

알베리히 무반향 코팅재 효과를 고려한 잠수함의 음향 표적강도 해석

권현웅* · 홍석윤** · 김화목*** · 송지훈****†

* 서울대학교 해양시스템공학연구소, ** 서울대학교 조선해양공학과, *** 방위사업청 함정사업부 전투함사업팀, **** 전남대학교 조선해양공학전공

Analysis of Acoustic Target Strength for the Submarine with Alberich Anechoic Coating Effects

Hyun-Wung Kwon* · Suk-Yoon Hong** · Hwa-Muk Kim*** · Jee-Hun Song****†

* Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University Seoul 151-742, Korea

** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University Seoul 151-742, Korea

*** Department Combatant Ships Project Team, Naval Ship Program, Defense Acquisition Program Administration Seoul 140-833, Korea

**** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University Yeosu 550-749, Korea

요 약 : 음향 표적강도는 잠수함의 생존성을 보장하기 위한 중요한 설계 고려 요소이다. 잠수함이 대형화 됨에 따라 음향 표적강도 저감을 위한 대표적인 방법으로 알베리히 무반향 코팅재가 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 규칙적으로 배열된 알베리히 무반향 코팅재 단위 셀에 대해 유한요소법을 이용하여 음압 투과반사 계수를 해석하였다. 해석 결과는 문헌의 실험결과와 비교 검증하였다. 또한, 잠수함의 음향 표적강도 계산시 해석된 코팅재의 입력 임피던스를 이용하여 반사계수를 고려하였다. 마지막으로 알베리히 무반향 코팅재 적용에 따른 음향 표적강도 감소 효과(Case 1: 10dB, Case 2: 6dB)를 확인하였다.

핵심용어 : 음향 표적강도, 알베리히 무반향 코팅재, 유한요소법, 투과반사계수, 키르히호프 근사법

Abstract : Acoustic target strength (TS) is one of the most considerable design elements for survival capacities of the submarine. It needs to reduce acoustic TS that submarines are getting larger and larger, Alberich anechoic coatings are widely used as the representative method. In this paper, the finite element method (FEM) is used to analyze the reflection and transmission coefficients of Alberich anechoic coatings, which have periodic unit cells. The FEM results are compared with experimental results in the literature. Moreover, acoustic TS for the submarine is analyzed by using that result. Finally, it is shown that acoustic TS (Case 1: 10dB, Case 2: 6dB) are reduced due to the use of Alberich anechoic coatings.

Key Words : Acoustic target strength, Alberich anechoic coatings, Finite element method, Reflection and transmission coefficients, Kirchhoff approximation

1. 서 론

음향 표적강도는 잠수함의 생존성을 보장하기 위한 중요한 설계 고려 요소로써 음향 산란체인 표적으로 입사된 음파의 강도(Intensity)와 반사된 음파의 강도의 비로 표현되며 기하학적 형상에 의해 대변된다. 잠수함이 대형화 됨에 따라 음향 표적강도를 설계 단계부터 예측하여 목표치를 달성

하고 더 나아가 이를 줄이기 위한 노력이 수행되고 있다.

평판, 구, 실린더 등의 대표적인 기하학적 형상에 대한 음향 표적강도는 이론적으로 이미 알려져 있으며(Urick, 1983) 보다 복잡한 형상에 대해서는 수치적인 방법으로 유한요소법(FEM; Finite Element Method)과 경계요소법(BEM; Boundary Element Method), 키르히호프 근사법(Kirchhoff Approximation) 등이 이용되고 있다(Schneider et al., 2003). 음향 표적강도를 고주파수에서 해석시 수치해석 측면에서 상대적으로 계산량과 오차가 적은 키르히호프 근사법이 일반적으로 널리 사

* First Author : khw1@snu.ac.kr, 02-880-7331

† Corresponding Author : jhs@jnu.ac.kr, 061-659-7156

용되고 있다(Schneider et al., 2003). 국내에서도 Boo(2001), Choi et al.(2005)이 잠수함 형상에 대해 물리광학을 기초로 한 키르히호프 근사법을 적용하여 단순반사에 대한 표적강도 해석을 수행하였으며, Kim et al.(2005)은 가시면(Visual surface) 분할 알고리즘을 이용하여 다중반사 효과를 고려하였다.

그러나 보다 정확한 음향 표적강도 해석을 위해서는 해석 대상의 재질에 대한 반사계수가 고려되어야 하며 특히 실제 잠수함의 경우 음향 표적강도 저감을 위해 음향 무반향 코팅재를 부착하므로 이를 고려한 표적강도의 해석이 이루어져야 한다. 음향 표적강도를 줄이기 위한 대표적인 무반향 코팅재는 소위 알베리히(Alberich) 무반향 코팅재로 불리는 형태로 코팅재 내부 기공(Air cavity)이 일정한 형상을 갖고 규칙적으로 배열되어 있다. 알베리히 무반향 코팅재는 기공에 의한 코팅재 내부의 음파 산란 및 기공의 공진효과에 의해 특정 주파수에서의 흡음 성능을 증대시키려는 목적으로 개발되었으며 이에 대한 연구는 Oberst(1957)에 의해 시작되었다. 이후 해석적인 방법에 대한 연구가 진행되었고 근래에 들어 코팅재 내부의 기공 형상을 고려한 수치적인 해석 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 Achenbach et al.(1988)은 경계요소법을 적용하였으며 Hennion and Decarpigny(1991), Easwaran and Munjal(1993), Cai et al.(2006), Panigrahi et al.(2008) 등은 유한요소법을 이용하여 코팅재 음향 성능 해석을 수행하였다.

본 논문에서는 잠수함 음향 표적강도 감소를 위한 방법으로 적용되는 알베리히 무반향 코팅재를 유한요소법을 이용하여 해석하였고, 기공의 크기 및 수압에 따른 반향음 감소(ER; Echo Reduction) 효과를 분석하였다. 또한 잠수함 음향 표적강도 해석시 이를 반사계수로써 고려하여 알베리히 무반향 코팅재 적용에 따른 음향 표적강도 감소효과를 확인하였다.

2. 알베리히 무반향 코팅재

2.1 해석방법론

Fig. 1은 알베리히 무반향 코팅재의 개념도를 나타낸다. 코팅재는 동일한 형상의 기공이 일정한 간격으로 규칙적으로 배열되어 있고 음파가 평면파로 수직 입사한다고 가정한다. 코팅재의 해석 대상은 단위 셀(Unit cell)로 한정하며 단위 셀의 주기성 및 대칭성에 대한 경계조건은 다음과 같다 (Easwaran and Munjal 1993).

$$u_x(-a, y, z) = u_x(a, y, z) = 0 \quad (1)$$

$$u_y(x, -b, z) = u_y(x, b, z) = 0 \quad (2)$$

$$u_x(x, -b, z) = u_x(x, b, z) \quad (3)$$

$$u_y(-a, y, z) = u_y(a, y, z) \quad (4)$$

여기서, u_x, u_y 는 각각 x 와 y 방향의 변위, $2a$ 와 $2b$ 는 단위 셀의 가로, 세로의 길이를 의미한다.

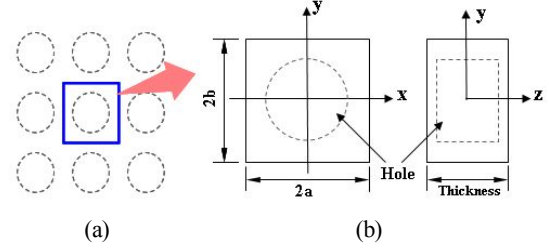


Fig. 1. Unit cell of Alberich lining: (a) front view of total Alberich anechoic coating and (b) front and side view of unit cell.

단위 셀의 전후에는 적당한 두께로 유체를 유한요소 모델링하며 후면부에는 반향음이 발생되지 않도록 무반향 경계 조건 처리를 한다.

입사파 진행방향의 입력 임피던스(Input Impedance, ζ_{in})는 다음과 같다.

$$\zeta_{in} = \frac{p_{sd}}{v_z} = \frac{p_{sd}}{j\omega u_z} \quad (5)$$

여기서, p_{sd} 는 입력영역에서의 정재파, v_z 은 z 방향의 평균 입자 속도, ω 는 각주파수, u_z 는 z 방향의 평균 변위를 의미한다.

구해진 입력 임피던스로부터 음압 반사계수(R)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \frac{\zeta_{in} - Z_c}{\zeta_{in} + Z_c} \quad (6)$$

여기서, Z_c 는 유체의 특성 임피던스를 의미한다.

음압 반사계수로부터 반향음 감소도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ER = 20 \log_{10} \left| \frac{p_{in}}{p_{re}} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{R} \right| \quad (7)$$

여기서, p_{in} 는 입사파 음압, p_{re} 는 반사파 음압을 의미한다.

한편, 음압 반사계수로부터 음압 투과 계수(T)는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$p_{sd} = p_{in} + p_{re} = p_{in}(1 + R) \quad (8)$$

$$T = \frac{p_{tr}}{p_{in}} = \frac{p_{tr}}{p_{sd}}(1+R) \quad (9)$$

여기서, p_{tr} 는 투과파 음압을 의미한다.

2.2 해석 모델의 검증

코팅재 유한요소 해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하였다. Case 1에서는 기공이 없는 경우에 대해 투과/반사 계수를 해석에 의한 값과 비교 검증 하였으며, Case 2에서는 기공이 실린더 형상인 전형적인 알베리히 무반향 코팅재에 대해 유한요소 해석결과와 문헌의 실험결과를 비교 검증하였다.

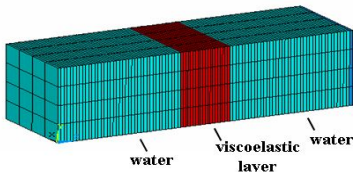


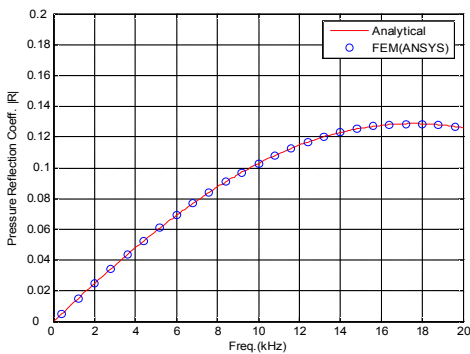
Fig. 2. FEM Model for viscoelastic plate immersed in water.

2.2.1 Case 1 : 기공이 없는 경우

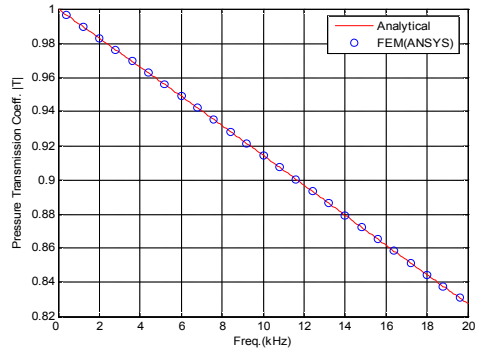
해석 대상은 점탄성 재료의 무한 평판으로 전·후면에는 해수로 접수되어 있으며 유한 요소 모델은 Fig. 2와 같다. 평판의 물성치는 Table 1과 같으며, 해수의 물성치는 밀도(ρ)는 $1000kg/m^3$, 음파속도(c)는 $1489m/s$ 이다. 기공이 없는 경우의 코팅재의 음압 투과/반사계수 해석결과는 Fig. 3과 같으며 해석에 의한 값과 유한요소 해석 결과와 일치된 결과를 보여주고 있다.

Table 1. Material property for viscoelastic layer

Young's modulus (E)	Density (ρ)	Poisson's ratio (ν)	Loss factor (η)	Thickness (d)
$1.4 \times 10^8 N/m^2$	$1100kg/m^3$	0.49	0.23	20mm



(a) Reflection coefficients



(b) Transmission coefficients

Fig. 3. Pressure reflection and transmission coefficients of an infinite viscoelastic plate immersed in water.

2.2.2 Case 2 : 기공이 있는 경우

해석 대상은 기공이 실린더 형상으로 규칙적으로 배열된 점탄성 재료의 알베리히 무반향 코팅재로 단위 셀 및 기공의 크기는 Fig. 4와 같으며 물성치는 Table 1과 동일하다. 단위 셀 내부에서의 대칭 경계조건을 고려하여 Fig. 5와 같이 유한요소 모델링을 하였다. Fig. 6에서 보듯이 음압 투과 계수에 대한 유한요소 해석결과와 실험값이 일치하는 결과를 얻었으며 이로써 유한요소법에 의한 알베리히 무반향 코팅재의 음향 성능해석이 타당함을 입증해 주었다.

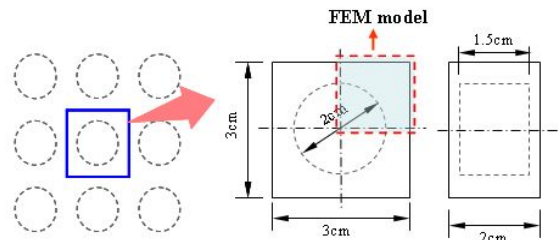


Fig. 4. Dimensions of unit cell and air cavity.

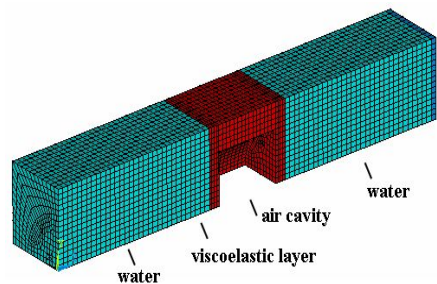


Fig. 5. FEM model for Alberich anechoic coating immersed in water.

알베리히 무반향 코팅재 효과를 고려한 잠수함의 음향 표적강도 해석

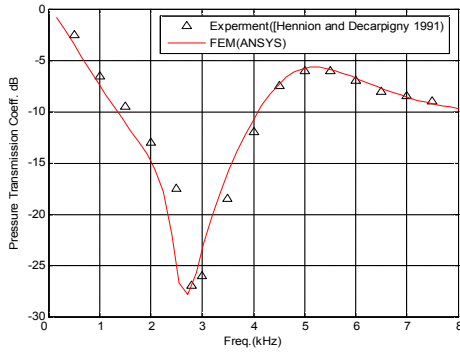


Fig. 6. Pressure transmission coefficient of Alberich anechoic coating immersed in water.

2.3 기공 크기에 따른 변화 분석

Case 2의 알베리히 무반향 코팅재가 선체에 부착되어 있는 경우에 코팅재 내부 기공 크기에 따른 음향 성능 변화를 분석하기 위해 Fig. 7과 같이 유한요소 모델링을 하였다. 잠수함의 압력선체를 모사하여 선체 재질은 Table 2와 같이 강철로 하였으며 후면부의 유체는 공기로 물성치를 부여하였다. 공기의 물성치는 밀도(ρ)는 1.12kg/m^3 , 음파속도(c)는 340m/s 이다.

Table 2. Material property for steel plate

Young's modulus (E)	Density (ρ)	Poisson's ratio (ν)	Loss factor (η)	Thickness (d)
$2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$	7800kg/m^3	0.3	0.001	25mm

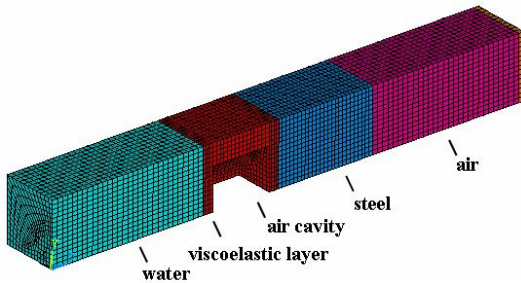


Fig. 7. FEM model for Alberich anechoic coated plate.

Fig. 8의 해석결과에서 보듯이 기공의 크기가 작아질수록 공진에 의한 최대 반향음 감소 주파수가 고주파수 대역으로 이동하며 동시에 기공이 없는 경우로 수렴함을 확인하였다. 이로써 특정 주파수 대역에서 최대 반향음 감소 효과를 얻기 위해서는 적절한 기공 크기의 결정이 필요하며 관심 주파수가 여럿인 경우에는 다양한 크기의 기공 조합 및 배열이 필요하다.

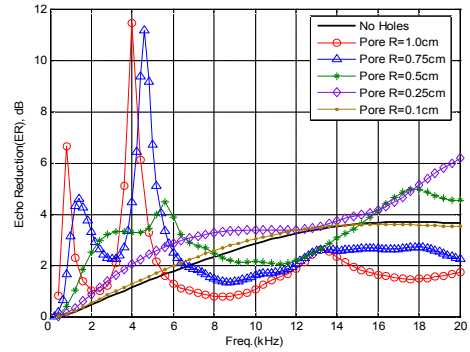


Fig. 8. Echo Reduction(ER) curves for different pore sizes on Alberich lining.

2.4 수압에 따른 변화 분석

잠수함은 수중에서 운용되므로 심해에서는 유체 정압을 받게 된다. 따라서 실제 잠수함 운용시와 유사한 환경을 구현하기 위해 유체정압이 작용할 경우 코팅재의 변형을 고려하였다. 본 논문에서는 유체정압에 의해 코팅재의 형상만 변형되며 코팅재의 물성치는 동일하다고 가정하였다. 해석 대상은 앞서 해석된 모델 Fig. 7과 동일하며 기공의 반지름은 1.0cm 로 하였다. 먼저 코팅재의 전면부에 수압을 분포하중으로 주고 선체 후면은 고정하여 정적 구조 해석을 수행하였으며 이후 해석 절차는 앞의 방법론과 동일하다. Fig. 9는 수압으로 인한 기공의 변형 형상을 보여준다.

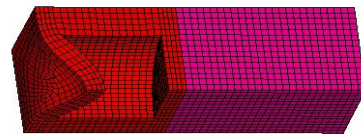


Fig. 9. Deformed shape of unit cell under hydrostatic pressure (1.0MPa) in deep water.

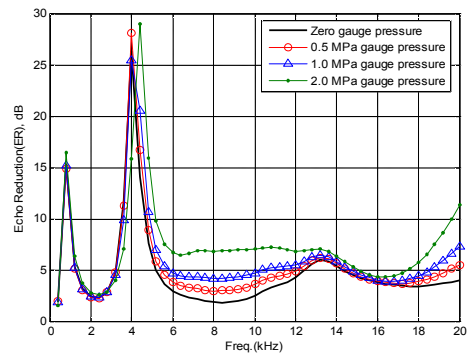


Fig. 10 Echo Reduction for different static pressure on Alberich anechoic coating (Radius of air cavity : 1.0cm).

Fig. 10은 수압 변화에 따른 코팅재의 반향음 감소도 변화를 나타내고 있다. 수압의 증가에 따라 반향음 감소효과가 증가하는 경향을 보이며 이로써 코팅재 해석에 있어 수압의 영향이 적지 않음을 보여주고 있다.

3. 알베리히 무반향 코팅재 효과를 고려한 잠수함 모델의 음향 표적강도 해석

2장에서 알베리히 무반향 코팅재의 유한요소 해석을 통해 음압 반사계수를 구하였다. 3장에서는 잠수함 모델에 대해 알베리히 무반향 코팅재가 부착되었을 때의 음향 표적강도를 해석하였다.

3.1 반사계수의 적용

음향 산란체의 단면적을 임의의 다각형으로 나누어 각각의 합으로 나타내고 음압 반사계수를 고려해 주면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{\sigma}_{total} \approx \sum_n R \sqrt{\sigma}_n \quad (10)$$

여기서, R 은 음압 반사계수를 의미한다.

입사각에 따른 반사계수는 아래와 같이 표현된다.

$$R(\theta) = \frac{\zeta_{in} - Z_c / \cos\theta}{\zeta_{in} + Z_c / \cos\theta} \quad (11)$$

여기서, ζ_m 은 수직입사에 대한 입력 임피던스(Input Impedance), Z_c 는 유체의 특성 임피던스, θ 는 입사각(입사파와 평판의 법선벡터와의 사이각)이다. 따라서, 알베리히 무반향 코팅재의 수직입사시 입력 임피던스 값을 식(11)에 대입하면 음향 표적강도 해석시 반사계수로써 무반향 코팅재의 효과를 고려해 줄 수 있다.

3.2 해석 모델

해석 대상 구조물은 Fig. 11과 같이 길이는 50m, 원통형 몸체의 중앙단면 반지름은 3.43m, 최고 높이는 9.33m인 잠수함 모델로 측면의 수직방향으로 20km에서 정중앙을 0°로 하여 -89°에서 +89°까지 송수신부가 동일한 단상태로 해석을 수행하였다. 코팅재 모델은 Fig. 7과 동일한 알베리히 무반향 코팅재로 구조물 전체에 부착되었다고 가정하였고 ‘해수-코팅선체-공기’의 환경을 적용하였다.

Case 1에서는 코팅재 내부 기공의 반지름을 1.0cm, 수압을 1.0MPa로 적용하였으며 해석 주파수는 코팅재의 최대

반향음 감소효과를 보기위해 공진주파수인 4kHz로 하였다. Case 2에서는 기공의 반지름을 0.75cm, 수압을 2.0MPa로 적용하였으며 해석 주파수는 기공의 공진주파수와 인접한 5kHz로 해석을 수행하였다.

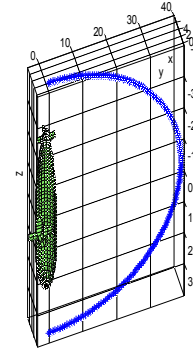


Fig. 11. Submarine model and source/receiving position.

3.3 해석 결과

3.3.1 Case 1

해석결과는 Fig. 12와 같으며 음파가 잠수함 모델의 측면에서 수직 입사(0°)할 때 예상대로 음향 표적강도가 가장 높게 나타났고 ±20° 부근에서는 브릿지(Bridge)의 영향, 양 끝각에서는 함수 및 함미의 영향으로 입사각과 수직을 이루는 구조물이 존재함에 따라 음향 표적강도 수치가 상승하였다. 알베리히 무반향 코팅재를 부착하였을 경우에는 표적강도가 전체적으로 약 10dB 감소하는 결과를 주었다.

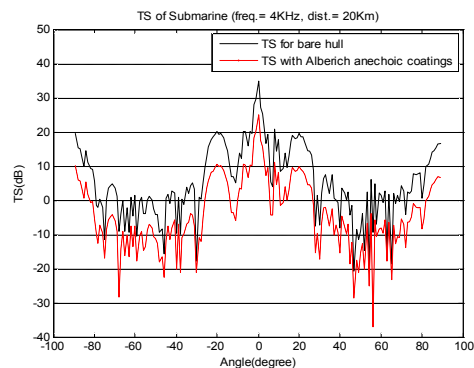


Fig. 12. Comparison of the bare hull and Alberich anechoic coated hull for TS calculation of the submarine model (Case 1).

3.3.2 Case 2

Fig. 13에서 보듯이 해석결과가 Fig. 12와 유사한 경향을 나타내고 있다. 알베리히 무반향 코팅재를 부착하였을 경우

음향 표적강도가 전체적으로 약 6dB 감소하여 잠수함의 음향 표적강도 저감을 위해서는 무반향 코팅재의 부착이 필요함을 확인하였다.

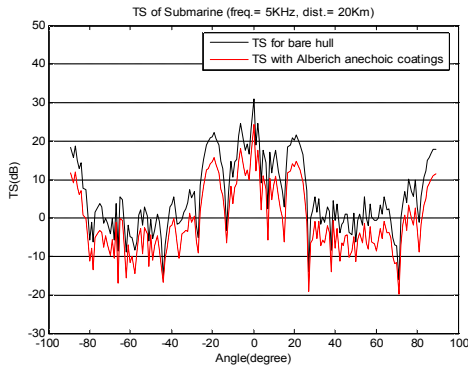


Fig. 13. Comparison of the bare hull and Alberich anechoic coated hull for TS calculation of the submarine model (Case 2).

4. 결론

본 논문에서는 음향 표적강도 감소 목적으로 잠수함 선체에 부착되는 대표적인 코팅재인 알베리히 무반향 코팅재에 대해 유한요소법을 이용하여 음압 투과/반사 계수를 해석 및 문헌의 실험결과와 비교 검증하였고 기공의 크기 및 수압에 따른 반향음 감소도를 분석하였다. 또한 키르히호프 근사법을 이용하여 원거리장에서 잠수함 모델의 음향 표적강도 계산시 해석된 코팅재의 입력 임피던스를 이용하여 반사계수를 고려함으로써 코팅재 효과를 적용하였고 이에 따른 표적강도 감소 효과를 확인하였다.

향후에는 알베리히 무반향 코팅재 내부 기공의 다양한 형상 및 다중 배열에 따른 공진 주파수 대역의 조절, 잠수함 선체 코팅재 배치 위치에 따른 효과 분석 등의 추가 연구 수행이 요구된다.

후 기

본 연구는 차세대함정첨단함형 특화연구실의 지원으로 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Achenbach, J. D., C. Y. Lu and M. Kitahara(1988), 3-D reflection and transmission of sound by an array of rods, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 125, pp. 463-476.
 [2] Boo, S. Y.(2001), Computation of RCS and TES of Curved

Objects Using a Curved-Patch Physical Optics Method, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 38, No. 1, pp. 62-71.
 [3] Cai, C., K. C. Hung and M. S. Khan(2006), Simulation-based analysis of acoustic absorbent lining subject to normal plane wave incidence, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 291, pp. 656-680.
 [4] Choi, Y. H., K. C. Shin, J. S. You, J. S. Kim, W. H. Joo, Y. H. Kim, J. H. Park, S. M. Choi and W. S. Kim(2005), Numerical Modeling and Experimental Verification for Target Strength of Submerged Objects, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 64-70.
 [5] Easwaran, V. and M. L. Munjal(1993), Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: A finite element approach, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 93, No. 3, pp. 1308-1318.
 [6] Hennion, A. C. and J. N. Decarpigny(1991), Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic elastic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 90, pp. 3356-3367.
 [7] Kim, K. H., D. S. Cho and J. C. Kim(2005), High Frequency Acoustic Scattering Analysis of Underwater Target, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 42, No. 5, pp. 528-533.
 [8] Oberst, H.(1957), Resonant sound absorbers, in *Technical aspects of sound*, edited by E. G. Richardson, Elsevier, Amsterdam, Chap. 7, pp. 287-327.
 [9] Panigrahi, S. N., C. S. Jog and M. L. Munjal(2008), Multi-focus design of underwater noise control linings based on finite element analysis, *Applied Acoustics*, Vol. 69, pp. 1141-1153.
 [10] Schneider, H. G., R. Berg, L. Gilroy, I. Karasalo, I. MacGillivray, M. T. Morshuizen and A. Volker(2003), Acoustic Scattering by a Submarine: Results from a Benchmark Target Strength Simulation Workshop, *ICSV10*, pp. 2475-2482.
 [11] Urlick, R. J.(1983), *Principles of underwater sound*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 291-327.

원고접수일 : 2013년 07월 16일
 원고수정일 : 2013년 08월 21일
 게재확정일 : 2013년 08월 28일