

연성보에서 연결 구조에 따른 파동 전달 특성

Characteristics of Wave Transmission Through Various Junctions in Coupled Beams

이병철* · 길현권** · 이효행** · 이용현** · 홍석윤***
B.-C. Lee, H.-G. Kil, H.-H. Lee, Y.-H. Lee, S.-Y. Hong

Key Words : Wave Transmission(파동전달), Wave Conversion(파동변환), Coupled Beams(연성보)

ABSTRACT

The objective of this paper is to analyze the characteristics of wave transmission through various junctions in coupled beams. The in-plane vibration as well as the out-of-plane vibration are generated due to the wave conversion at the junctions in the coupled beams. The out-of-plane vibration is associated with propagation of out-of-plane waves (flexural waves). The in-plane vibration is associated with propagation of in-plane waves (longitudinal and torsional waves). In order to effectively reduce vibration and structure-borne noise, it is necessary to understand the characteristics of wave conversion at various junctions in the coupled structures. The numerical results in this paper have showed the characteristics of wave transmission through various junctions in coupled beams. Those could be helpful to designer to develop the idea to reduce vibration and structure-borne noise.

1. 서론

연성보와 같은 복합구조물에서는 면의 가진력에 의한 진동 발생의 경우에도, 면외진동 뿐만이 아니라 연결 구조 지점에서 파동 변환에 의하여 면내진동 또한 발생하게 된다. 연성보의 경우 면외진동은 면외파동인 굽힘파의 전파에 의하여 발생되며, 면내진동은 면내파동인 종파와 비틀림파에 의하여 발생된다. 이러한 다양한 탄성파들은 구조 연결 부위에서는 종파에서 굽힘파 및 전단파로 또는 굽힘파에서 전단파 및 종파로의 파동 변환이 발생하게 된다. 그러므로 소음진동을 저감하기 위하여서는 구조물을 이루는 각 요소와 구조 연결 형태에 따른 다양한 탄성파에 따른 다양한 탄성파에 의한 진동에너지 전달 특성에 대한 이해가 앞서야 한다.

구조연결형태에 따른 파동변환 현상을 해석하기 위해서는 파동전달법[1]이 적용되어져 왔다. 예로서는 연성보, 연성평판, 보와 평판으로 이루어진 구조물 등의 연결부위에서의 파동변환 해석[2-6]을 들 수가 있다. 본

논문에서는 복합구조물 연결 형태에 따른 파동변환 해석의 첫 단계로서, 연성보에서 연결 구조에 따른 면외 및 면내파동 전달 특성을 다루고자 한다. 연성보에서의 다양한 연결 구조를 고려하였으며, 해당 연결 구조에서 주파수 변화에 따른 파동 전달 특성을 분석하였다

2. 파동 전달 해석

그림1 과 같이 4요소로 이루어진 연성보를 고려하고, 각 요소는 반무한보를 형성한다고 가정한다.

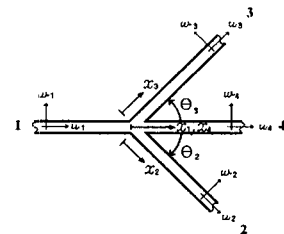


그림 1. 보요소로 구성된 연성보

* 수원대학교 기계공학과
E-mail : dhldark@hotmail.com
Tel : (031)225-8556, Fax : (031) 220-2494

** 수원대학교 기계공학과

*** 서울대학교 조선해양공학과

이 경우 연성보의 "1" 보요소의 $-x_1$ 방향으로 멀리 떨어진 지점에 놓여진 진동원에 의하여 발생하는 진동수 ω 의 진동을 고려한다. 따라서 $+x_1$ 방향으로 입사하는 탄성파가 발생한다. 이러한 탄성파에 의하여 "1" 보요소에는 면의 및 면내 변위가 발생하며, 시간 관련 항 $e^{i\omega t}$ 을 분리하여 고려하면 다음과 같이 표시된다.

$$w_1(x_1) = A_{f1} e^{-ik_{f1}x_1} + C_{f1} e^{ik_{f1}x_1} + D_{f1} e^{k_{f1}x_1} \quad (1)$$

$$u_1(x_1) = P_{11} e^{-ik_{11}x_1} + Q_{11} e^{ik_{11}x_1} \quad (2)$$

여기서 k_{f1}, k_{11} 은 "1" 보요소에서 발생하는 면외 파동인 굽힘파와 면내 파동인 종파의 파수를 각각 나타낸다. 그리고 A_{f1}, C_{f1} 는 "1" 보요소에서 $+x, -x$ 방향으로 전파하는 굽힘파의 크기를 각각 나타내며, D_{f1} 는 감쇠파의 크기를 나타낸다. P_{11}, Q_{11} 는 "1" 보요소에서 $+x, -x$ 방향으로 전파하는 종파의 크기를 각각 나타낸다. 나머지 각 보요소에서의 면의 및 면내 변위는 "m ($m=2,3,4$)" 보요소의 경우 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$w_m(x_1) = A_{fm} e^{-ik_{fm}x_m} + B_{fm} e^{-k_{fm}x_m} \quad (3)$$

$$u_m(x_m) = P_{lm} e^{-ik_{lm}x_m} \quad (4)$$

그러므로 주어진 "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파의 크기 혹은 종파의 크기가 주어지는 경우, 파동해를 구하기 위해서는 미지수인 식(1)-(4)의 해당 12개의 파동의 크기를 구하여야 한다. 이러한 미지수는 연결지점에서 힘 및 모멘트의 평형, 면의 및 면내 변위의 연속성, 면외 변위에 대한 기울기의 연속성에 대한 12 조건을 적용함으로써 구할 수 있다.

주어진 "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파의 크기가 주어지는 경우, 파워반사계수와 파워투과계수는

$$r_{ff}^{11} = \frac{|C_{f1}|^2}{|A_{f1}|^2}, \quad r_{ff}^{11} = \frac{E_1 S_1 k_{f1} |Q_{11}|^2}{2 E_1 I_1 k_{f1}^3 |A_{f1}|^2} \quad (5)$$

$$\tau_{ff}^{1m} = \frac{E_m I_m k_{fm}^3 |A_{fm}|^2}{E_1 I_1 k_{f1}^3 |A_{f1}|^2}, \quad \tau_{ff}^{1m} = \frac{E_m S_m k_{fm} |P_{lm}|^2}{2 E_1 I_1 k_{f1}^3 |A_{f1}|^2} \quad (6)$$

와 같이 표시된다. 여기서 r_{ff}^{11}, r_{ff}^{11} 는 연결지점으로부터 "1" 보요소로 반사되는 굽힘파와 종파와 관련된 파워반사계수를 각각 나타낸다. 그리고 $\tau_{ff}^{1m}, \tau_{ff}^{1m}$ 는 연결지점으로부터 "m" 보요소로 투과되는 굽힘파와 종파와 관련된 파워투과계수를

각각 나타낸다. 그리고 E_m, I_m, S_m 은 "m" 보요소의 탄성계수, 단면2차모멘트, 면적을 각각 나타낸다.

주어진 "1" 보요소에서 입사하는 종파의 크기가 주어지는 경우, 파워반사계수와 파워투과계수는

$$r_{ff}^{11} = \frac{|Q_{11}|^2}{|P_{11}|^2}, \quad r_{ff}^{11} = \frac{2 E_1 I_1 k_{f1}^3 |C_{f1}|^2}{E_1 S_1 k_{11} |P_{11}|^2} \quad (7)$$

$$\tau_{ff}^{1m} = \frac{E_m S_m k_{fm} |P_{lm}|^2}{E_1 S_1 k_{11} |P_{11}|^2}, \quad \tau_{ff}^{1m} = \frac{2 E_m I_m k_{fm}^3 |A_{fm}|^2}{E_1 S_1 k_{11} |P_{11}|^2} \quad (8)$$

와 같이 표시된다. 여기서 r_{ff}^{11}, r_{ff}^{11} 는 연결지점으로부터 "1" 보요소로 반사되는 굽힘파와 종파와 관련된 파워반사계수를 각각 나타낸다. 그리고 $\tau_{ff}^{1m}, \tau_{ff}^{1m}$ 는 연결지점으로부터 "m" 보요소로 투과되는 종파와 굽힘파와 관련된 파워투과계수를 각각 나타낸다

3. 계산 결과 및 고찰

연성보에서의 다양한 연결형태를 고려하고, 해당 연결구조에서의 파동전달의 주파수 특성을 고려하기 위하여 그림 2와 같은 모델을 고려하였다. 또한 그림 3과 같이 연성보에서 연결요소들의 연결 각도에 따른 영향을 분석하였다.

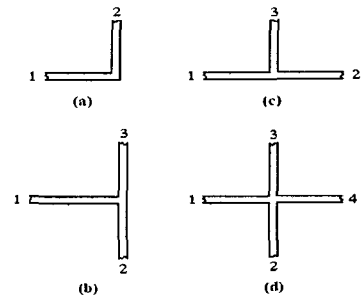


그림 2. 연성보 모델, (a): 2-보, (b) 3-보(B), (c): 3-보(A), (d) 4-보

그림 3. 연결 각도에 따른 연성보 모델, (a): 2-보, (b) 3-보(B), (c): 3-보(A), (d) 4-보

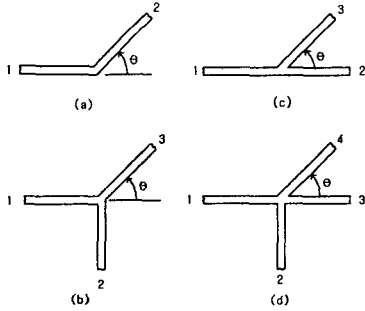


그림 4-7은 그림 2의 각 연성보의 경우 종파와 굽힘파가 각각 "1" 보요소에서 입사하는 경우에 대하여 해당 파동에 대한 파워반사계수와 파워투과계수의 주파수 특성을 나타내고 있다. 연결지점에서 파동변환에 의하여 서로 다른 파동들이 발생하여 반사 혹은 투과가 됨을 알 수 있다.

그림 4과 5는 그림 2(a)와 (b)같이 "1" 보요소와 연결되는 평행한 보요소가 없이 직각을 이루는 보요소가 있는 경우에 대한 파워반사계수와 파워투과계수의 주파수 특성을 보여준다. 이 경우 종파에 의한 면내진동 파워는 연결 지점에서 대부분 반사되지만 (그림 4(a), 5(a)), 굽힘파에 의한 면외진동파워는 연결 보요소들에 나누어져 반사 혹은 투과됨을 알 수 있다. 그러므로 이와 같이 직각을 이루는 보요소의 경우는 종파 전달을 효과적으로 막기 위한 방법으로 사용될 수 있다. 또한 주파수가 증가할수록 연결지점에서 서로 다른 파동의 진동파워로 변환되어 투과되는 현상이 커짐을 알 수 있다(그림 4(b), 5(b)). 예로써 그림 2(a)의 2-보에서 굽힘파가 입사하는 경우(그림 4(b)), 특정 주파수 (약 2kHz) 이상 주파수에서는 다른 연결 보로 투과하는 종파에 의한 면내진동파워 영향이 반사되는 면외진동파워 보다 커지게 된다. 그림 2(b)의 3-보에서 종파가 입사하는 경우(그림 5(a))에도 특정 주파수(약 2kHz) 이상에서 서로 다른 파동으로의 변환되어 투과되는 현상이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 6과 7은 그림 2(c)와 (d)와 같이 "1" 보요소와 연결되는 평행한 보요소가 있는 경우에 대한 파워반사계수와 파워투과계수의 주파수 특성을 보여준다. 그림 6(a)와 7(a)에서 "1" 보요소에서 입사하는 종파에 의한 면내진동파워는 직각을 이루는 보요소가 있음에도 평행한 보요소로 대부분 투과함을 알 수 있다. 그림 6(b)와 7(b)에서는 "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파에 의한 면외진동파워는 연결 보요소들에 나누어져 반사 혹은 투과됨을 알 수 있다. 그리고 특히 그림 7(b)에서 보면, 그림 2(d)의 4-보의 경우에는 모든 주파수 영역에 걸쳐 연결지점에서 굽힘파에 의한 면외진동파워의 반사가 투과 효과보다 두드러지게 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 8-11은 그림 3의 각 연성보의 연결 지점에서 연결 각도에 따른 파동 변환 특징을 보여주고 있다. 즉 주파수 1kHz 에서 종파와 굽힘파가 각각 "1" 보요소에서 입사하

는 경우에 대하여 해당 파동에 대한 파워반사계수와 파워투과계수의 특성을 나타내고 있다. 연결지점에서 파동변환에 의하여 서로 다른 파동들이 발생하여 반사 혹은 투과가 됨을 알 수 있다.

그림 8은 그림 3(a)의 연성보(2-보)에서 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수의 특성을 보여준다. 이 경우 "1" 보요소에서 입사하는 종파의 경우(그림 8(a)), 각도가 작은 경우 대부분의 파워는 "2"보요소로 투과되는 종파가 함유한다. 그러나 각도가 40° ~ 50° 정도에 이르면 "1"보요소로 반사 및 투과하는 종파들과 "2"보요소로 투과하는 굽힘파가 함유하는 파워가 거의 같게 발생한다. 그리고 각도가 더 증가 할수록 반사하는 종파가 대부분의 파워를 함유하게 되며 90° 각도에서 최대 파워를 갖으며 파워반사계수 0.7을 갖게 된다. 입사하는 종파가 투과하여 굽힘파로 변환되는 파동 변환 현상은 45° 와 145° 각도에서 크게 발생하게 되며 파워반사계수는 약 0.3 값에 이르게 된다. "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파의 경우(그림 8(b)), 굽힘파로 투과되는 현상은 각도증가에 따라 감소하여 90° 각도에서 최소가 되지만 약 0.43정도의 파워투과계수를 갖게 됨을 알 수 있다. 또한 입사하는 굽힘파가 투과하여 종파로 변환되는 파동 변환 현상은 종파 입사의 경우와 유사함을 알 수가 있다.

그림 9는 그림 3(b)의 연성보(3-보(B))에서 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수의 특성을 보여준다. 이 경우 "1" 보요소에서 입사하는 종파의 경우(그림 9(a)), 종파가 "3" 보요소로 투과되는 현상은 각도가 증가에 따라 감소하여 90° 각도에서 최소가 되며 거의 발생하지 않음을 알 수가 있다. 또한 입사하는 종파가 투과하여 "2" 보요소에서 굽힘파로 변환되는 파동 변환 현상은 거의 발생하지 않으나, "3" 보요소에서 굽힘파로 변환되는 파동 변환 현상은 각도의 증가와 함께 증가하여 90° 각도에서 가장 크게 발생함을 알 수가 있다. "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파의 경우(그림 9(b)), 굽힘파가 "2" 보요소와 "3" 보요소로 투과되는 현상은 유사하게 발생하며 각도에 따른 영향을 크게 받지 않음을 알 수가 있다.

그림 10은 그림 3(c)의 연성보(3-보(A))에서 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수의 특성을 보여준다. 이 경우 "1" 보요소에서 입사하는 종파의 경우(그림 10(a)), 각도가 증가할수록 대부분의 파워는 "2"보요소로 투과되는 종파가 함유하며, 이러한 현상은 90° 각도에서 최대가 됨을 알 수가 있다. "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파의 경우(그림 10(b)), 각도가 작은 경우는 "2"와 "3"보요소로 투과하는 굽힘파들이 대부분의 파워를 나누어 가지나, 각도 50°에서는 파동변환에 의하여 발생하여 "3"보요소로 투과하는 종파가 가장 큰 파워를 함유하게 된다.

그림 11은 그림 3(d)의 연성보(4-보)에서 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수의 특성을 보여준다. 이 경우 "1" 보요소에서 입사하는 종파의 경우(그림 11(a)), 각도가 증가할수록 대부분의 파워는 "4" 보요소로 투과되는 종파가 함유하며, 이러한 현상은 90° 각도에서 최대가 됨을 알 수가 있다. "1" 보요소에서 입사하는 굽힘파의 경우(그림 11(b)), 보요소에서 입사하는 굽힘파의 경우, 굽힘파가 "2" 보요소와 "3" 보요소로 투과되는 현상은 유사하게 발생하며 각도에 따른 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 복합구조물 연결 형태에 따른 파동변환 해석의 첫 단계로서, 연성보에서 연결 구조에 따른 면의 및 면내파동 전달 특성을 다루었다. 연성보에서의 다양한 연결 구조를 고려하였으며, 해당 연결 구조에서 주파수 변화에 따른 파동 전달 특성을 분석하였다. 향후 연성평판, 보와 평판으로 이루어진 구조물 등의 연결부위에서의 파동변환을 해석함으로써, 구조물을 이루는 각 요소와 연결 형태에 따른 진동전달 특성을 이해하고자 한다. 또한 이러한 결과들을 이용하여 구조물 요소 및 연결구조를 이용한 진동에너지 차단 설계 개념을 확립하는데 적용하고자 한다.

후 기

본 연구는 수중음향특화연구센터 연구과제의 일부분으로서 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] L. Cremer, M. Heckl, E.E. Ungar, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag, Berlin, 1973.
 [2] J.L. Horner, R.G. White, "Prediction of Vibrational Power Transmission Through bends and Joints in Beam-like structures," J. Sound and Vibration, 147(1), pp.87-103, 1991.
 [3] J. Moore, "Frame Junction Vibration Transmission with a Modified Frame Deformation Model," J. Acoust. Soc. Am., 88(6), pp.2777-2788, 1990.
 [4] R.S. Langley, K.H. Heron, "Elastic Wave Transmission Through Plate/Beam Junctions," J. Sound Vibration, 143(2), pp.241-253, 1990.
 [5] M.D. McCollum, J.M. Cuschieri, "Bending and In-plane Wave Transmission in Thick Connected Plates

Using Statistical Energy Analysis," J. Acoust. Soc. Am., 88(3), pp.1480-1485, 1990.

[6] A.N. Bercin, "An Assessment of the Effects of In-plane Vibrations on the Energy Flow Between Coupled Plates," J. Sound Vibration, 191(5), pp.661-680, 1996.

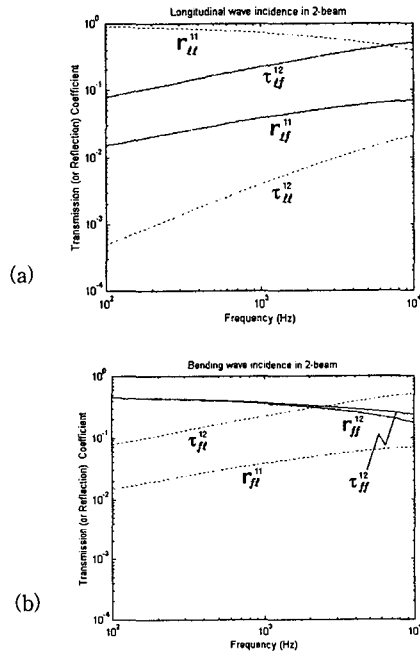
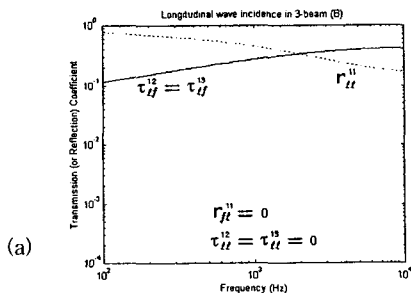


그림 4. 연성보 (그림 2(a)의 2-보)의 주파수에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우



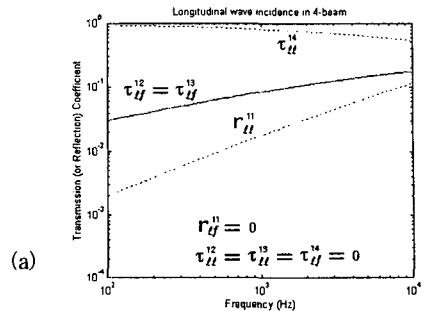
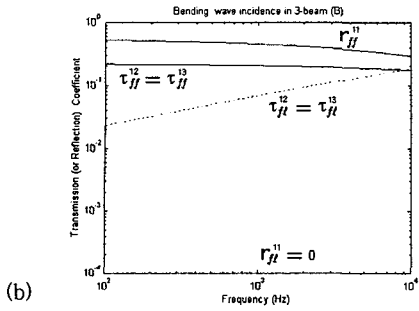


그림 5. 연성보 (그림 2(b)의 3-보(B))의 주파수에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우

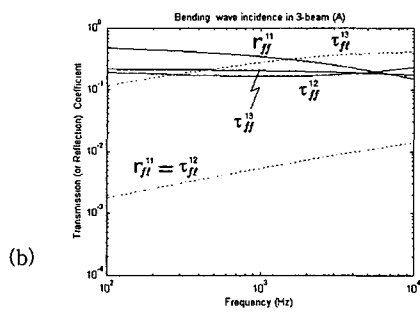
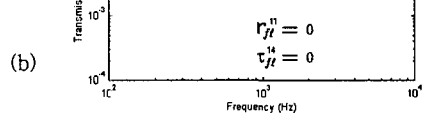
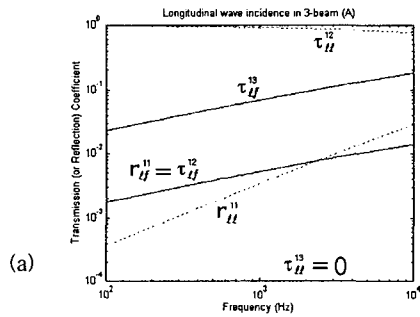


그림 7. 연성보 (그림 2(d)의 4-보)의 주파수에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사, (b): 굽힘파 입사 경우

그림 6. 연성보 (그림 2(c)의 3-보(A))의 주파수에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우

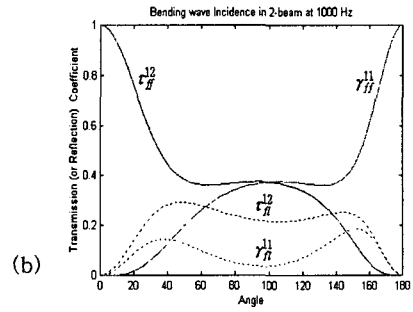
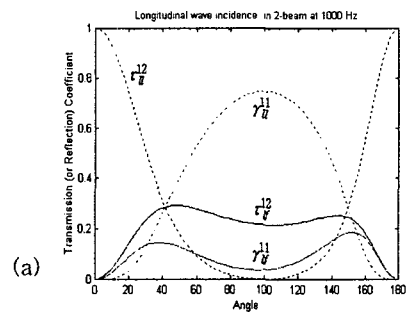


그림 8. 연성보 (그림 3(a)의 2-보)의 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우

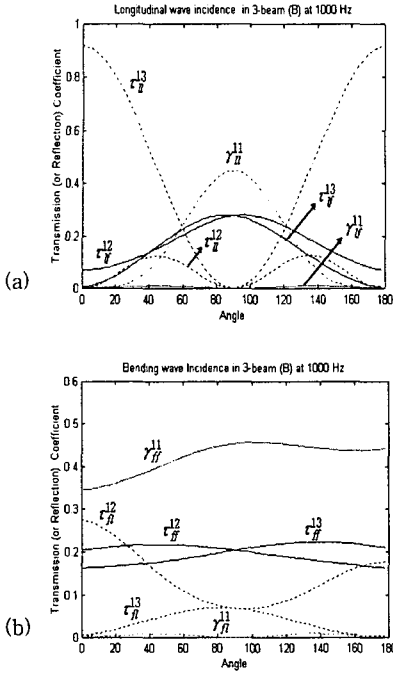


그림 9. 연성보 (그림 3(b)의 3-보(B))의 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우

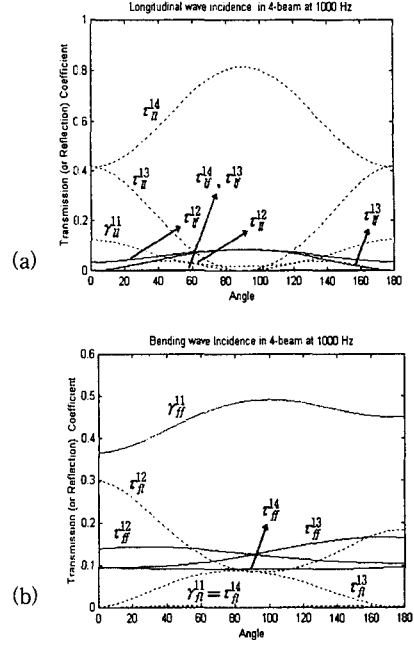


그림 11. 연성보 (그림 3(d)의 4-보)의 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우

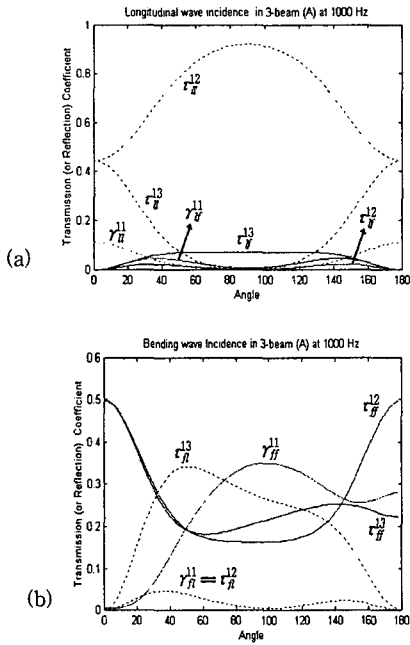


그림 10. 연성보 (그림 3(c)의 3-보(A))의 연결 각도에 따른 파워반사계수와 파워투과계수, (a): 종파 입사 경우, (b): 굽힘파 입사 경우