

연식주퇴 시스템의 전방운동량에 관한 연구

A Study on the Forward Momentum of a Soft Recoil System

박 선 영* 배 재 성** 황 재 혁** 강 국 정*** 안 상 태***
 Sun-Young Park Jae-Sung Bae Jai-Hyuk Hwang Kuk-Jeong Kang Sang-Tae Ahn

Abstract

A soft-recoil or FOOB (Fire-Out-Of-Battery) system can reduce the recoil force considerably. Its firing sequency is different from that of a conventional or FIB (Fire-In-Battery) system. In FOOB system, the gun is latched and preloaded in its battery position prior to firing. When unlatched, the gun is accelerated to the forward direction and then the forward momentum of the recoil part is generated. Since this momentum reduces the recoil impulse, the recoil force will decrease significantly. When designing the soft-recoil system it is important to design the forward momentum profile of a recoiling part. In the present study, the method to determine the forward momentum has been studied and its optimum value has been obtained theoretically. The numerical simulation of the soft-recoil system is performed to show that the present soft-recoil system works functionally well.

Keywords : 연식주퇴(Soft Recoil), FOOB(Fire-Out-Of-Battery), FIB(Fire-In-Battery), 전방운동량(Forward Momentum)

1. 서론

사거리 연장 및 관통력 향상 등 화력증대요구에 부응하기 위해 포구에너지가 증대된 포신을 경량화된 플랫폼에 탑재하기 위해서는 사격충격력의 크기를 기존에 비해 경감시킬 수 있는 새로운 개념의 주퇴제어기술 개발이 필요하다.

기존의 주퇴 시스템은 Fig. 1과 같이 주퇴부가 정지 상태에서 추진제가 점화되어 가스압력에 의해 탄체와

주퇴부(recoil part)를 상반된 방향으로 가속시킨다(FIB : Fire-In-Battery). 가속된 주퇴부는 주퇴 시스템에 의해 제공된 저항력에 대항하여 그 속도가 0이 될 때까지 감속된다. 정지된 주퇴부는 복좌 시스템(recuperator)에 저장된 에너지에 의해 원래의 사격위치로 복귀한다.

이와 달리 연식주퇴(soft recoil) 시스템은 주퇴부가 발사 전 latch에 의해 전하중(preload)을 받은 상태에서 latch가 풀리면서 전방으로 가속하게 되어 주퇴부는 전방 운동량(forward momentum)을 가지게 된다. 이러한 전방 운동량은 추진제 연소에 의한 충격력과 반대방향향이 되고, 이로 인해 주퇴력과 주퇴거리가 감소하게 된다.

연식주퇴 개념의 최초 적용^[1,2]은 1906년 프랑스의 “Schneider-Ducrest cannon 65 de Montagon Model”로 알려져 있으며, 미국의 경우는 50년이 지난 후, Rock

† 2010년 7월 16일 접수~2010년 10월 22일 게재승인

* 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원

** 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

*** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 배재성(jsbae@kau.ac.kr)

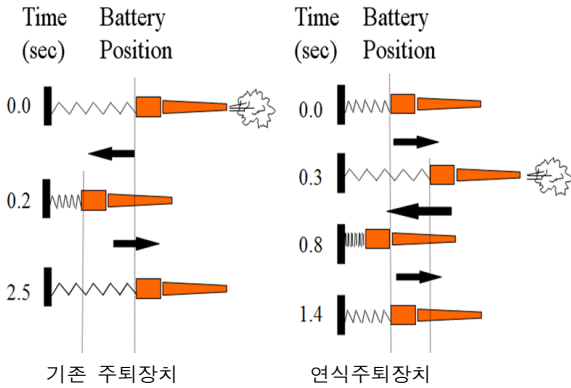


Fig. 1. 주퇴장치의 개념도

Island Arsenal에 의해서 M101 견인포에 연식주퇴의 개념이 처음 적용되었다. ER유체(Electro-Rheological Fluid)가 사용된 댐퍼를 적용한 연식주퇴장치의 시제품인 Viper가 1990년대 중반에 RIA(Rock Island Arsenal)사에 의해 개발되었다. 국내에서는 황재혁 등^[3]에 의해 사격 충격력 저감을 위한 연식주퇴 시스템에 대한 기초연구가 이루어졌고, 신철봉 등^[4,5]이 독립형 주퇴장치와 연식주퇴 시스템 동특성 및 오류모드 제어에 대한 연구가 수행되었다.

연식주퇴 시스템 개발에 있어서, 추진제 폭발에 의한 사격충격력 감소는 주퇴부의 전방운동량에 의해 이루어지므로 이에 대한 설계가 매우 중요하다. 추진제 폭발전 주퇴부의 전방운동량을 크게 할수록 사격 충격력은 감소시킬 수 있으나, 너무 큰 경우 발사위치(battery position)로 복좌할 수 없거나, 너무 큰 전방가속력을 필요로 하며, 전방가속 거리 및 전방 가속을 위한 장치의 용량도 증가할 수 있다. 따라서, 연식주퇴 시스템 설계에 있어서 사격충격력을 최대한으로 감소시킬 수 있는 최적의 전방운동량(forward momentum)을 결정할 필요가 있다.

본 연구에서는 연식주퇴시스템 설계를 위한 전방운동량 결정방법에 대해 연구를 수행하였다. 연식주퇴 시스템의 최적의 전방운동량을 수학적으로 결정하고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하여 최적의 전방운동량을 결정하였다.

2. 연식주퇴 시스템의 전방운동량 결정

연식주퇴 시스템은 주퇴부(recoiling part)에 가해지는

breech force에 의한 충격량은 전방운동량만큼 감소하게 된다. 따라서, 연식주퇴 시스템 설계의 첫 단계는 전방운동량을 격발 후 발생하는 breech force에 의한 충격량의 몇 %로 결정하는 것이다. 본 절에서는 연식주퇴 시스템의 전방운동량 결정하는 방법에 대해 기술하였다.

총주퇴저항력 $K(t)$ 를 일정한 값으로 가정하면, 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x} = K(t) \quad (1)$$

여기서, M 은 주퇴부의 질량, \ddot{x} 은 주퇴가속도, $K(t)$ 는 총주퇴저항력을 의미한다.

breech force에 의한 충격량 및 총주퇴저항력에 의한 충격량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_B = \int B(t)dt \quad (2)$$

$$I_K = \int_0^{T_1} K(t)dt = K_0 T_1 \quad (3)$$

여기서 $B(t)$ 와 T_1 은 각각 breech force와 주퇴종료 시간을 나타낸다. 식 (3)에서 총주퇴저항력의 크기는 식을 간소화하기 위해 일정한 값 K_0 로 가정하였다.

전방운동량과 breech force에 의한 충격량의 비 a 는 전방운동량을 결정하는데 중요한 변수(parameter)이며, 다음과 같이 정의하였다.

$$a = \frac{Mv_0}{I_B} \quad (4)$$

여기서, v_0 는 주퇴부의 전방속도를 나타내며, Mv_0 는 주퇴부의 전방운동량을 의미한다.

가. FIB시스템

연식주퇴 시스템의 전방운동량을 결정하기 위해 FIB 시스템의 총주퇴저항력을 먼저 계산하였다. FIB 시스템에서는 breech force의 충격량과 총주퇴저항력에 의한 충격량이 동일하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_1 = \frac{I_B}{K_0} \quad (5)$$

식 (1)에서 총주퇴저항력만 존재하는 것으로 가정하였으므로 가속도를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{K_0}{M} \quad (6)$$

가속도가 일정하고, 초기속도가 없으므로, 식 (6)을 적분하면 다음과 같이 주퇴변위에 대해 표현할 수 있다.

$$x_1 = \frac{1}{2} \ddot{x} T_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{K_0}{M} \right) \left(\frac{I_B}{K_0} \right)^2 = \frac{I_B^2}{2MK_0} \quad (7)$$

식 (7)로부터 FIB시스템의 총주퇴저항력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_0 = \frac{I_B^2}{2Mx_1} \quad (8)$$

나. 연식주퇴장치가 주퇴하는 경우

연식주퇴 시스템에서 breach force의 충격량은 전방 가속에 의한 운동량과 총주퇴 저항력에 의한 충격량의 합과 동일하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_0 T_1 = I_B - Mv_0 \quad (9)$$

전방운동량과 breach force에 의한 충격량의 비를 이용하여 주퇴시간을 표현하면 식 (9)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_1 = \frac{I_B}{K_0} (1-a) \quad (10)$$

FIB시스템의 경우와 동일한 방법으로 주퇴변위를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{2} \ddot{x} T_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{K_0}{M} \right) \left(\frac{I_B}{K_0} (1-a) \right)^2 \\ &= \frac{I_B^2}{2MK_0} (1-a)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 연식주퇴 시스템의 주퇴 시 총주퇴저항력은

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_0 = \frac{I_B^2}{2Mx_1} (1-a)^2 \quad (12)$$

여기서 전방가속 운동량의 정도를 표현하기 위한 중요한 변수 η 는 다음과 같이 정의할 수 있으며, 이는 FIB시스템의 총주퇴저항력과 연식주퇴 시스템의 총주퇴 저항력의 비를 의미한다.

$$\eta = \frac{K_{FOOB}}{K_{FIB}} = \left[\frac{I_B^2}{2Mx_{1_{FOOB}}} (1-a)^2 \right] / \left[\frac{I_B^2}{2Mx_{1_{FIB}}} \right] \quad (13)$$

다. 연식주퇴시스템이 전방가속하는 경우
전방 가속력 F_0 가 일정하다고 가정하면, 전방가속 시간 T_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_0 = \frac{aI_B}{F_0} \quad (14)$$

주퇴부가 전방가속 운동을 하는 경우, 전방가속거리 x_0 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_0 = \frac{1}{2} \ddot{x} T_0^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_0}{M} \right) \left(\frac{aI_B}{F_0} \right)^2 = \frac{a^2 I_B^2}{2MF_0} \quad (15)$$

전방가속거리와 주퇴거리가 동일하다고 가정하면, 식 (11)과 식 (15)로부터 전방가속을 포함한 연식주퇴 시스템의 총주퇴저항력 K_{FOOB} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{FOOB} = K_0 \left[1 + \left(\frac{a}{1-a} \right)^2 \right] \quad (16)$$

식 (8)과 식 (16)으로부터 FIB시스템의 총주퇴 저항력과 연식주퇴 시스템의 총주퇴 저항력의 비 η 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = 2 \left(a - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \quad (17)$$

식 (17)에서 전방운동량과 breach force에 의한 충격

량의 비 a 가 $\frac{1}{2}$ 일 때 총주퇴 저항력의 비의 최소값 $\frac{1}{2}$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서, 총 주퇴저항력을 최소화하기 위해 전방 운동량을 breech force의 충격량의 50%로 결정해야 함을 알 수 있다.

3. 연식주퇴 시스템 설계 및 해석

연식주퇴 시스템은 전방운동량을 발생시킴으로서 추진제 연소 후 사격충격력을 감소시키는 주퇴개념이다. 앞 절에서 전방운동량과 breech force에 의한 충격량의 비가 $\frac{1}{2}$ 일 때 총주퇴저항력의 비가 최소가 됨을 알 수 있었다.

연식주퇴 시스템의 전방가속력을 스프링에 의해 발생시킨다고 가정하면, 스프링 계수는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\frac{1}{2}kx_0^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}k(x_0 + x)^2 \quad (18)$$

$$k = \frac{mv_2^2}{2xx_0 - x^2} \quad (20)$$

가. 연식주퇴 시스템의 전방운동량 결정

오리피스 설계는 먼저 breech force와 총주퇴저항력을 결정하여야 한다. Fig. 2는 breech force를 보여준다.

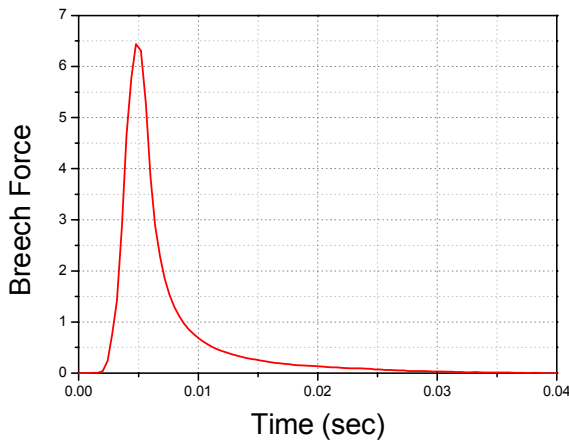


Fig. 2. breech force에 대한 곡선

본 연구에서는 총주퇴저항력 곡선을 Fig. 3과 같이 정의하였으며, 총주퇴저항력 곡선은 K_1 , K_2 , K_0 , t_r 의 값들로 의해 정해진다⁵⁾.

사격위치(battery position)에서의 주퇴저항력 K_1 은 시작점에서의 압축저항력과 마찰력등의 합으로 나타나며, 사격종료위치에서의 주퇴저항력 K_2 는 주퇴종료 위치인 주퇴장에서의 압축저항력과 마찰저항력 등의 합으로 나타낸다. 최대 주퇴저항력 K_0 와 주퇴종료시간 t_r 을 결정하면 Fig. 3과 같은 총주퇴저항력 곡선을 결정할 수 있다. 앞 절에서 구한 스프링 계수를 이용하여 연식주퇴 시스템의 총주퇴저항력을 구하였다.

Fig. 4는 전방가속 운동량이 breech force충격량의 50%일 때 총주퇴저항력 곡선을 보여준다. 총주퇴저항력 곡선 아래의 면적은 breech force 충격량의 50%와 동일하다. 전방가속 운동량의 크기를 충격량의 50%로 가정할 경우 사격위치에서의 주퇴저항력과 종료위치에서의 주퇴저항력이 상대적으로 크기 때문에 주퇴하는 동안 스프링만에 의한 주퇴력의 충격량보다도 작게 된다. 이는 전방으로 가속된 주퇴부는 latch 위치로 복귀할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서, 전방가속 운동량이 breech force 충격량의 50%가 되는 것은 주퇴력이 일정하다는 가정하에서 해석적으로 최소의 총주퇴저항력을 발생시키지만, 전방가속 및 주퇴운동 시의 마찰력 등, 고려하지 않은 요소들로 인해 50%보다 작게 설계되어야함을 알 수 있다.

Fig. 5는 다양한 전방가속운동량에 대한 총주퇴저항력곡선을 보여준다. Fig. 5로부터 전방가속운동량이 약

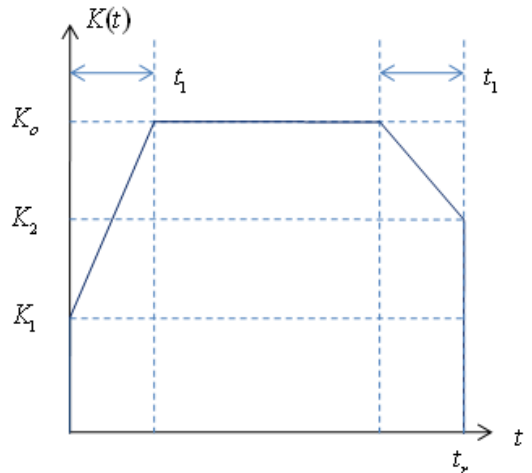


Fig. 3. 가정된 총주퇴저항력 곡선

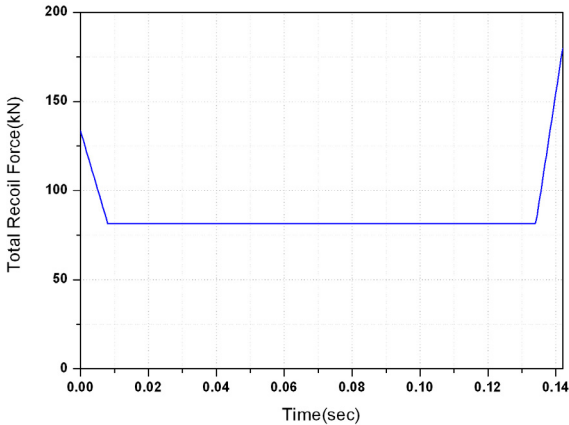


Fig. 4. a 가 1/2일 때 총주퇴저항력 곡선

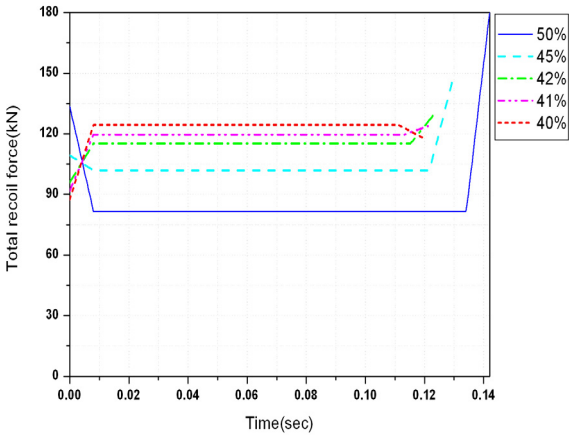


Fig. 5. 전방운동량에 따른 총주퇴저항력 곡선

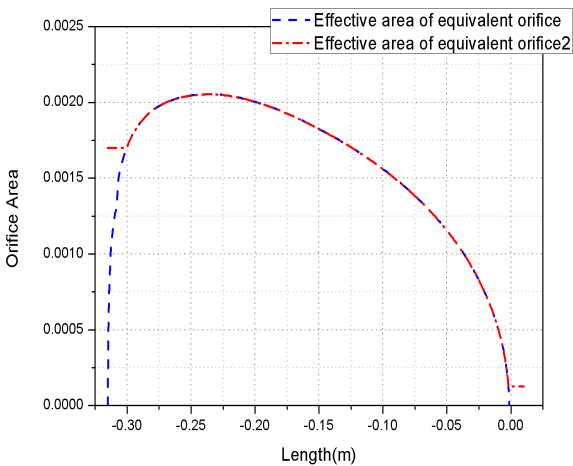


Fig. 6. 연식주퇴시스템의 등가오리피스 유효면적

40%부터 가정된 총주퇴저항력 곡선과 유사한 형태로 나타남을 알 수 있다. 따라서, breech force 충격량의 40%에서 등가오리피스 유효면적을 설계하는 것이 타당함을 알 수 있다. Fig. 6은 본 연구에서 전방운동량이 40%로 가정하였을 경우 설계된 연식주퇴 시스템의 등가오리피스 유효면적을 보여준다³⁾. 본 연구에서는 Fig. 6의 등가오리피스 유효면적을 사용하여 연식주퇴 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다.

나. 연식주퇴 시스템의 해석결과

연식주퇴의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x} = B(t) - K(t) + W_r \sin\theta \tag{21}$$

여기서 W_r 은 주퇴부의 무게, θ 는 사격고각을 나타낸다.

식 (21)에서 총주퇴저항력 $K(t)$ 를 오리피스 저항력, 복좌저항력, 마찰력³⁾으로 표현하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} = B(t) - pA - k(x + x_0) - F_f + W_r \sin\theta \tag{22}$$

여기서 p , A , x_0 , F_f 은 각각 유체압력, 실린더 면적, 초기압축변위, 마찰력을 나타낸다. 유체압력 p 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다³⁾.

$$p = \frac{M_b \left(A\dot{x} - a_c \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \right)}{(V_{in} - Ax)} \tag{23}$$

여기서 M_b , ρ , V_{in} 은 각각 체적탄성계수, 유체밀도, 유체의 초기체적을 나타낸다. 식 (22)와 식 (23)을 시간적분하여 연식주퇴 시스템의 주퇴거리, 속도, 주퇴력 등을 구할 수 있다.

Fig. 7은 연식주퇴 시스템의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 경우는 전방운동량이 breech force에 의한 충격량의 40%로 가정하여 해석한 결과이다. 전방운동량이 40%로 설계된 경우 연식주퇴 시스템의 주퇴부가 전방 가속, 주퇴, 및 복좌가 잘 이루어지고 FIB 시스템⁶⁾에 비해 주퇴속도 및 주퇴기의 감쇠력이 상당히 감소함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 연식주퇴 시스템이 기존의 주퇴시스템에 비해 사격충격력을 상당히 감소시킴을 알 수 있다.

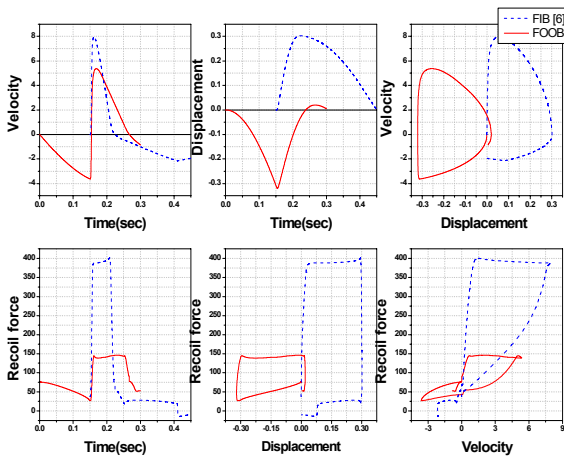


Fig. 7. 연식주퇴 시스템의 시뮬레이션 결과

4. 결론

연식주퇴 시스템에 있어서 주퇴부의 전방운동량은 breech force에 의한 충격력을 감소시켜 사격충격력을 감쇠시킨다. 본 연구에서는 연식주퇴 시스템의 설계에 있어서 전방가속 운동량을 결정하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 FIB 및 FOOB 시스템에 대한 사격충격량을 수학적으로 유도하여 최적의 전방운동량을 결정하였다. 수학적으로 전방운동량이 breech force에 의한 충격량의 50% 일 때, 총주퇴 저항력이 최소가 됨을 증명하였다. 그러나, 실제적으로는 마찰력 등에 의한 저항력을 고려하지 않았기 때문에, 약 40%일 때 가장 적합한 것을 알 수 있었다. 따라서, 연식주퇴 시스템의 전방운동량 설계에 있어서 본 연구에서는 전방운동량을 breech force에 의한 충격량의 40%로 결정하여 연식주퇴 시스템을 설계하였다. 이를 바탕으로 설계된 오리피스 유효면적을 이용하여 연식주퇴 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 연식주퇴 시스템이 잘 작동함을 알 수 있었고, FIB

시스템에 비해 사격충격력이 상당히 감소함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원(ADD-07-05-02)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Michael C. Nerdahl, Jerry W. Frantz, "Mathematical Models for Engineering Analysis and Design Howitzer, Light, Towed : 105mm Soft Recoil, XM204", Artillery Weapon Systems Directorate Weapons Laboratory-Rock Island U.S. Army Weapons Command, 1973.
- [2] Harvey Garver, "Design and Firing Tests of a Firing Out-Of-Battery Recoil Mechanism", Rock Island Arsenal, 2003.
- [3] 황재혁, 배재성, "사격충격력 저감을 위한 연식주퇴 제어 모델링 기법 연구", 국방과학연구소, ADDR-519-081862, 2009.
- [4] 신철봉, 배재성, 황재혁, 강국정, "연식주퇴 시스템의 동적 특성 해석", 한국군사과학기술학회 논문집, 제11권 제4호, pp. 13~19, 2008.
- [5] 신철봉, 배재성, 황재혁, 강국정, 안상태, 한태호, "사격충격력 저감을 위한 연식주퇴계의 제어", 한국소음진동공학회 논문집, 제18권 제7호, pp. 764~774, 2008.
- [6] 박선영, "사격충격력 저감을 위한 연식주퇴시스템 설계에 관한 연구", 한국항공대학교, 석사학위논문, 2010년.