

# $\mu$ -GA를 이용한 원전 캐비닛구조물의 최적감쇠보강

## The Optimum Damping Retrofit for Cabinet Structures of NPP by $\mu$ -GA

이 계 희\*      하 동 호\*\*  
Lee, Gye-Hee      Ha, Dong-Ho

### 국문요약

본 논문에서는 원전내부의 내진범주 1급 계전기를 포함하고 있는 캐비닛 구조물의 최적내진보강에 대한 연구를 수행하였다. 지진시 계전기는 구조적인 파괴보다는 떨림에 의한 기능적 파괴가 발생한다. 이를 방지하기 위해서는 캐비닛구조물의 응답을 적정 수준이하로 감소시켜야 하므로 다양한 감쇠보강의 설치패턴에 따라 최적의 감쇠계수를  $\mu$ -GA(micro-Genetic Algorithm)기법을 이용하여 산정하였다.

대상캐비닛 구조물은 해석의 정확도와 계산의 효율성을 만족시키기 위해 이용한 프레임구조로 모델링되었다. 구조물의 응답은 감쇠기의 비선형거동을 고려한 비선형 시간이력해석에 의해 얻어진 가속도응답스펙트럼으로 나타내었다. 목적함수는 구조물의 해석에서 얻어진 응답스펙트럼의 최대값과 목표 포괄기내진력 스펙트럼(GERS: General Equipment Ruggedness Spectra)의 최대응답비를 기초로 작성되었다.

해석결과 적절한 보강패턴을 선정한 경우 좋은 적합도의 향상을 보였으며 특히 감쇠지수의 값이 작은 경우 적합도의 개선효과가 뛰어났다.

**주요어** : 캐비닛구조,  $\mu$ -GA, 최적화, 감쇠보강설계, GERS(General Equipment Ruggedness Spectra)

### ABSTRACT

The optimal seismic retrofitting of NPP(Nuclear Power Plant) cabinet structures that contain seismic category 1 relays was 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 at the reducing of the structural response, such as acceleration. In this study, the optimal characteristic values of dampers were searched by  $\mu$ -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 inform of acceleration response spectra derived from the results of nonlinear time history analysis including damping nonlinearity. The objective function of the optimum procedure was constructed based on the maximum 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 values of damping exponents are low.

**Key words** : cabinet structure,  $\mu$ -GA, optimization, seismic retrofitting by dampers, GERS(General Equipment Ruggedness Spectra)

## 1. 서 론

현재 국내에서 상업운전중인 원자력발전소(이하 원전)는 1970년대부터 건설되었으며 이러한 오래된 가동원전(the older operating plants)의 설계기술은 1960년대의 기술을 반영하고 있다. 그러므로 현재 운영되는 오래된 가동원전을 구성하고 있는 기기들의 내진성능은 현재의 기술수준과 동일한 내진안전성을 보장한다고 볼 수 없다. 그러므로 현재의 기술을 바탕으로 설계/검증된 기설치 기기들과 동등한 내진안전성 확보를 위하여 오래된 가동원전에 설치된 기기의 내진성능을 재평가할 필요성이 대두되었다. 미국에서는 70년대부터 이러한 기기들의 내진안전성 재평가가 원전의 안전성과 관련한 중요한 문제로 인식되어 80년에 이 문제를 USI A-46이란 문서로 공식적으로 제기하였다.<sup>(1)</sup>

이러한 기기들에 대한 내진안전성평가과제의 해결을 위하여 미국의 원전사업자들에 의해 내진검증사용자그룹

(SQUG, Seismic Qualification Utility Group)이 결성되었고 이들이 제시한 방법론이 GIP(Generic Implementation Procedure)에 정리되었다.<sup>(2)</sup>

GIP방법론에서 다루고 있는 안전관련기기중 계전기(relay)의 경우 그 파괴모드가 다른 구조물과는 달리 계전기 자체의 구조적 파괴가 아니라 지진시 계전기에 가해지는 지진력에 의하여 발생하는 접지떨림(contact chatter)에 의한 오작동(malfunction)이다. 따라서 계전기의 내진안전성을 확보하기 위해서는 계전기가 설치되는 캐비닛 구조물의 지진응답을 감소시켜야 하고 이는 곧 ICERS(In-Cabinet Response Spectra)의 감소를 의미한다. 따라서 캐비닛 구조물의 내진안전성의 확보와 캐비닛 자체의 지진응답감소가 동시에 필요하다. 이러한 캐비닛 구조물의 지진응답을 감소시키기 위해서 감쇠기의 설치를 포함한 캐비닛구조물의 내진보강방안에 관한 연구가 수행되었다.<sup>(3)</sup>

감쇠기의 설치는 변형에너지를 열에너지로 소산시켜 구조물의 응답을 줄이는 보강방안이다. 일반적인 강성보강은 변형에너지가 모두 구조물에 작용하기 때문에 보강부에 큰 응력이나 변형이 발생할 가능성이 있는 반면 감쇠기를 설치한 경우에는 상대적으로 작은 힘이 작용하기 때

\* 북포해양대학교 해양시스템공학부, 조교수 (대표저자 : lghsk@mmu.ac.kr)

\*\* 성화원 · 건국대학교 토목공학과, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시기 바랍니다. 이 결과를 게재해 드립니다.  
(논문접수일 : 2004. 9. 13 / 심사종료일 : 2005. 2. 4)

문에 감쇠기가 연결되는 부분에 대한 추가 보강량이 감소하고 변위가 줄어드는 장점이 있다. 그러나 감쇠기를 고려한 지진응답해석은 비선형 해석이고 내진보강의 기준이 되는 포괄기내진력 스펙트럼(GERS; General Equipment Ruggedness Spectra, 이하 포괄스펙트럼)과의 비교를 위하여 추가적인 스펙트럼의 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.<sup>(4)</sup> 특히 유전자 알고리즘 중 효율성측면에서 주목받고 있는 μ-GA<sup>(5)</sup>를 이용하여 해석의 효율성을 증대시키고자 하였다.

이러한 감쇠기를 이용한 최적설계에 유전자 알고리즘을 적용하는 연구로는 박관순 등이 총생애주기비용을 목적함수로 하여 감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계에 대해 연구하였으며<sup>(6)</sup>, 이러한 접근법을 동조질량감쇠기에도 적용하였다.<sup>(7)</sup> 김진구 등은 구조물의 비탄성응답을 목적함수로 한 내진보강에 유전자 알고리즘을 적용하였다.<sup>(8)</sup> 현재 주된 대상구조물은 빌딩구조물의 수동제어<sup>(8,9)</sup>나 교량<sup>(10)</sup>이며 기기의 내진보강에는 적용된 예가 드물다. 따라서 본 연구에서는 캐비닛구조물에 이러한 최적화 기법을 적용하여 감쇠기를 이용한 내진보강시 구조물과 감쇠기의 거동특성과 감쇠보강의 특성을 파악하고자 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 해석대상구조물인 캐비닛구조물의 구조적 특성 및 모델링에 대해 서술되었고 3장에서는 본 연구에서 사용된 μ-GA의 개요와 목적함수의 작성들을 포함하는 최적화 과정에 대해 서술하였다. 4장에서는 얻어진 결과들을 분석하였으며 5장에서는 결론을 도출하였다.

## 2. 캐비닛구조의 지진해석모델 작성

### 2.1 구조물의 모델링

원전에 설치된 계전기를 포함하는 캐비닛의 크기는 제작회사나 시기에 따라 매우 다양하다. 따라서 본 연구에서는 캐비닛의 제원을 평균적인 값으로 가정하였다.<sup>(3)</sup> 해석대상인 캐비닛구조물의 제원은 그림 1과 같다.

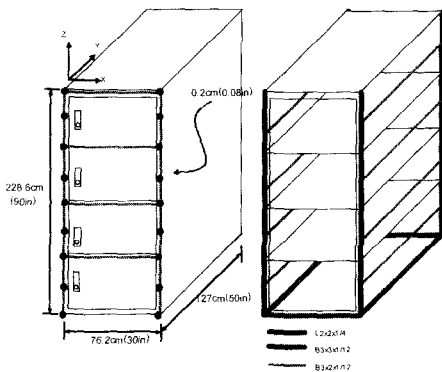


그림 1 해석대상캐비닛 제원

해석모델의 작성에 있어서 구조물 전면부의 문은 질량으로만 고려하고 강성을 갖지 않는 것으로 가정하였다. 그리고 후면부는 열려있는 것으로 가정하였다.

보모델은 힘에 의한 거동이 지배적이며 전단이나 비틀림, 평판의 평면의 진동 등 국부적인 진동모드에 대한 거동을 나타내기 어렵다. 이 모델은 전반적으로 캐비닛 구조물의 구조특성을 지나치게 단순화하는 측면이 있다. 특히 캐비닛구조물은 선반과 측면부재가 이루는 프레임이 횡방향으로 찌그러지는 변형이 주로 발생하므로 보요소의 휨거동만으로 이를 나타내기에는 어려움이 있다. 유한요소모델의 경우, 많은 수의 자유도로 인하여 구조물의 전반적인 거동보다는 국부적인 거동이 많이 나타나 충분한 수의 고유진동모드를 사용하여야 하며 이에 따라 계산의 효율성이 떨어지는 점이 있다. 유전자 알고리즘에서는 각 세대별 인구수에 따른 많은 반복해석이 필요하기 때문에 계산의 효율성이 중요하게 고려되어야 하므로 본 연구에서는 두 모델의 중간적인 접근법으로 프레임모델을 사용하였다. 이 모델은 좌우측의 측면패널과 선반 부분을 적절한 보요소로 구성한 모델로 횡방향 찌그러짐 거동을 충분히 나타낼 수 있을 정도의 자유도를 가지지만 유한요소 모델에 비해 적은 수의 자유도로 구성되어 반복적인 동적해석에 유리하다. 프레임모델에서 사용된 보요소의 강성자료는 표 1에 제시하였다. 구조물과 기기의 중량은 선반을 나타내는 보요소의 단위중량으로 치환하여 고려하였다.

표 1 캐비닛 해석모델에 사용된 보요소의 제원

		측면패널	선반
단면적		39.97cm <sup>2</sup>	30.81cm <sup>2</sup>
2차 모멘트	전후방향	8.65 x 10 <sup>4</sup> cm <sup>4</sup>	5.20 x 10 <sup>4</sup> cm <sup>4</sup>
	좌우방향	114.52cm <sup>4</sup>	3.68cm <sup>4</sup>
단위중량		0.014kgf/cm <sup>3</sup>	0.059kgf/cm <sup>3</sup>

### 2.2 감쇠기를 이용한 내진보강

캐비닛구조물의 내진보강해석은 앞에서 작성된 프레임 모델에 감쇠기를 추가부착 하여 수행되었으며 해석에서 얻는 응답은 3층 선반의 횡방향가속도 응답으로 하였다. 구조물의 모드감쇠비는 2%로 가정하였다.

비선형 점성감쇠기의 비선형 힘-변형관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

감쇠지수에 따른 감쇠기의 거동은 다음과 같은 특성을 보인다.(그림 2)

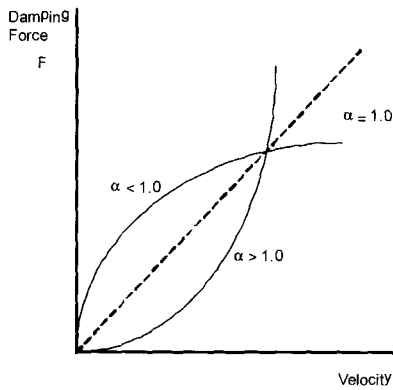


그림 2 감쇠지수와 감쇠력의 관계

- $\alpha = 1.0$  인 경우, 감쇠력은 속도에 비례하는 특징을 가진다. 이상적인 점성유체내의 감쇠력이다.
- $\alpha > 1.0$  인 경우, 감쇠력은 속도의 증가에 따라 급격하게 커지는 특징을 가지고 있다. 이에 따라, 구조물의 응답은 일정한 범위내에 유지될 수 있으나 댐퍼의 감쇠력의 상한치를 한정하기 어렵고 댐퍼 장착부에 큰 응력이 발생할 수 있다.
- $\alpha < 1.0$  인 경우, 변위의 발생에 따라 증가한 감쇠력은, 변위속도의 증가에 따라 일정한 값에 접근하는 특징을 가진다. 설계시에 최대감쇠력의 평가가 용이하고 이에 따라 댐퍼장착부의 설계도 쉬워지는 특징이 있다.

따라서 용도에 따라 적합한 특성을 가진 댐퍼의 선정이 필요하다. 그러나 감쇠지수의 경우는 각 제작사에서 고유한 값을 가진 경우가 많고 임의의 감쇠지수를 구현하는 것은 어려움이 있으므로 본 연구에서는 감쇠계수를 주 해석파라미터로 선정하여 최적화설계를 수행한다. 이 때, 감쇠계수가 지나치게 작으면 유연한 스프링과 같이 되어 충분한 응답감소효과를 기대하기 어렵고, 과대할 경우에도 강성의 증가효과만이 나타나므로 그 감쇠효과를 기대할 수 없다.

감쇠기의 역학적 모델링 방법은 spring과 dashpot의 직렬 연결인 Maxwell방법과 병렬연결인 Kelvin방법이 있다. 본 해석에 사용된 감쇠기는 오일감쇠기로 가정하여 Maxwell방법을 이용하여 구성하였다. 감쇠기를 고려한 시간이력 해석은 경계비선형해석이므로 이러한 기능을 제공하는 프로그램인 SAP2000/Nonlinear<sup>(11)</sup>을 이용하여 해석을 수행하였다.

### 3. 보강설계의 최적화

#### 3.1 μ-GA의 개요

유전자 알고리즘은 자연선택과 유전학에 근거한 랜덤탐색 알고리즘이며, 유전적 재생산 과정과 적자생존의 원리에 의해 수행된다. 몇 가지 장점을 나열하면 다음과 같다.

- 연속과 불연속 변수에 대해 최적화 가능하고,
- 매개 변수가 많을 경우도 가능하며,
- 여러 개의 극값을 갖는 매우 복잡한 형태의 목적함

수에 대해서도 최적화 가능성을 가지며,

#### □ 병렬컴퓨팅 기술에 적합하다

유전자알고리즘에는 총인구수, 교배확률, 돌연변이 확률 등의 3개의 중요한 요소가 있다. 이들 요소들은 문제에 따라 적당한 값을 취하며 이들 값을 결정하는 일반적인 방법은 아직까지는 알려지지 않은 상태이다. 그러나 유전자 알고리즘은 목적함수가 불록함수이거나 함수값을 계산하는데 매우 많은 시간이 드는 경우에는 효율성이 떨어진다. 본 연구의 대상이 되는 감쇠설계는 비선형 시간이력 해석이 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 본 연구에서는 μ-GA<sup>(12)</sup>(Micro-Genetic Algorithm)를 이용하여 최적화를 수행하였다.

μ-GA는 적은 수(일반적으로 5개)의 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 새로운 세대의 인구를 다시 발생시킨다. 이 새로운 인구는 다시 내부루프로 들어가서 연산이 수행된다. 이 방법의 특징은 적은 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 적은 수의 인구를 사용하므로 세대를 구성하는 인구에 대한 계산시간을 줄일 수 있고 수렴도가 큰 구성원에 대한 반복계산으로 적합도가 떨어지는 개체의 평가에 대한 계산시간을 줄일 수 있다. μ-GA의 전반적인 계산 과정은 그림 3과 같다.

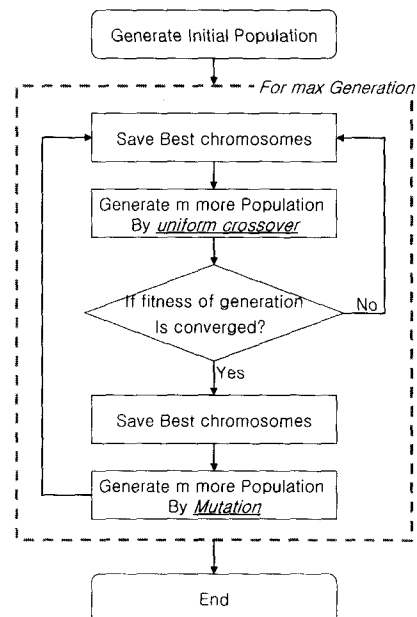


그림 3 μ-GA의 흐름도

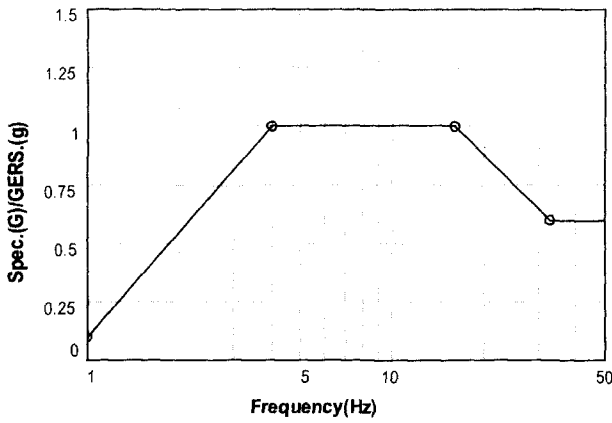


그림 4 정규화된 계전기 포괄스펙트럼(GERS)의 예

μ-GA에는 적은 인구수를 가지고 연산을 수행하기 때문에 내부루프는 매우 빠른 속도로 수렴하고 외부루프는 수렴된 이외의 영역에 대한 검사를 위해 돌연변이를 도입하는 특성을 가지고 있다. 실제연산에서 적합도의 개선은 처음 몇 개의 세대에서 집중적으로 이루어지고 대부분의 세대에서는 아주 드물게 해의 개선이 이루어진다. 이러한 과정으로 최적설계의 한 과정을 가정하면 우리가 설정한 정확도의 근접기준에 수렴했다고 판단되었을 경우 계산을 중지할 수 있다.

### 3.2 목적함수의 작성

내진보강의 목적을 달성하려면 캐비닛 구조물 응답스펙트럼의 최대값이 그림 4와 같은 기기의 포괄스펙트럼(GERS)이내에 들도록 하여야 한다. 따라서 이를 목적으로 한 최적화를 위해서는 포괄스펙트럼 보다 작은 응답이라는 개념을 수학적으로 표현한 목적함수를 정의하여야 한다. 이를 위해서 다음과 같은 변수를 이용할 수 있다.

$$A_{RS} = \int_{f_{low}}^{f_{high}} (RS(f) - GER(f))df \quad (2)$$

$$\gamma_{max} = \max \left( \frac{RS(f)}{GERS(f)} \right) \quad (3)$$

여기서  $f_{low}$ ,  $f_{high}$ 는 각각 고려대상인 진동수의 최소 및 최대값이다.  $RS(f)$ 는 구조 해석결과 얻어진 응답스펙트럼이고,  $GERS(f)$ 는 계전기의 포괄스펙트럼(GERS)이다. 식(2)은 포괄스펙트럼(GERS)와 응답스펙트럼 사이의 면적이고 식(3)은 두 스펙트럼간의 최대 응답비이다.

일반적인 함수의 최적화에는 두 곡선사이의 면적을 최소화하는 것이 정확한 값을 주나 본 연구의 대상인 캐비닛구조물의 응답은 기초의 입력지진이 구조물에 작용해 얻어지는 응답으로 캐비닛구조물의 동적특성을 반영한 narrow-banded 응답이기 때문에 구조물의 동적특성이 반영되는 진동수에서만 증폭이 크게 일어난다.

따라서 대상진동수중 한 곳에서라도 포괄스펙트럼(GERS)을 초과하게 되면 설계 요구조건을 만족시키지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는  $\gamma_{max}$ 를 사용하여 목적함수를 식(4)와 같이 구성하였다.

$$F_{RM} = 1 - \frac{\gamma_{max}^2}{\gamma_{max}^2 + 1} \quad (4)$$

여기서  $F_{RM}$ 은 목적함수의 함수값이고 이는 유전자알고리즘을 이용한 최적화에서는 적합도(fitness)로 사용한다.  $\gamma_{max}$ 는 구조해석에서 얻어진 응답스펙트럼의 임의 진동수에서의 포괄스펙트럼(GERS)와의 비의 최대값이다. 이 목적함수의 적합도가 0.5보다 작은 경우는 캐비닛의 최대 응답이 포괄스펙트럼(GERS)보다 큰 경우( $\gamma_{max} > 1.0$ )이며 따라서 보강조건을 만족시키지 못하는 설계가 된다. 반면에 적합도가 0.5보다 큰 경우는 캐비닛의 최대응답이 포괄스펙트럼 보다 작은 값( $\gamma_{max} < 1.0$ )을 가져 보강조건을 만족시키는 설계가 된다.

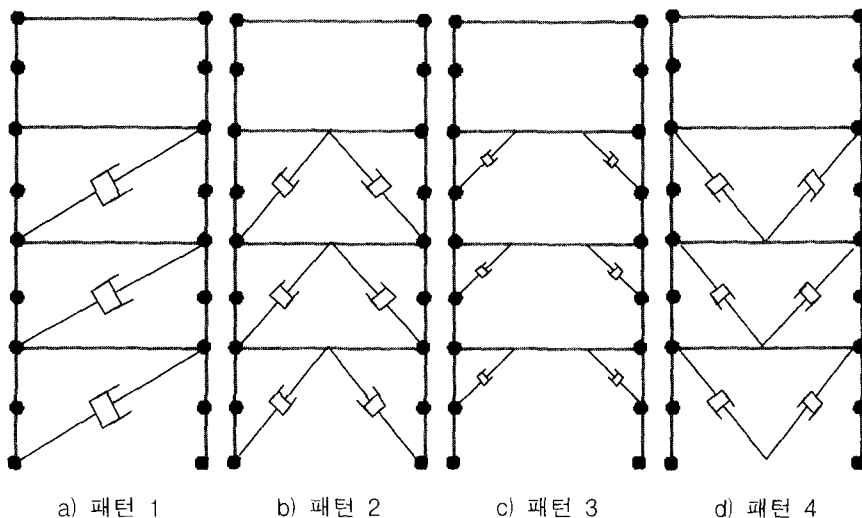


그림 5 해석에 고려된 보강패턴

### 3.3 해석파라미터

#### 3.3.1 보강 패턴

일반적으로 발전소에 설치된 캐비닛 구조물의 후면에는 많은 케이블이 설치되어 있으므로 일반적으로 사용되는 가새형식의 보강부재설치는 케이블들과 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서 케이블과의 간섭을 최소화 하고 캐비닛구조물의 지진응답을 최소화 할 수 있는 감쇠기 설치위치의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 그림5와 같은 4가지의 보강패턴에 대하여 검토를 수행한다.

그림 5에서 패턴 1의 경우는 일반적인 가새형식의 보강법이고 패턴 2, 3의 경우는 각 층의 중앙부에 케이블등을 위한 공간을 최대화하기 위한 배치법이다. 또한 패턴 4는 지지점의 위치에 따른 보강효과를 비교하기 위하여 패턴 2의 보강형식에서 보강재의 지점위치를 수직방향으로 대칭이동하였다.

#### 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 대표적인 감쇠지수(0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0)의 경우에 대한 해석을 수행하고 감쇠계수를 최적화변수로 사용하였다.

### 3.4 해석과정

#### 3.4.1 입력운동

원자력발전소의 지진입력은 여러 가지 규제조건을 만족시켜야 하므로 일반적인 지진기록보다는 인공지진을 발생시켜 사용한다. 따라서 본 연구에서는 울진3, 4호기의 설계에 사용되었던 입력지진을 사용하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 해석 대상인 캐비닛구조물은 원자력발전소 건물내에 위치해 있으므로 원전건물의 동적특성을 반영한 입력을 입력운동으로 사용해야한다. 따라서 본 연구에서는 고리1호기의 보조건물의 70ft 위치에 캐비닛구조물이 위치하고 있다고 가정하고 지반입력운동을 보조건물의 내진해석모델<sup>(13)</sup>에 작용시켜 얻은 보조건물의 해당층 응답을 캐비닛구조물의 입력운동으로 사용하였다.(그림 6)

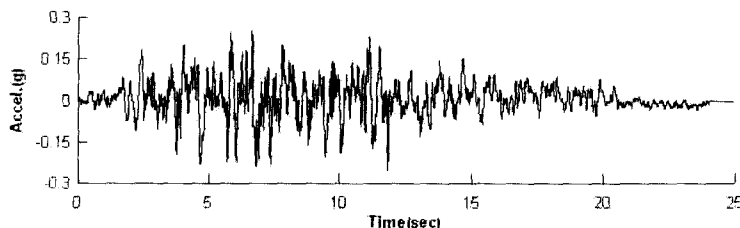


그림 6 캐비닛의 내진해석에 사용된 보조건물의 가속도시간이력

#### 3.4.2 비선형해석 및 응답스펙트럼 작성

앞의 2.2절에서 살펴보았듯이 감쇠기를 고려한 동적해석은 비선형 시간이력해석이기 때문에 이를 고려하기 위하여 구조해석프로그램<sup>(11)</sup>에서 제공하고 있는 비선형 해석기능을 사용하였다. 해석시 사용한 시간간격은 0.005sec이고, 15초의 시간에 대해 해석을 수행하였다.

해석결과 얻어진 가속도 응답시간이력에 대하여 응답스펙트럼을 작성하여 포괄스펙트럼(GERS)과 비교하여 식(4)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 200세대 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 2와 같이 나타났다.

4가지의 보강패턴중 패턴 1, 2, 4는 적절한 보강효과를 보였고 상대변위가 가장 작은 패턴 3은 최적화과정을 마치고도 적합도가 0.5에 이르지 못하여 보강설계가 적합하지 못한 것으로 나타났다. 패턴2와 패턴4는 모두 설계조건을 만족시키는 적합도를 보였으며 패턴 2가 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.

보강설계에 적합하지 않은 패턴3을 제외한 나머지 보강 패턴에 대한 μ-GA의 세대별 최적화 과정은 그림 7에 나타내었다. 이 그림에 따르면 전반적인 적합도의 개선은 50세대 미만에서 발생하고 이후로는 부분적인 개선만이 일어난다. 따라서 실제 문제에 있어서는 100세대 정도의

표 2 각 해석경우의 최종적합도( $F_{RM}$ )

	패턴1	패턴2	패턴3	패턴4
$\alpha=0.1$	0.8102	0.8076	0.3441	0.8086
$\alpha=0.2$	0.8180	0.8262	0.3703	0.8231
$\alpha=0.5$	0.8503	0.8476	0.3874	0.8455
$\alpha=1.0$	0.8622	0.8605	0.3782	0.8591
$\alpha=1.5$	0.8550	0.8522	0.3654	0.8502
$\alpha=2.0$	0.8466	0.8436	0.3537	0.8420

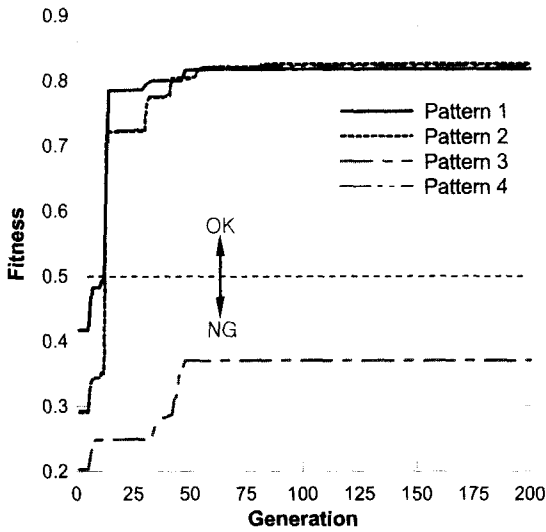


그림 7 적합도의 수렴과정 ( $\alpha = 0.2$ )

유전자조합이면 충분한 최적화결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감쇠지수에 따른 최적화과정의 효율성을 그림 8에 나타내었다. 패턴 2에 대하여 초기세대의 최대적합도를 가진 유전자와 최적화과정이 끝난 상태에서의 최대 적합도를 가진 유전자에 대한 해석결과를 포팔스펙트럼(GERS)와 비교하여 도시하였다. 그림 8a)는 감쇠지수가 0.2( $\alpha = 0.2$ )인 경우로 초기의 최적유전자의 결과가 포팔스펙트럼

의 값을 초과하여 보강설계로는 바람직하지 않다. 그러나 최종최적화 유전자에 대한 응답은 처음 응답에 비하여 최고값이 포팔스펙트럼의 값 이하로 내려가 타당한 보강설계 효과를 보여주고 있다. 이 때 최적화된 스펙트럼의 최대값(0.92g)와 초기의 스펙트럼의 최대값(3.12g)의 비는 3.39로 최적화 과정을 통해 최대응답이 약 1/3로 감소하였다. 반면에 그림 8b)에 나타난 응답스펙트럼은 감쇠지수가 1.5( $\alpha = 1.5$ )인 경우로 초기 응답스펙트럼의 최대값(1.29g)과 최종 응답스펙트럼의 최대값(0.83g)의 비가 1.55로 최적화과정을 통해 약 55%의 응답이 감소하였다. 유전자알고리즘에서 최초세대는 무작위로 선택되므로 초기세대의 최대 적합도도 또한 무작위로 나타나 최종세대에서의 적합도의 개선 정도는 초기값의 선택에 따라 달라질 수 있으나 평균적으로 감쇠지수가 클수록 이러한 초기세대의 적합도의 개선 정도가 작아지는 현상(최적화의 효율이 떨어지는 현상)은 모든 해석의 경우에 뚜렷하게 나타났다.

지진중 발생하는 감쇠기의 최대 감쇠력과 이때 발생하는 수직부재의 최대축력을 표 3,4에 각각 나타내었다. 감쇠력은 감쇠계수값의 증감에 크게 좌우되지 않는 것으로 보이나 보강에 성공한 패턴1, 2, 4의 경우 감쇠지수가 대략 0.5인 경우 최소 감쇠력을 보였다. 또한 패턴2와 패턴4는 유사한 보강적합도와 감쇠력을 보이지만 구조물에 작용하는 축력의 경우 최소 1.3배에서 최대 1.8배이상의 차이를 보인다. 이러한 경향은 감쇠지수가 1.0이상인 경우

표 3 각 해석경우의 최대감쇠력

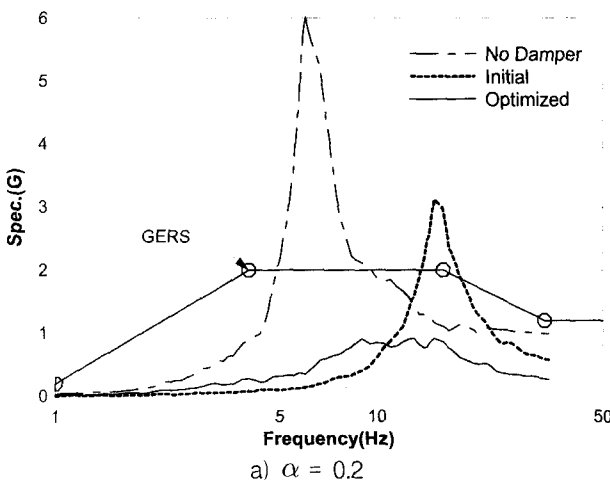
(unit : N)

	패턴1	패턴2	패턴3	패턴4
$\alpha=0.1$	1070.27	682.14	577.61	882.87
$\alpha=0.2$	816.31	902.07	645.86	754.56
$\alpha=0.5$	759.37	405.39	660.45	379.80
$\alpha=1.0$	799.84	652.45	904.65	647.26
$\alpha=1.5$	1130.78	905.86	926.03	897.80
$\alpha=2.0$	984.02	888.72	855.63	947.78

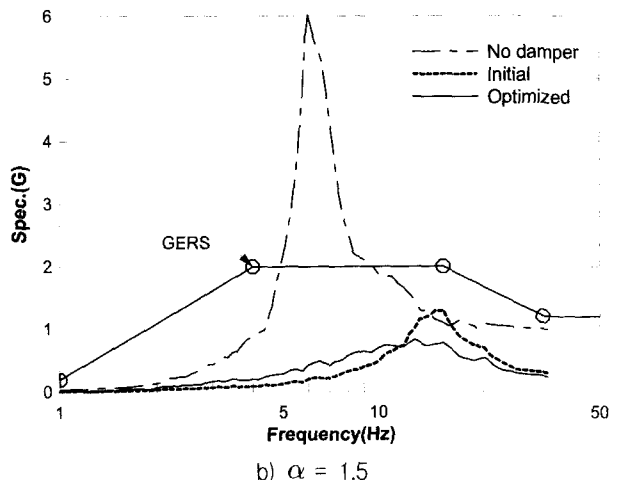
표 4 각 해석경우의 최대감쇠력

(unit : N)

	패턴1	패턴2	패턴3	패턴4
$\alpha=0.1$	816.32	973.61	1346.84	1372.35
$\alpha=0.2$	819.98	922.71	1266.30	1348.82
$\alpha=0.5$	729.85	947.52	1147.11	1290.04
$\alpha=1.0$	726.39	863.07	919.38	1400.63
$\alpha=1.5$	646.07	940.81	832.32	1662.05
$\alpha=2.0$	725.72	1020.93	842.41	1852.66



a)  $\alpha = 0.2$



b)  $\alpha = 1.5$

그림 8 최적화 과정에 의한 응답스펙트럼의 감소(패턴2)

감쇠지수에 따라 증가하는 경향을 보였다. 따라서 보강패턴의 선정시 감쇠기의 배치에 따른 이러한 부재력증가에 대한 주의가 필요하다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기존 원자력발전소에 설치된 계전기를 포함한 캐비닛 구조물의 내진성능을 향상시키기 위하여 감쇠기를 이용하는 최적보강설계시 감쇠계수에 따른 캐비닛구조물의 응답에 대한 연구를 수행하였다. 내진성능향상의 기준은 설계 지진하에서의 기능 유지를 위한 가속도 응답의 저감에 두었다.

μ-GA를 이용하여 최적화 과정을 수행한 결과 약 100 세대정도에 최종적합도에 도달하였다. 감쇠지수에 따른 적합도는 감쇠지수가 0.5이상인 경우는 큰 차이가 없었다. 감쇠지수의 값에 따른 적합도의 개선효과는 감쇠지수의 값이 작은 경우 최적화과정에 의한 적합도의 개선효과가 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.

### 참 고 문 헌

1. GL 87-02, "Verification of Seismic Adequacy of Mechanical and Electrical Equipment in Operating Reactors, Unresolved Safety Issue (USI) A-46," USNRC, 1987.
2. Seismic Qualification Utility Group, *Generic Implementation Procedure(GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plants Equipment*, Revision 2A, Corrected 2/ 14/92, 1993. 2.

3. 이계희, 김재민, 김상윤, "원자력 발전소 캐비닛구조물의 내진보강", 한국지진공학회 논문집, 제 7권 4호, 2003, pp. 31-37.
4. E. Vonk, L. C. Jain and R. P. Johnson, *Automatic generation of neural network architecture using evolutionary computation*, World Scientific Publishing Co., 1997.
5. Y. G. Xu and 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, 2002, pp. 3929-3946.
6. 박관순, 고현무, 함대기, "점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계" 대한토목학회논문집, 제22권, 제2A호, 2002, pp. 413-422.
7. K. S. Park, H. M. Koh and D. Hahm, "Integrated optimum design of visco-elastically damped structural systems," *Engineering Structures*, Vol. 26, 2003, pp. 581-591.
8. 김진구, 방성혁, "점탄성감쇠기를 이용한 비대칭-비탄성구조물의 내진보강", 한국지진공학회논문집, 제6권, 제3호, 2002, pp. 87-93.
9. A. S. Ahlwat and A. Ramaswamy, "Multi-objective optimal absorber system for torsionally coupled seismically excited structures," *Engineering Structures*, Vol. 25, 2003, pp. 941-950.
10. 권순덕, 박관순, "동조질량감쇠기를 이용한 공기역학적 불안정 현상의 제어", 대한토목학회논문집, 제23권, 제3A호, 2003, pp. 487-489.
11. Computers & Structures, Inc., *SAP2000/Nonlinear User' Manual-Version 7.0*, 1997.
12. K. Krishnakumar, *Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization*, SPIE: Intelligent control and adaptive systems, Philadelphia, PA, 1989.
13. 열화조건하의 내진안전성재평가 절차확립, 한국원자력안전기술원, KINS/HR-657, 2004. 2.