

고차모드 영향이 반영된 Pushover 해석을 위한 횡하중 분배계수 제안 Lateral Load Distribution Factor for Modal Pushover Analysis

김 건 우* 송 진 규**
Kim, Geon-Woo Song, Jin-Gyu

Abstract

Nonlinear static analysis is used to quantify the resistance of the structure to lateral deformation and to gauge the mode of deformation and intensity of local demands. A simple method for the nonlinear static analysis of complex building structures subjected to monotonically increasing horizontal loading(pushover analysis) is presented. The method is designed to be a part of new methodologies for the seismic design and evaluation of structures. A variety of existing pushover analysis procedures are currently being consolidated under programs such as ATC 40 and FEMA 273. And various techniques have been recommended, including the use of constant lateral force profiles and the use of adaptive and multimodal approaches. In this paper a modal pushover analysis using design response spectra of UBC 97 is proposed. Proposed method is compared against the method in FEMA 273 and ATC 40, and results of time history analysis.

키워드 : 횡하중 분배계수, 푸쉬오버 해석, 모달 푸쉬오버, 비정형성
Keywords : lateral load distribution factor, pushover analysis, modal pushover, irregularity

1. 서 론

1.1 연구 필요성 및 배경

구조물의 비탄성 저항능력(Capacity)을 평가하기 위한 방법으로는 일반적으로 pushover 해석을 사용한다. Pushover 해석은 층에 한 방향으로 하중을 분포시키고 이 하중을 점차 증가시키는 방법으로 구조물의 비탄성 거동을 관찰하게 된다. Pushover 해석법은 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계 상태를 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 방법이다. 이러한 장점으로 인하여 널리 사용되고 있지만 해석 시에 횡하중 분배방법의 변화에 따라 보유성능은 큰 차이를 나타낼 수 있다.

Pushover 해석은 고차모드 영향의 반영 여부에 따라서 두 가지로 분류된다. 고차모드의 영향이 반영되지 않은 방법은 건물의 높이에 분포되는 횡하중을 결정한다. 이때, 횡하중의 분포를 결정하는 방법은 탄성해석에 의한 1차 모드의 형상에 따르거나 코드에서 제시하는 층 지진하중에 의해

* 전남대 대학원 박사수료
** 전남대 건축학부 부교수, 공학박사

결정하는 방법이 일반적이다. 하지만 고차모드의 영향을 많이 받는 비정형 구조물이나 고층구조물에 대해서 고차모드의 영향을 고려하지 않으면 구조물의 실제 거동과 크게 차이를 나타낸다. 이러한 이유로 고차모드의 영향이 반영된 pushover 해석방법이 몇 가지 제시되고 있다.

고차모드의 영향이 반영된 pushover 해석법에는 일단 모드별로 해석을 수행한 후에 그 결과를 조합하는 방법과 횡하중 분배계수를 산정할 때 고차모드를 반영하여 pushover 해석을 수행하는 방법이 있다. 이 두 가지 방법은 모두 과거의 지진을 사용하여 각 모드의 영향을 반영하게 된다. 하지만 이때에 사용되는 지진은 과거의 실제 지진으로 그 지역에서 발생될 미래의 지진을 예견할 수 있는 대표지진이라 할 수 없다. 또한 각 방법별 단점을 살펴보면, 모드별로 해석을 수행한 후에 원하는 결과들(층간 변위비, 층 지진하중, 소성 분포 등)을 조합하는 방법은 복잡한 비선형 해석을 원하는 모드의 수만큼 수행하여야 하고 그 값들을 조합하는 방법 또한 명확하지가 않다. 또한 그 조합된 값의 정확도 또한 고차모드의 영향이 반영된 다른 방법에 비해 월등하다고 판단할 수가 없다. 두 번째 방법인 횡하중 분배계수를 산정할 때 고차모드를 반영하는 방법도 다소 복잡한 과정을 거쳐서 횡하중 분배계수를 산정하여 pushover 해석을 수행한다. 그리고 전자의 방법과 마찬가지로 결과의 정확성이 월등하지 못하다. 이 두 가지의 방법은 모두 나름의 단점을 가지고 있다. 하지만 모드별로 해석을 수행한 후에 그 결과를 조합하는 방법에 비해 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수를 산정하는 방법은 복잡한 비선형 해석을 한 번만 수행해도 된다는 장점을 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 고차모드가 반영된 pushover 해석법 중에서 해석 절차가 비교적 간단한 고차모드를 고려하여 횡하중을 산정하는 방법을 선택하여 이를 개선하고자 한다. 제안한 횡하중 분배방법은 예제건물을 이용하여 실제 역사지진의 시간이력해석과 ATC 40 및 FEMA 273에서 제시하고 있는 방법에 의한 pushover 해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

1.2 기존 횡하중 분배방법

표 1 ATC 40과 FEMA 273의 횡하중 분배방법

코드명	명칭	층 지진하중
ATC 40	Story height (ATC 1)	$f_x = \frac{w_x h_x}{\sum w_x h_x}$
	1st mode shape (ATC 2)	$f_x = \frac{w_x \phi_x}{\sum w_x \phi_x}$
FEMA 273	Uniform pattern (FEMA 1)	$f_x = \frac{w_x}{\sum w_x}$
	Load distribution factor(FEMA 2)	$f_x = \frac{w_x h_x^{k_1}}{\sum w_i h_i^{k_1}}$
	SRSS (FEMA 3)	$f_{jn} = \Gamma_n^2 m_j \phi_{jn} A_n^3$

- 1) $k = T \leq 0.5$ 일 때, 1.0
 $= 2.0 < T$ 일 때, 2.0
 $= 0.5 < T \leq 2.0$ 일 때, 직선보간법을 사용.
- 2) $\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}$, $M_n = \sum_{j=0}^n m_j (\phi_j)^2$, $L_n = \sum_{j=0}^n m_j \phi_j$
- 3) A_n : n번째 탄성단자유도계의 pseudo-acceleration

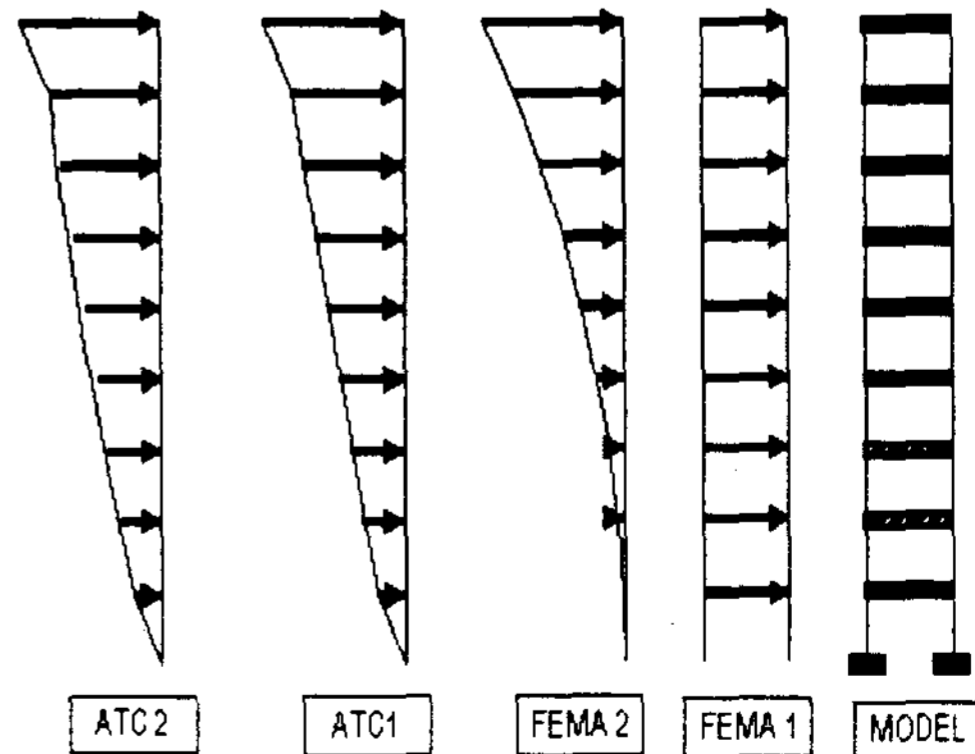


그림 1 횡하중 분배방법에 따른 횡하중 분배형태

ATC 40과 FEMA 273에서는 높이, 중량, 그리고 1차 모드의 형상에 의한 방법과 더불어 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수를 산정하는 방법을 제시하고 있다.

ATC 40과 FEMA 273에서 제시한 방법을 용어의 편의를 위하여 본 논문에서는 이후 ATC 1, 2 그리고 FEMA 1, 2, 3으로 칭하였다.

2. 횡하중 분배계수 제안

ATC 40과 FEMA 273에서는 각각의 횡하중 분배방법을 제안하고 있다. 이러한 횡하중 분배방법을 살펴보면, ATC 1, 2와 FEMA 1, 2의 방법은 고차모드의 영향이 반영되어있지 않기 때문에 상대적으로 고차모드의 영향을 많이 받는 고층 건물이나 비정형 건물의 비선형 성능을 정확히 평가할 수가 없다. 또한 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수를 산정하는 방법인 FEMA 3(SRSS 방법)도 지진파를 이용하여 응답스펙트럼을 구해야하는 과정을 거쳐야 한다. 그리고 어떠한 지진파를 이용해야 하는지에 대한 구체적인 언급이 없고, 선택한 지진이 그 지역에서 발생할 지진을 대표할 수 없으나 이를 이용하여 횡하중 분배계수를 산정한다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 코드에서 제시하고 있는 설계응답 스펙트럼을 사용하여 횡하중 분배계수를 구하는 방법을 제시하였다. 이는 FEMA 3이 가지고 있는 두 가지의 단점을 보완할 수 있다.

제시한 횡하중 분배방법의 산정 절차는 다음과 같다.

- ① 건물의 고유치 해석을 통해 3~5차 진동모드별 주기(T) 및 형상함수(ϕ)를 결정한다.
- ② 코드에서 제안한 설계응답 스펙트럼을 이용하여 n 번째 모드에 대한 층 지진하중을 식 (2.1)에 의해 결정

$$f_{jn} = \Gamma_n m_j \phi_{jn} \psi_n \quad (2.1)$$

f_{jn} : n 번째 모드에서 j 번째 층 지진하중

ψ_n : 코드에서 제시한 설계응답 스펙트럼에 의한 가속도

$$T_s = C_v / 2.5 C_a, \quad T_0 = 0.2 T_s$$

$$\text{단, } 0 \leq T < T_0 \quad \psi = 1.5 \frac{C_a}{T_0} T + C_a$$

$$T_0 \leq T < T_s \quad \psi = 2.5 C_a$$

$$T_s < T \quad \psi = \frac{C_a}{T}$$

- ③ 식 (2.1)에서 구해진 층별 지진하중에 의해 층 전단력을 산정한다.
- ④ 각 모드별 층 전단력을 SRSS를 이용하여 조합한다.
- ⑤ 조합된 층 전단력을 다시 층별 횡하중으로 분리한다.
- ⑥ 각 층별 횡하중의 최고치를 1로 normalize하여 횡하중 분배계수를 결정한다.

3. 검증

3.1 검증 방법

본 논문에서는 코드 스펙트럼 중 UBC 97⁽³⁾에서 제시하고 있는 $C_a = C_v = 0.15$ 인 설계응답 스펙트럼을 사용하여 횡하중 분배계수를 산정하였다. 산정된 횡하중 분배계수에 의해 pushover 해석을 수행하고 그 결과를 다른 횡하중 분배방법에 의한 pushover 해석결과와 선택된 스펙트럼과 특성이 유사한 지진파에 의한 시간이력해석의 평균값과 비교하였다. 각 방법들의 비교를 위하여 제안한 방법에 의한 pushover에서와 같은 크기의 밀면전단력에서 기존의 횡하중 분배방법에 의한 pushover 해석과 시간이력 해석에 의한 층간 변위비를 비교하였다.

검증을 위하여 다음 표 2와 같이 Bertero⁽⁴⁾가 제안한 층간 변위비(Interstory Drift Index, IDI)를 성능 단계별 지표로 정의하였다. 검증에 사용된 시간이력해석의 층간 변위비는 관성력에 의해 각 층별 최대 층간변위비의 발생 시각이 다르다. 따라서 시간이력해석 결과를 설계에 반영할 경우 각 층의 최대 층간 변위비를 사용하는 것이 합리적인 것으로 사료되어 각 층별 최대의 층간 변위비를 추출하여 이의 평균과 pushover 해석결과를 비교하였다.

표 2 성능단계별 IDI와 밀면전단력

성능단계	IDI(%)	밀면전단력(정형)	밀면전단력(비정형)
즉시거주	0.6	1,709	911
인명안전	1.5	2,031	1,142
붕괴방지	2.0	2,100	1,195

검증은 다음과 같은 순서에 의해 진행하였다.

- 1) 제안한 방법에 의해 pushover 해석을 수행한다.
- 2) 각 성능 단계별 층간 변위비가 발생하는 step에서의 밀면전단력을 확인한다(표 2).
- 3) 각 성능단계에서의 pushover 해석의 밀면전단력과, 선택된 각 지진의 시간이력해석의 최대 밀면전단력이 같아지도록 지진의 크기를 조정하여 시간이력해석을 수행한다.
- 4) 시간이력해석 결과 각 층의 최대 층간 변위비의 평균을 산정한다.
- 5) 각 성능단계에서 횡하중 분배방법별 pushover 해석에 따른 결과와 시간이력해석의 평균값을 비교한다.

3.2 예제 건물

예제건물의 시간이력 해석 및 pushover 해석은 3차원 비탄성 해석 프로그램인 CANNY-E⁽⁵⁾를 사용하여 예제 건물의 정보에 따라 모델링하고 비탄성 해석을 수행하였다. 각 부재의 소성 후 변형 경화율은 1%로 가정한 bilinear 모델을 사용하였다.

제안된 방법의 검증을 위해 정형적인 건물은 그림 2의 좌측과 같은 SAC project에 의해 설계된 철골조 9층 건물⁽⁶⁾을 사용하였고, 수직 비정형적인 건물은 그림 2의 우측과 같이 SAC building의 좌우 4층 이상의 좌우 1경간을 제거하여 사용하였다(표 3, 그림 2).

구조물의 지지상태는 그림에서 보는 바와 같이 B-1 level에서는 횡변위가 제어된 힌지이고, Ground level에서는 횡변위만 구속되고 수직변위는 롤러인 힌지로 모델링을 하였다.

표 3 예제건물의 상세

보 (248MPa)	지상~2층	W36×160	기둥 (345MPa)	지하~1층	W14×500
	3층~6층	W36×135		2층~3층	W14×455
	7층	W30×99		4층~5층	W14×370
	8층	W27×84		6층~7층	W14×283
	9층	W24×68		8층~9층	W14×257
Mass (비정형)	1층	1.01×10 ⁶	층고/경간	지하층	3.65m
	2층~4층	9.89×10 ⁵		지상층	5.49m
	5층~8층	3.56×10 ⁵		1층~8층	3.96m
	9층	3.85×10 ⁵		경간	9.15m
Mass (정형)	1층	1.01×10 ⁶	- 기둥의 단면은 splice에서 변화하며 ◆로 표시하고, 1, 3, 5, 그리고 7층에서 1.83m위에 위치한다.		
	2층~8층	9.89×10 ⁵			
	9층	1.07×10 ⁶			

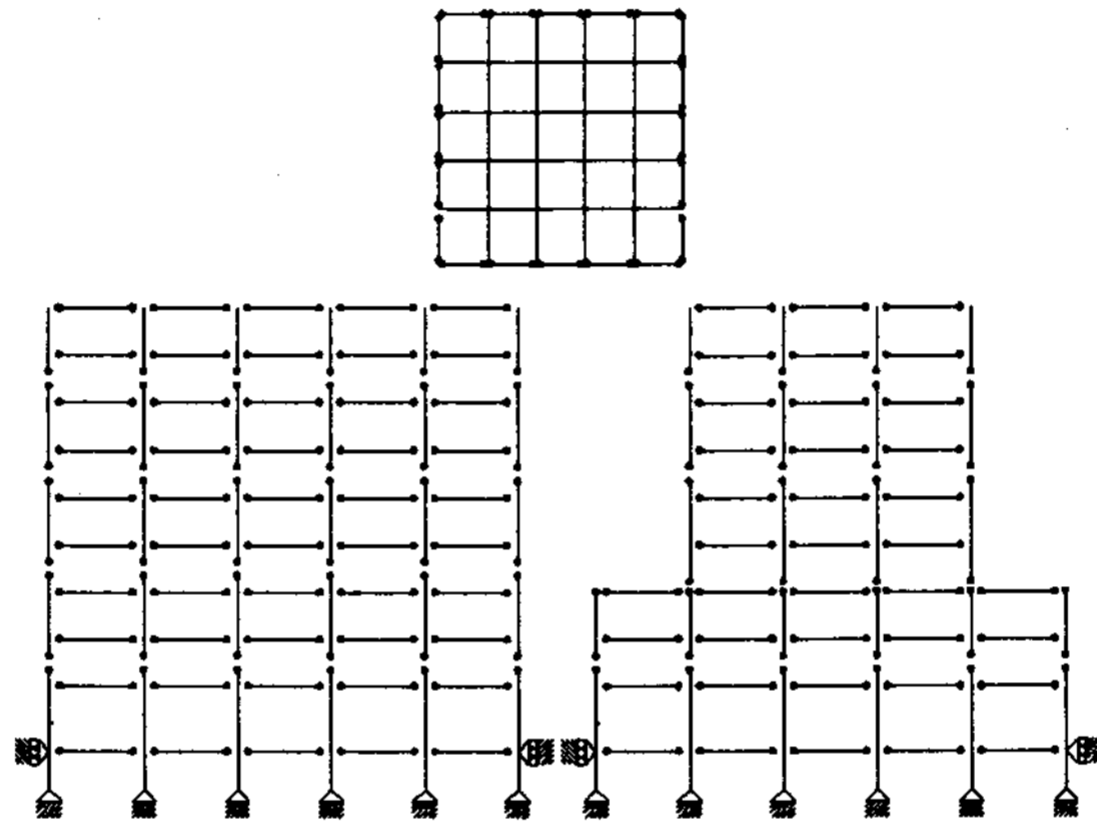


그림 2 예제건물의 평면도 및 단면도

3.3 비교 지진 선택

시간이력 해석을 위한 지진은 우선 본 논문에서 예제로 사용된 UBC 97의 설계응답 스펙트럼의 Ca값을 1.0g로 맞추어 스펙트럼의 Sa값을 구하고 다음 식 (3.1)을 사용하여 응답 스펙트럼의 속도 성분을 도출한다.

$$S_v = \frac{S_a}{\omega} = S_a \times \frac{T}{2\pi} \tag{3.1}$$

표 4 비교 지진 데이터

발생 년도	발생위치	PGA(g)	v/a	발생 년도	발생위치	PGA(g)	v/a
1979	Bonds Corner El Centro	0.778	22.65	1971	San Fernando 8244 Orion Blve.	-0.255	45.89
1979	Coyote Lake	0.429	44.88	1971	San Fernando Pacoima Dam	-0.117	38.21
1940	El Centro Site	0.357	48.10	1971	San Fernando	0.315	23.82
1952	Hollywood Storage P.E	0.059	39.59	1994	Northridge, St. Monica, City Hall	-0.882	18.18
1979	James RD. El Centro	-0.595	30.78	1952	Taft Lincoln School	-0.156	39.45
1995	Kobe, Japan	0.599	49.04	1999	Duzce, Turkey	0.356	29.92

이 데이터를 5% 감쇠비에 대해 가속도의 증폭계수인 2.12와 속도의 증폭계수인 1.65(Newmark & Hall, 1982)⁽⁷⁾로 각각 나누면 UBC 97의 설계응답 스펙트럼의 v_{max}/a 의 값은 31.57이 된다. 따라서 수집된 지진 가속도 데이터를 1g로 scaling을 한 후 FFT를 이용하여 v_{max} 을 구하고 v_{max}/a 의 값이 16보다 작거나 51을 초과하여 UBC 97의 설계응답 스펙트럼의 특성과 크게 차이를 나타낸다고 사료되는 지진을 제외한 다음, 표 4와 같은 12개의 지진데이터를 선택하여 시간이력 해석을 수행하였다.

3.4 시간이력해석과 pushover 해석 결과와의 비교

우선 pushover 해석을 수행하기 위한 횡하중 분배계수를 산정하면 그림 3~6과 같다. 그림 3과 4는 정형적인 건물의 횡하중 분배계수이고, 그림 5와 6은 수직 비정형적인 건물의 횡하중 분배계수이다. 그림 3과 5는 고차모드의 영향이 반영되지 않은 횡하중 분배방법인 FEMA 1, 2 그리고 ATC 1, 2에 의한 횡하중 분배계수이다. 그리고 그림 4와 6은 고차모드의 영향이 반영된 방법인 FEMA 3과 제안한 방법에 의한 횡하중 분배계수이다.

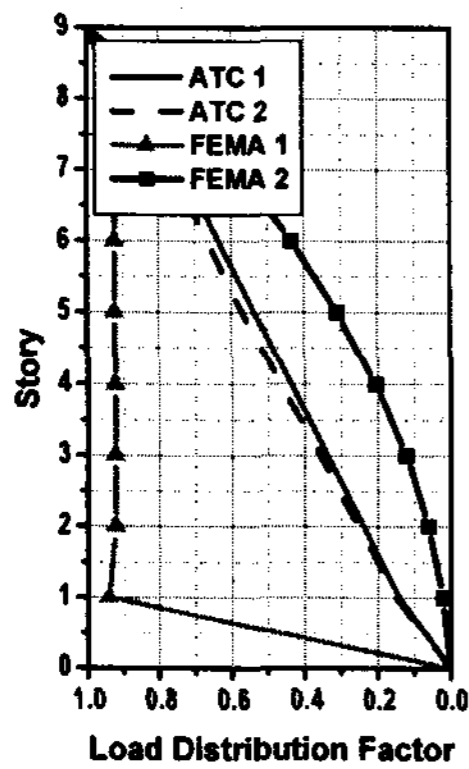


그림 3 정형건물의 횡하중 분배계수 1

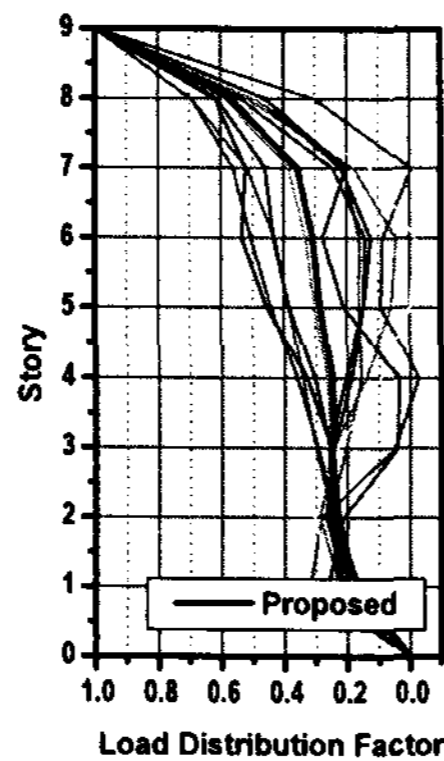


그림 4 정형건물의 횡하중 분배계수 2

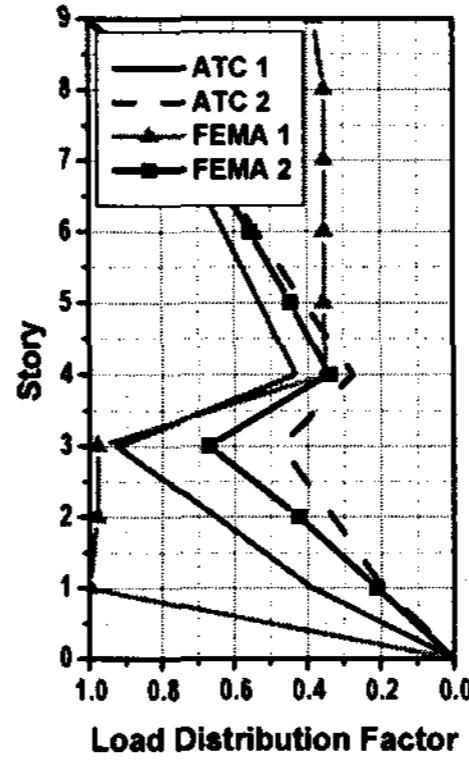


그림 5 수직 비정형건물의 횡하중 분배계수 1

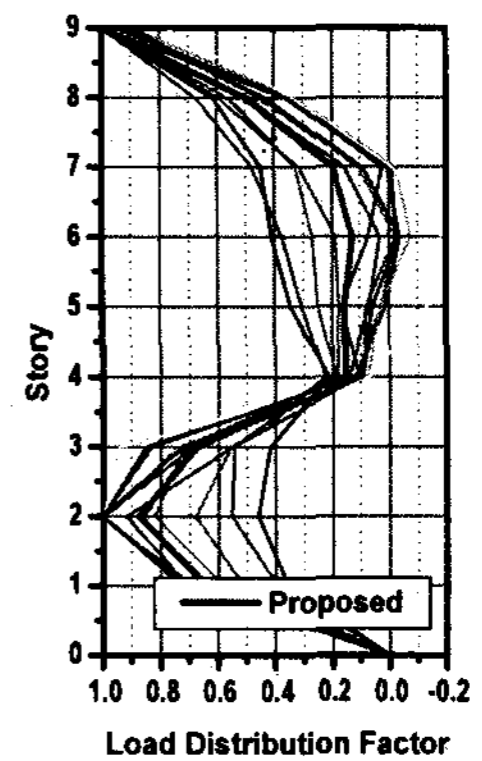


그림 6 수직 비정형건물의 횡하중 분배계수 2

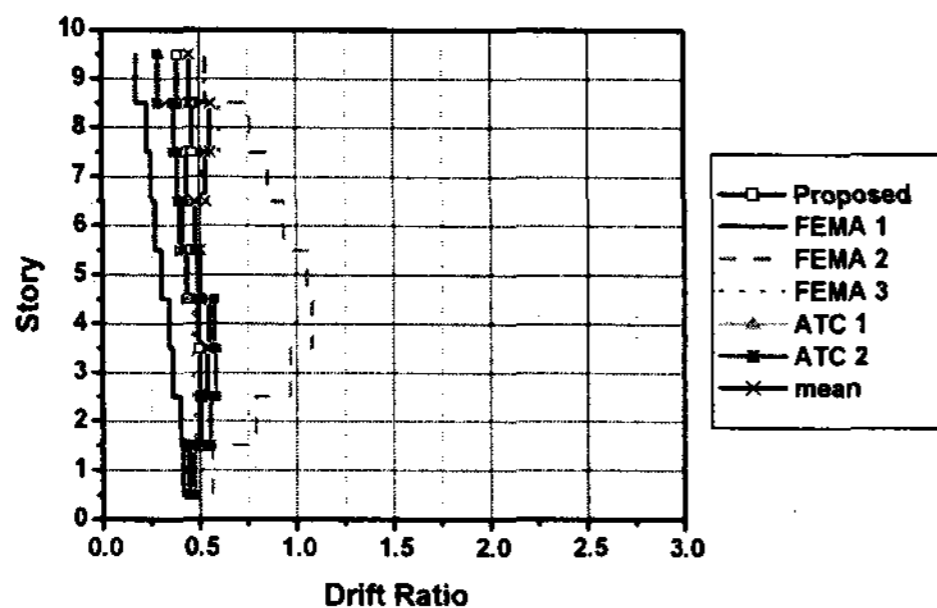


그림 7 즉시거주 단계의 층간 변위비

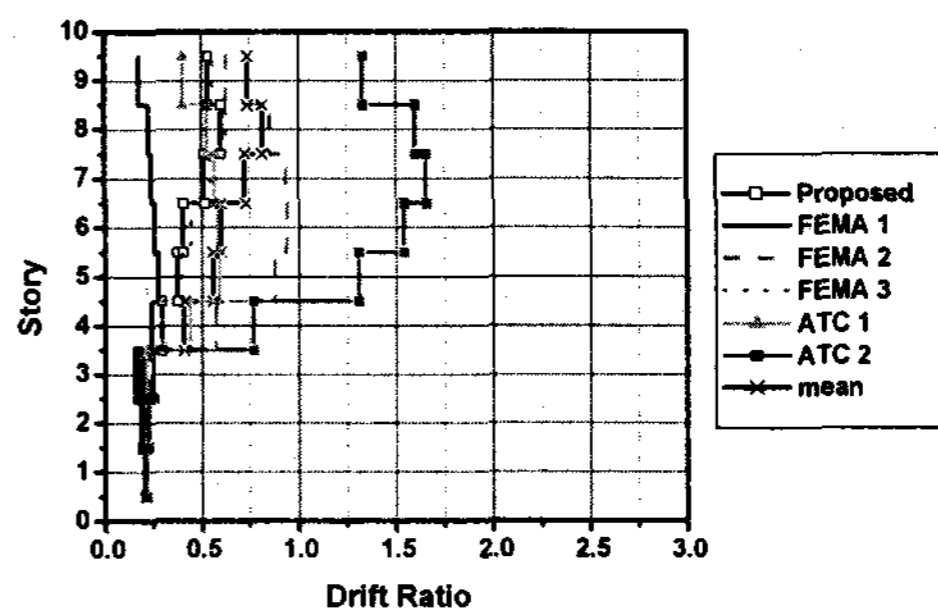


그림 8 즉시거주 단계의 층간 변위비

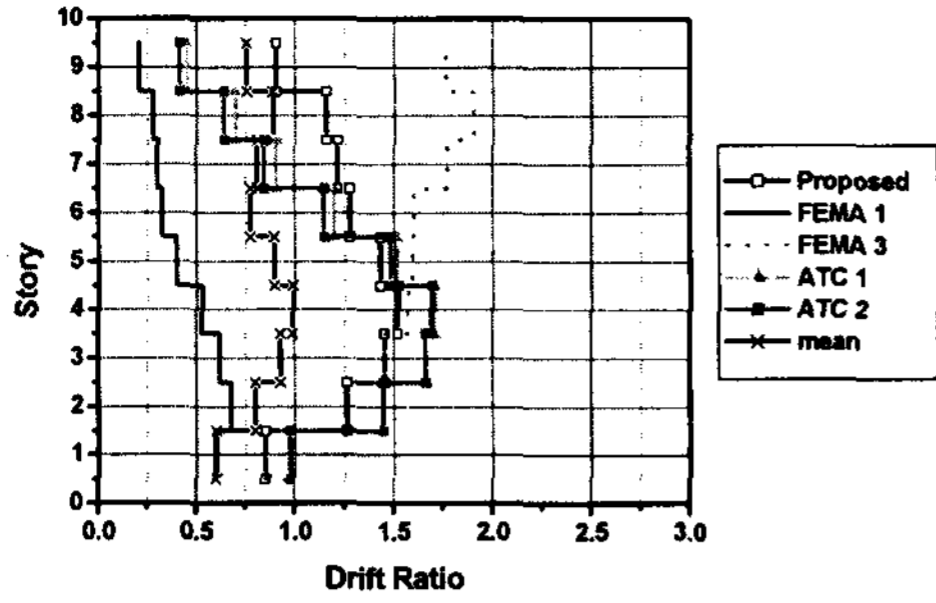


그림 9 인명안전 단계의 층간 변위비

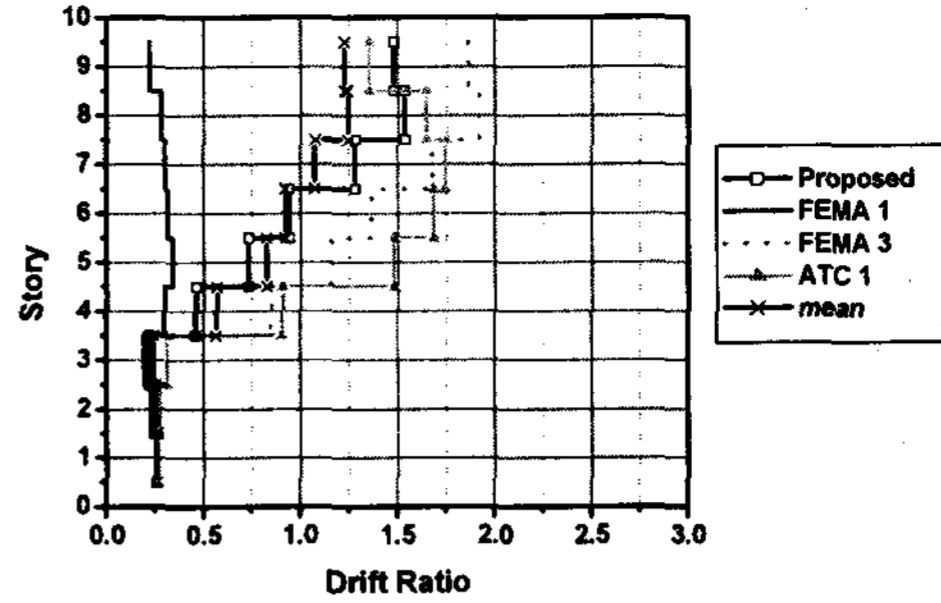


그림 10 인명안전 단계의 층간 변위비

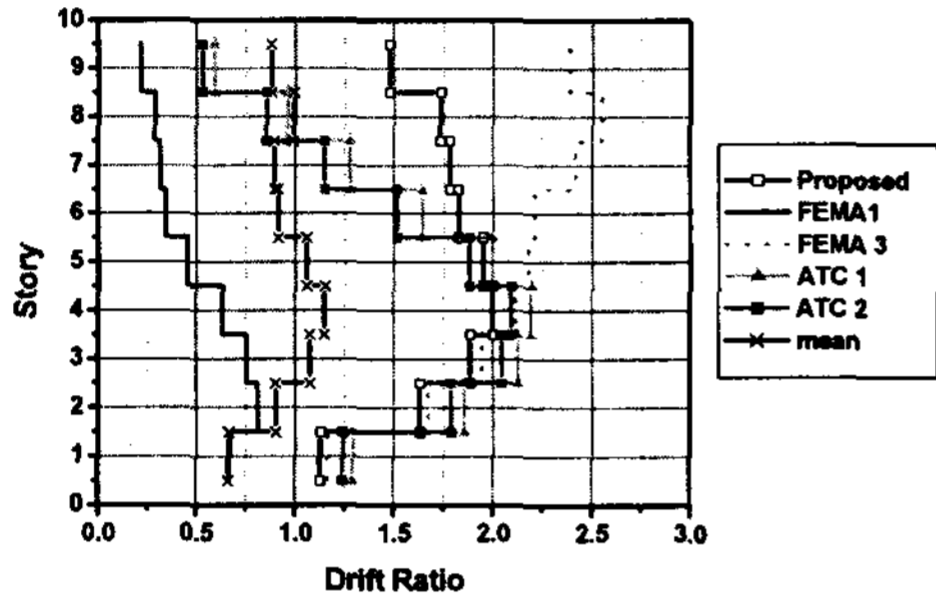


그림 11 붕괴방지 단계의 층간 변위비

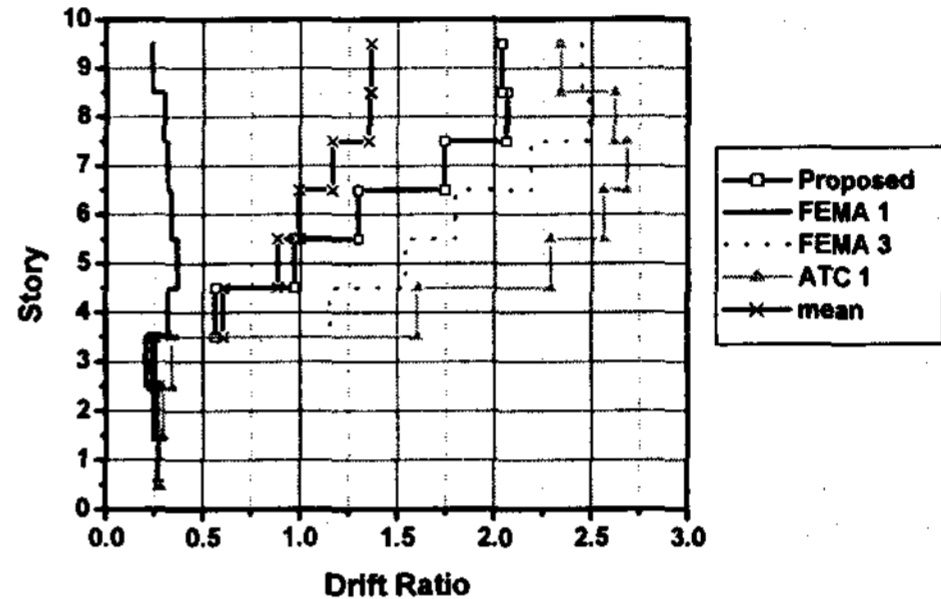


그림 12 붕괴방지 단계의 층간 변위비

그림 7~12는 예제건물의 해석결과로 각 성능단계별 층간 변위비를 나타낸 것이다. 그림 7, 9, 11은 정형건물이고 그림 8, 10, 12는 비정형 건물이다. 정형 건물에서의 FEMA 2와 비정형 건물에서의 FEMA 2, ATC 2는 인명안전단계와 붕괴방지단계에서 이미 층간 변위비 3.0%를 크게 초과하여 비교 대상에서 제외하고 나머지 방법들만을 비교하였다.

4. 결론

Pushover 해석은 고차모드 영향의 고려 여부에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. ATC 40과 FEMA 273의 방법 중 ATC 1, 2 그리고 FEMA 1, 2는 고차모드의 영향이 반영되어 있지 않은 횡하중 분배방법으로 요즘과 같이 고층화, 비정형화 되어가는 건물의 성능을 평가하기 위한 비탄성 해석으로는 적절치 못하다. 따라서 이러한 고차모드의 영향을 반영하기 위하여 FEMA 273에서는 SRSS방법을 제시하고 있다. 하지만 이 방법은 실제 지진을 이용하여 구조물의 고차모드 영향을 반영한다. 따라서 과거의 지진을 대표지진으로 결정한다는 단점과 함께 응답스펙트럼을 구하여야 하는 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 따라서 이러한 단점을 보완하고자 FEMA 3의 지진 응답스펙트럼 대신 코드에서 제안한 설계응답 스펙트럼을 이용하여 고차모드가 반영된 횡하중 분배법을 제안하였다. UBC 97의 설계응답 스펙트럼을 이용하여 제안한 방법, 기존의 횡하중 분배방법에 의한 pushover 해석과 시간이력 해석의 각 성능단계에서 결과를 비교 및 분석하면 다음과 같다.

1) 정형적인 건물의 결과, FEMA 2는 인명안전단계와 붕괴방지단계에서 이미 과도한 층간 변위비가 발생하여 비교 대상에서 제외하였다. 즉시거주단계를 제외한 나머지 단계에서의 오차는 ATC에서 제안한 두 가지 방법이 더 작았다. 층간 변위비의 분포는 ATC에서 제안한 방법은 저층부의 경우 제안한 방법과 유사한 결과이나, 상층부에서는 시간이력해석 결과보다 오히려 작은 값이 나왔다. 세 가지 단계 모두 층간 변위비의 오차와 분포를 함께 고려할 경우 제안한 방법이 본 논문에서 비교한 다른 횡하중 분배방법에 비해 시간이력 해석결과의 평균치와 더 근사하였다.

2) 수직 비정형적인 건물의 경우는 FEMA 2와 ATC 2는 즉시거주 단계를 제외한 나머지 단계에서 이미 과도한 층간 변위비가 발생하여 비교 대상에서 제외하였다. 수직 비정형적인 건물에서는 정형적인 건물의 결과에서 보다 층간 변위비의 전체 분포뿐만 아니라 오차를 그리고 최대 층간 변위비의 발생위치에서도 다른 횡하중 분배방법보다 더욱 시간이력 해석결과와 근사하였다.

이상의 결과를 정리하면, 본 논문에서 제시하고 있는 횡하중 분배방법이 기존 제시된 횡하중 분배방법보다 시간이력 해석결과의 평균값에 더 근사한 값을 갖는다. 이러한 경향은 정형적인 건물보다는 수직 비정형적인 건물에서 더욱 두드러지게 나타났다.

본 논문에서는 UBC 97의 설계응답 스펙트럼을 사용하여 9층 건물을 이용하여 검증하였으나, 고층 건물에 대한 적용성 여부와 미래의 지진을 좀 더 정확히 대변할 수 있는 표준 스펙트럼에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 구조물의 정확한 거동을 나타낼 수 있는 pushover 해석법도 계속 연구되어야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 “2003년도 건설핵심 기술연구개발사업(03산학연C103A1040001-03A0204-00210)”과 삼성물산(주) 건설부문의 “비탄성 내진성능 평가 및 프로그램 개발에 관한 연구”에 대한 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1", ATC 40, Applied Technology Council, 1996.
2. FEMA, "NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, 1997.
3. ICBO, "Uniform Building Code", UBC 97, International Conference of Building Officials, 1997.
4. Raul D. Bertero, Vitelmo V. Bertero, "Performance-based Seismic engineering: The Need for a Reliable conceptual comprehensive approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, pp. 627-650.
5. Kangning Li, "CANNY(Version C02) Users' Manual", Canny Structural Analysis, 2002.
6. Newmark, n. M. and Hall, W. J., "Earthquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Inst., Berkeley, CA, 1982.
7. Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, "A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation", PEER 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2001.