

# 유압완충기의 비선형 특성에 관한 연구

○이 규섭\*, 최 영진\*, 김 인성\*\*, 유 원희\*\*, 박 영필\*\*\*

( Study on the Nonlinear Characteristics of Oleo-Pneumatic Buffer System )

( Gyu-Seop Lee, Young-Jin Choi, Won-hee You, In-Sung Kim, Young-pil Park )

## 1. 서론

포는 대체로 정확도와 최대 발사거리 및 최대 발사속도 등에 의해 그 성능이 표현된다. 그 중에서도 최대 발사속도는 매우 중요한 인자로서 포의 주퇴복좌 장치의 성능에 의해 직접적으로 영향을 받게 된다. 따라서 포의 최대 발사속도 향상을 위해서는 주퇴복좌 장치의 동특성 해석 능력을 확보하고, 그로부터 주퇴 장치의 설계 변경이 가능하도록 해야 한다.

한편, 주퇴복좌기의 주퇴특성은 주퇴시 총주퇴저항력이 전 주퇴장에 대해서 거의 일정해야만 포신에 전달되는 힘을 최소로 하면서 주퇴시간을 최소로 할 수 있으며 이러한 설계 개념으로 주퇴복좌기를 설계한다. 그에 따라 주퇴복좌기는 그 내부가 가변 오리피스 및 조절 로드로 이루어져 주퇴복좌기의 주퇴저항력을 주퇴속도 및 주퇴변위에 따라 변화시키도록 되어 있다. 따라서 주퇴복좌기는 필연적으로 강한 비선형 특성을 나타낸다.

이러한 주퇴복좌기를 모델링할 때에 기존에는 주퇴복좌기내의 모든 유체역학적 요소를 고려하여 모델링하는 기법이 통용되어 왔다. 그러나 이러한 모델링은 각 요소의 모델링 오차가 누적될 위험이 있으므로 정확한 모델링을 보장할 수 없으며, 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 따라서 본 연구에서는 주퇴완충기 시뮬레이터를 이용한 실험에 따른 계의 파라미터 예측을 통하여 모델링하는 기법을 시도하여 보았다.

## 2. 동적 모델의 설정 및 파라미터 동정법

주퇴완충기의 동적 모델을 다음의 4가지 가능한 경우로 가정한다.

\* 국방과학연구소, 정희원

\*\* 연세대학교 대학원

\*\*\* 연세대학교 기계공학과, 정희원

모델#1

$$M_r \ddot{x} + Kx + C\dot{x} + C_v \dot{x}^2 \text{sgn}(\dot{x}) + f \text{sgn}(\dot{x}) - M_r g = 0 \quad (1)$$

모델#2

$$M_r \ddot{x} + Kx + C_v \dot{x}^2 \text{sgn}(\dot{x}) + f \text{sgn}(\dot{x}) - M_r g = 0 \quad (2)$$

모델#3

$$M_r \ddot{x} + Kx + C\dot{x} + f_1 \text{sgn}(\dot{x}) - f_2 |x| \text{sgn}(\dot{x}) - M_r g = 0 \quad (3)$$

모델#4

$$M_r \ddot{x} + Kx + C\dot{x} + f \text{sgn}(\dot{x}) - M_r g = 0 \quad (4)$$

단,  $x$  : 주퇴변위,  
 $M_r$  : 운동질량,  $K$  : 주퇴스프링의 스프링 상수,  
 $C$  : 주퇴속도에 대한 유체저항 계수,  
 $C_v$  : 주퇴속도의 제곱에 대한 유체저항 계수,  
 $f, f_1$  : 주퇴복좌기의 마찰 계수,  
 $f_2$  : 주퇴변위에 관한 마찰 계수,  
 $g$  : 중력가속도

모델#1에 대해 최소자승곡선적합에 의한 파라미터 동정법을 적용하기 위하여 측정 데이터에 의한 제곱오차  $E$ 를 다음과 같이 정한다.

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} [M_r \ddot{x}_i + Kx_i + C\dot{x}_i + C_v \dot{x}_i^2 \text{sgn}(\dot{x}_i) + f \text{sgn}(\dot{x}_i) - M_r g]^2 \quad (5)$$

이제,  $K, C, C_v, f$  를 미지의 파라미터로 놓으면, 각 미지의 파라미터에 대한  $E$ 의 편미분값을 0으로 놓으면 제곱오차  $E$ 는 최소값을 갖게된다. 이 때 얻어지는 4개의 방정식을 매트릭스 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\underline{A} \underline{q} = \underline{r} \quad (6)$$

단,

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \dot{x}_i & \sum x_i x_i \text{sgn}^2(x_i) & \sum x_i \text{sgn}(x_i) \\ \sum x_i \dot{x}_i & \sum \dot{x}_i^2 & \sum \dot{x}_i^3 \text{sgn}(\dot{x}_i) & \sum \dot{x}_i \text{sgn}(\dot{x}_i) \\ \sum x_i^2 \text{sgn}(x_i) x_i & \sum x_i^3 \text{sgn}(x_i) & \sum x_i^4 \text{sgn}^2(x_i) & \sum x_i^2 \text{sgn}^2(x_i) \\ \sum \text{sgn}(x_i) x_i & \sum \text{sgn}(\dot{x}_i) \dot{x}_i & \sum x_i^2 \text{sgn}^2(x_i) & \sum \text{sgn}^2(x_i) \end{bmatrix}$$

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} K \\ C \\ C_v \\ f \end{bmatrix} \quad \underline{r} = \begin{bmatrix} -\sum x_i P_i \\ -\sum \dot{x}_i P_i \\ -\sum x_i^2 \text{sgn}(x_i) P_i \\ -\sum \text{sgn}(\dot{x}_i) P_i \end{bmatrix}$$

그러므로, 미지의 파라미터  $\underline{q}$ 는 다음과 같다.

$$\underline{q} = \underline{A}^{-1} \underline{r} \quad (7)$$

똑같은 방법으로 모델 #2, #3, #4에 대해 최소자승곡선적합법을 사용하여, 정의한 미지의 파라미터를 찾아내며, 각 모델에 대한  $\underline{A}$ ,  $\underline{q}$ ,  $\underline{r}$  다음과 같다.

● Model #2 :

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \dot{x}_i & \sum x_i \text{sgn}(\dot{x}_i) \\ \sum x_i^2 \text{sgn}(x_i) x_i & \sum x_i^3 \text{sgn}(x_i) & \sum x_i^2 \text{sgn}^2(x_i) \\ \sum \text{sgn}(x_i) x_i & \sum \text{sgn}(\dot{x}_i) \dot{x}_i & \sum \text{sgn}^2(x_i) \end{bmatrix}$$

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} K \\ C_v \\ f \end{bmatrix} \quad \underline{r} = \begin{bmatrix} -\sum x_i P_i \\ -\sum x_i^2 \text{sgn}(x_i) P_i \\ -\sum \text{sgn}(\dot{x}_i) P_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

● Model #3 :

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \dot{x}_i \\ \sum x_i \dot{x}_i & \sum \dot{x}_i^2 \\ \sum \text{sgn}(x_i) x_i & \sum \text{sgn}(\dot{x}_i) \dot{x}_i \\ \sum |x_i| \text{sgn}(x_i) x_i & \sum |x_i| \text{sgn}(\dot{x}_i) \dot{x}_i \end{bmatrix}$$

$$\underline{r} = \begin{bmatrix} \sum x_i \text{sgn}(x_i) & \sum x_i |x_i| \text{sgn}(x_i) \\ \sum \dot{x}_i \text{sgn}(\dot{x}_i) & \sum \dot{x}_i |x_i| \text{sgn}(\dot{x}_i) \\ \sum \text{sgn}^2(x_i) & \sum |x_i| \text{sgn}^2(x_i) \\ \sum |x_i| \text{sgn}^2(x_i) & \sum |x_i|^2 \text{sgn}^2(x_i) \end{bmatrix}$$

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} K \\ C \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad \underline{r} = \begin{bmatrix} -\sum x_i P_i \\ -\sum \dot{x}_i P_i \\ -\sum \text{sgn}(x_i) P_i \\ -\sum |x_i| \text{sgn}(x_i) P_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

● Model #4 :

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \dot{x}_i & \sum x_i \text{sgn}(x_i) \\ \sum x_i \dot{x}_i & \sum \dot{x}_i^2 & \sum \dot{x}_i \text{sgn}(\dot{x}_i) \\ \sum \text{sgn}(x_i) x_i & \sum \text{sgn}(\dot{x}_i) \dot{x}_i & \sum \text{sgn}^2(x_i) \end{bmatrix}$$

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} K \\ C \\ f \end{bmatrix} \quad \underline{r} = \begin{bmatrix} -\sum x_i P_i \\ -\sum \dot{x}_i P_i \\ -\sum \text{sgn}(x_i) P_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3. 주퇴완충기 시뮬레이터에 의한 실험 및 분석결과

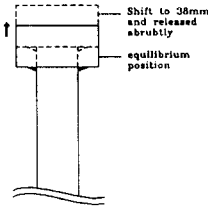
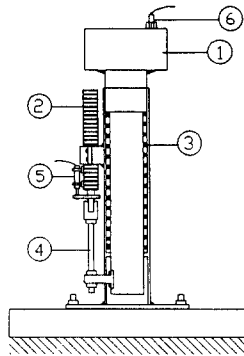
#### 3.1 주퇴완충기 시뮬레이터에 의한 실험방법

다음 그림 (a)와 같은 주퇴완충기 시뮬레이터를 사용하여 그림 (b)와 같이 각기 길이가 다른 8개의 연결 로드를 사용하여 8개의 각각 다른 피스톤 위치에서 자유낙하 실험을 실시하였다. 이 때, 운동질량 위에 가속도계를, 주퇴 완충기 피스톤 로드에 직선운동 가변저항기를 부착하여 각각 가속도와 변위 신호를 HP3562A 동적 신호분석기로 받아 저장한 다음, 속도는 변위 신호를 미분하여 저장하였다.

이 때 포의 주퇴운동시의 가동부분의 질량과 같게 제작한 주퇴완충기의 이동질량의 크기  $M_r$ 과 주퇴스프링의 스프링 상수는 다음과 같다.

$$M_r(\text{moving mass}) : 242.18 \text{ [kg]}$$

$$\text{spring stiffness} : 46,570 \text{ [N/m]}$$

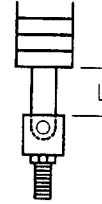


- ① 가동질량
- ② 주퇴완충기
- ③ 주퇴스프링
- ④ 연결 나사봉
- ⑤ 직선운동 가변저항기
- ⑥ 가속도계

(a) 주퇴완충기 시뮬레이터 (b) 실험방법  
그림 1. 주퇴완충기 시뮬레이션에 의한 실험

표 1. 각 피스톤 위치

| 피스톤 위치 | L(mm) |
|--------|-------|
| 1st    | 228   |
| 2nd    | 205   |
| 3rd    | 186   |
| 4th    | 167   |
| 5th    | 117   |
| 6th    | 127   |
| 7th    | 108   |
| 8th    | 88    |



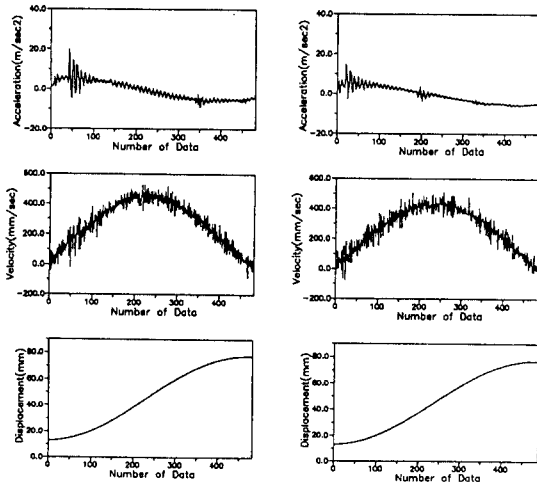
측정된 데이터를 이용하여, 앞에서 기술한 최소화승곡선적합에 의한 파라미터 동정법을 사용하여 각 모델에 대한 미지의 파라미터들을 찾아내면 다음의 표 2와 같다.

표 2. 각 모델에 대한 파라미터 동정

| posi-tion | 모델 # 1  | 모델 #2                                   | 모델 #3   | 모델 #4                                  |
|-----------|---|---|---|--|
| 1st       | (K) 4.7E+4<br>(C) 2.3E+3<br>(Cv) -2.6E+3<br>(f) -4.8E+1 | (K) 4.7E+4<br>(Cv) 1.7E+3<br>(f) 1.6E+2 | (K) 4.8E+4<br>(C) 9.6E+2<br>(f1) 8.9E+1<br>(f2) -1.0E+3 | (K) 4.7E+4<br>(C) 9.9E+2<br>(f) 6.0E+1 |
| 2nd       | (K) 4.5E+4<br>(C) 1.6E+3<br>(Cv) -1.6E+3<br>(f) 1.9E+2  | (K) 4.5E+4<br>(Cv) 1.4E+3<br>(f) 3.3E+2 | (K) 4.8E+4<br>(C) 6.5E+2<br>(f1) 3.9E+2<br>(f2) -4.8E+3 | (K) 4.5E+4<br>(C) 7.8E+2<br>(f) 2.6E+2 |
| 3rd       | (K) 4.6E+4<br>(C) 5.6E+1<br>(Cv) 3.2E+2<br>(f) 3.3E+2   | (K) 4.6E+4<br>(Cv) 3.3E+2<br>(f) 3.4E+2 | (K) 4.8E+4<br>(C) 7.9E+2<br>(f1) 2.6E+2<br>(f2) -4.1E+3 | (K) 4.5E+4<br>(C) 8.4E+2<br>(f) 1.5E+2 |
| 4th       | (K) 4.3E+4<br>(C) -6.1E+1<br>(Cv) 6.1E+2<br>(f) 4.2E+2  | (K) 4.3E+4<br>(Cv) 5.1E+2<br>(f) 4.1E+2 | (K) 4.5E+4<br>(C) 2.3E+2<br>(f1) 4.4E+2<br>(f2) -2.9E+3 | (K) 4.3E+4<br>(C) 2.7E+2<br>(f) 3.9E+2 |
| 5th       | (K) 4.4E+4<br>(C) 5.1E+2<br>(Cv) 4.4E+2<br>(f) 1.1E+2   | (K) 4.5E+4<br>(Cv) 1.3E+3<br>(f) 1.6E+2 | (K) 4.5E+4<br>(C) 7.1E+2<br>(f1) 1.4E+2<br>(f2) -1.9E+3 | (K) 4.4E+4<br>(C) 7.6E+2<br>(f) 8.5E+1 |
| 6th       | (K) 4.4E+4<br>(C) 9.2E+2<br>(Cv) -3.1E+2<br>(f) 1.5E+2  | (K) 4.4E+4<br>(Cv) 1.3E+3<br>(f) 2.3E+2 | (K) 4.6E+4<br>(C) 6.7E+2<br>(f1) 2.6E+2<br>(f2) -3.7E+3 | (K) 4.4E+4<br>(C) 7.5E+2<br>(f) 1.6E+2 |
| 7th       | (K) 4.6E+4<br>(C) 1.3E+3<br>(Cv) -1.4E+3<br>(f) 3.7E+1  | (K) 4.6E+4<br>(Cv) 8.3E+2<br>(f) 1.7E+2 | (K) 4.8E+4<br>(C) 4.9E+2<br>(f1) 1.7E+2<br>(f2) -3.0E+3 | (K) 4.6E+4<br>(C) 5.3E+2<br>(f) 1.1E+2 |
| 8th       | (K) 4.6E+4<br>(C) 9.6E+2<br>(Cv) -1.3E+2<br>(f) 1.2E+1  | (K) 4.6E+4<br>(Cv) 1.5E+3<br>(f) 1.1E+2 | (K) 4.6E+4<br>(C) 8.9E+2<br>(f1) 2.3E+1<br>(f2) -1.8E+2 | (K) 4.6E+4<br>(C) 8.9E+2<br>(f) 1.9E+1 |

### 3.2 측정결과 및 분석결과

8군데의 각 피스톤 위치는 표 1과 같고, 측정결과에 의해서 첫번째와 두번째 위치에서 측정된 가속도, 속도, 변위를 그림으로 그리면 그림 2. (a)~(b)와 같다.



(a) 첫번째 위치 (b) 두번째 위치

그림 2. 각 위치에서의 가속도, 속도, 변위  
(샘플링 타임 = 488μsec)

위 표 2로부터 각 모델의 파라미터가 물리적으로 가능한 모델은 모델 #2와 모델 #4이다. 이 모델 #2와 모델 #4에서 유체 저항력을 나타내는 항의 계수는 각각 Cv와 C이며, 실제 주퇴시에 유압에 의한 주퇴저항력과 근사한 주퇴저항력을 나타내는 모델은 모델 #2이다. 모델 #2의 Cv를 주퇴 변위에 따라 2차 다

항식으로 곡선적합하면 그림 3과 같으며 그때 곡선적합한 식은 식 (11)과 같다.

그러나 실험을 통하여 얻은  $C_v$ 가 8군데의 주퇴완충기 피스톤 위치로 한정되어 있고 실험장치의 구조상 피스톤의 양 끝단 위치에서의 실험이 불가능하여,  $C_v$ 를 2차 다항식으로 곡선적합한  $C_v$ 가 현재 주퇴완충기의  $C_v$ 의 전반적인 크기는 나타낼 수 있을지라도 그 형태까지 완벽하게 나타낸다고 하기에는 다소 무리가 있다.

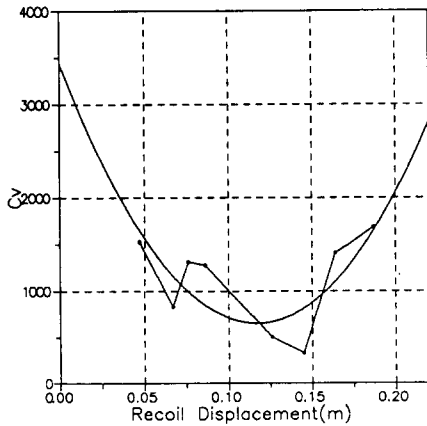


그림 3. 주퇴 변위 대  $C_v$  및  $C_v$ 의 곡선적합

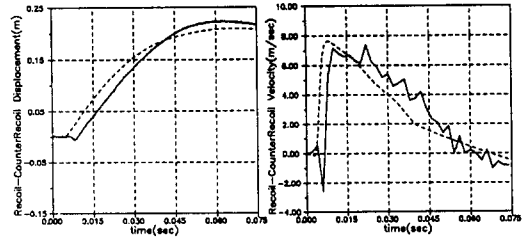
$$C_v(x) = 203,453x^2 - 47,596.2x + 3,436.7 \quad (11)$$

#### 4. 선정된 모델에 의한 시뮬레이션

선정된 모델 #2를 검증하기 실제 사격실험의 포미 압력 데이터를 포미력으로 환산한 다음, 모델 #2의 시뮬레이션 입력 데이터로 한다.

이 시뮬레이션으로부터 얻어진 주퇴변위 및 주퇴속도를 포미 압력과 동시에 측정된 주퇴변위 및 그로부터 미분한 주퇴속도와 비교하여 보면 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 결과와 측정결과가 어느정도 잘 일치하고 있음을 보여 모델 #2의 적합성을 보여주어 준다.



(a) 주퇴변위

(b) 주퇴속도

그림 4. 측정된 주퇴 변위, 속도와 시뮬레이션과의 비교

(— : 실험, --- : 시뮬레이션)

#### 5. 결론

가능성이 있는 몇가지의 모델을 설정하고 주퇴완충기 시뮬레이터에 의한 실험 데이터를 이용한 파라미터 동정을 실시하여, 물리적으로 의미가 있고 실제 주퇴저항력의 크기를 잘 나타내는 모델을 선정하였다. 이 모델을 이용하여 사격실험에서 측정된 포미 압력으로부터 환산된 포미력을 입력으로 한 시뮬레이션을 수행하여, 그 결과가 실제 사격실험에서 측정된 주퇴변위 및 주퇴속도와 잘 일치함을 보여 선정된 모델의 타당성을 검증하였다.

#### 참고 문헌

1. J.R. Anderson, A.A. Ferri, 1990 Journal of Sound and Vibration 140(2), 287-304, Behavior of a single-degree-of-freedom system with a generalized friction law.
2. H. Wilson, K. Deb, 1990 Journal of Sound and Vibration 141(1), 55-70, Evaluation of high order single-step integrators for structural response calculation.
3. J.S. Arora, E.J. Haug JR., A guide to design of artillery recoil mechanisms. U.S. Army Armament Research And Development Command, 1977.
4. Engineering design handbook, Carriages and mountseries Recoil systems. Headquarters, U.S. Army Material Command, 1963.

5. S.M. Wu, A.N. Madiwale, Optimal control of active recoil mechanisms, Technical report, Rock Island Arsenal, 1977.
6. J.W. Frantz, Fluid flow in 8 inch Howitzer M4 recoil mechanism, Technical notes, Rock Island Arsenal Research & Engineering Division Development Engineering Branch, 1966.

후기 : 본 연구는 국방과학연구소의 지원(UD910087CD)을 받아 수행되었음.