

기기의 면진을 통한 원전의 내진안전성 향상 Improvement of Seismic Safety of Nuclear Power Plants by Equipment Isolations

전영선*
Choun, Young Sun

최인길**
Choi, In Kil

ABSTRACT

Seismic isolation systems can improve the seismic safety of nuclear power plants by decreasing seismic force transmitted to structures and equipment. This study evaluates the effectiveness of equipment seismic isolation systems by the comparison of core damage frequencies in non-isolated and isolated cases. It can be found that the seismic isolation systems increase seismic capacity of nuclear equipment and decrease core damage frequencies significantly. The effect of equipment isolation is more significant in the PGA range of 0.3g to 0.5g.

1. 서론

지진은 다른 하중과는 달리 구조물, 계통 및 기기의 기능을 일시에 완전히 상실케 할 수 있을 뿐만 아니라 하중의 지속시간이 대단히 짧아 작업자들이 대응할 수 있는 여유가 거의 없기 때문에 더욱 위험하다고 할 수 있다. 최근 1999년도에 대만, 터키 등지에서 발생했던 지진에서도 몇몇 발전설비들이 파손되어 그 기능이 상실되는 사고가 보고된 바가 있다⁽¹⁻⁴⁾. 다른 전력설비와 달리 원자력발전소는 그 안전성을 최우선의 목표로 삼고 있으므로 발전소 내의 구조물, 계통 및 기기의 지진에 대한 안전성은 설계단계에서 충분히 확보하여야 한다.

그러나 모든 설비가 설계기준지진에 부합하도록 내진설계가 완전하게 이루어졌다고 하더라도 설계기준지진보다 큰 지반운동에 대해서 지진에 취약한 설비는 손상을 입을 가능성이 많다. 또한 내진설계 기준이 강화되고 관련 기술이 급진적으로 발전함에 따라서 운영 중인 발전소 설비의 내진성능을 재산정하여 내진 안전성을 재평가하고 내진성능을 향상시켜야 할 필요도 있을 것이다.

면진장치를 사용하여 기기에 전달되는 지진력을 감소시킴으로써 기기의 내진성능을 향상시키고 원전을 비롯한 다른 발전설비의 지진에 대한 안전성을 향상시키기 위한 기술개발이 수행되어 왔다⁽⁵⁻⁷⁾. Kelly⁽⁵⁾는 고무베어링, 마찰-감쇠 시스템, 에너지 흡수장치 등과 같은 면진시스템에 대한

* 정회원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부, 책임기술원

** 정회원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부, 선임연구원

소형기기들의 응답실험을 통하여 소형기기들의 지진응답이 감소함을 입증하였으며, Hall⁽⁶⁾은 증기 발생기와 같은 대형 기기의 거동을 실험적으로 평가함으로써 대형기기에 면진장치를 적용할 수 있는 가를 검토하였다. Ebisawa 등⁽⁷⁾은 면진장치를 원전기기에 적용했을 때의 효율성과 경제성을 평가하고 실험적으로 면진기기의 내진성능을 입증하였다.

본 연구에서는 면진시스템 등과 같은 지진력 저감시스템을 원전기기에 적용하였을 때 원전의 안전성에 미치는 영향을 평가하였다. 면진시스템을 도입한 경우와 도입하지 않았을 경우에 대해 각각 지진 PSA를 수행하여 원자로 노심의 손상빈도를 구하고, 그 변화량을 비교·평가함으로써 원전설비에 적용할 면진시스템의 효율성을 분석하였다.

2. 지진유발 초기사건

지진으로 인해 원자력발전소에서 발생하는 초기사건은 기기 및 구조물에 대한 취약도 분석, 계전기 오동작 및 고장영향 분석 결과 다음의 6가지로 분류하는 것이 보통이다⁽⁸⁾.

- 필수전원 상실사건 (Loss of Essential Power : LEP)
- 2차측 열제거 상실사건 (Loss of Secondary Heat Removal : LHR)
- 1차측 기기냉각수/필수냉수 상실사건 (Loss of Component Cooling Water/Essential Chilled Water : LOCCW)
- 소형 냉각재 상실사건 (Small LOCA : SLOCA)
- 소외전원 상실사건 (Loss of Offsite Power : LOOP)
- 일반 과도사건 (General Transient : GTRN)

소외전원이 상실된 상태에서 안전관련 계통 및 기기의 필수전원이 상실될 수 있는 사고를 유발하는 고장이 발생될 수 있으며, 지진으로 인해 복수저장탱크(Condensate Storage Tank)와 내진등급이 낮은 대체 급수원의 기능이 상실될 수 있다. 또한 지진으로 인해 필수용수 펌프의 콘크리트 앵커부분이 파손되어 기기냉각수 및 필수냉수의 상실사고가 유발될 수 있으며, 계측기 연결관에 파단사고가 발생하여 소형 냉각재 상실 사고를 유발시킬 수 있다.

일반적으로 원전의 소외전원과 관련된 구조물 및 기기는 지진에 대한 취약도 값이 대단히 작다. 특히, 절연 애자와 같은 내진능력이 없는 부품은 지진에 의해 쉽게 파손되며 그로 인해 소외전원이 상실된다. 또한 비내진 등급의 기기들이 지진으로 인해 고장을 일으킬 수 있다. 이 경우에는 발전소 내의 비안전 관련 전원계통과 모든 비내진 등급 기기들의 기능이 상실될 수 있다.

표 1은 영광 5, 6호기의 지진유발 초기사건들의 발생빈도와 노심손상빈도(Core Damage Frequency; CDF)를 정리한 것으로서 일반과도사건은 발생빈도는 가장 높으나 노심손상빈도는 크지 않으며, 노심손상빈도에 가장 큰 영향을 미치는 지진유발 초기사건은 필수전원상실사건으로서 전체의 50%이상을 차지함을 알 수 있다.

3. 노심손상빈도 산정

지진으로 인한 노심의 손상위험도를 계산하기 위한 절차는 그림 1과 같다⁽⁹⁾. 표 2는 국내 원자력발전소의 확률론적 지진안전성 평가 결과로서 대부분의 경우에 작은 노심손상빈도를 나타내고

표 1. 지진사건에 따른 노심손상빈도

초기사건	초기사건빈도	노심손상빈도	비고
필수전원상실 (LEP)	3.68E-06	3.68E-06	직접 노심손상 유발
2차측 열제거상실 (LHR)	1.16E-06	1.16E-06	직접 노심손상 유발
1차 기기 냉각수/필수 냉수 상실 (LOCCW)	2.48E-06	4.25E-08	2차 사건수목 연계
소형 냉각재 상실 (SLOCA)	3.82E-08	3.82E-08	직접 노심손상 유발
소외전원 상실 (LOOP)	1.12E-04	1.20E-06	2차 사건수목 연계
일반과도사건 (GTRN)	2.79E-03	8.73E-07	2차 사건수목 연계
계			6.96E-06

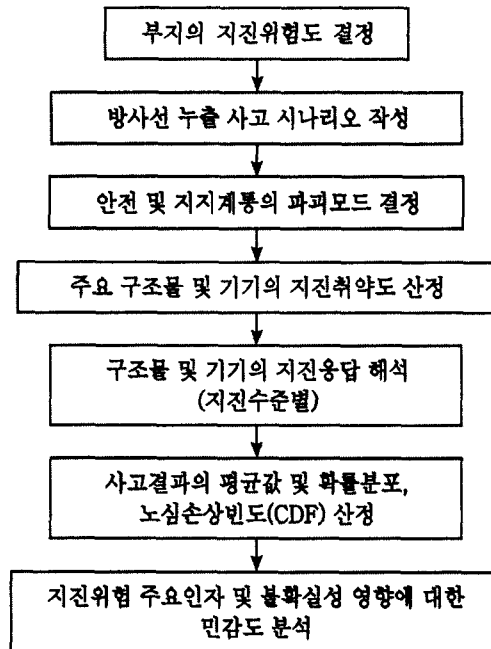


그림 1. 노심손상빈도 산정 절차

있지만, 월성 2, 3, 4호기의 경우에는 비교적 큰 값을 보여주고 있어 기기의 내진성능을 향상시킬 필요가 있다.

4. 변진장치의 영향

그림 1에서 보는 바와 같이 지진에 대한 노심손상빈도는 부지의 지진위험도와 기기 및 구조물의 지진취약도에 의해서 산정된다. 그러므로 노심손상빈도를 감소시키기 위해서는 지진에 비교적

표 2. 국내 원전의 지진 PSA 결과

호기	노심손상빈도	호기	노심손상빈도
고리 1, 2	SMA	울진 1, 2	미수행
고리 3, 4	3.20E-5	울진 3, 4	1.46E-5
영광 1, 2	1.20E-5	울진 5, 6	6.21E-6
영광 3, 4	1.40E-5	월성 1	수행중
영광 5, 6	6.96E-6	월성 2, 3, 4	1.97E-4

취약한 기기 및 구조물의 내진성능을 향상시킬 필요가 있으며 이를 위해서 기기 및 구조물에 전달되는 지진력을 감소시킬 수 있는 면진시스템을 설치하는 방안을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 안전관련 주요 기기 및 구조물에 면진장치를 설치하였을 때의 노심손상빈도를 비교·평가함으로써 면진장치의 효율성을 검토하였다.

4.1 주요 구조물 및 기기

그림 2는 영광 5, 6호기 원전에서 지진 유발 노심손상에 영향을 미치는 기기 및 구조물의 기여도를 도시한 것으로서 디젤발전기(29.8%), 소외전원(18.3%), 복수저장탱크(17.7%), 배터리 랙(9.3%) 및 배터리 충전기(7.2%)의 순으로 기여도가 높다. 이들 5가지 기기 및 구조물의 파손모드, HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure) 및 고장의 영향 등은 표 3과 같다. 표에서부터 노심손상에 많은 영향을 미치는 기기는 주로 필수전원 상실사건과 관련이 있으며 HCLPF 값도 크지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이들 5가지 기기 및 구조물의 내진성능 향상이 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하였다.

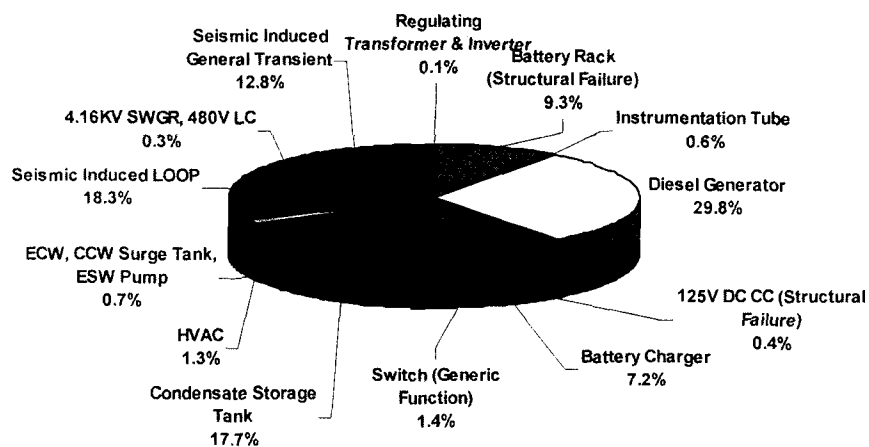


그림 2. 지진사건 노심손상빈도에 미치는 기기별 기여도

표 3. 지진유발 고장모드 및 영향

기기/구조물	파손모드	HCLPF	고장시 유발 가능성	관련초기사건
Diesel Generator	Concrete Coning	0.38	소외전원상실 하에서 모든 AC전원 상실	필수전원상실
			DG내로 유입되는 기기냉각수 배관 파손	기기냉각수상실
Off-site Power	Functional	0.15	회복시간 내에 회복 불가능한 소외전원 상실	소외전원상실
Condensate Storage Tank	Structural	0.41	보조급수펌프의 유량상실로 2차측 열제거 불가능	2차측 열제거 상실
Battery Rack	Structural	0.72	소외전원 상실 후 DG의 고장과 함께 파손되면 125V DC 전원계통 상실	필수전원상실
Battery Charger	Functional	0.41	과전류계전기의 오작동으로 125V DC 전원 상실	필수전원상실
	Structural	0.52	충전기 파손으로 125V DC 전원 상실	

4.2 지진취약도 평가

그림 3은 필수전원 상실사건의 경우 앞에서 기술한 5개의 주요 기기 및 구조물에 면진장치를 설치하여 지진력을 50% 감소시켰을 경우와 면진장치를 설치하지 않은 경우의 지진취약도 곡선을 도시한 것으로서 면진장치를 사용함으로써 기기 및 구조시스템의 지진취약도를 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 하나의 기기에 면진장치를 적용하는 것보다 모든 기기에 적용하는 것이 보다 효과적임을 쉽게 알 수 있다. 하나의 기기에 면진장치를 설치할 경우에는 필수전원 상실사건의 경우 디젤발전기를 면진대상으로 하는 것이 효과적임을 보여준다.

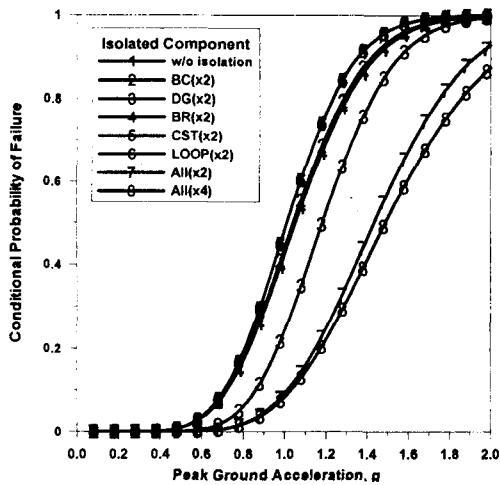


그림 3. 기기면진에 따른 지진취약도 곡선 (LEP의 경우)

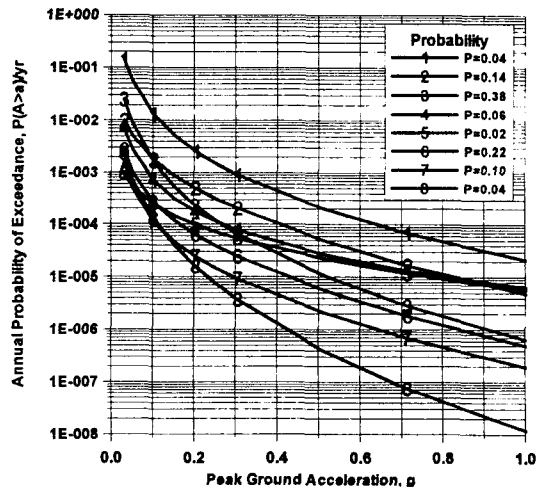


그림 4. 지진재해도 곡선 (영광 5, 6호기)

4.3 노심손상빈도 평가

면진장치의 적용으로 인한 주요 기기 및 구조물의 내진성능 향상이 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하기 위해서 영광원전 5, 6호기에 대한 지진 PSA를 수행하였다. 해석에서 사용한 지진 재해도 곡선은 그림 4와 같다.

그림 5와 6은 면진장치의 적용으로 인한 노심손상빈도의 변화를 도시한 것으로서 가로축은 최대지반가속도, 세로축은 면진장치를 설치하지 않은 경우에 대한 비율을 나타낸다. 그림 5는 필수 전원 상실사건의 경우에 기기의 면진에 따른 노심손상빈도의 변화를 보여주고 있다. 필수전원 상실사건으로 인한 노심손상에는 디젤발전기, 배터리 랙 및 배터리 충전기 등이 영향을 미치며 특히 디젤발전기는 중요한 역할을 한다. 그러므로 디젤발전기에 면진장치를 적용하여 내진성능을 향상시키면 노심손상빈도를 상당히 줄일 수 있다. 예를 들면, 최대지반가속도 0.5g에 대하여 노심손상빈도 1.61E-07가 9.98E-09로, 최대지반가속도 1.0g에 대하여 2.04E-06가 6.16E-07로 각각 감소한다. 그림 5로부터 디젤발전기에 면진장치를 적용한 경우는 비면진의 경우에 비하여 최대지반가속도 0.3g와 0.6g에 대해서 노심손상빈도를 각각 99%, 90%정도 줄일 수 있으며 2.0g에 대해서 최소한 50%정도 감소시키는 것으로 나타났다. 모든 대상기에 면진장치를 사용하였을 경우에는 80% 이상의 노심손상빈도 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

그림 6은 면진장치로 인한 지진력저감이 발전소의 노심손상빈도에 미치는 영향을 도시한 것으로서 모든 지진유발 초기사건을 반영하였다. 5가지의 주요 기기 및 구조물에 모두 면진장치를 사용하고 지진력 저감비를 25%로 가정했을 때의 노심손상빈도는 면진장치를 도입하지 않았을 때에 비해 최저 약 45%로 감소되며, 지진력 저감비를 50%, 75%로 가정했을 때에는 약 29%, 26%로 감소하여 결국 2~3배 정도 내진 안전성이 향상되는 것으로 나타났다. 일반적으로 최대지반가속도가 클수록 면진의 영향이 큰 것으로 나타났다. 국내원전의 설계기준인 0.2g에 대해서는 약 5%정도 노심손상빈도가 감소하며 0.3g의 최대지반가속도에 대해서는 노심손상빈도가 약 30%정도 감소시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

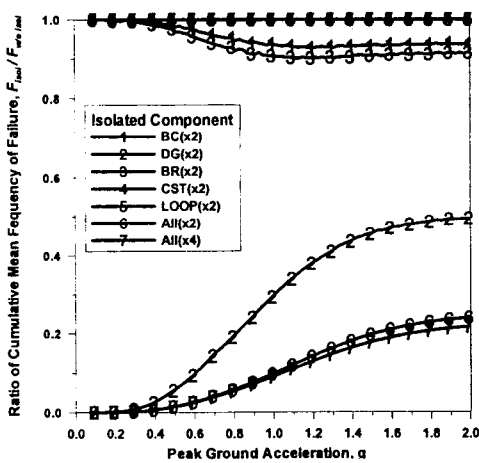


그림 5. 면진에 의한 노심손상빈도의 감소율 (LEP의 경우)

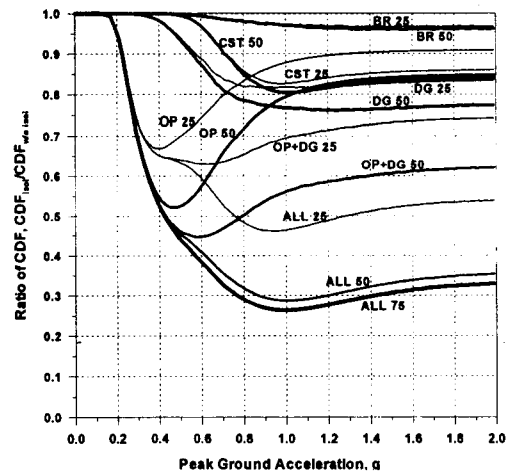


그림 6. 지진력 저감과 노심손상빈도

5. 결 론

본 연구에서는 면진시스템을 원전 기기 및 구조물에 적용하였을 때 원자로 노심의 손상빈도에 미치는 영향을 분석함으로써 원전의 내진 안전성을 향상시키기 위한 면진의 효율성을 평가하였다. 노심손상빈도에 영향을 크게 미치는 주요 기기 및 구조물을 면진대상으로 선정하고 지진력 저감율과 노심손상빈도와의 관계를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 기기 및 구조물에 면진시스템을 사용하면 지진취약도를 크게 향상시키고 노심손상빈도를 크게 줄일 수 있어 원전의 내진안전성을 향상시킬 수 있다.
- 지진유발 필수원상실 사건의 경우 디젤발전기에 면진장치를 사용하면 비면진에 비하여 노심손상빈도를 50% 이상 줄일 수 있다. 특히 최대지반가속도 0.3g 이하에서는 99% 정도까지 감소시킬 수 있다.
- 모든 지진유발 초기사건을 고려할 경우 최대지반가속도 0.2g와 0.3g에서 노심손상빈도를 각각 5%, 30% 정도 감소시킬 수 있다.
- 영광 5, 6호기 원전의 경우 최대지반가속도가 0.3~0.5g 범위에서 기기의 면진효과가 가장 크게 나타났다.

결론적으로 본 연구를 통하여 원전의 안전관련 기기 및 구조물의 내진성능은 면진시스템을 적용함으로써 향상시킬 수 있으며 기기 및 구조물의 내진성능 향상은 원전의 내진 안전성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. http://921.ncree.gov.tw/eng_report/lifeline/lifeline.html.
2. <http://www.eqe.com/revamp/taipei8a.htm>.
3. http://www.asce.org/pdf/kocaeli_turkey_report.pdf.
4. http://www.energy.ca.gov/reports/2002-01-10_600-00-031/APPENDICIES/600-00-031-A3-17.pdf.
5. Kelly, J.M., "The Influence of Base Isolation on the Seismic Response of Light Secondary Equipment", UCB/EERC-81/17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1982.
6. Hall, D., "The Use of Base Isolation and Energy-Absorbing Restrainers for the Seismic Protection of a Large Power Plant Component", EPRI NP-2918, Electric Power Research

Institute, Palo Alto, California, 1983.

7. Ebisawa, K., Ando K., and Shibata, K., "Progress of a Research Program on Seismic Base Isolation of Nuclear Components" , Nuclear Engineering and Design, Vol.198, 2000, pp. 61-74.
8. 임학규 외, "영광 5,6호기 PSA Notebook [외부사건분석: 본문]" , 한국전력공사 전력연구원, 2001.
9. Bohn, M.P. and Lambright, J.A., "Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150" , NUREG/CR-4840, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1990.