

소총의 견착 충격력 측정을 위한 Force Transducer 선정과 안전기준 적합성 평가

최시영
국방기술진흥연구소

A Selection of Force Transducer for Measuring Impulsive Force on Shoulder and Evaluation of Safety Standard Suitability

Si-Young Choi
Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT)

요약 소구경화기 사격 시에는 사수 및 화기에 흡수되는 사격 반대방향의 반발력이 발생한다. 과도한 반발력은 사수의 부상뿐만 아니라, 전투 능력을 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 물리적인 양 중 견착 충격력 측정 실험이 필요하며, 2종의 힘 변환기를 이용한 측정에 알맞는 힘 변환기를 선정하였다. 센서 A의 결과는 18.9kN이며, 센서 B의 결과는 5.5kN이다. 이러한 차이가 나는 이유는 센서 A는 ICP가 내장된 voltage 타입으로 센서 자체의 진동과 DC 성분의 노이즈로 인한 것으로 판단된다. 센서 B의 값이 이전 측정된 것과 유사하여, 품질 수준을 확인하기 위해서는 이 센서를 선택하는 것이 타당하다. 두 번째로는 적정 사격발수 선정 통한 안전기준 적합성을 확인하였다. 사격 시 발생하는 순수한 에너지 즉, 충격량과 주퇴에너지를 측정하였다. 충격량은 미 육군 TOP에 따른 진자 시험기에 따라 측정하였고, 그 결과에 따라 주퇴에너지를 계산하였다. 계산된 주퇴에너지는 28.41J이었으며, TOP의 안정성 평가 기준에 따라 사수의 하루 사격 발수는 200발 이내로 제한 됨을 확인하였다. 하지만 절대적인 기준은 아니며, 추후 화기 설계 시 참고자료로 이용되기를 기대한다.

Abstract Firing small arms produces a rearward force that must be absorbed by the shooter or the weapon. Excessive recoil can injure the shooter, degrading combat abilities. In order to select an appropriate sensor for firing tests, we need to measure physical quantities like impulse force in the shoulder and impulses according to TOP by using two different sensors. The result from sensor A is 18.9kN, and from sensor B, 5.5kN. The reasons for the difference are that sensor A (a voltage type with an embedded ICP) is believed to vibrate, and there is noise from the DC component. Since the result of sensor B is similar to previous measurements, it seems reasonable to select that sensor to check quality levels. In addition, pure energy such as impulse and recoil energy generated when firing is measured for safety evaluation. The impulse is measured using the pendulum test suggested by TOP and, based on the result, recoil energy is obtained. The recoil energy is 28.41J, according to the safety evaluation in TOP, so the shooter is limited to firing no more than 200 rounds per day. But this standard is not an absolute value, and is used as a reference for designing small arms or shock-reduction devices.

Keywords : Force Transducer, Impact, Impulse, Recoil Energy, Shock In Shoulder, Small Arms

*Corresponding Author : Si-Young Choi(KRIT)

email: sychoir@krit.re.kr

Received September 5, 2022

Accepted November 4, 2022

Revised October 14, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

소구경화기 사격 시 발생하는 충격은 뉴턴의 제3법칙인 작용-반작용의 법칙에 의해 사격 시 탄압에 의한 반동으로 사수를 뒤로 밀리게 한다[1,2]. 사수는 통상적으로 개머리판을 어깨에 밀착하는 견착 사격 자세를 취하는데, 이때 사수의 체감 반동은 개인마다 다를 수 있지만 누적되면 피로감 증가 등으로 전투력에 영향을 미칠 수 있다[3]. 이러한 충격을 저감시키기 위해서는 화기를 설계할 때 개머리판과 사수의 어깨 사이에 반동판, 완충기 등을 적용하는 등 감쇠 기구를 이용한다. 감쇠기구의 성능 및 효과를 판단하고 사수에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 사격 충격력의 정확한 파악이 중요하다.

본 논문에서는 사격 충격에 관한 두가지 시험을 실시하였다. 첫 번째 시험에서는 두 종류의 힘 변환기(이하 센서)를 이용하여 견착 충격력을 측정하여, 비교해봄으로써 측정에 적합한 센서를 선정하였다.

두 번째는 충격량 측정과 주퇴에너지에 관한 시험이다. 견착 충격력은 사수가 직접 어깨에 가해지는 힘이라고 볼 수 있기 때문에 사수 및 전달 기구의 특성 등에 따라 달라질 수 있다. 반면, 순수하게 화기가 갖는 충격량과 주퇴에너지를 알면 조금 더 객관적이며 비교 가능한 데이터로의 가치가 있을 것으로 판단되고 이 값을 이용하여 미 육군의 TOP(Test Operations Procedure)[4]에 따라 안전성 평가를 실시할 수 있다.

2. 본론

2.1 이론적 배경

2.1.1 충격량(Impulse)

소구경화기의 충격량 측정은 미 육군 시험평가절차서인 TOP 3-2-826(Kinetic test for small arms)에 따른 진자 시험기를 이용하여 측정할 수 있다. 진자의 조화운동에 따른 수평방향의 변위를 x 는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = x_0 \sin \omega t \quad (1)$$

여기서 x_0 는 수평방향 진폭, ω 는 진동수, t 는 시간이다.

진자의 속도 v 는 Eq. (1)을 미분하여 Eq. (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$v = x_0 \omega \cos \omega t = \frac{2\pi x_0}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

여기서 T 는 진자의 주기이다.

충격량은 화기의 격발 전후 운동량의 변화로 나타낼 수 있으므로 Eq. (3)과 같다.

$$I = m_t v_{x2} - m_t v_{x1} \quad (3)$$

여기서, m_t 는 화기와 마운트의 질량, v_{x2} 는 격발 직후의 수평 방향 속도, v_{x1} 은 격발 직전의 수평 방향 속도이다.

Eq. (3)에서 격발 직전의 수평 방향 속도 v_{x1} 을 0으로 가정하고 격발 직후의 수평 방향 속도 v_{x2} 에 Eq. (2)에서의 속도를 대입하면 충격량은 Eq. (4)와 같다.

$$I = \frac{2\pi m_t x_0}{T} (N \cdot s) \quad (4)$$

2.1.2 주퇴에너지(Recoil Energy)

주퇴에너지는 격발에 의해 충격량(I)이 발생할 때 화기가 받는 운동에너지이다. 화기의 질량을 m_w , 격발 후의 화기 속도를 v_{w2} 라고 하면 격발 후 화기의 운동에너지는 Eq. (5)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} m_w v_{w2}^2 \quad (5)$$

화기의 초기속도를 0이라고 할 때, 격발 후 화기속도는 Eq. (3)을 참고하여 다음 식과 같이 충격량과 질량의 비로 나타낼 수 있다.

$$v_{w2} = \frac{I}{m_w} \quad (6)$$

Eq. (6)을 Eq.(5)에 대입하면 주퇴에너지와 충격량과의 관계를 Eq. (7)로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{I^2}{2m_w} \quad (7)$$

2.1.3 힘 변환기(Force Transducer)

힘 변환기는 압전소자(Piezoelectric element)의 특성을 활용한 센서로, 외력에 의해 기계적 응력이 발생할 때 전하를 발생시키는 원리를 이용하여 힘의 크기를 측정할 수 있다. 아래의 Fig. 1의 왼쪽 그림과 같이 응력이 없을 때는 전하는 원자의 중심 존재하며 전기적으로 균형이 유지되지만, 외력이 인가되면 우측 그림과 같이 원자 구조의 변형으로 전하의 불균형이 발생하게 되며 이는 곧 전위차를 유발한다[5]. 압전소자의 이러한 성질을 압전 효과(Piezoelectric Effect)라 하며, 기계적 응력에 비례하여 전하가 발생하는 특징이 있다.

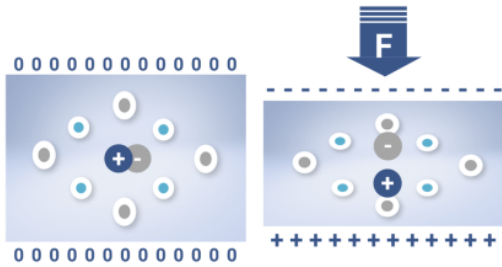


Fig. 1. Mechanism of piezoelectric effect

2.2 견착 충격력 측정 시험

2.2.1 시험장치 구성

견착 충격력은 사수와 화기의 개머리판(Butt Plate) 사이에 센서(Force Transducer 등)를 설치하여 측정할 수 있다. 시험에 사용하는 화기는 볼트액션(Bolt-action) 방식으로 저격총과 같이 사수가 직접 노리쇠(Bolt)를 전진시켜 약실 내 총알을 장전하게 된다. 이때 노리쇠는 정상적인 격발을 위해 총기 내부 노리쇠 뭉치와 총열부 구조에 의해 잠김 상태가 된다. 아래 Fig. 2에서와 같이 탄약이 약실 내에서 폭발하면 총알은 전방으로 발사되며 그 반동에 의해 반대 방향으로의 힘(Recoil Energy)이 발생하고, 총몸에 잠김 상태인 노리쇠에 충격이 전달된다. 충격은 Fig. 2의 전달경로를 따라 화기 후방에 있는 개머리판(Butt)에 도달하게 된다. 이에 따라 사수가 직접 개머리판에 어깨를 대고 측정하는 것은 오차 발생의 소지가 매우 클 것으로 예상되므로, 아래의 Fig. 3의 도식도와 같이 총구 방향과 반대 방향의 마찰이 거의 없는 화기 마운트(Gun Mount)에 화기를 고정하고[6], 개머리판과 마운트 사이에 센서를 설치하여 그 힘을 측정할 수 있다.

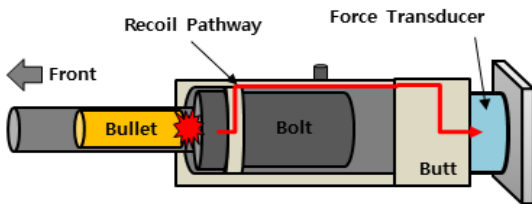


Fig. 2. Firing mechanism and recoil pathway

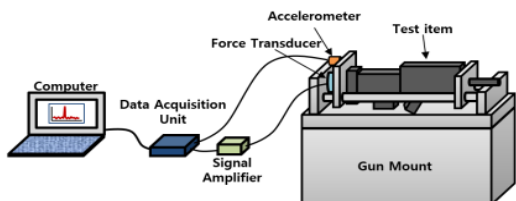


Fig. 3. Test setup for impulsive force measurement

Table 1. Specification of Equipment

Equipment	Maker	Model No.	Serial No.
FFT Analyzer	B&K	Pulse 3053-B12/0	105819
Signal Conditioning Amplifier	PCB	482C54	00000432

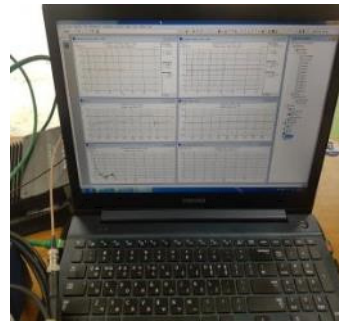


Fig. 4. Monitoring system

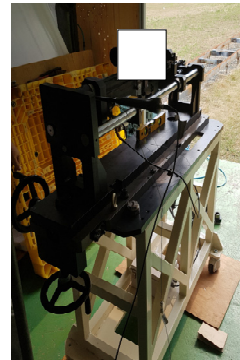


Fig. 5. The picture of gun mount

Fig. 3을 다시 보면 마운트와 화기의 후방부 사이에 설치한 힘 변환기에 신호증폭기(Signal Conditioning Amplifier)를 연결하였으며, 데이터수집장치(FFT Analyzer)를 통해 Fig. 4와 같이 PC로 측정값을 출력할 수 있도록 구성하였다. 신호증폭기와 데이터수집 장치의 제원은 위 Table 1에 나타내었고, 실제로 화기를 설치한 모습은 위의 Fig. 5와 같다.

이번 시험에 사용할 센서는 두 종류이다. 두 모델은 모두 압전소자를 이용한 센서이기는 하나, 센서 A는 Voltage Type으로 힘 변환기 내부에 전하 증폭기가 내장(ICP, Integrated Circuit Piezoelectric)되어 있어 압전소자에 의해 발생된 전하를 전위차의 형식으로 바로 출력이 가능하여 외부 증폭기가 없어도 측정이 가능하다 [7]. 센서 B의 경우 전하로 출력되는 형식이므로 외부 증

폭기를 통하여 신호를 수집하여야 한다. 두 개 센서 제원 표는 아래 Table 2와 같다.

2.2.2 시험 방법

사격 시험은 총 5발에 대하여 각 발당 5초 간격으로 연속 측정하였다. 방아쇠를 당길 때는 사수의 동작으로 인한 간섭을 최소화 하도록 격발끈을 연결하여 1 ~ 1.5m 떨어져서 당기도록 했다. 센서 A, B를 설치한 모습은 우측 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

2.2.3 시험결과 및 분석

센서 A와 B의 측정 결과는 아래 Table 3과 같다. 센서 A에서 계측된 충격력 피크(Peak)의 평균은 약 17.9 kN이며 최대값은 약 18.9 kN이다. 센서 B의 평균값 및 최대값은 약 5.5 kN이며 센서 A에 비해 고르게 나타났으며, 개별 간 측정 되었던 충격력에 근사한 값을 보였다. 센서 A의 견착 충격력 측정 결과는 센서 B에 비하여 약 3배 이상의 높은 수준이다.

Table 2. Specification of sensors

Performance	Sensor A	Sensor B
Compression Range	22.2kN	111.2kN
Sensitivity	0.23mV/N	2pF/N
Natural frequency	12kHz	75 kHz

Table 3. The measuring result of impulsive force on shoulder

I.F. on shoulder(N)	Sensor A	Sensor B	Rounds
Max	18947.9	5536.7	5
Mean	17871.1	5534.7	

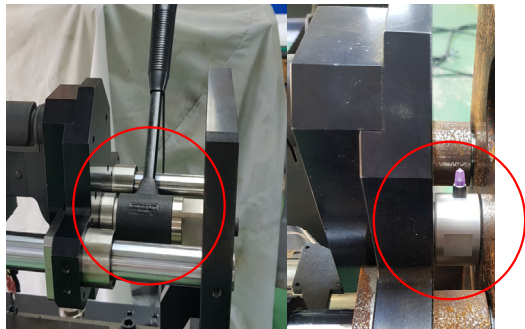


Fig. 6. Installation of two sensors

2.3 총격량 측정 시험

2.3.1 시험장치 구성 및 방법

충격량은 TOP 03-2-826(Kinetic tests for small arms) 에 따라 진행하며 아래 Fig. 7에서 보이는 진자시험기에 아래 Fig. 8과 같이 설치하여 진자의 주기와 수평 변위를 Eq. (4)에 대입하여 계산할 수 있다. 진자의 주기는 질량과 무관하기 때문에 시험품 부착 전 10회 측정하여 평균값을 사용하였다. 진자의 수평 변위는 진자시험기 한쪽에 펜을 부착하여 기록지를 맞대어 수평궤적을 그릴 수 있도록 하였다. 다만 이 수평 변위는 기록지와 펜 등의 마찰에 의해 지속적으로 감소하기 때문에 정확한 계산에 어려움이 있어 마찰력이 선형적으로 감소된다는 가정하에 1/4주기(전방 최대변위), 3/4주기(후방 최대변위)의 값을 외삽하여 구할 수 있다.



Fig. 7. Pendulum tester



Fig. 8. Installation of test item on pendulum tester

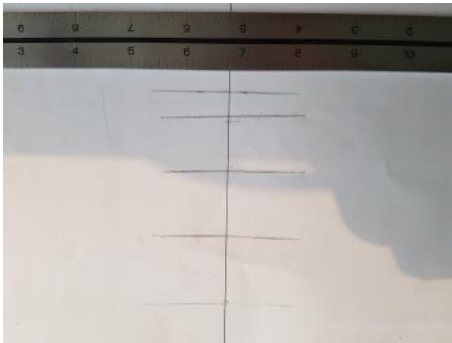


Fig. 9. Trajectory of pendulum

Table 4. The result of pendulum test

Displacement(mm)	Weight(kg)	Period(s)	Rounds
125.7 (Mean)	00.00	2.17	5

Table 5. Impulse of test item

Impulse(N·s)		Form	Rounds
Max	19.66	$I = \frac{2\pi m_w x_0}{T} (N \cdot s)$	5
Mean	19.16		

Table 6. Recoil energy per round

R.E.(J)	Form	Rounds
28.41 (Mean)	$E = \frac{1}{2} m_w v_w^2 = \frac{I^2}{2m_w} (J)$	5

2.3.2 시험결과

위의 Fig. 9는 마운트 측면에 위치한 기록지이다. 격발 시 진자는 작용 반작용 법칙에 의하여 후방으로 이동하여 1/4주기에 도달하게 되며 다시 원점을 지나 3/4주기 지점인 전방 최대변위에 도달하게 된다. 두 값을 바탕으로 외삽한 이동변위는 위의 Table 4와 같고, Eq. (4)에 대입하여 계산한 충격량은 위의 Table 5와 같으며 평균적으로 19.16 N·s의 값을 구할 수 있었다.

2.3.3 주퇴에너지를 통한 안전성 평가

주퇴에너지는 Table 4의 충격량을 활용하여 Eq. (7)에 대입하면 왼쪽의 Table 6과 같이 계산할 수 있다. TOP 03-2-504, 소구경화기 안전성 평가절차의 4.5절

Recoil Energy를 참고하면 아래 Table 7과 같이 사수가 하루에 사격가능한 발수를 제한하고 있다. 본 시험 화기의 주퇴에너지는 28.41J로, 이 표에 따른 사수의 하루 사격발수는 200발로 제한하여야 함을 알 수 있다.

Table 7. Recoil based firing limitations

Calculated Recoil Energy	Limitation on Rounds
Less than 15 ft-lb (20.3J)	Unlimited firing
15 to 30 ft-lb (20.3 to 40.7J)	200 round/day/individual
30 to 45 ft-lb (40.7 to 61.0J)	100 round/day/individual
45 to 60 ft-lb (61.0 to 81.4J)	25 round/day/individual
Greater than 60 ft-lb (81.4J)	No shoulder firing

3. 결론 및 고찰

사격 충격의 정도에 따라 사수의 안전 및 전투 능력에 밀접한 관련이 있다. 그러므로 사격 충격의 정도를 아는 것을 매우 중요한 일이다. 본 논문에서는 충격 관련 물리량 중 견착 충격력 측정을 통해 적합한 변환기를 선정하였으며, 충격량 및 주퇴에너지를 측정을 통해 미 육군의 TOP에 따른 화기의 안전성 평가를 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 견착 충격력은 두 종류의 힘 변환기를 사용하여 측정하고 결과를 비교해보았다. 시험결과, 센서 A에서는 약 17.9 kN, 센서 B에서는 약 5.5 kN의 충격력이 측정되었으며, 개발 간 측정되었던 충격력에 근사하여 품질 보증을 위한 충격력 확인에 적합할 것으로 판단된다. 시험결과 간 큰 차이를 보이는 이유는 센서 A는 사격 충격력에 대하여 DC 성분 노이즈와 센서 자체 공진의 영향에 의해 실제보다 높은 값이 계속되었기 때문인 것으로 판단된다.

2. 충격량은 TOP에 따른 진자시험기를 활용하여 측정하였고 19.16N·s의 결과를 확인할 수 있었다. 이로부터 계산된 주퇴에너지는 28.41J 이었으며, 이는 TOP에서 사수가 하루 200발 이상 사격을 제한하는 수준임을 확인하였다. 이 수치는 사수가 직접 느끼는 인지 정도에 따라 차이가 있어 객관적 판단이 힘든 점은 있으나, 새로운 화기에 대한 설계 시 참고하여 운용 환경에 맞는 충격저감 장치 등을 설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 충격력 측정과 안정성 평가를 실시하였으나 이것에 대한 검증과, 3가지 이상의 센서를 비교하여 결과값을 제시하는 것이 더 객관적인 비교가 될 수 있다는 점에서 그 한계가 있다. 다만 본 연구에서는 품질보증 관점에서 주기적으로 품질 수준을 확인하기 위한 센서의 적합성 문제를 판단하였다. 그러나 연구에서 제시한 방법과 안정성 평가를 통해서 향후 화기 및 충격 저감 장치 등의 설계 시에 필요한 기준을 설정하는 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] J. H. Lee, "Introduction to the Study of the Firing Shock of Small Arms", *KSNVE*, p593-595, Oct. 2013.
- [2] Y. J. Choi, "A study on the human impulse characteristics with the typical shooting posture", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Korea, 459-464, Nov. 2004.
- [3] S. H. Lee, "A study on the structural shooting impact analysis with 3-D beam elements human model", *the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, Korea, pp 1302-1307, 2006, June.
- [4] US Army, Test Operations Procedure(TOP) 03-2-504A Safety Evaluation of Small Arms and Medium Caliber Weapons, 41, US Army Aberdeen Test Center, 2013, p15.
- [5] HBM, force transducer, HBM Company, 2018, <https://www.hbm.com/kr/7318/how-does-a-piezoelectric-force-transducer-work/>, June 2018.
- [6] Benjamin Canfield-Hershkowitz, Rifle and shotgun recoil test system, Technical report, California Polytechnic State University, USA, pp 8-22.
- [7] PCB PIEZOTRONICS, Guide to dynamic force sensors, Technical report, PCB PIEZOTRONICS, USA, pp 1-8.

최 시 영(Si-Young Choi)

[정회원]



- 2011년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (학사)
- 2014년 8월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원 연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

기계설계, 시험/평가, 국방기술기획/품질보증