



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2023년 2월
석사학위 논문

큰 진폭의 반복 굽힘하중
조건에서 배관 엘보우의
손상거동에 미치는 형상의
영향

조선대학교 대학원

원자력공학과

홍 진 의

큰 진폭의 반복 굽힘하중
조건에서 배관 엘보우의
손상거동에 미치는 형상의
영향

**Effect of Dimensions on the Failure Behavior of
Pipe Elbows under Large Amplitude Cyclic Bending
Loads**

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

원자력공학과

홍 진 의

큰 진폭의 반복 굽힘하중
조건에서 배관 엘보우의
손상거동에 미치는 형상의
영향

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함
2022년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

홍 진 의

홍진익의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수 나만균(인)
위원	조선대학교	교수 김진원(인)
위원	조선대학교	교수 김종현(인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	ix
제 1 장 서론	1
제 2 장 엘보우 손상실험	3
제 1 절 엘보우 시편 및 재료	3
1. 엘보우 시편	3
2. 엘보우 및 연결직관 재료	3
제 2 절 실험조건	5
1. 실험하중	5
2. 손상실험 조건	8
제 3 절 실험절차 및 장비	10
1. 실험절차	10
2. 실험장비	13
가. 장비 및 데이터 취득	13
나. 가압장치	13
제 4 절 실험결과	14
1. 변형 거동	14
가. 하중-변위 거동	14
나. 변형률-시간 이력	17
2. 손상거동	19
가. 손상모드	19
나. 손상사이클	22
제 3 장 유한요소 변수해석	24

제 1 절 손상실험에 대한 FE 시뮬레이션	24
1. FE 시뮬레이션 모델	24
2. 손상지배 변수 결정	28
가. 균열위치	29
나. 균열방향	31
제 2 절 손상거동에 미치는 엘보우 형상의 영향	35
1. 손상위치	35
2. 손상방향	40
3. 손상모드 지배 형상인자	42
제 4 장 결론 및 향후계획	43
참고문헌	45

표 목차

표 1 엘보우 시편 2종의 곡관부 측면에서 원주방향 인장물성치	4
표 2 변위제어모드 반복하중 하의 엘보우 시편 손상실험 조건	9
표 3 변위제어모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 손상사이클	23
표 4 단조 응력-변형 곡선에서 결정된 이동경화 매개변수	25
표 5 엘보우 공칭 두께 및 압력조건	35
표 6 엘보우 형상에 따른 R_m/t 값	41

그림 목차

그림 1	준정적 엘보우 손상실험용 시편의 기본 형상	4
그림 2	엘보우 시편 손상실험에 적용된 변위제어모드 반복하중 형태	6
그림 3	엘보우 곡관부의 변형을 게이지 부착 위치	10
그림 4	엘보우 시편에 대한 반복하중 손상실험 장비 개략도	11
그림 5	엘보우 시편 반복하중 조건의 손상실험 사진	12
그림 6	변위제어모드 반복하중 조건의 손상실험에서 주어진 시간에 따른 변위와 응답하중	15
그림 7	변위제어모드 반복하중 조건에서 하중-변위 이력곡선	16
그림 8	변위제어모드 반복하중 조건의 엘보우 시편 곡관부에서 변형률-시간 이력 곡선	18
그림 9	변위제어모드 반복하중 조건에서 실험된 엘보우 시편의 실험 후 사진	20
그림 10	변위제어모드 반복하중 조건에서 실험된 엘보우 시편의 외면과 내면에 대 한 PT 검사 결과	21
그림 11	엘보우 시편에 대한 유한요소해석 모델	25
그림 12	곡선적합을 통한 Chaboche 인자 확보	26
그림 13	엘보우 시편에 대한 FE 시뮬레이션과 손상실험에서 주어진 하중-변위 이력 곡선 비교	27
그림 14	엘보우 시편의 FE 시뮬레이션 하중-변위 이력곡선 예	28
그림 15	등가소성변형률 및 변형률 범위 데이터 추출 위치	29
그림 16	곡관부 중심의 내면과 외면에서 원주방향 위치에 따른 등가소성변형률 분 포	30
그림 17	Sch. 40과 Sch. 160 엘보우 시편의 측면과 내륜에서 두께 방향 등가소성변 형률 분포	31
그림 18	내면과 외면에서 원주방향 위치에 따른 원주방향 및 축방향 변형률 분포	33
그림 19	Sch. 40 엘보우 시편의 측면과 Sch. 160 엘보우 시편의 내륜에서 두께 방향 변형률 분포	34
그림 20	엘보우 Schedule 별 공칭직경에 따른 측면과 내륜 등가소성변형률	38

그림 21 Schedule 별 엘보우 공칭직경에 따른 달힘모드 등가소성변형률 39
 그림 22 Sch. 40&120 엘보우 공칭직경에 따른 측면 내부의 원주 및 축방향 열림모드 달힘모드 사이 변형률 범위 값 40
 그림 23 Sch. 160 엘보우 공칭직경에 따른 측면 내면과 외면의 원주 및 축방향 열림모드 달힘모드 사이 변형률 범위 값 41

ABSTRACT

Effect of Dimensions on the Failure Behavior of Pipe Elbow under Large Amplitude Cyclic Bending Loads

Hong Jin Ney

Advisor : Prof. Jin Weon Kim, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

In order to evaluate the structural integrity of safety-related system, structure, and components (SSCs) of nuclear power plants (NPPs) under beyond design basis earthquake (BDBE) conditions, it is important to understand the non-linear deformation and failure behavior of SSCs under large-amplitude cyclic loads. In particular, the pipe elbow in the nuclear piping system is a vulnerable component under a large seismic load, and thus a number of experimental and numerical studies have been conducted on the pipe elbows. However, most studies have been conducted on limited elbow dimensions, e.g., thin-walled elbows, even though nuclear piping components have various dimensions. Thus, the non-linear deformation and failure behavior of pipe elbows under large-amplitude cyclic loads is still unclear. Therefore, the objective of this study is to investigate the effect of elbow dimensions on the failure behavior of pipe elbow under large-amplitude in-plane mode displacement-controlled cyclic bending loads.

For this purpose, cyclic failure tests were conducted on SA403 WP316 stainless steel elbow specimens with two different thicknesses: 4-inch Schedule 40 (Sch. 40) and 4-inch Schedule 160 (Sch. 160). In the tests, large-amplitude cyclic displacements were applied with and without internal pressure. The amplitude of the cyclic displacement corresponded to more than 6 times the allowable elastic stress range for the design basis earth

quake in the design code. From the test results, the failure mode and failure cycle were evaluated for two different elbow specimens. In addition, finite element (FE) simulations of the cyclic failure tests were performed to determine the parameters that govern the crack location and orientation in the elbow. Finally, parametric FE analysis was conducted for pipe elbows with various dimensions, e.g., various diameters and Schedules (thicknesses), and the location and orientation of cracks in the elbow were determined from the parametric FE analyses by applying the governing parameters identified in the FE simulation. It was found that failure mode of elbows, such as crack location and orientation, under large-amplitude in-plane mode displacement-controlled cyclic bending was dependent on the radius to thickness ratio of the pipe elbows (R_m/t). In case of smaller R_m/t elbows, circumferential cracks occurred at the intrados, and in case of larger R_m/t elbows, axial cracks occurred at the crown. Also, the critical R_m/t at which the failure mode changes increased with increasing internal pressure. The results of this study could contribute to the development of evaluation procedures and failure criteria for SSCs in NPPs under BDBE conditions.

제 1 장 서론

원자력발전소(이하, 원전)는 지진하중 조건에서도 구조건전성을 유지할 수 있도록 설계코드에 의해 설계되며, 설계기준지진 하중 조건에서 충분한 안전 여유도를 갖는 것으로 알려져 있다. 그러나, 일부 원전에서 설계기준을 초과하는 대형지진을 경험한 이후, 국내·외적으로 설계기준을 초과하는 설계초과지진 하중 조건에서 안전관련 주요 기기 및 설비의 내진안전성 확보에 대한 관심이 증가하게 되었다[1-3]. 이로 인하여 기존 원전과 신규 설계 원전의 안전관련 주요 기기와 설비에 대해서는 설계초과지진 조건 하의 안전여유도 확보와 이를 확인하기 위한 평가가 요구되고 있다[4]. 그러나, 설계기준을 초과하는 대형 지진하중 조건에서 원전 기기 및 설비의 구조건전성 평가를 위한 절차와 손상기준이 확립되어 있지 않은 실정이며, 이를 개발하기 위한 여러 연구들이 진행되고 있다[5-8].

특히, 원전 배관계통의 경우에는 다른 기기 및 설비에 비해 지진하중에 취약한 것으로 알려져 있기 때문에 다양한 실험적·해석적 연구들이 진행되었다. 이들 연구 결과들에 의하면 대형 지진하중 조건에서 배관계통은 대부분 엘보우에서 관통균열 생성에 의해 손상되며, 관통균열은 엘보우 측면에서 길이방향으로 전파하는 것으로 알려져 있다[7]. 또한, 다양한 엘보우 시편을 대상으로 수행된 큰 진폭의 반복하중 실험결과들에 의하면 엘보우 측면에서 축방향 균열 생성은 반복하중에 의한 라체팅을 동반한 피로에 기인하는 것으로 알려져 있다[8]. 그러나, 실제 원전에서는 Sch. 40 정도의 얇은 엘보우뿐 아니라 Sch. 120 이상의 두꺼운 엘보우들이 사용되고 있음에도 불구하고, 대부분의 실험은 두께가 얇은 배관 엘보우 (Sch. 40 또는 Sch. 80 등)를 대상으로 수행되었다. 따라서, 설계초과지진 조건에서 배관계통의 신뢰성 있는 구조건전성 평가 절차를 개발하고 손상기준을 설정하기 위해서는 큰 진폭의 반복하중 조건에서 배관 엘보우에 대한 손상거동을 다양한 형상 조건에서 파악하는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 큰 진폭의 반복하중 조건에서 배관 엘보우의 손상거동에 미치는 엘보우 형상의 영향을 파악하는 것이다. 이를 위해서 먼저

두께가 다른 Sch. 40과 Sch. 160 엘보우 시편을 대상으로 큰 진폭의 면내 (In-plane) 모드 변위제어 반복굽힘 하중 조건에서 손상실험을 수행하고, 손상모드와 손상사이클에 미치는 엘보우 형상의 영향을 살펴보았다. 또한, 엘보우 시편의 손상실험에 대한 유한요소(Finite Element, FE) 시뮬레이션을 수행하여, 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 손상모드를 지배하는 변수를 도출하였다. 마지막으로 다양한 형상의 배관 엘보우를 대상으로 유한요소 변수해석을 수행하고, 해석 결과에 손상모드를 지배하는 변수를 적용하여 배관 엘보우의 형상에 따른 손상모드를 예측하였다. 이들 결과를 바탕으로 배관 엘보우의 손상모드에 미치는 형상의 영향을 분석하였다.

제 2 장 엘보우 손상실험

제 1 절 엘보우 시편 및 재료

1. 엘보우 시편

In-plane 모드 변위제어 반복굽힘 하중 조건에서 엘보우 시편에 대한 손상실험에는 그림 1과 같이 엘보우의 양쪽에 직관이 연결된 엘보우 시편이 사용되었다. 엘보우에 연결된 직관의 끝단은 플랜지로 용접하였다. 시편은 시험기에 핀으로 체결되어 반복 굽힘하중 작용 시 시편이 자유롭게 회전할 수 있도록 하였다. 엘보우 시편을 이용한 굽힘시험 시 연결 직관의 길이가 짧으면 엘보우에 굽힘응력 뿐 아니라 인장응력이 작용될 수 있다. 따라서, 시험기 가진기(Actuator)의 이동 거리와 시편 중량 등을 고려하여 연결 직관의 길이를 엘보우 외경의 5배가 되도록 설계하였다 [9]. 플랜지는 내압과 굽힘하중 전달에 필요한 구조건전성을 갖도록 하였다. 시편의 가압과 내압 유지에 필요한 밸브, 압력계, 가압 장치 등의 연결을 위해 플랜지에 관통부, 게이지 거치를 위한 홀, 그리고 시험기에 시편을 거치하기 위한 체결부 등이 설계되었다.

시편 제작에는 두께가 다른 2종류의 엘보우(4-inch Sch. 40과 4-inch Sch. 160)가 적용되었다. 4-inch Sch. 40 엘보우의 공칭외경(D_0)과 공칭두께(t)는 각각 114.3 mm와 6.0 mm이며, 4-inch Sch. 160 엘보우의 공칭외경과 공칭두께는 각각 114.3 mm와 13.5 mm이다. 두 엘보우 모두 굽힘 각이 90° 이며, 곡률 반경은 152mm이다.

2. 엘보우 및 연결직관 재료

엘보우 시편 제작에 사용된 2종류 엘보우 재료는 SA403 WP316 스테인리스강(Stainless Steel, SS)이며, 각 엘보우에 연결된 직관의 재료는 SA312 TP316 SS이다. 표 1은 인장실험을 통해 구한 2종 엘보우에 대한 곡관부 측면에서 원주방향 인장물성치를 정리한 것으로, ASME Code SecII[10]에 제시된 각 재료의 설계응력세기 (S_m)를 함께 제시하였다.

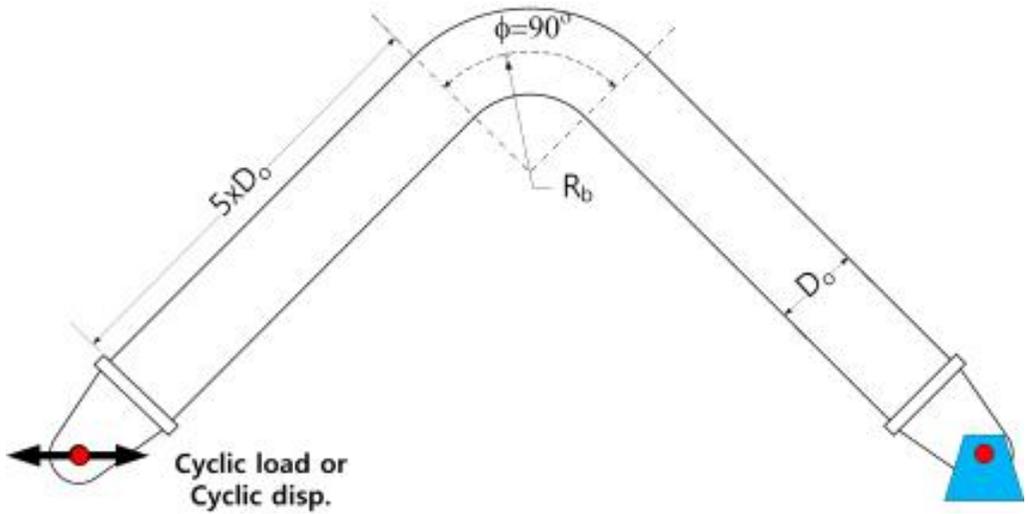


그림 1 준정적 배관요소 실험용 시편의 기본 형상

표 1 엘보우 시편 2종의 곡관부 측면에서 원주방향 인장물성치

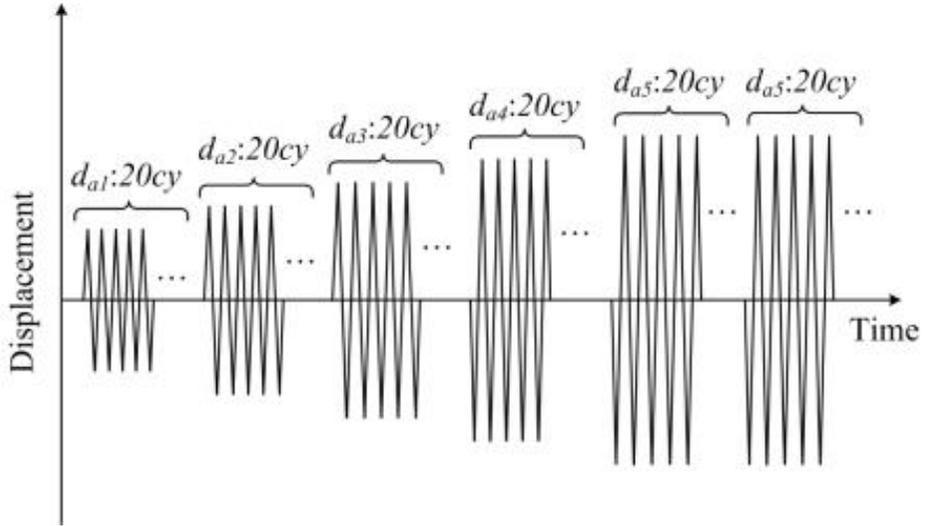
재료 종류	항복강도 YS[MPa]	인장강도 YS[MPa]	균일연신률 TE[%]	총연신률 TE[%]	설계응력세기 S_m [MPa]
SA403 WP316 SS (Sch.40)	337.6	620.3	56.0	70.7	138
SA316 TP316 SS (Sch.40)	284.8	612.4	57.4	74.5	138

제 2 절 실험조건

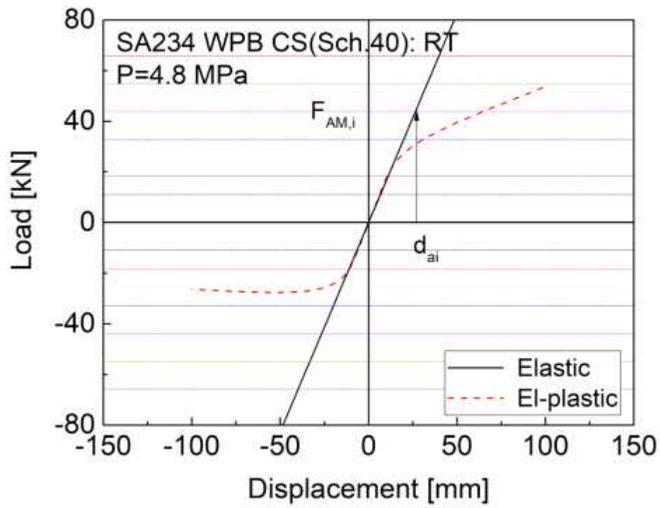
1. 실험하중

지진하중은 하중제어모드(관성력)와 변위제어모드의 하중 특성을 모두 갖는다. 따라서, 원전 배관의 설계에 적용되는 기술기준인 ASME B&PV Code Sec.III[23]에서는 지진하중 조건에서 배관의 구조건전성 평가 시 하중제어모드 하중과 변위제어모드 하중을 분리하여 별도의 허용응력기준을 적용하고 있다. 본 연구에서는 변위제어모드 반복하중에 대해 실험을 수행하기 위한 입력 하중을 설계하였다.

변위제어모드 하중 조건의 손상실험은 엘보우 시편이 견딜 수 있는 최대 변위제어모드 반복하중의 수준을 파악하기 위해 수행된다. 따라서, 변위제어 모드 반복하중은 그림 2(a)에 나타낸 것과 같은 5단계의 진폭($d_{a1} \sim d_{a5}$)을 갖는 변위의 비($R_d = d_{a,\min}/d_{a,\max}$)가 -1 인 역반복 변위가 시편의 끝단에 작용되도록 설계되었다. 각 진폭 별로 반복 변위는 20 사이클로 구성되며, 시편이 손상될 때까지 진폭을 한 단계씩 높이면서 각 단계 별로 20 사이클의 반복 변위를 시편에 가한다. 만약, 진폭이 d_{a5} 인 반복 변위를 20사이클 가한 후에도 시편이 손상이 되지 않으면, 시편이 손상될 때까지 진폭이 d_{a5} 인 반복된 변위를 연속해서 가한다. 반복하중 조건에서 진행되는 실험에서 엘보우 시편의 손상은 시편에서 균열이 관통되거나, 시편의 하중지지능력 상실로 변위가 급격히 증가하는 시점으로 정의하였다. 원전 설계에서 지진하중에 대한 피로평가 시 수명기간 동안 2회의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)이 발생하고 1회 발생시 SSE의 최대 진폭이 10 사이클 작용되는 것으로 가정한다[24]. 따라서 실험에 적용되는 변위제어모드 반복하중에서 한 단계 반복 변위의 수를 20 사이클 설계하였다.



(a) 변위제어모드 반복하중 작용 순서



(b) 변위 진폭 결정(예)

그림 2 엘보우 시편 손상실험에 적용된 변위제어모드 반복하중 형태

실험에 적용된 각 반복 변위 단계의 진폭에 해당하는 엘보우 시편에서 모멘트 변위(moment range, M_{AM})를 식(1)에 대입하여 탄성응력범위 (elastic stress range, $\sigma_{R,d}$)를 계산하면, $d_{a1} \sim d_{a5}$ 진폭에 해당하는 탄성응력범위는 $10.62 \sim 38.16 S_m$ 로 주어진다. 식(1)은 ASME B&PV Code Sec.III[23]의 Level D 조건에서 변위제어모드 반복 하중에 대한 허용응력기준이며, 설계기준지진 조건에 대한 원전 배관의 최대 허용 탄성응력범위는 $6.0 S_m$ 이다. 따라서, 실험에 적용된 변위진폭은 설계기준지진시 배관 엘보우에 작용되는 최대 허용값보다 1.7~6.3배 큰 값을 알 수 있다. 각 변위 진폭에 해당하는 엘보우 시편의 모멘트 범위는 그림 2(b)에 나타낸 것과 같이 각 엘보우 시편에 대한 탄성 하중-변위 곡선으로부터 결정하였다. 즉, 그림 3(b)의 탄성 하중-변위 곡선에서 $d_{a1} \sim d_{a5}$ 에 해당하는 하중진폭(F_{AM})을 구하고, F_{AM} 로부터 굽힘모멘트 범위를 결정하였다.

$$\sigma_{R,d} = C_1 \frac{M_{AM}}{Z} = 1.2 B_2 \frac{M_{AM}}{Z} \leq \text{stress limit} \quad (1)$$

여기서

$$B_2 = \frac{1.3}{h^{2/3}}$$

$$h = \frac{t_n R_b}{r_m^2}$$

$$Z = \frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{2D_o}$$

r_o , r_i , r_m 은 각각 배관의 외반경, 내반경 그리고 평균반경이다.

2. 손상실험 조건

두께가 다른 2종류의 엘보우 시편 (SA403 WP316 SS (Sch. 40), SA403 WP316 SS (Sch. 160))을 대상으로 변위제어모드 반복하중 조건에서 손상실험이 진행되었다. 시편 내부에 내압이 작용되지 않는 조건과 운전 압력이 작용된 조건을 각각 고려하였다. Sch. 40 엘보우 시편의 경우에는 4.8 MPa 운전 압력으로 고려되었으며, Sch. 160 엘보우 시편의 경우에는 16.0 MPa이 운전 압력으로 고려되었다. 내압이 작용되지 않는 경우에도 매우 낮은 압력(0.2 MPa)을 가압하여 관통균열에 의한 손상을 검출하였다. 모든 실험은 준정적 실험 속도로 진행되었으며, 실험에 적용된 시험기의 변위속도는 1.5 mm/s이다.

각 시편 별로 그림 2(a)와 같은 형태의 반복 변위가 작용되었으며, 각 시편에 적용된 5단계의 변위진폭과 각 진폭에 해당하는 엘보우 시편의 탄성응력범위는 표 2에 정리된 바와 같다. 각 실험조건 별로 1회씩 실험이 진행되었으며, 손상모드와 손상사이클의 재연성을 확인하기 위해 SA403 WP316 SS (Sch. 160) 시편에 대한 16.0 MPa 조건의 손상실험은 실험결과에 신뢰성 확인을 위하여 2회(S3-3 & S3-6) 수행하였다.

표 2 변위제어모드 반복하중 하의 엘보우 시편 손상실험 조건

Material	ID	Pressure [MPa]	Displacement amplitude [mm]	Elastic stress range	Etc.
SA403 WP316 SS (4-inch, Sch. 40)	S2-1	0.2	$d_{a1}=11.84$	$10.62 S_m$	-
			$d_{a2}=21.26$	$19.08 S_m$	
			$d_{a3}=28.35$	$25.44 S_m$	
			$d_{a4}=35.44$	$31.80 S_m$	
			$d_{a5}=42.52$	$38.16 S_m$	
	S2-3	4.8	$d_{a1}=11.84$	$10.62 S_m$	-
			$d_{a2}=21.26$	$19.08 S_m$	
			$d_{a3}=28.35$	$25.44 S_m$	
			$d_{a4}=35.44$	$31.80 S_m$	
			$d_{a5}=42.52$	$38.16 S_m$	
SA403 WP316 SS (4-inch, Sch. 160)	S3-1	0.2	$d_{a1}=12.73$	$10.62 S_m$	-
			$d_{a2}=22.87$	$19.08 S_m$	
			$d_{a3}=30.49$	$25.44 S_m$	
			$d_{a4}=38.12$	$31.80 S_m$	
			$d_{a5}=45.74$	$38.16 S_m$	
	S3-3	16.0	$d_{a1}=12.73$	$10.62 S_m$	-
			$d_{a2}=22.87$	$19.08 S_m$	
			$d_{a3}=30.49$	$25.44 S_m$	
			$d_{a4}=38.12$	$31.80 S_m$	
			$d_{a5}=45.74$	$38.16 S_m$	
	S3-6	16.0	$d_{a1}=12.73$	$10.62 S_m$	Confirmation test
			$d_{a2}=22.87$	$19.08 S_m$	
			$d_{a3}=30.49$	$25.44 S_m$	
			$d_{a4}=38.12$	$31.80 S_m$	
			$d_{a5}=45.74$	$38.16 S_m$	

제 3 절 실험절차 및 장치

1. 실험절차

실험에 앞서 모든 엘보우 시편에 대해서 곡관부의 직경과 두께를 측정하여 기록하였으며, 곡관부 측면(Crown), 외륜(Extrados), 그리고 내륜(Intrados) 중심부에 변형을 게이지를 부착하였다. 외륜과 내륜 중심에서는 원주방향 1개와 축방향 2개의 변형을 게이지를 부착하였으며, 측면 중심부에는 원주방향 2개와 축방향 1개의 변형을 게이지를 부착하였다(그림 3).

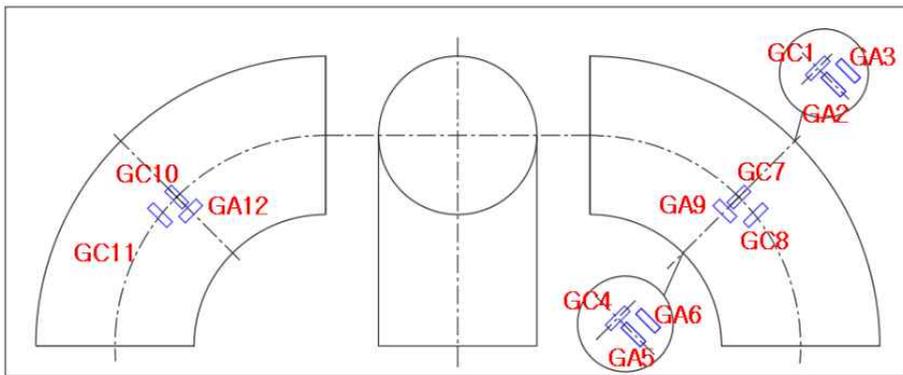


그림 3 엘보우 곡관부의 변형률 게이지 부착 위치

변형률 게이지 부착이 완료된 시편을 시험기에 거치한 후, 가압을 위해 시편에 물을 주입하였다. 물이 주입된 후 시편의 내압 측정을 위한 압력게이지를 시편의 한쪽 끝단에 연결하고, 반복하중 작용 시 시편의 In-plane 방향 변형을 측정하기 위한 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer)를 시편의 끝단에 연결하였다. 시편을 가압장치에 연결한 후 설정된 압력까지 가압하고 압력을 일정하게 유지하였다. 그림 4는 엘보우 시편에 대한 실험장비를 개략적으로 나타낸 것이다.

설정된 압력까지 가압된 엘보우 시편에 시편이 손상될 때까지 그림 2(a) 형태의 반복 변위를 가한다. 즉, 진폭이 작은 단계부터 20 사이클의 반복 변위를 가한 후 시편의 손상 여부를 확인하였다. 각 단계에서 시편이 손상되지 않으면 변위의 진폭을 증가시켜 다음 단계 반복하중을 가한다. 5번째 진폭 (d_{a5})의 반복하중을 20 사이

를 가한 이후에도 시편이 손상되지 않으면 시편이 손상될 때까지 $d_{0.5}$ 진폭의 반복 변위를 연속적으로 가하면서 시편의 손상 여부를 확인한다.

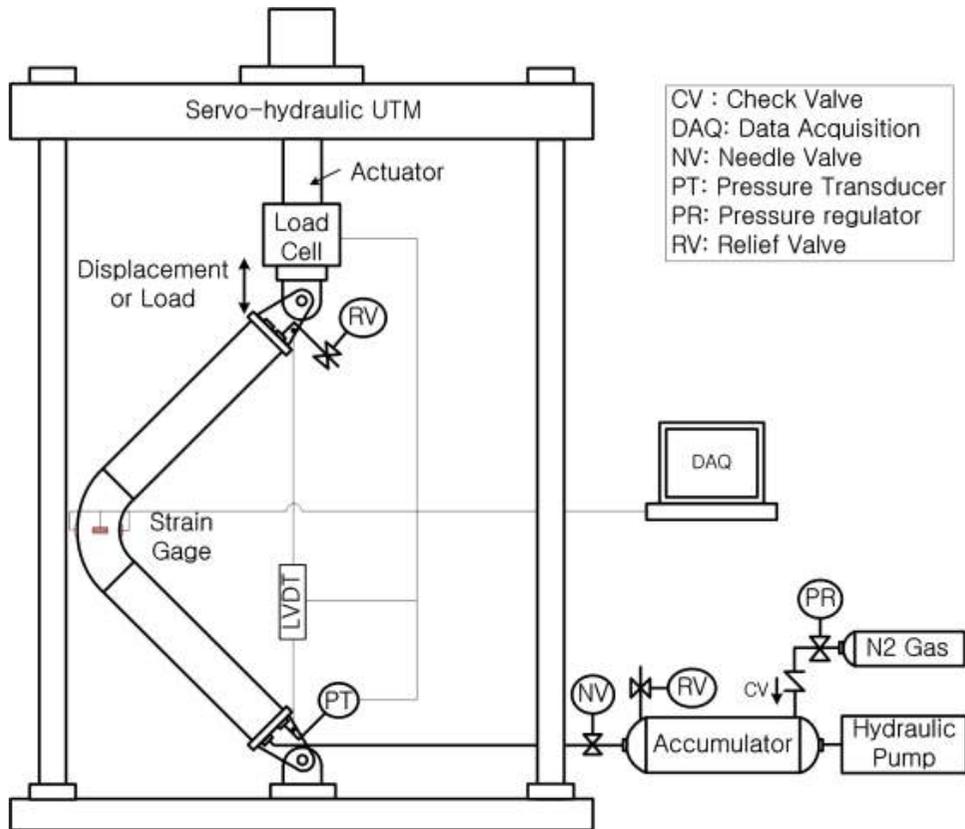


그림 4 엘보우 시편에 대한 반복하중 손상실험 장비 개략도



그림 5 엘보우 시편 반복하중 조건의 손상실험 사진

2. 실험장비

가. 장비 및 데이터 취득

엘보우 시편에 대한 손상실험에는 250 kN 용량의 로드셀이 부착된 유압식 만능 시험기가 사용되었다. 시편에 반복 변위가 작용되는 동안 시험기의 로드셀과 가진기에서 하중과 변위 데이터를, 곡관부에서는 변형을 게이지의 데이터를 취득하였다. 또한, 시편에 거치된 LVDT로부터 시편의 In-plane 방향 변위를 측정하였으며, 내압도 압력게이지를 이용하여 측정하였다. 모든 데이터는 PC와 연결된 DAQ 장비로 취득하였으며, 반복하중 형태에 관계없이 초당 10개씩 데이터를 취득하였다. 엘보우 시편의 굽힘 변위 측정에 적용된 LVDT는 Wire type으로 최대 500 mm의 변위를 측정할 수 있다. 그림 5은 엘보우 시편이 거치된 시험기와 가압장치 및 게이지가 연결된 상태의 실험 장면 사진을 나타낸 것이다

나. 가압장치

본 실험에서 각 반복하중 조건에서 손상실험은 내압이 작용되지 않는 경우와 운전압력이 작용된 경우에 대해 각각 수행되었다. 내압이 작용되지 않는 경우에도 균열에 의한 누설 시점을 검출하기 위해서 0.2 MPa의 낮은 내압을 작용시켰다. 따라서, 엘보우 시편을 실험 압력까지 가압하고, 실험이 진행되는 동안 일정한 내압을 유지할 수 있도록 가압장치를 설계·제작하였다. 본 실험에서는 물을 주입하여 시편을 가압하였으며, 가압장치는 고압 펌프, 고압 질소가스, 고압 탱크(Accumulator) 그리고 압력조절기(PR) 등으로 구성되며, 시편과 고압탱크를 설정 압력까지 가압하고 일정 압력을 유지할 수 있도록 설계하였다. 그림 4에 나타낸 것과 같이 반복 변위가 작용되는 동안 엘보우 시편의 변형으로 인해 내압이 감소하는 경우에는 고압질소가 자동으로 유입되고, 내압이 상승하는 경우에는 방출밸브(RV)를 통해 압력이 방출되어 일정한 압력이 유지되도록 하였다.

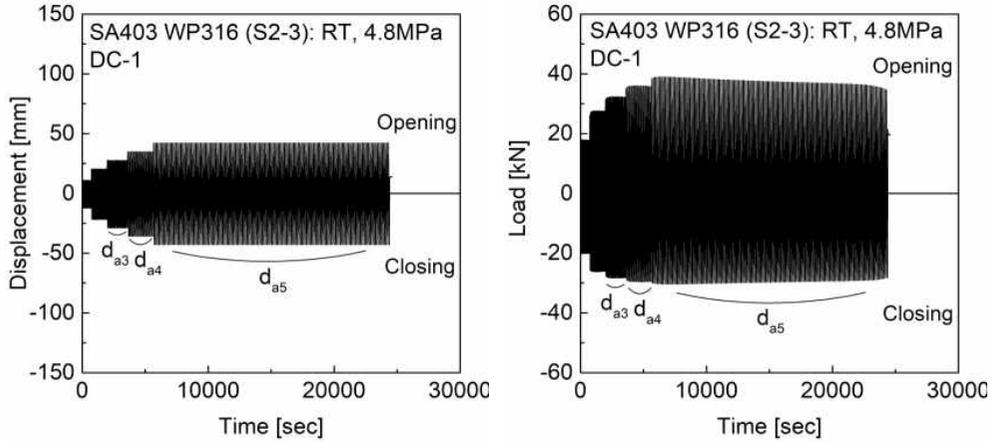
제 4 절 실험결과

1. 변형 거동

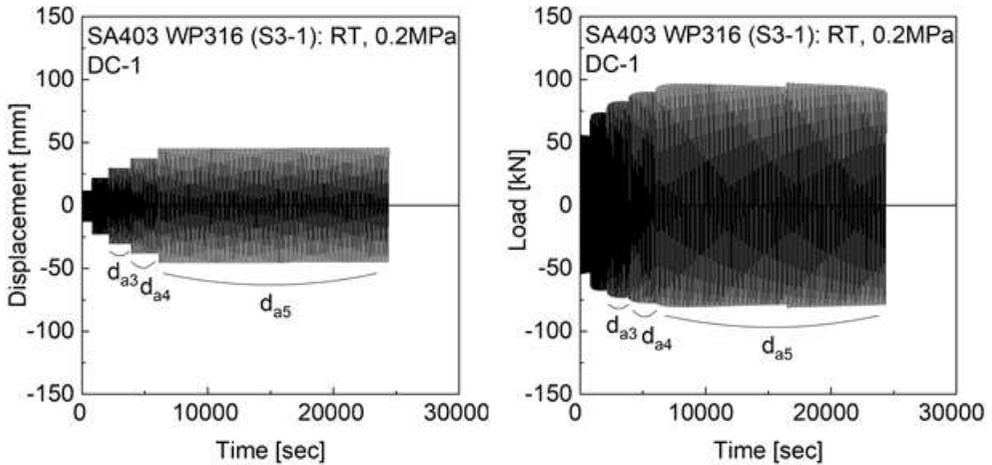
가. 하중-변위 거동

표 2의 실험 조건에서 엘보우 시편에 대한 변위제어모드 반복하중 하의 손상실험이 수행되었다. 그림 6은 실험에서 주어진 변위 (LVDT 측정 값)와 응답하중의 예를 보여주고 있다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 실험에는 일정한 진폭의 변위가 시편에 반복적으로 가해졌다. SA403 WP316 SS (Sch. 40) 엘보우 시편에서는 균일한 진폭의 변위가 반복됨에 따라 초기 수 사이클 동안 하중이 증가하다 일정한 값에 수렴한 후 서서히 감소하는 경향을 보였다. 일정한 진폭의 변위가 반복되는 동안 응답하중에서 이러한 차이는 엘보우의 반복경화 특성 차이에 기인하는 것으로 판단된다. Sch. 160도 Sch. 40과 같은 경향을 보였다.

변위제어 모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 하중-변위 거동을 보다 자세히 살펴보기 위해서, 실험조건 별로 하중-변위 이력곡선을 살펴보았다(그림 7). 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 열림모드(Opening mode) 방향과 닫힘모드(Closing mode) 방향에서 하중-변위 이력곡선이 비대칭을 보여준다. 즉, 동일한 변위에서 닫힘모드에 비해 열림모드 방향의 응답하중이 더 큰 값을 보여준다. 이러한 거동은 내압의 크기에 무관하게 같은 스테인리스강인 두께가 두꺼운 Sch. 160 엘보우 시편에 비해 두께가 얇은 Sch. 40 엘보우 시편에서 더 뚜렷한 것을 알 수 있다. 변위제어모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 하중-변위 이력 곡선의 비대칭 현상은 In-plane 굽힘 조건에서 곡관부의 단면변형(Ovalization)과 관련이 있는 것으로 판단된다. 엘보우 시편에 닫힘모드 방향의 변위가 작용될 때 엘보우 단면은 엘보우 시편의 강성을 저하시키는 반면, 열림모드 방향으로 변위가 작용될 경우에는 엘보우 시편의 강성을 증가시키는 방향으로 엘보우 단면이 변형되기 때문이다. 따라서 Sch. 160 시편에 비해 Sch. 40 시편에서 하중-변위 이력곡선의 비대칭 현상이 더 뚜렷한 것은 In-plane 굽힘하중 작용시 두께가 두꺼운 Sch. 160 시편에 비해 두께가 얇은 Sch. 40 시편에서 단면변형이 더 크게 발생하기 때문이다. 변위제어모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 두께에 따른 이와 같은 변형거동의 차이는 손상거동에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측된다.

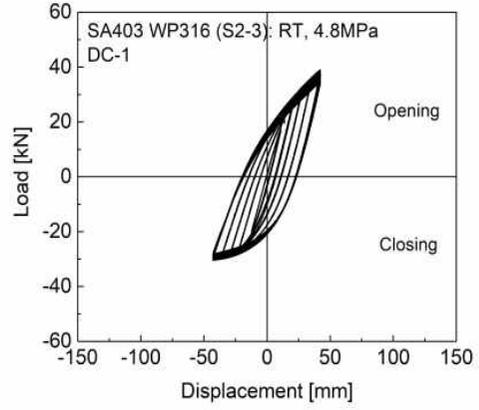
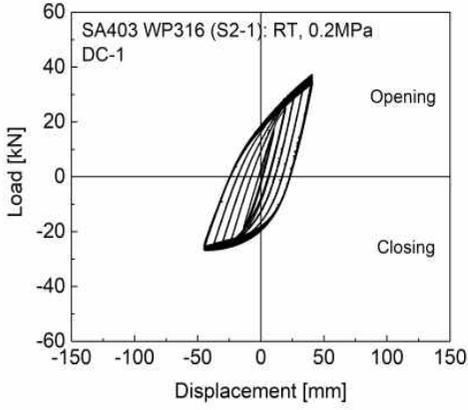


(a) SA403 WP316 SS (Sch. 40)

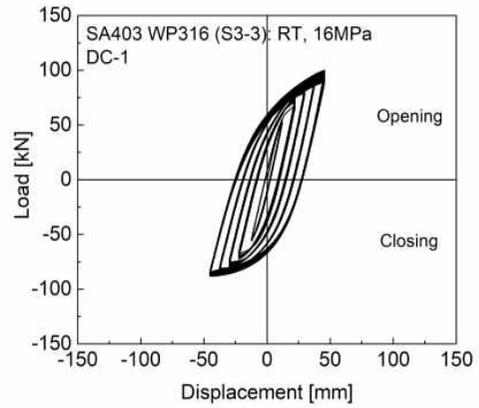
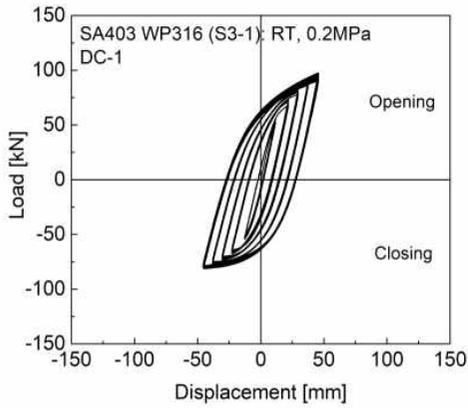


(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160)

그림 6 변위제어모드 반복하중 조건의 손상실험에서 주어진 시간에 따른 변위와 응답하중



(a) SA403 WP316 SS (Sch. 40) 시편



(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160) 시편

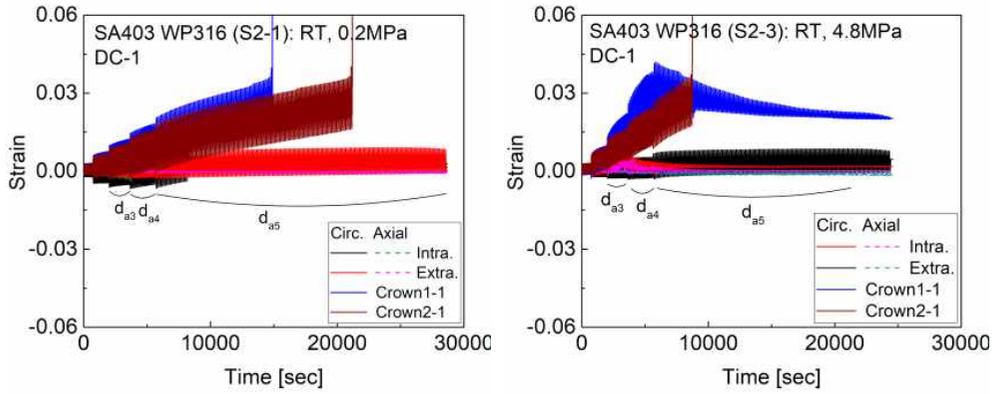
그림 7 변위제어모드 반복하중 조건에서 하중-변위 이력곡선

나. 변형률-시간 이력

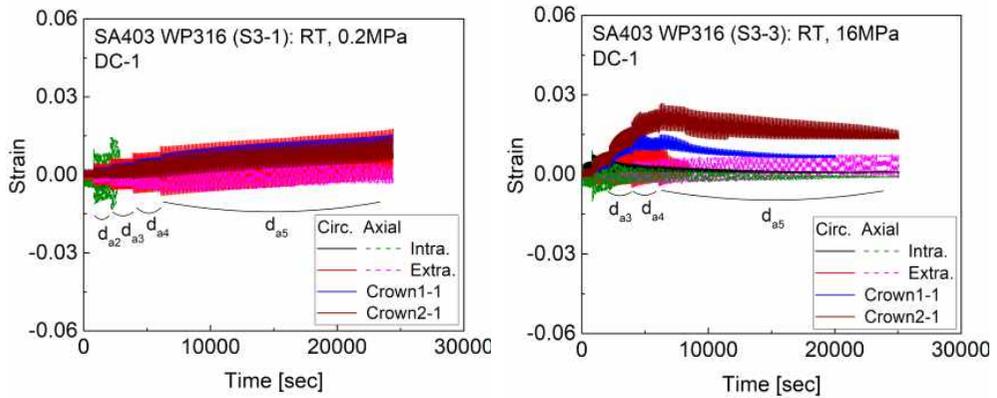
앞서 살펴본 엘보우 시편의 손상거동에 미치는 시편 두께와 내압의 영향을 이해하기 위해서 엘보우 시편의 엘보우 각 위치에서 측정된 변형률 게이지 값을 나타낸 것이다. 그림 8는 각 실험조건 별로 곡관부의 각 위치에서 측정된 변형률 게이지를 나타냈다. 그림 8(a)를 보면 알 수 있는 것은 두께가 얇은 Sch. 40 엘보우 시편에서는 내압의 크기와 관계없이 변위제어모드 반복하중이 작용될 때 다른 부위에 비해 엘보우 측면에서 원주방향 평균 변형률의 증가가 큰 것으로 관찰되었다. 즉, 다른 부위에 비하여 엘보우 측면에서 원주방향으로 변형률의 누적이 크게 발생하였다. 측면에서 원주방향 변형률은 시편에 작용된 반복하중의 진폭에 비례하여 증가하였으며, 일정한 진폭의 변위가 반복됨에 따라 원주방향 평균 변형률이 점진적으로 증가하였다.

모든 시편에서 진폭이 d_{a5} 인 변위가 반복되는 동안 게이지가 탈락하여 최종 파단 시점의 변형률은 측정하지 못하였다. 두께가 두꺼운 Sch. 160 엘보우 시편에서는 진폭이 작은 조건(d_{a1} , d_{a2})에서 엘보우 내륜의 축방향 변형률 진폭이 급격히 증가하다 게이지가 탈락하였으며, 게이지가 탈락할 때까지 평균 변형률은 크게 증가하지 않았다.(그림 8(b))

한편, 그림 8(a)에서 Sch. 40 엘보우 시편의 내압에 따른 원주방향 변형률을 비교하면, 내압이 작용되지 않는 조건인 0.2 MPa에 비해 내압이 작용되는 조건인 4.8 MPa에서 변형률 진폭은 감소한 반면, 평균 변형률은 더 크게 증가한 것을 알 수 있다. 그림 8(b)에서 Sch. 160 엘보우 시편의 내압에 따른 변형률을 비교하면, 내압이 작용되지 않은 조건에 비해 내압이 작용되는 조건인 16.0 MPa에서 곡관부 내륜의 축방향 변형률 진폭이 약간 감소하였다. 그러나 곡관부 측면의 원주방향 평균 변형률은 내압에 따라 뚜렷하게 증가하였다.



(a) SA403 WP316 SS (Sch. 40) 시편



(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160) 시편

그림 8 변위제어모드 반복하중 조건의 엘보우 시편 곡관부에서 변형률-시간 이력곡선

2. 손상거동

가. 손상모드

변위제어모드 반복하중 조건에서 손상실험을 수행한 결과, 내압의 크기와 엘보우 시편의 두께와 관계없이 모든 시편에서 균열 관통에 의한 누설이 관찰되었다. 즉, 실험조건에 관계없이 주된 손상모드가 균열 생성인 것으로 파악되었다. 하지만 균열 발생 위치와 형태는 엘보우 시편의 형상에 따라 다른 특징을 보여주었다. 두께가 얇은 Sch. 40 엘보우 시편에서는 내압의 크기에 관계없이 곡관부 측면에서 축방향 균열이 안쪽에서 바깥쪽으로 생성되어 관통된 반면, 두께가 두꺼운 Sch. 160 엘보우 시편에서는 곡관부의 내륜에서 원주방향 균열이 바깥쪽에서 안쪽으로 균열이 생성되어 관통되었다. 그림 9는 실험 후 엘보우 시편에서 촬영한 균열부의 사진이다. 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 곡관부 측면에서는 1개의 축 방향 균열이 발견된 반면, 곡관부 내륜에서는 관통된 균열 이외에도 다수의 작은 원주방향 균열들이 발견되었다.

변위제어모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 곡관부에 생성된 균열의 특징을 살펴보기 위해서, 엘보우 시편에서 채취된 곡관부의 외면과 내면에 대한 침투탐상 검사(Penetration Test, PT) 검사를 수행하였다. 그림 10은 시편 별로 PT 검사 결과를 정리한 것이다. 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 SA403 WP316 SS (Sch. 40) 시편의 경우 곡관부 외면에서는 한쪽 측면에서 균열이 발견되었으나 내면에서는 양쪽 측면에서 균열이 검출되었다. 또한, SA403 WP316 SS (Sch. 160) 엘보우 시편에서는 내륜의 외면에 여러 개의 원주방향 균열들이 생성되어 있으나, 내면에서는 관통균열 1개만 관찰되고 다른 결함부분은 관찰되지 않았다(그림 10(b)). 따라서 Sch. 40 엘보우 시편의 경우에는 곡관부 측면의 내면에서 축방향 균열이 생성되어 외면으로 성장하지만, Sch. 160 엘보우 시편에서는 곡관부 내륜의 외면에서 원주방향 균열들이 생성되어 내면으로 성장한다는 것을 확인할 수 있다. 엘보우 시편의 두께에 따른 이와 같은 차이는 앞서 언급한 바와 같이 변위제어모드 반복하중 조건에서 곡관부의 변형거동의 차이와 관련이 있는 것으로 판단된다.

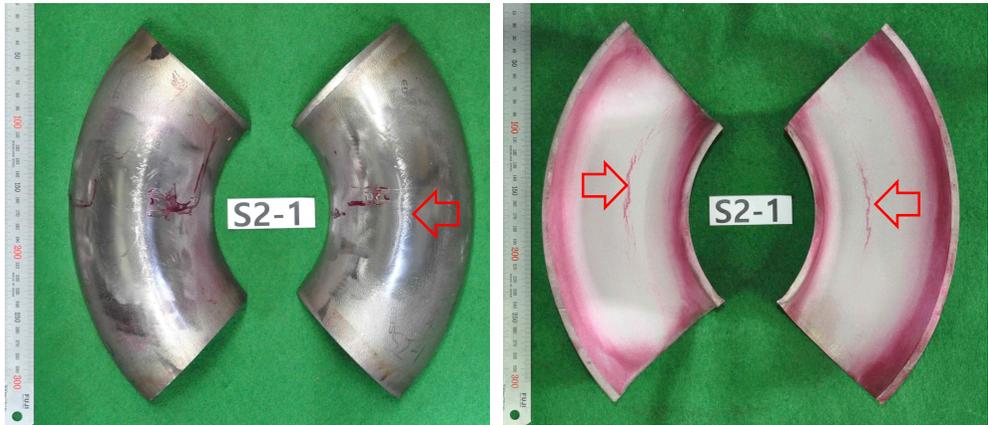


(a) SA403 WP316 SS (Sch. 40) 시편

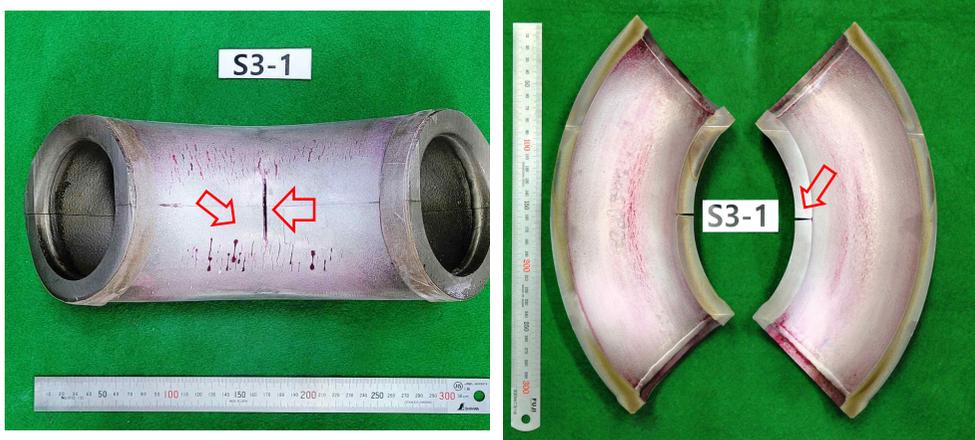


(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160) 시편

그림 9 변위제어모드 반복하중 조건에서 시험된 엘보우 시편의 시험 후 사진



(a) SA403 WP316 SS (Sch.40) 시편



(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160) 시편

그림 10 변위제어모드 반복하중 조건에서 실험된 엘보우 시편의 외면과 내면에 대한 PT 검사 결과

한편, 실험이 완료된 시편의 엘보우에 대한 육안 관찰 결과, 뚜렷한 부풀림(bulging) 현상을 관찰되지 않았다. 엘보우에서 반복하중에 따른 변형 정도를 정량적으로 파악하기 위해서 엘보우의 양측면과 외륜-내륜 방향에서 외경을 측정하고 측정된 외경을 식(2)에 대입하여 단면변형도 (Ovality)를 계산하였다.

$$Ovality(\%) = \frac{D_{0,max} - D_{0,min}}{D_{0,m}} \times 100 \quad (2)$$

여기서,

$D_{0,max}$: 엘보우 최대 외경

$D_{0,min}$: 엘보우 최소 외경

$$D_{0,m} = \frac{D_{0,max} + D_{0,min}}{2}$$

계산 결과, 표 3에 제시된 바와 같이 엘보우 시편의 종류와 내압의 크기에 관계 없이 최대 단면변형도가 10% 이하로 크지 않았다. 따라서, 변위제어모드 반복하중 조건에서는 시편이 손상될 때까지 큰 진폭의 변위가 반복적으로 작용되었음에도 불구하고 엘보우에서 잔류하는 단면변형은 크지 않은 것을 알 수 있다.

나. 손상사이클

표 3은 변위제어모드 반복하중 조건에서 수행된 실험결과로부터 각 시편의 손상 사이클을 정리한 것이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 모든 조건에서 진폭이 첫 단계(d_{21})에서 5번째 단계(d_{25})까지 증가하며 20 사이클씩 변위가 작용됨에도 불구하고 시편이 손상되지 않았다. 추가적으로 진폭이 d_{25} 인 변위가 100 사이클 이상 작용될 때 손상되었다. 즉, 시편의 두께와 내압의 크기에 관계없이 엘보우 시편은 SSE의 6배 이상 큰 진폭의 변위가 수십 회 이상 반복될 때 손상되는 것을 확인할 수 있었다.

표 3에서 시편의 두께 별로 내압에 따른 손상사이클 결과를 비교하면, 두께가 얇은 Sch. 40 엘보우 시편에서는 내압이 증가함에 따라 손상사이클이 약간씩 감소하지만, 두께가 두꺼운 Sch. 160 엘보우 시편에서는 내압에 관계없이 미미한 차이로 거의 유사한 손상사이클을 보였다. 또한, 동일한 실험조건에서 수행된 2개의 SA403

WP316 SS (Sch. 160) 엘보우 시편은 거의 같은 손상사이클을 보였다.

표 3 변위제어모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 손상사이클

Material	ID	Pressure [MPa]	Cycles to failure [cycle]	Failure Mode	Ovality [%]
SA403 WP316 SS (4-inch, Sch. 40)	S2-1	0.2	$20(d_{a1})+20(d_{a2})+20(d_{a3})$ $+20(d_{a4})+191(d_{a5})$	Axial Crack at Crown	8.7
	S2-3	4.8	$20(d_{a1})+20(d_{a2})+20(d_{a3})$ $+20(d_{a4})+156(d_{a5})$	Axial Crack at Crown	2.9
SA403 WP316 SS (4-inch, Sch. 160)	S3-1	0.2	$20(d_{a1})+20(d_{a2})+20(d_{a3})$ $+20(d_{a4})+141(d_{a5})$	Circ. Crack at Intrados	0.9
	S3-3	16.0	$20(d_{a1})+20(d_{a2})+20(d_{a3})$ $+20(d_{a4})+147(d_{a5})$	Circ. Crack at Intrados	1.9
	S3-6	16.0	$20(d_{a1})+20(d_{a2})+20(d_{a3})$ $+20(d_{a4})+145(d_{a5})$	Circ. Crack at Intrados	2.8

제 3 장 유한요소 변수해석

제 1 절 손상실험에 대한 FE 시뮬레이션

1. FE 시뮬레이션 모델

앞서 수행된 변위제어모드 반복하중 조건의 손상실험 결과로부터 엘보우 시편의 두께에 따라 균열 위치와 방향이 다른 것을 확인하였다. 따라서, 엘보우 손상실험에 대한 FE 시뮬레이션을 수행하여 엘보우 시편에서 균열 발생 위치와 방향을 지배하는 변수를 파악하고자 한다. 이를 위해서 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS [11]를 이용하여 In-plane 모드 변위제어 반복하중 조건에서 엘보우 시편에 대한 손상실험을 시뮬레이션 하였다. FE 시뮬레이션을 위해 그림 11에 나타난 것과 같이 엘보우 시편의 대칭성을 고려하여 시편의 1/4을 모델링하였다. FE 모델에는 ABAQUS의 절감적분이 적용된 3차원 고체 요소인 C3D20R 요소가 적용되었으며, 배관과 엘보우의 원주방향은 18등분, 두께 5등분 하였다. 길이방향으로는 엘보우와 직관이 각각 10등분과 20등분 되었다. 굽힘하중은 직관 끝 부분 절점에 실험에 적용된 변위의 진폭을 작용함으로써 가하였다. 해석 모델의 두께와 외경은 모두 동일하다고 가정하였다. 실제 엘보우 시편에서는 위치 별로 두께가 약간씩 차이를 보였으나, 손상실험에 대한 FE 시뮬레이션에서는 실측한 두께의 평균을 적용하였다. 모델에 적용된 Sch. 40과 Sch. 160 엘보우 시편의 평균 두께는 각각 6.7 mm와 14.4 mm이다.

반복하중 조건에서 재료의 탄소성 물성은 Chaboche 이동경화모델을 적용하여 모델링하였다. SA403 WP316 SS (Sch. 40)과 SA403 WP316 SS (Sch. 160) 엘보우 측면에서 채취된 시편에 대한 상온 인장실험 결과를 곡선적합하여 Chaboche 인자들을 구했으며 곡선적합을 통해 구한 각 엘보우의 Chaboche 인자는 표 4에 정리하였다. 그림 12는 실험에서 구한 응력-변형을 선도와 Chaboche 모델로 결정한 선도를 비교한 그래프이다.

표 4 단조 응력-변형 곡선에서 결정된 이동경화 매개변수

Sch.	σ_0	C_1	γ_1	C_2	γ_2	C_3	γ_3
40	223.00	1293.84	10.52	73949.50	463.11	1054.38	0.0
160	194.06	1695.54	7.74	83646.07	725.27	979.61	0.0

FE 모델을 이용하여 Sch. 40과 Sch. 160 엘보우 시편에 대한 FE 시뮬레이션을 수행하였다. FE 시뮬레이션에는 진폭이 d_{a5} 인 반복 변위를 3 사이클만 고려하였다. 그림 13은 내압이 0.2 MPa 조건에서 수행된 FE 시뮬레이션과 손상실험의 하중-변위 데이터를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Sch. 40 엘보우 시편은 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 정확히 일치하였으며, Sch .160 엘보우 시편에서는 시뮬레이션 결과가 실험결과에 비해 하중을 약간 낮게 예측하였다. 그러나, 전체적으로 FE 시뮬레이션 결과와 손상실험을 비교적 잘 예측하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, FE 시뮬레이션에 사용된 FE 모델과 재료물성 모델이 적절한 것으로 판단되었다.

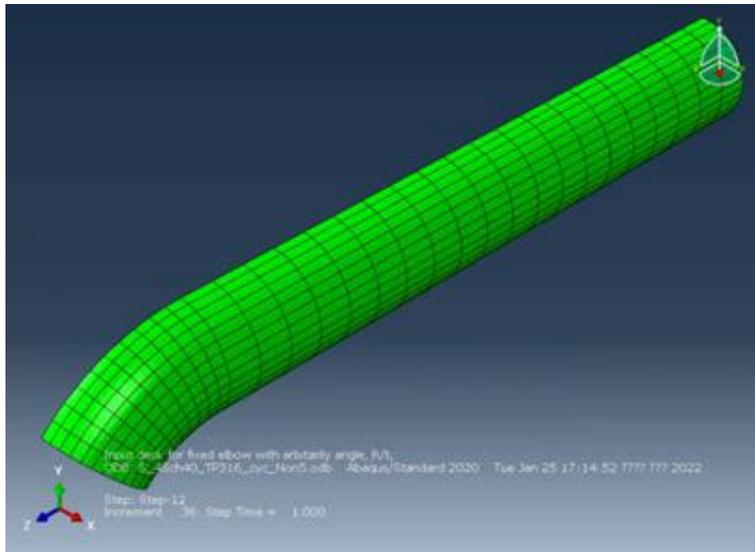


그림 11 엘보우 시편에 대한 유한요소해석 모델

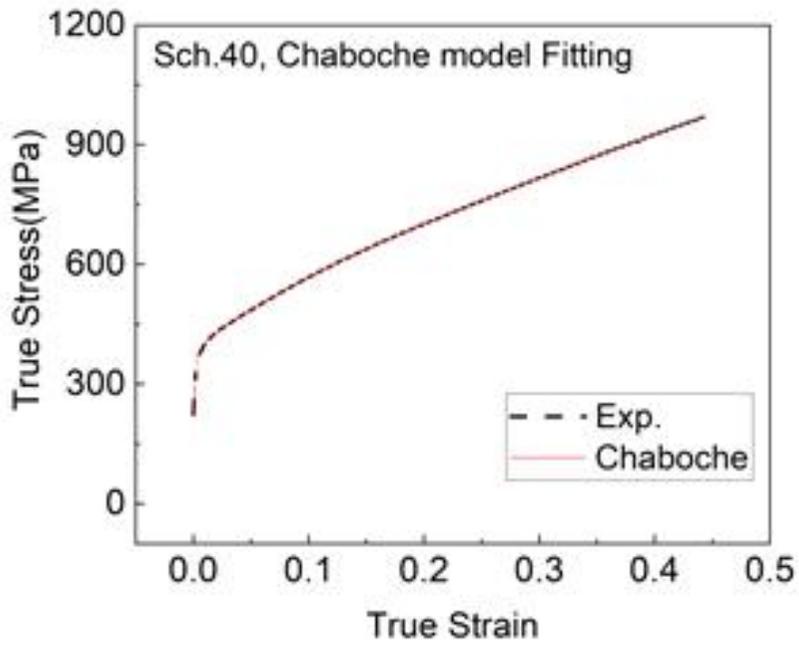
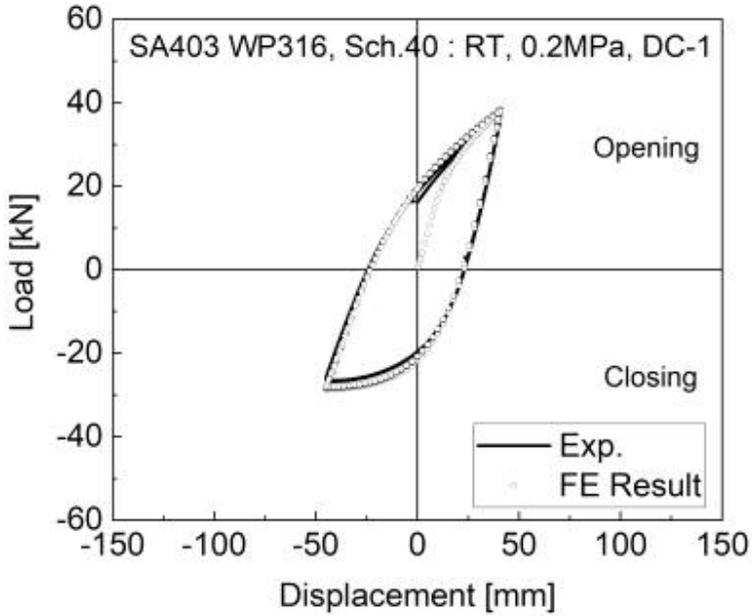
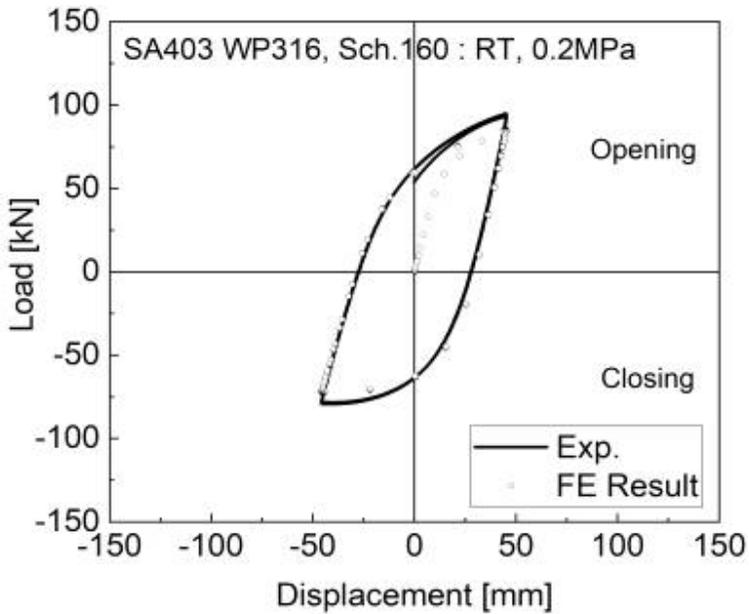


그림 12 곡선적합을 통한 Chaboche 인자 확보



(a) SA403 WP316 SS (Sch. 40)



(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160)

그림 13 엘보우 시편에 대한 FE 시뮬레이션과 손상실험에서 주어진 하중-변위 이력곡선 비교

2. 손상지배 변수 결정

앞서 엘보우 시편에 대한 FE 해석이 손상실험을 적절히 시뮬레이션을 진행하는 것으로 평가되었다. 따라서, 엘보우 시편에 대한 FE 시뮬레이션 결과로부터 변위제어 모드 반복하중 조건에서 엘보우 시편의 균열 발생 위치와 방향을 지배하는 변수를 파악하고자 한다. 선행 연구들에는 엘보우 시편의 손상을 지배하는 변수로 등가소성변형률과 방향 별 변형률 진폭, 원주방향 변형률, 등가응력, 굽힘모멘트, 라체팅 변형률, 누적 등가소성변형률 등이 제시된 바 있다[12-16]. 여기서는 이들 손상 지배 변수들 중 균열 발생 위치와 방향을 결정하는데 단순하면서 신뢰성이 있는 변수를 도출하고자 한다. 이를 위해서 그림 14에 나타낸 바와 같이 1 사이클의 반복 변위가 작용될 때, 곡관부 중심의 각 위치 별로 등가소성변형률(equivalent plastic strain)과 열림모드와 닫힘모드 사이의 변형률 범위(strain range)를 살펴보았다.

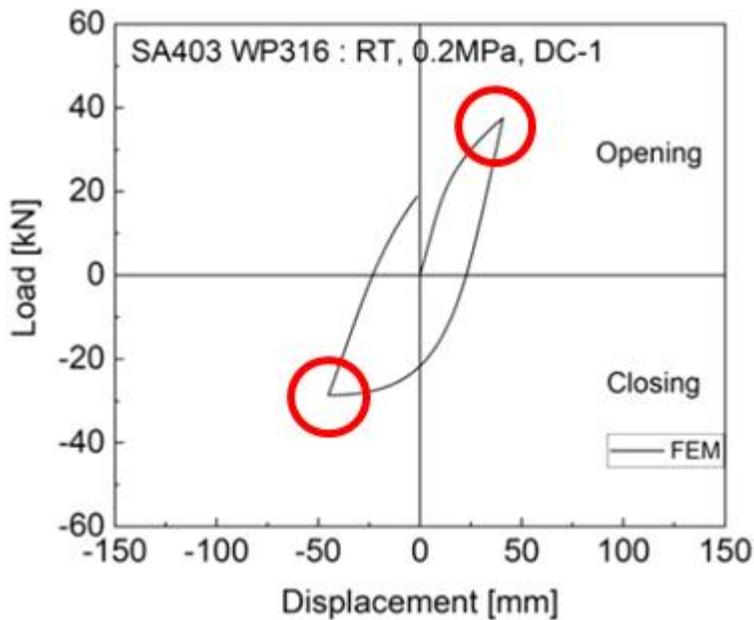


그림 14 엘보우 시편의 FE 시뮬레이션 하중-변위 이력곡선 예

가. 균열위치

엘보우 곡관부 중심의 내면과 외면에서 원주방향 위치에 따른 등가소성변형률 분포를 살펴보기 위하여, 그림 15와 같이 내면과 외면의 절점 38곳에서 열림과 닫힘 모드 굽힘상태에서 등가소성변형률을 추출하였다. 원주방향 위치에 따른 등가소성변형률을 그림 16과 같이 외륜(0°)에서부터 내륜(180°)까지의 19지점을 비교하였다. Sch. 40 엘보우(그림 16(a))는 닫힘모드 굽힘 작용시, 내면(In)의 측면에서 등가소성변형률이 높은 값을 가졌고, Sch. 160 엘보우(그림 16(b))에서는 닫힘모드가 작용할 때 외면(Out)의 내륜에서 등가소성변형률이 가장 높은 값을 가졌다. Sch. 40과 Sch. 160 엘보우에서 등가소성변형률이 가장 큰 위치에서 두께 방향의 분포를 살펴보면 그림 17과 같다. 엘보우 손상실험 결과에서 손상위치와 등가소성변형률의 최대 위치를 비교하면, 등가소성변형률이 가장 큰 곳과 실험에서 손상이 발생하는 위치가 동일하다. 따라서 손상위치는 등가소성변형률이 가장 큰 곳에서 발생하는 것을 알 수 있다.

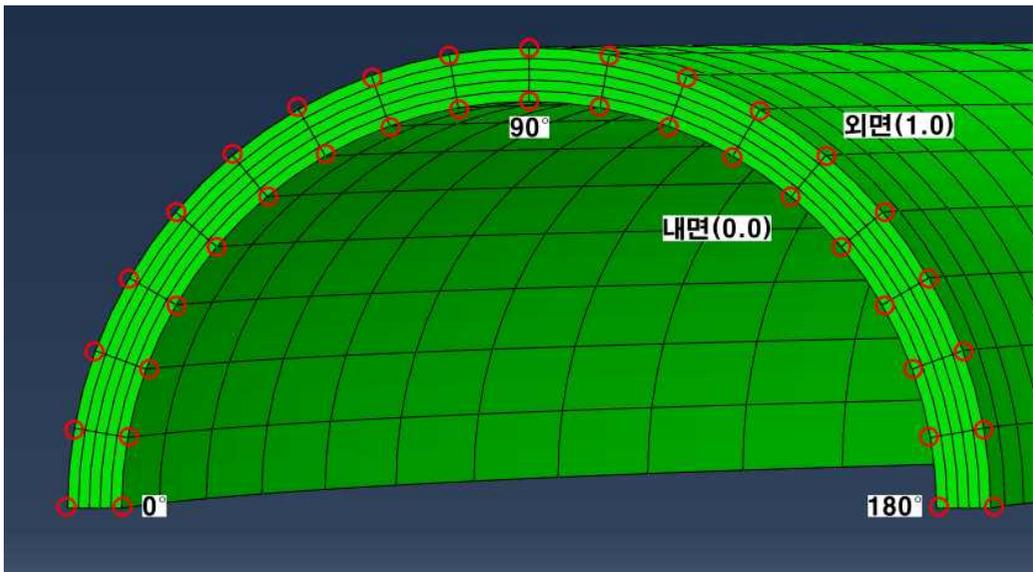
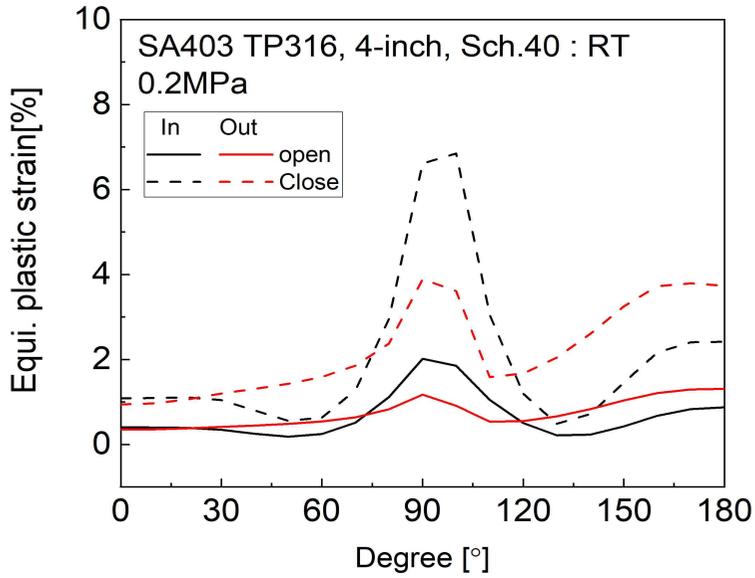
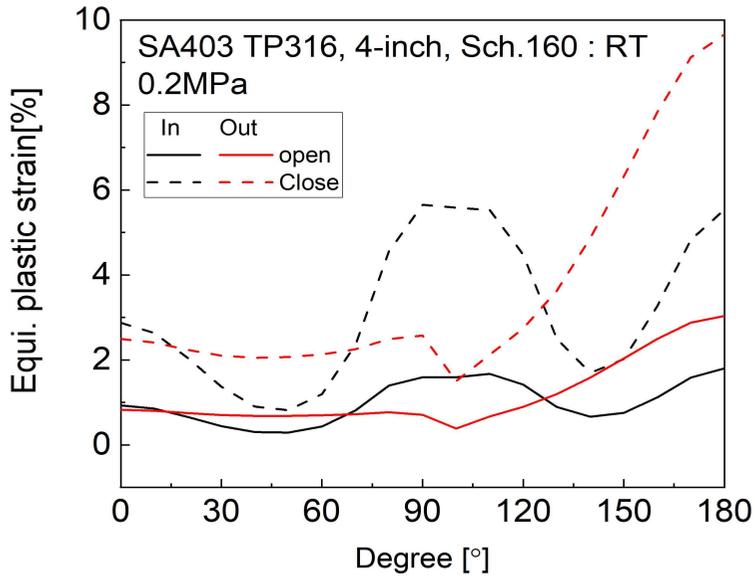


그림 15 등가소성변형률 및 변형률 범위 데이터 추출 위치

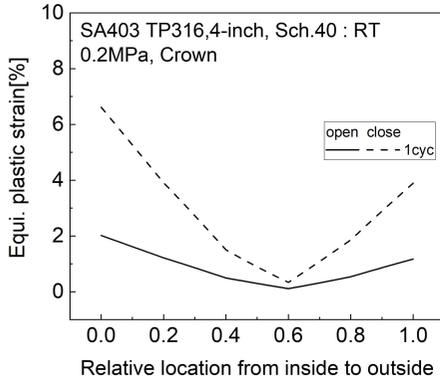


(a) SA403 WP316 SS (Sch. 40)

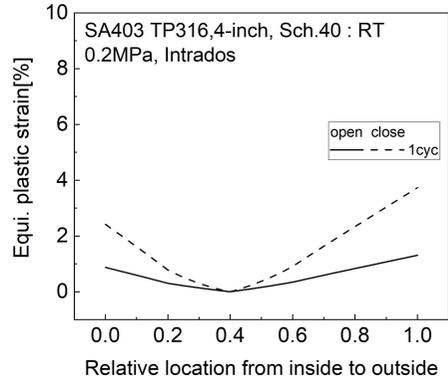


(b) SA403 WP316 SS (Sch. 160)

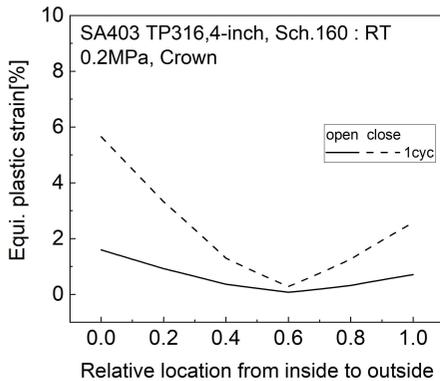
그림 16 곡관부 중심의 내면과 외면에서 원주방향 위치에 따른
 등가소성변형률 분포



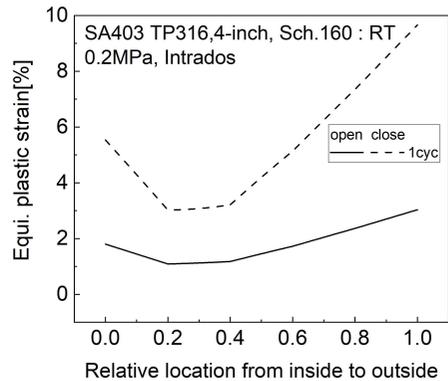
(a) Sch. 40 측면



(b) Sch. 40 내륜



(c) Sch. 160 측면



(d) Sch. 160 내륜

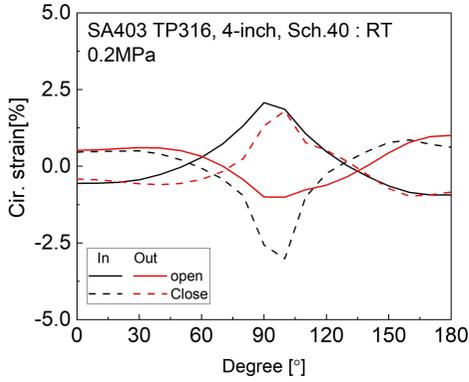
그림 17 Sch. 40과 Sch. 160 엘보우 시편의 측면과 내륜에서 두께 방향 등가소성변형률 분포

나. 균열방향

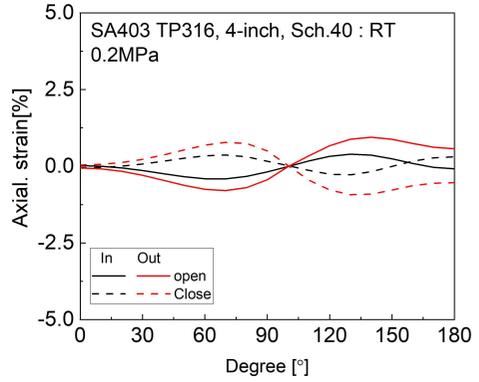
그림 18은 그림 15의 내면(In)과 외면(Out)의 절점 (38곳 위치)에서 열림모드와 닫힘모드 굽힘 작용시 원주방향과 축방향 변형률을 위치에 따라 나타낸 것이다. Sch. 40 엘보우의 원주방향(그림 18(a))인 경우, 내면에 비하여 외면은 측면으로 갈수록 변형률 값이 작아지는 경향을 보이며, 축방향(그림 18(b))에서는 외면이 내면보다 변형률 값들이 큰 경향을 보인다. Sch. 160 엘보우의 원주방향(그림 18(c))은 Sch. 40 엘보우와 같은 경향을 보이지만, 측면의 변형률이 더 작아진 것을 확인하였다. 축방향 변형률(그림 18(d))은 내륜에서 외면의 변형률이 급격하게 증가하였다.

그림 19는 변형률이 가장 크게 나타나는 방향의 두께방향 변형률 분포이다. Sch. 40 엘보우 측면의 원주방향과 축방향 변형률이 내면에서 외면 방향으로 갈수록, 열림모드 때 감소하고 닫힘모드 때 증가하지만, Sch.160 엘보우는 열림모드 때 증가하고 닫힘모드 때 감소하는 반대의 경향을 보인다.

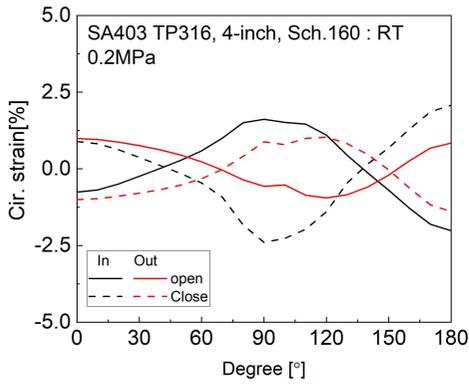
Sch. 40 엘보우 측면 원주방향 변형률(그림 19(a))의 내면에서 열림모드와 닫힘모드 사이 변형률 범위가 가장 큰 값을 가졌으며, Sch. 160 엘보우 내륜 축방향 변형률(그림 19(d))의 외면에서 열림모드와 닫힘모드 사이 변형률 범위가 가장 큰 값을 가졌다. 즉, 이를 분석하면, Sch. 40 엘보우 내면 원주방향으로 힘이 가해져 수직인 축방향 균열이 생성되고, Sch. 160 엘보우 외면 축방향으로 힘이 가해져 수직인 원주방향 균열이 생성된다. 이는 엘보우 손상실험 결과에서 손상위치에 따른 균열방향과 열림모드와 닫힘모드 굽힘 사이의 최대 변형률 범위를 비교하면 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 손상방향을 찾기 위해서는 열림모드와 닫힘모드 사이 변형률 범위가 가장 큰 방향의 수직으로 발생하는 부분이다.



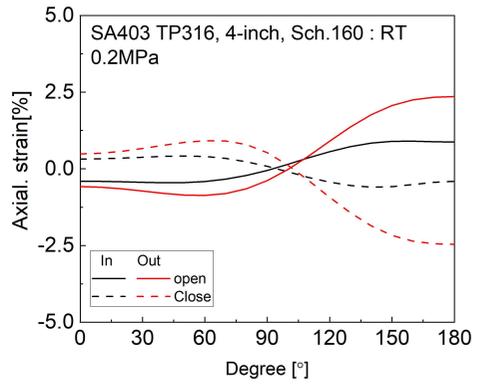
(a) Sch. 40 원주방향 변형률



(b) Sch. 40 축방향 변형률

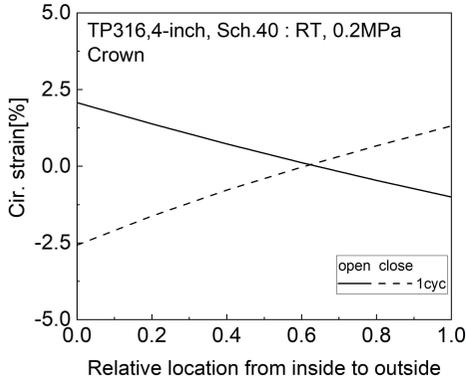


(c) Sch. 160 원주방향 변형률

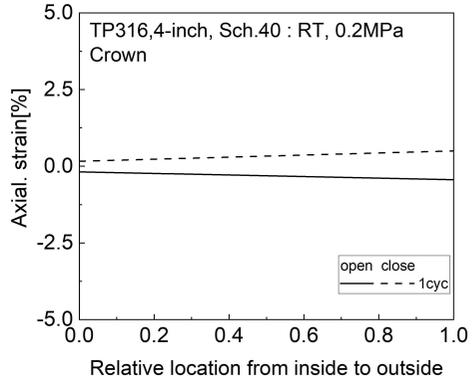


(d) Sch. 160 축방향 변형률

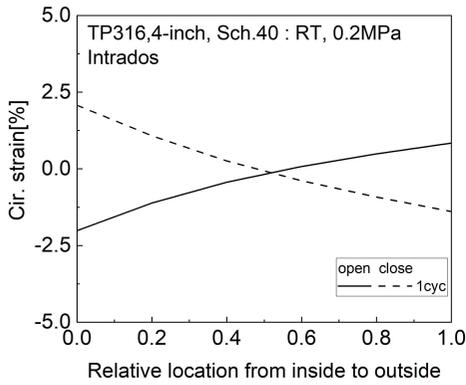
그림 18 내면과 외면에서 원주방향 위치에 따른 원주방향 및 축방향 변형률 분포



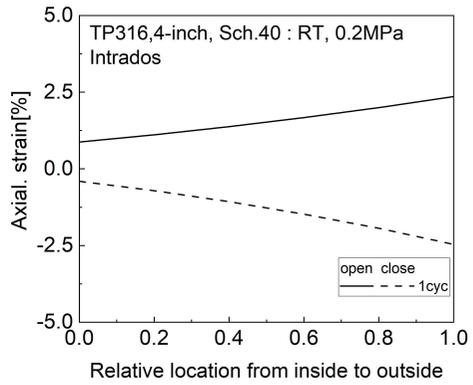
(a) Sch. 40 측면 원주방향 변형률



(b) Sch. 40 측면 축방향 변형률



(c) Sch. 160 내륜 원주방향 변형률



(d) Sch. 160 내륜 축방향 변형률

그림 19 Sch. 40 엘보우 시편의 측면과 Sch. 160 엘보우 시편의 내륜에서 두께 방향 변형률 분포

제 2 절 손상거동에 미치는 엘보우 형상의 영향

엘보우 형상에 따른 손상위치와 방향을 파악하고자, 앞서 엘보우 손상실험에 대한 시뮬레이션에 사용한 FE 모델을 이용하여 다양한 형상의 엘보우에 대한 FE 변수해석을 수행하였다. 즉, 변수해석에는 그림 11의 FE 모델이 사용되었으며, 엘보우의 직경에 따라 외경의 *배에 해당하는 직관이 연결된 엘보우가 FE 모델에 고려되었다. 다만, 변수해석에는 손상실험에 대한 FE 시뮬레이션과 달리 일정한 크기의 하중선 변위 대신 회전각(0.065 radian)을 직관의 끝단에 작용시켜 엘보우에 굽힘이 작용되도록 하였다. FE 변수해석에는 표 4에 제시된 Sch. 40 엘보우의 재료물성이 사용되었다.

변수해석에는 아래 표 7의 다양한 직경과 배관 Schedule이 고려되었다. 공칭직경이 4, 8, 12, 16-inch인 엘보우의 굽힘 반경은 각각 152 mm, 305 mm, 457 mm, 610 mm 이다.

표 5 엘보우 공칭 두께 및 압력조건

배관 Schedule	공칭직경				내압 [MPa]
	4-inch	8-inch	12-inch	16-inch	
Sch. 40	6.0 mm	8.2 mm	10.3 mm	12.7 mm	0.0
					4.8
Sch. 80	8.6 mm	12.7 mm	17.4 mm	21.4 mm	0.0
					8.0
Sch. 120	11.1 mm	18.2 mm	25.4 mm	30.9 mm	0.0
					12.0
Sch. 160	13.5 mm	23 mm	33.3 mm	40.5 mm	0.0
					16.0

1. 손상위치

그림 20은 내압이 없는 경우의 형상에 따른 엘보우에서 손상위치를 파악하기 위해, 1 사이클의 반복 변위가 작용되었을 때 곡관부 측면과 내륜에서 내면과 외면의 등가소성변형률을 엘보우 Schedule 별로 직경에 따라 나타낸 것이다.

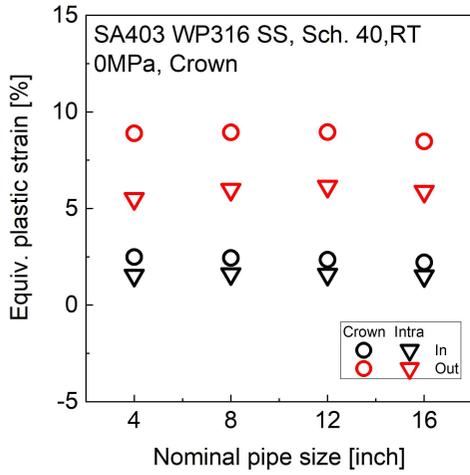
Sch. 40과 Sch. 160 엘보우 측면을 보면 외경과 두께에 상관없이 열림과 닫힘모드 굽힘에서 항상 내면이 외면보다 큰 등가소성변형률을 보였고, 곡관부 내륜에서

는 외면이 내면보다 큰 등가소성변형률을 보였다. 또한, 다른 Sch. 80과 Sch. 120 엘보우에서도 같은 경향을 가졌으며, 내압이 가해진 조건에서도 동일한 경향을 보였다.

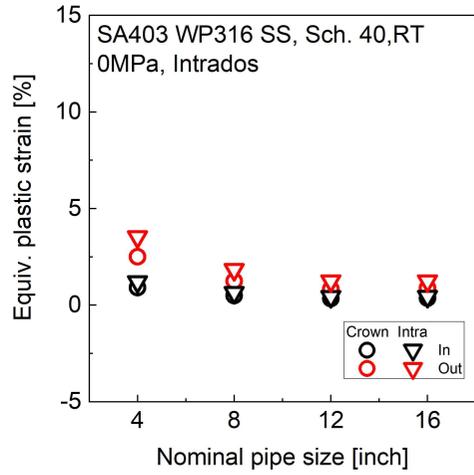
그림 21은 각 두께에 따른 공칭직경 별 그래프로 곡관부 측면의 내면과 내륜의 외면에서 등가소성변형률 값을 비교한 그래프이다. 내압이 0 MPa인 Sch. 40 엘보우(그림 20(a)), Sch. 80 엘보우(그림 20(b)), Sch. 120 엘보우(그림 20(c)) 모두 곡관부 측면의 내면이 곡관부 내륜의 외면에서 보다 등가소성변형률 값이 크게 나타나므로, 곡관부 측면 손상이 예측이 된다. 두께가 늘어날수록 곡관부 측면 등가소성변형률 값이 감소하며, 내륜 등가소성변형률이 증가하다 감소한다.

Sch. 160 (그림 21(d)) 4, 8-inch 엘보우에서 곡관부 내륜의 외면이 곡관부 측면의 내면보다 큰 등가소성변형률 값을 가지므로, 곡관부 내륜의 외면에서 손상이 예측 가능하다. 반면에 12, 16-inch 엘보우에서 곡관부 내륜의 외면 등가소성변형률이 커 곡관부 측면 손상예측이 된다.

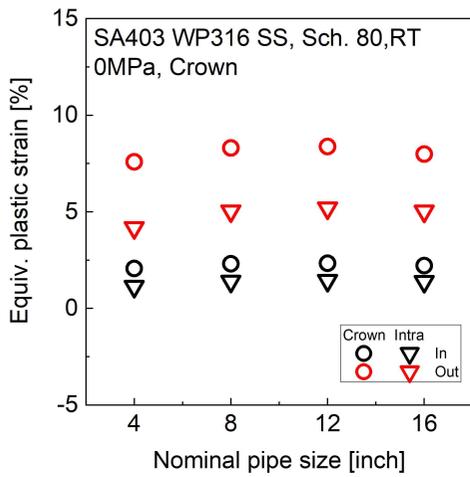
내압이 있는 경우는 Sch. 40, Sch. 80, Sch. 120 엘보우는 앞선 내압이 없을 때와 동일하게 측면에서 손상위치를 예측할 수 있지만, 16 MPa인 Sch. 160 엘보우(그림 21(e))에서 직경 16-inch 엘보우인 내압이 없을 때와 동일하지만, 4, 8, 12-inch 엘보우가 내륜이 측면보다 큰 등가소성변형률 값을 가져서 곡관부 내륜의 외면에서 손상위치가 예측된다.



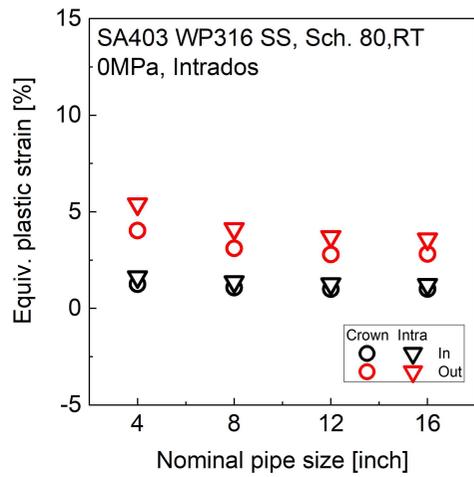
(a) Sch. 40 측면



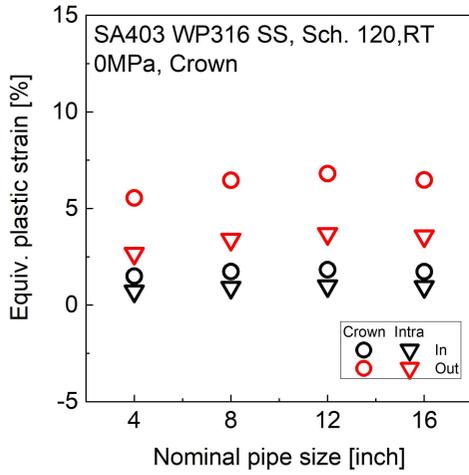
(b) Sch. 40 내륜



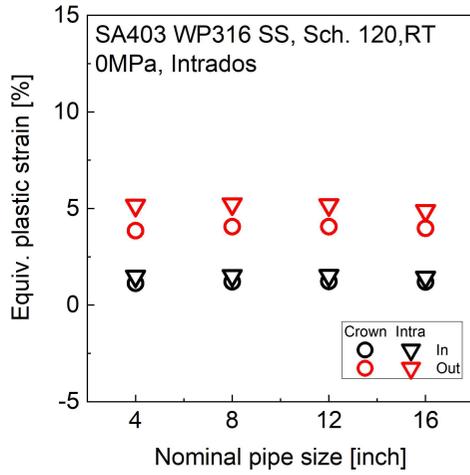
(c) Sch. 80 측면



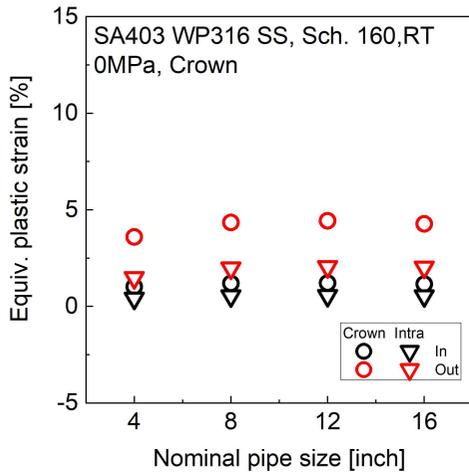
(d) Sch. 80 내륜



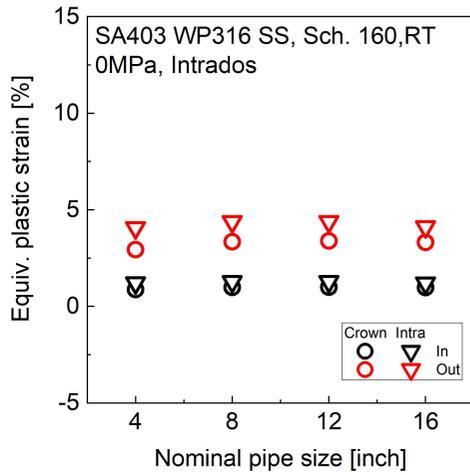
(e) Sch. 120 측면



(f) Sch. 120 내면

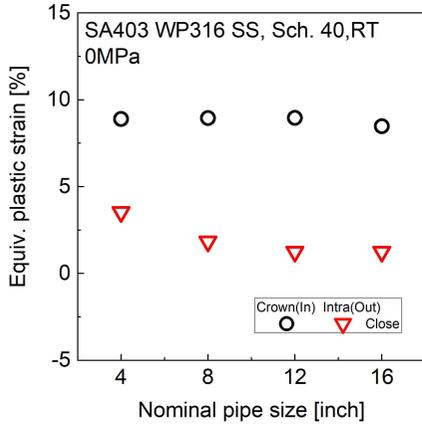


(g) Sch. 160 측면

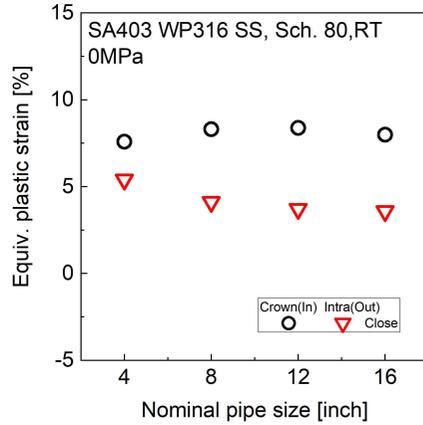


(h) Sch. 160 내면

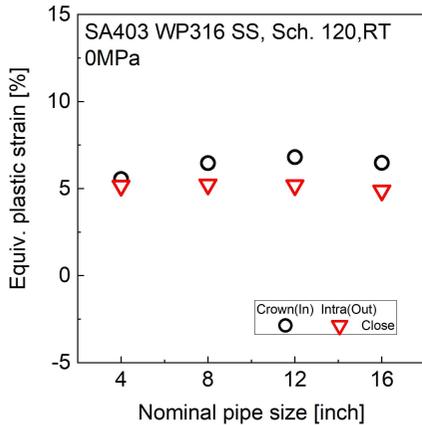
그림 20 엘보우 Schedule 별 공칭직경에 따른 측면과 내면 등가소성변형률



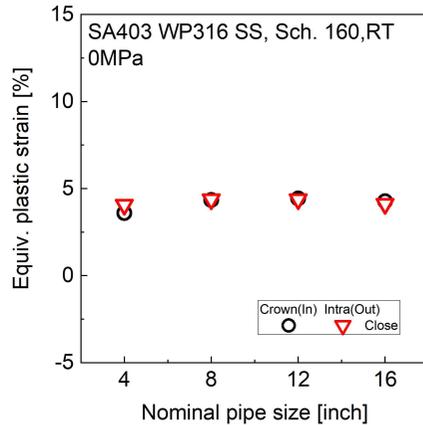
(a) Sch. 40 0 MPa



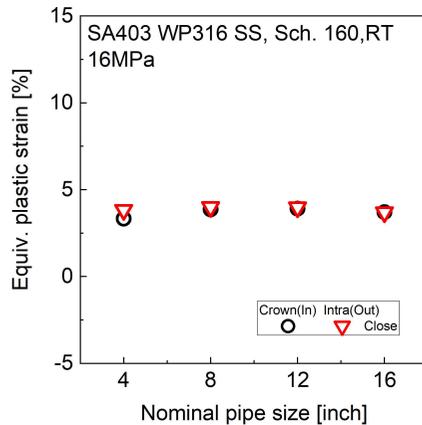
(b) Sch. 80 0 MPa



(c) Sch. 120 0 MPa



(d) Sch. 160 0 MPa

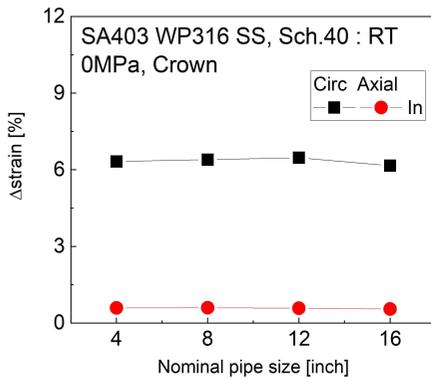


(e) Sch. 160 16 MPa

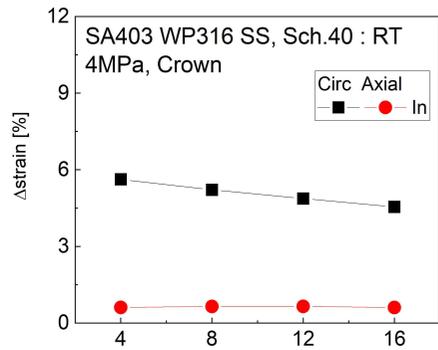
그림 21 Schedule 별 엘보우 공칭직경에 따른 달힘모드 등가소성변형률

2. 손상방향

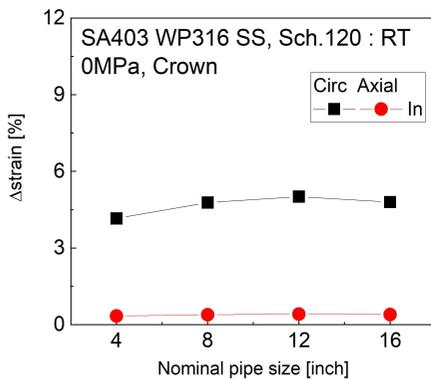
그림 22는 앞의 손상위치가 발생이 예측이 되는 곡관부 측면과 내륜에서 내압유무에 따라서 Sch. 40과 Sch. 120 두께 엘보우 경우의 형상에 따른 측면의 내면 원주 및 축방향 열림모드와 닫힘모드 사이 변형을 범위를 정리한 그래프이다. 균열방향을 파악하기 위해 균열이 발생한 측면 Sch. 40과 Sch. 120 엘보우 그래프를 분석하면, Sch. 40과 Sch. 120 엘보우는 내압유무에 관계없이 모두 내면의 원주방향 변형을 범위 값이 큰 것을 확인하였다. 따라서, Sch. 40, 120 엘보우는 손상위치에서 원주방향의 수직인 축방향 균열생성이 예측된다. 손상모드에서 같은 경향을 보였던 Sch. 80 엘보우는 위의 두 개의 두께 사이 값으로 같은 결과인 것을 확인하였다.



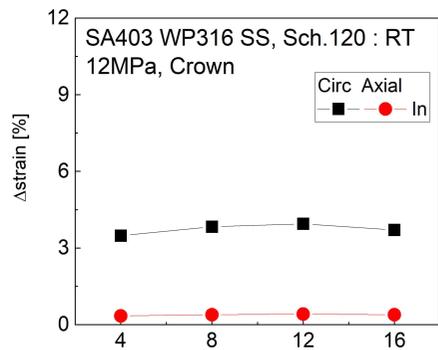
(a) Sch. 40 0 MPa



(b) Sch. 40 4 MPa



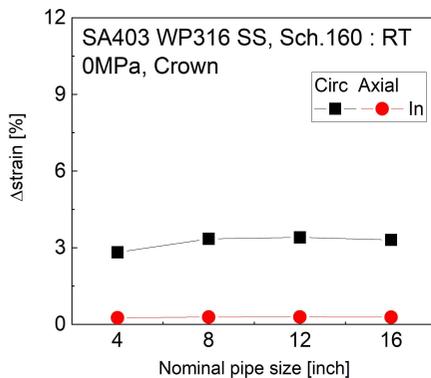
(c) Sch. 120 0 MPa



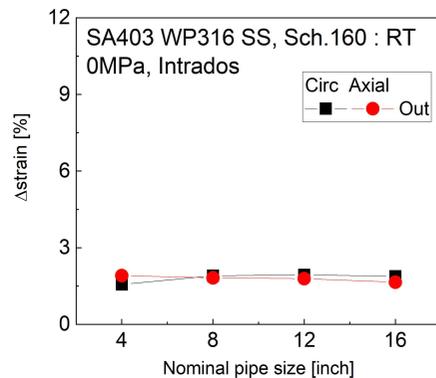
(d) Sch. 120 12 MPa

그림 22 Sch. 40 & 120 엘보우 공칭직경에 따른 측면 내부의 원주 및 축방향 열림모드 닫힘모드 사이 변형을 범위 값

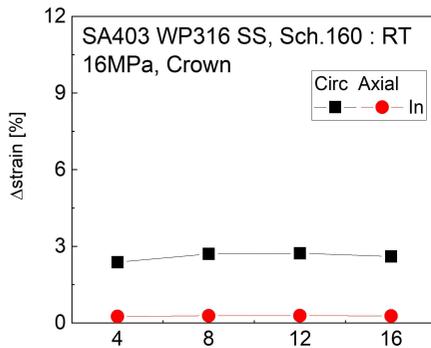
그림 23은 내압유무와 Sch.160 두께인 엘보우 경우의 형상에 따른 열림모드와 달힘모드 사이 변형을 범위 값의 그래프이다. 내압이 없을 때, 그림 22(a)에서 손상위치는 4, 8-inch 엘보우 내륜에서 생성되었지만, 그림 22(b)의 12,16-inch 엘보우 측면에서 생성되었다. 즉, 4, 8-inch 엘보우는 축방향 변형을 범위 값이 큰 것으로 보아 원주방향 균열생성이 예측 가능하며, 12, 16-inch 엘보우에서는 원주방향 변형을 범위 값이 커 축방향 균열생성이 예측된다. 그림 22(c)는 Sch. 160 엘보우 각 외경에 따른 내압이 있을 때의 조건으로 손상방향이 모두 내륜에서 생성되어 원주방향 균열생성이 예측 가능하다.



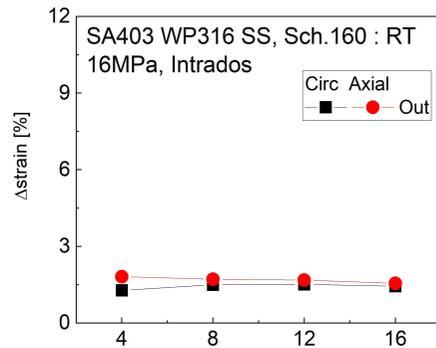
(a) 0MPa Crown strain range



(b) 0MPa Intrados strain range



(c) 16MPa Crown strain range



(d) 16MPa Intrados strain range

그림 23 Sch. 160 엘보우 공칭직경에 따른 측면 내면과 내륜 외면의 원주 및 축방향 열림모드 달힘모드 사이 변형을 범위 값

3. 손상모드 지배 형상인자

앞서 나온 해석 손상모드를 통하여 같은 Sch. 비율에도 불구하고 외경이 커지면 손상모드가 달라지는 점에 대해 알아보기 위하여, 평균반경과 두께 비(R_m/t)에 따른 식을 정리하여 보면 아래 식(3)이 나온다.

$$\frac{R_m}{t} = \frac{D_0 - t}{2t} \quad (3)$$

여기서,

D_0 , t , R_m 은 각각 배관의 외경, 두께, 평균반경이다.

각 공칭의 R_m/t 구하여 아래의 표 8에 나타냈다.

내압이 없는 경우, 내륜에서 측면으로 손상위치가 넘어가게 되는 기준은 Sch. 160 8-inch 엘보우에서 12-inch 엘보우로 넘어가는 사이 기준을 찾을 수 있게 되었다. 즉, 4.26에서 4.36으로 넘어가는 손상위치가 변경되는 기준이 된다. 내압이 가해지면 R_m/t 값이 커진다.

따라서 손상위치와 균열방향은 엘보우의 R_m/t 값에 따라서 결정이 되며, 내압이 없는 경우, R_m/t 가 일정 값 이상이면 Crown 축 방향 균열이 생성되고, 이하면 내륜에서 균열이 생성된다. 하지만 내압이 증가할수록 R_m/t 값이 커진다.

표 6 엘보우 형상에 따른 R_m/t 값

Sch.	4-inch	8-inch	12-inch	16-inch
40	9.025	12.859	15.223	15.5
80	6.145	8.125	8.754	8.995
120	4.649	5.486	5.875	6.076
160	3.733	4.263	4.363	4.517

제 4 장 결론

본 연구는 In-plane 변위제어모드 반복하중 조건에서 두께가 다른 SA403 WP316 엘보우 시편의 손상실험을 수행하였다. 이 결과를 바탕으로 유한요소해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 손상모드를 지배 인자를 파악하여 더 다양한 형상의 배관을 유한요소해석을 수행하여 영향을 파악하였다.

1) SA403 WP316 SS (Sch. 40 & 160) 엘보우 시편에서는 균일한 진폭의 변위가 반복됨에 따라 초기 수 사이클 동안 하중이 증가하나 일정한 값에 수렴한 후 점차 감소하는 특성을 가졌고, Sch. 160 엘보우 시편에 비해 Sch. 40 엘보우 시편에서 하중-변위 이력곡선의 비대칭 현상이 더 뚜렷한 것은 In-plane 굽힘하중 작용시 두께가 두꺼운 Sch. 160 엘보우 시편에 비해 두께가 얇은 Sch. 40 엘보우 시편에서 단면변형이 더 크게 발생하기 때문이다.

2) 내압의 크기와 엘보우 시편의 두께와 관계없이 모든 엘보우 시편에서 관통균열에 의한 누설이 발생하였고, 두께가 얇은 Sch. 40 엘보우 시편에서는 엘보우 측면에서 축 방향 균열이 생성되었으며, 두께가 두꺼운 Sch. 160 엘보우 시편에서는 엘보우 내륜에서 원주방향 균열이 생성된다.

4) SA403 WP316 SS (Sch. 40) 엘보우 시편에서는 내압이 증가함에 따라 손상사이클이 감소하였으나, SA403 WP316 SS (Sch. 160) 엘보우 시편에서는 손상사이클에 미치는 내압의 영향이 미미하다.

5) 실험결과를 바탕으로 Chaboche 이동경화모델을 적용한 유한요소해석을 1cycle 진행하여 엘보우 시편의 손상모드 지배하는 인자를 파악한 결과, 손상위치는 등가소성변형률(Equi-valent plastic strain) 크기에 따라 결정되고, 손상형태는 열림모드와 닫힘모드 사이의 변형률 범위(Opening-Closing Strain range) 값이 큰 축 또는 원주방향의 수직으로 방향이 결정된다.

6) 외경이 작고 두께가 두꺼울수록 엘보우의 손상모드가 내륜 외면의 원주방향으

로 균열이 발생하며, 배관의 Sch. 이나 외경보단 Elbow의 R_m/t 일정한 값의 이상이면 엘보우 측면에서 축방향 균열이 생성되고, 일정한 값의 이하이면, 엘보우 내륜에서 원주방향 균열이 생성된다. 또한 내압이 증가하면, R_m/t 의 일정한 값도 증가한다.

7) 향후계획으로는 앞서한 유한요소해석을 이용하여 더 여러 종류의 엘보우 형상에 따른 손상모드를 파악하고, 외경과 두께를 임의로 고정하여 R_m/t 의 값을 계산하여 손상모드의 기준되는 값을 찾고, 엘보우 손상모드가 다른 재료에 따라서 어떻게 되는지 알아 볼 예정이다.

참고문헌

- [1] Stevenson, J.D., 2014, “Summary of the historical development of seismic design of nuclear power plants in Japan and the U.S.,” *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 269, pp. 160-164.
- [2] JSME, 2014, *Lessons Learned from the Great East Japan Earthquake Disaster*, <http://www.jsme.or.jp/English>
- [3] EPRI, 2013, “Seismic Evaluation Guidance: Augmented Approach for the Resolution of Fukushima Near-term Task Force Recommendation 2.1: Seismic,” Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 3002000704.
- [4] IAEA, 2016, “Consideration of the application of the IAEA safety requirements for the design of nuclear power plants,” IAEA TECDOC-1791.
- [5] Otani, A., Shibutani, T., Morishita, M., Nakamura, I., Watakabe, T. and Shiratori, M., 2017, “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis: Part 2 - A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis,” *Proc. of the ASME PVP2017*, PVP2017-65190.
- [6] USNRC, 2008, “Seismic Analysis of Large-scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program,” *NUREG/CR-6983*.
- [7] Jeon, B. G., Kim, S. W., Choi, H. S., Park, D. U. and Kim, N. S., 2017, “A Failure Estimation Method of Steel Pipe Elbows under In-plane Cyclic Loading,” *Nucl. Eng. Tech.*, Vol. 49, pp. 245~253.
- [8] Nakamura, I. and Kasahara, N., 2017, “Excitation Tests on Elbow Pipe Specimens to Investigate Failure Behavior under Excessive Seismic Loads,” *J. of Press. Ves. Tech.*, Vol. 139, pp. 061802-1~061802-11.
- [9] Martzen, V.C. and Yu, L., 1998, “Elbow stress indices using finite element analysis,” *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 181, pp.257~265.
- [10] ASME, 2010, “Materials,” ASME B&PV Code, Sec.II.
- [11] ABAQUS. version 2018, 2018, User’s manual *inc. and Dassault systems*.
- [12] S.A. Karamanos, E. Giakoumatos, A.M. Gresnigt, 2003, “Nonlinear response and failure of steel elbows under in-plane bending and pressure.,” *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 125(4), pp. 393-402.
- [13] S.A. Karamanos, D. Tsouvalas, A.M. Gresnigt, 2006, “Ultimate bending capacity and buckling of pressurized 90 deg steel elbows”, *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 128(3), pp. 348-356.
- [14] H. Mourad, M.Y.A. Younan, 2001, “Nonlinear analysis of pipe bends subjected to

- out of- plane moment loading and internal”, ASME J. Pressure Vessel Technol., 123(2), pp. 253-258.
- [15] J. Chattopadhyay, D.K. Nathani, B.K. Dutta, H.S. Kushwaha, 2000, “Closed-form collapse moment equations of elbows under combined internal pressure and in-plane bending moment.”, ASME J. Pressure Vessel Technol. 122, pp. 431-436.
- [16] S.K. Gupta, S. Goyal, V. Bhasin, K.K. Vaze, A.K. Ghosh, H.S. Kushwaha, 2009, “Ratcheting- fatigue failure of pressurized elbows made of carbon steel.” Proc. Of SMiRT 20, Finland 2009; 110-2.