

## 원전 기기의 지진력 저감이 노심손상빈도에 미치는 영향 평가 Effect of Seismic Isolation of Nuclear Plant Equipment on Core Damage Frequency

전영신, 최인길  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

### 요 약

기기 및 구조물에 전달되는 지진력을 감소시킴으로써 지진에 대한 원전의 안전성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 지진력저감 시스템을 원전기기에 적용하였을 때 원자로 노심의 손상빈도를 분석함으로써 지진력저감 시스템의 효율성을 평가하였다. 지진유발 초기사건으로서 필수전원상실 사건을 선정하였으며 노심손상빈도에 많은 영향을 미치는 5종류의 기기 및 구조물을 면진대상으로 선정하였다. 평가결과 기기 및 구조물에 지진력 저감시스템을 사용함으로써 지진취약도가 크게 향상되며 노심손상빈도가 크게 감소됨을 확인하였다. 디젤발전기에 면진장치를 사용한 경우 비면진에 비하여 노심손상빈도를 50%이상 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 특히 최대지반가속도 0.3g이하에서는 99% 정도까지 노심손상빈도가 감소되었다. 그러나 지진력 저감율을 2배 이상 증가시키더라도 노심손상빈도의 감소율은 크게 줄어들지 않는 것으로 나타났다

### Abstract

Safety of nuclear power plants can be enhanced by decreasing seismic force transmitted to structures and equipment. The effectiveness of seismic isolation systems is evaluated by the comparison of core damage frequencies between non-isolated and isolated cases. Seismic-induced loss of essential power is considered and four equipment and one structure important to core damage are selected for comparison. It can be found from the result that the seismic isolation system increases seismic capacity of nuclear facilities and decreases core damage frequencies significantly. By introducing seismic isolation system to diesel generator, at least, the core damage frequency may decrease more than fifty percents. Specially, ninety-nine percents of reduction may be achieved for peak ground acceleration less than 0.3g. However, the core damage frequency may not decrease significantly even though the great reduction of seismic force is accomplished.

## 1. 서론

지진으로 인해 원자력 발전소가 손상을 입은 경우는 다행히도 아직까지 발생하지는 않았지만 원자력발전소가 운영되는 한 그 위험성은 상존한다고 말할 수 있다. 지진은 다른 사건과는 달리 구조물, 계통 및 기기의 기능을 일시에 완전히 상실케 할 수 있을 뿐만 아니라 지속시간이 짧아 작업자들이 대응할 수 있는 여유가 거의 없기 때문에 더욱 위험하다고 할 수 있다. 그러므로 원자력 발전소의 구조물, 계통 및 기기의 지진에 대한 안전성은 설계단계에서 충분히 확보하여야만 한다.

그러나 설계기준지진에 부합하도록 내진설계가 완전하게 이루어졌다고 하더라도 설계기준 지진보다 큰 지반운동에 대해서 발전소의 모든 설비는 손상을 입을 가능성이 있다. 또한 내진설계 기준이 강화되고 관련 기술이 급진적으로 발전함에 따라서 현재 운영 중인 발전소 설비의 내진성능을 재평가하여 경우에 따라서는 내진성능을 향상시켜야 할 필요도 있을 것이다.

이러한 여건을 감안하여 기기에 전달되는 지진력을 감소시킴으로써 기기의 내진성능을 향상시키고 원전을 비롯한 다른 발전설비의 지진에 대한 안전성을 향상시키기 위한 기술개발이 수행되어 왔다[1-3]. Kelly[1]는 고무베어링, 마찰-감쇠 시스템, 에너지 흡수장치 등과 같은 다른 형태의 면진시스템에 대하여 소형 기기들의 응답을 실험적으로 구하여 소형 기기들의 지진응답이 감소함을 입증하였으며, Hall[2]은 증기발생기와 같은 대형 기기의 거동을 실험적으로 평가함으로써 대형기기에 면진장치를 적용할 수 있는 가를 검토하였다. Ebisawa 등[3]은 원전기기에 면진장치를 적용하기 위한 연구를 1991년부터 2000년까지 10년동안 수행하였다. 그들은 면진장치를 원전기기에 적용했을 때의 효용성과 경제성을 평가하였고 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 지진력 저감시스템의 효용성을 분석하였다.

## 2. 지진유발 초기사건

지진으로 인해 발생하는 초기사건은 기기 및 구조물에 대한 취약도 분석, 계전기 오동작 및 고장영향 분석 결과 다음의 6가지로 분류할 수 있다[4].

- 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)

## 2.1 필수전원 상실사건

지진으로 유발되는 필수전원 상실사건에서는 소의전원이 상실된 상태에서 안전관련 계통 및 기기의 필수전원 상실사고를 유발하는 고장을 의미하는 것으로서 다음과 같은 사고가 포함된다.

- 4.16KV 교류 모션 캐비닛 내 계전기의 오동작과 가용시간내에 해당 계전기를 리셋시키기 위한 운전원의 조치 실패
- 480V 부하의 센터 캐비닛 내 계전기의 오동작과 가용시간 내에 해당 계전기를 리셋시키기 위한 운전원의 조치 실패
- Regulating Transformer 및 Inverter 관련 계전기의 오동작과 가용시간 내에 해당 계전기를 리셋시키기 위한 운전원의 조치 실패
- 지진으로 인한 비상디젤발전기의 콘크리트 앵커부분 파손
- 비상 디젤발전기의 고장과 함께 배터리 랙의 파손
- 125V 직류모션 파손
- 지진 유발 배터리 충전기와 관련된 계전기의 오동작과 가용시간내에 해당 계전기를 리셋시키기 위한 운전원의 조치 실패
- 지진으로 인한 배터리 충전기의 파손
- 지진으로 인한 공기조화계통 상실로 전기기기실의 기능 상실
- 스위치 고장

## 2.2 2차측 열제거 상실 사고

지진으로 인해 복수저장탱크(Condensate Storage Tank)의 기능이 상실되면 2차측 열제거 기능이 상실될 수 있다. 이 경우에는 복수저장탱크보다 내진등급이 낮은 대체 급수원도 이용 불가능할 수 있으므로 결국 2차측 열제거를 수행할 수 없게 된다. 이때 주입 및 방출운전을 통해 1차측 압력 및 유량을 제어함으로써 안전정지 상태를 유지하고 사고를 완화시킬 수도 있지만 지진사건 하에서 운전원의 주입 및 방출운전을 통한 감압 및 감온 운전은 수행할 수 없다고 가정할 수 있다. 그러므로 결국 복수저장탱크의 파손은 2차측 열제거 기능 상실에 따른 노심 손상을 유발한다고 할 수 있다.

## 2.3 1차 기기냉각수/필수냉수 상실사고

지진사건으로 인해 기기냉각수/필수냉수 상실사고가 유발될 수 있는 경우는 다음과 같다.

- 필수용수 펌프의 콘크리트 앵커부분 파손
- 기기 냉각수계통 완충탱크의 콘크리트 앵커부분 파손
- 필수냉수계통의 압축탱크 파손
- 필수냉수계통의 필수냉각기 파손
- 필수냉수 펌프의 볼트 파손

지진으로 인해 필수용수펌프의 콘크리트 앵커부분이 파손되면 기기냉각수계통의 열교환기에 해수를 공급하지 못하게 되어 결국 1차 기기냉각수계통의 기능이 상실될 수 있다. 또한 지진 유발 1차 기기냉각수 완충탱크의 앵커부분이 파손되면 기기 냉각수 계통의 유량 및 압력이 상실되어 기기냉각수계통이 상실될 수 있다. 지진유발 필수 냉수계통의 압축탱크, 필수 냉각기 및 필수냉수펌프의 파손은 바로 필수 냉수계통의 상실을 유발하여 결국에는 기기 냉각수 펌프를 포함한 모든 안전 주입 펌프, 모터 구동 보조급수 펌프실의 온도를 상승시켜 해당 기기의 기능상실을 초래할 수 있다. 이와 같이 1차 기기냉각수 및 필수 냉수계통의 상실은 결국 1차 기기 냉각수계통의 상실과 직결된다.

## 2.4 소형 냉각재 상실 사고

지진으로 인해 계측기 연결관에 파단사고가 발생하면 소형 냉각재 상실 사고를 유발시킬 수 있다. 일반적으로 소형 냉각재 상실 사고가 노심 손상으로 직결되지 않으며 지진유발 소형 냉각재 상실 사건의 발생빈도가 매우 낮기 때문에 사건수목에 연계하여 사고완화 과정을 상세히 분석하지 않는 것이 보통이다.

## 2.5 소외전원 상실 사고

원전의 소외전원과 관련된 구조물 및 기기는 일반적으로 지진에 대한 취약도 값이 대단히 낮다. 특히, 절연 애자와 같은 내진능력이 없는 부품의 파손은 소외전원 상실을 쉽게 초래할 수 있다. 만일 소외전원 상실시 비상 디젤발전기의 사용이 불가능하다면 바로 소내정전 사건으로 인한 노심손상을 일으킬 수 있다.

## 2.6 일반 과도사건

비내진 등급의 기기들이 지진으로 인해 고장을 일으켜 원자로의 정지를 유발할 수도 있다. 이 사건에서는 소외 전원이 상실되지 않은 상태에서 단지 발전소 내의 비안전 관련 전원계통과 모든 비내진 등급 기기를 이용할 수 없다고 가정한다.

## 3. 노심손상빈도 산정 절차

지진으로 인한 노심의 손상위험도를 계산하기 위해서 그림 1과 같은 7단계의 절차를 거친다[5].

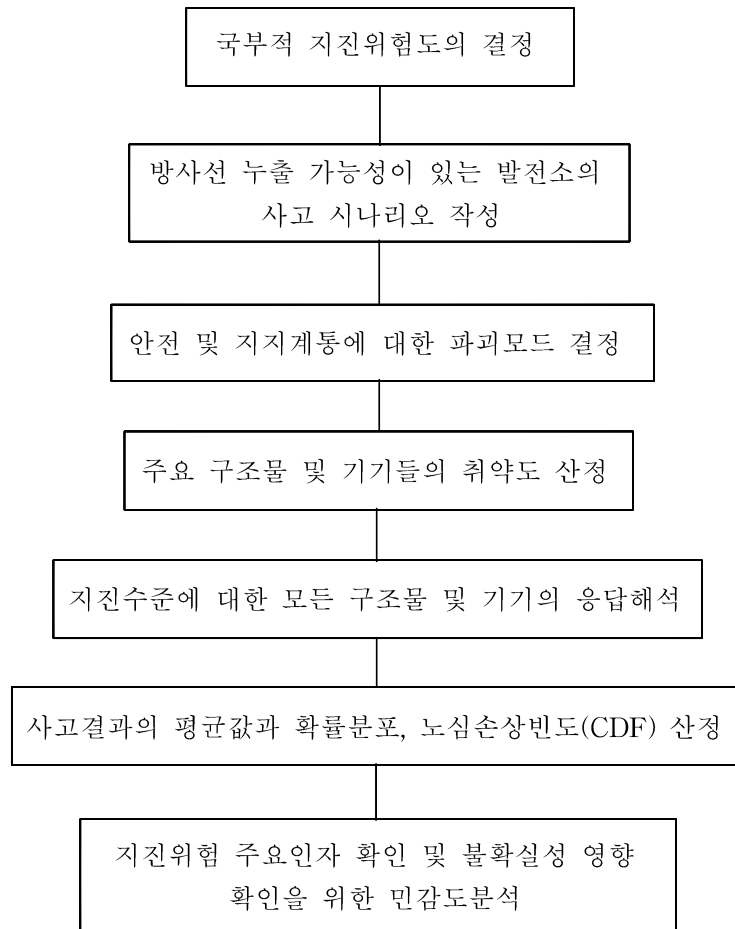


그림 1 노심손상빈도 산정 절차

#### 4. 면진장치의 영향 평가

앞에서 기술한 바와 같이 지진으로 인해 발생할 수 있는 노심손상빈도는 부지의 지진위험도와 기기 및 구조물의 지진취약도에 의해서 산정된다. 그러므로 노심손상빈도를 감소시키기 위해서는 기기 및 구조물의 지진에 대한 취약도를 향상시킬 필요가 있다. 이를 위해서 기기 및 구조물에 전달되는 지진력을 감소시키기 위한 면진시스템을 설치하는 방안을 고려할 수도 있다. 여기에서는 주요 기기 및 구조물에 면진장치를 설치하였을 때 노심손상빈도에 미치는 영향을 검토하였다.

##### 4.1 지진유발 초기사건

지진으로 인해 발생할 수 있는 초기사건으로 앞에서 기술한 6가지 사건을 고려하였다. 영광

5, 6호기의 경우에 각 사건들의 발생빈도와 노심손상빈도는 표 1과 같이 산정되었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 필수전원상실사건(LEP)으로 인한 노심손상빈도는 3.68E-06으로서 다른 사건에 비하여 노심손상에 더 큰 영향을 미치고 있다. 일반과도사건은 발생빈도는 높으나 노심의 손상에는 큰 영향을 주지 못한다. 그러므로 여기에서는 노심손상에 가장 큰 영향을 미치는 필수전원상실사건에 대해서만 분석을 하였다.

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

#### 4.2 면진대상 기기

그림 2는 지진사건이 발생하였을 때 노심손상에 영향을 미치는 기기 및 구조물의 기여도를 도시한 것이다. 여기에서는 면진대상으로서 노심손상 기여도가 높은 기기 및 구조물 5가지 즉, 디젤발전기(29.8%), 소외전원(18.3%), 복수저장탱크(17.7%), 배터리 랙(9.3%) 및 배터리 충전기(7.2%)를 선정하였다.

선정된 기기 및 구조물의 지진유발 고장모드와 그 영향은 표 2에 요약한 바와 같다. 표에서부터 노심손상에 많은 영향을 미치는 기기는 주로 필수전원 상실사건과 관련이 있으며 HCLPF 값도 크지 않음을 알 수 있다.

#### 4.3 면진장치의 영향

면진장치가 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하기 위해서 영광원전 5, 6호기에 대한 지진 PSA를 수행하였다. 해석에서 사용한 지진재해도 곡선과 기기의 지진취약도 곡선은 각각 그림 3, 4와 같다. 그림 4는 앞에서 선정한 5개의 대상기기에 대하여 면진장치를 통하여 지진력을 50% 감소시켰을 경우와 면진장치를 설치하지 않은 경우의 지진취약도 곡선을 도시한 것이다. 그림으로부터 면진장치를 사용함으로써 기기 및 구조계의 지진취약도를 향상

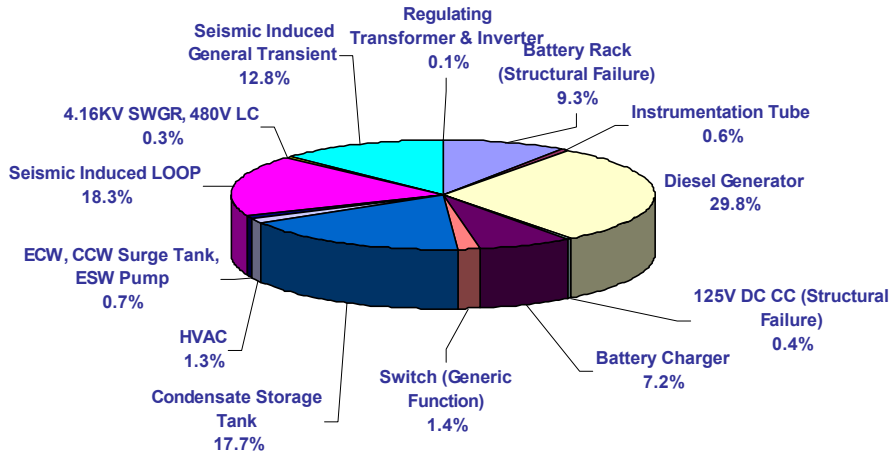


그림 2 지진사건 노심손상빈도에 미치는 기기별 기여도

표 2 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	

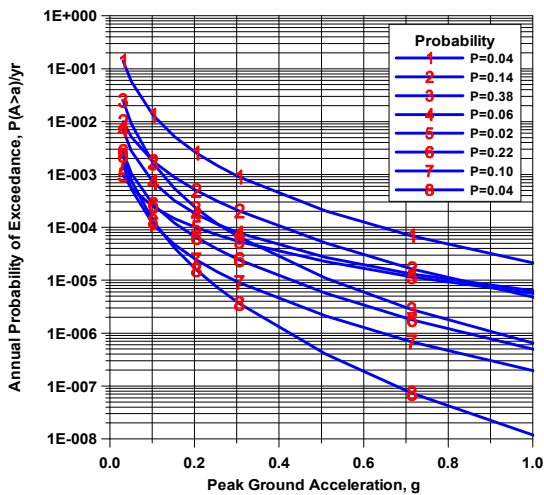


그림 3 지진재해도 곡선 (영광 5, 6호기)

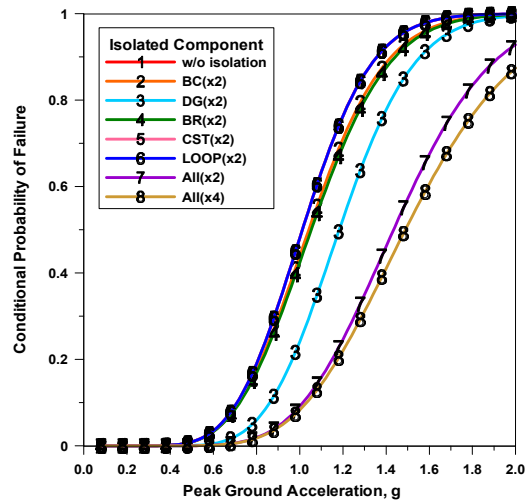


그림 4 기기면진에 따른 지진취약도 곡선

시킬 수 있으며 하나의 기기에 면진장치를 적용하는 것보다 모든 기기에 적용하는 것이 보다 효과적임을 쉽게 알 수 있다. 하나의 기기에 면진장치를 적용할 경우에는 디젤발전기를 면진 대상으로 하는 것이 효과적이며, 대상기기 전체에 면진장치를 사용할 경우에는 지진력을 75% 이상 감소시키더라도 50% 감소시켰을 경우와 큰 차이를 나타내지 않고 있다.

그림 5는 면진장치를 각 기기에 사용하였을 때 노심손상빈도에 기여하는 정도를 보여준다. 디젤발전기에 면진장치를 사용하였을 경우 노심손상빈도에 미치는 영향을 크게 줄일 수 있다. 즉 지진으로 인한 노심손상빈도를 줄이기 위해서는 디젤발전기의 내진성능을 향상시키는 것이 효과적이라 할 수 있다.

그림 6과 표 3은 기기의 면진에 따른 노심손상빈도의 변화를 보여주고 있다. 필수전원 상실사건으로 인한 노심의 손상에는 디젤발전기, 배터리 랙 및 배터리 충전기가 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 7은 각 기기 및 구조물에 면진장치를 사용하였을 때의 노심손상빈도를 면진장치를 사용하지 않았을 때의 노심손상빈도와 비교하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 디젤발전기에 면진장치를 적용한 경우는 비면진의 경우에 비하여 최대지반가속도 0.3g와 0.6g에 대해서 노심손상빈도를 각각 99%, 90% 정도 줄일 수 있으며 최소한 50% 정도 감소시키는 것으로 나타났다. 모든 대상기기에 면진장치를 사용하였을 경우에는 80% 이상의 노심손상빈도 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 지진력 저감율이 2배와 4배의 경우 큰 차이를 나타내지 않고 있어서 지진력의 저감율은 노심손상빈도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.



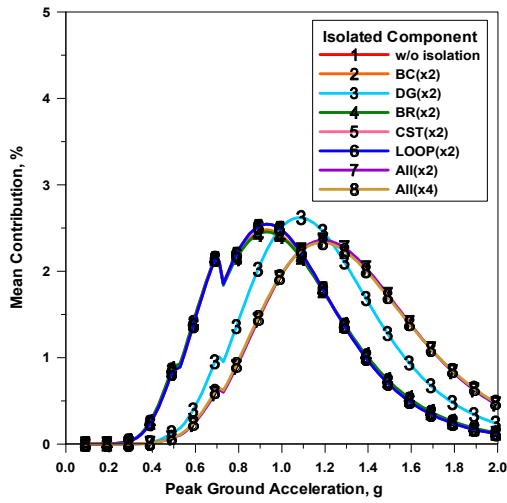


그림 5 면진기기의 노심손상빈도의 기여도

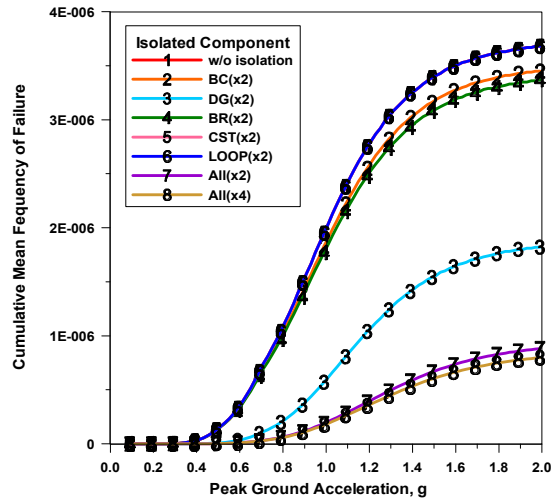


그림 6 기기면진에 의한 노심손상빈도의 변화

표 3 기기면진시의 노심손상빈도

대상기기/ 구조물	최대지반가속도(g)				
	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
비면진시	9.37E-11	1.61E-07	2.04E-06	3.41E-06	3.68E-06
디젤발전기	2.23E-13	9.98E-09	6.16E-07	1.56E-06	1.82E-06
소외전원	9.37E-11	1.61E-07	2.04E-06	3.41E-06	3.68E-06
복수저장탱크	9.37E-11	1.61E-07	2.04E-06	3.41E-06	3.68E-06
배터리 랙	9.36E-11	1.56E-07	1.85E-06	3.10E-06	3.37E-06
배터리 충전기	9.37E-11	1.58E-07	1.96E-06	3.19E-06	3.45E-06
전체(50% 저감)	8.76E-14	2.66E-09	2.07E-07	6.79E-07	8.81E-07
전체(75% 저감)	8.66E-14	2.57E-09	1.91E-07	6.13E-07	7.97E-07

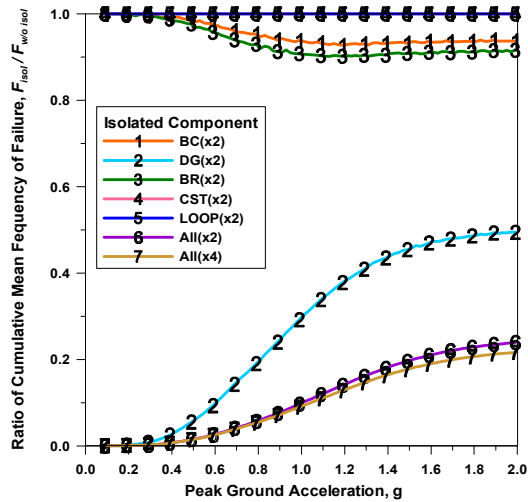


그림 7 기기면진에 의한 노심손상빈도의 감소율

## 5. 결 론

본 연구에서는 지진력저감 시스템을 원전기에 적용하였을 때 원자로 노심의 손상빈도에 미치는 영향을 분석하였다. 지진으로 인해 발생가능한 초기사건으로서 필수전원상실 사건을 선정하였으며 노심손상빈도에 많은 영향을 미치는 기기 및 구조물을 면진대상으로 선정하였다. 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 기기 및 구조물에 지진력 저감시스템을 사용함으로써 지진취약도를 크게 향상시키고 노심손상빈도를 크게 줄일 수 있다.
- 지진유발 필수전원상실 사건에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 기기는 디젤발전기로서 면진장치를 사용한 경우 비면진에 비하여 노심손상빈도를 50%이상 줄일 수 있다. 특히 최대지반가속도 0.3g이하에서는 99% 정도까지 감소시킨다.
- 모든 대상기에 면진장치를 사용하였을 경우에는 최소한 80% 이상의 노심손상빈도 감소효과가 있으나 지진력 저감율을 2배이상 증가시키더라도 노심손상빈도의 감소율은 크게 줄어들지 않는 것으로 나타났다

그러므로 본 연구를 통해서 원자로의 안전성에 중요한 영향을 미치는 기기 및 구조물의 내진성능 향상은 원전의 안전성을 크게 향상시킬 수 있으며, 지진력 저감장치를 적용함으로써 가능하다는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 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.
2. 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
3. Ebisawa, K., Ando K., and Shibata, K., “Progress of a Research Program on Seismic Base Isolation of Nuclear Components” , *Nuclear Engineering and Design*, 198, pp. 61-74, 2000.
4. 임학규 외, 영광 5,6호기 PSA Notebook [외부사건분석: 본문], 한국전력공사 전력연구원, 2001.
5. 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.