

면진된 비상디젤발전기의 지진위험도 평가

Seismic Risk Evaluation of Isolated Emergency Diesel Generator System

김민규* · 大鳥靖樹** · 전영선***
Kim, Min Kyu · Ohtori, Yasuki · Choun, Young-Sun

ABSTRACT

An Emergency Diesel Generator (EDG) is one of the safety related equipments of a Nuclear Power Plant. The seismic capacity of an EDG in nuclear power plants influences the seismic safety of the plants significantly. A recent study showed that the increase of the seismic capacity of the EDG could reduce the core damage frequency (CDF) remarkably. It is known that the major failure mode of the EDG is a concrete coning failure due to a pulling out of the anchor bolts. The use of base isolators instead of anchor bolts can increase the seismic capacity of the EDG without any major problems. This study introduces a seismic risk analysis method and presents sample results about the seismically isolated and conventional EDG system.

Keywords: Emergency Diesel Generator (EDG), Nuclear Power Plant, seismic capacity, core damage frequency (CDF), base isolator, seismic risk

1. 서론

원자력발전소의 비상디젤발전기는 원자로 주변 계통의 최악의 사고 발생시 원자로를 안전하게 정지시켜주는 역할을 한다. 최악의 사고란 냉각재 상실 사고(Loss of Coolant Accident), 소외전원 상실사고(Loss of Offsite Power), 주 증기관 파열사고(Rupture of Main Stream Line)의 단일 발생이나 복합발생을 의미한다. 냉각재 상실사고와 주 증기관 파열사고의 발생시에는 안전주입신호(Safety Injection Signal)가 발생하며 소외전원 상실사고의 발생시에는 전원상실신호(Loss of Voltage)가 발생한다. 비상디젤발전기는 이러한 사고시에도 원자로를 안전하게 정지시키고 냉각재 상실사고 상황하에서도 방사능의 소외 방출량을 기준치 이하로 유지시키기 위해 안전등급 필수부하에 전원을 공급한다. 따라서 비상디젤발전기는 높은 수준의 신뢰도를 유지할 것을 규정하고 있으며, 비상디젤발전기의 성능을 유지시키기 위한 성능감시시스템과 신뢰도 분석등에 관한 많은 연구가 수행되고 있는 실정이다. 그러나 비상디젤발전기 자체의 지진안전성에 대한 연구는 국내외적으로 미약한 것이 현실이다.

지진위험도는 해당부지의 지진재해도와 지진취약도의 조합을 통해서 정량적으로 평가할 수 있다. 원자력 발전소에서는 지진위험도를 평가하는 지표로서 노심손상빈도(Core Damage Grequency, CDF)를 사용한다. 노심

* 정회원 · 한국원자력연구소 · 선임연구원 · 공학박사 Email: minkyu@kaeri.re.kr

** 電力中央研究所 · 先任研究員 · 공학박사

*** 한국원자력연구소 · 책임기술원 · 공학박사

손상빈도는 원자력 발전소의 노심이 손상되어 중대한 사고로 발전할 수 있는 확률을 평가한 것이다. 본 연구에서는 비상디젤발전기 자체의 지진위험도를 연손상확률(Annual probability of Failure)로 평가하였다. 연손상확률은 비상디젤발전기만의 해당부지에서 지진에 의해 손상될 수 있는 확률을 정의한 것이다. 따라서 본 연구에서는 원자력 발전소의 주요 기기중 하나인 비상디젤발전기를 대상으로 하여 재해도 곡선과 취약도 곡선을 산정하여 면진 및 비면진 정량적으로 평가되는 위험도 지수에 의해서 면진에 의한 위험도 변화를 평가하였다.

2. 지진위험도 평가 방법

2.1 지진재해도 분석

지진재해도 분석이라 함은 다양한 크기의 지진이 임의 부지에 발생할 수 있는 확률을 평가하고 이들 지진으로부터 스펙트럼 형상을 결정하는 것이 포함된다. 지진재해도 분석은 그 특성상 결과를 확률론적으로 나타내기 때문에 확률론적 지진재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis: PSHA)이라고도 부른다. 원전 부지에서의 지진재해도는 재해도 곡선으로 나타낸다. 지진재해도 곡선은 초과확률 대 첨두지반가속도의 관계를 그 린 것이다. 지진재해도 분석에서는 역사지진 자료, 계기지진자료 뿐 아니라 활성 단층 및 기타 지진원자료 등을 이용하여 발생가능한 지진의 규모 등을 추정하고, 거리 및 지반 특성에 따른 지진파의 전달특성을 평가하여 최종적으로 임의부지에서의 지진재해도를 평가하게 된다.(최인길 등, 2001) 본 연구에서는 지진위험도 평가를 위한 지진재해도 곡선으로 월성원전을 대상으로 하여 본 연구진에 의해서 제안한 재해도 곡선을 사용하였다.

2.2 지진취약도 평가

지진취약도 분석을 위해서는 많은 수의 지진파를 이용하여 지진동 가속도를 변화시키면서 다수의 수치해석을 수행하여 지진파의 랜덤성을 고려한 분석을 수행한다. 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 1개의 지진동 파형으로 취약도 곡선을 작성하는 간편한 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 지진 응답과 입력 지진동과의 관계를 이용해, 취약도 곡선을 간편하게 작성하는 방법으로 그 방법은 다음과 같다.

일반적으로, 임의 지진하중에 A가 작용하고 있을 때 구조물체의 손상 확률은 다음 식 (1)로 구할 수 있다.

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

여기서, f_R 는 응답의 확률 밀도 함수이고, f_C 는 내력의 확률 밀도 함수이다. (1)식은 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 불확실함을 의미하고 β_R 는 응답의 불확실함을 의미한다. 평균치와 중앙치의 관계는 다음 식으로 구할 수 있다.

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

(3) 식의 관계를 이용하면, (2)식은 다음식과 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.

지진취약도 곡선을 산정하는 순서를 정리하면 다음과 같다.

- 1) (4) 식의 C_m , β_C , $\beta_R(A)$ 를 결정한다.
- 2) (3) 식의 $\overline{R(A)}$ 값을 지진 응답 해석 결과를 이용하여 결정한다.
- 3) (4) 식으로 $F_A(A)$ 와의 관계를 구해서 취약도 곡선을 구한다.

2.3 지진위험도 평가

지진에 의한 위험도는 지진재해도와 지진취약도 곡선의 교차되는 부분에 대한 convolution으로 정략적으로 나타낼 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 수평축을 가지는 재해도 곡선과 취약도 곡선에서 공통적으로 포함되는 부분의 면적으로 정의할 수 있다. (McGuire, 2004)

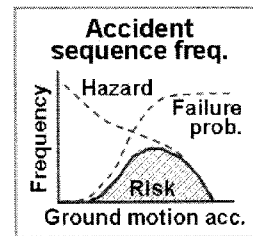


그림 1. 위험도의 산정

3. 지진응답해석

3.1 해석모델

비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)의 해석모델을 그림 2에 나타내었다. EDG는 높이 1/2위치에 중량(172,000Kgf)이 집중된 모델로 구성하였다. EDG저면에 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.

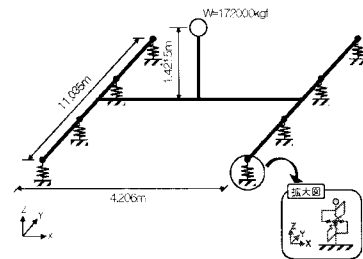


그림 2. 비상디젤발전기의 해석 모형

3.2 입력지진

취약도 곡선의 평가를 위해서는, 해당부지의 등재해도 스펙트럼 (Uniform Hazard Spectrum, UHS) (최인길 등, 2004)을 이용한 인공지진파와 US NRC의 Reg. Guide 1.60(1973)의 설계스펙트럼을 이용한 인공지진파의 두 가지 지진파를 사용하였다. 편의상 각각 UHS와 NRC로 명칭하기로 한다. 그림 3에 해석에 이용한 입력 지진동의 가속도 시간이력을 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 UHS 지진파는 고주파수 특성을 가지고 있으며, NRC 지진파는 저주파수 특성을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

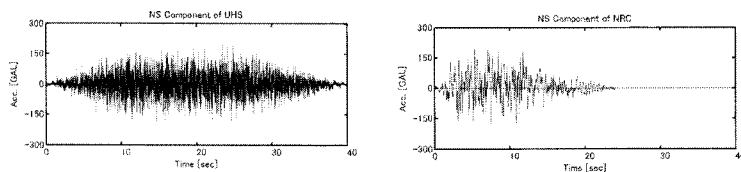


그림 3. 지진응답해석을 위한 입력 지진동

3.3 면진장치 모델링

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

4. 비상디젤발전기의 지진취약도 분석

4.1 파괴모드 결정

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 파괴모드인 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 안전성 평가실시기준(2006)에 따르면 비면진 비상디젤발전기의 경우 파괴기준이 EDG 중심위치에서 최대가속도 응답이 1.2g가 되는 것으로 하고 있다. 따라서 비면진 EDG의 경우 파괴기준을 1.2g로 설정하였으며 면진된 경우는 면진장치의 최대 허용변위를 5cm로 가정하여 파괴모드로 선정하였다.

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. 감쇠계수에 따른 최대가속도와 최대변위 응답을 그림 4에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진된 경우는 비면진인 경우에 비하여 가속도 응답이 크게 감소하고 있는 것을 알 수 있으면 반면 변위는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 NRC 지진시 면진된 경우 변위응답에서 허용변위인 5cm를 넘어서는 경우가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 면진된 경우는 취약도 분석에서 면진장치의 파괴가 전체 모드를 지배하고 있는 것으로 판단된다.

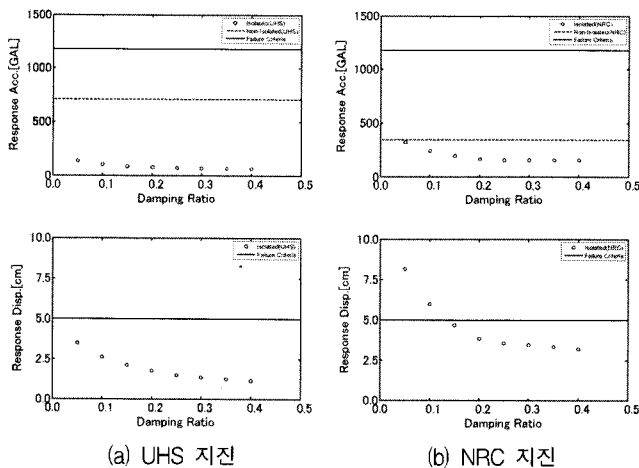


그림 4. 감쇠계수와 지진파에 따른 최대가속도와 최대변위 응답 변화

4.3 비상디젤발전기의 지진취약도 곡선

면진된 경우와 면진되지 않은 경우에 대하여 두가지 파괴모드에 대한 지진취약도 곡선을 작성하였다. 면진되지 않은 경우에는 면진장치의 파괴모드가 없으므로 EDG 자체의 파괴만을 고려하였다. 지진취약도 곡선의 산정 시 내력의 불확실성을 나타내는 β_C 와 응답의 불확실성을 나타내는 β_R 은 면진된 경우 0.05를 사용하였으며 면진되지 않은 경우 0.36과 0.30을 각각 사용하였다. 손상도 곡선은 그림 5에 지진파에 따라 구분하여 도시하였다.

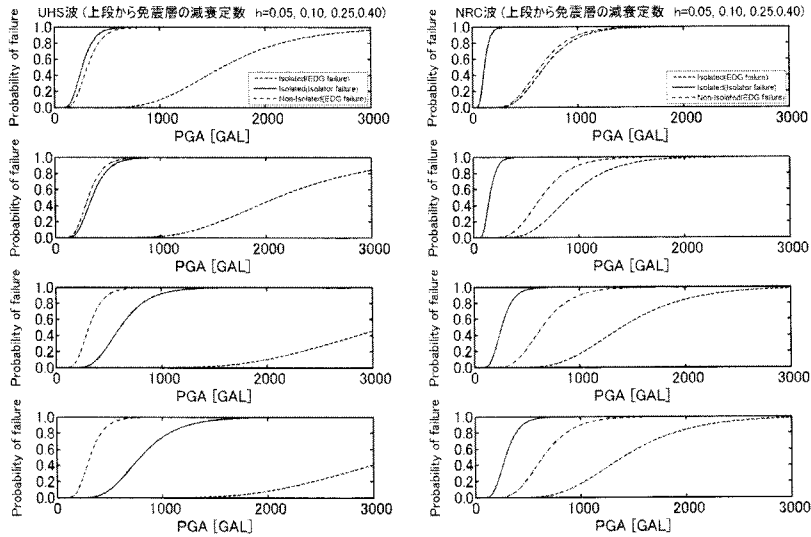


그림 5. 지진파에 따른 EDG의 지진취약도 곡선

5. 비상디젤발전기의 지진위험도 평가 및 분석

지진위험도 평가를 위하여 전영선 등(2005)에 의해 개발된 감쇄식의 종류에 따른 그림 6과 같은 재해도 곡선을 사용하였다. 지진파와 재해도 곡선에 따른 위험도를 연손상확률로 정의하여 표 1과 그림 7에 정리하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 UHS 지진의 경우는 면진에 의하여 동일 재해도 곡선을 사용하였을 경우 지진위험도가 크게 감소하는 것을 알 수 있지만 NRC 지진의 경우는 오히려 면진에 의해서 지진에 의한 위험도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 파괴모드를 면진장치의 파괴인 최대변위 5cm로 규정하였기 때문에 발생하는 결과로서 면진장치의 성능개선에 의해서 극복할 수 있는 것으로 판단된다.

표 1. 면진에 따른 비상디젤발전기의 연손상확률

Seismic Hazard Curves		Annual Probability of Failure			
Attenuation	Source Model	UHS		NRC	
		Non-Isolation	Isolation	Non-Isolation	Isolation
2004	A-Model	3.329E-04	9.799E-05	8.831E-05	4.650E-04
	C-Model	1.209E-05	2.457E-06	2.125E-06	1.807E-05
2005	A-Model	4.144E-04	1.067E-04	9.456E-05	5.893E-04
	C-Model	2.005E-05	4.645E-06	4.063E-06	2.888E-05

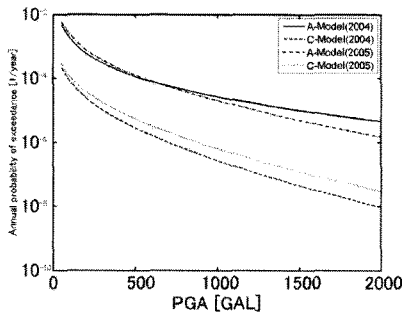


그림 6. 해석에 사용한 지진재해도 곡선

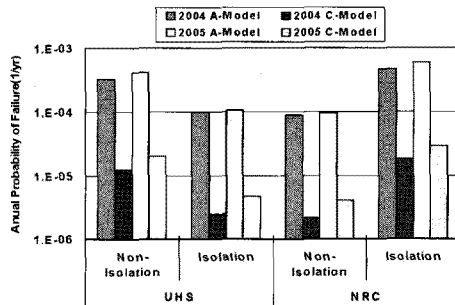


그림 7. 면진에 따른 비상디젤발전기의 연손상황률

6. 결론

본 연구에서는 지진재해도와 지진취약도를 이용하여 정량적으로 지진위험도를 산정할 수 있는 기법을 개발하였다. 개발된 기법을 이용하여 원자력발전소의 비상디젤발전기에 적용하여 면진여부에 따른 지진위험도를 평가하였다. 평가결과 면진에 의해서 가속도응답은 크게 감소시킬 수 있지만 면진장치에 의해서 파괴모드가 지배될 경우 오히려 지진위험도가 증가할 수도 있음을 알 수 있었다. 따라서 이러한 경우 궁극적인 지진위험도를 감소시키기 위해서는 면진장치의 성능개선이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 증장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 최인길, 서정문 (2001), 확률론적 지진위험도 분석을 위한 원전 격납건물의 비탄성에너지 흡수계수 평가, 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제5호, pp47-56
2. 최인길, 전영선, 서정문 (2004), Development of a Uniform Hazard Spectrum for a Soil Site by Considering the Site Soil Condition, 2004년도 원자력학회 추계 학술발표회
3. (社)日本原子力學會標準 (2006), 原子力發展所の地震에起因한 確率論的 安全性評價實施基準
4. McGuire, Robin H. (2004), Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute.
5. US NRC Regulatory Guide 1.60 (1973). Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.
6. Young-Sun Choun, Yasuki Ohtori, In-Kil Choi, Min-Kyu Kim, Yoshiaki Shiba and Masato Nakajima (2005), Korea-Japan Joint Research on Development of Seismic Capacity Evaluation and Enhancement Technology Considering Near-Fault Effect (Annual Report 2005), KAERI/RR-2604/2005.