

2007년 2월
석사학위논문

실 배관 파열시험을 통한 감육
Elbow의 손상압력 평가

Evaluation of Failure Pressure of Wall Thinned-elbow by Real
Scale Pipe Test

조선대학교 대학원

원자력공학과

나 연 수

실 배관 파열시험을 통한 감육
Elbow의 손상압력 평가

Evaluation of Failure Pressure of Wall Thinned-elbow by Real
Scale Pipe Test

2007년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

원 자 력 공 학 과

나 연 수

실 배관 파열시험을 통한 감육
Elbow의 손상압력 평가

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2006년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

원 자 력 공 학 과

나 연 수

나연수의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김승평인

위원 조선대학교 교수 나만균인

위원 조선대학교 조교수 김진원인

2006년 11월 30일

조선대학교대학원

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 실 배관 손상시험	3
제 1 절 유한요소해석을 통한 예비해석	3
1. 재료	3
2. 배관재료의 인장시험	4
3. 예비해석을 위한 유한요소해석	6
4. 예비해석 결과	7
제 2 절 시편 및 시험장치	12
1. 실 배관 손상 시편	12
2. 손상 시험 장치	17
제 3 절 실험절차 및 방법	19
제 3 장 손상시험 결과 및 토의	23
제 1 절 결함 형상에 따른 감육 엘보우의 손상압력	23
1. 결함 깊이에 따른 손상압력의 영향	23
2. 결함 길이에 따른 손상압력의 영향	25
3. 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 영향	27
제 2 절 감육 엘보우 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향	29
제 3 절 감육 배관의 결함 손상부 관찰	32
제 4 장 손상압력 평가 모델과 비교	38
제 1 절 손상압력 평가 모델	38
1. Battelle Model	38
2. Li's Model	40
3. Kim's Model	41

제 2 절 손상압력 평가 모델과 시험 결과 비교	42
1. 결함 깊이에 따른 손상압력의 영향	42
2. 결함 길이에 따른 손상압력의 영향	44
3. 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 영향	45
제 5 장 결론	47
참고문헌	49

표 목 차

표 2.1.1	실 배관 손상시험용 배관 재료의 인장 물성치 (CMTR 자료)	3
표 2.1.2	실 배관 손상시험용 배관 재료의 화학조성 (CMTR 자료)	3
표 2.1.3	예비해석에서 고려된 감육 결함의 형상	6
표 2.1.4	각 응력기준에 해당하는 감육 결함 최심부의 평균 등가응력	8
표 2.1.5	굽힘하중을 받는 감육 엘보우의 붕괴하중	11
표 2.2.1	실 배관 손상시험에 사용된 감육 시편	16

그림 목차

그림 2.1.1	엘보우에서 채취한 인장시편	4
그림 2.1.2	엘보우에서 채취한 인장시편의 변위-하중 곡선	
	(a) 외호면(Extrados) 부위	5
	(b) 내호면(Intrados) 부위	5
	(c) 측면(Crown) 부위	5
그림 2.1.3	유한요소해석에서 고려된 내부 감육 결함 정의	7
그림 2.1.4	내압에 따른 감육 결함부의 평균 등가응력 비교	9
그림 2.1.5	굽힘하중이 작용할 때 감육 엘보우의 하중-변위 곡선	
	(a) closing loading시 외호면 결함의 굽힘하중-변위 곡선	10
	(b) closing loading시 내호면 결함의 굽힘하중-변위 곡선	10
	(c) opening loading시 외호면 결함의 굽힘하중-변위 곡선	10
	(d) opening loading시 내호면 결함의 굽힘하중-변위 곡선	10
그림 2.2.1	실 배관 손상시편의 외부 형상	13
그림 2.2.2	Elbow의 외부 가공	13
그림 2.2.3	내부 감육 결함의 형상	14
그림 2.2.4	가공이 완료된 감육 손상시편	
	(a) 가공이 완료된 손상시편의 외부 형상	15
	(b) 외호면 결함(Extrados defect)	15
	(c) 내호면 결함(Intrados defect)	15
그림 2.2.5	실 배관 손상시험 장치의 전체 구성도	17
그림 2.2.6	감육 시편에 굽힘하중을 작용시키는 경우	18
그림 2.3.1	감육 엘보우의 두께 측정	19
그림 2.3.2	두께측정 결과 가공 완료된 시편의 결함 형상	20
그림 2.3.3	Strain gauge 부착	21

그림 2.3.4	실 배관 손상시험 장면	22
그림 3.1.1	결함 깊이에 따른 감육 엘보우의 손상압력	24
그림 3.1.2	결함 깊이에 따른 결함부 중심에서의 원주방향 변형률	25
그림 3.1.3	등가 결함 길이에 따른 감육 엘보우의 손상압력	26
그림 3.1.4	실제 결함 길이에 따른 감육 엘보우의 손상압력	27
그림 3.1.5	원주방향 결함 폭에 따른 감육 엘보우의 손상압력	28
그림 3.2.1	감육 엘보우 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향	30
그림 3.2.2	굽힘하중에 따른 결함부 중심에서의 원주방향 변형률 (a) 외호면 결함(Extrados defect)	31
	(b) 내호면 결함(Intrados defect)	31
그림 3.3.1	결함 깊이에 따른 시편의 손상부 (a) 외호면 결함(Extrados defect)	34
	(b) 내호면 결함(Intrados defect)	34
그림 3.3.2	결함 길이에 따른 시편의 손상부 (a) 외호면 결함(Extrados defect)	35
	(b) 내호면 결함(Intrados defect)	35
그림 3.3.3	원주방향 결함 폭에 따른 시편의 손상부 (a) Extrados defect : $\Theta/\pi = 0.125 \sim \Theta/\pi = 0.5$	36
	(b) Intrados defect : $\Theta/\pi = 0.125 \sim \Theta/\pi = 0.5$	36
	(c) $L/D_o = 1.0, \Theta/\pi = 1.0, t_p = 2.0 \text{ mm}$	36
	(d) $L/D_o = 1.5, \Theta/\pi = 1.0, t_p = 2.0 \text{ mm}$	36
그림 3.3.4	굽힘하중에 따른 시편의 손상부 (a) 외호면 결함(Extrados defect)	37
	(b) 내호면 결함(Intrados defect)	37
그림 4.2.1	결함 깊이에 따른 손상압력 모델 비교	43
그림 4.2.2	실제 결함 길이에 따른 손상압력 모델 비교	44

그림 4.2.3 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력 모델 비교 46

ABSTRACT

Evaluation of Failure Pressure of Wall Thinned-elbow by Real Scale Pipe Test

Na Yeon Soo

Adviser : Prof. Kim, Jin Weon

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Wall thinning defect due to flow-accelerated corrosion (FAC) is one of the degradation mechanisms of carbon steel piping component in nuclear power plant (NPP), and it results in reducing load carrying capacity and fatigue resistance of the piping components. Especially, the wall-thinning defect leads to abrupt rupture of piping components under normal operating pressure. Thus, it is important to accurately evaluate the failure pressure of piping components containing an internal wall-thinning defect for ensuring integrity of piping system of NPP. Unfortunately, the failure pressure data on the internally wall-thinned pipe are very rear. For wall-thinned elbow, especially, there are no published data up to this time. Therefore, this study performed failure tests using real-scale elbows containing simulated wall-thinning defect under internal pressure and combined internal pressure and bending moment. Based on the results of experiments, the effect of thinning depth, thinning length, circumferential thinning angle and bending moment

on the failure pressure was investigated. Also, these results were compared with failure pressure predicted by existing models.

The results of failure tests showed that the failure pressure decreased with increasing depth and it was decreased and saturated with increasing axial thinning length. These tendencies are similar as those observed from the straight pipe with local wall-thinning. Also, the failure pressure decreased with increasing circumferential thinning angle. This is different from that observed in the results of studies on the wall-thinned straight pipe. The effect of bending moment on the failure pressure was negligible. The comparison of failure pressures obtained from experiment and predicted by models showed that the existing models conservatively estimated the failure pressure of wall-thinned elbow, and reasonably predicted the effect of wall thinning length and depth. However, the models could not appropriately consider the effect of circumferential thinning angle and thinning location on the failure pressure.

제 1 장 서 론

원자력발전소의 탄소강 배관에서 발생하는 두께감소(감육, 減肉) 현상은 대부분 정상 운전 중 배관 내부를 흐르는 유체의 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의해 발생되며, 일반적으로 난류 유동이 크게 발생하는 밸브 후단, 배관의 연결부, 엘보우(Elbow)등에서 흔히 발생하는 것으로 보고되어 있다.[1] 배관 계통에서 감육 결함은 하중지지능력, 변형수용능력, 피로저항 등 배관의 건전성을 저하시키는 원인이 되며, 손상에 대한 예비 징후가 없이 순간적인 배관 파단으로 진행되는 특징을 가지므로 원전의 안전성과 운전성에 직접적인 영향을 미친다.[2~3] 따라서, 최근 원자력발전소 배관 계통에서 감육 결함은 탄소강 배관의 건전성을 위협하는 가장 대표적인 손상기구로 대두되고 있으며, 감육 결함에 대한 관리가 원전의 안정성과 건전성 측면에서 중요한 항목으로 고려되고 있다.

감육 결함에 대한 건전성 평가 연구는 1980년대부터 Oil과 Gas 배관을 대상으로 활발히 진행되었으며[4~6], 원전 배관의 감육 결함에 대한 건전성 평가 연구는 1987년 Surry 원전에서 감육에 의한 배관 파단사고 이후부터 ASME(American Society of Mechanical Engineers)와 EPRI(Electric Power Research Institute)를 중심으로 수행되었다.[7~8] 이들 연구를 바탕으로 다양한 형태의 실험적·해석적 연구들이 수행되었으며, 감육 배관에 대한 건전성 평가 모델들이 제시되었다.[7, 9~11] 일부 모델식들은 ANSI/ASME[12] 기준과 ASME Code Case[13~14]의 기준으로 채택되었다. 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 연구가 일부 진행되고 있으나,[15~17] 유한 요소해석을 기초로 제시된 Li[16]와 Kim[17]의 평가 모델을 제외하면 대부분이 굽힘 하중 조건에서의 붕괴하중을 평가하기 위한 연구로서 감육 엘보우의 손상압력 평가를 위한 연구는 전무한 실정이다. 또한, 감육 엘보우에 대한 손상압력 시험 데이터의 부재로 인해 제시된 모델들은 아직까지 신뢰성을 검증하지 못하고 있다. 그러나, 실제 발전

소현장에서 감육 결합의 손상모드가 내압에 의한 파열인 것을 고려할 때 , 감육 엘보우에 대한 정확한 손상압력 평가는 감육 배관의 건전성평가 측면에서 매우 중요하다.

따라서, 본 논문에서는 엘보우 내부에 감육 결합을 가공한 실 배관 시편을 이용한 파열시험을 수행하여, 감육 결합의 기하학적 형상과 하중 형태에 따른 손상압력을 평가하고자 한다. 이를 위해서, 파열시험에서는 외호면과 내호면에 다양한 결합 형상을 갖는 감육 엘보우를 고려하였으며, 작용하중으로는 단순 내압이 작용되는 경우와 일정한 굽힘하중 조건에서 내압이 작용되는 경우를 각각 고려하였다. 손상 시험 결과로부터 감육 엘보우의 손상압력에 미치는 감육 결합의 깊이, 길이, 원주방향 폭, 그리고 굽힘하중의 영향을 살펴보았다. 또한, 실험 결과를 기존의 손상압력 평가 모델과 비교하였다.

제 2 장 실 배관 손상 시험

제 1 절 유한요소해석을 통한 예비해석

1. 재료

실 배관 파열 시험을 위한 시편용 배관의 크기와 재료 종류는 시험 수행 시 시편의 취급과 구입의 용이성, 그리고 원자력발전소 탄소강 배관의 사양 등을 고려하여 결정하였다. 따라서 본 논문에서는 엘보우와 직관 모두 외경과 두께가 $D_o = 114.3\text{mm}$, $t_{nom} = 8.56\text{mm}$ 인 4 inch Sch.80 seamless pipe를 고려했으며, 결함이 가공될 엘보우는 곡률반경이 평균반경의 3배인 90°-엘보우를 사용하였다.

엘보우와 직관 재료는 모두 탄소강으로 각각 ASTM A234 WPB-S와 ASTM A106 Gr.B로서 현재 국내 원자력발전소 2차측 배관계통에서 널리 사용되며, 배관 구입 시 첨부된 CMTR상의 인장 물성치와 화학조성은 표 2.1.1 및 표 2.1.2와 같다.

표 2.1.1 실 배관 손상시험용 배관 재료의 인장 물성치 (CMTR 자료)

Materials		Yield stress, σ_y [MPa]	Tensile stress, σ_u [MPa]	총 연신률 [%]
Elbow	A234 WPB-S	302	518.5	39
Straight pipe	A106 Gr.B	306	483	36

표 2.1.2 실 배관 손상시험용 배관 재료의 화학조성 (CMTR 자료)

Materials		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	V
Elbow	A234 WPB-S	0.210	0.210	0.550	0.020	0.011	0.010	0.020	-	-	-	-
Straight pipe	A106 Gr.B	0.180	0.180	0.530	0.016	0.007	0.090	0.130	0.020	0.180	0.001	0.000

2. 배관재료의 인장시험

시편 및 시험장치의 설계를 위한 예비해석과 손상 실험 후 결과에 대한 유한요소 시뮬레이션을 위해서는 배관 재료에 대한 항복응력, 인장응력, 연신률 뿐 아니라 재료의 응력-변형률 곡선이 필요하다. 따라서 확보된 엘보우로부터 그림 2.1.1과 같이 외호면과 내호면 부위에서 원주방향으로, 측면에서는 길이방향으로 각각 시편을 채취하여 인장시험을 수행하였으며, 인장시험에 사용된 시편에는 외호면과 내호면에서 채취한 경우 직경 2mm이고 평행부 길이가 12mm이며, 측면에서 채취한 경우 직경 4mm이고 평행부 길이가 30mm인 봉상시편이 사용되었다.

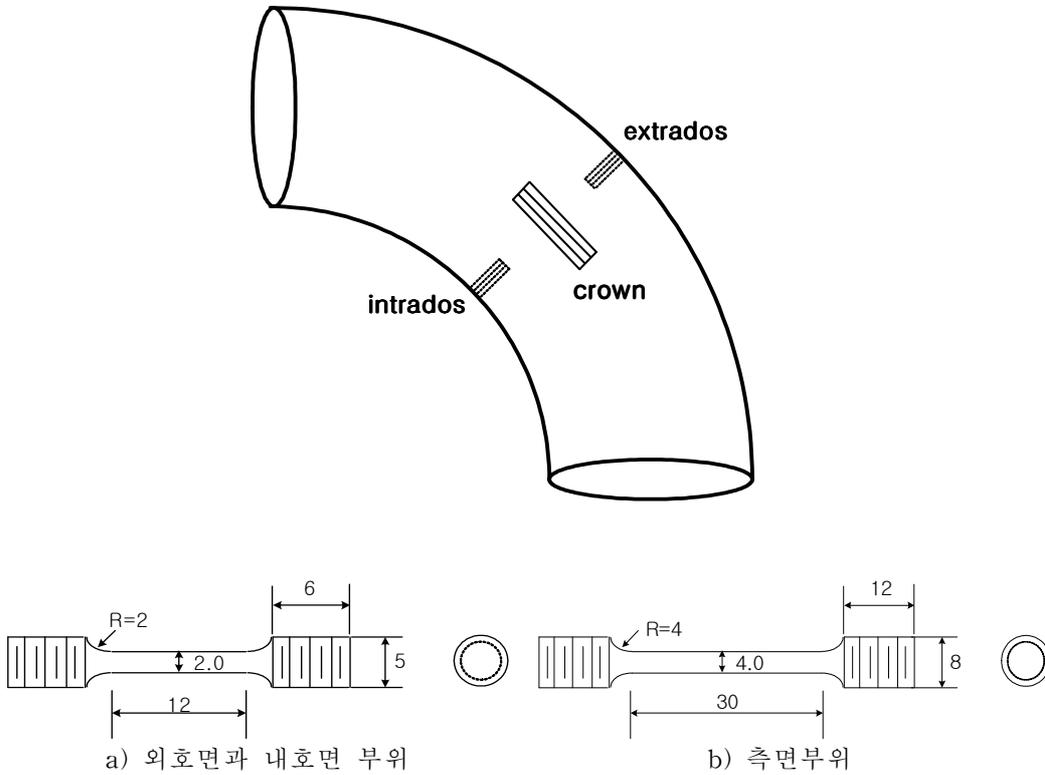
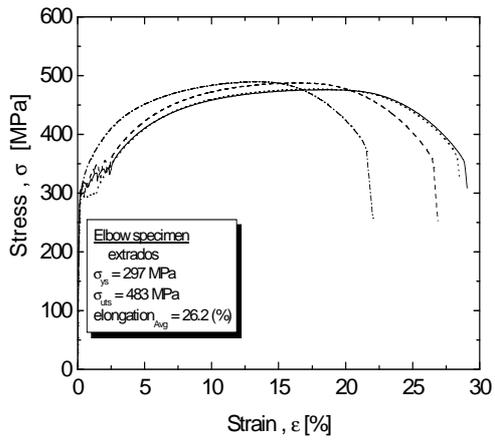
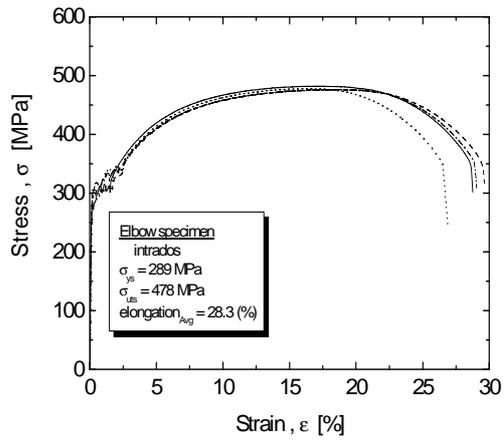


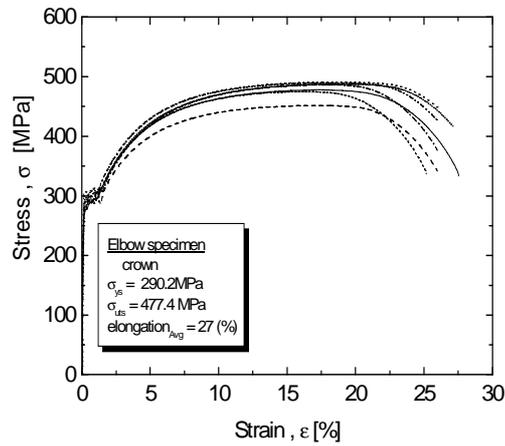
그림 2.1.1 엘보우에서 채취한 인장시편



a) 외호면(Extrados) 부위



b) 내호면(Intrados) 부위



c) 측면(Crown) 부위

그림 2.1.2 엘보우에서 채취한 인장시편의 변위-하중 곡선

인장시험 결과 그림 2.1.2와 같은 응력-변형률 곡선을 얻었다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 엘보우 외호면에서 항복강도(σ_{ys})와 인장응력(σ_{uts})가 가장 높았으며, 내호면과 측면의 인장 물성치는 거의 동일하였다. 그러나, 대부분 항복응력과 인장응력 모두

CMTR 상의 값보다 약간 낮은 값을 보였으며, 인장시험 결과의 편차가 외호면에서 크게 나타났다. 이러한 원인은 엘보우가 Hot forming에 의해 제작되었지만, 가공 시 변형에 의해 곡관의 위치별로 물성치 편차가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

3. 예비해석을 위한 유한요소해석

감육 엘보우에 대한 손상실험에서 유용한 데이터를 얻기 위해서는 적절한 수준의 하중이 작용될 때, 시편의 결함부가 손상될 수 있도록 감육 결함의 형상 및 시험 장치의 용량이 설정되어야 한다. 따라서, 손상 시편 및 시험 장치를 제작에 앞서 결함 형상과 크기에 따른 감육 엘보우의 손상 하중과 거동을 유한요소해석을 이용하여 대략적으로 파악하였고, 이를 바탕으로 결함의 형상과 시험 장치의 용량을 설계·제작하였다. 표 2.1.3은 예비해석에서 고려된 감육 결함의 형상을 정리하였으며, 해석에서 고려된 내부 감육 결함의 형상은 그림 2.1.3과 같다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS code[25]를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 해석 결과에서 보수적인 결과를 얻기 위해서 유한요소해석에는 상대적으로 높은 강도를 보인 곡관부의 변위-하중 곡선을 입력으로 사용하였다.

표 2.1.3 예비해석에서 고려된 감육 결함의 형상

Geometry	Thinning location	Thinning length, L/D_o	Thinning angle, Θ/π	Minimum thickness, t_p [mm]
$D_o = 114.3\text{mm}$ $t_{nom} = 8.56\text{mm}$ $R_b/R_m = 3.0$	Intrados, Extrados	0.25, 0.5, 1.0	0.125, 0.25, 0.5	2.0, 4.0

해석은 단순내압 조건과 내압과 굽힘의 복합하중 조건에서 수행되었다. 단순 굽힘하중 조건의 해석에는 굽힘 하중으로 엘보우를 열어주는 경우와 닫아주는 경우를 각각 고려하였으며, 굽힘 하중은 시험 장치에서 작용시킬 수 있는 것과 동일한 방법으로 직관의 끝단에 일정량의 선형 변위를 가함으로 작용시켰다.

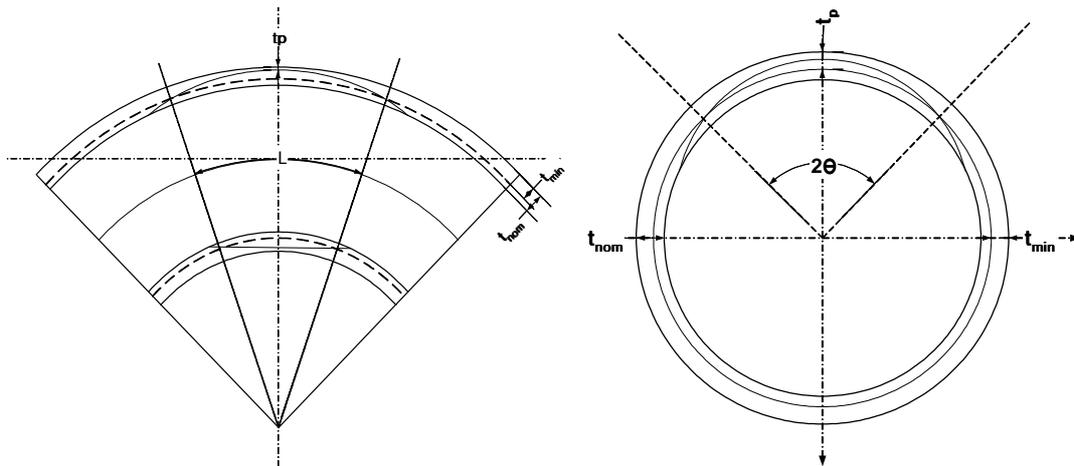


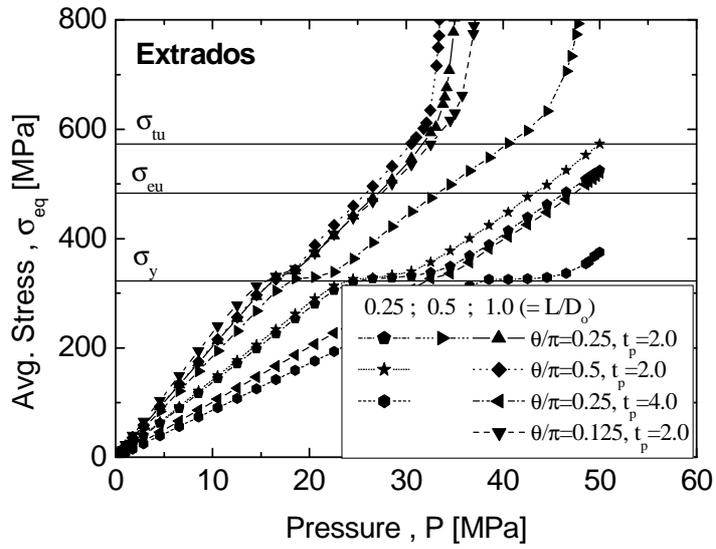
그림 2.1.3 유한요소해석에서 고려된 내부 감육 결함 정의

4. 예비해석 결과

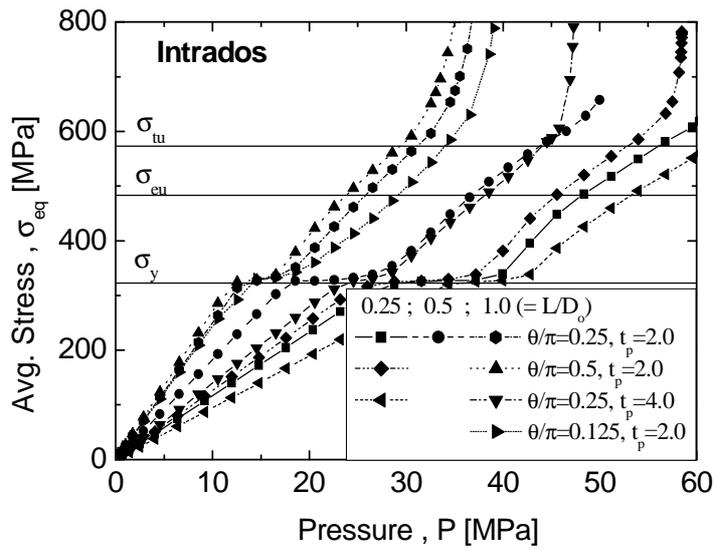
그림 2.1.4는 각 결함조건에서 단순 내압에 의한 손상압력을 파악하기 위해서 해석결과로부터 주어진 감육 결함부의 가장 얇은 부분의 평균 등가응력을 작용 내압에 따라 나타낸 것이다. 각 결함 조건에서 결함부의 손상압력을 평가하기 위해서는 손상에 대한 적절한 기준이 적용되어야 한다. 그러나 이에 대한 기준이 명확하지 않으므로 예비해석에서는 엘보우 재료의 항복응력, 공칭 인장응력(σ_{eu}), 진 인장응력(σ_{tu}) 등을 적용하여 각 결함조건에서 결함부가 소성 변형되거나 인장응력에 도달하는 압력의 크기를 살펴보았다. 표 2.1.4는 각 결함조건에서 각각의 응력기준에 해당되는 압력을 정리한 것이다. 표 2.1.4에서 알 수 있는 것과 같이 해석에서 고려된 결함 조건은 40 MPa 이하의 내압에서 결함부의 소성변형이 예상되며, 결함 길이가 $L/D_o = 0.25$ 인 경우와 결함부 두께가 4mm인 경우를 제외하면 대부분의 결함은 40 MPa 이하에서 결함부의 평균 등가응력이 재료의 공칭인장강도를 초과하는 것으로 파악되었다. 또한, 전체적으로 결함의 길이와 깊이에 따른 변화에 비해 원주방향 폭에 따른 감육부의 응력 변화가 작았으며, 내호면 결함에 비해 외호면 결함에서 높은 응력 값을 보였다.

표 2.1.4 각 응력기준에 해당하는 감육 결함 최심부의 평균 등가응력

Location	Thinning length, L/D_0	Thinning angle, Θ/π	Minimum thickness, t_p [mm]	Pressure [MPa]		
				σ_y -criteria	σ_{eu} -criteria	σ_{tu} -criteria
Extrados	0.25	0.25	2	24.52	46.52	-
	0.5	0.25	2	18.14	33.25	40.50
	1.0	0.25	2	16.19	27.11	31.69
	1.0	0.125	2	15.57	27.48	32.54
	1.0	0.5	2	16.34	25.84	30.51
	0.25	0.5	2	24.0	43.25	50.00
	0.25	0.25	4	38.09	-	-
	1.0	0.25	4	32.09	47.41	-
Intrados	0.25	0.25	2	34.49	48.96	-
	0.5	0.25	2	21.43	37.03	43.69
	1.0	0.25	2	15.33	25.87	31.24
	1.0	0.125	2	15.44	29.03	33.99
	1.0	0.5	2	16.59	24.13	29.67
	0.25	0.5	2	31.52	44.02	-
	0.25	0.25	4	36.89	-	-
	1.0	0.25	4	24.41	38.25	44.08

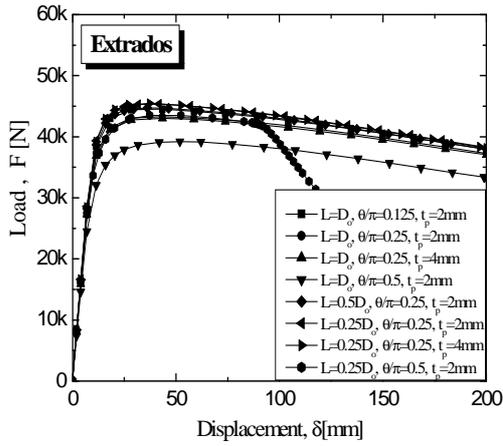


a) 외호면 결함(Extrados defect)

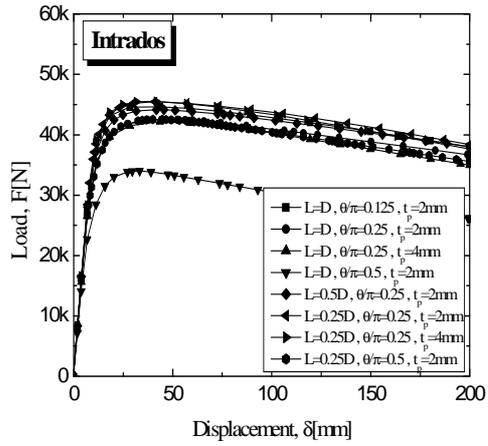


b) 내호면 결함(Intrados defect)

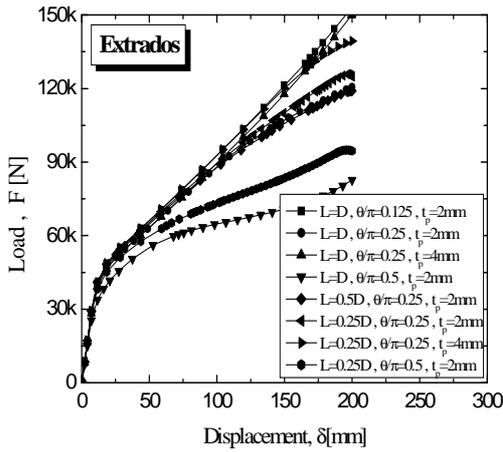
그림 2.1.4 내압에 따른 감육 결함부의 평균 등가응력 비교



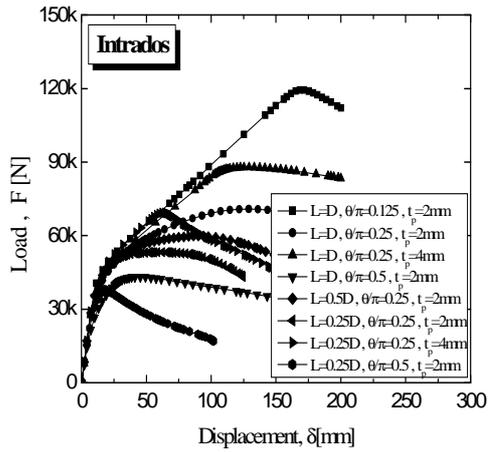
a) closing loading시 외호면 결함의
굽힘하중-변위 곡선



b) closing loading시 내호면 결함의
굽힘하중-변위 곡선



c) opening loading시 외호면 결함의
굽힘하중-변위 곡선



d) opening loading시 내호면 결함의
굽힘하중-변위 곡선

그림 2.1.5 굽힘하중이 작용할 때 감육 엘보우의 하중-변위 곡선

그림 2.1.5는 감육 엘보우의 변형에 필요한 굽힘하중의 크기와 변위의 크기 등을 파악하기 위해서 엘보우 끝단의 변위에 따른 하중-변위 곡선을 살펴보았다. 유한요소해석은 내압이 10 MPa인 조건에서 열림모드(opening mode)와 닫힘모드(closing mode)의 변위가 작용되는 경우를 고려하였다. 그림 2.1.5에서 알 수 있는 것과 같이 변위에 따른 하중의 크기는 작용하중의 방향과 결함의 위치 및 형상에 따라 차이가 있으나, 닫힘모드 굽힘하중을 받는 경우 열림모드보다 더 낮은 붕괴하중을 가지며, 동일한 굽힘하중을 받는 경우 내호면 결함보다 외호면 결함에서 더 높은 붕괴하중이 나타나는 것으로 예측되었다.

표 2.1.5 굽힘하중을 받는 감육 엘보우의 붕괴하중

결합조건	opening load		closing load	
	intrados	extrados	intrados	extrados
$L/D_o=0.25, \theta/\pi=0.250, t_p=2$	52.27 kN	53.72 kN	45.42 kN	45.73 kN
$L/D_o=0.25, \theta/\pi=0.250, t_p=4$	48.67 kN	52.66 kN	45.59 kN	45.96 kN
$L/D_o=0.25, \theta/\pi=0.500, t_p=2$	30.98 kN	39.89 kN	34.04 kN	34.88 kN
$L/D_o=0.50, \theta/\pi=0.250, t_p=2$	48.27 kN	51.78 kN	42.94 kN	44.92 kN
$L/D_o=1.00, \theta/\pi=0.125, t_p=2$	45.51 kN	46.47 kN	38.13 kN	38.06 kN
$L/D_o=1.00, \theta/\pi=0.250, t_p=2$	47.92 kN	49.99 kN	40.30 kN	43.04 kN
$L/D_o=1.00, \theta/\pi=0.250, t_p=4$	46.26 kN	50.73 kN	39.48 kN	42.15 kN
$L/D_o=1.00, \theta/\pi=0.500, t_p=2$	33.18 kN	34.58 kN	27.35 kN	31.25 kN

한편, 표 2.1.5에서 보는 것과 같이 닫힘모드 조건에서는 결함 형상과 관계없이 최대 46kN, 열림모드 조건에서는 외호면 결함의 경우에는 최대 52kN, 내호면 결함의 경우에는 최대 54kN 범위에서 붕괴하중이 예측되었다. 따라서, 감육 엘보우에 대한 손상시험을 위해서는 결함의 길이와 폭에 따라 차이가 있으나, 최심부 두께가 2mm인 감육 엘보우 시편을 가정하는 경우에 최대 40 MPa 정도의 가압 장치와 최대 50kN 정도의 굽힘하중을 가할 수 있는 시험장치가 설계·제작되어야 하는 것을 알 수 있었다.

제 2 절 시편 및 시험장치

1. 실 배관 손상 시편

실 배관 손상시편의 외부형상은 그림 2.2.1에서 나타낸 것과 같이 엘보우 직경의 5배 되는 길이의 직관을 곡관 끝 양단에 맞대기 용접을 하여 연결하였으며, 직관부 끝단에는 시험 장치와 시편을 고정시킬 수 있는 플랜지를 연결하였다.

엘보우 내부에 결함 가공에 앞서 예비가공을 통하여 엘보우 내부에 결함을 가공하는 과정에서 결함부 형상과 두께가 일정하게 제어되지 못하는 문제점 등을 파악하였다. 따라서, 손상 시편의 결함 가공 시 공차를 줄이기 위하여 결함 가공에 앞서 그림 2.2.2와 같이 엘보우 외면 전체를 밀링 가공하여 엘보우가 일정한 곡률반경(152.4mm)과 외경(113.4mm), 그리고 표면 거칠기를 유지하였다. 엘보우 내부에 결함가공은 5축 NC 기계를 이용한 3차원 가공을 하였다.

결함 형상은 그림 2.2.3과 같이 곡관부에서 원주방향과 길이방향으로 각각 원형이 되도록 가공하였으며, 그림 2.2.4는 결함 가공이 완료된 시편을 보여주고 있다. 결함의 크기는 배관 두께가 설계코드의 최소설계요구두께(t_{min})이하인 부분의 형상이며, 축방향 결함 길이 L 은 곡관 측면에서의 등가길이를 적용하였다. 식(2.1.1)은 ASME Sec.III Construction Codes에서 최소설계요구두께(t_{min})의 압력평가식을 나타내었다. 여기서, P_D , D_o 는 각각 배관의 설계압력과 공칭 직경을 나타내며, S 와 P_y 는 각각 배관의 허용응력과 다축응력상태를 고려하기 위한 보정계수이다.

$$t_{min} = \frac{P_D D_o}{2(S + P_y)} \quad (\text{식 2.1.1})$$

감육 시편은 결함의 형상과 위치, 하중형태에 따른 손상압력을 살펴보기 위해 표 2.2.3과 같이 결함 길이, 결함깊이, 원주방향 결함 폭을 달리하여 가공하였다.

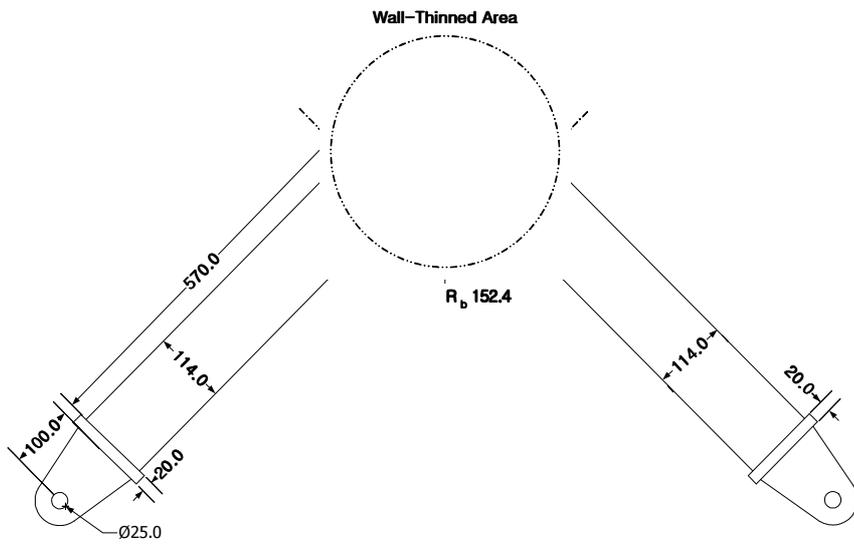


그림 2.2.1 실 배관 손상시편의 외부 형상



그림 2.2.2 Elbow의 외부 가공

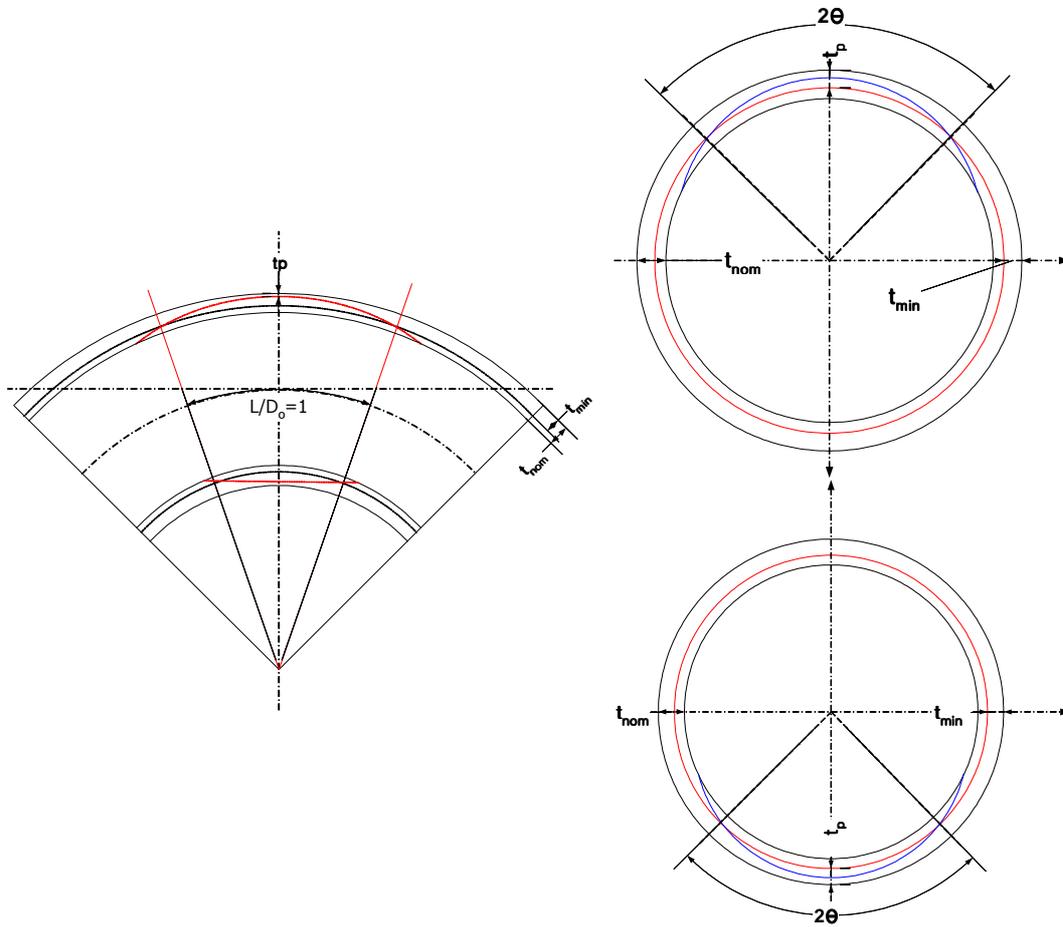
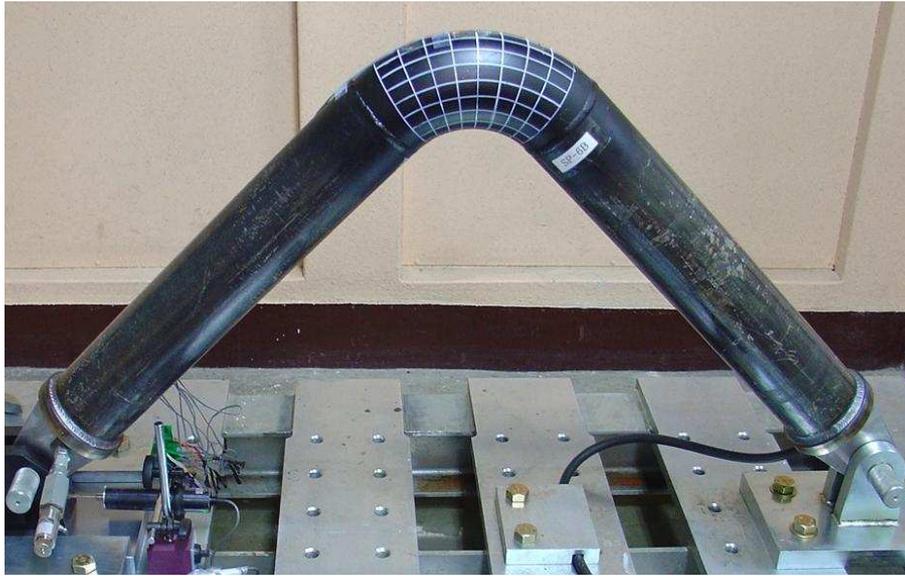
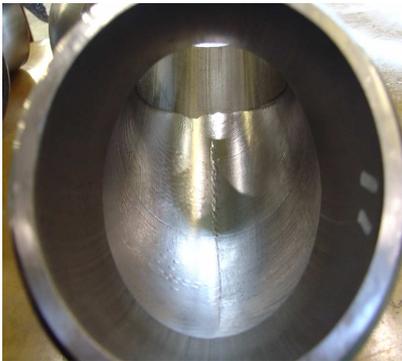


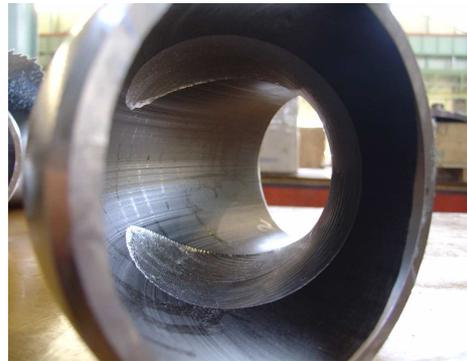
그림 2.2.3 내부 감육 결함의 형상



a) 가공이 완료된 손상 시편의 외부 형상



b) 외호면 결함
(Extrados defect)



c) 내호면 결함
(Intrados defect)

그림 2.2.4 가공이 완료된 감육 손상 시편

표 2.2.1 실 배관 손상시험에 사용된 감육 시편

<i>ID. No.</i>	<i>Thinning length, L/D_o</i>	<i>Thinning angle, Θ/π</i>	<i>Designed minimum thickness, t_p [mm]</i>	<i>Loading type</i>	<i>Thinning location</i>
<i>SP-1</i>	<i>1.5</i>	<i>0.25</i>	<i>2.0</i>	<i>Press.</i>	<i>Extrados</i>
<i>SP-2</i>	<i>0.25</i>				
<i>SP-3</i>	<i>0.5</i>				
<i>SP-4</i>	<i>1.0</i>				
<i>SP-5A</i>	<i>1.0</i>	<i>0.125</i>		<i>Press.+ Bending</i>	
<i>SP-6A</i>		<i>0.5</i>			
<i>SP-5B</i>		<i>0.125</i>			
<i>SP-6B</i>		<i>0.5</i>			
<i>SP-7</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>		<i>Press.</i>	
<i>SP-8</i>	<i>1.5</i>				
<i>SP-9</i>	<i>1.0</i>	<i>0.25</i>	<i>2.5</i>		
<i>SP-10</i>			<i>1.5</i>		
<i>SP-12</i>	<i>1.5</i>	<i>0.25</i>	<i>2.0</i>	<i>Press.</i>	<i>Intrados</i>
<i>SP-13</i>	<i>0.25</i>				
<i>SP-14</i>	<i>0.5</i>				
<i>SP-15</i>	<i>1.0</i>				
<i>SP-16A</i>	<i>1.0</i>	<i>0.125</i>		<i>Press.+ Bending</i>	
<i>SP-17A</i>		<i>0.5</i>			
<i>SP-16B</i>	<i>1.0</i>	<i>0.125</i>			
<i>SP-17B</i>		<i>0.5</i>			
<i>SP-18</i>	<i>1.0</i>	<i>0.25</i>		<i>2.5</i>	
<i>SP-19</i>				<i>1.5</i>	

2. 손상 시험장치

과열시험 장치는 예비해석 결과를 바탕으로 손상시험을 위한 가압장치의 용량과 시편을 설치할 지지대 및 연결부위의 형식과 크기를 결정하였다. 그림 2.2.5는 실 배관 손상 시험장치의 전체적인 구성도를 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 가압에 따른 곡관의 전체적인 변형을 수용할 수 있도록 시편의 한쪽은 고정하고 다른 한쪽은 미끄러질 수 있도록 설계하였으며, 가압장치의 최대 용량은 40 MPa로 설계하였다. 그리고, 내압에 따른 시편 손상 시 발생할 수 있는 안전사고를 예방하면서 손상 거동을 육안으로 확인할 수 있도록 하기 위하여 투명한 2중 방탄 보호막을 설치하였다.

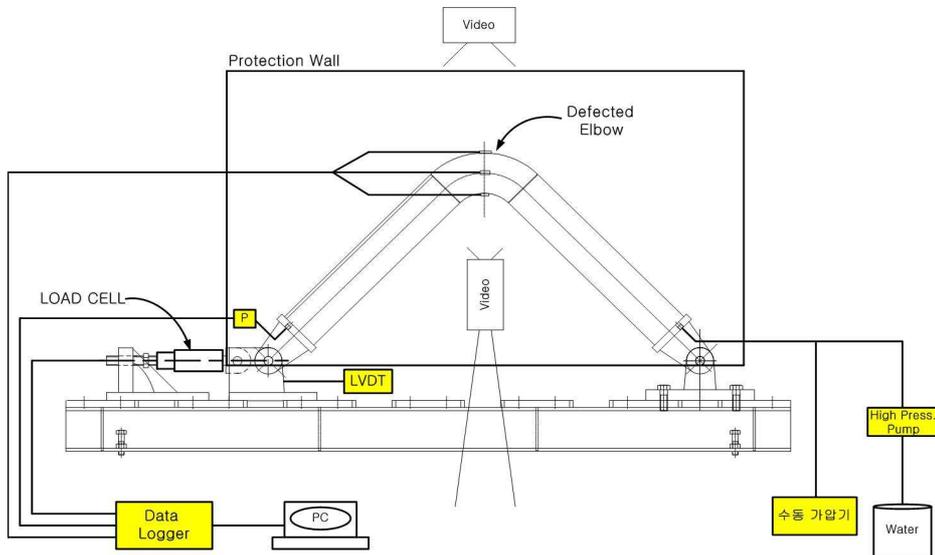


그림 2.2.5 실 배관 손상시험 장치의 전체 구성도

한편, 가압은 수압에 의한 가압 방법을 채택하여 수동 가압장치와 고압 펌프를 작동시켜 원하는 압력까지 압력을 높일 수 있도록 하였다. 내압에 따른 손상시편의 전체적인 변형을 측정하기 위하여 미끄럼이 가능하도록 설계된 시편의 한쪽 끝단에 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 설치하여 변위를 측정하였으며,

손상압력을 측정하기 위하여 시편에 압력게이지(Pressure Transducer)를 설치하였다. 그리고 가압에 따른 결합부에서의 변형률을 측정하기 위하여 시편에 부착된 소성 게이지(Plastic strain gauge)를 Data Logger와 연결하였다. 또한, 가압에 따른 결합부의 변형 및 파열 과정을 관찰할 수 있도록 2개의 Video 카메라를 설치하였다.

단순 내압만 작용되는 경우에는 시편의 끝단이 자유로이 미끌어질 수 있도록 한 상태에서 가압에 따른 변위를 LVDT로 측정하였으며, 감육 시편에 굽힘 하중을 작용시키는 경우에는 그림 2.2.6에서와 같이 미끌림이 가능한 시편의 끝단에 Load Cell과 LVDT를 설치하고, 끝부분의 변위를 조정할 수 있도록 설계하였다. 변위는 로드 셀에 연결된 나사를 회전시켜 수평방향으로 시편을 밀어주거나 당겨줌으로써 열림모드(Opening mode)와 닫힘모드(Closing mode)의 굽힘하중이 작용될 수 있도록 하였다. 시편이 가압되는 동안 모든 데이터는 Data Logger와 PC(Personal Computer)로 구성된 데이터 취득 장치를 통해 1초에 한 개씩 취득되었다.

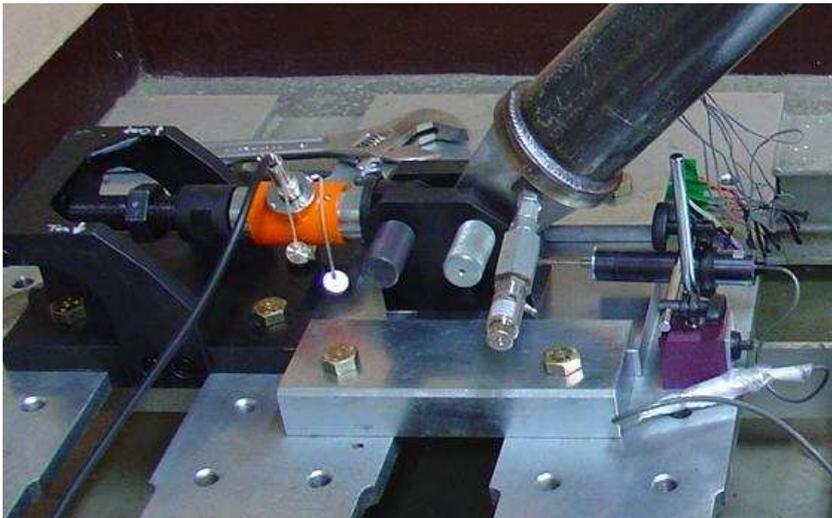


그림 2.2.6 감육 시편에 굽힘하중을 작용시키는 경우

제 3 절 시험절차 및 방법

손상시험에 앞서 가공이 완료된 시편은 육안으로 손상범위를 쉽게 확인할 수 있도록 검은색 페인트로 외면 전체를 도색하였다. 도색이 완료된 시편에 대하여 그림 2.3.1과 같이 엘보우 외면에 원주방향과 길이방향으로 일정한 간격의 격자를 그리고 결함부를 중심으로 각 격자점에서 초음파 두께 측정 장비를 이용하여 두께를 측정하였다. 이를 통해 엘보우 내부의 결함에 대한 형상과 결함 최심부 두께를 확인하였다. 그림 2.3.2에서 보는 것과 같이 모든 감육 손상시편의 두께 측정결과 설계된 결함 형상과 가공 결함 형상이 거의 일치하는 것을 알 수가 있었다.

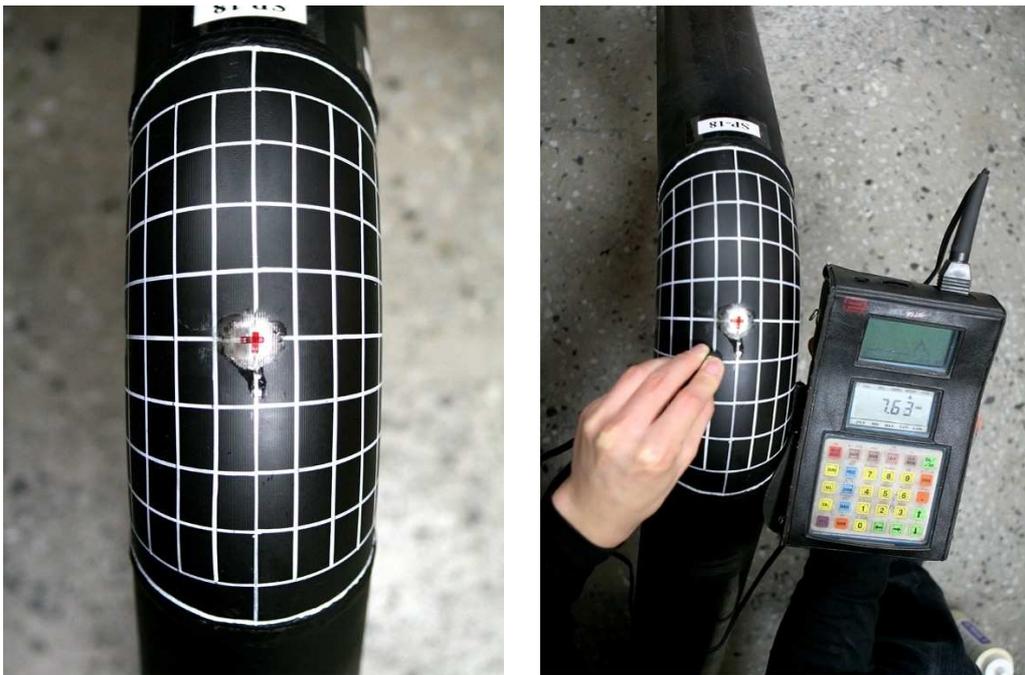


그림 2.3.1 감육 엘보우의 두께 측정

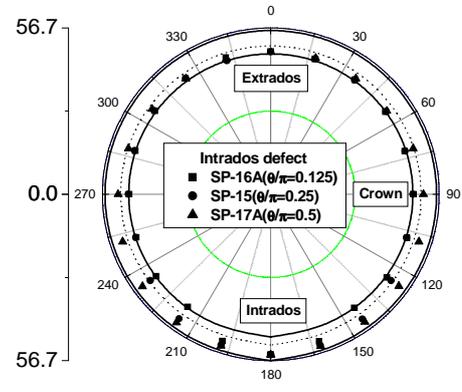
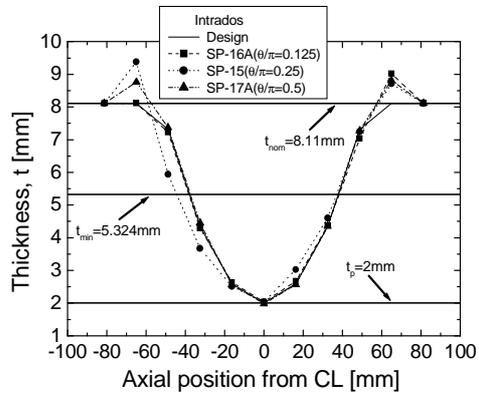
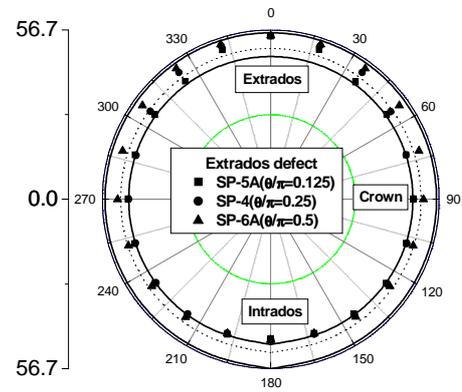
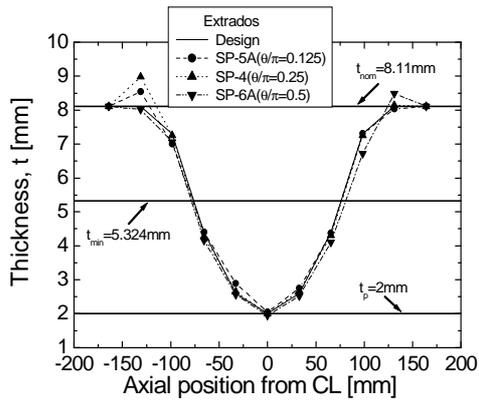


그림 2.3.2 두께측정 결과 가공 완료된 시편의 결함 형상

두께 측정이 완료된 시편은 곡관의 외호면, 내호면, 측면 및 최소설계요구두께(t_{min}) 부위에 변형률 게이지를 부착하기 위해 연마기를 이용하여 표면을 연마하였다. 또한, 결함부 중심에서는 연마 후 두께를 다시 측정하여 연마에 의한 두께 감소 정도를 확인하였다. 두께 측정이 완료된 시편은 그림 2.3.3에서와 같이 곡관부의 외호면, 내호면, 측면의 중심에 각각 원주방향과 길이방향으로 최대 15% 까지 신뢰성 있는 데이터를 취득할 수 있는 소성게이지를 부착하였다. 게이지 부착이 완료된 시편에는 물을 가득

채우고 시험 장치와 체결하였으며, 시편에는 압력게이지, LVDT등을 연결한 후 손상이 발생할 때 까지 계속 가압하였다. 초기 5 MPa까지는 고압 펌프와 수동 가압 장치를 모두 작동하여 가압하고, 5 MPa이후에는 고압 펌프만으로 1분 동안 1 MPa씩 내압이 증가하도록 유량을 조절하여 일정한 가압 속도를 유지하였다. 가압하는 동안 내압과 결합부의 변형률을 측정하였으며, 측면과 정면에 Video camera 를 설치하여 가압에 따른 결합부의 변형 및 파열 과정을 촬영하였다.

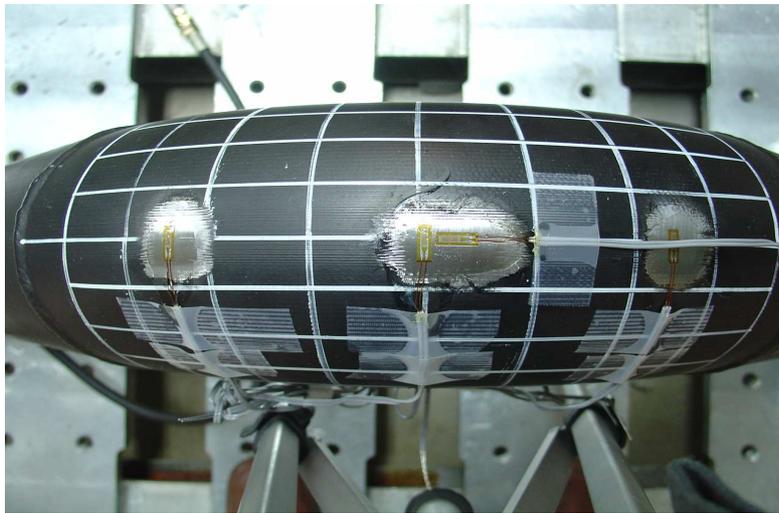


그림 2.3.3 Strain gauge 부착

일정한 굽힘하중을 작용시킨 후 손상시험을 수행하는 경우, 굽힘하중의 크기는 ASME NC-3653.2에 근거한 설계에서 내압 및 자중과 같은 지속하중과 열팽창 하중이 동시에 작용될 때의 최대 허용 굽힘모멘트 크기를 기초로 계산되었다.[18]

$$\frac{PD_O}{4t_{nom}} + 0.75i\left(\frac{M_A}{Z}\right) + i\left(\frac{M_C}{Z}\right) \leq (S_h + S_A) \quad (\text{식 2.3.1})$$

식 (2.3.1)은 설계코드에 제시된 허용 굽힘모멘트에 대한 식을 나타낸 것으로, 여기에서 M_A 와 M_C 는 각각 자중 하중과 열팽창 하중이며, Z 는 Section modulus of pipe, S_h 는 고려된 하중에서 온도에 대한 재료의 허용 응력이며, S_A 는 팽창 응력에 대한 허용 응력의 범위이다. 최대 허용 굽힘모멘트 계산에서 내압의 크기는 10 MPa로 가정하였으며, 시험 장치에서 굽힘모멘트 작용을 위한 변위량은 결함이 없는 시편에서 최대 허용 굽힘모멘트에 해당하는 변위로부터 결정하였다. 굽힘모멘트에 해당하는 변위는 외호면 결함을 갖는 시편의 경우 단힘모드 방향으로 8.52mm, 내호면 결함을 갖는 시편의 경우 열림모드 방향으로 8.29mm로 각각 결정되었다. 그림 2.3.4는 파열시험 장면을 촬영한 사진이다.



그림 2.3.4 실 배관 손상시험 장면

제 3 장 손상시험 결과 및 토의

제 1 절 결함 형상에 따른 감육 엘보우의 손상압력

1. 결함 깊이에 따른 손상압력의 영향

그림 3.1.1은 일정한 길이($L/D_o = 1.0$)와 원주방향 폭($\Theta/\pi = 0.25$)을 갖는 외호면 결함과 내호면 결함에서 결함 깊이에 따른 손상압력의 차이를 나타내고 있다. 그림에서 손상압력(P_o)은 식 (3.1.1)로 정의된 결함이 없는 곡관의 임계 내압으로 무차원화하여 나타내었다.

$$P_o = \sigma_u \frac{t_{nom}}{R_o} \quad (\text{식 3.1.1})$$

그림 3.1.1에서 알 수 있는 것과 같이 감육 결함 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.706$ 에서 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.833$ 로 증가함에 따라 손상압력은 외호면 결함을 갖는 경우 약 35.5%, 내호면 결함을 갖는 경우 약 19.6% 정도 감소하였으며, 손상압력의 감소 정도는 내호면 결함보다 외호면 결함에서 더 높았다. 결함 깊이에 따른 손상압력의 차이는 외호면, 내호면 결함 모두 결함 깊이가 증가함에 따라 손상압력은 감소하였다. 한편, 결함 위치에 따라 살펴보면, 결함 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.706$ 인 경우에는 외호면과 내호면의 손상압력 차이가 거의 없지만, 그 이외의 경우에는 외호면 결함에서 약 11% 정도로서 외호면 결함을 갖는 곡관이 내호면 결함보다 더 낮은 손상압력을 보였다. 일반적으로 결함이 없는 건전 엘보우에서 내압에 의한 원주방향 응력은 외호면에 비해 내호면에서 높은 것으로 알려져 있다.[17] 따라서, 응력의 크기를 고려하면 외호면에 비해 내호면에서 낮은 손상압력을 보일 것으로 예상되는데, 이는 그림 3.1.1의 결과와 상반되는 것이다. 결함 위치에 따른 이러한 거동은 그림 3.1.1에서 결함 깊이를 실제

결함길이가 아닌 엘보우 측면에서의 정의된 등가 길이를 적용하여 손상압력을 비교하였기 때문이다. 즉, 엘보우에서 실제 결함 길이는 외호면에 비해 내호면에서 2배 정도 짧기 때문에 내호면 결함에서 높은 손상압력을 보인 것으로 판단된다.

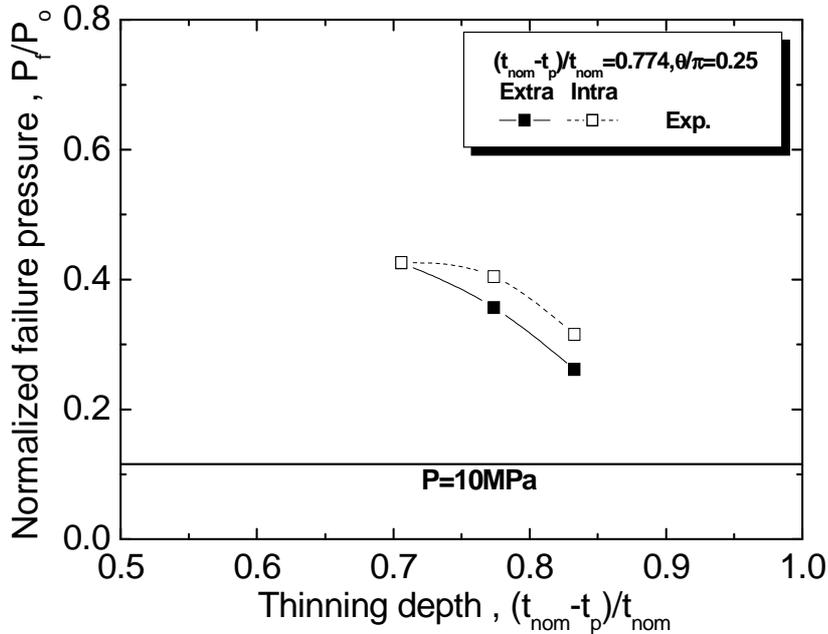


그림 3.1.1 결함 깊이에 따른 감육 엘보우의 손상압력

그림 3.1.2는 결함부 중심에서 원주방향 변형률을 나타내었다. 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 발생되지만, 변형이 진행됨에 따라 내압에 따른 원주방향 변형률의 증가율은 외호면에 비해 내호면 결함에서 둔화되는 경향을 보였다. 즉, 내압에 의한 원주방향 응력이 내호면에서 높기 때문에 외호면에 비해 낮은 압력에서 결함부의 소성변형이 시작되지만, 내호면의 결함길이가 짧기 때문에 내압에 따른 결함부의 소성변형이 제한되고 최종적으로 손상이 높은 압력에서 발생하는 것이다.

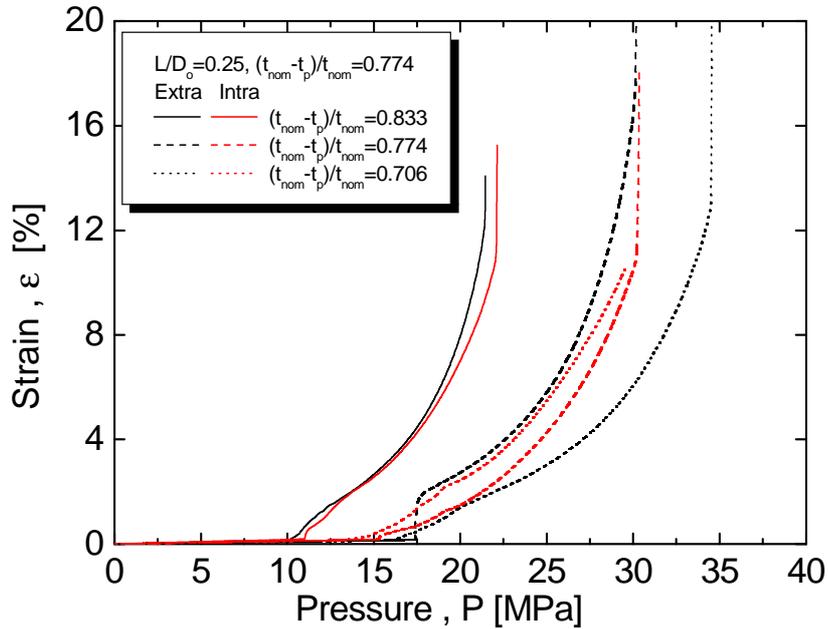


그림 3.1.2 결함 길이에 따른 결함부 중심에서의 원주방향 변형률

2. 결함 길이에 따른 손상압력의 영향

그림 3.1.3은 일정한 깊이($(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774$)와 원주방향 결함폭($\theta/\pi = 0.25$)을 갖는 외호면 결함과 내호면 결함을 갖는 엘보우에서 감육 결함의 축방향 길이에 따른 손상압력을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 결함길이가 $L/D_0 = 0.25$ 에서는 외호면과 내호면 결함을 갖는 엘보우 모두 가압장치의 최대용량(40 MPa)에서 손상이 발생하지 않았으며, 결함 길이가 $L/D_0 = 0.5$ 에서 $L/D_0 = 1.5$ 로 증가할 때 손상압력은 외호면 결함에서 약 17.25%, 내호면 결함을 갖는 곡관에서는 약 34.23% 정도 감소하였다.

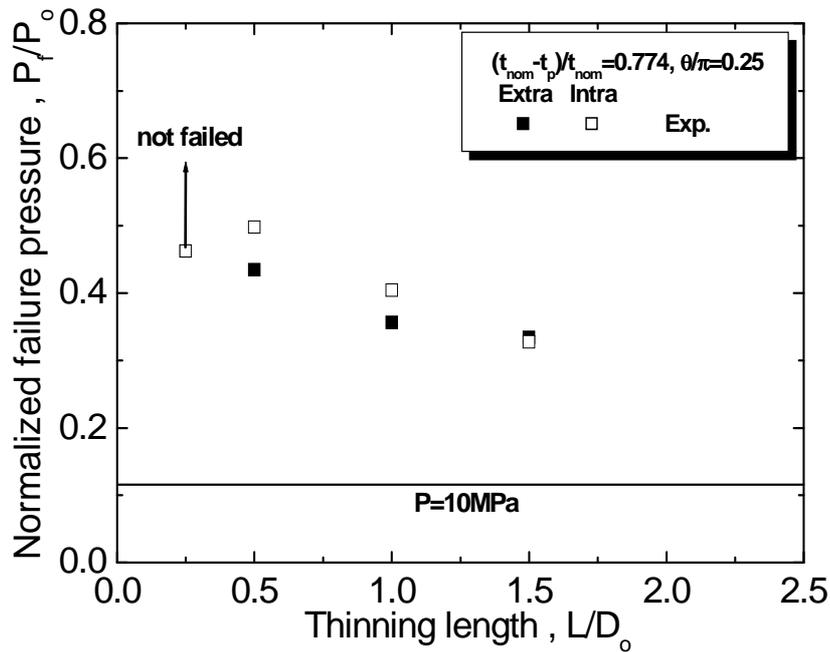


그림 3.1.3 등가 결함 길이에 따른 감육 엘보우의 손상압력

한편, 결함 위치에 따른 손상압력을 살펴보면 결함 길이에 따른 손상압력의 경향과 마찬가지로 외호면 결함보다 내호면 결함을 갖는 곡관에서 더 높은 손상압력을 보였다. 손상압력의 차이는 결함길이가 짧을수록 더 큰 손상압력 차이를 보였으며 이러한 경향은 위에서 언급한 것처럼 결함 길이를 실제 결함길이가 아닌 엘보우 측면에서의 등가길이를 적용하였기 때문이다. 그림 3.1.4는 결함길이를 등가길이가 아닌 실제 결함 길이에 따른 손상압력을 나타낸 것으로, 위의 결과를 잘 보여주고 있다. 다시 말해, 동일한 결함길이와 폭을 가질 때 실제 결함 길이에 따른 손상압력의 차이는 내호면 결함보다 외호면 결함의 손상압력이 더 높게 나타나는 것이다.

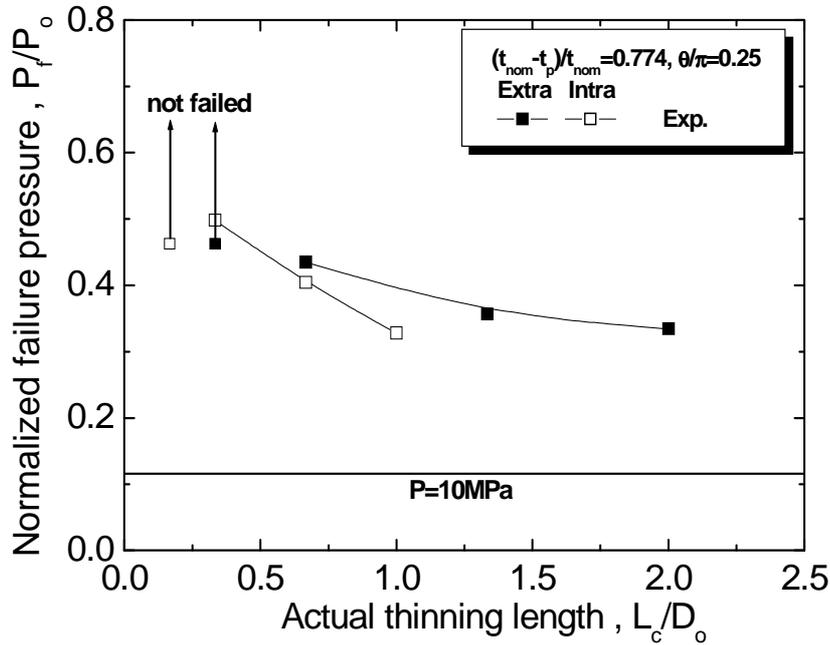


그림 3.1.4 실제 결함 길이에 따른 감육 엘보우의 손상압력

또한, 실제 결함 길이에 따른 손상압력을 살펴보면 외호면 결함의 경우에 결함 길이가 $L/D_0 > 1.25$ 에서 손상압력이 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 기존의 직관에 관한 손상압력 실험 및 해석적 연구의 결과와 일치하는 것으로 감육 엘보우 경우에도 결함 길이가 증가함에 따라 손상압력은 감소하다 일정한 값에 수렴하는 경향을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 영향

그림 3.1.5는 일정한 깊이($(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774$)와 길이($L/D_0 = 1.0$)의 결함을 갖는 감육 엘보우 경우 단순 내압이 작용할 때 원주방향 결함 폭에 따른 손상 압력을 나타

내었다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 외호면 결함과 내호면 결함 모두 원주방향 결함 폭이 증가함에 따라 손상압력이 감소하는 경향을 보였다. 특히, 결함 폭이 $\theta/\pi = 0.125$ 에서 $\theta/\pi = 0.5$ 로 증가함에 따라 손상압력이 약 20% 정도 감소하였으며, $\theta/\pi = 0.5$ 이상에서는 거의 유사한 값을 보였다. 또한, 동일한 등가길이($L/D_o = 1.0$)와 깊이 ($(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774$)를 갖는 경우에는 외호면 결함에 비해 내호면 결함을 갖는 감육 엘보우에서 높은 손상압력을 보였다.

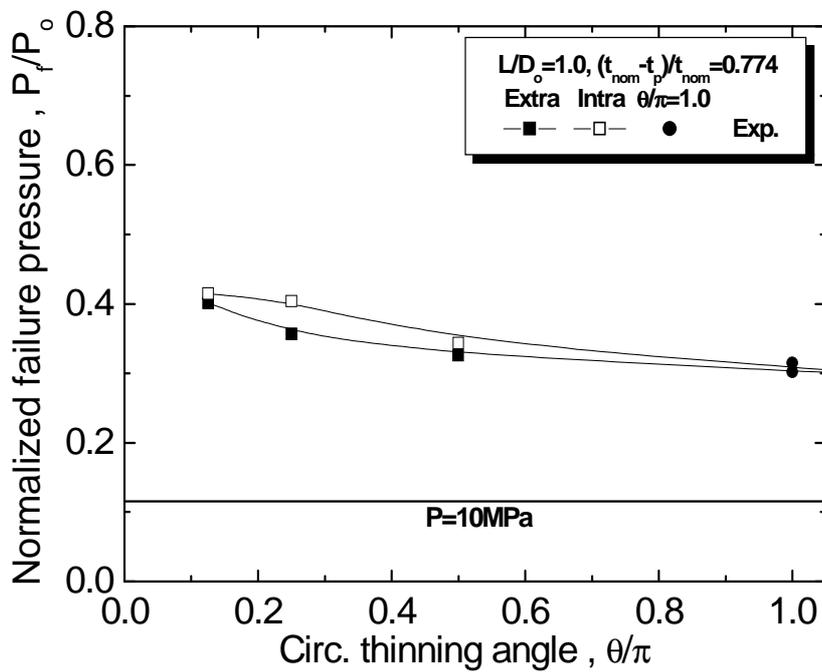


그림 3.1.5 원주방향 결함 폭에 따른 감육 엘보우의 손상압력

감육 직관에서 수행된 기존의 연구 결과에 의하면[19~24], 일반적으로 손상압력은 결함의 깊이와 길이에 크게 영향을 받으며, 원주방향 폭에는 거의 영향을 받지 않는

것으로 알려져 있다. 그러나, 본 실험 결과에서는 외호면 결함과 내호면 결함 모두 원주방향 결함 폭이 증가함에 $\Theta/\pi = 0.5$ 까지는 따라 손상압력이 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였으며, $\Theta/\pi > 0.5$ 에서는 감소 정도가 거의 미미하였다. 이러한 차이는 감육 결함의 손상을 지배하는 원주방향 응력이 직관에서는 원주방향 위치에 관계없이 일정한 반면, 엘보우에서는 원주방향 위치에 따라 변화하기 때문으로 판단된다. 즉, 직관의 경우에는 결함의 원주방향 폭이 증가할지라도 결함부의 원주방향 응력이 거의 유사한 반면, 감육 엘보우에서는 결함의 원주방향 폭이 증가함에 따라 응력의 크기가 다른 영역으로 결함이 성장하기 때문에 결함 폭에 따른 손상압력의 차이가 뚜렷하게 나타나는 것이다.

제 2 절 감육 엘보우 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향

실제 발전소 배관계통은 운전 중 내압뿐만 아니라 자중, 열팽창 하중등 다양한 형태의 굽힘하중을 받고 있다. 따라서, 감육 결함의 손상압력 평가에서 이들 굽힘하중의 영향을 살펴보는 것이 중요하다. 감육 엘보우의 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향을 살펴보기 위하여 단순 내압조건에서의 손상 시편과 동일한 시편을 이용하여 일정한 굽힘 하중의 작용된 상태에서 손상압력 시험을 수행하였다. 손상시험에 사용된 시편은 결함 형상이 $L/D_0 = 1.0$, $\Theta/\pi = 0.125$ 인 경우와 $L/D_0 = 1.0$, $\Theta/\pi = 0.5$ 인 외호면 결함 및 내호면 결함을 갖는 시편과 $L/D_0 = 1.0$, $\Theta/\pi = 1.0$ 인 시편을 사용하였다. 일정한 굽힘하중은 결함이 없는 시편에서 최대 허용 굽힘모멘트에 해당하는 변위를 적용하였다. 굽힘모멘트에 해당하는 변위량은 외호면 결함을 갖는 시편은 닫힘모드(Closing mode) 방향으로 8.52mm, 내호면 결함을 갖는 시편은 열림 모드(Opening mode) 방향으로 8.29mm의 변위를 적용하였다. 그림 3.2.1은 일정한 굽힘하중 조건에서 평가된 손상압력을 단순내압에서 평가된 손상압력과 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 원주방향 결함폭이 $\Theta/\pi = 0.125$ 인 외호면 결함을 제외하면 일정한 굽힘하중이 작용되는 경우가 단순 내압만 작용되는 경우에 비하여 약간씩 낮은 손상압력을 보였다. 그

러나, 굽힘하중의 작용에 따른 손상압력에 미치는 굽힘하중의 작용에 따른 손상압력의 감소 정도는 최대 3.3% 로 거의 차이가 없었다. 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향이 작은 것은 감육 엘보우에서 굽힘하중이 축방향의 응력과 변형에 주로 영향을 미치기 때문이다. 그러나, 내압에 의한 손상은 원주방향 응력과 변형에 의해 지배된다. 따라서, 굽힘하중에 의한 결함부의 길이방향 변형량이 항복변형률에 근접할지라도 최종적으로 손상에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

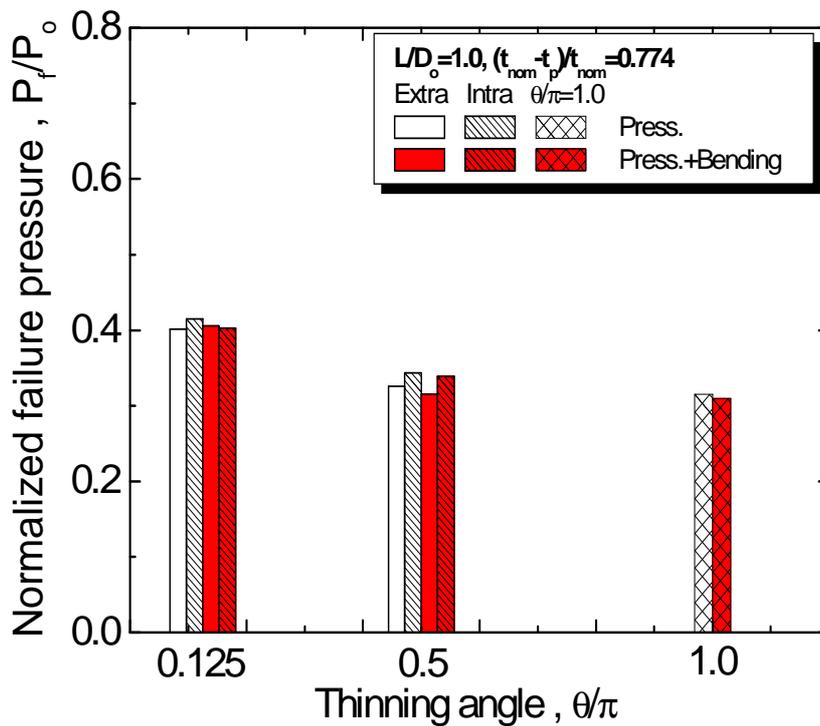
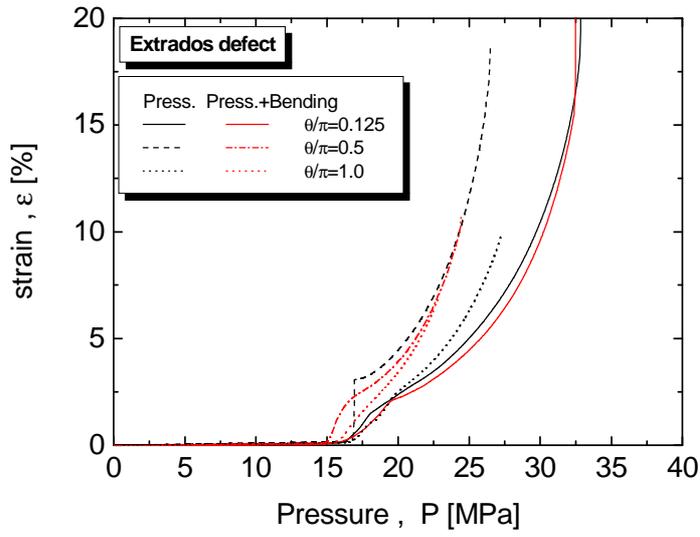
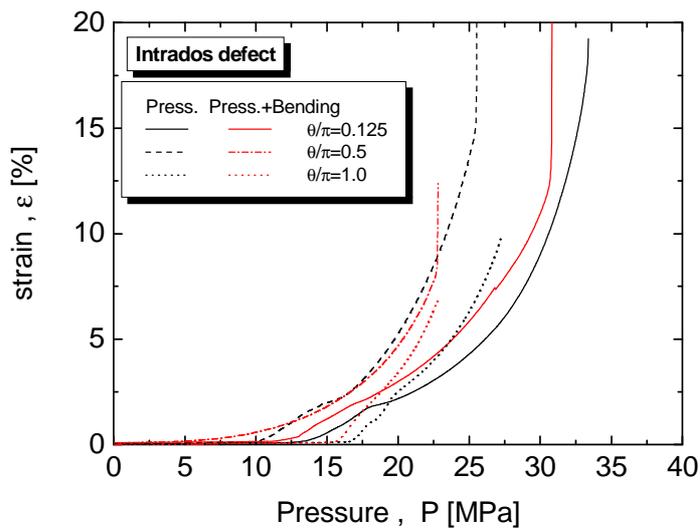


그림 3.2.1 감육 엘보우 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향



a) 외호면 결함(Extrados defect)



b) 내호면 결함(Intrados defect)

그림 3.2.2 굽힘하중에 따른 결함부 중심에서의
원주방향 변형률

그림 3.2.2는 결함부 중심에서 원주방향 변형률을 나타낸 것으로 위의 결과를 잘 나타내고 있다. 즉, 굽힘하중이 작용되는 경우는 단순내압만 작용하는 경우와 달리 결함부의 소성변형이 낮은 압력에서 시작된다. 그러나, 내압이 증가됨에 따라 결함부의 원주방향 변형률이 단순 내압만 작용되는 경우와 거의 유사하다. 따라서, 내압이 낮은 조건에서는 굽힘하중의 영향이 결함부의 변형에 영향을 미치지, 내압이 증가하여 결함부에서 손상이 발생하는 지점에서는 결함부의 원주방향 변형이 내압에 의해 지배되는 것을 알 수가 있었다.

제 3 절 감육 배관의 결함 손상부 관찰

손상 시험 완료 후 각각의 실험 조건에서의 감육 시편의 손상부를 살펴보았다. 그림 3.3.1 ~ 그림 3.3.4에서 나타낸 것과 같이 모든 감육 시편의 손상은 외호면 결함과 내호면 결함을 갖는 엘보우 모두 길이방향으로 균열이 전파하였으며, 결함 중심부의 파면에는 네킹의 흔적과 두께와 수직한 파면을 보였으며 균열이 성장함에 따라 파면이 두께와 45°를 이루고 있었다. 따라서, 감육 결함의 형상이나 하중형태와 관계없이 모두 균열은 감육 결함의 중심부에서 생성되어 길이방향으로 성장하였으며, 내압에 의한 원주방향 Hoop stress가 균열생성 및 성장을 지배한 응력임을 알 수 있었다.

결함 형상에 따른 손상부를 살펴보면, 그림 3.3.1 ~ 그림 3.3.3에서 나타낸 것과 같이 결함 위치와 관계없이 감육 결함의 두께와 길이가 감소할수록 균열길이는 짧아지는 것을 알 수가 있었으며, 원주방향 결함 폭에 따른 균열길이는 그림 3.3.3(a),(b)에서 보는 것과 같이 외호면 결함의 경우에는 원주방향 결함 폭에 관계없이 균열 길이가 거의 동일한 반면, 내호면 결함의 경우에는 결함 폭이 $\theta/\pi = 0.125$ 일 때 가장 작았고, $\theta/\pi = 0.25$, $\theta/\pi = 0.5$ 는 거의 동일한 균열 길이를 보였다.

한편, $\theta/\pi = 1.0$ 인 경우에는 결함의 길이에 따라 $L/D_o = 1.0$ 에서는 그림 3.3.3(c)에서와 같이 측면(Crown)에서, $L/D_o = 1.5$ 에서는 그림 3.3.3(d)에서와 같이 내호면(Intrados)에서 손상이 발생하였다. 이러한 손상 특성은 앞에서 언급한 것처럼 결함부

중심에서 원주방향으로 결함 최심부의 두께가 동일할 때 내압에 의한 결함부의 손상은 응력상태가 높은 내호면에서 손상이 발생되어야 하지만 손상압력에 미치는 결함 길이에 대한 영향으로 인하여 상대적으로 외호면 보다 응력이 큰 측면에서 손상이 발생하는 것이다. 또한, 내호면에서 손상이 발생한 경우는 그림 3.1.4에서처럼 $L/D_0 > 1.0$ 이상에서는 결함 길이가 증가하더라도 손상압력은 거의 일정하다. 따라서, 외호면 결함 길이가 내호면 보다 약 2배정도 길지만, 결함 길이가 증가하여도 손상 압력에 영향을 주지 못하기 때문에 응력상태가 가장 높은 내호면에서 손상이 발생한 것으로 판단된다.

한편, 일정한 굽힘하중이 작용했을 때의 손상 특성은 그림 3.3.4에서 보는 것과 같이 하중조건에 관계없이 외호면 결함과 내호면 결함을 갖는 감육 시편 모두 길이방향으로 균열이 전파하였다. 외호면 결함의 경우에는 원주방향 결함 폭에 관계없이 균열 길이가 거의 동일하였으며, 내호면 결함의 경우에는 결함 폭이 $\theta/\pi = 0.125$ 일 때 균열 길이가 가장 작았다. 또한, 전체적으로 굽힘하중에 의한 균열 길이는 단순내압이 작용했을 때와 거의 동일한 균열 길이를 보였다.



$$(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774 \sim 0.884$$

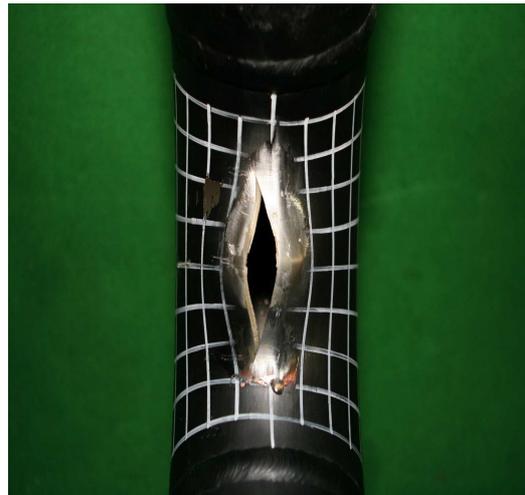


$$(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.706$$

a) 외호면 결함(Extrados defect)



$$(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774 \sim 0.884$$



$$(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.706$$

b) 내호면 결함(Intrados defect)

그림 3.3.1 결함 깊이에 따른 시편의 손상부



$L/D_o = 0.25 \sim L/D_o = 1.0$

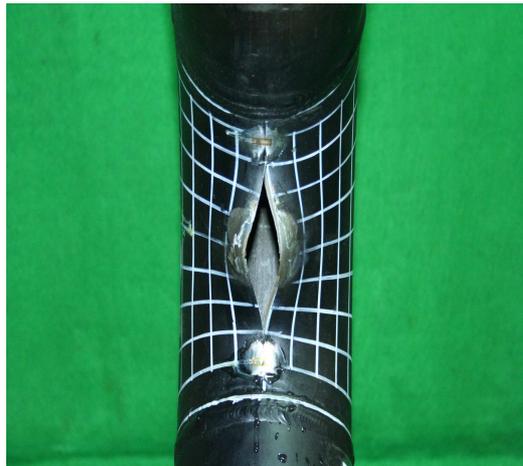


$L/D_o = 1.5$

a) 외호면 결함(Extrados defect)



$L/D_o = 0.25 \sim L/D_o = 1.0$



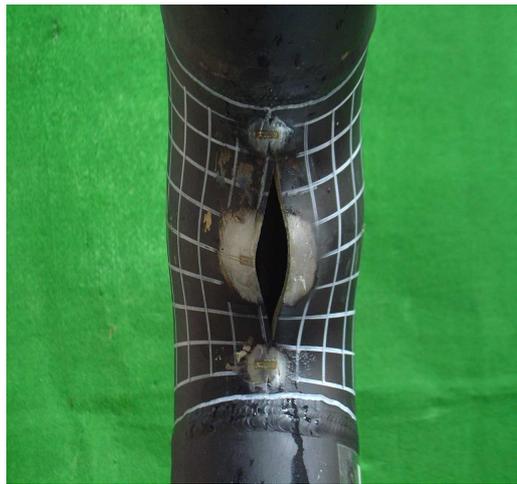
$L/D_o = 1.5$

b) 내호면 결함(Intrados defect)

그림 3.3.2 결함 길이에 따른 시편의 손상부



a) Extrados defect : $\Theta/\pi = 0.125 \sim 0.5$ b) Intrados defect : $\Theta/\pi = 0.125 \sim 0.5$



c) $L/D_o = 1.0, \Theta/\pi = 1.0$

d) $L/D_o = 1.5, \Theta/\pi = 1.0$

그림 3.3.3 원주방향 결함 폭에 따른 시편의 손상부



a) 외호면 결함(Extrados defect)



b) 내호면 결함(Intrados defect)

그림 3.3.4 굽힘하중에 따른 시편의 손상부

제 4 장 손상압력 평가 모델과 비교

제 1 절 손상압력 평가 모델

1. Battelle Model

직관의 외부에 존재하는 감육 결함에 대한 손상압력 평가를 위해 ANSI/ASME B31G[19]와 Modified B31G[20]에 대한 대체 방법으로 Battelle[21]에서는 감육 배관의 손상압력 평가 방법을 제시하였다. Battelle이 제시한 평가 모델은 감육 결함이 매우 짧은 경우에는 손상압력이 결함이 없는 배관의 손상압력에 접근하며, 결함이 매우 길어지면 감육 배관의 손상압력은 배관의 전체 두께가 결함부의 최소 두께를 갖는 경우의 손상압력에 접근한다. 따라서, Battelle에서는 결함의 형상이 이들 두 조건 사이인 경우에는 결함의 형상에 따라 이들 두 값 사이의 손상압력을 보이는 것에 기초하였다. 그러나, 기존의 ANSI/ASME B31G와 Modified B31G 모델의 경우에는 결함이 매우 짧아지거나 길어지는 조건에서 이러한 손상압력의 변화 거동을 충분히 반영하지 못하는 것으로 나타났다. Modified B31G 평가 모델의 경우에 결함의 길이 증가에 따른 거동은 적절히 예측하고 있지만, 결함이 짧아지는 경우에는 결함이 없는 배관의 손상압력과 차이를 보였다.

$$P_f = \frac{2\sigma_u t_{nom}}{D_o} \quad (\text{식 4.1.1})$$

$$P_f = \frac{2\sigma_u t_p}{D_o} \quad (\text{식 4.1.2})$$

따라서, Battelle은 결함이 없는 배관에 대한 손상압력을 파열 실험 결과를 기초로 식 (4.1.1)과 같이 간단히 유도하였으며, 전체가 결함의 최소 두께를 갖는 조건의 손상

압력도 식 (4.1.2)와 같이 나타냈다. 즉, 결함이 없이 일정한 두께를 갖는 배관의 내압에 의한 손상은 원주방향의 평균 Hoop 응력이 재료의 공칭 인장강도를 초과할 때 발생하는 것으로 가정하였으며, 이러한 가정은 배관 실험을 통해 타당성이 입증되었다. 다만, 연성이 낮은 배관 재료의 경우에는 이들 기준이 비보수적인 것으로 확인되었다.

식 (4.1.1)과 식 (4.1.2)를 기초로 감육 배관에 대한 손상압력 평가식은 식 (4.1.3)과 같이 제시되었으며, 식 (4.1.1)과 식 (4.1.2)사이에서 감육 결함 형상에 따른 손상압력 변화를 반영하기 위해서 형상 함수를 고려하였다. 형상 함수는 다양한 결함 조건에서 수행된 해석 결과를 Curve fitting하여 유도하였다. 해석에는 감육 결함에 대한 유한요소해석을 목적으로 개발된 PCORR 프로그램이 이용되었으며, 해석 결과에서 감육부 손상 발생에 대한 강도 기준으로는 식 (4.1.1)과 식 (4.1.2)의 일관성을 유지하기 위해 공칭 인장강도를 적용하였다. 해석은 다양한 결함 길이, 깊이, 그리고 폭에 대해 수행되었으며, 결함은 일정 깊이를 갖는 사각 결함으로 가정함으로써 결함의 형상 측면에서 보수성이 부여되었다. 식 (4.1.4)는 식 (4.1.3)의 손상압력 평가에서 결함 형상을 고려하기 위한 형상함수로서 결함 길이의 함수로 주어진다. 여기서는 형상 함수를 ANSI/ASME B31G와 Modified B31G 모델과 일관된 형태를 유지하기 위해 M으로 표시하였다.

$$P_f = \frac{2\sigma_u t_{nom}}{D_o} \left[1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) f(\text{geometries}) \right] \quad \text{식 (4.1.3)}$$

$$f(\text{geometries}) = M = 1 - \text{Exp} \left(-0.157 \frac{L}{\sqrt{\frac{D_o t_p}{2}}} \right) \quad \text{식 (4.1.4)}$$

2. Li's Model

감육 결함이 존재하는 직관에 대한 손상압력 평가 모델은 많은 연구들을 통해 제안되었다. 그러나, 감육 결함이 존재하는 엘보우에 대한 손상압력 평가 모델은 거의 개발되지 않았으며, 직관에 대한 평가 모델을 감육 엘보우의 손상압력 평가에 적용하고 있다. 최근, Li's[16]등은 외벽에 Pitting형 감육 결함이 존재하는 엘보우의 손상압력 평가 모델을 제안하였다. Li's 모델은 감육 엘보우의 손상압력이 곡관부의 원주방향 Hoop 응력에 의해 지배된다는 사실에 기초하여, 기존의 감육 직관에 대한 평가식에 엘보우의 기하학적 형상에 따른 Hoop 응력 변화를 고려하여 유도하였다.

Li's 모델은 3차원 유한요소해석을 통해 내압에 따른 감육부의 국부적인 응력을 계산하고, 결함부의 원주방향 응력이 재료의 임계 강도에 도달하는 내압의 크기로부터 손상압력을 평가하였다. 해석에서 결함의 형상을 같이 엘보우 외부에 길이방향으로 Groove 형태의 사각형 결함을 가정하였다. 해석 결과로부터 손상압력에 미치는 주요 영향 인자들을 분석하였다. 유한요소해석 결과를 토대로 직관의 손상압력 평가에 사용되는 Modified B31G 모델을 변형하여 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식을 식 (4.1.5)와 같이 제안하였다.

$$P_f = \frac{\sigma_f t_{nom}}{R_m} \frac{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right)}{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) M^{-1}} \left(\frac{\frac{R_b}{R_m} + \sin\beta}{\frac{R_b}{R_m} + \frac{\sin\beta}{2}} \right) \quad \text{식 (4.1.5)}$$

$$M = \begin{cases} \sqrt{1.0 + 0.6275\tilde{L} - 0.003375\tilde{L}^2} & \text{for } \tilde{L} \leq 50 \\ 3.3 + 0.032\tilde{L} & \text{for } \tilde{L} \geq 50 \end{cases}$$

Li's 모델에서는 손상에 대한 강도 기준으로 재료의 유동응력(σ_f)을 적용하였으며, 엘보우의 Hoop 응력에 미치는 기하학적 영향은 엘보우의 곡률 반경과 곡관부의 원주

방향 위치의 함수로 고려하였다. 여기서, R_b/R_m 은 곡률 반경과 배관반경 비이고, β 는 결함의 원주방향 위치이다. 또한, 유동응력과 무차원 결함 길이는 식 (4.1.6)과 같이 주어진다.

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad , \quad \tilde{L} = \left(\frac{L^2}{D_o} \right) \left(\frac{D_o}{t_{nom}} \right) \quad \text{식(4.1.6)}$$

3. Kim's Model

감육 엘보우의 손상압력 평가를 위해 제안된 Li's의 모델은 엘보우의 외부 감육 결함을 대상으로 개발되고, 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 무시하였다. 따라서, Kim등[17]은 실제 원전 배관에서 발생하는 내부 감육 결함을 갖는 엘보우에 대한 손상압력 평가에 적합한 새로운 평가 모델을 제안하였다. 평가 모델을 개발하기 위해서 다양한 결함형상에 대한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이들 결과를 바탕으로 기존의 외부 감육 결함에 대한 Li's 모델을 수정하였다. 해석에는 굽힘각이 90°인 엘보우 중심 내벽에 결함이 존재하는 것으로 가정하였으며, 감육 결함의 형상은 길이방향과 원주방향으로 원형인 것을 가정하였다.

엘보우 기하학적 특성과 결함 위치에 따른 영향을 파악하기 위하여 곡률반경 비가 3($R_b/R_m=3$)인 경우와 6($R_b/R_m=6$)인 경우를 각각 고려하였으며, 엘보우 외호면과 내호면에 존재하는 감육 결함을 고려하였다. Kim's 모델에서는 Li's 모델에서 적용한 유동응력기준(σ_f) 대신 재료의 공칭인장강도(σ_u)를 강도 기준으로 적용하여 식 (4.1.7)과 같이 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가 모델을 제안하였다.

$$P_f = \frac{\sigma_u t_{nom}}{R_m} \left(\frac{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right)}{1 - \left(\frac{t_{nom} - t_p}{t_{nom}} \right) \widehat{M}^{-1}} \right) \left(\frac{\frac{R_b}{R_m} + \sin\beta}{\frac{R_b}{R_m} + \frac{\sin\beta}{2}} \right) \Omega(\theta) \quad \text{식(4.1.7)}$$

유한요소해석 결과를 기초로 Folias 인자, M의 계수를 일부 수정하였으며, 식 (4.1.8)과 같다. 또한, 기존의 평가식에서 무시된 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 $\Omega(\Theta)$ 로 추가하였다.

$$\hat{M} = \begin{cases} \sqrt{1.44 + 0.6275\tilde{L} - 0.003375\tilde{L}^2} & \text{for } \tilde{L} \leq 50 \\ 3.3 + 0.032\tilde{L} & \text{for } \tilde{L} \geq 50 \end{cases} \quad \text{식(4.1.8)}$$

원주방향 결함 폭에 대한 영향을 고려하기 위한 $\Omega(\Theta)$ 는 유한요소해석 결과의 curve fitting을 통해 식 (4.1.9)와 같이 유도되었다.

$$\Omega(\theta) = C_0 + C_1\left(\frac{\theta}{\pi}\right) + C_2\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \quad \text{식(4.1.9)}$$

여기서, 상수 C_i 는 결함의 위치에 따라 아래와 같이 주어진다.

$$C_i = 1.10063; \quad -0.23486; \quad 0.12850; \quad \text{for } \textit{Extrados}$$

$$C_i = 1.21021; \quad -0.47552; \quad 0.17882; \quad \text{for } \textit{Intrados}$$

제 2 절 손상압력 평가 모델과 시험 결과 비교

1. 결함 깊이에 따른 손상압력의 영향

그림 4.2.1은 손상시험에서 주어진 손상압력을 기존의 손상압력 평가 모델과 비교하여 나타내었다. 여기서 비교된 손상 모델은 감육 직관을 대상으로 제안된 Battelle 모델과 외부 감육 결함을 고려한 Li's 모델, 내부 감육 결함을 가정한 Kim's 모델을 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 모든 손상 압력 평가 모델은 손상 시험 결

과와 동일하게 결함 깊이가 증가함에 따라 손상압력은 감소하였다. 따라서, 손상 압력 평가 모델은 감육 엘보우의 결함 깊이에 따른 손상 압력의 감소 정도는 잘 예측하였으나, 감육 엘보우의 손상압력을 과도하게 낮게 평가하였다. 특히, 외호면 결함에 비해 내호면 결함이 기존 평가 모델의 보수성이 높게 나타났다. 한편, 손상 압력 평가 모델을 손상 시험 결과와 정량적으로 비교해 보면, 곡관 외부의 피팅형 감육 결함에 대한 평가를 목적으로 제안된 Li's 모델에 비해 엘보우 내부의 감육 결함을 가정하여 유도된 Kim's 모델이 상대적으로 정확한 예측 결과를 보였다. 또한, 감육 직관을 대상으로 한 Battelle 모델은 Kim's 모델의 내호면 결함의 모델과 거의 유사하게 나타났으며, 다른 모델에 비해 Li's 모델이 가장 보수적인 평가를 보였다.

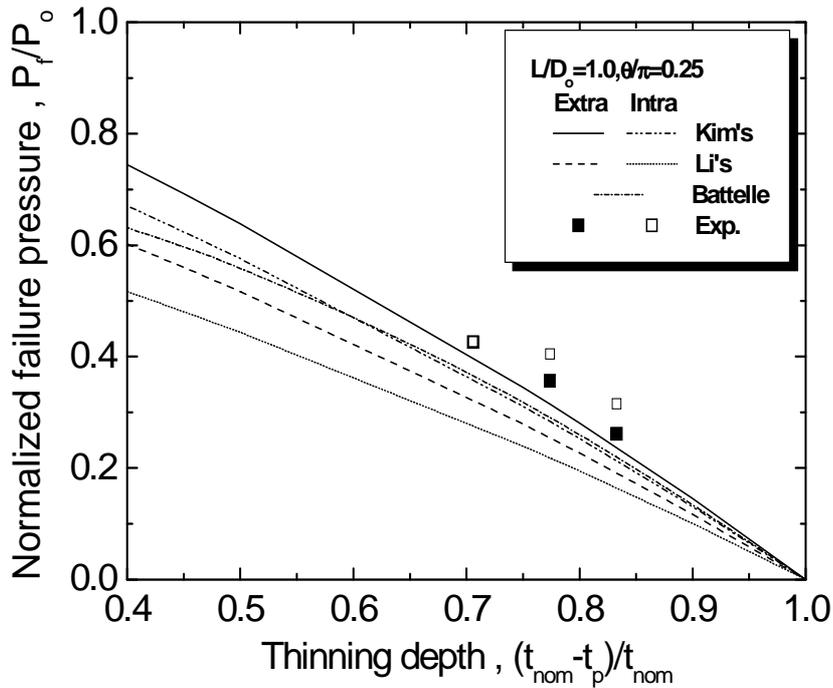


그림 4.2.1 결함 깊이에 따른 손상압력 모델 비교

2. 결함 길이에 따른 손상압력의 영향

감육 직관 및 엘보우를 대상으로 한 많은 손상 압력 모델[16~17, 18~24]은 동일한 결함 깊이와 원주방향 폭을 가질 때 결함 길이가 증가할수록 손상압력은 결함 길이에 대한 영향으로 손상 압력이 감소하다가 어떤 정점에 이르는 결함 길이를 가질 때 손상 압력은 거의 일정해진다.

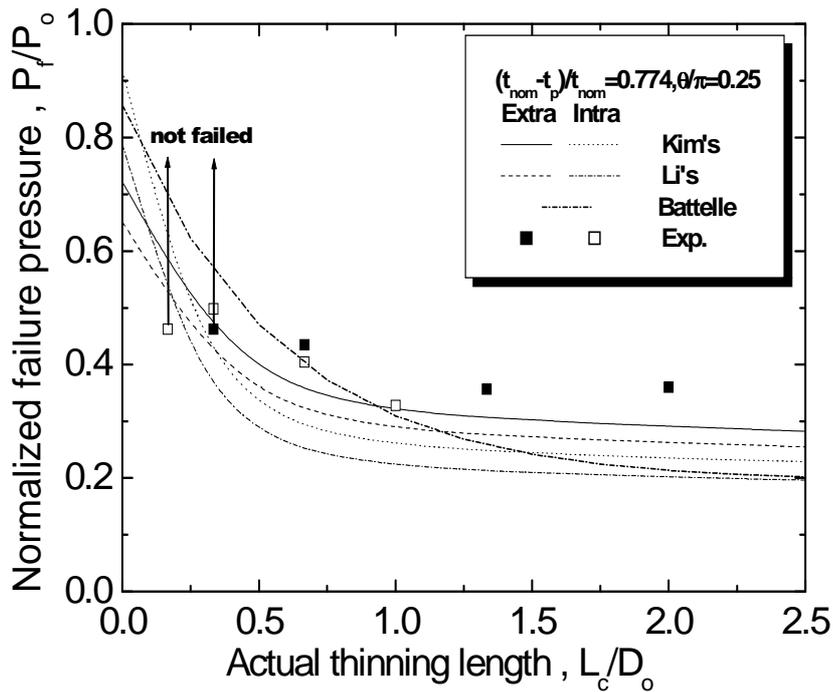


그림 4.2.2 실제 결함 길이에 따른 손상압력 모델 비교

그림 4.2.2는 손상시험에서 주어진 결함 길이에 따른 손상압력을 기존의 손상 압력 평가 모델과 비교한 것으로, 손상 시험 결과는 결함 길이가 $L/D_0 = 0.25$ 에서 $L/D_0 = 2.0$ 으로 증가할 때 손상압력은 감소하였으며, $L/D_0 > 1.0$ 에서는 거의 일정한 손상압력을 보였다. 이러한 결과는 위에서 언급한 것처럼 기존의 손상 압력 평가 모델들과 잘

일치하는 것으로 감육 엘보우의 결함 길이에 따른 손상 압력의 거동을 잘 예측하였다. 특히, 결함 길이에 따른 손상압력의 경향처럼 Li's 모델에 비해 곡관 내부의 감육 결함을 가정한 Kim's 모델이 상대적으로 더 정확한 예측 결과를 보인 반면, 감육 직관을 대상으로 제안된 Battelle 모델은 결함 길이가 짧을 때 감육 곡관 모델에 비해 정확한 손상압력을 예측 하였지만, 결함 길이가 증가하면 상대적으로 감육 곡관을 대상으로 제안된 모델에 비해 경향성에서 벗어났다. 따라서, 감육 엘보우를 대상으로 제안된 손상 압력 모델은 결함 길이에 대한 손상압력의 영향을 잘 예측하지만, Battelle과 같은 감육 직관 손상 모델은 긴 결함 길이를 갖는 감육 엘보우에 적용 시킬 수 없을 것으로 판단된다.

3. 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력의 영향

기존에 알려진 감육 배관에 대한 손상 압력 모델은 Kim's 모델을 제외하면, 원주방향 결함 폭에 대한 영향은 고려하지 않았다. 그러나, 손상 시험 결과 손상압력에 미치는 원주방향 결함 폭에 대한 영향이 적절히 고려되어야 하는 것을 알 수가 있었다. 그림 4.2.3은 원주방향 결함폭에 대한 손상압력을 기존의 손상 압력 평가 모델과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 원주방향 결함 폭이 $\theta/\pi = 0.125$ 에서 $\theta/\pi = 1.0$ 으로 증가할 때 손상압력은 뚜렷하게 감소하였으나, 손상 압력 평가 모델은 원주방향 결함 폭에 대한 영향이 고려되고 있지 않다. 특히, Li's 모델과 Battelle 모델은 원주방향 결함 폭에 대한 영향을 전혀 고려되고 있지 못하며, Kim's 모델의 경우 원주방향 결함폭에 따른 손상압력의 감소 정도는 예측하였으나, 결함 폭이 작은 경우에 손상 시험 결과와 많은 차이를 보였다.

한편, 기존의 손상 압력 평가 모델은 감육 엘보우의 손상압력을 과도하게 낮게 평가하였으며, 특히 외호면 결함에 비해 내호면 결함과 결함의 원주방향 결함 폭이 작은 결함에서 기존 평가 모델의 보수성이 높은 것으로 나타났다. 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.

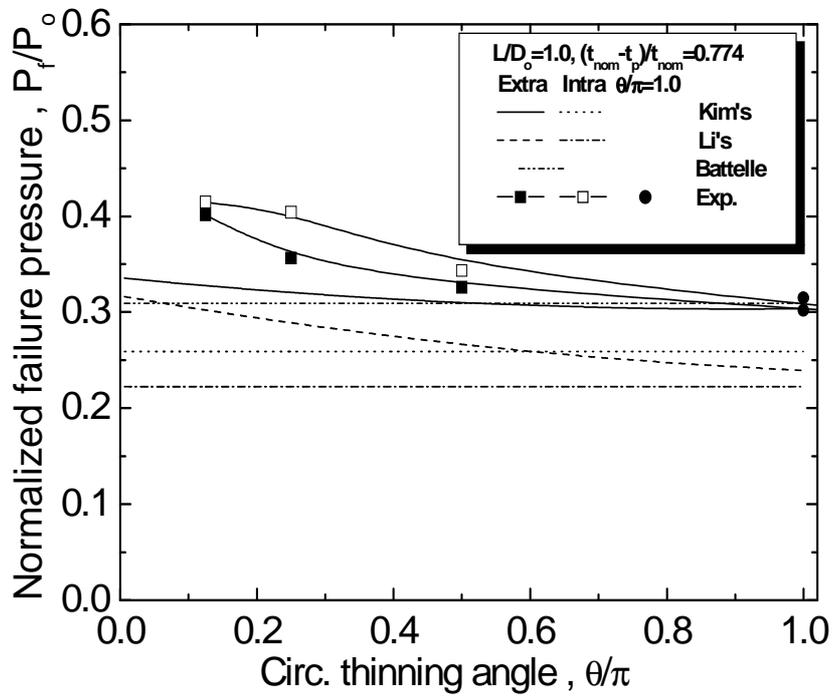


그림 4.2.3 원주방향 결함 폭에 따른 손상압력 모델 비교

제 5 장 결 론

본 논문에서는 감육 결함의 기하학적 형상과 위치 및 하중 형태에 따른 손상압력의 영향을 평가하기 위하여 곡관의 외호면과 내호면에 다양한 결함 형상을 갖는 감육 엘보우를 이용하여 실 배관 손상시험을 수행하였다. 작용하중으로는 단순 내압이 작용되는 경우와 일정한 굽힘하중 조건에서 내압이 작용되는 경우를 각각 고려하였으며, 손상 시험 결과로부터 감육 엘보우의 손상압력에 미치는 감육 결함의 최종심부 두께, 축방향 길이, 원주방향 폭, 그리고 굽힘 하중의 영향을 살펴보았다. 또한, 실험 결과를 기존의 손상압력 평가 모델과 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 감육 결함의 깊이가 증가할수록 손상압력은 감소하였으며, 결함길이가 증가할수록 손상압력은 감소하다가 일정하였다. 이러한 경향은 감육 직관에 대한 기존의 연구 결과와 일치하는 경향을 보인 것이다. 그러나, 감육 직관과 달리 원주방향 결함 폭이 증가할수록 손상압력은 감소하였다. 이러한 원인은 원주방향 응력이 직관에서는 원주방향 위치에 관계없이 일정한 반면, 곡관에서는 원주방향 위치에 따라 변화하기 때문으로 판단된다.

(2) 곡관 측면에서의 등가길이를 적용할 경우, 내호면 결함이 외호면 결함에 비해 높은 손상압력을 보이지만, 실제 결함 길이가 같은 경우 내호면 결함이 외호면 결함보다 더 낮은 손상압력을 보였다.

(3) 일정한 굽힘 하중이 작용되는 경우에 손상압력은 단순 내압에 의한 손상압력과 거의 동일하였다. 손상압력에 미치는 굽힘 하중의 영향이 작은 것은 감육 곡관에서 굽힘 하중이 길이방향의 응력과 변형에 주로 영향을 미치기 때문이지만, 내압에 의한 손상은 원주방향 응력과 변형에 의해 지배되기 때문에 굽힘 하중에 의한 결함부의 길이방향 변형량이 항복변형률에 근접할지라도 최종적으로 손상에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

(4) 손상압력 모델과 비교 결과, 모든 손상압력 평가 모델은 감육 결함의 깊이와 길

이에 대한 손상압력은 어느 정도 잘 예측 하였으나, 원주방향 결함 폭에 대한 영향은 적절히 고려되지 못하며 과도하게 보수적인 평가를 보여준다. 특히, 감육 직관을 대상으로 제안된 Battelle 모델의 경우 감육 엘보우를 평가하기에는 적절치 못하였다. 따라서, 감육 엘보우의 손상압력 평가를 위한 기존 모델의 개선과 개발이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R2.
- [2] Virginia Electric and Power Co., 1989, "Surry Unit 2 Reactor trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- [3] Presentation Materials for KINS, "Risk-Informed Inspection", 1999.
- [4] ANSI/ASME, Plant Piping, B31.G, 1984.
- [5] Coulson, K.E.W. and Worthington, R.G., 1990, "New guidelines promise more accurate damage assessment." Gas & Oil J., Vol.32, pp.41~44.
- [6] Kiefner, J.F. and Vieth, P.H., 1990, " New method corrects criterion for evaluating corroded pipe." Oil Gas J, Vol.32, pp.56~59.
- [7] Dearnorff, A.F. and Bush, S.H., 1990, "Development of ASME section XI criteria for erosion-corrosion thinning of carbon steel piping Conference, PVP-Vol-186, NDE-Vol.7, pp.71~75.
- [8] Gerber, T.L et al, 1988, EPRI NP-5911SP
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wildowski, G., Stephens, 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. & Des., Vol.195, pp.149~169.
- [12] American National Standards Institute/American Society of Mechanical Engineer, B31G, "Manual for Determinating the Remaining Strength of Corroded Pipelines," 1991 ed.
- [13] 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.
- [14] Draft for ASME SecXI, App.X, "Analytical evaluation of internal of external wall thinning in piping systems," 2003, rev.8.
- [15] Kim, J.W., Kim, T.S., Park, C.Y., 2005, "Effect of Local Wall Thinning Defect

- on the Collapse Moment of Elbow." Trans. of KSME (A), Vol. A28, No. 4, pp.402~409.
- [16] Zhang, L., Wang, Y., Chen, J., and Liu, C., 2001, "Evaluation of local thinned pressurized elbow." Int. J. Press. Ves. & Piping, Vol.78, pp.697~703.
- [17] Kim, J.W., Na, M.G., Park, C.Y., 2005, "Development of Failure Pressure Evaluation Model for Internally Wall Thinned Piping Components." Trans. of KSME (A), Vol. A29, No. 7, pp.947~954.
- [18] American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, "Nuclear Components." 1995 ed.
- [19] ASME-B31G. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines, A supplement to ASME B31G code for pressure piping. New York:American Society for Mechanical Engineers, 1991.
- [20] Kiefner F, Vieth PH. New method corrects criterion for evaluating corroded pipe. Oil Gas J 1990;AUGUST 6:56~59.
- [21] Leis N, Stephens DR. An alternative approach to assess the integrity of corroded line pipe. Part I current status and II alternative criterion, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, May 25-30 1997 pp.624~641.
- [22] Corroded pipelines. Recommended practice RP-F101. Det Norske Veritas. Printed by Det Norske Veritas Elendom AS, 1999.
- [23] Klever FJ, Stewart G. New developments in burst strength predictions for locally corrodes pipes. Shell Int Res; March 1995.
- [24] J.B. Choi., B.K. Goo., J.C. Kim., Y.J. Kim., W.S. Kim., Development of limit load solutions for corroded gas pipelines. Pres. Ves.&Piping.
- [25] ABAQUS/Standard User's Manual, Ver6.3, 2003

감사의 글

늘 후회하고 망설이지만 끊임없이 시간은 흘러가고 살아갈 날들이 조금씩 줄어들어 가는 것이 삶의 여정이라고 합니다. 삶의 여정에서 대학원 2년이라는 시간은 그 무엇과 바꿀 수 없는 소중한 선물이었습니다. 더 열심히 잘 할 수 있었을 건데 라는 자조 섞인 아쉬움이 머릿속에 맴돌고 있지만, 누구나 그렇듯 흘러간 시간에 대하여 되돌아보고 반성하며 한 단계 성숙한 人으로 태어나겠습니다.

대학원 생활동안 항상 뜨거운 열정과 학문연구 자세를 몸소 보여주시며 학자의 正道를 가르쳐주신 김진원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님의 가르침은 제 마음속에 영원히 간직하겠습니다. 늘 바쁜 와 중에도 항상 격려해주시고 도움을 주신 김승평 교수님, 나만균 교수님께 감사의 말씀 드립니다. 항상 정겹게 맞이해 주며 웃음을 선사해주신 송중순 교수님과 자기 자식처럼 따뜻한 마음을 전해주시신 심흥기 교수님, 생각의 깊이를 가르쳐주신 정운관 교수님, 이경진 교수님께 감사드립니다. 교수님들께서 있기에 우리 조선대학교 원자력공학과가 존재하며 제가 공학도로서 사회에 나아갈 수가 있었습니다. 다시 한 번 진심어린 마음으로 감사 말씀 드립니다.

항상 후배를 먼저 생각하고 따끔한 충고를 아끼지 않았던 금주형, 유선형, 철기형, 보미누나에게 감사드리며, 대학원 생활의 나침반이 되어 준 장곤형과 재법형, 동원형에게 감사드립니다. 대학교 4년 동안 같이 동고동락한 정운, 만석, 근용, 준석, 선민, 우섭, 현영, 경렬, 병집형, 건표, 선미, 주리, 98학번 동기 모두에게 고맙다는 말을 전합니다. 대학원 2년 동안 서로가 큰 힘이 되어주며 의지했던 대학원 동기인 인준이와 인섭이게도 고맙다는 말을 전합니다. 원자력기계재료실험실 후배인 종선이와 진행에게도 고마움을 표합니다. 우리 성덕회의 구성원이며 죽마고우인 경준, 성제, 동일, 병훈, 인수, 경주, 환수, 영두, 좌명, 천두, 홍렬, 정준에게도 고마움을 전합니다. 든든한 친구인 명숙이와 항상 웃어주고 힘들 때 어깨를 다독거리며 격려해준 수경이 누나에게 고맙다는 말을 전합니다. 위의 모든 분들은 저에게 있어서 그 무엇과 바꿀수 없는 무형의 재산이며, 영원히 같이 할 것입니다. 이 외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너

무나도 많습니다. 그 분들의 이름을 하나하나 새기지 못한 점 너무나 죄송하게 생각하며, “감사합니다.”로 대처하고자 합니다.

마지막으로, 진한 핏줄로서 나를 아껴주며 사랑해준 형과 누나는 든든한 저의 후원자였습니다. 또한, 제가 존재하는 이유이며, 세상과 맞서 싸울 수 있는 힘의 원천인 부모님은 부족한 형편에도 불구하고 자식들을 위하여 힘든 내색 하지 않고 물신양면으로 지원해주셨습니다. 부모님의 헌신적인 사랑에 비해 부끄러울 만큼 외소 하지만 이 논문을 사랑하는 부모님께 받칩니다.

2006년 12월

나 연 수

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20057115	과 정	석사
성 명	한글: 나 연 수 한문 : 羅 年 洙 영문 : Na Yeon Soo				
주 소	광주광역시 서구 농성동 363-3번지				
연락처	E-MAIL : attet@nate.com				
논문제목	한글 : 실 배관 파열시험을 통한 감육 Elbow의 손상압력 평가				
	영문 : Evaluation of Failure Pressure of Wall Thinned-elbow by Real Scale Pipe Test				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(○) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2007년 2월 일</p> <p style="text-align: center;">저작자: 나 연 수 (서명 또는 인)</p> <p style="text-align: center;">조선대학교 총장 귀하</p>					