

포스코건설 초고층 건물 풍진동 모니터링 시스템

Wind Induced Vibration Monitoring For High-rise Building in POSCO E&C



유 조 형^{1)*}

Yoo, Jo Hyeong



김 현 배²⁾

Kim, Hyun Bae



이 종 인³⁾

Lee, Jong In

1. 개 요

초고층 구조물에 대한 모니터링 시스템은 건물에 가해지는 외력 및 노후화에 따른 건물의 성능 저감에 대비하여 건물의 상태를 객관화하기 위한 건물의 동특성의 실시간 감시를 포함한다. 그 결과로 모니터링 시스템은 Fig. 1과 같이 사용자의 안전 및 사용성을 보장하고 장기적으로 생애 주기 측면의 비용 감소를 지향한다. 이러한 모니터링의 구성 항목으로는 크게 세 가지로 구분될 수 있는데 1) 구조물의 외력, 2) 구조물 자체의 반응, 그리고 3) 구조물 내 설치되는 장치에 대한 모니터링이 있으며, 포스코건설 송도사옥 모니터링은 그 목적에 따라 상기 각 항목들에 대하여 계측을 실시하여 풍진동에 대한 건물의

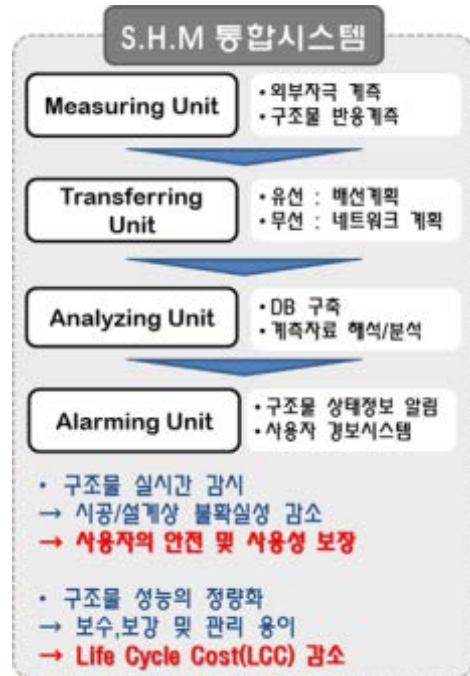


Fig. 1 모니터링 시스템의 목적 및 구성

1) 포스코건설 R&D Center 건축연구그룹 과장, 공학박사

2) 포스코건설 R&D Center 센터장 전무, 공학박사

3) 포스코건설 R&D Center 건축연구그룹 그룹리더

* E-mail : johyeong@poscoenc.com

거동을 모니터링 하는데 있다.

2. 계측대상 개요

포스코 건설 송도사옥은 38층의 사무용 건물이며, 층고가 4.1m로서 일반적인 건물보다 높아 건물의 높이가 185m에 이르고, 이에 바람에 의한 영향이 증대하였다. 풍동실험 결과에 의하면 송도사옥은 북서쪽에서 불어오는 계절풍과 주변에 계획된 고층빌딩의 영향으로 인하여 AIJ-2004의 사무용 건물에 대한 풍진동 기준 중, 인간 지각역 평균값보다 약간 큰 H-70을 두 배 이상 초과하였으며, 이에 따라 풍진동 저감 대책에 대한 여러 대안 검토가 실시되었다. 그 결과 경제성을 고려한 최적 대안으로서 구조보강과 제진장치의 동시 고려가 적용되었다.

우선 구조적 골조보강이 적용되어 시공시 반영되었으며, 제진장치의 성능 및 대상 건물에 대한 적용성 등의 종합적 대안 검토 결과로서 질량

동조 감쇠장치인 콘크리트 질량체를 이용한 TMD가 설치되었다.

위와 같은 특성으로 인하여 송도사옥에 대한 풍진동 영향성 감시 및 적용된 제진장치의 성능 검증을 목적으로 건물의 최상층 풍향풍속, 가속도와 TMD의 거동을 계측할 수 있는 모니터링 시스템이 적용되었다.

2.1 포스코건설 송도사옥

포스코 건설 송도 신사옥은 사옥동과 임대동으로 이루진 쌍둥이 빌딩으로서 각각의 빌딩이 185m(38층)으로서 일반적인 주거건물 55~60층 건물과 동일한 규모를 가진다. 또한, 서해안 인근에 위치하여 북서 계절풍의 영향을 크게 받으며, 주변에 북서 계절풍 방향으로 70층 이상의 고층 건물 건립이 계획되어 있어 외류에 의한 영향에 쉽게 노출될 수 있다.

다음 Table 1은 송도 사옥의 임대동 및 사옥



Fig. 2 포스코건설 송도사옥 모니터링 시스템 개요

Table 1 송도사옥 동특성

동특성 항목	기호	사옥동	임대동
높이(m)	H	184.6	184.6
총질량(ton)	M_t	48,487	50,354
X방향 1차 모드 질량(ton)	M_x	15,586	14,794
Y방향 1차 모드 질량(ton)	M_y	13,464	13,422
Z방향 1차 모드 질량 관성 모멘트($\text{ton}\cdot\text{m}^2$)	M_z	4,862,669	4,728,524
X방향 1차 고유진동수(Hz)	n_x	0.2521	0.2627
Y방향 1차 고유진동수(Hz)	n_y	0.2369	0.2420
Z방향 1차 고유진동수(Hz)	n_z	0.4242	0.4471
감쇠비(%)	ξ	1%	1%

동 각각의 동특성을 나타낸다. 각 건물의 특성은 풍진동 저감을 위한 골조보강이 실시된 후의 해석결과를 바탕으로 작성되었으며, 풍진동 저감 대책 중 하나인 제진장치 설계의 기본 자료로 사용되었다.

포스코 건설 송도사옥의 풍진동 모니터링 시스템은 경제성 및 데이터 관리, 적용의 효율성을 고려하여 사옥동에만 설치되는 것으로 결정되었

다. 이는 사옥동이 풍동실험 결과에 의하여 풍진동에 더 많이 노출된 것으로 분석되었기 때문이며, 이에 따라 설치된 제진장치의 용량 또한 임대동의 경우보다 두 배 이상이기 때문이다. 또한, 사옥동은 임대동과 높이, 동특성 및 질량면에서 거의 비슷한 특성을 보여서, 사옥동의 풍진동 모니터링에 따른 결과를 임대동에 동시 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 포스코건설 송도사옥 제진장치(TMD)

3.1 제진장치 개요

송도사옥 제진장치는 임대동, 사옥동의 풍진동 저감을 위하여 골조보강과 동시 고려되어 건물에 설치가 계획되었다.

다음 Fig. 3은 현장에 설치될 TMD의 물리적 규모를 나타낸다. 사옥동의 경우 임대동보다 풍진동에 대한 영향이 높은 관계로 임대동에 비해 두 배의 유효질량을 가진 TMD가 계획되었으며,

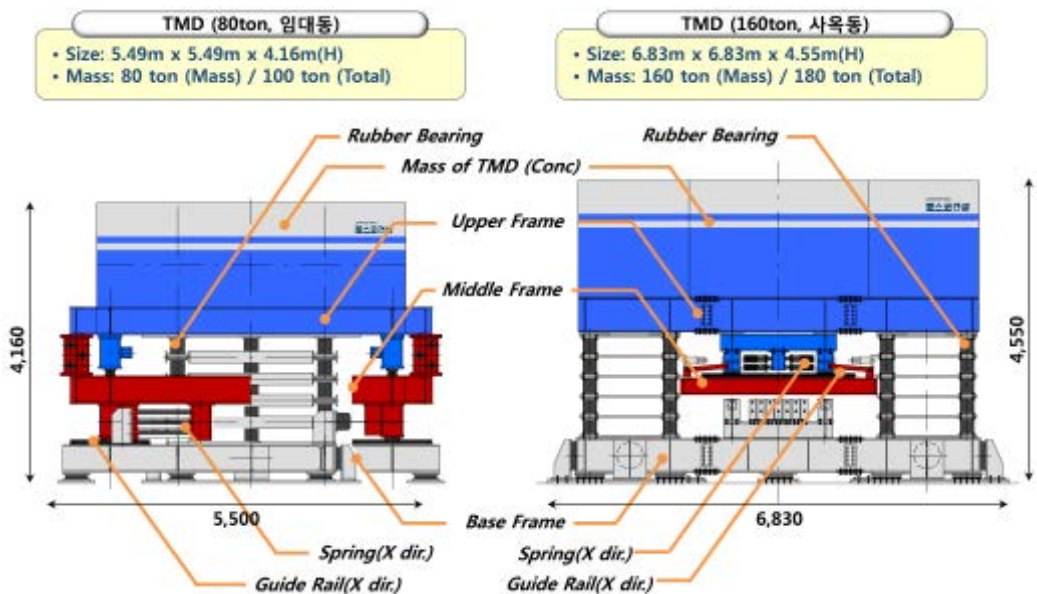


Fig. 3 임대동 TMD(좌) / 사옥동 TMD(우) 규모 및 구성

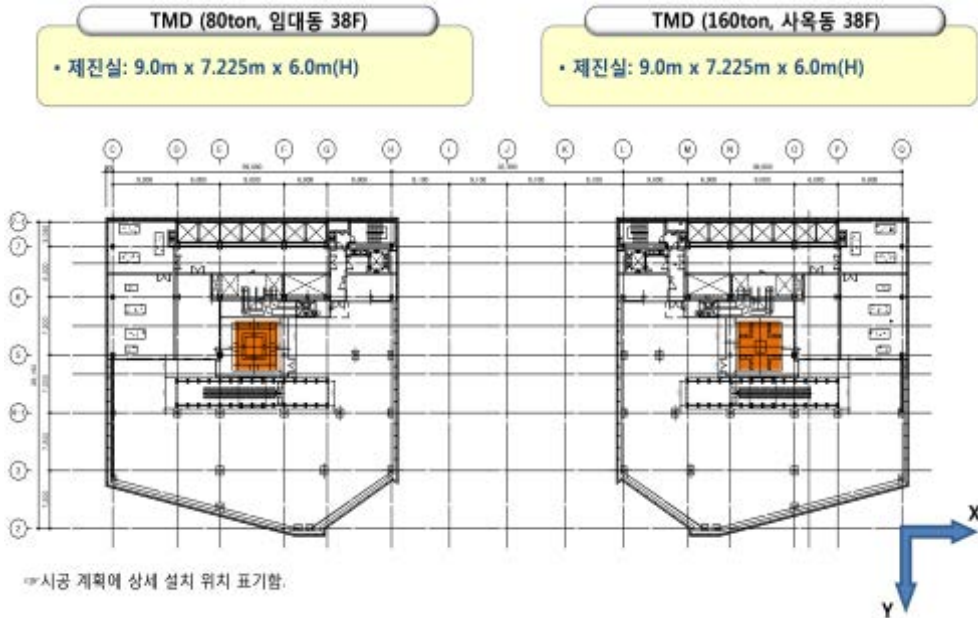


Fig. 4 임대동(좌), 사옥동(우)의 TMD 제진실 및 TMD 설치 위치

크기 또한 6.83m × 6.83m × 4.55m(H)로서 임대동의 5.49m × 5.49m × 4.15m(H) 보다 더 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 제진장치 및 제진실의 설치위치를 나타내며, 이는 현장과의 협의를 거쳐 건축 계획을 최대한 유지하는 방향으로 결정되었다. 그 결과 최종적으로 곤도라 및 기계실 중간 위치에 각각 설치를 하게 되었다.

3.2 제진장치 제작과정

송도사옥 제진장치의 제작은 프레임의 제작, 기타 부품의 제작, TMD의 가조립의 과정으로 이루어 졌으며, 현장 공사 일정을 준수하기 위하여 각 장비가 업체를 달리하여 제작되게 되었다. 각 단계의 세부과정은 Fig. 5와 같다.

3.3 제진장치 설치과정

TMD 현장 설치를 위한 설치 절차에 따른 나 타내었으며 세부 항목을 다음에 정리하였다.

- ① TMD현장반입: 크레인 사용 장비 인양 및 부속 야적
- ② 기초플레이트 설치: 먹물긋기, 앵커볼트 설치, 기초플레이트 위치고정 및 레벨링
- ③ Grouting 주입/양생: 무수축시멘트 혼합 및 기초플레이트 하부 충전 후 양생(1일소요)
- ④ 하부프레임 및 방진고무 설치: 수직방진고무 인양/설치, 하부프레임A(LM가이드포함) 설치
- ⑤ 수평적층고무설치: 수평적층고무 Assemble 현장조립
- ⑥ 적층고무받침프레임 설치
- ⑦ 상부프레임 설치
- ⑧ 코일스프링 설치: 코일스프링 인장 고정
- ⑨ 질량체 설치: 커버플레이트 조립, 철근 배

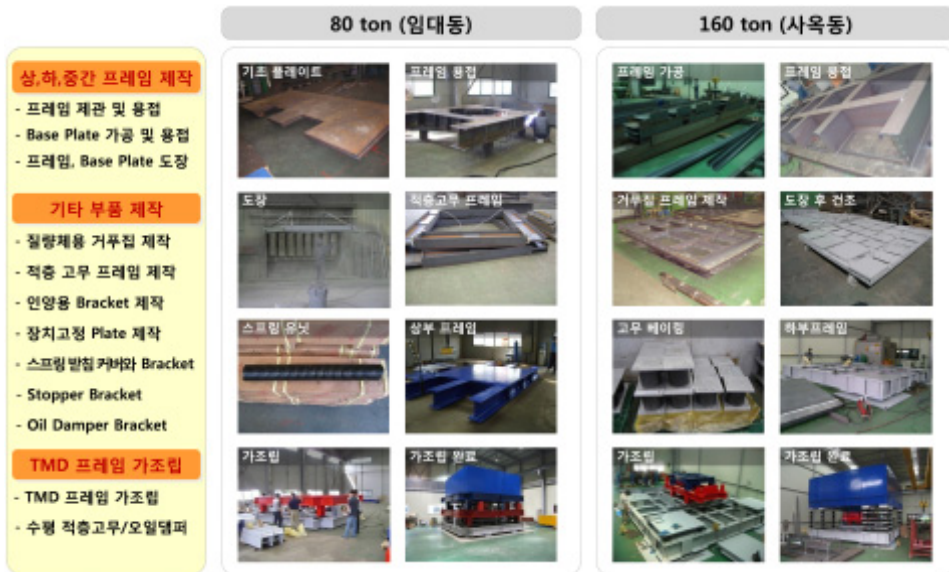


Fig. 5 송도사옥 제진장치의 제작과정

근 및 Con'c 타설
 ⑩ 오일댐퍼, 버퍼 설치 및 TMD 보양

3.4 제진장치 동특성

송도사옥의 풍진동 저감을 위해 제시된 제진 장치의 고유진동수 및 최적 감쇠비 등의 기본 설계목표치의 도달 여부를 판단하고자 공장성능 시험이 실시되었으며, 그 결과로서 각 장비의 성능을 다음 Fig. 6에 정리하였다. TMD의 최적 고유진동수는 건물 고유 진동수의 99%에 해당한다. 이 때, 최종건물 고유진동수의 변동성으로 인하여 최적 고유진동수의 실현을 위해서는 코일스프링 및 질량의 변화를 통하여 튜닝하는 작업이 필요하다. 본 대상 건물에 설치된 TMD의 경우 콘크리트 질량체 형태로서 질량의 변화가 어려워 진동수의 조절은 주로 코일 스프링의 추가, 제거에 의해 이루어진다. 특히, 해석시보다 실제 건물의 강성이 증가하는 경향을 보이는 것을 감안하여 각 장비의 진동수 조절 범위를 해석

상의 건물 고유진동수의 $-5\% \sim +15\%$ 수준으로 설계하였으며, 공장 성능 시험을 통하여 이러한 성능을 검증하였다. 최적감쇠비의 경우에는 최종 건물 동특성에 따라 오일댐퍼의 개수를 조정하여 추가 감쇠를 제공하게 된다.

송도사옥에 대한 풍진동 모니터링은 제진장치의 성능 검증 항목을 포함하며, 이에 따라 경제성 및 효율성을 고려하여 사옥동 TMD만 지속적인 성능 모니터링을 수행하기로 한다.

4. 계측시스템

4.1 계측기 선정

송도사옥의 풍진동 모니터링 시스템 구축은 1) 건물의 x, y-방향 및 Torsion 방향 동적거동, 2) 풍향/풍속, 3) TMD 동적거동의 세 가지를 계측하는 것을 주요 목적으로 한다. 이를 위해 1) 건물측정용 1방향 가속도계 3개, 2) 풍향 풍속계 1개, 그리고 3) TMD 동적거동 측정용 1



Fig. 6 송도사육 제진장치의 동특성

방향 가속도계 2개를 설치하고 데이터의 수집과 전송을 위하여 4) DAQ Board 및 데이터로거와 5) 인터넷기반 데이터 송수신 장비를 설치한다. 다음은 각각의 센서와 장비의 주요사양이다.

4.1.1 가속도계

건물의 동적거동과 TMD의 동적거동 계측을 위해 설치되는 가속도계는 서보타입 가속도계로 미국 Kinemetrics 사의 ES-U2 EpiSensor 가속도계이다. ES-U2 EpiSensor 가속도계(<http://www.kinemetrics.com/p-86-EpiSensor-ES-U2.aspx>)는 0~200Hz의 저주파 진동계측에 적합한 가속도계로 지진가속도 계측용으로 많이 사용되고 있다. 또한 $\pm 0.25g$, $\pm 0.5g$, $\pm 1g$, $\pm 2g$, $\pm 4g$ 의 최대 측정 가속도값을 쉽게 조절할 수 있어 다양한 진폭의 진동계측에 적합하다. 가속도계의 출력은 $-5V \sim 5V$ 의 전압값이며 설정된 최대 가속도값에 따라 scale factor를 조절하여 가속도 값으로 변환하여야 한다. 가속도계의



Fig. 7 Kinemetrics 사의 ES-U2 EpiSensor 가속도계

크기는 $55 \times 65 \times 97mm$ 이고 무게는 0.35kg 이다. 다음 Fig. 7은 ES-U2 EpiSensor 가속도계를 나타내었다.

4.1.2 풍향풍속계

풍향풍속의 계측을 위하여 설치된 풍향풍속계는 측정값의 신뢰성과 기상조건의 의존성을 고려하여 프로펠러형 풍향풍속계로 선정하였으며 미



Fig. 8 Young 05103 풍향풍속계

국 R. M. Young 社의 Wind Monito 모델 (<http://www.youngusa.com/products/7/5.html>) 을 설치하였다.

Young 05103 풍향풍속계는 네 개의 날개를 갖고 있으며, 날개의 회전에 의해 AC 싸인파 voltage 신호가 생성된다. 바람의 방향은 뒷 쪽의 날개판에 의해 감지되며 각도는 정밀한 변위 차계 (potentiometer)에 의해 정해진다. 자원선 차단 플라스틱과 스테인레스 스틸, 산화 알루미늄으로 이루어져 있으며 1 inch 파이프에 정착 된다.

4.1.3 데이터로거

5개의 가속도계와 1개의 풍향풍속계로부터 측정된 신호를 수집하고 Analogue 신호를 Digital 신호로 변화 (ADQ)하기 위한 장치로 영국 Keynes Controls Ltd 社의 Netpod 4003 데이터로거를 설치하였다. Netpod 4003은 16개 까지의 채널을 가질 수 있으나, 본 계측시스템에서는 7개의 Input (5 가속도계 + 1 풍향 + 1 풍속)만 측정하기 때문에 8개의 채널로 구성하였다. Netpod 4003의 주요 특징은 다음과 같다.

- 16 individually isolated Analogue inputs

- 4 Channel building blocks
- Integrated sensor excitation
- Hot-swap Support
- 24 bit ADC Resolution
- Sample rate to 2 KHz/channel
- Lightning protection – Gas Discharge / Transorb
- Option for 1000V DC Opto-isolation
- Digital Anti-aliasing filters.
- Digital Interface Options
- Variable Speed Temperature Controlled Fan
- Auto-detection 12V DC / 120/220 VAC Power supply

4.2 계측기 설치 위치

포스코 건설 송도사옥의 풍진동 모니터링을 내용은 다음과 같다. Fig. 10~13은 계측기의 설치 완료 사진 및 최종 선정된 풍향풍속계(상) 및 구조물, TMD 가속도계의 현장 설치 위치 계획과 데이터 로거와 통신 장비 등이 들어 있는 Rack의 설치위치 및 사진을 나타낸다.

풍향풍속계의 경우 구조물에 의한 바람의 영

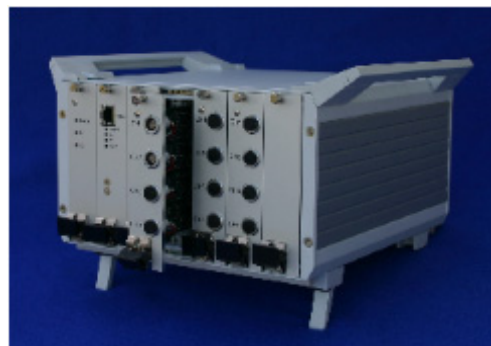


Fig. 10 Keynes Controls Ltd 社의 Netpod 4003 데이터 로거

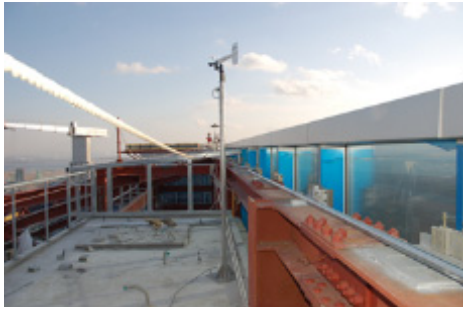


Fig. 10 풍향풍속계 설치 위치 및 사진

향을 최소화 하기 위하여 커튼월 최상부보다 더 높이에 설치해야 하므로, 사옥동 헬리포트 층 배면쪽에 위치한 위성안테나 설치대 위에 안테나와의 간섭을 피하여 설치하는 것으로 결정되었다.

5. 송도사옥 풍진동 모니터링 시스템 계통도

송도사옥의 풍진동 저감을 위하여 건물의 외력, 건물의 응답, 장치의 거동 등을 계측하기 위하여 최상층의 풍향풍속계를 비롯, 구조물 및 TMD 가속도계가 설치되었다. Fig. 14는 계측기로부터 획득된 데이터의 분석 및 현장 재적용을 위한 모니터링 시스템 계통도를 나타낸다.



Fig. 11 구조물 가속도계(좌) / TMD 가속도계(우) 설치 사진

현장으로부터 획득된 건물에 가해지는 외력정보 및 구조물의 동특성, TMD의 거동 정보는 통신장비를 통하여 포스코 건설 기술연구소의 데이터 베이스에서 관리하게 된다. 먼저 풍향풍속 정보의 경우 건물의 설계 풍속 및 각종 기준치와의 비교를 통해 거주자의 사용성 평가를 위해 사용된다. 또한, 구조물 가속도 데이터의 경우 주파수 대역으로의 변환을 통하여 건물의 고유진동수, 감쇠비 등의 동특성에 대한 정보를 제공하며, 이는 건물 강성의 변화 및 기존 해석 모델 수정의 기초자료를 제공한다. TMD에 설치되는 가속도계로부터의 정보는 구조물 가속도계와 마찬가지로 TMD의 동특성을 파악하여 건물의 동특



Fig. 12 Rack(데이터 로거, 서버) 설치 사진

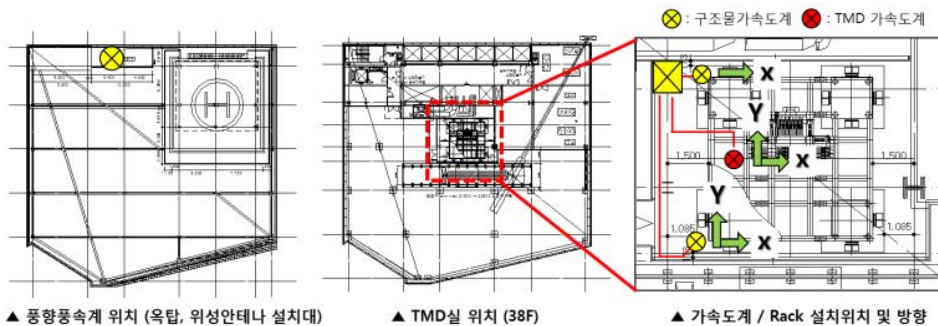


Fig. 13 가속도계, Rack 위치 및 방향

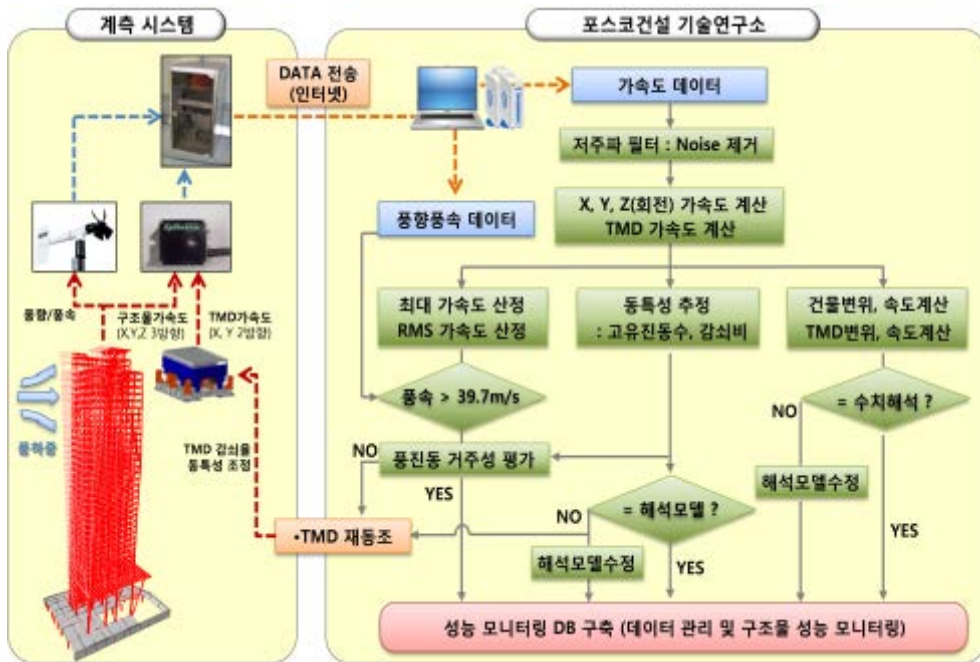


Fig. 14 송도사옥 풍진동 모니터링 시스템 계통도

성에 대한 최적화 여부를 정기적으로 모니터링하게 된다. 그 결과 건물의 동특성이 시간에 따라 변화 재 튜닝이 필요할 경우 이에 대한 정확한 정보를 제공하게 되어, 송도사옥 건물의 풍진동 저감의 효율을 극대화 시키게 된다.

6. 결론

송도사옥 풍진동 모니터링 시스템은 외력에 대한 건물 응답의 실시간 감시를 통하여 풍진동에 대한 거주자의 사용성을 향상시키고, 나아가 건물의 객관적 성능 및 설치된 제진장치의 성능을 검증하는 데에 그 목적이 있다.

- (1) 상기 풍진동 저감 대책으로서 제시된 골조 보강 및 제진장치의 설치안이 현장 적용되었으며 이에 따라 건물의 풍진동, 동특성 파악 및 제진장치의 성능 검증을 위

한 모니터링 시스템을 구상하였다.

- (2) 먼저 구조물에 가해지는 외력에 대한 정보 획득과 거주성 평가를 위하여 건물의 최상부에 풍향풍속계가 설치되게 되었으며, 건물의 동특성 파악 및 성능 평가를 위하여 X, Y, Z 방향의 가속도계가 각 1기씩 설치되었다. 또한, TMD의 성능 검증 및 재동조를 위하여 X, Y 방향의 가속도계가 각 1기씩 설치되어, 최종적으로 풍향풍속계 1기와 총 5기의 가속도계가 현장 설치되었다.
- (3) 데이터의 관리는 포스코 건설 내부 통신망을 통하여 포스코 건설 기술연구소에서 관리하고 있으며, 가속도 및 풍향풍속 데이터의 분석을 통하여 건물의 동특성 및 TMD의 성능을 지속적으로 모니터링하여, 송도사옥의 거주성 향상을 극대화 시키기 위하여 지속적으로 노력하고 있다.

(4) 이러한 송도사옥 모니터링 시스템을 통하여 지속적으로 관련 DB를 구축하여, 향후 초고층 빌딩의 모니터링 시스템에 대한 가이드 라인을 제시하고자 한다.

참고문헌

1. 조지성 외 4인, 초고층건물의 풍진동 제어기술 동향, 전산구조공학회 학회지, Vol. 19, No. 4, 2006, pp.62-70.
2. A. Kareem, T. Kijewski and Y. Tamura, Mitigation of Motion of Tall Buildings with Recent Applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, 1999, pp.201-251.
3. B. J. Vickery, N. Isyumov & A. G. Davenport, "The Role of Damping, Mass and Stiffness in the Reduction of Wind Effects on Structures", 5th Colloquium, Germany, Jun. 1982, pp.14-16.
4. Den Hartog, J. P., Mechanical vibrations. 4th edition, McGraw-Hill, NewYork, 1956.
5. S. J. Li, G. Q. Li, J. Tang and Q. S. Li, Shallow Cylindrical Tuned Liquid Damper for Vibration Control of High-Rise Structures, Structural Design of Tall Building, Vol. 11, 2002, pp.295-308.
6. Y. Fujino, Vibration Control by Multiple Tuned Liquid Dampers(MTLDs), Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 12, 1993, pp.3482-3502.

담당 편집위원: 유조형
(포스코건설 R&D Center)
johyeong@poscoenc.com