

<연구논문>

대형 지진하중에 대한 시편의 변형률기반 손상평가

권형도[†]·허은주*·이종민**·김진원***

Strain-based Damage Evaluation of Specimens under Large Seismic Loads

Hyeong Do Kweon[†], Eun Ju Heo*, Jong Min Lee** and Jin Weon Kim***

(Received 25 October 2018, Revised 16 November 2018, Accepted 28 November 2018)

ABSTRACT

In this paper, specimen tests with simulated large seismic conditions have been carried out to investigate damage characteristics such as structural deformation and crack initiation under seismic loading. The mechanical behavior of the specimens is predicted by numerical simulations and the strain-based damage evaluations are performed. Finite element analyses of the specimens under the simulated seismic loading at room and operating temperatures were carried out for low alloy steel and stainless steel materials. Peak strain amplitude, cumulative fatigue damage and cumulative strain limit damage are calculated considering the nature of cyclic loading. In all cases, the allowable damage criteria are exceeded at the time of observing cracks visually in the tests. Therefore, it is confirmed that the material behavior due to the large seismic loads can be predicted by the numerical method and the structural damage of the materials can be evaluated conservatively based on the strain criteria.

Key Words : Cyclic Loading (반복하중), Damage Evaluation (손상평가), Seismic (지진), Strain-based (변형률기반)

기호설명

ε_{an} : Peak strain amplitude
 S_{a10} : Alternating stress intensity at 10 cycles from the design fatigue curve
 E : Young's modulus
 $\varepsilon_{a,i}$: Equivalent strain amplitude for each cycle
 $\Delta \varepsilon_{eq,i}$: Equivalent strain range for each cycle
 $D_{f,i}$: Fatigue damage for each cycle
 D_f : Cumulative fatigue damage
 $N(\varepsilon_{a,i})$: Number of cycles from the design fatigue

curve corresponding to the $\varepsilon_{a,i}$ of each cycle
 $\varepsilon_{L,i}$: Strain limit for each loading condition
 m_1, m_2, m_3 : Material constants used for determining the strain limit
 ST_i : Stress triaxiality for each loading condition
 $D_{sl,i}$: Strain limit damage for each loading condition
 D_{sl} : Cumulative strain limit damage
 $\Delta \varepsilon_{eq,i}^p$: Equivalent plastic strain range for each loading condition

1. 서론

일본 후쿠시마 원전 사고 이후 설계기준을 초과하는 지진, 해일 등 외부사건에 대한 원자력발전 설비의 안전성 강화가 기술현안으로 부각되었다. 여러 설계기준초과 외부사건 중에서 주요한 사건이 대형 지

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

E-mail : hdkweon5523@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5413 FAX : (042)870-5449

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

** 고려대학교 기계공학과

*** 조선대학교 원자력공학과

진 발생이며, 지진에 대한 원자력발전소의 구조물, 계통, 기기의 건전성 확보에 관심이 증가하였다.⁽¹⁾

DeGrassi 등은 설계기준을 초과하는 대형 지진 하중이 작용하는 배관에 대한 응답을 탄소성 해석으로 모사하는 연구를 수행하였지만, 변형률 기반의 손상평가를 수행하지는 않았다.^(2,3) Snow 등은 방사성물질수송용기의 구조설계를 위해 변형률 기반 허용기준을 제시하였지만, 지진과 같은 반복하중 특성을 고려하지 않았다.⁽⁴⁾ 이 외에도 지진 하중이 작용하는 배관에 대한 거동특성, 손상모드 등을 규명하기 위한 시험을 수행하거나, 해석적으로 탄소성 거동을 모사하기 위한 연구가 다수 수행되었지만, 변형률에 기반하여 손상을 평가하기 위한 구체적인 방안이 제시되지는 않았다.^(5,6,7,8)

한편 대형 지진에 대한 원자력발전설비 안전 1등급 압력용기, 배관의 구조적 건전성을 결정론적으로 평가하기 위해 지진에 의한 손상모드를 고찰하고, 각 손상모드에 적용되는 변형률 기반의 손상평가 방안이 최근 제시되었다.⁽⁹⁾ 하지만 제시된 손상평가 방안에 대한 적절성, 보수성 등 실제 평가에의 적용성은 확인되지 않았다. 적용성을 확인하기 위해서는 대형 지진이 작용하는 실물 크기의 압력용기, 배관에 대한 지진시험이 요구되지만, 시험을 위해서는 많은 비용과 시간이 소요될 수밖에 없다. 따라서 대형 지진하중 조건을 모사하여 시편을 이용한 지진시험을 통해 압력용기나 배관의 구조적 변형, 균열개시 등 재료의 손상거동을 확인하는 연구가 수행되었다.⁽¹⁰⁾

이에 본 논문에서는 대형 지진하중에 모사하여 시편을 이용한 지진시험에 대해 유한요소해석을 통한 시편의 손상거동을 예측하고, 변형률에 기반하여 손상평가를 수행하였다. 해석에 의한 평가 결과와 시험 결과를 비교함으로써 평가 방법의 적절성과 보수성을 확인하였다.

2. 지진 모사 시편시험 요약

본 절에서는 참고문헌 (10)에서 Kim 등이 지진하중 조건을 모사하여 시편에 대해 수행한 지진시험의 주요 내용을 요약한다.

2.1 시편 재료 및 형상

시험에 사용된 시편의 재료는 압력용기 노즐에 사용되는 저합금강인 SA508 Gr.3 Cl.1⁽¹¹⁾과 배관에 사용되는 스테인리스강인 SA312 TP316⁽¹¹⁾이다. Fig. 1은 시편 형상인데, 중심부에 균열 대신 반경 6 mm 노

치가 있는 것을 제외하고는 ASTM E1820-15⁽¹²⁾에 따른 IT-CT 시편과 동일하다.

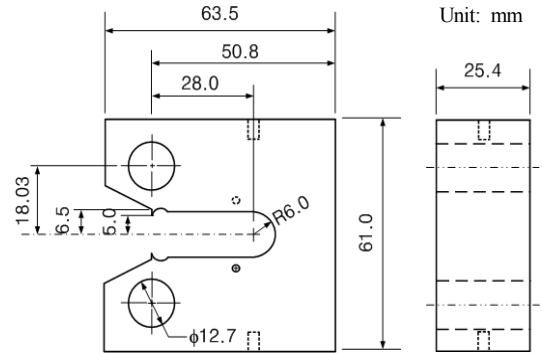
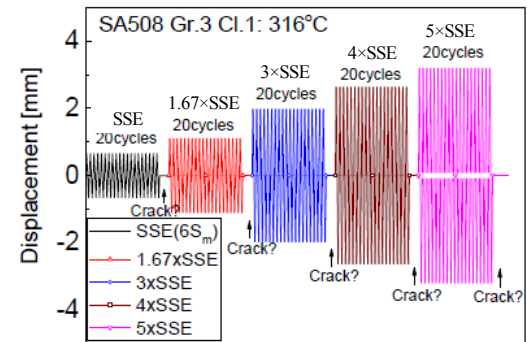


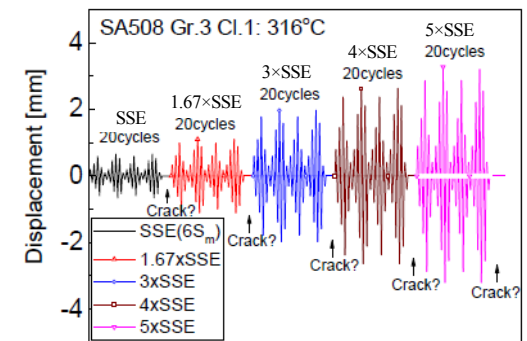
Fig. 1 The specimen used in the experiment

2.2 시험 조건 및 절차

시험은 상온과 원자력발전소 운전온도인 316 °C에서 수행되었다. 시험속도는 재료와 온도에 관계없이 모두 준정적(2 mm/min)의 조건에서 수행되었다.



(a) Constant amplitude



(b) Random amplitude

Fig. 2 Sample time history of the input load-line displacement

시험에 적용한 하중은 일정한 변위진폭을 갖는 반복하중과 임의의 변위진폭을 갖는 반복하중을 모두 고려하였다. 시험을 위해 원자력발전소 설계기준지진인 안전정지지진(SSE, safe shutdown earthquake) 이상의 지진수준에 상응하는 변위제어 반복하중을 시편에 부여하였다. 1 세트가 20 사이클로 구성된 일정한 하중선변위(Fig. 2 (a)) 또는 임의의 하중선변위(Fig. 2 (b))를 부여한 다음, 더 큰 하중선변위를 부여하는 방식으로 균열이 관찰될 때까지 계속하였다. 지진하중 수준에 따라 부여된 하중선변위 이력을 Fig. 2에 예시하였다.

2.3 시험 결과

모든 시험 경우에서 동일하게 시편 중심부 노치에서 균열이 관찰되었다. 이는 설계기준을 초과하는 큰 하중의 반복 작용에 따른 피로 기인 손상으로 판단된다. 각 시험 조건에서 육안으로 균열이 관찰된 시점, 즉, 사이클 수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Number of cycles at detecting a crack under cyclic loading

Temp.	Loading type	SA508 Gr.3 Cl.1	SA312 TP316
Room temp.	Constant	15 th cycle of 4 × SSE	14 th cycle of 7 × SSE
	Random	8 th cycle of 2nd 5 × SSE	17 th cycle of 3rd 7 × SSE
316 °C	Constant	7 th cycle of 4 × SSE	13 th cycle of 6 × SSE
	Random	18 th cycle of 1st 5 × SSE	13 th cycle of 3rd 7 × SSE

3. 손상평가를 위한 유한요소해석

3.1 해석 모델

시험 조건을 고려하여 1/4 대칭 모델에 대해 상용 유한요소해석 코드인 ABAQUS를 사용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 해석 모델의 요소 수는 9,296 개이며, 절점 수는 11,236 개 이다. 재료물성은 해당 재료의 반복 물성시험 결과를 토대로 이동경화(kinematic hardening)와 등방경화(isotropic hardening)를 함께 고려한 복합경화(combined hardening) 모델을 적용하였다.^(13,14)

관심 부위인 시편 중심부의 요소크기를 1 mm, 0.6 mm, 0.3 mm로 적용하여 민감도를 확인하였다. Fig. 3

(a)는 시편 중심부의 요소크기를 1 mm, 0.6 mm, 0.3 mm로 적용했을 때 해석과 시험 결과를 비교하기 위한 하중-하중선변위 선도를 보여준다. 대부분의 영역에서 해석과 시험 결과가 겹치게 나타나며 최대하중 또한 거의 차이가 없으므로 선정된 요소크기에 따른 영향이 매우 작은 것으로 판단된다. 따라서 해석에는 0.6 mm의 요소크기를 적용하였다.

요소종류를 C3D8 (1st order solid), C3D8I (1st order solid, incompatible mode), C3D20R (2nd order solid, reduce integration)로 적용하여 민감도를 확인하였다. Fig. 3 (b)는 요소종류를 C3D8, C3D8I, C3D20R로 적용했을 때 해석과 시험 결과를 비교하기 위한 하중-하중선변위 그래프를 보여준다. 대부분의 영역에서 해석과 시험 결과가 겹치게 나타나며 최대하중 또한 거의 차이가 없으므로 선정된 요소종류에 따른 영향이 매우 작은 것으로 판단된다. 하지만 1차 전체적분 요소에서 굽힘강성이 비정상적으로 발생하는 전단잠김

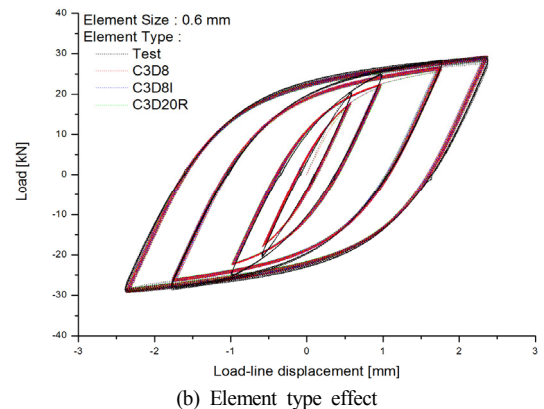
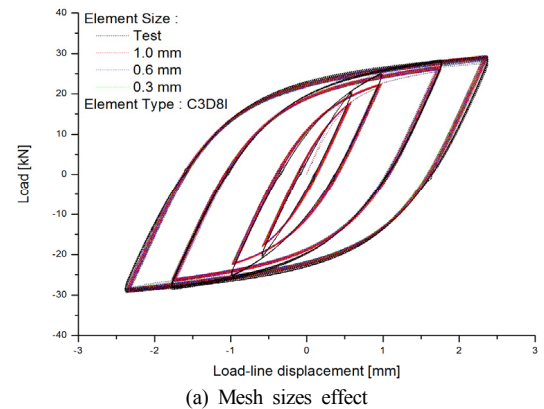


Fig. 3 Sensitivity check for mesh sizes and element types

(shear locking) 현상을 배제하고,⁽¹⁴⁾ 해석에 소요되는 시간을 고려하여 C3D8I를 적용하였다.

3.2 해석 결과

2절의 Table 1에서와 같이 총 8 가지의 경우에 대하여 시험을 모사하는 유한요소해석을 수행하였다. Table 2는 해석과 시험에서 취득한 하중-하중선변위 선도의 최대하중을 정량적으로 나타내 준다. 모든 경우에 대하여 해석결과가 시험결과와 비교하여 11% 이내의 오차로 최대하중을 예측하였으므로 해석에 의한 방법으로 시편의 거동을 비교적 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

Table 2 Comparison of maximum loads between analyses and experiments

Material	Temp.	Loading	Maximum loads [kN]		Error [%]
			Analysis	Experiment	
SA508	RT	Constant	29.52	29.36	-0.5
		Random	30.45	30.16	-1.0
	316 °C	Constant	34.28	31.17	-10.0
		Random	34.83	31.52	-10.5
SA312	RT	Constant	30.00	28.82	-4.1
		Random	29.19	27.93	-4.5
	316 °C	Constant	20.37	22.72	10.3
		Random	20.69	22.49	8.0

4. 손상평가

4.1 평가 방법

앞선 시험에서와 같이 설계기준을 초과하는 대형 지진하중이 작용하면 상당한 소성변형이 발생하고, 구조 건전성 확보 측면에서 변형률이 중요한 인자가 된다.^(2,3) 또한 소성변형이 발생하는 경우 응력보다 변형률에 기반하여 구조 건전성을 평가하는 것이 보다 실제적이다.⁽¹⁵⁾

지진과 같이 반복하중에 의한 변형률 누적을 고려하여 Fig. 4와 같이 등가소성변형률(PEEQ)의 누적이 가장 크게 나타나는 시편 중심부에 대하여 손상평가를 수행하였다.

대형 지진이 발생할 경우 반복하중의 작용에 따른 피로에 기인한 손상이 주요 손상기구임이 선행 연구에서 밝혀졌다.^(2,3,5,6,7,8) 따라서 본 논문에서는 하중의 반복 작용과 관련된 세 가지 손상평가 방법을 적용하였다.

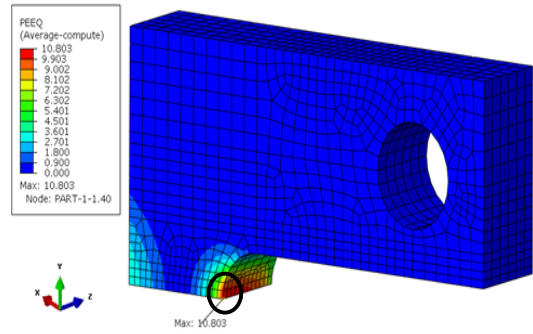


Fig. 4 Position for damage evaluation at the maximum equivalent plastic strain (PEEQ)

이를 위해 먼저 지진하중에 의해 발생하는 최대변형률진폭(peak strain amplitude)을 계산하여, 식 (1)과 같이 허용기준과 비교한다.^(9,16,17)

$$\epsilon_{an} \leq \frac{S_{a10}}{E\sqrt{10}} \quad (1)$$

다음으로 전체 지진 사이클에서 각 사이클에 의해 발생하는 피로손상(fatigue damage)을 누적시킨 누적 피로손상(cumulative fatigue damage)을 계산하여, 식 (3)과 같이 허용기준과 비교한다.^(9,16,18,19)

$$\epsilon_{a,i} = \frac{1}{2} \Delta \epsilon_{eq,i} \quad (2)$$

$$D_f = \sum_{i=1}^k D_{f,i} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i(\epsilon_{a,i})} \leq 1 \quad (3)$$

마지막으로 전체 지진 사이클에서 연속되는 하중 변화에 의해 발생하는 변형률손상(strain limit damage)을 누적시킨 누적변형률한계손상(cumulative strain limit damage)을 계산하여, 식 (5)와 같이 허용기준과 비교한다.^(9,20)

$$\epsilon_{L,i} = m_1 e^{m_2 \times ST_i} + m_3 \quad (4)$$

$$D_{sl} = \sum_{i=1}^k D_{sl,i} = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta \epsilon_{eq,i}^p}{\epsilon_{L,i}} \leq 1 \quad (5)$$

최대변형률진폭과 누적피로손상으로 평가하는 방법은 기본적으로 원자력발전설비 안전 등급 압력용기의 설계 기술기준⁽¹⁶⁾을 활용하므로 우선 수단으로 적용된다. 반면 누적변형률한계손상으로 평가하는

방법은 일반 등급 압력용기의 설계기술기준⁽²⁰⁾을 활용하므로 보조적인 수단으로 적용된다.

4.2 평가 결과 및 토의

각 시험 조건에서 육안으로 균열이 관찰된 시점에 해당하는 지진 사이클에서 세 가지 손상평가 방법에 따른 계산값과 허용값을 Table 3와 4에 나타내었다.

Table 3과 4는 모든 시험 조건에서 균열 관찰 시점에서 허용기준을 초과함을 보여준다. 이는 유한요소 해석에 의한 공학적 평가가 실제 파손 시점, 즉 균열 발생 시점보다 빨리 파손이 발생하는 것으로 예측함을 의미한다. 따라서 해석에 의한 평가 결과가 시험에 의한 실제 결과 보다 보수적임을 알 수 있다.

Fig. 5와 6은 각각 SA508 Gr.3 Cl.1 저합금강과

Table 3 Results of the strain-based damage evaluation for the SA508 Gr.3 Cl.3

Temp.	Loading	Peak strain amplitude		Cumulative fatigue damage		Cumulative strain limit damage	
		calc.	allow.	calc.	allow.	calc.	allow.
RT	Constant	0.066	0.024	1.9	1.0	3.4	1.0
	Random	0.083		1.6		3.1	
316°C	Constant	0.065		1.3		2.5	
	Random	0.085		1.2		2.5	

Table 4 Results of the strain-based damage evaluation for the SA312 TP316

Temp.	Loading	Peak strain amplitude		Cumulative fatigue damage		Cumulative strain limit damage	
		calc.	allow.	calc.	allow.	calc.	allow.
RT	Constant	0.094	0.033	3.0	1.0	5.3	1.0
	Random	0.091		1.8		4.1	
316°C	Constant	0.079		1.5		3.3	
	Random	0.093		1.7		4.0	

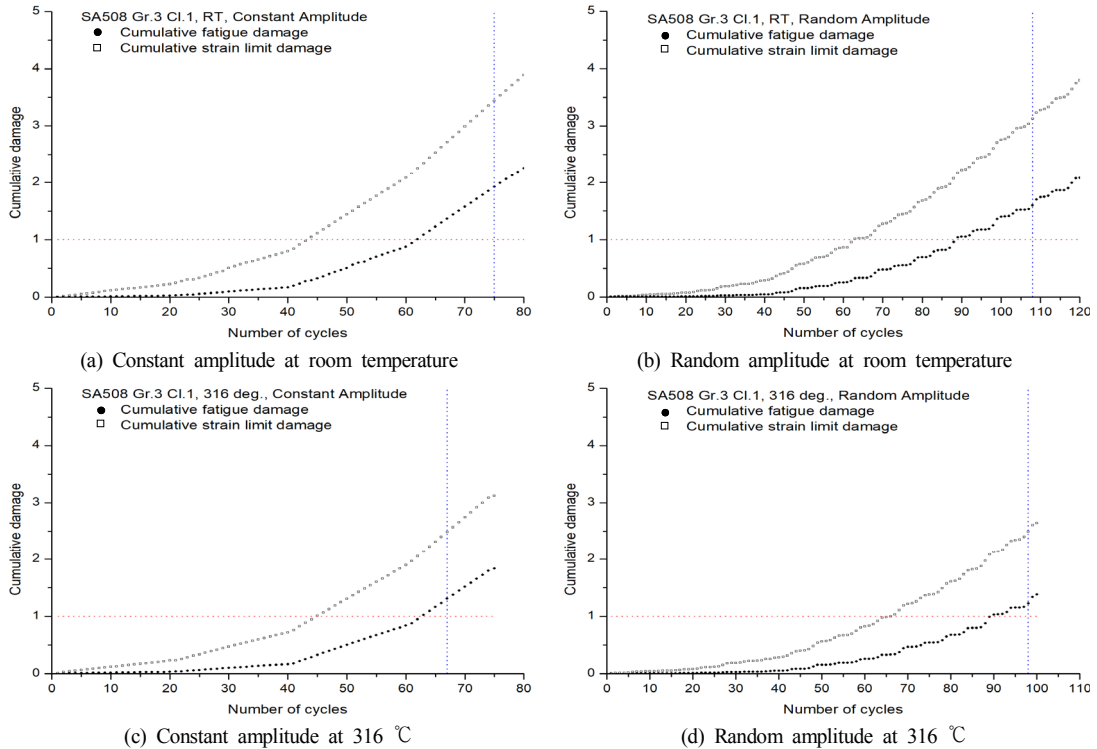


Fig. 5 Cumulative damage of SA508 Gr.3 Cl.1

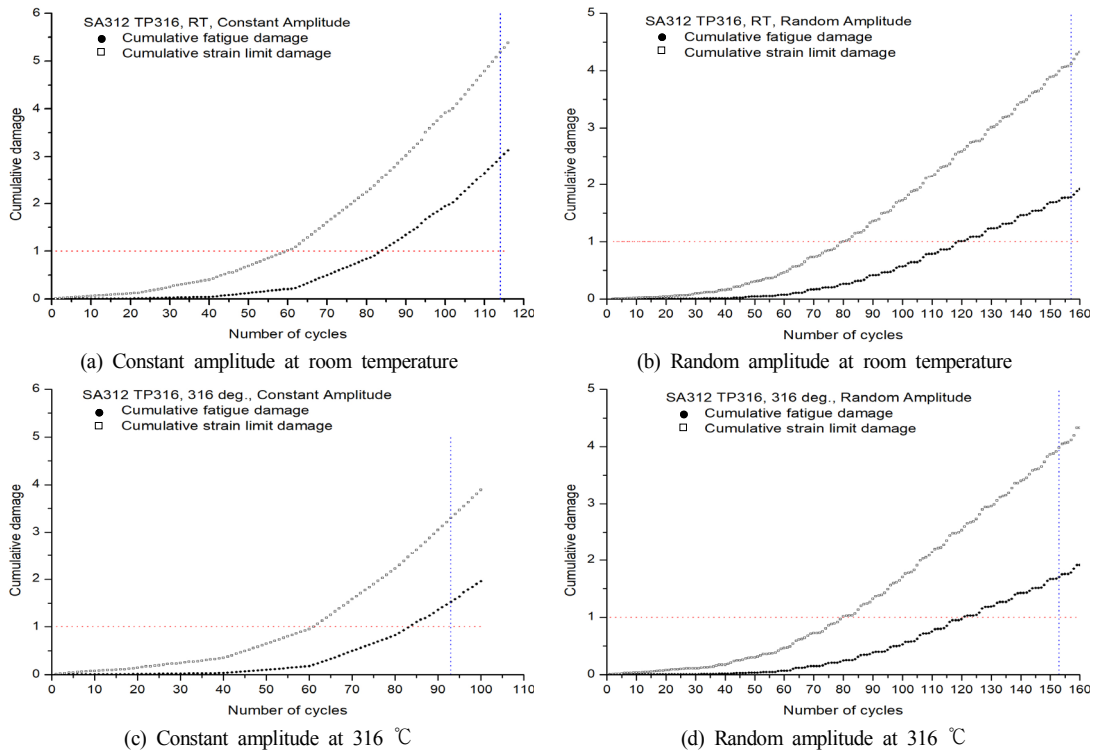


Fig. 6 Cumulative damage of SA312 TP316

SA312 TP316 스테인리스강에 대하여, 지진 사이클이 하중으로 작용할 때에 손상이 진행되는 과정을 보여준다. 세로 점선은 시험결과로부터 얻은 육안으로 균열이 관찰된 시점이다. 여기서 시점은 Fig. 2에서와 같은 지진하중의 사이클 수를 의미하는데, 이 시점에서 평가결과로부터 정량적으로 계산된 손상정도를 손상허용기준과 비교할 수 있다. 누적손상 1을 나타내는 가로 점선은 평가결과로부터 파손이 시작되리라고 예측되는 손상정도, 즉 손상허용기준을 의미한다. 손상허용기준에 도달하는 지진하중 사이클 수를 시험에서 실제 손상에 도달하는 사이클 수와 비교할 수 있다.

Fig. 5와 6을 비교해 보면, 지진과 같이 반복적으로 작용하는 하중에 대해 모든 경우에서 스테인리스강이 저합금강보다 더 큰 하중에서 손상이 발생한다. 다시 말하면 스테인리스강이 저합금강보다 저주기 피로에 대한 저항성이 더 크다고 할 수 있다. 이는 시험결과 및 설계피로곡선과도 일치한다.

지진하중의 형태 관점에서는 일정변위진폭을 가한 경우가 임의변위진폭을 가한 경우보다 파손이 일찍

발생함을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 보듯이 일정변위진폭이 임의변위진폭 보다 가해지는 하중 자체가 크기 때문이다. 온도 측면에서는 상온보다 운전온도인 316 °C에서 약간 일찍 파손이 진행되지만, 평가결과에 따른 손상허용기준에 도달하는 시점은 큰 차이를 보이지 않는다.

모든 경우에 있어서 누적피로손상 평가방법이 누적변형률한계손상 평가방법보다 더 큰 하중에서 그리고 더 늦게 파손이 발행하는 것으로 나타났다. 하지만 실제 시험결과보다는 여전히 일찍 파손이 발생되므로 보수성을 확보하고 있다고 볼 수 있다. 설계기준 하중에 대해서는 보수적 평가를 하고, 설계기준 초과 하중에 대해서는 최적 평가를 수행하는 것이 일반적이다. 이러한 측면에서 누적피로손상 평가방법을 통해 어느 정도 보수성을 유지하면서도 현실적이고 최적화된 평가가 가능함을 알 수 있다.

Table 3과 4에서 균열 관찰 시점에서 허용값 대비 계산값을 보면, 최대변형률진폭 평가방법이 누적피로손상 평가방법보다 항상 큰 값을 유지함을 알 수 있다. 두 가지 방법 모두 설계피로곡선을 활용하지

만, 최대변형률진폭 평가방법은 전체 지진 사이클에서 가장 큰 사이클만 반영되지만, 누적피로손상 평가 방법은 전체 지진 사이클에서 모든 사이클에 의해 발생하는 손상을 누적시키므로 각 사이클의 하중 크기가 모두 반영되기 때문이다. 따라서 실제 적용 시에는 먼저 최대변형률진폭 평가를 수행하여 허용기준을 만족하지 못할 경우에만 누적피로손상 평가를 수행함이 바람직할 것이다.

이상으로 시험 재료, 온도, 하중에 따른 총 8 가지 시험 조건에 대한 해석결과가 일관적인 경향을 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 해석결과가 적당한 보수성을 유지하면서도 시험결과를 비교적 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

대형 지진하중이 작용하는 시편에 대해 해석적으로 재료거동을 예측하고, 세 가지 방법으로 변형률 기반의 손상평가를 수행하였다. 손상평가 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 상세 유한요소해석을 통해 대형 지진하중이 작용하는 시편의 재료거동을 적절히 모사할 수 있다.
- 변형률 기반 평가 방법을 통해 대형 지진하중에 의한 손상을 적절히 평가할 수 있다.
- 누적피로손상 평가결과가 시험결과를 가장 실제적으로 반영한다.
- 최대변형률진폭 평가는 누적피로손상 평가 수행 대상을 선정하기 위한 예비평가로 활용할 것을 권고한다.
- 누적변형률한계손상 평가는 누적피로손상 평가에 대한 참고용으로 활용할 것을 권고한다.

본 논문은 대형 지진하중을 모사하여 시편에 대한 지진시험에 대해 해석적으로 손상을 평가하였다. 하지만 실제 압력용기 또는 배관의 지진시험에 대해 해석적인 평가 방법을 적용함으로써 변형률 기반 손상평가 방법의 적용성과 신뢰성을 좀 더 검증할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Saji, G., 2014, "Safety goals for seismic and tsunami risks: Lessons learned from the Fukushima Daiichi disaster," *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 280, pp. 449-463.
- (2) DeGrassi, G. and Hofmayer, C., 2005, "Seismic analysis of simplified piping systems for the NUPEC ultimate strength piping test program," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., *NUREG/CR-6889*.
- (3) DeGrassi, G. and Hofmayer, C., 2008, "Seismic analysis of large-scale piping systems for the JNES-NUPEC ultimate strength piping test program," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., *NUREG/CR-6983*.
- (4) Snow, S. D. and Morton, D. K., 2009, "Strain-based acceptance criteria for energy-limited events," *Proc. of ASME 2009 PVP Conference*, Prague, Czech Republic, July 26-30, PVP2009-77122.
- (5) 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," *20th Int. Conf. on Struct. Mech. in React. Tech. (SMIRT 20)*, Espoo, Finland, August 9-14, pp. 1-10.
- (6) Nakamura, I. and Kasahara, N., 2015, "Excitation tests on elbow pipe specimens to investigate failure behavior under excessive seismic loads," *Proc. of ASME 2015 PVP Conference*, Boston, MA, July 19-23, PVP2015-45711.
- (7) Watakabe, T., Nakamura, I., Otani, A., Morishita, M., Shibutani, T. and Shiratori, M., 2017, "Seismic qualification of piping systems by detailed inelastic response analysis: Part 4 – Second round benchmark analyses with stainless steel piping component test," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HI, July 16-20, PVP2017-65324.
- (8) Sollogoub, P., 2017, "The OECD-NEA programme on metallic component margins under high seismic loads (MECOS): Towards new criteria," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HI, July 16-20, PVP2017-63119.
- (9) Kweon, H. D., Heo, E. J., Kim, J. S., Lee, J. M., Nam, H. S., Kim, Y. J. and Kim, J. W., 2017, "Structural evaluation method for protection against failures of safety class 1 components under large seismic load," *Trans. of the KNS Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 18-19, pp. 1-3.
- (10) Kim, J. W., Song, I. H., Kweon, H. D. and Kim, J. S., 2017, "Evaluation of deformation and fracture behaviors of nuclear components using a simulated specimen under excessive seismic loads," *Proc. of ASME 2018 PVP Conference*, Prague, July 15-20, PVP2018-84576.
- (11) ASME BPVC Sec. II Part D, 2010, "Properties

- Materials,” American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (12) ASTM E1820-15, 2015, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (13) Chaboche, J. L., 1986, "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity," *Int. J. Plasticity*, Vol. 2, pp. 149-188.
- (14) Dassault Systems, 2016, *ABAQUS Analysis User's Guide*, France.
- (15) Ammerman, D. J. and Bjorkman, G. S., 2008, "Strain-based acceptance criteria for inelastic analysis," *Proc. of ASME 2008 PVP Conference*, Chicago, IL, July 27-31, PVP2008-61728.
- (16) ASME BPVC Sec. III Div.1 Sub. NB, 2001, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (17) Adams, T. M., 2015, "Basis of the upcoming changes to piping seismic design rules in the ASME BPVC Section III, Division 1, Article NB-3200," *Proc. of ASME 2015 PVP Conference*, Boston, MA, July 19-23, PVP2015-45697.
- (18) Morishita, M., Otani, A., Watakabe, T., Nakamura I., Shibutani, T. and Shiratori, M., 2017, "Seismic qualification of piping systems by detailed inelastic response analysis: Part 1 - A code case for piping seismic evaluation based on detailed inelastic response analysis," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HI, July 16-20, PVP2017-65166.
- (19) ASME BPVC Sec. III Sub. HB, 2017, "Class A metallic pressure boundary components," American Society for Mechanical Engineers, NY.
- (20) ASME BPVC Sec. VIII Div. 2 Part 5, 2015, "Design by analysis requirements," American Society for Mechanical Engineers, NY.