

# 고층 강구조물에서의 비팅(Beating)현상에 의한 특정 구조물의 공진에 대한 분석

최 현 · 박 해 동 · 이 흥 기 · 김 두 훈  
(유니슨산업(주) 기술연구소)

## 1. 머리 말

최근 들어 강구조 고층건물의 건축이 증가 추세에 있다. 기능적인 측면에서 인텔리전트 빌딩, 주상복합 건물 등과 같이 특정한 용도에 적합하도록 건축된 건물과 사무실과 주거공간 또는 공장과 주거공간이 함께 공존하는 복합형 건물이 많아지고 있다. 또한 이러한 건물내에는 기능적 구조물의외에 건축물의 조형미를 최대한 살리기 위한 특정한 구조물이 설치되기도 한다.

강구조의 고층건물은 구조적으로는 빌딩이 갖는 건물의 경량화 질량과 부재의 구조강성(structural stiffness)간에 형성되는 낮은 고유진동수<sup>(1)</sup>와 강구조물 소재를 적용함으로써, 기존의 콘크리트재료에 비하여 적은 내부댐핑특성<sup>(2)</sup>을 나타내게 된다. 이는 건물 자체의 유연성(flexibility)는 증가하나, 일단 발생된 진동에 대한 저감효과는 적다. 또한 기능적인 측면에서 건물내 여러 유틸리티를 공급하기 위한 기계에서의 각종 진동 및 소음원의 증가, 생활공간의 공존에 따른 보다 엄격한 소음 및 진동규제등을 고려할 때, 이러한 초고층건축물의 설계와 시공에는 진동 및 소음에 대한 보다 각별한 설계상의 검토가 요구된다. 이러한 설계상의 주의가 부족한 경우에는 진동 및 소음에 관계된 각종 문제점을 야기시킬 수 있으며, 심한 경우 건물의 안정성까지 위협할 수 있다. 따라서, 고층 강구조 건축물에서 발생할 가능성이 높은 진동 및 소음과 관련된 문제점을 최소화시키기 위해서는 건물의 구조설계 및 유틸리티와

관련된 기계장치들의 선정과 설치등에 특히 주의할 필요가 있다.

## 2. 본 론

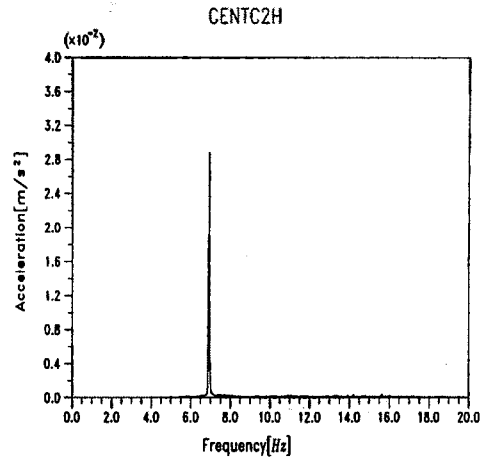
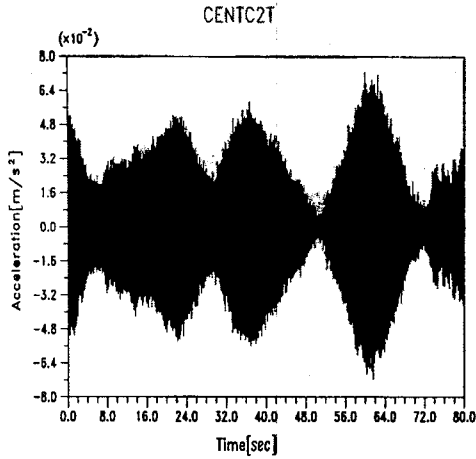
대상건물은 32층 높이의 고층 강구조 주상복합건물 형태로서 4층에 위치한 사무실에서 근무자들이 바닥진동을 심하게 느껴, 근무집중도가 저하되고 심한 사람들은 붕괴 등에 대한 불안감을 느끼는 바닥진동이 지속적으로 발생하고 있었다.

사무실의 아래에는 통행을 위한 길이 23 m, 폭 1.9 m의 다리구조물이 설치되어 있으며, 진동이 발생하는 4층 바닥과 환풍으로 연결되어 있었다. 이 다리는 통행뿐만 아니라, 건물의 조형미를 고려하여 설계된 다리이다. 다리 위에서도 사무실에서와 유사한 진동이 느껴져 다리의 진동과 사무실에서의 진동이 상호 관계함을 유추할 수 있었다. 사무실과 다리에서 느껴지는 진동은 그림 1에서와 같이 간헐적으로 큰 진동이 느껴진다는 점이다.

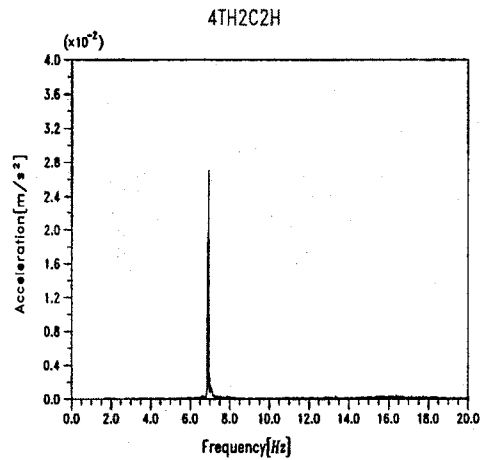
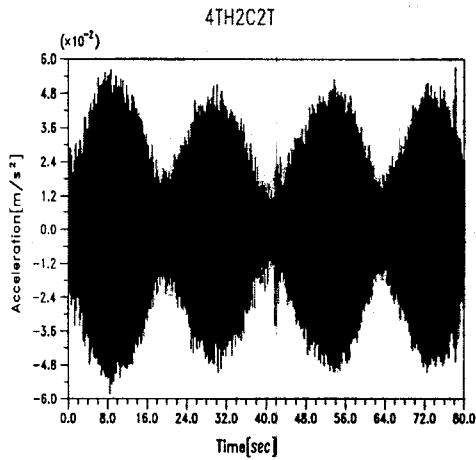
### 2.1 진동 측정

사무실과 다리에서 측정된 진동을 포함하여 효과적인 진동저감 대책수립을 위하여 건물 내에 여러 지점의 진동을 측정하였다.

사무실 및 다리에서 측정된 진동신호는 그림 1과 같으며, 7 Hz 단일주파수의 진동이 비팅현상( beating phenomenon)<sup>(3)</sup>을 일으키고 있음을 알 수 있다. 비팅현상은 서로 비슷한 주기의 두 진동이 두 주파수의 차에 해당하는 주파수로 상호신호가 동기되는 현



(a) Vibration on the bridge



(b) Vibration on the 4th floor

(Bridge: 6.938 Hz-2.886 gal-O.A.: 3.82 gal) (4th Floor: 6.938 Hz-2.70 gal-O.A.: 3.56 gal)

그림 1 Vibration level of bridge and 4th floor

상을 의미한다. 진동스펙트럼에서 다리 및 사무실에서의 진동은 동일한 진동주파수이며, 크기만 약간 다르다는 것을 알 수 있다.

다리의 중앙부에서 측정된 진동의 크기는 7 Hz성분이 평균 2.89 gal(0-p)수준이고, 사무실에서의 진동은 약 2.70 gal(0-p) 수준이다. 정확한 진동원 파악을 위하여 건물내외의 여러 지역에서 진동을 측정한 결과, 그림 2와 같이 건물내부에는 크기에 차이는 있으나, 다리의 진동수와 동일한 주파수의 진동이 측정위치에 따라서 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 건물에 인접한 도로교통 및 지하철 역사등

측정작업 전에 진동원으로 의심되었던 요인이 아닌 건물 내에 존재하는 진동원에 의해서 문제의 진동이 발생되고 있음을 의미한다.

## 2.2 진동원 추적

주상복합 건물 내에는 건물의 기능을 소화해 내기 위한 각종 유틸리티와 관계된 수많은 기계들이 운전되고 있으며, 이들 사이에서 정확히 진동원을 파악해내기 위해서는 진동측정 전에 건물 내에 진동원이 될 수 있는 각 기계장치들에 대한 기계 설치도와 장비사양을 확보, 검토할 필요가 있다.

**소특집 : 진동신호를 이용한 대형설비 및 구조물의 진단사례**

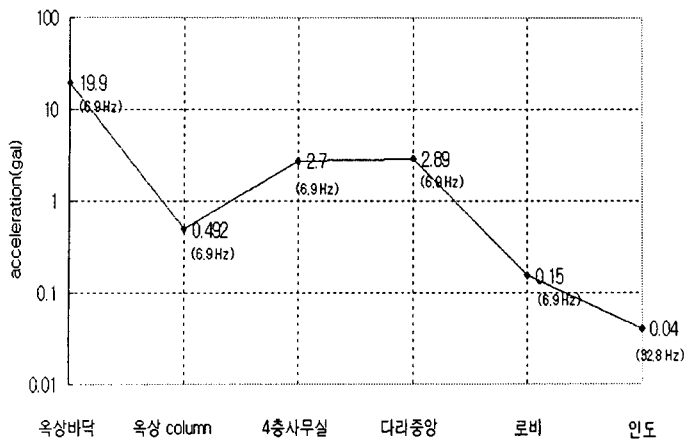
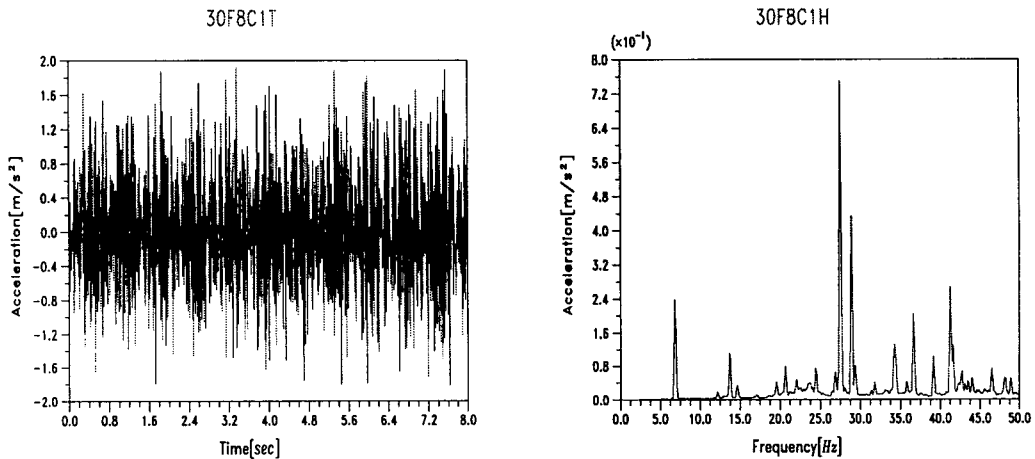


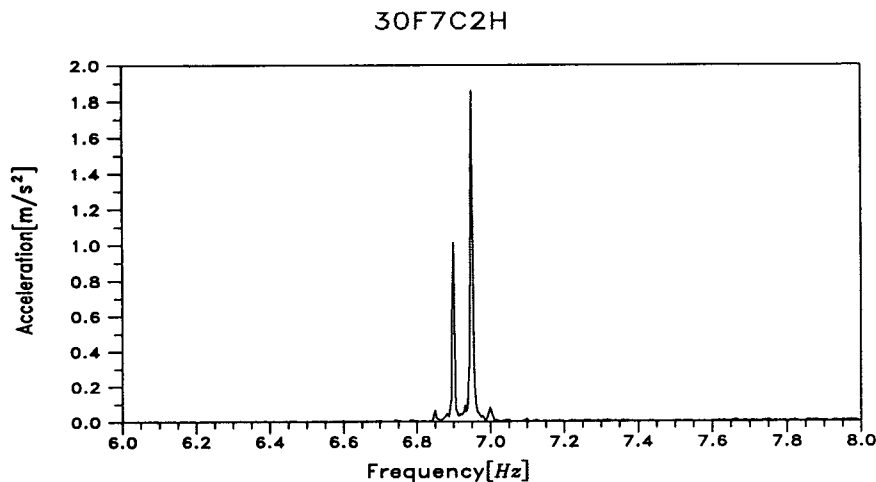
그림 2 Peak vibration levels on the different sites

기계장치의 설치도와 사양을 검토한 결과, 냉각타워 구동모터의 정격회전수가 470 rpm 으로서, 다리 위에서 측정된 문제의 7 Hz 주파수에 근접하며, 설치 위치가 옥상으로서 건물의 횡방향 굽힘모드의 진동과 연관되어 건물전체에 영향을 줄 수 있는 가진원으로 판단되어 우선적으로 옥상의 냉각탑이 설치된 위치에서 진동을 측정하였으며, 그 측정 결과는 그림 3과 같다.

진동신호의 스펙트럼에서 구동모터의 정격회전수의 1차(order)에 해당하는 7 Hz 근방의 주파수와 팬의 수에 따른 하모닉(harmonic) 성분의 주파수가 나타나고 있으며 특히, 냉



(a) Vertical direction  
(27.625 Hz-75.0 gal, O.A.:108.4 gal)



(b) Zoom plot(center frequency : 7 Hz)

그림 3 Vibration at the pipe of the cooling tower ( $f_1 = 6.9125$  Hz,  $f_2 = 6.9625$  Hz)

각편의 날개수가 4개로서 정격회전수의 4차에 해당하는 28 Hz 주파수가 우세하다. 건물전체의 진동신호의 특징인 비팅현상의 원인을 확인하기 위하여 7 Hz 주파수 근처를 zoom mode로 확대하여 충분한 평균화처리를 거친 결과, 7 Hz로 알려진 주파수가 사실은 두개의 주파수  $f_1 = 6.9125$  Hz,  $f_2 = 6.9625$  Hz가 공존하고 있었음을 그림 3의 (b)에서와 같이 알 수 있었다. 따라서 이러한 미소한 0.05 Hz 수준의 주파수 차이가 약 40초의 변조주기를 갖고 냉각타워 구동모터의 정격회전수에 해당하는 진동성분을 배관을 통해 건물 전체로 전달시키고 있으며, 이것이 다리 및 사무실에서 간헐적으로 큰 진동을 느끼게 된 원인임을 알 수 있었다. 0.05 Hz의 저주파 주기는 냉각타워 구동모터 간에 약 3 rpm의 회전수차이를 의미하며, 동일 사양의 모터인 경우에도 부하조건

등의 특성차에 따라서 회전수 차이를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

진동원으로 판단되었던 냉각탑의 영향을 파악하기 위하여 야간에 냉각탑을 정지시킨 후 측정된 진동에서 1/10 수준으로 진동이 저감됨을 확인할 수 있었다.

다음으로는 건물내 다른 위치에서 보다 특히 사무실과 다리에서 과도한 진동이 발생하는 지에 대한 원인분석을 위하여 4층 바닥과 다리구조물에 대하여 구조시험을 실시하였다.

### 2.3 구조시험

#### (1) 다리의 동특성

주간에 지속적으로 진동이 발생하고 있는 다리 위에서의 진동유형을 확인하기 위하여 다리의 여러 위치에서 측정된 진동값을 이용하여 신호처리(signal processing)된 결과는 그림 4와 같다. 주간에 다리에서 발생된 진

표 1 Common values of damping ratio  $\zeta$  for machine-supporting floors of industrial buildings<sup>(2)</sup>

Construction type	Damping ratio $\zeta$		
	min.	mean	max
Reinforced concrete	0.010	0.017	0.025
Prestressed concrete	0.007	0.013	0.020
Composite structures	0.004	0.007	0.012
Steel	0.003	0.005	0.008

Def : 0.00 Hz, # 1 : 7.00 Hz

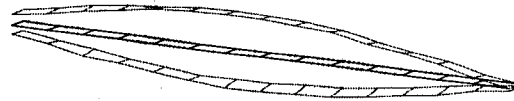
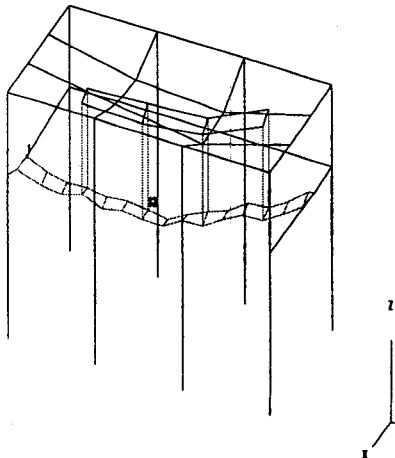


그림 4 Result of signal processing (1st bending mode, 7 Hz)

#1 : 7.00 Hz



#2 : 11.00 Hz

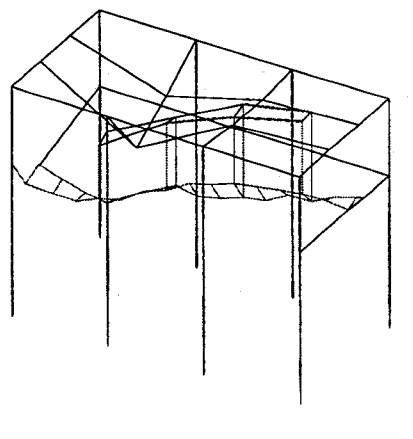


그림 5 Bending(7 Hz,  $\zeta = 5.2\%$ ) and twisting (11 Hz,  $\zeta = 5.4\%$ ) mode shape of bridge

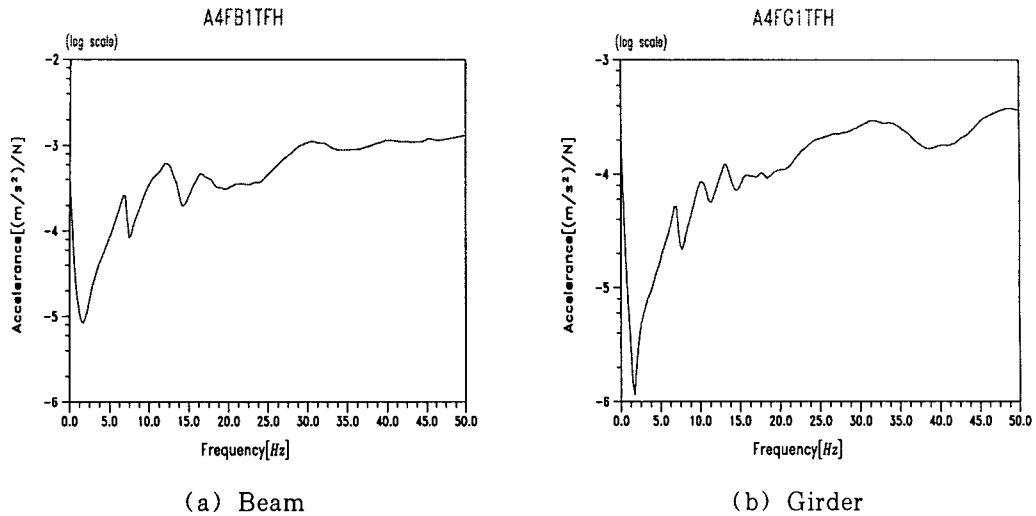


그림 6 Point acceleration of the beam and the girder on the 4th floor

동은 약 7 Hz의 다리구조물의 1차굽힘 진동이 문제가 되고 있음을 알 수 있다.

다리의 동특성을 평가하기 위하여 다리 구조물에 대하여 외부 기계에서 발생하는 노이즈영향을 배제하기 위해 야간에 실시된 모달 테스트 결과, 그림 5에서와 같이 7Hz에서 다리의 1차 굽힘 모드(1st bending mode), 11 Hz에서 굽힘과 비틀림 모드(2nd bending and twisting mode)가 함께 존재하는 고유진동수가 존재함을 알 수 있었다. 따라서, 다리 구조물은 옥상에 설치된 냉각탑 구동모터의 정격회전수의 1차에 해당하는 7 Hz의 진동원과 동일한 주파수의 고유진동수를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 5에서 4층 바닥은 다리의 진동거동과 동일하게 거동함을 알 수 있다. 즉, 다리의 굽힘 모드 및 비틀림 모드에 대해 4층 바닥은 동일위상으로 진동하며, 특이한 점은 바닥의 비틀림 강성이 크기 때문에 다리의 비틀림 진동에 대해서도 4층 바닥은 바닥의 굽힘 진동으로 그 영향이 나타나고 있다는 점이다.

다리의 진동에 대하여 동일한 위상으로 거동하는 다리의 진동양상은 다리의 진동이 4층 바닥의 진동을 야기시키고 있음을 의미하며, 이는 4층 바닥이 다리의 공진에 의한 과도진동을 억제시킬 만큼 충분한 구조강성을 확보하고 있지 못함을 의미한다.

## (2) 빔 및 거더의 동특성

공진이 발생하는 다리의 진동을 줄여 궁극적으로 4층 바닥에서 느껴지는 진동을 저감시키기 위해서는 냉각탑에서 전달되는 진동원에 대하여 다리의 고유진동수에 의한 공진현상이 일어나지 않도록, 다리의 동특성을 바꾸어 공진회피에 대하여 검토할 필요가 있다.

4층 사무실에서 느껴지는 진동은 다리의 공진에 의해 발생하는 진동을 충분히 억제시킬 수 없는 수준의 빔(beam)강성에 다리가 연결되어 있음을 의미하며, 이는 다리의 구조특성시험에서 다리와 4층 바닥이 동일하게 진동 거동하는 것으로도 확인할 수 있다. 따라서 다리의 지지연결부의 위치를 보다 강성이 높은 거더(girder)부에 연결하는 방법이 고려될 수 있다.

공진주파수, 7 Hz에 대한 빔 및 거더부의 액셀러런스(point acceleration)를 측정 한 결과는 그림 6 과 같다.

다리의 1차 굽힘진동 고유진동수, 7 Hz에서 거더에서 측정된 액셀러런스 값은,  $31.6E-5$  ( $\text{m/s}^2/\text{N}$ )으로 빔위에서의 값,  $178E-5$  ( $\text{m/s}^2/\text{N}$ )보다 약 5.6 배 적은 값으로서, 거더가 그만큼 구조강성이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 다리구조물의 상부연결을 빔이 아닌 거더에 고정한다면 다리 구조물에서 더 큰 구조강성을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2 Comparison of vibration level before and after additional vibration isolation (o-p value)

	냉각탑 7 Hz성분			Over all value			냉각탑정지시 진동
	공사전 gal	공사후 gal	저감율 %	공사전 gal	공사후 gal	저감율 %	
3층 다리 중앙	2.89	0.38	86.6	3.82	0.93	75.7	7Hz~0.12 gal, O.A.:0.24 gal
4층 사무실 바닥	2.7	0.31	88.5	3.56	0.66	81.5	-
30층 냉각탑 배관	183	17.6	90.4	210	23.6	88.8	-

※ 1차 측정 : 1, 3호기 가동  
 2차 측정 : 1, 2, 3호기 가동  
 다수의 측정위치중 최대 진동수준을 나타냄  
 Frequency span : 0~50 Hz  
 ISO 사무실 진동기준 2.0 gal(o-p)

**2.4 진동대책**

구조진동에 대한 일반적인 대책으로는 다음의 3가지를 생각할 수 있다.

- (1) 진동원(source) 대책
- (2) 전파경로(path) 대책
- (3) 수신점(receiver) 대책

진동원의 특성이나 전파경로를 고려할 때, 일차적으로 옥상 냉각탑의 운전상태를 확인하고, 구동모터 및 팬의 편심에 따른 영향을 최소화할 필요가 있다. 또한 냉각탑과 건물간의 진동전달 매개체인 배관에 대해서는 반드시 방진(진동절연)을 시도하여야 한다. 또한, 다리의 고유진동수가 7 Hz에 존재한다는 것은 동일한 가진주파수를 발생시키는 냉각탑의 방진성능 개선만으로는 확실한 대책이 될 수 없을 것으로 판단되며, 부분적으로 다리의 구조적 동특성을 변경시켜 공진회피를 시도하는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 그러나, 사용중인 구조물에 대한 구조변경은 비용 및 작업성등의 현실적 어려움이 많기 때문에 시공성과 경제성을 고려한 종합적인 대책을 수립해야 하며, 다음의 방법들을 고려하였다.

- (가) 옥상 냉각탑의 방진
  - (i) 냉각탑 구동모터의 편심상태(밸런싱)확인 및 배관 방진
  - (ii) 냉각탑 구동모터의 회전수 변경을

통한 공진회피

- (나) 다리구조물의 동특성 변경(구조보강)
- (다) TMD등 진동저감장치 설치

**2.5 냉각탑 방진보완 공사 후 진동 평가**

옥상 냉각탑의 방진공사의 보완작업이후 측정된 진동을 공사전의 진동과 비교한 결과는 표 2와 같다. 구동모터의 불평형력에 대한 밸런싱 및 배관의 진동절연에 의하여 옥상에서의 진동레벨이 크게 저감되었으며, 또한 건물전체에 전달되는 진동수준들이 모두 저감되었음을 알 수 있다. 다리의 고유진동수는 기존과 동일하지만 다리의 공진을 유발시키는 7 Hz 진동원의 크기가 저감되어 다리에서의 진동도 저감되었으며, 따라서 사무실에서의 진동도 저감되어 전체적으로 진동저감효과가 있음을 알 수 있다.

대부분 냉각탑은 옥외에 노출되어 있어, 온도,습기등에 따른 배관 방진재의 특성변화를 주기적으로 검사할 필요가 있다.

**3. 맺음말**

- (1) 강구조물 고층건물의 강제사용의 재료 특성상 내부댐핑이 적고<sup>(2)</sup>, 높은 건물이라는 구조특성상 건물의 고유진동수가 낮아<sup>(1)</sup>, 유틸리티와 관련된 기계들에서 비팅현상에 의

한 진동전파 가능성이 높으므로, 가진원의 방진에 특히 유의할 필요가 있다.

(2) 여러 대의 냉각탑이 동시에 운전되는 경우, 각 구동모터의 정격회전수차에 해당하는 비팅주기가 발생하고, 비팅주기가 건물의 고유주기와 일치하는 경우, 건물내의 여러 구조물로 진동이 쉽게 전파된다.

(3) 건물내의 진동원 분석에서 가진원의 설치위치, 기계사양등을 종합적으로 분석하여 진동을 측정, 분석, 적합한 진동대책을 수립, 적용하면 특정구조물의 과도한 진동을 최소화할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code™", 1994, Structural Engineering Design Provisions.
- (2) Hugo, Bachmann, et, 1994, "Vibration Problems in Structures (Practice Guidelines)", Birkhauser Verlag.
- (3) Singiresu S. Rao, 1984, "Mechanical Vibrations", Addison-Wesley Publishing Company.