

지능형 포탄의 저 감속 회수장치를 이용한 포탄의 감속방법

Deceleration Method of Munition to used Soft Recovery System for Smart Munition

김명구† · 조종두* · 이승수** · 유일용**

Myoung-Gu Kim, Chongdu Cho, Seungsu Lee and Ilyoung Yu

Key Words : Smart munition(지능형 포탄), Shock wave(충격파), Soft Recovery System(저 감속 회수장치)

ABSTRACT

With the development of micro electronic circuits and optical equipment, the demand for developing smart munitions with the ability to autonomously search for and attack targets has increased. Since the electronic components within smart munitions are affected by high temperatures, pressure, and impulsive forces upon the combustion of gunpowder, stability and reliability need to be secured for them. Securing those stability and reliability requires soft recovery system which can decelerate smart munitions. A theoretical analysis of flow is performed for the secure recovery of bullets on the basis of Navier-Stokes equation for compressible fluids. The inner pressure on a pressure tube, the speeds of bullets, and the deceleration of munitions are calculated theoretically. Theoretical results are compared with the data from the experiment with soft recovery system set up at the laboratory.

1. 서 론

과학기술의 발달로 현대전쟁에서 포탄 타격 효과를 극대화하고 탄약 소모량을 줄이기 위하여 지능형 포탄이 개발되었다. 최근에 극소형 전자회로 및 광학장치의 발전으로 무선과 유선으로 유도를 하는 재래식 포탄에서 자동적으로 표적을 탐색하고 공격하는 지능형 포탄에 대한 필요성이 높아지고 있다. 지능형 포탄은 정확도와 정밀도를 향상시키기 위해서 포탄의 내부에 초소형 센서 및 전자회로 등의 정밀 구성품을 내장하고 있다. 그러므로 지능형 포탄의 내부에 있는 전자 구성품들이 화약 연소 시 발생하는 높은 온도, 압력과 충격력을 받기 때문에 전자 부품에 대한 안정성과 신뢰성을 확보해야 한다. 따라서 전자 부품에 대한 신뢰성을 대한 확인 작업이 필요하다.

신뢰성 문제들을 해결하기 위해 포탄의 속도를 감속할 수 있는 저 감속 회수장치(SRS)가 필요하다. 신뢰성 문제들을 해결하기 위해 포탄의 속도를 감속할 수 있는 저 감속 회수장치가 필요하다. 저 감속 회수장치를 이용하여 포탄 내의 전자부품들의 생존여부 확인 작업이 필수적으로 요구된다. 저 감속 회수장치는 감속방식에 따라 여러 가지 종류가 있다. 본 논문에서는 포탄이 여러 단의 고압관을 통과하는 과정에서 포탄의 운동에너지 감소시키는 방법을 사용하였다. 관내에 충격파를 발생하여 포탄의 운동에너지의 감속시키면서 정지시키는 방식인 탄도압축 감속장치를 선택하였다. 기본적인 해석 데이터를 기반으로 저 감속 회수장치를 설계하였고 실험에 의해 측정된 값과 해석치를 보정할 수 있도록 하였다. 저 감속 회수 장치의 이론적 실험적으로 측정된 데이터를 기반으로 하여, 대구경의 지능형 포탄의 저 감속 회수장치를 설계하는데 기초적인 자료로 사용하려고 한다.⁽¹⁾⁽²⁾

† 책임저자, 인하대학교 기계공학과
E-mail : mgkim21@hotmail.com
Tel : (032) 860-7321, Fax : (032) 868-7321

* 인하대학교 기계공학과
** 인하대학교 항공공학과

2. 저 감속 회수장치의 유동해석

2.1 유동해석이론

저 감속 회수장치의 내부유동은 회수장치의 특성으로 인해 1차원 압축성 유동으로 가정하였다. 탄자의 운동으로 인해 격자는 이동 및 변형이 이루어져야 한다. 압축성 유체의 비정상 1차원 압축성 오일러 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

여기서 방정식의 해 벡터와 유량 벡터는 다음과 같이 가정하였다.

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (e+p)u \end{pmatrix} \quad (2)$$

관내부에서 고압의 내부유동 묘사를 위해서는 실 기체 상태방정식을 고려하였으며, 등가체적 (covolume) 기체 방정식을 이용하여 관 내부의 압력을 계산하였다.⁽³⁾

$$p = (\gamma - 1)(1 - b\rho)\left(e - \rho \frac{u^2}{2}\right) \quad (3)$$

식(1)을 이용하여 변형하는 격자에 대하여 유한체적법을 적용하여 공간차분화하였다. 탄자의 운동 해석은 식(4)을 4th stage Runge-Kutta time stepping method를 사용하여 수행하였다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

$$M\ddot{x} = -(P_f - P_a)A \quad (4)$$

P_f 와 P_a 는 각각 탄자의 전 후면에 작용하는 압력이고 후면의 압력의 경우 대기압으로 가정하였다. 탄자의 운동 해석 시 회수장치인 압력관의 내부에서 발생하는 탄자와의 마찰현상은 무시하였다.

2.2 유동해석을 통한 설계 데이터 확립

저 감속 회수장치를 구성하는 압력관의 내부 지름이 20mm이고 공차는 ± 0.1 mm이다. 탄자질량이 100g인 탄자를 화약을 연소시켜서 초기속도 500m/s로 발사시켰다. 탄자의 최대 감속률 1600G이하 감속도로 천천히 감속시켰다. 탄자의 감속률이 1600G를 초과하면 실제의 지능형 포탄의 내부에 있는 전자회로들이 충격에 의해서 파손이나 파괴가 될 확률이 커진다. 그러므로 탄자는 최대감속률 이하의 감속도로 감속을 시켜서 단시간 내에 정지를 시킨다. 탄자의 정지 시간이 길어지면 탄자의 이동거리가 길어져서 압력관의 길이가 길어지는 단점이 있다. 탄자를 최대감속률 이하

의 감속도로 감속을 하기 위한 압력관의 길이 및 압력관내에서 걸리는 최대압력의 크기를 계산하였다. 이론적인 계산은 실 기체에 가까운 등가체적 상태방정식을 이용하여 압력관내의 탄자가 통과하는 동안의 최대압력과 탄자가 정지하는 거리를 계산하였다. 압력관내에서 탄자를 정지시키는 힘은 탄자가 고속으로 압력관 내로 들어가면 관내부에서 충격파가 발생을 하게 된다. 관내부의 충격파는 탄자의 정면에서 계속 발생하게 된다. 이 충격파는 압력관 내부에서 반사가 되어서 다시 탄자의 정면에 부딪치게 되어서 탄자의 속도를 감속시키는 역할을 한다.

탄자운동을 이론적으로 해석한 결과에서 마지막 관의 압력이 낮아지면 회수장치의 끝에서 반사한 충격파로 인해 탄자 전면에 작용하는 압력이 낮아지며, 마지막 관의 길이가 길어지면 높은 압력이 탄자 전면에 작용하는 시간이 길어지기 때문에 압력관을 구분하는 격막의 수를 3개로 하였다. 그러므로 관내에서 발생하는 최대 압력을 줄일 수 있는 것으로 판단된다. 경우에 따라서 압력관 내부에 특정 압력과 압력관의 길이의 조합에서 탄자가 정지할 무렵에 감속률이 급격히 커지는 현상이 발생하였다. 이 경우에도 감속률은 설계 제한조건인 1600G 보다 작았다. 전체의 구간을 격막을 사용하여 3개의 구간으로 구분하였다. 각 압력관의 압력이 0.4052MPa(4기압), 0.1013MPa(1기압), 0.1013MPa(1기압) 그리고 길이가 각각 6m, 12m, 7m일 때 최적의 설계 제한조건 및 설계 목표를 만족하며 급격한 감속현상도 나타나지 않았다.⁽⁸⁾

Fig. 1은 해석적으로 탄두가 500m/s의 속도로 압력관을 통과하였을 때, 시간에 대한 감속을 나타낸 그래프이다. 탄자의 운동해석은 실기체 상태방정식을 사용하여 탄자의 운동을 계산하였다. 탄자의 운동 시뮬레이션을 통하여 얻어진 설계된 저 감속 회수장치의 감속도는 1600G이하의 값을 갖고 있다.(Fig. 2) 그 결과 압력관 내부에서 최대 압력이 4.60MPa이며, 최대압력은 탄자가 맨 처음 회수장치에 들어갈 때 가장 높다는 것을 알 수 있다. 회수장치 내부에서 발생하는 충격파에 의해서 탄자의 속도가 감소되어서 탄자가 압력관 내부에서 14.33m 이동하여 정지함을 확인 할 수 있었다. 이 경우 최대 감속률은 1600G보다 낮은 1495G로 감속하여 탄자가 안전하게 정지함을 이론적으로 해석하였다.⁽⁴⁾

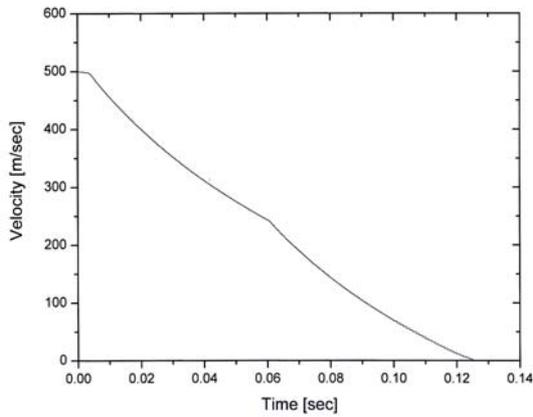


Fig. 1 The velocity of ballistic in the pressure pipe

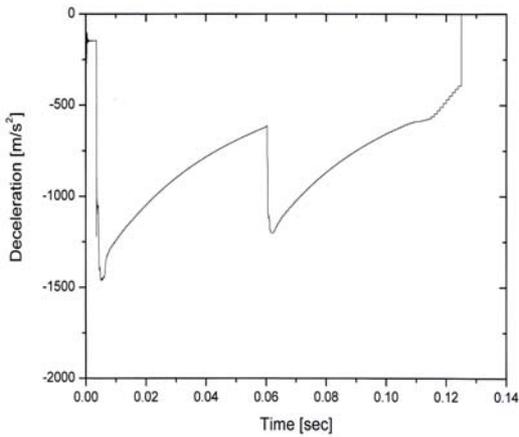


Fig. 2 The deceleration of ballistic in the pressure pipe

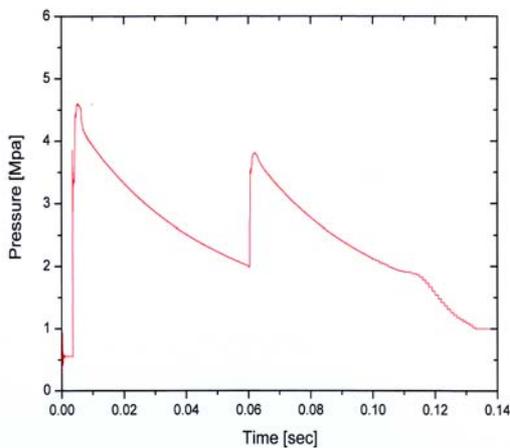


Fig. 3 The pressure distribution of ballistic in the pressure pipe

Table 1 Vulcan ball(STP K159 20mm) of specification

Materials	Size	Shape	Total mass	Velocity
Steel(SUS)	168.02mm	Parabolic	254g	1030m/s

3. 저 감속 회수장치의 설계 및 실험방법

3.1 저 감속 회수장치의 설계

SRS 전체 길이는 약 25.5m이고, 높이는 지상에서 0.72m이고, 발사대와 Muzzle Breaker Tube, 압력관으로 구성된다. 발사관은 20mm 탄자를 화약의 연소로 가속시키는 역할을 하며 탄자는 20mm 발칸탄(Vulcan)을 사용하였다. 발칸탄의 발사는 전기점화 방식을 이용하여 점화를 하였다. 사용된 발칸탄의 제원은 Table 1에 제시되어 있다. 발칸탄은 연습용 대공탄약으로 사용되는 STP K159의 20mm 탄을 사용하였다. 총질량은 254g이고, STP K159 탄자의 질량은 98.89g이고, 추진제의 질량은 31.61g(468.36grain)이며, 실제 발칸탄의 초구속도는 1030m/s이지만 발칸탄의 초구속도를 500m/s로 하기 위하여 추진제의 질량을 10.20g(151.20grain)만 넣어서 사용하였다. Muzzle Breaker Tube는 발사대에서 화약의 연소가스에 의해서 탄자의 연속적인 가속을 최소화하며, 탄자 후방에서 작용하는 고압의 연소가스를 제거하는 역할을 한다. 또한 연소가스가 압력관의 내부로 들어오지 못하도록 하여 압력관의 부식과 압력관 내부에 연소산화물이 쌓이는 것을 방지한다.

압력관의 각각의 단은 실리콘 격막을 사용하여 분리를 시킨다. 각각의 단의 압력관은 처음에 초기 압력으로 내부압력을 유지함과 동시에 탄자가 압력관에 들어오면 탄자의 전방에서 형성되는 고압의 압력과 충격파를 견디며 탄자를 감속하는 역할을 한다. 압력관은 2m 간격으로 실리콘 격막을 장착할 수 있도록 플랜지로 연결되어 있으며, 다양한 실험 조건에 따라 변경이 가능하도록 설계되었다. 압력관에서 탄자가 압력관을 통과할 때 발생하는 압력을 측정하기 위하여 압력센서를 각각의 압력관에 설치하였다. 그리고 탄자의 속도를 측정하기 위하여 탄자를 미리 자화를 하여 자성체로 만들었

다. 또한 압력관 외부에 코일을 감아서 탄자가 통과를 하면 속도를 측정할 수 있게 하였다.



Fig. 4 Launcher & Muzzle Breaker Tube of the soft recovery system



Fig. 5 Pressure pipe of the soft recovery system



Fig. 6 A Vulcan ball stop at end of pipe in the soft recovery system

3.2 실험방법

압력관의 초기압력과 압력관의 길이는 유동해석을 통해 얻은 이론치를 근거로 하여 실험을 수행하였다. 발칸탄의 점화는 전기적인 점화방식을 이용하여 점화를 한다. Muzzle Breaker를 통해 설치된 전기적인 트리거를 이용하여 탄자가 Muzzle Breaker를 통과하는 시점을 측정하여 탄자가 500m/s의 속도로 압력관에 들어가는 정확한 시점을 측정하였다. 시작 시점을 측정 후 압력관에 설치되어 있는 각각의 압력센서 및 속도센서들이 탄자가 압력관을 통과하는 동안의 압력관 내부에서 발생하는 충격파에 의한 내부 압력변화와 탄자가 감속이 되는 속도를 측정한다.

압력을 측정하기 위하여 사용된 압력센서는 피에조 센서로 PCB사의 111A22를 사용하였다. 피에조 압력센서는 높은 압력(100MPa)에서도 압력 측정이 가능하고, 응답속도가 좋아서 압력의 변화가 빠른 곳에 사용하기가 용의하다. 속도센서는 유도자장 방식의 유도코일을 사용하였다. 유도코일은 압력관 외부에 2m 간격으로 코일을 감아서 설치를 하였다. 탄자를 자화하기 위하여 자화기를 이용하여 자화를 한 후에 사용하였다. 자화를 한 탄자가 코일을 통과하면 코일에서 유도자장에 의해서 전압이 발생하고, 탄자가 고속으로 통과 시 발생하는 전압을 측정하여 속도를 계산하였다. 유도코일은 압력관 외부에 2m 간격으로 10개를 설치하여 탄자가 감속되는 속도와 가속도를 계산하는데 각각 사용하였다. 각각의 센서에서 측정된 전압 신호는 NI사의 NI-A/D board(PCI-4474)를 통해서 컴퓨터에 실시간으로 저장된다. 컴퓨터에서는 측정된 값이 0.1ms의 간격으로 측정값을 실시간으로 저장하였다.

측정하기 전에 두 번의 시험발사로 계측장비와 회수장치가 일직선으로 정렬이 되어 있는가를 점검 하였다. 첫 번째 압력관에 초기압력을 0.4052MPa(4기압)으로 설정을 하고 압력관의 길이는 6m로 하였다. 두 번째 압력관에 초기압력을 0.1031MPa(1기압)으로 설정을 하고 압력관의 길이는 12m로 하였다. 압력관을 구분하는 격막은 모두 3개를 사용하였다. 나머지 관의 끝부분은 모두 개방을 하여 대기압 조건으로 실험을 수행하였다.⁽¹⁾

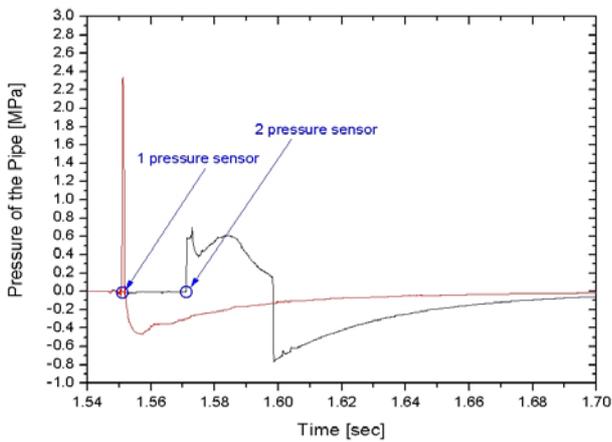


Fig. 7 Pressure curve for pressure sensor in the soft recovery system

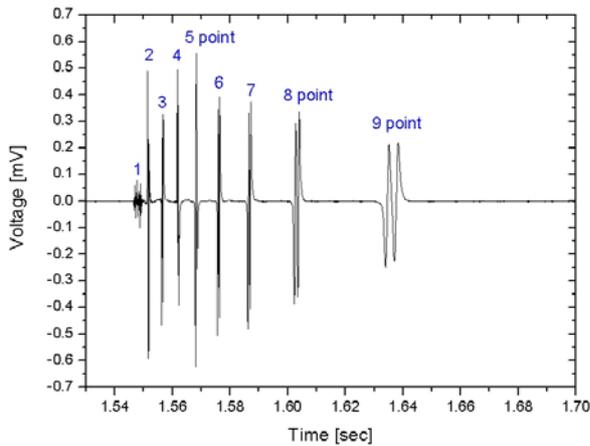


Fig. 8 Velocity curve for magnetic sensor in the soft recovery system

4. 실험 결과 및 분석

저 감속 회수장치를 이용하여 다음과 같은 실험 결과를 얻었다. Fig. 7는 탄자의 운동 시 각각의 압력센서에서의 압력데이터를 보여주고 있다. 각 센서에 따른 압력의 서로 다른 양상이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 압력센서에서의 압력분포를 보면 각 압력센서 중 최대의 압력인 2.41MPa이 작용하는 것을 볼 수 있다. 두 번째 압력센서에는 0.82MPa이 측정되었다. 설계 데이터 확립 시 예상 되었던 4.60MPa보다는 낮은 압력이었다. 저 감속 회수장치에서 고속의 탄자와

압력관 사이의 마찰과 내부의 불균일 유동 때문에 이론치 보다 낮은 압력값이 측정되었다. 탄자의 진행 후 첫 번째와 두 번째의 압력센서에서 압축력이 작용하는 것을 볼 수 있는데 이는 탄자의 정지 이후 관내에 생성된 충격파로 인한 일시적인 수축 현상이라고 판단된다.

탄자의 속도를 마그네틱 센서를 사용하여 측정한 속도 그래프가 Fig. 8에 보여주고 있다. 첫 번째 신호는 탄자의 속도가 너무 빨라서 정확한 속도를 측정을 하지 못했지만 그 이후의 속도는 모두 정확하게 측정을 할 수 있었다. 탄자의 속도가 감소함에 따라 센서의 진폭이 감소하고 센서로 측정되는 시간이 길어지고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 총 9개의 포인트에서 속도를 측정할 수 있었다. 속도가 감속을 함에 따라 측정된 값의 시간간격이 길어지고 있는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

고속으로 움직이는 탄자를 저 감속 회수장치를 이용하여 안전하게 회수하는 회수장치에 대하여 연구하였다. 회수장치를 설계하기 위하여 탄자의 움직임에 대한 압력관 내부의 유동해석을 하였고 유동해석의 결과로 얻어진 설계 변수 값들의 값을 이용하였다. 유동해석에서 압력관 내부에서 고속의 탄자에 의해 만들어지는 충격파의 최대 압력이 4.60MPa으로 계산되었고 정지거리는 14.33m이다. 설계 제작된 저 감속 회수장치에 탄자가 500m/s의 속도로 회수장치에 들어가서 약 18m 위치에서 탄자가 정지하였다. 압력관에 걸리는 최대 압력을 측정하였을 때 첫 번째 관에서 2.41MPa의 압력이 발생하였다. 초기 이론적인 해석이 실험적인 결과와 정성적으로는 어느 정도 맞으나 정량적으로 일치하지 않았다. 그 이유는 이론적 해석에서 탄자와 압력관 사이의 마찰현상을 무시하였고, 탄자에 의해 발생하는 충격파 해석에서 실기체의 온도를 상온(20°)을 기준으로 해석을 하였다. 또한 공기의 압축시 발생하는 순간 온도의 상승현상을 무시한 결과이다. 그러므로 이론적 모델을 수정을 하여 실험적 결과와 일치시키는 작업이 필요하다. 향후 155mm 이상의 대형 지능형 탄두에 대한 저 감속 회수장치에 대한 연구를 수행하려고 한다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 지정 인하대학교 고에너지물질 특화연구센터의 지원(HM-25)을 받았으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Teng, R. N., July 1972, Ballistic Compression Patent, issued to McDonnell Douglas Corporation, No. 3,678,745.
- (2) Roe, R. L., 1981, Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes, J. of Comp. Physics, Vol. 43, pp. 123-132.
- (3) Birk, A., and Kooker, D. E., 2001, A Novel Soft Recovery System for the 155-mm Projectile and It's Numerical Simulation, Army Research Laboratory, ARL-TR-2462.
- (4) Berthelot, J., 1998, Composite Material, Springer, pp. 384-391.
- (5) Chen, J. K. and Sun, C. T., 1985, Nonlinear Transient Responses of Initially Stressed Composite Plate, Computer & Structures, Vol. 40, No. 2, pp. 513-520.
- (6) Gibson, R. F., 1994, Principles of Composite Material Mechanics, Mc-Hill, pp. 1-31.
- (7) K. Loganathan and S. C. Chang, 1979, Finite Element Representation and Pressure Stiffness in Shell Stability Analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 14, pp. 1413-1429.
- (8) Jongyoung Chae, Myoung-Gu Kim, Chongdu Cho, Ilyoung Yu, Seungsu Lee and Yongsan Lee, 2006, The Design and Evaluation of Soft Recovery System's Stability by Structural Analysis, KSME Spring Conference, pp. 1290-1295.