

# 지진에 대한 강구조물의 피로손상도 추정법

## Fatigue Damage Assessment for Steel Structures Subjected to Earthquake

송 종 길<sup>1)</sup> · 윤 정 방<sup>2)</sup> · 이 동 근<sup>3)</sup>  
*Song, Jong Keol                  Yun, Chung Bang                  Lee, Dong Guen*

**ABSTRACT :** Structures subjected to strong seismic excitation may undergo inelastic deformation cycles. The resulting cumulative fatigue damage process reduces the ability of structures and components to withstand seismic loads. Yet, the present earthquake resistance design methods focus mainly on the maximum displacement ductility, ignoring the effect of the cyclic responses. The damage parameters closely related to the cumulative damage need to be properly reflected on the aseismic design methods.

In this study, two cumulative damage assessment methods derived from the plastic fatigue theory are investigated. The one is based on the hysteretic ductility amplitude, and the other is based on the dissipated hysteretic energy. Both methods can consider the maximum ductility and the cyclic behavior of structural response. The validity of two damage methods has been examined for single degree of freedom structures with various natural frequencies against two different earthquake excitations.

**KEYWORDS :** fatigue damage, low-cycle fatigue, displacement ductility, hysteretic displacement ductility, cyclic behavior, steel structure, earthquake resistant design, damage index

### 1. 서      론

현재 구조물의 내진설계는 구조물의 비탄성거동 영향을 반응수정계수로 간단히 고려한 후, 탄성해석에 의하여 수행되고 있다. 따라서, 구조물에

비탄성 거동이 크게 발생 하는 경우에는, 이에 대한 충분한 고려가 내진설계에 반영되고 있지 않다. 현재의 내진설계에서는 강한 지진에 의해 구조물이 얼마나 큰 비탄성 거동을 하게 되며, 이 비탄성 거동이 구조물에 어느 정도의 손상을 줄 것

---

1) 한국과학기술원 토목공학과 박사과정  
2) 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수  
3) 정회원, 성균관대학교 건축공학과 교수

이며, 아울러 이 영향을 내진설계과정에서 어떻게 반영해야 하는가가 해결해야 할 문제이다. 또한, 지진하중과 같은 불규칙한 동적하중하에서 피로 현상에 기인한 구조손상에 대한 연구가 많이 필요하다. 본 연구에서는 강한 지진에 의해 구조물에 유발되는 피로손상도를 추정하는 방법들에 대하여 연구하였고, 예제해석을 통하여 이 손상추정법들을 비교하였다.

구조물의 손상도를 추정하기 위해서는 어떠한 응답변수를 고려하는가가 중요하다. 이 응답변수는 구조물의 손상도와 큰 연관성을 가지며, 간편하고 정확하게 평가될 수 있는 값이라야 한다. 구조물의 지진응답을 평가하기 위해서 지금까지도 많이 사용되는 응답변수는 최대변위연성도이다. 최대 변위연성도는 최대 절대변위를 구조물의 항복변위로 나눈 값으로 정의되는데,<sup>(1,2,12)</sup> 하중을 한 쪽 방향으로만 증가시켜 가하는 단조하중조건하에서는 비탄성 변형의 좋은 지표가 되지만, 지진과 같은 불규칙한 하중에 의해 구조물이 반복적인 변형이력거동을 하는 경우에는 최대응답 이외의 응답들은 고려할 수 없기 때문에 손상도를 추정하는 변수로서는 적절하지 못하다. 그러나 최대변위연성도는 구조물의 내진설계를 위한 비탄성 설계 응답스펙트럼<sup>(2,12)</sup>을 만드는 주된 변수로 널리 사용되고 있기 때문에, 연성도의 개념이 일반적으로 손상도 추정방법에 널리 반영되고 있다. 연성도의 개념을 손상도 추정에 사용하기 위하여 최대응답뿐 아니라 다른 응답도 고려할 수 있는 소성연성도이력을 손상도 추정변수로 사용하는 것이 바람직하다. 이는 소성피로의 이론<sup>(6,8,10,17,23)</sup>을 손상도 추정법에 적용하면 가능해진다.

근래에는 소성 변형에너지<sup>(3,5,9,16)</sup>가 손상추정 변수로 널리 사용되고 있으며, 이 방법은 지진하중을 받는 구조물이 소성 거동에 의하여 소산시킨 에너지의 양과 구조물이 소산시킬 수 있는 에너지 능력과의 비교에 의하여 손상도를 추정한다. 지진에 의해 구조물에 전달되고 소산되는 에너지는 최대응답만이 아니고 크기가 작은 응답성분에 의한

에너지도 포함하고 있으며, 구조물의 피로손상도는 소성 거동에 의해 소산시킨 에너지와 긴밀한 연관성이 있기 때문에 소성 변형에너지가 손상추정 변수로 적합하다.

지진에 의한 구조물의 손상도 추정은 내진 요구도와 이에 대응되는 구조물의 내진능력을 비교하는 방법과 구조물의 내진능력과 관련된 구조적 성질의 저하정도를 평가하는 방법으로 나눌 수 있다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 피로현상에 의해 구조물에 유발되는 손상도의 추정변수로 소성 변형에너지를 사용한 방법과 이력소성연성도를 사용한 방법을 여러가지의 지진하중에 대하여 비교, 분석하였다. 위의 두 가지 방법은 구조물에 대한 내진요구도와 이에 대응되는 구조물의 내진능력의 비교에 의한 손상도 추정법에 속한다. 본 연구에서 사용한 방법은 단자유도계에 대한 방법이지만, 다자유도 구조물의 응답들로부터 시스템을 대표하는 하나의 응답을 산정하는 방법들<sup>(18~22)</sup>을 적용한다면 실제의 다자유도 구조물에 적용가능하다.

## 2. 손상도 추정법의 종류 및 적용성

### 2.1 내진요구도와 내진능력 비교에 의한 방법

이 방법은 구조물이 지진에 대해 저항할 수 있는 내진능력과 지진하중에 의하여 구조물에 유발되는 내진요구도를 비교하여 구조물의 손상도를 추정하는 방법이다.<sup>(5)</sup> 지진에 대해 안전한 구조물이라면 구조물이 가진 내진능력이 지진하중으로부터 구조물에 유발되는 내진요구도 보다 커야 한다. 이 방법에서 손상도를 추정하기 위해 사용되는 변수는 강도, 변위/변형의 이력, 에너지 소산 능력등이다. 각 경우의 손상도 추정변수는 최대값, 최대 진폭, 누적값등이 사용될 수 있다. 최대값이 변수로 사용될 경우에는 강도가 적당하고, 누적값이 변수로 사용될 경우에는 변위/변형의 이력과 소산된 에너지의 양이 적당하다. 그러나, 누적값은 최대응답 이외의 크기가 작은 응답도 고려할 수

있기 때문에 더 타당하다. 그러므로 본 연구에서는 변위의 이력과 소산된 에너지의 양을 손상도 추정변수로 사용하였다.

## 2.2 구조적 성질의 저하정도 평가에 의한 방법

이 방법은 지진에 의한 손상이 발생하기 전과 후의 구조적인 성질을 평가하여, 이의 비교에 의해 손상도를 추정하는 방법이다.<sup>(5)</sup> 이 방법에서 손상도를 추정하기 위해 사용될 수 있는 변수는 강도, 강성, 에너지 소산능력, 고유진동주기등이다. 강한 지진에 의해 구조물은 구조요소나 접합부에 균열이 발생하고 비탄성 변형을 경험하게 되는데, 이 결과 구조물의 강도, 강성, 에너지 소산능력 등 구조물의 내진능력이 저하되고, 구조물의 고유진동주기는 증가하게 된다. 앞에서 언급한 변수 값들을 구조물의 손상이 발생하기 전과 후에 적절하게 평가하여 비교하면 구조물의 손상정도를 산정할 수 있다. 위의 여러 변수중에서 주로 사용되는 변수는 고유진동주기의 증가율이다.

## 2.3 손상 지수

지진에 대해 붕괴 직전까지 붕괴를 견딜 수 있는 구조물의 내진능력을 손상저항 잠재력  $D_p$ 라고 정의하고, 지진에 의해 손상저항 잠재력의 소모된 양을 손상소모  $D_c$ 라고 정의한다면, 손상 지수는 손상저항 잠재력에 대한 손상소모의 비로서 나타낼 수 있다. 즉, 내진요구도와 구조물의 내진능력 비교에 의한 방법에서 손상저항 잠재력은 구조물의 내진능력이고 손상소모는 구조물에 대한 내진요구도가 된다. 즉, 손상 지수(Damage Index,  $DI$ )는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$DI = \frac{D_c}{D_p} \quad (1)$$

구조적 성질의 저하정도 평가에 의한 방법에서 손상 지수는 일반적으로 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$DI = 1 - \frac{P_d}{P_i} \quad (2)$$

여기서,  $P_d$ 는 지진에 의한 손상발생 후의 구조적 성질이며  $P_i$ 는 지진에 의한 손상발생 전의 구조적 성질이다.

손상 지수가 1 이상이면 구조물의 붕괴를 의미하고, 0이면 손상을 전혀 입지 않았음을 의미한다.

## 2.4 실제구조물에 대한 적용성

현재까지 연구된 지진에 의한 구조물의 손상도 추정법의 대부분은 단자유도계의 응답 결과로부터 손상도를 추정하게 하므로, 실제의 다자유도 구조물에 대하여 이 연구결과들을 명확하게 적용할 수 있는 방법은 제시되지 않고 있다. 그러나, 다음에 설명하는 방법들을 이용한다면 기존의 단자유도계에 대한 손상도 추정법을 실제의 다자유도 구조물의 손상도 추정에 적용할 수 있다.

(가) 실제의 다자유도 구조물을 등가단자유도계<sup>(18,19)</sup>로 전환한다. 등가단자유도계의 동적해석 결과로부터 손상변수값들을 평가한다. 이로부터 실제 다자유도 구조물의 손상도를 추정한다.

(나) 실제의 다자유도 구조물의 동적해석 결과로부터 시스템을 대표하는 동적응답값(예 : 시스템 연성요구도<sup>(20,21,22)</sup>)을 평가한 후에, 이를 이용하여 실제구조물의 손상도를 추정한다. 이 방법은 (가)의 방법과 비슷하지만 시스템을 대표하는 응답값을 (가)의 방법보다 좀 더 정확하게 평가할 수 있다.

(다) 실제의 다자유도 구조물의 동적해석의 수행시, 각 구조요소(보, 기둥, 전단벽 등)들에 대하여 국부적인 손상도를 평가한 후에 그 결과로부터 적절한 방법<sup>(5)</sup>에 의하여 전체구조계의 손상도를 추정한다. 일반적으로 국부손상이 큰 구조요소일수록 혹은 아래층의 구조부재일수록, 이들 국부손상이 전체구조계의 손상도에 더 많은 영향을 주므로, 각 구조요소의 국부손상도에 가중치를 적절히

적용하여 전체구조계의 손상도를 추정한다.

본 연구에서는 단자유도계에 대한 두 손상도 추정법의 개념 및 해석결과의 비교에 중점을 두고, 실제구조물에 대한 손상도 추정법의 적용성은 위의 설명만으로 제한한다.

### 3. 소성피로이론을 이용한 손상추정법

#### 3.1 소성 피로 개념

균일한 진폭의 응답을 유발하는 하중의 반복횟수와 손상의 관계는 피로분야에서 오래전부터 연구되어 왔다. 피로현상은 지진과 같이 재하방향이 변동하는 하중으로부터 구조물이 받는 손상의 주된 요인이다. 강 재료의 변형률제어에 의해 구해진 변형률-수명곡선( $\epsilon-N$  곡선)<sup>(6,8)</sup>은 그림 1과 같다. 이는 일정 진폭상태에서 얻어진 곡선을 로그-로그스케일로 나타낸 것이다.

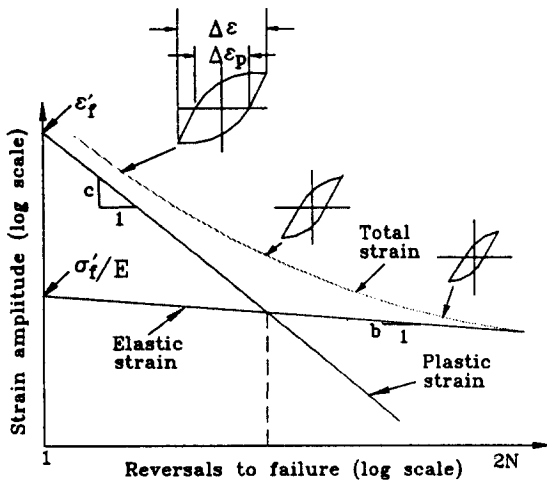


그림 1 변형률-수명 곡선

그림 1로부터 전체 변형률의 진폭( $\Delta\epsilon$ )은 탄성성분의 고되풀이수 피로(high cycle fatigue) 성분과 소성성분의 저되풀이수 피로(low cycle fatigue) 성분으로 구성되어 있음을 알 수 있고, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6,8,15)</sup>

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_p}{2} + \frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \epsilon_f'(2N)^c + \frac{\sigma_f'}{E}(2N)^b \quad (3)$$

여기서,  $\frac{\Delta\epsilon}{2}$ 는 전체변형률 진폭,  $\frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E}$ 는 탄성변형률 진폭,  $\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\Delta\epsilon}{2} - \frac{\Delta\epsilon_e}{2}$ 는 소성변형률 진폭,  $\epsilon_f'$ 는 피로연성도계수,  $c$ 는 피로연성도지수,  $\sigma_f'$ 는 피로응력계수,  $b$ 는 피로응력 지수,  $E$ 는 탄성계수이다.

변형율이 클 때 즉, 피로수명이 짧은 경우에는 소성변형률이 피로손상에 지배적이며, 반대로 변형률의 양이 작을 때 즉, 피로수명이 긴 경우에는 탄성변형률이 피로 손상에 지배적으로 영향을 끼친다는 사실을 알 수 있다. 또한, 그림 1로부터  $2N=1$  일 때, 즉 단조하중조건일 때 소성변형은  $\epsilon_f'$ , 탄성변형은  $\sigma_f'/E$ 임을 알 수 있다. 피로연성도지수  $c$ 는 보통 -0.5~-0.7 범위의 값이며, 피로응력지수  $b$ 는 -0.06~-0.14 범위의 값이다. 그림 1은 강 재료의 변형률 제어실험을 통해서 얻어낸  $\epsilon-N$ 관계이므로 이 실험 결과들로부터 식 (3)의 계수들을 산정할 수 있다.

고되풀이수 피로는 파괴를 유발하는 작은 진폭의 응답이 천번에서 만번정도 요구되는 탄성과정이다. 이에 반해 저되풀이수 피로는 큰 진폭의 소성거동을 유발하는 수십에서 수백번의 응답과정이다. 지진에 의해 유발되는 구조물의 손상누적과정은 저되풀이수 피로현상과 유사하고 고되풀이수 피로에 의한 손상은 상대적으로 매우 작을 것이므로 고되풀이수 피로에 의한 손상은 무시한다. 식 (3)에서 사용된 변형률은 지진공학에서는 일반적인 변수로 사용되지 않기 때문에 변위연성도항으로 교체한다. 변위연성도( $\mu$ )를 탄성성분인  $\mu_e$ 와 소성성분인  $\mu_p$ 로 구분하여 정의한 후, 식 (3)의 저되풀이수 피로에 관한 항에서 변형률을 변위연성도의 항으로 수정하면 식 (4)와 같다.<sup>(15)</sup>

$$\mu^* = \mu_p(2N)^c \quad (4)$$

여기서,  $\mu^*$ 는 이력소성연성도(hysteretic plas-

tic ductility),  $\mu_p$ 는 단조소성연성도(monotonic plastic ductility),  $c$ 는 피로연성도지수이다.

식 (4)에 의해 단조증가 하중조건에 의해 파괴되는 순간에 구해진 소성성분의 연성도인  $\mu_p$ 로부터, 균일한 진폭변위를 유발하는 반복하중에 대하여 파괴가 유발되는 소성연성도인  $\mu^*$ 를 구할 수 있다. 즉, 식 (4)는 단조증가하중에 의한 손상과  $N$ 번의 일정 진폭하중에 의한 손상이 같도록 정의된 식이다. 단조증가 하중조건에서는 즉,  $1/2$  사이클 ( $2N=1$ )에서는  $\mu^*$ 와  $\mu_p$ 가 같게 된다. 본 연구에서는 피로연성도지수  $c$ 는 저되풀이수 피로를 받는 강재의 대표적인 값  $-0.6$ 을 사용하였다. 식 (4)는 반복하중에 의해 구조물에 부과되는 손상을 변위연성도의 향으로 나타내 줌으로써 지진공학 분야에 간편하게 사용될 수 있다. 균일한 진폭의 변위를 유발하는 하중상태에서는 식 (4)는 피로에 의한 구조물의 손상과 남은 수명을 예측하기에 충분하다. 그러나 지진과 같은 불규칙한 하중상태에서는 불규칙한 진폭의 변위의 값이 산출되기 때문에 식 (4)을 그대로 적용할 수가 없다. 그러므로 불규칙한 하중상태에 대한 적절한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 이력소성연성도를 이용한 방법과 소성 변형에 의해 소산된 에너지 양을 이용한 방법을 연구하였으며, 이 두 방법에 의한 구조물의 손상도를 비교, 분석하였다.

### 3.2 이력소성연성도를 이용한 방법

이 방법에서는 선형손상모델<sup>(6,8,10)</sup>을 이용하여 한번의 응력되풀이에 의한 손상( $D$ )이 피로수명( $N$ )의 역수, 즉  $D=1/N$ , 이라는 관계식으로부터 연성도-수명( $\mu-N$ ) 곡선을 손상-연성도( $D-\mu$ ) 곡선으로 바꾸어서 구조손상도를 유도하였다.

선형손상모델에서 개선해야 할 점은 실제의 불규칙한 변위이력을 되풀이수(수명)들로 나타내느냐 하는 것이다. 이 문제는 적절한 반복횟수 계산 방법에 의해 해결될 수 있다. 모든 반복횟수 계산

방법의 목적은 규칙적인 반복하중 실험으로부터 구해진 변형률-수명 ( $\epsilon-N$ ) 곡선 또는 연성도-수명 ( $\mu-N$ ) 곡선을 불규칙 변위이력에 이용할 수 있도록 하는데에 있다. 반복 횟수의 계산과정에서 불규칙한 변위시간이력의 결과는 가능한 한 극점만으로 구성되도록 하고, 이를 적절한 반복횟수 계산방법에 의해 변위연성도 폭으로 변환한다. 이 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 Rain-flow 반복횟수 계산방법<sup>(6,8)</sup>을 사용하였다.

Rain-flow 반복횟수 계산방법을 이용하면 불규칙한 변위의 시간이력으로부터 변위폭을 구할 수 있으며, 이 변위폭에서 탄성성분을 제거해 주고 구조물의 항복변위( $U_y$ )로 나누어주면 이력소성연성도폭(hysteretic displacement ductility amplitude,  $\Delta\mu^*$ )이 구해진다. 식 (4)에서  $\mu^*$ 값 대신에  $\Delta\mu^*$ 값을 사용하기 위하여 식을 다시 정리하면 다음과 같다( $c = -0.6$ ).

$$\Delta\mu^* = 2\mu_p(2N)^{-0.6} \quad (5)$$

식 (5)를 불규칙한 하중에 대하여 적용하기 위해서는 손상누적이론<sup>(6,8,10)</sup>을 적용해야 한다. 즉, 선형손상모델에 의하면 일정변위 연성도폭(displacement ductility amplitude,  $\Delta\mu_i$ )으로 파괴에 도달하는데  $N_i$ 만큼의 횟수가 필요하다면 한번의 사이클에 대한 손상은  $1/N_i$ 이고,  $n$ 개의 서로 다른 변위연성도폭( $\Delta\mu_i$ )으로 인한 손상도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 손상지수( $DI_D$ )가 1이상이면 구조물의 붕괴 상태를 의미한다.

$$DI_D = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{N_i} \right)^{m_D} \quad (6)$$

여기서  $m_D$ 는 가중지수로 이 연구에서는 1을 사용하였다.

구조물의 변위이력으로부터 앞에서 설명한 방법을 이용하여  $\Delta\mu^*$ 을 구한 후, 이를 식 (5)에 적용하여 각 이력소성연성도폭에 대한 피로수명( $N$ )을

구할 수 있다. 그 다음에 각각의 이력소성연성도 폭에 대한 피로 수명을 식 (6)에 적용한다면 최종적으로 구하고자 하는 지진에 의해 강구조물에 누적된 피로손상도를 추정할 수 있다.

### 3.3 소성 변형에너지를 이용한 방법

이 방법에서 구조물의 비탄성 거동에 대한 에너지 소산능력과 실제로 지진하중에 의하여 소산시킨 에너지의 양의 비교에 의하여 손상도를 추정한다. 이력소성연성도를 이용한 방법은 각각의 소성피로에 대하여 손상도를 추정한 후 이를 손상누적 이론에 적용하여 최종적인 손상을 추정하지만, 이 방법은 각각의 소성피로에 대하여 손상을 평가하지는 않고 소산시킨 에너지의 총량의 비교에 의하여 손상을 추정한다. 그러나, 구조물이 소산시킨 소성 변형에너지의 총량은 최대응답 이외의 응답에 관한 소성 변형에너지도 포함하고 있고, 이 소성 변형에너지는 구조물의 손상도에 직접적인 연관성이 있기 때문에 소성피로에 의한 손상을 추정하기에 적합하다.

지진에 대하여 구조물이 소산시킨 에너지는 운동방정식을 상대변위에 대해 적분한 에너지 방정식을 사용함으로써 구할 수 있다. 지진에 의한 지반운동을 받는 그림 2와 같은 단자유도계의 운동방정식은 다음과 같다.

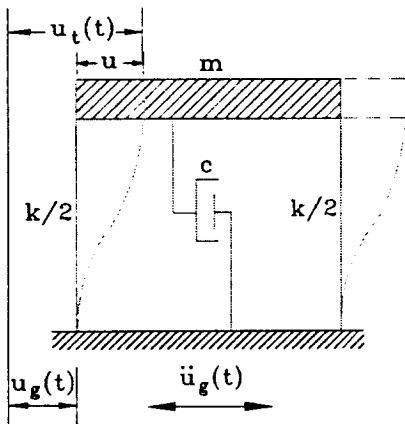


그림 2 단자유도계

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + r(u) = 0 \quad (7)$$

여기서,  $m$ 은 구조물의 질량,  $c$ 는 감쇠계수,  $r(u)$ 는 비선형 복원력,  $u$ 는 지반에 대한 상대변위,  $\ddot{u}_g$ 는 지반가속도,  $\ddot{u}_t$ 는 절대가속도이다( $\ddot{u}_t = \ddot{u} + \ddot{u}_g$ ).

상대변위( $u$ )에 대해서 식 (7)을 적분하면 에너지 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다. (3.9,14,16)

$$\frac{m(\dot{u}_t)^2}{2} + \int c\dot{u}du + \int r(u)du = \int m\ddot{u}_t dx_g \quad (8)$$

식 (8)에서 첫번째 항은 운동 에너지, 두번째 항은 감쇠 에너지, 세번째 항은 탄성 변형에너지와 소성 변형에너지의 합으로 구성된 구조물에 흡수된 에너지이다. 식 (8)의 오른쪽항은 지진 입력에너지이다. 이들 중에서 구조물의 비탄성 거동에 의해 소산시킨 소성 변형에너지가 구조물의 손상과 직접적인 연관성이 있다.

구조물이 가진 에너지 소산능력을 평가하는 방법은 다음과 같다. 지진과 같이 불규칙한 하중에 의한 구조물의 손상은 비탄성 변형 반복횟수의 함수로 나타낼 수 있다. 비탄성 변형 반복횟수를 구하는 문제에서 모든 변형 사이클이 동일한 크기가 아니므로, 비탄성변형 반복횟수와 구조물의 손상의 연관성을 간편하게 나타낼 수 있는 등가 비탄성변형 반복 횟수를 다음과 같은 과정에 의해 구한다. 먼저 식 (9)에 의하여 등가가중변위 (equivalent weighted displacement,  $U_{wt}$ )를 구한다.

$$U_{wt} = \frac{\sum(H_i \Delta U_i)}{H_i} \quad (9)$$

여기서  $H_i$ 는 비탄성 거동에 의해 소산된 총 소성 변형에너지이고  $H_i$ 와  $\Delta U_i$ 는 각 사이클의 비탄성 거동상태에서 소산시킨 소성변형 에너지와 변위이다. 식 (9)에 의해 구해진 등가가중변위에서 항복변위를 빼면 비탄성 반복 횟수를 구하는데 사용되는 등가 사이클의 소성변형  $\Delta U_{eqv}$ 를 구할 수 있다.  $\Delta U_{eqv}$ 에 항복력 ( $F_y$ )을 곱하면 등가 사이클

에 의해 소산되는 소성변형 에너지양을 구할 수 있다. 구조물의 비탄성거동에 의해 소산된 총 소성변형 에너지양을 등가 싸이클에 의해 소산되는 소성변형 에너지 양으로 나누면 등가 반복횟수를 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$N_{eqv} = \frac{H_t}{(F_y)(\Delta U_{eqv})} \quad (10)$$

식 (10)에 의해 구한 등가 반복횟수를 식 (4)에 대입함으로써  $N_{eqv}$  반복횟수 동안에 파괴에 도달하는 이력소성연성도( $\mu^*$ )를 구할 수 있다.  $2N_{eqv}$ 의 변위반복 동안에 구조물에 파괴를 입게 하는 소성 변형에너지양, 즉 구조물이 가진 에너지 소산능력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_{failure} = \mu^* U_y F_y (2N_{eqv}) \quad (11)$$

여기서  $U_y$ 는 구조물의 항복변위이다.

식 (11)에 의해 구해진 소성 변형에너지양을 구조물이 실제로 비탄성거동에 의해 소산시킨 소성 변형에너지양과 비교하면 지진 손상정도를 평가할 수 있다. 비대칭 응답에 의한 구조물의 잔여 변형의 발생이 손상을 증가시키므로, 구조물이 소산시킨 소성 변형에너지를 양방향 저항력에 관한 소성 변형에너지( $H_p$ )와 음방향 저항력에 관한 소성 변형에너지( $H_n$ )로 구분하여 구한다. 이 에너지의 차이에 의한 잔여 변형의 발생 정도가 구조물의 지진 손상추정에 반영되도록 실험결과와의 비교를 통하여 McCabe와 Hall은 식 (12)과 같이 손상지수를 2차식의 형태로 제안하였다.<sup>(15)</sup>

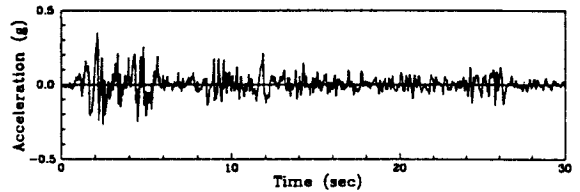
$$DI_E = \left[ \frac{H_p + H_n}{H_{failure}} \right]^{m_E} + \left[ \frac{H_p - H_n}{H_{failure}} \right]^{m_E}, \quad (m_E=2) \quad (12)$$

#### 4. 예제 해석

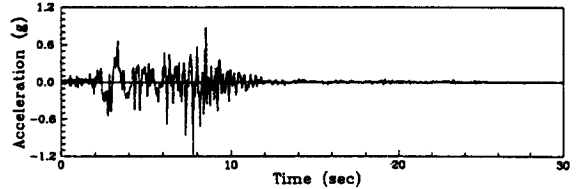
지진에 의한 구조물의 거동은 지반운동의 성질

과 구조물 자체의 특성에 의해 영향을 받는다. 구조물의 중요한 특성은 감쇠율, 비탄성 거동에 의해 지진에너지를 흡수, 소산할 수 있는 능력, 진동주기와 강도이다. 동력학 이론에 의하면 지진에 의한 응답스펙트럼값은 구조물의 감쇠율이 크면 클수록 감소되는데, 일반적으로 강골조 구조물은 2~5% 정도의 감쇠율을 가지며 응력이 항복점까지 올라가면 감쇠율은 5-7 %로 높아지게 된다. 지진에 의해 구조요소들에 분배되는 에너지를 흡수하거나 소산시키는 능력을 구조물을 설계하는데 고려한다면 어떠한 해석모델을 선택하는가가 중요하다.<sup>(9)</sup> 따라서 이 연구에서는 강구조물의 거동에 적합한 bilinear 모델을 선택하였고 감쇠율은 5%를 사용하였고, bilinear 모델에서 변형을 경화율(strain hardening ratio)은 강재의 대표적인 값인 0.02를 사용하였다.

이 연구에서는 그림 3에 나타난 것처럼 EI



(a) El Centro 지진



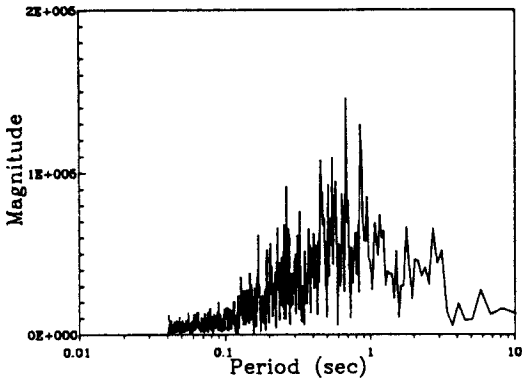
(b) Pacoima 지진

그림 3 입력 지진

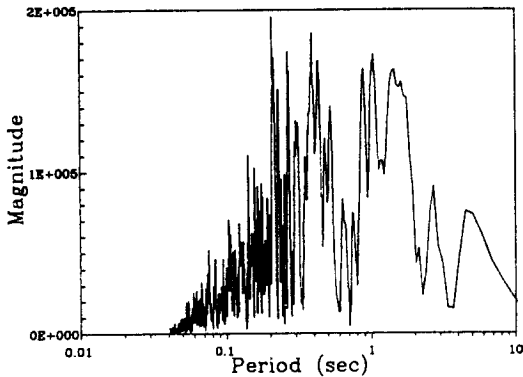
표 1 입력 지진의 공학적 성질

Earthquake Component	PGA (cm/sec <sup>2</sup> )	PGV (cm/sec)	PGA/PGV (g/m/s)	EPA (g)	Strong Motion Duration(sec)
El Centro S00E	341.7 (0.349g)	33.4	1.04	0.281	24.4
Pacoima S16E	1148.1 (1.170g)	113.2	1.04	0.825	9.1

주) PGA : 최대지반가속도, PGV : 최대지반속도, EPA : 유효최대가속도



(a) El Centro 지진



(b) Pacoima 지진

그림 4 지진기록의 Fourier Amplitude Spectrum

Centro 지진과, Pacoima 지진을 입력지진으로 선정하였다. 입력지진들의 공학적인 성질은 표 1에 나타내었다. 그림 4에는 입력 지진의 주된 주기성분을 알아보기 위하여 Fourier amplitude spectrum을 주기의 함수로 나타내었다. 그림 4로부터 Pacoima 지진이 El Centro 지진보다 긴 주기성분이 많음을 알 수 있다.

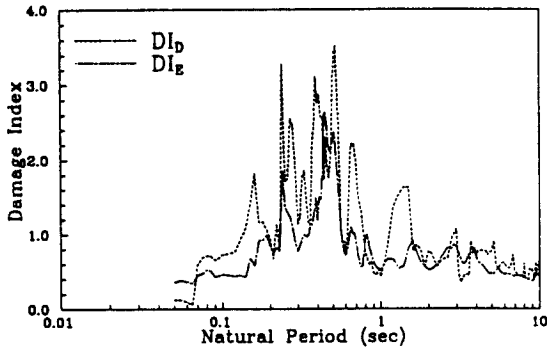
El Centro 지진과 Pacoima 지진에 대해서 구조물의 단조소성연성도 ( $\mu_p$ )가 5이고 최대변위연성도가 5인 경우에 이력소성연성도를 이용한 방법과 소성 변형에너지를 이용한 방법에 의한 구조물의 손상도 추정결과를 구조물의 고유주기의 함수로 그림 5에 나타내었다. 단조소성연성도  $\mu_p$ 는 단조 증가하중을 구조물에 가했을 때 파괴 상태에 도달

하는 순간의 소성변형 부분만의 연성도로서 이 값은 구조물이 가진 변형능력 및 에너지소산능력을 나타낸다. 지진에 의해 구조물에 유발되는 최대 변위연성도를 5로 고정한 것은 입력지진의 최대지반가속도가 다른 두 경우에도 구조물이 받는 내진 요구도가 같도록 조정된 것이다. 그림 5로부터 Pacoima 지진( $PGA=1.17g$ )보다 El Centro 지진( $PGA=0.35g$ )에 의한 손상도가 전반적으로 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 El Centro 지진의 강진기간<sup>(2)</sup>이 상대적으로 길기 때문에 구조물의 비탄성거동 및 변형반복횟수가 증가하여 누적되는 손상이 커진 때문으로 판단된다. 이 결과로부터 강진기간이 구조물의 손상도와 연관성이 있음을 확인할 수 있다. 그림 4와 그림 5의 비교에 의해 지진기록의 주된 주기성분에서 구조물의 손상도 크기를 알 수 있다. El Centro 지진에 비해 상대적으로 Pacoima 지진이 긴 주기 성분을 많이 가지고 있으므로, Pacoima 지진에 의하여는 긴 주기(5sec~10sec)의 구조물에서도 손상이 크게 나타남을 알 수 있다.

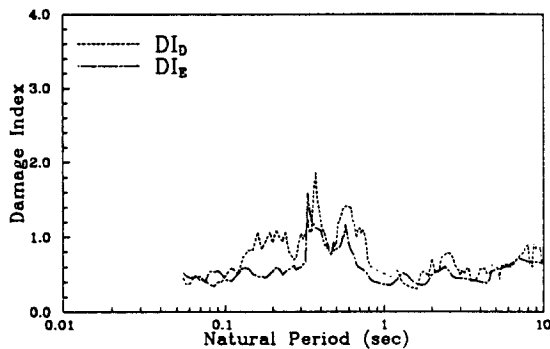
그림 5로부터 소성 변형에너지를 이용한 방법과 이력소성연성도를 이용한 방법에 의한 손상도 추정 결과의 전반적인 분포가 유사하지만 후자가 전자보다 다소 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 문헌<sup>(23)</sup>에 보고된 연구결과에 따르면, 손상도 추정법에 따라서는 해석결과가 큰 차이가 나기도 하지만, 각 방법에서 사용한 계수들을 적절히 비교, 조정한다면 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이 연구에서 사용된 방법들의 결과들도 계수( $m_D, m_E$ )를 적절히 조정한다면 더 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나, 대부분 방법의 결과는 실험결과와 별로 일치하지 않는 실정이다. 따라서, 수치해석과 실험결과와의 비교, 분석을 통하여 손상도 추정법을 보완하는 것이 바람직하며, 이와 같은 작업이 피로손상 연구의 과제이기도 하다.

앞에서 설명한 바와 같이 두 방법에 의한 결과 차이는 두 방법상의 다른 개념정의에 의한 차이이지만, 비슷한 지진 손상의 분포를 제시함으로써





(a) El Centro 지진



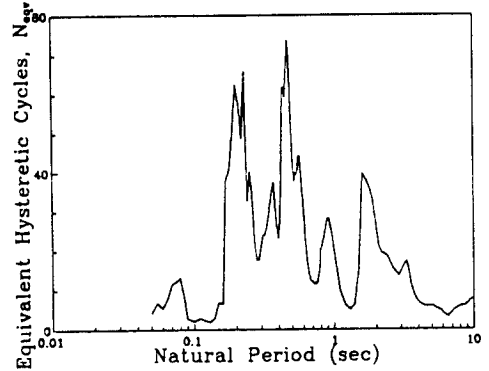
(b) Pacoima 지진

그림 5 손상추정방법에 따른 구조물의 손상지수 비교

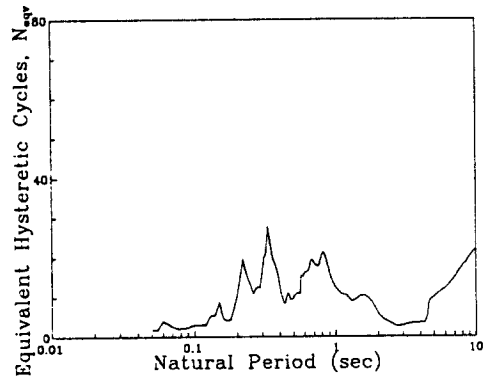
두 방법에 의한 구조물의 손상도 추정법의 타당성을 확인할 수 있다.

그림 6에는 소성 변형에너지의 비교에 의한 방법에서 사용된 변수인 등가 이력반복횟수를 나타내고 있다. 피로에 의한 구조물의 손상은 등가 이력반복횟수와 많은 연관성이 있음을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6의 비교를 통하여 등가 이력반복횟수는 이 자체만으로도 구조물의 고유진동주기에 따른 손상정도의 분포특성을 근사적으로 추정할 수 있는 변수로 적당함을 알 수 있다.

양방향 변위연성도( $\mu^+$ ), 음방향 변위연성도( $\mu^-$ )와 이 두 변위연성도의 소성성분의 합인 소성연성도응답폭( $\mu_{width}$ )의 개념을 그림 7에 나타낸 것과 같이 정의한다. El Centro 지진과 Pacoima 지진에 대하여 최대변위연성도가 5인 경우에, 구조물의



(a) El Centro 지진



(b) Pacoima 지진

그림 6 등가 이력반복횟수

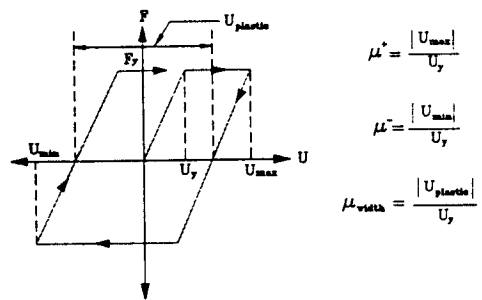
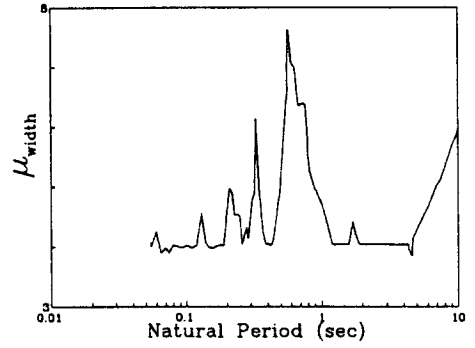
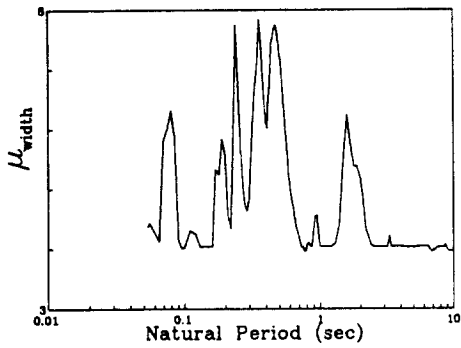
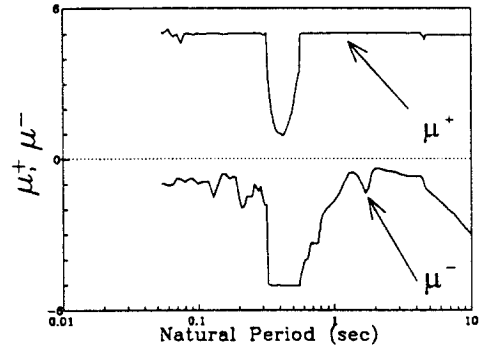
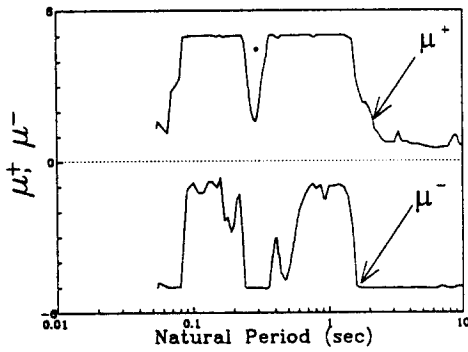


그림 7 소성연성도폭의 개념

고유진동주기에 따른 변위연성도( $\mu^+$ )와  $\mu^-$ )와 소성연성도응답폭( $\mu_{width}$ )의 해석결과를 그림 8에 나타내었다. 소성연성도응답폭은 최대 응답값만의 결과이지만, 그림 5와 비교할 때 구조물의 손상도



(a) El Centro 지진

(b) Pacoima 지진

그림 8 양방향 변위연성도( $\mu^+$ )와 음방향 변위연성도( $\mu^-$ ) 및 소성연성도폭( $\mu_{width}$ )의 해석 결과

와 많은 연관성이 있으므로 구조물의 고유진동 주기에 따른 손상도의 분포특성을 추정할 수 있는 변수로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이력소성연성도를 이용한 방법과 소성 변형에너지의 비교에 의한 방법에 의하여 지진에 의해 구조물에 누적되는 손상도를 해석하였다. 이 해석 결과를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- I) 등가 이력반복횟수, 지진기록의 **Fourier Amplitude Spectrum**, 소성연성도응답폭의 결과를 두 방법에 의한 구조물의 고유진동 주기에 따른 손상도 분포와 비교한 결과 이 연구에서 사용한 두 방법이 타당하다. 그러

므로 등가 이력반복횟수와 소성연성도폭은 구조물의 손상도를 추정하는 변수로서 적합하다.

- II) 두 방법에 의한 손상추정 결과가 대체로 비슷하다.
- III) 구조물이 비탄성거동에 의해 소산시킨 소성 변형에너지가 구조물의 손상도와 많은 연관성 있음을 확인할 수 있었다.
- IV) 지진의 강진기간과 구조물의 손상도와는 많은 연관성이 있음을 확인할 수 있었다.
- V) 구조물의 손상도를 보다 정확하게 추정하기 위해서는 이 연구에서 사용한 두 방법을 구조실험 결과와의 비교를 통해서 보완해야 한다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] Chopra, A. K. Dynamics of Structures - A primer, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, March, 1982.
- [ 2 ] Gupta, A. K. Response Spectrum Method, Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [ 3 ] Uang, C. M. and Bertero, V. V. 'Evaluation of Seismic Energy in Structures', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.19, 77-90, 1990.
- [ 4 ] Loh, C.H. and Ho, R. C. 'Seismic Damage Assessment Based on Different Hysteretic Rules', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, 753-771, 1990.
- [ 5 ] Powell, G. H. and Allahabadi, R. 'Seismic Damage Prediction by Deterministic Method: Concepts and Procedures', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, 719-734, 1988.
- [ 6 ] Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, 1980.
- [ 7 ] Krawinkler, H. and Zohrei, M. 'Cumulative Damage in Steel Structures subjected to Earthquake Ground Motions', Computer & Structures, Vol. 16, No. 1-4, pp. 531-541, 1983.
- [ 8 ] Bannantine, J., Comer, J. and Handrock, J., Fundamental of Metal Fatigue Analysis, Copyright Pending, February, 1987.
- [ 9 ] Tembulkar, J. M. and Nau, J. M. 'Inelastic Modeling and Seismic Energy Dissipation', Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, 1373-1377, 1987.
- [10] Suidan, M. T. and Eubanks, R. A. 'Cumulative Fatigue Damage in Seismic Structures', Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST5, May, 1973 [11] Paz, M., Structural Dynamics, Van Nostrand Reinhold Company, 1991.
- [12] Newmark, N. M. and Hall, W. J. Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute.
- [13] Clough, R. W. and Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill Book Company, 1975.
- [14] Mahin, S. A. and Lin, J. 'Construction of inelastic Response Spectra for Single Degree of Freedom Systems', Report No. UCB/EERC-83/17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1983.
- [15] McCabe, S. L. and Hall, W. J. 'Assessment of Seismic Structural Damage', Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 9, September, 1989.
- [16] Zahrah, T. F. and Hall, W. J. 'Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures', Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 8, August, 1984
- [17] 송종걸, 이동근, "축적손상 이론에 의한 구조물의 지진피해 평가", 大韓土木學會 學術發表會 概要集(I), 1992.
- [18] Baik, S. W., Lee, D. G. and Krawinkler, H. 'A Simplified Model for Seismic Response Prediction of Steel Frame Structures', Proceedings of 9WCEE, Vol. V, V375-V380, 1988.
- [19] Lee, D. G. 'Accurate and Simplified Models for Seismic Response Prediction of Steel Frame Structures', Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, California, 1984.
- [20] Lee, D. G., Song, J. K. and Yun, C. B. 'Estimation of System-Level Ductility Demands for Multistory Structures', Engineering Structures, in Press.
- [21] 송종걸, 이동근, 윤정방, '구조물의 내진설계시 연성요구도 평가', 大韓土木學會 學術發表會 概要集(I), 1995.
- [22] 이동근, 윤정방, 송종걸, '구조물의 내진설계를 위한 구조시스템에 대한 연성요구도 산정방법', 전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제 9권 1집, 1996.
- [23] Cosenza, C., Manfredi, G., and Ramasco, R., 'The Use of Damage Functionals in Earthquake Engineering: A Comparison Between Different Methods', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, 855-968, 1993.