

선박방사소음의 측정 및 평가방법

윤 종 락

(부경대학교 음향진동공학과)

1. 머리말

선박 방사소음은 군사적 목적의 수동소나가 탐지대상으로 하는 수중음향 표적이라 할 수 있다. 따라서 수동소나 운용자는 대잠전 수행이전에 다양한 선박들에 대한 방사소음을 측정, 분석하여 개별 선박 고유의 음향 특징을 수집함으로써 실전 상황에서 미지 선박이 탐지되는 경우 이들 자료를 식별의 기초자료로 활용하고자 한다. 또한 새로운 수동소나의 개발자나 스텔스 능력의 선박 설계자 역시 선박방사소음 특징자료를 필요로 한다.

본 글은 선박방사소음의 발생기구, 측정시스템 및 측정자료의 분석·평가 기술을 연구분석한 내용이다.

2. 방사소음의 발생기구 및 일반적 특성

2.1 기계소음

선박이 저속력으로 항해하는 경우 우세하게 측정되는 기계소음은 그림 1에 보이는 바와 같이 선박 내부에 존재하는 기계류의 회전운동, 왕복운동에 의한 기진력이 선각을 통해 방사하는 소음으로 기관소음(디젤엔진, 터보엔진, 전기모터, 감속기어) 및 보조기계소음(발전기, 펌프 등)으로 대별되며 음향신호의 스펙트럼은 Tonal(선스펙트럼)특성을 갖고 선각의 고유진동모드에 일치하는 성분이 가장 강하게 방사된다.

그러나 소음생성원의 단위요소인 기관을 포함한 선박 내부의 기계류 등은 독립적으로 구동하는 것이 아니고 추진기관은 감속기어를 통해 추진축과 연동하고 또한 각 개별 기계는 베어링, 회전축, 회전날개 등의 단위기계요소가 결합되어 전체 진동계로 동작한다. 또한 선박이 항해중인 경우를 가정하면 선박의 속력 변화 등 동적 변화에 의해 생성원의 특성이 변화하고 펌프류 등의 기계는 항상 시간적

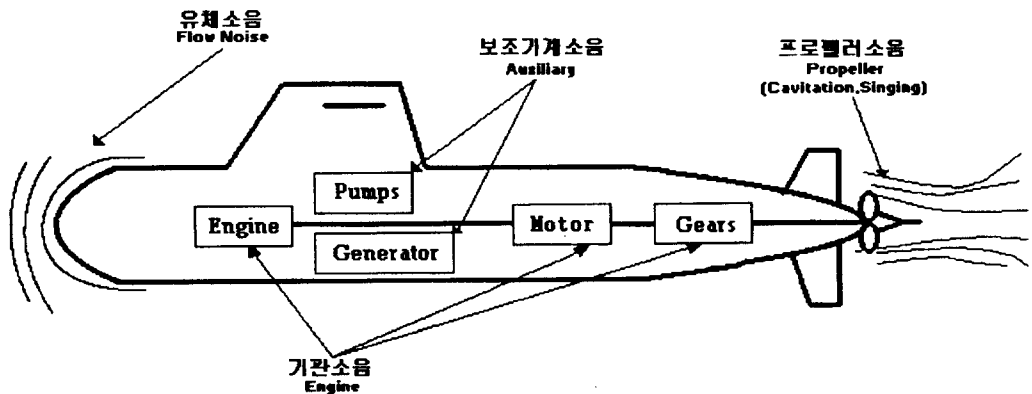


그림 1 Ship radiated noise sources

동적 부하변동으로 축계 부하변동이 일어난다. 따라서 Tonal 들은 진폭변조나 주파수변조된 스펙트럼 특성으로 나타난다.

추진축 회전주파수가 연동하는 기어, 베어링 등의 진동주파수와 진폭변조되는 경우 측정되는 방사소음의 특성 $f_{ma}(t)$ 는

$$f_{ma}(t) = \sum_{m=1}^{\infty} b_m (1 + \mu \sum_{n=1}^{\infty} a_n \times \sin(n\omega_s t + \theta_n)) \sin(m\omega_c t + \theta_m) \quad (1)$$

여기서,

ω_s, a_n 및 θ_n : 각각 축회전주파수, 각 고조파 진폭 및 각 고조파 위상

ω_c, b_m : 기어 혹은 베어링의 기본주파수 및 각 고조파 진폭

μ : 진폭변조의 변조지수 ($0 \leq \mu \leq 1$)

축계 부하변동에 의해 축회전수가 시간 적 변화를 일으키는 경우 주파수 변조되어 측정되는 방사소음의 특성 $f_{mf}(t)$ 는

$$f_{mf}(t) = \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(m\omega_c t + a \int_{t_0}^t x_s(\lambda) d\lambda) \quad (2)$$

여기서,

a : 주파수변조지수로 ω_c 에 대한 백분율

식 (2)에서 $x_s(\lambda)$ 는 축회전수 변화신호로써 변화신호는 주기신호인 경우와 랜덤신호인 경우로 구분된다.

2.2 프로펠러소음

선박이 고속으로 항해하는 경우 우세하게 측정되는 프로펠러 소음은 기계소음과 달리 선박외부에 위치한 프로펠러가 소음원으로 유체중에서 프로펠러가 회전하는 경우 프로펠러 날개 양면(Suction side & Pressure side)의 압력 변동에 기인되는 추력이 선각의 가진력으로 작용하거나 날개면의 압력이 증기압 이하로 떨어져 캐비테이션이 발생할때 측정되는 소음이다. 이들중 전자에 의해 발생하는 음향신호는 프로펠러 축 주파수 성분을 갖는 Tonal 특성으로 후자에 비해 상대적으로 낮은 진폭으로 수동소나 대상신호로는 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 후자의 캐비테이션에 의한 소음은 선박의 속도 증가와 함께 진폭이 급격히 증가하는 것으로 광대역

소음특성을 갖는다.

프로펠러 캐비테이션 소음의 발생조건은 캐비테이션 지수 K 로써 정의되고 선박 프로펠러의 경우 K 는 다음식으로 주어진다.

$$K = (P_{\infty} - P_v) / \frac{1}{2} \rho u_i^2 \quad (3)$$

여기서, P_{∞} : 정압
 P_v : 유체의 증기압
 ρ : 유체의 밀도
 u_i : 프로펠러 날개 끝단 속도

K 의 값이 대략 2 이하인 경우 캐비테이션 소음이 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 선박의 경우는 프로펠러가 선박 후미에 위치하므로 선미유속 분포가 불균일하여 프로펠러 날개 위치에 따라 u_i 및 K 가 변화하게 된다.

그림 2는 유속분포 및 날개 위치에 따른 캐비테이션 기포발생량 변화를 보인 것으로 $\theta = 0^\circ$ 위치에서 캐비테이션 지수 K 가 최소로 되어 기포 발생량 및 기포의 크기가 최대로 되며 또다른 유속 극소점인 $\theta = 180^\circ$ 위치에서는 캐비테이션이 발생하나 발생량 및 크기는 $\theta = 0^\circ$ 위치와 비교하면 상대적으로 적게된다.

이러한 주기적인 기포발생량의 변동은 프로펠러 날개주파수를 기본주파수로 하는 큰 진폭의 조화파 소음특성으로 관측된다. 따라서 프로펠러 소음 $P(t)$ 는 프로펠러 날개주파수를 기본주파수로 하는 비정현파 주기함수와 광대역 캐비테이션 소음이 진폭변조되어 방사되므로 다음식으로 주어진다.

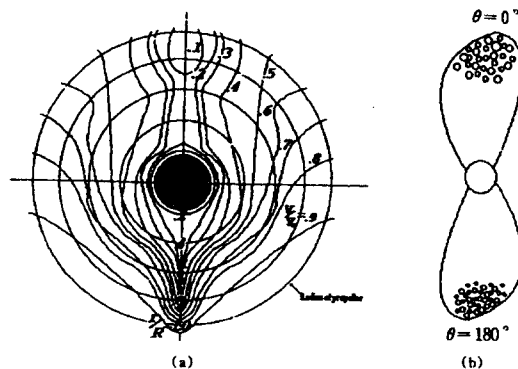


그림 2 (a) Nouniform inflow in the plane of propeller (b) Cavity volume and its size with respect to the propeller position

$$P(t) = (1 + \mu \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega_s t + \theta_n)) P_a(t) \quad (4)$$

여기서, ω_s : 프로펠라 기본 주파수
 μ : 진폭변조지수

$Pa(t)$: 광대역 캐비테이션 소음

또한 프로펠라축의 불평형이나 특정날개의 기계적 손상으로 인해 특정 날개의 캐비테이션 기포발생량이 여타의 날개의 것보다 상대적으로 많게되어 축 회전주파수를 기본주파수로 하는 진폭변조 특성이 관측되기도 한다.

따라서 수상 선박, 잠수함 등의 선미 유속 극소점이 작수개로 대칭인 경우 날개수를 홀수로 하여 캐비테이션 기포발생을 분산시켜 프로펠라 날개주파수 및 고조파 Tonal 및 광대역 스펙트럼의 진폭을 감소시키는 것이 선박 설계자가 고려해야 할 점이다. 또한 Skewed blade 로 설계하여 한개 날개가 유속극소점을 소인하는 시간을 길게하여 캐비테이션 진폭을 감소시키는 것도 채택되고 있지만 동일 추력을 얻기위해서 프로펠라가 대형으로 되는 단점이 있다. 이외에 선박 프로펠라 소음으로 종종 관측되는 Singing 소음은 날개 단면의 Trailing Edge에서 발생하는 Vortex Shedding 주파수와 날개의 특정 고유주파수가 일치할때 발생하는 것으로 날개주파수와 Vortex Shedding 주파수가 진폭변조되어 관측되며 식 (2)의 시간 파형 특성을 갖는데 이 경우 m은 날개의 특정 고유주파수에 대응되는 한개의 값만을 갖게 된다.

2.3 시간 및 주파수 영역의 일반적특성

그림 3은 프로펠라 축회전수가 75 RPM인 상선의 스펙트로그램, 시간파형 및 스펙트럼 특성이다. 500 Hz이하에서 4개의 Tonal 특성 진폭변조신호가 관측되고 500 Hz이상의 광대역 캐비테이션 소음에서는 강한 진폭과 약한 진폭을 나타내는 두 성분이 진폭변조되어 나타난다. 강한 성분은 언급한 바와 같이 축의 불평형이나 특정 날개의 결합에 의해 나타나는 현상으로 이 성분의 주기는 축회전주기와 일치하고 또한 강한 성분 사이에 3개의 약한 성분이 관측되는 것으로부터 프로펠라 날개수는 4개로 분석된다.

500Hz이하에서 나타나는 Tonal 성분의 진폭변조신호는 그림 3(b)의 500 Hz이하의

스펙트럼에서 보이는 바와 같이 진폭변조특성을 갖는 600 Hz, 120 Hz, 150 Hz, 300 Hz 성분과 진폭변조특성이 약하게 나타나는 220 Hz 성분이 관측된다. 60 Hz 와 120 Hz 성분은 발전기 특성으로 전기 기계진동에서 회전자가 편심된 경우 나타나는 특성으로 해석된다.

150 Hz, 220 Hz, 300 Hz 성분은 추진축의 감속기어 주파수가 축회전 주파수에 변조된 것으로 판단되고 스펙트로그램에서 관측되는 바와 같이 220 Hz의 진폭변조 주기는 프로펠라 축회전주기와 동일하고 150 Hz와 300 Hz성분은 프로펠라 축회전주기의 1/6로 분석되어 감속기어비는 1/6으로 분석된다. 또한 220 Hz성분은 고조파 성분이 관측된다. 보다 정확한 분석은 대상선박의 기계요소에 대한 재원이 필수적이라 판단된다.

이상과 같이 선박신호에는 다양한 형태의 변조특성이 관측된다. 대표적 변조특성은 캐비테이션 소음의 날개주파수 및 축 회전주파수에 의한 진폭변조와 Tonal 성분의 진폭변조 신호이다. 이러한 진폭변조신호는 복조(Demodu-

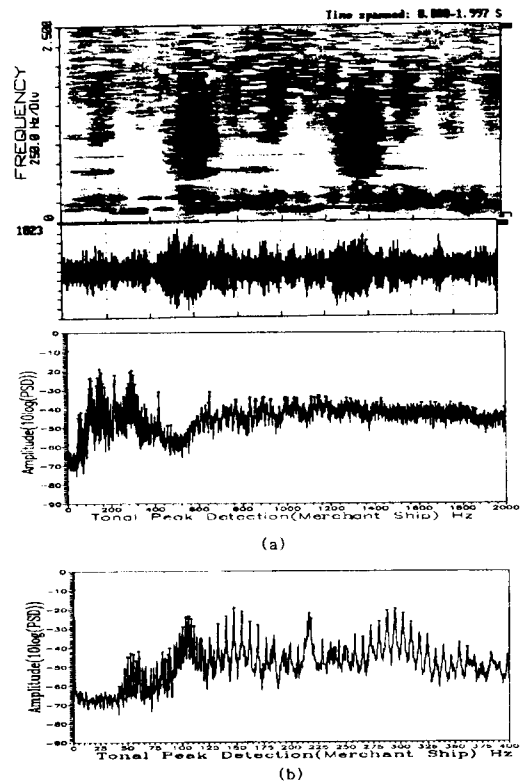


그림 3 Radiated noise characteristics of a merchantship

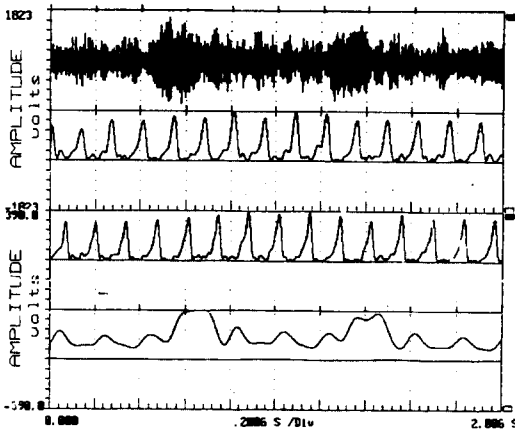


그림 4 Demodulation of the signal of Fig. 3

tion)과정으로 개별신호 특성을 해석할 수 있다. 그림 4는 복조과정으로 그림 3의 선박신호를 분석한 결과이다. 그림 4의 2번째 자료는 150 Hz 영역의 진폭변조 신호에 대한 복조신호, 3번째 자료는 300 Hz 영역의 진폭변조 신호에 대한 복조신호, 4번째 신호는 500 Hz 이상의 광대역 진폭변조 신호에 대한 복조신호 특성이다. 이들 복조신호는 개별기계 요소의 시간과형 특성으로 이들에 대한 상세한 해석으로부터 기계상태를 규명할 수 있을 것이다.

3. 측정 방법

3.1 측정환경

해면과 해저로 경계지워져 있는 해양 환경에서 선박소음과 같은 연속파 음원이 방사하는 경우 청음기에 수신되는 음은 직접파 및 해저, 해면에 의한 복반사음이 합성되어 측정된다. 따라서 2절에서 논의된 선박소음의 고유 특성을 얻기 위해서는 복반사음의 영향을 최소화하는 것이 요구된다. 국방과학연구소나 미 해군연구소 등에서 운용하고 있는 선박 방사소음 측정 시험장은 해저 저질이 빨리고 수심이 500 m 이상이며 수중청음기의 깊이는 최대 200 m 정도이다. 이러한 특성은 해저 경계면에서의 음향에너지 감쇠효과, 직접파에 대한 해저반사파의 전달손실효과를 증대시켜 해저반사파 영향을 측정자료의 분석시에 무시하기 위한 것이다. 그러나 해면에 의한 반사파는 무시할 수 없는 것으로 3.2절에서 논의

되는 수중청음기 배열 신호처리에 의해 그 영향을 제거할 수 있다. 이와 더불어 측정해역의 배경잡음준위가 방사소음준위보다 10 dB 이하의 조건을 요구하므로 해양배경잡음의 주요인인 해상상태가 Sea State 2 이하이어야 하며 반경 10 마일 이내에 통행선박이 없어야 한다.

3.2 수중청음기 배열

선박방사소음원을 점음원(선체진동을 국부 선각진동으로 묘사하는 경우나 프로펠라 소음)으로 가정하면 단일 수중청음기에 수신되는 음압은 해저반사파를 무시하는 경우 직접파와 해면반사파가 간섭되어 측정될 것이다.

그림 5은 수평거리 200 m, 깊이 5 m에 위치한 백색잡음원이 해면반사계수 1인 경우 단일 수중청음기에 수신된 음압준위 특성으로 청음기의 깊이와 주파수에 따라 수신 음압준위는 간섭무늬 형태로 측정됨을 보인다. 결국 청음기에 측정되는 음압은 소음원과 수중청음기 간의 수평거리, 소음원 및 청음기의 깊이 및 소음원의 주파수 함수로 주어진다. 따라서 특정의 선박방사소음을 측정하는 경우 소음원의 중심깊이와 수평거리는 일정하다고 가정하면 수중청음기의 깊이 변화에 대한 측정음압의 변동성분은 청음기 배열을 사용하여 각 청음기의 수신신호를 조화평균함으로써 변동의 크기를 줄일 수 있다. 즉 그림 5에서 x축(hydrophone depth축) 방향으로 수개 지점을 선택하여 청음기를 배열하는 것이다. 배열의 전체폭은 그림 5의 x축 방향으로 나타나

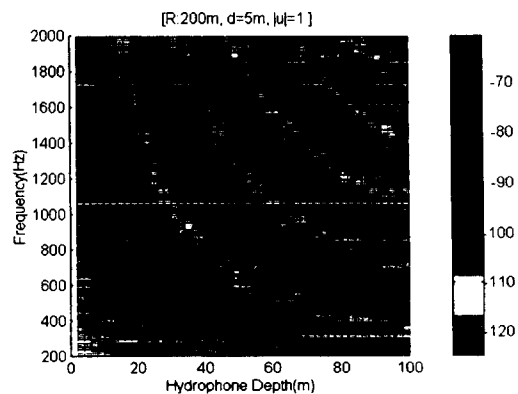


그림 5 Sound pressure level dependency on hydrophone depth and frequency

는 간섭특성에서 간섭무늬의 구배폭 이상으로 하고 청음기 갯수가 5개 이상인 경우 측정자료의 바이어스오차 및 표준편차는 각각 3 dB 및 1 dB 정도인 것으로 알려져 있다.

3.3 피측정 선박 기동법 및 측정·분석 장비

(1) 피측정 선박 기동법

그림 6은 DTRC(David Taylor Research Center)에서 운용하고 있는 잠수함의 방사소음 측정시스템이고 그림 7은 국방과학연구소에서 운용하고 있는 선박 방사소음 측정시스템이다. 피측정 선박과 배열 중심과의 최단 수평거리 CPA(Closest Point of Approach)는 잠수함의 경우 약 150 m, 수상 선박의 경우 약 250 m로 되어있다. CPA 거리가 원거리 음장조건을 만족하기 위해서는 주파수 20 kHz인 경우 성분소음원의 기하학적 최대 크기는 잠수함 측정시스템의 경우 약 3.5 m 이하이어야 하고 수상선박 측정시스템의 경우 4.5 m 이하이어야 한다. 따라서 대상 잠수함 및 수상선박의 선각이나 격실의 성분크기 및 소음발생원의 단위요소크기가 이 정도의 규

모로 산정된다면 CPA 값은 적정하다고 판단 될 것이다.

선박방사소음은 속력에 따라 혹은 가변핏치 프로펠라인 경우는 핏치에 따라 달라지며 또한 선박내 기계요소의 설치위치는 선수미선을 중심으로 비대칭적인 분포이므로 좌우현 특성이 다르다. 일반적으로 최저 속력으로부터 3~5 노트 간격으로 측정하며 CPA를 중심으로 최소 2000 m 이상을 직선 항해해야 한다. 각 속력에 대해 좌우현 특성을 측정한다.

(2) 측정 및 분석장비

① 수중청음기 배열

- 수중청음기는 최소 3개 이상이 요구되며 20 Hz~20 kHz까지 평탄한 특성이어야 한다.
- 최대 200 m 정도의 청음기 케이블이 요구되므로 케이블에 의한 신호 특성 저하를 보상하기 위한 Preamp가 요구된다.
- 해면의 파도에 의한 소음발생을 최소화 하기 위해 배열표시 부이(Spar Buoy)는 원통형 형태이어야 한다.
- 배열의 안정성을 위해 배열의 끝부분에 추를 달아야 한다.

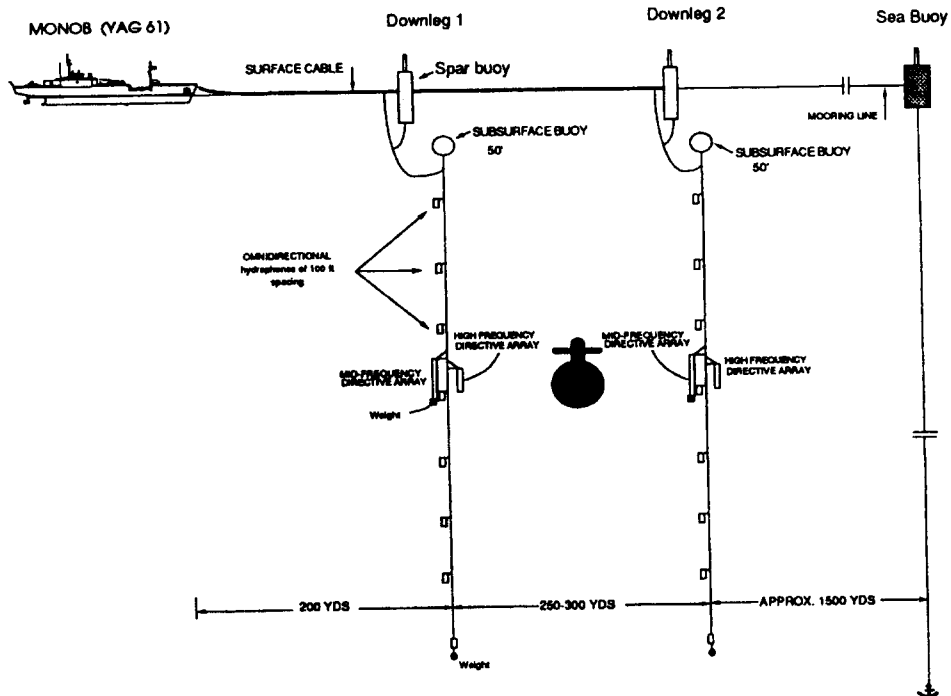


그림 6 Submarine radiated noise measurement system

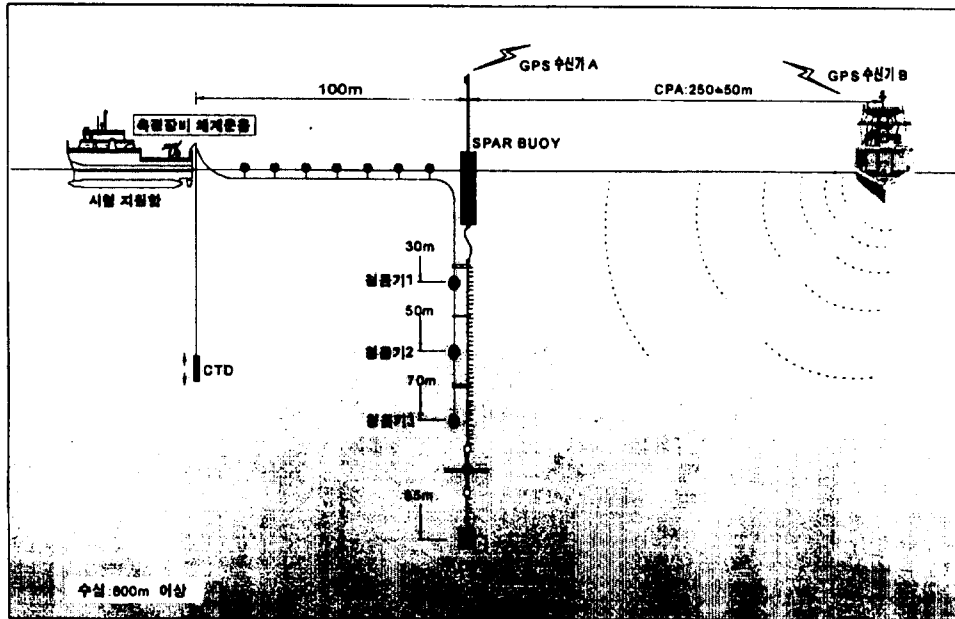


그림 7 Radiated noise measurement system

- 해류나 조류에 의한 배열케이블의 진동소음을 최소화 하기위해 깃털 로프를 배열지지줄로 사용한다.

② 녹음기

- 청음기배열 요소수, 음성 모니터링, time code 신호 등을 동시에 측정할 수 있는 채널수의 녹음기가 필요하고 20 kHz까지 평탄한 주파수 특성이어야 한다.

③ Time code generator

- 측정시의 시각정보를 코딩하는 장치로 코딩신호는 녹음되어 녹음신호재생시에 디코딩되어 음성모니터링 신호와 함께 측정상황을 재현하는데 필요한 장치이다.

④ 분석기

- 1/3 Octave 분석기가 필요하며 20 Hz~20 kHz, 평균시간 1~100 sec 정도의 특성이 요구된다. IEEE 488 bus가 사용가능해야 한다.

- Narrow Band 분석기가 필요하며 분해능이 최소 400 line으로 5 kHz까지 분석 가능해야 한다. 또한 IEEE 488 bus 사용이 가능해야 한다.

- LOFARgram(Spectrogram)분석기가 필요하며 주파수 범위는 2 kHz 정도 되어야 한다.

⑤ Ranging 시스템

- 청음기 배열과 피측정 선박간의 방위 및 거리를 추적하여 추적도를 제공하는 장치로 최소한 20 km 범위까지 사용가능해야 한다.

⑥ 측정선

- 측정선은 기동성보다 안정성이 확보되어야 하며 선박소음 측정시 측정선 내의 모든 소음장치는 정지될 수 있어야 하며 측정시스템에 필요한 최소한의 전력을 공급할 수 있는 저소음 발전기가 확보되어야 한다.

4. 결 론

본 글에서는 선박 방사소음의 측정방법, 소음발생기구 해석을 통한 측정자료의 분석방법 등을 간략히 제시하였다. 선박 방사소음의 측정·평가기술은 수동소나 운용자, 수동소나 설계자 및 선박건조자에게 필수적으로 요구되는 기술분야이지만 해양이라는 특수한 환경조건에 지배되는 기술로 일반연구자가 용이하게 다룰 수 있는 분야가 아니다. 즉 현재 국방과 학연구소 및 필자가 연구원으로 소속되어 있는 서울대 수중음향특화 연구센터에서만 부분적으로 이 분야에 대한 연구를 하고 있을 뿐이다. 그러나 본문에서 언급한 바와 같이 측

정된 선박 방사소음 자료의 효율적 분석, 활용 가능한 자료의 수집, 분석자료의 응용을 위해서는 선체, 프로펠라 및 기계구성품 등의 진동소음기술이나 해양의 물리음향기술 및 신호처리기술 등이 다양하게 요구된다.

또한 제시한 내용은 항해중인 선박의 방사소음을 대상으로 하였으나 개별 기계구성품의 방사소음 특성 해석을 위해 선박을 정박시켜 측정하는 방법도 있다. 아울러 측정해역에 따른 측정자료의 변이효과, 방사소음의 지향성이나 속력별 소음 증가도 등 응용연구자들이 개별적으로 요구하는 다양한 분석 형태들이 있다. 이러한 측면에서 본 글의 내용은 대단히 미흡한 것으로 판단되지만 선박 방사소음의 측정·분석에 대한 전반적인 이해에 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) L.M. Gray, 1980. "Source Level Model for Propeller Blade Rate Radiation for the World's Merchant Fleet", JASA 67(2).
- (2) R.J. Urick. Principles of Underwater Sound, New York : MxGraw Hill, 1983.
- (3) V.P. Morozov, 1969. "Cavitation Noise as a Train of Sound Pulses Generated at Random Times", Soviet Physics-Acoustics 14(3).
- (4) M.A. Deaett, 1987. "Signature Modelling for Acoustics Trainer Synthesis", IEEE J. of Oceanic Engr. 12(1).
- (5) "Sonar Audio/Video Training System", Thomson Sintra Activities SousMarines.
- (6) A.A. Pudovkin, 1976. "Noise Emission by the Cavitation Zone of a Marine Propeller", Soviet Physics-Acoustics 22(2).
- (7) D.Ross, Mechanic of Underwater Noise, Pergamon Press, 1976.
- (8) SPAS-K Offset Training Student Manual for Mechanics of Underwater noise, Automatic Electronic Systems Division, Canada.
- (9) H.Murai, International Symposium on Cavitation Vol. 1, Japan, 1986.
- (10) N.Okamura and T.Asano, 1988. "Prediction of Propeller Cavitation Noise And its Comparison with Full-Scale Measurements", J.S.N.A Japan, Vol. 164.
- (11) T.Hoshino, 1993. "Hydrodynamic Analysis of Propellers in Unsteady Flow Using a Surface Panel Method", J.S.N.A Japan, Vol. 174.
- (12) Y.Ukon, T.Kudo and Y.Kurobe, 1989. "Measurement of Pressure Distribution and Cavity Shape on Conventional and Highly Skewed Propeller Model", J.S.N.A Japan, Vol. 165.
- (13) 수동 소나 시뮬레이터용 모의 수중음향 신호 합성기법연구, 국방과학연구소, 1995
- (14) 윤종락, 1982. "Lloyd Mirror Effect 에 관한 연구", 한국음향학회 수중음향학분과 학술발표회.
- (15) 윤종락, 신현옥, 노용주, 1997. "수중 청음기 배열의 간격 및 깊이 변화에 따른 측정 소음준위 오차", 한국음향학회 학술발표회논문집, 제 16 권 제 2(s) 호, pp. 183~188.
- (16) L. E Kinsler and A. R Frey, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., 1982.
- (17) N. P Chotiros, 1988. "Source level estimation of a monopole source at rest in the presence of multipath", JASA, 84(2).
- (18) 윤종락, 김천덕, 하강열, 1997. "선박 방사소음의 측정, 분석 및 예측", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 524~532.
- (19) Program performance specification for the surface ship radiated noise measurement computer program, Naval Dcean System Center, 1983.
- (20) D.H. Johnson and D.E. Dudgeon, Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.