

형상 보강 판넬의 파동 전파 특성

이 종화*, 이 정 권*

(Wave Propagation in Swaged Panel)

(Jong-Hwa Lee, Jeong-Guon Ih)

ABSTRACT

Stiffened panels are very frequently used for body structures of automobiles, air-crafts, submarines, etc., to suppress the vibration level. Swaging technique is the modification of the configuration of panel itself, and this is preferred to rib-like stiffeners because it does not change the total weight of structure. In this paper, the transmissibility of vibratory power through swage is investigated, where the swage is modeled as an incomplete circular ring, utilizing the well-known transfer matrix method. The power transmission and reflection coefficients of swaged panel are estimated and compared with experimental results.

1. 서론

보강 판넬 (Stiffened panels)은 진동 레벨의 억제를 위하여 자동차, 비행기, 잠수함등의 몸체에 흔히 사용되어 진다. 현재까지 보강재의 부착에 따른 강성의 증가와 파동 차단 효과에 대해 많은 연구가 진행되어 왔으나, 그 주된 대상은 판넬에 추가적인 강성재 (rib, stringer)를 부착한 판넬들이었다 [1]. 한편, 형상 보강 판넬 (swaged panel)은 판넬 자체 형상의 변화에 의해 강성이 증가하게 되고, 따라서, 중량의 변화가 없게 되는데, 이러한 판넬에 대한 연구는 비교적 덜 이루어졌다. 본 논문에서는 보강 형상 (swage)을 통한 파동의 전파 특성을 전달 행렬법 (transfer matrix method)을 응용하여 살펴보고, 이를 실험을 통해 얻은 결과와 비교해 보고자 한다.

구조물의 진동 파워를 나타내는 상태 변수들 (state variables)의 상대적 위치에 따른 관계를 나타낸다.

Fig. 1 과 같이 중심각이 ϕ_0 인 원형 링 (ring)으로 가정된 보강 형상에 대해 상태 변수를 $\mathbf{z} = [u \ w \ \psi \ M \ V \ N]^T$ 과 같이 정의할 수 있는데, 이의 원주 방향에 대한 미분은 운동 방정식과 구성 조건 (constitutive relations)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \phi} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{z} . \tag{1}$$

여기서 \mathbf{A} 는 참고문헌 [2]에서 찾아볼 수 있고, 그 외에도 많은 논문에 제시되어 있다.

Eq. 1 의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{z}(\phi) = \exp(\mathbf{A}\phi) \cdot \mathbf{z}(0) \equiv \mathbf{T}_c \cdot \mathbf{z}(0) . \tag{2}$$

여기서 \mathbf{T}_c 는 전달 행렬을 의미하고, ϕ_0 는 swage의 중심각을 의미한다 [3]. 결국 Eq. 2 는 중심각이 ϕ_0 인 원형 링 (ring)의 양쪽 경계 사이의 관계를 나타낸다.

한편, Swage 와 단순 판넬 (straight beam)의 연결점은 고정단 (rigid connection)으로 가정하였고, 따라서, $\phi_0/2$ 만큼의 좌표 변환만이 이루어지고, 이를

2. 이론

2.1. 전달행렬법

보강 형상 (swage)의 진동 특성 해석을 위해 전달행렬법을 적용하였는데, 여기서 전달 행렬은

* 한국과학기술원 기계공학과

행렬로 나타내면 점 전달 행렬 (point transfer matrix), \mathbf{G} 가 된다. 결국 Eq. 2와 \mathbf{G} 를 이용하면 swage를 통한 상태 변수, \mathbf{z} 의 변환은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\mathbf{z}'_{tran} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{T}_c \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{z}'_{inc} \equiv \mathbf{T} \cdot \mathbf{z}'_{inc} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{z}'_{inc} 과 \mathbf{z}'_{tran} 은 각각 파동의 입사 영역 (incident region)과 전달 영역 (transmitted region)의 상태변수를 의미한다.

2.2. 진동 파워의 전달

2차원 판넬에서는 잘 알려져 있듯이 6 종류의 파동 성분과 각각에 해당하는 6개의 전파 상수, λ 가 존재한다. 즉, 1개의 내면운동 (in-plane motion)과 2개의 외면 운동 (out-of plane motion)이 있고, 각 성분의 진행 방향에 따라 모두 6개의 파동성분이 존재한다. 결국, 파동이 입사되는 영역과 swage를 통해 전달된 영역에는 전파 방향에 따라 각각 3개의 가용 파동 성분 (admissible wave)이 존재하게 된다. 또한, 각각의 파동 성분들은 구성 조건을 만족해야 하는데, 이를 특성 벡터, \mathbf{c}_j 로 나타낼 수 있다. 이를 이용하면 입사파, $\mathbf{c}_o \exp(\lambda_o x)$ 에 의해 발생하는 각각의 파동에 대한 상태 변수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{z}'_{inc} = \mathbf{c}_o e^{\lambda_o x} + \sum_{j=1}^3 r_j \mathbf{c}_j e^{\lambda_j x}, \quad \mathbf{z}'_{tran} = \sum_{j=1}^3 t_j \mathbf{c}_j e^{\lambda_j x} \quad (4)$$

또는, 다음과 같이 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$\mathbf{z}'_{tran} = \mathbf{P}_{tran} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{z}'_{inc} = \mathbf{T} \cdot [\mathbf{P}_o + \mathbf{P}_{inc} \cdot \mathbf{r}], \quad (5)$$

여기서 \mathbf{t} 와 \mathbf{r} 은 각각 전달 계수와 반사 계수를 의미하고, \mathbf{P}_j 는 각 영역에서의 가용 파동 성분들의 특성 벡터를 의미한다. 결국, 전달 계수와 반사 계수는

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{P}_o \quad (6)$$

이 되고, 여기서 $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_{tran} \quad \mathbf{M} \quad -\mathbf{T} \cdot \mathbf{P}_{inc}]$, $\mathbf{W} = \{\mathbf{t} \quad \mathbf{M} \quad \mathbf{r}\}$ 이다. Eq. 6으로부터 진동 파워의 전달 상수는 \mathbf{W} 의 각 요소를 제공하여 구할 수 있다.

3. 모의 실험

입사되는 파동이 횡파 (bending wave)일 경우, Eq. 6의 결과는 $\{\tau_{BL} \quad \tau_{BB} \quad \tau_{BB}' \quad \rho_{BL} \quad \rho_{BB} \quad \rho_{BB}'\}$ 이 된다.

여기서, τ 와 ρ 는 각각 전달 및 반사 계수를 의미하고, 밀집자 B 와 L 은 각각 횡파와 종파 (longitudinal wave)를 의미한다. 또, (\dots) '는 감쇠파 성분 (evanescent wave)을 나타낸다. Fig. 2와 3은 입사파에 의해 발생하는 각 파동 성분의 진동 파워 분포를 보여주고 있는데, 여기서 $\Omega (= (\rho E)^{1/2} R \omega)$ 는 swage의 링주파수 (ring frequency)로 정규화된 주파수 성분을 나타낸다.

Fig. 4는 입사파가 횡파일 경우에 보강 형상을 통해 전달된 횡파의 파워를 보여주고 있는데, 특정 주파수를 제외하고는 전파가 잘 이루어지지 않음을 관찰할 수 있다. 여기서 이러한 주파수들은 대략 양끝단이 고정단인 보강 형상의 공진 주파수와 관계된다. 한편, Fig. 5에서 종파가 입사될 경우를 살펴보면 보강 형상에 의해 횡파 성분이 발생함을 알 수 있다. 이는 위에 언급된 특정한 주파수에서 크게 나타나는데, 횡파 성분은 소음 방사의 주요인이므로 바람직하지 못하다.

4. 실험

전달 계수의 측정을 위해 시편의 한쪽 끝단을 모래를 사용하여 무한 경계 조건을 만족하도록 하였다. 또한, 반사파와 입사파를 분리하기 위하여 두개의 가속도계를 이용한 파동 분리법 [4]을 적용하였다.

Fig. 6의 \hat{A} 측정된 진동 파워의 전달 및 반사 계수와 Eq. 6을 통해 예측된 값을 비교한 것인데, 두 결과가 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

5. 결론

앞서의 결과로부터 보강 형상 (swage)에 의해 파동의 전파가 잘 이루어지지 않는 정지 영역 (stop band)과 그와 반대인 통과 영역 (pass band)이 발생함을 알 수 있다. 이는 적절한 swage의 설계를 통해 진동 레벨을 효과적으로 감쇠시킬 수 있음을 암시하고, 이로부터 소음 및 진동 제어의 측면에서 매우 유용하게 응용될 수 있으리라 예측된다.

References

- [1] M. Heckl, "Wave Propagation on Beam-Plate Systems," *J. Acoust. Soc. Am.*, 33(5), 640-651 (1961).

[2] M. S. Issa, *et al.*, " Extensional Vibrations of Continuous Circular Curved Beams with Rotary Inertia and Shear Deformation, I: Free Vibration," *J. Sound Vib.*, 114(2), 297-308 (1987).

[3] E. C. Pestel and F. A. Leckie, *Matrix Method in Elasto Mechanics*, McGraw-Hill, New York (1963).

[4] A. F. Seybert and D. F. Ross, "Experimental Determination of Acoustic Properties using a Two-Microphone Random-Excitation Technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, 61(5), 1362-1370 (1977).

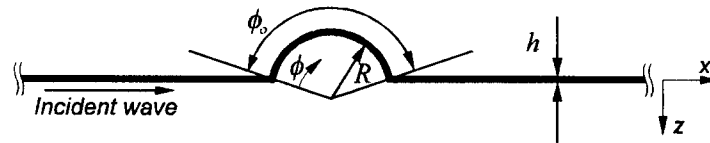


Fig. 1. Configuration of swaged panel of infinite extent.

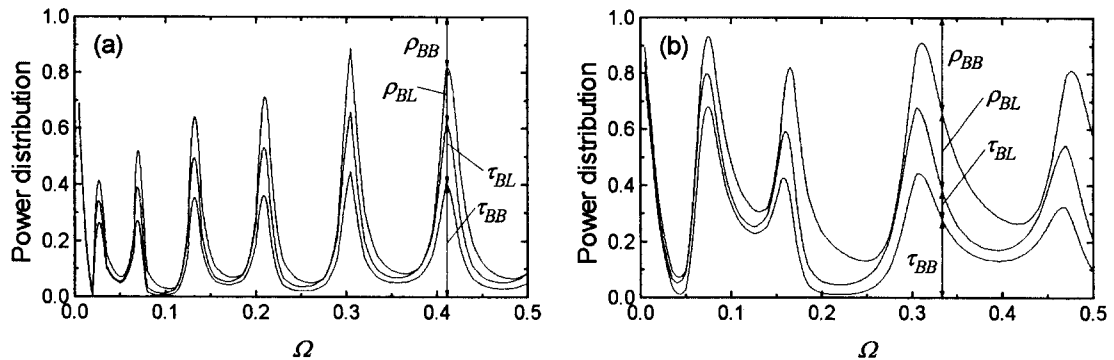


Fig. 2. Power distribution resulting from the bending wave incidence ($h/R = 0.03$). (a) $\phi_0 = \pi$, (b) $\phi_0 = 2\pi/3$.

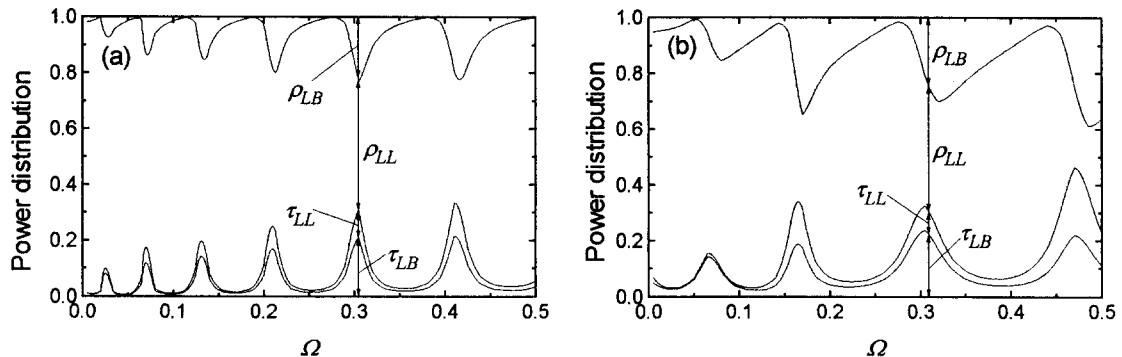


Fig. 3. Power distribution resulting from the longitudinal wave incidence ($h/R = 0.03$). (a) $\phi_0 = \pi$, (b) $\phi_0 = 2\pi/3$.

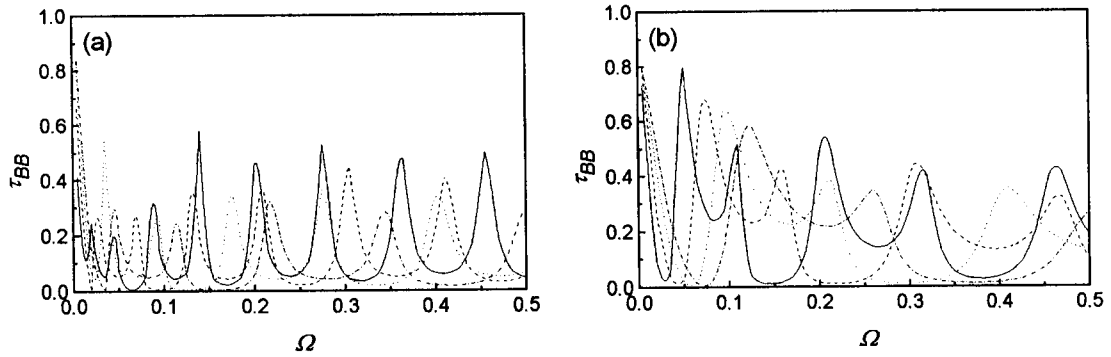


Fig. 4. Power transmission coefficients resulting from the bending wave incidence: —, $h/R=0.02$; ---, $h/R=0.03$; ···, $h/R=0.04$; -·-, $h/R=0.05$. (a) $\phi_0 = \pi$, (b) $\phi_0 = 2\pi/3$.

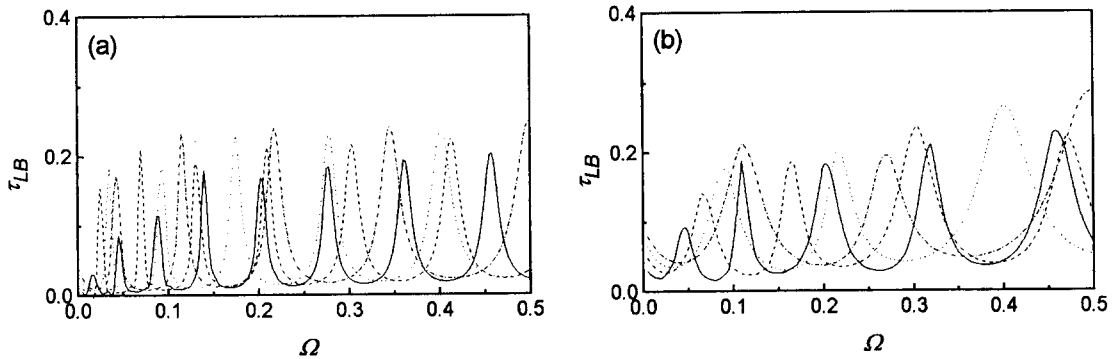


Fig. 5. Power transmission coefficients resulting from the longitudinal wave incidence: —, $h/R=0.02$; ---, $h/R=0.03$; ···, $h/R=0.04$; -·-, $h/R=0.05$. (a) $\phi_0 = \pi$, (b) $\phi_0 = 2\pi/3$.

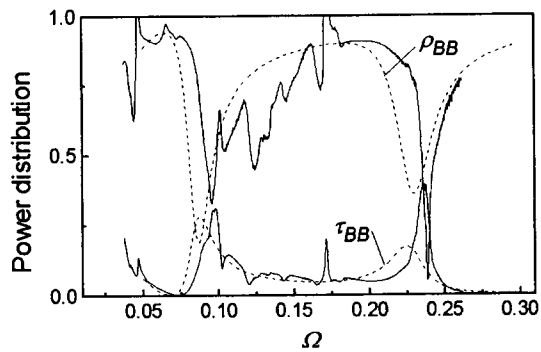


Fig. 6. Power transmission and reflection coefficients resulting from the bending wave incidence ($\phi_0 = \pi$, $h = 0.003$ m, $R = 0.0315$ m): —, Measured; ---, Calculated.