

최소오차 최적합화 방법에 의한 인공 시간이력 지진기록군의 생성

Generation of Artificial Time History Earthquake Record Family using the Least Squares Fitting Method

김용석¹⁾

Kim, Yong-Seok

국문 요약 >> 최근 구조물의 지진해석에서 시간이력 지진해석의 필요성이 증대되고 있는데, 시간이력해석을 위해서는 최소 7개의 지진 기록을 사용하도록 IBC2003, ASCE와 KBC2005의 내진설계 기준에서 요구하고 있다. 시간이력 지진해석을 위해 지진기록의 선정은 주어진 대지 조건에 따른 설계스펙트럼을 만족하도록 시간이력 지진기록을 설계 지반조건과 유사한 지반에서 계측된 지진기록들 중에서 선정하거나 설계스펙트럼을 만족하는 인공지진기록을 생성하여 사용할 수 있지만, 이 연구에서는 절충적 방법으로 태평양지진연구센터 (PEER) 데이터베이스에서 암반 지진기록으로 알려진 50개 계측지진기록을 이용하여 7개 인공 시간이력 지진기록을 생성하였다. 일차 조정계수를 곱한 지진응답스펙트럼이 목표설계스펙트럼에 최적합한 7개 지진기록을 선정하고, SRSS 평균값이 목표설계스펙트럼과 최소의 오차를 갖게 하는 최적합화법으로 구한 조정계수를 선정된 각 지진기록에 곱하여 7개 인공 시간이력 지진기록군을 생성하였다.

주요어 시간이력, 설계스펙트럼, 조정계수, SRSS 평균값, 최적합화법, 지진기록군

ABSTRACT >> Recently the necessity of time history analyses is increasing for the seismic analyses of a structure, and the seismic design provisions of IBC2003, ASCE and KBC2005 require the use of a minimum of seven earthquake records for the time history analyses. Earthquake records for the time history analyses could be selected from the database of the field-measured earthquake records having similar site conditions with the designed site, or from simulated sites satisfying the design spectrum. However, in this study seven earthquake records were generated using 50 earthquake records, classified as records measured at the rock, in the database of the Pacific Earthquake Research Center (PEER). Seven earthquake records were first selected by the least squares fitting method comparing the scaling factored response spectra with the specified design spectrum, and a family of seven artificial time history earthquake records was ultimately generated by multiplying scaling factors, which were calculated by the least squares fitting method and the SRSS averaging method, to the corresponding selected earthquake records.

Key words time history, design spectrum, scaling factor, SRSS averaging, least squares fitting method, family of earthquake records

1. 서론

구조물에 대한 합리적인 지진해석을 위해서는 구조물의 지반체계에 적합한 시간이력 지진기록을 사용하여 구조물에 대한 시간이력 지진해석을 수행하는 것이 가장 바람직하지만 대지조건에 적합한 시간이력 계측지진기록을 구하기가 쉽지 않고, 적절한 인공지진기록의 생성 또한 전문가들

에게도 상당히 어려운 일이다. 국내 건축물의 내진설계 기준인 건축구조설계기준(KBC2005)에서는 건축구조물의 동적지진해석법으로 시간이력 해석법을 허용하고 있지만 지반조건을 고려한 시간이력 설계지진기록의 선정방법에 대해서는 정확한 방법을 제시하지 않고 있다.⁽¹⁾ 따라서 실무에 종사하는 엔지니어들이 합리적이고 합당한 시간이력 지진 기록들을 적절히 선정하여 사용하는 것은 현실적으로 간단하고 쉬운 일이 아니다.⁽²⁾

KBC2005에 의하면 시간이력해석을 위해서는 7개 이상의 계측된 지진기록이나 설계스펙트럼을 이용하여 생성한 인공지진기록을 사용하여 설계대상 건물 주기의 0.2배에서 1.5배 사이에서 5% 감쇠 지진시간이력들의 조합제공

¹⁾ 정회원·국립목포대학교, 교수
(대표저자: yskim@mokpo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 7. 22 / 수정일 1차 : 2008. 8. 20, 2차 : 9. 13 / 게재확정일 : 2008. 9. 16)

(SRSS) 스펙트럼 평균값이 같은 구간의 설계스펙트럼 평균값의 1.4배 이상이 되도록 요구하고 있다.⁽¹⁾

또, IBC2003과 IBC2006에서 원용하고 있는 ASCE7-05에서는 시간이력 지진기록 선정에 대해 KBC2005와 유사하게 다음과 같이 요구하고 있다.⁽³⁻⁵⁾

For each pair of horizontal ground motion components, a square root of the sum of the squares(SRSS) spectrum shall be constructed by taking the SRSS of the 5 percent-damped response spectra for the scaled components. Each pair of motions shall be scaled such that for each period between 0.2T and 1.5T, the average of the SRSS spectra from all horizontal component pairs does not fall below 1.3 times the corresponding ordinate of the design response spectrum by more than 10 percent.

구조물의 시간이력해석을 위한 시간이력 지진기록 선정에는 설계스펙트럼에 맞는 인공지진기록을 생성하는 방법⁽⁶⁻⁹⁾과 시간이력 계측지진기록의 크기를 조정(Scaling)하여 시간이력 지진기록을 생성하는 방법^{(2),(10),(11)}이 있고, 최근까지도 수십 년 동안 여러 가지 독특한 방법들이 많이 연구되었지만 실제 지진기록의 특성을 갖춘 설계스펙트럼을 만족시키는 다수의 시간이력 지진기록을 한꺼번에 쉽고 간단하게 선정할 수 있는 방법은 많지 않다.

이 연구에서는 미국 Berkeley 소재 캘리포니아 주립대학교에 소속된 Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)⁽¹²⁾에서 제공하고 있는 전 세계 143개 지진으로부터 기록된 1557개 지진기록 중에서 United States Geology Survey(USGS)와 Geomatrix 지반조건 분류상 지반조건이 A(암반)로 평가된 표 1에 열거한 대부분 동서와 남북 방향으로 짝을 이룬 50개 지진기록⁽¹³⁾을 선정하여 구성한 데이터베이스를 이용하여 목표설계스펙트럼을 만족하는 구조물의 지진해석을 위한 시간이력 지진기록군을 생성하는 실무적인 수치해석 프로그램을 개발하였다. 연구는 최종 생성된 시간이력 지진기록군의 SRSS 평균스펙트럼이 목표설계스펙트럼을 최적으로 만족하도록 동적영역 조정계수방법을 이용한 최소오차 최적화법(Least Squares Fitting Method)으로 수행하였다.

그림 1에는 지진응답스펙트럼의 특성을 파악하기 위해서 50개 암반지진기록을 지진가속도가 0.1g이하인 14개의 약진 지진기록, 지진가속도가 0.1g에서 0.2g인 30개 중진 지진기록 및 지진가속도가 0.2g에서 0.3g인 6개 강진 지진기록으로 분류해서 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 평균스펙트럼과 동시에 나타냈다. 그림 1에 나타난 지진기록의 응답스펙트럼을 분석해 보면 지진기록에 연약지반의 영향이 상당히

포함되어 있는데, 장주기 영역에서 연약지반의 증폭영향이 포함된 암반지진기록을 데이터베이스에 사용한 것은 지반의 증폭영향이 없는 암반지진기록 만으로는 연약지반의 영향을 포함한 목표설계스펙트럼(Specified Design Spectrum)을 만족하는 지진기록을 생성하는 것이 상당히 곤란하기 때문이다. 한편, 데이터베이스를 위한 지진기록은 사용자가 임의로 추가하거나 다시 선정할 수 있다.

2. SRSS 평균스펙트럼 최적화

이 연구에서 이용한 SRSS 평균스펙트럼 최적화 알고리즘은 지진가속도 크기를 조정(Scaling Factored) n개의 지진기록으로 다음 식 (1)에 따라 작성한 SRSS 평균스펙트럼이 목표설계스펙트럼에 최적화하도록 다음 식 (2)를 이용하여 두 스펙트럼 사이의 오차를 제공한 값이 최소가 되도록 수치해석을 수행하는 것이다.⁽¹⁰⁾

$$Sa(T_i)_{avg} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [F_j Sa_j(T_i)]^2}{\sum_{j=1}^n F_j^2}} \quad (1)$$

$$Err = \sum_{T_i=T_s}^{T_f} [Sa(T_i)_{avg} - Ds(T_i)]^2 \quad (2)$$

여기서, $Sa(T_i)_{avg}$: 주기 T_i 에서 n개 지진기록의 SRSS 평균스펙트럼 가속도

$Sa_j(T_i)$: 주기 T_i 에서 j번째 지진기록의 응답스펙트럼 가속도

$Ds(T_i)$: 주기 T_i 에서 목표설계스펙트럼 가속도

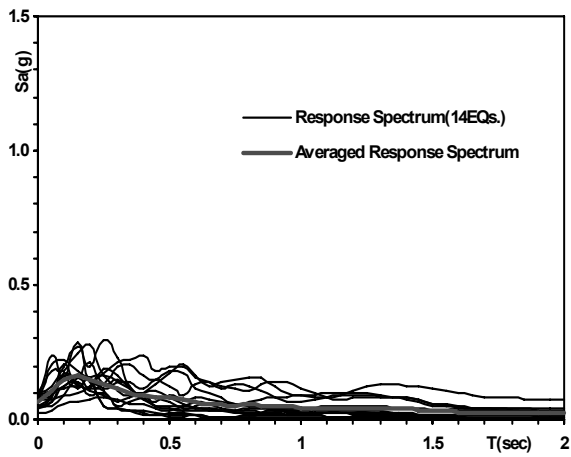
F_j : j번째 지진기록의 가속도 조정계수 (Scaling Factor)

T_s, T_f : 최적화 구간의 시작 및 마지막 주기

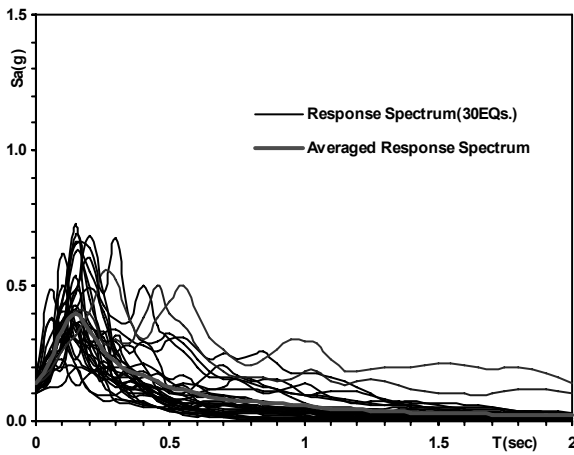
수치해석은 식 (1)에 나타난 것처럼 먼저 일정한 간격으로 각 주기에서 선정된 n개의 지진응답스펙트럼에 각 지진응답스펙트럼마다 체계적(뒤에서 설명됨)으로 가정한 조정계수를 곱해서 제공한 값을 모두 합계하고, n개의 가정한 조정계수를 각각 제공하여 합한 값으로 나누어 제공군을 구한다. 다음에 식 (2)로 각 주기에서 응답스펙트럼과 목표스펙트럼의 차이를 제공한 값을 구하여 최적화하고자 하는 시작주기에서 마지막주기까지 합한 값이 최소가 되도록 하는 조정계수를 선정한다.⁽¹⁴⁾ 이 때 최적화 주기영역은 사용자가 자유롭게 지정할 수 있다.

〈표 1〉 PEER 데이터베이스에서 내려받은 50개 지진기록

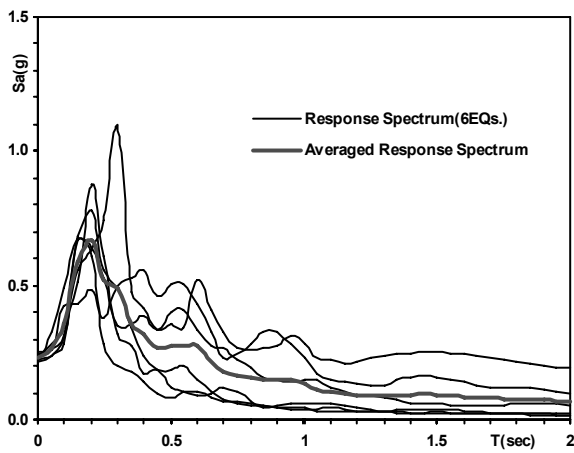
EQ. Name	Year	Station Location	M	Acceleration (g)	Epicenter (km)	Focus (km)	Site Conditions	Component
San Francisco	1957	1117 Golden Gate Park	5.3	0.095	11.1	8	A, A	GGP010
San Francisco	1957	1117 Golden Gate Park	5.3	0.112	11.1	8	A, A	GGP100
Anza(HorseCany)	1980	Anza - Pinyon Flat	4.9	0.110	12.7	13.6	A, A	PFT045
Anza(HorseCany)	1980	Anza - Pinyon Flat	4.9	0.131	12.7	13.6	A, A	PFT135
Anza(HorseCany)	1980	5045 Anza-Terwilliger Valley	4.9	0.131	7.6	13.6	A, A	TVY045
Anza(HorseCany)	1980	5045 Anza-Terwilliger Valley	4.9	0.081	7.6	13.6	A, A	TVY135
Landers	1992	12206 SilentValley-Poppet Flat	7.3	0.050	54.6	7	A, A	SIL000
Landers	1992	12206 SilentValley-Poppet Flat	7.3	0.040	54.6	7	A, A	SIL090
Loma Prieta	1989	58338 Piedmont Jr High	6.9	0.084	92.2	17.5	A, A	PJH045
Loma Prieta	1989	58338 Piedmont Jr High	6.9	0.071	92.2	17.5	A, A	PJH315
Loma Prieta	1989	58151 SF - Rincon Hill	6.9	0.078	94.3	17.5	A, A	RIN000
Loma Prieta	1989	58151 SF - Rincon Hill	6.9	0.092	94.3	17.5	A, A	RIN090
Loma Prieta	1989	So. San Francisco, Sierra Pt.	6.9	0.105	83.5	17.5	A, A	SSF205
Morgan Hill	1984	47379 Gilroy Array #1	6.2	0.069	38.6	8.5	A, A	G01230
Morgan Hill	1984	47379 Gilroy Array #1	6.2	0.098	38.6	8.5	A, A	G01320
N. Palm Springs	1986	13198 Murrieta Hot Springs	6	0.053	65.6	11	A, A	H01000
N. Palm Springs	1986	13198 Murrieta Hot Springs	6	0.049	65.6	11	A, A	H01090
Duzce, Turkey	1999	Lamont 1060	7.1	0.053	44.4	10	A, A	1060-E
Duzce, Turkey	1999	Lamont 1060	7.1	0.028	44.4	10	A, A	1060-N
Coyote Lake	1979	47379 Gilroy Array #1	5.7	0.103	12.6	9.6	A, A	G01230-2
Coyote Lake	1979	47379 Gilroy Array #1	5.7	0.132	12.6	9.6	A, A	G01320-2
Hollister	1974	Gilroy Array #1	5.2	0.105	11.1	6.1	A, A	A-G01157
Hollister	1974	Gilroy Array #1	5.2	0.132	11.1	6.1	A, A	A-G01247
Northern Calif	1975	Cape Mendocino, Petrolia	5.2	0.115	28.9	21	A, A	D-CPM030
Northern Calif	1975	Cape Mendocino, Petrolia	5.2	0.179	28.9	21	A, A	D-CPM120
Northridge	1994	Wonderland Ave	6.7	0.112	19	17.5	A, A	WON095
Northridge	1994	Wonderland Ave	6.7	0.172	19	17.5	A, A	WON185
Northridge	1994	San Gabriel- E. Grand Ave.	6.7	0.141	44.3	17.5	A, A	GRN180
Northridge	1994	San Gabriel- E. Grand Ave.	6.7	0.256	44.3	17.5	A, A	GRN270
Northridge	1994	Mt Wilson-CIT Seis Sta	6.7	0.234	44.8	17.5	A, A	MTW000
Northridge	1994	Mt Wilson-CIT Seis Sta	6.7	0.134	44.8	17.5	A, A	MTW090
Northridge	1994	Lake Hughes #9	6.7	0.165	44.8	17.5	A, A	L09000
Northridge	1994	Lake Hughes #9	6.7	0.217	44.8	17.5	A, A	L09090
N. Palm Springs	1986	Anza - Red Mountain	6	0.104	46.2	11	A, A	ARM270
N. Palm Springs	1986	Anza - Red Mountain	6	0.129	46.2	11	A, A	ARM360
N. Palm Springs	1986	Silent Valley - Poppet F	6	0.139	27.7	11	A, A	SIL000-2
N. Palm Springs	1986	Silent Valley - Poppet F	6	0.113	27.7	11	A, A	SIL090-2
Whittier Narrows	1987	Mt Wilson - CIT Seis Sta	6	0.123	19.6	14.5	A, A	A-MTW000
Whittier Narrows	1987	Mt Wilson - CIT Seis Sta	6	0.186	19.6	14.5	A, A	A-MTW090
Whittier Narrows	1987	San Gabriel - E Grand Av	6	0.199	4.8	14.5	A, A	A-GRN270
Whittier Narrows	1987	24399 Mt Wilson-CIT Seis Sta	5.3	0.158	18.7	14.6	A, A	B-MTW000
Whittier Narrows	1987	24399 Mt Wilson-CIT Seis Sta	5.3	0.142	18.7	14.6	A, A	B-MTW090
Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	7.4	0.244	47	15	A, A	GBZ000
Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	7.4	0.137	47	15	A, A	GBZ270
Kocaeli, Turkey	1999	Izmit	7.4	0.152	5.3	15	A, A	IZT180
Kocaeli, Turkey	1999	Izmit	7.4	0.220	5.3	15	A, A	IZT090
San Fernando	1971	Lake Hughes #9	6.6	0.157	23.1	13	A, A	L09021
San Fernando	1971	Lake Hughes #9	6.6	0.134	23.1	13	A, A	L09291
San Fernando	1971	Santa Anita Dam	6.6	0.212	39.2	13	- , A	SAD273
San Fernando	1971	Santa Anita Dam	6.6	0.151	39.2	13	- , A	SAD003



(a) 14개 약진 응답스펙트럼(0.0g-0.1g)



(b) 30개 중진 응답스펙트럼(0.1g-0.2g)



(c) 6개 강진 응답스펙트럼(0.2g-0.3g)

〈그림 1〉 50개 지진기록의 5% 감쇠비 응답스펙트럼

3. 동적 지진해석을 위한 시간이력 지진기록 생성 알고리즘

구조물의 동적 시간이력 지진해석을 위해서는 필요한 수 (n개) 만큼의 시간이력 지진기록이 필요하기 때문에 목표설

계스펙트럼을 만족시킬 수 있는 필요한 수의 시간이력 지진 기록들을 안정적이고 간편하게 생성할 수 있는 알고리즘을 그림 2에 나타난 것처럼 개발하였다.

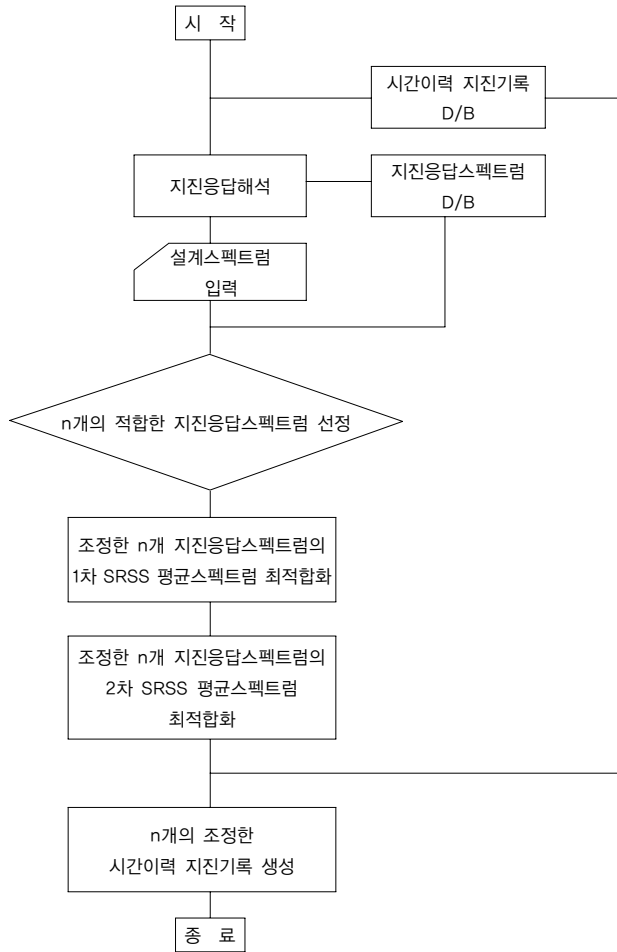
이 연구에서 시간이력 지진기록을 생성하기 위해서는 먼저 데이터베이스에 있는 지진기록으로 지진응답스펙트럼 데이터베이스를 만든다. 다음에 지진응답스펙트럼 데이터베이스에 있는 각 응답스펙트럼에 조정계수를 바꾸면서 곱하여 설계스펙트럼과의 오차제곱합이 최소가 되는 1차조정계수와 최소 오차제곱합을 구한다. 그 후 지진응답스펙트럼과 설계스펙트럼과의 오차제곱합이 작은 순서에 따라 필요한 갯수(n개) 만큼의 지진응답스펙트럼을 선정한다.

앞에서 선정한 지진응답스펙트럼에 1차조정계수를 곱한 지진기록의 응답스펙트럼을 구하여 다시 0.15에서부터 0.1 간격으로 가정한 2차조정계수를 곱하여 SRSS 평균스펙트럼을 구한 후 설계스펙트럼과의 오차제곱합이 최소가 되게 하는 2차조정계수를 구한다. 이때 각 1차조정계수를 곱한 지진응답스펙트럼에 곱하는 2차조정계수는 0.1 간격으로 5단계 씩 증가시키고 0.5까지 증가하여도 오차제곱합의 최소화 이루어지지 않을 때에는 연속해서 영역을 다시 0.5씩 증가시키면서 동적으로 반복계산과정을 수행하여 오차제곱합이 최소가 되게 하는 2차조정계수를 구한다. 이렇게 조정계수를 0.1 간격으로 5단계 씩 작게 구간화하여 최적합화하면 수십 단계를 한꺼번에 최적합화하는 것에 비해 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있다.

다음에 보다 정확한 2차조정계수를 구하기 위해서 앞에서 구한 2차조정계수(F)를 중심으로 F-0.05에서 F+0.04까지 0.01 간격으로 SRSS 최적합화 과정을 다시 10ⁿ번 수행하여 최종적으로 2차조정계수를 확정한다.

이와 같이 조정계수 구간을 단계적으로 세분화하여 개략적인 최적조정계수를 먼저 선정한 후 2차적으로 최적구간을 세세분하여 최적 조정계수를 구하는 경우와 구간을 처음부터 세세분하여 조정계수를 구하는 경우들의 계산시간을 표 2에서 비교하였다.

표 2에는 7개의 지진응답스펙트럼에 대해 2차조정계수를 0.15에서 1.65까지 0.01씩 증가시키면서 150단계를 한꺼번에 최적합화한 경우, 조정계수를 0.15에서 1.65까지 0.1 간격으로 15단계 씩 구간화하는 방법으로 1차 최적합화하여 구한 2차조정계수(F)를 F-0.05에서 F+0.04까지 0.01 단위로 10단계 다시 2차 최적합화한 경우, 또 조정계수를 0.1 간격으로 0.15에서 1.15까지 10단계 씩 구간화하는 방법과 0.15에서 0.65까지 5단계 씩 구간화하는 방법으로 1차 최적합화하여 구한 2차조정계수(F)를 F-0.05에서 F+0.04까지 0.01 단위로 10단계 다시 2차 최적합화한 경우들에 대한 결



〈그림 2〉 시간이력 지진기록 생성 흐름도

과가 나타나 있다.

이 결과에 의하면 표 2에 나타난 것처럼 15단계를 한꺼번에 1차 최적합화한 경우 15^7 번의 계산과정이 필요하지만, 조정계수를 5단계 마다 세부 구간화하여 1차 최적합화한 경우에는 5^7 번의 계산과정을 수십번이나 수백번 반복하면 1차 최적합화가 가능하기 때문에 계략적으로 6% 정도의 짧은 시간에 1,2차 최적합화를 완료할 수 있다.

목표설계스펙트럼에 최적합한 시간이력 지진기록군을 생성하기 위한 마지막 단계로써 최소오차 최적합화법으로 선정된 지진기록들에 대한 1차조정계수와 식 (1)에 따라 SRSS 최적합화법으로 구한 2차조정계수를 곱하여 최종조정계수들을 구하고, 데이터베이스의 선정된 지진기록들에 최종조정계수들을 곱하여 목표설계스펙트럼을 만족시키는 동적지진해석을 위한 필요한 갯수의 인공 시간이력 지진기록군을 생성한다.

4. 동적영역 조정계수방법에 의한 최적합화법 검증

이 연구에서 동적영역 조정계수방법을 이용한 최소오차 최적합화법을 검증하기 위하여 참고문헌 10에서 Genetic Algorithm(GA)으로 최적합화하여 선정된 표 3에 나타난 7개 지진기록의 응답스펙트럼을 사용하여 이 연구에서 제시한 최적합화법의 유효성을 검증하였다. GA방법에서는 상당

〈표 2〉 최적합화 방법에 따른 계산시간 비교

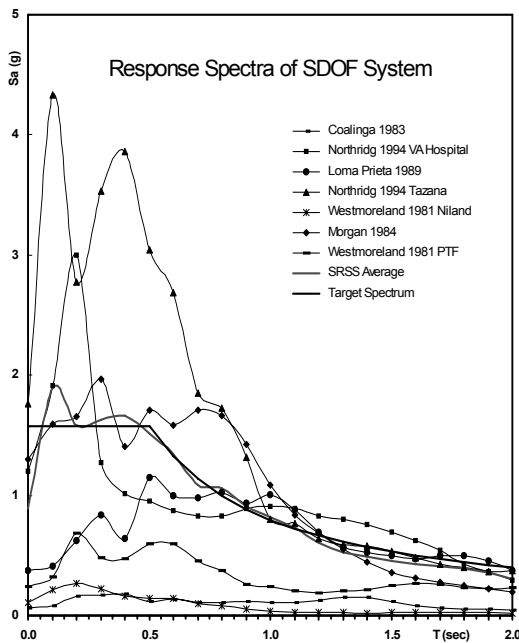
최적합화 방법	1차최적합화 경우 수	2차최적합화 경우 수	1차최적합화 시간 (초)	2차최적합화 시간 (초)	최적합화 시간 계 (초)	계산시간 상대적비교
1차 150단계 일괄최적합화	150^7	-	∞	-	∞	∞
1차 15단계 2차 10단계	15^7	10^7	1744	103	1847	1.00
1차 10단계 2차 10단계	10^7	10^7	775	103	878	0.48
1차 5단계 2차 10단계	5^7	10^7	2	103	105	0.06

〈표 3〉 Genetic Algorithm으로 구한 7개 지진가속도 조정계수

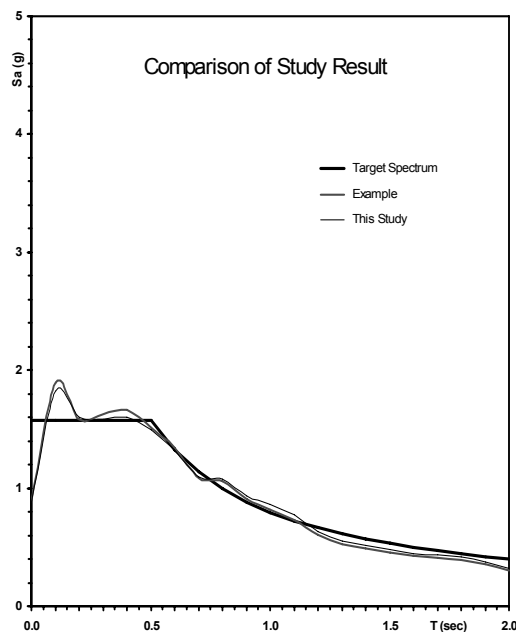
No.	발생 연도	지진기록명	계측소 및 성분력	조정계수	
				참고문헌	연구 결과
1	1983	Coalinga, CA	Parkfield Stone Corral 4 E, 0°	0.54	0.52
2	1994	Northridge, CA	LA, Wadsworth V.A. Hospital, 235°	0.72	0.76
3	1989	Loma Prieta, CA	Hollister-South & Pine, 0°	1.44	1.52
4	1994	Northridge, CA	Tarzana-Cedar Hill Nursery, 90°	0.89	0.82
5	1981	Westmoreland, CA	Niland, 0°	0.87	0.48
6	1984	Morgan Hill, CA	Coyote Lake Dam, 285°	0.50	0.48
7	1981	Westmoreland, CA	Parachute Test Facility, 0°	0.54	0.67

히 많은 지진기록을 1세대 가족으로 데이터베이스화하여, 모의 교배, 자연적인 선택, 돌연변이 과정을 거쳐 새로운 세대의 가족을 생성하는 GA 프로그램으로 목표설계스펙트럼에 최적의 SRSS 평균스펙트럼을 만족시키는 지진기록들을 얻을 때까지 GA 과정을 반복한다.

그림 3에는 참고문헌 10의 연구에서 사용한 7개 지진기록의 5% 감쇠비 응답스펙트럼과 응답스펙트럼의 SRSS 평균스펙트럼이 나타나 있고, 최적합화에서 목표로 한 설계스펙트럼(Target Design Spectrum)도 비교를 위해서 나타냈다.



〈그림 3〉 참고문헌의 응답스펙트럼



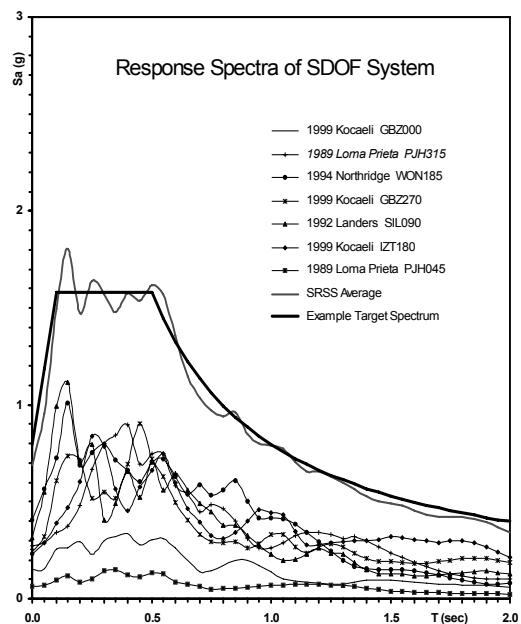
〈그림 4〉 참고문헌 예제와 연구 결과 비교

연구결과에 의하면, 표 3에 나타난 것처럼 이 연구에서 구한 조정계수가 참고문헌⁽¹⁰⁾에서 구한 조정계수와 약간의 차이는 있지만 거의 유사하고, 7개 지진응답에 대한 SRSS 평균응답스펙트럼은 그림 4에 나타난 것처럼 참고문헌⁽¹⁰⁾에서 구한 결과보다 더 양호하다는 것을 알 수 있다.

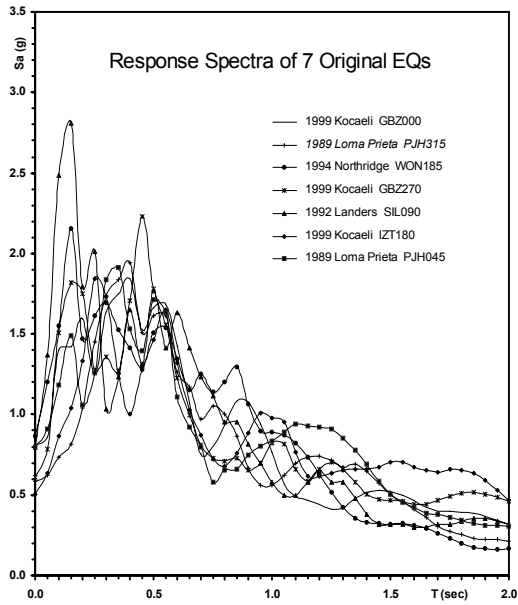
5. 연구방법에 대한 예제 검증

동적영역 조정계수방법을 이용한 최소오차 최적합화법으로 목표설계스펙트럼을 만족하는 구조물의 지진해석용 인공 시간이력 지진기록군을 생성하기 위한 이 연구의 합리성과 신뢰성을 검증하기 위해서 임의로 선정한 예제에 대하여 검증 연구를 수행하였다. 예제는 KBC2005 기준의 지반분류에서 S_D 에 해당하는 연약지반을 고려한 설계스펙트럼을 목표(Example Target Spectrum)로 하였다. 최적합화 연구를 위해 먼저 최소오차 최적합화법으로 목표설계스펙트럼에 가장 적합한 표 4에 나타난 7개 지진기록을 선정하였으며, 선정된 7개 지진기록으로 식 (1)을 이용하여 SRSS 평균스펙트럼을 구하였다.

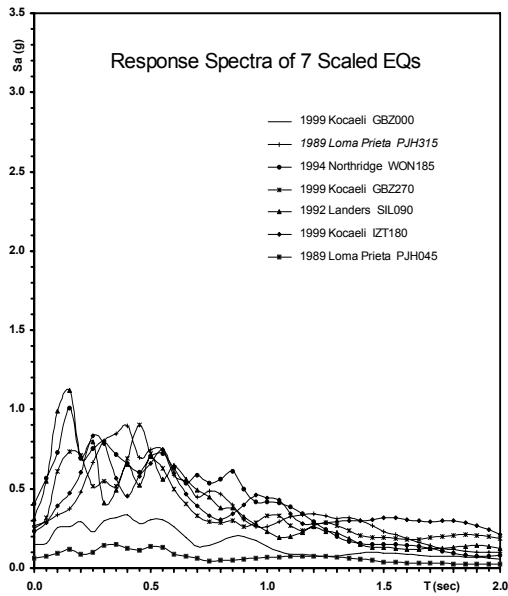
그림 5에는 목표설계스펙트럼(Example Target Spectrum)과 함께 표시된 SRSS 평균스펙트럼(SRSS Average)이 목표설계스펙트럼과 약간의 오르내림(Fluctuation)은 있지만 평균적으로 잘 일치하는 결과를 보여주고 있고, 7개 선정된 1989년 Loma Prieta 양방향 지진기록 2개, 1992년 Langers 지진기록 1개, 1994년 Northridge 지진기록 1개, 1999년 Kacaeli 양방향 지진기록 2개와 일방향 지진기록 1개의 조



〈그림 5〉 설계스펙트럼과 지진응답스펙트럼



〈그림 6〉 원래 지진기록의 응답스펙트럼



〈그림 7〉 계수 조정된 지진기록의 응답스펙트럼

〈표 4〉 예제에서 선정된 지진기록과 조정계수

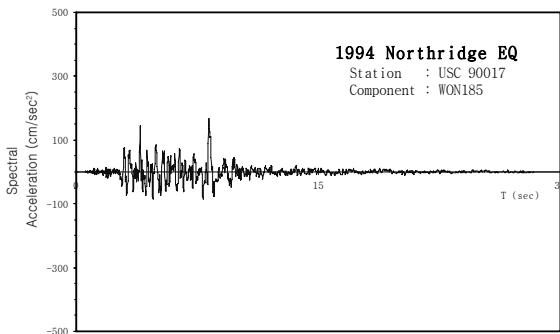
선정된 지진기록	조정계수		
	1차	2차	최종
1. 1999 Kocaeli GBZ000	3.31	0.169	0.558
2. 1989 Loma Prieta PJH315	8.23	0.463	3.807
3. 1994 Northridge WON185	5.02	0.484	2.431
4. 1999 Kocaeli GBZ270	4.45	0.414	1.840
5. 1992 Landers SIL090	19.9	0.381	7.580
6. 1999 Kocaeli IZT180	3.32	0.452	1.499
7. 1989 Loma Prieta PJH045	9.47	0.054	0.515

정계수를 곱해서 구한 5% 감쇠비 응답스펙트럼들도 나타나 있다.

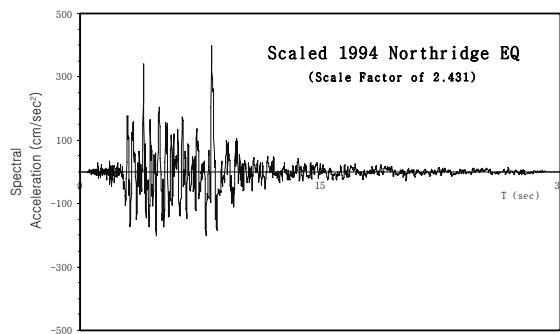
또, 이 예제에서 선정된 7개 지진기록의 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 그림 6에 나타냈고, 조정계수를 곱해 조정된 시간이력 지진기록의 응답스펙트럼은 그림 7에 비교를 위해 나타냈다. 표 4에는 선정된 7개 지진에 적용된 1차, 2차 및 최종 조정계수가 나타나 있으며, 그림 8에는 선정된 7개 지진기록 가운데 대표적인 1994년 Northridge 지진에 대한 원래 (Original) 지진기록의 시간이력과 조정계수(Scaling Factor) 2.431을 곱해서 새로 생성한 지진기록에 대한 시간이력이 나타나 있다.

6. 결론

최근 전산에 의한 계산능력의 향상으로 구조물의 동적 지진해석도 보다 실제 상황에 가깝게 수행하기 위해서 설계스펙트럼을 만족할 수 있는 시간이력 지진기록을 사용한 구조물의 동적 지진해석이 IBC, ASCE, KBC 등의 지진하중 기준에서 요구되고 있다. 그러나 실무에 종사하는 엔지니어들이 설계스펙트럼을 만족할 수 있는 기준에서 요구하는 갯수의 시간이력 지진기록들을 간편한 방법으로 선정하는 것이



(a) 1994 Northridge EQ. 시간이력



(b) 조정된 1994 Northridge EQ. 시간이력

〈그림 8〉 선정된 대표적인 지진의 시간이력과 조정된 시간이력

용이하지 않다. 따라서 이 연구에서는 태평양지진연구센터 (PEER)에서 암반지진기록으로 평가한 50개 계측지진기록을 데이터베이스(표 1)로 하여 동적영역 조정계수방법을 이용한 SRSS 평균스펙트럼 최적합화법으로 각종 지진하중 기준에서 요구하는 시간이력 지진기록군을 생성하는 전산 프로그램을 작성하였다.

이 연구에서 개발한 전산프로그램으로 구조물의 지진해석을 위해 참고문헌에 나타난 예제와 임의로 선정된 예제에 대하여 선정된 7개 시간이력 지진기록들의 SRSS 평균스펙트럼이 목표설계스펙트럼을 잘 만족시키는 것으로 평가되었다. 따라서 이 연구에서 개발한 동적영역 조정계수방법을 이용한 최소오차 최적합화법을 사용할 경우에는 목표설계스펙트럼을 만족할 수 있는 필요한 갯수의 시간이력 지진기록군을 실무엔지니어가 스스로 준비한 시간이력 지진기록 데이터베이스를 이용하여 쉽고 간편하게 생성할 수 있다. 또, 기준에 제시된 설계스펙트럼에 적합한 시간이력 지진기록군들의 데이터베이스를 마련할 경우에는 실무엔지니어들이 개별적으로 인공 시간이력 지진기록군을 생성하는 노력을 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-02)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 대한건축학회, 건축구조설계기준 (KBC2005), 기문당, 2005, 597pp.
2. 김태호 외 3인, “초고층 구조물의 지진해석을 위한 설계지진파의 조정방법,” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제27권 제1호(통권 제51호), 2007.10.26-27, pp. 337-340.
3. International Building Code Council (IBC), 2003 *International Building Code (IBC2003)*, 2002, pp. 301-343.
4. International Building Code Council (IBC), 2006 *International Building Code (IBC2006)*, 2005, pp. 302-325.
5. ASCE, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI7-05, 2006, pp. 109-233.
6. Robert L. W., *Earthquake Engineering*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA, 1970, 518pp.
7. MIT, *SIMQKE: A Program for Artificial Motion Generation*, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Nov. 1976, 65pp.
8. 연관희 외 3인, “위상특성을 반영한 인공지진파 작성” 한국지진공학회, 2000년도 추계학술대회논문집, 2000년 9월, pp. 91-97.
9. 전대한, 강호근, “설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파의 작성과 응답특성의 분석,” 대한건축학회논문집 구조계, 22권 5호(통권211호), 2006년 5월, pp. 121-128.
10. Naeim, F. et al. “Selection and Scaling of Ground Motion Time Histories for Structural design Using Genetic Algorithms,” *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 2, May 2004, pp. 413-426.
11. 이현호, 한상환, 이리형, “시간-이력해석을 위한 지진기록의 선정,” 대한건축학회논문집 구조계, 15권 6호(통권128호), 1999년 6월, pp. 53-60.
12. PEER Strong Earthquake Data Base, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html/>
13. 김용석, “구조물의 시간이력 지진해석을 위한 암반지진기록의 특성분석,” 한국지진공학회 논문집, 제12권 제1호(통권 제59호), 2008년 2월, pp. 89-95.
14. Crandall, S. H. “*Engineering Analysis: A Survey of Numerical Procedures*,” McGraw-Hill, 1956, 407pp.