

소구경 화기의 사격충격 측정 및 충격응답스펙트럼 분석

Firing Shock Measurement and Shock Response Spectrum Analysis of Small Arms

이준호† · 최의중* · 윤주홍*

Joon-Ho Lee, Eui-Jung Choe and Joo-Hong Yoon

Key Words : Small Arms(소구경 화기), Scope(조준경), Firing Shock Acceleration(사격충격가속도), 충격응답스펙트럼(Shock Response Spectrum)

ABSTRACT

Nowadays, various forms of electro-optical rifle scope have been developed and used in order to enhance the accuracy of small arms. However, firing shock acceleration has characteristics of pyroshock having a big acceleration value with very short duration time, which the electro-optical scopes should be designed to sustain. In this paper, the firing shock acceleration, which is transmitted to the electro-optical scope, was measured and SRS (Shock Response Spectrum) analysis was performed by using the measured firing shock acceleration. Furthermore, a shock test condition using a drop-table shock tester, which can simulate the actual firing shock acceleration, was devised. The devised shock test condition will be utilized to test the electro-optical scope itself before attaching it to the small arms.

1. 서 론

개인 병사가 휴대하는 소구경 화기의 정확도 향상을 위해 다양한 형태의 전자광학조준경이 개발되어 적용 중에 있으며, 레이저거리측정기 및 표적지시기 등의 전자광학장비도 화기 부수기재로 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 전자광학장비는 고충격의 사격충격가속도에 취약한 특성을 가지고 있으므로, 사격 시 인가되는 사격충격에 견딜 수 있는 내충격 설계가 이루어져야 한다. 본 논문에서 고려된 소구경 화기의 경우, 사격 시 발생하는 사격충격가속도는 큰 가속도 값이 매우 짧은 시간동안 지속되는 pyroshock의 특징을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서는 사격충격가속도 및 pyroshock에 대한 개요 및 pyroshock의 강도를 평가하기 위해 사용되는 충격응

답스펙트럼(이하 SRS, Shock Response Spectrum) 분석 방법을 먼저 소개하고, 고충격의 사격충격을 발생시키는 소구경 화기에 대한 실사격 시험을 통해 측정된 충격가속도를 이용하여 충격응답스펙트럼 분석을 실시하였다. 또한 실사격 시험을 실험실 차원에서 모사하기 위해서 낙하충격시험기를 이용한 조준경 충격시험조건을 설정하였고, 시험조건의 타당성을 검증하였다.

2. 사격충격가속도

사격충격가속도는 전자광학 주야조준경, 레이저거리측정기 및 표적지시기 등 전자광학장비의 구조 안전성을 평가할 때 활용되는 사격충격 관련 물리량이다.

사격충격가속도는 이론적으로 식 (1)과 같이 화기 질량, 탄 1발의 질량 및 사격충격력에 의해 결정된다⁽¹⁻³⁾. 여기서 사격충격력은 화기 작동방식에 따라 차이가 발생하긴 하나, 약실에 작용하는 약실압력

† 교신저자: 정희원, 국방과학연구소
E-mail : justinlee@add.re.kr
Tel : (042)821-2769, Fax : (042)823-3400
* 국방과학연구소

및 구경에 의해 지배적으로 결정된다.

$$a_{\text{사격충격가속도}} = \frac{F_{\text{사격충격력}}}{(m_{\text{화기질량}} + m_{\text{탄질량}})} \quad (1)$$

$$= \frac{\pi(d_{\text{구경}}/2)^2 \cdot p_{\text{약실압력}}}{(m_{\text{화기질량}} + m_{\text{탄질량}})}$$

참고로, M16/M203 화기 시스템 사격 시의 사격충격가속도의 이론값 및 측정값은 Table 1과 같으며⁽³⁾, 이론값이 측정값을 근사적으로 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 참고로 사격 시의 총구방향(수평, 상향, 하향) 및 거치조건(어깨, 겨드랑이밀, 허리)에 따라 측정되는 충격가속도값에는 차이가 없음을 참고문헌에서는 기술하고 있다.⁽³⁾

Table 1 Firing shock acceleration of M16/M203 (peak acceleration, half-sine duration time)

Ammunition	Predicted	Measured		
	Longitudinal (barrel axis)	Longitudinal (barrel axis)	Vertical (relative to barrel axis)	Transverse (left-right)
5.56 mm	180 g	250 g , 1 msec.	100 g , 0.5 msec.	100 g , 1 msec.
40 mm	487 g	400 g , 0.5 msec.	250 g , 0.5 msec.	100 g , 1 msec.

3. Pyroshock

Pyroshock은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 폭발장치 및 추진장치 작동 시, 발생하는 구조물의 기계적인 응답특성이다. 폭발장치 및 추진장치가 작동할 경우, 극심한 국부적 압력이 발생되며 순간적인 고주파수의 큰 응력파가 발생하게 된다. 이로 인해 인접한 구조물에는 Fig. 2와 같이 매우 짧은 지속시간을 갖는 매우 큰 가속도 응답이 발생하게 된다. Pyroshock은 고주파수(100 Hz ~ 1 MHz) 성분이 넓은 주파수 대역에 걸쳐 나타나며, 큰 가속도값(300 g ~ 300,000 g)이 20 msec. 이하의 매우 짧은 지속시간을 나타내는 특징을 갖고 있다. Pyroshock은 전자광학장비 내의 chip, relay, circuit card, electronic connector 등에 기능 불량을 유발하며, 유리나 크리스털 같은 취성이 강한 재료가 사용된 부품을 파손시키는 효과를 가져온다. 이러한 pyroshock은 구조물들을 연결하는 조인트나 볼트 결합부를 거치면서 크게 감소되는 특징이 있으므로, NASA에서는 Fig. 3과 같이 구조물들 간의 구조적 결합 방식이나 충격전달경로 변경,

washer 및 shrink tube를 활용한 shock mount 적용 등, pyroshock을 고려한 설계 지침서⁽⁵⁾를 제공하고 있다. Pyroshock은 충격의 강도에 따라 Near-field, Mid-field 및 Far-field로 구분되는데, 세 가지 경우에 따른 최대 가속도 및 관심주파수 대역은 Table 2와 같다. Near-field의 경우 구조물을 타고 전파되는 material stress wave에 의한 응답이 나타나며, Mid/Far-field의 경우에는 여기에 추가로 구조물 자체의 진동응답특성이 중첩되어 나타나는 특징을 갖고 있다. Pyroshock에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌⁽⁴⁾을 참고하면 된다.

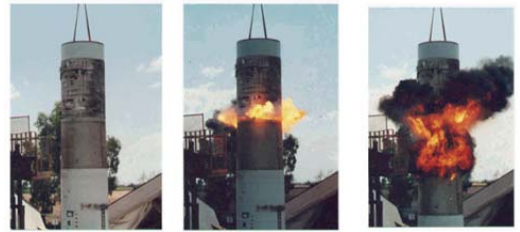


Fig. 1 Example of pyroshock (vehicle separation test)

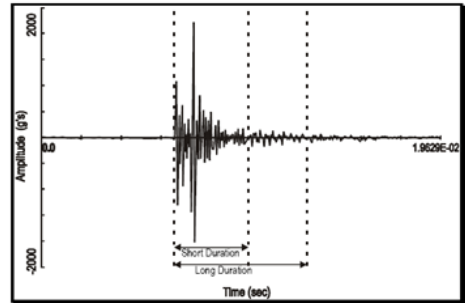


Fig. 2 Example of acceleration due to pyroshock

Table 2 Classification by pyroshock zone

Specification	Zone	Peak Accel. (g)	Max. Freq. (Hz)	Distance from Source (in)	
				Intense Source	Mild Source
NASA STD 7003	Near	> 5,000	> 100 k	< 6	< 1
	Mid	1,000 ~ 5,000	> 10 k	6 ~ 24	1 ~ 6
	Far	< 1,000	< 10 k	> 24	> 6
MIL-STD-810G	Near	> 10,000	> 10 k	-	-
	Mid	< 10,000	3 ~ 10 k	-	-
	Far	< 1,000	< 3 k	-	-

Interface	Percent Reduction
1. Solid Joint	0
2. Riveted butt joint	0
3. Matched angle joint	30 - 60
4. Solid Joint with layer of different material in Joint	0 - 30

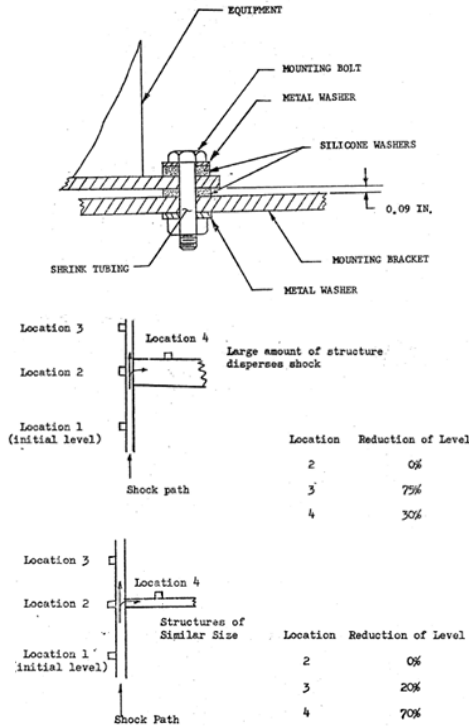


Fig. 3 Some contents from NASA pyrotechnic shock design guidelines manual⁽⁵⁾

4. 충격응답스펙트럼(SRS)분석

SRS는 1960년대 초반에 표준화된 data processing method로 개발되었으며, 미 국방성 및 NASA 등 정부 R&D 관련 연구소에서 최초 사용되었다. 최근 들어 기계적인 충격의 강도를 평가하는데 있어 점차 많이 사용되고 있는 추세이며, SRS 적용은 아래와 같이 크게 두 가지 분야로 나뉜다.

- 지지구조물(Base structure)의 내충격 설계 및 시험
- 지지구조물에 장착되는 장비/부품(component)의 내충격 설계 및 시험

특히 SRS는 pyroshock이 작용하는 지지구조물에 장착되는 장비 및 부품들이 노출되는 충격 환경을

설정하는데 유용하게 활용되며, SRS의 개념은 아래와 같이 요약된다. SRS는 Fig. 4와 같이 지지구조물에 장착되는 다양한 고유진동수를 갖는 1자유도 질량-강성-감쇠 시스템들이 지지구조물에 가해지는 입력 가속도에 어떻게 응답을 나타내는지 예측하는 기법이다.

예를 들어 지지구조물에 50 g, 11 msec.의 반정현 파형의 가속도가 인가되었을 경우, Fig. 5와 같이 각각의 고유진동수(예 : 30, 80, 140 Hz)를 갖는 1자유도 시스템들의 최대 가속도 값들을 구한 후, 1자유도 시스템의 고유진동수 별로 최대 가속도 값을 도시할 수 있다. 이러한 곡선을 SRS 곡선이라고 말하며, 장비의 충격 환경 사양으로 제시된다.

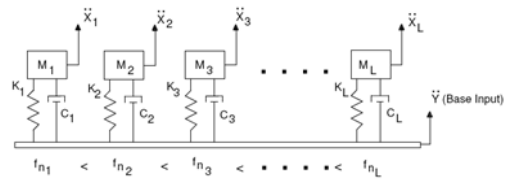


Fig. 4 Mathematical model for SRS

SRS 곡선은 1) Positive SRS (가속도 신호의 + 값들 중에 최대값), 2) Negative SRS (가속도 신호의 - 값들 중에 최소값의 절대값), 3) Maximax SRS (가속도 신호의 절대값 중에 최대값)으로 표현되며, 이중 Maximax SRS가 주로 활용된다. Fig. 6은 본 논문에서 고려된 소구경 화기 사격 시 발생하는 pyroshock 형태의 가속도신호 및 이에 대한 SRS 계산 결과를 예시하고 있다. 참고로 정확한 SRS 계산을 위해서는 아래와 같은 사항들을 반드시 고려해야만 하며, SRS에 대한 상세한 내용은 참고문헌^(4,6-9)을 참고하면 된다.

- 1) Sampling frequency $f \geq 10 \cdot \text{SRS Maximum Analysis Frequency(MAF)}$
- 2) Experimental data offset removal
- 3) Low-pass filtering for anti-aliasing
 $1.5 \cdot \text{MAF} \leq f_c \leq 0.6 f_{\text{Nyquist}} = 0.3f$
- 4) High-pass filtering to remove unwanted/erroneous low-frequency components
 $f_c = \max(2 \text{ Hz}, 0.1 \cdot \text{LAF})$
(LAF : Lowest Analysis Frequency)
- 5) 중요한 shock event + event 전/후 시간데이터들

을 포함하여 $2 \cdot T_e$ 이상의 시간대역 내의 데이터를 이용하여 SRS 계산

(T_e : Effective Shock Duration⁽⁴⁾)

- 6) Selection of SRS Algorithm : Smallwood vs. Kelly-Richman : Smallwood 권고
- 7) 최소 1/12 octave frequency interval로 계산

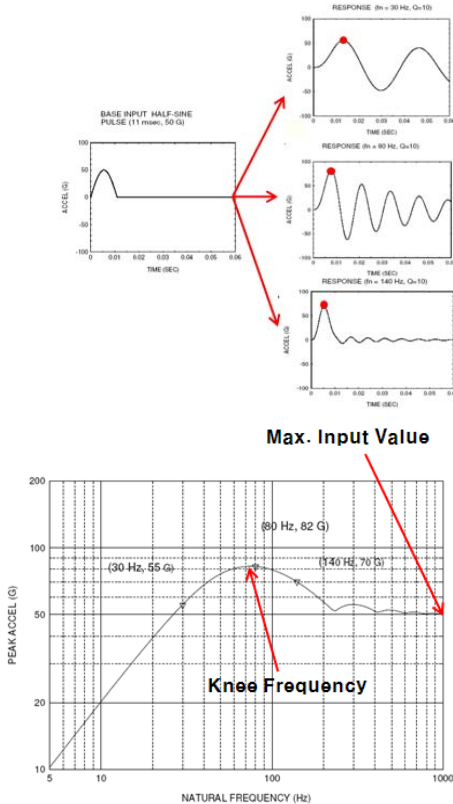


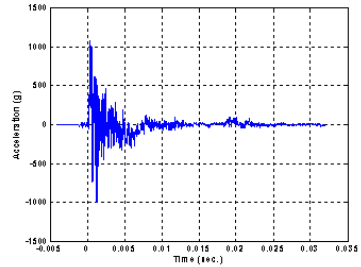
Fig. 5 Example of SRS plot when applying base input half-sine acceleration pulse (50 g, 11 msec.)

5. 충격가속도 측정시험 및 SRS 분석

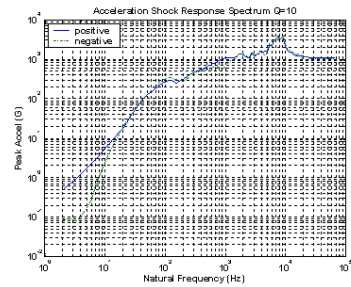
본 논문에서 고려된 소구경 화기의 경우, 전자광학조준경이 장착되고, 고충격의 탄 발사 시 이론적으로 식 (1)에 의해 약 900 g 정도의 사격충격가속도가 발생되며 이는 Far-field pyroshock에 해당된다.

조준경 부품 중, 사격충격에 가장 많은 영향을 받을 것으로 예상되는 특정 부품에 전달되는 사격충격가속도를 실사격을 통해 측정하였다. Fig. 7과 같이 조준경의 특정 부품이 장착되는 부위에 나사산을 가공하여 가속도계(FGPSENSORS XA1100)를 볼트로

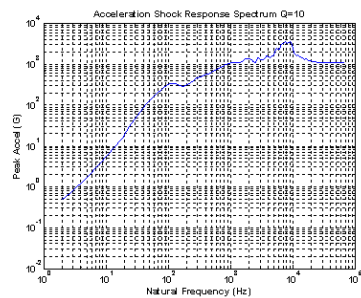
체결하였다. 계측은 DEWE-2010 Signal Measurement System을 사용하였으며, Sampling freq.는 500 kHz, Low pass filtering freq.는 가속도계의 최대 측정 가능 주파수인 10 kHz로 설정하였다. 화기 거치조건 별로 분산도/정확도시험용 마운트(Mount #1), 내구도시험용 마운트(Mount #2) 및 서서좌 견착사격을 실시하였으며, 각 거치조건별로 5발씩 사격을 실시하였다.



(a) Acceleration time history



(b) Positive/negative SRS



(c) Maximax SRS

Fig. 6 Example of SRS plot

실사격 시 조준경 부품에 전달되는 충격가속도는 Table 3과 같이 약 1000 ~ 1100 g 내외, 0.6 msec 수준으로 측정되었다. 측정값은 Far-field pyroshock과 Mid-field pyroshock의 경계 상에 위치하고 있으며, 화기 거치조건에 따라, 측정된 가속도 값에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 측정된 가속도신호를 이용해

여 계산된 SRS 곡선(Q = 10, 1/12 octave frequency interval)은 Fig. 8과 같이, 화기 거치조건에 따라 큰 차이가 없이 일정한 경향을 나타내며, 측정된 모든 가속도신호를 활용하여 계산된 P95/50 upper limit⁽⁴⁾를 기준으로 볼 때 ±3 dB 이내에 대부분의 SRS 곡선들이 포함되고 있다. 이를 통해 실사격 시험 데이터들 간의 일관성을 확인할 수 있었다.

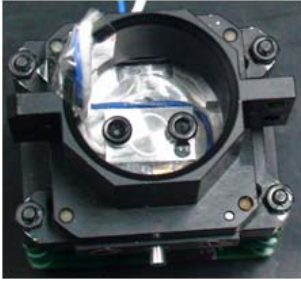


Fig. 7 Acceleration measurement point

Table 3 Mean value of peak shock acceleration by actual firing

Mount Condition	Acceleration (g)
Mount #1	1014
Shoulder-fired (standing)	1059
Mount #2	1110

다음으로 실사격 시의 충격가속도를 실험실 차원에서 모사할 수 있도록 Fig. 9와 같이 낙하충격시험기를 활용한 조준경 충격시험을 실시하였다. 실사격 시험과 동일한 가속도계 및 계측기를 활용하여 동일한 측정위치에서 충격시험을 실시하였다. 충격시험 시, 바닥조건을 일정하게 한 상태에서 낙하높이를 조절하여 시험을 실시하였으며, 높이별로 5회씩 시험을 실시하였다. 조준경 부품 장착면 가속도를 기준으로, 15발의 모든 실사격 충격가속도를 상회하는 충격을 모사하는 낙하높이는 Table 4와 같이 23 cm이었다. 충격시험을 통해 측정된 가속도신호를 이용하여 계산된 SRS 곡선(Q = 10, 1/12 octave frequency interval)의 평균은 Fig. 10과 같으며, 실사격 시험을 통해 획득된 P95/50 upper limit를 기준으로 할 때 낙하높이 23 cm 충격시험조건은 MIL-STD-810G Method 517.1 Pyroshock의 4.2.2. Tolerances 판정기준 (100 Hz ~ 10 kHz 주파수 대역의 최소 90% 대역 이상 -3 ~ +6 dB 이내, 나머지 10% 대역에서는 -6

~ +9 dB 이내, SRS magnitudes의 50% 이상이 nominal test spec.을 초과)을 만족시키고 있다. 따라서, 낙하높이 23 cm로 설정된 조준경 충격시험 조건은 실사격 시의 충격가속도를 잘 모사하고 있는 조건임을 확인하였다. 참고로 군수분야에서는 부체계(조준경) 시험조건을 체계(화기+조준경) 시험조건보다 엄격하게 설정함으로써 체계조립 전에 부체계 레벨에서 발생할 수 있는 품질 이상현상을 충분히 걸러내는 것이 일반적이다.

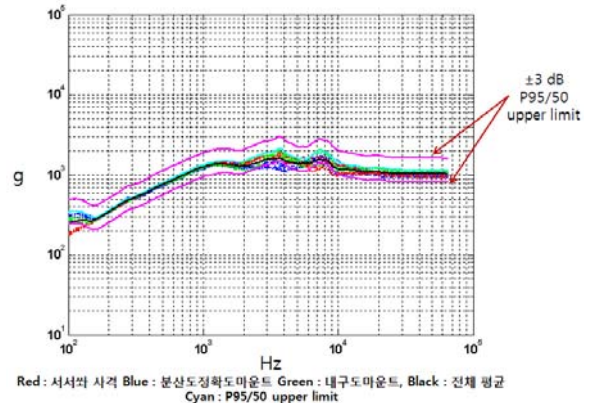


Fig. 8 SRS plot by actual firing



Fig. 9 Drop-table shock tester for scope shock test

Table 4 Mean value of peak shock acceleration by shock test

Drop Height (cm)	Acceleration (g)
29	1664
26	1497
23	1278
20	1103

6. 결론

본 논문에서는 소구경 화기 사격 시, 조준경에 전달되는 사격충격 수준을 평가하기 위해 실사격 및 낙하충격시험기를 활용하여 충격가속도 측정시험을 실시하였으며, 측정된 가속도신호를 이용하여 충격 응답스펙트럼(SRS) 분석을 수행하였다. 이를 통해 실사격 시험조건을 실험실 차원에서 모사할 수 있는 조준경 충격시험조건을 설정할 수 있었으며, 설정된 충격시험조건은 향후 조준경 단품의 충격시험 시 활용될 예정이다.

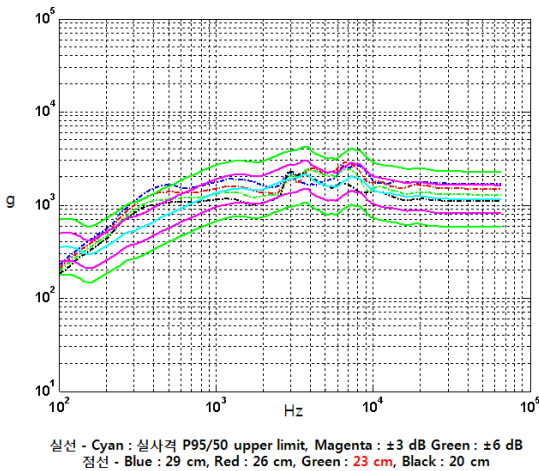


Fig. 10 SRS average plot by shock test

참고 문헌

- (1) Wiland, J. H., 1970, Firing Shock Measurement on the XM21 Rifle System, AD866997, US Army Armament Command
- (2) Wiland, J. H., 1972, Firing Shock Measurement on the M16 Rifle, AD903244, US Army Armament Command
- (3) Goldman, H. I., 1976, Firing Shock Measurement on the M16 Rifle/M203 Grenade Launcher System, AD-A030059, US Army Armament Command
- (4) MIL-STD-810G, 2008, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, US

Army Developmental Test Command

(5) Aerospace Systems Pyrotechnic Shock Data Volume VI, 1970, Pyrotechnic Shock Design Guidelines Manual, CR 116406, NASA

(6) Irvine, T., 2010, An Introduction to the Shock Response Spectrum, www.vibrationdata.com

(7) Hollowell, B. and Smith, S., 1996, A Proposed Method to Standardize Shock Response Spectrum(SRS) Analysis : To Provide Agreement Between Tests Performed at Different Facilities, Journal of the Institute of Environmental Sciences, Vol. 39, No. 3, pp. 19~24

(8) Thomson, W. T., 1981, Theory of Vibration with Applications, Second Edition, Prentice-Hall

(9) TOP-5-2-521, 2007, Pyrotechnic Shock Test Procedures, US Army Developmental Test Command

(10) Kim, I. S., Koo, S. W. and Hwang, C. G., 2004, Determination of Shock Response Spectrum Using FRF of Statistical Energy Analysis Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 551~560

(11) Woo, S. H., Kim, H. B., Moon, S. M., Kim, Y. K. and Kim, G. S., 2003, Shock Separation Test of KOMPSAT-II, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 1000~1005