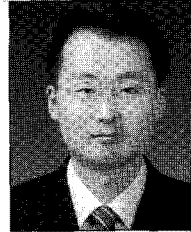
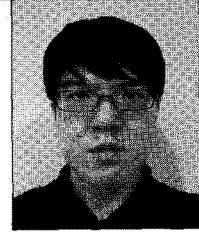


# 차세대 성능기반 내진설계를 위한 성능평가 사례

## Examples of Performance Assessment for the Next-Generation Performance-Based Seismic Design



김 태 완\*



신 윤 봉\*\*

\* 강원대학교 건축공학과 조교수

\*\* 서울대학교 건축학과 BK 박사후과정

### 1. 서 론

차세대 성능기반 내진설계를 위한 내진성능 평가절차에 대한 내용은 앞의 학술기사에 제공되어 있으며, 본 학술기사의 내용은 그 평가절차를 따라 실제 건물에 적용한 사례를 소개하는 것이다. 본 기사에서는 2가지 사례를 소개하고자 한다. 첫 번째는 ATC-58 50% Draft(ATC 2009)의 8장에 소개되어 있는 3층 철골 모멘트 골조건물 예제이며, 두 번째는 Yang(2006)의 6장에 소개되어 있는 3층 철골 가새 골조건물 예제이다. 이 두 예제는 모멘트 골조와 가새 골조의 차이만 있을 뿐 동일한 건물을 대상으로 하고 있다. 예제 건물의 일반적인 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 위 치 : 미국 캘리포니아주 버클리, UC 버클리대학 인근
- 완공연도 : 2004
- 층 수 : 3층
- 층 고 : 14 ft
- 전체높이 : 42 ft
- 연 면 적 : 22,736 ft<sup>2</sup>
- 용 도 : 사무실

### 2. 사례 1 - 3층 철골 모멘트 골조건물 (ATC 2009)

#### 2.1 건물 형상

예제 건물의 전경은 그림 1과 같다. 예제 건물의 구조 평면도는 그림 2와 같으며 각 방향으로 2개의 3경간 철골 모멘트골조가 횡력저항시스템의 역할을 하고 있다. 구조해석에는 그림 3과 같이 3층, 3경간 단일 골조를 사용하였으며, 2차원 해석을 수행하였다.



그림 1 예제 건물 전경

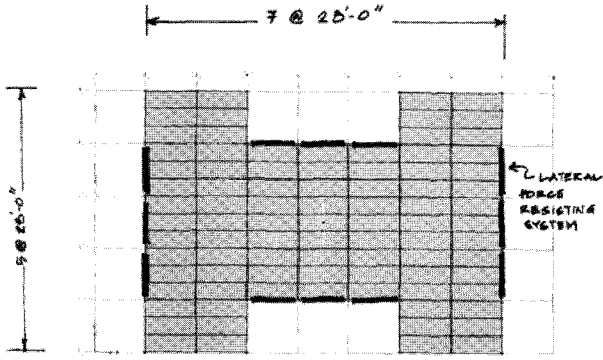


그림 2 예제 건물 평면도

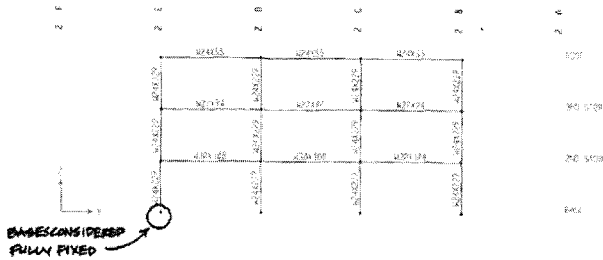


그림 3 예제 건물 입면 및 부재 크기

## 2.2 지반운동 결정

성능평가를 수행하기 위해 가장 먼저 지반운동을 결정한다. 지반운동은 강도, 시나리오, 및 시간기반 평가용으로 각각 구한다. 지반운동을 결정하기 위한 기본정보는 다음과 같다.

- 건물 위치 : Hayward 단층으로부터 1km 떨어짐
- 지반 조건 : soft rock (Site Class B per ASCE 7-05)
- 위도/경도 : 37.875°/-122.267°
- 건물 고유 주기 : 1.14초, 건물 각 방향

### 2.2.1 강도기반 평가를 위한 지반운동

지반운동은 Site Class B에 대해 2006년 International Building Code (ICC 2006)를 따른 5% 감쇠 설계 지진응답 스펙트럼을 바탕으로 하였다. 건물의 고유주기인 1.14초에서의 스펙트럼가속도는 0.51g이다. USGS ground motion calculator에서 위도/경도를 입력했을 때 설계스펙트럼 요구값은 SM1 = 0.874g, SD1 = 0.582g이며, SD1을 1.14로 나눈 값이 0.51g이다. 11쌍의 near-fault 지반운동(Bin 1)을 임의적으로 선택했는데, 이들의 Moment Magnitude는 6.2에서 7.6, 건물 위치와 지진 발생 위치의 거리는 1.0~10.7km이다. Bin 1의 정보는 ATC(2009)의 표 8-1에서 확인할 수 있다.

강도기반 평가를 위해 Bin 1 지반운동의 1.14초 스펙트럼 가속도가 0.51g가 되게 개별적으로 보정을 하였다. 이렇게 보정한 지반운동을 Bin II이라고 하였다. 총 22개의 지반운동 스펙트럼가속도는 ATC(2009)의 그림 8-4에서 확인할 수 있다.

### 2.2.2 시나리오기반 평가를 위한 지반운동

여기서는 지반운동을 특정하기 위한 시나리오가 필요하다. 본 예제에서의 시나리오는 건물 위치에서 1.0 km 떨어진 Hayward 단층이 붕괴되어 Moment magnitude가 대략 7.0인 지진이 발생하는 것으로 하였다. 이 시나리오에 맞는 지반운동을 생성하기 위한 과정은 ATC(2009)에서 5.6.5절에 있는 5단계 보정과정을 참고할 수 있다. 시나리오기반 평가를 위해 보정한 지반운동은 Bin S1으로 칭했으며, 이들의 스펙트럼은 ATC(2009)의 그림 8-6에서 확인할 수 있다.

### 2.2.3 시간기반 평가를 위한 지반운동

시간기반 평가용 지반운동을 생성하기 위해 먼저 USGS ground motion calculator를 사용하여 1초 지진 위험도 곡선을 산출한다. USGS ground motion calculator로 1초 지진 위험도 곡선을 산출하기 위한 창은 그림 4와 같으며, 그 결과인 1초 지진 위험도 곡선을 그림 5와 같다. 이를 바탕으로 Bin 1을 시간기반 평가용 지반운동으로 만드는 과정은 ATC(2009)에 자세히 소개되어 있다. 여기서 간략히 소개하자면 그림 5의 위험도 곡선을 건물의 고유주기인 1.14초에 맞게 보정한 후 8개의 구간으로 나눈다. 개별 구간별로 대표 스펙트럼값을 정한 후 이를 목표 스펙트럼으로 하여 Bin 1 지반운동을 각각 8개의 목표 스펙트럼에 맞게

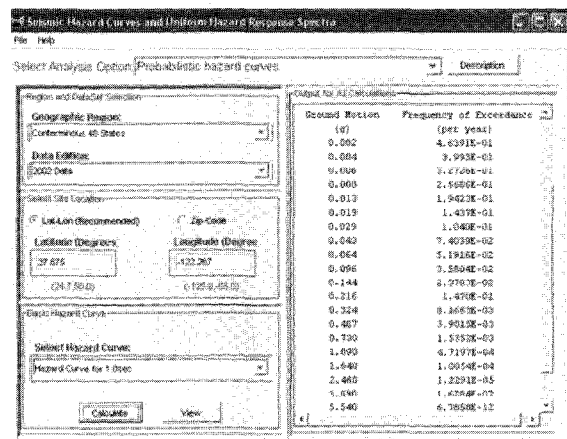


그림 4 건물의 위치에서 1초 위험도 곡선을 생성하기 위한 USGS ground motion calculator

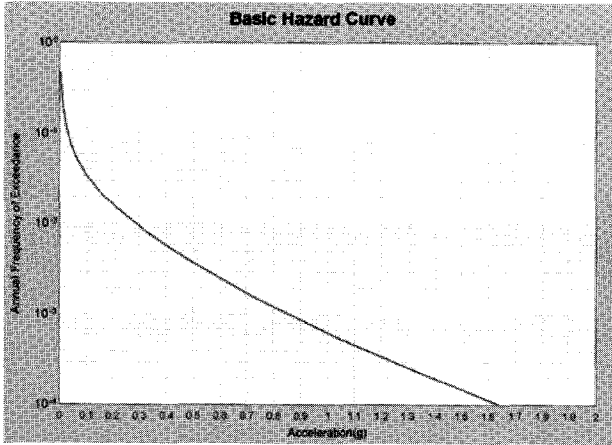


그림 5 초 지진 위험도 곡선

ATC(2009)에서 5.6.5절의 방법을 따라 보정한다. 시간기반 지반 운동을 Bin  $T_i$  ( $i=1-8$ )로 지정하였다. 이와 더불어 8개의 대표 스펙트럼값의 평균 연간 초과 확률도 함께 필요하다. 손실은 8개의 스펙트럼값에서 각각 계산된다. 최종적으로 연간 손실은 개별 대표 스펙트럼값에 해당하는 손실과 평균 연간 초과 확률을 곱한 것을 모두 더한 것이다.

### 2.3 구조해석 및 구조체 응답함수 계산

지반운동이 결정되면 구조해석 모델을 작성한 후 구조 해석을 수행하여 구조체 및 비구조체의 손상을 측정하기 위한 요구 변수들을 계산한다. 여기서 사용된 요구 변수는 총 7개이며, 3개의 층간 변위와 4개의 바닥 가속도로 구성하였다.

### 2.4 PACT(Performance Assessment Calculation Tool)에 자료 입력

ATC-58 프로그램에서는 성능평가 과정을 원활하게 수행하기 위해 PACT(Performance Assessment Calculation Tool)라는 프로그램을 함께 개발하고 있다. 여기서 다루고 있는 PACT 프로그램은 Beta 1.00 버전이다.

PACT를 사용하기 위해 먼저 프로젝트의 기본적인 사항을 입력한 후 그림 6과 같이 건물의 기본적인 정보를 입력한다. 그 다음 'Performance Group'을 편집한다. 여기서는 PACT 프로그램의 용도, 건물형식, 기본 건물정보에 따라 'Performance Group'을 자동적으로 생성하고 취약도를 배정하였다(그림 7). 마지막으로 구조해석의 결과를 PACT에 입력한다. 구조해석의 결과를 PACT에 입력하는 창은 그림 8과 같다.

그림 6 건물 기본 자료 입력 창

No.	Fragility	Link	Performance Group Quantiles		
			Story 1 (Floor 1 to 2)	Story 2 (Floor 2 to 3)	Story 3 (Floor 3 to Roof)
EQ05.000	Exterior Wall (Steel Moment Frame)	Extr	12	12	11
EQ06.000	Exterior Wall (Steel Moment Frame)	Extr	0	0	0
EQ07.000	Exterior Wall (Steel Moment Frame)	Extr	4500	4500	4500
EQ08.000	Interior Walls (Gypsum Wood Stud)	Int	0	0	0
EQ09.000	Interior Partitions (Type 9a)	Int	7550	6537	6537

그림 7 성능 그룹별 자료 입력 창

Sets	ID ST 1-2 (in.)	ID ST 2-3 (in.)	ID ST 3-4 (in.)	ACC 1 (g)	ACC 2 (g)	ACC 3 (g)	ACC ROOF (g)
EQ1	0.53	0.79	0.73	0.1	0.16	0.15	0.21
EQ2	0.61	0.81	0.92	0.15	0.22	0.25	0.25
EQ3	0.62	0.77	0.73	0.09	0.23	0.25	0.23
EQ4	0.5	0.78	0.73	0.07	0.11	0.12	0.17
EQ5	0.39	0.75	0.98	0.17	0.22	0.17	0.32
EQ6	0.55	0.81	0.81	0.08	0.11	0.13	0.19
EQ7	0.54	0.79	0.9	0.11	0.18	0.23	0.25
EQ8	0.55	0.74	0.88	0.13	0.19	0.19	0.22
EQ9	0.56	0.78	0.72	0.12	0.17	0.15	0.16
EQ10	0.48	0.77	0.76	0.12	0.28	0.23	0.24
EQ11	0.69	0.79	0.98	0.1	0.26	0.28	0.28

그림 8 해석 결과 입력 창

### 2.5 PACT를 이용한 손실 계산

최종적으로 PACT를 이용하여 손실을 계산한다. 손실 계산 결과의 형태는 강도 및 시나리오 기반 평가와 시간 기반 평가가 서로 약간의 차이가 있다. 강도 및 시나리오 기반 평가에서 손실 곡선은 특정 강도 또는 시나리오에 대한 건물의 전체 손실을 나타낸다. 이 손실 곡선을 나타낸 것이 그림 9다. 여기서 가로축은 손실을 나타내며, 세로축은 손실이 특정 값 이하일 확률(예, total repair cost <= \$C)을 나

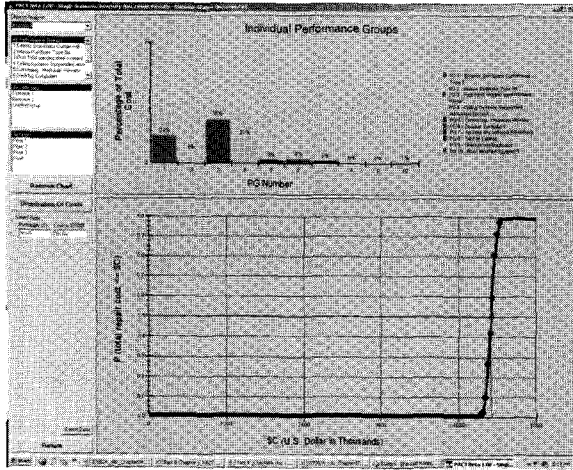


그림 9 강도 및 시간기반 손실곡선 창

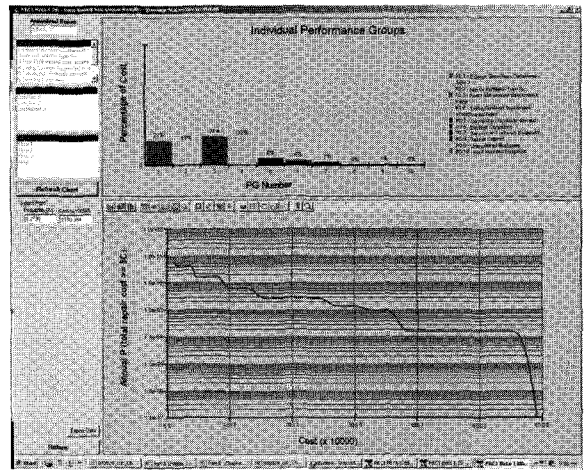


그림 10 시간기반 평가 손실곡선 창

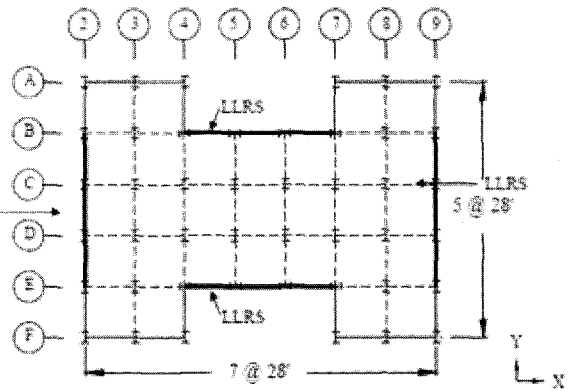
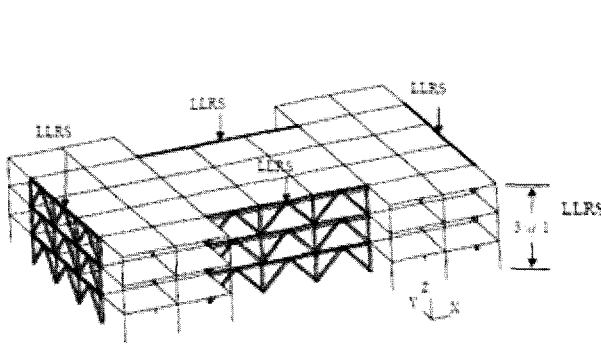


그림 11 예제 건물 및 평면도

타낸다. 예를 들어 그림 9에서 주어진 강도 또는 시나리오에 대해 전체 손실이 \$5,300,000 이하일 확률이 50%이다. 시간기반 평가 결과인 손실곡선을 보여주는 창은 그림 10과 같다. 여기서 가로축은 손실이며 세로축은 가로축의 손실이 초과할 연간 확률을 나타낸다. 이 곡선을 적분하면 전체 연간 손실, 즉 특정 시간 동안 (예, 건물 수명) 예상되는 전체 손실이다.

### 3. 사례 2 - 3층 철골 가새 골조건물 (Yang, 2006)

본 예제 건물은 사례 1의 건물과 거의 동일하나 그림 11과 같이 횡력저항시스템(LLRS)으로 건물 외부에 각 방향으로 2개씩 가새 골조를 가지고 있다. 가새 골조의 형태를 두 가지 (Inverted-V, Suspended Zipper)로 선택했으며 그림 12와 같다. 성능기반 지진공학에 따라 건물을 구조 및 비구조체 성

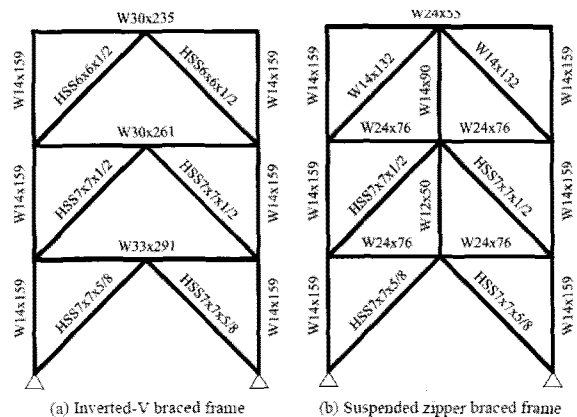


그림 12 가새 골조 프레임 입면 및 부재크기

능그룹(Performance Group, PG)으로 나누었으며 표 1과 같이 총 16 PG로 나누었다. 구조요소는 층간변형률과 관련된 있는 PG로 선정했고 비구조체는 변위에 민감한 그룹과 가속도에 민감한 그룹으로 나누었다. 변위에 민감한 그룹은

표 1 성능그룹(PG)

PG #	PG Name	Location	EDP	Components
1	SH12	between levels 1 and 2	$du_1$	Structural: lateral-load-resisting system
2	SH23	between levels 2 and 3	$du_2$	
3	SH3R	between levels 3 and R	$du_3$	
4	EXTD12	between levels 1 and 2	$du_1$	Exterior enclosure: panels, glass, etc.
5	EXTD23	between levels 2 and 3	$du_2$	
6	EXTD3R	between levels 3 and R	$du_3$	
7	INTD12	between levels 1 and 2	$du_1$	Interior nonstructural drift sensitive: partitions, doors, glazing, etc.
8	INTD23	between levels 2 and 3	$du_2$	
9	INTD3R	between levels 3 and R	$du_3$	
10	INTA2	below level 2	$a_2$	Interior nonstructural acceleration sensitive: ceilings, lights, sprinkler heads, etc.
11	INTA3	below level 3	$a_3$	
12	INTAR	below level R	$a_R$	
13	CONT1	at level 1	$a_1$	Contents: General office on first and second floor, computer center on third
14	CONT2	at level 2	$a_2$	
15	CONT3	at level 3	$a_3$	
16	EQUIPR	at level R	$a_R$	Equipment on roof

성능을 층간변형률로 정의하고 가속도에 민감한 그룹은 성능을 층 가속도로 정의한다.

### 3.1 지진위험도 해석

건물 위치 및 배치를 고려하여 지진위험도 해석을 한다. 건물의 동적응답을 연구하기 위하여 UC 버클리 지진지침(UCB 2003)에 따라 지반운동 세트를 선택한다. 건물위치에 지진 위험도를 나타내는 3개의 위험도(50년에 50%, 10%, 5% 초과확률)를 선택하며 각 위험도에 대해 10쌍의 지반운동을 선택한다. 각 지반운동을 그림 13과 같이 건물 고유 주기에 대하여 목표 재해도 스펙트럼으로 맞춰 보정한다.

### 3.2 응답해석

각 지반운동에 대하여 비선형 동적해석을 하고 EDP의

표 2 50년에 10% 초과확률 위험도에 대한 inverted-v 가새 골조의 최대 응답

Filename	$du_1$ (%)	$du_2$ (%)	$du_3$ (%)	$a_1$ (g)	$a_2$ (g)	$a_3$ (g)	$a_R$ (g)
LPigpcFN	0.85	0.62	0.26	0.44	0.55	0.65	0.68
LPigpcFP	1.09	0.87	0.45	0.57	0.57	0.74	0.73
LPsrtgFN	2.20	1.34	0.64	0.90	0.78	0.87	0.84
LPsrtgFP	0.79	0.54	0.38	0.89	0.75	0.70	0.79
LPcorFN	1.61	1.16	0.59	0.73	0.70	0.81	0.92
LPcorFP	1.17	0.98	0.53	0.58	0.55	0.70	0.81
LPgavFN	0.45	0.55	0.40	0.63	0.58	0.68	0.85
LPgavFP	0.86	0.77	0.41	0.73	0.54	0.67	0.84
LPgilbFN	0.81	0.74	0.45	0.59	0.54	0.60	0.84
LPgilbFP	0.79	0.59	0.31	0.57	0.50	0.59	0.69
LPlex1FN	3.62	2.04	0.82	0.69	1.08	0.95	0.96
LPlex1FP	1.11	0.97	0.60	0.84	0.91	0.99	0.94
KBkobjFN	1.98	1.31	0.65	0.58	0.75	0.90	0.90
KBkobjFP	1.04	0.87	0.46	0.52	0.53	0.71	0.88
TKkofuFN	0.48	0.50	0.34	0.64	0.67	0.66	0.84
TKkofuFP	0.72	0.68	0.38	0.94	1.27	0.83	0.93
TOhinoFN	1.99	1.38	0.69	0.67	0.58	0.82	0.86
TOhinoFP	1.33	1.07	0.54	0.60	0.62	0.74	0.86
EZerziFN	2.04	1.21	0.62	1.14	0.70	0.74	0.89
EZerziFP	1.17	1.02	0.65	1.24	0.98	0.90	0.92

최대값을 행렬로 표 2처럼 만든다. EDP를 추가적으로 비선형 동적해석을 통하여 계산하기는 지반운동 부족과 계산비용 때문에 EDP행렬을 결합로그정규분포에 맞추어 EDP를 추가적으로 생성한다. EDP행렬(X)은 결합로그정규분포라고 가정하고 X 행렬을 자연로그하면 Y 정규분포로 변환된다. 생성된 표준 정규 확률 변수(u)와 그림 14의 Equation 5를 이용하여 추가로 상관관계 있는 EDP벡터(y)를 생성하고 y의 지수를 하면 로그정규분포로 이루어진 추가 EDP벡터(x)를 생성할 수 있다. 추가 EDP생성 과정과 그 과정 중 사용하는 방정식은 그림 14와 같다.

### 3.3 손상해석

각 PG에 대하여 손상상태(Damage State, DS)를 정의하고 각 DS에 대한 취약도 모델은 주어진 EDP의 손상확률을 정의한다. 주어진 EDP에 따라 균일분포 난수 생성기를 이용하여 PG의 DS를 선택하고 그림 15와 같이 각 PG에 대하여 보수량을 보수량 표에서 검색한다. 각 PG에 대하여 이 과

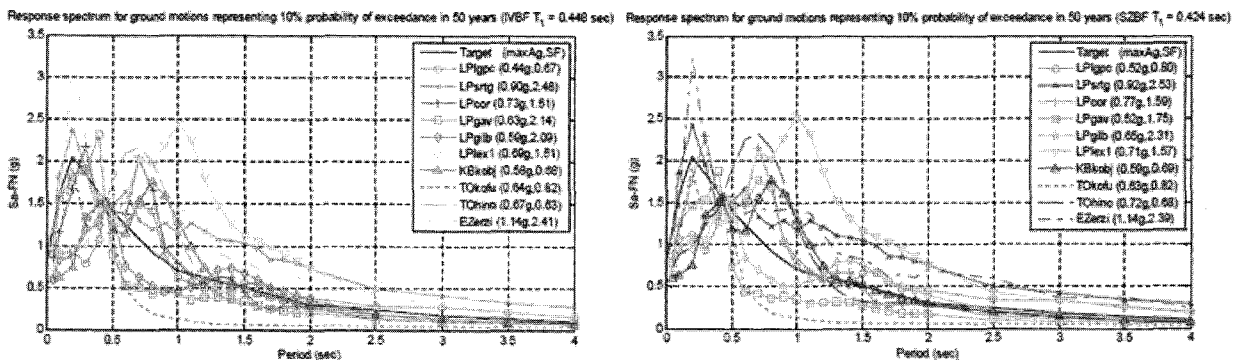


그림 13 50년에 10% 초과확률 위험도에 대한 지진운동 응답스펙트럼

정을 반복 하여 각 항목의 총보수량을 구한다.

### 3.4 손실해석

총보수비용은 총보수량에 단가를 곱해서 구한다. Inverted-v 및 suspended zipper 가새 골조 프레임 총비용의 이산누적분포함수는 그림 16과 같다. 가로축은 손실 금액을 나타내고 세로축은 총비용이하일 확률을 나타내며 일정 금액을 결정 변수로 사용하면 총비용이하일 확률을 구할 수 있다. 예를 들어 그림 16에서 50년에서 10% 초과확률 위험도에 전체 손실이 \$2,000,000 이하일 확률은 suspended zipper 가새 골조의 경우 44%이고 Inverted-V 가새 골조의 경우 9%이다. 50년에 10% 초과확률 위험도에는 inverted-v 가새 골조가 더 취약하다는 것을 볼 수 있다. 총비용을 각 PG에 대하여

개별화한 것이 그림 17과 같으며 총비용이 구조 PG와 변위에 민감한 비구조체 PG에 집중되어 있다.

### 4. 맺음말

차세대 성능기반 내진설계를 위한 성능평가 과정을 적용한 2가지 사례를 소개하였다. 앞서 소개한 학술기사인 'FEMA 445의 차세대 성능기반 내진설계를 위한 성능평가 과정'을 실제 적용한 사례는 잘 찾기 힘든 것이 현실이다. 현재 저자가 확보하고 있는 사례는 위에서 소개한 2가지 정도이다. 이 사례들도 성능평가 과정을 명확하게 소개하고 있지는 않다. 따라서 이 성능평가 과정을 개발하고 있는 미국 현지에서도 아직까지는 이 방법이 실용화되지는 않은 것으로 판단된다. 하지만 앞서 소개한 학술기사에서도 언

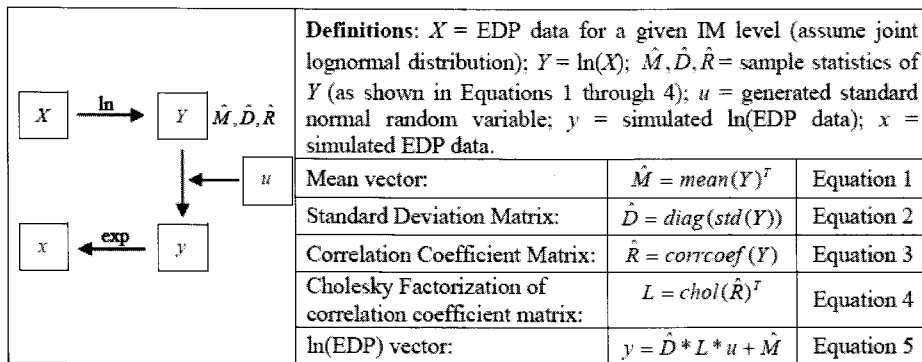
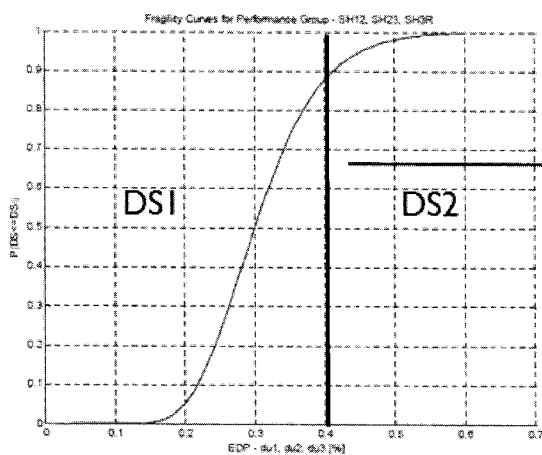


그림 14 추가 EDP 생성과정



Structural performance groups							
Repair items	Units	SH12		SH23		SH3R	
		DS1	DS2	DS1	DS2	DS1	DS2
Demolition/Access							
Finish protection	sf	0	6,000	0	6,000	0	6,000
Ceiling system removal	sf	0	5,000	0	5,000	0	5,000
Drywall assembly removal	sf	0	6,000	0	6,000	0	6,000
Miscellaneous MEP	loc	0	6	0	6	0	6
Remove exterior skin (salvage)	sf	0	5,600	0	4,000	0	3,000
Repair							
Welding protection	sf	0	1,500	0	1,500	0	1,500
Shore beams below & remove	loc	0	12	0	12	0	12
Cut floor slab at damaged connection	sf	0	1,600	0	1,600	0	1,600
Carbon arc out weld	lf	0	50	0	50	0	50
Remove portion of damaged beam/column	sf	0	100	0	100	0	100
Replace weld - from above	lf	0	40	0	40	0	40
Remove/replace connection	lb	0	3,000	0	3,000	0	2,000
Replace slab	sf	0	1,600	0	1,600	0	1,600
Put-back							
Miscellaneous MEP and clean-up	loc	0	6	0	6	0	6
Wall framing (studs, drywall, tape and paint)	sf	0	6,000	0	6,000	0	6,000
Replace exterior skin (from salvage)	sf	0	5,600	0	5,600	0	5,600
Ceiling system	sf	0	5,000	0	5,000	0	5,000

그림 15 PG 위험도 곡선 및 보수량

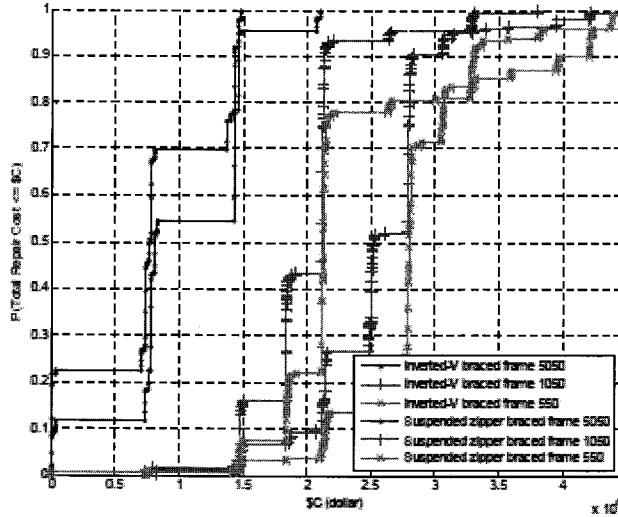


그림 16 보수비용의 이산누적분포함수

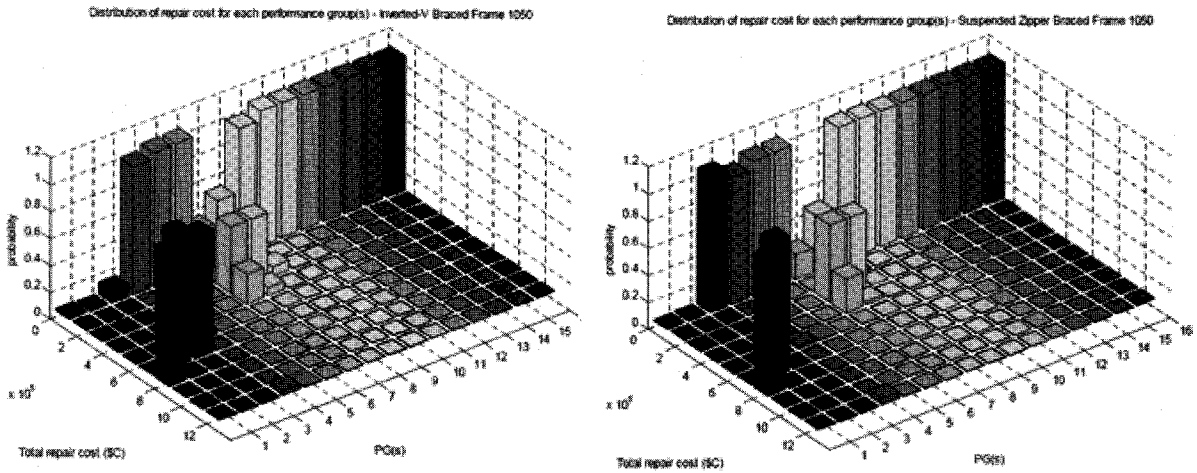



그림 17 50년에 10% 초과확률 위험도의 총비용 개별화

급했듯이 이 성능평가 방법은 성능기반 내진성능평가가 추구해야 할 방향이므로 관련 연구자들은 계속해서 주시할 필요가 있다.

### 참고 문헌

1. ASCE7 (2005) "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", American Society of Civil Engineers.
2. ATC (2009) "Guidelines for Seismic Performance Assessment of Buildings", ATC-58 50% Draft, Applied Technology Council.
3. ICC (2006) "International Building Code", International Code Council.
4. USGS Ground Motion Parameter Calculator, <http://earthquake.usgs.gov/hazards/designmaps/>.
5. Yang, T.Y. (2006) "Performance Evaluation of Innovative Steel Braced Frames", Ph.D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, California. 

[담당 : 유은중, 편집위원]