

쐐기형 수중음파 흡수타일의 음반사 특성 연구

A Study on the Characteristics of the Acoustic Reflection of the Wedge Shaped Underwater Sound Absorptive Tile

강 성 옥*, 홍 우 영**, 송 영 일**, 류 기 상**, 백 칠 기**

(Sung-oug Kang*, Woo-young Hong**, Yeong-il Song**, Ki-sang Lyu**, Chil-ki Baek**)

요 약

쐐기각이 다른 4종류의 쐐기형 수중음파 흡수타일을 설계, 제작하고 각각의 흡수타일에 대한 반사음장의 크기를 측정하였다. 흡수타일의 정면에서 측정된 반사음장의 크기는 실험한 4개의 타일중 쐐기의 꼭지각이 30°일 때 최소값을 갖고 120°일 때 최대값을 가졌다. 쐐기형 흡수타일의 꼭지각이 클수록 그 반사계수가 증가되는 것을 확인하였다. 또한 본 실험에 사용된 10kHz~30kHz 주파수 범위에서 쐐기각이 같은 흡수판에 의한 반사음장의 크기는 주파수와 무관하였다. 그리고 쐐기형 흡수타일 후면에서 측정된 반사음장의 크기는 흡수판의 형태와 실험에 사용된 주파수들에 무관한 일정한 값을 가졌다. 쐐기형 흡수타일의 반사음장에 대한 측정값과 수치모델에 의한 계산값은 대체로 잘 일치하였다.

ABSTRACT

Four different wedge angle absorptive tiles were designed and made, and the magnitudes of the reflected acoustic fields by the wedge shaped underwater sound absorptive tiles were measured. The minimum magnitude was found at the angle of 30° and the maximum of it was found at the wedge angle of 120° from measured the reflected acoustic fields at the front sides of the tiles. The fact that as wedge angle of the absorptive tile increases, the reflection coefficient is increasing is verified. The measured reflected acoustic fields were not dependent on the frequency in the range of 10kHz~30kHz used in this experiment for the same wedge angle tile. The measured reflected acoustic fields at the back sides of the tiles show that they are independent from both type of the absorptive tiles and the frequencies used in the experiments. The measured values and the computed values by the numerical model for the reflected acoustic fields of the wedge shaped absorptive tiles are fairly well comparable with one another.

1. 서 론

수중에서 음파가 특정 물체에 부딪치면 반사와 흡수, 투과의 과정을 갖게 된다. 물체에 입사하는 음파에너지는 물체의 표면에서 반사하는 에너지, 물체내에서 흡수되는 에너지, 물체를 투과하는 에너지를 모두 합한 것과 같다. 반사와 투과의 과정은 매질의 임피던스와 입사각에 관계되지만, 음파에너지의 흡수과정은 좀 다르다. 대표적인 음파 흡수과정의 형태는 점탄성형(viscoelasticity), 음파상쇄형(cancellation), 음화학형(sonochemistry), 음광형(sonoluminescence), 압전기형(piezoelectricity) 등으로 구분될 수 있다.

점탄성형은 다공성 물질의 흐름점성에 의한 음파에너지의 손실, 물질의 비탄성에 의한 음파에너지의 손실, 또는 기포에 의한 흡수와 산란 과정에서 발생하는 음파에너지의 손실에 의한 흡수형태로 구분할 수 있다. 흐름점성을 응용한 흡음물질로서는 물과 특성임피던스가 비슷하고 점성을 갖는 피마자유(castor oil)를 이용한 Mason Lining[1]과 소나무 재질의 톱밥과 시멘트를 혼합하여 다공질의 쐐기형태로 제작한 Insulcrete[2] 등이 있다. 상업적으로 판매되는 B.F. Goodrich사에서 제조되는 SOAB은 부틸고무의 알루미늄 가루의 혼합물이며 쐐기형태로 제작하고 금속입자 주변에 공기주머니를 형성시켜 기포가 발생되도록 하였으며 20kHz~500kHz에서 사용되고 최대 15dB 정도의 반향 감소를 얻도록 설계되어 있다[3, 4]. 물질의 비탄성을 응용한 흡음 물질로서는 rho-c 고무를 이용하여 기포 공동(air cavity)을 갖으며 쐐기형태로 제작한 Fafnir와 다양한 공진주파수를 발생시키기 위해 여러

*군사과학대학원 해양학과

**해군사관학교

접수일자: 1996년 12월 30일

가지 크기의 기포 공동을 갖는 rho-c 고무층으로 제작된 Alberich등이 있다. 특히, Alberich는 제2차 세계대전중 독일해군에서 삼수함 무반향 코팅재로 사용하여 9kHz~18kHz의 주파수 범위에 걸쳐 효과적인 것으로 밝혀졌다[5, 6]

음파상쇄형은 입사파, 반사파, 투과파의 위상차를 이용한 음파에너지 흡수형이며 음향학적으로 경한층과 연한층을 교대로 제작한 복합층형, 1/4파장의 층, 능동 상쇄형 등의 제품들이 이에 속한다. 이러한 형태는 특수한 조건에서만 적용되는 제한이 많이 따르는 단점도 있다.

음광전기화학형은 음파에너지를 광 또는 화학적인 에너지로 변형시켜 음파를 흡수하는 형태이며 아직 초보적인 단계에 있으나 장차 많은 발전이 기대되고 있다.

흡음에 관련된 국내의 연구로서는 흡음물질의 켜기형 경계면을 갖는 매질 내부의 음장특성을 영상방법(image method)으로 연구한 것과 부틸고무와 톱밥 등의 재료로 켜기형태의 타일을 만들어 수조내부에 부착한 후 그 수조에 대한 음파의 반사, 흡수손실 등을 연구한 것이 있는 정도이다[7, 8].

음파가 한 매질에서 다른 매질로 진행하여 경계면에 부딪칠 때 입사파는 반사파와 투과파로 나뉘어지고, 이들에 대한 각각의 음파강도와 음압진폭은 입사파의 입사각, 두 매질의 음향 특성임피던스와 흡수계수에 의해 결정된다[9, 10].

유한한 크기의 수조는 수중음향 실험시 수면과 수조의 경계면에서 반사되는 음파로 인하여 여러 가지 제약이 따른다. 제한된 크기의 수조에서 수중음향 실험과 연구를 수행 하기 위해서는 자유음장을 형성할 수 있는 무반향 수조의 제작이 요구된다[11].

수중 반사음을 제거하기 위한 이상적인 매질이란 1)경계면에 입사되는 음파에너지는 완전 투과시키고, 2)투과된 음파는 완전 흡수하는 매질이다. 수중 매질의 경계면에서 음파를 완전 투과시키는 무반향 매질은 매질의 음향 특성이 물과 같을 때에 존재하므로 반사음을 줄일 수 있는 효과적인 매질은 물과 유사한 음향 특성임피던스를 갖는 것이 요구된다. 또한 흡음물질 내에서 음파를 효과적으로 흡수하는 매질은 자체 방사음의 차단과 매질 내부로 투과된 음파가 매질의 또 다른 경계면에서 반사되는 반사음을 줄이는데 기여하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 일반적으로 반사음을 감소시키는 매질의 구조는 켜기형태나 원추형태이다. 이것은 입사되는 음파를 켜기형 경계면에서 다중반사를 만들어 흡음효과를 증가시키므로 광범위하게 응용되어 왔다[3, 5].

본 연구에서는 흡음판의 음장을 계산하기 위한 수치모델을 개발하고 흡음효과가 큰 켜기형태의 흡음타일을 제작하여 켜기각 변화에 따른 4가지 흡음판에 대한 반사계수를 측정하고 수치모델의 결과와 비교한 후 각판의 반사특성을 분석평가 하였다.

II. 켜기형 흡음판의 반사계수 계산 수치모델

일반적으로 켜기형태의 표면에서 반사하는 음장은 반사표면이 평평한 표면이 아니므로 거울반사(specular reflection)와 같은 완전반사에 의한 음장이라기 보다는 산란체의 후방 산란에 의한 간섭장이 형성되는 반사음장이다. 이것은 거울반사에 의한 음장과 후방산란에 의한 음장의 합으로 기술된다. 그러므로 켜기형 표면에 의한 반사음장은 거울반사에 의한 음장과 산란체에 의한 후방산란의 강도가 입사각에 의존되는 Lambert 법칙으로 기술될 수 있는 음장의 중첩이 발생되는 간섭장이므로 일반적인 켜기형 표면에 대한 해석적인 반사계수의 해법은 복잡하고 어렵게 된다. 또한 표면의 거칠기는 입사 음원의 주파수와 표면의 굴곡도에 따라 달라지는 Rayleigh 변수로 기술되므로 동일한 형태의 켜기 표면에 의한 반사음장이라도 입사 음원의 주파수에 따라 그 크기는 달라진다.

그림 1은 무한히 큰 켜기형 흡음판의 단면도 일부를 나타내고 있다. 일반적으로 이러한 표면에 의한 반사장의 해석적인 해는 구하기 어렵다. 청음기의 위치가 유한한 크기의 켜기형 표면으로부터 거리가 작을 때 표면에서 반사되는 음장의 측정값은 켜기형 무한평면 표면으로부터 임의의 거리에 있는 청음기에서 측정된 반사음장의 그것과 같다.

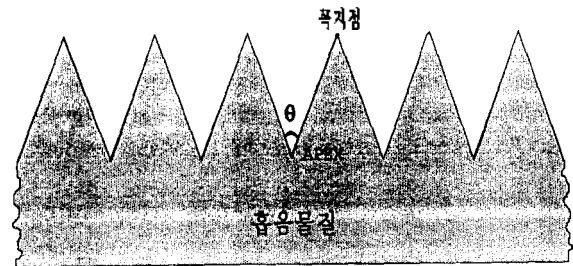


그림 1. 무한히 큰 켜기형 흡음판의 단면도 일부

그림 1과 같은 켜기형 무한평면에 평면파가 입사할 때 켜기형 표면에 의한 반사음장은 평면파가 그림 2와 같이 무한히 큰 켜기형 반사면에 입사할 때 생기는 그것과 같다고 가정할 수 있다. 그림 2와 같은 경우에 반사음장은 Back and Chang[7]에 의한 영상방법을 적용하면 계산 가능하다. 이 때 반사계수는 켜기정점(apex)에서 계산된 음장값에서 입사한 음장의 값을 빼면 반사음장의 크기가 되므로 반사계수를 계산 할 수 있다.

III. 수중음파 흡수타일 설계 및 제작

흡음타일은 물과 음향 특성임피던스가 비슷하고 내구성, 내수성이 우수하며 비탄성에 의한 음파에너지 손실이

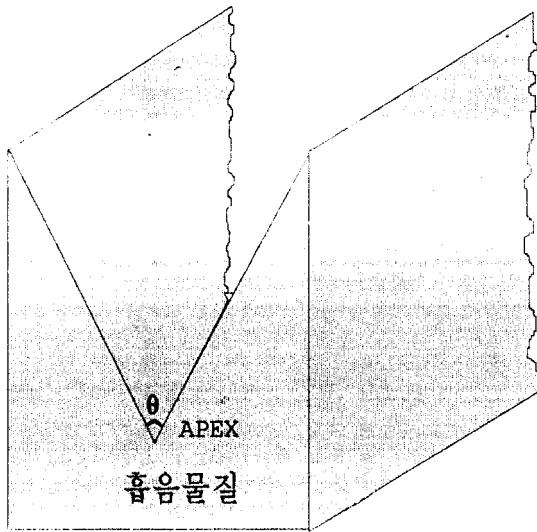
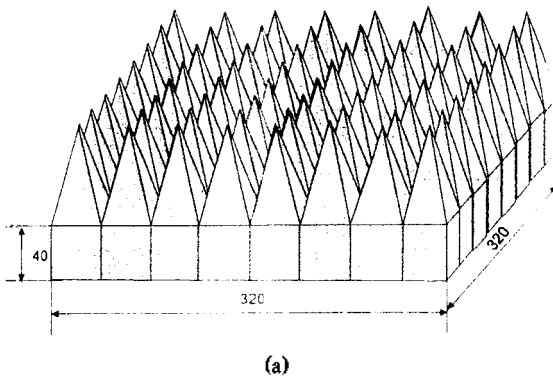
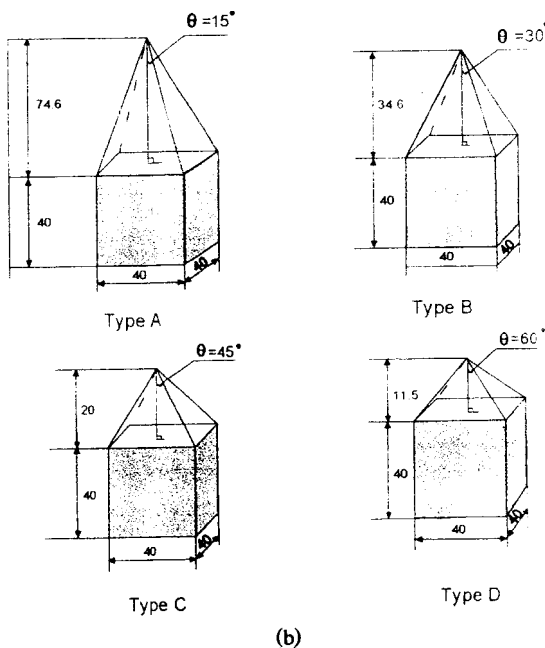


그림 2. 음장 계산을 위한 쇄기모형



(a)



(b)

그림 3. 흡음타일과 흡음판의 형태 (a)흡음판의 외부형태 (b)쇄기 폭지각이 다른 4종류의 흡음타일 형태

우수한 부틸고무에 산란에 의한 흡음효과를 높이기 위해 모래와 톱밥을 배합하였다. 흡음타일의 형태는 그림 3.(b)와 같이 쇄기각이 다른 4종류의 9면체이다.

흡음판은 제작된 4종류의 흡음타일들을 가로 32cm×세로 32cm×두께 4cm로 제작된 알루미늄 틀에 타일의 종류별로 그림 3.(a)와 같이 조밀하게 끼워 넣어 만들었다. 여기서 흡음타일의 물리적 특성을 변화시킬 수 있는 접착제는 사용하지 않았다. 흡음타일 제작시 고무 종류와 특성, 첨가물질과 그 구성비, 입자 크기, 프레스 가황(加黃)시간, 온도, 압력등은 흡음 특성을 좌우하는데 큰 영향을 준다. 제작한 흡음타일의 물질은 생고무와 혼합하여 사용한 배합제로서 고무의 경도를 높여주는 카본블랙, 고무의 탄성과 저항력을 크게 하고 용매에 용해되지 않게 하는 황동이 있다. 그리고 부틸고무는 화학적으로 안정하여 가황이 늦는데 충분한 가황을 하기 위해서는 장시간 동안 고온과 강력한 가황촉진제를 필요로 한다. 가황시간을 단축하고 온도를 낮춰 가황촉진 효과를 증가시키는 가황촉진제로서는 양호한 가황 평탄성(加黃平坦性)을 내는 티아졸계(Thiazoles)인 MBTS, CBS와 저온에서 비교적 평탄가황을 얻을 수 있고 내열(耐熱), 내노화성(耐老化性)이 좋은 티우람계(Thiuram)인 TMTD를 사용했고 가황촉진제를 더욱 활성화시키는 강화촉진조제로서 산화아연(ZnO)과 스테아린산(stearic acid)을 추가하여 일정비율로 배합하였다. 흡음타일은 생고무에 이와 같은 약품을 일정 비율로 배합하여 만드는 부틸고무와 직경 1mm 이하의 모래, 소나무 재질의 톱밥을 14:5:1의 질량비율로 혼합하여 제작하였다. 배합된 재료들을 충분히 혼합하고 으개는 로울러 작업을 거쳐 나온 고무 혼합물을 금형 규격별로 절단하고 금형내에 넣어 150톤 프레스로 가공하였는데 이때 작동 온도와 압력, 시간은 각각 155°, 130psi, 30분이었다. 그리고 X선 촬영결과 혼합물의 재료들은 균일하게 분포되어 있었다.

IV. 흡음타일의 음파 특성 측정 및 고찰

4.1 실험장치

실험장치는 그림 4와 같이 Tone Burst파를 발생시킬 수 있는 신호발생기 HP3314A, 전력증폭기 B&K2713, 무지향성 특성을 갖는 송음기 B&K8104와 청음기 B&K8103, 수신된 신호를 증폭하는 정밀조정 증폭기 B&K2650, 측정 증폭기 B&K2610와 오실로스코프 HP54601B 등으로 구성하였다.

4.2 실험 방법

그림 4에서 보는 바와 같이 수조(길이 180cm×폭 150cm×높이 150cm)에서 송음기, 청음기와 흡음판을 수조 중심 1.1m중 50cm의 깊이애 수면과 평행하게 수직으로 내리고 흡음판의 가장자리 효과를 줄이기 위하여 청음기를 흡음판 중앙에 위치하도록 하였다. 또한 수조 경계면에

서 반사되는 음파로 인한 간섭현상을 피하기 위해 청음기가 음원으로부터 수신한 신호와 흡음판에서 수신한 반사된 신호를 구분할 수 있는 범위내에서 청음기를 흡음판에 최대한 접근시켰다. 그리고 기포에 의한 산란현상을 없애기 위해 흡음판 표면에 생긴 기포를 제거하였다.

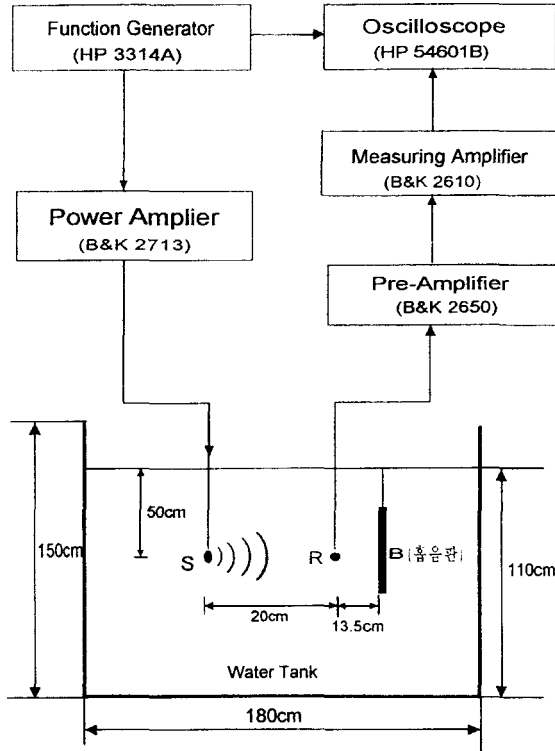


그림 4. 실험장비 배치도

물과 흡음타일의 음향 특성임피던스의 차이와 흡음타일의 흡수계수에 의해 발생하는 흡음판의 반사계수는 제작된 흡음판을 그림 4의 B에 오도록 고정시킨 후 10kHz~30kHz 주파수 범위에서 5kHz 간격으로 측정하였다. 반사계수 측정시 청음기와 썩기형 흡음판의 거리는 썩기정점을 기준으로 측정하였다.

제작된 4개의 썩기형 흡음판에 대한 반사계수를 측정하기 위하여 반사계수가 -0.99인 이중유리판을 이용하였다. 이중유리판의 크기는 45cm×45cm×1.1cm이며, 구조는 유리-공기-유리의 세 층으로 되어 있고, 유리의 두께는 3mm, 공기층의 두께는 5mm이다. 흡음판의 반사계수는 동일한 실험조건하에서 측정한 흡음판과 이중유리에 의한 반사신호를 측정하여 그 음압비율로써 구하였다.

음파가 흡음타일 내부로 투과시 투과파의 음파에너지 손실 정도를 알아보기 위하여 10kHz에 대한 흡음타일의 투과계수와 흡수계수를 측정하였다. 그 계수들은 흡음타일의 양쪽 표면에 송음기와 청음기를 배치하고 송음기와 청음기의 음압을 측정하여 구하였다.

4.3 측정 결과 및 고찰

제작한 흡음타일의 물리적 특성을 측정한 결과는 밀도 1,105kg/m³, 경도 50Hs(shoreA), 음속 540m/s, 음향 특성 임피던스 0.597×10⁶rayls, 10kHz에 대한 감쇠계수는 433dB/m이었다.

표 1.(a)는 4종류의 흡음판의 정면 즉, 썩기표면에 대한 반사계수를 나타내며, 표 1.(b)는 평면인 4종류의 썩기형 흡음판 후면에서 측정한 반사계수를 나타낸다. 정면에서 측정한 그 반사계수는 흡음타일의 썩기꼭지각이 30°일 때 최소값, 120°일 때 최대값을 갖고, 썩기각이 증가할수록 반사계수가 증가됨을 알 수 있다. 평면인 흡음판 후면에서 측정한 모든 반사계수는 흡음판 정면에서 측정한 값보다 같거나 높으며, 흡음판의 종류에 무관하게 거의 일정한 값을 보여 주고 있다. 그리고 본 실험에서 사용한 음원의 주파수 10kHz~30kHz 범위에서 같은 종류의 흡음판에 대한 반사계수는 사용한 주파수와 무관하였다.

표 2는 썩기형태의 흡음판에 대하여 영상방법(기)으로 반사계수를 계산한 수치모델 값이다. 표 2.(a)는 썩기형 흡음판의 재료가 흡수계수 a=0인 무손실(lossless)일때의 반사계수이고, 표 2.(b)는 흡수계수 a=433(dB/m)인 손실(lossy) 재료일 경우의 반사계수를 나타낸다.

표 2.(b)의 수치모델에 의한 계산값과 표 1.(a)의 측정값을 비교하면 썩기각이 30°인 타입A에서는 잘 일치하지만 60°인 타입B에서는 10%, 90°인 C에서는 22%, 120°인 D에서는 19%의 상대오차를 보이고 있다. 그림 5는 표 1과 표 2의 값을 그린 것인데 썩기각이 90°까지는 썩기각이 커짐에 따라 상대오차도 커지나 90°이상에서는 상대오차

표 1. 썩기형 흡음판의 반사계수 측정값

타일형태 주파수	A	B	C	D
10kHz	-0.18	-0.35	-0.39	-0.42
15kHz	-0.18	-0.34	-0.39	-0.42
20kHz	-0.18	-0.34	-0.39	-0.42
25kHz	-0.19	-0.35	-0.38	-0.43
30kHz	-0.18	-0.35	-0.39	-0.43

(a)청음기와 썩기정점의 거리가 13.5cm 일 때의 반사계수

타일형태 주파수	A	B	C	D
10kHz	-0.43	-0.45	-0.43	-0.43
15kHz	-0.44	-0.44	-0.44	-0.43
20kHz	-0.44	-0.46	-0.45	-0.45
25kHz	-0.43	-0.45	-0.43	-0.45
30kHz	-0.45	-0.45	-0.44	-0.44

(b)청음기와 흡음판 후면의 거리가 13.5cm 일 때의 반사계수

표 2. 수치모델에 의한 쐐기형 흡음판의 반사계수 계산값

타일형태 주파수	A	B	C	D
10kHz	-0.18	-0.40	-0.47	-0.48
15kHz	-0.18	-0.40	-0.47	-0.48
20kHz	-0.18	-0.40	-0.47	-0.48
25kHz	-0.18	-0.40	-0.47	-0.48
30kHz	-0.18	-0.40	-0.47	-0.48

(a) 흡수계수 $\alpha = 0$ dB/m일 때의 반사계수

타일형태 주파수	A	B	C	D
10kHz	-0.18	-0.39	-0.50	-0.52
15kHz	-0.18	-0.39	-0.50	-0.52
20kHz	-0.18	-0.39	-0.50	-0.52
25kHz	-0.18	-0.39	-0.50	-0.52
30kHz	-0.18	-0.39	-0.50	-0.52

(b) 흡수계수 $\alpha = 433$ dB/m일 때의 반사계수

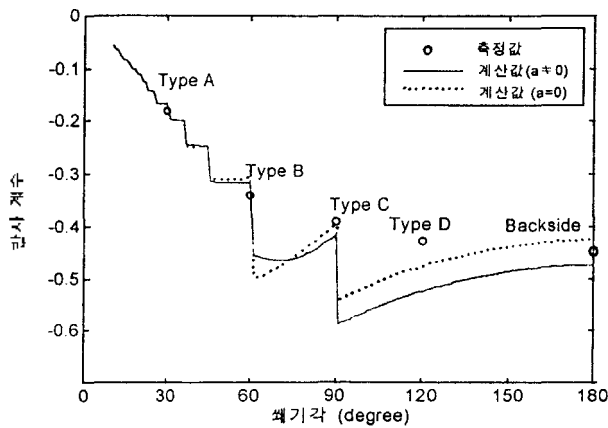


그림 5. 쐐기형 흡음판에 대한 반사계수의 측정값과 영상방법에 의한 수치모델의 계산값

가 다소 감소함을 알 수 있다. 이러한 상대오차가 발생한 원인은 쐐기각이 60° 이상에서 발생하는 영상방법에 의한 수치모델의 제한점으로 판단된다. 표 2에서도 반사계수의 주파수 의존성은 없지만 흡수계수에 대한 의존성은 있음을 알 수 있다.

흡음타일의 음압 투과계수는 10kHz 주파수에 대해 측정된 결과 0.0625였다. 이것은 흡음판을 투과한 음파 에너지가 대부분 흡음판 내부에서 흡수된다는 것을 의미한다.

흡음판의 반사신호는 주파수, 흡음판의 종류에 관계없이 입사신호에 대해 180°의 위상차를 나타냈다. 이것은 흡음판의 음향 특성임피던스가 물의 그것보다 적음을 의

미한다.

V. 결 론

동일한 재질로 쐐기각이 다른 4종류의 흡음타일을 설계, 제작하여 흡음판을 제작하고 그 물리적 특성을 측정 한 후 각각의 흡음판에 대한 음파 반사계수를 측정하였다. 흡음판의 정면에서 측정된 반사계수는 실험한 4개종 쐐기각이 30°인 흡음판이 최소값을, 120°인 흡음판이 최대값을 가졌다. 또한 쐐기각이 증가할수록 그 반사계수는 증가하였다.

쐐기각이 동일한 같은 종류의 흡음판에서 측정된 반사계수는 10kHz~30kHz의 주파수 범위에서는 주파수에 무관하게 나타났다. 그리고 흡음판의 반사신호는 주파수, 흡음판의 종류에 관계없이 입사신호에 대해 180°의 위상차를 나타냈다. 평면인 흡음판의 후면에서 측정된 반사신호는 흡음판의 종류와 타입에 관계없이 일정하게 측정되었다.

참 고 문 헌

1. W.P. Mason and F.H. Hibbard, "Absorbing Media for Underwater Sound Measuring Tank and Baffles," J. Acoust. Soc. Am. 20(4), pp. 476-482, 1948.
2. V.P. Benedetti, "Comment on Insulcrete and Aluminum," J. Acoust. Soc. Am. 51(1), p. 416, 1972.
3. W.S. Cramer and T.F. Johnston, "Underwater Sound Absorbing Structures," J. Acoust. Soc. Am. 28(3), pp. 501-502, 1956.
4. W.J. Toulis, "Simple Anechoic Tank for Under-water Sound," J. Acoust. Soc. Am. 28(6), pp. 1221-1222, 1956.
5. P. Tamarkin and R.K. Eby, "Tank Wall Lining for Underwater Sound Use," J. Acoust. Soc. Am. 27(4), pp. 692-698, 1955.
6. R.J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill Company, USA, 1983, p. 321.
7. Chilki Baek, Jee-Won Chang, "The Acoustic Pressure in a Wedge-Shaped Medium with Absorbing Material Boundaries," 한국음향학회지, Vol. 8(6), pp. 26-32, 1989.
8. 윤석왕, 박광준, 이병수, "무반향 구조의 설계, 제작 및 음향 특성," 성균관대학교 논문집 38(2), pp. 249-263, 1987.
9. L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, New York, 1981, pp. 124-139.
10. L.M. Brekhovskikh, Waves in Layered Media, 2nd., Academy Press Inc., New York, 1980, p. 10.
11. Robert J. Bobber, Underwater Electroacoustic Measurements, Naval Research Lab. 1970, pp. 166-168.

▲강 성 옥(Sung-oug Kang) 1968년 9월 29일생



1990년 3월:해군사관학교(이학사)
1994년 1월:제1전단 병기과장
1997년 2월:군사과학대학원 해양공
학과(이학석사)

▲류 기 상(Ki-sang Lyu) 1953년 3월 5일생



1975년 3월:해군사관학교(이학사)
1978년 2월:서울대학교 물리학과(이
학사)
1981년 8월:서울대학교 물리학과(이
학석사)
1988년 10월:Lehigh University(이학
박사)
현재:해군사관학교 물리학과 교수

▲홍 우 영(Woo-young Hong) 1960년 5월 9일생



1982년 3월:해군사관학교 전자공학과
(이학사)
1985년 2월:연세대학교 전자공학과
(공학석사)
1991년 10월:University of Minneso-
ta(공학박사)
현재:해군사관학교 전자공학과 교수

▲백 칠 기(Chil-ki Baek) 1949년 8월 26일생



1972년 2월:해군사관학교(이학사)
1975년 2월:서울대학교 물리학과(이
학사)
1984년 3월:Naval Postgraduate School
(이학석사)
1992년 12월:해군본부 작전참모부 수
중처장대리
1994년 2월:부산수산대학교 물리학

▲송 영 일(Yeong-if Song) 1956년 1월 3일생



1978년 3월:해군사관학교(이학사)
1981년 2월:서울대학교 해양학과(이
학석사)
1995년 8월:서울대학교 해양학과(이
학박사)
현재:해군사관학교 해양학과 교수

과(이학박사)

현재:해군사관학교 물리학과 교수