

## 음향학적방법에 의한 원자로랭각재루실 감시에 대한 연구

김성력, 로광철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 현실발전의 요구에 맞게 나라의 과학기술을 빨리 발전시켜야 하겠습니다.》

(《김정일선집》 증보판 제11권 134페이지)

원자력발전소에서 랭각재루실사고가 일어나는 경우 원자로의 정상적인 안전균형이 파괴되고 운영상 비정상적인 사고들이 일어날수 있으므로 루실위치와 크기를 정확히 판단하고 필요한 대책을 세우는것이 중요하다. 이로부터 원자력발전소 1차회로압력경계에서 랭각재루실을 감시측정하기 위한 여러가지 방법[1—4]들이 제기되였다.

문론에서는 이러한 방법들에 대한 비교분석을 진행하고 원자력발전소의 이상진단체에 적용할수 있도록 음향측정기술을 리용하여 랭각재루실감시의 정확성을 높이면서 실시간감시를 진행할수 있는 방법론을 제기하였다.

### 1. 음향학적방법에 의한 루실감시방법

원자력발전소의 1차회로압력경계에서 랭각재가 루실되는 경우 주위의 습도와 온도, 방사능의 준위가 높아지며 압력용기의 압력이 떨어지고 랭각재의 준위가 낮아진다. 따라서 이러한 물리적량들의 변화를 측정하면 랭각재의 루실정도를 평가할수 있지만 주위환경의 영향을 많이 받는것으로 하여 감도가 낮고 루실량이 적은 경우에는 실시간감시가 어렵고 루실위치를 정확히 판단할수 없는 부족점을 가지고있다.

원자력발전소의 압력경계에서 랭각재루실은 음파의 발생을 동반하며 주파수대역은 초음파대역에 놓인다.[1] 따라서 음향수감부를 리용하여 음압에 의해 발생하는 음파에 대한 측정과 분석을 통해 루실량을 실시간감시할수 있을뿐아니라 루실위치도 평가할수 있다.

그림 1에 초음파를 리용한 원자로랭각재루실감시원리도를 보여주었다.

원자로랭각재루실감시는 루실검출과 루실위치의 정확한 판정, 루실량평가의 세단계로 진행된다.

신호수집부분에서는 음향수감부를 리용하여 음파신호의 세기를 실시간적으로 측정하고 그 값이 현장잡음준위를 초과하면 측정된 자료값을 신호해석부분으로 넘긴다. 신호해석부분에서는 루실위치판정과 루실량평가를 진행한다. 우선 수집한 신호에 대한 상관분석을 진행하여 수감부들과 루실점사이거리를 구하고 정확한 루실위치를 찾는다. 다음 루실위치를 판정하는데 기초하여 루실위치에서의 음압준위와 루실구멍의 크기를 평가하고 이로부터 루실량을 평가한다.

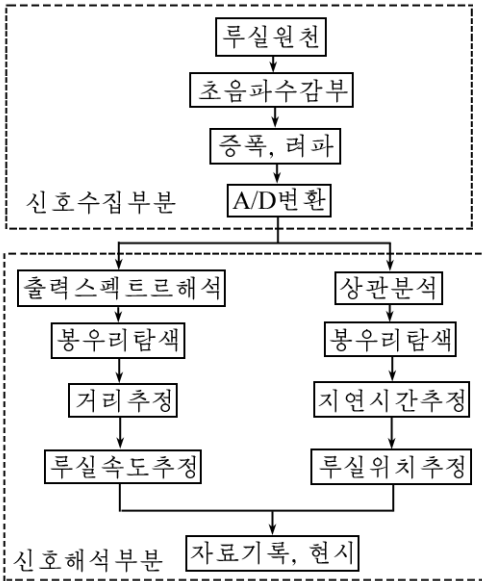


그림 1. 초음파를 이용한 원자로냉각재 루실감시원리도

## 2. 호상상관을 이용한 루실위치결정

음향학적방법에 의한 루실감시에서 루실 위치는 서로 다른 위치에 설치한 음향수감부신호들의 상관분석을 통하여 평가할수 있다. 일반적으로 두 수감부의 신호  $x(t)$ ,  $y(t)$ 의 호상상관함수는 다음의 식에 의하여 정의된다.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)Y(t+\tau)dt \quad (1)$$

두 음향수감부신호사이에 호상상관이 존재하면 상관함수는 어떤 점에서 붕우리값을 가지며 이때 붕우리중심위치는 음파의 지연시간에 해당된다. 지연시간에 음속도를 곱하면 그것은 루실위치로부터 두 수감부사이의 거리차로 된다.

그림 2에서 보는바와 같이 루실점의 위치를  $P$ , 수감부들의 위치를  $M_1, M_2, M_3$ 이라고 하면 지연시간은 루실점으로부터 해당 음향수감부사이의 거리  $L_1, L_2, L_3$ 과 음속도  $v$ 를 리용하여 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\begin{aligned} d_{12} &= (L_1 - L_2)/v \\ d_{13} &= (L_1 - L_3)/v \\ d_{23} &= (L_2 - L_3)/v \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터  $L_1, L_2, L_3$ 을 구할수 있다. 수감부들사이 거리차의 정확도는 호상상관함수로부터 얻어지는 지연시간의 정확도에 의하여 결정된다. 수감부들의 자리표를  $\{X_1, Y_1, Z_1\}, \{X_2, Y_2, Z_2\}, \{X_3, Y_3, Z_3\}, \{X_4, Y_4, Z_4\}$ , 루실원천의 자리표를  $\{X, Y, Z\}$ 라고 하자. 그러면 수감부들사이 거리차  $d_{12}, d_{32}, d_{34}$ 는 다음식으로 표시된다.

$$\sqrt{(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2} - \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2} = d_{12} \quad (3)$$

$$\sqrt{(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2} - \sqrt{(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2} = d_{32} \quad (4)$$

$$\sqrt{(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2} - \sqrt{(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2} = d_{34} \quad (5)$$

3개의 방정식이 있고 3개의 미지수가 있지만 2차뿌리를 처리하기 힘들기때문에 풀이를 구하기 힘들다. 이로부터 다음의 변수변환

$$\sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2} = s_1$$

$$X - X_1 = x, \quad Y - Y_1 = y, \quad Z - Z_1 = z$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = s_1^2$$

을 실시하면 식 (3), (4), (5)는 다음과 같이 쓸수 있다.

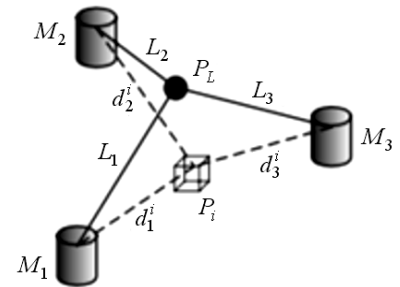


그림 2. 루실위치판별원리

$$\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}=s_1+d_{12} \quad (6)$$

$$\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2}=s_1+d_{12}+d_{23} \quad (7)$$

$$\sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2+(z-z_4)^2}=s_1+d_{12}+d_{23}+d_{34} \quad (8)$$

식 (6)–(8)에서 2차뿌리를 벗어나고 정돈하면 다음식이 얻어진다.

$$[A] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_{12}^2 - (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) + 2s_1 d_{12} \\ (d_{12} + d_{23})^2 - (x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) + 2s_1 (d_{12} + d_{23}) \\ (d_{12} + d_{23} + d_{34})^2 - (x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) + 2s_1 (d_{12} + d_{23} + d_{34}) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서

$$[A] = \begin{pmatrix} -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \\ -2x_4 & -2y_4 & -2z_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

이다. 식 (9)를

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \{X_{01}\} s_1 + \{Y_{02}\} \quad (11)$$

의 형식으로 표시하고 풀면

$$\{X_{01}\} = [A]^{-1} \begin{Bmatrix} 2d_{12} \\ 2(d_{12} + d_{23}) \\ 2(d_{12} + d_{23} + d_{34}) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\{X_{02}\} = [A]^{-1} \begin{Bmatrix} d_{12}^2 - (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) \\ (d_{12} + d_{23})^2 - (x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) \\ 2(d_{12} + d_{23} + d_{34})^2 - (x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

으로 된다. 식 (12), (13)의 오른변에 들어있는 량들은 이미 알려진 량들이므로 계산할수 있다. 식 (11)에서 왼변과 오른변의 렬벡토르들은 같아야 하므로

$$x^2 + y^2 + z^2 = \{X_{01}\} \cdot \{X_{01}\} s_1^2 + \{X_{02}\} \cdot \{X_{02}\} + 2\{X_{01}\} \cdot \{X_{02}\} s_1 \quad (14)$$

로 된다. 여기서  $\{X_{01}\} \cdot \{X_{01}\}$ 은 행렬벡토르  $\{X_{01}\}$ 과  $\{X_{01}\}$ 의 스칼라적을 의미한다.

방정식 (6)과 (14)로부터 다음식이 얻어진다.

$$(\{X_{01}\} \cdot \{X_{01}\} - 1) s_1^2 + \{X_{02}\} \cdot \{X_{02}\} + 2\{X_{01}\} \cdot \{X_{02}\} s_1 = 0 \quad (15)$$

식 (15)로부터  $s_1$ 을 구하면 다음과 같다.

$$s_1 = \frac{-\{X_{01}\} \cdot \{X_{02}\} \pm [(\{X_{01}\} \cdot \{X_{01}\} - 1)\{X_{02}\} \cdot \{X_{02}\}]}{\{X_{01}\} \cdot \{X_{01}\} - 1} \quad (16)$$

방정식 (11)에 식 (12), (13), (16)을 대입하고 수감부들의 자리표계로 표시하면 다음의 식으로부터 루실위치를 결정할수 있다.

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \{X_{01}\} s_1 + \{X_{02}\} + \begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

### 3. 루실량결정방법

루실량을 결정하려면 루실량과 루실구멍의 등가직경사이관계, 루실점에서의 음압과 측정위치에서의 음압사이관계를 알아야 한다. 그러나 실지 측정할수 있는 물리적량은 측정위치에서의 음압이므로 수감부위치에서의 음압으로부터 루실위치에서의 음압을 판정하고 루실위치에서의 음압으로부터 루실구멍의 크기를 결정한 다음 루실구멍의 크기로부터 루실량을 평가하여야 한다.

우선 측정한 음압과 루실점에서의 음압사이관계를 보자. 이 경우 루실점과 수감부사이거리와 음파의 흡수, 반사조건을 고려하여야 한다.

음파의 거리에 따르는 감쇠효과에 의하여  $r$  만큼 떨어진 점에서의 초음파세기  $I = I_0 e^{-2\alpha r}$  이며 여기에 공간상에서 음파의 퍼짐효과를 고려하면 측정위치에서의 음파세기는 다음과 같이 된다.

$$I = I_0 \frac{e^{-2\alpha r}}{4\pi r^2} \quad (18)$$

여기에 로그를 취하여 음파세기준위로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$L_p(f_i) = L_w(f_i) + 10 \lg \left[ \frac{\exp(-2\alpha r)}{4\pi r^2} \right] \pm 2\sigma \quad (19)$$

웃식으로부터 음파의 출력준위를 구하면 다음과 같이 된다.

$$L_w(f_i) = L_p(f_i) - 10 \lg \left[ \frac{\exp(-2\alpha r)}{4\pi r^2} \right] \pm 2\sigma \quad (20)$$

음파의 출력준위는 다음의 식으로 표시된다.

$$L_w = 10 \lg \frac{w}{w_0} \quad (21)$$

여기서  $\alpha$  는 감쇠계수,  $f_i$  는 음파의 주파수,  $r$  는 루실점과 수감부사이 거리,  $w_0$  은 음압,  $\sigma$  는 표준편차이다.

루실구멍의 등가직경을  $d$ , 루실되는 류체의 속도를  $v$  라고 하면 음파의 에네르기는 다음식으로 표시할수 있다.

$$W = K \rho_0 v^8 A_0^{-5} d^2 \quad (22)$$

여기서  $\rho_0$  은 류체의 밀도,  $v$  는 류체의 흐름속도,  $A_0$  은 류체속에서 소리의 속도,  $d$  는 균렬구멍의 직경,  $K$  는 상수로서 마흐(Mach)수가 0.3~1.0사이에 있는 경우  $0.6 \cdot 10^4$  이다. 음향에네르기는 구멍의 직경과 류체의 속도에 관계되며 구멍에서 얻을수 있는 최대속도는 류체의 음속도  $A_0$  이다. 이것은 구멍에서 압력이 림계압력에 도달하는 경우 발생하는데 이때 폐색흐름이 존재하게 된다. 폐색흐름조건이 만족되면 식 (22)는 다음과 같이 간단히 쓸수 있다.

$$W = K \rho_0 v^8 A_0^3 d^2 = Q \cdot d^2 \quad (23)$$

여기서  $Q$  는 상수이다.

식 (22)와 (23)으로부터 균렬구멍의 직경을 구하고 그로부터 루실량과 루실속도를 평가할수 있다.

## 맺 는 말

- 1) 음향수감부로 측정 한 음파세기준위의 스펙트럼분석과 상관분석을 진행하여 루실 유무와 루실위치를 평가할수 있다.
- 2) 루실위치를 평가한 기초우에서 거리에 따르는 음파의 감쇠법칙을 리용하여 루실위치에서 음파의 출력준위를 계산하고 그로부터 루실량을 결정할수 있는 방법론을 세웠다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. A. Aleksandrov; Atomic Energy, 97, 3, 620, 2004.
- [2] Yoshitaka; Journal of Nuclear Science and Technology, 47, 1, 103, 2010.
- [3] S. B. Shimanskii et al.; Atomic Energy, 98, 2, 2005.
- [4] R. Kumar Singh; Nuclear Engineering and Design, 241, 2448, 2011.

주체106(2017)년 9월 5일 원고접수

## Power Plants Coolant Leak Detection by Acoustic Method

*Kim Song Thaek, Ro Kwang Chol*

Based on the consideration of coolant leakage detection methods in NPP, we have proposed a real-time monitoring method of coolant leakage by acoustic method.

We have evaluated the existance and location of leakage throughout spectrum analysis and correlation analysis of sound wave intensity level, and then, using decay law of sound wave according to distance, offered a method that calculated sound power level in leakage point and determined leakage amount from it.

Key words: coolant leakage, leakage detection, cross correlation