

# 캐비테이션 터널 시험용 청음기배열 최적 설계기법

## A Study on Hydrophone Array Design Optimization for Cavitation Tunnel Noise Measurements

박철수<sup>†</sup>, 설한신, 김건도, 박영하

(Cheolsoo Park<sup>†</sup>, Hanshin Seoul, Gundo Kim, and Youngha Park)

한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소

(접수일자: 2012년 11월 7일; 채택일자: 2013년 2월 6일)

**초 록:** 본 논문에서는 캐비테이션 터널에서의 소음계측용 청음기 배열 설계를 위한 최적화 기법을 제안하였다. 제안된 최적설계 기법은 배열 설계인자 및 목적함수 정의 그리고 최적화 알고리즘 적용 등의 내용으로 구성되어 있다. 설계인자 정의는 원형배열, 나선배열, 다중나선배열을 대상으로 하였다. 목적함수는 주엽의 빔폭과 최대 부엽 크기를 동시에 고려할 수 있도록 정의하였다. 최적화 알고리즘으로는 광역 최적화 기법의 일종인 VFSR 기법을 적용하였다. 최적 설계기법을 각 배열에 적용 후 도출된 최적 배열을 대상으로 최대 부엽크기 및 주엽의 빔폭을 분석하였다. 끝으로 캐비테이션 터널 내부의 다중반사를 고려한 빔형성 결과 평가를 통해 본 기법의 유용성을 확인하였다.

**핵심용어:** 청음기배열, 빔형성 기법, 캐비테이션 터널, 최적화 기법, 배열설계

**ABSTRACT:** This paper proposes a hydrophone array design optimization technique for cavitation tunnel noise measurements. The optimization technique comprises of design parameters, an objective function and an optimization algorithm. The design parameters are defined for circular, spiral and multi-spiral arrays. The objective function is defined so as to consider the mainlobe beamwidth and the maximum sidelobe level simultaneously. A global optimization scheme is applied to the array design using very fast simulated reannealing (VFSR). After applying the optimization technique to arrays respectively, the peak sidelobe level and the mainlobe beamwidth of optimum arrays are analyzed. Finally the array patterns considering multiple reflections in the cavitation tunnel are evaluated to validate the proposed method.

**Keywords:** Hydrophone array, Beamforming, Cavitation tunnel, Optimization, Array design

**PACS numbers:** 43.60. Fg

### 1. 서 론

함정 및 잠수함의 경우 임무수행 및 생존성 관점에서 수중방사소음은 중요한 특수성능의 한 분야로서 오래 전부터 다루어져 왔다.<sup>[1]</sup> 최근에는 선박의 소음이 해양생태계에 미치는 잠재적인 악영향을 해소하고자 일반 상선의 수중방사소음 저감의 필요성이 널리 부각되었다.<sup>[2,3]</sup> 그런데 수중방사소음에 대한 연구는 현재 일부 선진국을 중심으로 제한적으로 수행되고 있고, 더욱이 그 내용이 주로 군사적인 측면

과 결부되어 있기 때문에 연구결과의 공유가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 한국해양과학기술원(구, 한국해양연구원)은 고부가가치 선박을 포함한 수상함 및 잠수함의 수중방사소음 연구를 국내에서 자체적으로 수행하기 위해 “저소음 대형 캐비테이션 터널(LCT, Large Cavitation Tunnel)”을 구축해 연구에 활용하고 있다. 수중방사소음은 소음원에 따라 기계류 소음, 유체동력학적 소음, 그리고 추진기 소음으로 나뉘 수 있으며, 그 중 “저소음 대형 캐비테이션 터널”은 주로 유체동력학적 소음과 추진기 소음 연구에 활용되고 있다.<sup>[4]</sup>

캐비테이션 터널에서 수행되는 소음실험의 주된

<sup>†</sup>Corresponding author: Cheolsoo Park (parkcs@kiost.ac)  
171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea.  
(Tel: 82-42-866-3465, Fax: 82-42-866-3449)

관심은 소음원의 크기를 측정하는 것이며, 이와 관련하여 많은 연구가 수행된 바 있다.<sup>[4,5]</sup> 캐비테이션 터널을 활용한 모형시험은 각 소음원 별 소음의 크기를 구별하여 측정이 어려운 실선 시험에 비해 유체동력학적 소음과 특히 프로펠러에 의해 발생하는 추진기 소음을 개별적으로 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 캐비테이션 터널에서 측정한 소음레벨은 모형선 스케일이기 때문에 스케일 효과 등을 고려해 이를 실선으로 확장하는 과정이 추가로 필요하다. 모형선-실선 상관관계는 참고문헌<sup>[6]</sup>을 참고하기 바란다. 캐비테이션 터널 소음실험의 또 다른 목적은 소음원의 위치를 판별하여 해당 소음원을 제거하거나 그 크기를 최소화하는 것이다. 캐비테이션 터널에서 소음원의 위치 판별에는 해양 음원탐지에 널리 활용되어진 빔형성(beamforming) 및 정합장처리(MFP, Matched Field Processing)가 적용된 바 있다.<sup>[7]</sup>

캐비테이션 터널에서 소음 측정은 단일 청음기(hydrophone) 또는 청음기 배열(hydrophone array)을 활용하여 측정된다. 단일 청음기는 측정시스템 구축이 손쉬운 장점으로 인해 소음원의 준위가 배경소음에 비해 월등히 큰 경우 소음원의 크기를 측정하는데 활용된다. 그러나 소음원의 준위가 배경소음과 대등하거나 작은 경우에는 측정이 불가능한 단점이 있고 이 경우 청음기 배열의 배열이득으로 이러한 한계를 극복할 수 있다. 특히, 빔형성 기법 및 정합장 처리를 위해서는 청음기 배열의 활용이 필수적이다.<sup>[8,9]</sup>

현재 캐비테이션 터널 중 소음측정용 청음기 배열 시스템이 구축된 곳은 대표적으로 미국의 LCC (Large Cavitation Channel)<sup>[10]</sup>과 일본의 FNS (Flow Noise Simulator)<sup>[11]</sup>를 들 수 있다. LCC의 청음기 배열은 95채널로 구성된 중첩 선형 평면배열이 시험부(test section) 하방의 음향계측부(acoustic trough)에 설치되었다. 시험부 내부의 유동이 음향계측부에 영향을 주지 않도록 시험부와 음향계측부는 음향창(acoustic window)에 의해 분리가 되어 있다. FNS의 청음기 배열은 32채널로 구성된 불규칙 원형배열이 역시 시험부 하방의 음향계측부에 설치되었다. 또한 FNS는 필요시 16채널로 구성된 불규칙 평면배열을 시험부 양 측면 관측창 외부에 부착 설치하여 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다.

소음측정을 위한 센서 배열의 활용은 풍동(wind tunnel)에서 자동차 및 항공기의 소음저감 목적으로 널리 활용되고 있다.<sup>[12]</sup> 단, 공기 중 소음을 대상으로 하는 풍동에서는 수중 청음기 대신 마이크로폰(microphone)을 측정센서로 사용하고 센서 배열이 유동에 영향을 덜 미치도록 풍동의 내부 벽면과 동일 평면에 위치하는 것이 일반적이다. 공력소음 측정을 위한 다양한 형태의 배열이 연구 및 활용되고 있으며 이 중 대표적인 평면배열로서는 스파스배열(sparse array),<sup>[13]</sup> 원형배열(circular array),<sup>[14]</sup> 나선배열(spiral array),<sup>[12]</sup> 그리고 다중 나선배열(multi-arm spiral array)<sup>[12]</sup> 등을 들 수 있다. 그런데 기존의 배열설계(array design)는 설계자의 경험을 바탕으로 주어진 조건을 만족하도록 시행착오 방식으로 이루어지는 것이 일반적이다.<sup>[12]</sup> 이에 본 논문에서는 캐비테이션 터널에 적용하기 위한 소음측정용 청음기 배열 설계를 위한 최적화 기법을 제안한다. 제안된 기법은 설계 인자(design parameter) 정의, 목적함수(objective function) 정의 및 최적화 알고리즘(optimization algorithm) 적용으로 구성되어 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 빔형성 및 청음기 배열 특성에 대해 기술하였고, 제3장에서는 청음기 배열설계 최적화 기법에 대해 기술한 후 제4장에서 배열설계 최적화 결과를 제시하였다. 끝으로 제5장에서 요약 및 결론을 맺었다.

## II. 빔형성과 청음기배열

빔형성은 배열의 위상을 조절하여 원하는 방향의 신호를 측정하는 신호처리 기법이다.<sup>[9,12]</sup> 빔형성 성능은 빔패턴(beam pattern)에 의해 평가될 수 있으며 빔패턴에는 일반적으로 하나의 주엽(mainlobe)과 다수의 부엽(sidelobe)이 함께 존재한다. 주엽의 빔폭(beamwidth)은 빔형성의 공간적 해상도(spatial resolution)를 결정하는 인자이며 부엽의 주엽 대비 상대적 크기는 빔형성에 의해 구분 가능한 소음원의 상대적 소음준위를 결정한다.

$M$ 개의 청음기로 구성된 배열의 빔형성을 위한 음향 신호모델은 주파수영역에서 다음과 같이 정의된다.

$$U(\omega, \vec{r}_s, \vec{r}_m) = S(\omega) G(\omega, \vec{r}_s, \vec{r}_m), m = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

식(1)에서  $S$ 와  $G$ 는 각각 음원신호와 전달함수(transfer function)를 말하며  $\vec{r}_s$ 와  $\vec{r}_m$ 은 임의의 원점에 대한 음원과  $m$  번째 청음기의 위치를 나타내는 위치 벡터이다. 자유음장(free field)에서 단극음원(monopole)의 전달함수는  $\exp(ikr_{sm})/r_{sm}$ 이다. 여기서  $k$ 는 매질의 파수(wave number)이고  $r_{sm}$ 은 음원과 청음기 사이의 거리를 의미한다. 가상의 음원위치에 해당하는 빔형성점(beamforming point)  $\vec{r}_b$ 로부터 모든 청음기에 도달하는 신호의 위상을 일치시키기 위한 조향벡터(steering vector)는 다음과 같이 정의된다.

$$W(\omega, \vec{r}_b, \vec{r}_m) = \exp(ik(r_{bo} - r_{bm})) \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

식(2)에서  $r_{bo}$ 와  $r_{bm}$ 는 빔형성점으로부터 임의의 배열 기준점  $\vec{r}_o$ 와 개별 청음기까지의 거리를 각각 의미한다. 음향신호와 조향벡터에 의한 빔형성 결과는 다음과 같이 주어진다.

$$Z(\omega, \vec{r}_b) = S(\omega) \sum_{m=1}^M \frac{1}{r_{sm}} \exp(ik(r_{bo} + r_{sm} - r_{bm})). \quad (3)$$

자유음장과 단극음원을 가정하면 음원으로부터 배열기준점까지 전파된 신호  $S_o(\omega, \vec{r}_s, \vec{r}_o)$ 는 구형파(spherical wave)인  $S(\omega) \exp(ikr_{so})/r_{so}$ 이고, 따라서 식(3)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$Z(\omega, \vec{r}_b) = AS_o(\omega, \vec{r}_s, \vec{r}_o) \quad A = \sum_{m=1}^M \frac{r_{so}}{r_{sm}} \exp(ik((r_{bo} - r_{so}) - (r_{bm} - r_{sm}))). \quad (4)$$

식(4)로부터 빔형성 결과는 배열 기준점에서 단일 청음기로 계측된 음장  $S_o(\omega, \vec{r}_s, \vec{r}_o)$ 와 배열이득  $A$ 의 곱으로 표현됨을 알 수 있다. 만약 음원과 청음기 배열과의 거리가 충분히 멀고( $r_{so} \approx r_{sm}$ ), 빔형성점과 음원의 위치가 일치한다면 배열이득은  $M$ 이 된다.

식(4)의 빔형성 결과로부터 빔패턴은 다음과 같이 정의된다.

$$B(\omega, \vec{r}_b, \vec{r}_s) = 10 \log_{10} (|Z(\omega, \vec{r}_b)|^2 / |Z(\omega, \vec{r}_s)|^2). \quad (5)$$

만약 소음원이 원거리에 있고 평면파(plane wave)로 전파한다면 다음과 같이 간단한 평면파 빔형성 결과를 유도할 수 있다.

$$B(\omega, \vec{k}_b) = 10 \log_{10} \left| \sum_{m=1}^M \frac{\exp(i\vec{k}_b \cdot \vec{r}_m)}{M} \right|^2. \quad (6)$$

식(6)에서  $\vec{k}_b$ 는 평면파의 진행 방향을 나타내는 파수 벡터를 의미한다. 식(6)의 지수함수의 변수는 평면파의 진행 방향( $\vec{k}_b$ )에 따른 청음기의 위치( $\vec{r}_m$ )별 상대적 위상차를 나타낸다.

배열의 설계 및 평가 목적으로는 간편한 평면파 빔형성의 적용이 편리하다.<sup>[12]</sup> 이에 본 논문에서는 최적 배열설계의 빔형성 모델로서 평면파 빔형성을 적용하였고, 구형파 빔형성(식(4))으로부터 최종 설계결과의 검증을 수행하였다. 그런데 캐비테이션 터널 시험부 내부는 막힌 구조로 되어 있다. 또한 시험부의 크기(LCT: 폭 2.4 m, 높이 1.8 m)가 반사파의 영향을 무시할 정도로 크지 않으므로 다중반사에 대한 영향이 고려되어야 한다. 다중반사는 거울 이미지(mirror image)로써 고려될 수 있다. 따라서 검토되어야 될 빔형성점의 범위는 실제 물리적 공간이 아니라 거울 이미지가 포함될 수 있도록 충분히 커야 한다.

가장 기본적인 평면배열(planar array)의 형태로서 선형배열을 들 수 있다. 선형배열은 청음기가 직선 형태로 배치되고 청음기 간격이 일정한 것이 일반적이다. 선형배열은 그 형태가 단순한 반면 인접하는 청음기의 간격이 최대 계측 주파수 신호의 반파장 이하가 되어야 하는 Nyquist 조건<sup>[15]</sup>을 만족하여야 한다. 만약 청음기 간격이 본 조건을 만족 못할 경우 공간 에일리어싱(spatial aliasing)에 의한 허상(ghost image)이 생성된다. 이러한 선형배열의 제한을 극복하기 위해 랜덤 배열(random array)<sup>[16]</sup>이 제안된 바 있다. 랜덤 배열의 핵심은 청음기 배열의 주기성을 최대한

배제하여 두 청음기 사이의 위치벡터로 구성된 벡터 공간(coarray)의 다양성을 극대화 하는데 있다.<sup>[12]</sup> 대표적인 랜덤 배열로는 원형배열, 나선 배열, 다중 나선배열이 있으며 본 논문에서는 위의 랜덤배열을 대상으로 설계 최적화를 수행하였다.

### III. 청음기배열 최적설계 기법

청음기배열 설계에서 우선적으로 고려되어야 할 인자는 해당 청음기 배열의 크기와 구성 청음기의 개수이다. 일반적으로 랜덤 배열의 크기는 주엽의 범폭을 결정하며 청음기 개수는 부엽의 크기와 관련된 인자이다.<sup>[6]</sup> 캐비테이션 터널에서 청음기 배열의 크기는 설치 공간 및 조건에 따라 제한되는 것이 일반적이다. 또한 청음기 배열의 센서의 개수가 증가할수록 시스템이 복잡해지고 비용이 증가하게 된다. 따라서 최대 부엽 크기 등 설계목표를 정한 후 설계 목표를 만족하는 최소 센서 개수를 결정해야 한다.

다수의 동심원으로 구성된 원형배열의 경우 동심원의 수( $N_r$ ) 및 각 동심원에서의 센서의 개수( $N_{si}$ )에 의해 전체 센서의 수( $N_s$ )가 결정된다. 만약 홀수개의 센서가 하나의 동심원상에 등간격으로 배치된다면 두 청음기간의 위치벡터는 서로 중복되지 않는다. 이 때 하나의 기준 청음기의 위치(원점으로부터의 거리( $r_i$ )와 방위각( $\theta_i$ ))가 결정되면 나머지 청음기의 위치 또한 자동으로 결정된다. 한편, 서로 다른 동심원 상의 두 청음기사이의 위치벡터는 각 동심원의 기준 청음기의 위치 및 동심원 상의 청음기의 개수에 따라 결정된다. 청음기 배열의 크기는 가장 외곽의 동심원 반지름에 의해 결정된다. 따라서 원형배열의 최적화 인자의 개수는 동심원의 개수에 따라 달라진다. 이는 각 동심원에서의 센서 수( $N_{si}$ ) 및 기준 청음기의 위치( $r_i, \theta_i$ )가 동심원의 개수에 비례하여 증가하기 때문이다. 문제를 단순화하기 위해서 동심원의 개수 및 동심원상의 센서 개수에 대한 다수의 후보군을 사전에 결정한 후, 각 후보를 대상으로 나머지 설계인자에 대해 최적화를 각각 수행하여 그중 가장 최적의 결과를 택하는 방식을 고려할 수 있다. 또한 동심원의 배치를 일정한 규칙(제4장 참

조)에 따라 수행한다면 동심원의 반지름( $r_i$ )에 대한 최적화 인자의 개수를 줄임으로서 최적화 효율을 높이는 효과를 얻을 수 있을 것이다.

나선배열의 경우 다음과 같이 기하학적으로 정의된 로그 나선(log spiral)의 호를 따라 등간격으로 센서를 배치함으로써 서로 다른 두 센서 사이의 위치벡터가 중복되지 않는 랜덤배열을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i(\theta_i) &= r_o \exp[\cot(\sigma)\theta_i], \quad i = 1, 2, \dots, N_s \\ \theta_i &= \frac{1}{\cot(\sigma)} \ln \left( 1 + \frac{\cot(\sigma)l_i}{r_o \sqrt{1 + \cot^2(\sigma)}} \right), \\ l_i &= \frac{i-1}{N_s-1} \frac{r_o \sqrt{1 + \cot^2(\sigma)}}{\cot(\sigma)} \left( \frac{r_{\max}}{r_o} - 1 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서  $r_i$ 와  $\theta_i$ 는  $i$ 번째 청음기의 원점으로부터의 거리와 방위각을 나타내며  $l_i$ 는 원점에서부터 해당 청음기까지 나선 호의 길이(arc length)를 의미한다. 또한  $\sigma$ 는 나선 각(spiral angle)을 의미하며  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 사이의 값을 가진다. 식(7)에 따라 나선배열에서 모든 청음기의 위치는  $r_o, r_{\max}$ , 그리고  $\sigma$ 에 의해 결정될 수 있다. 따라서 센서의 수가 결정된 후 최적화 인자는 위의 세 변수에 해당한다.

원형배열에서 각 동심원상의 청음기의 개수가 홀수로서 서로 동일하다면 기준청음기를 나선배열에서 사용된 로그 나선(식(7))과 교차하는 위치에 설치함으로써 서로 다른 두 기준 청음기 사이의 위치벡터가 중복되지 않도록 배열을 구성할 수 있다. 이 경우 배열에는 기준청음기의 개수와 동일한 수의 서로 중복되지 않는 나선들이 존재한다. 이 때 단일 나선배열에서와 같이 센서 사이의 나선호의 길이가 균일하다면 배열의 외곽에서 내부로 갈수록 센서가 밀집되는 현상이 발생한다. 따라서 다중 나선배열에서는 가장 안쪽의 동심원 상의 센서를 제외한 나머지 동심원 상의 센서가 차지하는 면적이 균일하도록 동심원의 반지름을 결정한다. 가장 안쪽의 센서를 예외로 한 것은 고주파 신호의 샘플링을 강화하기 위한 목적이다.<sup>[12]</sup> 이 경우 설계인자는 나선배열의 설계인자 외에 기준 청음기의 개수, 즉 동심원의 개수와 개별 동심원에서의 청음기의 개수가 추가된다. 그런

데 동심원의 개수 및 각 동심원상에서의 청음기 개수에 대한 다수의 후보를 미리 결정한 후 각 후보에 대한 최적화를 수행한다면 최적화의 관점에서 최적화 인자는 단일 나선배열과 같게 된다.

청음기 배열설계의 기본 목적은 관심 주파수 대역에서 주엽의 빔폭을 작게 하고 부엽의 크기를 제한하여 배열의 공간적인 분해능을 높이는 데 있다. 따라서 목적함수는 주엽의 빔폭과 부엽의 크기가 동시에 고려될 수 있도록 식(8)과 같이 정의되었다. 이때 관심 주파수 대역은 이산화 된  $N_f$ 개의 주파수에 의해 표현되며 목적함수 평가는 평면파 빔패턴(식(6))을 기준으로 한다.

$$\Phi(\bar{m}) = -\frac{1}{N_f} \sum_{i=f_1}^{f_{N_f}} \left( \frac{f_i \Delta_{HPBW}^i(\bar{m})}{SL_{max}^i(\bar{m})} \right) \quad (8)$$

$$\Delta_{HPBW} = (k_x/k + k_y/k)/2 \text{ @ HPBW}$$

식(8)에서  $\bar{m}$ 은 최적화 인자로 구성된 벡터이며  $SL_{max}$ 은 부엽의 최대크기(dB)를 의미한다. 빔폭( $\Delta_{HPBW}$ )은 주엽의 최대크기(파워)를 기준으로 절반 크기(HPBW: Half Power Beam Width)에 해당하는 무차원 파수로서 정의되었는데, 주엽의 형상이 비대칭일 경우를 고려하여 x축과 y축 두 방향의 매질 파수로 정규화 된 파수의 평균치를 취하였다. 또한 주엽의 빔폭은 주파수에 따라 달라지며, 특히 선배열에서는 주엽의 빔폭이 주파수에 반비례하는 것으로 알려져 있다.<sup>[9]</sup> 이러한 빔폭의 주파수 특성을 반영하고자 목적함수에 주파수 가중치  $f_i$ 를 도입하였다.

식(8)의 목적함수를 최소로 하는 최적 설계인자를 구하고자 광역 최적화 기법(global optimization method)의 일종인 VFSR(Very Fast Simulated Reannealing)<sup>[17]</sup>을 적용하였다. VFSR은 원자들의 집합적인 성질을 분석하는 통계역학에서 사용되는 개념을 차용한 SA의 변형된 한 형태이다. SA는 금속의 담금질 과정을 컴퓨터 시뮬레이션으로 모의한 것으로서 금속은 높은 온도에서는 분자의 운동이 활발해 지고 온도를 서서히 낮추는 과정에서 점점 더 안정된 상태, 즉 에너지(목적함수에 해당)가 낮은 상태로 굳어지게 된다. 이러한 개념을 최적화에 적용하면 온도가 높은 상태에

```

start at a random location  $\mathbf{m}_0$  with energy  $E(\mathbf{m}_0)$ 
loop over temperature ( $T$ )
• loop over number of random moves/temperature
• • loop over model parameters  $i = 1, \dots, M$ 
• • •  $u_i \in U[0,1]$ 
• • •  $y_i = \text{sgn}\left(u_i - \frac{1}{2}\right) T_i \left( \left(1 + \frac{1}{T_i}\right)^{|2u_i - 1|} - 1 \right)$ 
• • •  $m_i^{new} = m_i^{old} + y_i (m_i^{max} - m_i^{min})$ 
• • •  $m_i^{min} \leq m_i^{new} \leq m_i^{max}$ 
• • end loop
• • calculate  $E(\mathbf{m}^{new})$  for a new model  $\mathbf{m}^{new}$ 
• •  $\Delta E = E(\mathbf{m}^{new}) - E(\mathbf{m}_0)$ 
• •  $P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right)$ 
• • if  $\Delta E \leq 0$ , then
• • •  $\mathbf{m}_0 = \mathbf{m}^{new}$ 
• • •  $E(\mathbf{m}_0) = E(\mathbf{m}^{new})$ 
• • end if
• • if  $\Delta E > 0$ , then
• • • draw a random number  $r = U[0,1]$ 
• • • if  $P > r$  then
• • • •  $\mathbf{m}_0 = \mathbf{m}^{new}$ 
• • • •  $E(\mathbf{m}_0) = E(\mathbf{m}^{new})$ 
• • • end if
• • end if
• end loop
end loop
    
```

Fig. 1. Description of VFSR algorithm.

서는 탐색이 자유로워서 품질이 나빠더라도 그 해로의 이동이 허용될 수 있는 확률이 높다. 이는 지역 최적점으로부터의 탈출을 돕는 역할을 한다. 그러나 온도가 낮아지면 해의 이동은 점점 품질이 좋아지는 방향으로 집중되고 극도로 낮은 온도에서는 지역 최적화 알고리즘과 동일하게 된다. VFSR 알고리즘을 정리하면 Fig. 1과 같다.

#### IV. 청음기배열 최적설계 결과

본 연구의 관심 주파수 대역은 1-100kHz이며 대형 캐비테이션터널에서의 모형선 추진기 캐비테이션 소음을 주요 계측 대상으로 하였다. 대형 캐비테이션 터널의 배경소음은 각 설비 특성에 따라 달라지

나 1 kHz 이하의 대역에서는 장비 및 유동에 의한 배경소음이 지배적이다. 따라서 해당 주파수 영역의 신호는 신호대잡음비가 현저히 낮으므로 계측신호의 신뢰성을 확보하기가 어렵다. 또한 모형선 시험은 프로펠러의 회전수가 실선에 비해 높은 영역에서 수행되므로 모형선과 실선의 주파수 스케일링에 따라 모형선 스케일에서 1 kHz 이하의 주파수 영역은 실선 스케일에서 수십 Hz 이하의 주파수 대역에 해당한다. 실선에서 저주파 대역은 일반적으로 기계류에 의한 토널성분과 프로펠러의 회전에 의한 BPF (Blade Passing Frequency) 소음이 지배적이다.<sup>[18]</sup> 이에 프로펠러 캐비테이션 소음을 주요 계측대상으로 한 본 연구에서는 1 kHz 이상의 모형선 주파수 대역을 유효 주파수 대역으로 설정하였다. 최대 주파수는 모형선-실선 상관관계에 따라 실선으로 확장 시 실선 캐비테이션 소음 주파수 대역을 고려하여 설정되었다. 최적화 알고리즘 적용 주파수는 관심 주파수 대역에서 옥타브밴드(octave band) 중심주파수(2, 4, 8, 16, 32, 64 kHz)로 대표하였다. 배열을 구성하는 청음기의 개수는 45개이며, 청음기의 크기(B&K 8103 청음기)를 고려하여 두 청음기 사이의 최소간격은 4cm로 제한하였다. 청음기 배열판의 크기는 가로 1.6m, 세로 1.6m인 정사각형이며 캐비테이션 터널 시험부 길이방향을 x축, 폭방향을 y축, 그리고 수직방향을 z축으로 정의한다.

원형배열 최적설계를 위해 5개의 동심원을 가지는 두 가지 형태의 배열을 고려하였다. 첫 번째는 동심원간 거리가 등간격으로 배치되었으며 각 동심원에서의 청음기 개수가 5, 7, 9, 11, 13개로 구성된 배열(Case 1)이다. 두 번째는 외곽 4개의 동심원상의 청음기가 담당하는 면적이 균일하도록 각 동심원 당 9개의 청음기가 배치되고 고주파 신호의 샘플링을 위해 9개의 내부 청음기가 추가로 배치된 배열(Case 2)이다. 두 경우 공히 최적화 인자는 최소 동심원 반지름( $r_{\min}$ ), 최대 동심원 반지름( $r_{\max}$ ), 각 동심원에서의 기준 청음기 방위각( $\theta_i, i=2, \dots, 5$ ) 등 총 6개의 설계인자로 구성되었다. 기준 청음기 방위각  $\theta_1$ 은 x축을 기준으로  $0^\circ$ 이며, 각 설계인자의 탐색 범위는 Table 1과 같다.

총 45개의 청음기로 구성된 나선배열(Case 3) 설계

Table 1. Search bounds for circular array design parameters.

Parameter	Case 1	Case 2
$r_{\min}$ (m)	0-0.3	0-0.3
$r_{\max}$ (m)	0.6-0.8	0.6-0.8
$\theta_2$ ( $^\circ$ )	0-51.4	0-40.0
$\theta_3$ ( $^\circ$ )	0-40.0	0-40.0
$\theta_4$ ( $^\circ$ )	0-32.7	0-40.0
$\theta_5$ ( $^\circ$ )	0-27.7	0-40.0

Table 2. Search bounds for spiral and multi-spiral array design parameters.

Parameter	Spiral Array (Case 3)	Multi-spiral Array (Case 4)
$r_{\min}$ (m)	0 - 0.3	0 - 0.3
$r_{\max}$ (m)	0.6 - 0.8	0.6 - 0.8
$\sigma$ ( $^\circ$ )	0 - 90	0 - 90

인자는 제 3장에서 설명한 바와 같이  $r_o, r_{\max}$ , 그리고  $\sigma$ 이며 각 인자의 탐색범위는 Table 2와 같다. 다중 나선배열(Case 4)은 두 번째 원형배열(Case 2)과 동일하게 외각 4개의 동심원과 기준 나선이 만나는 위치에 기준 청음기가 배치되고 각 청음기가 차지하는 면적이 균일하도록 동심원 당 9개의 청음기가 배열되며 별도의 9개의 청음기가 내부에 배치되도록 구성되었다. 다중 나선배열 설계인자는 나선배열과 동일하며 탐색범위는 Table 2와 같다. VFSSR 탐색은 온도 변화 100회 및 각 온도에서의 100회 탐색을 통하여 총 10,000회의 목적함수 평가를 수행하였다.

목적함수 평가시 모든 평면과 전파방향이 고려될 수 있도록 최대 부엽크기는  $-0.99 \leq k_x/k$ ,  $k_y/k \leq 0.99$ 의 영역에서 결정하였다.

최적화 결과 설계된 청음기 배열은 각각 Fig. 2 (a)-(d)와 같다. 최적화 결과 분석을 위해 무작위 탐색(random search)에 해당하는 초기 100회의 탐색결과에 대해 주파수별 최대부엽크기의 평균값과 표준편차를 Fig. 3에서 오차막대(error bar) 그래프로 제시하였다. 그림에서 각 막대의 길이는 평균을 중심으로  $\pm$  표준편차의 크기를 나타낸다. Fig. 3은 최적 배열의 주파수별 최대 부엽크기 또한 비교하여 보여준다. 그림에서 y축은 주엽의 크기 대비 최대 부엽크기를

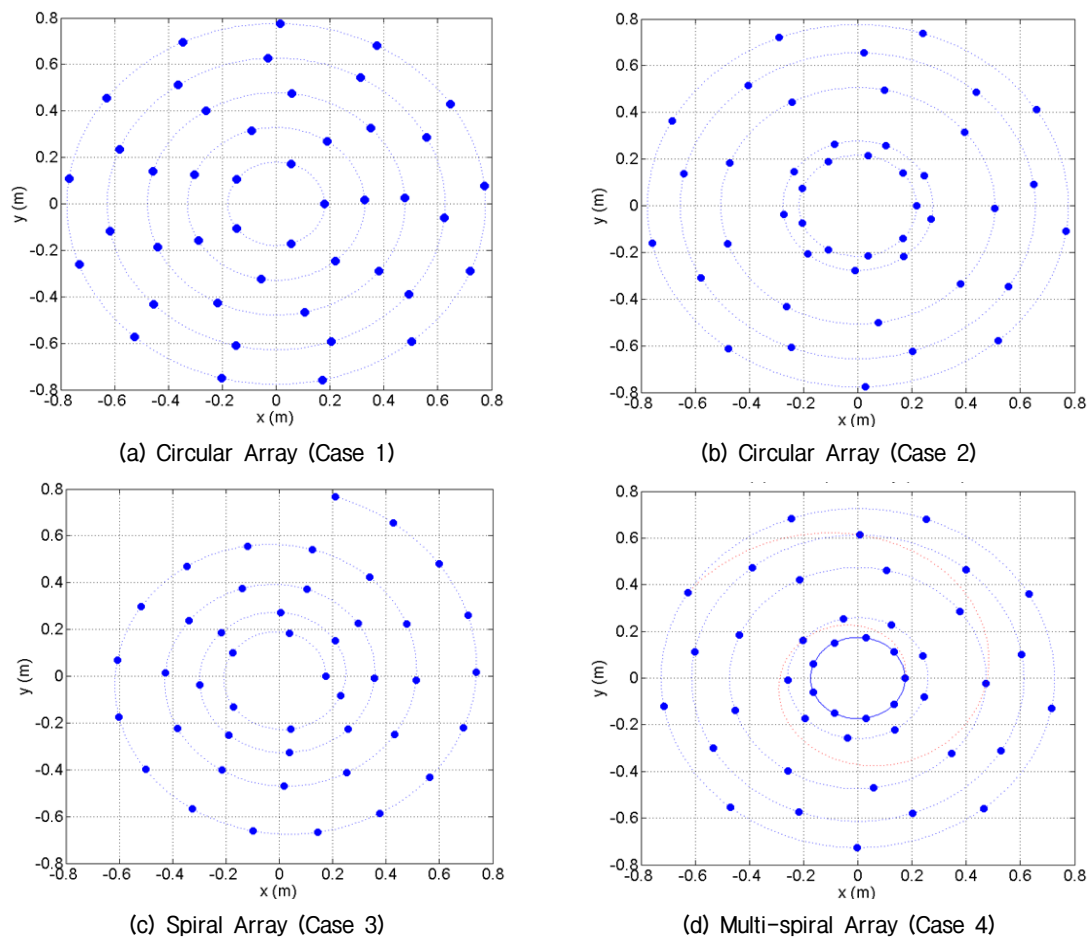


Fig. 2. Optimum arrays.

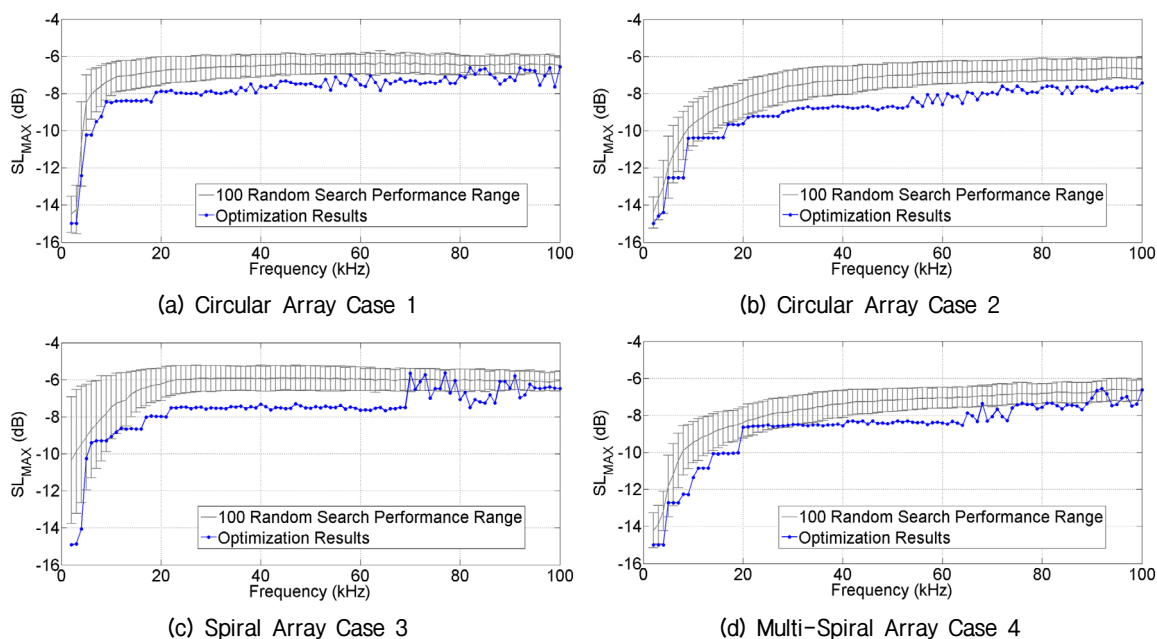


Fig. 3. Maximum sidelobe performances of 100 random searches and optimization results. ( $-0.99 \leq k_x/k, k_y/k \leq 0.99$ )

데시벨로 환산한 값으로써 식(6)으로부터 계산되었다. 따라서 값이 작아질수록 부엽의 크기가 작음을 의미한다. Fig. 3으로부터 모든 배열의 최적화 결과는 100회 무작위 탐색결과보다 우수한 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 특히 원형배열(Case 2)과 다중나선배열(Case 4)의 최적화 성능이 다른 두 배열에 비해 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 100회 무작위 탐색결과 또한 원형배열(Case 2)과 다중나선배열(Case 4)이 상대적으로 우수한 성능을 보였는데, 두 배열은 각 청음기가 차지하는 면적이 균일하게 배치되었다는 점에서 서로 공통점이 있다.

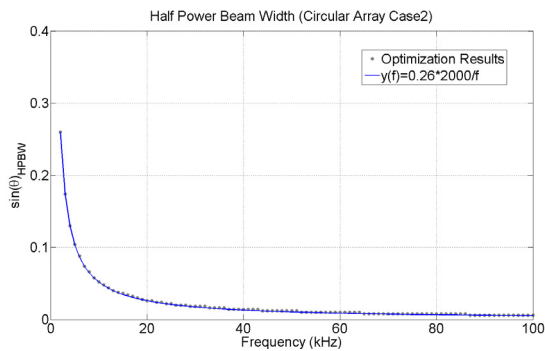


Fig. 4. Beam width of optimum circular array Case 2.

Fig. 4는 원형 배열(Case 2) 주엽 빔폭 최적화 결과를 보여준다. 제 3장에서 기술한 바와 같이 주엽의 빔폭은 주파수에 반비례하며  $\theta_{HPBW}(f) = \text{asin}(520f^{-1})$ 로 근사됨을 확인할 수 있다.

끝으로 구형과 빔형성을 통해 원형배열(Case 2)의 성능을 고찰하였다. 대상 소음원인 모형선 프로펠러는 일반적으로 상부 흡수판으로부터 약 40 cm 하방에 위치한다. 배열판은 프로펠러 중심으로부터 2 m 하방에 수평하게 배치된다. 주된 반사는 캐비테이션 터널 시험부 양 측면과 상부 흡수판에서 발생하게 된다. 이러한 반사파는 자유음장에서의 이미지 음원에 의한 직접파로 모의될 수 있으므로 식(4)의 적용이 가능하다. 프로펠러 중심의 좌표를 원점으로 할 때 각 반사면에서의 단일 반사에 의한 이미지 음원은 (0 m, -2.4 m, 0 m), (0 m, 2.4 m, 0 m), (0 m, 0 m, 0.8 m), 반사면 간의 이중 반사에 의한 이미지 음원은 (0 m, -2.4 m, 0.8 m), (0 m, 2.4 m, 0.8 m)의 위치에 존재한다. 따라서 빔형성점은 프로펠러 평면을 포함하는 폭 6 m, 높이 2 m의 사각형으로 구성하여 각각의 이미지 음원을 포함할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 5는 원형배열(Case 2)에 대한 옥타브밴드 중심

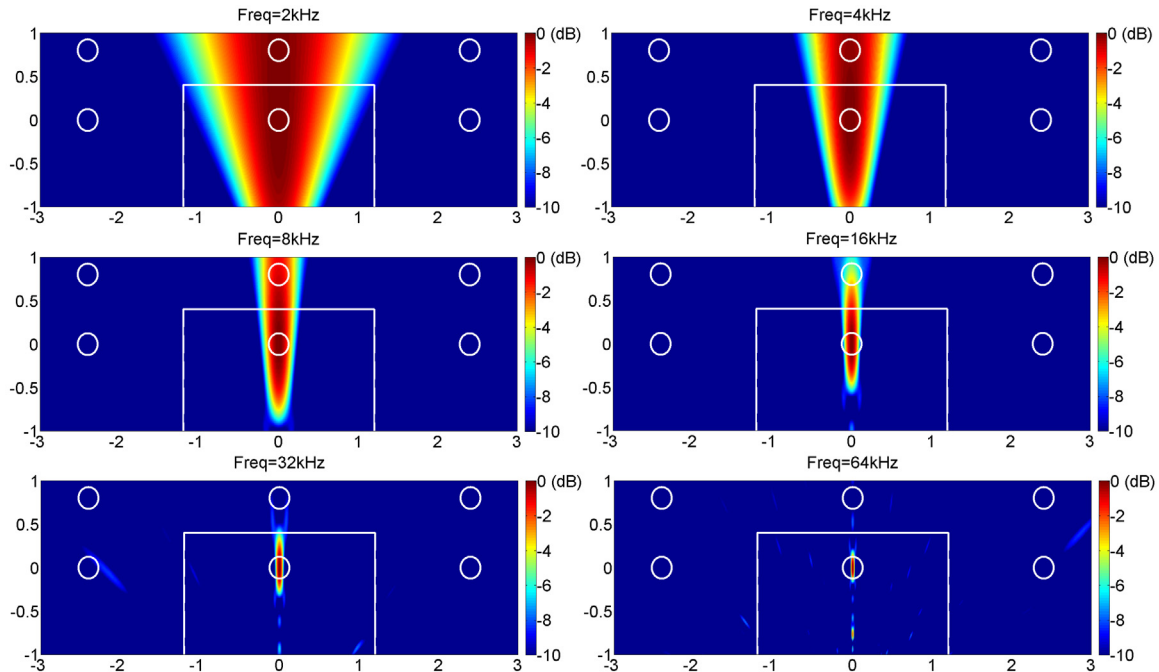


Fig. 5. Spherical wave beam patterns for the circular array Case 2. The beamforming points include a source and multiple image sources represented as circles in the figures.



주파수에서의 구형과 빔형성 결과(식(5))를 보여준다. 그림에서 x축과 y축은 프로펠러를 중심으로 빔형성 점의 폭방향 및 높이방향의 좌표를 각각 의미한다. 또한 그림에서 사각형은 시험부 양 측면과 상부 흡수관의 위치를 나타내고 원은 대상 소음원 및 다중 반사에 해당하는 이미지 음원의 위치를 나타낸다. 이때 원의 크기는 지름 25 cm인 모형선 프로펠러의 크기와 동일하다. 본 구형과 빔형성 결과에서 볼 수 있듯이 수평 평면으로 배치된 배열의 특성상 수직 분해능이 좋지 않음을 알 수 있다. 따라서 대부분의 주파수에서 상부 흡수관에 의한 반사파의 영향이 포함될 수밖에 없다. 그러나 일반적으로 상부 흡수관의 재질은 목재이고 그 위에 물로 채워짐을 감안할 때 실제 반사파의 강도는 해석에서 고려한 것 보다 작을 것으로 판단된다. 수직 반사파를 제외하고는 모든 이미지 음원의 위치에서 빔형성 결과는 대상 소음원에 비해 10 dB 이상 작은 것으로 평가되었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 캐비테이션 터널 시험용 배열 최적화 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 설계인자 정의(design parameterization), 목적함수(objective function) 정의 및 최적화 알고리즘(optimization algorithm) 적용으로 구성되었다. 두 가지 형태의 원형배열과 나선배열, 그리고 다중나선배열의 배열 형태를 수학적 또는 기하학적으로 규정하는 설계인자를 최적화 인자로 정의하였다. 목적함수는 주엽의 빔폭과 최대 부엽 크기가 동시에 고려될 수 있도록 정의되었고, 목적함수 평가는 평면파 빔패턴을 기준으로 하였다. 끝으로 최적화 알고리즘은 광역 최적화 기법의 일종인 VFSR 기법을 적용하였다.

제안된 기법을 각 배열에 적용 후 최적화 결과 및 100회의 무작위 탐색결과에 대한 최대 부엽크기를 비교하였고 주엽 빔폭 최적화 결과를 제시하였다. 100회 무작위 탐색결과 대비 최적화 결과는 모든 배열에서 개선되었으며 특히 원형배열(Case 2)와 다중 나선배열의 성능이 상대적으로 우수함을 확인하였다. 끝으로 원형배열(Case 2)에 대한 구형과 빔형성을 수행한 결과 수직 반사파를 제외하고는 모든 이

미지 음원의 위치에서 빔형성 결과는 대상 소음원에 비해 10 dB 이상 작은 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요사업(PES156E)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. D. Ross, *Mechanics of underwater noise* (Pergamon Press, New York, 1976).
2. B. L. Southall. *Final report of the NOAA International Conference: "Shipping Noise and Marine Mammals: A Forum for Science, Management, and Technology"* (NOAA, Arlington, 2004).
3. B. L. Southall and A. Scholik-Schlomer. *Final report of the NOAA International Conference: "Potential Application of Vessel-Quieting Technology on Large Commercial Vessels"* (NOAA, Silver Spring, 2007).
4. C. Park, H. Seol, G. D. Kim, and Y. H. Park, "A Study on the Noise Measurement of the Propeller and the Rudder in the Large Cavitation Tunnel," in Proc. 10th ICHD, 185-190, (2012).
5. E. Korkut and M. Atlar, "An experimental investigation of the effect of foul release coating application on performance, noise and cavitation characteristics of marine propellers," *Ocean Engineering*, **41**, 1-12 (2012).
6. ITTC, *Cavitation committee report*, in Proc. 18th International Towing Tank Conference (1987).
7. C. Park, Y. Cho, and H. Seol, "A Study on Propeller Noise Localizations in a Cavitation Tunnel using MFP," (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **26**, 220-225 (2007).
8. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics* (World Scientific, Singapore, 1993).
9. H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing* (Wiley, New York, 2002).
10. P. A. Abbot, S. A. Celuzza and R. J. Etter, "The Acoustic Characteristics of the Naval Surface Warfare Center's Large Cavitation Channel (LCC)," in Proc. Flow Noise Modeling, Measurement and Control, ASME (1993).
11. R. Sato, T. Mori, R. Yakushiji, K. Naganuma, M. Nishimura, K. Nakagawa and T. Sasajima, "Conceptual Design of the Flow Noise Simulator," in Proc. 4th ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference (2003).
12. T. J. Muller (Ed.), *Aeroacoustic Measurements* (Springer, Berlin, 2002).
13. H. C. Pumphrey, "Design of Sparse Arrays in One, Two, and Three Dimensions," *J. Acoust. Soc. Am.* **93**, 1620-1628 (1993).

14. D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques* (Prentice Hall, New Jersey, 1993).
15. A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing* (Prentice Hall, New Jersey, 1975).
16. B. D. Steinberg, *Principle of Aperture and Array System Design* (John Wiley & Sons, New York, 1976).
17. L. Ingber, "Very fast simulated reannealing," *Math. Comput. Modeling*, **12**, 967-993 (1989).
18. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (McGraw-Hill, New York, 1983).

## 저자 약력

### ▶ 박 철 수 (Cheolsoo Park)



1997년 2월: 서울대 조선해양공학과 학사  
 1999년 2월: 서울대 조선해양공학과 석사  
 2003년 8월: 서울대 조선해양공학과 박사  
 2009년 1월-12월: UCSD visiting scholar  
 2004년 9월~현재: 한국해양과학기술원  
 선임연구원

### ▶ 설 한 신 (Hanshin Seol)



1998년 2월: 부산대 항공우주공학과 학사  
 2001년 2월: 서울대 기계항공공학부 석사  
 2005년 2월: 서울대 기계항공공학부 박사  
 2005년 3월~현재: 한국해양과학기술원  
 선임연구원

### ▶ 김 건 도 (Gundo Kim)



1997년 2월: 충남대 선박해양공학과 학사  
 1999년 2월: 충남대 선박해양공학과 석사  
 2003년 8월: 충남대 선박해양공학과 박사  
 2005년 10월~현재: 한국해양과학기술원  
 선임연구원

### ▶ 박 영 하 (Youngha Park)



1995년 2월: 서울대 조선해양공학과 학사  
 1997년 2월: 서울대 조선해양공학과 석사  
 1997년 3월~현재: 한국해양과학기술원  
 선임연구원