



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2012년 2월
석사학위논문

복합하중조건에서 파열시험을 통한
감육곡관의 손상압력 평가

조 선 대 학 교 대 학 원

원 자 력 공 학 과

윤 민 수

복합하중조건에서 파열시험을 통한
감육곡관의 손상압력 평가

Evaluation of Failure Pressure for Wall-thinned Pipe
Bends by Burst Test under Combined Loading Condition

2012년 2월 24일

조 선 대 학 교 대 학 원

원 자 력 공 학 과

윤 민 수

복합하중조건에서 파열시험을 통한
감육곡관의 손상압력 평가

지 도 교 수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

원 자 력 공 학 과

윤 민 수

윤민수의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 나만균 (인)

위원 조선대학교 부교수 김진원 (인)

2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 감육곡관 시편의 파열시험	2
제 1 절 감육곡관 시편 및 재료	2
1. 굽힘하중에 따른 손상압력	2
2. 곡관부 재료 물성치	13
제 2 절 시험 장치	19
제 3 절 실험 절차 및 방법	20
제 3 장 손상시험 결과 및 토의	25
제 1 절 하중제어 굽힘하중	25
1. 굽힘하중에 따른 손상압력	25
2. 결함위치에 따른 손상압력	30
제 2 절 변위제어 굽힘하중	32
1. 굽힘하중에 따른 손상압력	32

2. 결함위치에 따른 손상압력	37
제 3 절 하중제어 & 변위제어에 의한 굽힘하중	39
제 4 장 유한요소 해석의 신뢰성 검토	43
제 1 절 유한요소 해석 조건	43
제 2 절 유한요소 해석 결과	46
제 5 장 결 론	50

표 목 차

표 2.1.1. 외면 가공 후 곡관부 시편의 외경측정 값	4
표 2.1.2 변위제어용 시편의 표면 가공 후 곡관의 외경 측정 결과	5
표 2.1.3 하중제어용 시편의 결함위치와 크기	11
표 2.1.4 변위제어용 시편의 결함위치와 크기	11
표 2.1.5 실배관 손상시험용 배관 재료의 인장 물성치 및 화학조성	13
표 2.1.6 실배관 손상시험용 배관 재료의 ASME 기준	13

그림 목차

그림 2.1.1 실배관 감육 시편의 곡관부에 사용된 ASTM A234 WPB 곡관	3
그림 2.1.2 내부 감육 결함 가공이 완료된 예비시편의 형상	6
그림 2.1.3 하중제어 시험용 시편의 외호면 결함부의 두께측정	7
그림 2.1.4 하중제어 시험용 시편의 내호면 결함부의 두께측정	8
그림 2.1.5 변위제어 시험용 시편의 외호면 결함부의 두께측정	9
그림 2.1.6 변위제어 시험용 시편의 내호면 결함부의 두께측정	10
그림 2.1.7 시험에 사용된 실배관 곡관 시편의 형상	12
그림 2.1.8 인장시편의 채취 위치 및 형상	14
그림 2.1.9 Elbow에서 채취한 봉상인장시편 사진	15
그림 2.1.10 1차 하중제어 시험용 시편의 인장시험 결과 응력-변형률 곡선	16
그림 2.1.11 2차 변위제어 시험용 시편의 인장시험 결과 응력-변형률 곡선	17
그림 2.1.12 1,2차 곡관부 시편의 응력-변형률 곡선 비교	18
그림 2.2.1 실배관 손상시험 배치 도식도 & 사진	19
그림 2.3.1 실배관 시편의 두께측정	20
그림 2.3.2 감육곡관 시편에 작용되는 굽힘하중의 형태	22
그림 2.3.3 변위를 구하기 위한 해석적 방법	23
그림 2.3.4 변위를 구하기 위한 실험적 방법	24
그림 3.1.1 손상시험 과정에 취득된 데이터의 예	25
그림 3.1.2 하중제어 굽힘하중의 손상시험 결과 시편 손상모드	26
그림 3.1.3 결함위치, 하중적용 손상압력 비교	27
그림 3.1.4 하중제어 굽힘하중의 외호면 원주방향 & 길이방향 변형률 ...	28
그림 3.1.5 하중제어 굽힘하중의 내호면 원주방향 & 길이방향 변형률 ...	29
그림 3.1.6 하중제어 굽힘하중의 외·내호면 원주방향 변형률 비교	31

그림 3.2.1 변위제어 굽힘하중의 손상시험 결과	32
그림 3.2.2 변위제어 굽힘하중의 손상시험 결과 시편 손상모드	33
그림 3.2.3 변위제어 형태의 굽힘하중에 의한 손상압력 비교	34
그림 3.2.4 굽힘하중 작용에 따른 결함위치별 원주방향 변형률	35
그림 3.2.5 굽힘하중 작용에 따른 결함위치별 길이방향 변형률	36
그림 3.2.6 단순내압만 작용할 경우 결함위치별 원주방향 변형률 비교 ..	38
그림 3.2.7 변위제어 굽힘하중이 작용할 경우 결함위치별 원주방향 변형률 비교	38
그림 3.3.1 하중제어 & 변위제어 손상압력 비교	40
그림 3.3.2 하중제어 & 변위제어 원주방향 변형률 비교	41
그림 3.3.3 하중제어 & 변위제어 하중 변화 비교	42
그림 4.1.1 유한요소해석시물레이션 사용된 실베관 3D 모델	44
그림 4.1.2 유한요소해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선	45
그림 4.2.1 하중제어 형태의 유한요소 시물레이션 결과 손상압력	46
그림 4.2.2 하중제어 형태의 굽힘하중 유한요소 시물레이션 결함위치별 원 주방향 변형률 비교	48
그림 4.2.3 변위제어 형태의 유한요소 시물레이션 결과 손상압력	49

ABSTRACT

Evaluation of Failure Pressure for Wall-thinned Pipe Bends by Burst Test under Combined Loading Condition

Min Soo Yoon

Adviser : Prof. Kim, Jin Weon

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Piping systems in nuclear power plants (NPPs) are subject not only to internal pressure but also to bending loads induced by deadweight, thermal expansion, and internal pressure under normal operating conditions. Bending is thus considered to be an important factor in evaluating the integrity of defective piping components. wall thinning defect due to flow-accelerated-corrosion(FAC) is known as a main degradation mechanism of carbon steel pipe in nuclear power plant, so the bending load effect on the integrity evaluation of wall-thinned piping components has become an important issue. Therefore, this study performed burst test using real-scale pipe specimens with local wall-thinning under combined internal pressure and constant bending load, to evaluated the bending load effect on the failure pressure of local wall-thinned pipe bends. As a bending load, in-plane closing- and opening-mode bending were considered in the experiment. Both modes of bending were applied to the specimen in load-control and displacement-control. Also, the specimens with local wall-thinning located at intrados and extrados of elbow were used in the experiment.

The results showed that the bending load effect was more significant when a

constant bending load was applied than when a constant displacement corresponding to the constant bending load was applied. This is associated with the relaxation of bending load which was applied by constant displacement during the pressurization. Thus, the bending effect is relatively minor when applying the displacement controlled bending compared to the load controlled bending. In the load-controlled bending condition the bending load effect was more significant under opening-mode bending than under closing-mode bending. Also, the effect was considerable for intrados rather than extrados wall-thinning case. All specimens were failed by bulging followed by axial cracking, which is a typical failure mode for wall-thinned piping components subjected to internal pressure. The shape of the crack and degree of bulging were virtually the same for all specimens, regardless of the wall-thinning location or applied bending load. This indicates that the failure mode of wall-thinned elbows is less affected by in-plane bending load. The finite element simulation showed that the predicted failure pressure for local wall-thinned elbow specimens under combined loading condition agreed well with the experimental one. This indicated that the conventional finite element analysis reasonably predicts the failure pressure of wall-thinned pipe bends.

제 1 장 서 론

발전소나 기타 플랜트의 배관 또는 Oil과 Gas배관에서 발생하는 국부적인 두께 감소 현상은 이들 배관의 건전성을 저하시키는 주된 손상 원인으로 알려져 있다.[1-7] 특히, 발전소나 화학 플랜트 배관에서의 두께 감소 현상은 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion)에 의해 배관 내부에서 감육 결함이 발생되며, 이들 결함은 발견이 어렵고 손상에 대한 예비 징후가 거의 나타나지 않는 특징을 가진다. 따라서, 원자력발전소 배관 계통의 경우 감육 결함은 탄소강배관의 건전성을 위협하는 가장 대표적인 손상기구로 대두되고 있으며, 감육 결함에 대한 관리가 원전의 안정성과 건전성 측면에서 중요한 항목으로 고려되고 있다.[8-9] 따라서, 최근에는 원전 감육 배관의 건전성 평가와 관련하여 여러 형태의 연구들이 국내·외적으로 진행되고 있으며, 이를 통해 배관 감육 결함에 대한 허용 기준과 건전성 평가 절차를 확립하고자 노력하고 있다.[10-14] 그러나, 이들 연구는 대부분 굽힘하중이 작용하는 배관의 붕괴모멘트에 미치는 감육 결함의 영향을 평가하거나, 단순 내압조건에서 손상압력에 미치는 감육 결함의 영향을 평가하였다. 원전 배관의 경우 내압과 함께 자중과 열팽창 등에 의한 굽힘하중이 동시에 작용되므로, 복합하중 조건에서 배관 손상에 미치는 결함의 영향을 평가하는 것이 중요하다.[4,15]

이와 관련하여 최근 내압과 함께 일정한 크기의 굽힘하중이 동시에 작용되는 조건에서 손상압력에 미치는 감육 결함의 영향을 유한요소해석을 통해 살펴본 바 있다.[16] 그러나, 실험데이터의 부족으로 인해 해석 결과에 대한 검증이 충분히 이루어지지 못하고 있다. 따라서, 본 연구는 하중제어 형태의 굽힘하중이 작용될 때, 감육곡관의 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향과 또 다른 작용하중 형태인 변위제어 형태의 굽힘하중이 작용될 때 감육곡관의 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향을 파악하여 이들을 비교하였다. 이러한 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향에 대한 실험을 통해 정량적 평가를 하고 해석결과와도 비교함으로써 해석적 연구에 대한 신뢰성 또한 검증해보고자 한다.

제 2 장 감육곡관 시편의 파열시험

제 1 절 감육곡관 시편 및 재료

1. 실배관 시편

실배관 시편의 곡관부는 ASTM A106 Gr.B 탄소강으로 냉간 인발 후 노말라이징 열처리를 하였으며, 직관을 상온에서 굽힘 후 열처리하여 잔류응력을 제거한 것이다. 그러나, 2.5in, Sch.80 크기의 ASTM A106 Gr.B 직관을 시편용으로 소량 굽힘 가공하여 곡관을 제작하는 것이 현실적으로 어렵다. 또한, 곡관 내부에 감육 결함을 가공하기 위해서는 굽힘 가공 후 곡관부를 다시 절단하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 곡관 형태로 제작되어 판매되는 2.5in, Sch.80 ASTM A234 WPB 탄소강 곡관(굽힘각=90°)을 구입하여 실배관 시편의 곡관부로 사용하였다. 그림 2.1.1은 구입된 ASTM A234 WPB 곡관을 보여주는 것으로 곡관의 공칭직경과 두께는 각각 $D_{nom}=73.025\text{mm}$, $t_{nom}=7.010\text{mm}$ 이다. 실제 곡관은 제작 과정에서 굽힘으로 인해 외경이 일정하지 못하며, 두께도 위치에 따라 다른 값을 보일 수 있다. 이와 같은 곡관의 초기 형상 편차는 감육 결함 가공 시 가공오차의 원인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 구입된 곡관의 외면을 먼저 가공하여 일정한 외경과 곡률반경, 그리고 표면 거칠기를 갖도록 하였다. 외면 가공을 위해서 먼저 곡관의 외경을 Elbow 중심과 양쪽 끝단에서 내호면-외호면 방향(0°-방향)과 측면-측면 방향(90°-방향)으로 측정하였다. 전체적으로 외경의 편차는 크지 않지만, 일부 곡관은 72mm 이하의 값을 보였다. 따라서, 외경이 72mm 이하인 곡관은 외면 가공에서 제외하였으며, 그 외 시편들은 외경 72mm를 가공 목표치로 설정하였다. 또한, 곡관의 곡률반경(R_b)은 측정 평균치인 94.6mm로 설정하여 외면을 가공하였으며, 그림 2.1.1은 가공 전·후의 Elbow를 보여주고 있다. 이들 외경은 표 2.1.1에 나타낸 바와 같이 모든 곡관 시편에서 72mm에 근접함을 보였으며, 상대적으로 편차가 작은 시편들을 가지고 본 실배관 시편에 사용될 곡관부로 선정하여 감육 결함을 가공 하였다.

결함 가공에 있어 형상은 외호면과 내호면의 위치에서 원형이 되도록 하였다.



(a) 외면 가공 전 곡관부 시편



(b) 외면 가공 후 곡관부 시편

그림 2.1.1 실패관 감육 시편의 곡관부에 사용된 ASTM A234 WPB 곡관

표 2.1.1 외면 가공 후 곡관부 시편의 외경 측정값

Spec. No	끝단-A		중심		끝단-B	
	0°-방향	90°-방향	0°-방향	90°-방향	0°-방향	90°-방향
1	72.30	72.03	71.81	71.50	71.96	71.99
2	72.03	71.95	72.13	71.55	71.96	71.94
3	72.11	72.00	72.35	71.91	71.89	72.00
4	71.92	72.00	72.32	71.80	72.15	71.99
5	72.16	72.01	72.17	71.91	71.94	72.02
6	71.87	71.97	71.77	71.57	72.12	71.91
7	71.91	71.97	72.04	71.79	72.09	71.96
8	71.95	71.95	72.35	71.73	72.17	71.93
9	71.96	71.95	71.92	71.55	72.06	72.00
10	72.09	71.96	72.10	71.63	71.89	72.02
11	71.90	71.95	72.01	71.34	72.00	71.93
12	71.93	71.92	71.74	70.76	72.01	71.89
13	72.10	72.03	71.88	71.75	71.90	72.03
14	71.90	72.05	71.84	72.00	72.15	72.05
15	72.26	71.98	72.17	71.70	72.07	71.95
16	72.15	71.94	71.94	70.98	72.00	72.04
17	71.93	72.00	71.93	71.97	72.23	72.07
18	72.03	71.97	71.82	71.52	72.32	71.95
19	71.95	71.92	71.62	71.89	71.93	71.91
20	72.04	72.03	71.90	71.93	72.19	72.00

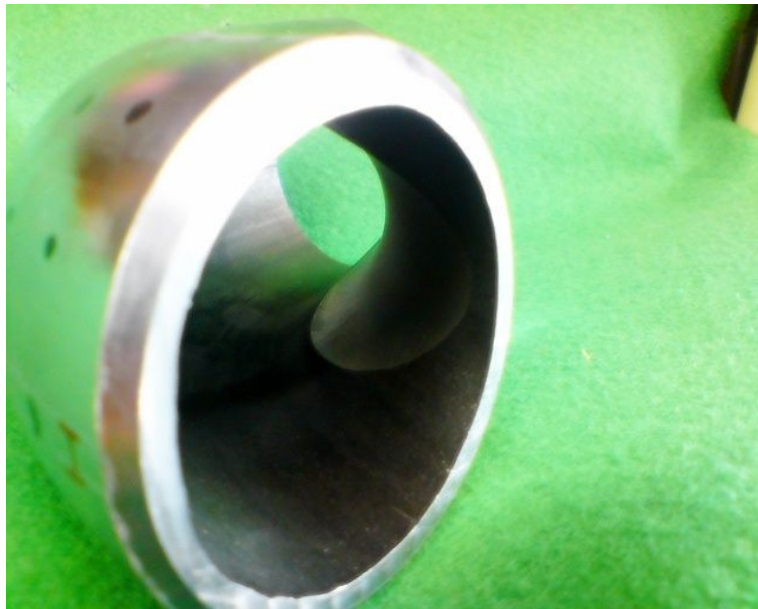
결합의 최소두께는 예비해석을 통해서 얻은 결과 값인 최소두께(하중제어 1.5mm, 변위제어 1.4mm)에 근접하게 가공을 하였다. 그림 2.1.2는 감육 결합 가공이 완료된 곡관부 시편이다. 그림에서 보여준 것과 같이 결합 가공이 완료는 되었지만 이들 결합이 제대로 이루어졌는지에 대한 확인이 필요하다. 따라서 가공의 정확성을 파악하기 위해 가공한 모든 시편의 두께를 측정하였다. 그림 2.1.3과 그림 2.1.4는 하중제어 시험에 사용 될 시편의 두께측정을 한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 가공은 양쪽 대칭면이 제대로 이루어져 가공이 이루어졌으며 의도한 최소두께 1.5mm 이상인 것들은 추가 가공을 하여 모두 일정하게 가공을 하였다. 그림 2.1.5와 그림 2.1.6은 변위제어 시험용 시편으로 이들 역시 정확한 가공여부를 파악하기 위하여 두께측정을 하였다. 하중제어 시험용 시편과 달리 감육 결합의 최소두께가 차이를 보이는 이유는 곡관부 시편을 추가 구입하여 시편을 제작하는 과정에서, 재료의 기본 물성치를 알아보기 위해 수행한 인장시험 결과 두 재료의 인장강도의 차이를 보였다. 따라서 보유한 고압펌프의 성능에 맞춰서 최소두께를 재가공하였다. 표 2.1.2는 추가 구입한 곡관부 시편의 표면 가공 후 외경을 측정한 표이다. 변위제어 시험용 시편 역시 하중제어 시험용 시편과 마찬가지로 72mm를 기준으로 결합가공을 결정하였다.

표 2.1.2 변위제어용 시편의 표면 가공 후 곡관의 외경 측정결과

Spec. No	끝단-A		중심		끝단-B	
	0°-방향	90°-방향	0°-방향	90°-방향	0°-방향	90°-방향
1	71.98	72.46	71.46	71.99	72.07	72.28
2	72.03	72.37	72.96	72.05	71.94	72.28
3	71.96	72.4	72.06	72.21	72.01	72.37
4	71.97	72.49	71.94	72.01	71.76	72.34
5	71.94	72.38	71.61	72.24	72.95	71.31
6	71.95	72.46	71.77	71.92	72	72.46
7	71.94	72.44	72.96	72.11	71.96	72.54
8	72.05	72.48	71.27	71.85	71.95	72.37
9	71.95	72.63	71.98	72.05	71.97	72.41
10	71.99	72.35	70.32	71.95	72.33	72.29



(a) Extrados



(b) Intrados

그림 2.1.2 내부 감속 결합 가공이 완료된 예비시편의 형상

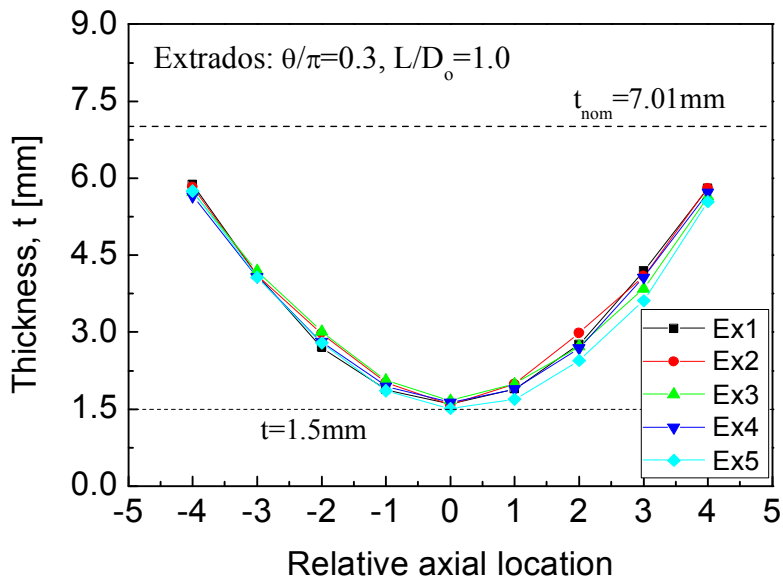
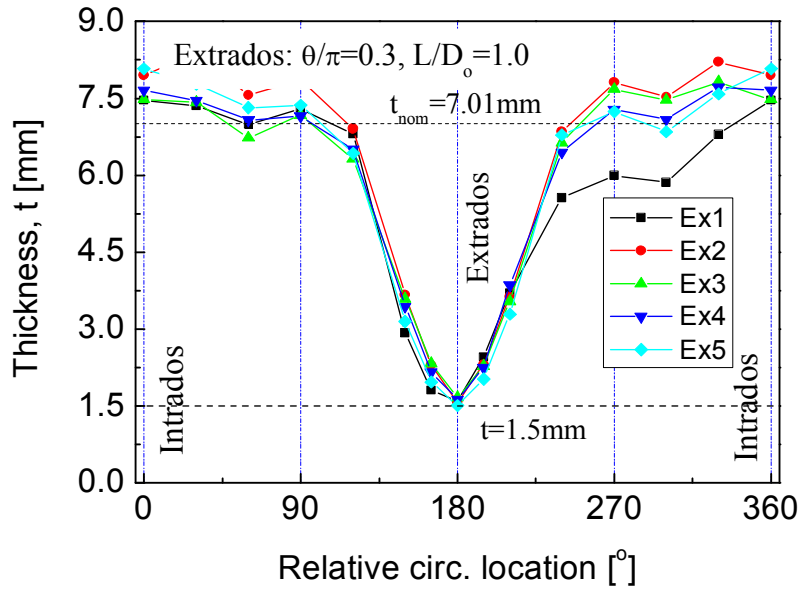


그림 2.1.3 하중제어 시험용 시편의 외호면 결함부의 두께측정

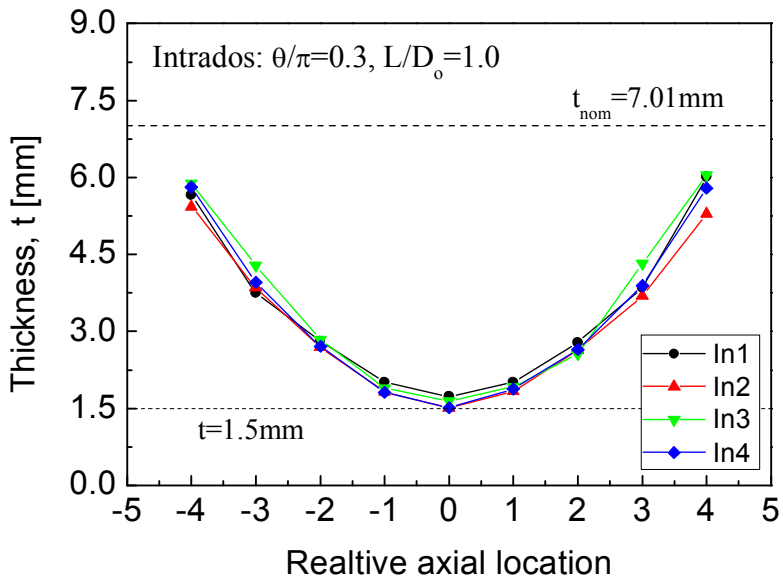
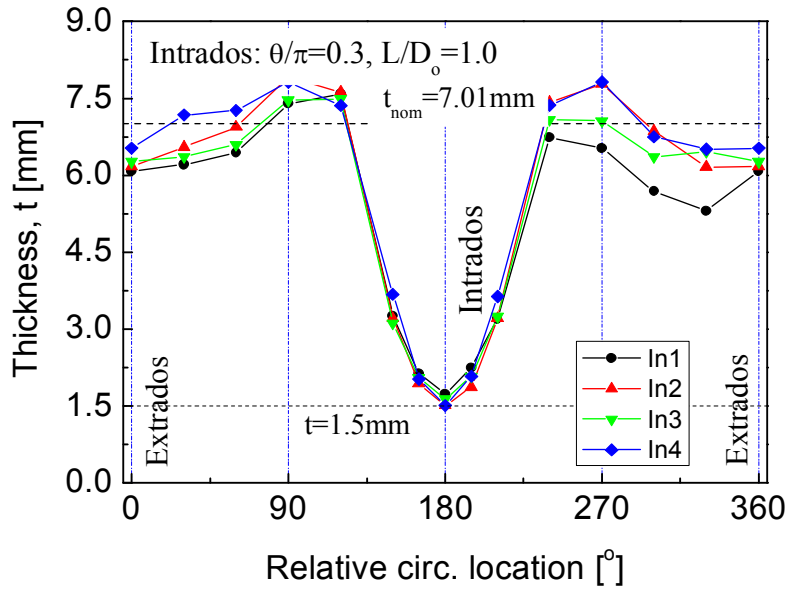


그림 2.1.4 하중제어 시험용 시편의 내호면 결함부의 두께측정

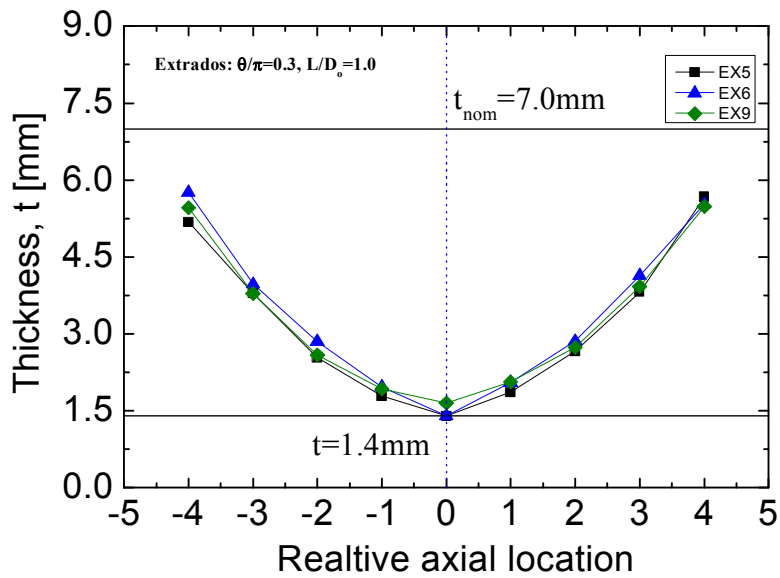
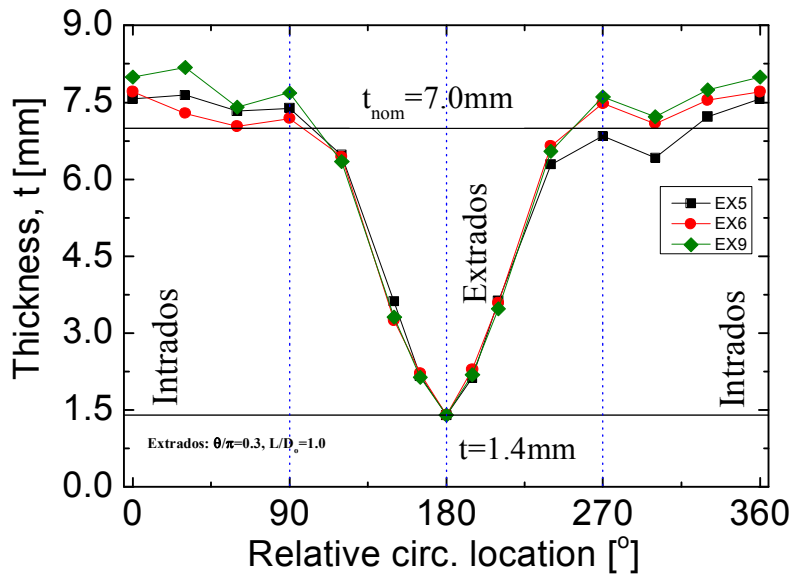


그림 2.15 변위제어 시험용 시편의 외호면 결함부의 두께측정

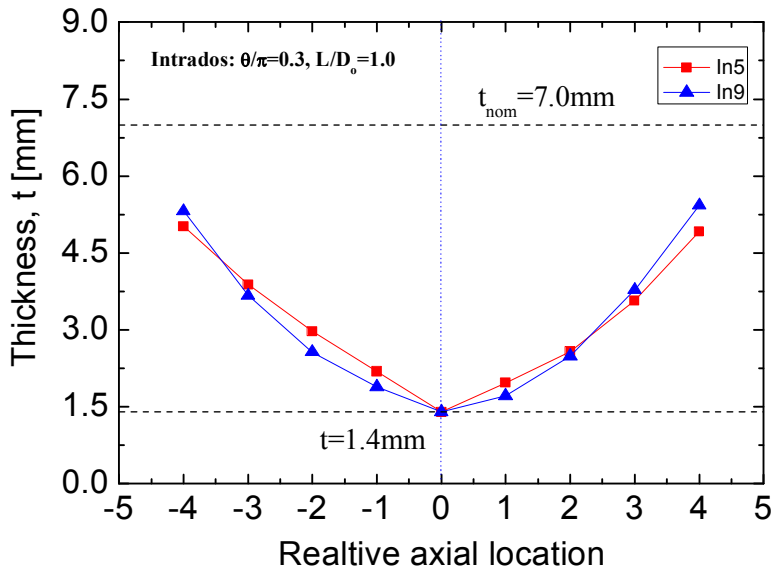
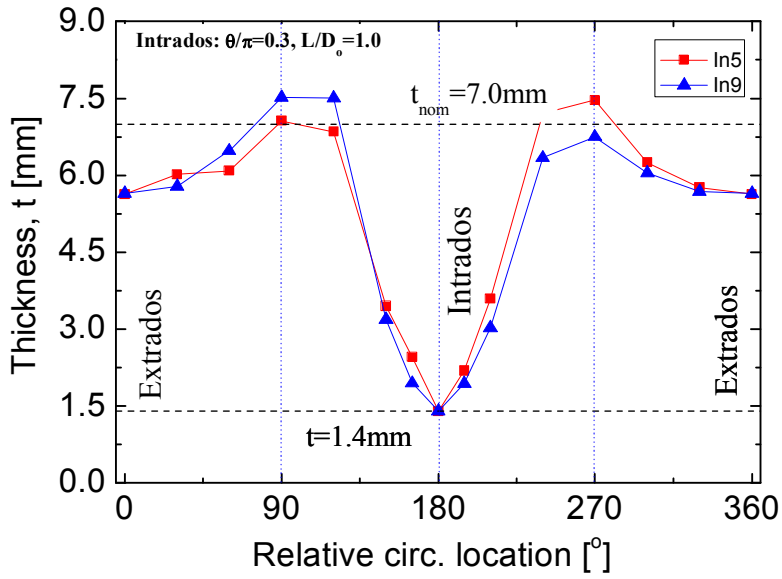


그림 2.1.6 변위제어 시험용 시편의 내호면 결함부의 두께측정

표 2.1.3과 표 2.1.4는 시험 시편의 결함 위치와 크기를 나타낸 것으로 하중제어 시험과 변위제어 시험에 사용된 시편의 최소두께를 제외하고 결함위치별로 결함의 길이와 폭은 모두 일정하게 가공을 하였다.

표 2.1.3 하중제어용 시편의 결함위치와 크기

Defect Location	ID. No	Loading Type	L/D ₀	t _p (mm)	θ/π	Defect Location	ID. No	Loading Type	L/D ₀	t _p (mm)	θ/π
Extrados	Ex1	Press	1.0	1.5	0.3	Intrados	In1	Press	1.0	1.5	0.3
	Ex2	Press+ Closing	1.0	1.5	0.3		In2	Press+ Closing	1.0	1.5	0.3
	Ex3	Press+ Opening	1.0	1.5	0.3		In3	Press	1.0	1.5	0.3
	Ex4	Press+ Opening	1.0	1.5	0.3		In4	Press+ Opening	1.0	1.5	0.3
	Ex5	x	1.0	1.5	0.3						

표 2.1.4 변위제어용 시편의 결함위치와 크기

Sp.ID	Defect Location	Loading type	t _p (mm)	L/D ₀	θ/π
Ex5	Extrados	Press + Open	1.5	1.0	0.3
Ex6		Press + Open	1.4	1.0	0.3
Ex9		Press	1.4	1.0	0.3
In5	Intrados	Press + Open	1.4	1.0	0.3
In9		Press	1.4	1.0	0.3

그림 2.1.7은 손상시험에 사용할 실패관 시편의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 실패관 시편은 굽힘각이 90° 인 곡관에 직관을 연결한 것으로 곡관과 직관 모두 2.5in, Sch.80 ($D_{nom}=73.025\text{mm}$, $t_{nom}=7.010\text{mm}$)이다. 시편은 단순 내압뿐 아니라 In-plane상에서 굽힘하중을 가할 수 있도록 설계되었으며, 곡관에 연결된 직관의 길이가 배관 직경의 5배로 시편의 양단에서 선형 변위를 가할지라도 곡관 부에 적절한 형태의 굽힘하중이 작용될 수 있도록 하였다. 실패관 시편에서 감육 결함은 곡관의 중심에 위치하도록 설계하였다.

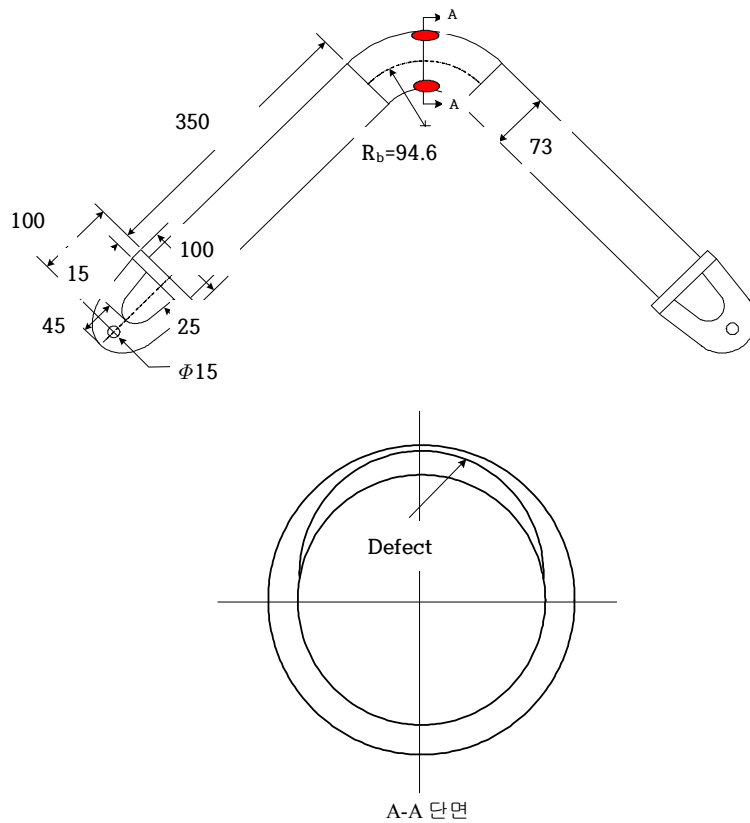


그림 2.1.7 시험에 사용된 실패관 곡관 시편의 형상

2. 곡관부 재료 물성치

가. 재료

앞서 기술한 실패관 시편의 곡관부의 크기와 재료는 시편의 취급 및 구입의 용이성과 원자력발전소에서 많이 사용되고 있는 재료로 결정하였다. 따라서 본 논문에서는 원자력 발전소에서 널리 사용되고 있는 2.5in, Sch.80 배관을 대상으로 실패관 시편을 제작하였으며, 시편의 재료는 현재 원자력발전소에서 1차측 배관뿐만 아니라, 2차측 배관에서 가장 많이 사용되고 있는 A234WPB 탄소강으로 하였다. 이들 재료의 배관 구입 시 첨부된 CMTR(Certified Material Test Report)과 ASME(American Society of Mechanical Engineer) 기준은 각각 표 2.1.5와 표 2.1.6이다.

표 2.1.5 실패관 손상시험용 배관 재료의 인장 물성치 및 화학조성 (CMTR)

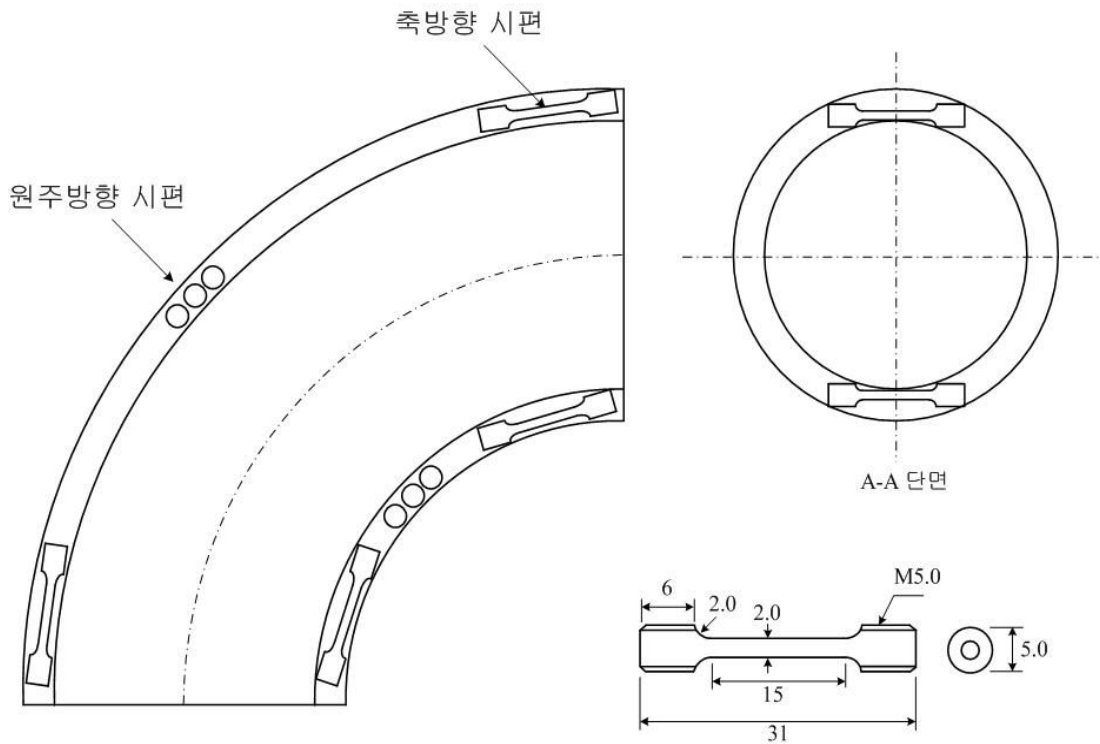
Materials		Yield stress, σ_y [MPa]				Tensile stress, σ_u [MPa]				총 연신률 [%]	
Elbow	A234 WPB	241.29				416.64				28.2%	
Materials		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
Elbow		0.18	0.22	0.64	0.014	0.006	0.02	0.05	0.02	0.02	0

표 2.1.6 실패관 손상시험용 배관 재료의 ASME 기준

Materials		Yield stress, σ_y [MPa]				Tensile stress, σ_u [MPa]				총 연신률 [%]	
Elbow	A234 WPB	240				415-585				22	
Straight pipe	A106 Gr.B	240				415				30	
Materials		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
Elbow		0.3	0.1	1.06	0.05	0.058	-	-	-	-	-
Straight pipe		0.3	0.1	1.06	0.035	0.035	0.4	0.4	-	0.4	0.08

나. 배관 시편의 인장시험

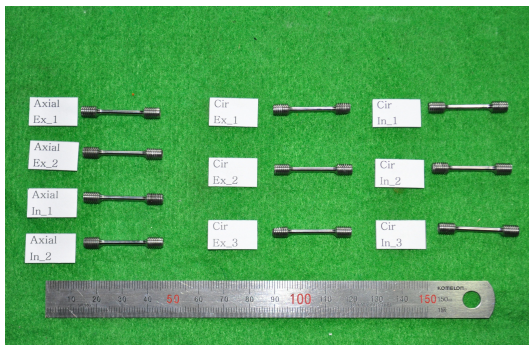
시험장치 설계 및 예비해석과 손상 시험 결과와 유한요소 해석결과를 비교하고 감육부의 손상특성 등을 파악하기 위해서는 재료에 대한 항복강도, 인장응력, 연신률이 필요하며, 추가적으로 응력-변형률 곡선 또한 필요하다. 이들에 대한 값을 구하기 위해서 배관재료에 대한 인장시험을 수행하였다. 인장시험편의 채취는 그림 2.1.8에 나타난 것과 같이 곡관의 내호면과 외호면 위치에서 시편의 양 끝단 그리고 중심부에서 원주방향과 길이방향으로 각각 3개씩 시편을 채취하여 상온에서 인장시험을 수행하였다. 인장시험의 방법 및 채취위치는 하중제어와 변위제어 시험용 시편 모두 동일하며, 시편은 직경 2mm이고 평형부 길이가 15mm인 봉상시편을 사용하였다.



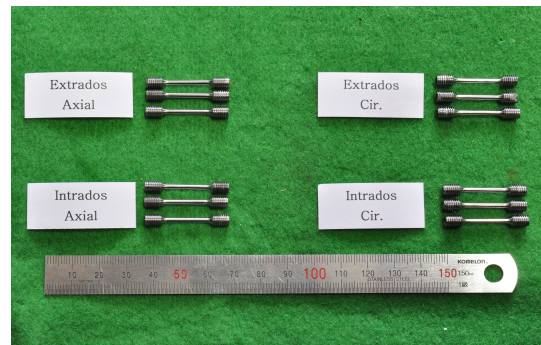
<봉상 인장시험편>

그림 2.1.8 인장시험편의 채취 위치 및 형상

인장시험은 준정적 하중속도에서 수행되었으며, 200kgf 로드셀이 부착된 기계식 만능시험기가 사용되었다. 모든 시험에서 변위는 게이지 길이가 12mm인 연신률계를 사용하여 측정하였다. 각각의 시험 조건에서 3회씩 시험이 수행되었다. 그림 2.1.9는 하중제어손상시험용 시편(1차), 변위제어손상시험용 시편(2차) Elbow에서 채취한 봉상시편을 보여주고 있다. 인장시험 결과 그림 2.1.10과 그림 2.1.11은 같은 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있었다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 동일한 시험 조건에서는 거의 동일한 응력-변형률 곡선을 보였지만, 앞서 기재한 CMTR 상의 값보다 항복응력, 인장응력이 낮았고 외호면과 내호면에서 편차를 보였다. 이는 Elbow의 제작 과정에서 변형에 의해 곡관의 위치별로 물성치 편차가 발생하기 때문인 것으로 보인다. 따라서, 비록 인장시험에 미소시편이 사용되었지만 데이터의 편차가 크지 않고 신뢰성 있는 결과를 주고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 2.1.12와 같이 하중제어 시험용 시편의 인장시험 결과와 변위제어 시험용 시편의 인장시험 결과를 비교해보면, 재료의 강도에서 차이가 나는 것을 확인할 수가 있다. 이는 구입당시 같은 재료로 구입을 하였으나, 인장시험 결과 2차로 구입한 곡관의 인장 강도가 더 높게 나오는 것을 확인하였다. 따라서, 예비해석 및 유한요소해석에서는 1차로 구입한 시편의 재료 물성치와 2차로 구입한 시편의 재료 물성치를 각각 적용하여 해석을 수행하였으며, 이에 해석결과 결함의 길이 및 폭은 일정하게 가공을 하되 결함부의 최소두께는 보유한 장비의 성능 범위를 초과하지 않는 한에서 추가 가공을 하였다.



(a) 1차 Elbow에서 채취한 시편



(b) 2차 Elbow에서 채취한 시편

그림 2.1.9 Elbow에서 채취한 봉상인장시험 사진

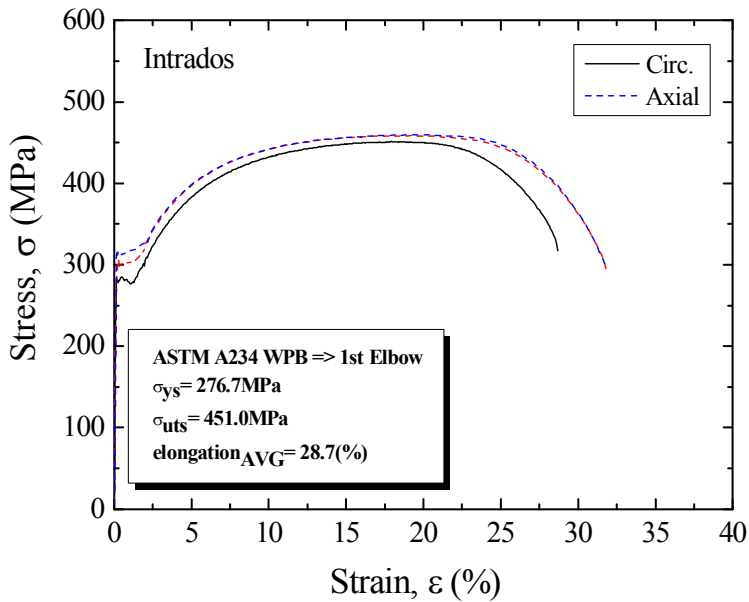
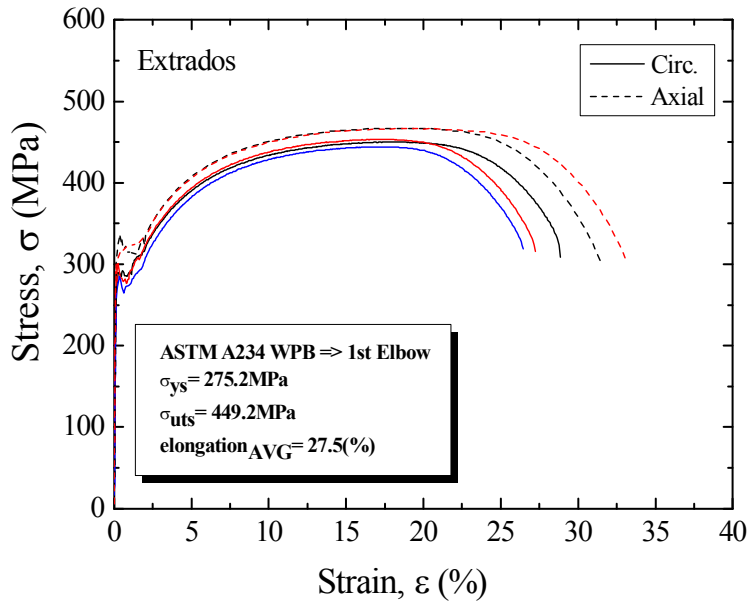


그림 2.1.10 1차 하중제어 시험용 시편의 인장시험 결과 응력-변형률 곡선

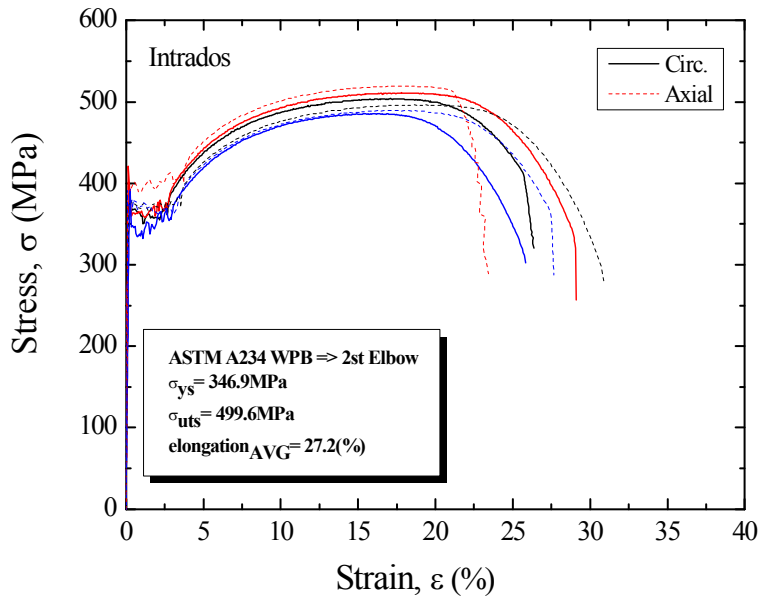
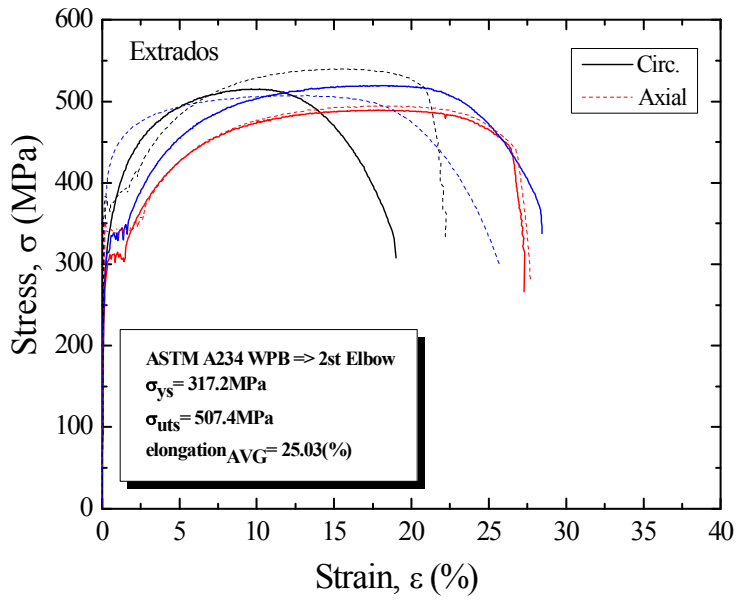


그림 2.1.11 2차 변위제어 시험용 시편의 인장시험 결과 응력-변형률 곡선

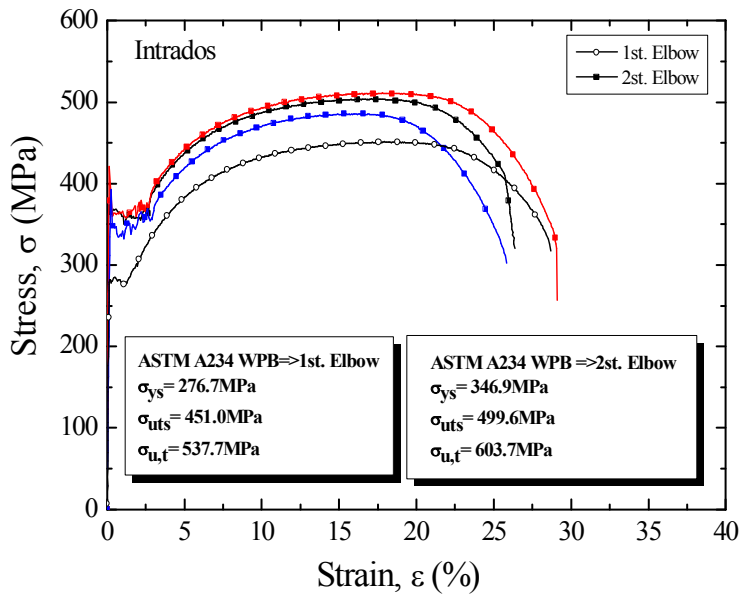
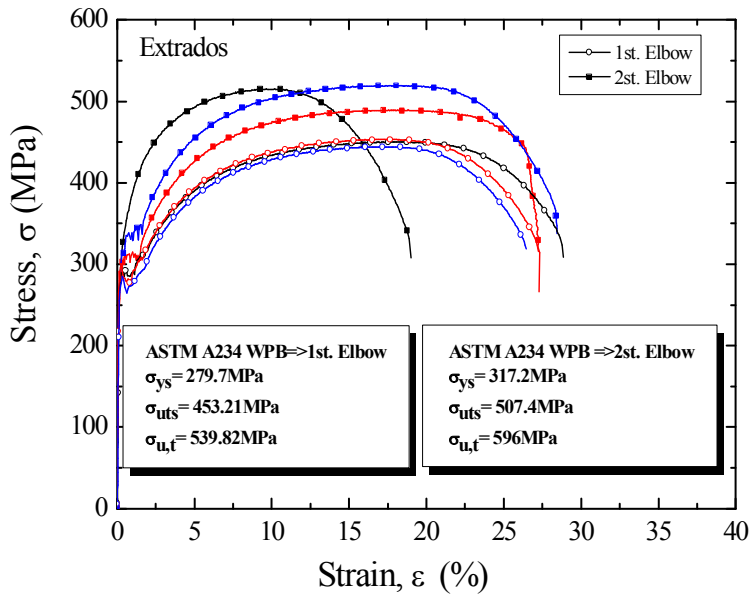


그림 2.1.12 1,2차 곡관부 시편의 응력-변형률 곡선 비교

제 2 절 시험 장치

90도 감육곡관 시편 손상시험은 그림 2.2.1에 나타낸 것과 같이 유압식 인장시험기 Instron 8500을 이용하였으며, 굽힘하중과 단순내압 실험을 진행하였다. 이 유압식 인장 시험기는 총 5ton의 하중을 줄 수 가 있으며, 실험 시 필요한 하중 약 1ton의 하중을 주기에 적합하다. 시편의 손상에 대한 안전성과 손상과정을 관찰할 수 있도록 하기위해서 강화 아크릴을 이용한 방호막을 제작하였다.

손상시험 시 이용할 가압장치는 수압을 이용하며 최고 40MPa 까지 가압이 가능한 자동고압장치 실린지 펌프와 실험시간 단축을 위한 수동 펌프를 연결하였다. 하중제어 시험과 변위제어 시험의 시험조건은 굽힘하중의 작용형태에 관계없이 시편과 시험장치의 결합은 모두 동일하게 설정되어 있으며 하중조건만을 달리 하였다.

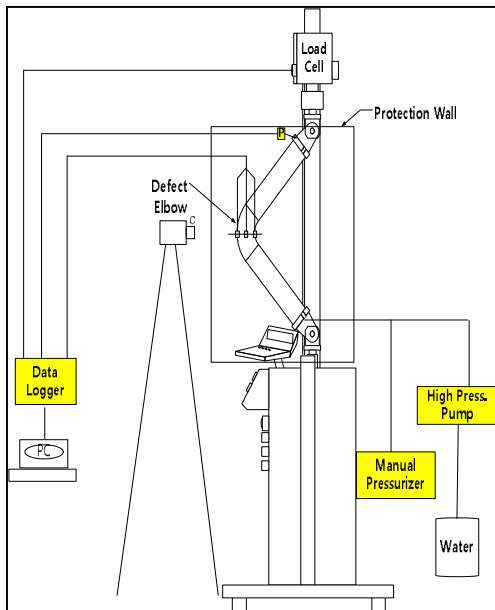


그림 2.2.1 실패관 손상시험 배치 도식도 & 사진

제 3 절 실험 절차 및 방법

손상 시험에 앞서 가공이 완료된 시편의 외면에 일정한 간격으로 점을 찍어 결함부를 중심으로 각 점에서 초음파 두께 측정 장비를 이용하여 두께를 측정하였다. 이를 통해 Elbow 내부의 감육 결함에 대한 형상과 결함부의 두께를 확인하였다. 그림 2.3.1은 실배관 시편에 두께측정을 하는 사진을 촬영한 것이다. 사진과 같이 두께측정을 한 결과 Elbow 내부의 결함 형상 및 두께가 설계된 값과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

두께 측정이 완료된 시편은 각 부위에 변형률 게이지를 부착하기 위해 표면을 연마하였다. 결함부 중심에서는 연마 후 두께를 다시 측정하여 연마에 의한 두께 감소 정도를 확인하였다. 두께 측정이 완료된 시편에 대해 곡관부의 외호면, 내호면, 측면의 중심에 각각 원주방향과 길이방향으로 변형률 게이지를 부착하였다. 변형률 게이지의 최대 유효 변형률은 15%이다.



그림 2.3.1 실배관 시편의 두께측정

게이지 부착이 완료된 시편을 인장 시험기에 장착 하고나서 시편 내에 물을 가득 채웠다. 또한 압력 및 변형률 데이터를 받을 수 있는 Data Logger 와 PC에 각각 연결하여 시험 준비를 마쳤다. 각 시편의 시험모드는 단순내압만을 주어 시험을 진행하는 경우, 손상이 발생할 때 까지 일정한 속도(약 1MPa/min)로 내압을 가하였으며 가압 방법은 초기 5MPa까지는 고압 펌프와 수동 펌프를 모두 작동 하고 이후에는 고압펌프만을 이용하여 1MPa/min의 가압 속도를 유지하도록 유량을 조절하였다. 굽힘하중이 적용되는 시험모드인 경우에는 고압펌프를 이용하여 10MPa 까지 가압을 한 후 가압을 멈추고 일정한 크기의 하중을 주거나, 일정한 크기의 변위를 작용하였다. 일정한 하중 또는 변위가 작용된 상태에서 시편은 다시 가압 되어 최종 손상되었다. 시험이 진행되는 동안 감육곡관 시편의 결함부에서 발생하는 변형률과 내압의 변화는 미리 준비된 데이터 취득 장치를 이용하였으며, 추가 적으로 비디오카메라를 결함부 전면에 설치하여 결함부의 변형과 손상 과정을 촬영하였다.

본 논문에서는 단순내압 뿐만 아니라 내압과 일정한 크기의 하중 또는 변위가 작용된 상태에서 내압에 의한 손상 거동을 파악하고, 감육곡관의 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향을 살펴보고자 한다.

따라서 시편에 작용하는 하중 결정은 매우 중요하다. 먼저 하중제어 형태의 굽힘 하중을 줄 경우, 시편 내에 압력을 10MPa까지 가압을 한 다음, 가압을 멈추고 계산된 일정한 하중을 적용·유지 시켰다. 하중은 식 (1)에 나타낸 것처럼 결함이 없는 90도 곡관이 ASME Sec.III NB의 허용기준을 만족하는 최대모멘트에 해당하는 하중을 계산하였다. 그림 2.3.2에 나타낸 것과 같이 하중제어 형태의 축 방향 하중 으로 시편에 작용시켰다. 따라서, 배관설계 시 고려될 수 있는 최대 굽힘하중이 손상시험에 고려된 것이다. 시험에는 In-plane상의 열림모드와 닫힘모드 굽힘하중이 고려되었으며, 두 방향 모두 같은 크기의 하중을 고려하였다. 시험에 적용된 축방향 하중은 닫힘모드의 굽힘하중인 경우에는 +1071.6kgf, 열림모드인 경우에는 -1071.6kgf이다. 굽힘하중 계산 시 곡관의 직경은 72.0mm, 두께는 7.0mm로 하였

으며, 허용응력세기(S_m)는 137.9MPa을 적용하였다. 이들 값은 변위제어 형태의 굽힘하중 계산에도 동일하게 적용시켰다.

변위제어 형태의 굽힘하중을 줄 경우에 변위량은 하중제어 형태의 굽힘하중 작용에 적용된 하중에 해당하는 크기로 결함이 없는 시편의 모델을 이용한 해석과 실제 시험결과를 통해 적합한 변위를 구하였다. 그림 2.3.3과 그림 2.3.4는 변위를 구하기 위한 방법을 나타낸 것이다.

$$S_e = C_2 \frac{D_0}{2I} M_i \leq 3S_m \quad (1)$$

여기서,

$$C_2 = 1.95/h^{\frac{2}{3}}, \text{ but } < 1.5$$

$$h = tR_b/r_m^2$$

$$r_m = (D_o - t)/2$$

$$I = 0.0491 \times (D_o^4 - D_i^4)$$

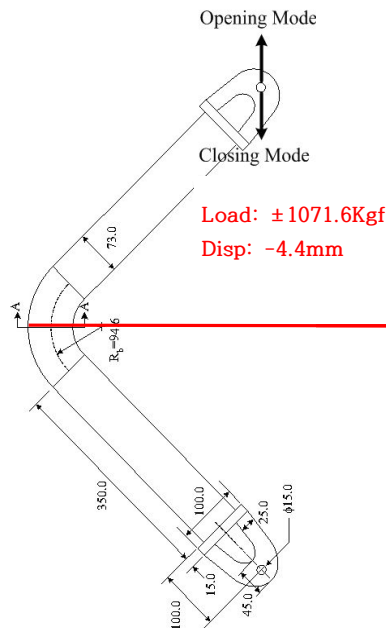
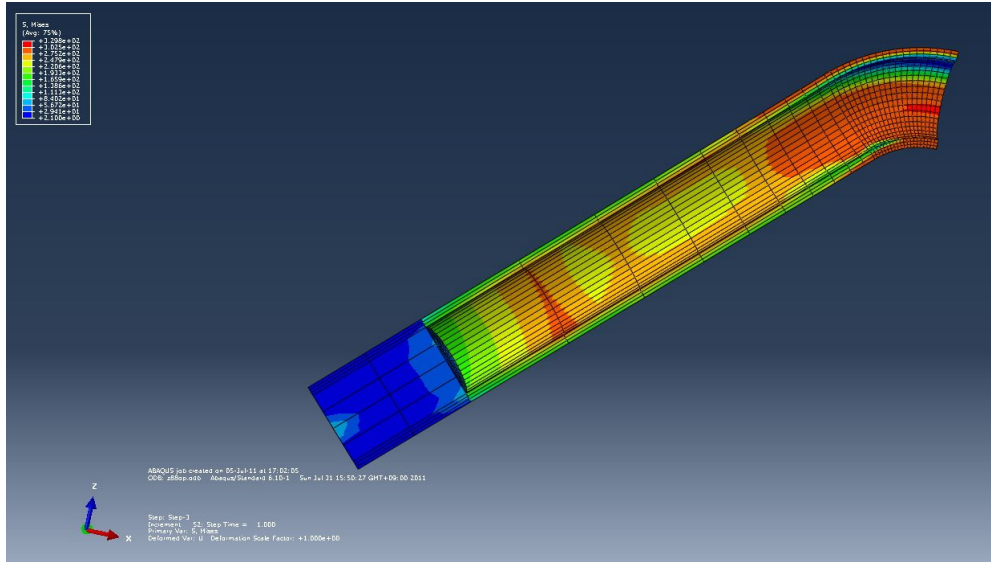
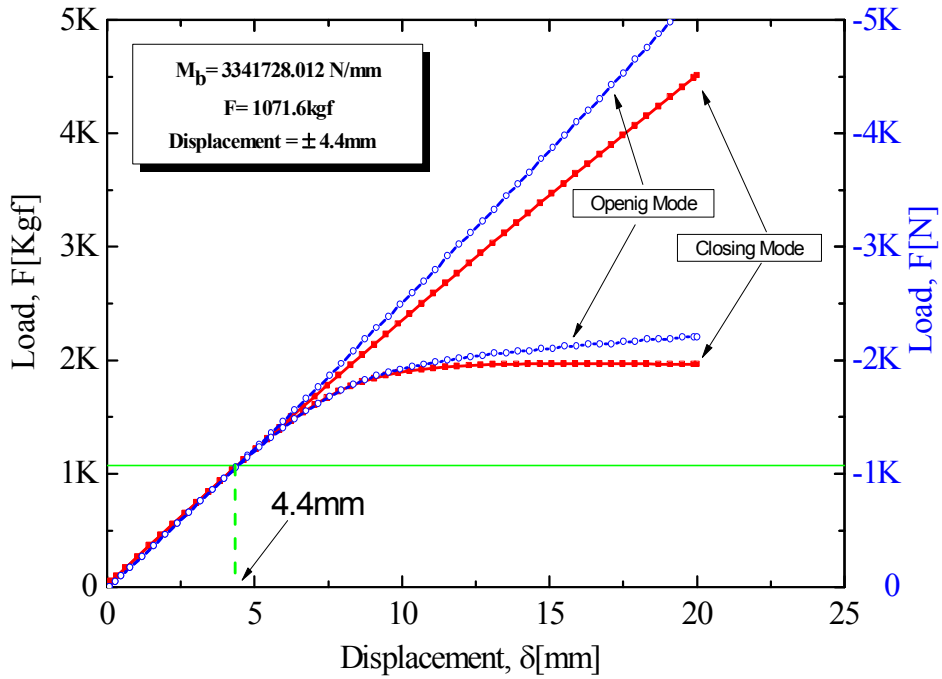


그림 2.3.2 감육곡관 시편에 작용되는 굽힘하중의 형태



(a) 해석에 사용된 결함 없는 곡관의 3D 모델



(b) 탄소성 해석을 통한 하중-변위 곡선

그림 2.3.3 변위를 구하기 위한 해석적 방법

이들 방법을 통해 구해진 변위량은 해석에서는 열림모드와 닫힘모드에서 축 방향으로 $\pm 4.4\text{mm}$ 이었으며, 실험적 방법에서는 열림모드와 닫힘모드 각각 -4.2mm , 5.2mm 의 결과를 보임으로써 시험에 적용될 변위는 -4.4mm 로 결정되었다.

변위제어 형태의 굽힘하중이 작용될 때 손상시험에서는 단순내압 및 내압과 열림모드 조건의 시험만을 수행하였다. 그 이유는 하중제어 형태의 굽힘하중 시험결과에서 단순내압 대비 내압과 닫힘모드 굽힘하중을 작용할 때 손상압력의 영향이 없거나 미비하였기 때문에 변위제어 손상시험에서는 시험조건을 내압과 열림모드 형태의 굽힘하중만을 적용시켰다.



그림 2.3.4 변위를 구하기 위한 실험적 방법

제 3 장 손상시험 결과 및 토의

제 1 절 하중제어 굽힘하중

1. 굽힘하중에 따른 손상압력

손상시험을 수행한 결과 표 2.1.3에 나타난 것과 같이 결함이 곡관의 외호면에 존재하는 경우와 내호면에 존재하는 경우에 대해 각각 단순 내압과 내압과 열림모드 굽힘하중 또는 닫힘모드 굽힘하중이 동시에 작용된 상태에서 손상시험을 수행하였다. 각 조건 별로 1개의 시험편이 사용되었으며, 결함부에서 두께 차이로 인해 손상압력의 편차가 클 것으로 판단되는 조건에서는 추가 시험을 수행하였다.

손상시험을 통해 결함부의 변형률과 내압의 변화, 그리고 곡관 시험편에 작용되는 굽힘하중 등이 측정된다. 그림 3.1.1은 손상시험 과정에 취득된 작용하중, 내압, 그리고 변형률 데이터의 예로 시간에 따른 이들 데이터의 변화를 나타낸 것이다.

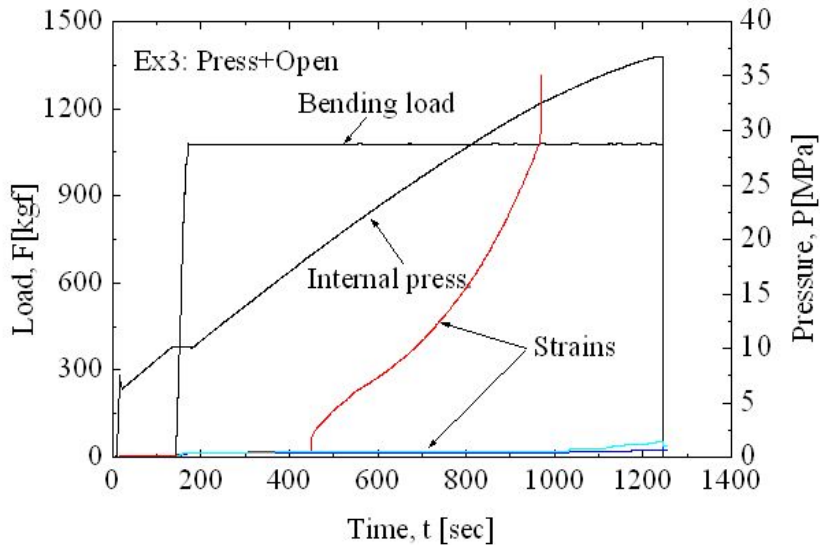


그림 3.1.1 손상시험 과정에 취득된 데이터의 예

그림에서 알 수 있듯이 초기 5MPa까지는 2대의 펌프를 동시에 작동함에 따라 내압이 급격히 증가하다가 5MPa이후 10MPa까지는 거의 일정한 속도로 내압이 증가하였다. 곁힘하중이 작용되는 과정에는 일정한 내압이 유지되고, 일정한 곁힘하중이 작용된 상태에서 다시 내압이 증가하여 최종 손상이 발생하였다. 일정한 크기의 내압 이상에서 결합부의 원주방향 변형률이 다른 변형률 데이터와 달리 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 최종 손상이 발생하기 전에 변형률 게이지가 탈락되어 신호가 중단되었다.

이들 데이터로부터 감육곡관 시편의 결합부에서 최종 손상이 발생할 때까지 일정한 크기의 곁힘하중이 유지된 상태에서 내압이 계속 가해지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 시험에서 의도한 바와 같이 하중제어 형태로 일정한 크기의 곁힘하중이 작용된 상태에서 감육곡관 시편이 내압에 의해 손상되는 것을 알 수 있다. 또한, 측정된 변형률 데이터로부터 감육곡관의 손상이 결합부에서 원주방향 변형에 의해 지배되고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 3.1.2는 시험 결과 손상모드를 보여주는 것으로 결합위치와 곁힘하중의 작용에 관계없이 유사한 손상모드를 보이고 있다. 단순내압, 열림모드, 닫힘모드 모두 손상 부분을 보면 길이방향으로 일정하게 손상이 이루어진 것을 확인할 수 있었으며, 이에 곁힘하중은 손상모드에는 영향이 크게 미치지 않음을 알 수 있었다. 이는 기존 연구와도 일치한다.[17]



그림 3.1.2 하중제어 곁힘하중의 손상시험 결과 시편 손상모드

손상모드에서의 차이는 없음을 확인하고 압력계이지를 통해 취득한 압력 값을 가지고 시험모드 각각의 손상 시 압력을 비교해 보았다. 손상압력 비교는 굽힘하중을 주었을 때 발생한 손상압력을 단순내압만을 작용시킨 손상압력으로 나누는 방식으로 비교를 하였다. 그림 3.1.3은 손상압력의 변화를 잘 나타낸 것이다.

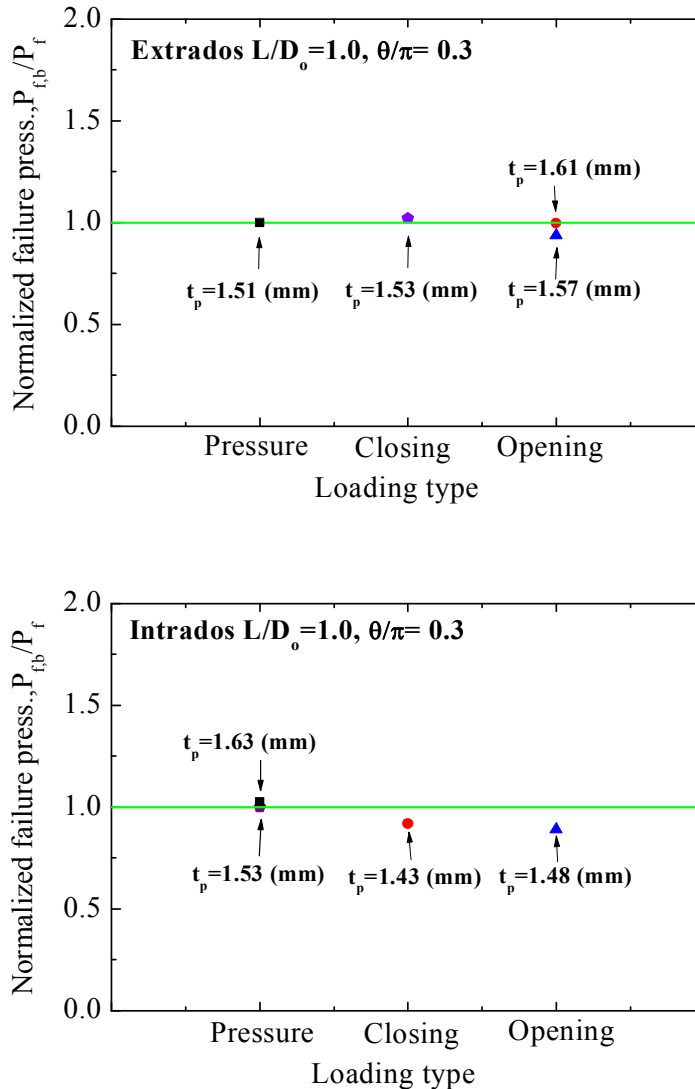


그림 3.1.3 결함위치별 단순내압 대비 굽힘하중 적용 손상압력 비교

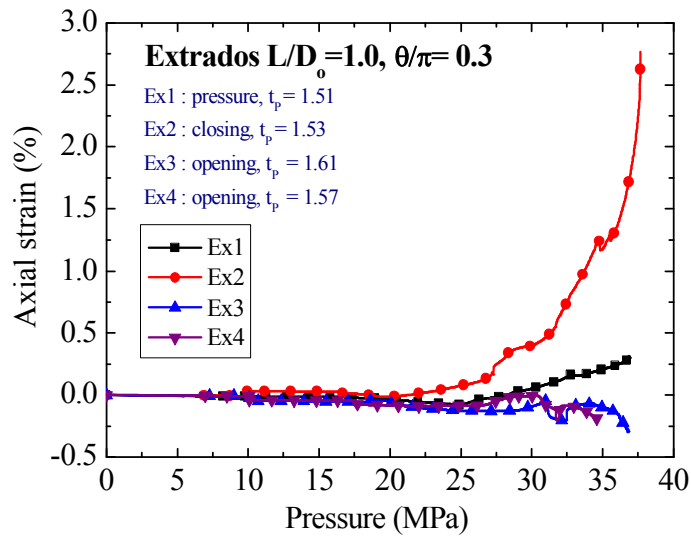
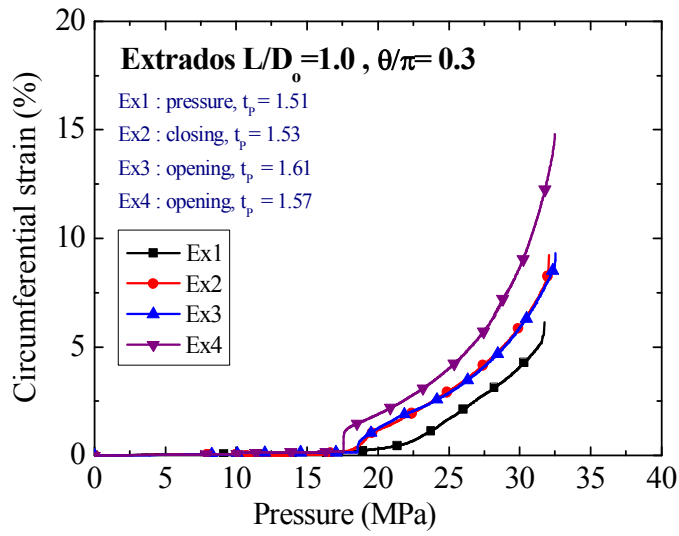


그림 3.1.4 하중제어 굽힘하중의 외호면 원주방향 & 길이방향 변형률

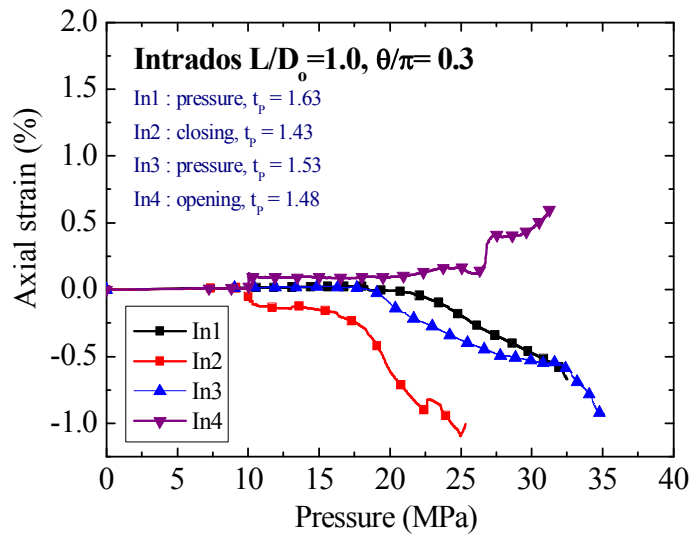
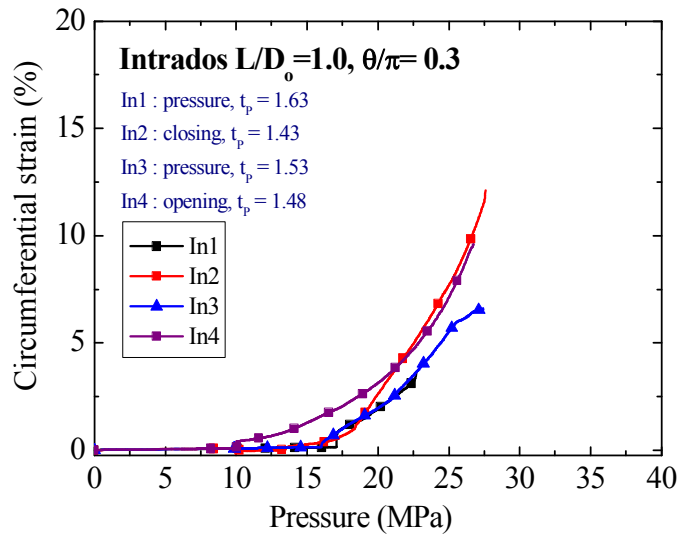


그림 3.1.5 하중제어 굽힘하중의 내호면 원주방향 & 길이방향 변형률

그림 3.1.3에서 1.0에 가까울수록 단순내압일 때 손상압력과 같음을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 하중제어 굽힘하중이 작용되어질 경우 단순내압 대비 각각 시편의 최소두께를 고려하였을 때 단힘모드 에서는 거의 변화가 없으며, 열림모드 일 때 외호면과 내호면에서 손상압력 감소를 보였다.

그림 3.1.4와 그림 3.1.5는 이러한 손상압력의 거동에 대해서 파악하기 위해 결함부의 원주방향과 길이방향 변형률을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 단순내압 대비 굽힘하중이 작용되어질 때 소성변형이 일어나는 구간이나 변형률의 변화가 크게 발생하는 것을 확인할 수가 있다. 특히 결함의 위치가 내호면에 있을 때 그리고 굽힘하중이 열림모드일 때 변형률의 변화 및 소성변형 구간이 더 크고 빨리 일어난다는 것을 알 수가 있었다.

2. 결함위치에 따른 손상압력

결함위치가 외호면인 경우와 내호면일 때 손상압력의 차이 역시 확연히 차이가 난다. 외호면과 내호면의 원주방향 변형률 비교를 나타낸 그림 3.1.6을 보면 세부적으로 보았을 때 단힘모드, 열림모드, 단순내압에서 결함위치에 따른 변형률의 큰 차이를 보이고 있다. 단순내압인 경우 외호면의 변형이 내호면에 비해 더 낮게 발생되며 소성변형 역시 더 높은 압력에서 일어났다.

또한 이들이 굽힘하중을 받았을 때는 단순내압과 달리 큰 차이를 보이면서 변형이 생기는 것을 관찰할 수 있다. 그리하여 전체적으로 보게 되면 내호면인 경우 외호면에 비해 변형률의 차이가 상당한 큰 차이를 보이고 있으며, 이에 내호면이 외호면에 비해 굽힘하중의 영향을 더 많이 받는다 할 수 있겠다.

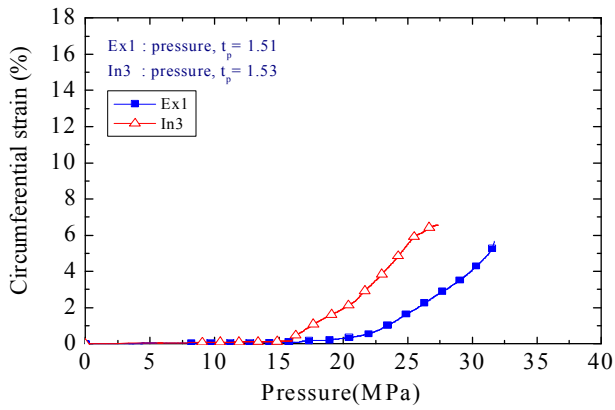
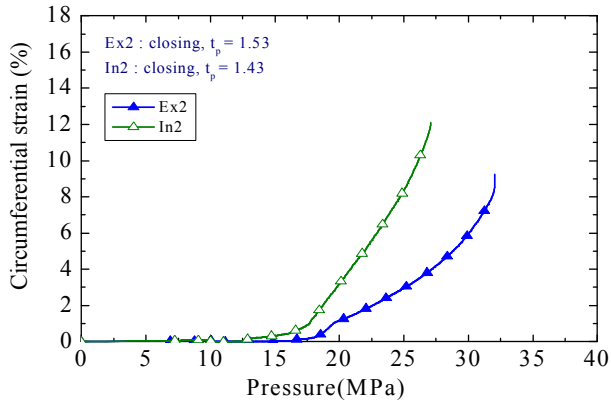
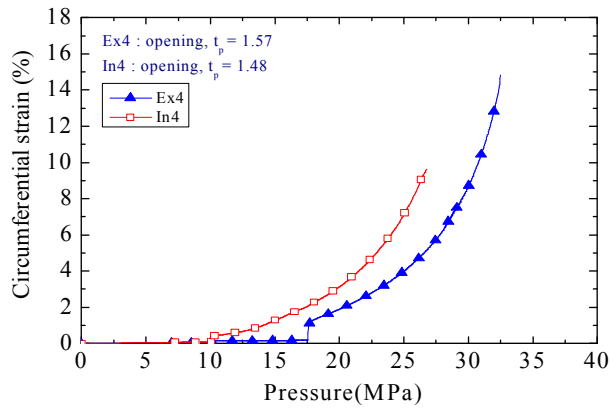


그림 3.1.6 하중제어 급힘하중의 외·내호면 원주방향 변형률 비교

제 2 절 변위제어 굽힘하중

1. 굽힘하중에 따른 손상압력

원자력 발전소에서는 열팽창뿐만 아니라 자중에 의한 변위가 발생한다. 따라서 복합하중 조건에서 변위제어 형태의 굽힘하중을 적용시켜 손상시험을 수행하였다. 그 결과 굽힘하중의 영향에 대해서 파악하기 위해 부착된 변형률 게이지를 통해서 취득한 데이터를 가지고 앞서 수행된 하중제어 형태의 굽힘하중과 마찬가지로 손상시험은 그림 3.2.1과 같이 본 연구의 의도대로 시험이 제대로 수행되어진 것을 확인할 수가 있다. 10MPa 부근에서 일정한 하중이 유지된 상태에서 내압이 가해진 하중제어 형태의 굽힘하중과 달리 일정한 변위가 유지된 상태에서 내압이 가해지는 것을 확인할 수가 있다. 즉, 최종 손상이 발생할 때까지 그 변위가 일정하게 유지되며 내압에 의해 손상이 발생하였다는 것을 확인할 수가 있다.

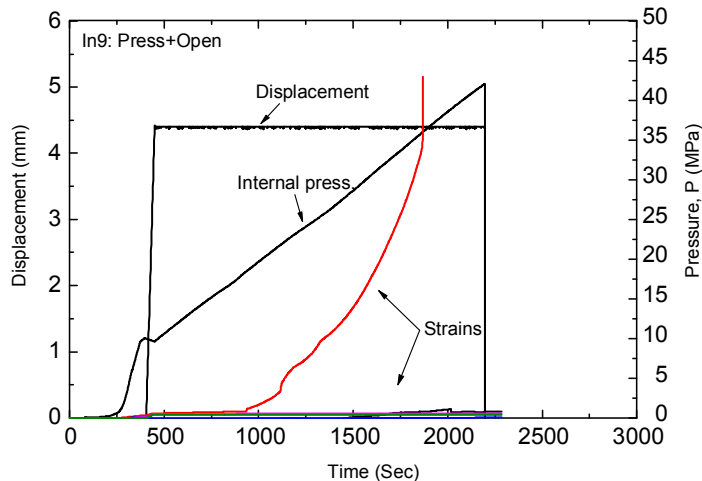


그림 3.2.1 변위제어 굽힘하중의 손상시험 결과

그림 3.2.2는 변위제어 형태의 굽힘하중이 주어졌을 때 최종 손상모드를 나타낸 것으로 외호면 결합위치의 최종 손상 시편의 경우 단순내압일 때는 길이방향으로 손상을 보인 반면 굽힘하중이 주어졌을 때는 기존에 보유하고 있는 고압펌프의 용량 이상에서

도 손상이 발생하지는 않았지만, 부풀어 오른 형상은 길이방향으로 부풀어 오르는 것을 확인할 수가 있었으며, 이는 외호면에 결함이 존재할 때 변위제어 형태의 굽힘하중은 손상압력을 오히려 증가시켰다. 내호면에 결함이 있는 경우에는 단순내압과 굽힘하중이 주어졌을 때 비교해 보면, 최종 손상 길이에서는 약간의 차이는 있지만 손상형태가 길이방향으로 발생함으로써 변위제어 형태의 굽힘하중은 시편의 손상모드에는 영향을 주지 않음을 알 수가 있었다. 이는 하중제어 형태의 굽힘하중 과도 일치한다.

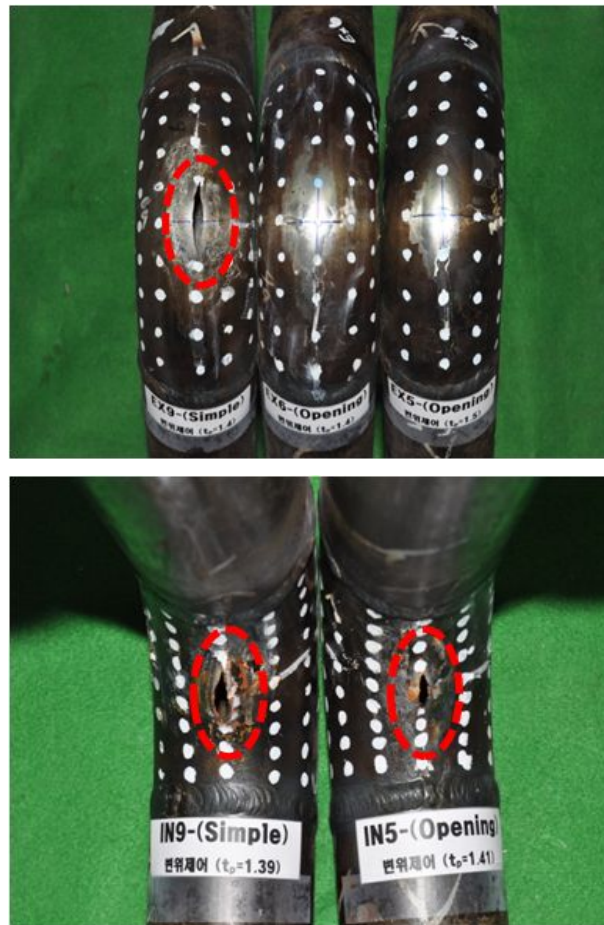


그림 3.2.2 변위제어 굽힘하중의 손상시험 결과 시편 손상모드

그림 3.2.3은 변위제어 형태의 굽힘하중의 영향에 의한 손상압력을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 변위제어 형태의 굽힘하중이 작용될 때 손상압력은 결함위치가 외호면인 경우에는 손상이 발생하지 않았다. 반면에 결함위치가 내호면인 경우에는 굽힘하중이 작용되는 것과 관계없이 손상압력에는 거의 변화가 없었다. 이러한 손상압력의 거동을 좀 더 파악하기 위하여 그림 3.2.4에 보여주는 바와 같이 결함위치별로 원주방향변형률을 굽힘하중이 작용했을 때와 단순내압인 경우를 비교해 보았다. 그림에서 알 수 있듯이 결함위치가 외호면인 경우 단순내압일 때 비해서 원주방향 변형률의 변화가 더 낮은 것을 볼 수가 있다. 또한 길이방향 변형률을 나타낸 그림 3.2.5에서 보여 주는 바와 같이 원주방향 변형률의 변화와 비슷한 양상을 보이고 있다. 따라서, 변위제어 형태의 굽힘하중의 영향이 결함위치가 외호면에 존재할 때 손상압력에 영향을 미치며, 결함위치가 내호면인 경우에는 거의 영향이 없다는 것을 알 수가 있었다.

이렇듯 결함위치가 외호면일 때 손상압력의 변화를 보이는 것은 여러 가지 원인이 있을 수 있겠으나, 인장시험결과 외호면에서 인장강도의 심한 편차를 보였던 점이 주 원인으로 판단되어진다.

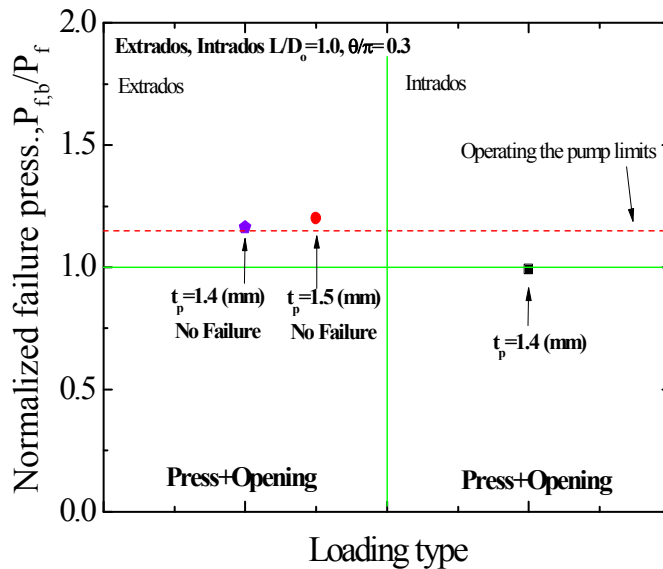
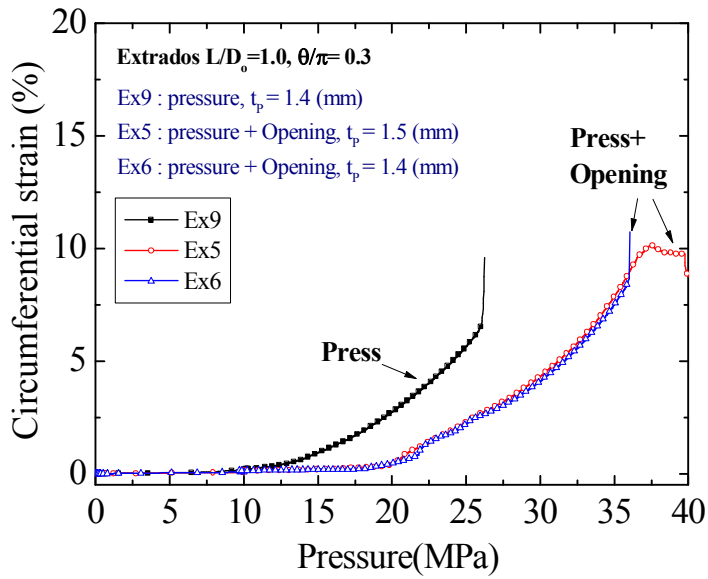
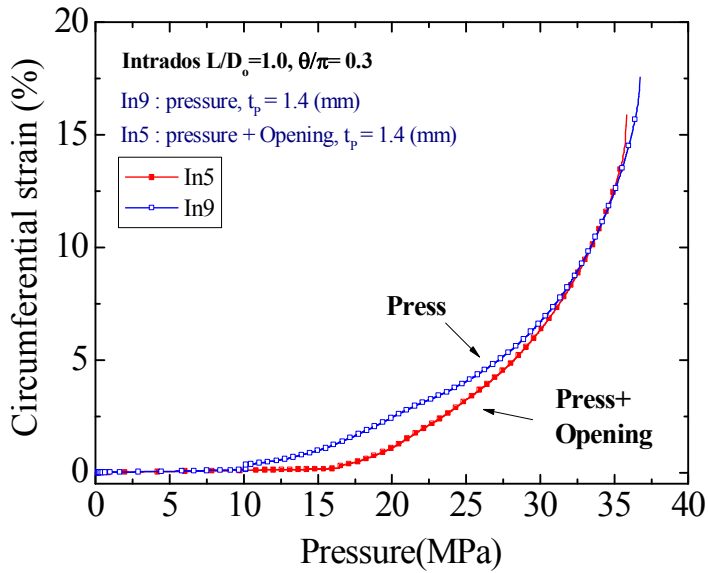


그림 3.2.3 변위제어 형태의 굽힘하중에 의한 손상압력 비교

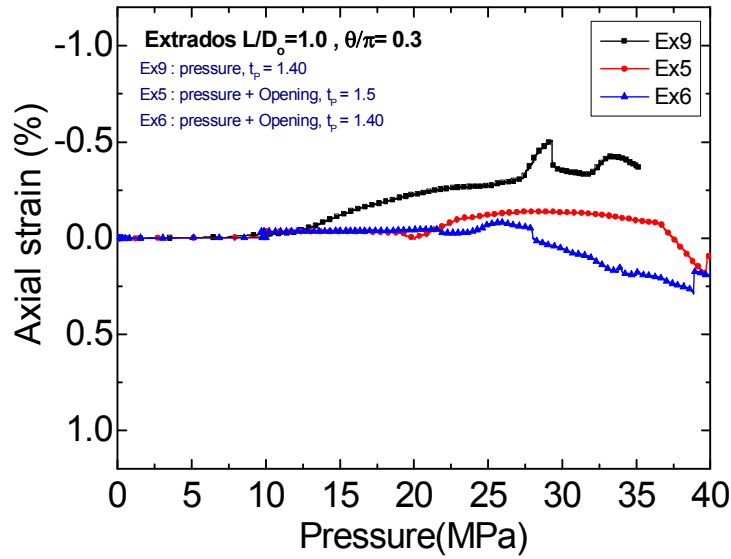


(a) 외호면 원주방향 변형률

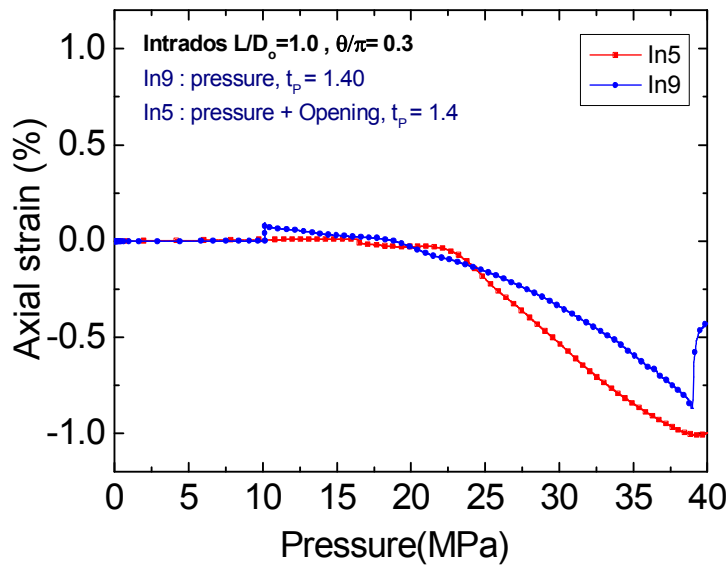


(b) 내호면 원주방향 변형률

그림 3.2.4 굽힘하중 작용에 따른 결함위치별 원주방향 변형률



(a) 외호면 길이방향 변형률



(b) 내호면 길이방향 변형률

그림 3.2.5 굽힘하중 작용에 따른 결함위치별 길이방향 변형률

2. 결합위치에 따른 손상압력

변위제어 형태의 굽힘하중이 작용될 때 결합위치에 따른 손상압력에 미치는 영향을 파악하기 위해서 단순내압인 경우와 굽힘하중이 작용하였을 때 결합위치별로 비교해 보았다.

그림 3.2.6은 단순내압만 작용될 때 손상압력에 미치는 영향을 결합의 위치별로 비교한 그래프이다. 그림에서 나타낸 것과 같이 단순내압인 경우 결합의 위치가 외호면에 존재할 때 내호면에 존재할 때에 비해서 변형이 더 크게 이루어진 것을 확인할 수가 있었다. 최종 손상압력 역시 내호면에 비해서 더 낮게 나왔다. 이에 외호면이 내호면에 비해서 손상압력이 더 낮게 나온 것은 1차 Elbow 시편을 이용한 시험 결과와 비교해 보면 반대의 양상을 보이고 있다. 이는 재료가 갖는 물성치의 차이나, 실패관 시편의 제작 당시 발생한 손실에 의한 전체시편 길이의 차이인 것으로 판단된다. 그림 3.2.7은 변위제어 형태의 굽힘하중이 주어질 때 원주방향 변형률을 결합위치별로 비교한 그래프이다. 이 그림에서 나타낸 바와 같이 결합위치가 외호면에 존재할 때 내호면에 비해서 원주방향 변형률이 더 작게 이루어 졌다. 이러한 결과는 곡관 결합부의 최종심부 두께가 더 두꺼운 시편(Ex5)과도 비슷한 양상을 보인 점을 볼 때 변위제어 형태의 굽힘하중은 외호면인 경우에 영향을 준다는 것을 보이고 있다.

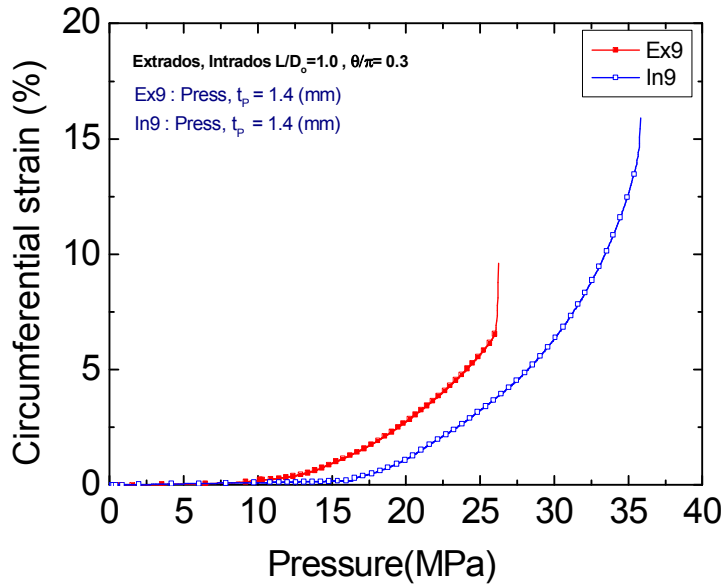


그림 3.2.6 단순내압만 작용할 경우 결함위치별 원주방향 변형률 비교

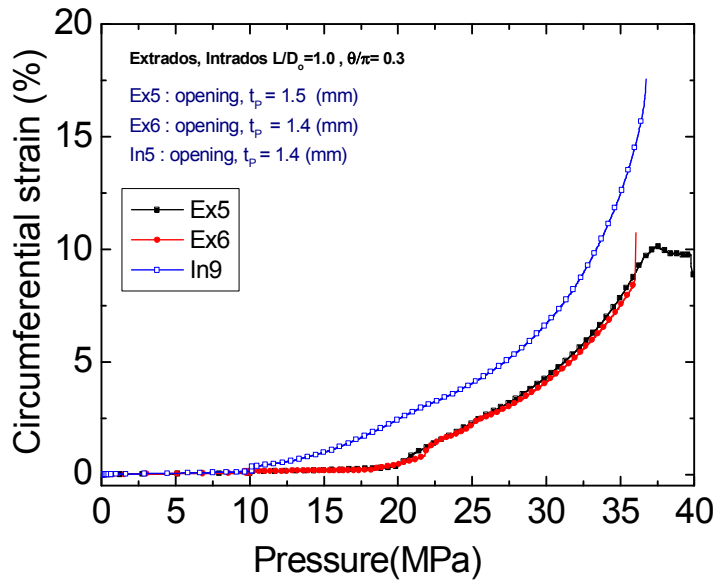


그림 3.2.7 변위제어 굽힘하중이 작용할 경우
 결함위치별 원주방향 변형률 비교

제 3 절 하중제어 & 변위제어 굽힘하중에 의한 손상압력

하중제어 형태와 변위제어 형태의 복합적인 굽힘하중이 일정하게 유지되고 있는 상태에서 이들의 손상압력을 비교하여 복합하중에 의한 감육곡관 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

그림 3.3.1은 하중제어와 변위제어 일 때 최종 손상압력을 비교한 그래프이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 하중제어 형태의 굽힘하중이 작용될 때 특히 단힘모드에 비해 열림모드의 하중형태가 주어질 때 결함위치에 관계없이 최종 손상압력이 낮게 나왔다. 반면에 변위제어 형태의 굽힘하중이 작용될 경우를 살펴보면 외호면인 경우에 손상이 발생하지 않았고, 내호면인 경우에는 단순내압인 경우와 손상압력 비교 시 거의 차이가 없었다.

그림 3.3.2는 굽힘하중 형태에 따른 원주방향 변형률을 보여주는 것으로서 그림 3.3.1을 설명해 주고 있다. 결함위치가 외호면에 있는 경우 굽힘하중 형태가 변위제어에 비해서 하중제어일 때 변형률의 변화가 더 크게 발생하였으며, 결함위치가 내호면인 경우에도 역시 하중제어가 변위제어에 비해서 변형률의 변화가 더 크게 발생하였다. 이렇듯 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향의 차이를 보이는 이유는 변위제어 하중이 작용하는 경우에는 배관에 작용하는 내압으로 인해 결함부위에서 소성변형이 일어나기 시작하면 일정한 변위제어 형태로 작용했던 하중이 완화되기 때문이다.[18] 그림 3.3.3은 이러한 이유를 보여주는 그래프이다. 하중제어인 경우에 비해서 실제로 변위제어인 경우 변위는 유지되고 있는 반면 하중은 감소하는 것을 볼 수가 있다. 두 번째 이유는 결함이 없는 곡관에 대한 하중제어 형태의 최대 굽힘모멘트(M_d)를 변위제어 하중에 해당하는 변위로써 결함이 없는 배관과 결함이 있는 배관에 가했을 때 나타나는 반력의 차이이다. 즉, 결함이 없는 곡관에 최대 굽힘하중을 결함이 있는 배관에 변위를 주었기 때문에 결함이 있는 배관에는 그 만큼 힘을 받지 못하기 때문이다. 실제로 그래프에서도 변위가 주어지는 시점의 하중이 결함이 없는 곡관의 최대 굽힘 하중보다 낮음을 볼 수 있다.

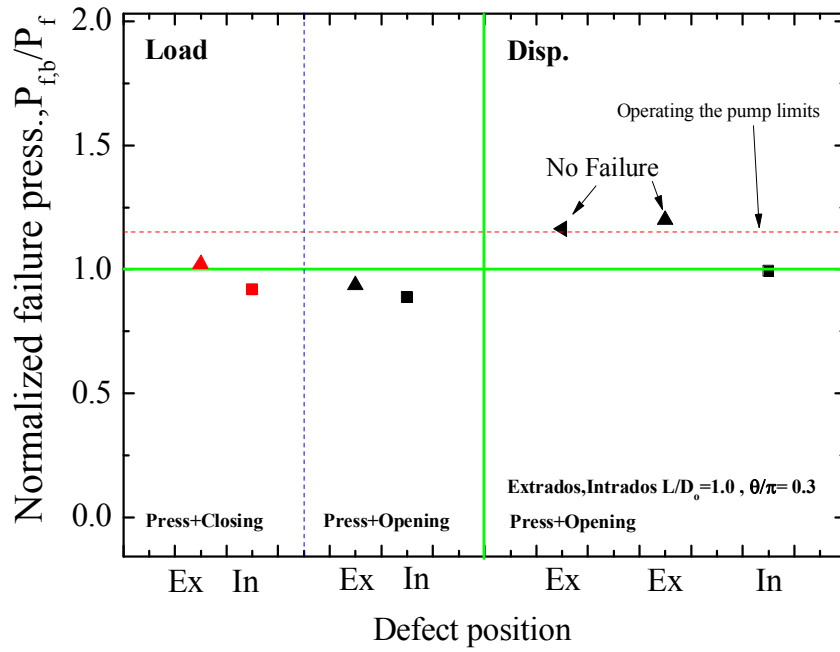
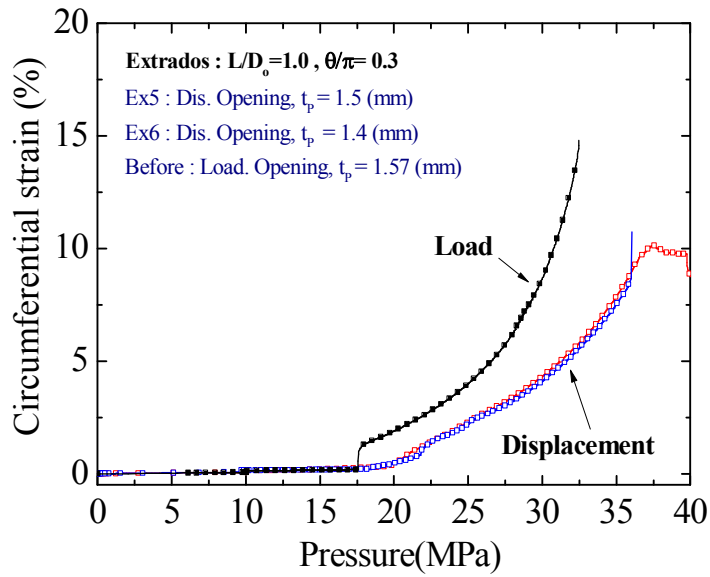
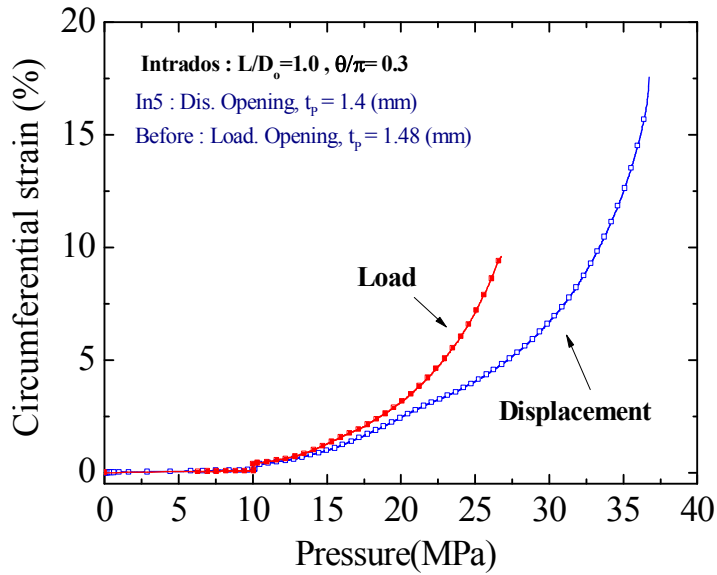


그림 3.3.1 하중제어 & 변위제어 손상압력 비교

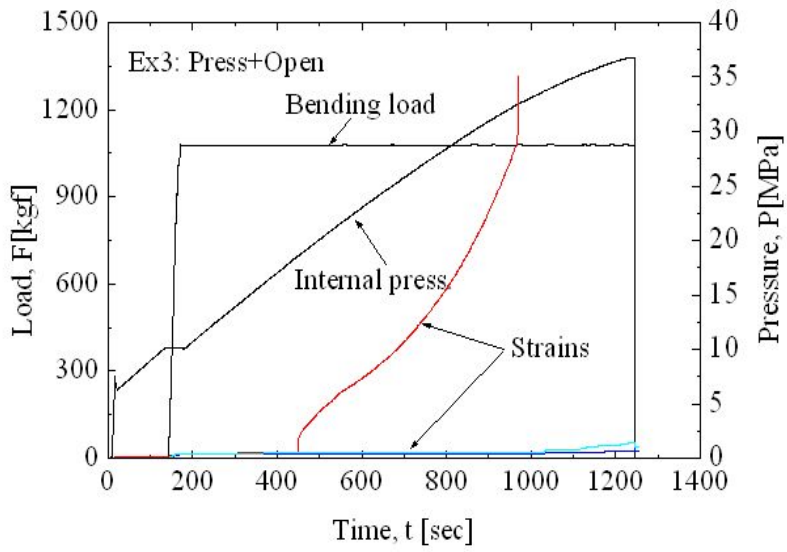


(a) 외호면 원주방향 변형률

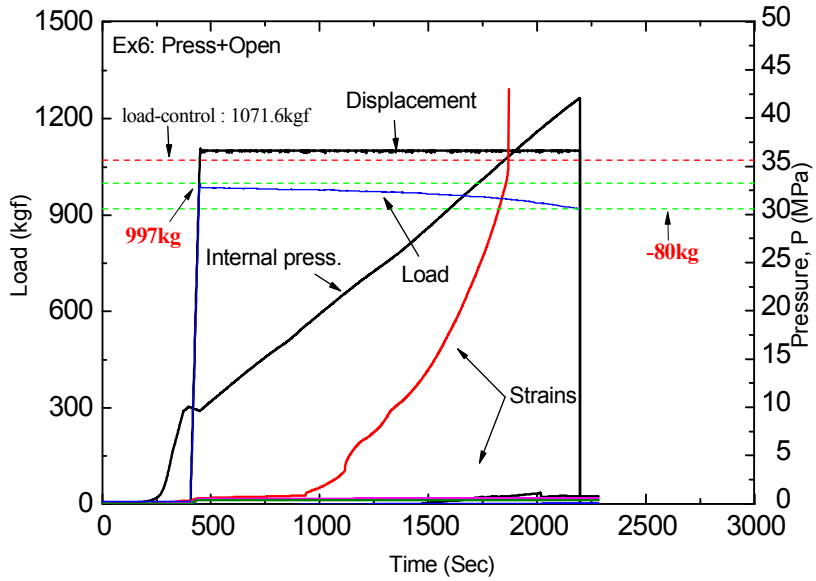


(b) 내호면 원주방향 변형률

그림 3.3.2 하중제어 & 변위제어 원주방향 변형률 비교



(a) 하중제어 형태의 급힘하중



(b) 변위제어 형태의 급힘하중

그림 3.3.3 하중제어 & 변위제어 하중 변화 비교

제 4 장 유한요소 해석의 신뢰성 검토

원자력발전소 배관 계통에서 감육 결함은 탄소강 배관의 건전성을 위협하는 가장 대표적인 손상기구로 대두됨에 따라 최근 감육 배관 연구가 활발해지면서 다양한 형태의 연구가 진행되고 있다. 그 결과, 허용기준 및 건전성 평가모델이 제시되고 있다. 그러나 이들 연구는 대부분이 유한요소해석 결과에 기초하고 있다. 이 경우에 개발된 건전성 평가 방법과 허용두께기준의 신뢰성 확보를 위해서는 감육 배관에 대한 유한요소해석 결과의 신뢰성 검증이 선행되어야 한다. 일반적으로 실배관 시편을 이용한 손상시험 결과와 유한요소해석 결과를 비교함으로써 해석 결과의 신뢰성을 검증한다. 그러나, 감육 배관에 대한 실배관 손상시험 데이터가 부족하고, 특히 복합하중 조건의 손상시험 데이터는 매우 부족하므로 복합하중 조건에서 감육곡관 손상압력 평가에 대한 유한요소해석의 신뢰성 확인은 아직까지 이루어지지 않았다. 따라서 여기서는 앞서 소개된 실배관 시편을 이용한 손상시험 데이터를 가지고 이를 토대로 복합하중 조건에서의 유한요소해석시물레이션 결과에 대한 신뢰성을 검토하고자 한다.

제 1 절 유한요소 해석 조건

감육곡관에 대한 유한요소 시물레이션에는 곡관시편의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링한 3차원 모델이 적용되었다. 모델은 실제 시험에 사용된 실배관 시편과 동일하게 곡관 반경의 10배인 직관을 연결하였으며, 두께가 가장 얇은 부위는 정확한 값을 보기 위해 모델을 잘게 쪼개어 3그룹으로 추가 분리하였다. 결함크기형상은 실측된 두께를 고려하였으며 경계조건으로는 대칭경계조건을 적용하였다. 작용하중은 손상시험 시 각 시편에 적용된 하중제어 또는 변위제어를 동일한 형태와 크기로 적용하였으며, 연결된 직관의 끝 단면 중심에 다중구조(MPC)를 적용하였다. 그림 4.1.1은 이러한 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 유한요소에는 절감적분이 적용된 20절점의 Brick 요소(C3D20R in ABAQUS)가 사용되었으며, 손상 시 결함 부에서의 대 변형을 고려하기 위해서 기하학적 비선형 옵션을 적용하였다.

해석에 사용되는 재료 물성치는 하중제어 시뮬레이션인 경우에는 1차 Elbow의 내호면 위치의 원주방향 인장시험을 통해 얻어진 재료 물성치를 적용하는 것이 보수적인 결과를 줄 것이라 판단하여 사용되었고, 변위제어 시뮬레이션인 경우에는 인장시험 결과에서 강도가 더 높게 나왔고 실제로 그림 4.1.2에 나타낸 바와 같이 진응력-진변형률 곡선에서 1차 Elbow에 비해 강도가 더 높음을 볼 수가 있다. 따라서, 변위제어 시뮬레이션에는 2차 Elbow 외호면 원주방향 물성치를 적용하여 해석하였다.

유한요소 해석에서의 손상압력은 감육부 중심에서 두께방향 평균 등가응력이 재료의 진 인장응력을 초과할 때 손상·발생하는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.8이 사용되었다.

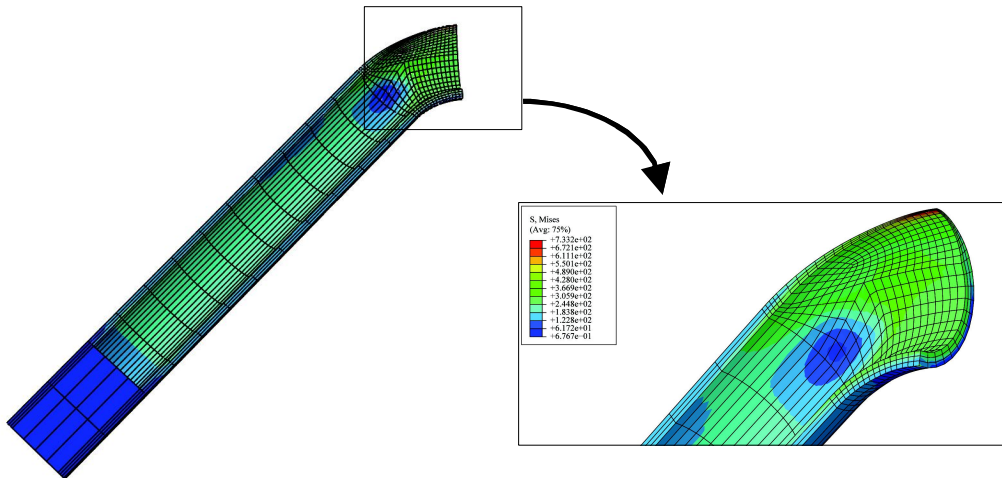


그림 4.1.1 유한요소해석시뮬레이션에 사용된 실배관 3D 모델

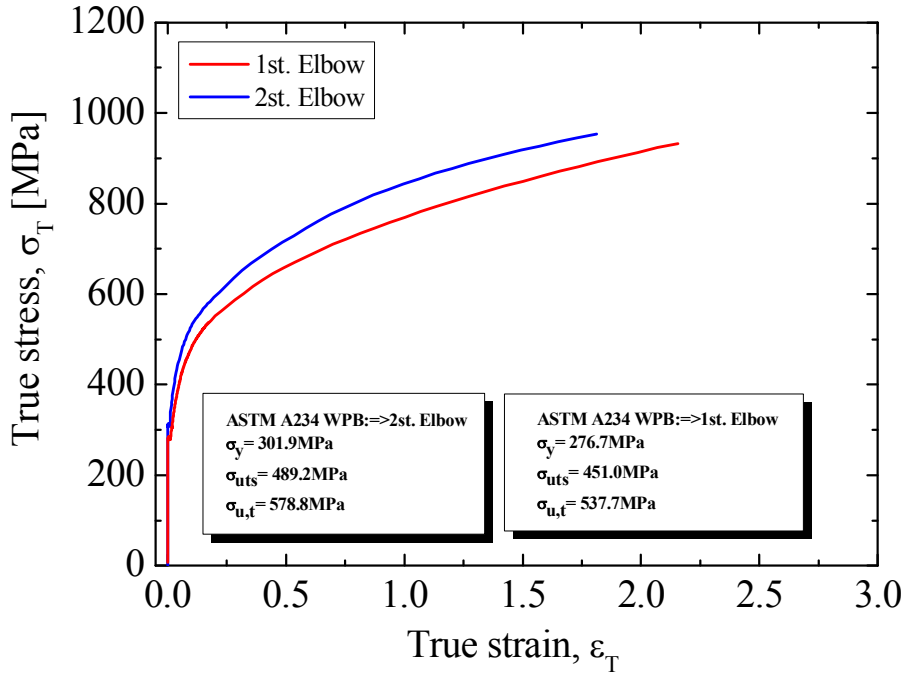


그림 4.1.2 유한요소해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선

제 2 절 유한요소해석 결과

그림 4.1.2에서 구해진 진응력-진변형률 곡선을 통해 얻어진 재료 물성치를 가지고 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서 시험조건 및 하중조건은 실제 시험과 모두 동일하게 설정하였다. 그림 4.2.1은 1차 Elbow의 재료 물성치를 적용한 하중제어 형태의 굽힘하중이 작용된 시뮬레이션 결과에서 얻어진 손상압력을 시험결과 손상압력으로 나누어 무차원화 하여 나타낸 그림이다. 여기서 1.0에 가까울수록 해석에서 손상압력이 시험결과와 같다는 것을 의미한다.

그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 보았을 때 유한요소해석결과 손상압력이 시험결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 복합하중 조건에서도 유한요소해석은 적절히 예측한다는 것을 뜻한다. 그러나 결함위치별로 손상압력 비교를 보면, 결함위치가 외호면에 존재할 경우 시험결과 손상압력보다 전체적으로 낮게 평가하는 반면, 결함위치가 내호면에 존재할 경우에는 손상압력을 높게 평가하였다. 따라서 해석에서 손상압력은 외호면인 경우에 내호면에 비해서 조금 보수적인 결과를 비춘다 할 수 있겠다.

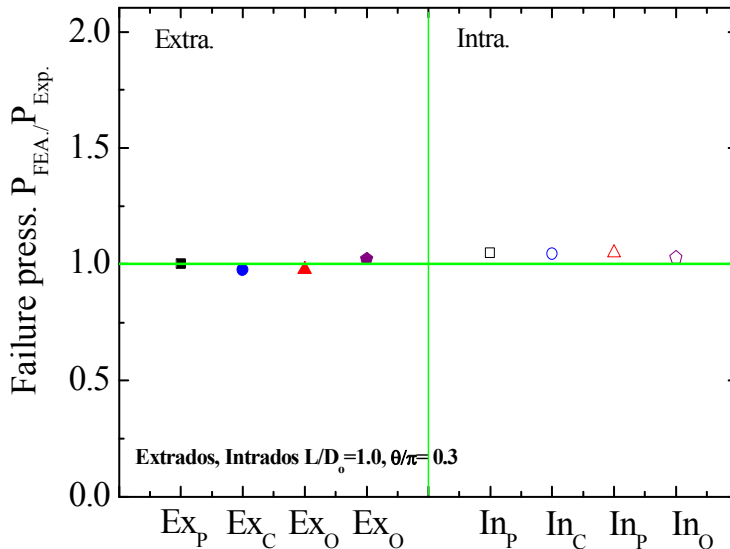


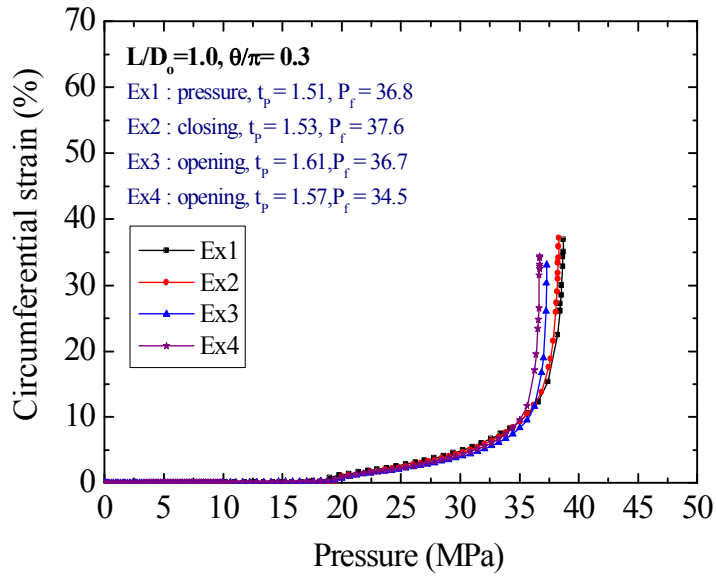
그림 4.2.1 하중제어 형태의 유한요소 시뮬레이션 결과 손상압력

이와 같이 손상압력에 대한 거동을 파악하기 위하여 그림 4.2.2와 같이 원주방향 변형률을 비교해 보았다. 그림에서 알 수 있듯이 단순내압 대비 굽힘하중 작용에 따른 원주방향 변형률의 차이를 보여주고 있다. 결합위치가 외호면에 존재하는 경우 굽힘하중이 작용되었을 때 변형률의 변화가 더 크게 발생하였으며, 특히 시험조건이 열립모드일 때 더 크게 변화가 생긴 것을 알 수가 있다. 이는 시험결과와도 일치한 값이다. 결합위치가 내호면에 존재하는 경우 굽힘하중이 작용되었을 때에도 역시 시험결과와 마찬가지로 더 큰 변화를 보였으며, 시험조건이 열립모드가 작용될 때 변형률이 더 크게 발생하였다. 이 역시 시험결과와 일치한다. 따라서, 유한요소 해석시물레이션에서 하중제어 형태의 굽힘하중이 작용되었을 때 거의 정확하게 예측을 한다는 것을 알 수 있었다.

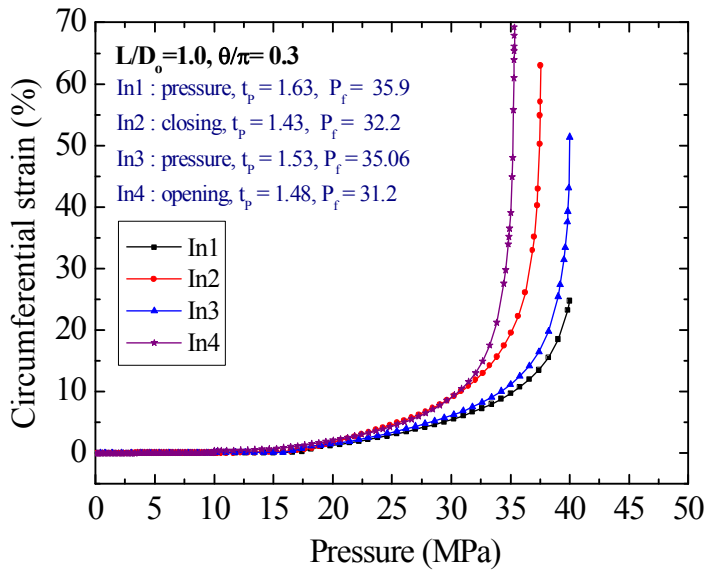
그림 4.2.3은 변위제어 형태의 굽힘하중이 작용되었을 때 구해진 손상압력을 시험결과와 비교한 그림이다. 여기서 알 수 있듯이 변위제어 형태의 유한요소 시물레이션에서는 하중제어와 달리 결합위치별 다른 양상을 보였다.

해석결과 결합위치가 외호면에 있는 경우 단순내압만을 주었을 때 손상압력이 실제 시험에서 손상압력보다 좀 더 높게 예측하였으며, 굽힘하중이 작용되었을 때는 손상압력이 시험보다 낮게 예측하였다. 이러한 양상을 보이는 이유는 앞서 재료 물성치 파악을 위한 인장시험 결과에서 외호면 위치의 강도가 크게 편차를 보였었다. 이러한 강도의 편차는 손상시험 시 시험값의 오류를 줄 수도 있기 때문이다.

반면에 결합위치가 내호면에 존재하는 경우 해석과 시험의 손상압력 예측이 거의 정확하게 이루어졌다. 따라서, 변위제어 형태의 굽힘하중 영향에 대한 유한요소 시물레이션에서 결합위치가 외호면에 존재하는 경우 정확한 신뢰성을 갖지 못하였지만, 결합위치가 내호면에 존재하는 경우 유한요소해석시물레이션에서 거의 정확한 손상압력을 예측하였다. 결론적으로 유한요소해석시물레이션은 복합하중조건에서도 배관의 건전성 평가 시 적절히 예측한다 할 수 있다.



(a) 유한요소해석 결과 외호면_하중제어



(b) 유한요소해석 결과 내호면_하중제어

그림 4.2.2 하중제어 형태의 굽힘하중 유한요소 시뮬레이션 결함위치별 원주방향 변형률 비교

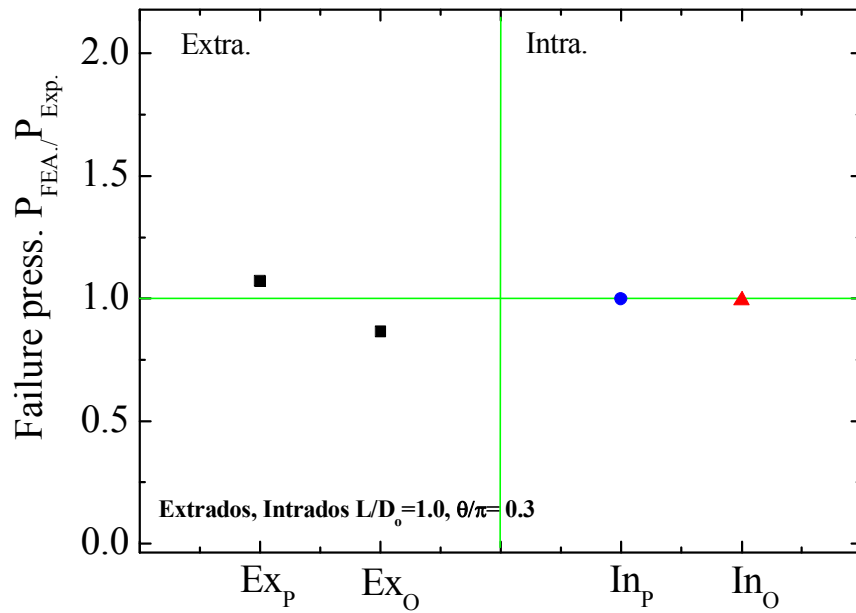


그림 4.2.3 변위제어 형태의 유한요소 시뮬레이션 결과 손상압력

제 5 장 결 론

본 논문에서는 내부에 감육 결함이 존재하는 Elbow에 대한 손상압력 시험을 복합하중조건에서 수행하고, 하중제어 굽힘하중과 변위제어 굽힘하중이 손상압력에 미치는 영향을 파악하여 정량적으로 평가하였다. 또한, 실험결과를 해석결과와 비교함으로써 복합하중 조건의 굽힘하중이 따를 때 유한요소해석 시뮬레이션에 대한 신뢰성 검토를 하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 하중제어 형태의 굽힘하중이 작용될 경우, 결함위치, 굽힘조건에 따라 차이는 있지만, 단순내압 조건에서의 손상압력과 비교하여 볼 때 하중제어 형태의 굽힘하중은 열림모드와 닫힘모드 굽힘하중 조건에서 특히 내호면의 열림모드 조건에서 손상압력이 낮게 나왔다.

(2) 변위제어 형태의 굽힘하중이 작용될 경우에는 결함위치가 외호면에 있을 경우 손상이 발생하지 않은 반면 내호면에 존재할 때는 거의 차이를 보이지 않았다. 따라서 하중제어 형태의 굽힘하중이 변위제어 형태의 굽힘하중에 비해서 손상압력에 미치는 영향이 더 크다.

(3) 외호면과 내호면에 결함이 존재하는 곡관의 최종 손상모드는 굽힘하중의 형태나 조건에 상관없이 모두 길이방향 손상모드를 보임에 따라 감육곡관의 손상모드에 미치는 굽힘하중의 영향은 없었다.

(4) 유한요소시뮬레이션 결과 시험결과와 일부 차이는 있으나, 변형률의 변화경향 등을 볼 때, 유한요소해석은 복합하중 조건에서도 손상압력에 미치는 굽힘하중의 영향을 적절히 예측한다.

참고문헌

- [1] Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., "Limit loads for pipe elbows subjected to in-plane opening moments and internal pressure," J. of Press. Ves. Tech., Vol.121, pp 17~23, 1999
- [2] Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R2, 1998
- [3] 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
- [4] Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., "Progress In Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas and Pipe and Piping Components," Nucl. Eng. & Des., Vol. 195, pp 249~169, 2000
- [5] Kim, J. W., Park, C. Y., "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment," Trans. of KSME (A), Vol. 26, No.4, pp 731~738, 2002
- [6] ANSI/ASME, Plant Piping, B31.G,1984
- [7] Kiefner, J.F. and Worthington, R.G., 1990, "New method corrects criterion for evaluating corroded pipe." Oil Gas J, Vol.32, pp.56~59
- [8] Virginia Electric and Power Co., 1989, "Surry Unit 2 Reactor trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- [9] Presentation Materials for KINS, "Risk-Informed Inspection", 1999.
- [10] Deardorff, A.F. and Bush, S.H., 1990, "Development of ASME Section XI Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping.", Processing of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol-186, NDE-Vol. 7, pp. 71~75.
- [11] Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, "Technical Report on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute(Japanese).", JAERI-M, 93-074, pp. 104~115.

- [12] 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.
- [13] Draft for ASME Sec.XI, App.X, 2003, rev.8. "Analytical Evaluation of Internal or External Wall Thinning in Piping Systems."
- [14] 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.
- [15] 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. Offshore and polar Eng. Conf., Honolulu, USA, May 25-30, pp. 624-641.
- [16] Kim, J.W. and Jeong, O. Y., 2010, "Effect of bending load on the failure pressure of wall-thinned pipe bends," Proc. of PVP2010, PVP2010-25287.
- [17] J.W. Kim, S.H. Lee, and C.Y. Park, "Experimental evaluation of the effect of local wall thinning on the failure pressure of elbows," Nucl.Eng.&Design,239,(2009)2737-2746.
- [18] Kim, J.W., Na, Y.S., Lee, S.H., 2008, "Experimental Evaluation of the Bending Load Effect of the Failure Pressure of Wall-Thinned Elbows.", Trans. of ASME Pressure Vessel and Piping Conference(CVP2008)

감사의 글

조선대학교 체육대학 종합체육관 대형 스크린 앞에 앉아서 초라하게 근심어린 표정으로 스크린을 바라보던 어린 윤민수가 생각이 납니다. 부모님 기대와 저의 소망에 걸맞지 않게 냉담한 수능시험 앞에 한없이 슬픔만을 안고 있던 저에게 원자력공학과는 손을 내밀었습니다. 재밌는 생활, 너의 꿈을 펼쳐보라고....저에겐 당시 기쁨과 행복이였고, 때문에 학교생활 역시 누구보다 열심히 하였습니다. 모든 학부과정 과대표와 힘들게 성공한 학생회장 그러나, 학교생활과 달리 원자력공학이란 학문은 더 없이 어렵게만 느껴졌었습니다. 그러던 어느 날 학문의 기쁨과 희열은 연착된 기차가 오듯 찾아왔습니다.

원자력공학이라는 학문을 한없이 어렵고 힘들게만 느끼다가 좀 더 높은 곳, 좀 더 멀리 보기 위해 대학원을 입학한지도 어느덧 2년이라는 세월이 흘렀습니다. 그 시간들을 윤민수의 행복한 인생이라는 탐의 기반으로 삼고 후회됨이 없이 훌륭한 인간으로 살아가겠습니다.

학부생활과 대학원 생활동안 항상 어진 가르침과 연구원으로서의 자세를 보여주신 김진원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님이 새겨주신 지식과 마음가짐은 제가 가지고 있는 생각의 그릇을 한층 더 넓혀 주셨고 더 깊게 만들어 주셨습니다. 결코 잊지 않고 눈부신 성장을 꼭 이룩하겠습니다.

항상 원자력공학과 학생들을 먼저 생각해 주시고 바쁘심에도 격려를 아끼지 않으신 김승평 교수님 감사합니다. 깊은 마음의 소리로 제가 나아갈 길을 흐트러지지 않게 잡아주신 정운관 교수님, 학업에 지쳐있을 때 항상 웃으시며 다정한 목소리로 감동을 전해주시는 이경진 교수님, 늘 학생들에게 편하게 다가가시고 저의 진로에 많은 영감을 주신 송중순 교수님, 학업자의 본분과 공부하는 법을 알려주시며, 용기를 잃지 않게 희망을 주신 나만균 교수님, 글로 다 표현만큼 감사하고 또 감사합니다.

대학원 1년 동안 현장의 실무와 전공서적에서만 보던 것을 직접보고 느끼게 해주신 이심교 교수님, 오랜 시간이 흘러도 항상 이름 불러주시며 격려를 보내주신 신원기 교수님, 원자로이론이라는 과목을 학생들 입장에서 더욱 이해하기 쉽게 가르쳐 주신 이기복 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

처음 NuMM에 들어와 어리바리한 저에게 많은 프로그램과 실험실 실장으로서의 행동을 가르쳐 준 연수형, 종선이형 형들에게 받은 노하우와 자세를 통해 우리 실험실의 발전과 화합을 가질 수 있었습니다. 같은 실험실원이 아님에도 친형처럼 걱정하고 진심어린 충고를 아끼지 않았던 현영이형, 인호형, 동혁이형 감사합니다. 부족한 지식을 같이 공부해 주면서 학업의 정말 많은 보탬을 주었으며, 항상 힘들어 할 때 술잔을 기울이며 고민을 들어주던 성한이형, 올바른 자세로 학업에 열중할 수 있게 도와주며 선배가 아닌 친형같이 다가와 끌어주고 밀어주신 유선이형, 정민이형, 형님들이 있어 학교생활이 더 즐거웠습니다. 항상 어린 동생같이 때론 동기처럼 대해주면서 자신보다 먼저 후배를 생각한 용진이형, 짓궂은 장난에도 거친 행동을 해도 웃으면서 늘 받아주던 강일이형, 신입생부터 재미난 유머와 선배로서 자질을 보여준 준근이형, 영원한 7조 조장님이자 회장님 영빈이형, 엄마 같은 요한이형, 해병대의 기상 우진이형, 세상에서 제일 강한 정치인이 될 건진이형, 항상 친근하게 대해준 도명이형, 말없이 이것저것 챙겨주는 늦깎이 신입생 한이형 까지 형들에게 직접 말하진 않았지만, 형들처럼 좋은 선배가 있어서 대학생활이 지루하지도 힘들지도 않았고 늘 웃을 수 있어서 좋았습니다. 모두들 진심을 감사합니다.

대학원에 진학하고 실험실 생활하면서 선배들만큼 힘이 되어준 우리 NuMM 동생들에게도 진심으로 감사의 말을 전합니다. 지금은 떠났지만 반년 이상을 나와 함께 하면서 힘든 상황에서도 웃음을 잃지 않던 엉뚱한 천재 우리 경준이, 자기만의 생각과 자기만의 사상으로 후회 없는 자신을 만드는 세훈이 모두 고맙다. 너희들이 있어 조금이나마 덜 힘들고 편했었다. 이제는 NuMM의 실장이 되어 더욱 빛을 발할 우리 사용이 어병하지만 똑 부러진 결단력과 실력은 우리 실험실을 더욱 발전시키리라 믿는다. 항상 혼이 나도 웃으면서 자신의 일을 묵묵히 해나가는 우리 성재, 미연이 커플! 너희가 실원의 막내로 들어오면서 우리가 더 가족같이 단단해지고 재밌는 실험실이 된 것이라 믿는다.

때론 나의 날개이자 팔이 되어주고 우산이 되어주었던 동기들에게도 감사를 전합니다. 형처럼, 동생처럼, 항상 옆에서 힘이 되어준 영규, 옆에만 있어도 든든한 상현이, 바른생활 사나이 재환이, 어떤 상황에서도 웃게 만드는 평규, 엄마처럼 다독여 주는 석철, 큰형 같은 용환, 영원한 라이벌이라 생각하는 동수, 영원한 영광 짱 충현, 이제는 가장이 된 진우, 깊은 무언가가 있는 지훈, 지혜엄마 징징의 달인 민서, 예나 지금이나

귀여운 진영, 여전히 예쁜 은정 모두 고맙고 항상 함께 하자.

오랜 세월 함께하면서 내가 힘들 때 옆에서 잘 지켜주었던 나의 친구들 승현, 부길, 다운, 영수, 도련님 동석, 나의 미래를 도와준 강훈, 상규, 정현, 국중 모두들 고맙다 사랑한다.

학교생활의 끊임없이 도움 주었던 후배들에게도 감사의 말을 전합니다. 항상 칭얼대지만 형들이 시키는 일 묵묵히 다 해내었던 심원, 학생회 할 때부터 든든한 힘이 되었던 민영, 형래, 현석, 남 주기 아까운 친덕꾸러기 지영, 동생이지만 누나 같았던 지현, 선아, 항상 자기 일에 발전에 발전을 거듭하는 주현, 순호, 영국, 현민 모두 노력한 만큼 큰 나래를 펼치기 바란다.

감사하다는 말로 전부를 표현하지 못할 세상에서 제일 사랑하는 우리 가족...매일 감사하는 마음으로 평생 간직하겠습니다. 우리 아들 우리아들 하면서 개울가에 어린아이 다루듯 하시지만 든든한 버팀목으로 의지하시며 사시는 세상에서 제일 아름다운 우리 어머니 고맙습니다. 앞으로 더 나은 모습 보여드리겠습니다. 아름다운 우리 엄마를 낳아주신 외할머니, 힘들 때 옆에서 기둥이 되어주고 기쁠 때 같이 만끽해 주신 외가 가족 분들 정말 감사합니다. 막내여서 어리게만 보이지만 어느덧 가장의 냄새가 나는 나의 동생 민호, 형은 네가 있어 항상 든든하였다. 어릴 때부터 유독 저를 예뻐하셨던 할머니 꼭 건강히 오래사세요. 그리고 하늘나라에서 늘 웃으며 저의 앞날과 힘든 일을 지켜봐주시면서 도움을 주신 아버지 감사합니다. 사랑합니다.

저에게 희망과 새로운 가정을 만들 수 있게 도움주신 장인어른, 장모님께 감사합니다. 저에게 아내를 먼저 생각하라는 말씀, 꼭 기억하여 세상에서 가장 예쁜 가정 이루겠습니다. 마지막으로 저의 영원한 반려자, 내 여자 콕원아!! 사랑한다!! 힘든 시기에 너는 나의 가장 큰 힘이고 태양 이였다. 세상에서 누구보다 행복하게 아름답게 해줄게 고마워 사랑해...

감사의 글에 거론되지 않았어도 마음만은 100명이든 1000명이든 담고 싶습니다. 이제는 정든 학교를 후배들에게 맡기고 새로운 출발을 위해, 아름다운 가정을 위해, 보석의 세상, 무한한 경쟁사회로 향합니다. 모두 행복하고 모든 꿈 이루길 간절히 바랍니다. 감사합니다...사랑합니다...고맙습니다...