

지진 손상 상관성이 플랜트의 확률론적 지진 안전성 평가에 미치는 영향

The Effects of Seismic Failure Correlations on the Probabilistic Seismic Safety Assessments of Nuclear Power Plants

임승현¹⁾ · 곽신영^{2)*} · 최인길³⁾ · 전범규⁴⁾ · 박동욱⁴⁾

Eem, Seunghyun¹⁾ · Kwag, Shinyoung^{2)*} · Choi, In-Kil³⁾ · Jeon, Bub-Gyu⁴⁾ · Park, Dong-Uk⁴⁾

¹⁾경북대학교 융복합시스템공학과 플랜트시스템전공 조교수, ²⁾한밭대학교 건설환경공학과 조교수, ³⁾한국원자력연구원 스마트안전진단연구부 책임연구원, ⁴⁾부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

¹⁾Assistant Professor; Major in Plant System Engineering, Department of Convergence and Fusion System Engineering, Kyungpook National University, ²⁾Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, ³⁾Principal Researcher, Smart Structural Safety and Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ⁴⁾Research Professor, Seismic Research and Test Center, Pusan National University

/ A B S T R A C T /

Nuclear power plant's safety against seismic events is evaluated as risk values by probabilistic seismic safety assessment. The risk values vary by the seismic failure correlation between the structures, systems, and components (SSCs). However, most probabilistic seismic safety assessments idealized the seismic failure correlation between the SSCs as entirely dependent or independent. Such a consideration results in an inaccurate assessment result not reflecting real physical phenomenon. A nuclear power plant's seismic risk should be calculated with the appropriate seismic failure correlation coefficient between the SSCs for a reasonable outcome. An accident scenario that has an enormous impact on a nuclear power plant's seismic risk was selected. Moreover, the probabilistic seismic response analyses of a nuclear power plant were performed to derive appropriate seismic failure correlations between SSCs. Based on the analysis results, the seismic failure correlation coefficient between SSCs was derived, and the seismic fragility curve and core damage frequency of the loss of essential power event were calculated. Results were compared with the seismic fragility and core damage frequency of assuming the seismic failure correlations between SSCs were independent and entirely dependent.

Key words: Seismic failure correlation, Probabilistic seismic safety assessment, Probabilistic seismic response analysis, Nuclear power plant, Seismic risk

1. 서론

2016년 9월 우리나라에서 지진관측이 이루어진 이후 최대 규모(리히터규모 5.8)의 지진이 경주에서 발생하였다[1]. 진앙으로부터 대략 30 km 정도 떨어진 월성 원자력발전소 부지에서 관측된 최대지반가속도는 0.098 g로 운전 기준지진인 0.1 g를 초과하지는 않았다. 하지만, 발생 지진의 응답스펙트럼은 운전기준지진 응답스펙트럼의 일부 구간을 초과하여 월성 원자력발전소를 수동정지 하였다[2]. 따라서, 이 지진 사건은 원자력발전소의 지진 안전성에 관

한 관심을 불러일으켰다[3]. 지진에 대한 원자력발전소의 안전성은 확률론적 지진 안전성 평가를 통해 수행된다. 이때 원자력발전소를 구성하고 있는 구조물, 계통 및 기기(SSCs: Structures, Systems and Components)간의 고장 확률은 서로 독립으로 가정한다. 그러나, 합리적인 확률론적 지진 안전성 평가를 수행하기 위해서는 SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려하여야 한다. SSCs간의 지진 손상 상관성 고려 여부에 따라 지진리스크의 값은 10배 이상 차이가 발생할 수 있다[4]. 또한 사고 시나리오 구성에 따라 지진 손상 상관성에 의해 지진리스크는 증가 혹은 감소할 수 있다. 따라서 지진 손상 상관성을 고려할 때 적합한 지진 손상 상관계수를 산정하는 것은 매우 중요하다.

합리적인 안전성 평가를 위해 원자력발전소의 확률론적 지진 안전성 평가 수행 시 SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려하는 연구가 수행되었다. 대표적인 연구로 미국 Lawrence Livermore National Laboratory에서 수행

*Corresponding author: Kwag, Shinyoung

E-mail: skwag@hanbat.ac.kr

(Received January 7, 2021; Revised February 9, 2021; Accepted February 9, 2021)

한 “Seismic Safety Margins Research Program (SSMRP)”의 연구가 있다. SSMRP에서 지진 손상 상관성에 의한 지진리스크에 관한 연구를 수행하였다 [4]. Mankamo는 Mankamo model을 통해 지진 손상 상관성에 의한 동시고장확률을 승수에 대한 함수로 표현하여 동시고장확률을 쉽게 적용 가능케 하였다 [5]. 또한 본 저자에 의해 SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려하여 지진리스크를 구하는 EEMS 프로그램을 개발하였다 [6]. SSCs간의 지진 손상 상관계수는 지진 응답 상관계수와 내진 성능 상관계수로부터 산출이 되며 주로 지진 응답 상관계수를 도출하는 방법에 대해 연구가 수행되었다. SSMRP 연구 [4] 및 Ebisawa 연구 [7]에서는 지진 응답 상관계수를 SSCs의 지진 응답해석으로부터 산출하는 것을 제안하였으며, 저자 및 Bohn 등은 간단한 경험 규칙으로부터 지진 응답 상관계수를 산정하는 방법을 제안하였다 [5, 8]. 그러나, 여전히 SSCs간의 지진 손상 상관성이 지진리스크에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 미미하다.

본 연구에서는 한국형 표준원자력발전소인 OPR1000을 대상으로 지진 리스크에 영향이 큰 필수 전원 상실 사건에 대하여 지진 손상 상관성을 고려하여 지진취약도 곡선 및 노심 손상 빈도(CDF: Core Damage Frequency)를 계산하였다. SSCs간의 지진 응답 상관계수는 대상 원자력발전소인 OPR1000의 확률론적 지진응답 해석을 통해 계산되었다. 이를 바탕으로 SSCs간의 지진 손상 상관계수를 산출하여 지진취약도 및 CDF에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 저자에 의해 제안된 지진 응답 상관계수 도출하는 단순화된 접근방법 [8]을 적용하여 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 필수 전원 상실 사건(LEP: Loss of Essential Power)

원자력발전소의 확률론적 지진 안전성 평가를 수행하기 위해서는 고장 모드 영향 분석이 수행되어야 한다. 고장 모드 영향 분석은 지진으로 인하여 발생하는 고장이 초기사건이나 사고 완화 과정에 어떠한 영향을 주는 것인지 평가하는 과정이다. 특히 고장 모드 영향 분석은 초기사건을 유발하는 고장을 식별한다. 지진 초기사건을 유발하는 고장으로는 원자력발전소의 과도 사건 혹은 압력 경계에서 고장을 일으켜 안전 계통의 작동을 유발하는 고장, 등으로 다양하다.

대표적인 초기사건으로 1차측 필수 냉수 상실 사건, 2차측 열제거 상실 사건, 필수 전원 상실 사건 등이 있다. 본 연구에서는 여러 초기사건 중에서

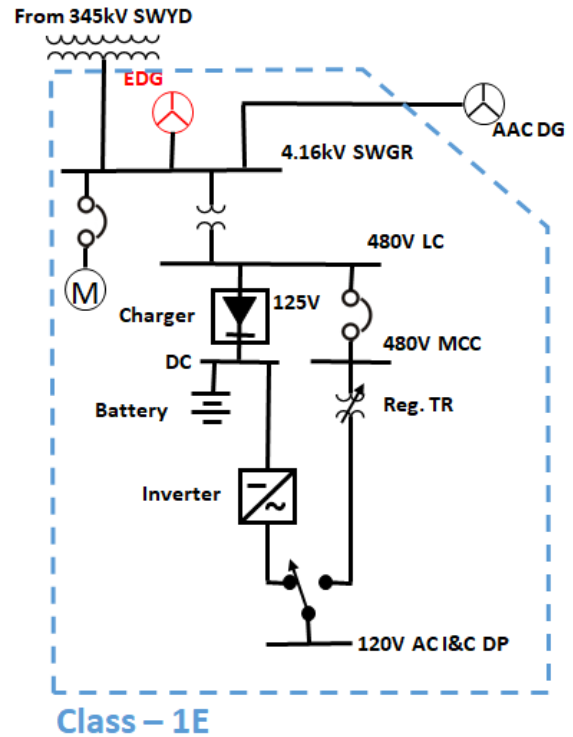


Fig. 1. Simplified power system in nuclear power plant [10]

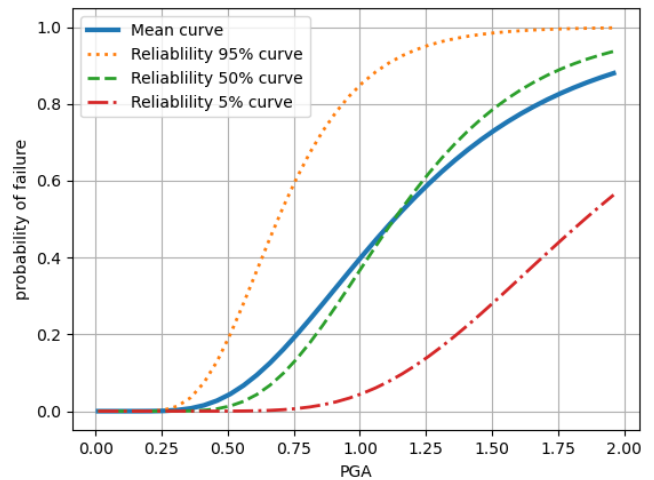


Fig. 2. Seismic fragility curves of diesel generator

Table 1. Configuration of Seismic-Induced Loss of Essential Power events [10]

Structures or Components	Median	β_R	β_U	Failure Modes	Event Codes
Diesel Generator	1.243	0.396	0.330	Structural failure	SDGSF
Battery Charger	1.133	0.308	0.308	Functional failure	SBCRC
4.16 kV SWGR	1.463	0.363	0.319	Functional failure	SSWRC
Battery Rack	1.606	0.363	0.341	Structural failure	SBRFS
480 V Load Center	1.650	0.352	0.319	Functional failure	SLCRC
125 V DC Control Center	1.738	0.363	0.319	Structural failure	SDCSF
Auxiliary building	2.200	0.352	0.407	Structural failure	SSEAU
Inverter	1.507	0.363	0.330	Functional failure	SINRC
Regulating Transformer	1.430	0.363	0.330	Functional failure	SRTRC

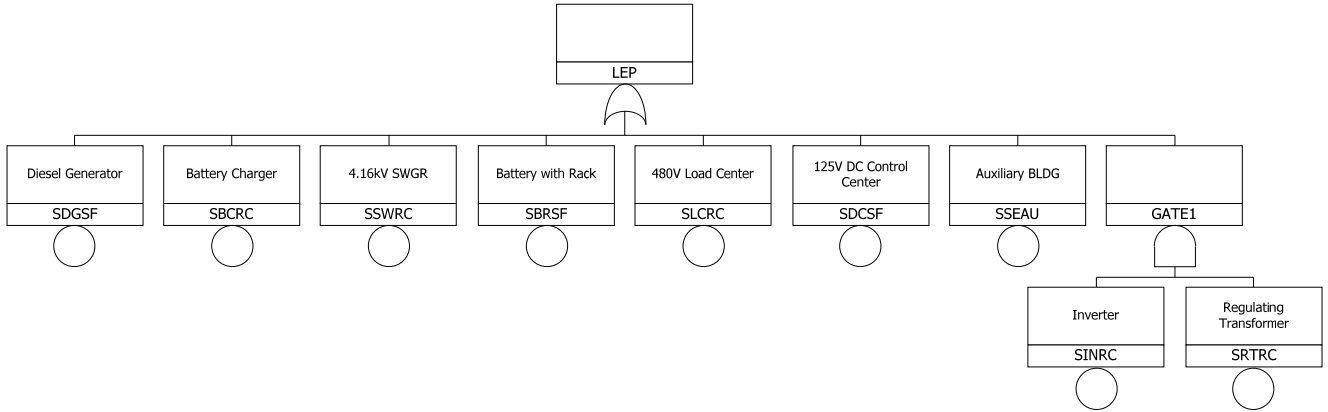


Fig. 3. Fault tree of seismic-induced loss of essential power [10]

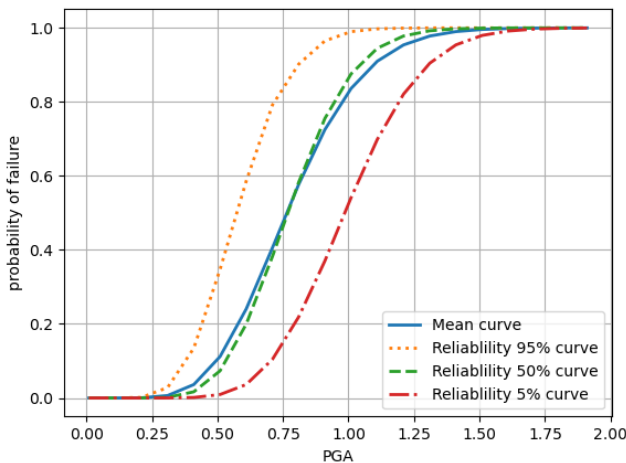


Fig. 4. Seismic fragility curves of loss of essential power

OPR1000의 CDF에 큰 영향을 미치는 필수 전원 상실 사건을 대상 사고 시나리오로 선정하였다 [9]. 필수 전원 상실 사건은 원자력발전소의 소외 전원이 상실된 상태에서 안전 관련 계통 및 기기에 전원 공급이 상실되는 사건이다. 또한 필수 전원 상실 사건은 보수적으로 사고 완화를 위한 조치가 불가능하다고 가정하여, 사건 발생 시 바로 노심에 손상으로 이어지는 것으로 간주한다. 원자력발전소의 전원 공급 계통은 Fig. 1 [10]에 간략히 나타내었다. 원자력발전소는 Fig. 1의 전원 공급 계통이 두 세트의 트레인이었다. 하지만 확률론적 지진안전성 평가 수행 시 보수적으로 각 트레인을 완전중속으로 가정하여 한 세트의 트레인만 있다고 가정하여 수행된다.

본 연구에서는 필수 전원 상실 사건을 구성하고 있는 구성 이벤트와 지진취약도를 간략히 단순화하여 확률론적 안전성 평가를 수행하였다. 필수 전원 상실 사건과 관련된 구성 이벤트와 지진취약도 정보는 Table 1과 같이 가정을 하였으며 Table 1의 이벤트 코드는 구성요소의 고장을 나타내며 고장수목 구성 시 활용하였다. Fig. 2는 필수 전원 상실 사건을 구성하고 있는 비상디젤발전기의 지진취약도 곡선을 보여준다. 지진취약도 곡선은 x축은 지진강도 y축은 고장확률을 나타내어 일반적으로 지진강도가 증가할수록 고장확률이 증가하는 형태를 보인다. 본 연구에서 활용한 필수 전원 상실 사건의 고장수목은 Fig. 3에 나타내었다 [10]. Fig. 4는 SSCs 간의 지진 손상 상관계수가 서로 독립일 경우의 필수 전원 상실 사건의 지진취약도 곡선을 신뢰도 95%, 50% 및 5%와 평균에 대해 보여준다 [10].

3. 지진 손상 상관계수

원자력발전소의 확률론적 지진 안전성 평가를 위해 SSCs의 고장확률은 지진취약도 곡선을 활용하게 된다. 이러한 지진취약도를 도출하기 위한 방법으로 안전계수법은 구조물의 설계나 지진응답 계산에서 고려하는 각종 변수를 크게 성능계수와 응답계수로 구분한다. 이때 SSCs의 동시손상을 고려하기 위해서는 SSCs간의 지진 손상 상관계수가 있어야 하고 SSMRP [4]에서는 이를 다음 식 (1)으로 계산할 것을 제안하였다.

$$\rho_{12} = \frac{\beta_{R1}\beta_{R2}}{\sqrt{\beta_{R1}^2 + \beta_{C1}^2} \sqrt{\beta_{R2}^2 + \beta_{C2}^2}} \rho_{R1R2} + \frac{\beta_{C1}\beta_{C2}}{\sqrt{\beta_{R1}^2 + \beta_{C1}^2} \sqrt{\beta_{R2}^2 + \beta_{C2}^2}} \rho_{C1C2} \quad (1)$$

여기서, ρ_{12} 는 최종적으로 얻고자 하는 두 SSCs간의 지진 손상 상관계수이며 ρ_{R1R2} 는 두 SSCs간의 지진 응답 상관계수, ρ_{C1C2} 는 두 SSCs간의 내진 성능 상관계수를 나타낸다. 또한 β_{R1}, β_{R2} 는 각각 1번 SSCs와 2번 SSCs의 지진응답 대수표준정규분포의 표준편차, β_{C1}, β_{C2} 는 각각 1번 SSCs와 2번 SSCs의 내진성능 대수표준정규분포의 표준편차이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 SSCs간의 지진 손상 상관계수(ρ_{12})를 계산하기 위해서는 SSCs간의 지진 응답 상관계수(ρ_{R1R2})와 내진 성능 상관계수(ρ_{C1C2})를 알아야 한다. 따라서 일반적으로 동일한 기기가 동일한 구조물, 같은 위치에 있을 때 지진 손상 상관계수의 값은 크며, 서로 다른 기기가 다른 구조물 다른 위치에 있을 때 지진 손상 상관계수의 값은 작다. 내진 성능 상관계수는 두 SSCs의 시험 데이터로부터 도출할 수 있으며, 지진 응답 상관계수는 다음 식 (2)를 활용하여 계산할 수 있고 필요한 정보는 지진응답해석을 통해 얻을 수 있다.

$$\rho_{R1R2} = \frac{COV(X_1(a), X_2(a))}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (2)$$

여기서, a 는 확률론적 지진 안전성 평가에서 사용한 지진강도이며, 일반적으로 PGA(Peak Ground Acceleration)를 사용한다. $X_1(a)$ 와 $X_2(a)$ 는 각각 1번 SSCs와 2번 SSCs의 최대 지진응답에 대한 확률변수이며, σ_1 와 σ_2 는 각각 $X_1(a)$ 와 $X_2(a)$ 의 표준편차이고, $COV(X_1(a), X_2(a))$ 는 $X_1(a)$

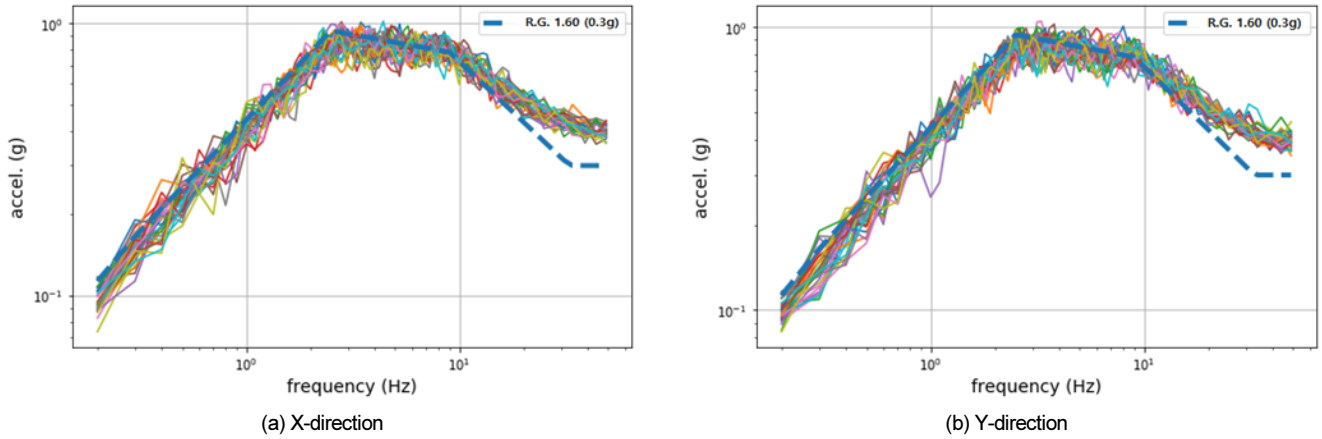


Fig. 5. Response Spectrum of generated earthquake signal [8]

Table 2. Material properties of each building [8]

Material	Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Shear Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Weight Density (kN/m ³)
Concrete	25.57	26.43	11.29	0.17	23.56
Structural Steel	344.73	199.94	79.97	0.27	76.97

Table 3. Seismic failure correlation coefficient for the loss of essential power

	SDGSF	SBCRC	SSWRC	SBRFSF	SLCRC	SDCSF	SSEAU	SINRC	SRTRC
SDGSF	1.000	0.602	0.580	0.706	0.573	0.714	0.259	0.608	0.642
SBCRC	0.602	1.000	0.537	0.698	0.575	0.636	0.289	0.568	0.765
SSWRC	0.580	0.537	1.000	0.575	0.391	0.582	0.271	0.794	0.500
SBRFSF	0.706	0.698	0.575	1.000	0.677	0.735	0.235	0.603	0.745
SLCRC	0.573	0.575	0.391	0.677	1.000	0.612	0.154	0.415	0.640
SDCSF	0.714	0.636	0.582	0.735	0.612	1.000	0.294	0.611	0.654
SSEAU	0.259	0.289	0.271	0.235	0.154	0.294	1.000	0.286	0.241
SINRC	0.608	0.568	0.794	0.603	0.415	0.611	0.286	1.000	0.529
SRTRC	0.642	0.765	0.500	0.745	0.640	0.654	0.241	0.529	1.000

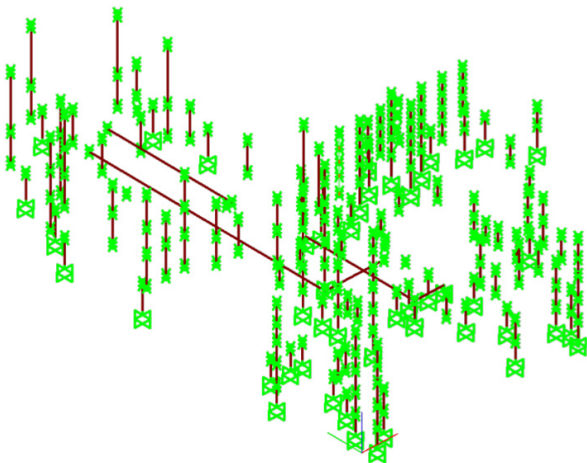


Fig. 6. Auxiliary-turbine-access control building complex model

와 $X_2(a)$ 의 공분산이다.

위의 방법으로 필수 전원 상실 사건을 구성하는 SSCs간의 지진 응답 상관계수를 계산하기 위하여 생성된 입력지진과 구조물에 대해 확률론적 지

진응답 해석을 수행하였고, 보조건물의 주요위치 별 층응답스펙트럼을 작성하였다. 작성된 층응답스펙트럼으로부터 SSCs간의 지진 응답 상관계수를 산정하였다. 국내 원자력발전소는 R.G. 1.60의 설계응답스펙트럼 [11]을 바탕으로 설계가 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 R.G. 1.60 설계응답스펙트럼의 최대지반가속도를 0.3 g로 하여 지진입력 신호를 생성하였다. 원자력발전소의 거동은 수평지진에 의해 지배된다고 가정하여 1 세트당 X, Y 방향 지진을 각각 생성하였다. Fig. 5는 생성한 입력지진으로 계산된 응답스펙트럼과 Reg 1.60 설계응답스펙트럼을 겹쳐서 나타내었다.

확률론적 지진응답해석을 위하여 총 30 set의 입력지진을 생성하였다. 대상 구조물은 OPR1000의 보조건물 집합체이다. 한국형 표준원자력발전소의 보조건물 집합체는 보조건물, 터빈건물, 출입통제 건물이 슬라브를 공유를 하고 있어 하나의 구조체로 모델링 하였다 [8]. 구성된 보조건물 집합체 모델은 Fig. 6에 나타내었다. Table 2는 보조건물의 모델링을 위하여 사용한 물성값을 나타내었다. 확률론적 지진응답 해석과 관련하여, 입력지진은 방향성에 대한 불확실성을 고려하였고 구조물은 강성과 감쇠에 대하여 변동성을 고려하였다 [8].

위에서 계산된 SSCs의 지진응답 해석 결과를 바탕으로 필수 전원 상실

사건을 구성하고 있는 SSCs간의 지진 응답 상관계수를 구하였다. 필수전원 상실 사건을 구성하고 있는 요소들은 서로 다른 기기이므로, 구성요소들 간의 내진 성능 상관계수는 독립으로 가정을 하였다. 구해진 지진 응답 상관계수와 내진 성능 상관계수로부터 지진 손상 상관계수를 계산하였다. 구해진 지진 손상 상관계수는 다음 Table 3에 나타내었다.

4. 지진 손상 상관성에 의한 플랜트 지진리스크의 영향

본 장에서는 구해진 지진 손상 상관계수를 고려하여 필수 전원 상실 사건의 지진취약도 곡선을 분석하였다. 또한 본 저자에 의해 제안된 기기의 고유진동수와 위치로부터 지진 응답 상관계수를 간략한 규칙 [8]을 통해 구하는 방법을 적용하여 지진 손상 상관계수를 도출하였고, 이를 Table 4에 나타내었다. 비교 분석을 위하여, SSCs 간의 지진 손상 상관계수가 독립 및 완전종속 조건에서의 지진취약도 곡선을 Fig. 7에 같이 작성하였다.

지진취약도 곡선을 독립인 경우와 비교하여 지진 손상 상관성을 고려하면 지진취약도 곡선에서 고장확률이 감소하는 것을 확인할 수 있다. SSCs 간의 고장확률을 완전종속으로 고려한 경우 고장확률이 추가로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 확률론적 지진응답 해석으로부터 계산되어진 지진 손상 상관계수를 적용한 지진취약도 곡선과 경험적 규칙을 통하여 얻어진 지진 손상 상관계수를 적용한 경우 그 결과가 고장확률이 미미하게 적은 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 3과 Table 4의 지진 손상 상관계수를 비교하면 규칙을 통해 얻은 지진 손상 상관계수의 값들이 약간 더 크므로 발생한 것으로 추측된다. 필수 전원 상실 사건의 경우 규칙을 활용하여 지진 손상 상관계수를 활용하여 지진취약도 곡선을 작성하면 비보수적 결과를 주는 것을 확인할 수 있다. 또한 지진취약도 곡선 고장확률의 감소폭은 1.0 g에서 1.25 g 사이에서 큰 것을 확인할 수 있다.

고신뢰도저확률손실 (HCLPF: High Confidence of Low Probability of Failure)를 살펴보면 SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려한 경우의 HCLPF는 0.328 g, SSCs간의 지진 손상 상관성을 완전종속으로 고려한 경우의 HCLPF는 0.362 g이다. 독립인 경우의 HCLPF는 0.321 g로 상관성을 고려하면 지진취약도 곡선의 고장확률 감소로 인하여 HCLPF가 증가하는 것으로 확인할 수 있다. 또한 경험 규칙을 통해 얻은 지진 손상 상관계수를 고려한 경우의 HCLPF는 0.329 g로 지진응답 해석으로 구해진 지진 손상 상관계수에 의한 HCLPF와 유사한 값을 보여준다.

Table 4. Seismic failure correlation coefficient for the loss of essential power from proposed thumb rules

	SDGSF	SBCRC	SSWRC	SBRFSF	SLCRC	SDCSF	SSEAU	SINRC	SRTRC
SDGSF	1.000	0.573	0.551	0.523	0.554	0.728	0.426	0.574	0.573
SBCRC	0.573	1.000	0.786	0.559	0.791	0.581	0.595	0.819	0.818
SSWRC	0.551	0.786	1.000	0.703	0.760	0.558	0.572	0.788	0.786
SBRFSF	0.523	0.559	0.703	1.000	0.540	0.531	0.452	0.733	0.559
SLCRC	0.554	0.791	0.760	0.540	1.000	0.562	0.575	0.792	0.791
SDCSF	0.728	0.581	0.558	0.531	0.562	1.000	0.432	0.582	0.581
SSEAU	0.426	0.595	0.572	0.452	0.575	0.432	1.000	0.596	0.595
SINRC	0.574	0.819	0.788	0.733	0.792	0.582	0.596	1.000	0.819
SRTRC	0.573	0.818	0.786	0.559	0.791	0.581	0.595	0.819	1.000

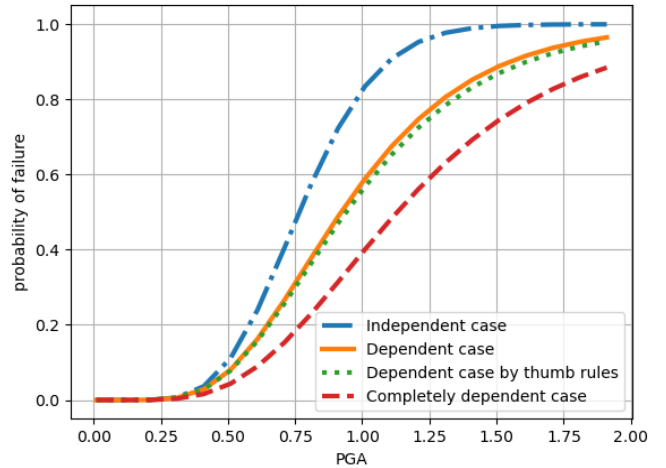


Fig. 7. Seismic fragility curves (mean) of loss of essential power

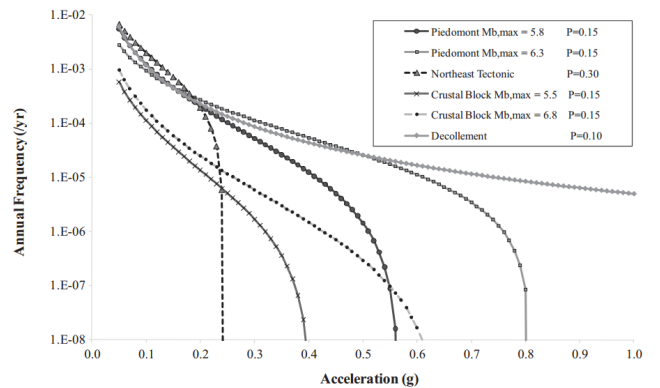


Fig. 8. Seismic hazard curves for all seismogenic zones at LGS site [6]

확률론적 지진 안전성 평가의 1단계의 결과는 CDF이다. CDF는 지진재해도 곡선과 지진취약도 곡선을 컨볼루션하여 계산된다. 필수 전원 상실 사건의 지진 손상 상관성이 CDF에 미치는 영향을 간접적으로 분석하기 위하여, Fig. 8 [6]과 같은 지진재해도 곡선에 대해 CDF를 계산하여 이를 비교하였다. Fig. 8에는 6개의 지진재해도 곡선을 각 확률을 고려한 평균 지진재해도 곡선을 활용하였다. 필수 전원 상실 사건의 CDF는 SSCs간의 고장확률이 독립일 경우는 $2.59 \times 10^{-6}/yr$ 이며, SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려할 경우 $1.89 \times 10^{-6}/yr$ 이고, 규칙을 적용한 경우는 $1.84 \times 10^{-6}/yr$, 마지막으로 SSCs간의 고장확률이 완전종속으로 가정할 경우 $1.10 \times 10^{-6}/yr$ 이

다. 독립인 경우와 비교하여 SSCs간의 지진손상상관성을 고려한 경우 CDF값이 27.2% 정도 감소하였고, SSCs간의 고장확률이 완전종속으로 가정할 경우 57.6% 정도 감소하였다.

많은 경우 확률론적 지진 안전성 평가수행 시 SSCs간의 고장확률은 서로 독립으로 가정을 하고 있다. 본 연구에서는 SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려하여 필수 전원 상실 사건에 대해 지진취약도 곡선과 CDF를 구하였다. 그 결과 SSCs간의 지진 손상 상관성을 고려하면 독립의 경우와 그 결과가 다른 것을 알 수 있다. 즉, 지진취약도 곡선과 CDF가 독립인 경우와 비교하여 고장확률이 낮은 것을 알 수 있으며, CDF의 값은 더 작은 것을 알 수 있다. 지진 손상 상관성에 의하여 지진취약도 곡선의 고장확률 값은 증가 혹은 감소할 수 있지만 필수 전원 상실 사건의 경우 SSCs의 조합이 대부분 OR Gate로 조합으로 되어 있어 독립인 경우와 비교하여 지진취약도의 고장확률이 감소한 것으로 보인다. 또한 지진 손상 상관계수에 의해 지진취약도 곡선의 고장확률과 CDF 값이 변화하기 때문에 적절한 지진 손상 상관계수를 고려하는 것이 중요한 것을 알 수 있다.

일반적으로 확률론적 지진 안전성 평가수행 시 지진이 발생하면 원자력 발전소에 전원을 공급하는 소의전원은 차단된다고 가정하고, 자체적으로 전원을 공급할 수 있는 트레인 2세트가 있지만 보수적으로 필수 전원 상실 사건 구성은 1세트의 트레인만 있다고 가정하여 SSCs간의 손상은 서로 독립으로 가정을 한다. 즉, 필수 전원 상실 사건의 경우 SSCs의 고장확률을 독립으로 가정하여 지진취약도를 분석할 경우 관련 취약도, HCLPF 및 CDF 결과는 보수적인 것을 알 수 있다.

5. 결론

지진 재해가 발생하면 이는 진원지로부터 매우 광범위하게 영향을 미친다. 따라서 지진 사건은 원자력발전소 부지 전체에 영향을 미치게 되어 동일한 지진 사건으로 인하여 부지 내 SSCs의 지진응답이 서로 연관되게 된다. 구체적으로, SSCs가 같은 지진 사건에 의해 지진응답이 발생하므로 지진 응답에 유사성이 발생하며, 이 유사성에 의해 SSCs의 고장확률 사이에 상관성이 적게나마 존재하게 된다. 하지만 일반적으로 원자력발전소의 확률론적 지진 안전성 평가수행 시 SSCs간의 고장확률을 독립으로 가정하여 수행한다. 보다 합리적인 확률론적 지진 안전성 평가의 결과를 얻기 위해서는 SSCs의 고장확률의 상관성을 고려하여 평가가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 지진 손상 상관성이 원자력발전소의 필수 전원 상실 사건에 미치는 영향을 확인하고자 필수 전원 상실 사건을 구성하고 있는 SSCs의 지진 응답 상관계수를 원자력발전소의 지진응답해석을 통해 산출하였다. SSCs의 내진 성능 상관계수는 서로 다른 SSCs 이므로 독립으로 가정하여 지진 손상 상관계수를 산출하였다. SSCs의 지진 손상 상관성을 고려하여 필수 전원 상실 사건의 지진취약도 곡선, HCLPF 및 CDF를 계산하였다.

그 결과 필수 전원 상실 사건을 SSCs의 고장확률의 관계를 독립으로 가정하고 계산을 수행하였을 경우와 지진 손상 상관성을 고려하여 계산을 수행하였을 경우를 비교하면, 지진취약도 곡선의 고장확률이 감소하고 HCLPF는 증가하는 것을 확인하였다. 또한 가정한 지진재해도를 통해 CDF를 계산할 경우 그 값이 대략 27% 정도 감소하는 것을 확인하였다. 경험에 의한 규칙은 지진응답해석을 통해 얻은 지진취약도 곡선과 CDF의 값

이 유사한 것을 확인하여 경향을 분석하기 위해 사용이 가능함을 확인하였다. 결과적으로, 지진 손상 상관성이 원자력발전소의 확률론적 지진 안전성 평가 결과에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 합리적인 결과를 위해서는 적절한 SSCs의 지진 손상 상관계수를 고려하여야 함을 알 수 있다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2020년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2020R1G1A1007570).

/ REFERENCES /

1. Korea Meteorological Administration, Earthquake Notification - 2016. 9. 12. 20:37. Official notice. c2016.
2. Eem SH, Choi IK, A Shape of the Response Spectrum for Evaluation of the Ultimate Seismic Capacity of Structures and Equipment including High-frequency Earthquake Characteristics, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2020;24(1):1-8.
3. Central Disaster Safety Measures Headquarters, Press Releases: Recovery cost of Pohang earthquake; c2017 Dec 6.
4. Smith PD, Dong RG, Bernreuter DL, Bohn MP, Chuang TY, Cummings GE, Smith PD, Dong RG, Bernreuter DL, Bohn MP, Chuang TY, Cummings GE, Johnson JJ, Mensing RW, Wells JE, Seismic safety margins research program, Phase I final report- Overview (No. NUREG/CR-2015 (VOL. 1)), Lawrence Livermore Laboratory. c1981.
5. US Nuclear Regulatory Commission, Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150 (NUREG/CR-4840). Washington, DC. c1990.
6. Eem SH, Choi IK, Influence Analysis of Seismic Risk due to the Failure Correlation in Seismic Probabilistic Safety Assessment, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2019;23(2): 101-109.
7. Ebisawa K, Teragaki T, Nomura S, Abe H, Shigemori M, Shimomoto M, Concept and methodology for evaluating core damage frequency considering failure correlation at multi units and sites and its application, Nuclear Engineering and Design, 2015;288:82-97.
8. Eem S, Choi IK, Cha SL, Kwag S, Seismic response correlation coefficient for the structures, systems and components of the Korean nuclear power plant for seismic probabilistic safety assessment, Annals of Nuclear Energy.
9. Choi IK, Eem S, High Frequency Earthquake Ground Motion Research - Selection of Equipment for Seismic Fragility Test, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 2017, May 18-19, Jeju, Korea.
10. Eem S, Choi IK, Influence in Seismic Fragility of Systems due to Seismic Correlation, In EESK spring workshop. c2019, p. 115-116.
11. US Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. c2014.