

모멘트-변형각의 관계를 이용한 SCH80 3인치 강재배관엘보의 한계상태 평가

김성완¹, 윤다운², 정진환³, 김성도^{4*}

Limit State Assessment of SCH80 3-inch Steel Pipe Elbows Using Moment-Deformation Angle Relationship

Sung-Wan Kim¹, Da-Woon Yun², Jin-Hwan Cheung³, Seong-Do Kim^{4*}

Abstract: To conduct probabilistic seismic fragility analysis for nuclear power plants, it is very important to define the failure modes and criteria that can represent actual serious accidents. The seismic design criteria for piping systems, however, cannot fully reflect serious accidents because they are based on plastic collapse and cannot express leakage, which is the actual limit state. Therefore, it is necessary to clearly define the limit state for reliable probabilistic seismic fragility analysis. Therefore, in this study, the limit state of the SCH80 3-inch steel pipe elbow, the vulnerable part of piping systems, was defined as leakage, and the in-plane cyclic loading test was conducted. Moreover, an attempt was made to quantify the failure criteria for the steel pipe elbow using the damage index, which was based on the dissipated energy that used the moment-deformation angle relationship.

Keywords: Damage index, Dissipated energy, Moment-deformation angle, Steel pipe elbow

1. 서론

원자력발전소에 적용하는 지진격리시스템은 지진력을 감소시키는데 크게 기여하지만, 원자력발전소에 새로운 시스템이 추가되는 것이므로 원자력발전소의 지진 안전성 평가가 지진격리시스템에 맞게 재평가되어야 한다(Yu et al., 2018; Cheng and Shi 2018). 특히 지진격리된 구조물과 일반구조물을 연결하는 설비인 배관시스템의 경우 지진리스크가 크게 증가될 것으로 예상된다. 배관이 서로 다른 구조물을 연결하는 경우 두 구조물의 고유진동수 차에 의하여 두 지지점 사이의 상대변위가 크게 발생할 수 있다. 특히 지진격리장치가 적용될 경우에 상대변위는 더욱 크게 증가할 가능성이 있다(Xu et al., 2019). 하지만 이러한 거동에 의한 배관의 파괴를 정량적으로 정의하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 지진격리장치의 설치로 지진리스크가 증가하는 배관시스템에 대해 확률론적 지진취약도 분석을 수행하여 내진성능을 검증할 필요가 있다(Kim et al., 2019a; Ravi Kiran et al., 2019).

원자력발전소의 확률론적 지진취약도 분석을 수행하기 위해서는 실제 중대 사고를 표현할 수 있는 파괴모드와 파괴기준의 정의가 매우 중요하다. 그러나 배관시스템의 내진설계 기준은 소성붕괴로서 실제 한계상태인 누수를 표현하지 못하므로 중대 사고를 충분히 반영하지 못하고 있다(Kasahara et al., 2014). 따라서 신뢰성 있는 확률론적 지진취약도 분석을 위해서는 한계상태를 명확히 정의할 필요가 있다(Kim et al., 2018).

일반적으로 두 지점 사이를 연결하는 배관시스템은 직관, 엘보 및 티 접합 등의 조합으로 구성된다. 복잡한 배관시스템의 지진취약도 분석을 위한 파괴기준을 정의하고자 한다면 체계적인 시험연구를 통하여 이를 정량화할 필요가 있다(Kiran et al., 2018). 원자력발전소 배관시스템의 엘보는 반복되는 과도한 하중에 의하여 라쳇트를 동반한 피로 파괴로 인하여 관통균열이 발생하여 누수가 발생하게 된다(Varelis and Karamanos, 2015; Urabe et al., 2012). 즉 지진으로 인해 배관시스템의 파괴모드는 라쳇트를 동반하는 저주기 피로 파괴이며 비선형거동이 집중되고 파손이 발생하는 요소는 엘보인 것으로 나타났다(Takahashi et al., 2009; Nakamura et al., 2010). 따라서 면진된 원자력발전소 배관시스템의 지진안전성을 평가하기 위한 연구(Choi et al., 2013)가 수행되었으며, 원자력 발전소의 확률론적 지진안전성 평가를 위해 배관시스템 엘보의 정량적 파괴기준을 정의하기 위한 연구가 수행되었다(Firoozabad et al., 2015; Jang et al., 2018; Kim et al.,

¹정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

²정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 주임연구원

³정회원, 부산대학교 건설융합학부 교수

⁴정회원, 경성대학교 건설환경도시공학부 교수

*Corresponding author: dskim@ks.ac.kr

309, Suyeong-ro, Nam-gu, Busan, 48434, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 7월 31일까지 학회에 보내주시면 2020년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2019b).

본 연구에서는 저주기 피로에 의한 SCH80 3인치 강제배관 엘보에 대한 파괴기준을 정량적으로 정의하기 위하여, 한계 상태를 누수로 정의하고 면내반복가력시험을 수행하였다. 배관시스템의 취약 지점인 배관 엘보에 대하여 모멘트-변형각의 관계를 이용한 손상도를 나타내었으며, 힘-변위 관계를 이용하여 계산된 손상도와 비교하였다. 또한 배관시스템의 취약 지점인 SCH80 3인치 강제배관엘보에 대하여 반복되는 외력에 의한 소산에너지에 기반을 둔 손상도로서 누수가 발생한 한계상태를 정량화하고자 하였다.

2. 강제배관엘보의 저주기 피로 수명

2.1 시험 구성

엘보는 형상을 변화시켜 제작되는 것이므로 원자력발전소의 배관시스템에서 지진에 취약한 부위로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 강제배관엘보의 한계상태를 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 엘보 시험체를 제작하여 면내반복가력시험을 수행하였다.

엘보 시험체는 ASME(American Society of Mechanical Engineers) B36.10M의 기준에 따라 직경이 3인치(88.90mm)

Table 1 Specification of elbow specimen

Item	Pipe	Elbow	D/T
Outer Diameter (D)	88.90mm	88.90mm	11.67
Thickness (T)	7.62mm	7.62mm	

이고 두께가 SCH80(7.62mm)인 카본강재배관(SA 106 Gr.b)과 90° 엘보를 용접하여 연결하였다. 본 연구에서 사용된 SCH80 엘보 시험체에 대한 사양은 Table 1에 나타내었다. 제작된 엘보 시험체는 직관부에서 소성거동이 발생할 수 있도록 외경의 3배(3D-270mm) 이상의 충분한 길이를 90° 엘보에 용접으로 부착하여 배관시스템의 결과와 동일한 시험결과를 나타낼 수 있도록 하였다. 또한 시험체의 양 끝에 핀 연결을 구현하기 위한 지그를 제작하여 용접으로 부착하였다. 지그는 큰가력변위에서도 시험체와 간섭이 생기지 않도록 하였으며 원활한 핀 거동을 고려하여 제작되었다. 본 연구에서 제작된 엘보 시험체는 설정된 변수 이외의 영향을 최소화하기 위하여 실제 원전에 배관을 제작 납품하는 업체를 통하여 제작하였으며, 각 부속의 연결은 용접을 이용하여 이루어지므로 원전 납품 자격을 보유하고 있는 용접사에 의뢰하여 용접하였다.

Fig. 2(a)는 UTM(Universal Testing Machine)에 설치된 엘보 시험체를 나타내었으며, 배관시스템의 운용상황을 최대한 고려하기 위하여 내부에 물을 채우고 레귤레이터가 적용된 에어 펌프를 이용하여 3MPa의 내압을 가압하였다. 면내반복가력시험을 닫힘모드(closing mode)에서 열림모드(opening mode)의 순서로 사인파로 가력하였다. 본 연구에서는 엘보 시험체의 한계상태를 누수로 정의하였으며, 면내반복가력시험은 누수가 발생할 때까지 수행하였다. 이미지측정시스템은 휴대성과 설치의 간편성을 고려하여 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)의 이미지 센서가 적용된 디지털 카메라(IMB-7050G, 2448×2048 픽셀 이미지)와 노트북을 사용하였다. 디지털카메라와 노트북은 LAN(Local Area Network)을 이용하여 이미지를 전송하며 저장 기능을 수행하게 된다. 또한 원거리에 위치한 엘보 시험체의 이미지를 획득할 때 빛의

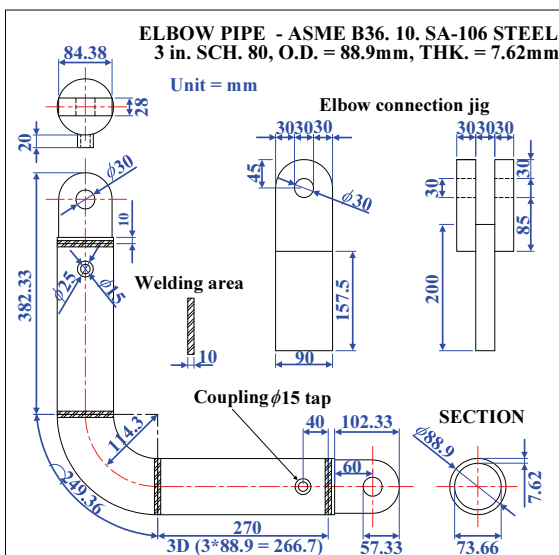


Fig. 1 Elbow specimen

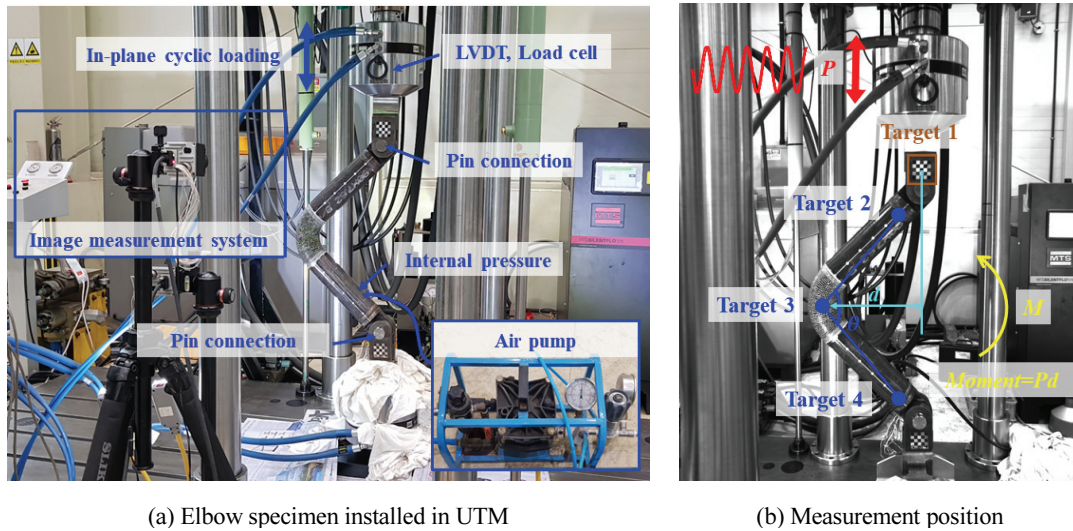


Fig. 2 Experimental setup

밝기, 초점 거리 등을 조절하기 위하여 렌즈(M5018-MP2, 8mm)를 이용하였다. 이미지측정시스템을 이용하여 UTM의 가력변위와 엘보 시험체의 모멘트 및 변형각을 측정하기 위해 필요한 표적들의 위치는 Fig. 2 (b)에 나타내었다. UTM은 변위제어를 통하여 면내반복가력시험을 수행하였으며, UTM의 가력 하중을 획득하기 위해서 UTM의 가력변위를 측정하여야 한다. 따라서 UTM 연결용 지그에 Target 1을 설치하여 이미지측정시스템을 이용하여 측정된 변위와 UTM 내부에 설치된 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)에서 측정된 변위와 비교하여 동기화하여 가력하중을 획득하였다. 설치된 표적의 변위는 선행연구에서 사용된 이미지 신호를 이용한 변형각 측정 알고리즘에서 제시된 방법을 사용하였다 (Kim et al. 2019c). Target 1과 엘보의 중심인 Target 3 지점에서 측정된 수평(d) 변위의 차이인 거리를 UTM에서 가력된 하중(P)을 곱하여 모멘트($M = Pd$)를 계산하였다. Target 2, Target 3 및 Target 4를 이용하여 측정된 3개 지점의 변위를 이용하여 변형각(R)을 산정하였다. 면내반복가력시험은 이미지측정시스템을 이용하여 2448×2048의 픽셀 이미지를 초당 2프레임으로 획득하였으며, UTM의 가력변위는 40mm/min으로 수행하였다.

2.2 저주기 피로 수명

원자력발전소의 강재배관엘보에 대한 저주기 피로파괴와 관련된 연구를 수행하면서 지진으로 인해 배관에 가해지는 SAM(Seismic Anchor Motion)은 20mm 이상인 것으로 나타났다(Takahashi et al., 2009; Urabe et al., 2013). 본 연구에서는 SIE(Seismic Inertia Effect)와 SAM 등에 의해서 가해지는 저주기 피로를 고려하여 최소상대변위인 10mm 이상에 대하여

면내반복가력시험을 수행하였다. 면내반복가력시험은 총 9개의 엘보 시험체에 대하여 $\pm 10\text{mm}$, $\pm 20\text{mm}$, $\pm 40\text{mm}$, $\pm 60\text{mm}$ 및 $\pm 80\text{mm}$ 의 하중 진폭에 대해서 수행하였으며, 시험결과는 Table 2에 나타내었다. 엘보에서 내부의 물이 외부로 누출되는 관통균열은 Fig. 3과 같이 발생하였다. 모든 시험체의 관통균열은 엘보의 크라운 또는 안쪽(intrados)방향의 크라운과 가까운 위치에서 누수가 발생하였으며, 균열은 축 방향으로 진전하는 것으로 나타났다. 대부분의 관통균열은 열림모드에서 발생하였으며, 닫힘모드에 비하여 열림모드에서 외력에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 면내반복가력시험에서 측정된 힘-변위(P - D) 및 모멘트-변형각(M - R)의 이력곡선을 나타내었으며, 각 하중 진폭에 대한 대표적인 시험체에 대해 나타내었다. 이력곡선에서 가력방향에 따라 비선형거동의 경향이 달라서 힘-변위, 모멘트-변형각의 상관관계가 비대칭으로 나타났다.

Fig. 5는 Table 2에서 제시된 모멘트, 변형각의 관계를 이용한 누수선도를 나타내었으며 최소자승법으로 계산된 엘보 시험체의 평균회귀곡선식은 Eq. (1)과 같다. Eq. (1)은 엘보 시험체에서 누수가 발생할 때의 모멘트와 변형각의 관계이며, 결정계수(R^2)는 0.99 이상으로 모멘트와 변형각은 선형적인 관계로 나타났다.

$$M = 31.73 \cdot R + 24.78, R^2 = 0.99 \quad (1)$$

엘보 시험체의 저주기 피로 수명(N_f)을 나타내기 위하여 모멘트와 변형각의 각각에 대하여 파괴 사이클에 대한 저주기 피로 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 도출된 저주기 피로 곡선은 Table 2에서 제시된 엘보 시험체가 누수가 발

Table 2 Test result of elbow specimen

Loading amplitude (mm)	Number of cycles to failure (N_f)	Moment range (kN·m)	Deformation angle range (rad)
±10	384.50	26.16	0.07
	73.50	29.61	0.13
±20	92.50	28.80	0.13
	96.75	29.06	0.13
±40	28.50	32.64	0.26
	30.25	33.55	0.26
±60	7.75	36.62	0.40
	11.50	38.55	0.41
±80	5.50	41.78	0.54

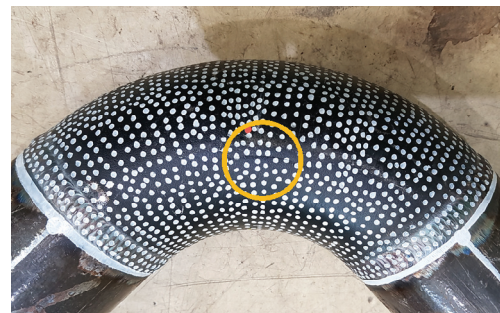
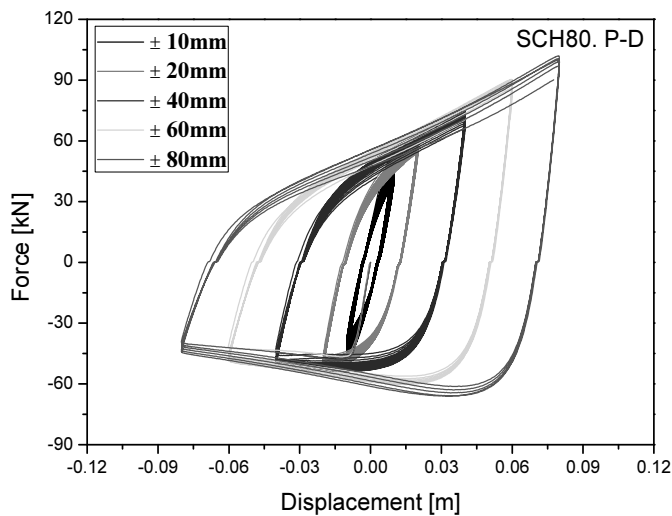
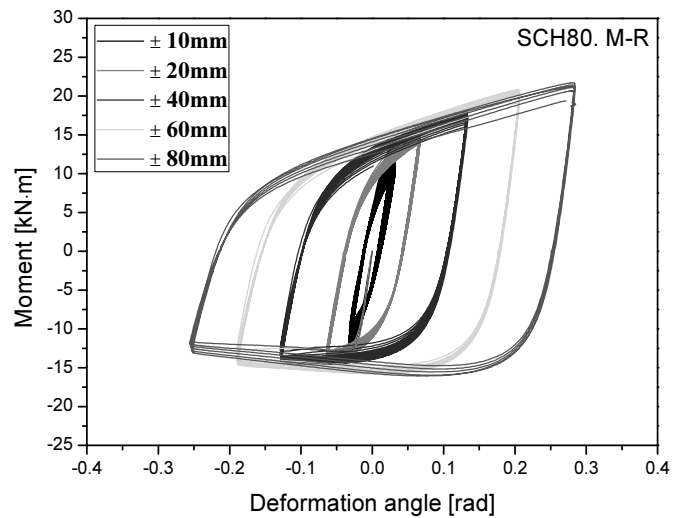


Fig. 3 Elbow specimen with leakage



(a) Force-displacement



(b) Moment-deformation angle

Fig. 4 Hysteresis loop

생하였을 때의 데이터이며, 결정계수가 0.94 이상으로 높은 신뢰도를 보이고 있다. Fig. 6에서 나타난 엘보 시험체에 대한 배관시스템의 저주기 피로 곡선들의 관계식은 각각 Eq. (2)와 Eq. (3)과 같다. Fig. 6에서 변형각에 대한 저주기 피로 곡선은

변형각이 커질수록 사이클 수가 감소하는 것을 확인하였다. Eq. (2)와 Eq. (3)을 이용하여 엘보 시험체에 대한 모멘트 및 변형각에 대한 저주기 피로 수명을 예측할 수 있다.

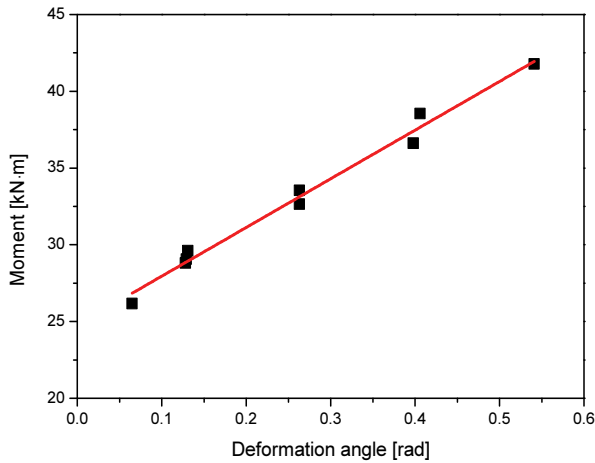
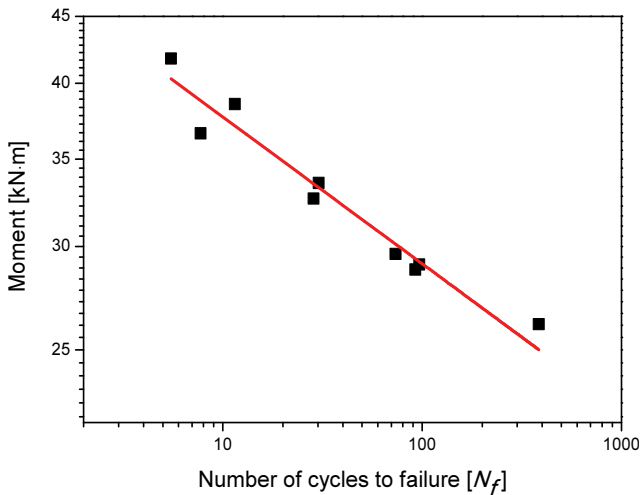
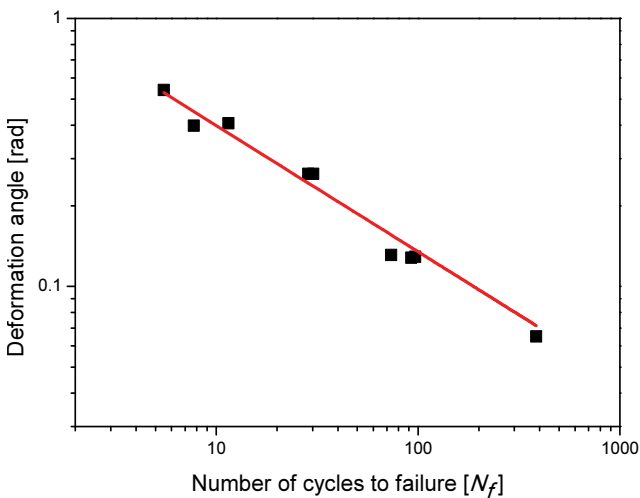


Fig. 5 Leakage line



(a) Moment-number of cycles



(b) Deformation angle-number of cycles

Fig. 6 Low cycle fatigue curve

$$M = 48.83N_f^{-0.11}, R^2 = 0.94 \quad (2)$$

$$M = 1.18N_f^{-0.47}, R^2 = 0.97 \quad (3)$$

3. 강재배관엘보의 손상도

배관시스템의 취약요소는 엘보이며, 저주기 라체팅 피로에 의해 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 소산에너지 기반의 손상도(Bannon et al., 1981)를 이용하여 엘보 시험체에 대하여 파괴기준을 정량적으로 나타내고자 하였다. 또한 모멘트-변형각의 관계를 이용하여 강재배관엘보의 정량적인 파괴기준의 표현 가능성을 확인하기 위해 힘-변위로 산정된 손상도와 비교하였다. Eq. (4)와 Eq. (5)는 각각 힘-변위, 모멘트-변형각을 이용한 손상도를 나타내었다. Eq. (4)에서 D_y 는 항복 변위, F_y 는 항복 힘, D_i 는 i 번째 사이클의 변위 진폭이며, E_i 는 소산 에너지이다. Eq. (5)에서 M_y 와 θ_y 는 항복 모멘트와 항복 변형각이며, θ_i 와 E_i 는 i 번째 사이클의 변형각의 진폭과 소산 에너지이다. Eq. (4)와 Eq. (5)에서 c , d 는 일정한 값으로써 이때 손상도의 상수(constant)인 c 와 d 는 실험결과로부터 최적화하여 3.3과 0.21을 적용하였다(Jeon et al., 2017).

$$D_{P-D} = \sqrt{\left(\max\left(\frac{D_i}{D_y} - 1\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N c \left(2 \frac{E_i}{F_y D_y}\right)^d\right)^2} \quad (4)$$

$$D_{M-R} = \sqrt{\left(\max\left(\frac{\theta_i}{\theta_y} - 1\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N c \left(2 \frac{E_i}{\theta_y M_y}\right)^d\right)^2} \quad (5)$$

항복점은 Fig. 7과 같이 힘-변위 및 모멘트-변형각의 이력

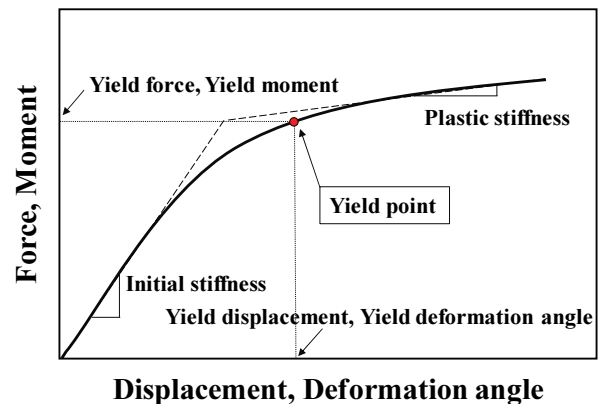
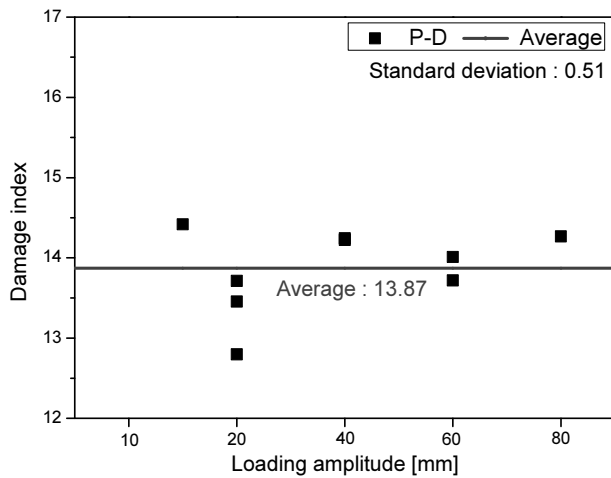


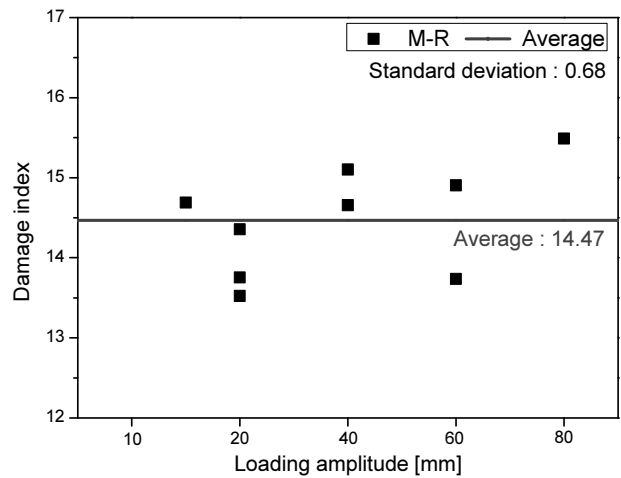
Fig. 7 Yield point

Table 3 Dissipated energy and damage index

Loading amplitude (mm)	Energy (kN-m)			Damage index		
	P-D	M-R	Difference (%)	P-D	M-R	Difference (%)
±10	161.98	145.13	11.61	14.42	14.69	1.85
	143.80	131.86	9.06	12.80	13.52	5.38
±20	180.07	159.62	12.81	13.46	13.75	2.15
	180.77	164.12	10.15	13.71	14.36	4.49
±40	169.19	149.10	13.48	14.22	15.10	5.81
	180.50	162.68	10.96	14.24	14.66	2.82
±60	82.08	73.29	12.00	13.72	13.74	0.13
	131.33	118.29	11.03	14.01	14.90	6.00
±80	84.88	73.93	14.81	14.27	14.99	4.81



(a) Force-displacement



(b) Moment-deformation angle

Fig. 8 Damage index of each loading amplitude

Table 4 Average damage index of each loading amplitude

Loading amplitude (mm)	P-D	M-R	Difference (%)
±10	14.42	14.69	1.85
±20	13.32	13.88	4.01
±40	14.23	14.88	4.34
±60	13.87	14.32	3.18
±80	14.27	14.99	4.81

곡선에 대한 초기 강성의 기울기와 소성 강성의 기울기의 연장선이 만나는 지점으로 각각 산정하여 적용하였다(Geršak, 1989). Table 3은 각각의 하중 진폭에 대하여 힘-변위 및 모멘트-변형각을 이용하여 산정된 소산 에너지와 손상도를 나타내었다. Table 3에서 소산 에너지는 9.057% ~ 14.812%, 손상도는 0.131% ~ 5.998%의 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 각각의 하중 진폭에 대한 힘-변위, 모멘트-변형각의

관계를 이용한 엘보 시험체의 손상도를 나타내었다.

Table 4는 각 하중 진폭에서 계산된 평균 손상도를 나타내었으며 힘-변위, 모멘트-변형각을 이용하여 산정된 손상도는 5% 이내의 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 엘보 시험체의 각 하중 진폭에 대한 평균 손상도들을 나타내었다. 평균 손상도는 엘보 시험체의 관통균열에 의한 누수를 정량적으로 표현 가능함을 확인하였으며, 이는 SCH80 3인치 강재배관엘

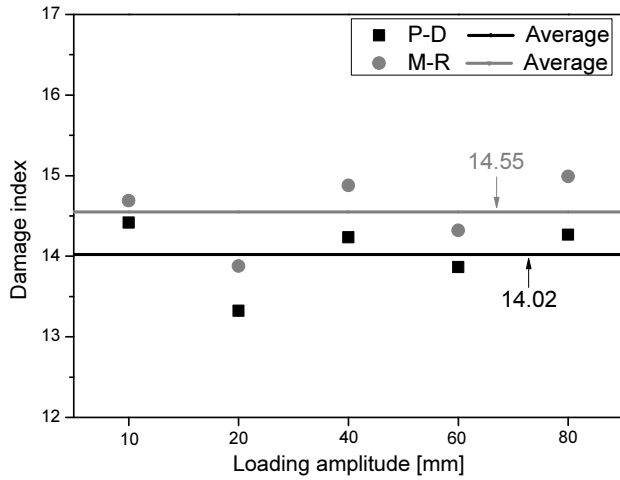


Fig. 9 Average damage index

Table 5 Average value and standard deviation of damage index

P-D		M-R		Difference (%)
Damage index	Standard deviation	Damage index	Standard deviation	
14.02	0.44	14.55	0.45	3.64

보의 파괴기준으로 사용할 수 있을 것으로 나타났다. 또한 각 가력변위에 대한 손상도들은 일정 수준에 수렴하며, 각 손상도에 대한 표준 편차는 Table 5와 같이 0.6 이하로 평균값은 파괴에 대한 대푯값으로 사용할 수 있을 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 지진격리된 배관시스템의 지진 취약부위는 엘보이며, 파괴모드는 저주기 피로에 의한 누수로 정의하였다. 그리고 파괴를 정량적으로 표현하기 위하여 SCH80 3인치 강재배관엘보를 대상으로 3MPa의 내압을 가압한 상태에서 다양한 하중 진폭에 대하여 면내반복가력시험을 수행하였다. 면내반복가력시험은 누수가 발생할 때까지 수행되었으며, 소산 에너지 기반의 손상도를 이용하여 SCH80 3인치 강재배관엘보의 파괴기준을 정량화하였다.

면내반복가력시험에서 SCH80 3인치 강재배관엘보의 누수가 발생한 위치는 엘보의 크라운 또는 안쪽방향의 크라운에 가까운 위치이며, 관통균열은 내부에서부터 외부로, 그리고 축 방향으로 진전하는 것을 확인하였다. SCH80 3인치 강재배관엘보는 힘-변위 및 모멘트-변형각의 관계의 소산에너지에 기반을 둔 손상도를 이용하여 파괴기준의 정량적인 표현이 가능함을 확인하였다. 또한 힘-변위와 모멘트-변형각을 이용하여 산정된 손상도는 강재의 90° 배관엘보에 대한 파괴

를 정량화할 수 있을 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시된 누수선도 및 저주기 피로 곡선들은 원자력발전소의 SCH80 3인치 강재배관엘보의 저주기 피로 거동을 분석하기 위한 자료로 사용될 수 있을 것으로 나타났다. 원자력발전소 배관시스템의 지진취약도 분석을 위해 요구되는 배관의 누수를 표현할 수 있는 정량적인 파괴기준으로써 사용될 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구의 결과는 제한된 하중과 시험체에 대한 결과이므로 다양한 조건에 대하여 추가적인 실험적 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B03031033).

References

- Bannon, H., Irvine, H. M., and Biggs, J. M. (1981), Seismic damage in reinforced concrete frames, *Journal of the Structural Division*, 107(9), 1713-1729.
- Cheng, Z. B., and Shi, Z. F. (2018), Composite periodic foundation and its application for seismic isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(4), 925-944.
- Choi, H. S., Cheung, J. H., Gae, M. S., Seo, Y. D., and Kim, M. K. (2013), Seismic capacity test of nuclear piping system using multi-platform shake table, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 17, 21-31.
- Firoozabad, E. S., Jeon, B. G., Choi, H. S., and Kim, N. S. (2015), Seismic fragility analysis of seismically isolated nuclear power plants piping system, *Nuclear Engineering and Design*, 284, 264-279.
- Geršak, J. (1989), Study of the yield point of the thread, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 10(3/4), 244-251.
- Jang, H. W., Hahm, D. G., Jung, J. W., and Hong, J. W. (2018), Effective numerical approach to assess low-cycle fatigue behavior of pipe elbows, *Nuclear Engineering and Technology*, 50(5), 758-766.
- 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, *Nuclear Engineering and Technology*, 49(1), 245-253.
- Kasahara, N., Nakamura, I., Machida, H., and Nakamura, H. (2014), Research plan on failure modes by extreme loadings under design extension conditions, *ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, Anaheim, California, USA*, PVP2014-28349.
- Kim, S. W., Choi, H. S., Jeon, B. G., and Hahm, D. G. (2019b),

- Low-cycle fatigue behaviors of the elbow in a nuclear power plant piping system using the moment and deformation angle, *Engineering Failure Analysis*, 96, 348-361.
10. Kim, S. W., Choi, H. S., Jeon, B. G., Hahm, D. G., and Kim, M. K. (2018), Strain and deformation angle for a steel pipe elbow using image measurement system under in-plane cyclic loading, *Nuclear Engineering and Technology*, 50(1), 190-202.
 11. Kim, S. W., Jeon, B. G., Cheung, J. H., and Kim, S. D. (2019c), Low-cycle Fatigue Behaviors of the Steel Pipe Tee of a Nuclear Power Plant Using Image Signals, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 77-83.
 12. Kim, S. W., Jeon, B. G., Hahm, D. G., and Kim, M. K. (2019a), Seismic fragility evaluation of the base-isolated nuclear power plant piping system using the failure criterion based on stress-strain, *Nuclear Engineering and Technology*, 51(2), 561-572.
 13. Kiran, A. R., Reddy, G. R., and Agrawal, M. K. (2018), Experimental and numerical studies of inelastic behavior of thin walled elbow and tee joint under seismic load, *Thin-Walled Structures*, 127, 700-709.
 14. Nakamura, I., Otani, A., and Shiratori, M. (2010), Comparison of failure modes of piping systems with wall thinning subjected to in-plane, out-of-plane, and mixed mode bending under seismic load: An experimental approach, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132, 031001.
 15. Ravi Kiran, A., Reddy, G. R., and Agrawal, M. K. (2019), Seismic fragility analysis of pressurized piping systems considering ratcheting: A case study, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 169, 26-36.
 16. Takahashi, K., Watanabe, S., Ando, K., Hidaka, A., Hisatsune, M., and Miyazaki, K. (2009), Low cycle fatigue behaviors of elbow pipe with local wall thinning, *Nuclear Engineering Design*, 239, 2719-2727.
 17. Urabe, Y., Takahashi, K., and Ando, K. (2012), Low cycle fatigue behavior and seismic assessment for elbow pipe having local wall thinning, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 134, 041801.
 18. Urabe, Y., Takahashi, K., Sato, K., and Ando, K. (2013), Low cycle fatigue behavior and seismic assessment for pipe bend having local wall thinning-influence of internal pressure, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 135, 2-6.
 19. Varelis, G. E., and Karamanos, S. A. (2015), Low-cycle fatigue of pressurized steel elbows under in-plane bending, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 137, 011401.
 20. Xu, Z. D., Ge, T., and Miao, A. (2019), Experimental and theoretical study on a novel multi-dimensional vibration isolation and mitigation device for large-scale pipeline structure, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 129, 546-567.
 21. Yu, C. C., Nolisetti, C., Coleman, J. L., Kosbab, B., and Whittaker, A. S. (2018), Using seismic isolation to reduce risk and capital cost of safety-related nuclear structures, *Nuclear Engineering and Design*, 7, 268-284.

Received : 05/08/2020

Revised : 06/15/2020

Accepted : 06/29/2020

요 지 : 원자력발전소의 확률론적 지진취약도 분석을 수행하기 위해서는 실제 중대 사고를 표현할 수 있는 파괴모드와 파괴기준의 정의가 중요하다. 그러나 배관시스템의 내진설계기준은 소성붕괴로서 실제 한계상태인 누수를 표현하지 못하므로 중대 사고를 충분히 반영하지 못하고 있다. 따라서 신뢰성 있는 확률론적 지진취약도 분석을 위해서는 한계상태를 명확히 정의할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 배관시스템의 취약부위인 SCH80 3인치 강제배관엘보의 한계상태를 누수로 정의하고 면내반복가력시험을 수행하였다. 또한 모멘트-변형각의 관계의 소산 에너지에 기반을 둔 손상도를 이용하여 강제배관엘보의 파괴기준을 정량화하고자 하였다.

핵심용어 : 손상도, 소산에너지, 모멘트-변형각, 강제배관엘보
