

M125 부스터 메카니즘의 해석 및 응용

임완권^{*,1),2)} · 김성식¹⁾ · 방재원¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

²⁾ 과학기술연합대학원대학교

Simplified Parametric Study on M125 Booster Mechanism and its Application for Determining the Characteristic Constant of Arming Distance

One kwon Rim^{*,1),2)} · Sung shik Kim¹⁾ · Jae won Bang¹⁾

¹⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ University of Science & Technology, Korea

(Received 4 November 2014 / Revised 14 May 2015 / Accepted 3 July 2015)

ABSTRACT

M125 booster is one of the reliable S&A device(safety and arming device) to determine the arming distance of fuze for gun ammunitions from 90 mm to 8 inch in diameter. And it is also well known that the arming distance of M125 booster is determined by the multiplication value of the gun tube property(traveled distance per turn of projectile) and the S&A device property(number of turns to arm), not by the projectile muzzle velocity. We have tried and succeeded in executing a proper analysis on M125 booster to figure out its characteristic constant of arming distance by considering only the gun tube properties and the S&A device properties. More detailed arming distance will be analyzed in the future by considering dynamic characteristics on all elements in the S&A device with vector analysis.

Key Words : M125 Booster(M125 부스터), Artillery Ammunition(화포 탄약), Safety Distance(안전거리), Safety and Arming Device(안전장전장치), Number of Turns to Arm(신관 장전 회전수)

기 호 설 명

a : 로타축에서 로타 무게중심까지 거리(cm)

d : 포신 직경(mm)

F : 탄 반경방향으로의 로타 원심력(dyne)

I_p : 진동자(pallet)의 관성모멘트($gr\text{-cm}^2$)

K : 장전회전수(number of turns to arm)

m_r : 로타 질량(gr)

n : 겐리버 수(number of calibre)

* Corresponding author, E-mail: okrim@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

- N : 탄의 분당 회전수(rpm)
- N_p : 별형 치차(escape wheel) 원주상 치수
- r : 로타축과 탄회전 축 사이 거리(cm)
- r_p : 진동자(pallet)의 회전축에서 접촉점까지 거리(cm)
- r_w : 별형 치차의 회전축에서 접촉점까지의 거리(cm)
- S : 장전 지연거리(m)
- T_{ew} : 별형 치차의 회전력(dyne-cm)
- T_p : 진동자에 전달되는 회전력(dyne-cm)
- T_r : 로타에서 발생하는 회전력(gr-cm)
- T_{ri} : 초기 로타 회전력(dyne-cm)
- T_{rf} : 최종 로타 회전력(dyne-cm)
- T_{ewi} : 초기 별형 치차에 전달된 회전력(dyne-cm)
- T_{ewf} : 말기 별형 치차에 전달된 회전력(dyne-cm)
- V_S : 탄 반경방향 끝부분에서의 원주 속도(m/sec)
- V : 탄의 포구 속도(m/sec)
- w : 탄의 회전 각속도(rad/sec)
- x : 탄 회전축에서 로타 무게중심까지 거리(cm)
- η : 치차열의 마찰효율
- θ_p : 진동자의 각변위(rad)
- $\dot{\theta}_p$: 진동자의 각속도(rad/sec)
- $\ddot{\theta}_p$: 진동자의 각가속도(rad/sec²)
- θ_{pi} : 진동자의 충돌변위 각(rad)
- θ_{wi} : 별형 치차의 충돌변위 각(rad)
- ϕ : 나선이 포신 축에 대해 이루는 각
- ϕ_{ew} : 별형 치차의 각변위(rad)
- ϕ_r : 로타의 회전각(rad)

1. 서론

M125 부스터는 90 mm 화포부터 8인치 화포까지 사용되는 각종 착발식 신관, 시한신관, 근접신관의 안전장전장치(S&A device)로 사용되고 있다.

작동 특성으로는 탄이 포구를 따라 일정거리를 비행한 후에만 장전이 완료되어 사수의 안전을 보장하고, 그 장전지연거리(S)는 탄의 속도와 무관하고 단지 M125 부스터 내 안전장전장치의 기계적 특성 즉 장전 회전수(K)와 포신 특성 즉 탄 1회전 시 탄 이동거리(nd)의 곱으로만 정의된다. 즉 추진제의 양, 탄 속도에 무관하고 동일 포신이면 항상 같은 장전 지연거리(constant arming distance)를 갖는다. 즉 $S = K \cdot nd$ 로

설명 된다. 기존의 보고서 중에 이와 관련하여 전산해석적 관점에서 다른 참고문헌^[1-4]의 내용을 안전장전장치의 각 부품들의 기계적, 물리적 특성을 반영하여 단순하게 일반화 하였다.

2. 본론

2.1 탄의 회전속도와 선속도의 관계^[5,6]

포신 나선은 포신 축에 대해 다음과 같은 형태를 갖고 있다.

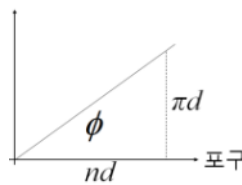


Fig. 1. Fixed rifling angle

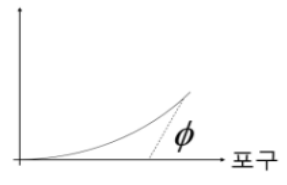


Fig. 2. Incremental rifling angle

포신 구경을 d , 켈리버 수를 n 이라 하면 탄이 1회전 시 움직인 직선거리는 nd 이다.

Fig. 1은 식 (1-1)로 표기된다.

$$\tan\phi = \frac{\pi d}{nd} = \frac{\pi}{n} \tag{1-1}$$

탄자 내의 반경방향 끝부분에서의 원주 속도는 $V_S = V \tan\phi$ 이며 $V_S = W \frac{d}{2}$ 이므로 $V \tan\phi = W \frac{d}{2}$ 가 되고 식 (1-2)가 된다.

$$w = \frac{2 \tan\phi V}{d} \tag{1-2}$$

(1-1)과 (1-2) 식에서 식 (1-3)과 (1-4)가 얻어진다.

$$w = \frac{2V}{d} \frac{\pi}{n} = \frac{2\pi}{nd} V \tag{1-3}$$

$$\frac{V}{w} = \frac{nd}{2\pi} \tag{1-4}$$

그런데, $w = \frac{2\pi}{60} N$ 이므로 식 (1-4)를 고려하면 식

(1-5)가 된다.

$$N = \frac{60}{nd} V \quad (1-5)$$

예로서 40 mm 유탄의 포구속도는 250 ft/sec, nd는 4 feet 이다. 그러므로 탄 회전수는 $N = \frac{60}{nd} V = \frac{60}{4} \times 250' = 3750$ (rpm)으로 산출되며 이는 관련 규격치와 동일한 값을 보인다.

2.2 안전장전장치 작동 해석

Fig. 3과 같이 안전장전장치인 M125 부스터는 로타, 기어, 피니언, 별형 치차, 진동자 등으로 구성된다.

로타 회전중심은 탄 회전중심으로부터 일정 거리로 변위되어 있고 로타 무게중심도 로타 회전중심과 일정 거리로 변위되어 있다. 탄이 포구를 따라 일정 각속도로 회전하게 되면 로타 무게중심에서 탄 회전중심의 반경 방향으로 원심력이 발생되어 로타는 로타 축을 중심으로 회전하게 되고 이 회전력은 치차열을 따라 별형 치차 및 진동자에 전달하게 되고, 진동자의 진동으로 로타의 회전은 지연된다. 따라서 M125 부스터의 장전지연시간이 확보되고, 장전지연거리가 이루어진다.



Fig. 3. Internal structure of safety & arming device

2.2.1 로타에서 발생하는 회전력^[7,8]

Fig. 4에서 로타 회전력은 $T_r = F a \sin B$ 이며 $F = m_r x w^2$ 이다. 여기서, 기하학에서 $\frac{r}{\sin B} = \frac{x}{\sin \phi_r}$ 이므로 로타 회전력은 식 (2-1)이 된다.

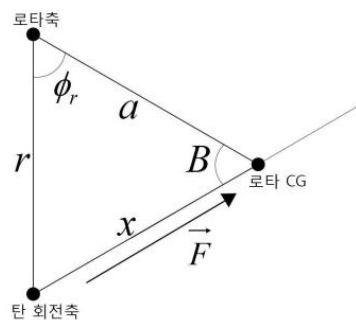


Fig. 4. Mechanism for rotor torque generation

$$T_r = m_r a r w^2 \sin \phi_r \quad (2-1)$$

2.2.2 별형 치차에 전달되는 회전력^[7-9]

로타에서 발생하는 회전력이 치차열을 따라 별형 치차에 전달될 때, 피벗 마찰, 치차 간 마찰, 진동자와 별형 치차간의 충격 마찰 등으로 많은 에너지 감소가 일어난다. 또한 치차열을 따라 전달되므로 별형 치차에 전달되는 회전력 T_{ew} 는 식 (2-2)가 된다.

$$T_{ew} = \frac{\eta T_r}{K_G} \quad (2-2)$$

여기서 K_G 는 기어비이다. 그리고 로타는 ϕ_r 만큼 회전하나 별형 치차의 회전 각변위는 식 (2-3)이다.

$$\phi_{ew} = \phi_r K_G \quad (2-3)$$

따라서 T_r 및 T_{ew} 의 곡선을 그리면 Fig. 5와 같다.

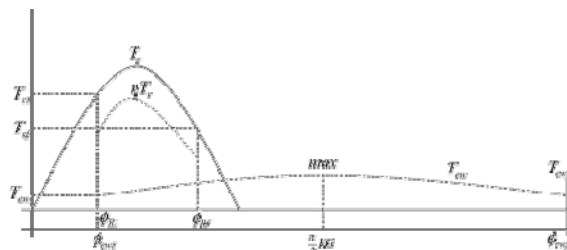


Fig. 5. Angular displacement-torque curves by gear ratio

T_r 은 완전한 sine곡선을 그리나 T_{ew} 는 완만한 곡선을 그린다. 여기서 T_{ew} 는 완만한 곡선을 그리므로

ϕ_{ewi} 에서 ϕ_{ewf} 까지 일정한 회전력 ϕ_m 이 전달된다고 가정할 수 있다.

즉 ϕ_m 을 $\sin \phi_r$ 의 평균값, $\phi_m = \frac{\int_{\phi_{Rf}}^{\phi_{Ri}} \sin \phi_r d\phi}{\phi_{Rf} - \phi_{Ri}}$, 이라고 하면 별형 치차에 전달되는 회전력은 (2-1) 식과 (2-2) 식으로부터 식 (2-4)가 된다.

$$T_{ew} = \frac{m_r arw^2 \phi_m \eta}{K_G} \quad (2-4)$$

2.2.3 진동자의 주기

진동자에 전달되는 회전력과 관련하여 $T_p = I_p \ddot{\theta}_p$, $T_p t = I_p \dot{\theta}_p$, $\frac{T_p t^2}{2} = I_p \theta_p$ 이므로, 왕복운동을 고려한 진동자의 주기는 식 (2-5)가 된다.

$$t = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{2I_p \theta_p}{T_p}\right)} \quad (2-5)$$

별형 치차와 진동자는 짧은 충돌시간 동안 충돌점에서 접선방향의 변위량(호의 길이)의 양은 같다고 가정할 수 있다. 따라서 충돌 변위량은 $r_w \theta_{wi} = r_p \theta_{pi}$ 이고, 이를 정리하면 식 (2-6)이 된다.

$$\frac{\theta_{wi}}{\theta_{pi}} = \frac{r_p}{r_w} \quad (2-6)$$

또한 충돌 시 별형 치차로부터 진동자에 전달되는 에너지는 같으므로 $T_{ew} \theta_{wi} = T_p \theta_{pi}$ 이고, 식 (2-6)을 활용하면 식 (2-7)과 (2-8)이 유도된다.

$$T_p = T_{ew} \frac{\theta_{wi}}{\theta_{pi}} \quad (2-7)$$

$$T_p = T_{ew} \frac{r_p}{r_w} \quad (2-8)$$

(2-8) 식과 (2-5) 식으로부터 진동자의 식 (2-9)가 된다.

$$t = 2 \sqrt{\left(\frac{2I_p \theta_p}{T_{ew} \frac{r_p}{r_w}}\right)} \quad (2-9)$$

(2-4) 식을 반영하면 주기는 식 (2-10)이 된다.

$$t = 2 \sqrt{\frac{2I_p \theta_p K_G}{m_r arw^2 \phi_m \eta \frac{r_p}{r_w}}} \quad (2-10)$$

2.2.4 진동자의 진동수^[7]

진동자의 주기는 별형 치차의 회전수와 별형 치차 원주상 치수에 의해 $f_n = \frac{\phi_{ew}}{2\pi} N_p$ 로 정해지는데 (2-3) 식에 의해 식 (2-11)이 된다.

$$f_n = \frac{\phi_R K_G}{2\pi} N_p \quad (2-11)$$

2.2.5 장전 지연시간^[7]

안전장전장치의 장전 지연시간은 진동자의 진동수와 진동자의 주기의 곱이므로 식 (2-10)과 (2-11) 식으로부터 식 (2-12)가 주어진다.

$$t = \frac{\phi_R K_G}{2\pi} N_p 2 \sqrt{\frac{2I_p \theta_p K_G}{m_r arw^2 \phi_m \frac{r_p}{r_w} \eta}} \quad (2-12)$$

2.2.6 장전 지연거리^[5,7]

안전장전장치의 장전 지연거리(S)는 포구속도(V)와 장전 지연시간의 곱이므로 식 (2-12)로부터

$$S = V \left(\frac{\phi_R K_G}{2\pi} N_p 2\right) \sqrt{\frac{2I_p \theta_p K_G}{m_r arw^2 \phi_m \frac{r_p}{r_w} \eta}} \\ = \frac{V}{w} \frac{\phi_R K_G}{\pi} N_p \sqrt{\frac{2I_p \theta_p K_G}{m_r ar \phi_m \frac{r_p}{r_w} \eta}}$$

가 되며 여기에 (1-4)식을 고려하면 장전 지연거리는 식 (2-13)이 된다.

$$S = \frac{nd}{2\pi} \frac{\phi_R K_G^{\frac{3}{2}}}{\pi} N_p \sqrt{\frac{2I_p \theta_p}{m_r ar \phi_m \frac{r_p}{r_w} \eta}} \quad (2-13)$$

이를 정리하면 식 (2-14)가 된다.

$$S = nd \frac{\phi_R K_G^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2} N_p \sqrt{\frac{2I_p \theta_p}{m_r a r \phi_m \frac{r_p}{r_w} \eta}} \quad (2-14)$$

여기서 S 는 장전 지연거리 이고, nd 는 탄 1회전 시 탄 이동거리로서 포신 상수이고 나머지 요소는 모두 안전장전장치(S&A device)의 기계적 성질이며 모두 상수들이다. 이를 신관의 장전회전수(K : number of turns to arm)로 불린다.

M125 부스터의 장전지연거리는 식 (2-14)에서 보는 바와 같이 포신 특성(nd)와 신관 안전장전장치의 특성(K : Number of turns to arm)의 곱으로 정의되므로 이 결과를 105미리 포탄, 155미리 포탄, 90미리 포탄에 적용할 경우 식 (2-15)가 된다.

$$K_{M25} = \frac{S_{105}}{(nd)_{105}} = \frac{S_{155}}{(nd)_{155}} = \frac{S_{90}}{(nd)_{90}} \quad (2-15)$$

이 정의될 수 있다.

3. 결과 분석

참고문헌^[1-4]은 로타, 치차, 별형 치차, 진동자와 같은 회전요소 들의 관성모멘트, 각속도, 각가속도 등과 별형 치차와 진동자 간의 충돌시 연계비(linkage ratio)를 고려하여 비선형적인 지배식을 도출하고 이를 실험치와 전산해석결과와 비교 분석하였다. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 $\sin \phi_r$ 의 평균값(ϕ_m)을 적용하였고, 별형 치차와 진동자 간의 충돌은 극히 짧은 시간동안 지속되고 되튀므로 연계비를 고려하지 않고 충돌 순간의 접선 방향 변위를 서로 동일한 것으로 가정하여 (2-6)식을 도출하였다. 이와 같은 과정을 통해 선형적인 지배식인 (2-12) 식을 도출하였다.

식 (2-14)을 보면 장전지연장치의 구동을 일으키는 힘 또는 에너지를 발생하는 요소인 로타 질량, 로타축에서 로타 무게중심까지의 거리, 로타축과 탄 회전축 사이 거리, 별형 치차와 진동자에서 각각 회전축에서 접촉점까지의 거리, 기계적 마찰 등의 값의 증가에 따라 장전지연거리가 증대하는 것을 보여 주고 있다.

또한 진동자의 관성모멘트, 진동자의 각 변위의 값이 증가하면 장전거리가 증대됨을 알 수 있다. 기어비(K_G)는 지배적으로 장전거리에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

장전지연 거리를 변경해야 할 경우 탄 1회전 시 탄 이동거리(nd)는 수정할 수 없는 상수이고, 나머지 안전장전장치 중 대부분의 부품도 제작성을 고려할 경우 설계를 용이하게 바꿀 수 없는 상수들이다. 다만 진동자의 관성모멘트(I_p) 및 로타 질량(m_r)은 비교적 변경이 용이한 변수이다. 이들 값을 용이하게 변경하기 위해 재질의 변경(질량 변경, 이에 따른 관성모멘트 변경), 두께, 형상 변경 등에 의한 관성모멘트의 변경 등을 용이하게 할 수 있다. 이러한 점은 추후 기본적인 안전장전장치를 개발한 후 타 용도로 장전지연거리를 수정할 필요가 있을 경우 쉽게 응용할 수 있다고 본다.

4. 결론

중대구경 화포용 신관에 장착되는 안전장전장치의 장전 지연거리는 탄의 속도와 무관하고 단지 안전장전장치의 기계적 특성(장전회전수)과 포신의 특성(탄 1회전시 탄 이동거리)의 곱으로만 정의된다. 추진체량 즉 탄속에 무관하고 동일 포신이면 항상 같은 장전지연거리를 갖는다. 이러한 기술적 특성을 안전장전장치인 M125 부스터의 기구와 포신과 탄의 상호 연동성을 연결하여 증명하였다. 유사한 내용을 전산해석적 관점에서 다른 참고문헌^[1-4]에서 안전장전장치의 각 부품들의 기계적, 물리적 특성을 보다 단순하게 일반화하였다.

실제 발사 시 안전장전장치 내 요소들은 매우 고속 충돌을 한다. 따라서 각 요소들 간의 충돌, 반발, 충돌 마찰 등 벡터(Vector)적 요소, 즉 입체적 요소들을 고려해야하나, 본 논문에서는 단순화하여 요소들의 스칼라(scalar) 량만을 고려하여 분석하였다. 추후에 이런 벡터적 요소를 고려한 정확한 해석이 필요하다고 본다. 본 논문에서 제시한 결과는 추후 중대구경 탄약의 안전거리를 결정하거나, 원하는 안전거리를 용이하게 확보하기 위해 안전장전장치 내 주요 부품의 물리적, 기계적 요소에 대한 설계 변경에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] David L. Overman, "Analysis of M125 Booster Mechanism," HDL-TR-1550, Harry Diamond Laboratories, June 1971.
- [2] G. G. Lowen, F. R. Tepper, "Dynamic of Pin Paet Runway Escapement," Technical Report, ARLCD-TR-77062, US ARMY Armament Research and Development Command. June, 1978.
- [3] C. W. Janow, F. R. Tepper "Derivation of the Kinematic Properties of the Pin Runway Escapement," Technical Report, ARLCD-TR-79019, US ARMY Armament Research and Development Command. October, 1979.
- [4] G. G. Lowen, F. R. Tepper, "Computer Simulations of Artillery S&A Mechanism(Involute Gear Train and Pin Pallet Runway Escapement)," Technical Report, ARLCD-TR-81039, US ARMY Armament Research and Development Command. July, 1982.
- [5] "Gun Series-Tubes," Engineering Design Handbook, AMCP 706-252, Army Material Command, Head Quarter U.S., 1969.
- [6] "Operation and Function of the M203 Grenade Launcher" FM3-22.31, Headquator of U.S. Army.
- [7] "Ammunition Series-Fuzes," Engineering Design Handbook, AMCP 706-210, Army Material Command, Head Quarter U.S., 1969.
- [8] Louis P. Farace, "Rotor Starting Torque Improvement Modification," Report R-2001, Frankford Arsenal, Mar. 1971
- [9] Nicolas J. Ranalli, "Production Engineering of the M125A1E3 Booster," Report 6011, Feb. 1971.