

Underwater 환경에서 표적 선박의 cavitation 소음 변조 분석 및 envelope 검출 연구

김규한, 남해운

한양대학교

kuhan10@hanyang.ac.kr, hnam@hanyang.ac.kr

Modulation Analysis and Envelope Detection of Cavitation Noise from Target Vessel in Underwater

Kyu Han Kim, Hae woon Nam

Hanyang Univ.

요 약

본 논문에서는 실험해역에서 수집한 선박 방사 데이터를 활용하여, 기존의 대역 통과 필터 대신 대역 분할 필터를 적용한 포락선 스펙트럼 및 고조파 성분의 에너지를 분석하였다. 4-band 대역 분할 필터를 적용한 결과, 주파수 성분이 가장 명확하게 추출되는 것을 확인할 수 있었으며, 기존 주파수 통과 필터로는 검출되지 않았던 28Hz, 42 Hz 부근의 캐비테이션 고조파 주파수 성분이 뚜렷하게 검출되었다. 또한, 주파수별 dB 그래프를 통하여 고조파 성분들의 dB를 비교한 결과를 비교하였을 때, 대역분할 기법을 통한 결과가 기존 대역통과 필터에 의한 결과에 비해 각각의 peak별로 크기는 5dB에서 적게는 0.5dB가 차이가 발생하였으며 전체적으로 검출 성능이 향상되었다. 또한, 대역분할 기법(2-band, 4-band)간 비교 시 4-band가 성능이 높은 것으로 나타났으며, 특히 42Hz 고조파 peak 값이 높게 검출되어 주파수 선이 뚜렷하게 관측될 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 기술을 활용하여, 산업단지 지역의 공장 환기시스템 등의 팬(fan) 및 진동 소음을 통해 공장의 장비 가동 상태 등을 모니터링 하는데 활용할 수 있을 것으로 예상되며 공장 및 장비 가동 모니터링을 통해 에너지 효율화에 기여할 수 있는 방안이 될 것이다.

I. 서 론

수중환경에서 미확인 물체의 탐지, 분류 및 추적은 항만 방어와 연안 및 해양 감시 체계의 핵심 임무이다. 수동 소나에 수신된 미확인 선박 방사 소음은 유체 소음, 기계류 소음, 프로펠러 소음으로 분류된다[1]. 이 중 프로펠러 소음은 수중에서 발생하는 소음으로, 고속으로 회전할 때 캐비테이션 현상이 발생하여 날개 수, 회전 속도 등에 의해 결정되어 진폭 변조된 광대역 주파수로 방사된다. 이러한 변조 신호를 평가함으로써 선박 프로펠러의 회전 주파수와 같은 정보를 얻을 수 있으며, 선박 탐지를 위한 제원으로써 활용될 수 있다. 포락선 변조 추정 방법은 DEMON(Detection of Envelope Modulation on Noise)으로 알려져 있으며, 특히 수상에서 미확인 선박이 출현할 경우, DEMON 분석을 통해 프로펠러 정보를 분석함으로써 미확인 수상정 및 선박에 대해 이상 여부를 판단할 수 있다. 하지만 실제 선박 방사소음은 복잡한 해양환경과 주변 잡음 등 다양한 상황에 의해 표적의 식별 성능에 영향을 주는데, 특히 DEMON 처리 시 해양환경 등 다양한 요인들로부터 표적 선박의 정보를 추출하기 위해서는 주파수 필터를 통해 원치 않는 주파수 구성요소를 제거하여 원하는 캐비테이션 소음을 분리하는 것이 중요하다.[2]

따라서 본 논문에서는 실험해역 선박 방사 데이터를 활용하여, 기존의 대역 통과 필터 대신 대역 분할 필터를 적용하여 포락선 스펙트럼 및 고조파 하모닉 성분의 에너지를 분석하였다.

II. 본론

1. 제안하는 DEMON 분석법

선박 프로펠러의 회전으로 인해 발생하는 진폭 변조된 캐비테이션 소음은 선박 프로펠러 제원을 추정할 수 있는 회전 주파수 지표를 확인하기 위해 그림1과 같이 제안하는 DEMON 분석 과정을 통해 처리된다. 이 과정에서 선박의 방사 소음에 기존의 주파수 통과 필터가 아닌 대역 분할 필터(2

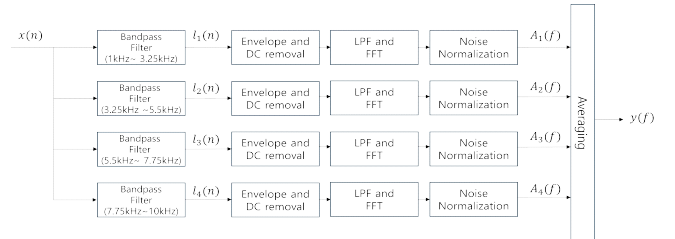


그림 1. Proposed DEMON analysis algorithm

band 대역 분할 필터, ① 1 kHz 5.5 kHz / ② 5.5 kHz 10 kHz, 4 band 대역 분할 필터, ③ 1 kHz 3.25 kHz / ④ 3.25 kHz ~ 5.5 kHz / ⑤ 5.5 kHz ~ 7.75 kHz / ⑥ 7.75 kHz 10 kHz)를 적용하여 기계적인 소음의 영향을 최소화하고, 광대역 캐비테이션 신호가 두드러지는 주파수 대역의 신호를 추출한다. 이후, 변조된 신호를 복조하기 위해 포락선을 추출하는데 이때 Hilbert 변환을 이용한다. 포락선 추출을 위한 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며 포락선은 식(2)과 같이 식(1)의 진폭으로 정의된다[3]

$$\hat{h}(t) = h(t) + j\dot{h}(t) \quad (1)$$

$$|\hat{h}(t)| = (h(t)^2 + \dot{h}(t)^2)^{0.5} \quad (2)$$

여기서 $h(t)$ 는 분석하고자 하는 시간신호, $\hat{h}(t)$ 는 $h(t)$ 의 힐버트 변환(Hilbert transform)이며 이는 식(3)과 같다.

$$\dot{h}(t) = H(h(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h(\tau)}{\tau - t} d(\tau) \quad (3)$$

이후 추출된 포락선 신호에는 선박 정보가 낮은 주파수 대역에 위치하므로

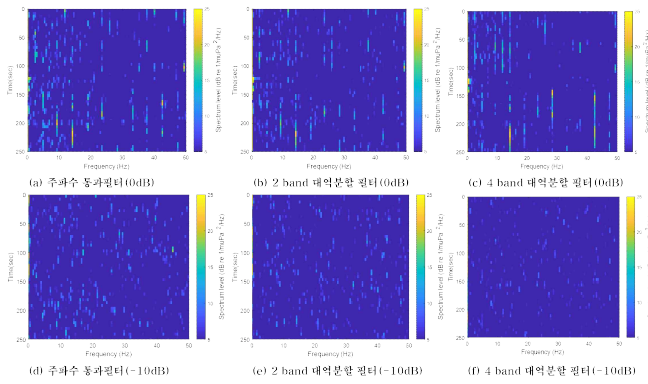


그림 2 DEMON Spectrogram

로, 저역 통과 필터를 통해 고주파 신호를 제거한다. 다음으로, 시간 도메인의 시계열 신호를 주파수 도메인으로 변환하기 위해 FFT를 수행한다. 이후 마지막으로, 해양 노이즈의 영향을 줄이기 위해 소음 정규화 과정을 거친 뒤 DEMON 그래프를 생성한다.

2. 시뮬레이션

모의된 신호는 실험역 수중 데이터의 기계류 소음 신호가 우세한 대역과 캐비테이션 소음 신호가 최대로 확장되는 대역을 고려해 대역 통과 필터의 전체 대역폭을 1 kHz ~ 10 kHz로 선정하고, 저주파 통과 필터의 차단 주파수를 50 Hz로 설정하였다. 저주파 통과 필터를 통과하기 전 연산량 감소를 위해 4 kHz로 다운샘플링을 수행하였으며, FFT 크기를 8192로 설정하였다. 위의 조건에 맞게 DEMON 그래프를 생성하였고, 두 가지의 주파수 대역대의 분할 변동 인자를 고려하여 데이터를 제작하였다. 해양 환경을 AWGN 채널로 가정하여 SNR이 0 dB, -10 dB인 환경을 모의하였으며, 이는 실제 실험역 데이터에 노이즈를 추가하여 모의한 데이터이기 때문에 실제 환경보다 잡음이 더 심한 환경으로 실험을 진행하였다.

III. 시뮬레이션 결과분석

SNR 0 dB 조건에서 기존 주파수 통과 필터를 적용한 결과, 전체 신호 길이 4분 10초 중 마지막 50초 구간에서 캐비테이션 소음이 검출되었으며, 고조파 성분이 확인된 것으로 분석된다. 동일한 신호에 대해 2-band 대역 분할 필터를 적용한 경우에도 마지막 50초 구간에서 캐비테이션 소음이 해석되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 4-band 대역 분할 필터를 적용한 결과, 주파수 성분이 가장 명확하게 추출되는 것을 확인할 수 있었으며, 기존 주파수 통과 필터로는 검출되지 않았던 160초 부근의 28Hz, 마지막 100초 구간의 42 Hz 부근의 캐비테이션 주파수 성분이 뚜렷하게 검출되었다. SNR -10 dB에서는 모든 주파수 필터(주파수 통과 필터, 2-band, 4-band 대역 분할 필터)에서 노이즈의 영향으로 인해 고조파 성분이 전혀 검출되지 않았다. 그럼에도 불구하고, 4-band 대역 분할 필터를 사용한 경우가 다른 필터에 비해 노이즈의 영향력이 상대적으로 줄일 수 있었음을 확인할 수 있었다. 따라서 선박의 수중 방사소음은 대역통과 필터에 비해 대역분할 기법의 성능이 더 좋다고 판단이 되나, 이는 DEMONGRAM을 직관적으로 비교하는 '정성적' 분석이므로 '정량적' 분석을 통해 차이를 비교하고자 한다.

표 1은 10dB 환경에서 3개 기법의 고조파 성분(peak) 간 dB 차이를 표로 나타낸 것으로, 주파수별 dB 그래프를 통하여 고조파 성분들의 dB를 비교한 결과이다. 대역분할 기법을 통한 결과가 기존 대역통과 필터에 의한 결과에 비해 각각의 peak 별로 크기는 6dB에서 적게는 0.5dB가 차이가 발생하였으며 전체적으로 성능이 향상되었다. 또한, 대역분할 기법(2-band, 4-band)간 비교 시 4-band가 성능이 높은 것으로 나타났으며,

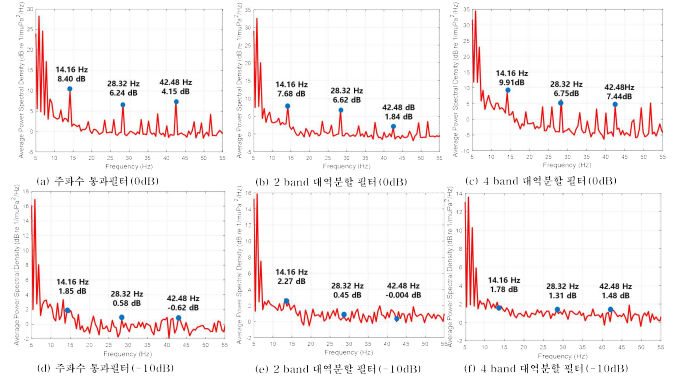


그림 3. 포락선 고조파 성분 분석

고조파 dB	14.16 Hz	28.32 Hz	42.48Hz	peak 평균
주파수 통과 필터	8.40 dB	6.24 dB	4.15 dB	6.26 dB
2-band 대역 분할 필터	7.68 dB	6.62 dB	1.84 dB	5.28 dB
4-band 대역 분할 필터	9.91 dB	6.75 dB	7.44 dB	8.03 dB

표 1. 고조파 하모닉 성분 peak dB

특히 42Hz 고조파 peak 값이 높게 검출되어 주파수 선이 뚜렷하게 관측될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

IV 결론

본 연구에서는 실험역에서 수집된 선박 신호의 진폭 변조를 분석하고, 주파수 분할필터와 힐버트 변환을 통해 포락선을 검출하는 방법을 제시하였다. 이를 통해 캐비테이션 소음을 효과적으로 탐지하고, 불필요한 잡음을 제거함으로써 에너지 소비를 최소화할 수 있었다. 본 기술을 활용하여, 산업단지 지역의 공장 환기시스템 등의 팬(fan) 및 진동 소음을 통해 공장의 장비 가동 상태 등을 모니터링 하는데 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 대해 2024년 구미산단 기업의 설문조사 결과 기업의 자체 에너지 효율화를 위한 활동으로 에너지 모니터링 시스템 구축 등의 기업 수요를 나타낸 바 있어[4] 본 연구에서 제시하는 기술을 활용한다면 구미산단 공장 및 장비 가동 모니터링을 통해 에너지 효율화에 기여할 수 있는 방안이 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 한국산업단지공단인 경북구미 스마트그린산업단지 에너지 자급자족 인프라 구축 및 운영사업에서 제공하는 데이터를 활용하여 수행되었음”

참 고 문 헌

- [1] 윤종락. 선박방사소음의 측정 및 평가방법. 소음·진동, 1998, 8:2: 232-238.
- [2] 정명준, “대역 분할 처리를 통한 데몬 처리 성능 향상 기법”, 한국음향학회지 제32권 제2호 138-146 (2013).
- [3] . M. F. McKenna, D. Ross, S. M. Wiggins, and J. A. Hildebrand, “Underwater radiated noise from modern commercial ships,” J. Acoust. Soc. Am. 131, 92-103 (2012).
- [4] 2023년도 구미사업단지공단 ‘스마트에너지클러스터 기업 설문조사 및 수요조사’ 7 - 12p