한국음향학회지 제20권 제4호 pp. 5~11 (2001)

꼭지각이 다른 쐐기형 무반향 타일의 음향특성

Acoustic Characteristics of Wedge-shaped Anechoic Tiles with Different Wedge-apex Angles

김 성 기*, 이 강 일*, 윤 석 왕*
(Sung Ki Kim*, Kang Il Lee*, Suk Wang Yoon*)

*성균관대학교 물리학과 음향학연구실, BK21 물리 연구단

(접수일자: 2001년 4월 23일; 채택일자: 2001년 5월 2일)

본 논문은 차일환 명예회장의 정년퇴임을 기념하여 헌정되었습니다

무반향 수조의 내벽 흡음재로 사용되는 무반향 타일을 쐐기형으로 제작하여 쐐기의 꼭지각 변화에 따른 음향학적인 특성을 고찰하였다. 실험에서 사용된 무반향 타일 평판 시료의 크기는 400 mm×385 mm×15.5 mm이며, 무반향 타일을 구성하는 쐐기의 길이는 27.5 mm로 고정하였다. 음선추적법을 이용하여 무반향 타일 시료 평판에 부착될 흡음쐐기의 꼭지각을 각각 30°와 60°로 설계 및 제작하였으며, 수중에서 쐐기가 부착되지 않은 평판형 무반향 타일과 흡음쐐기의 꼭지각이 30°와 60°인 무반향 타일에 음파를 수직 입사하여 반사손실을 측정하였다. 또한 쐐기의 유무와 무반향 타일을 구성하는 쐐기의 꼭지각 변화에 따른 반사 및 흡음특성을 고찰하였다. 쐐기의 꼭지각이 30°일 때 60°보다 반사손실이 증가함을 이론을 통해 예측하였고, 실험을 통해 확인할 수 있었다. 본 실험의 결과로써 음선추적법을 이용하여 설계 및 제작한 무반향 타일의 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 무반향 타일의 흡음특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 흡음재, 무반향 타일, 음선추적법, 반사손실, 투과손실
투고분야: 수중음향 분야 (5.1, 5.2), 물리음향 및 광음향 분야 (9.4)

Acoustic characteristics of the wedge-shaped anechoic tiles, used as absorbing lining materials for an anechoic water tank, were investigated for different wedge-apex angles. The anechoic tile base has the dimensions of 400 mm×385 mm×15.5 mm. In order to investigate anechoic effect, the wedge-apex angles 30° and 60° were selected by using a ray-tracing method. The reflection loss of the anechoic tiles with and without wedges were experimentally studied at normal incident sound waves in water. In this experiment, the reflection loss of wedge-shaped anechoic tiles with the optimum wedge-apex angle 30° is larger than one with the angle 60° and one without wedges. The experimental results show that the wedge-shaped anechoic tiles with the wedge-apex angle 30°, optimized by using ray-tracing method, turn out better absorbing lining materials of an anechoic water tank.

Keywords: *Absorbing material, Anechoic tile, Ray-tracing method, Reflection loss, Transmission loss*
ASK subject classification: *Underwater acoustics (5.1, 5.2), Physical acoustics and photo-acoustics (9.4)*

책임저자: 윤석왕 (swyoon@skku.ac.kr)
440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300번지
성균관대학교 물리학과 음향학연구실
(전화: 031-290-7043; 팩스: 031-290-7055)

I. 서 론

음원으로부터 방출된 음파는 그 음원 주위를 둘러싸고 있는 매질을 통해 전파된다. 이 음파의 전파 과정 중 다른 매질을 만나는 경우, 두 매질의 음향특성 차이에 의해 음파의 반사 및 투과 현상이 발생하게 된다. 따라서 제한적인 공간 내에서 음파가 전달되는 경우에는 경계면에서의 반사효과에 의하여 자유음장 (free-field)에서의 음파전달 현상과는 상이한 차이를 보인다[1]. 그러므로 제한적인 공간 내에서 음파가 전달되면서 발생하는 반사의 효과를 줄이고자 무반향 타일을 사용함으로써 인위적으로 자유음장과 같은 이상적인 조건을 형성하여, 제한적인 공간 내에서의 음향 관련 연구를 가능하도록 하기 위한 무반향 타일의 설계 및 제작이 요구되어진다. 그러나 국내에서는 자유음장 형성을 위한 무반향 타일의 설계와 제작에 관한 발표된 문헌상의 연구결과 및 연구사례가 매우 미비한 실정이다.

본 연구에서는 무반향 타일 제작에 사용된 시료 자체의 음향특성 및 쐐기형 무반향 타일의 쐐기효과와 더불어 그 물리음향학적 특성을 고찰하고자 한다. 또한 음선추적법 (ray-tracing method)[2]을 이용하여 쐐기형 무반향 타일을 설계 및 제작하며, 무반향 타일에 부착된 쐐기에 의한 흡음효과를 측정함으로써 무반향 타일로서의 성능을 평가하고자 한다.

II. 흡음쐐기의 꼭지각 결정을 위한 음선추적법 (ray-tracing method)

매질을 통해 전파하는 음파가 흡음쐐기에 입사되는 경우에 음파전달 매질과 흡음쐐기의 음향특성임피던스 차이에 의해 두 매질의 경계면에서 입사음파의 일부는 흡음쐐기를 투과하며 흡수되고, 나머지 음파는 경계면에서 다중반사하며, 흡수와 반사를 반복하게 된다. 그림 1에서와 같이 음파가 음향특성임피던스 Z_1 인 매질에서 음향특성임피던스 Z_2 인 흡음쐐기 경계면의 수선에 대해 β 의 입사각으로 입사하는 경우, 음파의 비수직 입사효과에 의해 음향특성임피던스는 $Z_2 \cos\beta$ 로 주어진다.

따라서 두 매질의 음향특성임피던스가 주어지면 그 경계를 1회 반사하는 경우 발생하는 반사손실 (reflection loss), $RL(\beta)$ 은 다음과 같이 입사각의 함수로써 구할 수 있다[3,4].

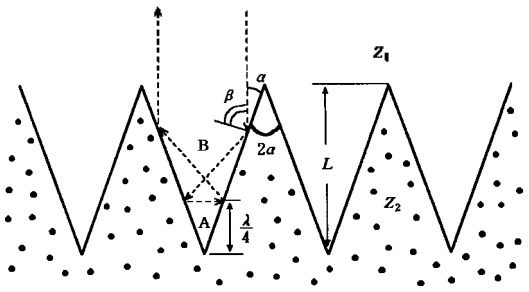

그림 1. 음향특성임피던스가 다른 두 매질의 쐐기형 경계면에서의 다중반사

Fig. 1. Multi-reflection on the wedge shaped surface for two different acoustic impedance material.

$$RL\ (\beta) = -20\log_{10}\left|\frac{\left(\frac{Z_2}{Z_1}\cos\beta - 1\right)}{\left(\frac{Z_2}{Z_1}\cos\beta + 1\right)}\right| \quad (1)$$

입사하는 음파가 원거리음장[2]을 충분히 만족하는 조건의 음원에서 발생하여 흡음쐐기에 입사하는 음파를 고려하면, 쐐기의 꼭지각 2α 의 변화에 따른 입사음파의 반사횟수 N 은 $\pi/2\alpha$ 의 정수값만을 택함으로써 구할 수 있다[4]. 음파의 반사횟수와 쐐기 경계면의 수선에 대한 음파의 비수직 입사효과를 고려하면, 다중반사에 의한 흡음쐐기 내에서의 반사손실 $RL(\beta)$는 다음과 같이 쓰여진다[4].

$$RL(\beta) = -20\sum_{n=1}^{N}\log_{10}\left|\frac{\left[\frac{Z_2}{Z_1}\cos\{\beta-(n-1)\cdot 2\alpha\}-1\right]}{\left[\frac{Z_2}{Z_1}\cos\{\beta-(n-1)\cdot 2\alpha\}+1\right]}\right| \quad (2)$$

입사음파 파장 λ 의 1/4에 해당하는 $\lambda/4$ 가 흡음쐐기의 길이 L 보다 짧은 경우의 음파가 입사되면, 그림 1과 같이 쐐기 경계면에서의 다중 반사에 의해 흡음효과가 증가한다. 그러나 $\lambda/4$ 가 흡음쐐기의 길이 L 보다 길거나, 입사음파가 다중반사 후, 쐐기의 길이가 $\lambda/4$ 보다 짧아지는 그림 1의 A지역에서는 공명 (resonance)효과[5]와 공동잔향 (cavity reverberation)효과[1]에 의해 흡음쐐기 경계면에서의 다중반사에 의한 흡음효과는 기대할 수 없으며, 평판형 흡음재와 같이 입사 음파에 대해 1회 반사손실에 해당하는 흡음효과만이 기대된다.

일반적으로 쐐기의 길이 L 이 $\lambda/4$ 값에 비해 큰 경우는 그림 1의 B지역 내에서의 반사횟수 N 은 쐐기의 길이 및 각도에 관계없이 6회를 초과하지 않으므로, 다중반사뿐만 아니라 입사 음파의 파장 및 쐐기의 길이 L 을 고려

한 반사손실 $RL(\beta)$는 아래의 (3)식과 (4)식의 총 반사손실 SRL로 쓸 수 있다[4].

$$L > \frac{\lambda}{4} \ : \ SRL = RL(\beta) - 20\log_{10}\left(1 - \frac{\lambda}{4L}\right) \quad (3)$$

$$L \le \frac{\lambda}{4} \ : \ SRL = RL(0) - 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{4L}\right) \quad (4)$$

위의 (3)식과 (4)식으로부터 주어진 환경조건에서 쐐기형 무반향 타일의 쐐기 꼭지각과 그 길이에 따라 반사손실이 달라짐을 알 수 있다.

III. 실험방법 및 결과

3.1. 무반향 타일 매질의 음향특성임피던스측정

임의의 매질이 가지고 있는 물리 음향학적 성질을 나타내는 음향특성임피던스 Z는 매질 내에서의 음속 c와 밀도 ρ의 곱으로써 정의한다[6]. 실험에서 사용한 매질은 무반향 타일 제작이 용이하며, 불순물이나 내부 기포가 완전히 제거된 천연고무를 선택하였다. 무반향 타일 매질의 음속을 측정하기 위해 수중에서 그림 2와 같이 직경이 25.4mm, 중심 주파수가 1 MHz인 한 쌍의 음파발생기를 무반향 타일 매질의 양쪽에 부착시키고 파열음(tone burst)을 입사시킨 뒤, 송신된 신호와 수신된 신호의 시간차를 측정하여 음속을 결정하였다. 실험결과, 쐐기형 무반향 타일 시료를 투과하는 음속 c는 1430 m/s, 밀도 ρ는 1500 kg/m^{3}로 측정되었다. 따라서, 무반향 타일 매질의 음향특성임피던스 Z는 2.14×10^6 Pa · s/m임을 알 수 있으며, 순수한 물의 음향특성임피던스인 1.48×10^6 Pa · s/m와 비교하였을 때 수중에서 음파의 투과성이 좋은 매질임을 알 수 있다[5].

3.2. 평판형 무반향 타일의 제작 및 음향특성

그림 3의 실험장치에 의해 음향특성임피던스를 측정한 매질을 사용하여 두께가 15.5 mm이고, 가로와 세로가 각각 400 mm× 385 mm 인 평판형 무반향 타일을 제작하였다.

그림 4는 수중에서 평판형 무반향 타일에 입사된 음파의 주파수 변화에 따른 투과계수 및 반사계수를 측정하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. 평판형 무반향 타일의 투과계수 및 반사계수를 측정함으로써, 무반향 타일 제작에 사용된 매질의 음향특성을 고찰하였다. 함수발생기

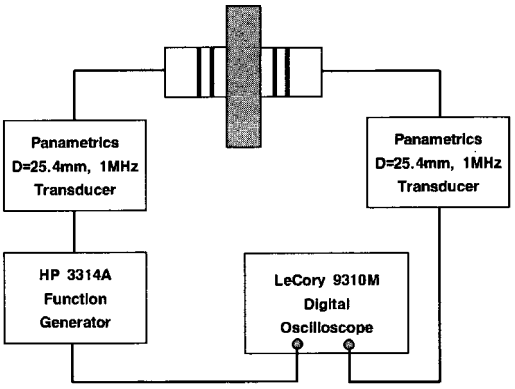

그림 2. 무반향 타일 매질의 음속 측정장치
Fig. 2. Block diagram of experimental measurement of sound speed in anechoic tile material.

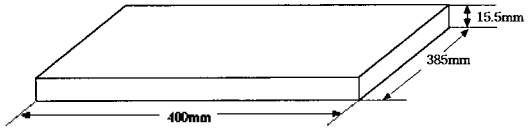

그림 3. 평판형 무반향 타일
Fig. 3. Plane shaped anechoic tile.

(HP 3314A)에서 발생된 신호를 출력증폭기 (ENI 2100L)를 통해 증폭시킨 후에 직경이 273 mm, 중심주파수가 95 kHz인 음파발생기 (AF-33)를 통해 방출하고, 직경이 21 mm인 음파수신기 (B&K 8103)로 수신된 신호는 전치증폭기 (B&K 2635)를 거친 후에 디지털 오실로스코프 (LeCroy LT322)로 신호를 분석하였다. 이때 음파발생기

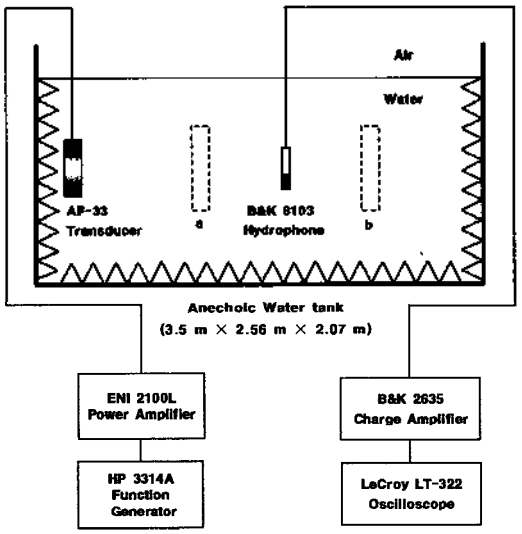

그림 4. 평판형 무반향 타일의 투과계수 및 반사계수 측정장치
Fig. 4. Block diagram of experimental measurement of transmission and reflection coefficients for the plane shaped anechoic tile.

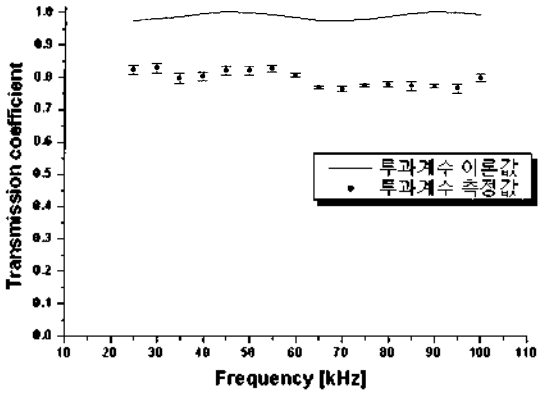

그림 5. 입사음파의 주파수 변화에 따른 평판형 무반향 타일에서의 투과계수 이론값과 측정값

Fig. 5. Theoretical and experimental transmission coefficients as a function of frequency for the plane shaped anechoic tile.

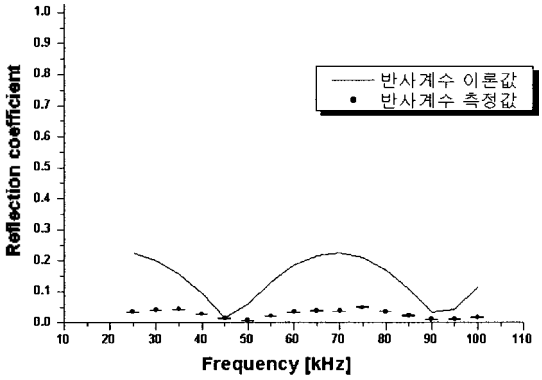

그림 6. 입사음파의 주파수 변화에 따른 평판형 무반향 타일에서의 반사계수 이론값과 측정값

Fig. 6. Theoretical and experimental reflection coefficients as a function of frequency for the plane shaped anechoic tile.

(AF-33)와 음파수신기 (B&K 8103)는 평판형 무반향 타일의 수직한 축에 일직선으로 배열하였다. 쇄선으로 표시된 a 위치에 평판형 무반향 타일을 설치하여 투과계수를 측정하였고, 쇄선으로 표시된 b 위치에 평판형 무반향 타일을 설치하여 반사계수를 측정하였다. 입사음파의 주파수는 25 kHz에서 100 kHz까지 5 kHz 단위로 변화시켜가며, 음파발생기에서 파열음을 발생시켜 평판형 무반향 타일에 수직으로 입사시켰다.

그림 5는 입사음파의 주파수 변화에 따른 평판형 무반향 타일의 투과계수를 측정한 그림이다. 실험에서 사용된 주파수 대역에서 투과계수가 0.7~0.9 사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 5의 실선은 "물-평판형 무반향 타일-물"의 세 전파매질 조건에서 투과계수의 이론값을 나타낸 것으로, 매질 내에서의 음파감쇠를 고려

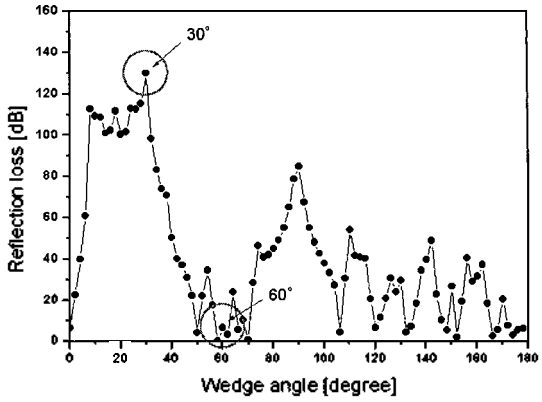

그림 7. 음선추적법을 이용한 (3)식에 의하여 계산된 쐐기 꼭지각의 변화에 따른 입사음파의 반사손실

Fig. 7. Reflection loss calculated by ray-tracing method as a function of wedge apex angle.

하지 않았다. 측정값과 비교하여 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있으며, 입사된 음파가 평판형 무반향 타일을 투과하면서 발생하는 감쇠효과에 기인하는 것으로 생각할 수 있다[6].

그림 6은 입사음파의 주파수 변화에 따른 평판형 무반향 타일의 반사계수를 측정한 그림이다. 실험에서 사용한 주파수 대역에서 반사계수의 값이 0.1 이하임을 확인할 수 있다. 평판형 무반향 타일에 입사하는 음파의 주파수가 각각 45 kHz와 90 kHz인 경우에 실선으로 나타낸 반사계수의 이론값이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 평판형 무반향 타일의 두께가 입사하는 음파의 반 파장 또는 한 파장과 일치하여 발생하는 두께모드에 의한 효과임을 알 수 있다[6]. 반사계수의 이론값도 투과계수의 이론값과 마찬가지로 매질내의 음파감쇠를 고려하지 않았기 때문에 실험값과 비교하여 다소 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6의 결과로부터 평판형 무반향 타일의 제작에 사용된 매질은 수중에서 음파의 반사가 매우 작고, 투과성이 매우 좋은 매질임을 알 수 있다.

3.3. 쐐기형 무반향 타일의 설계 및 제작

그림 7은 음선추적법을 이용한 (3)식에 의하여 쐐기 꼭지각의 변화에 따른 반사손실을 계산한 그림이다. 음향특성임피던스인 Z_1과 Z_2는 본 실험에서 사용된 물과 무반향 타일 제작에 사용된 매질의 음향특성임피던스를 사용하였으며, 입사되는 음파의 주파수는 100 kHz인 경우에 대하여 계산하였다. 이 결과로부터 무반향 타일 표면에 부착되는 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 경우에 가장 큰 반사손실을 가짐을 알 수 있다. 그림 7의 음선추적법을

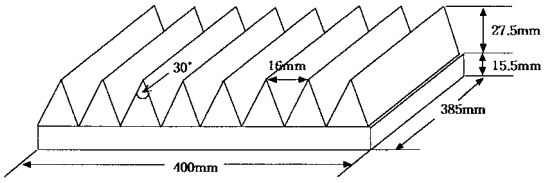

그림 8. 꼭지각이 30°인 쐐기형 무반향 타일
Fig. 8. Wedge shaped anechoic tile with the apex angle 30°.

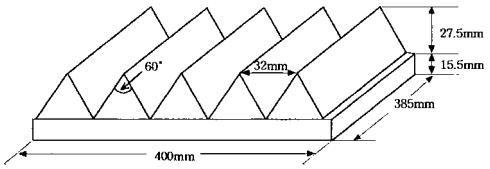

그림 9. 꼭지각이 60°인 쐐기형 무반향 타일
Fig. 9. Wedge shaped anechoic tile with the apex angle 60°.

이용하여 이론적으로 계산한 반사손실 값은 두 매질의 두께가 무한한 경우이므로 실험적으로 측정할 수 있는 반사손실 값보다 매우 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.

이와 같이 음선추적법을 이용하여 쐐기 꼭지각의 변화에 따른 반사손실의 변화를 고려함으로써, 흡음성능이 좋은 최적의 쐐기 꼭지각을 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 쐐기형 무반향 타일을 제작하여 실험적으로 반사손실을 측정하였다. 또한 흡음쐐기의 꼭지각이 60°인 쐐기형 무반향 타일을 제작하여 반사손실을 측정함으로써, 서로 다른 꼭지각을 갖는 무반향 타일의 흡음성능을 비교 및 분석하였다.

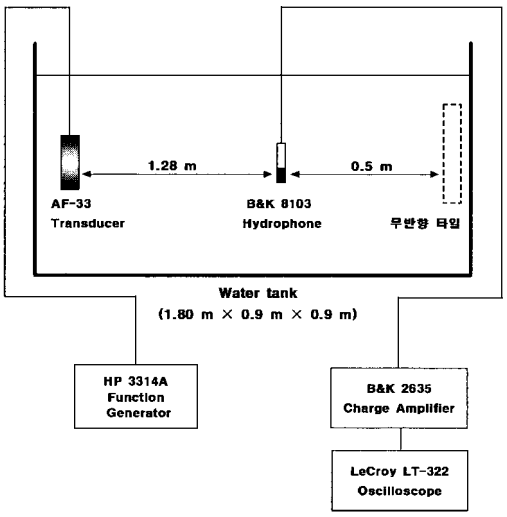

그림 10. 쐐기형 무반향 타일의 반사손실 측정장치
Fig. 10. Block diagram of experimental measurement of reflection loss for the wedge shaped anechoic tile.

본 연구에서는 무반향 타일을 쐐기형으로 제작함으로써 그 흡음특성을 증진시키고자 하였다. 따라서 물과 무반향 타일 매질의 음향특성임피던스를 사용하여 계산한 음선추적법의 결과로부터, 쐐기 꼭지각이 30°인 경우에 그 반사손실이 가장 큰 값을 갖기 때문에 꼭지각이 30°인 흡음쐐기를 평판형 무반향 타일에 부착해 쐐기형 무반향 타일을 제작하였다.

음선추적법의 결과로부터, 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 경우에 비하여 반사손실이 매우 작은 꼭지각이 60°인 쐐기형 무반향 타일을 제작하여 반사손실을 측정하였다. 이 때, 쐐기 꼭지각이 다른 쐐기형 무반향 타일의 흡음쐐기 길이는 쐐기 길이에 의한 흡음효과의 변화를 배제하기 위하여 27.5 mm로 고정하였다.

3.4. 쐐기형 무반향 타일의 반사손실 측정

수중에서 무반향 타일 매질의 음파투과성이 매우 좋기 때문에 쐐기형 무반향 타일에 입사되는 입사음파의 반사손실을 효과적으로 측정하기 위하여, 그림 10과 같이 쇄선으로 표시된 수조벽면에 쐐기형 무반향 타일을 설치하여 반사손실을 측정하였다. 함수발생기 (HP 3314A)에서 발생된 신호를 음파발생기 (AF-33)를 통해 방출하고, 음파수신기 (B&K 8103)로 수신된 신호는 전치증폭기 (B&K 2635)를 거친 후에 디지털 오실로스코프 (LeCroy LT322)로 신호를 분석하였다. 입사음파의 주파수는 25 kHz 에서 100 kHz 까지 5 kHz 단위로 음파발생기에서 파열음을 발생시켰다. 그림 10에서 쇄선으로 표시된 위치에 실험에서 사용될 쐐기형 무반향 타일을 설치하여 "물-쐐기형 무반향 타일-공기"의 세 전파매질의 조건에서 입사음파의 주파수 변화에 따른 반사손실을 측정하였다.

그림 11은 쐐기형 무반향 타일의 반사손실을 측정하는

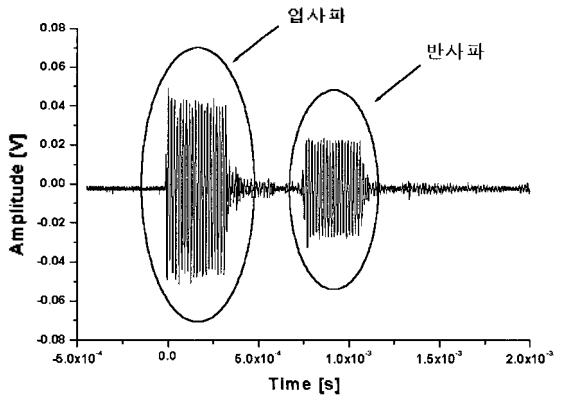

그림 11. 파열음의 주파수가 60kHz인 경우에 수신된 신호의 파형
Fig. 11. Received tone burst at the frequency 60 kHz.

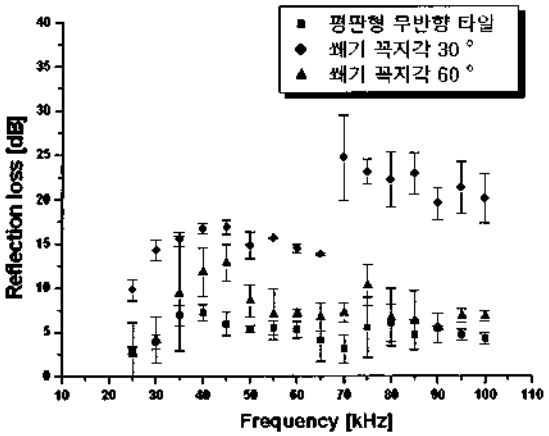

그림 12. 입사음파의 주파수 변화에 따른 무반향 타일의 반사손실 측정값

Fig. 12. Reflection loss as a function of frequency for the anechoic tile.

경우에 음파수신기로 수신된 신호의 파형을 보여주고 있다. 처음 수신된 신호는 음파발생기에서 발생된 입사파이고, 두 번째 수신된 신호는 무반향 타일로부터의 반사파이다. 이 두 신호의 진폭을 측정함으로써 쐐기형 무반향 타일의 반사손실을 계산하였다[6]. 입사음파의 지속시간 (duration time)은 300 μs이며, 입사음파의 반복시간 (repetition time)은 100 ms인 파열음을 방출하였다.

그림 12는 입사음파의 주파수 변화에 따른 반사손실을 측정한 그림이다. 평판형 무반향 타일에 대하여, 25 kHz~30 kHz의 주파수 대역에서 반사손실이 5 dB 이하의 값이고, 35 kHz~100 kHz의 주파수 대역에서는 5 dB~10 dB 사이의 반사손실을 가짐을 볼 수 있다. 주파수가 40 kHz와 80 kHz 주변에서 반사손실이 증가함을 볼 수 있으며 이것은 평판형 무반향 타일의 두께가 입사하는 음파의 반 파장 또는 한 파장과 일치하여 발생하는 두께 모드에 의한 효과임을 알 수 있다. 흡음쐐기의 꼭지각이 60°인 무반향 타일에 대하여, 25 kHz~30 kHz의 주파수 대역에서 반사손실이 5 dB 이하로써 쐐기가 부착되지 않은 평판형 무반향 타일의 경우와 비슷한 반사손실을 가지나, 35 kHz~45 kHz의 주파수 대역에서는 10 dB~15 dB 사이의 가장 큰 반사손실을 가짐을 볼 수 있다. 또한 50 kHz~100 kHz의 주파수 대역에서 반사손실은 10 dB 이하의 값을 가짐을 볼 수 있다. 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 무반향 타일에 대하여, 25 kHz의 주파수에서 약 10 dB, 30 kHz~65 kHz의 주파수 대역에서는 15 dB~20 dB 의 반사손실을 가짐을 볼 수 있다. 70 kHz~100 kHz의 주파수 대역에서의 반사손실은 20 dB~25 dB 사이의 값으로써 가장 큰 반사손실을 가짐을 볼 수 있다.

본 논문의 실험결과로써 쐐기형으로 제작한 무반향 타일이 쐐기가 부착되지 않은 평판형 무반향 타일에 비하여 무반향 특성이 매우 우수하며, 음선추적법을 이용하여 설계 및 제작한 쐐기형 무반향 타일의 쐐기 꼭지각이 30°인 경우에 무반향 수조를 위한 내벽 흡음재로써 그 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

무반향 수조의 내벽 흡음재로 사용되는 무반향 타일을 쐐기형으로 제작하여 쐐기의 꼭지각 변화에 따른 흡음특성을 고찰하였다. 무반향 타일 제작을 위해 선정한 매질의 음향특성임피던스는 2.14×10^6 Pa · s/m로 측정되었다. 흡음효과 증진을 위하여 쐐기형으로 무반향 타일을 설계하였고, 음선추적법을 이용하여 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 경우 가장 우수한 흡음효과를 가짐을 이론적으로 예측할 수 있었다.

쐐기가 부착되지 않은 평판형 무반향의 타일의 음향특성을 고찰하기 위하여, "물-평판형 무반향 타일-물"의 세 전파매질의 조건에서 입사음파의 주파수 변화에 따른 투과계수 및 반사계수를 측정하였다. 실험결과로써 평판형 무반향 타일의 투과계수는 약 0.7~0.9, 반사계수는 0.1 이하로 측정되었다. 본 연구에서 사용된 수중에서 평판형 무반향 타일은 음파의 투과성이 매우 좋은 매질임을 알 수 있었다.

쐐기형 무반향 타일에 입사되는 음파의 반사손실을 효과적으로 측정하기 위하여, "물-쐐기형 무반향 타일-공기"의 세 전파매질의 조건에서, 평판형 무반향 타일과 음선추적법을 이용하여 설계한 흡음쐐기의 꼭지각이 30°와 60°인 쐐기형 무반향 타일의 반사손실을 측정함으로써 쐐기형 무반향 타일의 무반향 특성을 고찰하였다. 실험결과로써 흡음쐐기가 부착된 무반향 타일이 흡음쐐기가 부착되지 않은 평판형 무반형 타일에 비해 반사손실이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 흡음쐐기의 꼭지각이 30°와 60°인 쐐기형 무반향 타일의 반사손실을 비교한 결과, 흡음쐐기의 꼭지각이 30°인 무반향 타일이 흡음쐐기의 꼭지각이 60°인 무반향 타일에 비하여 반사손실이 매우 큰 것을 실험적으로 알 수 있었다.

본 연구의 결과로서 쐐기형으로 제작한 무반향 타일이 쐐기가 부착되지 않은 평판형 무반향 타일에 비하여 무반향 특성이 매우 우수함을 알 수 있었다. 음선추적법을 이

용하여 설계 및 제작한 흡음쐐기 꼭지각이 30°인 쐐기형 무반향 타일이 무반향 수조의 내벽 흡음재로써 그 흡음성능이 가장 우수함을 이론적으로 예측 및 실험적으로 검증할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 수중음향특화연구센터와 두뇌한국21 사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. E. Mayer and E. G. Neumann, Physical and Applied Acoustics, Academic Press, York, pp. 80-86, pp. 140-143, 1972.
2. R. J. Urick, Principles of underwater sound, 3rd ed., Peninsula Publishing, Altos, California, pp. 125-128, pp. 130-136, pp. 237-290, 1983.
3. A. P. Dowling and J. E. Ffowcs Williams, Sound and Sources of Sound, Ellis Horwood Limited, England, pp. 82-84, 1983.
4. 윤석왕, 박광준, 이병수, "무반향 수조의 설계, 제작 및 음향특성", 성균관대학교 논문집 38(2), pp. 26-32, 1989.
5. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 4th ed., (John Wiley & Sons, New York, p. 126, pp. 526-528, 2000.
6. D. T. Blackstock, Fundamentals of Physical Acoustics, John Wiley & Sons, York, pp. 46-48, pp. 108-114, pp. 163-173, 2000.

저자 약력

● 김 성 기 (Sung Ki Kim)
1976년 7월 8일생
1999년 2월: 세종대학교 물리학과 (이학사)
2001년 2월: 성균관대학교 물리학과 (이학석사)
※ 주관심분야: 수중음향, 건축음향, 의료음향

● 이 강 일 (Kang Il Lee)
한국 음향학회지 제19호 제1E호 참조

● 윤 석 왕 (Suk Wang Yoon)
한국 음향학회지 제19권 제1E호 참조