 같이 나타난다.

$$e = -N \cdot c$$

여기서,  $c$ =시간당 자속의 변화(change in magnetic flux)/(unit time)

$e$ =전기유도력

$N$ =코일감김수

부호가 서로 다른 것은 전기유도력의 방향이 서로 반대인 것을 나타내며, 시간당 자속의 변화가 마그네트의 속도에 비례할 때 우리는 이 센서로 진동하는 물체의 속도를 측정할 수 있다.

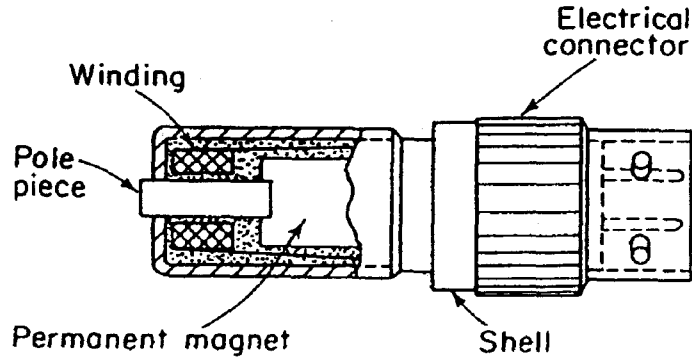


그림 1 속도센서의 구조

### 3. 교정상수의 특성

속도센서의 출력에 영향을 주는 변수로는 속도센서와 마그네트 사이의 측정거리(가우스 크기), 측정 주파수, 측정속도가 있다. 이들 각각의 변수가 속도에 미치는 영향을 조사한 후 교정상수를 구하여 연료다발의 진동특성을 구하는 데 사용하였다. 교정상수는 센서에서 출력되는 전압과 속도가 선형적으로 변하는 정도를 나타낸다. 연료봉 다발의 진동신호를 측정하는 속도센서의 교정상수를 알면 진동신호 크기는 속도센서의 출력전압을 교정상수로 나눈 후 가우스 크기를 곱하면 속도신호의 크기가 계산된다.

$$\text{속도}(mm/s) = \frac{\text{출력전압}(V)}{\text{교정상수}} \cdot \text{gauss}$$

속도센서의 속도를 25 mm/s로 일정하게 가진하고 가우스의 크기를 변화하면서 얻은 교정상수는 거의 선형적으로 변하며(그림 2), 가우스의 크기가 증가함에 따라 교정상수는 감소하였다. 압력관 내에 장전된 연료봉과 압력관 사이의 간격이 변하는 것 때문에 가우스의 크기와 교정상수의 관계를 알기위한 시험이다. 압력관 내의 연료봉 다발은 6 시 위치에서 간격이 가장 작고, 9 시 위치 및 12 시 위치로 진행하면서 간격이 점점 커져서 12 시 위치에서 가장 간격이 크다. 주파수가 교정상수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 주파수를 변화시키면서 실험하였다. 일정한 속도(25 mm/s)와 가우스(-100 gauss)를 유지하고 주파수를 증가하면서 실험한 결과 주파수가 증가하면 교정상수는 감소하였다(그림 3). 주파수와 가우스의 크기(-100 가우스)를 고정하고 속도의 크기를 변화시켰을 때 교정상수는 그림 4와 같다. 속도의 크기에 따라 교정상수는 어느정도 일정한 값을 가지지만, 속도의 크기가 5 mm/s 이하에서는 교정상수가 큰폭으로 감소했으며, 1 mm/s 이하에서는 그 값의 반복성이 없었다.

#### 4. 연료봉 다발의 진동모드

연료봉 다발의 진동신호를 측정하기 위하여 속도신호를 압력관 표면에 고정할 수 있는 장치를 별도로 고안하였다(사진 3). 연료봉 내부에는 펠릿(pellet)과 크기가 같은 자석을 심은 후 연료봉이 진동하면 압력관 표면에 고정된 속도센서로 가우스 변화를 측정하여 연료봉 및 연료다발의 진동을 측정하였다. 연료다발내에 자석은 0 시 및 4 시 방향에 심었으며 연료봉의 길이방향으로 3 개를 심었다(그림 5). 연료봉의 양단 끝과 중앙에 자석을 심었는데, 양단 끝에서 측정되는 진동신호는 연료봉 다발의 진동모드와 연료봉 다발의 로킹을 잘 측정하기 위한 것이고 중앙에서는 연료봉의 진동모드를 측정하기 위한 것이다. 내구성 시험은 3000 시간 동안 진행되었으며 압력관 내부의 온도는 266℃, 압력은 10.0 MPa, 그리고 유량은 30.6 kg/s 가 유지되었다. 연료봉 다발의 양단 끝에서 측정된 주파수 성분은 60~70 Hz가 현저하게 보였으며 상대적으로 낮은 출력의 저주파수 성분인 20 Hz 가 보였다(그림 6). 연료봉 다발의 양단 끝에서 연료봉 진동보다 연료봉 다발 진동과 로킹이 더 잘 일어난다는 것을 고려할 때 60~70Hz의 주파수 성분은 연료봉 다발의 진동이고 20 Hz 는 연료봉 다발의 로킹이다. 연료봉의 중앙에서 측정되는 진동신호는 양단 끝에서 측정되는 것과 다르게 37~38 Hz의 주파수 성분이 현저하게 나타났다(그림 7). 이것은 연료봉의 진동으로 판단된다.

#### 5. 향후계획

연료다발이 압력관 내에서 유동유인에 의해서 생기는 진동은 속도센서를 사용하여 측정 후 진동특성을 분석하였다. 그러나 연료다발의 고유진동수를 알아야 유동유인 진동으로 인한 진동이 연료다발의 공진영역에 접근하는 지를 판단할 수 있기 때문에 물속에 있는 연료다발의 고유진동수를 측정하여야 한다. 물속에 있는 연료다발의 고유진동수는 레이저 진동측정기를 사용하여 물속에서의 고유진동수를 측정할 예정이다. 그리고 측정된 연료다발의 고유진동수와 유동유인 진동에 의해 측정된 진동수와 비교할 예정이다.

#### References.

1. 정장환 외 다수, "중수로용 고연소도핵연료 열유동시험," 한국원자력연구소 보고서 KAERI/R-1730/96.
2. B. A. W Smith "Vibration Behaviour of CANFLEX Fuel Element in Axial Air/Water Flow," CANFLEX-048, AECL/KAERI proprietary, August, 1994.

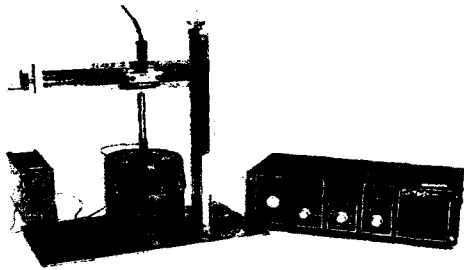


Photo 1 The Equipment Used for Magnetic Probe Calibration

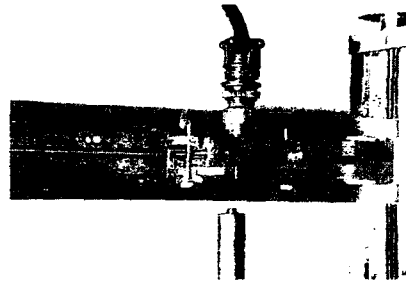


Photo 2(a) The Location of Magnetic Sensor and Magnet

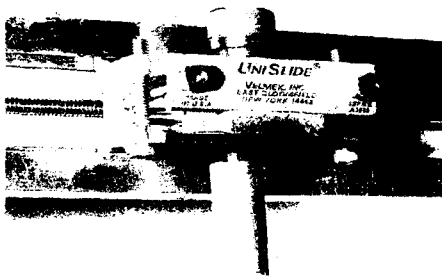


Photo 2(b) X-Y Slider for Magnetic Sensor Calibration

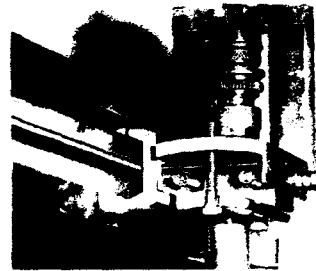


Photo 2(c) Location of the Pieces of Pressure Tube

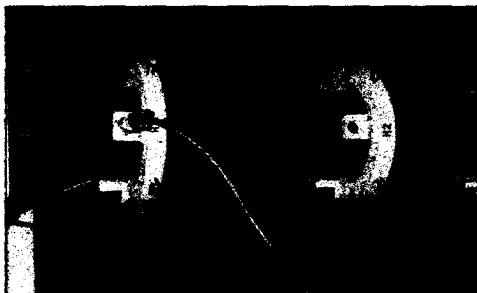


Photo 3 The Location of Magnetic Sensors at Pressure Tube

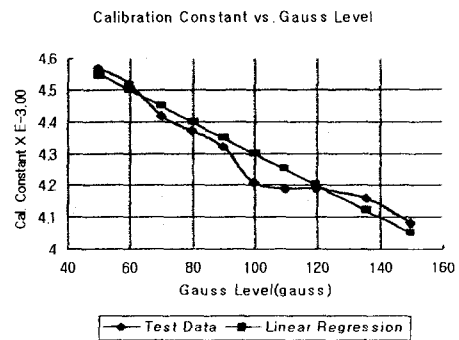


Fig.2 Calibration Constant Trend with Gauss Level

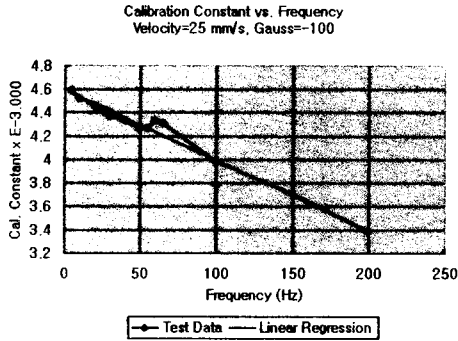


Fig.3 Calibration constant trend with frequency

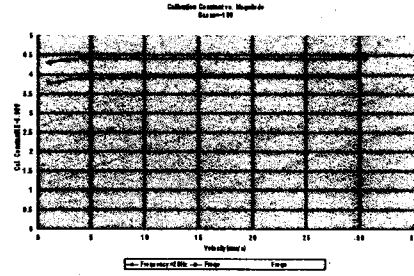


Fig.4 Calibration constant trend with Velocity

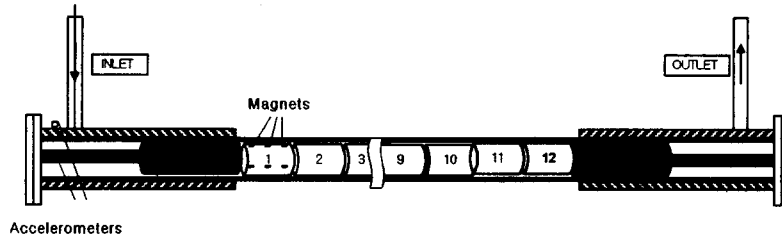


Fig. 5 Test rig and sensor Location for endurance test

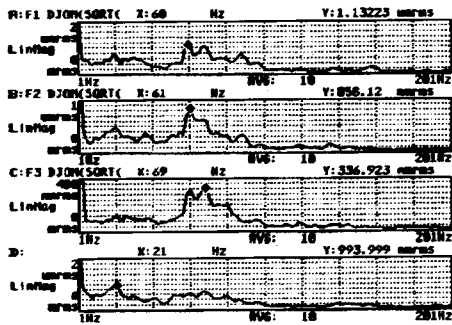


Fig.6 Fuel bundle vibration at end span of the first bundle(t=3000 hours)

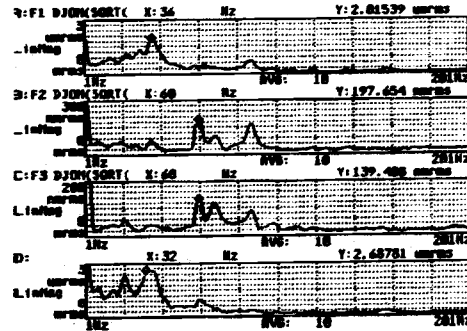


Fig.7 Fuel bundle vibration at mid span of the first bundle(t=3000 hours)