

횡하중에 의한 고층건물의 비틀림 거동 분석

Prediction of Torsional Behavior for High-Rise Building Structures under Lateral Load

서현주*
Suh, Hyun-Joo

이동근**
Lee, Dong-Guen

김용부***
Kim, Yong-Boo

Abstract

It is recommended to have symmetric plan and elevation in structural design of high-rise building structures to reduce torsional response of the structures. However, it is not always allowed to do so due to architectural purposes, in many cases high-rise buildings are asymmetric.

The purpose of this study is to predict the torsional behavior of high-rise building structures with asymmetric plan. Equivalent lateral stiffness and deformation shape factor are used for prediction of torsional response of high-rise buildings. Overall torsion of a structure is estimated by equivalent lateral stiffness and torsion of each floor is estimated by deformation shape factor in each 2-D lateral force resisting elements.

1. 서론

고층건물에 수평하중이 작용할 때 저항하는 구조시스템은 한 건물 내에서 여러 종류의 수평저항시스템이 조합되어 저항하기도 하고 동일한 저항시스템이라 하더라도 평면 형태 및 위치에 따라 2차원 저항요소의 거동이 다를 수 있다. 모멘트저항골조로만 이루어진 횡저항 구조시스템이라도 스패 수와 보-기둥의 강성에 따라 2차원 구조요소의 수평 거동은 다르며 모멘트저항골조와 가새가 조합된 시스템에서는 모멘트저항골조와 가새구조의 2차원 저항요소들의 변형형상이 확연히 다르게 나타난다. 한 건물내에서 이러한 여러 2차원 저항 구조요소의 조합에 의해 그 건물의 전체적인 수평변위가 발생하게 되는 것이다.

구조물의 각 층에서 강성과 질량의 분포가 대칭이 아니면 수평하중에 의해 비틀림이 발생하게 된다. 한층의 건축평면 내에서는 질량의 중심과 강성의 중심이 일치하여 편심이 발생하지 않더라도 층별 입면 형태 변화에 따라 건물의 일부가 갑자기 삭제되거나 상부의 평면형태가 변화되어 건물형태상 불연속성으로 인해 비틀림거동이 유발되기도 한다. 또한 한 건물내에서 수평변형형상이 다른 여러 구조시스템이 조합된 경우는 국부적인 층별 비틀림 거동이 발생하게 된다.

본 논문에서는 장방형 정형 평면을 가지되 강성의 분포가 대칭이 아닌 20층, 30층, 40층의 강성비대칭 분석모델에서 2차원 저항 구조요소들의 등가수평강성과 변형형상계수로 각각의 편심거리를 산정하여 비틀림 거동을 예측하기로 한다. 또한 비틀림 거동을 일으키는 편심을 제거하기 위하여 개선 효과가 가장 큰 외부 2차원 저항요소의 강성을 편심제거 강성으로 변환시킨다. 그렇게 하

* 창,민우구조건설단트, 소장

** 성균관대학교 건축공학과, 교수, 정회원

*** 성균관대학교 건축공학과, 명예교수

므로써 실무에서 보편적으로 나타나는 비정형구조물의 비틀림거동을 쉽게 분석할 수 있을 것이다.

2. 이차원 저항요소의 변형 특성

2.1 등가수평강성

본 논문에서는 수평저항 구조시스템의 2차원 저항요소를 복잡한 다자유도의 해석모델대신 하나의 등가 수평강성값으로 나타내어 단순화된 단자유도의 등가모델로 치환했다. 각 저항요소의 2차원 분석모델을 단자유도의 등가모델로 치환하므로써 구조물의 3차원 분석모델을 단순화된 단자유도의 2차원 저항 요소의 조합으로 나타낼 수 있다.

일반적으로 강성은 작용한 하중과 구조물의 변위의 관계로 표현된다. 구조물의 강성을 평가하는데는 변위뿐만 아니라 변형형상도 중요한 요소가 된다. 수평하중을 받는 구조시스템의 변형특성은 크게 휨모드와 전단모드의 2가지 유형으로 나눌 수 있다. 모멘트에 의해 발생하는 휨모드는 하부층의 변위량보다 상부층의 변위량이 크며 전단력에 의해 발생하는 전단모드는 상부층의 변위량보다 하부층의 수평변위량이 크게 나타난다. 모멘트골조인 경우는 기둥과 보에 발생하는 전단력에 의해 전단모드가 지배적이며 기둥의 축방향변형으로 인한 휨모드는 비교적 작게 나타난다. 중심가새구조인 경우는 모멘트에 의한 휨모드가 지배적이며 전단변형으로 나타나는 전단모드는 비교적 미소하다. 이와 같이 구조시스템에 따라 변형형상이 확연히 다르므로 2차원 저항요소의 단일 등가수평강성을 찾는 데 수평변위의 변형형상도 고려되어야 할 것이다.

동일한 형태의 하중을 받는 구조물의 단일 등가강성을 찾는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나 본 논문에서는 최상부변위법, 합력점변위법, RMS 수평변위대표값에 의한 변위법 중에서 RMS 수평변위대표값에 의한 변위법으로 등가강성을 구하고자 한다. 구조물의 최상부변위로 강성을 나타내거나 하중의 합력점의 위치에서 나타나는 변위로 강성을 결정할 때는 모두 전체적인 수평변형형상을 무시하고 등가 단일강성을 결정하는 것이므로 실제 구조시스템에서 나타나는 강성과는 차이가 날 것이다. 가새구조와 같이 휨모드가 지배적인 구조시스템에서는 상부층의 변위가 크게 나타나고 전단모드가 지배적인 모멘트골조에서는 상부층의 변위가 작게 나타나므로 최상부층의 변위값으로는 가새구조는 등가강성이 과소평가되며 모멘트골조에서는 등가강성이 과대평가된다. 그러므로 각 시스템의 수평변위대표값이라고 말할 수 없으며 그 값으로 어떤 구조물의 강성이나 다른 구조물과의 강성비도 합리적으로 구할 수 없다. 합력점변위법으로도 강성의 불규칙성을 고려할 수 없으며 각 구조시스템의 변형형상도 고려되지 않은 것이므로 하중의 합력점의 위치에서 발생하는 수평변위도 그 구조물의 수평변위대표값이라고 말하기는 어렵다. 매층 변위를 제공하여 더한 후 층수로 나누어 제공근으로 구하는 RMS방법의 수평변위대표값은 수평하중을 받는 수평저항 구조시스템에서 전체 변형형상을 고려한 변위대표값이므로 이 변위법으로 구조물의 강성대표값을 구하면 최상부변위법이나 합력점변위법보다 좀 더 실제적인 구조물의 등가강성을 비교 평가할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 RMS에 의한 수평변위대표값 $(\sum \Delta_i^2/n)^{\frac{1}{2}}$ 의 역수로 2차원 저항요소의 등가수평강성을 산정하기로 한다.

2.2 변형형상계수

수평하중에 대한 구조물의 변형형상은 구조시스템별 구조변수에 따라 변하게 된다. 단일 등가수평강성으로 구조물의 강성을 평가하는 경우와 마찬가지로 전체의 변형형상을 하나의 대표할 수 있는 변형형상계수로 정의할 수 있으면 구조물의 변형특성을 파악하는데 간편할 것이다. 다자유도

의 끌조변형형상을 여러개의 모드를 조합한 변형형상이 아니라 하나의 모드, 즉 제1차 모드의 형상함수로 나타낼 수 있다면 다자유도의 해석모델을 등가단자유도 해석모델로 치환할 수 있을 것이다. 다자유도 운동방정식을 단자유도 운동방정식으로 표현해 보면 다음과 같다.

$$\ddot{X}_{pi} + \omega_i^2 X_{pi} = -\frac{\sum M_i \phi_{ij}}{\sum M_i \phi_{ij}^2} \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서 $\sum M_i \phi_{ij} = \zeta_j$, $\sum M_i \phi_{ij}^2 = \mu_j$ 라면 $\ddot{X}_{pi} + \omega_i^2 X_{pi} = -\frac{\zeta_j}{\mu_j} \ddot{x}_g$ 가 되며 여기서 $\frac{\zeta_j}{\mu_j}$ 를 modal participation factor라 한다.

자유진동모드 ϕ 는 그 형상만 정해지는 것이고 그 크기는 임의의 값이므로 modal participation factor만 가지고는 정확한 변위를 추정할 수 없다. 그러므로 각 진동 모드의 영향을 정확히 분석하기 위해서는 모드별 유효질량(effective mass)을 구해 모드별 진동 영향을 유추해 내야 한다. j 번째 모드의 유효질량(EM)은 다음과 같다.

$$EM(j) = \frac{(\sum M_i \phi_{ij})^2}{\sum M_i \phi_{ij}^2} = \frac{\zeta_j^2}{\mu_j} \quad (2)$$

각 모드의 유효질량을 전체 질량으로 나누면 각 모드의 질량참여율(mass participation factor)이 되며 단자유도의 운동방정식으로 변환하면서 나타나는 1차 모드의 질량참여율은 다음과 같다.

$$MPF_{1ST} = \{(\sum M_i \phi_{i1})^2 / \sum M_i \phi_{i1}^2\} / \sum M_i \quad (3)$$

각 층의 질량이 동일하다고 가정하면 1차 모드의 질량참여율 MPF_{1ST}은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} MPF_{1ST} &= \frac{(M \phi_{11} + M \phi_{21} + \dots + M \phi_{n1})^2}{(M \phi_{11}^2 + M \phi_{21}^2 + \dots + M \phi_{n1}^2)} / (M \times n) \\ &= \frac{(\phi_{11} \phi_{21} + \dots + \phi_{n1})^2}{n(\phi_{11}^2 \phi_{21}^2 + \dots + \phi_{n1}^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

동일한 층질량에 대한 1차 모드의 질량참여율은 식(4)와 같으며 1차 모드의 형상과 수평하중을 받는 구조물의 수평변위 형상이 유사하므로 형상벡터인 ϕ_i 대신 수평변위 Δ_i 를 대입할 수 있을 것이다. 수평변위로 1차 모드의 질량참여율과 유사하게 구한 $((\sum \Delta_i)^2 / \sum \Delta_i^2) / n$ 의 물리적인 형상을 살펴보면 그림 1과 같다.

일반적인 건물에서 수평변형형상은 하부에서 상부로 변위가 증가하는 형상이고 휨모드와 전단모드에 따라 거동형상이 그림 1과 유사할 것이다. 휨모드가 우세할수록 하부층의 질량 이동 변위량은 작고 상부층의 변위증가량이 크며 전단모드가 우세할수록 하부층의 질량 이동 변위량이 크며 상부층의 변위증가량은 작다. 그러므로 (1)을 변형전의 건물형상이라 할 때 (2)는 휨모드가 두드러진 변형형상이고 (6)은 전단모드가 두드러진 변형형상이라 볼 수 있다. 표1은 단순화된 수평변형형상을 수치로 분석한 것이다. 동적해석에서 이용되는 유효질량이 층별 질량의 변위이동 개수로 나타나며 휨모드에서 전단모드로 갈수록 그 값이 일정하게 커지는 것을 알 수 있다. 또한 층수로 유효질량을 나누면 질량참여율과 같이 층 수와 상관없이 특정계수로써 시스템의 수평변형형상을 나타낼 수 있을 것이다. 본 논문에서는 $((\sum \Delta_i)^2 / \sum \Delta_i^2) / n$ 을 변형형상계수라 부르기로 한다.

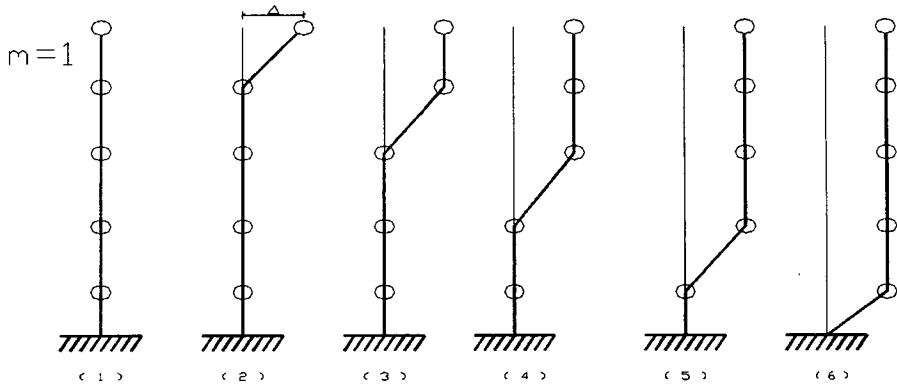


그림 1. 단순화된 5층 수평변형형상 모드

표 1. 단순화된 5층 수평변형형상 모드의 정량적 분석 (n은 층수)

수평변형형상 모드	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$(\sum M \Delta_i)^2 / \sum M \Delta_i^2$	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$(\sum \Delta_i)^2 / \sum \Delta_i^2 / n$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

3. 삼차원 구조물의 비틀림 특성

3.1 등가수평강성

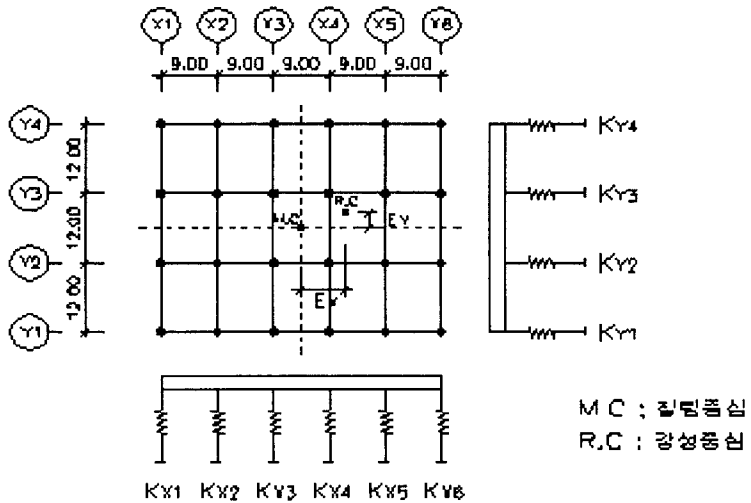


그림 2 비정형분석모델의 단순화된 2차원 등가모델

비정형구조물에서 나타나는 질량의 중심과 강성 중심의 차에 의한 편심거리를 단순화된 2차원 저항요소의 등가수평강성을 이용하여 쉽게 구할 수 있다면 2차원 해석으로 복잡한 3차원 구조물의 거동을 쉽게 파악할 수 있을 것이다. 3차원 비정형구조물의 해석모델을 2차원 등가모델로 바꾸어 표현해 보면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2에서 K는 2차원 저항요소의 등가강성이며 건물의 질량이 건축평면의 중심에 작용한다고 가정하면 각 저항요소의 단일등가수평강성에 의해 쉽게 편심을 구할 수 있다. 각 2차원 저항요소들의 강성에 의한 편심을 제거하기 위하여 여러 가지 구조요소 보완방법이 가능하나 본 논문에서는 보완효과가 가장 큰 X6열의 2차원 저항요소를 변경시켜 비틀림 거동을 개선하고자 한다.

3.2 변형형상계수

비틀림 거동을 개선하기 위한 X6열의 편심 제거 강성 증대방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 모멘트골조에서 부재강성을 증대시켜 X6열의 강성을 증대시킬 수도 있고 모멘트골조에 가새를 추가하여 X6열의 강성을 증대시킬 수도 있으며 모멘트골조 대신 가새구조로 변경하여 X6열의 강성을 증대시킬 수도 있다. 이와 같이 비틀림 거동을 야기시키는 강성의 편심을 제거할 수 있는 방법은 여러 가지가 있겠으나 그 중에서도 전층에 대해 비틀림 회전각이 거의 발생하지 않는 최선의 비틀림 거동 개선 방법을 찾기 위하여 변형형상계수를 이용한다. 각 2차원 저항요소의 변형형상은 구조시스템과 부재강성에 따라 그 형상이 변화한다. 여러 구조 요소들이 조합된 비정형구조물에서는 각 2차원 저항요소마다 변형형상계수가 다르게 나타나며 변형형상계수가 대칭으로 배열되어 있다면 층바닥이 다이아프램으로 작용하여 국부적인 비틀림 회전각이 발생하지 않으나 변형형상계수가 비대칭으로 나타나면 평면내에서 변형형상의 차이에 의해 국부적인 비틀림 회전각이 발생하게 된다. 이렇게 비대칭으로 나타나는 변형형상계수에 의해 나타나는 국부적인 비틀림 거동을 개선하기 위하여 등가수평강성으로 편심을 구한 방법과 동일한 방법으로 변형형상계수에 의한 편심을 산정한다. 등가수평강성에서와 마찬가지로 개선효과가 가장 큰 X6열의 2차원 저항요소를 변경시켜 변형형상계수의 편심을 제거하며 국부적으로 나타나는 비틀림 거동도 개선하고자 한다.

4. 예제 해석

4.1 예제 구조물

예제구조물은 일반 사무실 건물평면 형태로 내부에 편심 코어를 가지는 강성 비대칭 구조물로 질량중심과 강성중심이 일치하지 않아 비틀림 거동을 일으키는 비정형구조물이다. 비정형구조물의 층별 규모는 20층, 30층, 40층으로 하였으며 분석모델명을 각각 BI2, BI3, BI4로 하였다. 층별 규모에 따른 비정형 분석모델의 건축 평면은 모두 동일하게 가정하였으며 그림 3과 같다. X1과 X4, X5, X6열은 모멘트저항골조이고 X2열과 X3열은 중심가새로 Y방향 수평하중에 대해 비대칭 2차원 저항요소를 가지는 건축평면이다.

비정형 분석모델 BI2와 BI3, BI4에서는 Y방향으로만 수평하중이 정적으로 작용한다고 가정하였으며 X방향으로는 수평저항구조시스템이 없고 수평하중도 작용하지 않는 것으로 하였다. 한 방향 수평하중에 의해 편심모멘트가 발생할 경우 편심모멘트는 하중작용방향의 수평저항구조시스템 뿐만 아니라 하중방향과 직교되는 방향의 수평저항구조시스템에 의해서도 편심모멘트가 제어된다. 그러므로 단순화된 분석모델을 통하여 명확한 비틀림 거동을 살펴보기 위하여 한방향으로만 비대칭으로 수평저항시스템을 설치하고 하중도 한 방향으로만 작용하는 것으로 하였다.

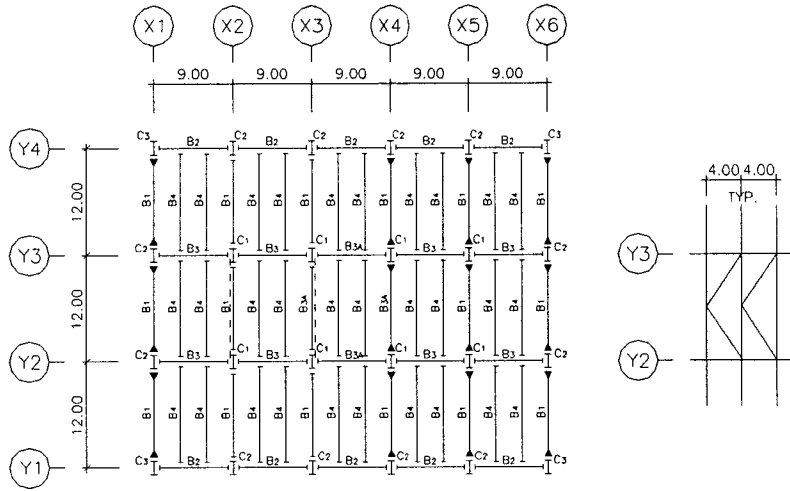


그림 3 비정형구조물의 분석모델

4.2 이차원 저항요소의 변형특성

비정형구조물의 각 분석모델에서 등가수평강성과 변형형상계수를 각 2차원 저항요소별로 구하면 다음과 같다.

표 2 BI2에서의 구조요소별 등가수평강성과 변형형상계수

BI2	X1	X2	X3	X4	X5	X6
등가수평강성	3.846	22.145	22.145	4.689	4.689	3.846
변형형상계수	0.724	0.661	0.661	0.718	0.718	0.724

표 3 BI3에서의 구조요소별 등가수평강성과 변형형상계수

BI3	X1	X2	X3	X4	X5	X6
등가수평강성	2.106	7.530	7.530	2.864	2.864	2.106
변형형상계수	0.725	0.643	0.643	0.711	0.711	0.725

표 4 BI4에서의 구조요소별 등가수평강성과 변형형상계수

BI4	X1	X2	X3	X4	X5	X6
등가수평강성	1.391	3.717	3.717	1.894	1.894	1.391
변형형상계수	0.699	0.625	0.625	0.697	0.697	0.699

비정형분석모델의 2차원 저항요소는 구조시스템의 거동이 상이한 가새구조와 모멘트저항골조가 열별로 조합된 경우이므로 등가수평강성과 변형형상계수가 각 구조요소별로 큰 차이를 보이고 있다. 저층에서는 모멘트저항골조보다 가새구조의 강성이 훨씬 우세하여 전체건물의 강성에서 가새가 차지하는 비율이 약 72%에 달하나 고층으로 갈수록 모멘트저항골조의 수평강성참여율이 높아

저 가새구조가 차지하는 강성은 60%, 53%로 감소하는 것을 알 수 있다. 변형형상계수는 가새구조인 경우는 그 값이 0.625-0.665로 대체로 작고 모멘트저항골조인 경우는 그 값이 0.697-0.725로 대체로 증가하는 것을 알 수 있다.

4.3 삼차원 저항요소의 변형특성

각 비정형 분석모델에서 2차원 저항요소의 등가수평강성과 변형형상계수로 3차원 분석모델의 강성의 편심거리와 변형형상계수에 따른 편심거리를 각각 구할 수 있으며 등가수평강성과 변형형상계수에 의한 편심거리를 제거할 수 있는 X6열의 등가수평강성 및 변형형상계수는 다음과 같다.

표 5 BI2에서 X6열의 변경 등가수평강성 및 변형형상계수

BI2	X1	X2	X3	X4	X5	X6	E _x (m)	X6열 변경
등가수평강성	3.846	22.145	22.145	4.689	4.689	3.846	-5.121	17.810
변형형상계수	0.724	0.661	0.661	0.718	0.718	0.724	+0.244	0.678

표 6 BI3에서 X6열의 변경 등가수평강성 및 변형형상계수

BI3	X1	X2	X3	X4	X5	X6	E _x (m)	X6열 변경
등가수평강성	2.106	7.530	7.530	2.864	2.864	2.106	-3.360	5.839
변형형상계수	0.725	0.643	0.643	0.711	0.711	0.725	+0.296	0.670

표 7 BI4에서 X6열의 변경 등가수평강성 및 변형형상계수

BI4	X1	X2	X3	X4	X5	X6	E _x (m)	X6열 변경
등가수평강성	1.391	3.717	3.717	1.894	1.894	1.391	-2.343	2.849
변형형상계수	0.699	0.625	0.625	0.697	0.697	0.699	+0.320	0.641

5. 비틀림 개선방법

비정형분석모델에서 비틀림거동을 개선하기 위한 개선방법 적용 절차는 다음과 같다.

- i) 비정형구조물에서 각 열별로 2차원 저항요소의 등가수평강성을 RMS에 의한 수평변위대표 값의 역수로 구한다.
- ii) 비정형구조물에서 각 열별로 2차원 저항요소의 변형형상계수를 구한다.
- iii) 산정된 각 열별 2차원 저항요소의 등가수평강성으로 편심거리를 구하고 적당한 위치에 2차원 저항요소의 강성을 증대시켜 편심을 제거할 수 있도록 증대된 보완강성을 산정한다.
- iv) 이차원 저항요소의 등가수평강성에 의한 편심을 제거할 수 있는 2차원 저항요소의 증대 보완 강성은 부재의 강성을 증대시키거나 구조시스템을 변경하거나 구조시스템을 추가하는 방법등 여러 가지가 있다. 이러한 증대 보완 강성은 2차원 저항요소의 변위 그래프를 이용하여 요구되는 등가수평강성으로 쉽게 접근할 수 있다. 각 시스템의 구조변수에 의한 강성 증대비와 변형형상계수비를 수식과 그래프를 이용하여 쉽게 찾을 수만 있다면 비대칭 강성을 가지는 구조물의 비틀림 거동은 쉽게 개선될 수 있을 것이다.

- v) 결정된 개선방법을 비정형분석모델에 적용하여 3차원으로 해석하고 건물회전각으로 비틀림거동의 개선효과를 평가할 수 있다.
- vi) 적용된 비틀림 개선 방법은 단순화된 2차원 분석모델로 구한 것이므로 완전히 비틀림 거동을 제거시키는 개선방법은 아닐 것이다. 그러나 상당한 개선효과는 나타날 것이며 회전 각이 거의 zero로 되는 개선방법은 몇번 안되는 try & error 방법으로 쉽게 구할 수 있을 것이다.
- vii) 비틀림거동 개선방법중에서 강성에 의한 편심을 줄일 수 있는 방법은 여러 가지가 있으며 그 중에서도 각 2차원 저항요소의 변형형상계수에 의한 편심도 최소화할 수 있는 개선방법이 있을 것이다. 등가수평강성에 의한 편심의 개선은 건물 전체의 비틀림을 개선하는 방법이고 국부적인 각 2차원 저항요소의 각기 다른 변형형상에 의한 층별 비틀림거동은 변형형상계수에 의한 편심을 개선하므로써 얻을 수 있는 것이다. 그러므로 강성에 의한 편심도 개선하면서 변형형상계수에 의한 편심도 개선할 수 있는 보완 시스템을 채택한다면 가장 이상적인 비틀림거동 개선 시스템이 될 것이다.

6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 비대칭 강성을 가지는 비정형구조물에서 단순화된 2차원 저항요소의 등가수평강성 및 변형형상계수를 이용하여 쉽게 편심거리를 산정하였다. 각 2차원 저항요소들의 등가수평강성에 의한 편심은 건물 전체의 비틀림거동을 나타내는 것이며 각 2차원 저항요소들의 변형형상계수에 의한 편심거리는 층별 국부 비틀림 거동을 나타내는 것이므로 산정된 편심거리를 제거할 수 있는 여러 가지 방법 중에서 등가수평강성과 변형형상계수에 의한 편심을 모두 제거할 수 있는 비틀림 개선 시스템이 가장 완벽한 개선 방법이 될 것이다.

비정형구조물에서 편심 개선 방법으로 2차원 저항요소의 보완이 용이하도록 대표적인 모멘트저항골조와 가새구조의 구조변수에 따른 강성증대비와 변형형상계수비를 그래프와 수식으로 제안할 수 있도록 현재 연구 진행중에 있으며 평면 비정형구조물 뿐만 아니라 입면 비정형구조물에서도 실제적으로 쉽게 적용 가능한 비틀림 거동의 개선 방법이 계속 연구 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Bungale S. Taranath, Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- 2) Council on Tall Buildings and Urban Habitat Committee 3, Structural Systems for Tall Buildings, McGraw-Hill, Inc., 1995
- 3) 서현주, 이동근, 김용부, “고층건물의 수평변형형상에 대한 평가”, 한국지진공학회 1998년도 추계학술발표회 논문집 제2권 제2호, 1998.9.25
- 4) W. Weaver, Jr., S. P. Timoshenko, D. H. Young, VIBRATION PROBLEMS IN ENGINEERING, JOHN WILEY & SONS, FIFTH EDITION, 1989.
- 5) 윤정방, 이한선, 조규남, 방명석, “구조동력학의 이론 및 응용”, 한국전산구조공학회 기술강습회 교재11-1, 1995.2.