

<연구논문>

반복하중 하의 엘보우 변형 및 손상 특성 평가를 위한 모사시험 방법 제안

김진원^{†*}·이대영^{**}·박흥배^{**}

Proposal of a Simulated Test Method for the Evaluation of Deformation and Failure Characteristics of Pipe Elbows under Cyclic Loads

Jin Weon Kim^{†*}, Dae Young Lee^{**} and Heung Bae Park^{**}

(Received 6 January 2020, Revised 19 February 2020, Accepted 26 February 2020)

ABSTRACT

This study proposed a simulated test method using ring specimen to evaluate the deformation and failure characteristics of pipe elbows under a large amplitude cyclic load. The validity of the test method was demonstrated by finite element (FE) analysis of pipe elbow and ring specimen under cyclic loads. The results showed that the proposed test method adequately simulates the distribution of circumferential strain at crown of pipe elbows where cracks occur under cyclic loads and presents the cyclic hardening behavior of pipe elbows. The parametric FE analysis showed that consistent simulated test results could be obtained when the test section of the ring specimen is longer than 1/2 of the inner diameter of the ring specimen and the radius of the inner loading jig is less than 1/4 of the inner diameter of the specimen.

Key Words : Pipe Elbow (배관 엘보우), Cyclic Loads (반복하중), Simulated Test (모사시험), Deformation Characteristics (변형특성), Failure Characteristics (손상특성)

1. 서 론

미국과 일본 등에서 원자력발전소 (이하 원전)의 설계기준을 초과하는 대형 지진을 경험한 이후, 원전의 지진 안전성에 대한 관심이 크게 증가되었다.⁽¹⁻³⁾ 따라서, 신규 설계 원전뿐 아니라 기존 원전의 기기와 설비에 대해서도 지진에 대한 안전여유도 재평가를 요구하고 있다. 특히 안전 관련 주요 기기와 설비에 대해서는 설계기준지진 뿐 아니라 설계초과지진 조건에서 구조건전성 확보와 이를 입증하기 위한 평가를 요구하고 있다.⁽⁴⁾ 설계기준지진과 달리 설계초

과지진 조건에서는 기기와 설비들이 큰 진폭의 반복하중에 의해 비선형 변형과 그에 다른 손상이 발생할 수 있다. 따라서, 원전 주요 기기와 설비에 대한 비선형 변형과 손상거동을 파악하고 구조건전성 평가에 이를 적절히 반영하는 것은 매우 중요하다.

이와 관련하여 많은 연구가 국내·외적으로 진행되고 있으며,⁽⁵⁻⁷⁾ 특히 원전 배관계통에 대해서 다양한 실험적·해석적 연구들이 진행되었다.⁽⁸⁻¹³⁾ 이들 연구 결과에 의하면 기존의 원전 배관계통은 설계기준지진보다 10 배 정도 큰 지진하중 조건에서도 건전성을 유지하는 것으로 확인되었다. 또한, 큰 지진하중 조건에서 배관계통의 손상은 대부분 엘보우 곡관부 측면 (Crown)에서 발생하는 것으로 파악되었다.^(8,12,13) 따라서, 최근에는 설계초과지진 조건에서 배관계통의 구조건전성 평가 절차와 허용기준 개발을 위해, 지진하중을 모사한 반복하중 조건에서 배관 엘보우

† 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail: jwkim@chosun.ac.kr

TEL: (062)230-7109 FAX: (062)232-9218

* 조선대학교 원자력공학과

** 한국전력기술(주) 미래전력기술연구소

를 대상으로 다양한 손상시험을 수행하고 있다.^(8,14-17) 실패관 시험은 실제 배관 엘보우의 변형거동과 손상거동을 정확히 평가할 수 있지만, 시편 제작과 시험시설 사용에 고비용이 소요되므로 확보할 수 있는 데이터의 수가 제한적이다. 특히 고온에서는 대형 실패관 시편을 이용한 실험이 어렵기 때문에 배관계통의 운전온도 조건에서 엘보우의 반복 변형거동과 손상거동을 파악하는데 한계가 있다.

따라서, 본 논문에서는 실패관 시편 대신 엘보우에서 채취가 가능한 형상의 시편을 이용하여, 반복하중 조건에서 배관 엘보우 곡관부의 변형거동과 손상거동을 평가할 수 있는 모사시험 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해서 배관 엘보우와 모사시험용 시편에 대한 유한요소해석을 수행하여, 두 시편의 취약부에서 변형을 분포의 유사성을 확인하였다. 또한, 모사시험이 엘보우 시편의 하중-변위에서 나타나는 반복경화 현상을 평가할 수 있는지 검토하였다. 마지막으로 변수해석을 통해 일관된 모사시험 결과를 얻기 위한 최적의 시편 및 지그 형상을 살펴보았다.

2. 모사시험 방법 제안

2.1 반복하중 하의 배관 엘보우 변형/손상 특성

반복하중 조건에서 배관 엘보우의 변형과 손상거동은 대부분 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 변위제어 모드 또는 하중제어모드의 반복 굽힘시험을 통해 파악한다. 이들 시험에 의하면, 반복 굽힘하중 조건에서 배관 엘보우는 대부분 곡관부 측면에서 축방향 균열 생성에 의해 손상되며, 곡관부 측면에서 라체팅-피로 누적이 균열 생성의 원인인 것으로 확인되었다.^(8,13-17) 즉, 배관 엘보우에 반복 굽힘하중이 작용됨에 따라 곡관부 단면이 주기적으로 변형되고, 단면 변형시 곡관부 측면에서 원주방향 변형률이

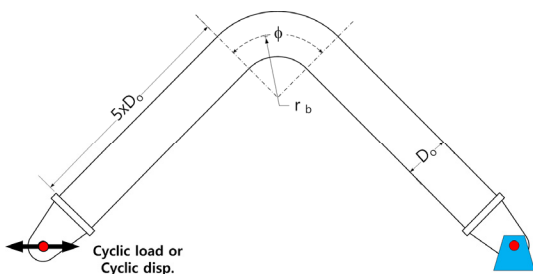


Fig. 1 Schematic diagram of pipe elbow test under cyclic bending loads

인장방향과 압축방향으로 교번하기 때문에 균열이 생성되는 것이다.

2.2 모사시험 방법 및 시편

앞서 언급한 바와 같이 곡관부 측면의 원주방향 변형률이 반복하중 조건에서 배관 엘보우의 변형과 손상거동을 지배한다. 따라서, 반복하중 조건에서 배관 엘보우의 변형거동과 손상거동을 파악하기 위한 모사시험과 시편은 반복하중 조건에서 곡관부의 단면 변형과 측면에서 원주방향 변형률을 적절히 모사할 수 있어야 한다. 이를 고려하여 본 논문에서는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 배관 엘보우 중심에서 링 형태로 시편을 채취하여 변위제어 또는 하중제어 모드의 반복하중을 가함으로써, 반복하중 조건에서 곡관부 단면의 변형과 곡관부 측면의 원주방향 변형률을 모사할 수 있는 시험 방법을 제시하였다. Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 반복하중 작용시 링 시편의 측면에서 변형과 손상을 유도하기 위해서, 시편 측면의 일부를 시편 폭에 비해 작게 설계하였다.

Fig. 2의 실험에서 링 시편에 작용되는 하중은 시험기의 로드 셀에서 측정하고, 시편의 변형은 시편에 거치된 선형변위센서(LVDT)를 통해 측정한다. 측정된 하중과 변위 데이터로부터 시편의 반복 변형거동을 파악할 수 있다. 또한, 시편이 손상될 때까지 작용된 반복하중 (또는 반복변위)의 사이클 수와 진폭,

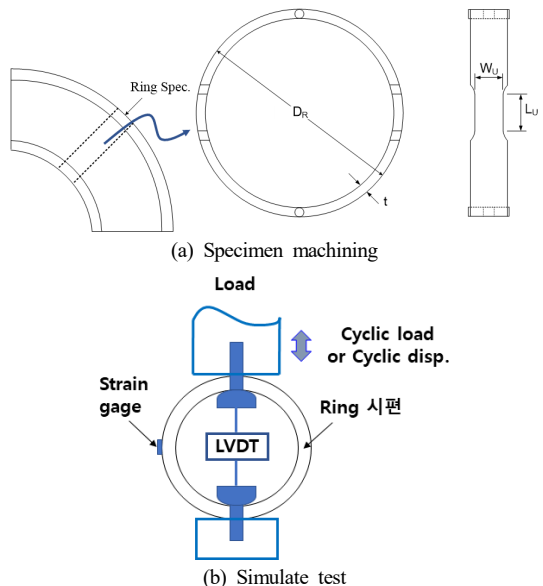


Fig. 2 Conceptual design of simulated test

그리고 시편 측면에서 측정된 원주방향 변형률로부터 시편의 손상거동을 파악할 수 있다. 이와 같은 모사 시험 방법은 시편에 가해지는 하중 또는 변위의 진폭을 조절하여 시편 측면의 원주방향 변형률 크기를 제어할 수 있으며, 인장과 압축 하중의 비 (또는 인장과 압축 변위의 비)를 조절하여 원주방향 변형률의 분포를 변경할 수도 있다. 따라서, 모사시험을 통해 반복하중 조건에서 엘보우의 거시적인 하중-변위 거동은 파악할 수 없지만, 엘보우 곡관부의 반복 변형거동과 측면에서 변형률 크기에 따른 손상 사이클은 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 제안된 시험 방법 타당성 검증

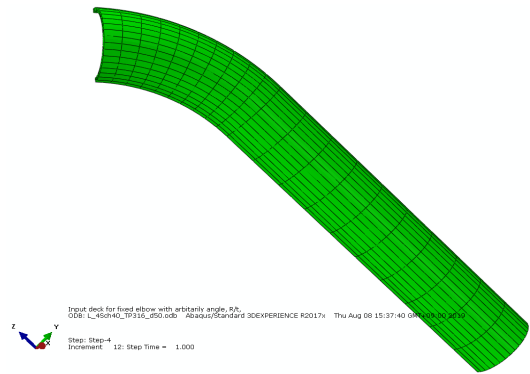
3.1 원주방향 변형률 분포

앞서 제안한 모사시험 방법과 시편의 타당성을 확인하기 위해서, 열림모드와 닫힘모드의 단순하중 조건에서 배관 엘보우 시편과 링 시편에 대한 유한요소해석을 수행하여 두 시편의 측면에서 원주방향 변형률 분포를 비교하였다.

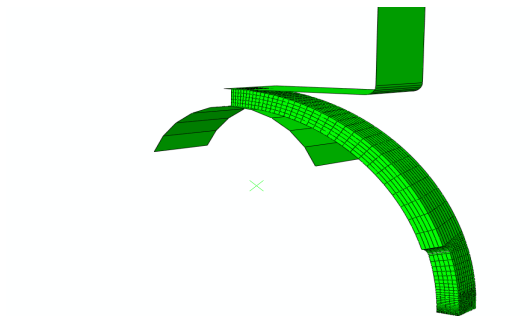
3.1.1 유한요소모델

배관 엘보우 시편에 대한 유한요소해석에는 Fig. 1과 같은 공칭외경 (D_o)과 공칭두께 (t_n)가 각각 114.3 mm와 6.0 mm이고 곡률반경 (r_b)과 굽힘각 (ϕ)이 $1.5D_o$ 와 90° 인 4-inch, Sch.40 엘보우에 길이가 570 mm인 직관이 연결된 시편이 고려되었다. 해석시 시편의 끝단에 100 mm의 변위를 닫힘모드 (closing mode)와 열림모드 (opening mode)로 1 회씩 작용시켰으며, 해석에 적용된 변위의 크기는 엘보우 곡관부에서 충분한 크기의 소성변형이 발생될 수 있는 조건으로부터 결정되었다. Fig. 3(a)는 해석에 적용된 유한요소모델을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 시편의 1/4만을 모델링하였다. 두께방향으로 5개, 원주방향으로 18개, 곡관부에는 10개의 요소가 배열되었으며, 절감적분을 고려한 육면체요소 (C3D20R in ABAQUS)가 적용되었다. 해석에는 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS가 사용되었으며, 대변형 옵션 (NLGEOM in ABAQUS)을 적용한 탄소성해석이 수행되었다.⁽¹⁸⁾

링 시편에 대한 유한요소해석에는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 외경 (D_o)과 두께 (t)가 각각 114.0 mm와 5.0 mm이고, 시험부 (test section)의 폭 (W_t)과 길이 (L_t)가



(a) Pipe elbow specimen



(b) Ring specimen

Fig. 3 Finite element models for pipe elbow specimen and ring specimen

각각 16.0 mm와 20.0 mm인 링 시편이 적용되었으며, 앞서 고려된 배관 엘보우 시편의 곡관부에서 채취할 수 있는 최대 크기의 시편 형상을 고려하였다. 링 시편에는 외부와 내부 지그 (jig)를 통해 압축과 인장 방향으로 20 mm의 변위가 1 회씩 작용되었다. 링 시편의 경우에도 해석에 적용된 변위는 시편 측면에서 충분한 크기의 소성변형이 발생될 수 있는 조건으로부터 결정되었다. Fig. 3(b)는 링 시편에 대한 유한요소모델을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 시편의 1/8만 모델링하였다. 두께방향으로 5개, 폭방향으로는 위치에 따라 9~18개의 요소가 배열되었으며, C3D20R 요소가 적용되었다. 링 시편에 닫힘모드와 열림모드의 변위를 가하는 내부와 외부 지그는 강체로 가정하였으며, 지그와 시편 사이의 마찰계수 (μ)는 0.15를 적용하였다. 해석에는 ABAQUS 프로그램이 사용되었으며, 대변형 옵션을 적용한 탄소성해석이 수행되었다.

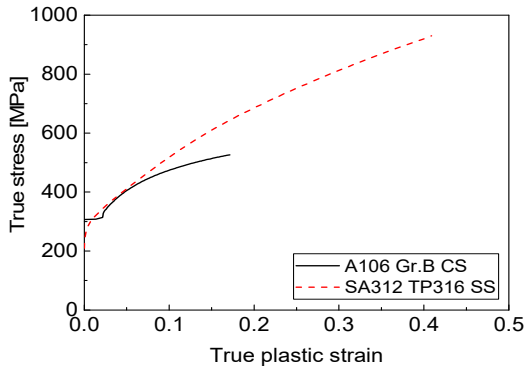
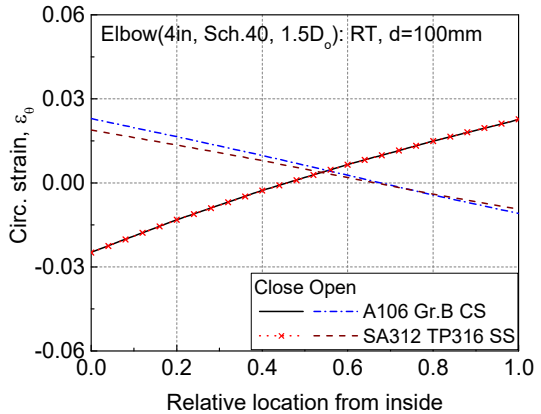
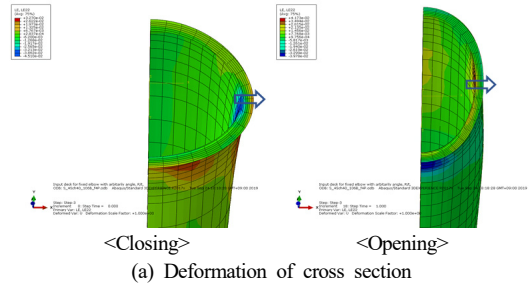


Fig. 4 True stress vs. true plastic strain curves used for finite element analysis

배관 엘보우 시편과 링 시편의 재료로 2가지 배관재 (SA312 TP316 스테인리스강 (stainless steel, SS), A106 Gr.B 탄소강 (carbon steel, CS))가 고려되었다. Isotropic 재료 경화 모델이 고려되었으며, Fig. 4의 진응력-진변형률 곡선이 입력으로 적용되었다. 해석에 적용된 SA312 TP316 SS와 SA106 Gr.B CS의 영률은 각각 195.1 GPa과 202.0 GPa이며, 두 재료의 포아송 비는 0.3이다.

3.1.2 원주방향 변형률 분포 비교

Fig. 5는 배관 엘보우 시편에 닫힘모드와 열림모드 방향으로 각각 100 mm의 변위가 작용되었을 때, 곡관부 단면의 변형과 변형률 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 닫힘모드 변위가 작용될 때 곡관부 단면은 좌우로 팽창되었으며, 측면의 외면에는 인장방향, 내면에는 압축방향의 원주방향 변형률이 형성되었다. 반면, 열림모드 변위가 작용될 때는 곡관부 단면이 좌우로 수축되며, 내면에는 인장방향, 외면에는 압축방향의 원주방향 변형률이 형성된다. Fig. 5(b)는 곡관부 측면에서 원주방향 변형률을 두께방향 위치(Fig. 5(a)의 화살표 위치와 방향)에 따라 나타낸 것이다. 열림모드 조건에서 약간 차이를 보이지만, 전체적으로 재료에 따른 원주방향 변형률 분포의 차이는 크지 않았다. 배관 엘보우 시편의 굽힘 모드에 관계없이 두께 방향으로 원주방향 변형률은 거의 선형적으로 변화되었으며, 굽힘 모드가 변화됨에 따라 변형률 분포가 역전되었다. 따라서, 닫힘모드와 열림모드 변위가 연속적으로 작용되면, 곡관부 측면의 내면과 외면에서 원주방향 변형률이 서로 교번하며 내면에서 원주방향 변형률의 진폭이 가장 큰 것을 알 수 있다.



(b) Circumferential strains along thickness at crown
Fig. 5 Results of finite element analysis for the pipe elbow specimen

Fig. 6은 링 시편에 20 mm의 변위가 닫힘모드 (압축 방향)와 열림모드 (인장 방향)로 작용될 때, 시편의 변형과 변형률 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 시편에 닫힘모드 변위가 작용될 때, 시편 단면이 좌우로 팽창되며, 측면의 외면에 인장방향, 내면에 압축방향의 원주방향 변형률이 형성되었다. 열림모드 변위가 작용될 때는 시편이 좌우로 수축되며, 내면에 인장방향, 외면에 압축방향의 원주방향 변형률이 형성되었다. 이러한 단면 변형과 원주방향 변형률 분포는 앞서 배관 엘보우 시편의 곡관부에서 관찰된 것과 거의 일치한다 (Fig. 5(a)). Fig. 6(b)는 닫힘모드와 열림모드 변위가 작용될 때, 링 시편 측면의 중심부에서 원주방향 변형률의 두께방향(Fig. 6(a)의 화살표 위치와 방향) 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5(b)와 비교하면 링 시편 측면에서 원주방향 변형률 분포 (Fig. 6(b))는 엘보우 시편의 곡관부 측면에서 원주방향 변형률 분포와 거의 일치하였다. 즉, 원주방향 변형률이 두께 방향 위치에 따라 거의 선형적으로 변화되었으며, 시편에 작용되는 변위의 방향에 따라 변형률 분포가

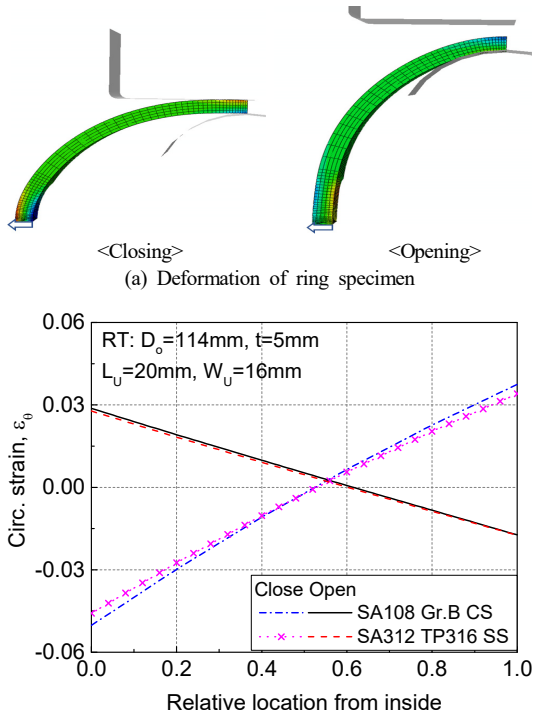


Fig. 6 Results of finite element analysis for the ring specimen

역전되었다. 따라서, 열림모드와 닫힘모드 변위가 연속적으로 작용할 때 시편 측면의 내면과 외면에서 원주방향 변형률이 교번하며, 내면에서 원주방향 변형률의 최대 진폭이 나타났다.

결론적으로 링 시편을 이용한 모사시험이 반복 굽힘하중 조건에서 배관 엘보우의 곡관부 측면에서 원주방향 변형률 분포를 적절히 모사하는 것을 확인하였다.

3.2 반복 변형거동

모사시험을 통해 반복하중 조건에서 배관 엘보우의 변형거동과 손상거동을 파악하기 위해서는 곡관부 측면의 변형률 분포뿐 아니라 반복하중에 따른 경화 거동을 적절히 모사할 수 있어야 한다. 이를 확인하기 위해서 유한요소해석을 통해 배관 엘보우 시편과 링 시편의 반복 변형거동을 살펴보았다.

3.2.1 유한요소모델

각 시편에 대한 유한요소해석에는 Fig. 3의 모델이

적용되었다. 다만, 앞서 해석과 달리 배관 엘보우 시편에 닫힘모드와 열림모드 변위 (± 100 mm)가 12회 반복적으로 작용되었으며, 링 시편에 대해서는 닫힘모드와 열림모드 변위 (± 20 mm)가 11회 반복적으로 작용되었다. 시편 재료로는 반복경화 현상이 뚜렷한 것으로 알려진 SA312 TP316 SS를 고려하였으며, 재료의 반복경화 현상을 모사하기 위해서 Chaboche 이동경화 모델 기반⁽¹⁹⁾의 복합경화 모델이 적용되었다. Table 1은 해석에 적용된 SA312 TP316 SS의 복합경화 변수들을 정리한 것이다. Table 1의 변수는 SA312 TP316 SS에 대한 반복 응력-변형률 시험 데이터로부터 구한 것이다.⁽²⁰⁾

Table 1 Parameters for combined hardening model of SA312 TP316 stainless steel⁽²⁰⁾

σ_0 [MPa]		Q		b	
108.9		113.8		6.214	
C_1	C_2	C_3	γ_1	γ_2	γ_3
112305	30670	1103.0	2000	266.7	0

3.2.2 반복 경화거동 비교

Fig. 7은 일정한 크기의 변위가 시편에 반복적으로 작용될 때, 배관 엘보우 시편과 링 시편의 하중-변위 이력 곡선을 나타낸 것이다. 두 시편의 형상과 크기 차이로 인해 하중-변위 이력 곡선의 형태와 크기는 일치하지 않지만, 반복하중에 따른 하중-변위 이력 곡선의 변화 경향은 유사한 것을 알 수 있다. 즉, 두 시편에 일정한 크기의 변위가 반복적으로 작용됨에 따라 인장과 압축 방향으로 하중이 증가하다 일정 사이클 이상에서 수렴하는 경향을 보였다. 즉, 두 시편에서 모두 반복경화에 의한 응답하중의 증가 현상이 확인되었다.

Fig. 8은 두 시편에서 반복하중에 따른 하중의 변화를 자세히 살펴보기 위해서, Fig. 7에서 각 사이클 별로 최대하중 (인장하중)과 최소하중 (압축하중)을 추출하여 사이클 수에 따라 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 두 시편에서 동일하게 인장하중은 6번째 사이클까지 빠르게 증가하다 수렴하였다. 압축하중도 6번째 사이클까지 빠르게 증가하다 이후에는 증가 경향이 둔화되었다. 즉, 두 시편에서 공통적으로 반복경화에 의한 강도 증가가 나타났다고, 반복경화 현상이 안정화되는 사이클 수가 일치하였다. 따라서, 링 시편을 이용한 모사시험은

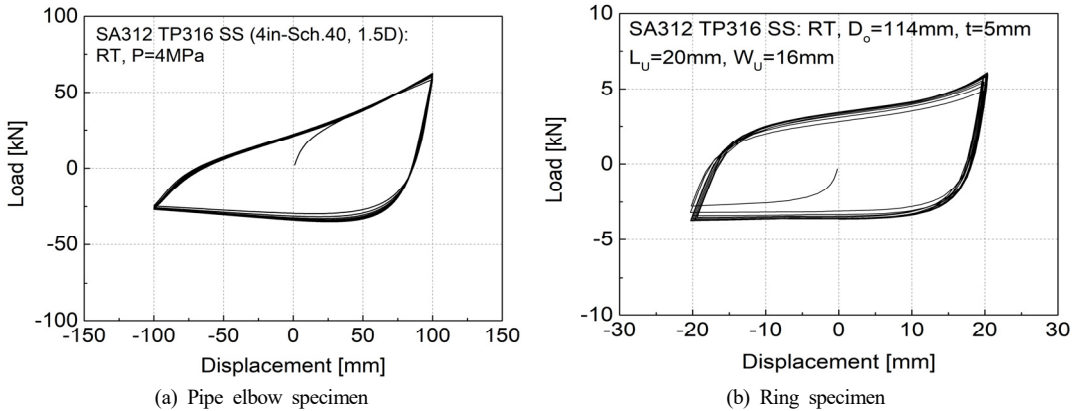


Fig. 7 Load-displacement hysteresis loop of pipe elbow and ring specimens obtained from finite element analysis

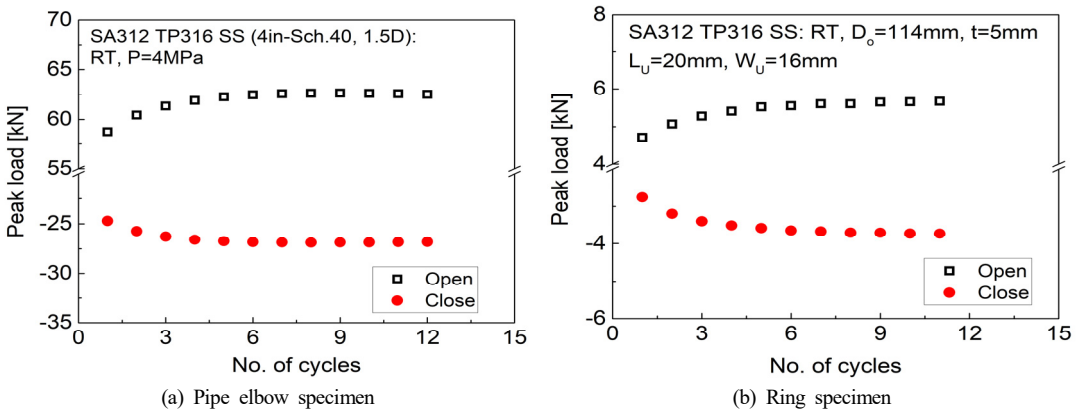


Fig. 8 Variation in the peak load with increase in the number of cyclic load

엘로우 곡관부 측면의 원주방향 변형률뿐 아니라 반복경화에 의한 배관 엘로우 시편의 하중지지능력 변화도 적절히 모사하는 것을 확인할 수 있다.

4. 변수해석을 통한 최적 시편 형상 제안

4.1 변수해석 방법 및 조건

Fig. 9는 모사시험을 위한 링 시편과 시편에 하중(또는 변위)을 가하기 위한 지그의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 반복하중 작용시 시편 측면에서 손상을 유도하기 위해 시편의 양쪽 측면은 일정 길이 (L_U)의 폭 (W_U)을 시편 폭 (W_t)에 비해 좁게 설계되었다. 하중 작용시 시편의 단면 변형에 따른 지그와 시편 사이의 마찰을 최소화하기 위해서, 단립모드 하중(또는 변위)을 가하는 외부 지그는 평면으로 설계하였으며, 열립모드 하중

(또는 변위)을 가하는 내부 지그는 일정한 반경 (R_b)을 갖는 곡면으로 설계되었다.

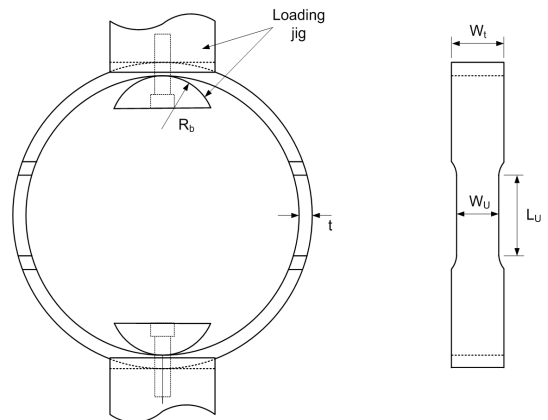


Fig. 9 Design of ring specimen and loading jig for simulated test

Table 2 Variables for parametric finite element analysis

W_i [mm]	W_U [mm]	L_U [mm]	R_b [mm]
20	16	20	20, 25, 30, 35
20	16	10, 20, 30, 50, 80	25
20	12, 14, 16	20	25
20, 25, 30	16	20	25

여기서는 유한요소해석을 통해 시편 형상과 내부 지그의 곡률에 따른 시편 측면의 원주방향 변형률 분포와 하중-변위 거동을 분석함으로써, 일관된 모사시험 결과를 얻기 위한 최적의 시편 및 지그 형상을 파악하고자 한다. 변수해석에 고려된 형상 변수들은 Table 2와 같으며, 링 시편의 외경과 두께는 각각 114.0 mm와 5.0 mm로 일정하게 고려하였다. 해석에는 Fig. 3(b)의 유한요소모델이 적용되었으며, 닫힘모드와 열림모드 방향으로 20 mm의 변위를 작

용시켰다. 앞서 Fig. 5에서 재료에 따른 원주방향 변형률 분포의 차이가 크지 않은 것으로 확인됨에 따라, 변수 해석에는 SA106 Gr.B CS만을 고려하였다.

4.2 최적 시편 및 지그 형상

Fig. 10은 변수해석에서 주어진 시편 형상과 지그의 곡률반경에 따른 시편 측면에서 두께방향 (Fig. 6(a)의 화살표 위치와 방향)의 원주방향 변형률 분포를 나타낸 것이다. 동일한 폭의 시편 ($W_i = 20\text{mm}$, $W_U = 16\text{mm}$)에서 시험부 길이 (L_U)가 증가함에 따라 내면과 외면에서 원주방향 변형률은 감소하다, 닫힘모드에서는 $L_U \geq 30\text{mm}$, 열림모드에서는 $L_U \geq 50\text{mm}$ 에서 변형률의 변화가 사라졌다 (Fig. 10(a)). Figs. 10(b)와 10(c)에서 알 수 있는 바와 같이 시험부 폭 (W_U)과 시편 폭 (W_i)의 비가 감소할수록 시편 측면의 내면과 외면에서 원주방향 변형률이 약간씩 증가하였다. 그러나, W_i 와 W_U 변화에 따른 변형률의 차이는 크지 않았다. 한편,

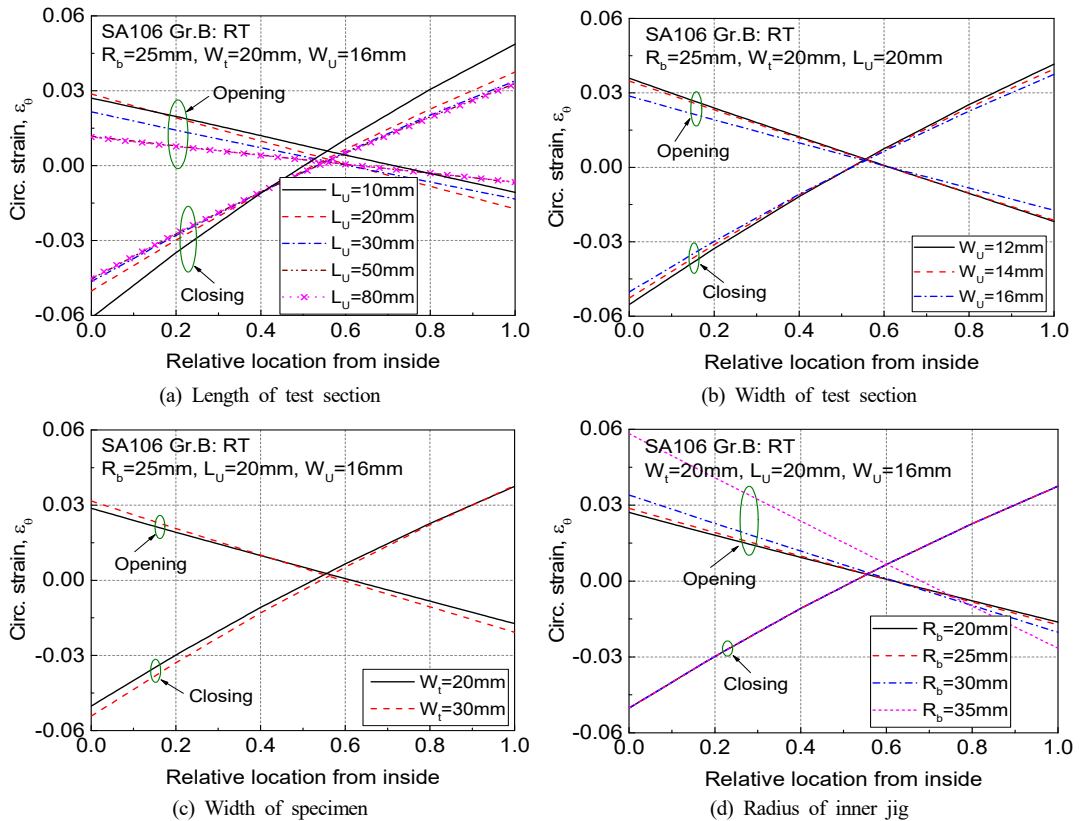


Fig. 10 Effect of specimen dimension and jig radius on the distribution of circumferential strain along thickness at center of specimen

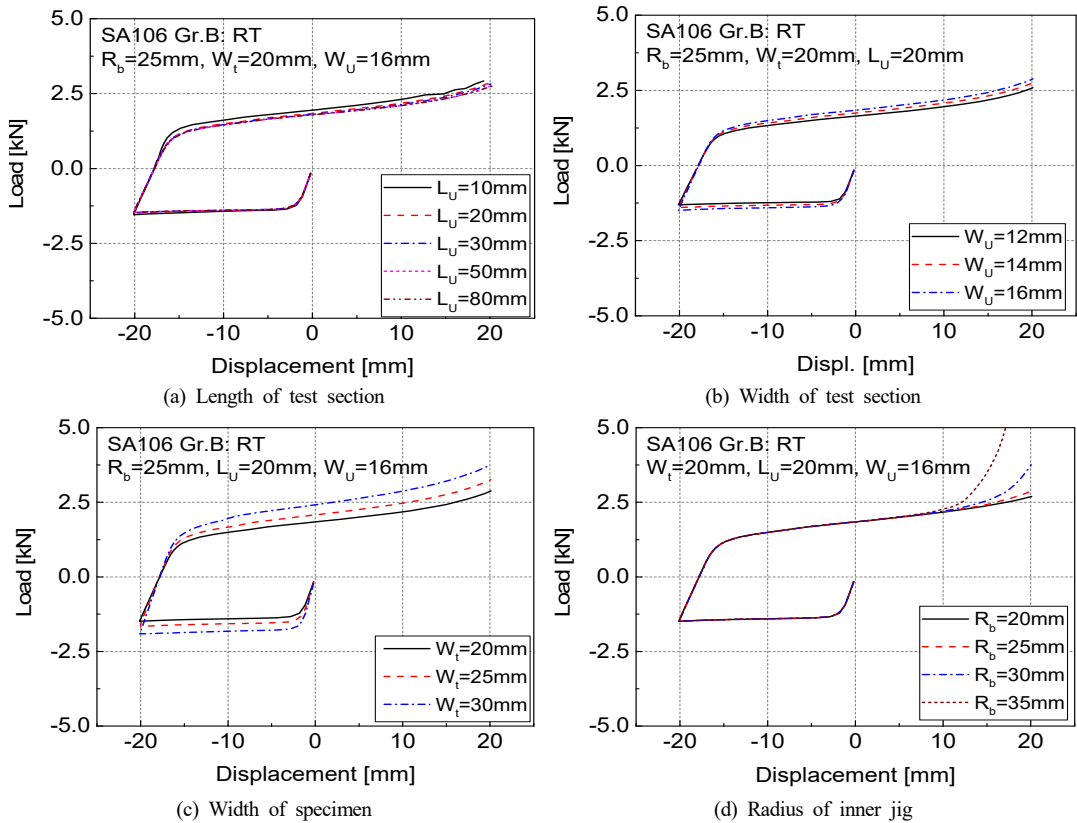


Fig. 11 Effect of specimen dimension and jig radius on the response load vs. displacement behavior

Fig. 10(d)에 나타난 바와 같이 내부 지그의 곡률반경이 $R_b = 25mm$ 이하에서는 원주방향 변형률이 큰 차이를 보이지 않았지만, $R_b \geq 30mm$ 에서는 곡률반경에 따라 원주방향 변형률이 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다.

따라서, 시편 측면에서 원주방향 변형률 분포는 L_U 와 R_b 에 민감하며, 시험부 길이와 지그의 곡률반경이 각각 $L_U \geq 50mm$ 와 $R_b \leq 25mm$ 일 때 원주방향 변형률 분포가 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

한편, 시편 형상과 지그의 곡률반경에 따른 링 시편의 하중-변위를 살펴보면, $L_U = 10mm$ 를 제외하면 시험부 길이에 따른 하중-변위 곡선의 변화는 미미하였다 (Fig. 11(a)). Figs. 11(b)와 11(c)에서 시편의 폭에 따른 영향을 살펴보면, 일정한 W_t 에서 W_U 이 증가함에 따라 하중-변위 곡선에서 하중이 약간씩 증가하는 경향을 보였으나, 변화 정도는 크지 않았다. 동일한 W_U 조건에서 W_t 이 증가하는 경우에는 하중-변위 곡선에서 하중이 뚜렷이 증가하는 경향

을 보였으나, 하중-변위 곡선의 전체적인 경향은 변하지 않았다. 따라서, W_t 증가에 따른 하중의 증가는 시편의 단면 증가에 따른 영향으로 판단된다. 한편, Fig. 11(d)에서 내부 지그의 곡률반경에 따른 영향을 살펴보면, 시편에 작용된 변위가 10 mm 이하에서는 지그 반경에 따른 하중-변위 곡선의 차이가 거의 없었다. 그러나, 시편에 작용된 변위가 10 mm를 초과하는 경우에는 곡률반경에 따른 하중-변위 곡선의 뚜렷한 차이를 보였다. 특히 지그의 곡률반경이 $R_b = 25mm$ 를 초과하는 경우에는 곡률반경에 따라 하중-변위 곡선이 비정상적으로 증가하는 경향을 보였다. 이것은 시편의 단면 변형에 따른 시편과 내부 지그의 접촉면 증가 때문이며, 지그의 최적 곡률반경은 링 시편의 내경에 의존할 것으로 판단된다.

따라서, 시편의 형상 변수에 따른 원주방향 변형률과 하중-변위 곡선의 차이로부터 종합적으로 판단할 때, 링 시편의 폭에 비해 시험부 길이와 내부

지그의 반경이 시험 결과에 상대적으로 크게 영향을 미쳤다. 또한, 시험부 길이가 시편 내경의 1/2 이상 ($R_b \geq D_i/2$)이고, 내부 지그의 곡률반경이 시편 내경의 1/4 이하 ($R_b \leq D_i/4$)일 때, 링 시편을 이용한 모사시험에서 일관된 원주방향 변형률 분포와 하중-변위 곡선을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 큰 진폭의 반복하중 조건에서 실패관 엘보우의 변형거동과 손상거동을 모사할 수 있는 시편과 시험 방법을 제시하고, 유한요소해석을 통해 제안된 시험 방법의 적절성을 분석하였다. 분석 결과, 제안된 모사시험은 단립모드와 열립모드의 반복하중 조건에서 배관 엘보우 시편의 곡률부 측면의 원주방향 변형률 분포를 적절히 모사하였다. 또한, 제안된 모사시험이 반복하중 조건에서 반복경화 현상에 의한 배관 엘보우의 하중지지능력 변화를 평가할 수 있는 것으로 확인되었다. 변수해석 결과, 링 시편의 시험부 길이와 내부 지그의 곡률반경이 모사시험 결과에 크게 영향을 미쳤으며, 시험부 길이가 시편 내경의 1/2이상이고 내부 지그의 곡률반경이 시편 내경의 1/4 이하일 때 일관된 시험 결과를 줄 수 있는 것으로 분석되었다.

후 기

본 논문은 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(20193110100020)의 결과입니다.

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. <http://doi.org/10.1066/j.nuclengdes.2013.08.023>
- (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, 30020 00704.
- (4) IAEA, 2016, "Consideration of the application of the IAEA safety requirements for the design of nuclear power plants," IAEA TECDOC-1791.
- (5) Donavin, P.R., Gilada, R., Gustin, H.G., Vo., T., and Pace, R., 2016, "Technical Basis for Proposed ASME section XI Code Case on Beyond Design Bases Earthquake," *Proc. of ASME 2016 PVP Conference*, Vancouver, British Columbia, Canada, July 17-21, PVP2016-63827.
- (6) JSME, 2019, "Code for Nuclear Power Generation Facilities: Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plants," JSME S NC1, NC-CC-008 (in Japanese)
- (7) Berkovsky, A., 2018, "The OECD-NEA Programme MECOS Towards New Criteria," *Proc. of ASME 2018 PVP Conference*, Prague, Czech Republic, July 15-20, PVP2018-84684.
- (8) Kim, S.W., Jeon, B.G., Hahm, D.G., and Kim, M.K., 2019, "Seismic fragility evaluation of the base-isolated nuclear power plant piping system using the failure criterion based on stress-strain," *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 51, pp. 561-572. <http://doi.org/10.1016/j.net.2018.10.006>
- (9) BNL, 2005, "Seismic Analysis of Simplified Piping System for the NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC., *NUREG/CR-6889*
- (10) USNRC, 2008, "Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC., *NUREG/CR-6983*
- (11) Slagies, G.C., 1997, "Evaluation of Seismic Response Data for Piping," *WRC Bulletin 423. ISSN 0043-2326*
- (12) Ravikiran, A., Dubey, P.N., Agrawal, M.K., Reddy, G.R., Singh, R.K., and Vaze, K. K., 2015, "Experimental and Numerical Studies of Ratcheting in a Pressurized Piping System under Seismic Load," *J. Press. Vess.-T ASME*, Vol. 137, No. 3, 031011. <http://doi.org/10.1115/1.402819>
- (13) Kim, J.W., Kim, J.S., Kim, Y.J., and Kweon, H.D., 2017, "State-of-the-Art on the Experiment Studies for Evaluating Piping Integrity under Seismic Loading Conditions," *Trans. of the KPVP*, Vol.13, No.1, pp. 16-39. <http://dx.doi.org/10.20466/KPVP2017.13.1.016>
- (14) Nakamura, I., Otani, A., and Shiratori, M., 2013, "Damage Process Compared to the Design

- Standard of the Elbow Subjected to In-Plane Cyclic Bending Load," *Proc. of ASME 2013 PVP Conference*, Paris, France, July 14-18, PVP2013-97834.
- (15) Gupta, S.K., Goyal, S., Bhasin, V., Vaze, K.K., Ghosh, A.K., and Kushwaha, H.S., 2009, "Ratcheting-Fatigue Failure of Pressurized Elbows made of Carbon Steel," *Proc. of SMiRT-20 Conference*, Espoo, Finland, Aug. 9-14, Paper 1861.
- (16) Varelis, G.E., Karamanos, S.A., and Gresnigt, A.M., 2013, "Pipe Elbows Under Strong Cyclic Loading," *J. Press. Vess.-T ASME*, Vol. 135, No. 2, 011207. <http://doi.org/10.1115/1.4007293>
- (17) Warakabe, T., Tsukimori, K., Kitamura, S., and Morishita, M., 2016, "Ultimate Strength of a Thin Wall Elbow for Sodium Cooled Fast Reactors under Seismic Loads," *J. Press. Vess.-T ASME*, Vol. 138, No. 3, 021801. <http://doi.org/10.1115/1.4031721>
- (18) ABAQUS. version 2018, 2018, *User's manual*, Inc. and Dassault systems.
- (19) Chaboche, J. L., 1991, "On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects," *Int. J. Plasticity*, Vol. 7, pp. 661-667. [http://doi.org/10.1016/0749-6419\(91\)90050-9](http://doi.org/10.1016/0749-6419(91)90050-9)
- (20) Ryu, H.W., 2019, *Determination of Simplified Hardening Parameters to Simulate Deformation Behavior of Cracked Components under Cyclic Loading Condition*, Korea University, Ph.D Thesis