

# 파열 시험을 통한 감육곡관의 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭과 굽힘하중의 영향 평가

김진원<sup>†</sup> · 나연수 · 이성호<sup>\*</sup>

조선대학교 원자력공학과 · <sup>\*</sup>한전 전력연구원 원전기계재료그룹  
(2006. 10. 12. 접수 / 2006. 12. 10. 채택)

## Evaluating on the Effects of Circumferential Thinning Angle and Bending Load on the Failure Pressure of Wall-Thinned Elbow through Burst Tests

Jin-Weon Kim<sup>†</sup> · Yeon-Soo Na · Sung-Ho Lee<sup>\*</sup>

Department of Nuclear Engineering, Chosun University

<sup>\*</sup>Nuclear Mechanical and Material Group, KEPRI

(Received October 12, 2006 / Accepted December 10, 2006)

**Abstract** : This study performed burst tests using real-scale pipe elbow containing simulated local wall-thinning to evaluate the effects of circumferential thinning angle and bending load on the failure pressure of wall-thinned elbow. The tests were carried out under the loading conditions of internal pressure and combined internal pressure and bending loads. Three circumferential thinning angles,  $\theta/\pi = 0.125, 0.25, 0.5$ , and different thinning locations, intrados and extrados, were considered. The test results showed that the failure pressure of wall-thinned elbow decreased with increasing circumferential thinning angle for both thinning locations. This tendency is different from that observed in the wall-thinned straight pipe. Also, the failure pressure of intrados wall-thinned elbow was higher than that of extrados wall-thinned elbow with the same thinning depth and equivalent thinning length. In addition, the effect of bending moment on the failure pressure was not obvious.

**Key Words** : burst test, bending load, circumferential thinning angle, elbow, failure pressure, internal wall-thinning

### 1. 서 론

원자력발전소(이하 원전)를 비롯한 각종 화학 플랜트의 배관과 매설된 Oil과 Gas 배관에서 발생하는 국부적인 두께 감소(감육, 減肉) 현상은 이들 배관의 건전성을 저하시키는 주된 원인으로 알려져 있다<sup>1-5,8)</sup>. 특히, 발전소나 화학 플랜트 배관의 경우, 감육 현상이 유동가속부식(FAC, flow accelerated corrosion)에 의해 배관 내부에서 발생하므로, 결함의 발견이 어렵고 손상에 대한 예비 징후가 거의 나타나지 않는 특징을 가진다<sup>1)</sup>. 따라서, 원전 배관계통에서 감육 결함은 부식에 취약한 탄소강 배관의 건전성을 위협하는 가장 대표적인 손상기구이며, 원전의 운전성과 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 사항으로 대두되고 있다.

기존 감육 배관에 대한 건전성 평가 연구는 주로 매설된 Oil과 Gas 배관을 대상으로 수행되었으며<sup>3,4)</sup>, 원전 배관에 대해서는 1986년 발생한 Surry 원전의 감육 배관 손상사례 이후에 활발히 진행되었다<sup>5-9)</sup>. 이를 통해 다양한 실험적·해석적 연구들이 수행되었으며, 감육 배관에 대한 건전성 평가 모델들이 제시되었다<sup>10,11)</sup>. 그러나, 대부분의 연구들이 직관에 존재하는 감육 결함을 대상으로 수행되었으며, 실제 감육 결함의 발생 가능성이 높은 곡관이나 연결관 등을 대상으로 한 연구는 거의 수행되지 않았다. 최근 감육 곡관과 연결관에 대한 연구들이 일부 진행되고 있으나<sup>12-14)</sup>, 굽힘하중에 의한 붕괴거동을 평가한 것으로 손상압력 평가를 위한 연구는 유한요소해석을 기초로 제시된 Li<sup>15)</sup>와 Kim<sup>16)</sup>의 모델을 제외하면 전무한 실정이다. 또한, 감육 곡관에 대한 손상압력 시험 데이터의 부재로 인해 제시된 이들 모델은 아직

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
jwkim@chosun.ac.kr

까지 검증되지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 엘보우 내부에 감육 결함을 가공한 실패관 시편을 이용하여 파열시험을 수행하고, 원주방향 결함 형상과 하중 형태에 따른 손상압력을 평가하고자 한다. 이를 위해서, 다양한 원주방향 결함 폭을 갖는 감육 엘보우가 고려되었으며, 작용하중으로 단순 내압이 작용되는 경우와 일정한 굽힘하중 조건에서 내압이 작용되는 경우가 각각 고려되었다. 시험 결과로부터 감육 엘보우의 손상압력에 미치는 결함의 원주방향 폭, 결함 위치, 그리고 굽힘하중의 영향을 살펴보았다. 또한, 실험 결과를 기존의 감육 엘보우 손상압력 평가 모델과 비교하였다.

## 2. 파열 시험

### 2.1. 시편 및 시험장치

시험에 사용된 시편은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 곡률반경이 배관 평균반경의 3배인 90° 엘보우 양단에 길이가 외경의 5배인 직관을 연결한 것이다. 직관과 엘보우의 재료는 각각 ASTM A106 Gr.B와 ASTM A234 WPB로 원전 2차 측 배관에 주로 사용되는 것이다. 엘보우와 직관은 모두 4인치 Sch.80으로 공칭 외경( $D_o$ )과 공칭 두께( $t_{nom}$ )는 각각 114.3mm와 8.56mm이며, 엘보우의 곡률반경( $R_b$ )은 152.4mm이다. 결함 가공에 앞서 표면의 거칠기와 결함 가공시 공차를 최소화하기 위하여, 외면을 밀링하여 엘보우의 곡률반경과 외경이 일정하도록 하였다. 가공 후 엘보우의 외경은 113.4mm이다. 결함은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 엘보우 외호면(Extrados)과 내호면(Intrados) 중심에서 길이방향과 원주방향으로 각각 원형이 되도록 가공하였다. Table 1은 손상압력 시험에 사용된 시편의 종류를 정리한 것이다.

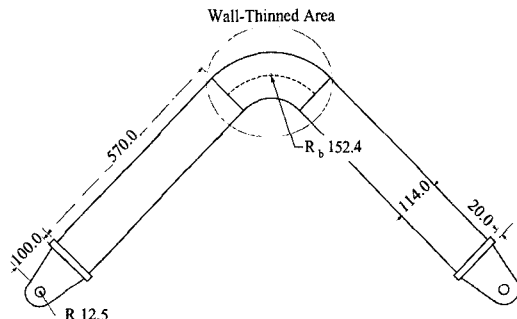


Fig. 1. Dimension of wall-thinned elbow specimen.

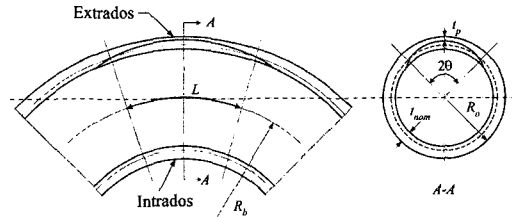


Fig. 2. Definition of wall-thinning dimensions of specimen.

Table 1. Matrix for burst test of local wall-thinned elbow

Location	Loading Type	Designed wall-thinning length, $L/D_o$	Designed minimum thickness, $t_p$ [mm]	Designed wall-thinning angle, $\theta/\pi$
Extrados	Pressure only	1.0	2.0	0.125 0.25 0.5
	Bending + Pressure	1.0	2.0	0.125 0.5
Intrados	Pressure only	1.0	2.0	0.125 0.25 0.5
	Bending + Pressure	1.0	2.0	0.125 0.5

Fig. 3은 시험장치의 전체적인 개략도를 나타낸 것이다. 시험 장치는 단순 내압만 작용되는 경우, 가압에 따른 시편의 변형을 수용하도록 한쪽 끝단이 자유롭게 미끄러질 수 있도록 설계하였다. 내압과 함께 굽힘하중이 작용되는 경우에는 시편 끝단에 로드셀과 LVDT를 설치하고, 끝부분에서 변위를 조절할 수 있도록 설계하였다. 변위는 로드 셀에 연결된 나사를 회전시켜 수평방향으로 시편을 밀어주거나 당겨줌으로써 열림모드와 닫힘모드 형태의 굽힘 하중이 작용되도록 하였다. 가압 장치는 수동 장치와 고압 펌프로 구성되며, 일정한 압력까지는 두 장치를 함께 사용하고 일정 내압 이상에서는 고압 펌프만을 작동시켜 가압하였다. 모든 데이터는 Data Logger와 PC로 구성된 데이터 취득 장치를 통해 취득되었다.

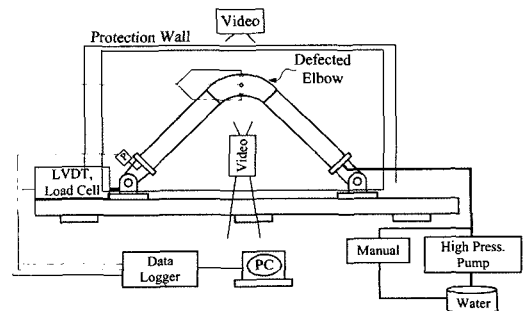


Fig. 3. Schematics of failure pressure testing system.

## 2.2. 시험 절차

파열 시험에 앞서 시편의 외면에 일정한 간격으로 격자를 표시하고 각 격자점에서 초음파 두께 측정 장비를 이용하여 두께를 측정하였다. 이를 통해 엘보우 내부에 가공된 감육 결함의 형상과 두께를 확인하였다. 두께 측정이 완료된 시편의 각 부위에 변형률 게이지를 부착하기 위해 표면을 연마하였다. 결함부 중심에서는 연마 후 두께를 다시 측정하여 연마에 의한 두께 감소 정도를 확인하였다. 두께 측정이 완료된 시편의 외호면, 내호면, 측면 중심에 각각 원주방향과 축방향으로 변형률 게이지를 부착하였다. 게이지 부착이 완료된 시편에는 물을 채우고 손상이 발생할 때까지 수압을 이용하여 가압하였다. 가압하는 동안 내압과 결함부의 변형률을 측정하였으며, 측면과 정면에 Video Camera를 설치하여 가압에 따른 결함부의 변형 및 파열 과정을 촬영하였다.

## 2.3. 하중 작용 방법

작용하중으로 단순 내압만 고려된 경우, 시편의 끝단이 자유로운 상태에서 가압되었다. 초기 5MPa까지는 고압 펌프와 수동 가압 장치를 함께 사용하여 가압하고, 5MPa 이상에서는 1MPa/min.의 가압 속도가 유지되도록 펌프의 유량을 조절하며 가압하였다. 내압과 함께 굽힘하중이 작용되는 경우에는 일정한 굽힘하중을 시편에 먼저 작용시킨 후 손상이 발생할 때까지 가압하였다. 굽힘하중의 크기는 설계 코드에서 주어지는 내압 및 자중과 같은 지속하중과 열팽창 하중이 동시에 작용될 때의 최대 허용 굽힘모멘트 크기를 기초로 계산되었다<sup>17)</sup>. 식 (1)은 설계코드에 제시된 허용 굽힘모멘트 기준을 나타낸 것이다. 시험장치에서 굽힘모멘트를 작용시키기 위한 변위의 크기는 결함이 없는 시편의 최대 허용 굽힘모멘트에 해당하는 변위로부터 결정되었다. 외호면에 결함이 존재하는 경우에는 단립모드 방향으로 8.52mm, 내호면에 결함이 존재하는 경우에는 열립모드 방향으로 8.29mm의 변위를 각각 작용시켰다. Fig. 4는 손상시험 장면을 보여주고 있다.

$$\frac{PD_o}{4t_{nom}} + 0.75i \left( \frac{M_A}{Z} \right) + i \left( \frac{M_C}{Z} \right) \leq (S_h + S_A) \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 내압,  $i$ 는 응력증대계수,  $M_A$ 는 지속하중에 의한 모멘트,  $M_C$ 는 열팽창에 의한 모멘트,  $S_h$ 는 하중이 작용되는 온도에서 재료의 허용응력,  $S_A$ 는 팽창에 대한 허용응력,  $Z$ 는 배관의 단면계수이다.



Fig. 4. Photograph of burst test for local wall-thinned elbow.

## 3. 시험 결과

### 3.1. 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭의 영향

Fig. 5는 단순 내압 조건에서 감육 곡관의 손상 시험 결과를 원주방향 결함 폭에 따라 나타낸 것이다. 여기서, 손상압력은 식 (2)로 정의되는 결함이 없는 곡관의 파열에 대한 임계 내압( $P_o$ )으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 외호면 결함과 내호면 결함 모두 원주방향의 결함 폭이 증가함에 따라 손상압력이 감소하는 경향을 보였다. 결함 폭이  $\theta/\pi=0.125$ 에서  $\theta/\pi=0.5$ 로 증가함에 따라 손상압력이 약 20% 정도 감소하였다. 또한, 동일한 등가 길이( $L/D_o$ )와 깊이( $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$ )를 갖는 경우에는 외호면 결함에 비해 내호면 결함을 갖는 엘보우에서 높은 손상압력을 보였다.

$$P_o = \sigma_u \frac{t_{nom}}{R_o} \quad (2)$$

직관을 대상으로 수행된 기존의 연구 결과에 의하면, 일반적으로 손상압력은 결함의 깊이와 길이에 크게 영향을 받으며, 원주방향 폭에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다<sup>18,19)</sup>. 그러나, 본 실험 결과에서는 외호면 결함과 내호면 결함 모두 원주방향 결함 폭이 증가함에 따라 손상압력이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 차이는 감육 결함의 손상을 지배하는 원주방향 응력이 직관에서는 원주방향 위치에 관계없이 일정한 반면, 곡관에서는 원주방향 위치에 따라 응력의 크기가 변화하기 때문으로 판단된다. 즉, 직관의 경우에는 결함의 원주방향 폭이 증가할지라도 결함부 위치의 응력 크기가 거의 유사

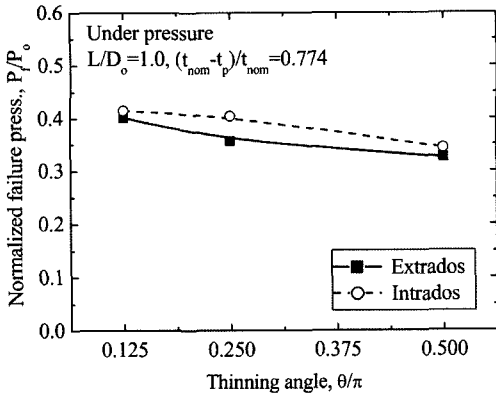


Fig. 5. Failure pressure of wall-thinned elbows with different thinning angle and locations.

한 반면, 곡관의 경우에는 결함의 원주방향 폭이 증가함에 따라 결함부의 응력 크기가 변하기 때문에 결함 폭에 따른 손상압력의 차이가 뚜렷이 나타나는 것이다.

또한, Fig. 5에서 감육 엘보우의 손상압력은 외호면보다 내호면 결함을 갖는 경우에 높게 나타났다. 결함이 없는 건전 엘보우에서 내압에 의한 원주방향 응력은 외호면에 비해 내호면에서 높은 것으로 알려져 있다<sup>15,16)</sup>. 따라서, Fig. 5의 결과와 달리 외호면에 비해 내호면에서 낮은 손상압력을 보일 것으로 예상된다. 결함 위치에 따른 이러한 거동은 Fig. 5에서 결함 길이를 실제 결함길이가 아닌 엘보우 측면에서 정의된 등가 길이를 적용하여 손상압력을 비교하였기 때문이다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 곡관에서 실제 결함 길이는 외호면에 비해 내호면에서 2배 정도 짧다. 따라서, 내호면 결함에서 높은 손상압력은 결함 길이가 외호면 결함에 비해 짧기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6은 결함부의 원주방향 변형률을 나타낸 것이다. 최종 손상발생까지의 데이터 취득은 이루어지지 못했지만, 결함위치에 따른 이러한 차이를 잘 설명해 주고 있다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 결함 폭에 관계없이 내호면 결함이 외호면 결함에 비해 낮은 압력에서 소성변형이 발생한다. 그러나, 변형이 진행됨에 따라 원주방향 변형률의 증가는 외호면에 비해 내호면 결함에서 둔화되는 경향을 보였다. 즉, 내압에 의한 원주방향 응력이 내호면에서 높기 때문에 외호면에 비해 낮은 내압 조건에서 결함부의 소성변형이 시작되지만, 내호면의 결함 길이가 짧기 때문에 내압에 따른 결함부의 소성변형이 제한되고 최종적으로 손상이 높은 압력에서 발생하는 것이다.

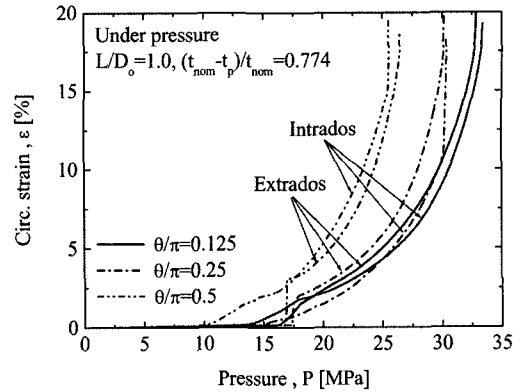


Fig. 6. Comparison of circumferential strains at different wall-thinning locations.

### 3.2. 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향

실제 발전소 배관계통은 정상운전 중에도 지중과 열팽창 등 일정한 크기의 굽힘하중이 작용된다. 따라서, 여기서는 감육부 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향을 살펴보기 위해서, 앞서 수행된 시편과 동일한 결함 형상( $\theta/\pi = 0.125$ 와  $0.5$ )을 갖는 시편을 이용하여 일정한 굽힘하중이 작용된 상태에서 손상압력을 평가하였다. Fig. 7은 일정한 굽힘하중 조건에서 평가된 손상압력( $P_{f,P+B}$ )을 단순내압 조건에서 평가된 손상압력( $P_{f,P}$ )으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이  $\theta/\pi = 0.125$ 인 외호면 결함을 제외하면 굽힘하중이 작용되는 경우가 단순내압만 작용되는 경우보다 약간씩 낮은 손상압력을 보였다. 그러나, 굽힘하중의 작용에 따른 손상압력의 감소 정도는 최대 3.3%로 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향이 크지 않았다. 또한,  $\theta/\pi = 0.125$ 인 외호면 결함에서는 굽힘하중이 작용됨에 따라 손상압력이 약간 증가하였다.

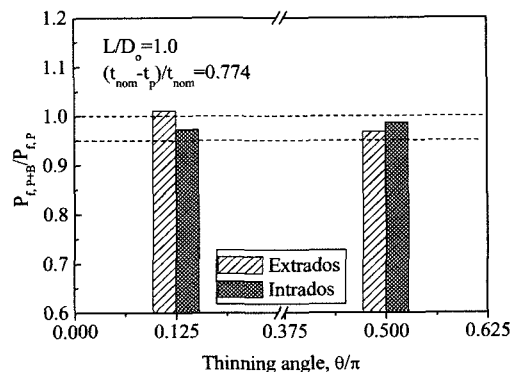


Fig. 7. Comparison of failure pressures under pressure only and combined bending and pressure.

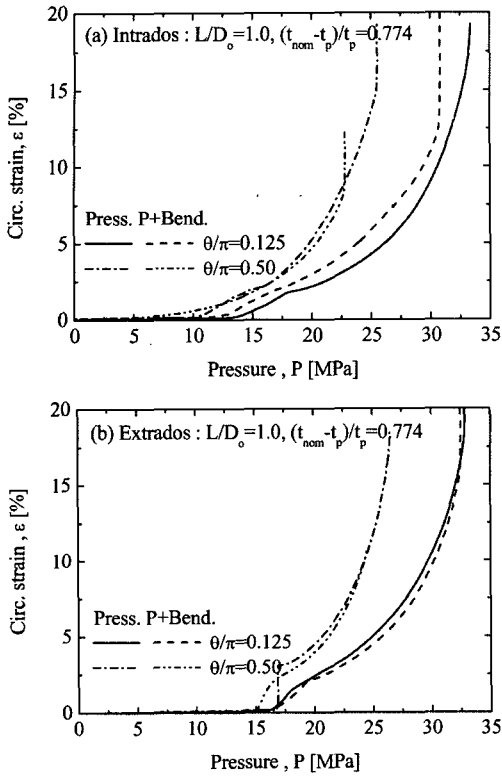


Fig. 8. Comparison of circumferential strains at wall-thinned area for different loading type.

이들 결과에서 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향이 크지 않은 것은 감육 엘보우에서 굽힘하중이 축방향 응력과 변형에 주로 영향을 미치는 반면, 손상압력은 원주방향 응력과 변형에 지배되기 때문이다. Fig. 8은 내호면 결함과 외호면 결함의 중심에서 측정된 원주방향 변형률을 비교한 것으로 위의 설명을 잘 뒷받침해 주고 있다. 단순 내압만 작용될 때와 비교하여 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우에는 낮은 내압 조건에서 결함부의 변형률 증가가 뚜렷하였다. 그러나, 내압이 증가됨에 따라 결함부의 원주방향 변형률이 단순 내압만 작용되는 경우의 변형률 값에 접근하는 것을 알 수 있다. 따라서, 내압이 낮은 조건에서는 굽힘하중이 엘보우 감육부의 변형거동에 영향을 미치지 않으나, 최종 손상이 발생하는 시점에서는 원주방향 변형이 내압에 의해 지배되기 때문에 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향이 미미한 것으로 판단된다.

### 3.3. 기존 손상압력 평가 모델과의 비교

Fig. 9는 파열시험에서 주어진 손상압력을 기존의

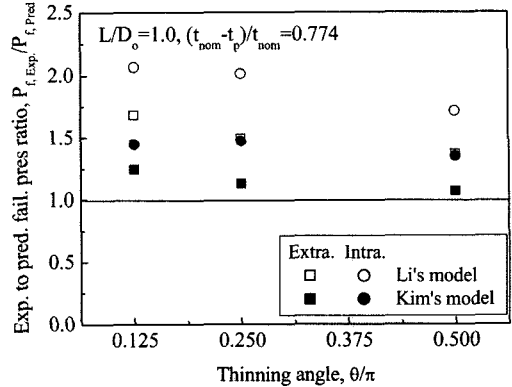


Fig. 9. Comparison of experimental and predicted failure pressures.

감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델<sup>15,16</sup>과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 모델 모두 감육 엘보우의 손상압력을 낮게 평가하였다. 특히 외호면 결함에 비해 내호면 결함과 결함의 원주방향 폭이 작은 결함에서 기존 평가 모델의 보수성이 높은 것으로 나타났다. 두 모델을 비교해보면, 곡관 외부에 존재하는 피팅형 감육 결함 평가를 목적으로 제안된 Li의 모델<sup>15</sup>에 비해 곡관 내부의 감육 결함을 가정하여 유도된 Kim의 모델<sup>16</sup>이 상대적으로 정확한 예측 결과를 보였다. 그러나, 두 모델 모두 감육 결함의 원주방향 폭에 대한 영향을 적절하게 고려하지 못하였다. 또한, 외호면 결함에 비해 내호면 결함에서 편차가 크게 증가하는 것으로 볼 때, 결함의 위치에 따른 영향도 충분히 고려하지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 감육 엘보우의 손상압력 평가를 위한 기존 모델의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 내부에 감육 결함이 존재하는 엘보우 시편을 이용하여 파열시험을 수행하고, 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭과 굽힘하중의 영향을 살펴보았다. 단순 내압이 작용할 때 외호면 및 내호면 결함 모두 원주방향 결함 폭이 증가됨에 따라 손상압력이 감소하였으며, 일정한 등가길이와 깊이 조건에서 내호면 결함을 갖는 엘보우가 외호면 결함을 갖는 엘보우보다 높은 손상압력을 보였다. 설계시 고려되는 최대 허용 굽힘하중이 작용되는 경우에 감육 엘보우의 손상압력은 약간 감소하였으나, 감소 정도는 최대 3.3%로 크지 않았다. 감육 엘보우에 대한

기존의 손상압력 평가 모델은 모두 손상압력을 실제보다 낮게 평가하였으며, 결함의 원주방향 폭에 대한 영향과 결함의 위치에 대한 영향을 충분히 고려하지 못하는 것으로 파악되었다.

### 참고문헌

- 1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant", EPRI/TR-106611-R2, 1998.
- 2) Frank, M., Hans, R., and Helmut, S., "Experience with piping in German NPPs with respect to ageing-related aspects", Nucl. Eng. & Des., Vol. 207, pp. 307~316, 2000.
- 3) Coulson, K. E. W. and Worthington, R. G., "New guidelines promise more accurate damage assessment", Gas & Oil J., Vol. 32, pp. 41~44, 1990.
- 4) Kiefner, J.F. and Vieth, P.H., "New method corrects criterion for evaluating corroded pipe", Oil Gas J., Vol. 32, pp. 56~59, 1990.
- 5) Deardorff, A. F. and Bush, S. H., "Development of ASME section XI criteria for erosion-corrosion thinning of carbon steel piping", PVP-Vol-186, NDE-Vol.7, pp. 71~75, 1990.
- 6) Japan Atomic Energy Research Institute, "Technical Report on the piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute", JAERI-M, 93-074, pp. 104~115, 1993.
- 7) 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.
- 8) Wildowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components", Nucl. Eng. & Des., Vol. 195, pp. 149~169, 2000.
- 9) Lim, H., Shim, D. J., and Kim, Y. J., "Development of Assessment Methodology for Locally Corroded Pipe Using Reference Stress Concept", Trans. of KSME(A), Vol. 27, No. 7, pp. 1200~1209, 2003.
- 10) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec. XI, Div. 1, ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning", 1998ed.
- 11) Draft for ASME Sec. XI, App. X, "Analytical evaluation of internal of external wall thinning in piping systems", rev.8., 2003.
- 12) Hasegawa, K., Miyazaki, K., and Nakamura, I., "Failure mode and failure strengths for wall thinning straight pipes and elbows subjected to cyclic loading", PVP-6, pp. 745~752, 2005.
- 13) Ando, K., Takahashi, K., Kato, A., Kimura, Y., Hisatsune, M., and Hasegawa, K., "Fracture Behavior of Tee pipe with Local Wall Thinning", Tran. of the 17th Int. Conf. on SMiRT, Paper #G07-4, 2003.
- 14) Kim, J.W., Kim, T.S., Park, C.Y., "Effect of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow", Trans. of KSME(A), Vol. 28, No. 4, pp. 402~409, 2004.
- 15) Li, Z., Yinpei, W., Jin, C., and Cengdian, L., "Evaluation of local thinned pressurized elbow", Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol. 78, pp. 697~703, 2001.
- 16) Kim, J. W., Na, M. G., Park, C. Y., "Development of Failure Pressure Evaluation Model for Internally Wall Thinned Piping Components", Trans. of KSME (A), Vol. 29, No. 7, pp. 947~954, 2005.
- 17) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, "Nuclear Components", 1995ed.
- 18) Fu, B. and Kirkwood, M. G., "Predicting Failure Pressure of Internally Corroded Linepipe using the Finite Element Method", ASME OMAE, Vol. V, Pipeline Technology, pp. 175~184, 1995.
- 19) Leis, B. N. and Stephens, D. R., "An Alternative Approach to Assess the Integrity of Corroded Line Pipe Part II: Alternative Criterion", Proc. of the 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. IV, pp. 635~641, 1997.