2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

진동격리된 디젤발전기의 지진취약도 평가

Seismic Frailty Evaluation of Diesel Generator Mounted on Vibration Isolator

황규호, 송정국, 강선구
한국전력기술주식회사
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

서용표, 이종림
한국전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요약

국내 원전의 내진설계에는 0.2g에 고정된 RG 1.60 표준지반응답스펙트럼을 사용한다. 디젤발전기를 포함한 모든 안전관련 기기는 시험 및 해석을 통한 내진검증을 실시하여 설계지진에 대한 안전성을 검토한다. 그러나 진동격리장치 위에 설치된 디젤발전기는 설계치를 초과하는 지진하중에서 과도한 횡변위에 의한 지지 스프링의 파손이 우려된다. 이 파손모드에서 충분한 비탄성 거동을 기대하기 어려움에 따라 디젤발전기 구조 시스템의 내진성능을 평가하였다. 본 연구에서는 진동격리기를 포함한 디젤발전기 구조시스템의 내진성능을 지진취약도 분석기법을 사용하여 평가하였으며, 최종 HCLPF 값은 0.39g로 나타났다.

Nuclear power plants in Korea are seismically-designed based on the RG 1.60 standard spectrum anchored to 0.2g. All the safety-related equipment including diesel generator should be seismically qualified by testing or analysis. However, diesel generator mounted on the spring isolator is well known to be vulnerable when subjected to the earthquake exceeding design level. The seismic performance level of the diesel generator was evaluated using the seismic fragility approach. The HCLPF (High Confidence and Low Probability of Failure) capacity of the diesel generator is 0.39g.

개요

1998 년 대만 치치 지진 피해 사례에서 알 수 있듯이 변전시설물들이 지진에 매우 취약하다는 것은 잘 알려져 있다. 원자력발전소에서 소외 전원 상실은 원자로 노심의 손상으로 이어진다. 따라서 소외 전원 상실에 대비하여 디젤발전기를 설치함으로써 사고 원전에 안정적으로 비상전원을 공급하도록 설계되고 있다. 그러나 설계 지진의 불확실성과 사고의 중요성을 감안할 때, 디젤발전기가 가지는 내진성능을 평가하는 것은 매우 의미있는 일이다.

현행 원자력 안전 규제지침서 1.100 에 따르면 원전의 모든 안전관련기기는 지진동안 및 이후에 그 안전기능을 유지하여야 한다고 명시하고 있으며, 아울러 표준심사지침 SRP 3.10 에서는 IEEE-344 규준에 따른 내진검증방법을 허용하고 있다. 내진검증의 목적은 주어진 설계지진에 대해 기기의 기능성을 확보하기 위함이다. 그러나 설계지진이 가지고 있는 큰 불확실성 때문에, IEEE-344 규준에 따른 내진검증 외에도, 안전에 중요한 기기들에 대한 내진성능의 검토가 권고되고 있다. 미국 원자력규제위원회는 자국내 원전 사업자들에게 보낸 공문 GL 88-20 에서 지진과 같은 자연재해에 대해 노심손상빈도를 평가하도록 권고하고 있다. 노심손상빈도의 평가를 위해서는 안전에 중요한 기기 및 이를 지지하는 구조물의 내진성능 평가가 필수적이며 개별 설비의 내진성능은 '지진취약도'라는 값으로 표현된다. 지진취약도는 특정구조부재가 5%의 파손 확률을 가진다는 진술에 95%의 신뢰도를 부여할 수 있는 수준의 지진내력이다. 즉, 기기 및 구조물이 그 허용한계에 도달할 때의 최대지반가속도 내력을 의미한다.

지진취약도 방법론

지진취약도방법론은 모든 공학적 변수들이 로그-정규분포를 가진다는 가정에 근거해서 전개된다. 기기를 포함한 모든 구조 시스템의 내력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$A_{HCLPF} = A_m \times e^{-1.65\cdot(b_R + b_U)}$$

A_{HCLPF} : HCLPF 내력
A_m : 메디안 지반 가속도
b_R : 불확실성 로그표준편차
b_U : 랜덤성 로그표준편차

분포 형태에 많은 이론들이 있을 수 있으나 로그-정규 분포는 실무자가 다루기 편리하다는 장점이 있어 흔히 사용된다. 지진취약도 평가 시에는 공학자의 주관적인 판단을 중요시하는 바, 이는 평가를 위해 필요한 자료의 확보가 현실적으로 어렵기 때문이다. 따라서 평가에 가용한 자료가 불충분하면 그 영향이 기기의 최종 내진성능에 미치게 되므로 항상 최소 내력을 안전측으로 계산할 수 있다. 지진취약도를 구성하는 세 가지 인자는 메디안 값과 그와 관련된 불확실성 및 랜덤성이다. 불확실성은 재료 물성치와 실험공식 등에 내재한 분산도를 나타내며, 랜덤성은 지진의 고유특성에 기인하는 인자이다. 따라서 불확실성은 충분한 자료의 통계처리 등을 통하여 줄일 수도 있으나 랜덤성은 줄일 수 없다. 결국 지진취약도 평가 절차는 설계상에 내재한 보수성 혹은 비보수성의 정도를 이들 세 가지 인자로 표현하는 과정이다.

디젤발전기 설계 상세

원전에 사용되는 디젤발전기는 운전 중 유발

되는 진동을 저감할 목적으로 댐퍼와 스프링을 이용하여 철근콘크리트 건물의 슬래브로부터 격리, 시공되었다. 다음은 본 연구에서 검토된 디젤발전기의 사양이다.

■ 디젤발전기 중량

W = 172000kg

■ 진동격리장치

진동격리장치는 20 개의 스프링 셀과 8 개의 댐퍼로 이루어졌으며, 각 스프링 셀은 8 개의 코일 스프링으로 구성된다 (그림 1).

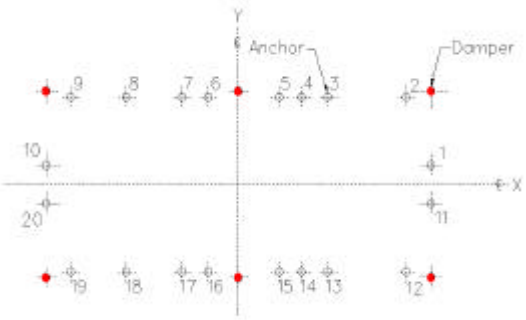

그림 1 : 스프링 및 댐퍼 위치

- 스프링

  재질 : DIN 17221

  모델번호 : GERB GP 8.721

  와이어 직영 d = 21mm

  평균 코일 직경 D = 97mm

  스프링 비지지 길이 L_o = 185mm

- 코일 스프링 강성

  수평 강성도 k_h = 2490 N/mm

  수직 강성도 k_v = 3560 N/mm

■ 댐 퍼

- 모델 번호 : GERB VH6-SP1
- 임계감쇠값 C = 250000 N/m/s

■ 디젤발전기의 동특성

모드	진동수	감쇠비	기여질량
1	2.46 Hz	0.235	94%
2	2.58 Hz	0.245	91%
3	3.23 Hz	0.215	100%
4	3.49 Hz	0.425	-
5	3.72 Hz	0.310	9%
6	5.43 Hz	0.510	6%

파손모드 선정

상세 평가 전에 다음의 세 가지 파손모드에 대한 검토가 이루어졌다.

- 연결 배관의 파손
- 댐퍼 및 스프링 정착부 파손
- 스프링 파손

디젤발전기와 연결되는 배관 및 배선들은 진동 격리를 목적으로 가요성 이음을 사용하므로 내진상 문제는 없는 것으로 판단되었다. 또한 강재 스키드에 정착된 스프링 및 댐퍼의 연결부의 내력은 스프링의 변형 내력보다 우수하므로 선별제거되었다. 그러나 지지 스프링의 우선적인 파손은 진동격리장치를 포함한 디젤발전기 구조시스템의 지배적인 파손모드를 형성한다고 판단되었다.

진동격리장치의 지진취약도 평가

디젤발전기 지지 스프링의 지진취약도평가는 다음의 가정 및 절차에 따라 수행되었다.

- 디젤발전기가 스프링 지지대 위에 놓이므로 디젤발전기 자체는 강체로 간주하였다.
- 전체 기기 구조 시스템은 세 방향에 대해 단자유도계처럼 거동한다고 가정하였다. 단일 진동수에서 디젤발전기 질량의 90% 이상이 기여하므로, 이 모드에서의 응답이 디젤발전기 전체의 응답을 지배한다고 간주하였다.
- 메디안 지반운동에 대한 디젤발전기의 메디

안 응답을 계산하였다.

- 정상운전하중과 지진하중의 조합에 의한 스프링 전단응력이 계산되었다.
- EPRI TR-103959 의 지침과 스프링의 설계전단강도를 이용하여 스프링의 메디안 전단강도를 평가하였다.
- EPRI TR-103959 의 지침에 근거한 보수적인 가정을 통하여 높은 신뢰도의 구조 내력과 응답변수를 평가하였다.

설계강도에 내재한 보수성

메디안 내진강도계수를 평가하기 위하여 메디안 지진응답을 계산하였다. 디젤발전기의 진동수가 수평 및 수직방향 모두 3Hz 부근에 있는 반면, 보조건물의 진동수는 7 Hz 이므로 디젤발전기의 메디안 지진응답은 메디안 지반응답스펙트럼으로부터 직접 구할 수 있다. 평가에 사용된 층응답스펙트럼은 그림 2 에 제시되어 있다.

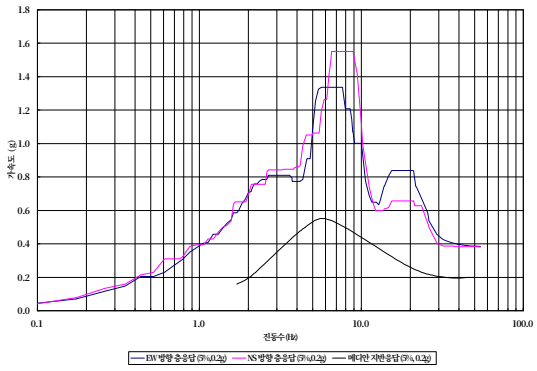

그림 2 : 층응답 및 지반응답스펙트럼

설계지반응답스펙트럼과 층응답스펙트럼을 비교함으로써 지진동이 구조물 기초로부터 기기에 전달되는 과정에 내재된 내진여유도를 검토하였다.

■ 수평방향 층응답스펙트럼 검토

디젤발전기 고유 진동수에서 메디안 지반응답스펙트럼과 층응답스펙트럼의 가속도값을 얻었다.

$$F_H = \frac{S_{a(5\%\&2.5Hz)FRS}}{S_{a(5\%\&2.5Hz)GRS}} = \frac{0.74g}{0.66g} = 1.12$$

■ 메디안 스펙트럴 값

메디안 지반응답스펙트럼에 NUREG/CR-0098 의 메디안 증폭계수와 메디안 감쇠비를 이용해서 디젤발전기의 메디안 응답을 구하였다

응답	수평 방향	수직 방향
S_v	0.11 m/sec	0.07 m/sec
S_a	0.176 g	0.150 g
S_d	7.01 mm	3.66 mm

메디안 스프링 변위 및 하중

상기의 스펙트럴 값들을 이용하여 해석한 결과, 스프링에 발생되는 변위는 다음과 같다.

■ 종방향 성분

수평 강성도 $k_h = 49800N/mm$

회전 강성도 $k_{xx} = 2.395 \cdot 10^6 N \cdot m/rad$

회전각 $q_{yy} = 3.12 \times 10^{-3} \cdot rad$

횡변위 $\Delta_x = 5.969mm$

수직변위 $\Delta_z = 1.626mm$

■ 횡방향 성분

수평 강성도 $k_h = 49800N/mm$

회전 강성도 $k_{yy} = 8.255 \times 10^8 N \cdot m/rad$

회전각 $q_{xx} = 1.071 \times 10^{-3} \cdot rad$

횡변위 $\Delta_x = 5.969mm$

수직변위 $\Delta_z = 2.184mm$

수직방향 스펙트럴 변위는 3.658mm 이다. 각 방향성분은 100-40-40 법칙을 적용하여 벡터 합을 디젤발전기의 최대 수평변위로 간주하였다. 이렇게 평가된 디젤발전기의 최대 수평방향변위는 6.426 mm 이다.

상기에서 구한 지지대 강성도와 수평 및 수직 방향의 변위를 고려한 메디안 스프링 하중은 다음과 같다.

- 스프링에 작용하는 수평 하중
  $Q(N) = 2002 \cdot F_S$
- 스프링에 작용하는 수직 하중
  $P_v(N) = 1913 \cdot F_S + 10545$

여기서 F_S 는 내진강도계수이며 작용하중이 스프링 응력한계에 도달할 때 파손이 발생한다. 스프링의 경우, 수평하중에 대한 보정이 필요하며 보정계수 R_T 는 다음 식과 같다.

$$R_T = \frac{g_o}{R_c} + b_o - g_o$$

$$R_c = \frac{C_p}{C_q} = 0.699$$

여기서 수직 강성, $C_p = 311.25N/mm$

수평 강성, $C_q = 445N/mm$

$$b_o = \frac{L_o}{D} = 1.907$$

$$g_o = \frac{f_p}{D} = 0.063$$

$$f_p = \frac{P_v}{C_p} = 0.242in$$

R_T 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$R_T = 0.0019 \cdot F_S + 2.005$

<u>스프링 응력 한계</u>

디젤발전기에 사용된 스프링 재료는 독일공업 표준인 DIN 17221 이며 직경 21 mm 의 코일 스프링의 강도 특성은 다음과 같다.

허용전단응력 : $t_a = 830N/mm^2$

인장강도 : $s_u = 1480 \cdot N/mm^2$

주어진 메디안 인장강도에 대응하는 메디안 전단강도는 EPRI TR-103959 이 제시하는 지침에 따라 인장강도의 62%를 취하였다. 스프링의 전단에 대한 메디안 응력한계는 다음과 같다.

$F_v = 1011 \cdot N/mm^2$

또한 수직하중에 의한 스프링 응력은 다음과 같다.

$$t_p = \frac{8 \cdot P_v \cdot D}{p \cdot d^3}$$

상기의 메디안 강도와 메디안 응답값을 구한 후, 이를 다음의 전단공식에 대입하면, 메디안 내진강도계수를 구할 수 있다.

$$t_m = t_p \cdot (1 + \frac{Q}{P_v} \times R_T)$$

얻어진 메디안 내진강도계수는 아래와 같다.

$F_S = 4.4$

<u>내진강도계수의 불확실성</u>

기기 내진검증시 사용된 스프링의 전단응력산출공식에 의하면, 스프링 수직력이 스프링 전단응력에 큰 영향을 미치지 않는다. 스프링 수직력은 주로 디젤발전기 자중의 영향에 기인하므로 이 수직력은 지진력에 의한 응답의 분산도에는 거의 영향을 주지 못한다. 따라서 스프링에 발생하는 전단응력의 분산도는 주로 수평

응답에 기인한다고 가정하였다. EPRI TR-103959 에 근거하여 스프링 내력은 보수적으로 0.12 의 불확실성을 가진다고 가정하였다. 반면 스프링 내력에 대한 랜덤성은 없다고 본다.

$b_R = 0.0$

$b_{U\_strength} = 0.12$

$b_{U\_DL} = 0.03$

$b_{U\_equation} = 0.05$

$b_U = \sqrt{(b_{U\_strength}{}^2 + b_{U\_DL}{}^2 + b_{U\_eqn}{}^2)} = 0.13$

비탄성에너지흡수계수

진동격리장치의 스프링 파손은 취성파괴로 간주되어, 내진강도계수 평가시 스프링의 극한강도를 사용하였다. 따라서 비탄성에너지 흡수능력을 표현하는 비탄성에너지흡수계수는 1.0 이고 이와 관련된 불확실성이나 랜덤성은 없다.

기기응답에 내재한 보수성 평가

지진동이 유발하는 기기응답은 해석적인 과정을 통하여 얻어지는 바, 이 과정에 내재한 보수성을 평가하였다. 보수성의 원인은 사용된 감쇠비, 사용된 내진해석모델, 모드응답의 조합, 지진분력의 조합 등에서 찾을 수 있다.

기기 감쇠계수

통상 감쇠비는 실험을 통하여 얻어지지만, 본 분석에서는 mean-1σ에 대응하는 감쇠비로서 보수적인 값인 15% 감쇠비를 사용하였다. 메디안 속도 증폭계수는 15% 감쇠비에서 1.2 이므로 기기 감쇠계수와 관련한 불확실성은 다음과 같이 평가되었다.

$F_d = 1.0$

$b_R = 0.0$

$b_U = \ln(\frac{AF_{15\%}}{AF_{50\%}}) = \ln(\frac{1.20}{1.05}) = 0.13$

기기 모델링계수

디젤발전기는 단자유도계처럼 거동하고, 사용된 스프링 강성도값은 시험에 의해 검증되었다. 이 경우, 계산된 진동수에 내재된 불확실성을 0.10, 모드 형태에 내재한 불확실성을 0.05 로 평가하였다.

$F_M = 1.0$

$b_R = 0.0$

$b_{MF} = \ln(\frac{S_{a\_2.76Hz}}{S_{a\_2.5Hz}}) = \ln(\frac{0.200g}{0.176g}) = 0.13$

$b_{MS} = 0.05$

$b_U = \sqrt{(b_{MF}{}^2 + b_{MS}{}^2)} = 0.14$

기기 모드조합계수

단일모드이므로 모드조합과 관련된 보수성은 없으며 그 불확실성은 보수적으로 0.05 를 취하였다.

$F_{MC} = 1.0$

$b_R = 0.0$

$b_U = 0.05$

기기 지진분력조합계수

발생된 변위에 대해 제곱합의 제곱근 조합을

메디안으로 간주한다. 반면, 절대합을 3σ로 간주하면 지진분력조합과 관련된 불확실성은 다음과 같다.

$F_{ECC} = 1.0$
$b_R = 0.0$

수평변위에 대한 불확실성은 다음과 같다.

$$b_{U\_H} = \frac{1}{3}\ln(\frac{\Delta_{ABS}}{\Delta_{SRSS}}) = \frac{1}{3}\ln(\frac{0.332''}{0.253''}) = 0.09$$

수직변위에 대한 불확실성은 다음과 같다.

$$b_{U\_V} = \frac{1}{3}\ln(\frac{\Delta_{ABS}}{\Delta_{SRSS}}) = \frac{1}{3}\ln(\frac{0.294''}{0.169''}) = 0.18$$

$b_U = 0.12$

구조응답에 내재한 보수성 평가

<u>지반응답스펙트럼형태계수</u>

디젤발전기가 설치된 건물의 주요 진동모드인 7Hz 부근에서의 지반응답스펙트럼의 변동의 랜덤성은 0.2 으로 간주된다. 지반응답스펙트럼형태계수의 불확실성값은 건물의 지진취약도 계산에서 사용했던 0.05 를 사용하였다.

$F_{SA} = 1.0$
$b_R = 0.2$
$b_U = 0.05$

<u>수평지진방향분력계수</u>

EPRI TR-103959 에서 권고하는 0.10 의 랜덤성을 사용하였다.

$F_{HED} = 1.0$
$b_R = 0.10$
$b_U = 0.0$

<u>기타 구조물 응답영향계수</u>

디젤발전기의 고유 진동수 부근에서 구조물에 의한 지반운동의 증폭은 거의 없으므로 불확실성은 보수적으로 0.05 로 간주한다.

$F_{ECC} = 1.0$
$b_R = 0.0$
$b_U = 0.05$

지진취약도 결과

앞에서 구한 모든 안전계수를 서로 곱하고, 관련 불확실성 및 랜덤성의 각각을 제곱합의 제곱근법으로 조합하면, 다음과 같은 전체안전계수, 전체불확실성, 전체 랜덤성을 얻을 수 있다.

$F_O = 4.4$
$b_R = 0.26$
$b_U = 0.24$

전체 안전계수에 0.2g 의 최대지반가속도를 곱하면 메디안 가속도 내력을 얻을 수 있다.

$A_m = F_m \times PGA = 0.88 \cdot g$

최종 디젤발전기의 최종 HCLPF 값은 다음과 같다.

$$A_{HCLPF} = A_m \times e^{-1.65\cdot(b_R + b_U)} = 0.39 \cdot g$$

각 계수의 값들은 다음 표에 수록되어 있다.

인자	계수	b_R	b_U
F_S	4.4	0.0	0.13
F_m	1.0	0.0	0.0
F_d	1.0	0.0	0.13
F_M	1.0	0.0	0.14
F_{MC}	1.0	0.05	0.0
F_{ECC}	1.0	0.12	0.0
F_{SA}	1.0	0.2	0.05
F_{HED}	1.0	0.10	0.0
F_O	4.4	0.26	0.24

진동격리장치의 역할로 디젤발전기의 진동수가 건물의 지배 진동수로부터 상당이 편기되어 입력 지진이 대폭 감소되었다. 그러나 진동격리장치의 과도한 변위가 스프링의 내력을 지배하였다.

진동격리장치에 설치된 기기의 내진 보강 대책으로써 설비의 측면에 범퍼를 두는 사례가 많다. 그러나 일반적인 디젤발전기는 하나의 설비로 이루어지는 경우는 드물고, 윤활유 공급 시스템, 냉각 시스템, 연료공급 시스템, 공기 압축시스템, 소음제거시스템 등 다양한 부속설비를 가지고 있어, 보강을 위한 여유 공간을 확보하기가 매우 어렵다.

또한 현행 내진검증 기준이 수립되기 이전에 건설된 원전의 경우, 미국 원자력규제위원회는 안전에 중요한 기기에 대해 내진재검증을 요구하는 바, 이 문제의 해결을 위하여 지진경험데이터베이스의 이용을 허용하고 있다. 그러나 진동격리장치에 설치된 기기는 예외기기로 분류되어 별도의 평가가 요구되는 바, 본 평가 사례는 진동격리장치의 내진성능을 가늠하는 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 '가동원전 주기적 안전성평가 사업'의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Seismic Qualification of PC 2-5 Engine, Qualification Description, by S.E.M.T. Pielstick, M263-EP-A01-02 Rev.1.
2. Seismic Qualification of PC 2-5 Engine - EDG Engine Qualification Synthesis Report, by S.E.M.T. Pielstick, M263-ER-A01-04 Rev.1.
3. Seismic Qualification of PC 2-5 Engine - Seismic Analysis of the Engine, by S.E.M.T. Pielstick, M263-EP-A01-07 Rev.1.
4. EDG Units Generator Dynamic Qualification Report, by Gegelec, M263-ER-A01-01, Rev. 1.
5. Resilient Mounting Calculation, by S.E.M.T. Pielstick, M263-DG-E01-03, Rev. 1.
6. Common Skid Calculation, by S.E.M.T. Pielstick, M263-DG-E-01-02.
7. Seismic Qualification of Piping, MT6-94/221.