

<연구논문>

# 감육 배관의 다양한 보강 형태에 따른 이론적 등가 강성 검증

장제훈\*·김지수\*·김윤재†

## Analytical Equivalent Stiffness Analysis for Various Reinforcements of Wall-thinned Pipe

Je-Hoon Jang\*, Ji-Su Kim\* and Yun-Jae Kim†

(Received 15 November 2021, Revised 8 April 2022, Accepted 11 April 2022)

### ABSTRACT

When wall-thinning in a pipe occurs during operation of nuclear power plant, reinforcement of the pipe needs to be performed. Accordingly, the structural response of the piping system due to introduction of the reinforcement may be re-evaluated. For elastic structural analysis of the piping system with the reinforced pipe using finite element (FE) analysis, the stiffness of the reinforced pipe is needed. In this study, the stiffness matrix of wall-thinned pipe with pad reinforcement or composite reinforcement is analytically derived. The validity of the proposed equations is checked by comparing with systematic finite element (FE) analysis results.

**Key Words** : Elastic Stiffness (탄성 강성), Elastic Finite Element Analysis (탄성 유한 요소 해석), Wall-thinned Pipe (감육 배관), Pad Reinforcement(패드 보강), Composite Reinforcement (복합재 보강)

### 기호설명

$F$  = applied tension

$M_i$  = applied bending moment for  $i = x, y$

$T$  = applied torsion

$l, l_s, l_w$  = half length of pipe, reinforcement and wall-thinning

$t, t_s, t_w$  = thickness of pipe, reinforcement and wall-thinning

$t_{s,1}, t_{s,2}$  = thickness of material 1 and 2 in composite reinforcement

$r_i, r_o$  = inner radius and outer radius of pipe

$q$  = half angle of wall-thinned area of pipe

$y$  = half angle of pad reinforcement

$k_0$  = elastic stiffness of pure pipe

$k^F, k^M, k^T$  = elastic stiffness of reinforced wall-thinned pipe for tension, bending and torsion

$I, I_s, I_w$  = moment of inertia of pure pipe, reinforcement and wall-thinned pipe

$J, J_s, J_w$  = polar moment of inertia of pure pipe, reinforcement and wall-thinned pipe

$A, A_s, A_w$  = cross-sectional area of pure pipe, reinforcement and wall-thinned pipe

$m^F, m^M, m^T$  = dimensionless variable for tension, bending and torsion

$h^F, h^M, h^T$  = final correction factor for tension, bending and torsion

$E, E_s$  = Young's modulus of pure pipe and reinforcement

$G, G_s$  = shear modulus of pure pipe and reinforcement

† 김윤재, 회원, 고려대학교 기계공학부

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)9299-1718

\* 고려대학교 기계공학부

## 1. 서 론

원자력 발전소의 구조 건전성 유지에 있어, 배관시

스텝의 건전성은 주요한 요인 중 하나이다<sup>(1)</sup>. 그러나 원전 가동 시 배관은 다양한 요인으로 인해 열화가 발생하여 건전성이 영향을 받게 된다<sup>(2)</sup>. 이 중 고온, 고압의 유체로 인한 배관의 감육은 배관의 주된 열화 현상 중 하나이다<sup>(3)</sup>. 감육이 발생한 배관시스템은 건전성 평가를 수행하여 지속적이고 안정적인 운전을 위한 최적의 시스템 보강 방법을 결정한다. 건전성 보강의 가장 확실한 방법은 감육 발생 배관을 직접 교체하는 것이지만, 이를 위해서는 전체 발전 시스템의 운전을 중단시켜야 하기 때문에 비효율적인 대체 방법일 수 있다. 이에 배관 전체 시스템을 중단시키지 않고 감육 배관의 건전성을 확보하기 위한 효율적인 대체 방안으로써 감육 발생 배관의 부분 보강이 수행될 수 있다<sup>(4)</sup>.

부분 보강이 이루어진 배관 시스템은 가동 안전성을 확인하기 위해 배관 시스템 재해석이 요구될 수 있다. 배관시스템의 평가에는 구조적 복잡성으로 인해 1차원 빔(beam)요소를 사용하여 간략히 모델링된 형상으로 유한요소 해석 평가가 진행된다<sup>(5)</sup>. 이때 보강된 감육 배관에서는 기존 배관에 대비해 강성이 변화하게 된다. 하지만 감육 및 보강으로 인한 배관의 형상을 1차원 빔요소에 직접적으로 반영할 수 없으므로 그 강성 변화를 대체적으로 반영해 줄 수 있는 방법론 개발이 필요하다.

앞선 연구<sup>(6)</sup>에서는 단일 재료를 감육 배관 외부 전 둘레에 보강하는 경우에 대해 감육 보강 배관의 등가 강성을 1차원 빔요소에 적용하는 방법론이 본 연구자들에 의해 제시되었다.

본 연구에서는 앞선 연구에서 제시된 보강 방법 및 재료를 개선하여 보다 일반적인 경우에 대해 감육 보강 배관의 등가 강성보정계수를 계산하였다. 해석 케이스는 감육 배관 외부 둘레의 일부를 감싸는 패드 보강의 경우와 감육 배관 외부 전체 둘레를 감싸는 두 개 이상의 복합 재료의 경우를 고려하였다. 감육 배관 내 발생한 감육의 길이와 두께, 보강의 길이를 달리한 여러 조건들에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 본 연구에서 제시한 등가 강성 계산 방법을 검증하였다.

## 2. 감육 배관의 보강 형태에 따른 강성 계산

### 2.1 모델

본 연구에서는 보강된 부분 감육 배관의 인장, 비틀림, 굽힘의 하중이 가해졌을 때의 이론적 등가 강성에

대한 분석을 수행하였다. 분석을 수행한 배관의 형상은 Fig. 1에 제시하였다. 분석을 수행하기에 앞서 다음과 같이 가정하였다. 1) 감육은 배관 하단, 내부에 균일한 두께로 형성되었다. 2) 보강 용접부의 형상은 고려하지 않았으며, 본 모델에서는 사각 형상을 띄고 있다. 3) 배관의 길이 방향을  $z$ 축으로 가정한다. 4) 해당 모델은 탄성영역에 대해서만 분석을 진행하였다.

$l$ ,  $t$ 는 각각 배관의 길이와 두께를 뜻하며, 감육 형상 변수로는  $l_w$ 는 감육의 길이,  $t_w$ 는 감육의 두께를 뜻한다. 보강 형상 변수로는  $l_s$ 는 보강의 길이,  $t_s$ 는 보강의 두께를 뜻한다. 배관의 내부 반지름과 외부 반지름은 각각  $r_i$ 와  $r_o$ 로 나타냈다. 감육부가 이루는 각은  $q$ 로 나타냈다.

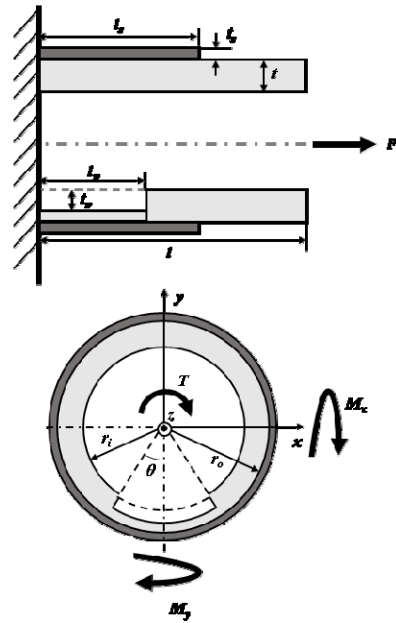


Fig. 1 Schematic design of reinforced wall-thinned pipe.

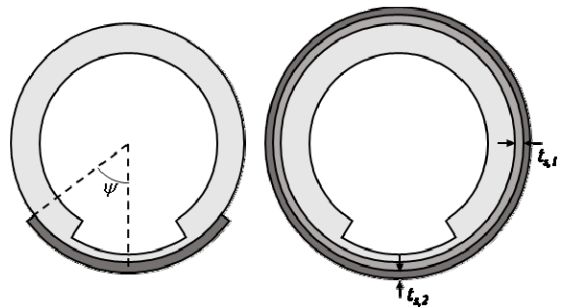


Fig. 2 Design of pad and composite reinforcement.

Fig. 2는 본 연구에서 강성해석을 수행하기 위해 가정된 보강의 형태로, 패드 보강과 복합재 보강의 간략한 형상을 표기한 그림이다. 패드 보강형상에서 보강이 이루는 각은  $y$ 로 나타내었다. 복합재 보강형상에서 각 층을 이루는 재료의 두께는 각각  $t_{s,1}$ 과  $t_{s,2}$ 로 나타냈다.

### 2.2 배관 분석 및 강성 계산

Fig. 3은 강성을 계산하기 위해 앞서 형상을 3개의 구역으로 나눈 것을 나타낸다. 첫 번째 구역은 감육이 발생한 배관이 보강된 형태이며, 두 번째 온전한 배관이 보강된 형태, 세 번째 구역은 온전한 배관으로 분석하였다. 본 연구에서는 중첩의 원리를 적용한 등가 강성보정계수 모델<sup>(6)</sup>에 패드 보강 형상과 복합재 보강 형상의 영향을 반영하여 감육 배관의 패드 보강과 복합재 보강의 하중 별 등가 강성을 계산하였다.

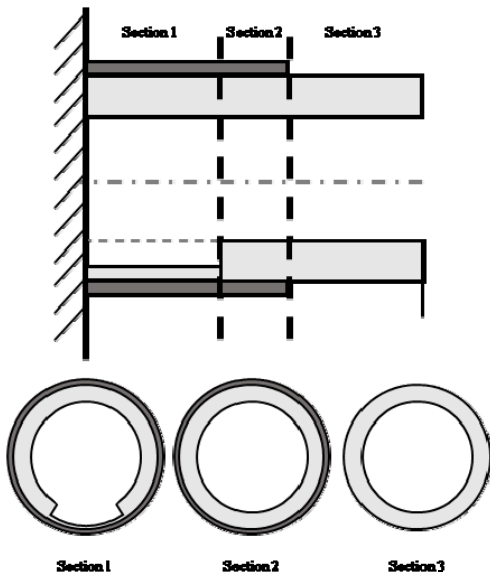


Fig. 3 Illustration of reinforcement of wall-thinned pipe based on principle of superposition.

#### 2.2.1 등가 강성보정계수 모델<sup>(6)</sup>

등가 강성 보정계수 모델<sup>(6)</sup>은 탄성 영역에서 하중에 의한 변위가 선형적이므로 Fig. 3에서처럼 배관의 나눠진 각 구역에서 하중에 의한 변위를 구한 후 중첩의 원리를 이용하여 배관 전체의 변위를 구하는 방법이다. 모델에서 제시하는 등가 강성보정계수는 감육과

보강이 없는 배관의 강성과 보강된 감육배관 간의 강성비를 나타낸다. 해당 모델에서 제시한 하중 별 등가 강성보정계수 계산 방법은 다음과 같다.

인장 하중의 경우 각 구역별 보정계수는 다음과 같이 계산된다.

$$(m^F)_1 = \frac{A_w}{A_p} + \frac{E_s A_s}{E_p A_p}, \quad (m^F)_2 = 1 + \frac{E_s A_s}{E_p A_p}, \quad (1)$$

여기서  $(m^F)_1$ 는 Fig. 3에 제시된 첫 번째 구역의 인장 하중에서의 보정계수이며,  $(m^F)_2$ 는 두 번째 구역의 인장 하중에서의 보정계수이다.  $E_p$ ,  $A_p$ 는 배관의 탄성계수와 단면적을 뜻하며,  $E_s$ ,  $A_s$ 는 보강의 탄성계수와 단면적,  $A_w$ 는 감육배관의 단면적을 뜻한다. 인장 하중에 의한 전체 배관에 대한 강성보정계수,  $h^F$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$h^F = \frac{(m^F)_1(m^F)_2(l)}{(l-l_s)(m^F)_1(m^F)_2 + (l_s-l_w)(m^F)_1 + (l_w)(m^F)_2} \quad (2)$$

최종적으로 보강과 감육이 없는 배관의 인장 하중에 대한 강성,  $(k^F)_0$ 에 대해, 인장 하중에서 보강된 감육 배관의 강성은 다음과 같이 계산된다.

$$k^F = h^F(k^F)_0 \quad (3)$$

굽힘 하중의 경우 각 구역별 보정계수는 다음과 같이 계산된다.

$$(m^M)_1 = \frac{I_w}{I_p} + \frac{E_s I_s}{E_p I_p}, \quad (m^M)_2 = 1 + \frac{E_s I_s}{E_p I_p} \quad (4)$$

여기서  $(m^M)_1$ 는 Fig. 3에 제시된 첫 번째 구역의 굽힘 하중에서의 보정계수이며,  $(m^M)_2$ 는 두 번째 구역의 굽힘 하중에서의 보정계수이다.  $E_p$ ,  $I_p$ 는 배관의 탄성계수와 관성모멘트를 뜻하며,  $E_s$ ,  $I_s$ 는 보강의 탄성계수와 관성모멘트,  $I_w$ 는 감육배관의 관성모멘트를 뜻한다. 굽힘 하중에 의한 전체 배관에 대한 강성보정계수,  $h^M$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$h^M = \frac{(m^M)_1(m^M)_2(l)}{(l-l_s)(m^M)_1(m^M)_2 + (l_s-l_w)(m^M)_1 + (l_w)(m^M)_2} \quad (5)$$

최종적으로 보강과 감육이 없는 배관의 굽힘 하중에 대한 강성,  $(k^M)_0$ 에 대해 굽힘 하중에서 보강된 감육 배관의 강성은 다음과 같이 계산된다.

$$k^M = h^M(k^M)_0 \quad (6)$$

비틀림 하중의 경우 각 구역별 보정계수는 다음과 같이 계산된다.

$$(m^T)_1 = \frac{J_w}{J_p} + \frac{G_s J_s}{G_p J_p}, \quad (m^T)_2 = 1 + \frac{G_s J_s}{G_p J_p} \quad (7)$$

여기서  $(m^T)_1$ 는 Fig. 3에 제시된 첫 번째 구역의 굽힘 하중에서의 보정계수이며,  $(m^T)_2$ 는 두 번째 구역의 굽힘 하중에서의 보정계수이다.  $G_p, J_p$ 는 배관의 전단 탄성계수와 극관성모멘트를 뜻하며,  $G_s, J_s$ 는 보강의 전단 탄성계수와 극관성모멘트,  $J_w$ 는 감육배관의 극관성모멘트를 뜻한다. 비틀림 하중에 의한 전체 배관에 대한 강성보정계수,  $h^T$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$h^T = \frac{(m^T)_1(m^T)_2(l)}{(l-l_s)(m^T)_1(m^T)_2 + (l_s-l_w)(m^T)_1 + (l_w)(m^T)_2} \quad (8)$$

최종적으로 보강과 감육이 없는 배관의 비틀림 하중에 대한 강성,  $(k^T)_0$ 에 대해, 비틀림 하중에서 보강된 감육 배관의 강성은 다음과 같이 계산된다.

$$k^T = h^T(k^T)_0 \quad (9)$$

본 연구에서는 보강된 감육 배관의 강성을 온전한 배관의 강성으로 정규화한 등가 강성보정계수에 대해 분석했다.

### 2.2.2 보강 형상의 영향 반영

앞서 제시된 등가 강성보정계수 모델의 경우 보강이 배관 전체를 감싸며, 단일재료로 이루어져 있다 가정되어 있다. 본 연구에서는 앞서 Fig. 2에 제시된 패드 보강 형상과 복합재 보강 형상의 영향을 등가 강성보정계수 모델에 반영하는 과정을 수행하였다.

복합재 보강 형상의 경우 두 겹의 재료로부터 구해지는 등가의 탄성계수를 계산하여 강성보정계수를 구하였다. 인장 하중인 경우와 굽힘 하중인 경우의 등가 탄성계수 계산식이 다른데, 각각 아래에서 술하였다.

인장 하중일 때<sup>(7)</sup>,

$$E_s = \frac{E_{s,1}V_{s,1} + E_{s,2}V_{s,2}}{V_s} \quad (10)$$

이 때,  $E_{s,1}$ 과  $E_{s,2}$ 는 복합재 보강을 이루는 각 재료의 탄성계수 값이며,  $V_s$ 는 보강 전체의 부피,  $V_{s,1}$ 과  $V_{s,2}$ 는 각 재료가 보강 내에서 이루는 부피를 나타낸다.

굽힘 하중일 때<sup>(8)</sup>,

$$E_s = \frac{E_{s,1}I_{s,1} + E_{s,2}I_{s,2}}{I_{s,1+s,2}} \quad (11)$$

이 때,  $E_{s,1}$ 과  $E_{s,2}$ 는 복합재 보강을 이루는 각 재료의 탄성계수 값이며,  $I_{s,1}$ 과  $I_{s,2}$ 는 복합재 내에서 각 형상이 이루는 관성 모멘트값을 나타낸다.

비틀림 하중에서는 전단 탄성 계수를 구하게 되며 해당 식은 아래와 같다<sup>(8)</sup>.

$$G_s = \frac{G_{s,1}J_{s,1} + G_{s,2}J_{s,2}}{J_{s,1+s,2}} \quad (12)$$

이 때,  $G_{s,1}$ 과  $G_{s,2}$ 는 복합재 보강을 이루는 각 재료의 탄성계수 값이며,  $J_{s,1}$ 과  $J_{s,2}$ 는 복합재 내에서 각 형상이 이루는 극관성 모멘트값을 나타낸다.

## 3. 유한요소 해석을 통한 검증

### 3.1 분석 조건

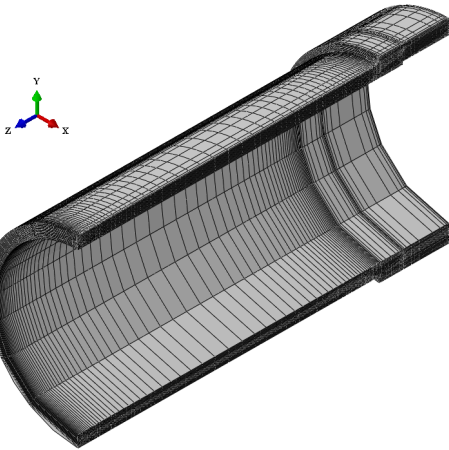
본 연구에서 분석에 사용된 조건은 Table 1에 제시되었다. 분석은 총 48개의 조건에 대해 수행했으며, 배관에 가해지는 하중 4가지 (굽힘,  $M_x$ 와  $M_y$ , 비틀림,  $T$  그리고 인장,  $F$ )를 12개의 형상 조건에 대하여 분석했다. 형상 조건으로는 2개의 감육 형상 변수( $l_w, l_w$ )와 1개의 보강 형상 변수 ( $l_s$ )가 고려되었다. 감육의 두께  $l_w$ 는 배관의 두께  $t$ 로, 감육의 길이  $l_w$ 는 배관의 길이  $l$ 로 정규화했으며, 보강의 길이  $l_s$ 는 배관의 길이  $l_w$ 로 정규화했다. 배관에 가해지는 하중의 종류에 대해서 감육 형상 변수와 보강 형상 변수가 등가 강성에 미치는 영향에 대한 분석을 진행하였다.

### 3.2 유한요소 해석 모델링

상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(9)</sup>를 이용하여 유한요소 해석을 수행하여 등가 강성보정계수 모델을 통해 계산된 패드 보강과 복합재 보강의 등가 강성 값을 검증하였다. 사용된 모델링의 예시는 Fig. 4에 제시되었다.

**Table 1** Analysis cases for equivalent stiffness calculation

Dimensions	Ratio					
Force	$M_x, M_y, T, F$					
$t_w/t$	0.25, 0.75					
$l_w/l$	0.125	0.25	0.5	0.75		
$l_s/l_w$	1.5	1	1.5	1	1.5	1



**Fig. 4** FE mesh example of reinforced wall-thinned pipe.

모델링은 전체 모델링으로, 3차원 2차 저감적분 요소 (C3D20R)를 사용하였다. 감육 형상과 보강 형상에 따라 99,980개에서 112,578개 사이의 요소가 사용되었다. 배관의 길이는 1625.6 mm, 두께는 50.8 mm, 내 반지름은 355.6 mm, 외 반지름은 406.4 mm를 사용하였다. 또한 배관 내 감육이 형성하는 각은 30°로 고정하였다. 하중은 모델의 끝에 ABAQUS의 MPC (Multi Point Constraint) 조건을 적용하여 배관 끝면에 전체적으로 가하였다. 하중이 가해지는 반대편 면에는 완전구속조건을 주었다. 배관의 탄성계수는 200GPa, 포아송비는 0.3을 사용하였다.

패드 보강 모델에서는 보강의 탄성계수와 포아송비는 배관과 동일한 200GPa, 0.3을 사용하였다. 패드 보강부가 형성하는 각은 60°로 고정하였다.

복합재 보강 모델에서는 보강을 이루는 두 재료에 대해, 안쪽 재료의 탄성계수로는 50GPa, 바깥쪽 재료의 탄성계수로는 102GPa를 사용하였다. 포아송비는 두 재료 동일하게 0.3을 사용하였다.

**3.3 유한요소 해석 결과**

패드 보강과 복합재 보강에 대하여, 3.2절에서 제시한 모델로 유한요소 해석을 수행하여 등가 강성

보정계수 모델로 계산된 값과의 비교 검증한 결과를 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 표시하였다. 해석을 통해 얻어진 강성과 이론적 계산을 통해 얻은 강성은 감육과 보강이 없는 배관의 강성( $k_0$ )으로 정규화하여 표시하였다. 그림에서 선은 이론값을, 기호는 유한요소 해석값을 나타낸다. 점선은 감육과 배관의 두께비가 0.25인 경우를 나타내고, 실선은 감육과 배관의 두께비가 0.75인 경우를 나타낸다. 마찬가지로 삼각기호는 두께비가 0.25인 경우를, 원형기호는 두께비가 0.75인 경우를 나타낸다. 보강과 감육의 길이비는 각 그림내에 표시하였다.

**3.3.1 패드 보강의 등가 강성 이론식 검증**

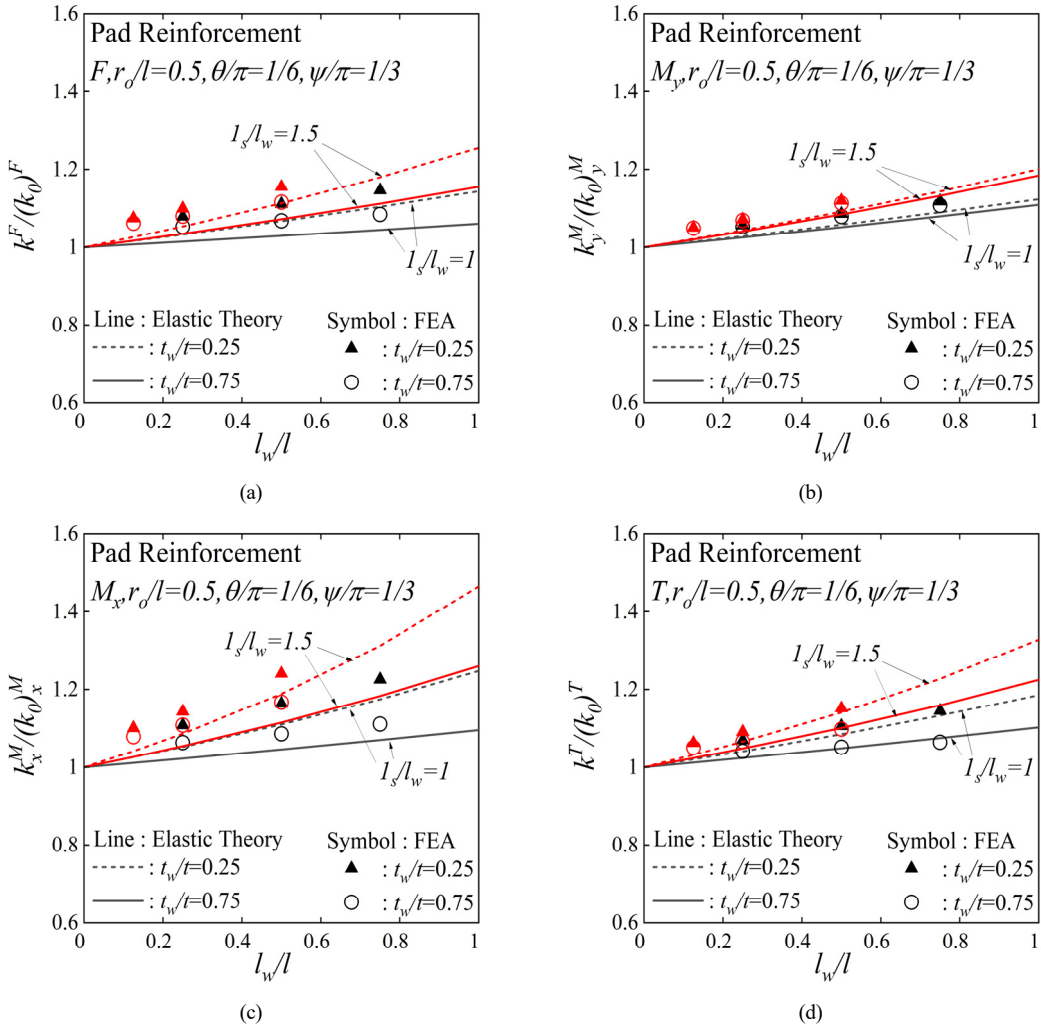
감육 배관의 패드 보강에 대한 유한요소 해석 결과는 Fig. 5에 나타났다. 모든 종류의 하중에 대하여 이론식을 통해 예측된 강성비와 유한요소 해석을 통해 구해진 강성비 간의 오차는 최대 6%로, 등가 강성보정계수 모델이 감육 배관의 패드 보강의 강성을 잘 예측했다.

**3.3.2 복합재 보강의 등가 강성 이론식 검증**

감육 배관의 복합재 보강에 대한 유한요소 해석 결과는 Fig. 6에 나타났다. 패드 보강에서의 결과와 마찬가지로 이론식과 해석으로 구해진 강성비는 최대 5%이내의 오차를 나타내었으며, 마찬가지로 모델이 감육 배관의 복합재 보강에 대해서도 강성을 잘 예측했음을 볼 수 있다.

**3.4 감육과 보강의 배관에서의 영향 분석**

배관에 감육이 발생하게 되면 배관의 강성이 감소하게 되는데, Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 보면 보강의 형태나 재료와 무관하게 감육의 길이와 배관의 길이의 비인  $l_w/l$ 이 증가하여도 강성은 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 감육 보다 더 큰 보강의 형상이 배관의 강성에 더 큰 영향을 주기 때문이다. 또한 감육의 길이가 일정한 경우, 보강재의 길이( $l_s$ )가 증가하게 되면 배관의 강성이 증가하는 것을 Fig.5와 Fig. 6을 통해서도 알 수 있다. 하지만 Fig. 5(a)나 Fig. 6(a)에서  $t_w/t = 0.75, l_w/l = 1$ 인 경우에는 보강으로 인한 강성의 증가가 미미한 것으로 미루어보아, 감육의 깊이가 깊은 경우에는 감육에 의한 강성의 감소량이 크기에 보다는 높은 강성의 복합재 사용 또는 보다 넓은 범위의 패드 보강이 적용해야 함을 유추할 수 있다.



**Fig. 5** Comparison of simulation result and theoretical calculation result for pad reinforcement (a) for tension, (b) for bending (x-direction), (c) for bending (y-direction) and (d) for torsion.

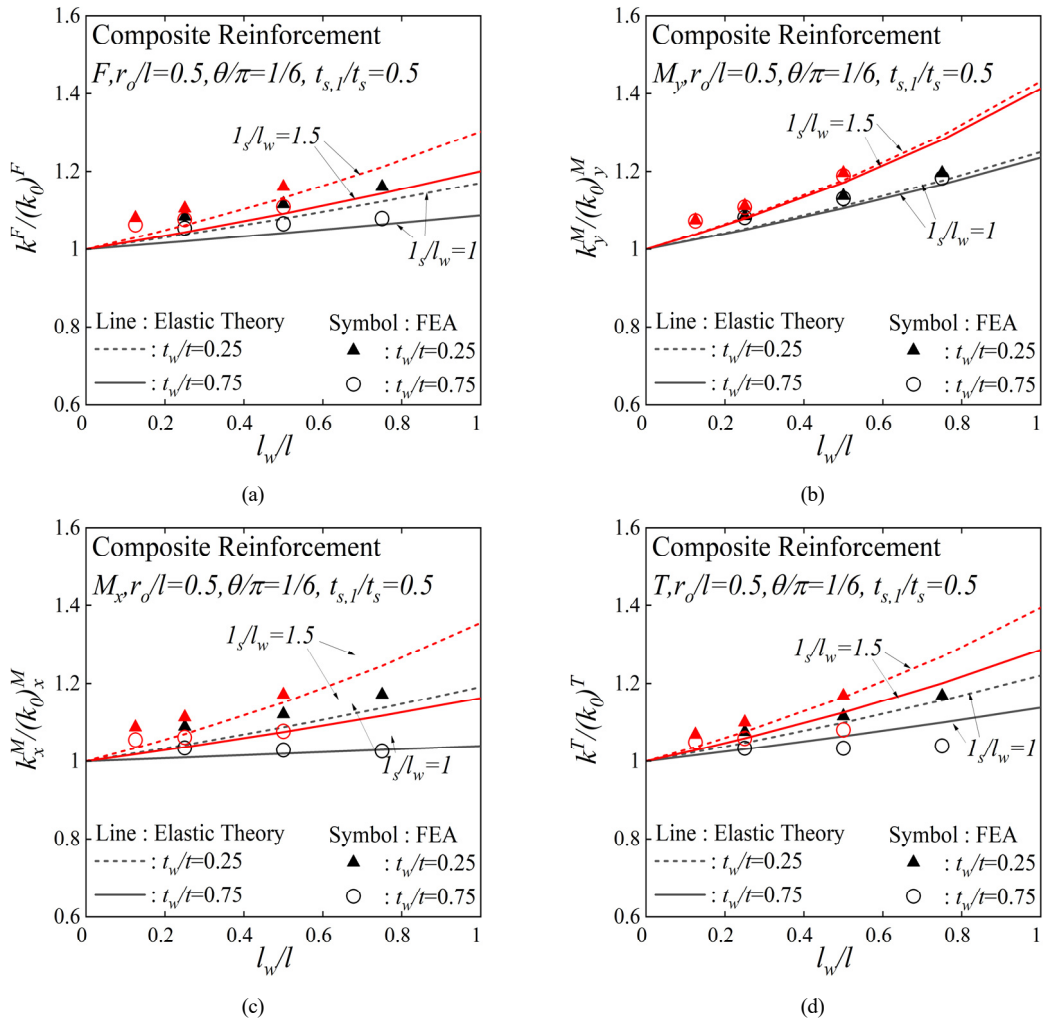
#### 4. 결 론

본 연구에서는 감육 배관에 패드 보강과 복합재 보강을 하였을 때 등가 강성 계산식을 기존 슬리브 보강에 따른 등가 강성보정계수 모델을 수정하여 구하였다. 이론적으로 계산된 강성을 유한요소 해석으로부터 구해지는 강성과 비교하여 제안한 이론식의 타당성을 검증하였다. 감육 배관에 대한 패드 보강과 복합재 보강 모두 이론식으로 구해진 강성 값과 유한요소 해석으로 구해진 강성 값 간의 오차가 적음을 확인했다.

해당 이론식을 통해 배관시스템을 해석하기 위한 1차원 범요소 해석프로그램에 배관의 형상 변화를 반영한 등가 강성을 별도의 3차원 해석 없이 얻어 낼 수 있음을 검증하였다.

#### 후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20206510100030, 가동원전2,3등급 대 구경 배관 보수기술 개발)



**Fig. 6** Comparison of simulation result and theoretical calculation result for composite reinforcement (a) for tension, (b) for bending (x-direction), (c) for bending (y-direction) and (d) for torsion.

### 참고문헌

- (1) Kim. S. H., Choi. H. S., Jeon. B. G. and Hahm. D. G., 2019, "Low-cycle Fatigue Behaviors of the Elbow in a Nuclear Power Plant Piping System Using the Moment and Deformation Angle," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 96, pp. 348-361. doi:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.0 21
- (2) Kim. J. W. and Park. C. Y., 2002, "An Experimental Study on the Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning," *Proc. of ASME 2016 PVP Conference*, Vancouver, BC, August 5-9, PVP2002-1258.
- (3) Yamagata, T., Ito, A., Sato, Y. and Fujisawa, N., 2014, "Experimental and Numerical Studies on Mass Transfer Characteristics Behind an Orifice in a Circular Pipe for Application to Pipe-wall Thinning," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 52, pp. 239-247. doi:https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.09.017
- (4) Peyvandi, A., Soroushian, P. and Jahangirnejad, S., 2013, "Enhancement of the Structural Efficiency and Performance of Concrete Pipes Through Fiber Reinforcement," *Constr. Build Mater.*, Vol. 45, pp. 36-44. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.084
- (5) Fonseca, E.M.M., De Melo, F.J.M.Q. and Oliveira,

- C.A.M., 2005, "The Thermal and Mechanical Behaviour of Structural Steel Piping Systems" *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, Vol. 82, Issue 2, pp. 145-153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2004.06.012>
- (6) 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. Tech.*, Vol. 54, pp. 732-740. doi:<https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.026>
- (7) Chin. W, S, and Lee. D. G., 2006, "Binary Mixture Rule for Predicting the Dielectric Properties of Unidirectional E-glass/epoxy Composite," *Compos. Struct.*, Vol. 74, Issue 2, pp. 153-162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.04.008>
- (8) Peng, L. C. and Peng, T. L., 2009, *Pipe stress engineering*, ASME press, New York.
- (9) *ABAQUS Version 2019*, 2019, Dassault Systems.