

건축물 지진 손실평가를 위한 전산프로그램

Seismic Loss Estimation of Building Using Computation Program



김 유 석*



이 승 원**



전 새 미**

* 아키맥 대표이사
** 서울시립대학교 건축공학과 석사과정

1. 서 론

우리나라는 지진 발생이 빈번한 환태평양 지진대를 벗어나 있다는 점에서 중·약진 지역으로 인식되어 지진 발생 가능성이 현저히 낮은 것으로 평가되어 왔다. 하지만 최근들어 중국의 쓰촨성 지진과 같은 판내 지진이 자주 발생하면서 국내에서도 지진으로 인한 건축물의 피해에 대한 경각심이 높아지고 있다. 또한 인구 증가 및 거주 영역 확대와, 기술의 발달로 구조 부재의 세장화 및 구조물의 비정형성 증대는 지진발생으로 인한 피해규모를 증가시킬 수 있는 요인이다.

즉, 국내·외 재난으로 인한 피해가 증가추세(유순영, 2011)일 뿐만 아니라, 지진의 발생으로 인한 예상 피해규모가 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 발생 빈도가 증가하고 있는 지진에 대한 건축물의 성능을 정확하고 정량적으로 평가하는 프로그램과 지진 발생 후 사회·경제적인 피해를 최소화할 수 있는 시스템 구축의 중요성이 대두되고 있다.

미국 연방재난관리청(이하 FEMA)에서는 지진과 홍수, 허리케인에 따른 대상지역의 직·간접적인 피해를 예측할 수 있는 HAZUS 시스템으로 재난 발생에 대한 피해 예측 및 사후 영향을 분석하는 등 효과적으로 재난에 대비하고 있다. 뿐만 아니라 1994년 미국의 노스리지 지진 이후 내진 설계 방법에 대한 패러다임 변화로 성능기반 내진설계

(Performance-Based Seismic Design)가 각광받기 시작하면서 지속적인 연구·개발로 최근에 구조물 성능평가 방법론과 프로그램(FEMA, 2012)을 배포하였다. 이로써 지진으로 인한 건축물의 피해를 예측하고 대비함에 있어서, 기존의 사양설계법에 의한 정성적인 방법이 아닌 정량적으로 건축물의 성능을 평가할 수 있게 되었다. 본 고에서는 정량적인 손실평가를 위한 전산프로그램인 PACT와 HAZUS에 대한 기본 이론과 간략한 사용법을 소개하고자 한다.

2. 내진성능 평가 프로그램 소개

미국의 통합재해대응시스템인 HAZUS는 지진과 홍수, 허리케인에 따른 대상지역의 직·간접적인 피해를 예측할 수 있는 시스템이다. 그림 1과 같이 HAZUS는 재난(지진, 홍수, 허리케인)으로 인한 손실을 평가하기 위해 재난(Hazard) 평가, 자산 정보(Inventory) 구축, 분석(Analysis) 과정을 거친다(Grossi and Kunreuther, 2005).

이 시스템 중 HAZUS Earthquake는 NIBS(National Institute of Building Sciences)와 FEMA에 의해 수년간의 연구를 통해 개발된 시스템이다. 주로 관공서에서 지진으로 인한 피해 예측 및 계획 수립을 위한 목적으로 사용된다. HAZUS는 GIS(Geographic Information Systems) 기반이며, 구조물의

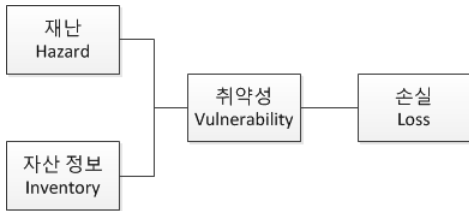


그림 1 재난 모델의 구조 (Grossi and Kunreuther, 2005)

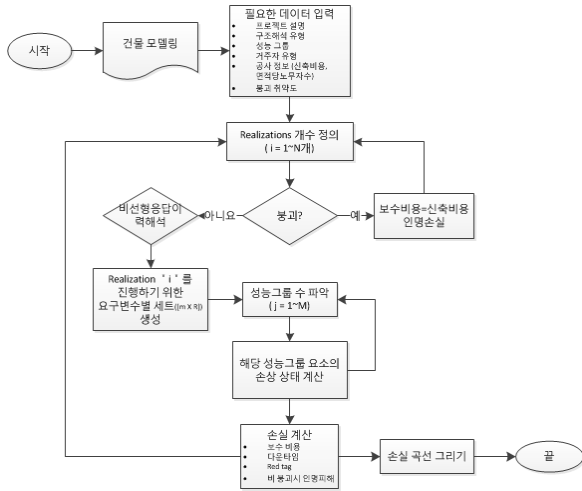


그림 2 PACT 프로그램 흐름도 (FEMA, 2012)

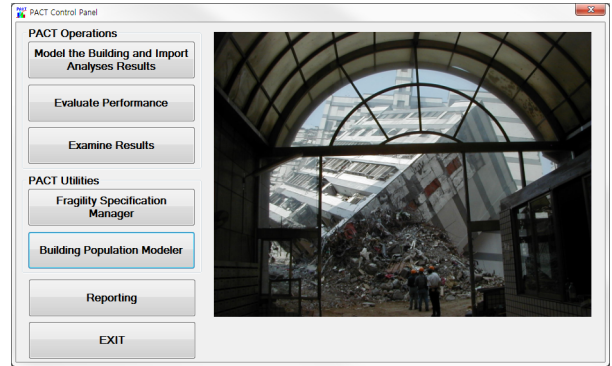


그림 3 PACT 메인화면

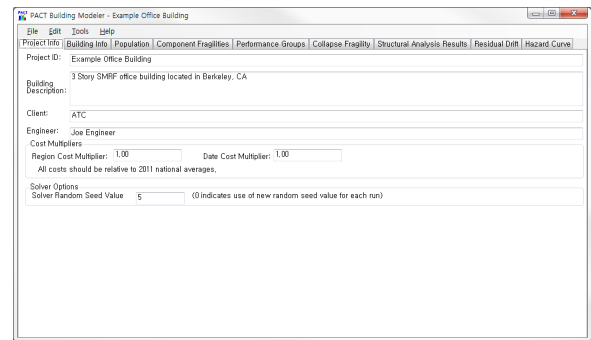


그림 4 건물성능평가 모델 입력창

취약도함수(Fragility Function)를 이용하여 지진으로 인한 대상지역의 확률적인 피해정도를 예측하고 손실함수(Loss Function)를 통하여 물리적·경제적 재해 및 사회적 영향으로 나누어 지진으로 인한 피해를 예측한다.

PACT(Performance Assessment Calculation Tool) 프로그램은 구조물의 지진으로 인한 손실평가를 이용한 성능평가 방법론(FEMA, 2012)에 근거한 프로그램이다. 이 프로그램은 건물의 종류, 경과 년수, 시공 방법, 용도 등과 관계없이 내재된 부재별 취약도함수와 확률을 기반으로 건물 1개동의 내진성능을 평가한다. 그림 2과 같은 순서로 대상 건축물의 구조체·비구조체·부대시설의 지진 발생으로 인한 손실 금액과 인명피해, 영업 손실 등을 정량적으로 평가한다.

3. 건축물 내진성능 평가 프로그램 (PACT)

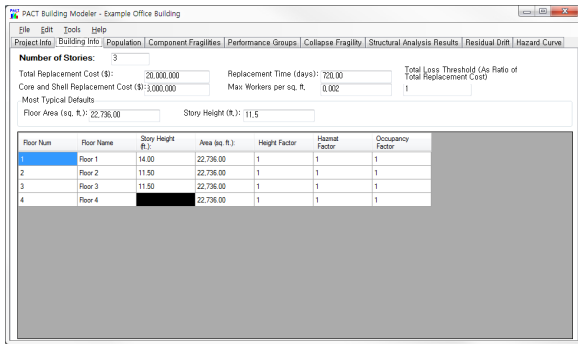
PACT는 사용자 기반의 프로그램으로써 최대한 편리하게 건축물과 관련된 정보를 입력하도록 구성되어 있다. 건물에 사용되는 부재의 취약도 정보와 건물 용도별 인구분포도 등의 정보는 기본적으로 내장되어 있기 때문에 정확한 입력 정보가 없을 경우에는 내장 데이터를 활용할 수 있다.

PACT를 통한 건축물의 내진 성능 평가 절차는 다음과 같다. 그림 3은 PACT의 메인화면으로, 첫 번째 버튼(건물

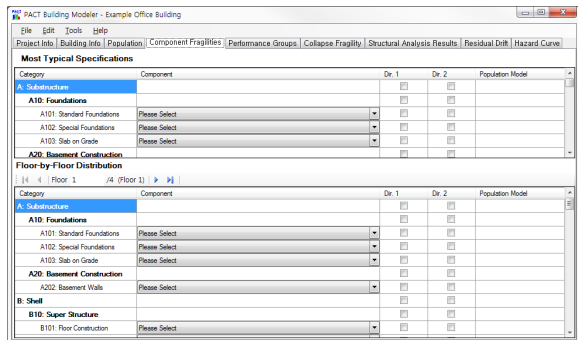
모델 및 해석결과 입력, Model the Building and Import Analyses Results)을 클릭하여 성능평가를 진행할 대상 건물의 기본 정보와 구조해석 결과 등을 입력하고, 두 번째 버튼(성능평가, Evaluate Performance)을 클릭하면 앞서 입력한 정보를 토대로 프로그램 자체에 내장되어 있는 알고리즘을 통해 성능평가를 수행한다. 세 번째 버튼(평가 결과, Examine Results)을 클릭하면 결과에 대한 자세한 사항을 확인 할 수 있으며, 결과 확인 후 수정사항이 있을 경우 다시 상기의 절차를 반복하면 된다.

3.1 PACT 입력 데이터

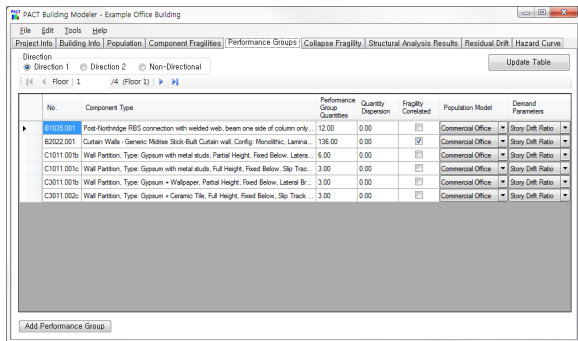
메인화면에서 첫 번째 버튼을 눌러 대상 건물의 성능평가 모델 입력을 위한 창을 활성화 시킨다. 정확한 성능평가를 위해 체계적이고 정량적인 정보를 입력하도록 구성되어 있다. 그림 4와 같이 입력창 상단부에 상세 탭이 있으며, 이는 평가 프로젝트 개요(Project Info.), 건물 기본 정보(Building Info.), 건물 용도 및 거주자 유형(Population), 비구조 요소의 취약도(Component Fragilities), 성능 그룹(Performance Groups), 붕괴 취약도(Collapse Fragility), 구조 해석(Structural Analysis Results), 잔류 변위(Residual Drift), 위험도 곡선(Hazard Curve)이다.



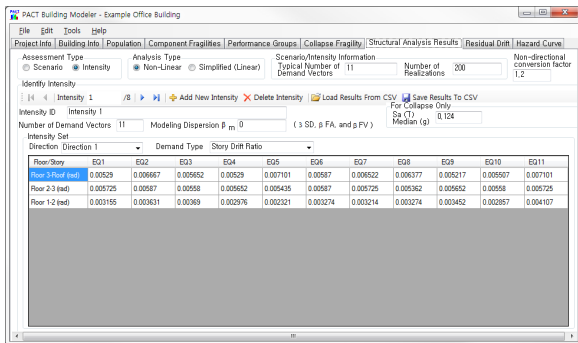
(a) 대상건물 기본정보 입력창



(b) 취약성 요소 입력창



(c) 성능 그룹 입력창



(d) 대상건물의 구조 해석 결과 입력창

그림 5 PACT 데이터 입력 순서

그림 5(a)의 대상건물의 기본정보 입력창에서 건물의 층 수, 면적, 높이, 공사 비용, 공사 기간, 공사 기간 동안 건물 면적당 투입되는 근로자의 수 등을 입력한다. 비용은 대상 건

물의 신축 비용(Total Replacement Cost)과 건물의 코어 및 외장재, 비구조체의 비용(Core and Shell Replacement Cost)을 입력해야 한다. Core and Shell Replacement Cost는 신축 비용에서 거주자에 의한 비구조적 요소(사무실 칸막이, 천장, 조명기구, HVAC 등)를 제외한 비용이다(FEMA, 2012).

대상건물의 용도를 거주자 유형 탭에서 입력한다. 구조물 성능평가 방법론(FEMA, 2012)에서는 건물의 용도를 상업, 교육(초,중,고), 의료, 숙박, 거주, 연구, 판매, 창고시설로 구분하여 용도별 거주 분포를 시간, 월, 년 단위의 데이터로 제공한다. 이 데이터는 메인화면(그림 1)의 Building Population Manager에서 수정하거나 새로 만들 수 있다.

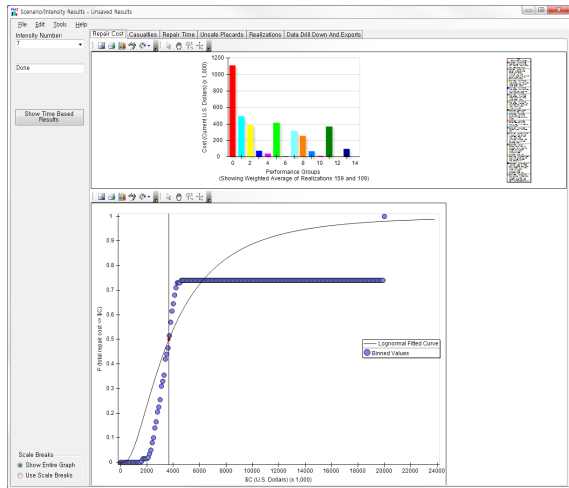
건물의 전체적인 정보 입력을 완료한 후, 세부적으로 건물 내 지진으로 인하여 손상을 입을 수 있는 요소의 분포, 취약도, 수량 등을 입력해야 한다. 그림 5(b)와 (c)에서와 같이 요소의 취약도 탭에서는 각 층별 취약성 요소를 정의하고, 그 다음 성능 그룹 탭에서 각 층의 성능 그룹 별 취약 요소의 수량을 정의한다. 성능 그룹은 비슷한 손상을 입는 취약 요소들로 구성되어 있다. PACT에는 주로 사용되는 구조 및 비구조 요소, 부대시설의 취약도 등의 정보를 내포한 데이터를 내장하고 있다.

건물의 붕괴 취약도 함수를 이용하여 건물의 붕괴여부를 판단하고 지진으로 인한 피해 발생에 대한 평가를 진행한다. 붕괴 취약도 함수는 하나 이상의 모드에서의 붕괴 가능성과 1차 모드주기에서의 스펙트럼 가속도로 표현된다. 이 식은 건물의 고유주기에서의 스펙트럼 응답 가속도의 중앙값($\hat{S}_a(\bar{T})$)과 붕괴와 관련된 분산(β), 발생 가능한 붕괴 모드(붕괴로 영향을 받는 각 층의 면적 당 확률), 붕괴가 일어날 각 붕괴 모드의 확률, 그리고 사상자 및 부상자 발생 확률로 표현된다. 이 값들을 붕괴 취약도 탭에 입력한다.

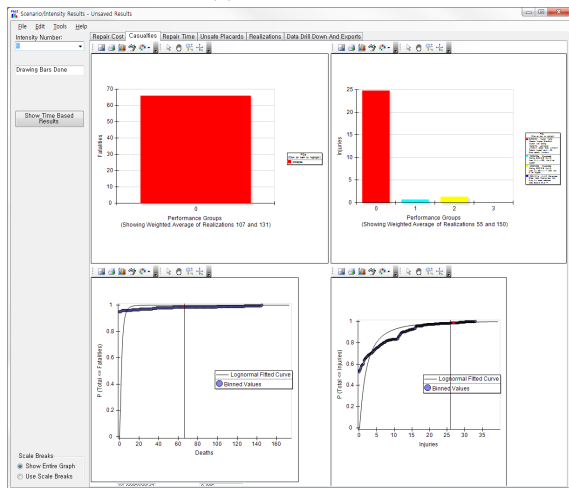
그림 5(d)는 미리 수행한 구조해석 결과를 입력하는 창이다. 건물성능평가 유형(시나리오, 강도, 특정기간 기반 성능평가)을 선택하고, 해석 유형(비선형응답해석, 증분동적해석)을 선택한다. 또한 구조 해석 시 사용한 지진파 개수와 시뮬레이션 횟수를 입력한다. 시뮬레이션 횟수는 보수비용과 보수기간의 신뢰도와 비례하므로 정확성이 요구되는 구조물 계산 시에는 500이상의 숫자를 입력해야 한다. PACT에서의 기본 값은 200이다.

3.2 PACT를 통한 손실평가 결과

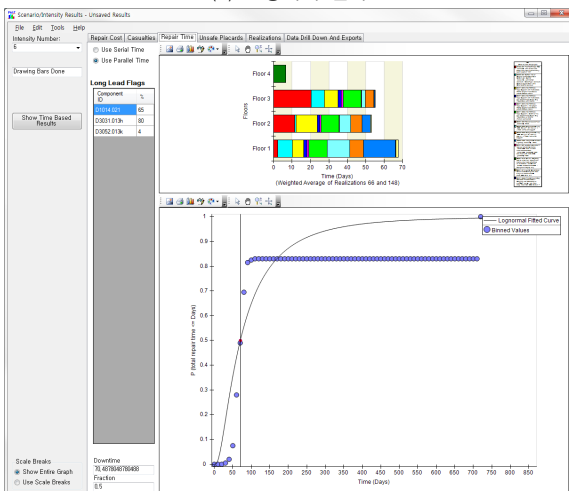
위의 순서에 따라 입력을 하면 성능기반 내진설계를 위한 구조물의 지진 피해 계산에 대한 기본적인 정보 입력이 마무리된다. PACT의 메인 메뉴(그림 1)에서 성능평가 버튼



(a) 손실비용 결과



(b) 인명피해 결과



(c) 보수기간 결과

그림 6 PACT를 통한 손실평가 결과

을 클릭하여 내장된 알고리즘을 통해 자동으로 손실을 계산하고, 평가결과 버튼을 눌러 결과를 확인한다.

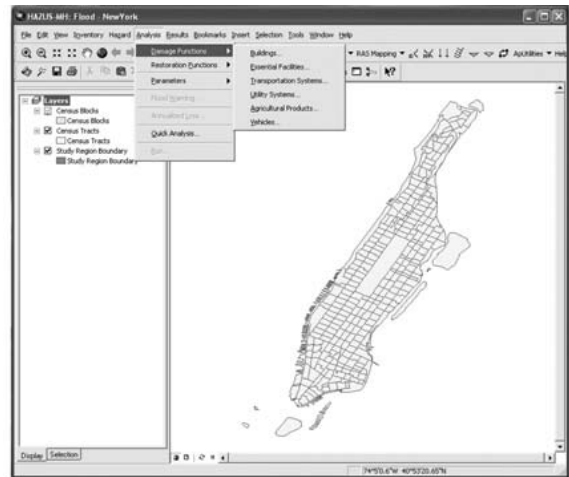


그림 7 HAZUS-MH 인터페이스(유순영, 2011)

성능기반 내진설계에 의한 성능지표의 수준은 보수비용, 보수 기간, 피해자 탭 등에서 확인할 수 있으며, 이 결과는 그림 6과 같다. Data Drill Down And Exports 탭에서 시뮬레이션별 결과를 저장하거나 전체 시뮬레이션의 결과를 검토할 수 있으며, 이는 CSV파일로 저장되기 때문에 Microsoft Excel과 같은 스프레드시트 프로그램에서 열 수 있다.

4. HAZUS를 이용한 지진 피해 예측

HAZUS는 ArcGIS를 기반으로 개발된 통합재해정보시스템으로 ArcMap과 동일한 사용자 인터페이스를 가지고 있다(유순영, 2011). PACT로는 지진으로 인한 건물 1개동의 직접적인 성능 손실을 평가했다면, HAZUS는 대상 지역의 건물군, 지형도, 지진의 위치 및 규모 등의 다양한 자료를 토대로 지역 단위에 대한 직·간접적인 손실을 평가할 수 있다(소방방재청, 2009).

HAZUS 프로그램은 그림 8과 같은 절차로 손실을 산정한다. 우선 Potential Earth Science Hazards (PESH) 모듈에서 지반운동 및 지반파괴를 평가한다. 지반운동 계산을 위한 방법으로는 결정론적 방법 혹은 확률론적 방법이 있다. 결정론적 방법은 특정 지진 자료로부터 선택된 단층의 유형과 위치, 지진 규모 등을 기반으로 계산하는 방법이며, 확률론적 방법은 재현주기별로 지반운동에 의한 최대지반가속도를 계산한다. 혹은 사용자가 GIS 기반의 지반운동 지도를 입력할 수도 있다. HAZUS에서는 최대지반가속도 값 뿐만 아니라 스펙트럴 가속도를 계산하는 방법을 병행하고 있다.

또한, 대상 지역에 대한 인구 통계 자료와 건축물군의 가치, 유형기반시설(도로 및 교통 관련 시설 및 설비, 철도, 교량, 항만시설, 통신 네트워크 설비, 전기 설비, 상·하수

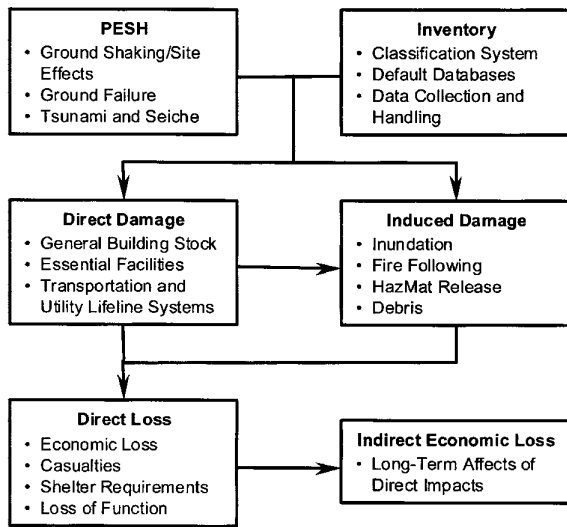


그림 8 HAZUS Earthquake의 손실평가 프레임 워크 (Kircher 외, 2006)

도 설비 등), 위험 지반 등에 대한 Inventory 모듈에서 해당 되는 자료를 선택한다.

이와 같이 손실 평가에 필요한 데이터가 입력이 되면 대상 지역 내 건물군의 취약도 함수를 통해 피해를 계산한다. 지진취약도 곡선은 건축물의 구조 유형별, 사용 용도별로 구분하여 계산되었으며, 구조체 혹은 비구조체의 손상상태가 일정수준을 넘는 확률을 대수정규함수로 곡선을 정의하였다. 건물의 피해를 None, Slight, Moderate, extensive, Complete의 5단계로 구분하고 None 이외의 4가지 손상단계에 대해서 평가하고 있다(소방방재청, 2009).

HAZUS로부터 예측할 수 있는 지진 피해는 다음과 같다. 먼저, 직접적인 피해로는 일반적인 건물과 주요 시설물과 운송수단 및 Lifeline 시스템의 피해를 예측할 수 있다. 이에 따른 2차 피해가 발생할 수 있는데, 화재, 잔해 및 위험물질 발생, 침수 등이 이에 해당된다(그림 9(a), (b)). 이러한 예측 가능한 피해로부터 직접적인 사회·경제적 손실 및 간접적인 경제적 손실을 계산할 수 있다. 직접적인 경제적 손실은 건물의 가치 하락과 Lifeline 시스템의 붕괴 등에 의한 손실로써 그림 9(c)와 같이 HAZUS를 통해 정량적으로 평가할 수 있다. 직접적인 사회적 손실은 인명피해로 인한 사망자·부상자 발생 등이다. 그림 9(d)는 대상 지역 내 이재민 발생으로 인한 대피소의 요구량이다. 마지막으로 지진피해 후 장기적인 경제 손실에 의한 간접적인 손실을 예측할 수 있다.

5. 결 론

최근 국내·외에서 재난으로 인한 피해가 증가하고 있는 가운데, 중국의 쓰촨성 지진과 같은 판내 지진이 자주 발생

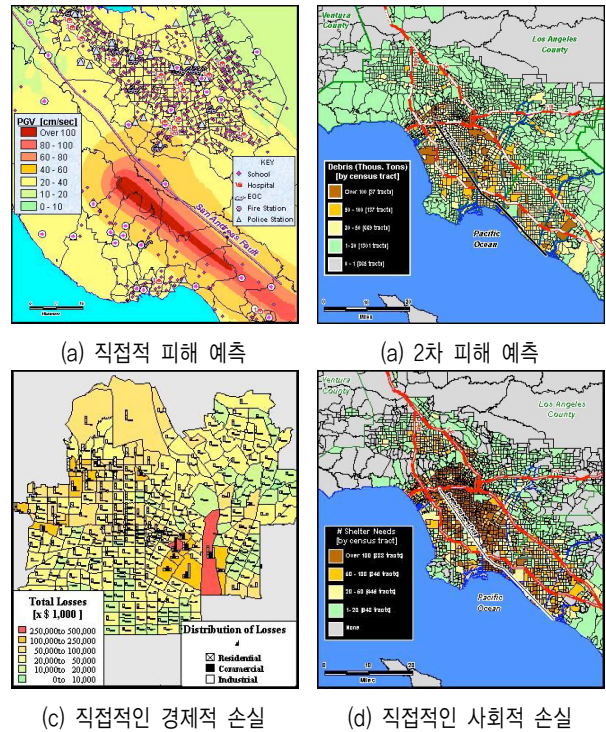


그림 9 HAZUS를 이용한 지진 피해 예측

하면서 국내에서도 지진으로 인한 건축물의 피해에 대한 경각심이 높아지고 있다. 이에 따라 재난 발생 전에 피해를 예방하고 사후 영향을 분석하여 피해를 최소화하기 위한 프로그램과 시스템 구축의 중요성이 대두되고 있다. 미국의 경우, FEMA에서 수년간의 연구를 통해 개발된 통합재해정보시스템인 HAZUS으로 지진, 홍수, 허리케인으로 인한 손실을 예측 및 분석할 수 있으며, 성능기반 내진설계 방법론에 의거한 프로그램인 PACT로 건물 1개동에 대한 정량적인 손실 평가를 수행할 수 있다. 본 고에서는 PACT와 HAZUS에 대한 기본 이론과 간략한 사용법을 소개하여 지진 발생으로 인한 건축물의 피해를 정량적으로 예측하는데 도움을 주고자 한다.

하지만, 손실평가에 사용되는 성능지표 및 건물의 구성요소 데이터 등을 국내에 바로 적용하기는 어려우므로, 데이터의 검증과 지속적인 연구를 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. FEMA, Seismic Performance Assessment of Buildings: Volumn 1 - Methodology, FEMA P-58, Federal Emergency Management Agency, 2012
2. FEMA, Seismic Performance Assessment of Buildings: Volumn 2 - Implementation Guide, FEMA P-58, Federal Emergency

- Management Agency, 2012
3. FEMA, HAZUS-MH MR4 Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, 2003
 4. Kircher, C., Whitman, R., and Holmes, H., HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods, Natural Hazards Review, volume 7, 2006
 5. 유순영, 국내 재난 손실 평가 모델 개발을 위한 HAZUS-MH4 분석, 한국방재학회지, 2011
 6. Grossi, P., and Kunreuther, H., Catastrophe Modeling: a new approach to managing risk. Springer, 2005.
 7. 소방방재청, 국내 건축구조물의 지진취약도함수 개발, 소방방재청, 2009
 8. Norm Levine, Overview of Hazus-MH: The Earthquake Module, South Carolina Earthquake Education and Preparedness Program, 2008 