

지진으로 인한 건축물의 경제적 피해예측을 위한 지진재해대응시스템 구축

Development of Seismic Response System for Economic Seismic Loss Prediction Models



권 기 봉¹⁾

Kwon, Gi Bong



박 남 룰^{2)*}

Park, Nam Ryoul



이 석 태³⁾

Lee, Seok Tae

1. 머리말

우리나라의 지진방재종합대책은 「재난 및 안전관리 기본법」에 따라 2006년 제2차 지진방재종합대책을 수립하였으며, 우리나라가 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식하에 2008년 3월 「지진재해대책법」이 제정·공포되었고, 이 법이 2009년 3월부터 시행되면서 다시 한 번 필요성이 제기되어 2009년 제3차 지진방재종합대책을 마련하였다. 제2차 지진방재종합대책은 지진발생 시에 전국단위에 걸쳐 진도분포도를 표출하여 이를 활용해 건축물의 손상피해 동수 및 인명 피해를 추계하기 위하여 국민안전처가 시행한 지진재해대응시스템 구축사업(“제2차 구축사업”이라 한다)을 통해 완성되었다. 그러나 지진 발생 시에는 건축물 피해뿐만 아니라 다양한 시설물 피해가 발생되므로 제2차 지진방재종합대책에 대한 보완의 필요성이 제기되었다. 이에 따라 실제에 가까운 지진피해를 예측하기 위하여 제3차 지진방재종합대책을 마련하게 되었다. 제3차 지진방재종합대책은 건축물의 손상피해 동수 및 인명피해 예측 뿐 아니라 주요 라이프라인(도로, 가스, 전기, 상하수도, 통신 등) 시설에 대해서도 피해예측을 적용하기 위하여 국민안전처가 시행한 지진재해대응시스템 구축사

업(“제3차 구축사업”이라 한다)을 통해 완성되었다. 특히 제3차 구축사업에서는 국내 건축구조물에 대하여 지진 취약도를 평가하는데 적합하도록 건축물의 구조유형을 분류하고 각 유형별로 지진취약도 함수를 개발하여 이를 적용함으로써 지진발생 시에 건축물에 대한 피해추정의 정확도를 향상시켰다. 지진재해대응시스템의 작동 체계는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이 이 체계는 기상청에서 지진 발생정보를 통보하면, 지진대해대응시스템에서 지진정보를 수신함과 동시에 각 지자체 및 행정동 별 시설물의 피해예측과 그에 대응되는 지원체계를 산출하는 시스템이다.

지진재해대응시스템의 건축물 피해예측 방식은 지진강도에 의한 건축물의 손상정도를 확률론적 통계방식으로 손상률을 결정하는 방식이다. 이와 같은 지진재해 취약도 평가 방법은 초기 대응전략을 수립하는 측면에 있어서는 개략적이기 때문에 빠른 전략수립을 가능케 하지만 개별 건축물에 직접적인 피해 및 경제적 손실을 정량적으로 평가하기에는 한계가 따른다.

본고에서는 지진재해대응시스템의 정량적 지진피해 예측 모델과 이를 적용한 사회·경제적 피해예측 시스템을 구축한 사례를 기술하고자 한다.

1) 케이아이티밸리(주) 이사

2) 케이아이티밸리(주) 책임연구원

3) 케이아이티밸리(주) 수석연구원

* E-mail : ryouly81@gmail.com

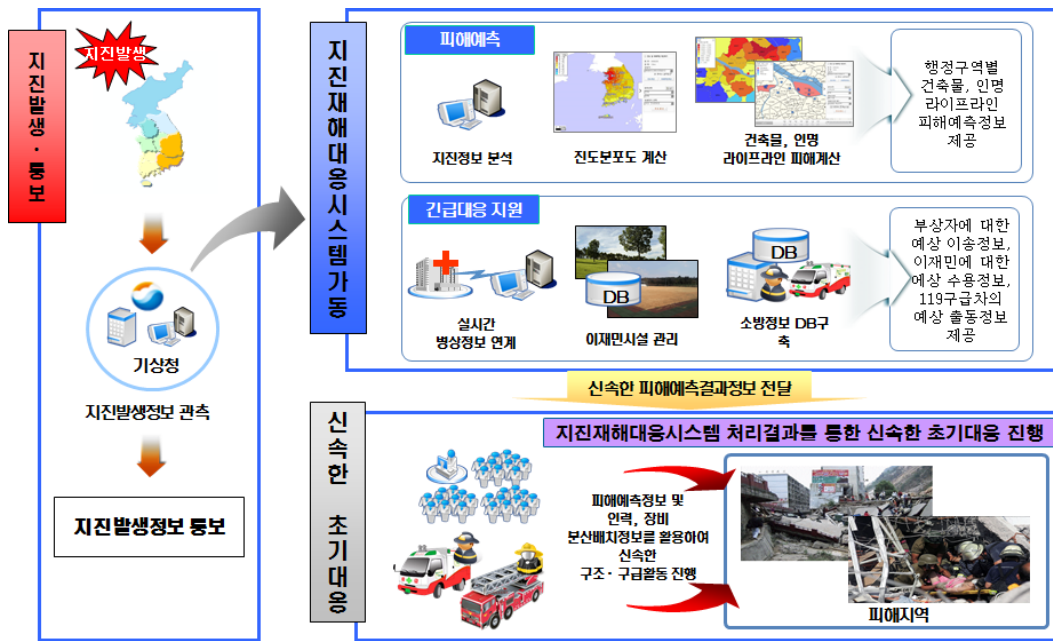


Fig. 1 지진재해대응시스템 체계도

2. 건축물의 지진피해예측 모델

건축물의 지진피해예측 시스템은 지진발생 위치 및 규모 등의 제한된 정보만으로 전국단위의 건축물에 관한 피해 규모의 정보와 범위에 관한 정보를 예측하는 시스템이다.

우리나라 건축물 대장의 건축물 구조를 합리적으로 분류하여 이에 해당하는 취약도 함수를 선정하고, 건축물에 대한 피해를 추정하는 시스템으로 건축물 구조유형별 피해정도를 4단계(붕괴, 비붕괴, 반파, 부분손실)로 구분하여 예측 계산한다.

건축물에 대한 지진재해평가를 위해서 크게 두 가지 접

근법이 가능하다. 하나는 해당 지역에 속하는 개별 구조물에 대해서 평가하는 방법과, 다른 하나는 내진성능이 유사한 구조물끼리 그룹으로 한데 묶어서 평가하는 방법이다. 지진재해대응시스템은 후자의 방법으로 모델이 구축되어 있으며, 미국의 HAZUS* 건축물 분류 기준을 기초로 우리나라 실정에 맞게 41개의 구조시스템으로 분류하였다.

분류된 41개의 건축 구조물의 지진재해평가를 위해서 지진으로 인한 건축물의 구조적 손상함수를 먼저 도출한다. 손상함수는 입력 지진(ex. 응답 스펙트럼 범위)에 대해서 구조물이 특정 손상 상태에 있거나 이를 넘어설 확률을 나타내는 로그 정규 형태의 취약도 곡선이다. 취약도 곡선은 구조적 또는 비구조적인 피해상태가 일정수준을 넘는 확률을 정의하는 함수이다. 취약도 함수곡선은 로그함수의 표준편차(β) 값과 평균값을 가지는 누적 로그정규함수로 모델링하고, 구조물의 능력곡선, 피해 정도와 지반 운동과 관련된 편차의 불확실성을 고려한다. 스펙트럴 변위 S_d 로 정의된 손상상태 d_s 를 초과할 구조물의 손상확률은 다음 식과 같다.

$$P[d_s | S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \quad (1)$$

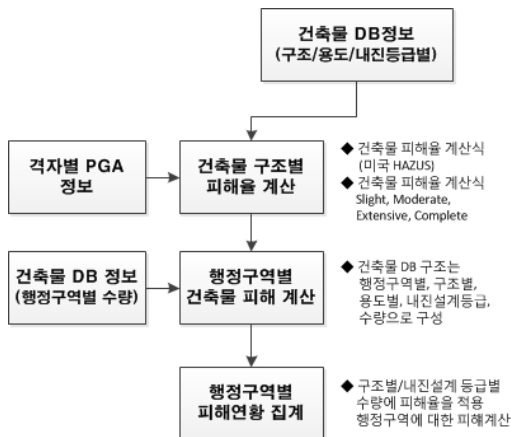


Fig. 2 건축물의 지진피해예측 모델

* 미국재난관리청(FEMA)의 주된 임무는 재해발생시 재해지원을 제공하는 것이며, 이를 위해 재해경감사업, 예방, 대응 및 복구등 재해관리를 효율적으로 수행하기 위해 개발한 소프트웨어.

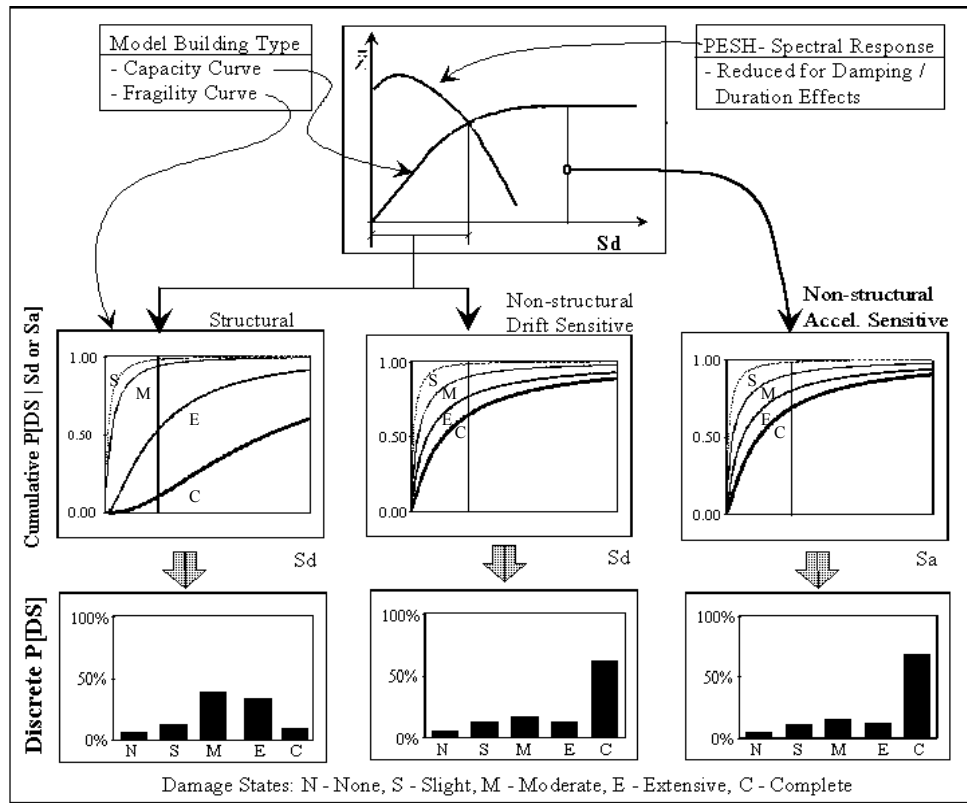


Fig. 3 지진피해 건물에 대한 손상평가 과정의 흐름도

여기서 $S_{d,ds}$ 는 구조물이 피해상태 ds의 임계치에 도달하는 순간의 스펙트럼 변위의 중앙값, β_{ds} 는 피해상태 ds의 스펙트럼 변위의 자연 로그의 표준 편차, Φ 는 표준 정규 누적 분포 함수이다.

3. 건축물 현존가치 추정

건축물의 지진손실을 계산하기 위해서 건축물의 현존 가치는 반드시 평가되어야 한다. 현존가치는 건축물의 신축 단가를 기준으로 경과 연수에 따라 내재된 성능이 감소되거나 회복이나 개량 등에 따라 성능변화를 정량적으로 함수화 하여 신축된 이후 사용승인 시점부터 일정한 시간(연수)이 경과된 시점까지의 가치를 의미한다.

건축물에서 초기성능은 건축당시의 설계와 재료의 품질 그리고 시공수준에 따라 결정됨으로 신축에 소요된 초기투자비와 비례적인 상관관계가 있다. 따라서 건축물의 초기 성능가치는 초기투자비로 표현할 수 있다. 이와 같은 관점으로 일정한 경과 연수에 도달한 건축물에서의 성능가치는 초기성능보다 감소되는 경향에 대하여 건축물의 성능곡선

모델을 통해 일반화하여 건축물의 현존가치 곡선 모델을 도출한다.

건축물의 성능곡선 모델을 도출하기 위해서 건축물 신축 비용에 포함된 설계비, 시공비, 유지관리 등의 비용을 제외한 21종의 건축 구성재에 대한 재료상수, 재료요소별 중요도 계수, 교체주기를 고려하여 건축물의 성능곡선 모델을 도출한다.

$$P(t) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot e^{-k_i \left\{ t_j - INT \left(\frac{t_j}{y_i + 1} \right) (y_i + 1) \right\}} \quad (2)$$

여기서 I_i 는 구성재별 중요도로 총 21종류의 구성재에 대한 중요도를 합치면 초기의 성능지수($p_o = 1.0$)가 나온다. k_i 는 구성재별 재료상수, t_j 는 경과연수, y_i 는 구성재별 내용연수(혹은 교체주기)를 의미한다. t_i 는 교체주기에 도달된 구성재를 최대 1년 동안에 걸쳐 교체된 직후부터 다시 시작되는 경과 연수이다. 위의 계수들은 한국감정원에서 발행하는 '건물신축단가표'를 참조하여 산정하였다.

Fig. 4는 건축물의 구조별 대표건축물 41종에 대해 경

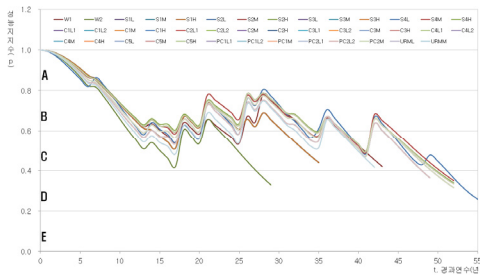


Fig. 4 건축물 구조별 경과연수에 따른 성능곡선

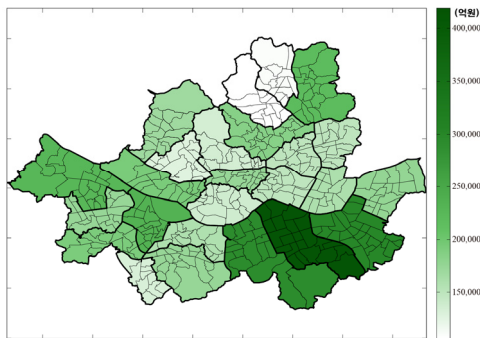


Fig. 5 서울시 행정도별 모든 건축물의 현존가치

과 연수에 따른 성능곡선을 나타낸다. 현존가치는 위 성능곡선을 토대로 신축단가대비 경과연수에 따른 성능하락 지표를 적용하여 현존가치를 산정한다. 신축단가는 각 건축물 구조별 신축단가표를 기초로 단위면적당 금액으로 데이터베이스화 하였다. 현존가치는 위 식에 건축물의 경과연수를 대입하여 건축물의 현재시점의 성능지표에 신축단가와 건축물의 연면적으로 적용함으로써 현존가치를 산정한다. 이렇게 계산된 서울시 행정도별 모든 건축물의 현존가치 결과는 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 강남구, 서초구 일대 및 여의도가 포함된 영등포구, 강서구등 상업지구 및 도시개발지역에 속한 건축물의 현존가치가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이들 지역들은 고층 건축물이 밀집된 지역으로 단위 대지면적당 연면적이 크기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다.

4. 지진으로 인한 건축물의 손상지표의 정량화

지진으로 인한 건축물의 성능손실은 기존 지진재해대응시스템에서 사용되는 지진피해구분을 준용하여 다음과 같이 설정하였다.

지진피해를 입은 건축물에서 성능지수함수는 2장에서 기술한 경과 연수에 따른 건축물의 성능지수에서 지진피

Table 1 건축물의 지진피해구분별 성능손실지표

지진피해구분		부분손실S	부분손실M	반파	전파
성능손실지표(D_i)	구조재(D_{11})	0.0	0.3	0.7	0.9
	비구조재(D_{12})	0.3	0.7	0.9	0.9

해로 인한 건축물의 성능손실지수를 제하여 아래 식과 같이 정의할 수 있다.

$$P_D(t) = P(t) - P_L \tag{3}$$

$$= \sum_{i=1}^n I_i \left[e^{-k_i \left\{ t_j - \text{INT} \left(\frac{t_j}{y_i + 1} \right) (y_i + 1) \right\}} - D_i \right]$$

($i = 1, 2, \dots, n, \dots, 21$)

여기서 $P(t)$ 는 경과 연수에 따른 건축물의 성능지수로 식 2과 같이 산정하며 P_L 은 지진피해를 입은 건축물의 성능손실지수로 21개의 구성요소에 대하여 구성재별 중요도(I_i)와 지진피해로 인한 성능손실지표(D_i)를 곱하여 합한 값($\sum I_i \cdot D_i$)으로 나타낸다. 위 식으로 일정 경과연수가 지난 건축물에 대해 지진에 의한 손실비용을 산정할 수 있다.

5. 지진으로 인한 경제적 손실비용 산정 알고리즘 적용

기존 지진재해대응시스템은 최대지반가속도에 의해 산출된 건축물의 손상 단계별 피해율로 산정된 건축물의 피해가 예상될 건축물 수만 산출이 가능하였다. 본 연구에서는 건축물의 현존가치 및 지진으로 인한 건축물의 손상지표를 정량화 함으로써 직접적인 경제적 손실액을 산정할 수 있는 알고리즘을 적용하였다. 경제적 손실액을 산정하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 지진의 진원과 진앙과 함께 진도를 가정한다.
- 2) 지진 감쇠식에 의하여 전국 각 지역의 최대지반가속도를 결정한다.
- 3) 전국 모든 행정동에 위치한 건축물의 현존가치 및 신축단가를 생성한다.
- 4) '2)'에서 결정된 최대지반가속도로부터 전국 모든 행정동별 지반의 상태를 고려하여 요구곡선을 생성한다.

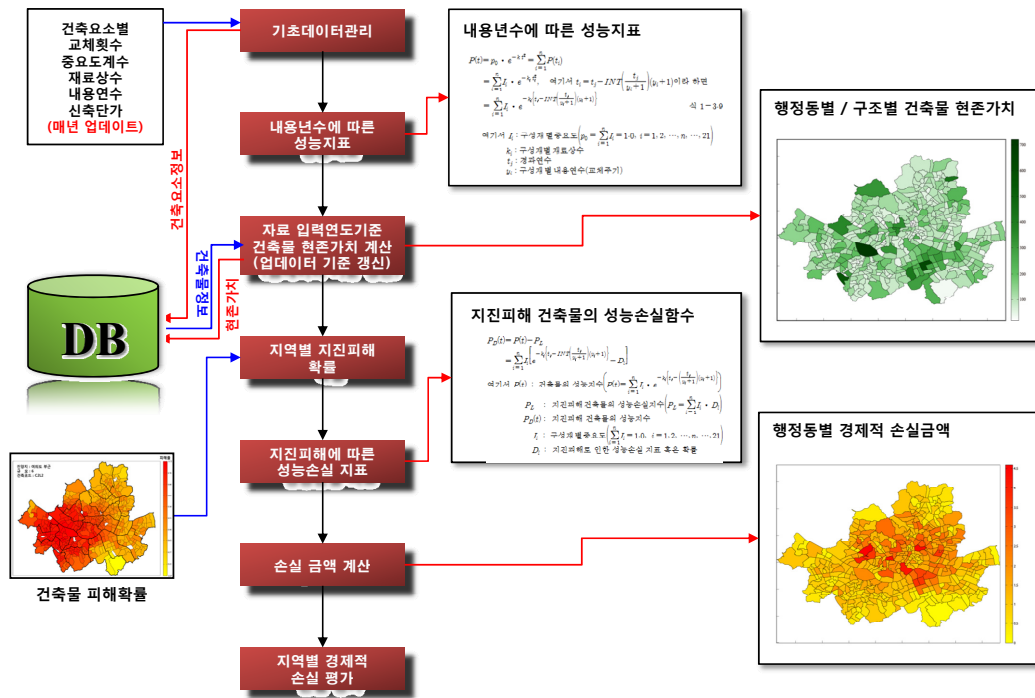


Fig. 6 지진으로 인한 건축물의 경제적 손실액 평가 과정

- 5) 경과연수, 구조형식 등을 고려하여 전국 모든 행정동에 위치한 건축물을 대표하는 건축물의 역량 곡선을 생성한다.
- 6) 전국 모든 행정동에 위치한 건축물을 대표하는 건축물의 성능점을 산정한다.
- 7) 구조요소의 지진취약도 함수 등을 이용하여 해당 건물의 피해 발생 확률을 계산한다.
- 8) 식 2의 손실함수에서 정의하는 성능손실지표에 따라 손상상태에 따른 성능저감 비율을 적용한다.
- 9) '7)'의 손상상태별 피해 발생 확률, '8)'의 성능저감 비율과 '3)'에서 현존가치를 이용하여 구조요소, 비구조요소, 부대시설 등의 지진손실비용을 산정한다.
- 10) '9)'에서 산정된 건축물 구조별 단위 미터당 지진손실비용을 각 행정동별 동일 구조 건축물의 연면적 합과 곱하여 최종 손실비용을 산정한다.

국제적 추세와 인구 및 주요산업시설이 집중된 대규모 도시에 관한 국내 특성을 고려하여, 지진에 대한 효율적인 대응을 위한 건축물의 정량적인 지진피해 예측 모델을 개발하였다. 정성적인 지진피해를 추정하는 국민안전처의 지진재해대응시스템에 탑재되어 있는 건축물 손상예측 모델을 활용하여 건축물의 경제적 지진손실을 예측하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 건축물의 경과연수에 따른 현존가치 모델을 수립하여 탑재하여, 지진피해 뿐만 아니라 자연재난 및 인적재난에 대한 피해 모델링을 적용함으로써 재난피해에 대한 정량적 손실 금액을 산정할 수 있는 기초를 확보하였다.

이로 인해 향후 국가 차원의 지진 대응 정책 수립 및 결정의 근거자료로 활용하여 현실적이고, 체계적인 지원체계 확립에 기초 자료로 활용 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 맺음말

지진 발생 빈도 및 지진 발생의 불확실성 증대에 관한

담당 편집위원: 장봉석
(K-water연구원 책임연구원)
concrete@kwater.or.kr