

## 가속도 측정에 있어 고주파 잡음 제거를 위한 기계적 필터의 재료 특성에 관한 실험적 연구<sup>§</sup>

최원영\* · 유승열\* · 차기업\*\* · 김성수\* · 노명규\*<sup>†</sup>

\* 충남대학교 메카트로닉스공학과, \*\* 국방과학연구소

### An Experimental Study on the Material Characteristics of Mechanical Filters for Eliminating High-Frequency Noise in Accelerometer Measurements

Won-Yeong Choi\*, Seong-Yeol Yoo\*, Ki-Up Cha\*\*, Sung-Soo Kim\* and Myounggyu Noh\*<sup>†</sup>

\*Department of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ., \*\*Agency for Defense Development.

(Received December 20, 2010 ; Revised April 20, 2011 ; Accepted April 21, 2011)

**Key Words:** Mechanical Filter(기계적 필터), High-Frequency Noise Elimination(고주파 잡음제거), Accelerometer(가속도계)

**초록:** 포신과 같은 충격하중을 받는 파이프 형태의 구조물 진동을 측정하기 위해 가속계가 널리 사용된다. 포약의 폭발로 인해 발생하는 응력파는 포신의 횡진동에 미미한 영향을 미치지만 매우 큰 가속도 성분을 가지고 있어 미세 진동의 계측을 어렵게 한다. 기계적 필터는 가속도계를 부착하는 기계적 구조물과 진동감쇠재료로 구성되어, 고주파의 응력파를 제거하고 횡진동에 관련된 가속도 성분만을 가속도계로 전달하는 역할을 한다. 진동감쇠재료는 비선형성이 강하여 수학적 모델링이나 수치적 해석에 어려움이 있다. 본 논문에서는 9 가지의 진동감쇠재료의 진동특성을 실험적으로 확인하여, 기계적 필터에 가장 적합한 재료를 선택하였다. 또한, 압착에 따른 진동특성의 변화를 통해, 기계적 필터의 설계 데이터를 얻을 수 있었다. 기계적 필터를 설계 제작하여, 필터의 성능을 확인하였다.

**Abstract :** Accelerometers are widely used to measure the lateral vibrations of pipe-like structures such as a gun tube under impulse loads. Stress waves that precede the lateral vibrations due to the explosion within a gun contribute little to the vibrations, but saturate the accelerometer input. A mechanical filter eliminates this high-frequency stress wave and only transmits the signal corresponding to the lateral vibrations. The mechanical filter consists of a mechanical structure for mounting the accelerometers and a damping material. The low-pass filter characteristics are determined from the equivalent damping and stiffness property of this damping material. In this paper, we tested nine commercially available damping materials for their vibration characteristics by using a test rig. We also observed the change in the vibration characteristics while compressing the material. We designed and manufactured a mechanical filter and verified its filtering performance.

## 1. 서 론

포신과 같은 파이프 형태의 횡진동을 측정하는 데 널리 사용되는 방법 중의 하나는 가속도계를 이용하는 것이다.<sup>(1)</sup> 가속도계는 크기가 작고 파이프에 직접 부착될 수 있어 포신의 주퇴복좌 운동과 같은 큰 움직임과 탄자의 포신 내 이동에 따른 미세 변형을 동시에 측정할 수 있다.<sup>(2,3)</sup>

가속도계를 이용하여 포신의 횡진동을 측정하는 경우, 해결하여야 할 과제 중의 하나는 포신을 통해 전달되는 응력파의 제거이다<sup>(4)</sup>. 1~3 kHz의 주파수 영역에 있는 응력파는 포신의 횡진동에는 미미한 영향을 미치지만 매우 큰 가속도 성분을 가지고 있어, 가속도계의 입력을 포화시켜 미세 진동 측정을 어렵게 한다.

기계적 필터는 이러한 고주파 신호를 제거하고 포신의 미세 변형에 관련된 신호만을 전달하는 역할을 한다. 또한, 포신의 진동특성에 영향을 미치지 않을 정도의 크기를 가져야 하며, 포신에 부착되어 포신과 함께 움직여야 한다. 기계적 필터는 가속도계를 부착하는 구조물과 진동감쇠재료 등으

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, mnoh@cnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 구성되어 있다. 기계적 필터를 사용한 이전 연구<sup>(2,3)</sup>에서는 필터를 통해 응력과 제거를 확인하였으나, 필터의 설계 인자와 진동 특성의 상관성이 나타나 있지 않아, 필터의 설계에 활용하는데 어려움이 있다.

기계적 필터의 주파수 응답특성은 필터의 질량, 진동감쇠재료의 특성, 압착 정도 등 여러 인자에 의해 결정된다. 이러한 인자들과 진동특성 간의 수학적 모델이나 수치적 해석을 통해 필터의 설계가 이루어질 수도 있으나 기계적 필터에 사용되는 진동 감쇠 재료는 대부분 비선형 특성을 가지고 있어 이를 수학적으로 모델링 하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 진동감쇠재료의 수학적 모델링 혹은 유한요소해석 기반 모델링 기법을 적용하는 대신 상업적으로 흔히 사용되는 진동감쇠재료의 진동 특성을 실험적으로 구하여 등가 강성계수와 등가 감쇠 상수를 구하고 이를 통해 기계적 필터의 설계에 활용하고자 한다. 이를 위해 평판 실험장치를 설계 제작하고 9 가지 진동감쇠재료의 진동 특성을 측정하였다. 실험 결과로부터 필터에 적합한 재료를 선택하고, 압착에 따른 필터 주파수의 변화를 실험적으로 구하였다. 이 자료를 기반으로 기계적 필터를 설계 제작하였으며, 진동 특성을 실험적으로 확인하였다.

## 2. 기계적 필터의 모델 및 요구조건

질량이  $m$  인 물체에 힘  $F$  가 작용하면 뉴턴의 운동 법칙에 의해 물체의 가속도는

$$\ddot{x} = \frac{F}{m} \tag{1}$$

와 같이 정해진다 (Fig. 1(a) 참조). 포탄 발사 시 포신의 진동을 가속도계를 이용하여 측정하는 경우, 충격하중에 의한 고주파 가속도 신호의 크기가 매우 커, 가속도 센서의 입력 범위를 포화시킬 수 있다. 특히, 포신을 통해 전달되는 응력파는 포신의 횡진동에 큰 영향을 미치지 않지만, 가속도 신호의 대부분을 차지하여, 미세 진동의 측정을 어렵게 한다.<sup>(4)</sup>

기계적 필터는 진동감쇠재료를 이용하여 고주파 가속도 신호를 필터링하고 저주파 가속도 신호를 전달하는 역할을 한다. Fig. 1(b)는 기계적 필터의 모델을 보여준다. 가속도계가 장착되는 필터 질량  $m_f$  의 변위를  $x_f$  라 할 때,  $x$  와  $x_f$  간의 전달함수는

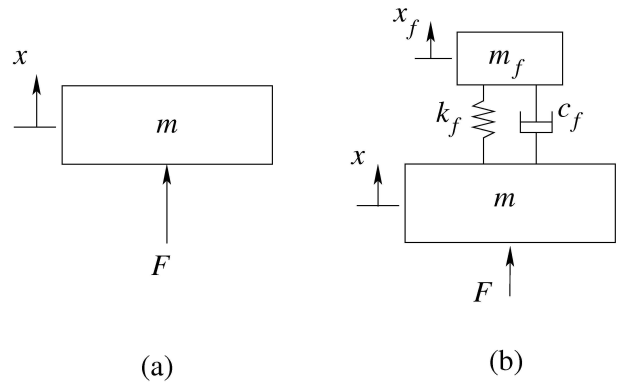


Fig. 1 Dynamic model of a mechanical filter

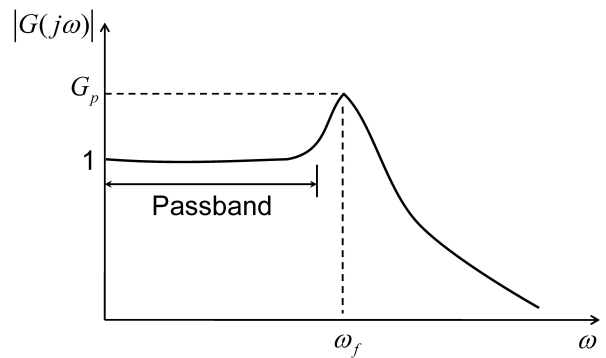


Fig. 2 Ideal frequency response of a mechanical filter

$$G(s) = \frac{X_f}{X} = \frac{c_f s + k_f}{m_f s^2 + c_f s + k_f} \tag{2}$$

이다. 식 (2)에서 강성계수  $k_f$  와 감쇠상수  $c_f$  는 기계적 필터에 사용되는 진동감쇠재료의 등가 강성계수와 등가 감쇠상수이다. 식 (2)를 필터 주파수  $\omega_f$  와 감쇠비  $\zeta_f$  를 이용하여 표준형태로 표현하면

$$G(s) = \frac{2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \tag{3}$$

와 같다. 포신  $m$  과 필터  $m_f$  의 가속도 간의 전달함수도 식 (2) 혹은 (3)과 동일하다. 이 전달함수의 주파수 응답 특성은 Fig. 2 와 같은 형태를 가진다. 즉, 저주파 영역에서는 크기가 1 이며 따라서 가속도계가 측정하는 가속도는 포신의 가속도와 같다. 필터주파수  $\omega_f$  를 넘어서는 고주파 영역에서는 포신의 가속도가 필터에 전달되는 양이 줄어들게 된다. 감쇠비  $\zeta_f$  에 따라 필터 주파수  $\omega_f$  에서 전달함수의 크기는 커질 수 있으며 이는

$$G_p = \sqrt{1 + \frac{1}{4\zeta_f^2}} \quad (4)$$

와 같이 구할 수 있다.

식 (3)의 전달함수와 Fig. 2의 주파수 응답 특성을 통해 기계적 필터의 요구조건을 도출할 수 있다. 포신의 응력파는 대체로 1~3 kHz에 집중되어 있으므로<sup>(4)</sup> 필터 주파수  $\omega_f$ 는 1 kHz를 넘지 않아야 한다. 또한, 설계 조건에 따라 필터 주파수를 변화시킬 수 있어야 한다.

포신의 횡진동은 1차 굽힘 모드와 2차 굽힘 모드에 대부분 집중되어 있다. 본 논문에서 고려하는 포신의 경우 1차 굽힘 모드는 25Hz, 2차 굽힘 모드는 100Hz 근방이다. 필터의 저역 통과 특성과 필터주파수에서의 공진현상을 고려하여 2차 굽힘 모드의 3~4배 정도까지 가속도를 측정한다면, 기계적 필터의 필터 주파수는 300~400Hz 근방에서 결정되어야 한다.

### 3. 기계적 필터의 진동감쇠 재료 선정

#### 3.1 진동특성 측정 실험 장치

기계적 필터에 사용할 진동감쇠 재료의 진동특성을 측정하기 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 설계 제작하였다. 볼트와 너트를 이용하여 기계적으로 고정된 2개의 알루미늄 판이 가진기(B&K Model 4808) 위에 설치되고, 또 하나의 알루미늄 판이 진동감쇠 재료를 사이에 두고 앞서의 2판 가운데 위치하게 된다. 가진기의 진동을 입력 가속도계 (B&K Model 4396)로 측정하고 가운데 위치한 판의 진동을 출력 가속도계로 측정하여, 스펙트럼분석기(DataPhysics Mobilyzer)로 주파수 응답을 측정하였다. 볼트와 너트를 이용하여 진동 감

쇠 재료의 압착 두께를 조절하였다.

실험에 사용할 재료로 다양한 진동감쇠 재료가 있겠지만 본 논문에서는 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 9가지의 재료를 선택하였다. 이 재료들의 대략적인 두께는 Table 1에 정리되어 있다. 정확한 두께를 측정할 수 없는 이유는 재료의 탄성으로 인해 측정에 오차가 있을 수 있으며, 두께가 균일하지 않을 수 있기 때문이다.

#### 3.2 진동특성 실험 결과

앞서 기술한 9가지의 재료에 대해 진동특성을 측정한 결과 3가지 형태의 주파수 응답을 얻을 수 있었다. 첫 번째 형태는 Fig. 4에 나타나 있는 바와 같이 필터에 적합하지 않은 주파수 응답으로서 실리콘, 고무, PVC 판 등의 경우에 해당한다. 저주파 영역에서는 크기가 1로 유지되나, 필터주파수가 뚜렷하지 않고, 고주파 영역에서 크기가 감소하는 경향을 보기 어렵다.

두 번째 형태의 주파수 응답은 요구되는 필터의 주파수 응답을 대략적으로 보여주나, 필터주파수가 명확하지 않거나, 너무 높은 경우이다. Fig. 5를

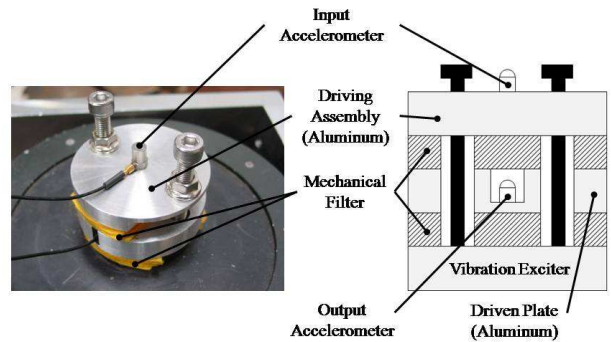


Fig. 3 Test set-up to measure the vibration characteristics of various damping materials

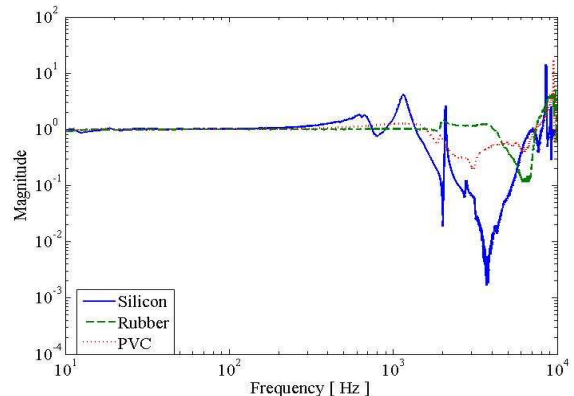


Fig. 4 Frequency responses of least adequate materials: silicon, rubber, and PVC

Table 1 Tested damping materials

Materials	Appr. Thickness [mm]
Silicon	6.5
Rubber	5.7
PVC	5.2
Urethane	6.3
Silicon foam	5.3
Felt	5.5
Noise-isolation sheet	5.7
Butyl sheet	5.1
Felt+rubber sheet	4.8

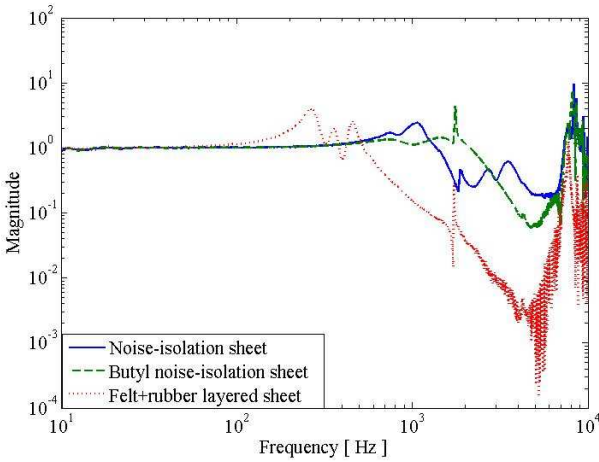


Fig. 5 Frequency responses of mildly adequate materials: noise isolation sheet, and butyl sheet, felt+rubber sheet

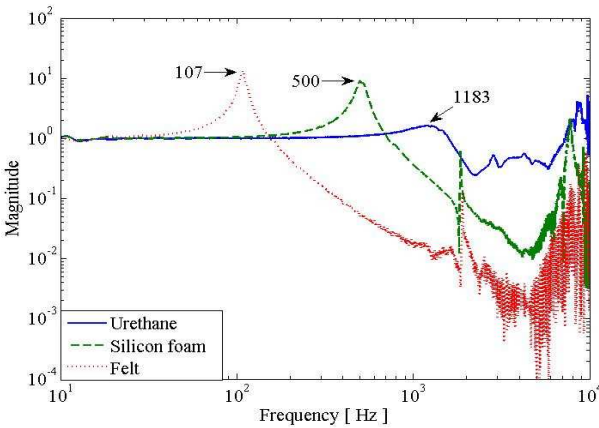


Fig. 6 Frequency responses of the most adequate materials: urethane, silicon foam, and felt

보면 차음지, 부틸차음지, 고무/펠트 복합지 등의 주파수 응답은 Fig. 2 의 이상적인 필터 주파수 응답과 차이가 있다.

Fig. 6 은 이상적인 필터의 주파수 응답에 가장 근접한 응답을 얻은 결과를 보여준다. 우레탄, 발포 실리콘, 펠트 등은 뚜렷한 필터 주파수를 확인할 수 있으며, 고주파 영역에서 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 중 우레탄은 필터 주파수가 1 kHz 를 넘어서므로, 필터 요구조건을 만족하지 않는다. 발포 실리콘의 경우, 필터 주파수가 500 Hz 근방에 있어 필터 요구조건을 만족한다고 할 수 있으나, 실제 필터에 사용될 때 압착될 가능성이 있으므로 필터 주파수가 1 kHz 이상으로 올라갈 수 있다.

펠트는 주파수 응답이 Fig. 2 에 가장 근접하며 필터주파수가 100 Hz 근방에 있어 압착을 통해 원

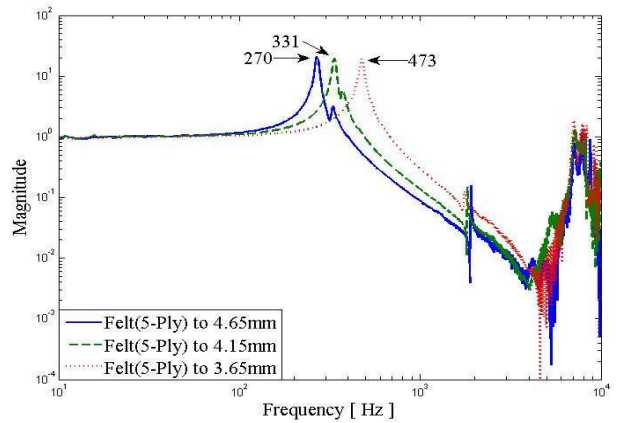


Fig. 7 Change in filter characteristics due to compression

하는 필터주파수를 얻을 수 있는 여지가 있다. 펠트의 또 다른 장점은 온도에 따른 특성 변화가 다른 재료에 비해 비교적 작아, 포탄 발사에 따른 온도 상승에도 안정된 성능을 제공한다.

### 3.3 압착에 따른 진동특성의 변화

기계적 필터를 필터주파수를 변화시킬 수 있는 가장 간단한 방법은 진동감쇠 재료의 압착을 통해서이다. 재료를 압착하면 등가 강성계수가 커지게 되고, 따라서 필터주파수가 증가하게 된다. 앞서, 재료간 진동특성의 비교를 통해 펠트가 가장 적합한 진동감쇠재료로 선택되었는데, 압착을 통해 필터주파수의 변화를 측정하였다.

Fig. 7 은 펠트를 5 겹으로 접친 후, 두께가 4.65mm, 4.15mm, 3.65mm 가 되도록 압착한 후 주파수 응답을 구한 결과이다. 압착정도가 클수록 필터주파수는 증가하게 되며 압착된 두께가 4.15mm 인 경우, 필터의 요구조건을 만족하는 필터주파수를 얻을 수 있었다.

주파수 응답 측정 결과로부터 필터주파수와 감쇠비를 추정하기 위해 최소자승법(Least Mean Square)을 이용하였다. 측정주파수  $\omega_i$  에서의 주파수응답 크기가  $G_i$  라고 하면 식 (3)과의 평균자승오차는 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_i - G(j\omega_i)|^2 \quad (5)$$

최적화 기법을 이용하여  $E$  를 최소화하는  $\omega_f$  와  $\zeta_f$  를 구하게 된다. Fig. 8 은 최소자승법에 의해 구한 기계적 필터의 모델과 실험결과를 비교한 결과이다. 이 경우, 필터주파수는 334Hz, 감쇠비는 0.0259 로 추정되었다.

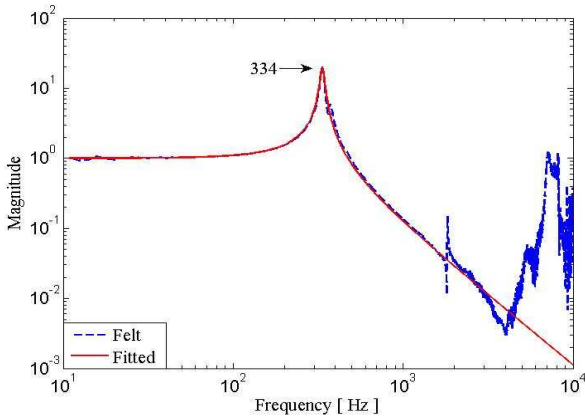


Fig. 8 Fitted frequency response compared with the experimental data

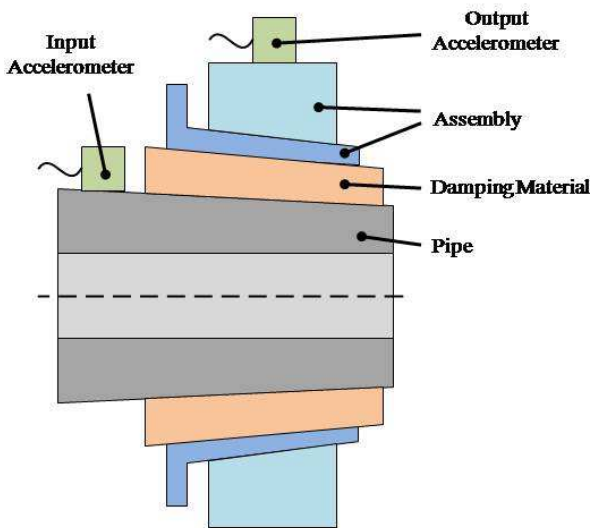


Fig. 9 The cross-sectional diagram of the mechanical filter

#### 4. 기계적 필터의 성능 평가

앞 절의 평판 실험 결과를 이용하여 포신과 같은 파이프 형태 구조물의 횡진동 측정을 위한 기계적 필터를 설계 제작하였다. 기계적 필터는 가속도계를 부착하는 외측구조물이 파이프와 진동감쇠재료를 통해 연결되고, 진동감쇠재료의 압착 정도를 조절하기 위해 슬리브 형태의 링이 끼워진다. Fig. 9는 기계적 필터의 개략도를 보여준다.

기계적 필터의 성능을 확인하기 위해 Fig. 10과 같은 실험장치를 구성하였다. 파이프에 직접 부착된 가속도계를 입력 신호로 사용하고 기계적 필터에 붙어있는 가속도계를 출력 신호로 하여 주파수 응답을 구하였다. Fig. 11은 펠트 5장을 겹쳐 4.15mm로 압착한 후 실험한 결과이다. 평판 실험 결과와 같이 주파수 응답은 Fig. 2와 같은 이상적

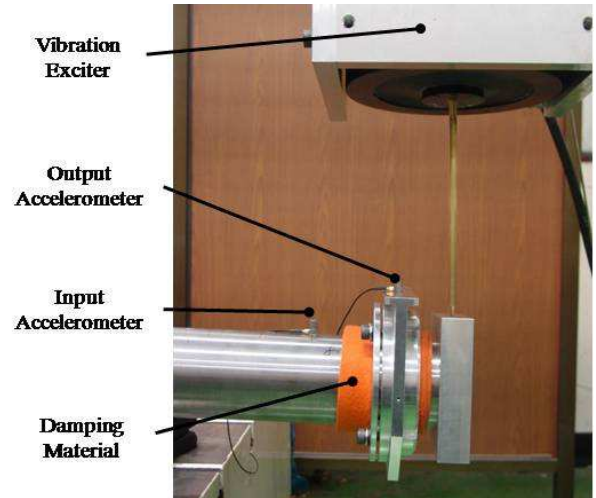


Fig. 10 Experimental setup for testing the performance of the mechanical filter

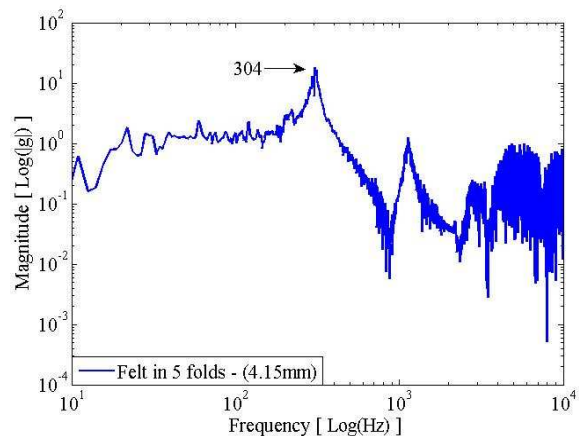


Fig. 11 Frequency response of the mechanical filter for the test

필터의 응답과 유사하며, 필터 주파수는 304Hz, 감쇠비는 0.06으로 추정되었다.

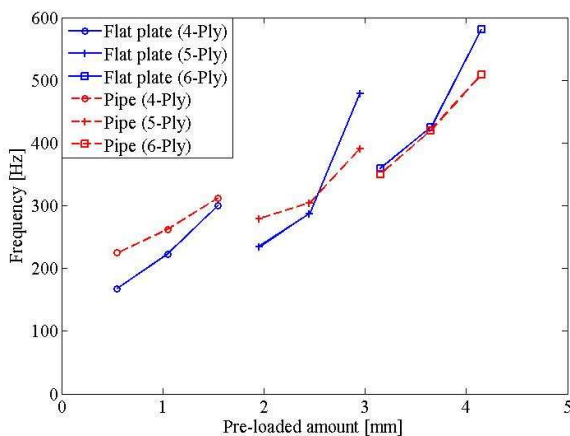
#### 5. 토 의

기계적 필터의 주파수 응답특성은 필터의 질량, 진동감쇠재료의 특성, 압착 정도 등 여러 인자에 의해 결정된다. 이러한 인자들과 진동특성 간의 수학적 모델이나 수치적 해석을 통해 필터의 설계가 이루어질 수도 있으나, 진동감쇠 재료의 비선형 특성으로 인해 해석의 어려움이 있다. 본 논문에서는 평판 실험 장치를 통해 여러 진동감쇠재료의 진동특성을 측정하고, 이를 기계적 필터의 설계에 활용하였다.

동일한 진동감쇠 재료를 동일한 정도로 압착하여도 파이프 형태의 구조물용 기계적 필터와 평판

**Table 2** Change of resonance frequency and damping ratio with respect to the compressed thicknesses of felt using flat plate apparatus

No. of folded-layer	Thickness [mm]	Resonance Freq.	Damping ratio
4	4.65	169	0.0233
	4.15	224	0.0219
	3.65	300	0.0232
5	4.65	234	0.0305
	4.15	287	0.0412
	3.65	475	0.0538
6	4.65	359	0.0270
	4.15	425	0.0458
	3.65	581	0.0243



**Fig. 12** Frequency response result of each compressed mechanical filter between two tests

형태의 필터는 상이한 진동특성을 나타낼 수 있다. Table 2 와 Fig. 12 는 펠트를 4, 5, 6 겹으로 겹쳐 평판형 실험장치와 파이프용 실험장치에 적용하여 얻은 결과이다. 두 경우 모두 압착 정도가 클수록 필터주파수가 증가하며 추세를 보인다. 겹친 수가 많아지면 필터의 질량이 증가하므로 필터 주파수가 전반적으로 감소하지만 압착량에 따라 필터주

파수가 증가하는 추세는 더 가파르다. 펠트를 6 겹으로 겹친 경우, 평판형 실험장치와 파이프용 실험장치에서 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 평판형 실험장치로부터 얻은 결과의 효용성을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 기계적 필터를 설계 및 제작하기 위하여 시중에서 쉽게 구할 수 있는 진동감쇠재료의 진동 특성을 평가하여 필터재료를 선정하였다.

선정된 재료에 대하여 기계적 필터 설계변수에 영향을 주는 예압(pre-load)에 대하여 진동특성 변화를 확인하고 설계자료를 도출하였다. 파이프 형태의 진동 구조물에 적합한 기계적 필터를 설계 제작하여 성능을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소(ADD) 주관 위탁 연구 과제 (No. 2009-0985)의 일환으로 진행 되었다. 지원에 감사드리며, 기계적 필터의 제작에 협조하여준 S&T 중공업에도 감사드린다.

## 참고문헌

- (1) Bornstein, J., Celmins, I., Plostins, P. and Schmidt, E. M., 1988, "Techniques for the Measurement of Tank Cannon Jump," Memorandum Report BRL-MR-3715, AD A201713, Aberdeen Proving Ground, MD.
- (2) Cha, K., Ahn, S. and Hong, S., 2008, "A Study on the Effect of Lateral Motion of Barrel due to Projectile Motion," *16th Conference on Ground Weapons*, Daejeon, Korea (in Korean).
- (3) Ryu, B. and Koo, K., 2010, "Measurement of Vibration Signals of a Gun Barrel Type Structure Using Mechanical Filter," *Trans. KIEE*, Vol. 59, No. 4, pp. 440~443 (in Korean).
- (4) Pilcher, J. O., 1982, "Acceleration Measurements in a High G Environment," *American Control Conference*, Arlington VA, USA, pp. 950~954.