

변위기여도 및 변형에너지밀도를 활용한 초고층 건물의 센싱 부재 선정

Selection of Sensing Members in a High-rise Building Structures using Displacement Participation Factors and Strain Energy Density

이 홍 민* 박 성 우** 박 효 선†

Lee, Hong-Min Park, Sung-Woo Park, Hyo-Seon

(논문접수일 : 2009년 6월 8일 ; 심사종료일 : 2009년 8월 6일)

요 지

초고층 건물의 안전성 및 사용성을 합리적으로 확보하고 유지하기 위해서 부재의 구조 반응 모니터링은 필요하다. 이러한 대형 건물의 건전도 모니터링은 최근 들어 많은 연구자들에 의해서 관심 되어지고 있지만 건물 특성상 계측 대상 부재가 많고 하중과 구조반응의 관계가 복잡하기 때문에 센싱 부재 선정의 어려움으로 그 적용에 한계가 있다. 본 논문에서는 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도를 기반으로 초고층 건물의 안전성 모니터링을 위한 구조반응 계측 부재 선정에 대한 연구를 수행하였다.

핵심용어 : 구조 건전도 모니터링, 초고층건물, 센싱, 변위기여도, 변형에너지밀도

Abstract

To rationally secure and maintain the safety and serviceability of a high-rise building, monitoring of structural responses of members is necessary. As such health monitoring of large-scale building structures has received growing attention by researchers in recent years. However, due to a very large number of members complexity of structural responses of a high-rise building structure, practical difficulties exist in selection of structural members to be sensed for assessment of structural safety of a structure. In this paper, a selection technique for active members for safety monitoring of a high-rise building based on displacement participation factor and strain energy density of a member is investigated.

Keywords : structural health monitoring, high-rise building, sensing, displacement participation factor, strain energy density

1. 서 론

초고층 건물은 중·저층 건물에 비하여 건물 높이에 기인한 지진 또는 바람의 영향 그리고 예상할 수 없는 외부의 환경변화에 의하여 대규모 거주자의 인명 손실 등을 포함한 대형 건설 사고로 이어질 수 있는 중요도가 매우 높은 건물이다. 이러한 중요도가 높은 고층 건물에 대한 안전성 모니터링의 현재 수준은 건물 특성상 계측 대상 부재가 많고 하중과 구조반응의 관계가 복잡하기 때문에 그 적용에 한계가 있

다. 건물의 대형화, 고층화 되어가는 현 시점에서 초고층 건물의 안전성 모니터링은 필요하며, 이를 위해서는 먼저 작용 하중에 대한 고층 건물의 구조 거동이 합리적으로 예측, 분석되고 이로부터 적절한 위치에서의 구조반응 모니터링이 이루어져야 한다.

건물 또는 부재의 건전성 평가에 관한 연구로는 부재 레벨에서는 광센서를 이용한 부재의 최대응력 추정(Park 등, 2006; 2007), 레이저 스캐너를 이용한 변형형상 및 최대변위(또는 처짐) 추정(Lee 등, 2008) 등의 연구가 진행되었으

† 교신저자, 정회원 · 연세대학교 건축공학과 교수
Tel: 02-2123-2794 ; Fax: 02-365-4668
E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

* 정회원 · 연세대학교 대학원 건축공학과 박사수료

** 학생회원 · 세대학교 대학원 건축공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 10월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

며, 구조물 레벨에서는 GPS를 이용한 건물 최상층 변위 모니터링(박효선 등, 2005), 진동 특성을 이용한 건물의 손상 평가(박수용 등, 2002) 등의 연구가 진행되어 왔다.

이러한 연구들로부터 부재 레벨 또는 구조물 레벨에서 각 건물 구조 거동을 대표할 수 있는 구조반응을 추출하고 이를 기반으로 안전성 평가를 수행할 수 있다. 그러나 각각의 센서 또는 안전성 평가 기법으로부터 확인되는 구조반응 또는 구조적 특성은 건물 전체의 거동을 대표하는 데는 한계가 있으며, 특히 부재수가 수 만개에 이르는 초고층 건물과 같은 대형 구조물의 경우에는 더욱 어려움이 있다. 초고층 건물 특성상 계층 대상 부재가 많고 하중과 구조반응의 관계가 복잡하기 때문에 어느 부재에 어느 정도의 센서를 설치해야 하는지에 대한 근본적인 문제에 부딪히게 되며 먼저 이를 해결할 필요가 있다.

센서 설치 위치 선정에 있어서 고정하중 및 적재하중과 같은 수직하중 그리고 풍하중 및 지진하중과 같은 수평하중에 대해서 구조해석상의 최대응력이 발생한 위치를 판단하여 그 수준에 따라 순차적으로 센싱 위치를 결정할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 해당 부재가 구조물의 전체 거동에 대해서 그 영향이 어느 정도인지 즉, 각 부재의 기여도 또는 중요도가 얼마나 되는지를 판단할 수 없기 때문에 건물 전체의 안전성 평가를 위한 합리적인 방법이 될 수 없다. 또한 센싱을 위한 대상 부재가 구조물의 거동에 있어 중요 부재라 하더라도 센서의 계층 수준(또는 정밀도)에 비해 구조반응의 크기가 상대적으로 작을 수 있으며, 이러한 경우에도 구조물의 안전성 평가를 위한 효율적인 구조반응 계측을 기대하기는 어렵다. 이러한 문제는 부재의 과다설계 시에도 발생할 수 있으며, 결국 구조 설계자의 질에 좌우될 수 있는 주관적인 요소가 내재되어 있어 센싱 위치 선정에 있어서 적절한 방법이 될 수 없다.

본 논문에서는 초고층 건물의 구조 안전성 모니터링을 위한 합리적인 구조반응 계측 위치를 결정하기 위해서 에너지 이론에 근거한 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도 개념을 도입하였다. 부재의 변위기여도는 구조물의 거동에 미치는 각 부재의 영향 즉 중요도 개념으로 접근할 수 있으며, 변형에너지밀도는 변위기여도를 해당 부재의 부피로 나눈 값으로서 구조반응 정도의 개념으로 접근할 수 있다. 이로부터 객관적이고 합리적인 부재 선정이 가능하게 되며, 해당 부재를 대상으로 구조해석을 통해 부재 내에서 부재력 또는 최대응력을 확인함으로써 센싱 위치를 결정할 수 있다.

기 시공된 코어 전단벽-아웃리거 벨트 트러스 구조시스템의 초고층 건물을 대상으로 풍하중에 대한 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도를 확인하였으며, 이로부터 고층 건물

의 부재 종류별 구조 안전성 모니터링을 위한 센싱 부재를 예상해 보았다.

2. 변위기여도 및 변형에너지밀도

변위기여도는 에너지 이론에 기초한 단위하중법(Unit load method)을 이용하여 계산하는 값으로서 외부 힘(하중)으로부터 발생하는 특정 방향의 구조물의 거동에 대한 구조물을 구성하는 각 부재의 참여도를 나타낸다. 주로 고층 건물의 구조설계 시 구조 물량의 최적화 또는 최상층 변위를 제어하기 위한 수단으로 사용되어 왔다(서지현 등, 2006; Park 등, 2008).

특정 방향으로의 구조물의 거동, 특히, 건물 최상층의 수평변위를 대상으로 한다면, 수평변위, δ_h 는 해당 변위가 발생하는 방향으로의 단위하중에 의한 부재력과 실제 하중으로부터 발생한 부재력으로부터 식 (1)과 같이 계산할 수 있으며(Weaver 등, 1990), 이때 i 번째 부재의 변위기여도, δ_i 를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_h &= \sum_{i=1}^m \delta_i = \sum_{i=1}^m (\delta_i^N + \delta_i^M + \delta_i^V + \delta_i^T) \\ &= \sum_{i=1}^m \left(\int_0^l \frac{N_i^L N_i^U}{E_i A_i} dx + \int_0^l \frac{M_i^L M_i^U}{E_i I_i} dx + k \int_0^l \frac{V_i^L V_i^U}{G_i A_i} dx \right. \\ &\quad \left. + \int_0^l \frac{T_i^L T_i^U}{G_i I_{pi}} dx \right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, δ_i^N , δ_i^M , δ_i^V , δ_i^T 는 각각 i 번째 부재의 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림에 의한 변위기여도를, N , M , V , T 는 각각 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림을 나타낸다. 상첨자 L 과 U 는 각각 실제 작용하중과 단위하중을 나타내며, A_i , I_i , I_{pi} 는 각각 i 번째 부재의 단면적, 단면 2차 모멘트, 극 단면 2차 모멘트를, 그리고, E_i , G_i 는 각각 i 번째 부재의 탄성계수, 전단 탄성계수를 나타낸다. k 는 형상계수, 그리고 m 은 전체 부재수를 나타낸다. 식 (1)로부터 작용하중에 대한 각 부재의 변위기여도를 계산할 수 있으며, 또한 각 부재에서 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림의 성분별 변위기여도를 확인할 수 있다. 각 부재의 변위기여도는 건물의 전체 구조 거동에서 부재의 중요도 개념으로 접근할 수 있으며, 센싱 위치 선정에 있어서 이를 반영할 수 있다.

변형에너지밀도는 변위기여도를 부재의 부피로 나눈 단위 체적당 변위기여도로 정의된다. 이러한 변형에너지밀도는 건물의 전체 구조 거동에 대한 각 부재들의 구조반응 정도에 대한 정보를 제공해주며, 변위기여도와 더불어 센싱 위치 선정을 하는데 활용될 수 있다.

3. 예제 적용

3.1 예제 적용 모델

초고층 건물의 구조 안전성 모니터링을 위한 합리적인 구조반응 계측 부재를 결정하기 위해서 에너지 이론에 근거한 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도 개념을 도입하였다. 본 장에서는 변위기여도 및 변형에너지밀도로부터 구조반응 계측 부재 결정에 대한 실 구조물의 적용성을 확인하기 위하여 기 시공된 초고층 건물을 대상으로 구조해석을 수행하였다. 그림 1과 같은 구조 부재들로 이루어진 건물 예제 모델을 대상으로 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도를 확인하였으며, 이로부터 초고층 건물의 부재 타입별 구조 안전성 모니터링을 위한 센싱 부재를 예상해 보았다.

예제 적용 대상 건물은 표 1의 내용과 같이 코어 전단벽 - 아웃리거 벨트 트러스 구조시스템으로 철근 콘크리트 전단벽, 합성 기둥, 철골 보, 그리고 아웃리거 벨트트러스로 구성

되어 있다. 건물 전체 높이는 약 240m이며, 아웃리거는 9층, 32층, 50층에 총 3개층에 설치되어 있고, 전단벽과는 강접으로 연결되어 있으며 기둥과는 핀으로 연결되어 있다. 커플링 보를 제외한 보는 기둥 및 전단벽과 핀으로 연결되어 중력하중만을 부담하도록 설계되었다.

고층 건물의 거동에 비교적 영향을 크게 줄 수 있는 풍하중에 대해서 해석을 수행하고, 데이터를 분석하는데 범위를 한정하였다. 풍하중은 대한건축학회 건축물 하중기준 및 해설(2000)에 따른 정적 풍하중으로 기본풍속 30m/sec, 노풍도 B, 중요도 계수 1.1로 가정하였으며, 이때 최상층 수평변위는 약 60cm(h/400)정도 발생하였다. 적용 대상 부재의 수는 약 22000개로 현실적으로 구조반응 계측을 위한 센서 설치 부재수의 한계를 고려하여 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도가 상위 10%이내에 해당하는 부재들을 대상으로 결과를 분석하였다.

3.2 변위기여도 결과

변위기여도 상위 10%이내에 드는 부재 분포는 그림 2와 같다. 기둥 부재는 주로 아웃리거를 지지하는 외부기둥의 변위기여도가 크게 나타났으며, 아웃리거 벨트 트러스는 주로 외부기둥과 전단벽을 연결하는 아웃리거의 경사재에서, 전단벽 부재는 아웃리거 주변과 구조물의 하부 층, 그리고 보 부재는 전단벽을 연결해주는 커플링 보 에서 변위기여도가 크게 나타났다.

상위 10%이내에 드는 각 주요부재 타입 별 변위기여도 분포는 표 2 및 그림 3과 같다. 상위 10%이내의 구조 부재들이 전체구조물의 변위기여도의 약 85%를 차지하였으며, 특히 1%이내의 부재에서 전체구조물의 변위기여도의 약 30%, 3%이내의 부재에서 약 50%의 변위기여도를 차지하였다. 부재 타입별로 보면 기둥과 코어 전단벽의 변위기여도

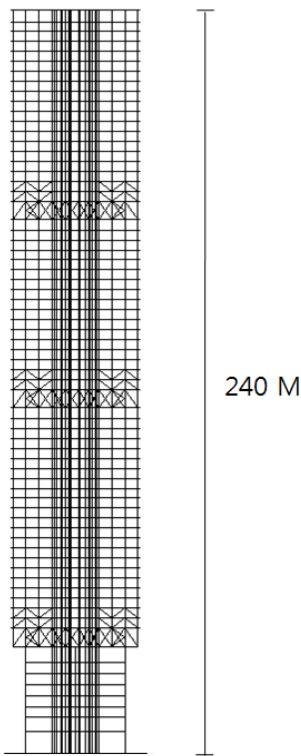


그림 1 예제 모델

표 1 예제 모델 일반사항

건물용도	주상 복합 건물
높이	약 240m
구조시스템	코어 전단벽-아웃리거 벨트 트러스
주요부재 타입	전단벽, 합성기둥, 철골 보, 아웃리거 벨트 트러스
총 부재 수	약 22000개

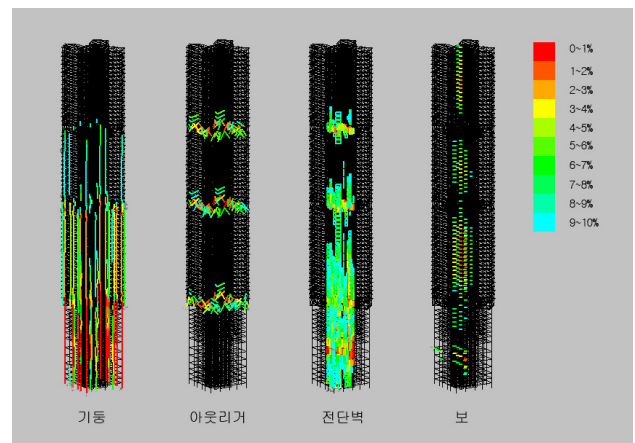


그림 2 변위기여도 상위 10%이내 부재 분포

표 2 변위기여도 상위 10%이내 부재의 각 구간에 따른 부재 타입 별 변위기여도

부재 종류	변위기여도(%)										계
	0~1%	1~2%	2~3%	3~4%	4~5%	5~6%	6~7%	7~8%	8~9%	9~10%	
기둥	16.78	4.13	6.55	3.91	1.99	0.84	1.88	0.94	0.72	0.89	38.6
전단벽	11.45	5.39	2.27	2.51	3.22	2.34	1.24	1.71	1.66	1.27	33.0
아웃리거	1.02	3.17	0.59	0.77	0.33	0.66	0.27	0.34	0.29	0.19	7.6
보	0	1.09	0.45	1.13	0.85	0.96	0.57	0.39	0.18	0.13	5.7
계	29.25	13.78	9.85	8.32	6.40	4.80	3.95	3.37	2.86	2.48	85.1

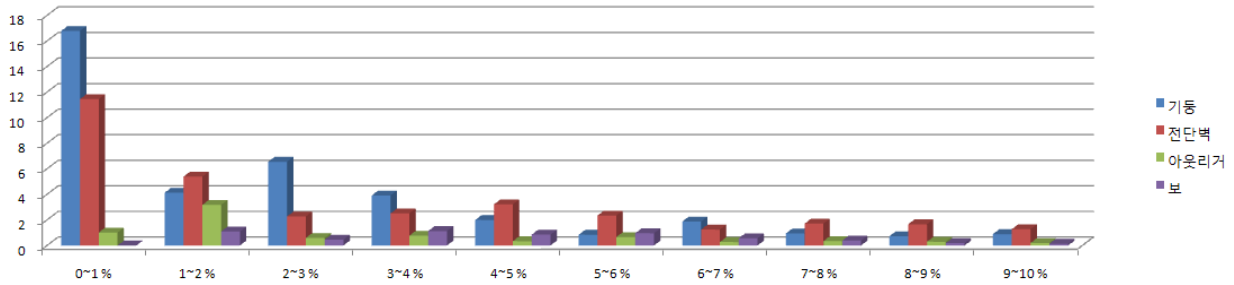


그림 3 변위기여도 상위 10%이내 부재의 각 구간에 따른 부재 타입 별 변위기여도 분포도 (각 구간에서 막대그래프 앞에서부터 기둥, 전단벽, 아웃리거, 보 순서임)

가 구조물 전체의 70%이상을 차지하였으며 다음으로 아웃리거, 보의 순서를 나타내었다.

3.3 변형에너지밀도 결과

변형에너지밀도 기준으로 상위 10%이내에 드는 각 주요 부재 타입 별 부재 수 분포는 표 3 및 그림 4와 같다. 상위 10%이내의 변형에너지밀도를 갖는 부재 수는 기둥이 약

63%, 아웃리거가 약 19%, 그리고 보와 전단벽이 각각 약 9%를 차지하였다. 변형에너지밀도 기준으로 볼 때 전반적으로 기둥 및 아웃리거의 부재 수가 가장 많았으며 보와 전단벽 부재는 상대적으로 적은 부재 수를 나타냈다. 아웃리거의 경우 상위 1%이내의 부재 수가 두드러짐을 알 수 있으며 전단벽과 보 부재는 5%이상에서 부재수의 분포가 점차적으로 발생, 증가함을 알 수 있다.

표 3 변형에너지밀도 상위 10%이내 부재의 각 구간에 따른 부재 타입 별 부재 수

부재 종류	변형에너지밀도(부재수)										계	%
	0~1%	1~2%	2~3%	3~4%	4~5%	5~6%	6~7%	7~8%	8~9%	9~10%		
기둥	128	192	190	166	198	153	143	123	47	55	1395	63.4
전단벽	2	0	3	7	0	9	9	26	64	85	205	9.3
아웃리거	90	28	27	47	21	44	38	21	52	43	411	18.7
보	0	0	0	0	1	14	30	50	57	37	189	8.6

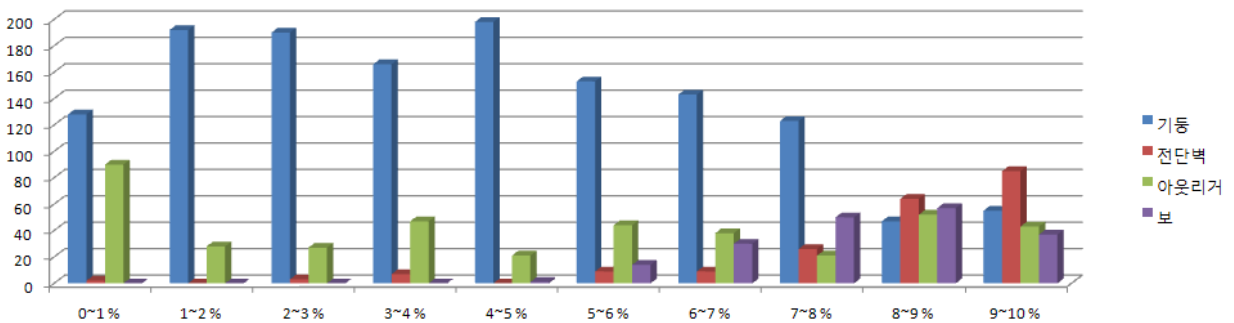


그림 4 변형에너지밀도 상위 10%이내 부재의 각 구간에 따른 부재 타입 별 부재 수 분포도 (각 구간에서 막대그래프 앞에서부터 기둥, 전단벽, 아웃리거, 보 순서임)

3.4 센싱 부재 선정

변위기여도와 변형에너지밀도의 크기가 상위 10%이내에 드는 부재들을 분석한 결과 변위기여도 면에서는 외부기둥과 전단벽이 큰 비중을 차지하였으며, 변형에너지밀도 면에서는 외부기둥과 아웃리거가 큰 비중을 차지하였다. 특히 전체 부재수의 3%이내의 부재들이 건물 전체 거동에 대한 변위기여도의 50%이상을 차지하였으며 건물의 전체 거동에 대한 양상과 유사함을 알 수 있었다. 따라서 센싱을 위한 부재 선택을 위해서 이 부재들을 대상으로 변형에너지밀도 분포를 분석하였으며 그 결과는 표 4 및 그림 5와 같다. 표 4 및 그림

표 4 변위기여도 상위 3%이내 부재의 변형에너지밀도 분포

부재종류	변형에너지밀도(부재수)					
	0-2%	2-4%	4-6%	6-8%	8-10%	10% 이상
기둥	141	208	2	1	0	0
전단벽	2	10	9	0	49	121
아웃리거	66	7	0	15	0	0
보	0	0	12	17	0	0

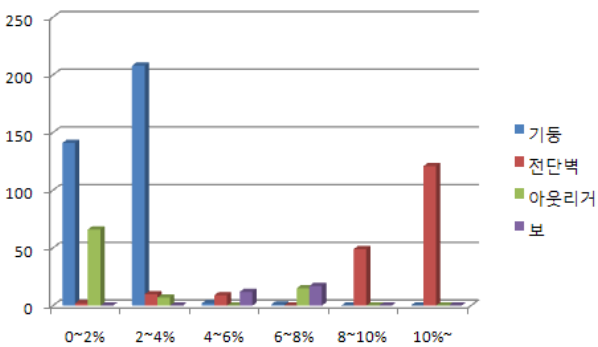


그림 5 변위기여도 상위 3%이내 부재에 대한 부재 타입 별 변형에너지밀도 분포도(각 구간에서 막대그래프 앞에서부터 기둥, 전단벽, 아웃리거, 보 순서임)

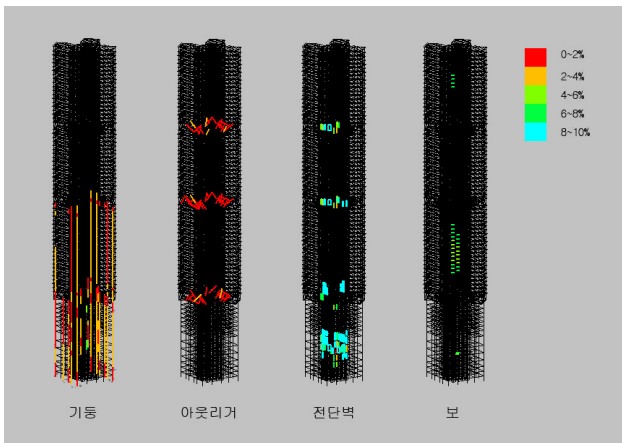


그림 6 변위기여도 상위 3%이내 부재에 대한 부재의 변형에너지밀도 분포

5에서 기둥과 아웃리거는 해당 부재 대부분이 변형에너지밀도 4% 수준 이내였으며, 보는 4~8%, 그리고 전단벽은 대부분 8%이상으로 나타났다.

각 부재 타입별 센싱 대상이 되는 부재를 구체적으로 확인하기 위하여 변위기여도 상위 3%이내 부재에 대한 부재의 변형에너지밀도 분포를 그림 6과 같이 나타내었다. 변위기여도 분포(그림 2)와 유사하게 기둥 부재는 주로 아웃리거를 지지하는 외부기둥에서, 아웃리거 벨트 트러스는 주로 외부기둥과 전단벽을 연결하는 아웃리거의 경사재에서, 전단벽 부재는 아웃리거 주변과 구조물의 하부 층, 그리고 보 부재는 전단벽을 연결해주는 커플링 보에서 분포를 나타내었다. 특히 아웃리거 및 외부기둥은 본 구조물의 거동에 있어서 변형에너지밀도 수준이 대부분 4%이내에 들어 센서 설치를 위한 실질적인 부재임을 예상할 수 있다.

이러한 결과를 고찰해 볼 때 본 건물의 안전성 평가를 위한 구조반응 계측 부재는 외부기둥과 아웃리거 부재를 중심으로 선택되어야 하며, 필요에 따라서는 최하층의 일부 전단벽 부재 및 전단벽을 연결하는 커플링 보를 계측 부재로 선택할 수 있다.

주요부재 타입에 대해서 변위기여도를 축방향, 휨, 그리고 전단 변형으로 분류하여 각각에 따른 영향을 확인할 결과 기둥 부재 및 아웃리거 벨트트러스의 경우 축방향 변형의 영향이 90%이상을 차지하였으며, 보 부재는 휨 변형이 약 80%, 전단 변형이 약 20%, 그리고 전단벽 부재는 휨 변형 약 30%, 전단 변형 10%, 축방향 변형 60%를 나타내었다. 따라서 이를 고려하여 축방향 변형이 지배적인 기둥, 및 아웃리거 벨트 트러스와 같은 횡력 저항 시스템이 들어간 고층 건물에 대한 구조반응 모니터링을 위해서는 외부기둥과 아웃리거를 중심으로 센싱 부재를 선정하는 것이 바람직함을 알 수 있으며, 실제 구조반응 계측 위치를 결정하기 위해서는 3%이내 부재들에 대해서 변위기여도 및 변형에너지밀도를 정량적으로 분석해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

초고층 건물에 대한 구조 안전성 모니터링은 건물 특성상 계측 대상 부재가 많고 하중과 구조반응의 관계가 복잡하기 때문에 센싱 부재 선정의 어려움으로 그 적용에 한계가 있다. 본 논문에서는 초고층 건물의 구조 건전도 모니터링을 위한 구조반응 계측 부재를 선정하기 위해서 에너지 이론에 근거한 부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도 개념을 도입하였다. 기 시공된 코어 전단벽-아웃리거 벨트 트러스 구조시스템의 초고층 건물을 대상으로 풍하중에 대한 부재 종류별

부재의 변위기여도 및 변형에너지밀도를 확인한 결과 초고층 건물의 구조 건전도 모니터링을 위한 센싱 부재를 예상할 수 있었으며, 센싱 부재 선정에 대한 적용 이론의 타당성을 확인하였다. 추후 실제 센서 설치를 위한 다양한 구조물에서의 이론 적용 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정 연구 개발사업 국가지정연구실 사업의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호 : 2005-01504

참 고 문 헌

대한건축학회 (2000) 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사.
박수용, 윤성원 (2002) 진동특성을 이용한 철골조 건물의 손상평가, 대한건축학회 논문집 구조계, 18(1), pp.45~52.
박효선, 손홍규, 김일수, 박재환 (2005) GPS를 이용한 고층 건물의 수평변위 모니터링시스템, 대한건축학회 논문집 구조계, 21(5), pp.11~18.
박효선, 손홍규, 김일수, 박재환 (2005) GPS를 이용한 고층 건물의 풍응답 모니터링, 대한건축학회 논문집 구조계, 21(4), pp.11~19.

서지현, 박효선 (2006) 부재 그룹과 하중 조합을 고려한 고층 건물 변위조절 설계법, 한국전산구조공학회 논문집, 19(4), pp.357~367.
Lee, H.M., Park, H.S. (2008) Estimation of Deformed Shapes of Beam Structures using 3D Coordinate Information from Terrestrial Laser Scanning, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 29(1), pp.29~44.
Park, H.S., Jung, H.S., Kwon, Y.H., Seo J.H. (2006) Mathematical models for assessment of the safety of steel beams based on average strains from long gage optic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 125, pp.109~113.
Park, H.S., Jung, S.M., Lee, H.M., Kwon, Y.H., Seo, J.H. (2007) Analytical models for assessment of the safety of multi-span steel beams based on average strains from long gage optic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 137, pp.6~12.
Park, H.S., Seo, J.H., Kwon, Y.H. (2008) Development of drift design model for high-rise buildings subjected to lateral and vertical loads, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 17, pp.273~293.
Weaver, W., Gere, J.M. (1990) Matrix analysis of framed structures, *Kluwer Academic Publishers*.