

폭발 충격 발생기구의 인체전달 충격력 및 완충시스템 해석

김효준*, 양현석**, 박영필**, 류봉조***, 최의중****, 이성배****

Analysis of Optimal Dynamic Absorbing System Considering Human Behavior Induced by Transmitted Force

Hyo Jun Kim*, Hyun Seok Yang**, Young Pil Park**, Bong Jo Ryu***, Eui Jung Choe**** and Sung Bae Lee****

ABSTRACT

In this study, the optimal dynamic isolation system for gas operated combat weapon has been investigated. For this purpose, firstly, the dynamic behavior of human induced by firing operations has been analyzed through a series of experimental works using the devised test setup. The characteristics of linear impulse has been compared under some conditions of support system. In order to design the optimal dynamic isolation system, parameter optimization process has been performed based on the simplified isolation system under constraints of moving displacement and transmitted force. Finally, the performance of the designed dynamic absorbing system has been evaluated by simulation.

Key Words : Human behavior (인체거동), Isolation system (완충시스템), Impulse (충격량), Optimal design (최적설계)

1. 서론

국방과학 기술의 개발은 국가 안보와 직결된 중요한 부분으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 그중 소화기(gas operated gun)의 성능향상 부분은 운동역학적으로 볼 때 불가피하게도 보다 큰 충격에너지 발생시키게 되므로 이로 인한 영향을 고려한 설계가 요구된다.

충격력을 받는 구조물에서 충격 전달력 및 진동을 차단하거나 감소시키는 연구는 구조 설계에 있

어 중요한 인자가 될 뿐만 아니라^[6,8] 충격이나 진동이 전달되는 2차 계의 안정성에도 주요한 문제가 되어왔다^[9,10]. 이러한 완충시스템과 관련된 연구로서 Zhang^[1] 등은 철도차량에서 외팔보형 동흡진기의 최적 감쇠인자를 유도하고, 효율을 쉽게 평가할 수 있는 등가질량비를 정의하였으며, Sekine^[2] 등은 충격흡수나 진동흡수에 새롭게 사용되고 있는 실리콘 겔을 사용한 인슐레이터(insulator)의 고유진동수와 감쇠비를 유도하여 인슐레이터 특성을 분석하였다. Hundal^[3] 등은 공압 완충기를 이용하여 최적 응

* 2002년 3월 27일 접수

* 국립삼척대학교 기계공학과

** 연세대학교 기계전자공학부

*** 한밭대학교 기계설계학과

**** 국방과학연구소

답성을 유도할 수 있는 설계 방안에 대하여 고찰하였다. 또한 Alanoly^[4] 등은 완충기 내부의 유체 흐름을 오리피스로 조절하여 완충력을 조정하는 반응동형 완충기를 이용하여 질량체의 가속도와 상대변위를 감소시키는 연구를, Walsh^[5] 등은 회전체를 갖는 기계장비의 시동/정지 시점에서 발생하는 과다진동을 흡수하기 위하여 강성이 변화하는 완충기에 대한 연구를 수행하였으며, Seto^[7] 등은 유압식 콘크리트 파쇄기의 성능개선을 위한 이론 해석과 설계를 수행하였다.

고충격 발생기구인 발사기의 경우에는 1차 계인 발사기에서 발생하는 폭발 충격력이 발사기를 지지하는 구조물이나 인체에 직접 전달되게 된다. 차량 등에 탑재되어 사용되는 발사기는 탑재장비를 지지구조물로 하거나 별도의 지지구조를 가지도록 설계되어 있다. 이와 같은 경우 사격시의 충격력을 완충시켜 반동력을 감소시키도록 지지물의 구조를 최적화하거나 다양한 종류의 충격완충기를 설계하여 사용하고 있다. 그러나, 인체에 직접 전달되는 휴대용 발사기의 충격력은 사람과 발사기로 이루어진 동적계에 충격형태의 외란(disturbance)으로 작용하여, 최초 계획된 운동형태를 교란시키게되므로 결과적으로 사용자에게 의한 운용성능 저하를 초래하는 역기능을 할 수 있다. 그러므로 목표된 성능향상으로 인한 발사기의 충격전달을 완화시키는 연구가 필수적이며, 연구의 특성상 기존 연구에 대한 접근성이 용이하지 않으므로 이에 대한 해석 및 설계 기술의 확보가 필수적이다.

본 연구에서는 폭발 가스압에서 발생하는 에너지를 동력으로 사용하는 발사기와 이를 지지하는 인체를 대상 시스템으로 선정하여, 실사격 조건에서 발생하는 인체 거동에 대한 실험을 수행하였으며, 이에 대한 분석을 토대로 지지부 특성을 고려한 간략화된 완충시스템 모델을 기반으로 파라미터 최적화를 수행하였다. 설계된 완충 시스템을 적용하여 발사기로부터 발생하는 충격 전달력의 완충 효과를 평가하였다.

2. 충격력을 받는 인체의 동특성 분석

2.1 충격입력에 대한 인체 거동

복잡한 구조의 인체에 입력으로 작용하는 충격

력에 대하여 인체의 동특성을 해석하기 위해서 실제 사격 조건하에서 지지구조물로 작용하는 인체의 거동을 실측하고 분석할 필요가 있다.

본 절에서는 사격시험에 의한 인체 및 대상 소화기의 동적반응을 살펴보기 위하여 거치방식^[11] 외에 Fig. 1처럼 실험장치를 구성하여 실사격시험(5.56mm 보통탄 M193, 탄속 960 m/sec)을 행하였고 시험에 따른 결과들을 분석하였다.

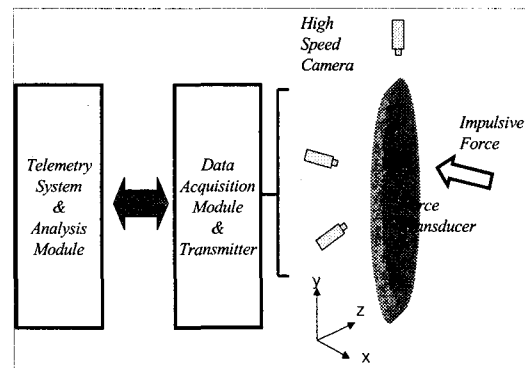


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

시험은 실제 충격 입력의 유형을 고려하여 단발 및 연발 사격(10연발, 직립 견착 자세)으로 구분하였으며, 인체 주요 지점을 선정하여 고속 카메라를 이용하여 거동을 측정하였다. 실사격시 발사기 및 인체의 거동은 3차원 궤적을 나타내지만 탄두 궤도에 지배적인 영향을 주는 수직 단면에 대하여 Fig. 2~Fig. 7에 실험 결과를 정리하여 x-y 평면상에 각각의 측정 지점의 궤적을 도시하였다. 이때 x축은 발사기의 수평방향을, y축은 이에 수직인 상하방향을 각각 나타낸다.

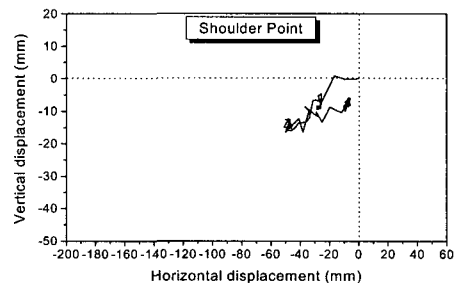


Fig. 2 Trajectory of shoulder position (single shoot)

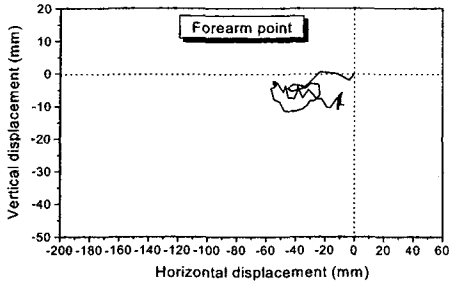


Fig. 3 Trajectory of forearm position under single shoot condition

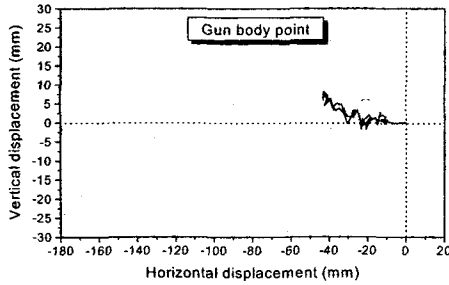


Fig. 4 Trajectory of gun-body position under single shoot condition

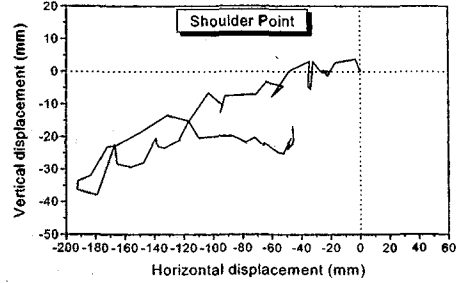


Fig. 5 Trajectory of shoulder position under multiple shoot condition

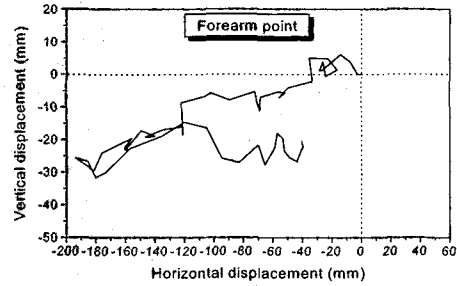


Fig. 6 Trajectory of forearm position under multiple shoot condition

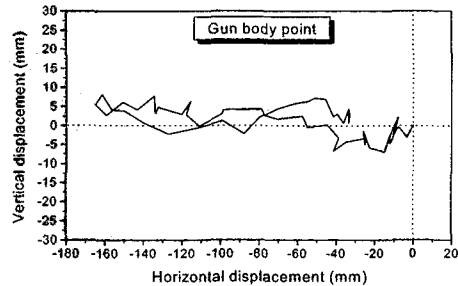


Fig. 7 Trajectory of gun-body position under multiple shoot condition

결과에서처럼 단발 실사격 조건에서 어깨지점의 궤적은 수직 변위가 수평 변위의 25% 이하로, 팔꿈치 지점은 수직 변위가 수평 변위의 15% 정도로 수평 변위가 지배적인 거동을 나타내고 있다. 또한 발사기의 경우에는 충격입력으로 인하여 견착점을 중심으로 회전 모우멘트가 발생하며, 수직 변위의 방향이 + 방향으로 나타남을 알 수 있다.

연발 실사격 조건에서는 수평 변위가 단발 실사격 조건대비 3배 정도로 증가하여 나타남을 확인할 수 있으며, 전체적인 경향은 단발 조건과 유사한 결과를 나타낸다.

전술한 결과로부터 발사기로부터 인체에 전달되는 충격 입력은 불필요한 인체 운동과 발사기의 회전운동을 유발하여 탄두 궤도에 치명적인 영향을 주게되므로 인체 전달 충격력의 저감에 대한 연구가 요구된다.

2.2 인체 전달 충격량

2.1절의 실사격 조건에서 발사기로부터 인체에 전달되는 충격력 실측 실험을 동시에 수행하였으

며, 인체 거동을 유발하는 충격량을 Fig. 8에 도시하였다. 발사기로부터 전달되는 충격량은 지지부의 조건에 따라 상이하게 나타나게 되는데, 이를 고려하여 견고한 스프링으로 지지된 경우와 인체 자체가 지지부가 되는 경우의 실험 결과를 비교하여 Fig. 8에 도시하였다.

실사격에서와 같이 인체에 견착된 조건에 비하여 견고한 구조물로 지지된 경우에는 발사기 내부

요소들의 충격력 발생 파형 영향이 반영되어 나타나게 되며, 그 크기도 인체 지지의 경우보다 크게 나타남을 확인할 수 있다.

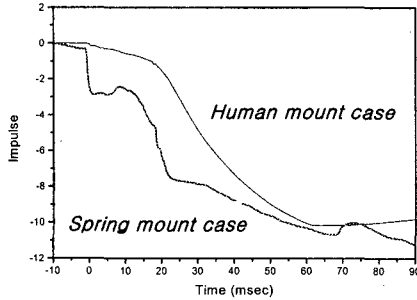


Fig. 8 Experimental result of impulse variation depending on the mount condition

3. 완충시스템의 최적설계

3.1 지지부 특성을 고려한 완충시스템의 최적설계

본절에서는 발사기의 지지부로 작용하는 인체 거동을 고려하여 충격전달력을 경감시키기 위한 완충시스템을 설계하였다. 인체의 거동 특성은 자세, 체중 등 사격자의 조건에 따라 변동하며, 복잡한 구조의 인체에 대한 수학적 모델의 구성 및 적용에 어려움이 있으므로, 실험 결과를 토대로 지배적인 저차의 수평 진동 모드만을 고려하여 간략화된 완충 시스템을 구성하고, 설계 변수인 완충시스템의 파라미터를 결정하기 위하여 적용 구속 조건을 고려하여 최적화를 수행하였다.

발사기 M_s , 지지부 M_u 와 등가의 강성 k_s , 감쇠 c_s 로 나타내지는 완충기를 포함한 전체 완충 시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, x_s 는 발사기 변위, x_u 는 지지부 변위, F_i 는 사격시 발생하는 충격력, k_u 는 지지부 강성을 나타낸다.

완충시스템의 최적의 파라미터를 결정하기 위하여 성능지수(Performance Index)는 완충기 변위와 지지부에 전달되는 전달력을 고려하여 다음의 식(2)와 같이 정의한다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T (\dot{x}_u^2 + \rho(x_s - x_u)^2) dt \right] \quad (2)$$

여기서, ρ : weighting factor

상기 식(2)를 상태변수 형태로 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T (\dot{x}_4^2 + \rho(x_1 - x_3)^2) dt \right] \quad (3)$$

식(3)의 내부 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \ddot{x}_4^2 + \rho(x_1 - x_3)^2 \\ & = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] \\ & \begin{bmatrix} \frac{k_s^2}{M_u^2} + \rho & \frac{k_s c_s}{M_u^2} & \frac{k_s(k_s + k_u)}{M_u^2} - \rho & -\frac{k_s c_s}{M_u^2} \\ \frac{k_s c_s}{M_u^2} & \frac{c_s^2}{M_s} & -\frac{c_s(k_s + k_u)}{M_u^2} & -\frac{c_s^2}{M_u^2} \\ \frac{k_s(k_s + k_u)}{M_u^2} - \rho & -\frac{c_s(k_s + k_u)}{M_u^2} & \frac{(k_s + k_u)^2}{M_u^2} + \rho & \frac{c_s(k_s + k_u)}{M_u^2} \\ -\frac{k_s c_s}{M_u^2} & -\frac{c_s^2}{M_u^2} & \frac{c_s(k_s + k_u)}{M_u^2} & \frac{c_s^2}{M_u^2} \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = X^T Q X \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $X = [x_s \ \dot{x}_s \ x_u \ \dot{x}_u]^T$

Q : 대칭, 양의 한정(symmetric, positive definite) 행렬

가진력 F_i 를 강도(intensity) E 를 갖고 다음의 식(5),(6)을 만족하는 것으로 가정하면,

$$E[\dot{F}_i(t) \dot{F}_i(t+\tau)] = E\delta(t-\tau) \quad (5)$$

$$E[\dot{F}_i(t)] = 0 \quad (t \geq 0) \quad (6)$$

식(4)와 식(3)으로부터 성능지수는 다음과 같이 나

타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T X^T Q X dt \right] \\
 &= \text{Trace} \{ Q E [X^T X] \} \\
 &= \text{Trace} \{ Q \Sigma \}
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서,

$$\Sigma = E [X^T X] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{bmatrix}$$

대상 시스템의 상태방정식에 대한 공분산전파 방정식(covariance propagation equation)은 다음의 식(8)를 만족한다.

$$A \Sigma + \Sigma A^T + B E B^T = 0 \tag{8}$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{M_s} & -\frac{c_s}{M_s} & \frac{k_s}{M_s} & \frac{c_s}{M_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{M_u} & \frac{c_s}{M_u} & -\frac{k_s+k_u}{M_u} & -\frac{c_s}{M_u} \end{bmatrix}$$

$$B = \left[0 \quad \frac{1}{M_s} \quad 0 \quad 0 \right]^T$$

따라서 간략화된 완충시스템에 대한 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} &= \frac{c_s^2 k_s k_u m_s + k_s^3 m_s^2 + 3 k_s^2 k_u m_s^2 + k_u^3 m_s^2 + c_s^2 k_s k_u m_u + 2 k_s^2 m_s m_u}{2 c_s k_s k_u m_s^2} \\
 &\quad + \frac{2 k_s^2 k_u m_s m_u + k_s^3 m_u^2}{2 c_s k_s k_u m_s^2} \\
 \sigma_{12} &= 0 \\
 \sigma_{13} &= \frac{c_s^2 k_u m_s + k_s^2 m_s^2 + 2 k_s k_u m_s^2 + k_u^2 m_s^2 + c_s^2 k_u m_u + 2 k_s^2 m_s m_u}{2 c_s k_u^3 m_s^2} \\
 &\quad + \frac{k_s k_u m_s m_u + k_s^2 m_u^2}{2 c_s k_u^3 m_s^2} \\
 \sigma_{14} &= -\frac{1}{2 k_u m_s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{21} &= \sigma_{12} \\
 \sigma_{22} &= \frac{c_s^2 k_u + k_s^2 m_s + 2 k_s k_u m_s + k_u^2 m_s + k_s^2 m_u}{2 c_s k_u^2 m_s^2} \\
 \sigma_{23} &= \frac{1}{2 k_u m_s} \\
 \sigma_{24} &= \frac{c_s^2 k_u + k_s^2 m_s + k_s k_u m_s + k_s^2 m_u}{2 c_s k_u^2 m_s^2} \\
 \sigma_{31} &= \sigma_{13} \\
 \sigma_{32} &= \sigma_{23} \\
 \sigma_{33} &= \frac{c_s^2 k_u m_s + k_s^2 m_s^2 + k_s k_u m_s^2 + c_s^2 k_u m_u + 2 k_s^2 m_s m_u + k_s^2 m_u^2}{2 c_s k_u^3 m_s^2} \\
 \sigma_{34} &= 0 \\
 \sigma_{41} &= \sigma_{14} \\
 \sigma_{42} &= \sigma_{24} \\
 \sigma_{43} &= \sigma_{34} \\
 \sigma_{44} &= \frac{c_s^2 k_u + k_s^2 m_s + k_s^2 m_u}{2 c_s k_u^2 m_s^2}
 \end{aligned}$$

구한 해 σ_{ij} 로부터 식(7)의 성능지수식 J는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned}
 J &= \text{Trace} \{ Q \Sigma \} \\
 &= \frac{k_s^2}{2 c_s k_u m_s^2} + \frac{c_s}{2 m_s^2 m_u} + \left(\frac{1}{2 c_s k_s} + \frac{1}{2 c_s k_u} \right) \times \rho
 \end{aligned} \tag{9}$$

이를 최소화하는 완충시스템의 최적의 스프링 상수 k_{eq} 와 감쇠계수 c_{eq} 는 다음의 식(10),(11)과 같이 구할 수 있다.

$$k_{eq} = \sqrt[3]{\frac{k_u m_s^2 \rho}{2}} \tag{10}$$

$$c_{eq} = \sqrt{m_u \times \left\{ \frac{k_s^2}{k_u} + \left(\frac{m_s^2}{k_s} + \frac{m_s^2}{k_u} \right) \times \rho \right\}} \tag{11}$$

3.2 완충특성 해석

완충변위에 대한 구속조건 5mm를 만족시키는 가중치 ρ 로부터 완충시스템의 설계변수인 k_{eq} 와 c_{eq} 는 식(10),(11)으로부터 다음과 같이 결정하였다.

$$k_{eq} = 2385 \text{ (N/m)}$$

$$c_{eq} = 520 \text{ (N-sec/m)}$$

완충시스템의 최적 설계에서 구한 결과를 기초로 대상 소화기에 적용하여 완충 성능에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과를 완충 시스템 적용 전/후로 비교하여 Fig. 9에 도시하였다.

결과에서처럼 완충 시스템의 적용으로 지지부에 전달되는 충격력의 최대 크기는 6050N에서 1270N으로 21% 수준으로 감소됨을 확인할 수 있으며, 이는 외란으로 작용하는 충격력으로 인한 발사주체인 사격자의 불필요한 거동을 경감시켜 연속적인 사격 조건에서 조준안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

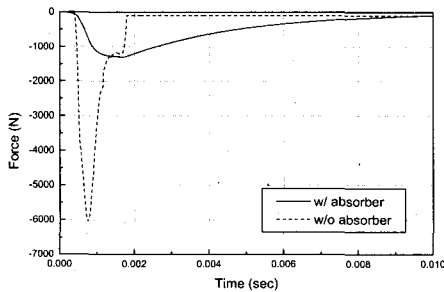


Fig. 9 Comparison of transmitted forces to mount

4. 결론

본 연구에서는 가스작동식 발사기와 이에 대한 지지부로 작용하는 인체를 대상 시스템으로 하여 실사격 조건에서 발생하는 충격 입력에 대한 인체 거동 특성을 분석하였으며, 지지 조건에 의한 충격량의 발생 특성으로부터 발사기-인체로 구성된 완충 시스템 모델을 기반으로 완충기 파라미터의 최적화를 수행하였다. 설계된 완충시스템을 적용한 해석 결과, 약 80%의 충격력 저감 효과를 얻었으며, 향후 충격력을 받는 인체 거동 해석과 상이한 구조의 발사기 개발에 있어서도 발사기구의 충격특성 해석과 완충기 설계를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Zhang, W., Matsuhisa, H., Honda, Y. and Sato, S., "Vibration Reduction of a Railway Wheel by Cantilever-Type Dynamic Absorbers," JSME

- International Journal, Series III, Vol. 32, No. 3, pp. 400-405, 1989.
2. Sekine, S., Shimizu, N., Yamazaki, H., Zako, M. and Matsumoto, K., "Development of Silicone Gel Insulator Composed of Coil Spring and Silicon Gel," 日本機械學會論文集(C編), Vol. 60, No. 569, pp. 162-168, 1994.
3. Hundal, M. S. and Fitzmorris, D. J., "Response of a Symmetric Self-Damped Pneumatic Shock Isolator to an Acceleration Pulse," Shock and Vibration Bulletin, Vol. 55, Part 1, pp. 139-154, 1985.
4. Alanoly, J. and Sankar, S., "Semi-Active Force Generators for Shock Isolation," Journal of Sound and Vibration, Vol. 126, No. 1, pp. 145-156, 1988.
5. Walsh, P. L. and Lamancusa, J. S., "A Variable Stiffness Vibration Absorber for Minimization of Transient Vibrations," Journal of Sound and Vibration, Vol. 158, No. 2, pp. 195-211, 1992.
6. Gürgöze, M. and Müller, P. C., "Optimal Positioning of Dampers in Multi-Body Systems," Journal of Sound and Vibration, Vol. 158, No. 3, pp. 517-530, 1992.
7. Seto, K., Shiozuka, T., Isii N. and Kaneda, K., "Theoretical Analysis of the Shock Isolation Type Concrete Breaker and Its Effect on Preventing the Hand-Arm Vibration Syndrome," 日本機械學會論文集(C編), Vol. 56, No. 528, pp. 2022-2030, 1990.
8. Harris, C. M., "Shock and Vibration Handbook," McGRAW-HILL, 1997.
9. Korenev, B. G., "Dynamic Vibration Absorbers," John Wiley & sons, 1993.
10. Kim, D. S. and Lee, S. C., "Experimental Study on Cushioning Characteristics of Pneumatic Cylinder with Meter-in/Meter-out Control System," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 57-65, 2002.
11. 손세원, 홍성희, "방탄소재의 연구동향 및 방탄 헬멧 개발," 한국정밀공학회논문집, 제19권, 제7호, pp. 7-19, 2002.