

강진지속시간 기준 개선을 위한 원전 격납구조물의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of NPP Containment Structures to Improve the Guidelines of Strong Motion Duration

허정원¹⁾ · 정호섭²⁾ · 김재민³⁾ · 현창현⁴⁾

Huh, Jung Won · Jung, Ho Sub · Kim, Jae Min · Hyun, Chang Hun

국문 요약 >> 이 논문은 원전구조물의 내진설계에 적용되는 인공지진파의 강진지속시간과 포락함수에 대한 현행 국내 설계기준의 개선과 보완을 위해서 필요한 기본연구에 관한 내용을 다루고 있다. USNRC와 ASCE 4-98에서 제안한 응답스펙트럼과 강진지속시간에 대한 규정이 현재 통상적으로 사용되고 있으며, 첫 번째로 두 기준에 대한 비교와 검토를 수행하였다. 다음으로 총 209개의 암반사이트에서 실제 계측된 규모 5.0 이상인 강진기록을 ASCE 4-98의 강진지속시간기준에 적용한 결과를 통계 처리하여 지진규모에 대한 함수로 표현되는 강진지속시간의 실험적 예측모델을 제시하였다. 마지막으로 강진지속시간이 원전구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 6초에서 20초까지 약 2초 간격으로 강진지속시간을 달리하는 10가지 Case에 대한 인공지진파를 각 30개씩 작성하고, 이들을 적용하여 대만 Hualien 지진시험구조물과 국내 울진 원자력발전소 원자로 격납구조물에 대한 광범위한 지진응답해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

주요어 강진지속시간, 인공지진파, 내진설계, 시간이력해석, 응답스펙트럼

ABSTRACT >> This paper addresses a fundamental study that is necessary to complement and improve the current domestic design specifications for the strong motion duration criterion and the envelope function of artificial accelerograms that can be applied to the earthquake-proof design of nuclear structures. The criteria for the design response spectra and strong motion duration suggested by USNRC and ASCE Standard 4-98 are commonly being used in the profession, and they are first compared with each other and reviewed. By applying 209 real strong earthquake records that are greater than 5 in magnitude at rock sites to the strong motion duration criterion in ASCE 4-98, an empirical regression model that predicts the strong motion duration as a function of the earthquake magnitude was then developed. Using synthetically generated earthquake time histories for the 10 cases whose strong motion durations varied from 6 to 20 seconds, extensive seismic analyses were finally conducted to identify the effects of the strong motion durations on the seismic responses of the nuclear power plant containment structures.

Key words Strong motion duration, Artificial accelerograms, Seismic design, Time-history analysis, Response spectrum

1. 서론

원전구조물의 시간영역에 대한 지진해석, 내진설계 및 지진위험도 평가에서 강진지속시간은 중요한 영향인자 중 하나로 알려져 있다. 그러나 현재 국내 원전구조물의 내진설

계에 적용되는 USNRC SRP 3.7.1⁽¹⁾에서는 인공 지진시간 이력을 생성하기 위한 강진지속시간과 포락함수의 결정기준이 상세히 제시되지 않아, 설계자의 판단 및 직관에 따른 상대적인 편차가 발생할 수 있으므로 안전성을 고려하면 보다 엄정하고 합리적인 기준이 필요한 실정이다. 이에 따라 1999년 미국토목학회에서 제시한 원전시설물의 내진설계지침인 ASCE 4-98⁽²⁾을 반영하여 국내 원전의 내진설계지침을 보완하는 방안이 검토⁽³⁾되고 있다. ASCE 4-98에서는 인공 지진시간이력에 대한 강진지속시간과 포락함수의 기준이 상대적으로 보다 구체적이고 명확하게 제시되었다. 그러나 이는 현행 국내 기준과 차이가 있을 수 있으므로, 면밀한 검토 없이 단순 도입할 경우 현행 설계수준의 내진안전성을 보장하지 못할 수 있다. 따라서 국내 도입에 선행하여 ASCE

¹⁾ 정회원 · 전남대학교 해양토목공학과, 부교수

²⁾ (주) 인을시스, 대리

³⁾ 정회원 · 전남대학교 해양토목공학과, 교수

(교신저자: jm4kim@chonnam.ac.kr)

⁴⁾ 정회원 · 한국원자력안전기술원 구조부지실, 실장

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 4. 18 / 수정일 : 2011. 7. 13 / 게재확정일 : 2011. 7. 13)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

4-98 기준의 타당성과 현행 설계기준과의 차이점에 대한 비교 및 분석이 절대적으로 필요하다. 이 논문에서는 우선 현행 국내기준에 준용되고 있는 USNRC^{(1),(4)}와 ASCE 4-98⁽²⁾의 설계응답스펙트럼과 강진지속시간에 대한 기준의 차이점을 비교 및 분석하였다. 현행 국내기준의 개선과 보완을 위하여 총 209개의 암반사이트에서 실제 기록된 규모 5.0 이상인 강진기록을 ASCE 4-98의 강진지속시간결정 기준에 대하여 적용한 결과를 토대로 통계분석을 수행하여 지진 규모(Seismic Magnitude, M_w)에 대한 함수로 표현되는 강진지속시간의 예측 모델을 제시하였다. 또한 강진지속시간이 원전구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 파악하고 이로부터 새로운 ASCE 4-98기준의 국내적용의 타당성을 평가하는 자료로 활용하기 위하여, 6초에서 20초까지 약 2초 간격으로 강진지속시간을 달리하는 10가지 사례에 대한 인공지진파를 각기 30개씩 생성하고, 이들을 적용하여 대만 Hualien 지진시험구조물과 국내 울진 원자력발전소 격납구조물에 대한 시간영역에서의 지진응답해석을 수행하였다.

2. 설계응답스펙트럼과 강진지속시간에 대한 기준

2.1 설계응답스펙트럼의 허용기준

2.1.1 USNRC 설계응답스펙트럼

USNRC RG 1.60⁽⁴⁾에서 제시하고 있는 그림 1의 수평방향 설계 응답스펙트럼은 최대 지반가속도(PGA) 1.0g에 기준한 것이다. 최대 지반변위는 지반가속도에 비례하는 값으로 선정하므로, 최대 지반가속도 1.0g에 대응하는 지반 변위는 36 inch이다. 설계응답스펙트럼의 설계 변위, 속도 그리고 가속도

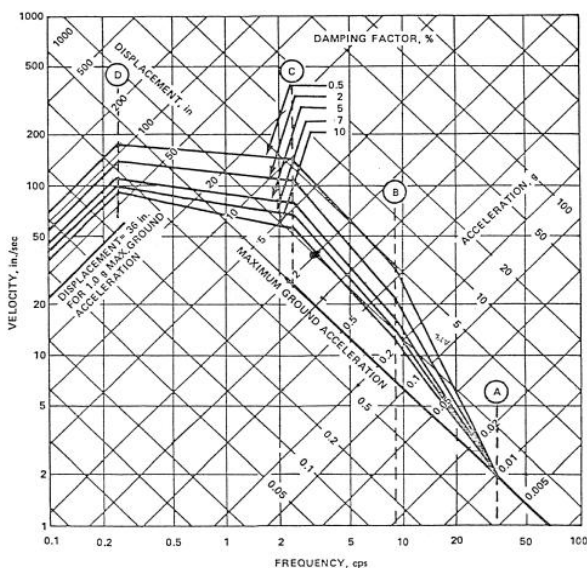
의 값은 최대 지반변위와 가속도에 대응하는 값에 표 1에 제시된 증폭계수를 곱하여 산정한다. 한편 시간이력 해석법에서 시간이력은 설계응답스펙트럼의 요건을 만족하도록 실제 기록된 지진운동을 수정하거나 인공적으로 생성된 지진운동을 사용하도록 규정하고 있다. 그리고 0.4Hz의 진동수에서 설계응답스펙트럼을 적절히 만족시키기 위해서는 총 10초에서 25초 사이의 지진지속시간이 필요하며, 이에 상응하는 정상상태 강진지속시간을 6초에서 15초 사이의 시간범위로 규정하고 있다.

2.1.2 ASCE 4-98 설계응답스펙트럼

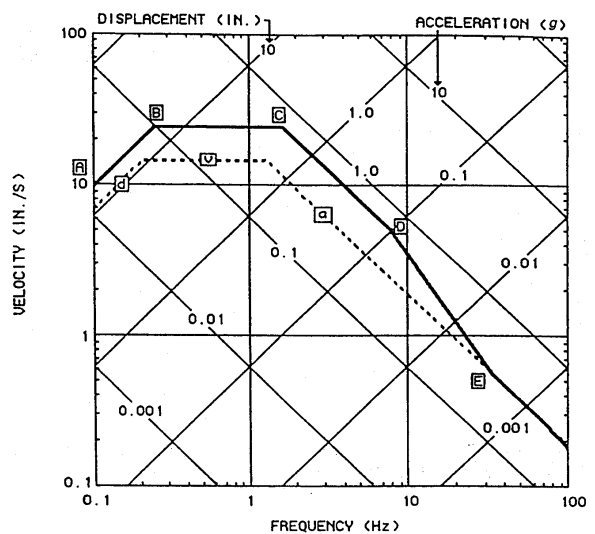
ASCE Standard 4-98⁽²⁾에서는 내진설계나 내진평가를 위하여 그림 2에 제시된 설계스펙트럼의 총가속도(S_a =가속도 스펙트럼, S_v =속도 스펙트럼, S_d =변위 스펙트럼)을 최대 가속도 a , 최대 속도 v , 최대 변위 d 의 향으로 정의되는 대응지반운동의 최대값에 표 2에 주어진 동적 증폭계수(Dynamic Amplification Factors)를 곱하여 계산한다. 표 2의 증폭계수는 중앙값(Median)으로 정의된다. 이 증폭계수는 적정 초과확률수준에서 선정된 최대 지반운동 매개변수인 a , v , 그

〈표 1〉 USNRC RG 1.60의 수평방향 표준응답스펙트럼 증폭계수

Percent of Critical Damping	Amplification Factors for Control Point			
	Acceleration			Displacement
	A(33Hz)	B(9Hz)	C(2.5Hz)	
0.5	1.0	4.96	5.96	3.20
2.0	1.0	3.54	4.25	2.50
5.0	1.0	2.61	3.13	2.05
7.0	1.0	2.27	2.72	1.88
10.0	1.0	1.90	2.28	1.70



〈그림 1〉 USNRC RG 1.60 응답스펙트럼 (Rock, PGA=1.0g)



〈그림 2〉 ASCE 4-98 수평방향 응답스펙트럼(Soil site, 지반가속도 0.3g, 감쇠비 5%)

〈표 2〉 ASCE 4-98 설계스펙트럼 증폭계수의 중앙값

Spectral Parameter	Amplification Factor	5% 증폭계수 중앙값
S_a/a	$3.21-0.68\ln(\lambda)$	2.12
S_v/v	$2.31-0.41\ln(\lambda)$	1.65
S_d/d	$1.82-0.27\ln(\lambda)$	1.39

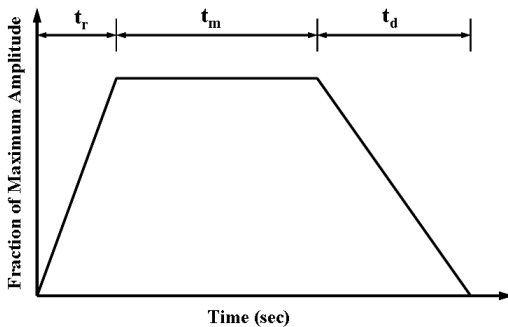
일반지반 $v = 48a/g(\text{in}/\text{sec})$, 암반 $v = 36a/g(\text{in}/\text{sec})$;
 일반지반 $d = 36a/g(\text{in})$, 암반 $d = 20a/g(\text{in})$;
 $\lambda = \text{임계 감쇠비}$, $a = \text{PGA}$, $g = \text{중력가속도}$

〈표 3〉 ASCE 4-98 설계스펙트럼 Control Point

Control Point	주파수(Hz)	스펙트럼 가속도(g)
A	0.1	$(0.395 S_d/g)$
B	$(S_v/2\pi S_d)$	$(S_v^2/g S_d)$
C	$(S_a/2\pi S_v)$	S_a/g
D	8	S_a/g
E	33	a/g

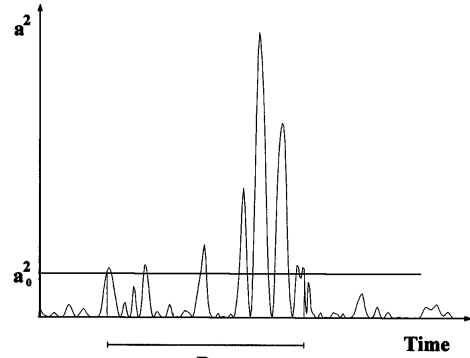
〈표 4〉 ASCE 4-98 강진지속시간 포락함수의 매개변수

규모	상승시간(t_r)	강진 지속시간(t_m)	쇠퇴시간(t_d)
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

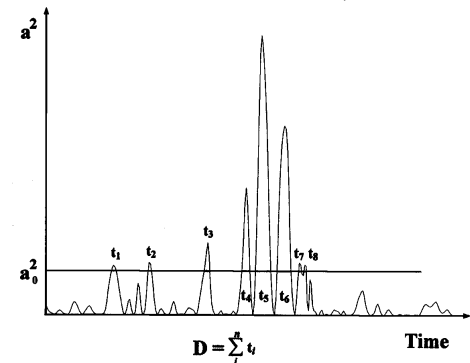


〈그림 3〉 ASCE 4-98 지속시간 포락함수

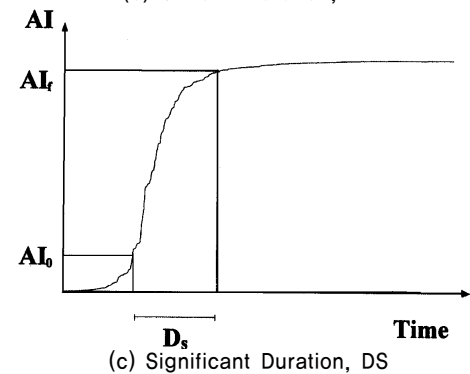
리고 d 와 함께 사용해야 한다. 그림 2에 제시한 응답스펙트럼의 직선구간의 통제점(Control Points)에 대응되는 진동수와 가속도 스펙트럼의 값을 표 3에 나타내었다. 한편 시간 이력은 특정장소에 기대되는 지반운동을 합리적으로 재현 하도록(예를 들어 규모와 거리에 적합한 지진의 진폭과 지속시간을 갖도록) 선택되거나 개발되어야 한다. 달리 타당하게 입증되지 않았다면, 그림 3과 표 4에 정의된 지반운동 지속시간 포락함수와 매개변수를 사용해야 하는 것으로 규정하고 있다.



(a) Bracketed Duration, D_B



(b) Uniform Duration, D_U



(c) Significant Duration, D_S

〈그림 4〉 Definition of Strong Motion Duration

2.2 강진지속시간

2.2.1 강진지속시간의 정의

Accelerogram의 강진위상을 정의하고 측정하는 다양한 종류의 접근방법들이 여러 연구자들에 의해 제안되었다. 지진가속도 자료에 대한 강진 지속시간은 그림 4에 제시한 대표적인 3개의 분류방법⁽⁵⁾으로 정의된다. 첫 번째인 “Bracketed Duration (D_B)”는 그림 4(a)와 같이 규정된 가속도수준 a_0 를 초과하는 첫 번째와 마지막 진폭 사이의 총 경과시간을 강진 지속시간 D_B 로 정의한다. 두 번째 “Uniform Duration(D_U)”는 경계수준을 초과한 가속도진폭의 시간간격의 합으로 강진 지속시간 D_U 를 정의한다. D_U 의 개념은 그림 4(b)에 나타내었다. D_U 의 정의는 D_B 보다 규정된 에너지수준에 대한 민감도가 작으나, 강진의 경우에 지속시간의 연속성을 나타내지 못 한다.

마지막 “Significant Duration(D_s)”로 그림 4(c)와 같이 지반 가속도에 대한 특정 시간구간에 누적된 에너지양을 기준으로 정의하며, 일반적으로 총 가속도 시간이력에 대한 누적 에너지양은 Arias Intensity, AI⁽⁵⁾로 표현되고 아래 식 (1)과 같다.

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_r} a^2(t) dt \quad (1)$$

여기서 $a(t)$ =가속도 시간이력, t_r =가속도시간이력의 총 시간, g =중력가속도이다.

이러한 “Significant Duration”의 개념은 Accelerogram 전체의 특성을 잘 나타내고 강진 지속시간의 연속성을 고려할 수 있는 특징을 가지고 있는 것으로 입증⁽⁵⁾되었으며, ASCE 4-98⁽²⁾에서는 AI곡선에서 5%~75%에 해당하는 시간범위를 강진지속시간 D_s로 정의하였다.

2.2.2 결정방법에 따른 강진지속시간의 비교

본 절에서는 이전에 기술된 여러 연구자들⁽⁵⁾에 의해 제안된

〈표 5〉 강진지속시간의 비교에 사용된 지진기록

No.	Earthquake Event	Magnitude(M _w)	PGA(g)
1	Victoria, Mexico 1980/06/09	6.4	0.62
2	Superstittn Hill(B) 1987/11/24	6.7	0.89
3	Northridge 1994/01/17	6.7	0.57
4	Loma Prieta 1989/10/18	6.9	0.51
5	Landers 1992/06/28	7.3	0.82

〈표 6〉 결정방법별 강진지속시간

강진지속시간의 정의	추정된 강진지속시간(sec)				
	Earth. 1	Earth. 2	Earth. 3	Earth. 4	Earth. 5
Bracketed(a0=0.03g)	19.22	19.66	23.06	17.69	38.61
Bracketed(a0=0.05g)	13.30	19.43	22.54	16.82	33.35
Bracketed(a0=0.10g)	9.27	15.85	21.38	13.96	22.22
Uniform(a0=0.03g)	9.74	13.16	9.74	12.21	16.89
Uniform(a0=0.05g)	5.86	10.42	5.86	10.01	11.94
Uniform(a0=0.10g)	2.52	6.01	2.52	6.40	6.74
Bracketed(a0=0.1amax)	12.27	16.89	17.72	16.83	25.07
Bracketed(a0=0.3amax)	6.27	12.25	3.40	10.98	11.86
Bracketed(a0=0.5amax)	2.19	8.78	1.68	10.07	9.27
Uniform(a0=0.1amax)	4.80	6.86	5.32	9.97	8.05
Uniform(a0=0.3amax)	0.94	0.96	1.00	4.02	1.72
Uniform(a0=0.5amax)	0.02	0.17	0.38	1.47	0.45
Significant 0~90% 1A	10.67	14.65	12.27	17.80	18.09
Significant 5~95% 1A	12.68	12.24	9.08	9.81	13.16
ASCE 4-98 0~75%	4.40	8.91	3.90	6.89	7.43

방법에 따라 표 5에 나타난 것과 같이 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center) 웹사이트(<http://peer.berkeley.edu>)⁽⁶⁾로부터 임의로 선택한 지진규모(M_w) 6에서 7.5사이의 5개 지진기록을 이용하여 강진지속시간을 산정하고 그 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6의 결과를 살펴보면 대표적인 3가지 강진지속시간을 산정하는 기준별로 편차와 변동성이 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 같은 분류방법 내에서도 적용되는 기준 값에 따라 산정된 강진지속시간에 차이가 크게 발생하고 있다. 그러므로 강진 지속시간을 정의하는 방법의 합리적인 선정 및 적용과 설계기준에서 강진지속시간을 명확하게 정의하는 것은 매우 중요하다고 판단된다.

3. 지진규모에 따른 강진지속시간 상관식 예측모델

본 논문에서는 ASCE 4-98의 강진지속시간 기준에 대한 평가와 지진규모의 함수로 표시되는 합리적인 강진지속시간 예측모델의 개발을 위하여, 실제 계측된 다수의 지진기록에 대하여 ASCE 4-98이 제시한 강진지속시간 D_s의 결정방법⁽⁴⁾과 포락함수기준을 적용하였다. 즉, ASCE 4-98⁽²⁾에서는 강진 지속시간을 앞서 기술한 식 (1)로 표현되는 AI 곡선에서 5%~75%의 에너지가 누적되는 데 필요한 시간으로 정의하였다.

이 절에서는 ASCE 4-98의 강진지속시간 기준에 대한 평가와 지진규모(M_w)의 함수로 표현되는 강진지속시간의 합리적인 예측모델 개발을 위하여, 다수의 실제 지진기록에

대하여 ASCE 4-98이 제시한 강진지속시간 D_s 의 정의와 포락합수기준을 적용하였다. 사용된 지진 계측데이터는 표 7과 8에 나타난바와 같이 지진규모 5.0에서 7.5까지의 진앙

〈표 7〉 강진지속시간의 비교에 사용된 지진기록

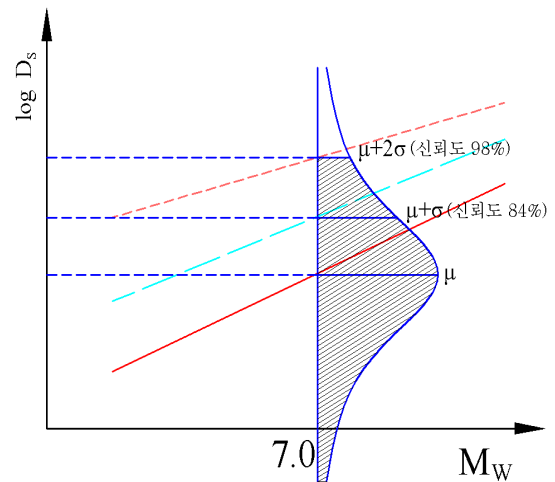
No.	Earthquake Information	Magnitude (M _w)	No. of Earth. Time History
1	Coalinga 1983/05/09 02:49	5.0	13
2	Coalinga 1983/07/25 22:31	5.2	2
3	Coalinga 1983/07/09 07:40	5.2	9
4	Hollister 1974/11/28 23:01	5.2	2
5	Northern California 1975/06/07 08:4	5.2	2
6	San Francisco 1957/03/22 19:44	5.3	1
7	Whittier Narrows 1987/10/04 10:59	5.3	2
8	Livermore 1980/01/27 02:33	5.4	2
9	Lytle Creek 1970/09/12 14:30	5.4	2
10	Coyote Lake 1979/08/06 17:05	5.7	4
11	Mammoth Lakes 1980/05/25 16:49	5.7	1
12	Mammoth Lakes 1980/05/25 20:35	5.7	4
13	Coalinga 1983/07/22 02:39	5.8	8
14	Westmorland 1981/04/26 12:09	5.8	1
15	Saguenay/1988/11/25	5.9	8
16	N. Palm Springs 1986/07/08 09:20	6.0	7
17	Whittier Narrows 1987/10/01 14:42	6.0	5
18	Whittier/1987/10/1 7:42	6.0	2
19	Mammoth Lakes 1980/05/25 19:44	6.0	7
20	Parkfield 1966/06/28 04:26	6.1	2
21	Helena, Montana 1935/10/31 18:38	6.2	2
22	Chalfant Valley 1986/07/21 14:42	6.2	2
23	Morgan Hill/1984/4/24	6.2	13
24	Mammoth Lakes 1980/05/25 16:34	6.3	2
25	Coalinga 1983/05/02 23:42	6.4	6
26	Imperial Valley 1979/10/15 23:16	6.5	8
27	Western Washington/1949/4/13	6.5	6
28	San Fernando 1971/02/09 14:00	6.6	5
29	Northridge 1994/01/17 12:31	6.7	20
30	Nahanni, Canada 1985/12/23	6.8	3
31	Loma Prieta 1989/10/18 00:05	6.9	22
32	Nahanni/1985	6.9	4
33	Loma Prieta/1989/10/17	7.0	2
34	Duzce, Turkey 1999/11/12	7.1	3
35	Puget sound. Wa./1965/4/29	7.1	6
36	Eastern Wa./1965/4/29	7.1	8
37	Lander/1992/6/28	7.3	6
38	Miyagi-oki /1978	7.4	2
39	Kocaeli, Turkey 1999/08/17	7.4	4
40	Tabas, Iran 1978/09/16	7.4	1
Total :		209	

거리가 10km에서 300km이내로서 Rock site에서 기록된 PGA값이 0.1g에서 0.5g인 총 209개의 자료를 대상으로 하였으며, 미국 PEER의 웹사이트⁽⁶⁾에서 획득하였다.

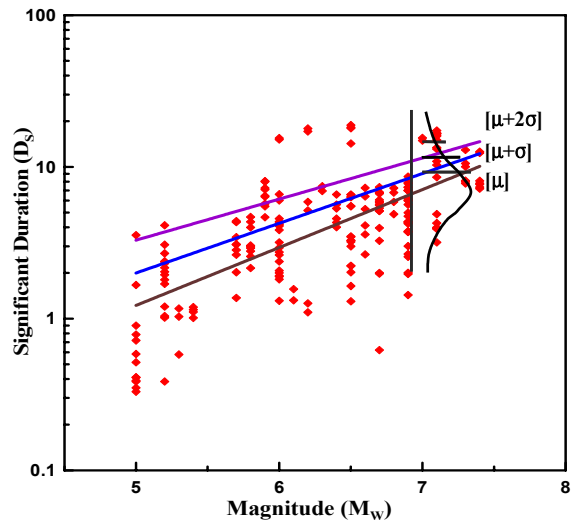
수집된 209개의 지진가속도 계측자료를 지진 규모(M_w) 0.5간격별로 분류한 후 2.2.1에서 기술한 ASCE 4-98의 기준($D_s=AI_{5\% \sim 75\%}$)에 따라 강진지속시간을 산정하였다. 그리고 궁극적으로 국내 관련 설계기준의 정립을 위해 그림 5에 도시한 지진통계자료의 변동성을 고려할 수 있는 비초과확률 개념을 도입하여 그림 6과 같이 지진규모별 강진지속시

〈표 8〉 지진 DATA 현황

PGA	규모	5~5.5	5.5~6	6~6.5	6.5~7	7~7.5
0.1g~0.3g		30	17	42	47	10
0.3g~0.5g		5	11	14	13	20
총계		209				



〈그림 5〉 비초과확률 개념도



〈그림 6〉 지진규모에 대한 강진 지속시간

간에 각각의 변동성을 고려한 평균으로 실험적 추세선을 평균(비초과확률 50%), 평균+표준편차(비초과확률 84.1%) 그리고 평균+2표준편차(비초과확률 98% = 초과확률 2%) 값에 대하여 작성하였다. 이로부터 얻어진 지진규모에 따른 강진지속시간 예측 상관식을 식 (2), (3) 그리고 (4)에 각각 제시하였다.

$$D_S = e^{0.886M_W - 4.236} \quad [\mu] \quad (2)$$

$$D_S = e^{0.740M_W - 3.020} \quad [\mu + \sigma] \quad (3)$$

$$D_S = e^{0.595M_W - 1.805} \quad [\mu + 2\sigma] \quad (4)$$

여기서 $D_S = AI$ 가 5% ~ 75% 누적되는 시간,

$$M_W = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7,$$

$$M_0 = \text{Seismic Moment}.$$

표 9에는 지진 규모 5.5에서 7.5까지의 범위를 0.5간격으로 구분한 5단계의 지진규모(M_W)에 대한 강진지속시간을 식 (3)과 (4)의 예측 상관식으로 계산하여 제시하였다. 또한 상승시간과 쇠퇴시간도 그림 3과 표 4에 제시된 ASCE 4-98⁽²⁾의 포락함수 매개변수를 근거로 산출하여 표 9에 같이 표시하였다.

표 9의 결과는 표 4에 제시한 ASCE 4-98의 결과와 대체적으로 유사하므로, 제안된 예측 상관식의 타당성을 간접적으로 확인할 수 있었다. 한편 두 결과에서 나타나는 미소한 차이는 사용된 지진자료의 숫자와 특성 및 통계처리 방법의 차이, 그리고 이 연구에서는 특정 지진규모에 대한 결과를

제시한 반면 ASCE 4-98에서는 지진규모의 구간별 값을 제시한 점으로부터 발생하는 것으로 판단된다.

향후 실제 적용 가능한 국내 지진기록자료의 확보와 추가적인 국외 지진기록자료의 적용을 통하여 상관식을 보완한다면, 국내여건이 고려된 보다 높은 정확도를 담보하고 사실적인 예측이 가능한 강진지속시간 예측모델을 도출할 수 있을 것으로 판단한다.

4. 강진지속시간 변화에 따른 원전구조물의 동적응답 거동에 대한 사례분석

현행 내진설계 기준에 의해 설계된 원전구조물의 강진지속시간 변화에 따른 동적거동 특성을 파악함으로써 새로운 ASCE 4-98기준의 국내적용에 대한 타당성을 평가하는 기초자료로 활용하기 위하여, 6초에서 20초까지 약 2초 간격으로 강진지속시간을 달리하는 10가지 경우에 대한 인공지진파를 각 30개씩 생성한 후 이들을 사용하여 대만 Hualien 지진시험구조물⁽⁷⁾과 국내 울진 원자력발전소 3, 4호기 격납구조물⁽⁸⁾에 대한 지진응답해석을 수행하였다.

4.1 입력지반가속도

ASCE 4-98에서 제시한 그림 3의 포락함수와 최대지반가속도 1.0g로 정의된 그림 1의 USNRC RG 1.60⁽⁴⁾의 목표설계응답스펙트럼을 만족하도록 표 10과 같은 강진지속시간별로 총 10가지 경우에 대하여 각기 30개의 독립적인 인공지진파를 생성하였다. 인공 입력지진파 생성에는 기 개발된 연구용 프로그램인 QuakeGem^{(9),(10)}이 사용되었으며, 강진지속시간이 6초인 Case 1에 대하여 생성된 전형적인 인공지진 시간이력곡선 및 목표응답스펙트럼과의 비교를 그림 7과 8에 각각 나타내었다.

〈표 9〉 예측 상관식에 의한 사다리꼴 포락함수 매개변수 산정

MW	상승시간(tr)	강진지속시간(tm)	쇠퇴시간(td)	총 지속시간(t)
7.5	1.8	12.6	9.0	23.4
7.0	1.2	8.7	6.2	16.1
6.5	0.9	6.0	4.3	11.1
6.0	0.6	4.1	3.0	7.7
5.5	0.4	2.9	2.0	5.3

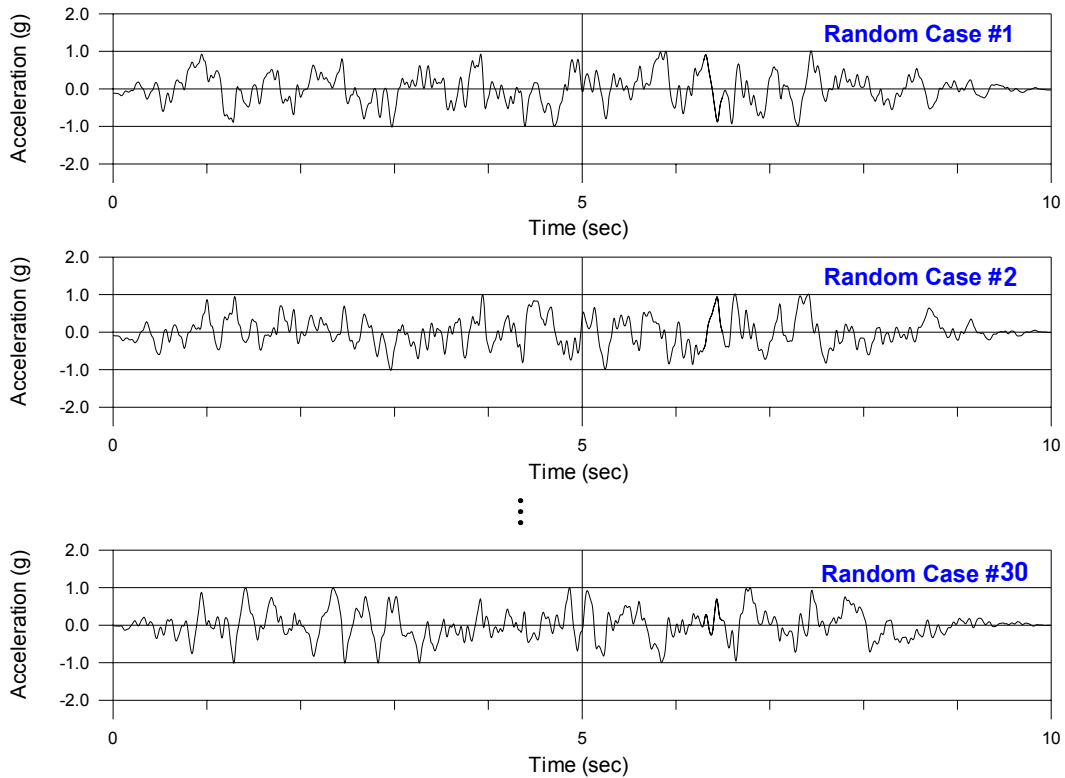
(a) $\mu + \sigma$ 포락함수 매개변수(비초과확률 84.1%)

MW	상승시간(tr)	강진지속시간(tm)	쇠퇴시간(td)	총 지속시간(t)
7.5	2.0	14.2	10.2	26.5
7.0	1.5	10.6	7.6	19.7
6.5	1.1	7.9	5.6	14.6
6.0	0.8	5.8	4.2	10.8
5.5	0.6	4.3	3.1	8.1

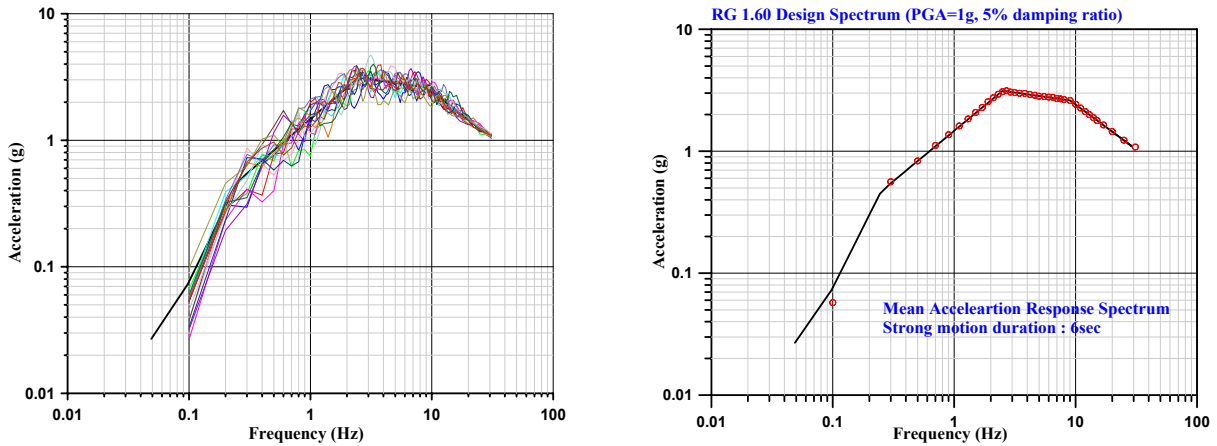
(b) $\mu + 2\sigma$ 포락함수 매개변수(비초과확률 98%)

〈표 10〉 강진지속시간 변화에 따른 10가지 Case

Case	상승시간(tr)	강진지속시간(tm)	쇠퇴시간(td)
Case 1	1	6	3
Case 2	2	8	4
Case 3	2	10	6
Case 4	3	11	7
Case 5	3	12	7
Case 6	3	13	7
Case 7	3	15	7
Case 8	4	16	8
Case 9	4	17	8
Case 10	5	20	9



〈그림 7〉 인공지진 시간이력곡선(Case 1, 강진지속시간 6sec)



〈그림 8〉 생성 인공지진파의 설계 응답스펙트럼과 비교(Case 1)

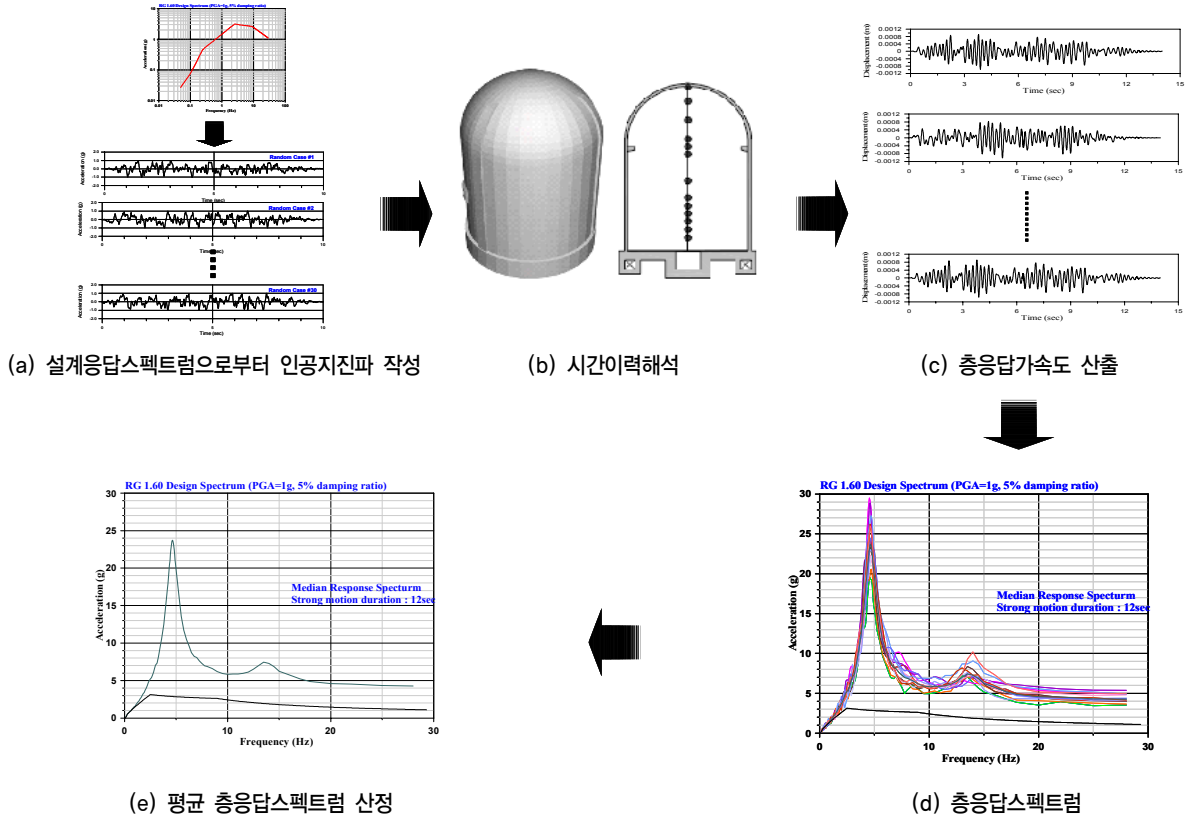
4.2 원전구조물의 지진응답 분석절차

이 연구에서 적용한 강진지속시간에 따른 원전구조물의 동적거동 특성 분석을 위한 절차는 그림 9와 같다. 우선 강진지속시간의 변화에 따라 4.1절에서 설명한 방법과 같이 각 Case별로 30개씩 독립적으로 생성된 인공 입력지반가속도들에 대하여 상용유한요소 프로그램인 SAP2000 V7.42⁽¹¹⁾를 이용하여 시간이력 지진해석을 수행하였다. 각 Case 별로 원전구조물의 최대 가속도응답이 발생하는 위치에서 층

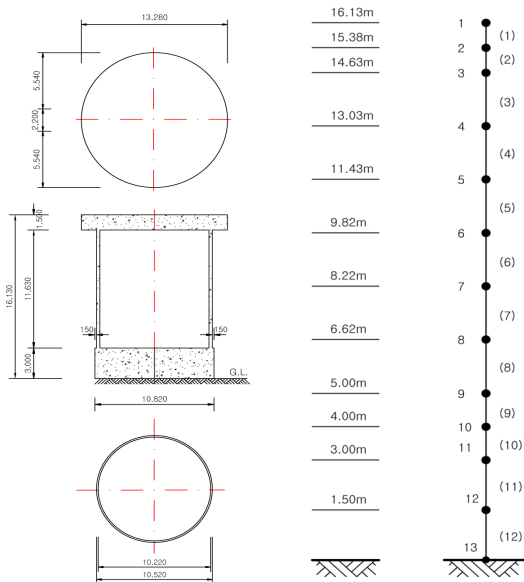
응답가속도를 구한 다음 해당 응답스펙트럼들의 평균값을 산정하여 대상구조물의 동적 거동을 비교 분석하였다. 사례 분석에는 대만 Hualien의 지진시험 구조물⁽⁷⁾과 국내 내진 설계기준에 의해 설계·시공되고 가동 중인 울진 원자력 발전소 3, 4호기 격납구조물⁽⁸⁾을 대상구조물로 고려하였다.

4.3 사례 1 - 대만 Hualien 대형 지진시험 구조물

대만 Hualien 대형 지진시험구조물은 원자로 격납구조물

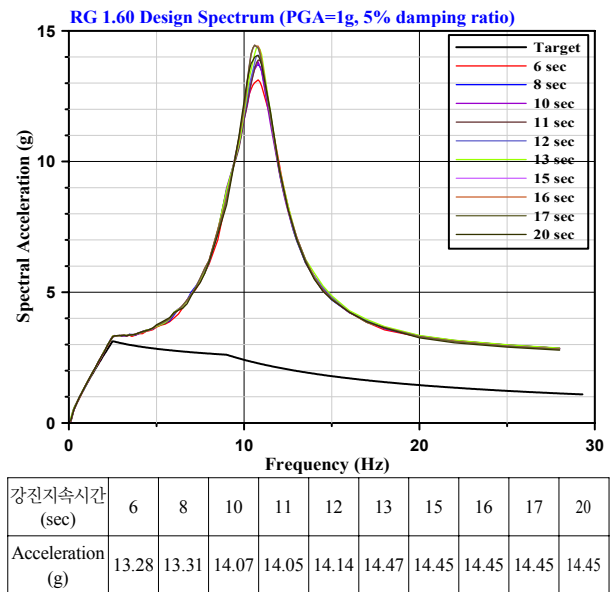


〈그림 9〉 원전구조물의 지진응답 분석절차



〈그림 10〉 Hualien 지진시험 구조물의 평면도와 단면도 및 해석을 위한 SAP2000 구조모델링

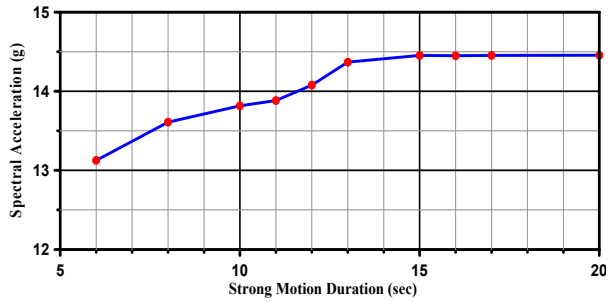
의 1/4축소 모형으로서 그림 10의 좌측 편에 보이는 것과 같이 폭이 약 11m, 높이가 약 16m인 철근콘크리트구조로 전체중량은 1500톤이다. 구조단면도에 근거하여 그림 10의 우측 편과 같이 Stick 모델의 절점에 집중질량을 부과하는 방법으로 단순화하여 모델링 하였다. 자세한 구조계의 재료



〈그림 11〉 대만 Hualien 지진시험 구조물 총 응답스펙트럼 비교

특성과 단면제원 및 해석모델의 집중질량 등에 관한 정보는 참고문헌(7)에서 확인할 수 있다.

이전의 4.2에서 기술한 분석절차에 따라 인공지진파를 생성하고 이 모델을 이용한 시간이력해석, 응답가속도 및 응답스펙트럼 그리고 평균 응답스펙트럼을 산정하여 그 결과를 그림 11과 12에 도시하였다.



〈그림 12〉 대만 Hualien 지진시험 구조물 강진지속시간에 따른 구조물의 최대가속도응답

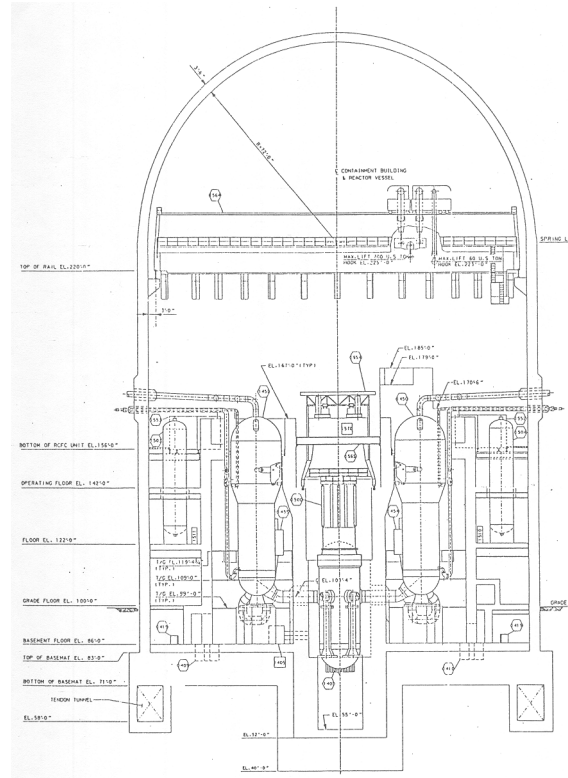
강진지속시간 변화에 따른 원전구조물의 동적거동 특성의 비교를 위하여 그림 11과 12에 각 Case 별 평균 응답스펙트럼을 제시하였다. 그 결과를 간략히 살펴보면, 그림 11에서와 같이 구조물 층 응답은 구조물의 고유주기의 1차 모드인 10.38Hz부분에서 최대 평균응답가속도가 상대적으로 많이 증폭되었고, 대만 Hualien 지진시험 구조물의 경우 그 진동수 위치에서 6초에서 15초의 강진지속시간에 대한 응답의 최대 차이가 약 11%로 이는 현행 USNRC SRP 3.7.1⁽¹⁾의 강진지속시간 규정에 따른 변동성이 일부 존재함을 확인하였다. 또한 그림 12는 강진지속시간의 변화에 따른 최대 평균응답가속도를 나타낸 것으로 강진지속시간이 6초에서 점차 증가함에 따라 최대 응답가속도도 점진적으로 증대하다가 약 12~13초 부근을 지나면서 일정한 값으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

4.4 사례 2 - 울진 원자력발전소 3, 4호기 격납구조물

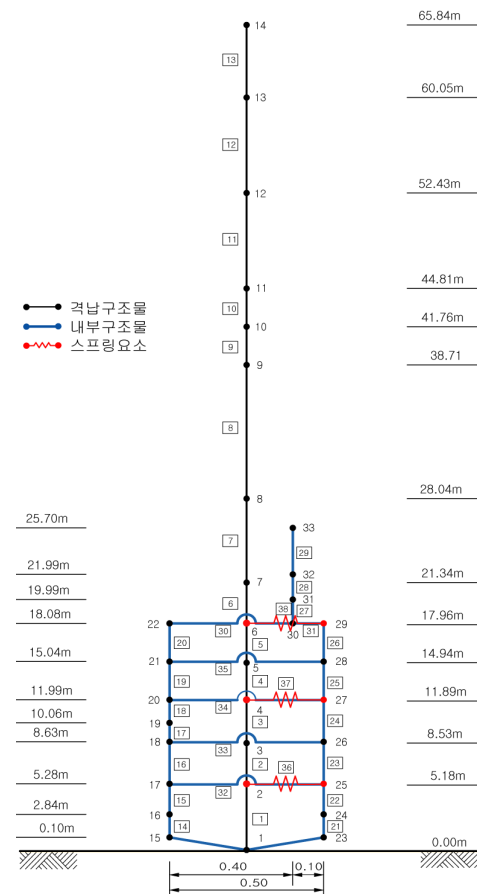
본 절에서는 그림 13에 보이는 지름 48.77m 그리고 높이 69.5m인 울진 원자력발전소 3, 4호기 격납구조물을 대상으로 4.3절과 동일한 입력지진가속도와 방법으로 강진지속시간에 따른 원전구조물의 동적거동을 분석하였다. 지진해석을 위한 구조물 모델링은 동적거동 특성만을 확인하기 위해 그림 14와 같이 격납구조물 및 내부구조물을 단순화함으로써 FRAME 구조물의 절점에 집중질량을 부과하는 방식으로 모델링하였다. 지면의 제약으로 생략한 자세한 구조계의 재료특성과 단면제원 및 해석모델의 집중질량 등에 관한 정보는 참고문헌⁽⁸⁾에서 확인할 수 있다.

4.3절과 동일한 분석절차에 따라 평균 층 응답스펙트럼을 산정하여 그 결과를 그림 15에 그리고 강진지속시간에 대한 동적 거동경향을 그림 16에 나타내었다.

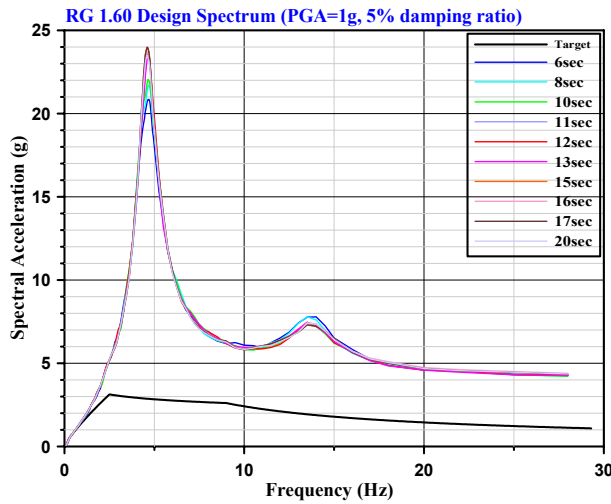
울진 3, 4호기 격납구조물 또한 1차 고유진동수인 4.5Hz에서 층 응답이 크게 증가하였고 그 결과 강진지속시간이 6초에서 점차 증가함에 따라 구조물의 최대 응답가속도가 점



〈그림 13〉 울진 3, 4호기 원자력발전소 격납구조물

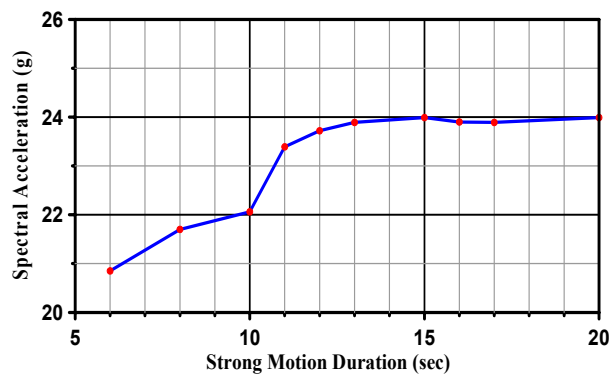


〈그림 14〉 SAP2000 해석을 위한 울진 3, 4호기 원자력발전소 격납구조물 모델



강진지속시간 (sec)	6	8	10	11	12	13	15	16	17	20
Acceleration (g)	20.85	21.70	22.06	23.39	23.72	23.8	23.99	23.70	23.79	23.99

〈그림 15〉 울진 3, 4호기 원자력발전소격납 구조물 층 응답스펙트럼 비교



〈그림 16〉 울진 3, 4호기 원자력발전소 격납구조물 강진지속시간에 따른 구조물의 최대가속도응답

진적으로 증대되다가 13~15초 부근을 지나면서 일정한 값으로 수렴한다. 울진 원자력 발전소의 경우 6초에서 13초의 강진지속시간에 대한 응답의 최대 차이가 약 15%로, 이는 현행 USNRC SRP 3.7.1⁽¹⁾의 강진지속시간 규정에 따른 변동성이 무시할 수 없을 정도라는 것을 나타낸다. 따라서 현재로서는 원전구조물의 안전성을 고려한 SSE(Safe Shutdown Earthquake) 설계기준에 13~15초의 강진지속시간을 사용하는 것이 타당한 것으로 사료되나, 향후 이에 대한 추가연구와 면밀한 검토가 필요하다. 또한 강진지속시간에 대한 최대 임계치는 15초로 판단되며, 7.5이상의 큰 지진규모에 대한 인공지진파 작성에서 15초 이상의 강진지속시간을 규정하는 것은 최대응답의 측면에서 불필요한 것으로 사료된다.

5. 결론

이 논문은 원자력 발전소 격납구조물의 내진설계에 적용되는 인공지진파의 강진지속시간과 포락함수의 결정기준에 대한 현행 국내기준의 보완과 개선을 위한 기초연구에 중점을 두고 다음 세 가지 연구내용을 수행하였다. 첫째 국내에서 일반적으로 준용되는 USNRC RG 1.60 및 SRP 3.7.1과 1999년 발간된 ASCE 4-98의 설계응답스펙트럼과 강진지속시간의 기준을 비교·검토하였다. 둘째 암반사이트에서 실제 기록된 규모 5.0 이상인 총 209개의 강진기록을 ASCE 4-98의 강진지속시간기준에 적용한 결과에 대하여 통계분석을 수행하고 이로부터 지진규모와 강진지속시간 사이의 예측 상관식을 제시하였다. 셋째 강진지속시간이 원자력 발전소 격납구조물의 지진응답 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 강진지속시간을 달리 정의한 10가지 경우에 대한 인공지진파를 작성하고 대표적인 원자력 발전소의 격납구조물의 응답경향을 분석·고찰하였다. 이상의 연구내용에 대한 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. USNRC SRP 3.7.1 허용기준에서의 강진지속시간은 6초에서 15초의 범위로 규정되어 있어 설계자의 주관적 공학적 판단에 따른 다소의 변동성이 존재하는 반면 ASCE 4-98에서는 지진 규모별로 구체적인 값을 제시하여 상대적으로 합리적인 것으로 판단된다.
2. 지진규모(M_w)가 5~7.5이고 PGA는 0.1~0.5g 범위에 해당하는 암반에서 계측된 209개의 실제 지진기록을 이용하여 지진규모에 따른 강진지속시간 예측 상관식을 제시하였으며, 그 결과가 ASCE 4-98과 상당히 유사하여 제안식의 타당성이 입증되었다.
3. 실 계측된 지진자료를 토대로 계산된 지진규모(M_w)와 강진지속시간($AI_{5\% \sim 75\%}$)의 추세선에 대한 평균과 표준편차를 이용하여 임의 규모의 특정초과확률 값을 만족하는 강진지속시간을 제시하였다.
4. 현행 원전구조물의 내진설계에 적용되는 USNRC의 기준에 따라 생성된 다수의 인공지진가속도를 이용하여 원전구조물의 지진해석을 수행한 결과, 지진 규모의 구간별로 구체적으로 강진지속시간을 규정한 ASCE 4-98기준이 보다 합리적인 것으로 판단된다. 또한 현재로서는 국내 원전구조물의 안전성을 고려한 SSE(Safe Shutdown Earthquake) 설계기준에는 강진지속시간으로 10초 이상 15초 이내의 값을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 추가연구와 면밀한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 과학기술부 원자력중장기연구와 전남대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. USNRC, Seismic Design Parameters, *USNRC Standard Review Plan 3.7.1*, 1996.
2. ASCE, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, *ASCE Standard 4-98*, 1999.
3. 현창현, 최호선, 이용일, 김문수, 김상윤, “원자력발전소 내진 설계 규정 개정 방향,” 한국지진공학회 추계워크샵 발표논문집, 1-26, 2008.
4. USNRC, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants - Revision 1, *Regulatory Guide 1.60*, USNRC, 1973.
5. Bommer, J.J., and Martinez-Pereira, A., “The Effective Duration of Earthquake Strong Motion”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3, No. 2, 127-172, 1999.
6. Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER), <http://peer.berkeley.edu/>
7. 원자력안전기술원, 지반-구조물 상호작용 해석 및 지진입력 판단기준의 적용성 연구, 보고서번호 KINS/HR-779, 2007.
8. Nuclear Safety Related, Seismic Analysis of Containment Building-Ulchin Nuclear Power Plant Units 3 and 4, KEPCO, 1991.
9. 김재민, QuakeGem 사용자 설명서, 여수대학교 건설환경공학부, 2002.
10. Deodatis, G., “Non-stationary stochastic vector process: Seismic ground motion applications,” *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 11, 149-168, 1996.
11. *Computers and Structures, SAP2000 User's Manual*, USA, 1995.