

大型 鋼構造物의 地震損傷度 解析

Seismic Damage Analysis of Large Steel Structures

송 종 결*
Song, Jong-Keol

이 동 근**
Lee, Dong-Guen

윤 정 방***
Yun, Chung-Bang

ABSTRACT

Under severe earthquake, structural elements or structures may sustain a large number of inelastic excursions. To predict seismic damage of the structures with accuracy, much research for general definition of structural collapse and seismic damage analysis is required. The ductility method, the energy method and Park and Ang method for seismic damage analysis of structural elements and structures are compared in this paper. Also, the seismic damage analysis for system-level of structure is carried out using the ESDOF-system method and Powell method. To compare tendency of the seismic damage analysis using each methods, example analysis is accomplished for several cases of different structures and different earthquake excitation.

1. 서론

현재까지의 구조물의 내진설계는 탄성해석에 의하여 수행되고 있기 때문에, 구조물이 비탄성 거동을 하는 경우에는 이에 대한 적절한 고려가 내진설계기법에 반영되고 있지 않다. 따라서 현재의 내진설계기법에서는 강한 지진에 의해 구조물이 얼마나 큰 비탄성 거동을 하게 되며 이 비탄성 거동이 구조물에 어느 정도의 손상을 줄 것인가가 주요 관심사이다.

구조물의 지진손상도를 해석하기 위해서는 어떠한 손상 응답변수를 선택하는가가 중요하다. 손상 응답변수는 구조물의 손상도와 많은 연관성이 있으며 간편하고 정확하게 평가할 수 있는 값이라야 한다. 변위의 최대절대치를 구조물의 항복변위로 나눈 값으로 정의되는 변위 연성도를 사용하는 연성도 방법^{1,2}은 지진하중에 의한 구조물의 연성요구도와 연성도 능력의 비교에 의해 손상도를 추정한다. 연성도 방법은 최대응답에 의한 지진손상도만을 반영하므로 다른 손상도 추정방법에 비하여 작은 지진손상도 추정값을 나타낸다. 그러나 변위연성도는 구조물의 내진설계를 위한 비탄성 설계응답스펙트럼을 만드는 주된 변수로 널리 사용되고 있기 때문에, 연성도 개념이 일반적으로 손상도 추정방법에 널리 반영되고 있다. 비탄성 변형에너지를 사용하는 에너지 방법^{1,2}은 지진하중을 받는 구조물이 비탄성 거동

* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 성균관대학교 건축공학과 교수, 정회원

*** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

에 의하여 소산시킨 에너지의 양과 구조물이 소산시킬수 있는 에너지 능력과의 비교에 의하여 손상도를 추정한다. 이 방법은 모든 응답에 의해 소산된 비탄성 변형에너지의 합으로부터 손상도를 추정하기 때문에 다른 방법에 비하여 큰 값을 나타낸다. 즉, 이 방법은 모든 응답이 구조물의 지진손상도에 주는 영향이 동일하다고 간주한다. 근래에는 앞에서 설명한 연성도 방법 및 에너지 방법을 조합한 방법들을 구조물의 지진손상도 해석을 위하여 많이 사용하고 있으며, 그 중에서 가장 널리 사용되고 있고 가장 대표적인 것이 *Park & Ang* 방법^[2,3,4,5]이다. 이 방법에서 최대응답에 의한 구조물의 지진손상도는 연성도 방법을 이용하여 구하고, 소성피로에 의한 지진손상도는 에너지 방법을 이용하여 구하고 이를 선형적으로 조합하여 지진손상도를 산정한다.

본 연구에서 구조부재들에 대한 지진손상도는 연성도 방법, 에너지 방법과 *Park & Ang* 방법을 이용하여 예제해석을 통하여 비교하였으며, 전체구조계에 대한 지진손상도는 *Powell* 방법^[6]과 등가단자유도계 방법^[4,7,8]을 이용하여 예제해석을 통하여 비교하였다. *Powell* 방법은 각 구조부재에 대한 손상추정결과를 이용하는 방법이며, 등가단자유도계 방법은 전체구조계의 시스템 응답을 이용하는 방법이다.

2. 지진손상도 해석법

2.1 연성도와 에너지 방법

연성도 방법은 구조물의 연성도 능력이 제한적이라는 가정하에서 지진하중에 의해 유발된 연성요구도가 단조하중조건하에서 실험을 통하여 구해진 붕괴상태에서의 연성도인 연성도 능력과 같아진다면 붕괴가 발생한다는 개념으로 손상지수는 다음과 같이 정의된다.

$$D_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\mu_{u,mon} - 1} \quad (1)$$

여기서, μ 는 지진하중에 의한 구조물의 최대변위를 항복변위로 나눈 변위 연성요구도이고, $\mu_{u,mon}$ 는 연성도의 최대허용값으로 단조증가하중조건의 실험에 의해 결정된 구조물의 붕괴상태에서의 최대변위를 항복변위로 나눈값이다.

에너지 방법은 구조물의 지진에너지를 소산시킬 수 있는 능력이 제한적이라는 가정하에서, 지진하중에 의하여 소산된 에너지가 구조물이 가진 에너지 소산능력과 같아진다면 붕괴가 발생한다는 개념으로 손상지수는 다음과 같이 정의된다.

$$D_E = \frac{\mu_e - 1}{\mu_{e,u,mon} - 1}; \quad \mu_e = \frac{E_h}{F_y x_y} + 1 \quad (2)$$

여기서, E_h 는 구조물이 실제로 소산시킨 비탄성 변형에너지이고, F_y 와 x_y 는 구조물의 항복력과 항복변위이며, μ_e 는 이력연성도이다. 또한, $\mu_{e,u,mon}$ 는 이력연성도의 최대허용값으로써 완전 탄소성 모델에서는 연성도의 최대허용값인 $\mu_{u,mon}$ 와 같다.

위에서 설명한 손상지수들은 그 값이 0 이면 손상을 입지 않았음을 의미하며, 1 이면 구조물의 붕괴를 의미한다.

2.2 연성도와 에너지 방법의 조합 : Park & Ang Method

Park과 Ang이 제안한 손상함수는 연구문헌에 가장 많이 사용되고 있으며, 이 방법은 최대변위와 소산된 비탄성에너지 선형조합에 의해 다음과 같이 정의된다^[2,3,4,5].

$$D_{PA} = \frac{x_{max}}{x_{u,mon}} + \beta \frac{E_h}{F_y x_{u,mon}} = \frac{\mu + \beta(\mu_e - 1)}{\mu_{u,mon}} \quad (3)$$

여기서, x_{max} 는 최대변위이고, $x_{u,mon}$ 는 최대변위의 허용값이다. β 는 구조요소의 성질저하 정도를 나타내는 변수이고, 실험결과에 따르면 β 는 -0.3~1.2의 값이며 평균값은 0.15의 값이다.

이 손상도 함수는 구조물의 최대변위가 탄성범위내에 존재할 때에도 손상지수가 0이 아닌 값을 나타내는 단점이 있다. 또한, 단조증가 하중조건하의 실험에서 붕괴상태에서도 손상지수의 값은 1을 나타내지 않는다. 즉, 이 손상함수는 정규화되지 않은 단점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 구조물의 최대변위가 탄성범위내에 존재할 경우에는 손상지수가 0이라고 가정하여 사용하였다.

3. 전체 구조계에 대한 지진손상도 해석

현재까지 연구된 지진손상도 추정법의 대부분은 단자유도계의 응답 결과로부터 지진손상도를 추정하게 하므로, 실제의 다자유도 구조물에 대하여 이 연구결과들을 적용할 방법은 명확하게 제시되지 않고 있다. 그러나, 다음에 설명한 방법들을 이용한다면 기존의 단자유도계에 대한 지진손상도 추정법을 실제의 다자유도 구조물에 적용할 수 있다.

3.1 등가단자유도계를 이용한 방법

실제의 다자유도 구조물을 등가단자유도계^[4,7,8]로 전환한다. 이 전환과정에서 등가단자유도계의 탄성 및 비탄성 성질은 삼각형 분포, UBC^[10] 및 ATC^[11]에 정의된 등가정적하중분포와 같은 적절한 수직분포의 점진적으로 단조증가되는 하중에 의한 준정적 해석으로부터 구한 변형형상 및 비선형 힘-변위(등가저항력-등가단자유도변위) 관계를 이용하여 구한다. 등가단자유도계의 비탄성 동적해석 결과로부터 다자유도 구조시스템을 대표할 수 있는 응답값을 평가한다. 이로부터 앞에서 설명한 방법들을 이용하여 실제구조물의 지진손상도를 추정한다.

3.2 Powell 방법

실제의 다자유도 구조물의 동적해석 수행시, 앞에서 설명한 방법들을 이용하여 각 구조요소(보, 기둥, 전단벽 등)들에 대한 국부적인 손상도를 평가한다. 각 구조부재의 손상도로부터 다음과 같이 정의된 식에 의하여 전체구조계의 지진손상도를 추정한다.

$$DI_t = \frac{\sum_{i=1}^n DI_i^2}{\sum_{i=1}^n DI_i} \quad (4)$$

여기서 DI_i 는 각 구조요소의 손상지수의 값이고 이는 연성도 방법, 에너지 방법 또는 Park & Ang 방법

을 사용하여 구할 수 있다. DI_i 는 전체구조계에 대한 손상지수의 값이다. 식 (4)는 손상이 심한 구조요소가 전체구조계의 손상도에 미치는 영향이 크다는 가정하에서 각 구조요소의 손상도를 가중합수로 사용한 방법이다.

4. 예제해석

4.1 예제구조물과 입력지진

UBC^[10] 규준에 따라서 설계된 4가지의 예제구조물^[8] ㉠을 선정하였다. 이들을 강기둥-약보(SCWB)와 약기둥-강보(WCSB)의 설계개념에 따라 설계된 8층과 20층의 구조물이다. 각 층의 집중질량은 모든 층에 대하여 $0.8953 \text{ kips} \cdot \text{sec}^2 / \text{in}$ 로 가정하였다. 2차원 비선형 해석용 프로그램인 DRAIN2D^[9]를 예제구조물의 동적해석에 사용하였다. 구조물의 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 적용하고, 첫번째 두 진동모드에 대한 모드감쇠계수는 0.02와 0.05를 적용하여 α 와 β 의 계수 값을 결정하였다. 8층 구조물에 대한 고유진동주기는 1.17초와 1.16초(SCWB8 과 WCSB8)이며, 20층 구조물에 대해서는 2.77초와 2.97 초(SCWB20 과 WCSB20)로 계산되었다.

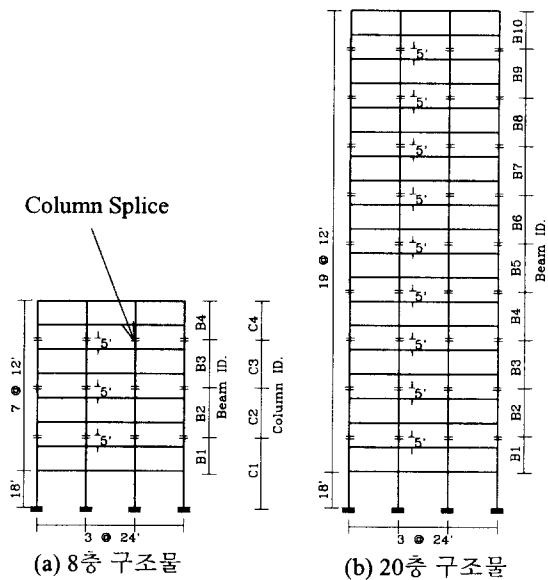


그림 1. 예제 구조물

입력지진으로는 그림 2에 나타난 바와 같이 유효지반가속도(EPA)^[11]가 0.4 g가 되도록 스케일 조정된 El Centro 와 Mexico 지진을 사용하였다.

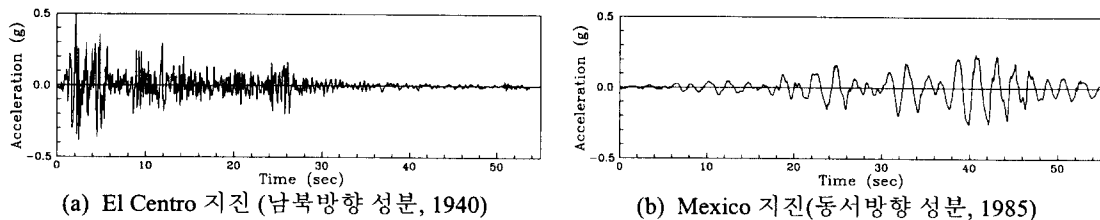


그림 2. 입력 지진가속도 (EPA가 0.4 g가 되도록 스케일 조정)

4.2 구조부재에 대한 지진손상도 해석

지진에 대한 각 구조요소의 손상도 해석은 비탄성 해석으로부터 구한 각 구조부재의 소성힌지에서 회전연성요구도와 비탄성변형에너지의 결과를 연성도 방법, 에너지 방법과 Park & Ang 방법에 적용하여 수행하였다. 이 과정에서 구조부재들의 연성도 능력은 해석적인 방법으로는 구할 수 없고 실험적인 방법에 의해서만 평가가능하므로 균일적으로 10 이라고 가정하여 사용하였다.

연성도 방법에 의한 각 구조부재의 손상도($D_{\mu, local}$)를 그림 3, 6 과 9에 나타내었다. 연성도 방법에 의한 손상도 추정은 최대응답값만에 대한 평가이므로 본 연구에서 사용된 방법중에서 가장 낮은 손상도 추정결과를 나타낸다. 에너지 방법에 의한 각 구조부재의 손상도($D_{E, local}$)를 그림 4, 7 과 10에 나타내었다. 에너지 방법에서는 모든 응답에 의해 소산된 비탄성 변형에너지가 손상도를 추정하는데 사용되었기 때문에 손상도 추정방법들 중에서 가장 큰 값을 나타내게 된다. 연성도 방법에 의해서는 Mexico 지진에 대한 손상도가 El Centro 지진에 대한 손상도의 1.5 배정도이지만 에너지 방법에서는 6~10 배 정도이다. 즉, 에너지 방법은 모든 비탄성 응답에 의한 손상도를 동일하게 반영하므로 Mexico 지진과 같은 많은 횡수의 비탄성 거동을 유발하는 지진에 대해서는 손상도를 연성도 방법에 비하여 크게 나타내게 된다. 그러나, 하나의 큰 비탄성 응답에 의해 소산된 비탄성 에너지의 양과 수십 혹은 수백번의 작은 비탄성 응답에 의해 소산된 에너지의 양이 같다고 하더라도, 구조물의 손상도는 일반적으로 하나의 큰 비탄성 응답에 의한 손상도의 영향이 더 크게 되므로 Park and Ang 방법과 같이 하나의 큰 응답에 의한 손상도와 그 외의 나머지 응답에 의한 손상도를 적절히 조합하여 평가하는 것이 합리적일 것이다. Park & Ang 방법에 의한 각 구조부재의 손상도($D_{PA, local}$)를 그림 5, 8 과 11에 나타내었다. 이 결과로부터 8 층구조물의 Mexico 지진에 의한 손상도는 비탄성 변형에너지의 영향이 연성요구도의 영향보다 많음을 에너지 방법과 연성도 방법에 의한 결과와의 비교를 통하여 알 수 있고, El Centro 지진은 반대의 경향을 나타낸다. 즉, 이는 구조물이 많은 횡수의 비탄성 거동을 할 경우에는 에너지에 관련된 손상함수의 항이 손상도 추정에 더 많은 영향을 미치고, 그 이외의 일반적인 지진하중과 같이 비탄성 거동의 횡수가 상대적으로 적은 경우에는 연성요구도에 관계된 손상함수가 손상도 추정을 지배함을 알 수 있다. 모든 방법에 대하여 약기동-강보 구조물이 국부적인 손상도가 큼을 알 수 있다.

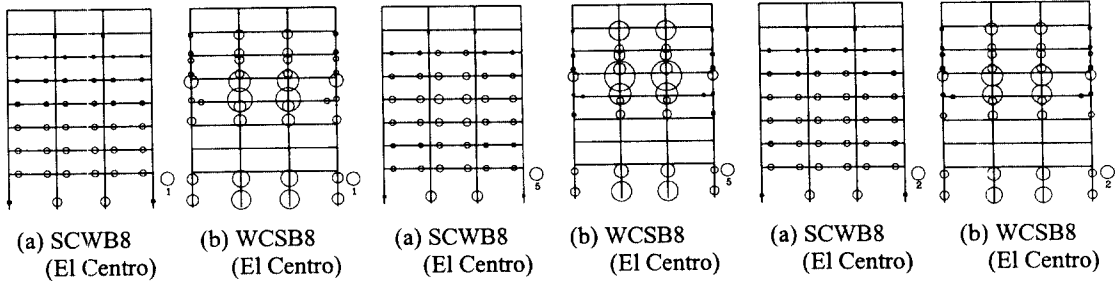


그림 3. $D_{\mu, local}$ 의 분포

그림 4. $D_{E, local}$ 의 분포

그림 5. $D_{PA, local}$ 의 분포

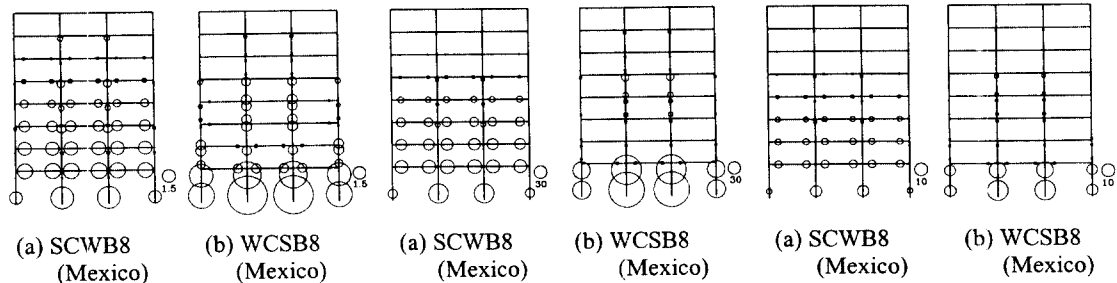


그림 6. $D_{\mu, local}$ 의 분포

그림 7. $D_{E, local}$ 의 분포

그림 8. $D_{PA, local}$ 의 분포

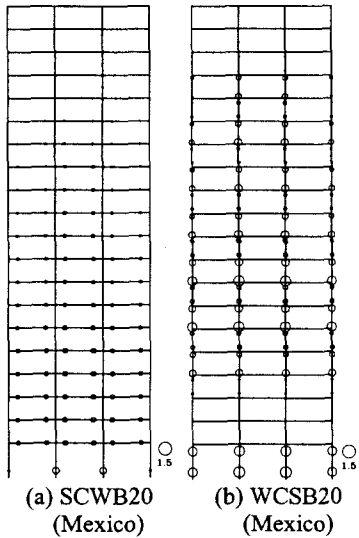


그림 9. $D_{\mu, local}$ 의 분포

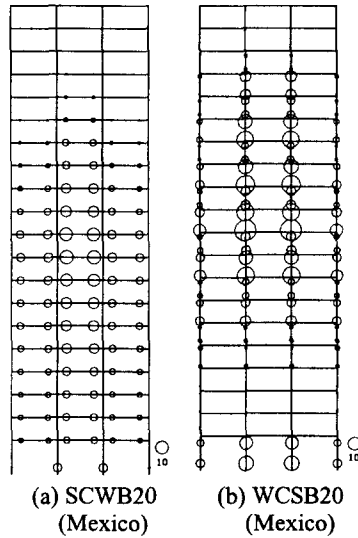


그림 10. $D_{E, local}$ 의 분포

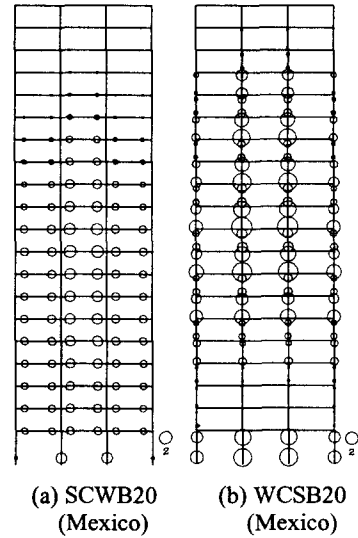


그림 11. $D_{PA, local}$ 의 분포

4.5 전체구조계에 대한 지진손상도 해석

전체구조계에 대한 지진손상도의 평가는 등가단자유도계를 이용하여 시스템 응답을 평가한 후에 이로부터 구조물의 손상도를 추정하는 방법(등가단자유도계 방법)과 각 구조부재에 대한 손상추정결과로부터 전체구조계의 손상정도를 추정하는 방법(Powell 방법)을 이용하였으며, 각 방법에 대하여 연성도 방법(D_{μ}), 에너지 방법(D_E)과 Park & Ang 방법(D_{PA})을 적용하여 수행하였다. 등가단자유도계 방법에서 각 예제구조물에 대응되는 등가단자유도계의 선형 및 비선형 성질을 표 1에 나타내었다. 구조물의 지진손상도를 해석하기 위하여 필요한 시스템 연성요구도와 비탄성 변형에너지는 등가단자유도계의 비선형 동적해석으로부터 구하였으며 이 결과를 표 2에 나타내었다. 강기둥-약보 구조물 및 약기둥-강보 구조물 등 설계개념의 차이에 따른 시스템 연성요구도와 비탄성 변형에너지의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 일반적으로 구조물의 전체구조계에 대한 연성도는 구조부재 연성도의 1/3~1/2의 값을 가진다^[12]. 또한, 강기둥-약보의 구조물이 약기둥-강보의 구조물에 비하여 연성도 능력이 우수하다^[13]. 위의 설명을 근거로 하여 구조부재의 연성도 능력은 10이라고 가정하여 사용하였기 때문에 전체구조계의 연성도 능력은 강기둥-약보의 구조물은 5, 약기둥-강보의 구조물은 3.3이라고 가정하여 사용하였다.

예제구조물의 방법에 따른 전체구조계에 대한 지진손상도 추정결과를 표 3 과 4 에 나타내었다. 등가단자유도계 방법과 Powell 방법은 강기둥-약보(SCWB) 예제구조물에 대한 지진손상도를 약기둥-강보(WCSB) 예제구조물에 대한 지진손상도 보다 작게 평가하고 있다. 이 결과는 그림 3~11에 나타낸 각 부재에 대한 손상도 추정결과와 잘 일치하며, 약기둥-강보의 구조물이 강기둥-약보의 구조물보다 지진손상을 입기 쉽다는 일반적인 견해와 일치한다. Powell 방법은 각 구조부재의 손상지수 값을 가중합수로 이용하여 전체구조계의 손상도를 평가하였기 때문에, 만약에 지진손상이 특정한 하나의 부재에 국한적으로 발생한다고 하더라도 이를 전체구조계의 지진손상도에 그대로 반영하기 때문에 소수의 부재에 집중적인 손상이 발생하는 경우에는 전체구조계의 지진손상도를 과대평가할 수 있는 단점이 있다.

그러나, 내진설계가 적절히 수행된 경우의 구조물은 극단적인 지진손상의 집중현상은 발생하지 않을 것이므로 Powell 방법이 개념은 전반적으로 합리적이라고 할 수 있다. 등가단자유도계 방법은 Powell 방법과는 달리 모든 부재의 비탄성 동적해석 결과를 필요로 하지 않고 등가단자유도계의 비탄성 동적해석 결과만을 이용하므로 계산시간 및 작업내용이 간편한 장점이 있다. 등가단자유도계 방법이 Powell 방법보다 전반적으로 지진손상도를 약간 크게 평가하고 있지만 두 방법이 서로 비슷한 분포의 결과를 제시하고 있다. 연성도 능력은 실험적으로만 평가가능하기 때문에 본 연구에서 구조부재 및 전체구조계의 연성도 능력을 문헌에 나온 연구결과를 토대로 가정하여 사용하였는데, 보다 정확한 지진손상도 해석을 위해서는 연성도 능력을 보다 합리적으로 평가하는 방법의 개발이 요구된다.

표 1. 등가단자유도계의 성질

Properties of the ESDOF system	Frame ID.			
	SCWB8	WCSB8	SCWB20	WCSB20
Equivalent Mass, m (kips-sec ² /in.)	5.934 (7.162)	5.985 (7.162)	13.854 (17.91)	13.711 (17.91)
Damping Ratio, ξ	0.020	0.020	0.020	0.020
Elastic Stiffness, k_e (kips/in)	171.7	176.9	71.4	61.5
Period (sec)	1.17 (1.17)	1.16 (1.16)	2.77 (2.77)	2.97 (2.97)
Yield Force, F_y (kips)	298	318	535	560
Strain Hardening Ratio, p_1	0.029	0.033	0.033	0.040

참고 : 괄호안의 질량과 주기는 다자유도계에 관한 값이다.

표 2. 등가단자유도계 방법에 의한 시스템 연성요구도 및 비탄성 변형에너지

Frame ID.	El Centro Earthquake		Mexico Earthquake	
	System Ductility Demand	Hysteretic Energy (klb-in)	System Ductility Demand	Hysteretic Energy (klb-in)
SCWB8	4.4	6602	9.2	63124
WCSB8	4.0	6866	8.6	62022
SCWB20	1.7	10601	3.4	132250
WCSB20	1.8	9370	3.3	126580

표 3. 8층 예제구조물에 대한 전체구조계의 지진손상도

Damage Functional	Damage Index for Structural System							
	El Centro Earthquake				Mexico Earthquake			
	ESDOF Method		Powell Method		ESDOF Method		Powell Method	
	SCWB8	WCSB8	SCWB8	WCSB8	SCWB8	WCSB8	SCWB8	WCSB8
D_μ	0.850	1.304	0.499	0.988	2.050	3.304	1.316	2.028
D_E	3.190	5.221	2.396	5.832	30.505	47.163	23.693	43.717
$D_{P,1}$	1.263	1.758	0.833	1.663	5.501	7.537	4.377	7.302

표 4. 20층 예제구조물에 대한 전체구조계의 지진손상도

Damage Functional	Damage Index for Structural System							
	El Centro Earthquake				Mexico Earthquake			
	ESDOF Method		Powell Method		ESDOF Method		Powell Method	
	SCWB20	WCSB20	SCWB20	WCSB20	SCWB20	WCSB20	SCWB20	WCSB20
D_μ	0.175	0.348	0.145	0.300	0.600	1.000	0.429	0.731
D_E	0.661	0.799	0.743	1.069	8.248	10.792	6.196	8.193
$D_{P,1}$	0.419	0.629	0.308	0.457	1.670	2.128	1.260	1.754

5. 결론

대형구조물의 지진손상을 추정하는 방법으로서 연성도 방법, 에너지 방법, *Park & Ang* 방법을 예제 해석을 통하여 비교하였다. 연성도 방법과 에너지 방법을 선형조합한 *Park & Ang* 방법이 최대응답에 의한 지진손상도는 변위연성도를 이용하고 소성피로에 의한 지진손상도는 비탄성변형에너지를 이용하여 구하기 때문에 실제구조물의 손상도를 개념적으로 가장 잘 반영하고 있다.

전체구조계에 대한 지진손상도를 추정하기 위하여는 등가단자유도계 방법과 Powell의 방법을 사용하여 비교하였다. 두 방법은 약기둥-강보의 구조물이 강기둥-약보의 구조물 보다 지진손상도를 입기 쉽다는 일반적인 견해를 잘 반영하고 있다. 등가단자유도계 방법을 이용하면 지진손상도 추정에 관한 기존의 연구결과를 각 구조부재에 대한 지진손상도의 평가를 수행하지 않고도 등가단자유도계의 지진해석결과로부터 바로 대형구조물의 전체구조계에 대한 지진손상도를 추정할 수 있는 장점이 있다. Powell 방법은 만약에 지진손상이 특정한 하나의 부재에 국한적으로 발생한다고 하더라도 이를 전체구조계의 지진손상도에 그대로 반영하기 때문에 소수의 부재에 집중적인 손상의 발생의 경우에는 과대평가할 수 있는 단점이 있다. 본 연구에서 구조부재 및 전체구조계의 연성도 능력을 문헌에 나온 연구결과를 토대로 가정하여 사용하였는데, 보다 정확한 지진손상도 해석을 위해서는 연성도 능력을 보다 합리적으로 평가하는 방법의 개발이 요구된다.

참고 문헌

1. Mahin, S. and Bertero, V. V., 'An evaluation of inelastic seismic design spectra', *J. Struct. Eng. ASCE*, 1981, **107**, 1777-1795
2. Cosenza, C., Manfredi, G., and Ramasco, R., 'The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different methods', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1993, **22**, 855-968
3. Park, Y. J. and Ang, A. H.-S., 'Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete', *J. Struct. Eng. ASCE*, 1985, **111**, 722-739
4. Fajfar, P. and Gaspersic, P., 'The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1996, **25**, 31-46
5. Daali, M. L. and Korol, R. M., 'Adequate ductility in steel beams under earthquake-type loading', *Engineering Structures*, 1996, **18** (2), 179-189
6. Powell, G. H. and Allahabadi, R., 'Seismic damage prediction by deterministic method: concepts and procedures', *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1988, **16**, 719-734
7. Baik, S. W., Lee, D. G. and Krawinkler, H., 'A simplified model for seismic response prediction of steel frame structures', *Proc. 9th World Conf. Earthquake Engng*, Tokyo, Kyoto, 1988, Vol. 5, pp. 375-380
8. Lee, D. G., Song, J. K. and Yun, C. B., 'Estimation of system-level ductility demands for multistory structures', *Engineering Structures*, 1997, in press.
9. Tsai, K. C. and Li, J. W., 'DRAIN2D+ - A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor', *Report No. CEER/R83-03*, National Taiwan Univ., 1994
10. *Uniform Building Code (UBC)*, Int. Conf. of Building Officials (ICBO), Whittier, Calif., 1994
11. *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*, ATC-3-06, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif., 1984
12. Newmark, N. M. and Hall, W. J. *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engng Res. Inst., El Cerrito, Calif., 1982
13. Roeder, C. W., Schneider, S. P. and Carpenter, J. E., 'Seismic behavior of moment-resisting steel frames: analytical study', *J. Struct. Engng, ASCE* 1993, **119** (6), 1866-1884