

강재 배관 Tee의 한계상태 평가를 위한 손상지수의 적용

김성완¹, 윤다운², 전법규³, 김성도^{4*}

Application of Damage Index for Limit State Evaluation of a Steel Pipe Tee

Sung-Wan Kim¹, Da-Woon Yun², Bub-Gyu Jeon³, Seong-Do Kim^{4*}

Abstract: Maintaining structural integrity of major apparatuses in a nuclear power plant, including piping system, is recognized as a critical safety issue. The integrity of piping system is also a critical matter related to the safety of a nuclear power plant. The actual failure mode of a piping system due to a seismic load is the leakage due to a fatigue crack, and the structural damage mechanism is the low-cycle fatigue due to large relative displacement that may cause plastic deformation. In this study, in-plane cyclic loading tests were conducted under various constant amplitudes using specimens composed of steel straight pipes and a steel pipe tee in the piping system of a nuclear power plant. The loading amplitude was increased to consider the relative displacement generated in the piping system under seismic loads, and the test was conducted until leakage, which is the limit state of the steel pipe tee, occurred due to fatigue cracks. The limit state of the steel pipe tee was expressed using a damage model based on the damage index that used the force-displacement relationship. As a result, it was confirmed that the limit state of the steel pipe tee can be quantitatively expressed using the damage index.

Keywords: Damage index, Damage model, Low-cycle fatigue, Steel pipe tee

1. 서 론

원자력발전소의 배관시스템은 원자로를 이용한 발전 및 이의 냉각을 위하여 복잡하게 구성되는 것이 일반적이다. 이러한 배관시스템은 원자력발전소가 운영되는 동안에 다양한 하중을 받으며 증기, 오일, 가스 등을 이동시키기 위한 용도로 활용되고 있다 (Surh et al., 2015). 원자력발전소의 배관시스템은 원자력발전소의 전체 설비에서 약 40%를 차지하고 있을 정도로 그 중요도가 크다 (Choi and Choi, 2004). 배관시스템의 손상은 원자력발전소의 가동 중지, 원자로 냉각 불능에 따른 폭발, 방사능 유출 등 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 원자력발전소의 배관시스템은 원자력발전소의 설비 중 중요한 구성요소로 분류되며 지진하중에 대한 안전성을 확보하여 사용하도록 하고 있다 (Bursi et al., 2015).

배관시스템은 다양한 규격의 요소를 포함하여 복잡하게 구성되므로 유한요소해석을 이용한 내진성능을 평가하기 위해

서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 대부분의 연구에서는 배관시스템의 지진하중에 취약한 요소에 대하여 실험을 수행하며 실험결과에 기초한 유한요소해석을 수행하여 배관시스템의 내진성능을 평가한다. 따라서 유한요소해석을 이용하여 신뢰성 있는 배관시스템의 내진성능을 평가하기 위해서는 요소 단위의 실험에서 다양한 조건들을 고려하는 것이 필요하다 (Varelis et al., 2013; Ravi Kiran et al., 2019).

배관시스템의 실제 파괴모드는 피로 균열에 의한 누수이며 지진하중으로 인한 구조적인 손상 메커니즘은 소성변형을 발생할 수 있는 큰 상대 변위로 인한 저주기 피로이다. 따라서 지진과 같은 강한 주기적 하중 조건에서 배관시스템의 손상은 누적된 손상으로 인해 발생하는 피로 균열에 의한 누수이다 (Nakamura and Kasahara, 2017). 그중에 피팅(Elbow, Tee)은 배관시스템의 진행하는 방향을 변경하기 위해 필수적으로 사용되는 요소이며 배관시스템에서 발생하는 주요한 변형 및 에너지를 흡수할 수 있는 중요한 요소이다. 피팅은 같은 재료와 단면을 적용한 직관에 비하여 휨강성이 작아 외부하중이 작용하면 상대적으로 변형이 크게 발생하므로 원자력발전소의 배관시스템에서 지진하중에 취약한 요소로 고려된다 (Takahashi et al., 2014; Kim et al., 2020). 따라서 배관시스템의 피팅에 대하여 저주기 피로 거동에 대한 파괴모드와 파괴 기준을 확인하기 위한 연구들이 수행되었다 (Hasegawa et al., 2008; Watakabe et al., 2016).

¹정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

²정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 전임연구원

³정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

⁴정회원, 경성대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: sdkim@ks.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2022년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 연구에서는 배관시스템의 확률론적 지진취약도 평가를 위해 필요한 강제 배관 Tee의 실제 파괴모드를 고려할 수 있는 한계상태를 손상지수에 기반을 둔 손상모델을 이용하여 정량적으로 표현하였다. 원자력발전소의 배관시스템에서 3인치의 강제 직관부와 3인치의 강제 배관 Tee로 구성된 Tee 시험체를 제작하여 변위 제어로 면내반복가력실험을 수행하였다. 실험은 지진하중으로 인한 저주기 피로를 고려하고 실제 파괴모드인 피로균열에 의한 누수가 발생할 때까지 다양한 크기의 일정한 진폭에 대하여 수행되었다. 따라서 실험으로 확인되는 강제 배관 Tee의 실제 파괴모드를 고려한 한계상태를 다양한 손상모델들을 이용하여 정량적으로 한계상태를 표현하였다. 실제 파괴모드를 고려한 한계상태는 실험에서 측정된 힘-변위(P-D)의 관계에 대하여 다양한 손상모델들을 이용하여 표현하고 그 차이를 분석하였으며, 강제 배관 Tee에 적합한 손상모델을 확인하였다.

2. 손상모델

원자력발전소는 지진하중에 대한 안전성을 확인하기 위하여 확률론적 지진취약도 평가가 수행된다 (Wang et al., 2018). 원자력발전소에 설치된 구조물의 취약한 요소를 선정하고 한계상태를 표현할 수 있는 파괴모드와 파괴기준을 명확히 정의하는 것이 중요하다 (Ma et al., 2020). 원자력발전소 배관시스템의 내진설계기준은 소성 붕괴이며 실제 파괴모드를 고려한 한계상태인 피로균열에 의한 누수와 차이가 크다. 따라서 지진취약도 평가의 신뢰성을 확보하기 위하여는 실제 파괴모드를 고려할 수 있는 한계상태를 명확히 정의할 필요가 있다 (Koo et al., 2021).

원자력발전소 배관시스템의 지진하중에 대한 구조적인 반응은 소성 영역에서 큰 변형과 함께 적은 수의 사이클이 특징이다 (Udagawa et al., 2018; Harun et al., 2020). 이 연구에서는 배관시스템의 국부적인 영향보다 구조 요소의 글로벌 거동에 대하여 평가하였다. 따라서 구성요소의 저주기 피로를 평가하기 위하여 강성, 강도, 에너지 소산 등이 전체 구조적 거동에 미치는 영향을 고려하였다. 이러한 목적으로 응력 및 변형률과 같은 국부적인 매개변수 대신 일반화된 힘과 변위를 한계상태 평가를 위한 매개변수로 선택하였다.

손상지수에 기반을 둔 손상모델은 구조물에 작용하는 외력에 대하여 구조물의 손상된 정도를 수치적으로 표현하여 전체 구조물의 성능 특성을 나타내는 방법이다 (Castiglioni and Pucinotti, 2009; Kim et al., 2021). 따라서 배관시스템의 확률론적 지진취약도 평가를 수행하기 위하여 적절한 손상의 정량화가 필요하며 손상모델을 이용하여 산정된 손상지수는 배관시스템의 외력에 의한 손상을 수치적으로 정량화하여 표현

하는 방법이다.

이 연구에서는 배관시스템에서 실제 파괴모드인 피로 균열에 의한 누수가 발생한 한계상태를 손상지수에 기반을 둔 손상모델들을 이용하여 정량적으로 표현하였다. 손상모델들은 연성, 에너지 소산 및 연성과 에너지 소산의 조합을 모두 고려하였으며 여섯 가지의 손상모델들을 이용하여 손상지수를 산정하였다.

2.1 누적소성변형지수

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i}{D_y} - 1 \right)^a \quad (1)$$

누적소성변형지수(Cumulative plastic deformation index)는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 다양한 사이클의 소성변형에 대한 가중치를 고려할 수 있다 (Krawinkler, 1987). 누적된 변위를 지수함수를 이용하여 표현한 손상모델이며 Eq. (1)에서 i 번째 사이클에서 가력된 변위(D_i)와 항복변위 사이(D_y)의 비로 정의된다. Eq. (1)에서 상수 a 는 철근 콘크리트 구조물과 강구조물의 다양한 실험들을 이용하여 결정되었으며 범위는 1.6 ~ 1.8 사이이다. 이 연구에서는 Tee 시험체가 강구조물이므로 선행연구들을 참조하여 a 는 1.6을 사용하였다 (Krawinkler, 1987).

2.2 누적일지수

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i}{D_y} - 1 \right) \frac{F_i}{F_y} \quad (2)$$

누적일지수(Cumulative work index)는 구조물의 소성변형(D_i/D_y)과 지지력(F_i)을 결합하였으며 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Gosain et al., 1977). Eq. (2)에서 첫 번째 항은 누적소성변형지수와 유사하며 두 번째 항은 i 번째 사이클에서의 지지력과 항복력(F_y)의 비로 정의된다. 누적일지수는 포락 곡선으로부터의 변위와 힘만을 고려하기 때문에 소산되는 에너지를 직접적으로 나타내지 않는다. 그러나 포락곡선이 소산 에너지 및 손상과 관련된 강성의 저하를 나타내므로 누적일지수는 에너지를 간접적으로 나타낼 수 있음을 의미한다.

2.3 에너지소산지수

$$D_{ce} = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{F_y \cdot D_y} \quad (3)$$

지진과 같은 반복적인 하중을 받는 구조물의 성능에서 가장 중요한 측면 중 하나는 에너지를 적절하게 분산시키는 구조물의 능력이다. 에너지소산지수(Energy dissipation index)

는 각 구조물은 주어진 양의 소성 에너지를 소산할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 그러한 양의 에너지가 소산할 때 파괴가 발생하는 것을 의미한다. 에너지소산지수는 누적된 손상을 정량화하여 표현할 수 있으며 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Darwin and Nmai, 1986). Eq. (3)에서 E_i 는 i 번째 사이클에서의 에너지, F_y 는 항복력, D_y 는 항복변위이다.

2.4 누적에너지감소지수

$$D = \sum_{i=1}^N 2 \frac{\eta_{i-1} - \eta_i}{\eta_0}, \quad \Delta D / D_y > 1.15 \quad (4)$$

누적에너지감소지수(Cumulative energy reduction index)는 외력에 의한 구조물의 응답과 관련된 매개변수로 에너지 소산 능력을 기반으로 한다. 에너지 흡수 능력의 감소에 기반을 둔 손상지수이며 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다 (Castiglioni, 1999). 누적에너지감소지수는 에너지 흡수 능력이 특정 수준 아래로 떨어질 때 파괴가 발생하는 것을 의미한다. Eq. (4)는 변위진폭(ΔD)과 한 사이클에 대한 항복변위(D_y)의 비가 1.15 이상일 때 사용할 수 있다. Eq. (4)에서 η_i 는 탄소성 거동을 갖는 경우 전체 사이클에서 흡수된 에너지에 대한 i 차 사이클에서의 에너지에 대한 비율을 나타낸다. η_0 는 전체 사이클에서의 에너지에 대한 첫 번째 소성이 발생하는 사이클에서의 에너지에 대한 비율을 나타낸다.

2.5 Park and Ang 지수

$$D = \max\left(\frac{D_i}{D_y}\right) + b \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i}{F_y D_y}\right) \quad (5)$$

Park and Ang 지수는 최대 변형 및 누적된 에너지 소산에 대하여 선형적인 조합에 기반을 둔 이중 매개변수를 고려하였으며 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다 (Park and Ang, 1985; Park et al., 1987). Eq. (5)에서 첫 번째 항은 연성 기반의 지수이고 두 번째 항은 구조물의 항복력과 항복변위에 의해 정규화된 에너지 소산을 나타내는 지수이다. 여기서 E_i 는 i 번째 사이클에서의 소산되는 에너지, D_i 는 i 번째 사이클의 변위진폭, F_y 는 항복력, D_y 는 항복변위이다. b 는 에너지 기반의 강도 감소 계수이며 구조물의 특성에 따라 달라지는 음이 아닌 무차원 상수이다. 강구조물에 대해서는 상수 b 의 값으로 0.025를 사용할 수 있다.

구조물의 실제 손상된 상태를 나타내는 효과, 콘크리트 구조물, 강구조물 및 목재 구조물 등에 폭넓게 적용되었으며 Park and Ang 지수가 구조물의 손상을 표현하는 지수로써 가장 선호되고 있다.

2.6 Banon 지수

$$D = \sqrt{\left(\max\left(\frac{D_i}{D_y} - 1\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N c \left(2 \frac{E_i}{F_y D_y}\right)^d\right)^2} \quad (6)$$

Banon 지수는 최대 변형 및 누적된 에너지 소산에 대하여 Park and Ang 지수와 다르게 고려하였다. Banon 지수는 연성과 누적된 에너지 소산을 비선형 조합에 기반을 두고 있다 (Banon et al., 1981; Banon and Veneziano, 1982). Banon 지수는 Park and Ang 지수와 같이 첫 번째 항은 누적된 손상을 고려하지 않는 변위 기준이고 두 번째 항은 누적된 손상을 고려한 흡수된 에너지를 나타내었다. 이러한 방식으로 이 지수들은 반복하중으로 인한 피로에 의한 손상과 동시에 최대 변형의 영향을 고려할 수 있다. Eq. (6)의 c 와 d 는 구조적인 특성에 따라 음이 아닌 상수이며 각각 1.1과 0.38로 제시되었다.

3. 실험방법

이 연구에서는 원자력발전소의 배관에서 널리 사용되는 재료의 Tee 시험체를 제작하였으며 Fig. 1에 나타내었다. Tee 시험체는 3개의 ASME B36.10 SA106 Grade B SCH 40 3인치 직관과 1개의 A234 Gr. WPB SCH 40 3인치 Tee가 용접으로 연결되어 중앙의 Tee에서 소성변형이 집중될 수 있도록 구성하였다. 배관의 외경은 88.9mm이며 두께는 5.5mm이며 외경의 약 4.3배 길이의 직관부 3개가 Tee와 용접으로 접합된다. 수직방향 직관부의 끝은 UTM(universal testing machine)에 고정될 수 있도록 길이 150mm, 두께 25mm의 강판으로 구성하였다.

수평방향의 직관부의 끝은 힌지 지점을 구현하기 위하여, $\Phi 30$ 홀이 있는 25mm 두께의 강재를 용접하여 지그와 핀으로 연결할 수 있도록 하였다. Tee 시험체에서 수직방향 배관의 끝에는 내부에 물을 채우고 내압을 가압하기 위하여 양쪽으

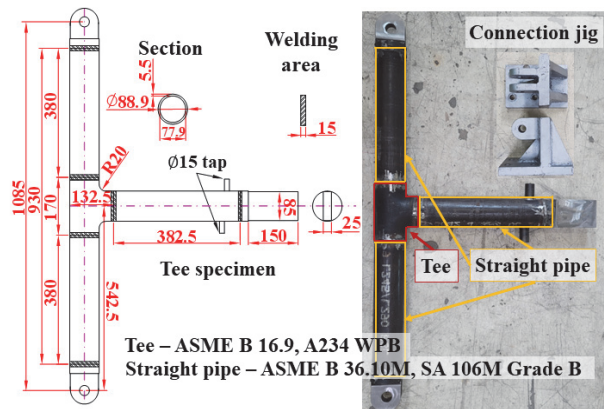


Fig. 1 Manufactured tee specimen

로 $\Phi 15$ 의 연결부(coupling tap)가 가공되었다. 이 연결부는 서로 다른 높이에 위치하여 물을 주입하기 용이하도록 구성하였다. 내부에 압력을 가압하기 위하여 하나의 연결부는 공기 펌프와 연결되며 반대편은 밸브를 이용하여 밀폐하게 된다.

면내반복가력실험은 250 kN 용량의 UTM을 이용하여 수행되었으며 최대 스트로크는 250mm이다. UTM의 하부에는 T-nut를 이용하여 상부 구조물을 고정할 수 있도록 홈이 있는 정반으로 구성되어 있다. Fig. 2는 UTM에 설치된 Tee 시험체를 나타내었다. Tee 시험체의 상부는 Fig. 2와 같이 UTM에 고정되며 양 끝은 지그와 핀으로 연결된다. 연결지그는 UTM의 정반에 4개의 M20 볼트로 고정된 3축 로드셀 (Dacell, 3축, 200 kN)과 4개의 M20 볼트를 이용하여 연결하게 된다. Tee 시험체는 총 15개를 제작하였으며, 제작에 사용된 모든 재료 및 제작 공정은 우리나라의 원자력발전소에 납품 규격에 맞도록 구매 및 제작하였다. 특히 Tee와 직관부의 용접을 이용한 연결은 국제인증 및 원자력발전소에 납품 자격을 보유하고 있는 용접사에 의해 정밀하게 처리함으로써 실험의 신뢰성을 확보하도록 하였다.

모든 실험은 변위제어에 의한 정현파 가력으로 수행하였으며 입력 하중은 일정한 진폭의 변위가 적용되었다. Tee 시험체의 지지부에서 모멘트와 비틀림 발생 등을 방지하고 Tee에서 비선형 거동이 집중될 수 있도록 면내방향에 대해 실험을 수행하였다. 면내반복가력실험은 실제 파괴모드를 고려하기 위하여 Tee 시험체에서 피로균열에 의한 누수가 발생할 때까지 수행되었다. 피로균열에 의한 누수를 확인하기 위하여 Tee 시험체의 내부에 물을 채우고 공기펌프를 이용하여 3MPa의 내부 압력을 가압하였으며, 내부 압력은 실험이 진행되는 동안 유지하였다. 하중진폭은 ASME에서 제시된 붕괴하중지점을 초과하여 Tee에서 충분한 소성거동이 발생할 수 있도록 ± 20 mm 이상으로 고려되었다 (ASME, 2004). 면내반복가력 실험은 ± 20 mm, ± 40 mm, ± 60 mm, ± 80 mm 및 ± 100 mm의 하중진폭마다 3개의 Tee 시험체에 대하여 수행되었다.

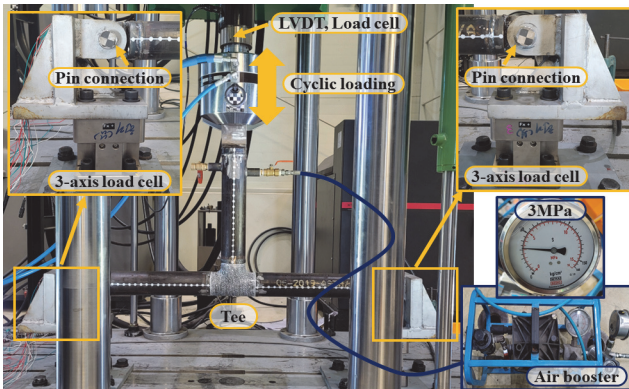


Fig. 2 Experimental setup

4. 실험결과

4.1 파괴모드

Table 1은 일정한 사이클의 하중진폭에 대하여 총 15개의 Tee 시험체의 강제 배관 Tee에서 누수가 발생하였을 때의 저주기 피로 수명과 평균 피로수명을 나타내었다. N_f (number of cycles to failure)는 피로균열에 의한 누수가 발생할 때까지의 사이클 수이다. 40mm 이상의 큰 하중진폭에서 피로균열이 발생할 때까지의 사이클의 수가 30회 이하이며, 큰 하중진폭에서는 한 사이클에 대한 소산에너지는 상당히 큰 비중을 차지하게 된다. ± 80 mm의 경우 N_f 가 발생하였을 때의 한 사이클은 전체 사이클의 약 14% 이상을 차지하므로 이 연구에서는 한 사이클에 대하여 4등분 하여 나타내었다. 각각의 하중진폭은 ± 20 mm부터 ± 100 mm까지 수행되었으며 피로 균열은 5.25 ~ 98.25 사이클 사이로 나타났다. 가장 작은 하중진폭인 ± 20 mm인 경우의 평균 N_f 는 89.33 사이클이며, 가장 큰 하중진폭인 ± 100 mm인 경우의 평균 N_f 는 5.33 사이클로 나타났다.

면내반복가력실험에서 강제 배관 Tee의 파괴모드는 피로 균열에 의한 누수이다. Fig. 3은 누수가 발생한 ± 60 mm 및 ± 100 mm의 하중진폭에 대한 대표적인 Tee 시험체를 나타내었다. 모든 Tee 시험체에서 피로 균열은 Tee에서 횡방향의 중립축과 수직방향의 중립축이 만나는 위치의 상부에서 피로균열에 의한 누수가 발생되었다. 피로균열은 수직 방향의 중립축에 따라 길이 방향으로 진전하였으며 피로균열은 모든 Tee 시험체에서 매우 유사하게 나타났다.

Table 1 Low cycle fatigue life

Loading amplitude (mm)	Number of tee specimen (ea)	N_f		
		Each	Average	Standard deviation
± 20	3	81.5, 88.25, 98.25	89.33	6.88
± 40	3	19.50, 20.75, 26.00	22.08	2.82
± 60	3	10.25, 11.00, 12.75	11.33	1.05
± 80	3	6.00, 7.50, 7.50	7.00	0.71
± 100	3	5.25, 5.25, 5.50	5.33	0.12

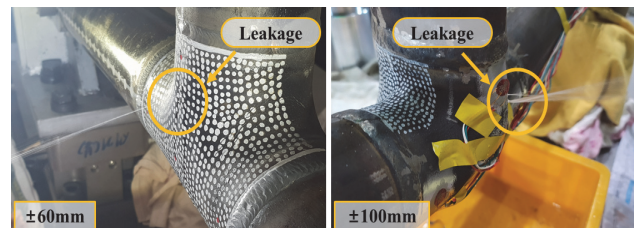


Fig. 3 Tee specimen with fatigue crack

4.2 에너지

Fig. 4는 각각의 하중진폭에서 측정된 힘 범위와 변위 범위의 관계를 나타내었으며 최소자승법으로 산정한 평균 회귀곡선식은 Eq. (7)과 같다. Eq. (7)에서 결정계수(R^2)는 0.93 이상으로 힘 범위와 변위 범위의 관계는 선형적으로 나타났다.

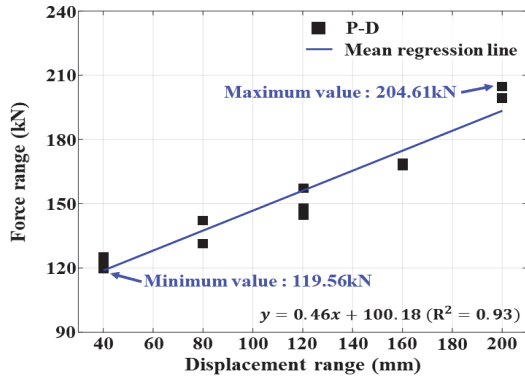
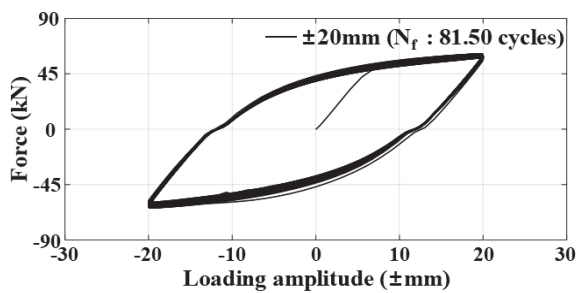


Fig. 4 Relationship between force range and displacement range

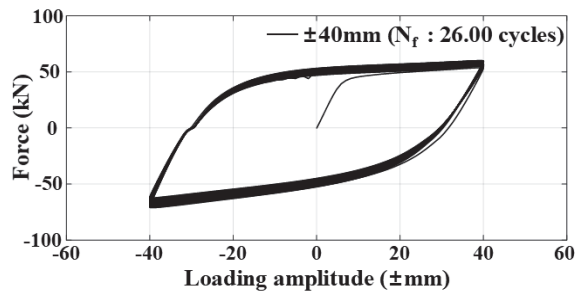
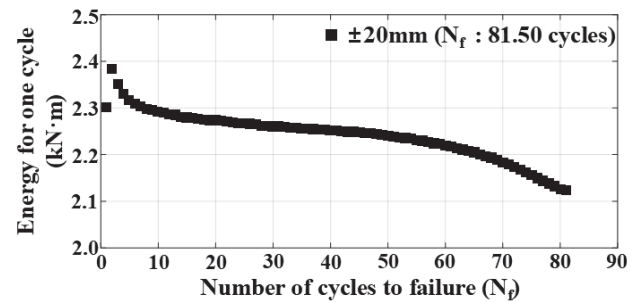
Fig. 4에서 변위의 범위는 40mm~200mm이며 이에 대응하여 힘의 범위는 68.91 kN~140.64 kN로 나타났다.

$$P(kN) = 0.46D(mm) + 100.18, \quad R^2 = 0.96 \quad (7)$$

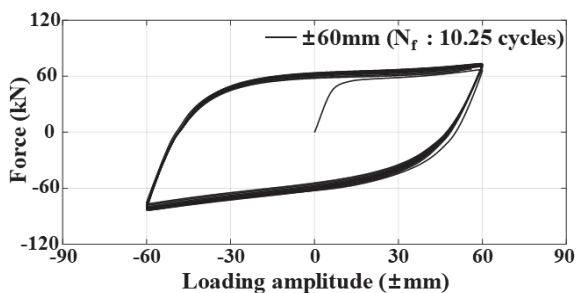
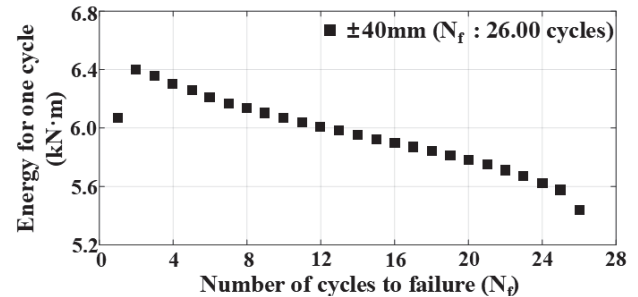
Fig. 5는 각각의 하중진폭에서 대표적인 Tee 시험체의 P-D 관계에 대한 이력곡선과 한 사이클에 대한 에너지를 나타내었다. 반복적인 하중으로 인한 Tee 시험체의 거동은 이력곡선의 형태로 나타낼 수 있으며 이력곡선의 높이는 힘이며 폭은 변위이다. 그리고 각각의 이력곡선의 면적은 사이클 동안 사용된 에너지로 Tee 시험체가 받는 소성변형의 정도를 나타낸다. 따라서 이력곡선의 면적은 Tee 시험체가 외력으로 인한 소성변형으로 소실되는 에너지이며 하중진폭의 크기가 증가할수록 한 사이클에서 소산되는 에너지도 증가함을 확인할 수 있었다. 모든 Tee 시험체는 일반적으로 주어진 변위 수준에서 두 번째 사이클 후에 Tee 시험체의 강도와 강성의 저하가 나타났다. 또한 하중진폭의 반복가력 횟수가 증가할수록 최대하중이 감소



(a) ±20mm loading amplitude



(b) ±40mm loading amplitude



(c) ±60mm loading amplitude

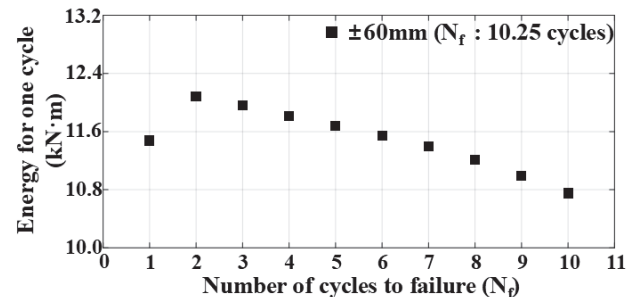
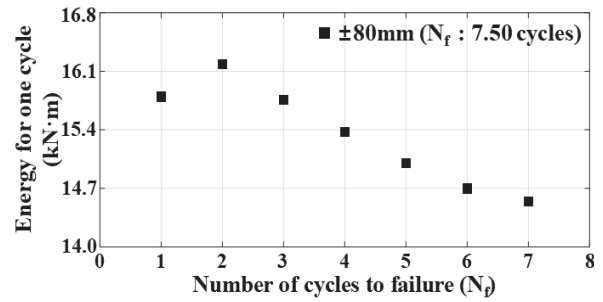
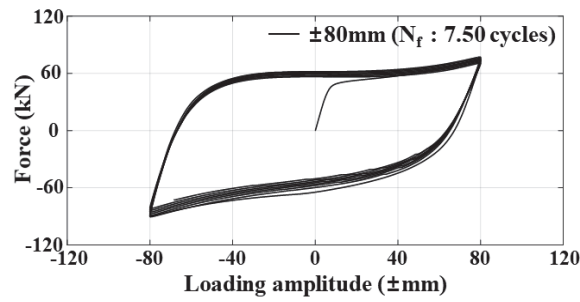
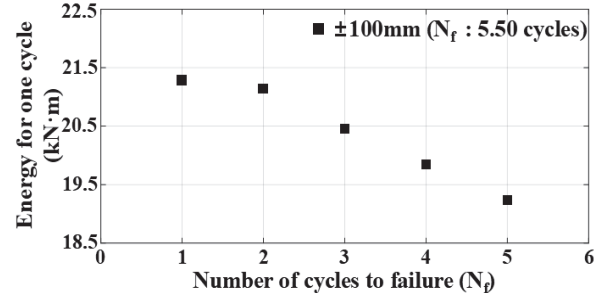
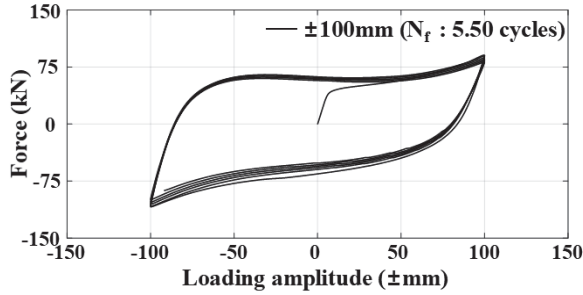


Fig. 5 Hysteresis loop and energy for one cycle



(d) ±80mm loading amplitude



(e) ±100mm loading amplitude

Fig. 5 (Continued)

함을 확인할 수 있었다. 하중진폭이 ±80mm에서는 첫 번째 사이클과 두 번째 사이클에 대한 에너지가 유사함을 확인할 수 있었으며, ±100mm인 변위 수준에서는 첫 번째 사이클 후에 Tee 시험체의 강도와 강성의 저하가 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 ±80mm 이상인 하중진폭부터는 첫 번째 사이클에서부터 소성변형이 집중됨을 확인할 수 있었다.

4.3 손상모델을 이용하여 산정된 손상지수

이 연구에서는 Tee 시험체의 실제 파괴모드인 피로균열에 의한 누수가 발생한 한계상태를 손상지수에 기반을 둔 손상 모델들을 이용하여 정량적으로 표현하였다. 여섯 가지의 손상 모델들은 단순성을 기반으로 선택되었으며 연성, 에너지 소산 및 연성과 에너지 소산에 대한 조합을 모두 고려하였다.

손상모델들을 이용한 손상지수들을 산정하기 위해서는 한계하중인 항복변위와 항복력에 대한 정의가 필요하다. ASME Boiler & Pressure Vessel Code에서는 배관 및 압력용기의 최대하중은 붕괴하중으로 나타낸다(ASME, 2004). 붕괴하중은 Fig. 6과 같이 배관 및 압력용기에서 측정된 P-D 곡선의 탄성 구간에서 최소자승법을 이용하여 회귀선을 그리고 이때의 기울기를 θ 라 한다. Eq. (8)과 같이 두 배의 기울기인 ϕ 를 가지는 붕괴한계선을 그리고 이 선 이상을 가지는 첫 번째 데이터를 붕괴하중점으로 정의한다. 이 연구에서는 붕괴하중점을 손상지수를 산정하는 데 필요한 항복점으로 정의하였다.

$$\phi = \tan^{-1}(2 \tan \theta) \quad (8)$$

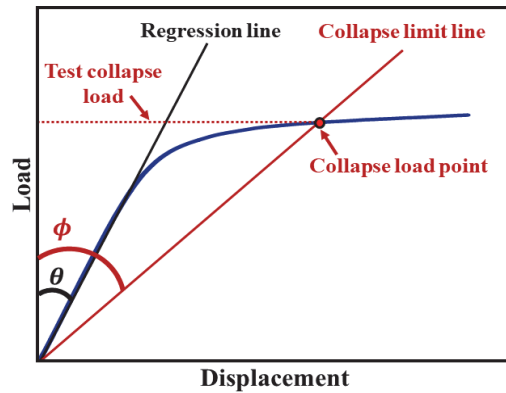


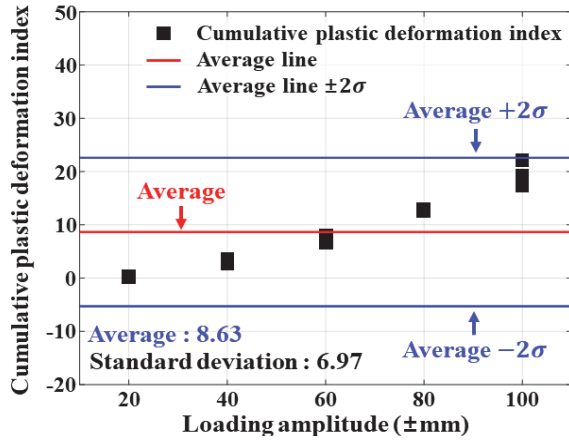
Fig. 6 Collapse load point

Fig. 7은 각각의 하중진폭에 대한 P-D 관계를 이용하여 산정된 손상지수들을 나타내었다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 누적 소성변형지수와 누적일지수이며 누적된 연성을 표현하는 손상지수이다. Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)는 에너지소산지수와 누적에너지감소지수이며 누적된 에너지 소산을 표현하는 손상지수이다.

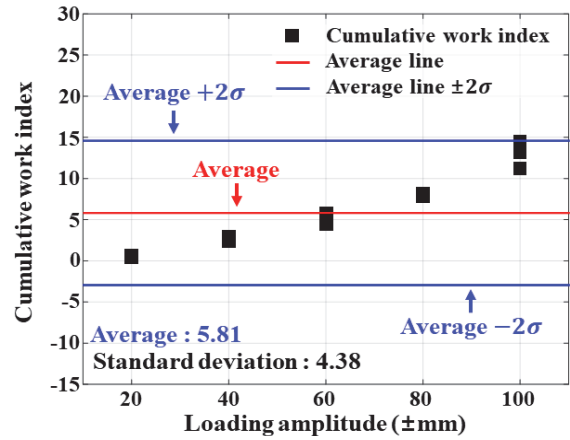
Fig. 7(e)와 Fig. 7(f)는 Park and Ang 지수와 Banon 지수이며 연성과 누적된 에너지 소산의 조합을 표현하는 손상지수이다. Fig. 7에서 각각의 하중진폭에서 대부분의 손상지수들은 평균 선도의 $\pm 2\sigma$ (표준편차) 사이에 위치함을 확인할 수 있었다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 하중진폭이 증가할수록 누적된 연성을 표현하는 손상지수들은 증가함을 확인할 수 있었다. 누적된 연성을 표현하는 손상모델의 차이는 함수의 형태이므

로 결과적으로 두 손상지수들의 경향은 유사하게 나타났다. Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)는 하중진폭이 증가할수록 손상지수는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. Fig. 7(e)와 Fig. 7(f)는 연성과 누적된 에너지 소산의 조합을 고려한 손상지수를 나타내었으며 손상지수가 다른 손상지수보다 균등하게 분포함을 확

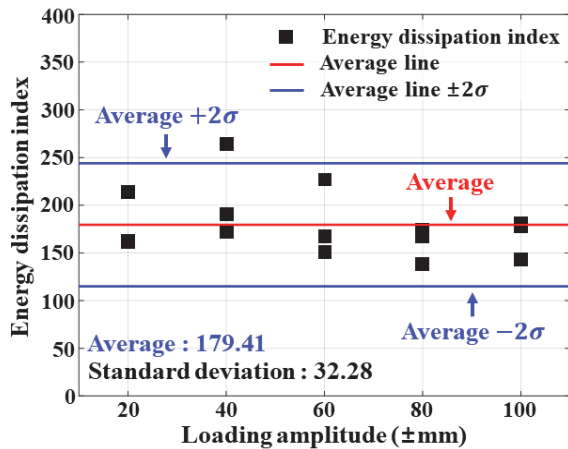
인할 수 있었다. Park and Ang 지수 및 Banon 지수는 손상을 표현하는 매개변수는 기본적으로 일치하나 조합 형태와 매개변수의 가중치가 다르므로 두 손상모델에 대한 손상지수의 차이를 확인할 수 있었다. Table 2에서 P-D 관계를 이용하여 산정된 손상지수에 대한 평균값, 최댓값, 최솟값 및 표준편차



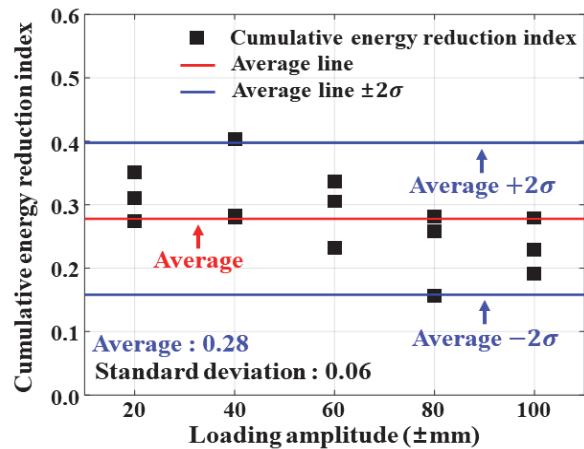
(a) Cumulative plastic deformation index



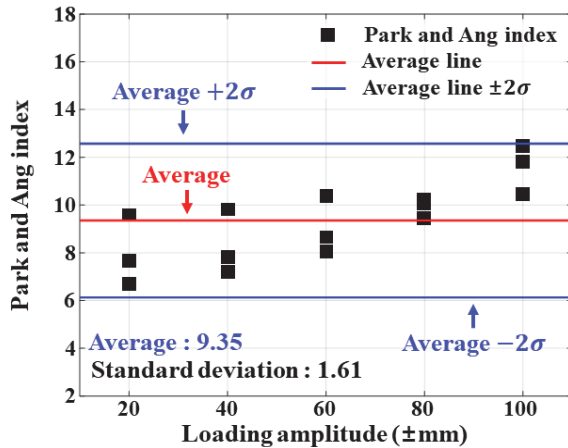
(b) Cumulative work index



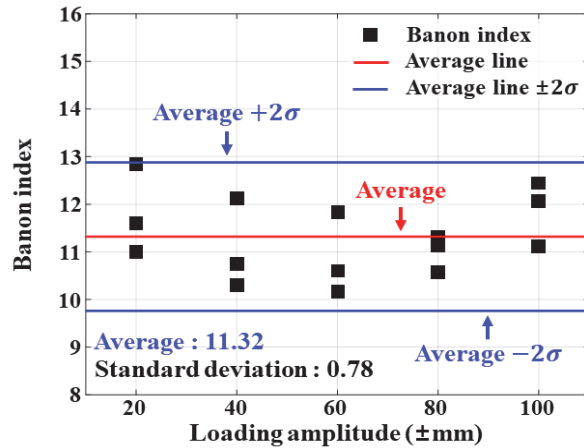
(c) Energy dissipation index



(d) Cumulative energy reduction index



(e) Park and Ang index



(f) Banon index

Fig. 7 Damage index calculated using damage model

를 나타내었다. Table 2에서 Park and Ang 지수 및 Banon 지수를 제외한 나머지 손상지수들의 표준편차는 평균값과 비교하여 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

지진과 같은 반복하중을 받는 구조물은 붕괴에 저항하면서 구조물에 제어된 손상이 발생하도록 허용한다. 이는 구조물의 해석 및 설계 과정에서 적절한 손상의 정량화가 필요하며 손상지수는 구조물의 외력에 의한 손상을 수치적으로 정량화하는 데 필요하다. 손상지수의 정규화된 값은 0(손상되지 않은 구조물의 경우)에서 1(완전히 손상되거나 붕괴된 구조물의 경우) 사이의 범위로 의도된 무차원 매개변수이며 중간값을 이용하여 부분적인 손상 정도를 측정할 수 있다.

Fig. 8과 Table 3은 각각의 하중진폭에서의 평균 손상지수를 최대 손상지수로 정규화한 손상지수를 나타내었다. 이 연구에서는 Tee 시험체의 실제 파괴모드는 피로균열에 의한 누수이므로 누수가 발생한 한계상태에 대한 손상지수는 모든 하중진폭에서 유사하게 나타나야 한다. 따라서 Tee 시험체의

한계상태에 대한 손상지수의 정규화된 값은 1과 가깝게 분포하여야 한다. Fig. 8과 Table 3에서 Banon 지수를 제외한 나머지 손상지수들은 하중진폭이 증가할수록 손상지수들이 증가하거나 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 연성과 누

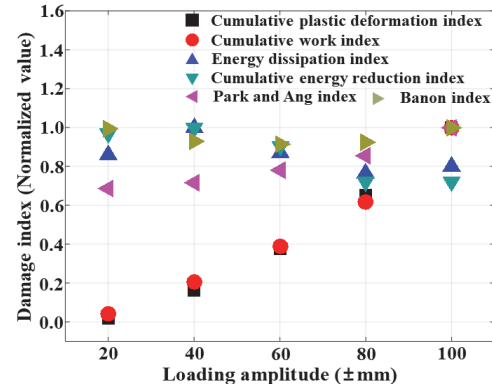


Fig. 8 Damage index normalized to maximum value

Table 2 Statistical information of damage index

Statistics	Damage index					
	Cumulative plastic deformation index	Cumulative work index	Energy dissipation index	Cumulative energy reduction index	Park and Ang index	Banon index
Average	6.22	5.13	121.45	0.28	6.83	9.37
Maximum	18.63	14.40	240.62	0.54	9.83	11.50
Minimum	0.05	0.16	68.68	0.05	5.38	7.89
Standard deviation	5.46	4.20	47.39	0.12	1.17	0.94

Table 3 Normalized value of calculated damage index

Loading amplitude (mm)	Damage index (Normalized value)					
	Cumulative plastic deformation index	Cumulative work index	Energy dissipation index	Cumulative energy reduction index	Park and Ang index	Banon index
±20	0.02	0.04	0.86	0.97	0.69	0.99
±40	0.16	0.20	1.00	1.00	0.71	0.93
±60	0.37	0.39	0.87	0.90	0.78	0.91
±80	0.65	0.62	0.76	0.72	0.86	0.93
±100	1.00	1.00	0.80	0.72	1.00	1.00

Table 4 Statistical information of normalized damage index

Statistics	Damage index (Normalized value)					
	Cumulative plastic deformation index	Cumulative work index	Energy dissipation index	Cumulative energy reduction index	Park and Ang index	Banon index
Average	0.44	0.45	0.86	0.86	0.81	0.95
Maximum	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Minimum	0.02	0.04	0.76	0.72	0.69	0.91
Standard deviation	0.35	0.34	0.08	0.12	0.11	0.04

적된 에너지 소산을 비선형으로 조합한 Banon 지수의 손상모델이 다른 손상모델들보다 누수가 발생한 한계상태를 잘 표현함을 확인할 수 있었다. Table 4에서 손상지수의 정규화된 값의 통계 정보를 나타내었으며 Banon 지수에 대한 표준편차는 0.04로 평균값에 가깝게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 Tee 시험체의 실제 파괴모드인 누수가 발생한 한계상태에 대한 손상지수를 나타내므로 각각의 하중진폭에 대한 손상지수가 평균값에 가깝게 분포하고 있는 Banon 지수를 사용하는 것이 타당할 것으로 나타났다. 따라서 각각의 하중진폭에 대하여 산정된 Banon 지수의 평균값은 피로균열에 의한 누수를 표현할 수 있는 한계상태에 대한 대푯값으로 사용할 수 있을 것으로 나타났다.

5. 결 론

원자력발전소 배관시스템의 확률론적 지진취약도 평가를 수행하기 위해서는 실제 중대 사고를 표현할 수 있는 파괴모드와 파괴기준의 정의가 매우 중요하다. 이 연구에서는 원자력발전소 배관시스템에서 지진하중에 취약한 요소인 강제 배관 Tee의 실제 파괴모드를 고려한 한계상태를 손상모델을 이용하여 정량적으로 표현하였다.

지진과 같은 반복하중으로 인한 Tee 시험체의 실제 파괴모드를 고려한 한계상태인 피로균열로 인한 누수가 발생할 때까지 면내반복가력실험을 수행하였다. Tee 시험체는 3인치의 규격을 가지고 있으며 1개의 Tee와 3개의 직관부로 구성되었다. 일정한 변위진폭은 ASME에서 제시된 붕괴하중점을 고려하기 위하여 $\pm 20\text{mm} \sim \pm 100\text{mm}$ 까지 $\pm 20\text{mm}$ 간격으로 수행하였다. 모든 시험체에서 피로균열로 인한 누수는 Tee의 상부 중립축에서 발생하였으며, 모든 하중진폭에서 피로균열이 발생한 위치는 유사하게 나타났다.

이 연구에서는 Tee 시험체의 실제 파괴모드인 피로균열에 의한 누수가 발생한 한계상태를 손상지수에 기반을 둔 손상모델을 이용하여 정량적으로 표현하였다. 손상모델은 연성, 에너지 소산 및 연성과 에너지 소산의 조합을 고려하기 위하여 선택하였다. Tee 시험체의 실제 파괴모드는 피로균열에 의한 누수이므로 누수에 대한 손상지수는 모든 하중진폭에 대하여 유사하게 나타나야 한다. Banon 지수를 제외한 나머지 손상지수들은 평균값과 비교하여 표준편차가 크게 나타났다. 따라서 연성과 누적된 에너지 소산을 비선형으로 조합한 Banon 지수의 손상모델이 다른 손상모델들보다 실제 파괴모드인 누수가 발생한 한계상태를 잘 표현함을 확인할 수 있었다.

이 연구에서 제시된 손상지수를 산정하는 방법은 원자력발전소 배관시스템의 실제 파괴모드인 피로 균열로 인한 누수를 표현할 수 있는 정량적인 한계상태를 표현하는데 사용할

수 있을 것으로 나타났다. 힘과 변위의 관계를 이용하여 산정된 손상지수의 평균값은 강제 배관 Tee의 한계상태인 누수를 표현할 수 있는 대푯값으로 사용될 수 있을 것이다. 또한 손상지수의 표준편차는 확률론적 지진취약도 평가를 수행할 때 불확실성을 표현하는 데이터로 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C1013782).

References

1. Surh, H. B., Ryu, T. Y., Park, J. S., Ahn, E. W., Choi, C. S., Koo, J. C., Choi, J. B. and Kim, M. K. (2015), Seismic response analysis of a piping system subjected to multiple support excitations in a base isolated NPP building, *Nuclear Engineering and Design*, 292, 283-295.
2. Choi, S. Y. and Choi, Y. H. (2004), Piping failure frequency analysis for the main feedwater system in domestic nuclear power plants, *Journal of the Korean Nuclear Society*, 36(1), 112-120.
3. Bursi, O. S., Reza, M. S., Abbiati, G. and Paolacci, F. (2015), Performance-based earthquake evaluation of a full-scale petrochemical piping system, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 10-22.
4. Varelis, G. E., Karamanos, S. A. and Gresnigt, A. M. (2013), Pipe elbows under strong cyclic loading, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 135(1), 011207.
5. Ravi Kiran, A., Reddy, G. R., Agrawal, M. K., Raj, M. and Sajish, S. D. (2019), Ratcheting based seismic performance assessment of a pressurized piping system: Experiments and analysis, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 177, 103995.
6. Nakamura, I. and Kasahara, N. (2017), Excitation tests on elbow pipe specimens to investigate failure behavior under excessive seismic loads, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 139(6), 061802.
7. Takahashi, K., Ando, K., Matsuo, K. and Urabe, Y. (2014), Estimation of low-cycle fatigue life of elbow pipes considering the multi-axial stress effect, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 136(4), 041405.
8. Kim, S. W., Jeon, B. G., Hahm, D. G. and Kim, M. K. (2020), Ratcheting fatigue failure of a carbon steel pipe tee in a nuclear power plant using the deformation angle, *Engineering Failure Analysis*, 114, 104595.
9. Hasegawa, K., Miyazaki, K. and Nakamura, I. (2008), Failure mode and failure strengths for wall thinning straight pipes and elbows subjected to seismic loading, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 130(1), 011404.
10. Watakabe, T., Tsukimori, K., Kitamura, S. and Morishita, M. (2016), Ultimate strength of a thin wall elbow for sodium cooled fast reactors under seismic loads, *Journal of Pressure Vessel*

Technology, 138(2), 021801.

11. Wang, Z., Pedroni, N., Zentner, I. and Zio, E. (2018), Seismic fragility analysis with artificial neural networks: Application to nuclear power plant equipment, *Engineering Structures*, 162, 213-225.
12. Ma, Q., Kwon, O. S., Kwon, T. H. and Choun, Y. S. (2020), Influence of frequency content of ground motions on seismic fragility of equipment in nuclear power plant, *Engineering Structures*, 224, 111220.
13. Koo, G. H., Kwag, S. Y. and Nam, H. S. (2021), Study on inelastic strain-based seismic fragility analysis for nuclear metal components, *Energies*, 14(11), 3269.
14. Udagawa, M., Li, Y., Nishida, A. and Nakamura, I. (2018), Failure behavior analyses of piping system under dynamic seismic loading, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 167, 2-10.
15. Harun, M. F., Mohammad, R. and Kotousov, A. (2020), Low cycle fatigue behavior of elbows with local wall thinning, *Metals*, 10(2), 260.
16. Castiglioni, C. A. and Pucinotti, R. (2009), Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 751-765.
17. Kim, S. W., Yun, D. W., Jeon, B. G. and Kim, S. D. (2021), Damage Index Evaluation Based on Dissipated Energy of SCH 40 3-Inch Carbon Steel Pipe Elbows Under Cyclic Loading, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(1), 112-119.
18. Krawinkler, H. (1987), Performance assessment of steel components, *Earthquake spectra*, 3(1), 27-41.
19. Gosain, N. K., Brown, R. H. and Jirsa, J. O. (1977), Shear requirements for load reversals on RC members, *Journal of the Structural Division*, 103(7), 1461-1476.
20. Darwin, D. and Nmai, C. K. (1986), Energy dissipation in RC beams under cyclic load, *Journal of Structural Engineering*, 112(8), 1829-1846.
21. Castiglioni, C. A. (1999), Failure criteria and cumulative damage models for steel components under low-cycle fatigue, *In Proceedings of 17th California Teachers Association Conference*, Napoli.
22. Park, Y. J. and Ang, A. H. S. (1985), Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722-739.
23. Park, Y. J., Ang, A. H. S. and Wen, Y. K. (1987), Damage-limiting aseismic design of buildings, *Earthquake Spectra*, 3(1), 1-26.
24. Banon, H., Biggs, J. M. and Irvine, H. M. (1981), Seismic damage in reinforced concrete frames, *Journal of the Structural Division*, 107(9), 1719-1729.
25. Banon, H. and Veneziano, D. (1982), Seismic safety of reinforced concrete members and structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(2), 179-193.
26. American Society of Mechanical Engineers (2004), ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, American Society Mechanical Engineers, New York, USA.

Received : 06/14/2022

Revised : 07/02/2022

Accepted : 08/19/2022

요 지 : 원자력발전소 주요기기의 건전성 유지는 구조물의 안전성과 관련하여 매우 중요한 문제로 인식되고 있으며 배관시스템의 건전성은 원자력발전소의 안전과 관련된 매우 중요한 문제이다. 지진하중으로 인한 배관시스템의 실제 파괴모드는 피로균열에 의한 누수이며 구조적인 손상 메커니즘은 소성변형을 발생할 수 있는 큰상대변위로 인한 저주기 피로이다. 이 연구에서는 원자력발전소의 배관시스템에서 3인치 의 강제 직관과 강제 배관 Tee로 구성된 시험체에 대하여 다양한 크기의 일정한 진폭에 대하여 면내반복가력실험을 수행하였다. 지진하중으로 인한 배관시스템에서 발생하는 상대변위를 고려하기 위하여 하중진폭을 증가시켰으며, 강제 배관 Tee의 한계상태인 피로균열에 의한 누수가 발생할 때까지 수행하였다. 힘과 변위의 관계에 대하여 손상모델에 기반을 둔 손상지수를 이용하여 한계상태를 표현하였다. 그 결과 손상지수를 이용하여 강제 배관 Tee의 한계상태를 정량적으로 표현할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 손상지수, 손상모델, 저주기 피로, 강제 배관 Tee
