

수중 환경용 음향 배플의 내구성 연구

A Durability Study on the Acoustic Baffle for Underwater Environment

서영수[†]·김동현*·김진태**·강명환***·정우진***

Young Soo Seo, Dong Hyun Kim, Jin Tae Kim, Myeng Hwan Kang and Woo Jin Jung

(Received May 3, 2016 ; Revised May 30, 2016 ; Accepted June 2, 2016)

Key Words : Cylindrical Array Sensor(원통형 배열센서), Acoustic Baffle(음향 배플), Durability(내구성), Echo Reduction(반향음 감소량), Underwater Environment(수중 환경)

ABSTRACT

Cylindrical array sensor of a surface ship to detect an enemy is normally installed in the sonar dome. Reflected signals by some structures inside the sonar dome make unwanted signals. To minimize unwanted signals, acoustic baffles are used. Acoustic baffles are hard to install and replace, so the durability of acoustic baffles is an important design parameter. To verify the durability of acoustic baffle, accelerated aging tests according to temperature and pressure were performed. Acoustic baffle specimens were made and they are tested the visual and the performance (echo reduction and transmission loss) inspection before and after aging. After the inspection, the effect of accelerated aging of the acoustic baffles were discussed.

1. 서 론

수중 환경에서 사용되는 음향 배플은 상대 음향 신호를 탐지하기 위해 사용되는 원통형 배열센서 후면에 설치되어 격벽에 의해 반사되는 허위표적신호를 감소시키는 역할을 수행한다⁽¹⁾. 음향 배플은 함정의 건조 단계에서 격벽에 접촉제 및 볼트를 이용하여 설치된다. 한번 설치된 음향 배플은 함정의 운용 및 정비과정에서 교환이 까다로운 장비이다. 따라서 음향 배플의 내구성을 사전에 예측함으로써 함정 설치 후 유지 보수에 사용되는 시간과 비용을 줄일 수 있으므로 음향 배플의 개발 단계에서 음향 배플의 내구성을 예측 및 검증하여야 한다.

일반적으로 음향 배플은 다양한 재료를 이용하여

제작할 수 있다. 이 논문에서는 폴리우레탄을 모체로 사용하고 다양한 첨가제를 이용하여 사용 목적에 맞추어 음향 배플을 설계 및 제작하였다. 음향 배플은 사용목적에 따라 음향성능(반향음 감소량 또는 음향투과손실)의 기준값을 만족할 수 있도록 설계된다^(2,3). 이 기준값은 음향 배플에게 요구되는 최소한의 값이며 수중에서 사용되는 동안 기준값 이상의 값을 가져야 한다. 따라서 음향 배플은 일정시간 이상 음향성능을 유지해야하는 내구성을 가져야 한다.

음향 배플의 성능 저하를 발생시키는 요소로 배플이 설치되는 수중 환경에서의 장기적인 압력변화와 음향 배플의 재료인 폴리우레탄의 주된 노화의 요소인 온도로 설정할 수 있다. 장기적인 압력변화 시험은 가속 수명 시험의 한 종류에 속한 시험이며 가속 수명 시험은 고장 발생 시간을 단축하고 검사

[†] Corresponding Author; Member, Agency for Defense Development
E-mail : bluesapo@naver.com

* LIG Nex1

** HwaSeung Material

*** Member, Agency for Defense Development

A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

비용의 절감 효과를 얻기 위해 사용 조건을 정상 조건보다 가혹하게 하여 제품을 작동시키는 시험 방법이다. 이 시험 방법은 사용온도가 10 °C 높아지면 수명이 반감되는 수명 반감의 법칙을 응용하여 성능 저하를 판단하고 있다. 장기적인 압력변화 시험은 압력 챔버를 이용하여 음향 배플을 가속 노화시킬 수 있으며 온도 변화는 온도 챔버를 이용하여 시험을 수행할 수 있다. 시험에 사용된 압력 및 온도 변화 조건은 음향 배플이 사용되는 수중 환경조건을 바탕으로 설정하였다. Kim⁽⁴⁾은 환기팬용 모터의 방진고무부품의 수명 예측을 위해 가속 열 노화 시험을 수행하고 방진고무부품의 다양한 온도에서의 수명과 활성화에너지를 구하였다. 그리고 고무에 첨가되는 노화 방지제가 수명에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Kim⁽⁵⁾은 연료전지용 고무 개스킷으로 사용되는 황으로 가황한 NBR 컴파운드의 수명을 예측하기 위해 가속 산-열 노화시험 후 인장강도, 신장률, 경도 및 가교 밀도를 측정하여 수명을 평가하였다. Han⁽⁶⁾은 열과 기계적 하중을 동시에 받는 내연기관의 냉각기 고무호스에 사용되는 EPDM 고무에 대하여 복합노화 시험을 하고 아레니우스 관계식을 이용하여 노화온도에 따른 가속 수명 예측식을 구하였다.

이 논문에서는 수중 환경에서 사용되는 음향 배플 3종의 내구성을 검증하기 위하여 시편을 제작하고 설정된 온도와 압력조건을 이용하여 가속노화를 시켰다. 각 음향 배플 시편은 가속노화 전과 노화 후, 육안검사와 성능검사를 수행하였다. 육안검사의 경우 음향 배플의 외관이나 크기가 변형되어 일시적 또는 영구적으로 성능저하를 일으킬 수 있는 손상이 발생하였는지를 확인하였다. 성능검사의 경우 음향 배플의 목적에 따라 음향성능(반향음감소량 또는 음향투과손실)을 측정하여 가속노화에 따른 특성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 시험조건

장기 동작시험 및 가속수명시험은 설계수명 동안 노화에 의한 물리적인 손상이나 변형 및 성능 저하의 발생 여부를 검증하는 시험이다. 장기 동작시험 및 가속수명시험 항목은 음향 배플의 설치 조건 및

설치된 함정의 운항조건 등을 고려하여 온도와 압력을 시험 항목으로 선정하였다. 가속수명시험의 여러 기법 중 온도에 의한 노화의 경우는 아레니우스 모델을 이용한 가속 열 노화 기법을 적용할 수 있다. 아레니우스 모델은 여러 온도에서 폴리머 재료의 초기 특성값의 변화가 발생하는 시점을 한계 수명으로 판단하며 시간-온도의 관계식으로 표현할 수 있다. 이런 관계로부터 특정 온도에서 수명을 계산할 수 있으며 상온에서의 자연 노화에 의한 수명을 가속시험 결과로 얻어진 자료를 이용하여 예측할 수 있다. 아레니우스 모델의 관계식은 식 (1)~(2)와 같다.

$$k = A e^{-E_a/RT} \tag{1}$$

$$\ln(k) = A - \frac{E_a}{RT} \tag{2}$$

여기서 k 는 속도정수(1/시간(h)), A 는 빈도인자, R 은 가스정수(8.314 472 J/(°K·mol)), T 는 절대온도(°K) 그리고 E_a 는 활성화에너지(kJ/mol)이다. 아레니우스 모델은 제품의 수명과 고장률이 반비례한다는 가정에서 정리된 것으로 여기서부터 가속온도(T_a)와 정상 사용 온도(T_n)에서의 제품의 수명을 식 (3)~(5)와 같이 구할 수 가 있다.

$$\ln(1/L_a) = A - \frac{E_a}{R T_a} \tag{3}$$

$$\ln(1/L_n) = A - \frac{E_a}{R T_n} \tag{4}$$

$$\ln(L_n/L_a) = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_n} \right) \tag{5}$$

여기서 L_a 는 가속온도 조건에서의 수명(시간)이고 L_n 은 정상사용온도 조건에서의 수명(시간) 이다. 음향 배플의 내구성 수명의 요구조건은 10년, 즉 87 600시간이고 음향 배플 재료인 폴리우레탄의 활성화에너지는 65 kJ/mol⁽⁷⁾, 그리고 배플의 정상사용온도는 10 °C로 설정하면 가속온도조건 60 °C 시험할 경우 다음과 같이 시험시간을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\ln(87600/L_a) = -\frac{65 \times 1000}{8.314472} \left(\frac{1}{333} - \frac{1}{283} \right) \tag{6}$$

$$L_a = 1383.68$$

계산된 시험시간을 일수(24 h)로 계산하면 약 57.6 일이 된다. 즉 60 °C의 온도조건에서 약 58일 이상 노화 후 성능을 검사해서 이상이 없으면 이 음향 배플의 사용조건인 10 °C에서 내구성 수명은 10년 이상이라는 의미이다.

음향 배플의 수명비(가속계수)에 따라 온도 저장 시험 수행 후 성능 정상여부를 검증하였다. 가속수명시험(온도) 프로파일은 MIL-STD-810G의 Method 501.5-I(고온저장) 규격과 시험장비의 능력, 피시험장비의 한계온도 및 안전을 고려하여 Table 1 및 Fig. 1과 같이 적용하였다. 시험 온도(60 °C) 또는 상온으로의 온도 변화 구간의 온도변화율은 3 °C/min 이하로 하고, 시험 온도 도달 시 피 시험장비의 온도 안정화를 위해 최소 2시간 이상 온도를 유지하였다. 시험온도 유지시간은 기준시간 이상으로 설정하였다.

온도시험은 프로파일에 따라 1주기 시험 후 시료에 대한 육안검사를 수행하였다. 육안검사 결과 이상이 없을 시 추가로 2주기 시험을 수행하고 사후 성능 검사를 실시하여 내구성을 검증하였다.

가속수명시험(압력)은 음향 배플에 대해 설계수명 동안 수중 환경의 운용조건에서 반복적으로 가해지는 압력에 의한 물리적인 손상이나 변형 및 성능 저하의 발생 여부를 검증하는 시험이다. 반복 압력시험의 주기는 음향 배플이 설계수명동안 받는 압력변화 횟수를 고려해 4000회로 설정하였다.

Table 1 Test condition of accelerated temperature aging

Contents	Criteria
Temperature	60 °C
Cycle	3
Period	66.5 days

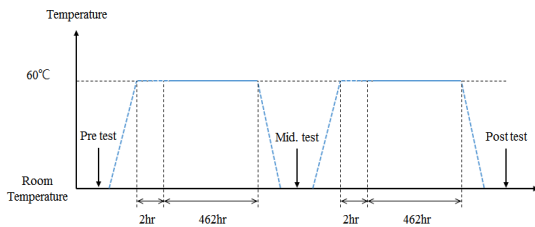


Fig. 1 Accelerated test profile(temperature)

압력시험은 가속수명시험(압력) 프로파일에 따라 반복 주기 시험을 실시한 후 시료에 대한 사후 육안 검사 및 성능검사를 실시하여 설계수명을 검증하였다. 시험에 사용된 시험장치는 Fig. 2와 같으며 압력 탱크(2조)와 압력을 조절할 수 있는 펌프 및 제어장치로 구성된다. 압력탱크의 크기는 직경이 1 m, 높이가 1.6 m이며 약 10 MPa까지 가압이 가능하다.

가속수명시험(압력) 프로파일은 MIL-C-24217A와 압력시험장비의 능력 및 안전을 고려하여 Table 2 및 Fig. 3과 같이 적용하였다. 최대압력 또는 대기압으로의 압력 변화 구간 시간은 기준시간 대비 ±20% 이내로 조정할 수 있으며, 최대압력 및 대기압 유지시간은 기준시간(1분) 이상으로 설정하였다.

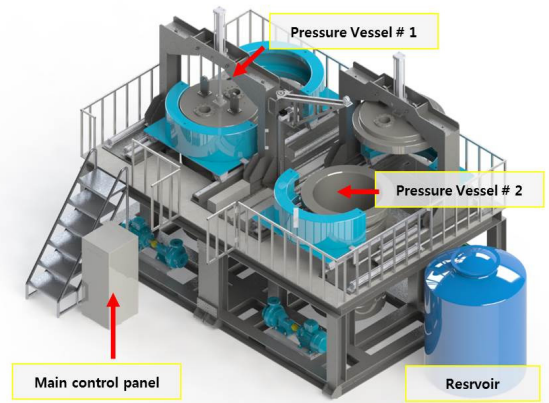


Fig. 2 Pressure vessel for pressure test

Table 2 Test condition of accelerated pressure aging

Contents	Criteria
Pressure	0.1 ~ OO[MPa]
Cycle	4000
Period	28 days

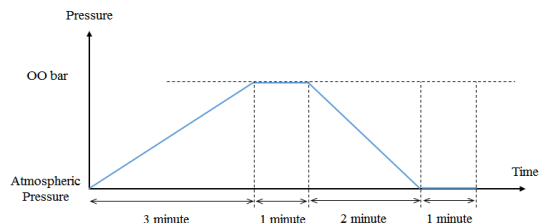


Fig. 3 Accelerated test profile(pressure)

2.2 시험준비

내구성 시험 수행을 위해서 음향 배플 3종에 대해서 시편을 제작하였다. 시편은 반향음 감소용 음향 배플 1종(ER)과 음향투과손실용 음향 배플 2종(TL1, TL2)에 대해서 제작하였다. 반향음 감소용 음향 배플 시편의 경우 총 6조를 제작하여 3조는 온도시험, 나머지 3조는 압력시험에 사용하였다. 그리고 음향투과손실용 음향 배플 시편은 2종에 대해서 제작하였고 각 종에 시편 6조를 제작하여 온도 및 압력시험에 사용하였다. Table 3은 각 시험에 사용된 시편의 이름을 나타내는데 시편 이름 중 *t*는 온도시험용, *p*는 압력시험용, 그리고 숫자 1, 2, 3은 각 시편 3종에 대한 일련번호를 나타낸다.

2.3 시험결과

성능 검사는 가속노화 전과 후의 음향성능(반향음 감소량 또는 음향투과손실)을 측정하였다. 음향성능은 Fig. 4의 펄스튜브를 사용하여 측정하였으며 펄스튜브 내의 온도는 10±1 °C, 압력은 1±0.1 MPa로 설정하여 측정하였다. 반향음 감소량과 음향투과손실은 소스에서 발생된 음파가 펄스 튜브 내에서 평면파로 진행한다고 가정하면 입사파와 음파가 시편에 의해서 반사 및 투과되는 음파를 각각 시간 영역에서 측정한 후 푸리에 변환(fourier transform)하여 그 크기의 비를 이용하여 주파수에 따라 식 (7)~(8)과 같이 계산하였다⁽⁸⁾.

$$ER = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{\text{mag. of incident wave}(f)}{\text{mag. of reflected wave}(f)} \right), \text{ dB} \tag{7}$$

Table 3 Specimens

Acoustic baffle	Accelerated test	Name of specimen
ER	Temperature	ER_t_1, ER_t_2, ER_t_3
	Pressure	ER_p_1, ER_p_2, ER_p_3
TL1	Temperature	TL1_t_1, TL1_t_2, TL1_t_3
	Pressure	TL1_p_1, TL1_p_2, TL1_p_3
TL2	Temperature	TL2_t_1, TL2_t_2, TL2_t_3
	Pressure	TL2_p_1, TL2_p_2, TL2_p_3

$$TL = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{\text{mag. of } \epsilon \text{cident wave}(f)}{\text{mag. of transmitted wave}(f)} \right), \text{ dB} \tag{8}$$

Figs. 5~7은 반향음 감소용(ER) 음향 배플 시편 3종에 대해서 가속 열 노화 전과 후의 반향음 감소량 측정 결과 및 비교한 그림이다. 그림에서 평균값은 산술평균을 나타낸다. 평균값을 비교한 Fig. 7을 보면 내구수명 요구조건인 10년에 해당되는 가속 열 노화에 따른 반향음 감소량의 변화는 크게 없는 것으로 판단된다. 일반적으로 복합 소재의 경우 노화에 따라 강성이 증가되고 감쇠 능력이 저감됨에 따라 반향음 감소 특성이 달라질 수 있으나 이 시험에 사용된 음향 배플에는 현재 설정된 시험 조건에서는 이러한 현상이 나타나지 않았다. 이후 시험이 추가적으로 계속된다면 특성변화가 나타날 수 있을 것으로 생각된다. 그림에서 피크 값은 재료의 두께에 따른 공진으로 판단되며 시험장치의 주파수 분해능에 따라 피크 값이 달라질 가능성이 있고 협대역에서 발생하는 피크 값은 광대역의 반향음 감소를 목적으로



Fig. 4 Underwater acoustic performance measurement system(pulse tube)

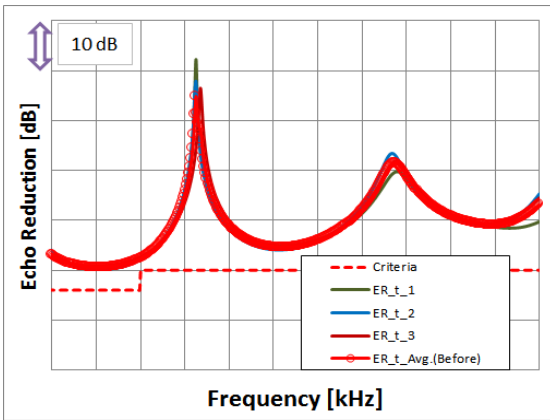


Fig. 5 Echo reduction of ER baffle before accelerated test(temperature)

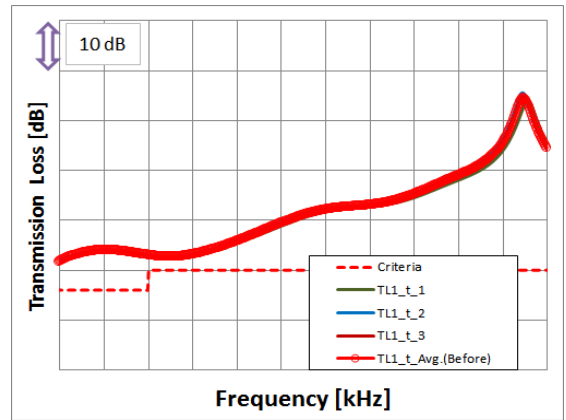


Fig. 8 Transmission loss of TL1 baffle before accelerated test(temperature)

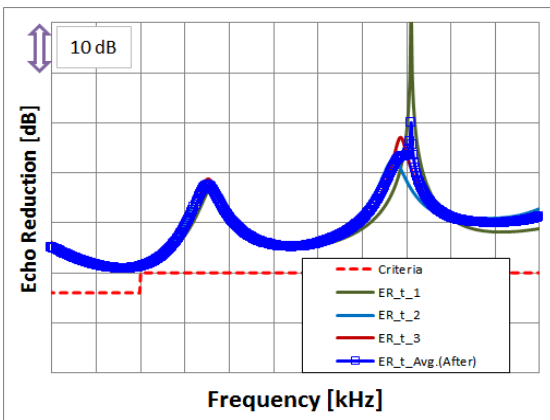


Fig. 6 Echo reduction of ER baffle after accelerated test(temperature)

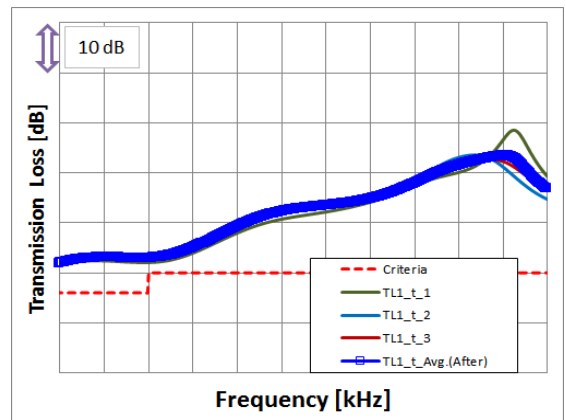


Fig. 9 Transmission loss of TL1 baffle after accelerated test(temperature)

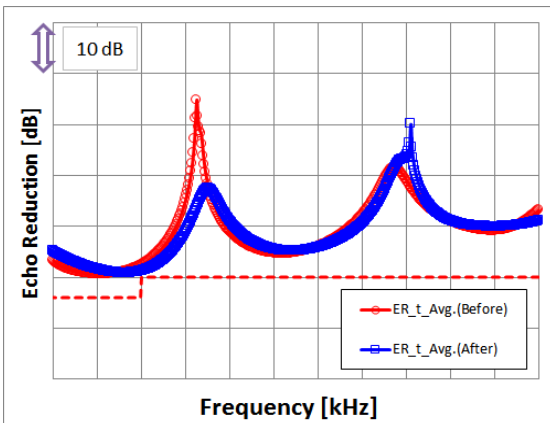


Fig. 7 Comparison of echo reduction of ER baffle according to accelerated test(temperature)

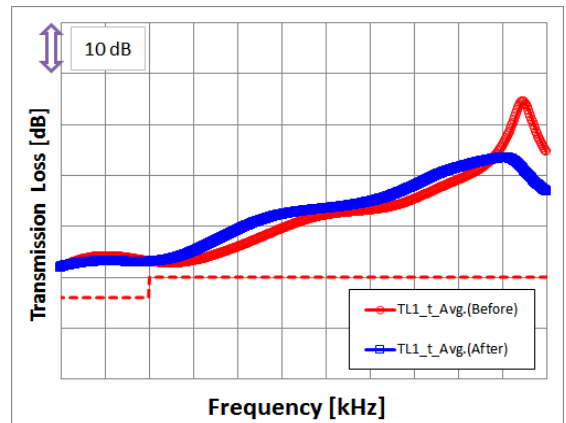


Fig. 10 Comparison of transmission loss of TL1 baffle according to accelerated test(temperature)

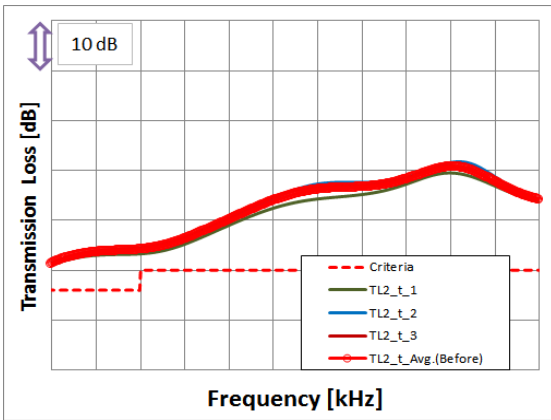


Fig. 11 Transmission loss of TL2 baffle before accelerated test(temperature)

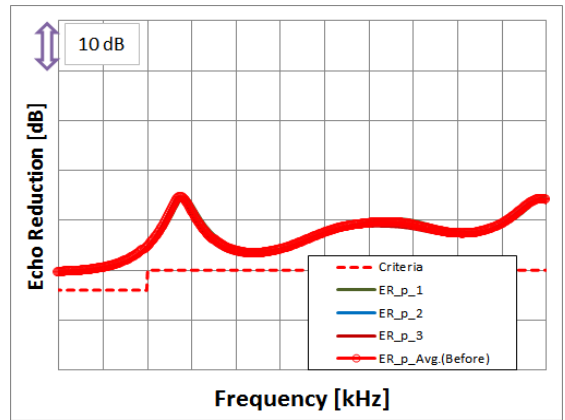


Fig. 14 Echo reduction of ER baffle before accelerated test(pressure)

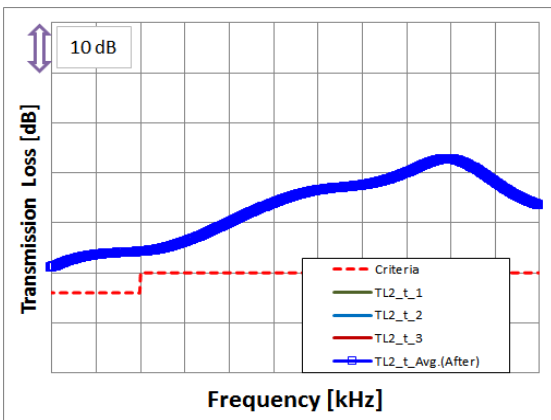


Fig. 12 Transmission loss of TL2 baffle after accelerated test(temperature)

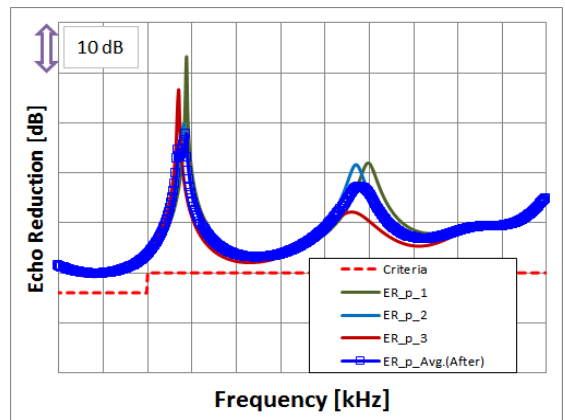


Fig. 15 Echo reduction of ER baffle after accelerated test(pressure)

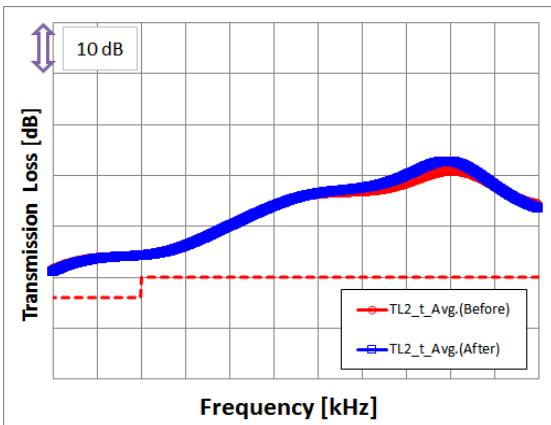


Fig. 13 Comparison of transmission loss of TL2 baffle according to accelerated test(temperature)

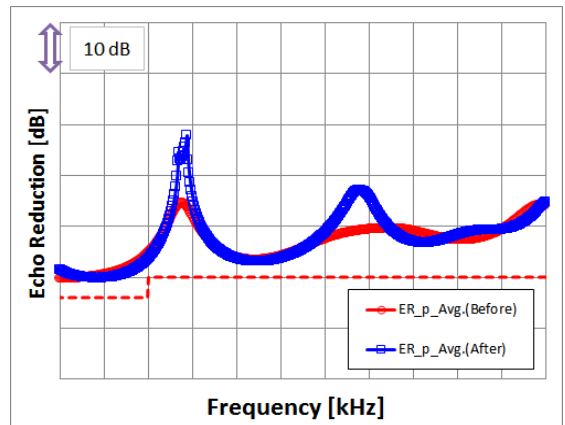


Fig. 16 Comparison of echo reduction of ER baffle according to accelerated test(pressure)

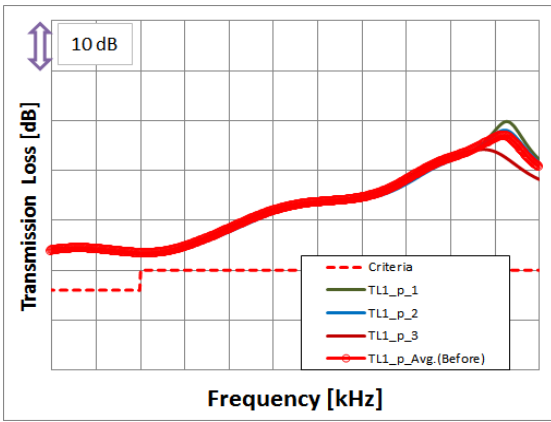


Fig. 17 Transmission loss of TL1 baffle before accelerated test (pressure)

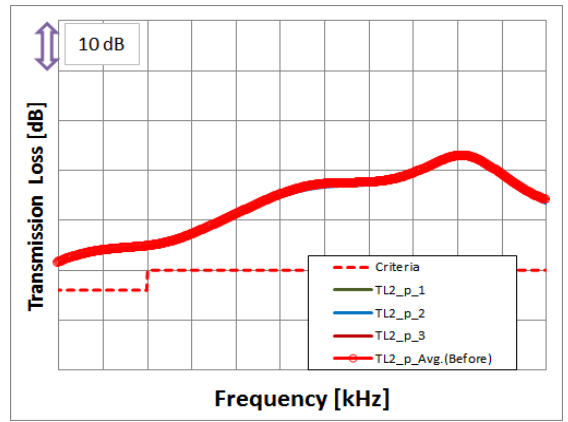


Fig. 20 Transmission loss of TL2 baffle before accelerated test (pressure)

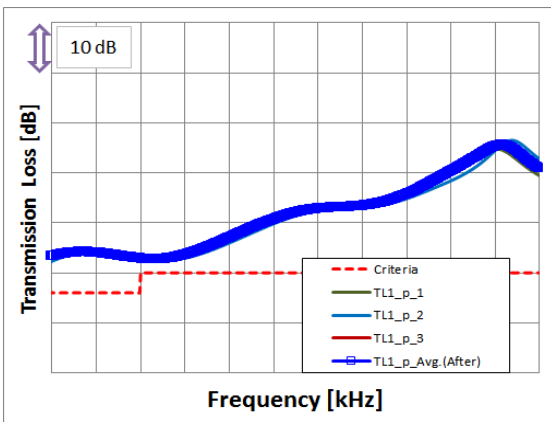


Fig. 18 Transmission loss of TL1 baffle after accelerated test (pressure)

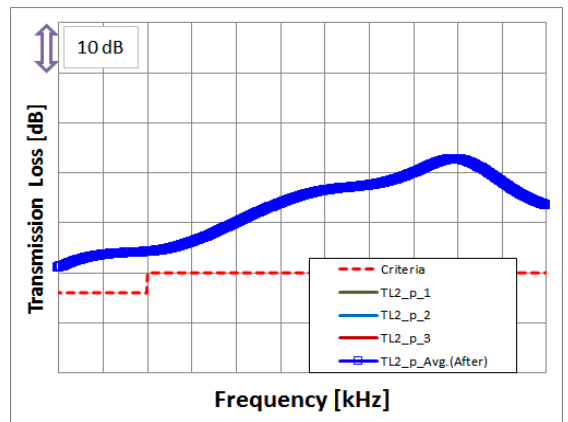


Fig. 21 Transmission loss of TL2 baffle after accelerated test (pressure)

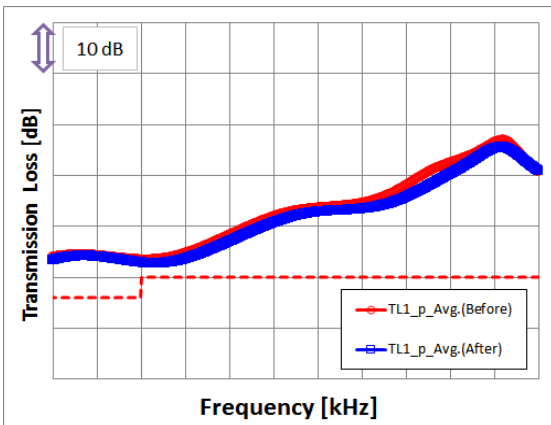


Fig. 19 Comparison of transmission loss of TL1 baffle according to accelerated test (pressure)

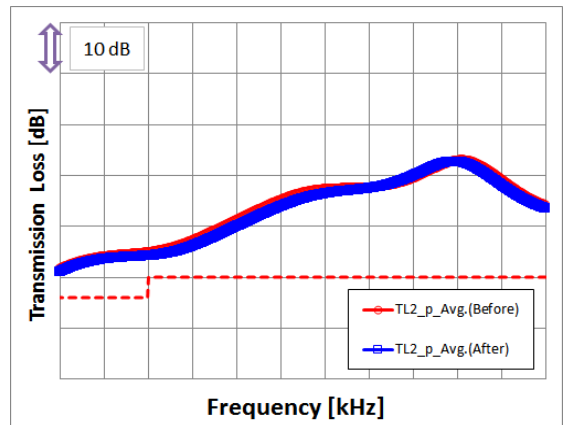


Fig. 22 Comparison of transmission loss of TL2 baffle according to accelerated test (pressure)

하는 음향 배플의 성능 평가에 주요한 요소라고는 볼 수 없다. 음향 배플은 특정한 주파수에서 반향음 감소가 목적이 아니고 광대역의 주파수 대역에서 반향음 감소 목적으로 설계된 장비이다. 따라서 요구되는 설계 기준치도 광대역에서 반향음 감소량을 요구하고 있다. Figs. 8~13은 음향투과손실용(TL1, TL2) 음향 배플에 대한 시험 결과이다. 음향투과손실용 음향 배플은 음향투과손실의 변화가 거의 없는 것으로 보인다. 또한 음향 배플의 설계 기준치를 모두 만족하고 있으므로 가속 열 노화에 따른 내구성 조건인 10년을 모두 만족하는 것으로 판단된다.

Figs. 14~16은 반향음 감소용 음향 배플에 대한 가속 압력 노화 시험 결과이다. 시험결과 반향음 감소량 변화가 피크 주파수 주변에서 관찰 되었다. 이는 가속 압력에 따른 재질의 특성의 미세한 변화로 인하여 발생한 것으로 판단된다. 그러나 음향 배플이 요구하는 요구사항을 만족하고 있고 전체적인 거동이 유사하므로 현재 시험조건으로 설정된 가속 압력 시험이 음향 배플의 내구성에 큰 영향을 주지 못한 것으로 생각된다. Figs. 17~22는 음향투과손실용 음향 배플에 대한 시험 결과이다. 두 가지 배플 모두 압력에 따른 음향투과손실 변화가 미세하게 발생하였으나 요구사항을 모두 만족하였다. 이러한 음향투과손실의 변화는 재료의 미세한 물성변화에 기인한 것으로 판단되며 주기적인 압력변화에 따른 기계적 물성에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3. 결 론

이 논문에서는 수중 환경에서 사용되는 음향 배플 3종의 내구성을 검증하기 위하여 시편을 제작하고 설정된 온도와 압력조건을 이용하여 가속노화를 시켰다. 가속노화 조건으로 온도 조건은 아레니우스 식 그리고 압력은 음향 배플의 수중환경 사용조건을 바탕으로 내구수명 시험 조건을 설정하였다. 각 음향 배플 시편은 가속노화 전과 노화 후, 육안검사와 성능검사를 수행하였으며 육안검사 결과 외관상 손상이나 변형이 없었다. 성능검사는 펄스튜브를 이용하여 음향 배플의 사용목적에 따라 음향성능(반향음 감소량 또는 음향투과손실)을 측정하였다.

반향음 감소용 및 음향투과손실용 음향 배플 모

두 온도 및 압력조건에 따른 음향성능 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다. 일부 피크 주파수 영역에서 성능변화가 관찰 되었지만 주파수에 따른 음향성은 거의 유사한 것으로 확인되었다. 따라서 세 가지 배플 모두 내구성 10년을 모두 만족하였다. 이 시험은 수중 환경에 사용되는 음향 배플의 내구성 검증을 위해 최초로 수행된 내용으로 앞으로 이러한 환경에 사용되는 음향재료의 내구성 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- (1) Seo, Y. S., Kim, D. H. and Kim, J. T., 2015, A Study on the Acoustic Baffle to Reduce Ghost Target According to Structure Behind Cylindrical Array Sensor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 440~446.
- (2) Seo, Y. S., Ham, I. B. and Jeon, J. J., 2013, A Study on the Acoustic Performance Design Technique of Underwater Acoustic Material, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 920~927.
- (3) Seo, Y. S., Ham, I. B. and Jeong, W. J., 2014, A Study on the Echo Reduction Performance of Underwater Acoustic Material, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 11, pp. 868~875.
- (4) Kim, W. D., Kim, W. S., Woo, C. S. and Cho, S. J., 2002, Prediction of Useful Life by Hear Aging of Motor Fan Isolating Rubber, Elastomer, Vol. 37, No. 2, pp. 107~114.
- (5) Kim, M. S., Kim, J. H., Kim, S. J. and Kim, J. K., 2007, A Study on the Life Time Prediction and Acid-heat Aging Property of NBR Rubber for Fuel Cell Gasket, Elastomer, Vol. 42, No. 1, pp. 20~31.
- (6) Han, S. W., Kwak, S. B. and Choi, N. S., 2014, Accelerated Life Prediction of Ethylene-propylene Diene Monomer Rubber Subjected to Combined Degradation, Transaction of Korean Society of Mechanical Engineering A, Vol. 38, No. 5, pp. 505~511.
- (7) Celina, M., Cillen, K. T. and Assink, R. A., 2005, Accelerated Aging and Lifetime Prediction: Review of Non-Arrhenius Behaviour Due to Two Competing Processes, Polymer Degradation and Stability,

Vol. 90, No. 3, pp. 395-404.

(8) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sander, J. V., 2000, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, Inc.



Yong-Soo Seo is currently a senior researcher at Agency for Defense Development. He received the B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.



Myung-Hwan Kang is received a B.S. degree from Kyungpook National University in 2007. M.S. degree from Postech in 2009. He is currently a researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are underwater acoustic stealth technologies.



Woojin Jung is received his B.S. and M.S. degrees from Korea Aerospace University in 1985 and 1987 respectively, a Ph.D. degree from Pusan National University. He is currently a principal researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are underwater acoustic stealth technologies.