

철도차량용 패널 감쇠처리재의 감쇠계수 평가

강길현
(주)SR 기술본부

An Evaluation of Loss Factor of Damping Treatment Materials for Panels of Railway Vehicles

Gil-Hyun Kang
Technical Division, SR Corp.

요약 본 논문은 철도차량 및 자동차용 패널의 진동 및 소음억제용으로 사용되는 감쇠 처리재의 감쇠특성 평가에 관한 연구이다. 감쇠재의 모드별 매개변수들을 구하기 위해 다른 종류의 PVC를 알루미늄과 철계 범위에 도포한 시편을 제작하여 가진시험을 수행하였다. 시편은 10 Hz부터 1,000 Hz까지의 주파수 대역을 조화력으로 가진하여 가속도계로 전달 모빌리티값을 측정하였다. 감쇠계수는 몇 가지 이론인 반력법, 최소 탄젠트오차법 및 최소 각오차법 조합법과 위상변화법을 모드 원호곡선 맞춤과 최소자승오차법을 사용하여 작성한 통합 프로그램을 이용하여 평가하였다. 감쇠값이 비교적 낮고 측정값이 선형인 경우는 어느 방법을 사용해도 되나, 감쇠값이 높거나 측정값에 비선형특성이 있는 경우에는 최소 각오차법이 감쇠계수 측정오차를 줄일 수 있다. 도포 감쇠재의 동적특성 평가로부터 구한 재료의 물성값은 차체나 철도차량 하부 기기함과 같이 복잡한 구조물의 소음해석을 위한 유한요소법에 사용할 수 있다. 빔 시험에서 수행한 모드별 감쇠계수의 특성 평가 결과 2차 이상 모드의 주파수 대역에서 감쇠 효과가 크기 때문에 구조소음억제에 유용할 것으로 사료된다.

Abstract This paper is a study on the evaluation of loss factor of damping treatment materials to reduce the noise and vibration for panels of railway vehicles and automobiles. In order to determine the modal parameters of damping materials, beam excitation tests were carried out using different type PVC coated aluminum and steel base beam specimens. The specimens were excited from 10 Hz to 1000 Hz frequency range using sinusoidal force, and transfer mobility data were measured by using an accelerometer. The loss factors were determined by using integrated program, based on theories of Half Power Method, Minimum Tangent Error Method, Minimum Angle Error Method and Phase Change Method, which enable to evaluate the parameters using modal circle fit and least squares error method. In the case of lower loss factor and data of linear characteristics, any method could be applied for evaluation of parameters, however the case of higher loss factor or data including non-linear characteristics, the minimum angle error method could reduce the loss factor evaluation. The obtained dynamic properties of the coating material could be used for application of Finite Element Method analyzing the noise control effects of complex structures such as carbody or under-floor boxes of rolling stock. The damping material will be very useful to control the structural noise, because the obtained modal loss factors of each mode show very good effect on over 2nd mode frequency range.

Keywords : Beam Tests, Loss Factor, Dynamic Characteristics, Half Power Method, Minimum Tangent Error Method, Minimum Angle Error Method, Phase Change Method

*Corresponding Author : Gil-Hyun Kang(SR Corp.)

Tel: +82-10-8616-2757 email: ghkang789@hanmail.net

Received January 11, 2019

Revised March 18, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

1. 서론

철도차량 차체(carbody)나 기기함의 재질은 철이나 알루미늄합금 재질이므로 주행 중 진동과 소음을 줄이는 노력을 오랫동안 수행해왔다. 차체 패널의 감쇠처리는 대부분 판재에 감쇠재를 도포(coating)하는 방식을 사용하며, 이때 적절한 두께를 선택하여 중량을 최적화한다. 최적화 과정 동안 시행착오를 줄이기 위해서는 일정 주파수 영역에서 유한요소해석 등을 통하여 감쇠재의 효과를 사전에 비교 평가하는 것이 중요하다. 감쇠 효과 관련 해석 및 평가에 요구되는 입력 매개변수는 동적 특성값(dynamic characteristics)으로서, 이는 감쇠계수(damping factor, loss factor)와 탄성계수이다. 이들 특성값 중 감쇠계수는 일반적으로 반력법(half power method, HPM)으로 구할 수 있지만, 높은 감쇠값 영역에서 반력법의 적용은 한계가 있다. 또한, 감쇠처리된 빔이나 패널은 2차와 3차 모드 등에서 공진 모드가 상호인접(close modes)하거나 이들 측정값의 비선형으로 인하여 최소오차의 감쇠계수 결정을 위한 별도의 방법이 필요하다. 반력법 이외의 개별적인 감쇠계수 결정 방법에 관한 연구[1,2]로는 최소 탄젠트오차법(minimum tangent error method, MTEM), 최소 각오차법(minimum angle error method, MAEM) 및 위상변화법(phase change method) 등이 있다. 그러나 이러한 개별방법 또한 각각의 장단점과 한계가 있다. 본 연구는 이러한 기존 감쇠계수 평가방법의 현장 적용 시 개별방법 고유의 한계를 이해하고 실수를 방지할 수 있는 통합프로그램 개발하여 최소오차의 감쇠계수 결정틀을 제시하고, 실제 빔시험을 수행하여 패널 감쇠계수를 평가하여 도포재 적용 시의 최적 중량비와 두께 결정 등에 유효한 기준을 제시하고자 한다.

이를 위해서 다른 소재로 감쇠처리된 빔을 10 ~ 1,000 Hz의 광대역 주파수로 가진하고, 공진 모드별 응답값으로부터 빔의 감쇠계수를 구하여 감쇠재의 성능을 비교 평가하고자 한다. 또한, Oberst식[3]을 사용하여 도포재 자체의 감쇠계수를 구하여 대형구조물의 감쇠처리의 시행착오를 줄일 수 있는 유한요소해석 입력데이터로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 감쇠처리된 빔의 감쇠계수 평가시험

감쇠재가 도포된 빔의 동적 특성은 오베르스트 빔시험(Oberst beam Test)이나 ASTM 표준빔 시험으로부터 얻어진다[3-5].

Fig. 1과 Table 1은 도포감쇠재의 감쇠계수와 동적특성 평가를 위하여 제작된 시험편을 나타낸 것이다. 시험편의 크기는 20 mm(W) × 200 mm(L)이며, 사용된 판재는 0.8 mm 및 1.2 mm 탄소강(490C)과 1.0 mm 및 1.6 mm 알루미늄합금(6005A-T6)으로 시험편의 중량과 코팅 두께 및 재료는 Table 1과 같다.

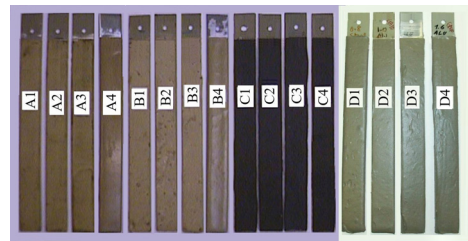


Fig. 1. Damping material coated beam specimens

Table 1. Test specimens for the coated beam test

Specimen	Base metal(mm)	Beam weight(g)	Coating thickness(mm)	
PVC A HWACO	A1	steel 0.8	39	2.782
	A2	steel 0.8	37.16	1.442
	A3	Al 1.0	26.67	1.5
	A4	Al 1.0	25.26	2.914
PVC B EFTEC M200	B1	steel 0.8	37.7	2.928
	B2	steel 0.8	37.1	2.812
	B3	Al 1.0	24.88	2.988
	B4	Al 1.0	31.7	3.334
PVC C ESSEX 30 INS 30F	C1	steel 0.8	39.4	3.262
	C2	steel 0.8	30.4	1.44
	C3	Al 1.0	27.73	3.27
	C4	Al 1.0	20.1	1.786
PVC D ESSEX 50 INS 500	D1	steel 0.8	37	3.138
	D2	Al 1.0	25.1	3.224
	D3	steel 1.2	51.4	3.034
	D4	Al 1.6	30.6	1.9

빔시험에 사용된 가진기는 Ling Altec 407 전자기형 가진기, 포스센서는 Kistler사 model 9173B(측정 -3~12 kN, -3.5 pC/N), 가속도계는 Endevco사 초소형 가속도계 2222C(micro-miniature accelerometer: 중량 0.5 gram, 1.578 pC/g, 535 pF)를 사용하였다. 측정 노이즈를 최소화하기 위해 측정주파수 50 kHz까지 필터 차단 상태에서 -1 ~ +2 %오차를 보증하는 Kistler 5011B 전

하 증폭기(charge amplifier: 출력전압 ± 10 V, -3.34 pC/N)와 Beran 402 주파수응답 분석기(frequency response analyzer: 100 mHz to 20 kHz 주파수 해상도 1/10,000에서 1% 왜곡) 및 범용 컴퓨터와 데이터 수집 프로그램과 MATLAB 소프트웨어를 사용하였다. 모드별 매개변수를 측정하기 위해 서로 다른 재료와 두께의 빔을 1차적으로 10 Hz에서부터 1,000 Hz까지 조화 가진력(sinusoidal force)을 전달하여 공진주파수를 측정하였으며, 모달 모빌리티(modal mobility)데이터를 얻기 위해 가속도계를 사용하였다. 가진 형태는 빔을 직접 가진기로 가진하는 방식으로 Fig. 2(a)와 같이 빔의 경계면을 가진하는 경계가진시험을 수행하였다. 또한, 감쇠계수 측정용 데이터를 얻기 위해서 2차적으로 공진주파수 모드별 일정 주파수 대역을 0.1 Hz나 0.25 Hz의 고해상도로 시험하였으며 이 시험은 일정한 특성을 얻고자 환경시험 챔버내(Fig. 2(b))에서 수행하였다.

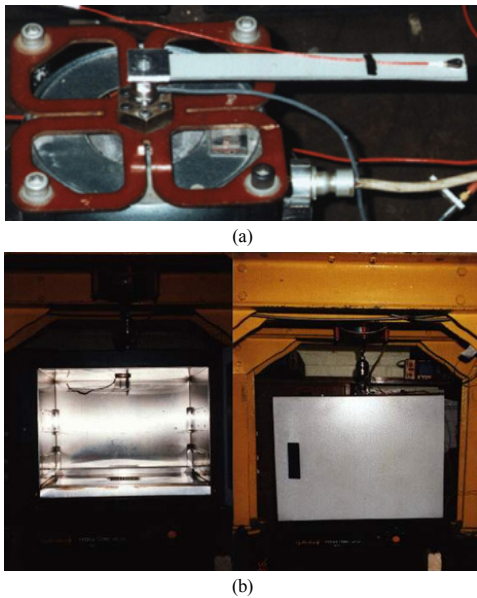


Fig. 2. Coated beam tests: (a) boundary excitation, (b) environmental chamber tests

주파수응답 특성은 속도와 힘의 관계인 모빌리티값으로부터 얻는다. 가진력 F 에 대한 다자유도계의 전달 모빌리티(transfer mobility) \dot{x}/F 는 식(1)과 같다[6,7].

$$\frac{\dot{x}_j}{F_k} = \frac{i\omega_r A_{jk}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2 + i\eta_r} + c \quad (1)$$

Where, \dot{x} denotes velocity, F denotes force, A denotes modal flexibility, ω denotes exciting frequency, ω_r denotes resonant frequency of r mode, η_r denotes loss factor of r mode, c is constant.

또한, 아래첨자는 각각 k : 입력점, j : 응답점, r : 공진 모드이며, 전달 모빌리티 \dot{x}_j/F_k 는 입력점 k 에서 가진하는 동안 응답점 j 에서 모빌리티 응답이다. ${}_r A_{jk}$ 는 모드 r 에서 입력점 k 와 관련된 j 점의 모드 유연도(modal flexibility)이다.

Fig. 3은 1.0 mm 두께의 알루미늄 빔과 도포 처리된 빔의 전달 모빌리티로 나타낸 주파수 응답특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 측정주파수가 높아질수록 공진진폭이 감소하며, 감쇠재의 감쇠효과도 2, 3, 4차 모드로 갈수록 커진다.

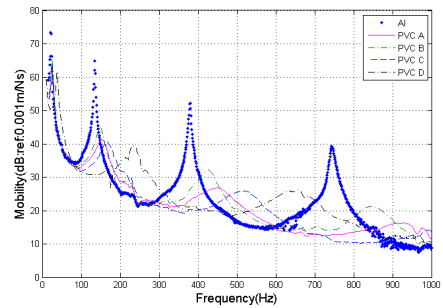


Fig. 3. Frequency response plot by transfer mobility of beam tests: aluminium base specimen

3. 감쇠계수의 결정

3.1 반력법

반력법은 공진주파수 대역에서 피크값과 3 dB이 차이나는 반력값을 구하여 반력값 주파수 대역폭을 이용하여 감쇠계수를 결정하는 방법으로 비교적 낮은 감쇠계수 결정 시에 사용한다[8].

$$\eta_n = \frac{\Delta\omega}{\omega_{rn}} \quad (2)$$

Where, η_n denotes loss factor of n^{th} mode, $\Delta\omega$ denotes half power bandwidth, ω_{rn} denotes resonant frequency of n^{th} mode.

본 연구에서는 곡선맞춤 반력법(curve fit HPM)을 사용하여 공진주파수와 좌우 일정 주파수 대역 데이터를 곡선 맞춤함으로써 얻어진 반력값에 따라 감쇠계수를 평가하였다. Fig. 4는 Fig. 3으로부터 370 ~ 390 Hz 구역에서 알루미늄합금 빔에 대하여 반력법을 사용하여 감쇠계수를 평가한 것이다. 그림에서 곡선 맞춤값에 의해 반력값의 최소오차로부터 감쇠계수는 0.0115이다. 그러나 감쇠처리된 빔에 대하여 Fig. 5와 같이 인접모드가 발생한 경우는 반력법을 사용하기 어렵다.

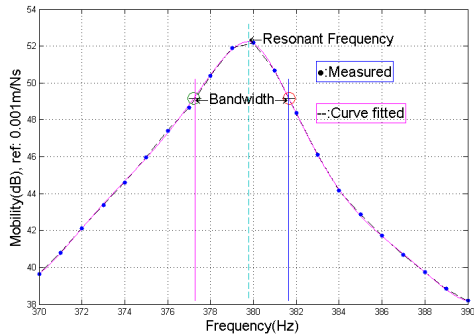


Fig. 4. Curve fit HPM(Al 1.0 mm, mode 3, 1 Hz resolution)

3.2 최소자승오차법

원호곡선맞춤 최소자승오차법은 벡터도법으로 모드별 응답값을 계산하고 모드 원호맞춤(modal circle fit)을 수행한 후에 최소자승오차법을 사용하는 방법이다. 이의 최소자승오차 합은 식(3)과 같다[8].

$$E = \sum_{i=1}^n error^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2 \quad (3)$$

Where, E denotes sum of least squares error, x and y denote x, y coordinate data of a point, a, b, c are constant.

이 오차를 최소화하기 위한 조건은 각각 $\frac{\partial E}{\partial a} = 0$, $\frac{\partial E}{\partial b} = 0$, $\frac{\partial E}{\partial c} = 0$ 으로 선형이며, a, b, c 와 독립적이다. 감쇠계수는 공진주파수와 인접주파수 대역에서 얻어진 측정값에 최적원의 데이터를 이용하여 구한다. 이의 방법은 두 가지로, 최소 탄젠트오차법과 최소 각오차법이다 [1,2].

최소 탄젠트오차법은 모든 측정점으로부터 연속되는 응답 위상면 원호(response phase plane circle)상 두점 1, 2 에서 측정된 위상각의 탄젠트값 차이에 대한 최소 오차를 구한다. 최소오차의 자승값에 대한 합은 식(4)와 같다[9].

$$\sum_{i=1}^{n-1} e^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \{ \omega_{i+1}^2 - \omega_i^2 - P(\tan(\alpha_i) - \tan(\alpha_{i+1})) \}^2 \quad (4)$$

Where, e denotes error, ω denotes frequency, $P = \omega_r^2 \eta_r$ is constant, α denotes phase angle.

공진주파수를 알면 P 값에서 감쇠계수를 얻으며, 이는 탄젠트 함수가 비교적 선형적인 경우에 유용하다. 최소 각오차법은 위상각의 오차를 이용하는 방법으로 두 연속하는 주파수에서 이론적 위상각과 실제 측정값의 오차 자승 합을 사용한다[9].

$$\Sigma error^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\tan^{-1} \frac{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_r}\right)^2}{\eta_r} - \tan^{-1} \frac{1 - \left(\frac{\omega_{i+1}}{\omega_r}\right)^2}{\eta_r} - (\theta_i - \theta_{i+1}) \right)^2 \quad (5)$$

Where, θ_i and θ_{i+1} denote each of measured phase angle of continuing two points.

공진주파수 ω_r 과 감쇠계수 η_r 는 이들의 오차값을 최소화하는 반복해(iterative solution)로부터 구한다.

3.3 MTEM과 MAEM의 적용

MTEM과 MAEM 기법들은 선정된 공진주파수 주변 좌우 주파수 대역폭의 실수부와 허수부에 대한 모드 원호맞춤을 수행하고, 이로부터 선형성(linearity) 여부를 확인하는 것이 필요하다.

감쇠처리된 빔은 Fig. 5와 같이 2차 이상의 공진모드에서 가끔 인접모드 현상을 보인다. 또한 공진점과 3 dB 이상의 차이에 나타나는 반력점을 구할 수 없는 경우 반력법으로 평가하기 어렵다.

Fig. 6은 인접모드인 Fig. 5의 모드 측정값을 2차원상에서 모드 원호맞춤 기법을 이용하여 나타낸 것이다. 모드별 데이터 선정범위에 따라 원의 직경이 변동되므로 본 연구에서 감쇠계수는 선정 구간 중에서 모드 원호맞춤 기법의 상관계수(correlation coefficients)의 최대값인

구간으로 선정하였다. 이후에 최소 탄젠트오차법이나 최소 각오차법을 사용한다. 최소 탄젠트오차법은 측정데이터의 선형성이 요구되며 낮은 위상각 데이터에서는 정밀한 방법이다. 그러나 이 방법은 공진주파수와 떨어진 데이터가 포함되는 경우에 큰 오차가 발생하는 단점을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 식(5)와 같이 오차를 최소화하는 최소 각오차법을 사용하여 비선형성 데이터의 감쇠계수를 평가한다.

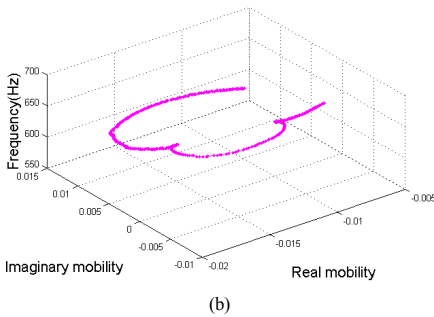
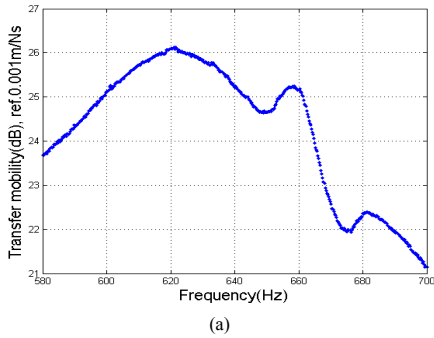


Fig. 5. Close modes(damping treated AL 1.6mm based beam, mode 3, 0.25 Hz resolution), (a) frequency response plot (b) 3D Nyquist plot

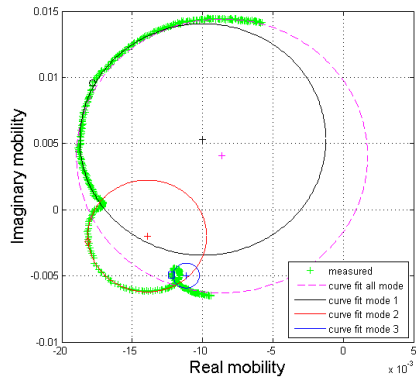


Fig. 6. Modal circle fit for close modes(damping treated AL beam, mode 3, 0.25 Hz resolution)

Table 2는 PVC D 재질에 대하여 600 ~ 640 Hz 영역 내에서 MAEM기법을 이용하여 임의의 선정 주파수 구간별 감쇠계수를 정리한 것이다.

표에서 보는 바와 같이 입력 주파수 범위가 큰 경우가 감쇠계수 0.1532로 다소 변동성을 갖지만, 범위를 줄인 나머지 구간에서는 평균 감쇠계수 0.1506 기준에 대하여 1.5 % 오차범위 이내이다.

Table 2. Input frequency bandwidth dependency of modal parameters of combination of MTEM & MAEM (Fig. 5. coated AL beam, mode 3, 0.25 Hz resolution)

Selected frequency range(Hz)		resonant frequency(Hz)	loss factor(error %) from MEAM	
600	640	620.6	0.1532	exclude
605	635	621.7	0.1492	0.9%
610	630	621.4	0.1499	0.46%
615	625	621.5	0.1527	1.39%
average loss factor: 0.1506(exclude wide range data)				

3.4 위상변화법(PCM)

위상변화법(phase change method)은 최대 응답점과 인접한 양측 점의 위상차를 이용하는 방법이다. 측정된 위상값을 이용하면 감쇠계수는 식(6)과 같다[2].

$$\eta = 2 \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_r} \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (6)$$

Where, η denotes loss factor, ω denotes frequency ω_r denotes resonant frequency, θ denotes measured phase angle.

공진주파수 부근에서 위상각은 0에 근접하므로 위상각을 미분값을 이용하여 구하며 감쇠계수를 구한다. 이 방법도 최소 오차법과 독립적으로 사용 가능하나 공진주파수를 사전에 알아야 하며 데이터의 선형성이 요구되는 단점이 있다.

3.5 감쇠계수의 결정

3.5.1 감쇠처리된 빔의 감쇠계수 결정

Fig. 7은 다양한 감쇠계수 기법을 사용하여 최소오차로 감쇠계수를 결정할 수 있는 통합프로그램의 절차도를 나타낸 그림이다. 시험 측정값은 실수부와 허수부의 모달 데이터를 사용하고, 감쇠계수는 데이터 특성에 따라

사용법을 비교하여 선택한다.

모드별 주파수응답 측정값이 감쇠계수 값이 커서 반력값을 구할 수 없을 때는 반력법의 대체로 최소 탄젠트 오차법, 최소 각오차법 및 위상변화법의 적용이 가능하며, 측정값의 모드 원호맞춤을 도시하여 비선형성을 판정하고 입력데이터 구간을 판단하여 최소 탄젠트오차법이나 위상변화법을 사용할 수 있도록 하였으며, 인접모드 발생 시 모드 원호맞춤을 통하여 최소오차의 감쇠계수를 결정을 지원할 수 있다. 또한, 비선형 측정값이 포함된 경우는 비선형 값에 적합한 최소 각오차법을 사용하되 최소 탄젠트오차법으로 구한 감쇠계수를 최소 각오차법의 초기 입력값으로 하여 쉽게 사용할 수 있게 조합 프로그램을 개발하여 어느 경우에도 감쇠계수를 결정할 수 있도록 하였다.

다시 말해서, 측정값이 선형적인 경우에 감쇠계수는 반력법과 최소 탄젠트오차법, 위상변화법으로부터 얻는 것이 쉽다. 반면 큰 감쇠값과 비선형 데이터를 포함하는 경우에 감쇠계수는 최소 각오차법을 적용하여 얻어진다.

3.5.2 감쇠재의 감쇠계수 결정

유한요소의 입력데이터는 감쇠 해석방법에 따라 감쇠재의 감쇠계수가 필요하므로 도포재의 감쇠계수를 결정해야 하며 이는 Oberst식을 사용하여 구할 수 있다.

Oberst beam과 같이 금속판에 감쇠 처리된 빔의 감쇠계수는 식(7)에 의하여 얻어진다[6].

$$\eta_E = \eta_c \frac{1 + EH}{EH} \left(\frac{3 + 6H + 4H^2 + 2EH^3 + E^2 H^4}{1 + 2EH(2 + 3H + 2H^2) + E^2 H^4} \right) \quad (7)$$

Where, η_E denotes loss factor of coated beam, η_c denotes loss factor of coating material, $E = E_d / E_m$ denotes Young's Modulus ratio, $H = h / h_m$ denotes thickness ratio(m : metal, d : damping material).

이 관계식과 감쇠 처리된 빔의 측정된 감쇠값으로부터 감쇠재의 자체의 감쇠계수와 동적탄성계수(dynamic modulus)를 구할 수 있다. Table 2는 Oberst 식(7)을 이용하여 구한 도포용 감쇠재의 동적 특성치 값들이다. 대부분 사용된 재료의 감쇠계수는 0.26 ~ 0.35로 높다.

Table 2. Dynamic parameter determination: coating material properties

Specimen	Average of measured loss factor	Oberst Calculation		
		Modulus (MPa)	Loss factor	
PVC A	HWACO	0.1485	2,219	0.267
PVC B	M200	0.1701	1,503	0.301
PVC C	INS 30F	0.1361	896	0.264
PVC D	INS 500	0.1607	804	0.355

4. 감쇠 처리된 빔의 감쇠계수 평가

소음억제에 따른 빔의 감쇠효과를 높이기 위해서는 상당량의 감쇠재를 부재 표면에 도포해야 한다. 이러한 감쇠재의 대량사용은 차량 중량의 증가와 함께 에너지 효율감소(연비/전력사용증가)를 가져온다. 따라서 감쇠

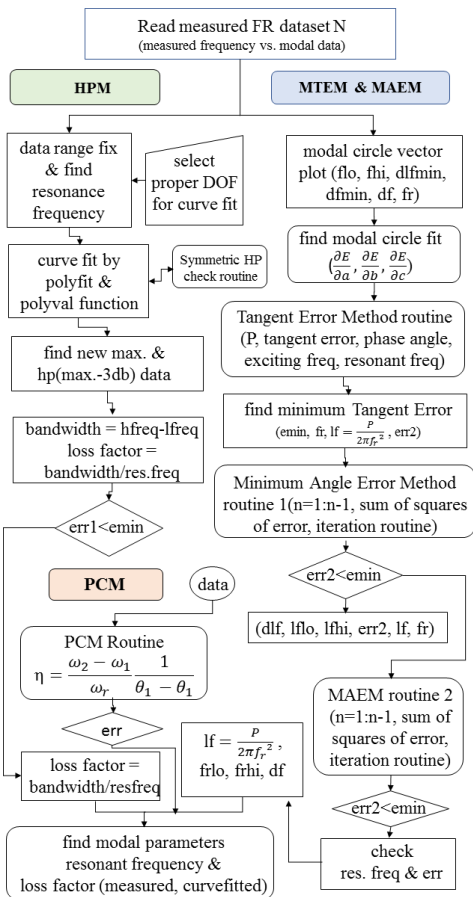


Fig. 7. Flowchart of loss factor evaluation(HPM, Combination of MTEM & MAEM & PCM)

재의 효율적인 사용을 위하여 감쇠재 도포량에 따른 감쇠계수 평가가 중요하다.

Fig. 8은 감쇠재와 모재의 중량비에 따른 감쇠계수 값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 금속판재에 대한 감쇠재의 질량비(M_{cn}/M_{mn}) 1.2 ~ 1.7 영역에서 최대 감쇠계수는 0.2 이상 증가한다. 그러나 질량비 1.7 이상의 구간은 실용적 측면에서 과도한 중량 증가로 인하여 경제성이 부족하다. 따라서 허용 중량 이내에서 최적화가 필요하며 바닥재 중량대비 1.7배 이내가 바람직한 것으로 사료된다. 또한, 세 번째 중량비에서 감쇠계수가 모두 낮아졌는데 이는 주파수비가 높아진 데서 기인된 것으로 보인다. 즉 금속도재와 도포재의 특성으로 공진주파수($F_{rn} = \frac{f_{cn}}{f_{mn}}$, 여기서 f_{cn} : 감쇠처리된 빔의 공진주파수, f_{mn} : 금속 빔의 공진주파수)비가 커지면 특정 모드에서 빔의 유연도(질량비와 공진 주파수비 곱으로 일정)에 영향을 주게 되어 감쇠효과가 떨어질 수 있다는 점이다.

이로부터 현장 적용 측면에서 감쇠재의 도포두께에 따라 Fig. 8을 정리하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 Fig. 8로부터 두께비($H = h/h_m$)에 따른 감쇠계수를 나타낸 결과이다. 도포두께에 대한 금속 두께비를 4 정도까지 감쇠계수는 최대 0.20으로서 감쇠효과를 보인다.

Fig. 10은 탄소강과 알루미늄합금에 대하여 가진주파수 630 Hz 영역까지 각각의 감쇠재의 감쇠계수를 함께 나타낸 것이다. 두 재질 모두 가진 주파수 500 Hz 부근까지 이들의 감쇠계수는 주파수 증가에 따라 완만하게 커졌다. 따라서 감쇠 처리된 두 재질의 감쇠효과는 500 Hz 영역까지 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

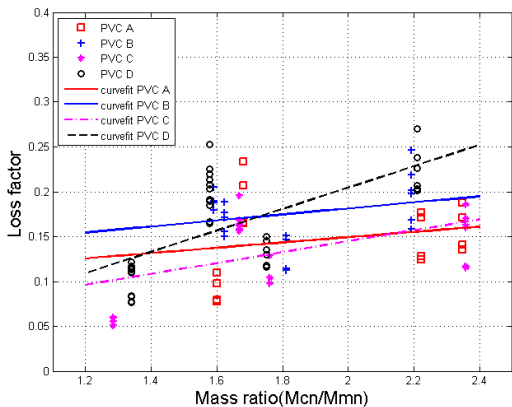


Fig. 8. Loss factor comparisons to evaluate the coating mass effect of material

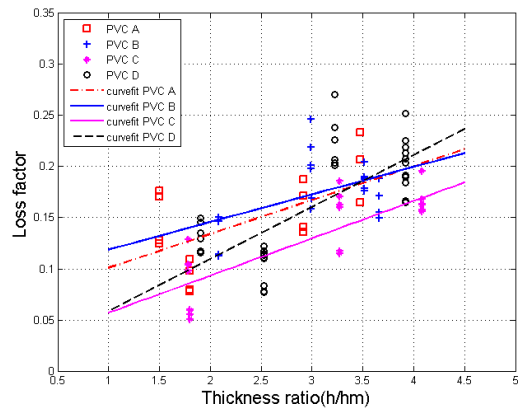


Fig. 9. Loss factor comparisons to evaluate the coating thickness effect of material

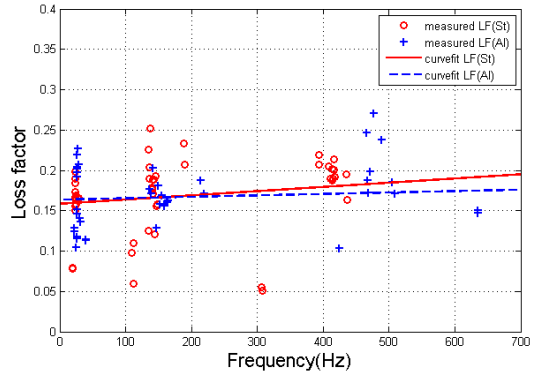


Fig. 10. Loss factor comparisons to evaluate the base metal effect and frequency dependency of material

5. 결론

철도차량 차체나 기기함용 금속판재에 소음억제를 위해 도포용 감쇠재의 빔 실험결과로부터 감쇠계수, 동적특성 평가에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 알루미늄합금 빔에 대하여 반력법에 준하여 감쇠계수는 구할 수 있지만, 감쇠처리된 빔의 응답특성은 반력값을 찾을 수 없거나 인접모드 발생 시에는 구하기 어렵다. 따라서 반력법은 감쇠처리된 빔의 감쇠계수를 평가하기에 다소 부적합하다.
- (2) PVC D 재질에 대하여 600 ~ 640 Hz 영역 내에서 최소 각오차법을 이용하여 임의의 선정 주파수 구간별 감쇠계수를 평가하였다. 입력 주파수 범위가 큰 경우가 감쇠계수 0.1532로 다소 변동성을

갖지만, 범위를 줄인 나머지 구간에서는 평균 감쇠계수 0.1506 기준에 대하여 1.5 % 오차범위 이내이다.

- (3) 금속판재에 대한 감쇠재의 질량비 1.2 ~ 1.7 영역에서 최대 감쇠계수는 0.2 이상 증가한다. 그러나 질량비 1.7배 이상의 구간은 실용적 측면에서 과대한 중량 증가로 인하여 경제성이 부족하다. 따라서 허용중량 이내에서 최적화가 필요하며 바닥재 중량대비 1.7배 이내가 바람직할 것으로 사료된다.
- (4) 알루미늄합금과 탄소강 두 재질의 감쇠된 빔에 대한 감쇠계수는 가진주파수 500 Hz 부근까지 주파수 증가에 따라 완만하게 커졌다. 따라서 감쇠 처리된 두 재질의 감쇠효과는 500 Hz 영역까지 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

또한, 빔시험과 Oberst식으로 얻어진 감쇠재의 감쇠계수는 기계 부품/구조물의 소음억제를 위한 소음해석 유한요소 시뮬레이션의 입력자료로 활용할 수 있다.

References

- [1] D. L. Brown, R. J. Allemang, R. Zimmerman, and M. Mergeay, "Parameter Estimation Techniques for Modal Analysis", *SAE Transactions*, paper No. 790221, pp.828-846, 1979.
DOI: <https://doi.org/10.4271/790221>
- [2] D. J. Mead, The Internal Damping Due to Structural Joint and Techniques for General Damping Measurements, C.P. No. 452, A.R.C. Technical Report, p.14, Her Majesty's Office, 1959. Available from: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/arc/cp/0452.pdf> (accessed Dec. 10, 2018)
- [3] H. Oberst unter Mitwirkung von K. Frankenfeld, "Über die Dämpfung der Bigeschwingungen dünner Bleche durch fest haftendende Beläge", *Acustica, Akustische Beiheft 4*, Vol. 2, pp.AB181-AB194, 1952.
- [4] H. Oberst, "Reduction of Noise by the Use of Damping Materials", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 263, No. 1142, pp.441-453, 1968.
Available from: <https://www.jstor.org/stable/73401>
- [5] ASTM E756-05, Standard method for Measuring Vibration-damping Properties of Materials, American Society for Testing and Materials, ASTM, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1520/E0756-05R17>
- [6] D. J. Ewins and J. Griffin, "A State-of-the-art Assessment of Mobility Measurement Techniques -Results for the mid-range Structure (30-3000Hz)", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 78, No. 2, pp.197-222, 1981.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80033-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80033-8)

- [7] Gil-Hyun Kang and Chul-Su Kim, "Damping Characterization of the Double-skin Aluminum Extruded Panels for rolling Stock Carbody", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14. No. 7, pp.3198-3199, July 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.7.3197>
- [8] C. C. Kennedy and C. D. P. Panco, "Use of Vectors in Vibration Measurement and Analysis", *Journal of Aero Science*, Vol. 14, No. 11, pp.603-625, 1947.
DOI: <https://doi.org/10.2514/8.1474>
- [9] A. M. Brown, *An Experimental and Theoretical Analysis of Vehicle Body Structure Dynamics*, Ph.D. Thesis, The University of Birmingham, Birmingham, UK, pp.60-74, 1985.

강길현(Gil-Hyun Kang)

[정회원]



- 2001년 12월 : 영국 The University of Birmingham (기계공학 박사)
- 1981년 5월 ~ 2007년 6월 : 철도청, 철도공사 근무
- 2010년 7월 ~ 2016년 12월 : (주)현대로템 연구소, 철도사업본부 근무
- 2016년 2월 ~ 2019년 1월 : (주)SR 개통운영단, 기술본부 근무

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량진동소음