

유전자알고리즘을 이용한 캐비닛 구조의 최적감쇠보강

The optimum damper retrofit of cabinet structures by genetic algorithm

이계희 *	최익창 †	하동호 ‡
Lee, Gye-Hee	Choi, Ik-Chang	Ha, Dong-Ho

ABSTRACT

The optimal seismic retrofitting of NPP(Nuclear Power Plant) cabinet structures that contained class 1 relays were studied in this paper. During earthquake event, the failure modes of relays are not appeared in form of structural failure, but are appeared in form of contact chatter of relay. Therefore, the retrofitting of cabinet has to be aimed to the reducing of the structural response, such as acceleration. In this study, the optimal characteristic values of dampers were searched by μ -GA (micro-Genetic Algorithm) scheme for several installation patterns.

To keep accuracy and efficiency of analysis, the structural models of cabinet were considered as a frame structure. The responses of structure were obtained in form of acceleration response spectra derived from the results of nonlinear time history analysis including damping nonlinearity. The fitness function of the optimum procedure was constructed based on the ratio of maximum spectral value and target GERS (General Equipment Ruggedness Spectra)

The results show the good improvements of fitness for adequate retrofitting pattern. Especially, the improvements of fitness were remarkable when the damping exponents are proper

1. 서론

구형원전의 기기내진재평가 방법인 GIP방법론⁴에서 다루고 있는 안전관련기기중 계전기(relay)의 경우 그 파괴양상이 다른 구조물과는 달리 계전기 자체의 구조적 파괴가 아니라 지진시 계전기에 가해지는 지진력에 의하여 발생하는 접지떨림(contact chatter)에 의한 오작동(malfunction)이 문제가 된다. 따라서 이러한 캐비닛 구조물의 내진응답을 감소시키기 위해서 감쇠기의 설치를 포함한 캐비닛 기기의 내진 보강방안에 관한 연구가 수행되었다.³

감쇠기를 고려한 지진응답해석은 비선형 해석이고 내진보강의 기준이 되는 포괄기기내진력 스펙트럼(GERS; General Equipment Ruggedness Spectra, 이하 포괄스펙트럼)과의 비교를 위하여 추가적인 스펙

*목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

†목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

‡건국대학교 토목공학과 조교수

트럼의 작성이 필요하다는 점에서 일반적인 최적화 기법으로는 접근이 쉽지 않다. 본 연구에서는 이러한 고도의 비선형성을 가진 복잡한 문제에 대한 최적화 기법으로 최근 많이 사용되고 있는 유전자 알고리즘을 적용하여 최적화를 수행하였다.¹ 특히 진화연산자로 통칭되는 유전자 알고리즘에서 효율성 측면에서 주목받고 있는² μ -GA를 이용하여 해석의 효율성을 증대시키고자 하였다.

2. 캐비닛구조물의 내진보강

2.1 구조물의 모델링

따라서 본 연구에서는 캐비닛의 제원을 평균적인 값으로 가정하였다.³ 해석대상인 캐비닛구조물의 제원은 그림 1과 같다. 해석모델의 작성에 있어서 구조물 전면부의 문은 질량으로만 고려하고 강성을 갖지 않는 것으로 가정하였다. 그리고 후면부는 열려있는 것으로 가정하였다.

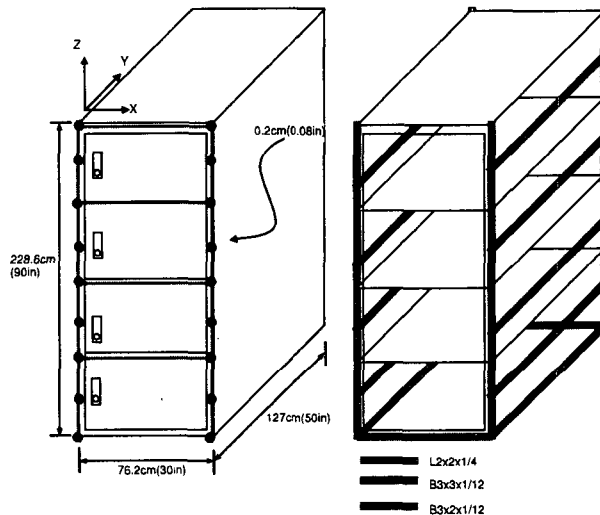


그림 1: 해석대상캐비닛 제원

본 연구에서는 캐비닛의 해석을 위한 접근법으로 프레임모델을 사용하였다. 이 모델은 좌우측의 측면패널과 선반 부분을 적절한 보요소로 구성된 모델로 전단거동을 충분히 나타낼 수 있을 정도의 자유도를 가지지만 유한요소 모델에 비해 적은 수의 자유도로 구성되어 해석에 유리하다. 구조물과 기기의 중량은 각 보요소의 단위중량으로 치환하여 고려하였다.

2.2 내진보강방법

계전기가 설치된 캐비닛 구조물의 응답이 계전기의 포괄스펙트럼을 초과하게 되면 내진보강이 필요하다. 캐비닛구조물의 내진보강해석은 앞에서 작성된 프레임모델에 감쇠기를 추가부착하여 수행되었으며 해석에서 얻는 응답은 3층 선반의 횡방향가속도 응답으로 하였다. 구조물의 모드감쇠비는 2%로 가정하였다.

감쇠기의 설치는 변형에너지를 열에너지로 소산시켜 구조물의 응답을 줄이는 방안이다. 일반적인 프레임 보강은 변형에너지가 모두 구조물에 작용하기 때문에 보강부에 큰 응력이나 변형이 발생할 가능성이 있는 반면 감쇠기를 설치한 경우에는 상대적으로 작은 힘이 작용하기 때문에 감쇠기가 연결되는 부분에 대한 추가 보강량이 감소하고 변위가 줄어드는 장점이 있다. 비선형 점성감쇠기의 비선형 힘-변형관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = C\dot{u}^\alpha \quad (1)$$

여기서 C 는 감쇠계수, \dot{u} 는 변위의 상대속도, α 는 감쇠지수이다. 일반적으로 감쇠지수로 사용되는 0.2에서 2.0사이이다. 감쇠기의 설계는 식 (1)에 의하여 감쇠기의 감쇠계수와 최대 감쇠력을 정하는 것이다.

감쇠기의 역학적 모델링 방법은 spring과 dashpot의 직렬연결인 Maxwell방법과 병렬연결인 Kelvin방법이 있다. 본 해석에 사용된 감쇠기는 오일감쇠기로 가정하여 Maxwell방법을 이용하여 구성하였다. 감쇠기를 고려한 시간이력 해석은 경계비선형해석이며 상용프로그램인 SAP2000/Nonlinear⁵을 이용하여 해석을 수행하였다.

3. 최적보강설계

3.1 μ -GA의 개요

유전자알고리즘에는 총인구수, 교배확률, 돌연변이 확률 등의 3개의 중요한 요소가 있다. 그러나 유전자 알고리즘은 목적함수가 불록함수이거나 함수값을 계산하는데 매우 많은 시간이 드는 경우에는 효율성이 떨어진다. 본 연구의 대상이 되는 감쇠설계는 비선형 시간이력해석이 필요하고 이의 스펙트럼화가 필요하는 등 계산에 많은 시간이 필요한 경우라 할 수 있다. 따라서 유전자 알고리즘의 계산효율을 높여 가능한 한 최소의 반복계산으로 원하는 최적값을 얻어내는 것이 중요하다. 이러한 접근법으로 μ -GA(Micro-Genetic Algorithm)를 이용하여 최적화를 적용하였다.

μ -GA는 $m+1$ (일반적으로 $m=5$)의 염색체에 대한 작은 수의 인구를 가지고 연산을 수행한다. 이 방법에는 내부루프와 외부루프가 있다. 내부루프에서는 선택과 교배연산이 수행되고 각 세대에서 최적의 값을 가진 염색체가 저장된다. 이러한 과정이 일정한 수렴조건을 만족시키면 내부루프의 최대 적합도를 가진 염색체에 대하여 돌연변이를 일으켜 $m+1$ 개의 인구를 다시 발생시킨다. 이 방법의 특징은 작은 수의 구성원들에게 내부루프에서의 돌연변이 확률을 작게 하여 각 세대의 구성원들이 일정한 단계에 수렴하게 하고 수렴된 세대의 구성원에 대해 돌연변이를 일으켜 이 과정을 반복하는 것이다. 이 방법에 의하면 작은 수의 인구를 사용하므로 계산시간을 줄이고 해와 적합도가 떨어지는 값들에 대한 계산시간을 줄일 수 있다. μ -GA의 전반적인 계산 과정은 그림 2과 같다.

3.2 목적함수의 작성

본 연구의 기본 목적은 캐비닛구조물의 내진보강을 통한 응답감소이기 때문에 기기의 포괄스펙트럼(GERS)보다 작은 응답을 보이면 1차적인 목표는 달성할 수 있게 된다.

일반적인 함수의 최적화에는 두 곡선사이의 면적을 최소화하는 것이 정확한 값을 주나 본 연구의 대상인 캐비닛구조물의 응답은 기초의 입력지진이 구조물에 작용해 얻어지는 응답으로 캐비닛구조물

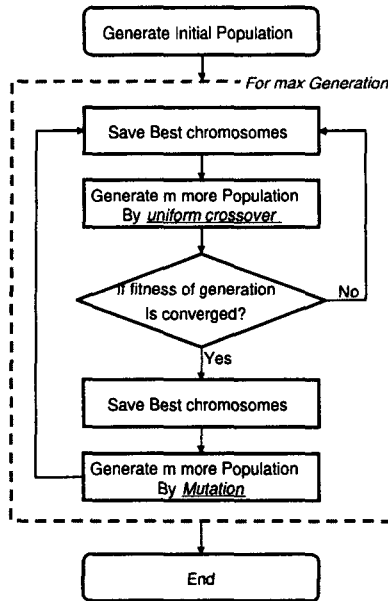


그림 2: μ -GA의 흐름도

의 동적특성을 반영한 narrow-banded 응답이기 때문에 구조물의 동적특성이 반영되는 주파수에서만 큰 값을 갖는다. 따라서 대상진동수중 한 곳에서도 포괄스펙트럼(GERS)을 초과하게 되면 설계요구조건을 만족시키지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 r_{max} 를 사용하여 목적함수를 식(2)와 같이 구성하였다.

$$F_{RM} = 1 - \frac{r_{max}^2}{r_{max}^2 + 1} \quad (2)$$

여기서 F_{RM} 은 목적함수의 적합도(fitness)이고 r_{max} 는 구조해석에서 얻어진 응답스펙트럼의 임의 진동수에서의 포괄스펙트럼(GERS)와의 비의 최대값이다. 이 목적함수의 적합도가 0.5보다 작은 경우는 구조물의 응답이 포괄스펙트럼(GERS)보다 큰 경우($r_{max} > 1.0$)이며 따라서 보강조건을 만족시키지 못하는 설계가 된다. 반면에 적합도가 0.5보다 큰 경우는 구조물의 응답이 포괄스펙트럼 보다 작은 값($r_{max} < 1.0$)을 가져 보강조건을 만족시키는 설계가 된다.

3.3 해석파라미터

3.3.1 보강 패턴

본 연구의 대상이 되는 캐비닛 구조물의 후면에는 많은 케이블이 설치되어 있다. 따라서 일반적으로 효율적인 보강으로 사용되는 각 층에 가새형식의 설치는 케이블들과 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서 케이블과의 간섭을 최소화하고 캐비닛구조물의 내진응답을 최소화 할 수 있는 감쇠기 설치위치의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 그림 3와 같은 4가지의 보강패턴에 대하여 검토를 수행한다.

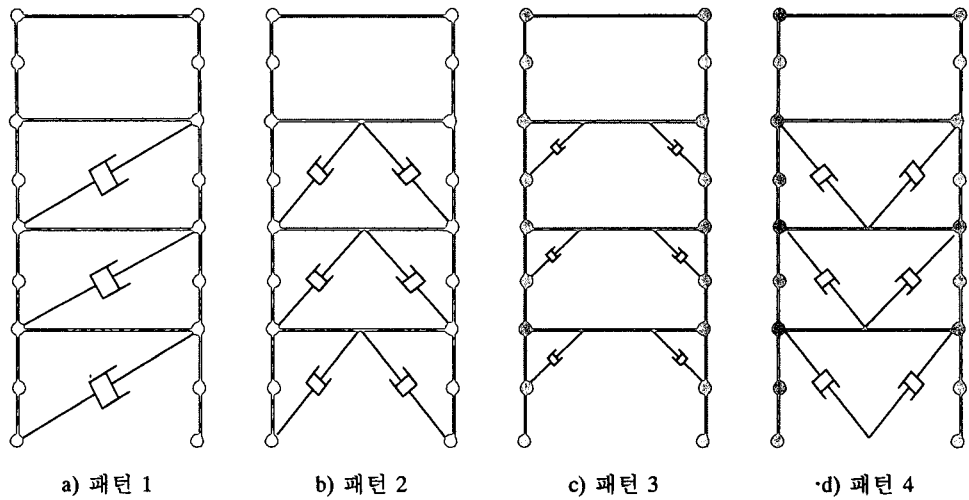


그림 3: 해석에 고려된 보강패턴

3.3.2 감쇠계수

일반적으로 감쇠기의 설계에 있어서 감쇠지수는 각 업체마다 규정된 값이 있고 이의 변화가 쉽지 않다. 따라서 이 감쇠지수를 최적화의 파라미터로 사용하는 것은 실무에의 적용성이 떨어지므로 본 연구에서는 주로 사용되는 감쇠지수(0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0)의 경우에 대한 해석을 수행하고 감쇠계수를 최적화변수로 사용하였다. 본 파라미터에 대해서는 앞의 두 파라미터에서 얻어진 최적구조에 대하여 검토를 수행하였다.

3.4 해석과정

3.4.1 입력운동

원자력발전소의 지진입력은 여러 가지 규제조건을 만족시켜야 하므로 일반적인 지진기록보다는 인공 지진을 발생시켜 사용한다. 따라서 본 연구에서는 울진3, 4호기의 설계에 사용되었던 입력지진을 사용하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 해석대상인 캐비닛구조물은 원자력발전소 건물내에 위치해 있으므로 원전건물의 동적특성을 반영한 입력을 입력운동으로 사용해야한다. 따라서 본 연구에서는 고리1호기의 격납건물내에 캐비닛구조물이 위치하고 있다고 가정하고 지반입력가속도를 격납건물의 내진해석모델에 작용시켜 얻은 격납건물의 해당층응답을 캐비닛구조물의 입력운동으로 사용하였다.³

3.4.2 비선형해석 및 응답스펙트럼 작성

앞의 2.2절에서 살펴보았듯이 감쇠기를 고려한 해석은 비선형 해석이기 때문에 이를 고려하기 위하여 구조해석프로그램⁵에서 제공하고 있는 비선형 해석기능을 사용하였다. 해석시 사용한 시간간격은 0.005sec이고, 해당 지진입력시에 응답의 최대치를 얻는데 충분한 15초의 시간에 걸쳐 해석을 수행하였다.

해석결과 얻어진 가속도 응답시간이력에 대하여 응답스펙트럼을 작성하여 포괄스펙트럼(GERS)과

비교하여 식 (2)의 목적함수를 이용하여 적합도를 산정하였다. 비교에 사용된 응답스펙트럼은 모두 5%의 감쇠비에 대하여 작성되었다.

3.4.3 유전자 알고리즘의 적용

해석을 위한 최적화 변수로는 3.3.2절에서 언급한 바와 같이 감쇠계수를 사용하였다. 하단과 상단의 2개 층에 설치된 감쇠기의 감쇠계수에 대하여 5개의 인구수와 200세대의 조건에 대하여 유전자 알고리즘을 계산하였다. 이때 0.5의 교배확률과 0.02의 돌연변이 확률로 15bit의 유전자를 사용하였다. 따라서 각 최적화변수는 미리 선정된 영역에서 각각 32768개의 경우의 수를 가진다.

4. 해석결과

최적화과정을 거쳐 얻어진 각 보강경우의 최종 적합도는 표 1과 같이 나타났다. 4가지의 보강패턴중 지진시 상대적인 변위량이 큰 패턴1이 가장 큰 보강효과를 보였고 상대변위가 가장 작은 패턴3은 최적화과정을 마치고도 적합도가 0.8에 이르지 못하여 보강설계가 적합하지 못한 것으로 나타났다. 패턴2와 패턴4는 모두 설계조건을 만족시키는 적합도를 보였으며 패턴2가 약간 우세한 적합도를 보였으나 그 차이는 크지 않아 실제 보강될 구조물의 조건에 따라 혼용이 가능할 것으로 보인다. 감쇠지수에 따른 적합도는 감쇠지수의 값이 0.5이상이면 큰 차이를 보이지 않는다.

표 1: 각 해석경우의 최종적합도

	패턴1	패턴2	패턴3	패턴4
$\alpha=0.1$	0.5393	0.5270	0.3971	0.5214
$\alpha=0.2$	0.5898	0.5741	0.3816	0.5674
$\alpha=0.5$	0.6848	0.6683	0.3850	0.6576
$\alpha=1.0$	0.6989	0.6823	0.3874	0.6707
$\alpha=1.5$	0.6934	0.6738	0.2993	0.6627
$\alpha=2.0$	0.6848	0.6434	0.3243	0.6421

보강설계에 적합하지 않은 패턴3을 제외한 나머지 보강패턴에 대한 μ -GA의 세대별 최적화 과정은 그림 4에 나타내었다. 이 그림에 따르면 전반적인 적합도의 개선은 50세대 미만에서 발생하고 이후로는 부분적인 개선만이 일어난다. 따라서 실제 문제에 있어서는 100세대 정도의 유전자조합이면 충분한 최적화효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감쇠지수에 따른 최적화과정의 효율성을 그림 5에 나타내었다. 패턴2에 대하여 초기세대의 최대적합도를 가진 유전자와 최적화과정이 끝난 상태에서의 최대적합도를 가진 유전자에 대한 해석결과를 포괄스펙트럼(GERS)와 비교하여 도시하였다. 그림 5 a)는 감쇠지수가 0.2($\alpha = 0.2$)인 경우로 초기의 최적 유전자의 결과가 포괄스펙트럼의 값을 초과하여 보강설계로는 바람직하지 않다. 그러나 최종 최적화 유전자의 응답은 처음 응답에 비하여 최고값이 포괄스펙트럼의 값 이하로 내려가 타당한 보강설계효과를 보여주고 있다. 이 때 두 유전자의 최대응답비는 76%로 초기응답에서 약 24%의 응답감소가 발생하였다. 반면에 그림 5 b)에 나타난 응답스펙트럼은 감쇠지수가 0.5($\alpha = 0.5$)인 경우의 초기 최적유전자와 최종 최적유전자의 응답비교이다. 이 경우에는 초기 최적유전자의 응답과 최종 최적유전자의 응답간에 큰 차이가 없어 감쇠계수의 변화가 구조물의 전반적인 응답에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다른 보강패턴의 경우에도 동일하게 나타났다. 이 경우 초기와 최종 최적유전자

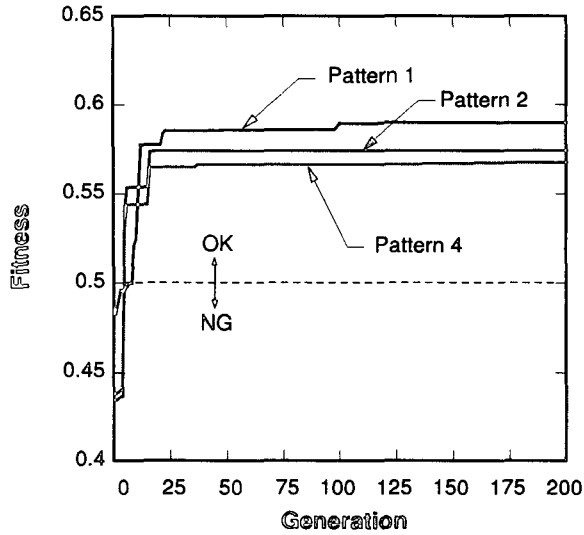


그림 4: 적합도의 수렴과정(패턴2, $\alpha = 0.2$)

의 최대응답비는 92%로 약 8%의 응답개선이 발생하였다. 그러나 두 경우 모두 포괄스펙트럼에 비하여 낮은 값에서 시작하였기 때문에 최적화 과정의 효용성을 크지 않다고 말할 수 있다.

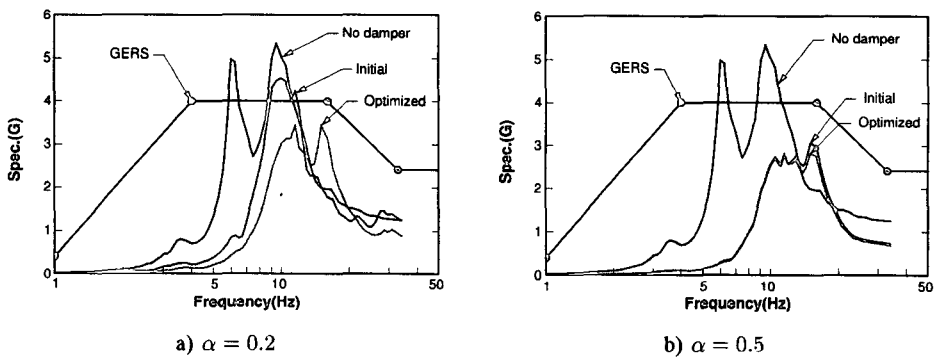


그림 5: 최적화 과정에 의한 응답스펙트럼의 감소(패턴2)

지진중 발생하는 감쇠력의 최대 감쇠력과 이때 발생하는 수직부재의 최대부재력을 표 2에 나타내었다. 감쇠지수가 증가할 수록 이 값들은 증가하는 경향을 보이며 부재력의 경우 감쇠지수(α)가 2.0인 경우 0.5인 경우보다 25%정도의 증가를 보인다. 이는 두 경우가 유사한 보강 적합도를 보이는 것(표 1)을 비교하여 볼때 낮은 감쇠지수의 사용이 바람직하다는 점을 보여준다. 또한 패턴2와 패턴4는 유사한 보강적합도와 감쇠력을 보이지만 구조물에 작용하는 부재력의 경우 2배이상의 큰 차이를 보인다. 이러한 경향은 감쇠지수의 증가에 따라 커지므로 보강패턴의 선정에 주의가 필요하다.

표 2: 각 해석경우의 최대부재력

	(unit : N)			
	패턴1	패턴2	패턴3	패턴4
$\alpha=0.1$	1578.86	2019.97	1259.72	3518.95
$\alpha=0.2$	1404.46	1912.82	1336.58	3604.44
$\alpha=0.5$	1334.84	2109.60	1373.36	4589.89
$\alpha=1.0$	1441.37	2380.48	1393.65	5133.75
$\alpha=1.5$	1497.91	2515.92	1386.00	5369.49
$\alpha=2.0$	1549.06	2671.38	1576.37	5694.24

5. 결론

본 연구에서는 기존 원자력발전소에 설치된 계전기를 포함한 캐비닛 구조물의 내진성능을 향상시키기 위하여 감쇠기를 이용하는 최적보강설계에 대한 연구를 수행하였다. μ -GA를 이용하여 최적화 과정을 수행한 결과 초기의 보강패턴이 적합한 경우 좋은 최적화결과를 얻을 수 있었다. 또한 감쇠지수의 값이 작은 경우 최적화과정에 의한 적합도의 개선이 뚜렷했으며 감쇠지수가 커질수록 최적화 과정에 의한 적합도의 개선이 작아져 감쇠계수의 선택이 최종응답에 주는 영향이 작아짐을 알 수 있었다. 또한 동일한 적합도와 감쇠력을 보임에도 보강패턴에 따라 큰 부재력의 차이를 보여 보강패턴의 선정에 주의가 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-281-01)주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

1. E. Vonk, L. C. Jain and R. P. Johnson, *Automatic generation of neural network architecture using evolutionary computation*, World Scientific Publishing Co., 1997
2. Y.G. Xu, G.R. Liu, "Detection of flaws in composites from scattered elastic-wave field using an improved μ GA and a local optimizer", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 191, pp3929-3946, 2002
3. 이계희, 김재민, 김상윤, "원자력 발전소 캐비닛구조물의 내진보강", 한국지진공학회 논문집, 제 7권 4호, pp. 31-37, 2003.
4. Seismic Qualification Utility Group, "Generic Implementation Procedure(GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plants Equipment," Revision 2A, Corrected 2/ 14/92, February 1993.
5. Computers & Structures, Inc., *SAP2000/Nonlinear User's Manual- Version 7.0*, 1997.