



## 원주 방향 두께가 불균일한 배관의 진동 모드 특성을 이용한 배관 감육 검사 기법 연구

†한순우 · 서정석 · 박진호

한국원자력연구원 원자력융합기술개발부  
(2016년 7월 27일 접수, 2017년 1월 6일 수정, 2017년 1월 11일 채택)

### Pipe Wall-Thinning Inspection using Vibration Modes of Pipes with Circumferentially Varying Thickness

†Soon-Woo Han · Jeong-Seok Seo · Jin-Ho Park

\*Dept. of Nuclear Convergence Technology, Korea Atomic Energy Research Institute  
Daejeon 34057, Korea

(Received July 27, 2016; Revised January 6, 2017; Accepted January 11, 2017)

#### 요약

현재의 초음파 두께 측정에 기반한 배관 감육 검사 속도를 개선하기 위해 배관 쉘 진동 모드의 고유 진동수 변화를 이용한 감육 검사 기법을 제안하였다. 감육이 발생한 부위의 축방향 수직 단면의 두께는 원주 방향을 따라 불균일하게 변화하는데, 두께가 균일한 경우에 비해 쉘 모드의 고유 진동수가 감소하거나 두 개 이상으로 분기됨을 확인하였다. 배관의 고유 진동수는 한 번의 측정으로도 평가할 수 있으므로, 제안한 방법을 이용하면 축방향 수직 단면의 평균 두께 변화를 빠르게 확인할 수 있어 초음파 두께 측정 방식에 비해 신속한 감육 검사가 가능하다. 본 논문에서는 제안 기법의 원리를 설명하고, 2차원과 3차원 감육 배관 모델 및 시편을 이용한 전산 해석과 실험을 통해 제안한 기법의 적용성을 검증하였다.

**Abstract** - This work proposes an alternative pipe wall-thinning inspection method based on change of eigenfrequencies of shell vibration modes in wall-thinned pipes. It takes much time to detect wall-thinning of pipes using ultrasonic thickness gauge and only a limited number of pipes are under regular inspection. In a pipe with locally decreased thickness, stiffness varies along circumferential direction and natural frequencies of shell vibration modes of the pipe change or frequencies of same modes bifurcate into two different values. Therefore, one can monitor pipe wall-thinning by measuring change of natural frequencies or estimate wall-thinning shape qualitatively. The feasibility of the proposed method was studied by FE vibration analysis for wall-thinned pipes. Modal testing was also carried out for the pipes with artificial wall-thinned section to verify the working performance of the suggested technique.

**Key words** : pipe wall-thinning inspection, natural frequencies, shell vibration modes

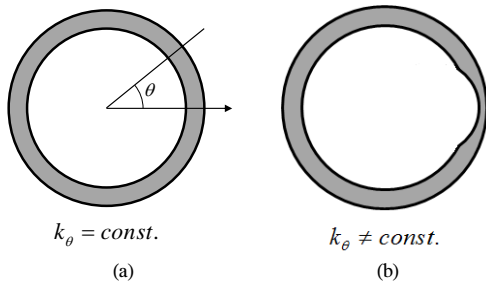
#### 1. 서론

배관 내부의 유체 흐름에 따라 배관의 두께가 감소하는 감육(wall-thinning) 현상은 조기에 발견하여 대

처하지 않으면 배관의 파손은 물론, 시설 전체의 안전에 악영향을 미칠 수 있어 구조 건전성의 중요 검사 항목 중 하나로 설정되어 있다[1,2].

현재는 상용 초음파 두께 측정기를 이용하여 검사 부위 여러 지점의 두께를 측정하여 감육을 검사하는 방법을 많이 사용하고 있다[3,4]. 이 방법은 두께를 정확히 측정할 수 있으나, 한 지점만의 두께를 측정하기

†Corresponding author: swan@kaeri.re.kr  
Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas



**Fig. 1.** Schematics of cross-section of (a) a healthy and (b) a wall-thinned pipe

때문에 감육 검사에 많은 시간이 소요된다. 따라서 사전에 감육 발생 가능성이 높다고 판단된 일부 배관에 대해서만 감육 검사를 수행하고 있어[5,6], 검사 대상이 아닌 배관의 감육 발생 여부는 파악이 어렵다.

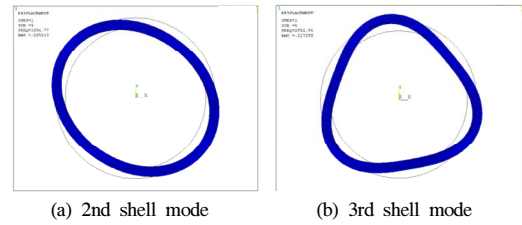
감육은 곡관부, T-분기부 또는 오리피스(orifice) 후 단부에서 주로 발생한다[7]. 배관 축 방향에 수직인 감육 발생부 단면을 가정하면, 감육에 의해 배관의 두께는 원주 방향으로 불균일하게 변화한다. 따라서 배관의 강성 또한 원주 방향을 따라 변하며(Fig. 1) 이는 고유 진동수의 변화를 불러온다.

따라서 감육이 없는 배관의 고유 진동수와 비교하면 감육의 존재 여부를 알 수 있다. 고유 진동수는 한 지점에서만 측정해도 파악할 수 있으므로, 축 방향에 수직인 단면에서의 평균 두께 변화를 한 번에 파악할 수 있어, 여러 지점에서의 두께 측정이 필요한 초음파 감육 검사 방식에 비해 감육 발생 여부를 빠르게 판단할 수 있다.

본 논문에서는 감육 배관 전산 모델과 시편을 이용한 유한요소해석과 시험을 통해 감육에 따른 고유 진동수의 변화를 살펴보았다. 배관의 여러 진동 모드 중 감육에 따른 원주 방향의 강성 변화에 직접적으로 영향을 받는 셸(shell) 진동 모드를 중점적으로 분석하였다. 또한 감육량 뿐 아니라 감육 양상에 따른 고유 진동수의 변화에 대한 해석 및 실험 결과도 기술하였다.

## II. 감육에 의한 배관 진동 모드의 변화

배관의 진동 모드는 굽힘(flexural), 비틀림(torsion) 및 셸(shell) 모드로 구분된다[8]. 배관 단면의 강성 변화는 모든 모드의 고유 진동수에 영향을 준다. 그러나 굽힘 모드는 배관 단면의 변화보다는 배관 길이에 큰 영향을 받으며, 수많은 모드가 존재하기 때문에 검사부의 두께 변화에 의해 어떤 고유 진동수가 변화했는지 찾기 어렵다. 비틀림 모드는 배관 두께에 관계된 비틀림 강성의 영향을 받지만, 모드 별 변형 형상에 의한



**Fig. 2.** Shell vibration modes of a pipe

배관 표면 변위가 원주 방향으로 발생하므로 범용 센서로는 측정이 쉽지 않다[9].

셸 모드도 비틀림 모드와 마찬가지로 배관 두께 변화에 지배적으로 영향을 받으며(Eq. (1)[10] 참조) 배관 길이의 영향은 무시할 수 있다.

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

( $f_i$ : 셸 모드의  $i$ 차 고유 진동수,  $R$ : 배관 반경,  $E$ : 배관 탄성 계수,  $\rho$ : 배관 밀도,  $\nu$ : 배관 포와송 비)

여기에서  $\lambda_i$ 는 다음과 같이 배관 두께  $t$ 의 함수이다.

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

셸 모드에서는 배관 표면의 변위가 반경 방향으로 나타나(Fig. 2 참조) 일반 가속도계로 측정이 가능하며, 굽힘 모드에 비해 모드 수가 적어 고유 진동수의 변화를 관찰하기 쉽다. 이에 본 논문에서는 배관 감육이 셸 모드 고유 진동수 변화에 미치는 영향을 중점적으로 살펴보았다.






## III. 감육에 의한 셸 모드 고유 진동수 변화 분석

실제 배관에서의 감육 영향을 살펴보기 전에, 굽힘 진동 모드의 영향을 최대한 배제하고 셸 진동 모드의 변화만을 관찰하기 위해 길이가 없는 2차원 감육 배관 모델과 축 방향 길이를 최소화한 감육 배관 시편에 대한 해석 및 시험을 수행하였다.

### 3.1. 2차원 감육 배관 모델을 이용한 감육 영향 해석

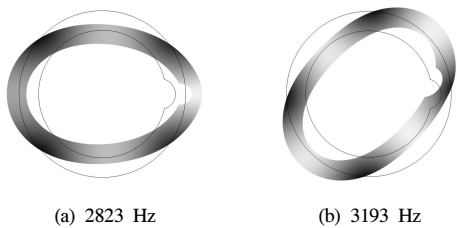
감육량의 영향을 우선 살펴기 위해 건전 배관과, 감육량이 다른 4가지의 감육 배관 등 총 5가지의 2차원 배관 모델(Table 1 참조)에 대한 전산 해석을 수행하였다. 상용 유한요소해석 도구인 COMSOL[11]을 이용

**Table 1.** Thinning amount of 2-D wall-thinned pipe models (outer diameter = 115 mm, normal thickness = 13.5 mm)

	Healthy pipe	Wall-thinned pipe			
		case A	case B	case C	case D
Thinning amount (%)	0	2.3	3.9	6.0	10.0
Cross section					

**Table 2.** The analysis results for natural frequencies of shell vibration modes of 2-D wall-thinned pipe models according to thinning amount

Mode no.	Healthy pipe (Hz)	Wall-thinned pipe (Hz)			
		case A	case B	case C	case D
2	3215	2823	2807	2821	2651
		3193	3118	2950	2795
3	8666	7873	7888	7714	7355
		8483	8142	7875	7423
4	15651	13952	13942	13938	13445
		15126	14517	14163	13539

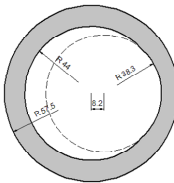
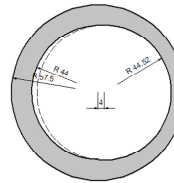
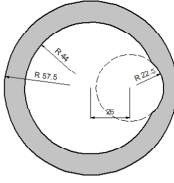
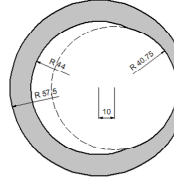
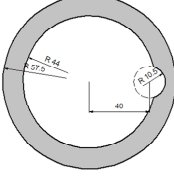
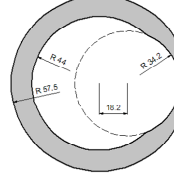


**Fig. 3.** Deformation shapes of 2nd shell vibration modes of case A

하여 2차원 모델링 및 해석을 수행하였다.

Table 2는 그 결과를 보여주는데, 두 가지를 알 수 있다. 우선 예측한 바와 같이 감육량이 증가함에 따라 쉘

**Table 3.** 2-D wall-thinned pipe modes for the analysis of the effect of thinning shape on shell mode eigenfrequencies

Model no.	Wall-thinned pipe set A (Thinning amount 2.3 %)	Wall-thinned pipe set B (Thinning amount 10.0 %)
1		
2		
3		

모드 고유 진동수가 감소하는 것으로 이는 모드 차수 (mode no.)에 관계없이 나타난다. 또 하나는 감육이 발생한 후에는 같은 모드 차수가 두 개로 갈라지는 점이다. 이는 감육에 의해 배관 두께가 원주 방향(Fig.1의  $\theta$ 방향)으로 불균일해지면서 배관 강성 또한 원주 방향에 대해 변화하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 3은 감육량 2.3%의 2차원 배관 모델의 2차 쉘 모드 고유 모드 형상 해석 결과로, 감육에 의한 동일 모드의 분기를 보여준다.

감육량 뿐만 아니라 감육 형상도 배관 단면의 원주 방향 강성 변화에 영향을 주어 고유 진동수 변화를 유발할 수 있다. 이를 확인하기 위해 Table 3와 같이 감육량은 동일하나 감육 형상이 다른 두 세트의 배관 모델에 대해 고유 진동수를 해석하였다. 각 세트마다 1번 모델에 비해 3번 모델의 감육 발생 범위가 상대적으로 협소하게 설정하였다.

해석 결과는 Table 4에 정리하였다. 감육에 의해 동일한 모드 차수에서 분기된 고유 진동수 간 차이값( $\Delta f$ )이 3번 모델로 갈수록 커짐을 볼 수 있다. 감육량이 같아도 감육부가 협소하여 배관 단면의 원주 방향 두께

**Table 4.** The analysis results for eigenfrequencies of shell vibration modes of 2-D wall-thinned pipe models according to thinning shape

Shell mode no.	Model no.	Set A		Set B	
		$f$	$\Delta f$	$f$	$\Delta f$
2 <sup>nd</sup> shell mode	1	3053	83	2750	34
		3136		2784	
	2	2942	238	2651	144
		3180		2795	
	3	2823	370	2580	151
		3193		2731	
3 <sup>rd</sup> shell mode	1	8347	29	7487	23
		8376		7510	
	2	8139	296	7355	68
		8435		7423	
	3	7873	610	7300	128
		8483		7428	

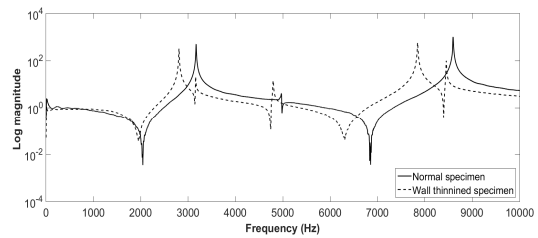
가 급격하게 변하면 단면의 가로 방향과 세로 방향 간 강성 차이가 커진다. 따라서 같은 모드에서도 고유 진동수가 분기되고 그 차이도 커지는 것으로 생각된다. 즉 고유 진동수의 변화를 관찰하면 감육의 발생 여부 뿐 아니라 감육 양상을 정성적으로 파악할 수도 있다.

**3.2. 길이가 짧은 감육 배관 시편에서의 고유 진동수 변화 실험 결과**

감육에 의한 셸 모드 고유 진동수 변화를 실험적으로도 살펴보았다. 시편 배관의 직경, 두께 및 감육 형상은 해석 모델과 동일하게 유지하였으나, 굽힘 진동 모드의 영향은 최대한 배제하면서 센서 부착 등은 가능하도록 축 방향 길이는 50 mm로 제작하였다. 해석과 마찬가지로 감육량과 감육 형태가 고유 진동수 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 이후의 모든 실험에서는 임팩트 해머 B&K 8203을 이용하여 시편을 가진하였고, 가속도계 B&K 4374를 이용하여 진동 응답을 측정하였으며, B&K Pulse 시스템을 이용하여 신호를 저장하고 분석하였다. Fig. 5는 정상 시편과 감육 시편 각각에서 측정한 주파수 응답 함수 비교 예를 보여주고 있다. 해석 결과에서와 마찬가지로 감육 시편에서는 고유 진동수가 감소하면서 분기되는 것을 볼 수 있다. Table 5에는 감육량에 따른 고유 진동수 변화 측정 결



**Fig. 4.** Test specimens of wall-thinned pipes with short axial length



**Fig. 5.** Comparison of frequency response functions of the healthy pipe specimen and a wall-thinned pipe specimen

**Table 5.** The experimental results for natural frequencies of shell vibration modes of test specimens in Fig. 4 according to thinning amount

Mode no.	Healthy pipe (Hz)	Wall-thinned pipe (Hz)			
		case A	case B	case C	case D
2	3169	2802	2753	2750	2631
		3154	3062	2887	2769
3	8588	7843	7793	7581	7306
		8431	8031	7737	7401

과를, Table 6에는 감육 형태에 따른 동일 모드 고유 진동수 간의 차이를 정리하였다. 해석과 실험 결과를 정리하면 배관에 감육이 발생하면 셸 모드 고유 진동수는 분기되며 분기된 진동수 중 낮은 값 및 분기된 진동수 간의 차이값 변화는 감육 정도 및 양상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

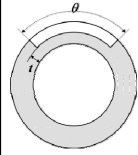
**Table 6.** The experimental results for natural frequencies of shell vibration modes of test specimens in Fig. 4 according to thinning shape

Shell mode no.	Model no.	Set A		Set B	
		$f$	$\Delta f$	$f$	$\Delta f$
2 <sup>nd</sup>	1	3065	69	2836	6
		3134		2842	
	2	2957	259	2634	132
		3216		2766	
	3	2802	352	2628	197
		3154		2825	
3 <sup>rd</sup>	1	8512	91	7681	49
		8603		7730	
	2	8399	292	7383	85
		8691		7468	
	3	7843	588	7370	106
		8431		7476	

#### IV. 실 배관 모델 및 시편에서의 감육에 따른 고유 진동수 변화 해석 및 실험

단순화된 배관 모델 및 시편을 대상으로 감육에 따른 쉘 모드 고유 진동수의 변화를 분석한 후, 실제의 3차원 감육 배관 모델 및 시편을 제작하여 감육의 영향을 살펴보았다. 직관 및 곡관 각각의 모델과 시편에서 단면 형상은 앞 절과 동일한 외경 115 mm, 두께 13.5 mm로 적용하였다. 길이가 긴 배관의 내부를 가공하는 것이 현실적으로 어려워 배관의 외부를 가공하여 감육을 모사하였다. 이는 실제의 감육 발생 부위와는 다르지만 배관의 원주 방향 두께 변화는 유사하게 모사한다는 점에서 제안한 방법의 적용성을 검증하기에는 문제가 없다고 판단하였다. 이하의 해석 모델과 실험 시편에서의 감육부 형상은 Table 7에 정리하였고 이는 직관과 곡관 모두 동일하다. Case I, III 및 V의 비교를 통해서는 감육량의 영향을, Case II, III 및 IV의 비교를 통해서는 감육량은 유사하나(20% 부근) 감육 발생 범위가 달라질 때의 고유 진동수 변화를 살펴볼 수 있도록 시편을 설계하였다. 직관 및 곡관 진동 해석 시 CAD 프로그램인 CATIA를 이용하여 3차원 모델을 만들었고, 해석은 앞과 같이 COMSOL을 이용하여 수

**Table 7.** Cross-section of wall-thinned straight and curved pipe models and test specimens

	case	$t$ (mm)	$\theta$ (deg.)	Thinning amount (%)
	I	9.0	120	12.1
II	8.0	160	19.5	
III	6.0	120	19.6	
IV	3.0	90	20.0	
V	3.0	120	26.7	

행하였다.

앞에서 살펴본 바와 같이 쉘 진동 모드에서는 단면의 변형이 주되게 발생하지만, 길이가 있는 실제의 배관에서는 축 방향에 따라 단면 변형 형상이 달라진다. 이하에서는 이를  $(m, n)$ 으로 표시하였는데  $m$ 은 단면 변형과 관련된 모드 차수를,  $n$ 은 축 방향으로의 단면 변형과 관련된 모드 차수를 의미한다.

또한 길이가 있는 배관에서는 쉘 진동 모드 외에 굽힘 진동 모드가 넓은 주파수 범위에 걸쳐 다수 차수로 발생한다. 따라서 이하에서는 감육에 의한 쉘 진동 모드와 굽힘 진동 모드의 변화를 구분하여 살펴보았다.

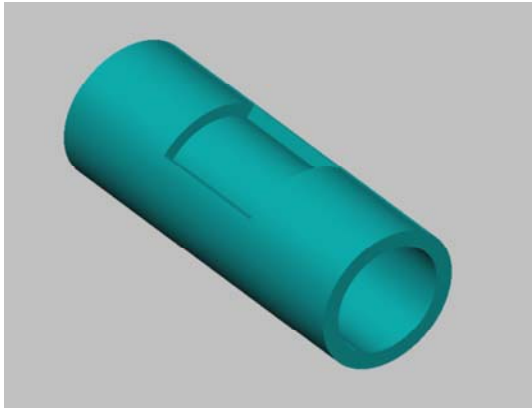
#### 4.1 감육 직관에서의 감육 영향 분석

감육 단면은 Table 7과 같으며 축 방향 길이는 300 mm인 직관 모델 및 시편의 고유 진동수를 해석하고 실험적으로 측정하였다.

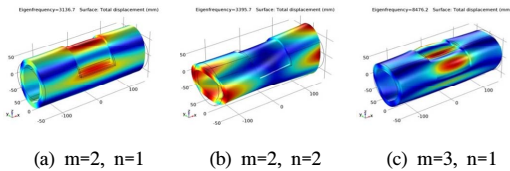
##### (1) 해석 결과 비교

해석 모델의 예를 Fig. 6에, 쉘 모드 해석 결과의 일부를 Fig. 7에 나타내었다. 해석 결과를 낮은 차수부터 정리해 보면(Table 8 참조) (2,2) 모드를 제외하면 감육량 증가에 따른 고유 진동수의 감소 및 감육 형상에 따른 고유 진동수 간 차이값의 변화를 확인할 수 있다. (2,2) 모드에서 감육량 및 감육 형상이 변화해도 고유 진동수는 변하지 않는 이유는 해당 모드에서는 감육부의 변형이 크지 않아(Fig. 7 (b) 참조) 감육에 의한 강성 변화가 전체 고유 진동수에 미치는 영향이 작기 때문으로 판단된다. 따라서 고유 진동수 변화를 통해 배관 감육 발생 여부를 판단할 때는 감육 검사 부분의 변형이 큰 모드를 선택하는 것이 유리함을 알 수 있다.

굽힘 진동 모드 해석 결과는 Table 9에 별도로 정리하였는데, 동일 진동 모드에서의 고유 진동수 분기 현상은 나타나지 않았으나 감육량의 증가에 의한 고유 진동수의 감소(case I, III 및 V 비교)는 확인할 수 있다.



**Fig. 6.** The FE model for the analysis of effect of wall-thinning on change of natural frequencies of straight pipes.



**Fig. 7.** Several shell vibration mode shapes of the thin-walled straight pipe of case II of Table 7.

(2) 측정 결과 비교

해석 모델과 동일한 직관 감육 시편을 제작하고 (Fig. 8) 감육에 따른 고유 진동수 및 변형 형상을 측정하였다. 그 일례를 Fig. 9에 나타내었고 셸 모드 고유진동수 측정 결과는 Table 10에 정리하였다.

실험에서도 감육량에 의한 셸 모드 고유 진동수의 감소와 감육 형상에 의한 고유 진동수 차이의 변화를 확인할 수 있다.

시편이 축 방향 길이를 가짐에 따라 굽힘 진동 모드는 여러 주파수에서 나타나는데, 그 중에서는 Table 11과 같이 감육과 고유 진동수 변화의 상관성을 확인할 수 있는 주파수도 있으나 대부분의 모드에서는 변화를 명확히 확인하기 힘들었다.

정리하자면, 직관 모델 및 시편에서는 감육량 및 감육 양상과 셸 모드 고유 진동수 변화 간의 상관성을 해석과 실험을 통해 확인할 수 있었다. 이 경우 검사 부위의 셸 모드를 사전에 파악하고 낮은 차수의 모드 3개의 변화를 관찰하면 감육 평가가 가능하리라 판단된다. 오리피스가 설치된 직관에서는 오리피스 후단부에 감

**Table 8.** The analysis results for natural frequencies of shell vibration modes of wall-thinned straight pipe models

Shell mode no. (m,n)	Analysis case	f		Δf
		Healthy	Thinned	
(2,1)	Healthy	3317		0
	I	3200	3239	40
	II	3137	3193	56
	III	3147	3211	64
	IV	3051	3126	75
	V	2983	3145	162
(2,2)	Healthy	3440		0
	I	3411	3411	0
	II	3396	3403	7
	III	3398	3398	0
	IV	3390	3407	17
	V	3386	3392	6
(2,3)	Healthy	4479		0
	I	4265	4291	26
	II	4145	4167	22
	III	4211	4284	73
	IV	4174	4300	126
	V	4119	4189	70
(3,1)	Healthy	8916		0
	I	8579	8718	139
	II	8248	8476	228
	III	7999	8328	329
	IV	6917	8062	1145
	V	6627	7361	734

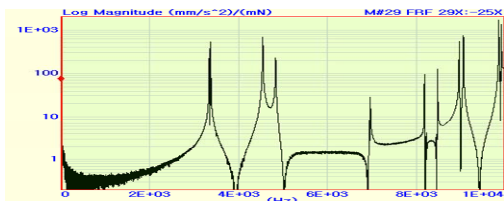
**Table 9.** The analysis results for natural frequencies of bending vibration modes of wall -thinned straight pipe models

Bending mode no	Analysis case					
	Healthy pipe	Thin-walled pipes				
		I	II	III	IV	V
1	4738	4709	4605	4683	4734	4631
2	7949	7709	7463	7449	7511	7200

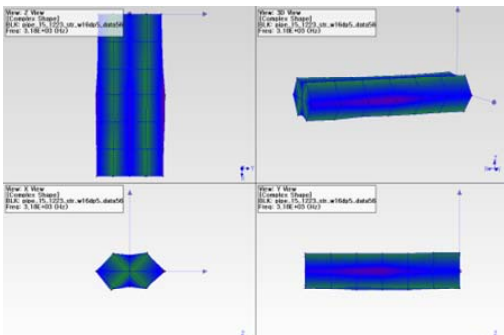
육이 발생하는 경우가 있는데, 이 부위에 본 방법을 적용하면 직관의 감육 발생 여부를 신속하게 검사할 수 있을 것으로 판단한다.



Fig. 8. The specimens for test of wall-thinning effect on eigenfrequency change of straight pipes.



(a)



(b)

Fig. 9. Examples of (a) frequency response functions and (b) mode shapes measured at thin-walled straight pipes.

## 4.2 감육 곡관에서의 감육 영향 분석

Fig. 10과 같은 곡관 모델에 대해 감육 발생 전·후의 고유 진동수 변화를 해석을 통해 비교하였다. 감육 배관의 단면은 Table 7에 따라 모델링하였다.

곡관은 그 형상으로 인해 낮은 주파수 대역에서도 많은 진동 모드가 발생하며, 동일한 진동 모드 내에도 여러 고유 진동수가 인접하여 존재한다(Table 12). 그 중

Table 10. The test results for natural frequencies of shell vibration modes of wall-thinned straight pipe specimens

Shell mode no. (m,n)	Test case	$f$		$\Delta f$
(2,1)	Healthy	3360		0
	I	3167	3204	37
	II	3170	3205	35
	III	3148	3196	48
	IV	3016	3170	154
	V	3035	3155	120
(2,2)	Healthy	3490		0
	I	3445	3450	5
	II	3440	3446	6
	III	3421	3442	21
	IV	3450	3468	18
	V	3382	3410	28
(2,3)	Healthy	4560		0
	I	4330	4354	24
	II	4244	4270	26
	III	4105	4230	125
	IV	3472	3770	298
	V	3945	4202	257
(3,1)	Healthy	8506		0
	I	8574	8782	208
	II	8341	8560	219
	III	8122	8440	318
	IV	7912	8285	373
	V	7467	7798	331

**Table 11.** The test results for natural frequencies of bending vibration modes of wall-thinned straight pipe specimens

Healthy pipe	Thin-walled pipes				
	I	II	III	IV	V
4856	4640	4540	4460	4256	4310

**Table 12.** The analysis results for natural frequencies of shell vibration modes of a healthy curved pipe model

Shell mode (m,n)	Natural frequencies (Hz)
(2,2)	3445, 3462, 3493, 3501, 3612
(2,4)	3978, 4240, 4274, 4431, 4433
(2,5)	4932, 4998, 5590, 5777

**Table 13.** The analysis results for natural frequencies of shell vibration modes of wall-thinned curved pipe models

Shell mode (m,n)	Analysis case					
	Healthy pipe	Thin-walled pipes				
		I	II	III	IV	V
(2,4)	4240	4235	4221	4224	4126	4031
(2,5)	5590	5511	5426	5380	5202	5268

**Table 14.** The test results for natural frequencies of wall-thinned curved pipe specimens

No.	Test case					
	Healthy pipe	Thin-walled pipes				
		I	II	III	IV	V
1	950	932	898	890	870	854
2	1760	1750	1692	1704	1662	1662
3	4255	4180	4110	4045	3742	3650
4	4446	4362	4235	4246	4190	4135
5	5108	4920	4850	4738	4726	4570

에서 감육부의 변형이 크게 나타나는 일부 모드의 고유 진동수는 감육량에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있었다(Table 13 참조). 그러나 수많은 고유 진동수가 존재하는 관계로 기타 진동 모드에서는 감육량에 따른 셸 모드 고유 진동수의 변화 및 감육 형상에 따른 고유 진동수의 분기 등을 추적하는 것은 어려웠다.

해석 모델과 동일한 감육 곡관 시편을 제작하여 감육에 의한 고유 진동수 변화를 실험적으로도 살펴보았다. 신속한 배관 감육 검사를 가정하여 배관별로 동일한 지점(Fig. 10의 A 지점)에서 주과수응답함수를 한번만 측정하여 고유 진동수를 분석하였다. Table 14에 배관별로 측정 결과를 비교하였는데, 한 지점에서의 측정만으로는 셸 모드와 굽힘 모드를 구분할 수 없으므로 단순히 크기순으로 고유 진동수 측정 결과를 나열하였다. 감육부에서만 측정했으므로 이 부분에서 변형이 적은 모드의 고유 진동수는 잘 측정되지 않아 해석에 비해서는 적은 수의 고유 진동수가 나타나지만, 측정된 고유 진동수들이 감육량에 비례하여 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 해석 결과를 기준으로 할 때 셸 모드로 볼 수 있는 4 ~ 5 kHz 대역의 고유 진동수의 변화가 큰 것을 확인하였다. 즉 실험 결과에서는 감육부의 강성 변화에 영향을 크게 받는 모드의 고유 진동수가 주로 측정되었고 이 값들이 감육에 의해 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 제안한 방법에 의해 곡관의 감육 발생 여부도 한 번의 측정으로 신속하게 검사할 수 있음을 의미한다. 물론 이를 위해서는 감육이 발생하지 않은 상태의 배관 고유 진동수를 사전에 측정하여 기준값으로 설정해야 하며 이는 직관의 경우도 마찬가지이다.



**Fig. 11.** Test specimens of wall-thinned curved pipes.



## V. 결 론

감육에 의해 원주 방향의 두께가 불균일해진 배관에서의 고유 진동수 변화, 특히 쉘 모드 고유 진동수의 변화를 이용하여 배관의 감육 발생 여부를 1차적으로 신속하게 판단할 수 있는 방법을 제안하였다. 여러 형태의 감육 배관 모델과 시편을 이용한 전산 해석과 실험을 수행하여 제안한 방법을 검증하였다. 직관에서는 감육량에 따른 고유 진동수의 변화와, 감육 형상에 따른 동일 모드 내 고유 진동수의 분기를 확인하였다. 감육 곡관에 대한 실험에서도 감육량에 따른 쉘 모드 고유 진동수의 변화를 입증하였다. 고유 진동수는 한번의 측정으로도 분석할 수 있으므로 검사 대상 배관별 고유 진동수를 사전에 파악하고, 수시 또는 주기적으로 그 변화를 모니터링하면 설비의 운영 중에도 현재보다는 많은 수의 배관에 대해 감육 발생 여부를 신속하게 점검할 수 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 출연금으로 지원을 받아 수행된 한국원자력연구원 주요사업의 성과임.

## REFERENCES

- [1] Wu, P. C., *Erosion/Corrosion-Induced Pipe Wall Thinning in US Nuclear Power Plants*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, (1998)
- [2] Song, K. H., Lee, S. M., Chang, Y. S., Choi, J. B., and Kim, Y. J., "Estimation of Local Stress Change of Wall-Thinned Pipes due to Fluid Flow," *KIGAS*, **10**(3), 7-12, (2006)
- [3] Nishiguchi, I., Inada, F., Takahashi, M, Ogawa, B., Inagaki, T, Ohira, T, Iwahara, K., and Yamakami, K., "A Review: Japanese pipe wall thinning management based on JSME rules and recent R&D studies performed to enhance the rules", *E-Journal of Advanced Maintenance*, **2**, 14-24, (2011)
- [4] Knook, T., Persoz, M., Trevin, S., Friol, S., Mouttrille, M. -P., and Dejoux, L., "Pipe wall thinning management at Electricite de France (EDF)," *E-Journal of Advanced Maintenance*, **2**, 1-13, (2011)
- [5] Schefski, C., Pietralik, J., Hazelton, T., and Bitonte, V., "CHECWORKS - Integrated Software for Corrosion Control", *Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on CANDU Maintenance*, 82-87, (1997)
- [6] Baier, R. and Zander, A., "COMSY-A software tool for aging and plant life management with an integrated documentation tool", *Proceedings of IYNC 2008*, 246.1-246.9, (2008)
- [7] Hwang, K. M., "Cause analysis for the wall thinning and leakage of a small bore piping downstream of an orifice", *Corrosion Science and Technology*, **12**(5), 227-232, (2013)
- [8] Olson, D. E., *Companion Guide to the ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Chapter 37. Pipe Vibration Testing and Analysis*, ASME, 1-37, (2008)
- [9] Janssens, K. and Britte, L., "Comparison of torsional vibration measurement techniques", *Proceedings of ISMA2012-USD2012*, 1447-1461, (2012)
- [10] Blevins, R. D., *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, 3<sup>rd</sup> ed., Krieger Pub. Co., Malabar, (2001)
- [11] *COMSOL Structural Mechanics Module User's Guide*, (2015)