2003 춘계원자력학회 논문집
한국원자력학회

곡관의 파열압력에 미치는 내부 감육결함의 영향
Effect of Internal Wall Thinning Defect on the Burst Pressure of Elbow

김진원
조선대학교 원자력공학과

박치용, 김태순
한전 전력연구원

요약
본 논문에서는 원전 배관 엘보우의 파열압력에 미치는 감육결함의 영향과 결함에 따른 파열압력 평가식을 도출하기 위해서 곡관 내부에 다양한 형태의 감육 결함을 모사한 3 차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 국부응력기준을 적용하여 파열압력을 평가하고, 이들 결과로부터 파열압력에 미치는 결함의 위치, 엘보우의 곡률반경, 그리고 결함의 형상 등에 대한 영향을 평가하였다. 또한, 이들 분석 결과와 외부감육 곡관의 파열압력 평가식에 기초하여 내부에 감육결함이 존재하는 곡관에 대한 파열압력 평가식을 제안하였다.

Abstract
In the present study, three-dimensional finite element analysis was performed to investigate the effects of wall thinning defect on the burst pressure of elbow in piping system of nuclear power plant and to develop the burst pressure evaluation model. From the results of finite element analysis, the burst pressure was derived by applying local stress criteria, and the effects of thinning location, bend radius, and thinning geometry on the burst pressure of wall thinned elbow were investigated. Also, based on these investigations and previous model which estimates burst pressure of elbow with an external pitting defect, it was proposed the burst pressure evaluation model to be applicable to the elbow containing an internal thinning defect.

1. 서론

유동가속부식에 의한 배관의 두께감소(감육)는 원자력발전소 탄소강 배관에서 나타나는 가장 대표적인 결함의 형태로 탄소강 배관의 건전성을 저하시키는 주요 원인이 되고 있다[1]. 또한, 감육 결함은 용접부가 아닌 모재부에서 주로 발생하며, 손상에 대한 예비 징후가 나타나지 않는 특징 때문에 원전의 안전성과 운전성에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 최근 감육 결함은 원전 배관의 건전성 확보와 관련하여 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 감육 결함을 가진 배관의 계속 사용, 교체, 정비 등을 결정하기 위한 적절한 형태의 건전성 평가 방법이 요구되고 있다.

원전 감육 배관에 대한 건전성 평가 방법의 개발은 1990 년대 이후부터 활발히 진행되고 있는데, 미국기계학회 (ASME)와 EPRI 등을 중심으로 여러 형태의 연구들이 수행되었으며[2,3], 이를 바탕으로 ASME Code Case N-597 이 발간되었다[4]. 또한, 일본원자력연구소 (JAERI)와 Hitachi 등 에서는 감육 배관에 대한 실배관 실험과 실험에 기초한 이론식들을 제안한 바 있다[5,6]. 최근에는 그 동안의 연구 결과들을 반영하고 AMSE Code case N-597 의 문제점들을 보완한 감육 결함 평가식을 ASME Sec.XI 의 부록으로 Code 화하기 위한 노력이 진행되고 있다[7]. 그러나, 현재 제안되어 있는 평가 방법 대부분이 직관에 존재하는 감육 결함의 평가에 집중되어 있으며, 실제 원전 배관계통에서 흔히 나타나는 곡관부의 감육 결함에 대해서는 적절한 평가 방법은 제시하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 감육 결함에 대한 건전성 평가 방법의 확립을 위해서는 직관뿐 아니라 곡관에 존재하는 결함을 적절히 평가할 수 있는 방법의 개발이 요구된다.

곡관에 존재하는 감육 결함의 건전성 평가를 위해서는 곡관에 작용하는 하중과 결함의 특징, 그리고 하중과 결함의 형상에 따른 손상거동과 손상기준 등에 대한 파악이 선행되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 감육 엘보우의 가장 기본적인 손상형태인 내압에 의한 파열에 미치는 감육 결함의 영향과 결함에 따른 파열기준을 제시하고자 한다. 감육 결함이 존재하는 곡관의 파열에 대한 평가와 관련한 연구는 피팅형 외부 결함을 대상으로 하는 Gas 나 Oil 배관에 대해서 일부 수행되었으나[8], 원전 배관 엘보우의 감육과 같이 결함이 배관의 내부에 넓게 형성되는 경우에 대해서는 아직까지 연구가 수행되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 원전 배관 엘보우의 파열압력에 미치는 감육결함의 영향과 결함에 따른 파열기준을 도출하기 위해서 곡관의 내부에 다양한 형태의 감육 결함을 가정한 3 차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 국부응력기준을 적용하여 파열압력을 평가하고, 이 결과로부터 결함의 형상과 엘보우의 형태 등이 고려된 파열압력 평가식을 제시하였다.

2. 유한요소해석

2.1 곡관의 모델

감육결함에 따른 곡관의 파열압력을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 직경(D_o)이 400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm인 90^o 엘보우를 고려하였다. 평가 결과에서 곡관의 기하학적 특성과 결함의 위치에 따른 영향을 평가하기 위해 엘보우의 곡률반경(R_b)이 배관 평균반경(R_m)의 3배(R_b/R_m=3)와 6배(R_b/R_m =6)인 엘보우의 바깥쪽(extrados)과 안쪽(intrados)에 감육결함이 존재하는 경우를 각각 가정하였다. 해석에서 고려된 결함의 형상은 Table 1에 정리된 바와 같다. Table 1에 나타낸 감육결함의 크기는 배관의 두께가 설계코드의 최소 설계요구두께(t_{min}) 이하인 부분의 형상이며, 결함의 길이(L_S)는 직관인 상태에서의 길이이고, L_C는 곡관 상태에서 결함 길이를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 해석에 적용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 엘보우의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델하였다. 본 모델은 내압에 대한 파열 평가뿐 아니라 굽힘모멘트에 의한 붕괴 평가에도 적용할 수 있도록 하기 위해서 배관부를 충분히 길게 모델(10$\times R_m$)하였으며, 배관의 끝단부(5$\times R_m$)는 빔으로 가정하여 굽힘모멘트 작용시 집중하중을 작용시킬 수 있도록 하였다. 곡관의 1/4만을 모델함에 따라 Fig. 2에서 보는 것과 같은 대칭 경계조건이 적용되었으

며, 내압은 분포하중 형태로 배관의 내면에 작용시켰다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Code를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3은 해석에 적용된 배관 재료의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다.

2.2 감육배관 파열기준

유한요소해석 결과로부터 감육부의 파열압력을 결정하기 위한 기준으로 식 (1)에 나타낸 것과 같이 감육부에서 가장 얇은 부분의 두께방향 등가응력(von Mises Stress) 평균이 재료의 공칭 인장강도를 초과할 때 파열이 발생하는 것으로 가정하였다. 이러한 국부응력기준은 연성이 큰 배관이 소성붕괴에 의해 손상되는 경우에 손상기준으로 적절한 것으로 알려져 있으며[9], 결함이 없는 배관의 파열에 대한 기준으로도 적용되고 있다.

$$\sigma_{eq,app}\,(\text{sect. avg.}) \geq \sigma_{u,mat.} \tag{1}$$

3. 감육결함의 형상과 위치에 따른 파열압력

유한요소해석 결과에 식(1)의 기준을 적용하여 파열압력을 평가한 결과 다음과 같이 감육결함의 형상과 위치, 그리고 엘보우의 형상에 따른 파열압력의 거동을 파악하였다.

3.1 결함의 위치와 곡관의 곡률반경에 따른 파열압력

파열압력에 미치는 결함의 위치에 대한 영향을 살펴보기 위해 R_b/R_m=3 과 6 인 엘보우의 Extrados 와 Intrados 에 깊이와 폭이 각각 t/t_{min} = 0.5, θ/π = 0.25 인 감육결함이 존재하는 경우의 파열압력을 유한요소해석을 이용하여 구하고, 결과를 결함의 길이에 따라 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 깊이과 폭을 가진 감육결함의 경우에 결함의 길이에 관계없이 곡관의 Intrados 에 결함이 존재하는 경우가 Extrados 에 존재하는 경우에 비해 낮은 파열압력을 보였다. 이러한 거동은 식(2)와 같이 주어지는 결함이 없는 곡관의 내압에 따른 원주방향 응력분포에서 알 수 있듯이 내압에 의한 곡관에 원주방향 응력이 곡관의 Extrados 에서 가장 낮고 intrados 에서 가장 높게 나타나는 것에 기인한다. 이러한 거동은 선행연구에서 수행된 곡관의 외부 피팅 결함에 대한 파열압력에서도 동일하게 관찰되었으며, 이들 결과에 의하면 결함이 곡관의 옆면(Crown)에 존재하는 경우에는 Intrados 와 Extrados 의 중간 정도 파열압력을 보이는 것으로 나타나 있다[8]. 따라서, 감육결함이 곡관의 내벽에 존재하는 경우에도 Crown 쪽 결함에서 중간 정도의 파열압력을 보일 것으로 예상할 수 있다.

$$\sigma_C(\beta) = \frac{P_m R_m}{2t_{nom}} \frac{2R_b + R_m \sin\beta}{R_b + R_m \sin\beta} \tag{2}$$

여기서, β는 Fig. 1 에 정의된 것과 같이 곡관에서 원주방향 위치를 나타낸 것이다.

동일한 결함 조건에서 곡관의 곡률반경에 따른 파열압력을 살펴보면, Fig. 4 에서 알 수 있는 것과 같이 곡관의 Extrados 에 결함이 존재하는 경우에는 곡률반경이 감소할수록, 그리고

Intrados 에 결함이 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가할수록 파열압력이 증가하는 경향을 보였다. 곡관의 곡률반경에 따른 이러한 경향 역시 식(2)로 주어지는 내압에 의한 곡관의 원주방향 응력변화 때문인 것으로 판단된다. 즉, 일정한 내압조건에서 곡관의 Extrados 측 원주방향 응력은 곡률반경이 증가할수록 증가하는 반면, Intrados 측 원주방향 응력은 곡률반경이 증가할수록 감소하기 때문이다.

따라서, 이들 결과로부터 감육 엘보우의 파열에 미치는 결함의 위치와 곡관의 형상에 대한 영향은 내압의 의한 곡관에서의 원주방향 응력분포에 크게 의존하는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 곡관의 외부에 결함이 존재하는 경우와 동일한 경향인 것을 알 수 있다.

3.2 감육결함의 형상에 따른 파열압력

감육 엘보우의 파열에 미치는 결함형상의 영향을 살펴보기 위해서 결함의 길이, 결함의 폭, 결함의 깊이에 따라 파열압력을 유한요소해석을 통해 평가하고, 그 결과를 Fig. 4~6 에 나타내었다. Fig. 4 에서 알 수 있는 것과 같이 결함의 폭과 깊이가 일정한 경우, 결함 길이에 따라 파열압력은 감육길이가 배관의 반경 정도까지는 급격히 감소하다가 그 이상에서는 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 감육 깊이에 따른 파열압력의 변화는 Fig. 5 에 나타낸 것과 같이 결함의 위치와 곡관의 곡률반경에 관계없이 일정한 감육 폭과 길이에서 감육부 두께가 증가함에 따라 기울기가 감소하는 경향은 있으나 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 감육결함의 원주방향 폭에 따른 파열압력의 변화는 결함의 깊이와 길이에 따른 변화에 비해 영향은 크지는 않았지만, 일정한 결함길이와 깊이에서 결함의 폭이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6). 감육결함의 폭에 따른 파열압력의 변화는 피팅형 감육결함을 대상으로 하는 Oil & Gas 배관의 평가식에서는 고려하지 않고 있으나[8], 본 결과로부터 결함의 형상이 원주방향으로 넓게 형성되는 경우에는 정확한 파열압력 평가를 위해서 원주방향 감육 폭에 대한 영향을 무시할 수 없다는 것을 알 수 있다.

4. 감육 엘보우의 파열압력 평가식

4.1 기존 감육엘보우 평가식

현재까지 감육 엘보우에 대한 파열압력 평가는 거의 수행되지 않았다. 다만, 피팅형 결함이 엘보우의 외부에 존재하는 경우에 대한 파열압력 평가식이 최근에 제안되었다[8]. 이 평가식은 내압에 따른 감육 엘보우의 파열압력이 엘보우의 원주방향 Hoop 응력 변화에 직접적으로 영향을 받는다는 사실에 기초하여, 직관에서와 같이 엘보우 결함부의 잔류강도 감소를 유효단면적 감소에 의한 원주방향 Hoop 응력 증가로부터 파열압력은 다음과 같이 유도하였다.

$$P_{bst} = \frac{\sigma_0 t_{nom}}{R_m} \frac{A_o - A}{A_0 - AM^{-1}} \frac{R_b / R_m + \sin\beta}{R_b / R_m + \sin\beta / 2} \tag{3}$$

여기서, $\sigma_0 = (\sigma_y + \sigma_u)/2$, A_0와 A는 결함부의 배관 단면적과 결함의 단면적으로 결함의 형상을 사각형으로 가정하여 아래와 같이 평가하였다. M은 Folias factor로 다음의 식을 적용하였다 [10].

$$A_0 = Lt_{nom}, \quad A = L(t_{nom} - t)$$

$$M = \sqrt{1 + 0.6275\left(\frac{L}{D_0}\right)^2\left(\frac{D_0}{t_{nom}}\right) - 0.003375\left(\frac{L}{D_0}\right)^4\left(\frac{D_0}{t_{nom}}\right)^2} \quad \text{for} \quad \left(\frac{L}{D_0}\right)^2\left(\frac{D_0}{t_{nom}}\right) \le 50.0$$

$$M = 3.3 + 0.032\left(\frac{L}{D_0}\right)^2\left(\frac{D_0}{t_{nom}}\right) \quad \text{for} \quad \left(\frac{L}{D_0}\right)^2\left(\frac{D_0}{t_{nom}}\right) \ge 50.0$$

4.2 감육엘보우 평가식 제안

본 연구에서 고려하고 있는 곡관 내부에 존재하는 감육결함에 대한 파열압력 평가에 식(3)의 적용 가능성을 평가하기 위해서 식(3)의 결과를 앞서 수행된 유한요소해석 결과와 비교하였다. 식(3)에 의한 평가에서 결함부와 결함의 단면적인 A_0와 A는 감육결함의 최대폭과 최대 깊이를 이용하여 사각형 결함으로 가정하였으며, 유동응력은 앞 절에서 제시된 것과 같이 항복응력과 인장응력의 평균값을 적용하였다.

비교 결과 Fig. 7 과 8 에서 알수 있는 것과 같이 식(3)에 의한 평가 결과가 유한요소해석에서 계산된 파열압력보다 전체적으로 작았으며, 감육결함의 폭에 따른 파열압력의 변화 경향을 예측하지 못하는 한계를 보였다. 그러나, 결함의 위치와 곡관의 곡률반경에 관계없이 결함의 길이와 깊이에 따른 파열압력의 변화 경향은 비교적 잘 예측하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 식(3)에 유동응력 대신 유한요소해석 결과로부터 파열압력 도출에 적용한 공칭 인장강도(σ_u)를 적용하고, 결함의 원주방향 형상에 대한 영향을 고려할 수 있는 형상함수를 추가하여 곡관의 내부에 존재하는 감육결함에 대한 파열압력 평가식을 식(4)와 같이 유도하였다.

$$P_{bst} = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \frac{A_o - A}{A_0 - AM^{-1}} \frac{R_b / R_m + \sin\beta}{R_b / R_m + \sin\beta / 2} \cdot \Omega(\theta) \tag{4}$$

여기서, $\Omega(\theta)$이 원부방향 결함 폭에 대한 영향을 고려하기 위해서 추가된 식이며, 유한요소해석 결과를 회귀분석하여 구한 것으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Omega(\theta) = \left[30.15756 + 1.20833\cos\left(4.97984\frac{\theta}{\pi}\right)\right] / 28.85819 \quad \text{for Extrados}$$

$$\Omega(\theta) = \left[27.16682 + 2.03829\cos\left(6.55069\frac{\theta}{\pi}\right)\right] / 23.75084 \quad \text{for Intrados}$$

식(4)에 의해 평가된 곡관의 파열압력과 유한요소해석 결과를 Fig. 7 과 8 에 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 Extrados 에 결함이 존재하는 경우에는 결함이 짧고 감육부의 두께가 두꺼운 경우를 제외하고는 곡관의 곡률반경과 결함의 폭, 길이, 깊이에 관계없이 식(4)에 의해 평가된 파열압력이 유한요소해석 결과를 거의 정확하게 예측하였다. 한편, Intrados 측에 결함이 존재하는 경우에는 곡률반경이 R_b/R_m=3 인 조건에서 유한요소해석 결과를 약간 과소평가하는 경향이 있으나, 비교적 정확한 예측을 보였다. 따라서, 전체적으로 평가식 (4)에 의한 평가 결과는 결함의 형상과 위치, 그리고 곡관의 형상 등에 관계없이 내부에 감육결함이 존재하는 곡관의 파열압력을 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 곡관의 파열압력에 미치는 내부 감육결함의 영향을 파악하기 위해 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 결함의 위치, 곡관의 형상, 그리고 결함의 형상에 따른 영향을 평가하였다.

평가한 결과, 결함이 곡관의 Intrados 에 존재하는 경우가 Extrados 에 존재하는 경우에 비해 낮은 파열압력을 보였으며, 결함이 곡관의 Extrados 에 존재하는 경우에는 곡률반경이 감소함에 따라, Intrados 에 존재하는 경우에는 곡률반경이 증가함에 따라 파열압력이 증가했다. 또한, 파열압력은 결함의 길이가 증가함에 따라 초기에 크게 감소하다(Lc/Do<0.5) 결함의 길이가 증가함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 또한, 결함의 깊이에 따라 파열압력은 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 원주방향 감육 폭에 따른 변화는 결함의 깊이와 길이에 따른 변화보다는 민감하지 않았지만, 결함의 폭이 증가함에 따라 파열압력이 감소하는 경향을 보였다.

한편, 이들 유한요소해석 결과와 외벽에 감육결함에 대한 기존의 파열압력 평가식을 바탕으로 감육 결함이 내부에 존재하는 곡관에 대한 파열압력 평가식을 제안하였다. 제안된 평가식을 유한요소해석 결과와 비교한 결과, 결함의 위치, 곡관의 곡률반경, 결함의 크기 등에 관계없이 파열압력을 잘 예측하는 것으로 확인되었다.

참고문헌

[1] Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, EPRI/TR-106611-R2.

[2] Deardorff, A.F., Bush, S.H., 1990, ASME PVP, PVP-Vol-186, NDE-Vol.7, pp.71 75.

[3] Merz, K. L. and Ibanez, P., 1993, EPRI TR-102066.

[4] ASME, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, 1998ed., ASME Code Case N-597.

[5] Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, JAERI-M, 93-074, pp. 104 115.

[6] Miyazaki, K., et.al. , 1999, Nucl. Eng. & Des, Vol.191, pp. 195 204.

[7] Draft for ASME Sec.XI, App.X , revision 4, 2001

[8] Zhang, L., Wang, Y., Chen, J., and Liu, C., 2001, Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol.78, pp.697 703.

[9] Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., 2000, Nucl. Eng. & Des., Vol.195, pp. 149 169.

[10] Kiefner, J.F. and Vieth P.H., Oil Gas J, 1988, Vol.32, pp.56 59.

Table 1 Matrix for FE analysis

Location	Bend radius, R_b/R_m	Length		Circ. Ang., θ/π	Thickness, t/t_{min}
		L_S/D_o	L_C/D_o		
Extrados	3	1/4, 1/2, 1.0, 2.0	1/3, 2/3, 4/3, 8/3	1/4	0.5
		1.0	4/3	1/16, 1/8, 1/4, 1/2	0.5
		1.0	4/3	1/4	0.25, 0.5, 0.75
	6	1/4, 1/2, 1.0, 2.0	1/3, 2/3, 4/3, 8/3	1/4	0.5
		1.0	4/3	1/16, 1/8, 1/4, 1/2	0.5
		1.0	4/3	1/4	0.25, 0.5, 0.75
Extrados	3	1/4, 1/2, 1.0, 2.0	1/6, 1/3, 2/3, 4/3	1/4	0.5
		1.0	2/3	1/16, 1/8, 1/4, 1/2	0.5
		1.0	2/3	1/4	0.25, 0.5, 0.75
	6	1/4, 1/2, 1.0, 2.0	1/6, 1/3, 2/3, 4/3	1/4	0.5
		1.0	2/3	1/16, 1/8, 1/4, 1/2	0.5
		1.0	2/3	1/4	0.25, 0.5, 0.75

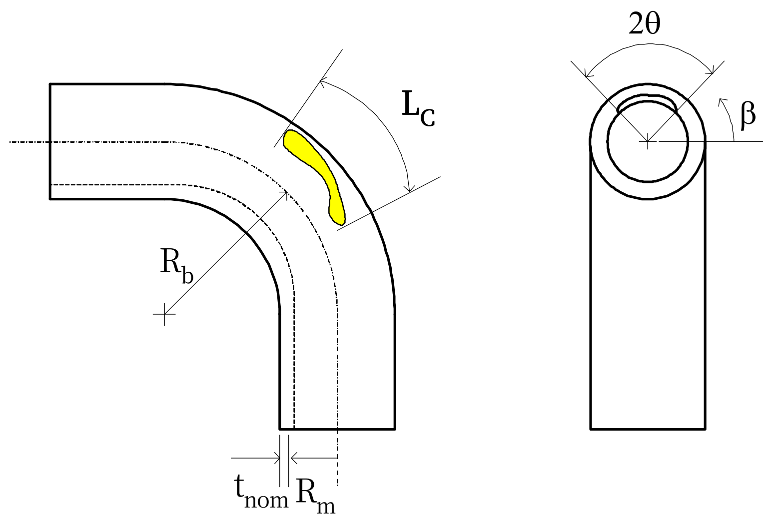

Fig. 1 Definition of elbow and wall thinning geometry

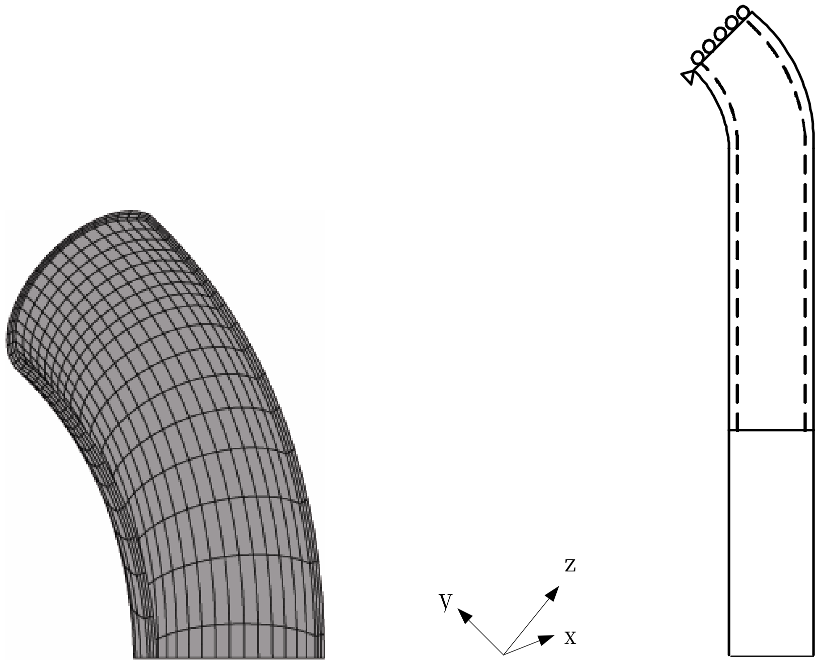

Fig. 2 FE model and boundary condition

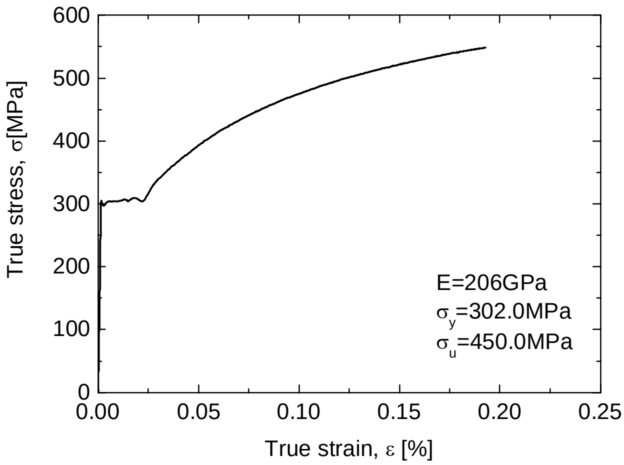

Fig. 3 True stress-strain curve used in FE analysis

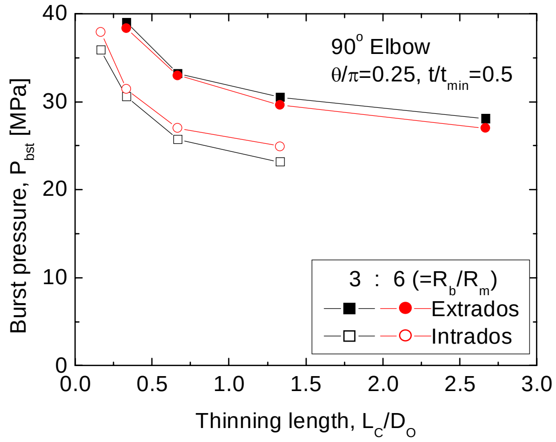

Fig. 4 Effects of defect location and bend radius on burst pressure of wall thinned elbow

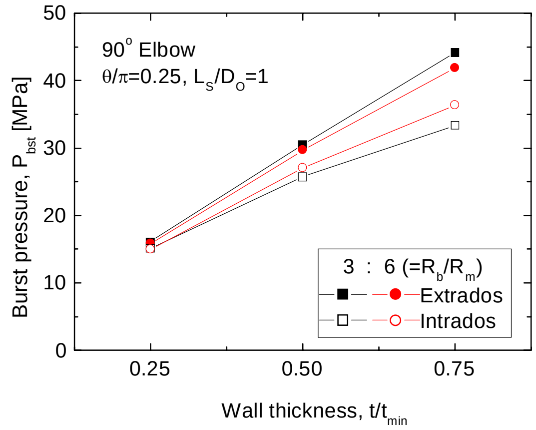

Fig. 5 Dependence of burst pressure on local minimum thickness of wall thinned elbow

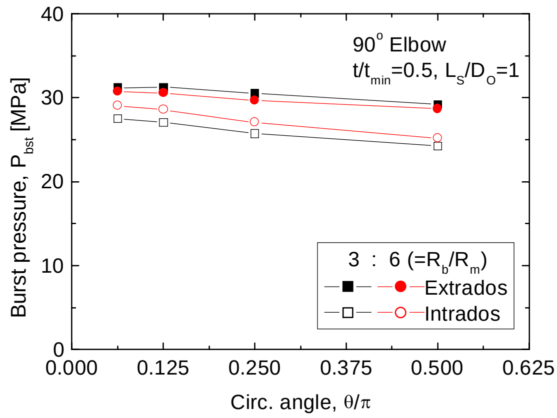

Fig. 6 Dependence of burst pressure on circumferential thinning angle of wall thinned elbow

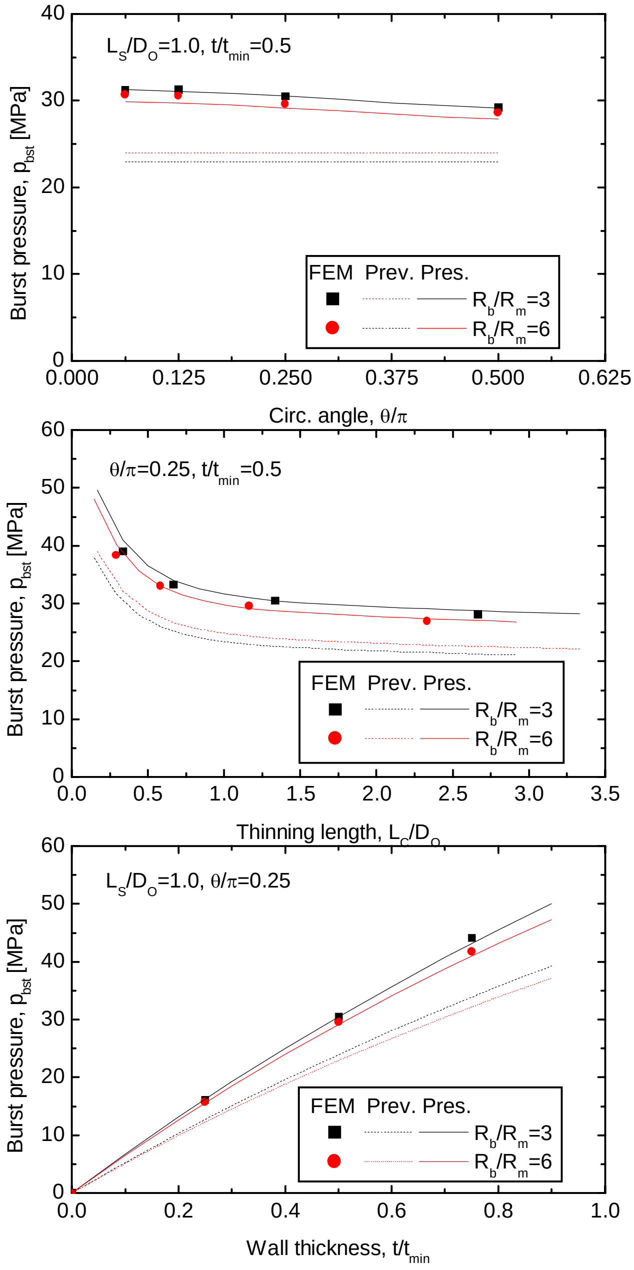

Fig. 7 Comparisons of burst pressure calculated by models and FE analysis for extrados wall thinning

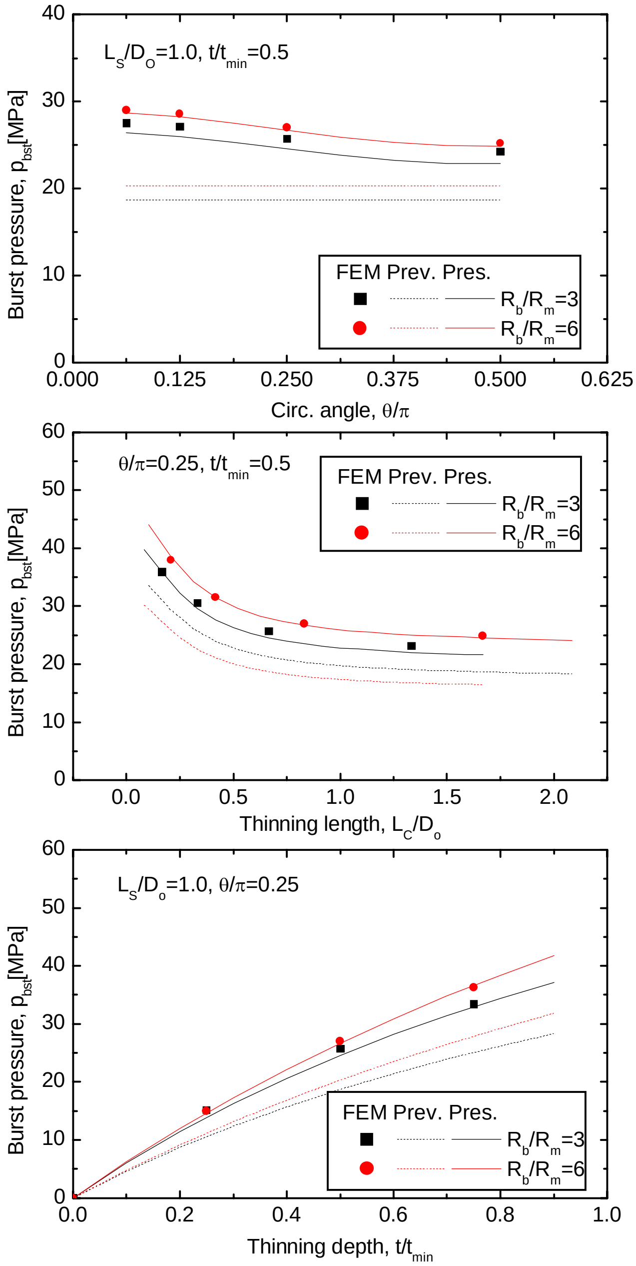

Fig. 8 Comparisons of burst pressure calculated by models and FE analysis for intrados wall thinning