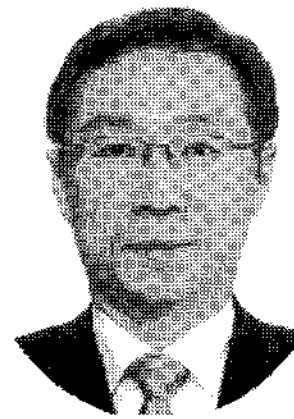
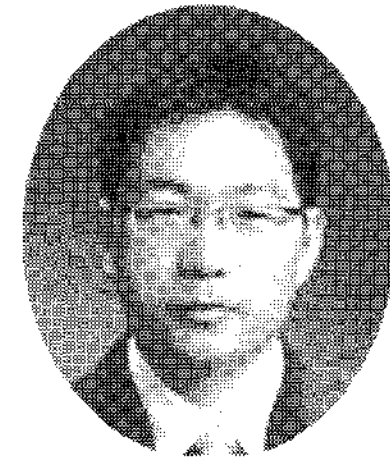


# 재분배 기법을 이용한 실용적인 초고층 건물 변위 조절 설계 기법

Practical Drift Design Technique for High-rise Buildings Using Resizing Algorithm



조한욱\*  
Cho, Han-Wook



서지현\*\*  
Seo, Ji-Hyun

## 1. 서론

최근, 구조물이 대형화, 고층화되면서 중·저층에서는 중요하게 여겨지지 않았던 사용성과 관련된 문제들이 구조물 설계의 중요한 설계 변수가 되고 있다. 초고층 건물 구조설계에서는 횡 하중에 의한 최상층 변위 제어, 층간 변위 제어, 풍 응답 가속도 제어와 같은 강성 설계 요소가 구조 설계를 결정짓는 지배적인 요소가 되고 있다. 특히, 최상층 변위 제어, 층간 변위 제어는 초고층 건물의 구조시스템과 구조물량을 결정짓는 결정적인 요소이다. 하지만, 아직까지 실용적으로 사용할 수 있는 초고층 건물 변위 설계법이 개발되어 있지 못하므로 초고층 건물의 변위 설계는 설계자의 경험과 직관에 의존하고 있는 실정이다. 초고층 건물의 변위를 합리적으로 제어하기 위해 구조 최적화 기법이 도입되고 있으나, 대부분의 구조 최적화 기법이 민감도 해석이나 반복적인 구조해석으로 인한 과도한 계산량의 요구로 인해 실무 적용에는 많은 어려움이 있다. 그러므로 현 실무

에서 사용 가능한 실용적인 초고층 건물 변위 설계 기술의 개발이 요구된다. 이에 본 기사에서는 초고층 건물의 변위 설계에 적용할 수 있는 실용적인 초고층 건물 변위 설계 방법으로서 재분배 기법을 소개하고자 한다.

## 2. 재분배 기법(Resizing Algorithm)

### 2.1 변위기여도(Displacement Participation Factors)

일반적으로 고층건물의 구조설계에서 강도기준 보다는 변위와 같은 강성 기준에 의해 물량이 결정되는데, 이 경우 구조설계자는 대상 변위를 조절하는데 가장 민감한 부재를 경험에 의존해 선택하고, 선택된 부재의 단면 성능을 변경하고 구조해석을 하는 반복적인 방법으로 변위를 조절하게 된다. 하지만, 초고층 건물의 규모와 부재 수를 고려할 때 설계자의 경험과 직관에 의존해서 변위에 가장 민감한 부재를 선택하는 것은 불가능하므로, 재분배기법에서는 단위 하중법을 이용하여 제어하고 하는 변위에 대한 각 부재의 변위 기여도(Displacement Participation Factors)를 정량

\* (주)정회원 · GS 건설 건축사업본부 상무

\*\* (주)GS 건설 기술연구소 선임연구원

적으로 계산한다. 변위기여도는 변위를 조절하고자 하는 절점에 가해진 단위하중에 의한 부재력과 실제 하중에 의한 부재력 및 부재 단면 성능을 이용하여 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \sum_{i=1}^k \delta_i = \sum_{i=1}^k (\delta_i^n + \delta_i^m + \delta_i^v + \delta_i^t) \\ &= \sum_{i=1}^k \left\{ \int_0^l \frac{N_i^L N_i^U}{E_i A_i} dx + \int_0^l \frac{M_i^L M_i^U}{E_i I_i} dx \right. \\ &\quad \left. + \alpha \int_0^l \frac{V_i^L V_i^U}{G_i A_i} dx + \int_0^l \frac{T_i^L T_i^U}{G_i I_\pi} dx \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\delta, \delta_i$  는 각각 제어하고자 변위와  $i$ 번째 부재의 변위기여도를 나타내며,  $\delta_i^n, \delta_i^m, \delta_i^v, \delta_i^t$  은 각각  $i$ 번째 부재의 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림에 의한 부재 변위기여도를 나타낸다.  $N, M, V, T$ 는 각각 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림을 나타내며, 상첨자  $L$ 과  $U$ 는 각각 실제하중과 단위하중을 나타낸다.  $A_i, I_i, I_\pi$ 는 각각  $i$ 번째 부재의 단면적, 단면 2차 모멘트, 극 단면 2차 모멘트를 나타내며,  $E_i, G_i, \alpha$ 는 각각  $i$ 번째 부재의 탄성계수, 전단 탄성계수, 형상계수를 나타내며,  $k$ 는 전체 부재수를 나타낸다.

## 2.2 구조 정식화(Structural formulation)

변위기여도가 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 정량적인 기여도를 나타내지만, 재분배 기법 적용시 변위를 최소화시키기 위해서 각 부재의 물량 분배량을 결정하기 위한 수학적 모델이 필요하며 이를 구조정식화라 한다. 재분배 기법에서는 적용성과 효율성을 높이기 위한 여러 가지 구조 정식화가 있으나, 본 기사에서는 가장 기본적인 구조 정식화에 대해서 소개하고자 한다.

구조 정식화에서 목적함수는 조절하고자 하는 변위를 최소화하는 것으로 하며, 부재 변위기여도는 부재 물량에 반비례하는 것으로 식(2)와 같이 표현된다. 제약함수는 재분배 전·후의 전체의 구조 물량이 동일한 것으로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } \delta = \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\beta_i} \quad (2)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i = \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i \quad (3)$$

여기서,  $\delta$ 는 제어하고자 하는 변위를 나타내며,  $\delta_i, \beta_i$ 는  $i$ 번째 부재의 변위기여도와 물량 수정계수를 나타낸다.  $\rho_i, A_i, L_i$ 는 각각  $i$ 번째 부재의 비중, 단면적, 길이를 나타내며  $m$ 은 부재수를 나타낸다. 식(2), 식(3)과 같은 제약 최적화 문제는 라그랑지 승수(Lagrangian multiplier)를 이용하여 식(4)와 같은 무제약 최소화 문제로 변환된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \delta_t &= \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\beta_i} + \lambda_L \left( \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i \right) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)로 표현된 가목적 함수( $\delta_t$ )가 최적 해를 갖기 위한 필요조건으로  $\beta_i, \lambda_L$ 에 대하여 미분하여 각 식을 영(zero)으로 두면 식(5), 식(6)과 같이 표현되며, 이를 정리하면 식(7)과 같은 물량 수정계수( $\beta_i$ )를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \delta_t}{\partial \beta_i} = -\frac{\delta_i}{\beta_i^2} + \lambda_L \rho_i A_i L_i = 0 \quad i = 1, m \quad (5)$$

$$\frac{\partial \delta_t}{\partial \lambda_L} = \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i - \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i = 0 \quad (6)$$

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\delta_i}{\rho_i A_i L_i} \frac{\sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\delta_i \rho_i A_i L_i}}} \quad i = 1, m \quad (7)$$

식(7)에서 얻어진 물량 수정계수를 현재의 물량에 곱하여 전체 구조물량의 변화없이 물량을 재분배(Resizing) 하게 된다.

## 2.3 재분배 기법의 순서도

재분배 기법은 에너지 이론에 근거하여 제어하고자 하는 지점(일반적으로 구조물 최상층)의 변위에 대한 각 부재의 기여도를 정량적으로 계산하고 이를 이용하여 반복이 필요치 않는 최적화 기법을 이

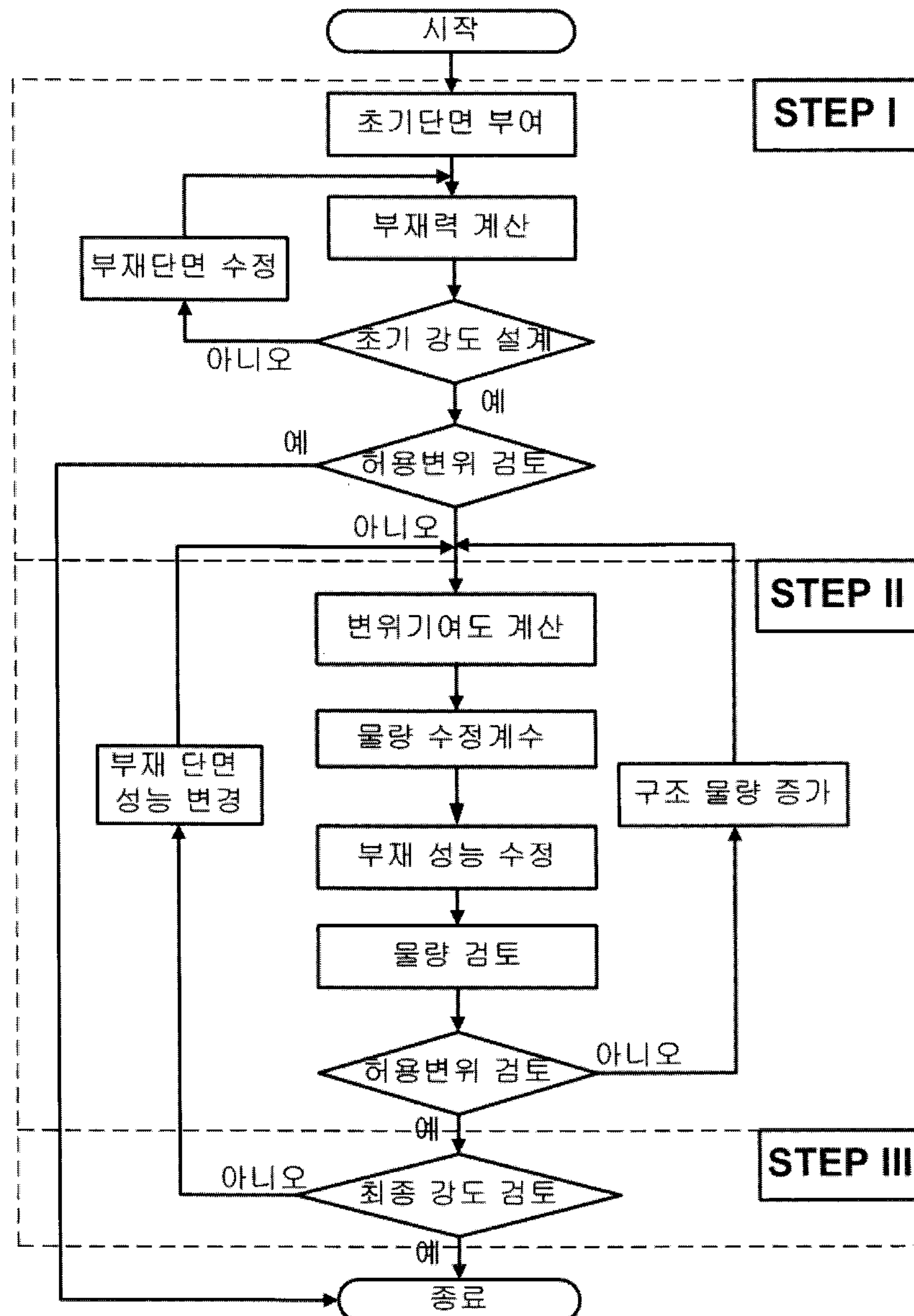
용하여 전체 물량의 변화없이 물량을 분배하여 변위를 조절하는 방법으로서 <그림 1>과 같이 크게 세 단계로 구성되어 있다.

- (1) STEP 1: 초기 강도 설계를 수행하는 단계로서 대부분의 초고층 건물은 높이가 증가함에 따라 강도 설계보다는 변위와 같은 강성설계를 위해 요구되는 물량이 훨씬 더 많기 때문에 먼저 강도설계를 수행한다.
- (2) STEP 2: 구조해석에서 얻어진 부재력과 부재 성능을 이용하여 변위기여도를 예측하고 재분배 기법을 통해 물량을 분배함으로써 변위

를 제어한다. 재분배 기법은 초기 물량을 유지한 채 부재 물량을 재분배하게 되나, 물량을 재분배 한 후에도 허용 변위를 만족시키지 못하면 전체 구조물량을 증가시켜서 변위를 조절한다.

- (3) STEP 3: 물량 재분배 과정에서 강도 조건을 위배하는 부재가 발생할 수 있으므로 변위가 제어된 구조물을 대상으로 강도 설계를 수행한다.

이상과 같은 과정을 통해 재분배 기법을 이용한 변위 설계법에서는 변위 설계와 강도 설계를 동시



<그림 1> 재분배 기법을 이용한 변위 설계법의 순서도

에 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

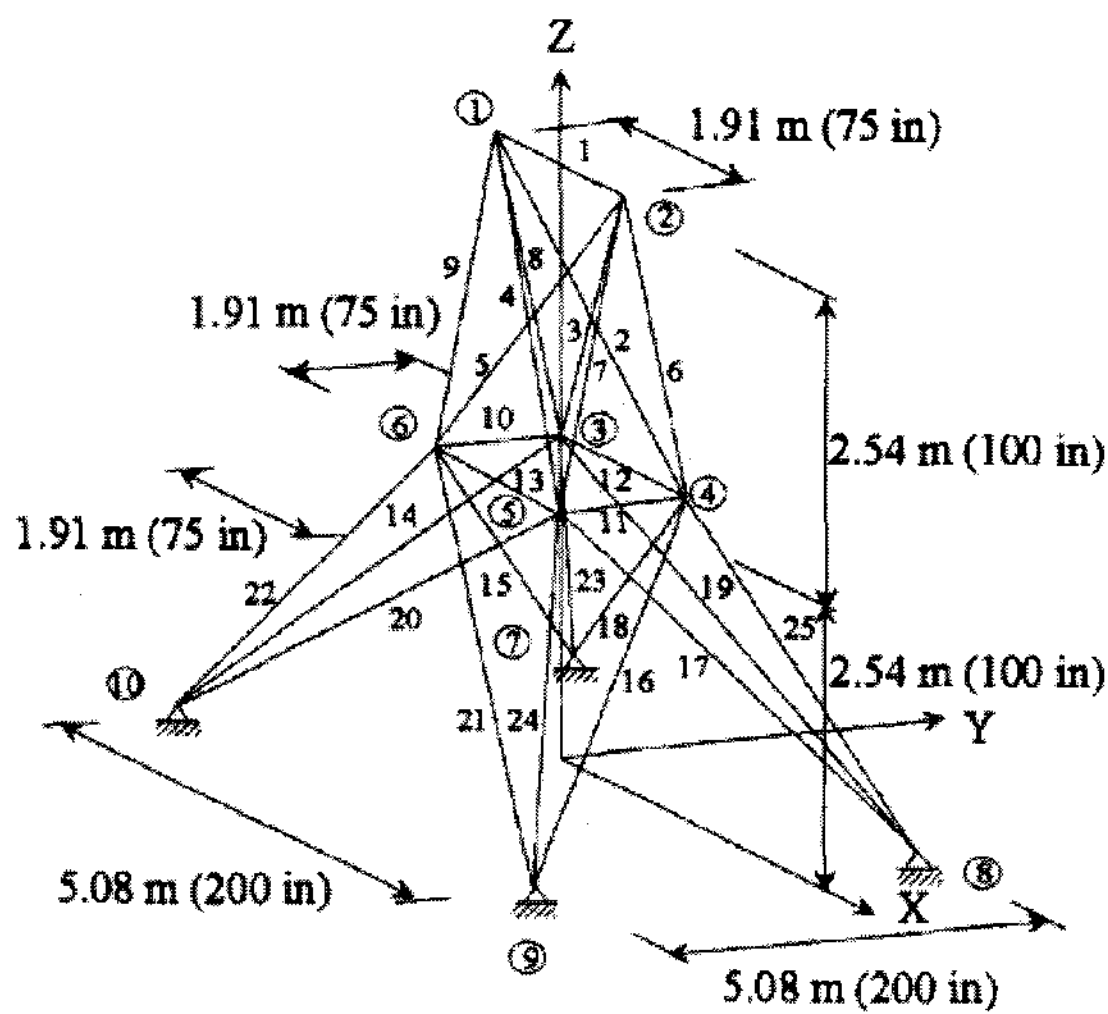
### 3. 25 부재 트러스 예제

#### 3.1 예제 소개

25 부재 트러스 예제는 최적화 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 널리 사용되는 예제로서 형상은 <그림 2>와 같으며 하중은 <표 1>과 같다. 이 예제의 모든 부재의 단면적은  $1.0 \text{ in}^2$  이며 강재의 탄성계수  $E=10000 \text{ ksi}$ , 단위중량은  $0.1 \text{ lb/in}^3$ 이다.

<표 1> 25 부재 트러스의 하중

하중 종류	절점	하중(kips)		
		X 방향	Y 방향	Z 방향
실제하중	1	1.0	10.0	-5.0
	2	0.0	10.0	-5.0
	3	0.5	0.0	0.0
	6	0.5	0.0	0.0
단위하중	2	1.0	0.0	0.0



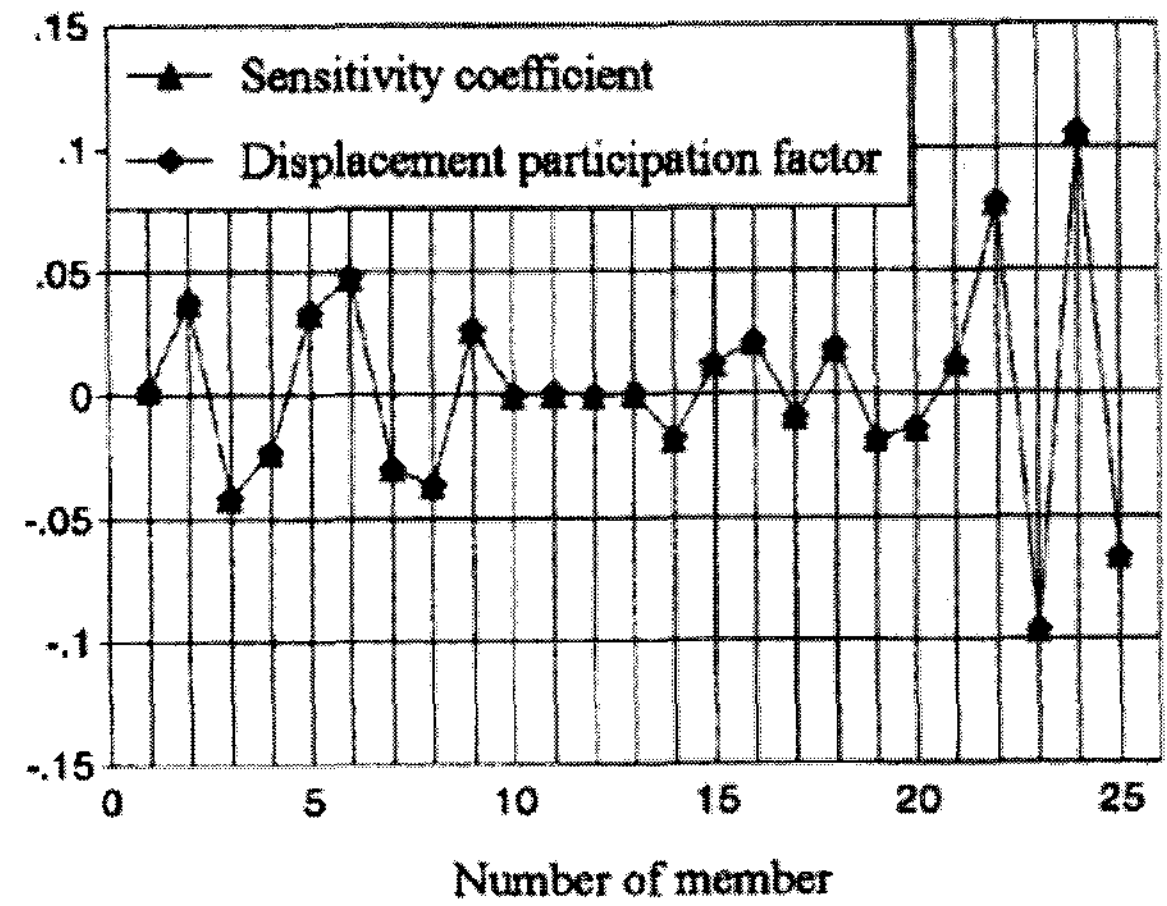
<그림 2> 25 부재 트러스 형상

### 3.2 적용 결과

#### 3.2.1 민감한 부재 선택 기법

<그림 3>은 초기 모델을 대상으로 민감도해석과 단위하중법을 이용하여 구한 민감도 계수와 변위기여도를 나타내는 것으로서 민감도 계수와 변위기여도가 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 간단한 계산을

통해 얻어진 변위기여도가 충분한 신뢰성을 가짐을 알 수 있다. 변위기여도와 민감도 계수를 통해 24번 부재가 가장 변위에 민감한 부재(Active member)이므로 24번 부재의 물량을 증가시키는 것이 변위를 제어하는데 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다.

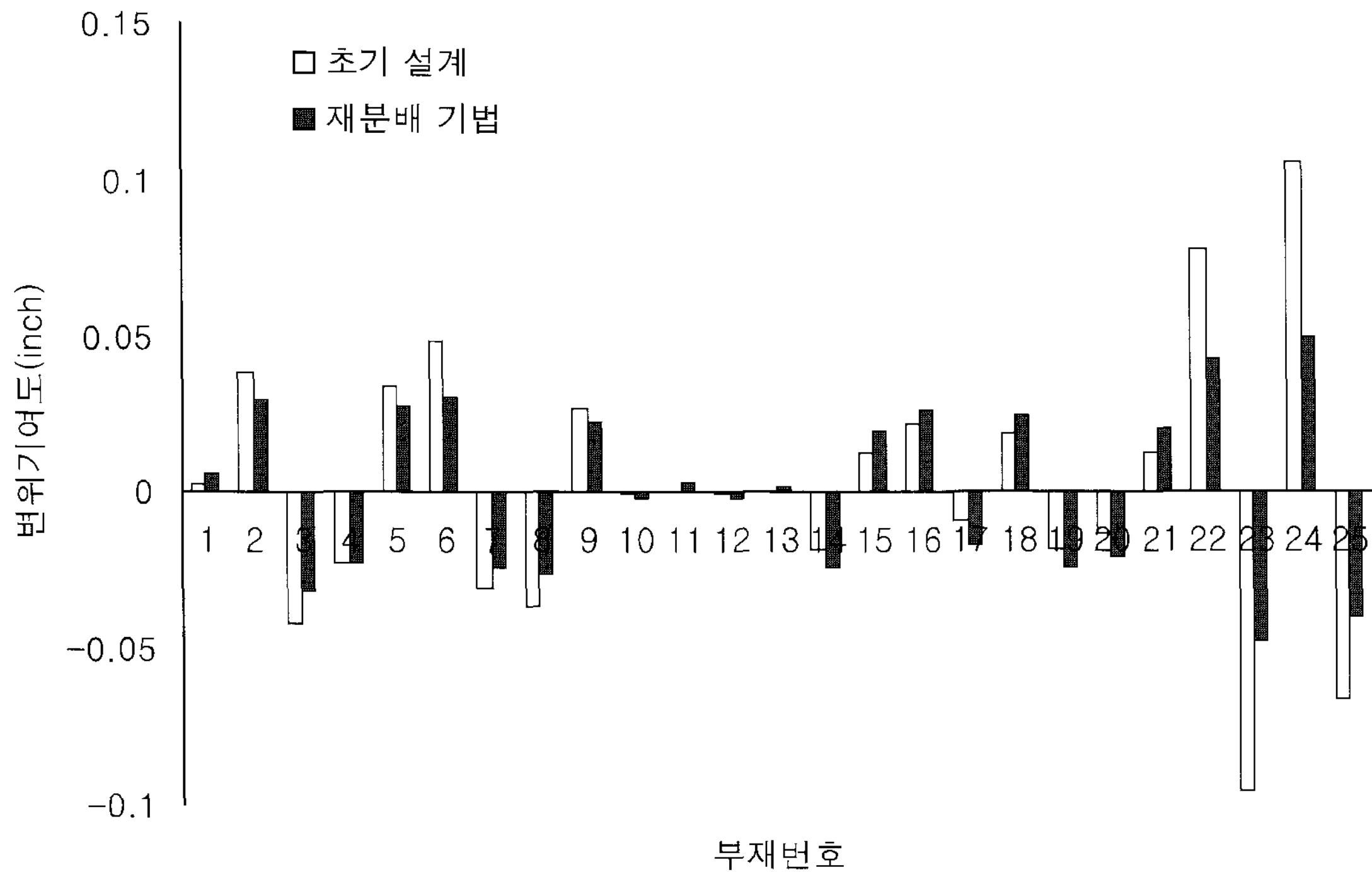


<그림 3> 25 부재 트러스의 민감도 계수와 변위 기여도

#### 3.2.2 변위 제어 성능

<표 3>은 25 부재 트러스 예제에 재분배 기법을 적용한 결과를 정리한 것이다. 제어하고자 하는 지점의 변위는 부재들의 변위기여도를 모두 합한 것으로서 초기 해석에서 변위는  $0.0458 \text{ inch}$  이다. 이를 (식 1)~(식 7)의 과정을 통해서 얻어진 물량 수정계수를 이용하여 전체 구조 물량의 변화 없이 각 부재의 물량을 재분배하면, 물량 분배후의 변위는  $0.0233 \text{ inch}$ 로서 초기 변위의 51% 수준으로 감소한다. 물량분배에 따른 부재 강성 변화의 영향을 고려된 정확한 변위를 예측하기 위해 재분배 기법으로 얻어진 부재 성능을 이용하여 구조 재해석을 수행하였다. 구조 재해석을 통해 얻은 변위는  $0.01967 \text{ inch}$ 로서 초기 변위의 43% 수준으로 감소한다. 결과적으로, 이 예제에 재분배 기법을 적용한 결과, 전체 구조물량의 변화없이 변위를 초기의 43% 수준으로 감소시킬 수 있었다.

이와 같이 재분배 기법을 이용하면 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 기여도를 정량적으로 계산할 수 있으며, 간단한 계산만으로 전체 구조물량의 변화없이 물량을 분배하여 구조물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있다.



〈그림 4〉 25 부재 트러스의 민감도 계수와 변위 기여도

〈표 3〉 25 부재 트러스 예제의 적용 결과

부재 번호	초기		재분배후	
	단면적(in <sup>2</sup> )	변위기여도	단면적(in <sup>2</sup> )	변위기여도
1	1.0000	0.0025	0.4334	0.0058
2	1.0000	0.0382	1.2860	0.0297
3	1.0000	-0.0417	1.3429	-0.0310
4	1.0000	-0.0228	0.9933	-0.0229
5	1.0000	0.0336	1.2053	0.0278
6	1.0000	0.0482	1.5962	0.0302
7	1.0000	-0.0302	1.2636	-0.0239
8	1.0000	-0.0366	1.3920	-0.0263
9	1.0000	0.0269	1.1928	0.0226
10	1.0000	-0.0002	0.1275	-0.0017
11	1.0000	0.0006	0.2190	0.0029
12	1.0000	-0.0002	0.1343	-0.0018
13	1.0000	0.0003	0.1387	0.0018
14	1.0000	-0.0183	0.7561	-0.0242
15	1.0000	0.0123	0.6185	0.0198
16	1.0000	0.0216	0.8201	0.0263
17	1.0000	-0.0088	0.5246	-0.0168
18	1.0000	0.0189	0.7683	0.0246
19	1.0000	-0.0184	0.7573	-0.0243
20	1.0000	-0.0135	0.6499	-0.0208
21	1.0000	0.0125	0.6237	0.0200
22	1.0000	0.0777	1.8130	0.0428
23	1.0000	-0.0959	2.0146	-0.0476
24	1.0000	0.1058	2.1165	0.0500
25	1.0000	-0.0664	1.6767	-0.0396
합	-	0.0458	-	0.0233

#### 4. 결 론

본 기사에서는 최근 국내외 초고층 건물의 시공 및 계획이 증가하고 있는 시점에서 초고층 구조 설계분야의 핵심 기술 중 하나인 변위 설계 기술로서 재분배 기법을 소개하였다. 본 기사에서는 25 부재 트러스 예제를 대상으로 변위에 민감한 부재를 선택하는 방법과 재분배 기법의 개념에 대해서 간단히 소개하였다. 재분배 기법은 이러한 소규모 예제 뿐만 아니라 초고층 건물이나 변위 제어가 중요한 설계 요소가 될 수 있는 대형 구조물 설계에도 적용이 가능하다. 현재, 재분배 기법은 실제 초고층 건물을 대상으로 연구가 진행되고 있으며 조만간 실제 초고층 프로젝트에 적용할 수 있는 수준의 기술이 개발될 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. Park, H. S., and Park, C. L., "Drift control of high-rise buildings with unit load method", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 6, No. 1, 1997, pp.23-35.
2. 서지현, 연세대학교 박사학위 논문, "재분배 기법

- 을 이용한 고층건물 강성 설계 모델 개발”, 2006.
3. Chan, C. M., and Grierson, D. E., “An efficient resizing techniques for the design of tall buildings subject to multiple drift constraints”, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 2, No. 1, 1993, pp.17-32.
  4. Park, H. S., Hong, K. P. and Seo, J. H., “Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings”, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 11, No. 2, 2002, pp.35-49.
  5. Park, H.S. and Sung, C.W., “Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computer”, *Comp. Struct.*, Vol. 80, 2002, pp. 1305-1316.
  6. Seo, J. H., and Park H. S. “Formulation of Drift Design Methods for High-rise Buildings Subjected to Lateral and Vertical Forces”, *The Fifth World Congress of STRUCTURAL AND MULTIDISPLINARY OPTIMIZATION*, May 19-23, 2003, Lido di Jesolo, Italy.
  7. Seo, J. H., and Park, H. S. “Drift Design Method for High-rise Buildings using Dynamic Resizing Algorithm”, *Proceedings of the CTBUH 2004 Seoul Conference*, Vol. 2. pp.1052-1056, October 10-13, 2004, Seoul, Korea.