

지진에 의한 영향을 고려한 비구조물 확률론적 내진응답모델링을 위한 향상된 지진강도

허지은
한국스마트구조시스템연구원

Advanced Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Model of Nonstructural Components Considering the Effects of Earthquake

Ji-eun Hur

Korea Research Institute of Smart Material & Structures System

요약 전기 장비와 같은 비구조적 요소는 다양한 제반 시설에서 적절한 기능을 수행하는 중요한 역할을 한다. 특정 시설에서 이러한 비구조적 요소 중 일부는 강한 지진 발생이 발생한다고 하더라도 계속적으로 작동해야 한다. 그러나 다양한 이유 중 지진 진동의 불확실성과 전기 장비와 같은 비구조적 요소의 다양성 때문에 지진 진동의 영향으로 인한 각 기계적 손상과 작동 상의 손상을 정의하는 것과 시스템 손상 확률을 결정하는 것은 어려운 일이다. 따라서 비구조적 요소의 특성과 지진의 변화를 고려한 전기 장비의 성능 평가를 위한, 실용이고 효과적인 확률 모델을 개발할 필요가 있다. 이 연구는 비구조적 요소의 동적 거동과 비구조적 요소를 구조물에 구속 시키는 구속 장치의 선형 거동 및 비선형 거동에 대한 이해를 향상 시킬 것이다. 또한, 이 연구는 폭넓고 새로운 지진 강도를 위한 구속된 비구조적 요소의 확률론적 내진 응답 모델을 생성할 것이다.

Abstract Nonstructural components, such as electrical equipment, have critical roles in the proper functionality of various infrastructure systems. Some of these devices in certain facilities should operate even under strong seismic shaking. However, it is challenging to define each mechanical and operational failure and determine system failure probabilities under seismic shaking due to the uncertainties in earthquake excitations and the diversity of electrical equipment, among other factors. Therefore, it is necessary to develop effective and practical probabilistic models for performance assessment of electrical equipment considering variations in equipment features and earthquakes. This study will enhance the understanding of the effect of rocking behavior on nonstructural equipment, and linear-to-nonlinear behavior of restrainers. In addition, this study will generate probabilistic seismic demand models of rigid equipment for a set of conventional and novel intensity measures.

Keywords : Intensity Measures, Latin Hypercube Sampling, Nonlinear Dynamic Analyses, Nonstructural Components, Probabilistic Seismic Demand Models

1. 서론

비구조적 요소는 건설된 구조물의 기능을 수행하기 위하여 구조물에 설치되는 전기설비, 기계장치, 배관 등 다양한 요소를 말한다. 지진과 같은 자연재해 발생 시 구조물의 손상뿐 아니라 비구조적 요소의 손상으로 인한

피해는 인적·경제적 피해를 가져온다.

구조물이 붕괴되는 최악의 경우가 아니라면, 비구조적 요소는 사용자의 안전을 위하여 계속적으로 작동하여야 한다. 하지만 기존의 지진피해사례를 살펴보면, 지진 하중으로 인하여 구조물의 손상은 발생하지 않았으나, 다양한 비구조적 요소의 손상이 발견되었다. 일반적으로

본 논문은 2014년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2014R1A1A1005398).

*Corresponding Author : Ji-eun Hur (Korea Research Institute of Smart Material & Structures System)

Tel: +82-42-486-5676 email: sudarr@naver.com

Received March 13, 2017

Revised April 6, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

IEEE/ANSI 및 FEMA와 같은 기준에서 지진 위험 지역의 비구조적 요소는 구조물에 강력하게 부착되기를 권장하고 있지만, 전기 및 기계 장비와 같은 무거운 비구조적 요소는 구조물에 완전히 고정되지 않아 비구조적 요소에 손상을 줄 수 있는 지진 진동으로 인한 강한 움직임이 발생할 수 있다. 최근 지진으로 인한 비구조적 요소의 손상에 대한 분석결과를 살펴보면, 비구조적 요소를 구조물에 구속시키는 구속 장치에 손상이 발생됨으로 인하여 비구조적 요소에 흔들림과 미끄러짐 같은 높은 응답 가속도가 발생되었음이 확인되었다.

이와 같이 지진과 같은 외부의 요인으로 인한 비구조적 요소의 피해를 예측하기 위하여 다양한 연구가 진행되었다. Shenton(1996)과 Taniguchi(2002)는 비구조적 요소를 구속되지 않은 강체로 가정하고, 수평 및 수직 외력을 받는 구속되지 않은 강체의 비선형적 거동을 분류했다[1, 2]. Yim(1985)은 지진 진동을 받은 구속되지 않은 강체의 흔들림 거동에 대한 지배 방정식을 유도하고, 지반 운동 특성에 대한 비구조적 요소의 응답 감도를 나타냈다[3]. Makris와 Zhang(1999)은 수평적 펄스형(pulse-type) 지반 운동을 받는 구속된(고정된) 강체의 흔들림 거동에 대한 분석 모델을 개발하였다[4]. Makris와 Zhang(2001)은 분석 모델을 사용하여 강체가 전도되는데 요구되는 수평적 펄스의 크기를 조사하였다[5]. 그러나 이와 같은 기존의 분석 모델은 강체가 같은 방향으로 다시 흔들리지 않고 완벽하게 흔들리는 것으로 가정하였다. 그에 따라 기존의 분석모델은 강체의 세장비에 기초하여 계산된 가상의 반발계수를 사용하였다. 이와 같은 기존 분석모델을 개선하기 위하여 Gupta(1999)와 Yang(2003)은 구속되어 있는 전기 캐비닛의 흔들림 거동을 추정하기 위한 Ritz 벡터 접근법을 제안하였다[6,7]. Hur(2012)는 구속된 요소의 분석 모델에 대한 이전의 문제점을 기술하였으며, Hur와 Shafieezadah(2013)은 흔들림 거동을 하는 구속된 요소에 대한 새로운 분석 모델을 제안하였다[8,9]. 이 논문에서 Bouc-Wen 모델을 이용하여 강체의 흔들림 거동 제어를 위하여 두 개의 독립적인 구속 장치의 비선형적 거동을 고려하였다.

본 연구에서는 일반적인 비구조적 요소의 내진성능을 평가하기 위하여, 전기 캐비닛의 다양한 물리적 특성을 고려하고, 구속 장치의 비선형 거동을 고려하여 상대적으로 세장비가 큰 형태의 전기 캐비닛에 강하게 나타나는 흔들림 거동과 같은 지진 거동을 분석할 것이다. 또

한, 지진의 다양한 특성을 고려하기 위하여 폭넓은 지반 운동 기록을 사용할 것이다. 연구의 결과는 Probabilistic Seismic Demand Models(PSDM)의 형태로 제시할 것이다. 마지막으로 강성 요소의 PSDM에 사용되는 강도 기준에 대한 특성을 탐구하고, 더욱 안정적인 PSDM을 만들기 위한 새로운 강도 기준을 제안할 것이다.

2. 강체의 역학적 거동

전기캐비닛의 내진성능은 전기 캐비닛의 흔들림 거동을 방지하는 구속 장치(앵커 및 볼트)의 성능에 좌우된다. Fig. 1(a)는 높이 2h, 폭 2b를 갖는 구조물에 구속된 강성체로 가정된 비구조적 요소(=블록)를 보여준다.

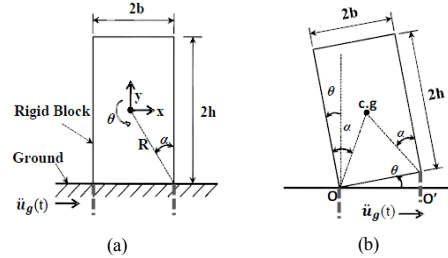


Fig. 1. Schematic restrained block of rocking motion
(a) Restrained rigid block (b) Block oscillates

이 블록의 질량 m 은 요소의 중심에 위치하고, 요소의 회전반지름 R 은 구조물에 부착된 블록 바닥의 끝부분부터 블록의 중심까지의 거리를 나타낸다. 외력에 의한 구조물의 거동에 따라 발생하는 구속 장치의 변형에 의하여 블록은 각도 θ 로 회전한다. 블록의 회전은 블록의 형상과 구속 형태에 좌우된다. 이 블록은 그림 1(b)와 같이, 회전 중심 O 와 O' 사이에서 왕복운동을 한다. Makris와 Zhang(2001)의 방정식을 기반으로, Hur와 Shafieezadah(2013)가 개발한 구속된 강성 블록의 흔들림 거동 모델은 식(1-2)와 같다[5, 9].

$$I_0\ddot{\theta}(t) + mgR\sin[\alpha - \theta(t)] + 4Kb^2\theta_y Z(t)\cos\frac{\theta(t)}{2} = -m\ddot{u}_g(t)R\cos[\alpha - \theta(t)], \theta(t) > 0 \quad (1)$$

$$I_0\ddot{\theta}(t) + mgR\sin[-\alpha - \theta(t)] + 4Kb^2\theta_y Z(t)\cos\frac{\theta(t)}{2} = -m\ddot{u}_g(t)R\cos[-\alpha - \theta(t)], \theta(t) > 0 \quad (2)$$

여기서, I_0 는 회전 중심 ($4/3 \times W/g \times R^2$, W 는 블록의 중량, g 는 중력가속도)에 대한 질량관성모멘트로 총 중량 $m = W/g$ 으로 고려하였다. 또한, 질량은 사각형 블록 전체에 균일하게 분포한다고 가정하였다. 이 공식에서 \ddot{u}_y 는 수평방향의 외력이고, K 는 블록 구속 장치의 강성이며, θ_y 는 구속 장치의 항복에 따른 회전 각도이다. 그리고 $Z(t)$ 는 Bouc-wen 모델의 무차원 이력이고, α 와 θ_y 는 블록의 기운 정도를 정의하며, $\theta_y \ll \alpha$ 라고 가정한다.

블록의 회전각(θ)이 θ_y 를 넘어설 때, 구속 장치의 항복이 시작된다. θ 가 임계각도 α 에 도달할 때, 블록은 안정과 불안정 상태의 분기점에 근접하게 된다. 즉, $|\theta| > \alpha$ 일 때, 중력 하중의 전도 모멘트로 인하여 블록이 전도되어 추가적인 복원력 없이 원래의 위치로 돌아 갈 수 없다. 그리고 $|\theta| < \alpha$ 일 때, 블록은 흔들리거나 왕복운동을 한다.

3. 비선형동적해석 조건

3.1 전기 캐비닛 샘플

3.1.1 전기 캐비닛의 물리적 특성

비구조적 요소의 대표적인 전기캐비닛은 스위치, 회로차단기, 모니터, 회로와 같은 다양한 구성 요소를 포함한다. 미국은 NEMA (National Electrical Manufacturers Association) 표준에 전기 캐비닛에 대하여 규정하고 있다. 본 연구에서는 미국에서 전기캐비닛을 생산하는 3곳의 제조업체의 저전압 스위치 보드의 물리적 특성에 초점을 맞추었다. 해당 업체의 모든 전기캐비닛의 높이는 $2,286\text{mm} \sim 2,336.8\text{mm}$, 폭은 $558.8\text{mm} \sim 1219.2\text{mm}$ 범위 안에서 제작되었다. 캐비닛 외벽의 깊이는 사용자의 요구에 따라 달라지고, 무게는 장착된 구성요소에 따라 다양하다. 전기 캐비닛의 사양은 물리적 특성과 캐비닛에 배치되는 다양한 요소, 그리고 배치되는 요소의 분포에 따라 고려되어야 한다. 이러한 다양한 요소와 그 분포가 캐비닛의 다양한 조합을 만들어 내므로, 시뮬레이션의 목적에 맞는 적절하고 효과적인 조합을 만드는 것이 중요하다. 본 논문에서는 확률 분포로부터 다양한 조합을 무작위로 생성하기 위한 통계적인 방법인 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling, LHS)을 사용하였으며, 총 720개의 표본 세트를 생성하였다. LHS는 상대적으로 매우 적은 수의 시뮬레이션의 진행으로

사용자가 원하는 정확성을 획득할 수 있는 방법으로 확률변수 공간에서 중복되지 않는 샘플을 추출하기 위하여 각 확률변수의 범위를 n 개의 영역으로 나눈 후 각 구간에서 n 개의 난수를 추출한다. Table 1은 본 논문에서 고려한 전기 캐비닛의 기하학적 매개변수(구성요소의 분포) 및 물리적 매개변수(구성요소의 종류)의 집합을 보여준다.

Table 1. Geometrical and Physical Parameters of Electrical Cabinets (UNIT: inch/mm, lbf/kgf)

Parameter	Distribution	
Height (H)	Constant: 91.5/2324	
Width (B)	Discrete: 24-54/610-1370	Uniform distribution
Depth (D)	Discrete: 16-32/400-810	Uniform distribution
Total Weight (Wtotal)	Discrete +Continues: 500-1340/225-610	Normal distribution

Table 1에는 캐비닛 외벽의 두께와 추가적인 구성요소에 따른 다양한 매개변수가 포함되어 있다. 캐비닛의 취약한 흔들림 거동을 관찰하기 위하여 상대적으로 큰 세장비의 캐비닛을 선택하였다. 전기 캐비닛의 일반적인 외벽은 전기 장비의 품질에 대한 ANSI코드를 따라 강판으로 만들어진다. 이러한 외벽은 각 제조업체마다 특정한 모듈로 표준화 되어 있다. 본 논문에서는 Table 1과 같이, 캐비닛의 높이, 외벽의 깊이, 폭을 가정하였다. 캐비닛의 총 중량이 지진 발생 시 동적 거동에 영향을 주는 질량으로 작용하기 때문에 다양한 매개 변수를 고려하여 총 중량을 추정하는 것이 중요하다. 외벽의 두께, 캐비닛 안에 장착되는 구성요소들의 수량과 유형에 따라 캐비닛의 무게는 크게 달라진다. 한 개의 캐비닛의 총 중량은 식 (3)과 같이 외벽($W_{enclosure}$), 구성 요소(W_{comp}), 기타 아이템(W_{mis})들의 중량의 합으로 결정된다. $W_{enclosure}$ 는 외벽의 면적당 단위 중량(w_s)과 식 (4)에서 주어진 4개의 수직면과 상부 및 천장 덮개를 포함하는 외벽의 표면적을 사용하여 추정할 수 있다. 외벽의 평균 단위 중량(w_s)은 $0.00003\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 정규분포를 갖는다고 가정한다. W_{comp} 는 캐비닛 내의 회로, 회로차단기 등의 구성 요소 유형 및 수량을 고려하여 계산되며, 회로의 무게와 수량은 장비의 전류 용량에 따라 다르다. 따라서, 캐비닛의 깊이와 전류 용량은 구성요소와의 종속도를 고려하여 무작위로 선택하였으며, W_{comp} 은 식 (5)에 의하

여 계산하였다.

$$W_{total} = W_{enclosure} + W_{comp} + W_{mis} \quad (3)$$

$$W_{enclosure} = w_s \times surface\ of\ enclosure \quad (4)$$

$$W_{components} = \sum_i w_i \times n_i \quad (5)$$

식 (5)에서 w_i 는 구성 요소 각각의 중량, n_i 는 구성 요소의 수량이다.

3.1.2 구속된 전기 캐비닛의 흔들림 강도

구속된 캐비닛의 동적 거동을 평가하기 위해서는 캐비닛의 흔들림 강성 모델이 필요하다. 본 논문에서는 Ritz 벡터 접근법을 사용하여 전기 캐비닛의 흔들림 강성을 공식화한 Gupta(1999)와 Yang(2003)의 연구를 참조하였다[6, 7]. 그들은 매개 변수 연구를 통해 회전 강성 (K_θ)에 대한 방정식을 도출하였다. 이 방정식에서 전기캐비닛의 흔들림 강성 값은 볼트 연결의 수량(N), 볼트 사이의 거리 (Δ_b), 캐비닛 하부 강판의 두께(t), 그리고 볼트와 회전축 사이 거리에서의 모멘트 팔의 길이 ($D - \Delta_b$)에 따라 결정되며, 이들 식은 다음의 식 (6) 및 (7)와 같다.

$$K_\theta = 13.30 \left(\sum_{i=1}^N c_i^2 \right) D^2 \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{2}{\Delta_b^2} \quad (6)$$

여기서, $2.57mm \leq t \leq 5.08mm$, $25.4mm \leq \Delta_b \leq 50.8mm$, $406.4mm \leq D \leq 609.6mm$ 이다.

$$K_\theta = 16.44 \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{1}{\Delta_b^2} \quad (7)$$

여기서, $5.08mm \leq t \leq 10.16mm$, $57.15mm \leq \Delta_b \leq 82.55mm$, $635mm \leq D \leq 914.46mm$ 이다. 식 (6)과 (7)에서 상수 값 C 는 16.4로 가정하였으며, E 는 캐비닛 밀판의 인장탄성계수, ν 는 푸아송비, 그리고 t 는 밀판의 두께이다. 3.1.1의 데이터와 식(6,7)을 토대로 회전 강성 (K_θ)은 정규분포로 계산된다. 계산된 K_θ 값을 사용하여 식 (1)과 (2)에서 사용되는 각 구속 장치의 수직 강성 K 가 계산된다.

3.2 비선형동적해석을 위한 지반운동

캐비닛에 작용시킬 외력인 지반 운동은 Baker(2011)

이 생성한 지반운동 기록 세트로부터 선정하였다[10]. 이 지반운동 기록 세트는 미국 캘리포니아 전역의 여러 위치에서 구조 및 지반 시스템 분석을 비롯한 다양한 용도로 사용되고 있다. 표준화된 지반 운동 세트에는 광범위한 기간과 근접한 단층의 방향성 진동 현상을 포함한다. 본 논문에서 선택한 지반 운동은 50년 주기의 위험 수준 안에서 각각 2%, 10%, 그리고 50% 해당하는 지반 운동 위험도를 낼 수 있도록 선택하였다. 각 위험 수준은 40가지의 지반 운동을 포함하며, 각 지반 운동은 단층직 각방향, 단층평행방향, 그리고 단층수직방향의 세 가지 요소로 구성된다. 이와 같은 과정을 통하여 각 위험 수준에서 단층직각방향과 단층평행방향 요소에 대하여 각각 80개의 지반 운동 기록과 총 240개의 수평방향 지반 운동 시간 이력을 생성하였다. 강한 지반 운동 효과를 포함하기 위하여 1, 1.5, 그리고 2 배로 지반 운동을 조절하였다. 결과적으로 총 720개의 지반 운동 기록을 비선형 동적 해석에 적용하였다.

4. 확률론적 내진응답모델 생성

4.1 확률론적 내진응답 모델(PSDM)

본 논문에서는 구조응답과 지반 운동의 강도를 나타내는 지진강도의 관계를 정의하기 위하여 확률론적 응답 모델(Probabilistic Demand Models)을 사용하였다. 이러한 모델은 구속된 요소의 내진 성능을 평가 할 수 있다. 식(8)은 Cornell(2002)이 제안한 예상 내진 응답(D)과 지진강도(IM)간의 상관관계에 대해 일반적으로 사용되는 방정식이다[11].

$$D(IM) = a \times IM^b \times \varepsilon \quad (8)$$

여기서, a 와 b 는 상수이고, ε 은 오차항이다. 식 (8)의 방정식은 대수공간에서 식 (9)로 변환할 수 있으며, 이 경우 a 와 b 가 비편향 추정치인 \hat{a} 와 \hat{b} 로 변환된다.

$$\lambda_{DIM} = \ln(\hat{a}) + \hat{b} \cdot \ln(IM) \quad (9)$$

여기서, 요구매개변수(λ_{DIM})와 IM 매개변수 $\ln(IM)$ 은 선형관계를 갖는다. 그러나 캐비닛의 흔들림 거동은 선형 상관관계와 맞지 않는다[9]. 흔들림 거동이 매우 비선

형적 특성을 보이기 때문에, 본 연구에서는 Fisk 분포라고 알려진 PSDM(Probabilistic Seismic Demand Models)의 대수 통계 분포의 수학적 모델을 사용하였다. 이 확률 분포는 대수가 로지스틱 분포를 갖는 비음수 랜덤 변수에 대하여 연속적이다. 누적 분포 함수는 식 (10) 과 같이 대수 정규 분포와는 달리 닫힌 형태로 표현할 수 있다.

$$F(x|\alpha,\beta) = \frac{1}{1+(x/\alpha)^{-\beta}} \quad (10)$$

여기서, α 와 β 는 모델 매개변수이다. 이 방정식을 바탕으로 본 연구에서는 지진강도와 예상내진응답간의 관계를 평가하기 위하여 식 (11)을 사용하였다.

$$D(IM|\alpha,\beta) = \frac{1}{1+(IM/\alpha)^{-\beta}} \quad (11)$$

4.2 PSDM을 위한 공학적 응답

PSDM은 전기 캐비닛의 다양한 구성 요소에 대한 구조응답으로 개발될 수 있다. 일반적으로 층간 편차, 변위 혹은 응력들은 건물 내부의 구조적 요소에 대한 중요한 응답으로 취급된다. 그러나 전기 캐비닛과 같은 구속된 비구조적 요소들의 PSDM의 경우 구속 장치의 변형, 전반적인 틀의 이동을 포함하는 다른 구조응답이 필요하다. 추가적으로 이전 연구에 따르면 장치에 부착된 가속도계의 위치는 전기 캐비닛과 같이 주파수에 민감한 구성 요소의 응답을 평가하는 데 중요한 사항이다[11]. 본 논문에서 다양한 구조응답 중 상대적으로 세장비가 큰 전기 캐비닛의 넘어짐 손상에 대한 필수 지표인 다양한 지진의 영향을 받는 강체 블록의 회전 변위 (θ/α)의 비율 조건을 제안한다.

4.3 PSDM을 위한 효과적인 지진강도 제안

지진 취약도 분석에 일반적인 지진강도는 지반 최대 가속도(PGA)와 모의 스펙트럼 가속도(PSA)가 사용된다. 이러한 전통적인 IM들은 전기 캐비닛에 적용할 때, 장점과 단점이 있다. 예를 들어, PGA는 진동수 민감 요소의 취약성 평가를 위한 적합하지 않은 IM 일 수 있다. 특정 구간의 스펙트럼 가속도(PSA_{T_n})는 진동수 민감 요소의 성능 평가를 위해 성능이 좋은 지표이지만, 서로 다른 진동수 민감도를 갖는 수많은 장치가 전기 캐비닛에 부착되는 복잡한 캐비닛의 경우 실용적인 방법이 아닐

수 있다. 즉, 전기 캐비닛의 구조적 기본 진동수는 캐비닛에 부착되어 있는 장치의 진동수와 다를 수 있다. 이러한 이유로 평균 스펙트럼 가속도(PSA_{Avg})는 PGA 및 PSA_{T_n} 의 단점을 해결하기 위해 제안되었다[12]. 이 방법은 해당 진동수 대역을 응답스펙트럼 곡선 (g -value 대 정규 스케일의 진동수)아래의 영역으로 나눔으로써 얻어지며, 이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 특정 캐비닛의 관심 주파수 대역이다.

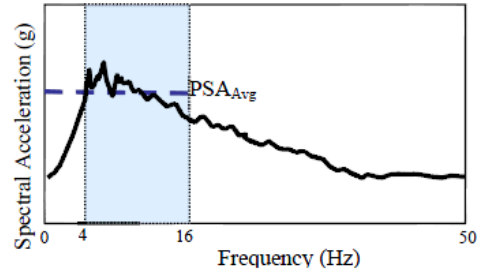


Fig. 2. The Average Spectral Acceleration

Fig. 2의 평균 스펙트럼 가속도를 사용하면, IEEE 표준 344(2005)에 따라 관심 주파수 대역에서 응답 가속도를 고려할 수 있다. 일반적으로 변전소 실내의 전기 설비는 별도의 표시가 없는 한 4~16Hz의 주파수 범위를 갖는 것으로 가정한다. 그 외에 일반적으로 채택된 IM은 최대 지반 속도(PGV)와 최대 지반 변위(PGD)이고, 이것은 Table 2에서 보는 바와 같다.

본 연구에서는 선택된 캐비닛의 PGA, 총질량, 그리고 고 깊이를 고려한 식 (12)의 새로운 IM을 제안하였다.

$$IM_{suggested} = PGA \times \frac{mass}{Depth^2} = PGA \times \frac{W_{total}/g}{Depth(D)^2} \quad (12)$$

Table 2. Intensity Measures in this study

IM	Definition	Units
PGA	Peak ground acceleration	g ($9.81m/sec^2$)
PGV	Peak ground Velocity	m/sec
PGD	Peak ground displacement	m
Suggested IM	$PGA \times Mass/Depth^2$	$g \times kg/m^2$ ($9.81kg/(m \times sec^2)$)

4.4 제안한 IM의 적합성 검증

3.1절에서 생성된 720개의 표본 세트와 3.2절에서 설명된 등급별로 분류된 지반운동 기록을 2절에서 제시한 해석적 모델에 적용 및 분석하여 블록의 흔들림 거동을 평가하기 위한 구속된 블록의 회전각 $\theta(t)$ 를 계산하였다. 또한, 2절의 비선형 상미분 방정식은 Bogachi-Shampine 방법을 사용하여 Matlab로 계산하였다[13]. 다음의 Fig. 3~5는 각각 시뮬레이션 결과와 PGA , PGV , PGD 의 일반적인 지진강도로 생성한 PSDM을 보여준다.

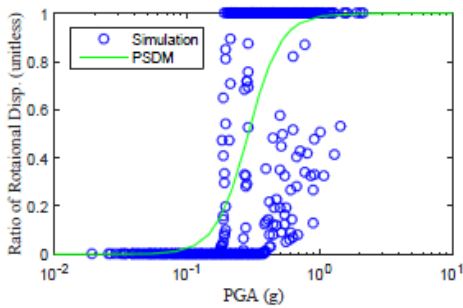


Fig. 3. PSDM using PGA

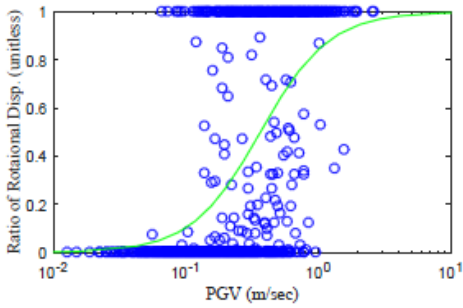


Fig. 4. PSDM using PGV

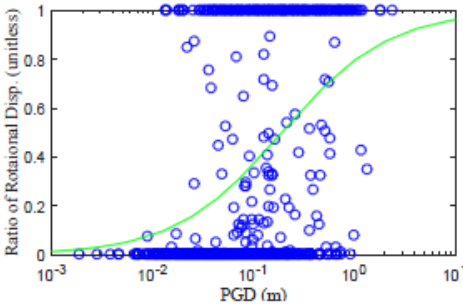


Fig. 5. PSDM using PGD

Fig. 3~5의 y축에서 회전각의 비율(θ/α)이 1에 도달하면 캐비닛은 넘어지고, 비율이 0에 가까워지면 캐비닛은 흔들리지 않는다. 시뮬레이션 결과에 720개의 표본 중 약 380개의 표본은 다양한 지진 상황에서 흔들리지 않고 비선형 거동을 나타내지 않았으며, 약 230개의 표본은 강한 지반 운동에서 캐비닛이 넘어지는 결과를 보였다.

Fig. 3~5의 시뮬레이션 결과와 본 연구에서 제안한 IM으로 생성한 PSDM의 적합성을 평가하기 위한 결정계수 R^2 는 식 (13)에서 주어진 바와 같이 계산하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

여기서, y 는 시뮬레이션 응답 (회전각의 비율, θ/α)이고, f 는 예측 값이다. Table 3은 식 (13)에 의해 계산된 PGA , PGV , PGD , 그리고 제안한 IM의 결정계수이다.

Table 3. Coefficient of Determination (R^2)

PGA	PGV	PGD	Suggested IM
0.50	0.34	0.19	0.73

Table 3에서 보는 바와 같이 R^2 값은 PGA 를 사용하는 PSDM이 시뮬레이션 결과에 수용 가능한 적합성을 제공한다는 것을 보여준다. 본 논문에서 제안한 IM을 적용한 PSDM의 결과는 다음의 Fig. 6에 나타내었다.

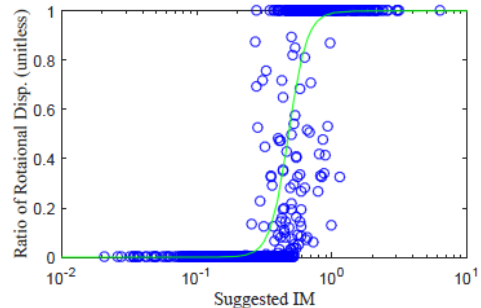


Fig. 6. PSDM using Suggested IM

시뮬레이션 데이터의 약 85%가 이진 결과 (0 또는 1)를 나타내었지만, 제안된 IM을 사용한 로그노리 분산 모

델은 일반적으로 사용되는 IM 과 비교하여 R^2 가 0.73을 보이며, 최고의 적합성을 제공하였다.

5. 결론

본 연구에서는 강한 지진 진동을 받는 구속된 전기 캐비닛의 비선형 PSDM에 대한 지진강도를 평가하였다. PSDM을 생성하기 위하여 전기 캐비닛의 다양한 매개 변수를 고려하였으며, LHS를 사용하여 720개의 표본 샘플을 생성하였다. 캐비닛 표본의 비선형 시간 이력 해석을 수행하기 위하여 지반 운동 세트를 적용하였고, 기존의 PSDM을 위하여 사용되는 지진강도의 적합성을 강화하기 위하여 새로운 IM 을 제안하였다.

그 결과, 본 연구에서 제안한 새로운 IM 은 기존에 캐비닛의 PSDM을 위한 PGA , PGV , PGD 와 같은 일반적으로 사용되는 지진강도보다 더 적합하다는 것을 확인하였다. 또한, 제안된 지진강도 및 비선형 대수로지스틱 분포모델은 인식적 u 를 줄임으로써 구속된 전기 캐비닛의 PSDM을 향상시켰다. 향상된 PSDM은 낮은 불확실성을 갖는 지진 취약도 함수를 생성할 수 있으며, 다양한 유형의 전기 캐비닛의 지진 위험 관리를 위한 체계적이고 안정적인 의사 결정 방식을 개발하는 데 도움을 줄 것으로 판단된다.

References

[1] Shenton, H. W., Criteria for initiation of slide, rock, and slide rock rigid body modes. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 122, no. 7, pp. 690-693, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:7\(690\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:7(690))

[2] Taniguchi, T., Non-linear response analyses of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 31, no. 8, pp. 1481-1500, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.170>

[3] Yim A. C., Chopra A., Simplified earthquake analysis of multistory structures with foundation uplift. *Journal of Structural Engineering*, vol. 111, no. 12, pp. 2708 - 2731, 1985. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:12\(2708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:12(2708))

[4] Makris, N., Zhang, J. Rocking Response and Overturning of Anchored Equipment under Seismic Excitations. PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley NUREG - U.S, 1999.

[5] Makris, N., Zhang, J., Rocking Response of Anchored Blocks Under Pulse-Type Motions. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 127, no. 5, pp. 484-493, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:5\(484\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:5(484))

[6] Gupta A., Rustogi S. K., Gupta A. K., Ritz vector approach for evaluating in cabinet response spectra. *Nuclear engineering and design*, vol. 190, no. 3, pp. 255-272, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00076-X)

[7] Yang J., Rustogi S. K., Gupta A., Rocking stiffness of mounting arrangements in electrical cabinets and control panels. *Nuclear engineering and design*, vol. 219, no. 2, pp. 127-141, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00279-0](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00279-0)

[8] Hur J., Seismic performance evaluation of switchboard cabinets using nonlinear numerical models. Chapters 4-6, Georgia Institute of Technology, 2012.

[9] Hur J., Shafieezadeh A., Characterization of Main-Shock Effects on the Aftershock Fragility of Rigid Electrical Equipment. *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures*. pp. 4415 - 4421, 2013.

[10] Baker, J. W., Lin, T., Shahi, S. K., Jayaram, N., New Ground Motion Selection Procedures and Selected Motions for the PEER Transportation Research Program. PEER Technical Report 2011/03, 2011.

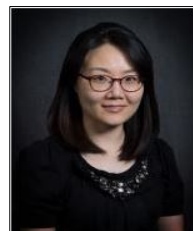
[11] Cornell C. A. Jalayer F., Hamburger R. O., Foutch D. A., Probabilistic basis for the 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 4, pp. 526 - 533, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(526\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(526))

[12] Bandyopadhyay K. K., Hofnayer C. H., Kassir M. K., Pepper S. E., Seismic Fragility of Nuclear Power Plant Components [PHASE II],” NUREG/CR-4659, BNL-NUREG-52007, 2, Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, Long Island, 1987.

[13] Shampine L. F., Reichelt M. W., The Matlab ODE Suite. *SIAM Journal on Scientific Computing* vol. 18, no. 1, pp. 1 - 22, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1137/S1064827594276424>

허 지 은(Ji-eun Hur)

[정회원]



- 2006년 12월 : Georgia Institute of Technology (토목/구조공학석사)
- 2012년 12월 : Georgia Institute of Technology (토목/구조공학박사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 한국스마트 구조시스템연구원 책임연구원

<관심분야>

비구조물 취약도 평가, 확률론적 지진강도 모델 개발