

능력 스펙트럼법을 이용한 건물 지진 손실 평가 방법

A Methodology of Seismic Damage Assessment Using Capacity Spectrum Method

변지석*
Byeon, Ji-Seok

국문요약

본 연구는 지진으로 인하여 발생한 건물의 피해액을 보다 객관적으로 예측 평가할 수 있는 ACM(Advanced Component Method) 개발 방법에 관한 것이다. ACM은 지금까지의 재래식 손실 평가방법에 사용된 구조 기술자들의 주관적인 관점과 전문가적 견해에서 탈피하여, 지진의 크기에 따른 구조형식이 각기 다른 건물들의 내진 성능 평가 기술에 바탕을 둔 지진 손실 평가 방법이다. 그 과정을 살펴보면 먼저 선별된 전형적인 건축 구조물에 대하여 비선형 정적 내진 해석인 pushover 해석을 실행하여 그들의 건물 능력도와 각 부재의 비선형 응답을 계산한다. 지진하중은 ADRS(Acceleration-Displacement Response Spectrum)의 응답 가속도와 응답 변위의 형태로 표현하여 이를 건물 능력도와 함께 능력 스펙트럼법(Capacity Spectrum Method) 기법을 이용하여 건물의 내진 성능점을 찾는다. 또한 전체 건물을 주요 구조체인 기둥, 보, 슬래브 등과 비구조체인 비내력 벽판, 외벽 장식용 요소 등을 각각 분리하여 건물 각 부재들의 지진 응답 변위에 따른 피해율을 산출한다. 이들 각 부재들의 피해는 그 부재들의 특성에 따른 적절한 보수보강기법과 그에 따른 비용산정 모델을 이용하여 각 부재의 금전적인 피해액으로 전환한다. 마지막으로 Monte Carlo 기법을 이용하여 지금까지 얻은 건물의 응답과 각 부재들의 지진에 따른 피해율, 그리고 그 부재들의 비용산정 모델을 종합하여 전체 건물의 최종의 피해율을 얻는다. 특히, 현존하는 건물에 사용된 재료와 설계 가정 하중의 가변성에 따른 건물 거동에 대한 불확실성 등을 고려하기 위하여 Latin Hypercube 추출 기법을 사용하며, 마지막으로 본 연구의 사례평가를 위하여 과거 일어났던 지진 피해정보와 손실 자료들을 바탕으로 ACM방법과 재래식 방법을 이용한 건물 손실 평가 방법을 비교 분석하였다.

주요어 : 건물 지진 손실 평가 방법, pushover 해석, 지진 응답 피해율, 보수보강 기법, Monte Carlo 기법

ABSTRACT

This paper describes a new objective methodology of seismic building damage assessment which is called Advanced Component Method(ACM). ACM is a major attempt to replace the conventional loss estimation procedure, which is based on subjective measures and the opinions of experts, with one that objectively measures both earthquake intensity and the response of buildings. First, response of typical buildings is obtained analytically by nonlinear seismic static analysis, push-over analyses. The spectral displacement is used as a measure of earthquake intensity in order to use Capacity Spectrum Method and the damage functions for each building component, both structural and non-structural, are developed as a function of component deformation. Examples of components include columns, beams, floors, partitions, glazing, etc. A repair/replacement cost model is developed that maps the physical damage to monetary damage for each component. Finally, building response, component damage functions, and cost model were combined probabilistically, using Monte Carlo simulation techniques, to develop the final damage functions for each building type. Uncertainties in building response resulting from variability in material properties and load assumptions were incorporated in the Latin Hypercube sampling technique. The paper also presents and compares ACM and conventional building loss estimation based on historical damage data and reported loss data.

Key words : earthquake loss estimation methodology, pushover analyses, building damage functions, repair/replacement cost analysis, Monte Carlo simulation

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 들어 인도네시아, 일본 등 세계 각 국에서 빈번히 발생하는 큰 지진으로 인하여, 우리나라에서도 지진 재난에 대한 경각심이 크게 고조되고 있다.

지진으로 인한 인명피해와 경제적 손실을 최소화하기 위해선 건축물의 내진 성능을 향상시킬 수 있는 내진 설계 기준과 지침서, 그리고 각 부재들의 강도기준 등과 관련된 새로운 법규제정이 이루어져야 한다.

또한, 지진으로 인한 건물의 피해와 손실을 줄이기 위한 노력의 일환으로 미국, 일본과 같은 선진국에서는 재

난으로 인한 손실액을 예측할 수 있는 프로그램(loss estimation) 개발이 정부는 물론 학계와 기업체를 중심으로 활발하게 이루어지고 있다.

특히, 이러한 피해 예측 프로그램은 재난 발생 시 정부나 지자체에서 필요로 하는 응급복구와 대응에 사용될 뿐 아니라, 각종 자연 재난에 노출되어 있는 주요 산업시설물들의 안전 및 재해 위험 평가(safety inspection and risk assessment)등에 널리 사용되고 있다. 하지만 국내에서는 아직까지 재난피해를 편협 적으로만 보아 왔으며 이제 이러한 프로그램의 연구와 개발이 요구된다.

미국의 경우 연방 재난 관리청인 FEMA에서 1999년 HAZUS(Hazard in US)라는 지진 손실 평가 방법을 개발하였으며 현재 정부기관 뿐만 아니라 여러 기업과 연구소에서 이 재난 예측 프로그램을 널리 사용하고 있다. 이 평가 방법을 이용한 한 연구 결과(FEMA, 2000: Report-366)에 따르면, 미국의 경우 지진으로 인하여 발생할 경

* 정회원·삼성에버랜드(주) 방재컨설팅팀, 팀장, 공학박사
(대표저자: byeon02451@yahoo.com)

본 논문에 대한 토의를 2005년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일: 2003. 4. 22 / 심사종료일: 2005. 6. 1)

제적 손실이 연간 약 5조 3천억 원에 달하며, 산출된 이 금액을 근거하여 정부에서는 재난에 필요한 것들을 체계적으로 관리하고 있다.

HAZUS 이전의 지진 손실 평가 방법은 건물의 피해 정도(damage state)를 결정하기 위하여 MMI(Modified Mercalli Intensity)나 최대 지진 가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 사용하였는데, 이들은 지진이 지닌 자체 성질을 표현하는 단위들이어서 국지적으로 건축된 각 건물이 가지는 있는 고유한 피해 특성을 충분히 반영하지 못하였다. 이러한 예로 여러 지진 피해 현장조사에서, 지진의 진앙지(epicenter)로부터 거리가 거의 같은 곳에 위치한 두 건물에서 한 건물은 완전히 붕괴되어 있는 반면, 그 바로 옆의 건물은 경미한 피해만 입는 등의 경우를 쉽게 찾아 볼 수 있는데, 이러한 현상은 각 건물이 가지고 있는 고유한 구조적 취약성(building vulnerability)에 기인한 것으로 ATC-13과 같은 피해평가로는 설명하기 어려웠다.

본 연구에서는 이러한 취약성을 반영하기 위해 개발된 ACM(AIR, 2000)이라 일컬어지는 새로운 피해예측 프로그램에 관한 내용을 다루고, 이는 구조형식이 각기 다른 건물들의 지진의 규모에 따른 실제 건물의 내진 성능 평가에 바탕을 둔 건물 손실 평가 방법이다.

1.2 연구방법 및 내용

먼저, 본 평가 방법에서는 구조물에 대하여 비선형 정적 내진 해석인 pushover 해석을 실행하여 건물 능력도와 각 부재의 비선형 응답을 정밀하게 계산한다. 지진하중은 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)의 응답 가속도와 응답 변위의 형태로 표현하여 이를 건물 능력도와 함께 능력 스펙트럼법(Capacity Spectrum Method) 기법을 이용하여 그림 1처럼 건물의 내진 성능점을 찾는다.(ATC, 1996) 또한 전체 건물을 주요 구조체인 기둥, 보, 슬래브 등과 비구조체인 비내력 벽판, 외벽 장식용 요소 등을 각각 분리하여 건물 각 부재들의 지진 응답 변위에 따른 피해율을 산출한다. 이들 각 각의 부재의 피해는 그 부재의 특성에 따른 보수보강기법과 그

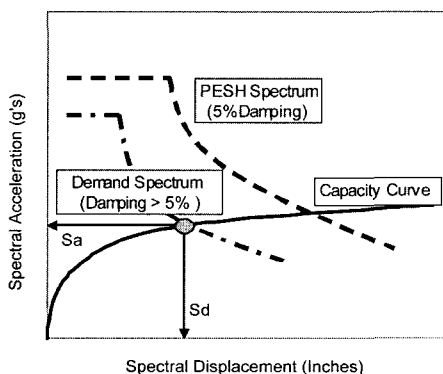


그림 1 Capacity Spectrum Method 개요도

에 소요되는 비용 산정 계산 방법을 이용하여 각 부재의 피해액으로 전환한다. 마지막으로 확률론에 바탕을 둔 Monte Carlo 기법을 이용하여 지금까지 얻은 건물의 응답과 각 부재들의 지진에 따른 피해율, 그리고 그 부재들의 비용산정 모델을 종합하여 전체 건물의 최종의 피해율을 얻는다. 특히, 건물에 사용된 재료와 설계 하중의 가변성에 따른 건물 거동에 대한 불확실성 등을 고려하기 위하여 Latin Hypercube 추출 기법이 사용되었다.

본 연구에서는 적용사례로 철근 콘크리트 건물의 경우를 제시하였으며, 프로그램 개발에 따른 최종 결과로써, 실제 과거 일어났었던 지진 피해 정보와 손실 자료들을 바탕으로 본 평가 방법과 기존의 건물 손실 평가 방법을 비교 분석하였다.

2. 재해 손실 평가 방법

지진 재해 손실 평가 방법의 일반적인 구성요소와 계산 순서는 그림 2와 같이 세 단계를 거치게 된다. 먼저, 첫 단계로는 지진 위험 산정 단계로, 지진이 일어날 가능성이 있는 곳의 위치 파악과 만약 그곳에 지진이 일어날 경우 예상되는 지진의 규모 등을 파악한다. 또한 같은 규모의 지진이라 할지라도 그 지역의 토질이나 지반 응답계수 등에 따라 건물에 미치는 영향은 상당히 차이가 있다. 따라서 각 지역의 정확한 지질학적 정보를 충분히 반영한다.

다음단계로, 각 건물이 지닌 구조적 특성을 고려하여 각 지진규모에 따른 건물의 피해를 계산한다. 이는 각 지역에 산재해 있는 건물들의 정보를 필요로 하며, 각 지역의 내진 설계기준과 건설 공법 등을 모두 고려하여야 한다. 최종 결과로는 건물의 피해에 의한 손실율(damage factor)이며, 이는 피해를 입은 건물 각 부분의 수리비용(repair cost)에 대한 교체 비용(replacement cost)으로 식(1)과 같이 정의된다.

$$\text{손실율}(DF) = \frac{\text{수리 비용}(\text{Repair cost})}{\text{교체 비용}(\text{Replacement cost})} \quad (1)$$

마지막 단계는 최종 손실액 산출단계로, 이를 이용하여 지진으로 인한 전체 규모의 피해액뿐만 아니라, 보험계약

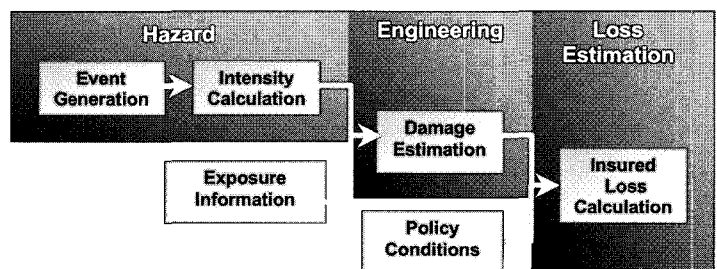


그림 2 지진으로 인한 피해 손실 계산 방법 순서도

조건(policy condition)등에 따른 피해를 입은 건물들의 예상 보상 보험금액 산정할 수 있다. 지진으로 인한 전체 손실액은 다음의 공식을 이용한다.

$$\text{손실액} = D_{rm} * \text{건물 전체의 교체비용} \quad (2)$$

$$D_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^n [D_{ri}]}{N} \quad (3)$$

여기서 N은 그 지역 전체 건물의 수 (피해를 입은 건물의 수와 피해를 입지 않은 건물의 수의 합계)이며, D_{ri} 는 피해를 입은 각 건물들의 피해율을 나타낸다. 따라서 손실율(D_{rm})은 피해를 입은 건물들의 손실을 합산을 전체 건물의 수로 나눈 뒤 이를 그 지역의 전체 교체비용을 곱한 값이다.

확률론에 바탕을 둔, 재해로 인한 피해 및 손실평가 방법이 일반에게 소개된 것은 불과 20년 정도에 불과하다. 초기의 피해 계산방법은 재해 발생 후 현장 피해조사 보고서 등을 통하여 기존의 얻어진 정보를 이용하여 만들어진 것과, 체계적인 연구보다는 지진관련 학자 및 구조 기술자들의 전문가적 견해와 그들의 주관에 바탕을 하여 만들어 졌다. 그 중 대표적인 손실평가 방법으로는 ATC-13을 들 수 있다. 그 후 점차 건축 공학을 이용한 다양한 방법이 개발되었으며 1999년 HAZUS에는 현재 건물의 지진에 대한 응답을 가장 잘 예측할 수 있는 기법중의 하나인 능력스펙트럼을 이용하기에 이르렀다.

2.1 ATC-13

ATC(Applied Technology Council)가 주관이 되어 처음으로 체계적인 지진피해예측에 관한 연구 결과가 1985년 캘리포니아주의 지진 안전 위원회에 상정되었고 이는 지금까지도 여러 지진 연구 기관에서 사용되고 있다. ATC-13 (ATC, 1985)이라 일컬어지는 이 보고서는, 특별히 캘리포니아에 존재하는 모든 건물을 대상으로 하여 각각의 구조적 특성을 고려한 총 42종류의 건물 군으로 분류한 뒤, 그들을 다시 주거용, 상업용, 또는 공장용 등과 같은 건물 용도별(occupancy type)로 구분하여, 지진규모에 따른 그들 각각의 건물 피해율을 제시하고 있다. 하지만, 이 방법은 앞장에서 이미 소개한 것처럼 건물 피해율이 MMI와 그에 상응하는 PGA를 기준으로 하여 개발되었으며, 캘리포니아 지역의 한정된 지진 구조 전문가들의 견해에 의존하여 만들어진 단점을 가지고 있다.

또한 ATC-13은 지금까지 중약 규모의 지진에 대한 피해예측은 대체로 좋은 평가를 받아왔다. 하지만 대규모 지진의 경우 피해예측에 많은 오차가 있음이 1994년 Northridge지진을 통하여 입증되었고, 결국은 보다 정확하고 새로운 피해 예상 프로그램 필요성을 대두시켰다.

2.2 HAZUS

미국의 FEMA와 National Institute of Building Science(NIBS)의 정부기관 합작으로 1995년과 1997년 발표한 HAZUS (FEMA, 1997)라고 일컬어지는 국가 차원의 종합적인 재해 손실 평가 방법이 소개되었다. 이 프로그램은 수년간의 실험과 연구를 거친 것으로, 지진의 규모를 지금까지는 인간이 느낀 경험과 그 현상을 토대로 하여 만들어진 MMI 기준 대신, 최신의 구조 공학이론에 기초를 둔 능력 스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 통하여 건물의 직접적인 거동을 공학적인 수치인 응답 변위 함수로 표현하여 건물피해 함수곡선을 완성하였다.

표 1 ACM에 의한 건물 분류표

	건물분류	층수
1	Wood, Light Frame	1 - 2
2	Wood, Commercial and Industrial	All
3	Steel Moment Frame, Low	1 - 3
4	Steel Moment Frame, Mid	4 - 7
5	Steel Moment Frame, High	8+
6	Steel Braced Frame, Low	1 - 3
7	Steel Braced Frame, Mid	4 - 7
8	Steel Braced Frame, High	8+
9	Steel Light Frame	All
10	Steel Frame w/ Cast-in-Place Concrete Shear Wall, Low	1 - 3
11	Steel Frame w/ Cast-in-Place Concrete Shear Wall, Mid	4 - 7
12	Steel Frame w/ Cast-in-Place Concrete Shear Wall, High	8+
13	Steel Frame w/ Unreinforced Masonry Infill Walls, Low	1 - 3
14	Steel Frame w/ Unreinforced Masonry Infill Walls, Mid	4 - 7
15	Steel Frame w/ Unreinforced Masonry Infill Walls, High	8+
16	Concrete Moment Frame, Low	1 - 3
17	Concrete Moment Frame, Mid	4 - 7
18	Concrete Moment Frame, High	8+
19	Concrete Shear Wall, Low	1 - 3
20	Concrete Shear Wall, Mid	4 - 7
21	Concrete Shear Wall, High	8+
22	Concrete Frame w/ Unreinforced Masonry Infill Wall, Low	1 - 3
23	Concrete Frame w/ Unreinforced Masonry Infill Wall, Mid	4 - 7
24	Concrete Frame w/ Unreinforced Masonry Infill Wall, High	8+
25	Precast Concrete Tilt-up Walls	All
26	PC w/ Concrete Shear Wall, Low	1 - 3
27	PC w/ Concrete Shear Wall, Mid	4 - 7
28	PC w/ Concrete Shear Wall, High	8+
29	Reinforced Masonry Bearing Wall w/ Wood or Metal, Low	1 - 3
30	Reinforced Masonry Bearing Wall w/ Wood or Metal, Mid	4+
31	Reinforced Masonry Bearing Wall w/ Precast Conc., Low	1 - 3
32	Reinforced Masonry Bearing Wall w/ Precast Conc., Mid	4 - 7
33	Reinforced Masonry Bearing Wall w/ Precast Conc., High	8+
34	Unreinforced Masonry Bearing Walls, Low	1 - 2
35	Unreinforced Masonry Bearing Walls, Mid	3+
36	Mobile Homes	All

건물 군을 살펴보면, 오로지 캘리포니아에만 존재하는 건물분류를 한 ATC-13보다는 한 단계 발전시켜, 미국 전역에 존재하는 모든 구조형태를 포함시켰다. 또한, HAZUS는 정부가 가지고 있는 방대한 자료들, 즉 지질학적 데이터와 매년 실시하는 census 통계자료 등을 집대성하여 개발한 재해손실 프로그램이다. 또한, 지금이라도 일어날 수 있는 지진의 피해를 GIS(Graphical Information Sys-

tem)를 이용하여 그 피해의 규모와 상황 등을 컴퓨터 화면으로 즉시 출력할 수는 있는 기능을 추가하였다. 이로 인하여 미국 전국 각 지역 관공서와 행정부서 등에서는 그 지역에서 일어난 피해를 쉽게 파악하고 그에 따른 피해 복구작업을 크게 향상시키고 있다.

하지만, HAZUS의 건물 피해율은 최대 변위와 최대 가속도의 함수인 건물피해 정의를 전문가들의 경험적 견해에 의존하여 만들어 진 단점이 있다.

이러한 기존의 재해손실평가 방법의 결점들을 서로 보완하여, 정확한 보수 보강비 산출 기법과 확률론을 배경으로 개발된 피해 계산 방법이 바로 ACM이다.

3. ACM (Advanced Component Method)

ACM은 ATC-13 과 HAZUS 각각의 단점을 보완하기 위해 시작된 연구이며, 이는 기존의 피해 손실 계산 방법을 한 단계 더 발전시킨 것이다. 즉 ACM은 기존의 주관적이고, 전문가들의 경험과 견해에 비중을 두었던 방법에서 탈피하여, 건물이 가지고 있는 구조적 특성을 최대한 고려한 손실 계산방법이다.

먼저, ACM은 지진의 크기를 나타내는 단위로 기존의 MMI대신 HAZUS에서 소개되었던 응답 변위(spectral displacement)를 사용하며, 이 공학적인 단위는 단자유도계(single degree of freedom)로 간주한 건물에 지진 외력이 작용할 때, 건물이 경험하는 최대 수평변위를 나타낸 것이다.

ACM을 구성하는 각 요소들과 전체 개발 순서를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

첫 단계로, 미국 각 지역의 전형적인(typical) 건물 구조 형태를 선정한다. ACM은 총 36개의 건물군으로 구분하였는데, 이는 그들이 가지고 있는 면적 및 층수, 재료 그리고 구조적 특성에 의해서 결정하였다. (표 1참조)

둘째로, 선정된 각각의 건물들에 대한 구조 설계를 위하여 각 지역에 있는 구조 설계 전문 회사에게 구조 설계를 의뢰하였다. 이를 통하여 각 구조물의 축방향 및 휨 응력, 모멘트 허용 응력 및 전단 응력, 그리고 각 부재들의 정확한 치수와 허용 저항력 등과 같은 구조 디테일을 얻는다. 이렇게 디자인된 건물들을 “표준건물”로 정한 뒤, 실제 현존하고 있는 건물들의 구조적 다양성을 고려하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션 중의 하나인 Latin Hypercube Sampling을 이용하였다. 이를 위해 표준 건물의 재료특성과 설계 가정하중 등을 임의 변수(random variable)로 정의한 뒤 이들을 매개변수(parameter)로 선정하였다. 이는 실제로 한번만 구조해석을 시행한 표준건물을 유한 요소 구조해석법에 적합한 모델로 전환하여 이들 매개 변수가 가지고 있는 불확실성(uncertainty)을 최대한 고려한 여러 개의 컴퓨터 모형 건물들로 만들기 위함이다. 이미 여러 연구를 통하여 각광을 받고 있는 이 Sampling 이론은 특히 Song의 연구결과(Song, 1999)에

서 언급한 바와 같이, 건물의 응답과 부재들의 허용응력 등과의 적합한 연관 관계를 얻을 수 없을 때나, Sampling 수가 한계가 있을 때, 효율성 면에 아주 뛰어난 통계학적 방법론으로 잘 알려져 있다.

셋째로, Sampling으로 정하여 진 각각의 매개 변수들을 구조 해석용 프로그램인 SAP2000 (2000)에 입력하여, 비선형 pushover 해석을 실행시켜 여러 컴퓨터 모형 건물들의 거동을 자세히 측정한다. 이 pushover 해석 방법은 정적 내진 해석법으로 가장 널리 쓰이고 있으며, 그 이론적 배경을 간단히 설명하면, 건물의 측면에 건물 높이에 따른 각층의 수평하중을 점차 증가시켜 건물이 완전히 붕괴될 때까지의 건물 거동을 기록하는 것으로, 이들의 기록은 최종적으로 건물의 수용능력도(resistance capacity)를 나타낸다. 건물 수용능력도를 살펴보면, 하중이 점차 증가할 때, 처음에는 기둥-보 접합부 등에서 하중이 잘 분산되어 선형특성을 나타내지만, 하중이 계속 증가하여 약한 구조물에서부터 서서히 균열과 파괴가 발생하여 이들이 구조적 기능을 상실하면, 남아 있는 구조물들이 재분산 작업을 함으로써 능력이 비선형적인 형태로 변화되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 건물의 장, 단방향에 따른 건물의 3차원적 pushover 해석을 실행하였다.

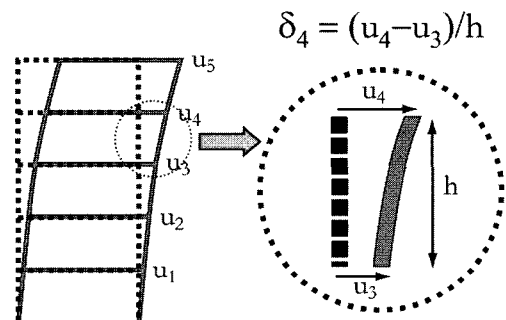


그림 3 층별 변위 비율 값

또한, pushover 해석을 통해 각 구조체 또는 비구조체 요소(components)들의 층별 변위 비율 값 (interstory drift ratio)을 얻는다. 이는 점차 증가하는 측면 하중에 따른, 아래위로 이웃한 층에서의 상대적 변위(relative displacement)를 그 층의 높이로 나눈 값으로 그의 개념도는 그림 3에 나타나 있다.

이렇게 기록된 각 요소들의 층별 변위 값을 여러 연구소나 학교 등에서 실험과 연구를 통해서 얻을 수 있는 각 요소들의 피해율과 비교 분석하여 그 부재들의 정확한 피해율을 파악한다. 본 연구에 사용된 구조체(column, beam, floor) 및 비구조체(partition, gladding, glazing, ceiling, MEP: mechanical, electrical and plumbing item) 요소들의 층별 변위 비율 값에 의한 피해율이 그림 4에 나타나 있다.

ACM의 마지막 단계로는 이러한 각 요소들의 피해 함수 곡선을 확률적으로 종합하여 피해에 따른 손실(mone

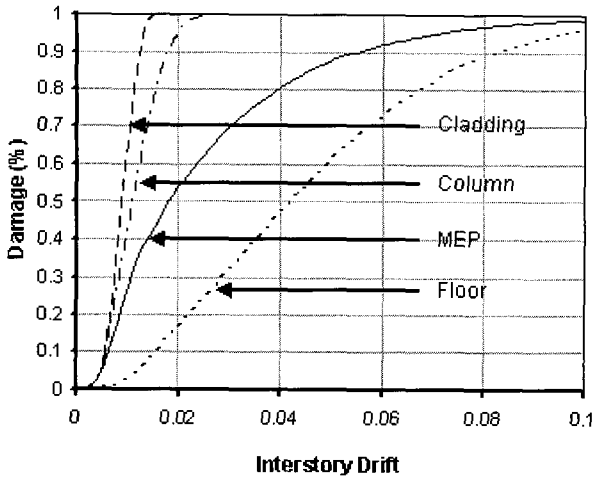


그림 4 각 요소들의 피해 함수 곡선

tary damage) 곡선을 산출한다. 이미 기록된 요소들의 층별 변위를 기준으로 건물의 각 요소마다 얼마만큼의 피해가 발생하였는지를 파악하여, 그 피해에 대한 어떤 보수 보강 기법 (repair & replacement strategy)이 필요한지를 공학적인 기준으로 판단하고, 그에 상응하는 비용산정 해석기법(cost analysis)을 산출하여, 전체 건물의 피해에 따른 손실액을 예측한다.

ACM은 방법론을 구성하는 각 요소들이 지진 독립성 때문에, 새로운 연구나 실험에서 나온 결과를 각 요소에 언제든 최신의 것으로 쉽게 수정(update)시킬 수 있도

록 하였다. 예를 들면, 각 지역 특성에 따른 새로운 형태의 건물을 쉽게 추가시키거나, 지역에 따른 독특한 보수 보강비용도 매년 발간되는 R. S. Mean(2002)을 이용하여, 최신의 모델로 변화시킴으로써 보다 정확한 손실을 계산할 수 있다.

다시 정리하면, 기존의 손실 예측방법은 그 절차가 너무 복잡하고 불확실하여, 전문가의 견해에 전적으로 의존하였으나, ACM 방법은 구조체와 비구조체의 각 요소들로 세분화시키고, 그 요소들의 현존하고 있는 수많은 실험과 연구 결과들을 체계적으로 접목시킴으로써, 보다 공학적이고 객관적인 방법이라 할 수 있다.

본 연구는 5층 높이의 철근 콘크리트 모멘트 구조물을 대상으로 지금까지 설명한 ACM의 전체과정을 자세히 살펴보고자 한다.

4. ACM 에 의한 건물 피해 평가

캘리포니아 지역에 세워질 건물로 가정된 이 철근 콘크리트 모멘트건물은 우선 그 지역에 있는 구조설계사무실을 통하여 표준적인 건물을 선정하였다. 내진 구조 설계 및 각종 구조 디테일을 취합한 후, 그 정보를 바탕으로 Sampling을 위한 다양한 설계하중과 재질의 특성 등이 표 2 에 나타난 것처럼 14개의 임위변수로 선정하였다. 이들 임위변수는 현존하는 건물들이 가지고 있는 재

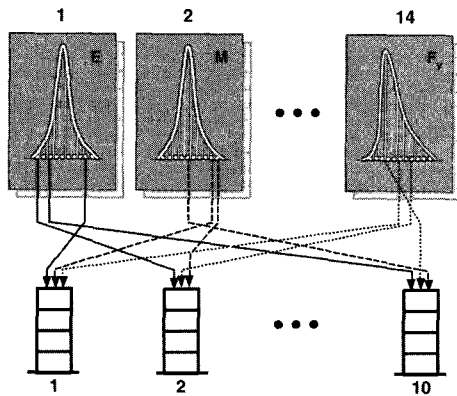


그림 5 Latin Hypercube Sampling기법

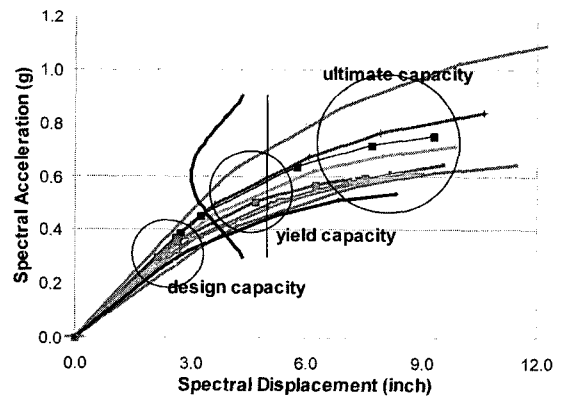


그림 6 중층 규모의 철근 콘크리트 건물 능력도

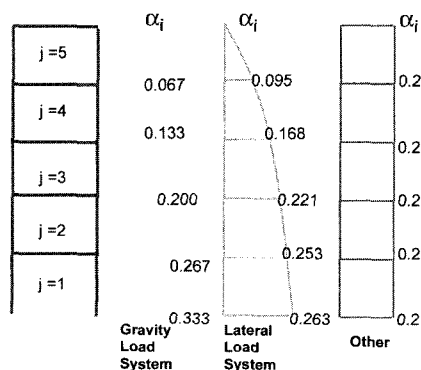


그림 7 중요도 계수

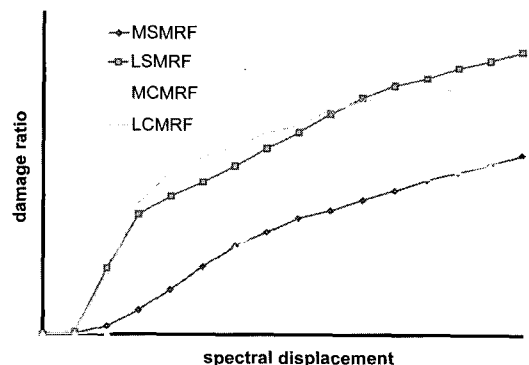


그림 8 철근 콘크리트 건물과 철골 건물의 최종 손실율

표 2 임의 변수 값과 그 분포도

임의 변수	평균값	표준 편차	분포도
Roof Mass at edge (MASS r,e)	0.0313	0.18	Normal
Roof Mass in middle (MASS r,m)	0.053	0.18	Normal
Floor Mass at edge (MASS f,e)	0.0701	0.18	Normal
Floor Mass in middle (MASS f,m)	0.1378	0.18	Normal
Roof Dead Load at edge (DL r,e)	0.0378	0.1	Normal
Roof Dead Load in middle (DL r,m)	0.0183	0.1	Normal
Roof Live Load at edge (LL r,e)	0.0042	0.6	Type I Largest
Roof Live Load in middle (LL r,m)	0.003	0.6	Type I Largest
Floor Dead Load at edge (DL f,e)	0.0836	0.1	Normal
Floor Dead Load in middle (DL r,m)	0.0479	0.1	Normal
Floor Live Load at edge (LL r,e)	0.0104	0.6	Type I Largest
Floor Live Load in middle (LL r,m)	0.0075	0.6	Type I Largest
Modulus of Elasticity of Steel (Esteel)	29000	0.05	Normal
Steel Yield Strength (Fsteel)	39	0.14	Log-normal

료특성과 설계가정하중을 대상으로 선택하였으며, 이미 여러 연구들의 실험결과를 토대로 선정하였다.(Galambos and Ravindra, 1978, MacGregor, Mirza, and Ellingwood, 1983, Ellingwood and Galambos, 1982) 또한 이들 임의변수는 각각의 다른 분포특성(distribution)을 가지고 있다. 그림 5는 각기 다른 분포 특성을 가진 변수들이 Latin Hypercube Sampling을 이용하여 총 10개의 컴퓨터 모형 건물이 만들어지는 과정을 개념적으로 보여주며, 이 10개의 가상 건물은 현존하는 중층 (4-7층) 규모의 철골 모멘트 구조물을 전부 대표함을 의미한다.

컴퓨터 모형 건물을 SAP 2000 구조해석용 프로그램에 입력한 뒤 Pushover 해석을 통하여, 부재 및 하중의 불확실성을 확률적으로 포함한 총 10개의 건물의 능력도를 그림 6에서 처럼 얻을 수 있다. 이들 10개의 건물의 능력도는 각각의 설계 능력점(design capacity), 항복 능력점(yield capacity point) 및 극한 능력점(ultimate capacity point)등으로 결정되며, 이들의 평균값을 최종의 중층 건물의 능력도로 가정하였다.

또한 이 평균 건물 능력도와 각 지역의 예상되는 지진 요구도(demand spectrum)를 능력 스펙트럼법(CSM)을 이용하면 이 건물이 존재하는 각 지역의 최종 내진 성능점(performance point)을 구할 수 있다.

SAP 2000 구조해석을 통하여 건물능력도 뿐만 아니라 각 부재들의 기록된 층별 변위값(interstory drift)도 얻을 수 있다. 이를 이미 검증된 각 부재들의 층별 변위에 따른 피해에 관한 여러 연구자료와 종합하여 이 중층 건물의 각 부재 최종 피해율을 결정한다. 또한 이 부재들의 피해율(physical damage)은 손실율(monetary damage)로의 전환이 필요한데, 철근 콘크리트 건물의 기둥 부재를 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

먼저, 각 기둥이 입을 수 있는 피해 정도를 5 단계의 피해 정도: 즉 경미한 피해 (negligible damage), 약간의 피해 (slight damage), 보통의 피해 (moderate damage), 큰 피해 (extensive damage), 그리고 완전 붕괴 (collapse)로 정의하였다. 그리고 그 피해 정의에 해당되는 피해 현상에 대하여 상세히 서술 나열하였고, 최종적으로 보수 보강 기법에 따른 비용을 계산하면 최종 손실을 산출 할 수 있다.

여기서 특이한 사항은, 만약 피해의 정도가 커서 부재를 완전 교체하여야 할 경우 드는 비용은, 대체로 건물이 처음 지어질 때 들었던 비용의 거의 2 배 정도가 된다는 사실이다. 그 이유는 기존 부재의 철거비와 기술 자문비 등 보수에 소요되는 추가 금액 때문이다. 또한 부재 위치에 따른 보수 비용차이가 있는데, 예를 들어 저 층에 있

표 3 철근 콘크리트 기둥의 보수보강 기법

피해의 정도	피해 현상의 정의	보수보강 기법
경미한 피해 (negligible damage)	눈으로 확인하기 어려운 미세한 damage 발생	보수 불필요
약간의 피해 (slight damage)	국부적으로 가는 haircrack 발생	Epoxy 주입
보통의 피해 (moderate damage)	약한 접합부에서 콘크리트가 떨어져 나감	Epoxy 주입, 회반죽 입히기, 금속제로 덮어 씌우기
큰 피해 (extensive damage)	제법 많은 양의 콘크리트가 떨어져나가고, 보강 철근이 휘어짐	금속제로 덮어 씌우기, 또는 정도에 따라 부재로 교체
완전 붕괴 (collapse)	많은 양의 콘크리트가 떨어져 나가고, 띠 철근의 기능이 상실	완전 교체

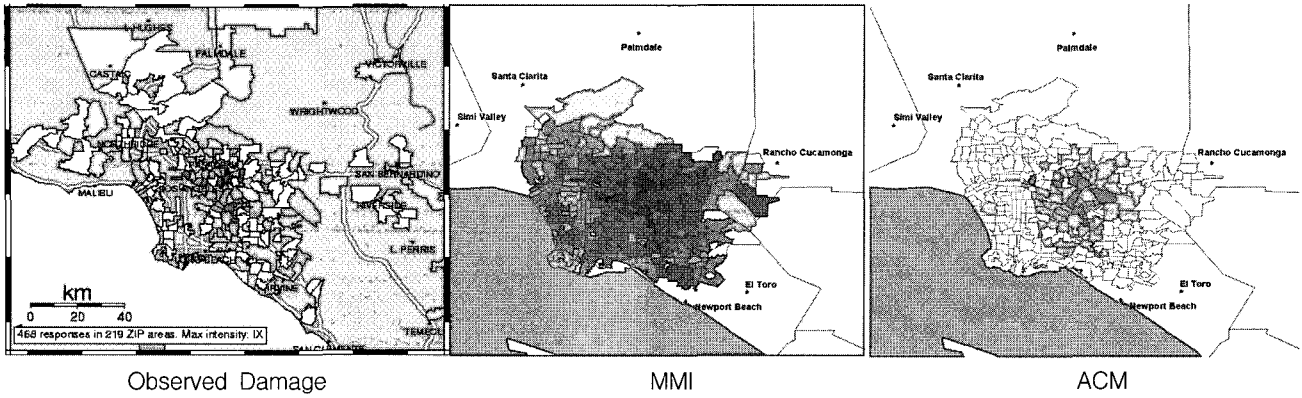


그림 9 Whittier 지진으로 인한 손실

는 기둥이 상층의 기둥보다는 구조적으로 더욱 중요하며, 철거에 따른 기술적 어려움 등을 고려하여야 한다. 이러한 요인을 중요도 함수 (weighting function)로 정의하였으며, 본 연구에 사용된 중요도 계수는 그림 7에 잘 나타나 있다.

최종 건물의 손실율은 모든 부재들의 손실비용합산과 중요도 함수를 거쳐서 식(4)와 같이 결정된다.

$$D_k = \sum_{j=1}^{N_f} \alpha_j * D_{jk} \quad (4)$$

이러한 모든 ACM 순서를 거쳐서 만들어진 저층과 중층 규모의 철근 콘크리트 건물과 철골 구조물의 최종 피해율이 그림 8에 나타나 있다.

그림 9는 1987년 미국 캘리포니아의 Whittier 지진에 관한 것으로 이 지진은 5.9의 강도와 도심지 한가운데서 발생한 특징을 가지고 있다. 왼쪽 그림은 지진으로 인하여 실제로 일어난 피해현황을 나타낸 것으로 피해 정도에 따라 지역적으로 다른 색깔로 표현되었으며 어두운 색깔일수록 큰 피해율을 나타낸다. 중간그림은 MMI를 이용한 재래식 손실프로그램에 의한 결과이고 오른쪽 그림은 ACM을 이용한 새로운 손실 프로그램에 의하여 산출된 결과이다. 그림에서 쉽게 확인할 수 있듯이 실제 관찰된 피해와 ACM의 결과는 매우 흡사하며 지진의 크기가 크지 않는 이 지진으로 인하여 전반적인 피해는 경미한 피해로 나타나 있고 일부 특정지역에서만 큰 피해를 입은 것을 볼 수 있다. 하지만 MMI를 이용한 결과는 먼저 피해지역이 띠 형식을 하고 있으며, 또한 피해 예상 결과가 과장되었음을 그림을 통하여 볼 수 있다. 이러한 결과는 이미 앞서 설명한 것처럼 피해의 정도를 나타내는 피해율의 단위 때문으로, ACM은 건물의 최대 변위를 피해 함수 곡선의 단위로 사용하였지만, 기존의 방법은 건물의 응답보다는 MMI나 PGA라는 지반 가속도를 기준으로 건물 피해를 예측하였다. 구조 동력학적인 측면에서 보면, 건물이 가지는 고유 진동수 때문에 비록 거의 비슷한 크기의 지반 가속도라 하더라도 건물의 지진에 대한 응답이 상당히 다를 수 있다. 예를 들어, 진도 8인 지진이 50

km정도 떨어진 곳에 위치한 건물과 진도 5와 5km 정도 떨어진 건물에서의 지진 가속도 0.5g로 똑같다고 가정하면, 기존의 계산 방법으로는 같은 지진가속도에 의한 건물의 피해는 서로 똑같다는 결론이 나온다. 하지만 실제로는 지진의 성질과 건물이 가지고 고유한 성격 때문에 건물 피해는 상당한 차이가 있음을 여러 지진관련 연구 및 실험을 통해 잘 알 수 있다. 따라서 MMI나 PGA를 단위로 한 기존의 계산 방법은 상대적으로 협소한 피해 분포를 나타내어, 현장조사에서 흔히 볼 수 있는 고르지 못한 피해 현상을 설명하기 어렵지만, ACM을 이용한 방법은 건물 각각이 가지는 피해 분포를 공학적으로 분산 수용할 수 있는 특징을 가지고 있다.

5. 결 론

ACM의 특징은 지금까지의 재래식 피해 함수 곡선에서 보아왔던 구조물의 자체적 특성과는 상관없이 지역에 따라 균등하게 적용되던 피해 예측과는 달리 각각의 구조물이 입는 피해의 정도가 다양하다는 것이다. 이는 지금까지의 평균적이고 보편적이던 피해 계산 방법에서 탈피하여, 세부적이고 보다 정확한 계산 방법이라는 것이다.

또한 ACM은 구조체뿐 아니라, 전체 건물 액수 (building cost)의 상당부분을 차지하는 비구조체에 대한 피해도 포함시킴으로써, 지금까지 비구조체를 제외하여 왔던 재래식 산출 방법보다 더욱 현실적인 계산 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 건물 자체에 발생하는 피해액을 계산하는 방법만을 설명하였지만, 사실 지진으로 인하여 발생하는 피해는 더욱 다양하다. 예를 들면, 집안의 가구 및 전자제품, 혹은 공장내부의 장비와 제품 피해 등과 같은 내용물 피해(contents damage), 그리고 최근 들어 피해액을 눈에 띄게 증가시키는 영업용 불능 손실(business interruption)등이 있다. ACM은 이러한 피해들도 최신의 구조공학 기법과 과학적인 방법을 이용하여 완성하였으며 그에 대한 설명은 다음기회에 더욱 자세하게 하고자 한다.

끝으로, 지금까지 설명한 ACM방법을 한국 재해모델에

발에 적용시켜 본다면, 먼저 현존하는 국내 건물들이 가지고 있을 수 있는 저 품질 시공작업의 고려와 국내에서 사용된 재료들의 재질에 관한 연구, 각 부재들의 적절한 중요도 함수선정 및 각 요소들의 피해 함수 곡선들을 ACM의 각 요소 요소에 적합하게 교체시킨다면, 한국 실정에 적합한 지진 손실 피해 계산 방법이 완성될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 프로그램 개발에 HAZUS 프로그램 개발의 총 책임자였던 미국 MIT대학의 Robert Whiteman 교수의 검증이 있었으며, 그의 노고에 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

1. AIR, "ACM Advanced Component Method: A Breakthrough in Vulnerability Assessment Technology," *Technical Report* (<http://www.air-worldwide.com/Publications/PDF/acm.pdf>), 2000.
2. ATC, "Earthquake Damage Evaluation Data for California" (ATC-13), *Applied Technology Council*, Redwood City, California, 1985.
3. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building," (Report No. SSC 96-01), *Applied Technology Council*, Redwood City, California, 1996.
4. Computer and Structures), SAP 2000 Nonlinear Version 7.21, Structural Analysis Program, Berkeley, CA, 2000.
5. Ellingwood, B.R. and Galambos, T.V., Probability-based criteria for structural design, *Structural Safety*, 1(1), 1982, pp. 15-26.
6. FEMA, "Estimating Losses From Future Earthquakes" Report No. FEMA-177, 1989.
7. FEMA, "HAZUS: Earthquake Loss Estimation Methodology," Vol. 1, *National Institute of Building Sciences*, Washington, D.C., 1997.
8. FEMA, *HAZUS 99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States* (FEMA 366: <http://www.fema.gov/pdf/FEMA366.pdf>), 2000.
9. Galambos, T.V. and Ravindra, M.K., Properties of steel for use in LRFD, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 104(9), 1978, pp. 1459-1468.
10. Gunturi, S.K., "Building Specific Earthquake Damage Estimation," Dissertation of Civil Engineering Department, Stanford University, 1992.
11. MacGregor, J.G., Mirza, S.A. and Ellingwood, B., "Statistical analysis of resistance of reinforced and prestressed concrete members," *Journal of Am. Concrete Inst.*, 80(3), 1983, pp. 167-176.
12. Song, J. and Ellingwood, B.R., Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections: I and II, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 125(4), 1999, pp. 357-384.
13. R.S. Means, "Square Foot Cost Data," R.S. Means, Inc. Kingston, Mass, 2002.