

## 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 국부 감육결함의 영향

김진원<sup>†</sup> · 김태순<sup>\*</sup> · 박치용<sup>\*</sup>

(2003년 6월 12일 접수, 2004년 2월 14일 심사완료)

### Effect of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow

Jin-Weon Kim, Tae-Soon Kim, and Chi-Yong Park

**Key Words:** Wall Thinning Defect(감육결함), Elbow(엘보우), Collapse Moment(붕괴모멘트), Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식)

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of local wall thinning on the collapse of elbow subjected to internal pressure and bending moment. Thus, the nonlinear three-dimensional finite element analyses were performed to obtain the collapse moment of elbow containing various wall thinning defects located at intrados and extrados under two loading modes (closing and opening modes) with internal pressure. From the results of analysis, the effect of wall thinning defect on the global moment-rotation behavior of elbow was discussed, and the dependence of collapse moment of elbow on wall thinning depth, length, and circumferential angle was investigated under different loading mode and defect location.

#### 1. 서론

원자력발전소는 수많은 배관계통으로 구성되어 있는데, 이들 배관계통에는 배관의 적절한 배열과 다양한 운전하중에 대한 배관계통의 유연성을 높이기 위해 여러 형태의 엘보우들이 적용되고 있다. 또한, 엘보우는 탄성영역 이상의 과도한 하중조건에서도 국부적인 소성변형에 의해 에너지를 흡수함으로써 배관계통 전체의 건전성을 유지할 수 있도록 하는 역할을 한다.<sup>(1)</sup> 따라서, 붕괴하중을 초과하지 않는 범위에서 엘보우에 대한 건전성을 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 다양한 운전조건에서 엘보우의 안전여유도를 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다.

그러나, 원전 배관계통에서 엘보우는 다양한 형태의 기계적 또는 재료적인 열화 손상에 노출되어 있다. 특히, 탄소강 배관의 경우에는 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)으로 배관의 두께가 얇아지는 감육현상이 발생하는데, 이러한 현상은 직관에 비해 유속의 변화가 큰 곡관부에서 심하게 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 따라서, 원자력발전소 배관계통에 대한 건전성을 보장하기 위해서는 이러한 결함이 존재하는 엘보우에 대한 건전성 평가 방법과 허용두께기준의 확립이 필요하다. 또한, 이를 위해서는 엘보우 건전성에 미치는 감육결함의 영향을 정량적으로 파악하는 것이 선행되어야 할 것이다.

배관의 감육결함 평가와 관련한 많은 실험적·이론적 연구들이 1990년대 이후 수행되었다. 그러나, 대부분 직관에 존재하는 감육결함을 대상으로 하고 있으며,<sup>(3~8)</sup> 최근 감육결함이 존재하는 엘보우의 건전성 평가에 관한 일부 연구가 제한적인 범위에서 수행된 바 있다.<sup>(9,10)</sup> 따라서, 아직까지 감육결함의 존재와 결함의 형상이 엘보우의

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109 FAX : (062)230-7243

<sup>\*</sup> 한전 전력연구원 원자력연구실

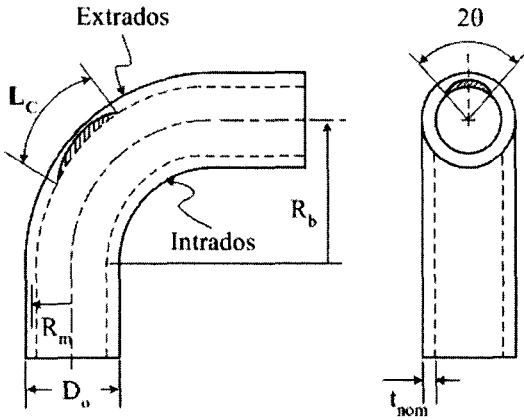


Fig. 1 Definition of dimensions of wall thinning defect in elbow

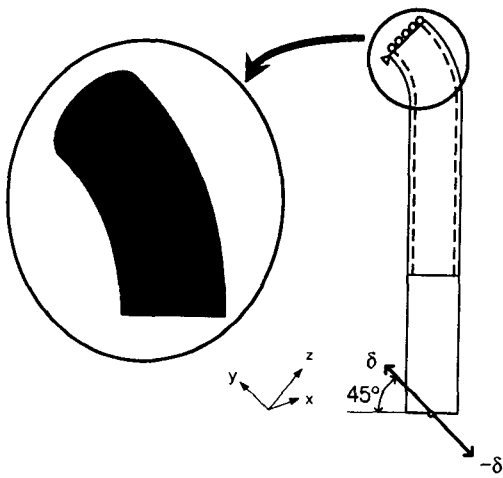


Fig. 2 FE model and boundary conditions employed in the present analysis

건전성에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 감육결합이 엘보우의 건전성에 미치는 영향을 평가하기 위해서, 감육결합의 형상과 곡관의 곡률반경 등을 고려한 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 이들 결과로부터 감육결합에 따른 엘보우의 붕괴모멘트 변화를 정량적으로 비교·분석하였다.

## 2. 붕괴모멘트 계산

### 2.1 유한요소해석

#### 2.1.1 해석조건

감육결합을 가진 엘보우에 대한 붕괴모멘트를 평가하기 위해 본 연구에서는 외경( $D_0$ )이 400mm 이고 공칭두께( $t_{nom}$ )가 20mm인 90° 엘보우를 대상으로 해석을 수행하였다. 또한, 평가 결과에 미치는 곡관의 기하학적 영향을 살펴보기 위해서 곡률반경( $R_b$ )이 배관 반경( $R_m$ )의 3배( $R_b/R_m=3$ )와 6배( $R_b/R_m=6$ )인 경우를 각각 고려하였다.

실제 엘보우에서 감육결합은 유체의 유동특성에 따라 다양한 위치에서 발생한다<sup>(2)</sup>. 따라서, 본 논문에서는 내압과 굽힘하중 조건에서 붕괴모멘트에 미치는 결합의 영향이 민감할 것으로 예상되는 엘보우 바깥쪽(extrados)과 안쪽(intrados)의 중심 내부에 존재하는 감육결합을 가정하였다. 해석에 적용된 결합의 형상은 Table 1에 정리된 것과 같다. 여기서 결합의 형상은 배관의 두께가 설계코드의 최소설계요구두께( $t_{min}$ ) 이하인 영역의 크기를 나타낸 것이다. Table 1에서 결합 길이(L)는 직관 상태에서의 길이이고,  $L_c$ 은 곡관 상태

Table 1 Matrix for FE analysis of wall thinned elbow

Location	Loading type	$R_b/R_m$	Thinning length		Minimum thickness, $t/t_{min}$	Thinning angle, $\theta/\pi$
			$L/D_0$	$L_c/D_0$		
Extrados	Closing	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.334, 0.667, 1.334, 2.667	0.25, 0.5, 0.75	0.0625, 0.125, 0.25, 0.50
		6		0.292, 0.583, 1.167, 2.334		
	Opening	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.334, 0.667, 1.334, 2.667	0.25, 0.5, 0.75	0.0625, 0.125, 0.25, 0.50
		6		0.292, 0.583, 1.167, 2.334		
Intrados	Closing	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.167, 0.334, 0.667, 1.334	0.25, 0.5, 0.75	0.0625, 0.125, 0.25, 0.50
		6		0.208, 0.417, 0.834, 1.667		
	Opening	3	0.25, 0.5, 1.0, 2.0	0.167, 0.334, 0.667, 1.334	0.25, 0.5, 0.75	0.0625, 0.125, 0.25, 0.50
		6		0.208, 0.417, 0.834, 1.667		

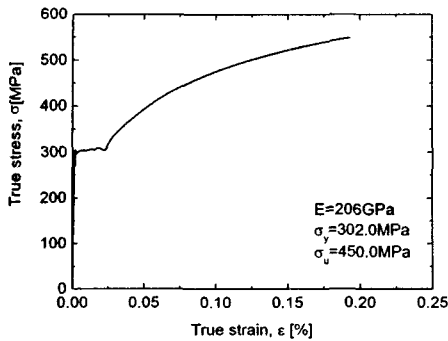


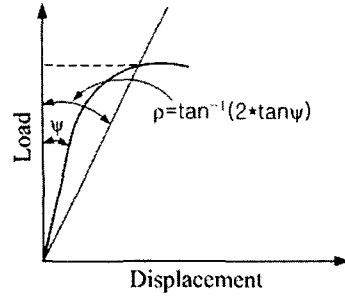
Fig. 3 True stress-strain curve used in FE analysis

에서의 결함 길이로 동일한 L에 대해서 결함의 위치와 곡률반경에 따라 다른 값을 가진다.

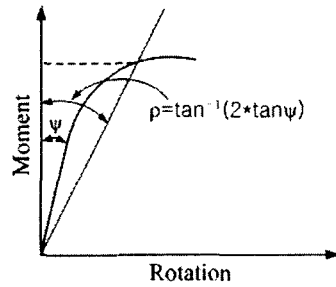
엘보우에 작용되는 하중은 실제 운전 하중을 고려한 내압과 굽힘하중이 동시에 작용되는 조건을 가정하여, 작용 내압으로는 10MPa를 고려하였다. 굽힘하중은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 In-plane상에서 엘보우를 닫아주는 경우(단힘모드)와 펴주는 경우(열림모드)로 각각 고려하였다.

2.1.2 유한요소모델

Fig. 2는 해석에 사용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로 그림에 나타낸 바와 같이 엘보우의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델하였다. 집중하중이 작용되는 배관의 끝단부(5×R<sub>m</sub>)는 빔으로 가정하여 모델링하였으며, 엘보우에 연결된 배관부는 배관 직경에 비해 충분히 길게(10×R<sub>m</sub>) 모델링하여 곡관부에 순수 굽힘모멘트가 작용되도록 하였다. 유한요소는 20 절점의 Brick 요소가 적용되었으며, 모델을 구성하는 요소 수와 절점 수는 각각 1660과 8922이다. 엘보우의 1/4만을 모델함에 따라 Fig. 2에서 나타낸 것과 같은 대칭 경계조건이 적용되었으며, 직관의 45° 방향으로 변위를 적용하여 곡관부에 굽힘모멘트가 작용되도록 하였다. 내압은 굽힘모멘트를 적용하기 전에 분포하중 형태로 곡관의 내면에 작용시켰다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Code를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 곡관부에서 변형에 의한 좌굴현상을 고려하기 위해서 대변형 조건(option)을 적용하였다. Fig. 3은 해석에 적용된 ASTM A333Gr.6 재료의 응력-



(a) Load-displacement curve



(b) Moment-rotation curve

Fig. 4 Illustration of determination of collapse limit load and collapse moment for elbow

변형률 곡선과 재료물성치를 나타낸 것이다.

엘보우의 붕괴모멘트를 구하기 위해서 해석 결과로부터 하중 작용점의 반력과 두 방향(y-, z-방향)의 변위, 그리고 결함 중심부의 응력을 출력하였다.

2.2 엘보우의 붕괴모멘트

엘보우에 대한 붕괴모멘트는 여러 가지 방법으로 정의할 수 있으나, Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이 하중-변위 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 offset 선과 하중-변위 곡선이 교차하는 하중으로부터 붕괴하중(P<sub>c</sub>)을 구하고, 이것에 하중 작용점까지의 거리를 고려하여 붕괴모멘트를 구하는 방법이 일반적으로 적용되고 있다.<sup>(1,11)</sup>

그러나, 이들 방법에서는 하중이 작용되는 동안 하중 작용점의 위치 이동에 따른 굽힘모멘트의 변화를 고려하지 않고 있기 때문에 변형이 증가하는 경우에는 붕괴모멘트의 오차가 크게 증가하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 4(b)와 같이 해석 결과로부터 주어진 하중과 하중점의 변위로부터 모멘트-회전 곡선을 먼저 구하고, 이 곡선으로부터 직접 붕괴모멘트(M<sub>c</sub>)를 정의하였다.

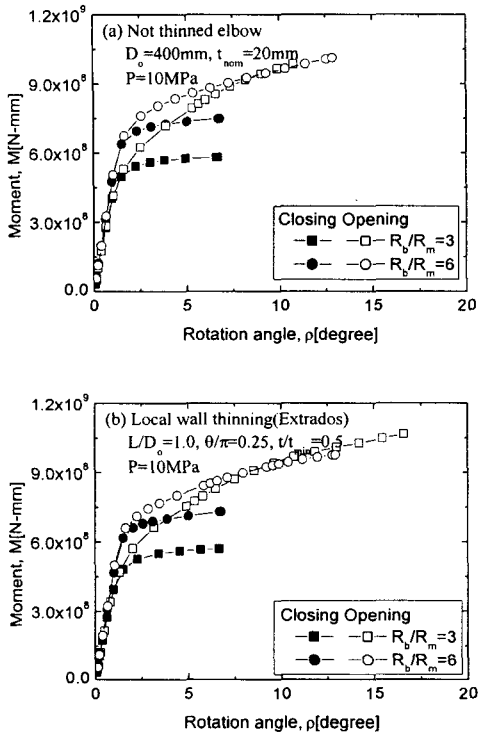


Fig. 5 Moment-rotation behaviors of not thinned and locally thinned elbows

또한, 작용하중으로 내압을 함께 고려하고 있으므로 붕괴모멘트 결정시 모멘트-회전 거동뿐 아니라 감육결합부의 응력을 추가 기준으로 고려하였다. 즉, 감육결합부에서 두께방향의 평균 등가 응력이 재료의 공칭 인장강도를 초과할 때 감육부에서 붕괴가 발생하는 것으로 가정하고, offset 선에 의해 결정된 붕괴모멘트보다 응력기준에 의해 결정된 붕괴모멘트가 더 낮은 경우에는 낮은 모멘트 값을 붕괴모멘트로 취하였다.

### 3. 엘보우 붕괴모멘트에 미치는 감육결합의 영향

#### 3.1 엘보우의 모멘트-회전 거동

감육결합에 따른 엘보우의 붕괴모멘트를 살펴보기에 앞서 결함이 존재하지 않는 건전 엘보우의 모멘트-회전 거동을 먼저 살펴보았다. Fig. 5(a)는 R<sub>b</sub>/R<sub>m</sub>이 3과 6인 건전 엘보우에 대한 닫힘

모드와 열림모드 하중 작용시 모멘트-회전 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 곡관의 곡률반경에 관계없이 닫힘모드에서는 엘보우의 변형에 따라 모멘트가 증가하다 수렴하는 경향을 보이는 반면, 열림모드에서는 엘보우의 변형이 증가됨에 따라 굽힘모멘트가 계속 증가하는 거동을 보였다. 따라서, 닫힘모드에 비해 열림모드 하중에서 높은 하중지지능력을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 거동은 엘보우에 대한 기존의 연구 결과와 일치하는 것으로<sup>(1),(11)</sup>, 닫힘모드 하중에서는 변형에 따라 곡관부 단면의 관성모멘트가 감소하는 반면, 열림모드 하중에서는 변형에 따라 단면의 관성모멘트가 증가하기 때문이다. 또한, 닫힘모드의 하중 조건에서는 엘보우의 곡률반경이 클수록 모멘트가 항상 크게 나타나고 있으나, 열림모드에서는 엘보우의 변형 정도에 따라 다른 거동을 보였다. 즉, 변형이 작은 영역( $\rho < 9^\circ$ )에서는 곡률반경이 큰 곡관이 높은 모멘트를 보이지만, 엘보우의 변형량이 증가( $\rho \geq 9^\circ$ )함에 따라 이러한 경향은 역전되어 곡률반경이 작은 엘보우가 높은 모멘트 값을 보였다.

한편, Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와 동일한 엘보우에 크기가 L/D<sub>o</sub>=1.0, t=0.5t<sub>min</sub>, theta/pi=0.25인 감육결합이 곡관 내부의 바깥쪽에 존재할 때, 모멘트-회전 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 내부에 감육결합이 존재함에 따라 회전에 따른 굽힘모멘트 값은 전체적으로 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 전체적인 모멘트-회전 거동에 미치는 곡관의 곡률반경과 하중모드의 영향은 결함이 존재하지 않는 건전 엘보우의 경우와 유사하였다. 따라서, 감육결합이 존재하는 경우에도 엘보우의 전체적인 모멘트-회전 거동은 엘보우에 작용되는 하중모드와 곡률반경에 크게 지배되는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 감육결합 깊이에 따른 붕괴모멘트

Fig. 6은 감육결합의 깊이에 따른 엘보우의 붕괴모멘트 변화를 살펴보기 위해서 크기가 theta/pi=0.25, L/D<sub>o</sub>=1.0인 감육결합을 가진 엘보우의 붕괴모멘트를 건전 엘보우의 붕괴모멘트로 무차원화하여 결함부의 두께에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 R<sub>b</sub>/R<sub>m</sub>=3인 엘보우에 닫힘모드 하중이 작용되는 경우에는 결함의 위치에 상관없이 붕괴모멘트에 미치는 결함

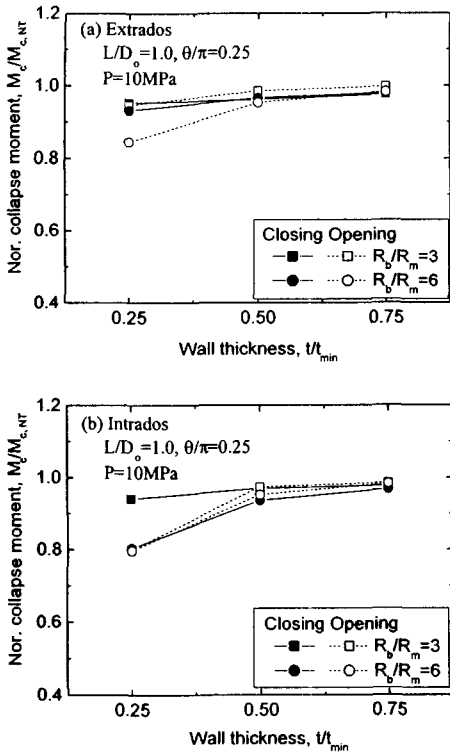


Fig. 6 Effect of depth of wall thinning defect on the collapse moment of wall thinned elbow

깊이의 영향이 거의 나타나지 않았다. 그러나 엘보우의 곡률반경이 증가됨에 따라 결함 깊이에 따른 붕괴모멘트의 감소가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 결함 위치에 관계없이 닫힘모드에 비해 열림모드 하중에서 결함 깊이의 영향이 크게 나타났다. 또한, 결함이 곡관의 바깥쪽에 존재하는 경우보다 곡관의 안쪽에 존재하는 경우에 결함 깊이에 따른 붕괴모멘트의 감소가 크게 나타났다. 이러한 결함 깊이에 따른 붕괴모멘트의 감소 현상은 깊이가 증가함에 따라 급격히 증가되는 경향을 보였다.

평가 결과에서 엘보우의 곡률반경이 크고 열림모드 하중에서 결함 깊이에 따른 붕괴모멘트의 변화가 크게 나타나는 것은 곡률반경이 작고 닫힘모드 하중이 작용되는 경우에 비해 엘보우 거동에 미치는 곡관 자체의 기하학적 영향이 작기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 곡률반경이 작고 닫

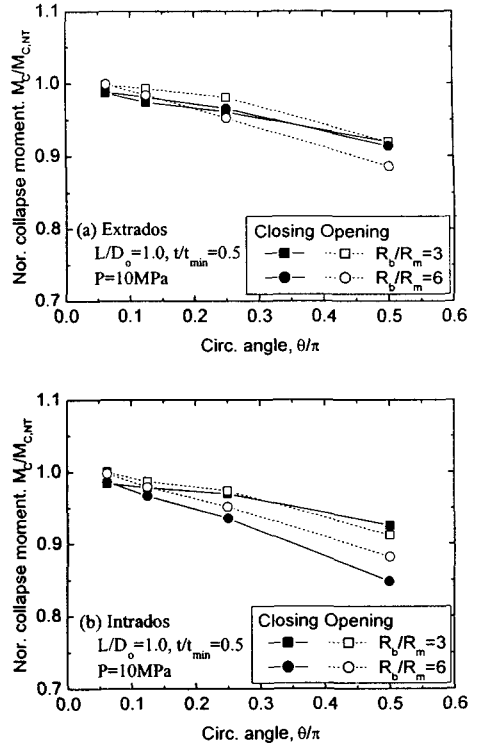


Fig. 7 Effect of circumferential angle of thinning defect on the collapse moment of elbow

힘모드 하중조건에서는 엘보우 자체의 기하학적 영향이 엘보우 거동을 지배하기 때문에 결함 깊이에 따른 영향이 상대적으로 작게 나타나는 것이다.

3.3 감육결함 원주방향 폭에 따른 붕괴모멘트

Fig. 7은 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 감육결함의 원주방향 폭에 대한 영향을 살펴보기 위해서  $L/D_o = 1.0, t = 0.5t_{min}$ 인 감육결함을 가진 엘보우의 붕괴모멘트를 결함의 원주방향 폭에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타나 있는 것과 같이 결함의 폭이 작은 경우( $\theta/\pi = 0.0625$ )에는 붕괴모멘트가 건전 엘보우와 거의 차이가 없으며, 결함의 폭이 증가함에 따라 붕괴모멘트의 감소가 점차 크게 나타났다. 결함의 원주방향 폭에 따른 붕괴모멘트의 감소 정도는 닫힘모드에 비해 열림모드 하중에서 약간 크게 나타나고 있으며, 곡관의 곡

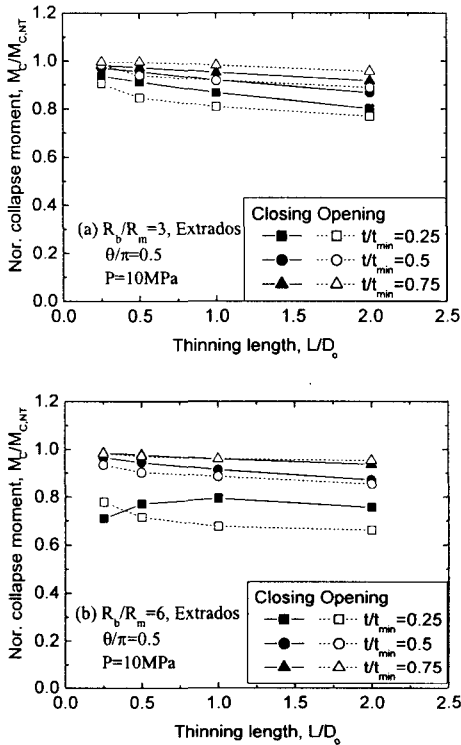


Fig. 8 Effect of length of thinning area on the collapse moment of elbow containing wall thinning defect at extrados

를반경이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 결함이 곡관의 바깥쪽에 존재하는 경우에 비해 안쪽에 존재하는 경우에 보다 뚜렷하게 관찰되었다. 또한, 그림에는 나타내지 않았지만 결함의 원주방향 폭에 따른 붕괴모멘트의 감소 형상은 감육결합의 깊이가 깊을수록 결함의 길이가 증가할수록 크게 나타났다.

한편, Fig. 7에서 원주방향 결함 폭에 따라 붕괴모멘트의 감소 정도를 Figs. 6, 8과 9의 결함 깊이와 길이에 따른 붕괴모멘트 변화와 비교해보면, 결함의 폭에 따른 붕괴모멘트 감소가 결함의 깊이 및 길이에 따른 감소 정도와 유사한 것을 알 수 있다. 이것은 내압만 작용되는 조건에서 감육 엘보우의 파열에 미치는 결함 폭의 영향이 결함 길이와 깊이에 비해 상대적으로 작은 것과 비교되는 결과이다<sup>(12)</sup>. 따라서, 감육 엘보우의 건전성 평가에서 굽힘하중이 고려되는 경우에

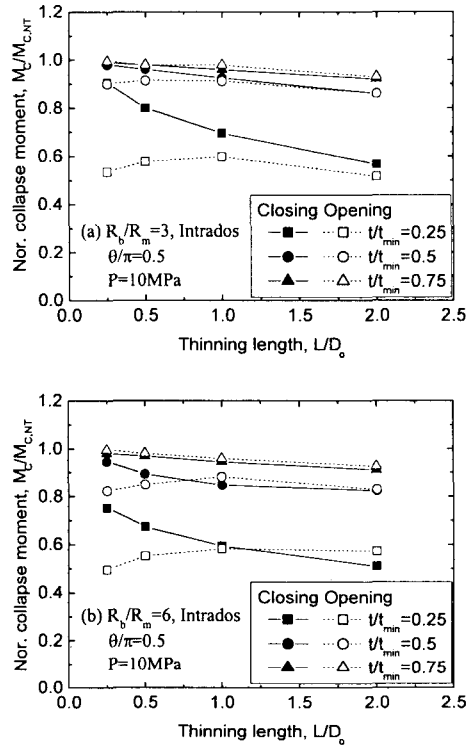


Fig. 9 Effect of length of thinning area on the collapse moment of elbow containing wall thinning defect at intrados

는 감육결합의 깊이와 길이뿐 아니라 결함의 원주방향폭도 중요한 영향 인자로 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 감육결합 길이에 따른 붕괴모멘트

Figs. 8과 9는 각각 엘보우의 바깥쪽과 안쪽에 폭이  $\theta/\pi=0.5$ 인 결함을 가진 엘보우의 붕괴모멘트를 건전 엘보우의 붕괴모멘트로 무차원화하여 결함길이에 따라 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있는 것과 같이 곡률반경이  $R_b/R_m=6$ 이고  $t=0.25t_{min}$ 인 결함을 가진 엘보우가 단힘모드 하중을 받는 경우를 제외하면, 엘보우에 작용되는 하중 모드에 관계없이 결함 길이가 증가함에 따라 전체적으로 붕괴모멘트가 감소하는 경향을 보였다. 결함 길이에 따른 붕괴모멘트의 감소 경향은 결함 깊이가 증가할수록 현저하게 나타났으며, 단힘모드 하중에 비해 열림모드 하중 조건에서

뚜렷하게 나타났다. 한편,  $t=0.25t_{min}$ 인 결함을 가진 곡률반경이  $R_b/R_m=6$ 인 엘보우에 닫힘모드 하중이 작용되는 경우는 결함 길이가 증가함에 따라 붕괴모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 깊이가 깊은 감육결함이 존재하는 직관의 거동과 유사한 것으로<sup>(6)</sup>, 길이가 짧고 깊은 결함부에 인장응력이 작용될 때 응력집중이 크게 발생하여 응력기준에 의한 붕괴모멘트가 낮게 평가되기 때문으로 판단된다.

결함이 곡관의 안쪽에 존재하는 경우에는 Fig. 9에서 알 수 있는 것과 같이 전체적으로 결함 길이에 따라 붕괴모멘트가 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 결함의 깊이가 깊은 조건( $t=0.25t_{min}$ )에서 열림모드 하중이 작용되는 경우에는 결함의 길이가 증가함에 따라 붕괴모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 또한,  $R_b/R_m=6$ 인 경우에는 이러한 거동이  $t=0.5t_{min}$ 에서도 뚜렷이 관찰되었다. 결함 길이에 따른 이러한 경향의 변화는 앞서 설명된 바와 같이 엘보우가 열림모드의 굽힘하중을 받을 때, 곡관의 안쪽에 존재하는 결함에는 인장응력이 작용되고, 이때 결함의 길이가 짧고 깊이가 깊은 조건에서는 결함부의 높은 응력집중 때문에 붕괴모멘트가 낮아지는 것으로 판단된다.

Figs. 8과 9에서 결함 길이에 따른 붕괴모멘트의 감소는 곡관의 곡률반경이 증가할수록 크게 나타나고, 결함이 곡관의 바깥쪽에 존재하는 경우보다 안쪽에 존재하는 경우에 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 결함 깊이와 폭에 따른 붕괴모멘트의 변화와 동일한 것으로 붕괴모멘트에 미치는 곡관의 기하학적인 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이 곡관의 곡률반경이 증가함에 따라 굽힘 거동에 미치는 곡관 자체의 기하학적 영향이 감소하고, 곡관의 안쪽이 바깥쪽에 비해 굽힘 하중에 의한 응력 집중이 크게 발생하기 때문에 결함 형상에 따른 붕괴모멘트의 변화 거동이 뚜렷한 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 엘보우 건전성에 미치는 감육결함의 영향을 파악하기 위하여, 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 감육결함의 형상, 곡관의 곡률반경, 그리고 결함의 위치 등의 영향을 탄소성 유한요소해석을 이용하여 평가하였다. 그 결과 다

음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 감육 엘보우의 전체적인 모멘트-회전 거동에 미치는 곡률반경과 굽힘하중 모드의 영향은 결함이 없는 건전 엘보우와 유사하였다.

(2) 곡관의 곡률반경이 증가할수록, 그리고 감육결함이 곡관 내부의 안쪽에 존재할 때, 감육결함의 형상(깊이, 폭, 길이 등) 변화에 따른 붕괴모멘트의 변화가 크게 나타났다.

(3) 곡률반경이 작은 엘보우에 닫힘모드 하중이 작용되는 경우에는 감육결함 깊이에 따른 붕괴모멘트의 감소가 거의 없었다. 그러나, 곡률반경이 증가하고 열림모드 하중이 작용되는 경우에는 감육결함의 깊이가 증가함에 따라 붕괴모멘트가 급격히 감소되는 경향을 보였다.

(4) 감육결함의 원주방향 폭이 증가함에 따라 엘보우의 붕괴모멘트는 거의 선형적으로 감소하였으며, 결함 폭에 따른 붕괴모멘트의 감소 정도는 결함의 깊이와 길이에 따른 감소 정도와 유사하였다.

(5) 감육결함의 길이가 증가함에 따라 엘보우의 붕괴모멘트는 대부분의 조건에서 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 결함의 깊이가 깊고 감육부에 인장응력이 작용되는 하중모드에서는 감육부 길이가 증가함에 따라 붕괴모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였다.

#### 후 기

본 논문은 2003년도 조선대학교 연구보조비 지원에 따라 수행된 연구 결과임.

#### 참고문헌

- (1) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., 1999, "Limit Loads for Pipe Elbows Subjected to In-Plane Opening Moments and Internal Pressure," *J. of Press. Ves. Tech.*, Vol.121, pp 17~23.
- (2) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R2.
- (3) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H., and Ando, K., 1999, "Fracture Behavior of Carbon Steel Pipe with

- Local Wall Thinning Subjected to Bending Load," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 191, pp. 195~204.
- (4) Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, "Technical Reprt on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," JAERI-M, 93-074, pp. 104~115.
- (5) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., 2000, "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 195, pp. 149~169.
- (6) Kim, J.W., Park, C.Y., and Kim, B.Y., 2001, "Evaluation of Local Allowable Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 25, No.1, pp. 81~88.
- (7) Lim, H., Shim, D.J., Kim, Y.J., and Kim, Y.J., 2002, "Development of New Assessment Methodology for Locally Corroded Pipe," *Proceedings of the KSME 2002 Fall Annual meeting A*, pp. 13~19.
- (8) Kim, J.W. and Park, C.Y., 2002. "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Tinning by Pipe Experiment," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No.4, pp. 731~738.
- (9) Ahn, S. H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., K., Ando, K., Ji, S.H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., 2002, "Fracture Behavior of Stright Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 211, pp. 91~103.
- (10) Li,Z., Yinpei, W., Jin, C., and Cengdian, L., 2001, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows," *Int. J. Press. Ves. and Piping*, pp. 697~703.
- (11) Martzen, V.C. and Yu, L., 1998. "Elbow stress indices using Finite Element Analysis," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 181, pp. 257~265.
- (12) Kim, J.W, Kim, T.S., and Park, C.Y., 2003,"Effect of Internal Wall Thinning Defect on the Burst Pressure of Elbow," *Proceedings of the KNS Spring Annual meeting*.