

# 액체금속로 핵연료봉의 초음파 산란 해석

주영상, 이운상, 유봉

한국원자력연구소

## Analysis of ultrasonic scattering from nuclear fuel pins of liquid metal reactor

Young-Sang Joo, Yoon-Sang Lee, and Bong Yoo

Korea Atomic Energy Research Institute

### Abstract

The scattering of plane ultrasonic waves by the nuclear fuel pin of liquid metal reactor in sodium is studied. According to the internal composition in the cladding tube, the fuel pin has three cross sections, i.e. helium gas plenum, sodium-filled section, and fuel insertion section. The scattering spectra for each section of the fuel pin are different. The circumnavigating ultrasonic waves of each section are analyzed by the resonance scattering method. The whispering gallery wave modes are generated in the sodium-filled plenum section and the fuel rod insertion section with a sodium-gap. The circumferential wave modes are propagated in the cladding tube of the helium gas plenum section. The annular gap between the cladding tube and metal uranium pellet rod affects the scattering spectra. The different propagation characteristics can be utilized for the nondestructive method of detecting the unbonded area and measuring the level of the sodium-filled section of the fuel pin.

### 1. 서론

현재 국내의 원자력발전소(원전)는 경수(H<sub>2</sub>O)를 냉각재로 사용하는 가압경수로(PWR)와 중수(D<sub>2</sub>O)를 냉각재로 사용하는 가압중수로(PHWR)가 있다. 프랑스, 일본 등의 선진 외국에 시는 액체 나트륨을 냉각재로 하는 고속중수로(액체금속로)를 독자 개발하여 운영하고 있다. 우리나라는 액체금속로의 개발을 목표로 현재 실

증로(KALIMER)를 설계 중에 있다. 원전의 에너지는 원자로 노심내의 핵연료봉에 의해서 발생된다. 핵연료봉의 피복관은 핵연료가 냉각재와의 직접적인 접촉을 방지하고 핵분열생성물이 1차 냉각재로 유입되는 것을 방지하는 1차 방호벽 역할을 하므로 연료봉 피복관의 구조적 건전성 확보가 매우 중요하다. 액체금속로는 500°C 이상의 고온에서 운전되며 핵분열성 물질이 증식되기 때문에 가압경수로 핵연료봉과는 매우 다르게 설계 제조된다. 액체금속로 핵연료봉의 형상은 Fig. 1과 같다. 액체금속로의 핵연료는 U-Zr 금속연료가 사용되며 가동중에 기포의 생성에 의해 반경방향 부피 팽창이나 축방향 길이 증가가 과대하게 발생하기 때문에 핵연료와 피복관 사이에 큰 갭과 핵연료 상부에 핵연료 길이보다 긴 빈 공간(plenum)을 가지도록 설계한다. 피복관 튜브는 높은 중성자 속에서도 매우 낮은 팽윤 특성을 갖는 ferritic-martensitic steel HT-9가 사용된다. 피복관 내에 금속연료가 장입되고 열전달 효율을 증진시키기 위하여 그 사이에 액체 나트륨(소듐)이 충전 집합된다. 핵연료심 바로 위까지 소듐이 채워서 저미 상부 plenum 에 헬륨 가스가 충전되고 연료봉 상부는 봉단 마개로 용접되어 진다. 액체금속로 연료봉 제조 시에 연료봉 튜브에 결함이 존재하지 않아야 하며 또한, 금속연료와 피복관 사이에 소듐 갭에 비결합부 및 기포가 없어야 한다. 비결합부나 기포는 연료봉 연소시 열전달을 방해해서 국부적인 온도상승을 일으켜 연료봉을 손상시킬 수 있다. 그리고 연료봉

상단부의 소음층의 높이는 설계치에 맞게 제조되어 상단 가스층이 일정하게 유지되어야 한다. 그러므로 제조시에 피복관 튜브 및 소음 겹의 비파괴 검사와 상단 소음층의 높이 측정이 이루어져야 한다. 이러한 검사를 위해서 가동전에 방사선투과검사와 와전류검사 방법의 적용에 대한 연구가 이루어졌다.[1,2] 가동중/후에는 연료봉이 소음 내에 있기 때문에 방사선투과검사와 와전류검사 방법 보다는 오히려 초음파 검사법이 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 아직까지 가동중/후의 초음파검사법의 적용에 관한 연구가 수행되지 못하였다. 최근에 초음파의 공명 현상을 이용하여 경수로용 원전연료봉의 파손 여부를 가동중에 아주 쉽게 탐지할 수 있는 새로운 비파괴평가 방법을 국내에서 개발하였다.[3] 이 방법은 연료봉 파손시 연료봉 내부로 스며든 냉각수에 의해 피복관에서의 공명초음파 신호가 사라지는 특성을 이용한 것이다. 가동중에 연료봉이 파손되면 외부 소음 냉각계가 피복관 내부로 유입되어 내부 소음층진부의 높이가 증가하게 된다. 가동중/후의 액체금속로 핵연료봉의 비파괴평가 방법으로서 초음파 공명법의 가능성을 조사하기 위하여 본 연구가 이루어졌다. 본 논문에서는 초음파 공명산란을 이론적으로 모델링하고 수치 해석을 수행하였으며 그 결과를 분석하였다.

## 2. 초음파 공명산란 해석

Fig. 2와 같이 소음 속에 잠겨져 있는 연료봉에 단위 진폭을 가진 평면 음파  $\exp[i(kX - \omega t)]$ 가 수직으로 입사할 때 산란 음압은 레이리 정규 모드 방법에 의하여 해석된다.[4] 소음 속의 연료봉에 대한 초음파 공명 현상은 음파의 공명산란 이론에 기초하여 분석하였다. 산란음압의 진폭은 입사파의 주파수가 증가함에 따라 비교적 부드럽고 규칙적으로 변화하는 배경음압과 불규칙적으로 변화하는 공명신호의 합으로 구성되어 있어 산란음압에서 배경음압을 제거하면 공명신호만을 격리할 수 있는데[5] 최근에 순수 공명성분만을 격리할 수 있는 완전한 배경음압에 대한 새로운 이론(고유 배경음압)을 개발하였다.[6,7] 이 개념은 적층 구조의 산란체에도 확장

적용되며 적층 산란체에 대한 배경음압 계수가 새롭게 제시될 수 있음을 보였다.[8] 또한 이전의 연구에서 적층 구조와 배열 순서에 상관없이 적층 산란체의 산란음압을 이론적으로 정확히 계산할 수 있게 하였다.[9]

소음냉각계 내의 액체금속로 핵연료봉에 대한 초음파 산란은 연료봉 내부 물질의 구성 상태에 따라 세 부분, 즉, 피복관 내부가 헬륨으로 충전된 핵연료봉의 최상단부, 소음만으로 채워진 중간부 그리고 금속핵연료가 삽입된 하단 부분으로 나누어 해석하여야 한다. 연료봉 상단부 및 소음 충전 중간부는 고체/유체 경계의 2단 구조로 되어 있고, 금속 핵연료가 삽입되어 있는 하단부는 고체/유체/고체 경계의 3단 구조로 되어 있다. Fig. 2의 연료봉 단면도에서 금속연료의 반경을  $a_0$ , 피복관의 안쪽 반경을  $a_1$ , 그리고 바깥 반경을  $a_2$ 라 둔다. 연료봉 외부의 유체에서의 입사파에 의한 산란 음압은 다음과 같이 레일리 정규 모드 시리즈로 표현된다:[5]

$$p_{sc} = e^{-i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n i^n R_n H_n^{(1)}(kr) \cos(n\theta). \quad (1)$$

연료봉의 각 층에 대한 변위 포텐셜을 정의하고 이를 경계조건식에 넣어 계산하면 다음과 같이 연료봉의 산란 행렬식  $D[\mathbf{X}] = \mathbf{E}_{inc}$ 을 구할 수 있다. 여기서  $\mathbf{X}$ 는 미지의 산란계수  $R_n$ 이 포함된 행 벡터이고,  $\mathbf{E}_{inc}$ 는 외부 입사파를 나타낸다. 그리고 산란 매트릭스  $D$ 의 요소는 연료봉의 각 부분에 대하여 각기 달리 구성되며 이전의 연구에서의 일반화된 요소식으로부터 쉽게 구해질 수 있다.[9] 외부 유체에서의 산란 계수  $R_n$ 은 Cramer의 법칙(즉,  $R_n = B_n/D_n$ )에 의하여 구할 수 있다. 여기서  $D_n$ 은  $D$ 의 행렬식이고  $B_n$ 은  $D$ 의 첫번째 열이  $\mathbf{E}_{inc}$ 의 요소로 대체된 행렬식이다. 식 (1)에 Hankel 함수의 원거리 근사식을 적용하면 산란음압은 다음과 같다:

$$p_{sc} \cong \sqrt{a_2/2r} e^{i(kr - \omega t)} \sum_{n=0}^{\infty} f_n(\theta, x). \quad (2)$$

윗 식에서

$$f_n(\theta, x) = \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \epsilon_n R_n \cos(n\theta). \quad (3)$$

함수  $f_n(\theta, x)$ 은 적층 셀에 의한 산란 형태함수

로 정의되고 입사 주파수와 산란각에 대한 산란 유압의 분포를 나타낸다.

### 3. 수치 해석

핵연료봉의 세 부분에 대한 산란유압에서 고유 배경유압을 제거함으로써 공명 스펙트럼을 구하고 공명의 발생 특성을 해석한다. 여기서의 계산은 200°C 온도의 소듐 속에서의 연료봉에 대하여 수행되었다. 소듐의 점성효과는 무시하였으며 금속연료는 재료 감쇠 효과를 고려하여 수치 해석을 수행하였다. HT-9 피복관의 외경은 7.4 mm 이고 두께는 0.53 mm 이다. 그러므로 외반경 대 내반경 비( $a_0/a_1$ )는 0.857(상대두께:  $h = 14.3\%$ )이다. HT-9 의 밀도는  $7.92 \text{ g/cm}^3$  이고, 종파와 횡파의 속도는 각각 5790 m/s 와 3180 m/s 이며, U-Zr 금속연료의 외경은 4.66 mm 이고 밀도는  $16.6 \text{ g/cm}^3$  이며, 종파와 횡파의 속도는 각각 2900 m/s 와 1190 m/s 이다. 연료봉의 소듐 겹은 0.84 mm 이다. 소듐의 밀도는  $0.97 \text{ g/cm}^3$  이고, 종파의 속도는 2500 m/s 이다. 공명신호는 후방 산란 방향에서의 산란형태함수( $f_n$ )와 산란체의 배경유압( $f_n^{(b)}$ )을 계산하고 이를 격리함으로써 얻어진다. 공명신호의 후방 산란 진폭( $|f_n - f_n^{(b)}|$ )을 정규 모드(혹은 부분파)  $n = 0 \sim 25$ , 무차원 주파수  $x(=ka_2) = 0 \sim 20$  범위 내에서  $\Delta x = 0.05$  간격으로 계산하였다.

Fig. (a), (b), (c)는 각각 헬륨 충전부, 소듐 충전부 그리고 소듐겹이 있는 금속연료 삽입부에 대한 공명 스펙트럼을 보여준다. 헬륨 충전부에서는 음파가 연료봉 내부로 투과할 수 없기 때문에 피복관에 의한 원주파 공명 신호만이 존재한다. 소듐 충전부의 스펙트럼은 매우 복잡하다. 이는 피복관의 원주파 공명과 함께 소듐 코아에서의 맴돌이파(whispering gallery wave)에 의한 것이다. 금속연료 삽입부의 스펙트럼은 헬륨 충전부의 스펙트럼과 유사하게 나타났으나 소듐겹이 피복관의 공명에 영향을 주어 원주파 공명의 크기가 크게 줄어들었으며 소듐겹에 의한 새로운 공명 신호가 발생함을 알 수 있다.

### 4. 결론

액체금속로 핵연료봉의 내부 물질의 구성 상태에 따른 초음파 산란을 고체/기체, 고체/액체 그리고 고체/액체/고체의 구조를 갖는 세 가지 경우로 나누어 해석하였다. 산란체 내부 구성 상태에 따라 초음파 산란 신호는 크게 달라진다. 헬륨 충전부에 의한 산란에서는 튜브의 원주파에 의한 공명신호가 크게 나타났으며 소듐 충전부에서는 소듐 코아에서의 맴돌이파가 복잡한 양상으로 나타났다. 금속연료가 있는 부분에서는 소듐 겹의 공명과 함께 피복관 공명신호가 나타났다. 이러한 산란 신호의 차이는 연료봉 상단부 소듐 충전부의 위치를 측정할 수 있는 근거를 제시한다.

### 참고문헌

- [1] K. Ono and W. J. McGonagle, "Pulsed eddy current instrument for measuring sodium levels of EBR-II fuel rods," ANL-6278 (1961).
- [2] E. S. Sowa and E. L. Kimont, "Development of a process for sodium bonding of EBR-II fuel and blanket elements," ANL-6384 (1961).
- [3] M.-S. Choi, Y.-S. Joo, H.-K. Jung, and Y.-M. Cheong, "Development of nuclear fuel rod testing technique using ultrasonic resonance phenomena," KAERI/RR-1680/96 (1996).
- [4] Bowman, T. Senior, and P. Uslenghi, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, New York: Wiley Interscience, North-Holland (1969).
- [5] L. Flax, L. R. Dragonette and H. Überall, "Theory of elastic resonance excitation by sound scattering," *J. Acoust. Soc. Am.* **63**, 723-731(1978).
- [6] M.-S. Choi and Y.-S. Joo, "Theory of the background amplitudes in acoustic resonance scattering," *J. Acoust. Soc. Am.* **101**, 2083-2087 (1997).
- [7] M.-S. Choi, Y.-S. Joo, and J.-P. Lee, "Inherent background coefficients for submerged cylindrical shells," *J. Acoust. Soc. Am.* **101**, 1743-1745 (1997).
- [8] Y.-S. Joo, J.-G. Ih, and M.-S. Choi, "Inherent background coefficients for acoustic resonance scattering from submerged, multilayered, cylindrical structures," *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 900-910 (1998).
- [9] Y.-S. Joo and J.-G. Ih, "Acoustic wave scattering from multilayered cylindrical targets," *Conference Proceeding of the Acoustical Society of Korea*, Vol. **16**, No 1(s), 117-121 (1997).

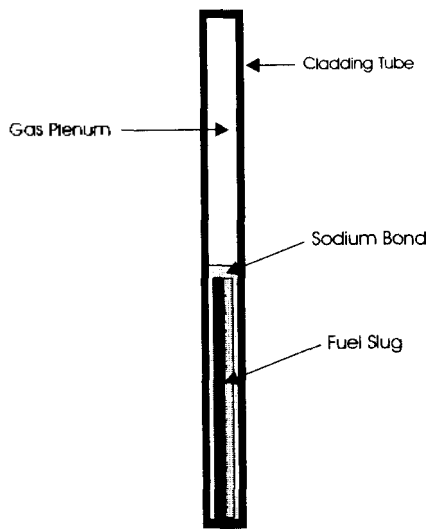


Fig. 1 Nuclear fuel pin of a liquid metal reactor .

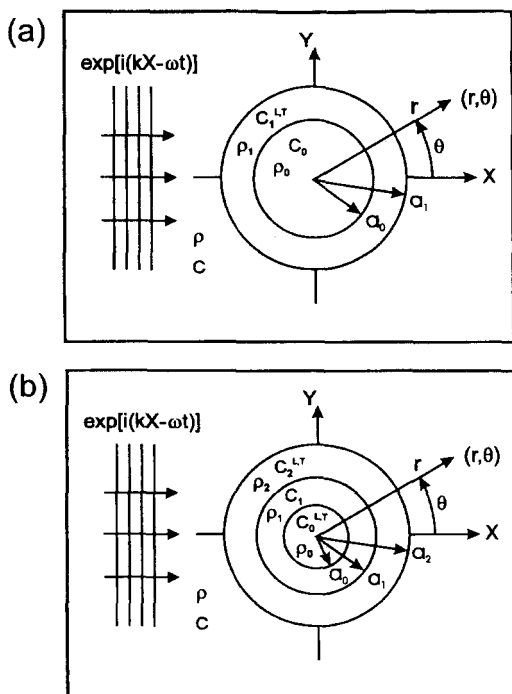


Fig. 2 Geometry of a plane ultrasonic wave scattering from a fuel pin: (a) helium plenum or sodium-filled section, (b) fuel rod insertion section with a sodium gap

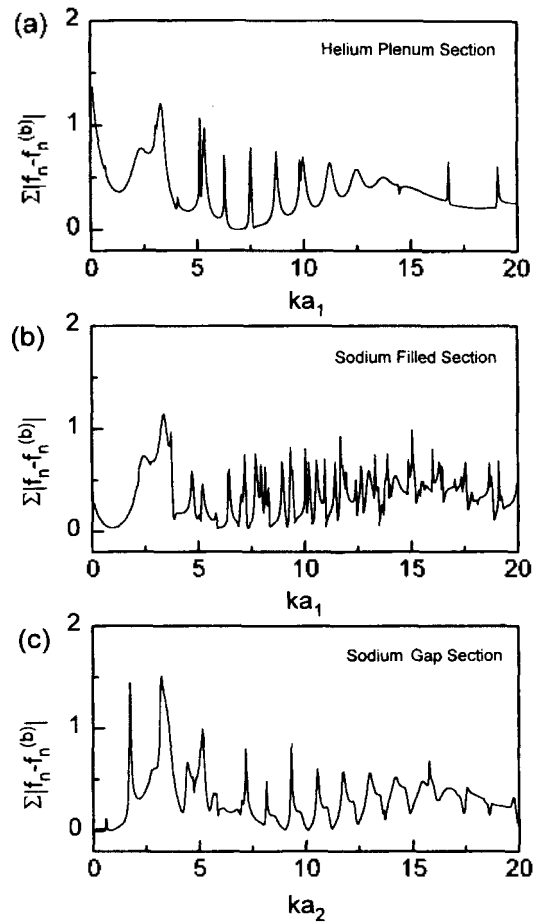


Fig. 3 Resonance spectra for the three sections of a fuel pin: (a) helium plenum section, (b) sodium-filled section, (c) fuel rod insertion section with a sodium gap.