

<연구논문>

국부 감육이 배관 굽힘 컴플라이언스에 미치는 영향

서기완·김재민·김윤재[†]

Effect of Local Wall Thinning on Pipe Elastic Bending Compliance

Ki-Wan Seo, Jae-Min Gim and Yun-Jae Kim[†]

(Received 20 October 2021, Revised 29 November 2021, Accepted 29 November 2021)

ABSTRACT

The thickness of pipe can be locally reduced during operation due to wall thinning. Due to its significance on structural integrity, many non-destructive detecting techniques and assessment methods are available. In this study, the elastic bending compliance of local wall-thinned pipe is presented in terms of the wall thinning geometry: wall thinning depth, circumferential angle and longitudinal length. Elastic finite element (FE) analysis further shows that the presented equation can be used for any wall thinning shape. The proposed solution differs from FE results by less than 6% for all cases analyzed. The bending compliance increases linearly with increasing longitudinal thinning length and non-linearly with increasing thinning angle and depth.

Key Words : Elastic Compliance(탄성 컴플라이언스), Wall-thinned Pipe(감육 배관), Finite Element Analysis(유한 요소 해석)

기호설명

t = thickness of pipe
 L = half length of pipe
 r_o = outer radius of pipe
 r_i = inner radius of pipe
 l = half length of wall thinning
 q = half circumferential angle
 a = depth of wall thinning
 M = applied bending moment
 f = rotating angle of pipe with wall thinning
 f_0 = rotating angle of plain pipe
 f_l = rotating angle of wall-thinned pipe
 C = bending compliance of pipe with wall thinning

C_0 = bending compliance of plain pipe
 I = moment of inertia of pipe with wall thinning
 I_0 = moment of inertia of plain pipe
 I_l = moment of inertia of wall thinned pipe
 d_l = distance from wall thinning edge to neural axis

1. 서론

원자로의 배관이나 지하에 매설된 공급관 등은 여러 요인에 의해 국부적으로 두께가 얇아지는 현상(배관의 국부 감육)이 발생한다⁽¹⁾. 국부 감육은 배관의 건전성에 큰 영향을 주기 때문에, 국부 감육 배관의 건전성을 평가하기 위한 여러 가지 방법들이 존재한다. 미국 Nuclear Regulatory Commission(NRC)에서는 1986년 발생한 Surry 원전 2호기 사고의 발생 이유를 국부 감육으로 인한 급수관 파열로 분석했으며, 이 외의 감육으로 인한 여러 사고의 조치로 감육 배관의 두께를 측정해 감육 배관의 건전성 평가를

[†] 회원, 고려대학교 기계공학부
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)9299-1718
* 고려대학교 기계공학부

하도록 권고하고 있다⁽²⁾. 국내에서도 Code Case N597-2⁽³⁾를 참고해 검사 시점에 두께를 측정 후 차기 검사 시점의 예상 두께를 계산하여 최소 요구 두께와의 비교를 통해 현 검사 시점의 관리 여부를 결정하는 등의 방법으로 배관의 감육을 평가하는 중이다⁽⁴⁾. 위의 방법들로 감육을 평가하기 위해 배관의 현재 감육 상태를 측정하는 기술도 같이 발전 중이다. 감육 배관의 평가에 대한 연구는 펄스와전류(PEC)를 이용해 감육부의 두께를 측정하는 비파괴적 방법에 대한 연구와^(5,6), 유한요소해석을 이용해 감육 배관의 과열압을 예측하거나, 감육부에서 균열이 발생하는 조건을 예측하는 등의 수치해석적 연구가 수행된 바가 있다^(7,8). 그러나 감육 형상을 통해 배관의 컴플라이언스를 이론적으로 예측하는 연구는 확인하지 못했다.

본 연구에서는 이론적으로 계산된 국부 감육 배관의 형상에 따른 탄성굽힘 컴플라이언스식을 제시하고 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 검증했다. 또한 제시된 식을 이용 감육 형상 변수가 배관의 컴플라이언스에 미치는 영향을 분석했고, 역으로 컴플라이언스를 통해 감육 형상을 예측하는 방법을 제안한다.

2. 국부 감육배관의 굽힘 컴플라이언스 식

2.1 모델

본 연구에서 분석한 감육 배관 형상은 Fig. 1과 같다. 감육은 사각 형상으로 가정했고, 배관의 중심부에 위치한다고 가정했다. 배관은 단면의 중심에 굽힘하중 M 으로 인해 굽힘각 ϕ 가 생긴다고 가정했다. 배관 형상 변수는 $2L$ 은 총 길이, t 는 배관 두께, r_o 는 외경, r_i 는 내경으로 설정했으며, 감육 형상에 대한 변수는 a 는 감육 깊이, $2q$ 는 감육 각, $2l$ 는 감육 길이를 의미한다.

2.2 굽힘 컴플라이언스 계산

탄성 영역에서 서로 선형적인 관계를 갖는 변수는 중첩의 원리를 적용할 수 있다⁽⁹⁾. 본 연구에서는 굽힘각과 굽힘하중의 선형성을 기반으로 중첩의 원리를 적용해 국부 감육 배관의 탄성 컴플라이언스를 계산했다. 굽힘 컴플라이언스 계산을 위해 Fig. 1에서 설명한 감육배관의 축방향 중심을 대칭면으로 설정해 Fig. 2와 같이 절반으로 분석 모델을 간략화했다.

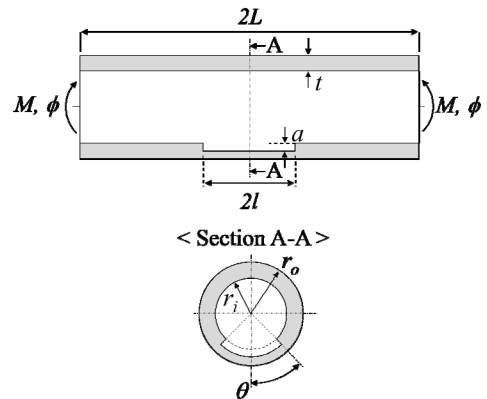


Fig. 1 Schematic of an analysis model for a pipe with wall thinning.

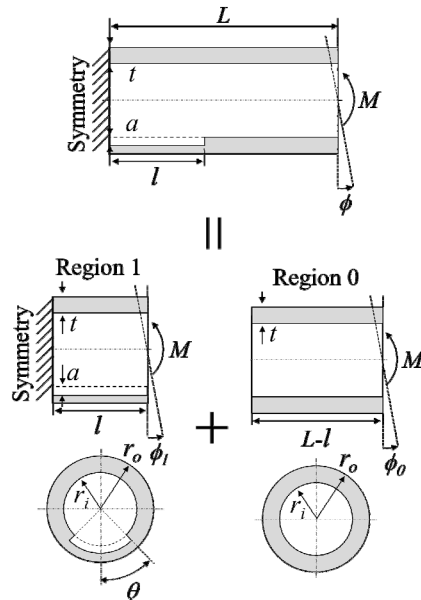


Fig. 2 Schematic illustration for analysis of bending compliance using the superposition principle.

간략화된 감육 배관을 두 개의 구역으로 나누어 개별적으로 거동을 계산한 뒤 중첩 원리를 이용해 전체 배관의 거동을 계산했다. 이 때 배관은 대칭면으로부터 감육길이 l 만큼 떨어진 거리를 기준으로 나뉘었다. 나뉜 배관의 첫 번째 구역 (Region 1)은 배관 전체가 감육된 배관으로 분석이 가능하며, 두 번째 구역 (Region 0)은 배관 전체가 온전한 배관으로 분석이 가능하다. 굽힘하중 M 은 힘 평형으로 전체 배관에 동일하게 작용하며, 이로 인한 구역 1과 구역 0의 굽힘각

은 각각 f_1, f_0 로 표현했다. 굽힘하중에 의한 굽힘각은 고체역학적 계산에 의해 다음과 같이 계산된다⁽⁹⁾.

$$\phi = \frac{L}{EI}M ; I = \int y^2 dA \quad (1)$$

이 때 E 와 I 는 각각 물체의 탄성계수와 관성 모멘트를 나타낸다. 전체 배관의 굽힘각은 구역 0과 구역 1의 굽힘각의 합으로 다음과 같이 계산할 수 있게 된다.

$$\phi = \phi_0 + \phi_1 ; \phi_0 = \frac{L-l}{EI_0}M ; \phi_1 = \frac{l}{EI_1}M \quad (2)$$

I_0 와 I_1 은 각각 온전한 배관의 단면과 감육이 있는 배관의 단면의 관성모멘트를 의미하며 원주 방향을 따라 배관 단면의 면적을 적분하여 계산할 수 있다. 굽힘하중하 국부 감육 배관의 탄성 컴플라이언스 C 는 아래와 같이 계산된다.

$$C = \frac{\phi}{M} = \frac{L}{EI} ; \frac{I}{I_0} = \frac{\frac{I_1}{I_0}}{\left(1 - \frac{l}{L}\right)\frac{I_1}{I_0} + \frac{l}{L}} \quad (3)$$

변수들의 무차원화를 위해 식 (3)의 C 를 감육이 없는 배관의 굽힘 컴플라이언스 C_0 로 나누게 되면 감육배관의 컴플라이언스는 최종적으로 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{I_0}{I} = 1 - \frac{l}{L} + \frac{l}{L} \frac{I_0}{I_1} \quad (4)$$

3. 유한요소해석 검증

3.1 유한요소해석 개요

유한요소해석을 통해 제안한 탄성 컴플라이언스 계산식을 검증했다. 검증은 총 76개의 조건에 대해 수행했으며, 세 개의 감육 변수 (감육 길이 l , 감육 깊이 a , 감육 각 q)를 기준으로 분석했다. 세 개의 감육 변수는 전체 길이 L , 두께 t , 원주각 p 로 정규화 했고, 정규화된 값을 0~1 사이에서 결정해 분석했다. 두께에 대한 반경비 r_o/t 는 5와 50으로 설정했으며, 한 경우에 대해서 두께에 대한 반경비의 영향을 분석했다. 전체 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Summary of analysis cases

Shape	Constant-depth	Semi-ellipse
θ/π	0.25, 0.5, 0.75, 1	0.25, 0.5, 0.75, 1
l/L	0(Crack), 0.25, 0.5, 0.75	0.5
r_o/t	5	50
a/t	0.5	0.25, 0.5, 0.75

3.1.1 유한요소해석 모델링

해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 이용하여 수행했다. 해석에 사용된 모델링은 Fig. 3와 같다. 유한요소 모델링은 1/4 모델로 만들었으며 각 단면을 대칭면으로 설정했다. 물성은 탄성계수는 200 GPa, 프와송 비는 0.3로 가정해 탄성해석을 했기 때문에 대변형 유무에 따른 결과 차이는 발생하지 않았다. 요소는 3차원 2차 저감적분 요소 (C3D20R)를 이용했으며, 감육 형상에 따라 20,586개에서 79,920개 사이의 요소를 이용했다. 감육 근처는 두께 방향 요소를 12개로 설정했으며, 감육과 먼 부분에서는 두께 방향 요소를 6개로 설정하였다. 굽힘하중은 해석 모델의 끝단에 ABAQUS의 Multi Point Constraint (MPC) 옵션을 이용해 배관의 중앙부에 가했다. 결과 분석을 위해 하중이 가해진 지점에서 굽힘각을 추출해 컴플라이언스를 계산했다. 이렇게 계산한 컴플라이언스는 감육이 없는 배관의 컴플라이언스로 나누어 해석 결과 검증을 수행했다.

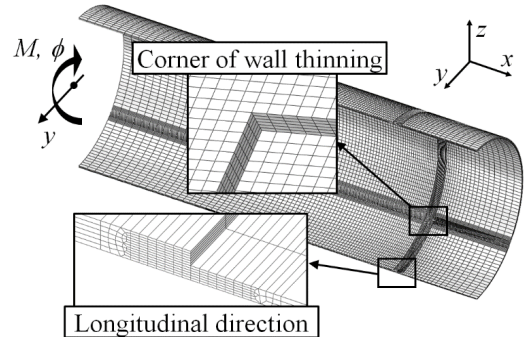


Fig. 3 Example of FE mesh of a pipe with wall thinning.

3.2 유한요소해석 결과

3.2.1 유한요소해석을 이용한 계산식 검증

3.1절에서 설명된 유한요소해석의 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 선은 제안식을 통해 계산한 결과물

나타내며, 심볼은 유한요소해석 결과를 보인다. 제안식 결과와 유한요소해석 결과의 오차는 최대 4% 이내로, 제안식이 국부 감육 배관의 탄성 컴플라이언스를 잘 예측하는 것을 확인했다. 특히 제안식 식 (4)는 감육의 길이가 0인 경우 균열 배관의 굽힘 컴플라이언스를 온전한 배관의 굽힘 컴플라이언스와 같게 예측하게 되는데, 유한요소해석을 통해 계산해 본 결과 표면 균열은 배관의 굽힘 컴플라이언스에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이런 이유로 표면균열 배관의 굽힘 컴플라이언스는 균열이 없는 배관의 굽힘 컴플라이언스와 거의 같다고 예측하여 이 경우에도 제안식을 사용해 예측이 가능하다고 판단했다. Fig. 4(a)의 결과와 같이 배관의 반경비 r_o/t 는 굽힘 컴플라이언스에 영향이 미미하며, 감육 길이 l/L 은 굽힘 컴플라이언스와 선형적인 관계를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 선형성은 식 (4)에서도 컴플라이언스가 l/L 에 선형적 관계를 갖는 것을 통해 예측할 수 있었다.

감육각 q/p 이 커질 때 탄성 컴플라이언스는 Fig. 4(b)와 같이 전반적으로 커지지만, q/p 가 0.5~0.75인 구간에서는 거의 변하지 않고 일정한 것을 확인할 수 있다. 이 구간을 지나서는 다시 굽힘각이 증가함에 따라 컴플라이언스가 증가한다. 이 경향은 감육 깊이 a/t 의 크기와 상관없이 모든 경우에서 나타나는 것을 확인했다. 이 경향은 본문 3.2.2에서 분석할 예정이다.

Fig. 4(c)는 l/L 이 0.5일 때 a/t 에 대한 컴플라이언스 변화를 나타내는 그림이다. a/t 가 0.9보다 큰 경우 컴플라이언스가 급격하게 커지게 되어 그림에서는 제

외하였다. a/t 가 증가할 때 컴플라이언스는 q/p 와 무관하게 지수함수적으로 증가하는데, 감육각에 대한 분석과 함께 본문 3.2.2에서 분석할 예정이다. Fig. 4(b)의 결과와 유사하게 q/p 가 0.5, 0.75인 감육의 경우 a/t 의 크기와 무관하게 컴플라이언스가 거의 유사한 것을 볼 수 있다.

3.2.2 감육 변수 분석

앞 장에서 설명한 바와 같이, 굽힘하중하 국부 감육 배관의 탄성 컴플라이언스에 감육길이 l/L 은 선형적인 관계를 갖으며, 다른 두 파라미터 a/t 와 q/p 는 비선형적인 관계를 갖는다. 본 절에서는 비선형적인 관계를 갖는 두 변수에 대한 분석을 진행했다.

다른 변수는 일정하고 감육각만 커질 때 실제 단면이 변화하는 위치는 감육 형상의 양 끝단이다. 감육각이 변할 때 배관의 굽힘 컴플라이언스의 변화를 확인하기 위해 Fig. 5(a)와 같이 중립축부터 감육 형상의 끝단까지의 거리를 d_l 으로 정의했다. Fig. 5(b)에 나타난 것과 같이 감육각 q/p 가 증가할 때 d_l 의 절대값은 감소하다가 $q/p \approx 0.5$ 보다 큰 경우 다시 커지기 시작한다. 이는 q/p 가 0.5 까지는 감육각이 커질 때 단면의 변화가 점차 중립축 근처에서 발생하고, q/p 가 0.5 보다 커질때는 그 변화가 중립축과 멀리서 발생한다는 것을 의미한다. 배관의 굽힘 컴플라이언스는 관성모멘트에 영향을 받는데, 관성모멘트는 중립축으로부터 먼 거리의 면적에 큰 영향을 받게 된다. 이런 이유로 단면의 관성모멘트는 Fig. 5(c)와 같이 나와있는 것과 d_l 이 클 때 급하게 변하고 d_l 이 작을 때는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 그 결과

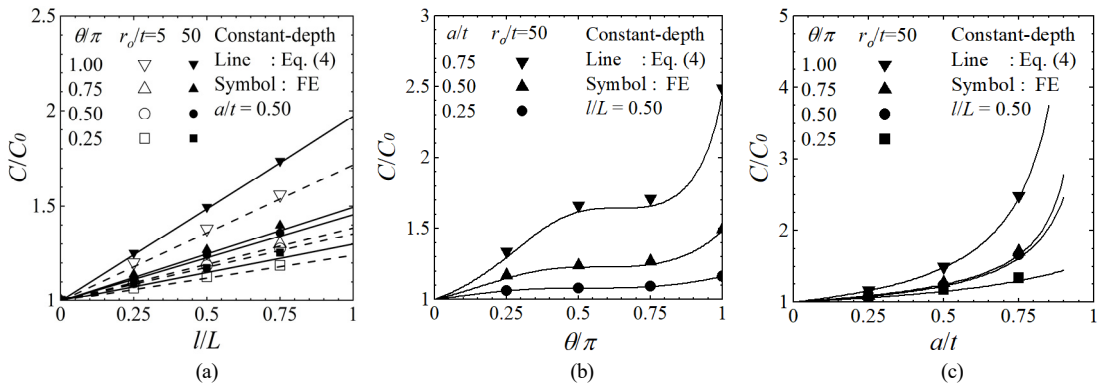


Fig. 4 Comparison of FE results with the analytical solution, Eq. (4) : the effect of (a) l/L and r_o/t for $a/t=0.5$, (b) q/p and (c) a/t .

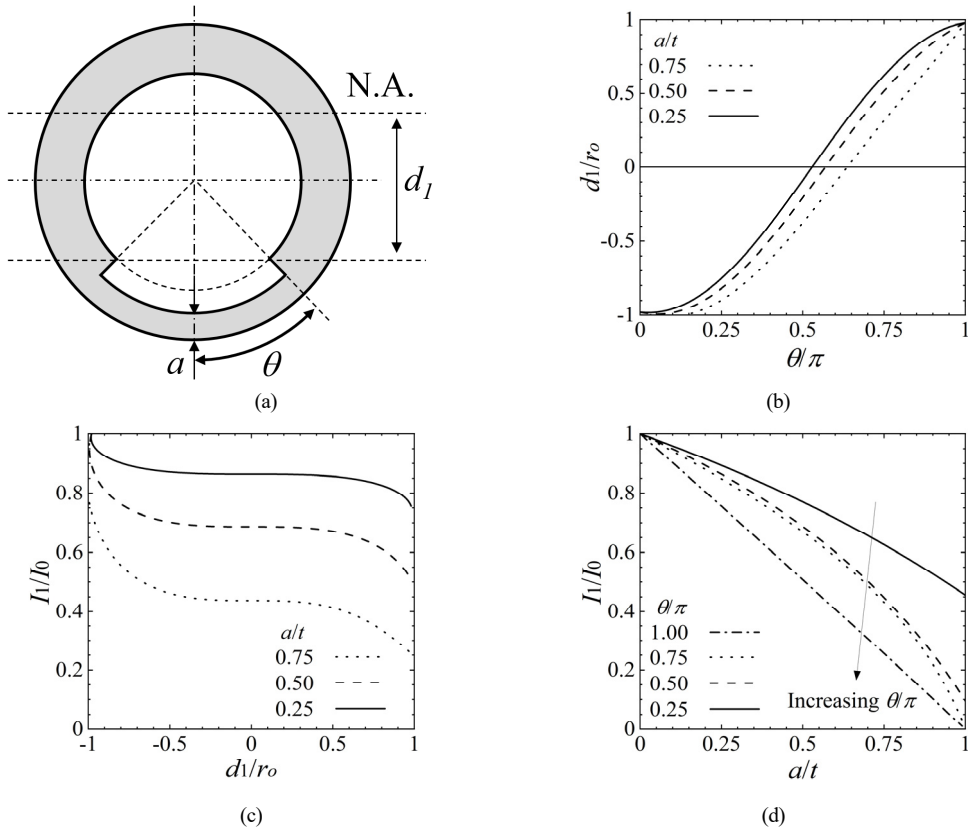


Fig. 5 (a) Cross section of wall-thinned pipe with the definition of d_1 , (b) variation of d_1/r_o with q/p , and (c)-(d) variation of the moment of inertia for the wall-thinned pipe I_1 normalized with respect to that for the plain pipe I_0 with d_1/r_o and a/t . The results are for $r_o/t=50$ and $l/L=0.5$.

Fig. 4(b)와 같이 감육각이 커짐에 따라 굽힘 컴플라이언스는 증가하다가 $d_1 \approx 0$ 인 구간에서는 일정하고 그 이후에 다시 증가하게 된다.

Fig. 5(d)와 같이 q/p 가 일정하고 a/t 만 증가하는 경우 단면의 관성 모멘트는 꾸준히 감소하는 경향을 보이는데, a/t 가 큰 경우 중립축과의 거리 영향으로 더 큰 감소를 나타낸다. 이 때 전체 둘레에 감육이 존재하는 경우에는 감육 깊이와 상관없이 중립축은 배관의 중심에 위치하기 때문에 거의 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그 결과 감육 깊이 a/t 가 증가할 때 관성모멘트는 꾸준히 감소하고, 컴플라이언스는 Fig. 4(c)와 같이 꾸준히 증가하게 된다.

3.3. 감육 형상 분석

실제 감육 형상은 복잡할 수 있으며, 일반적으로 분석을 위해선 반타원 형상이나 사각형상으로 간략

화 된다^(11,12). 본 연구에서는 사각형상 감육에 해석식을 제안했으며 다른 형상으로의 적용성을 분석하기 위해 유한요소해석을 통해 구한 반타원 형상 감육의 컴플라이언스와 제안식을 통해 계산한 컴플라이언스를 비교했다.

해석에 사용된 모델링은 Fig. 6(a)와 같이 평판으로 모델링한 뒤 배관으로 변환했다. Fig. 6(b)에 나타난 것과 같이, $q/p < 0.75$ 인 경우 제안식은 유한요소 해석에서 나온 굽힘 컴플라이언스를 최대 6% 오차 내에서 예측하여, 제안식을 통해 반타원 형상 감육 배관의 굽힘 컴플라이언스도 계산할 수 있음을 확인했다. 사각형상 감육과의 차이점으로는 q/p 이 큰 경우(감육 끝단이 중립축을 다시 지난 경우)에도 컴플라이언스가 급격하게 증가하지 않는다는 점이었다. 이는 반타원 형상은 끝 부분으로 갈수록 감육 두께가 얇아지기 때문에 끝단이 중립축과 멀더라도 컴플라이언스에 큰 영향을 주지 않기 때문이다.

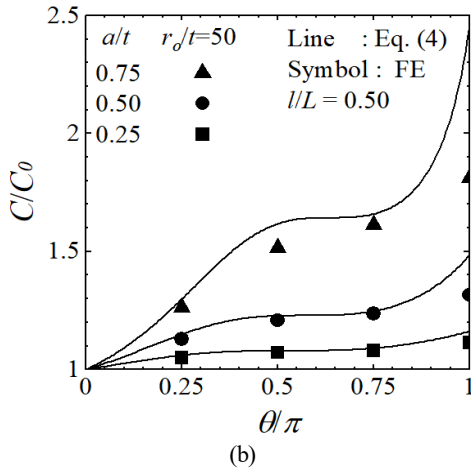
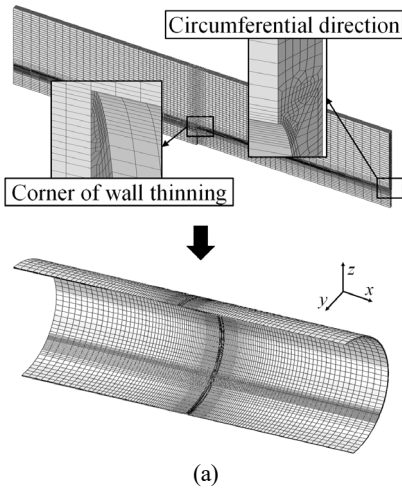


Fig. 6 (a) FE mesh for analysis the semi-elliptical wall thinning and (b) the results of FE analysis.

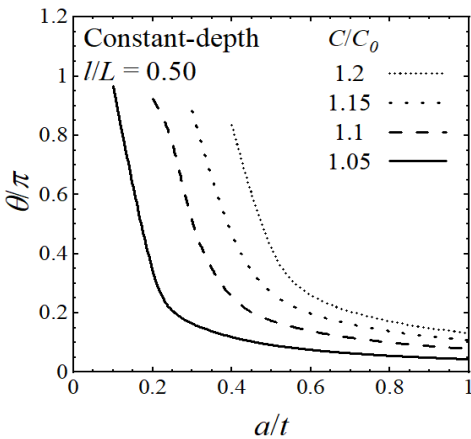


Fig. 7 Relationship between θ/π and a/t for constant compliance.

3.4. 컴플라이언스를 통한 감육 형상 예측

배관의 컴플라이언스는 배관에 작용하는 하중과 그로 인한 변형에 의해 계산된다. 배관의 축방향 변형률은 광센서를 통해 얻을 수 있는데⁽¹³⁾, 이렇게 얻은 축방향 변형률을 이용해 축방향 하중과 변형을 계산해 배관의 굽힘 컴플라이언스를 얻을 수 있다. 3.3절에서 검증된 식 (4)와 계산된 배관의 탄성 컴플라이언스를 통해 굽힘하중하 배관에 대해서 Fig. 7과 같이 컴플라이언스에 따른 감육 형상을 예측할 수 있다. 단, 식 (4)를 감육 길이가 0인 경우(균열 배관)에 적용할 때는 균열 배관을 온전한 배관으로 판단할 수 있기 때문에 제안식 적용에 주의가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 국부 감육이 발생한 배관의 굽힘하중 하 탄성 컴플라이언스를 계산식을 제안했고, 유한요소해석을 통해 검증하여 굽힘하중하 배관의 탄성 컴플라이언스 계산을 위해 사용할 수 있음을 확인했다. 제안된 식은 세 개의 감육 변수(감육 깊이 a/t , 감육 각 q/p , 감육 길이 l/L)의 함수며, 컴플라이언스는 감육 길이에는 선형적, 나머지 두 변수에는 비선형적으로 변한다. 반타원 형상 감육 배관과 사각형상 감육 배관의 굽힘 컴플라이언스는 큰 차이가 나지 않는 것을 유한요소해석을 통해 확인하여, 제안식을 반타원 형상 감육의 컴플라이언스를 예측할 때도 사용할 수 있음을 확인했다. 추가로 굽힘 컴플라이언스를 통해 감육 형태를 예측하는 방법을 제안했다.

후 기

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리 연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (No. 127587)

참고문헌

- (1) EPRI, 1996, "Flow Accelerated Corrosion in Power Plants," TR-106611-R1.
- (2) USNRC, 1989, "Erosion Corrosion Induced Pipe Wall Thinning," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, *Generic Letter 89-08*.

- (3) ASME, 2003, "Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," *ASME B&PV CC N597-2*.
- (4) Lee, S. H., Lee, Y. S., Kim, H. D., Lee, K. S. and Hwang, K. M., 2015, "Review on the Integrity Evaluation and Maintenance of Wall-Thinned Pipe," *Trans. of the KPVP*, Vol. 11, No. 2, pp. 51-60. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2015.11.2.051
- (5) Park, D. G., Babu, M. K. and Lee, D. H., 2014, "Nondestructive Evaluation of Wall Thinning Covered with Insulation Using Pulsed Eddy Current," *Trans. of the KPVP*, Vol. 10, No. 1, pp. 90-95. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2014.10.1.090
- (6) Xie, S., Chen, Z., Takagi, T. and Uchimoto, T., 2015, "Quantitative Non-Destructive Evaluation of Wall Thinning Defect in Double-Layer Pipe of Nuclear Power Plants Using Pulsed ECT Method", *NDT&E Int*, Vol. 75, pp. 87-95. doi:https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.002
- (7) Kim, K. S., Kim, M. K., Cho, D. H. and Jung, J. J., 2021, "Evaluation of the Burst Pressure for Rectangular Wall-thinning of CANDU Feeder Pipe," *Trans. of the KPVP*, Vol. 17, No. 1, pp. 28-35. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2021.17.1.028
- (8) Kim, J. W. and Lee, S. H., 2011, "Geometric Characteristic of Wall-thinning Defect Causing Circumferential Crack in Pipe Elbows," *Trans. of the KPVP*, Vol. 7, No. 1, pp. 27-34. doi:http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2011.7.1.027
- (9) Hibbeler, R. C., 2018. *Mechanics of Materials* 10th ed., Pearson Education, United Kingdom.
- (10) *ABAQUS Version 2018*, 2018, Dassault Systems.
- (11) Kim, Y. J., Oh, C. K., Park, C. Y. and Hasegawa, K., 2006, "Net-Section Limit Load Approach for Failure Strength Estimates of Pipes with Local Wall Thinning," *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, Vol. 83, No. 7, pp. 546-555. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.03.001
- (12) Oh, C. K., Kim, Y. J. and Park, C. Y., 2009, "Effects of Local Wall Thinning on Net-Section Limit Loads for Pipes Under Combined Pressure and Bending," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 239, No. 2, pp. 261-273. doi:https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.019
- (13) Inaudi, D. and Glisic, B., 2009, "Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing," *J. Press. Vesse-T ASME*, Vol. 132, No. 1. doi:https://doi.org/10.1115/1.3062942