

지진 데이터 생성 및 격납건물 시간이력 해석

Generation of Simulated Earthquakes and Time-history Dynamic Analysis of Containment Building

배 용 귀* 이 성 로**
Bae, Yong Gwi Lee, Seong Lo

ABSTRACT

In the seismic response analysis, the artificial earthquake time history is generated to do the exact seismic analysis for the complex structural system like as containment building. In the present study the several simulated earthquakes are generated by use of SIMQKE program and the time history dynamic analysis of containment building is performed. Also, the seismic responses are statistically analyzed. The seismic response uncertainty arisen from the simulation of earthquakes is one of major uncertainties and the statistical description is needed to account for the random nature of earthquake.

1. 서론

원자력발전소 격납건물은 일반 구조물과 달리 안전성 확보가 강조되는 구조물로 지반-구조물 상호 작용을 고려한 내진해석, 격납건물의 극한 저항능력 분석을 위한 비선형 해석, 내진 안전성 평가 및 원전 구조물 수명 관리 등을 포함한 특수 해석 및 설계 검증 과정을 필요로 한다⁽¹⁾.

내진 안전성을 평가할 때 동적 해석법에는 응답스펙트럼법과 시간이력해석법이 있다. 응답스펙트럼법은 적용이 쉽고 보편화된 방법이지만, 원자력발전소 등과 같은 특수한 구조물에 대해서는 보다 정확한 해석을 수행하기 위하여 시간이력해석법을 사용한다. 그러나 설계 가속도 시간이력은 응답스펙트럼과 달리 설계규정이 구체적으로 명시되어있지 않고, 우리나라의 지형에 맞는 조건이나 강진에 대한 자료가 없으므로, 역학적으로 문제가 없는 범위 내에서 설계자가 자체적으로 가속도 시간이력을 작성하여 해석에 활용하고 있다.

본 연구에서는 SIMQKE⁽²⁾를 사용하여 가속도 시간이력을 생성하고, 시간이력의 형상과 특성에 따른 격납건물의 동적 해석 결과를 비교 검토하였다. 또한, 같은 설계응답스펙트럼에 상응하는 가속도 시간이력에서의 지진응답의 통계적 특성을 분석하였다.

2. 본론

2.1. 인공지진 시간이력 생성

우리나라 원전 구조물의 내진설계시 미국 원자력규제위원회(US NRC)⁽³⁾에서 제시하고 있는 표준 응답스펙트럼을 사용하고 있으며, 발전소 부지의 지질 및 지진활동 등을 고려하여 안전정지지진(SSE)

* 정회원, 목포대학교 토목대학원 석사과정

** 정회원, 목포대학교 토목공학과 교수

또는 설계기준지진(DBE)을 결정하는데 월성이나 고리의 경우 0.2g를 설계기준지진으로 사용하고 있다. 설계응답스펙트럼과 일치하는 가속도 시간이력은 격납건물의 내진설계 또는 내진 안전성 평가를 수행하는데 이용할 수 있다. SIMQKE를 이용한 인공지진 시간이력은 입력자료에 따라 각기 다른 형상으로 생성되는데, 여기에서는 구조계의 감쇠값에 따른 설계응답 스펙트럼, 강도형상, 강진 및 지진 지속시간에 따라 각각 상이한 시간이력을 얻은 후 이를 이용하여 동적 해석을 수행하였다. 미국 원자력규제위원회에서는 철근콘크리트 격납건물 및 프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 내진설계시 감쇠비를 조작기준지진(OBE)와 설계기준지진으로 구분하여 제시하고 있다⁽⁴⁾. RC 격납건물의 경우 설계기준지진에서 7%의 감쇠비를, PS 격납건물의 경우 5%의 감쇠비를 제시하고 있다. 또한, 조작기준지진에서는 각각 4% 및 2%의 감쇠비를 제시하고 있다.

2.1.1. 설계응답 스펙트럼과 감쇠비

구조물은 동적 거동 중에 구조계의 마찰, 열의 발생, 균열 및 항복에 의해 에너지가 소산된다. 특히 구조물이 비선형 영역에서 거동할 때 균열과 항복에 의한 감쇠가 큰 비중을 차지한다. 따라서 감쇠비는 재료 물성과 하중의 크기에 따라 다르며 구조물이 비선형 거동을 하면 감쇠비가 증가한다. 그림 1. (a), (b), (c)에서 좌측 그림의 굵은 실선은 각각 2%, 5%, 10% 감쇠비를 가지는 설계응답 스펙트럼이며, 가는 파형의 선들은 프로그램(SIMQKE)에서 계산된 값으로 감쇠비에 따른 수렴정도를 보여주고 있다. 또한 우측 그림은 입력된 설계응답 스펙트럼에 의해 생성된 설계가속도 시간이력이다.

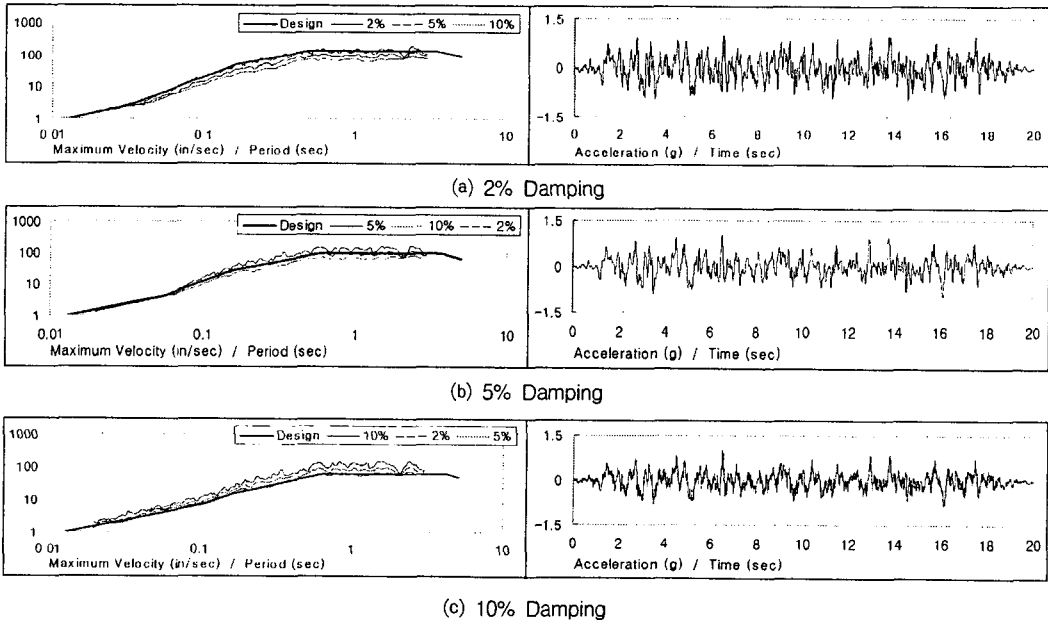
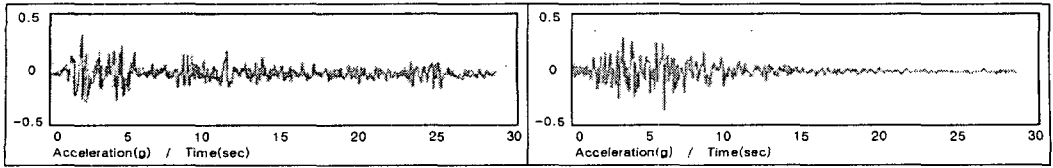


그림 1. 설계응답스펙트럼과 일치하는 인공지진 시간이력

2.1.2. 강도형상

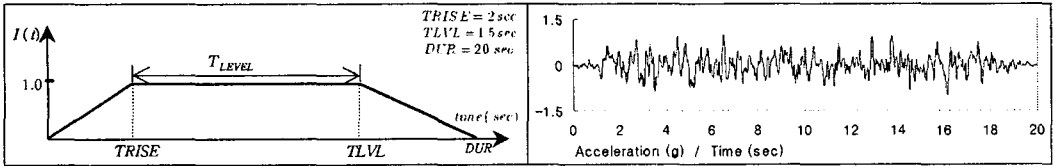
그림 2는 잘 알려진 El Centro 지진과 Managua 지진가속도 기록이다. 실제 지진가속도와 유사하게 인공지진 가속도를 생성하기 위해 강도형상은 그림 3 (a), (b), (c)에서와 같이 사다리 형태, 지수 형태, 혼합 형태의 세 가지로 분류한다.



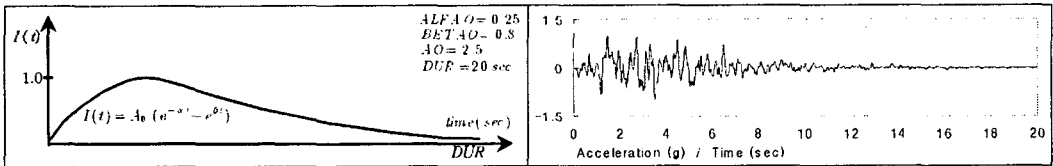
(a) El Centro 1940 - NS

(b) Managua 1972 - East

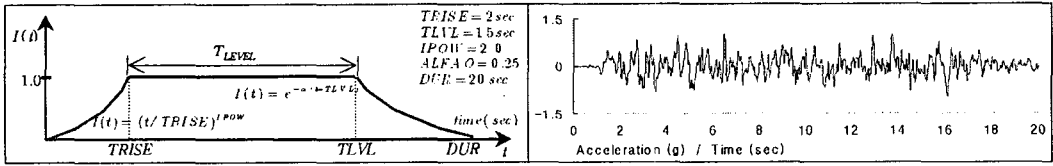
그림 2. 실제지진기록



(a) 사다리형태



(b) 지수형태

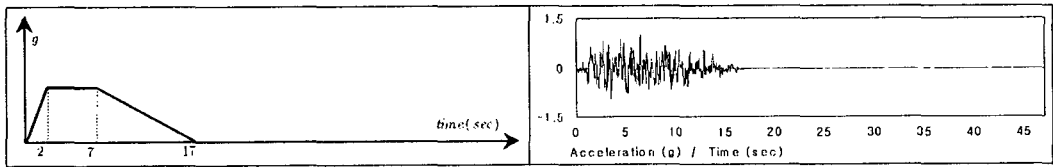


(c) 혼합형태

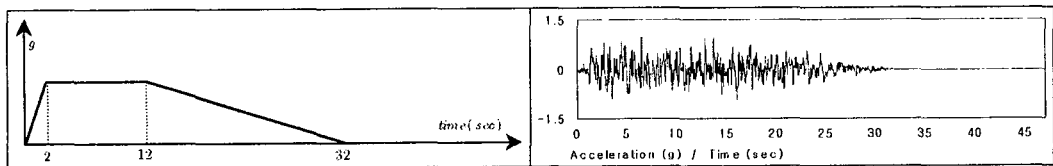
그림 3. 강도형상이 다른 인공지진 시간이력

2.1.3. 강진시간

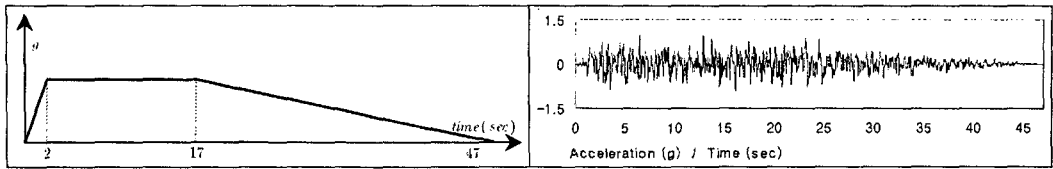
사다리형태의 강도형상에서 강진시간을 달리하여 생성한 인공지진 시간이력을 그림4 (a), (b), (c)에 나타내었다. 그림에서 강진시간(Leveling Time)은 각각 5초, 10초, 15초로 하고, 지속시간(Duration)을 각각 17초, 32초, 47초로 하였다.



(a) 강진시간 : 5sec, 지속시간 : 17sec



(b) 강진시간 : 10sec, 지속시간 : 32sec



(c) 강진시간 : 15sec, 지속시간 : 47sec

그림 4. 강진시간이 다른 인공지진 시간이력

2.2 격납건물의 시간이력 해석

범용구조해석프로그램 SAP2000⁽⁵⁾을 사용하여 시간이력 해석을 하였다. 동적 해석에서 고려한 구조물은 원통형 벽체와 반구형 돔으로 구성되어 있는 콘크리트 격납건물로 그림 5와 같다.

표 1은 앞의 절에서 변수를 달리하여 생성한 인공지진 시간이력에 대해 최대지반 가속도를 0.2g로 스케일링하여 해석한 결과를 나타내고 있는데 변위는 최대값을 가지는 격납건물의 정점에 대한 값이며, 응력은 격납건물의 하단부에 대한 값이다. 2%, 5%, 10%의 감쇠비에 대한 해석결과를 비교하면 3.27:1.85:1의 비를 가지고 있다. 또한, 강도형상에 의한 영향을 보면, 사다리형태와 혼합형태의 강도형상을 가지는 시간이력에 대한 지진응답이 거의 비슷한 것에 비하여 지수형태에 대한 지진응답이 상대적으로 크다. 강진시간에 의한 영향을 비교해 보면 강진시간이 다른 시간이력이 지진응답의 크기에 큰 영향이 없다.

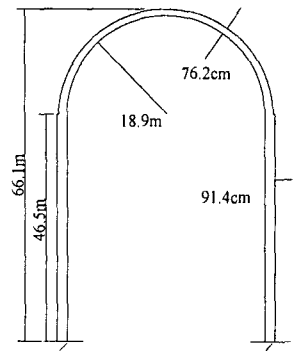


그림 5 격납건물 단면 형상

표 1. 인공지진 시간이력에 의한 격납건물의 해석결과

Design Spectrum		강도 형상(5% damping)		강진시간(5% damping)	
감쇠비	변위(m)	형태	변위(m)	시간	변위(m)
2% damping	0.0208	사다리형태	0.0118	5 sec	0.0122
5% damping	0.0118	지수형태	0.0125	10 sec	0.0119
10% damping	0.00637	혼합형태	0.0117	15 sec	0.0116

지금까지 인공지진 시간이력을 생성하는데 있어서 대표적인 몇 가지 변수들의 변화에 의해 지진의 형상 및 동적 해석결과가 다르게 나타나는 것을 보았다. 특히 지진응답에 대한 감쇠비의 영향이 크게 나타나고 있다. 이와 더불어 유한한 지진기록과 시간이력 생성시의 제한된 설계변수로 지진하중의 불확실성을 충분히 고려하기 어려움이 있다. 동일한 설계응답스펙트럼을 가지는 설계가속도 시간이력에 의한 지진응답이 서로 차이가 많이 날 수 있으며, 이러한 응답의 특성을 생성된 인공지진 시간이력에 대한 동적해석 결과에 의해 통계적으로 분석하였다.

5% 감쇠의 설계응답 스펙트럼에 상응하는 20개의 인공지진 시간이력을 생성하고 각각의 지진하중에 대한 시간영역해석을 수행하였다. 인공지진 시간이력의 강도형상은 강진시간 10초, 지속시간 32초인 사다리형태이다. 그림 6과 표 2는 각각 생성된 20개의 인공지진에 대한 해석결과를 변위 및 영위 통과율에 대하여 나타낸 것이다. 응답의 분산계수는 2% 감쇠비에 대한 해석결과가 5% 및 10%의 감쇠비에 대한 해석결과에 비해 2.56배 정도 크게 나타나고 있고, 영위통과율은 감쇠비가 증가할수록 분산계수가 증가하고 있다.

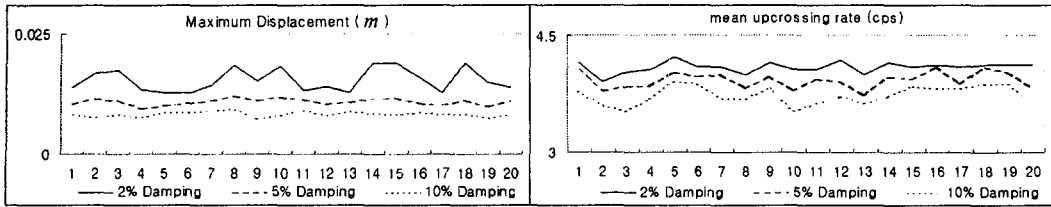


그림 6. 최대변위 및 영위통과율 분포

표 2. 격납건물 지진응답의 통계적 특성

	maximum displacement(m)			mean upcrossing rate(cps)		
	2%	5%	10%	2%	5%	10%
평균	0.0154	0.0110	0.0083	4.094	3.923	3.730
c.o.v	0.156	0.061	0.062	0.018	0.028	0.032
최대값	0.0192	0.0122	0.0094	4.219	4.094	3.906
최소값	0.0126	0.0096	0.0074	3.906	3.719	3.531

3. 결론

설계자가 인공적으로 설계 가속도 시간이력을 만들고자 할 때, 강도형상이나 지진시간에 비해 구조계의 감쇠비에 따라 설계된 기본응답스펙트럼이 해석결과에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 가속도 시간이력을 만들기 위해서는 적용될 구조물의 감쇠비를 형상, 재료, 사용목적 등을 고려하여 합리적으로 도출해내는 것이 최우선의 과제이며, 그 이후 설계목적에 따라 강도형상 및 지진시간을 결정하는 것이 바람직하다. 또한, 동일한 진도를 가지는 지진이력에 대해서 구조물의 응답이 변동성을 가지고 있으므로 지진응답에 대한 통계적 분석과 확률론적 해석이 요구된다. 본 연구에서는 SAP2000 프로그램을 이용한 선형해석을 수행하여 해석결과에 대한 비교 내용은 선형거동에 제한되며, 구조물의 거동이 선형에서 비선형 영역으로 이동하면 해석결과가 다를 수 있다. 특히 감쇠비는 재료의 항복 등 비선형성의 영향을 많이 받으므로 향후 비선형 구조해석에 의한 비교와 분석이 필요하다.

참고문헌

1. ASCE, Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of the American Society of Civil Engineers, 1980.
2. Gasparini, D.A., and Vanmarcke, E.H., "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra," Dept. of Civil Engineering Constructed Facilities Division, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
3. Paz, Mario., Structural Dynamics: Theory and Computation (Fourth Edition), Chapman and Hall, New York, 1997.
4. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
5. US NRC Regulatory Guide 1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
6. SAP2000 "Input File Format", "Analysis Reference", Computers and Structures, Inc., 1998.