

<논 문>

점탄성 감쇠재료를 이용한 포신 잔류진동의 조기 안정화 방안연구

A Study on the Stabilization of Gun Barrel by Viscoelastic Damping Material

임 재 희* · 백 판 구* · 이 재 영** · 정 백 기**

Jae-Hee Lim, Pan-Gu Baek, Jae-Yeong Lee and Baek-Gi Chung

(1999년 1월 18일 접수 : 1999년 7월 13일 심사완료)

Key Words : Residual Vibration(잔류진동), Bore Evacuator(제연기), Muzzle Brake(제퇴기), Fundamental Frequency(기본 진동수), Settling Time(안정화 시간), Passive Damping(수동감쇠), Viscoelastic Damping(점탄성 감쇠)

ABSTRACT

Because the residual vibration of a gun barrel acts negatively on the firing of a large calibers gun, the fast stabilization of the residual vibration is indispensable to the precise and successive firing. In this study, the residual vibrations of a gun barrel carrying a bore evacuator and a muzzle brake are investigated by the experimental method. The influence of the eigenfrequencies and the mode shapes of gun barrel on the fast stabilization of the residual vibration is studied for the various masses of bore evacuator and muzzle brake, the position of bore evacuator. Also the relationships between the fundamental frequencies and the settling times of the gun barrel are investigated for the various parameters. The experiments to reduce the residual vibration using the viscoelastic damping material were done for the various damping treatments. The results show that the partial damping treatment gives the best result among the various treatments for the reduction of residual vibration of the system.

1. 서 론

전차, 자주포 등과 같은 무기체계에서 사거리 증가를 위해서는 장포신화와 더불어 약실압력을 증가시켜야하지만 이는 사격간 포신의 진동 및 사격후 포신의 잔류진동을 증가시키게 된다.

포신의 잔류진동을 감소시켜 요구되는 발사속도와 이에 따르는 사격의 정확도를 향상시키기 위해서는 탄두가 포구를 이탈한 후 진행되는 포신의 진동 현

상에 대한 분석과 더불어 포신의 잔류진동을 유발시키는 원인들을 규명한 후, 잔류진동을 감소시킬 수 있는 방안들을 연구하여야 한다.

포신의 길이, 강성, 무게와 더불어 포신의 중간 및 끝단에 각각 부착된 제연기와 제퇴기가 포신의 거동에 영향을 미칠 것이기 때문에 본 연구에서는 포신의 강성과 무게, 제연기와 제퇴기의 무게 및 제연기의 부착위치 등의 변화에 대한 포신의 잔류진동을 해석하고 효과적인 포신 안정화 대책으로 점탄성재료를 이용한 수동제어 방안을 실험적 방법을 중심으로 연구하였다.

이를 위해 먼저 포신 및 제퇴기 무게에 의한 관성력을 포신의 끝단에 작용하는 충격하중으로 간주하

* 군사과학대학원 무기공학과

** 정회원, 군사과학대학원 무기공학과

고 포신의 감쇠를 고려한 단순화된 수학적 모델로부터 포신의 운동 방정식을 구한 후, 이를 이용하여 포신, 제연기 및 제퇴기의 무게변화, 제연기의 부착 위치 등이 포신의 잔류진동의 안정화 시간에 미치는 영향을 해석하고, 점탄성 감쇠재료를 이용하여 잔류진동을 제어하는 방안을 실험적 방법으로 연구를 하였다.

2. 포신의 잔류 진동 해석

2.1 포신의 운동방정식

본 연구를 위하여 포신은 Fig. 1에서와 같이 일단이 고정되고 단면이 균일한 Euler-Bernoulli보로 간주되었으며 제연기와 제퇴기는 그림에서와 같이 보에 부착된 집중질량들로 간주되었다.

Fig. 1에서 단순화된 포신모델에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$EIu^{IV} + c\dot{u} + [\rho A + M_1\delta(x-\xi)]\ddot{u} = p(x, t) \quad (1)$$

여기서, u 는 보의 수직변위, E 는 Young's modulus, I 는 단면 관성모멘트, ρ 는 밀도, A 는 단면적, M_1 과 M_2 는 각각 제연기와 제퇴기의 질량, ξ 는 제연기 M_1 의 부착위치를 나타내며, $p(x, t)$ 는 포신에 작용하는 외력, c 는 감쇠상수(damping constant)를 나타낸다. 한편 보의 강성계수 EI 와 ρ 및 A 가 보의 전 길이에 걸쳐 일정하다고 가정하였다.

보의 경계조건은 다음과 같으며

$$\begin{aligned} u(0, t) &= 0 \\ u'(0, t) &= 0 \\ EIu''(l, t) &= 0 \\ EIu'''(l, t) &= M_2\ddot{u}(l, t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 (')은 위치좌표에 대한 변화율을, ($\dot{}$)는 시간에 대한 변화율을 각각 나타낸다. 포신에 작용하는 외력은 충격하중으로 간주하였으며, 하중 $p(x, t)$ 는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 임의의 위치

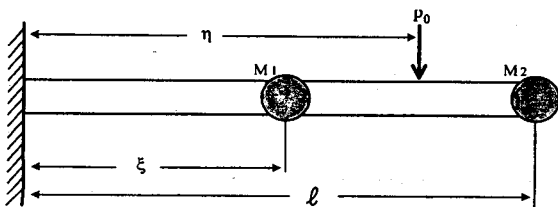


Fig. 1 Forced vibration model for gun barrel

η 에 작용하며, 하중의 크기 P_0 는 일정하고 짧은 시간 t_0 동안 작용하는 것으로 간주하였다. 충격하중을 Dirac delta 함수 $\delta(x)$ 와 Unit-step 함수 $H(t)$ 를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$p(x, t) = P_0\delta(x-\eta) \cdot [H(t) - H(t-t_0)] \quad (3)$$

Galerkin method를 적용하기 위해 수직변위를

$$u(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} T_r(t) U_r(x) \quad (4)$$

로 하여 구한 포신의 진동을 나타내는 최종적인 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{P_0 l}{m_0} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{e^{-\zeta_r \omega_r t}}{\omega_r^2 \sqrt{1-\zeta_r^2}} \\ &\quad \frac{\hat{U}_r(x) \hat{U}_r(\eta)}{\int_0^l \hat{U}_r^2(x) + m_1 l \hat{U}_r^2(\xi)} \times \\ &\quad [\cos(\omega_{dr}(t-t_0) - \phi_r) - \cos(\omega_{dr}t - \phi_r)] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 m_0 는 포신의 질량을, m_1, m_2 는 제연기와 제퇴기의 포신에 대한 질량비 $m_1 = M_1/m_0$, $m_2 = M_2/m_0$ 를 각각 나타낸다. 또한 ω_r 과 \hat{U}_r 은 각각 고유진동수와 고유진동모드를 나타내며 ζ_r 은 감쇠비를 나타낸다. $\omega_{dr} = \omega_r \sqrt{1-\zeta_r^2}$ 로서 감쇠 고유진동수를 나타내며,

$$\phi_r = \tan^{-1} \frac{\zeta_r}{\sqrt{1-\zeta_r^2}}$$

를 나타낸다.

2.2 포신의 안정화시간 해석

본 절에서는 포신 끝단에서의 수직변위를 식 (5)로부터 구한 후, 포신의 거동을 지배하는 각종 변수들이 포신의 안정화 시간에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 해석을 위해 사용된 포신의 제원은 길이 $l=8.1$ m, 단면적 $A=0.0427$ m², 탄성계수 $E=206.84$ GPa, 관성모멘트 $I=2.8508 \times 10^{-4}$ m⁴, 포신의 질량 $m_0=2,295$ kg, 밀도 $\rho=13,785$ kg/m³이며, 제연기와 제퇴기의 포신에 대한 무게비 $m_1=0.032$, $m_2=0.066$, 제연기의 부착위치는 포이로부터 4.765 m 떨어진 곳이다. 충격하중이 40 kN 크기로 포신의 끝단에 시간 $t_0=0.1$ 초 동안 작용하였을 때의 수직변위의 시간이력(time history)이

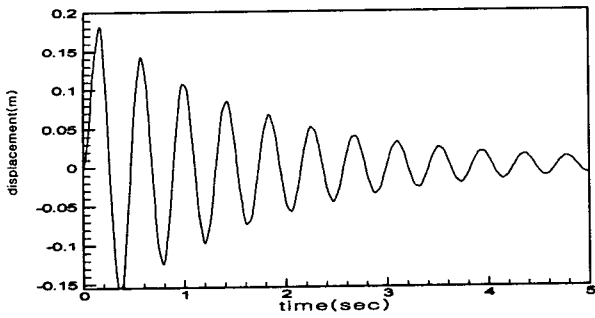
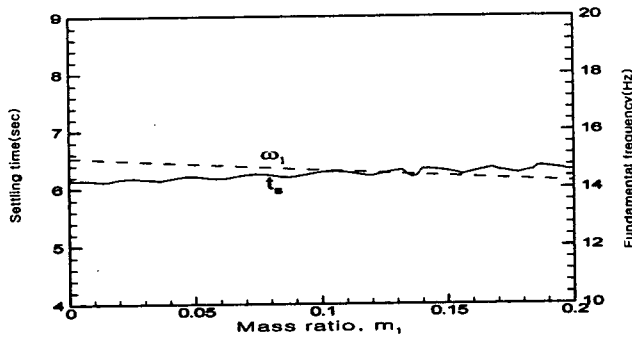
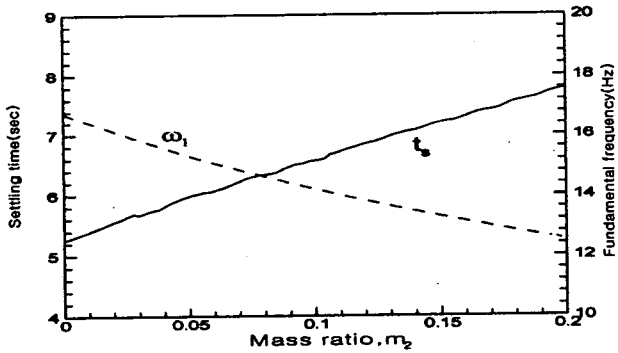


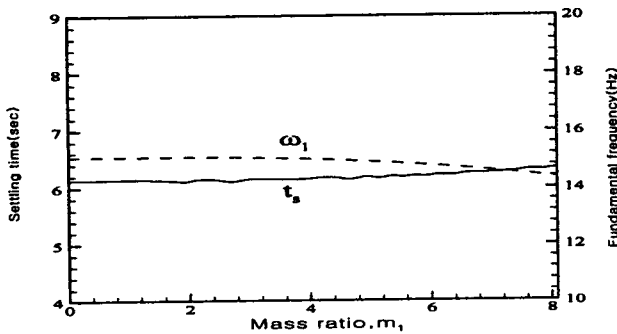
Fig. 2 Time history of vertical displacement



(a) ω_1 and t_s for various m_1



(b) ω_1 and t_s for various m_2



(c) ω_1 and t_s for various ξ

Fig. 3 Fundamental frequency (ω_1) and settling time (t_s)

Fig. 2 에 나타나 있으며 이때의 감쇠비는 $\zeta = 0.04$ 로 가정하였으며, 여기서 작용하중의 크기와 감쇠비는 실제 포신의 진동형태를 고려하여 선정한 값이다.

식 (5)로부터 구한 제연기와 제퇴기의 포신에 대한 무게비 m_1 과 m_2 의 변화 (0.0~0.2)에 따른 포신의 안정화시간(settling time)과 기본진동수(fundamental frequency)가 각각 Fig. 3(a)~(c)에 보여져 있다. 포신 끝단의 수직변위가 5 mm 이내로 들어올 경우 포신은 안정화된 것으로 간주하였으며, 안정화시간은 보간법을 이용하여 계산하였다.

Fig. 3 (a), (b)에서 알 수 있듯이 제연기의 무게 변화에 대해서는 안정화시간(t_s)이 거의 변하고 있지 않지만, 제퇴기의 무게가 증가함에 따라 기본진동수(ω_1)는 감소하는 반면 안정화시간은 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3 (c)는 제연기의 부착위치 ξ 의 변화에 대한 안정화 시간과 기본진동수의 변화를 보여주고 있다. 제연기의 부착위치가 포이에서 포구 쪽으로 옮겨감에 따라, 포신의 중앙까지는 안정화시간이 거의 변하지 않다가 포신의 중앙을 지난 후 안정화 시간이 미소 증가하고 있으며, 아울러 기본진동수도 미소 감소하고 있다. 한편, 기본진동수가 감소함에 따라 안정화시간도 같은 비율로 증가하고 있다.

Fig. 4에는 m_1 , m_2 및 ξ 의 변화에 대한 안정화시간이 서로 비교되어 있으며, 전술한 바와 같이 제연기의 무게와 위치 변화는 안정화시간에 거의 영향을 미치지 않지만 제퇴기의 무게 변화는 안정화시간에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

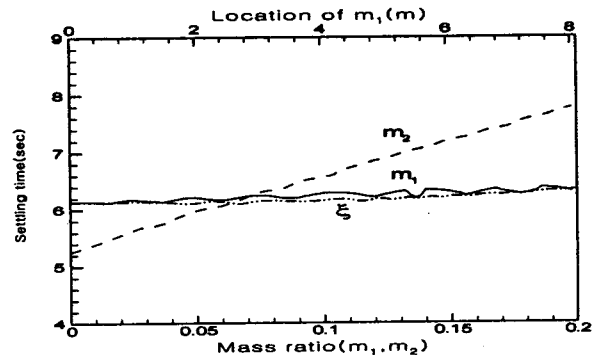


Fig. 4 Settling time for various m_1 , m_2 , ξ

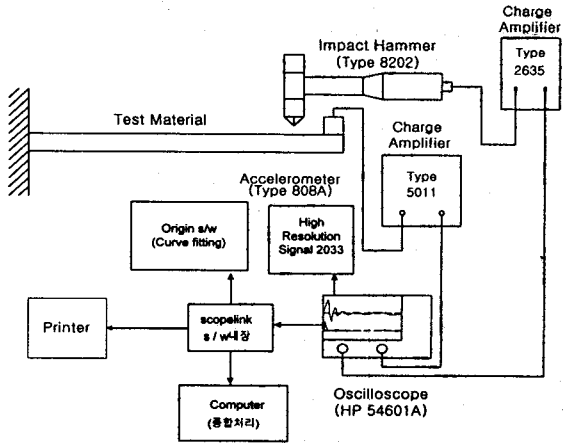


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

3. 실험 및 분석

3.1 실험 장치 및 모델

사격후 포신의 잔류진동을 측정하기가 용이하지 않으므로 실제 포신과 잔류진동 현상이 유사한 모델을 선정하였다. 실험장치는 Fig. 5와 같이 구성되어 있으며, 충격력은 붕의 자유단 5 cm지점에 충격해머를 이용하여 입력하였고, 가속도계를 끝단에 설치하여 측정하였다. 또한 외부 진동방지를 위해 실험대를 포함한 각 장치의 하단에는 차음/진동방지제를 설치하였고, 잡음에 의한 측정신호의 교란을 방지하기 위하여 시일드 케이블을 사용하였다.

3.2 실험 내용 및 방법

실험은 3단계로 나누어 실시되었으며 1단계에서는 감쇠처리 되지 않은 포신 모델의 잔류진동을 측정하였다. 2단계에서는 단순화한 포신모델의 검증을 위하여 제연기의 위치변화(ξ/L), 제연기 무게비(m_1)변화, 제퇴기의 무게비(m_2)변화에 따른 안정화 시간을 측정하였다. 3단계에서는 3가지 형태로 감쇠처리된 포신모델의 잔류진동을 측정하여 안정화 시간을 산출하였다. 안정화시간은 최대 잔류진동 진폭의 10%에 도달하는 시간으로 설정하였다.

3.3 실험 결과 및 분석

(1) 포신모델의 응답특성

감쇠처리 하지 않은 모델의 진동형상은 Fig. 6과 같고, 고유진동수는 8.75Hz, 안정화 시간은 7.745초이다.

(2) 파라미터 변화에 대한 모델의 응답특성

해석적으로 구한 결과와 비교하기 위하여 앞에서

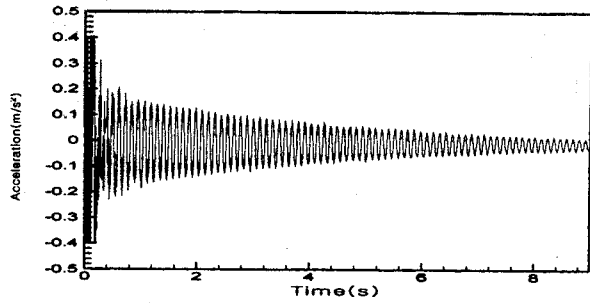


Fig. 6 Residual vibration of without damping treatment

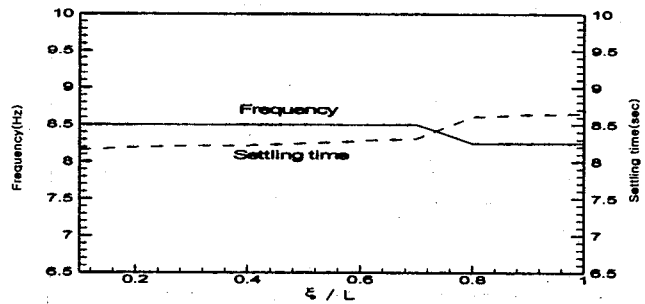


Fig. 7 Frequency/settling time vs ξ/L

기술한 바와 같이 모델의 파라미터값을 변화시켜 가며 응답을 측정한 결과는 다음과 같다.

ξ/L 변화에 따른 주파수 및 안정화시간은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 $\xi/L \leq 0.7$ 의 구간에서는 변화가 거의 없으며 $\xi/L > 0.7$ 의 구간에서는 안정화시간이 약간 증가한 반면 주파수는 약간 감소하였다. 이는 해석적으로 구한 결과인 Fig. 3(c)의 경향과 일치함을 알 수 있다.

m_1 변화에 따른 주파수와 안정화시간은 Fig. 8과 같이, 전구간에서 거의 변화가 없었다. 그러나 m_2 변화에 따른 주파수와 안정화시간은 Fig. 9와 같이, 전구간에서 주파수는 8.75~7.5 Hz로 변화가 발생하였

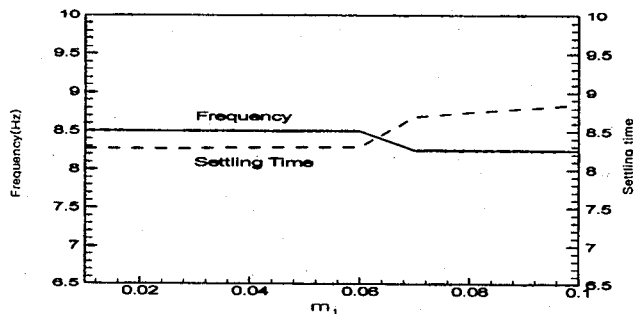


Fig. 8 Frequency/Settling time vs m_1 ratio

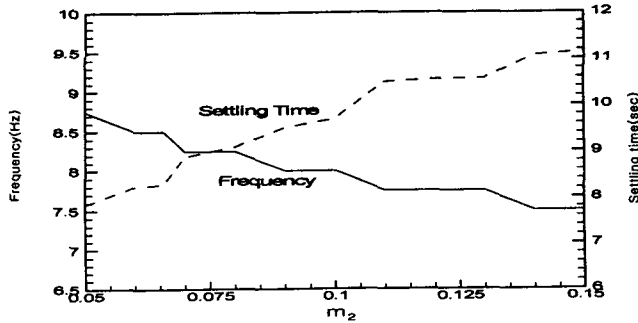


Fig. 9 Frequency/settling time vs m_2 ratio

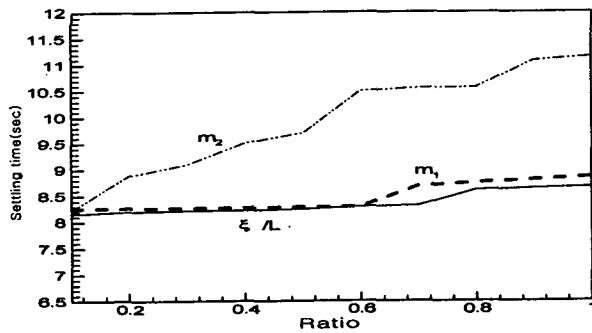


Fig. 10 Settling time vs system parameters

으며, 안정화시간도 3초 이상의 변화가 있었으며 이는 Fig. 3(b)의 해석적 결과와 마찬가지로 m_2 가 증가함에 따라 안정화시간은 증가하는 반면 고유주파수는 감소하였다.

따라서 파라미터 변화에 대한 안정화시간 변화는 Fig. 10과 같이 ξ/L 및 m_1 의 변화는 모델의 동적 거동에 큰 영향을 미치지 않으나, m_2 의 변화는 모델의 동적 거동 특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

(3) 점탄성 감쇠처리에 대한 모델의 응답

점탄성 재료(3M Scotchdamp, SJ2015X, type110)를 이용하여 감쇠처리된 모델의 잔류진동 측정시, 주파수와 안정화 시간에 영향을 상대적으로 작게 미치는 파라미터들은 일정값으로 고정한 후 ($\xi/L=0.589$, $m_1=0.0318$) 측정을 실시하였다. 감쇠처리의 효과를 비교하기 위하여 포신모델의 감쇠처리는 모델의 원둘레를 따라 반면, 전면, 부분면(strip)으로 구분하고 각각에 대하여 구속층(constraining layer)을 설치하지 않은 경우(자유층)와 설치한 경우로 나누어 잔류진동을 측정하였다. 파라미터 변화는 잔류진동의 변화에 민감한 제퇴기의 무게비(m_2)로 하였으며 변화범위는 $0.05 \leq m_2 \leq 0.1$ 을 설정하였다.

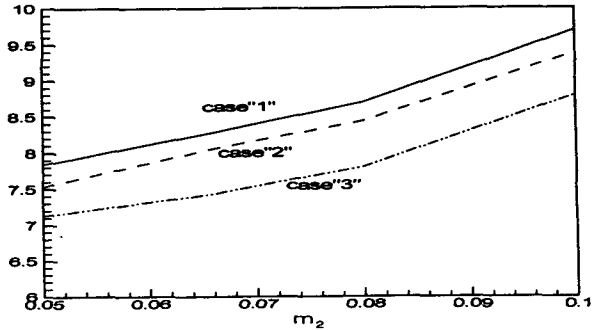


Fig. 11 Settling time of half-plane damping treatment

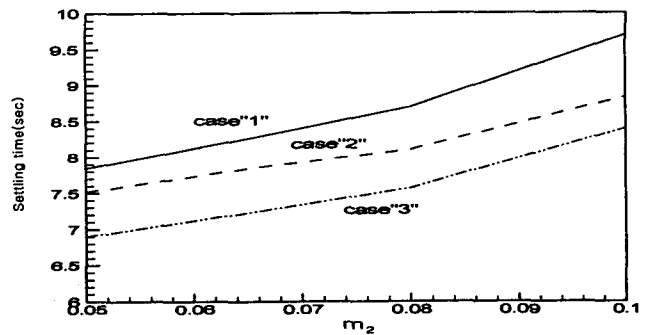


Fig. 12 Settling time of whole plane damping treatment

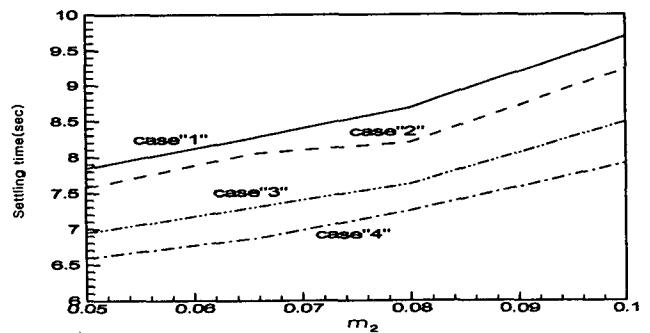


Fig. 13 Settling time of partial-damping treatment

반면 감쇠/구속층의 안정화 시간은 Fig. 11과 같이 비감쇠처리 모델(case'1')의 안정화시간과 비교할 때, 자유층 감쇠모델(case'2')은 약 0.3초, 구속층 모델(case'3')은 약 0.7~0.9초 단축되었다.

전면 감쇠/구속층인 경우의 안정화 시간은 Fig. 12와 같이 비감쇠처리 모델의 안정화 시간과 비교할 때, 자유층 감쇠 모델은 0.3~0.7초, 감쇠/구속층 모델은 0.9~1.3초 단축되었다.

한편, 부분면의 감쇠/구속층 모델은 감쇠효과를 극대화 할 수 있는 길이 6.8 cm, 설치 간격 4 cm를

도출하여 감쇠처리 하였다.

부분면의 감쇠/구속층 처리시 $0.05 \leq m_2 \leq 0.1$ 구간에서 0.25 Hz의 주파수 변화가 발생하였다.

안정화시간 변화는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 비감쇠처리 모델(case"1")에 대하여 부분면 자유층모델(case"2")은 0.4~0.9초, 부분면 구속층 모델(case"4")은 1.6~2.1초의 큰 변화가 발생하였다. 그러나, 임의의 길이 3 cm, 간격 2 cm로 설정한 구속층 모델(case"3")은 0.8~1.2초의 변화가 있었다.

실험결과 점탄성 재료를 이용하여 포신 모델을 감쇠처리 했을 때 안정화 시간은 자유층일 경우 모든 경우에 0.3~0.9초의 작은 변화가 발생하였다. 그러나 구속층의 경우에는 부분면 감쇠처리의 경우 1.6~2.1초로 가장 큰 시간변화가 발생되었으며 따라서 부분면 감쇠처리가 잔류진동을 조기에 안정화시킬 수 있는 가장 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서 포신의 진동을 지배하는 변수들이 포신의 동적거동과 안정화시간에 미치는 영향을 해석적 방법으로 연구한 결과, 제연기의 무게 및 부착 위치는 포신의 고유진동 및 안정화시간에 거의 영향을 미치지 않지만, 제퇴기의 무게가 증가함에 따라 안정화 시간은 증가하는 반면 기본진동수는 감소하였음을 알 수 있었으며, 이러한 포신의 잔류진동을 점탄성 재료를 이용하여 수동제어하기 위한 방안을 실험을 통해 연구하였다.

실험 모델에 대한 감쇠 처리는 반면, 전면, 부분면에 대하여 점탄성층을 형성하고, 점탄성층에 구속층의 유무에 따라 안정화 시간을 측정된 결과, 이론적으로 도출한 구속층의 최적 길이로 부분 감쇠/구속 처리시 잔류진동의 감쇠가 가장 효과적임을 검증하였다.

그러나 점탄성 재료의 손실계수는 포신의 고유진동수와 포신의 온도에 영향을 받는다. 그러므로 점탄성 재료를 이용한 감쇠 처리시에는 사격에 의하여 발생하는 포신의 온도 상승에 따른 점탄성 재료의

성능을 유지시켜야 하는 문제점을 안고 있다. 따라서 사격에 의한 포신의 급격한 온도상승을 고려하여, 재료의 성능 유지 및 과도한 온도상승을 방지할 수 있는 연구가 지속적으로 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) Laura, P.A.A., Pombo, J.L., and Susemihl, E.A., 1974, "A Note on the Vibrations of a Clamped-free Beam with a Mass at the Free End," J. of Sound and Vibration, Vol. 37, pp. 161~167.
- (2) 조성훈, 박광웅, 안태영, 1995, "신형 자주포 포탑 구조 설계해석 보고서," 국방과학연구소, GWSO-519-950360.
- (3) Parnell, L.A., and Cobble, M.H., 1976, "Lateral Displacements of a Vibrating Cantilever Beam with a Concentrated Mass," J. of Sound and Vibration, Vol. 44, pp. 499~511.
- (4) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997, ABAQUS User's Manual, Version 5.7, 1080 Main Street, Pawtucket, RI.
- (5) 이재영, 정백기, 최진희, 1998, "자주포 포신의 진동 감소방안 연구," 국방과학연구소, UD96048 CD.
- (6) Jones, D. I. G., and Henderson, J. P., 1965, "Fundamental of Damping Materials," University of Dayton Vibration Damping Short Course.
- (7) Lazan, B. J., 1968, "Damping of Materials and Members in Structural Mechanics," Pergamon Press.
- (8) Meirovitch, L., 1975, "Elements of Vibration Analysis," McGraw-Hill.
- (9) Kerwin, E. M., Jr., 1959, "Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer," The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 31, No. 7.