

도달지연시간 기법을 이용한 수중 소음원의 위치추적

안병권¹·고영주²·이 욱²·최종수^{2,†}·이창섭¹
충남대학교 선박해양공학과¹
충남대학교 항공우주공학과²

Localization of Underwater Noise Sources Using TDOA (Time Difference of Arrival) Method

Byoung-Kwon Ahn¹·Yeong-Ju Go²·Wook Rhee²·Jong-Soo Choi^{2,†}·Chang-Sup Lee¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National University²

Abstract

As considerable interests in noise emission from a ship have been increased, the need for localization of noise sources of the marine propeller generating cavitation and singing noise is looming large. In many practical cases, cavitation and singing noise occur on a particular position of the certain blade of the propeller. It is so important to know the position of noise source correctly in order to eliminate or suppress unwanted noise. In this study, we develop "noise source localization technology" using TDOA method. Experimental measurements carried out at the circulating water channel and towing tank show that noise source can be clearly identified and localized using TDOA method.

Keywords : Marine propeller(선박 프로펠러), Cavitation(캐비테이션), Singing(명음), Underwater noise(수중 소음), Time Difference Of Arrival(도달지연시간, TDOA), Localization(위치추적)

1. 서론

선박용 프로펠러와 같이 수중에서 고속으로 회전하는 물체의 표면에서는 다양한 종류의 캐비테이션이 발생한다. 캐비테이션은 회전하는 날개 표면에서 생성과 소멸을 반복하고, 이 과정에서 필연적으로 수중에 방사되는 소음을 증가시킨다.

캐비테이션이 발생하기 전후의 음압수준(sound pressure level)을 비교해 보면 캐비테이션의 초기발생(cavitation inception)으로 인해 음압수준은 큰 폭으로 증가하며 이후 선속이 증가함에 따라 지속적으로 증가한다(Lee et al., 2011; Ahn et al., 2002). 따라서 캐비테이션이 최초로 생성되는 속도(cavitation inception speed, CIS)는 저소음 프로펠러 설계를 위한 하나의 중요한 기준이 되고 있다. 그러나 캐비테이션 터널에서의 모형시험의 부정확성 또는 실 해역에서 운용되는 실선의 여러 가지 불확실한 요소로 인해 모형시험을 통해 예측된 CIS 성능이 실선 기준속도를 만족시키지 못하는 경우가 발생하고 있다. 실선의 경우 CIS 성능은 수중청음기를 사용한 실 해역에서의 수중 방사소음계측에 의해 결정된다. 하지만 캐비테이션 초기 발생에 의한 소음증가 여부는 밝힐 수 있으나, 프로펠러의 어느 위치에서 초기 발생하는 캐비테이션에 의한 소음이 발생하는지는 명확히 알 수 없는

실정이다(Ahn et al., 2009).

또 다른 현실적인 문제로, 수중 프로펠러의 날개 뒷날에서 이 탈되는 와류의 진동수와 날개 뒷날의 고유진동수가 공진하게 되면 명음(singing)이라는 강한 소음이 발생하게 된다. 명음 소음은 대체로 동일 프로펠러에서도 특정 날개의 특정 위치에서 발생하는 것으로 알려져 있으며, 자력진동으로 인해 넓은 속도 범위에서 동일한 주파수 특성을 가지는 소음이 발생된다(Ahn et al., 2010). 현재 실선 시운전 시 명음 소음이 발생하게 되면 프로펠러의 모든 날개의 뒷날 전체를 경험적으로 연삭하는 방법을 사용하고 있다. 만일 명음 소음이 발생하는 특정 위치를 정확하게 추적할 수 있다면 이를 제거하는 데 필요한 비용 및 시간을 획기적으로 줄일 수 있을 것이다.

본 연구는 수중 프로펠러에서 캐비테이션의 초기발생 및 명음 소음과 같이 특정 위치에서 발생하는 수중 소음원의 위치를 추적할 수 있는 기술개발을 목표로 하고 있다. 이를 위해 도달지연시간(Time Difference Of Arrival, 이하 TDOA) 기법을 이용하여 소음원의 위치를 추적하는 기술을 개발하고 실험을 통해 측정기법의 유용성을 검증하였다. Ahn et al. (2008), Go et al. (2010)은 TDOA 기법을 이용하여 소음원의 위치를 추적할 수 있는 기초기술을 개발하였으며, 본 연구에서는 그동안의 기술을 확장하여 수중에서 회전하는 소음원의 위치를 보다 정확하게 추적할 수 있는

기술을 개발하였다. 또한 수중 소음원의 위치를 추적할 수 있는 알고리즘과 계측장치를 개발하고 회류수조 및 예인수조 실험을 통해 측정기법의 정확성과 유용성을 검증하였다.

2. 도달지연시간(TDOA) 기법

소음원에 의해 발생하는 음압신호는 신호를 측정하는 측정 센서의 위치 차이에 따라 서로 다른 위상정보를 갖고 도달한다. 이때 서로 다른 위상정보를 이용하여 각 신호의 도달지연 시간(TDOA)에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 소음원의 위치를 추적하게 된다(Fig. 1). TDOA 기법은 보편적으로 잘 알려진 빔 형성 기법이나 음향 홀로그래피 기법(Edmonds 1981)을 사용하는 것에 비해 소수의 측정 센서와 적은 양의 데이터 계산으로도 소음원의 위치를 추적할 수 있는 장점이 있다. 프로펠러와 같이 수중에서 회전하는 날개에서 발생하는 특정 소음원의 위치를 추적할 수 있는 TDOA 알고리즘은 신호의 발신 지점으로부터 각 측정 지점의 위치 정보를 정의해야 한다. 직교좌표계에서 소음원의 위치를 (x, y, z) , 측정점의 위치를 (x_i, y_i, z_i) 로 정의하여 발신 지점과 각각의 측정 지점까지의 거리차이를 r_i 로 나타내고, 선택된 각 쌍의 거리차이 d_{ij} 를 식 (1)과 같이 표현 할 수 있으며 도달지연시간(τ_{ij}), 거리차이(d_{ij})와 음속(c_0)은 식 (2)와 같은 관계를 갖는다. 여기서 n 개의 측정 센서를 이용하면 $n(n-1)/2$ 개의 도달지연시간을 측정할 수 있다.

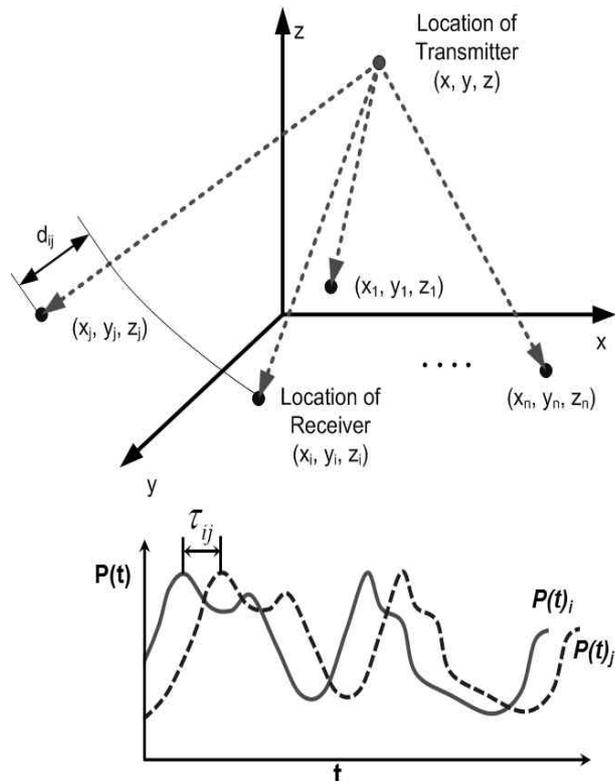


Fig. 1 Concept of the TDOA method

$$d_{ij} = r_i - r_j = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{c_0} \quad (2)$$

이러한 방법으로 얻어지는 도달지연시간의 관계는 비선형 연립방정식의 형태로 주어지며, 이는 선형화된 연립방정식의 형태로 전개하여 해를 구한다.

위치관계로 얻어지는 식 (1)을 f_a 로 정의하고 도달지연시간과의 관계인 식 (2)를 식 (3)과 같이 u_a 로 정의하면 식 (4)와 같은 연립방정식을 정의할 수 있다. 여기서 소음원 위치의 초기 가정을 x_v, y_v, z_v , 위치 오차를 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 라고 하여 소음원의 위치를 식 (5)와 같이 표현하고, 식 (6)과 같이 급수로 전개하여 나타낼 수 있다.

$$u_0 = d_{ij} = c_0 \tau_{ij} \quad (3)$$

$$f_a(x, y, z, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) = u_a \quad (4)$$

$$(a = 1, 2, \dots, n)$$

$$x = x_v + \delta_x, y = y_v + \delta_y, z = z_v + \delta_z \quad (5)$$

$$f_{av} + c_{a1}\delta_x + c_{a2}\delta_y + c_{a3}\delta_z \cong u_a \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_{av} = f_a(x_v, y_v, z_v, x_i, \dots) \\ c_{a1} = \left| \frac{\partial f_a}{\partial x} \right|_{x_v, y_v, z_v} \\ c_{a2} = \left| \frac{\partial f_a}{\partial y} \right|_{x_v, y_v, z_v} \\ c_{a3} = \left| \frac{\partial f_a}{\partial z} \right|_{x_v, y_v, z_v} \end{cases}$$

식 (6)을 식 (7)과 같이 대수방정식으로 표현하고 최소자승법을 이용하여 오차가 최소가 되는 δ 를 식 (8)을 이용, 반복 계산을 통해 결정한다.

$$A \delta \cong z \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & c_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - f_{1v} \\ u_2 - f_{2v} \\ \vdots \\ u_n - f_{nv} \end{bmatrix}$$

$$\delta = [A^T A]^{-1} A^T z \quad (8)$$

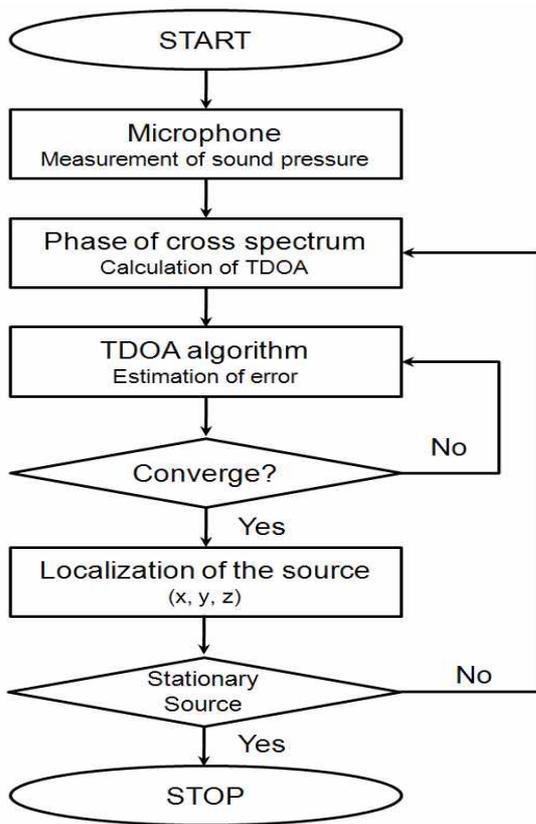


Fig. 2 TDOA algorithm

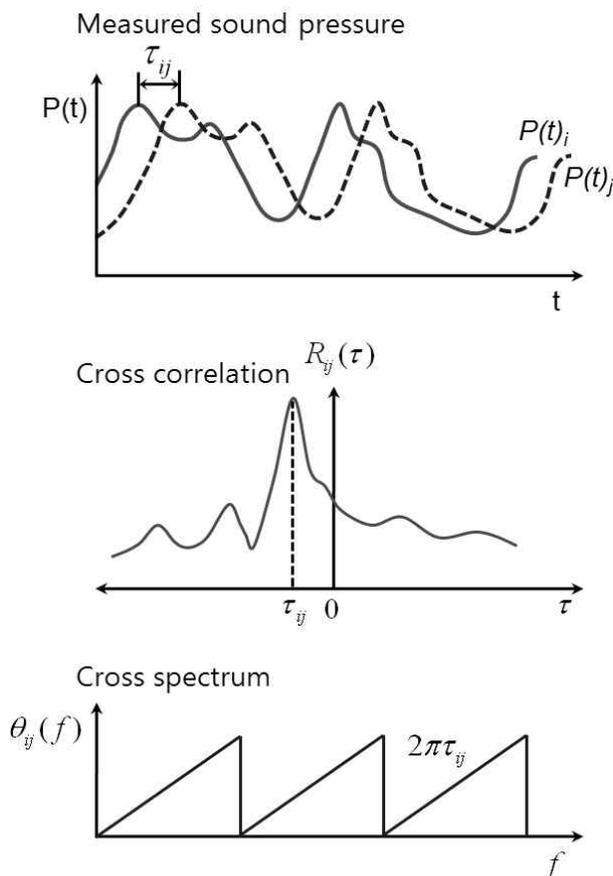


Fig. 3 Cross correlation and cross spectrum

Fig. 2는 TDOA 기법을 이용하여 소음원의 위치를 추적하는 알고리즘이다. TDOA 기법을 이용한 위치추적에 있어서 계측된 음압신호의 상호상관(cross correlation) 함수를 이용하여 도달지연시간을 측정하는 경우 오차가 크게 발생하고, 동시에 다수의 소음원이 발생하는 경우 가장 강한 음원에 대한 도달지연시간의 측정만 가능하다는 한계를 갖고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 상호상관함수 대신 상호스펙트럼(cross spectrum) 함수를 이용하여 도달지연시간을 측정하는 알고리즘을 구현하였다. 결과적으로 다수의 소음원이 동시에 발생하는 소음환경에서도 특정 주파수 성분을 갖는 소음원에 대한 도달지연시간 측정이 가능하며, 시뮬레이션을 이용하여 선박 프로펠러의 날개에서 발생하는 소음환경과 같은 다수의 소음원에 대한 위치추적이 가능함을 확인하였다.

3. 회전하는 소음원의 위치추적

앞서 설명한 TDOA 기법을 이용한 소음원의 위치추적 기술을 검증하기 위해 먼저 공기 중의 유동장에서 회전하는 소음원에 대한 실험을 수행하였다. 회전하는 날개의 서로 다른 위치에서 서로 다른 주파수 특성(3kHz와 3.5kHz)을 갖는 두 개의 소음원을 발생 시킬 수 있는 장치를 고안하였다. 두 소음원은 약 70dB의 동등한 음압수준을 갖고 첫 번째 소음원 s_1 은 반경 0.57m에 두 번째 소음원 s_2 는 반경 0.27m에 위치하여 회전하도록 구성하였다(Fig. 4).

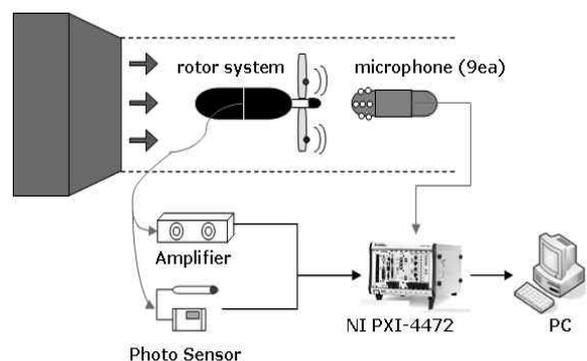
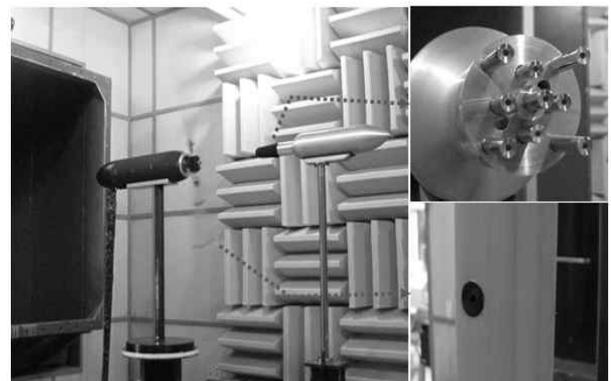


Fig. 4 Experimental set-up at the wind tunnel

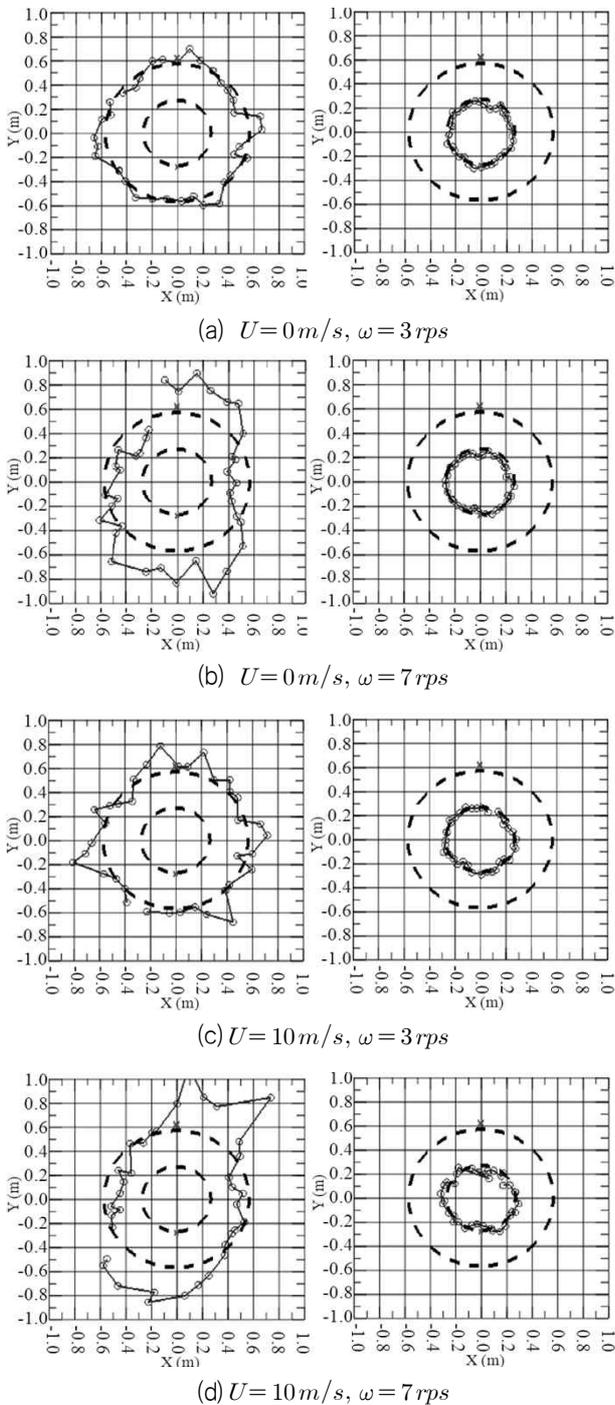


Fig.5 Noise source localization at different inlet velocities and blade revolutions

유속과 날개의 회전속도를 변경하면서 실험을 수행하여 유속 및 회전속도가 위치추적 결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 음압 신호는 9개의 압전소자 방식의 마이크로폰(MPA416, 1/4")을 소음원의 회전면과 마주보도록 배치하여 계속하였다. 음압신호는 동시 샘플링이 가능하며 샘플링 주파수가 100kHz까지 가능한 PXI-4472를 사용하였고, 광센서를 사용하여 블레이드의 회전수를 측정하였다.

Fig. 5는 유속과 날개의 회전속도 변화에 따른 두 소음원의 위치를 추적한 결과이다. 여기서 S_1 (3kHz)에 대한 결과는 좌측에 표시하였고, S_2 (3.5kHz)는 우측에 표시하였다. 유속과 날개의 회전속도가 증가되면서 추적 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 측정된 도달지연시간의 오차는 TDOA 알고리즘의 반복 계산 수행과정에서 나타나며 반복계산이 수렴하였더라도 위치추적의 신뢰성이 낮아지는 문제가 발생된다. 본 연구에서는 τ_{ij} 를 측정함에 있어서 발생하는 오차를 줄이기 위해 계속된 음압신호에 대해 다음과 같은 후처리 기법을 사용하였다. 먼저 1회전 동안 측정되는 신호의 앙상블 데이터를 확보한 뒤 앙상블평균(ensemble average)을 적용하고, 다음으로 회전하는 소음원의 경우 측정된 데이터를 주파수 분석을 통해 사인파형으로 재구성하는 방법을 적용하였다. Fig. 6은 5번과 7번 마이크로폰에서 측정된 데이터(τ_{57})와 제안된 기법을 통해 재구성한 데이터를 비교한 그림이다. 측정 데이터를 "Measured", 앙상블평균의 결과를 "Averaged", 사인파형으로 모델링한 결과를 "Sine-fitted"로 표시하였다. 측정 데이터의 경우 불규칙한 데이터들이 다수 존재함을 확인할 수 있으며 앙상블평균한 경우 전자에 비해 불규칙하게 발생하는 오차가 감소됨을 확인할 수 있다.

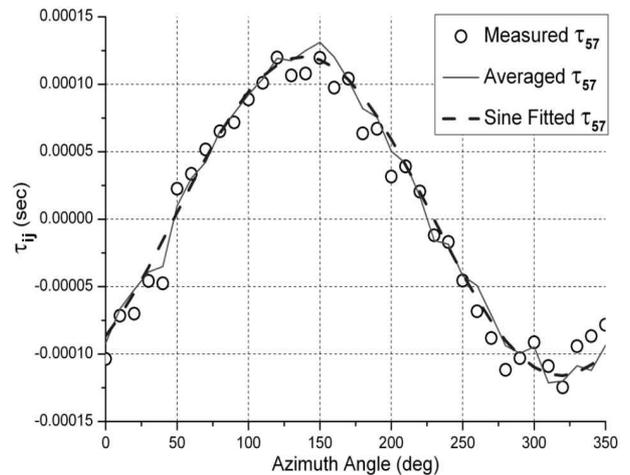
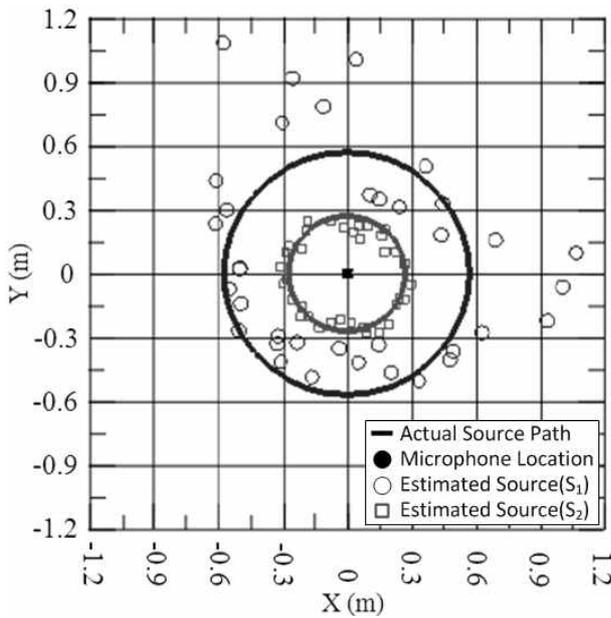


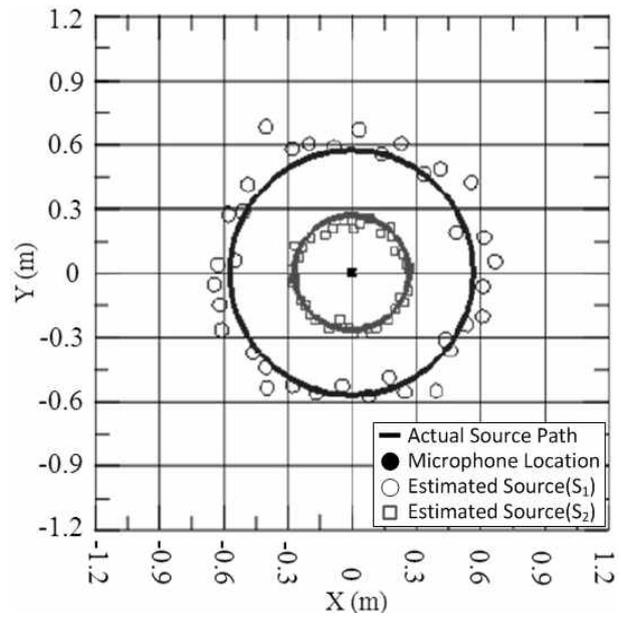
Fig.6 Comparison of τ_{ij} of S_1

Fig. 7은 위에서 설명한 방법을 적용하여 유속 10m/s에서 프로펠러가 7rps로 회전하는 조건에 대한 결과이다. Fig. 7 (a)는 소음원이 1 회전하는 동안 계속된 데이터를 가지고 추적한 위치이며 추정오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 측정오차 τ_{ij} 를 개선하는 두 가지 기법인 앙상블 평균(Fig. 7 (b))과 sine 접합(Fig. 7 (c))을 적용하여 결과적으로 소음원의 위치를 보다 정확하게 얻을 수 있음을 보여준다.

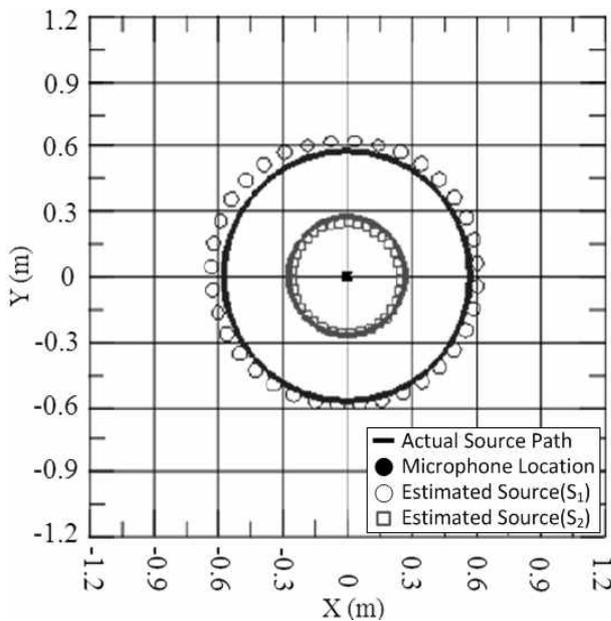
소음원의 실제 위치(실선)를 벗어나 최대오차를 갖는 점에 대하여 실선의 반경으로 정규화한 오차율은 S_1 의 경우 (a)115.13%, (b)38.62%, (c)12.01%이며 S_2 의 경우 (a)36.18%, (b)22.95%, (c)7.96%이었다. 또한 다양한 조건 하에서 실험을 수행해봄으로써 본 기법의 유용성을 충분히 검증하였으며, 지면 관계상 제한된 결과만을 정리하였다.



(a) Measured τ_{ij} by 1 revolution data



(b) Averaged τ_{ij} by 200 revolution data



(c) Sine fitted τ_{ij} by 30 sec data

Fig.7 Noise source localization

4. 수중 소음원의 위치추적

소리의 전달 속도는 매질에 따라 달라진다. 앞서 수행한 공기 중에서 회전하는 소음원의 경우 음속은 이상기체 방정식으로부터 쉽게 계산이 가능하며, 표준 대기상태에서 약 343m/s라는 것을 알 수 있다. 하지만 물속에서의 음속은 이론식으로 예측하기가 어렵다. 보통 물속에서의 음속은 표준 대기상태에서 약 1,466m/s로 알려져 있으며 공기에서보다 약 4.3배 빠르기 때문에 동일 주파수 조건에서 파장은 약 4.3배 길어지는 특징을 갖는다.

수중에서의 음속은 열역학적 관계로부터 식 (9)와 같이 유도되는데, 이때 유체의 단열체적탄성율(adiabatic bulk modulus) β 는 예측하기 어렵기 때문에 실험적으로 측정 가능한 등온체적탄성율(isothermal bulk modulus) β_T 와의 관계 $\beta = \gamma\beta_T$ 를 이용하여 표현한다. 하지만 등온체적탄성율과 매질의 밀도 또한 유체의 온도와 압력의 방정식에 대한 변수로 예측이 가능한 간단한 이론식이 없기 때문에 비교적 간편한 실험식을 사용한다.

$$c_0^2 = \frac{\beta}{\rho_0} = \frac{\gamma\beta_T}{\rho_0} \quad (9)$$

담수 조건에서 음속은 실험적 방법을 통하여 식 (10)과 같이 구하여 진다. 이 때, P_G 는 측정된 게이지압[bar]이고 t 는 섭씨 온도 T를 100으로 나눈 값이다. 이 식에서 음속은 $0 < T < 100^\circ\text{C}$ 와 $0 \leq P_G \leq 200$ bar에서 0.05%의 정확도를 갖는다. 바닷물의 경우 염도에 대한 영향을 고려해야 하는데, 천분율[ppt]로 표시되는 염도 S에 대하여 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다(Ross, 1992). 본 연구는 담수에서 수행 되었으며, 식 (10)을 이용하여 도달지연 시간을 계산하였다.

$$c_0 = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(P_G/100) \quad (10)$$

$$c_0 = 1449.08 + 4.57e^{-[T/86.9 + (T/360)^2]} + 1.33(S - 35)e^{-T/120} + 0.1522P_G e^{T/1200 + (S - 35)/400} + 1.46 \times 10^{-5} P_G e^{-[T/20 + (S - 35)/10]} \quad (11)$$

수중에서 회전하는 소음원을 측정하기 위한 실험은 충남대학교 선박해양공학과에서 보유하고 있는 회류수조(Circulating Water Channel)에서 수행하였다(Fig. 8). 회류수조의 시험부는 1.2m×0.8m×3.0m이며 최대 유속은 2m/s이다.

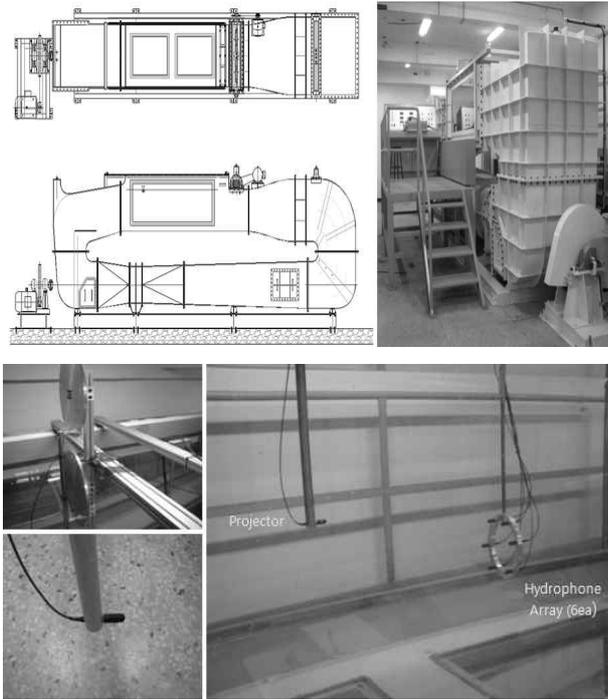


Fig. 8 Experimental set-up at the circulating water channel

회류수조의 시험부는 크기가 작기 때문에 반사파의 영향이 크게 발생된다. 하지만 Ping 실험을 수행하여 측정된 소음원의 신호에서 반사파의 영향을 제거하면 오차가 적은 도달지연시간을 계산할 수 있으며, 소음원의 위치를 확인하기에 충분한 음압신호를 얻을 수 있다. 회류수조에서 반사파의 영향을 확인한 결과 반사파가 매우 빠른 시간의 영역 내로 들어온다는 것을 확인하였으며, Fig. 9와 같이 측정된 신호에서 반사파의 영향을 제거하고 도달지연시간을 계산하였을 경우 이론적인 계산결과와 오차가 거의 없는 결과를 얻을 수 있었다.

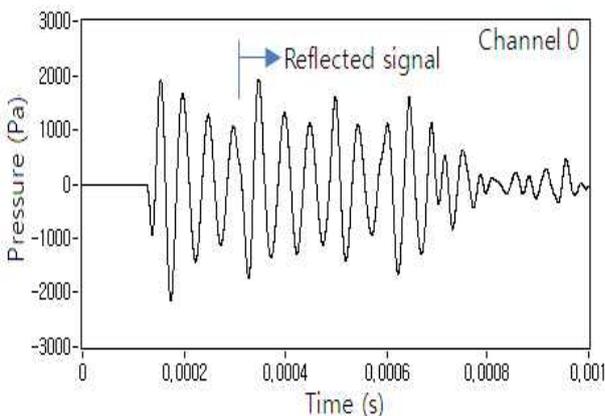


Fig. 9 Ping test and reflected waves

실험은 소음원을 회전반경(120mm)상의 0도, 90도, 180도, 270도의 네 지점에 차례로 위치시키고, 유속이 0m/s, 0.5m/s, 1m/s인 조건에서 수행하였다. Fig. 10에 그 결과를 표시하였으며, 유속 변화에 관계없이 실제 소음원의 위치를 비교적 정확하게 찾아내는 것을 확인할 수 있다.

수중 소음원의 위치추적을 위한 추가 검증을 위해 해양시스템안전연구소(MOERI)의 예인수조(L×B×D=200m×16m×7m)에서 실험을 수행하였다. 반사파 및 자유수면의 영향을 파악하기 위해 수심 0.5m, 1.5m 및 2.5m에서 회류수조시험에서와 같이 (Fig. 9 참조) 반사파의 도달시간을 측정하였으며 수심 2.5m에서는 반사파의 영향이 없이 데이터 측정이 가능함을 확인하였다.

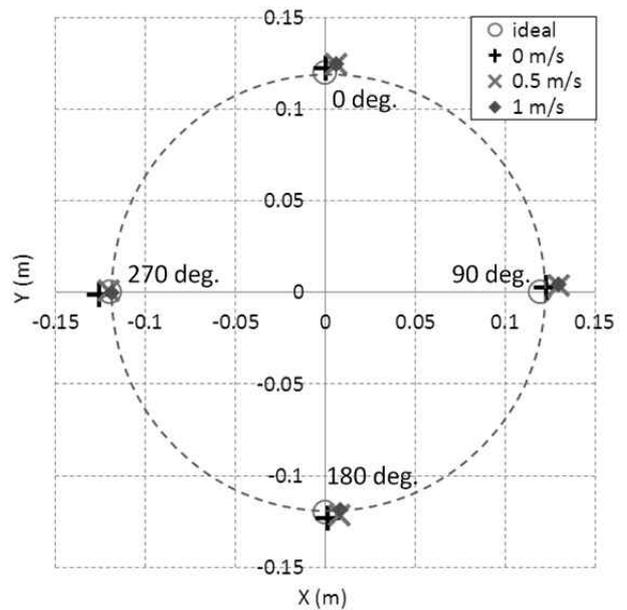


Fig. 10 Underwater noise source localization at the CWC

회류수조 실험과 동일하게 여섯 개로 구성된 수중청음기를 배열하여 음압신호를 계측하였으며, 소음원 프로젝터를 원형 궤적 60, 180 및 300도에 차례로 위치시키고 특정 주파수를 갖는 소음원을 발생시키도록 하였다. 예인전차에 고정된 소음원과 수중청음기를 1m/s, 2m/s, 3m/s의 속도로 이동시키면서 실험을 수행하였다(Fig. 11).

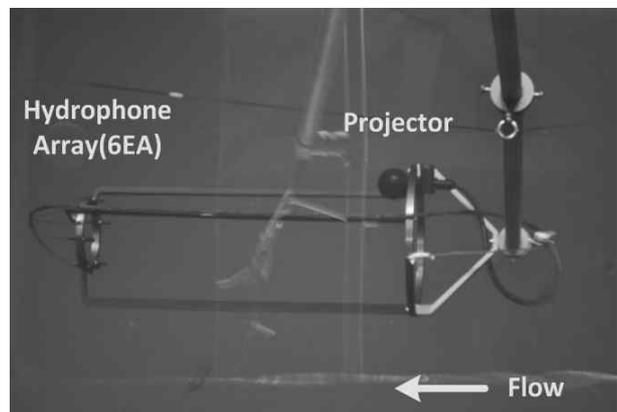


Fig. 11 Experimental set-up at the towing tank (MOERI)

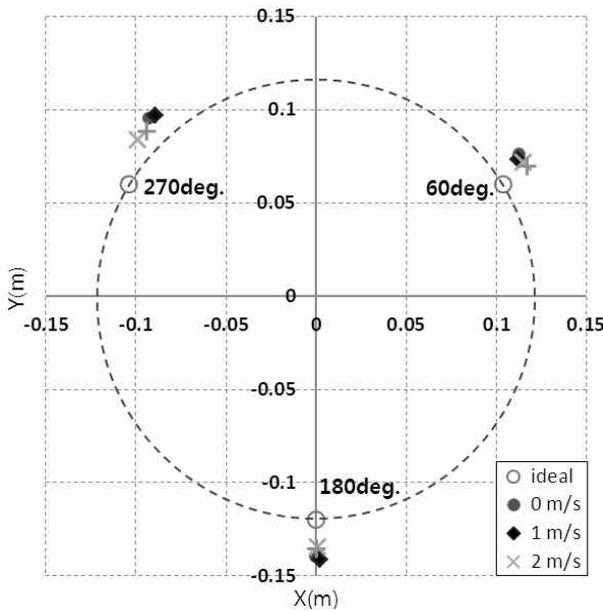


Fig. 12 Underwater noise source localization at the towing tank

Fig. 12는 예인수조 실험 결과로, 회류수조 시험결과와 비교하여 위치추정 오차가 약간 증가된 것을 확인할 수 있다. 유동장 내부에 위치한 소음원에서 발생하는 음파는 도플러 효과에 의해 유동 속도와 방향에 관계하여 전달 속도가 달라진다. 따라서 측정 센서와의 위치관계에 따라 음파의 전달 경로가 변하며, 도플러 효과를 고려하여 주파수 변화를 예측할 수 있다. 하지만 본 실험 결과의 경우 정지 상태와 유속이 있는 경우 모두 유사한 오차 범위를 갖고 있으며, 증가된 유속에 대해서 동일한 도달지연시간 값을 가짐을 확인하였다. 또한 수중에서의 음속을 고려하면(경험식을 사용한 예측 값 1,479m/s) 본 결과는 도플러 효과에 의한 오차가 아님을 확인할 수 있다. 이는 실험 장치에 소음원 프로젝터를 고정시키는 과정에서 유격이 발생하여 초기 계획한 위치에 정확히 고정되지 못했기 때문에 발생한 오차로 분석되었다. 하지만 충분한 정밀도를 가지는 것으로 보아 수중 소음원 위치추적을 위한 TDOA 기법의 유용성을 잘 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구를 통해 TDOA 기법을 이용하여 유동장에서 작동되는 선박용 프로펠러의 캐비테이션 초기발생 또는 명음 소음과 같이 회전하는 물체에서 발생하는 특정 소음원의 위치를 추적할 수 있는 기술을 개발하였다.

먼저 개발된 기술의 음향신호 처리 및 계측장치에 검증을 위해 풍동 실험을 수행하였으며, 공기 유동장에서 회전하는 복수개의 특정 소음원의 위치를 정확하게 추적할 수 있음을 보였다. 또한 회류수조 및 예인수조 실험을 통해 수중에서 이동하는 소음원의 위치도 정확하게 추적할 수 있음을 보였다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업의 재원의 일부로 수행된 연구 결과이며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Ahn, B.K. Lee, J.H. Rhee, W. & Choi, J.S., 2010. Theoretical and Experimental Study on Airfoil Singing. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 20(2), pp.115~121.

Ahn, B.K. Lee, C.S. & Han, J.M., 2009. Study on CIS Control of Navy Vessels. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, SNAK, pp.678-684.

Ahn, B.K. Lee, J.H. Choi, J.S. & Lee, C.S., 2008. Noise Source Identification Techniques using TDOA and Beam-forming Methods. *Proceedings of the Annual Spring Meeting*, SNAK, pp.1704-1713.

Ahn, J.W. Park, Y.H. Kim, K.S. & Lee, J.T., 2002. The Flow Noise Characteristics on Hydrophone Installation Method in the Cavitation Tunnel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(1), pp.1-7.

Edmonds, P. D., 1981. *Methods of Experimental Physics*, Vol. 19, Academic Press, INC.

Go, Y.J. Rhee, W. Choi, J.S. Ahn, B. K. & Lee, C.S., 2010. A Study on the Localization of Underwater Rotating Sound Source. *Proceedings of the KSMVE Twentieth Anniversary Spring Conference*, pp.156-157.

Lee, P.H. Ahn, B.K. Lee, C.S. & Lee, J.H., 2011. An Experimental Study on Noise Characteristics of Propeller Cavitation Inception. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), pp.1-7.

Ross, D., 1992. *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press.

