

## 가역성 원리를 이용한 보강 원통형 셸에서의 탄성과 전파에 대한 실험적 해석

### Experimental Analysis of Elastic Wave Propagation in a Ribbed Cylindrical Shell Using the Principle of Reciprocity

길 현 권\* · 양 귀 봉\*\* · 김 창 렬\*\* · 홍 석 윤\*\*\*

H.-G. Kil, K.-B. Yang, C.-Y. Kim and S.-Y. Hong

#### ABSTRACT

In order to measure the vibration of a ribbed cylindrical shell, the principle of reciprocity has been implemented. An accelerometer was fixed at the position defined as the excitation point. An impact hammer was used to tap at the response array points (64 points) located along the circumference of the shell. The frequency response function was reciprocally measured at each point in turn. The response data was processed to obtain the frequency/wavenumber spectrum. From the spectrum the characteristics of wave propagation on the ribbed cylindrical shell have been observed.

#### 1. 서론

보강 원통형 셸 구조물이 진동하는 경우, 진동 에너지는 진동원으로부터 여러 형태의 탄성과 전파로 전파져 나가게 된다. 이러한 탄성과 전파는 면의 진동을 주로 발생시키는 굽힘파와 면내 진동을 주로 발생시키는 종파와 전단파, 그리고 가진점 및 구조 연결 지점 근접장에 존재하는 감쇠파를 들 수가 있다. 또한 보강재 등의 내부 구조물 연결 지점에서는 파동 변환이 발생하여 서로 다른 탄성과 전파의 특성 변환이 이루어진다. 그러므로 내부 구조물을 갖는 원통형 셸의 진동을 저감하고, 나아가서 방사소음을 감소시키기 위해서는, 진동을 탄성과 전파 측면에서 해석할 필요가 있다. 이러한 원통형 셸의 진동을 해석하기 위하여, 이론적 연구 및 실험적 연구가 많이 이루어져 오고 있다. 국내에서도 보강형 원통 셸의 진동 및 방사 소음을 해석하기 위한 실험적 연구가 이루어지고 있으나, 주로 방사소음

해석에 대해 이루어지고 있고<sup>(1),(2)</sup>, 원통형 셸의 진동을 탄성과 전파 측면에서 해석하고자 하는 실험 연구는 미비한 실정이다.

원통형 셸 진동을 측정함으로써 탄성과 전파를 분리하기 위해서는 셸 표면의 진동장에 대한 많은 양의 진동 데이터가 요구된다. 그러므로 기존의 진동 측정 방법인 가속도계를 이용시키면서 진동을 측정하는 방법을 이용함은 한계가 있다. 실험적 해석 방법으로는 근접장 음향 홀로그래피(Nearfield Acoustical Holography)<sup>(3)</sup> 비접촉식 진동 측정 방법으로써 스캐닝 레이저 도플러 진동 측정 장치를 이용하는 방법<sup>(4)</sup>을 들 수가 있다. 또한 가역성 원리를 이용하면 가속도계와 충격 해머를 이용할 수 있기 때문에, 보다 쉽게 진동장을 측정할 수 있다<sup>(5)</sup>. 본 연구에서는 보강형 원통 셸의 진동을 측정하기 위하여 가역성 원리를 이용하였다. 진동원에 해당하는 지점에 가속도계를 부착하고, 원주 방향을 따라 64 지점에서 충격 해머를 이용하여 가진하며 가속도계의 신호를 측정하였다. 이 경우 가역성 원리에 의하여, 가속도계가 부착된 지점에 실제로 가진한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이러한 방법으로 측정된 64개의 가속도 신호와 가진 신호를 이용하여 주파수 응답함수를 구하였다. 그리고 주파수 응답함수 신호 데이터로부터 신호 처리를 통하여 주파수

\* 수원대학교 기계공학과

E-mail : hgkil@mail.suwon.ac.kr  
Tel : (031) 220-2238, Fax : (031) 220-2494

\*\* 수원대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과

/과수 스펙트럼(frequency/ wavenumber spectrum)을 구하고 탄성파들을 분리함으로써, 보강형 원통 셀에서의 탄성과 전파 특성들을 확인하였다.

## 2. 진동 측정

### 2.1 실험 모델

본 연구의 실험 모델은 그림 1에서 보여지는 철 구조물인 보강 원통형 셀이다. 원통형 셀의 규격은 그림 2에서 보여지는 데로 직경  $a=80.5\text{cm}$ , 두께  $17\text{mm}$ 이며 내부에  $5\text{mm}$  두께의 원형 보로  $20\text{cm}$  간격마다 보강되어 있다. 원통형 셀의 경계 조건으로는 자유지지 조건을 가정할 수 있도록 설정하였다. 즉 그림 3에서와 같이 두 지점에서 케이블을 이용하여 원통형 셀이 직립 상태로 지지되도록 하였다.

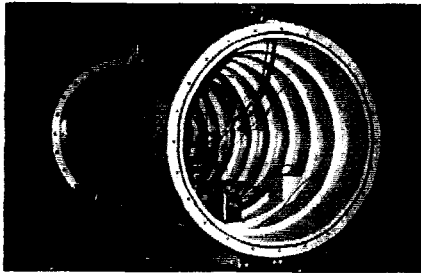


그림 1. 보강 원통형 셀의 내부 구조

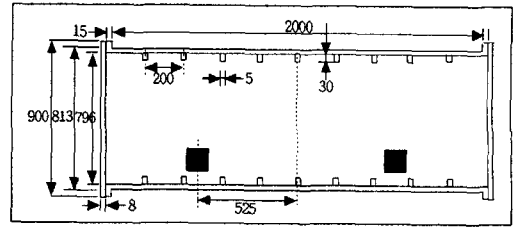


그림 2. 보강 원통형 셀의 규격 (단위 mm)



그림 3. 보강 원통형 셀의 지지

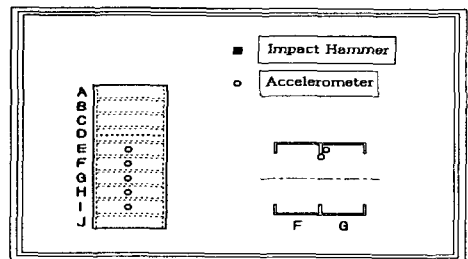


그림 4. 가속도계 부착 및 충격 해머 가진 위치.

### 2.2 실험 내용

가역성 원리를 이용하여 진동을 측정하기 위하여, 그림 4에서 보여지는 것처럼 가속도계를 원통형 셀의 세부 요소 E, F, G, H, I 지점에 각각 하나의 가속도계를 부착하고, 세부 요소 F와 G 사이의 보강재의 끝단과 옆면에 가속도계를 부착하였다. 진동원으로는 충격 해머를 이용하였으며, 세부 요소 D에서 원주 방향을 따라 64 지점을 가진하였다 (그림 3, 4). 이 경우 가역성 원리에 의하여, 7개의 가속도계들이 부착된 각 지점에 차례로 가진하면서 원주 방향 64 지점에서 동시에 가속도 신호를 얻는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다.

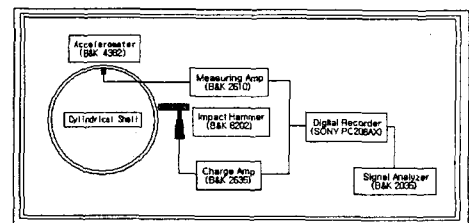


그림 5. 실험 장치 배열.

그림 5는 실험 장치 배열을 보여 준다. 원주 방향을 따라 64 지점을 충격 해머를 이용하여 차례로 5회씩 반복하여 가진하면서, 8 채널 디지털 레코더를 이용하여 7개의 가속도 신호와 가진력 신호를 샘플링 주파수 24kHz 로 저장하였다.

### 3. 주파수/파수 스펙트럼을 위한 분석

원주 방향을 따라 충격 해머로 가진해야 되는 지점들의 간격은 공간 변조현상 (spatial aliasing)을 피할 수 있도록 결정되어야 한다. 즉 관심 주파수 대역에서 탄성파가 갖는 가장 짧은 파장당 적어도 두 지점이 속할 수 있도록 결정되어야 한다. 이러한 기준은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$N_{\phi} > \frac{4\pi a}{\lambda_{\min}} \quad (1)$$

여기서  $N_{\phi}$ ,  $\lambda_{\min}$  는 원주 방향 지점 수 및 탄성파의 가장 짧은 파장을 나타낸다.  $\lambda_{\min}$  로써는 굽힘파의 파장을 고려할 수 있으며, 최대 주파수가 링주파수 ( $f_r$ )의 2배 이상 되는 경우 평판에서 굽힘파가 갖는 파장으로 근사될 수 있다. 링주파수는

$$f_r = \left[ \frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \frac{1}{2\pi a} \quad (2)$$

로 표시되며,  $E, \rho, \nu$  는 원통형 셀의 재료 특성인 탄성계수, 밀도 및 Poisson비를 나타낸다. 본 연구 모델인 원통형 셀의 링주파수는  $f_r = 2074 \text{ Hz}$  이며, 최대 주파수  $f = 12 \text{ kHz}$  ( $= 5.78f_r$ ) 을 고려하는 경우, 식(1)에 의하여  $N_{\phi} = 64$  로 결정될 수 있다.

64 지점에서 충격 해머로 가진하면서 얻는 가진력 신호와 특정 위치의 가속도계 신호가 한 세트의 신호 군을 형성한다. 이 경우 가역성의 원리를 이용하기 때문에 가속도계의 특정 위치를 진동원으로 고려할 수 있다. 이러한 신호를 이용하여 64 지점에서의 주파수 응답함수를 구하게 된다. 이러한 신호 처리 결과는 주파수 성분에 따른 원주 방향 64지점에서 진동의 공간 분포 정보를 함유하게 된다. 이러한 공간 분포 정보로부터 파수 스펙트럼을 구하기 위해서는, 공간 영역에서 파수 영역으로의 변환을 이루어야 한다. 이러한 변환은 시간-주파수 대신에 공간-파수를 고려한 FFT 변

환을 이용하여 수행할 수 있다. 이러한 신호 처리 과정을 통하여 주파수/파수 스펙트럼을 구할 수 있으며, 주파수/파수 스펙트럼으로부터 보강 원통형 셀에서 전파하는 탄성파들을 분리하여 낼 수 있다.

### 4. 실험 결과

그림 6은 세부 요소 G에 부착된 가속도계의 신호를 분석한 결과인 주파수/파수 스펙트럼을 보여준다. 이 경우 가역성의 원리를 고려하는 경우, 해당 가속도계 부착 지점을 가진하고 세부 요소 D에서 원주 방향 64 지점에서 동시에 얻는 가속도 신호를 해석한 경우에 해당한다. 그림 6에서 좌표축은 주파수  $f$  와 원주 방향 파수 모드  $n (= k_{\phi} a)$  이며,  $k_{\phi}$  는 탄성파가 갖는 원주 방향 파수 성분을 나타낸다.  $n$  의 (+) 및 (-) 값은 탄성파가 원주 방향을 기준으로 시계 방향과 시계 반대 방향으로 전파함을 의미한다. 그러므로 주파수/파수 스펙트럼에서 확인되는 피크들은 해당 주파수에서 해당 원주 방향 파수 성분을 갖고 전파하는 탄성파의 기여도를 나타낸다. 그림 6의 결과로부터 탄성파가 주파수/파수 영역에서 특정 대역(passband)에서만 전파하고 그 이외의 대역(stopband)에서는 거의 전파하지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 보강재 등과 같은 주기적인 내부 구조물을 갖는 구조물에서 나타나는 전형적인 현상에 해당한다.

그림 7과 8의 주파수/파수 스펙트럼은 가속도계를 세부 요소 F와 G 사이의 보강재 끝단과 옆면에 각각 부착한 경우이다. 즉 가역성 원리를 고려하는 경우 보강재 끝단과 옆면을 가진을 가진하고 세부 요소 D에서 원주 방향 64 지점에서 동시에 얻는 가속도 신호를 해석한 경우에 해당한다. 원통형 셀 표면을 가진하는 경우인 그림 6과 비교하여 볼 때 보강재의 옆면 가진의 경우와는 유사한 경향을 보이고 있으나, 보강재 끝단 가진의 경우와는 조금 다른 경향을 보임을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 실험 결과들을 명확히 분석하기 위해서는 원통형 셀 자체에서의 파동 전파, 그리고 보강형 원통형 셀에서 탄성파 전파에 보강재가 주는 영향 등에 대한 이론적 연구가 수행되어야 한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 보강형 원통 셀의 진동을 측정하기 위하여 가역성 원리를 이용하였다. 진동원에 해당하는

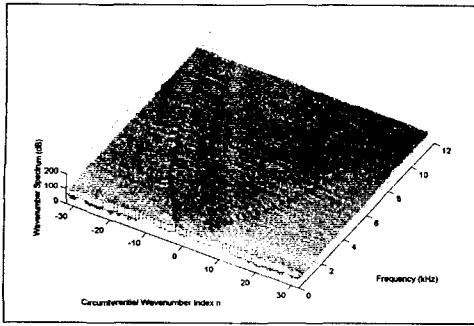


그림 6. 주파수/파수 스펙트럼 (가진 위치 : 원통형 셸 표면 세부 요소 G).

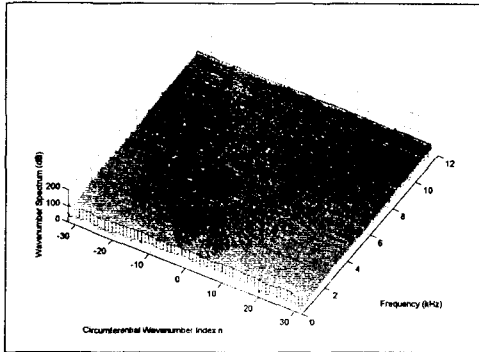


그림 7. 주파수/파수 스펙트럼 (가진 위치 : 보강재 끝단).

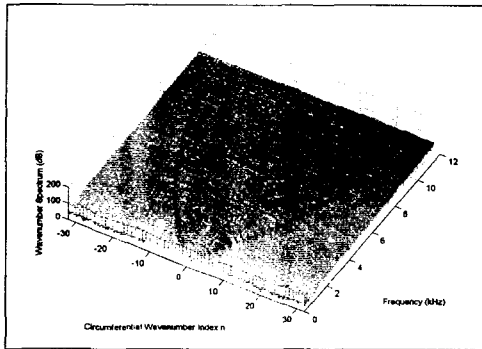


그림 8. 주파수/파수 스펙트럼 (가진 위치 : 보강재 옆면).

지점에 가속도계를 부착하고, 원주 방향을 따라 64 지점에서 충격 해머를 이용하여 가진하며 가속도계의 신호를 측정하였다. 이 경우 가역성 원리에 의하여, 가속

도계가 부착된 지점에 실제로 가진한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이러한 과정으로 측정된 64개의 가속도 신호와 가진 신호를 이용하여 주파수 응답함수를 구하였다. 그리고 주파수 응답함수 신호 데이터로부터 신호 처리를 통하여 주파수/파수 스펙트럼 (frequency/wavenumber spectrum)을 구하고 탄성파들을 분리함으로써, 보강형 원통 셸에서의 탄성파 전파 특성들을 확인할 수 있었다. 또한 가역성 원리를 적용하여 가속도계와 충격 해머를 이용하는 방법은 구조물에서 진동장을 구하고, 탄성파들을 분리하여 내는 방법으로써 유용하게 사용될 수 있다.

## 후기

본 연구는 수중음향특화연구센터 연구과제의 일부 분으로서 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. 실험을 위하여 도움을 준 국방과학연구소 관계자분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 배수룡, 전재진, 이현근, 1993, "SEA 기법을 이용한 보강 원통형 셸의 수중방사소음 해석," 한국소음진동공학회지, 3(2), pp. 155-161.
- (2) 류정수, 정우진, 전재진, 1999, "원통형 셸 구조물 내부에 설치된 기계류 소음원에 의한 수중방사소음 특성변화에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.735-740.
- (3) E. G. Williams, B. H. Houston and J. A. Bucaro, 1990, "Experimental Investigation of the Wave Propagation on a Point-Driven, Submerged Capped Cylinder Using K-Space Analysis," J. Acoust. Soc. Am 87(2), 513-522.
- (4) H.-G. Kil, J. Jarzynski and Yves H. Berthelot, 1998, "Wave decomposition of the vibrations of a cylindrical shell with an automated scanning laser vibrometer," J. Acoust. Soc. Am. 104(6), 3161-3168.
- (5) J. R. Chapman, 1986, "Model-scale Measurements of the transmission and radiation of hull-borne vibration energy using frequency/wavenumber analysis," J.(ed). Shipboard Acoustics, ISBN 90-247-3402-7, pp. 135-154.