

# 실험계획법을 이용한 예인 음탐기용 음향패키지 형상 연구

## A study on configuration of acoustic package for towed array sonar using design of experiments

이정현,<sup>1†</sup> 신중호,<sup>1</sup> 권오조,<sup>1</sup> 김군철<sup>1</sup>

(JungHyun Lee,<sup>1†</sup> Jeungho Shin,<sup>1</sup> Oh-Cho Kwon,<sup>1</sup> and Gunchil Kim<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>국방과학연구소 제6기술연구본부

(Received November 10, 2018; revised January 24, 2019; accepted March 26, 2019)

**초 록:** 본 연구에서는 예인 음탐기용 음향패키지에 대한 수신전압감도 특성을 분석하기 위해 수치해석과 실험계획법을 적용하였다. 수치해석 결과는 초기 설계된 음향패키지의 구조 공진 모드 특성으로 인한 수신전압감도 변화를 보여준다. 수신전압감도 편차를 줄이기 위해 도출된 음향패키지 설계 변수의 영향은 실험계획법을 통해 분석하였다. 수신전압감도 편차는 수중청음기 쉴드켄 두께(t)의 변화에 가장 민감한 것을 확인하였다. 수조시험 결과 실험계획법에 의해 도출된 음향패키지는 수신전압감도 편차가 감소됨을 확인하였다.

**핵심용어:** 음향패키지, 예인 음탐기, 수치해석, 실험계획법, 수신전압감도

**ABSTRACT:** In this paper, the characteristics of receiving voltage sensitivity about acoustic package in towed array sonar is analyzed through the numerical simulation and design of experiments. Simulation results show that the variation of receiving voltage sensitivity is caused by the structural resonance mode shape on baseline acoustic package. The effect of design parameters of the acoustic package are analyzed through the design of experiments to reduce the deviation of receiving voltage sensitivity. A change of hydrophone shield can thickness (t) is the greatest effect on the deviation of receiving voltage sensitivity. As a result of water tank test, the acoustic package derived from the design of experiments has reduced deviation of receiving voltage sensitivity.

**Keywords:** Acoustic package, Towed array sonar, Numerical simulation, Design of experiments, Receiving voltage sensitivity

**PACS numbers:** 43.30.Yj, 43.38.Hz

### 1. 서 론

최근 어뢰 등의 표적 소음 및 능동소나의 송신신호에 대한 표적 반사음이 수신 가능한 예인 음탐기가 개발되고 있다. 이러한 요구사항을 반영하기 위해서는 기존 저주파 대역보다 넓은 주파수 대역의 탐지가 가능한 센서 설계가 필요하다. 넓은 주파수 대역 탐지를 가능하게 하기 위한 설계에는 배열이득이 고려되어야 한다.<sup>[1]</sup> 많은 수의 수중청음기를 적용하기 위해서는 기구 구조물 설계 시 최적 형상을 도

출하는 것이 중요하다. 특히 좌우 분리를 위해 삼각 배열이 적용된 예인 음탐기의 경우 수중청음기와 전자부 조립체 등의 조밀한 구조 설계가 필요하다.

예인 음탐기 음향 모듈에 적용된 다수의 수중청음기는 음향패키지에 고정되어 인장부재를 따라 일정한 간격으로 배열되어 있다. 이때 사용되는 음향패키지는 수중청음기 및 전자 구성품을 고정하고 외부 압력으로부터 보호하는 역할을 한다. 이에 따라 음향패키지는 수중청음기와 구조적으로 연결되어 있기 때문에 수신전압감도(Receiving Voltage Sensitivity, RVS)에 영향을 주는 요소를 고려하여 설계되어야 한다.

예인 음탐기 음향 모듈에 적용되는 음향패키지 설

†Corresponding author: JungHyun Lee (atownlj@add.re.kr)  
Agency for Defense Development & Jinhae P.O. Box 18, Changwon, Gyeongnam, 51678, Republic of Korea  
(Tel: 82-55-540-6145, Fax: 82-55-542-3737)

계 시 고려되어야 할 사항으로는 음향투과성 및 구조물의 형상 및 재질에 따른 산란 음장의 크기, 구조물의 모드 특성 등이 있다.<sup>[2,3]</sup> 따라서 음향패키지는 특성 임피던스를 고려하여 저비중 재질을 사용하는 경우가 많다. 이러한 재질의 구조물은 저주파 대역에서 공진 모드가 발생할 가능성이 있기 때문에 음향패키지 설계는 수중청음기의 RVS에 영향을 주는 모드 특성 분석이 선행되어야 한다. 하지만 수중청음기가 적용된 음향패키지 형상에 대한 모드 특성이나 음향투과성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 삼각 배열 수중청음기가 적용된 예인 음탐기의 음향패키지 형상에 대한 연구를 위해 수치해석과 실험계획법을 활용하였다. 먼저 수치해석을 통해 음향패키지의 구조 모드 특성을 분석하고 중요 설계 인자를 도출하였다. 이후 실험계획법을 적용하여 실험 조건에 대한 반응표면을 생성하였고 반응표면분석을 통해 적절한 음향패키지 형상을 제시하였다. 마지막으로 수조 시험을 수행하여 해석 결과 검증 및 설계 개선된 음향패키지에 대한 RVS 특성을 확인하였다.

## II. 음향패키지 특성 해석

본 연구에서 초기 설계된 음향패키지의 기본 형상은 실린더형으로서 Fig. 1과 같이 수중청음기의 삼각 배열이 고려된 구조를 가지고 있다. 전자부는 음향패키지 중앙에 위치하고 그 주위로 수중청음기가 정삼각형 배열로 전자부를 둘러싸고 있는 형태이다. 전자부케이스는 금속 재질로 구성되어 있고 수중청음기는 음향패키지에 고정하기 위해 티타늄 재질의 슬드캔과 오픈셀스폰지가 적용되었다. 인장부재와

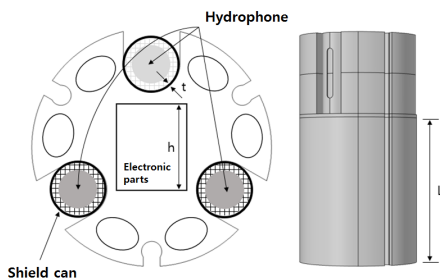


Fig. 1. Configuration of acoustic package.

결합되기 위한 공간 및 배선 공간 등은 수중청음기 주위에 원형으로 배치하였다. 음향패키지의 전체 길이는 전자부 형상 설계에 필요한 공간에 맞춰 설계하였으며 외경은 예인센서 보관용 원치의 안전 곡률 직경을 고려하여 설계하였다. 음향패키지의 재질은 음향투과성을 고려하여 폴리에틸렌 복합 화합물을 적용하였다.

초기 설계된 음향패키지에 대한 RVS 특성을 분석하기 위해 COMSOL multiphysics를 사용하여 수치해석을 진행하였다. 음향패키지와 수중청음기, 호스로 구성된 3D 모델을 해석에 반영하였고 호스 내부 유체는 절연오일을 적용하였다. 음향패키지 고정을 위해 사용되는 로프구조와 내심호스(호스 내부에 로프 적용)는 미소 영역에 대한 격자 생성 어려움 및 해석 시간을 고려하여 제외하였다. 내심호스는 로프를 제외하고 호스 물성만을 적용하였다. 해석 모델은 유체-구조-압전세라믹 경계 조건을 적용하여 음압에 의한 구조 진동 및 압전세라믹의 전기적 특성을 해석하였다. 음압은 자유음장의 반사파가 없는 경계조건을 적용하고 외부에서 유입되는 압력 조건은 평면파(plane wave)를 적용하였다. 해석에 사용한 모델 및 경계조건은 Fig. 2와 같다.

3D 유체 영역에서의 음파 및 음압 전달 모델을 위한 Helmholtz 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} \nabla P - q_d \right) - \frac{\omega^2 P}{\rho_c c^2} = Q_m. \quad (1)$$

위의 식에서  $P$ 는 음압,  $\rho_c$ 는 유체 밀도,  $\omega$ 는 각속도,  $c$ 는 음속,  $Q_m$ 과  $q_d$ 는 각각 monopole, dipole 음원에 대한 source term을 나타낸다.

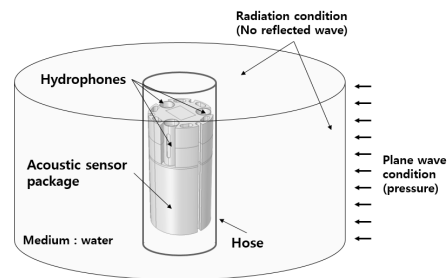


Fig. 2. Numerical simulation model domain.

Fig. 3은 수중청음기의 RVS로서 음향패키지 해석 모델에 대한 주파수 대역 Y0 ~ Y5에서의 수치해석 결과이다. 그래프의 실선은 음향패키지에 적용되는 세 개의 수중청음기에 대한 RVS값이다. 주파수와 RVS는 정규화 하여 표현하였다. 해석 결과 Y1 부근과 Y3 ~ Y4 사이에서 세 개의 수중청음기 RVS의 급격한 변화를 확인할 수 있었다. Y1 주파수의 경우, 해석에 적용된 호스의 영향으로 분석되었고 Y3~Y4 사이의 큰 RVS변화는 음향패키지와 실드캔의 모드 특성에 영향을 받은 것으로 확인되었다. Fig. 4는 Y3 부근 주파수에서 음향패키지의 정현파 진동 시 발생

되는 변위 변화이다. Fig. 4의 오른쪽 그림(radial)과 그래프(longitudinal)를 통해 음향패키지의 방사방향 공진 모드와 종방향 공진 모드를 확인하였다. 이와 같은 구조 공진 모드 발생은 음향패키지 내의 수중 청음기 수신신호의 크기와 위상 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 음향패키지의 형상만을 변경하여 구조 모드형상을 줄일 수 있는 방안에 대해 연구하였다. 음향패키지 형상 설계 시 장착 공간의 제약조건을 고려한 음향패키지 설계변수로 길이 L과 전자부케이스 높이 h, 수중청음기 실드캔 두께 t를 선정하였다. 이를 통해, 각 변수에 대한 민감도 분석 및 최적점을 찾기 위해 실험계획법을 적용하였다.<sup>[46]</sup>

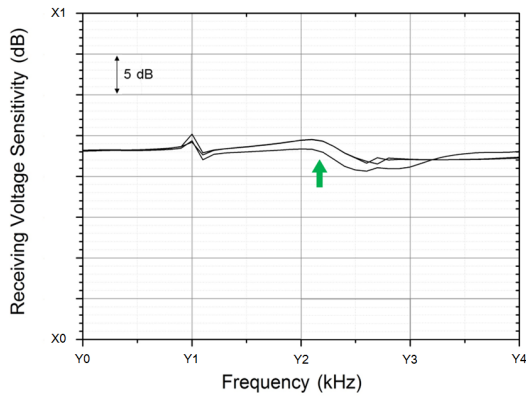


Fig. 3. Simulation result of acoustic package.

### III. 실험계획법 적용

앞서 언급한 설계 변수들의 최적 조건을 찾기 위하여 본 연구에서는 실험계획법을 적용하였다. 여러 실험계획법 중 적은 회수의 실험으로 곡면을 추정하기 위해 중심합성법(Central Composite Design, CCD)을 사용하였다. 반응표면분석은 설정된 요인들이 관심 반응값에 어떤 영향을 미치는지 확인하고 원하는 반응값에 대한 최적 조건을 찾기 위해 사용하였다.

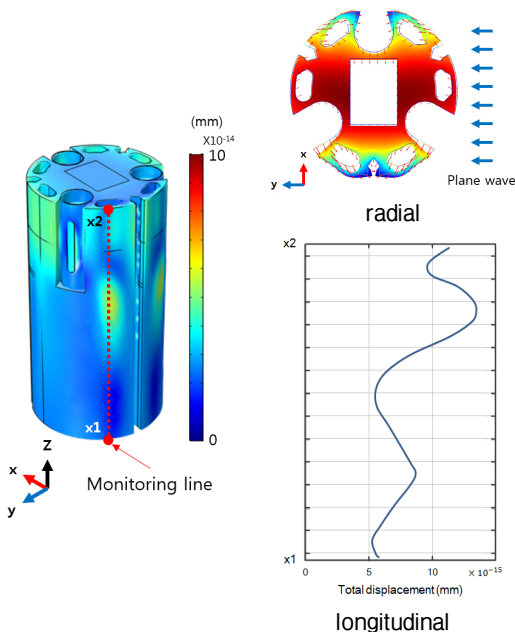


Fig. 4. Mode shape of acoustic package (at arrow point in Fig. 3).

#### 3.1 중심합성법

중심합성법은 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 중심점과 축점을 2<sup>k</sup> 요인실험에 추가시킨 실험설계기법이다. 본 연구에서는 초기 설계 모델의 수치해석 결과를 바탕으로 Fig. 1에 표현된 길이 L(x<sub>1</sub>)과 수중청음기 실드캔 두께 t(x<sub>2</sub>), 전자부케이스 높이 h(x<sub>3</sub>)로 독립 변수를 선정하였다. 설계 변수의 기본값을 100%로 가정하였을 때 길이 L과 실드캔 두께 t는 ±30%의 변동폭을 적용하였으며 전자부조립체 높이 h는 ±10%의 변동폭을 적용하였다. 음향패키지의 설계 제한사항을 고려하여 수준을 30% 범위 내에서 선정하였다. 특히 전자부케이스 높이의 경우는 음향패키지 내부 공간이 협소하기 때문에 최대 10%의 범위만 허용 가능하였다. 종속 변수는 반응 표면을 생성하기 위해 필요한 목적 함수로서 관심 주파수 대역인 Y3 ~ Y4에서의 RVS 편차로 결정하였다.

Table 1. Factors and levels.

Factor (mm)	Level			Axial point
	0	-1	+1	
L	$x_1$	$x_1-30\%$	$x_1+30\%$	1.414
t	$x_2$	$x_2-30\%$	$x_2+30\%$	1.414
h	$x_3$	$x_3-10\%$	$x_3+10\%$	1.414

중심합성법에 따라 설계된 총 3개 인자에 대한 수준은 Table 1과 같다.

### 3.2 반응표면분석

중심합성법을 통해 얻은 실험조건에 대한 결과를 이용하여 반응표면을 생성하고, 이에 대한 최적점을 찾기 위해 반응표면분석을 수행하였다. 반응표면분석은 관심 영역 전체에 속한 임의의 변수 수준에서 결과값을 예측하고, 이를 통해 원하는 결과값의 변수 수준을 최적화하는 통계 분석법을 의미한다. 따라서 반응표면분석을 통해 여러 독립변수의 변화에 따른 특정 종속 변수의 변화를 알 수 있다. 반응표면분석에는 독립변수들의 복합적인 반응을 분석할 수 있는 회귀 모형을 이용한 예측식이 사용된다. 본 연구에서는 Eq. (2)와 같이 반응면을 생성하기 위한 2차 회귀 모형을 이용하였다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j, \quad (2)$$

여기서 Y는 종속 변수, x는 독립 변수,  $\beta$ 는 회귀 계수를 나타낸다. Table 2는 중심합성법에 따라 설계된 총 15회의 실험조건과 각 실험에 대한 RVS 편차결과이다. Table 2에서 RVS 편차는 최소 1.7에서 최대 8.1로 확인되었다. 총 15개의 실험 결과를 바탕으로 minitab 프로그램을 이용하여 각 독립 변수에 대한 주효과도와 이때의 반응 표면 회귀 방정식을 산출하였다. 2차 회귀 모형을 통해 얻은 주효과도는 Fig. 5와 같으며 이때의 반응 표면 회귀 방정식은 Eq. (3)과 같다.

$$Y = -29.9 + 0.405L + 23.3t + 0.08h - 0.0017L^2 + 3t^2 - 0.0067h^2 - 0.1Lt + 0.0028Lh - 0.215th \quad (3)$$

Table 2. Test condition and simulation results.

Case	L	t	h	RVS deviation
1	-1	-1	-1	2.2
2	-1	-1	1	1.9
3	-1	1	-1	6.8
4	1	-1	-1	1.9
5	-1	1	1	5.1
6	1	-1	1	1.7
7	1	1	-1	3.2
8	1	1	1	3.4
9	0	0	0	4.9
10	-1.414	0	0	2.3
11	1.414	0	0	1.7
12	0	-1.414	0	2.5
13	0	1.414	0	8.1
14	0	0	-1.414	4.9
15	0	0	1.414	4.9

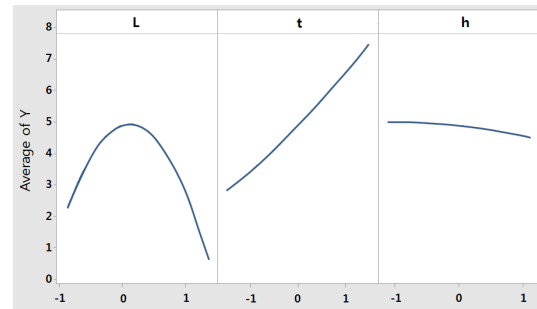


Fig. 5. Main effects plot of dependent variables.

반응 표면 회귀 방정식을 통해 반응 표면을 생성하여 목표로 하는 RVS 편차가 1 dB가 되는 최적점을 찾은 결과, -1수준(L), -1.414수준(t), 1.414수준(h)으로 확인되었다.

Fig. 5의 주효과도는 각 변수의 변화에 따른 종속 변수(Y)에 대한 영향력을 비교할 수 있다. 그래프의 기울기가 클수록 종속변수에 대한 영향이 높다는 것을 의미한다. Fig. 5에서 보이는 것과 같이 종속변수인 RVS 편차는 독립 변수 t의 변화에 가장 지배적인 것을 확인할 수 있다. 주효과도 분석을 통해 전자부 조립체의 높이 h는 L과 t보다 RVS 편차에 영향이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 높이 h에 대한 유의성을 확인하기 위하여 파레토 차트를 확인하였다.

Fig. 6의 파레토 차트에서 보여지는 것과 같이 점선보다 큰 인자는 유의수준 2.571에서 유의함을 뜻

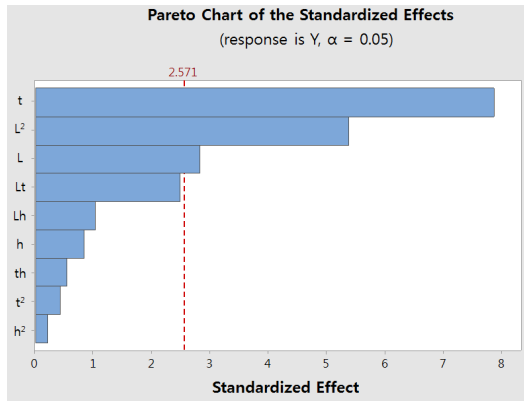


Fig. 6. Pareto chart.

한다. h 인자와 관련된 교호작용은 모두 유의하지 않은 것으로 분석되었기 때문에 수준을 크게 바꾸더라도 결과값에 큰 영향을 주지 않을 것으로 예상되었다.

반응표면분석을 통해 얻은 최적점에서의 음향패키지 형상을 바탕으로 설계 개선 모델을 제작하였다. 이때 음향패키지의 설계 조건을 고려하여 h는 -1 수준, t는 -1 수준으로 변경하였다. 설계 개선된 음향패키지는 중심합성법의 실험 조건인 Table 2의 Case 1과 같기 때문에 RVS 편차값이 2.2 dB를 가질 것으로 예상된다. 본 논문에서는 수치해석 결과에 대한 검증은 위해 수조시험을 수행하였다.

#### IV. 수조시험 결과

초기 설계된 음향패키지와 설계 개선된 음향패키지에 대해 수조시험을 진행하였다. 수조시험은 가로×세로×수심이 18 m × 20 m × 10 m인 국방과학연구소 수조에서 수행되었으며, RVS 측정 조건 및 음향 측정 시스템의 구성은 Fig. 7과 같다. 측정대상 수중청음기의 RVS는 이미 교정된 표준 수중청음기와 상대 비교하여 얻을 수 있는 비교교정법을 사용하였다. 이러한 방법에 의한 측정대상 수중청음기의 RVS( $M_x$ )는 Eq. (4)와 같이 얻어진다.

$$20\log M_x = 20\log M_s + 20\log e_x - 20\log e_s \quad (4)$$

$M_s$ 는 교정된 표준 수중청음기의 수신 전압감도,  $e_s$ 는 표준 수중청음기의 개방회로 출력 전압,  $e_x$ 는 측정대

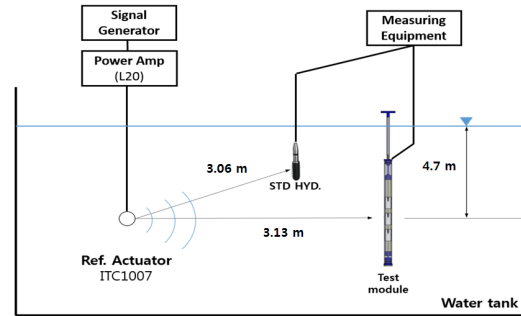


Fig. 7. Water tank test configuration and conditions.

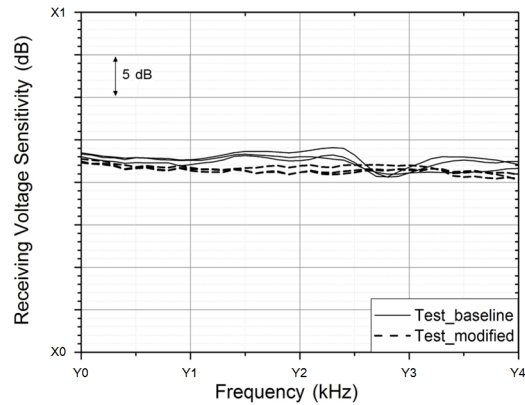


Fig. 8. Water tank test results.

상 수중청음기의 개방회로 출력전압이다.

수조시험을 통해 측정된 초기 설계 모델과 설계 개선된 음향패키지의 RVS는 Fig. 8과 같다. 그래프의 실선은 초기 설계된 음향패키지에 적용한 세 개의 수중청음기 RVS 값이며, 점선은 설계 개선된 음향패키지에 적용한 세 개의 수중청음기 RVS 값이다. 시험에 적용된 수중청음기는 같은 lot에서 제작된 제품을 사용하였다. Fig. 8의 실선(Test\_baseline)은 초기 설계된 음향패키지에 대한 수조시험 결과로서 수치해석 결과와 마찬가지로 Y3 ~ Y4 사이의 주파수 대역에서 세 개의 수중청음기 모두 RVS가 급격히 떨어지는 것이 확인되었다. 또한 세 개의 수중청음기 간 RVS 레벨 차이는 약 4 dB로서 수치해석 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 시험에 사용된 모듈에는 로프 인장구조와 내심호스가 적용되었기 때문에 Y1 주파수에서의 RVS 변화는 나타나지 않았다.

설계 개선된 음향패키지(Fig. 8의 Test\_modified)는 기존 음향패키지와 비교하여 전 주파수 대역에서 RVS는 떨어지지만 RVS 변동폭이 안정적인 것을 확



인할 수 있다. 설계 목적은 Y3~Y4 주파수 부근에서 세 개의 수중청음기간 수신전압감도 레벨 차이를 줄이는 것이다. 설계 개선된 모델의 경우 RVS의 편차는 약 2 dB로서 기존 음향패키지 대비 약 2 dB 개선되었다. 또한 이 값은 중심합성법의 실험 조건인 Table 2의 Case 1 편차값 2.2 dB와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 검증 결과를 통해 실제 실험계획법을 통해 얻은 최적점에서의 음향패키지 형상은 Y3~Y4 주파수 부근에서 약 1 dB의 RVS 편차를 가질 것을 예상할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 삼각 배열 수중청음기가 적용된 예인 음탐기의 음향패키지 형상에 대한 연구를 위해 수치해석과 실험계획법을 이용하였다. 초기 설계된 음향패키지 형상에 대한 수치해석 결과 음향패키지의 구조 공진 모드 특성이 확인되었다. 이에 따라 발생된 관심 주파수 대역에서 RVS 편차를 줄이기 위해 설계 변수를 설정하고 실험계획법을 진행하였다. 중심합성법을 이용하여 총 3개 인자에 대한 15회의 실험 조건을 생성하고 수치해석을 이용하여 종속변수를 구하였다. 중심합성법을 통해 얻은 실험조건에 대한 결과를 이용하여 반응표면을 생성, 최적점을 찾기 위해 반응표면분석을 사용하였다.

각 독립 변수에 대한 주효과도와 파레토 차트를 통해 쉘드캔의 두께와 음향패키지의 길이가 관심 주파수 대역에서의 RVS 편차에 영향이 높은 것을 확인할 수 있었다. 반응표면분석을 통해 얻은 최적점은 -1수준(L), -1.414수준(t), 1.414수준(h)으로서 RVS 편차는 약 1 dB로 확인되었다. 최적점에서의 음향패키지 형상은 RVS 편차만 고려된 것이기 때문에 실제 예인 음탐기 음향모듈에 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 음향패키지 설계 강도를 고려하여 각 설계 변수는 -1수준으로 변경하여 음향패키지를 제작하였다. 각 설계 변수가 -1인 경우 중심합성법의 실험 조건인 Case 1과 일치하기 때문에 RVS 편차는 2.2 dB로 예상되었다.

수조시험은 초기 설계된 음향패키지와 설계 개선된 음향패키지를 대상으로 진행되었다. 시험 결과

수치해석에서 보인 RVS 변화가 동일한 주파수 대역에서 확인되었다. 설계 개선된 음향패키지의 경우 전 주파수 대역에서 안정적인 RVS를 가지고 관심 주파수 대역에서 RVS 편차는 2 dB로 측정되었다. 설계 개선된 음향패키지 수조시험 결과는 중심합성법의 실험 조건인 Case 1의 수치해석 결과와 거의 유사함을 확인할 수 있다.

## References

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound, 3<sup>rd</sup> Ed.* (McGraw-Hill, Washington D. C, 1983), pp. 31-46.
2. H. S. Seo, Y. H. Cho, and C. Y. Joh, "Structural-acoustic coupled analysis of buried hydrophone system" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **17**, 797-804 (2007).
3. S. Chen, W. Zhu, and Y. Cheng, "Multi-Objective optimization of acoustic performances of polyurethane foam composites," *Polymers.* **10**, 788 (2018).
4. H. Kang, J. S. Jang, D. H. Kim, J. H. Kang, W. S. Yoo, and J. W. Lee, "Prediction of impact energy absorption in a high weight drop tester by response surface methodology" (in Korean), *J. Korean Soc. Manuf. Process Engineers.* **15**, 44-51 (2016).
5. D. Shin, C. Cheong, S. Heo, T. H. Kim, and J. Jung, "Performance/Noise optimization of centrifugal fan using response surface method" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.* **41**, 165-172 (2017).
6. S. N. Rim, S. R. Shin, and H. S. Shin, "A study on a-pillar & wiper wind noise estimation using response surface methodology at design stage" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **37**, 292-299 (2018).

## 저자 약력

▶ 이 정 현 (JungHyun Lee)



2013년 2월: 홍익대학교 조선해양공학과 학사 졸업

2016년 8월: 서강대학교 기계공학과 석사 졸업

2016년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원

▶ 신 증 호 (Jeungho Shin)



2009년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 학사 졸업  
2011년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 석사 졸업  
2015년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임  
연구원

▶ 권 오 조 (Oh-Cho Kwon)



1990년 2월: 아주대학교 기계공학과 학사  
졸업  
1993년 2월: 아주대학교 기계공학과 석사  
졸업  
1993년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임  
연구원

▶ 김 군 철 (Gunchil Kim)



1980년 2월: 동아대학교 전자공학과 학사  
졸업  
1982년 2월: 동아대학교 전자공학과 석사  
졸업  
1982년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 수석  
연구원