

# 초음파 조건에 노출된 핵연료 진동평가

## The Vibration Evaluation of the Nuclear Fuel under Ultrasonic Condition

김경홍† · 박남규 \* · 김경주\* · 김재익\* · 김형구\*

Kyoung-hong kim, Nam-gyu Park, Kyoung-joo Kim, Jae-ik Kim and Hyeong-koo Kim

### 2.2 초음파 세정 원리

인간의 귀를 통해 들을 수 없는 20kHz이상 주파수를 갖는 음파를 초음파라 지칭하며, 초음파 세정 장비는 초음파 사용에 의한 캐비테이션(Cavitation) 효과를 이용한다. 캐비테이션 효과란 초음파에 의한 압축 및 팽창력을 유체에 지속적으로 발생을 시키면서 감압력이 작용할 때 액체에 미소의 진공의 공동을 생성하고 액체에 녹아 있는 기체가 이 공동으로 모이면서 기체가 충만한 기포로 변하는 현상이다. 이 기포가 터질 때, 국부적으로 충격력이 발생되어, 연료봉에 침착된 크러드를 제거한다.

### 1. 서 론

국내의 발전소에서 발생하고 있는 비정상 축방향 출력분포(AOA: Axial Offset Anomaly)는 발전소 운전 중 노심 상부의 축 방향 출력 분포가 크러드 및 붕소의 침착에 의해 비정상적으로 찌그러지는 현상을 말하며, 발전소 운전에 많은 영향을 미치고 있다. 장주기, 고연소도 원전으로 발전해 갈수록 AOA 는 더 많은 영향을 줄 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 핵연료 피복관에 크러드 및 붕소의 침착을 제거하기 위한 기술들이 개발 및 연구 중에 있으며, 이중 초음파 원리를 이용하는 크러드 세정장비가 대표적이다. 크러드 세정장비는 고주파의 진동을 유체를 통해 전달하기 때문에 전달되는 음파의 크기에 따라 핵연료의 건전성에 영향을 미칠 수 있으며, 건전성을 증명하기 위한 모의 시험이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 초음파 세정 방법을 사용하는 장비를 이용하여 초음파 조건에 노출된 핵연료의 모의시험을 수행하고, 펠렛 및 피복관 측면에서 핵연료 건전성을 평가하였다.

### 2.3 초음파 세정 장비의 구성

본 시험에서 사용된 주요 초음파 세정장비는 Fig.1과 같다. 초음파 신호 발생기는 초음파 변환기의 파워 및 생성 주파수를 제어하기 위해 사용되며, 초음파 변환기는 유체에 직접 투입되어 초음파를 발진시킨다. 초음파 신호 발생기 및 변환기는 핵연료 집합체의 4면에 각각 독립적으로 구성되며, 20 kHz 이상에서 총 4000 W급의 에너지에 해당하는 초음파를 생성한다. 본 시험에 사용된 장비는 현재 원자력 발전소에서 사용하는 크러드 세정장비보다 약 10% 정도 선형 밀도 출력이 높아 실제 사용조건 보다 보수적인 조건이다.

### 2. 초음파 크러드 세정시험

#### 2.1 초음파 크러드 세정장비 개요

초음파 크러드 세정방법은 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 1998년부터 개발을 시작하였고, 미국 원자력 발전소에 적용하여 성공적으로 크러드 세정작업을 수행하여왔다. 현재 미국 및 스페인 등에서 PWR 및 BWR 원전용 핵연료를 대상으로 크러드 세정작업을 수행하고 있으며, 한국에서도 한전원자력연료(주)가 국내 원자력 발전소의 크러드 세정작업을 성공적으로 수행하였다.



(a) 초음파 신호 발생기 (b) 초음파 변환기

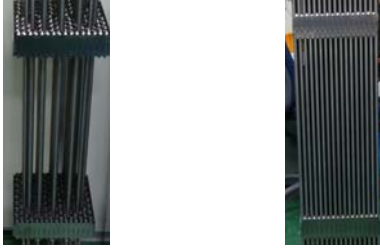
Fig.1 초음파 세정장비

#### 2.4 모의 핵연료 집합체 및 측정시스템

Fig.2와 같이 길이방향으로 1/4로 축소된 핵연료 집합체를 제작하였으며, 피복관에는 우라늄 펠렛과 동일한 질량 효과를 주기 위한 텅스텐 펠렛이 장입되었다. 1/4 축소 모델은 실제 크러드 세정장비의 초음파 변환기에 노출될 때 가장 많은 진동에 영향

† 교신저자; 한전원자력연료(주)  
E-mail : kyounghong@knfc.co.kr  
Tel :042-868-1367, Fax : 042-868-1149  
\* 한전원자력연료(주)

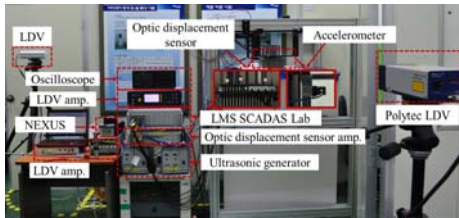
을 받을 수 있는 지점으로 선정하였으며, 시험 시 유체가 피복관 내부로 침투하지 못하도록 상부 및 하부를 밀봉하였다.



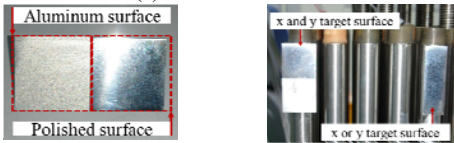
(a) 핵연료 골격체 (b) 핵연료 집합체

Fig. 2 모의시험용 핵연료 집합체

핵연료 집합체의 진동을 분석하기 위하여 Fig.3 (a)와 같이 시험장치가 구성되었으며, 연료봉의 진동을 측정하기 위한 광 변위센서, 가속도 센서, 레이저 속도계, 음압센서 등이 사용되었다. 광 변위센서의 경우, Fig.3(b)와 같이 1/4  $\mu\text{m}$ 로 폴리싱된 표적을 핵연료 집합체에 부착하여 미세한 진동을 측정하였다. 또한 핵연료의 크리드 세정작업이 수행되는 사용 후 저장조와 같은 온도를 만들어 주기 위해 히터가 장착된 수조가 사용되었다.



(a) 시험장치 구성도



(b) 광 변위센서 타겟면

Fig. 3 시험장치 구성도

### 2.5 초음파 세정장비의 음압특성

초음파 세정장비에서 온도 조건에 따라 발생하는 초음파의 음압특성을 확인하기 위해 B&K사의 Hydrophone(Type8103)을 사용하여 상온과 사용 후 저장조 온도 조건에서 핵연료 집합체 없이 시험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig.4와 같다. 최소 100회 이상 평균화된 데이터를 이용하여 가로축은 DAQ에서 측정 가능한 최대 주파수로, 세로축은 최대 값으로 정규화되었다. 냉각수의 온도가 높아짐에 따라 초음파 변환기에서 발생하는 음압이 상온 조건보다 약 30 %정도 낮아졌으며, 초음파 세정장비

의 구조적 영향으로 인해 서브하모닉 주파수와 슈퍼하모닉 주파수 성분도 관측되었다.

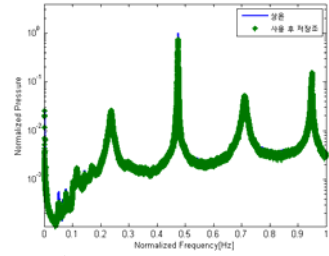
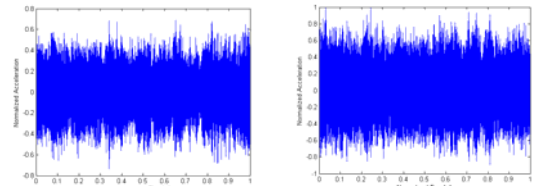


Fig.4 온도에 따른 음압 측정 결과

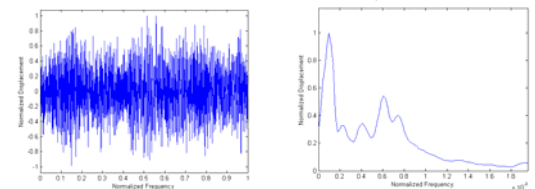
### 2.6 핵연료 집합체 진동특성

핵연료 연료봉의 진동특성 시험결과는 Fig.5와 같으며, 가로축은 최대시간으로, 세로 축은 시험중 발생한 최대 가속도로 정규화되었다. 연료봉에 부착된 가속도계로 측정된 최대 가속도는 우라늄 펠렛의 파손을 야기할 수 있는 가속도의 약 65 % 수준으로 관측되었다. 변위의 경우, 100 Hz 미만에서 최대값이 발생하며, 시간 도메인에서 측정된 최대변위는 연료봉 파괴응력의 0.3 % 수준으로 매우 낮다. 따라서 초음파 세정작업으로 핵연료 집합체가 약 10분간 초음파에 노출될 경우, 연료봉은 약 60,000 번 진동하지만 하중이 작아 핵연료 건전성에 충분히 유지되는 것으로 평가된다.



(a) x축 가속도

(b) y축 가속도



(c) 변위{시간도메인}

(d) 변위{주파수도메인}

Fig.5 핵연료 진동특성 시험 데이터

## 3. 결론

본 연구에서는 초음파를 사용하는 크리드 세정장비를 이용하여 초음파 조건에 노출된 핵연료 연료봉의 진동특성을 확인하였으며, 크리드 세정작업으로 인하여 핵연료 연료봉 건전성에 미치는 영향은 미미할 것으로 평가되었다.