

빔형성 기법을 이용한 공동수조 내부의 소음원 탐지

Detection of Noise Sources in a Cavitation Tunnel by using Beam-Forming Method

이정학 * · 서종수**

Jeong Hak Lee and Jong Soo Seo

Key Words : Beam-forming method (빔형성 기법), Cavitation tunnel (공동수조), Detection of noise sources (소음원 탐지)

ABSTRACT

In this paper, we introduce the measurement of the underwater noise with 32channel hydrophone array of Samsung CAvitation Tunnel (SCAT) and the detection technique of noise sources by using the beam-forming method. Measurement and array signal processing under fluid flow are essential works for the underwater acoustics, especially for the detection of noise sources. As the acoustic impedence of the water is relatively high and the tunnel is an enclosed system, we have to consider the interaction between tunnel and water together with the reflection of noise in the beam-forming technique. Also, for a hydrophone array system that is fixed on one side of tunnel wall as done in SCAT is liable to suffer from some limitations in the detection of the noise sources with the array, we discuss these limitations particularly on the frequency range and spacing of noise sources.

1. 서 론

수중소음에 대한 연구는 주로 군사적인 목적으로 많은 연구가 진행되어 왔지만, 안보와 연결되어서 연구결과가 거의 공개되지 않는 분야이다. 최근에는 상업적, 연구적 목적으로 여객선과 같은 고부가가치 선박이나 해양 탐사선 등에서도 낮은 소음 수준이 요구되므로, 추진기 소음을 비롯한 수중 소음원에 대한 관심이 증가하고 있다.

공기 중에서는 소음을 측정하고 마이크로폰 어레이 시스템을 이용하여 여러 신호처리 기법을 이용하여 소음원을 탐지하는 연구는 많이 수행되어 왔다[1-3]. 그런데, 수중 소음을 측정하고 소음원을 탐지하는 것은 공기 중에서도 달리 소리를 전파하는 매질이 밀도가 큰 유체인 물이므로 실험적, 해석적으로 공기 중에서도보다는 많은 제약이 따른다[3-7]. 수중에 소음원을 설치하여 하이드로폰 등을 이용하여 측정하는 것이 가장 좋은 방법이겠지만, 측정장비 설치, 비용적인 문제 및 실험 조건을 구현하는 일 등의 어려운 문제점이 많다. 이러한 여러 문제점의 많은 부분을 해결할 수 있는 설비가 압력, 유속 등을 조절할 수 있는 대형공동

수조(large cavitation tunnel)이다.

본 논문에서는 수중 소음 측정을 고려하여 제작된 삼성중공업의 대형공동수조에서 32채널 하이드로폰 어레이를 이용하여 수중 소음을 측정하고, 빔형성 기법을 이용하여 소음원을 탐지한 결과를 분석하였다. 한편, 수중 소음원 탐지를 위한 어레이 신호처리에서 음향학적 임피던스가 큰 물에 의하여 공동수조의 경계조건을 단순화하기 어려운 문제가 발생한다. 이로 인하여 발생한 현재까지의 소음원 탐지 한계에 대한 고찰과 수중 소음원을 탐지하는데 고려해야 할 점도 살펴보았다.

2. 수중 소음 측정 장비

2.1 대형공동수조

현재 삼성중공업에서는 국내 최대 규모의 대형공동수조 (Samsung CAvitation Tunnel)을 1997년부터 운용하면서 다양한 수중 소음 측정 및 소음원 탐지 관련 연구를 수행해 오고 있다[4-7]. 아래의 그림1에 나타난 삼성중공업의 공동수조 (SCAT)는 길이가 36m, 높이가 13.3m이고, 두 개의 시험부로 구성되어 있다. 대형 시험부(3.0×1.4×12.0, m)에서는, 모형선을 설치하여 선박 진동의 가진원으로 작용하는 추진기에서 유기된 변동압력을 계측하고, 캐비테이션 발생 현상 등을 관찰하는 연구를 주로 수행한다.

* 삼성중공업(주) 선박연구센터
E-mail : piscas.lee@samsung.com
Tel: (042) 855-4750, Fax: (042) 855-4380

** 삼성중공업(주) 선박연구센터
E-mail : jongsoo.seo@samsung.com
Tel: (042) 855-4770, Fax: (042) 855-4380

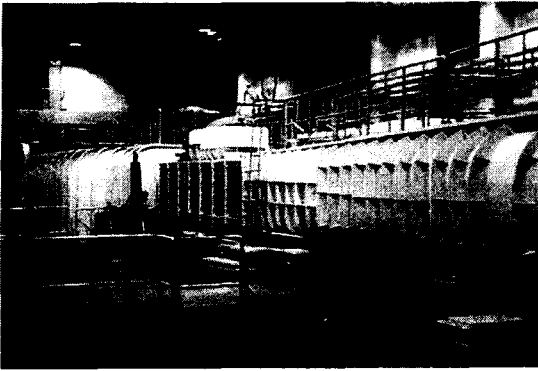


그림 1. 삼성중공업의 대형공동수조

수중 소음 실험은 주로 소형 시험부(1.2×1.2×6.0, m)에서 수행되는데, 수조 내부의 최대 유속은 28m/s 이고, 압력은 통상 0.3bar - 4.0 bar 범위 내에서 운용되는데, 유속과 압력을 변화시키면서 필요한 시험 조건에서 수중 소음을 측정하고 있다.

2.2 수중소음 측정 시스템

공동수조 내부에서 발생한 소음은 하이드로폰 (B&K type 8103) 어레이에서 측정한다. 하이드로폰 어레이는 아래 그림2와 같이 시험부 측면의 acoustic chamber 내부에 설치되어 있다.

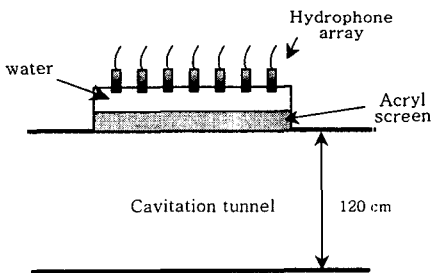


그림 3. Acoustic chamber의 개략도

수중 소음을 측정하는 하이드로폰 어레이는 (+)형, (o)형, (X)형의 여러 형태로 배치 가능하지만, 현재 SCAT에는 이 중에서 효율적인 형태인 (X)형 32채널 어레이로 설치되어 있다. 어레이에서 하이드로폰은 아래 그림3과 같이 가로, 세로 각각 3cm 간격으로 설치되어, 어레이의 크기는 45×45 (cm)이다. 위의 그림2에서 알 수 있듯이 acoustic chamber에서 하이드로폰은 수조 내부에 노출되어 있지 않고, 중간에 아크릴 막이 존재한다. 이는 현재 사용하고 있는 하이드로폰(B&K type 8103)이 flush mounting이 아니므로 유동이 있는 수조 내부에 노출되어 있으면, 유동의 흐름을 방해하면서 이에 의한 소음이 발생하게 된다. 이와

같은 현상을 최소화하기 위하여 수조 내부가 평면을 유지하는 것이 필요하며, 아크릴 막을 수조 내부와 평면이 되게 설치하였다. 소음원과 하이드로폰 물과 다른 매질 (본 수조에서는 아크릴 막)이 존재하여 소음을 측정할 때 각 하이드로폰에서 위상각이 왜곡되는 현상이 발생할 수 있다. 본 수조에서는 위상각이 왜곡되는 것을 최소화하기 위하여 물과 음향학적 임피던스가 유사한 재질인 아크릴 막을 이용하여 하이드로폰 어레이를 설치하였다. 하지만, 주파수와 하이드로폰의 위치에 따라 위상각의 왜곡 현상은 존재하고, 이와 같은 현상이 소음원을 탐지하는데, 오차를 발생시키는 중요한 요인으로 작용하기도 한다 [3,4].

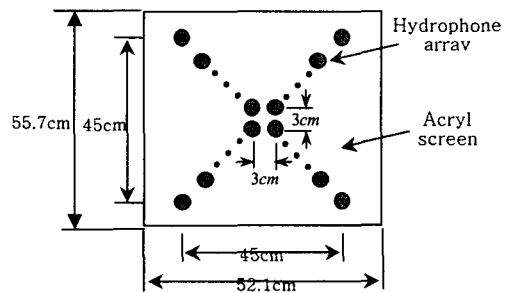
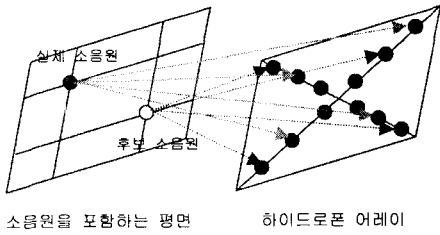


그림 3. 하이드로폰 어레이 구성 형상

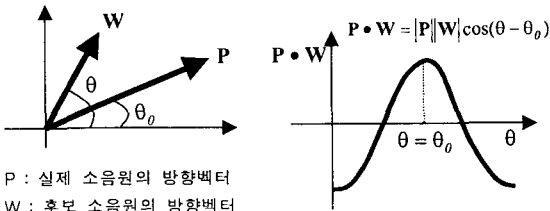
위의 하이드로폰 어레이로부터 측정된 수중소음 데이터는 48채널까지 동시에 100kHz로 샘플링할 수 있게 제작한 데이터 저장 시스템, 또는 32채널을 동시에 50kHz로 샘플링하는 데이터 레코더(Racal Storeplex)를 이용하여 저장한다. 이와 같은 절차로 구한 소음 데이터는 빔형성 기법 (beamforming method)으로 신호처리하여 소음원을 탐지한다.

2.3 빔형성 기법 (Beam-forming Method)

빔형성 기법은 어레이 센서를 이용한 대표적인 소음원 탐지 기법 중의 하나로 기본적인 개념은 아래 그림4와 같다. 실제 소음원 위치에서 측정된 음압의 정보는 가지고 있으므로, 소음원이 있을 것으로 예상되는 위치에서의 방향 벡터를 각각 스캔해가면서 실제 소음원 위치를 탐지하는 것이다. P는 측정된 음압으로 실제 소음원의 위치를 나타내는 벡터이고, W는 음원이 있는 곳으로 가정된 위치를 나타내는 벡터라고 할 때, 수학적으로는 두 벡터의 내적 (inner product)을 취하여 소음원의 위치를 탐지하게 된다. 후보 소음원의 위치가 실제 소음원의 위치와 일치하게 되면, 최대의 파워를 가지게 된다.



(a) 빔형성 기법의 도식적 표현



P : 실제 소음원의 방향벡터
W : 후보 소음원의 방향벡터

(b) 빔형성 기법의 수학적 표현

그림 4. 빔형성 기법의 기본적 개념

위의 그림과 같은 개념으로 파워가 최대가 되는 위치에 소음원이 존재하는 것을 파악할 수 있다.

여기서 음파에 대한 정의가 필요한데, 평면파로 가정할 수 있다면 문제를 단순화시킬 수 있다. 하지만, 공동수조에서는 내부 단면이 1.2×1.2 (m)이고, 소음원은 하이드로폰으로부터 이보다 짧은 거리에 존재하며, 물에서 음파의 속도가 약 1481m/s이므로 평면파로 가정하는 것이 많은 오차를 유발시킬 수 있다. 이러한 문제점을 고려하여 음파를 구면파로 가정하였다. 단일 소음원이 존재하며 구면파로 가정할 경우, M개의 하이드로폰 어레이로부터 얻은 음압신호 P와 스캔하는 방향벡터 W는 각각 아래의 식(1-a)와 (1-b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \bar{P} \left[\frac{e^{jkr_{s1}}}{r_{s1}} \frac{e^{jkr_{s2}}}{r_{s2}} \dots \frac{e^{jkr_{sM}}}{r_{sM}} \right]^T \quad (1-a)$$

$$W = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[\frac{e^{jkr_1}}{r_1} \frac{e^{jkr_2}}{r_2} \dots \frac{e^{jkr_M}}{r_M} \right]^T \quad (1-b)$$

여기서 r_{sm} 은 실제 소음원에서 m번째 하이드로폰까지의 거리를 나타내고, r_n 은 후보음원에서 n번째 하이드로폰까지의 거리를 의미한다. 이로부터 파워를 구하면 아래의 식(2)처럼 나타낼 수 있다.

$$P(x, y) = \frac{\bar{P}^2}{M} \left[\sum_{m=1}^M \frac{1}{r_{sm}^2} + 2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=m+1}^M \frac{1}{r_{sm} r_{sn}} \cos(r_{sm} - r_{sn} - r_m + r_n) \right] \quad (2)$$

위의 수식은 구면파 모델에서 단일 소음원인 경우를 나타낸 것이고, 반사파의 영향도 고려되지 않은 수식이다. 공동수조는 밀폐된 공간이므로 반사파가 존재하고 이에 대한 고려가 필요하다. 반사파를 고려하는 방법에는 가상음원(image source)을 이용하는 방법과 그린함수(Green's function)를 이용하는 방법 등이 있다. 이러한 방법들은 강체 벽면으로 가정할 수 있는 잘 정의된 공간에서는 수식화 및 적용이 가능하다. 공기 중에서 아크릴 덕트로 밀폐된 공간에서는 소음원의 위치 탐지가 가능한 것을 보여주는 연구결과도 있다[3,4]. 그런데, 공동수조에서는 매질이 임피던스가 큰 물이므로 공동수조의 벽면이 완전한 강체벽면으로 가정할 수 없고 수조 벽면의 거동까지 고려해야하는 복잡한 문제가 된다. 공동수조에서 수조 벽면의 거동을 무시하고 강체로 고려할 경우, 소음원 탐지를 하지 못하였다[3]. 공동수조 구조물의 진동모드를 정확히 파악할 수 있으면, 이들을 적용하여 그린함수 방법을 이용하는 것이 가장 좋겠지만, 이 또한 용이하지 않다. 본 논문에서는 이와 같은 반사파의 영향을, 벽면에서 반사되는 음파의 크기 및 위상각이 매우 불규칙(random)한 평면파의 합으로 고려하였고, 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$P_i = \frac{\bar{P}}{r_{si}} e^{jkr_{si}} + \sum_{j=1}^{\infty} B_j e^{jkr_{si} \sin \theta_j} \quad (3)$$

여기서 \bar{P} 는 소음원의 크기를 나타내고 r_{si} 는 소음원과 i번째 하이드로폰사이의 거리를 나타내며, B_j 와 θ_j 는 불규칙한 반사파의 크기와 위상각을 의미한다. 음압 파워를 계산할 때, 이처럼 불규칙하게 반사되는 평면파의 크기와 위상각의 합은 $\sum_{j=1}^{\infty} |B_j|^2$ 성분만 남게 되고, 나머지 성분은 0에 수렴하게 된다. 이를 개념적으로 도식화하면 아래 그림5와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 반사파의 성분은 반사파가 없는 상태에서의 빔 파워에 DC 성분이 합해지는 형태가 된다[3]. 따라서 반사파가 없는 경우와 동일하게 소음원의 위치를 탐지하게 된다. 이와 같은 개념으로 빔형성 기법 프로그램을 작성하여 대형공동수조에서 소음원을 탐지하기 위한 실험을 수행하였다.

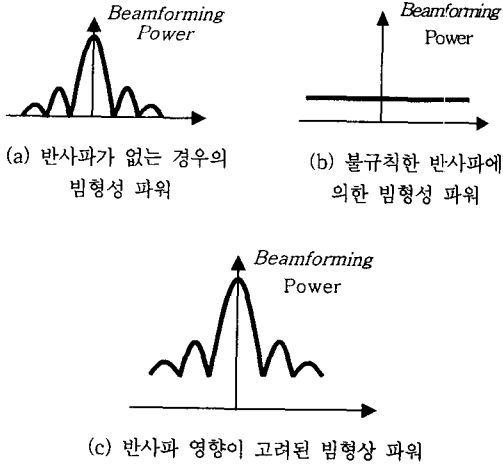


그림 5. 반사파를 불규칙한 평면파의 합으로 모델링한 경우의 빔형성 파워 [3]

3. 대형공동수조에서의 소음원 탐지

3.1 소음원

공동수조에서 소음원을 탐지를 위한 실험에서, 넓은 주파수 영역에서도 충분한 파워를 낼 수 있는 구형 (shperical type) 하이드로폰(G&W D/17)을 이용하여 하이드로폰 이외의 유동에 의한 소음은 최소화되게 소음원을 제작하였다. 소음원으로 사용된 구형 하이드로폰의 저주파수에서도 큰 파워를 낼 수 있는 장점이 있지만, 직경이 0.1m로 하이드로폰 어레이 크기에 비하여 상대적으로 큰 편이다.



그림 6. 공동수조 내부에 설치된 소음원

소음원은 수조 내부의 중앙에 설치하고, 아래 그림과 같이 신호발생기로 발생시킨 백색잡음(white noise)을, 파워 증폭기(B&K 2713)에서 신호를 증폭하여

소음원의 입력으로 사용하였고, 이 신호를 하이드로폰 어레이에서 측정하였다.

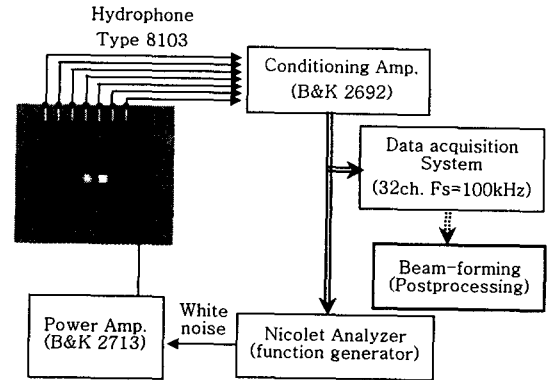


그림 7. 공동수조 내에서 소음원 탐지를 위한 실험장치

3.2 소음원 탐지

본 절에서는 수조 내부의 압력이 2bar 인 상태에서 유동이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 소음원에서 발생한 소음을 측정하고, 소음원 탐지 결과를 분석하였다. 아래 그림8에는 소음원의 주파수가 12.5kHz에서 유동이 없는 경우와 유속이 12.5m/s 정도 빠른 유동 속에서의 소음원 탐지 결과를 도시하였다. 아래의 그림에서 알 수 있듯이 유동이 존재하는 경우에도 소음원의 위치를 탐지하는 것을 알 수 있다. 소음원이 위치하는 부분에서 빔형성 파워가 크게 나타나고 있고, 주파수가 동일할 경우에 소음원의 위치를 탐지하는데는 유동의 영향을 받지 않는다.

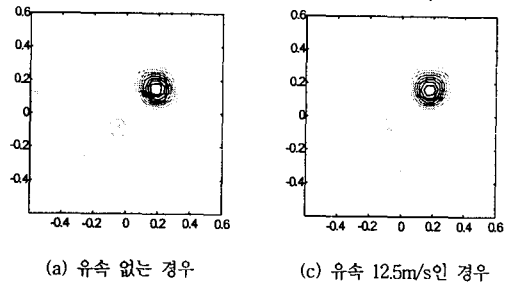


그림 8. 유속 변화에 따른 소음원 탐지 결과 (f=12.5kHz)

그림 9에는 소음원의 주파수가 소음원 탐지에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 유속 12.5m/s에서 8.5kHz와 17.34 kHz에서의 소음원 탐지결과를 도시하였다. 아래 그림에서 알 수 있듯이 두 경우에도 소음원 탐지가 가능한 것을 알 수 있다. 그림 8과 함께 살펴볼 때 두가지의 특성을 알 수 있는데 그 하나는, 주파수가 낮아짐에 따라 빔형성 파

위를 나타내는 영역이 넓어지는 것을 알 수 있다. 즉 주파수가 낮아짐에 따라 분해능(resolution)이 감소함을 나타내고 있는데, 이것은 빔형성 기법의 한계이다.

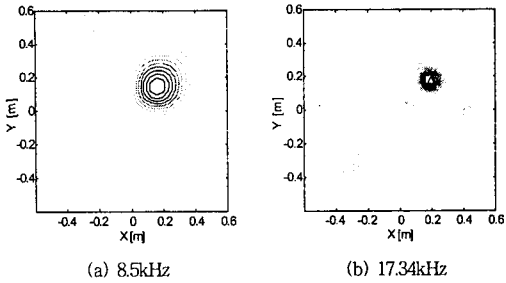


그림 9. 주파수 변화에 따른 소음원 탐지 결과 ($v=12.5\text{m/s}$)

분해능이 좋은 소음원 탐지 기법인 MUSIC (Multiple Signal Classification) 기법을 이용하여 이런 문제점을 해결 가능성을 살펴보았다. MUSIC 기법은 신호와 잡음 중에서 잡음에 해당하는 고유벡터가 소음원 위치로부터의 방향벡터와 서로 직교하는 특성을 이용한 것이다[2,3]. 서로 직교하므로 소음원 위치에서 파워를 구하면 이론적으로는 0이 되고, 이의 역수를 취하면 무한대의 크기를 갖는 값이 된다. 이와 같이 직교성을 이용하여 파워 합 역수의 최대값이 되는 위치를 취하여 소음원 위치를 탐지하므로, 분해능은 빔형성 기법보다 훨씬 좋다. 이 기법은 마이크로폰 어레이를 이용하여 아크릴 덕트 내에서의 소음원을 탐지할 경우, 훌륭한 결과를 얻을 수 있었다[3]. 이는 아크릴 덕트를 음향학적으로 강체로 볼 수 있어서 문제의 정의가 명확하므로 가능한 일이다. 하지만, 공동수조에서는 물의 임피던스가 크기 때문에 수조 벽면을 음향학적으로 강체로 볼 수 없다. 따라서 앞서 언급하였듯이 반사가 불규칙적으로 발생하고, 문제의 정의가 명확하지 않으므로 잡음에 의한 고유벡터가 정확하게 정의되지 않을 수 있다. MUSIC 기법은 고유벡터와 역수를 취하는 과정이 있으므로, 외란에 영향을 받기 쉽고, 공동수조에서는 적용하기 어렵다는 것을 확인하였다[3]. 따라서 본 논문에서는 분해능은 떨어지지만 보다 강건한 방법인 빔형성 기법을 이용하였다.

다음으로, 소음원의 위치는 동일하지만, 소음원 탐지 결과를 살펴보면, 주파수가 변화에 따라 소음원의 위치가 조금씩 왜곡되며, 주파수가 증가함에 따라 소음원 탐지 위치의 왜곡이 감소함을 알 수 있다. 이는 앞 절에서 acoustic chamber에서 아크릴 막에 의한 위상각 왜곡 현상에 의한 영향과 반사파의 고려 방법에 의한 영향으로 판단된다.

한편, 본 실험에서 소음원은 백색 잡음인데, 주파수에 따라 소음원을 탐지하지 못하는 영역이 존재하고 있다. 서로의 상관관계가 낮은 부분에서는 이와 같은 현상이 발생하는 것을 설명할 수 있지만, 서로의 상관관계가

큰 주파수에서도 아래 그림 10에서와 같이 소음원을 탐지하지 못하는 현상을 나타내고 있다.

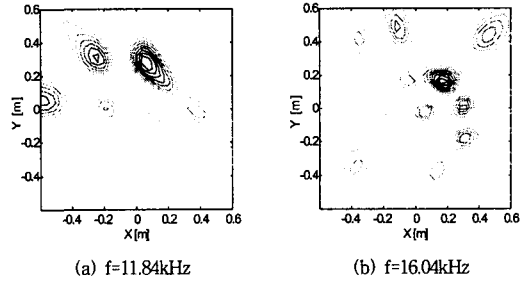


그림 10. 소음원 탐지가 되지 않는 주파수 ($v=12.5\text{m/s}$)

이는 현재, 해석적으로 잘 정의가 되지 않는 공동수조의 거동과 반사파의 특성을 정확히 반영하지 못함으로 발생하는 현상으로 판단하고 있다. 이처럼, 소음원을 탐지하지 못하는 주파수 영역도 존재하고, 소음원을 탐지하더라도 빔형성 파워가 넓게 분포함으로 인하여 발생할 수 있는 여러 한계도 발생하게 되는데, 다음 절에서는 빔형성 기법을 이용하여 소음원을 탐지할 때 SCAT에서의 소음원 탐지가 가능한 영역에 대하여 살펴보았다.

3.3 소음원 탐지 범위

소음원 위치를 탐지함에 있어서 공동수조에 하이드로폰은 일정한 간격으로 설치되어 있으며, 소음원은 여러 개 존재할 수도 있고, 다양한 주파수의 소음이 존재하므로 공간상의 엘리어싱(aliasing) 현상이 존재하는 영역도 있다. 하이드로폰 어레이 시스템이 유한하므로 이와 같은 문제는 항상 발생하는데, 현재 SCAT에 설치된 하이드로폰 어레이 시스템으로 가능한 소음원 탐지 범위에 대하여 살펴보았다.

우선, 공간상에서 엘리어싱(aliasing) 현상이 발생하지 않기 위해서는 설치되어 있는 각 하이드로폰 사이의 간격이 파장의 1/2 보다 작아야 한다. 현재 하이드로폰은 대각선 방향으로 약 4.24cm 간격으로 설치되어 있으므로, 물에서 음파의 속도를 $c=1481\text{m/s}$ 라 할 때, 주파수는 약 17.4kHz 이하에서 소음원 탐지가 가능하며, 보다 높은 주파수에서는 엘리어싱 현상이 발생할 수 있다. (X) 형상으로 하이드로폰이 설치되어 있어서, 수평, 수직방향으로는 각각 3cm 간격으로 설치되어 있어서 보다 높은 주파수까지 가능할 수도 있지만, 보장할 수 있는 주파수 영역은 약 17.4kHz이다.

다음으로, 저주파수의 한계는 어레이의 크기(dimension)에 의하여 결정된다. 저주파수로 갈수록 파장이 길어지는데, 어레이에 포함된 파장의 수가 작

을수록 해석의 정도는 떨어진다. 또한 이는 분해능(resolution)에도 큰 영향을 미친다. 상대적으로 긴 파장인 저주파수에서는 소음원 파워를 나타내는 부분이 넓어지고, 짧은 파장인 고주파수에서는 좁아지는 것을 알 수 있다. 소음원 파워를 나타내는 폭이 넓어지면, 주위에 다른 소음원이 존재할 경우, 이를 구별해내는 것이 어렵다. 현재 SCAT에 설치된 하이드로폰 어레이에서 빔형성 기법을 이용할 경우, 어레이 각 방향의 크기(dimension)에 최소 두 파장 정도가 포함되어야 의미있는 결과를 내는 것을 확인할 수 있었다. 소음원의 주파수가 6.5kHz 일 경우, 어레이 내에는 약 2 파장이 포함되는데, 이때 분해능을 나타내는 bandwidth는 약 33cm로 전체 소음원 파워는 약 58cm에 걸쳐 나타난다. 주파수가 17.3kHz일 경우에는 분해능을 나타내는 band width는 약 12cm이고, 전체 소음원과 관련된 파장은 약 20cm 정도까지 나타나고 있다. 이처럼 주파수가 낮을 경우에는 소음원을 나타내는 파워의 범위가 넓어서, 다른 소음원이 주위에 존재할 경우에 구별하기 힘든 경우가 발생한다. 주파수가 낮을 경우 이와같은 문제점을 포함하면서, 본 수조에서는 약 6.5kHz에서 17.4kHz까지 주파수 범위는 소음원을 탐지할 수 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 하이드로폰 어레이를 크게 하는 방법과 공동수조에서 어레이의 이동이 가능하게 설치하는 방법 등이 이용되고 있다. 현재 SCAT에서는 하이드로폰 어레이가 고정되어 있으므로 신호처리의 관점에서, 현재의 빔형성 기법에서 반사파를 보다 효과적으로 고려하는 방법과 정합필터배열처리(Matched filter array processing)와 같은 분해능이 좋은 신호처리 적용에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 삼성중공업의 대형공동수조에서 32채널 하이드로폰 어레이 시스템으로 수중 소음을 측정하고 빔형성 기법을 이용하여 수중 소음원을 탐지한 결과에 대하여 살펴보았다. 이에 대한 내용 및 결과를 요약하면 아래와 같다.

우선, 공기 중에서의 소음원 탐지와 공동수조에서의 소음원 탐지의 가장 큰 차이점은 매질의 차이이다. 공동수조에서는 음향학적 임피던스가 큰 물을 통하여 음파가 전파되는데, 공동수조를 음향학적으로 강체로 가정할 수 없으므로, 여러 복잡한 문제가 발생하므로 이에 대한 정확한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 소음원 탐지를 위하여 빔형성 기법을 이용하였는데, 구면파 모델을 이용하였고, 반사

파는 매우 불규칙(random)한 크기와 위상각을 갖는 평면파의 합으로 가정하였다.

빔형성 기법이 소음원 탐지 여부는 공동수조 내부에 소음원을 설치하고 이로부터 측정된 신호를 이용하여 소음원 탐지가 가능한 것을 확인하였다. 현재 SCAT에 갖추어진 시스템에서 소음원 탐지는 약 6.5kHz에서 17.4kHz 사이의 주파수 영역에서 가능하고, 분해능은 6.5kHz에서는 약 33cm, 17.4kHz에서는 약 12cm 정도이다. 주파수가 낮을수록 분해능이 감소하는 한계가 있다.

한편, 현재의 빔형성 기법에서는 주파수에 따라 소음원을 탐지하지 못하는 영역도 존재한다. 이와 같은 분해능 문제와 소음원 탐지를 못하는 주파수 구간이 존재하는 문제를 개선하기 위하여, 향후 보다 정확한 반사파 고려 방법과 효과적인 신호처리 기법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

- (1) Pillsi, S. U. and Burrus, C. S., 1989, *Array Signal Processing*, Springer-Verlag.
- (2) J. W. Choi and Y.-H. Kim, 1995, "Spherical Beamforming and MUSIC methods for Estimation of Location and Strength of Spherical Sound Sources", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, No. 5, pp. 569- 588.
- (3) 김양한 외, 2001, "빔 형성 방법을 이용한 캐비테이션 터널 내의 소음원 규명", KAIST, 산학협동 과제 연구보고서.
- (4) 삼성중공업 조선플랜트 연구소, 2002, "수중소음 계측시스템 정상화", 연구개발과제 보고서.
- (5) 삼성중공업 조선플랜트 연구소, 2001, "수중소음 계측시스템 개발", 연구개발과제 보고서.
- (6) 삼성중공업 조선플랜트 연구소, 2001, "공동수조 시험법 개선 및 공동시험 표준화", 연구개발과제 보고서.
- (7) 이무열 외, 2001, "위터 터널에서의 수중소음 계측을 위한 하이드로폰 어레이 시스템 개발", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 342 -349.