

내진설계를 위한 인공지진파 강진지속시간 기준의 평가

Assessment of the Strong Motion Duration Criterion of Synthetic Accelerograms

허정원* 정호섭** 김재민*** 정연석****
 Huh, Jungwon Jung, Ho-Sub Kim, Jae-Min Chung, Yun-Suk

ABSTRACT

This paper addresses a fundamental research subject to complement and improve current domestic design specifications for the strong motion duration criterion and the envelop function of artificial accelerograms that can be applied to the earthquake-proof design of nuclear structures. The criteria for design response spectra and strong motion duration suggested by NRC RG 1.60 and ASCE Standard 4-98 are commonly being used in the profession, and they are first compared with each other and reviewed. By applying 152 real strong earthquake records that are over magnitude of 5 in the 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 earthquake magnitude is then developed. Using synthetically generated earthquake time histories for the five cases whose strong motion durations vary from 6 to 15 seconds, a seismic analysis is conducted to identify effects of the strong motion durations on the seismic responses of nuclear structures.

1. 서론

강진지속시간은 원전구조물의 내진설계와 지진위험도에 중요한 영향을 미치는 인자로 알려져 있다. 그러나 현재 국내 원전구조물의 내진설계에 적용되는 NRC RG 1.60⁽¹⁾에서는 인공 지진시간 이력 생성을 위한 강진지속시간과 포락함수의 결정기준이 명확하지 않아 설계자의 판단 및 직관에 따른 변동성이 상당하여 보다 엄정하고 합리적인 기준이 필요한 실정이다. 한편 최근 발간된 미국토목학회의 ASCE Standard 4-98⁽²⁾에서는 인공 지진시간이력에 대한 강진지속시간과 포락함수의 기준이 상대적으로 보다 구체적이고 명확하게 제시되었다. 본 연구에서는 NRC RG 1.60과 ASCE 4-98의 설계응답스펙트럼과 강진지속시간에 대한 기준의 차이점을 비교·분석하고, 현행 국내기준의 개선과 보완을 위하여 총 152개의 암반사이트에서 실제 기록된 규모 5.0 이상인 강진기록을

* 전남대학교 해양기술학부 해양공학전공, 조교수
 ** 전남대학교 해양기술학부 해양공학전공, 석사과정
 *** 정회원·전남대학교 건설환경공학부, 부교수
 **** 정회원·한국원자력안전기술원 원자력안전연구실, 책임연구원

ASCE 4-98의 강진지속시간기준에 적용한 결과의 통계분석을 통하여 지진규모에 대한 함수로 표현되는 강진지속시간의 실험적 예측모델을 제시하였다. 또한 강진지속시간이 원전구조물의 지진 응답특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 6초에서 15초까지 2초 간격인 강진지속시간의 5Case에 대한 인공지진파를 작성하고 울진 원자력발전소 격납구조물에 대한 지진응답경향을 분석하였다.

2. RG 1.60과 ASCE Standard 4-98의 설계 응답스펙트럼 허용기준

2.1 NRC RG 1.60⁽¹⁾ 설계 응답스펙트럼 허용기준

그림 1에 보이는 NRC RG 1.60⁽¹⁾의 수평방향 설계 응답스펙트럼은 최대 지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration) 1.0g에 기준한 것이다. 최대 지반가속도에 비례하는 값으로 최대 지반변위를 선정하므로, 최대 지반가속도 1.0g에 대응하는 36inch로 최대 지반변위를 규정하였다. 설계응답스펙트럼의 설계 변위, 속도 그리고 가속도의 값은 최대 지반변위와 가속도에 대응하는 값에 표 1에 제시된 증폭계수를 곱한 값으로 정의한다. 한편 시간이력 해석법에서 시간이력은 설계응답스펙트럼의 요건을 만족하도록 실제 기록된 지진운동을 수정하거나 인공적으로 생성된 지진운동을 사용하도록 규정하고 있다. 그리고 0.4Hz에서 설계응답스펙트럼을 적절히 만족시키기 위해서는 총 10초부터 25초 사이의 지진지속시간이 필요하며, 이에 상응하는 정상상태 강진지속시간을 6초에서 15초 사이의 시간 범위로 정의하였다.

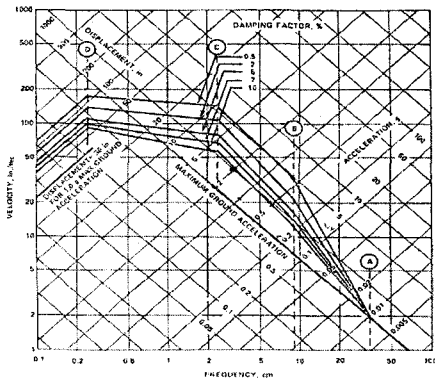


그림 1. RG 1.60 응답스펙트럼 (Rock, PGA=1.0g)

표 1. 수평방향 표준응답스펙트럼의 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

2.2 ASCE Standard 4-98⁽²⁾ 설계 응답스펙트럼 허용기준

ASCE Standard 4-98⁽²⁾에서는 설계스펙트럼의 스펙트럼 증거(S_a =가속도 스펙트럼, S_v =속도 스펙트럼, S_d =변위 스펙트럼)는 최대 가속도 a , 최대 속도 v , 최대 변위 d 의 향으로 정의된 지반운동에 대응하는 최대값에 표 2에 주어진 동적증폭계수(dynamic amplification factors)를 적용한 값으로 규정하였다. 표 2의 증폭계수는 중앙값으로 정의된다. 중앙의 증폭계수는 최대 지반거동 매개변수로 개연성이 일정한 a , v , 그리고 d 를 선택했다. 주파수의 상응하는 값과 그림 2의 응답스펙트럼의 직선 구역의 교점에서 가속도 스펙트럼은 표 3에 나타내었다. 또한 시간이력은 특정 장소에 기대되는 지반운동을 합리적으로 재현하도록(예를 들어 진도와 거리에 적합한 지진의 진폭과 지속시간을 갖도록) 선택되거나 개발되어야 한다. 달리 타당하게 입증되지 않았다면, 그림 3과 표 4에 정의된 지반운동 매개변수와 포락함수를 사용하여야 한다.

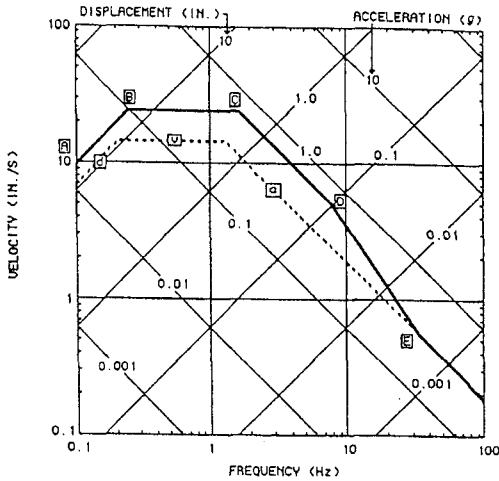


그림 2. ASCE 4-98 수평방향 응답스펙트럼
(Soil site, 지반가속도 0.3g, 감쇠비 5%)

표 2. 설계스펙트럼 증폭계수의 증양값

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

일반지반 $v = 48a/g$ (in/sec), 암반 $v = 36a/g$ (in/sec);
 일반지반 $d = 36a/g$ (in), 암반 $d = 20a/g$ (in);
 λ =임계 감쇠비, a =PGA, g =중력가속도)

표 3. 스펙트럼 Control Point의 주파수

Control Point	주파수(Hz)	스펙트럼 가속도(g)
	λ	λ
A	0.1	$(0.335S_d/g)$
B	$(S_d/2\pi S_d)$	(S_d^2/gS_d)
C	$(S_d/2\pi S_d)$	S_d/g
D	8	S_d/g
E	33	a/g

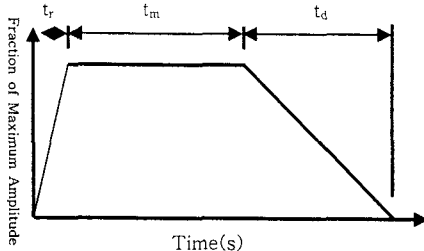


그림 3. 지속시간 포락함수

표 4. 지속시간 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

3. 강진지속시간의 정의 및 지진기록자료를 이용한 강진지속시간의 예측 상관식

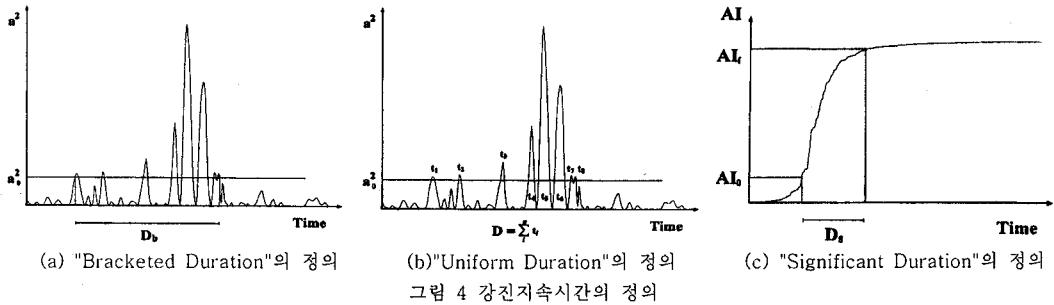
3.1 강진지속시간의 정의

Accelerogram의 강진위상을 정의하고 측정하는 다양한 종류의 접근방법들이 여러 연구자들에 의해 제안되었다. 지진가속도 자료에 대한 강진 지속시간은 그림 4에 제시한 대표적인 3개의 분류방법⁽³⁾으로 정의된다. 첫 번째 정의로 "Bracketed Durations" (D_b)은 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 정의인 "Uniform Durations" (D_u)은 경계수준을 초과한 가속도진폭의 시간간격의 합으로 강진 지속시간 D_u 를 정의한다. D_u 의 개념은 그림 4(b)에 나타내었다. D_u 정의는 D_b 보다 규정된 에너지수준에 대한 민감도가 작으나, 강진의 경우에 지속시간의 연속성을 나타내지 못 한다. 마지막은 "Significant Durations" (D_s)로 그림 4(c)에서와 같이 지반가속도에 대한 특정 시간구간에 누적된 에너지양을 기준으로 정의하며, 일반적으로 총 가속도 시간이력에 대한 누적 에너지양은 Arias Intensity, AI ⁽³⁾로 표현되고 아래 식 (1)과 같다.

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

여기서 $a(t)$ 는 가속도 시간이력, t_r 는 Accelerogram의 총 시간이다.

이러한 "Significant Durations"의 개념은 Accelerogram 전체의 특성을 잘 나타내고 강진 지속 시간의 연속성을 고려할 수 있는 특징을 가지고 있는 것으로 입증⁽³⁾되었으며, ASCE 4-98⁽¹⁾에서는 AI곡선에서 5%~75%에 해당하는 시간범위를 강진지속시간(D_s)으로 정의하였다.



3.2 실제 지진계측자료를 이용한 지진 규모에 따른 강진지속시간 상관식

본 연구에서 ASCE 4-98의 강진지속시간 기준에 대한 평가와 지진규모에 대한 함수로 표현되는 합리적인 강진지속시간 예측모델의 개발을 위하여, 다수의 실제 지진기록에 대하여 ASCE 4-98이 제시한 강진지속시간(D_s)의 정의와 포락함수기준을 적용하였다. 실제 사용한 지진 계측데이터는 표 5에 나타난바와 같이 지진규모 5에서 7.5까지의 진앙거리가 10km에서 300km이내이고 Rock site에서 기록된 PGA값이 0.1g에서 0.5g인 자료를 대상으로 하였으며, 그 수는 총 152개로 미국PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)⁽⁴⁾의 웹사이트에서 획득하였다.

수집된 152개의 계측자료를 지진 규모(Magnitude, M_w) 0.5간격별로 분류한 후 ASCE 4-98의 기준($D_s = AI_{5\% \sim 75\%}$)을 적용하여 강진지속시간을 산정하였다. 그리고 궁극적으로 설계기준의 정립을 위해 그림 5에 제시된 지진통계자료의 변동성을 고려할 수 있는 비초과확률 개념을 도입하여, 그림 6에 도시된 지진규모별 강진지속시간에 대한 실험적 추세선을 평균과 평균+2표준편차(비초과확률 98%) 값에 대하여 작성한 후 지진규모에 따른 강진지속시간 예측 상관식을 아래 식 (2)와 (3)에 각각 제시하였다.

$$D_s = \exp^{0.833M_w - 4.048} \quad [\mu] \quad (2)$$

$$D_s = \exp^{0.655M_w - 2.229} \quad [\mu + 2\sigma] \quad (3)$$

표 5. 지진 DATA 현황

규모 \ PGA	5~5.5	5.5~6	6~6.5	6.5~7	7~7.5
0.1g~0.3g	30	17	32	43	8
0.3g~0.5g	6	1	5	11	0
총계	152				

표 6. 제안 예측상관식을 적용한 강진지속시간 매개변수

M_w	상승시간 (t_r) AI 5%	강진지속시간 (t_m) AI 70%	쇠퇴시간 (t_d) AI 25%
7.5	2.1	14.6	10.5
7.0	1.5	10.5	7.5
6.5	1.1	7.6	5.4
6.0	0.8	5.5	3.9
5.5	0.6	3.9	2.8

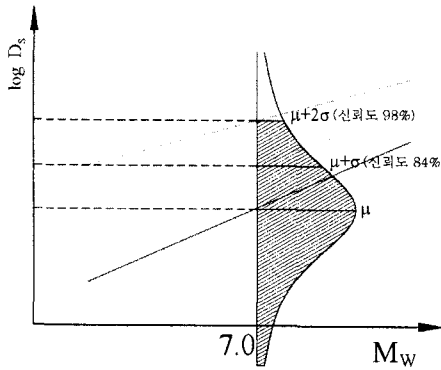


그림 5. 비교과확률 개념도

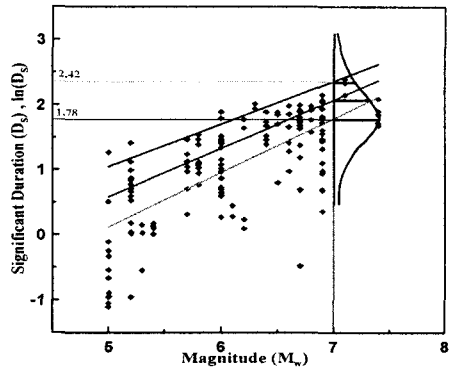


그림 6. 지진규모에 대한 강진지속시간

표 6에는 지진 규모 5.5에서 7.5까지의 범위를 0.5간격으로 구분한 5개 지진 규모에 대한 강진 지속시간을 식 (3)의 예측 상관식으로 산정하여 제시하였다. 또한 상승시간과 쇠퇴시간도 그림 3과 표 4에 제시된 ASCE 4-98의 포락함수 매개변수를 근거로 산출하여 표 6에 같이 표기하였다. 본 연구에서 제시된 표 6은 ASCE 4-98의 표 4의 결과와 대체적으로 유사하여 제안된 실험적 상관식의 타당성을 확인할 수 있었다. 한편 두 결과에서 발생하는 근소한 차이는 사용된 지진자료의 숫자와 특성 그리고 통계처리의 방법에 기인하는 것으로 판단된다. 향후 추가적인 실제 지진기록 자료의 확보와 적용을 통하여 상관식을 update함으로써 보다 높은 정확도와 엄밀한 예측이 가능할 것으로 사료된다.

5. 강진지속시간에 따른 원전구조물의 영향

5.1 울진 원자력 발전소 3&4호기 격납구조물 지진해석

본 절에서는 그림 7에 보이는 지름 48.77m 그리고 높이 69.5m인 울진 원자력발전소 3 & 4호기 격납구조물⁽⁵⁾을 대상으로 강진지속시간에 따른 원전구조물의 동적거동을 분석하였다. 지진해석을 위한 구조물 모델링은 동적거동 특성만을 확인하기 위해 그림 8과 같이 격납구조물 및 내부구조물을 단순화함으로써 FRAME 구조물의 절점에 집중질량을 부과하는 방식으로 모델링하였다⁽⁶⁾.



그림 7. 울진 원자력발전소 3 & 4호기 격납구조물

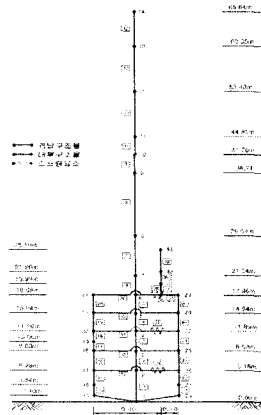
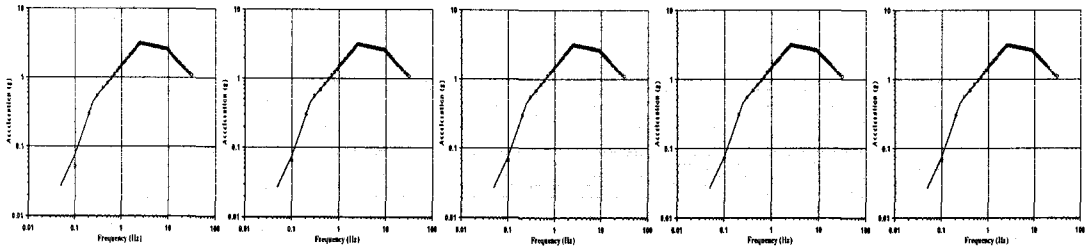


그림 8. SAP2000 해석을 위한 원전구조물 모델

표 7. 포락함수 매개변수

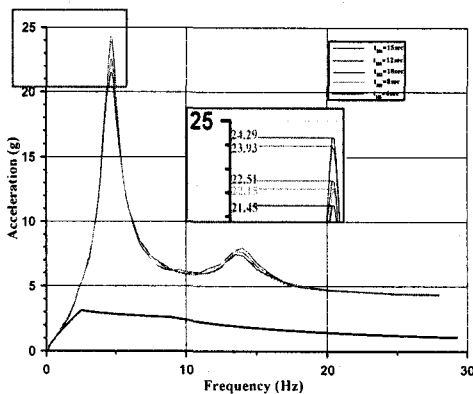
	상승시간	강진지속시간	쇠퇴시간
Case 1	1	6	3
Case 2	2	8	4
Case 3	2	10	6
Case 4	3	12	7
Case 5	3	15	7

본 연구에서는 인공 입력지진과 생성을 위하여 QuakeGem(Deodatis, 1996; 김재민, 2002)⁽⁶⁾과 원전구조물의 지진응답해석을 위하여 SAP2000 V7.42(Computers & Structure, 1995)⁽⁷⁾ 전산프로그램을 사용하였다. 현행 원전구조물의 내진설계에 적용되는 NRC RG 1.60⁽¹⁾의 기준에 따라 동일한 PGA=1.0g에 대하여 표 7과 같이 강진지속시간을 달리하는 5 Case에 대하여 각기 15개의 독립적인 인공지진을 생성하였으며, 아래 그림 7에 나타난바와 같이 그들의 평균 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼을 만족하였다.



(a) 강진지속시간 6sec (b) 강진지속시간 8sec (c) 강진지속시간 10 sec (d) 강진지속시간 12 sec (e) 강진지속시간 15sec
그림 9. 목표설계응답스펙트럼과 평균 입력지반가속도응답스펙트럼의 비교

강진지속시간의 변화에 따라 각 Case별로 15개씩 생성된 인공 입력지반가속도들에 대하여 SAP2000 V7.42(Computers & Structure, 1995)⁽⁷⁾를 이용한 시간이력 지진해석을 수행하였으며, 각 Case 별 구조물의 최대 가속도응답스펙트럼의 평균값을 그림 10에 나타내었다. 먼저, 구조물의 자유진동해석을 통하여 산정된 1차와 2차 모드의 고유주파수인 $f_1=4.56\text{Hz}$ 및 $f_2=13.09\text{Hz}$ 에서 최대 응답가속도가 상당히 증폭되며 또한 지배적인 고유주파수 영역부근에서 강진지속시간의 변화에 따른 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 예측 가능한 결과로서 원자력구조물을 위한 입력지진과의 강진지속시간에 대하여 현행 NRC RG 1.60⁽¹⁾의 기준에 비하여 지진 규모에 따라 구간별로 구체적으로 강진지속시간을 규정한 ASCE 4-98기준⁽¹⁾이 보다 합리적인 것으로 판단된다.



강진지속시간 (sec)	6	8	10	12	15
Acceleration (g)	21.45	22.15	22.51	23.93	24.29

그림 10. 울진 원자력 발전소 3 & 4호기의 평균 최대가속도응답스펙트럼과 목표설계응답스펙트럼의 비교

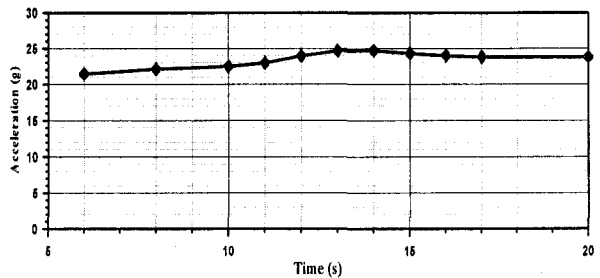


그림 11 강진지속시간에 따른 구조물 최대응답가속도

한편 그림 11에서는 강진지속시간의 증가에 따른 구조물의 응답가속도 변화를 도시한 것으로서, 강진지속시간이 6초로부터 점차 증가함에 따라 구조물의 최대 지반응답가속도가 점진적으로 증대되다가 13~15초 부근을 지나면서 일정한 값에 수렴한다. 6초와 13초의 강진지속시간에 대한 응답의 최대차이는 약 15%로, 이는 현행 NRC RG 1.60의 강진지속시간 규정에 따른 변동성이 무시할 수 없을 정도라는 것을 나타낸다. 따라서 현재로서는 원전구조물의 안전성을 고려한 SSE(safe shutdown earthquake) 설계기준에 최소 13~15초의 강진지속시간을 사용하는 것이 타당한 것으로 사료되며, 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.

6. 결론

본 논문에서는 원전구조물의 내진설계에 적용되는 인공지진파의 강진지속시간과 포락함수의 결정기준에 대한 현행 국내기준의 보완과 개선을 위한 기초연구에 대한 내용을 기술하였다. 먼저 국내에서 일반적으로 준용되는 NRC RG 1.60과 2000년 발간된 ASCE Standard 4-98의 설계응답스펙트럼과 강진지속시간의 기준을 비교·검토하였다. 또한 암반사이트에서 실제 기록된 규모 5.0 이상인 총 152개의 강진기록을 ASCE 4-98의 강진지속시간기준에 적용한 결과에 대하여 통계분석을 통한 지진규모와 강진지속시간 사이의 상관식을 제시하였다. 마지막으로 강진지속시간이 원전구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 강진지속시간이 다른 5 Case에 대한 인공지진파를 작성하고 원전구조물의 응답경향을 분석하였다. 이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① RG 1.60 설계응답스펙트럼 허용기준에서의 강진지속시간은 6초에서 15초의 범위로 규정되어 있어 설계자의 주관적 공학적 판단에 따른 변동성이 큰 반면 ASCE 4-98에서는 지진 규모별로 구체적인 값을 제시하여 상대적으로 합리적인 것으로 사료된다.
- ② 실제 지진기록자료를 이용하여 지진규모에 따른 강진지속시간 예측 상관식을 제시하였으며, 결과가 ASCE 4-98과 상당히 유사하여 제안식의 타당성이 입증되었다.
- ③ 현행 원전구조물의 내진설계에 적용되는 NRC RG 1.60의 기준에 따라 생성된 다수의 인공지진가속도를 이용하여 원전구조물의 지진해석을 수행한 결과, 지진 규모의 구간별로 구체적으로 강진지속시간을 규정한 ASCE 4-98기준이 보다 합리적인 것으로 판단되고 또한 현재로서는 원전구조물의 안전성을 고려한 SSE(safe shutdown earthquake) 설계기준에는 최소 13~15초의 강진지속시간을 사용하는 것이 타당한 것으로 사료되며, 향후 이에 대한 추가연구와 면밀한 검토가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력중장기연구의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Regulatory Guide 1.60
2. ASCE 4-98, "Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary", ASCE, 1999.
3. Bommer, J. J. and Martinez-Pereira, A. "The Effective Duration of Earthquake Strong Motion", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, No 2, 1999
4. Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER), <http://peer.berkeley.edu/>
5. Nuclear Safety Related, "Seismic Analysis of Containment Building-Ulchin Nuclear Power Plant Units 3&4", KEPCO. 1991.
6. 김재민, QuakeGem 사용자 설명서, 여수대학교 건설환경공학부, 2002.
7. SAP2000 Manual, Computers & Structure, 1995.