

연식주퇴 시스템의 동적 특성 해석

Dynamic Characteristics of a Soft Recoil System

신철봉*
Shin, Chul-Bong

배재성**
Bae, Jae-Sung

황재혁**
Hwang, Jai-Hyuk

강국정***
Kang, Kuk-Jeong

ABSTRACT

In order to reduce the level of recoil force, new recoil technology must be employed. The present study discusses a soft-recoil system that can reduce dramatically the recoil force. The firing sequence of the soft recoil system is radically different from that of a conventional system. The gun is latched and preloaded in its out-of-battery position prior to firing. When unlatched, the gun is accelerated and forward momentum is imparted to the recoiling parts. This momentum is opposed by the ballistic force imparted by firing and the recoil force and stroke will be reduced. In the present study, the soft-recoil system with hydraulic dampers is simulated and its characteristics are investigated theoretically. The results of the simulation show that the soft-recoil system could dramatically reduce the recoil force and the recoil stroke compared to the conventional recoil systems. However, the soft-recoil system was not able to perform well when the firing fault modes like prefire, hang-fire, and misfire happen. Hence, we need to employ a control algorithm to prevent the damage of the recoil system due to these fault mode.

주요기술용어(주제어) : 연식주퇴, Soft Recoil, FOOB(Fire-Out-Of-Battery), FIB(Fire-In-Battery)

1. 머리말

미래의 전장 환경은 다양한 위협, 전천후 환경 및 전방위 작전 수행능력 확보로 운용개념이 변화되고 있다. 화력 무기체계는 사거리 연장, 대구경화 및 고퍽탄화에 따른 포구에너지 증대와 목표 집중에 의한 정밀발사 능력 보유, 플랫폼(platform) 경량화에 의한

기동성 확보, 직사 및 곡사 통합기능을 보유한 다기능 무장의 개발이 요구되고 있다. 파괴력이 증대된 화력의 다기능 무장 포신을 경량화된 플랫폼에 탑재하기 위해서는 주퇴력(recoil force)을 기존에 비해 경감시킬 수 있는 새로운 개념의 주퇴제어기술 개발이 필요하다.

주퇴제어 기술은 화력 무기체계의 성능 및 형상에 직접적으로 영향을 미치는 주요한 핵심기술이며, 또한 강내탄도 특성(탄두 중량 및 약실압력) 및 포탑운용 공간 배치에 따른 허용주퇴거리를 고려하여 사격 충격력 및 주퇴거리 등을 설계할 때 반드시 필요한 근본기술이다.

기존의 주퇴 시스템은 그림 1과 같이 주퇴부가 정

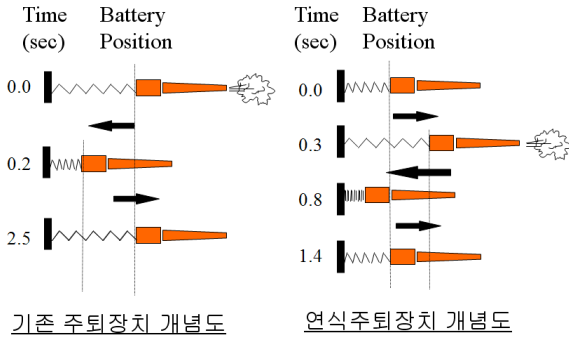
† 2008년 1월 10일 접수~2008년 5월 9일 게재승인

* 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원

** 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

*** 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : jsbae@kau.ac.kr



[그림 1] 주퇴장치의 개념도

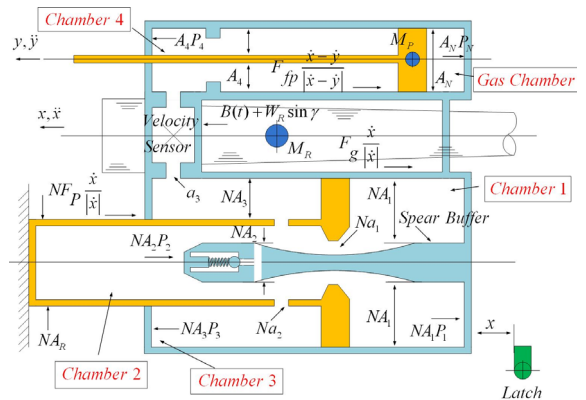
지 상태에서 추진제가 점화되어 가스압력에 의해 포탄과 주퇴부(recoil part)를 상반된 방향으로 가속시킨다(FIB : Fire-In-Battery). 가속된 주퇴부는 주퇴시스템에 의해 제공된 저항력에 대항하여 그 속도가 0이 될 때까지 감속된다. 정지된 주퇴부는 복좌 시스템(recuperator)에 저장된 에너지에 의해 원래의 사격위치로 복귀한다. 이와 달리 연식주퇴(soft recoil) 시스템은 주퇴부가 발사 전 Latch에 의해 전하중(preload)을 받은 상태에서 Latch가 풀리면서 전방으로 가속하게 되어 주퇴부는 전방 운동량(forward momentum)을 가지게 된다. 이러한 전방 운동량은 추진제 폭발에 의한 충격력과 반대방향이 되고, 이로 인해 주퇴력과 주퇴거리가 감소하게 된다.

연식주퇴 개념의 최초 적용은 1906년 프랑스의 “Schneider-Ducrest Cannon 65 de Montagon Modele”로 알려져 있으며, 미국의 경우는 50년이 지난 후, Rock 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.

본 연구에서는 기존의 주퇴기법 및 연식주퇴기법에 대한 동역학 모델을 수립하여 시뮬레이션을 통해 그 특성을 비교, 고찰하였으며, 연식주퇴기법의 정상모드와 오류모드 및 주퇴부 질량 변화의 비교에 대한 동특성에 대하여 고찰하였다.

2. 연식주퇴기법의 수학적 모델링

본 연구에서 사용된 모델은 그림 2와 같이 주퇴장치와 복좌장치가 결합된 종속형이다^[1]. Chamber 1, Chamber 2, Chamber 3, Chamber 4는 유체에 의해서 연결되었고 Gas Chamber안의 Gas는 피스톤에 의해 유체와 격리 되어 있다. 주퇴방향을 양의 방향으로 정의하였고 Latch된 위치를 영점으로 정의하였다. 운동 메커니즘은 아래와 같다. 처음 Latch된 위치에서 Latch를 풀면 Gas Chamber의 압력에 의해 유체가 Chamber 4에서 Chamber 1로 흐르면서 주퇴부를 전방 가속시킨다. 일정한 속도에 도달 후 격발이 되면 주퇴운동부는 Breech Force에 의해 양의 방향으로 주퇴 운동을 하게 된다. 주퇴 시 유체가 Chamber 1로부터 Chamber 4로 흐르면서 Breech Force를 흡수하는 동시에 다음 가속을 위해 에너지를 Gas Chamber에 저장한다. 주퇴 종료 후 주퇴부는 다시 Gas Chamber의 압력에 의해 Latch 위치로 복귀한다. 이 메커니즘에 대한 운동방정식을 세우면 식 (1)과 같다^[1].



[그림 2] 연식주퇴 시스템의 개념도

$$\begin{cases} \left[M_R + \left(\frac{A_4 - NA_R}{A_4} \right)^2 M_P \right] \ddot{x} = B(t) - \frac{NA_R A_N}{A_4} P_N + \\ \left[W_R + \left(\frac{A_N - NA_R}{A_4} \right) W_P \right] \sin \gamma - \left(NF_P + F_g + \frac{NA_R}{A_4} F_{fp} \right) \\ \text{sgn}(\dot{x}) - N(A_1 + HA_2)g(v_1) - N(A_1 + A_2)g(v_2) - NA_R g(v_3) \end{cases} \quad (1)$$

연식주퇴 시스템의 물성치를 표 1과 같이 사용하였

[표 1] 연식주퇴 시스템 물성치

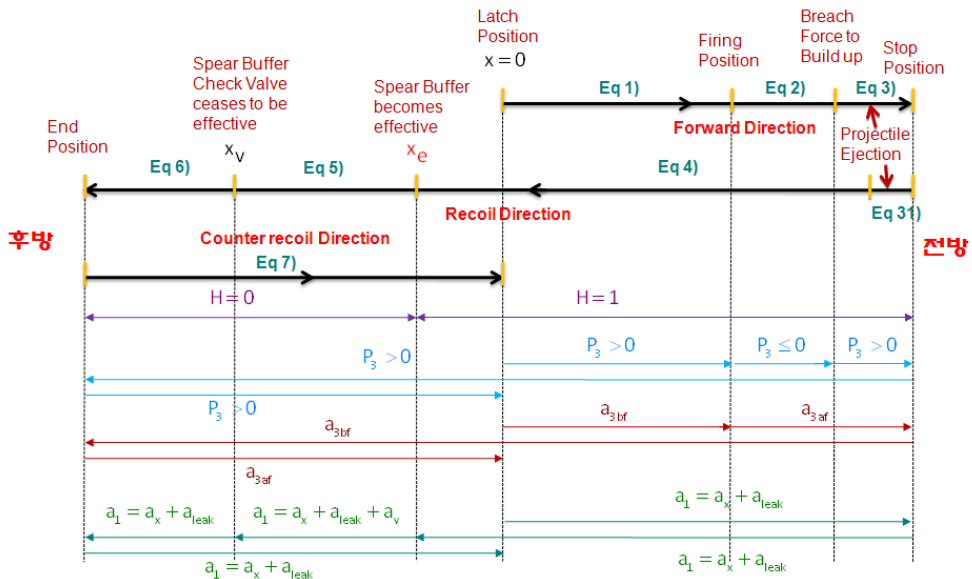
물성치	크기	물성치	크기
$MR(kg)$	900	$ro(kg/m^3)$	0.9
$MP(kg)$	100	$g(m/s^2)$	9.8
$A_1(m^2)$	0.009121	γ (도)	45
$A_2(m^2)$	0.009121	N	2
$A_3(m^2)$	0.009121	$a_2(m^2)$	0.00127694
$A_4(m^2)$	0.009121	c_1	0.5
$A_N(m^2)$	0.009121	c_2	0.5
$F_P(N)$	100	c_3	0.5
$F_g(N)$	100	H	1
$F_{fp}(N)$	100	k	1.8
$P_0(p_a)$	2500000	$a_{3bf}(m^2)$	0.009121
$V_0(m^3)$	0.03	$a_{leak}(m^2)$	0.00018242
$a_x(m^2)$	0.009121	c	0.9
$a_v(m^2)$	0.00054726	$Bt(N)$	285000
$a_{3af}(m^2)$	0.0002		

다. 여기서 MR, MP 는 각각 주퇴부의 질량과 복좌 시스템 안의 피스톤 질량을 나타내고 A_1, A_2, A_3, A_4, A_N 은 각각 유압이 작용하는 면적을 나타내며 F_P, F_g, F_{fp} 는 마찰력을 나타낸다. c, c_1, c_2, c_3 은 유량계수를 나타내고 $a_2, a_x, a_v, a_{3af}, a_{3bf}, a_{leak}$ 는 오리피스 면적, N 은 주퇴기의 개수, γ 는 포신의 경사 각도, P_0 는 복좌기의 초기 압력, V_0 는 복좌기의 초기 체적, Bt 는 Breach Force를 나타내는데 이는 추진제의 연소로 발생한 추진가스의 힘이다.

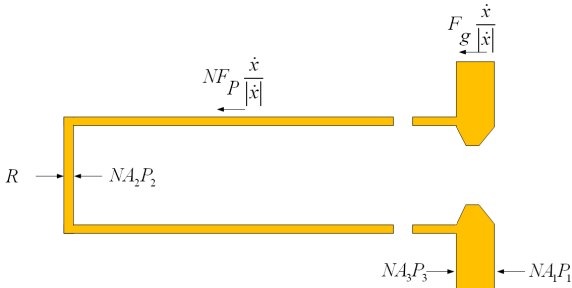
그림 3과 같이 전방 운동과정에서 주퇴부의 위치에 따라 H, P_3, a_3, a_1 등 파라메타가 변한다.

수식 (1)에서 Spear Buffer가 오리피스 입구에 도달하기 전에는 유체 체적을 변화시키는 면적은 Chamber 1의 면적 A_1 과 Spear Buffer 면적 A_2 의 합과 같다. 그러므로 H 를 1로 표시하여 면적 A_2 의 영향을 고려하였다. Spear Buffer가 오리피스 a_1 의 입구를 지난 후에는 유체의 체적을 변화 시키는 면적은 단지 A_1 이므로 H 를 0으로 하여 A_2 의 영향을 제거하였다.

P_3 은 Chamber 3의 압력과 기준 압력과의 차를 나타내고 포가 점화 후 Breach Force가 작용하기까지



[그림 3] 연식주퇴 시스템의 운동 로직



[그림 4] 피스톤 로드 의 자유 물체도

시간 지연이 발생하므로 속도 센서의 면적 a_3 이 변하여 $P_1 = P_2 = P_3 = 0$ 이 된다.

a_1 이 변하는 것은 Spear Buffer가 오리피스 a_1 을 통과할 때 a_1 의 면적이 변하기 때문이다. 위에서 설명한 로직에 따라 식 (1)을 모두 7개의 방정식으로 분류할 수 있다^[1,2].

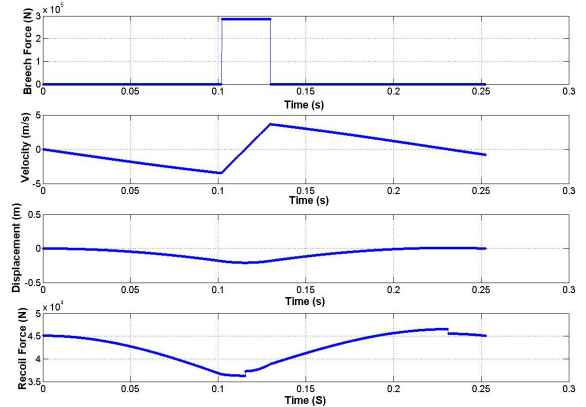
그림 4는 피스톤 로드 에 가해지는 힘들을 나타낸다. 주퇴력은 Chamber 1, Chamber 2, Chamber 3내의 유압과 로드 에 작용하는 마찰력의 합력으로 나타낼 수 있다. 주퇴력에 대한 식은 다음과 같이 표현된다^[1].

$$R = NA_1P_1 + NA_2P_2 - NA_3P_3 + (NF_P + F_g)sgn(\dot{x}) \quad (2)$$

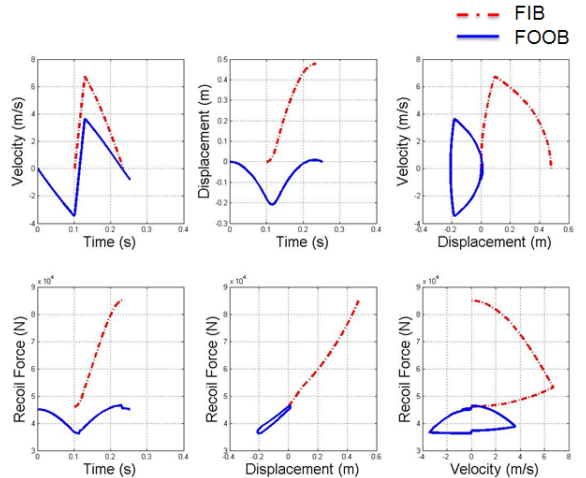
3. 연식주퇴 시뮬레이션

가. FIB와 FOOB의 비교

연식주퇴 시스템의 시뮬레이션을 수행하여 연식주퇴와 FIB, 정상모드와 오류모드를 비교함으로써 연식주퇴 시스템의 타당성과 오류모드의 위험성 및 오류모드를 제어할 추가 댐퍼의 필요성을 설명하였다^[3,4]. 그림 5는 시간에 따른 Breach Force, 속도, 변위와 주퇴력을 나타낸 그래프이다. Breach Force는 사각파 형식으로 가정하였다. 주퇴운동부는 초기에 앞으로 가속하고, 발사 후 Breach Force에 의해 속도가 양의 방향으로 최대로 되고 주퇴과정에 속도가 작아져 정지 된 후 다시 복좌하므로 음의 방향으로 증가한다. 변위 그래프를 보면 음의 방향으로 변위가 증가하다가 Breach Force에 의해 주퇴를 하므로 다시 양



[그림 5] Breach Force와 속도, 변위, 주퇴력 비교



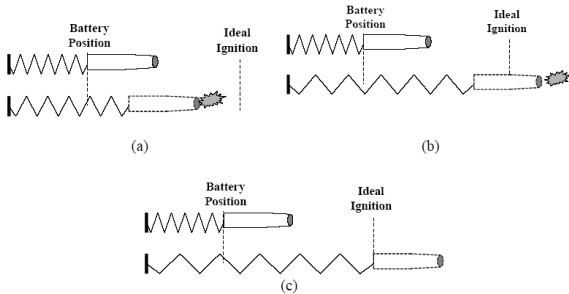
[그림 6] FIB와 FOOB의 비교

의 방향으로 증가하고 최대 주퇴위치에서 다시 Gas 압력에 의해 Latch 위치로 돌아온다. 주퇴력의 변화는 변위 그래프와 비슷하지만 마찰력에 의해 수치가 급격히 변하는 부분이 있다.

그림 6은 FIB와 FOOB를 비교한 그래프이다. FIB의 경우는 FOOB시스템에서 전방가속을 하지 않고 Breach Force를 가하여 최대 주퇴거리까지 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6과 같이 FOOB의 속도, 주퇴 변위, 주퇴력이 FIB보다 현저하게 작은 것을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과로부터 연식주퇴기법은 기존 주퇴기법에 비해 현저한 주퇴력 및 주퇴거리의 감소가 가능함을 알 수 있다.

나. 정상모드(normal mode)와 오류모드(fault mode)의 비교

시뮬레이션 결과로부터 FOOB의 경우 현저한 주퇴력의 감소가 가능함을 알 수 있었다. 그러나, 연식주퇴 시스템의 경우, 정확한 발사시점에서 발사하여야만 주퇴력의 감소의 효과를 얻을 수 있다. 만약, 발사를 하였으나, 추진제가 점화되지 않거나, 혹은 정상위치 아닌 곳에서 점화가 일어나는 경우, 주퇴부의 전방운동량이 작거나 혹은 너무 과도하여 오히려 주퇴시스템이 손상될 수 있다. 따라서, 이와 같은 오류모드가 발생할 경우 FOOB시스템의 특성 및 성능도 분석하여야 한다. 그림 7에서와 같이 오류모드에는 Prefire, Hang-fire, Misfire 세 가지 경우가 있다. Prefire란 발사 위치에도 도달하기 전에 사격이 되는 경우이고, Hang-fire란 발사 위치를 통과하고 사격이

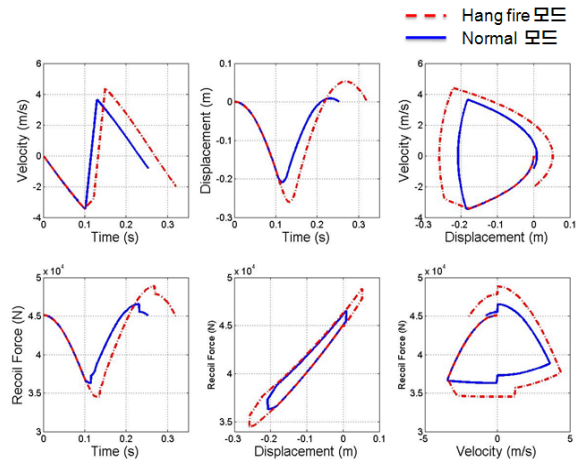


[그림 7] 오류모드 (a) Prefire, (b) Hang Fire, (c) Misfire

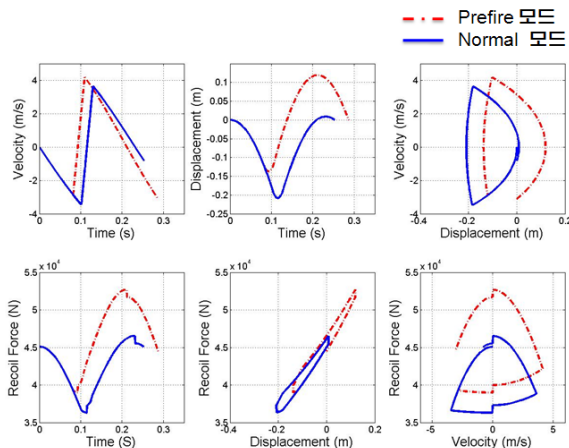
되는 경우이며, Misfire이란 사격이 되지 않은 경우이다.

그림 8은 Normal 모드와 Prefire 모드의 시뮬레이션 결과를 보여준다. Prefire의 경우 전방 운동량이 Normal 모드보다 작게 되므로, 주퇴거리와 주퇴력이 증가하게 되어, 플랫폼에 큰 충격을 줄 수 있다. 또, Prefire 모드가 발생할 경우 주퇴 속도, 주퇴 변위, 주퇴력이 Normal 모드 경우보다 현저하게 크다.

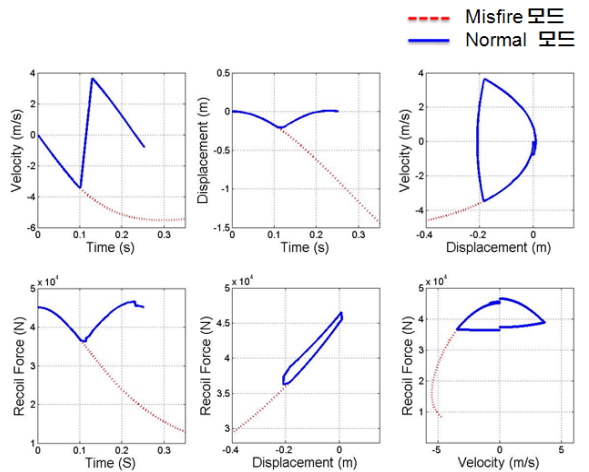
그림 9는 Normal 모드와 Hang-fire 모드의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 경우는 발사 위치를 지나쳐 제여기가 오류모드로 인식하고 추가의 댐퍼가



[그림 9] Normal 모드와 Hang Fire 모드의 비교



[그림 8] Normal 모드와 Prefire 모드의 비교



[그림 10] Normal 모드와 Misfire 모드의 비교

작동하여 전방가속을 감소시키게 된다. 그러나, 속도가 감소되는 도중에 포가 발사되어 전방 운동량은 정상모드에 비해 작아지게 된다. 따라서, 주퇴부의 주퇴거리 및 주퇴력이 Normal 모드 보다 현저하게 크게 된다.

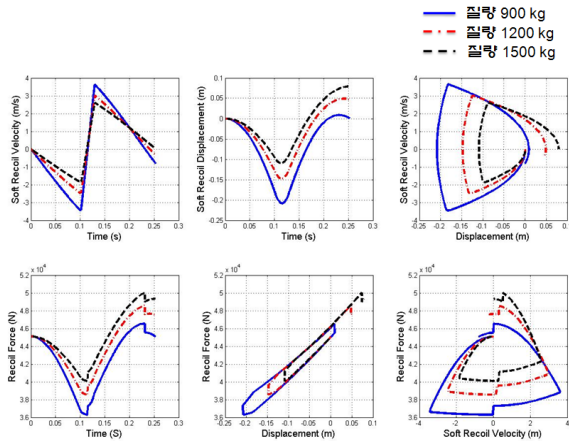
그림 10은 Normal 모드와 Misfire 모드를 비교한 그래프이다. 이 경우에는 사격이 되지 않으므로 Breach Force가 발생하지 않아 Gas 압력에 의해 주퇴부가 전방 Mount에 충돌하여 큰 충격을 줄 수 있다. Misfire 모드의 경우는 주퇴 운동이 발생하지 않기 때문에, 발사위치로 보내기 위해 추가적인 장치가 있어야 한다.

다. 주퇴부 질량 변화에 대한 특성 변화

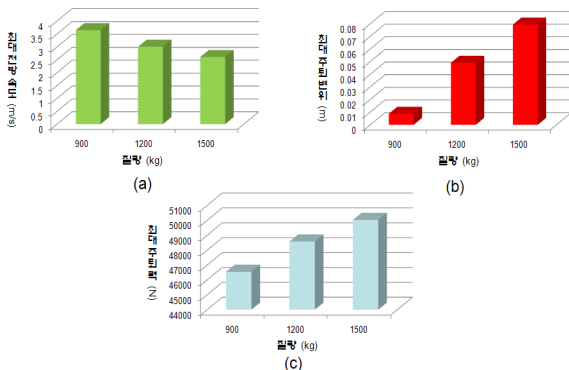
그림 11은 질량을 각각 900kg, 1200kg, 1500kg일 때 주퇴속도, 주퇴거리 및 주퇴력을 비교한 결과를 보여준다. 가속하는 힘과 전방 가속 운동량이 같은 상태에서 질량이 증가하므로 최대 전방 가속 속도 및 최대 전방 가속 변위는 감소한다. 전방 가속 변위가 감소하면 Latch 위치까지 주퇴과정에 댐퍼에 의한 에너지 소모량이 적으므로 그림 12(b), (c)에서와 같이 질량이 증가함에 따라 주퇴거리 및 주퇴력은 증가한다.

4. 맺음말

본 연구에서는 연식주퇴의 개념 수립, 유압 댐퍼의 모델링을 포함한 연식주퇴 시스템의 동역학 모델을 해석하였다. 연식주퇴 시스템의 운동방정식으로부터 전방가속 및 주퇴운동의 시뮬레이션을 수행하였다. FIB 시스템은 정지 상태에서 포가 발사되므로, 연식주퇴와 동일한 조건에서 단지 전방 가속을 시키지 않고 시뮬레이션을 진행 하였다. FIB와 FOOB의 시뮬레이션 결과로 부터 FOOB 시스템의 사격충격력이 FIB 시스템 보다 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. FOOB의 최대 주퇴력과 주퇴변위는 가속 힘과 전방 가속 운동량이 같은 상태에서 주퇴부의 질량이 증가하면 최대 전방 가속 속도와 최대 전방 가속 변위가 작아지므로 최대 주퇴력과 최대 주퇴 변위가 증가하게 된다. FOOB 시스템에서는 전방 가속 운동량에 흡수되는 Breach Force의 충격량 만큼 댐퍼가 작게 설계되므로 오류 모드가 일어나는 경우, 주퇴력 및 주퇴거리가 현저히 증가할 수 있다. 따라서 오류 모드의 주퇴력을 감소시키기 위한 제어기법 도입이 필요함을 알 수 있었다.



[그림 11] 질량 변화에 대한 비교



[그림 12] 질량 변화에 대한 비교 (a) 최대 전방 속도 비교 (b) 최대 주퇴변위 비교 (c) 최대 주퇴력 비교

후 기

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

참 고 문 헌

- [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] Ronald Gast, Eric Kathe, Michael Gully, Robert Durocher, Kenneth Olsen, Steven Pigliavento, "Design, Testing, And Simulation Of An Experimental 105mm Fire Out-of-Battery(FOOB) Direct Fire Gun", US Army Armament Research, Development and Engineering Center, 2003.
- [4] E. Kathe, R. Gast, "A Fire-Out-Of-Battery Tank Gun : Theory And Simulation", US Army Armament Research, Development and Engineering Center, 2002.