

마찰 스프링을 이용한 주퇴복좌기 설계 연구[§]

김영선*·김성수**†·차기업***·노명규**

* 충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스공학과 대학원, ** 충남대학교 메카트로닉스공학과, *** 국방과학연구소

Study on Designing Recoil System with Friction Springs

YoungSeon Kim^{*}, Sung-Soo Kim^{**†}, Ki-up Cha^{***} and Myounggyu D. Noh^{**}

^{*} Graduate School of Mechanical·Mechanical Design-Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

^{**} Dept. of Mechatronics Engineering in Chungnam Nat'l Univ., ^{***} Agency for Defense Development

(Received July 6, 2010 ; Revised February 1, 2011 ; Accepted February 1, 2011)

Key Words : Recoil System(주퇴복좌 시스템), Friction Spring(마찰 스프링)

초록: 마찰 스프링은 부하가 가해질 때와 가해지지 않을 때 서로 다른 특성을 가지고 있다. 마찰 스프링의 이러한 특성으로 인해 충격 시스템에 주로 사용된다. 본 논문에서는 마찰 스프링을 포함한 발사장치의 주퇴복좌기 설계 연구가 수행되었다. 마찰 스프링의 강성을 결정하기 위해서는 충격량과 운동량 관계를 고려한 단순한 발사장치 모델의 운동방정식이 개발되었다. 발사장치의 동적 거동 시뮬레이션 결과에 기초하여, 주퇴복좌 시스템의 마찰 스프링의 지름을 결정하였다.

Abstract: Friction springs have different characteristics while loading and un-loading. Because of these characteristics, they are utilized in impact systems. In this paper, the design of a recoil system with friction springs for use in a machine gun system has been presented. In order to determine the stiffness of a friction spring, equations of motion for a simple gun model with a recoil system have been derived. The impulse balance scheme has been adopted. On the basis of simulation results, the diameter of the friction spring has been determined.

1. 서 론

기존에 사용되고 있는 발사장치에는 탄의 발사에 의해 발사장치에 가해지는 충격을 완화시켜주는 장치인 주퇴복좌 시스템이 장착되어 있다.

일반적으로 주퇴복좌 시스템은 주로 유기압 시스템으로 구성되어 있다.^(1,2) 유기압 시스템은 진동이 적으며, 제어가 단순하고 반응속도가 빠르다는 장점을 지니고 있지만, 주요 부품의 가격이 비싸고, 에너지 손실이 크며 설치 공간을 많이 차지한다는 단점을 가지고 있다.

새로운 발사장치 시스템에서는 유기압식 주퇴복좌 시스템 대신 댐핑 효과를 가지고 있는 마찰 스프링을 주퇴복좌 시스템에 적용하여 발사장치의 크기와 무게, 비용을 효율적으로 감소시키는 방안에 대해서 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 발사장치 시스템 주퇴복좌 운동 요구도에 따른 적합한 마찰 스프링의 설계 변수를 구하는 것이 최종 목표로서, 이를 달성하기 위하여 마찰 스프링을 이용한 주퇴복좌를 포함하는 발사장치 시스템의 수학적 모델을 제시하였다. 수학적 모델에는 마찰 스프링, 제퇴기 효율, 발사장치에서 발생하는 마찰력, 주퇴 고각, 제퇴 압력 등의 효과를 고려하였다.

제안된 주퇴복좌 시스템에서 사용될 마찰 스프링의 설계 변수를 결정하기 위해, 주퇴복좌 시스템의 주퇴장, 주퇴 시간, 제퇴기 효율 등을 변화시켜가며 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 마찰 스프링을 장착한 발사장치의 주퇴복좌기 수학적 모델

2.1 발사장치의 수학적 모델

발사장치의 주퇴복좌 시스템에 마찰 스프링을 적용할 경우, 탄이 발사될 때의 충격량을 감소시키는 주퇴복좌용 마찰 스프링과 주퇴복좌 운동이 종료된 이후의 반동을 감소시킬 스탱퍼(Stopper)용

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주과기원) 발표논문임.

† Corresponding Author, sookim@cnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

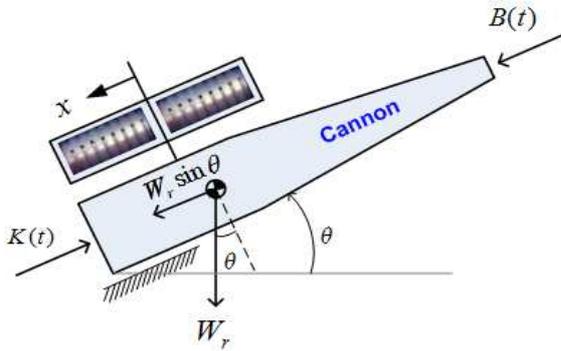


Fig. 1 Schematic of a recoil system using friction spring

마찰 스프링이 함께 고려되어야 한다.

Fig. 1 은 마찰 스프링 주퇴복좌 시스템을 장착한 발사장치의 개념도를 나타내고 있다. 여기서 x 는 주퇴복좌 운동 변위 (또는 주퇴장), $B(t)$ 는 발사 시 발생하는 약실 힘 (Breeching Force), $K(t)$ 는 주퇴복좌기의 힘, θ 는 주퇴 각, W_r 은 주퇴복좌 시스템의 무게를 나타내고 있다.

사격 시 장약 폭발 힘에 의해 발사장치가 x 방향으로 운동하게 되며, 동시에 주퇴복좌기에 의한 힘 $K(t)$ 의 완충작용에 의하여 포신의 병진운동이 안정된다.

Fig. 1 을 바탕으로 식 (1)과 같이 주퇴복좌 시스템의 운동방정식을 수립할 수 있다.

$$M_r \ddot{x} = (1 - \beta)B(t) - K(t) + W_r \sin \theta - F_\mu \quad (1)$$

$$F_\mu = \mu mg \cos \theta \quad (2)$$

여기서 β 는 제퇴기(Muzzle Brake) 효율 계수, F_μ 는 주퇴 복좌기의 병진운동 시 발생하는 마찰력, $K(t)$ 는 마찰 스프링의 운동에 의한 힘, M_r 은 발사장치의 질량을 나타내고 있다.

제퇴기는 Fig. 2 에 나타난 바와 같이, 사격 시 발사관 내부에서 발생한 연소 가스를 발사장치 출구에서 방향 전환판으로 연소 가스의 방향을 반대로 전환하여 주퇴력을 감소시키는 장치이다. 제퇴기에 의해 주퇴력이 감소되면 발사장치에 전달되는 충격도 감소하여 주퇴성능을 향상시킬 수 있다.

식 (1)에서 제퇴기 효율 계수 β 값이 증가하면 방향 전환판에서 전환되는 약실 힘의 증가로 인해 주퇴력이 감소하게 된다.

제퇴기 효율 계수, 주퇴복좌기 하중, 마찰력, 제퇴 압력, 마찰 스프링의 힘이 결정되었을 때, 식 (1)을 이용하여 시간에 대한 주퇴복좌기의 거리, 속도, 가속도를 얻을 수 있다.

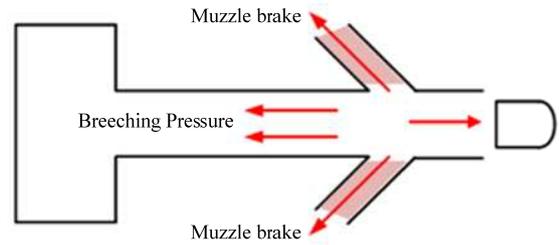


Fig. 2 Schematic of a muzzle brake

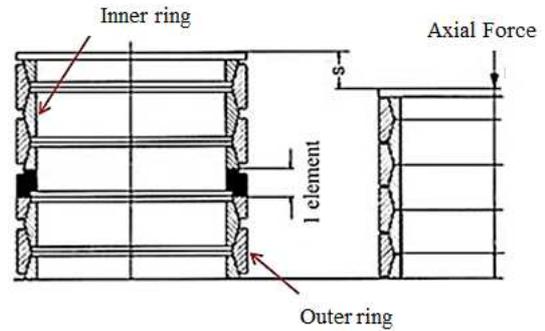


Fig. 3 Section of friction spring

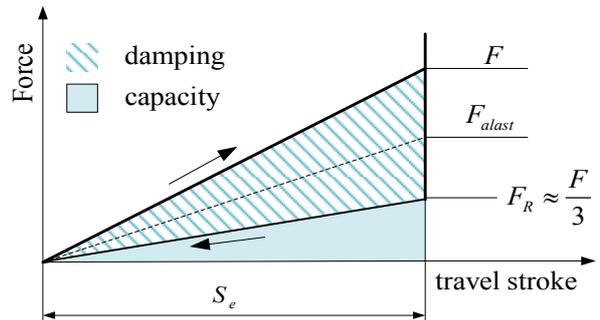


Fig. 4 Theoretical characteristics of friction spring

2.2 마찰 스프링 모델

Fig. 3 은 주퇴복좌기에 사용될 마찰 스프링의 단면도를 나타내고 있다. 내부 링(Inner ring)과 외부 링(Outer ring)을 번갈아 쌓아놓은 형태로 구성되어 있다. 마찰 스프링에 축 하중을 가하면 내부 링과 외부 링의 경사면을 통해 미끄러짐과 동시에 내부 링은 수축하고 외부 링은 확장하게 된다.

Fig. 4 는 축 하중이 증가하면서 마찰 스프링이 압축될 때와 축 하중이 감소하면서 원상태로 복귀할 때의 스프링 강성을 나타내고 있다. 마찰 스프링 압축 시 강성계수는 $\frac{F}{S_e}$ 이며, 원상태로 복귀 시

의 강성계수는 $\frac{F_R}{S_e}$ 이다.⁽⁴⁾ F_R 은 마찰 스프링이 원상태로 복귀할 때 마찰 스프링 힘, S_e 는 마찰 스프링의 최대 압축 거리를 나타낸다. 설계에

이용한 마찰 스프링은 Fig. 4 와 같이 최대 압축 시 힘 F 를 받으며, 초기상태로 복귀할 때에는 $\frac{F}{3}$ 만큼의 힘을 받는 특성을 가지고 있다.⁽⁴⁾

이를 수학적 모델로 설계하여 Fig. 5 와 같은 마찰 스프링 모델로 나타낼 수 있다.

식 (1)의 마찰 스프링 힘 $K(t)$ 는 Fig. 5 의 주퇴복좌기의 수학적 모델에 의해 구해질 수 있다. 마찰 스프링에 부하가 가해질 때, 즉 주퇴복좌기가 $+x$ 변위에서 주퇴 운동을 수행하고 있을 때 강성계수 k_1 이, 복좌 운동을 수행하고 있을 때에는

강성계수 $\frac{k_1}{3}$ 이 작용하게 된다.⁽⁴⁾ 또한 주퇴복좌 운동이 종료된 이후, 주퇴복좌기가 $-x$ 로 운동하게 되면 마찰 스프링은 스탱퍼(Stopper)로 작동하게 된다. 이 때의 마찰 스프링 강성 계수는 각각 $k_2, \frac{k_2}{3}$ 이다.

식 (3), (4)는 주퇴복좌기가 $+x$ 방향으로 운동하고 있을 때의 마찰 스프링 힘을 나타내고 있다. F_B 는 마찰 스프링의 최대 힘, F_V 는 마찰 스프링의 초기 힘, X_L 은 주퇴복좌기의 최대 주퇴장을 의미한다.

$$0 \leq \dot{x}; \quad F_s = \frac{F_B - F_V}{X_L} x + F_V \quad (3)$$

$$0 > \dot{x}; \quad F_s = \frac{1}{3} \left[\frac{F_B - F_V}{X_L} x + F_V \right] \quad (4)$$

식 (5), (6)은 주퇴복좌기가 $-x$ 구간에서 스탱퍼로 작용하는 마찰 스프링 힘을 나타내고 있다.

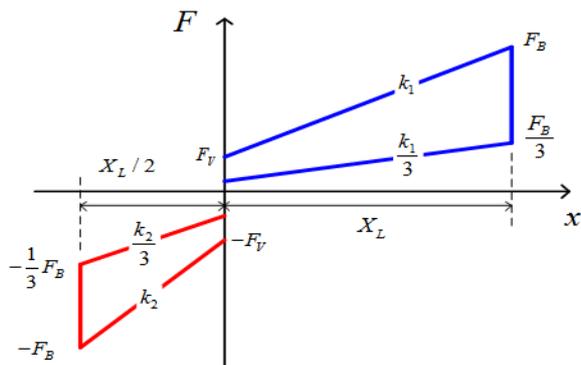


Fig. 5 Friction spring model

$$0 > \dot{x}; \quad F_s = 2 \frac{F_B - F_V}{X_L} x - F_V \quad (5)$$

$$0 \leq \dot{x}; \quad F_s = \frac{1}{3} \left[2 \frac{F_B - F_V}{X_L} x - F_V \right] \quad (6)$$

2.3 마찰 스프링 모델 검증 실험

2.2 절의 마찰 스프링 모델을 검증하기 위하여 Fig. 6 의 만능시험기를 사용하여 힘을 삼각파에 의해 가했다가 제거하는 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 마찰 스프링의 외부 링과 내부 링 지름은 각각 42mm, 35mm 이다. 마찰 스프링의 각 링의 이탈을 방지하도록 하는 제작한 지그에 만능시험기 유압척을 연결한 뒤, 시간에 비례하여 증가하는 축 하중을 인가하였다. 또한 최대 축 하중이 25kN 이 되었을 때 같은 비율로 축 하중이 감소하도록 실험을 진행하였다. 이 때 마찰 스프링에

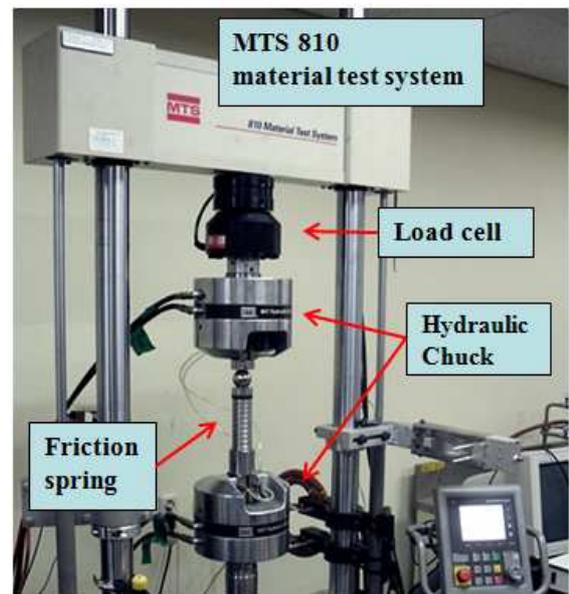


Fig. 6 Friction spring test setup using MTS machine

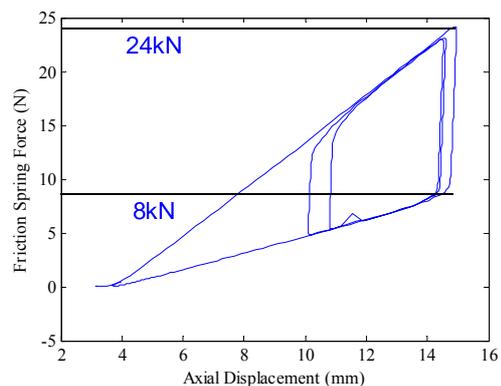


Fig. 7 Friction spring characteristic in loading / unloading test

가해지는 축 하중은 로드셀에서, 마찰 스프링의 압축 변위는 LVDT 센서에 의하여 실시간으로 계측하게 된다.

Fig. 7 은 만능시험기 시험을 통해 얻은 마찰 스프링에 가해지는 힘과 변위의 관계를 나타내고 있다. 세차레의 삼각파형의 하중을 가하였고, 여기서 약간의 힘의 차이를 보이는 경향은 마찰 스프링에 윤활유를 사용하지 않아서 나타나는 비선형적인 효과라고 생각한다. Fig. 4 의 마찰 스프링의 매뉴얼에 나타난 이론적인 곡선과 같이 마찰 스프링에 걸리는 부하가 감소할 때의 힘, 부하가 증가할 때의 힘의 $\frac{1}{3}$ 이라는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 2.2 절의 마찰 스프링 모델을 검증할 수 있었다.

2.4 제퇴기 계수 결정

발사장치의 동적 거동 특성 시뮬레이션을 수행하기 위해서는, 제퇴기의 계수를 결정해야 한다.

식 (1)에서 마찰력을 제외한 뒤, 시간 t 에 대해서 적분하면 운동량과 충격량의 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$M_r \dot{x} = (1 - \beta) \int_0^t B(\tau) d\tau - \int_0^t F_s d\tau + t W_r \sin \theta \quad (7)$$

주퇴 종료 시간 t_r 이라고 가정했을 때, 초기 주퇴 속도와 주퇴 종료 시점의 주퇴 속도는 모두 0 이 되어 하므로 식 (8)의 조건을 식 (7)에 대입하여 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$t = t_r, v_0 = 0, v_r = 0 \quad (8)$$

$$0 = \int_0^{t_r} (1 - \beta) B(t) dt - \int_0^{t_r} F_s dt + t_r W_r \sin \theta \quad (9)$$

식 (7)을 시간에 대해서 다시 한번 적분한 뒤, 모멘트 면적법을 이용하면 최대 주퇴장 X_L 과 주퇴시간 t_r 에 대한 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$M_r X_L = (t - \bar{t}) I_{B_m} - (t - \bar{\bar{t}}) I_K + \frac{1}{2} W_r \sin \theta t_r^2 \quad (10)$$

여기서 주퇴력 충격량 I_{B_m} 과 마찰 스프링 힘 충격량 I_K 은 식 (11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{B_m} = \int_0^{t_r} (1 - \beta) B(t) dt \quad (11)$$

$$I_K = \int_0^{t_r} F_s dt \quad (12)$$

\bar{t} 는 주퇴력 충격량 I_{B_m} 의 시간-힘 그래프의 면적 중심을, $\bar{\bar{t}}$ 는 마찰 스프링 힘에 의한 충격량 I_K 의 면적 중심을 의미하고 있다. 또한 I_K 는 마찰 스프링 강성 변수 F_B , F_V 와 t_r 의 함수로 표현될 수 있다. Table 1 은 계수 결정을 위한 발사장치 시스템의 변수를 나타내고 있다.

Table 1 의 변수를 사용하고, 각도를 0°로 하며, 최대 주퇴 시간의 범위를 19ms~25ms 로 가정했을 때, 식 (10)을 통해 제퇴기 효율 계수 β 의 변화에 따른 주퇴시간 t_r 과 마찰 스프링의 강성 변수 F_B 의 관계 그래프 Fig. 8 을 얻을 수 있다.

Fig. 8 에 의하면 Table 1 의 주퇴복좌 시스템의 설계 변수를 만족하는 제퇴기 효율 계수 β 는 0.7 임을 알 수 있다. 또한 이때의 주퇴시간은 21ms 임을 알 수 있다.

3. 주퇴복좌 운동 해석 프로그램 개발

요구되는 설계 조건을 만족하는 마찰 스프링의 설계 변수 값을 결정하기 위해서는 발사장치의 수학적 모델을 통한 시뮬레이션이 수행되어야 하며, 이를 위해서 프로그램이 개발되었다.

Table 1 Desired design parameters of recoil system

Parameters	Values
주퇴 질량	240 kg
마찰 스프링의 강성 변수 1	$F_V = 10$ kN
마찰 스프링의 강성 변수 2	$F_B \leq 100$ kN

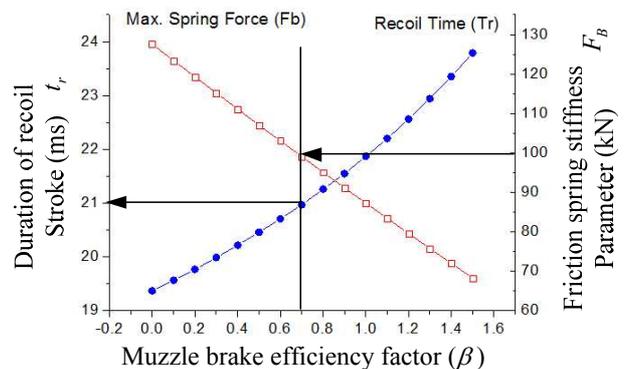


Fig. 8 Desired F_B, t_r for β

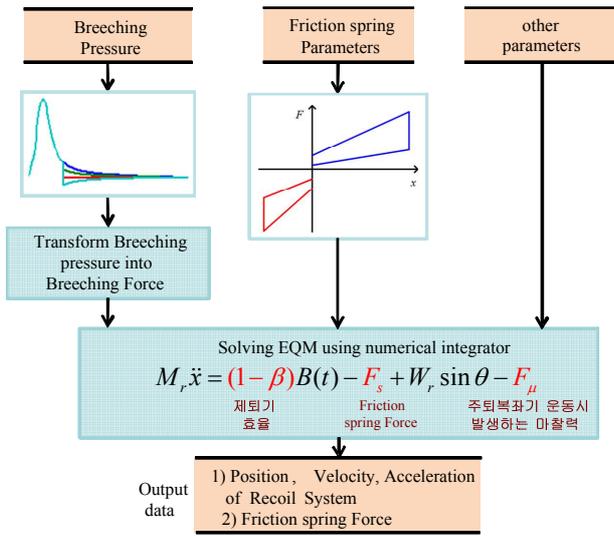


Fig. 9 Computational flow of recoil system analysis program

Fig. 9는 주퇴복좌기의 각 변수가 결정되었을 때 수치 적분기를 이용하여 운동방정식의 해를 구하도록 구현된 프로그램의 데이터 흐름도를 보여주고 있다.

데이터 입력부는 주퇴 압력, 마찰 스프링의 관련 변수를 입력받는 부분으로 구성되어 있다. 약실 압력 (Breaching Pressure)은 기존의 발사 장치의 시험에서 측정된 데이터를 사용한다. 여기에 제퇴기 계수를 적용한 뒤, 발사장치 출구 면적을 곱하여 약실힘으로 변환하게 된다. 마찰 스프링의 각 변수 (최대 힘 F_B , 초기 힘 F_V , 최대 주퇴장 X_L)를 입력하면, 2.2 절에서 기술한 마찰 스프링 모델에 의하여 시간에 따른 마찰 스프링 힘을 얻을 수 있다. 마지막으로 주퇴질량, 발사관의 마찰 계수, 발사 고각 등의 변수가 프로그램에 입력된다.

주퇴복좌기 해석을 위한 발사장치의 운동방정식은 4 차 Runge-kutta 수치적분 방법을 이용하여 해를 구하게 되며, 최종적으로 주퇴장, 속도, 가속도, 마찰 스프링 힘의 시간선 데이터를 얻게 된다.

4. 주퇴복좌기 설계를 위한 시뮬레이션

발사장치의 요구되는 주퇴 성능이 주어졌을 때 그 성능을 만족시키는 마찰 스프링에 의한 주퇴복좌기를 설계하기 위해서는, 마찰 스프링의 설계 변수를 변경 하면서 시뮬레이션을 수행해야 한다. 주퇴복좌기의 성능은 주변 급탄장치의 요구도 등 주변 장치의 요구도에 따라서 결정되어야 한다. 주변 장치의 요구도를 반영 본 연구에서는 주퇴장은 50mm 이내, 주퇴 복좌시간은 200ms, 그리고 발사장

Table 2 Input parameters of recoil system simulation

Parameters	Values
주퇴 질량	240 kg
마찰 스프링의 초기 힘	$F_v = 10$ kN
제퇴기 계수	$\beta = 0.7$
발사관의 마찰 계수	$\mu = 0.2$

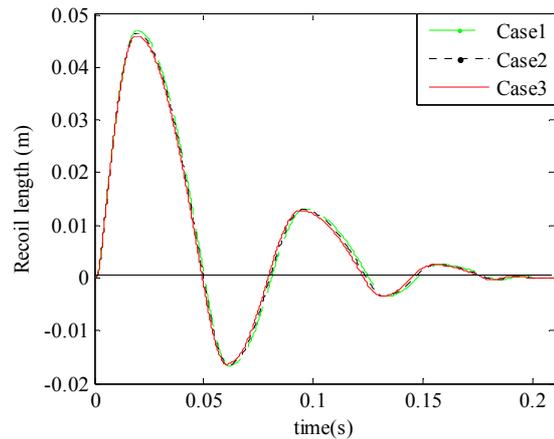


Fig. 10 Recoil length

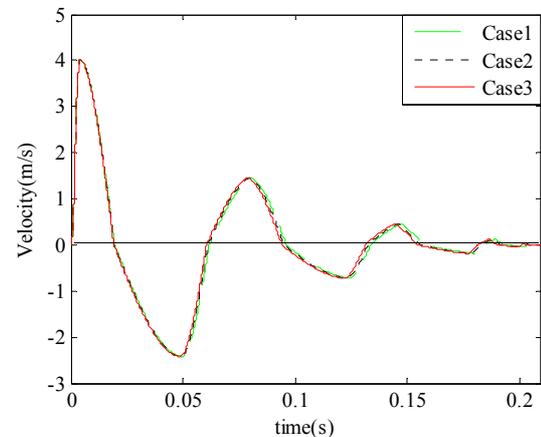


Fig. 11 Recoil velocity

치의 구조강도를 고려 최대 주퇴력은 100kN 이하가 될 수 있도록 주퇴장치가 설계되어야 한다.

Table 2는 2.4 절의 계산을 통해 결정된 주퇴복좌 동적 거동 해석 시뮬레이션의 입력 변수를 나타내고 있다.

4.1 마찰 스프링의 강성 변수 결정

주퇴복좌기 성능(주퇴장, 복좌 시간, 최대 주퇴력)을 만족하는 마찰 스프링의 강성 변수 F_B 를 결정하기 위하여, 강성 변수 F_B 를 100kN (Case 1), 102 kN (Case 2), 104 kN (Case 3), 으로 변화시키면서

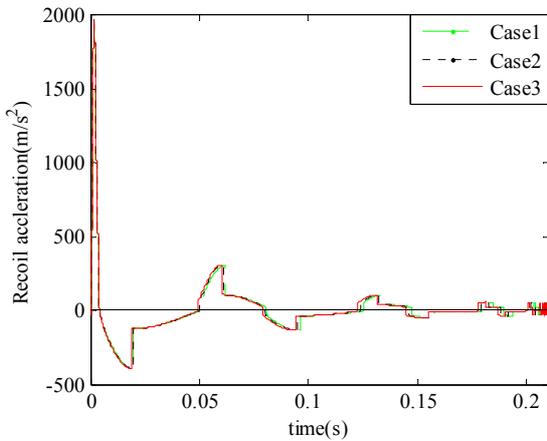


Fig. 12 Recoil acceleration

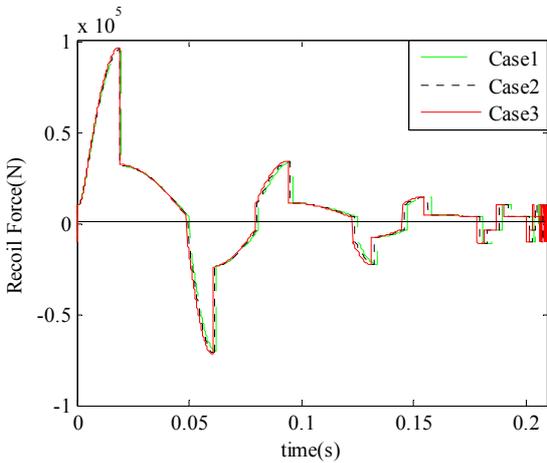


Fig. 13 Recoil force

주퇴복좌기의 동적 거동 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 10~13은 주퇴장, 속도, 가속도 및 마찰 스프링의 힘에 대한 시간선 데이터를 나타내고 있다. Fig. 10에서는 3가지 경우 모두 요구 주퇴장 50mm 이내를 만족함을 알 수 있다. Fig. 11에서는 주퇴속도가 0으로 되는 시간이 약 200ms 이 되는 것을 알 수 있으며, Fig. 13에서는 3가지 경우 모두 최대 주퇴력이 100kN 이내로 되는 것을 확인할 수가 있었다.

Fig. 10~13의 결과를 Table 3에 비교 정리하였다. DPV 열의 주퇴복좌기의 성능조건(주퇴장, 복좌 시간, 최대 주퇴력)을 만족하는 마찰 스프링 강성 변수 F_B 는 104kN 임을 알 수 있었다.

Fig. 14는 Table 3의 시뮬레이션 결과에서 주퇴장, 마찰 스프링의 강성 변수 F_B 와 최대 주퇴력 F_S 와의 관계를 나타낸 것이다.

마찰 스프링의 강성 변수가 증가함에 따라 최대 주퇴장은 감소하며, 최대 주퇴력은 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

Table 3 Simulation result of recoil system analysis

	Case 1	Case 2	Case 3	DPV
마찰 스프링 강성 변수 (kN), F_B	100	102	104	-
주퇴장 (mm)	46.97	46.48	46.02	50
주퇴 시간 (ms)	19.4	19.13	19.05	-
복좌 시간 (ms)	202.3	200.7	199.3	200
최대 주퇴력 (kN) F_S	94.55	95.54	96.52	100

* DPV : Desired Performance Values

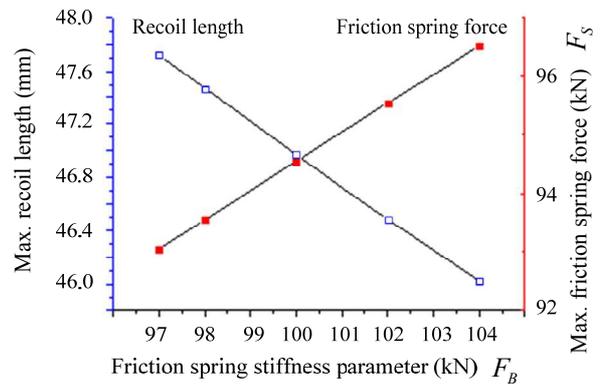


Fig. 14 Parameter variation study by friction spring stiffness

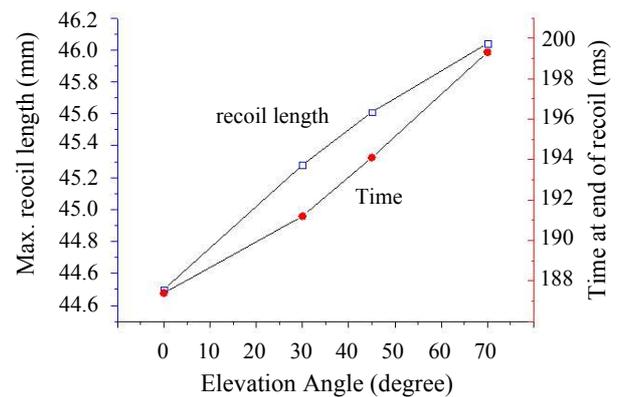


Fig. 15 Parameter variation study by elevation angle

4.2 주퇴 고각 변화에 따른 주퇴복좌 시스템 성능 분석

Fig. 15는 주퇴 고각이 0°에서 70°로 변화할 경우의 최대 주퇴장과 복좌 시간의 경향을 나타내고 있다.

주퇴 고각이 증가함에 따라 최대 주퇴장 및

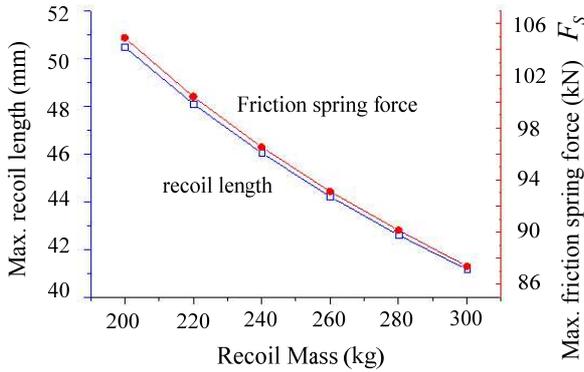


Fig. 16 Parameter variation study by recoil mass

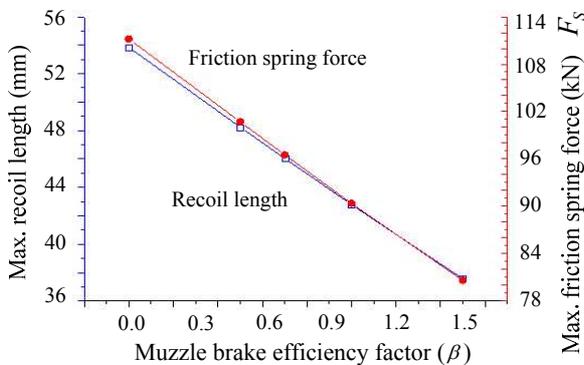


Fig. 17 Parameter variation study by muzzle brake efficiency factor

복좌 시간이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

4.3 주퇴 질량 변화에 따른 주퇴복좌 시스템 성능 분석

Fig. 16 은 주퇴 질량을 200kg 에서 300kg 으로 변화시킬 경우의 최대 주퇴장과 복좌 시간의 경향을 나타내고 있다.

주퇴 질량이 증가함에 따라 최대 주퇴장 및 복좌 시간이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

4.4 제퇴기 효율 계수 변화에 따른 주퇴 복좌 시스템 성능 분석

Fig. 17 은 제퇴기 효율 계수가 0 에서 1.5 로 변화할 경우의 최대 주퇴장과 복좌 시간의 경향을 나타내고 있다.

제퇴기 효율 계수가 증가함에 따라 주퇴력이 감소하므로 최대 주퇴장 및 복좌 시간이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

5. 마찰 스프링의 지름 결정

발사관의 좌우 대칭으로 2 개의 주퇴복좌기를

Table 4 Selection of friction spring diameters

$\frac{F_s}{2}$ (kN)	Parameter of Friction spring		
	F (kN)	Outer ring diameter (mm)	Inner ring diameter (mm)
48.26	54	63.0	51.9

장착하여 사용하면, 이 때 필요한 주퇴력은 Table3 에서의 Case 3 의 최대 주퇴력의 절반에 해당하는 48.26kN 이다. 최대 주퇴력이 결정되었을 때, 마찰 스프링 제조사에서 제공하는 매뉴얼을 참고하여 마찰 스프링의 지름을 결정할 수 있다.⁽⁴⁾ Table 4 는 48.26kN 의 최대 주퇴력을 감당할 수 있는 마찰 스프링의 제원을 나타내고 있다. 즉 54 kN 의 하중을 감당할 수 있는 스프링이 적합하다는 것을 알 수 있고, 이를 통해서 외경 63mm, 내경이 51.9mm 인 마찰 스프링을 선택하였다.

6. 결론

본 논문을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 마찰 스프링을 이용하는 새로운 주퇴복좌 시스템의 동적 거동에 대한 수학적 모델을 제안하고, 실제 실험을 통해서 마찰 스프링의 수학적 모델을 검증하였다.

(2) 제안한 주퇴 복좌 시스템의 수학적 모델을 이용하여 운동방정식을 유도하고, 이를 이용한 주퇴 복좌기의 동적 거동 해석 프로그램을 개발하였다.

(3) 주퇴 복좌기의 동적 거동 해석 시뮬레이션을 통해서 요구되는 주퇴 복좌기 성능을 만족하는 마찰 스프링의 최대 주퇴력에 대한 데이터를 얻고, 이를 통해 주퇴 복좌기에 사용될 마찰 스프링의 지름을 결정하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(ADD) 주관 위탁 연구 과제 (No. 2009-0985)에 의해서 수행되었음.

참고문헌

(1) Park, M. S., Kang, T. H. and Byun, Y. S., 2008, "Dynamics Analysis and Experiments of High Impulsive Force Device with Isolation System," *Journal of the Korean Society of Precision*

- Engineering*, Vol. 25, No. 10, pp.107~114.
- (2) Eches, N., Cosson, D., Lambert, Q., Laglet, A. and Renard, J., 2009, "Modeling of the Dynamics of a 40 mm Gun and Ammunition System During Firing," 7th *European LS-DYNA conference*, DYNAmore GmbH, Germany.
- (3) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannaery, B. P., 1992, *NUMERICAL RECIPES in Fortran*, CAMBRIDGE, University Press, USA.
- (4) *Friction Springs Catalogue GB 8*, 2009, RINGFEDER CORPORATION, Germany.