

지진 재해도의 닫힌 근사식 제안에 관한 연구

A Study to Propose Closed-form Approximations of Seismic Hazard

곽신영¹⁾ · 함대기^{2)*}

Kwag, Shinyoung¹⁾ · Hahm, Daegi^{2)*}

¹⁾한국원자력연구원 연구로설계종합실, ²⁾한국원자력연구원 구조지진안전연구실

¹⁾Research Reactor System Engineering Team, Korea Atomic Energy Research Institute, ²⁾Structural and Seismic Safety Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute

/ A B S T R A C T /

In this paper, we address some issues in existing seismic hazard closed-form equations and present a novel seismic hazard equation form to overcome these issues. The presented equation form is based on higher-order polynomials, which can well describe the seismic hazard information with relatively high non-linearity. The accuracy of the proposed form is illustrated not only in the seismic hazard data itself but also in estimating the annual probability of failure (APF) of the structural systems. For this purpose, the information on seismic hazard is used in representative areas of the United States (West : Los Angeles, Central : Memphis and Kansas, East : Charleston). Examples regarding the APF estimation are the analyses of existing platform structure and nuclear power plant problems. As a result of the numerical example analyses, it is confirmed that the higher-order-polynomial-based hazard form presented in this paper could predict the APF values of the two example structure systems as well as the given seismic hazard data relatively accurately compared with the existing closed-form hazard equations. Therefore, in the future, it is expected that we can derive a new improved APF function by combining the proposed hazard formula with the existing fragility equation.

Key words: Seismic hazard equation, High-order polynomials, Annual probability of failure, Seismic fragility

1. 서론

지진에 대비하여 구조물을 안전하게 설계하고, 또한 이를 확률론적으로 평가하기 위한 방법이 다수 연구 되었다. 이러한 연구 결과는 실제 설계 측면에서는 구조물의 성능기반 내진설계 (PBEE : Performance-Based Earthquake Engineering 혹은 PBSE : Performance-Based Seismic Design) 프레임 워크를 통하여 반영 되었고, 설계 기준을 초과하는 지진의 영향에 대한 구조 시스템의 안정성 평가는 지진 확률론적 안정성 평가 (SPSA : seismic probabilistic safety assessment) 개발을 통하여 이루어지고 있다 [1].

PBEE와 SPSA의 공통 인자는 지진 및 구조물의 무작위성 (randomness)과 불확실성 (uncertainty)을 지진 재해도 및 지진 취약도를 이용하여 고려하고 또한, 이를 통합하여 연간파괴확률 (APF : Annual Probability of Failure)을 산정한다는 것이다. 특히, PBEE는 초기 설계 단계부터 APF

로 표현되는 성능을 고려하기 위하여, 간략한 닫힌 근사식 형태의 재해도 및 취약도 함수를 사용하였고, 이를 통하여 APF 함수를 도출하였다 [2]. 제안된 APF 함수는 원자력 시설 관련 구조물의 내진설계 기준 [3]에도 반영되어, 다양한 구조물이 목표한 수준의 내진성능을 가지도록 도움을 주고 있다. 또한, PBEE에 제시된 재해도 및 취약도 근사식들은 다양한 구조 시스템의 SPSA에도 활용되고 있다 [4-8].

그러나, 최근에 이루어진 몇몇의 연구는 PBEE에 사용되는 APF 식의 정확성에 대한 문제를 제기하였고, 특히 로그-로그스케일에서 지진동 세기와 APF 사이에 선형적인 관계를 가진 재해도 근사식이 이에 대한 가장 큰 원인이라고 지적하고 있다. 이에 따라, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 재해도 근사식을 단일 쌍곡선 (hyperbolic) 혹은 2차 함수 형태로 제안하는 연구가 수행된 바 있다 [9-11]. 이러한 접근법은 기존 선형식 방법에 비하여 원래의 재해도 데이터를 표현하는데 있어 상당한 정확도를 보장해 주었다. 그럼에도 불구하고, 이 또한 큰 비선형성을 가진 재해도 정보를 표현하기에는 여전히 무리가 있다. 특히, 미국 중동부 지역의 재해도 정보는 비선형성이 다소 커서 이러한 모델의 정확도에 있어 원 데이터와 차이가 있을 것으로 예상된다.

그러므로, 이러한 배경 아래 이번 연구는 위에서 언급된 기존 재해도 근

*Corresponding author: Hahm, Daegi

E-mail: dhahm@kaeri.re.kr

(Received December 15, 2017; Revised April 13, 2018; Accepted April 20, 2018)

사식의 단점을 극복하고자 새로운 형태의 재해도 함수를 제안하였다. 이는 기존과 달리 고차 다항식 (higher-order polynomial)을 이용함으로써 기존의 방법보다 비선형성이 큰 재해도 데이터를 더 정확하게 묘사할 수 있다. 또한 제안된 근사식이 일반 단일 구조물 및 원자력 발전소 (원전)의 APF 산정에 있어 기존 방법보다 더 정확한 결과를 도출함을 확인하였다. 향후에는 이러한 정확도가 높아진 재해도 근사식이 기존의 취약도 식과 결부되어 새롭게 향상된 APF 함수를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 도출된 함수는 원전구조물 내진설계 목표성능과 지진 재해도 사이의 좀 더 상세한 상호관계에 대한 연구를 수행할 수 있을 것으로 보인다.

2. 지진 재해도 근사식 제안

이 장에서는 기존 재해도 근사식의 문제점을 먼저 명시한 후, 기존 재해도 식의 형태와 배경을 자세히 살펴보고자 한다. 또한, 이를 바탕으로 이 연구에서 제안하는 고차 다항식 기반 지진 재해도 근사식을 소개하고자 한다.

2.1 기존 재해도 근사식의 문제점

확률론적 지진 재해도 분석 (PSHA : Probabilistic Seismic Hazard Analysis)은 주어진 부지에서 여러 가지 불확실한 인자를 고려하여 특정한 시간 동안 어느 정도 세기의 지진동이 발생할지에 대한 분포를 산정하는 것을 목적으로 한다. 최종적인 PSHA 결과물은 지진 재해도 데이터로 나타낼 수 있고, 이는 지진동 세기 (IM : intensity measure)에 대한 연간초과빈도 (AFE : Annual Frequency of Exceedance)로 표현된다. 이미 많은 나라에서 광역적으로 PSHA를 수행하였고, 해석 결과물인 지진 재해도 정보는 공개하여 구조물 내진설계에 사용토록 하고 있다. 예를 들면, 미국의 경우, 미국 내 전 지역의 지진 재해도 정보를 미지질조사국 (USGS : US Geological Survey) 웹사이트를 통하여 제공하고 있고, 한국의 경우는 국가지진위험도를 공표 (소방방재청 공고 제2013-179호)하여 일곱 가지 재현주기 (50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년, 4800년)에 대한 최대지반가속도 (PGA : Peak Ground Acceleration) 크기를 지진 재해도 정보로서 공개적으로 제

공하고 있다. Fig. 1의 빨강색 원은 USGS를 통하여 획득한 정보로서 미국 동부 지역 Charleston의 지반 B/C 조건 (전단파 속도 760 m/s에 해당함.)에서 PGA에 대한 평균 지진 재해도 데이터를 보여주고 있다.

PBEE 프레임워크 내에서, 이러한 지진 재해도 정보를 기반으로 이를 포괄할 수 있는 지진 세기와 AFE 사이 로그-로그 선형 형태의 근사식이 제안된 바 있다 [2]. 이 식의 두 가지 주요 계수는 설계기준지진 (DBE : Design Basis Earthquake) 및 최대가능지진 (MCE : Maximum Considered Earthquake)에 해당하는 지진 재해도 정보를 바탕으로 적정한 값이 선정되게 된다. 여기서 DBE 및 MCE 세기 레벨은 각각 50년간 10% 및 2% 초과확률을 의미한다. 이는 AFE 기준으로 $2.1E-3$ (/Yr) 및 $4.04E-4$ (/Yr)에 해당하는 값이다. Fig. 1의 검은색 실선은 DBE와 MCE 값을 보여주고 있고, 초록색 점선은 이 값을 기준으로 설정된 로그-로그 선형식을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 선형식은 DBE와 MCE 세기 사이의 지진 재해도 정보는 잘 표현하고 있지만, 다른 영역에서는 상당히 부정확한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

이에 따라, 이러한 단점을 해결하기 위해 로그-로그 스케일에서 지진세기와 AFE 간의 단일 쌍곡선 근사식이 제안되었다 [9]. 이 식의 주요 계수는 로그-로그 선형식에서와는 달리 모든 재해도 정보를 기반으로 원래의 값과 근사식에 예측하는 값과의 잔차를 최소화하여 획득되어지게 된다. Fig. 1의 파란색 파선은 모든 재해도 정보와 로그-로그 곡선 근사식을 기반으로 산정된 값을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것처럼, 선형식에 비하여 곡선 근사식이 주어진 지진 재해도 정보를 잘 표현함을 볼 수 있다. 그러나, 여전히 이 근사식이 그림의 원래 지진 재해도 데이터의 비선형성을 정확하게 묘사하지는 못하는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 Fig. 1을 통하여 볼 때, 현재의 재해도 근사식 형태로는 미국 Charleston에서 나타난 바와 같은 비선형성이 강한 지진 재해도 정보 값들은 제대로 묘사하기 어렵다는 문제점을 볼 수 있다. 그러므로, 이러한 한계를 극복하기 위해서 주어진 지진재해도 데이터를 보다 정확히 표현할 수 있는 새로운 식 형태를 도입할 필요가 있다. 다음 절 부터는 위에서 간단하게 언급한 로그-로그 선형 근사식과 곡선 근사식을 구체적으로 기술하고, 본 연구에서 제안하는 로그-로그 스케일에서의 고차 다항식 기반 지진 재해도 식을 소개하고자 한다.

2.2 로그-로그 선형 근사식

로그-로그 선형 형태의 근사식은 원래 식 (1)과 같이 지수함수 형태로 제시되었다. 이는 결국 로그-로그 스케일에서 지진동 세기와 AFE 사이에서 식 (2)과 같은 선형 관계를 나타낸다.

$$v = k_0 \cdot IM^{-k} \tag{1}$$

$$\ln(v) = -k \cdot \ln(IM) + \ln(k_0) \tag{2}$$

여기서, v 는 AFE이고, IM 은 지진동의 세기를 나타낸다. k_0 및 k 는 근사식의 모델 파라미터로서 특정한 지진 재해도 데이터에 따라 fitting 되어야 하는 값이다. 앞서 간단하게 언급한 바와 같이 이 파라미터 값들은 DBE와 MCE 세기 레벨 사이 지진 재해도 데이터에서 근사식의 정확도가 높도록 선정되

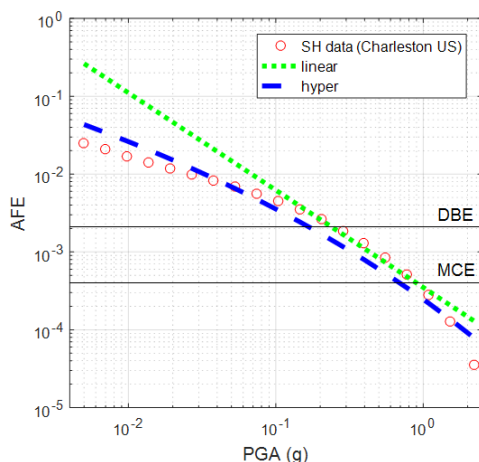


Fig. 1. Comparison between seismic hazard data (Charleston US) and existing fitted equations

어진다. k 는 로그-로그 선형식에서 기울기를 의미하는 인자로서 보통 1~4의 값을 갖는다. 미서부 지역과 단주기 (shorter periods) 영역에서 이 값이 상대적으로 크다고 알려져 있다.

2.3 로그-로그 곡선 근사식

로그-로그 단일 쌍곡선 형태의 근사식은 전형적인 지진 재해도 데이터의 지진동 세기와 AFE 관계가 로그-로그 스케일에서 볼록한 형태를 보이는 데에서 착안되었다. 이는 구체적으로 식 (3)과 같은 모델로 제시되었다.

$$\ln(v) = \frac{\alpha}{\ln(IM) - \ln(IM_{asy})} + \ln(v_{asy}) \quad (3)$$

여기서, 위의 근사식을 이루는 파라미터는 총 3개로서 α 는 곡선의 형태를 결정하는 상수이고, IM_{asy} 및 v_{asy} 는 쌍곡선의 참고 원점 (reference origin)을 의미하는 파라미터로서 구체적으로 IM_{asy} 는 수직축 점근선이며, v_{asy} 는 수평축에 대한 점근선이다.

위의 3개의 파라미터는 최소자승법 (method of least square)에 의하여 결정될 수 있고, 이는 아래와 같이 정식화 할 수 있다.

$$Min. RSSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\ln(v_i) - \ln(v(IM_i))]^2} \quad (4)$$

여기서, v_i 는 PSHA를 통하여 얻어진 지진 재해도 데이터 값이고, n 은 지진 재해도 데이터 총 개수이며, $v(IM_i)$ 은 식(3)의 곡선 근사식으로부터 얻어진 값을 나타낸다. r_i 는 각각의 데이터 값에서의 자승오차 (least square residual)를 의미한다. 근사식에 대한 정확도 척도는 상관변수 (coefficient of correlation, R^2) 혹은 자승오차의 표준편차 (β_F)를 통하여 나타낼 수 있다. 근사식의 정확도는 R^2 값이 클수록, β_F 값은 작을수록 원 지진 재해도 데이터 값을 잘 표현함을 의미한다.

2.4 로그-로그 고차 다항 근사식

이 절에서는 본 연구에서 제안하는 고차 다항식 (higher-order polynomial)에 기반한 지진 재해도 근사식에 대하여 기술하였다. 제안하는 근사식은 기본적으로 로그-로그 스케일에서 고차 함수로 표현되고, 아래와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\ln(v) = a_0 + a_1 \cdot \ln(IM) + a_2 \cdot (\ln(IM))^2 + a_3 \cdot (\ln(IM))^3 + \dots + a_n \cdot (\ln(IM))^n \quad (5)$$

여기서, n 은 다항식의 차수를 나타내고, 식을 이루는 파라미터는 총 $n+1$ 개로서 a_i 는 각 IM의 차수에 대한 계수를 의미한다. 예를 들면, 2차 다항식의 경우 총 파라미터는 3개이고 구체적으로는 a_0, a_1 및 a_2 가 된다. 파라미터 값들은 2.3절에 언급한 최소자승법인 식 (4)에 의하여 결정될 수 있다.

Fig. 2는 Fig. 1에 나타난 미국 Charleston의 지진 재해도 데이터를 기반

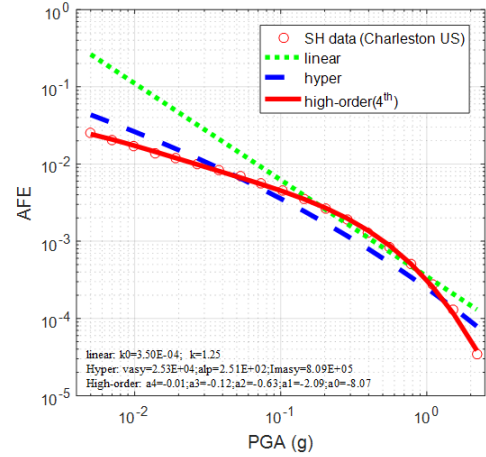


Fig. 2. Comparison between seismic hazard data (Charleston US) and proposed higher-order equation

Table 1. R^2 and β_F for the hazard equation models regarding seismic hazard data

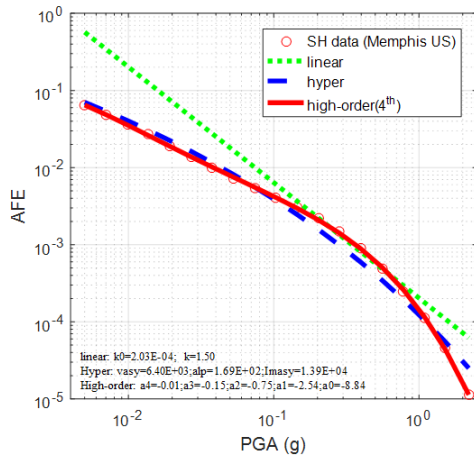
Seismic hazard data	R^2			β_F		
	Linear	Hyperbolic	Proposed (4th order)	Linear	Hyperbolic	Proposed (4th order)
Charleston	0.6083	0.9498	0.9993	0.8314	0.4094	0.0478
Memphis	0.7793	0.9859	0.9998	0.7466	0.2893	0.0309
Kansas	0.9878	0.9665	0.9994	0.2549	0.4665	0.0629
LA	0.5785	0.9985	0.9999	1.5801	0.1411	0.0362

으로 식 (5)를 이용하여 4차 다항식으로 근사한 그래프를 기존의 근사식의 결과와 함께 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 4차의 다항식으로 지진 재해도 데이터의 비선형성을 기존의 근사식보다 정확하게 묘사함을 볼 수 있다. 각 모델에 대한 R^2 및 β_F 값은 Table 1에 정리하였다. 추가적으로, 미국 중부 Memphis 와 Kansas 및 미국 서부 LA에 대한 지진 재해도 데이터 (지반 B/C 조건)를 고려하여 제안된 근사식 그래프를 기존의 근사식에 의한 그래프와 함께 Fig. 3에 나타내었고, 근사식의 정확도를 나타내주는 값들은 Table 1에 정리하였다.

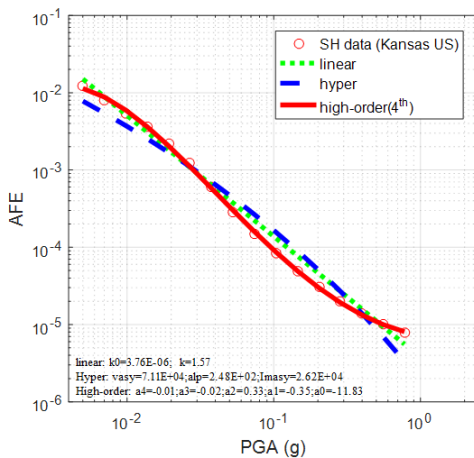
이 결과를 통해 주목할 점은 미국 서부 LA에 나타난 지진 재해도 데이터는 기존 곡선 근사식으로도 충분히 정확하게 표현할 수 있지만, 미국 중동부 지역인 Memphis, Kansas 및 Charleston에서 관찰된 재해도 데이터는 기존 근사식으로는 충분히 묘사할 수 없음을 확인할 수 있다는 것이다. 특히 Kansas와 같은 재해도 데이터에서는 곡선 근사식의 정확도가 선형 식보다 더 떨어짐을 볼 수 있었다. 한편, 제안된 근사식은 전형적인 지진 재해도 데이터 형상을 갖고 있는 LA 지역 뿐 아니라 비선형성이 큰 미국 중동부 지역 지진 재해도 정보 또한 잘 예측함을 확인할 수 있었다.

3. 재해도 근사식이 연간파괴확률에 미치는 영향

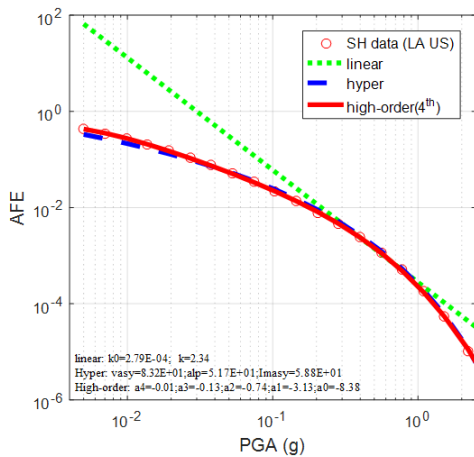
본 장에서는 제안된 고차 다항식에 기반한 지진 재해도 근사식이 기존 근사식과 비교하여 APF 값을 얼마나 정확하게 예측할 수 있는지 예제 구조 시스템을 통해 살펴보았다. 이를 위하여, 먼저 3.1 절에서는 PBEE와 SPSA



(a) Memphis



(b) Kansas



(c) LA

Fig. 3. Comparison between seismic hazard data (memphis, kansas, LA) and various hazard equation

에서 APF를 산정하는 방법을 간단하게 소개하였다. 3.2절에서는 구체적으로 단일 구조물의 APF 값이 실제 지진 재해도 데이터를 기반으로 한 경우와 기존 및 제안된 근사식을 이용하여 구한 경우에 얼마나 차이를 보이는지 비교하였으며, 마지막으로 원자력 발전소의 APF 값인 연간 노심손상확률에 근사식의 정확도가 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

3.1 연간파괴확률 (APF) 산정

구조 시스템의 리스크인 APF는 지진 취약도와 지진 재해도 기율기 절대 값의 곱을 적분(convolution integral)하여 산정할 수 있고, 이는 수학적으로 아래와 같이 정의된다.

$$APF = \int_{-\infty}^{+\infty} P_f(IM) \left| \frac{dv(IM)}{dIM} \right| dIM \quad (6)$$

여기서, $P_f(IM)$ 은 지진 취약도이다. 이는 주어진 지진동 세기에 대한 조건부 파손확률로 정의된다. 수학적으로는 아래와 같은 로그 정규분포로 표현될 수 있다 [12].

$$P_f(IM) = \Phi \left(\frac{\ln(IM/A_m) + \beta_r \Phi^{-1}(Q)}{\beta_r} \right) \quad (7)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 는 표준 가우시안 누적분포함수이고, Q 는 취약도 곡선의 신뢰도 수준(confidence level)을 의미한다. A_m 은 특정한 파손 모드에 대한 해당 구조물의 지진동 내력 중앙값(median)이며, β_r 과 β_u 는 로그표준편차로서 각각 지진동 내력에 대한 무작위성(randomness) 및 모델링 불확실성(uncertainty)을 나타낸다. 평균 취약도 곡선의 경우는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f(IM) = \Phi \left(\frac{\ln(IM/A_m)}{\sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2}} \right) \quad (8)$$

단순한 구조 시스템의 경우는 하나의 지진 취약도로 나타낼 수 있고, 원전과 같은 복잡한 구조 시스템은 여러 구조물 및 기기들이 갖는 지진 취약도의 조합으로 표현될 수 있다. 이 때, 취약도의 조합은 사건수목 및 고장수목의 시스템 해석을 통하여 이루어지는 것이 일반적이다 [13].

3.2 적용 예제 1: 플랫폼 구조물

첫 번째 예제로서, 지진 재해도 근사식의 정확도가 단일 구조물 APF 결과에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 이는 현재 PBEE에서 사용하는 로그-로그 선형 근사식 기반 APF 함수의 정확도를 간접적으로 보여줄 수 있을 것이다. 대상 예제로는 플랫폼 구조물을 고려하였다. 이 플랫폼 구조물은 2016년에 요르단에 완공된 연구용 원자로의 유지 보수 및 방사화된 노심 냉각수의 상향류를 막기 위하여 Fig. 4와 같이 원자로 수조 내부에 설치되었다. 이는 원자로 구조물 (reactor structure assembly) 상부에 자리 잡고 있어 지진에 대한 안전성이 매우 중요한 구조물이다. 이에 따라 수조수의 영향을 고려한 플랫폼의 지진 취약도 해석이 수행된 바 있다 [14]. 해석 결과, 플랫폼을 지지하는 기본 프레임 구조가 인장과 휨에 의한 응력 파괴 모드에 대하여 가장 지진에 취약한 것으로 평가 되었고, 구체적인 파라미터 값은 $A_m = 1.65g$, $\beta_r = 0.30$ 및 $\beta_u = 0.39$ 와 같이 산정되었다.

이러한 구조물의 취약도 분석 결과를 바탕으로, 식 (6)을 이용하여 제안

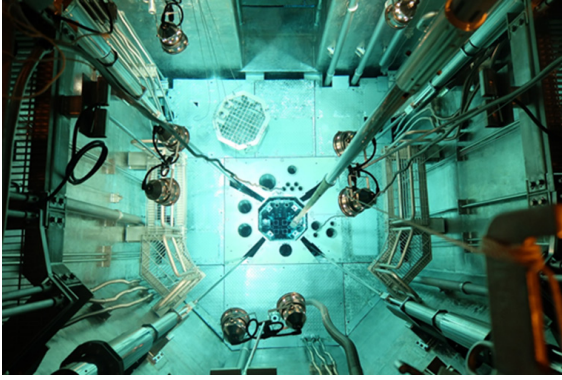


Fig. 4. Pool platform structure in Jordan research reactor

Table 2. Comparison of APFs of platform structure using various hazard equations

Seismic hazard data	Annual probability of failures (/Yr)			
	Linear	Hyperbolic	Proposed (4th order)	Exact (data interpolation)
Charleston	2.00E-04 (23.6%)	1.37E-04 (15.4%)	1.57E-04 (3.3%)	1.62E-04
Memphis	1.14E-04 (57.4%)	6.66E-05 (8.1%)	7.37E-05 (1.6%)	7.25E-05
Kansas	5.22E-07 (13.2%)	3.72E-07 (38.1%)	6.04E-07 (0.5%)	6.01E-07
LA	1.67E-04 (24.9%)	1.42E-04 (6.7%)	1.30E-04 (2.5%)	1.34E-04

된 재해도 근사식의 정확도가 기존 근사식과 비교하여 APF 값을 얼마나 잘 예측할 수 있는지 살펴보았다. 기본적인 지진 재해도 데이터는 2.4절에 나타난 4개 지역에서의 값을 사용하였다. Table 2는 각 지역에서 3개의 재해도 근사식을 이용한 APF 값과 재해도 데이터 선형 보간 (data interpolation)을 이용한 APF 값 (numerical exact solution)을 비교하여 보여주고 있다. Table 2 내 괄호 안의 값은 지진 재해도 근사식을 이용한 수치와 데이터 보간을 이용한 수치와의 퍼센트 오차 (percent error (%)) = $(APF_a - APF_e) / APF_e * 100$, 여기서 APF_a 는 재해도 근사식에 의한 값을 의미하고, APF_e 는 데이터 보간을 이용한 값을 의미함)를 나타낸다. 결과에서 보이는 바와 같이 2.4절에 제안된 방법으로 지진 재해도 데이터를 4차 다항식으로 근사하면 약 3% 오차 이내로 충분한 정확도를 플랫폼 APF 값 산정에서 확보함을 확인할 수 있었다. 반면에 기존 재해도 근사식을 이용할 경우에는 LA 및 Memphis 지역에서의 로그-로그 곡선 근사식을 이용한 값을 제외하고는 모두 10% 이상의 큰 오차를 보여주었다. 이는 PBEE에서 달린 형식의 APF 함수를 유도할 때, 기존 근사식을 사용하면, Charleston 등과 같은 지진 재해도 정보 아래서는 큰 오차를 유발할 수 있게 된다는 것을 의미한다. 그러나, 제안된 방법의 고차 다항식 지진 재해도 근사식을 이용하여 APF 값을 유도하면, 어떠한 지진 재해도 데이터 정보 하에서도 일정하게 높은 정확도를 확보하여 강인한 (robust) APF 산정 성능을 보일 것으로 기대된다.

3.3 적용 예제 2: 원자력 발전소 SPSA

두 번째 예제로서, 지진 재해도 근사식의 정확도가 원전 SPSA 결과에

Table 3. Seismic fragilities for SSCs of example NPP

Systems, structures and systems (SSCs)		A_m (g)	β_r	β_i
C1	Offsite power (154 kV Switchyard)	0.30	0.22	0.15
C2	Diesel generator	1.13	0.36	0.38
C3	Essential chilled water compression tank	1.00	0.35	0.40
C4	Battery charger and relay chatter (480 V)	1.03	0.28	0.41
C5	Battery charger (125 V related)	1.54	0.33	0.52
C6	Condensate storage tank	1.04	0.25	0.46
C7	Essential chilled water chiller	1.08	0.28	0.44
C8	Regulating transformer	1.30	0.33	0.46
C9	Essential service water pump	1.20	0.29	0.47
C10	Component cooling water surge tank	2.00	0.41	0.47
C11	4.16 kV switchgear	1.33	0.33	0.47
C12	Inverter	1.37	0.33	0.49
C13	Battery rack	1.46	0.33	0.51
C14	480 V load center	1.50	0.32	0.55
C15	HVAC ducting and supports	2.06	0.32	0.62
C16	Essential chilled water pump	1.85	0.36	0.66
C17	Instrumentation tube (primary system)	1.50	0.30	0.56
C18	125 V DC control center	1.58	0.33	0.57
C19	Switches	2.33	0.41	0.57
C20	Motor Center functional failure	1.33	0.33	0.47
C21	Motor Center structural failure	1.99	0.33	0.67
C22	Auxiliary building	2.00	0.32	0.64
Cr	Operator error (mean failure rate)	0.01 (/Yr)		

어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 원전은 다양한 구조물, 시스템 및 기기 (SSCs : Structures, Systems, and Components)로 이루어진 복잡한 구조 시스템이다. 원전의 SPSA는 원전 전체의 APF를 평가하기 위하여 일반적으로 지진이 유발할 수 있는 연간 노심손상률 (CDF : Core Damage Frequency)을 정량화한다. 이 연구에서는 이와 같은 특징을 갖는 일반적인 원전 SPSA 모델을 고려하여 적용하였다.

대상 원전에서 지진을 유발하는 초기 사건은 (1) 필수원전상실 (LEP : Loss of Essential Power), (2) 2차측열제거상실 (LHR : Loss of secondary Heat Removal), (3) 1차측기냉각수/필수냉수상실 (LOCCW : Loss of Component Cooling Water/essential chilled water), (4) 소형냉각제 상실사고 (SLOCA : Small Loss of Coolant Accidents), (5) 소외전원상실 (LOOP : Loss of Offsite Power), (6) 일반과도사건 (GTRN : General TRaNsient), 등 모두 여섯 가지로 구성된다. 이 중 LEP, LHR, LOCCW 및 SLOCA의 초기 사건은 곧바로 직접적인 노심 손상으로 이어지고, 나머지 초기 사건은 2차적인 사고 전개에 따라 노심 손상 유무가 결정되게 된다. 초기 사건에 대한 자세한 기술은 대상 원전 SPSA 보고서에 자세히 기술되어 있다.

Fig. 5는 대상 원전의 전체적인 초기 사건 사이의 계층적 관계를 보여준다. Table 3은 이러한 사건 수목과 연계된 SSC의 개별 취약도 정보를 나타낸다.

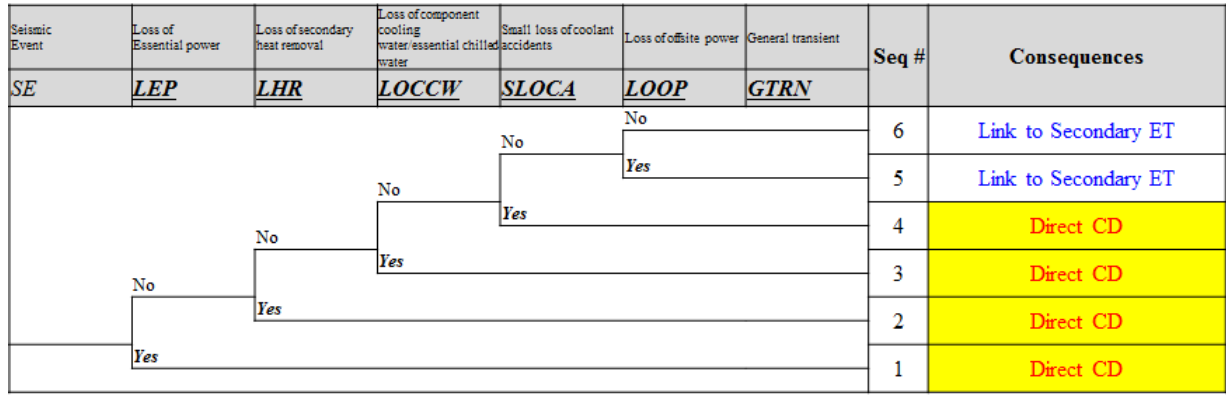


Fig. 5. Event tree for initiating events of nuclear power plant (NPP) example

각각의 초기 사건은 Table 3의 개별 지진 취약도 조합의 결과로 발생하게 되고, 이러한 구체적 조합은 고장 수목 혹은 아래와 같은 불리안 표현(Boolean expression)으로 정의된다.

$$\leq P = C2 + C22 + C19 + C15 + (C11 \cdot C7) + (C14 \cdot C7) + (C4 \cdot C7) + (C12 \cdot C8 \cdot C7) + C18 + C5 + C13 \quad (9)$$

$$LHR = \overline{\leq P} \cdot C6 \quad (10)$$

$$LOCCW = \overline{\leq P} \cdot \overline{C6} \cdot (C3 + C7 + C16 + C9 + C10) \quad (11)$$

$$SLOCA = \overline{\leq P} \cdot \overline{C6} \cdot \overline{(C3 + C7 + C16 + C9 + C10)} \cdot C17 \quad (12)$$

$$LOOP = \overline{\leq P} \cdot \overline{C6} \cdot \overline{(C3 + C7 + C16 + C9 + C10)} \cdot \overline{C17} \cdot C1 \quad (13)$$

$$GTRN = \overline{\leq P} \cdot \overline{C6} \cdot \overline{(C3 + C7 + C16 + C9 + C10)} \cdot \overline{C17} \cdot \overline{C1} \cdot (C20 \cdot C7) \cdot C21 \quad (14)$$

여기서, α 는 취약도 곡선이고, $\overline{\alpha}$ 는 α 와 보(complement)의 관계를 나타낸다. 각각의 초기 사건에 대한 노심 손상 취약도 곡선은 위의 정의된 관계식에 따라 계산되고, 원전 전체에 대한 지진유발 CDF는 식(6)의 적분식 및 각각의 초기 사건 CDF의 총 합을 통하여 산정된다. Fig. 6은 식(9)~(14)에 따라 산정된 노심 손상을 일으키는 초기 사건들의 평균 취약도 곡선을 보여준다.

이러한 초기 사건들의 취약도 결과를 바탕으로, 제안된 재해도 근사식의 정확도가 기존 근사식과 비교하여 CDF 값을 얼마나 잘 예측할 수 있는지 살펴보았다. Table 4는 각 지역에서 3개의 재해도 근사식을 이용한 CDF 값과 재해도 데이터 선형 보간을 이용한 CDF 값을 비교하여 보여주고 있다. Table 4에서 보는 바와 같이 적용 예제 1의 결과와 비슷하게 제안된 방법으로 지진 재해도 데이터를 4차 다항식으로 근사하면, CDF 값에서 작은 오차 이내의 정확도를 확보함을 확인할 수 있었다. 반면에 기존 재해도 근사식 방법은 LA 지역에서의 로그-로그 곡선 근사식을 이용한 값을 제외하고는 모두

Table 4. Comparison of CDFs of nuclear power plant using various hazard equations

Seismic hazard data	core damage frequencies (Yr-1)			
	Linear	Hyperbolic	Proposed (4th order)	Exact (data interpolation)
Charleston	8.65E-04 (26.4%)	4.76E-04 (30.5%)	6.95E-04 (1.6%)	6.84E-04
Memphis	9.57E-04 (115.8%)	3.49E-04 (21.3%)	4.52E-04 (2.0%)	4.43E-04
Kansas	2.09E-05 (10.7%)	1.28E-05 (32.1%)	1.80E-05 (4.6%)	1.89E-05
LA	6.23E-02 (4433.3%)	1.34E-03 (2.7%)	1.35E-03 (1.3%)	1.37E-03

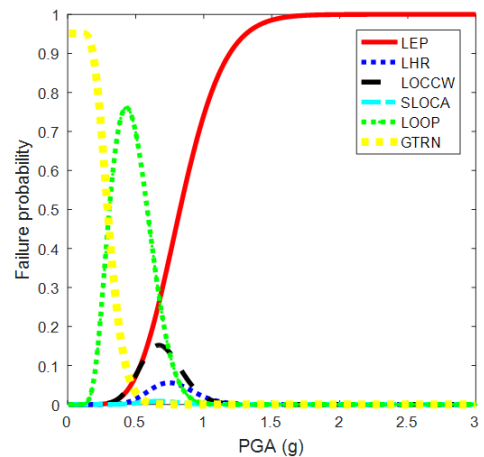


Fig. 6. Seismic fragility curves for initiating events

10% 이상의 큰 오차를 보여주었다. 특히 적용 예제 1의 결과와 비교할 때, 로그-로그 선형 근사식은 Memphis와 LA 지역에서 상당히 큰 오차를 발생 시킴을 보여주었다. 이러한 결과의 이유는 누적분포함수 형태의 단조 증가를 보이는 단일 구조물의 지진 취약도 분포와는 달리 대상 원전 초기 사건의 지진 취약도는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 다양한 형태를 갖고 있기 때문으로 판단된다. 구체적으로 보면, GTRN과 LOOP 초기 사건의 취약도는 작은 지진세기에도 높은 파괴확률을 보이는데 이 영역에서 선형 지진 재해도 근

사식은 상당한 오차를 보이므로, 식(6)을 통한 CDF 산정 시 비교적 큰 오차를 유발하게 되는 것이다. 결론적으로 보면, 원전과 같은 복잡한 시스템에 있어 SPSA를 평가할 때, 기존 방법 대신 제안된 방법의 고차 다항식 지진 재해도 근사식을 사용하면 정확도를 현저히 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 지진 재해도의 닫힌 근사식에 대한 문제를 제기하고 이를 해결하기 위한 방법으로 고차 다항식에 기반한 재해도 근사식을 제안하였다. 또한, 제안된 근사식이 구조 시스템의 연간파괴확률(APF) 산정 정확도에 있어 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 이를 위하여, 지진 재해도 데이터 예제로는 미국 대표적 지역(서부: LA, 중부: Memphis 및 Kansas, 동부: Charleston)의 재해도 정보를 사용하였다. APF 산정에 있어서의 근사식 영향 비교분석 예제로는 연구로 플랫폼 구조물과 원전 시스템 SPSA 문제를 적용하였다. 수치 예제 해석 결과, 본 논문에서 제시된 재해도 근사식이 기존의 근사식들과 비교하여 주어진 지진 재해도 데이터 뿐 아니라 두 가지 예제 구조 시스템에 대한 APF 값을 상대적으로 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 향후에는 제안된 재해도 근사식을 기존의 취약도 근사식과 결합하여 새롭게 향상된 APF 함수를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 한국연구재단이 주관하는 원자력연구개발사업(No. NRF-2017 M2A8A4015290)의 지원을 받아 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. ASCE, Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary (ASCE/SEI 4-16), American Society of Civil Engineer, Reston, Virginia, c2005.
2. Cornell CA, Jalayer F, Hamburger RO, Foutch DA, Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines, *Journal of Structural Engineering*, 2002 April; 128 (4):526-533.
3. ASCE, Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities (ASCE 43-05), American Society of Civil Engineer, Reston, Virginia, c2005.
4. Kwag S, Ok S-Y, Robust design of seismic isolation system using constrained multi-objective optimization technique, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013 July;17(5):1051-1063.
5. Kwag S, Gupta A, Bayesian network technique in probabilistic risk assessment for multiple hazards, *Proceedings of 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24)*; 2016 June 26-30; Charlotte, NC, US.
6. Kwag S, Gupta, A, Probabilistic risk assessment framework for structural systems under multiple hazards using Bayesian statistics, *Nuclear Engineering and Design*, 2017 April;315:20-34.
7. Kwag S, Oh J, Lee JM, Ryu JS, Bayesian-based seismic margin assessment approach: application to research reactor system, *Earthquakes and Structures*, 2017 June;12(6):653-663.
8. Kwag S, Oh J, Lee JM, Application of Bayesian statistics to seismic probabilistic safety assessment for research reactor, *Nuclear Engineering and Design*, 2018 March;328:166-181.
9. Bradley BA, Dhakal RP, Cubrinovski M, Mander JB, MacRae GA, Improved seismic hazard model with application to probabilistic seismic demand analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007 Nov.;36(14):2211-2225.
10. Vamvatsikos D, Derivation of new SAC/FEMA performance evaluation solutions with second-order hazard approximation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013 July;42(8):1171-1188.
11. Kumar R, Gardoni P, Second-order Logarithmic formulation for hazard curves and closed-form approximation to annual failure probability, *Structural Safety*, 2013 Nov.;45:18-23.
12. Kennedy RP, Cornell CA, Campbell RD, Kaplan S, Perla HF, Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant, *Nuclear Engineering and Design*, 1980 Aug.;59(2):315-338.
13. Kwag S, Gupta, A, Dinh N, Probabilistic risk assessment based model validation method using Bayesian network, *Reliability Engineering and System Safety*, 2018 Jan.;169:380-393.
14. Kwag S, Lee JM, Oh J, Ryu JS, Development of system design and seismic performance evaluation for reactor pool working platform of a research reactor, *Nuclear Engineering and Design*, 2014 Jan.; 266:199-213.