엘보우 붕괴모멘트에 미치는 국부 감육결함의 원주방향 위치에 대한 영향

김진원† · 이장곤
조선대학교 원자력공학과
(2004. 12. 23. 접수 / 2005. 3. 12. 채택)

Effect of Circumferential Location of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow

Jin-Weon Kim† · Jang-Gon Lee
Department of Nuclear Engineering, Chosun University
(Received December 23, 2004 / Accepted March 12, 2005)

Abstract : The purpose of this study is to investigate the effect of circumferential location of local wall thinning defect on the collapse behavior of an elbow. Thus, the present study conducts three-dimensional finite element analysis on the 90-degree elbow containing a local wall thinning at intrados, crown, and extrados of bend region and evaluates the collapse moment of wall thinned elbow under various thinning shapes and loading conditions. Combined internal pressure and bending moment are considered as an applied load. The internal pressure of 0~20MPa and both closing and opening mode bending are employed. The results of analysis show that the reduction in collapse moment of the elbow by local wall thinning is more significant for a defect locating at crown than for a defect locating at intrados or at extrados. Also, the effect of internal pressure on the collapse moment of wall thinned elbow depends on the circumferential location of thinning defect and applied bending mode.
Key Words : circumferential location, local wall thinning, 90 degree elbow, collapse moment, combined load

1. 서 론

원자력발전소를 비롯한 대부분의 발전소는 수많은 배관계통으로 구성되어 있는데, 이들 배관계통에는 배관의 적절한 배치와 배관계통의 유연성을 높이기 위해 여러 형태의 엘보우들이 적용되고 있다. 또한, 엘보우는 탄성영역 이상의 과도한 하중조건에서 국부적인 소성 변형에 의해 에너지를 흡수함으로써 배관계통 전체의 건전성을 유지하는 역할을 한다[1]. 따라서, 붕괴 하중을 초과하지 않는 범위에서 엘보우의 건전성을 유지하는 것은 매우 중요하며, 이를 위해서는 다양한 운전하중 조건에서 엘보우에 대한 정확한 안전 여유도의 예측이 필요하다. 그러나, 배관계통에서 엘보우는 여러 형태의 열화 손상에 노출되어 있다. 특히, 탄소강 배관의 경우에는 유동가속부식 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 감육 결함의 발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있다[2]. 따라서, 가동 중 배관계통의 건전성 확보를 위해서는 엘보우 거동에 미치는 결함의 영향을 정확히 파악하는 것이 중요하다.

그 동안 배관 계통의 감육결함에 대한 건전성 평가와 관련한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나, 대부분의 연구가 직관에 존재하는 감육결함 평가에 집중되었으며[3-5], 엘보우 감육결함에 대한 연구는 최근에 일부 수행되었다[6-8]. 감육 엘보우에 대한 이들 연구는 제한적인 범위에서 수행되었으며, 결함 위치, 형상, 그리고 하중 조건 등에 대한 평가는 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 특히, 실제 발전소 배관계통에서 감육결함은 곡관부의 다양한 위치에서 발생됨에도 불구하고[2], 건전성에 미치는 감육결함의 위치에 대한 영향은 아직까지 체계적으로 평

†To whom correspondence should be addressed.
jwkim@chosun.ac.kr

Table 1. Matrix for FE analysis of wall thinned elbow

Location	Bending type	Thinning length, L/D_o	Maximum thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$	Thinning angle, θ/π
Extrados	Closing	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.301, 0.534, 0.767	0.0694, 0.125, 0.25. 0.50
	Opening			
Intrados	Closing	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.301, 0.534, 0.767	0.0694, 0.125, 0.25. 0.50
	Opening			
Crown	Closing	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.301, 0.534, 0.767	0.0694, 0.125, 0.25. 0.50
	Opening			

가된 바 없다. 따라서, 감육 엘보우의 건전성에 대한 신뢰성 있는 평가를 위해서는, 엘보우 거동에 미치는 결함 위치에 대한 영향의 파악이 필요하다.

본 연구에서는 엘보우 손상 거동에 미치는 감육 결함의 원주방향 위치에 대한 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해서 결함이 엘보우의 측면 (Crown), 외호면 (Extrados), 그리고 내호면 (Intrados)에 존재하는 감육 엘보우에 대한 유한요소해석을 수행하여 붕괴모멘트를 평가하였다. 해석은 다양한 결함 형상, 내압, 그리고 굽힘하중 조건에서 수행되었으며, 이들 결과를 바탕으로 다양한 하중조건에서 감육 엘보우의 손상 거동에 미치는 결함의 원주방향 위치에 대한 영향을 평가하였다.

2. 유한요소해석

2.1. 해석 조건

결함의 원주방향 위치에 따른 감육 엘보우의 거동을 평가하기 위해서, 본 연구에서는 외경 (D_o)이 400mm이고 공칭두께 (t_{nom})가 20mm이고, 곡률 반경 (R_b)이 배관 평균 반경 (R_m)의 3배인 90° 엘보우를 대상으로 해석을 수행하였다. 해석에서 엘보우의 외호면, 내호면, 측면 내부에 존재하는 감육결함을 가정하였으며, 결함의 형상은 Table 1에 정리된 것과 같다. 여기서 t_p는 결함부에서 가장 얇은 부분의 두께이며, L은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 측면 위치에서 결함의 등가 길이이다.

엘보우에 작용되는 하중은 내압과 굽힘 하중이 동시에 작용되는 조건을 가정하였으며, 내압으로는 0, 5, 10, 15, 20MPa을 각각 고려하였다. 굽힘 하중은 In-plane 상에서 엘보우를 닫아주는 경우(닫힘모드: Closing mode)와 펴주는 경우 (열림모드: Opening mode)를 각각 고려하였다.

2.2. 감육 배관의 손상기준

Fig. 2는 해석에 사용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로 엘보우의 대칭성을 고려하여 1/2만을 모델링 하였다. 엘보우 거동에 미치는 연결 배관의 영향을 최소화하기 위해서, 엘보우에 연결된 직관을 배관 직경에 비해 충분히 길게 ($10\times R_m$) 모델링하였다[9]. 유한요소로 20절점의 Brick 요소가 적용되었으며, 엘보우의 1/2만을 모델링함에 따라 Fig. 2에서 나타낸 것과 같은 대칭경계조건이 적용되었다. 굽힘 하중은 배관 끝단의 모든 절점을 구속한 후 변위제

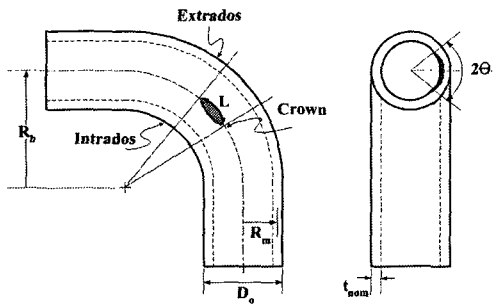


Fig. 1. Definition of dimensions of wall thinned elbow

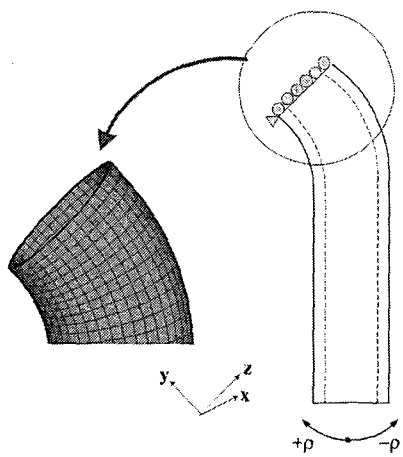
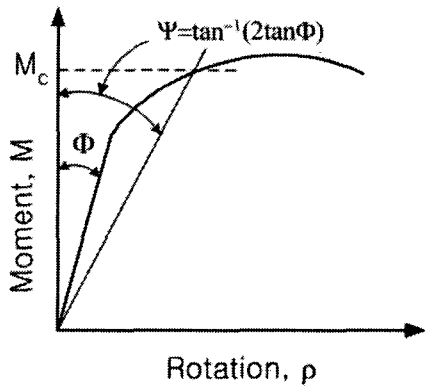


Fig. 2. FE model and boundary conditions

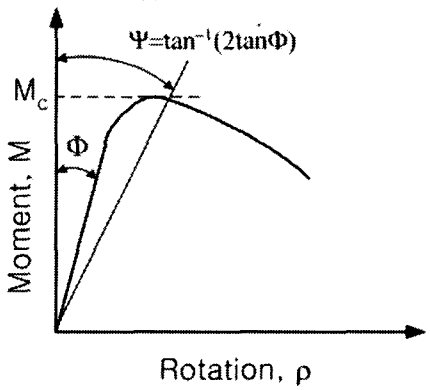
어 형태로 일정각 (ρ)을 회전시킴으로써 작용시켰다. 내압은 굽힘 모멘트를 적용하기 전에 분포하중 형태로 곡관의 내면에 작용시켰다. 해석은 범용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS[10]를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 엘보우에서 단면변형과 국부좌굴 현상을 고려하기 위해 대변형 조건을 사용하였다. 해석에 적용된 배관 재료의 영률 (E)은 206.0GPa, 항복응력 (σ_y)은 302.0MPa, 인장응력 (σ_u)은 452.0MPa이다.

2.3. 감육 엘보우의 붕괴기준

본 논문에서는 감육 엘보우의 붕괴모멘트 (M_C)를 Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 모멘트-회전 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 Offset선과 모멘트-회전 곡선이 교차하는 모멘트 값으로 정의하였다. 이러한 붕괴모멘트 결정 방법은 다른 방법에 비해 결과의 재연성과 적용의 편의성이 높은 것으로 알려져 있다[9,11,12]. 한편, 최대 모멘트가 모멘트-회전



(a) Offset moment



(b) Maximum moment

Fig. 3. Determination of collapse moment for wall thinned elbow

곡선과 Offset선의 교차점 보다 작은 회전각에서 나타나는 경우에는 Fig. 3(b)와 같이 최대 모멘트를 붕괴모멘트로 정의하였다.

3. 해석 결과

3.1. 결함 위치에 따른 붕괴모멘트

감육 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 결함의 원주방향 위치에 대한 영향을 파악하기 위해서, 결함의 각 위치 별로 결함 형상에 따른 붕괴모멘트 감소 정도를 살펴보았다. 여기서는 감육결함에 의한 붕괴모멘트 감소를 감육 엘보우의 붕괴모멘트 (M_C)에 대한 건전 엘보우의 붕괴모멘트 ($M_{C,NT}$) 비로 나타냈으며, 이것을 취약계수 (weakening factor, w)로 정의하였다. 따라서, 취약계수가 1에 근접할수록 붕괴모멘트 감소에 미치는 감육결함의 영향이 작으며, 취약계수가 작아질수록 붕괴모멘트 감소에 미치는 감육결함의 영향이 크다는 것을 의미한다.

3.1.1. 닫힘모드 하중 조건

Fig. 4는 닫힘모드 하중조건에서 취약계수를 결함 깊이, 길이, 그리고 원주방향 폭에 따라 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 전체적으로 결함 깊이, 길이, 그리고 원주방향 폭이 증가함에 따라 취약계수는 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 외호면과 내호면 결함을 갖는 엘보우는 내압의 크기에 관계없이 동일한 결함 크기에서 거의 유사한 취약계수를 보였으나, 측면 결함을 갖는 엘보우에서는 내압의 작용에 따라 취약계수가 크게 증가하는 경향을 보였다. 결함 형상에 관계없이 내압이 작용되지 않는 측면 결함에서 취약계수가 가장 낮았으며, 결함 깊이와 길이에 따른 취약계수의 변화도 가장 크게 나타났다. 그러나, 원주방향 결함 폭에 따른 취약계수의 감소 경향은 측면 결함에 비해 외호면이나 내호면 결함을 갖는 엘보우에서 크게 나타났다.

3.1.2. 열림모드 하중 조건

열림모드 하중 조건에서도 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 결함의 위치에 관계없이 전반적으로 결함의 깊이, 길이, 그리고 원주방향 폭에 따라 감육 엘보우의 취약계수는 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 다만, 내압이 작용되는 경우 (P=10MPa), 내호면과 외호면 결함을 갖는 엘보우에서 결함 깊이

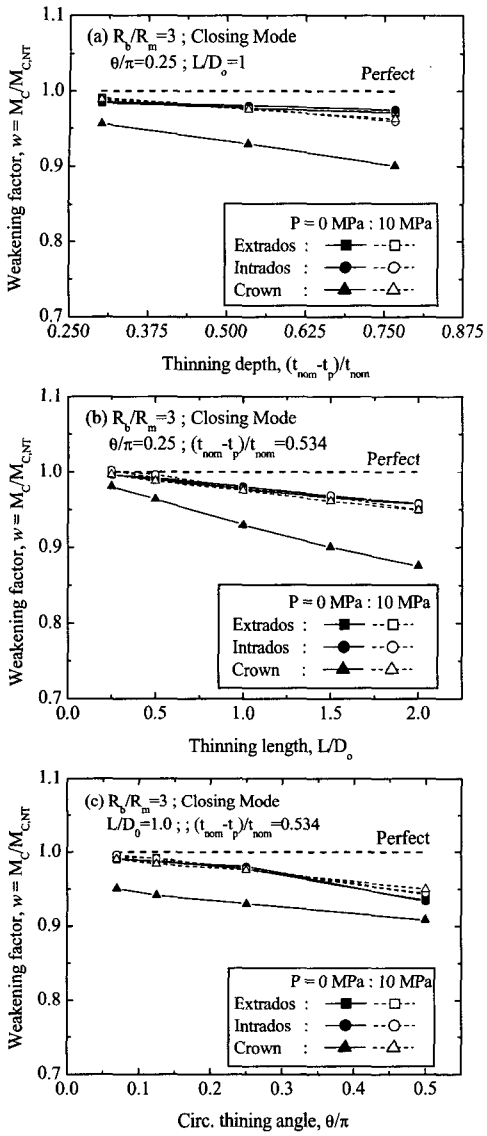


Fig. 4. Dependence of collapse moment of wall thinned elbow on the defect shape for each location under closing mode bending

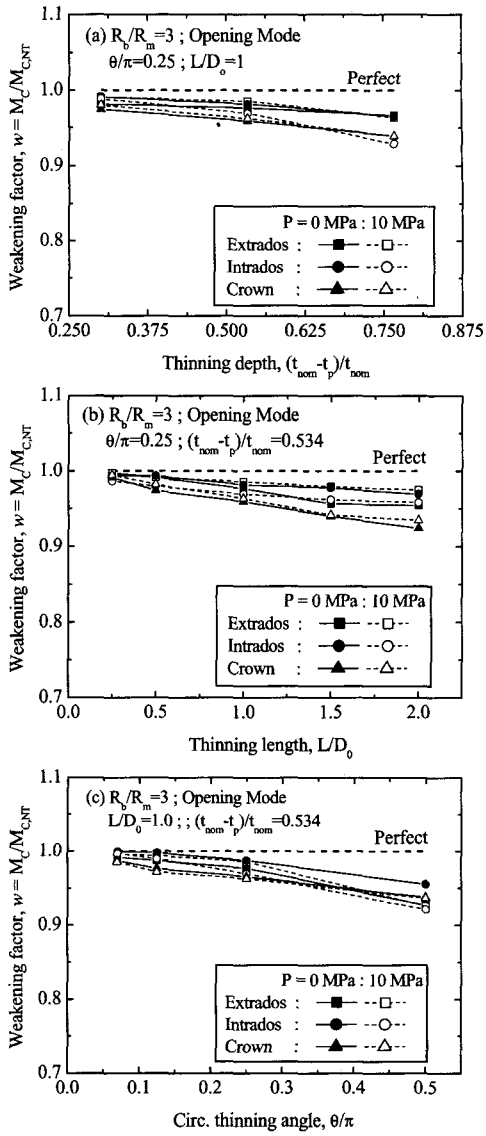


Fig. 5. Dependence of collapse moment of wall thinned elbow on the defect shape for each location under opening mode bending

와 원주방향 폭이 증가함에 따라 취약계수가 비선형적으로 크게 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 전반적으로 다른 결함 위치에 비해 측면 결함이 가장 낮은 취약계수를 보였지만, 결함 폭이 크고(θ/π = 0.5) 깊이가 깊은($(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$ = 0.767) 경우에는 외호면과 내호면 결함이 측면 결함에 비해 낮은 취약계수를 보였다. 또한, 닫힘모드 하중 조건과 달리 열림모드 하중 조건에서는 측면 결함을 갖는 엘보우가 내호면과 외호면 결함을 갖는 엘보우에 비해 작용 내압의 크기에 따른 취약계수의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

3.2. 내압에 따른 붕괴모멘트

Fig. 4와 5의 결과에서 굽힘하중의 형태와 결함 위치에 따라 감육 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 내압의 영향이 다른 것으로 나타났다. 따라서, 원주방향의 각 위치에 일정한 크기($(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$ = 0.534, θ/π = 0.25, L/D_o = 1.0)의 감육결함을 갖는 엘보우

를 대상으로 붕괴모멘트를 평가하고, 내압의 크기에 따른 취약계수의 변화를 살펴보았다.

Fig. 6은 내압의 크기에 따른 취약계수를 결함의 위치에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 닫힘모드 하중이 작용되는 경우, 외호면과 내호면 감육결함은 내압이 증가함에 따라 취약계수가 약간 증가하다 감소한 반면, 결함이 측면에 위치한 경우는 내압에 따라 취약계수가 계속 증가하는 경향을 보였다.

열림모드 하중이 작용되는 경우에는 결함의 위치에 관계없이 내압이 증가함에 따라 취약계수가 약간 증가하다가 감소하는 유사한 경향을 보였다. 결함이 내호면에 존재하는 경우에는 상대적으로 낮은 내압 조건에서 취약계수가 감소하기 시작하였으며, 외호면 결함의 경우에는 가장 높은 내압 조건에서 취약계수가 감소하기 시작하였다. 즉, 열림모드 하중 조건에서 감육 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 내압의 영향은 내호면 결함에서 가장 크고, 외호면 결함에서 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 토 의

4.1. 붕괴모멘트에 미치는 결함 위치의 영향

앞서 살펴본 바와 같이 굽힘 하중의 형태와 결함의 형상에 관계없이 전반적으로 측면 결함이 외호면이나 내호면 결함에 비해 엘보우 붕괴모멘트에 미치는 감육결함의 영향이 큰 것으로 나타났다. 결함의 원주방향 위치에 따른 이러한 특징은 엘보우 곡관부의 응력상태에 미치는 결함의 영향이 다르기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 건전 엘보우에 일정한 회전각 (ρ = 0.1 radian)이 작용될 때, 곡관부의 원주방향 위치에 따른 등가응력의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 닫힘모드와 열림모드 굽힘조건 모두 엘보우의 측면에서 최대 응력이 형성되었으며, 특히 닫힘모드에서 엘보우 측면의 응력이 높게 형성되는 것을 알 수 있다. 엘보우 측면에서 높은 등가응력은 굽힘하중이 작용될 때 곡관부에서 단면변형이 크게 발생하기 때문이며, 굽힘하중 작용시 엘

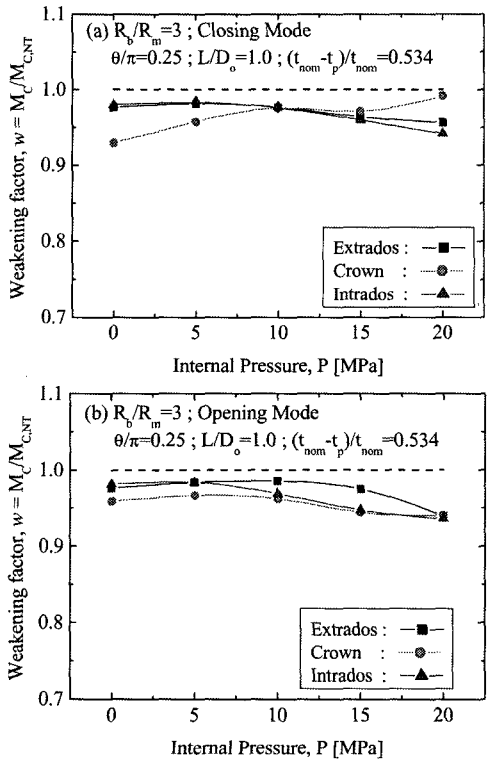


Fig. 6. Effect of internal pressure on the collapse moment of wall thinned elbow for each defect location

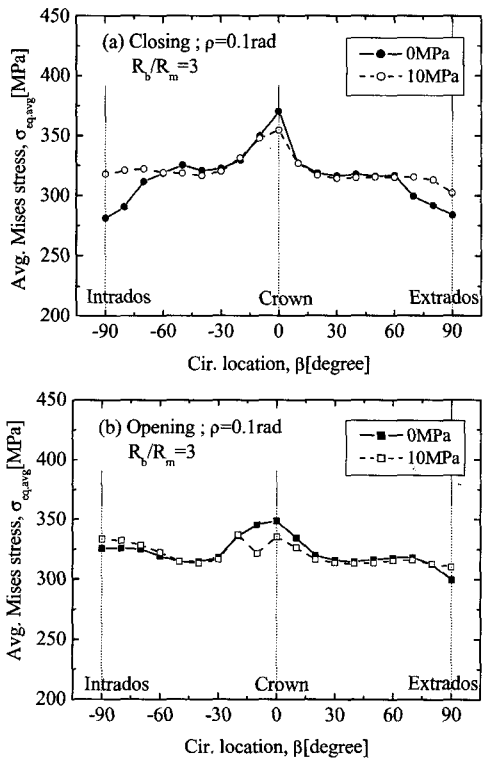


Fig. 7. Stress distributions along the circumference of not-thinned elbow under bending moment

보우의 측면이 가장 취약하다는 것을 보여주는 것이다. 또한, 열림모드에 비해 닫힘모드에서 측면의 취약성이 더욱 높다는 것을 의미한다. 따라서, 다른 위치의 결함에 비해 측면 결함을 갖는 엘보우에서 붕괴모멘트 감소와 결함 깊이와 길이에 따른 변화가 크게 나타나는 것은 취약부에 결함이 존재함으로써 다른 위치에 비해 결함에 의한 응력과 변형률의 변화가 크게 나타나기 때문이다. 또한, 측면 결함에 비해 외호면과 내호면 결함에서 결함 폭에 따른 붕괴모멘트 감소가 크게 나타나는 것은 결함의 폭이 증가함에 따라 측면 결함은 엘보우의 외호면과 내호면 영역으로 확장지만, 외호면과 내호면 결함은 취약부인 엘보우의 측면 영역으로 확장되기 때문인 것을 알 수 있다.

4.2. 붕괴모멘트에 미치는 내압의 영향

해석 결과에서 감육 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 내압의 영향은 감육결함의 원주방향 위치와 작용되는 굽힘하중의 형태에 의존하였다. 일반적으로 엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 내압의 영향은 내압에 의한 단면변형 억제, 강성 증가, 그리고 벽면의 응력 증가 효과 등에 의해 복합적으로 나타나는 것으로 알려져 있다[9,11,13]. Fig. 7은 내압에 의한 이러한 거동을 잘 설명해주고 있다. 내압이 0MPa에서 10 MPa로 증가함에 따라 굽힘하중에 의한 단면변형 억제로 측면의 등가응력은 낮아지고, 내압에 의한 응력 증가로 내호면과 외호면 측의 등가응력은 증가하였다.

따라서, 닫힘모드 하중 작용시 외호면과 내호면 결함을 갖는 엘보우에서 결함에 의한 붕괴모멘트 감소 효과가 증가하는 것은 내압에 의한 벽면의 응력 증가에 기인하는 것이다. 또한, 다른 위치의 결함과 달리 측면 결함을 갖는 엘보우에서 결함에 의한 붕괴모멘트 감소가 내압 증가에 따라 작아지는 것은 측면 결함에 의한 단면변형증가가 내압에 의해 억제되는 효과 때문이다. 한편, 열림모드 하중 조건에서는 내호면 결함을 갖는 엘보우가 다른 결함에 비해 낮은 내압에서 붕괴모멘트의 감소를 보였으며, 감소 경향이 크게 나타났다. 이것은 다른 위치에 비해 엘보우 내호면에서 내압에 의한 응력이 높고[8], 굽힘 하중에 의해 결함부에 인장응력이 작용되기 때문이다. 즉, 내압에 의한 내호면 측의 응력이 다른 부위보다 높고, 이것이 굽힘하중에 의한 인장응력과 중첩되기 때문에 다른 부위에 비해 결함부에서 내압에 의한 응력 증가 효과가 크게 나타나며, 보다 낮은 압력에서 내압에 의한 붕괴모멘트 감소 효과가 나타나는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 감육 엘보우의 손상 거동에 미치는 결함의 원주방향 위치에 대한 영향을 살펴보기 위하여, 엘보우의 내호면, 측면, 그리고 외호면에 다양한 형상의 감육결함을 가정하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하고, 각 하중조건에서 붕괴모멘트를 비교·평가하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 감육결함이 엘보우의 외호면과 내호면에 존재하는 경우보다 측면에 존재할 때, 전반적으로 결함에 의한 붕괴모멘트의 감소가 크고, 결함 깊이와 길이에 따른 붕괴모멘트의 변화가 크게 나타났다. 이것은 엘보우에 굽힘하중이 작용되는 경우, 엘보우의 측면이 응력과 변형이 집중되는 취약부이기 때문이다.

2) 외호면과 내호면 감육 엘보우의 경우, 굽힘하중의 형태에 관계없이 일정한 내압 이상에서는 내압에 따라 결함에 의한 붕괴모멘트 감소가 증가되었다. 특히, 내호면 결함에서는 내압에 의한 붕괴모멘트 감소가 뚜렷하였다. 반면, 측면 결함의 경우는 굽힘하중의 형태에 따라 닫힘모드에서는 내압이 증가함에 따라 결함에 의한 붕괴모멘트 감소 효과가 작아지고, 열림모드에서는 내압이 증가함에 따라 결함에 의한 붕괴모멘트 감소 효과가 증가하였다.

참고문헌

1) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., "Limit loads for pipe elbows subjected to in-plane opening moments and internal pressure", J. of Press. Ves. Tech., Vol. 121, pp. 17~23, 1999.
2) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant", EPRI/TR-106611-R2, 1998.
3) Miyazaki, k., kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H., and Ando, K., "Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load", Nucl. Eng. & Des, Vol. 191, pp. 195~204, 1999.
4) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P.,

Leis, B., and Rudland, D., "Progress In Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas and Pipe and Piping Components", Nucl. Eng. & Des., Vol. 195, pp. 149~169, 2000.

5) Kim, J.W., Park, C.Y., "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment", Trans. of KSME (A), Vol. 26, No. 4, pp. 731~738, 2002.
6) Ahn, S.H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., K., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., "Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning", Nucl. Eng. & Des, Vol. 211, pp. 91~103, 2002.
7) Kim, J.W., Kim, T.S., Park, C.Y., "An Evaluation of The Effect of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow", Trans. of KSME (A), Vol. 28, No. 4, pp. 402~409, 2004.
8) Kim, J.W., Kim, T.S., Park, C.Y., "An Evaluation of the Effect of Internal Thinning Defect on the Failure Pressure of Elbow", J. of the KIIS, Vol. 18, No. 4, pp. 28~34, 2003.
9) Yu, L., and Martzen, V.C., "B_2 stress index for elbow analysis", Nucl. Eng. & Des, Vol. 192, pp. 261~270, 1999.
10) Hibbitt, Karlson and Sorensen Inc., 2001, "ABAQUS ver. 6.2 User's Manual"
11) Chattopadhyay. J., "The effect of internal pressure on in-plane collapse moment of elbows", Nucl. Eng. & Des, Vol. 212, pp. 133~144, 2002.
12) Yahiaoui, K., Moffat, D.G. and Moreton, D.N., "Piping elbows with cracks, Part 2: Global finite element and experimental plastic loads under opening bending", J. Strain Anal., Vol. 35, pp. 47~57, 2000.
13) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., "Nonlinear analysis and plastic deformation of pipe elbows subjected to in-plane bending", Int. J. of Press. Ves. & Pip., Vol. 75, pp. 603~611, 1998.