

〈논 문〉

내부손실계수 측정을 위한 실험 방법

Experimental Methods for the Measurement of Damping Loss Factors

김 관 주** · 최 승 권*

Kwanju Kim and Sungkwon Choi

(1999년 7월 27일 접수 : 1999년 9월 20일 심사완료)

Key Words : Damping Loss Factor(내부손실계수), Decay Rate Method(감쇠비율방법), Half-power Bandwidth Method(파워반감대역법), Power Balance Method(파워평형법), SEA(통계적에너지해석)

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the most appropriate experimental method of the measurement of "damping loss factors" (DLF) for the statistical energy analysis(SEA) calculation. The successful prediction of vibration levels from the structure is critically dependent on the accurate estimation of DLF's not only in conventional vibration analysis but especially in SEA. Unfortunately, calculation of accurate DLF is not an easy matter. So experimental methods are made use of for the DLF values. Three kinds of experimental methods for estimating DLF, i. e. decay rate method, half-power bandwidth method and power balance method, are presented and tests are carried out for the plate and the cylindrical shell examples. Pro and con of each methods is reviewed. Finally, calculated DLF values are used for vibration level estimation using commercial SEA software and compared with measured vibration data.

1. 서 론

통계적 에너지 해석은 선박, 항공기, 철도 차량 같은 복잡한 구조물이나 높은 주파수 대역의 진동, 소음 저감에 유용하게 사용되는 해석 방법의 하나이다⁽¹⁾. 이러한 통계적 에너지 해석의 중요한 변수로는 구조물을 이루고 있는 요소들의 내부손실계수와 각 요소들의 연결에 의한 연성손실계수 그리고 요소들의 동적 특성을 표현하는 모드 밀도 등이 있다. 복잡한 구조물의 경우 손실계수는 모드 밀도에 비해 이론적인 접근이 거의 불가능하다. 따라서 손실계수의 계

산은 실험에 의존하게 된다. 본 논문에서는 구조물의 내부손실계수를 실험적으로 구하는 방법에 대하여 살펴보고자 한다. 실험 방법은 크게 세 가지를 들 수 있다. 첫째는 감쇠 비율 방법이며 둘째는 모달 해석(modal analysis)으로 측정이 가능한 파워 반감 대역법, 셋째는 파워 평형법이다. 감쇠 비율 방법은 비교적 실험 방법이 간단하다. 충격 해머를 이용한 가진과 대역 통과필터(band pass filter)만 있다면 구조물의 선형적으로 감소하는 진동응답 곡선으로부터 관심 주파수 대역의 내부손실계수를 측정할 수 있다. 그러나 구조물의 감쇠 곡선은 항상 선형이 아니므로 기울기 선택에 의해 내부손실계수가 크게 좌우된다. 또한 고주파 대역에서 한계가 있다. 파워 평형법은 구조물에 입력되는 입력 파워를 측정하고 구조물의 진동 레벨을 측정하여 주파수 대역

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

** 홍익대학교 대학원 기계공학과

평균 입력 파워(frequency bandwidth average input power)와 주파수 대역 평균 에너지 손실(frequency bandwidth average energy dissipation)을 증가시켜 내부손실계수를 측정한다. 이론적으로 파워 평형법은 구조 감쇠(structural damping)에 가장 근사하나 균일한 질량 밀도(mass density)를 갖는 구조물이어야 한다는 제한이 있다. 이들 방법 중 근래 사용되는 방법은 감쇠 비율 방법과 파워 평형법이다. Brown 등은 충격 해머 또는 비접촉 가진을 사용할 경우, 실험 대상이 되는 구조물에 가속도계 이외의 부가 질량이 없으므로 적은 내부손실계수를 갖는 구조물에 대해 가장 정확한 내부손실계수를 측정할 수 있는 내용을 실험적으로 검증하였다⁽²⁾. 그에 반해 Ranky 등은 구조물의 진동 응답 감쇠가 선형 기울기가 아닌 평판과 비균일 질량 밀도를 갖는 별집구조물의 내부손실계수를 파워 평형법을 사용하여 실험으로 구하였다⁽³⁾. 본 논문에서는 이러한 세 방법들을 이용하여 구조물의 내부손실계수를 측정하고 전산 해석을 하여 비교·분석하였다.

2. 내부손실계수 측정 방법

2.1 감쇠 비율 방법

감쇠 비율 방법은 선형적인 손실계수(linear damping)를 갖는 공진 모드의 과도 응답(transient response)에 그 기반을 둔다. 초기 가진이 완료되면 공진 주파수 f_n 에서 모드 에너지의 크기는 $e^{(-\pi f_n \eta t)}$ 에 비례하여 감소한다. 이 관계를 이용해 감쇠의 기울기로 표현되는 감쇠 비율(decay rate) DR([dB/sec])을 정의하고 내부손실계수를 표현하면 다음과 같다⁽⁴⁾.

$$\eta = \frac{DR}{27.3 f_c} \quad (1)$$

이 때 주파수 f_c 는 주파수 대역의 중심 주파수(center frequency)이다. 감쇠 비율 방법은 하나의 공진 모드에 대한 내부손실계수 측정 또는 주파수 대역에 존재하는 공진 모드들의 평균 내부손실계수의 측정에 적용할 수 있다. 충격 해머를 사용할 경우 실험 방법과 측정 장치들이 간단하고 부가 질량 및 경계조건에 의한 구조물의 동특성 변화가 없으므로 가장 정확한 내부손실계수를 측정할 수 있다는 장점이 있으나 약 3000 Hz~5000 Hz이상의 고주파 대역은 측정 결과의 신뢰도가 낮아지거나 불가능하다. 또한 실제 현상에서는 감쇠 비율 DR이 항상 선형 기울기는 아니므로 측정자의 기울기 선택에 의해

내부손실계수의 값이 크게 변화될 수 있다.

2.2 파워 반감 대역법

파워 반감 대역법은 주파수 응답 함수를 사용한다. 이 방법은 일자유도의 모드를 갖고 있는 경우의 구조물의 내부손실계수의 측정만 가능하다. $\eta < 0.3$ 인 경우 3 dB 감소하는 주파수는 모드의 공진 주파수를 f_n 이라 할 때 $f \cong f_n \pm \eta f_n / 2$ 이 된다⁽⁴⁾. 따라서 내부손실계수는 다음으로부터 계산된다.

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_n} \quad (2)$$

여기서 파워 반감대역 Δf 는 주파수 응답 함수의 최대치에서 3 dB 감소된 주파수들의 간격이다. 이 방법은 모달 해석을 통해 수행될 수 있으나 정확한 값을 예측하려면 상대적으로 높은 주파수 해상도(frequency resolution)를 필요로 한다. 모드의 중첩(overlapping)이 높은 경우도 정확한 내부손실계수 측정을 어렵게 만든다. 임의의 주파수 대역의 평균 내부손실계수는 다음으로 계산할 수 있다⁽⁵⁾.

$$\eta = \frac{1}{N} \sum \eta_n, f_n \in B \quad (3)$$

여기서 N 은 대역 B 안에 있는 공진 주파수 f_n 에 해당하는 모드의 개수이다.

2.3 파워 평형법

랜덤 가진의 경우에는 내부손실계수를 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있으므로 주파수 대역 평균 내부손실계수를 측정하는 것이 상대적으로 쉬워진다.

$$\eta = \frac{\text{Average power dissipated}}{\text{Average energy stored} \times \omega} \quad (4)$$

여기서 분자의 평균 손실 파워는 구조물에 입력되는 주파수 대역 입력 파워와 동일($\Pi_{in} = \Pi_{diss}$)하므로 입력 파워를 측정함으로써 알 수 있다. 분자의 주파수 대역 평균 에너지는 구조물의 진동을 여러 점에서 측정한 공간 평균값으로 계산할 수 있다. 평균 입력 파워는 임피던스 헤드(impedance head)나 힘 변환기(force transducer)를 사용하여 가진력과 속도를 측정하고, $\overline{F(t)v(t)}$ 에 의해 직접 구할 수 있다. 다음과 같은 형태로 모빌리티 함수를 이용할 수도 있다⁽⁴⁾.

$$\Pi_{in} = \text{Re}[F_{rms} \cdot v_{rms}^*] = \overline{F^2(t)} \text{Re}(Y) \quad (5)$$

여기서 F, v 는 모두 복소수이며 $\bar{\quad}$ 는 시간 평균을 의미하고 Re 는 실수부, Y 는 모빌리티 함수, $*$ 는 공액 복소수를 말한다. 이와 유사한 형태로 입력 파워가 모빌리티 함수의 역수인 임피던스 함수로 표현할 수 있음은 당연하다. 구조물에 저장되는 평균 에너지는 공간 평균된 구조물의 속도와 질량으로 $E_{total} = M \langle v^2 \rangle$ 와 같이 쓸 수 있으므로 진동 표면의 속도 분포를 측정하여 계산할 수 있다. 식 (4)를 이용하여 평균 주파수 대역 내부손실계수를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta(f) = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \frac{\Pi(if) 2\pi f}{\langle |a(if)|^2 \rangle mA} df \quad (6)$$

여기서 m 은 단위 면적당 질량, A 는 구조물의 면적이다. a 는 가속도, $\langle \quad \rangle$ 는 공간 평균을 의미한다.

3. 실험 및 해석

해석에 앞서 위에서 언급한 세 가지 실험 방법을 이용하여 내부손실계수 실험을 수행하였다. 실험은 강(鋼)으로 제작된 평판과 원통 셸, 두 가지 구조물에 대해 수행하였다. 두 실험 대상 모두 균일한 질량 분포를 갖고 있다. 평판과 원통 셸의 제원을 Table 1에 나타내었다.

3.1 원통 셸의 내부손실계수 측정 실험

(1) 파워 반감 대역법을 이용한 내부 손실 계수

원통 셸 실험은 고무줄을 이용한 자유지지 경계조건으로 수행하였다. 힘 변환기를 부착시킨 가진기를 사용하여 0 Hz ~ 3200 Hz대역으로 랜덤 가진하였다. 가속도계로 원통 표면의 72점(반경방향 8점, 길이방향 9점)의 주파수응답함수를 얻었다. 가진점(driving point)의 주파수응답함수는 Fig. 1과 같다. 모달 해석에 의해 0Hz ~ 3200 Hz대역에 40개의 모드가 있음

Table 1 Properties of test structures

Flat plate	
Size($w \times h \times t$)	0.914 × 0.838 × 0.003 m
Mass (kg)	17.45 kg
Material	Steel
Cylindrical shell	
Size(radius × length × t)	0.05 × 1.00 × 0.0035 m
Mass (kg)	8.12 kg
Material	Steel

이 확인되었다. 파워 반감 대역법을 이용하여 계산한 각 모드들의 내부손실계수를 Fig. 2에 나타내었다. 위 결과로부터 3200 Hz대역 평균 내부손실계수는 산술 평균에 의해 $\eta_{half} = 0.00458$ 이 된다.

(2) 감쇠 비율 방법을 이용한 내부손실계수
감쇠 비율 방법은 가진으로 충격 해머를 사용하여

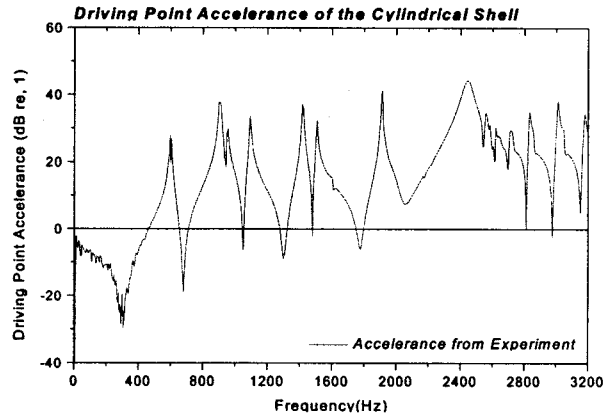


Fig. 1 Driving point accelerance of the cylindrical shell

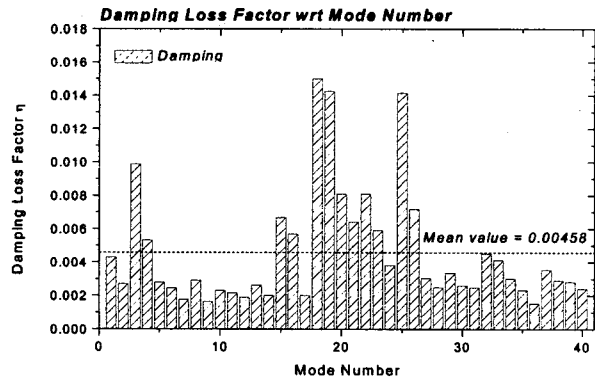


Fig. 2 Damping loss factors with respect to the modes

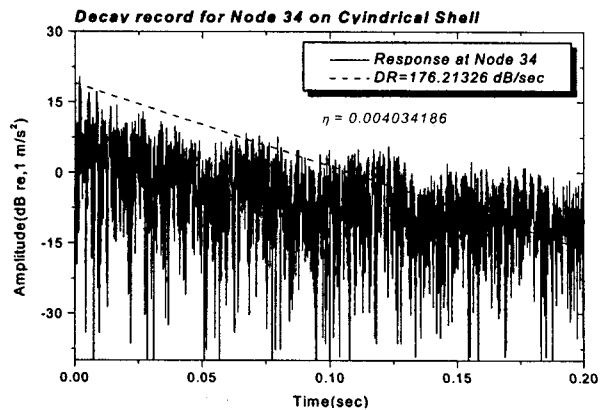


Fig. 3 Decay record for node 34 (0.2 sec)

Table 2 Damping loss factors of the cylindrical shell from decay rate method (0 Hz~3200 Hz)

Bandwidth	Decay rate(dB/s)	DLF
0~3200 Hz	71.00773	0.001625635
	333.50622	0.007635216
	148.35666	0.003396444
	131.20043	0.003003673
	176.21326	0.004034186
	286.58638	0.006561043
	186.33551	0.004265923
	170.29282	0.003898645
	66.55896	0.001523786
Average		0.003993839

다. 측정 샘플시간은 1초로, 원통 셀 표면의 가진점 포함 9점의 감쇠 파형을 이용하였다. 9점 중 하나의 측정점에 대한 감쇠 파형을 도시하면 Fig. 3과 같다. 감쇠 비율 방법을 통한 0 Hz~3200 Hz 주파수 대역 감쇠 비율과 내부손실계수를 9개의 측정점에 대하여 Table 2에 정리하였다.

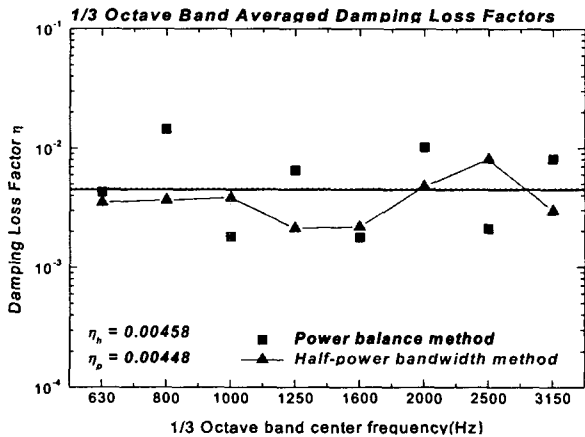


Fig. 4 Comparison of damping loss factor estimates in 1/3 octave band. ■ : Power balance method, ▲ : Half-power bandwidth method

Table 3 Comparison of three method results for damping loss factors of the cylindrical shell

	HPBM	DRM	PBM
η	0.00458	0.00399	0.00448

(3) 파워 평형법을 이용한 내부손실계수

9점의 공간 평균된 가속도와 입력 파워를 이용하여 식 (6)에 의해 파워 평형법으로 내부손실계수를 구하였다. Fig. 4는 파워 평형법을 이용하여 1/3 옥타브 대역으로 평균한 내부손실계수와 파워 반감 대역법으로 구한 내부손실계수에 식 (3)을 적용한 1/3 옥타브 밴드별 평균값을 함께 보여준다. 각 방법들로 구한 원통 셀의 3200 Hz대역 주파수 평균 내부손실계수를 Table 3에 나타내었다.

3.2 평판의 내부손실계수 측정 실험

평판 실험은 네 모서리를 고정시킨 경계조건으로 수행하였다. 경계조건에 의한 연성손실계수는 평판의 순수한 내부손실계수에 비해 대단히 작아 평판의 내부손실계수에 포함될 수 있다고 가정하였다.

(1) 파워 반감 대역법을 이용한 내부손실계수

실험에 사용한 평판은 원통 셀과 달리 0 Hz~3200 Hz주파수 대역에 수백 개의 모드들이 있으므로 3200 Hz 주파수 대역의 모달 해석을 통한 내부손실계수 측정은 불가능하였다. 따라서 0 Hz~200 Hz 주파수 대역을 추가하여 실험을 수행하였다.

측정점은 가진점 포함 총 28점이며 가진은 가진기를 사용하여 랜덤 가진과 충격 가진(pulse excitation)을 하였다. 이 때 충격 가진은 충격 해머를 사용하는 경우의 입력 신호와 동일하나 가진기와 실험 대상인 평판 사이에 연결봉(stinger)이 존재하는 차이점이 있다. Fig. 5는 모달 해석에 의한 각 모드들의 내부손실계수를 모드 번호에 대해 나타낸 것이다. 내부손실계수의 거시적인 경향은 주파수가 높아질수록 낮아진다는 것이다. 파워 반감 대역법에 의한 0

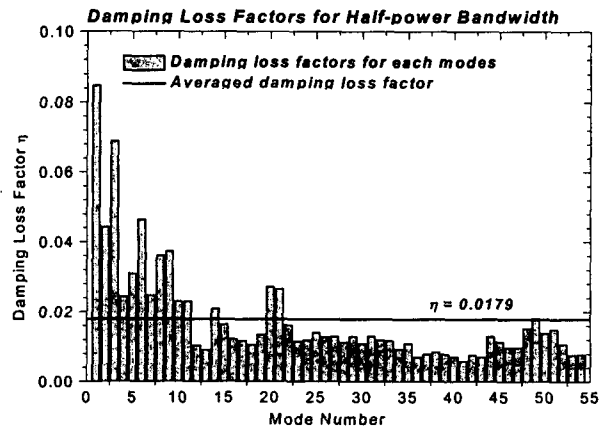


Fig. 5 Damping loss factors with respect to the modes of the flat plate

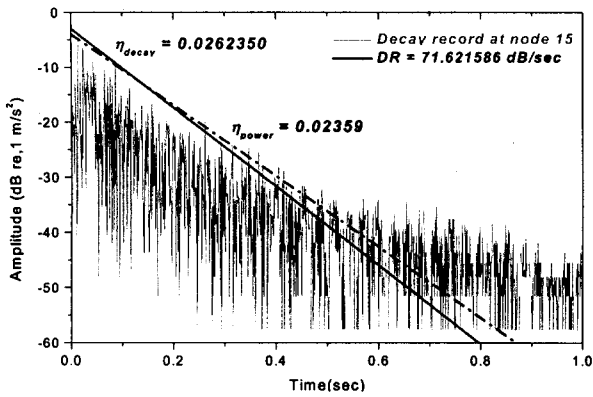


Fig. 6 Decay record for node 15

Table 4 Damping loss factors of the flat plate from decay rate method (0 Hz~200 Hz)

Bandwidth	Decay rate (dB/s)	DLF
0 Hz~200 Hz	87.268248	0.0319664
	86.915001	0.0318370
	71.621586	0.0262350
	78.881038	0.0288942
Average		0.02973315

Hz~200 Hz 주파수 대역 평균 내부손실계수는 $\eta_{half} = 0.0179$ 로 나타났다.

(2) 감쇠 비율 방법을 이용한 내부손실계수

평판 위 네 점의 감쇠 곡선을 이용하여 감쇠 비율 방법으로 0 Hz~200 Hz 주파수 대역의 평균 내부손실계수를 계산하였다. Fig. 6은 한 점의 감쇠 곡선과 파워 평형법에 의해 측정된 내부손실계수를 보여준다. 실선이 감쇠 비율 방법에 의한 내부손실계수이며, 일점 쇄선이 파워 평형법으로 계산한 내부손실계수이다.

각 측정점의 감쇠 비율과 그에 의한 내부손실계수를 Table 4에 정리하였다. 감쇠 비율 방법에 의한 0 Hz~200 Hz 주파수 대역 평균 내부손실계수는 $\eta_{decay} = 0.02973315$ 로 나타났다.

(3) 파워 평형법을 이용한 내부손실계수

평판에 대한 파워 평형법은 세 가지 주파수 대역에 적용했다. 앞서 보인 두 측정 방법의 결과와 비교하기 위한 0 Hz~200 Hz 주파수 대역, 3200 Hz까지 네 구간으로 나눈 800 Hz주파수 대역, 그리고 3200 Hz주파수 대역을 하나로 본 대역이다. Fig. 7에 200 Hz주파수 대역의 세 가지 측정 방법을 통한 평판의 내부손실계수를 하나의 그래프로 도시하였

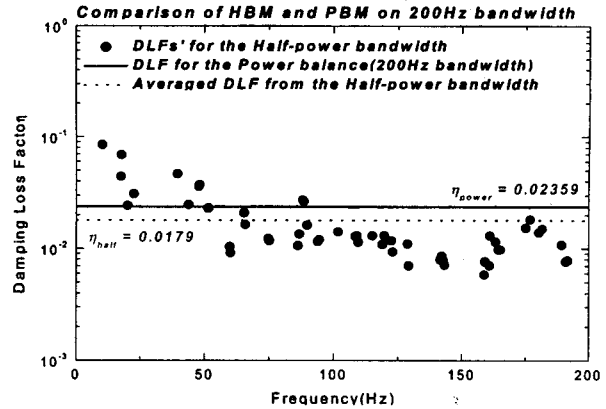


Fig. 7 Comparison of damping loss factors(200 Hz Bandwidth)

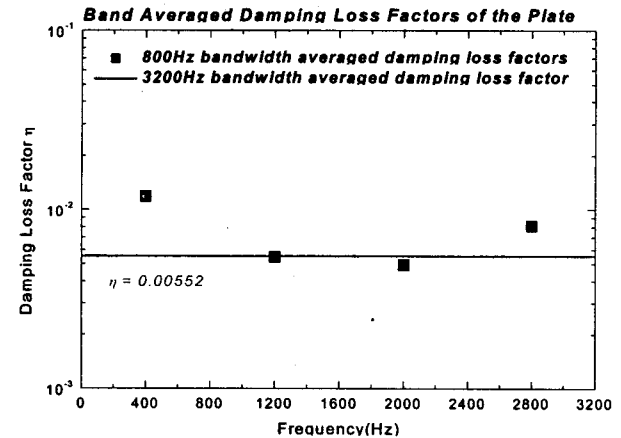


Fig. 8 Damping loss factors of the flat plate

다. Fig. 8은 파워 평형법을 통한 800 Hz주파수 대역 평균 내부손실계수와 3200 Hz주파수 대역 평균 내부손실계수를 보여준다. 800 Hz주파수 대역의 결과에서도 파워 반감 대역법의 결과와 유사하게 주파수가 높아지면서 내부손실계수가 작아지는 경향을 볼 수 있다. 3200 Hz주파수 대역 평균 내부손실계수는 $\eta_{power} = 0.00552$ 이다.

3.3 구조물 속도 크기의 실험과 전산 해석 비교

평판과 원통 셀에 대해 파워 평형법으로 구한 내부손실계수와 가진력을 사용하여 전산해석을 수행하여 진동 크기를 측정치와 비교해 보았다. Table 5는 원통 셀과 평판에 대해 힘 변환기에 의해 측정된 가진력과 내부손실계수의 3200 Hz주파수 대역 평균값을 보여준다

Fig. 9, 10은 원통 셀과 평판에 대한 속도 크기를 보여준다. 실험으로 구한 속도와 Table 5의 입력값에 의한 해석 결과가 잘 맞고 있다. 이 때 평판의

Table 5 Input data for simulation

	Force(N)	DLF
Cylinder	0.00383	0.00448
Plate	0.00418	0.00552

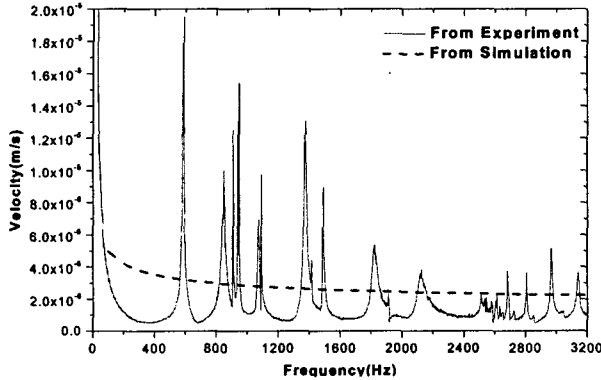


Fig. 9 Velocity level of simulation and experiment for the cylindrical shell (3200 Hz frequency bandwidth)

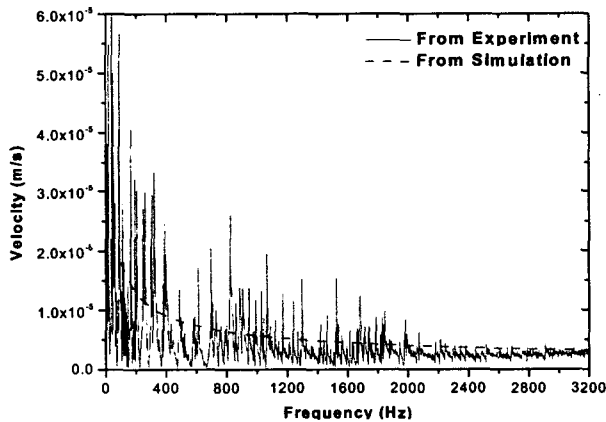


Fig. 10 Velocity level of simulation and experiment for the flat plate (3200 Hz frequency bandwidth)

경우 네 모서리가 고정된 경계 조건임에도 불구하고 해석 결과와 실험 결과가 잘 부합되는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 경계 효과(boundary effect)에 의한 연성손실이 비교적 작은 경우 연성손실계수는 구조물의 내부손실계수에 큰 영향을 미치지 못함을 보여준다.

4. 결 론

구조물의 내부손실계수 측정 방법은 세 가지가 있다. 근래에는 주로 두 가지가 사용되고 있는데, 이

중 감쇠 비율 방법은 실제 구조물에 있어 감쇠 곡선의 선형 기울기 선택에 많은 정확성이 요구된다. 예를 들어 국부 감쇠 처리된 구조물의 감쇠 곡선은 기울기가 비선형 거동을 보이므로 이런 경우 감쇠 비율 방법을 통한 주파수 대역 평균 내부손실계수 측정이 용이하지 못하다. 반면 파워 평형법은 입력 파워의 정확한 계산이 요구되어진다. 이론적으로 동일한 입력 파워 계산식이라 하더라도 식 (5)에 나타난 모빌리티 또는 임피던스 함수를 사용하는 것보다 $\overline{F(t)v(t)}$ 를 이용하는 것이 보다 정확한 입력 파워를 얻을 수 있었다. 또한 실험에 있어 경계 효과에 의한 연성손실계수가 작으면 구조물 자체의 내부손실계수에는 큰 영향을 주지 못하였다. 각 실험 방법들은 고유한 장점과 단점이 있으나 통계적 에너지 해석에 적용하기 위한 실험적 내부손실계수 측정 방법으로는 파워 평형법이 가장 적절하다고 사료된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 과제번호 95-0200-15-01-3의 지원을 받아 수행되었으며 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Lyon, R. H., 1975, "Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications", The MIT Press.
- (2) Brown, K. T. and Norton, M. P., 1985, "Some Comments of the Experimental Determination of Modal Densities and Loss Factors for Statistical Energy Analysis Applications", Journal of Sound and Vibration 102, pp. 588~594.
- (3) Ranky, M. F. and Clarkson, B. L., 1982, "Frequency Average Loss Factors of Plates and Shells", Journal of Sound and Vibration 89, pp. 309~323.
- (4) Lyon, R. H., 1995, "Theory and Application of Statistical Energy Analysis", Butterworth-Heinemann.
- (5) "AutoSEA Theory", 1995, Vibro-Acoustic Science Ltd.
- (6) Lyon, R. H., 1997, "Machinery Noise and Diagnostics", Butterworth Publishers.
- (7) 김정태, 김동혁, 1990, "평판구조와의 상사조건을 이용한 원통형 구조물의 진동해석", 한국항공우주학회지, 제 18 권, 제 4 호, pp. 46~55.