

소나 신호처리 기술

吳元天
國防科學研究所

I. 서론

바다는 오랜 역사를 통해 인간에게 식량 제공과 수송로로서 가치를 지니고 왔다. 현대과학의 발달로 인간의 해양자원 이용도가 높아지면서 바다의 중요성이 강조되고 있으며 이로 인한 국가간의 이해가 첨예화되고있다. [1] 바다의 이용가치와 관련되어 해양에서의 패권 우위를 위한 해군력의 증강 및 해저자원 개발 등과 관련된 해양공학의 발전이 활발하게 이루어지고 있는데 수중 음향공학이 이들 분야에 지대한 역할을 하고 있다. 수중음향 공학의 상업적, 군사적 중요성이 증대함에 따라 이를 이용하는 기술 및 장비인 소나의 발전도 급속도로 진행되어 왔다. 소나(SONAR)는 Sound Navigation and Ranging의 약자로서 “수중음향을 이용하여 수중 물체의 존재, 위치, 성질 등을 알아내는 기술이나 장비”를 통칭하는 것이다. [2]

그림 1에서, 음향공학의 적용 주파수 스펙트럼 범위에서 [3] 보듯이 소나에서 사용되는 주파수 범위는 지진파 탐지 및 유전 개발을 위한 해저지질 탐사용 초저주파 대역과 의료용 초음파 진단기 및 음향 현미경 등을 위한 음향 영상용 초고주파 대역에 걸쳐 10mHz에서 10GHz까지 매우 광범위하게 분포되어 있다. 이와같은 소나의 범위는 적용 분야 별로 군사용과 상업용으로 구분된다. 군사용 소나의 용도는 표적의 탐지, 위치산출, 식별, 추적, 파라메타 추정, 무기유도, 음향대항(acoustic counter measure), 통신 등이고 상업용 소나의 용도는 어군탐지, 해저지형 탐사, 항해 보조, 지질탐사, 음향해양학 등을 들수 있다.

소나의 역사는 [4] 1490년 Leonardo da Vinci가 튜브 막대기를 이용하여 수중에서 원거리 합정소음을 탐지할 수 있음을 언급한 것을 시초로 1877년 Lord Rayleigh가 음향학 이론을 정립하기 까지 완만한 발전을 해왔다. 하지만, 1, 2차 세계대전을 치르면서

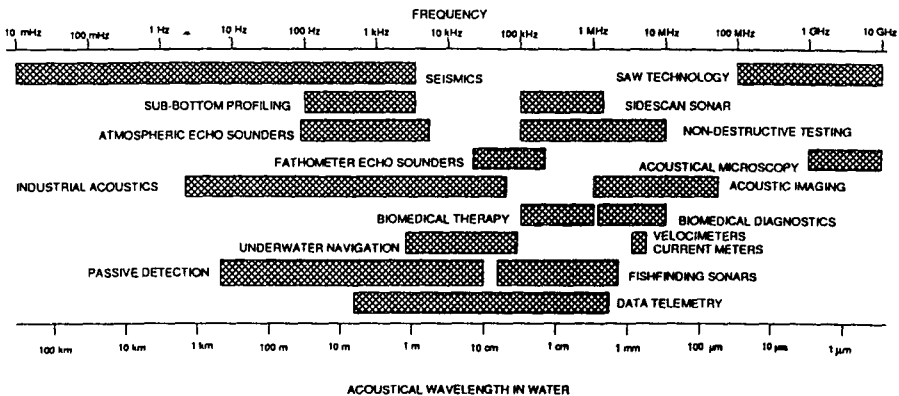


그림 1. 음향공학의 적용 주파수 스펙트럼 범위

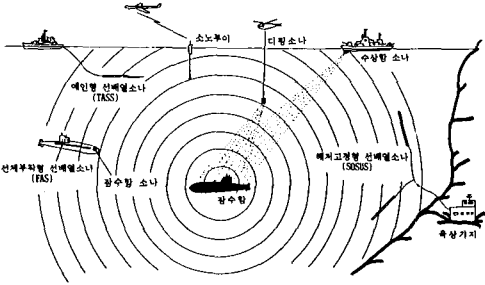


그림 2. 소나 시스템 종류의 예

독일 잠수함 U-boat에 대한 연합군의 대잠수함 작전의 중요성이 강조되면서 군사용 소나 관련 기술이 급속히 발전했다. [5] 또한 2차 세계대전 후에는 해양자원 개발이 활발해지면서 군사적 목적으로 발전해온 소나 기술을 기반으로 상업용 소나 기술분야 연구도 증가하고 있다. 소나의 응용분야가 매우 광범위 하지만 주된 소나의 연구 활동 및 적용 분야는 군사적 목적이고 광범위한 분야의 소나에 대해 언급하는 것이 매우 어려우므로 이 논문에서는 대표적인 소나 적용 분야인 군사용 소나를 중심으로 언급하고자 한다.

군사용 소나의 주된 목표는 대잠수함 작전용으로서 소나 탑재 형태에 따라 대잠초계기용 소노부이, 대잠헬기용 디핑소나 (dipping sonar), 수상함용 선체부착형 소나 및 가변심도형 소나, 예인형 선배열소나, 잠수함 소나 등으로 구분된다. 특히 이들 소나체계 중에서 잠수함 소나체계는 다양한 센서들을 복합적으로 운용하며 적용되는 신호처리 기술도 첨단 기법이 적용된다. 그림 3의 잠수함 소나체계에서 보듯이 잠수함 소나의 센서체계는 수천개의 센서 요소들까지

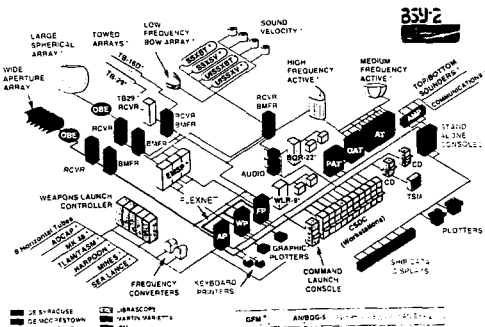


그림 3. 잠수함 소나 체계의 예, 미해군의 잠수함 전투체계인 AN/BSY-2에서 사용되는 다양한 센서의 소나 체계 [7]

사용되며 사용 주파수 대역도 10Hz - 100KHz 정도로 광대역이다. 잠수함 소나 센서체계는 장거리 표적 탐지용 저주파 예인센서 배열, 광대역 주파수 스펙트럼을 수신하기 위해 채용되는 선체부착형 센서들로서 저주파 구형센서 배열과 컨포멀 (conformal) 선수 센서배열 및 중주파수와 고주파 능동 센서배열, 수동 표적위치 산출 (passive ranging sonar)을 위한 선복 부착형 평면 센서배열, 보조센서로서 수심 측정 센서와 수중통신 센서 등으로 구성되어 있다.

소나의 성능을 결정하는 요소들은 다양하지만 크게 세가지로 분류할 수있다: 1) 표적의 음향 특성, 2) 음파전달 매체 및 소음원으로서 매질의 음향특성, 3) 소나 장비 성능이다. 이 세가지 요소들을 연관시켜 소나의 성능을 수치화한 것이 소나방정식이다. 소나 방정식은 소나의 성능을 예측하고 특정 목적에 적합한 소나 장비를 설계하는데 사용된다. 소나는 동작방식에 따라 능동형과 수동형 소나로 크게 분류되는데 소나방정식도 능동소나와 수동소나용 두가지가 있다. 능동소나는 음향신호를 송신하여 표적에서 반사되어 오는 반향음으로 부터 표적탐지 및 표적위치 등의 표적정보를 추정하며 수동소나는 표적에서 발생하는 방사소음, 즉, 기계소음, 유체소음, 프로펠러 소음, 능동소나 송신음 등을 수신하여 표적탐지 및 표적정보를 추정한다. Urick에서 [8] 정의된 소나방정식은 다음과 같다.

$$\text{능동소나 방정식: } SE = SL - 2TL - TS - (NL - DI) - DT \quad (1)$$

$$\text{수동소나 방정식: } SE = SL - TL - (NL - DI) - DT \quad (2)$$

장비 요소:

- SL(Source Level): 송신출력 (능동)
- NL(Noise Level): 자체소음 준위
- DI(Directivity Index): 수신 지향지수
- DT(Detection Threshold): 탐지문턱 준위

환경 요소:

- TL(Transmission Loss): 음파 전달손실
- NL(Noise Level): 배경 소음준위

표적 요소:

- SL(Source Level): 표적 방사소음 (수동)
- TS(Target Strength): 표적 반사강도

여기서 능동소나에서 잔향소음이 배경소음 준위보다 크면 능동소나 방정식의 (NL - DI)는 잔향소음

준위 RL(Reverberation Level)로 대체된다. SE (Signal Excess)는 소나 수신기 출력단에서의 신호 대 잡음비인데 소나의 표적탐지 거리는 SE=0 일때의 TL에 해당되는 음파전달 거리로 주어진다. 즉, 식 2의 수동 소나방정식에서 최대 표적탐지 거리 FOM (Figure Of Merit)는

$$FOM = TL = SL - (NL - DI + DT) \quad (3)$$

으로 주어진다. 여기서 소나 신호처리 기술과 직접적인 연관이 있는 파라미터인 DT를 살펴보면 표적탐지 거리 향상을 위해 DT가 감소되어야 함을 알수있다. DT는 신호처리 이득 (signal processing gain)과 반비례하는데 신호처리 이득 향상을 위한 소나 신호처리 기술에 막대한 노력과 투자가 꾸준히 이루어지고 있다.

대잠전에서 탐지와 피탐지 간의 꾸준한 경쟁으로 관련 기술들이 발전해 왔다. 우선, 피탐지 측면에서 소나방정식을 살펴보면 표적요소인 방사소음 SL과 반사강도 TS의 감소 노력이다. 피탐지 확률을 감소시키기 위해 잠수함 정숙화 기술의 발전은 방사소음 감소를 위한 기계 진동, 프로펠러 소음, 유체소음 감소 기술과 반사강도 감소를 위한 선체 흡음제 표면처리 기술 분야와 진동소음 예측 및 측정 분석 기술 분야에서 이루어지고 있다. [9] - [12] 그림 4의 미소 해군의 잠수함 방사소음 감소 추세에서 [13] 나타났듯이 30여년 동안 약 30dB 정도의 소음준위 감소로 피탐지 거리가 약 10배 이상 감소되었다. 표적 소음 준위가 6dB 감소할 때 탐지거리가 대략 반으로 감소함을 고려해볼 때 30dB 감소는 대잠전에서 엄청난 영향을 미치고 있다. 예를 들면 잠수함 방사소음 준위가

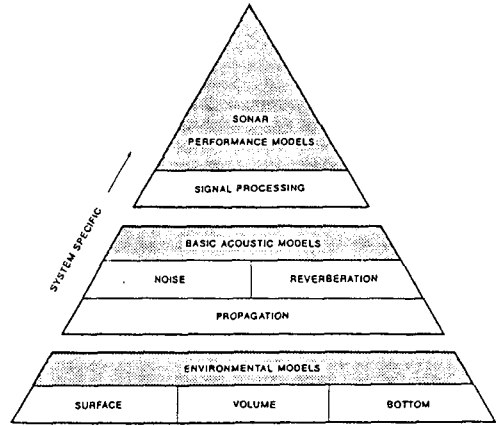


그림 5. 해양환경 모델, 음향 모델, 소나 성능 모델 사이의 관계

90dB 정도이면 피탐지 거리는 잠수함 선체 길이 정도로 감소되어 탐지가 거의 불가능하다.

소나방정식을 살펴보면 해양환경 요소와 소나 장비 관련 요소 사이에 밀접한 관계가 있음을 알 수있다. 해양환경 요소는 탐지와 피탐지 성능과 밀접한 관계를 지니고 있지만 탐지 측면에 비중이 더 있다. 그러므로 소나성능을 향상시키기 위한 소나방정식의 요소들에 대한 연구, 즉, 신호처리 기술, 해양학, 음향학 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 지난 이십년간 전자공학의 발전에 의한 신호처리 기술, 고속 고밀도의 디지털 소자 및 컴퓨터 제작 기술이 소나성능 향상에 기여한 점은 매우 중요하다. 음향 해양환경 요소, 즉, 음파전달 특성 및 배경소음 특성 등의 정확한 이해도와 소나 성능은 비례하는데 해양환경 요소가 소나 신호에 미치는 영향에 대한 지식이 증대함에 따라 이러한 환경요소 들을 이용하여 소나 성능을 향상시키기 위한 복잡하고 정교한 신호처리 기법들이 개발되고 있다. [14,15] 그림 5는 해양환경 모델, 음향 모델, 소나 성능 모델 사이의 관계를 나타내고 있다. [16]

소나 신호처리 기술은 레이더 신호처리 기술과 기본 개념은 매우 유사하나 환경요소가 소나 신호에 미치는 영향이 레이더에 비해 매우 복잡하고 민감하게 작용하므로 소나의 신호처리 기술에 더욱 복잡하고 정교한 고도의 기술이 적용된다. 또한 고도의 신호처리 기법이 소나에 적용될 수있는 요인으로서 실시간 소나 신호처리에 요구되는 시간이 레이더에 비해 비

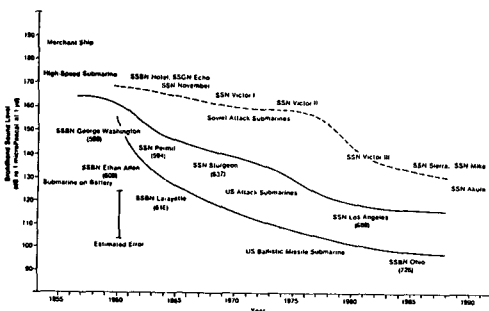


그림 4. 1958년 이후 미소 잠수함의 방사소음 준위 감소 추세 추정

교적 길고 신호처리 주파수 범위도 상대적으로 매우 낮아 하드웨어로 실현이 용이하다는 점이다. 이와 같은 점으로 소나 신호처리 기법 연구에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있으며 흥미를 갖고 도전해 볼만한 연구분야이다.

수중에서의 음파 전달특성이 소나 신호를 매우 복잡하게 만드는 주된 요소인데 음파전달 매체로서 바다를 시간, 공간, 주파수 영역의 3차원 필터 $h(t, \tau; r, r_s)$ 로 모델할 수있다. 이 필터 모델의 입력 신호로서 표적신호 $g(t, r_s) = e^{j(\omega t - k r_s)}$ 가 주어졌을 때 센서에서의 수신신호 $p(t, r)$ 는 식 4로 주어진다. [17]

$$p(t, r) = \int h(t, \tau; r, r_s) g(t - \tau, r_s) d\tau \quad (4)$$

여기서 $k = \omega/c$ 이다. 식 4에서 주어진 바와같이 수신신호를 매질인 선형 랜덤 시변 공간상 필터와 표적신호와의 컨볼루션으로 수식화 함으로서 소나 신호처리 문제를 선형 시스템 이론으로 접근할 수가 있다. 선형 시스템 모델의 유용성으로 소나 문제를 다중 표적 신호가 존재할 경우도 쉽게 확장할 수있다. 즉 N개의 표적이 존재할 때의 선형 시스템 모델은 식 5로 표현된다.

$$p(t, r) = \sum_{s=1}^N \int h(t, \tau; r, r_{s_n}) g(t - \tau, r_{s_n}) d\tau \quad (5)$$

그러므로 수동소나 문제를 그림 6과 같이 선형 시스템 문제로 모델할 수있다.

소나 신호처리 기법은 시간, 공간, 주파수 3차원 신호처리 기술이며 3차원 영역에서의 특성들은 서로 독립적이 아니라 종속적인 관계이다. 이제 소나 신호처리 문제가 랜덤신호 입력의 다중 채널 3차원 선형 시스템 해석 문제로 변환되었으므로 기존의 신호처리 기법들로 문제를 접근할 수있다.

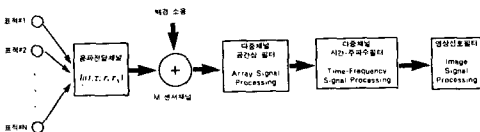


그림 6. 수동소나 문제의 선형 시스템 모델

서론에 이어 2장에서는 3차원 영역에서의 소나 신호처리 기술들에 대해 언급하고, 3장에서는 소나 신호처리 기술에서의 하드웨어 측면에 대해 기존 제품

을 중심으로 설명하고 4장에서 결론을 맺는다.

II. 소나 신호처리 기법

소나 신호처리는 공간-시간-주파수 3차원 영역에서 수행되는데 이들 각 영역에서의 신호처리를 이 장에서 언급한다. 각 영역에서의 신호처리 기법을 살펴보기 전에 소나에서의 3차원 신호처리 기법의 이해를 돕기위해 신호처리 적용 모델로서 전형적인 수동 소나 시스템의 신호처리 흐름인 그림 7을 통해 살펴보자. 센서 배열에서 다중 채널 신호가 프리앰프, 아나로그 대역 필터 및 자동이득조정 (automatic gain control)을 통해 적절히 신호 크기 조절 및 잡음 제거된 후 디지털 신호로 변환된다. 이렇게 전처리된 신호는 공간상 필터인 빔형성기에서 지향성 빔이 형성되어 시간-주파수 신호처리기에 입력된다. 빔 출력은 대부분 complex demodulation 과 decimation 과정을 거쳐 기본 주파수 대역으로 천이된 후 FFT에 의해 주파수 변환되어 처리된다. 하지만 시변신호인 천이신호 (transient signal) 처리를 위해선 주파수 분석을 위한 FFT와 병행하여 시간영역 신호처리도 중요하게 수행된다. 시간-주파수 영역 신호처리는 소나신호가 랜덤신호이므로 통계학적인 신호처리 (stochastic signal processing)가 수행된다. 시간-주파수 영역 처리된 신호는 최종적으로 소나 운용자에게 최적인 오디오나 비디오 형태의 정보를 제공하기 위해 처리된다. 현대 소나는 영상신호처리 기술의 발전으로 다양한 형태의 표적정보를 운용자 콘솔에 전시한다. 전시되는 형태는 스펙트로그램, 주파수/방위그림, 방위/시간그림, 방위 추적정보, 추파수선 추적정보 등 매우 다양하다. 특히 수동소나 신호의 표적 정보량은 매우 방대하여 컴퓨터의 최적 정보 관리 및 전시 능력의 도움없이는 효율적인 작전 수행이 불가능하다. 그러므로 데이터 처리 및 영상 신호처리 분야도 소나 신호처리에 필수적인 분야이다.

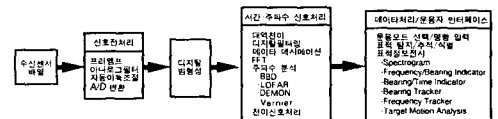


그림 7. 전형적인 수동소나 신호처리 흐름도

1. 시공간상 신호처리 (Space-Time Signal Processing)

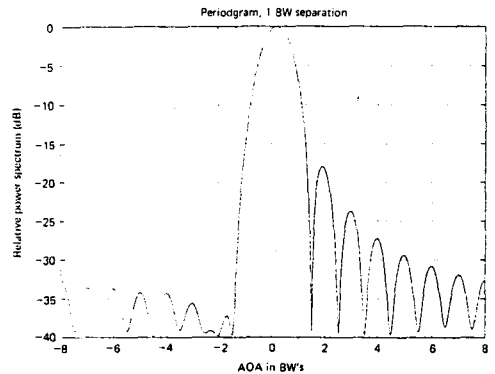
시공간상 신호처리는 배열 신호처리 (array signal processing)로서 다중 센서 배열 신호를 사용하여 지향성 빔을 만드는 다중채널 공간상 필터 기법이다. 즉 배열 신호처리는 센서 주변의 배경소음이나 간섭신호에 대해 센서 채널간에 상대적으로 코히어런트한 신호음이 매질을 통해 전달되면서 생긴 시간지연을 보상해주는 코히어런트 신호처리를 함으로서 지향성 빔을 형성하여 소음 및 간섭을 제거하는 배열이득 (array gain)을 얻는다. 배열이득은 신호의 파장에 대한 센서 배열의 상대적 크기에 비례하며 지향성 빔형성으로 표적 방위도 추정할 수 있다. 공간상 신호처리는 시간-공간 파라미터 사이의 대응으로 시간영역에서의 신호처리로 쉽게 변환될 수 있는데 시간 샘플은 공간 샘플, 즉, 일정 시점에서의 센서 신호 (sensor signal snap shot)로, 주파수는 파수 (wave number)로, 시간영역 필터 계수는 센서신호 가중상수로 대체될 수 있다.

배열 신호처리 기법은 고전적인 기법 (conventional beamforming)과 고분해능 기법 (high-resolution beamforming)으로 분류할 수 있다. [18, 19] 20) 우선 고전적인 빔형성기법을 살펴보자. 매질에서의 신호 시간지연이 주파수 영역에서의 위상 천이와 동일하므로 빔형성 기법은 시간영역 빔형성과 주파수영역 빔형성으로 이루어진다. 시간영역 빔형성은 전형적인 지연합 (delay-sum), 지연합 빔형성의 메모리 부담을 줄이기위한 부분합 (partial-sum), 입력 신호 샘플링을 줄여 A/D 변환기와 신호전송 대역폭 및 하드웨어의 부담을 감소시킨 보간기법 (interpolation)과 측파대천이 (shifted side band) 빔형성이 있다. [21, 22]

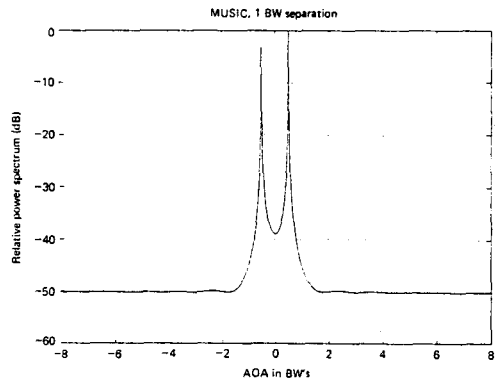
주파수영역 빔형성은 Fourier 변환 특성과 빔형성의 선형성의 결과로 이루어 지는데 DFT (Discrete Fourier Transform) 빔형성과 고주파 현대역 신호에 효율적인 위상천이 빔형성을 기본으로 CZT (Chirp Z Transform) 빔형성 등이 [23] 있다. 주파수영역 빔형성의 장점은 정밀한 빔형성을 위한 높은 입력신호 샘플을 없이 Nyquist 샘플율을 만족하면 되어 A/D 관련 하드웨어와 신호전송의 부담을 줄일 수 있다는 점이다. 또한, 대부분의 빔형성 다음 단계의 신호처리가 주파수 영역에서 이루어지므로 하드웨어 제작면에서도 효율적이다. 하지만 천이신호같은

시변신호에 대한 신호처리 이득이 매우 저하되는 단점이 있다. DFT 빔형성은 FFT로 연산의 효율성을 높일 수 있는데 센서의 갯수가 100개 이상될 때 효율성이 현저하게 나타난다.

고전적인 빔형성기법의 낮은 방위 분해능을 높이기 위하여 고분해능 빔형성기법들이 제시되었는데 대표적인 기법으로서 MVDR, MUSIC, ESPRIT, MIN-NORM 등이 있다. [24] 고분해능 기법들은 eigenspace의 dominant subspace를 이용하는데, 이상적인 경우 그림 8과 같이 근접한 두개의 표적 분해능이 고전적인 기법에 비해 매우 우수하다. 이 기법들은 배열센서 신호의 CSDM (Cross-Spectral Density Matrix)로 부터 1) 표적신호의 갯수를 추정하고 2) 신호 subspace의 eigenvector를 구하고



(a) 고전적 빔형성



(b) MUSIC

그림 8. 고전적 빔형성기법과 고분해능 빔형성기법의 방위 분해능 비교. 동일 신호 준위의 표적이 빔폭 간격으로 존재할 경우

이를 이용하여 표적 방위를 추정한다. 고분해능 기법은 모델 베이스 기법으로서 모든 가용한 정확한 사전(a priori) 정보를 이용하는 것을 기본 전략으로 한다. 그러므로 파라메릭 모델에 대한 사전 정보에 비례하여 성능이 향상된다.

고분해능 빔형성기법들의 우수한 성능에도 불구하고 해결해야 될 다수의 문제점으로 인해 아직 실제 소나 시스템에 적용된 예는 찾아보기 힘들다. 고분해능 빔형성의 문제점은 1) 모델이나 중요한 모델 파라미터 오차에 대해 성능이 견실(robust)하지 못하고, 2) CSDM 등을 계산하는 비용이 매우 비싸며 알고리즘이 복잡하여 실시간 연산 실현이 어렵고, 3) 신호대 잡음비, 센서의 위상이나 감도 오차, 신호나 잡음의 통계적 특성의 변화 등 수중음향의 복잡한 환경 변화에 대해 성능이 매우 민감하게 영향을 받는 점이다. 하지만 고속 디지털 연산 비용이 급속히 감소하고 실시간 처리를 위한 연산속도의 고속화가 하드웨어 측면에서 이루어지고 고분해능의 단점들을 보완하기 위한 알고리즘의^[25] 개발로 이 분야 연구의 결실이 실제 시스템에 적용될 시기도 멀지 않다고 하겠다.

이외의 시공간 신호처리 기법으로서 최적 빔형성기법(optimum beamforming)^[18]이 있다. 고전적인 빔형성기법이 빔 지향특성을 위한 센서 가중상수가 신호 특성과 독립적으로, 스펙트럼 분석위한 윈도우 함수같이, 주어지는 반면 최적 빔형성기법은 센서 가중상수가 신호 특성의 함수로서 주어진다. 즉, 원하는 방향 이외의 간섭이나 소음이 신호에 미치는 영향이 최소가 되도록 빔 지향특성을 최적화 한다. 최적 빔형성기법은 MSC(Multiple Sidelobe Canceller), Reference Signal, Max SNR, LCMV(Linearly Constrained Minimum Variance) 빔형성이 있다.

신호나 소음의 통계적 특성이 시간에 따라 변화하면 최적 빔형성기법의 가중상수도 시변특성에 따라 적응해야하므로 최적 가중상수 추정을 LMS나 RLS와 같은 적응기법을 적용하여 구한다. 이와 같은 적응 빔형성기법은 특히 교란신호(Jamming) 제거에 효과적으로 적용된다.

마지막으로 최근에 관심이 부각되고 있는 시공간상 신호처리 기법으로 SAR(Synthetic Aperture Array)와 MFP(Matched Field Processing)이 있는데 MFP만 여기서 언급한다. MFP는 Bucker^[26]에 의해 제안되었는데 수신단에서 표적신호의 음

장분포와 매질의 환경 특성의 충분한 정보로부터 표적 정보, 즉, 거리나 심도를 추정하는 매우 유용한 기법이다. 시스템 분석적인 용어로 해석하면 시스템 출력과 시스템 전달함수로 부터 입력신호를 추정하는 inverse filtering과 유사하다. MFP도 고분해능 빔형성과 같이 매우 유용한 기술이나 모델을 근거로 하는 접근방법을^[27] 사용하므로 모델, 파라미터, 신호 특성, 환경 등의 오차에 의해 성능이 매우 민감하게 영향을 받으며 측정 음장분포와 추정 음장분포와의 정합과정 연산에 막대한 시간이 요구되어 연산에 효율적이고 오차에 견실한 기법 연구가 상당히 요구되는 연구 분야이다.

2. 시간-주파수 영역 신호처리(Time-Frequency Signal Processing)

소나의 기본적인 기능은 표적 탐지, 추적, 식별, 기동분석 등이다. 이러한 기능을 수행하기 위해선 표적 신호로부터 필요한 정보를 추출해야 한다. 시공간상 신호처리에서 얻은 공간상 표적정보와 함께 시간-주파수 영역에서의 표적정보인 신호파형, 에너지 준위, 기본 주파수 및 고조파, 주파수 토널(tonal) 폭 및 안정도, 광대역 신호 스펙트럼 등이 기본적인 정보이다. 이러한 정보를 이용하여 표적 탐지 식별 등의 기능에 대한 소나 성능을 향상시키기 위해 표적 신호의 특성에 대한 정확하고 깊은 이해가 필요하다. 이를 위해 표적에서 발생하는 소음원의 시간-주파수 특성에 최적인 신호처리가 이루어져야 한다.

함정 방사소음은 기본적으로 nonstationary 신호인데 신호의 통계적 특성이 완만하게 변하는 성분과 급격히 변하는 성분으로 구분할 수 있다. 완만하게 변하는 신호는 일정 신호처리 시간동안 stationary 신호로 간주할 수 있어서 함정소음을 stationary와 transient 신호로 특정 지을 수 있다. 최근까지 stationary 신호에 대한 소나 신호처리가 주된 대상이었으나 잠수함 정속화 기술의 발전으로 대잠수함전에서의 손실을 극복하기 위하여 transient 신호에 대한 연구 및 소나 시스템에 대한 적용이 활발하게 진행되고 있다.^[28]

함정 방사소음은 크게 기계 소음, 프로펠러 소음, 유체소음으로 구성되는데 기계소음은 협대역 토널 성분의, 프로펠러 및 유체소음은 광대역 스펙트럼 성분의 원천이다. 그림 9는 디젤-전기 추진 함정의 소음원의 구성과^[6] 발생하는 방사소음 스펙트럼의 전형적

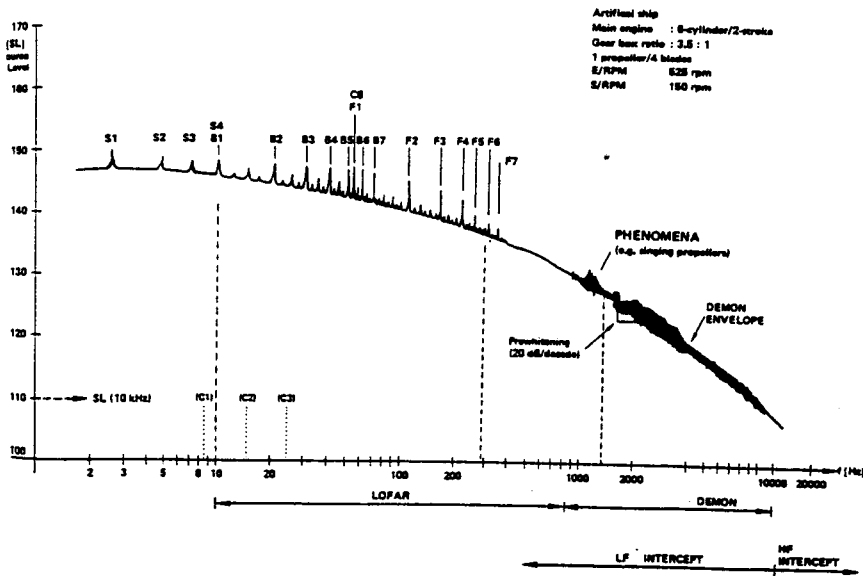
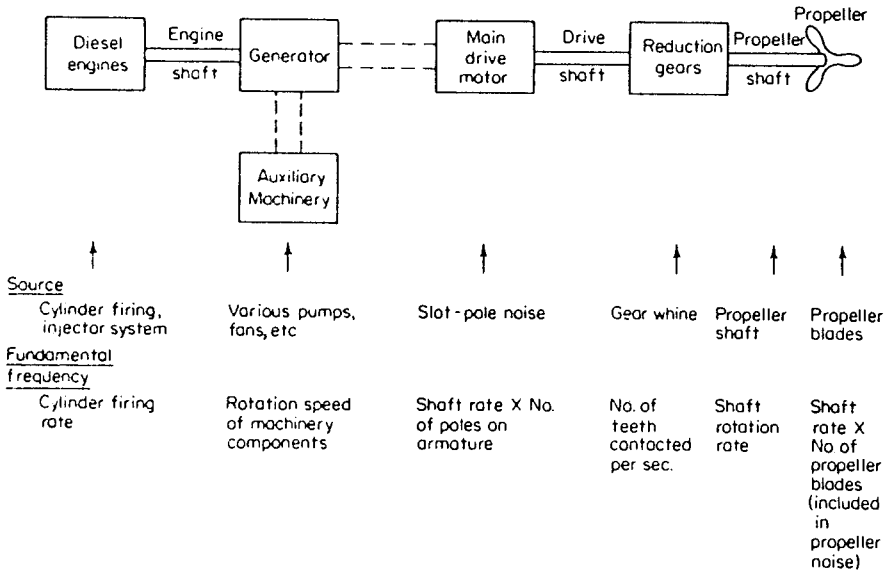


그림 9. 디젤-전기 추진 함정의 소음원과 방사소음의 스펙트럼

인 예^[29]이다. 표적신호 스펙트럼이 광대역과 협대역 신호로 구성되어 있듯이 소나신호 처리도 광대역과 협대역으로 수행되는데 기본적인 신호처리 구성은 스펙트럼 분석기와 유사하다. 소나 신호처리의 기본 메뉴는 표적 탐색용 광대역탐지, tonal 주파수 분석용 LOFAR (Low Frequency Analysis and Recording), 프로펠러 케비테이션 소음 분석용

DEMON (Demodulated Envelope Modulation On Noise), zoom FFT에 의한 정밀 주파수 분석용 Vernier 모드로 구성된다. 소나 신호처리를 위한 주파수 분석 시스템의 구성과 설계 기법은 Nielsen과^[30] Defatta를^[31] 참조하기 바란다.

신호처리 이득 향상을 위해 주요 고려 대상인 주파수 분석 대역폭과 적분시간을 살펴보자. 함정 방사소

음 탐지 문제는 랜덤 소음에 묻혀있는 주기적인 정현파 신호들의 탐지로 모델할 수 있다. 신호처리 이득을 높이기 위해선 주파수분석 대역폭을 줄이고 적분 시간을 늘여야 하는데 이로 인해서 얻어지는 신호처리 이득은, 이상적인 경우, 파워 스펙트럼의 비동기(incoherent) 적분에 의한 이득 $5\log N$ (N =number of average)과 분석 대역폭 감소에 의한 신호대 잡음비 향상 $10\log(1/BW)$ (BW =Band Width)이다. 그러므로 신호의 주파수가 안정되고 통계적 특성이 stationary하며 배경소음이 백색잡음인 이상적 경우 적분시간 2배 증가에 의해 1.5dB, 주파수 분석 대역폭 반감에 3dB씩 소나성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 수중 음향신호는 소음원과 매질 등의 nonstationary 특성과 시간-주파수 번짐(spreading)에 의해 신호처리 이득은 제한된다.^[32] 스펙트럼 분석 분야도 빔형성 분야와 같이 파라메트릭 방법을 적용한 고분해능 분석기법이 연구되고 있으나 공간상 신호처리와 유사한 이유로 소나 시스템에 적용된 예는 찾기 힘들다.

지속적이고 주기적인 합정소음의 감소에 의한 탐지 손실을 극복하기 위하여 활발하게 진행되는 연구분야는 대표적으로 3가지가 있는데, 1) 수동-능동 소나의 융합^[33], 2) transient 신호처리, 3) bispectrum^[34] 등의 비선형 신호처리이다. 수동-능동 소나의 융합은 선체고정형 능동소나의 송신신호를 장거리 탐지용 저주파 선배열 소나의 수신센서 및 신호처리를 융합한 경우 외에 bistatic/multistatic sonar 등이 연구되고 있다. 잠수함의 어뢰 발사, 급격한 심도/속도/진로 변경, 펄프와 같은 보조 기관 작동 등의 경우에 발생하는 순간적인 transient 신호 처리를 위해 파형분석, short time FFT, wavelet transform^[35] 등의 기법이 적용 및 연구되고 있다.

고차 스펙트럼(higher-order spectrum) 등의 비선형 신호처리 기법은 수중소음과 합정 방사소음의 통계적 특성이 degree of Gaussianity 관점에서 다름을 이용한다. 발생 메카니즘의 비선형 특성에 의해 주로 기인되는 비선형-비가우시안 표적신호를 가우시안 배경소음으로부터 분리하기 위해 고차 스펙트럼의 성질을 이용한 소나 성능 향상 연구가 진행되고 있다.

이외에 자동 표적추적, 다중 표적추적, 표적기동분석, 자동 표적식별 기법, 정보융합, 오디오/영상신호 처리 등에 대해서는 관련 문헌을 참고하기 바란다.

Ⅲ. 소나 신호처리 기술 현황

소나 신호처리 하드웨어 설계 제작 기술은 80년대 이후 급속하게 발전한 반도체 기술과 하드웨어 개발 환경을 바탕으로 혁신적으로 발전해 왔다. 신호처리, 데이터처리 및 그래픽 처리를 위한 고속 연산 및 큰 용량의 메모리 문제는 대규모의 병렬처리 알고리즘과 관련 프로세서 및 고속의 디지털 신호처리 전용 프로세서 등장으로 실현이 매우 용이해졌다. 이로 인해 소나 신호처리 개발 비용과 기간 단축 및 정비유지의 용이성이 효율적으로 실현되어 왔다. 특히 최근의 신호처리 개발 추세는 공용 모듈화 개념의 도입으로 동일 신호처리가 적용 분야에 따라 다양한 형태의 신호처리 요구를 만족시키고 있다. 대표적인 시스템이 미해군의 최신 표준 디지털 공용 신호처리기인 AN/UYS-2이다.^[36,37] AN/UYS-2는 수상함용 대잠수함 통합 전투체계 AN/SQQ-89, 최신 잠수함 통합 전투체계 AN/BSY-2, 대잠 헬기용 저주파소나 ALFS, 대잠 초계기 소노부이 신호처리기 P-3 Update IV, 조기경보용 저주파 선배열 소나 SURTASS 및 FDS 등의 신호처리기로 사용된다. 그러므로 AN/UYS-2의 설계 개념 및 기능을 분석해 봄으로써 현대 소나 신호처리의 현주소를 파악해볼 수 있다.

AN/UYS-2의 기본 설계 개념은 프로그래머블, 모듈화, 확장성, 유연성, 신뢰도가 강조되고 향후 20년간의 신호처리 요구성능을 만족할 수 있도록 설계되었다. 특히 PGM(Programmable Graph Method) 개념의 도입으로 신호처리 알고리즘의 개발이 프로그래밍이나 하드웨어에 대한 전문적인 기술 없이도 가능함으로써 매우 단순해졌다. 그래픽에 의한 프로그래밍 기법은 최근 상용 소프트웨어 개발 환경인 Simulink, Labview, SPW 등에서도 널리 사용되고 있다.

그림 10은 AN/UYS-2의 모듈화된 구조의 구성도와 신호처리 알고리즘 개발 환경을 보여준다. AN/UYS-2는 다양한 기능의 FE(Functional Element) 들과, 데이터 전송망, 시스템 제어 버스, BIT(Built In Test) 제어 버스로 구성되어 있다. VHSIC 소자로 실현된 연산 프로세서 한개는 4개의 병렬 연산 파이프라인 구조로 120MFLOPS의 32bit floating point 연산 능력이 있다. AN/UYS-2의 성능 개선은 SSI/MSI 소자의 ASIC화에 의한 고집

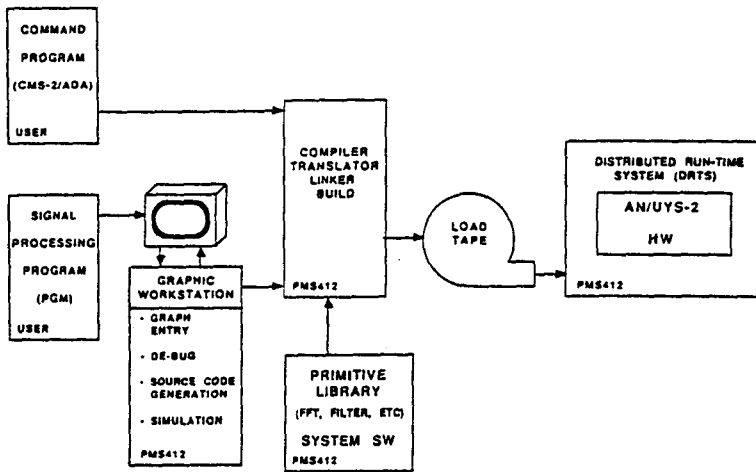
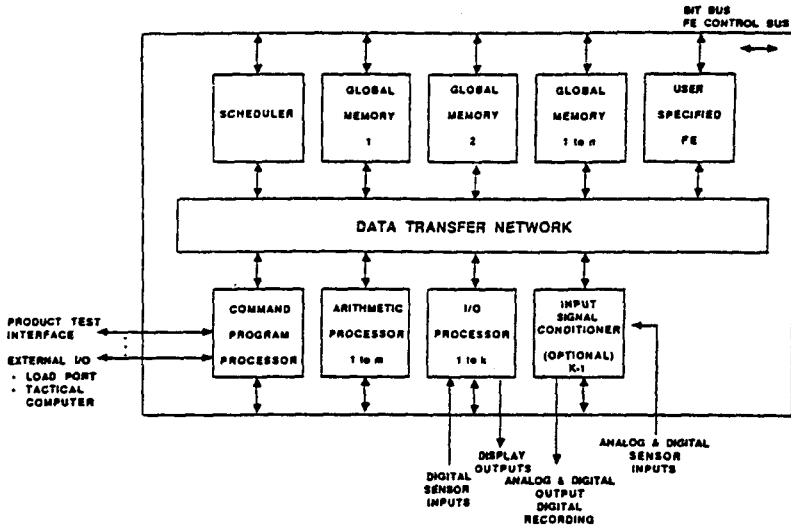


그림 10. AN/UYS-2의 구조 및 신호처리 알고리즘 개발 환경

적화 및 큰 사이즈의 PCB 채택으로 연산의 고속화, 소형 경량화 및 절전형 시스템으로 실현되어 공간 및 전력의 제한을 받는 잠수함 및 항공기에 더욱 적합하도록 발전하고 있다.

IV. 결론

이 논문에서는 소나 신호처리 기술 전반에 대해 개

략적으로 살펴보았다. 소나 신호처리 기술의 성능은 음향환경 및 소음 발생원 등에 의한 수중음향 특성과 매우 밀접한 관계를 갖고 있으므로 수중음향에 대한 정확하고 깊은 이해가 신호처리 기술의 연구에 유익적으로 접합되어야 한다. 세계 각국이 해양 자원 및 해양전략을 중요시 하고 이에 대한 연구와 투자를 확대하고 있는 시점에 이 분야에 대한 인식의 부족으로 아직 국내의 해양공학 및 소나 관련 기술은 매우 미약하다. 국내의 소나관련 기술 연구는 80년대 부터 진행되어 왔는데 현재 소나 국내 독자 개발 기반을

마련한 단계이다. 하지만 정부 및 관련 분야에서 이들의 중요성이 강조되고 있고 대양 해군 전략으로 연구 개발의 투자가 증대되고 있어서 소나 관련 분야의 장래성은 매우 밝다고 하겠다.

參 考 文 獻

- [1] 김종민, 전쟁과 해양전략, 이성과 현실사, 1992.
- [2] A. A. Winder, "II. Sonar system technology," *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, vol. SU-22, no. 5, pp. 291-332, Sep. 1975.
- [3] F. W. Rodney, *Underwater Acoustic Systems*, ch. 1, 1989.
- [4] W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 2nd Ed., ch.1, 1991.
- [5] L. Gerken, *ASW versus Submarine Technology Battle*, American Scientific Corp., 1986.
- [6] A. J. Watts, *Jane's Underwater Warfare Systems 1992-1993*, 4th Ed., Jane's Information Group, 1992.
- [7] *International Defense Review*, "BSY-2 continues for now," pp. 587-588, June 1992.
- [8] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 1983.
- [9] Navy International, "Signature management," pp. 152-158, May 1991.
- [10] R. W. Thorne, "Detection and suppression of noise in naval platforms - the 'acoustic signature'," *Noise & Vibration Worldwide*, pp. 20-23, Nov. 1990.
- [11] B. Garnier et al., "Acoustic imaging for dockyard noise measurements: an efficient tool for the signature management of submarines," *Warship '93*, ch. 17, May 1993.
- [12] M. Almgren et al., "Submarine target strength prediction and assessment," *Warship '93*, ch. 22, May 1993.
- [13] T. Stefanick, *Strategic Antisubmarine Warfare and Naval Strategy*, Institute for Defense & Disarmament Studies, Appendix 6, 1987.
- [14] W. M. Carey and W. M. Moseley, "Space-time processing, environmental-acoustic effects," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 285-301, July 1991.
- [15] Special Issue On Low-Frequency Acoustics In the Ocean, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 13, no. 4, Oct. 1991.
- [16] P. C. Etter, *Underwater Acoustic Modeling: Principles, Techniques & Applications*, Ch.1, Elsevier Allpied Science, London, 1991.
- [17] W. C. Knight, R. G. Pridham, and S. M. Kay, "Digital signal processing for sonar," *Proc. of the IEEE*, vol. 69, no. 11, pp. 1451-1506, Nov. 1981.
- [18] B.D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, Apr. 1988.
- [19] N. W. Owsley, "Sonar array processing," *Array Signal Processing*, ch. 3, S. Haykin Ed. Prentice Hall Inc. New Jersey, 1985.
- [20] R. A. Wagstaff and A. B. Baggeroer, *High-Resolution Beamforming*, Proceedings of Workshop on the Application of High-Resolution Spatial Processing in Underwater Acoustics, The Univ. of Southern Mississippi Oct. 11-14, 1983.
- [21] R. A. Mucci, "A comparison of efficient beamforming algorithms," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-32, no. 3, June 1984.
- [22] 오 원 천, 보간기법 디지털 빔형성기 설계, 국

- 방과학연구소, 기술보고서 SENP-717-86028, Oct. 1986.
- [23] B. Maranda, "Efficient digital beamforming in the frequency domain," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 86, pp. 1813 - 1819, 1989.
- [24] S. Haykin, ed., *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*, vol. II, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [25] J. A. Marks and K. M. Buckley, "Improved rooting method for source localisation," *IEE Proceedings-F*, vol. 139, no. 5, pp. 321 - 326, Oct. 1992.
- [26] H. P. Bucker, "Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 82, pp. 606-613, 1987.
- [27] 송 희 천, Performance Bounds on the Passive Localization of a Moving Source for Ocean Acoustics, Ph.D. Dissertation, MIT, 1990.
- [28] C. Chen, "Automatic recognition of underwater transient signals - review," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 1270 - 1272, 1985.
- [29] Krupp Atlas Elektronik, Towed Array Sonar System, 1990.
- [30] R. O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Artech House, Boston, 1991.
- [31] D. J. Defatta et al., *Digital Signal Processing: A System Design Approach*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [32] W. S. Hodgkiss and V. C. Anderson, "Detection of sinusoids in ocean acoustic background noise," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 67, pp. 214 -219, 1989.
- [33] Anti-Submarine Warfare, Maritime Defense, July/August, pp. 176 - 187, 1993.
- [34] 오 원 천, Application of Higher-Order Statistics to Time Delay Estimation for Passive Sonar Systems, Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, 1992.
- [36] F. Hlawatsch and G. F. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representations," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 21 - 67, April 1992.
- [36] G. Melcher, G. Thomas and D. Kaaplan, "The Navy's new standard digital signal processor, the AN/UYS-2," *J. of VLSI Signal Processing*, vol. 2, pp. 103 - 109, 1990.
- [37] Anti-Submarine Warfare Forecast, Forecast International/DMS Market Intelligence Report, 1992. 🌐

筆者紹介



吳元天

1956年 9月 7日生

1980年 2月 고려대학교 전자공학과(학사)

1982年 2月 고려대학교 대학원 전자공학과(석사)

1992年 5月 The University of Texas at Austin(박사)
Dept. Electrical and Computer Eng.

1982年 1月 ~ 1993年 현재 국방과학연구소 수중음향연구실 선임연구원

주관심분야 : 수중음향, 소나신호처리, 배열신호처리, 음향신호분석 및 합성, 스펙트럼추정,
고차 통계적 신호처리, 적응잡음감소, 표적추적 고속신호처리기 설계