

3차원 유한요소해석을 이용한 엘보우의 감육 결함 특성 평가

김태순[†] · 박치용 · 김진원* · 박재학**

한전전력연구원 원자력연구실 · *조선대학교 원자력공학과 · **충북대학교 안전공학과

(2003. 7. 21. 접수 / 2003. 8. 22. 채택)

Evaluation on Failure Characteristics of the Local Wall Thinning Elbows Using Three Dimensional Finite Element Analysis

Tae Soon Kim[†] · Chi Yong Park · Jin Weon Kim* · Jai Hak Park**

Nuclear Laboratory, Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

*Department of Nuclear Engineering, Chosun University

**Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received July 21, 2003 / Accepted August 22, 2003)

Abstract : The failure mode of a pipe due to local wall thinning is increasingly more attention in the nuclear power plant industry. To assess the integrity of locally wall thinned pipe, it is necessary to perform many simulations under various conditions. Because the modeling for locally wall thinned elbow is more complicated than that of straight pipe, the efficient modeling method for finite element analysis is necessary. In this study, the more simple efficient modeling method of three-dimensional finite element analysis for locally wall thinned elbow has been suggested and verified. And using the method, the failure mode of local wall thinned elbows that have different thinning lengths and circumferential angles is evaluated. From the results, we concluded that the collapse load of elbows has been decreased by the increase of wall thinning shape factors such as thinning lengths and circumferential angles

Key Words : wall thinned elbow, flow accelerated corrosion, finite element analysis, collapse load

1. 서 론

가압중수로형 원전의 1차측 배관과 가압경수로형 원전의 2차측 배관은 가공성과 용접성이 우수한 탄소강이 주로 사용되고 있으나, 이 탄소강은 부식에 취약하여 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion) 현상에 의한 배관의 두께가 감소하는 감육(減肉)결함에 의한 손상을 일으킨다^{1,2)}. 이러한 감육현상은 다른 어떤 설비보다 안전성의 확보가 강조되고 있는 원전 배관의 경우에 있어서는 특히 중요한 건전성 저해요인으로 인식되고 있다. 그러나 원전 배관의 경우에는 종류와 형상이 다양하고 감육부의 형태 또한 일정하지 않은 관계로 유한요소 해석을 위한 모델링이 쉽지 않은 것이 현실이다. 특

히, 감육엘보우(wall thinned elbow)는 직관에 비해 감육형태가 복잡하고 감육부의 위치에 따라 배관의 건전성에 주는 영향이 달라지므로 정확한 형상의 모델링과 보다 많은 계산이 요구된다.

기존의 연구결과에 의하면 일반적으로 감육배관의 건전성 평가는 감육부의 형상과 감육배관의 손상기준, 작용하중 등에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 감육엘보우의 경우에는 이외에도 엘보우의 곡률반경과 굽힘각도 등이 건전성 평가에 영향을 주는 것으로 인식되고 있다^{3,4)}. 이러한 감육엘보우의 건전성평가가 신뢰성을 갖기 위해서는 다양한 감육엘보우의 특성들을 충분히 고려할 수 있는 해석방법의 확립이 무엇보다 중요하다.

엘보우의 감육부 형상은 직관에서와는 달리 굽은 부위에서 감육형상을 묘사해야 하기 때문에, 모든 해석대상에 대하여 각각 모델링을 수행하는 것은 비효율적일 뿐만 아니라 거의 불가능한 방법일 수

[†]To whom correspondence should be addressed.
tskim@kepri.re.kr

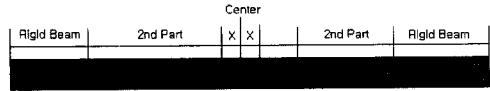
밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 엘보우에 비해 비교적 감육형상을 묘사하기 용이한 직관에서 감육형상을 모델링한 후, 이 감육직관을 임의의 각도와 방향으로 좌표변환(transformation)하는 방법을 사용하여 감육부를 포함하고 있는 엘보우에 대한 다양한 응력해석의 수행이 가능하도록 하였다. 또한 엘보우의 감육부 위치를 엘보우 중심부를 기준으로 원주방향으로는 바깥쪽(extrados)에서 안쪽(intrados)로, 축방향으로는 엘보우의 중심에서 대칭은 물론 중심에서 임의의 거리만큼 떨어진 비대칭 감육도 고려할 수 있도록 하였다. 이러한 감육엘보우의 모델링을 통해, 감육위치를 외부와 내부로 구분하고 곡률반경(bend radius)과 감육형상을 변화시켜 가면서 손상 거동을 살펴보았다. 이때 엘보우에 작용되는 하중은 in-plane 상에서 닫힘모드(closing mode)와 열림모드(opening mode)로 하였다.

2. 형상적응형 유한요소 생성

2.1. 직관 모델링

엘보우에서 임의의 감육형상 및 위치에 대한 형상 적응형 유한요소 격자를 생성하는 방법으로, 먼저 직관에서 감육형상 및 배관 직경 등 기하학적 특성을 간단하게 모델링한 후 좌표변환을 통하여 임의의 각도에서 엘보우 곡률반경 및 엘보우에서의 임의의 감육부 축방향 위치를 결정할 수 있도록 하였다.

다음절에서 감육형상 적응형 감육엘보우 유한요소 모델 생성 방법을 근간으로, 본 연구에 적용한 90도 엘보우를 예제로 하여 기술하였다. 감육엘보우의 유한요소 모델링을 하기 위해 먼저 유한요소 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 Fig. 1과 같은 직관을 고려하였다⁵⁾. 엘보우 모델링의 전단계로 수행되는 직관 모델링은 전체 배관의 중심부에 감육이 된 부분과 두께가 일정한 배관 부분, 그리고 하중을 가하기 위한 양끝의 강체(rigid beam)부분으로 이루어져 있다. 감육부의 길이를 포함한 감육배관의 모든 형상은 자유롭게 조정할 수 있도록 하였으며, 감육부 길이의 증감에 따라 요소(elements)나 절점(nodes)의 수가 적절히 결정되도록 하였다. 특히, 감육부는 실제 배관의 감육형상을 고려하여 모델링의 오류로 인한 응력집중 등의 현상을 최소화하기 위해 감육부와 비감육부가 만나는 부분을 구형으로 처리하였다.



• ZX : Wall Thinned Length

Fig. 1. Configuration for a wall thinned pipe



Fig. 2. Meshes of a local wall thinned pipe

그리고 Fig. 1과 2에서 보는 것처럼 배관의 양끝에 직관의 해석에서는 고려하지 않아도 되는 일정한 길이의 강체를 고려한 것은 엘보우의 해석시에 굽힘하중을 주기 위한 것이다. 직관에서 가하는 하중은 4점굽힘 하중이었으나, 엘보우 해석에서 하중 조건은 엘보우의 끝단에서 중심쪽으로 하중을 가하는 닫힘모드와 반대의 경우로 하중을 가하는 열림모드로 나눌 수 있다.

2.2. 감육엘보우 모델링

2.2.1. 감육엘보우 형상 구현

감육부를 포함하고 있는 직관을 기본으로 하여 Table 1과 같이 다양한 경우에 대한 감육엘보우의 형상을 구현하기 위해, 먼저 Fig. 3과 같은 20개의 절점을 갖는 3차원 Brick요소를 고려하였다. 이 요소를 간단한 좌표변환을 통해 Fig. 4와 같이 임의의 방향 및 각도로 굽히는 방법을 통해 모서리가 곡선화된 요소를 생성하게 된다. 이를 감육이 된 배관의 경우에 적용하면 간단히 감육이 된 엘보우 배관을 모델링 할 수 있다. 즉, 직관의 각 절점좌표를 엘보우의 좌표로 변환하는 방법은 다음과 같은 식에 의해 간단하게 이루어진다.

$$[X'] = [T] [X] \tag{1}$$

여기에서, $[X]$ 와 $[X']$ 는 직관 및 엘보우 배관의 좌표를 나타내는 행렬이고, $[T]$ 는 굽힘이 이루어지는 부분에서의 좌표변환행렬(transformation matrix)이다⁷⁾.

직관을 엘보우로 변환하는 과정에서 요소와 절점의 수, 그리고 각 요소를 구성하는 절점의 연결 순서 등은 변화가 없다. 따라서 해석하고자하는 엘보우의 요소형태(element type)와 직관의 요소형태는

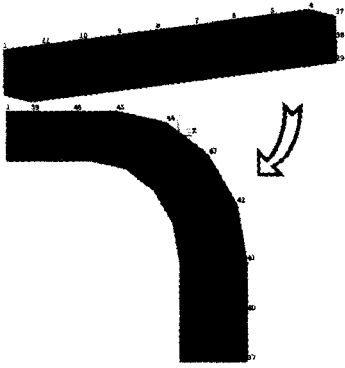


Fig. 3. Transforming straight brick elements to bend shape elements

Table 1. Modeling parameters for the analysis of a wall thinned elbow

Classification	Variables
Pipe geometry	Pipe length (l_n)
	Thickness (t_{nom})
	Bend radius (R_b)
Configuration of a wall thinned elbow	Location(Extrados, Intrados etc.)
	Length
	Width (2θ)
	Wall thinned thickness (d / t_{nom})
Loading condition	Load type (Tension, Compression)
	Internal pressure

동일하다. 직관을 굽히는 방향은 감육된 위치를 기준으로 바깥쪽과 안쪽, 그리고 측면(crown) 방향 등의 일반적인 경우는 물론 임의의 굽힘방향과 굽힘각을 갖는 엘보우 배관에 대해서도 각각의 해석 조건에 따라 결정할 수 있다. 엘보우에서 감육부의 길이는 엘보우의 중심축을 따르는 길이가 직관에서의 감육길이와 같도록 하였으나, 엘보우로 변환시 중심축의 길이를 조절함으로써 감육이 된 위치에 따라 곡률반경의 중심에서 바깥쪽(extrados)에 위치한 경우가 안쪽(intrados)에 위치한 경우보다 감육길이가 길어지게 되는 점을 보완할 수 있다.

2.2.2. 감육엘보우 유한요소모델 최적화

엘보우에서 감육은 Fig. 4에서와 같이 축방향으로 는 중심에서 전후로, 원주방향으로 외부, 내부, 측면 등 다양하게 분포하고, 감육형상 또한 매우 다양하다. 따라서 감육엘보우의 건전성 평가를 위해서는 여러 가지 경우의 감육조건을 유연하게 수용할 수 있는 모델링이 요구된다.

본 연구에서는 축방향 대칭으로 위치한 감육형상에 대해 해석을 수행하였고, Fig. 5에서 보여주는 것처럼 감육중심부 단면에 대칭조건을 고려하고, 하중에 의한 변형을 반영할 수 있도록 단면 안쪽의 한 점을 국부좌표계상에서 두방향에 대해 구속하였다. 배관에 연결된 강체의 끝에서 가해지는 하중은 국부좌표계상에서 y방향(전체좌표계를 기준으로 하였을 경우 y-z평면상에서 y방향과 45°를 이루는 방향)으로 변위(displacement)로써 가해진다. 감육엘보우에 대한 유한요소해석은 요소의 수가 많고, 또 다양한 경우에 대한 계산을 수행해야 하므로 동일한 결과를 도출할 수 있는 한 가장 최소의 요소와 절점을 가져야 한다. Fig. 5는 감육부를 중심으로 관의 축방향(z방향) 대칭을 고려하여 경사대칭(skew symmetry) 경계조건을 적용하였음을 나타내고 있다.

최적화를 완료한 상태에서 본 연구의 해석대상조건을 고려하면 감육부 중심에서 축방향과 원주방향으로 대칭인 1/4모델이다. 이때의 해석 결과와 원주방향 대칭만을 고려한 1/2모델과의 해석 결과가 동

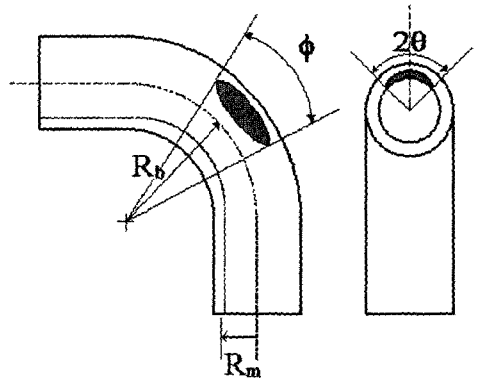


Fig. 4. Definition of wall thinning defect in elbow

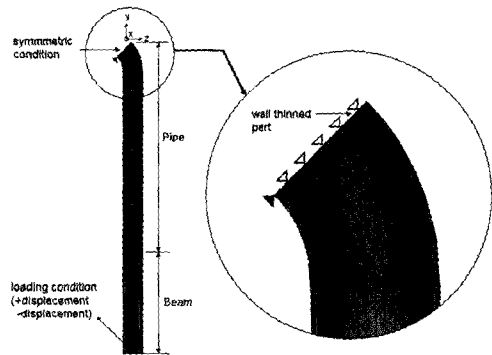


Fig. 5. Boundary conditions of a local wall thinned elbow

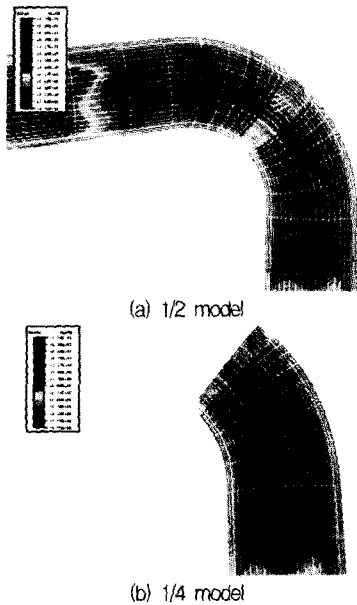


Fig. 6. Stress distribution in the wall thinning zone of elbows

일함을 Fig. 6의 (a)와 (b)에 나타내었고, 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 감육형상에 대한 손상 해석을 위해 최적화된 모델을 사용하였다.

3. 손상거동 해석 및 평가

3.1. 해석 조건

감육엘보우의 손상거동을 살펴보기 위해, 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 응력-변형률관계를 갖는 재료로 된 직경(D_0)이 400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm인 엘보우에 직관이 연결된 배관을 대상으로 하였다. 엘보우의 기하학적 특성 중의 하나인 곡률 반경은 배관의 평균반경(R_m)의 3배, 6배, 10배로 하였고, 8,000mm 길이의 배관에 양끝에는 각각 2,000mm 길이의 강체를 고려하였다. 감육이 된 위치는 Fig. 8에서 나타낸 것처럼 바깥쪽(extrados)과 안쪽(intrados)으로 하였다. 감육부의 길이는 Table 2에서 나타낸 바와 같이 100~800mm로 하였고, 감육폭(2θ)은 22.5~180°, 그리고 감육두께는 t_{min} (18.63mm)의 50%인 경우에 대해 해석을 하였다.

하중조건으로는 배관의 내압을 10MPa로 하였고, 배관에 연결된 강체의 끝부분의 한점에서 축방향에 대해 45° 방향으로 감육부 중심의 응력이 재료의 공칭인장강도를 초과하거나 지지하중이 감소하는 시점까지 변위를 가하였다.

응력해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며, 곡관부에서의 좌굴(buckling)현상을 고려하여 대변형 조건을 추가하였다⁶⁾. 엘보우의 손상거동을 살펴보는 데는 여러 가지 방법이 사용될 수 있지만, 본 연구에서는 Fig. 9에서와 같이 하중-변위 곡선에서 탄성영역기울기의 1/2에 해당하는 offset line과 교차하는 점에서 구해지는 붕괴하중을 사용하였다⁸⁻⁹⁾.

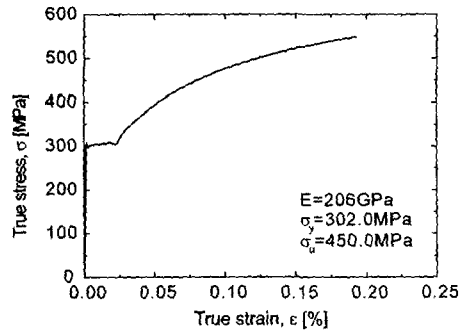


Fig. 7. True stress-strain curve used in FE analysis

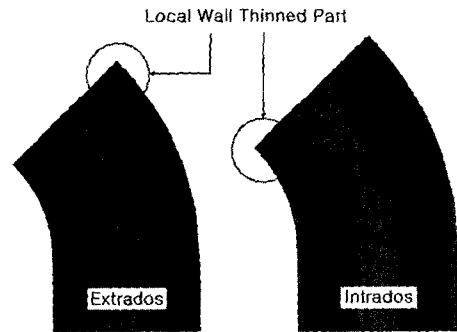


Fig. 8. Local wall thinning in the extrados and intrados

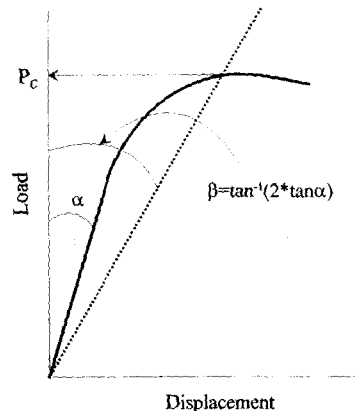


Fig. 9. Determination of collapse limit load for elbow

Table 2. Analysis condition of the wall thinned elbow.

Wall-thinned location	Curvature radius, R_b/R_m	Pressure [MPa]	Eroded Configuration				Load type
			t_{min} [mm]	d/t_{min}	2θ [°]	Length [mm]	
Extrados Intrados	3.0	10.0	18.63	0.50	22.5	100	Closing Opening
	6.0				45.0	200	
	10.0				90.0	400	
					180.0	800	

3.2. 감육형상 영향 평가

3.2.1. 곡률반경에 의한 영향

감육엘보우의 붕괴하중을 구하기 위해 Table 2에서와 같이 고려한 해석조건들에 대해 각각 배관 끝단에서 가해진 변위에 대한 감육부의 하중지지를 살펴보고 있다. Fig. 10은 감육위치가 엘보우의 바깥쪽에 위치했을 경우의 하중-변위곡선으로 단힘과 열림모드 각각에 대해 곡률반경의 변화에 따른 하중지지가능력이 증가하는 것을 보여주고 있다. 단힘모드에서는 하중이 증가하다 일정한 값에 이르면 수렴하는 현상을 보여준다. 반면에 열림모드에서는 단힘모드의 경우와는 달리 변위의 증가에 따라 하중이 계속 증가하는 거동을 보여주고 있다. 따라서 열림모드 하중조건에서의 붕괴하중은 Fig. 9에서와 같이 offset line에 의해 구한 하중과 응력기준에 의해 결정된 하중을 비교한 후, 더 낮은 값을 붕괴하중으로 결정하였다.

하중지지가능력의 관점에서 보면 열림모드 하중이 작용되는 경우가 단힘모드 하중이 작용되는 경우보다 더 높은 하중지지가능력을 갖는 것으로 나타났다. 감육엘보우에서 곡률반경과 하중조건에 따라 구해진 붕괴하중을 Fig. 11에 그림으로 정리하였다. 결과에서 보듯이 동일한 감육길이에 대해서는 곡률반경의 증가가 붕괴하중의 증가를 보여주고 있으며, 단힘모드에서 보다는 열림모드에서 큰 붕괴하중 값을 갖는 것으로 나타났다. 감육이 엘보우의 안쪽 면에 생겼을 때의 붕괴하중도 바깥쪽에 있을 경우와 유사한 경향을 띠는 것으로 나타났다.

3.2.2. 감육길이에 의한 영향

엘보우의 감육길이가 붕괴하중에 미치는 영향을 살펴보기 위해, Table 2에서와 같이 감육위치가 안쪽 및 바깥쪽에 위치했을 때, 감육길이를 100, 200, 400, 800mm로 하여 해석한 결과를 각각 Fig. 12와 13에 나타냈다. 이때 엘보우의 곡률반경(R_b/R_m)은 3.0과 6.0으로 하였고, 원주방향으로 감육폭(2θ)은

180°, 내압은 10MPa, 그리고 감육깊이(d/t_{min})는 0.5로 하여 계산하였다. 먼저 Fig. 12는 감육위치가 엘보우의 바깥쪽에 위치했을 경우의 감육길이에 대한 붕괴하중으로서, 열림모드의 하중조건에서 R_b/R_m 이 3.0이고 감육길이가 100mm인 경우를 제외하면, 전

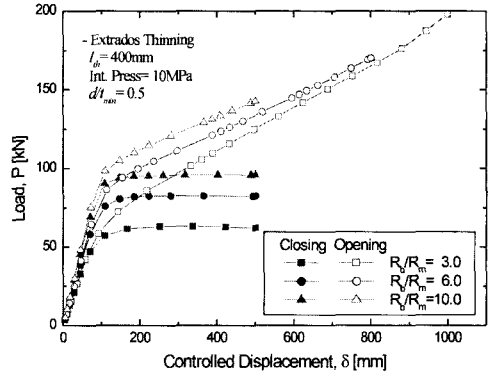


Fig. 10. Load-displacement curve according to the bend radius of elbow

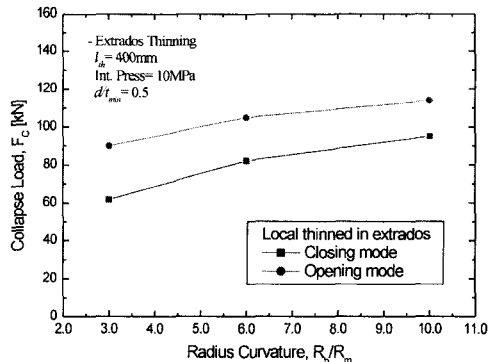


Fig. 11. Effects of bend radius on collapse load for local thinning elbows

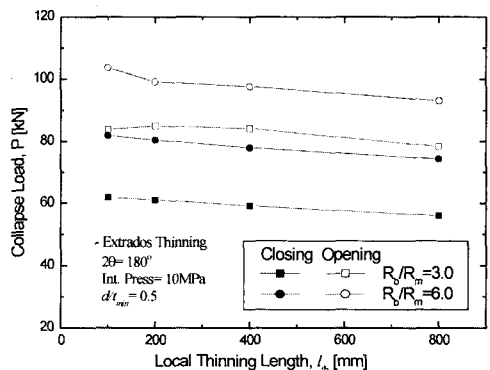


Fig. 12. Effects of thinning length on collapse load for extrados thinning elbows

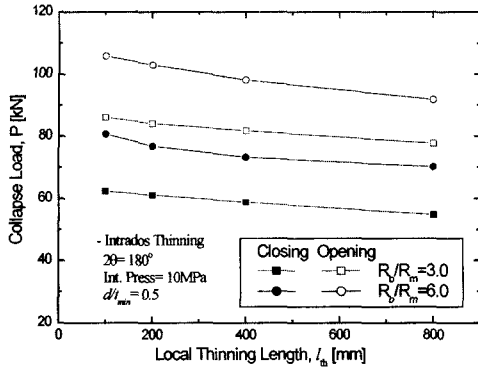


Fig. 13. Effects of thinning length on collapse load for intrados thinning elbows

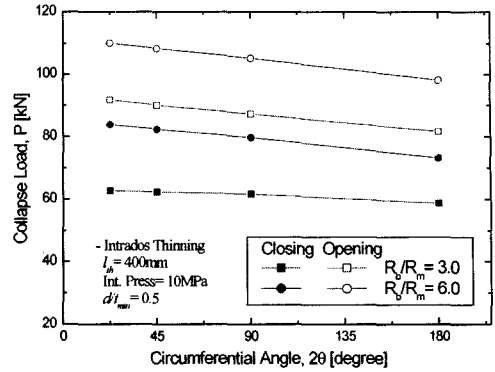


Fig. 15. Effects of circumferential thinning angle on collapse load for intrados thinning elbows

체적으로 감육길이가 증가함에 따라 붕괴하중이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 배관의 하중지지능력이 감육부 체적과 일정부분 비례하는 것을 의미한다. 그러나, 국부적인 균열성 감육을 제외하고는 감육길이는 미소한 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

예외적인 결과를 보이는 경우, 즉 R_b/R_m 이 3.0이고 감육길이가 100mm인 경우는 열림모드의 하중조건에서는 엘보우 바깥쪽에 작용하는 축방향 압축응력과 상대적으로 짧은 감육길이에 의한 감육부에 강한 응력집중이 발생하게 되어 결과적으로 붕괴하중의 값이 낮아지는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 감육길이가 깊어질수록 더욱 현저하게 나타날 것으로 예상되므로, 감육깊이에 대한 영향을 고려한 해석결과를 비교해 보면 보다 정확한 결과를 알 수 있을 것이다. Fig. 13은 감육위치가 엘보우의 안쪽에 위치했을 경우의 감육길이에 대한 붕괴하중으로서, 전체적으로 감육길이가 증가함에 따라 붕괴하중이 감소하는 것으로 나타났다.

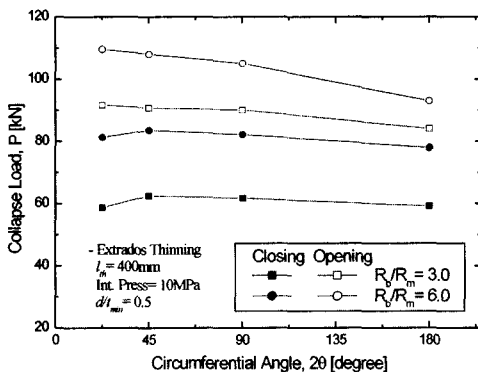


Fig. 14. Effects of circumferential thinning angle on collapse load for extrados thinning elbows

3.3.3. 감육폭에 의한 영향

Fig. 14와 15는 엘보우의 원주방향의 감육폭이 붕괴하중에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 감육폭은 22.5°, 45.0°, 90.0°, 180.0°로 하였다. 이때 엘보우의 곡률반경(R_b/R_m)은 위의 경우와 마찬가지로 3.0과 6.0으로 하였고, 축방향 감육길이는 400mm, 내압 10MPa, 그리고 감육깊이(dl_{min})는 0.5로 하여 계산하였다. 먼저 Fig. 14는 감육위치가 엘보우의 바깥쪽에 위치했을 경우의 감육폭에 대한 붕괴하중으로서, 축방향 감육길이에 대한 결과에서와 마찬가지로 감육폭이 22.5°인 경우를 제외하면, 전체적으로 감육폭이 증가함에 따라 붕괴하중이 감소하는 것으로 나타났다.

닫힘모드의 하중조건에서 감육부가 엘보우의 바깥쪽에 위치하고, 감육폭이 작은 경우(22.5°)에 결함의 형상이 균열에 가까워지는 감육부에는 상당한 인장하중을 받게 되고, 이때의 인장하중으로 인한 응력집중이 발생하게 되어 감육폭이 45°인 경우보다 오히려 하중지지력이 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 15는 감육위치가 엘보우의 안쪽에 위치했을 경우의 감육폭에 대한 붕괴하중의 변화를 나타낸 것으로서, 전체적으로 감육폭의 증가와 함께 붕괴하중 값은 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결론

감육엘보우의 손상 평가를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 해석방법을 제시하고 실제 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 감육엘보우를 모델링하기 위해 직관에서 감육

형상을 모델링한 후, 이 감육직관을 적절한 각도와 방향으로 굽히는 방법을 사용하였다. 또한 해석의 효율성을 위해 요소를 최적화하는 과정을 거치도록 하여, 감육으로 인한 엘보우의 손상에 대한 광범위하고 빠른 유한요소해석이 가능하도록 하였다.

2) 곡률반경과 하중조건에 따라 구해진 붕괴하중은 곡률반경이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 단립모드의 하중이 작용하는 경우보다는 열립모드의 하중이 작용하는 경우가 큰 붕괴하중 값을 갖는 것으로 나타났다. 감육위치에 따라서는 동일한 감육길이가 존재할 경우는 바깥쪽에 존재할 때의 붕괴하중이 안쪽 보다 큰 것으로 나타났다.

3) 엘보우의 축방향 감육길이가 붕괴하중에 미치는 영향은 상대적으로 짧은 경우를 제외하면, 감육위치나 곡률반경에 관계없이 전체적으로 감육길이가 증가함에 따라 붕괴하중이 감소하는 것으로 나타났다.

4) 또한 엘보우의 원주방향의 감육폭에 대한 붕괴하중에 미치는 영향도 축방향 감육길이에 대한 결과에서와 마찬가지로 일부 감육폭이 아주 작은 경우를 제외하면, 전체적으로 감육폭이 증가함에 따라 붕괴하중이 점진적으로 감소하였다.

5) 이상의 결과에 비추어볼 때 감육엘보우의 손상거동은 감육형상과 하중조건에 의해 크게 영향을 받는 것으로 판단되며, 따라서 감육엘보우의 손상기준의 제시나 수명평가를 위해서 추가적인 영향인자들을 포함한 해석이 요구된다.

참고문헌

- 1) B. Chexal, J. Horowitz, B. Dooley, P. Millett, C. Wood and R. Jones, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant", EPRI/TR106611-R2, 1998.
- 2) F. Michael, H. Rock and H. Schultz, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Aging-Related Aspects", Nucl. Eng. & Des., Vol. 207, pp. 307~316, 2001.
- 3) 김진원, 박치용, 김범년, "내압과 굽힘하중하에서 감육배관의 국부허용두께 평가", 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제1호, pp.81~88, 2001.
- 4) 김진원, 박치용, "내압과 굽힘의 복합하중에서 감육배관의 손상기준", 산업안전학회지, 제17권, 제4호, pp. 81~88, 2001.
- 5) ANSYS, Inc., "ANSYS User's Manual", 2001.
- 6) Hibbit, Karlson and Sorensen Inc., "ABAQUS User's Manual", 2001.
- 7) D. F. Rogers and J. A. Adams, "Mathematical Elements for Computer Graphics", 2nd edition, pp. 61~76, 1989.
- 8) Y. Tan, and V. Matzen, "Correlation of In-plane Bending Test and FEA Results for Thin-walled Elbows", Nucl. Eng. & Des., Vol. 217, pp. 21~39, 2002.
- 9) Z. Li, W. Yenpei, C. Jin and L. Cengdian, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows", Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, pp. 697~703, 2001.