



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

초고층 건축물 동특성 분석 및 풍응답 가속도 평가

Analysis of Dynamic Characteristics and Evaluation of Wind
Acceleration Response of Tall Building

지도교수 송 화 철

2019년 08월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

문 일 권

본 논문을 문일권의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장	박 수 용
위 원	송 화 철
위 원	박 동 천



2019년 05월 30일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables.....	iii
List of Figures.....	iv

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 목적.....	1
1.2 연구 동향.....	4
1.3 연구 범위 및 방법.....	5
제 2 장 초고층 다이아그리드 시스템 특성 및 현황 분석	7
2.1 다이아그리드 구조시스템 특성.....	7
2.1.1 다이아그리드 구조시스템의 개념.....	7
2.1.2 다이아그리드 구조시스템 집합부.....	9
2.1.3 다이아그리드 구조시스템 최적각도.....	11
2.2 국내외 다이아그리드 구조시스템 고층건물의 사례.....	13
제 3 장 초고층 건물의 풍응답 가속도 평가	17
3.1 풍응답 가속도 특성 기준 및 분석.....	17
3.1.1 KBC2016 풍응답 가속도 특성.....	18
3.1.2 NBCC1995 풍응답 가속도 특성.....	19
3.1.3 Solari Method 법 풍응답 가속도 특성.....	22
3.2 풍응답 가속도 거주 성능 평가 기준.....	23
3.2.1 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선.....	23

3.2.2 AIJES-V001-2004(일본기준).....	24
3.2.3 ISO 6897(국제기준).....	25
3.2.4 NBCC 2005(캐나다기준).....	26
3.2.5 풍응답 가속도 거주 성능 평가 비교.....	27
제 4 장 국내외 고층건물의 풍응답 특성.....	29
4.1 국내외 고층건물 동특성 현황 분석.....	29
4.1.1 국외 고층건물의 높이, 층수, 고유주기.....	29
4.1.2 국내 고층건물의 높이, 층수, 고유주기.....	36
4.2 감쇠비를 통한 풍응답 특성 분석.....	42
4.2.1 NBCC95 이용한 초고층 건물 풍응답 가속도 산정	42
4.3 KBC2016 풍응답 및 풍동실험값의 구조설계 적용시 감쇠비.....	44
4.3.1 KBC2016 기준에 의한 감쇠비.....	44
4.3.2 고유진동수 및 진폭 의존형 감쇠비 제안식.....	44
제 5 장 초고층 다이아그리드 구조물의 사용성 평가.....	46
5.1 초고층 다이아그리드 구조시스템 구조물예제.....	46
5.2 풍응답 가속도 평가.....	50
5.2.1 KBC2016 풍응답 사용성 평가.....	50
5.2.2 NBCC95 풍응답 사용성 평가.....	56
5.3 건물층수에 따른 풍응답 사용성 평가 (NBCC95).....	57
5.4 건물평면과 층수에 따른 풍응답 사용성 평가.....	62
5.5 전단벽 포함한 다이아그리드 구조물의 풍응답 사용성 평가	64
제 6 장 결 론.....	70
참고문헌.....	72

List of Tables

Table 1	다이아그리드 형상에 따른 분류.....	10
Table 2	노출계수, 지형 계수, 고도분포지수.....	21
Table 3	$a_{\max} = an^b (cm/s^2)$ 의 계수 a,b의 값.....	25
Table 4	국외의 진동 사용성 평가기준.....	27
Table 5	국외 건축물의 높이에 따른 분류.....	32
Table 5	국외 건축물의 높이에 따른 분류.....	33
Table 6	국내 건축물의 높이에 따른 분류.....	39
Table 7	감쇠정수비 2% (NBCC 1995).....	43
Table 8	감쇠정수비 KBC2016 건축구조기준 0.9%.....	43
Table 9	ISO 4354의 구조감쇠비(ζ_{str}).....	45
Table 10	큰보, 작은보 부재사이즈.....	47
Table 11	대각가새, 중력기둥 부재사이즈.....	48
Table 12	구조물 고유주파수, 고유주기.....	49
Table 13	고유주기, 변위 비교.....	49
Table 14	풍방향, 풍직각방향 가속도.....	51
Table 15	층별 풍방향, 풍직각방향 가속도 (56층, 52층, 48층).....	52
Table 16	층별 풍방향, 풍직각방향 가속도 (44층, 40층, 36층).....	52
Table 17	NBCC95 풍응답 가속도 평가 (감쇠비 1%).....	56
Table 18	NBCC95, KBC2016 풍응답 가속도 평가.....	57
Table 19	층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가 (56층, 52층 48층).....	59
Table 20	층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가 (44층, 40층 36층).....	59
Table 21	층수에 따른 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도.....	60
Table 22	층수에 따른 변위 및 수평 변위 제한.....	61
Table 23	층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가.....	63
Table 24	전단벽 있는 경우 KBC2016 풍응답 사용성 평가 비교.....	65
Table 25	전단벽 있는 경우 NBCC95 풍응답 사용성 평가 비교.....	67
Table 26	전단벽 있는 경우 NBCC95, KBC2016 풍응답 가속도 평가.....	68

List of Figures

Fig. 1	국내외 초고층 건물의 현황.....	1
Fig. 2	전 세계 가장 높은 200개 빌딩의 층수.....	2
Fig. 3	풍응답 가속도 평가.....	2
Fig. 4	다이아그리드 구조시스템의 형상.....	3
Fig. 5	다이아그리드 구조시스템 개념.....	7
Fig. 6	가새(Braced) 시스템과 다이아그리드 구조물의 모듈.....	8
Fig. 7	다이아그리드 구조시스템 접합부 노드해석 대상과 노드해석.....	9
Fig. 8	대각 골조 모델.....	11
Fig. 9	$\sin 2\theta \cos \theta$	12
Fig. 10	초고층 건물 구조시스템의 추세.....	13
Fig. 11	국외 고층 다이아그리드 구조시스템 건축물 예.....	14
Fig. 12	국내외 고층 다이아그리드 구조시스템 건축물 예.....	15
Fig. 13	Along-Wind, Across-Wind, Torsional-Wind.....	17
Fig. 14	바람의 방향에 따른 건물의 진동방향.....	17
Fig. 15	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선.....	24
Fig. 16	바람에 의한 수평진동에 관한 성능평가곡선(AIJ 2004).....	25
Fig. 17	ISO 6897 진동 사용성 평가기준.....	26
Fig. 18	국외 고층건물 개요 (Majestic Building, 110.06m).....	29
Fig. 19	국외 고층 건축물 예.....	30
Fig. 19	국외 고층 건축물 예.....	31
Fig. 20	고층건물의 높이에 따른 주기.....	34
Fig. 21	고층건물의 층수에 따른 주기.....	34
Fig. 22	국외 고층건물의 감쇠비 분포도.....	35
Fig. 23	국내 고층건물 개요 (센텀스타, 212m).....	36
Fig. 24	국내 고층 건축물 예.....	37
Fig. 24	국내 고층 건축물 예.....	38

List of Figures

Fig. 25	국내 고층건물의 높이에 따른 주기	40
Fig. 26	국내 고층건물의 층수에 따른 주기	40
Fig. 27	국내 고층건물의 감쇠비 분포도	41
Fig. 28	초고층 건물 예시 모델	46
Fig. 29	초고층 건물 예시 모델 구조평면도	47
Fig. 30	설계 풍속	50
Fig. 31	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (60층)	51
Fig. 32	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (56층)	53
Fig. 33	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (52층)	53
Fig. 34	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (48층)	54
Fig. 35	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (44층)	54
Fig. 36	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (40층)	55
Fig. 37	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (36층)	55
Fig. 38	층수별 다이아그리드 구조시스템	58
Fig. 39	층수에 따른 풍방향, 풍직각방향 가속도	60
Fig. 40	층수에 따른 변위	61
Fig. 41	Volume Design 변화 다이아그리드 구조시스템	62
Fig. 42	전단벽 설계 구조물 단면도	64
Fig. 43	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 전단벽(1.0m)	65
Fig. 44	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 전단벽(1.2m)	66
Fig. 45	ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 전단벽(1.4m)	66

Analysis of Dynamic Characteristics and Evaluation of Wind Acceleration Response of Tall Building

Moon, Il Kwon

Department of Ocean Architectural Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Many high-rise buildings as landmarks are designed and constructed. Its appearance is also becoming diverse, including the Diagrid Structural System. Generally, the behavior of high-rise buildings are more affected by wind loads than seismic loads, and The assessment of acceleration response induced by wind load is required. This study examined the characteristics of the structure system of high-rise buildings and analyzed the characteristics of wind-response acceleration in the high-rise buildings. This study looked for the dynamic characteristics (height, number of floors, and frequency) of high-rise buildings in and out of Korea. The wind response velocity was obtained by using MIDAS GEN, a structural analysis program using KBC2016 type based on architectural structures, for high-rise buildings with Diagrid structural systems. This study also compared and analyzed the wind response velocity of high-rise buildings with Diagrid structural systems according to height using the NBCC95 expression.

The conclusion is as follows

1) The 60-story high-rise Diagrid structure meets the displacement standard of $0.48m(H/500)$ of the high-rise, The Along-wind acceleration of ISO10137(resident performance evaluation curve) is satisfied with the reference value, but the Across-Wind acceleration significantly exceeds the reference value.

2) For ISO 10137 residential performance evaluation curve acceleration criteria, acceptance criteria vary with frequency. For high-rise Diagrid structural systems, the acceleration of wind response is deemed difficult to satisfy the permissible level.

3) A Diagrid structure with more than 50 stories is applied to the wind response Estimation of NBCC95. For a attenuation ratio of 1%, The Along-wind acceleration and The Across-Wind acceleration will result in values exceeding the permissible value of 2.5%. But below the 48th floor are expected to meet the acceptable 2.5% of NBCC95.

4) Comparing the existing Diagrid structure with the Diagrid structure that changed the plane, The results showed that Along-wind acceleration increases as the displacement of the building increases, and Across-wind acceleration decreases as the average density of the building increases.

5) Place an internal core in a 60-story high-rise diamond structure system. The attenuation ratio is increased to 0.825%, increasing the mean density of the building. Thus, Along - wind acceleration and Across-Wind acceleration can be reduced.

KEY WORDS: High-rise Building, Diagrid, Along-Wind Acceleration,
Across-Wind Acceleration, Assessment of Acceleration response
Usability Evaluation

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

과거 인간은 이집트의 피라미드나 바빌론의 바벨탑처럼 고대 신이 거주하는 하늘에 가까워지기 위해 높은 건조물을 지어왔다. 고대의 건조물 기술이 사원과 교회의 탑, 성의 건축과같이 전해지면서 오늘날의 고층 빌딩 건축에 발달로 이어져오고 있다. 근대에 들어오면서 산업혁명이 일어나고 철의 생산이 많아지며 21세기에는 건축기술의 발달, 재료의 발달과 더불어 인구의 도시 집중화와 제한된 토지를 극대화하기 위해 초고층 건축물의 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

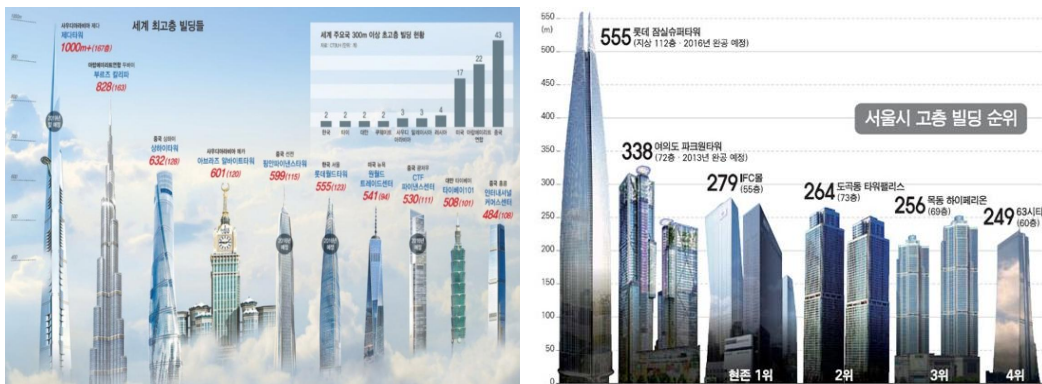


Fig. 1 국내외 초고층 건물 현황

초고층 건물은 높이 200m 이상 또는 50층 이상인 건축물을 말한다. 초고층 건축물은 마천루라고도 일컬으며, 세계의 대도시들은 도시경쟁력 강화, 도시 이미지 향상, 관광 및 경제 활성화 등을 위하여 랜드마크로서의 초고층 건축물 건축을 활발히 진행 중에 있다. 대표적인 건물로는 아랍에미리트의 부르즈 칼리파(Burj Khalifa, 162층), 대만의 타이베이 101(Taipei 101, 101층), 말레이시아의

페트로나스 트윈 타워(Petronas Twin Tower, 88층) 등이 있다.

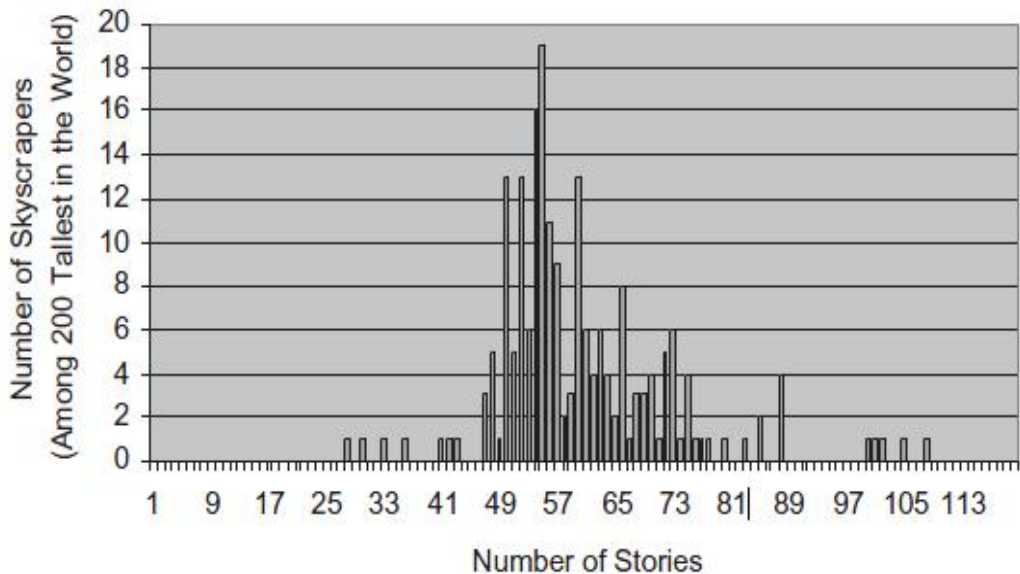


Fig. 2 전 세계 가장 높은 200개 빌딩의 층수 (www.emporis.com)

50층 이상 규모의 고층 건축물이 건설되면서 풍하중에 의한 건축물의 안전성 뿐만 아니라 사용성(Serviceability)에 대한 관심이 많아지고 있다. 풍하중에 의한 건축물의 사용성이라고 하면, 일상생활에서 건축물에 가해지는 풍하중에 의해 수평진동(가속도)이 발생하고 그 진동에 대해 사용자가 느끼는 불편감, 떨림, 현기증 등의 만족 정도를 의미한다. 고층건물의 풍하중에 대해 풍방향(Along-Wind) 가속도 응답과 풍직각방향(Cross-Wind) 가속도 응답으로 크게 분류하여 응답을 구하여 평가한다.

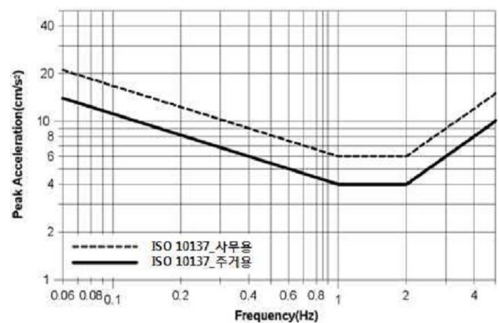
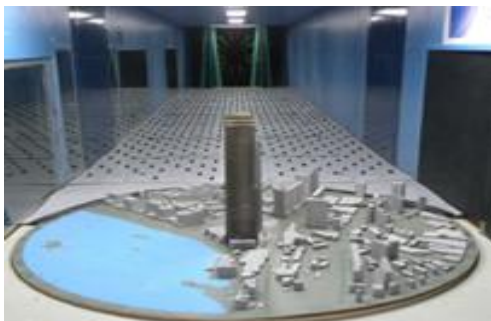


Fig. 3 풍응답 가속도 평가

일반적으로 많이 적용되는 AIJ(일본 기준), ISO(국제 기준), NBCC(캐나다 기준) 등의 사용성 평가 산정식 및 기준은 상이하며, 국내에서는 처음으로 KBC2016에서 산정식과 기준치를 제시하고 있으며 실무 적용 시 이에 대한 충분한 검토가 필요하다.

최근에는 단순한 된 정형화 형태의 기존 건물에서 비정형화되고 다른 자유로운 형상을 추구하고 있다. 이러한 추구는 높이에 대한 경쟁뿐만 아니라 자유로운 형상으로 랜드마크로서의 가치를 높이기 위해 기존의 정형화된 직사각형 형태를 벗어나 비정형의 형태를 추구하고 있다. 초고층 구조물의 비정형 형태의 첫 형태인 테이퍼드 형상(Tapered Shape)에서 기울어진 형상(Tilted Shape), 비틀어진 형상(Twisted Shape) 등 구조물 표면이 평면에서 곡면의 형태로 변화하고 있다. 비정형 건물들의 특징을 살펴보면 비틀어지거나 기울어지거나 가늘어지는 형태를 가지고 있고 이러한 특징을 가지는 건물은 기존의 수직 기둥과 보로 표현하기에는 어려운 한계를 가지고 있다. 이에 다이아그리드 구조 시스템이 제안되었고, 다이아그리드 구조 시스템은 대각 부재가 수직하중뿐만 아니라 수평하중에도 저항하여 기초까지 안전하게 전달하고 구조물의 최 외곽 수평하중에도 효과적으로 저항하여 효율성을 높일 수 있는 구조 시스템이다.

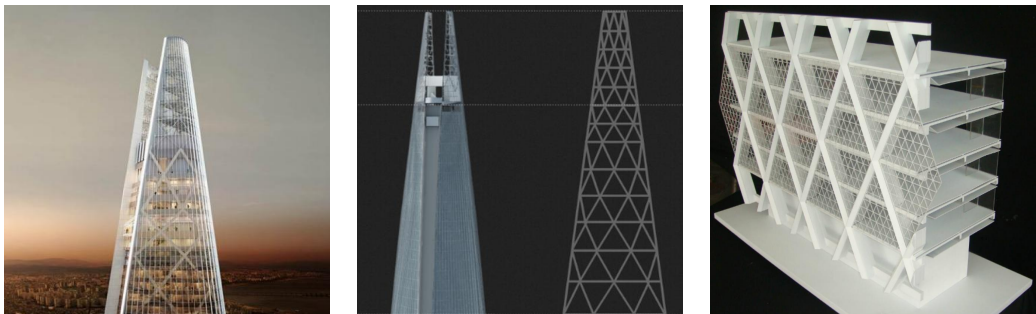


Fig. 4 다이아그리드 구조 시스템의 형상

기존의 다이아그리드 구조 시스템에 대한 연구는 다이아그리드 각도에 따른 변위 제어(Moon, 2007)와 내진 성능 평가 (김선웅, 2013)(윤상호, 2015)가 주로 이루어졌지만 초고층 건물 다이아그리드 구조 시스템의 사용성 평가에 대한 풍 응답 가속도 기준 검토, 감쇠율에 대한 연구는 미비한 상태이다.

본 논문에서는 다이아그리드 구조 시스템의 특성과 국내외 고층건물의 동특

성을 조사하였으며 60층 초고층 다이아그리드 구조 시스템의 건물을 풍응답 가속도 KBC2016, NBCC95 기준에 의해 평가한 결과값 분석하고 풍응답 사용성 평가를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구 동향

국내외 초고층 건물은 단순히 높이만을 추구하는 것이 아니라 구조물의 정형화된 형태에서 비정형 형태로 바뀌고 있다. 이러한 비정형 형태를 적용하기 위해선 다양한 구조 시스템을 적용하여야 하는데 다이아그리드 구조 시스템은 기둥 없이 대각 부재로 수직력과 수평력을 저항할 수 있는 구조 시스템이다. 다이아그리드 구조 시스템에 대하여 연구를 살펴보면 국내에서는 김선웅(2013)은 초고층건물 철골 대각가새 골조를 다이아그리드 구조 시스템을 사용하여 건축 평면의 비틀림 각(*twisted angle*)에 따라 내풍설계된 비정형 초고층 철골 대각가새 골조의 주요 구조부재의 물량 변화에 따른 경제성분석과 내진 성능 평가하였고, 윤상호(2015)는 축 회전 다이아그리드 구조시스템의 내진 성능 평가에 관한 연구로 축을 중심으로 매 층마다 일정한 각도로 회전하면서 동일한 평면 형태를 유지하는 다이아그리드 구조 시스템으로 모델링 하여 가새 각도와 구조 시스템 평면의 회전 각도 변화에 따른 플랜지, 웹 부분의 응력분포를 분석, 선형 시간 이력 해석과 비선형 정적 해석을 수행하여 층간 변위, 최대 밀면 전단력을 통해 가새 각도와 구조시스템 평면의 회전 각도 변화에 따른 다이아그리드 구조 시스템의 내진 성능 평가에 관한 연구를 하였다. 국외에서는 Moon(2007)은 가상 60층 규모의 초고층건물에 다이아그리드 구조 시스템을 적용 가새 부재의 각도에 따른 횡력 저항성능에 대해 연구 하였으며 높이에 따른 최적 각도를 제안하여 다이아그리드 구조시스템과 Brace Tube 시스템과의 횡력 저항 성능 비교를 하였으며 100층 이하 건물은 다이아그리드 구조 시스템이 더 효율적이라는 결론을 내리고 대각가새의 각도에 따라 상층부의 변위($H/500$), 고유진동수를 비교 검토하였다.

그리고 초고층 건물이 풍하중에 의해 적용되는 풍응답 평가에 대한 연구를 정리하면 다음과 같다. 국내에서 송화철(1999)은 가상 100층 규모의 초고층건물에 대한 풍방향 및 풍직각방향 가속도 응답을 기존의 여러 평가 기법을 이용하여 구한 결과값과 상호 비교하여 평가기법의 특징을 고찰하였다. 풍방향 가속

도응답은 Solari법, 캐나다 기준(NBCC90), 일본 기준에 의하여 구하였으며, 풍직 각방향 응답은 Saunders & Melbourne법, NBCC90, 호주 기준(SAA83)을 각각 구하여 결과값을 비교 검토를 하였다. 윤성원(2004)은 국내 철근 콘크리트조 아파트 17동의 진동 계측을 실시하여 상시 진동 계측 데이터에서 하프 파워 법을 이용하여 감쇠율을 구하였다. 강풍 시 철근 콘크리트조 아파트의 사용성 설계용 감쇠율 식을 제안하였다. 조강표(2009)은 초고층 건축물의 진동 사용성 평가 기준인 일본 기준(AIJ 2004), 캐나다 기준(NBCC2005), ISO 10137(국제 기준) ISO 6897(국제 기준) 건축물의 진동 사용성 평가 기준 비교 분석하였다. 김홍진(2013)은 우리나라의 실제 완공된 초고층 건축물을 대상으로 상시 진동 계측을 실시하여 구한 감쇠비를 해외의 감쇠비 제안식들과 비교함으로써 각 기준들의 국내 적용성과 유효성을 분석하였다.

국외 에서는 Jeary(1986)는 실험 방법과 평가방법에 대한 오차를 검토하여 충분한 신뢰성이 있는 데이터를 선택하여 감쇠율 식을 제안하였다. Tamura(1996)는 건물 높이 10.8m~97.2m 범위의 철근콘크리트조를 대상으로 하여 상시 진동 계측 데이터에 근거하여 감쇠율 식을 제안하였다. ISO 4354(1997)에서는 건물전체의 감쇠율을 구조감쇠율과 대체로 동등하게 평가하고 있으며 풍응답을 평가하는 때의 철근콘크리트조 고층건물에 대해서는 감쇠율을 0.015를 사용하고 있다. 독일 기준 DIN 1055에서는 풍응답을 평가하는 때의 철근콘크리트조에 대한 감쇠율을 건물의 균열이 없는 경우에는 0.006, 균열이 있는 경우에는 0.016으로 하고 있다. 호주 기준 AS 1170에서는 풍응답 평가시의 철근콘크리트 건물의 감쇠율 산정식에서 재료관련 감쇠율의 경우 균열이 없는 경우 0.004, 균열이 있는 경우 0.0072를 제안하고 있으며, 구조 관련 감쇠율의 경우 벽 식은 0.0032, 골조의 경우 0.0064를 제안하고 있다.

1.3 연구 범위 및 방법

본 논문에서는 초고층 건축물에 사용되는 다이아그리드 구조 시스템 특성을 분석하고 국내외 고층 건물들의 동특성을 조사하였으며, 풍응답 가속도 기준들에 대해 조사하고 감쇠비를 매개변수로 하여 풍응답 특성 및 사용성 평가를 하였다. 또한 초고층 건물 다이아그리드 구조 시스템을 적용한 예제 건물을 각각의 높이별, Volume Design, 전단벽 설계를 통해 사용성 평가, KBC2016,

NBCC1995를 통하여 결과를 도출해보고자 한다.

해석은 MIDAS GEN 프로그램을 통하여 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도 결과값을 도출하였으며 NBCC1995 식을 이용하여 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도 결과값을 비교 분석하였다.

본 논문의 내용을 정리하면 다음과 같다.

2장에서는 다이아그리드 구조 시스템의 특성과 국내외 다이아그리드 구조 시스템의 고층건물의 사례를 소개하였다.

3장에서는 고층 건물에 사용되는 KBC2016 풍응답 가속도 산정식과 기준치를 살펴보고 일반적으로 많이 적용되는 NBCC95(캐나다 기준), Solari Method(미국 기준), AIJ 2004(일본 기준)의 사용성 평가 산정식 및 기준을 정리하였으며 풍응답 가속도 거주 성능평가 기준들에 대해 비교 분석하였다.

4장에서는 고층건물 풍응답 특성에 필요한 고층건물의 동특성(높이, 층수, 고유주기)을 조사하였고 풍응답 가속도 식 KBC2016, NBCC95를 통해 풍방향(Along-Wind) 가속도 응답과 풍직각방향(Cross-Wind) 가속도 응답을 구해 비교 분석하였다. 또한 풍응답 및 풍동실험값의 구조설계 감쇠비를 적용하기 위한 감쇠비 제안식(ISO 4354)을 고찰하였다.

5장에서는 초고층 건물 다이아그리드 구조 시스템에 대해 Moon(2007)이 제시한 건축 평면 60층 건물을 표본 모델로 삼아 KBC2016 풍응답 사용성 평가를 해보았다. 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도를 구하여 ISO 10137 거주 성능평가 곡선에 넣어 결과를 도출하였고, 또한 NBCC95 풍응답 사용성 평가 식을 이용 다이아그리드 구조 시스템과 평면의 변화를 주어 다이아그리드 구조 시스템과의 비교를 통해 비주거시설 제한치인 2.5%g에 만족하는 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도의 결과를 도출하였다.

제 2 장 초고층 다이아그리드 시스템 특성 및 현황 분석

2.1 다이아그리드 구조시스템 특성

2.1.1 다이아그리드 구조시스템 개념

다이아그리드 구조 시스템이란 Diagonal과 gird의 합성어로 수직 기둥 없이 보와 가새의 삼각형 모듈로 부재의 축력만으로 수직력과 수평력에 저항하는 시스템이다. 이러한 형태는 사각형 형태와 비교하여 평면의 변화와 입면 상의 변화에 유연하게 대처할 수 있는 장점을 가진다. 다이아그리드 구조 시스템은 가장 기본적인 형태의 모듈 변화를 가져옴으로써 고층 건물의 형태에 무한한 가능성을 제공하고 삼각형 모듈의 조합은 사각형 모듈의 조합보다 훨씬 더 다양한 형태를 표현하는 것이 가능하다.

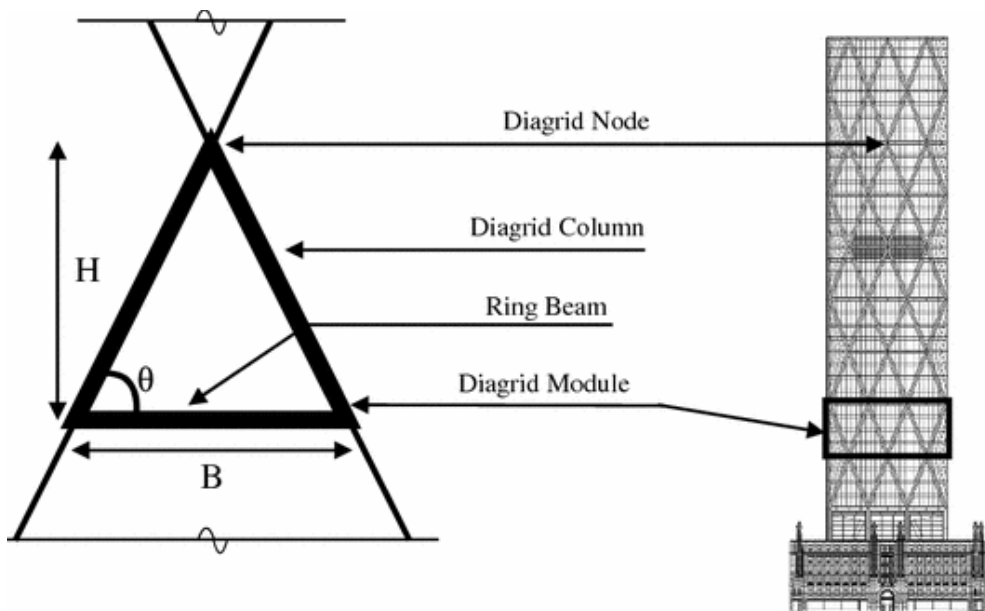


Fig. 5 다이아그리드 구조시스템 개념

Fig. 6을 보면 바람이나 지진 같은 횡력의 저항에 매우 효율적이고 다이아그리드의 하중 저항 원리는 수직 하중에 대하여 가새부재의 압축응력과 수평 부재의 Strut-Tie 효과를 통하여 저항한다.

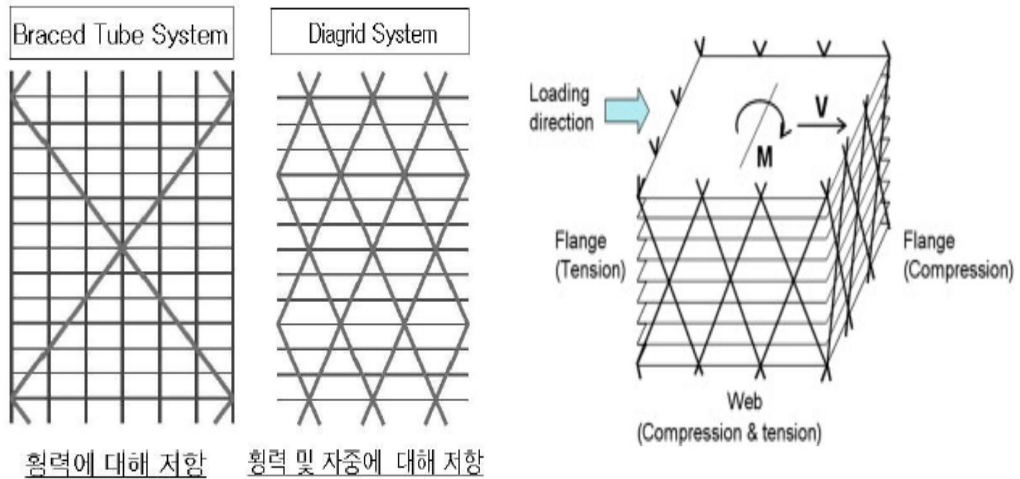


Fig. 6 가새(Braced) 시스템과 다이아그리드 구조물의 모듈

기존의 가새 시스템의 경우 수직 기둥이 전도 모멘트를 분담하고 가새 골조가 전단력을 분담하는 형식이다. 하지만 다이아그리드 구조 시스템의 경우 수직 기둥 없이 대각 가새가 수직력과 수평력을 모두 저항하기 때문에 기존 가새 시스템과는 접합부에 대한 부재 성능에서 차이가 발생한다.(Mele, 2014) 다이아그리드 구조는 가새 부재의 축 방향 거동을 통해 전단력을 전달한다.

2.1.2 다이아그리드 구조시스템 접합부

다이아그리드 구조 시스템의 접합부에는 최소한 6개의 부재가 만나며 이러한 복잡한 접합부 설계 및 제작에는 고난도 엔지니어링이 필요로 하다. 다이아그리드 구조 시스템은 기존의 수직 방향 보, 기둥 접합과는 그 거동이 상이하기 때문에 기존의 구조 시스템의 내진 성능 계수를 그대로 적용하기에는 다소 어려움이 있다.

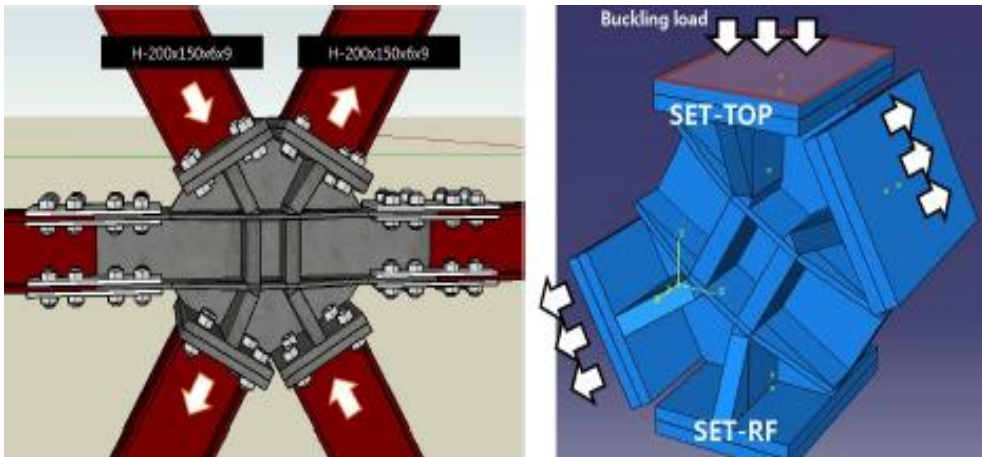


Fig. 7 다이아그리드 구조시스템 접합부 노드해석 대상과 노드해석

다이아그리드 구조 시스템을 설계하는 데 있어 가장 중요한 부분은 접합부(Node)라고 할 수 있다. 효과적인 힘의 흐름을 위해 가장 중요한 역할은 접합부이다. 전우구조에서는 다이아그리드 구조 시스템으로 시공하였거나 현재 시공 중인 건물들을 Table 1과 같이 노드 형상에 따라 몇 개의 요소를 이용하여 다이아그리드 구조 시스템의 형상을 분류하였다.(주영규, 2008)

Table 1 다이아그리드 형상에 따른 분류 (주영규, 2008)

구 분	Heart Tower	30st Mary Axe	Cocoon Tower	Sony City	Meet port
노드 형상					
노드 모듈	상하 4개층	상하 2개층	상하 1개층	상하 3개층	상하 1개층
노드 제작 방법	일체형	일체형	일체형	주강(Casting)	분할접합
노드 가새 접합	볼트	볼트	용접	용접	용접
비 고	축소량 정밀계산 정밀계측 및 가공	파이프-판재 전이형 노드	편재 플랜지형상 제단 사용	각형강판 가새의 노드를 위한 주강	파이프분할 분위 수직판재 보강

2.1.3 다이아그리드 구조시스템 최적각도

다이아그리드에서 최대 전단강성을 위한 대각부재의 최적 각도를 찾기 위해 전단 강성만을 고려했을 때 대각 부재의 최적 각도는 Fig. 8에 나타난 간단한 대각 프레임 모델을 사용하여 추정할 수 있다.

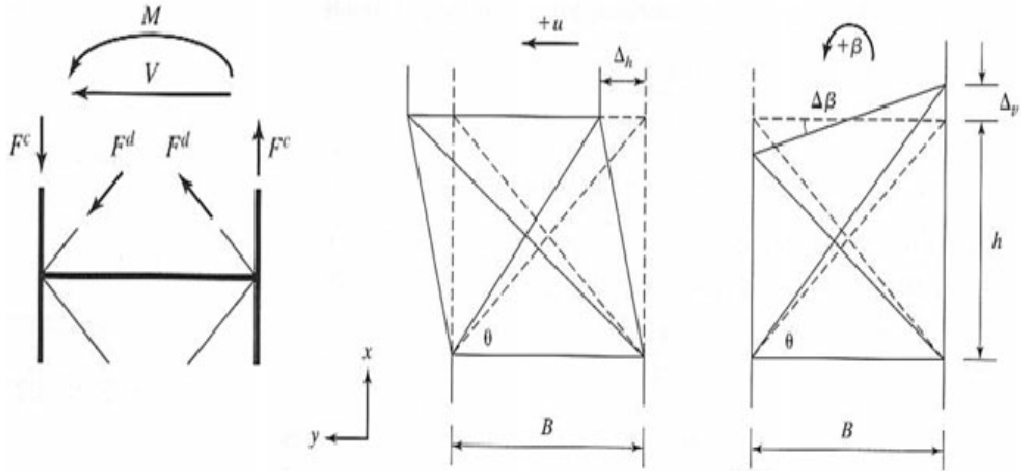


Fig. 8 대각 골조 모델

여기서 핵심은 부재들이 축력만을 가지고 있다는 것을 가정한 것이다.

단면전단력은 식(1)과 같이 대각 부재력과 관련된다.

$$V = 2F_d \cos \theta \quad (1)$$

선형으로 탄성거동을 할 경우, 부재들의 힘은 대각선 변형률 증가와 관련이 있다.

$$F_d = A_d \sigma_d = A_d E_d \varepsilon_d \quad (2)$$

인접한 노드들에서 상대적인 횡 방향 운동으로 인한 변형률은 Δ_h 와 θ 이다.

$$\varepsilon_d = \frac{e_d}{L_d} = \frac{\Delta_h \cos \theta}{\frac{h}{\sin \theta}} = \frac{\Delta_h \cos \theta \sin \theta}{h} \quad (3)$$

회전에 의한 대각선의 확장 변형률 $\Delta\beta$ 는 무시하고 식(4)와 같이 횡방향 전단 변형률 근사치는 γ 이다.

$$\eta \approx \frac{\Delta_h}{h} \quad (4)$$

총 연장 변형률에 대한 근사치 식(5) 구한다.

$$\varepsilon_d \approx \gamma \cos\theta \sin\theta \approx \frac{\gamma \sin 2\theta}{2} \quad (5)$$

위의 방정식을 조합하면 이 전단력에 대해 다음과 같은 식(6)이 된다.

$$V = (A_d E_d \sin 2\theta \cos\theta) \gamma \quad (6)$$

정리를 하면 전단강성은 전단력 및 전단 변형률과 관련이 있는 식(7)이 나온다.

$$V = D_T \gamma \quad (7)$$

결과 식(8)과 같이 정리 할 수 있다.

$$D_T = A_d E_d \sin 2\theta \cos\theta \quad (8)$$

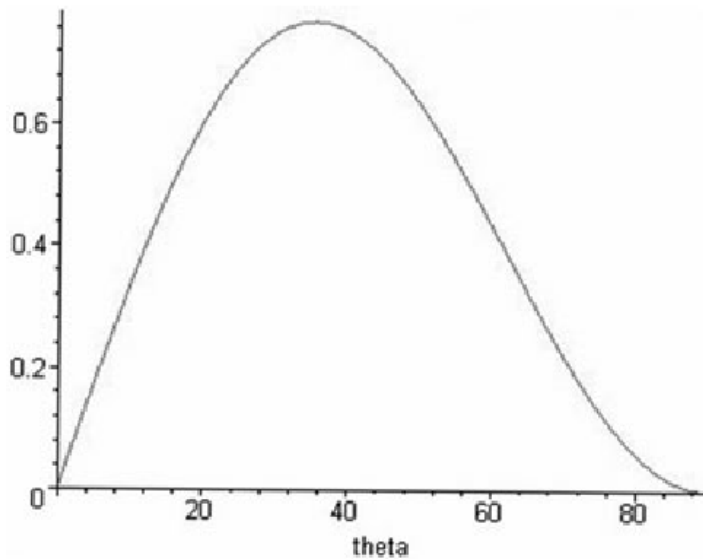


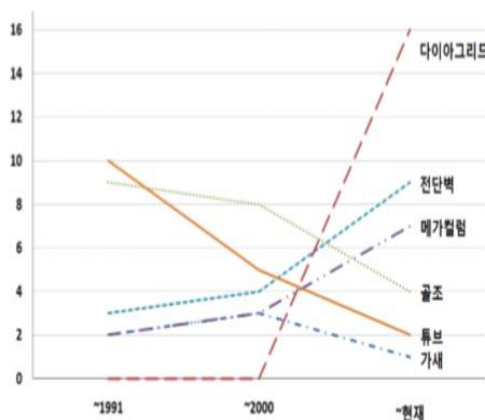
Fig. 9 $\sin 2\theta \cos \theta$

Fig. 9에 $\sin 2\theta \cos \theta$ 에 대한 그림이 표시되어 있는데 시스템의 최대 전단 강성에 대한 최적의 각도가 약 35° 임을 나타내고 있다. 일반적인 브레이스 프레임에서 휨 모멘트는 수직 기둥의 축력에 의해 전달된다.

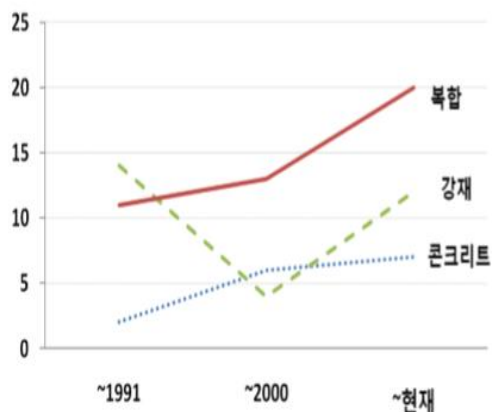
그러나 수직 기둥을 가지지 않는 구조물의 경우 휨은 대각선의 축력에 의해 전달된다. 최대 휨강성을 위한 기둥의 최적 각도는 90° 이고 최대 전단강성을 위한 대각선의 각도는 약 35° 이므로 다이아그리드 구조의 대각부재 최적 각도는 그 사이에 있을 거라고 예상된다. 세장비가 작은 건물(높이/넓이)은 전단 보처럼 동작하고, 세장비 비율이 높은 고층 건물은 휨 보처럼 동작하는 경향이 있다. 따라서 건물 높이가 증가함에 따라 최적 각도도 증가할 것으로 예상된다. (Moon, 2007)

2.2 국내외 다이아그리드 구조시스템 고층건물의 사례

세계적으로 각국의 기술력과 경제력을 바탕으로 한 초고층 건축물 건설이 증가하고 있다. 다이아그리드 구조 시스템은 이러한 건축 경향에 반영하는 새로운 구조 시스템으로서 그 사용이 늘어나고 있다.



(a) 구조시스템별



(b) 재료별

Fig. 10 초고층 건물 구조시스템의 추세

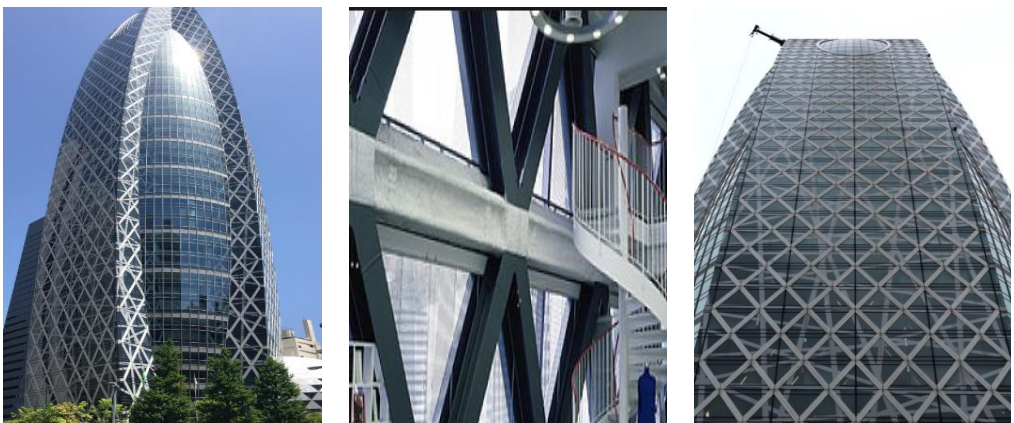
Fig. 11,12에서 대상 건축물은 미국, 일본, 영국, 중국 등 국내외 다이아그리드 구조 시스템 고층 건물 사례를 조사하였다.



(a) 30 St Mary Axe, London, UK (180m)

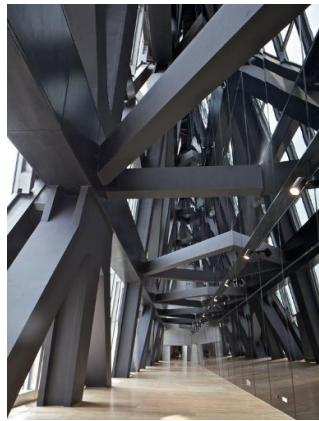


(b) Hearst Tower, New York, USA (186m)

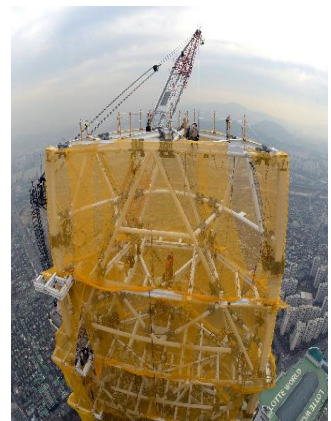


(c) Cocoon Tower, Tokyo, Japan (203m)

Fig. 11 국외 고층 다이아그리드 구조시스템 건축물 예



(d) The New Headquarters of CCTV, Beijing, China (234m)



(e) Lotte World Tower, Seoul, Korea (555m)



(f) 아산 배방 사이클론 타워

(g) 대전 퓨처렉스 프로젝트

Fig. 12 국내외 고층 다이아그리드 구조시스템 건축물 예

영국 런던의 30 St Mary Axe는 높이 180m로 다이아그리드 구조시스템이 적용된 대표적인 건물로 비정형 형태를 유지하고 있다. 미국 뉴욕의 Hearst Tower는 높이 186m로 다이아그리드 구조 시스템 적용함으로서 기존의 철골 부재 사용을 20% 줄 일 수 있다는 결과를 가져왔다. 일본 도쿄의 위치한 Cocoon Tower는 높이 203m이고 누에고치 같은 외부 구조를 만들어 학생들을 내부에서 양육하는 건물을 상징한다. 중국 베이징의 The New Headquarters of CCTV는 234m로 건물 전면에 불규칙한 그리드가 들어간 형태이다. 국내에서 다이아그리드 구조 시스템이 적용된 가장 높은 건물은 서울특별시 송파구에 위치해 있는 롯데월드타워로 555m이다. 롯데월드타워의 상층부에 다이아그리드 구조 시스템이 적용이 되었다. 강구조 전문 연구기관, 철구 제작 전문기관, 구조설계사, 건설사 등에서 공동으로 Diagrid Node의 제작 및 설계/시공과 관계된 연구를 수행하였다. 또한 초고층 건축을 위한 여러 프로젝트 아산 배방 싸이클론타워, 대전 퓨처엑스 프로젝트 등 초대형 대각가새 구조 적용을 검토하고 있다.

향후 초고층 건축물에 효율성 때문에 많은 사용이 예상되며, 관련 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 다이아그리드 구조 시스템을 적용하기는 쉽지 않은 일이다. 개발이 된 지 오래되지 않은 구조 시스템으로서 연구가 충분히 이뤄지지 않아 적용을 위해 사전 연구가 진행되고 있다.

제 3 장 초고층 건물의 풍응답 가속도 평가

3.1 풍응답 가속도 특성 기준 및 분석

최근 40~50층 규모의 주상복합건축물이 다수 건설되면서 풍하중에 의한 건축물의 안정성뿐만 아니라 사용성(serviceability)에 대한 관심이 많아지고 있다. 사용성 평가란 초고층건물의 설계 시 태풍, 계절풍 등의 강풍으로 인한 건물의 진동에 따라 거주자가 불쾌감을 느끼지 않도록 하는 사용성능평가로 초고층 건물의 풍하중에 대해 풍방향(Along-Wind) 가속도 응답, 풍직각방향(Across-Wind) 가속도 응답으로 크게 분류하여 두 방향에 대한 응답을 구하여 평가하고 있다.

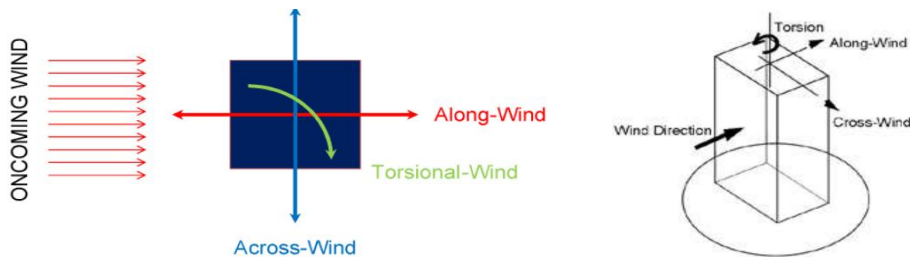


Fig. 13 Along-Wind, Across-Wind, Torsional-Wind

Fig. 14를 보면 풍직각방향(Across-Wind)은 건축물의 모서리에서 박리하여 후류에 방출되는 와류로 인하여 발생하는 변동 풍력이다. 풍속의 변동에 기인하는 풍방향의 변동 풍력과는 그 성격이 완전히 달라 확인이 필요로 하다.

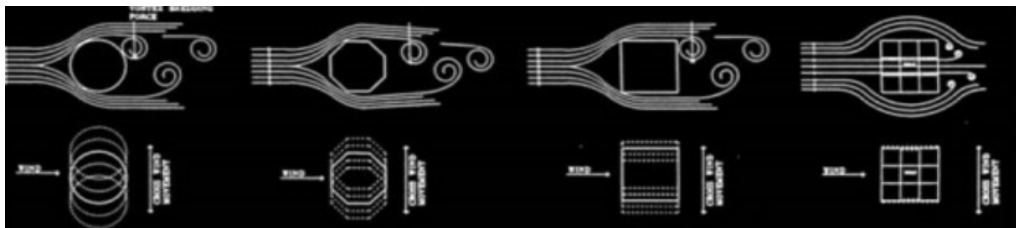


Fig. 14 바람의 방향에 따른 건물의 진동방향

본 장에서는 먼저 주요 각국 사용성 평가 기준을 검토해 본 후 건축물의 사용성을 평가할 경우 어떠한 방법으로 접근하는 것이 우리나라 풍 기후에 적합한 평가 방법인지에 대해 방법론적으로 고찰해 보고자 한다.

3.1.1 KBC2016 풍응답 가속도 특성

강풍으로 발생하는 건축물의 풍방향 응답을 구하기 위하여 일반적으로 사용하는 방법이 스펙트럼 모드 해석(Spectral modal analysis)이다. 스펙트럼 모드 해석이란 불규칙한 풍속을 받아 불규칙하게 진동하는 건축물의 진동 특성을 풍속, 풍력, 변위의 변동 특성은 스펙트럼에 의해서 표현하고, 진동하는 건축물의 진동 특성은 선형 연속체인 건축물의 진동은 1차 진동모드가 탁월하기 때문에 진동 변위는 1차 진동모드로 움직이는 것으로 이상화하여 주파수영역에서 건축물의 진동 응답을 평가하는 것이다. 건축물의 진동가속도를 평가할 때는 1년 재현주기의 풍속을 사용한다.(건축구조기준, 2016)

1) 풍방향 최대응답가속도 (KBC2016)

건축물 최상층에서의 풍방향 최대응답가속도 $a_{D,max}$ 는 다음 식으로 산정한다.

$$a_{D,max} = \frac{1.5g_D C_D q_H B H I_z \sqrt{R_D}}{M^*(\alpha + 2)} (m/s^2) \quad \text{단, } g_D = \sqrt{2 \ln(600 n_D) + 1.2}$$

$$C_D = 1.2 \left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha}$$

여기서, g_D : 풍방향 피크팩터

C_D : 평균풍력계수

q_H : 설계속도압(N/m^2)

M^* : 풍방향1차진동일반화질량(kg)

B : 건축물의 풍방향대표폭(m)

α : 고도분포지수

H : 건축물의 기준높이(m)

β : 진동모드형에 관한 지수

I_z : 풍속의 난류강도

n_D : 건축물의 풍방향1차고유진동수(Hz)

R_D : 풍방향공진계수

z : 지표면으로부터의 높이(m)

2) 풍직각방향 최대응답가속도 (KBC2016)

건축물 최상층에서의 풍직각방향 최대응답가속도 $a_{L, \max}$

$$a_{L, \max} = \frac{g_L C_{M,L}' q_H B H}{M_L^*} \sqrt{R_L} (m/s^2) \quad \text{단, } g_L = \sqrt{2 \ln(600 n_D) + 1.2}$$

여기서, g_L : 풍직각방향피크팩터

q_H : 설계속도압(N/m^2)

$C_{M,L}'$: 풍직각방향변동전도모멘트계수

B : 건축물의 대표폭(m)

M_L^* : 풍직각방향1차진동일반화질량(kg)

H : 건축물의 기준높이(m)

R_L : 풍직각방향공진계수

n_L : 풍직각방향진동의 1차고유진동수(Hz)

3.1.2 NBCC 1995 풍응답 가속도 특성

풍하중으로 인한 건물의 가속도를 측정 주거 시설의 적합성을 검토한다. 바람에 의해 유발되는 건물의 수평진동을 다양한 경계층 풍동실험 결과에 의해 도출한 경험식 NBCC 1995에서 최상층의 풍방향 및 풍직각방향 최대 가속도를 평가한다.

NBCC95의 가스트 영향계수 아래식과 같다.

1) 가스트 영향계수

$$C_g = 1 + g_p(\sigma/\mu)$$

$$\text{여기서 } (\sigma/\mu) = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}} \left(B + \frac{sF}{\beta} \right)}$$

K : 조도구분에 따른 지형계수

s : 크기감소계수

C_{eH} : 건물높이에서의 노출계수

F : 고유진동수의 거스트 에너지율

다음은 풍방향(Along-Wind) 가속도응답과 풍직각방향(Across-Wind) 가속도응

답에 이용되는 식이다.

2) 풍방향(Along-Wind) 가속도응답 식(1)은 다음과 같다.

$$a_D = g_p \sqrt{\left(\frac{KsF}{C_e\beta}\right)} \left(\frac{3.9}{2+\alpha}\right) \left(\frac{C_e q}{Dg\rho_B}\right) \quad (1)$$

$$g_p : \text{피크팩터} = \sqrt{2\ln\nu T} + \frac{0.577}{\sqrt{2\ln\nu T}} \quad T : \text{샘플시간 } 3600\text{s}$$

$$\nu = n_0 \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta_D B}} \quad (\text{평균변동}) \quad n_0 : \text{구조물의 고유진동수}$$

B : 백그라운드 난류패턴

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{914/H} \left[\frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{xW}{122}} \right] \left[\frac{1}{(1+x^2)^{(4/3)}} \right] dx$$

H : 구조물의 높이

W : 구조물의 폭

s : 크기 감소계수

$$s = \frac{\pi}{3} \left[\frac{1}{1 + \frac{8n_0 H}{3V_H}} \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{10n_0 W}{V_H}} \right]$$

F : 고유진동수의 거스트 에너지율

$$F = \frac{x_0^2}{(1+x_0^2)^{\frac{4}{3}}}, \quad x_0 = \left(\frac{1220n_0}{V_H} \right)$$

V_H : 구조물의 최상층에서의 풍속

C_e : 노출계수(exposure factor)

K : 조도구분에 따른 지형계수

α : 풍속의 고도분포지수

Table 2에는 노출 계수, 지형 계수, 고도분포 지수의 값 들을 정리해 놓았다.

Table 2 노출 계수, 지형 계수, 고도분포 지수

Exposure	C_e	K	α
개방된 지역과 교외지역	$C_e = (\frac{z}{10})^{0.28}, C_e \geq 1.0$	0.08	0.28
교외지역과 도심지역	$C_e = 0.5(\frac{z}{12.7})^{0.50}, C_e \geq 0.5$	0.1	0.5
고층건물로 구성된 도심지역	$C_e = 0.4(\frac{z}{30})^{0.72}, C_e \geq 0.4$	0.14	0.72

β : 감쇠율

D : 구조물의 폭

q : 기준풍속압 $= C \bar{V}^2$ (C 는 대기압에 따라 결정되는 상수값)

g : 중력가속

ρ_B : 구조물의 밀도

3) 풍직각방향(Across-Wind) 가속도응답 식(2)은 다음과 같다.

$$a_W = n_w^2 g_p \sqrt{WD} \left(\frac{a_r}{\rho_B g \sqrt{\beta_w}} \right) \quad (2)$$

n_w : 횡방향의 1차 고유진동수

g_p : 피크팩터

W, D : 건물의 폭과 깊이

$$a_r : 7.85 \times 10^{-3} \left[\frac{V_H}{n_w \sqrt{WD}} \right]^{3.3}$$

g : 중력가속도

β_w : 횡방향의 감쇠율

3.1.3 Solari Method 법 풍응답 가속도 특성

Solari의 간편계산법에 의한 최대 가속도 산정 방법이다. 밑면 길이(D), 밑면 가로 길이(B), 건물 높이(H) 중 최소값을 Δ 로 정하였고 건물의 단위 길이 당 질량 $m(z)$ 와 공기밀도 ρ 를 계산, 모드 질량 $M_1=m/3$ 을 계산, 건물의 고유주기와 감쇠비를 결정하였다. 풍상면 풍압계수 $C1$ 과 풍하면 풍압계수 $C2$ 를 결정하여 건물의 풍력 계수 $Cd=(C1+C2)$ 이다. 지면 조도 계수 z_0 와 fastest 10분 풍속 V_{10} 로 풍속이 10분 평균속도보다 작을 경우에는 10분 평균 치환하여 마찰속도 V_* 를 다음 식 $V_{(z)} = \frac{1}{\chi} V_* \ln \frac{Z}{Z_0}$ 에 의해 구하였다. F1-F10 계수 값을 구한 후 건물 최상층에서의 평균 진동($\bar{X}$)과 평균제곱근(rms) 진동(X_s)을 구하며, R(주응답 주파수), 최대 계수(g), 가스트 계수(G), 최대 진동($\hat{X}$), 평균제곱급가속도($\ddot{X}_s$), 최대 가속도계수(g_a), 최대 가속도($\hat{\ddot{X}}$) 등을 차례로 구한다.

다음은 Solari 법에 이용되는 계수치이다.

$$F_1 = 2(\ln \frac{H}{Z_0}) - 1$$

$$F_2 = \frac{n_1 H}{V_* F_1}$$

$$F_3 = 0.78 F_1^2$$

$$F_4 = \frac{6.71 F_1^2}{1 + 0.26(B/H)}$$

$$F_5 = 12.32 \frac{F_2 \Delta}{H}$$

$$F_6 = 3.55 F_2$$

$$F_7 = \frac{1}{F_5} - \frac{1}{2F_5^2} [1 - \exp(-2F_5)]$$

$$F_8 = \frac{1}{F_6} - \frac{1}{2F_6^2} [1 - \exp(-2F_6)]$$

$$F_9 = C_1^2 + 2C_1 C_2 F_7 + C_2^2$$

$$F_{10} = \frac{0.59 F_1^2 F_2^{-2/3} F_8 F_9}{\zeta C_D^2 [1 + 3.95(F_2 B/H)]}$$

$$\bar{X} = \frac{C_D B H q_* F_3}{M_1 (2\pi n_1)^2}$$

$$X_s = \bar{X} \left(\frac{\sqrt{F_4 + F_{10}}}{F_3} \right)$$

$$R = n_1 \sqrt{\frac{F_{10}}{F_4 + F_{10}}}$$

$$g = \sqrt{1.175 + 2 \ln(RT)} \quad (T = 100)$$

$$G = 1 + g \frac{X_s}{\bar{X}}$$

$$\hat{X} = G \bar{X}$$

$$X_s = \frac{C_D \ddot{B} H q_*}{M_1} \sqrt{F_{10}}$$

$$g_a = \sqrt{1.175 + 2 \ln(n_1 T)} \quad (T = 600)$$

$$\ddot{X} = g_a \ddot{X}_s$$

여기서 $V_{(z)}$ 는 평균풍속이며, k 는 Karman 계수로서 근사적으로 0.4이며 z 는 10m이며 마찰속도를 구한 후 풍압력 $q = \rho V_*^2/2$ 을 구하였다.

3.2 풍응답 가속도 거주 성능 평가 기준

풍하중에 의한 건축물의 사용성이라고 하면, 일상생활에서 건축물에 가해지는 풍하중에 의해 수평진동(가속도)이 발생하고 그 진동에 대해 사용자가 느끼는 불편감, 멀미, 현기증 등의 만족 정도를 말한다. 일반적으로 일상적인 거주 공간에 있어서 진동은 발생하지 않는 것이 이상적이지만 진동이 발생하더라도 그것을 거주자가 지각할 수 없을 정도라고 한다면 진동에 관한 평가로서는 만족이라고 말할 수 있다. 즉 진동의 크기가 거주자에게 지각될 것인지 아닌지가 사용성 평가의 기본 척도라고 할 수 있다.

국내에서 KBC2016에서 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선이 사용되며 국외에서 캐나다(NBCC95, 2005), 일본(AIJES-V001-2004), ISO 6897(국제 기준) 등의 기준이나 제안된 이론식을 이용하여 풍응답 가속도 거주 성능 평가를 하고 있는 실정이다. 그리하여 국내외 기준 중 건축물의 용도를 주거용, 사무용 건축물로 분류하고 진동 사용성 평가를 하고 있는 ISO 10137, AIJES-V001-2004(일본 기준), ISO 6897(국제 기준), NBCC 2005(캐나다 기준) 기준들의 진동 사용성 평가에 대해 조사, 연구하고 재현기간의 차이에 대해 비교 및 분석하였다.

3.2.1 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선

1년 재현 기대 풍속의 바람이 불었을 때, 건축물의 병진 진동의 고유진동수와 1차 고유진동수가 nHz 인 건물에 발생한다. 진동가속도에 의해 거주성에 문제가 발생하지 않기 위해서는 건물 최상층에서 발생하는 최대 응답 가속도 $a_{\max}$ 가 다음 식 이하의 값이 되어야 한다.

$$a_{\max} = Cn^{-0.454} \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

$$C = 6.0 \text{ (사무용 건축물)}$$

$$C = 4.0 \text{ (주거용 건축물)}$$

Fig. 15의 실선 및 점선의 값보다 보다 밑에 위치하여야 한다.

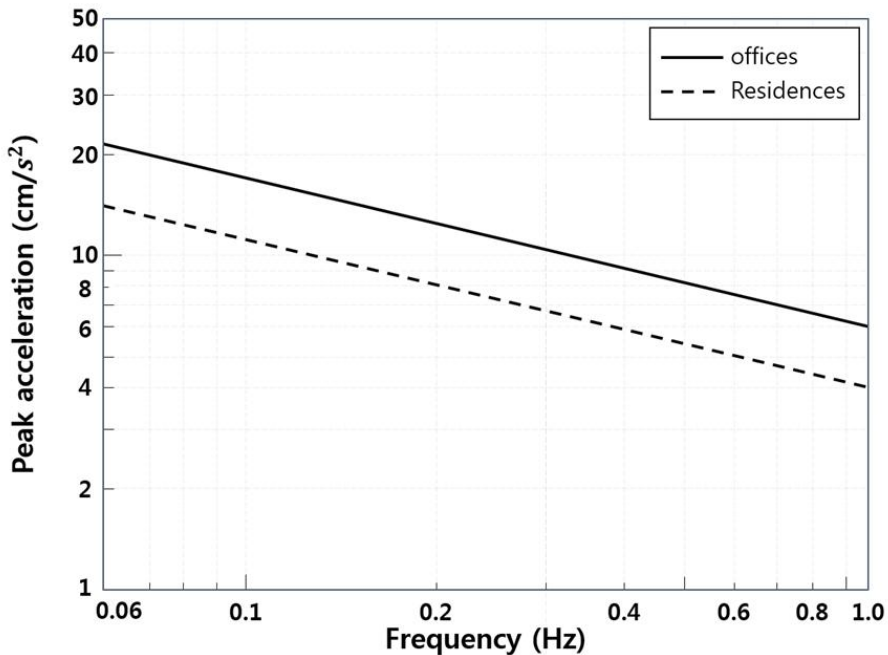


Fig. 15 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선

3.2.2 AIJES-V001-2004(일본기준)

일본 건축 학회에서는 건축물의 목표 성능을 유지하는 관점에서 강풍으로 건축물에 발생하는 수평진동을 평가하는 경우에 적용하며 10분 평균풍속의 1년 재현 기대 풍속이 부는 경우 건축물 최상층에서 진동으로 발생하는 최대 응답 가속도를 Fig. 16에 도시하고, 설계자와 건축주가 목표 성능(인간이 가속도를 지각하는 확률)을 설정하여 거주성을 결정하도록 하고 있다. 진동수의 범위는 0.1Hz~5H까지 저층부터 고층까지 건축물의 고유진동수를 포함하고 있으며, 목표 성능을 H-90으로 하면 거주성 평가 기준이 엄격하지 않은 것이고, H-50으로 하면 거주성평가기준이 엄격해지는 것이다. Fig. 16의 최대 응답 가속도 a_{max} 는 다음 식에 의해 평가하는 것이다. Table 3에서 $a_{max} = an^b(cm/s^2)$ 의 계수 a,b의 값들을 나타내었다. (日本建築學會, 2000)

$$a_{\max} = an^b (\text{cm/s}^2)$$

여기서, n : 건축물의 1차고유진동수(Hz)

a, b : Table 3 주어진 상수

Table 3 $a_{\max} = an^b (\text{cm/s}^2)$ 의 계수 a, b 의 값

진동수 평가곡선	$0. \leq n < 1$		$1.5 \leq n < 2$	$2.5 < n \leq 1$	
	a	b	$a_{\max}$	a	b
H-10	1.17	-0.5	0.96	0.461	0.8
H-30	1.67		1.37	0.658	
H-50	2.15		1.76	0.846	
H-70	2.76		2.26	1.086	
H-90	3.87		3.22	1.547	

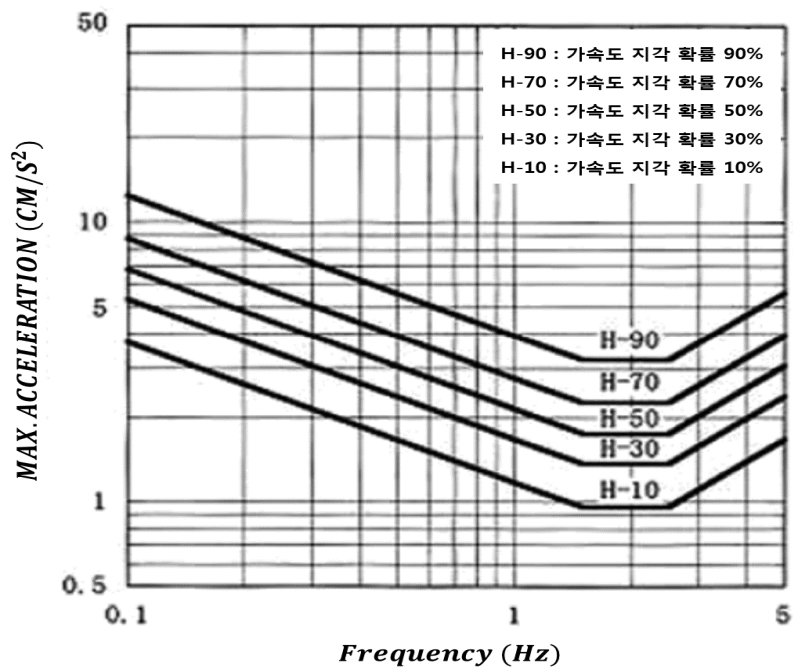


Fig. 16 바람에 의한 수평진동에 관한 성능평가곡선(AIJ 2004)

3.2.3 ISO 6897(국제기준)

ISO 6897에서 규정하고 있는 진동 사용성 평가시의 가속도는 10분 평균풍속의 5년 재현 기대 풍속에 대한 진동가속도를 RMS 값으로 사용하고 있다.(ISO6897, 1984) 재현기간 환산 계수($0.68+\ln R/5$)와 피크 팩터(Peak Factor) $\sqrt{2\ln n_0 T}$ 적용하여 재현기간 5년에 해당하는 RMS 가속도를 임의의 재현기간에 해당하는 최대 가속도로 나타낼 수 있다. Fig. 17은 재현기간에 따라 평가 기준을 도식적으로 나타낸 것이다. ISO 6897기준은 건축물의 고유진동수 n_0 에 따라 달리하며 초고층 건축물의 고유진동수 영역은 0.05Hz~1.00Hz의 값을 두고 있다.

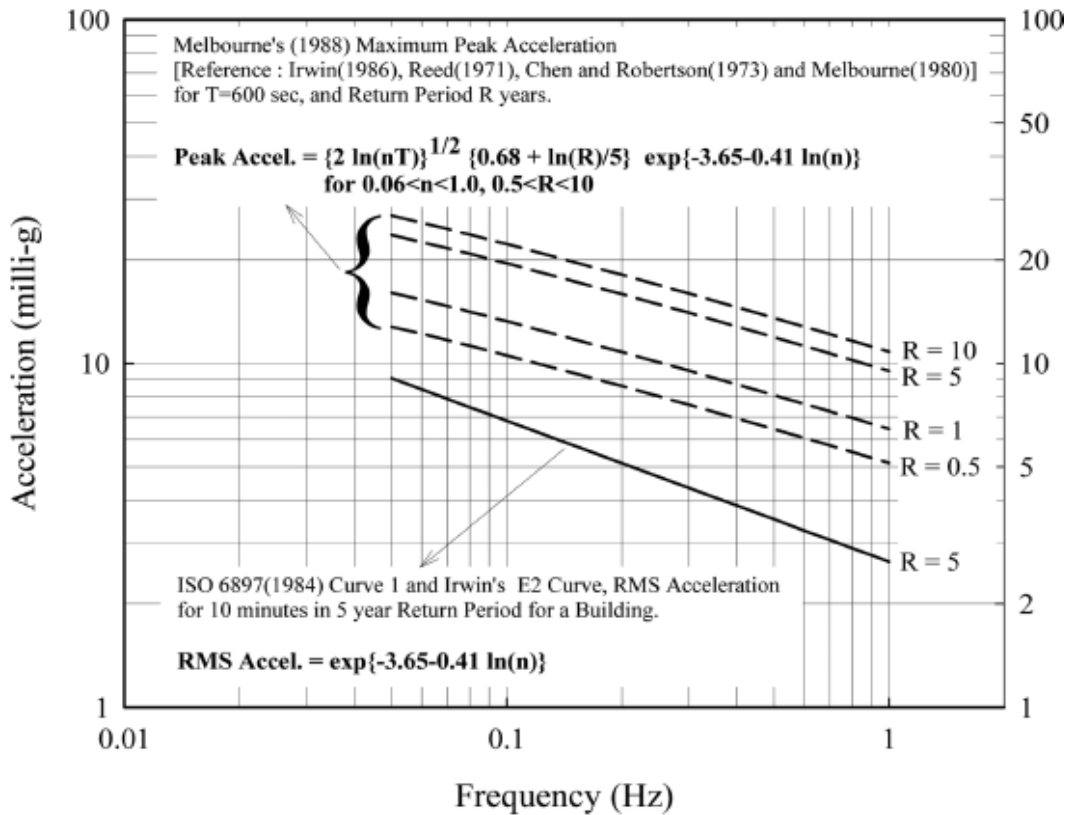


Fig. 17 ISO 6897 진동 사용성 평가기준

3.2.4 NBCC 2005(캐나다기준)

캐나다 기준은 건축물의 수평진동을 풍방향과 풍직각방향에 대해서 최대 가속도를 나타내는 경험식으로 제안하고 있다. 가속도 한계는 평가 시간 1시간, 10년 재현 기대 풍속에 대하여 주거용 건축물의 경우 가속도 한계는 중력가속도의 1.5%, 사무용 건축물은 중력가속도의 2.5%를 적용하도록 하고 있다. 그중 사무용 건축물은 주거용 건축물보다 약 1.67배 정도 더 높게 두어 가속도를 제한하고 있다. 건축물 고유진동수의 값과 상관없는 NBCC 2005는 주거용 건축물과 사무용 건축물로 나누어 평가하고 ISO 10137은 건축물의 고유진동수의 값을 구하여 거주 성능 평가하고 있다. 그러나 수평진동 체험 실험 결과 건축물의 고유진동수(진동 대 입력 진동수)에 따라 인간의 진동 체감도가 다른 것으로 평가되었다.(조강표, 2009)

3.2.5 풍응답 가속도 거주성능평가 비교

Table 4는 각각의 진동 사용성 평가 기준을 정리를 해보았고 다음과 같은 내용을 정리할 수 있다.

Table 4 국외의 진동 사용성 평가 기준 (조강표, 2009)

거주성능평가기준	가속도 척도	재현기간	평가시간	허용가속도의 의존성	실험근거
AIJ 2004 (일본기준)	최대가속도	1년	10분	건축물의 고유진동수 목표성능	Moving Room (정현파 진동)
NBCC 2005 (캐나다 기준)	최대가속도	10년	1시간	건축물의 용도	Moving Room (정현파 진동)
ISO 10137 (국제 기준)	최대가속도	1년	10분	건축물의 고유진동수 건축물의 용도	Moving Room (정현파 진동)
ISO 6897 (국제 기준)	RMS가속도	5년	10분	건축물의 고유진동수	Moving Room (정현파 진동)

풍응답 가속도 거주 성능 평가 기준을 Table 4과 같이 정리하였다. 각 기준
 들에서 사용되는 가속도 척도에서 AIJ 2004, NBCC 2005, 그리고 ISO 10137은
 최대 가속도를 사용하는 데에 반해 ISO 6897은 RMS 가속도를 사용하고 있다.
 RMS 가속도는 임의재현기간의 최대 가속도를 재현기간 환산 계수($0.68+\ln R/5$)와
 피크팩터($\sqrt{2\ln n_0 T}$)을 적용하여 구할 수 있다. 재현기간에서 AIJ2004, ISO 10137
 은 1년을 NBCC2005는 재현기간 10년, ISO 6897은 재현기간 5년을 사용하는데
 이렇게 다른 이유는 각 국가의 풍기후 특성이나 바람의 발생 빈도, 크기의 정
 도가 다르기 때문이다. 수십 년에 한 번 발생할 것 같은 큰 진동은 일상적이라
 고 할 수 없다. AIJ 2004는 설계자나 건축주의 판단에 따라 목표 성능을 설정하
 나 NBCC 2005, ISO 10137은 건축물의 용도를 주거용 건축물과 사무용 건축물
 로 분류하여 진동 사용성을 평가한다. 국외의 기준 중 AIJ 2004, ISO 6897 그리
 고 ISO 10137은 건축물의 고유진동수를 고려하지만 NBCC 2005는 건축물의 고
 유진동수와 관계없이 건축물의 용도만 고려하여 평가하고 있다.

제 4 장 국내외 고층건물의 풍응답 특성

4.1 국내외 고층건물 동특성 현황 분석

4.1.1 국외 고층건물의 높이, 층수, 고유주기

해외 기준에서 제시된 감쇠비 제안식 검토하기 위해 건축물의 주기를 조사하였다. 고층 건축물을 대상으로 총 51개 건축물을 조사하였고 계측 대상 건축물은 미국, 일본, 홍콩, 중국 등 다양한 소재지에 위치하고 있으며, 21층부터 75층까지의 층수를 가지며, 가장 낮은 건물의 높이는 75.3m이고 가장 높은 건물의 높이는 310.3m이다.

Architect	Manning and Associates	 Majestic Building (110.06m)
Structural engineer	Wass Buller and Associates	
Year of completion	1991	
Height from street to roof	116m (380 ft)	
Number of stories	29	
Building use	Office	
Frame material	Concrete	
Typical floor live load	3.5kPa (70 psf)	
Basic wind velocity	50 m/sec (112 mph)	
Design fundamental period	2.9sec	
Design acceleration	10 mg peak	
Design damping	1% serviceability	
Earthquake loading	$C_d = 0.0432$	

Fig. 18 국외 고층건물 개요 (Majestic Building, 110.06m)



(a) Sunitomo Life Insurance Building (75.3m)



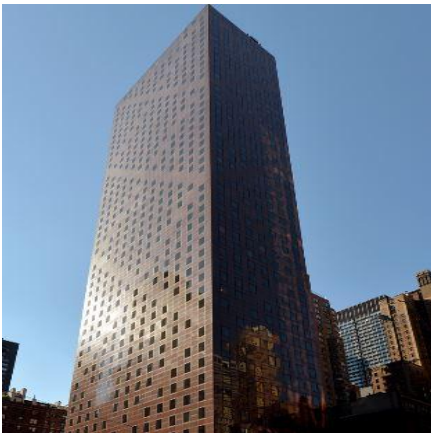
(b) Casselden Place (160m)



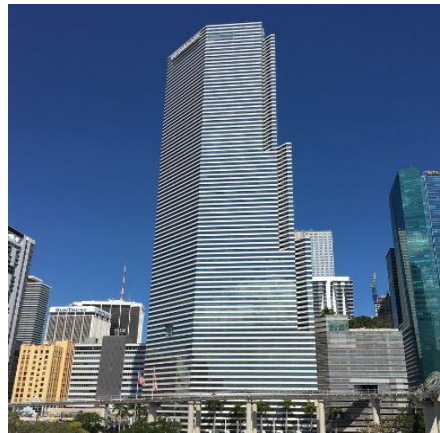
(c) 17 State Street (167.3m)



(d) 450 Lexington Avenue (168m)



(e) 780 Third Avenue (174m)

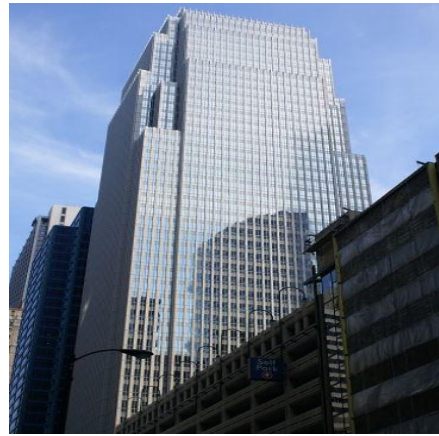


(f) Cen Trust Tower (178m)

Fig. 19 국외 고층 건축물 예



(g) 77 West Wacker Drive (203.6m)



(h) 181 West Madison Street (207m)



(i) Four Allen Center (210.5m)



(j) ACT Tower (211.9m)



(k) Carnegie Hall Tower (230.7m)



(l) First Interstate World Center (310.3m)

Fig. 19 국외 고층 건축물 예

국외 건물의 높이, 층수, 고유주기, 고유주기 산정식을 Table 5에 나타내었다

Table 5 국외 건축물의 높이에 따른 분류

번 호	건물 이름	지 상 높이(m)	층 수	고 유 주기(s)	고유주기 산정식		
					높이/46 (CTBUH)	높이/66.67 (AIJ 2000)	층수/10 (CTBUH)
1	Sumitomo Lift Insurance Building	75.3	21	2.08	1.64	1.13	2.1
2	Sanwa Bank	99.7	25	3	2.17	1.50	2.5
3	Kamogawa Grand Tower	105	33	1.92	2.28	1.57	3.3
4	Kobe Commerce, Industry and Trade Center	110.06	26	3.42	2.39	1.65	2.6
5	Kobe Portopia Hotel	112	31	3.6	2.43	1.68	3.1
6	Majestic Building	116	29	2.9	2.52	1.74	2.9
7	Tokyo Marine Building	118	27	3.95	2.57	1.77	2.7
8	Taj Mahal Hotel	128	42	3	2.78	1.92	4.2
9	Hotel de las Artes	137	43	5.2	2.98	2.05	4.3
10	Embassy Suites Hotel	146.3	46	7.4	3.18	2.19	4.6
11	Nankai South Tower Hotel	147	36	3.24	3.20	2.20	3.6
12	Riverside Center	150	39	3.8	3.26	2.25	3.9
13	Waterfront Place	158	40	5	3.43	2.37	4
14	Casselden Place	160	43	5	3.48	2.40	4.3
15	17 State Street	167.3	44	5	3.64	2.51	4.4
16	450 Lexington Avenue	168	40	5.5	3.65	2.52	4
17	Morton International	170	36	4	3.70	2.55	3.6
18	Central Plaza One	174	44	4.1	3.78	2.61	4.4
19	780 Third Avenue	174	50	4.8	3.78	2.61	5
20	Marriott Marquis Hotel	175	50	5	3.80	2.62	5
21	Cen Trust Tower	178	48	3.5	3.87	2.67	4.8
22	Hongkong Bank Headquarters	180	45	4.4	3.91	2.70	4.5
23	Dewey Square Tower	182	46	5.5	3.96	2.73	4.6
24	Telecom Corporate Building	192	47	4.5	4.17	2.88	4.7

Table 5 국외 건축물의 높이에 따른 분류

번 호	건물 이름	지 상 높이(m)	층 수	고 유 주기(s)	고유주기 산정식		
					높이/46 (CTBUH)	높이/66.67 (AIJ 2000)	층수/10 (CTBUH)
25	Trump Tower	202	58	5.2	4.39	3.03	5.8
26	77 West Wacker Drive	203.6	50	6.67	4.43	3.05	5
27	181 West Madison Street	207	50	6.7	4.50	3.10	5
28	Four Allen Center	210.5	50	4.03	4.58	3.16	5
29	Melbourne Central	211	54	4.2	4.59	3.16	5.4
30	ACT Tower	211.9	47	4.73	4.61	3.18	4.7
31	Chifley Tower	215	50	5	4.67	3.22	5
32	Metropolitan Tower	218	68	5	4.74	3.27	6.8
33	Figueroa at Wilshire	218.5	53	6.5	4.75	3.28	5.3
34	Two Union Square	220	56	6	4.78	3.30	5.6
35	Bourke Place	223	54	4.8	4.85	3.34	5.4
36	Georgia Pacific	230	52	6.2	5.00	3.45	5.2
37	Carnegie Hall Tower	230.7	62	4.8	5.02	3.46	6.2
38	Singapore Treasury Building	234	52	5.6	5.09	3.51	5.2
39	First Bank Place	236.5	56	6.48	5.14	3.55	5.6
40	Bank One Center	240	60	6.8	5.22	3.60	6
41	CitySpire	248	75	5.5	5.39	3.72	7.5
42	World Trade Center	252	55	5.3	5.48	3.78	5.5
43	Nations Bank Coporate Center	256	62	5.3	5.57	3.84	6.2
44	Mellon Bank	259	55	6	5.63	3.88	5.5
45	AT&T Corporate Center	270	61	6.5	5.87	4.05	6.1
46	Two Prudential Plaza	278	64	7.2	6.04	4.17	6.4
47	Citicorp Center	279	60	7.2	6.07	4.18	6
48	Oversesa Union Bank Center	280	63	7.3	6.09	4.20	6.3
49	One Liverty Place	288	61	5.5	6.26	4.32	6.1
50	Columbia Seafirst Center	288	76	5.3	6.26	4.32	7.6
51	First Interstate World Center	310.3	75	7.46	6.75	4.65	7.5

국외 건물의 높이에 따른 고유주기를 추세 선, 높이/46(CTBUH 1995), 그리고 높이/66.67(AIJ 2000기준)를 Fig. 20에 나타내었다.

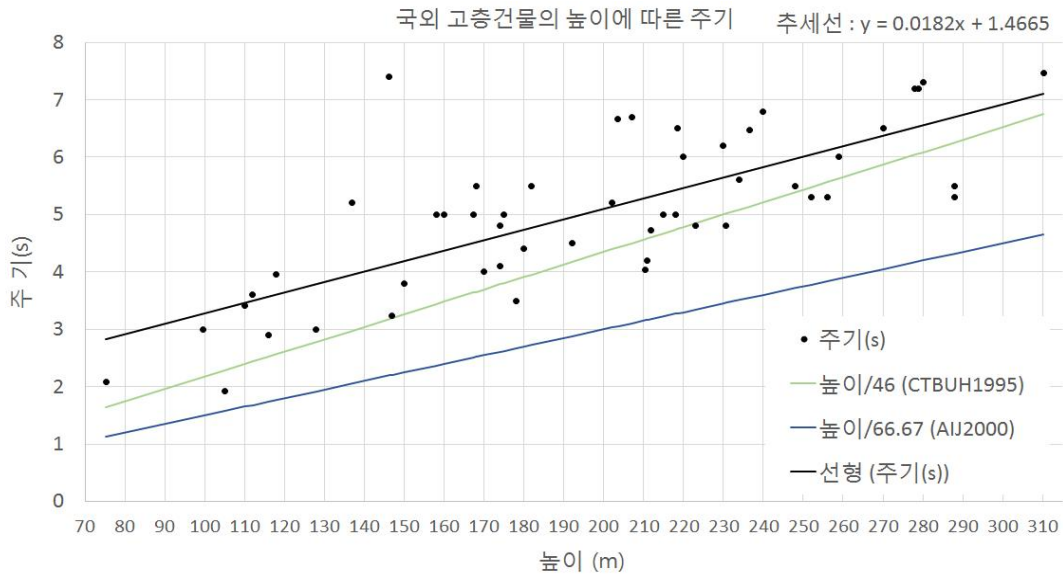


Fig. 20 고층건물의 높이에 따른 주기

국외 건물의 층수에 따른 고유주기를 추세 선, 층수/10(CTBUH 1995)를 Fig. 21에 나타내었다.

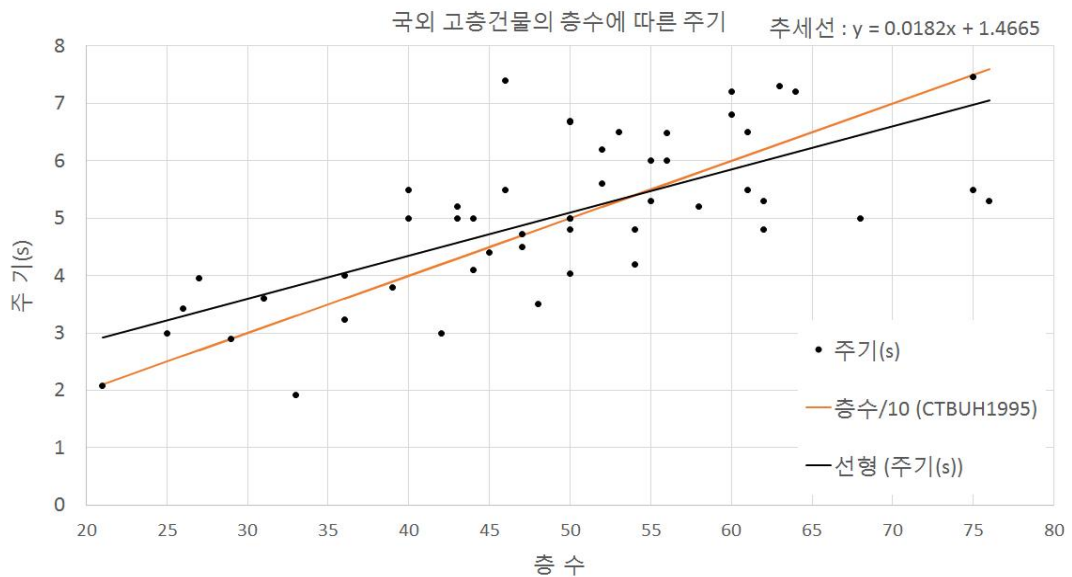


Fig. 21 고층건물의 층수에 따른 주기

Fig. 20,21을 통해 건축물의 층수와 높이에 따라 고유주기를 볼 수 있었다. Fig. 10에서 세계 초고층학회 CTBUH(1995)에서 제안한 식 건축물 높이에 따른 주기 $h/46$ 은 추세 선보다 더 낮음을 알 수 있다. AIJ 2000(2000)에서 제안한 철근콘크리트 구조 $f_1 = \frac{1}{0.015H}$ 즉 식 $h/66.67$ 은 추세 선보다 더 낮은 값을 나타냈다. Fig. 21에서 세계초고층학회 CTBUH(1995)에서 제안한 식 건축물 층수에 따른 주기 $h_f/10$ 은 추세 선과 유사한 값으로 나타났다.

아래 Fig. 22는 국외 건축물 51개의 감쇠비 조사하여 나타낸 결과이다.

1% 22개, 1.25% 4개, 1.5% 8개, 2% 17개로 보인다.

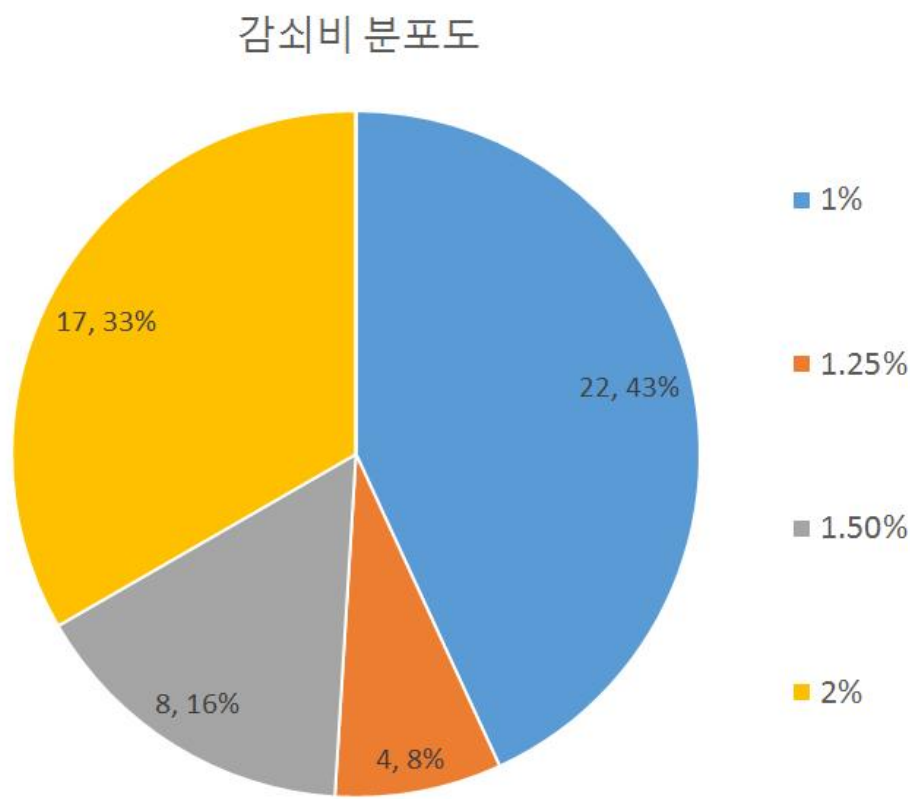


Fig. 22 국외 고층건물의 감쇠비 분포도

4.1.2 국내 고층건물의 높이, 층수, 고유주기

국내 철근콘크리트 건축물의 상시 진동 계측을 수행한 후 감쇠비 식별 결과를 각 제안식과 비교하였다.(김홍진, 2013)

다음은 Fig. 23, 24는 전국의 초고층 건축물을 대상으로 총 12 건축물 14개 동이다. 서울시, 부산시, 대구시, 인천시, 화성시 등 다양한 소재지에 위치해 있다. 33층부터 68층까지의 층수를 가지며, 가장 낮은 건물의 높이는 148.2m이고 가장 높은 건물의 높이는 305m이다.

건축물	해운대 더샵 센텀스타(B)	
주 소	부산광역시 해운대구 재송동 1196	
층 수	60F	
높 이	212m	
고유 진동수	0.234Hz	
주 기	4.28s	
감쇠비	0.6	

센텀스타 (2008)

Fig. 23 국내 고층건물 개요 (센텀스타, 212m)



(a) 센트로드 (2011)



(b) 센트럴파크 II (2011)



(c) 센텀파크 (2005)



(d) 아텔리스 (2006)



(e) 센트럴파크 I (2010)



(f) 두산위브 (2009)

Fig. 24 국내 고층 건축물 예



(g) 스타시티 (2007)



(h) 센텀스타 (2008)



(i) 리더스뷰 (2010)



(j) 메타폴리스 (2010)



(k) 아이파크 (2011)



(l) NEATT(2010)

Fig. 24 국내 고층 건축물 예

국내 건물의 층수, 높이, 측정고유주기, 높이/46(CTBUH 1995), 높이/66.67(AIJ 2000기준), 감쇠비, 그리고 층수/10(CTBUH)를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 국내 건축물의 높이에 따른 분류

번호	건물 이름	층수	높이 (m)	측정 고유 주기(s)	고유주기 산정식			감쇠비
					높이/46 (CTBUH)	높이/66.67 (AIJ2004)	층수/10 (CTBUH)	
1	센트로드 A동	33	148.2	4.167	3.22	2.22	3.30	0.8
2	센트로드 B동	34	152.4	3.378	3.31	2.29	3.40	2.11
3	센트럴파크 II B동	42	152.7	3.077	3.32	2.29	4.20	0.67
4	센텀파크	51	153.0	2.545	3.33	2.29	4.70	0.73
5	아텔리스	47	157.7	2.924	3.43	2.37	4.70	1.43
6	센트럴파크 I A동	47	161.3	3.521	3.51	2.42	4.90	0.56
7	센트럴파크 II C동	49	174.6	3.571	3.80	2.62	5.10	0.59
8	두산위브 105동	54	182.0	3.460	3.96	2.73	5.40	0.49
9	스타시티	60	204.0	4.049	4.43	3.06	5.70	1.63
10	센텀스타	60	209.6	4.329	4.56	3.14	6.00	0.84
11	리더스뷰 105동	57	217.0	4.425	4.72	3.25	6.00	1.1
12	메타폴리스 101동	66	248.7	5.556	5.41	3.73	6.60	0.57
13	아이파크	72	292.0	4.329	6.35	4.38	6.80	0.36
14	NEATT	68	305.0	4.808	6.63	4.57	7.20	1.29

국내 건물의 높이에 따른 고유주기를 추세선, 높이/46(CTBUH 1995), 그리고 높이/66.67(AIJ 2000기준)를 Fig. 25에 나타내었다.

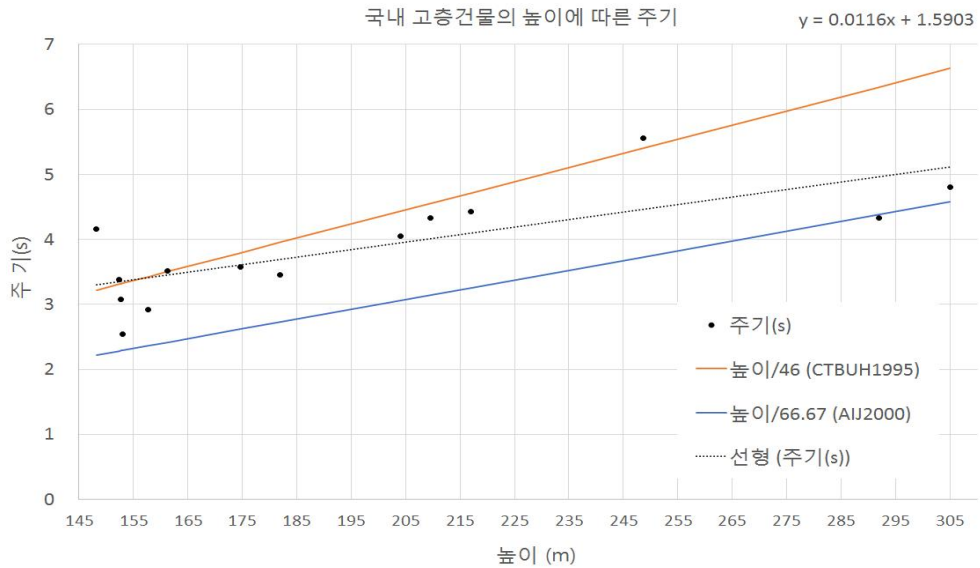


Fig. 25 국내 고층건물의 높이에 따른 주기

국내 건물의 층수에 따른 고유주기를 추세선, 층수/10(CTBUH 1995)를 Fig 26에 나타내었다.

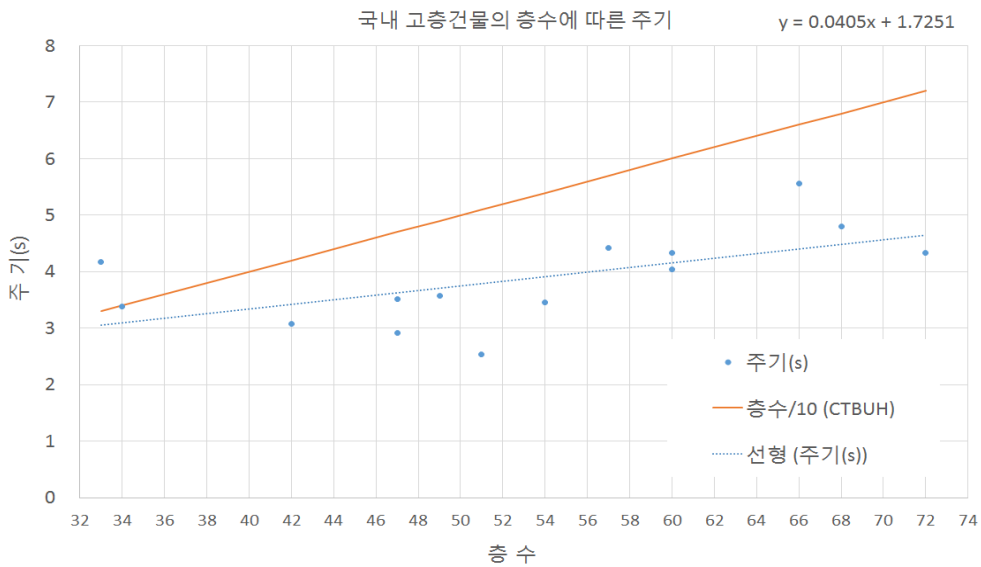


Fig. 26 국내 고층건물의 층수에 따른 주기

위 Fig. 25,26을 통해 국내 건축물의 층수와 높이에 따른 고유주기를 볼 수 있다. Fig. 25에서 세계 초고층학회 CTBUH(1995)에서 제안한 식 건축물 높이에 따른 주기 $h/46$ 은 215m까지는 추세 선과 유사하지만 높이가 클수록 차이가 나며 추세선 값보다 높게 나타남을 알 수 있다. AIJ 2000(2000)에서 제안한 $f_1 = \frac{1}{0.015H}$ 즉 식 $h_f/66.67$ 은 평균 값 보다 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 26 세계 초고층학회 CTBUH(1995)에서 제안한 식 건축물 층수에 따른 주기 $h/10$ 은 추세선 값보다 높게 나오는 것을 알 수 있고, 국외 사례의 경우와는 달리 차이가 큰데, 국외 사례는 구조설계용 주기이며 국내 사례는 계측한 주기이기 때문에 차이가 나는 것으로 판단된다.

아래 Fig. 27은 국내 건축물 15개의 감쇠비 조사하여 나타낸 결과이다.

0~0.5% 2개, 0.5~1% 7개, 1~1.5% 3개, 1.5~2% 1개, 2~2.5% 1개로 나타난다.

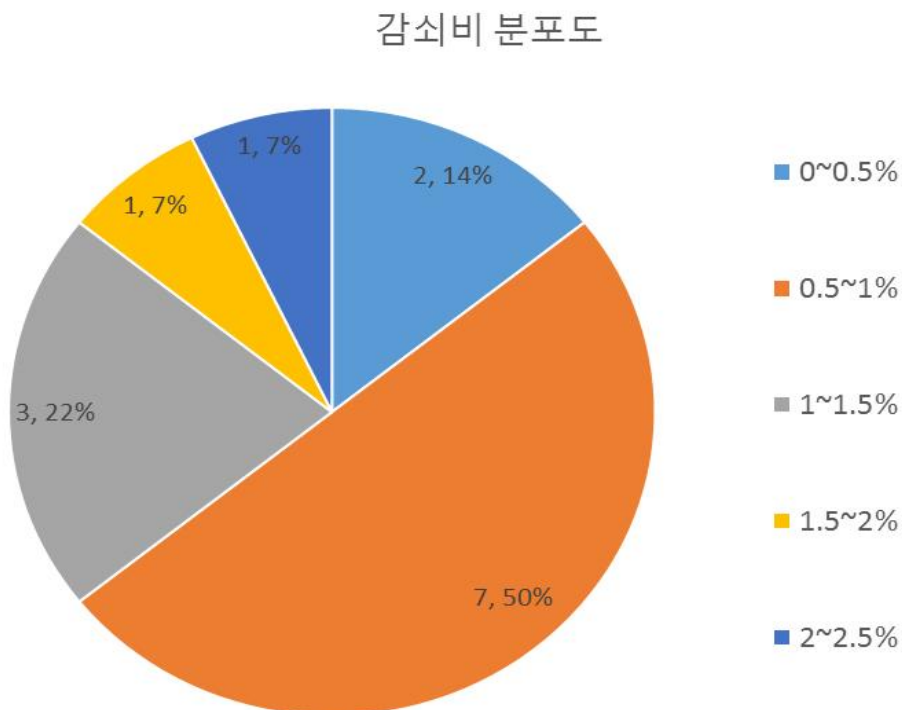


Fig. 27 국내 고층건물의 감쇠비 분포도

4.2 감쇠비를 통한 풍응답 특성 분석

4.2.1 NBCC 1995 이용한 초고층 건물 풍응답 가속도 산정

풍하중으로 인한 건물 진동 감지 수준을 주거 시설의 적합성을 검토하였다. NBCC 1995에서는 인간의 시각, 신체 위치, 신체 조직, 마음 상태 등이 진동 지각에 영향을 미치지만, 가속도의 크기가 중력가속도(g)의 $0.5\%g \sim 1.5\%g$ 의 범위가 되면 대부분의 사람은 건물 진동을 지각하는 것으로 평가하고 있다. 가속도 한계는 10년 재현 기대 풍속에 대하여 중력가속도의 $1\%g \sim 3\%g$ 범위로 규정하고 있다. 경험식에 의하여 가속도를 평가하는 때 건축물의 고유진동수에 관계없이 건축물의 용도에 따라, 주거를 주목적으로 하는 건축물인 경우의 가속도 한계는 중력가속도의 $1\% \sim 3\%$ 범위 중 낮은 값을 적용, 비주거용 건축물의 가속도 한계는 중력가속도의 $1\% \sim 3\%$ 범위 중 높은 쪽의 값을 적용하도록 하고 있다.

다음은 부산광역시 해운대구에 위치해 있는 초고층 L 건물을 대상으로 NBCC95를 적용해보았다. 높이 334.8m, 폭 60.5m, 춤 67.1m로 고유주기 across-wind 0.1778Hz, along-wind 0.1501Hz이며 건물 평균 밀도 $466.13kg/m^3$, 변위 0.287m이다.

감쇠정수비는 기존 2% 값인 Table 7과 KBC2016 건축구조기준에 따라 0.9% (사용성 평가의 경우 1.2%의 75%) Table 8에 정리하였다.

Table 7 감쇠정수비 2% (NBCC 1995)

NBCC 1995 (감쇠정수비 2%)		
높이		334.8m
폭, 춤		60.5m, 67.1m
고유 주기	across-wind	0.1778Hz
	along-wind	0.1501Hz
건물의 평균밀도		$466.13kg/m^3$
변위(m)		0.287m
Peak acceleration in along-wind direction (aD)		$0.1095m/s^2$
aD/g*100		1.1%
Peak acceleration in across -wind direction (aW)		$0.081m/s^2$
aW/g*100		0.83%g

Table 8 감쇠정수비 KBC2016 건축구조기준 0.9%

NBCC95 (감쇠정수비 0.9%)		
높이		334.8m
폭, 춤		60.5m, 67.1m
고유 주기	across-wind	0.1778Hz
	along-wind	0.1501Hz
건물의 평균밀도		$466.13kg/m^3$
변위(m)		0.287m
Peak acceleration in along-wind direction (aD)		$0.1372m/s^2$
aD/g*100		1.4%
Peak acceleration in across -wind direction (aW)		$0.122m/s^2$
aW/g*100		1.24%g

Table 7에서 Across - wind direction Dir. 0.8%g와 Along - wind direction Dir. 1.1%g 수준으로 평가 된다. Along-wind direction Dir.의 가속도 평가는 주거시설 제한치인 1%를 약간 초과하고 있다.

Table 8에서는 Across - wind direction Dir. 1.24%g와 Along - wind direction Dir. 1.4%g 수준으로 평가된다.

풍직각방향 및 풍방향 가속도 평가는 주거시설 제한치인 1%를 초과하여 KBC2016 사용성 평가 감쇠비 적용 시 유의하여야 한다.

감쇠 정수비가 2%에서 0.9%로 변동에 의해서 풍직각방향 가속도는 1.49배 증가하고 풍방향 가속도는 1.27배 증가한다.

4.3 KBC2016 풍응답 및 풍동실험값의 구조설계 적용 시 감쇠비

4.3.1 KBC2016 기준에 의한 감쇠비

기준 0305.6.2. 유연 구조물 등의 주골조설계용 감쇠비에 대한 해설 부분(기준 p131)에서는 구조감쇠비는 ISO 4354에 규정된 값으로 건축물에 가해지는 강풍의 레벨이 설계풍속 정도일 때의 값에 해당되고, 구조물의 안전과 관련되는 풍하중과 변위를 평가할 때 사용하는 값으로 80m이상의 경우 강구조는 0.01, 철근콘크리트 구조는 0.12를 적용을 한다. 1년 재현기간 정도의 강풍으로 인하여 건축물에 발생하는 진동에 대한 거주성을 평가하고자 하는 경우에는 75%를 적용하는 것이 합리적이다.(철근콘크리트구조 $0.12 \times 0.75 = 0.09$)

우리나라 건축물에 대한 강풍 시 감쇠비를 실측한 결과에 의하면 철근콘크리트조 고층 아파트의 경우에는 감쇠비가 0.0152 ~ 0.0183, 강구조 고층건물인 경우에는 0.75%로 나타난다.(건축구조기준, 2016)

4.3.2 고유진동수 및 진폭 의존형 감쇠비 제안식

감쇠비 ζ_1 는 임계감쇠에 대한 임의감쇠의 비로서 많은 경우에 구조감쇠비 ζ_D (structural damping ratio)와 동일하다.

구조감쇠비 ζ_D 값은 건축물의 내풍설계 시 사용할 수 있는 지침이며 풍하중

에 적용하는 감쇠비 ζ_1 의 수준은 일반적으로 지진하중에 적용하는 감쇠비인 5%에 비하여 작은 값을 가진다. 풍하중을 받는 건축물은 탄성적으로 응답하지만 설계 레벨의 지진을 받는 건축물은 높은 감쇠 레벨에서 비탄성적(소성적)으로 응답하기 때문이다. 구조감쇠는 재료 감쇠, 접합부 접촉면에서의 마찰감쇠, 주골조, 2차 부재 및 외장재, 지반과 구조물의 상호작용 등과 같은 여러 원인들에 의해 생기는데 건축물의 주골조가 철골구조 또는 콘크리트 구조로 이루어진 경우의 대표적인 구조 감쇠비 ζ_D 이다.

ISO 4354(2009)에서 구조물의 감쇠비는 Euro Code 1과 유사하게 구조 감쇠비, 공력 감쇠비, 부가 감쇠비의 합으로 규정된다.

$$\zeta = \zeta_{str} + \zeta_{aer} + \zeta_{aux}$$

ζ_{str} 는 구조감쇠비, ζ_{aer} 는 공력감쇠비, ζ_{aux} 는 부가 감쇠비로 감쇠 장치나 감쇠 재료에 의해 추가로 주어지는 감쇠비를 의미하고 구조 감쇠비의 경우 건축물의 높이에 따라 다른 감쇠비를 사용하도록 하고 있다. 일반적으로 건축물의 높이가 높아짐에 따라 고유주기는 길어지고 고유진동수는 작아지므로 ISO 4354의 감쇠비 제안식을 고유진동수 의존형으로 구분할 수 있다.

Table 9에서 ISO 4354에서 제시하는 건축물의 높이별, 구조형식별 감쇠비이고 ISO 4354 기준의 감쇠비는 철근콘크리트 구조가 철골구조보다 큰 값이고, 건축물의 높이가 높을수록 감쇠비가 작아짐을 알 수 있다.

Table 9 ISO 4354의 구조감쇠비(ζ_{str})

건축물 높이	구조 형식	
	철골구조	철근콘크리트구조
40m	1.8%	2.0%
50m	1.5%	2.0%
60m	1.5%	1.5%
70m	1.5%	1.5%
80m 이상	1.0%	1.2%

제 5 장 초고층 다이아그리드 구조물의 사용성 평가

5.1 초고층 다이아그리드 구조시스템 구조물예제

본 논문에서 Fig. 28과 같이 초고층 구조물은 60층 규모, 기준층의 층고 4m, 건물의 전체 높이는 240m인 다이아그리드 구조 시스템으로 설계하였다. 건물의 거동 특성을 알아보기 위해 세장비(건물의 높이/건물의 폭) 6.7을 갖도록 하였다. 초고층 건물 다이아그리드 구조 시스템에 대해 Moon(2007)이 제시한 건축 평면 60층 건물을 본 논문의 표본 모델로 정하였다. Moon은 철골 대각가새 골조 시스템의 경제적이고 최적 설계조건으로 세장비가 5이상, 대각가새의 경사각은 69° 일 때 내풍 저항 성능이 우수하다는 결과에 근거하여 69.44° 의 대각가새의 경사각을 설계하였다. Fig. 29는 초고층 건물 예시 모델 구조 평면도이고 Table 10은 큰 보, 작은 보 부재사이즈를 Table 11에서는 대각가새, 중력기둥 부재사이즈 나타내었다.

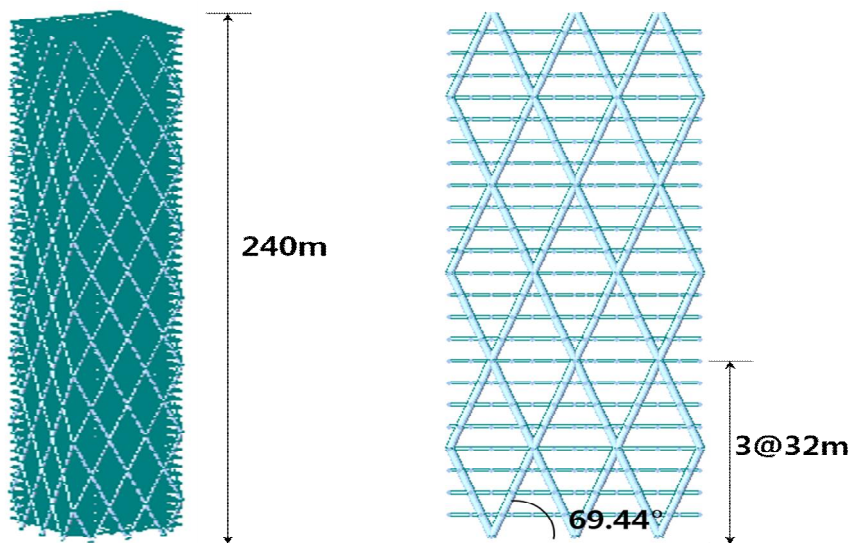


Fig. 28 초고층 건물 예시 모델

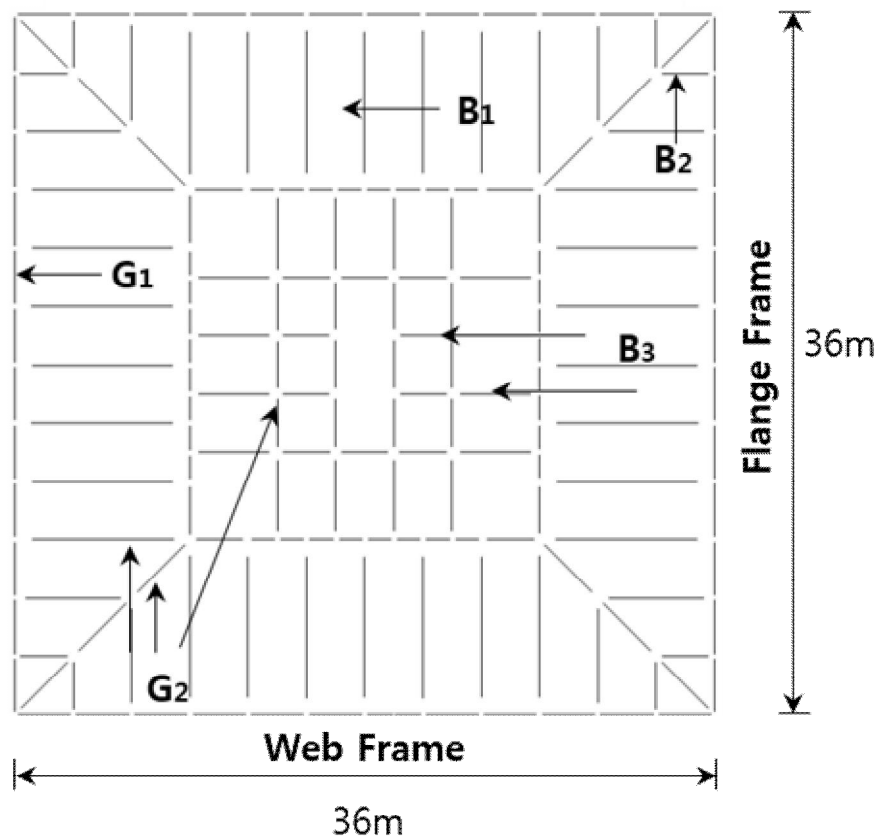


Fig. 29 초고층 건물 예시 모델 구조평면도 (김선웅, 2013)

Table 10 큰 보, 작은 보 부재사이즈

부 재	단 면
G1	H-488x300x11x18
G2	H-440x300x11x18
B1	H-300x300x10x15
B2	H-350x150x9x15
B3	H-300x150x6.5x9

Table 11 대각가새, 중력기둥 부재사이즈

분 류	대각가새의 부재사이즈	중력기둥 부재사이즈
Tier	단 면	단 면
15	○ - 730 x 25	□ - 215 x 215 x 12
14	○ - 840 x 29	□ - 285 x 285 x 15
13	○ - 970 x 34	□ - 340 x 340 x 20
12	○ - 1,040 x 37	□ - 395 x 395 x 22
11	○ - 1,080 x 39	□ - 435 x 435 x 25
10	○ - 1,100 x 40	□ - 475 x 475 x 27
9	○ - 1,120 x 40	□ - 520 x 520 x 29
8	○ - 1,140 x 40	□ - 550 x 550 x 31
7	○ - 1,160 x 40	□ - 580 x 580 x 33
6	○ - 1,180 x 40	□ - 605 x 605 x 35
5	○ - 1,190 x 40	□ - 645 x 645 x 36
4	○ - 1,210 x 41	□ - 670 x 670 x 38
3	○ - 1,210 x 41	□ - 735 x 735 x 41
2	○ - 1,240 x 41	□ - 770 x 770 x 42
1	○ - 1,260 x 41	□ - 805 x 805 x 43

또한 4개 층을 단위 골조로 하여 부재 사이즈를 동일하게 구조설계 하였다. 고정하중은 $3kN/m^2$, 활하중은 $2.4kN/m^2$ 을 적용하였으며, 해석프로그램으로는 MIDAS GEN을 사용하였다. Moon의 논문에서는 대각가새 각도가 69° 일 때 주기는 3.71초, 수평 변위는 0.43m로 수평 변위 기준치 $H/500(0.48m)$ 을 만족하며, 본 논문의 예제 구조물의 고유주파수, 고유주기를 Table 12에 나타내었다. Model에서는 0.2563 Frequency, 3.9period로 나왔다.

Table 12 구조물 고유주파수, 고유주기

Mode No.	Frequency(cycle/sec)	Period(secs)
Mode 1	0.2563	3.9
Mode 2	0.2563	3.9
Mode 3	0.8783	1.14

Table 13에서 Moon(2007)의 모델링과 예제 모델링의 고유주기와 변위를 비교를 해보니 Moon(2007)의 모델링 모드 1은 주기 3.71(s) 예제 모델링은 3.9(s)이며 상층부의 변위는 Moon(2007)은 0.43m, 예제 모델링은 0.41m로 초고층 건축물 변위 $H/500$ 로 즉 0.48m를 만족하였다. 주기와 수평 변위의 값은 3.9초, 0.41m 값으로 비슷한 결과값을 나타낸다.

Table 13 고유주기, 변위 비교

구 분 (각도 69° 일 때)	Moon 모델링	예제 모델링
Mode 1 Period (s)	3.71	3.9
Horizontal displacement @ top (m)	0.43	0.41

하지만 Moon(2007)의 연구뿐만 아니라 국내외에서는 변위 기준에 대한 연구만 수행하였고 풍응답 가속도 평가에 대한 연구는 하지 않았다.

5.2 풍응답 가속도 평가

5.2.1 KBC2016 풍응답 사용성 평가

기존의 평가 기법들은 중·고층 건축물에 적용하였을 때 정확한 결과를 보여주지만 초고층 건축물에 적용 시 결과값 상이하게 나타난다. 따라서 기존의 평가기법을 살펴보고 초고층 건물에 적용하여 평가 기법들을 비교 검토를 해보고자 한다.

Fig. 30은 설계 풍속을 설정한 값이다. 설계풍속은 기상청 자료에 의한 100년 재현주기 서울 인근 지역인 설계 기본풍속을 30m/sec 정하고, 건물의 대상 지역은 평균 높이 20m 정도의 장애물이 산재해 있는 지표면 조도(노풍도) B의 서울 인근 지역의 도시계획구역 내로 가정하였다. 중요도 계수는 1.1, 지형 계수는 평탄지형으로 1.0을 채택하였다. 감쇠비는 대한건축학회 KBC2016에 의해 풍하중과 변위 평가 시 1%이지만 수평진동에 의한 거주성 평가 시 75%인 0.75%를 사용한다. 풍방향 가스트영향계수 G_D 는 건축물의 풍방향 고유진동수가 n_D 가 1Hz 이하인 경우 유연구조물로 해석하여야 한다. (대한건축학회, 2016)

Load Case Name : W,X
Wind Load Code : KBC(2016)
Description :
☐ Simplified Method ☒ General Method
☐ Wind Load Parameters
Exposure Category : B
Basic Wind Speed : 30 m/sec
Importance Factor : 1.1
Average Roof Height : 240 m
☐ Include Topographic Effects
Topographic Factor at Building Ground Level
Kzt : 1
Vertical Range For Kzt : 0 m
☐ Rigid Structure ☒ Flexible Structure
Gust Factor : GDx 1.9557 GDy 1.9557

Fig. 30 설계 풍속

1년 재현주기 풍속에 대한 가속도 응답 값은 KBC2016의 산정식을 통해 구하였다. Table 14에 풍방향, 풍직각방향 가속도의 값을 정리 하였다. 감쇠비 0.75% 일 때 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도의 값은 8.64cm/s^2 , 34.56cm/s^2 이다. Fig. 31은 응답 가속도 기준인 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 대입하여 응답 가속도를 나타내었는데, 풍방향 가속도에서 거주 성능이 만족하였지만 풍직각방향 가속도에서 기준치(Offices) 10.5cm/s^2 를 넘는 34.56cm/s^2 로 크게 초과하는 것을 알 수 있다.

Table 14 풍방향, 풍직각방향 가속도

구 분	감쇠비(0.75%)
풍방향 가속도	8.64cm/s^2
풍직각방향 가속도	34.56cm/s^2

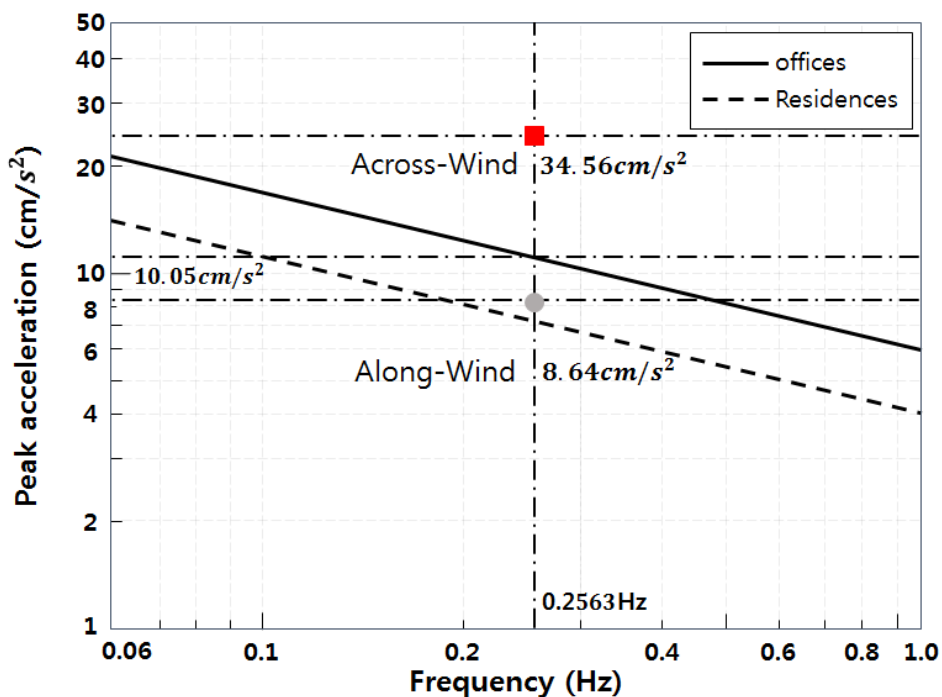


Fig. 31 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (60층)

건물의 높이에 따라 변화하는 진동수에 의해 응답 가속도 기준인 ISO 10137

거주 성능 평가 곡선의 허용 기준치(Office)의 값이 다르다. 예제 60층 건물의 높이를 4개 층 식 줄여 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도 값을 구해 비교해보았다. ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 가속도 기준의 경우 진동수에 따라 허용 기준치가 다르기 때문에 초고층 다이아그리드 구조 시스템의 경우 풍응답 가속도가 허용치를 만족하기 어려운 것으로 판단된다. 다음 Table 15,16은 층별 풍방향, 풍직각방향 가속도를 나타내었다. Fig. 32, 33, 34, 35, 36, 37은 각각의 층수별로 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선에 결과 값을 대입하여 나타내었다.

Table 15 층별 풍방향, 풍직각방향 가속도 (56층, 52층, 48층)

구 분	56층	52층	48층
높 이	224m	208m	192m
세장비	6.22	5.78	5.33
Period (s)	3.49	3.09	2.72
Frequency (cycle/sec)	0.2866Hz	0.3228Hz	0.3672Hz
변 위(m)	0.311m	0.234m	0.141m
중요도 계수	1.1	1.1	1.0
감쇠비	0.75%		
풍방향가속도	$7.88cm/s^2$	$7.12cm/s^2$	$6.39cm/s^2$
풍직각방향가속도	$29.25cm/s^2$	$24.57cm/s^2$	$20.44cm/s^2$

Table 16 층별 풍방향, 풍직각방향 가속도 (44층, 40층, 36층)

구 분	44층	40층	36층
높 이	176m	160m	144m
세장비	4.89	4.44	4
Period (s)	2.37	2.04	1.74
Frequency (cycle/sec)	0.4218Hz	0.4899Hz	0.5755Hz
변 위(m)	0.102m	0.072m	0.051m
중요도 계수	1.0	1.0	1.0
감쇠비	0.75%		
풍방향가속도	$5.66cm/s^2$	$4.96cm/s^2$	$4.3cm/s^2$
풍직각방향가속도	$16.81cm/s^2$	$13.63cm/s^2$	$10.9cm/s^2$

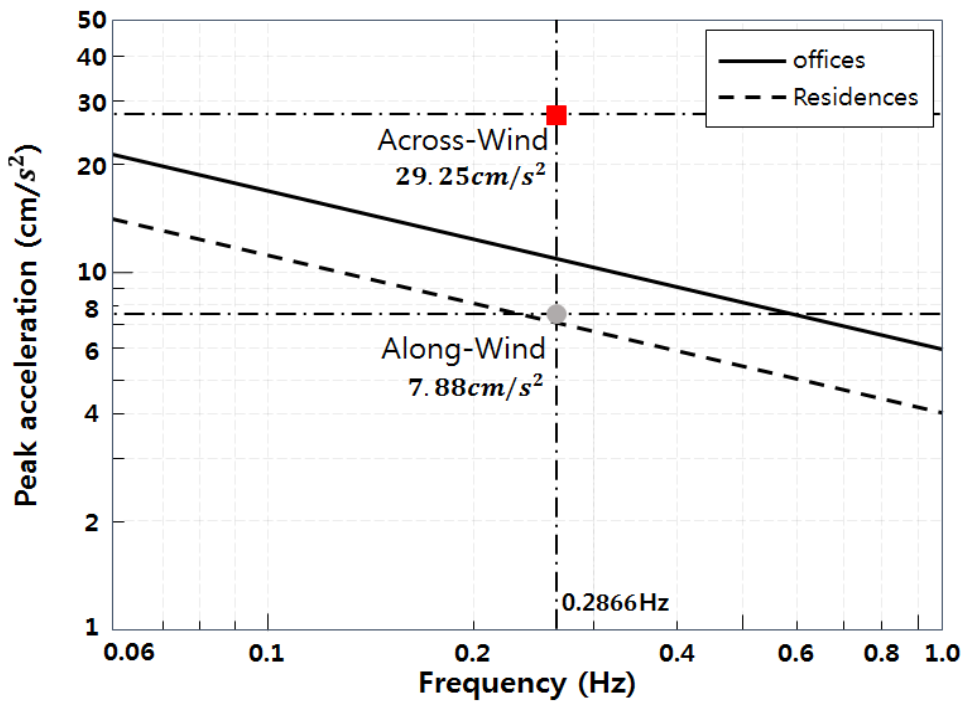


Fig. 32 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (56층)

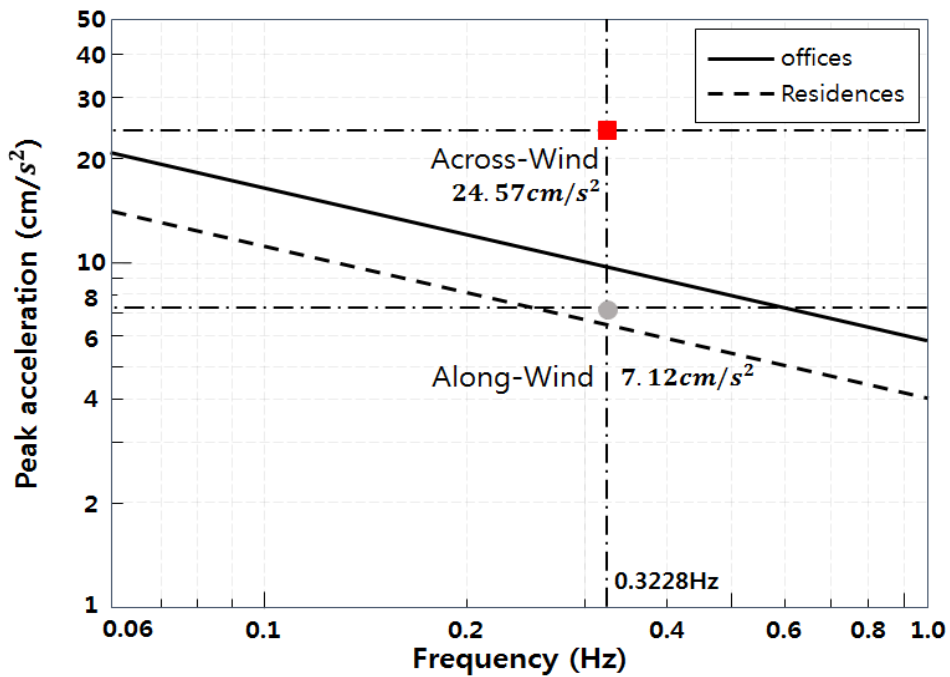


Fig. 33 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (52층)

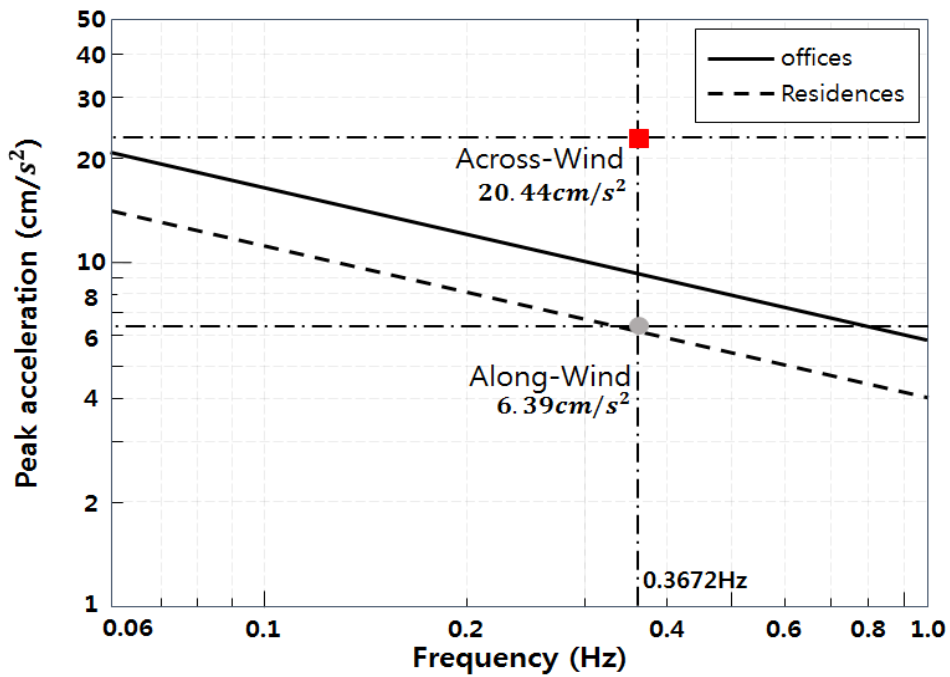


Fig. 34 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (48층)

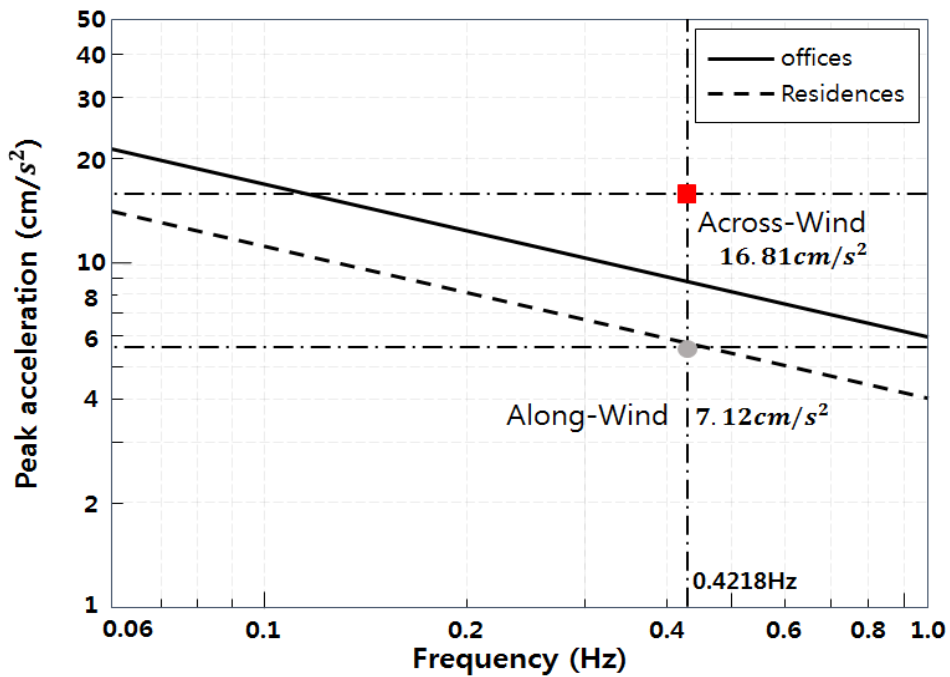


Fig. 35 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (44층)

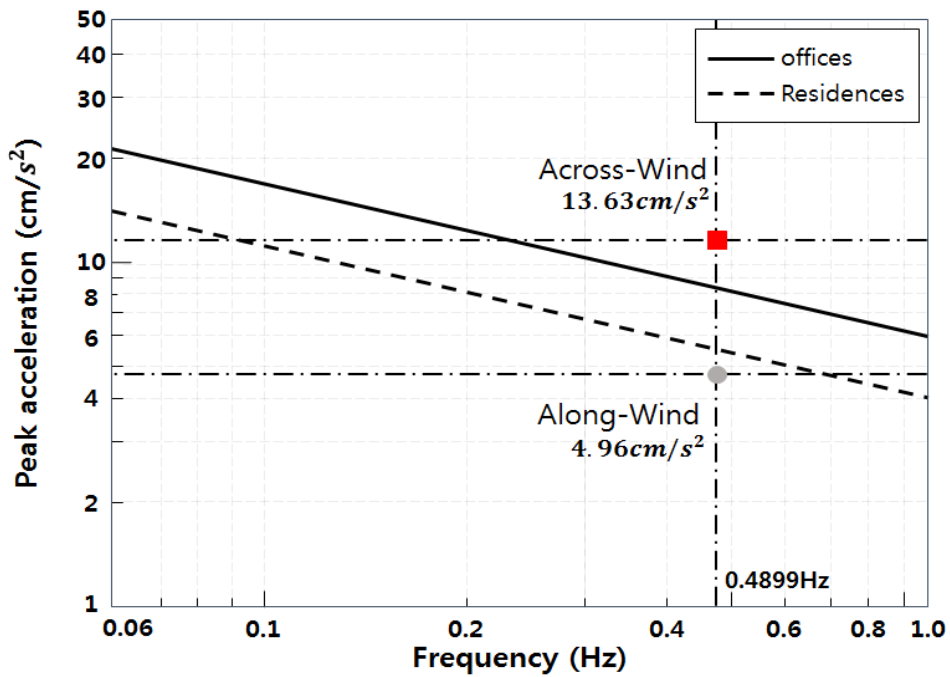


Fig. 36 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (40층)

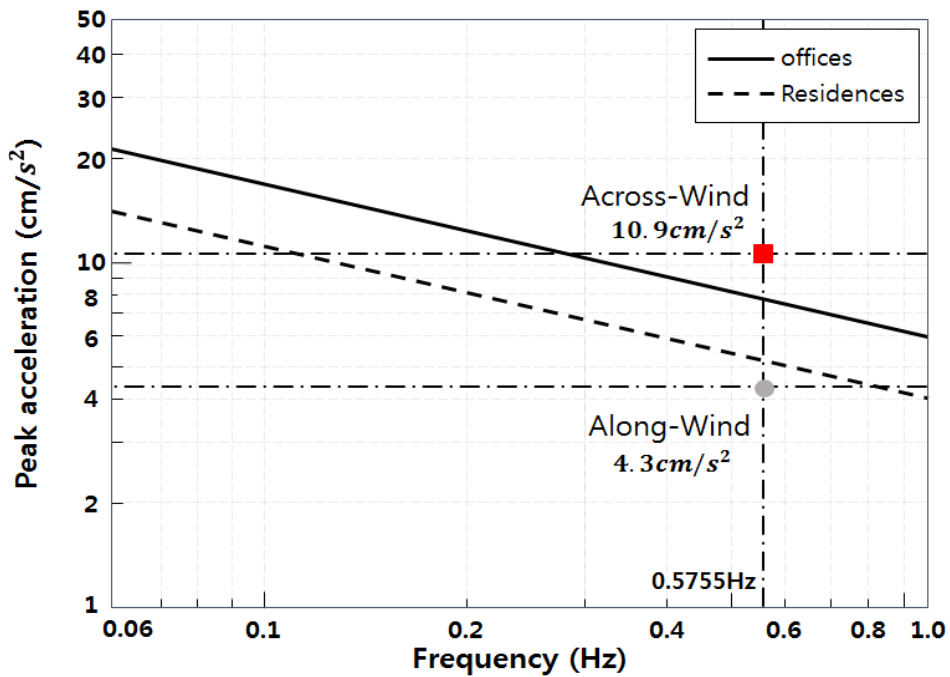


Fig. 37 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 (36층)

5.2.2 NBCC95 풍응답 사용성 평가

NBCC95를 이용하여 위 예제 초고층 다이아그리드 구조 시스템 구조물의 풍응답 가속도 산정을 하였다. 풍속 재현주기는 10년을 기준으로 한 것으로 V' 는 23.07m/s이다. 높이 240m, 폭 36m, 층 36m로 고유주기 Across - wind 0.2564Hz, Along - wind 0.2564Hz이고 건물 평균 밀도 $116.12kg/m^3$, 변위 0.32m이다. 감쇠비는 0.01값을 적용시켰다. 중력가속도의 경우 1%~3% 범위로 규정하고 있는데 비주거용 건축물의 가속도 한계는 중력가속도의 1%~3% 범위 중 높은 쪽의 값인 2.5%를 적용하여 다음 Table 17과 같이 결과를 도출해보았다.

Table 17 NBCC95 풍응답 가속도 평가 (감쇠비 1%)

구 분		NBCC95 (감쇠비 1%)
층 수		60층
높 이		240m
폭, 층		36m, 36m
세 장 비		6.67
주 기(s)		3.8996
고유 주파수	across-wind	0.2564Hz
	along-wind	0.2564Hz
건물의 평균밀도		$116.1kg/m^3$
변 위(m)		0.32m
Peak acceleration in along-wind direction (aD)		$0.304m/s^2$
aD/g*100		3.1%g
Peak acceleration in across -wind direction (aW)		$0.457m/s^2$
aW/g*100		4.66%g

감쇠비 1%인 경우 Along - wind direction Dir. 3.1% 와 Across - wind direction Dir. 4.66%g 수준으로 평가 된다.

Along - wind direction Dir.와 Across - wind direction Dir. 의 가속도 평가는 비주거시설 허용값인 2.5%g를 초과하고 있다.

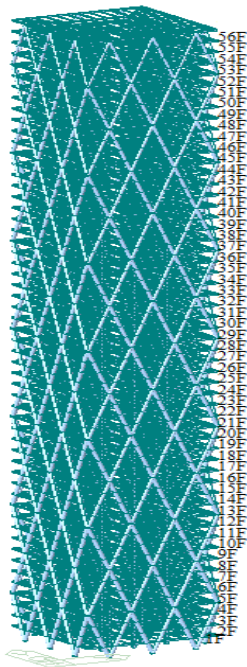
Table 18 NBCC95, KBCC2016 풍응답 가속도 평가

구 분	풍방향 가속도		풍직각방향 가속도	
KBC2016 (감쇠비 : 0.75%)	$0.0864m/s^2$		$0.3456m/s^2$	
NBCC95 (감쇠비 : 1%)	$0.304m/s^2$	3.1%g	$0.457m/s^2$	4.66%g

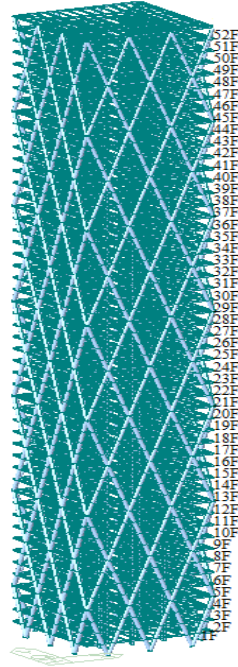
Table 18에서 60층 다이아그리드 구조 시스템 구조물의 풍응답 가속도 KBC2016과 NBCC95 식을 사용하여 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도의 결과 값을 나타냈다. KBC2016의 감쇠비는 0.75%이고 NBCC95의 감쇠비는 1%로 감쇠비의 차이가 있고 또한 KBC2016의 풍속은 1년 재현주기를 기준으로 하였으며 NBCC95의 풍속은 10년 재현주기를 하였다. KBC2016의 결과는 풍방향 가속도만 허용 기준치(Office)에 만족한다. NBCC95 결과는 허용 값(2.5%g)에 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도 둘 다 초과하여 만족하지 못한 값을 가지게 된다.

5.3 건물층수에 따른 풍응답 사용성 평가 (NBCC95)

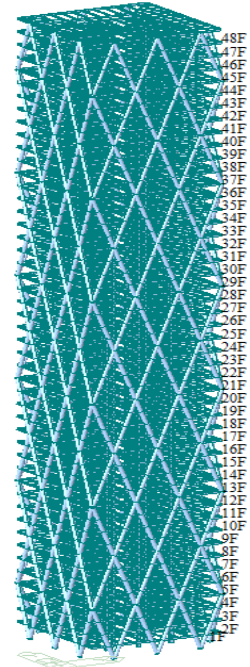
앞서 5.2.2. 절의 적용 예제에서 NBCC95를 이용하여 초고층 다이아그리드 구조 시스템 구조물의 풍응답 가속도 산정을 하였다. 감쇠비가 0.01인 경우 Along - wind direction Dir. 와 Across - wind direction Dir.의 가속도 평가는 비주거시설 제한치인 2.5%를 초과한다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 해석한 적용 예제를 높이, 평면을 줄여 풍응답 가속도를 알아보고 비주거시설의 허용 값인 2.5%를 만족하는 값을 구해보았다. 다음 Fig. 38은 층수별 다이아그리드 구조 시스템 건물을 나타내었다. Table 19, 20은 층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가를 나타내어 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도의 값들을 정리하여 나타내었다.



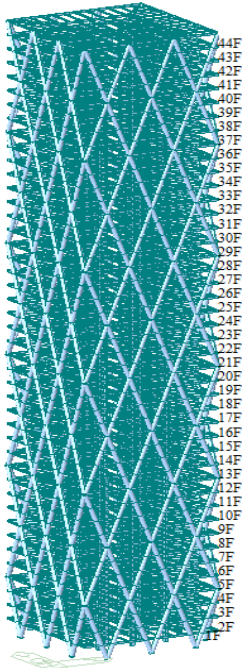
56층 (224m)



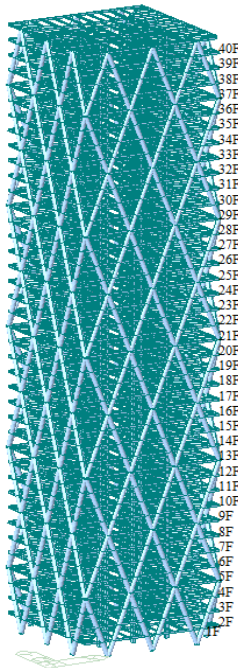
52층 (208m)



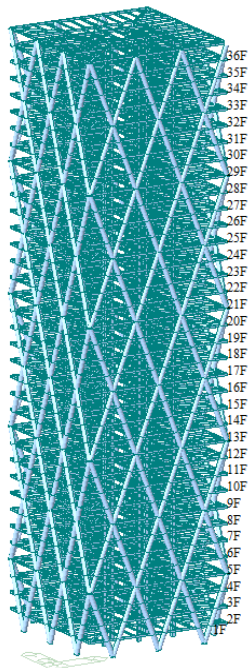
48층 (192m)



44층 (176m)



40층 (160m)



36층 (144m)

Fig. 38 층수별 다이아그리드 구조 시스템 건물

Table 19 층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가 (56층, 52층 48층)

구분		NBCC95 (감쇠비 1%)		
층 수		56층	52층	48층
높 이		224m	208m	192m
세장비		6.22	5.78	5.33
주기(s)		3.49	3.09	2.72
고유 주파수	across-wind	0.2866Hz	0.3228Hz	0.3672Hz
	along-wind	0.2866Hz	0.3228Hz	0.3672Hz
건물의 평균밀도		$117.3kg/m^3$	$118.3kg/m^3$	$119.1kg/m^3$
변위(m)		0.24m	0.18m	0.11m
Peak acceleration in along-wind direction (aD)		$0.263m/s^2$	$0.226m/s^2$	$0.157m/s^2$
aD/g*100		2.68%g	2.31%g	1.6%g
Peak acceleration in across -wind direction (aW)		$0.373m/s^2$	$0.299m/s^2$	$0.235m/s^2$
aW/g*100		3.8%g	3.05%g	2.4%g

Table 20 층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가 (44층, 40층 36층)

구분		NBCC95 (감쇠비 1%)		
층 수		44층	40층	36층
높 이		176m	160m	144m
세장비		4.89	4.44	4
주기(s)		2.37	2.04	1.738
고유 주파수	across-wind	0.4218Hz	0.4899Hz	0.5755Hz
	along-wind	0.4218Hz	0.4899Hz	0.5755Hz
건물의 평균밀도		$119.8kg/m^3$	$120.3kg/m^3$	$120.8kg/m^3$
변위(m)		0.079m	0.055m	0.039m
Peak acceleration in along-wind direction (aD)		$0.132m/s^2$	$0.1063m/s^2$	$0.0868m/s^2$
aD/g*100		1.35%g	1.08%g	0.88%g
Peak acceleration in across -wind direction (aW)		$0.183m/s^2$	$0.139m/s^2$	$0.101m/s^2$
aW/g*100		1.87%g	1.42%g	1.03%g

건물의 층수에 따른 풍방향 가속도(%g), 풍직각방향 가속도(%g), 허용 값 (2.5%g) Table 21과 Fig. 38로 나타내었다.

Table 21 층수에 따른 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도

번 호	층 수	높 이(m)	풍방향 가속도(%g)	풍직각방향 가속도(%g)	허용 값(%g)
1	60	240.0	3.1	4.66	2.5
2	56	224.0	2.68	3.8	2.5
3	52	208.0	2.31	3.05	2.5
4	48	192.0	1.92	2.4	2.5
5	44	176.0	1.35	1.87	2.5
6	40	160.0	1.08	1.42	2.5
7	36	144.0	0.88	1.03	2.5

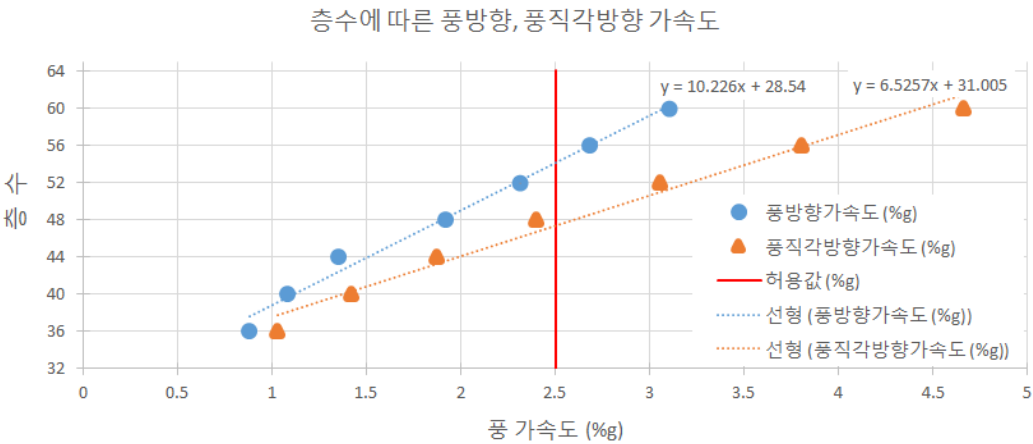


Fig. 39 층수에 따른 풍방향, 풍직각방향 가속도

Fig. 39를 통해 건물의 층수에 따른 풍방향, 풍직각방향 가속도를 볼 수 있다. 비거 주 시설의 허용 값 2.5(%g)를 하였다. 기준에 만족하는 층 48층, 44층, 40층, 36층으로 풍방향 가속도는 1.92%g, 1.35%g, 1.08%g, 0.9%g, 풍직각방향 가속도는 2.4%g, 1.87%g, 1.42%g, 1.26%g로 허용 값에 만족하지만 52층은 풍방향 가속도 2.31%g 값만 만족하고 풍직각방향 가속도 3.05%g을 허용 값 2.5%g 넘는 값이 나온다.

건물의 층수에 따른 변위, 수평 변위 제한(H/500)을 Table 22와 Fig. 39로 나타내었다.

Table 22 층수에 따른 변위 및 수평 변위 제한

번 호	층 수	높 이(m)	변 위(m)	수평변위제한(m) (H/500)
1	60	240.0	0.32	0.48
2	56	224.0	0.24	0.45
3	52	208.0	0.18	0.42
4	48	192.0	0.13	0.38
5	44	176.0	0.079	0.35
6	40	160.0	0.055	0.32
7	36	144.0	0.0393	0.29

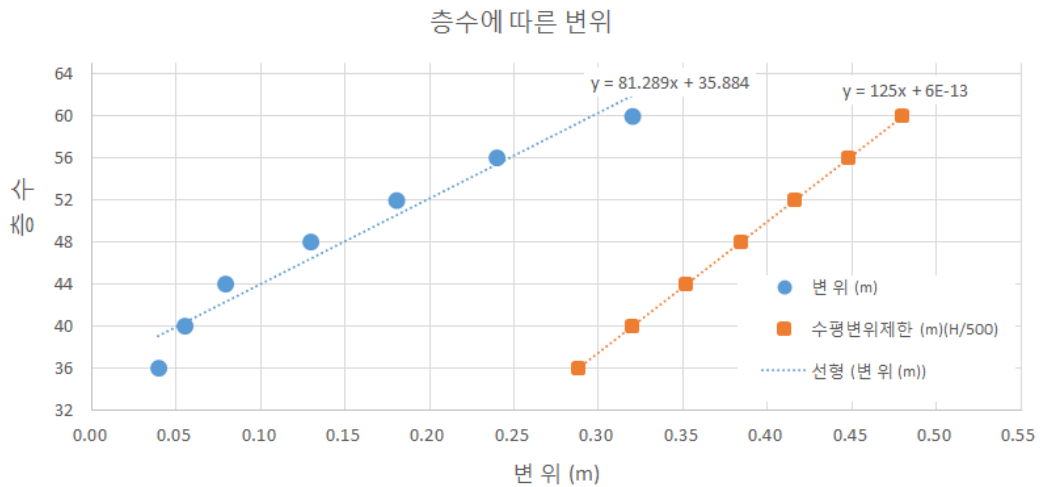


Fig. 40 층수에 따른 변위

풍하중에 대한 수평 변위 제한은 강구조 한계 상태설계 기준 및 해설(대한건축학회)에서 H/500로 기준 되어있다. Fig. 40에서 보는 바와 같이 모든 층 변위에 대한 추세선은 수평 변위 제한 추세선에 만족하는 값에 든다는 것을 알 수 있다.

5.4 건물평면과 층수에 따른 풍응답 사용성 평가

초고층 다이아그리드 구조 시스템의 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도의 허용값 2.5%g 만족하는 값을 도출하기 위해 기존 초고층 다이아그리드 구조시스템 건물의 36층에서부터 평면을 줄이고 층수 올린 다이아그리드 구조시스템 건물의 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도의 값을 비교를 해보았다. Fig. 41은 Volume Design 다이아그리드 구조 시스템을 나타내었다.



Fig. 41 Volume Design 다이아그리드 구조 시스템

Table 23 층수별 NBCC95 풍응답 가속도 평가

구 분	NBCC95 (감쇠비 1%)					
층 수	52층	48층	44층	52층 (36층+16층)	48층 (36층+12층)	44층 (36층+8층)
높 이(m)	208m	192m	176m	208m (144m+64m)	192m (144m+48m)	176m (144m+32m)
세장비	5.78	5.33	4.89	5.78	5.33	4.89
주기(s)	3.09	2.72	2.37	2.92	2.41	2.09
변위(m)	0.18	0.13	0.079	0.236	0.143	0.089
고유 주파수(Hz)	0.3228	0.3672	0.4218	0.3422	0.4151	0.4778
건물의 평균 밀도 (kg/m^3)	118.31	119.1	119.75	122.36	122.31	122.03
Along-wind (aD) (m/s^2)	0.226	0.1879	0.132	0.3146	0.2338	0.1686
aD/g*100 (%g)	2.31	1.92	1.35	3.21	2.38	1.72
Across-wind (aW) (m/s^2)	0.299	0.235	0.183	0.268	0.195	0.154
aW/g*100 (%g)	3.05	2.4	1.87	2.73	1.99	1.57

기존 다이아그리드 구조물과 평면을 줄인 다이아그리드 구조물과의 차이를 Table 23에 정리하였다. 평면을 줄인 다이아그리드 구조물은 건물의 변위와 평균 밀도가 증가했다는 것을 알 수 있었다. 건물의 변위가 증가함으로서 풍방향 가속도가 증가하였다. 52층의 경우 2.31%g에서 3.21%g로 0.9%g 증가하였으며 48층의 경우 1.92%g에서 2.38%g로 0.46%g 증가, 44층의 경우 1.35%g에서 1.72%g로 0.37%g 증가하였다.

반대로 건물의 평균밀도가 증가하면 풍직각방향 가속도가 감소하다는 것을 알 수 있다. 52층의 경우 3.05%g에서 2.73%g로 0.32%g 감소하였고 48층의 경우 2.4%g에서 1.99%g 0.41%g 감소하였고 44층의 경우 0.3%g로 감소하였다.

풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도의 허용 값인 2.5(%g)을 만족하는 층은 48

층, 44층으로 풍방향 가속도는 2.38%g, 1.72%g 풍직각방향 가속도는 1.99%g, 1.57%g로 허용 값에 만족하는 값이 나오지만 52층은 풍방향 가속도 3.21%g, 풍직각방향 가속도 2.73%g 허용 값 2.5%g 넘는 값이 나온다.

초고층 다이아그리드 구조 시스템은 풍응답 가속도 기준치에 만족하기 위해서는 Volume-Design의 필요하지만 주기와 건물 밀도의 변화에 따라 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도가 상이하게 변하기 때문에 구조 설계 시 유의하여야 한다.

5.5 전단벽 포함한 다이아그리드 구조물의 풍응답 사용성 평가

예제 모델 60층 다이아그리드 구조 시스템의 경우 내부에 전단벽, 코어가 없이 설계가 되어있는 상태이다. KBC2016 풍응답 사용성 평가에서 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선에 만족하는 값을 도출하기 위해 다이아그리드 구조 시스템 구조물에 전단벽을 설계하여 풍응답 사용성 평가를 해보았다. 전단벽은 내부에 설계하였으며 재료는 콘크리트로 강도 C60으로 하였으며 두께는 1.0m을 하였다. 콘크리트가 들어감으로서 감쇠비는 기존 감쇠비 0.75%에서 0.825%로 바꾸어 계산하였다. Fig. 42는 전단벽 설계한 구조물의 단면도이다.

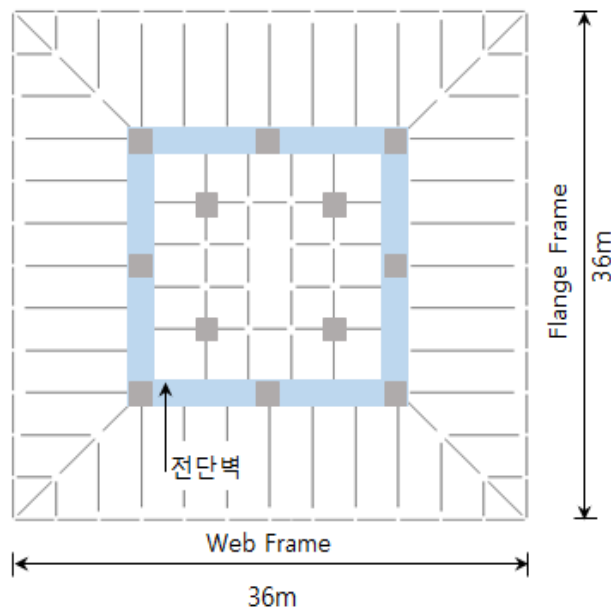


Fig. 42 전단벽 설계 구조물 단면도

다음 Table 24은 다이아그리드 구조 시스템에 전단벽 설계하여 KBC2016 풍 응답 사용성 평가 한 결과 값을 비교 정리를 하였고 Fig 43, 44, 45는 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선에 결과 값을 대입하여 나타내었다.

Table 24 전단벽 있는 경우 KBC2016 풍응답 사용성 평가 비교

구 분	다이아그리드 모델링	전단벽 설계	전단벽 설계	전단벽 설계
전단벽 두께	없음	1.0m	1.2m	1.4m
감쇠비	0.75%	0.825%	0.825%	0.825%
고유 주기(s)	3.9	3.69	3.69	3.69
고유 주파수(Hz)	0.2563	0.2711	0.2711	0.2711
변 위(m)	0.41	0.171	0.154	0.141
건물의 평균 밀도 (kg/m^3)	116.1	251.25	277.92	304.58
풍방향 가속도(cm/s^2)	8.64	3.63	3.28	2.99
풍직각방향 가속도(cm/s^2)	34.56	14.41	13.03	11.89

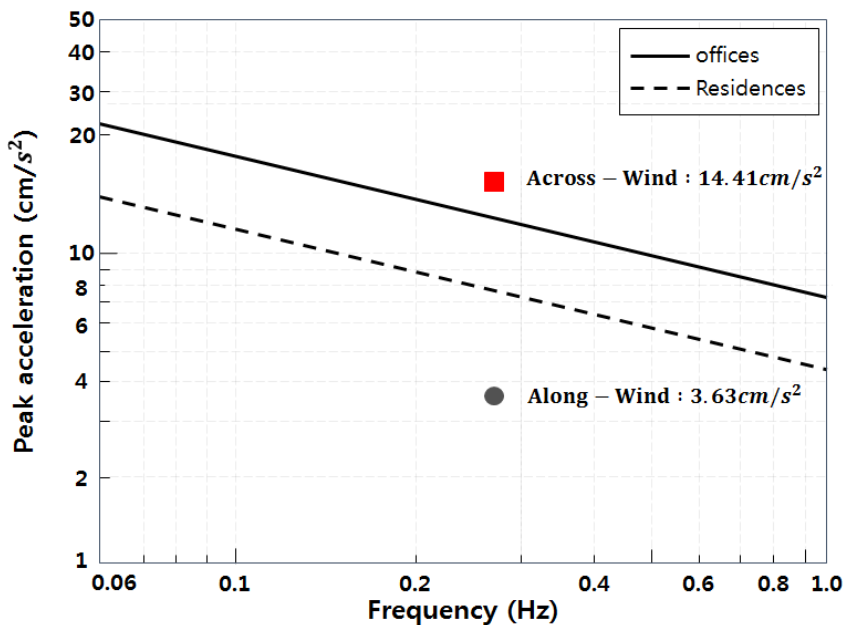


Fig. 43 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 전단벽(1.0m)

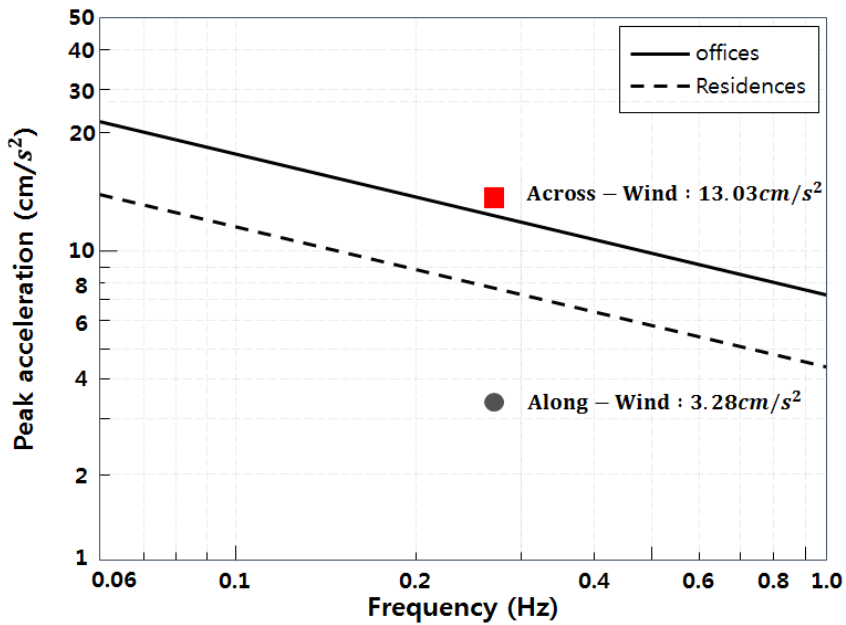


Fig. 44 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 전단벽(1.2m)

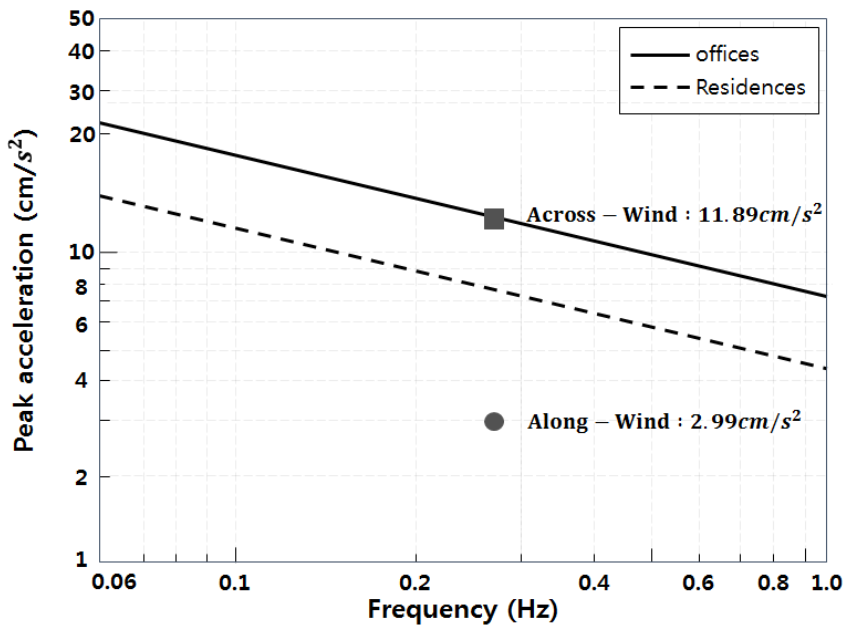


Fig. 45 ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 전단벽(1.4m)

전단벽 있는 경우 변위는 0.41m에서 0.141m로 줄어들었으며, 건물의 평균 밀도는 $304.58\text{kg}/\text{m}^3$ 로 증가하였다. 고유주파수는 증가하여 ISO 10137 거주 성능

평가 곡선의 기준치에도 영향을 미친다. Fig. 43을 보면 풍방향 가속도의 값은 3.63cm/s^2 , 풍직각방향 가속도는 14.41cm/s^2 결과값으로 풍직각방향 가속도는 기준치를 초과하는 값을 가진다. Fig. 44에서는 풍방향 가속도의 값은 3.28cm/s^2 , 풍직각방향 가속도는 13.03cm/s^2 로 여전히 초과하는 값을 가진다. Fig. 45에서 풍방향 가속도의 값은 2.99cm/s^2 , 풍직각방향 가속도는 11.89cm/s^2 로 기준치에 만족하는 결과값을 가진다.

Table 25 전단벽 있는 경우 NBCC95 풍응답 가속도 평가 비교

구 분		예 제	전단벽 설계	전단벽 설계	전단벽 설계
전단벽 두께		없음	1.0m	1.2m	1.4m
감쇠비		0.75%	0.825%	0.825%	0.825%
고유 주파수(Hz)	$n_w(\text{Hz})$	0.2564	0.2711	0.2711	0.2711
	$n_d(\text{Hz})$	0.2564	0.2711	0.2711	0.2711
변 위(m)		0.32	0.132	0.119	0.109
건물의 평균 밀도(kg/m^3)		116.1	251.25	277.92	304.58
풍방향 가속도	Along-wind (aD) (m/s^2)	0.304	0.116	0.104	0.096
	aD/g*100 (%g)	3.1%g	1.18%g	1.06%g	0.97%g
풍직각방향 가속도	Across-wind (aW) (m/s^2)	0.457	0.16	0.145	0.32
	aW/g*100 (%g)	4.66%g	1.63%g	1.48%g	1.35%g

다음 Table 25는 다이아그리드 구조 시스템 구조물에 전단벽이 있는 경우 NBCC95의 결과값을 비교 정리하였다. 식 NBCC95 계산에서 전단벽 두께가 1.0m 일 때 풍방향 가속도 값은 1.18%g, 풍직각방향 가속도의 값은 1.63%g로 허용치 2.5%g에 만족하는 값을 가진다. NBCC95에서는 전단벽 두께가 1.0m에서도 만족하다는 것을 알 수 있다.

Table 26 전단벽 있는 경우 NBCC95, KBC2016 풍응답 가속도 평가

구 분	풍방향 가속도	풍직각방향 가속도
전단벽 설계 (1.0m)		
KBC2016 (감쇠비 : 0.825%)	$0.0363m/s^2$	$0.1441m/s^2$
NBCC95 (감쇠비 : 1.5%)	$0.116m/s^2$	$0.16m/s^2$
	1.18%g	1.63%g
전단벽 설계 (1.2m)		
KBC2016 (감쇠비 : 0.825%)	$0.0328m/s^2$	$0.1303m/s^2$
NBCC95 (감쇠비 : 1.5%)	$0.104m/s^2$	$0.145m/s^2$
	1.06%g	1.48%g
전단벽 설계 (1.4m)		
KBC2016 (감쇠비 : 0.825%)	$0.0299m/s^2$	$0.1189m/s^2$
NBCC95 (감쇠비 : 1.5%)	$0.096m/s^2$	$0.32m/s^2$
	0.97%g	1.35%g

Table 26은 60층 다이아그리드 구조 시스템 구조물에 전단벽 추가하여 풍응답 가속도 KBC2016과 NBCC95 식을 사용하여 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도의 결과값을 나타냈다. 콘크리트 전단벽 추가됨으로써 KBC2016의 감쇠비는 0.825%이고 NBCC95의 감쇠비는 1.5%로 하였다. 전단벽이 1.0m, 1.2m인 경우 풍응답 가속도 KBC2016에서는 풍방향 가속도는 만족하지만, 풍직각방향 가속도는 허용 기준치(Office)가 초과하는 결과값을 가진다. NBCC95에서는 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도가 허용치(2.5%g)에 만족하는 값을 가진다. 전단벽이

1.4m인 경우 KBC2016에서 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도가 허용 기준치 (Office)에 만족하는 결과값을 가진다. NBCC95에서도 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도가 허용치(2.5%g)에 만족하는 값을 가진다.

다이하그리드 구조 시스템의 경우 전단벽(코어)가 없어도 풍하중에 대한 변위는 해결되지만 풍응답 가속도는 기준치가 만족하기 어렵고, 감쇠비의 경우에도 철골 구조(0.75%)는 기준치에 만족하기 어렵다. 그러므로 다이하그리드 구조 시스템은 내부에 전단벽(코어)을 배치하여 감쇠비를 0.825%로 증가, 건물의 평균 밀도 증가시키고 전단벽을 1.4m 이상을 하여야 KBC2016, NBCC95에 만족하는 풍응답 가속도 값을 구할 수 있다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 초고층 건축물의 풍응답 가속도 평가를 위해 국내외 고층건물의 동특성을 분석을 하였다. 각국의 풍응답 가속도 기준들 비교 검토하여 이전 연구(Moon, 2007)에서 제안된 60층 규모의 초고층건물에 다이아그리드 구조 시스템을 모델로 풍응답 가속도 평가를 하였다. 초고층건물 다이아그리드 구조 시스템에 대한 풍방향 및 풍직각방향 가속도 응답평가를 기존의 평가 기법 NBCC95와 우리나라 새로 생긴 기준 KBC2016 풍응답 가속도 평가를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 60층 다이아그리드 구조물은 초고층 건축물 변위기준 $0.48\text{m}(H/500)$ 를 만족하였지만 KBC2016 풍응답 가속도 평가 기준인 ISO 10137(거주 성능 평가 곡선)의 풍방향 가속도는 기준치에 만족하지만 풍직각방향 가속도는 기준치를 크게 초과한다.
- 2) ISO 10137 거주 성능 평가 곡선 가속도 기준의 경우 진동수에 따라 허용 기준치가 다르기 때문에 초고층 다이아그리드 구조 시스템의 경우 풍응답 가속도가 허용치를 만족하기 어려운 것으로 판단된다.
- 3) 50층 이상의 세장비(5.5)를 가지는 다이아그리드 구조물을 풍응답 사용성 평가 NBCC95에 적용 시 감쇠비 1%인 경우 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도는 허용 값인 2.5%를 초과하는 값이 나오고, 48층 이하 세장비(5.3)에서는 풍방향 가속도, 풍직각방향 가속도가 NBCC95의 허용 값인 2.5% 만족하는 값이 나온다.
- 4) 평면의 변화를 준 다이아그리드 구조물은 주기와 건물 밀도의 변화에 따라 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도가 상이하게 결과값을 가지므로 구조설계 시 유의하여야 한다.

5) 60층 초고층 다이아그리드 구조 시스템은 내부에 코어를 배치하고 감쇠비를 0.825%로 증가하면 건물의 평균 밀도를 증가시킴으로서 풍방향 가속도와 풍직각방향 가속도의 허용치를 만족할 수 있다.

이와 같이 본 연구에서는 기준치를 초과하는 풍직각방향 수평진동은 건물의 사용자에게 멀미 등과 같은 불쾌감을 유발해 거주성을 저하시키는 문제를 야기하므로 이에 대한 조치가 필요하다. 풍하중에 의한 거주성을 만족하기 위하여 다이아그리드 구조물의 평면의 변화, 강성의 증가 또는 전단벽 설계, 코어부분 강성의 증가 등의 방법과 진동제어 장치의 설치 등의 해결방안에 관한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Moon, K.S., J.J.. 2007, *Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design, the Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16.2, pp.205-230.
2. Moon, k. 2008. *Optimal Grid Geometry of Diagrid Structural Diagrid Structures for Tall Buildings*. Architectural Science Reivew. Vol. 51.3, pp.239-251
3. Associate Committee NBCC(1995), 1995. *The National Building Code of Canada*.
4. Bungale S. Taranath., 1997. *Steel, Concrete, and Composite Design of Tall Buildings : 2nd Edition*. McGraw-Hill Education
5. 建築物の減衰, 2000. 日本建築學會
6. 김병준, 2010. *다이하그리드 구조시스템을 적용한 장방형 고층건물의 구조설계에 관한 연구*. 석사학위논문. 부산:부경대학교
7. 유종혜, 2012. *다이하그리드 초고층 철골 구조물의 형상 최적기법 개발에 관한 연구*. 석사학위논문. 인천: 인하대학교
8. 이수곤, 2008. *비정형 초고층 프로젝트를 위한 구조설계 기술*. 대한건축학회. 제52권 4호. pp.55-58
9. 주영규, 2008. *Diagrid 구조 시스템의 최근 동향*. 대한건축학회. 제52권. 4호 pp.72-76
10. 한상을, 2011. *테이퍼드 다이하그리드 초고층 구조물의 형상 최적설계기법 개발*. 한국강구조학회논문집. 제23권 3호. pp.349-356
11. 김선웅, 2010. *노풍도에 따라 내풍설계된 초고층 대각가새 골조의 내진성능평가*. 대한건축학회논문집. 제26권 11호. pp.47-56
12. 김선웅, 2011. *초고층 철골중심가새골조의 내진성능평가*. 대한건축학회논문집. 제27권 7호. pp.65-75

13. 김선웅, 2013. 비틀림 비정형 초고층 철골대각가새골조의 내진성능평가.
대한건축학회논문집. 제29권 3호. pp.47-54
14. 윤상호, 2015. 축회전 다이아그리드 구조시스템의 내진성능평가에 관한 연구.
대한건축학회논문집. 제17권 1호. pp.187-194
15. 대한건축학회, 2016. 건축구조기준 및 해설. 대한건축학회.
16. MIDAS Genw, 2010. *General Structure Design System for Window*. MIDAS IT
17. 송화철, 1999. 초고층 건물의 사용성 평가. 기술연구소 연구 논문집. 제17회
pp163-174
18. 유기표, 2004. 풍하중을 받는 고층건물의 진동 가속도 응답-각국의 하중기준과
풍동실험 비교-. 대한건축학회 논문집. 제20권. 7호. pp.45-53
19. 윤성원, 2004. 풍응답계측시 RD법에 의한 고층건물의 동적특성의 진폭의존성.
한국공간구조학회. 제4권. 1호. pp.61-68
20. 조강표, 2007. 초고층 건축물의 수평진동에 대한 인지도 평가. 한국전산구조공학회.
제20권. 1호. pp.751-756
21. 조강표, 2009. 초고층 건축물의 진동사용성 평가기준안 제안. 한국풍공학회 논문집.
제13권 3호. pp155-162
22. 정진희, 2013. 풍하중을 받는 초고층 건축물의 상시진동계측을 통한 감쇠비
계측값과 국내외 감쇠비 제안식 비교. 대한건축학회 논문집. 제29권. 4호. pp11-18
23. 김홍진, 2013. 풍하중을 받는 초고층 건축물의 상시진동계측을 통한 감쇠비
계측값과 국내외 감쇠비 제안식 비교. 대한건축학회논문집. 제29권. 4호. pp.11-18