

비탄성 지진응답평가를 위한 Spectrum Intensity Scale 분석

Analysis of the Spectrum Intensity Scale for Inelastic Seismic Response Evaluation

박경록¹⁾ · 전법규²⁾ · 김남식³⁾ · 서주원⁴⁾

Park, Kyung Rock · Jeon, Bub Gyu · Kim, Nam Sik · Seo, Ju Won

국문 요약 >> 최대지반가속도(PGA : Peak Ground Acceleration)는 지진파의 최대값을 나타내는 매개변수(Parameter)이며 주로 지진파의 강도를 나타낸다. PGA가 동일하더라도 지진파에 따라 다른 동적특성을 가질 수 있고 구조물에 미치는 영향도 다를 수 있다. 따라서 PGA만으로 구조물에 미치는 지진의 특성을 평가하는 것은 바람직하지 못하다. 본 연구에서는 구조물의 비탄성 지진응답해석을 위하여 단자유도(Single Degree Of Freedom) 구조물의 시간이력해석 수행하였으며, 수치해석모델은 완전 탄소성(Perfect Elasto-Plastic)으로 가정하였다. 검토한 입력 지진파는 El Centro NS(1940)의 값을 증감한 지진파를 포함한 실측지진파, 인공지진파를 사용하였다. 이와 같은 수치해석을 통하여 PGA가 동일한 인공지진파들에 대해 비탄성 지진응답해석을 수행하고, 각 지진파에 대하여 변위연성도와 누적소산에너지를 비교하였다. 그 결과 동일한 PGA를 가지더라도 지진파에 따라 서로 다른 응답을 확인할 수 있었다. 따라서 지진의 특성뿐 아니라 구조물의 특성을 반영할 수 있는 지표가 필요할 것으로 판단된다. 구조물의 비탄성 지진응답을 대표할 수 있는 SI(Spectrum Intensity)는 속도응답스펙트럼의 일정구간에 대한 적분을 통하여 얻을 수 있다. 이러한 SI와 변위연성도 및 누적소산에너지의 상관관계 분석을 통하여 구조물의 지진에 대한 비탄성응답의 대표값으로 SI가 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

주요어 스펙트럼강도, 최대지반가속도, 강지진동, 비탄성 지진응답, 인공지진파

ABSTRACT >> PGA (Peak Ground Acceleration) is the parameter which indicates the peak value for strong ground motion and is mainly due to the intensity of the seismic wave. Usually, seismic waves can consist of different characteristics and can have different effects on structures. Therefore, it may be undesirable that the effects of a seismic wave are evaluated only based on the PGA. In this study, time history analysis was executed with a single degree of freedom model for inelastic seismic analysis. The numerical model was assumed to be a perfect elasto-plastic model. Input accelerations were made with El Centro NS (1940), other earthquake records and artificial earthquakes. The displacement ductility demand and cumulative dissipated energy, which were calculated from other artificial earthquakes, were compared. As a result, different responses from other seismic waves which have the same PGA were identified. Therefore, an index which could reflect both seismic and structural characteristics is needed. The SI (Spectrum Intensity) scale which could be obtained from integration by parts of the velocity response spectrum could be an index reflecting the inelastic seismic response of structures. It can be possible to identify from correlation analysis among the SI scale, displacement ductility demand and cumulative dissipated energy that the SI scale is sufficient to be an index for the inelastic response of structures under seismic conditions.

Key words Spectrum Intensity scale, PGA scale, Strong Ground Motion, Inelastic seismic response, Artificial earthquake

1. 서론

최근 국내외에서 발생한 큰 규모의 지진으로 인하여 지진의 피해에 대한 경각심과 내진설계의 필요성에 대한 인식이 증가되고 있다. 특히 세계적으로 초고층 빌딩이나 장대교량 등 대형 구조물에 대한 관심이 높아지면서 그 안정성에 대해 우려의 목소리가 커지고 있다. 이와 같은 대형구조물의 지진피해는 사회에 막대한 영향을 미치므로 내진성능을 확

¹⁾ 대창이엔지(주) 기술연구소, 전임연구원, 공학석사

²⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과, 박사과정

³⁾ 정희원·부산대학교 사회환경시스템공학부, 부교수, 공학박사
(교신저자: nskim@pusan.ac.kr)

⁴⁾ 정희원·현대건설 연구개발본부, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 6. 7 / 수정일 : 2011. 8. 29 / 게재확정일 : 2011. 9. 2)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

보해야 한다. 현재까지 연구된 바에 따르면 Peak Ground Acceleration(PGA), Peak Ground Velocity(PGV), Spectrum Intensity(SI) 등은 지진파의 강도를 나타내는데 중요한 요소로 사용되어져 왔다.⁽¹⁾ Matsumura(1992)는 구조물의 주기 범위와 파괴의 연관성에 대하여 연구하였고, Tso et al.(1992)⁽²⁾는 PGA와 PGV의 비(Ratio)를 이용하여 M(Magnitude)-R(Epicentral Distance)의 관계를 연구하였다. Ueong(2006)⁽³⁾은 지진이 발생한 지역에 대하여 SI와 PGA를 비교하고 지진 위험을 보다 빨리 예측할 수 있는 시스템인 Risk Index를 발표하였다. Martinez-Rueda(1998)⁽⁴⁾는 SI와 변위연성도의 관계에 대하여 최적수행(Optimum Performance)이 가능한 기준을 제시하였다. 박종관(1998)⁽⁵⁾은 지진발생 후 지반의 액상화를 판단하는 기존의 방법은 입력지진파의 PGA만을 이용하여 지진가속도의 주기 및 진폭 등의 영향은 고려하지 못하는 것으로 판단하였다. 따라서 지표면에서 측정된 지진가속도신호를 통하여 진동의 크기를 에너지로 변환하여 나타낼 수 있는 SI를 적용하여 액상화 가능성을 평가하였다. SI를 이용하여 비탄성 지진응답인 변위연성도와 누적소산에너지의 상관관계로 부터 지진의 특성을 평가하는 방법은 Housner⁽⁶⁾에 의해 처음 정의되었으며 PGA만을 이용하던 기존의 방법에 비하여 지진의 특성을 보다 잘 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 동일한 PGA를 가지는 인공지진파에 대해 비탄성 지진응답의 결과가 동일함을 확인하고 SI와 변위연성도 및 누적소산에너지의 상관관계 분석으로 지진의 특성뿐 아니라 구조물에 대한 비탄성 지진응답의 대표값으로 SI의 적합성을 확인하기 위하여 단자유도(Single Degree of Freedom) 구조물에 대하여 비탄성 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석을 위하여 사용된 수치해석모델은 완전탄소성(Perfect Elasto-Plastic)으로 가정하였으며 입력 지진파는 PGA를 증감한 지진파를 포함한 실측지진파들과 7개의 인공지진파들을 사용하였다. 이와 같은 수치해석을 통하여 PGA가 동일한 인공지진파들에 대해 비탄성 지진응답해석을 수행하고, 각 지진파에 대하여 변위연성도와 누적소산 에너지를 비교하였다.

2. Spectrum Intensity

스펙트럼은 많은 종류의 서로 다른 특성을 가지는 지진파를 이용하여 표현한다. 하지만 지진파 각각의 특성이 모두 다르기 때문에 이를 사용하기 위해서는 정규화 과정이 필요하다. 가장 많이 알려진 정규화 방법으로는 Arias SI와 Housner

SI가 있다. Arias SI는 가속도의 RMS(Root Mean Square)를 사용하고, Housner SI는 구조물의 주요 주기범위인 0.1~2.5초에서의 속도응답스펙트럼을 적분하여 구한 값으로 정규화(Normalizing)하여 나타낸다.

2.1 Scaling Methods of Spectrum Intensity

2.1.1 Housner SI⁽⁶⁾

SI는 속도응답스펙트럼을 기준으로 하는 구조물의 진동주기와 감쇠비의 함수이며, 구조물에 미치는 지진의 영향을 평균진동속도 개념으로 나타낸 것이다.

Housner는 속도응답스펙트럼에서 대부분의 지진에너지가 집중되는 구간을 0.1~2.5초의 주기영역으로 판단하였으며 이를 이용하여 식 (1)과 같은 SI를 제안하였다. 여기서 SV 는 속도응답스펙트럼, T 는 구조물의 주기, ξ 는 감쇠비(5%로 가정)를 의미한다.

$$\overline{SI}_H = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} SV(T; \xi) dT \quad (1)$$

2.1.2 Nau and Hall SI⁽¹¹⁾

Nau and Hall SI는 12개 지진응답의 앙상블(Ensemble)을 이용한 지진응답스펙트럼의 스케일링(Scaling)방법이다. 구조물의 주기 범위에 따라 식 (2)~(4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)는 가속도 영역의 SI로 단주기 구조물에 적용할 수 있다. 식 (3)의 경우는 속도영역의 SI이며 단주기와 장주기 사이 즉 0.5~5.0초의 구조물에 적용할 수 있으며 식 (4)는 변위영역의 SI이며 장주기 구조물에 적용된다.

$$\overline{SI}_a = \frac{1}{0.157} \int_{0.028}^{0.185} SV(T; \xi) dT, \text{ for } T_n \in [0.118; 0.500] \text{ secs} \quad (2)$$

$$\overline{SI}_v = \frac{1}{1.715} \int_{0.285}^{2.000} SV(T; \xi) dT, \text{ for } T_n \in [0.500; 5.000] \text{ secs} \quad (3)$$

$$\overline{SI}_d = \frac{1}{8.333} \int_{4.167}^{12.500} SV(T; \xi) dT, \text{ for } T_n \in [5.000; 14.085] \text{ secs} \quad (4)$$

2.1.3 Kappos SI⁽¹⁰⁾

Kappos SI는 Housner에 의해 제안된 SI를 개선하여 정규화 기법(Normalization Technique)이 적용된 SI_m 을 제안하였다. Kappos SI는 구조물의 고유주기에 변수인 t_1 과 t_2 를 조합하여 나타내었다. 식 (5)에서 t_1 은 $T_n - 0.1$, t_2 는 $2.5 - T_n$ 으로 정의하였는데 이는 Housner SI의 정의와 일

치한다. 변수인 t_1 과 t_2 는 패턴의 일관성이 없고 SI_m 의 안정된 값을 확보하기 위한 t_1 과 t_2 의 제한이 없으므로 본 연구에서는 Kappos가 제안한 t_1 과 t_2 의 값을 $0.2T_n$ 으로 사용하였다. 여기서, T_n 은 구조물의 고유주기이다.

$$SI_m = \int_{T_n - t_1}^{T_n + t_2} SV(T; \xi) dT \quad (5)$$

2.1.4 Matsumura SI⁽¹⁾

식 (6)은 구조물의 손상과 지진 거동의 강도에 대한 상관관계를 알아보기 위한 Matsumura SI를 나타낸 것이다. Matsumura는 항복하중과 누적소성변형계수(η) 관계에서 $\overline{SI_M}$ 은 광대역 주기 구간일 경우 강도측정방법으로 적합하다고 제시하였다. 최적화된 주기 구간은 $0.9T_n \sim 1.35T_n$ 이지만 광대역 연성도(Ductility Demand)에 대해 보다 나은 상관관계를 가지는 $T_n \sim 2T_n$ 을 주기 구간으로 사용한다.

$$\overline{SI_M} = \frac{1}{T_n} \int_{T_n}^{2T_n} SV(T; \xi) dT \quad (6)$$

3. 비탄성 시간이력해석

3.1 입력지진파

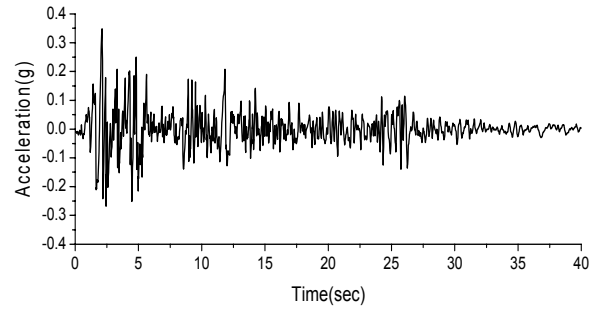
입력지진파는 크게 3가지로 분류하여 비탄성 시간이력해석에 사용하였다. El Centro NS(1940)의 PGA를 증감시킨 지진파를 사용하였고 동일한 PGA를 가지지만 서로 다른 특성을 나타내는 인공지진파 7개를 생성하여 비탄성 시간이력해석을 수행하였다. 그리고 실제 관측된 지진파를 이용한 비탄성 시간이력해석을 수행하였다.

3.2 El Centro NS(1940) PGA 조정

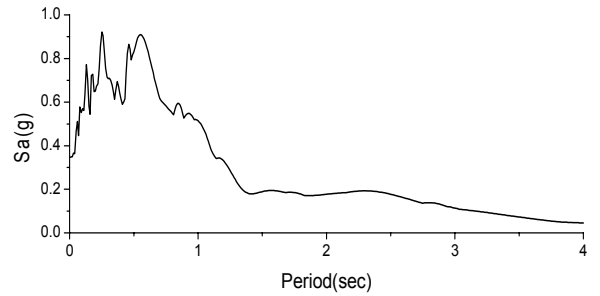
El Centro NS(1940)지진파의 PGA를 0.2배, 0.5배, 1.0배, 1.5배, 2.0배, 2.5배, 3.0배로 증감시켜 수치해석을 수행하였다. PGA를 증감하여 조정함으로써 그에 따른 구조물의 비탄성 지진응답의 변화를 평가하기 위하여 사용하였다. 그림 1의 (a)는 El Centro NS(1940)의 가속도 시간이력이고 그림 1의 (b)는 응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

3.2.1 인공지진파의 생성 및 검증

도로교설계기준(2010)를 만족하는 인공지진파 생성프로그램을 이용하여 7개의 인공지진파를 그림 2와 같은 사다리

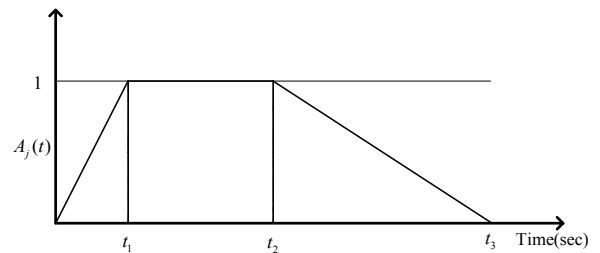


(a) 가속도 시간이력



(b) 가속도 응답스펙트럼

〈그림 1〉 El Centro NS(1940)



〈그림 2〉 사다리꼴 포락함수

꼴 형태의 포락함수(Envelope Function)를 사용하여 생성하였다. 이 때 포락함수의 특성을 나타내는 계수값을 결정하기 위하여 표 1의 ASCE Standard(1999)⁽⁸⁾에서 제시된 최대지진규모(7.0~7.5)에 해당하는 값을 이용하였다. 생성된 인공지진파들의 상승시간(t_1)은 2.0초, 강진지속시간($t_2 - t_1$)은 19.0초, 감쇠시간($t_3 - t_2$)은 20.0초이다.

국내의 내진설계기준⁽¹⁵⁾에 의하면 두 방향 이상의 입력지진을 고려할 경우 각 직교방향의 시간이력은 통계학적으로 독립이 되어야 한다. 여기서 식 (7)과 같이 두 입력지진 사이의 시작시간 차이를 고려하여 계산된 상관계수함수의 최대 절대값($|\rho_{ij}|$)이 0.3을 넘지 않는다면 두 시간이력은 통계학적으로 독립이라고 간주한다. 이와 같은 기준은 내진설계가 가장 엄밀하게 수행되고 있다고 할 수 있는 원자력발전 시설물에도 적용되는 기준이다.

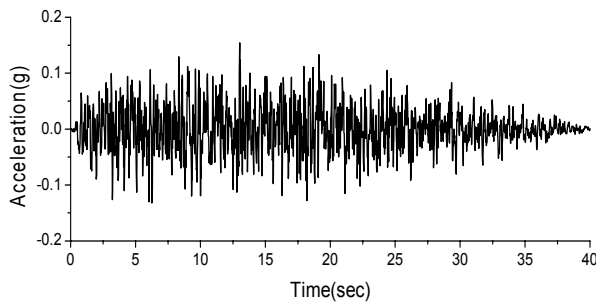
$$|\rho_{ij}| = \left| \lim_{0 \leq \tau \leq T_0} \rho_{ij}(\tau) \right| < 0.3 \quad (7)$$

〈표 1〉 사다리꼴 포락함수를 가지는 인공지진파 계수⁽⁶⁾

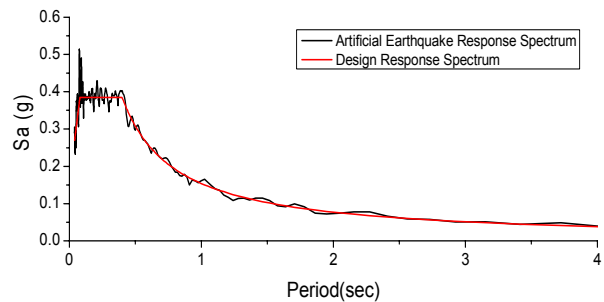
지진의 규모	상승시간(t_1) [초]	강진지속시간($t_2 - t_1$) [초]	감쇠시간($t_3 - t_2$) [초]
7.0-7.5	2	13	9
6.5-7.0	1.5	10	7
6.0-6.5	1	7	5
5.5-6.0	1	6	4
5.0-5.5	1	5	4

〈표 2〉 인공지진파간의 상관계수(ρ_{ij})

	A-01	A-02	A-03	A-04	A-05	A-06	A-07
A-01	1						
A-02	0.0359	1					
A-03	0.0036	0.0408	1				
A-04	0.0098	0.0399	0.0080	1			
A-05	0.0078	0.0106	0.0037	0.0116	1		
A-06	0.0327	0.0519	0.0577	0.0130	0.0079	1	
A-07	0.0214	0.0299	0.0092	0.0086	0.0203	0.0197	1



(a) 가속도 시간이력



(b) 설계응답스펙트럼 및 가속도 응답스펙트럼

〈그림 3〉 인공지진파 A-01 (Soil type I, PGA=0.154g)

$$\rho_{ij}(\tau) = \frac{\sum_{m=1}^{N_i} [\ddot{x}_i(t_m) - \mu_i] [\ddot{x}_j(t_m - \tau) - \mu_j]}{\sqrt{\sum_{m=1}^{N_i} [\ddot{x}_i(t_m) - \mu_i]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^{N_j} [\ddot{x}_j(t_m) - \mu_j]^2}} \quad (8)$$

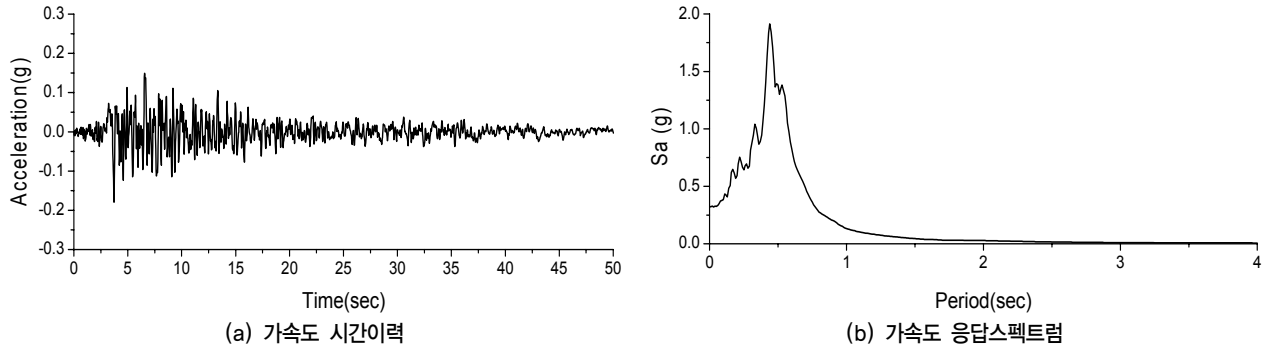
인공지진파 $\ddot{x}_i(t)$ 와 $\ddot{x}_j(t)$ 사이의 상관계수 $\rho_{ij}(\tau)$ 는 두지진파 시계열이 가우스 확률분포를 따르므로 식 (8)과 같이 계산할 수 있다. 여기서 $t_m = m\Delta t$ 이며, μ_i 와 μ_j 는 각각 $\ddot{x}_i(t)$ 와 $\ddot{x}_j(t)$ 의 시간 축에 대한 평균으로 일반적으로 0에 가까운 값이 나타난다.

표 2는 앞서 생성한 7개의 지진파에 대하여 상관관계를 조사한 것으로, 생성된 인공지진파의 상관계수는 모두 0.3 미만으로 나타났다. 따라서 7개의 인공지진파는 국내의 내진설계기준을 만족함을 알 수 있다.⁽¹⁵⁾ 그림 3은 Soil type I, PGA는 0.154g를 가지는 인공지진파이다. 그림 3의 (a)는 인공지진파의 가속도 시간이력을 나타낸 것이고 그림 3의

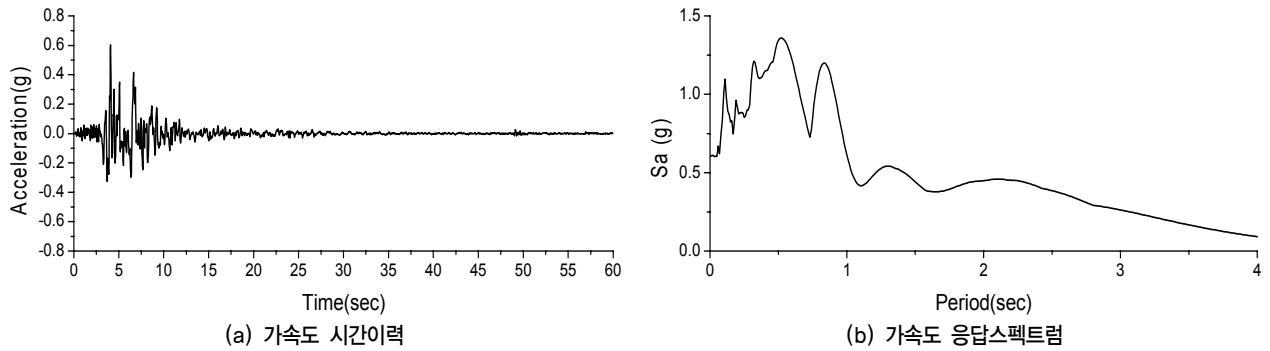
〈표 3〉 지반의 분류⁽¹⁴⁾

지반 종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 (N치)	비배수 전단강도(kPa)
I	경암지반 보통암지반	760이상	-	-
II	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360 ~ 760	>50	>100
III	단단한 토사지반	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~ 100
IV	연약한 토사지반	180미만	<15	<50
V	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

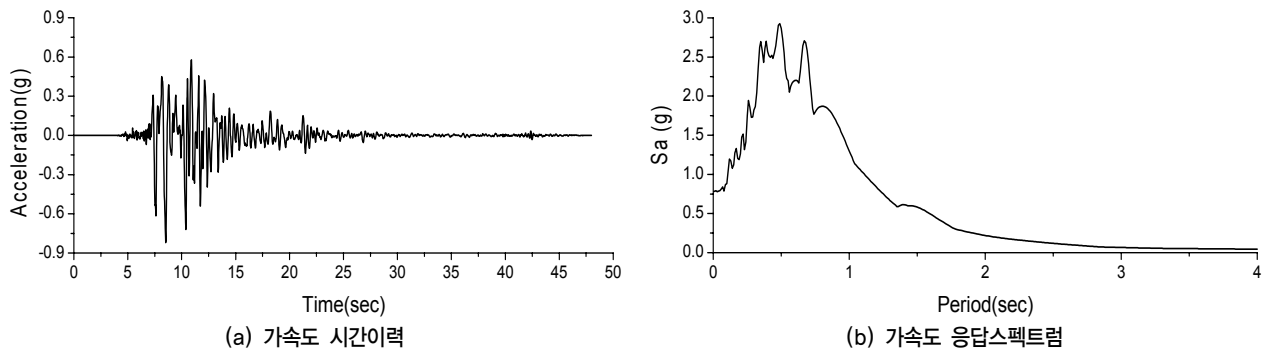
(b)는 도로교 설계기준을 만족하는 설계스펙트럼과 인공지진파의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 본 연구에서 생성한 인공지진파 7개는 동일한 PGA를 가지지만 서로 다른 응답스펙트럼을 보였다. 지반에 대한 분류는 표 3에 제시하였다.



〈그림 4〉 Taft NS(1952), PGA=0.179g



〈그림 5〉 Northridge NS(1994), PGA=0.605g



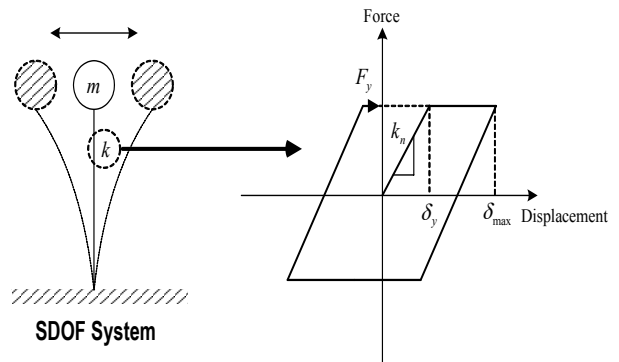
〈그림 6〉 Kobe NS(1995), PGA=0.835g

3.2.2 실측 지진파

비탄성 시간이력해석에 사용된 실측 지진파는 El Centro NS(1940), Taft NS(1952), Northridge NS(1994), Kobe NS(1995) 등 구조물의 지진응답해석에 대표적으로 사용되는 지진파를 선택하였다. 그림 4-6의 (a)는 시간이력해석에 사용된 실측 지진파의 가속도 시간이력을 나타내고 그림 4-6의 (b)는 응답스펙트럼을 나타내고 있다.

3.3 단자유도 구조물의 비탄성 이력모델

비탄성 지진응답을 구하기 위하여 그림 7과 같은 단자유도 구조물을 이용하였다. 그림 7은 단자유도 구조물에서 강



〈그림 7〉 단자유도 구조물의 이력모델(완전 탄소성 모델)

성의 변화를 변위와 하중의 관계로 나타낸 완전 탄소성 이력모델(Perfect Elasto-Plastic Hysteresis Model)을 나타낸

것이다. 본 연구에서 적용된 완전 탄소성 이력모델은 Newmark method와 Newton-Raphson iteration⁽¹²⁾을 사용하여 수치 해석을 수행하였다. 여기서 F_y 는 항복하중, k_n 은 초기강성, δ_{max} 와 δ_y 는 각각 최대변위와 항복변위를 의미한다. 구조물의 매개변수로는 고유주기(T_n)와 지진항복계수(Yield Seismic Coefficient, $C_y = F_y / W$)를 사용하였다. 여기서 고유주기의 범위는 0.2~2.5초, 감쇠비는 5%로 가정하였으며 항복하중을 구조물의 총중량으로 나눈 값으로 구해지는 지진항복계수는 총중량을 고정시키고 항복하중을 변화시켜 0.1과 0.25 그리고 0.5를 사용하였다.

3.4 비탄성 지진응답(Inelastic Seismic Response)

본 연구에서 다루고자 하는 비탄성 지진응답은 변위연성도(Displacement Ductility Demand)와 누적소산에너지(Cumulative Dissipated Energy)이며 그림 7의 비탄성 이력모델로부터 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다. 식 (9)는 변위연성도를 의미하고 단자유도 이력모델의 응답에서 최대변위를 항복변위로 나눈 무차원 값을 나타낸다. 그리고 식 (10)은 누적소산에너지를 구하는 식이며 단자유도 이력모델에서 하중-변위곡선의 면적을 의미한다. 식 (11)은 그림 7에 나타난 이력모델의 하중응답을 이용하여 복원력(Restoring Force)을 계산한 것이고 식 (12)는 그림 7의 변위응답을 계산하는 과정을 나타낸 것으로 여기서 F_i 와 δ_i 는 각각 i 번째 step의 복원력과 변위이다.

$$\mu = \delta_{max} / \delta_y \quad (9)$$

$$V_E = \sum_{i=1}^n F_i^* \Delta D_i \quad (10)$$

$$F_i^* = (F_i + F_{i+1}) / 2 \quad (11)$$

$$\Delta D_i = (\delta_{i+1} - \delta_i) \quad (12)$$

〈표 4〉 인공지진파 7개의 변위연성도($C_y = 0.1$)

Artificial earthquakes	$T_n = 0.2$ 초	$T_n = 0.3$ 초	$T_n = 0.5$ 초	$T_n = 1.0$ 초	$T_n = 2.0$ 초	$T_n = 2.5$ 초
A-01	7.08	4.05	2.78	1.67	0.69	0.61
A-02	16.81	3.81	2.61	1.36	0.78	0.55
A-03	6.23	10.33	3.20	1.35	0.78	0.52
A-04	7.80	11.07	3.79	1.47	0.79	0.59
A-05	6.70	7.86	3.91	1.51	0.76	0.68
A-06	6.85	9.18	6.54	1.58	0.82	0.63
A-07	7.28	8.04	2.65	1.79	0.71	0.61

4. PGA와 SI를 이용한 비탄성 지진응답의 비교

4.1 PGA와 비탄성 지진응답특성 비교

일반적으로 내진설계에서 지진의 특성을 나타내는 대표 값으로서 PGA를 주로 사용하였으며 이 경우 동일한 PGA를 가지는 지진파는 동일한 특성을 가지는 것으로 가정하게 된다. 하지만 현재까지 기록된 모든 지진파는 그 특성이 상이하며 동일한 PGA의 인공지진파를 생성함에 있어서도 서로 상관성이 없게 생성하여 내진설계에 사용하도록 권장하고 있다. 즉, 지진파의 특성에 따라 그 응답이 다를 수도 있다는 것을 인정하는 것이다. 따라서 PGA를 이용하여 지진의 특성을 평가하는 것이 타당하지 확인하기 위하여 앞서 생성된 동일한 PGA를 가지며 서로 상관성이 없는 7개의 인공지진파를 이용하여 비탄성 지진응답을 구하였다. 이때 매개변수로서 지진항복계수(C_y)와 대상구조물의 주기(T_n)를 이용하였다.

표 4-6은 동일한 PGA를 가지는 지진파에 대하여 지진항복계수에 따른 비탄성 지진응답인 변위연성도를 나타낸 것이다. 그리고 표 7-9는 같은 경우에 대한 누적소산에너지를 나타낸 것이다. 그림 8-9는 앞서 설명한 표를 도식화하여 나타낸 것이다. 그림 8과 9를 보면 동일한 PGA를 가지더라도 지진파의 특성이 각기 다르므로 서로 다른 지진응답이 나타남을 알 수 있다. 그림 8과 9에서 구조물의 주기가 2.0초일 경우 동일선 상에 존재하는 것처럼 보이지만, 이는 구조물이 비탄성 영역까지 이르지 않아 탄성영역에서 머물기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 변위연성도 μ 가 1이하의 값을 가지므로 비탄성 영역의 응답으로 보기 힘들다는 의미가 된다. 따라서 PGA는 지진파의 강도를 나타내는 값으로 지진파의 특성까지 나타내기에는 부족하다는 것을 알 수 있으며 PGA가 비탄성 지진응답특성과는 연관성이 크지 않다는 것으로 볼 수 있다.

〈표 5〉 인공지진파 7개의 변위연성도($C_y = 0.25$)

Artificial earthquakes	$T_n = 0.2$ 초	$T_n = 0.3$ 초	$T_n = 0.5$ 초	$T_n = 1.0$ 초	$T_n = 2.0$ 초	$T_n = 2.5$ 초
A-01	2.25	2.24	1.28	0.65	0.27	0.24
A-02	2.33	1.86	1.19	0.62	0.31	0.22
A-03	1.68	2.16	1.46	0.59	0.31	0.21
A-04	2.53	1.67	1.14	0.64	0.32	0.24
A-05	1.48	1.92	1.35	0.64	0.30	0.27
A-06	3.03	1.50	1.31	0.53	0.33	0.25
A-07	2.43	1.85	1.37	0.58	0.28	0.24

〈표 6〉 인공지진파 7개의 변위연성도($C_y = 0.5$)

Artificial earthquakes	$T_n = 0.2$ 초	$T_n = 0.3$ 초	$T_n = 0.5$ 초	$T_n = 1.0$ 초	$T_n = 2.0$ 초	$T_n = 2.5$ 초
A-01	0.77	0.71	0.61	0.33	0.14	0.12
A-02	0.82	0.72	0.57	0.31	0.16	0.11
A-03	0.85	0.77	0.64	0.3	0.16	0.1
A-04	0.81	0.79	0.6	0.32	0.16	0.12
A-05	0.79	0.78	0.63	0.32	0.15	0.14
A-06	0.79	0.73	0.58	0.27	0.16	0.13
A-07	0.78	0.69	0.61	0.29	0.14	0.12

〈표 7〉 인공지진파 7개의 누적소산에너지($\text{kN} \cdot \text{mm}$, $C_y = 0.1$)

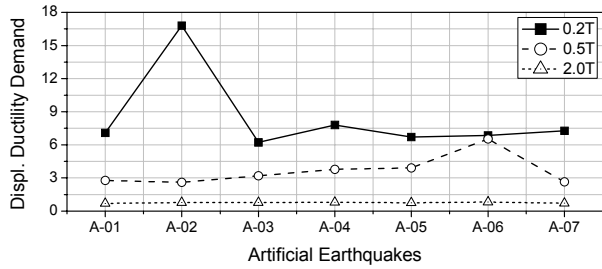
Artificial earthquakes	$T_n = 0.2$ 초	$T_n = 0.3$ 초	$T_n = 0.5$ 초	$T_n = 1.0$ 초	$T_n = 2.0$ 초	$T_n = 2.5$ 초
A-01	2429	4492	2183	1325	2.7	18.1
A-02	2698	3682	4651	1078	2.3	3.7
A-03	2103	4259	2584	694	9.9	9
A-04	2658	4691	3055	1300	2.1	1.1
A-05	2649	4827	3250	1084	0.2	6.2
A-06	2830	3743	4640	685	1.3	2.3
A-07	2366	4291	4267	1653	4.8	1.3

〈표 8〉 인공지진파 7개의 누적소산에너지($\text{kN} \cdot \text{mm}$, $C_y = 0.25$)

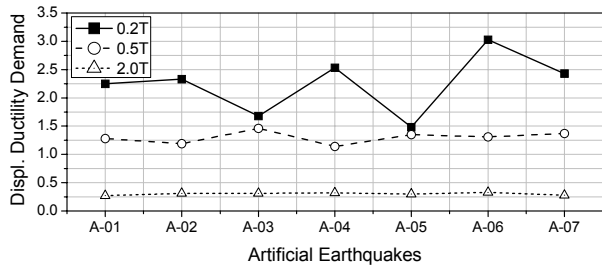
Artificial earthquakes	$T_n = 0.2$ 초	$T_n = 0.3$ 초	$T_n = 0.5$ 초	$T_n = 1.0$ 초	$T_n = 2.0$ 초	$T_n = 2.5$ 초
A-01	300.4	735	265.2	1	2.3	18.1
A-02	69.2	910.2	402	0.4	2.3	3.7
A-03	199.7	1480	666	3.4	5.5	4.8
A-04	425.1	1268	411	1.7	2.1	0.6
A-05	373.1	1050	429	0.7	0.5	2.9
A-06	184.6	553	594	2.6	1.1	7.5
A-07	304	1382	900	1.3	0.9	1.2

〈표 9〉 인공지진파 7개의 누적소산에너지($\text{kN} \cdot \text{mm}$, $C_y = 0.5$)

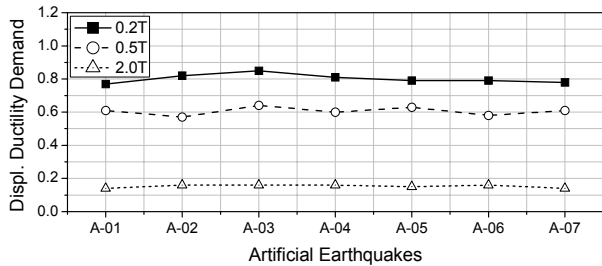
Artificial earthquakes	$T_n = 0.2$ 초	$T_n = 0.3$ 초	$T_n = 0.5$ 초	$T_n = 1.0$ 초	$T_n = 2.0$ 초	$T_n = 2.5$ 초
A-01	0.8	0.9	0.4	1	2.3	18.1
A-02	1	0.7	0.6	0.5	2.3	3.7
A-03	0.3	3.6	0.9	0.8	3.4	3.9
A-04	0.5	1.8	1.3	0.4	2.1	1.1
A-05	0.2	0.3	1.4	0.9	0.5	2.4
A-06	0.5	0.6	0.8	0.7	1	2.1
A-07	0.8	1.4	0.3	1.2	1.3	1.7



(a) $C_y = 0.1$ 일 때의 변위연성도

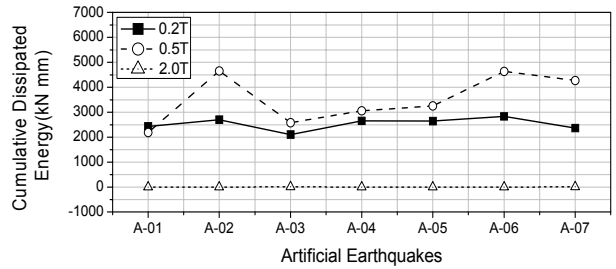


(b) $C_y = 0.25$ 일 때의 변위연성도

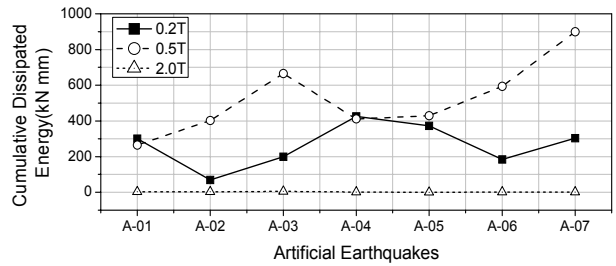


(c) $C_y = 0.5$ 일 때의 변위연성도

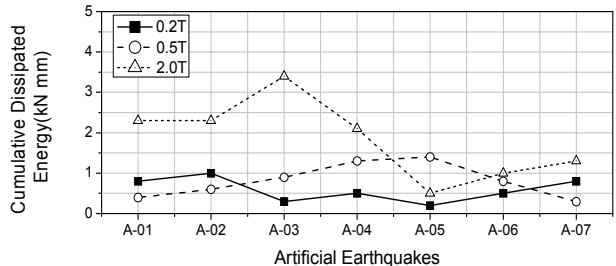
〈그림 8〉 지진항복계수에 따른 인공지진파의 변위연성도 변화



(a) $C_y = 0.1$ 일 때의 누적소산에너지



(b) $C_y = 0.25$ 일 때의 누적소산에너지



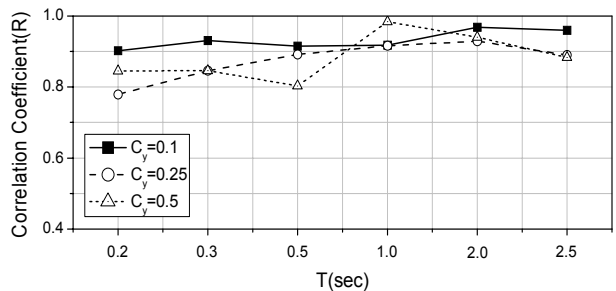
(c) $C_y = 0.5$ 일 때의 누적소산에너지

〈그림 9〉 지진항복계수에 따른 인공지진파의 누적소산에너지 변화

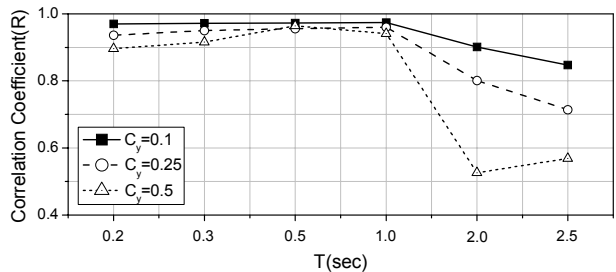
4.2 SI와 비탄성 지진응답과의 상관관계

SI가 PGA보다 지진특성을 표현하는데 타당함을 검증하기 위하여 생성된 7개의 인공지진파들과 4종류의 실측지진파들을 이용하여 비탄성 지진해석을 수행하였으며 그 결과로부터 비탄성 지진응답과 SI의 상관관계를 그래프로 나타내어 보았다. 사용된 실측지진파는 El Centro NS(1940), Taft NS(1952), Northridge NS(1994), Kobe NS(1995)이며 이중 El Centro NS(1940)파의 경우 PGA를 증감한 7개의 지진파를 사용하였다.

그림 10~13은 SI에 대하여 비탄성 지진응답과의 상관관계를 주기와 상관계수(Correlation Coefficient)로 나타낸 것이며 그림 10~13의 (a)는 SI와 변위연성도와의 상관관계를 도식화 한 것이다. 지진항복계수가 0.1일 경우는 대체적으로 90%이상의 상관성을 가지고, 지진항복계수가 증가할수록 상관계수는 다소 작아지는 경향이 있다. 이는 대상 구조물이 유연할 경우 SI와 변위연성도의 관계는 상당히 밀접한 연관성이 있다고 볼 수 있다. 그림 10~13의 (b)는 SI와 누적소산에너지와의 상관관계를 나타낸 것으로 변위연성도



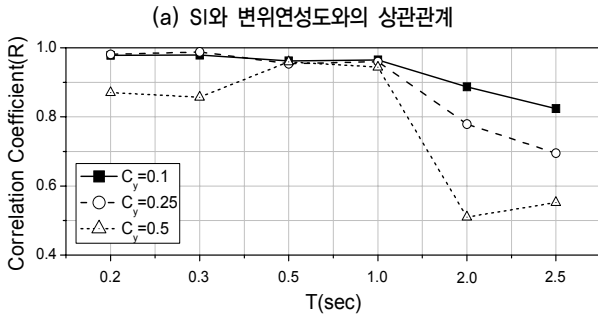
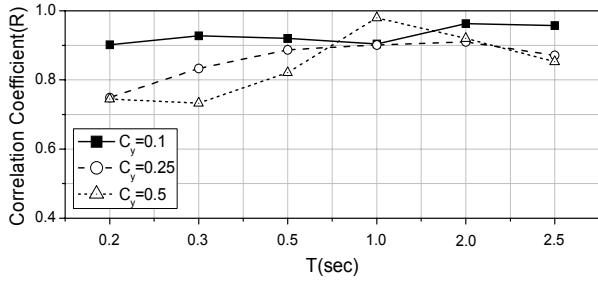
(a) SI와 변위연성도와의 상관관계



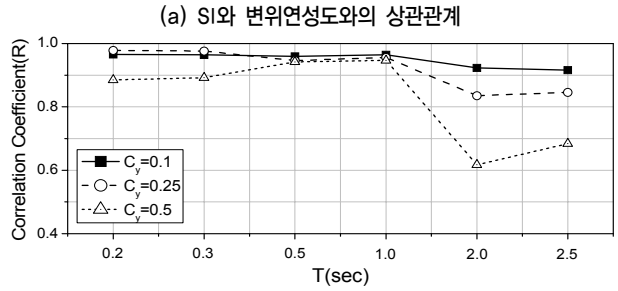
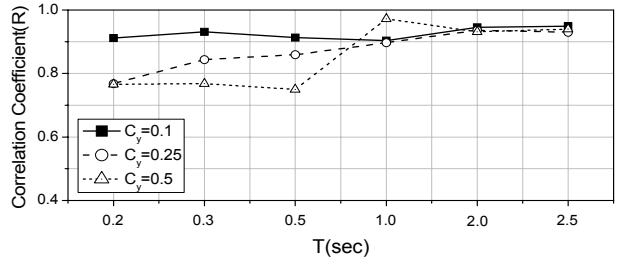
(b) SI와 누적소산에너지와의 상관관계

〈그림 10〉 Housner $S_i^{(6)}$ 와 비탄성 지진응답의 상관관계

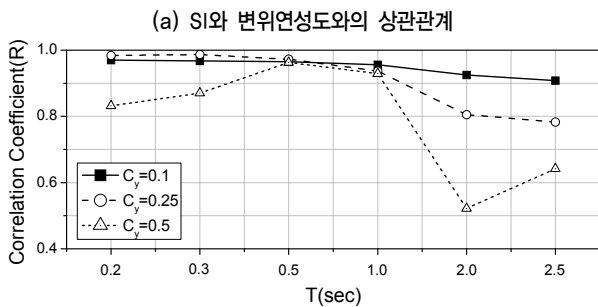
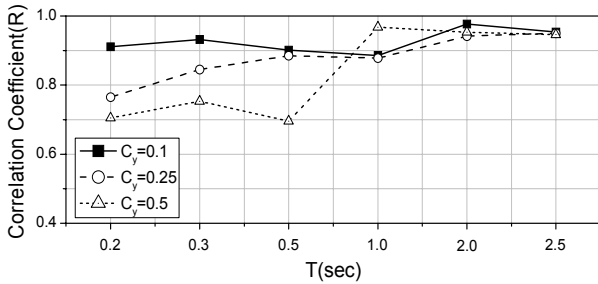
와 유사한 경향을 가지며 주기가 1.0초보다 커질수록 상관계수가 급격히 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 단자



〈그림 11〉 Nau and Hall SI⁽¹¹⁾와 비탄성 지진응답과의 상관관계



〈그림 13〉 Matsumura SI⁽¹⁾와 비탄성 지진응답과의 상관관계



〈그림 12〉 Kappos SI⁽¹⁰⁾와 비탄성 지진응답과의 상관관계

유도 구조물의 비탄성 수치해석을 수행하였을 때 대상 구조물의 주기가 1.0초를 초과하면 비탄성영역으로 해석이 진행되지 않았기 때문이다. 에너지가 큰 실측지진파인 KOBE(1995)나 Northridge(1994)의 경우에는 대상 구조물의 주기가 1.0초를 초과하여도 비탄성영역까지 해석이 진행되지만 타 지진파들의 경우 구조물의 주기가 1.0초를 초과하면 탄성영역에서만 해석이 진행되기 때문에 그림 10~13(b)와 같은 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 PGA를 이용하여 지진의 특성을 평가하는 것이 타당하지 확인하기 위하여 동일한 PGA를 가지는 7개의 인공지진파를 이용하여 단자유도 구조물에 완전 탄소성 이력모델을 적용하고 구조물의 주기와 지진항복계수를 매개변수로 하여 비탄성 수치해석을 수행하였다. 그리고 각 지진파에 대하여 동일한 비탄성 지진응답이 나타나는지 확인하였다. 또한 SI가 PGA에 비하여 지진의 특성을 잘 반영하고 있음을 검증하기 위하여 인공지진파와 실측된 지진파들을 이용하여 동일한 방법으로 비탄성 수치해석을 수행하였으며 그 결과로 얻어진 비탄성 지진응답과 SI의 상관관계를 검토하였다.

동일한 PGA를 가지는 인공지진파를 이용한 비탄성 수치해석을 통해 얻어진 변위연성도와 누적소산에너지를 비교한 결과 동일한 PGA(0.154g)임에도 불구하고 인공지진파의 비탄성 지진응답의 경향이 다르게 나타났으며 변위연성도의 경우 지진항복계수가 작을수록 커지는 경향이 있음을 확인할 수 있었다. 항복하중을 구조물의 총 중량으로 나눈 값인 지진항복계수가 작으면 대상 구조물은 유연한 것으로 가정할 수 있기 때문에 외부하중에 대한 응답이 크게 나타나게 된 것으로 판단된다.

각기 다른 특성을 가지는 인공지진파와 실측지진파 등 17개의 지진파에 대하여 비탄성 수치해석을 수행하고 그 결과로 얻어진 속도응답스펙트럼들을 이용하여 4가지 기법으로 SI를 구하였다. 그리고 비탄성 지진응답과의 상관관계를 분

석하였다. 그 결과 변위연성도의 경우 지진항복계수가 0.1 일 경우 90%이상의 상관성을 보였고 대체로 SI와 상관성은 밀접하게 나타났다. 누적소산에너지는 구조물의 주기가 1.0 초 전후로 상관성에 차이를 보였다. 수치해석결과 주기가 1.0초일 경우 비탄성영역과 탄성영역이 맞물려 지진에너지의 크기에 따라 응답차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 SI는 유연한 구조물에 대하여 상당한 신뢰성을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 탄성영역에서 지진에너지의 크기에 따라 비탄성응답이 확연한 차이를 보이고 있으며 차후 연구를 통하여 이 부분에 대한 SI의 효용성을 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 내용을 바탕으로 지진격리시스템과 같이 비탄성거동이 두드러진 경우에 PGA는 지진의 강도를 나타내는 계수로서 지진의 전체적인 경향이나 특성을 대표하기에는 부족한 것으로 판단됨에 따라 보다 신뢰성 있는 비탄성 지진해석응답을 구하기 위하여 SI를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 지식경제부의 재원으로 시행하는 에너지기술평가원의 에너지기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 2011T100200080)

참고 문헌

1. Matsumura, K., "On the intensity measure of strong motions related to structural failures," *Proceedings of Tenth World Conference Earthquake Engineering*, Vol. 1, 375-380, 1992.
2. Tso, W.K., Zhu, T.J., and Heidebrecht, A.C., "Engineering implication of ground motion A/V ratio," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 3, 133-134, 1992.
3. Ueong, Y.S., "A study on feasibility of SI for identification of earthquake damages in Taiwan," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, No. 1, 185-193, 2009.
4. Martinez-Rueda, J.E., "Scaling procedure for natural accelerograms based on a system of spectrum intensity scales," *Earthquake Spectra*, Vol. 14, No. 1, 135-152, 1998.
5. 박종관, "지표면 스펙트럼 강도를 통한 지반의 액상화 평가에 대한 연구," 한국지반공학회 논문집, 제14권, 제2호, 9-19, 1998.
6. Housner, G.W., "Spectrum intensities of strong motion earthquakes," *Proceedings of Symposium on Earthquake and Blunt Effects on Structures*, EERI, 1952.
7. 김남식, 김재민, 이계희, 강형택, "지진격리교량의 지진해석을 위한 인공지진파의 작성," 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 487-494, 2005.
8. ASCE Standard, *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary*, ASCE, 4-98, 1999.
9. Housner, G.W., "Measures of severity of earthquake ground shaking," *Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 25-34, 1975.
10. Kappos, A.J., "Sensitivity of calculated inelastic seismic response to input motion characteristics," *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Vol.2, 25-34, 1990.
11. Nau, J.M. and Hall, W.J., "Scaling methods for earthquake response spectra," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.110, No.7, 1533-1548, 1984.
12. Paz, M., *Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
13. Rodriguez, M., "A measure of the capacity of earthquake ground motions to damage structures," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 23, No. 6, 627-643, 1994.
14. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설교통부, 2010.
15. 대한토목학회, 도로교설계기준 해설, 기문당, 2008.