

임팩트해머 실험에 의한 부재의 동적파라미터 및 콘크리트 강도 추정

Estimation of Dynamic Parameters and Concrete Strength of a Structural Member by Impact Hammer Testing

김세희* · 경정현** · 은희창***

Sehee Kim* · Junghyun Kyung** · Heechang Eun***

Abstract

Structural health monitoring involves performance evaluation based on measurements for maintenance purposes. By back-calculating measured Frequency Response Function (FRF) data, the concept of effective mass was introduced and applied to the performance evaluation of structural members. An identification method was proposed that uses participation factors to estimate the dynamic parameters and the strength of concrete of structural members. The appropriateness of these methods for identifying dynamic parameters and concrete strength of structural members was validated through experimental results, proving their utility in non-destructive testing for concrete strength.

Keywords: Effective Mass, Participation Factor, Nondestructive Test, Concrete Strength, Frequency Response Function (FRF)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

구조물의 건전도 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)은 센서에 의해 측정된 데이터를 분석하여 부재의 구조성능을 평가하고 내구성능 개선을 위한 유지관리를 목적으로 한다. 이 과정에서 주파수 응답함수(Frequency Response Function, FRF)는 구조 부재의 모달 특성이나 질량, 강성 및 감쇠와 같은 동적 파라미터를 추정하는데 중요한 데이터로 활용된다.

콘크리트 강도 추정은 구조물의 노후화, 리모델링

등에 선행하여 수행되는 안전진단 항목의 하나이며, 리모델링 시 기존 하중뿐만 아니라 옥상녹화 하중과 같은 추가적인 하중에 대한 고려가 필요하다는 점에서 콘크리트 강도 추정이 활용된다(이범식 외, 2016). 콘크리트 강도를 추정하는 비파괴 실험법인 슈미트 해머에 의한 반발경도 실험은 콘크리트 표면의 경도를 측정하여 강도를 추정하지만, 이 방법은 콘크리트의 표면 처리 상태나 습기 함유량 등 외부 조건에 크게 영향을 받을 수 있으며(이주형·조재열, 2020), 추정된 식으로 계산된(일본재료학회, 일본건축학회 등) 압축강도에 편차는 사용자를 혼란스럽게 한다.

*강원대학교 건축공학과 석사과정(주저자: leekimsahi@kangwon.ac.kr)

**강원대학교 건축공학과 박사과정

***강원대학교 건축공학과 정교수(교신저자: heechang@kangwon.ac.kr)

비록 이 기법이 사용성 측면에서 용이하다는 장점이 있지만, 결과의 신뢰성에 대한 문제가 제기되고 있다. 따라서 한 가지의 비파괴 실험만으로는 콘크리트 구조물의 전체적인 상태나 강도를 종합적으로 평가하는 데 한계가 있을 수 있으며, 복수의 시험 방법을 조합하여 사용할 때 신뢰성이 개선될 것이다. 결론적으로 가능한 다양한 방법을 조합하여 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 평가를 이루는 것이 중요하다.

이 연구에서는 연속계로 이루어진 부재를 단자유도계로 모델링하고 충격력에 의한 부재의 1차진동인 동적응답에 질량의 참여정도를 반영하여 분석된 부재의 동적파라미터 및 콘크리트 강도를 추정한다. 실험을 통해 진동에 참여하는 참여계수와 유효질량(effective mass) 및 유효파라미터를 추정하는 방법을 제시하고, 이를 기반으로 구조물의 콘크리트 강도를 추정하는 방법을 제시한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

이 연구는 구조부재를 단자유도계로 모델링하고, 임팩트해머 실험으로부터 추출한 주파수영역의 FRF 데이터를 활용 및 유사역행렬(pseudo inverse)을 사용하여 참여계수 및 유효파라미터를 추정하는 방법을 제안한다. 또한 부재의 세장경도와 관련이 깊은 유연성이나 강한(stiff) 정도에 따라 단자유도계의 동적 거동을 지배하는 유효질량을 파악하고, 이 개념을 활용하여 부재의 유효파라미터를 추정하는 해석방법을 제시한다. 그리고 세장비가 작은 철근콘크리트 기둥의 콘크리트 강도 추정으로 확대하고 이를 반발경도 실험 및 공시체 실험 결과와 비교하고 본 연구의 타당성을 검증한다.

2. 선행연구 검토

부재의 구조성능과 콘크리트 강도 추정은 건축 및 토목 구조물의 구조 및 사용성능을 평가하는 SHM의

주요 항목 중 하나이다. 부재의 구조성능은 주파수 영역의 동적 응답 데이터인 FRF 데이터를 활용하여 효과적으로 분석하고 평가할 수 있다.

연속계인 부재의 동적인 응답에 참여하는 질량의 크기는 부재의 유연성이나 지배하는 거동과 깊은 관련이 있다. 부재가 유연하여 휨거동이 지배할 경우에 유효질량의 크기는 작고, 반면 세장비가 작고 강성이 클 경우 유효질량의 크기는 증가한다. 이러한 유효질량을 고려한 연구는 아직 미미하며 대부분 이론적인 연구에 국한되어 있다. Ewins(2000)는 모달매스(modal mass)의 개념을 제시하며 단자유도계의 모델에서 특정 모드와 자유도와 관련된 유효질량을 정의하였다. Wai-Chi et al.(2010)는 양단이 고정된 보의 대칭성을 고려하여 1/2 경간에 대한 유효질량을 산정하였다. 실험에 의한 유효질량은 유한요소 모델로부터 산정된 값으로 검증하게 된다. Mayes et al.(2014)과 Sedaghati et al.(2003)은 유한요소 모델을 사용하여 유효질량을 추정하였으며, 실험을 통한 추정의 어려움을 언급하였다. Irvine(2012)은 다양한 종류의 보에 대해 이론적인 유효질량을 유도하였다.

임팩트해머 실험을 통해 얻은 FRF 데이터를 사용하여 구조물의 동적파라미터를 추정하는 연구들이 진행되었다. 이들 연구에서는 구조물을 단자유도계로 모델링하고 계측된 FRF 데이터를 활용하여 구조물의 파라미터 행렬을 추정하는 방법을 제시하였다(Lee et al., 2022; 홍유식 외, 2022). 그러나 이 연구는 계측된 FRF 데이터로부터 참여계수를 고려하지 않고 콘크리트 강도를 직접 추정하였으며 이는 추가적인 보완 연구의 필요성이 제기되었다.

부재의 물성치인 콘크리트강도를 추정하는 비파괴 실험 방법들이 있다. 그 중 슈미트해머에 의한 반발경도법이 안전진단이나 현장에서 가장 용이하고 경제적인 평가법으로 널리 사용되고 있다. 이 방법은 콘크리트 표면에 일정한 에너지로 충격을 가한 후, 반발력을 측정하여 표면경도를 평가한다. 반발

력은 콘크리트의 표면 강도와 관련이 있으며, 이를 통해 간접적으로 콘크리트의 압축강도를 추정할 수 있다. 많은 연구가 이 방법을 활용했지만 반발경도법을 비롯한 기존 비파괴 실험에 의한 콘크리트강도 추정기법들은 부재의 국부적인 응답으로부터 콘크리트의 강도를 추정하므로 표면 상태와 테스트 환경 등 다양한 요인의 영향을 받으며, 데이터 해석 결과들의 편차가 커서 신뢰성이 다소 낮을 수 있다.

3. 동적파라미터 추정 알고리즘

동적파라미터는 부재의 동적 응답을 나타내는 중요한 물리적 특성으로 질량(m), 감쇠(c), 강성(k) 등을 의미한다. 보나 기둥 등과 같은 부재를 1차진동모드가 지배하는 단자유도계로 모델링할 때, 질량의 크기는 동적인 응답과 관련한 부재의 유연성이나 지배거동에 따라 설정된다. 이때 진동 응답에 참여하는 질량을 유효질량이라고 한다. 유효질량과 1차모드만을 고려하여 캔틸레버보와 양단고정보를 Fig. 1과 같이 모델링할 수 있다.

길이가 L 이며, 단면이 일정한 단위길이 당 질량이 ρ 인 캔틸레버보에서 전단변형을 무시하고 휨 거동만을 고려하고 운동에너지와 포텐셜에너지가 일치하는 Rayleigh 법으로부터 유효질량 m_{eff} 은 다음으로 유도되었다(Irvine, 2012).

$$m_{eff} = 0.2235\rho L \tag{1}$$

여기서, 계수 0.2235는 참여계수를 나타낸다.

또한, 전단변형과 회전관성을 무시한 4차 편미분 방정식의 풀이로부터 캔틸레버보와 양단고정보의 유효질량은 각각 다음과 같이 근사화된다(Irvine, 2012).

$$m_{eff} = 0.2427\rho L \tag{2}$$

$$m_{eff} = 0.384\rho L \tag{3}$$

Rayleigh 기법에 변위분포함수를 적용한 양단고정보의 유효질량은 다음과 같이 유도된다(Wai-Chi et al., 2010).

$$m_{eff} = 0.3714\rho L \tag{4}$$

식 (1)~(4)에 사용된 계수는 각각의 보의 진동에 대한 참여계수를 나타내며, 이들 간의 차이는 이론식 유도과정에서 설정된 가정의 차이로 인해 발생하며, 이들 이론식은 임팩트 해머 실험으로 추정되는 참여계수와 비교 및 검증에 의해 활용된다.

한편 유한요소 모델에서는 모드와 자유도에 따라 유효질량 등이 추정되지만 1차모드만을 고려한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \tag{5}$$

여기서, m, c, k 는 각각 질량, 감쇠 및 강성을 u, \dot{u}, \ddot{u} 는 각각 변위, 속도 및 가속도를 f 는 외란을 나타낸다. $u(t) = Ue^{j\Omega t}$ 와 $f = Fe^{j\Omega t}$, $j = \sqrt{-1}$ 를 식 (5)에 대입하고, $e^{j\Omega t} \neq 0$ 을 사용하여 그 결과를 정리하면 다음을 얻는다.

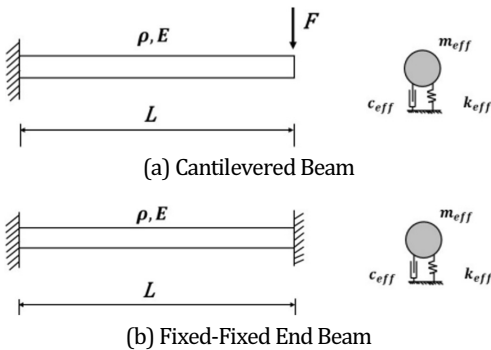


Fig. 1. Finite Element Modeling

$$(-\Omega^2 m + j\Omega c + k)U = F \tag{6}$$

여기서, Ω 는 외란 주파수를 나타낸다.

식 (6)은 단자유도계의 주파수영역에서의 운동방정식으로 U 의 계수는 동적강성(dynamic stiffness) k_d 을 의미하며, 그 역은 컴플라이언스(compliance) H 로 정의된다.

$$k_d = -\Omega^2 m + j\Omega c + k \tag{7}$$

$$H = k_d^{-1} = (-\Omega^2 m + j\Omega c + k)^{-1} \tag{8}$$

만약 식 (6)에서 계측데이터가 변위응답을 대신하여 가속도응답인 경우 k_d/Ω^2 는 동적 질량(dynamic mass)으로 정의되며, 그 역은 액셀러런스(accelerance) FRF가 된다.

또한, 임팩트해머 실험에 의해 계측된 FRF 데이터는 다음과 같이 복소수로 표현된다.

$$H(\Omega) = H_{re}(\Omega) + jH_{im}(\Omega) \tag{9}$$

여기서, H_{re} 와 H_{im} 은 FRF 데이터의 실수부와 허수부를 나타낸다.

식 (8)로부터 주파수영역 Ω_1 에서 $\Delta\Omega$ 씩 증분하여 Ω_2 까지 측정된 FRF 값과 동적강성행렬 사이에 다음의 관계가 성립한다(홍유식 외, 2022).

$$\begin{aligned} (H_{re}(\Omega_1) + jH_{im}(\Omega_1))(-\Omega_1^2 m + j\Omega_1 c + k) &= 1 \\ (H_{re}(\Omega_1 + \Delta\Omega) + jH_{im}(\Omega_1 + \Delta\Omega)) \\ (-(\Omega_1 + \Delta\Omega)^2 m + j(\Omega_1 + \Delta\Omega)c + k) &= 1 \\ &\vdots \\ (H_{re}(\Omega_2) + jH_{im}(\Omega_2))(-\Omega_2^2 m + j\Omega_2 c + k) &= 1 \end{aligned} \tag{10}$$

식 (10)을 실수부와 허수부로 구분하고 주파수 영역 내에 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -\Omega_1^2 H_{re} - \Omega_1 H_{im} & H_{re} \\ -\Omega_1^2 H_{im} & \Omega_1 H_{re} & H_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\Omega_2^2 H_{re} & \Omega_2 H_{im} & H_{re} \\ -\Omega_2^2 H_{im} & \Omega_2 H_{re} & H_{im} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ c \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서, H_{re} 와 H_{im} 은 해당하는 주파수의 실수부와 허수부의 FRF 값이다.

식 (11)의 계수행렬 R은 전계수(full rank) 행렬이므로 유사역행렬을 사용하면 단자유도계의 동적파라미터는 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{bmatrix} m \\ c \\ k \end{bmatrix} = R^+ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} -\Omega_1^2 H_{re} - \Omega_1 H_{im} & H_{re} \\ -\Omega_1^2 H_{im} & \Omega_1 H_{re} & H_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\Omega_2^2 H_{re} & \Omega_2 H_{im} & H_{re} \\ -\Omega_2^2 H_{im} & \Omega_2 H_{re} & H_{im} \end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서, $+$ 는 유사역행렬을 나타낸다. 이 식에서 측정된 FRF 데이터 내에는 경계조건이나 계측환경, 계측기술자의 숙련도, 계측오차, 센서의 민감도 등에 의해 발생하는 노이즈를 포함한다. 임팩트해머의 가력크기에 따라 다른 FRF값으로부터 산정된 동적파라미터는 유효질량에 따라 편차가 발생하므로 이를 보정할 필요가 있다. 이를 위해, 실험데이터와 이론적으로 계산된 강성을 사용하여 참여계수를 추출하고 데이터를 보정하여 유효동적파라미터 및 콘크리트의 강도를 추정하게 되며, 이 과정을 본 실험을 통해 검증한다.

4. 보의 물성치 추정실험

4.1 보의 임팩트해머 실험

알루미늄 재질의 캔틸레버보(Fig. 1(a))와 양단고

정보(Fig. 1(b))의 동적파라미터를 추정하는 실험을 실시하였고, 임팩트해머 실험을 통해 얻은 데이터를 분석하여 파라미터를 계산하고 보정하는 전 과정을 Fig. 2에 도식화하였다. 이들 보의 단면은 12.5×10mm이며 양단고정보의 길이는 640mm, 질량은 0.3576kg(단위길이당 질량 0.00056kg/mm), 캔틸레버보는 길이가 945mm, 질량이 0.528kg(단위길이 당 질량 0.00056kg/mm)이다. 실험에 앞서 티보과워텍(주) 시험기관에 실험에 사용될 재료의 물성치시험을 의뢰하여 물성치는 Table 1과 같은 결과를 얻었다. 표점거리가 60mm인 세 개의 시험편 중 시험편 1과 2

의 탄성계수와 차이를 보이는 시험편 3의 탄성계수 77.0GPa를 대신 제조사에서 제공한 68.9GPa를 사용하여 평균 값인 70GPa를 해석에 적용하였다. 양단고정보는 경간 중앙에서 캔틸레버보는 자유단에서 가력하고 가속도계로 응답을 측정하였다(Fig. 3 및 Fig. 4). 민감도 50mV/lbf, 측정범위가 ±100lbfpk인 임팩트해머로 가력하였고 DYTRAN사의 민감도 10mV/g인 가속도계로 응답을 측정하였다. 데이터 분석은 Dewesoft X3으로 수행하였다.

가력에 대한 가속도 응답의 전달함수인 엑셀런스

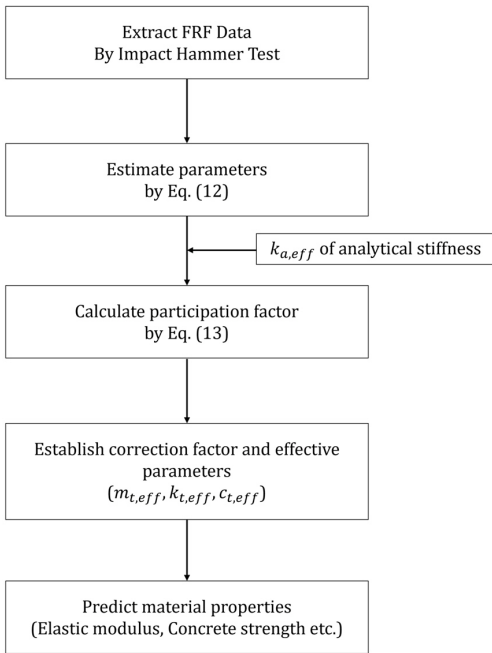
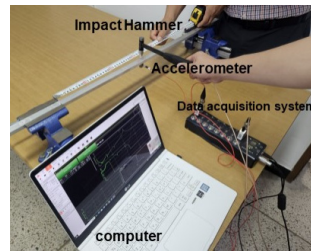
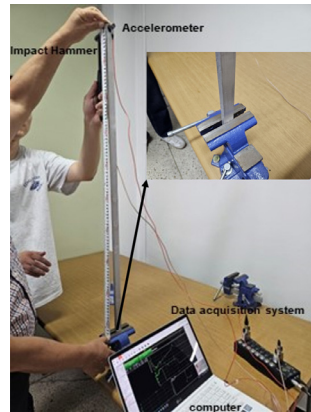


Fig. 2. Summary of the Experimental Procedure for Estimating Dynamic Parameters



(a) Fixed-Fixed End Beam



(b) Cantilevered Beam

Fig. 3. Measurements

Table 1. Material Properties of Experimental Specimen

Measurement items	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Average
Tensile strength (MPa)	368	369	365	367.3
Yield strength (MPa)	343	344	340	342.3
Elastic modulus (GPa)	70.8	70.0	77.0	72.6

* The manufacturer's test report provides an elastic modulus of 68.9 GPa.

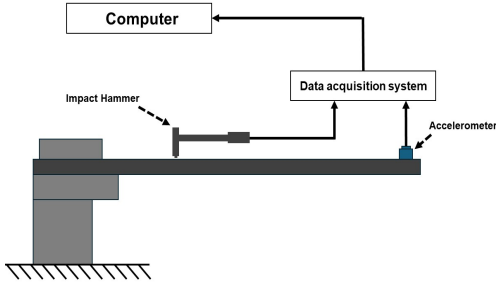
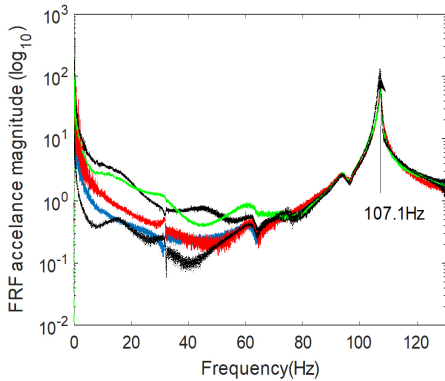
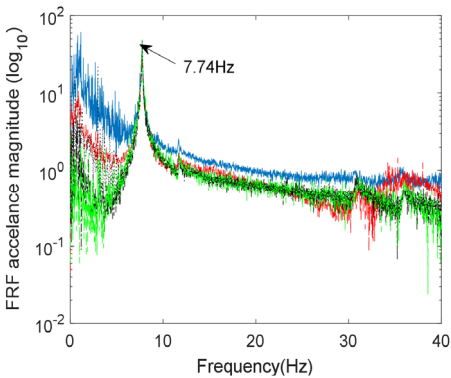


Fig. 4. Impact Hammer Test Apparatus



(a) Fixed-Fixed End Beam



(b) Cantilevered Beam

Fig. 5. FRF Accelerance Curves

FRF 크기 곡선을 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내고 있다. 이 그림에 의하면 계측된 데이터에 노이즈가 포함된 것을 확인할 수 있으며, 1차 공진주파수가 각각 107.1Hz와 7.74Hz에 위치하는 것을 알 수 있다.

식 (1)~(4)에서 산정된 유효질량과 강성을 사용

하여 계산된 공진주파수는 각각 99.1Hz(식 (3))와 100.4Hz(식 (4)), 7.45Hz(식 (1))와 7.15Hz(식 (2))으로 나타났으며, 임팩트해머 실험에서 얻은 Fig. 5의 공진주파수보다 약간 낮은 공진주파수를 나타냈다. 이러한 차이는 이론해석과 실험간의 불일치에서 비롯된 오차라고 분석된다. 파라미터 산정 시 주파수 모든 영역에서 FRF 데이터는 식 (11)을 만족해야 하지만, 저주파수 영역에서 노이즈에 의한 오염된 데이터를 사용할 경우 산정된 파라미터에 큰 오차가 발생하여 일관되지 않은 결과를 초래한다. 따라서 노이즈의 영향이 미미한 공진주파수 영역에서 즉, 양단고정보의 경우 106.64Hz~107.435Hz, 캔틸레버보의 경우 7.52Hz~7.618Hz 범위에서 FRF 데이터를 추출하였다.

추출된 FRF 데이터를 식 (12)에 대입하여 추정된 파라미터 m, c, k 를 Tables 2와 3에 나타냈다. 이 표에서는 동일한 충격하중을 가할 수 없기 때문에 각 경우에 다소 편차를 포함하는 파라미터 값을 보여준다. 이러한 편차는 해머를 동일한 위치에서 동일한 크기로 가력하지 못하는 점과 주변 소음으로 인해 계측값이 일관되지 않게 나타나는 등 계측 시에 발생한 오차가 원인으로 분석된다.

4.2 유효질량 및 물성치 추정

유효질량은 부재의 질량과 참여계수의 곱으로 정의된다. Tables 2와 3에는 양단고정보(19회 실험)와 캔틸레버보(14회 실험)에 대해 추정된 파라미터를 보정한 값을 제시하고 있다. 참여계수 및 유효질량은 부재의 유연성과 관련되며, 실험에 사용된 보는 매우 유연하여 휨 거동이 지배적이다. 따라서 계측된 데이터로부터 진동에 참여한 유효질량의 크기에 대한 식 $m_{t,eff} = \alpha m_T$ 로부터 유효강성을 산정하였다.

$$k_{t,eff} = \frac{m_{t,eff}}{m} k = \frac{\alpha m_T}{m} k \quad (13)$$

Table 2. Dynamic Properties of Fixed-Fixed Beam Estimated from Impact Hammer Test Data

Test	Impulse (N)	m (kg)	k (N/mm)	c (N·sec/mm)	P.F.	k_{eff} (N/mm)	c_{eff} (N·sec/mm)
1	9.82	0.186	83.8	0.00107	0.331	53.1	0.00068
2	13.50	0.160	72.3	0.00102	0.330	53.3	0.00075
3	16.91	0.154	69.4	0.00121	0.331	53.2	0.00093
4	13.82	0.164	74.0	0.00111	0.330	53.2	0.00080
5	15.34	0.107	48.1	0.00081	0.331	53.3	0.00089
6	11.85	0.193	87.4	0.00127	0.329	53.1	0.00078
7	10.04	0.167	75.5	0.00105	0.330	53.2	0.00074
8	13.34	0.085	38.2	0.000485	0.331	53.3	0.00067
9	15.31	0.162	73.5	0.001071	0.328	53.1	0.00078
10	17.01	0.148	66.2	0.0015	0.333	53.4	0.0012
11	14.41	0.125	56.3	0.0008	0.331	52.9	0.00076
12	18.86	0.158	71.2	0.00112	0.331	53.1	0.00084
13	17.19	0.154	69.5	0.001	0.330	53.2	0.00077
14	14.44	0.185	83.6	0.001	0.330	53.2	0.00064
15	17.59	0.168	75.9	0.0011	0.330	53.3	0.00077
16	16.90	0.189	85.4	0.001	0.330	53.3	0.00062
17	14.88	0.194	97.7	0.00124	0.330	53.3	0.00075
18	10.33	0.143	64.7	0.00078	0.329	53.3	0.00064
19	14.79	0.199	89.8	0.0013	0.330	53.6	0.00077
Avg					0.330	53.2	0.000754*

PF: participation factor

* The damping value of test 10 is significantly larger compared to other test values; therefore, it was excluded from the calculation of the average damping.

여기서, $m_{t,eff}$ 와 $k_{t,eff}$ 는 각각 실험으로부터 얻은 유효질량과 유효강성을, m 과 k 는 식 (12)로부터 추정된 질량과 강성을, m_T 는 부재의 전체 질량을, α 는 참여계수를 의미한다.

Tables 2와 3의 3번째에서 5번째 열은 식 (12)로부터 계산된 질량, 강성 및 감쇠값을 각각 보여주고, 6번째 열에서는 식 (13)에 $k_{a,eff} = k_{t,eff} = \frac{192EI}{L^3}$ 와 $k_{a,eff} = k_{t,eff} = \frac{3EI}{L^3}$ 를 사용하여 계산된 참여계수를 7번째와 8번째 열은 이 참여계수를 기반으로 산

출한 유효강성과 감쇠 값을 나타낸다. 보 실험에서는 재료실험에 의해 이미 물성치를 취하였으므로 최초에 $k_{t,eff} = k_{a,eff}$ 를 사용하여 참여계수를 얻었다. 여기서, $k_{a,eff}$ 는 이론해석에 의한 강성을 나타낸다. 다만, 양단고정보의 실험 10번에서 산정된 감쇠는 다른 실험결과들과 큰 차이가 나므로 평균의 감쇠값에서 배제하였다. 양단고정보의 평균 참여계수는 0.330, 캔틸레버보는 0.216으로 계산되었다. 이는 각각 부재 질량의 33.0%와 21.6%만이 동적진동에 참여하는 것으로 해석된다. 이러한 참여계수는 앞선 이론해석 결과보다 작게 나타났다. 이 차이는 해석

Table 3. Dynamic Properties of Cantilevered Beam Estimated from Impact Hammer Test Data

Test	Impulse (N)	<i>m</i> (kg)	<i>k</i> (N/mm)	<i>c</i> (N·sec/mm)	P.F.	<i>k_{eff}</i> (N/mm)	<i>c_{eff}</i> (N·sec/mm)
1	4.14	0.122	0.277	0.00015	0.216	0.259	0.00014
2	2.44	0.173	0.395	0.00015	0.215	0.260	0.000098
3	4.69	0.134	0.304	0.00016	0.216	0.259	0.00014
4	4.07	0.156	0.353	0.00018	0.216	0.259	0.00013
5	3.96	0.144	0.329	0.00017	0.215	0.260	0.00013
6	3.85	0.140	0.318	0.000165	0.216	0.259	0.00013
7	4.10	0.127	0.289	0.000165	0.216	0.259	0.00015
8	4.17	0.151	0.345	0.000154	0.215	0.260	0.00012
9	4.46	0.147	0.333	0.00017	0.217	0.258	0.00013
10	4.74	0.143	0.324	0.00018	0.217	0.258	0.00014
11	3.92	0.175	0.397	0.000168	0.216	0.259	0.00011
12	4.97	0.154	0.350	0.00017	0.216	0.259	0.00013
13	3.82	0.124	0.283	0.00015	0.215	0.260	0.00014
14	3.12	0.163	0.371	0.000165	0.216	0.259	0.00012
Avg					0.216	0.259	0.00013

과 실험 사이의 불일치로 변위응답함수 같은 해석에서 가정된 조건이 임팩트해머 실험이나 응답 조건과 일치하지 않기 때문에 발생한 것으로 해석된다. 따라서, 본 실험 결과는 정확한 파라미터값보다는 추정치이므로 이로 인한 편차를 감안할 필요가 있다.

실험의 결과에 유효질량의 개념을 도입한 양단 고정정보와 캔틸레버보의 강성은 각각 53.2N/mm와 0.259N/mm으로 이를 역으로 사용하면 부재의 탄성계수를 추정할 수 있다.

$$E = \frac{k_f L^3}{192I} = 69730.3 \text{ MPa}$$

$$E = \frac{k_c L^3}{3I} = 69943.1 \text{ MPa}$$

여기서, *k_f*와 *k_c*는 양단고정정보와 캔틸레버보의 유효강성의 평균값을 각각 나타낸다. 보의 실험에서는 재료실험으로부터 얻은 재료의 물성치 *k_{a,eff}*를 강성

의 이론식에 가정하였기 때문에 추정된 강성과 일치하는 결과를 얻었지만, 만약 최초 탄성계수가 미지의 값이라면 탄성계수를 가정한 후 해석결과를 보정하여 최종 탄성계수를 도출할 수 있다. 한편 실증적으로 얻은 감쇠 값의 적정성은 이를 검증할 이론적 식이 부족하기 때문에 판단하기 어려운 한계가 있다. 이와 같은 제약에도 불구하고 추정된 파라미터를 사용하여 1차 공진주파수는 다음으로 산정된다.

$$f = \sqrt{\frac{k_f}{\alpha m_T}} / (2\pi) \tag{14}$$

식 (14)를 사용하여 실증 실험의 데이터로 산정된 양단고정정보의 1차 공진주파수는 106.9Hz로 Fig. 5(a)와 유사하며, 이론해석에 의한 99.1Hz이나 100.4Hz와 근소한 차이를 나타내고 있다. 캔틸레버보의 경우에는 실증실험에서 7.59Hz으로 Fig. 5(b)와 유사한 주파수에서 1차공진을 볼 수 있으며 이론해석에

Table 4. Summary of Test Results

	Fixed-fixed End Beam			Cantilever Beam		
	Eq. (3)	Eq. (4)	This Study	Eq. (1)	Eq. (2)	This Study
PF	0.384	0.374	0.330	0.224	0.243	0.216
NF (Hz)	99.1	100.4	106.9	7.45	7.15	7.58

PF: Participation factor
 NF: Natural frequency

서는 7.15Hz나 7.45Hz로 이 또한 근소한 차이를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이 실험에서 부재의 세장 정도와 유연성이 유효질량의 크기를 설정하는데 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며 참여계수 등을 Table 4에 요약하였다.

5. 콘크리트 강도의 추정실험

유효질량의 개념과 임팩트해머 실험에 의한 FRF 데이터를 실무에 적용하고자 콘크리트강도를 추정하는 현장실험을 실시하였다. 제안한 방법을 통해 부재의 강성 및 콘크리트강도를 추정하고자 계획되었으며, 실험은 00아파트 지하주차장의 기둥 2개소를 대상으로 진행하였다. b×h=800×500mm 단면의 콘크리트기둥의 높이는 2,900mm으로 측정되었고 기둥의 단면은 Fig. 6에 나타냈다. 실험에는

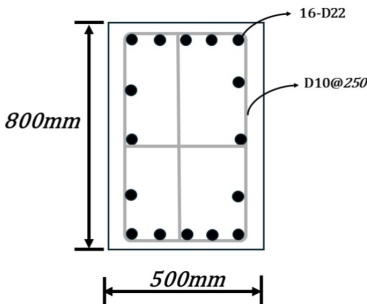
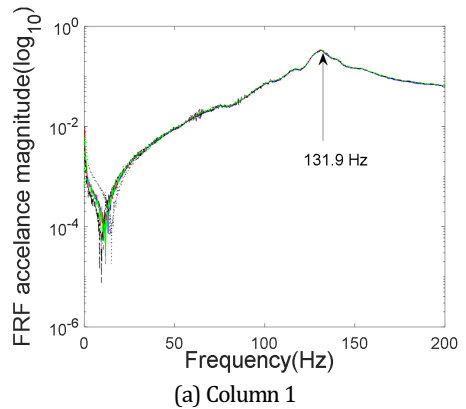
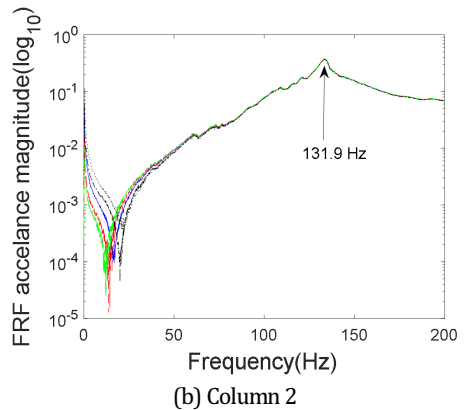


Fig. 6. Section of Concrete Column

DYTRAN사의 민감도 1mV/lbf, 헤드무게가 12 파운드인 임팩트해머와 민감도가 5,000mV/lbf인 가속도계를 사용하였다. 장마철이라 현장작업이 많지 않았고 노이즈의 영향을 최소화할 수 있는 시간대인 평일 오후 3시경, 일관된 계측결과를 확인하기 위하여 동일기둥에 대해 각각 15회씩 실시하였다. 추정된 콘크리트강도의 타당성을 검증하기 위하여 기둥 타설 시에 콘크리트 공시체를 준비하고 수중양생한 후 28일 후에 강도를 측정하였으며, 슈미트해머에 의한 비파괴 실험과 병행하여 결과를 비교하였다. 계측실험을 실시하는 동일한 날에 3개의 콘크리트공시체의 강도는 각각 28.9MPa, 30.3MPa, 31.3MPa이며, 평균강도는 30.2MPa으로 측정되었다. 앞선 보 실험과는 달리, 양단고정인 기둥의 강성을 추정하기 위하여



(a) Column 1



(b) Column 2

Fig. 7. FRF Accelance Curves

먼저 물성치를 가정하여야 하며 단위체적당 질량은 2,300kg/m³, 탄성계수는 $E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}}$ (MPa)을 사용하였다. 여기서, $f_{cu} = f_{ck} + 4$ (MPa), $f_{ck} = 24$ MPa으로 콘크리트의 압축강도를 가정하였다. 콘크리트 기둥에 임팩트하며 실험 결과로 엑셀런스 FRF 곡선을 Fig. 7에 나타냈으며, Tables 5~7에 요약하였다. 주파수 118.9Hz~134.9Hz 범위에 측정된 FRF 데이터를 분석한 결과 두 기둥의 질량참여계수는 각각 0.950과 0.938로 거의 유사하게 나타났다. 이는 앞선 양단고정보 실험에서 얻은 참여계수 0.330 보다 훨씬 큰 값이며 이는 부재의 작은 세장비로 인해 부

재 대부분이 횡진동에 참여하였기 때문으로 분석되었다. 또한, 기둥 상부로부터 작용하는 자중으로 인해 횡강성이 증가하여 부재 전체가 횡진동에 더 크게 기여하게 되므로 참여계수를 1.0으로 추가보정하였다. 식 (13)에 따르면 참여계수가 증가하면 유효질량 및 유효강성이 증가하는 것으로 설명된다. 이 경우 보정계수를 1을 설정해도 콘크리트강도 추정에 큰 오차가 발생하지 않는다. 최종적으로 참여계수 0.950과 0.938을 1.0으로 보정하여 콘크리트 탄성계수 $E_c = \frac{k_{i,eff}L^3}{192I}$ 와 콘크리트 강도 $f_{cu} = \left(\frac{E}{8,500}\right)^3$, $f_{ck} = f_{cu} - 4$ (MPa)를 계산한 결과 콘크리트의 탄성계수는 각각 27.1GPa과 27.5GPa, 압축강도는 28.7MPa와 28.5MPa로 추정되었다. 콘크리트 강도는 재료실험의 결과와 약 5% 정도의 오차를 나타냈다. 비파괴실험인 반발경도법으로 측정하기 위해 콘크리트타설 후 28일 후에 측정되었으므로 경시변화에 대

Table 5. Summary of Test Results

Column 1 (MPa)		Column 2 (MPa)		f_{ck} (MPa)
Elastic Modulus	Concrete Strength	Elastic Modulus	Concrete Strength	
27132.8	28.7	27529.1	28.5	30.2

Table 6. Dynamic Properties of Column 1 Estimated from Impact Hammer Test Data

Test	Impulse (N)	m (kg)	k ($\times 10^3$) (N/mm)	c (N·sec/mm)	P.F.	k_{eff} ($\times 10^6$) (N/mm)	c_{eff} (N·sec/mm)
1	6133.9	3.034	2.03	0.2880	0.949	1.696	240.6
2	5477.6	2.950	1.973	0.2802	0.949	1.695	240.7
3	4006.0	2.923	1.961	0.2789	0.946	1.700	241.8
4	5666.5	2.906	1.943	0.2792	0.949	1.695	243.5
5	7553.6	2.970	1.982	0.2850	0.951	1.691	243.2
6	3775.3	2.862	1.920	0.2738	0.946	1.700	242.5
7	3892.4	2.825	1.891	0.2690	0.948	1.697	241.3
8	7524.2	2.908	1.939	0.2806	0.952	1.690	244.6
9	5260.5	2.832	1.890	0.2698	0.951	1.692	241.5
10	4906.6	2.831	1.889	0.2711	0.951	1.691	242.7
11	5382.9	2.843	1.898	0.2726	0.951	1.692	243.0
12	5799.4	2.869	1.914	0.2749	0.951	1.691	242.9
13	5144.2	2.859	1.908	0.2756	0.951	1.692	244.3
14	5361.8	2.820	1.882	0.2706	0.951	1.692	243.2
15	5760.5	2.902	1.935	0.2789	0.952	1.690	243.6
Avg.					0.950	1.694	242.6

Table 7. Dynamic Properties of Column 2 Estimated from Impact Hammer Test Data

Test (No.)	Impulse (N)	m (kg)	$k (\times 10^3)$ (N/mm)	c (N·sec/mm)	P.F.	$k_{eff} (\times 10^6)$ (N/mm)	c_{eff} (N·sec/mm)
1	5654.0	1.868	1.268	0.2973	0.935	1.698	398.3
2	6846.5	1.927	1.304	0.2978	0.938	1.694	386.8
3	6683.3	1.931	1.307	0.2979	0.938	1.694	386.1
4	6388.8	2.005	1.358	0.3030	0.937	1.695	378.2
5	5585.3	1.923	1.303	0.2956	0.937	1.696	384.7
6	5080.1	1.904	1.290	0.2929	0.937	1.696	385.0
7	6096.1	1.988	1.344	0.3002	0.939	1.692	377.9
8	5742.2	1.951	1.321	0.2975	0.937	1.694	381.6
9	5345.0	1.904	1.288	0.2930	0.938	1.693	385.1
10	6977.9	1.983	1.342	0.3020	0.938	1.694	381.1
11	6872.5	1.973	1.334	0.2982	0.939	1.692	378.2
12	5394.1	1.942	1.314	0.2957	0.938	1.693	381.1
13	7540.5	2.021	1.366	0.2992	0.939	1.692	370.5
14	6761.7	1.992	1.345	0.2959	0.940	1.690	371.7
15	7335.6	1.994	1.346	0.2953	0.940	1.689	370.6
Avg					0.938	1.690	381.1

한 보정계수는 1을 사용하였고 각 학회에서 제시한 추정식으로 계산한 결과 콘크리트강도는 일본재료 학회 27.8MPa, 동경도 건축재료검사소 24.5MPa, 일본건축학회 35.9MPa로 추정되며 이는 임팩트해머 실험의 결과에 비해 9~25%의 차이를 나타냈다. 현장실험을 통해 이론적인 배경에 기반한 참여계수의 개념과 임팩트해머 실험을 통해 콘크리트 강도를 보다 근접하게 추정할 수 있음을 확인했다. 비록 부재의 유연성이나 전단에 대한 영향 등을 고려한 휨부재인 보나 슬래브에 대한 참여계수를 추정하기 위한 보다 광범위한 연구가 필요하지만 콘크리트기둥의 경우에는 참여계수를 1.0을 사용하여 신뢰할 수 있는 콘크리트 강도 추정이 가능할 것으로 판단된다. 향후에는 부재의 형상, 크기, 작용하는 고정하중의 위치와 크기 등을 고려하여 보나 슬래브 등의 유효질량을 설정하고 이를 바탕으로 콘크리트강도를 추정할 수 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 결론

이 연구는 임팩트해머 실험을 통해 얻은 FRF 데이터를 분석하여 유효질량 및 참여계수를 설정하였으며 실증실험을 통해 부재의 동적파라미터와 콘크리트 강도를 추정하였다. 그 결과 다음과 같은 연구 결과를 도출하였다.

- (1) 부재를 1차진동모드만을 고려하여 단자유도계로 모델링하고, 유효질량 개념을 도입하여 측정된 FRF 데이터로부터 산정된 동적파라미터를 보정함으로써 실제 부재의 동적파라미터를 추정할 수 있었다. 이론적 해석을 근거로 실험결과를 분석한 결과, 그 타당성을 확인할 수 있었다.
- (2) 연속계인 부재의 진동에 참여하는 유효질량의 크기는 부재의 유연성 혹은 강성과 관련된 형상을 포함한 세장 정도에 영향을 받으며, 이를 참

여계수를 통해 분별할 수 있었다.

- (3) 이번 연구에서 실험한 유연하고 휨이 지배하는 양단고정보와 캔틸레버보의 참여계수는 각각 0.330과 0.261으로 나타났으며, 유사한 부재에 적용하기 위해 세장 정도를 변수로 하여 참여계수를 설정할 필요가 있다.
- (4) 콘크리트 기둥은 낮은 세장비와 큰 강성으로 인해 참여계수가 크게 증가하며, 상부층으로부터 작용하는 자중으로 인해 횡강성과 질량이 증가하는 것을 고려하여 참여계수를 1.0으로 보정하여 콘크리트 강도를 추정할 수 있었다. 대꽃값으로는 오차가 있으나 근사치로서 콘크리트 강도를 추정할 수 있었으며, 임팩트해머 실험을 실무에 활용할 가능성을 확인할 수 있었다.
- (5) 향후, 보나 슬래브 등의 유효질량을 설정하는 방법을 강구하여 콘크리트 강도를 추정할 수 있는 광범위한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 이를 통해 다양한 부재 형상과 크기, 작용하는 고정하중의 위치와 크기를 고려한 종합적인 강도 추정 방법을 확립할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 이범식·권희삼·김정곤·김지현(2016), “옥상녹화하중이 LH 공동주택 및 부대복리시설의 옥상층 슬래브 설계에 미치는 영향”, 『LHI Journal』, 7(1): 56~63.
2. 이주형·조재열(2020), “노후 콘크리트 구조물의 실용적 유지관리를 위한 콘크리트 구조물 안전진단 지침 분석”, 『LHI Journal』, 11(3): 83~92.
3. 홍유식·은희창·송준혁·안재형(2022), “주파수응답 함수 데이터로부터 부재의 물성치 추정”, 『대한건축학회논문집』, 38(5): 177~184.
4. Ewins, D. J. (2000), *Modal Testing: Theory, Practice and Application 2nd Edition*, London: Research Studies Press LTD.
5. Lee, E. T., Y. S. Hong and H. C. Eun (2022), “Prediction of the Physical Properties of a Structural Member by the Impact Hammer Test”, *Sensors*, 22(18): 6762.
6. Mayes, R. L., T. F. Schoenherr, J. Blecke and D. P. Rohe (2014), “Efficient Method of Measuring Effective Mass of a System”, in *Topics in Experimental Dynamic Substructuring, Volume 2*, (ed) Mayes, R. L., 311~320, Berlin: Springer.
7. Sedaghati, R., Y. Soucy and N. Etienne (2003), “Experimental Estimation of Effective Mass for Structural Dynamics and Vibration Applications”, *Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC XXI)*, Kissimmee, FL.
8. Wai-Chi, W., A. A. Azid and B. Y. Majlis (2010), “Formulation of Stiffness Constant and Effective Mass for a Folded Beam”, *Archives of Mechanics*, 62(5): 405~418.
9. Irvine, T. (2012), “Beam”, <https://www.vibrationdata.com/tutorials2/beam.pdf>.

요약

이 연구는 임팩트해머 실험을 통해 얻은 FRF 데이터를 분석하여 유효질량을 설정하고 부재의 물성치를 추정하는 방법을 제시하였다. 또한 콘크리트 구조물에 대한 콘크리트 강도를 추정하는 방법을 제안하였다. 이 연구에서 측정된 FRF 데이터로부터 파라미터를 보정하고 유효질량을 추출하여 강성 및 감쇠치를 실증적으로 추정하였다. 연속계를 단자유도계로 모델링 시에 유효질량은 부재의 유연성 혹은 강성의 영향과 세장정도 및 경계조건에 영향을 받는다. 이 연구에서 실시한 실험에서 유연하고 휨이 지배하는 양단고정보와 캔틸레버보의 참여계수는 각각 0.330과 0.261으로 나타났으며, 유사한 부재에 대한 기준데이터로 적용할 수 있다. 콘크리트 부재는 강성이 크며, 낮은 세장비와 기둥 상부에서 작용하는 자중을 고려하여 참여계수를 1.0으로 보정하여 콘크리트 강도를 추정하였으며, 실제 콘크리트 강도와 근사한 값을 나타내어 실무에 적용할 수 있는 기법으로 판단된다.

주제어: 유효질량, 참여계수, 비파괴검사, 콘크리트 강도, 주파수응답함수