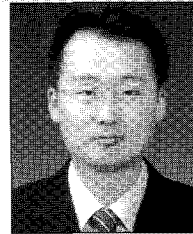
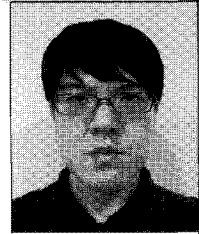


# FEMA 445의 차세대 성능기반 내진설계를 위한 성능평가 과정

## A Performance Assessment Procedure for the Next-Generation Performance-Based Seismic Design in FEMA 445



김 태 완\*



신 윤 봉\*\*

\* 강원대학교 건축공학과 조교수  
\*\* 서울대학교 건축학과 BK 박사후과정

### 1. 머리말

현재 미국에서는 차세대 성능기반 내진설계지침을 개발하기 위해 연방재난관리국(Federal Emergency Management Agency)의 지원으로 ATC(Applied Technology Council)의 ATC-58 프로그램에서 건물의 내진성능평가에 대해 연구하고 있다. 현재 ATC-58 50% Draft(ATC 2009)의 형태로 ATC 홈페이지에서 내려 받기를 할 수 있다. 이 연구에 앞서 차세대 성능기반 내진설계지침 개발, 즉 ATC-58 프로그램을 위한 일종의 사전 또는 기획 연구가 진행되었으며 그 결과는 'Next-Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines, Program Plan for New and Existing Buildings'의 제목으로 FEMA 445 (FEMA 2006)에 제시되었다. FEMA 445에서는 성능기반 내진설계를 위해 필요한 주제들과 그 배경 및 의미를 설명하고 있다.

성능기반 내진설계는 전통적인 내진설계 방법과는 다르게 설계과정에 내진성능평가를 반드시 수반한다. 즉, 성능기반 내진설계에서는 설계와 평가가 서로 다른 과정이 아니라 하나의 통합된 과정인 것이다. 따라서 내진성능평가를 정확히 수행해야만 성능기반 내진설계의 목적을 잘 달성할 수 있다. 본 학술기사에서서는 FEMA 445의 부록-A에 수록된 내진성능평가 과정을 소개하고자 한다. 여기에는 차세대 성능기반 내진설계를 위해 필요한 성능평가 과정을

간략하게 정리하고 있으므로 보다 자세한 사항은 ATC-58 50% Draft를 참고할 수 있다.

### 2. 성능평가 과정

그림 1은 성능기반 설계 과정을 보여준다. 하나 또는 그 이상의 성능목표의 형식으로 설계기준을 선택한 다음 기본설계를 하고 선택한 성능목표를 충족시키는지 확인하기 위한 성능평가를 수행한다. 그림 2는 성능평가 과정의 각 단계를 보여주며 차세대 성능기반 내진설계 과정에 시행한다. 성능평가 과정은 다음과 같다:

- ① 지반 운동 위험을 특정
- ② 응답 및 지진 강도의 함수로 비구조체 요소에 전달되는 지진 강도를 결정하기 위해 구조물을 해석하며 과도한 하중이라면 비선형해석을 수행해야 함.
- ③ 다양한 응답 수준에서 발생할 구조물의 손상을 결정.
- ④ 구조 및 비구조체 응답을 함수로 비구조체 요소에 발생할 손상을 결정.
- ⑤ 구조 및 비구조체 응답을 함수로 인명, 비용, 및 거주기간 손실의 가능성을 결정.
- ⑥ 지진 강도, 구조 및 비구조체 응답 및 그로인한 손상을 함수로 미래에 예상되는 손실 계산.

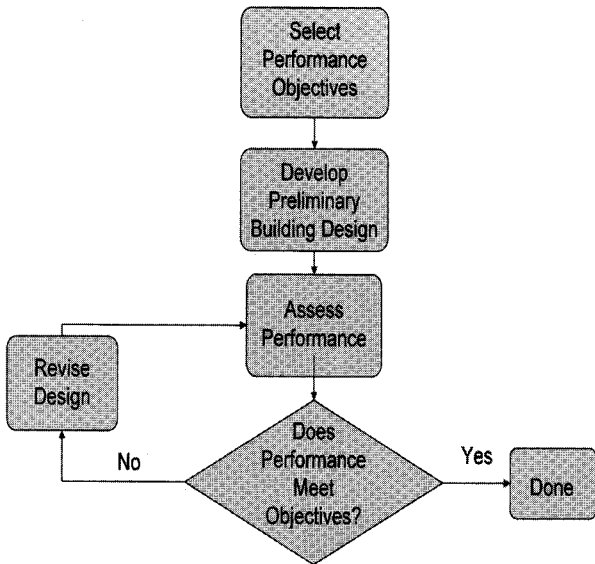


그림 1 성능기반 설계 흐름도

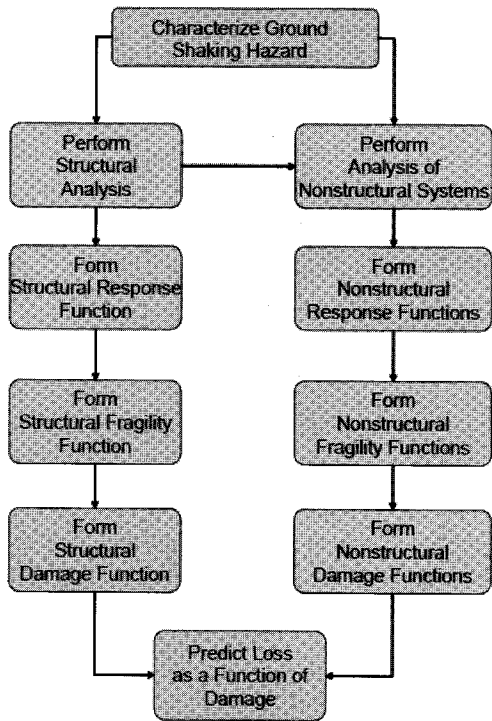


그림 2 성능평가 과정

2.1 지반운동 위험도 선택

지반운동 위험 특정 방법은 성능목표의 형식(강도, 시나리오 또는 시간 기반 등)에 좌우하며 강도 기반일 때가 가장 간단하다. 지반운동 강도 변수로 Intensity Measure(IM)를 사용하는데 과거에는 MMI, RFI, PGA, Sa 등을 사용했다. 가장 유용한 방법으로 Linear acceleration response

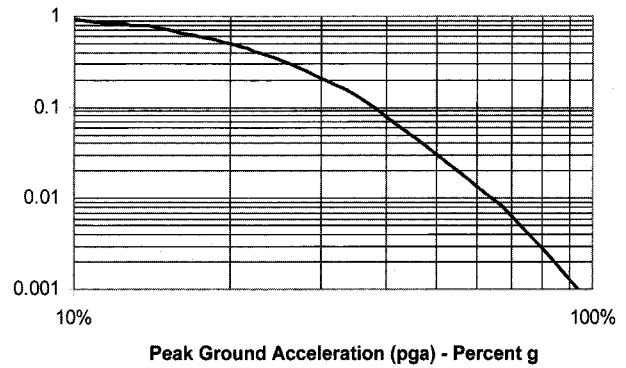


그림 3 가상의 건물 위치와 지진 시나리오에 대한 시나리오 기반 위험도 함수(로그 스케일)

spectra(Sa)를 30년 이상 설계에 이용했고 지진 재해도에 사용했다. 문제는 어떻게 특정 강도에 맞게 축척하는 가이며 더욱이 비선형 해석에서는 변동성이 너무 큰 단점이 있다.

건물이 시나리오 또는 시간 기반 성능목표를 충족하는지 평가하기 위해서는 하나의 지반운동 강도를 정함과 동시에 여러 지반운동 및 강도를 정하여 각각이 발생할 확률을 정의 한다. 이는 주로 위험도 함수의 형태로 제시되며, 한 위치의 위험도 함수는 단순히 그 위치에서 다른 강도의 지반운동을 경험할 확률의 표현이다. 위험도 함수의 형태는 시나리오 기반(특정 단층에서 특정 규모의 지진 발생만을 고려) 또는 시간-주기 기반(모든 알려진 단층에서 발생가능한 모든 지진과 정의한 주기 안에 그 지진이 발생할 확률을 고려)에 형성할 수 있다.

그림 3은 가상의 위치에서 시나리오 기반 위험도 함수의 예이며, 이 함수는 log-log의 형태로 시나리오 지진이 발생했다면 그 위치에서 다양한 수준을 초과하는 PGA를 가진 지반운동의 조건부 확률이다. 그림 4는 동일한 함수를 log 스케일이 아닌 일반 좌표계로 표현한 것이다. 특정 위치에서 시나리오 지진의 PGA가 0.2g를 초과할 확률은 50%이고 0.4g를 초과할 확률은 25%이고, 0.6g를 초과할 확률은 5%이다.

시간 기반 성능목표를 사용할 때, 지진 강도는 모든 발생가능한 지진 시나리오와 주어진 시간 안에 각 시나리오가 발생할 확률을 고려해 개발된 위험도 함수로 나타난다. 시간 기반 위험도 함수는 시나리오 기반 위험도 함수와 유사하게 보이며 같은 방식으로 쓰인다. 하지만, 시나리오 기반 위험도 함수는 특정 시나리오 지진이 발생했을 때 다양한 수준의 지진 강도를 경험할 조건부 확률을 지칭하고 시간 기반 위험도 함수는 확률적인 위험도 함수로서, 정의된 시간 동안 그 위치에서 여러 다른 지진 강도 수준을 초과할 전체 확률을 가리킨다. 위험도 함수는 연간 초과(또는 비초

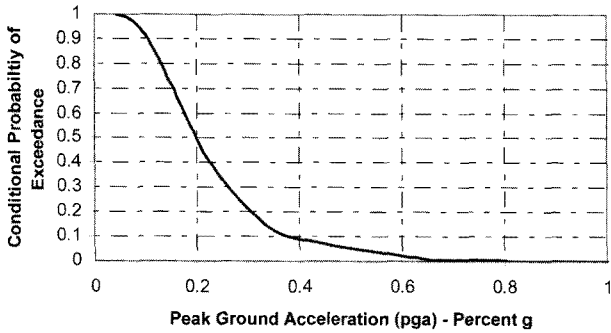


그림 4 그림 3을 일반 좌표계로 표현한 시나리오 기반 위험도 함수

과) 확률, 평균 재현 주기, 50년과 같은 특정 시간 내에 초과(또는 비초과)할 확률로 표현할 수 있으며, 평균 확률(함수의 불확실성은 평균화하거나 불확실성과 관련한 신뢰구간을 명백히 지정)로도 표현할 수 있다.

### 2.2 구조해석 및 구조체 응답함수 계산

구조해석은 성능평가 과정에서 두 가지 기본기능을 제공한다. 부재력, 변형, 층간변형률과 같은 구조응답량(engineering demand parameters 또는 demand)의 예측과 층간변형률, 바닥 가속도, 속도를 이용하여 비구조체 및 구조체에 의해 지지되고 매달려 있는 시스템 요구량(nonstructural engineering demand parameters 또는 nonstructural demand)의 강도를 예측하는 것이다.

구조해석의 첫 번째 용도는 구조체 손상 예측이며, 구조해석을 통해 하나 또는 그 이상의 요구량을 계산한 후 이를 바탕으로 손상을 예측한다. 성능평가를 위해 Intensity measure를 사용하여 지진운동 강도 정량화한다. 예를 들어 구조물의 고유 주기에서 5% 감쇠 선형 응답스펙트럴 가속도를 선택한다. 손상예측을 위한 Demand를 선택 (EDP: 층간변형률) 한다. 구조물 위치에 맞는 지반운동 선택 후 선택한 IM에 맞게 축척하고 비선형 동적해석을 수행하여 층간변형률 최대값을 선택한다. 층간변형률 계산에는 질량, 강성, 강도, 감쇠, 이력 특성 및 지진운동 기록 등이 영향을 미친다. 만약 다른 지진운동 기록을 사용한다면 그 외 다른 변수가 동일하더라도 다른 결과가 나온다. 많은 수의 지진운동 기록을 사용하여 해석을 반복하면 층간변형률의 임의 분산을 얻을 수 있다. 그림 5는 이를 나타내는 확률 밀도 함수이며 그림 6은 그림 5의 누적 확률 분포 곡선이다.

위 과정을 일정 범위의 지진운동에 대해 수행하면 구조체 응답함수를 개발할 수 있다. 그림 7은 이를 나타내며 층간변형률의 요구량의 중간값, 10% 및 90% 초과확률을 보

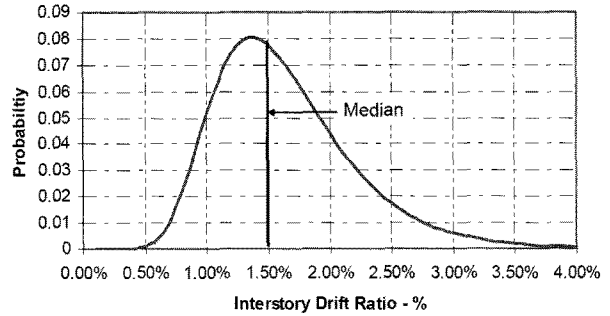


그림 5 특정 구조 및 지진 강도에 대한 구조체 응답(층간변형률)의 확률 분포

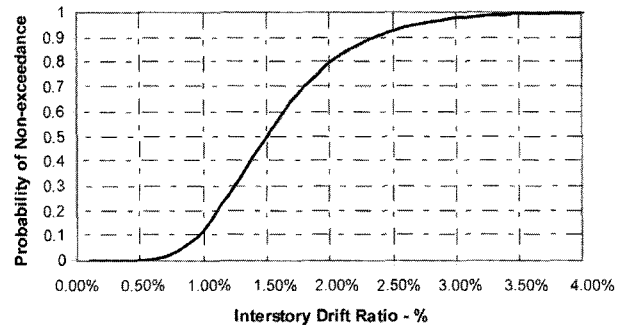


그림 6 그림 5와 동일한 곡선의 누적 확률 분포

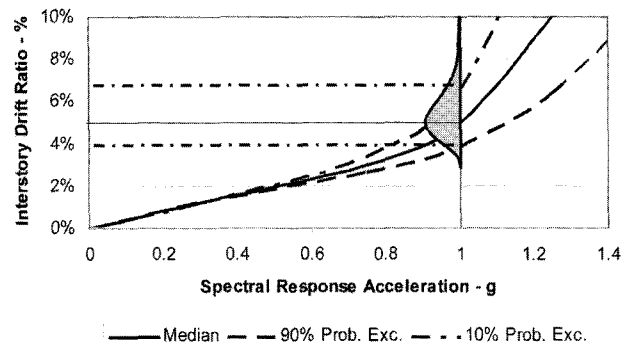


그림 7 건물의 가상 구조체 응답함수

여주고 있다. 낮은 Sa 수준에서는 변동성이 크지 않고 높은 수준에서는 변동성이 크다는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 구조체의 강성, 질량, 감쇠, 이력 특성을 명확히 안다는 가정하의 결과다. 하지만 이들의 불확실성을 고려한다면 위 결과는 부정확하며, 응답을 과도 또는 부족하게 예측할 수 있다. 불확실한 구조체 변수를 적절한 범위 내에서 변화시키면서 해석을 수행하면 위 결과는 더욱 분산될 것이며, 낮은 Sa에서도 변동성을 보일 것이다.

위의 모두를 고려하는 것은 매우 복잡하고 시간 소모적이다. 구조체의 불확실성 고려로 인한 추가적인 변동성을 측정하기 위한 대안으로는 전문가의 판단이나 제한된 숫자

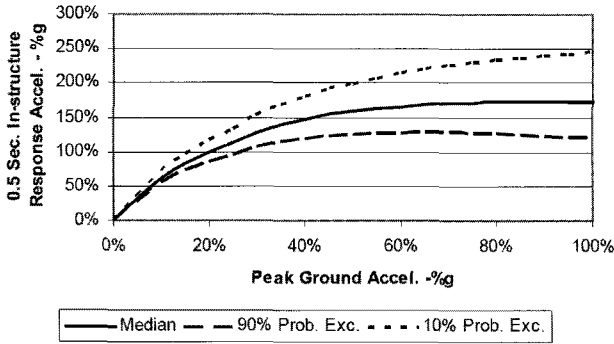


그림 8 0.5초 주기에서 바닥 응답 가속도에 대한 비구조체 요소 요구함수

의 표준 건물 해석결과의 변동성을 바탕으로 한 COV를 선택해서 로그 정규분포로 표현하는 것이다.

구조해석의 두 번째 목적은 비구조체 요소 및 시스템이 경험할 만한 지진 강도를 예측하는 것이다. 이 결과는 그림 7과 동일한 형태이며, 층간변형을 대신에 비구조체 응답(특정 비구조체 요소 주기에서 구조물내 응답 가속도)을 잘 나타낼 수 있는 변수로 표현한다. 다음 절에 보다 자세한 설명이 있다.

### 2.3 비구조체 응답함수 계산

무한 강성을 가진 비구조체 요소인 경우, 구조체로부터 그 요소에 전달되는 진동(층간변위 최대값이나 바닥 가속도로 표현되는)을 요소의 거동을 예측하는 데 직접적으로 사용 가능하다. 반면 유한 강성을 가진 비구조체 요소인 경우, 요소에 전달되는 진동에 의한 그 요소의 응답(가속도나 요소 자체의 변위)을 예측하기 위해 구조해석을 수행해야 한다.

그림 8은 가속도에 민감한 0.5초 주기를 가지는 유한 강성 요소의 응답을 예측하는데 사용한 비구조체 요소 요구함수를 나타낸 것이다. 그림에서 0.5초 주기에서 구조체내에서의 응답 가속도(in-structure acceleration), 즉 구조체의 특정 위치에 설치되어 있고 0.5초의 고유주기를 가지는 요소가 경험하는 가속도를 지반운동 강도, 여기서는 PGA로 나타낸 것이다. 그림 7과 같이 여기서도 구조물 응답의 불확실성과 신뢰도 범위가 존재한다.

비구조체 요소의 성능평가가 용이하기 위해서는 요구함수의 자료를 건물 위치에서의 지진 운동 위험도 함수와 함께 나타내는 것이 필요하다. 이는 특정 바닥이나 지붕층에서 주어진 구조체내의 진동 강도를 경험할 확률을 가리키는 위험도 함수를 산출한다. 그림 9가 그림 8의 요구함수와 그림 3의 위험도 함수를 혼합하여 나타낸 구조체내 진동

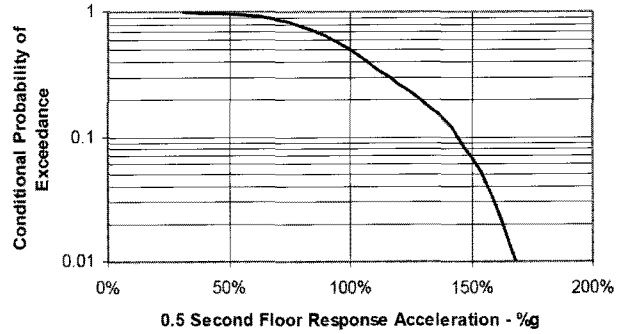


그림 9 비구조체 요소 응답 가속도 위험도 곡선

강도 함수이다. 이 함수는 가상 건물의 특정 위치에 설치된 고유주기 0.5초의 비구조체 요소에 대한 응답을 예측하는데 사용될 수 있다.

### 2.4 구조체 취약도 평가

구조체 취약도는 구조 요소 또는 시스템이 특정 수준의 응답(demand, 요구)에 대해 특정 수준 이상의 손상을 입을 확률이다. 응답함수와 같이 취약도도 구조체 응답함수로 구조체 손상을 예측하는데 내재된 변동성 및 불확실성을 고려하기 위해 확률분포로 표현된다. 변동성은 개별 지진 운동 기록에 대한 구조체 응답의 임의적(random) 특성과 이러한 응답의 변동성 및 그 응답이 야기하는 손상을 구별하는데 간단한 요구 변수의 무능과 같은 요인과 관련이 있다. 예를 들어 동일한 10cm 최대 변위라도 어떤 경우는 잠깐 최대 변위를 보이고 어떤 경우는 최대 변위 후에 영구 변형이 5cm이다. 불확실성은 재료 강도 및 시공 품질의 정확한 정의 결여와 같은 요인에 의한다.

취약도 함수를 도출하기 위해서는 손상을 측정해야 한다. 손상측정 방법은 개별 구조체 요소의 상태를 직접적으로 추적하고 각각을 건물 전체의 손상과 결합한다. 예를 들어 철골모멘트골조의 패널존 항복, 보 소성 힌지, 보 플랜지 좌굴, 용접부 파괴를 접합부별 손상측정에 사용할 수 있다. 영구 층간변형 추적(1, 2, 3%, 붕괴)을 층별 전체 건물 손상측정에 사용할 수 있다. 이러한 손상상태는 지진 발생 동안의 거주자 안전, 지진 후 안전, 보수노력 및 비용, 거주제한 등과 같은 다른 의미를 가진다. 개별손상은 전체 구조체에 대해 시스템 기반으로 합쳐져야 한다. 구조체 취약도는 특정 구조체 또는 특정 구조시스템 기반으로 구성할 수 있으며 실제 건물을 사용하기 힘들기 때문에 해석, 실험, 전문가 판단으로 취약도를 구성할 수 있다.

취약도는 FEMA/SAC 프로젝트의 저층 철골모멘트골조 대상으로 작성하였다. FEMA/SAC 프로젝트의 추천에 따라

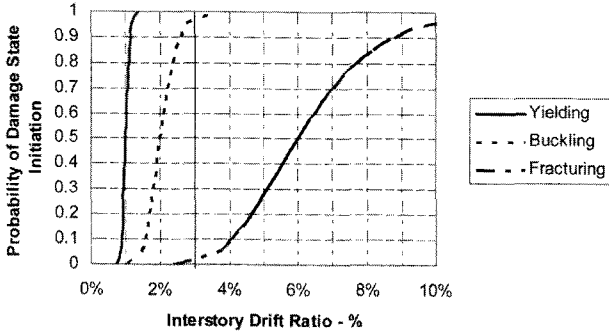


그림 10 보-기둥 접합부의 여러 손상상태에 대한 취약도 예

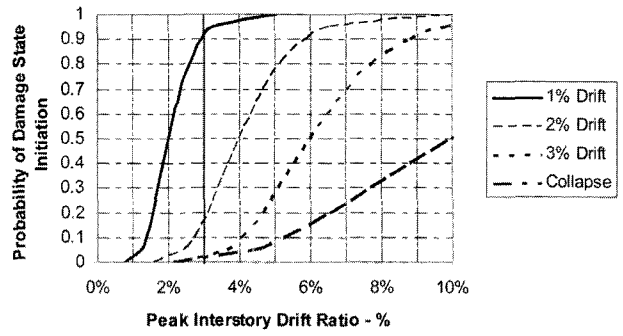


그림 11 전체 건물의 거동에 대한 취약도 함수 예

면 손상측정으로 최대 층간변형률을 사용하며 부분(국부) 손상측정을 보 항복, 보 플랜지 좌굴, 보 플랜지 파괴로 선택하고 구조 전체 손상측정은 영구 층간변형 1%, 2%, 3%, 층 붕괴로 선택했다. 보 플랜지 항복할 때 층간변형률 중간값을 0.01 radian으로, 보 플랜지 좌굴 시작할 때 층간변형률 중간값을 0.02 radian으로, 보 플랜지 파괴할 때 층간변형률 중간값을 0.06 radian으로, 영구 변형은 최대 층간변위의 50%로 하며 붕괴 시작을 0.1 radian으로 선택했다.

그림 10은 개별 보-기둥 접합부의 여러 손상상태에 대한 취약도 그래프이고, 그림 11은 구조 시스템의 전체 손상 측정에 대한 취약도 그래프이다. 취약도 곡선은 로그 정규분포이며 앞에서 언급한 중간값과 분산을 사용한다. 그림 10과 11의 취약도 곡선은 손상이 개별 손상상태에 해당하는 손상 이상이 될 확률을 나타낸다. 구조체가 특정 응답 수준에서 특정 상태내의 손상을 경험할 확률을 결정하기 위해서는 주어진 상태내의 손상이 시작되는 확률과 바로 다음의 열악한 상태에서 손상이 시작되는 확률의 차이를 취할 필요가 있다. 그림 10의 층간변형률 3%에서, 보 플랜지가 항복하나 좌굴은 발생하지 않을 확률은 보 플랜지 항복 확률(100%)에서 좌굴 확률(95%)을 뺀 5%이다. 그림 11의 최대 층간변형률 3%에서, 영구변형 1% 이상 발생할 확률은 96%이고 영구변형 2% 이상 발생할 확률은 18%이고, 영구변형 3%이상 발생할 확률은 5%이고, 붕괴 확률은 3%이다.

### 2.5 비구조체 취약도 개발

비구조체 취약도는 비구조 요소 또는 시스템이 특정 손상 수준을 초과할 확률이다. 강체 요소는 층간 변형이나 최대 바닥 가속도와 같은 구조체 요구함수를 직접 사용하여 구성할 수 있다. 유연한 요소는 비구조 요소의 구조해석으로부터 얻은 비구조체 요구에 의해 측정된 비구조체 요구의 함수로 구성한다. 비구조 요소 및 시스템의 손상 상태(기능 손실, 방수 손실, 구조적 긴결 손실, toppling등)를 포

함할 수 있다. 실링, 스프링클러, 내부 간막이 등과 같은 비구조 요소 또는 시스템은 여러 개의 다른 손상상태 및 IM에 연결된 서로 다른 취약도 함수를 가진다. 이들은 실제 설치된 상태에서 지진 시 성능 자료를 취합, 연구실에서의 실험, 구조해석을 통해 결정할 수 있다.

그림 12는 단일 층간변형률에 민감한 비구조요소(외부 클래딩)에 대한 가상 취약도 곡선이다. 취약도 곡선은 다양한 손상상태(유리 파괴, 유리 박리, 패널 접합부 파괴)를 구조체 층간변형률로 표현했으며, 본 내용은 실제자료가 아니고 설명에 도움을 주려는 자료다. 비구조 요소 뿐만 아니라 비구조 시스템(스프링클러, 조명, HVAC 시스템, 생산 설비, 전산 시스템)의 취약도 함수도 개발이 필요하다. 이를 위해서는 그 시스템을 구성하고 있는 요소들의 상호관계를 고려하고 개별요소 및 요소의 조합의 파괴가 시스템 성능에 어떻게 영향을 미치는지 이해할 필요가 있다. 특히, 단일 요소 및 요소들의 조합의 파괴가 시스템의 사용 가능성 및 기능에 미치는 영향을 파악하는 논리구조를 만드는게 필요하다. 그 다음에는 다양한 수준의 강도에서 개별요소, 요소의 조합, 시스템 자신에 대한 파괴 확률을 계산할 수 있다.

### 2.6 구조체 및 비구조체 손실함수의 평가

손실함수는 구조 또는 비구조 요소 또는 시스템이 특정 수준으로 손상을 입었을 때 다양한 수준의 손실이 발생할 확률이다. 손실함수는 인명손실, 직접적인 경제적 손실(보수비용), 서비스 또는 거주 제한시간 등과 같은 변수로 표현된다. 손실함수는 특정 건물이나 건물의 종류에 대해 구조체 또는 비구조체 요소 또는 시스템의 대표적인 손상 수준을 특징짓고, 이 손상과 관련된 손실을 측정해서 만들 수 있다. 이러한 손상수준에 대해서는 사용 가능한 취약도함수가 존재해야 한다. 가정을 변화하거나 이러한 평가에서 내재된 가정과 관계된 불확실성의 수준을 조사하여 가능한 손실의 확률 분포를 손상상태의 함수로 정할 수 있다. 대체

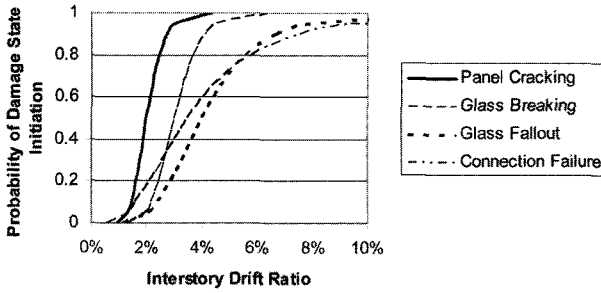


그림 12 외부 클래딩에 대한 가상 취약도 곡선

방법으로는 역사 지진 기록으로부터 직접적으로 손실 함수를 만드는 것이다.

손실함수는 위험도, 응답, 취약도 함수와 비교해서 불확실성이 매우 심한 경향이 있다. 이유는 손실함수가 인간적인 요인에 매우 의존하기 때문이다. 그것은 필요한 설계 전문가를 보유하고 시공자가 보수를 수행하도록 하는 소유주의 빠른 대처 능력, 설계 전문가 및 시공자의 수행 효율성, 관계 당국이 제안된 보수 프로그램을 승인하는 속도, 보수 기간 동안 사람들이 그 건물에 거주하려는 의지 등이다.

그림 13은 접합부가 그림 10과 같은 보 플랜지 항복, 보 플랜지 좌굴, 보 플랜지 파괴와 같은 특정 수준으로 손상을 입었을 때, 철골모멘트골조의 단일 보-기둥 접합부에 대한 예상 보수비용을 나타내는 가상의 손실 곡선이다. 접합부의 보 플랜지가 파괴되었을 때, 보수비용은 \$1400미만일 확률이 20%, \$5000미만일 확률이 50%, \$17000이하일 확률이 80%이다. 변동성은 실링의 종류, 덕트 작업량, 손상된 골조에 접근을 제한하는 요소들, 보수를 수행하는 시공자의 효율성과 같은 요인의 결과이다. 그림 13은 FEMA/SAC 프로젝트에 근거한 것이다.

그림 14는 한 층이 붕괴되었을 때 사무실 건물의 인명손실에 대한 손실 곡선이며 1000 제곱 피트당 0.2명 미만의 인명손실일 확률이 20%, 0.5명 미만의 인명손실일 확률이 50%, 1명 미만의 인명손실일 확률이 80%이다. 변동성은 건물 상주 인원이 하루 중 시간, 주중 요일에 따라 다르고 붕괴가 부분 또는 전체일 수 있기 때문이다. 특히 이러한 종류의 손실 곡선은 건물의 용도에 크게 좌우된다. 비구조 요소나 시스템에 대한 손실 곡선도 유사한 방법으로 구할 수 있다.

### 2.7 손상함수를 사용한 손실예측

적절한 IM에 대한 위험도 함수, 구조체 및 유연한 비구조체 요소의 응답 함수, 구조체 및 비구조체 요소의 취약도 함수, 이들 각각의 손실곡선이 주어지면, 건물의 성능, 즉 건물의 성능 목표를 여러 다른 방법으로 특정할 수 있다.

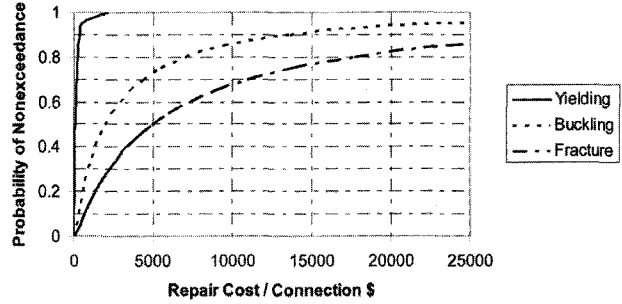


그림 13 손상된 보-기둥 접합부의 보수비용에 대한 가상의 손실곡선

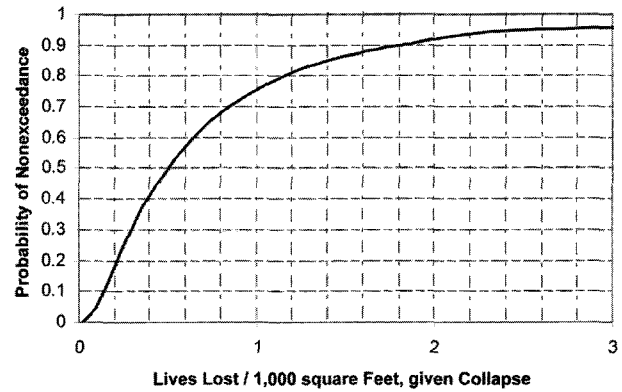


그림 14 붕괴 시 인명손실에 대한 가상의 손실곡선


다수의 건축주는 시나리오 기반에서 성능이나 위험 정보를 다루길 원한다. 예를 들어, 특정 규모의 지진이 발생했을 때 얼마만큼의 손실이 발생할지 알기 원한다. 건축주 중에서 일부는 상한치 또는 가능한 최대치 기반으로 이런 정보를 알기 원하고, 다른 일부는 가능한 손실의 정확한 예측치를 알기 원한다. 또 다른 일부는 여전히 주어진 크기의 손실을 경험할 확률을 1년 또는 다년간에 대해 알기 원한다. 이들과 손실을 표현하는 다른 수단들은 위험도, 응답, 위험도 및 손실함수들을 사용해서 유도할 수 있다.

### 3. 맺음말

FEMA 445의 차세대 성능기반 내진설계를 위한 성능평가 과정을 소개하였다. 이 평가과정은 지반운동을 정하고, 해석 모델을 작성한 후, 구조해석을 수행하여 응답을 얻고, 얻어진 응답으로 손상을 측정할 후, 손상에 따른 손실을 산정하는 것으로 이루어져 있다. 평가과정 중의 각 함수들에는 임의성 및 불확실성을 고려하는 확률의 개념이 포함되어 있으며, 이들을 수치적 또는 직접적으로 적분하여 건축주들이 쉽게 이해할 수 있는 변수 및 용어로 건물의 성능을 나타낸다. 소개된 대로 평가과정 자체는 현재 명확히 확

립되어 있다고 볼 수 있지만 구체적인 내용으로 들어가면 아직 해결해야 할 부분이 많다. 특히 손실함수의 경우는 단시일 내에 확립되기가 어렵다. 하지만 이러한 성능평가 방법은 앞으로 내진성능평가 분야에서 추구해야 할 방향으로 사료된다. 따라서 국내 관련 연구자들은 ATC 58의 연구결과를 주시할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. ATC (2009) "Guidelines for Seismic Performance Assessment of Buildings", ATC-58 50% Draft, Applied Technology Council.
2. FEMA (2006) "FEMA 445, Next-Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines", Applied Technology Council. 

[담당 : 유은종, 편집위원]