해운대 하이페리온의 동조액체감쇠기(TLD) 튜닝계획 수립을 위한 현장계측

Field Measurement of Tuned Liquid Damper (TLD) for Vibration Control of Haeundae Hyperion

김 재 건* 김 도 균**

*현대건설 건축사업본부 차장 공학박사
**현대건설 건축사업본부 대리

1. 진동제어장치의 필요성

초고층 건물에서의 거주자들은 일반적으로 약 0.01g정도의 반복적인 가속도에 노출될 때 거부감을 나타낸다. 이러한 거주자들의 사용성을 높이기 위해 내력벽과 기둥을 크게 설계하는 대신 부산 해운대 하이페리온에서는 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper; 이하 TLD)를 사용하여 구조물의 진동을 제어시키는 방법을 사용하였다. 물이 채워진 저수탱크형태의 TLD 효율성은 설계의 적절성 및 실제 완공된 구조물의 물성치에 대한 최종 튜닝에 따라 달라진다. 빌딩의 동적질량과 TLD 부가질량의 비율 역시 중요하다. 부가 질량이 증가될수록 TLD 저수 탱크의 크기가 증가되는 반면 TLD의 효율성은 향상될 것이다. 그러나 일반적으로 TLD 저수 탱크 설치를 위한 공간은 경제적인 이유로 제한된다. 따라서 해운대 하이페리온의 경우, TLD와 구조물 동적 질량의 질량비는 약 1%로써 거주자들의 사용성이 상당부분 개선될 수 있는 것으로 풍동실험결과를 통해 보고하고 있으나, 실제 건물에서 이러한 효과를 발휘할 지는 아직 정확한 데이터 축적이 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 기사에서는 TLD가 설치된 초고층 건물에서의 진동제어효과를 검증하기 위해 진동계측시스템을 구축하고, 실제 건물의 동적 특성을 파악하여 TLD의 효율성을 검증한 내용을 소개하고자 한다.

TLD는 건물 총 중량의 약 1%에 해당하는 유체를 사용하여 진동을 감소시키는 장치로 일반적으로 건물 옥상층에 설치되며 강풍 작용시 건물의 진동에너지를 흡수하여 유체 유동이 발생하고, 이로 인하여 건물의 진동은 감소하게 된다. 따라서 TLD의 제진 효과를 평가하기 위해서는 작용 풍속, 건물의 가속도, 유체 유동량의 현장 계측이 필요하다. 이러한 현장 계측을 통하여 TLD의 진동 제어 효과를 검증하고 나아가 TLD에 대한 기술적 자료를 축적하였다. 또한 상시 모니터링을 통하여 TLD의 수위를 최적으로 유지함으로써 TLD의 제진 효과를 지속적으로 유지하고자 하였다.

수행절차는 다음과 같다.

(1) TLD를 설치한 해운대 현대 하이페리온의 진동계측시스템을 구축한다.
(2) 현장 계측을 통해 구조물의 동적 특성을 파악하고, TLD의 진동제어효과를 검증한다.

2. 부산 해운대 하이페리온에 설치된 동조액체감쇠기(TLD)

부산 해운대 하이페리온은 동백섬과 오륙도가 바라다 보이는 수영만 바닷가에 위치하고 있으며, 건물 층수 42

층, 높이 140m의 철근콘크리트 구조의 초고층 주상복합건물로서 아파트 타워와 오피스 타워의 2개동으로 이루어져 있다. 공사 기간은 2004년 4월부터 2006년 11월까지 43개월 공기이며, 현재 공사가 완료되어 입주가 진행 중이다(그림 1 참조).

풍하중을 받고 있는 고층 건물의 정확한 진동 평가를 위해서는 풍동실험을 실시하게 되는데, 실험의 종류는 풍력 실험(건물의 형태만 상사한 높은 진동수를 가지는 모형을 사용) 및 공력진동실험(건물의 질량(m)과 강성(k) 및 점성(c)을 고려한 모형을 사용)이 있다. 이들 실험에서 구한 가속도 응답은 각국에서 제안하고 있는 1년(AIJ), 5년(ISO) 및 10년(NBCC) 재현 주기 풍속에 따른 가속도 제한치에 대한 기준에 적용하여 진동저감을 위한 부가장치를 설치하고 있다. 일반적으로 10년 재현주기 풍속에 대한 건물 용도별 가속도 제한치는 다음의 표 1과 같다.

표 1 10년 재현주기 풍속에 대한 가속도 제한치(NBCC)

10-year acceleration level for :	Hourly Peak Acc.
Residential building	10-15 milli g
Hotel	15-20 milli-g
Office building	20-25 milli-g

Note) 1 g = 1,000 milli-g = 중력가속도

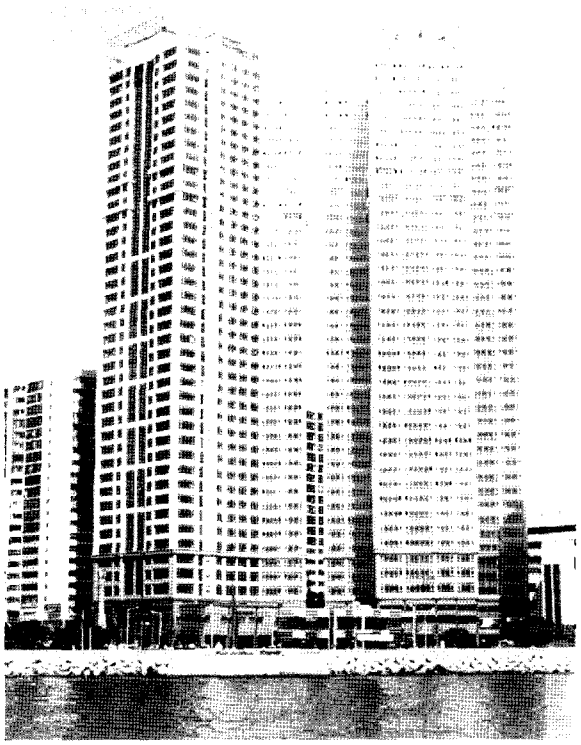


그림 1 부산 해운대 현대 하이페리온전경

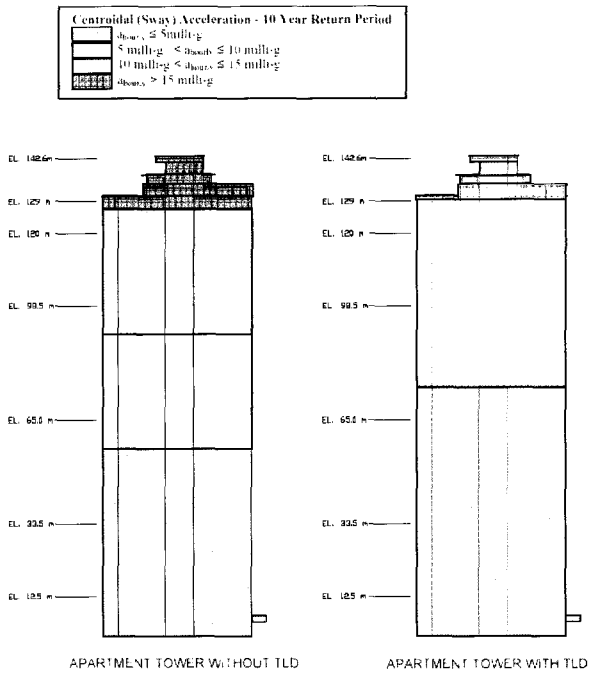
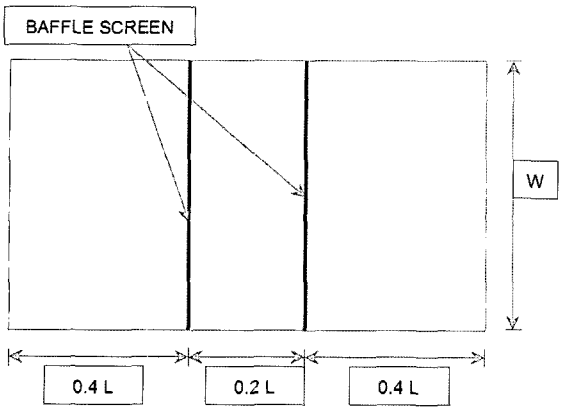
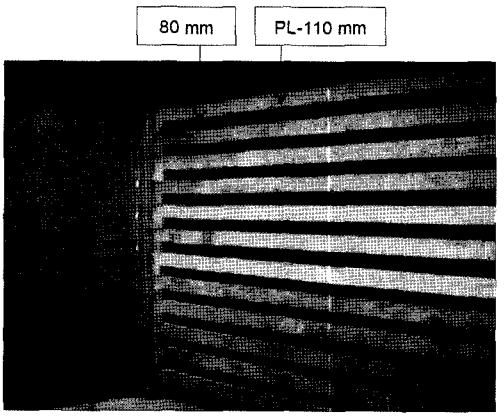


그림 2 풍동 실험 및 해석을 통한 TLD의 효율성 검토

부산 해운대 하이페리온에 설치된 동조액체감쇠기의 경우, 우선 오피스 타워에는 남북 방향에 대한 진동을 동시에 저감시킬 수 있는 1-D 물탱크 두 곳을 옥탑 층에 설치하였다. 오피스 타워의 경우 동적 질량(Dynamic mass)이 약 18,000tons(실제 건물의 질량은 동적 질량의 3배이나, 감쇠기의 경우 동적 질량에 대해서만 평가한다)이므로, 남북 방향 감쇠기의 질량은 동적 질량의 1.1%에 해당하는 약 200tons 정도가 된다. 동조액체감쇠기가 없는 경우 건물의 가속도는 10년 재현 주기 풍속에 대해 약 15~19 milli-g의 값을 보여 표 1에 의한 제한치를 만족하지 못하는 결과를 얻었다. 그러나 동조액체감쇠기를 설치한 경우에는 감쇠기가 2.5~3% 정도의 감쇠를 제공하여 약 11 milli-g의 가속도를 나타내어 본 감쇠기의 효과가 뛰어남을 알 수 있었다(그림 2 참고). 또한 아파트 타워의 경우에는 지상 41층에 남북 방향의 진동을 저감할 수 있는 물탱크 한 곳과 지상 40층에 동서 방향의 진동을 저감할 수 있는 물탱크 두 곳, 모두 3곳을 설치하였다. 아파트 타워의 경우에도 오피스 타워와 동일하게 동적 질량의 약 1%에 해당하는 150tons정도를 이용하게 된다.

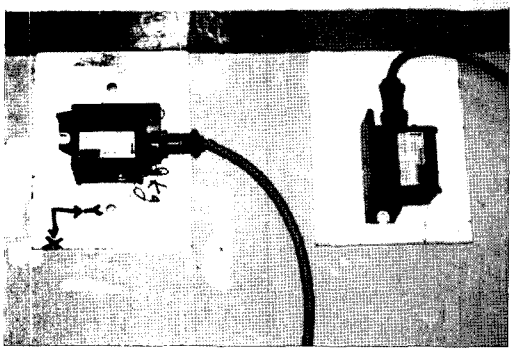
이러한 동조액체감쇠기는 건물의 변위 및 응력을 저감시키는 효과를 발휘하고 있으나, 구조 설계의 안전율을 높이기 위해 이러한 영향을 고려하지 않고 있다. 결국 동조액체감쇠기는 항상 건물에 유리하게 작용하는 것을 의미한다.





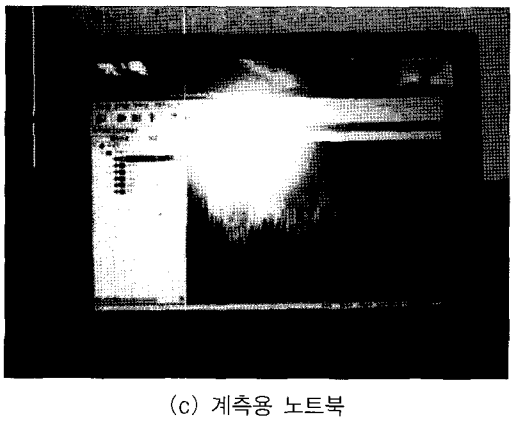
	WATER DEPTH (m)	"L"	"W"	"T"	"H1"	"H2"
APARTMENT TANK 1	1860	6200	5150	25	2350	2580
APARTMENT TANK 2	1860	6200	5150	25	2350	2580
APARTMENT TANK 3	1620	6200	5800	30	2350	2580
OFFICE-TEL TANK 1, 2	1980	6200	6225	30	2350	2580

그림 3 해운대 하이페리온에 설치된 저수 탱크의 크기

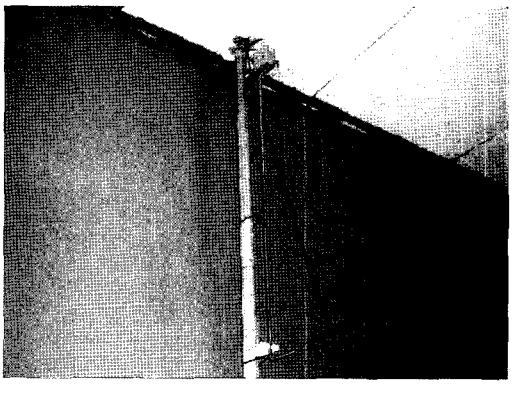


(a) 가속도계

(b) 풍향풍속계



(c) 계측용 노트북



(d) 수위계

그림 4. 계측 장비의 구성

3. 현장 계측 실시

해운대 하이페리온(Office Tower)의 동적 특성(고유진동수, 감쇠비)을 측정하여 내풍 성능의 재평가 및 TLD의 정밀 튜닝에 반영하며, TLD의 설치로 인한 구조물의 감쇠성능의 향상(등가유효감쇠비)을 확인하고자 현장에 계측장비를 그림 4에 나타낸 바와 같이 설치하였다. 현장 계측 항목 및 저장 방법은 다음과 같다.

1) 계측 항목

(1) 건물 최상층에서의 풍향 및 풍속

(2) 건물 최상층 X-, Y- 방향 가속도

(3) TLD 수위

2) 저장 방법

(1) 매 10분별 측정 항목에 대한 대표값

- 10분 평균 풍속, 순간 최대 풍속(1sec 기준)
- 가속도의 10분 평균(bias), RMS, 최대, 최소
- 수위의 10분 평균, RMS, 최대, 최소

(2) 측정 항목에 대한 대표값이 일정치(trigger level) 이상인 경우 측정 항목의 10분 동안의 시간 이력 데이터

현장계측은 1차 계측으로 2005년, 2차 계측은 2006년 각각 실시하였으며, 1차 계측에서는 TLD의 물탱크에 물이 채워지지 않은 조건으로 시공 완료 후의 건물 동특성을 측정하는 것을 목표로 하여 상시계측을 실시하였다. 2차 계측은 튜닝계획에 따라 TLD 물탱크에 물을 공급하여 TLD를 제진모드로 전환하며 계측을 수행하였다. 2차 계측의 경우는 부산권이 태풍의 영향권에 들어가는 시점에 계측을 수행하였다.

2차 현장계측은 2회에 걸쳐 수행하였다. 첫 번째 현장계측은 부산지역이 제10호 태풍 우쿵(WUKONG)의 영향권에 들어간 2006년 8월 18~19일에 이루어졌으며, 두 번째는 제13호 태풍 산산(SHANSHAN)의 영향권에 들어간 2006년 9월 17~18일에 수행하였다.

3) 2차 현장계측 - 태풍 산산(SHANSHAN), 9월 17일~18일

제13호 태풍 산산(SHANSHAN)은 최대풍속이 약 45m/s

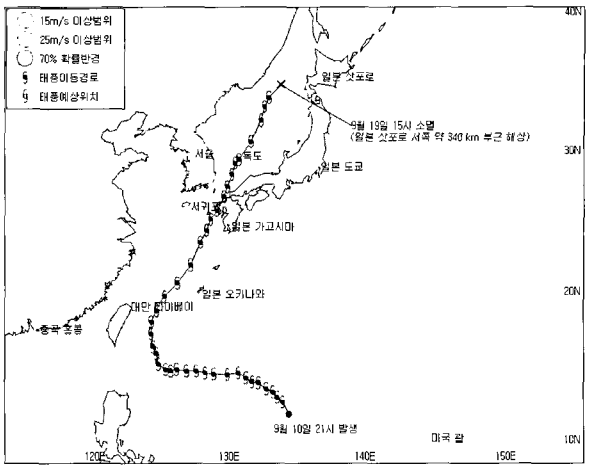


그림 5 태풍 13호 산산(SHANSHAN)의 이동경로

의 대·중형태풍으로 우리나라 남동쪽에서 접근해와 대한해협을 지나 동해안으로 빠져나갔다. 태풍 산산의 기상청 예보상황과 태풍 이동경로를 각각 표 2와 그림 5에 나타내었다.

데이터 분석은 9월 17일부터 9월 18일까지의 계측 데이터를 이용하여 풍속 대비 건물 가속도와 건물의 고유진동수를 계산하였다.

(1) 풍속 및 풍향분석

계측데이터의 풍속 및 풍향분포를 그림 6에 나타내었다. 분석 결과 풍향은 동북동쪽에서 북동으로 변해감을 확인할 수 있다. 이는 태풍이 부산 지역의 동남쪽에서 북상해 북동쪽으로 지나감과 동시에 태풍회전방향이 지상에서 반 시계방향인 영향으로 보인다. 10분 평균풍속은 북동풍향에서 최대 17.25 m/s를 나타내었으며, 순간최대풍속(1초 평균풍속)은 같은 풍향에서 최대 43.01 m/s의 값을 나타내었다.

(2) 풍속 별 진동가속도

풍속 별 MAX 가속도를 그림 7에 나타내었다. 그림을 살펴

표 2 13호 태풍 산산의 기상예보(기상청)

일 시	중심기압(hPa) 최대풍속(m/s)	강풍 반경(km)	강도 및 크기	진행방향 속도(km/h)
17일 03시	930, 49 (176km/h)	300	매우 강, 중형	북동, 34
17일 09시	940, 45 (162km/h)	300	매우 강, 중형	북북동, 33
17일 12시	940, 45 (162km/h)	320	매우 강, 중형	북북동, 38
17일 15시	950, 41 (148km/h)	300	강, 중형	북북동, 39
17일 18시	950, 41 (148km/h)	300	강, 중형	북북동, 33
17일 21시	960, 39 (140km/h)	350	강, 중형	북북동, 38
18일 00시	965, 37 (133km/h)	330	강, 중형	북북동, 39
18일 03시	970, 33 (119km/h)	250	강, 소형	북, 43
18일 06시	970, 33 (119km/h)	280	강, 소형	북북동, 35
18일 09시	975, 30 (108km/h)	280	중, 소형	북동, 26
18일 15시	980, 28 (101km/h)	280	중, 소형	북동, 31

*19일 15시경 온대저기압으로 변질됨.

보면 건물의 진동가속도는 풍속의 제곱에 비례하여 나타남을 확인할 수 있다. 태풍 우쿵에 비해 강하고 큰 태풍인 영향으로 우쿵 때에 비해 가속도값이 크게 계측되었다.

(3) 건물의 고유진동수

계측 데이터 중에서 10분 평균풍속이 최대인 시점의 10분간의 시간이력데이터를 이용하여 FFT 분석을 수행하였다. FFT해석 결과 건물의 X, Y방향의 1차 모드 고유진동수는 표 3과 같다. 해석에 사용한 시간이력데이터를 그림 8에, FFT해석결과를 그림 9에 나타내었다. 2005년 9월, 2006년 8월, 2006년 9월의 계측데이터를 이용한 고유진동수 산정결과를 표 3에 정리하였다. 2005년과 2006년의 계측결과의 차이는 공사진행에 따른 질량의 증가로 고유진동수가 감소한 영향으로 사료되며, 2006년의 8월과 9월의 계측결과의 차이는 구조재 중 콘크리트에서 진동이 클수록 균열의 영향이 크게 나타나기 때문인 것으로 추정된다.

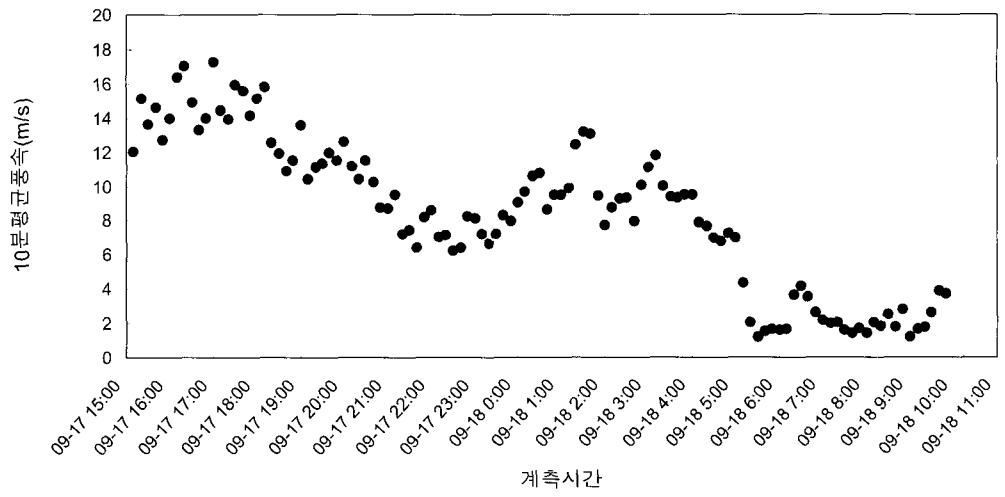
표 3 고유진동수의 변동

방향	MKA 해석 결과	2005년 9월	2006년 8월	2006년 9월
X-Dir.	0.313Hz	0.406Hz	0.387Hz	0.379Hz
Y-Dir.	0.345Hz	0.448Hz	0.433Hz	0.428Hz

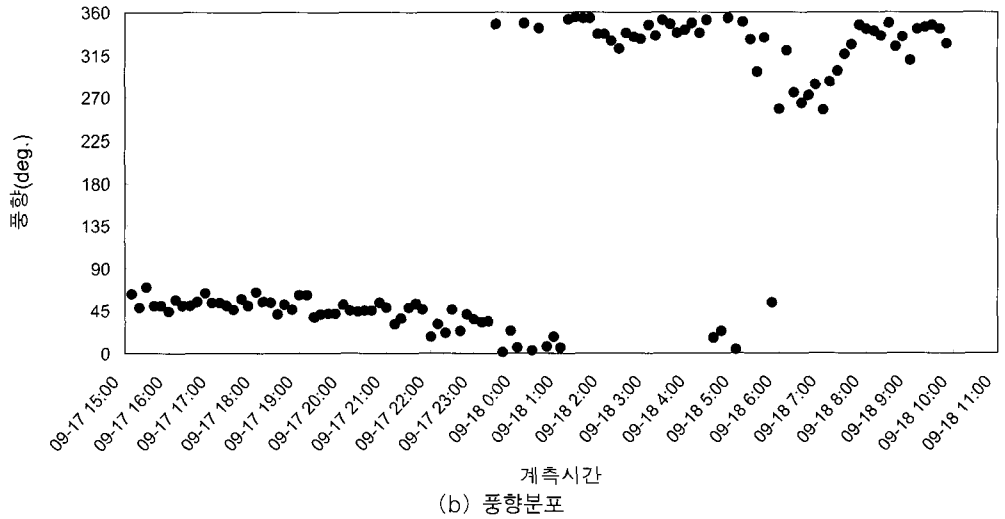
4. 맺음말

부산 해운대 하이페리온에 설치한 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper ; TLD)의 효율성 검토 및 정밀 튜닝을 위해 현장 계측을 실시하여 구조물의 동적 특성을 분석하였다.

해운대 하이페리온의 현장 계측 결과, X-방향 주기는 약 2.63sec, Y-방향 주기는 약 2.34sec로 TLD 설계 당시의 예측 주기인 X-방향 3.2sec와 Y-방향 2.9sec와 차이가 있는 것으로 분석되었다. TLD의 효율성을 높이기 위해 이러한 고유 주기의 차이는 매우 중요한 의미를 가지고 있



(a) 풍속분포



(b) 풍향분포

그림 6 풍속 및 풍향분포

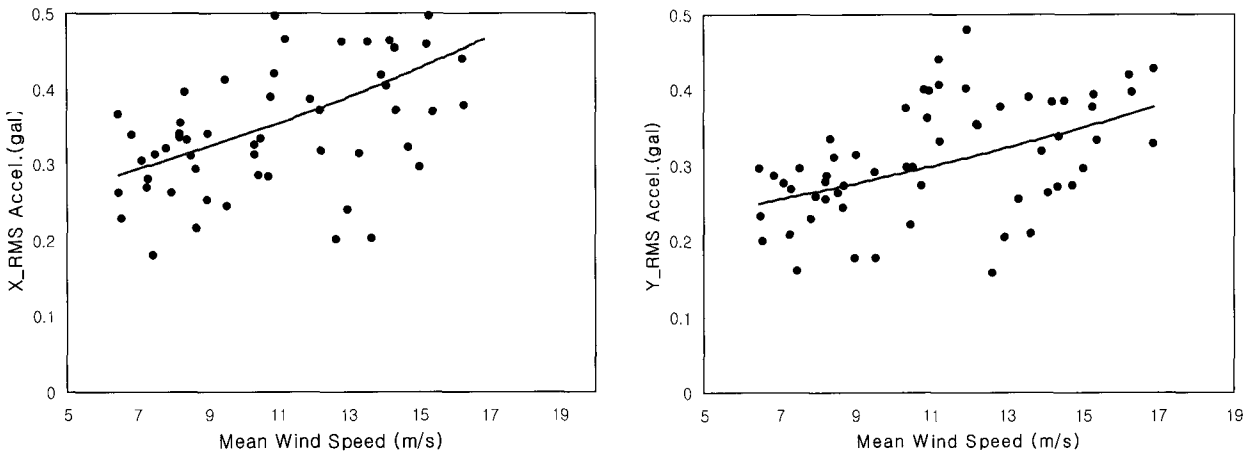


그림 7 풍속별 진동가속도

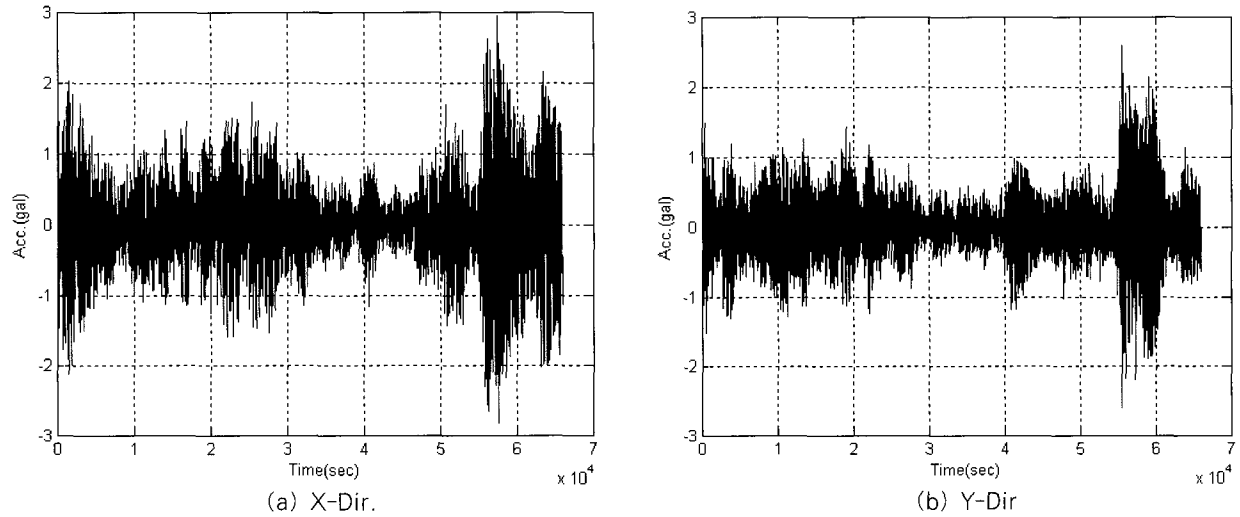


그림 8 FFT해석을 위한 시간이력데이터

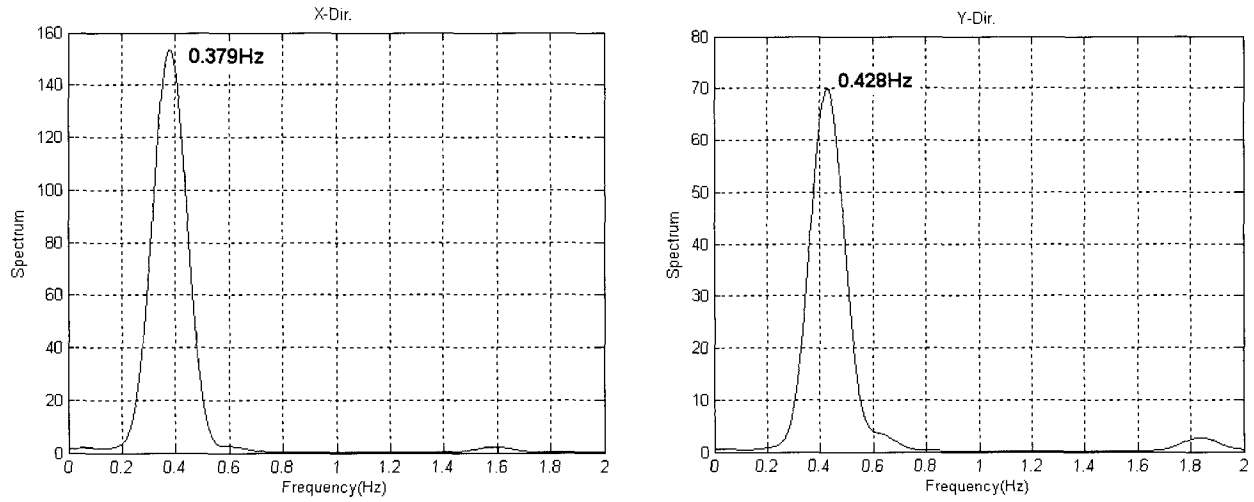


그림 9 FFT 해석결과

으며, 이러한 차이는 구조물이 계측시점에서 완전히 시공이 완료 되지 못한 결과로 판단된다. 따라서 입주 당시의 현장 계측을 실시하여 TLD의 정밀 튜닝(=수위 조절)에 반영해야 하므로 최종튜닝을 위한 계측 및 보정작업이 진행되고 있다. 또한 해운대 하이페리온의 진동 계측치는 최대 6gal 정도로 10년 재현 주기 평균 풍속에 따른 허용 가속도인 10~15gal 에 만족하는 결과를 얻었다. 그러나 10분 평균 풍속 대비 계측 가속도 값이 급격하게 증가하는 추세를 볼 때, 10년 재현 주기 평균 풍속에 대해서는 상당한 크기의 진동이 느껴질 것으로 예상된다. 따라서 이러한 진동에 대해 TLD는 진동 저감에 큰 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 유기표, 김영문(2004) 동조액체댐퍼를 이용한 고층건물의 공력진동모형실험, 대한건축학회논문집 구조계, 20(10) pp.79~8
2. 김홍진, 김형섭, 민경원, 오정근(2003) TMD와 TLCD의 지진응답에 대한 제어성능평가연구, 한국지진공학회논문집, 7(5), pp.85~91, 2003
3. Mim, K.W., Kim, H.S., Lee, S.H., Kim, H.J., Ahm, S.K.(2004) Characlerislics of Tuned Lipuid Column Dampers for a 76-Story Benchmark Building, CTBUH 2004, pp.166~173
4. 유기표(2005), TLD와 TLCD의 진동성능실험, 대한건축학회논문집 구조계, 21(5), pp.19~26
5. 윤성원, 신상준, 주영규, 이진영, 조성용(2002) 상시진동계측을 통한 철골조 건물의 사용성 평가용 감쇠율, 한국강구조학회학술발표논문집, pp.58~591