

< 논문 >

# 실배관 파열실험을 통한 국부감육 곡관 손상압력 평가

김진원<sup>†</sup> · 박치용\* · 이성호\*  
(2007년 7월 19일 접수, 2007년 8월 31일 심사완료)

## Failure Pressure Evaluation of Local Wall-Thinned Elbows by Real-scale Burst Tests

Jin-Weon Kim, Chi-Yong Park and Sung-Ho Lee

**Key Words:** Real-scale Pipe Specimen (실배관 시편), Burst Test (파열시험), Local Wall-Thinning (국부감육), Elbow (곡관), Failure Pressure (손상압력)

### Abstract

This study performed a series of burst tests at ambient temperature using real-scale elbow specimen containing a local wall-thinning defect at its intrados or extrados and evaluated failure pressure of locally wall-thinned elbows. In the experiment, a 90-degree 100A, Sch. 80 standard elbow was employed, and various wall-thinning geometries, such as length, depth, and circumferential angle, were considered. From the results of experiment, the dependences of failure pressure of wall-thinned elbows on the defect geometries and locations were investigated. In addition, the reliability of existing models was examined by comparing the tests data with the results predicted from existing failure pressure evaluation models for locally wall-thinned elbow.

### 1. 서 론

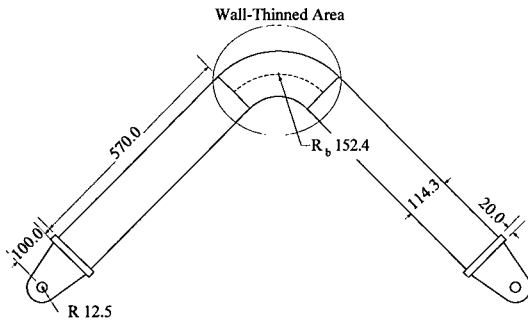
발전소나 기타 화학 플랜트, 그리고 Gas나 Oil 배관에서 흔히 발생하는 국부 감육결함은 배관의 두께가 국부적으로 허용치 이하로 얇아져 있는 3차원 형태의 결함이며, 이들 결함은 배관의 하중 지지능력, 파열압력, 피로균열과 국부좌굴 저항성을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 감육결함은 여러 가지 원인에 의해 발생될 수 있는데, 원자력발전소(이하 원전) 배관의 경우에는 대부분 유체 유동에 의한 가속부식이 원인인 것으로 알려져 있다.<sup>(1~3)</sup> 따라서, 국부 감육결함은 부식에 취약한 탄소강 배관의 건전성을 위협하는 가장 대표적인 손상기구로 인식되고 있으며, 원전의 안전성과 운전성 확보 측면에서 감육결함의 건전

성 평가에 대한 관심이 높아지고 있다.

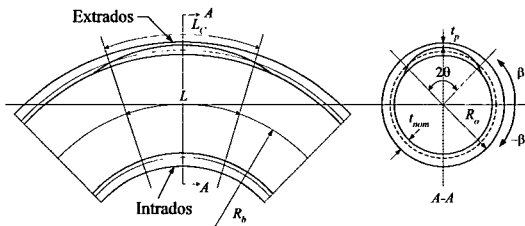
최근 원전 감육 배관의 건전성 평가와 관련하여 여러 형태의 이론적, 실험적 연구들이 국내외적으로 진행되고 있으며, 이를 통해 배관에 존재하는 감육결함에 대한 허용 기준 및 건전성 평가 절차를 확립하고자 노력하고 있다.<sup>(4~6)</sup> 그러나, 대부분의 기존 연구는 직관에 존재하는 감육결함을 대상으로 수행되었으며,<sup>(7~10)</sup> 결함이 주로 발생하는 곡관, 배관 연결부, Reducer 등을 대상으로 한 연구는 거의 수행되지 않았다. 최근 감육결함이 존재하는 곡관과 배관 연결부에 대한 건전성 평가를 위한 실험적 연구들이 일본을 중심으로 일부 수행되었으며,<sup>(11~13)</sup> 국내에서도 유한요소해석을 이용한 해석적 연구들이 진행되고 있다.<sup>(14,15)</sup> 이들 연구에서는 단순 굽힘하중이나 반복 굽힘하중 조건에서 배관의 하중지지능력과 피로 저항성에 미치는 감육결함의 영향 평가에 초점이 맞추어져 있다. 그러나, 아직까지 내압조건에서 곡관의 손상에 미치는 감육결함의 영향에 대한 연구는 거의 수행되지 않았으며, 유한요소해석에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과  
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr  
TEL : (062)230-7109

\* 한전 전력연구원 원전기계그룹



(a) Dimensions of elbow specimen



(b) Definition of local wall-thinning dimensions

Fig. 1 Definition of real-scale elbow specimen used in the experiment

기초한 Li<sup>(16)</sup>와 Kim<sup>(17)</sup>의 연구 결과만 보고되어 있다. 이들 연구에서는 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델을 제시하였으나, 감육 곡관에 대한 손상압력 시험 데이터의 부재로 인해 모델의 신뢰성을 검증하지 못하고 있는 실정이다. 원전 배관에 작용하는 가장 기본적인 하중이 내압이고 실제 대부분의 감육 배관이 파열에 의해 손상되는 것을 고려할 때, 감육 배관에 대한 건전성 확보를 위해서는 신뢰성 있는 손상압력 평가 모델의 개발과 이를 검증하기 위한 실험 데이터의 확보가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 결함 길이, 깊이, 원주방향 폭의 감육결함을 곡관의 내호면 (intrados) 또는 외호면 (extrados)에 가공한 실패관 시편을 이용하여 파열시험을 수행하였다. 이들 결과로부터 곡관의 손상압력에 미치는 감육결함의 형상과 위치에 대한 영향을 파악하였다. 또한, 이들 결과를 기존의 감육곡관 손상압력 평가 모델과 비교함으로써, 기존의 감육 곡관 손상압력 평가 모델에 대한 신뢰성을 확인하였다.

Table 1 Tensile properties at intrados and extrados of elbow

Location	Yield stress, $\sigma_y$ [MPa]	Ulti. tensile stress, $\sigma_u$ [MPa]	Total elong., %EL[%]
Intrados	289.4	478.2	29.0
Extrados	297.3	483.2	27.9

## 2. 감육 곡관 파열시험

### 2.1 시편 및 시험 조건

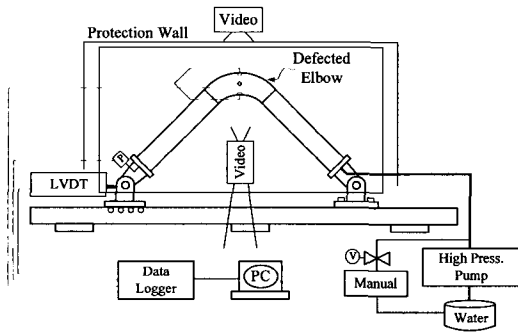
파열시험에는 Fig. 1과 같이 양단에 일정 길이의 직관을 연결한 곡관 시편이 이용되었다. 곡관 재료는 ASTM A234 WPB이고, 연결 직관은 ASTM A106 Gr.B이다. 이들은 모두 원전 2차 계통 배관에 널리 사용되는 재료들이다. 곡관과 직관의 크기는 모두 4 인치 Sch. 80으로 공칭 외경과 두께는 각각 114.3 mm와 8.56 mm이고, 곡관의 곡률반경은 152.4 mm이다. Table 1은 시험에 사용된 곡관의 인장물성치를 정리한 것으로, 실제 곡관의 내호면과 외호면에서 원주방향으로 채취한 시편을 이용하여 시험한 결과이다. 인장시험에는 직경이 2mm이고 게이지 길이가 12mm인 봉상시편이 사용되었으며, 각 위치별로 3회씩 시험을 수행하였다. Table 1에서 알 수 있는 것과 같이 곡관부에서 위치에 따른 기계적물성치의 편차는 거의 없었으며, 이는 고온 포밍을 통해 곡관을 제조하였기 때문으로 판단된다.

감육결함은 곡관의 내호면 또는 외호면 중심에 가공되었으며, 원주방향과 길이방향 모두 원형이 되도록 설계하였다. 구매된 상태에서 곡관의 외경과 길이, 그리고 곡률반경 등이 일정하지 않기 때문에 감육결함의 가공에 앞서 곡관의 외부를 밀링 가공하여 일정한 외경 ( $D_o = 113.4$  mm)과 길이, 그리고 반경이 되도록 하였다. 감육결함은 일정하게 가공된 외경을 기준으로 곡관 내부에 가공됨으로써, 결함부에서 일정한 형상과 두께가 되도록 하였다. 결함 가공이 완료된 곡관의 양단에 직관을 용접하고, 직관의 끝단에는 플랜지를 용접하여 내압을 지탱할 수 있도록 하였다.

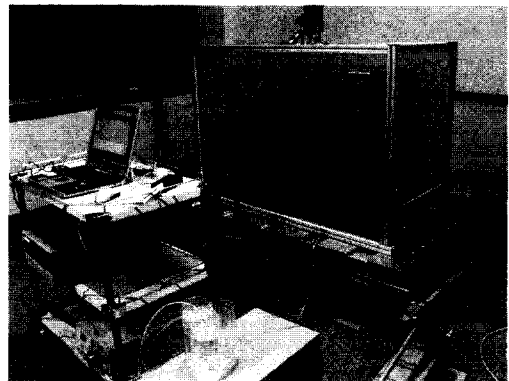
시험 결과에서 손상압력에 미치는 감육결함의 길이, 원주방향 폭, 깊이, 그리고 위치 등에 대한 영향을 확인하기 위해서, 총 18 종류의 19개 시편이 시험에 사용되었다. Table 2는 각 시편의 결

**Table 2** Designed dimensions of wall-thinning defect and thinning location considered in the burst tests under internal pressure

ID. No.	Equiv. thinning length, $L/D_0$	Actual. thinning length, $L_c/D_0$	Circ. thinning angle, $\Theta/\pi$	Thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$	Thinning location	Failure mode			
SP-1	1.5	2.0	0.25	0.774	Extrados	Axial crack at extrados			
SP-1_1	1.5	2.0				"			
SP-2	0.25	0.334				No failure			
SP-3	0.5	0.667				Axial crack at extrados			
SP-4	1.0	1.334				"			
SP-5	1.0	1.334				0.125	"		
SP-6						0.5	"		
SP-9						0.25	0.833	"	
SP-10						0.706	"		
SP-12	1.5	1.0				0.25	0.774	Intrados	Axial crack at intrados
SP-13	0.25	0.167	No failure						
SP-14	0.5	0.334	Axial crack at intrados						
SP-15	1.0	0.667	"						
SP-16	1.0	0.667	0.125	"					
SP-17			0.5	"					
SP-18	1.0	0.667	0.25	0.833	"				
SP-19			0.706	"					
SP-7	1.0	-	1.0	0.774	Full circumference				Axial crack at crown
SP-8	1.5	-							Axial crack at intrados



**Fig. 2** Schematic diagram of testing system



**Fig. 3** Test set-up for burst test of local wall-thinned elbow

함 형상과 위치를 나타낸 것이다. Table 2에서 결함 길이는 곡관의 측면에서 정의된 등가길이 ( $L$ )와 내호면과 외호면에서 정의된 실제 결함길이 ( $L_c$ )로 나타내었다 (Fig. 1 참조). Table에서 알 수 있는 것과 같이 등가결함 길이가 같을지라도 실제 결함 길이는 결함 위치에 따라 약 2배 정도 차이를 보인다. 결함부의 최대 깊이는 설계시 고려된 최소 두께 ( $t_p$ )를 기준으로 정의되었으며, 변형을 게이지를 부착하기 위한 표면 연마를 고려

하면 실제 결함 깊이는 이보다 약간 큰 값을 갖는다.

2.2 시험 장치

감육 곡관에 대한 파열시험 장치는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 시험을 장착하기 위한 시험대 (Test bed), 가압장치, 그리고 데이터 취득 장치로

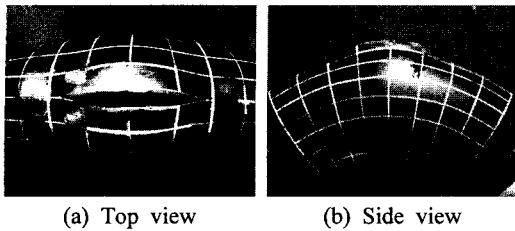


Fig. 4 Typical failure mode of extrados wall-thinned elbow

구성된다. 시험대는 시편의 양 끝단을 힌지 형태로 고정할 수 있도록 설계되었으며, 한쪽 끝단의 힌지는 고정되어 있으며 다른 쪽 힌지는 가압에 따른 시편의 변형을 허용할 수 있도록 미끌림이 가능하게 설계되었다. 시편은 수압을 이용하여 가압하였으며, 가압장치는 수동 펌프와 자동 고압펌프로 구성된다. 가압시 두 장치를 동시에 가동하거나, 자동 고압펌프만을 가동하여 가압할 수 있도록 설계되었다. 여기서 사용된 고압 펌프의 최대 허용 운전압력은 40 MPa이다. 데이터 취득 장치는 Data Logger와 데이터 취득 프로그램이 설치된 PC로 구성되며, 가압하는 동안 시편에 부착된 게이지로부터 결함부의 변형률, 내압, 시편 끝단의 변위 등을 초당 1 회씩 취득할 수 있다. 추가적으로 2 대의 비디오카메라를 설치하여 가압에 의한 결함부의 변형과 손상발생 등 전체 시험 과정을 관찰하고 기록할 수 있도록 하였다. Fig. 3의 사진은 시험 장치를 보여주고 있다.

### 2.3 시험 절차

제작이 완료된 시편의 곡관부에 원주방향과 길이방향으로 일정한 간격의 격자를 그리고, 가공된 결함의 형상 및 두께를 확인하기 위해 각 격자점에서 초음파 두께 측정 장비를 이용하여 두께를 측정하였다. 두께 측정이 완료된 시편은 변형률 게이지 부착을 위해 표면을 연마하고, 연마 후 결함부의 두께를 다시 측정하여 연마에 의한 두께 감소를 확인하였다. 변형률 게이지는 최대 15%까지의 변형률을 측정할 수 있는 소성 게이지이며, 결함부 중심과 결함 반대편에는 축방향과 원주방향으로 2 개, 곡관부 측면과 결함의 가장자리 부분에는 원주방향으로 1 개의 게이지를 부착하였다. 게이지 부착이 완료된 시편은 내부에 물을 채운 후 수압을 이용하여 가압하였다.

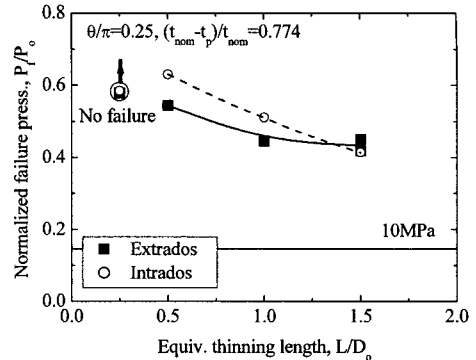


Fig. 5 Variations in failure pressure of local wall-thinned elbow with equivalent thinning length

초기 5 MPa까지는 가압속도를 높이기 위해 수동 펌프와 자동 고압펌프를 동시에 가동하고, 그 이상에서는 고압 펌프만을 이용하여 손상 발생 시까지 가압하였다. 가압 속도를 일정하게 유지하기 위해서 내압의 크기에 따라 유량을 조절하여 약 1 MPa/min의 가압 속도를 유지하였다.

## 3. 손상압력 시험 결과

Table 2의 모든 조건에서 파열시험을 수행하였으며, 각 시편에 대한 손상압력과 가압에 따른 결함부의 변형률 데이터를 확보하였다. Fig. 4는 파열시험 후 손상된 시편을 보여주는 것으로 대부분의 시편은 결함부에서 부풀어 오른 후 축방향의 균열이 발생하였다. 본 연구에서는 시험 결과로부터 감육 곡관의 손상압력에 미치는 결함 형상과 위치에 따른 영향을 살펴보았다.

### 3.1 손상압력에 미치는 결함 형상의 영향

Fig. 5는 일정한 깊이( $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774$ )와 원주방향 폭( $\theta/\pi = 0.25$ )에서 감육결함의 등가 길이에 따른 곡관의 손상압력 차이를 나타낸 것으로 감육 곡관에 대한 손상압력( $P$ )을 식 (1)로 정의되는 임계압력으로 무차원화하여 나타낸 것이다.

$$P_o = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_o} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_u$ 는 재료의 공칭 인장응력,  $t_{nom}$ 은 공칭두께,  $R_o$ 는 곡관의 외반경이다. 그럼에서 알 수

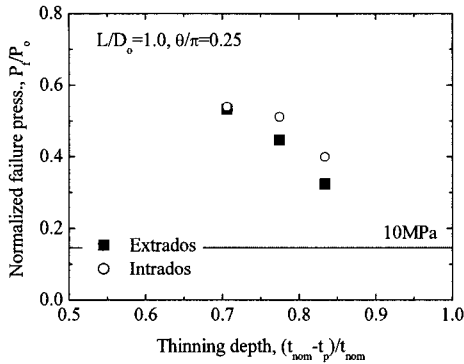


Fig. 6 Variations in failure pressure of local wall-thinned elbow with thinning depth

있는 것과 같이 결함의 위치에 관계없이 결함 길이가 짧아질수록 손상압력이 지수 함수적으로 증가하며, 결함의 증가길이가  $L/D_0 = 1.5$ 에서 0.5로 짧아짐에 따라 손상압력이 내호면 결함의 경우 약 51%, 외호면 결함의 경우 약 25% 정도 증가하였다. 결함의 증가길이가  $L/D_0 = 0.25$ 인 경우에는 외호면 결함과 내호면 결함 모두 40 MPa까지 손상이 발생하지 않았다.  $L/D_0 = 0.5$ 인 내호면 결함에서는 가압 펌프의 용량을 초과하여 가압됨에 따라 43.1 MPa에서 손상이 발생하였다. 따라서, 손상이 발생하지 않은  $L/D_0 = 0.25$ 의 경우에는 이보다 높은 손상압력을 보일 것으로 예상할 수 있다. Fig. 6은 일정한 원주방향 폭 ( $\theta/\pi = 0.25$ )과 등가 길이 ( $L/D_0 = 1.0$ ) 조건에서 결함 깊이에 따른 감속 곡관의 손상압력 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 내호면 결함에서는 약간 벗어나는 경향을 보이지만, 결함 깊이가 증가함에 따라 손상압력이 거의 선형적으로 감소하였다. 결함의 깊이가  $(t_{nom} - t_p)/t_{nom} = 0.706$ 에서 0.833으로 증가함에 따라 손상압력이 외호면 결함의 경우 약 40%, 내호면 결함의 경우 약 26% 정도 감소하였다. Fig. 7은 일정한 결함 깊이 ( $(t_{nom} - t_p)/t_{nom} = 0.774$ )와 등가길이 ( $L/D_0 = 1.0$ ) 조건에서 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 결함의 위치에 관계없이 원주방향 결함 폭이 증가함에 따라 손상압력이 감소하였다. 원주방향 폭이  $\theta/\pi = 0.125$ 에서 0.5로 증가함에 따라 손상압력이 약 20% 정도 감소하였으며, 그 이상에서는 손상압력의 변화가 크지 않았다.

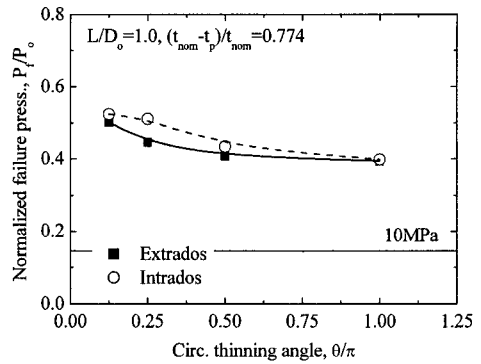


Fig. 7 Variations in failure pressure of local wall-thinned elbow with circumferential thinning angle

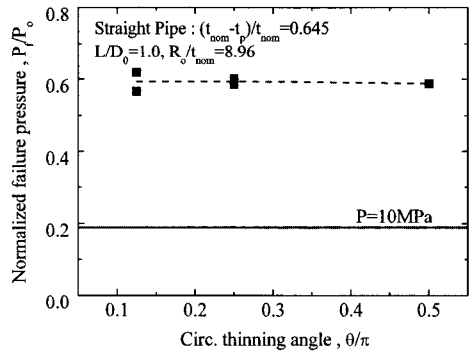


Fig. 8 Variations in failure pressure of local wall-thinned straight pipe with circumferential thinning angle

결함 형상에 따른 손상압력의 변화 경향을 감속 직관에 대한 연구 결과와 비교하여 살펴보면, 결함 길이와 깊이에 따른 손상압력의 변화 경향은 감속 직관에서 관찰된 결과와 거의 일치한다.<sup>(18-20)</sup> 그러나, 원주방향 결함 폭에 따른 감속 곡관의 손상압력 변화 경향은 감속 직관과 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 감속 직관에 대한 기존의 연구 결과에서는 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭의 영향은 무시할 정도로 작은 것으로 보고하고 있다.<sup>(18,19)</sup> 또한, 본 연구자에 의해 수행된 감속 직관에 대한 파열시험 결과에서도 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭의 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다 (Fig. 8). 그러나,

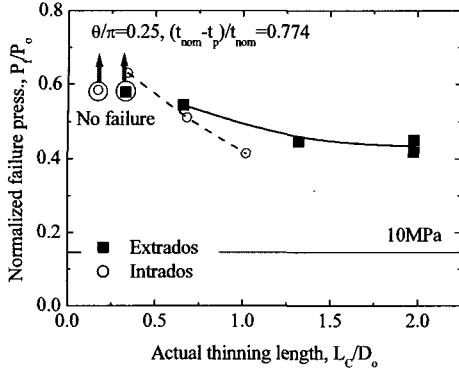


Fig. 9 Variations in failure pressure of local wall-thinned elbow with actual thinning length

Fig. 7의 결과에 의하면 결함 길이와 깊이에 대한 영향보다는 작지만, 감육 곡관에서 손상압력은 원주방향 결함 폭에 따라 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 차이는 감육결함의 손상을 지배하는 원주방향 응력이 직관에서는 원주방향 위치에 관계없이 일정한 반면, 곡관에서는 원주방향 위치에 따라 변화하기 때문으로 판단된다.<sup>(16)</sup>

### 3.2 결함 위치에 따른 손상압력

기존의 해석적 연구 결과에 의하면 외호면보다 곡관의 내호면에 감육결함이 존재하는 경우에 손상압력이 더 낮은 것으로 보고하고 있다.<sup>(16,17)</sup> 실제 결함이 없는 곡관에서 내압에 의한 Hoop 응력은 외호면에 비해 내호면에서 높다.<sup>(16)</sup> 따라서, 감육결함의 형상이 동일하다면, 외호면보다 내호면 감육 곡관에서 낮은 손상압력을 보이는 것이 타당하다. 그러나, Figs. 5~7에서는 외호면보다 내호면 감육 곡관의 손상압력이 높게 표시되었다. 이것은 Figs. 5~7에서 결함 길이를 실제 결함 길이가 아닌 곡관 측면에서 정의된 등가길이를 적용하여 손상압력을 비교하였기 때문이다. Table 1에서 알 수 있는 것과 같이 등가길이가 동일할 지라도 곡관의 외호면에 존재하는 결함은 내호면 결함에 비해 약 2배의 결함 길이를 갖는다. 따라서, Figs. 5~7에서 내호면 감육 곡관의 손상압력이 외호면 감육 곡관에 비해 높은 것은 실제 결함 길이가 짧기 때문이다.

Fig. 9는 Fig. 5의 결과를 등가길이 대신 실제 감

육결함의 길이 ( $L_c/D_0$ )를 적용하여 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 실제 결함 길이를 적용하여 손상압력을 비교한 결과, 외호면에 비해 내호면 결함을 갖는 곡관이 낮은 손상압력을 보였다. 따라서, 감육결함의 형상이 동일하다면, 감육결함이 곡관의 외호면보다 내호면에 존재할 때 낮은 손상압력을 보이는 것을 파열시험 결과에서 확인할 수 있었다.

## 4. 기존의 손상압력 평가 모델과 비교

여기서는 기존의 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델의 신뢰성을 확인하기 위해서, 기존의 손상압력 평가 모델과 파열시험에서 주어진 손상압력 데이터를 비교하여 살펴보았다.

### 4.1 기존의 손상압력 평가모델

감육 배관에 대한 손상압력 평가 모델은 대부분 배관의 외부에 감육결함이 존재하는 직관을 대상으로 개발되었다. 감육 곡관에 대한 손상압력 평가 모델은 아직까지 거의 개발되지 않았으며, 현재까지 확인된 바로 Li<sup>(16)</sup>와 Kim<sup>(17)</sup>이 제시한 모델뿐이다. Li의 평가 모델은 식 (2)로 주어지며 곡관의 외부에 존재하는 감육결함을 대상으로 개발되었다. 식 (3)으로 주어지는 Kim의 모델은 곡관 내부에 존재하는 감육결함을 대상으로 개발되었다. Kim의 모델은 Li의 모델을 변형한 것으로  $\sigma_r$  대신  $\sigma_u$ 를 적용하고, 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 고려하기 위한 항이 추가되고 결함 길이에 대한 영향을 약간 수정한 것을 제외하면, 식 (2)와 (3)은 거의 같은 것을 알 수 있다.

$$P_f = \frac{\sigma_f t_{nom}}{R_b} \left\{ \frac{1 - \left( \frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right)}{1 - \left( \frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) M^{-1}} \right\} \left\{ \frac{R_b/R_m + \sin\beta}{R_b/R_m + \frac{\sin\beta}{2}} \right\} \quad (2)$$

$$M = \sqrt{1.0 + 0.6275\bar{L} - 0.003375\bar{L}^2}, \quad \bar{L} = (L_c/D_0 t_{nom})^2$$

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \left\{ \frac{1 - \left( \frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right)}{1 - \left( \frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) \hat{M}^{-1}} \right\} \left\{ \frac{R_b/R_m + \sin\beta}{R_b/R_m + \frac{\sin\beta}{2}} \right\} \Omega(\theta) \quad (3)$$

$$\hat{M} = \sqrt{1.44 + 0.6275\bar{L} - 0.003375\bar{L}^2}$$

$$\Omega(\theta) = C_0 + C_1 \left( \frac{\theta}{\pi} \right) + C_2 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^2$$

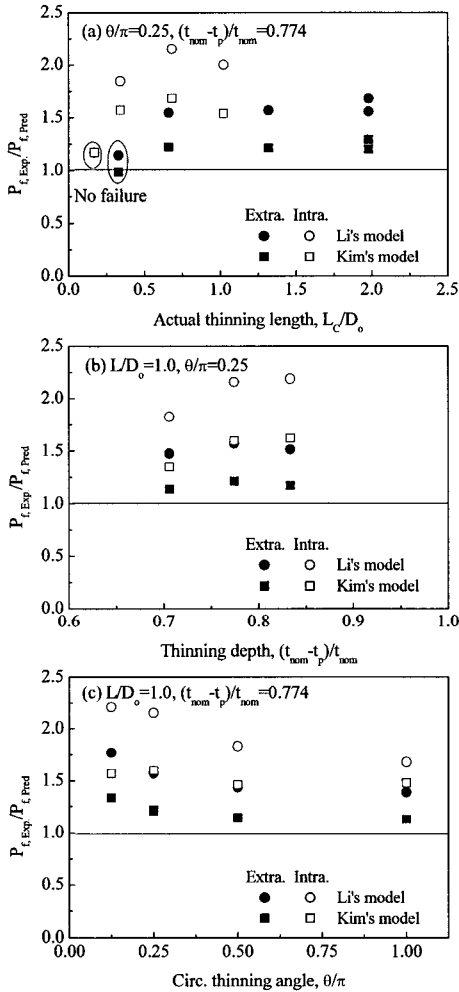


Fig. 10 Comparison of experimental to predicted failure pressures

4.2 손상압력 평가 모델과의 비교 결과

Fig. 10은 파열시험을 통해 확보된 감육 곡관의 손상압력 데이터를 기존의 손상압력 평가 모델과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 감육 곡관에 대한 기존의 평가 모델은 전체적으로 감육 곡관에 대한 손상압력을 보수적으로 평가하였다. 특히, 두 모델 모두 내호면 결함을 갖는 곡관의 손상압력 예측에서 큰 보수성을 보였다. 전체적으로 Kim의 모델이 Li의 모델에 비해 상대적으로 손상압력을 정확하게 예측하였으며, 외호면 결함의 경우에는 모든 결함형상

에서 파열시험 결과와 최대 30% 이내의 데이터 편차를 보였다. 또한, Kim의 모델은 결함의 길이와 깊이에 따른 손상압력의 변화 경향을 적절히 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 결함 폭에 따른 손상압력의 변화 경향은 적절히 예측하지 못하였다.

이들 결과로부터 감육 곡관에 대한 손상압력을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 기존 감육 곡관 손상압력 평가 모델의 개선이 필요하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 다양한 결함 형상과 위치를 고려한 감육 곡관 시편을 이용하여 파열시험을 수행하였다. 파열시험 결과로부터 손상압력에 미치는 감육결함의 형상과 위치에 따른 영향을 살펴 보았다. 또한, 손상압력 데이터를 기존의 손상압력 평가 모델과 비교함으로써 기존의 손상압력 평가 모델의 신뢰성을 확인하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 감육 곡관에서 손상압력은 결함 길이에 따라 지수 함수적으로, 결함 깊이에 따라 거의 선형적으로 변화하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 감육 직관에서와 일치한다. 반면, 곡관에서 감육결함의 원주방향 폭에 따른 손상압력의 변화 경향은 직관에서와 달리 뚜렷한 감소를 보였다.
- (2) 감육결함의 형상이 동일한 경우에는 감육결함이 곡관의 외호면보다 내호면에 존재할 때 낮은 손상압력을 보였다.
- (3) 기존의 감육 곡관 손상압력 평가 모델은 모든 조건에서 파열시험 결과를 보수적으로 예측하였으며, 특히 내호면 감육 곡관에서 큰 보수성을 보였다.
- (4) Li의 모델에 비해 Kim의 모델이 상대적으로 정확하게 감육 곡관의 손상압력을 예측하였으나, 원주방향 결함 폭에 대한 영향은 적절히 예측하지 못하는 한계를 보였다.
- (5) 따라서, 감육 곡관에 대한 신뢰성 있는 손상압력 평가 모델의 개발이 필요하며, 본 연구의 파열시험 결과는 이들 모델의 개발과 검증에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P.,

- Wood, C. and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," *EPRITR-106611-R2*.
- (2) Frank, M., Hans, R., and Helmut, S., 2001, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 207, pp. 307~316.
- (3) Kuen, T. and Yin, P. M., 1999, "The evaluation of erosion/corrosion problems of carbon steel piping in Taiwan PWR nuclear power plant.," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 191, pp. 231~243.
- (4) Wilkowski, G, Stepens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., 2000, "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 195, pp. 149~169.
- (5) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, App.X (Draft), "Analysis Evaluation of Internal or External Wall Thinning in Piping Systems," 2003 (Rev.8).
- (6) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, ASME Code Case N-597 rev.2, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," 2003ed.
- (7) 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. & Design*, Vol. 191, pp. 195~204.
- (8) Japan Atomic energy Research Institute, 1993, "Technical report on the piping reliability tests at the Japan Atomic Energy Research Institute," JAERI-M, 93-074, pp. 104~115.
- (9) Kim, Y.J., Shim, D.J., Lim, H., and Kim, Y.J., 2004, "Reference Stress Based Approach to Predict Failure Strength of Pipes with Local Wall Thinning Under Single Loading," *J. of Press. Ves. Technology*, Vol. 126, pp. 194~201.
- (10) Hasegawa, K., Sakata, K., Miyazaki, K. and Kanno, S., 2002. "Fatigue Strength for Pipes With Allowable Flaws and Fatigue Design Curve," *Int. J. Press. Ves. and Piping*, Vol. 79, pp. 37~44.
- (11) Hasegawa, K., Miyazaki, K., and Nakamura, I., 2005, "Failure mode and failure strengths for Wall Thinning straight Pipes and Elbows Subjected to Cyclic Loading," *Proc. of the Int. Conf. on PVP, ASME PVP-6*, pp. 745~752.
- (12) Takahashi, K., Kato, A., Ando, K., Hisatsune, M., and Hasegawa, K., 2007, "Fracture and Deformation Behaviors of Tee Pipe with Local Wall Thinning," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 237, pp. 137~142.
- (13) Ahn, S.H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., K., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 211, pp. 91~103.
- (14) Kim, J.W., Kim, T.S., Park, C.Y., 2004, "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.
- (15) Kim, J.W and Lee, J.G., 2005, "Effect of Circumferential Location of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow," *J. of Kor. Soc. of Safety*, Vol. 20, No. 1, pp. 55~61.
- (16) Li, Z., Yinpei, W., Jin, C., and Cengdian, L., 2001, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows," *Int. J. Press. Ves. and Piping*, Vol. 78, pp. 697~703.
- (17) Kim, J.W, Na, M.G., and Park, C.Y., 2005, "Development of Failure Pressure Evaluation Model for Internally Wall Thinned Piping Components," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 29, No. 7, pp. 947~954.
- (18) Fu, B. and Kirkwood, M.G., 1995, "Predicting Failure Pressure of Internally Corroded Linepipe Using the Finite Element Method," *OMAE-Vol.V, Pipeline Tech.*, ASME, pp. 175~184.
- (19) Leis, N. and Stephens, D.R., 1997, "An Alternative Approach to Assess The Integrity of Corroded Line Pipe. Part I Current Status and II Alternative Criterion," *Proc. of 7th Int. Conf. on Offshore and Polar Eng.*, pp. 624~641.
- (20) American National Standards Institute/American Society of Mechanical Engineer, B31G, "Manual for Determinating the Remaining Strength of Corroded Pipelines," 1991 ed.