한국소음진동공학회 창립 20주년 기념 2010년 춘계학술대회논문집, pp.156~157

수중 회전 소음원의 위치추적에 관한 연구

A Study on the Localization of Underwater Rotating Sound Source

고영주† · 이욱* · 최종수** · 안병권*** · 이창섭***

Yeong-Ju Go, Wook Rhee, Jong-Soo Choi, Byoung-Kwon Ahn and Chang-Sup Lee

1. 서 론

최근에 선박용 프로펠러에서 특정 운용 영역에서 발생하는 명음현상에 의한 소음발생 사례가 자주 보고되고 있으며 이를 제어하기 위한 연구가 수행 되고 있다. 이의 발생 원인으로는 프로펠러 깃 뒷전에서 분리되는 와류, 깃의 펄럭거림에 의한 자려 진동, 구동축 베어링의 마찰 등이 지적되고 있으나, 일반적으로 깃 뒷전에서 분리되는 와류의 발생주기와 깃의 고유진동수 사이의 공진에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 명음현상의 발생 조건이 명확히 밝혀지지 않아 설계단계에서 이를 방지할 수 있는 대책이 반영되지 못하고 있는 실정이다.

이러한 명음현상이 발생할 경우 프로펠러 뒷전을 연삭하는 방법을 사용할 수 있는데, 뒷전의 형상변경에 따라 발생 와류의 주파수가 달라져 공진현상을 피할 수 있게 해 주는 것이다. 하지만 명음현상은 동일 형상으로 제작된 여러 개의 깃 중 국부적으로 발생하게 되며, 뒷전 형상변경은 추진기의 효율 저하를 초래하기 때문에 소음의 발생 위치를 정확하게 측정할 방법을 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 이와 같은 수중에서 회전하는 소음원의 위치를 복수의 음향 센서에서 수신된 신호의 도달 지연시간을 활용하여 측정할 수 있는 TDOA 를 제시하고, 해당 환경에서의 적용 가능성을 수치적 시뮬레이션과 수조 시험을 통하여 제시하였다.

2. 본 론

2.1 원통좌표계에서의 TDOA 기법의 적용

TDOA 알고리즘은 음원의 위치와 수신점의 위치관계에 의해 위치의 기하학적인 관계를 수학적인 정의를 통해 설명할 수 있다. 그림 1 에서부터 각 측정

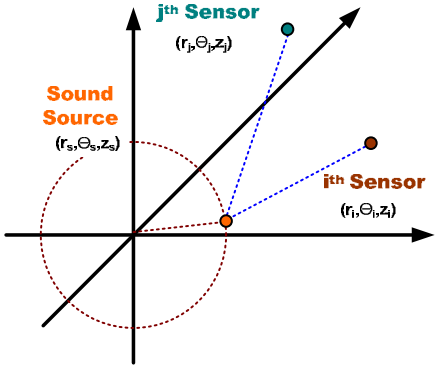

그림 1. Applications of TDOA in Cylindrical Coordinate System

센서와 소음원의 위치정보와 측정신호의 도달 지연시간, τ_{ij} 사이의 상관관계는 매질에서의 음속, c_0 에 대하여 다음과 같아진다.

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{c_0} \tag{1}$$

$$d_{ij} = \sqrt{(r_i - r_s)^2 + (\theta_i - \theta_s)^2 r_i^2 + (z_i - z_s)^2} - \sqrt{(r_j - r_s)^2 + (\theta_j - \theta_s)^2 r_j^2 + (z_j - z_s)^2} \tag{2}$$

여기에서 본 연구와 같이 소음원이 특정 평면상에 존재할 경우 식(1), (2)는 r_s 와 θ_s 만을 미지수로 정리할 수 있으며, 측정에 n 개의 음향센서를 사용한 경우 식(1), (2)로부터 각 수신점 사의의 조합에 의해 $n(n-1)/2$ 개의 독립 연립방정식을 얻을 수 있다. 이때 도달 지연시간은 두 신호의 상호상관함수나 상호스펙트럼에서 구할 수 있는데, 기존 연구에서 주파수영역 측정방법인 상호스펙트럼을 이용하는 것이 잡음이 있는 환경에서 유리함을 볼 수 있었다.

하지만 이는 식(1)의 비선형성에 의해 직접해를 구할 수 없으므로 이를 선형화하는 과정이 요구되는데, 이를 위해서 2 차항 이하의 테일러급수 전개를 통해 선형화한 뒤 최소자승법을 이용, 위치 오차가 최소가 되도록 반복계산을 수행함으로써 소음원의 위치를 추정할 수 있다.

† 교신저자; 충남대학교 항공우주공학과 대학원
E-mail : yjgo@cnu.ac.kr
Tel : (042) 821-7774, Fax : (042) 825-9225
* 충남대학교 항공우주공학과 대학원
** 충남대학교 항공우주공학과
*** 충남대학교 선박해양공학과

2.2 수중조건에서의 음속의 계산

이러한 TDOA 기법의 적용을 위해서는 해당 환경에서의 음속을 알아야만 하는데, 이는 열역학적 관계로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c_0^{\,2} = \gamma\beta_T / \rho_0 \tag{3}$$

하지만 여기의 비열비, 등온체적탄성비율, 그리고 매질의 밀도는 온도와 압력 평형 방정식에 대한 변수이기 때문에 일반적으로 실험식을 사용하게 되는데, 다음은 증류수 조건에서 얻어진 결과이다.

$$\begin{aligned} c_0 &= 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 \\ &\quad + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(P_G/100) \end{aligned} \tag{4}$$

이때 P_G는 측정된 게이지압[bar]이며 t 는 섭씨온도, T 를 100 으로 나눈 값이다. 이 식은 0<T<100℃와 0 ≤ P_G ≤200bar 에서 0.05%의 정확도를 갖는다.

바닷물의 경우 염도에 대한 영향을 고려해야 하는데, 천분률[ppt]로 표시되는 염도, S 에 대하여 다음과 같아진다.

$$\begin{aligned} c_0 &= 1449.08 + 4.57e^{-[T/86.9+(T/360)^2]} \\ &\quad + 1.33(S-35)e^{-T/120} \\ &\quad + 0.1522P_G e^{[T/1200+(S-35)/400]} \\ &\quad + 1.46\times10^{-5}P_G^{\,2}e^{-[T/20+(S-35)/10]} \end{aligned} \tag{5}$$

3. 검증시험의 수행

3.1 수치적 시뮬레이션을 통한 센서위치의 결정

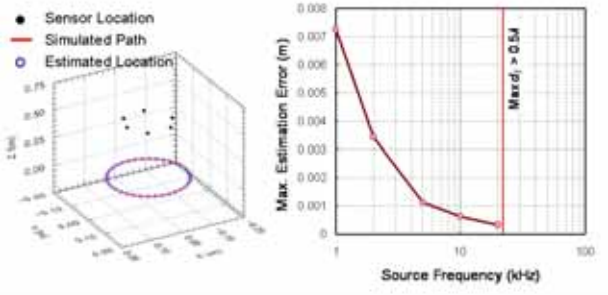

그림 2. Source Estimation Errors in the Numerical Simulation for various Source Frequencies

소음원 위치추적성능을 향상시키기 위해서는 해당 시험조건에서 최적화된 센서 위치를 선택하는 것이 중요하다. 시험 조건에서 도달 지연시간 측정의 정확도는 측정대상 소음원의 주파수와 음속에 영향을 받게 되는데 사용하는 모든 센서 쌍의 거리차이는 관심 소음원의 1/2 파장보다 짧고, 센서 사이의 간격은 비등간격을 사용한다는 기준에 의하여 하이드로폰의 설치 위치를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 반경 0.12m 를 회전하는 소음원에 대한 수치적 시뮬레이션을 통하여 관심 주파수 범위에서 최적화된 센서 위치를 결정하였다. 그림 2 는 시뮬레이션 결과에서 주파수 별 위치추정 오차를 나타낸 것이다. 이를 살펴보면 10%의 백색잡음을 포함한 정현파를 발생시키는 소음원에 대하여 주파수 증가에 따라 위치추정 오차는 감소함을 볼 수 있다. 하지만 소음원의 파장이 센서간 거리차이의 최대값의 2 배 이상이 될 경우 도달 지연시간 오차에 의해 소음원 위치추정이 발산함을 볼 수 있었으며, 그 한계치를 함께 표시하였다.

3.2 충남대학교 회류수조에서의 검증실험

TDOA 방법을 검증하기 위하여 다음과 같은 수조실험을 수행하였다. 사용된 회류수조는 W1.2 x H0.8 x L3.0m 의 시험부를 지니며 최대 유속은 2m/s 이다. 시험에서는 6 개의 하이드로폰(RESON TC4013)을 사용하였으며 NI PXI-5105 디지털 오실로스코프로 데이터를 취득 분석하였다. 동일 센서를 프로젝터로 활용한 고정된 소음원에 대한 실험에서 도달 지연시간 측정 정밀도를 확인하였으며, 워터젯을 사용하여 구현한 회전장치를 사용하여 회전 소음원 위치추정 정밀도를 검증하였다.

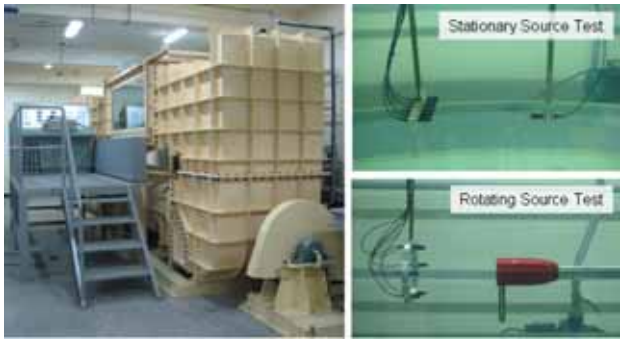

그림 3. Validation Test in the Circulating Water Channel in Chungnam National University

4. 결 론

선박용 프로펠러의 명음현상의 발생 위치 규명을 위하여 TDOA 기법을 활용한 회전하는 수중 소음원의 위치추적 방법을 제안하고, 검증시험을 통하여 그 타당성을 보였다. 개발 측정기법은 해수 조건에서의 음속조건을 고려할 경우 실선조건으로의 적용도 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문의 내용은 과학기술부 기초과학연구사업(R01-2007-000-20376-0)의 일부로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.