

# 고층 건축물의 수평진동에 대한 사용자의 지각임계가속도

## Acceleration of the Perception Threshold of Occupants for the Horizontal Vibration of Tall Buildings

조 강 표†      신 성 우\*      정 승 환\*\*      조 수 연\*\*\*  
Cho, Kang-Pyo      Shin, Sung-Woo      Jeong, Seung-Hwan      Cho, Soo-Youn  
(논문접수일 : 2007년 2월 26일 ; 심사종료일 : 2007년 5월 14일)

### 요 지

본 논문에서는 진동대를 이용하여 고층 건축물의 수평진동에 대한 지각임계가속도를 측정하였다. 바람에 의한 초고층 건축물의 과도한 진동은 거주자들에게 시각차와 현기증 같은 불쾌감을 줄 수 있다. 초고층 건축물 거주자들에게 쾌적한 환경을 제공하기 위해서는 가속도를 제한할 필요가 있다. 초고층 건축물은 1차 고유주기에 지배적이다. 본 연구진은 1차 고유주기를 재현하기 위해 진동대를 사용하여 사인파진동에서 실험을 수행하였다. 실험은 진동하우스를 제작하고, 건장한 40명의 피험자를 대상으로 실시하였다. 40명의 피험자를 8명씩 5개조로 나누고, 특정주파수범위(0.2Hz~1.2Hz)에서 가속도를 증가시키면서 수평진동에 대한 인지도를 측정하였다. 수평진동실험으로 피험자들의 진동에 대한 인지도를 누적분포표로 만들고, 0~20%, 21~40%, 41~60%, 61~80%, 81~100%의 누적분포에 대해 추세선을 그려서 성능평가곡선을 작성하였다.

**핵심용어** : 지각임계가속도, 수평진동, 사용성 평가, 초고층 건축물

### Abstract

In this paper, acceleration threshold of perception for the horizontal vibration of tall buildings was estimated. Excessive vibration of tall buildings by wind can give displeasure, such as giddiness and visual insecurity. To provide comfortable environment to residents of tall buildings, acceleration needs to be limited. For tall buildings the first mode of vibration is dominant. To reproduce the first mode of vibration, experiments were performed by generating sine waves by a shaking table. A vibration house was made and forty persons were employed for experiments. The forty persons were organized into five experimental groups, each of which was composed of eight persons, and the threshold of perception for horizontal vibration was measured by increasing acceleration in the range of 0.2Hz through 1.2Hz of frequency. Performance curves were obtained by dividing the distribution of perception for horizontal vibration into the range of 0~20%, 21~40%, 41~60%, 61~80% and 81~100% and by fitting curves.

**Keywords** : acceleration threshold of perception, horizontal vibration, human comfort, tall buildings

### 1. 서 론

건설기술의 발달과 토지를 효율적으로 이용하기 위해 초고층 건축물의 건설이 증가하고 있는 추세이다. 초고층 건축물은 지진하중보다는 오히려 풍하중에 대해 구조적 안전성의 검토를 필요로 한다. 그리고 초고층 건축물은 구조적인 안전성 뿐만아니라 여러 가지 사용성을 충족시켜야 하지만 특히 진동사용성의 검토는 꼭 필요하다고 할 수 있다. 이와 같이

현실적으로 반드시 필요한 진동사용성에 관한 기준이 제정되어 있지 않아 구조설계사무소 등 실무에서는 필요에 따라 국외의 기준을 준용하고 있는 실정이다. 그러나 국외의 기준들은 각각 자국의 실정에 맞게 제정되어 있어 일률적으로 적용하는 것은 바람직하지 않다.

바람에 의한 초고층 건축물의 과도한 진동은 거주자들에게 현기증 또는 시각차 등으로 인해 불쾌감을 유발시킬 수 있다. 이런 불쾌감은 초고층 건축물 거주자들에게 많은 정신적

† 책임저자, 정회원 · 원광대학교 건축학부 조교수  
Tel: 063-850-6708 ; Fax: 063-843-0782

E-mail: kpcho@wonkwang.ac.kr

\* 한양대학교 건축학부 교수

\*\* (주)CKP풍공학연구소 수석연구원

\*\*\* 원광대학교 대학원 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

피해와 자기가 살고 있는 초고층 건축물에 대해 불안감으로 이어질 수 있고, 종국적으로는 초고층 건축물의 비호감의 요인이 될 수도 있다. 선진 국가에서는 초고층 건축물의 바람에 의한 수평진동의 사용성을 만족시키기 위해 수평진동 가속도의 크기를 제한하고 있다.

초고층 건축물의 바람에 의한 수평진동에 대한 사용성 평가는 바라보는 관점에서 우선 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 진동사용성 평가기준에서 가속도의 크기를 허용가속도를 설정하여 건설될 초고층 건축물의 진동가속도의 크기를 제한하는 방법이고 둘째는 허용가속도보다는 진동의 지각임계가속도를 설정하여 초고층 건축물의 수평가속도의 크기를 제한하는 것이다. Soliman(1963), Chen & Robertson(1972), Chang(1973), Irwin(1978), CTBUH(1981), Kanda et al.(1994)의 수평진동에 대한 지각 임계점에 대한 연구를 수행하였다. 그들이 말하는 "지각임계점"(threshold of motion perception)은 진동을 처음 인지하는 가속도의 크기를 나타낸 것으로, 지각임계점에 대한 연구는 주로 실험실에서 진동대를 이용하여 특정 주파수에서 진동가속도의 사인파진폭을 변화시키는 방법으로 연구를 진행하였다. 실험대상 주체(피험자)들이 어떤 진동크기에서 처음으로 지각을 하는지 확률통계 해석을 통해 지각임계점을 정한다. 최근에 Kwok et al.(2005)은 초고층 건축물의 풍진동을 보다 사실적으로 모사하기 위해 2축 진동대에서 0.125Hz~1.00Hz 범주의 주파수 영역에 대해 사인파가 아닌 무작위 진동(random vibration)에 대한 인간의 지각임계점과 거주성능 평가기준에 대해 보고하였다.

ISO6897, 호주/뉴질랜드 기준, 미국기준, 일본기준 등 세계선진국가의 기준 초고층 건축물이 1차모드가 지배적이라는 가정아래 조화함수를 입력하여 얻은 결과에 근거하여 기준을 제정하였다.

본 연구는 국내에 아직 마련되어 있지 않은 바람에 의한 초고층 건축물의 수평진동에 대한 사용성 평가를 위해 진동대를 이용하여 특정주파수 범위를 설정하여 각 주파수별 인지속도를 평가하고자 한다. 수평진동 인지속도결과를 확률통계적으로 평가함으로써 수평진동 사용성 기준 정립에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 연구방향을 모색하기 위해 현재 국외에서 널리 사용되고 있는 수평진동 사용성 평가기준을 다음 절에서 간단히 살펴본다.

## 2. 국외 사용성 평가기준

현재 국내 내풍설계기술자와 건축구조설계사무소에서 주로

준용하고 있는 풍진동에 대한 사용성 평가기준을 위주로 국외의 진동사용성 평가기준을 조사하였다. 조사대상은 ISO 6897(김동우 등, 2006), 일본기준(日本建築學會, 2004), 캐나다기준(National Research Council of Canada, 1995)이다.

ISO 6897에서 규정하고 있는 진동사용성 평가시의 가속도는 10분 평균풍속의 5년 재현 기대풍속에 대한 진동가속도의 RMS값을 사용하고, 허용 가속도를 건축물의 고유진동수에 따라 달리하고 있다. 그림 1은 재현기간 5년에 대한 RMS가속도와 재현기간 0.5년, 1년, 5년, 10년에 대한 최대가속도를 나타내고 있다. 건축물의 수평진동은 거주자가 경험하는 불안의 대상으로 하고 있고, 적용되는 초고층건축물의 고유진동수 영역은 0.05Hz~1.00Hz 값이다.

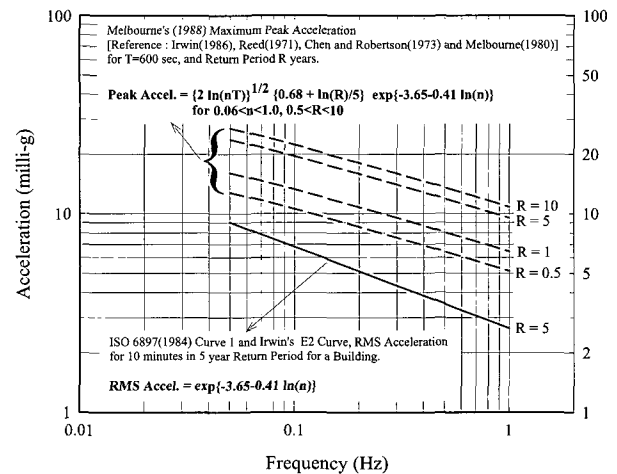


그림 1 ISO 6897 진동사용성 기준

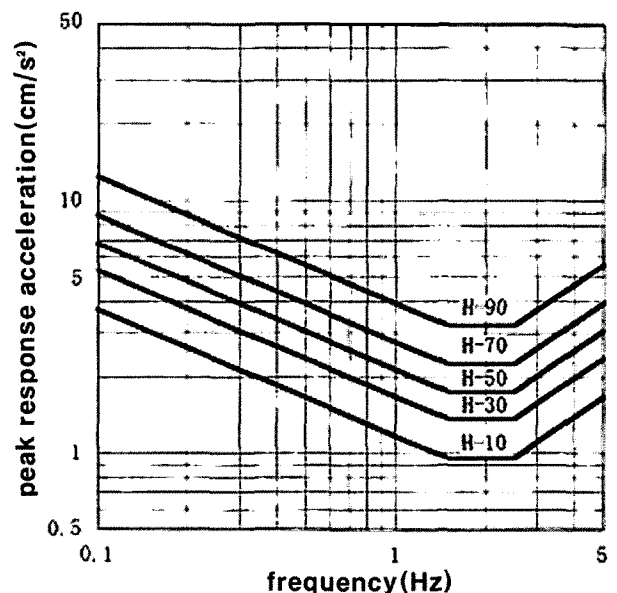


그림 2 수평진동에 관한 성능평가곡선 (일본기준)

일본기준은 진동사용성 평가시의 가속도는 10분 평균풍속의 1년 재현 기대풍속에 대한 최대 진동의 가속도 값을 사용하고, 건축물의 목표성능을 유지하는 관점에서 건축물에 발생하는 수평진동을 평가하는 경우에 적용하도록 하고 있다. 대상으로 하는 진동수의 범위는 0.1Hz~5Hz까지로 고층 건축물뿐만 아니라 저층 건축물의 고유진동수를 포함하고 있다. 바람에 의한 수평진동뿐만 아니라 기타 다른 요인에 의한 수평진동도 그림 2에 의해 평가하도록 하고 있다. 여기에서 H-10은 전체 거주자의 10%가 지각했을 때의 가속도 크기를 나타내는 선이고, H-30,50,70,90은 각각 거주자의 30%, 50%, 70%, 90%가 진동을 지각했을 때의 가속도를 나타내고 있다.

캐나다 기준은 다양한 경계층 풍동실험결과를 통해 바람에 의해 야기되는 건축물의 수평진동을 풍방향과 풍직각방향에 대해서 최대가속도를 나타내는 경험식으로 제안한다. 최대가속도 값은 1시간 평균풍속의 10년 재현 기대풍속으로 구하고 건축물에 용도에 따라서 주거용건물의 가속도한계는 중력가속도의 1%~3% 범위 중 작은 쪽의 범위를 적용하고, 사무용건축물의 가속도한계는 중력가속도의 1%~3% 범위 중 큰 쪽의 범위를 적용하도록 하고 있다.

현재 캐나다 기준은 건축물의 용도에 따라 즉 주거용 건축물과 사무용 건축물로 구분하여 가속도 한계를 구분하여 적용하고 있다. 그러나 건축물의 고유진동수에 따라 수평체감도가 다르다는 것을 기준에서 고려하고 있지 않다.

### 3. 수평진동실험

#### 3.1 고유진동수의 설정

ISO 6897과 일본기준 이외에도 세계 여러 선행연구에서 수평진동에 대한 체감도는 건축물의 고유진동수에 따라 다른 것으로 널리 알려져 있다. 건축물의 고유진동수는 건축물 개개의 중량과 강성에 의해서 결정되는 물리량이지만 실측을

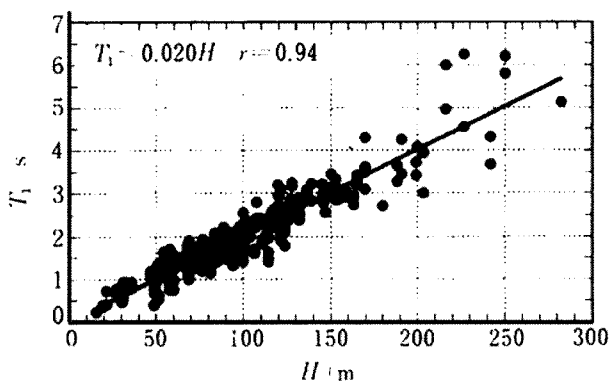


그림 3 건축물의 높이와 1차 고유주기와의 관계

통해서 건축물의 높이와 상호관련성이 높은 것으로 알려져 있다(日本建築學會, 2000). 초고층 건축물의 풍진동이 1차 모드에 지배적이라는 기본 가정하에 1차모드만을 고려하였으며 건축물의 높이와 1차 고유주기와의 관계는 그림 3과 같다. 본 연구에서는 건축물의 높이가 약 43m~250m정도에 해당하는 고유진동수 0.2Hz~1.2Hz 범위에서 진동실험을 수행하였다.

#### 3.2 수평진동대와 진동대용 룸

수평진동실험에 사용된 진동대는 한양대학교에 소재한 가로 3미터 세로 3미터의 정방형으로서 1축진동대이다. 이에 대한 자세한 사양은 표 1에 나타나 있다.

진동대용 룸은 본 실험을 위해 특별히 제작되었으며 룸의 크기는 4m(가로)×5m(세로)×2.6m(높이)이다. 진동대용 룸은 철골부재를 뼈대로하여 샌드위치 panel을 붙이는 조립식 건축물로 그림 5와 같이 설계하여 제작하였다. 진동대와 진동대용 룸을 고정하기 위해 H형강을 진동하우스의 바닥판 frame에 용접하여 대고, plate를 용접하여 구멍을 뚫고, volt로 진동대에 진동대용 룸을 고정시켰다. 진동대와 진동대용 룸에 가속도계를 설치하여 진동대의 가속도가 진동대용 룸에 그대로 전달되는지를 확인하였다.

진동대용 룸은 피험자들이 실제로 생활공간으로 느낄 수 있도록 내부 인테리어를 하였으며 사무실에서 사용하고 있는 책

표 1 진동대의 제원

변형요소	범위
테이블 크기	3m × 3m
가속도	-1g ~ +1g
주파수	0.1 ~ 50Hz
변위	-100mm ~ +100mm
속도	-800mm/sec ~ +800mm/sec

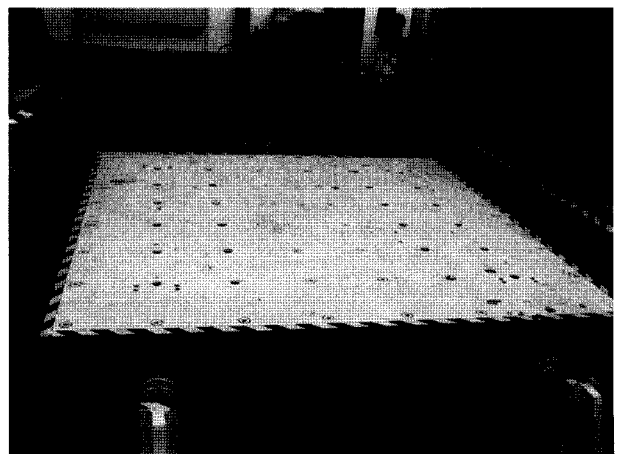


그림 4 수평 진동대

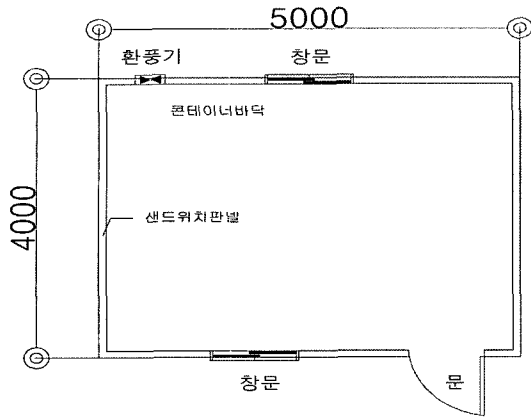


그림 5 진동대용 룸의 평면도

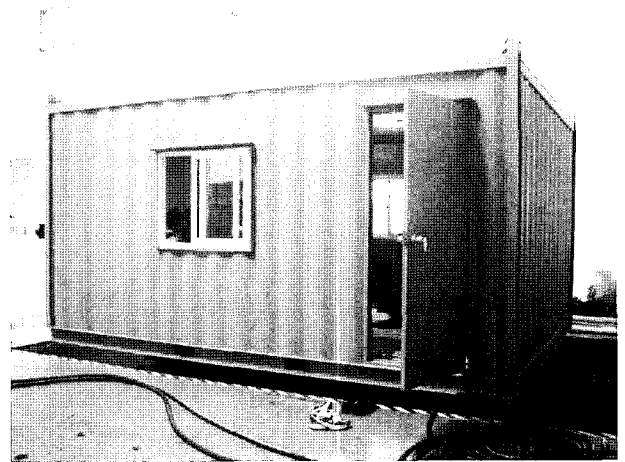


그림 6 수평 진동대위에 설치된 진동대용 룸 전경

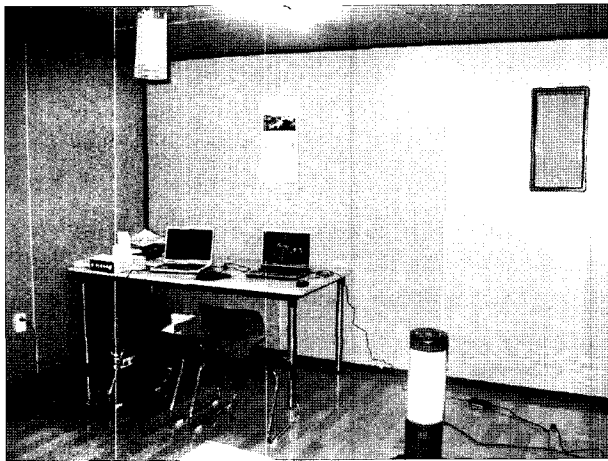


그림 7 진동대용 룸의 실내 전경



그림 8 진동체험중에 피험자집단

상과 컴퓨터, 책 등을 배치하였고, 생활공간에서 흔히 볼 수 있는 달력, 시계, 거울 및 전등 등을 설치하였다(그림 7 참조).

### 3.3 수평 진동체감 실험

본 실험은 건축물의 거주자들이 건축물의 고유진동수에 따라 진동체감이 다르다는 것을 감안하여 고유진동수(주파수)를 고려하여 수행하였다. 본 실험에서 고려된 주파수는 0.2Hz~1.2Hz 범위로 약 15층~80여층 정도의 규모의 고층 건축물을 대상으로 하였다.

수평진동 피험자는 신체가 건장한 대학생들로 구성되었으며 진동체험에 동원된 피험자 총인원은 130명이었다. 각 주파수별로 40명의 피험자가 느끼는 진동가속도의 값을 가지고 확률통계분석을 하여 주파수별 지각임계가속도를 결정하였다. 각 주파수별 피험자 집단 40명은 8명이 한 조가 되어 5개조로 편성되었고 진동체감실험은 각 조가 진동대용 룸에 들어가 느끼는 진동가속도를 결정하는 방식으로 진행하였다.

진동대용 룸에 들어간 8명에게는 번호가 매겨진 무선용 벨이 제공되었으며 각 피험자가 진동을 처음 인지했을 때 벨을 누르게 되면 실험통제실의 무선 수신기가 수신하여 벨의 번호를 알려줌으로써 누가 어느 가속도에서 느꼈는지 통제실에서는 파악할 수 있다. 통제실에서는 피험자 전원이 벨을 누를 때까지 일정 가속도를 증가시켜가면서 실험을 수행하였다. 각 단계별 가속도에서는 30초간 진동이 지속되었으며 피험자가 벨을 누를 때 다른 피험자가 인지할 수 없도록 하였다.

각 주파수는 0.2Hz에서 0.1Hz씩 증가시키면서 1.2Hz에 이를 때까지 수행하였다. 각 주파수별 40명의 전원이 처음 느끼는 진동 가속도를 조사하여 전체피험자의 백분율로 나타내었다.

### 4. 실험결과

수평진동실험을 통하여 11개의 주파수에서 피험자들의 진동에 대한 지각임계가속도를 평가하였다.

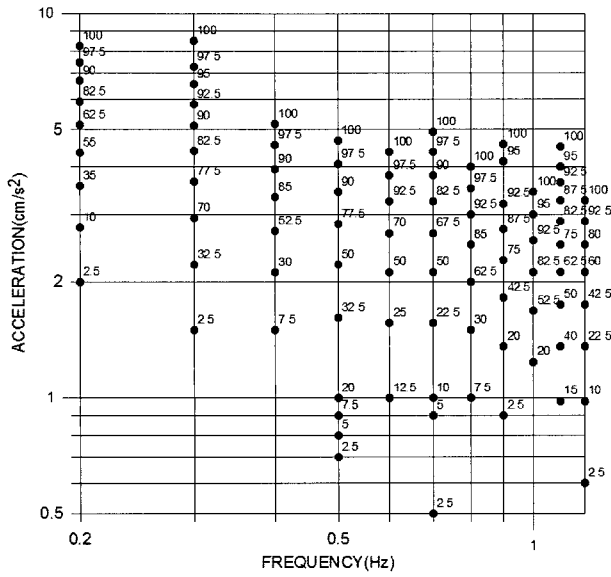
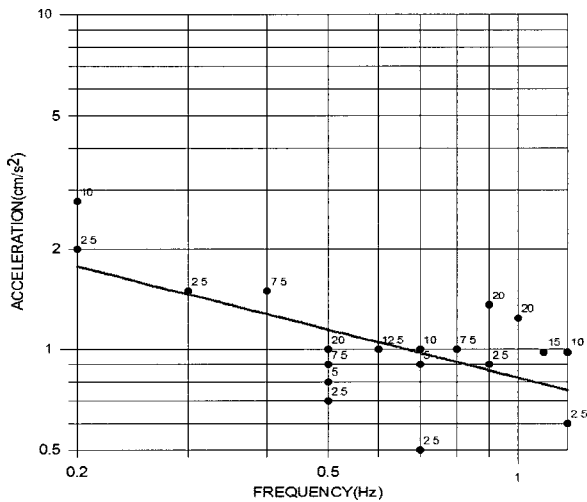
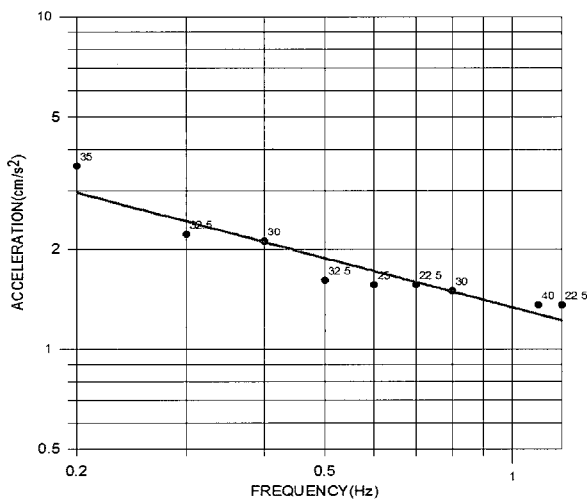


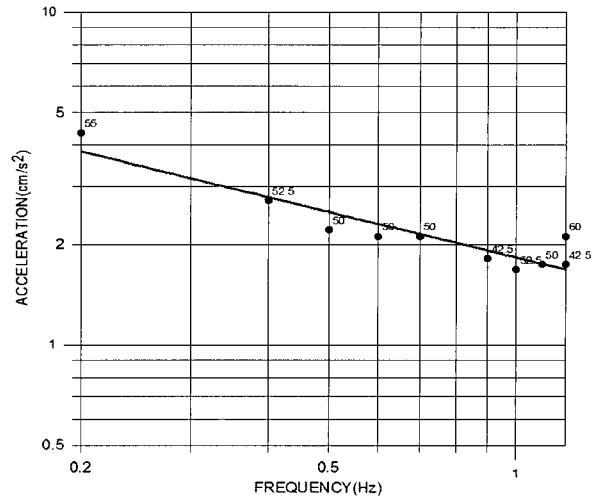
그림 9 수평진동에 대한 지각누적분포도



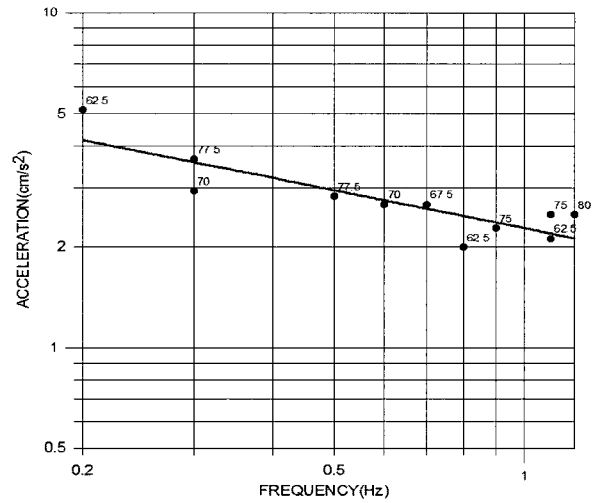
(a) 0~20%의 분포와 추세선



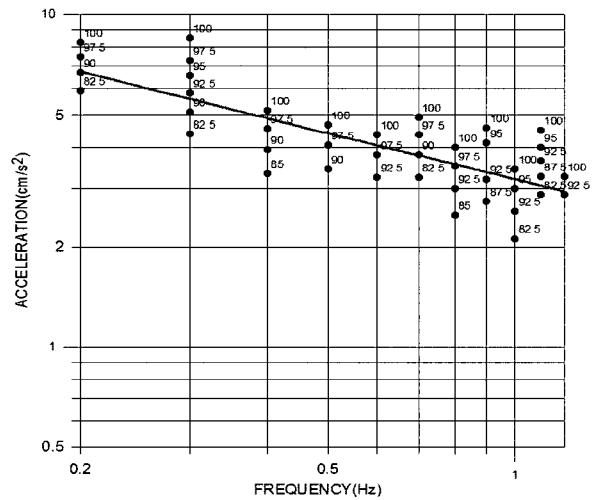
(b) 21~40%의 분포와 추세선



(c) 41~60%의 분포와 추세선



(d) 61~80%의 분포와 추세선



(e) 81~100%의 분포와 추세선

그림 10 수평진동 임계지각가속도의 누적분포 추세선

그림 9는 각 주파수대별 지각임계가속도를 누적 백분율로 나타낸 것이다. 그래프의 횡축은 건축의 고유진동수(진동대의 입력주파수)를 나타내고 종축은 건축물의 수평진동(진동대의 가속도의 크기)을 나타낸다. 만약에 0.2Hz의 고유진동수를 갖는 건축물의 거주자의 2.5% 정도는 진동가속도 2 gal(cm/sec<sup>2</sup>)에서 처음으로 건축물이 진동한다는 것을 인지하였다는 의미이다.

그림 9에서 보는 바와 같이 건축물의 거주자는 각 주파수대별 지각임계가속도가 다른 것을 보여 주고 있다. 주파수가 높아질수록 지각임계가속도가 낮게 나타났는데 이것은 건축물이 낮을수록 거주자들이 진동을 처음 인지하는 가속도의 크기가 낮다는 것을 의미한다. 즉 건축물의 높이가 높아 고유진동수가 낮을 경우 보다 큰 가속도에 대해서 거주자가 진동에 반응을 별로 하지 않는다는 것이다.

그림 9의 누적 분포도를 통해 그림 10과 같은 수평진동실험에 대한 체감도 성능평가추세선을 얻을 수 있었다. 이 성능평가추세선은 실험을 통하여 얻은 누적분포도를 그림 10(a)~(e)와 같이 0~20%, 21~40%, 41~60%, 61~80%, 81~100%의 5단계의 범위로 나누어 수평진동에 대한 지각임계가속도를 각 범위의 평균값 즉, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%로 나타냈다.

현재 일본은 풍진동에 의한 사용성 평가기준을 적용함에 있어 건축주가 건축물의 성능을 직접 결정할 수 있도록 지각임계가속도를 피험자의 진동에 대한 체험을 누적분포로 나타내고 있다. 본 실험에서 얻은 결과와 일본의 거주성능평가기준을 단순 비교할 경우에 본 실험결과가 같은 주파수에서 지각임계가속도가 조금 낮은 것으로 평가되었다. 이를테면 0.4Hz에서 약 90%의 거주자가 인지하는 가속도는 일본기준의 경우에는 6gal 정도 되지만 본 실험결과 5 gal 정도인 것으로 평가되었다.

## 5. 결 론

본 논문은 초고층 건축물의 수평진동에 대한 지각임계가속도를 조사하는 기초적인 연구로서 진동대를 사용하여 특정주파수(0.2Hz~1.2Hz)범위에서 가속도를 증가시키는 방법으로 수평진동실험을 수행하여 수평진동에 대한 피험자들의 지각임계가속도를 평가하여 자료를 제공하였다.

건축물의 고유진동수가 낮을수록 지각임계가속도는 큰 것으로 평가되었다. 이것은 같은 가속도로 진동을 한다고 하였을 때 고층건축물 거주자들이 저층건축물 거주자들 보다 진동을 덜 느낀다는 것이다.

수평진동실험을 통해 얻은 성능평가추세선과 일본기준이

제시하고 있는 성능평가곡선을 비교해본 결과, 같은 고유진동수에서 진동을 인지하는 지각임계가속도가 전반적으로 낮다는 것을 알 수 있었다.

본 연구가 보다 신뢰할 만한 바람의 의한 수평진동에 대한 인지도를 평가하기 위해서는 좀 더 많고, 다양한 계층의 피험자를 대상으로 정량적인 연구가 필요하다. 그리고 국제 주요 사용성 평가기준에서도 바람에 의한 수평진동의 인지도를 평가하는 방법은 각기 다르기 때문에, 우리나라에서도 국내 실정에 적합한 바람에 의한 수평진동의 체감도를 평가하기 위해 보다 체계적인 연구를 수행해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 "이상기후 대비 시설기준 강화" 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김동우, 하영철, 김종락(2006) 수평진동에 대한 고층건축물의 사용성 평가방법. 2006년도 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 9, pp.49~56.
- 조강표, 홍성일(2006) 초고층 건축물의 진동사용성 평가기준의 검토 및 고찰, 한국풍공학회지, 10(1), pp.73~82.
- Chang, F.K.(1973) Human Response to Motions in Tall Buildings. *J. Struct. Div., ASCE*, 99(ST6), pp.1259~1272.
- Chen, P.W., Robertson, L.E.(1972) Human Perception Thresholds of Horizontal Motion. *J. Struct. Div., ASCE*, 98(ST8), Proc. Paper 9142, pp.1681~1695.
- Committee 36, Council on Tall Buildings and Urban Habitat(1981) Motion Perception and Tolerance. Chapter PC-13, Monograph on Planning and Design of Tall Buildings, Volume PC: Planning and Environmental Criteria for Tall Buildings.
- Irwin, A.W.(1978) Human Response to Dynamic Motion of Structures. *The Struct. Engr.*, 56A(9), pp.237~244.
- ISO 6897-1984(E) Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion(0.063 to 1 Hz). International Organization for Standardization, Geneva.

- Kanda, J., Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Shioya, K., Nakata, S.**(1994) Probabilistic Evaluation of Human Perception Threshold of Horizontal Vibration of Buildings(0.125 Hz to 6.0 Hz). Presented at the ASCE Structures Congress and the IASS International Symposium, Atlanta.
- Kwok, K.C.S., Burton, M.D., Hitchcock, P.A.** (2005) Human Perception of Tall Building Motions in Strong Wind Environments. The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-IV), Seoul, Korea, September 12-14, pp.248~262.
- National Research Council of Canada**(1995) National Building Code of Canada, User's Guide-NBC 1995 Structural Commentaries(part 4).
- Simiu, Emil, Scanlan, Robert H**(1986) Wind Effects on Structures(2nd ed.), *John Wiley & Sons*, New York, pp.192~193.
- Soliman, J.I.**(1963) Criteria for Permissible Levels of Industrial Vibrations with Regard to Their Effect on Human Beings and Buildings. Proc. Symp. Measurement and Evaluation of Dynamic Effects and Vibrations of Constructions, The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures(RILEM), 1, pp.111~147.
- 日本建築學會**(2000) 『建築物の減衰』.
- 日本建築學會**(2004) 建築物の振動にする居住性能評価指針・同解説.