

<연구논문>

등가 강성 개념을 이용한 가동 원전 2, 3등급 감육 보강 배관의 응력 평가 및 사례해석

Ma Xinyu* · 김재윤* · 황진하** · 김윤재*† · 김만원***

Stress Evaluation and Case Study of Reinforced Wall-thinned Class 2 and 3 Pipes in Operating Nuclear Power Plants Using Equivalent Stiffness Concept

Xinyu Ma*, Jae Yoon Kim*, Jin Ha Hwang**, Yun Jae Kim*†, and Man Won Kim***

(Received 17 November 2022, Revised 19 December 2022, Accepted 23 December 2022)

ABSTRACT

ASME BPVC provides stress evaluation rules for Class 2 and 3 nuclear piping. However, such rules are difficult to be applied to reinforced wall-thinned pipes during service. To resolve this issue, a new method for stress evaluation of reinforced wall-thinned pipes is proposed in this work, based on the equivalent stiffness concept. By converting a reinforced wall-thinned pipe to an equivalent straight pipe having the same stiffness, stress evaluation can be proceeded using the current ASME BPVC rules. The proposed method is applied to pipes with 4 different normal pipe size and the effects of reinforcement and wall-thinning dimensions on evaluated stresses are discussed.

Key Words : Stress evaluation (응력 평가), Class 2 and 3 large diameter pipe (2, 3 등급 대구경배관), Reinforced wall-thinned pipe (감육 보강 배관), Equivalent straight pipe (등가 직관)

기호설명

B_1, B_2 = stress parameters of straight and curved pipes provided in ASME code
 P = applied internal pressure
 M_A, M_B = bending moment caused by sustained and occasional load
 D_o, D_{eq} = outer diameter of original and equivalent pipe
 D_i = inner diameter of original and equivalent pipe
 t, t_{eq} = normal thickness of original and equivalent pipe

Z, Z_{eq} = section modulus of original and equivalent pipe
 S_y, S_h = yield strength and allowable stress of the pipe material
 K_P, K_M = elastic stiffness of the wall-thinning pipe with reinforcement for tension and bending
 E = Young's modulus of original pipe and reinforcement
 C_P, C_M = correction factor for tension and bending
 A_o, A_{eq}, A_r, A_{wt} = cross-sectional area of original pipe, equivalent pipe, reinforcement and wall-thinning
 l, l_{wt} = axial length of reinforcement and wall-thinning
 t_r, t_{wt} = thickness of reinforcement and depth of wall-thinning
 c_r, c_{wt} = circumferential length of reinforcement and wall-thinning

† 김윤재, 회원, 고려대학교 기계공학부
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)928-4569

* 고려대학교 기계공학부

** 육군사관학교 기계시스템공학과

*** 한국수력원자력(주) 중앙연구원

m_P, m_M = dimensionless variable for tension and bending
 I_o, I_{eq}, I_r, I_{wt} = moment of inertia of original pipe, equivalent pipe, reinforcement and wall-thinning
 s = length of partial penetration attachment weld provided by code requirement
 ψ_r = angle of pad reinforcement
 θ_{wt} = angle of wall-thinning

1. 서 론

발전소 배관의 복잡하고 다양한 운전환경으로 인해 배관 감육이 주로 발생하고 과거부터 이로 인한 배관 결함에 대해 보고되고 있다⁽¹⁾. 배관 감육을 대처하는 방안으로 배관을 직접적으로 교체하거나 감육부에 보강재로 보강을 하는 방법 등 다양한 방법 있고 이에 대한 거동 및 파손 기구를 분석하기 위한 많은 연구들이 수행되었다⁽²⁻⁵⁾. 있다. 그러나 가동원전 2, 3 등급 대구경배관의 경우 시간이나 비용 등 다양한 측면을 고려하였을 때, 배관 교체가 아닌 보강재를 이용한 보강이 합리적이다. 보강된 감육 배관에는 다양한 응력 불연속부가 발생하여 일반 배관에 적용하는 응력 평가 기준을 적용하기 힘들며, 이에 보강된 감육 배관의 효과적인 응력평가법이 필요하다.

ASME Code Sec. III NC/ND-3600⁽⁶⁾에서 제시하는 응력 평가식들은 기초적인 배관 응력해석식을 이용하여 내압에 의한 인장과 벤딩에 의한 응력을 계산하여 재료 허용응력과 비교하는 방법을 사용한다. 이는 배관 두께가 일정하고 응력불연속부가 없는 경우에 적용 가능하다. 하지만 보강된 감육배관의 경우 감육부와 보강부 그리고 용접부 등 배관의 두께가 균일하지 않고 국부적인 응력집중부가 존재하는 경우 적용하기 힘들며 상세 3차원 유한요소 해석을 통해 응력 계산 결과도 위치별 응력 차이로 인해 적용이 힘들다.

기존 저자들은 보강된 감육배관의 강성(stiffness) 식을 이론적으로 제시한 바 있다^(7,8). 이 연구에서는 보강된 감육배관의 인장, 벤딩 그리고 비틀림에 대한 강성을 이론적으로 유도하고 이 강성을 가진 등가의 직관(equivalent straight pipe)을 정의한 바 있다. 이런 기존 연구를 활용하여 본 연구에서는 보강된 감육배관의 효과적인 응력 평가를 위한 이론적 방법을 제시하였고 이를 실제 가동원전 2, 3 등급의 해수

배관에 적용하여 보강 및 감육 형상에 따른 응력 경향을 분석하였다.

2장에서는 ASME Code Sec. III NC/ND-3600⁽⁶⁾에서 제공하고 있는 응력 평가식에 대한 설명과 이를 이용해 감육 보강 배관의 응력 방법에 대한 방법을 소개하였다. 3장에서는 이전 연구에서 제시한 감육 보강 배관의 이론적 등가 강성을 도출하는 과정을 이용해 감육 보강 배관과 동일한 강성 및 내경을 갖는 등가 배관 치환 과정을 자세하게 설명하였다. 이 과정을 이용해 4장에서는 실제 가동원전 2,3 등급 해수배관에 적용하여 감육 및 보강 형상에 따른 응력 경향을 분석하였다.

2. 방법론

2.1 기존 ASME Code 응력 평가

ASME Code Sec. III NC-3600과 ND-3600⁽⁶⁾에 제시되어 있는 가동 원전 2, 3등급 배관의 응력 평가식은 아래와 같다.

$$B_1 \frac{PD_o}{2t} + B_2 \frac{(M_A + M_B)}{Z} \leq \min(1.5S_y, 1.8S_h) \quad (1)$$

여기서 B_1 과 B_2 는 배관 형상과 관련된 응력 지수로, ASME Code Sec. III에 형상에 따른 값이 제시되어 있고, 직관의 경우 B_1 과 B_2 는 각각 0.5, 1.0 이다. D_o , t , Z 는 각각 배관의 외경, 공칭 두께 그리고 단면 계수이다. P 는 배관에 가해지는 압력이고, M_A 와 M_B 는 각각, 자중과 같은 지속 하중에 의한 굽힘 모멘트과 지진 하중과 같은 간헐 하중에 의한 굽힘 모멘트의 미한다. S_y 와 S_h 는 배관 재료의 항복 응력과 허용 응력을 의미하며, 이는 ASME Code Sec. II, Part D, Subpart 1, Table 1A, 1B, 3에 제시되어 있다. 좌측의 내압에 의한 응력과 굽힘 모멘트에 의한 응력의 합이 $1.5S_y$ 와 $1.8S_h$ 중 작은 값 이하여야 한다.

만약 원전 2, 3등급 배관에 감육이 발생하여 보강을 하게 되면 감육과 보강으로 인한 다양한 구조적 불연속부가 생기게 되고 따라서 위에 제시된 ASME Code 응력 평가식 적용이 불가능하다. 본 논문에서는 식(1)을 이용한 보강된 감육 배관의 효율적인 응력 평가법을 등가 강성 개념을 이용해서 제시하고자 한다.

2.2 제안 방법론

감육 보강 배관 응력 평가 시에는 기존 배관과 달리 기하학적 형상이 변하기 때문에 식(1)에 주어진 ASME Code 응력 평가식 적용이 어렵다. 이전 연구^(7,8)에서는, 이론적으로 감육 보강 배관의 강성을 배관 재질 및 형상, 감육부 형상, 보강부 재질 및 형상의 함수로 계산한 식을 제시하고 유한요소 해석 결과와 비교해서 정확성을 검증하였다. 또한 제시한 이론적 식을 이용하면 1차원 범요소를 사용하여 감육 보강 배관을 포함한 배관계 탄성 해석이 가능하다는 것도 제시되었다. ASME Code에서 제시하고 있는 2, 3 등급 배관의 응력 계산의 핵심은 배관계의 1차원 해석을 통해 계산된 하중을 이용하여 응력을 계산하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 감육 보강 배관과 인장 및 굽힘 하중에 따라 같은 강성을 갖는 등가 배관을 정하고 이 배관의 단면 특성을 이용하여 인장 및 굽힘 응력을 계산하는 방법을 적용하였다. 제시한 방법을 적용 시 보강 전 배관시스템 응력해석을 통해 이미 계산된 하중을 적용하여 효과적으로 감육 보강 배관의 응력 평가가 가능하다.

응력 평가법 제시를 위해 이전 연구에서 가정한 바와 동일하게 보강재는 배관과 동일한 재료로 보강하였고 등방성 재료라고 가정하였다. 또한 보수적인 평가를 위해 감육부는 직사각형으로 가정하였고 보강 종류는 패드 보강으로 가정하였다. Fig. 1(a)는 감육 및 보강부가 있는 배관을 나타낸 그림이다. 여기서 D_o , t 는 배관의 직경과 두께이고 l_{wt} , t_{wt} , θ_{wt} 는 각각 감육 길이, 깊이, 각도를 나타내고 l_r , t_r , ψ_r 는 각각 보강 길이, 두께, 각도를 나타낸다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에 보인 보강된 감육배관과 같은 강성을 가지는 등가 배관을 나타낸 그림이다. 여기서 D_{eq} , t_{eq} , Z_{eq} 는 각각 등가 배관의 외경, 두께, 단면 계수를 나타낸다. 등가 배관의 내경은 감육 보강 배관의 내경과 동일하고, 배관 길이는 감육 보강 배관의 보강부 길이와 동일하다. 감육 보강 배관을 등가 배관으로 치환한 후 등가 배관의 형상을 기존 ASME Code에서 제시하고 있는 응력 평가식에 대입하면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_1 \frac{PD_{eq}}{2t_{eq}} + B_2 \frac{(M_A + M_B)}{Z_{eq}} \leq \min(1.5S_y, 1.8S_h) \quad (2)$$

등가 배관은 감육 보강 배관과 동일한 강성을 갖

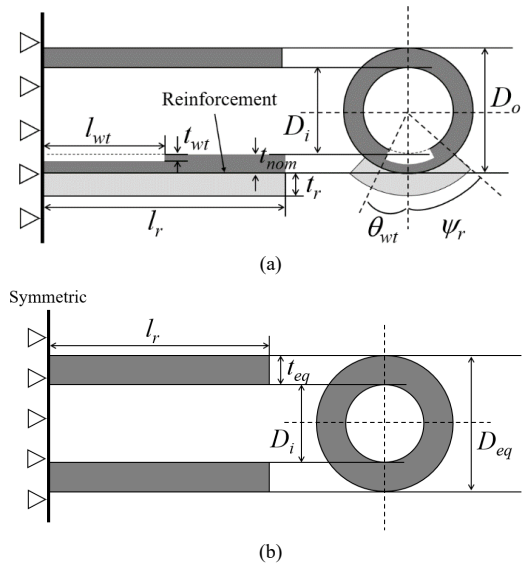


Fig. 1 Schematic diagram of (a) reinforced wall-thinned pipe and (b) equivalent straight pipe giving the same stiffness

고 있는 배관이기 때문에, 위의 응력 평가식을 통해 감육 보강 배관의 응력 평가가 가능하다.

3. 등가 배관 결정 식

이전 연구에서는 인장, 굽힘, 비틀림 하중을 받는 감육 보강 배관의 이론적 강성을 보정 계수를 이용하여 제시하였다^(7,8). ASME Code에서 제시하고 있는 응력 평가식은 내압에 의한 축 방향 응력과 굽힘 모멘트에 의한 축 방향 응력으로 나눌 수 있다. 따라서 서로 다른 하중에 의해 발생하는 응력에 대한 등가 배관으로 치환하는 각각의 과정이 필요하다.

3.1 내압에 의한 축 방향 응력

내압을 받는 감육 보강 배관에 대한 이론적 인장 강성을 보정 계수 및 등가 배관 치수를 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = \frac{E \cdot C_p \cdot A_o}{l_r} = \frac{E \cdot A_{eq}}{l_r} \quad (3)$$

여기서 A_o 는 감육 및 보강부가 없는 일반 배관의 단면적, A_{eq} 는 등가 배관의 단면적이다. 그리고 C_p 는 인장 보정 계수로 아래 식과 같다.

$$C_P = \frac{(m^P)_1 \cdot (m^P)_2 L_r}{(m^P)_2 (L_r - l_{wr}) + (m^P)_1 (l_{wr})} \quad (4)$$

$$(m^P)_1 = 1 + \frac{A_r}{A_o}; \quad (m^P)_2 = \frac{A_r + A_{wr}}{A_o} \quad (5)$$

위 식을 정리하여 등가 배관의 치수를 나타내면 아래 식과 같다.

$$D_{eq} = \sqrt{C_P (D_o^2 - D_i^2) + D_i^2}; \quad t_{eq} = \frac{D_{eq} - D_i}{2} \quad (6)$$

따라서 위에서 구한 D_{eq} 와 t_{eq} 를 Eq. (2)의 내압에 의한 응력 항에 대입하면 내압에 의한 축 방향 응력을 계산할 수 있다.

3.2 굽힘 응력

3.1 절에서 제시한 절차와 동일하게 굽힘 모멘트를 받는 감속 보강 배관에 대한 이론적 굽힘 강성을 보정 계수 및 등가 배관 치수를 이용하여 나타내면 아래와 같은 결과가 도출된다.

$$K_M = \frac{E \cdot C_M \cdot I_o}{l_r} = \frac{E \cdot I_{eq}}{l_r} \quad (7)$$

여기서 I_o 는 감속 및 보강부가 없는 일반 배관의 단면 2차 모멘트, I_{eq} 는 등가 배관의 단면 2차 모멘트이다. 그리고 C_M 는 굽힘 보정 계수로 아래 식과 같다.

$$C_M = \frac{(m^M)_1 \cdot (m^M)_2 L_r}{(m^M)_2 (L_r - l_{wr}) + (m^M)_1 (l_{wr})} \quad (8)$$

$$(m^M)_1 = 1 + \frac{I_r}{I_o}; \quad (m^M)_2 = \frac{I_r + I_{wr}}{I_o} \quad (9)$$

위 식을 정리하여 등가 배관의 치수를 나타내면 아래 식과 같다.

$$D_{eq} = \sqrt[4]{C_M (D_o^4 - D_i^4) + D_i^4} \quad (10)$$

여기서 등가 배관의 두께는 Eq. (6)과 동일하다. 굽힘 모멘트에 의한 응력 항 계산을 위해서는 등가 배관의 단면 계수가 필요하다. 따라서 위에서 구한 D_{eq}

와 t_{eq} 를 이용해 Z_{eq} 를 나타내면 아래와 같다.

$$Z_{eq} = \frac{\pi}{32} \frac{C_M (D_o^4 - D_i^4)}{\sqrt[4]{C_M (D_o^4 - D_i^4) + D_i^4}} \quad (11)$$

위에서 구한 Z_{eq} 를 Eq. (2)의 굽힘 응력 항에 대입하면 굽힘 모멘트에 의한 축 방향 응력을 계산할 수 있다.

4. 해수 배관 적용 사례

4.1 해석 대상 해수 배관

가동원전 2, 3 등급 해수배관은 ESW(Essential Service Water) 계통 및 ESW Screen Wash 계통 배관으로, NPS 0.75 in부터 36 in 배관 등 소구경 및 대구경배관을 모두 포함하고 있다. NPS 12 in 이상은 모두 Sch. STD를 사용하여 배관 공칭 두께가 9.53 mm로 일정하다. NPS 12 in 미만은 모두 Sch. 40 배관으로, NPS에 따라 배관의 두께가 다르다. 다양한 크기의 해수배관 중 감속 및 보강 형상에 따른 응력 경향 파악을 위해 Table 1에 보인 4가지 배관을 선정하였고 재료는 ASTM A106 Gr. B 탄소강이다. 설계압력 및 온도는 보수적 평가를 위해 최댓값으로 가정하여 1.65 MPa(225 psig), 65.56 °C(150 °F)로 고려하였다. 재료 물성은 ASME Sec. II, Part. D, Subpart 1, Table 1A, 1B, 3에서 제시하고 있는 물성을 사용하여 가동 온도 조건 하 ASTM A106 Gr.B 탄소강의 항복응력, S_y 와 허용응력, S_h 는 각각 242 MPa, 118 MPa이다.

4.2 등가배관을 이용한 응력 평가

설계압력 및 온도 조건 하에 ASTM A106 Gr. B 탄소강 재료에 대한 Eq. (1) 및 Eq. (2)의 우측항은 212 MPa이다. Eq. (2)를 통한 감속 보강 배관 응력 평가 시 내압에 의한 축 방향 응력은 설계압력 최댓값인 1.65 MPa 및 3.1 절에서 제시한 등가 배관 치수를 적용하여 계산할 수 있다. 만약 배관에 작용하는 굽힘 하중을 알지 못하는 경우, 감속 및 보강이 없는 배관에 내압과 굽힘 하중에 의한 응력을 설계 허용 기준 최대인 212 MPa로 가정해 역으로 최대 굽힘 하중 M_{max} 를 도출하였고, Table 1에 계산된 값들을 정리하였다. 굽힘 하중에 의한 응력은 Table 1에 제시된 M_{max} 및 3.2 절에서 제시한 등가 배관 치수를 이용하여 계산하였다.

Table 1 Pipe dimensions for analysis

NPS [in]	D_o [mm]	t [mm]	r/t	M_{\max} [kN·m]
0.75	26.7	2.87	5	0.24
4	114.3	6.02	9	11
12	323.9	9.53	17	142
36	914.4	9.53	48	1046

*NPS: Normal Pipe Size.

위에서 선정된 4가지 배관에 대하여 감육 및 보강 형상에 따른 응력 경향 및 설계 기준 만족 여부를 분석하였다. 응력 경향 분석 시 ASTM A106 Gr. B 배관 재료 및 가동 조건 하에 최대값인 212 MPa로 정규화하여 분석하였다.

4.2.1 감육 형상에 따른 영향 분석

ASME Code Case N-786, N-789에는 슬리브 및 패드 보강에 보강 길이 및 보강 각도에 대한 요건을 제시하고 있다^(9,10) Fig. 2는 감육이 발생한 부분에 패드 보강을 수행한 배관을 도식적으로 나타낸 그림이다. 여기서 l_{wr} 와 c_{wr} 는 감육부 형상으로 각각 길이 방향과 원주 방향의 감육 길이의 절반이다. 여기서 s 는 부분용입부착 용접부로 아래와 같이 정의된다.

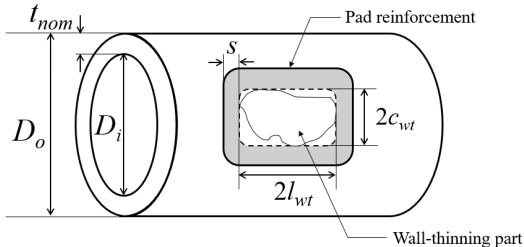


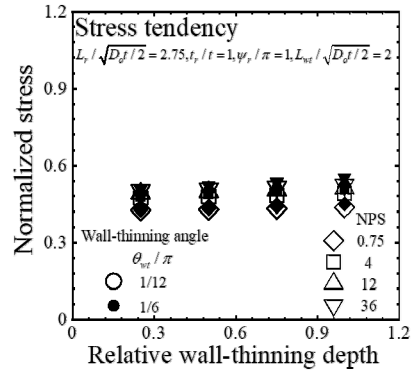
Fig. 2 Schematic diagram of wall-thinned pipe with pad reinforcement.

$$s = 0.75 \sqrt{\frac{D_o t_{nom}}{2}} \quad (12)$$

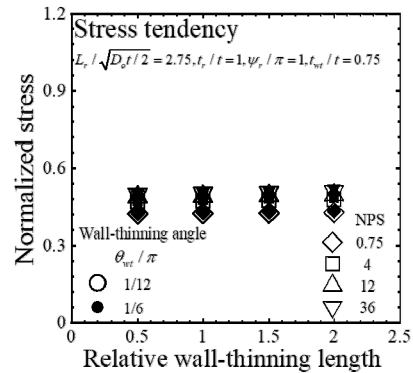
부분용입부착 용접부 크기를 고려한 패드 보강 시 최소 보강부 길이, l_r 및 보강 각도, ψ_r 는 아래와 같다.

$$l_r \geq l_{wr} + s; \quad c_r \geq c_{wr} + s \quad (13)$$

$$\psi_{r(\min)} = \frac{c+s}{D_o} = \theta_{wr} + \frac{s}{D_o} \quad (14)$$



(a)



(b)

Fig. 3 Effect of wall-thinning dimensions on normalized stress; (a) wall-thinning depth and (b) wall-thinning length.

감육부 형상에 따른 응력 영향 분석을 위해 보강부 형상은 슬리브 보강($\nu_r = p$), 보강 두께는 배관 두께와 동일하다고 가정하였다. 보강 길이 l_r 는 가정된 최대 감육 길이에 대해 Eq. (13)을 적용하였다. 감육 깊이 및 각도에 따른 응력 경향 분석을 위해 감육 길이는 $2(D_o t / 2)^{1/2}$ 로 고정하였다.

Fig. 3(a)는 배관 두께로 정규화한 감육 깊이 및 각도에 따른 4가지 배관에 대한 응력 경향을 나타낸 그림이다. 감육 깊이에 따른 응력 차이는 최대 약 3% 차이로 감육 깊이에 따른 영향은 미미한 것으로 보인다. 감육 길이에 따른 응력 경향 분석을 위해 감육 깊이 및 각도는 각각 $0.75 t_{wr}$ 로 고정하였다.

Fig. 3(b)는 $(D_o t / 2)^{1/2}$ 로 정규화한 감육 길이에 따른 4가지 배관에 대한 응력 경향을 나타낸 그림이다. 감육 길이에 따른 응력 경향은 최대 2% 차이로 감육 길이에 따른 영향은 미미한 것으로 보인다. 따라서

감속 형상이 감속 보강 배관에 작용하는 응력에 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다.

4.2.2 보강 형상에 따른 영향 분석

앞서 감속 형상에 따른 영향을 분석하는 것과 동일한 절차를 통해 보강 형상에 따른 영향을 분석하였다. 보강 각도 및 각도에 따른 응력 경향 분석을 위해 앞서 가정한 감속 형상 중 감속 길이, 깊이, 각도는 각각 $2(D_o t/2)^{1/2}$, $0.75t_{nom}$, $\theta_{wt} = 1/6\pi$ 로 고정하였다. Fig. 4(a)는 기존 배관 두께로 정규화한 보강 두께 및 보강 각도에 따른 4가지 배관에 대한 응력 경향을 나타낸 그림이다. 보강 각도에 및 보강 두께가 증가함에 따라 급격하게 응력이 감소하는 것을 확인하였다.

보강 길이 및 각도에 따른 응력 경향 분석을 위해 앞서 가정한 감속 형상 중 감속 길이, 깊이, 각도는 각각 $2(D_o t/2)^{1/2}$, $0.75t_{nom}$, $\theta_{wt} = 1/6\pi$ 로 고정하였다. Fig. 4(b)는 $(D_o t/2)^{1/2}$ 로 정규화한 보강 길이 및 보강 각도에 따른 4가지 배관에 대한 응력 경향을 나타낸 그림이다. 보강 각도가 증가함에 따라 응력이 급격하게 감소하는 경향은 동일하나 보강 길이에 따른 응력 경향은 보강 두께에 따른 경향과 비교해보았을 때 매우 작다. 보강 길이에 따른 응력 경향은 최대 5% 차이로 보강 길이에 따른 영향은 거의 없는 것으로 보인다.

보강부 형상의 경우 감속부 형상에서 보이는 경향과는 다르게 보강 두께 및 보강 각도에 따라 응력이 급격하게 변하는 것을 볼 수 있다. 패드 보강 시 슬리브 보강에 비해 보강재 비용 절약 및 보강하는데 용이하다는 장점이 있지만, 앞서 언급한 바와 같이 보강 각도에 따라 감속 보강 배관에 작용하는 응력이 민감하게 변하기 때문에 적절한 보강 각도를 갖는 패드 보강을 하는 것이 중요할 것으로 보인다.

5. 결론

원전 2, 3등급 배관에 다양한 원인에 감속이 발생하여 보강을 하게 되면 감속과 보강으로 인한 다양한 구조적 불연속부가 생기게 되고 이에 따라 기존 ASME Code에 제시된 응력 평가식 적용이 불가능하다. 본 연구에서는 보강된 감속 배관의 효율적인 응력 평가법을 등가 강성 개념을 이용해서 제시하였다. 감속 보강 배관과 같은 강성을 갖는 등가 배관을 정의하였고, 내압에 의한 인장 하중과 외부 하중에 의한 굽힘 모멘트가 작용하는 경우에 따라 등가 배관 치수를 도출하는 과정을 서술하였다. 또한 이를 실제 해수 배관 문제에 적용하여 감속 및 보강 형상에 따른 응력 경향을 분석하였다. 감속 및 보강 형상에 따른 응력 경향 분석 결과는 아래와 같다.

- 분석을 위해 가정한 감속 길이, 깊이, 각도에 따른 영향은 최대 약 3% 정도로 감속부 형상이 감속 보강 배관에 작용하는 응력 경향은 미미하다.
- 보강 형상의 경우 ASME Code Case에서 제시하고 있는 요구 조건과 다양한 보강 형상에 따른 응력 경향을 분석하였다. 보강 길이에 따라 약 5% 정도로 미미한 차이를 보이지만, 보강 각도

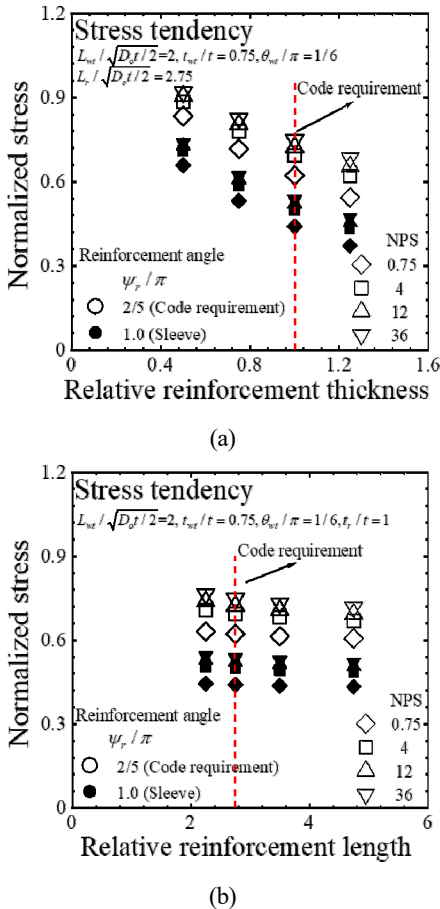


Fig. 4 Effect of reinforcement dimensions on normalized stress; (a) reinforcement thickness and (b) reinforcement length.

와 보강 두께에 따라 급격하게 변화한다.

- 감육 보강 배관의 정확한 응력 평가를 위해서, 배관에 실제로 작용하는 모멘트 크기나 감육 및 보수 형상을 파악하는 것이 중요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20193110100020).

참고문헌

- (1) USNRC, 1989, "Erosion/corrosion-induced pipe wall thinning in US NPPs", *NUREG-1344*.
- (2) 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:<https://doi.org/10.20466/KPVP.2015.11.2.051>
- (3) Seo, K. W., Gim, J. M., and Kim, Y. J., 2021, "Effect of Local Wall Thinning on Pipe Elastic Bending Compliance," *Trans. of the KPVP*, Vol. 17, No. 2, pp. 83-89. doi:<https://dx.doi.org/10.20466/KPVP.202.17.2.083>
- (4) Kim, K. S., Kim, M. K., Cho, D. H., and Jeong, 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:<https://dx.doi.org/10.20466/KPVP.202.17.1.028>
- (5) Park, C. Y., Lee, S. H., Kim, T. R., and Park, S. K., 2008, "Development of PiTEP for Integrity Evaluation of Wall Thinned Pipes," *Trans. of the KPVP*, Vol. 4, No. 1, pp. 37-44.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, 2015, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (7) Kim, J. S., Jang, J. H., and Kim, Y. J., 2022, "Efficient Elastic Stress Analysis Method for Piping System With Wall-thinning and Reinforcement," *Nucl. Eng. Des*, Vol. 54, pp. 732-740. doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.026>
- (8) Jang, J. H., Kim, J. S., and Kim, Y. J., 2022, "Analytical Equivalent Stiffness Analysis for Various Reinforcements of Wall-thinned Pipe," *Trans. of the KPVP*, Vol. 18, No. 1, pp. 11-18. doi:<http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.202.18.1.011>
- (9) ASME Section XI Code Case N-786-3, 2017, "Alternative Requirements for Sleeve Reinforcement of Class 2 and 3 Moderate-Energy Carbon Steel Piping for Raw Water Service," American Society of Mechanical Engineers, NY, USA.
- (10) ASME Section XI Code Case N-789-3, 2017, "Alternative Requirements for Pad Reinforcement of Class 2 and 3 Moderate-Energy Carbon Steel Piping," American Society of Mechanical Engineers, NY, USA.