

## 내압이 작용하는 직관과 엘보우의 경계면에 존재하는 원주방향 관통균열의 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위 예측식

장윤영<sup>a</sup>, 정재욱<sup>b</sup>, 허남수<sup>a\*</sup>, 김기석<sup>c</sup>, 조우연<sup>c</sup>

## Closed-Form Solutions for Stress Intensity Factor and Elastic Crack Opening Displacement for Circumferential Through-Wall Cracks in the Interface between an Elbow and a Straight Pipe under Internal Pressure

Youn-Young Jang<sup>a</sup>, Jae-Uk Jeong<sup>b</sup>, Nam-Su Huh<sup>a\*</sup>, Ki-Seok Kim<sup>c</sup>, Woo-Yeon Cho<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

<sup>b</sup> School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University,  
2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16419, Korea

<sup>c</sup> Energy Infrastructure Research Group, Steel Solution Center, POSCO,  
100, Songdogwahak-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21985, Korea

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 27 August 2015  
Revised 17 September 2015  
Accepted 17 September 2015

#### Keywords:

Stress intensity factor (SIF)  
Crack opening displacement (COD)  
Linear elastic fracture mechanics  
Elbow  
Leak-before-break (LBB)  
Crack instability

### ABSTRACT

Fracture mechanics analysis for cracked pipes is essential for applying the leak-before-break (LBB) concept to nuclear piping design. For LBB assessment, crack instability and leak rate should be predicted accurately for through-wall cracked pipes. In a nuclear piping system, elbows are connected with straight pipes by circumferential welding; this weld region is often considered a critical location. Hence, accurate crack assessment is necessary for cracks in the interface between elbows and straight pipes. In this study, the stress intensity factor (SIF) and elastic crack opening displacement (COD) were estimated through detailed 3D elastic finite element (FE) analyses. Based on the results, closed-form solutions of shape factors for calculating the SIFs and elastic CODs were proposed for circumferential through-wall cracks in the abovementioned interfaces under internal pressure. In addition, the effect of the elbow on shape factors was investigated by comparing the results with the existing solutions for a straight pipe.

## 1. 서론

균열이 존재하는 배관의 파괴역학 해석은 파단전누설(LBB: Leak-Before-Break) 개념을 원자력 배관 설계에 적용하는데 있어 필수적인 요소로 고려된다. LBB 개념을 원자력 배관 설계에 적용

하면 배관의 양단파단 발생을 억제하기 위한 구속장치 같은 보조 구조물들을 제거할 수 있어 많은 비용 절감이 가능하다. LBB 개념을 배관 설계에 적용하기 위해서는 누설률 평가를 통해 누설균열길이 결정하고 파손평가선도를 통해 균열 건전성을 입증함으로써 안전 여유도를 확보해야 한다. 이를 위해서 탄소성 파괴역학 매개

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6317

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: nam-su.huh@seoultech.ac.kr (Nam-Su Huh).

변수인 균열열림변위(COD: crack opening displacement)와  $J$ -적분이 사용된다. 이 매개변수들을 계산하기 위해서는 먼저 선형 탄성 파괴역학(LEFM: linear elastic fracture mechanics) 해석이 선행되어야 하며, 응력확대계수(SIF: stress intensity factor)와 탄성 균열열림변위 같은 LEFM 매개변수 계산이 수행되어야 한다. 이를 위해 지난 30여 년간 배관의 파괴역학 매개변수를 계산하기 위한 많은 연구가 수행되었으며<sup>[1-4]</sup> 다양한 배관 및 균열형상에 대한 응력확대계수 및 균열열림변위 예측식이 제시되어왔다.

하지만 대부분 직관의 형상에 대한 연구가 수행되어 왔으며 엘보우 대한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 최근 원주방향 관통 균열이 존재하는 엘보우 형상에 대한 균열 해석이 일부 수행된 바 있으며<sup>[5,6]</sup>, 이 연구들에 따르면 엘보우 형상이 고려되지 않을 경우 균열 안정성 평가 시 비보수적인 평가를 할 수 있음을 보였다. LBB 해석 관점에서 원전 설비의 안정적인 운용을 위해서는 보수적인 평가가 이뤄져야 하므로 균열이 존재하는 엘보우에 대한 정확한 균열 해석이 필요하다. 특히, 원자력 배관 계통에서 직관과 엘보우는 용접에 의해 연결되는 경우가 많으며, 용접부는 용접 과정에서 발생하는 잔류 응력과 열변형 등의 원인으로 균열 발생에 취약한 것으로 알려져 있다. 최근 내압이 작용하는 직관과 엘보우의 경계면의 원주방향 관통균열에 대한 응력확대계수 및 탄성 균열열림 변위 예측식이 제시된 바 있으나<sup>[7]</sup> 일부 제한된 엘보우 형상에 대해서 제시되었으며, 예측식이 테이블 형태(tabular solutions)로 되어 있어 적용성에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 내압이 작용하는 직관과 엘보우의 경계면에 존재하는 원주방향 관통균열에 대해서 3차원 탄성 유한요소해석을 통해 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위를 계산할 수 있는 형상계수를 제시하였으며, 추가적으로 공학적 예측식(closed-form expression)도 함께 제시하였다. 또한 엘보우 형상이 LEFM 매개변수에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양한 균열 길이, 배관 두께 및 곡률 반경의 변화를 반영하여 유한요소해석을 체계적으로 실시하였으며, 기존에 제시된 직관의 응력확대계수 및 탄성 균열열림 변위 결과와 비교함으로써 곡률 반경이 LEFM 매개변수에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석 대상

Fig. 1은 직관과 엘보우의 경계면에 위치한 원주방향 관통균열이 존재하는 배관계통의 형상과 균열 단면을 나타낸 것으로  $R$ 은 곡률 반경을 의미하며  $r_i$ ,  $r_m$ 은 각각 배관의 내반경과 평균반경을 의미한다. 또한  $t$ 는 배관의 두께,  $a$ 는 균열 길이의 반,  $\theta$ 는 균열각의 반을 나타낸다. 본 논문에서 고려된 균열은 외호면(extrados)에

Table 1 Summary of geometries considered the present work

$r_m/t$	$R/r_m$	$\theta/\pi$
5, 10, 20, 30	2, 3, 4, 5, 6	0.125, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5

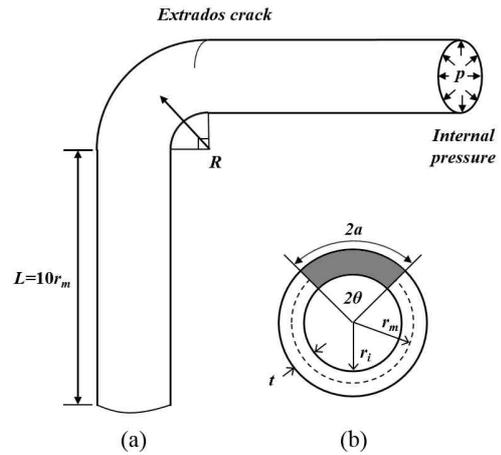


Fig. 1 Schematics of elbow geometry: (a) an elbow with circumferential through-wall crack (TWC) under internal pressure and (b) a circumferential TWC in the interface between an elbow and a pipe

위치하며, 엘보우에 연결된 직관의 길이( $L$ )는 하중에 의해 발생하는 끝단 효과를 피하기 위해 평균반경의 10배로 적용되었다<sup>[8]</sup>. 또한 다양한 엘보우 형상에 따른 LEFM 매개변수를 계산하기 위해 4가지의 배관 두께 비( $r_m/t=5, 10, 20, 30$ ), 5가지의 곡률 반경의 비( $R/r_m=2, 3, 4, 5, 6$ ), 5가지의 균열길이의 비( $\theta/\pi=0.125, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5$ )를 고려하였다. 본 논문에 고려된 엘보우 형상 변수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 해석 조건

Fig. 2는 해석에 적용된 유한요소모델을 나타낸 것이며, 대칭조건을 고려하여 1/2 모델링을 적용하였다. 해석에 고려된 배관 재료의 탄성계수( $E$ : Young's modulus)는 200 GPa, 포아송 비( $\nu$ )는 0.3이 고려되었다.

탄성 유한요소해석을 위해 ABAQUS 프로그램<sup>[9]</sup>이 사용되었으며 비압축성 문제를 해결하기 위해 20절점 등계수 사각 감차적분 요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D20R in ABAQUS)가 적용되었다. 본 연구에 고려된 엘보우 유한요소모델은 총 10,500개의 요소와 50,521개의 절점으로 구성되어 있으며, 균열 선단은 균열면을 따라 썩기모양 요소를 배열하였고 두께 방향으로 5개의 요소가 적용되었다.

하중 조건으로는 내압을 배관 내부에 분포 하중의 형태로 적용하였고, 배관 끝단의 막힘 효과를 고려하기 위해 등가 인장하중(equivalent tensile load)을 배관 끝단에 적용하였으며, 균열면에

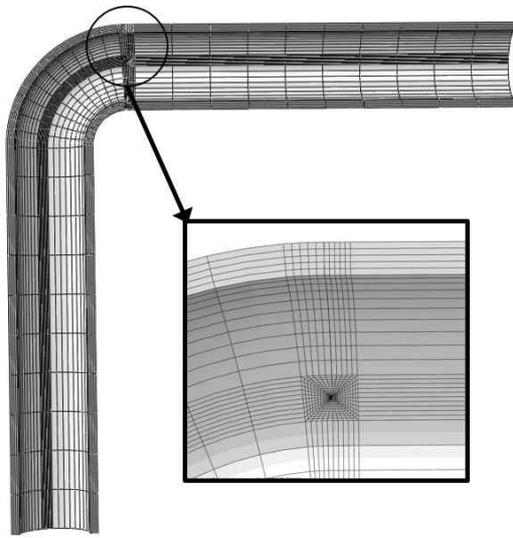


Fig. 2 Typical finite element model used in the present study

작용하는 압력의 영향을 반영하기 위해 내압의 50%에 해당하는 압력을 균열면에 고려하였다.

### 2.3 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위 계산

응력확대계수( $K$ )는 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

$$K = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} F \quad (1)$$

여기서  $F$ 와  $a(=r_m \theta)$ 는 각각 형상계수와 균열길이를 나타내며,  $\sigma^\infty$ 는 배관에 작용하는 공칭응력(remote nominal stress)으로 본 연구에서는 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma^\infty = \frac{pr_i}{2t} \quad (2)$$

본 논문에서의 형상계수  $F$ 는 엘보우 형상에 따른 응력확대계수의 변화를 나타내며 다음 식으로부터 계산된다.

$$F = \frac{K^{FE}}{\sigma^\infty \sqrt{\pi a}} \quad (3)$$

$$K^{FE} = \sqrt{E J_c^{FE}} \quad (4)$$

여기서  $E$ 는 탄성계수를 나타내며  $J_c^{FE}$ 는 유한요소해석으로부터 계산되는 탄성  $J$ -적분값으로 두께방향에 따라 최외면과 최내면을 제외한 평균값으로 계산되었다. 응력확대계수와 탄성  $J$ -적분식의 관계식 (4)에 따라 응력확대계수가 결정되며, 식 (3)으로부터 형상계수  $F$ 가 계산된다.

탄성 균열열림변위( $\delta$ )는 유한요소해석에서 얻어지는 균열 중심에서 두께 중심의 변위( $\delta^{FE}$ )로 계산되며, 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\delta^{FE} = \frac{4\sigma^\infty a}{E} V \quad (5)$$

Table 2 Comparisons of shape factor  $F$  between present FE results and existing solutions

$r_m/t$	$R/r_m$	$\theta/\pi$			
		0.3		0.5	
		Ref. [7]	Present FE	Ref. [7]	Present FE
5	2	1.938	1.930	3.746	3.738
	4	1.914	1.906	-	-
10	2	2.349	2.346	4.258	4.263
	4	2.231	2.226	-	-

Table 3 Comparisons of shape factor  $V$  between present FE results and existing solutions

$r_m/t$	$R/r_m$	$\theta/\pi$			
		0.3		0.5	
		Ref. [7]	Present FE	Ref. [7]	Present FE
5	2	2.514	2.514	6.615	6.613
	4	2.393	2.239	-	-
10	2	3.790	3.817	9.668	9.786
	4	3.319	3.327	-	-

여기서  $\sigma^\infty$ 는 앞서 언급한 것과 같이 배관에 작용하는 공칭응력으로 식 (2)와 같이 정의된다. 따라서 형상계수  $V$ 는 다음 식에 따라 계산된다.

$$V = \frac{E}{4a\sigma^\infty} \delta^{FE} \quad (6)$$

### 2.4 해석결과 검증

본 논문에서 사용된 유한요소 해석모델 및 방법의 타당성을 검증하기 위해 내압이 작용하는 직관과 엘보우 경계면에 존재하는 원주방향 관통균열에 대한 기존 형상계수<sup>[7]</sup>와 비교하였다. Table 2와 3은 기존 형상계수와 본 논문에서 수행된 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 참고문헌 [7]에서는 형상계수 계산을 위한 공칭 응력 정의 시 기준 반경으로  $r_m$ 을 사용하였으나, 본 논문에서는 식 (2)에 나타낸 바와 같이  $r_i$ 를 사용하였다. 이에 따라 비교를 위해서는 동일한 정의를 사용해야 하기에 본 유한요소해석 결과를 기준 반경  $r_m$ 을 이용하여 재변환하여  $F$ 와  $V$ 를 Table 2와 3에서 비교하였다.

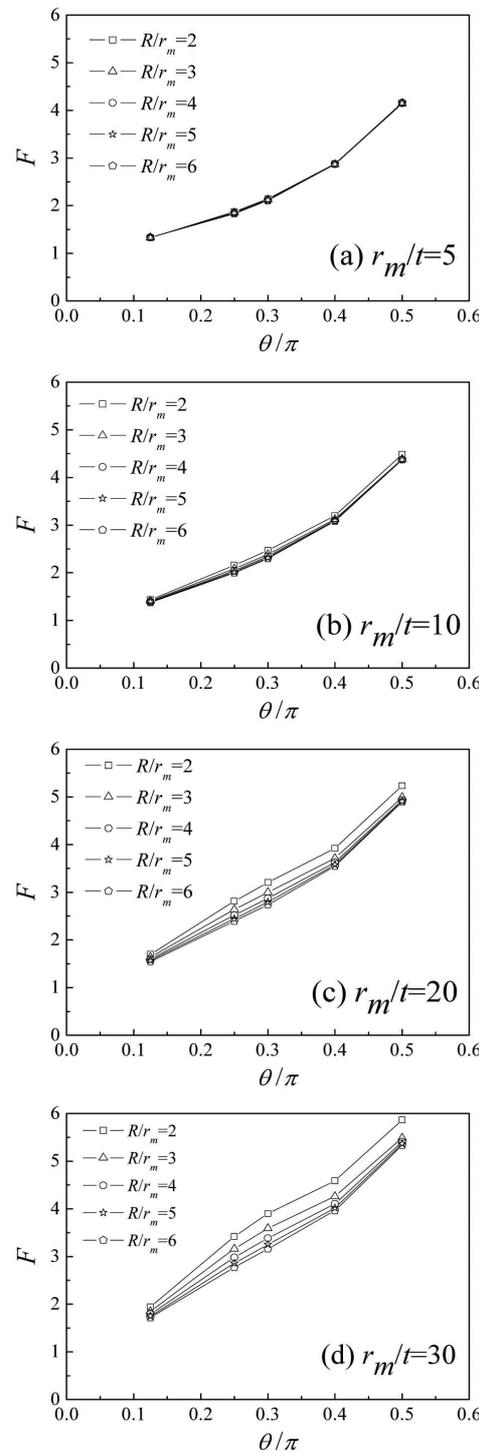
Table 2와 3에 나타난 바와 같이  $F$ 와  $V$  각각 6가지 경우에 대해서 검증이 수행되었으며, 빈 칸은 기존 논문에서 형상계수가 제시되지 않는 경우이다. 최대 차이는 약 2% 이내로 잘 일치하여 본 논문에서 적용한 해석 모델 및 방법의 타당성이 입증되었다.

**Table 4** Values of the shape factor  $F$  for stress intensity factor

$r_m/t$	$R/r_m$	$\theta/\pi$				
		0.125	0.25	0.3	0.4	0.5
5	2	1.330	1.870	2.145	2.880	4.153
	3	1.335	1.855	2.128	2.869	4.138
	4	1.334	1.845	2.118	2.869	4.146
	5	1.332	1.838	2.112	2.870	4.155
	6	1.330	1.833	2.108	2.871	4.163
10	2	1.434	2.160	2.469	3.199	4.487
	3	1.410	2.087	2.387	3.124	4.386
	4	1.395	2.044	2.344	3.099	4.371
	5	1.384	2.017	2.318	3.087	4.372
20	2	1.700	2.812	3.204	3.921	5.234
	3	1.638	2.635	2.998	3.716	4.991
	4	1.597	2.520	2.871	3.626	4.934
	5	1.569	2.445	2.793	3.577	4.909
30	2	1.941	3.418	3.900	4.587	5.867
	3	1.851	3.159	3.591	4.262	5.492
	4	1.792	2.980	3.384	4.105	5.406
	5	1.749	2.859	3.252	4.020	5.363
30	6	1.718	2.772	3.159	3.962	5.334

**Table 5** Values of the shape factor  $V$  for elastic crack opening displacement

$r_m/t$	$R/r_m$	$\theta/\pi$				
		0.125	0.25	0.3	0.4	0.5
5	2	1.379	2.256	2.793	4.373	7.348
	3	1.378	2.196	2.705	4.240	7.185
	4	1.373	2.160	2.656	4.180	7.137
	5	1.369	2.137	2.626	4.145	7.119
	6	1.366	2.121	2.606	4.123	7.110
10	2	1.557	3.110	4.017	6.399	10.301
	3	1.515	2.880	3.684	5.861	9.541
	4	1.488	2.750	3.502	5.595	9.237
	5	1.470	2.670	3.393	5.444	9.087
	6	1.458	2.617	3.320	5.348	9.001
20	2	2.042	5.354	7.317	12.018	18.292
	3	1.922	4.696	6.313	10.259	15.709
	4	1.847	4.293	5.705	9.235	14.371
	5	1.797	4.033	5.320	8.613	13.607
	6	1.762	3.855	5.060	8.200	13.116
30	2	2.564	8.072	11.500	19.575	28.991
	3	2.365	6.894	9.648	16.238	24.127
	4	2.241	6.144	8.470	14.106	21.160
	5	2.156	5.645	7.695	12.747	19.368
	6	2.096	5.294	7.155	11.811	18.166



**Fig. 3** Variations of  $F$  according to crack length and radius of curvature

### 3. 해석 결과

#### 3.1 엘보우 형상 변화에 따른 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위

유한요소해석을 통해 구한 직관과 엘보우 경계면에 존재하는 원주방향 관통균열의 형상계수  $F$ 와  $V$ 를 Table 4와 5에 나타내었으

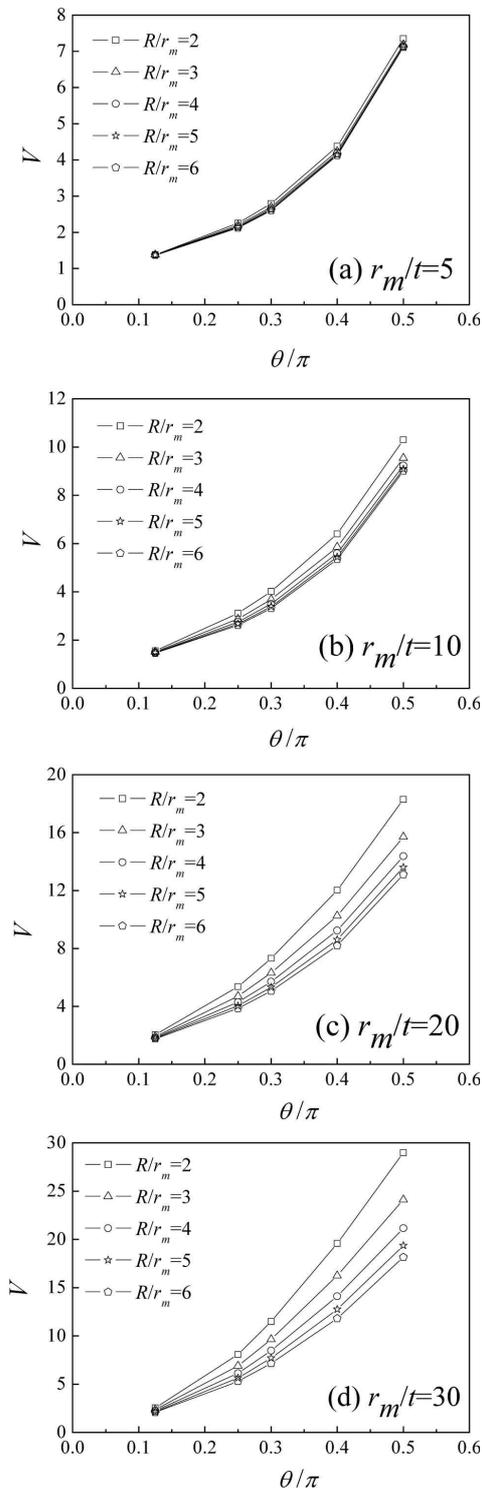


Fig. 4 Variations of  $V$  according to crack length and radius of curvature

며, 형상 변수에 따른 변화를 Fig. 3과 4에 그래프로 나타내었다.

Fig. 3에서 나타난 바와 같이 모든 경우에 대해서  $F$ 는 균열길이에 비례하여 증가하였으며, 곡률 반경이 증가할수록 감소하였다. 곡률 반경에 따른  $F$ 의 차이는 두꺼운 배관( $r_m/t=5$ )의 경우 곡률

반경이 가장 큰( $R/r_m=6$ ) 형상계수 값을 기준으로 2% 미만이지만, 얇은 배관( $r_m/t=30$ )의 경우 9.1%~19.0%의 차이를 보였다.

또한 Fig. 4에 나타난 바와 같이  $V$ 의 경향은 전체적으로  $F$ 의 경향과 유사하게 나타났으며, 곡률 반경에 따른  $V$ 의 차이는 두꺼운 배관( $r_m/t=5$ )의 경우 곡률 반경이 가장 큰( $R/r_m=6$ ) 형상계수 값을 기준으로 7.2% 미만이지만, 얇은 배관( $r_m/t=30$ )의 경우 균열 길이에 따라 18.3~39.7%의 차이를 보였다.

### 3.2 새로운 공학적 계산식 제시

본 논문에서는 LEFM 매개변수 계산의 편의성을 위해 유한요소 해석 결과를 바탕으로 내압이 작용하는 직관과 엘보우의 경계면에 존재하는 원주방향 관통균열의  $F$ 와  $V$ 를 예측할 수 있는 공학적 계산식을 다음과 같이 제시하였다. 본 연구에서 제시한  $F$ 와  $V$ 에 대한 공학적 계산식을 이용하면 식 (1), (2), 그리고 (5)를 이용하여 응력확대계수와 탄성 균열열림변위를 계산할 수 있다.

$$F = 1 + a_1(\theta/\pi) + a_2(\theta/\pi)^2 + a_3(\theta/\pi)^3 + a_4(\theta/\pi)^4 \quad (7)$$

$$a_1 = 2.299 - 0.070\left(\frac{r_m}{t}\right) + 0.002\left(\frac{r_m}{t}\right)^2 - 1.215\left(\frac{r_m}{R}\right) - 0.133\left(\frac{r_m}{t}\right)\left(\frac{r_m}{R}\right) - 0.003\left(\frac{r_m}{t}\right)^2\left(\frac{r_m}{R}\right)$$

$$a_2 = -0.072 + 1.293\left(\frac{r_m}{t}\right) - 0.004\left(\frac{r_m}{t}\right)^2 - 5.450\left(\frac{r_m}{R}\right) + 5.943\left(\frac{r_m}{t}\right)\left(\frac{r_m}{R}\right) - 0.010\left(\frac{r_m}{t}\right)^2\left(\frac{r_m}{R}\right)$$

$$a_3 = 2.414 - 3.060\left(\frac{r_m}{t}\right) - 0.027\left(\frac{r_m}{t}\right)^2 + 30.200\left(\frac{r_m}{R}\right) - 21.900\left(\frac{r_m}{t}\right)\left(\frac{r_m}{R}\right) + 0.120\left(\frac{r_m}{t}\right)^2\left(\frac{r_m}{R}\right)$$

$$a_4 = 24.500 + 2.180\left(\frac{r_m}{t}\right) + 0.050\left(\frac{r_m}{t}\right)^2 - 35.600\left(\frac{r_m}{R}\right) + 22.300\left(\frac{r_m}{t}\right)\left(\frac{r_m}{R}\right) - 0.180\left(\frac{r_m}{t}\right)^2\left(\frac{r_m}{R}\right)$$

$$V = 1 + b_1(\theta/\pi) + b_2(\theta/\pi)^2 + b_3(\theta/\pi)^3 + b_4(\theta/\pi)^4 \quad (8)$$

$$b_1 = 2.216 - 0.294\left(\frac{r_m}{t}\right) + 0.006\left(\frac{r_m}{t}\right)^2 - 0.722\left(\frac{r_m}{R}\right) - 0.360\left(\frac{r_m}{t}\right)\left(\frac{r_m}{R}\right) + 0.010\left(\frac{r_m}{t}\right)^2\left(\frac{r_m}{R}\right)$$

$$b_2 = 1.930 + 4.180\left(\frac{r_m}{t}\right) - 0.051\left(\frac{r_m}{t}\right)^2 - 11.400\left(\frac{r_m}{R}\right) + 8.742\left(\frac{r_m}{t}\right)\left(\frac{r_m}{R}\right) - 0.224\left(\frac{r_m}{t}\right)^2\left(\frac{r_m}{R}\right)$$

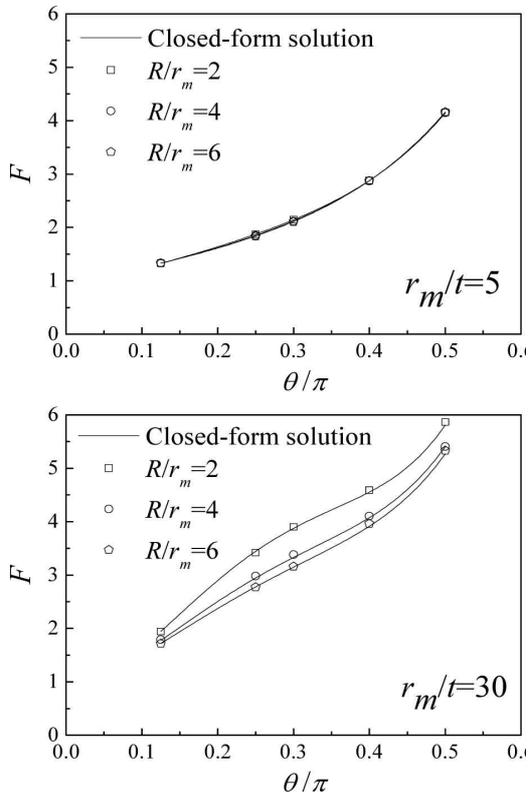


Fig. 5 Comparison of shape factor  $F$  from proposed solutions with present FE results

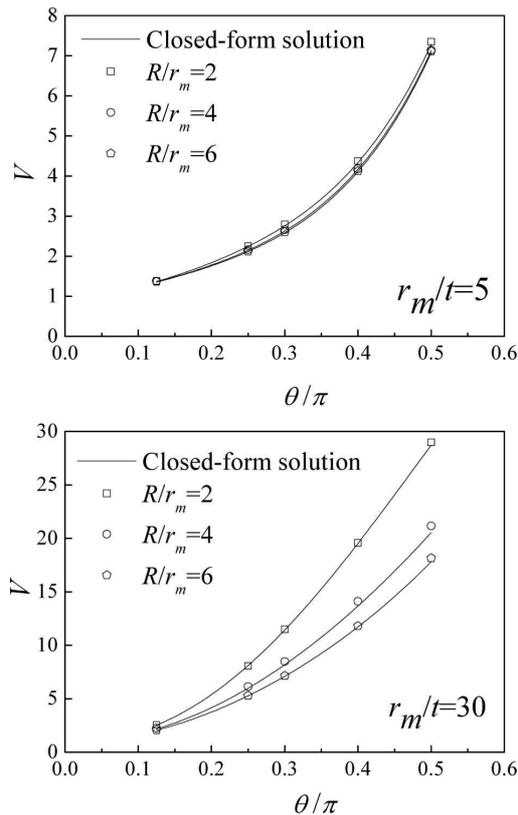


Fig. 6 Comparison of shape factor  $V$  from proposed solutions with present FE results

$$b_3 = -16.000 - 11.300 \left( \frac{r_m}{t} \right) + 0.195 \left( \frac{r_m}{t} \right)^2 + 31.800 \left( \frac{r_m}{R} \right) - 23.900 \left( \frac{r_m}{t} \right) \left( \frac{r_m}{R} \right) + 1.430 \left( \frac{r_m}{t} \right)^2 \left( \frac{r_m}{R} \right)$$

$$b_4 = 83.900 + 11.900 \left( \frac{r_m}{t} \right) - 0.240 \left( \frac{r_m}{t} \right)^2 - 35.300 \left( \frac{r_m}{R} \right) + 20.000 \left( \frac{r_m}{t} \right) \left( \frac{r_m}{R} \right) - 1.580 \left( \frac{r_m}{t} \right)^2 \left( \frac{r_m}{R} \right)$$

식 (7)과 (8)의 적용 범위는  $r_m/t=5\sim30$ ,  $R/r_m=2\sim6$ ,  $\theta/\pi=0.125\sim0.5$ 이다. Fig. 5와 6은 형상계수  $F$ 와  $V$ 의 예측식과 유한요소해석 결과를 비교한 그래프이며, 오차는 각각 2.2%와 3.9% 이내로 해석 결과를 잘 예측하였다.

#### 4. 고찰

앞서 언급한 것처럼 엘보우 형상 변화는 응력확대계수와 단성 균열열림변위의 값에 영향을 주며, 특히 곡률 반경의 크기가 증가할수록  $F$ 와  $V$  모두 감소하는 경향을 보였다. 엘보우 형상에서 곡률 반경이 매우 크게 증가할 경우 직관의 형상에 가까워지므로 형상계수도 직관의 결과에 가까워질 것으로 예상할 수 있다.

기존 연구<sup>[10]</sup> 중 내압이 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 직관의 응력확대계수와 단성 균열열림변위의 형상계수가 제시된

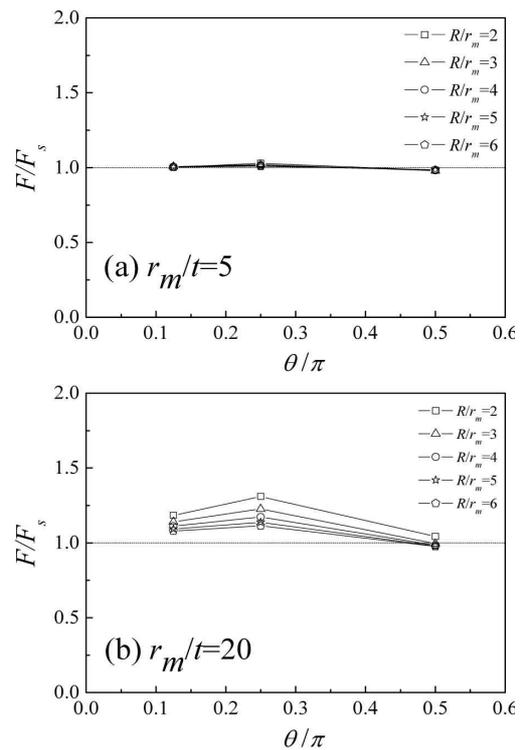


Fig. 7 Comparisons of  $F$  values for elbows with those for straight pipes

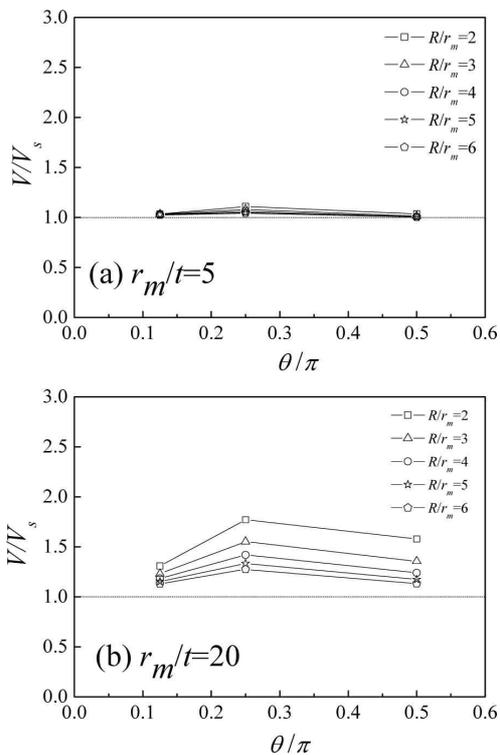


Fig. 8 Comparisons of  $V$  values for elbows with those for straight pipes

바가 있으며, 곡률 반경이 형상계수에 미치는 영향을 확인해보기 위해 본 논문에서 제시된 엘보우 형상계수와 직관 형상계수를 비교하여 Fig. 7과 8에 나타내었다.

Fig. 7과 8에서 y축은 본 연구에서 구한 엘보우 형상계수( $F$ ,  $V$ )를 참고문헌 [10]에 주어진 직관의 형상계수( $F_s$ ,  $V_s$ )로 나눈 값이며, 1에 가까울수록 직관의 결과에 가까워지는 것을 의미한다. Fig. 7(a)과 8(a)에 나타난 것처럼 두꺼운 배관( $r_m/t=5$ )의 경우, 엘보우의 형상계수는 직관과 거의 유사한 값을 보이며, 곡률 반경과 균열 길이의 영향이 거의 나타나지 않는다. 반면 Fig. 7(b)과 8(b)와 같이 얇은 배관 조건( $r_m/t=20$ )의 경우, 엘보우의 형상계수는 대부분 직관보다 크게 나타나며,  $\theta/\pi=0.25$ 에서  $F$ 와  $V$  각각 직관의 형상계수를 기준으로 최대 31%와 77% 차이를 보였다.

결과에 따르면 두꺼운 배관의 경우 엘보우의 형상계수는 직관과 거의 유사한 값을 나타내지만, 얇은 배관에서 엘보우의 형상계수는 곡률 반경이 커질수록 직관의 결과에 가까워진다. 엘보우의  $F$ 와  $V$  값은 대부분 직관의 결과보다 큰 값을 나타내기 때문에 곡률 반경의 영향을 고려하지 않을 경우 응력확대계수와 탄성 균열열림변위를 과소예측을 할 수 있다. 따라서 엘보우 균열 평가 시 정확한 평가를 위해서는 곡률 반경의 영향이 고려된 균열 평가가 수행되어야 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 내압이 작용하는 직관과 엘보우 경계면에 존재하는 원주방향 관통균열에 대한 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였으며, 다양한 엘보우의 형상에 따른 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위의 형상계수를 계산하였다. 또한 해석 결과를 바탕으로 형상계수  $F$ 와  $V$ 의 공학적 예측식을 각각 제시하였다. 또한 기존에 제시된 직관의 형상계수와 본 논문에서 제시된 엘보우의 형상계수를 비교함으로써 응력확대계수와 탄성 균열열림변위에 미치는 곡률 반경의 영향을 평가하였다.

두꺼운 배관의 경우 곡률 반경의 크기 변화는 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위의 형상계수 변화에 큰 영향을 주지 않으며, 직관과 엘보우의 형상계수 간의 차이에도 크게 나타나지 않는다. 따라서 직관과 엘보우의 형상계수는 거의 유사한 값을 보였다. 얇은 배관의 경우 엘보우의 형상계수는 직관보다 큰 값을 나타내며 곡률 반경의 값이 작아질수록 직관과의 차이는 증가한다. 따라서 엘보우의 균열 안정성 평가 시 곡률 반경의 영향을 고려하지 않을 경우 응력확대계수 및 탄성 균열열림변위를 실제보다 작게 예측하여 실제 균열 거동을 다르게 예측할 수 있으므로 보다 정확한 예측을 위해서는 곡률 반경의 영향이 고려된 균열 평가가 필요하다.

## 후기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 플랜트 연구사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다 (13IFIP-B06700801).

## References

- [1] Kumar, V., German, M. D., 1988, Elastic-plastic Fracture Analysis of Through-wall and Surface Flaws in Cylinders, EPRI Report NP-5596.
- [2] Zahoor, A., 1988, Ductile Fracture Mechanics Methodology for Complex Cracks in Nuclear Piping, Nuclear Engineering and Design, 106:2 243-256.
- [3] Takahashi, Y., 2002, Evaluation of Leak-before-break Assessment Methodology for Pipes with a Circumferential Through-Wall Crack. Part I: Stress Intensity Factor and Limit Load Solutions, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 79:6 358-392.
- [4] Huh, N. S., Shim, D. J., Choi, S., Yang, J. S., Wilkowski, G. M., 2008, Stress Intensity Factors for Slanted Through-wall Cracks Based on Elastic Finite Element Analyses, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 31:2 197-209.
- [5] Song, T. K., Kim, Y. J., Oh, C. K., Jin, T. E., Kim, J. S., 2009,

- Net-section Limit Moments and Approximate J Estimates for Circumferential Cracks at the Interface between Elbows and Pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86:8 495-507.
- [6] Oh, C. K., Song, T. K., Kim, Y. J., Jin, T. E., 2008, Elastic-plastic Fracture Mechanics Analyses of Circumferential Through-wall Cracks between Elbows and Pipe, *Engineering Fracture Mechanics*, 75:5 1231-1250.
- [7] An, J. H., Kim, Y. J., Budden, P. J., 2010, Elastic Stress Intensity Factors and Crack Opening Displacements for Circumferential Through-walled Cracked Elbows, *Engineering Fracture Mechanics*, 77:14 2821-2839.
- [8] Kim, Y. J., Oh, C. S., 2006, Closed Form Plastic Collapse Loads of Elbows under Combined Pressure and In-plane Bending, *Engineering Fracture Mechanics*, 73:11 1437-1454.
- [9] ABAQUS, 2011, ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.11-1, Dassault Systemes.
- [10] Kim, Y. J., Huh, N. S., Kim, Y. J., 2002, Quantification of Pressure-induced Hoop Stress Effect on Fracture Analysis of Circumferential Through-wall Cracked Pipes, *Engineering Fracture Mechanics*, 69:11 1249-1267.