

기기의 내진성능 개선을 통한 영광 5,6호기 원전의 지진안전성 향상 Seismic Safety Improvement of Yonggwang Nuclear Unit 5&6 by Increase of Equipment Seismic Capacity

전영선, 최인길
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

본 연구에서는 원전설비의 내진성능이 원전의 지진안전성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 영광원전 5,6호기의 주요 기기 및 구조물의 내진성능과 노심손상빈도와의 관계를 분석하였다. 노심손상빈도에 기여도가 높은 기기 및 구조물 선정하고 그들의 내진성능을 증가시키면서 지진에 대한 확률론적 안전성 평가를 수행하였다. 분석결과 기기 및 구조물의 내진성능 개선은 원자로 노심의 손상빈도를 크게 줄일 수 있어 원전의 지진안전성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 영광 5, 6호기 원전의 경우 최대지반가속도가 0.3~0.5g 범위에서 기기의 내진성능 개선 효과가 가장 크며, 이 때 소외전원 또는 디젤발전기의 내진성능을 향상시키는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 소외전원의 내진성능을 25%, 50% 증가시켰을 경우 최대지반가속도 0.4g에서 노심손상빈도는 각각 33%, 45% 감소되는 것으로 나타났다.

Abstract

The effect of seismic capacity of nuclear facilities on the safety of nuclear power plants is investigated by the evaluation of the relation between the seismic capacity of equipment and structures and the core damage frequency(CDF) in the Yonggwang Nuclear Unit 5 & 6. The equipment and structures important to CDF are selected and seismic PSA is performed using various seismic capacities. It is demonstrated from the results that the increase of seismic capacity of equipment and structures can reduce CDF and, therefore, increase seismic safety significantly. For improving the seismic safety of the Yonggwang Nuclear Unit 5 & 6, the increase of seismic capacities of offsite power and diesel generator is the most effective in the PGA range of 0.3g to 0.5g. In case of offsite power, at 0.4g, the increase of its seismic capacity of 25 and 50% leads to reduction of 33 and 45% in CDF, respectively.

1. 서 론

원전의 안전성은 내외적인 모든 사건에 대하여 확보되어야 한다. 원전의 안전에 요구되는 기준은 기술이 발달하고 원전이 추가적으로 건설됨으로 인하여 점차적으로 강화되고 있는 추세이다. 또한 사회환경과 국민의식의 발달로 인해 지속적인 원전의 운영 및 추가적인 건설을 하기 위해서는 무엇보다도 원전의 안전이 최대의 목표가 되어야 할 것이다. 국내에서도 지속적으로 원전이 건설되고 있으며 원전부지 부근에서 단층이 발견됨으로 인해 원전의 안전성에 대한 전반적인 검토와 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

지진은 원전 발전설비의 주요기능을 일시에 완전히 상실케 할 수 있을 뿐만 아니라 지반운동의 지속시간이 매우 짧기 때문에 작업자들이 대응할 수 있는 여유가 거의 없어서 더욱 위험하다고 할 수 있다. 그러므로 원전 구조물, 계통 및 기기의 지진에 대한 안전성은 설계 단계에서 충분히 확보하여야만 한다. 그러나 설계기준지진에 부합하도록 모든 설비에 대해 내진설계가 이루어졌다고 하더라도 특이한 진동수 특성을 갖는 지반운동이나 설계기준지진보다 큰 지반운동에 대해서 발전소의 모든 설비는 손상을 입을 가능성이 있다.

지진은 불확실성이 대단히 큰 하중으로서 지진에 대한 안전성을 충분히 확보하기 위해서는 매우 보수적으로 내진설계를 할 필요가 있다. 그리고 가동중인 발전소의 지진안전성을 향상시키기 위해서는 기존 설비의 내진성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 방안이 마련되어야 할 것이다. 이와 관련하여 외국에서는 기기의 내진성능을 향상시키기 위하여 면진장치를 개발하기 위한 연구를 1980년대부터 수행하여 왔다[1-3]. 국내에서는 최근에 기기의 내진성능을 평가하고 향상시키기 위한 연구를 착수하여 활발하게 진행하고 있다[4-5].

본 연구에서는 원전설비의 내진성능이 원전의 안전성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 영광원전 5,6호기의 주요 기기 및 구조물의 내진성능과 노심손상빈도와의 관계를 분석하였다.

2. 원전의 지진안전성 평가

2.1 지진안전성 평가

원전의 지진안전성 평가는 해당 부지에서의 지진동에 대한 원자로 노심의 손상빈도를 확률론적으로 분석하는 것으로서 지진위험도에 기여하는 인자들의 영향을 감소시켜 원전의 지진위험도를 감소시키는 것이 그 최종목표라 할 수 있다. 지진안전성 평가의 과정은 그림 1과 같이 요약하여 도시할 수 있으며 크게 확률론적 지진재해도 분석, 지진취약도 분석 및 지진사고 분석의 3단계로 구분된다. 확률론적 지진재해도 분석 단계에서는 부지에서의 지진 발생빈도를 지반운동의 가속도 함수로서 나타내며 지진취약도 분석 단계에서는 지진사건이 발전소의 구조물 및 안전관련 기기에 미치는 영향을 평가한다. 그리고 지진사고 분석에서는 지진재해도 및 지진취약도를 사건수목 및 고장수목과 결합하여 지진으로 인해 유발되는 원자로 노심의 손상빈도를 산정한다. 이 중에서 지진재해도와 발전소의 사건 및 고장수목은 발전소의 부지와 계통에 따라서 정해지므로 발전소의 지진 안전성을 향상시키기 위해서는

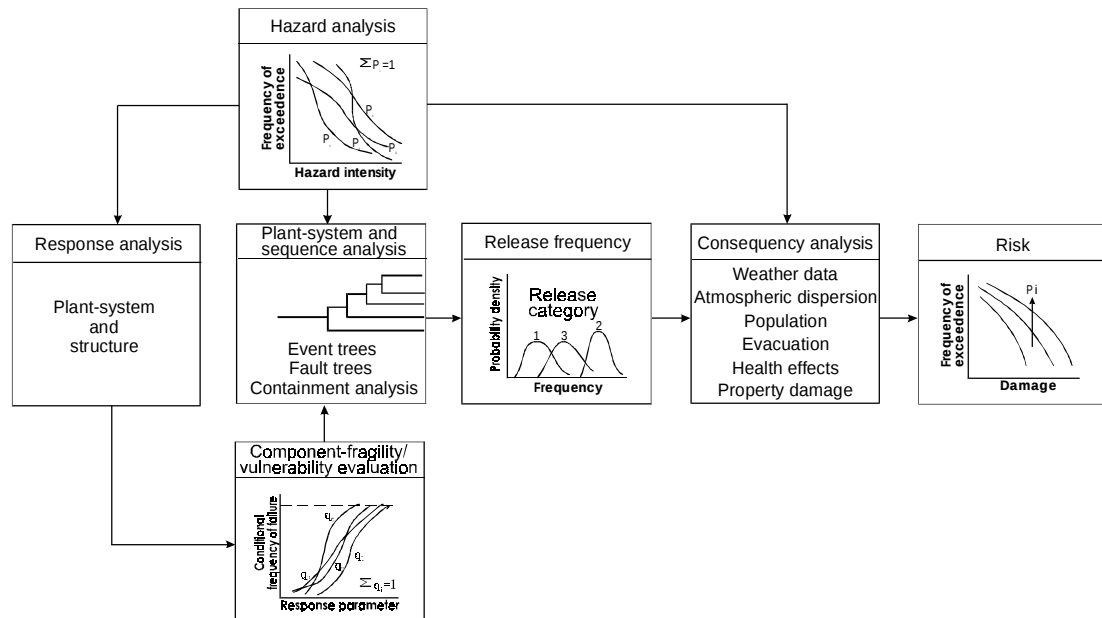


그림 1. 지진안전성 평가 흐름도

구조물 및 기기의 지진취약도를 개선할 필요가 있다.

2.2 지진유발 초기사건

지진으로 인해 발생하는 초기사건은 기기 및 구조물에 대한 취약도 분석, 계전기 오동작 및 고장영향 분석 결과에 따라서 결정된다. 영광 5,6호기의 외부사건분석에서는 지진유발 초기사건을 다음의 6가지로 분류하였다[6].

- 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)

2.2.1 필수전원 상실사건

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

- 4.16KV 교류 모선 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 직류모선 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

2.2.2 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.

2.2.3 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 냉

각수 펌프를 포함한 모든 안전 주입 펌프, 모터 구동 보조급수 펌프실의 온도를 상승시켜 해당 기기의 기능상실을 초래할 수 있다. 이와 같이 1차 기기냉각수 및 펄수 냉수계통의 상실은 결국 1차 기기 냉각수계통의 상실과 직결된다.

2.2.4 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.

2.2.5 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.

2.2.6 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.

2.3 지진유발 노심손상빈도

지진으로 인한 노심의 손상빈도는 지진재해도 곡선과 조건부 노심손상확률의 곱으로 계산되는 노심손상빈도밀도(frequency density of core damage)를 적분하여 계산한다. 즉,

$$F_{CDF} = \int F_{GM}(a) \cdot P_{CD}(a) \cdot da \quad (1)$$

여기서 $F_{GM}(a)$ 은 지진재해도, $P_{CD}(a)$ 는 노심손상의 누적파괴확률을 나타내며 a 는 기반암에서 각 지진의 크기를 나타낸다.

표 1은 영광 5,6호기 원전에서 지진으로 인해 발생하는 각 초기사건의 발생빈도와 노심손상빈도를 정리한 것이다. 초기사건 발생빈도는 일반과도사건이 2.79E-03으로서 가장 크고 소형 냉각재 상실사건이 3.82E-08으로서 가장 작게 나타났다. 그러나 노심손상빈도는 펄수 전원 상실사건이 3.68E-06으로 가장 커서 전체의 약 53%를 차지하는 것으로 나타났다. 영광원전 5,6호기의 지진유발 노심손상빈도는 각 초기사건에 대한 값들을 합한 결과 6.96E-06

표 1. 지진유발 초기사건빈도 및 노심손상빈도 분석 결과[6]

초기사건	초기사건빈도	노심손상빈도	비고
필수전원 상실사건	3.68E-06	3.68E-06	직접 노심손상 유발
2차측 열제거 상실사건	1.16E-06	1.16E-06	직접 노심손상 유발
1차 기기냉각수/필수냉수 상실사건	2.48E-06	4.25E-08	2차 사건수목 연계
소형 냉각재 상실사건	3.82E-08	3.82E-08	직접 노심손상 유발
소외전원 상실사건	1.12E-04	1.20E-06	2차 사건수목 연계
일반과도사건	2.79E-03	8.73E-07	2차 사건수목 연계
계			6.96E-06

으로 산정되었다.

3. 지진취약도 분석

지진취약도는 지진하중에 대한 발전소 설비의 조건부 파괴빈도를 의미하며 지진재해도와 함께 노심손상빈도를 산정하는데 사용된다. 발전설비의 취약도를 분석하기 위해서는 계통을 분석하여 노심손상에 민감한 구조물 및 기기를 선정해야 한다. 그러나 원자력발전소는 수많은 기기와 장치들로 구성되어 있기 때문에 모든 설비에 대해 지진취약도를 분석하는 것은 거의 불가능하고 할 수 있다. 따라서 설비의 안전에 영향을 미치는 주요 설비만을 선정하여 분석하는 것이 보다 효과적이라 할 수 있다. 지진취약도의 분석대상이 되는 기기 및 구조물은 다음과 같다.

- 내부사건 분석에서 고려된 기기
- 내부사건 분석에는 포함되지 않았지만 지진으로 인해 심각한 결과를 초래할 수 있는 동형 기기
- 이상에서 언급한 기기를 지지하는 모든 구조물

3.1 구조물의 지진취약도

영광 5,6호기 원전에서 지진취약도 분석을 수행한 주요구조물은 격납건물, 보조건물, 핵연료건물, 기기냉각수 건물, 냉각해수 취수구조물 및 필수용수펌프 건물, 비상 디젤발전기 건물, 복수저장탱크로서 취약도 분석결과는 표 2와 같다. 표에서 A_m 은 지반가속도의 중앙값, β_R 은 무작위성을 나타내는 대수표준편차, β_U 는 불확실성을 나타내는 대수표준편차를 의미한다. 그리고 HCLPF는 고신뢰도 저파손 확률값(High Confidence and Low Probability of Failure)으로서 기기의 내력을 의미한다. 이 값은 무작위성과 불확실성을 모두 고려하여 5%보다 작은 조건부 파손확률에 95%의 신뢰도를 가지는 값으로서 식 (2)와 같이 계산된다.

표 2. 영광 5,6호기 구조물의 지진취약도 분석 결과[6]

구조물	파손모드	A_m	β_R	β_U	HCLPF(g)
격납건물	격납건물 외벽 전단파손	3.80	0.32	0.33	1.30
격납건물 내부구조물	2차 차폐벽 전단파손	2.02	0.19	0.32	0.87
보조건물(PAB, SAB)	벽체(3WAF) 전단파손	3.12	0.32	0.33	1.07
핵연료건물	벽체 전단파손	6.15	0.33	0.34	2.01
기기냉각수 건물	벽체 전단파손	4.72	0.29	0.37	1.61
냉각해수 취수구조물 및 필수용수펌프 건물	벽체 전단파손	3.88	0.25	0.29	1.59
비상 디젤발전기 건물	벽체 전단파손	선별제거	-	-	-
복수저장탱크	슬라이딩	0.91	0.21	0.27	0.41

표 3. 영광 5,6호기 기기의 지진취약도 분석 및 선별 결과[6]

기기명	진동수	파손모드	A_m	β_R	β_U	HCLPF(g)
Off-Site Power	-	Generic function	0.30	0.22	0.20	0.15
Diesel Generator	>33	Concrete Coning	1.13	0.36	0.30	0.38
ECW Compression Tank	>33	Anchorage	1.00	0.35	0.20	0.40
Battery Charger	11.5	Functional	1.03	0.28	0.28	0.41
		Structural	1.54	0.33	0.33	0.52
ECW Chiller	8	Functional	1.08	0.28	0.27	0.44
		Structural	1.62	0.33	0.32	0.56
Regulating Transformer	9.9	Functional	1.30	0.33	0.30	0.46
ESW Pump	33.98	Anchorage	1.20	0.29	0.28	0.47
CCW Surge Tank	17.6	Concrete Coning	2.00	0.41	0.47	0.47
4.16kV Switchgear	6	Functional	1.33	0.33	0.29	0.48
Inverter	13.8	Functional	1.37	0.33	0.30	0.49
Battery Rack	23	Functional	1.46	0.33	0.31	0.51
480V Load Center	5.5	Functional	1.50	0.32	0.29	0.54
Switchyard	-	Generic function	2.33	0.41	0.45	0.55
Instrumentation Tube (Primary system)	-	Piping Break	1.50	0.30	0.30	0.56
125VDC Control Center	8	Functional	1.58	0.33	0.29	0.57
HVAC Duct & Support	-	Generic function	2.06	0.32	0.41	0.62
ECW Pump	37.2	Pump H.D bolt	1.85	0.36	0.27	0.65

$$HCLPF(g) = A_m(g) \times \exp[-1.65(\beta_R + \beta_U)] \quad (2)$$

표 2에서 보는 바와 같이 분석대상 구조물 중에서 복수저장탱크의 내진성능이 0.41g로서 지진에 대해 가장 취약한 것으로 나타났으며 비상 디젤발전기 건물의 내진성능이 가장 큰 것으로 나타났다.

3.2 기기의 지진취약도

기기의 지진취약도를 분석하기 전에 먼저 지진내력이 상대적으로 높은 기기들과 발전소 전체의 안전성에 큰 영향을 미치지 않는 기기들을 대상에서 제외하는 것이 보통이다. 영광 5,6호기의 지진사건 분석에서는 최대지반가속도의 중앙값이 1.5g를 초과하는 설비들은 노심손상에 영향을 주지 않는 것으로 가정하고 기기들을 선별 제거하였다. 그리고 지진취약도 분석을 수행하여 HCLPF가 0.65g를 초과하는 기기들은 상세분석에서 제외하였다. 표 3은 그 선별결과로서 17가지의 기기가 도출되었다. 그 중에서 소외전원의 지진내력은 0.15g로서 설계지진 값인 0.2g보다도 작은 것으로 나타났다.

4. 기기의 내진성능 개선 효과

앞에서 기술한 바와 같이 지진으로 인해 발생할 수 있는 노심손상의 빈도는 부지의 지진 위험도와 기기 및 구조물의 지진취약도에 의해서 산정된다. 그러므로 노심손상빈도를 감소시키기 위해서는 기기 및 구조물의 지진에 대한 성능을 향상시킬 필요가 있다. 여기에서는 주요 기기 및 구조물의 내진성능을 개선시켰을 때 노심손상빈도에 미치는 영향을 검토하였다.

4.1 대상기기 선정

지진 발생시에 원자로의 노심손상을 야기시킬 가능성이 있는 기기 및 구조물은 표 4와 같다. 표에서 보는 바와 같이 디젤발전기의 평균 고장빈도가 가장 큰 것으로 나타났다.

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 높았다. 이들 5가지 기기 및 구조물의 파손모드, HCLPF 및 고장의 영향 등은 표 5에 기술한 바와 같다. 표에서부터 노심손상에 많은 영향을 미치는 기기는 주로 필수전원 상실사건과 관련이 있으며 HCLPF 값도 크지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서는 기기 및 구조물의 내진성능 향상이 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 위에서 언급한 5가지 즉, 디젤발전기(DG), 소외전원(OP), 복수저장탱크(CST), 배터리 랙(BR) 및 배터리 충전기(BC)를 대상으로 선정하였다.

표 4. 지진유발 노심손상과 관련된 기기의 고장빈도[6]

기기명	고장모드	평균(Mean)	비 고
Diesel Generator	Concrete Coning	1.95E-06	노심손상가정
ECW Compression Tank	Anchorage	1.84E-06	노심손상가정
Condensate Storage Tank	Structural Failure	1.16E-06	노심손상가정
Battery Rack	Structural Failure	6.11E-07	노심손상가정
ECW Chiller	Structural Failure	5.17E-07	2차 지진사건수목으로 연계
Battery Charger	Structural Failure	4.70E-07	노심손상가정
ESW Pump	Anchorage	2.58E-07	2차 지진사건수목으로 연계
Switch	Generic Failure	9.29E-08	노심손상가정
HVAC	Generic Failure	8.50E-08	노심손상가정
Instrumentation Tube	Piping Break	3.82E-08	노심손상가정
ECW Pump	Pump H.D Bolt	3.31E-08	2차 지진사건수목으로 연계
CCW Surge Tank	Concrete Coning	2.93E-08	2차 지진사건수목으로 연계
125V DC Control Center	Structural Failure	2.38E-08	노심손상가정
4.16KV SWGR	Functional Failure	1.28E-09	노심손상가정
Battery Charter	Functional Failure	3.89E-09	노심손상가정
Regulator Transformer & Inverter	Functional Failure	3.89E-07	노심손상가정

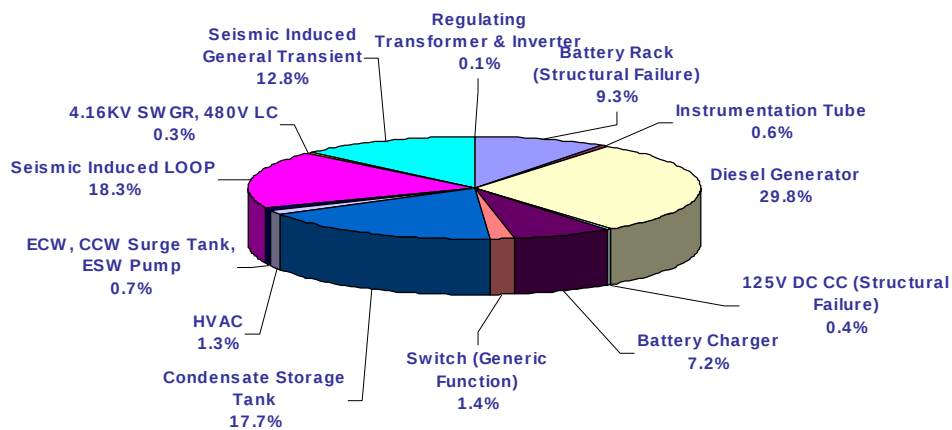


그림 2. 지진사건 노심손상빈도에 미치는 기기별 기여도[6]

표 5. 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 구조물의 내진성능을 2배로 향상시켰을 경우의 지진취약도 곡선을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기기 및 구조계통의 내진성능을 향상시킴으로써 지진취약도를 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 하나의 대상기기 보다는 모든 대상기기에 적용하는 것이 보다 효과적임을 쉽게 알 수 있다. 필수전원 상실사건의 경우에는 디젤발전기의 영향이 가장 크기 때문에 그 내진성능을 개선하는 것이 보다 효과적이라 할 수 있다.

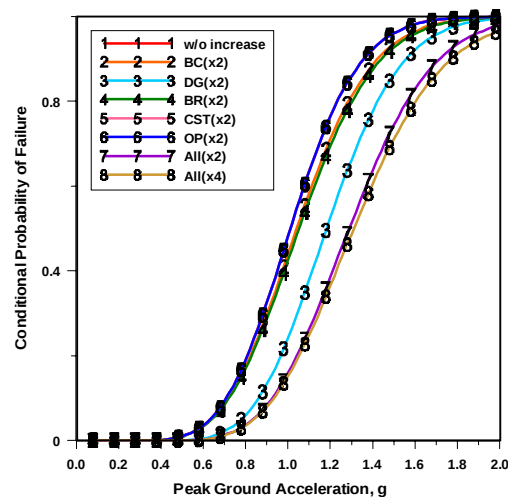


그림 3. 기기의 내진성능 증가에 따른 지진취약도 (필수전원 상실 사건의 경우)

4.3 노심손상빈도 평가

영광원전 5, 6호기에서 기기의 내진성능이 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하기 위해서 지진 PSA를 수행하였다. 그림 4는 앞에서 선정된 5가지 주요기기 및 구조물의 내진성능 증가에 따른 노심손상빈도의 변화를 도시한 것이고 표 6은 최종 노심손상빈도와 그 감소율을 보여 준다. 그림과 표에서 보는 바와 같이 기기의 내진성능을 향상시킬 경우 노심손상빈도를 크게 줄일 수 있다.

내진성능의 증가에 따른 노심손상빈도의 감소는 배터리 랙의 경우는 상대적으로 적으며 디젤발전기의 경우에 가장 큰 것으로 나타났다(표 6). 5가지 주요기기 및 구조물의 내진성능을 모두 증가시켰을 경우에는 약 50% 이상 노심손상빈도를 줄일 수 있다. 배터리 랙과 복수저장탱크의 경우에는 내진성능 증가율에 따라서 노심손상빈도의 감소가 크지 않지만 디젤발전기와 소외전원의 경우에는 크게 나타났다. 이것은 디젤발전기와 소외전원의 내진성능 증가가 노심손상빈도의 감소에 더욱 효과적이라는 것을 의미한다.

최대지진가속도가 0.2g에서부터 1.0g까지는 노심손상빈도가 최대지진가속도에 민감하고 내진성능 증가의 영향이 큰 것으로 나타났으며 특히 소외전원의 내진성능 증가는 1.0g이하에서 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 4). 그림 5는 기기 및 구조물의 내진성능 증가에 따른 노심손상빈도의 비율을 도시한 것이다. 최대지진가속도가 클수록 내진성능 증가의 영향이 큰 것으로 나타났으나 1.0g 이상에서는 거의 일정한 감소율을 보였다. 모든 주요기기의 내진성능을 향상시켰을 경우 국내원전의 설계기준인 0.2g에 대해서는 약 5%정도 노심손상빈도가 감소하며 0.3g의 최대지진가속도에 대해서는 노심손상빈도를 약 30%정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 최대지진가속도가 0.4g 이하에서는 소외전원의 내진성

표 6. 주요기기의 내진성능 증가에 따른 노심손상빈도의 감소율

대상기기	내진성능 증가율(%)	노심손상빈도 ($\times 10^{-6}$)	노심손상빈도 감소율(%)
초기상태	-	6.96	-
배터리랙(BR)	25	6.78	2.6
	50	6.74	3.2
복수저장탱크(CST)	25	6.02	13.5
	50	5.86	15.8
디젤발전기(DG)	25	5.83	16.2
	50	5.41	22.3
소외전원(OP)	25	6.36	8.6
	50	5.93	14.8
주요기기(ALL)	25	3.77	45.8
	50	2.47	64.5
	75	2.30	67.0

능을 개선하는 것이 가장 효과적이며 0.6g 이하에서는 소외전원과 디젤발전기의 내진성능을 동시에 증가시키는 것이 효과적이다. 그리고 모든 주요기기의 내진성능을 향상시키더라도 1.0g 이상에서는 노심손상빈도의 감소율이 증가하지 않는 것으로 나타났다.

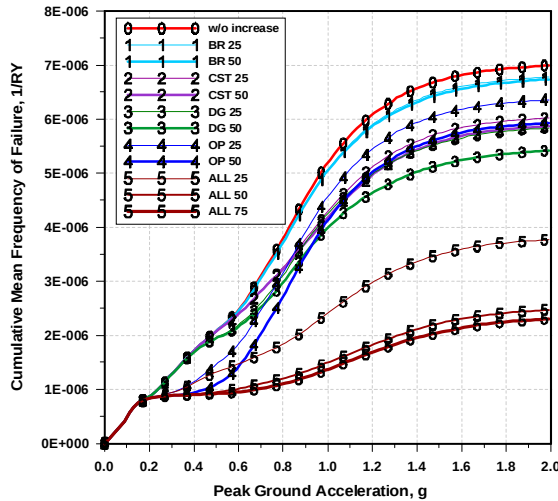


그림 4. 기기 및 구조물의 내진성능 증가와 노심손상빈도

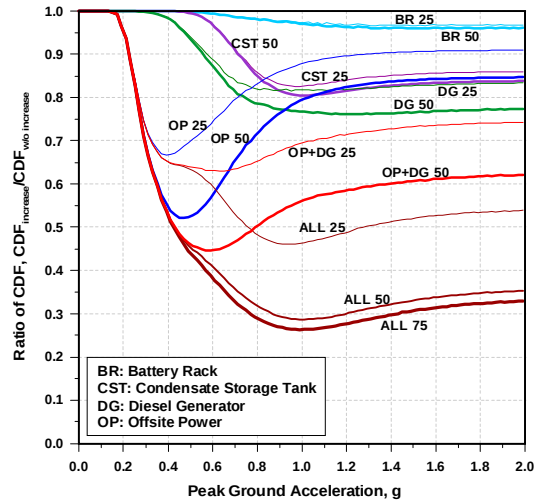


그림 5. 내진성능 증가와 노심손상빈도의 비율

5. 결 론

본 연구에서는 영광원전 5,6호기 기기 및 구조물의 내진성능을 개선했을 때 원자로 노심의 손상빈도에 미치는 영향을 분석함으로써 국내 원전의 지진안전성 향상방향을 제시하였다. 노심손상빈도에 영향을 미치는 주요 기기 및 구조물을 선정하고 그 내진성능의 증가율과 노심손상빈도와의 관계를 분석하였다. 분석결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 기기 및 구조물의 내진성능 개선은 노심손상빈도를 크게 줄일 수 있어 원전의 지진안전성을 향상시킬 수 있다.
- 영광 5, 6호기 원전에서 지진유발 노심손상에 영향을 미치는 주요 기기 및 구조물은 디젤발전기, 소외전원, 복수저장탱크, 배터리 랙 및 배터리 충전기이다.
- 노심손상빈도에 기여도가 높은 5가지의 주요기기 및 구조물의 내진성능을 모두 25% 증가시켰을 경우 약 50% 이상 노심손상빈도를 줄일 수 있다.
- 디젤발전기와 소외전원의 내진성능 증가가 노심손상빈도의 감소에 더욱 효과적이다.
- 최대지진가속도가 0.2g에서부터 1.0g까지는 노심손상빈도가 최대지진가속도에 민감하고 내진성능 증가의 영향이 큰 것으로 나타났으며 특히 소외전원의 내진성능 증가는 1.0g 이하에서 크게 영향을 미친다.

- 모든 주요 기기의 내진성능을 향상시켰을 경우 국내원전의 설계기준인 0.2g에 대해서는 약 5%정도 노심손상빈도가 감소하며 0.3g의 최대지반가속도에 대해서는 약 30%정도 감소된다. 최대지반가속도가 0.4g 이하에서는 소외전원의 내진성능을 개선하는 것이 가장 효과적이며 0.6g 이하에서는 소외전원과 디젤발전기의 내진성능을 동시에 증가시키는 것이 효과적이다. 1.0g 이상에서는 모든 주요기기의 내진성능을 향상시키더라도 노심손상빈도의 감소율이 증가하지 않는다.
- 영광 5, 6호기 원전의 경우 최대지반가속도가 0.3~0.5g 범위에서 기기의 내진성능 개선 효과가 가장 크게 나타났다.

결론적으로 본 연구를 통하여 원전의 안전관련 기기 및 구조물의 내진성능의 개선은 원전의 지진안전성 향상에 크게 기여한다는 것을 확인하였다. 향후에 기기 및 구조물의 내진성능 개선을 위한 방안이 강구되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었음.

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. 전영선, 최인길, "원전 기기의 지진력 저감이 노심손상빈도에 미치는 영향 평가", 한국 원자력학회 추계학술발표회, 2002.
5. 최인길, 서정문, 전영선, "고진동수 지진동에 대한 원전 기기의 지진취약도 분석", 한국 지진공학회 춘계학술발표회논문집, pp.110~117, 2003.
6. 임학규 외, 영광 5,6호기 PSA Notebook [외부사건분석: 본문], 한국전력공사 전력연구원, 2001.