

구조물 동특성의 실험적 해석과 응용기술에 관한 연구 (기계식 주차설비 진동제어)

* 이흥기*, 박상규*

(A Study on Experimental Analysis of Dynamic properites for Structure and its Application)

(Hong-Ki Lee, Sang Kyu Park)

1. 서론

일반적으로 건물 구조물에 전달되는 기계진동을 감소시키기 위해서 기계와 기초사이에 유연한 방진소자를 삽입하여 기계 가진력(exciting force)의 전달률을 줄인다. 또한 구조물의 고유진동수와 진동원의 가진주파수가 일치할 경우, 가진주파수를 변화시키거나, 구조물의 동특성을 변화시키는 방법을 사용한다. 어떠한 방안을 선택하든 효과적이고 정량적인 방진 시스템을 구성하고 구조물의 정확한 진동상태를 예측하기 위해서는 진동원의 가진특성과 구조물의 동특성에 대한 정보가 요구된다. 일반적으로 방진설계를 위해 필요한 진동원의 가진 특성은 제조회사의 사양이나 측정을 통하여 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 복합재료, 다양한 경계조건, 복잡한 대형구조물 등은 수치해석을 이용하여 해석적인 방법으로 동특성을 구할 경우, 신뢰성있는 정보를 얻기에는 많은 노력이 요구된다. 더우기 현장에서 발생하는 진동문제는 대부분 복잡하고 시간적으로 시급히 해결해야 하기 때문에 효율적인 절차를 구성하여 구조물의 동특성을 해석하는 방법을 사용할 필요가 있다. 구조물의 동특성은 실험적인 방법을 통하여 구하고 그 외의 필요한 계산들은 해석을 통하여 얻는 것이 효율적일 수 있다. 실험적 동특성해석은 입력하중에 대한 응답의 크기와 위상비를 주파수별로 나타내는 전달함수를 측정하는 방법으로서 가진장치 및 여러 측정/분석 장비가 필요하며, 철교, 교량, 건물의 철골 및 콘크리트 슬라브등 다양한 중대형의 구조물을 Signal/Noise비가 좋도록 가진시켜야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 이러한 실험적 방법의 현장 적응성과 신뢰성을 확보하기 위해 대형충격기(large impact hammer, max. peak force 약 10000N, time duration 약 20ms)를 제작하고 실험/분석 시스템 및 구조물의 진동제어를 위한 절차를 Fig.1과 같이 구성하고 이를 철근콘크리트 건물에 설치한 기계식 주차설비의 진동제어에 적용하였다.

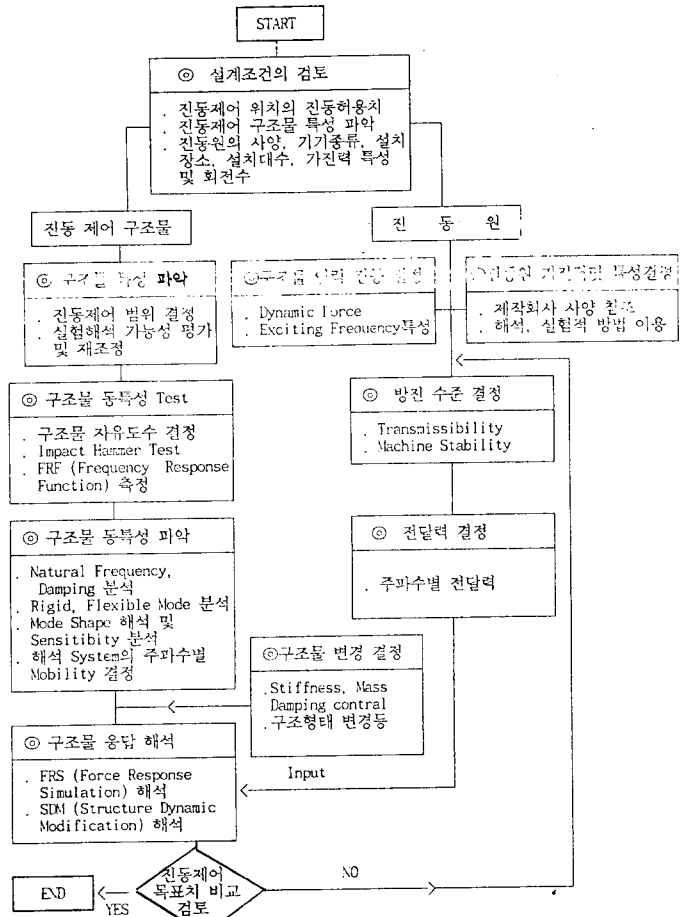


Fig.1 구조물 진동제어 흐름도

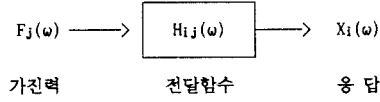
2. 이 론

실험적 방법에 의한 구조물의 동특성해석은 주파수응답함수를 구하기 위하여 진동제어가 요구되는 구조물을 충격실험모

델링한다. 그리고 각자유도에 대한 주파수응답함수를 구하고 구조물 전체의 전달함수를 구성하여 동특성을 구한다. 실험 해석의 기본적인 가정과 전달함수는 아래와 같이 정의된다.

*. 유니스산업(주) 부설 유니스기술연구소, 정희원

- 해석구조물은 선형계
- 구조물은 time invariant
- 구조물은 입력에 대한 응답이 측정가능해야 한다.



$$X_j(\omega) = H_{ij}(\omega) F_j(\omega)$$

$$H_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)} \quad \text{----- (1)}$$

여기서, i : Measurement in DOF i
j : Excitation Spectrum in DOF j

선형운동방정식에 전달함수를 도입하기 위하여 Laplace Domain에서 다자유도 Matrix 형태로 나타내면 식(2)와 같다.

$$S^2[M]\{X(S)\} - S[M]\{X(0)\} - [M]\{\dot{X}(0)\} + S[C]\{X(S)\} - [C]\{X(0)\} + [K]\{X(S)\} = \{F(S)\} \quad \text{----- (2)}$$

초기 계가 안정된 상태이면 $\{X(0)\} = \{\dot{X}(0)\} = 0$ 가 되고 이 때 식(2)는 식(3)과 같이 정리된다.

$$\{S^2[M] + S[C] + [K]\}\{X(S)\} = \{F(S)\} \quad \text{----- (3)}$$

Laplace Domain에서 전달함수는 식(4)와 같이 된다.

$$\{H(S)\} = \{S^2[M] + S[C] + [K]\}^{-1} \quad \text{----- (4)}$$

식(3)을 다자유도에서 풀어쓰면 식(5)와 같고 h_{ij} 는 각 자유도에서 입력에 대한 출력의 비로 나타나는 전달함수이다.

$$\begin{matrix} X_1(S) \\ X_2(S) \\ \vdots \\ X_n(S) \end{matrix} = \begin{matrix} h_{11}(S) & h_{12}(S) & \dots & h_{1n}(S) \\ h_{21}(S) & & & \\ \vdots & & & \\ h_{n1}(S) & \dots & \dots & h_{nn}(S) \end{matrix} \begin{matrix} F_1(S) \\ F_2(S) \\ \vdots \\ F_n(S) \end{matrix} \quad \text{----- (5)}$$

Laplace Transforms of Responses Transfer Function Matrix of Laplace Transforms of Applied Forces

여기서, S : Laplace variable ($= -\sigma + j\omega$)
 $\omega_d = \omega_0 (1 - \zeta^2)^{1/2}$: damped natural frequency
 ζ = damping ratio, σ = decay rate
 ω_0 = undamped natural frequency
 $\{X(S)\}$: Laplace transform of displacement response (n by 1)
 $\{F(S)\}$: Laplace transform of applied force (n by 1)

일반적으로 구조물의 모빌리티를 알 경우 아래와 같은 구조물의 동특성해석에 유용하게 이용할 수 있다.

- 구조의 공진모드 결정 (Natural Frequency, Mode Shape, Damping Ratios).
- 구조물 구성재료의 동특성 파악(the complex modulus of elasticity).

- 예상 가진력에 대한 구조물 응답예측.
- 구조물 동적인자 (Stiffness, mass, damping)의 변경시 응답 예측.

측정으로 구해진 전달함수의 시스템 전체 행렬(full matrix)을 이용하여 FRS (force response simulation)과 SDM (structure dynamic modification)을 해석적으로 수행하여 진동원의 필요한 전달함수를 결정하고 구조물의 응답을 예측한다. FRS는 전달함수 행렬에서 가진력에 대한 응답을 구한다. 식(5)를 특정 Fourier transform으로 나타나는 아래 식(6)을 풀어 구한다.

$$\{X(\omega)\} = \{H(\omega)\} \{F(\omega)\} \quad \text{----- (6)}$$

여기서, $\{F(\omega)\}$ = n-vector of Fourier transforms of user specified excitation forces

$\{X(\omega)\}$ = computed n-vector of fourier transforms of structure responses

$\{H(\omega)\}$ = (n x n) matrix of FRFs Synthesized from modal data

n = number of DOFs in the mode shapes

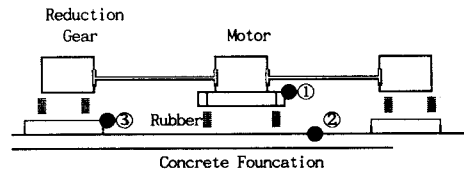
SDM은 decouple 된 modal coordinate의 각 진동계의 m, c, k의 DOFs별 변화량에 대하여 재계산을 수행함으로써 변형된 진동계에 대한 동특성을 구할 수 있다.

3. 본 문

3.1 기계식 자동주차설비

주차공간의 효율적인 사용과 법적확보를 위하여 건물지하공간을 활용하는 기계식 자동주차설비가 많이 채용되고 있다. 이러한 주차설비는 철골구조물과 동력장치(모터, 감속기, 동력전달장치 등) 및 자동차 반송판넬로 구성되어 있으며, 설비의 안전성을 위하여 복잡한 제어시스템을 사용하고 있다. 특히 많은 위치제어용 센서를 사용하고 있어, 주차설비 중 철골구조의 안정성이 중요한 제한인자(因子)로 작용하고 있다. 이와 함께 자동차의 고속이승에 따른 동적외력의 변동폭을 줄이기 위하여 지하건물 콘크리트 골조와 일체가 되도록 설계하기 때문에 구조소음(structure-borne noise)과 건물진동이 커다란 문제로 대두될 여지를 갖고 있다. 특히 주동력원인 모터와 동력전달장치에서 발생하는 진동과 모터제어 브레이크 소음 및 자동차 반송판넬의 충격성 진동, 소음이 문제가 되고 있다. 여기서는 주차설비에서 발생한 진동문제에 한정하고, 전달함수를 이용한 동적실험과 해석을 통하여 콘크리트 건물구조의 진동문제를 정량적으로 접근하고자 한다.

지하 기계식 주차설비 및 건물구조의 개략도와 측정위치를 Fig.2에 나타내었다.



(a) 주차설비 주동력(Motor+Reduction Gear Set)시스템

3.2 진동측정 결과

용도가 일반 사무실인 지하주차설비 UNIT 1,2의 상부 1층 슬라브에 진동이 매우 심하게 발생하였다. 측정위치별로 건물 및 주차설비 진동을 측정된 결과 Fig.3과 같이 나타났으며, 특히 1층 슬라브(측정위치⑤)에서 29.3Hz의 단일 진동이 약 0.42m/s²(rms, 92.5dB)로 진동하고 있었다.

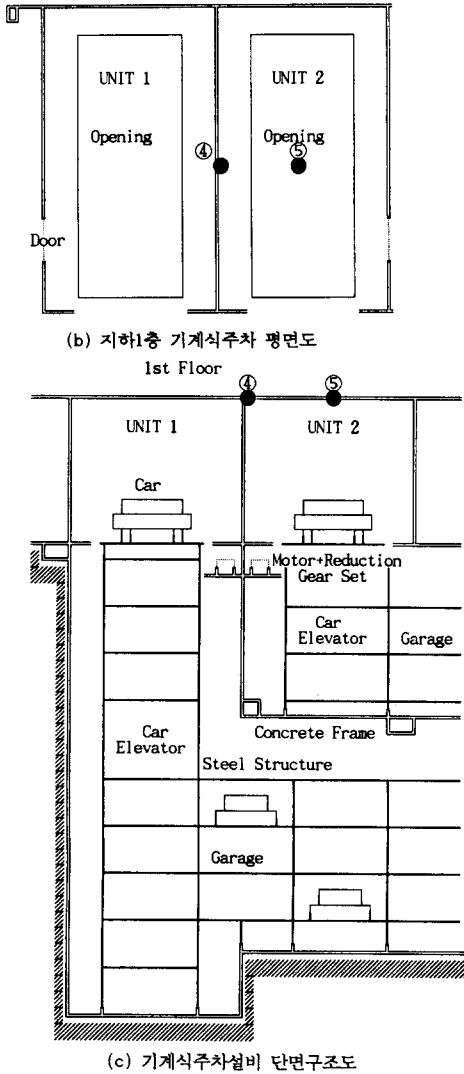
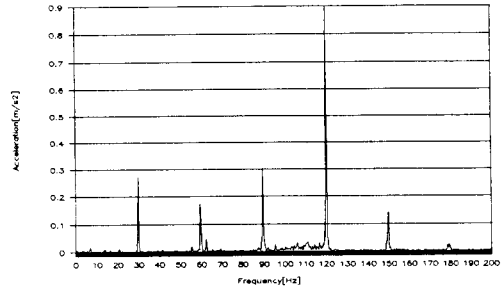


Fig.2 기계식 주차설비 개략도 및 구조도

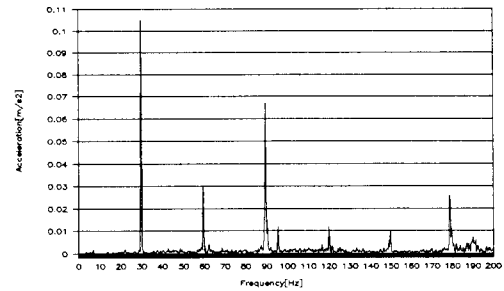
- 측정위치: ① Motor Base
 ② Motor Concrete Foundation
 ③ Reduction Gear Concrete Foundation
 ④ Center Wall 1st Floor
 ⑤ UNIT.2 1st Floor Center

Table.1 Description of Motor, Reduction Gear

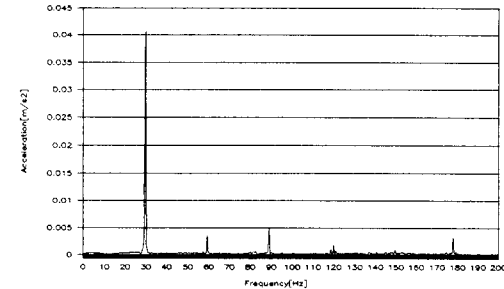
No.	품 목	내 역	
1	입고제한치수	LU-SPE	
2	승강장치	구동방법	ENDLESS CHAIN DEVICE
		구동속도	3300/780rpm
		MOTOR	2.5/11kwx380
		MOTOR SPEED	1760/420rpm
3	MOTOR BRAKE	POLE CHANGING WITH HIGH RESISTANCE MOTOR BRAKE	



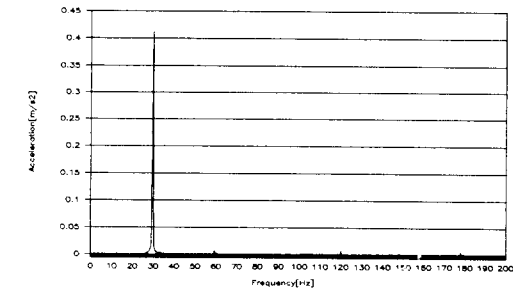
(a) Frequency Signal of Measurement Point①
(Motor Base)



(b) Frequency Signal of Measurement Point②
(Motor Concrete Foundation)



(c) Frequency Signal of Measurement Point④
(Center Wall 1st Floor)



(d) Frequency Signal of Measurement Point⑤
(UNIT.2 1st Floor Center)

Fig.3. 측정위치별 진동분석 주파수신호

3.3 건물구조물 동적실험

진동 심한 지하주차설비의 2개 대칭 UNIT 중, UNIT 2의 상부 1층 슬라브 동적특성을 파악하기 위하여 충격가진 실험을 실시하였다.

3.3.1 실험장치 구성

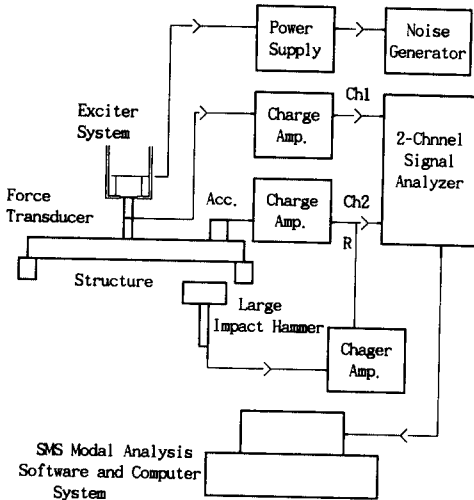


Fig. 4 구조물 동특성 측정/분석시스템의 구성도

3.3.2 동적 실험

A) 1층 슬라브의 모델링

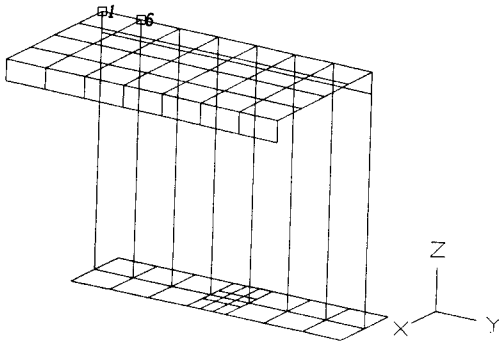


Fig. 5 Modeling of Test Slab

B) 측정신호 분석

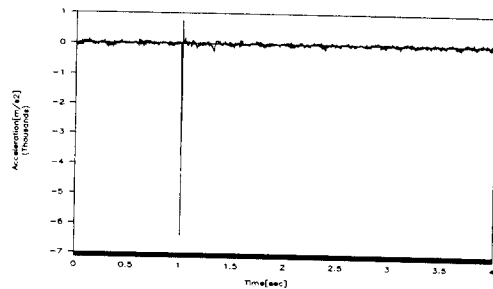
Fig. 1 과 같이 구성된 시스템으로 2-Ch FFT를 이용하여 impact hammer test의 입력Force와 출력 가속도를 관찰하여 실험구조물의 자유도별 FRF를 구하였다.

- . Frequency span : DC-200Hz
- . Frequency resolution : 0.25Hz
- . Ch A : transient time window (입력신호)
- . Ch B : exponential time window (출력신호)
- . Average number : 3회
- . FRF의 측정 : H₁ Function 사용 FFT 분석

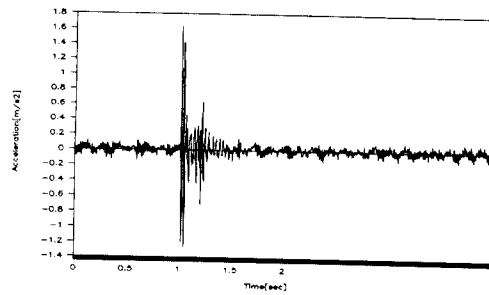
$$H_1 = \frac{G_{XF}}{G_{FF}}$$

여기서, G_{XF}: Cross Spectrum between Response and Excitation
G_{FF}: Auto Spectrum of Excitation

C) Test Signal Description



(a) Impact Hammer Time Signal



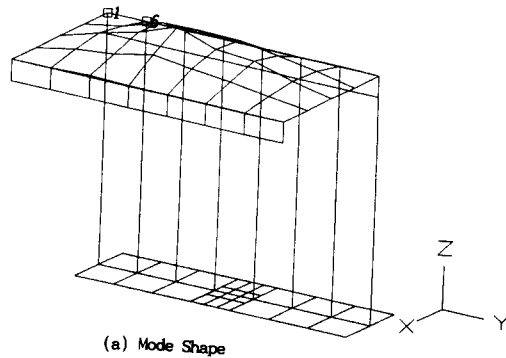
(b) Output Time Signal

Fig. 6 Description of Dynamic Test Signal

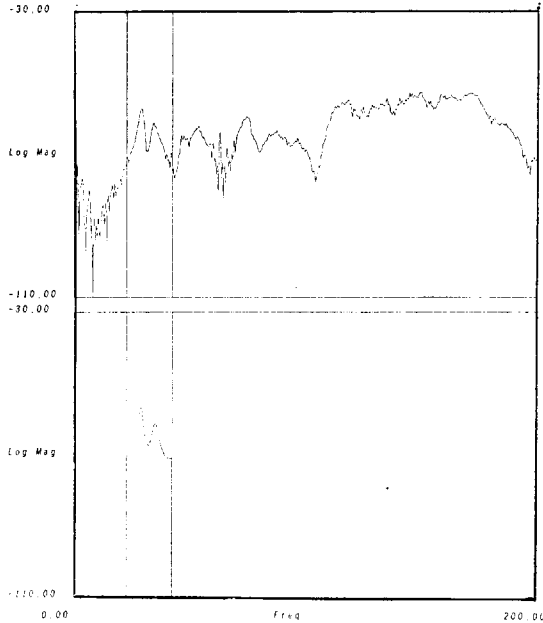
3.3.3 실험구조물의 동특성해석

실험구조물에서 측정된 FRF를 3-200Hz주파수영역에서 Curve Fitting을 수행하였으며, 1차 Bending Mode가 28.9Hz서 나타남을 알수 있다. 측정된 전달함수 FRF에 대한 Curve Fitting 및 Mode Shapes을 Fig. 7에 실었다.

A) FRF and Curve Fitting



(a) Mode Shape



(b) FRF and Curve Fitting of FRF

Fig. 7 Curve Fitting and Mode Shape

B) 실험구조물의 모드 특성

Table 2. Dynamic Properties of Test Structure

Mode	Frequency [Hz]	Damping Ratio (C/Cc) [%]	Remarks
No. 1	28.92	2.88	1차 Bending
No. 2	34.9	3.69	Local Mode

3.4 진동 대책

1층 슬라브의 진동이 큰 원인은 반송판넬의 고속이송시 주 동력원인 모터의 회전수(RPS : 29.3Hz)가 1st Floor의 1차 굽힘 모드-의 고유진동수(fn=28.9Hz)와 거의 일치하여 공진을 일으키고 있는 것으로 추정된다. 이때, 증폭계수(amplification factor)는 $\zeta=3\%$ 일 경우 11.5이다. 충분한 시간으로 가진될 경우 진동전달 추정로인 중앙옹벽(측정위치④)의 진동수준보다 최대 11.5배정도 증폭될 것으로 추정된다(측정위치④ : 0.041m/s², ⑤ : 0.42m/s², 실제 약10배정도 증폭). 그리고 모터와 감속기 설치시에 기초와 하부베이스 사이에 고무패드 가 삽입하고 볼트로 고정시키는 마운트방식을 사용하고 있어, 볼트 죄임에 따라 방진계가 불확실하게 결정되고 모터의 진동이 볼트를 통하여 직접 전달될 가능성을 갖고 있다. 모터의 작동 회전수를 변화시키는 것이 공진을 피할 수 있는 가장 용이한 방법이나 모터 구조상 기존 모터를 교환해야만 가능하기 때문에 진동대책은 다음 2가지 경우로 검토할 수 있다.

- 추진동원인 모터 및 감속기의 방진.
- 1층 슬라브의 1차 굽힘 모드-의 고유진동수 변경.

3.4.1 모터 및 감속기 방진

모터 및 감속기를 고유진동수 4Hz로 스프링 방진할 경우 모터의 가진주파수(29.3Hz)에서 전달률이 2%로 방진효율은 98% 수준이다. 다른 진동전달 경로 및 진동원이 없다면 중앙옹벽(측정위치④)의 진동수준은 약0.8gal 수준이고 1층 슬라브 증폭계수를 고려할때 9.2gal(약79dB)로 추정된다.

Table 3 Description Anti-Vibration System of Motor+Reduction Gear Set (UNIT : m/s²)

Description	방진전 측정치	방진후 이론치	방진후 측정치	비 고
측정위치 ④ (중앙옹벽)	0.041	0.008	0.011	RMS 주파수: 29Hz 방진계 고유진동수 4Hz
측정위치 ⑤ (1층슬라브)	0.42 (92.5dB)	0.092 (79dB)	0.072 (77.2dB)	

방진처리후 1층 슬라브에서 진동수준은 0.072m/s²(약 77.2dB)로 약15.3dB 감소하였으며, 진도계기준으로는 Ⅲ수준(약진, Rather Strong)으로 사람 감각으로 크게 느껴지는 상태이다.

3.4.2 1층 슬라브 구조변경

공진을 피하기 위해서는 1층 슬라브 1차 Bending Mode의 고유진동수(28.9Hz)를 변경 시켜야한다. 구조물의 고유진동수 변경은 동적인자를 (Mass, Damping, Stiffness)를 효율적으로 제어하므로써 가능하다. 정량적인 진동제어 인자를 결정하기 위해서는 구조물의 동적특성이 알려질 때만 가능하다. 1층 슬라브를 충격실험으로 얻어진 각 자유도에 대한 전달함수를 분석하므로써 구조물의 전반적인 동특성을 파악할 수 있다. 그리고 계 전체 행렬을 수학적으로 해석하므로써 SDM, FRF를 수행할 수 있으며 구조물 동특성의 변화를 분석할 수 있다. 고유진동수 변화에 따른 증폭계수를 줄이는 방안은 외력진동이 정현파일 경우 아래 식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$M(\omega) = \frac{1}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}^{1/2}$$

여기서, M(ω)는 Amplification Factor이다. 1층 슬라브의 공진을 피하기 위하여 1차 굽힘모드-의 고유진동수를 모터의 가진주파수 보다 낮게하는 Low Tuning과 높게하는 High Tuning을 고려할 수 있다. 1층 슬라브의 목표진동수준을 70dB(약 0.032m/s²) 정도로 결정하여 SDM 및 FRF를 수행하였다. FRF를 수행할 경우 입력이 하중으로 되어야 하지만 1층 슬라브에 중앙옹벽을 통하여 입력되는 하중을 직접적으로 측정하는 것은 어렵다. 단지 1층 슬라브의 동적응답을 역으로 추정하므로써 가진력을 해석적으로 추정할 수 있다.

A) 가진력의 추정

현실적으로 직접 1층 슬라브에 입력되는 가진력을 측정하는 것은 어렵지만, 동적으로 정확히 알려진 진동계의 응답을 측정하여 역으로 응답해석하므로써 구할 수 있다. 그리고 가진력은 FRF 수행할 경우 입력 데이터로 필요할 뿐만 아니라, SDM을 수행한 후 재응답해석을 위해서도 필요하다. 여기서는 실험적으로 알려진 1층슬라브의 동적특성과 측정된 응답을 이용하여 자유도 162에 집중하중이 작용한다고 가정하였다. FRF를 수행하여 실험적으로 측정된 동일한 응답이 발생하는 하중을 구한 결과 약3,500N으로 추정 되었다.

B) Mass Tunning (Low Tunning)

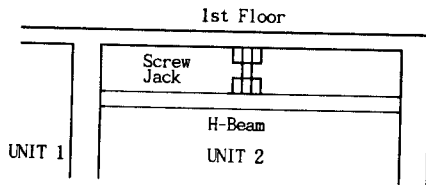
1차 횡모드에서 1층 슬라브의 경계조건을 고려할 때 질량 효과가 가장 큰 위치는 자유도 18Z와 23Z이며, 이곳에 각각 질량을 부가하여 1차 횡모드의 고유진동수를 20Hz 정도로 낮추어 증폭계수를 약 1수준에 맞추기 위해서는 각각의 위치에 약 3ton 정도 필요할 것으로 분석되었다.

C) Stiffness Tunning (High Tunning)

강성을 보장하는 효과적인 방법은 자유도 18Z와 23Z 위치에 강체기둥을 지반사이에 설치할 경우이다. 이때, 1차 횡 모드의 고유진동수를 40Hz까지 높일 경우 각 위치에 $75 \times 10^6 \text{N/m}$ 정도의 보강이 필요한 것으로 분석되었으며 이 경우 증폭계수는 약 2정도이다.

D) 구조변경 방안

질량을 추가하는 방안은 설치상의 문제와 정적 하중의 증가를 가져오는 단점이 있다. 지반에 기둥을 세워 1층 슬라브의 자유도 18Z, 23Z를 지지하는 것이 가장 효율적이지만, 지지 지반이 없이 개구된 주차설비와 같은 경우는 벽체에 가로 철골보를 설치하여 강성을 부여해야 한다. 그러나 $75 \times 10^6 \text{N/m}$ 의 굽힘강성을 보장하기 위하여 매우 큰 H-Beam이 필요하다. 현장여건에 알맞은 높이 200mm 정도의 H-Beam을 사용할 경우 필요한 강성의 약 1/8 정도 밖에 얻을 수 없다. 또한, H-Beam이 1층 슬라브에 이상적으로 설치될 경우가 아닌 이상, 강성 증가량을 명확히 보장할 수 없으며 시공상에서도 많은 불확실한 인자를 내포하고 있다. 여러가지 현장 상황에 적절한 200mm H-Beam을 사용할 경우 1차 횡 모드의 고유진동수 변화량은 1.7Hz (28.9Hz → 30.6Hz, 모터회전수: 29.3Hz) 정도로 분석되었으며, 이 경우 증폭계수는 6 정도로서 초기 11.5보다 약 2배 정도 진동이 감소된다. 이때 1층 슬라브 진동은 약 0.036m/s^2 (71.1dB)이 될 것으로 추정되었다. 이상적으로 1층 슬라브에 보강 H-Beam 강성이 기여를 하도록 하기 위하여 Screw Jack을 이용하였으며 1층 슬라브 강성보강 개념도는 Fig. 8에 나타내었다.



중앙용벽

Fig. 8 1층 슬라브 강성보강 개념도

E) 구조변경 결과

Table 4 구조변경 후 진동특성 변화

Description	구조변경전	구조변경후	비 고
1차 굽힘 모드 고유진동수	28.9Hz	30.3Hz ($\Delta 1.4\text{Hz}$)	* UNIT 1 측정위치 ⑤는 0.02 m/s^2 (66 dB)
1층 슬라브 측정위치 ⑥ 진동수준	0.072 m/s^2 (77.2dB)	0.038 m/s^2 (71.6dB)	

4. 고찰 및 결론

기계식 주차비에서 발생하는 진동을 제어하기 위하여 진동 측정 및 실험적 모드해석 방법을 이용하였다. 그 결과 초기 문제된 1층 슬라브에 매우 큰 진동(92.5dB)을 발생시킨 원인은 모터의 가진주파수(29.3Hz)와 1층 슬라브의 1차 굽힘모드(28.9Hz) 사이의 공진에 기인함을 알 수 있으며 1차적으로 진동원의 전달률을 줄인 결과 1층 슬라브의 진동이 77.2dB로 15.5dB 정도의 감소효과를 가져왔다. 2차적으로는 구조물의 강성을 변경 후 5.8dB 정도 진동이 줄었다. 방진과 구조 변경 후 최종 진동감쇠 수준은 UNIT.1 상부 1층 슬라브에서 초기보다 약 24dB 정도, UNIT.2에서는 21dB 정도 감쇠하였다. 대형구조이면서도 이러한 차이를 보이는 것은 주차설비를 구성하고 있는 전체 콘크리트 구조를 볼때 UNIT.2보다 UNIT.1의 지지강성이 크기 때문인 것으로 사료된다.

FRS 해석결과 가진력이 3,500N으로 추정되었으나, 이의 오차범위를 확인할 실험실 차원에서 SDM, FRS 해석과 병행하여 차후 수행할 필요가 있다. 정확한 해석을 위해서는 진동에 영향을 미치는 구조물 전체를 동적 실험모델하는 시도가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. SMS STAR Theory and Application, Issue A:25 January 1990.
2. Mark R. Herbert, Donald W. Kientzy Application of Structural Dynamics Modification, Society of Automotive Engineers, Inc. 1981, 801125.
3. D. J. Ewins, Modal Testing, Theory and Practice, Research studies press Ltd., Letchworth, herts, England.
4. 권형오, 정지만, 이흥기, 교량의 실험적 동특성 해석, '92 춘계학술대회 논문집 1992. 5. p115-121.
5. ANSI S2.31 - 1979, Methods for the Experimental Determination of Mechanical Mobility, Part I.
6. ANSI S2.32 - 1982, Methods for the Experimental Determination of Mechanical Mobility, Part II.