

무향수조를 위한 흡음재질에 관한 연구

김성부* · 이종규
부경대학교 물리학과

A study on the new absorption material for anechoic water tank

Sung-Boo KIM* and Jong-Kyu LEE

Department of Physics, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

A new absorption material, cellulose sponge soaked in cement, was made for anechoic water tank and its acoustical properties were investigated by pulse methods. The sound absorption coefficient α (dB/cm) of the material was obtained in the frequency range of 40~120kHz from the echo reduction ER (dB) and insertion loss IL (dB) data. The result was averagely 1.8dB/cm higher than the sound absorption coefficient α (dB/cm) of cork-filled rubber which is one of the most effective absorption materials. The wedge (1.2~5.0cm long) type absorption tiles were made with this new material. The echo reduction ER (dB) of the absorption tile with 5.0cm wedge measured in water tank was higher than 20dB in the experimental frequency range.

Keywords : Far field, Echo reduction, Insertion loss, Absorption coefficient

서 론

어군탐지용 트랜스듀서의 음향학적 특성을 측정하기 위해 주로 수조를 많이 이용하고 있다. 이것은 편리한 위치 선정과 조정 가능한 해양환경 때문에 실제 해양에서의 측정에 비해 여러 이점을 지니고 있기 때문이다. 수조의 실제 설계에 있어서 우선적으로 고려하

여야 할 사항은 첫째, 트랜스듀서에서 나오는 음파가 원거리음장 (far field) 조건을 만족시킬 수 있는 거리를 확보하여야 한다는 것이고, 둘째는 어군탐지기의 펄스폭에 따라 수조 벽면에서 되돌아오는 반사파 (reflected wave)와 직접파 (direct path wave)를 구분할 수 있는 거리를 확보하여 자유음장 (free field) 조건을 만족하여야 하

*Corresponding author: sbookim@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5565, Fax: 82-51-629-5549

는 것이다 (Bobber, 1970). 보통 50kHz에서 150kHz 사이의 주파수와 1ms까지의 펄스폭을 사용하는 어군탐지기일 경우에는 수조의 크기가 가로, 세로, 높이가 각각 3m에서 4m 이상이어야만 이러한 조건들을 만족시켜 음향학적 특성의 측정이 가능하게 된다. 이러한 규모의 수조제작은 공간의 확보 문제뿐만 아니라 경제적으로 꽤 큰 비용이 들어야만 가능하게 된다. 그러나 무향수조 일 경우는 펄스폭의 제한 없이 원거리 음장 조건만 만족시키면 되므로 수조의 규모를 줄일 수 있는 이점이 있다. 이러한 무향수조의 제작을 위해서 수조벽면에 주로 무향코팅물질을 바르거나 흡음재질로 만든 썬기를 부착한다.

흡음재질에 대한 연구는 제2차 세계대전 이후 군사적 내지는 연구용으로 집중되어 왔으며 시멘트와 톱밥을 섞은 Insulcrete 라든지, 여러 크기의 기포를 갖는 rho-c 고무처럼 고무를 이용한 다양한 물질들이 개발되었다 (Zwicker et al., 1949; Damer, 1954). 그 이후 부틸고무와 알루미늄 가루를 혼합시켜 금속입자 주변에 기포를 형성하게 한 SOAB 재질, 그리고 코르크로 채워진 고무재질 (Corsaro et al., 1980; Hagelberg et al., 1985) 등의 다양한 것들이 개발되었다. 그러나 이러한 흡음재질들은 고가이거나 제작이 용이하지가 않아 실제로 손쉽게 무향수조를 제작, 사용하기가 매우 어려웠다.

본 논문에서는 현재 어군탐지기에서 주로 사용하는 주파수 대역에서 경제적이면서 반향음 감쇠량이 20dB이상인 새로운 흡음재질을 제시하고자 한다. 이 흡음재질을 사용하여 썬기형 흡음타일을 만들어 수조벽면에 부착했을 때, 무향수조의 크기는 1m에서 1.5m 정도가 되어 공간적, 경제적으로 수조의 제작이 훨씬 용이할 것으로 판단된다.

재료 및 방법

흡음재질

그동안 개발되어 왔던 흡음재질들은 고가이

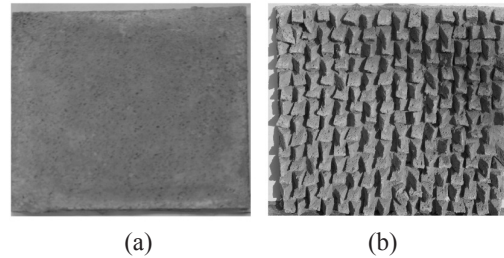


Fig.1. (a) Absorption plate (thickness 1.7cm) and (b) Wedge type absorption tile.

거나 제작이 용이하지가 않은 단점 때문에 무향수조의 제작을 손쉽게 할 수가 없었다.

본 논문에서는 시중에서 손쉽게 구입할 수 있는 다공질의 셀룰로오스 스펀지에 시멘트로 굳힌 것을 새로운 흡음재질로 사용하였다. 일반적으로 다공성 재질 내에서는 입사음파가 가진 운동에너지를 상당부분 마찰에 의한 열에너지로 변환시키는 과정에서 흡음이 발생하게 된다.

우선 이 재질의 내부를 음파가 진행하면서 발생하는 단위길이 당 흡음손실량인 흡음계수 α (dB/cm)를 측정하기 위하여 두께 1.7cm, 가로 35cm, 세로 27cm 길이의 직사각형 판 (Fig. 1 (a))을 사용하였다. 다음으로 실제 수조벽면에 부착할 썬기형 흡음타일 (Fig. 1의 (b))은 위의 직사각형 흡음판 위에 1.2cm, 2.5cm, 3.7cm, 5cm 길이의 썬기를 각각 부착하여 만들었으며, 이들의 반향음감쇠량은 40~120kHz의 실험주파수 대역에서 이 타일로 부터 되돌아오는 반향음을 측정하여 얻었다.

흡음재질에 대한 음향특성의 측정

흡음재질을 이용하여 측정하여야 하는 물리량은 반향음감쇠량 (Echo reduction) ER (dB)과 투과손실 (Insertion loss) IL (dB)이다. 흡음계수 α (dB/cm)는 이들 자료로 부터 얻게 된다. Fig. 2에 물에서 흡음판으로 입사하는 입사파 p_i 와 반사파 p_r , 흡음판 내부에서 진행되는 음파 p_a (0)와 p_a (d), 그리고 투과파 p_t 가 그려져 있다.

여기에서 흡음판 내부에서의 음파는 큰 흡음 손실로 인해 다중양복진행은 무시할 수 있는 것으로 가정하며, $p_a(0)$ 는 물에서 흡음재질로 막 투과한 지점의 음압이고, $p_a(d)$ 는 두께 d 의 흡음판을 통과한 뒤 물로 재 투과하기 직전의 음압이다. 이 때 반향음감쇠량 ER과 투과손실 IL, 그리고 흡음계수 a 는 다음식과 같이 정의된다.

$$ER (dB) = 20 \log \frac{P_i}{P_r} \quad (1)$$

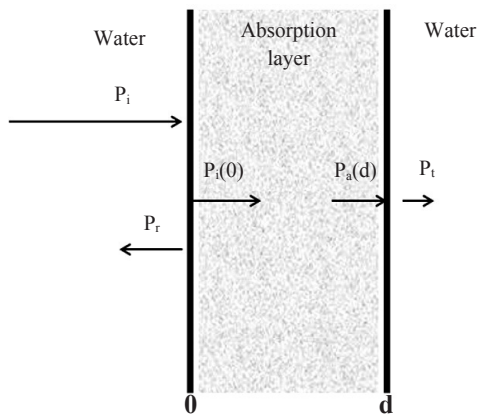


Fig. 2. Reflection and transmission of sound waves normally incident on a absorption layer (this simple approach is valid only for highly absorbing materials in which no appreciable round trip echoes occur within the material).

$$IL (dB) = 20 \log \frac{P_i}{P_t} \quad (2)$$

$$a (dB/cm) = (20 \log \frac{P_a(0)}{P_a(d)}) / d \quad (3)$$

여기서 (3)식을 IL과 물의 특성 임피던스 z_w , 그리고 흡음재질의 특성 임피던스 z_a 로 표시하면 (Bobber, 1970; Hagelberg et al., 1985),

$$a (dB/cm) = (IL - 20 \log \frac{(z_w + z_a)^2}{4z_w z_a}) / d \quad (4)$$

로 표현 가능하다. 뿐만 아니라 (4)식에서 특성 임피던스 z 값을 모르더라도 IL과 ER만으로 바꾸어 표시할 수 있다.

$$a (dB/cm) = \{IL + 20 \log (1 - 10^{-\frac{ER}{10}})\} / d \quad (5)$$

본 논문에서는 흡음계수 a (dB/cm)를 특성 임피던스의 측정 없이 (5)식을 이용하여 구하였다.

우선 다공질의 셀룰로오즈 스펀지에 시멘트로 굳힌 것인 새로운 흡음재질에 대한 흡음계수를 구하기 위해 가로 4m, 세로 5m, 높이 4m인 수조 내에서 Fig. 3과 같은 장치로 펄스기법을 사용하여 ER과 IL을 측정하였다.

이들 자료를 측정할 때 회절에 의한 영향을 최소화하기 위해 흡음판을 비대칭인 직사각형

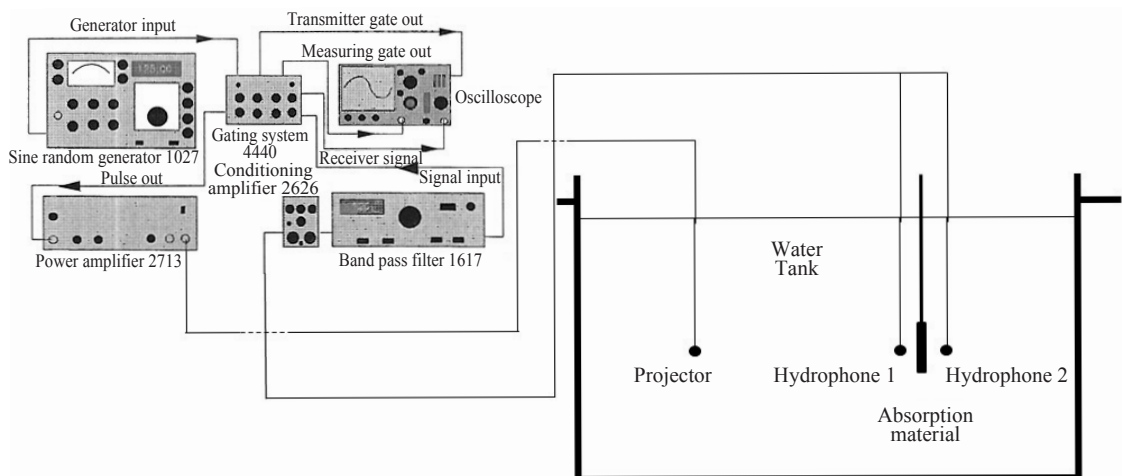


Fig. 3. Schematic block diagram for measurements in the water tank.

(가로 35cm, 세로 27cm)으로 제작하였으며, 수중청음기는 B&K사의 8103 소형수신기로 흡음판으로부터 10cm 떨어진 지점에, 그리고 회절효과를 줄이기 위하여 흡음판의 중앙 위치에서 약간 벗어난 지점의 앞과 뒤에 두었다. 그리고 음원 역시 B&K사의 8103을 사용하였으며 흡음판으로부터 200cm 떨어진 지점에 두었다. 실험당시의 수온이 19.5°C이었고, 음속은 1,482m/s이었으며, 수조벽면에서의 반사파와 직접파를 구분하기 위하여 펄스폭을 0.1ms 로 두고 측정하였다.

먼저 ER을 측정하기 위하여 흡음판 앞에 있는 수신기를 통해 직접파인 p_i 와 반사파인 p_r 를 측정하여야 하는데 직접파와 반사파의 음원으로 부터의 거리가 동일하지 못하므로 입사파의 음압은 측정값보다 0.87dB 감소된 값으로 보정되었다. 다음으로 IL을 측정하기 위하여 직접파인 p_i 와 투과파인 p_t 를 측정하여야 하는데, 직접파는 흡음판 뒤에 있는 수신기를 통해 흡음판이 제거된 상태에서 관측한 값이고, 투과파는 흡음판을 넣었을 때의 관측 값이다.

결과 및 고찰

다공질의 셀룰로오스 스펀지에 시멘트로 굳힌 새로운 흡음판에 대한 반향음감쇠량 ER과 투과손실 IL에 대한 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다.

40kHz 에서 120kHz 까지 측정된 ER은 약 6dB 전후로 거의 일정하게 나타난 반면, IL은 약 17dB 에서 39dB 까지 일정하게 증가하는 것으로 관측되었다. 이러한 관측 자료를 (5)식에 대입하면 Fig. 5와 같은 흡음계수 a (dB/cm)를 얻을 수 있다.

새로운 흡음재질에 대한 흡음계수는 40kHz에서 약 8.6dB/cm, 그리고 120kHz에서 약 21.7dB/cm로 주파수에 따라 일정하게 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 그동안 λ 로 널리 사용되어 오던 코르크로 채워진 고무에 비해 약 1.8dB/cm 정도 더 높은 흡음계수 값을 보이고 있어 무향수

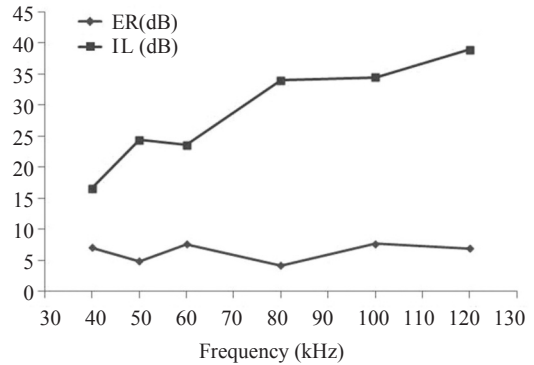


Fig. 4. Echo reduction (ER) and Insertion loss (IL) for a absorption plate (thickness $d=1.7$ cm) of cellulose sponge soaked in cement.

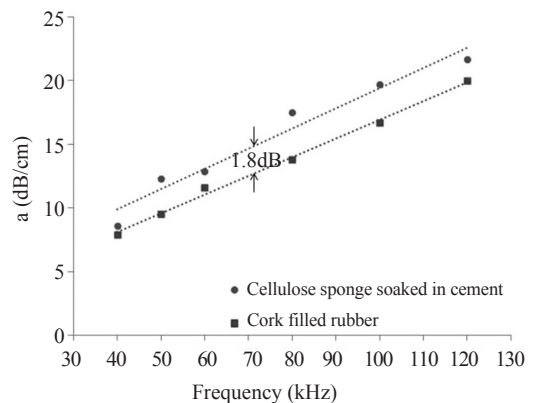


Fig. 5. Sound absorption coefficient a (dB/cm) for cellulose sponge soaked in cement and cork-filled rubber.

조의 제작을 위한 새로운 흡음재질로 충분할 것으로 판단된다 (Hagelberg et al., 1985).

다음으로 썰기의 크기에 따른 반향음감쇠량을 관측하였다. 실험에서의 흡음썰기는 가로 2cm, 세로 1.7cm로 고정시키고, 길이를 1.2cm, 2.5cm, 3.7cm, 5.0cm로 가변시키는 썰기형태로 만들었으며 이를 두께 1.7cm의 흡음판 위에 붙여 흡음타일을 제작하였다. 이 경우 썰기에 의한 흡음효과가 기대되는 썰기의 크기는 $\lambda/4$ 이상이어야 한다. 이는 썰기의 후면에서 반사되는 반사파와 입사파가 정상파를 만드는데, 정상파의

$\lambda_c/4$ 가 되는 매질의 한 지점에서 최대 입자속도를 갖게 되고, 동시에 마찰에 의한 흡음이 최대로 나타나기 때문이다. 여기서 λ_c 는 흡음효과가 기대되는 최소진동수인 임계진동수 f_{cutoff} 의 파장이다. 실험에서는 f_{cutoff} 을 40kHz로 두었기 때문에 λ_c 는 약 3.7cm이다. 그러나 실제로는 흡음재질의 밀도, 썰기의 정각 (wedge angle) 등의 영향으로 f_{cutoff} 값이 더 높아지게 된다 (Koidan et al., 1972). 본 실험에서는 수조벽면에 부착하는 것과 같은 조건으로 하기 위해 썰기판의 뒤편에 강체인 동판을 붙이고 관측하였다. 썰기 크기에 따른 반향음감쇠량 (ER)을 Fig. 6에 나타내었다.

썰기의 길이가 거의 $\lambda_c/2$ 부근인 1.2cm과 2.5cm까지는 주파수가 f_{cutoff} 인 40kHz에서의 값이 5dB 부근으로 썰기가 없을 때의 값과 별다른 차이가 없었으며, 주파수의 증가에 따라 ER 값이 다소 증가함을 보이고 있다. 그러나 썰기의 길이가 λ_c 이상인 3.7cm과 5.0cm에서는 40kHz에서 10dB 이상 감쇠량이 증가하는 것으로 나타나며, 더 높은 주파수 영역에서도 일정하게 증가함을 볼 수 있다. 특히 5.0cm인 경우, 모든 실험주파수 영역에서 20dB 이상의 반향음감쇠량을 보여 어군탐지기에서 사용하는 주파수대인 50kHz 이상의 음파에 대한 흡음썰기의 크기로 이 정도면 충분할 것으로 판단된다.

다음으로 이 흡음재질로 무향수조를 제작했

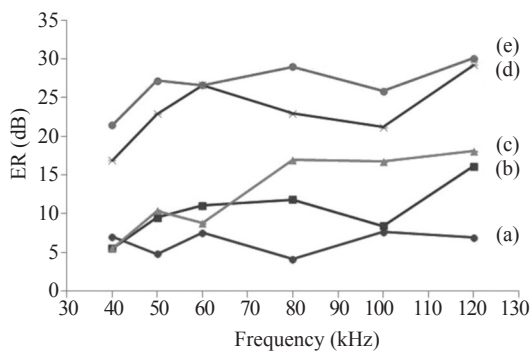


Fig. 6. Dependence of echo reduction (dB) on the wedge length ((a)=0cm, (b)=1.2cm, (c)=2.5cm, (d)=3.7cm, (e)=5.0cm).

을 때 수조의 크기에 대하여 검토하였다. 앞서 서론에서도 잠시 언급한 바와 같이 수조의 여섯면 전체가 20dB 이상의 흡음벽으로 붙어있을 때 직접파에 대한 반사파의 영향은 무시할 수 있으므로 트랜스듀서의 크기와 음파의 진동수에 따른 원거리음장의 조건만 만족하면 된다. 미국 표준연구소에서 정한 (Clay et al., 1977) 근거리음장과 원거리음장의 기준은 (6)식으로 표현되는 임계거리인 r_c 에 의한다. 음원으로부터의 거리 r 이 r_c 보다 가까운 지점에서의 음파는 근거리음장이 되고, 먼 지점에서는 원거리음장으로 볼 수 있다.

$$r_c = A/\lambda \tag{6}$$

여기서 A는 트랜스듀서의 단면적이고, λ 는 음파의 파장을 가리킨다.

트랜스듀서의 모양을 가장 흔한 원형 피스톤형이라 가정할 때, 150kHz를 공진진동수로 갖는 진동자의 직경이 12cm 이내 이거나 또는 공진진동수가 40kHz 일 때의 직경이 24cm 이내일 경우, 원거리음장의 기준인 r_c 값이 1m 보다 약간 더 크므로 무향수조의 크기는 가로, 세로 각 1m, 그리고 길이가 1.5m 정도이면 충분할 것으로 판단된다.

결론

다공질의 셀룰로오스 스펀지에 시멘트로 굳힌 것을 새로운 흡음재질로 사용하여 어군탐지기에서 주로 사용하는 40~120kHz의 주파수대역에서 흡음에 관련된 음향학적 특성을 관측해 보았다. 우선 이 흡음재질의 흡음계수 a (dB/m)는 40kHz에서 약 8.6dB/cm로 시작해서 120kHz에서 약 21.7dB/cm로 주파수에 따라 일정하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그동안 강력한 흡음재질의 하나로 널리 사용되어져 왔던 코르크로 채워진 고무의 흡음계수보다 평균적으로 1.8dB/cm 정도 높은 값이다.

다음으로 새로운 흡음재질로 다양한 썰기의

길이를 갖는 썩기형 흡음타일을 만들어 벽에 부착했을 때의 반향음감쇠량 ER (dB)을 측정해 보았는데, λ_c 이상인 5.0cm의 썩기길이를 갖는 흡음타일을 부착했을 경우, 전 실험주파수 대역에서 20~30dB의 반향음감쇠량을 보여 이 흡음타일을 무향수조의 제작에 사용했을 때 그 기능을 충분히 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 다공질의 셀룰로오스 스펀지는 시중에서 손쉽게 구입할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 흡음재질에 비해서 가격도 훨씬 저렴한 편이어서 흡음타일의 제작 또한 용이할 것으로 여겨진다.

마지막으로 이 흡음타일로 무향수조를 제작했을 때 그 크기에 관해서 검토해 보았는데 150kHz를 공진진동수로 갖는 진동자의 직경이 12cm 이내 이거나 또는 공진진동수가 40kHz 일 때의 직경이 24cm 이내일 경우, 원거리음장의 기준인 r_c 값이 1m 보다 약간 더 크므로 무향수조의 크기는 가로, 세로 각 1m, 그리고 길이가 1.5m 정도이면 어군탐지용 트랜스듀서의 음향학적 특성을 측정하기 위해 충분할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Bobber, R.J., 1970. Underwater electroacoustics measurements. Naval Research Laboratory, Washington. pp. 18–314
- Clay, C.S. and H. Medwin, 1977. Acoustical oceanography. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 153–155
- Corsaro, R.D., J. D. Klunder and J. Jarzynski, 1980. Filled rubber materials system: application to echo absorption in waterfilled tanks. J. Acoust. Soc. Am. 68 (2), 655–664
- Darmer, C.L., 1954. An anechoic tank for underwater sound measurements under high hydrostatic pressures. J. Acoust. Soc. Am. 26 (2), 221–222
- Hagelberg, M.P. and R. D. Corsaro, 1985. A small pressurized vessel for measuring the acoustic properties of materials. J. Acoust. Soc. Am. 77 (3), 1222–1228
- Koidan, W.,G. Hruska and M. Pickett, 1972. Wedge design for national bureau of standards anechoic chamber. J. Acoust. Soc. Am. 52 (4), 1071–1076
- Zwicker, C. and C.W. Kosten, 1949. Sound absorbing materials. Elsevier Publishing Co., Inc., New York. pp. 85–106

2012년 3월 2일 접수

2012년 4월 9일 1차 수정

2012년 5월 1일 수리