

In-plane 굽힘 조건에서 감육엘보우 거동에 미치는 내압의 영향

김진원[†] · 김태순^{*} · 박치용^{**}

Effect of Internal Pressure on the Behavior of Wall Thinned Elbow under In-Plane Bending

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

Key Words: Wall Thinned Elbow (감육엘보우), Internal Pressure (내압), In-Plane Bending (동일면 굽힘), Collapse Moment (붕괴 모멘트)

Abstract

This study is conducted to clarify the effect of internal pressure on the deformation and collapse behaviors of wall thinned elbow under in-plane bending moment. Thus, the nonlinear three-dimensional finite element analyses were performed to obtain the moment-rotation curve of elbow containing various wall thinning defects located at intrados and extrados under in-plane bending (closing and opening modes) with internal pressure of 0~15MPa. From the results of analysis, the effect of internal pressure on the global deformation behavior of wall thinned elbow was discussed, and the dependence of collapse moment of elbow on the magnitude of internal pressure was investigated under different loading mode, defect location, and defect shape.

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 유지하는 역할을 한다.⁽¹⁾ 따라서, 운전조건에서 엘보우는 붕괴하중을 초과하지 않는 범위에서 건전성이 유지되어야 하며, 설계 과정에 이러한 특징들이 적절히 반영되도록 요구된다.

그러나, 원전 배관계통에서 엘보우는 운전중에 다양한 형태의 기계·재료적인 열화에 노출된다. 특히, 탄소강의 경우에는 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)으로 두께가 얇아지는 감육결합이 심하게 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 따라서, 가동중 배관계통에 대한 건전성 확보를 위해서는 엘보우 거동에 미치는 감육결합의 영향을 정확히 파악하는 것이 중요하다.

원전 배관의 감육결합과 관련한 많은 실험적·이론적 연구들이 1990년대 이후 수행되었다. 그러나, 대부분 직관에 존재하는 감육결합을 대상으로 수행되었으며,⁽³⁻⁶⁾ 엘보우에 대해서는 최근 일부 연구가 진행되었다.⁽⁷⁻⁹⁾ 따라서, 아직까지 엘보우 거동에 미치는 결합의 위치와 작용하중 등에 대한 영향이 충분히 파악되지 못하고 있다. 특히, 굽힘하중 조건에서 엘보우 거동에 미치는 내압의 영향이 뚜렷한 것으로 보고되고 있지만,^(10,11) 감육엘보우에 대해서는 이들 영향이 평가된 바 없다.

[†] 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109 FAX : (062)230-7763

^{*} 한국원자력연구소

^{**} 한전 전력연구원 원자력연구실

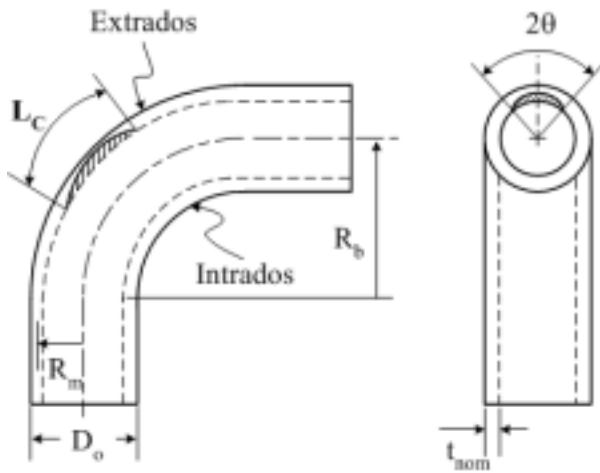


Fig. 1 Definition of dimensions of wall thinning defect in elbow

본 연구에서는 In-plane 굽힘하중이 작용될 때, 감속엘보우의 굽힘거동과 붕괴거동에 미치는 내압의 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해서 다양한 내압 조건에서 감속결합의 형상과 엘보우의 곡률반경, 그리고 작용하중의 방향에 따른 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 이 결과로부터 내압에 따른 엘보우의 모멘트-회전 거동과 붕괴모멘트 변화 등을 비교·평가하였다.

2. 평가 방법

2.1 유한요소해석

2.1.1 해석조건

In-plane 굽힘조건에서 감속결합을 고려한 엘보우 거동을 평가하기 위해서, 본 논문에서는 외경(D_o)이 400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm인 90° 엘보우를 대상으로 해석을 수행하였다. 또한, 평가 결과에 미치는 엘보우의 기하학적 영향을 살펴보기 위해서 곡률반경이 $R_o/R_i=3$ 과 $R_o/R_i=6$ 인 경우를 각각 고려하였다.

본 논문에서는 엘보우의 외호면(extrados)과 내호면(intrados) 내부에 존재하는 폭이 $\theta/\pi=0.0625, 0.125, 0.25, 0.50$, 길이가 $L_g/D_o=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$, 최소두께가 $t_{min}=0.25, 0.5, 0.75$ 인 결함을 고려하였다. 여기서 결함의 형상은 배관의 두께가 설계코드의 최소설계요구두께(t_{min}) 이하인 영역의 크기를 나타낸 것이다. 결함 길이(L_g)는 직관 상태의 길이이고, 실제 곡관 상태에서의 결함 길이(L_c)는 동일한 L_g 에 대해서 결함의 위치와 곡률

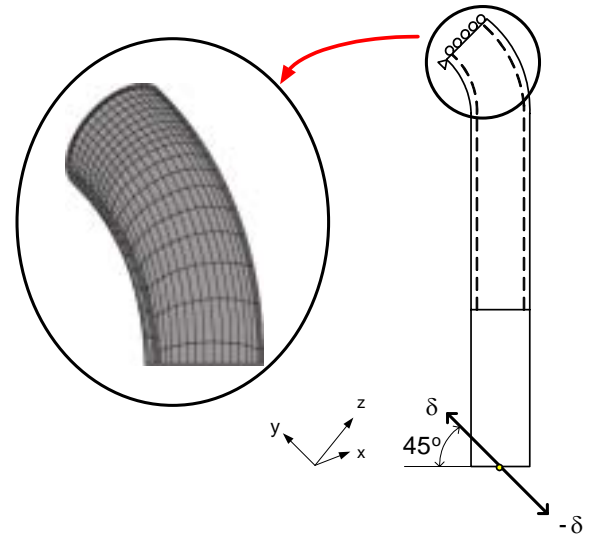


Fig. 2 FE model and boundary conditions employed in the present analysis

반경에 따라 다른 값을 가진다.

해석에는 내압과 굽힘하중이 동시에 고려되었으며, 내압의 크기는 0, 5, 10, 15MPa이고 굽힘하중은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 In-plane상에서 엘보우를 닫아주는 경우(닫힘모드)와 펴주는 경우(열림모드)로 각각 고려하였다.

2.1.2 유한요소모델

Fig. 2는 해석에 사용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로 엘보우의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델하였다. 배관의 끝단부($5 \times R_i$)는 빔으로 가정하여 모델링하였으며, 엘보우에 연결된 배관부는 배관 직경에 비해 충분히 길게($10 \times R_i$) 모델링하여 곡관부에 순수 굽힘모멘트가 작용되도록 하였다. 유한요소는 20 결점의 Brick 요소가 적용되었으며, 엘보우의 1/4만을 모델링함에 따라 Fig. 2에서 나타난 것과 같은 대칭 경계조건이 적용되었으며, 직관의 45° 방향으로 변위를 적용하여 곡관부에 굽힘모멘트가 작용되도록 하였다. 내압은 굽힘모멘트를 적용하기 전에 분포하중 형태로 곡관의 내면에 작용되었다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Code를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 엘보우에서 단면변형과 좌굴 현상을 고려하기 위해서 대변형 조건(option)을 사용하였다. Fig. 3은 해석에 적용된 배관 재료(ASTM A333Gr.6)의 응력-변형률 곡선과 재료물성치를 나타낸 것이다.

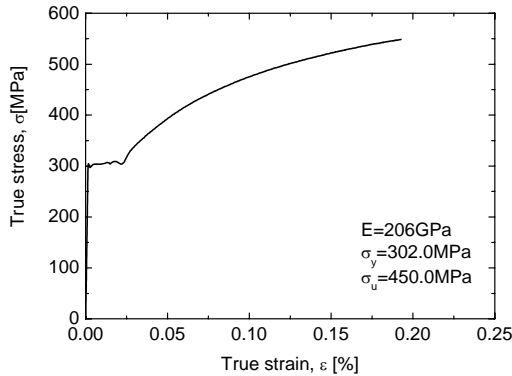


Fig. 3 True stress-strain curve used in FE analysis

2.2 굽힘 붕괴모멘트 계산

본 논문에서 굽힘 붕괴모멘트(M_c)는 엘보우의 모멘트-회전 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 offset선과 모멘트-회전 곡선이 교차점으로부터 정의하였다.^(11,10,11) 모멘트와 회전각은 각각 해석 결과에서 주어진 하중 작용점의 반력과 변위, 그리고 하중 작용점과 엘보우 중심까지의 거리로 계산하였다.

3. 내압에 따른 감속엘보우 거동

3.1 감속엘보우의 모멘트-회전 거동

감속엘보우의 거동에 미치는 내압의 영향을 살펴보기 위해서, 먼저 내압에 따른 감속엘보우의 모멘트-회전 거동을 고찰하였다. Figs. 4와 5는 각각 닫힘모드와 열림모드 굽힘하중에 따른 $R_b/R_m=3$ 인 엘보우의 모멘트-회전 거동을 나타낸 것으로 Extrados와 Intrados에 $L_s/D_o=1.0$, $\theta/\pi=0.25$, $t/t_{min}=0.5$ 인 감속결합이 존재하는 경우를 각각 나타낸 것이다.

3.1.1 닫힘모드 굽힘하중

감속엘보우에 닫힘모드 굽힘하중이 작용되는 경우, Fig. 4에 나타난 것과 같이 결함의 위치에 관계없이 내압이 증가함에 따라 모멘트-회전 곡선이 증가하는 거동을 보였다. 따라서, 모멘트-회전 곡선에서 최대 모멘트 값과 최대 모멘트 값에 해당하는 회전각이 모두 내압에 따라 증가하였다. 이러한 모멘트-회전 거동은 내압에 따른 건전 엘보우의 거동과도 일치하는 것으로, 그림에는

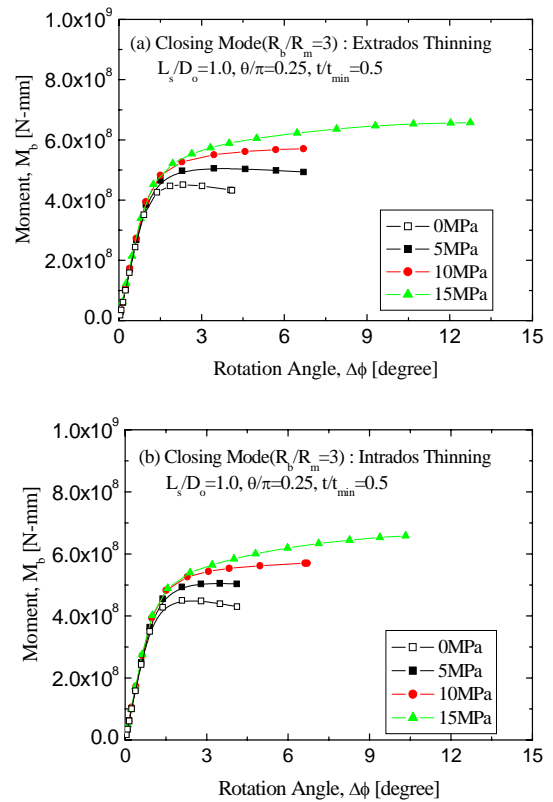


Fig. 4 Effect of internal pressure on the moment-rotation behavior under in-plane closing mode

나타내지 않았지만 곡률반경이 $R_b/R_m=6$ 인 경우에도 유사하였다.

닫힘모드에서 내압에 의한 모멘트-회전 곡선의 증가는 내압에 의한 단면변형 억제 때문인 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 따라서, 닫힘모드에서 결함의 유·무와 결함의 위치, 그리고 엘보우의 곡률반경에 관계없이 내압에 따른 모멘트-회전 거동의 변화가 유사하게 나타나는 것은 모두 동일한 손상거동을 가지기 때문으로 판단된다. 즉, 닫힘모드 하중에서는 결함의 존재와 위치에 관계없이 곡관부의 단면변형이 엘보우의 손상거동을 지배하기 때문에 내압에 따른 단면변형 억제가 모멘트-회전 거동을 증가시키는 것이다.

3.1.2 열림모드 굽힘하중

엘보우에 열림모드 하중이 작용되는 경우, 굽힘 정도가 작을 때는 Fig. 5에서 알 수 있는 것과 같이 내압의 영향이 결함의 유·무와 결함의 위치에 관계없이 유사하였으며, 곡률반경이 $R_b/R_m=6$

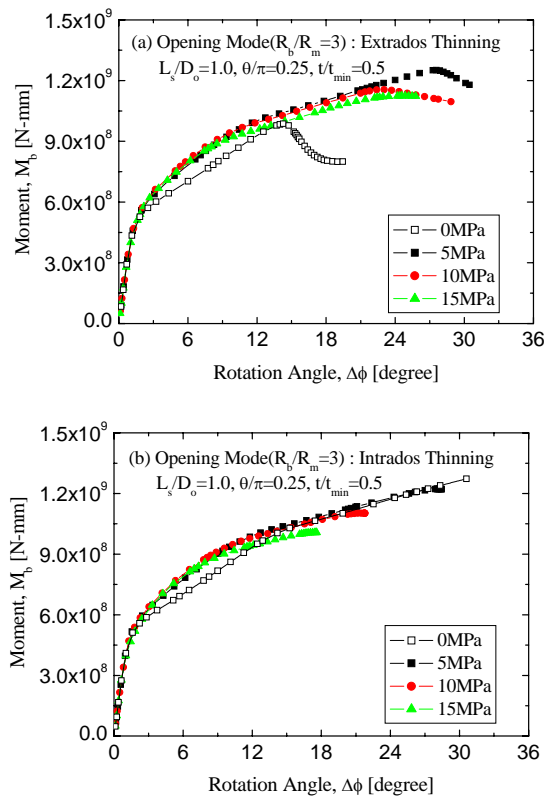


Fig. 5 Effect of internal pressure on the moment-rotation behavior under in-plane opening mode

인 경우에도 비슷한 거동을 보였다. 그러나, 엘보우에 작용되는 굽힘량이 증가함에 따라 건전엘보우의 경우에는 회전각에 따라 모멘트가 계속 증가한 반면, 감속엘보우는 회전각에 따라 모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 결함이 Extradados측에 존재하는 경우에는 모멘트-회전 곡선에서 최대 모멘트와 최대 모멘트에 해당하는 회전각이 내압에 따라 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 결함이 Intrados에 위치하는 경우에는 최대 모멘트와 최대 모멘트에 해당하는 회전각이 내압에 따라 계속 감소하는 경향을 보였다. 또한, Intrados측 감속에서 이러한 경향은 결함의 길이가 짧고 깊이가 깊을수록, 그리고 곡률반경이 작을수록 뚜렷이 나타났다.

열림모드에서 이러한 모멘트-회전 거동의 변화는 손상모드에 의해 설명될 수 있다. 엘보우에 열림모드 하중이 작용되는 경우에는 엘보우의 거동이 1차적으로 곡관부의 단면변형에 의해 지배된다. 그러나, 감속결함이 존재하는 경우에는 결

함의 위치와 크기에 따라 2차적으로 Extradados측 결함에서는 국부과굴이 발생할 수 있고, Intrados측 결함에서는 소성붕괴에 의해 균열이 발생할 수 있다. 따라서, 굽힘 정도가 작을 때 결함의 유·무와 위치에 관계없이 내압의 영향이 유사하게 나타나는 것은 엘보우 거동이 단면변형에 의해 지배되기 때문이다. 또한, 굽힘 정도가 증가함에 따라 내압의 영향이 달라지는 것은 2차적인 손상모드인 국부과굴과 균열발생에 의해 감속엘보우의 거동이 지배되기 때문으로 판단된다.

3.2 내압에 따른 붕괴모멘트 변화

감속엘보우의 붕괴모멘트에 미치는 내압의 영향을 평가하기 위해서, 앞서 제시한 것과 같이 offset 방법에 따라 붕괴모멘트를 결정하였다.

Figs. 6과 7은 각각 Extradados와 Intrados에 결함이 존재하는 $R_b/R_m=3$ 인 엘보우의 붕괴모멘트를 내압에 따라 나타낸 것이다. 각 그림에서 알 수 있는 바와 같이 닫힘모드에서는 내압이 증가함에 따라 기울기는 감소하지만 붕괴모멘트가 계속 증가하는 경향을 보이고 있으며, 열림모드에서는 내압에 따라 붕괴모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 그림에는 나타내지 않았지만, $R_b/R_m=6$ 인 경우에는 열림모드와 닫힘모드 모두에서 내압에 따라 붕괴모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 전체적으로 내압의 증가에 따라 붕괴모멘트는 증가하다 감소하였으며, 최대 붕괴모멘트는 결함의 위치에 관계없이 열림모드와 곡률반경이 클수록 낮은 압력에서 나타났다. 이러한 거동은 내압에 따른 건전엘보우의 붕괴모멘트 변화 경향과 거의 유사한 것이다. 한편, 결함 형상에 따른 내압의 영향을 살펴보면, 결함의 위치에 관계없이 결함 길이와 폭이 증가하고 최소두께가 감소함에 따라 내압의 영향이 뚜렷하고, 최대 붕괴모멘트가 나타나는 내압의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, $R_b/R_m=3$ 에 비해 $R_b/R_m=6$ 인 엘보우에서 결함 형상에 따른 붕괴모멘트의 변화가 크게 관찰되었다.

기존의 건전엘보우에 대한 연구 결과에 의하면, 닫힘모드에서 내압에 따라 붕괴모멘트가 증가하는 것은 내압이 증가함에 따라 단면변형 억제에 의한 배관의 강성 증가 때문이며, 이 보다 높은 압력에서 붕괴모멘트가 다시 감소하는 것은 내압에 의한 응력 증가로 하중지지능력이 감소하

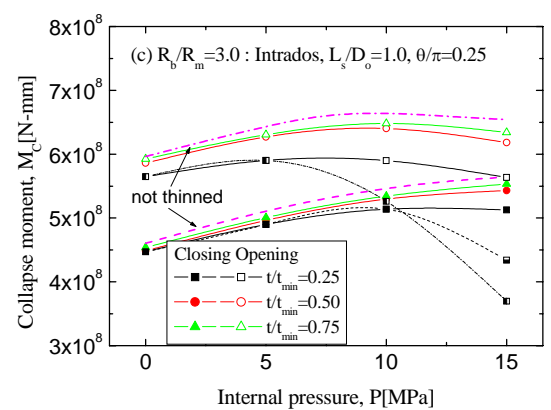
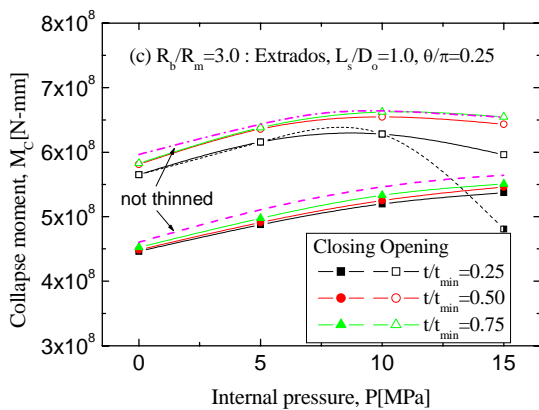
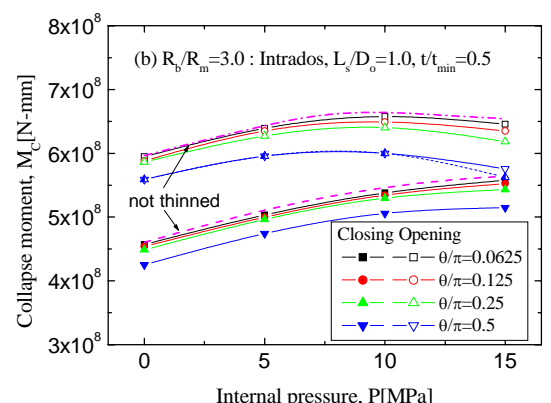
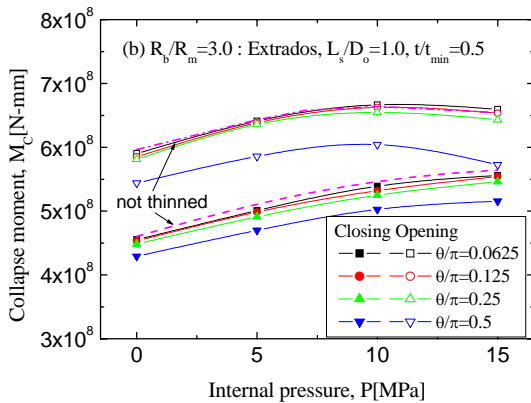
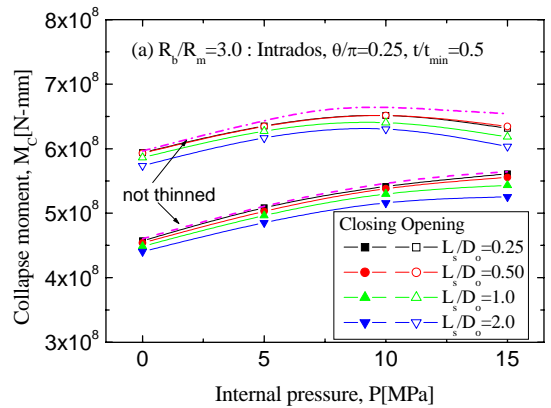
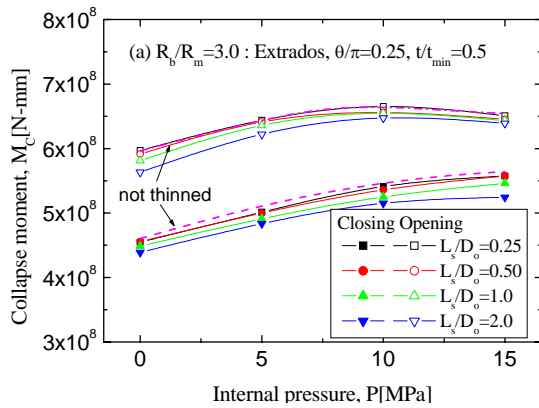


Fig. 6 Dependence of collapse moment on the internal pressure for a elbow with wall thinning at extrados

기 때문이다.^(10,11) 또한, 열림모드에서 내압에 따라 붕괴모멘트가 증가하는 것은 엘보우 단면변형 억제에 따른 엘보우 끝단의 회전 감소에 기인하며, 붕괴모멘트가 다시 감소하는 것은 단면변형 억제에 따른 단면관성모멘트 증가의 감소 때문이다.^(10,11) 따라서, 결함의 길이와 폭이 증가하고, 최소두께가 감소함에 따라 최대 붕괴모멘트에 해당

Fig. 7 Dependence of collapse moment on the internal pressure for a elbow with wall thinning at intrados

하는 내압이 감소하는 것은 보다 낮은 압력에서 단면 변형에 미치는 내압의 영향이 크게 나타나기 때문이다.

한편, Fig. 6(c)와 7(b), (c)에 나타난 것(점선)과 같이 원주방향 폭이 크고 깊은 결함에 내압이 크게 작용되는 경우에는 굽힘 붕괴모멘트에 도달하기 전에 결함 최심부의 평균 등가응력이 재료의

인장강도를 초과하였다. 따라서, 국부적으로 감속부의 응력이 손상응력을 초과할지라도 굽힘에 의한 감속엘보우의 전체적인 붕괴거동은 급격히 변화하지 않는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 In-plane 굽힘 조건에서 감속엘보우 거동에 미치는 내압의 영향을 파악하기 위해서, 내압이 0 ~ 15 MPa인 조건에서 다양한 결함을 고려한 엘보우 거동을 탄소성 유한요소해석을 이용하여 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단힘모드에서는 감속결합의 유·무와 결합의 위치에 무관하게 내압 증가에 따라 엘보우의 모멘트-회전 곡선이 증가하는 거동을 보였다.

2) 열림모드의 경우, 굽힘이 작은 조건에서는 결합의 유·무와 위치에 관계없이 내압에 따라 모멘트-회전 곡선에서 모멘트가 증가하다 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 굽힘 량이 증가함에 따라 모멘트-회전 거동에 미치는 내압의 영향은 결합의 유·무와 위치에 따라 다르게 나타났다. 이는 감속결합의 존재와 위치에 따라 엘보우의 손상모드가 달라지기 때문이다.

3) 내압에 따른 붕괴모멘트 변화는 굽힘 방향과 곡률반경에 따라 차이는 있으나 전체적으로 내압이 증가함에 따라 증가하다 감소하였으며, 이는 내압에 따른 건전엘보우의 붕괴모멘트 변화와 거의 유사하였다. 또한, 최대 붕괴모멘트가 나타나는 내압의 크기는 결합 길이와 폭이 증가하고 감속부 두께가 얇을수록 감소되었다.

4) 감속부에서 국부적인 응력이 재료의 인장응력을 초과하는 경우에도 감속엘보우의 붕괴모멘트는 급격히 감소하지 않았다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 (R-2003-0-290) 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

(1) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., 1998, "Limit loads for pipe elbows with internal pressure under in-plane closing bending moments," J. of

Press. Ves. Tech., Vol.120, pp 35~42.

(2) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRVTR-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) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(8) 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.

(9) Kim, J.W, Kim, T.S., and Park, C.Y., 2003,"Effect of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow," Proceedings of the KSME Spring Annual meeting.

(10) Yu, L. and Martzen, V.C., 1999. "B₂ stress index for elbow analysis," Nucl. Eng. & Des, Vol. 192, pp. 261~270.

(11) 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.