

면진장치를 설치한 회전기기의 지진취약도 개선효과 분석

Analysis of Seismic Fragility Improvement Effect of an Isolated Rotational Equipment

김민규¹⁾ · 大鳥靖樹²⁾ · 전영선³⁾ · 최인길⁴⁾

Kim, Min-Kyu · Yasuki Ohtori · Choun, Young-Sun · Choi, In-Kil

국문 요약 >> 본 연구에서는 원자력발전소 비상디젤발전기의 내진안전성을 정량적으로 평가하기 위하여 지진취약도 분석방법을 제안하고 제안한 방법을 이용하여 비상디젤발전기의 지진취약도를 평가하여 정량적인 지진위험도를 제시하였다. 기존의 비상디젤발전기뿐만 아니라 면진장치를 설치하여 지진력 저감효과를 증대시킨 비상디젤발전기에 대한 지진취약도 분석을 함께 수행하여 비상디젤발전기와 같은 대형 회전기기의 경우 면진장치를 통한 지진취약도의 변화를 살펴보았다. 최종적으로 지진취약도 결과를 이용하여 HCLPF값의 변화를 비교하여 면진에 의하여 비상디젤발전기의 취약도를 크게 개선 할 수 있는 것을 알 수 있었으며, 면진된 경우 면진장치의 파괴가 전체 거동을 지배하므로 면진장치의 성능개선이 필요한 것을 알 수 있었다.

주요어 비상디젤발전기, 지진취약도 분석, 지진위험도, HCLPF, 면진장치

ABSTRACT >> In this study, for the evaluation of seismic safety of the isolated Emergency Diesel Generator (EDG) System more quantitatively, the seismic fragility analysis method were proposed. Using the proposed method, seismic fragility analysis performed and a seismic risk of EDG system was present. The fragility analysis performed not for an existing EDG system but also for an isolated EDG system which increases the seismic capacity. At first, numerical models for existing and isolated EDG system were constructed and seismic response analysis performed according to input seismic waves and peak ground accelerations. An uncertainty factors and failure modes of both fixed and isolated EDG system were assumed for fragility analysis. The HCLPF values were evaluated for the compare the improvement effect using the isolation system. As a result, the isolation system can make better the seismic fragility of EDG system, but the failure of isolation system was govern the behavior of whole system.

Key words Emergency diesel generator (EDG), seismic fragility analysis, seismic risk, HCLPF, isolation system

1. 서론

구조물에 지진력을 저감시키기 위하여 면진장치를 이용하는 방법은 일반적으로 대형 토목구조물에 적용하는 것으로 알려져 왔다. 그것은 면진장치로서 가장 널리 사용되는 고무계 베어링의 경우 어느 정도 이상의 무게가 되어야지만 효과적으로 지진력 저감효과를 발휘할 수 있기 때문일 뿐 아니라 토목 건축구조물의 지진에 의한 피해는 직접적으로

인명의 손실을 유발하기 때문일 것이다. 그러나 원자력 발전소에 존재하는 많은 기기들은 그 중요성이 토목 건축구조물의 그것과 비교하여 결코 간과할 수 있는 수준이 아닐 뿐만 아니라 지진에 의한 기기의 손상은 원자력발전소 전체의 안전에 영향을 미칠 수 있는 부분이므로 최근 들어 국내외적으로 기기면진에 대한 많은 관련 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 원자력발전소에 설치되어 있는 기기중에 직접적인 안전과 관련되는 핵심기기도 있지만 발전소 격납건물 밖에 위치하고 있으면서도 발전소의 안전에 매우 중요한 역할을 하는 기기들이 많이 있다. 이와 같은 기기중에서 본 연구에서는 원자력발전소의 비상디젤발전기를 대상으로 하여 면진장치를 설치함으로써 지진안전성의 개선효과를 정량적으로 분석하기 위하여 취약도 분석을 통한 검토를 수행하였다.

비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)는 디젤엔진과 발전기가 결합되어 전기를 생산하는 기계로서

¹⁾ 정희원·한국원자력연구원 종합안전평가센터 선임연구원, 공학박사

(대표저자: minkyu@kaeri.re.kr)

²⁾ 일본전력중앙연구소 선임연구원, 공학박사

³⁾ 한국원자력연구원 종합안전평가센터 책임연구원, 공학박사

⁴⁾ 한국원자력연구원 종합안전평가센터 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 10. 10 / 심사종료일 : 2007. 11. 20)

원자력발전소에서 원자로 주변 계통의 최악의 사고 발생시 원자로를 안전하게 정지시켜주는 역할을 한다. 원자력발전소에서 생산되는 전기는 전체를 외부로 송전하는 것이 아니고 일부는 원자력발전소가 가동되기 위한 에너지원으로 사용하게 된다. 만약의 사고로 인하여 원자력발전소가 자체 생산하는 전기를 공급받지 못하게 될 경우에는 외부로부터 전력을 공급받아서 원자로가 안전하게 가동을 정지할 수 있도록 하게 된다. 만약 원자로도 가동이 정지되었는데 외부의 전력을 공급받을 수도 없는 상황이 발생하면 비상디젤발전기를 가동하여 비상전원으로 사용하게 되는 것이다. 여기서 최악의 사고란 냉각재 상실 사고(Loss of Coolant Accident), 소외전원 상실사고(Loss of Offsite Power), 주 증기관 파열 사고(Rupture of Main Stream Line)의 단일 발생이나 복합 발생을 의미한다. 냉각재 상실사고와 주 증기관 파열사고의 발생시에는 안전주입신호(Safety Injection Signal)가 발생하며 소외전원 상실 사고의 발생시에는 전원상실신호(Loss of Voltage)가 발생한다. 비상디젤발전기는 이러한 사고시에도 원자로를 안전하게 정지시키고 냉각재 상실사고 상황에서 방사능의 소외 방출량을 기준치 이하로 유지시키기 위해 안전등급 필수부하에 전원을 공급한다. 따라서 비상디젤발전기는 높은 수준의 신뢰도를 유지할 것을 규정하고 있으며, 비상디젤발전기의 성능을 유지시키기 위한 성능 감시시스템과 신뢰도 분석등에 관한 많은 연구가 수행되고 있는 실정이다. 그러나 비상디젤발전기 자체의 지진안전성에 대한 연구는 국내외적으로 미약한 것이 현실이다. 디젤발전기와 같은 회전기계는 원자력발전소 뿐 아니라 일반 산업현장에서도 널리 사용되고 있는 장치이므로 본 연구의 결과는 타 회전기계의 지진안전성 분석에도 적용이 될 수 있을 것으로 판단되며 회전기계는 기계의 특성상 회전시 발생하는 진동을 제어하는 것이 또한 중요한 부분이므로 지진력 저감뿐만 아니라 진동저감을 위한 고려가 병행되어야 하는 부분이다.

지진취약도 분석에 관한 연구는 원자력 발전소에서 안전도를 평가하기 위하여 가장 처음 시작한 연구로서 Kenedy와 Ravindra(1984)에 의해서 시작이 되어 정립되었다고 할 수 있다. 취약도 분석연구는 원자력발전소의 확률론적 위험도 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment)를 위하여 개발된 방법인 만큼 초기에는 대부분의 연구가 원자력발전소를 대상으로 하여 구조물과 기기등에 대한 평가를 실시하였으며 최근에 일반 구조물로 그 대상을 넓혀가고 있는 상황이다. Park 등(1998)은 원자력 발전소의 확률론적 위험도 분석 연구를 위한 지진 취약도 함수를 조사하여 각 시설

및 기기에 대한 취약도 함수를 정리하였으며 Ghiocel 등(1998)은 미국 동부의 원자력발전소를 대상으로 하여 지반 구조물 상호작용을 고려한 취약도 평가방법을 개발하기도 하였다. Ozaki 등(1998)은 격납건물을 대상으로 하여 지진 취약도 분석을 위한 응답계수방법을 발전시킨 방법을 제안하였으며, Bhargava 등(2002)는 물탱크를 대상으로 한 지진취약도 평가를 수행하였고, Singhal 등(1996)은 일반 건축물을 대상으로 한 취약도 분석을 수행하기도 했다. 취약도 분석방법은 일반 구조물뿐 아니라 구조물에 면진장치를 설치하였을 경우 지진안전성의 향상정도를 판단하기 위한 연구가 많이 진행되었다. 일본에서는 Hirata 등(1991, 1994)이 면진된 고속증식로(Fast Breeder Reactor, FBR)의 지진취약도 분석에 관한 연구를 수행하기도 하였으며 이후 마찰형 면진장치를 사용한 구조물에 대한 취약도 분석 연구가 Dimova와 Hirata(2000)에 의해 수행되기도 하였다. 전력시설의 경우 Ang 등(1996)은 변전시설에 대한 취약도 분석을 통하여 지진위험도 평가를 수행하였으며, Camensig 등(1997)은 고압의 변압기에 대한 지진위험도 평가를 수행하였다.

국내에서 지진취약도 분석에 대한 연구가 수행된 것은 최근의 일이며 주로 원전시설물을 중심으로 그 연구가 이루어져 왔다. 최인길 등(2001, 2003)은 원자력 발전소를 대상으로 하여 국내 실정에 맞는 취약도 함수의 개발을 위한 연구를 수행하였으며, 최근 들어 김상훈(2003a, 2003b)은 교량에 대한 지진취약도 분석을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 원자력발전소 비상디젤발전기의 내진안전성을 정량적으로 평가하기 위하여 지진취약도 분석방법을 제안하고 제안한 방법을 이용하여 실제 비상디젤발전기의 지진취약도를 평가하여 정량적인 지진위험도를 제시하였다. 기존의 비상디젤발전기뿐 아니라 면진장치를 설치하여 지진력 저감효과를 증대시킨 비상디젤발전기에 대한 지진취약도 분석을 함께 수행하여 비상디젤발전기와 같이 대형 회전기에서 면진장치를 통한 지진취약도의 변화를 살펴보았다. 결과적으로 면진장치를 이용하여 원전 비상디젤발전기의 지진위험도가 어떻게 변화하는 지를 정량적으로 분석할 수 있었다.

2. 지진취약도 분석

2.1 개요

지진취약도 분석은 구조물 및 기기의 개별적인 내진성능을 평가하고 이를 이용하여 취약도 곡선을 작성하는 일이다. 취약도 분석은 확률론적 특성을 가지고 있으며 지진의 크기

에 따른 파괴확률로 나타내게 된다. 원자력발전소에서 구조물이나 기기에 대한 취약도 평가를 수행하는 것은 원전 전체의 확률론적 지진위험도 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA)를 수행하기 위한 과정으로서 실시한 것이다. 원전의 안전성을 평가하는 SPRA에서는 원전의 안전성을 노심손상확률(Core Damage Frequency, CDF)로서 정의하는데 이를 평가하기 위해서는 발전소 내부의 주요 안전관련 기기 및 구조물에 대한 취약도 분석 결과와 원전부지의 지진재해도 결과가 필요하기 때문이다. 구조물 및 기기의 취약도분석은 먼저 파괴모드를 정의하고 이에 대한 취약도를 평가하는 두 단계로 구분할 수 있다.

가. 파괴모드 정의

정확한 지진취약도 평가를 위해서는 대상 기기 또는 구조물의 성능이나 기능적인 요건을 모두 고려하여 파괴모드를 정의하여야 한다. 원전 구조물 및 기기는 일반적으로 여러 가지 파괴모드를 가지고 있다. 예를 들면 구조물은 균열, 파쇄, 항복, 좌굴 및 층간변형 등에 의해 파괴된다. 취약도분석의 목적은 부품이 어떻게 어디에서 어느 정도의 확률을 가지고 파괴될 것인지를 예측하는 것이므로 각각의 부품에 대한 파괴모드를 명확히 규정하는 것이 반드시 필요하다. 파괴모드가 명확히 정의되지 않을 경우 기기의 성능 결정, 응답해석 방법 및 동일 부품에 대한 다른 해석과의 결과 비교 등이 불가능하다. 파괴모드가 잘 확인되지 않으면 취약도 평가에 대한 오차를 유발할 수 있는 부적절한 자료를 사용하게 된다. 구조물의 경우 파괴모드는 일반적으로 구조물 내부의 안전관련 기기의 안전에 영향을 미칠 수 있는 과도한 좌굴의 발생이나 붕괴로 정의할 수 있다. 일반적으로 미미한 구조적 손상은 파괴모드로 보지 않는다.

파괴모드의 결정은 각 경우별로 계통해석자의 조인과 함께 손상이 발생하기 쉬운 안전관련 기기의 파괴 및 기능 파괴를 고려하여 구조해석자가 결정하게 된다. 경우에 따라서는 하나 이상의 파괴모드를 해석 시 고려하여야 한다.

나. 취약도 분석

구조물 및 기기의 취약도는 지반응답 변수에 대한 조건부 파괴확률로 정의한다. SPRA에서의 지반응답 변수로는 주로 첨두지반가속도(PGA : Peak Ground Acceleration)이나 부지의 스펙트럴 가속도(local spectral acceleration)의 가속도 변수가 사용되기도 한다. 일반적으로 취약도곡선은 단일 곡선이 아닌 일련의 곡선으로 나타낸다. 지진취약도 곡선은 매디안값과 각종 불확실성 및 랜덤성에 대한 변동성을 고려하여 대수정규분포를 이용하여 나타낸다(Kennedy and

Ravindra, 1984).

원전 구조물 및 기기의 지진 취약도분석은 다음과 같은 자료들을 이용하여 수행한다.

- 실제 지진경험 자료
- 취약도 또는 성능검증 실험 자료
- 상세 해석 모델
- 간략한 해석 모델
- 설계자료 및 공학적 판단

가장 바람직한 취약도분석은 실제 지진 경험자료나 실험에 의한 자료를 이용하는 방법으로, 이들 자료는 파괴 여부에 대한 신뢰성 있는 정보를 제공해 준다. 지진 경험자료나 실험 자료가 충분한 정보를 제공해 주지 못할 경우에는 간략한 또는 상세한 해석모델을 이용하여 파괴를 예측한다. 구조물의 경우 대부분 해석적인 방법이 사용되는데 이는 구조물은 각각에 대하여 개별적으로 설계가 이루어지기 때문이며 또한 주요 파괴모드가 결정되면 손쉽게 정확한 거동을 계산할 수 있기 때문이다. 해석 모델에는 물리적 특성치, 파괴기준 및 모델 자체에 내재된 랜덤성 및 불확실성을 포함시킬 수 있다. 해석적으로 얻은 취약도곡선은 가능하면 실제 지진데이터를 이용하여 검증하여야 한다.

기기의 경우에는 지진경험자료나 실험자료를 이용하는 것이 일반적이다. 기기의 경우에는 광범위하고 많은 경험자료 및 실험자료의 확보가 가능하며 미국 등의 국가에서는 데이터베이스화하여 이를 이용할 수 있도록 하고 있다. 또한 수년동안 실험자료를 보완하기 위해 지진경험자료가 활용되어 왔다. 지진경험자료에는 원전 기기의 지진경험자료가 포함되어 있지 않은데 이는 원전부지에서 강진이 발생한 기록이 없기 때문이다. 그러나 유사하거나 동일한 기기가 화력발전소나 일반 산업시설에 사용되고 있으며 이들 시설에 강진이 발생한 경험이 있으므로 이를 활용할 수 있다. 지진 경험자료를 이용하면 취약도를 보다 현실에 가까운 개선된 평가를 수행할 수 있다.

설계자료 및 공학적 판단을 이용하는 방법은 취약도분석에 가장 경제적인 방법이다. 그러나 그 결과는 주관적인 판단에 매우 민감하며, 특히 그 결과가 일부 기술자의 주관적인 의견을 기본으로 하여 결정된 경우 매우 민감하게 된다.

2.2 지진취약도 분석 방법의 제한

지진취약도 분석을 위해서는 많은 수의 지진파를 이용하여 지진동 가속도를 변화시키면서 다수의 수치해석을 수행하여 지진파의 랜덤성을 고려한 분석을 수행한다. 이러한

취약도 분석은 수많은 수치해석을 수행하여 그 결과를 정리 하여야 하므로 많은 노력을 필요로 하는 것이 사실이다. 그러나 실제로 대상으로 하는 기기 또는 구조물이 위치할 부지가 정해진 경우에는 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum, UHS)으로부터 작성한 인공지진파를 지진 응답 해석에 이용하는 것이 일반적이기 때문에 본 연구에서는 하나의 지진동 파형으로 취약도 곡선을 작성하는 간편한 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 지진 응답과 입력 지진동과의 관계를 이용해, 취약도 곡선을 작성하는 방법으로 그 방법은 다음과 같다.

일반적으로, 임의 지진하중 A 가 작용하고 있을 때 구조물에서의 손상 확률은 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다 (Choun et al, 2005).

$$F_A(A) = \int_0^\infty f_R(A, x_R) \left[\int_0^{x_R} f_C(x) dx \right] dx_R \quad (1)$$

여기서, f_R 는 응답의 확률 밀도 함수이고, f_C 는 내력의 확률 밀도 함수이다. 식 (1)은 내력과 응답의 불확실성을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_A(A) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln C_m - \ln R_m(A)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_R(A)^2}} \right] \quad (2)$$

여기서, β_C 는 내력의 불확실성을 의미하고 β_R 는 응답의 불확실성을 의미한다. C_m 은 가속도 내력의 중앙값이며, R_m 은 구조물 응답의 중앙값이다. 구조물 응답의 평균값과 중앙값과의 관계는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$R_m(A) = \frac{\overline{R(A)}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_R}{\overline{R(A)}} \right)^2}} = \overline{R(A)} \cdot e^{-\frac{1}{2}\beta_R^2} \quad (3)$$

여기서 σ_R 은 구조물 응답의 표준편차를 의미한다. 식 (3)의 관계를 이용하면, 식 (2)는 다음 식과 같이 정리 할 수 있다.

$$F_A(A) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln C_m - \ln \overline{R(A)} - \frac{1}{2}\beta_R^2(A)}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_R(A)^2}} \right] \quad (4)$$

여기서, $\ln \overline{R(A)}$ 는 응답의 평균에 대한 대수를 나타내고 있다. 앞의 관계를 정리하여 지진취약도 곡선을 산정하는 순서를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 식 (4)의 C_m , β_C , $\beta_R(A)$ 를 결정한다.
- 2) 식 (3)의 $\overline{R(A)}$ 값을 지진 응답 해석 결과를 이용하여 결정한다.

- 3) 식 (4)로 $F_A(A)$ 와의 관계를 구해서 취약도 곡선을 구한다.

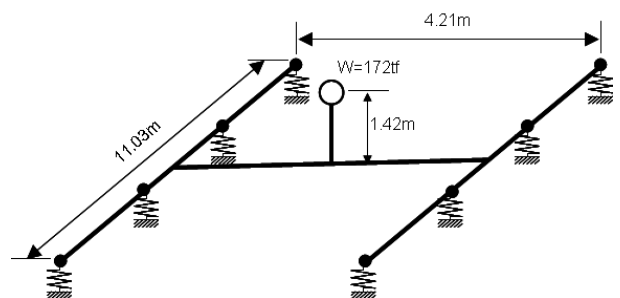
3. 지진응답해석

3.1 해석 모델

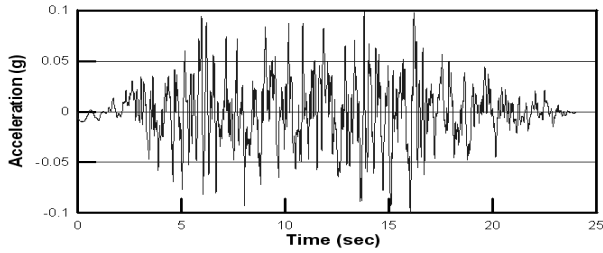
비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)의 해석모델을 그림 1에 나타내었다. 비상디젤발전기는 높이 1/2위치에 중량(172,000Kgf)이 집중된 모델로 구성하였다. 비상디젤발전기 저면에 면진요소를 설치하였으며, 강체요소를 사용하여 수치모형화 하였다. 면진장치가 설치되어 있지 않은 기존의 비상디젤발전기의 해석을 수행하는 경우에는 면진장치를 설치한 위치에서 수평 및 상하의 진동수가 20Hz가 되는 스프링을 설치하였다. 면진장치가 설치되어 있지 않은 경우에는 비상디젤발전기가 기초에 강결되어 있는 형태이지만 비상디젤발전기와 기초면과의 사이에 진동저감용 고무패드를 삽입하여 고정시킴으로 수치해석상의 고정으로 모형하는 것은 적절치 않을 것이라는 판단에 기인한 것이다 (Choun et al, 2005).

3.2 입력지진

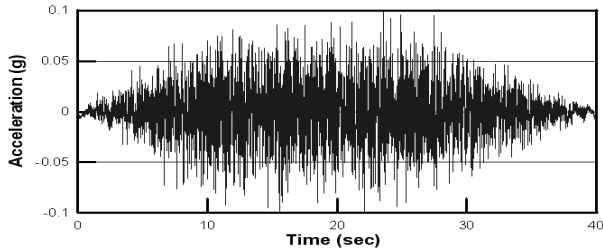
취약도 곡선의 평가를 위해서, 해당부지의 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum, UHS)(최인길 등, 2004)을 이용한 인공지진파와 US NRC의 Reg. Guide 1.60(1973)의 설계스펙트럼을 이용한 인공지진파의 두가지 지진파를 사용하였다. 편의상 각각 UHS와 NRC로 명칭하기로 한다. 그림 2에 해석에 이용한 입력 지진동의 가속도 시간이력을 제시하였으며 그림 3에는 각 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 UHS 지진파는 고주파수 특성을 가지고 있으며, NRC 지진파는 저주파수 특성을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 취약도 분석을 위해서 지진동의 최대가속도를 0.2g에서 3g까지 0.2g 간격으로 지진응답해석을 수행하였다.



〈그림 1〉 비상디젤발전기의 수치해석 모형

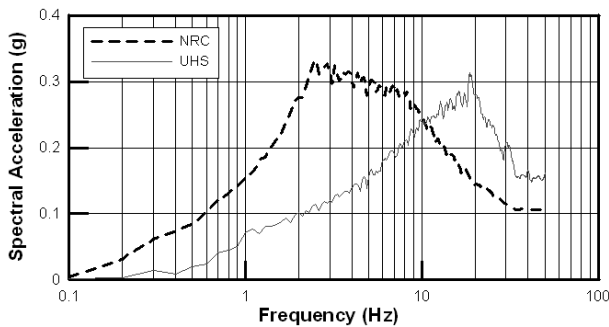


(a) NRC 지진



(b) UHS 지진

〈그림 2〉 입력지진의 가속도 시간이력



〈그림 3〉 입력지진의 가속도 응답스펙트럼(5% 감쇠비)

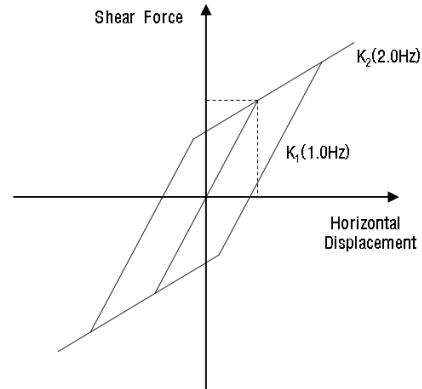
3.3 면진장치 모델링

면진장치는 그림 1의 비상디젤발전기의 수치해석 모형에서 제시한 바와 같이 수평 2방향과 연직방향의 스프링요소로 모형화 하였다. 수평방향의 스프링은, 그림 4에 제시한 바와 같이 bilinear 모델로 하였다. 면진구조물의 제1주기가 2초, 제2주기가 1초가 되도록 각 면진장치의 강성을 결정하였으며, 연직방향은 20Hz의 강성을 갖는 선형스프링으로 하였다.

4. 취약도 분석

4.1 파괴모드

파괴모드의 결정은 취약도 분석에서 결과를 좌우하는 가장 중요한 부분이다. 면진된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 파괴모드를 다르게 설정하였다. 비면진 비상디젤발전기의 파괴모드는 앵커의 파괴로서 기능적 손실이 주된 파괴

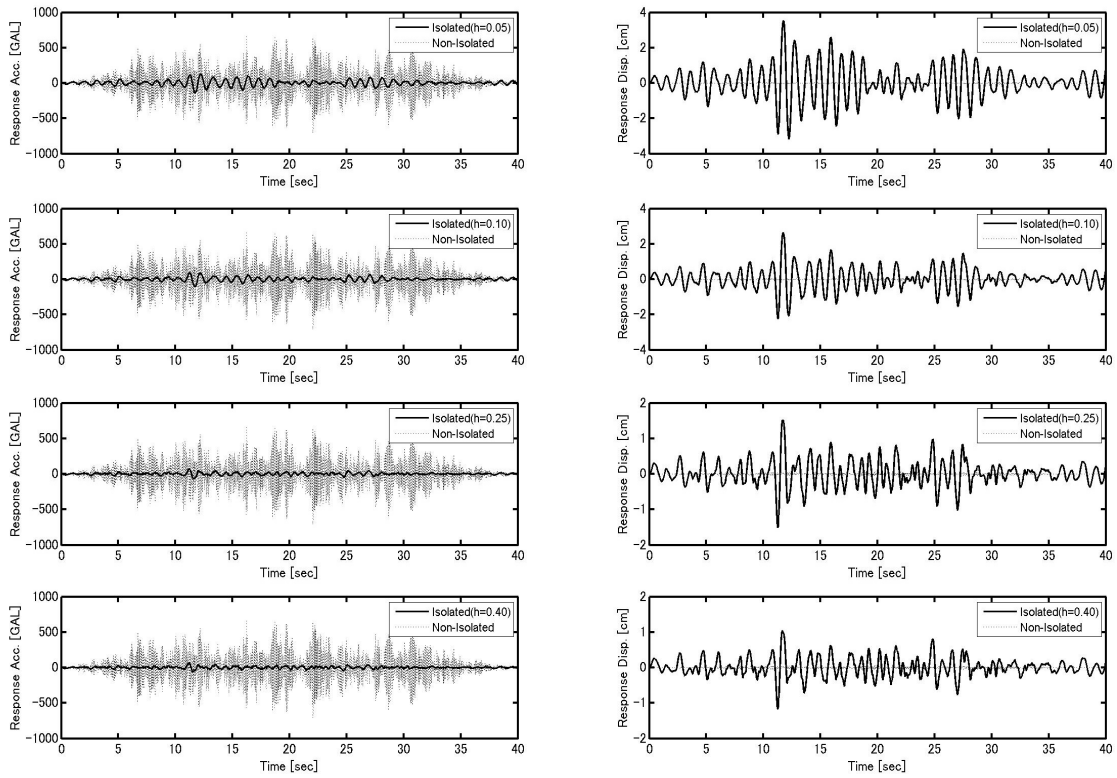


〈그림 4〉 면진장치의 하중-변위 관계

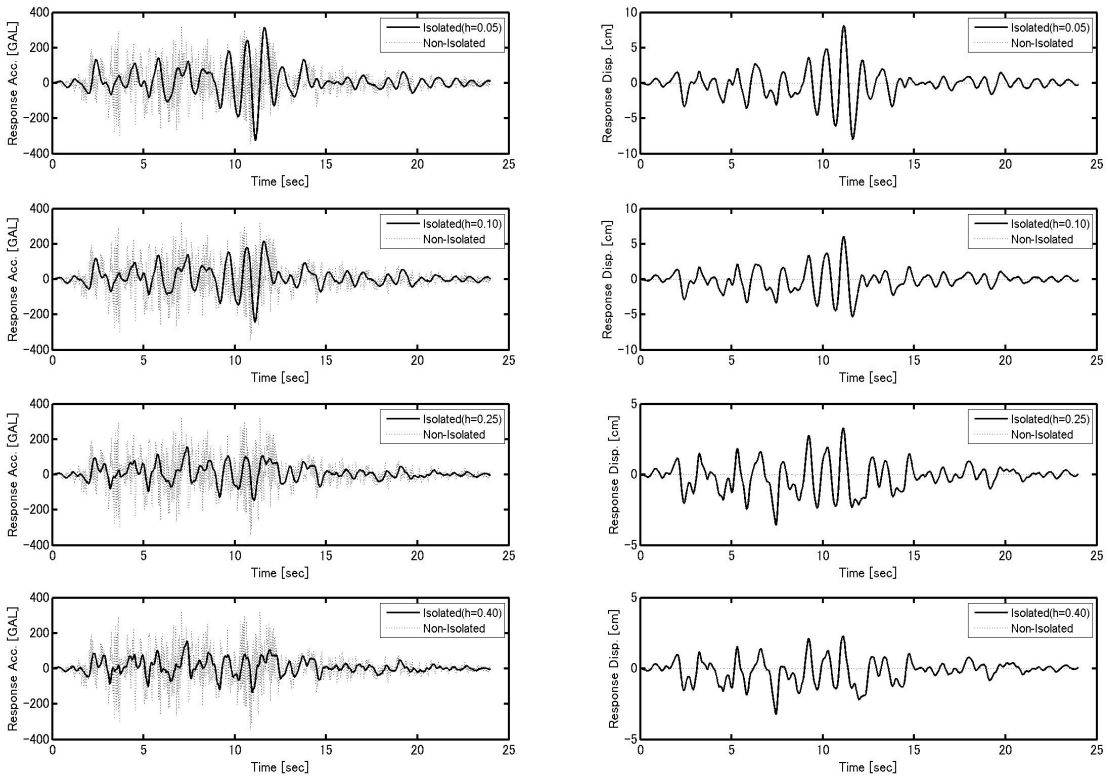
모드인 것으로 알려져 있다. 반면 면진된 경우에는 면진장치가 대부분의 에너지와 변형을 흡수하기 때문에 면진장치의 파괴가 주된 파괴모드가 될 것이다. 이에 대한 기준이나 연구결과는 현재 명확하지 않은 실정이나, 일본원자력학회에서 2006년 발간한 ‘원자력발전소의 지진에 기인한 확률론적 안전성평가 실시기준(2006)’에 따르면 비면진 비상디젤발전기의 경우 파괴기준이 비상디젤발전기 중심위치에서 최대가속도 응답이 1.2g가 되는 것으로 하고 있다. 따라서 비면진 비상디젤발전기의 경우 파괴기준을 1.2g로 설정하였으며 면진된 경우는 면진장치의 최대 허용변위를 5cm로 가정하여 파괴모드로 선정하였다. 면진장치의 최대변위 5cm를 파괴모드로 선정한 것은 비상디젤발전기가 설치되어 있는 원자력발전소를 현장답사한 결과 비상디젤발전기 기초와 주변건물의 바닥면과의 사이에 실제 유격을 근거로 선정한 것이다. 그러나 실제 일본의 堤英明 등(2003)에 의한 연구에 의하면 비상디젤발전기의 경우 배관을 유연한 것으로 교체할 경우 최대 22cm까지의 변위가 가능한 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 선정한 최대변위 5cm는 충분히 개선의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

4.2 감쇠계수 결정

면진 장치의 최적 특성을 결정하기 위해서, 면진장치의 감쇠계수를 변경시키면서 파라미터 해석을 수행하였다. 면진 장치의 고유 주기는 1초에 고정하고, 감쇠계수를 5%에서 40%까지 5% 간격으로 변화시켜 지진 응답 해석을 실시하였다. 면진된 경우와 비면진 경우 비상디젤발전기 중심부에서의 가속도 응답 시간이력과 면진장치의 위치에서의 변위 응답 시간이력을 면진장치의 감쇠비의 변화에 따라서 그림 5와 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진된 경우는 비면진인 경우에 비하여 가속도 응답이 크게 감소하고 있는 것을 알 수 있으며 반면 변위는 크게 증가하는 것을 알



〈그림 5〉 UHS 지진파에 의한 가속도 및 변위 응답 시간이력(5% 감쇠비)



〈그림 6〉 NRC 지진파에 의한 가속도 및 변위 응답 시간이력(5% 감쇠비)

수 있다. 또한 NRC 지진시 면진된 경우 변위응답에서 허용 변위인 5cm를 넘어서는 경우가 발생하고 있는 것을 알 수

있다. 따라서 면진된 경우는 취약도 분석에서 면진장치의 파괴가 전체 모드를 지배하고 있는 것으로 판단된다.

그림 7에서는 전체 가속도 응답과 변위응답에서 최대가속도와 최대변위를 구하여 감쇠비에 따른 변화를 도시하였다. 파괴기준을 같이 도시하여 파괴기준과의 관계를 파악할 수 있도록 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진된 경우는 비면진인 경우에 비하여 가속도 응답이 크게 감소하는 것을 알 수 있으며 가속도 응답이 감쇠비의 증가에 따라 감소하지만 일정값에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 최대 변위 값도 감쇠비의 변화에 따라 가속도 응답과 유사한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 감쇠비는 25%까지 가속도와 변위응답에 감소를 가져오지만 더 이상의 감쇠비의 증가는 응답에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

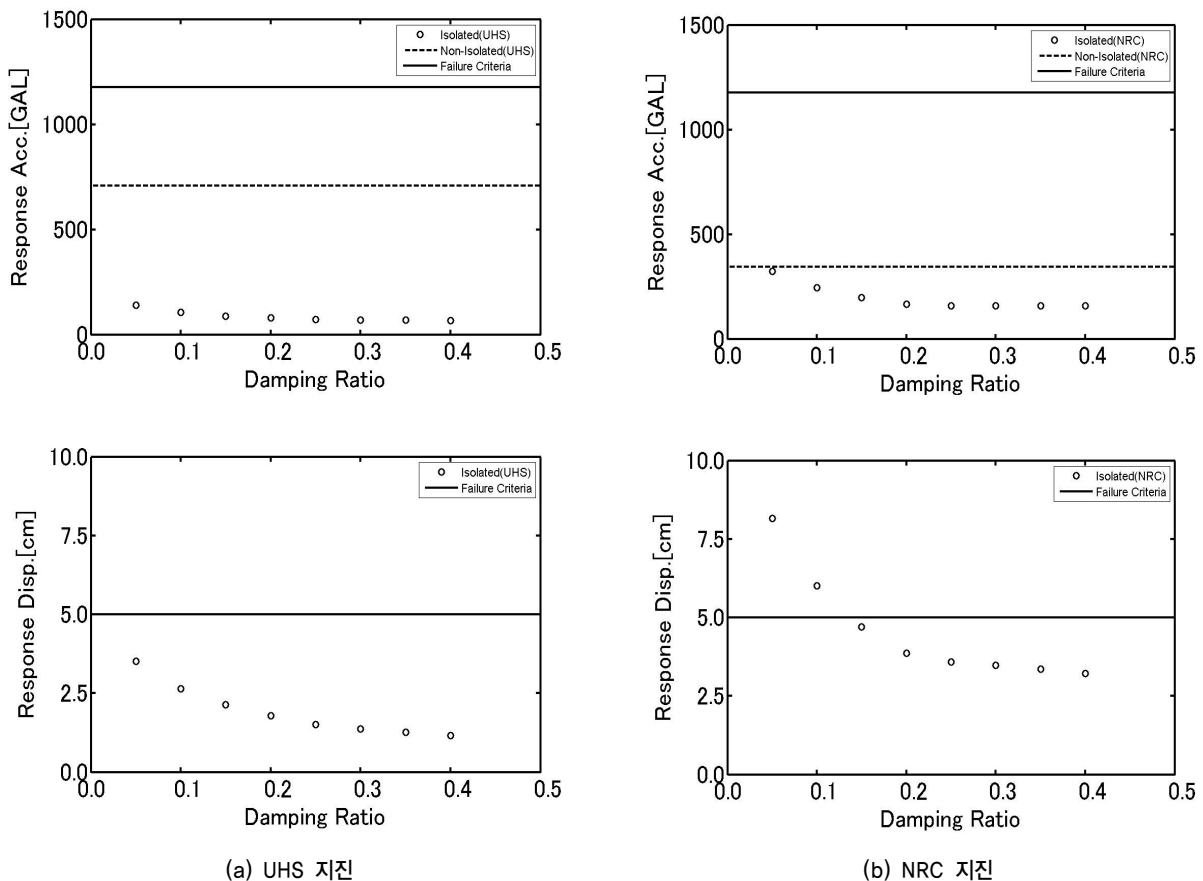
4.3 취약도 곡선

2장에서 제안한 방법을 이용해서 지진취약도 곡선을 작성해 비교하였다. 면진된 경우와 면진되지 않은 경우에 대하여 두가지 파괴모드에 대한 지진취약도 곡선을 작성하였다. 면진되지 않은 경우에는 면진장치의 파괴모드가 없으므로 비상디젤발전기 자체의 파괴만을 고려하였다. 지진취약도 곡선의 산정시 내력의 불확실성을 나타내는 β_c 와 응답

의 불확실성을 나타내는 β_R 은 다음의 표 1에 제시한 값을 사용하였다. 불확실성 계수의 결정은 취약도 응답에 결정적인 역할을 하는 중요한 계수임에도 그에 대한 근거는 빈약한 것이 현실이다. 따라서 비면진된 내진형 비상디젤발전기의 경우는 기존의 원자력 발전소를 대상으로 수행하였던 “영광 5,6호기 확률론적 안전성 평가”에서 전체 원자력 발전소의 안전성을 평가하였던 자료를 사용하였다(전력연구원, 2001). 면진된 경우에는 실제 취약도 분석을 수행한 결과가 없으므로 2006년 일본에서 발간된 “원자력발전소의 지진에 기인한 확률론적 안전성평가 실시기준”에서 제시하고 있는 값을 준용하여 결정하였다(일본원자력학회, 2006). 표 1에서 제시한 바와 같이 내진형의 경우는 콘크리트 앵커의 Concrete breakout failure를 파괴모드로 정하고 있기 때문에 콘크리트의 재료적 불확실성이 크므로 불확실성 계수가 크게 결정된 반면 면진형 비상디젤발전기의 경우는 면진

〈표 1〉 불확실성 계수

	면진형	내진형
내력의 불확실성을 나타내는 β_c	0.05	0.36
응답의 불확실성을 나타내는 β_R	0.05	0.30

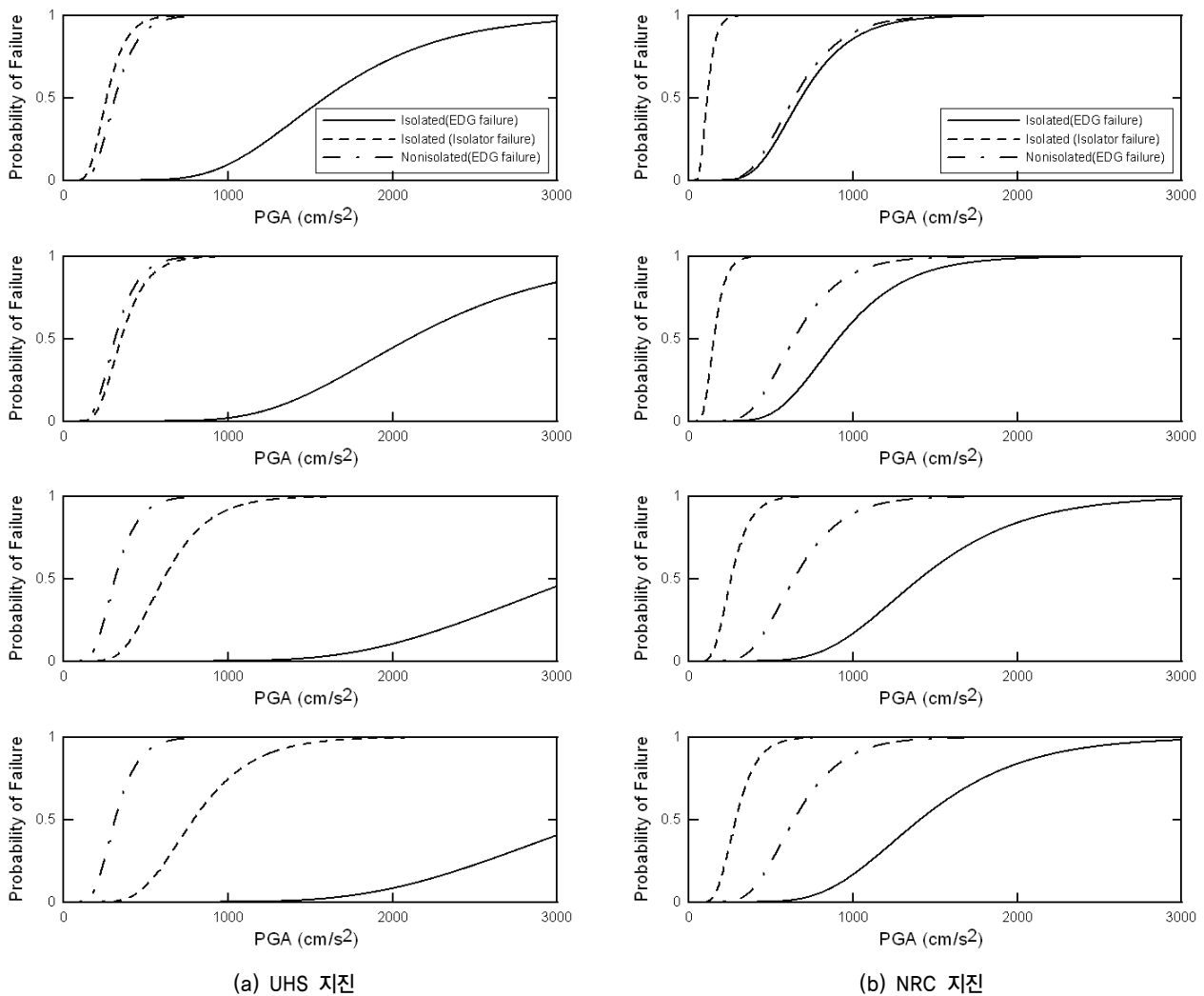


〈그림 7〉 감쇠계수와 지진파에 따른 최대가속도와 최대변위 응답 변화

장치의 파괴 또는 최대가속도에 의한 파괴모드를 선정하였으므로 불확실성이 더 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 손상도 곡선은 그림 8에 지진파에 따라 구분하여 도시하였다. 취약도 곡선으로부터 산정한 결과는 정량적으로 HCLPF (High Confidential and Low Probability of Failure, 고신뢰도 저파손확률)(최인길 등, 2001) 값으로 비교하여 나타낼 수 있다. HCLPF값은 95%의 신뢰도수준에서 파괴확률이 5%가 될 때의 지반가속도를 나타내며 따라서 단위는 중력가속도로 나타내고 일반적으로 해당 기기와 구조물의 HCLPF가 결정되면 그 정도 크기의 지진이 발생했을 경우 파괴가

일어나지 않는 수준인 것으로 판단한다. 표 2와 그림 9에서는 지진파와 감쇠비에 따라서 비상디젤발전기의 HCLPF값을 산정하여 비교하였다.

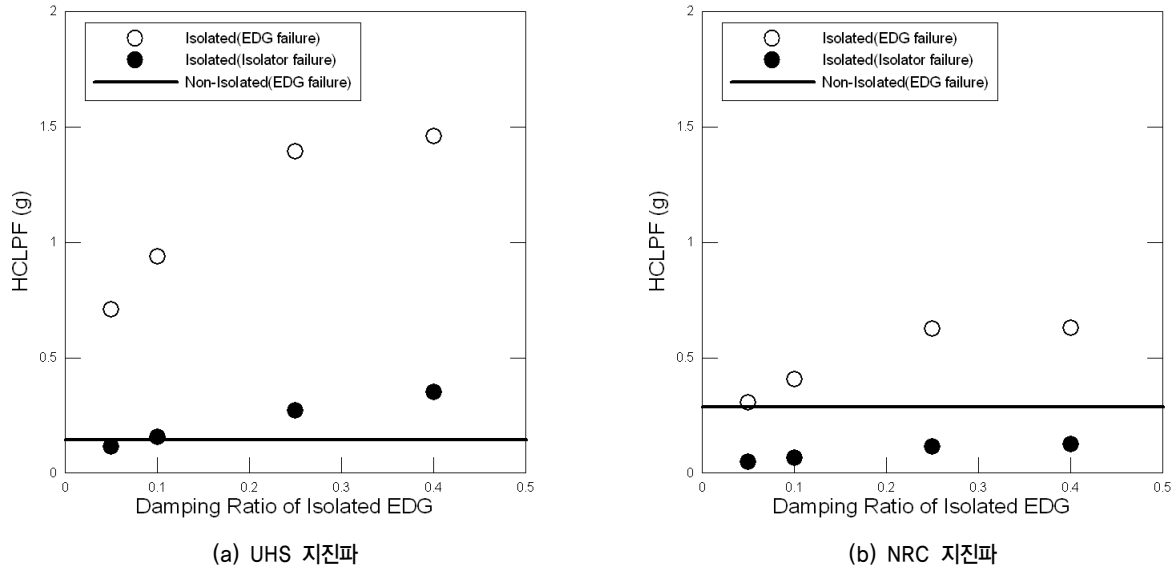
표 2 및 그림 8과 9에서 보는 바와 같이 감쇠계수의 증가에 의해서 UHS 지진의 경우 지진에 의한 손상확률이 크게 개선되는 것을 알 수 있다. HCLPF값도 감쇠계수의 증가에 따라서 크게 증가하여 지진내력이 증가한다는 것을 알 수 있다. 감쇠비에 따라서 개선효과에 차이가 발생하기는 하지만 비상디젤발전기 자체의 파괴를 기준으로 비교하였을 경우 최대 10배가량의 위험도 개선효과가 있는 것으로 나타나



〈그림 8〉 지진파에 따른 비상디젤발전기의 지진취약도 곡선(감쇠비는 위에서부터 0.05, 0.10, 0.25, 0.40)

〈표 2〉 지진파와 감쇠계수에 따른 HCLPF값(단위: g)

감쇠계수	UHS 지진		NRC 지진	
	비상디젤발전기파괴	면진장치 파괴	비상디젤발전기파괴	면진장치 파괴
0.05	0.711	0.117	0.306	0.051
0.1	0.939	0.157	0.407	0.069
0.25	1.397	0.272	0.629	0.115
0.4	1.460	0.353	0.629	0.128



〈그림 9〉 감쇠계수와 지진파에 따른 HCLPF값의 변화

고 있다. 그러나 면진장치의 파괴를 기준으로 비교하였을 경우에는 최대 2.5배의 지진위험도 개선효과가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 면진장치의 파괴가 전체거동을 지배하고 있는 것을 알 수 있으며 이러한 효과는 면진장치의 성능 개선 및 주변구조물의 설계변경을 통하여 허용최대변위를 증가시켜서 지진위험도를 더욱 개선할 수 있을 것으로 판단된다. NRC 지진의 경우는 비상디젤발전기의 파괴를 기준으로 하였을 경우 지진내력이 2배 이상 증가하지만 면진장치의 최대변위를 파괴모드로 하여 분석하였을 경우 HCLPF 값이 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 면진장치에 의해서 비상디젤발전기에 전달되는 지진력이 크게 감소하였음에도 면진장치에서 먼저 파괴가 발생하기 때문에 발생한 현상으로 UHS 지진파의 경우와 동일하게 면진장치의 성능개선과 주변구조물의 설계변경을 통해서 개선될 수 있는 부분으로 판단된다. 즉 본 연구에서 면진장치의 최대변위를 5cm로 제한한 것은 실제 비상디젤발전기의 상황을 고려하여 결정한 것이고 실제 면진장치의 파괴가 최대변위 5cm에서 발생하는 것은 아니므로 실제 적용시 면진장치로 인한 최대변위를 증가시키도록 설계를 수행한다면 좀 더 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 원전 비상디젤발전기의 지진취약도 분석을 통하여 면진에 의해 지진에 대한 위험성의 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 개발하였다. 개발된 기법을 이용하여 비상디젤발전기의 지진취약도를 지진파와 면진여부에 따라서 평가하였다. 분석결과 면진에 의해서 지진취약

도를 크게 개선할 수 있는 것으로 분석하였으나 그 개선 정도는 지진파의 주파수 특성 즉 지진력 저감효과 여부에 따라서 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 원전부지에 대한 확률론적 재해도 평가에 의해서 개발된 UHS 지진파를 이용한 경우 지진취약도 평가의 결과로서 나타나는 HCLPF값이 최대 2.5배까지 증가하므로 면진에 의해서 지진에 의한 위험도를 그만큼 감소시킬 수 있다고 평가할 수 있으나 국내 원자력발전소의 설계지진인 NRC 스펙트럼을 이용한 인공지진의 경우 면진장치를 적용함으로써 인하여 지진위험도가 오히려 더 증가하는 것으로 평가되었다. 이것은 본 연구에서 면진장치의 최대허용변위를 5cm로 결정하여 검토하였기 때문이며, 면진장치의 적용으로 인하여 비상디젤발전기의 파괴확률은 크게 개선되었음에도 불구하고 면진장치가 먼저 파괴되는 것으로 설정하였기 때문에 발생한 현상인 것으로 판단된다. 따라서 이러한 결과는 면진장치의 성능개선을 통하여 최대변위를 증가시키므로써 면진장치를 설치하여 비상디젤발전기의 지진위험도를 크게 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 실험은 과학기술부 원자력 중장기연구사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

1. (社)日本原子力學會標準, 原子力發展所の地震에起因한確率論的的安全性評價實施基準, 2006.

2. Ang, A.H.S. Pires, J.A. and Villaverde, R. A Model for the Seismic Reliability Assessment of Electric Power Transmission System, Reliability Engineering and System Safety, Vol 51, 1996, pp. 7-22.
3. Bhargava, K., Ghosh, A.K., Agrawal, M.K., Patnaik, R., Ramanujam, S. and Kushwaha, H.S. Evaluation of Seismic Fragility of Structures-a case study, Nuclear Engineering and Design 212, 2002, pp. 253-272.
4. Camensig, C. Bresesti, L., Clementel, S. and Salvetti, M. Seismic Risk Evaluation for High Voltage Air Insulated Substations, Reliability Engineering and System Safety, Vol 55, 1997, pp. 179-191.
5. Dimova, S.L. and Hirata, K. Simplified Seismic Fragility Analysis of Structures with Two Types of Friction devices, Earthquake Engineering and Structural dynamics, Vol 29, 2000, pp. 1153-1175.
6. Ghiocel, D.M., Wilson, P.R., Thomas, G.G. and Stevenson, J.D. Seismic Response and Fragility Evaluation for an Eastern US NPP Including Soil-Structure Interaction Effects, Reliability Engineering and System Safety, Vol 62, 1998, pp. 197-214.
7. Hirata, K. and Somaki, T., Fragility estimation of an Isolated FBR Structure Considering the Ultimate State of Rubber Bearing, Nuclear Engineering and Design 147, 1994, pp. 183-196.
8. Hirata, K., Kobayashi, Y., Kameda, H. and Shiojiri, H., Fragility of Seismically Isolated FBR Structure, 1991.
9. Kenedy, R.P. and Ravindra, M.K., Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies, Nuclear Engineering and Design 79, 1984, pp. 47-68.
10. Ozaki, M., Okazaki, A., Tomomoto, K., Iba, T., Satoh, R., Nanba, H., Seya, H., Moriyama, K. and Ugata, T. Improved Response Factor Methods for Seismic Fragility of Reactor Building, Nuclear Engineering and Design, 185, 1998, pp. 277-291.
11. Park, Y.J. Hofmayer, C.H and Chohshi, N.C. Survey of Seismic Fragility Used in PRA Studies of Nuclear Power Plants, Reliability Engineering and System Safety, Vol 62, 1998, pp. 185-195.
12. Singhal, A. and Kiremidjian, A.S. Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage, Journal of Structural Engineering Vol. 122, No. 12, 1996, pp. 1459-1467.
13. US NRC Regulatory Guide 1.60. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
14. Young-Sun Choun, Yasuki Ohtori, In-Kil Choi, Min-Kyu Kim, Yoshiaki Shiba and Masato Nakajima, Korea-Japan Joint Research on Development of Seismic Capacity Evaluation and Enhancement Technology Considering Near-Fault Effect (Annual Report 2005), KAERI/RR-2604 / 2005.
15. 김상훈 (2003a), "Steel Jacket으로 보강된 콘크리트 교량에 대한 지진취약도 개발", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제5호, pp. 75-83.
16. 김상훈 (2003b), "다경간 콘크리트 교량의 지진 취약도", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, pp. 35-47.
17. 영광 5,6호기 확률론적 안전성 평가[외부사건분석 보고서], 2000. 11. 전력연구원.
18. 堤英明, 蛭沢勝三, 山田博幸, 柴田勝之, 確率論的手法에 의한 機器免震性能設計의 有效性評價手法, 日本學術會議, 2003.
19. 최인길, 서정문, "확률론적 지진위험도 분석을 위한 원전 격납 건물의 비탄성에너지 흡수계수 평가", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제5호, 2001, pp. 47-56
20. 최인길, 서정문, 전영선, 이종립, "스펙트럼 형상이 원전 기기 지진취약도에 미치는 영향 평가", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제4호, 2003, pp. 23-30.
21. 최인길, 전영선, 서정문, "Development of a Uniform Hazard Spectrum for a Soil Site by Considering the Site Soil Condition," 2004년도 원자력학회 추계 학술발표회, 2004.