

진동신호의 자기상관함수를 이용한 배관두께변화 감지방법에 대한 연구

A Study on Method for Estimating Pipe Thickness by using Auto-correlation Function of the Pipe Vibration Signal

윤두병† · 박진호* · 전형섭** · 손기성**

D.-B. Yoon, J.-H. Park, H.-S. Jeon, and K.-S. Sohn

1. 서 론

원자력발전소를 포함한 플랜트의 경우, 초기 건설 시에 설치된 배관의 노후화에 따라, 배관의 감육(wall thinning) 및 파단이 발생한 사례가 보고되고 있으며, 특히 일본 미하마 원전에서의 배관 감육 및 파단 사고가 발생한 이후 배관의 감육상태를 파악하기 위한 기술에 대한 관심이 증가하고 있다.

발전소의 경우, 배관의 감육상태를 파악하기 위하여 초음파방식의 두께측정기법이 현장에 널리 적용되고 있으며, 이러한 방식은 배관 두께를 정확하게 측정할 수 있으나, 배관 표면에 분포하는 다수의 측정점을 일일이 측정하여야 하므로, 발전소의 예방정비기간에 많은 배관을 검사하기에는 어려움이 있다. 따라서, 비록 배관 두께 측정에 대한 정확도는 다소 떨어지더라도, 배관의 광범위한 부분을 한번에 검사하기 위한 연구에 대한 관심이 높아지고 있다.

본 연구에서는 배관 원주방향을 따라서 전파하는 진동파의 전파속도가 배관의 두께에 따라 달라짐을 이용하여 감육상태(배관두께의 변화)를 파악하기 위한 방법을 개발하기 위한 연구로서, 배관 두께 변화에 따른 진동파의 원주방향 전파속도 변화 정도를 파악하고, 이러한 진동전파 속도 변화를 배관의 감육상태 추정에 활용하는 방법의 타당성에 대하여 알아보고자 한다.

2. 배관 진동파의 원주방향 전파속도

배관의 원주방향으로 전파하는 진동파의 전파속도(c)는 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 이때 ω 는 진동주파수를 나타내며, h 는 배관의 두께를 나타낸다. E 는 배관재질의 영계수(Young's modulus), $I(h^3)$ 는 배관두께의 3승에 비례하는 두께단면의 2차 모우멘트를 나타내며, ρ 는 배관재질의 밀도를 나타낸다.

$$c \propto \sqrt{\omega} \cdot \left(\frac{EI(h^3)}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

식 (1)에서 배관의 원주방향으로 전파하는 진동파의 전파속도(c)는 배관 두께의 함수임을 알 수 있으며, \sqrt{h} 에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 배관감육에 의해서 두께가 감소할수록 원주방향으로 전파하는 진동파의 전파속도는 감소하게 된다.

감육현상에 의해 배관두께가 감소하는 경우, 진동파의 전파속도가 늦어지며, 반복적으로 계측되는 주기(Δt)는 길어지게 되므로, 원주방향 진동파의 주기(Δt)를 측정하면 배관두께의 변화 상태를 검사할 수 있다.

이러한 반복주기를 정량적으로 파악할 수 있는 신호분석용 함수로는 자기상관함수(auto-correlation function)가 있다. 자기상관함수 $R(\tau)$ 는 다음의 식 (2)로 표현되며, 시간지연(반복주기) τ 의 함수로 표현된다. 이 때 $x_1(t)$ 는 가속도계에서 측정된 신호를 나타내며, Δt 마다 반복적으로 동일한 신호가 계측되는 경우, 자기상관함수는 $R(\tau)$ 는 시간지연 $\tau = \Delta t$ 에서 큰 값(피크값)을 갖게 된다.

† 교신저자; 한국원자력연구원
E-mail: yoondb@kaeri.re.kr
Tel: 042-868-8909, Fax: 042-868-8313
* 한국원자력연구원
** (주)세안기술

$$R(\tau) = \text{Expectation}[x_1(t)x_1(t+\tau)] \quad (2)$$

따라서 가속도계로부터 측정된 신호 $x_1(t)$ 에 대한 자기상관함수 $R(\tau)$ 를 구하고, 이 때 $\tau \neq 0$ 인 지점에서 $R(\tau)$ 가 최대값(피크값)을 갖는 시간지연(τ_{\max})이 원주상에서 반복적으로 측정되는 진동파의 반복주기를 나타내게 된다. 그러므로, 배관에 설치된 진동센서로부터 측정된 신호에 대한 자기상관함수 $R(\tau)$ 를 구하고, τ_{\max} 를 구함으로써 배관의 원주방향의 평균적인 두께에 대한 정보를 추정할 수 있다.

3. 원주방향 진동전파 속도 측정실험

제안한 방법의 타당성을 실험적으로 검증하기 위하여, 아래 Fig. 1과 같이 외경은 같고, 배관 두께가 각각 다른 4개의 배관(두께: 3.6mm, 5.2mm, 7.6mm, 9.5mm)에 대한 실험을 수행하였다. 가속도계를 배관에 설치하고, 임팩트해머로 가속도계가 위치한 배관 원주상의 한 지점을 가진(excitation)한 후, 가속도계에서 측정된 진동신호에 대한 자기상관함수를 구하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.



Fig. 1 Experiment for estimating pipe thickness by using measured vibration signal

Fig. 2를 관찰해 보면 배관두께가 가장 얇은 3.6mm 배관(파란색)의 시간지연(τ_{\max})이 가장 크고, 가장 두꺼운 9.5mm 배관(하늘색)의 시간지연이 가장 작게 나타남을 확인할 수 있다.

따라서 두께가 감소할수록 자기상관함수의 반복주기(τ_{\max})가 길어짐을 알 수 있으며, 이를 이용하여 배관의 감육상태를 기존 방법에 비하여 신속하게 파악할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2에서 구

한 자기상관함수의 반복주기(τ_{\max})의 역수인 $1/\tau_{\max}$ 과 배관두께와의 관계를 나타낸 것으로, $1/\tau_{\max}$ 과 배관두께는 비례관계를 나타냄을 관찰할 수 있다. 따라서 발전소 운전 중 주기적으로 실험을 통해 $1/\tau_{\max}$ 을 구해봄으로써, 배관 원주방향의 평균적인 두께변화 상태를 파악할 수 있음을 확인할 수 있다.

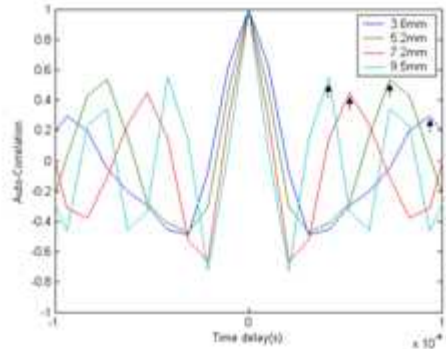


Fig. 2 Auto-correlation of the measured vibration signal due to impact

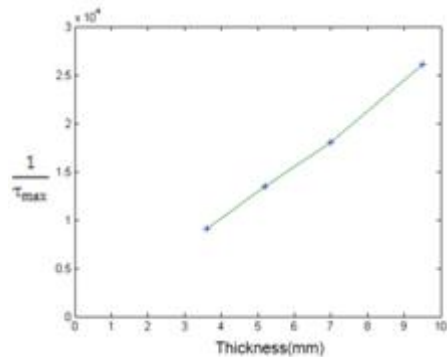


Fig. 3 Relation between thickness and $1/\tau_{\max}$

4. 결 론

본 연구에서는 배관의 원주방향 진동 전파속도를 측정하여 배관두께 변화를 감지하기 위한 기초연구로써, 배관 진동파의 원주방향 전파속도 변화는 배관두께와 상관이 있음을 실험을 통해 확인하였으며, 제안한 방법의 적용 가능성을 확인하였다. 향후 다양한 두께의 배관 및 다양한 형태의 감육 부분을 가진 배관에 대한 실험을 수행하여, 제안방법을 실질적으로 적용하기 위한 연구를 수행할 예정이다.