

충격 해머의 感度補正

On the Calibration of Impact Hammer Sensitivity

한 상 보
Sangbo Han

1. 서론

구조물의 진동특성을 파악하기 위한 실험적 모드 해석법에서 가진력을 제공하는 한 방법으로 힘측정기가 부착된 해머를 이용한 충격시험기법이 널리 사용되고 있다.

충격해머 시험의 유용성은 가진력의 에너지가 정현파 가진력의 경우처럼 특정 주파수대에 산재해있는 것이 아니라 가용 주파수 영역내에 연속적으로 분포해 있다는 점이며 이러한 충격력은 가용 주파수 범위내에 있는 모든 고유진동형을 여기시킬 수 있다는 장점이 있다.

충격해머가 가지고 있는 동적특성은 구조물을 가진시키는 선형충격량의 크기를 결정하며, 이는 다시 충격력의 크기와 가용 주파수 범위를 결정하게 된다. 일반적으로 가진주파수 범위는 해머의 질량에 반비례하고 충격해드의 경도에 비례하는 것으로 알려져 있다. 해머의 질량 자체가 충격력의 크기를 좌우하기도 하므로, 가진력의 크기를 고려하여 해머의 질량이 선택되며 충격해드는 충격 시간을 조절하기 위하여 적절히 선택된다.

충격해머에 장착된 힘측정기의 감도는 해머질량과 충격해드의 질량 변화에 영향을 받게 되는데, 충격 시험시 측정되는 값은 해머에 부착되어 있는 힘측정기에 가해지는 힘인 반면 구조물에 가해지는 가진력은 충격해드와 구조물사이에 발생하는 힘이다. 이 두 힘의 비는 해머 및 충격해드의 질량효과에 따라 좌우된다. 주어진 충격 시험에서 충격해머의 질량효과를 정확히 예측 한다는 것은 불가능 하므로, 충격해머는 매 실험 조건에 따라 감도보정을 해주어야 한다. 충격해머의 감도보정에 대해서는 문헌 [2]에 잘 나타나 있다.

본 논문에서는 해머 및 충격해드의 질량이 힘 측정기의 전압감도에 미치는 영향을 파악하고자 질량 효과를 고려한 수학적 모형을 제시하고 그 모형의 타당성을 실험을 통해 검증하고자 한다.

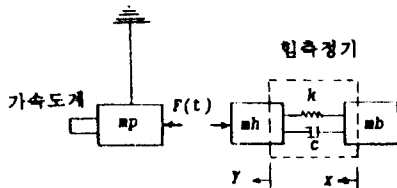


그림 1. 충격해머의 동역학적 모형과 감도보정 실험 장치

2. 충격해머의 이론적 모형

그림 1에 충격해머의 동역학적 모형을 나타내었으며 여기서 m_b 는 충격해드의 질량 (힘측정기의 보조질량 포함), m_h 는 해머의 질량 (보조질량을 제외한 힘측정기의 질량 포함), k 는 힘측정기의 스프링상수, c 는 힘측정기의 감쇠계수를 나타낸다. 좌표계 x 와 y 는 해머 질량(m_b)과 충격해드의 질량(m_h)의 거동을 각각 나타낸다.

해머 몸체와 충격해드의 운동방정식은

$$m_b \ddot{x} = c(\dot{y} - \dot{x}) + k(y - x) \quad (1)$$

$$m_h \ddot{y} = -c(\dot{y} - \dot{x}) - k(y - x) - F(t) \quad (2)$$

로 각각 주어지며, \cdot 은 시간에 대한 미분을 나타낸다.

힘측정기는 실제로 충격해드와 해머 몸체 사이의 상대 운동을 감지하므로

$$z = y - x \quad (3)$$

을 이용하여 (1)과 (2)를 정리 하면

$$m_0 \ddot{z} + c\dot{z} + kz = -\frac{1}{1+N} F(t) \quad (4)$$

이 얻어지고, 여기서

$$m_0 = \frac{m_b m_h}{m_b + m_h} \quad (5)$$

는 전체 계의 유효질량을 나타내며

$$N = m_h / m_b \quad (6)$$

은 해머 몸체의 질량에 대한 충격해드의 질량비이다. 힘 측정기의 고유진동수는

$$\omega_n = \sqrt{k / m_0} = \sqrt{(1+N)k / m_h} \quad (7)$$

로 주어지며, 이 식은 힘 측정기의 고유진동수가 충격해드의 질량 및 질량비 N 에 따라 변화함을 보여 준다. N 의 값이 1 보다 작은 경우, 즉 해머 몸체의 질량이 큰 경우에는 고유진동수가 충격해드의 질량 변화에 몹시 민감해 짐을 알 수 있다.

(4)로 표시되는 표준형 2차계 기계요소에 대한 진동수 응답함수는 다음과 같이 주어지며

$$H(j\omega) = \frac{1}{k - m_0\omega^2 + j c \omega} = \frac{1}{k(1 - r^2 + j 2\zeta r)} \quad (8)$$

여기서 $r = \omega/\omega_n$ 은 진동수 비, $\zeta = c / 2\sqrt{k m_0}$ 는 무차원 감쇠비이다.

(4)와 (8)로부터, 주파수 영역이 힘측정기의 고유 진동수보다 매우 낮은 충격력에 대해서는 (즉, $r \ll 1$ 인 경우) 상대운동이 스프링 상수의 크기에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서, 상대 운동 z 에 직접 비례하는 양인 출력전압 E_f 는

$$E_f = S z = \frac{S F(t)}{k(1+N)} = \frac{S_f F(t)}{(1+N)} = S_f^* F(t) \quad (9)$$

로 주어지며, 여기에서 S 는 압전센서의 상대운동에 비례하는 전압감도, S_f 는 힘측정기의 공칭 전압감도, S_f^* 는 충격해머의 전압감도도 정의 된다. 충격해머의 전압감도 S_f^* , 해머에 장착된 힘측정기의 전압감도 S_f , 그리고 질량비 N 사이의 상대적 관계는

$$S_f^* = \frac{S_f}{1+N} \quad (10)$$

으로 나타내어지며, 충격해머의 감도는 해머 형성 부위의 질량비 N 에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

3. 실험 장치

앞 절에서 파악된 이론적 모형에 대한 실험적 검증 을 위해서 여러가지의 질량비 N 에 대한 충격해머의 감도 보정을 실시 하였다.

충격력 $F(t)$ 는 그림 1에 나타나 있는 진자 질량 m_p 의 가속도를 측정하므로써 결정할 수 있는데

$$F(t) = m_p a = m_p g_0 (a/g_0) \quad (11)$$

여기서 a 는 진자의 가속도, g_0 는 표준 중력가속도이다. 가속도계의 출력전압 E_a 는

$$E_a = S_a (a/g_0) \quad (12)$$

로 주어지는데, 여기서 S_a 는 가속도계의 전압 감도로서 표준 중력가속도 g_0 당 출력 전압이다. (9), (11), (12)를 결합하면 힘측정기의 감도는

$$S_f^* = \frac{E_f S_a}{E_a m_p g_0} = \frac{S_f}{1+N} \quad (13)$$

과 같이 N 의 함수로 나타내어진다. (13)을 이용하여 충격해머의 전압감도를 결정하기 위해서는 진자질량 m_p , 가속도계의 전압감도 S_a (표준 중력 가속도 g_0 당 볼트 단위) 가속도계 및 힘측정기로부터의 출력 전압비 E_f/E_a , 질량비 N 을 결정하면 된다. 이러한 감도보정 실험 장치는 참고문헌 [2] 및 [3]에 기술되어 있는 것과 유사하며 본 실험에서는 그림 2의 장치를 이용 하였다.

가속도계의 감도보정은 감도보정을 표준 가속도계를 사용하여 100 Hz에서 측정 하였으며, 힘측정기 및 가속도계 용 전하 증폭기의 피이드백 하전 용량은 모든 측정에 대하여 100 pF로 고정시켰고, 포텐시오미터의 감도는 1로 고정하였다. 따라서, 전하감도와 전압감도와의 관계는

$$S_f = S_{qf} / C_f \quad (14)$$

로 나타내어 지는데 S_f 는 V/N 단위의 전압감도, S_{qf} 는 pcB/N의 전하감도를 가리킨다.

충격해머의 전하감도는 (13)을 이용하여 최종적으로

$$S_{qf}^* = \frac{S_{qf}}{1+N} = \frac{E_f S_a C_f}{E_a m_p g_0} \quad (15)$$

로 주어진다.

4. 실험 방법

충격 해머의 전하감도는 그림 2의 실험장치에 나타난 가속도계 및 힘측정기의 출력 전압을 비교 함으로써 결정 할 수 있다. 그림 3은 가속도계 및 힘측정기로부터의 충격 신호를 5 μ sec의 샘플링 간격으로 계속한 것을 나타내고 있다. 곡선 A는 1024 샘플링 점을 모두 사용한 것이며, 곡선 B는 두 신호의 경미한 차이가 드러나도록 확대한 것이다. 출력 전압비 E_f/E_a 는 두가지 방법으로 계산되었는데, 그 첫번째 방법은 각 곡선의 최대치 만을 비교한 것이며, 두번째 방법은 신호 해석기에 내장되어 있는 통계 프로그램을 이용하여 1024 샘플링 점에 대한 최소자승오차 해석을 이용하여 구한 것이다.

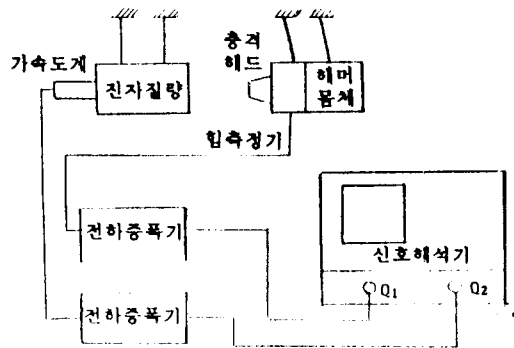


그림 2. 감도보정에 사용된 계속 장비도

A: 1024 샘플링 점으로 표시된 전체 신호
 B: 통계처리에 사용된 확대된 신호로 P와 Q는 시작과 끝점을 나타낸다.

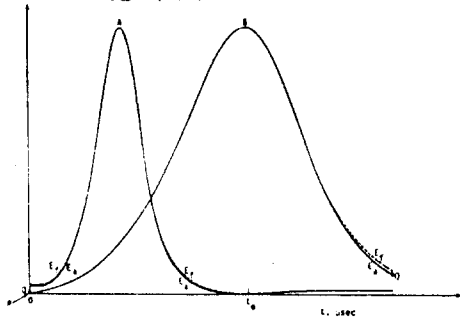


그림 3. 충격헤머와 가속도계로 부터의 충격신호

표 1. N 값에 따른 충격헤머의 전하감도

No.	N	E_r/E_a	S_{qr}^* (pcb/N)
1	0.036	33.0950	10.5261
2	0.068	31.1880	9.9196
3	0.228	26.8330	8.5344
4	0.256	26.2200	8.3395
5	0.602	19.6180	6.2397
6	0.890	17.2280	5.4795
7	0.930	17.1570	5.4569
8	1.257	14.6740	4.6672
9	2.254	9.7942	3.1151
10	3.097	8.0445	2.5586
11	4.188	6.4136	2.0399
12	8.187	3.4113	1.0850
13	11.000	2.7655	0.8796

5. 실험결과

충격헤드 및 헤머 몸체 질량에 대한 13 가지의 서로 다른 조합에 대한 실험 결과가 표 1에 주어져 있다. 이 계측 결과를 보다 쉽게 알아 보기 위하여 S_{qr}^* 를 $(1+N)$ 의 함수로 log-log 스케일 상으로 나타내면

$$\log(S_{qr}^*) = \log(S_{qr}) - \log(1+N) \quad (16)$$

또는

$$y = y_0 + nx \quad (17)$$

과 같은 경사 -1의 직선 관계식이 얻어지며 표 1의 결과를 나타낸 것이 그림 4이다. 실험결과에 대한 최소자승오차 해석을 행한 결과가 표 2에 주어져 있으며 여기서 CR은 상관계수, n는 기울기, σ는 측정점의 이분치에 대한 표준편차를 나타낸다. 그리고 S_{qr} 는 N=0 일때의 힘측정기의 전하감도이다.

첫번째 열은 최고 전압비를 이용한 값이며 두번째 열은 가속도 신호에 대한 충격력 신호의 최소자승오차 해석에 의한 값이다.

이 표에 나타나 있듯이, 상관계수가 매우 높은 값을 갖는다는 것을 알 수 있고 직선의 기울기는 0.6~0.8x 오차내에서 -1임을 알 수 있다. 표준 편차의 값은 N=0 일때 평균치 10.50에 대해 0.01 이며 N=11.0 일때 0.6 정도임을 알 수 있다. 힘 측정기의 전하감도는 10.49 pcb/N에서 10.51 pcb/N으로 약 10.50 pcb/N의 평균치를 갖는다.

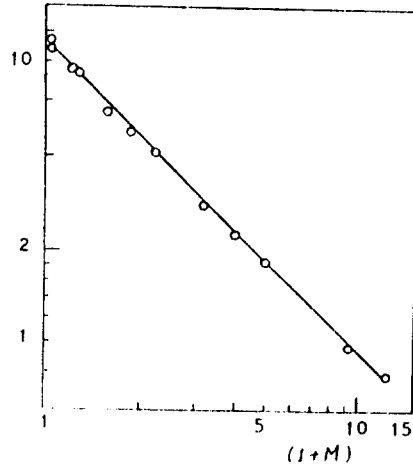


그림 4. (1+N)의 값에 따른 충격헤머의 유효 전하감도

표 2. 그림 4에 나타난 결과의 통계 처리

Data	CR	n	σ	S_{qr} (pcb/N)
(1)	-0.9996	-1.0067	0.00972	10.49
(2)	-0.9996	-1.0081	0.01063	10.51

* (1) 최대 전압치만을 사용
 (2) 최소자승오차 해석 결과

5. 결론 및 고찰

충격해머의 질량 효과를 고려한 감도보정 방법에 대한 모형을 제시하고 그에 대한 실험적 검증을 해 보았으며, 이러한 모형은 충격해머의 다양한 제작 형태가 힘측정기의 감도에 미치는 영향을 적절히 파악할 수 있는 것으로 파악된다. 실험 결과에 의하면, 충격헤드와 해머 몸체의 질량이 장착된 힘측정기의 전하 및 전압감도에 큰 영향을 미치며, 실험에 사용된 해머의 감도보정을 하지 않을 경우 그 오차는 상당한 양이 된다는 것을 알 수 있다.

또한 힘측정기의 고유 진동수는 질량비 N 과 충격헤드의 질량 변화에 따라 달라지며, 이러한 점은 충격 시험에 사용되는 해머의 동적 특성에 큰 변화를 야기시킬 수 있다.

7. 참고문헌

1. Halvorsen, W. G. and Brown, D. L., "Impulse Technique for Structural Frequency Response Testing.", *Sound and Vib.*, 8-21, Nov. 1977.
2. Dally, J. W., Riley, W. F. and McConnell, K. G., *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley & Sons, Inc., NY, 1984.
3. Corelli, D., "Ratio Calibration - The Right Choice for Modal Analysis.", *Sound and Vib.*, 27-30, Jan. 1984.
4. Corelli, D. and Brown, D. L., "Impact testing Considerations.", *Proceedings of 2nd IMAC*, 735-742, Feb. 1984.
5. Good, M. and Rost, R., "Summary of Excitation Signals for Structural Testing.", *Proceedings of 2nd IMAC*, 566-571, Feb. 1984.
6. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, Wiley-Interscience, 1980.
7. Han, S. and McConnell, K. G., "The Effects of Transducer Cross-Axis Sensitivity in Modal Analysis.", *Proceedings of 7th IMAC*, 505-511, Jan. 1989.