한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 860~861

쉘 모드 고유 진동수 측정을 통한 배관 감육 감시 방안 연구

Monitoring of wall thinning of a pipe by measuring natural frequencies of shell vibration modes

한순우† · 윤두병* · 박진호*

Soon-Woo Han, Doo-Byung Yoong and Jin-Ho Park

1. 서 론

원자력 발전소 등의 배관에 발생하는 감육(thinning)은 배관의 건전성에 악영향을 미치므로, 가능한 한 조기에 발견하여 지속적으로 모니터링하는 것은 매우 중요하다. 현재는 초음파를 이용하여 배관 두께를 측정하여 감육 여부를 판단하는 기법이 가장 많이 사용되고 있으며, 감육 감시의 효율을 높이기 위해 유도 초음파 기법, 직류 전위차 기법(DCPD) 등을 이용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 기존 배관 감육 감시 기법의 대안으로서 배관의 쉘 (shell) 모드 고유 진동수를 측정하여 감육 여부를 판단하는 기법을 제안하고자 한다. 배관의 두께가 변화하면 고유 진동수가 달라지며 그 변화 정도는 쉘 모드에서 잘 관찰할 수 있다.

본 논문에서는 배관의 두께와 쉘 모드 고유 진동수 간의 관계에 관해 언급하고, 유한 요소 해석을 이용하여 감육이 있는 배관의 고유 진동수 및 모드 형상 변화를 규명하였다. 이후 감육 배관 시편을 이용하여 감육 정도에 따른 고유 진동수의 변화를 실험적으로 살펴본 결과를 제시하였다.

2. 감육 배관 고유 진동수 해석

2.1 배관 두께와 쉘 모드 고유 진동수 관계

배관 쉘 모드 고유 진동수는 다음 식 (1)과 같이 두께에 의해 영향을 받는다.

$$f_i = \frac{\lambda_i}{2\pi R}\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \qquad (1)$$

여기에서 f_i 는 i 번째 고유 진동수, R은 배관 반경, E는 탄성계수, ρ 는 배관 밀도, ν 는 포와송 비이며 λ_i 는 다음과 같이 정해지는 계수이다.

$$\lambda_i = \frac{1}{\sqrt{12}}\frac{t}{R}\frac{i(i^2-1)}{\sqrt{1+i^2}} \qquad (2)$$

여기에서 t 는 배관의 두께이다. 식 (1)과 (2)로부터 배관의 두께에 의해 변화함을 알 수 있다. Fig. 1은 외경 115 mm의 배관이 두께가 5 mm에서 20 mm까지 변화할 때의 고유 진동수를 표시한 것이다.

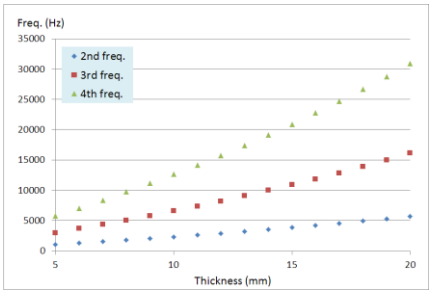
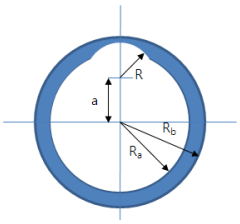


Fig. 1 Natural frequencies of a pipe of d = 115 mm according to the pipe thickness

2.2 배관 감육에 따른 고유 진동수 해석

배관의 전체적인 두께 변화가 아닌, 감육에 의해 고유 진동수가 변화하는 양상을 살펴보기 위해 외경 115 mm, 두께 13.5 mm의 탄소강관에 대해 감육량을 변경하면서 유한 요소 해석을 수행하였다.



Test specimen no.	Area ratio (%)
1	97.7
2	96.1
3	94.0
4	90.0

Fig. 2 A thin-walled pipe model and area ratio

† 교신저자; 정회원, 한국원자력연구원
E-mail : swhan@kaeri.re.kr
Tel : 042-868-2881, Fax : 042-868-8313
* 한국원자력연구원

Fig. 2에 감육 시편 모델의 단면 형상 및 감육량을 나타내었다. 여기에서 감육량은 정상 시편의 단면적에 대한 감육 시편의 단면적 비율로 정의하였다. 이를 단순히 2차원으로 모델링하고 평면 변형률 요소로 요소망을 구성한 후 해석을 수행한 결과를 정리하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1 FEM analysis results for the natural frequencies of a healthy pipe and thin-walled pipes (D: 115 mm, t = 13.5 mm)

Case		Natural frequencies		
		2nd	3rd	4th
Healthy pipe		3214	8666	15651
Thin-walled pipe	1	2823/3192	7873/8483	13952/15126
	2	2808/3118	7888/8142	13942/14517
	3	2821/2950	7714/7875	13938/14163
	4	2651/2795	7355/7423	13445/13539

감육 정도가 증가함에 따라 배관의 고유 진동수는 감소하며, 같은 차수의 고유 진동수가 분기되는 것을 확인할 수 있다. 이는 감육이 발생하면 배관의 전체적인 강성이 약해지면서, 감육이 발생한 위치에 따라 배관의 강성이 달라지기 때문이다. 이상과 같이 해석을 통해 감육이 발생할 경우 배관의 고유 진동수가 감소함을 확인할 수 있었다.

3. 감육 배관 시편의 고유 진동수 측정

감육에 따른 배관 고유 진동수의 변화를 실험적으로 확인하기 위해 Fig. 2와 같은 단면 형상을 가진 감육 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 Fig. 3와 같으며 50 mm의 길이를 갖고 있다.

Fig. 2 Test specimens of thin walled pipes

정상 시편 및 감육 시편에서 측정한 고유 진동수를 비교하면 다음 Table 2와 같다. 유한 요소 해석 결과와 동일하게 감육이 진행함에 따라 차수별 고유 진동수가 분기되면서 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Experimental results for the natural frequencies of a healthy pipe and thin-walled pipes (D: 115 mm, t = 13.5 mm)

Case		Natural frequencies	
		2nd	3rd
Healthy pipe		3169	8588
Thin-walled pipe	1	2806/3150	7837/8431
	2	2753/3062	7793/8031
	3	2750/2887	7581/7737
	4	2631/2769	7306/7401

따라서 감육이 발생하지 않은 초기 상태의 배관의 고유 진동수를 구한 후, 정기적으로 배관의 고유 진동수를 측정하면 비교하면 위의 해석 결과 및 실험 결과에서와 같이 배관의 감육 진행 여부를 파악할 수 있다. 배관의 고유 진동수는 임의의 충격 신호를 가속도계로 측정하여 이의 자기 파워 스펙트럼 (APS)만을 관찰하여도 알 수 있으므로, 이 기법은 하나의 가속도계와 휴대용 스펙트럼 분석기 만을 이용하여도 현장에서 적용이 가능하리라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 배관의 고유 진동수를 측정하여 배관 감육 여부를 판단하는 기법을 제시하였다. 배관이 감육이 진행함에 따라 각 고유 모드 별 고유 진동수가 분기되고 감소되는 것을 유한 요소 해석과 실험을 통하여 확인하였다. 이 기법은 하나의 가속도계 및 휴대용 스펙트럼 분석기 만으로도 현장 적용이 가능하다. 실제의 발전소 배관들에 대해 감육에 따른 고유 진동수 변화 추이 등을 유한 요소 해석 또는 시편 실험 등을 통하여 DB화 한다면 배관의 감육 여부를 정성적으로 파악하는 것은 물론, 감육량 등을 정성적으로 파악할 수 있으리라 예상한다. 추후 본 기법이 실제 현장 배관에서 견실하게 적용 가능한지에 대한 검증 등을 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2012M2A8A4013245)