



# 음향창 박리에 따른 음향투과특성 연구

정병규<sup>†</sup>·강명환·서영수  
국방과학연구소

## Study on Sound Transmission Characteristics by the Delamination of Acoustic Window

Byung-Kyoo Jung<sup>†</sup>·Myunghwan Kang·Youngsoo Seo  
Agency for Defense Development

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper investigated sound characteristics by the delamination of an acoustic window. In detail, acoustic scattering and transmission characteristics on the delaminated acoustic window were estimated using an experimental and numerical approach. The experiment results showed that acoustic wave could lose its amplitude and take phase delay when it propagates the delaminated acoustic window. The numerical results showed that scattering phenomena occur on the delamination surface. The scattering characteristics presented differently according to the delamination size in the acoustic window. It also showed that transmitted sound distortion due to delamination could cause a direction detection error of SONAR by changing the position of the main lobe and the magnitude of the side lobe. In conclusion, the delamination has to be managed during the manufacturing process of acoustic windows.

**Keywords** : Acoustic window(음향창), Delamination(박리), Scattering(산란), Transmission(투과)

### 1. 서론

함정의 소나(sonar)는 수중음향신호를 송수신하여 수중 표적을 탐지, 식별하는 기능을 갖는다. 음파의 송수신을 담당하고 있는 소나 센서는 수중환경에 노출되어 있기 때문에, 탑재함의 다양한 운항조건에 대해 음향센서를 보호할 수 있는 소나돔(sonar dome)이 필요하다. 소나돔에서 음향 에너지가 투과하는 부분을 음향창(acoustic window)이라 하는데, 음향창은 구조적으로 충분한 강도 및 강성을 가져야하고 음향적으로 송수신되는 음향신호를 원활히 투과할 수 있어야 한다 (Sin et al., 2013).

최근의 음향창은 소나의 음향 성능 향상을 목적으로 대형화되고 있는 추세이다. 또한 음향창에 요구되는 구조/음향 성능을 향상시키기 위해 복합재와 고감쇠 재료로 구성된 다층구조로 설계되고 있다. 그러나 이는 제작공정을 복잡하게 하고 제작 면적을 증대시켜 제작 불량 확률을 높게 된다. 특히 대형 음향창의 경우, 복합재 섬유(fiber)에 레진(resin)을 함침시키는 공법(resin infusion process)을 적용하여 제작을 하는데, 해당 공법에서 레진의 유로가 잘못 형성되면 레진의 미함침 영역이 발생

하여 복합재 내부와 복합재와 고감쇠 재료 계면 간에 붙어있지 못하고 일부가 떨어지는 박리(delamination)가 발생한다. 음향창의 박리는 음향적으로 임피던스 차이를 발생시켜, 결과적으로 투과되는 음향에너지의 손실을 일으킨다.

음향창을 투과하는 과정에서의 에너지 손실 및 전파특성은 지금까지 많은 연구가 수행되었다 (Brekhovskikh, 1980; Skelton, 1997). 서영수 등 (Seo et al., 2011)은 다층 평판 모델의 동강성 행렬을 이용하여 다양한 입사각에 대한 음향창의 음향투과손실을 계산하고 시험결과와 비교하여 이론모델을 검증하였다. 정우진 등 (Jung et al., 2006)은 음향창을 이용한 측정 분석 방법 및 음향창 음향특성을 분석하였다. 그러나 이들 연구는 박리가 없는 정상적인 음향창을 대상으로 하였기에, 음향창 내부에 박리가 존재하는 경우에 대한 음향특성은 규명할 수 없다.

이에 본 논문에서는 음향창 박리에 의해 발생하는 음향 산란 특성 및 투과 특성에 대한 분석을 수행하였다. 실험적으로는 박리가 발생한 시편을 이용하여 투과압을 측정하고 박리에 따른 투과 특성을 분석하였다. 해석적으로는 음향창 면적 대비 박리 면적 비율을 변화시켜 가면서, 박리에 의한 산란, 투과 특성을 분석하였다. 또한 소나 센서의 방위탐지의 측면에서 음향창의 박리가 미치는 영향을 해석적으로 파악하였다.

## 2. 음향창 박리에 따른 음파 투과 메커니즘

음향창의 수중 음파 투과 메커니즘은 Fig. 1과 같다 (Joseph, 1999). 임의 각도를 가지고 음향창으로 입사된 종파(longitudinal wave) 형태의 파동은 고체(solid) 구조물인 음향창 표면에서

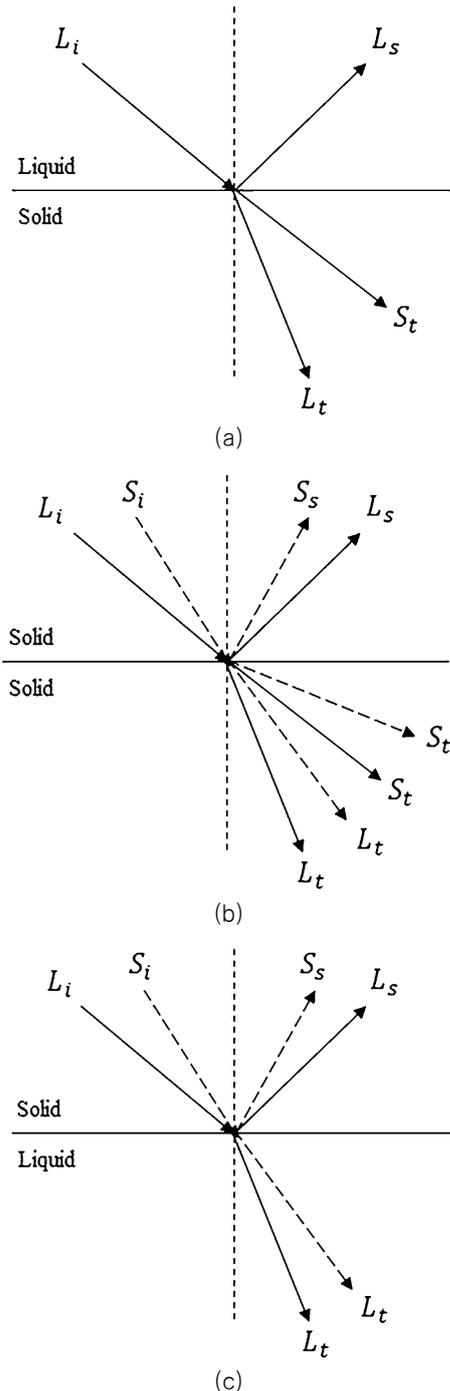


Fig. 1 Wave propagation phenomena at the interface between (a) liquid–solid media, (b) solid–solid media, (c) solid–liquid media

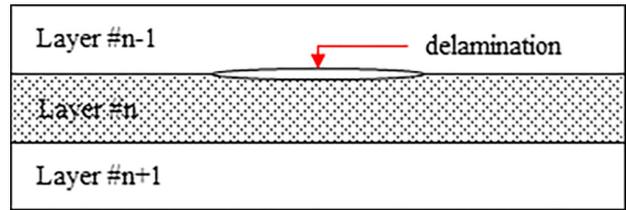


Fig. 2 Delamination represented in composite layered material

Fig. 1(a)와 같이 종파와 횡파(transverse wave)로 모드 변환(mode conversion)된다. 종파와 횡파로 변환되어 음향창 내를 전파하는 파동은 재질 특성이 바뀌는 다층 구조 음향창의 층간 계면에서 Fig. 1(b)와 같이 새로운 종파, 횡파 특성을 갖는 파동으로 변환된다.

이후 음향창의 최내층에서 유체(liquid)인 물을 만나 Fig. 1(c)와 같이 종파 형태의 파동으로 전파한다. 여기서 L은 종파, S는 횡파, 위첨자 i는 입사(incidence), s는 산란(scattering), t는 투과(transmission)를 의미한다.

본 논문에서 언급하는 음향창의 박리는 종파와 횡파가 전파하는 고체 구조물 내에서의 계면 탈착을 의미한다. 해당 박리는 복합재 음향창을 구성하는 하나의 복합재 층인 라미나(lamina)와 라미나 사이 또는 이종 재질이 접하는 계면에서 발생할 수 있으며 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

음향창 내부를 전파하는 파동이 박리 계면을 만나는 경우, 해당 계면에서는 파동의 산란 현상이 나타난다. 이때, 음향창 내부 파동인 변위 \$u\$는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Allan, 2019).

$$\bar{u} = u_i + u_s \tag{1}$$

여기서 하첨자 i는 입사, s는 산란을 의미한다. 즉, 박리가 존재하는 경우, 입사된 변위, 응력 이외에 산란에 의한 변위가 추가적으로 발생한다. 만약 박리의 형태가 구형이며 \$ka \ll 1\$ (\$k\$: 파수, \$a\$: 반지름)인 경우, 레일리 산란(Rayleigh scattering) 현상에 따라 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Kerr, 1992).

$$u_s = \nabla \phi_s \tag{2}$$

$$\phi_s = -\phi_0 \frac{e^{i(\kappa r - \omega t)}}{\kappa r} \sum (2n + 1) A_n P_n(\cos \theta) \tag{3}$$

여기서 \$\phi\_s\$는 스칼라 포텐셜, \$\kappa\$는 모재의 종파 파수, \$A\_n\$은 \$n\$차 산란계수, \$P\_n\$은 \$n\$차 르장드르 다항식을 의미한다. 즉, 음향창 내부의 박리는 \$A\_n\$에 따라 고체 내에서 단극자(monopole, \$n=0\$), 쌍극자(dipole, \$n=1\$) 음원 형태로 진동하여 파동 특성을 변화시키고 음향창을 통해 전달되는 음파의 전파특성도 변화시킨다. 만약 \$ka\$ 값이 1과 유사한 경우에는 미 산란(Mie scattering) 현상이 발생하며, 후방산란(back scattering) 보다 전방산란(forward scattering)이 강하게 발생한다. 전방산란에 대한 방향

성(directivity)는 ka 값이 커질수록 더 증가하며, 이에 따라 박리면 후면으로 역 위상을 갖는 산란 음파에 의해 음압이 떨어지는 음영(shadow) 구역도 발생하게 된다 (Lester, 2016). 결과적으로 소나 센서의 측면에서는 음향창의 내부 박리로 인해 왜곡된 음향 신호가 전달됨에 따라 오탐 문제가 유발될 수 있다.

### 3. 음향창 박리에 따른 투과특성 분석

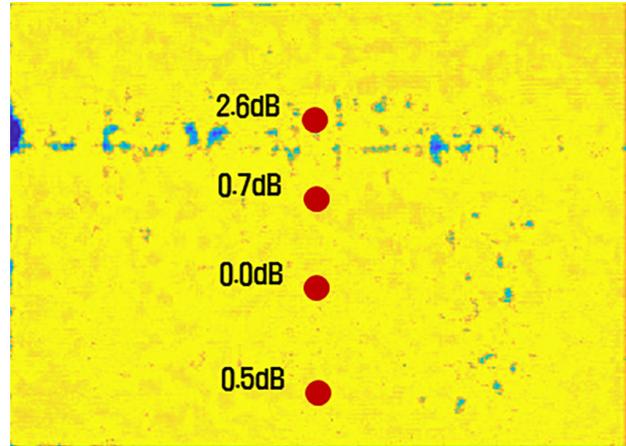
#### 3.1 실험적 확인

음향창의 박리에 따른 파동 전달 특성을 실험적으로 확인하기 위해, 약 1900 mm × 1750 mm × 20 mm(가로×세로×두께) 제원을 갖는 음향창에 대해 박리 유무에 따른 투과음압 측정시험을 수행하였다. 이때 음향창의 박리 유무는 주파수 0.5 MHz의 초음파 C-scan 장비를 통해 확인하였다. Fig. 3은 정상 음향창과 박리 음향창에 대한 초음파 C-scan 결과를 나타낸 것이다. 초음파 C-scan은 측정대상에 대한 상대적인 투과율을 dB 값으로 나타내는 장치로 Fig. 3 기준으로 노란에 가까울수록 투과율이 높고, 파란에 가까울수록 투과율이 낮음을 나타낸다. 따라서 그림의 dB 값은 박리가 없는 정상부 0.0 dB에 대한 상대적인 값을 나타낸다. 박리가 없는 정상 음향창(Fig. 3(a))의 경우, 측정 면적 전반에 대해 손실정도가 유사하나, 박리가 존재하는 음향창(Fig. 3(b))은 박리 구간에서 높은 손실을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

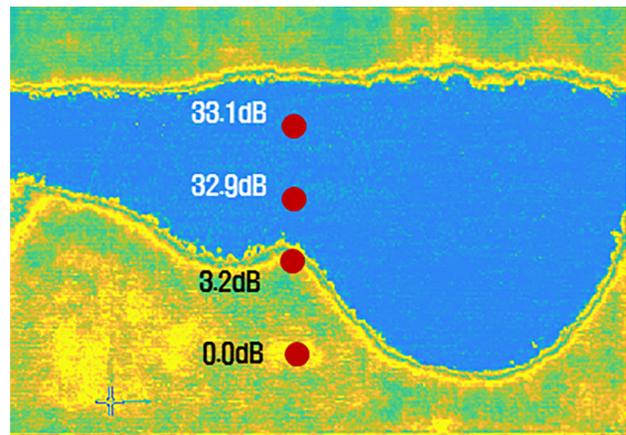
이들 시편을 이용한 투과음압 측정 시험은 Fig. 4와 같이 수행하였다. 이때 송신기(transducer)와 음향창 사이의 거리는 5400 mm, 음향창과 수신기(hydrophone) 사이 거리는 100 mm로 설정하였다. 수신기 높이의 경우, 정상부와 박리부의 전달 특성 차이를 확인하기 위해 초음파 C-scan 결과를 기준으로 하여 차별을 두어 설치하였다. 송신음의 경우, 주파수 5kHz에 대한 톤버스트 파동(tone-burst wave), 5파장을 입력으로 주고 측정을 수행하였다.

Fig. 5는 음향창 투과 이후의 수신기 음압을 나타낸 것으로, 박리 음향창의 경우 박리 영향을 확실히 살펴보기 위해 Fig. 3(b)의 결과를 기준으로 수신기 위치를 박리부 근방으로 배치하였다. 이때 비교를 위해 음향창이 없는 경우에 대한 수신기 음압도 함께 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 정상 음향창(빨강)의 경우, 입사된 대부분의 음향 에너지를 투과시켜 음향창이 없는 경우의 참조 신호(파랑)와 거의 유사한 수준의 응답을 보인다. 반면, 박리 음향창(노랑)은 초음파 C-scan 결과와 유사하게 박리부에서 음향 에너지가 손실되어 진폭이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 또한 위상의 변화도 발생한 것을 확인할 수 있다. 신호의 최대 피크(peak)를 기준으로 투과손실을 추정하면 정상 음향창의 경우 0.64 dB, 박리 음향창의 경우 10.55 dB의 값을 갖는다. 즉, 본 연구의 박리 음향창은 설계 요구인자인 음향 투과성이 매우 떨어짐을 확인할 수 있으며, 매우 큰 박리 면적으로 인해 미 산란 현상이 발생하여 음향창 박리부 후

면으로 음영 구역이 나타났음을 확인할 수 있다. 번외로 Fig. 4의 시험을 통해 추정된 투과손실 값이 Fig. 3의 C-scan 결과 값과 다른 이유는 가진 주파수의 차이 때문으로 보인다.



(a)



(b)

Fig. 3 Measurement results by an ultrasonic C-scan device for (a) normal acoustic window, (b) delaminated acoustic window

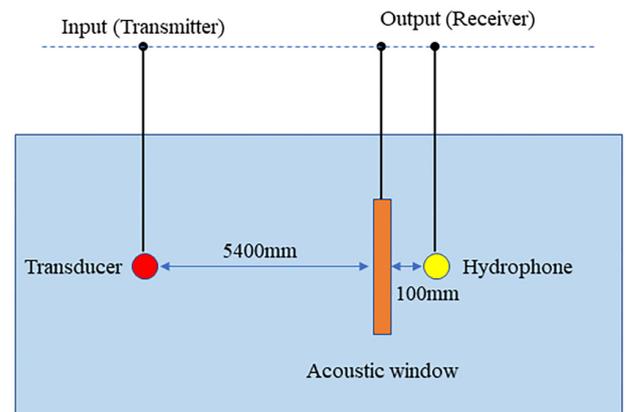


Fig. 4 Measurement concept to acquire transmitted sound through the acoustic window

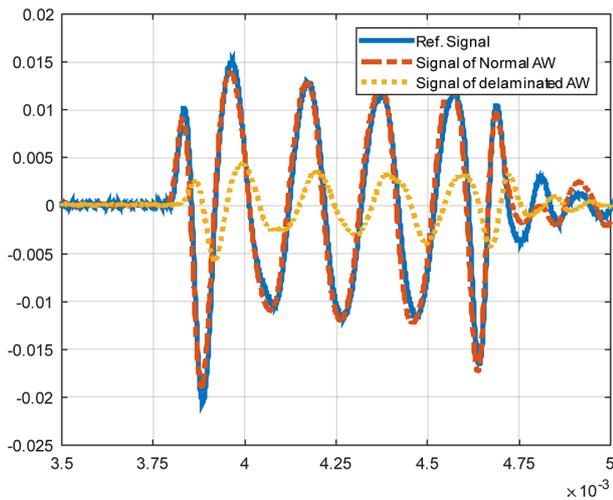


Fig. 5 Comparison of transmitted sound through the normal and the delaminated acoustic window

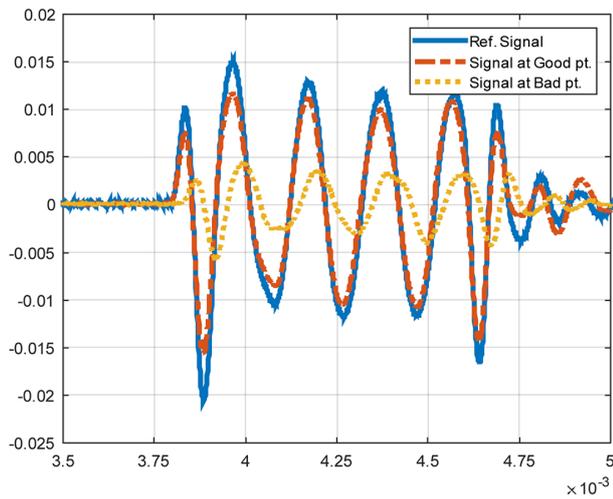


Fig. 6 Comparison of transmitted sound acquired at good and bad positions for the delaminated acoustic window

Fig. 6은 박리 음향창에 대하여 초음파 C-scan 결과를 기준으로 음파 투과성이 우수한(good) 위치(빨강)와 나쁜(bad) 위치(노랑)에서의 투과 음압을 나타낸 것이다. 투과성이 우수한 위치에서의 음압은 나쁜 위치에서의 음압 대비 진폭이 커서 시간 지연이 거의 나타나지 않는다. 추정 투과손실의 경우 2.16 dB로 약간의 에너지 손실이 발생했음을 확인할 수 있다. 즉, 박리 음향창이더라도 박리부와 떨어진 부분에 대해서는 투과, 회절의 영향으로 음파가 약간의 손실을 가지며 전파됨을 확인할 수 있다.

### 3.2 해석적 확인

음향창의 박리 크기에 따른 파동 전파 현상을 확인하기 위해, 수치해석 소프트웨어인 COMSOL을 이용하여 1000 mm × 1000 mm × 20 mm 음향창 평판 모델에 대한 구조-음향 연성해석을

수행하였다. 이때 음향창의 박리는 Fig. 7과 같이 음향창의 중심부에 원형의 단면 형태를 가지며 면적 비율(이하 '박리 비율') 0.25 %, 0.5 %, 1 %, 2 %, 4 %만큼 집중되어 있다고 가정하였다. 박리 두께의 경우, 실제  $\mu\text{m}$  단위로 예상되어 0에 가까운 값을 입력하였다. 해석모델의 경우 구조, 음향 요소를 육면체 요소(hexahedral element)로 구성하였으며, 유한 길이에 의한 영향을 배제하기 위해 동-서, 남-북의 면에 대해 대칭(symmetric) 조건을 부여하였고, 상면 및 바닥면에는 반사를 배제하기 위해 무반사 경계(non-reflecting boundary) 조건을 입력해주었다. 입력파의 경우,  $\theta=90^\circ$ (수직입사)로 1 Pa의 평면파를 입사시켰으며 해석주파수는 5 kHz로 고정하였다. 해석주파수를 기준으로 박리 비율에 따른  $ka$ 값은 Table 1과 같이 나타난다.

Fig. 8은 박리 비율에 따른 수직입사에 대한 음장 단면이다. 박리 비율이 0.25 %인 경우에는  $ka$ 가 1보다 작은 구간으로 레일리 산란 현상에 따라 단극자 및 쌍극자 음원의 형태로 산란이 발생함을 확인할 수 있다. 박리 비율이 0.5 % 이상인 경우에는  $ka$ 가 1에 가깝거나 1보다 큰 구간으로 미 산란 현상이 발생하여, 음향창 박리부 후면으로 전방산란에 의한 음장 변화가 발생하였음을 확인할 수 있다. 이는 박리 크기와 주파수로 결정되는  $ka$ 가 증가할수록 더 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 박리부 주변으로는 박리부에 의해 회절 및 산란된 음파에 의해 음장의 변화가 발생하였으며, 음장의 왜곡 정도는 대체로  $ka$ 값이 커질수록 더 명확하게 나타난다. 결론적으로 박리에 따른 음장 왜곡은 박리 면적의 비율보다는 박리의 크기에 따라 특성이 달라진다.

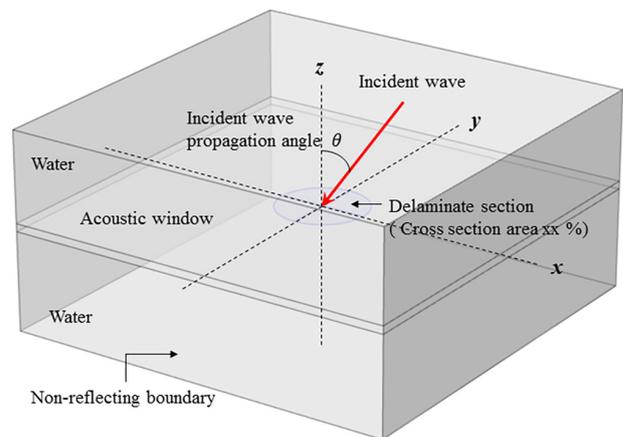


Fig. 7 Numerical model for the acoustic window with a delamination to analyze a wave propagation phenomena

Table 1  $ka$  according to delamination ratio

Delamination ratio	$ka$
0.25 %	0.5908
0.5 %	0.8355
1 %	1.1816
2 %	1.6711
4 %	2.3633

### 4. 음향창 박리에 따른 방위탐지 영향분석

음향창 박리 크기에 따른 음장의 변화가 소나의 방위탐지에 미치는 영향을 확인하기 위해, 선측배열소나 및 음향창을 모사하여 Fig. 9와 같이 모델링하였다. 해석방법, 주파수 및 조건은 앞서와 동일하게 설정하였다. 단, 음향창 통과 이후의 바닥면은 음파의 무반사조건을 부여한 기존 모델과 달리 소나 표면을 강체 벽면(rigid wall)로 처리하여 음파의 반사효과를 고려하였다. 박리 크기의 경우, 음파의 왜곡이 커지는 미 산란에서 방위탐지 영향을 확인하기 위해  $ka$  값이 0.92, 1.84, 3.68인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 박리 비율은 0.25 %, 1 %, 4 %에 해당한다. 그리고 입사각은 90°, 70°, 50°, 30°로 설정하였다.

Fig. 10은 박리 비율과 입사각에 따른 소나 센서 위치( $x$ 축 방향)에서의 투과음압을 나타낸 그림이다. 본 해석모델에서 박리의 중심 위치는 음향창의 중심( $x = 1.0$  m) 부근에 위치한다. 소나 센서가 위치한 바닥면의 기준으로 음장 분포결과를 살펴보면, 소나 표면에서의 음파 반사가 고려되어 Fig. 8의 음장 분포결과와는 다른 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 그러나 박리 비율(또는  $ka$ )이 증가함에 따라 음향창 통과 이후의 음장 왜곡이 증가되는 경향은 동일하게 나타내고 있다. Fig. 11은 Fig. 10의 소나 센서 표면 음압을 빔포밍(*beam-forming*)하여 방위탐지 분석을 수행한 결과이다. 결과를 살펴보면, 주엽(*main lobe*)의 경우 박리 비율이 증가함에 추정 방위각에 대해 약간의 오차(입사각 30° 0.25 % 박리 기준 0.1°, 1 % 박리 기준 0.2°, 4 % 박리 기준 0.8° 오차)가 발생하고 있으나 대체로 정확하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 부엽(*side lobe*)을 살펴보면 박리 비율이 증가함에 따라 그 레벨도 동시에 증가함을 확인할 수 있다. 특히 입사파가 음향창 면에 평행해질수록 그 경향이 증가하는 것을 살펴볼 수 있다. 박리 비율이 4%인 경우, 주엽과 부엽의 dB 차이가 수직 입사를 제외했을 때 10 dB 미만으로 나타나고 있으며, 입사각 50°인 경우 dB 차이가 약 5 dB 정도로 나타나 방위탐지에 혼란을 줄 우려가 있다고 판단된다.

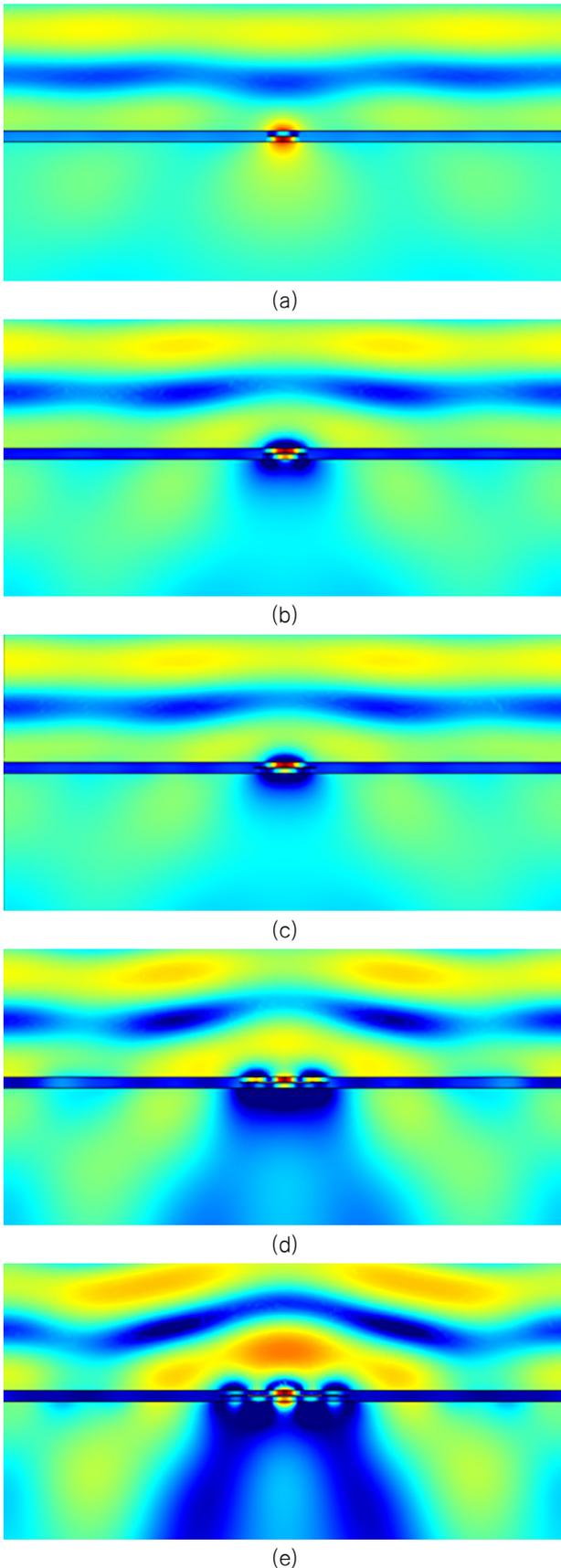


Fig. 8 Cross-section of acoustic fields near the acoustic window with a delamination, which ratio is (a) 0.25 %, (b) 0.5 %, (c) 1 %, (d) 2 %, (e) 4 %

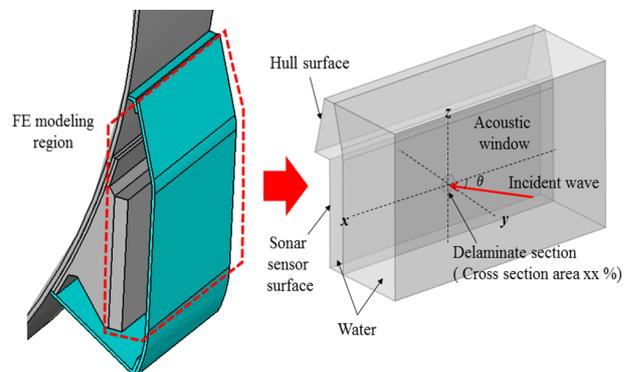


Fig. 9 Numerical model for the acoustic window of flank array SONAR to analyze effects of delamination ratio to direction detection

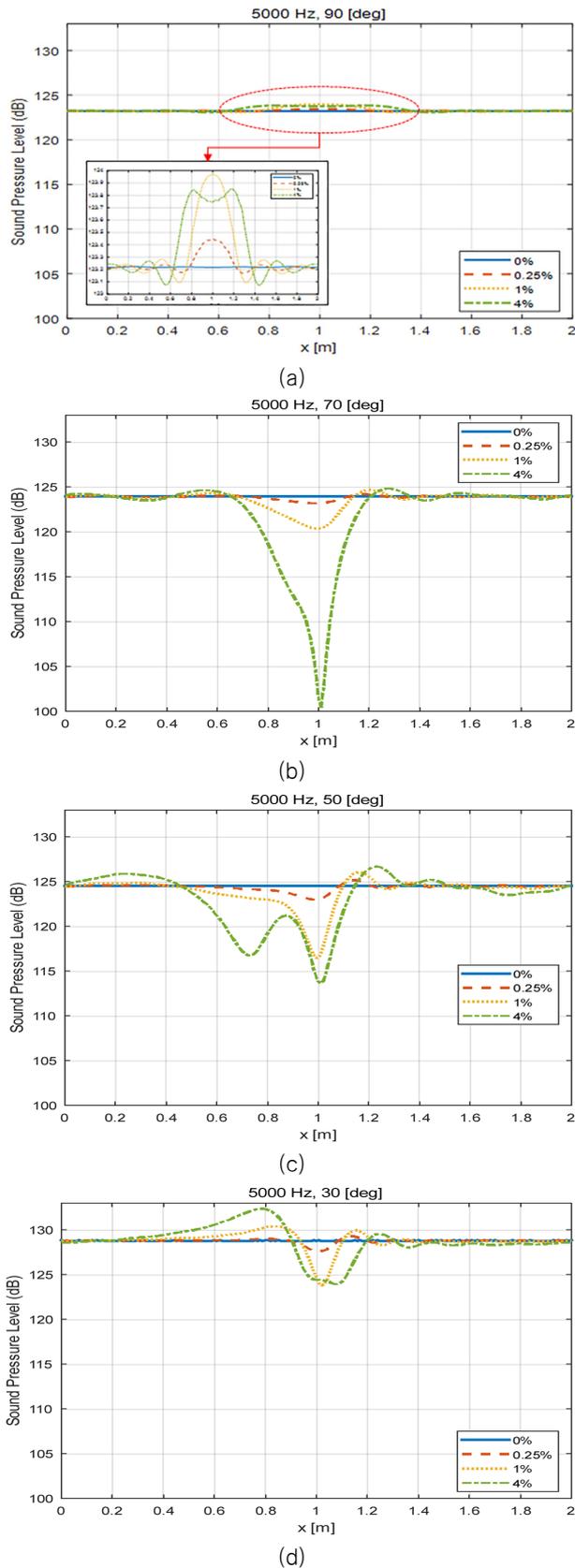


Fig. 10 Transmitted sound on SONAR sensor surface through the acoustic window with a delamination, when wave propagates with an incident angle (a) 90°, (b) 70°, (c) 50°, (d) 30°

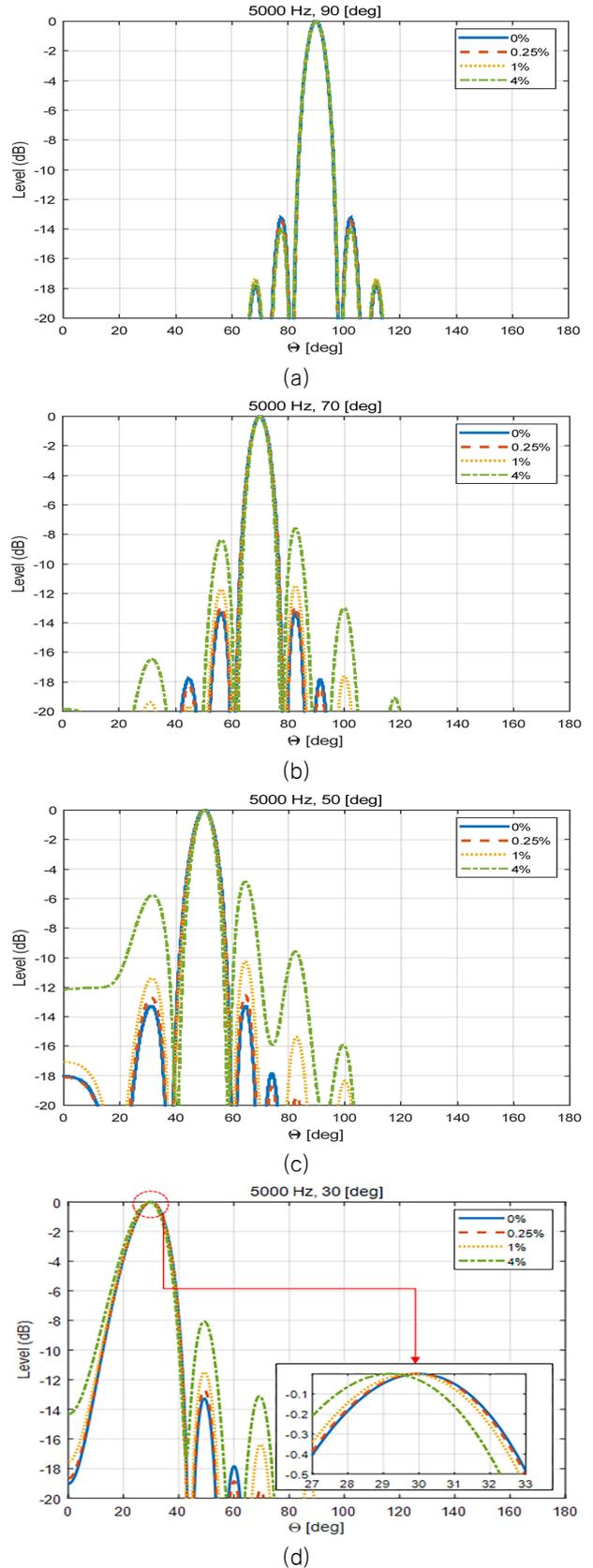


Fig. 11 Direction detection by beam-forming of transmitted sound through the acoustic window with a delamination, when wave propagates with an incident angle (a) 90°, (b) 70°, (c) 50°, (d) 30°

## 5. 결론

본 논문에서는 음향창의 박리에 따른 음향특성 변화를 실험적, 해석적으로 확인하였다. 음향창 내부에 박리가 존재하는 경우, 음향창 면적에 대비한 박리 면적의 비율보다는 박리의 반경과 주파수로 결정되는  $ka$  값에 따라 음파의 산란 특성 및 투과 특성이 변화함을 확인하였다. 또한 음파의 투과특성 변화로 왜곡된 음장은 소나의 방위탐지 측면에서 주엽과 부엽의 변화를 일으켜 방위탐지에 혼란을 줄 수도 있음을 확인하였다. 그러나 본 연구의 결과는 음향창의 박리 형태를 하나의 원으로 가정했을 때의 결과로, 실제 음향창의 박리는 다양한 형태, 크기로 음향창 전 면적에 산포되어 있을 가능성이 높아 이를 고려한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 일반적인 접근으로 음향창의 박리는 소나의 탐지성능 저하와 연계되기 때문에, 제작과정에서 관리될 필요가 있다고 판단된다.

## References

- Allan, D.P., 2019. *Acoustics – an introduction to its physical principles and applications, third edition*, Springer Nature, Switzerland.
- Brekhovskikh, L.M., 1980. *Waves in layered media*, Academic Press, London.
- Joseph, L.R., 1999. *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University Press.
- Jung, W.J. et al., 2006, A study on the measurement and analysis method for the acoustic transmission loss of the material for the acoustic window of sonar dome, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 16(7), pp.729–738.
- Kerr, F.H., 1992. The scattering of a plane wave by spherical elastic inclusion, *International Journal of Engineering Science*, 30(2), pp.169–186.
- Lester, W.S., 2016, *Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation – a modeling approach, second edition*, Springer International, Switzerland.
- Seo, Y.S., Kang, M.H., Shin, K.K. & Jeon, J.J., 2011. Acoustic performance study of FRP acoustic window, *Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 21(10), pp.890–896.
- Shin, K.K., Seo, Y.S., Kang, M.W. & Jeon, J.J., 2013. The influence of design factors of sonar acoustic window on transfer function of self noise due to turbulent boundary layer, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 23(1), pp.56–64.
- Skelton, E.A. & James, J.H., 1997. *Theoretical acoustics of underwater structures*, Imperial College Press.



정병규



강명환



서영수