

# 비선형 정적해석을 통한 횡저항 시스템의 보유성능 평가 및 설계방안 연구

## Design of Lateral Load Resisting System using Nonlinear Static Analysis

김 건 우\*      송 진 규\*\*      정 성 진\*\*\*      송 영 훈\*\*\*\*      이 승 창\*\*\*\*  
Kim, Geon-Woo      Song, Jin-Gyu      Jung, Sung-Jin      Song, Young-Hoon      Lee, Seung-Chang

### 국문요약

횡저항 시스템의 설계는 구조 엔지니어의 경험과 노하우에 의존하는 경향이 크다. 또한 건물의 보유성능을 평가하여 설계과정에 적절히 반영할 수 있는 방법이 제시되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 구조물이 실제 보유하고 있는 유효보유성능(available full capacity,  $R_{uc}$ )과 설계기준에서 제시하고 있는 요구보유성능(minimum required capacity,  $R_{code}$ )에 의해 건물의 횡저항 시스템을 합리적으로 설계하는 방안을 제시하고자 한다. 제안 방법은 기존 구조 설계과정에 비선형 해석에 의한 횡저항 성능 평가가 추가된 것으로, 우선 기본 설계를 마친 후, 푸쉬오버(pushover)해석을 통해 구조물의 실제 횡저항 성능을 평가한다. 비선형 평가단계에서는 푸쉬오버(pushover) 해석을 수행하고 이산화도를 통해 항복밀면전단력( $V_f$ )을 결정한다. 그리고 설계밀면전단력( $V_{wind}$ )이 설계지진밀면전단력( $V_D$ )보다 큰 경우 항복밀면전단력보다 설계밀면전단력이 작은 값을 확인한 후에, 구조물이 보유한  $R_{uc}$ 를 산정한다. 설계지진밀면전단력이 큰 경우에는 바로 유효보유성능을 산정하고 이 유효보유성능( $R_{uc}$ )이 요구보유성능( $R_{code}$ )에 근접하도록 피드백 과정을 통하여 부재를 재설계한다. 본 논문에서는 간단한 2차원 철골 가새가 설치된 철근콘크리트 구조를 이용하여 두 가지 경우에 대하여 제안한 합리적인 횡저항 시스템의 설계를 적용하였다. 그 결과 기본설계와 비선형 정적해석의 피드백 과정의 반복을 통하여 요구보유성능에 근접한 유효보유성능을 갖는 횡저항 시스템을 설계하는 것이 가능하였다.

**주요어** : 횡저항 시스템, 유효보유성능, 요구보유성능, 비선형 정적 해석

### ABSTRACT

The design practice of the lateral resisting system has been traditionally dependent on the experience and know-how of a structural engineer. And the method to reflect the evaluation results of building's capacity on design process doesn't exist. The proposal of a rational design of the lateral load resisting system is based on the available full capacity ( $R_{uc}$ ) of a building and the minimum required capacity ( $R_{code}$ ) suggested in the code. This study suggests that nonlinear static analysis, which is the estimation of the lateral capacity with the pushover analysis, be included in the existing design procedure of the structure. After finishing the basic structural design, the lateral resisting capacity of a building is estimated. At the phase of nonlinear static analysis, pushover analysis is performed to define the fully yielded baseshear ( $V_f$ ). When the design wind baseshear ( $V_{wind}$ ) is bigger than the design seismic baseshear ( $V_D$ ), the value is checked to determine whether or not it is smaller than the  $V_f$ . After confirming that it is smaller, the  $R_{uc}$  of the structure is computed. If the  $V_D$  is bigger at first, only the  $R_{uc}$  is computed. When the value of the estimation shows remarkable differences with the  $R_{code}$ , repetition of the design modification is needed for those approximate to the  $R_{code}$ . Application of the proposed design procedure to 2-D steel braced RC buildings has proven to be efficient.

**Key words** : lateral resisting system, available full capacity, minimum required capacity, nonlinear static analysis

## 1. 서 론

우리나라는 매년 태풍과 같이 강한 풍하중이 발생하며, 지진의 위험도 또한 매년 증가하고 있는 추세이다. 또한 요즘과 같이 구조물이 대형화 특히 고층화 되어감에 따라 지진하중 및 풍하중과 같은 횡하중에 대한 구조물의 저항 성능이 중요시 되고 있다. 건물의 구조설계 시 수직하중과 수평하중에 대하여 구조부재가 안전하게 설계되어야 하며, 수평하중에 대해서는 수평변위가 일정 범위 내에 들어 건물의 사용성 요구조건을 만족하여야 한다. 구조물의 횡저항 시스템은 중력 하중에 저항하는 시스템에 비하여 같은

구조 시스템이라도 설계에 따라 저항 성능이 큰 차이를 나타낼 수 있다. 하지만 현행의 횡저항 시스템의 설계는 어떠한 지침이나 정량적인 기준이 없이 구조 엔지니어의 경험과 노하우에 의존하는 경향이 크다.

따라서 본 논문에서는 구조물이 실제 보유하고 있는 유효보유성능(available full capacity,  $R_{uc}$ )과 설계기준에서 제시하고 있는 요구보유성능(minimum required capacity,  $R_{code}$ )의 관계를 이용하여 횡저항 시스템을 합리적으로 설계하는 방안을 제시하고자 한다. 본 방법은 현행 구조설계에서 이루어지는 기본 설계과정에 비선형 정적해석에 의한 횡저항 성능의 평가과정이 추가된 방법으로 먼저 사용성 평가까지 모든 기본 구조설계 과정을 마친다. 그리고 비선형 정적해석인 푸쉬오버(pushover) 해석을 실시하여 구조물의 성능곡선을 얻어낸다. 우선 성능곡선을 이산화한 후에 횡하중의 중요한 성분 중 하나인 바람에 대한 안전성을 확인하고 구조물의 중요한 횡저항 성분인 강도계수( $R_s$ )와 연성계수( $R_\mu$ )를 이용하여  $R_{uc}$ 를 산정한다.

\* 정회원·전남대 대학원 박사수료

\*\* 정회원·전남대 건축학부 부교수, 공학박사  
(대표저자: jgsong@chonnam.ac.kr)

\*\*\* 비회원·한남대 건축학부 부교수, 공학박사

\*\*\*\* 비회원·삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 차장, 공학박사

\*\*\*\*\* 비회원·삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원, 공학박사  
본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일: 2005. 10. 7 / 심사종료일: 2006. 1. 10)

코드에서 제시하고 있는  $R_{code}$  값은 구조물이 보유하여야 할 최소값으로  $R_{ac}$ 는 항상  $R_{code}$ 를 초과하여야 한다. 실제로 대부분의 경우에는  $R_{ac}$ 가  $R_{code}$ 를 크게 초과하므로  $R_{ac}$ 를  $R_{code}$ 에 근접시키고자 부재의 단면을 감소시킬 경우 기본 설계과정에서 각 하중조합에 의한 부재의 안전성 검토를 만족시킬 수 없는 경우가 발생하므로 본 논문에서는 피드백(feedback) 과정의 반복을 통하여 기본 설계과정을 모두 만족시키면서  $R_{ac}$ 가 기본 구조설계를 만족시키는 한도 내에서 최대한  $R_{code}$ 에 근접하도록 구조물의 횡저항 시스템을 합리적으로 설계하는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수 산정

본 논문에서 제안한 방법에 의한 횡저항 시스템의 설계를 위해서는 구조물이 실제 보유한 유효보유성능의 정확한 평가가 중요하다. 하지만 푸쉬오버(pushover) 해석은 횡하중 분배형태에 따라 같은 구조물을 해석하더라도 그 결과가 상당한 차이를 나타낼 수 있다. ATC 40<sup>(1)</sup>과 FEMA 273<sup>(2)</sup>에서는 각각의 횡하중 분배방법을 제안하고 있다. 하지만 일반적인 횡하중 분배방법은 고차모드의 영향이 반영되어있지 않기 때문에 상대적으로 고차모드의 영향을 많이 받는 고층 건물이나 비정형 건물의 비선형 성능을 정확히 평가할 수가 없다. 또한 기존의 고차 모드의 영향이 반영된 방법<sup>(3),(4)</sup>에서는 다소 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 그리고 그 지역에서 발생할 미래의 지진을 대표할 수 없으나 특정 지진파를 이용하여 횡하중 분배계수를 산정한다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 FEMA 273에서 제시된 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수의 산정을 위한 방법을 실용적이며, 지진파에 대한 대표성을 확보하도록 본 연구자가 수정한 방법<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 그리고 건물의 설계에 사용된 KBC 2005<sup>(6)</sup>에서 제시하고 있는 설계응답 스펙트럼을 사용하여 고차모드의 영향을 고려한 횡하중 분배계수를 산정하였다.

횡하중 분배방법의 산정 절차는 다음과 같다.

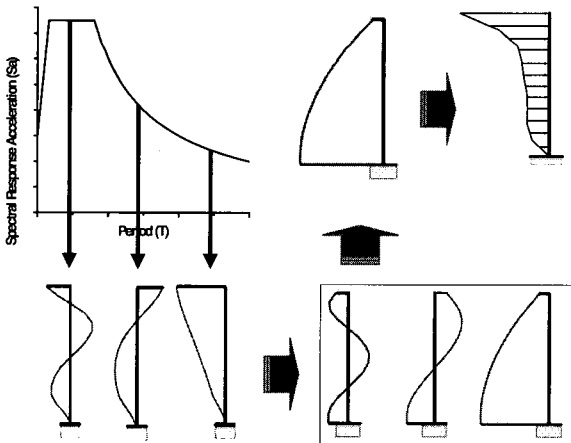


그림 1 횡하중 분배계수 산정 방법

- ① 건물의 고유치 해석을 통해 3~5차 진동모드별 주기 ( $T$ ) 및 형상함수( $\phi$ )를 얻어낸다.
- ② 코드의 설계응답 스펙트럼을 이용하여 n차 모드에 대한 층 횡하중을 식 (1)에 의해 계산한다.

$$f_{jn} = \Gamma_n m_j \phi_{jn} \psi_n \quad (1)$$

$\psi_n$ : 코드에서 제시한 설계응답 스펙트럼에 의한 가속도

- ③ 식 (1)에서 구해진 층 횡하중에 의해 식 (2)를 이용하여 층 전단력을 산정하게 된다.

$$V_{jm} = \sum_{i=j}^N f_{in} \quad (2)$$

- ④ 각 모드별 층 전단력을 SRSS(식 (3))를 이용하여 조합한다.

$$V_i = \sqrt{\sum (V_{in})^2} \quad (3)$$

- ⑤ 조합된 층 전단력을 식 (4)에 의해 다시 층별 횡하중으로 분리한다.

$$f_i = V_{i-1} - V_i \quad (4)$$

- ⑥ 각 층별 횡하중의 최고치를 1로 표준화하여 횡하중 분배계수를 결정한다.

## 3. 횡저항 시스템의 합리적인 설계절차 제안

### 3.1 횡저항 시스템의 설계 절차

본 연구에서는 요구보유성능의 지표로 구조물의 설계시에 적용하는 반응수정계수( $R_{code}$ )를 이용하여 횡저항 시스템을 합리적으로 설계하는 방안을 제시하고자 한다. 그림 2는 합리적 설계절차를 간단하게 나타낸 것이다.

제안된 방법은 우선 구조시스템 결정, 작용하중(고정, 활, 지진, 풍하중 등) 계산, 재료 선택, 부재 설계, 그리고 최종적으로 사용성평가까지 모두 실시하는 기존의 기본 설계를 우선 마친다. 그 후에 푸쉬오버(pushover) 해석을 통해 구조물의 횡저항 성능곡선을 얻어내 이 곡선을 이선형화 한다. 이선형화를 마친 후에는 설계풍밀면전단력 ( $V_{wind}$ )과 설계지진밀면전단력 ( $V_D$ )의 크기를 비교한다.  $V_D$ 와  $V_{wind}$ 는 건물의 횡저항 시스템 설계의 가장 중요한 두 가지 요소로 일반적으로 높이가 그리 높지 않은 건물은  $V_D$ 가  $V_{wind}$ 보다 크다. 이러한 경우에는 그림 2에서 보는 바와 같이 바로  $R_{ac}$ 를 산정한다. 하지만 초고층 건물과 같은 경우는  $V_{wind}$ 가  $V_D$ 보다 커 거의  $V_E$ 의 크기와 비슷한 경우도 발생하기도 한다. 또한 이러한 경우 때로는 전체시스템의 소성분배 과정이 합리적으로 이루어지지 않고 특정층에 집중되어 부재에 소성 발생이 시작된 지 얼마 후에

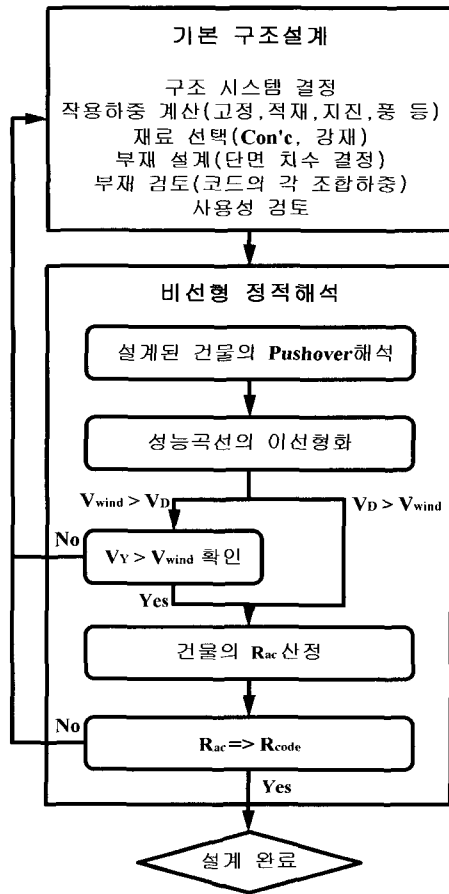


그림 2 합리적인 횡저항 시스템 설계절차

건물이 항복밀면전단력( $V_Y$ )에 도달하는 경우가 발생할 수 있기 때문에 이를 확인하기 위하여  $V_{wind}$ 와  $V_Y$ 를 비교하여  $V_{wind}$ 가  $V_Y$ 보다 작아 탄성구간에 있음을 우선 확인한 후에  $R_{ac}$ 를 산정한다. 그리고 산정된  $R_{ac}$ 의 값을  $R_{code}$ 와 비교하여  $R_{ac}$ 가  $R_{code}$ 에 근접하도록 기본 구조설계와 비선형 정적해석의 피드백(feedback) 과정을 반복한다.

### 3.2 유효보유성능( $R_{ac}$ ) 평가 방법

구조물이 보유한 유효보유성능은 강도계수( $R_S$ ), 연성계수( $R_\mu$ )로 표현할 수 있다.

$R_S$ 는 설계 대상건물에서 기대되는 최대 보유강도(항복 밀면전단력)와 설계강도(설계지진밀면전단력)의 비로 정의 되어진다. FEMA 302<sup>(7)</sup>(Provision)와 FEMA 303<sup>(8)</sup>(Commentary)에서는 건물의 초과강도를 연속적인 소성 힌지 메카니즘의 관점에서 접근하였다. 즉, 건물이 충분한 잉여력을 보유하고 있고 내력의 재분배가 발생하도록 적절히 설계되었을 경우에, 잉여력을 상실하기 직전의 밀면전단력(항복밀면전단력,  $V_Y$ )과 건물에 초기항복(first plastic hinge)이 발생하였을 때의 밀면 전단력( $V_S$ ) 비를 강도계수로 정의한다. 따라서 본 연구에서는 항복밀면전단력은 그대로 사용하나  $V_S$  대신 크기는 비슷하나 반응수정계수의 기본 정의에 사용되는  $V_D$ 를 사용하여 강도계수를 다음 식 (5)와 같이 정의하였다.

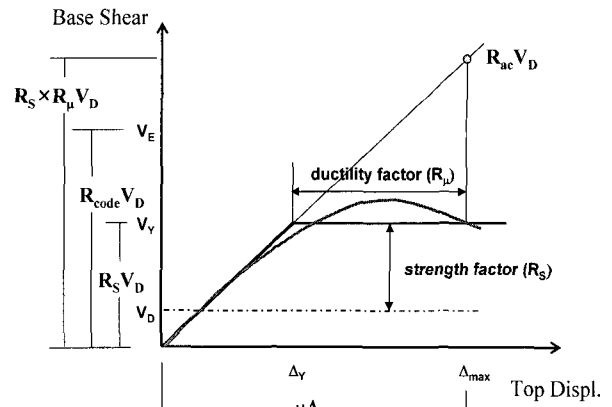


그림 3 유효보유성능( $R_{ac}$ )의 정의

$$R_S = \frac{V_Y}{V_D} \quad (5)$$

연성계수( $R_\mu$ )는 구조물이 비탄성 거동에 의해 탄성한계를 넘어서도 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 의미한다.  $R_\mu$ 에 대해 여러 가지 제안된 식이 있으나 본 논문에서는 Fajfar(2000)<sup>(9)</sup>가 N2 법에서 제안한 식 (6)을 사용하였다.

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \quad T < T_C \quad (6)$$

$$R_\mu = \mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_Y} \quad T \geq T_C$$

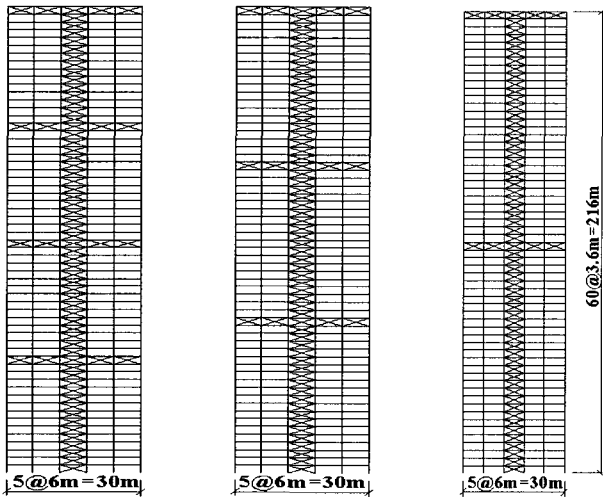
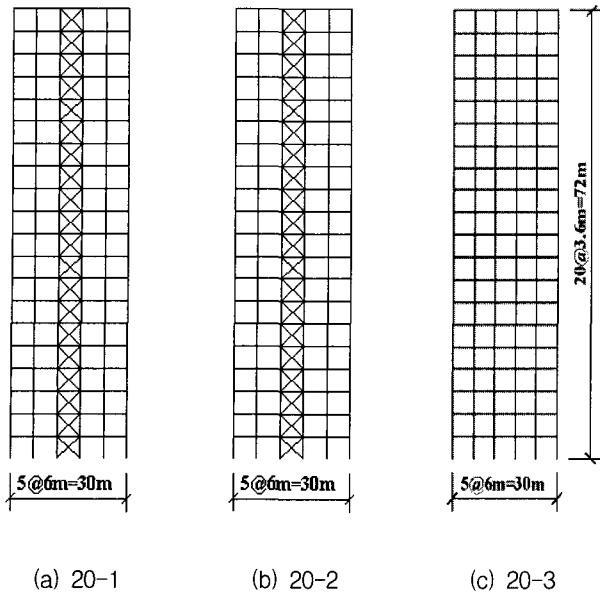
여기서,  $\mu$ 는 연성비로 두 번째의 식과 같고  $T_C$ 는 특성 주기로 건물의 설계에 사용된 설계응답스펙트럼의 가속도가 일정한 구간 중 가장 큰 값의 주기를 나타낸다. 그리고  $\Delta_Y$ 는 이선형화 곡선에서 항복변위이고,  $\Delta_{max}$ 은 최대변위로 본 논문에서는 특정 층에서 최대 층간변위비가 발생하였을 때의 최고층에서의 변위이다. 일반적으로  $R_\mu$ 는 그림 3에서 보는 바와 같이 등가 변형법을 적용할 경우  $\mu$ 와 같은 값을 갖게 된다.

이러한 개념에 의거하여 그림 3과 같이  $R_{ac}$ 를 정의하면 식 (7)과 같이 강도계수와 연성계수의 곱으로 설명할 수 있다.

$$R_{ac} = R_S \times R_\mu \quad (7)$$

### 4. 횡저항 시스템의 합리적인 설계

본 논문에서는 횡저항 시스템의 설계에 영향을 미치는 두 가지 횡하중인 지진하중과 풍하중에 대하여 비탄성 시에 절차를 나누고 있다. 건물의 폭이 같을 경우 높이가 높아질수록  $V_{wind}$ 가 임계횡하중이 되는 경우가 많다. 따라서  $V_D$ 가  $V_{wind}$ 보다 큰 경우와  $V_{wind}$ 가  $V_D$ 보다 큰 두 가지 경우에 대한 적용을 위하여 그림 4와 같이 20층과 60층 예제건물을 이용하여 합리적인 횡저항시스템의 설계를 적용하였다. 20층 예제는  $V_D$ 가  $V_{wind}$ 보다 큰 경우로 건물의 높이방향 수직가새가 설치되어있는 건물을 설계하중에 의



(a) 20-1 (b) 20-2 (c) 20-3  
(d) 60-1 (e) 60-2 (f) 60-3  
그림 4 예제건물의 층 가새 위치변화

해서 모든 부재의 초기 기본 설계를 하고 제시한 설계과정에 의해 비탄성 해석을 실시하였다. 제안된 절차에 따라 기본 구조설계를 실시하여 철근콘크리트 부재가 모든 설계 하중 조합에 의해 안전하므로 가새의 단면을 1/2로 감소를 시켜  $R_{ac}$ 를 감소시켰다. 그리고 최종적으로 가새를 모두 제거하고 순수한 철근콘크리트 골조만으로 저항하는 경우에 대하여  $R_{ac}$ 의 변화를 살펴보았다. 60층은  $V_{wind}$ 가  $V_D$ 보다 큰 경우로 15개 층마다 층 가새가 설치된 초기 건물을 설계과정에 적용하고 층 가새의 수를 한 개층씩 감소시키고 위치도 20층 그리고 30층마다 한 개층씩으로 설치하며 기본 구조설계단계로의 피드백(feedback) 과정을 반복하며  $R_{ac}$ 의 변화를 살펴보았다. 두 가지 예제에서 20층은 더 이상 단면을 감소시킬 수 없고, 60층은 층가새를 최상층에만 설치할 경우 사용성을 만족할 수 없어 피드백(feedback) 과정을 중단하였다.

예제건물의 명칭은 편의상 그림 4에서와 같이 20-1~3과 60-1~3으로 표기하였다.

#### 4.1 예제건물의 기본 구조설계

##### 4.1.1 예제건물의 기본사항

예제건물은 사무소 용도의 건물로 본 논문에서 제안한  $V_D$ 와  $V_{wind}$ 의 크기에 따른 절차의 차이를 위하여 기본 풍속을 30m/sec(20층), 40m/sec(60층)로 나누어 비교하였다. 20층 건물의 경우는 층가새는 설치하지 않고 수직가새만을 설치하였으며, 60층 건물은 층가새를 15개 층에 하나씩 설치하였다. 건물의 층고는 3.6m로 철근콘크리트 구조에 가새는 철골로 예제건물은 (주)마이더스IT에서 개발한 MIDAS Gen 6.3.5<sup>(10)</sup>를 이용하여 2차원 설계 및 해석을 수행하였다. 각 부재별로 보는 모멘트, 가동은 축력과 모멘트 그리고 가새는 축력에 대하여 힌지(hinge) 특성을 정의하였으며, 기본값이 back-bone 모델로 정의되어있는 힌지(hinge) 유형을 이선형 모델로 변화하였으며 변형 후 경화율은 1%를 적용하였다. 하중조건은 아래와 같은 따라 설계를 실시하였다.

표 1 예제건물의 설계정보

건물타입	부재	치수(mm)	위치(층)	사용재료			
20층	기둥	C1	750×750	1~3	$f_{ck}=30$		
		C2	900×900				
		C1	650×650	4~10			
		C2	800×800				
		C1	600×600	11~17		$f_{ck}=27$	
		C2	650×650				
	C1	450×450	18~20				
	C2	500×500					
	보	G1	400×550	1~10	$f_{ck}=30$		
		G1A	400×600				
		G1	400×550	1~20		$f_{ck}=27$	
		G1A	400×600				
	트러스	B-200×200×4.5		SS400			
	60층	기둥	C1	1700×1700	1~3		$f_{ck}=40$
C2			1550×1550				
C1			1650×1650	4~10			
C2			1450×1450				
C1			1500×1500	11~20	$f_{ck}=30$		
C2			1300×1300				
C1			1450×1450	21~29			
C2			1200×1200				
C1			1200×1200	30~35			
C2			1050×1050				
C1			1000×1000	36~40		$f_{ck}=27$	
C2			900×900				
C1		950×950	41~46				
C2		850×850					
C1		800×800	47~52				
C2		700×700					
C1		600×600	53~60				
C2		500×500					
보		G1	700×900	1~20	$f_{ck}=40$		
		G1A		21~40	$f_{ck}=30$		
		G1					
		G1A		41~60	$f_{ck}=27$		
	G1						
트러스	B-500×500×12		SS400				

표 2 사용성 검토결과

	풍하중		지진하중		
	제한치 (mm)	최상층 변위(mm)	제한치 (mm)	최대층간 변위(mm)	층간 변위비(%)
20-1	144 (h/500)	38.67	54mm (1.5%)	30.25	0.840
20-2		44.17		34.91	0.970
20-3		63.01		51.42	1.428
60-1	432 (h/500)	412.17		52.13	1.448
60-2		420.85		53.23	1.479
60-3		429.40		53.61	1.489

① 고정하중

지붕 슬래브  $6.00 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$

일반층 슬래브  $5.00 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$

② 활하중

지붕  $2.00 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$

사무실(일반층)  $2.50 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$

③ 지진하중

내진등급 : 특

Site Class : S<sub>B</sub>

S<sub>DS</sub> : 0.36575

S<sub>D1</sub> : 0.1463

중요도 계수 : 1.5

반응수정계수(R<sub>code</sub>) : 5

④ 풍하중

설계 기본 풍속 : 30m/sec(20층), 40m/sec(60층)

중요도 계수 : 1.1

노풍도 : A

가스트 계수 : 2.5

② 지진하중에 대한 검토

지진하중에 대해서는 탄성밀면전단력( $V_E$ )에 의해 사용성 검토를 실시한다.  $V_E$  수준의 하중에 대해서 어떤 층에서도 최대 층간변위비(Interstory Drift Ratio, IDR)가 1.5%를 넘지 않아야한다. 그 결과는 표 2와 같다.

4.2 비선형 정적해석

4.2.1 모달 푸쉬오버(pushover) 해석을 위한 횡하중 분배계수 산정

우선 횡하중 분배계수를 산정하기 위한 코드 스펙트럼은 설계 시에 사용한, 다음 식(7)~(9)를 이용하여 작성된 KBC 2005의 설계응답 스펙트럼(그림 5)을 사용하였다.

$$S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \quad T \leq T_0 \quad (7)$$

$$S_a = S_{DS} \quad T_0 < T \leq T_s \quad (8)$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad T_s < T \quad (9)$$

여기서,  $S_{DS}$  : 단주기에서의 설계스펙트럼 응답가속도

$S_{D1}$  : 1초에서의 설계스펙트럼 응답가속도

$T$  : 구조물의 고유주기

$$T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS} \quad T_s = S_{D1} / S_{DS}$$

고차모드의 영향이 반영된 푸쉬오버(pushover) 해석을 위한 횡하중 분배계수의 산정을 위해 우선 예제건물들의 고유치해석을 통하여 주기( $T$ )와 형상함수( $\psi$ )를 얻어내었다. 주기와 형상함수는 20층과 60층 예제건물에서 모드참여율의 합이 95%까지, 20층 예제에서는 3차 모드, 60층 예제에서는 6차 모드까지를 산출하여 조합하였다. 그리고 얻어진 이 값들에 의해 횡하중 분배계수를 산정하는 순서에 따라 예제건물들의 횡하중 분배계수를 산정하였다.

그림 6은 초기 설계 예제건물인 20-1과 60-1의 횡하중 분배계수이다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 사용하고 있는 1차 모드의 형상과 같이 고차모드의 영향이 반영되지 않은 횡하중 분배계수의 형상과는 차이가 많음을 알 수 있다.

4.1.2 사용성 검토

① 풍하중에 대한 검토

풍하중에 대한 사용성의 검토는 계산된 설계풍하중에 의하여 건물 최상층의 변위가 h/500이내가 되도록 한다. 따라서 검토 결과 표 2와 같은 값을 얻을 수 있다.

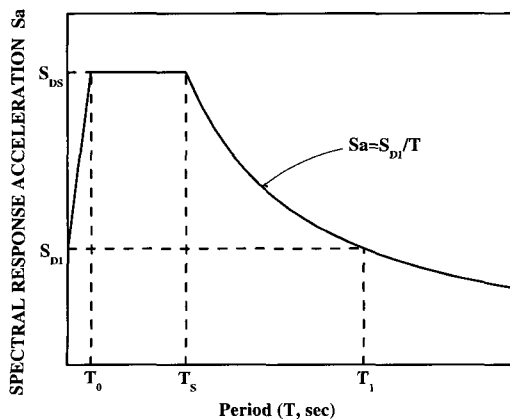
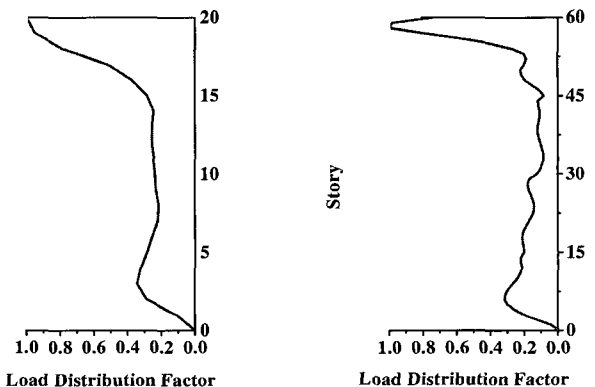


그림 5 KBC 2005 설계응답 스펙트럼



(a) 20-1 횡하중 분배계수 (b) 60-1 횡하중 분배계수  
그림 6 초기 예제건물의 횡하중 분배계수

4.2.2 성능곡선 이선형화 및  $V_{wind}$ 와  $V_D$  비교

각 예제건물의 푸쉬오버(pushover) 해석을 실시하여 성능곡선을 얻은 다음 이선형화를 실시하였다. 이선형화를 실시함에 있어 가장 중요한 요소는 이선형화 곡선의 기울기와  $V_Y$ 의 결정이다. 본 연구에서는 우선 이선형화 곡선의 기울기를 결정하기 위하여 원점과 설계 시에 지진하중에 의한  $V_D$ 를 연결하여 초기 기울기를 우선 결정하였다. 그리고  $V_Y$ 는 성능곡선과 탄성-완전소성 그래프와의 등가 면적법에 의하여 결정하였다. FEMA 273에서는 철근콘크리트 기둥의 최대 회전능력을 3%로 정의하고 있다. 따라서 본 논문에서는 철근콘크리트구조의 최대 층간변형능력을 3%로 정의하고 임의의 층에서 층간변위비가 3%가 발생한 시점까지를  $\Delta_{max}$ 으로 보고 이때의 성능곡선을 이선형화에 사용하였다.

본 논문에서는  $V_{wind}$ 와  $V_D$ 의 크기에 따라 20층과 60층 예제건물을 선택하여 제안한 횡저항시스템의 설계에 적용하였다. 먼저 20층 예제건물은 세 가지 예제건물이 모두  $V_D$ 는  $1.09 \times 10^6 N$ 이고,  $V_{wind}$ 는  $0.58 \times 10^6 N$ 으로  $V_D > V_{wind}$ 인 경우이다. 그리고 60층 예제건물에서 60-1의  $V_D$ 는  $4.90 \times 10^6 N$ , 60-2와 60-3의  $V_D$ 는  $4.89 \times 10^6 N$ 이고  $V_{wind}$ 는  $6.35 \times 10^6 N$ 으로  $V_D < V_{wind}$ 인 경우이다. 따라서 60층 건물의 경우 모든 예제건물에 대하여  $R_{ac}$ 를 산정하기에 앞서  $V_Y > V_{wind}$ 임을 확인하면 표 3에서 보는 바와 같이 모든 60층 예제건물이 이를 만족한다.

각각의 예제건물에 대한 성능곡선과 이선형화 곡선은 그림 7과 같다. 본 논문에서 사용한 성능곡선의 이선형화를 위한  $V_D$ 는 예제건물의 설계 지진하중으로 각 예제건물

표 3 예제건물의  $R_{ac}$  산정결과

	20층		
	20-1	20-2	20-3
$V_D (\times 10^6 N)$	1.09	1.09	1.09
$V_{wind} (\times 10^6 N)$	0.58		
$V_Y (\times 10^6 N)$	2.90	1.97	1.44
$R_S$	2.66	1.81	1.32
$\Delta_Y (\times 103mm)$	0.244	0.204	0.200
$\Delta_{max} (\times 103mm)$	1.348	1.424	1.616
$R_{\mu}$	5.52	6.98	8.08
$R_{ac}$	14.68	12.63	10.67
$R_{code}$	5.0		
	60층		
	60-1	60-2	60-3
$V_D (\times 10^6 N)$	4.90	4.89	4.89
$V_{wind} (\times 10^6 N)$	6.35		
$V_Y (\times 10^6 N)$	19.96	18.16	16.40
$R_S$	4.07	3.71	3.35
$\Delta_Y (\times 103mm)$	1.540	1.440	1.330
$\Delta_{max} (\times 103mm)$	4.620	4.450	4.360
$R_{\mu}$	3.00	3.09	3.28
$R_{ac}$	12.21	11.46	10.99
$R_{code}$	5.0		

의 중량이 크게 변화하지 않으므로 큰 차이를 나타내지 않았다.

4.2.3 예제건물의 유효보유성능 산정

우선 20층 예제건물의 비선형 해석 결과를 살펴보면, 20-1 예제건물에서는  $R_S$ 가 2.66,  $R_{\mu}$ 가 5.52로  $R_{ac}$ 의 값은

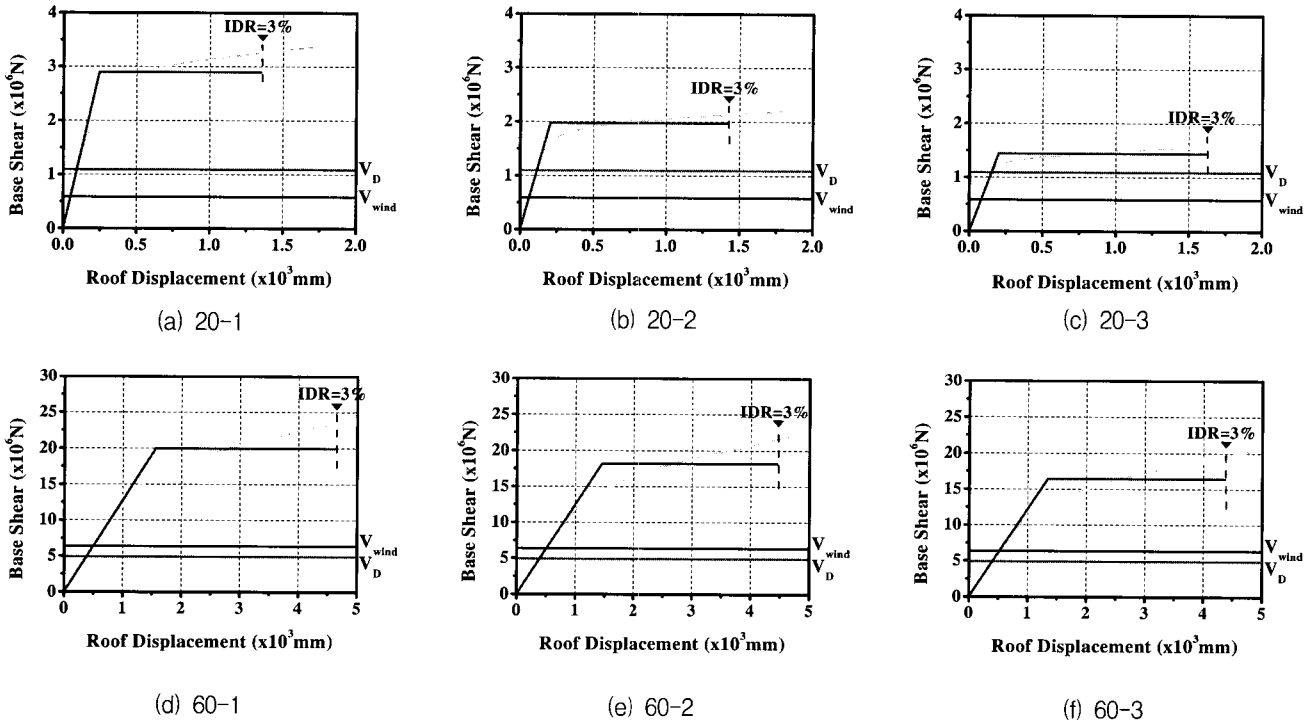


그림 7 예제 건물의 성능곡선

14.68을 나타내었다. 따라서 이 값을  $R_{code}$ 에 근접시키기 위하여 20-1 예제건물에 설치되어있는 수직 가새의 단면을 1/2로 감소시켰다. 이때에 가새를 제외한 나머지 구조부재는 설계하중에 대하여 안전함을 확인하였고 사용성 평가까지 모두 마친 후 다시 비선형 해석을 수행하였다. 그 결과 앞에서 언급한 바와 같이  $V_D$ 는 거의 차이가 없으나  $V_Y$ 가 20-1보다 30%정도 감소하여  $R_S$ 는 1.81로 감소하였다. 또한  $R_\mu$ 를 결정하기 위한  $\Delta_Y$ 는 20-1의 값보다 작은 값을 나타내었으나  $\Delta_{max}$ 은 20-1보다 증가하여  $R_\mu$ 의 값은 6.98로 20-1보다 증가하였다. 하지만 20-2의  $R_{ac}$ 는  $R_\mu$ 의 증가폭에 비해  $R_S$ 의 감소폭이 커서 12.63으로 20-1의 14.68보다는 감소하였다. 다시 20-2의  $R_{ac}$ 를 감소시키기 위하여 건물의 중앙에 설치되어있는 수직가새를 모두 제거하였다. 그리고 기본 구조설계과정을 모두 마친 뒤 20-3의  $R_{ac}$ 를 산정하기 위한 비선형 해석을 수행한 결과 20-1에서 20-2로 변화했을 때의 모든 계수에서 나타난 현상과 같았다.  $R_S$ 는 20-2에서와 마찬가지로 20-3에서도 30%정도 감소된 1.32를 나타내었고,  $R_\mu$ 도 20-2에 비해  $\Delta_Y$ 는 약간 감소하고  $\Delta_{max}$ 은 증가하여 8.08로 15%정도 증가하였다. 하지만 20-2에서와 마찬가지로  $R_\mu$ 의 증가폭에 비해  $R_S$ 의 감소폭이 커서  $R_{ac}$ 는 20-2보다 감소한 10.67로 계산되었다.

60-1 예제건물에서는 20층에서와는 달리 횡변위에 대한 사용성 평가를 만족시키기 위하여 2개 경간에 걸쳐 수직 가새를 설치하였고, 15개 층에 하나씩 층가새를 설치하였다. 60층 예제건물의 비선형 해석 결과를 살펴보면, 60-1에서는  $R_S$ 가 4.07,  $R_\mu$ 가 3.00으로  $R_{ac}$ 의 값은 12.21을 나타내었다. 따라서 이 값을  $R_{code}$ 에 근접시키기 위하여 60-1의 예제건물에 설치되어있는 층 가새를 하나 제거하고 그 위치도 20개 층에 하나씩으로 변화하였다. 그 결과  $V_Y$ 가 60-1보다 감소된  $18.16 \times 10^6 \text{N}$ 으로 나타나  $R_S$ 는 3.71로 감소하였다.  $R_\mu$ 를 결정하기 위한  $\Delta_Y$ 와  $\Delta_{max}$ 는 20층 예제에서와는 달리 두 계수가 모두 감소하였다. 하지만  $\Delta_{max}$ 의 감소에 비해  $\Delta_Y$ 의 감소폭이 커서  $R_\mu$ 는 3.09로 60-1에 비해 약간 증가하였다. 따라서 60-2의  $R_{ac}$ 는 20층 예제건물에서와 마찬가지로  $R_\mu$ 의 증가폭에 비해  $R_S$ 의 감소폭이 커서 11.46으로 60-1보다 감소하였다. 다시 60-2의  $R_{ac}$ 를 감소시키기 위하여 층 가새를 하나 더 제거하고 위치도 30개 층에 하나씩으로 변화하였다. 따라서 모든 계수가 60-1에서 60-2로 변화했을 때의 현상과 같은 현상을 나타내면서 60-3의  $R_{ac}$ 의 값도 10.98로 감소하였다.

20층 예제에서는 수직가새의 변화에 의해서 본 논문에서 제시한 합리적인 설계과정을 적용하였다. 그 결과 예제건물의 변화에 따라 시스템의 연성은 증가하였으나, 초과강도와 강성은 점차 감소하며  $R_{ac}$ 의 값이  $R_{code}$ 에 점차 근접하였다. 60층 예제에서는 층가새를 한 개층씩 제거하고 그 위치도 건물 높이에 균등분배가 되도록 변화하며 합리적인 설계과정을 적용하였다. 그 결과 시스템의 강성과 연

성은 초과강도의 변화에 비해 크게 변화하지 않지만 초과강도의 감소에 의해서 시스템의  $R_{ac}$ 의 값이 점차 감소하며  $R_{code}$ 에 근접하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 구조물의 비선형 해석에 의해 횡저항 시스템을 합리적으로 설계하는 방법을 제시하고자 하였으며, 예제건물을 통해  $V_D$ 가  $V_{wind}$ 보다 큰 경우와  $V_{wind}$ 가  $V_D$ 보다 큰 경우에 대하여 본 논문에서 제시한 방법을 적용해보았다.

20층 예제건물의 경우는 설치된 가새의 변화에 따라 시스템의 연성은 증가하였으나 강성과 강도가 감소하면서  $R_{ac}$ 의 값이 점차  $R_{code}$ 에 근접하였다. 그리고 60층의 경우도 시스템의 강성과 연성은 크게 변화하지 않았으나 초과강도가 감소하면서  $R_{ac}$ 의 값을 점차  $R_{code}$ 에 가깝도록 감소시킬 수 있었다.

본 논문에서 제안한 합리적인 횡저항 시스템의 설계 방법을 이용할 경우 구조물이 실제 보유한 횡저항 성능의 산정에 의하여 적절한 횡저항 시스템의 도출이 가능할 것이다. 또한 현재는 건물이 대형화, 고층화 되어가므로 부재설계에 제안한 방법을 적용할 경우 적합한 구조물량의 산출도 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 "2005년도 교육인적자원부 지방연구중심대학 육성사업"과 "삼성물산(주)에서 출연한 성능에 기초한 내진 해석/설계 Procedure 정립 및 비탄성 해석 프로그램 개발"에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1*, ATC 40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. FEMA, *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
3. Chopra, AK and Goel, R, "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation", *PEER 2001/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 2001.
4. 이동근, 최원호, 안지희, "건축구조물의 비선형 지진 응답 평가를 위한 개선된 지진하중 분배방법", 한국지진 공학회 논문집, 제5권, 제2호, 2001년 4월, pp. 33-47.

5. 김건우, 송진규, “고차모드 영향이 반영된 Pushover 해석을 위한 횡하중 분배계수 제안”, 한국지진공학회 춘계학술발표대회 논문집, Vol. 9, No. 1, 2005년 3월, pp. 236-242.
6. 대한건축학회, “건설교통부 고시 건축구조설계기준”, 대한건축학회, 2005.
7. FEMA, *NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures(Part 1 Provision)*, FEMA 302, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
8. FEMA, *NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures(Part 2 Commentary)*, FEMA 303, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
9. Peter Fajfar, “A nonlinear analysis method for performance-based seismic design,” *M.EERI*, 2000, pp. 573-592.
10. MIDAS/Gen, *General structure design system-MIDAS/Gem Ver. 6.3.5 Program*, MIDAS Information Technology Co., LTD., 2004.
11. ATC, *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design*, ATC 34, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
12. Elnashai, A. S. and Mwafy, A. M., “Overstrength and force reduction factors of multi-storey reinforced-concrete buildings,” *Sturct. Design Tall Build*, 11, 2002, pp. 329-351.