‘2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

소듐내 기포와 튜브에 의한 산란 음장 해석

Analysis of Acoustic Scattering Fields from a Bubble and a Tube in Sodium

주영상, 김석훈, 유봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로에서 증기발생기의 물누설의 능동탐지법의 적용연구를 위한 기초 연구를 수행하였다. 능동 누설탐지법은 음파의 산란과 감쇠 특성을 이용한다. 소듐내의 튜브와 기포에 의한 음파의 이론적 산란해를 구하고 수치해석을 하였다. 소듐내의 구형 기포의 음파산란장은 튜브의 산란장과 큰 차이를 보였다. 구형기포의 경우 저주파수 영역에서 진폭이 매우 큰 단극 공명이 나타났으며 신호의 공명폭이 매우 작은 고차 공명이 나타났다. 튜브의 경우 고주파수 영역에서 튜브의 원주파와 튜브내 물에서의 맴돌이파에 의한 산란신호가 크게 나타났다. 저주파수영역에서의 기포의 산란특성은 튜브 누설을 탐지하는 데 유용할 것이다.

Abstract

Acoustic scattering and attenuation technique is used as the active leak detection method in steam generator of liquid metal reactor. The acoustic scattering field from a tube and a bubble in sodium is studied by normal mode analysis. The acoustic scattering properties of spherical gas bubble in sodium differ from those of cylindrical tube by the large monopole resonance at very low frequencies. The large monopole resonance is due to the compressibility of the gas in the bubble. The circumnavigating waves and whispering gallery wave modes are generated in the water-filled tube at higher frequency range. The unique scattering characteristics of a bubble in very low frequency range can be utilized for the detection of the gas bubble of the leaked tube area.

1. 서 론

액체금속로는 소듐을 냉각재로 사용하는 발전소 특징으로 소듐 경계면의 파손으로 인한 안전성 확보가 매우 중요하며 소듐 경계면에서 소듐누설의 조기검출은 발전소의 신뢰성 향상의 필수 요건이다. 전세계에서 운전되고 있는 액체금속로에서는 주로 증기발생기와 2 **차계통 배관에서 누설사고가 발생하였으며 제조 결함, 열피로 및 용접부 결함이 주요**

원인인 것으로 나타났다.[1] 액체금속로 증기발생기에서 소듐내 물누출은 소듐-물 반응으로 인한 대형사고로 유발시킬 수 있다. 증기발생기 열전달 튜브는 많은 용접부가 있고 고온 고압에서 장시간 가동되어 누설사고를 완벽하게 예방할 수 없으므로 누설이 대형사고로 이어지기 전에 조기에 누설을 탐지하여 사고확산을 미연에 방지하는 것이 매우 중요하다. 기존에 사용되어온 증기발생기 누설탐지기는 수소탐지기와 같은 농도 감시기이나 반응시간이 매우 긴 것이 단점으로 지적되어 왔다. 이러한 단점을 보완하기 위해 실시간 탐지가 가능한 음향탐지법이 개발되어 왔다.[2] 증기발생기의 음향누설탐지법은 크게 능동 음향탐지법(Active Leak Detection)과 수동 음향탐지법(Passive Leak Detection)이 있다. 증기발생기의 튜브에서 물 누설시 소듐과 물의 화학반응으로 수소기포가 발생한다. 수소기포의 발생으로 인해 음향방출 신호가 전파하게 되는데 용기 외부에 부착되어 있는 음향방출 센서로 신호를 수집 분석하여 누설을 탐지한다. 외부 노이즈가 큰 경우에 탐지 감도가 저하된다. 외부 노이즈에 상관없이 누출을 탐지할 수 있는 방법이 능동음향 탐지법이다. 용기 외부 또는 소듐 내에 음향파 발생 센서를 설치하고 용기 주위에 수신 센서를 설치하여 음향파의 산란신호와 감쇠 신호를 측정하여 누설의 존재를 탐지하는 방법이다. 각국에서 이 수동 및 능동 탐지법을 개발하여 서로의 장단점을 보완하며 실제 적용하고 있으나 국내에서는 주로 음향방출에 의한 수동 음향탐지 기술에 대한 연구가 이루어져 왔다.[3]

능동 음향탐지법을 이용한 증기발생기의 소듐-물 누설탐지 기술개발을 위하여 본 연구를 수행한다. 소듐내 수소기포와 전열관 튜브의 음향파 산란 특성을 이해하기 위하여 먼저 단일 원형 튜브와 단일 구형 기포에 대한 음파산란의 이론적 모델링을 하여 수치해석 프로그램을 작성한다. 이론적 모델링을 단순화하기 위하여 소듐의 점성효과와 감쇠효과를 무시한다. 소듐 속의 튜브와 기포에 대한 음파 산란장을 수치해석을 통하여 구하고 그 산란 특성을 분석한다.

2. 음장 해석

2.1 전열관 튜브의 산란

Fig. 1(a)와 같이 소듐 속에 잠겨져 있는 원통형 튜브에 단위 진폭을 가진 평면 음파 $\exp[i(kX - wt)]$가 수직으로 입사할 때 소듐 유체에서의 총 음압 p는 입사파와 산란파의 음압의 합으로 다음과 같이 정규 모우드 시리즈로 표현된다.[4,5,6]

$$p = p_{inc} + p_{sc} = e^{-iwt} \sum_{n=0}^{\infty} i^n e_n [J_n(kr) + R_n H_n^{(1)}(kr)] \cos nq \ . \qquad (1)$$

여기서 하첨자 n은 정규 모우드 차수(normal mode number)이고 e_n은 Neumann 계수로서 n = 0 일 때 e_n = 1, $n > 0$ 일 때 e_n = 2 의 값을 가지며 i는 허수, J_n은 제 n차 Bessel 함수, $H_n^{(1)}$은 제 1종 Hankel 함수, k는 파수 그리고 R_n은 경계 조건에 의하여 결정되는 산란계수이다 Helmholtz 방정식을 만족시키는 원통형 튜브에서의 변위 포텐셜은 다음과 같이 주어진다:

$$\Phi(r,q,t) = e^{-iwt} \sum_{n=0}^{\infty} i^n e_n [T_n J_n(k_L r) + U_n Y_n(k_L r)] \cos nq \ , \qquad (2)$$

$$\Psi_z(r,q,t) = e^{-iwt} \sum_{n=0}^{\infty} i^n e_n [V_n J_n(k_T r) + W_n Y_n(k_T r)] \sin nq \ . \qquad (3)$$

여기서 Y_n은 Neumann 함수이다.

튜브 내부 유체의 음압은 다음과 같다.

$$p_0 = e^{-i\omega t}\sum_{n=0}^{\infty} i^n \varepsilon_n X_n J_n(kr)\cos n\theta \ . \tag{4}$$

윗 식들에서 $R_n, T_n, U_n, V_n, W_n, X_n$ 은 튜브의 내 반경(a_0)과 외 반경(a_1)에서의 경계 조건에 의하여 구해지는 미지의 계수이다.:

$$\tau_{rr}^{(1)}|_{r=a_1} = -p|_{r=a_1}, \quad u_r|_{r=a_1} = u_r^{(1)}|_{r=a_1}, \quad \tau_{r\theta}^{(1)}|_{r=a_1} = 0 \, . \tag{5}$$

$$\tau_{rr}^{(1)}|_{r=a_0} = -p_0|_{r=a_0}, \quad u_r^{(1)}|_{r=a_0} = u_r^{(0)}|_{r=a_0}, \quad \tau_{r\theta}^{(1)}|_{r=a_0} = 0 \, . \tag{6}$$

소듐유체 및 튜브 내부유체의 반경 방향의 변위는 음압으로부터 구해진다:

$$u_r = \frac{1}{\rho\omega^2}\frac{\partial p}{\partial r} . \tag{7}$$

경계조건식으로부터 원통형 튜브의 산란 행렬식을 구할 수 있다.

$$D[\mathbf{X}] = \mathbf{E}_{inc} . \tag{8}$$

여기서 X 는 산란계수 R_n 이 포함된 행 벡터이고, E_{inc} 는 외부 입사파를 나타낸다. 그리고 D 는 6x6 산란 매트릭스로서 그 요소식은 부록에 수록되어 있다. 외부 유체에서의 산란 계수 R_n 은 Cramer 의 법칙에 의하여 구할 수 있다.

$$R_n = B_n / D_n \tag{9}$$

여기서 D_n 은 D 의 행렬식이고 B_n 은 D 의 첫번째 열이 E_{inc} 의 요소로 대치된 행렬식이다. Hankel 함수의 원거리 근사식을 적용하면 산란음압은 다음과 같이 표현된다:

$$p_{sc} \cong \sqrt{\frac{a_1}{2r}}\, e^{i(kr-\omega t)} \sum_{n=0}^{\infty} f_n(\theta, \xi) \, . \tag{10}$$

윗 식에서

$$f_n(\theta, \xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi i \xi}}\varepsilon_n R_n \cos(n\theta) \cdot \tag{11}$$

함수 $f_n(\theta, \xi)$ 은 적층 쉘에 의한 산란형태함수로 정의되고 입사 주파수와 산란각에 대한 산란장의 음압 분포를 나타낸다. 후방산란방향($\theta = \pi$)에서 직경이 a_1 인 튜브의 정규화된 산란단면적은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma}{\pi a_1^2} = \left| \sum_{n=0}^{\infty} f_n(\theta = \pi, ka_1) \right|^2 . \tag{12}$$

2.2 소듐내 수소기포 산란

Fig. 1(b)와 같이 소듐 속의 기포에 단위 진폭을 가진 평면 음파 $\exp[i(kX - \omega t)]$ 가 수직으로 입사할 때 입사파와 산란파 및 기포내부의 음압은 다음과 같이 구형 좌표계에서의 정규 모우드 시리즈로 표현된다.

$$p_{inc} = e^{-i\omega t}\sum_{n=0}^{\infty}(2n+1) i^n j_n(kr) P_n(\cos\theta) , \tag{13}$$

$$p_{sc} = e^{-i\omega t}\sum_{n=0}^{\infty}(2n+1) i^n A_n h_n^{(1)}(kr) P_n(\cos\theta) , \tag{14}$$

$$p_0 = e^{-iwt} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) i^n B_n j_n(kr) P_n(\cos q) . \qquad (15)$$

여기서 j_n과 $h_n^{(1)}$은 n차 구형 Bessel 함수와 Hankel 함수이고 P_n은 Legendre Polynomials 이다.

기포표면에서 음압연속 및 속도연속의 경계조건식에 의해 산란계수 A_n은 다음 식으로 주어진다.

$$A_n = -\frac{x j_n'(x) - F_n j_n(x)}{x h_n^{(1)}{}'(x) - F_n h_n^{(1)}(x)} . \qquad (16)$$

여기서

$$F_n = \frac{r}{r_0} x_0 \frac{j_n'(x_0)}{j_n(x_0)} . \qquad (17)$$

후방산란방향에서 정규화된 산란단면적은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{s}{p a_0^2} = \left| \sum_{n=0}^{\infty} f_n(q = p, ka_0) \right|^2 = \left| \frac{2}{ika_0} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_n (2n+1) \right|^2 . \qquad (18)$$

3. 수치 해석

소듐 속에서의 튜브와 기포에 대한 산란장에 대한 수치해석을 수행하고 산란단면적을 계산하였다. 수치해석을 단순화하기 위하여 소듐의 점성효과와 튜브의 재료 감쇠효과를 무시하여 수치 해석을 수행하였다. KALIMER 증기발생기의 튜브(재질: 2¼Cr-1Mo)의 외경은 23 mm , 두께는 3.5 mm 이고 외반경 대 내반경 비(a_0 / a_1)는 0.696(상대두께: $h =$ 30.4%)이다. 2¼Cr-1Mo 의 밀도는 7.8 g/cm^3 이고, 종파와 횡파의 속도는 각각 5900 m/s 와 3200 m/s 이다. 400°C 온도에서 소듐의 밀도는 0.852 g/cm^3 이고, 종파의 속도는 2370 m/s 이다. 수소기포의 밀도는 0.00009 g/cm^3 이고 종파속도는 1280 m/s 이다. 산란단면적은 후방산란방향에서의 산란형태함수(f_n)를 계산하여 얻어진다. 후방 산란 신호는 정규 모우드(혹은 부분파)는 n= 0~25, 무차원 주파수는 x=0~20 범위 내에서 튜브인 경우에는 $\Delta x = 0.01$ 간격으로 기포인 경우에는 $\Delta x = 0.002$ 간격으로 계산하였다.

그림 2 는 내부에 물이 채워져 있는 튜브의 산란 스펙트럼을 보여준다. 그림 3 은 수소 기포의 산란 스펙트럼을 보여준다. 그림 2 의 경우 튜브 내부로 투과된 음파에 의한 산란신호와 원주 공명신호가 나타난다. 튜브의 산란스펙트럼은 매우 복잡하다. 이는 튜브의 원주파 공명과 함께 튜브 내부 물에서의 맴돌이파(whispering gallery wave)에 의한 것이다. 수소기포의 산란 스펙트럼은 튜브의 산란 스펙트럼과는 그 양상이 크게 다르게 나타났다. 기포 산란에서 고차 기포 공명신호는 그 폭이 매우 작아 산란장에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었으나 영차(n=0) 공명신호는 ka=0.012 부근의 저주파수 영역에서 신호진폭이 매우 큰 산란신호 특성을 보인다. 이는 monopole 공명으로 기포내부 가스의 압축효과에 기인한 것으로 판단된다. 이 영역의 주파수 범위에서는 튜브의 산란 신호는 상대적으로 매우 낮게 나타나 저주파수의 음파를 이용하면 기포산란에 의한 음압 투과손실 효과가 매우 커지게 되므로 기포의 영차 공명 산란신호를 이용할 경우 기포 발생을 탐지하는데 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

4. 결 론

액체금속로 증기발생기의 능동 음향 누설 탐지법의 적용 가능성을 연구하기 위한 기초연구로서 소듐내의 단일 증기발생기 튜브와 단일 수소기포에 의한 산란음장을 해석하였다. 기포의 반경방향 수축팽창 모우드인 monopole 공명신호가 저주파수 영역에서 나타났으며 공명 폭이 아주 작은 고차 모우드들은 고주파수 영역에서 나타났다. 튜브의 산란신호는 튜브의 원주파에 의한 공명신호와 튜브 내의 물 충진부의 맴돌이 공명신호가 크게 복잡한 양상으로 나타났다. 저주파수 영역에서 기포의 산란 단면적은 튜브의 산란 단면적보다 크게 나타났다. 기포의 monopole 모우드 영역의 주파수를 사용하면 튜브의 산란 단면적보다 크므로 음압 투과 손실이 매우 클 것으로 생각되어 소듐내 기포 탐지에 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 작성되었음.

참고문헌

[1] S.-H. Kim, "액체금속로 구조재의 소듐누출사고 현황 및 대책" KALIMER/MS400-WR-01-Rev.A/1998.

[2] IAEA, IWGFR/79, Proceedings of the Special Meeting on Acoustic/Ultrasonic Detection of In Sodium Watre Leaks on Steam Generators, France, 1-3 October, 1990.

[3] KAERI, 액체금속로 냉각재 안전대책 연구, KAERI/RR-1694/96.

[4] Bowman, T. Senior, and P. Uslenghi, *Electro-magnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, New York; Wiely Interscience, North-Holland (1969).

[5] 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).

[6] Y.-S. Joo, H.-K. Jung, and Y.-M. Cheong, "Measurement of oxide layer thickness of nuclear fuel rod using ultrasonic resonance," Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Vol. II, pp. 204-209 (1998).

부 록 I. 원통형 튜브에서의 6×6 행렬식 D_n 의 요소 d_{ij} 및 e_1, e_2

$$d_{11} = \frac{r}{r_1} x_T^2 H_n^{(1)}(x), \quad d_{12} = (2n^2 - x_T{}^2) J_n(x_L) - 2x_L J_n{}'(x_L), \quad d_{13} = (2n^2 - x_T{}^2) Y_n(x_L) - 2x_L Y_n{}'(x_L),$$

$$d_{14} = 2n[x_T J_n{}'(x_T) - J_n(x_T)], \quad d_{15} = 2n[x_T Y_n{}'(x_T) - Y_n(x_T)],$$

$$d_{21} = -x_1 H_n^{(1)'}(x_1), \quad d_{22} = x_L J_n{}'(x_L), \quad d_{23} = x_L Y_n{}'(x_L), \quad d_{24} = nJ_n(x_T), \quad d_{25} = nY_n(x_T),$$

$$d_{32} = 2n[J_n(x_L) - x_L J_n{}'(x_L)], \quad d_{33} = 2n[Y_n(x_L) - x_L Y_n{}'(x_L)],$$

$$d_{34} = 2x_T J_n{}'(x_T) + [x_T^2 - 2n^2] J_n(x_T), \quad d_{35} = 2x_T Y_n{}'(x_T) + [x_T^2 - 2n^2] Y_n(x_T),$$

$$d_{42} = -2y_L J_n{}'(y_L) + [2n^2 - y_T^2] J_n(y_L), \quad d_{43} = -2y_L Y_n{}'(y_L) + [2n^2 - y_T^2] Y_n(y_L),$$

$$d_{44} = 2n[y_T J_n{}'(y_T) - J_n(y_T)], \quad d_{45} = 2n[y_T Y_n{}'(y_T) - Y_n(y_T)], \quad d_{46} = \frac{r_0}{r_1} y_T^2 J_n(y_0),$$

$$d_{52} = y_L J_n{}'(y_L), \quad d_{53} = y_L Y_n{}'(y_L), \quad d_{54} = nJ_n(y_T), \quad d_{55} = nY_n(y_T), \quad d_{56} = -y_0 J_n{}'(y_0),$$

$$d_{62} = 2n[J_n(y_L) - y_L J_n{}'(y_L)], \quad d_{63} = 2n[Y_n(y_L) - y_L Y_n(y_L)],$$

$$d_{64} = 2y_T J_n{}'(y_T) + [y_T^2 - 2n^2] J_n(y_T), \quad d_{65} = 2y_T Y_n{}'(y_T) + [y_T^2 - 2n^2] Y_n(y_T),$$

$$e_1 = -\frac{r}{r_1} x_T^2 J_n(x), \quad e_2 = xJ_n(x).$$

여기서, $x \equiv ka_1$ **,** $x_i \equiv k_i a_1, y_i \equiv k_i a_0, (i = L, T, 0)$

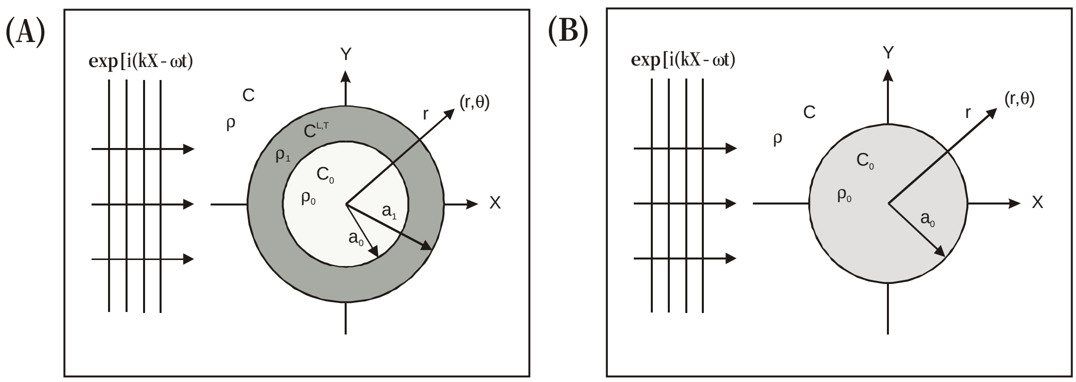

Fig. 1 Plane acoustic wave scattering from (A) a tube and (B) a H_2 bubble in sodium.

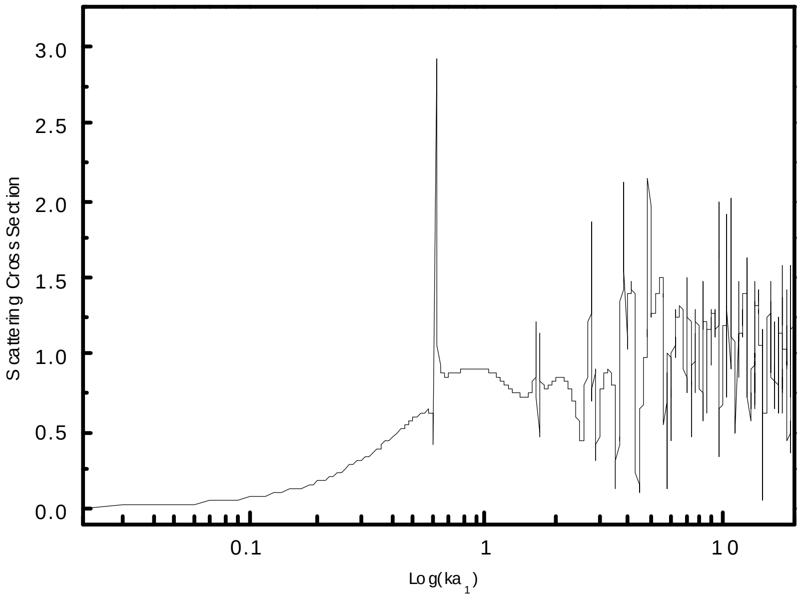

Fig. 2 Scattering cross section of a water filled tube in sodium.

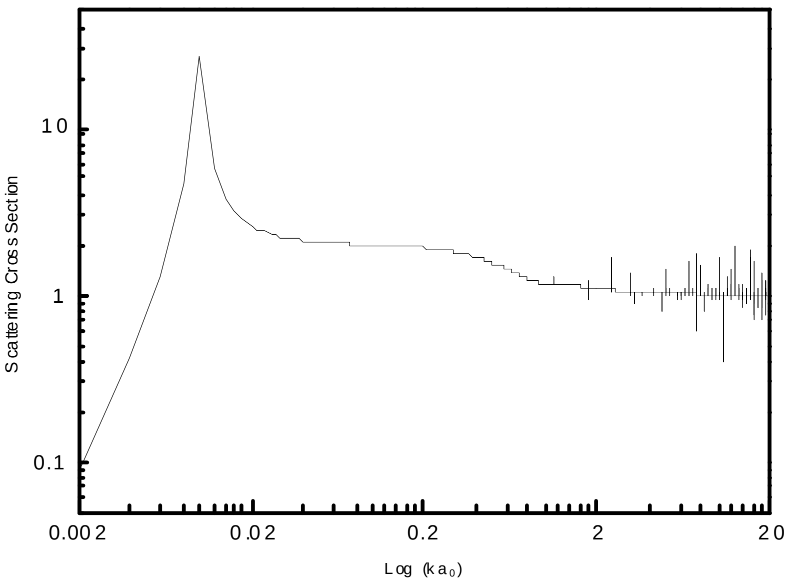

Fig. 3 Scattering cross section of a hydrogen bubble in sodium.