한국소음진동공학회지 제 1 권 제 2 호, pp. 115~120, 1991.

〈論 文〉

충격 해머의 感度補正

On the Calibration of Impact Hammer Sensitivity

한 상 보*
Sang bo Han

〈1991년 6월 13일 접수 ; 1991년 9월 5일 심사완료〉

ABSTRACT

The impact hammer is extensively used in experimental modal analysis as a means to provide force over a broad range of frequencies. The hammer mass and the impact head are often changed to achieve a desired impact time duration with its corresponding input frequency spectrum. these mass changes affect the performance and sensitivity of the force transducer employed to measure the impact force. Both a mathematical model describing the effects of impact head and hammer mass on the performance of the force transducer and experimental verification of this model are presented here.

기호설명

C_F : Feedback capacitance of the charge amplifier
E_a : Output voltage from the accelerometer
E_f : Output voltage from the force transducer
$F(t)$: Impact force to be measured
$H(jw)$: Frequency response function of the force transducer
M : Mass ratio of hammer head and body
S : Transducer displacement voltage sensitivity
S_a : Voltage sensitivity of the accelerometer
S_f : Nominal voltage sensitivity of the force transducer
S_f^* : Voltage sensitivity of the impact hammer
S_{qf} : Charge sensitivity of the force transducer
S_{qf}^* : Charge sensitivity of the impact hammer
a : Pendulum acceleration
c : Damping coefficient of the force transducer
k : Spring constant of the force transducer
g_s : Standard gravitational acceleration
m_b : Mass of the hammer body
m_e : Effective mass of the hammer
m_h : Mass of the hammer head
m_p : Mass of the pendulum for calibration
r : Dimensionless frequency ratio
x,y,z : Coordinate system
ξ : Dimensionless damping ratio
ω : Frequency domain variable
ω_n : Natural frequency of the force transducer

* 경남대학교 공과대학 기계설계학과

I. 서 론

구조물의 진동특성을 파악하기 위한 실험적 모우드 해석법에서 가진력을 제공하는 한 방법으로 힘측정기가 부착된 해머를 이용한 충격시험기법이 널리

사용되고 있다.

충격해머 실험의 유용성은 가진력의 에너지가 정현파 기진력의 경우처럼 특정 주파수대에 산재해있는 것이 아니라 가용 주파수 영역 내에 연속적으로 분포해 있다는 점이며 이러한 충격력은 가용 주파수 범위내에 있는 모든 고유진동형을 여기시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 복잡하고 값비싼 가진 장비없이도 간편하게 해석을 수행할 수 있다는 이점이 있으므로 신호/잡음비가 낮으며 해석 대상물의 비선형성을 감지하기 어렵다는 단점에도 불구하고 실험실이나 현장에서 예비실험 및 본실험의 수단으로 광범위하게 애용되고 있다. 또한, 충격시험에 사용되는 해머는 파손되기 쉬운 박판형 구조물에 적합한 촉침형에서부터 큰 질량을 가진 구조물을 해석하기 위한 대형해머에 이르기까지 용도에 따라 그 종류가 다양하다[1].

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

충격해머에 장착된 힘측정기의 감도는 해머질량과 충격헤드의 질량 변화에 영향을 받게 되는데, 충격시험시 측정되는 값은 충격헤드와 해머 사이에 부착되어 있는 힘측정기에 가해지는 힘인 반면 구조물에 가해지는 가진력은 충격헤드와 구조물사이에 발생되는 힘이다. 이 두 힘의 비는 해머 및 충격헤드와 구조물사이에 발생되는 힘이다. 이 두 힘의 비는 해머 및 충격헤드의 질량효과에 따라 좌우된다. 주어진 충격 시험에서 충격해머의 질량효과를 정확히 예측한다는 것은 불가능하므로, 충격해머는 매 실험조건에 따라 감도보정을 해 주어야 한다. 충격해머의 감도보정에 대해서는 문헌 [2]에 잘 나타나 있다.

본 논문에서는 해머 및 충격헤드의 질량이 힘측정기의 전압감도에 미치는 영향을 파악하고자 질량 효과를 고려한 수학적 모형을 제시하고 그 모형의 타당성을 실험을 통해 검정하고자 한다.

2. 충격해머의 이론적 모형

Fig. 1에 충격해머의 동역학적 모형을 나타내었으

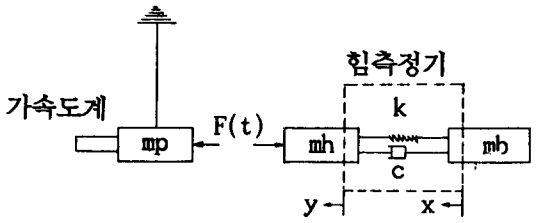


Fig. 1 Dynamic model of impact hammer and calibration setup

며 여기서 m_h는 충격헤드의 질량(힘측정기의 보조질량(seismic mass) 포함), m_b는 해머의 질량(보조질량을 제외한 힘측정기의 질량 포함), k는 힘측정기의 스프링상수, c는 힘측정기의 감쇠계수를 나타낸다. 좌표계 x와 y는 해머 질량(m_b)과 충격헤드의 질량(m_h)의 거동을 각각 나타낸다.

해머 몸체와 충격헤드의 운동방정식은

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

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

로 각각 주어지며, ·은 시간에 대한 미분을 나타낸다.

힘측정기는 실제로 충격헤드와 해머 몸체 사이의 상대운동을 감지하므로

$$z=y-x$$

을 이용하여 (1)과 (2)를 정리 하면

$$m_e\ddot{z}=c\dot{z}+kz=-\frac{1}{1+M}F(t) \tag{4}$$

이 얻어지고, 여기서

$$m_e=\frac{m_b m_h}{m_b+m_h} \tag{5}$$

는 전체 계의 유효질량을 나타내며

$$M=m_h/m_b \tag{6}$$

은 해머 몸체의 질량에 대한 충격헤드의 질량비이다.

충격해머계의 고유진동수는

$$\omega_n=\sqrt{k/m_e}=\sqrt{(1+M)k/m_h} \tag{7}$$

로주어지며, 이 식은 충격해머계의 고유진동수가 충격헤드의 질량 및 질량비 M에 따라 변화 함을 보여준다. M의 값이 작지 않을 경우, 즉 해머 몸체의 질량에 비하여 충격헤드의 질량이 작지 않을 경우에는 충격해머계의 고유진동수가 장착된 힘측정기 자체의 고유진동수와 다른 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

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

$$H(jw)=\frac{1}{k-m_e\omega^2+jc\omega}$$
$$=\frac{1}{k(1-r^2+j2\xi r)} \quad (8)$$

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

식 (4)와 (8)로부터, 주파수 영역이 충격해머계의 고유진동수보다 매우 낮은 충격력에 대해서는 (즉, $r\ll1$인 경우) 상대운동이 스프링 상수의 크기에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서, 상대 운동 z에 직접 비례하는 양인 출력전압 E_f는

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

로 주어지며, 여기에서 S는 압전세서의 상대운동에 비례하는 전압감도, S_f^*는 충격해머의 전압감도로 정의된다. 충격해머의 전압감도 S_f^*, 해머에 장착된 힘 측정기의 전압감도 S_f, 그리고 질량비 M사이의 상대적 관계는

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

으로 나타내어 지며, 충격해머의 감도는 해머 형성 부위의 질량비 M에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

앞 절에서 파악된 이론적 모형에 대한 실험적 검증을 위해서 여러가지의 질량비 M에 대한 충격해머의 감도 보정을 실시 하였다.

충격력 $F(t)$는 Fig. 1에 나타나 있는 진자 질량 m_p의 가속도를 측정함으로써 결정할 수 있는데

$$F(t)=m_pa=m_pg_s(a/g_s) \quad (11)$$

여기서 a는 진자의 곡도, g는 진자의 가속도, g_s는 표준 중력가속도이다. 가속도계의 출력전압 E_a는

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

로 주어지는데, 여기서 S_a는 가속도계의 전압 감도로서 표준 중력가속도 g_s당 출력 전압이다. 식 (9), (11), (12)를 결합하면 힘측정기의 감도는

$$S_f^*=\frac{E_f\ S_a}{E_a\ m_pg_a}=\frac{S_f}{1+M} \quad (13)$$

과 같이 M의 함수로 나타내어 진다. (13)을 이용하여 충격해머의 전압감도 S_f^*를 결정하기 위해서는 진자질량 m_p, 가속도계의 전압감도 S_a(표준 중력가속도 g_s당 볼트 단위) 가속도계 및 힘측정기로 부터의 출력 전압비 E_f/E_a, 그리고 질량비 M을 결정하면 된다. 이러한 감도보정 실험 장치는 참고문헌 [2] 및 [3]에 기술되어 있는 것과 유사하며 본 실험에서는 Fig. 2의 장치를 이용하였다.

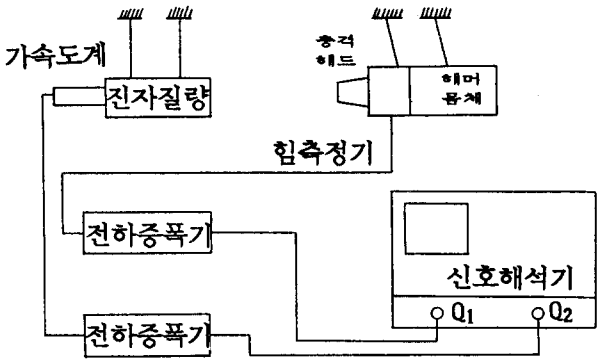


Fig. 2 Schematic diagram of instrumentations used in calibration procedure

Fig. 2에서와 같이 힘측정기는 실험실용 충격해머에서 흔히 볼 수 있는 손잡이를 제거하여 진자 운동을 할 수 있도록 지지하였으며, 질량비 M의 값은 힘측정기에 부착되는 충격 헤드 및 해머 몸체의 질량을 변경시켜 다양한 값을 갖도록 하였다. 또한, 충격 헤드의 질량이 해머 몸체의 질량보다 큰 경우를 포함하여 현장에서 사용되는 대형 해머의 적용시 발생할 수 있는 상황도 구현하도록 하였다. 충격 시간은 실험 장치에 포함된 질량들(m_h, m_b, m_p)과 충격 헤드 면에 여러가지 반발계수 값을 갖는 재질을 부착하여 조절하였으며, 충격이 가해질 때 진자 운동의 축이 가속도계의 주축과 일치 하도록 주의하였다. 한가지 유의할 점은 해머 몸체의 질량이 해머 헤드의 질량에 비해 지나치게 클 경우 이중 충격이 발생하여 입력 신호를 오염시킬 수 있으며, 이는 실제 충격해머 시험시 방지해야 할 사항이다.

진동 실험에 사용되는 일반적인 힘측정기와 가속도계는 대개 전하 발생형으로 높은 출력 임피이던스 때문에 반드시 전하 증폭기를 거쳐야 한다. 전하 증폭기를 거친 신호는 전압의 형태로 신호 해석기에 연결되며, 이때 전하 증폭기 내의 피이드백 정전 용량과 포텐시오미터의 저항치를 조절하여 적절한 크기의 전압감도치로 환산된다.

본 실험에 사용된 가속도계의 감도보정은 감도보

정용 표준 가속도계를 사용하여 100Hz에서 실시하였으며, 힘측정기 및 가속도계 용 전하 증폭기의 피이드백 정전 용량은 모든 측정에 대하여 100pF로 고정시켰고, 포텐시오미터의 감도는 1로 고정하였다. 따라서, 전하감도와 전압감도와의 관계는

$$S_f = S_{qf}/C_F \tag{14}$$

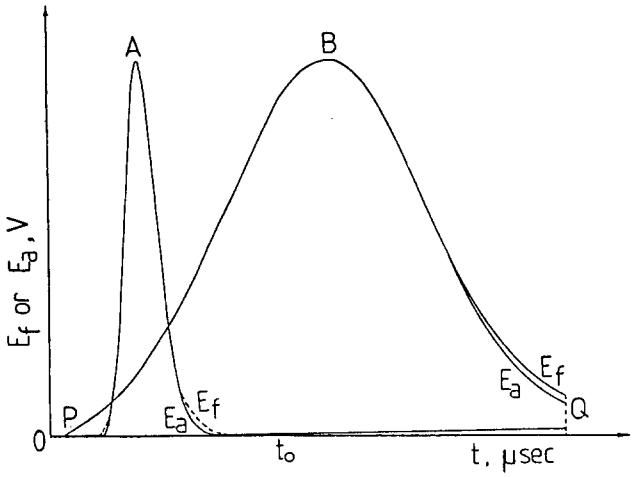
로 나타내어 지는데 S_f는 V/N 단위의 전압감도, S_{qf}는 pcb/N의 전하감도를 가리킨다.

충격해머의 전하감도는 (13)을 이용하여 최종적으로

$$S_{qf}^* = \frac{S_{qf}}{1+M} = \frac{E_f}{E_a}\frac{S_a C_F}{m_p g_s} \tag{15}$$

로 주어진다.

충격 해머의 전하감도는 그림 2의 실험장치에 나타난 가속도계 및 힘측정기의 출력 전압을 비교함으로써 결정 할 수 있다. 그림 3은 가속도계 및 힘측정기로부터의 충격 신호를 5μsec의 샘플링 간격으로 계측한 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_a는 두가지 방법으로 계산되었는데, 그 첫번째 방법은 그림 3과 같이 반정현파 형태로 주어진 각 충격 신호의 최대치 만을 비교한 것이며, 두번째 방법은 신호 해석기에 내장되어 있는 통계 프로그램을 이용하여 각 충격 신호를 구성하고 있는 1024 샘플링 점 모두에 대한 최소자승오차 해석을 이용하여 구한 것이다.



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

Fig. 3 Impulse signals from impact hammer and accelerometer

4. 실험결과

충격헤드 및 해머 몸체 질량에 대한 13 가지의 서로 다른 조합을 이용하여 질량비를 0.036에서 11.0까지 변화시켜 실험을 행하였다. 실험의 결과로 구해진 충격 해머의 전하감도치가 Table 1에 주어져 있다. 이 계측 결과를 보다 쉽게 알아 보기 위하여 S_{qf}^*를 $(1+M)$의 함수로 log−log 스케일 상으로 나타내면

$$\log(S_{qf}^*) = \log(S_{qf}) - \log(1+M) \tag{16}$$

또는

$$y = y_0 + nx \tag{17}$$

과 같은 경사 −1의 직선 관계식이 얻어지며 Table 1의 결과를 나타낸 것이 Fig. 4이다. y_0의 값은 바로 $M=0$ 일때의 충격 해머의 전하 감도치를 나타내며 충격 해머에 부착된 힘측정기에 대한 감도보정의 기준으로 사용될 수 있다. 실험 결과치의 식 (16)에 대한 최소자승오차 해석을 행한 결과가 Table 2에 주어져 있으며 여기서 CR은 상관계수, n는 기울기, σ는 측정점의 이론치에 대한 표준편차를 나타낸다.

Table 1 Charge sensitivity of impact hammer for various values of M

No.	M	E_f/E_a	S_{qf}(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

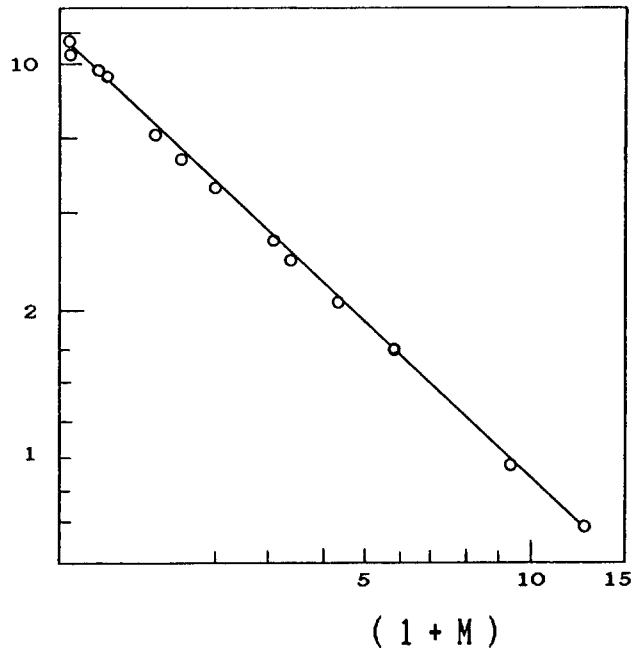


Fig. 4 Effective impact hammer charge sensitivity as a function of $(1+M)$

그리고 S_{qf}는 $M=0$일때의 힘측정기의 전하감도이다.

첫번째 열은 최고 전압비 만을 이용한 값이며 두번째열은 가속도 신호에 대한 충격력 신호의 1024 샘플링 점을 이용한 최소자승오차 해석에 의한 값이다.

이 표에 나타나 있듯이, 상관계수가 매우 높은 값을 갖는다는 것을 알 수 있고 직선의 기울기는 0.6~0.8% 오차내에서 −1임을 알 수 있다. 표준편차의 값은 $M=0$일때 평균치 10.50에 대해 0.01이며 $M=11.0$일때 0.6 정도 임을 알 수 있다. 힘측정기의 전하감도는 10.49 pcb/N에서 10.51 pcb/N으로 약 10.50 pcb/N의 평균치를 갖는데 이는 힘측정기 제작자가 제시한 공칭 전하감도와 일치한다.

위의 실험 결과는 일정한 전하 및 전압 감도를 가진 힘측정기라 할지라도 그것을 부착한 충격 해머의 제작 상태에 따라 결과적인 전하 및 전압 감도는 큰 폭으로 변할 수 있으며 그 변화의 크기는 식 (10) 및 (15)를 이용하여 정확하게 추정할 수 있다는 것을 보여준다.

Table 2 Statistical fit to 13 data in Fig. 4.

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

13개의 측정 결과치에 대한 통계 처리
* (1) 최대 전압치 만을 사용
(2) 최소자승오차 해석 결과

5. 결론 및 고찰

충격해머의 질량 효과를 고려한 감도보정 방법에 대한 모형을 제시하고 그에 대한 실험적 검증을 해보았으며, 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 경우에 따라 상당한 양이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

또한 충격해머계의 고유진동수는 질량비 M과 충격헤드의 질량 변화에 따라 달라지며, 이러한 점은 충격 시험에 사용되는 해머의 동적 특성이 장착된 힘측정기의 동적 특성과는 많은 차이가 있을 수 있다는 것을 말해 주고 있다.

참고문헌

1. Halvorsen, W.G., and Brown, D. L., 1977,

"Impulse Technique for Structural Frequency Response Testing", Sound and Vib., Nov. pp. 8 ~21.

2. Dally, J.W., Riley, W.F., and McConnell, K.G, 1984, Instrumentation for Engineering Measure ments, John Wiley & Sons, Inc., NY, Chap. 7.
3. Corelli, D., 1984, "Ratio Calibration-The Right Choice for Modal Analysis", Sound and Vib, Jan., pp. 27~30.
4. Corelli, D., and Brown, D. L., 1984, "Impact Testing Considerations", proceedings of 2nd IMAC, pp. 735~742.
5. Good, M., and Rost, R., 1984, "Summary of Ex citation Signals for Structural Testing", Proceed ings of 2nd IMAC, pp. 566~571.
6. Bendat, J.S., and Piersol, A.G., 1980, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analy sis, Wiley-Interscience, Chap. 5.
7. Han, S., and McConnell, K.G., 1989, "The Effects of Transducer Cross-Aixs Sensitivity in Modal Analysis", Proceedings of 7th IMAC, pp. 505 ~511.