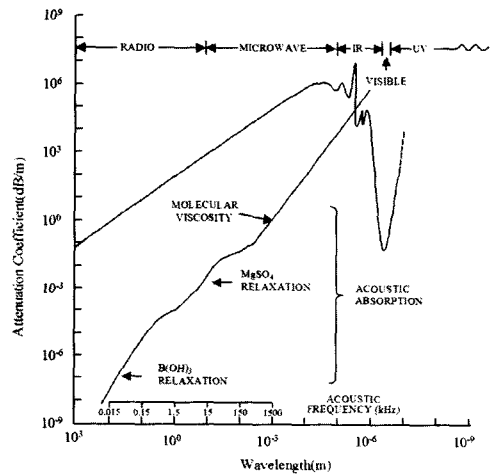


해양음향 토모그래피 기술

나경열(한양대학교 과학기술대학)

I. 서론

해수의 물리적 성질은 수온, 염분 그리고 밀도 등으로 특성 지워지며 이러한 특성들의 시공간적인 분포 파악은 해수의 유동, 해양-대기 상호작용 및 해수자원 분포 파악 등에 필수적인 요소로 해양학 연구의 기본 관측 항목이 된다. 이를 음파를 이용하여 관측하기 위해 사용되는 소나(Sound Navigation And Ranging, SONAR)는 레이더(Radio Detection And Ranging, RADAR)의 원리를 근거로 발전되어 왔다. 수중 음향을 이용하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 음원으로부터 음파를 방사하여 목표물에 부딪쳐 되돌아 오는 신호를 분석하는 능동 소나를 사용하며, 두번째는 목표물에서 발생한 음파를 수신하는 수동소나를 이용하는 방법이 있다. 이때 음파의 방사 및 수신시 가장 중요한 인자는 주파수라고 할 수 있다. 해수 중에서 전자기파의 에너지 감쇠율이 음파에 비해 매우 크기 때문에 <그림 1>, 결국 해양탐사에는 음파를 사용하게 되었으며 이와 관련된 기술은 꾸준한 발전을 거듭하여 그 활용도가 점차 확대되고 있는 상황이다. 또한 국제적으로 배타적



<그림 1> 해수 중에서 파장에 따른 에너지 감쇠율

경제수역 선포를 통한 국가 관할 해역의 확대 등 해양이 점차 국가 위주로 분할되어 가고 있다. 한편 음파의 전파 매질인 해수는 공기 중에 비해 공간적으로 비균질하며 시간적으로 불규칙하기 때문에 이러한 매질에서의 탐사 활동은 매질의 특성 즉 해수의 물리적 성질을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이러한 관점에서 우리 해역에 대한 감시 및 관할을 위해 수중음향을 이용한 탐사기법의 활용이 바람직하다.

〈표 1〉 해양역학 규모에 따른 비균질성 분류

구분	분류명	공간(L, meter)	시간(T, second)
Micro-scale	Micro-scale turbulence	$10^{-3} \leq L \leq 10$	$10^{-3} \leq T \leq 10^{-2}$
	Vertically layered ocean structures	$10^{-3} \leq L \leq 10$	$10^2 \leq T \leq 10^4$
	Capillary surface waves	$10^{-3} \leq L \leq 10^2$	$10^{-1} \leq T \leq 10$
	Gravity surface waves	$10^{-1} \leq L \leq 10^2$	$10^{-1} \leq T \leq 10^2$
	Short-period internal waves	$10^1 \leq L \leq 10^3$	$10^2 \leq T \leq 10^3$
Meso-scale	Long-period internal waves	$10^3 \leq L \leq 10^4$	$10^3 \leq T \leq 10^4$
	Internal waves	$10^3 \leq L \leq 10^5$	$10^4 \leq T \leq 10^5$
	Tidal flows in shallow water		
Synoptic-scale	Meso-scale turbulence		
	Movements of hydroleness of cool and warm water		
	Ocean eddies	$10^4 \leq L \leq 10^5$	$10^5 \leq T \leq 10^6$
Gyre-scale	The Rossby waves	$10^4 \leq L \leq 10^5$	$10^5 \leq T \leq 10^6$
	Ocean circulation		
	Seasonal variability		

해양환경의 비균질성은 다양한 형태의 해양역학과정에 의해 결정되며, 공간(L) 및 시간(T)의 범위에 따라 비균질성의 형태는 해양역학 및 다양한 종류의 혼합과정 등에 의한 복잡한 과정으로 나타나는 결과라 할 수 있다 <표 1>. 표 1과 같은 분류는 해수면 부근의 열교환, 해상풍 및 조석 등과 관련된 해수유동에 기인한 것이다. 이러한 비균질성은 주로 해수면 부근의 층(해수면에서 수온약층까지)에서의 해수 유동에 커다란 영향을 미치게 된다. 예를 들면 해수면 부근의 입자, 공기방울, 어류 및 플랑크톤, 어군, 공기방울 군집, 선박의 분포 등이 상층의 비균질성을 결정하게 하는 요소인 것이다. 이 규모는 미세규모(micro-scale)에서 중규모(meso-scale)까지의 비균질성에 영향을 미친다. 반면에 비균질성을 약한(weak) 영향과 강한(strong) 영향의 측면

에서 보면, 약한 비균질성은 음파 등 감지 파라미터에 굴절을 일으키며 강한 비균질성의 경우 비단열적(non-adiabatic)이며 이는 회절(diffraction)을 일으킨다. 이러한 회절효과는 음파 전달시 경로의 변화를 일으키게 된다 [1]. 이러한 관점에서 해양환경의 비균질성에 의한 영향은 정도에 따라 다양하게 또한 복합적으로 나타난다고 할 수 있다.

이를 위한 일반적인 관측방법은 현장에서 조사선을 이용하는 것으로 관측 정점 및 수심별 수온, 염분 관측을 통하여 시공간적 특성을 파악하고 있다. 따라서 관측 대상해역의 범위가 넓을 때에는 해수특성의 시간적 변화의 파악을 위해서는 방대한 작업과 함께 막대한 예산과 인원이 소요된다. 최근에 원격탐사 기법의 하나로 인공위성을 이용한 해수면 수온 관측이 있으나, 이는

해수면으로부터의 적외선 복사에너지를 측정하기 때문에 대기중의 구름이나 수증기 등에 의한 제한을 받으며, 특히 표층수온의 관측에 국한되는 제한점을 갖고 있다. 해양은 상층 수백 m 층이 대기 및 취송류 등에 의해 물리적 성질의 변화가 크고 시공간적인 변화가 다양하므로 해양 내부에 대한 관측방법이 필요하다. 해양의 단주기 변동 특성을 기존의 관측방법으로 파악하기 위해서는 대규모의 조사선이 필요하다. 따라서 해양의 단주기적이고 중규모적인 변화를 관측하기 위하여 해수 중에서 물리적 성질에 의한 영향을 크게 받고 에너지 감쇠율이 적은 음파를 이용한 해양탐사 방법이 발전되었다.

해양에서 음파는 수중음속에 의해 전달 경로가 결정되며 음속의 전형적인 구조들에 의해 음파전달 조건은 결정된다. 일례로 수중음파통로 (underwater sound channel), 표층도파관 (surface duct) 등은 음파의 전달경로에 영향을 미치며 음파의 사용 주파수에 의해 전달손실 증폭수량이 달라지게 된다. 그런데 이러한 환경에서 해류, 내부파 및 소규모 난류 현상 등은 수평적으로 성층화되어 있는 환경을 시공간적으로 변화를 갖게 함으로 인해 수중음향신호의 변동을 야기시키게 된다. 해양환경의 비균질성 중 대규모 해류, 해양전선 및 와동류는 공간 및 시간 규모가 크며 중장거리 음파 전달에서 난수파 및 냉수파 분포에 따라 음파는 그 전달 경로가 크게 바뀔 수 있으며 장기간 동안 영향을 미칠 수 있다. 또한 최근 관심의 대상이 되고 있는 내부파의 경우 그 발생 기작 등은 잘 알려지지 않고 있으나 수시간 및 수 km 규모에 해당되는 수직적인 음속구조의 변화를 일으켜 음향센서의 운용 환경에 따라 음파의 전달경로, 도달시간 및 수신 강도에 변동을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이

외에도 미세 규모의 물리적 변동과 관련된 음파 변동 특성은 지속적인 관심의 대상이 되고 있다. 또한 해수면 거칠기 등에 의한 효과로는 해상풍 속도 및 방향에 따른 해수면 거칠기 및 공기방울 생성량, 또한 사용 센서의 시스템 변수 및 설치 환경에 따른 음파의 반사 및 산란 영향은 시간적으로 큰 영향 요소로 작용하고 있다. 그리고 해저면의 경우 우리나라와 같은 천해 환경의 경우 그 중요성은 다른 어떤 해양환경요소보다 중요하다고 할 수 있다.

최근까지 고주파수 능동 음향센서를 대상으로 해저면의 구성물질 및 거칠기 등의 영향을 파악하였으나 저주파수 다상태(Multi-static) 음향센서의 운용이 필요하게 되면서 해저면하의 체적의 비균질성에 의한 효과까지 고려해야 하는 시점에 있다. 또한 지금까지 언급되었던 모든 영향 요소들은 모두 주변소음과 밀접한 관계를 가지고 있으며 주변소음의 경우 공간적으로 변동성이 있을 뿐 아니라 동일한 공간에서도 시간적인 변동량은 공간적인 변동량에 상응하는 정도로 크다고 알려져 있다.

이러한 비균질적이며 불규칙적인 매질인 해양에서 수중음향을 이용한 탐사는 음파의 전파매질 변화에 따른 음파전파 특성을 근거로 해수의 물리적 특성을 역으로 추정하는 방법으로 매우 최근의 일이다. 본 고에서는 수중음향을 이용한 해양탐사기법에 대해 기술한다.

II. 음향을 이용한 해양탐사 기법

본 장에서는 수중음향을 이용하여 해양 매질 즉 해수면, 해저면 및 체적의 특성을 역추정하는 해양탐사 기법에 대해 기술한다. 수중에서의 음파의 특성은 크게 전달 (propagation)과 산란

(scattering)으로 나눌 수 있다. 해양은 상하의 경계면의 특성이 매우 상이하며 체적 또한 그 변화량이 음파의 전달에 영향을 미치기 때문에 매질의 특성 변화에 대한 음파 전달 및 산란의 영향을 파악해야 한다.

능동 탐사는 정확한 전파시간 혹은 산란된 신호를 이용하여 전파매질(해양)을 탐사하는 것으로 산란신호를 이용하는 고주파 능동탐사가 주를 이루고 있다. 그 예는

- 해저 지형 탐사 : 측면 주사 Sonar, 측심기 (Echo sounder), 다중빔 Sonar, Chirp sonar
- Biomass(어류, 플랑크톤) : 어군탐지기
- 도플러 해류계 (ADCP: Acoustic Doppler current profiler)
- 특수목적 Sonar: Bubble 탐지, 해저온천, Fish migration, 오염 모니터링

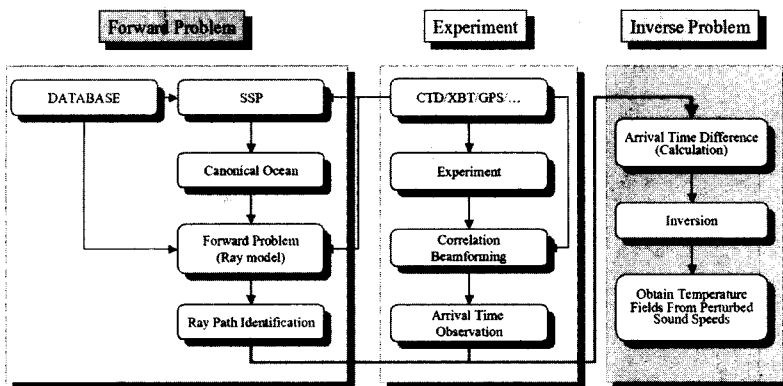
수동탐사의 대부분은 해양에서 발생하는 소음 (Ambient noise)을 이용하여 소음의 발생 원인과 해양특성을 연관 짓는 방법이다. 강수시 해수면에 부딪히는 물방울 소리, 파도가 부서질 때 발생하는 공기 방울이 깨지거나 군집을 이루어 내는 소리 등은 해수면의 강수량, 해상풍속(파고)을 추정할 수 있다. 더 나아가 공기방울 분포를 추정하여 해수면에서의 탄산가스의 대기로의 방출량을 추정 지구 온난화와 관련된 연구의 일부를 담당하고 있다.

한편 근래 저주파 능동탐사는 음향해양 토모그래피에 응용되어 지구 온난화 연구에 사용되고 있으며 중규모의 해양환경 변화 탐지에 자주 사용되는 기술이다. 특히 OAT는 매질에서 전파되는 음향신호를 예측할 수 있는 기술 (forward problem) 그리고 수신신호를 분석하여 매질의 음향학적 특성(해양특성)을 역으로 추정하는 기

술 (inverse problem)로 구성되어 음파방정식의 해법 및 정합장 처리기법 개발의 건인차 역할도 수행하고 있다.

1. 해양음향 토모그래피 원리

수중음향을 이용한 해양탐사 중에서 해양음향 토모그래피는 해수 중에서 음파가 전파할 때 통과매질의 음속장 변화에 따른 음파 전파시간 변화특성을 근거로 해수의 물리적 성질 (수온이나 음속, 해류 등)을 역추정하는 해양탐사 방법이다. 해수 중에서 음속은 매질의 수온과 염분, 그리고 밀도의 함수로 음파 통과매질의 음속변화는 음파 전파경로 및 도달시간 변화를 일으킨다. 즉, 송신기와 수신기 사이의 음속장에 따라 도달시간이 달라지게 된다. 이때 송신기와 수신기 사이의 매질의 음속장 변화량이 평균 음속장에 비하여 크지 않다는 가정하에 대상해역의 음속구조 기준이 되는 표준해양 (canonical ocean)을 설정한다. 이러한 표준해양에서의 음파 도달시간을 음향모델을 이용하여 계산하고 대상해역에서 정확한 도달시간을 관측하여 역문제를 이용한 음속 변동량 추측이 해양음향 토모그래피의 핵심 내용이라고 할 수 있다. OAT는 Munk and Wunsch (1979)에 의해 제안되었으며 [2], 음원과 수신기 사이의 거리가 수천 혹은 수백 km인 해양에서 음파의 도달시간 변화를 정확하게 관측하여 그 변동량과 매질의 변화와의 관계를 구하게 된다. 즉, 해양탐사 대상해역에 수개의 음향 송신기와 수신기를 배치하여 송수신 경로상의 매질특성을 음파의 도달시간 관측으로 수평단층 (horizontal slice)이나 수직단층 (vertical slice)에 대한 음속이나 수온분포를 추정하는 것이다. 이 기술은 미국을 중심으로 선진 각국에서



* SSP: Sound Speed Profile, CTD: Conductivity, Temperature and Depth, XBT: Expendable BathyThermograph, GPS: Global Positioning System

(그림 2) 해양음향 토모그래피 수행 과정

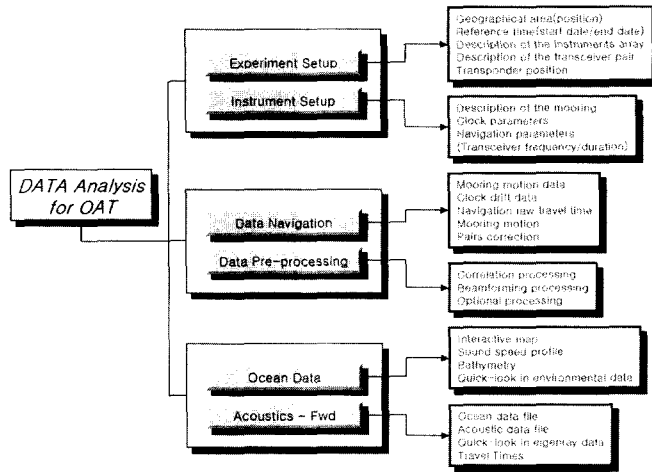
의 이론 연구 및 해상 실험을 통해 적용 가능성이 입증되었으며 이미 국제적 학술활동 영역을 확보하고 있는 상태이다. 토모그래피 기술은 대상해역에 대한 신호의 도달시간 차이 또는 모드별 진폭 정보 등을 이용하여 수평 및 수직단면에 대한 환경변수를 역추정할 수 있다. 최근 수년간에 걸쳐 음향을 이용하여 해양을 모니터링하기 위한 새로운 역추정 방법 (inversion method)이 제안되고 있다. 이러한 방법은 음장에서의 진폭과 위상 정보를 이용하며 이 정보를 측정된 도달시간에 근거하여 기존의 역추정 방법을 확장하는 것이다. 가장 일반적인 방법은 모드 상관 또는 해양 매질과 해양 지질 파라미터의 반복 추정을 통해 선배열에서 측정된 상호간섭 형태를 일치시키는 것이다. 역추정에 필요한 구성요소는 다음과 같다 [3].

- 저주파수 음원 및 대규모 선배열 수신 기술, 음원, 선배열, 선배열 내의 각 수신기에 대한 정확한 위치 모니터링 기법
- 음장에서 공간적인 변동량을 관측할 수 있는 선배열

- 해양 매질 및 해저면의 물리적 특성을 효율적이며 정확하게 나타낼 수 있는 파라미터
- 빠르고 정확한 음장 예측 알고리즘
- 관측치와 예측치의 상관관계를 비교할 수 있는 효율적인 알고리즘
- 추정하고자 하는 해양 매질 및 해저면 파라미터의 탐색 공간에서 전체적인 상관관계를 확실히 하고 효율적으로 찾아내는 탐색 알고리즘

2. 해양음향 토모그래피 구성

해양음향 토모그래피 수행에는 그림 2과 같이 Forward, 실험 및 Inverse 문제가 있다. Forward 문제에는 대상해역에 대한 자료를 이용하여 실험 시기에 해당되는 표준 음속구조를 구성해야 한다. 이를 이용하여 실험에 사용한 시스템 및 해양환경 자료에 대해 음향 모델을 적용하여 표준 해양에 대한 음파 도달시간을 산출한다. 이를 이용하여 실험에서 획득된 수신신호와 비교하여 음파 전달 경로를 식별해야 한다. Inverse 문



〈그림 3〉 해양음향 토모그래피 자료 처리 분류

제에서는 음향 모델에 의한 모델 수신신호와 실험에 의해 수집된 수신 도달신호와의 도달시간 차이를 이용하여 표준해양에 대한 변동해양 또는 실험 당시 해양에서의 음속구조 변화 차이를 계산하여 음원과 수신기 사이의 수온변화를 역 추정하는 것이다.

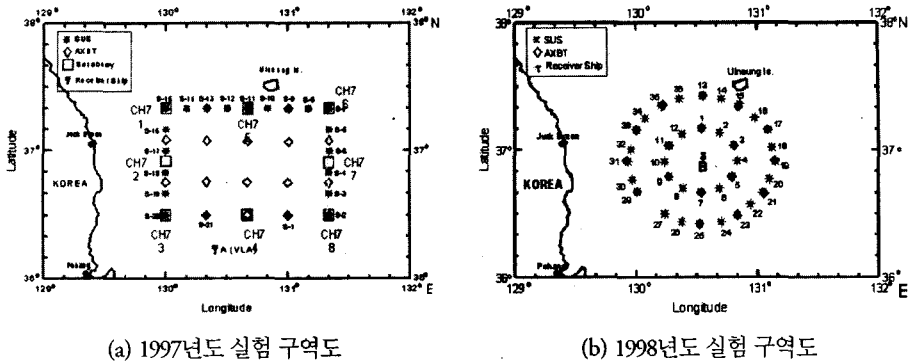
이를 위해서는 송수신체계, 자료 분석, 모델링 일 필수적이다 <그림 3>. 여기서 송수신 체계의 경우 우선 실험과 관련된 체계에 대한 지리정보(설치 위치), 송수신 시간, 배열 위치, 트랜스폰더 위치 등이 포함되며, 송수신기의 송신 및 수신 정보 등이 포함된다. 두번째로는 자료 분석과 관련된 사항으로 송신 및 수신 시간 및 위치에 대한 보정 과정과 수신된 신호에 대한 처리가 포함된다. 마지막으로 모델링의 경우 실험 해역에 대한 데이터베이스를 기반으로 음속구조와 해저수심이 환경자료로 모델에 입력되며 계산된 고유음선 정보를 이용한 순방향 및 역방향 문제가 포함된다 [4].

3. 동해 해양음향 토모그래피 실험

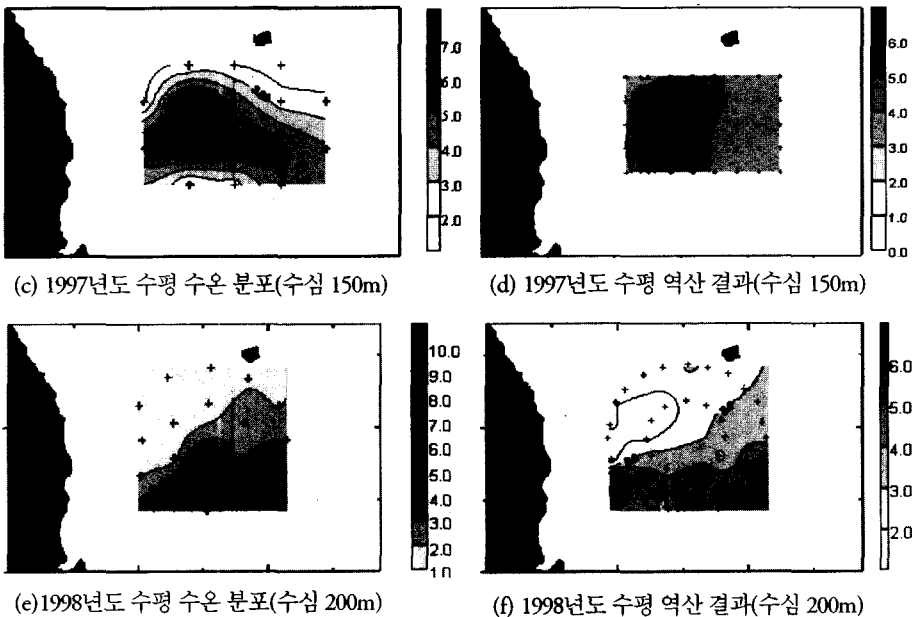
우리나라의 경우 동해에서 총 4회의 해양음향 토모그래피 실험이 수행되었다. 총 4회 중 처음 2회는 1997년과 1998년 폭발성 광대역 음원인 SUS를 이용하여 동해 중부에서 실시되었으며 나머지 2회는 1999년 2000년 우리나라를 비롯한 미국 및 러시아와의 국제 공동 실험이었다.

가) SUS-해양음향 토모그래피 실험

동해 울릉 분지에서 해양 내부구조를 파악하기 위한 실험의 일환으로 1997년 6월 해양음향 토모그래피 실험을 수행하였다. 토모그래피 실험은 120×120km 격자의 바깥쪽 경계선에 SUS(Signal Underwater Sound) 21개를 항공기를 이용하여 단시간에 투하하였으며 그 신호는 관측해역 남쪽에서 수직선배열 수신기로 수신하였다. 역산결과 얻어진 수온분포에 의하면 수심 150m에서 난수성 소용돌이가 존재하는 것으로 나타났으며 이는 AXBT 관측결과와도 일치



(a) 1997년도 실험 구역도 (b) 1998년도 실험 구역도
 <그림 4> 1997/1998년도 SUS-해양음향 토모그래피 실험 구역도



(c) 1997년도 수평 수온 분포(수심 150m) (d) 1997년도 수평 역산 결과(수심 150m)
 (e) 1998년도 수평 수온 분포(수심 200m) (f) 1998년도 수평 역산 결과(수심 200m)
 <그림 5> 1997/1998년도 SUS-해양음향 토모그래피 수온분포 및 역산결과

하는 결과이다 [5] <그림 4~5>. 또한 1998년에도 동일한 해역에서 수신기를 중심으로 반경 30km와 60km 거리에 SUS를 원형으로 투하하여 수신하였다. 그 결과 실험해역의 남동쪽에 난수성 소용돌이가 존재함을 관측결과와 역산결과에서 잘 나타내 주었다 [6] <그림 4~5>. 그러나 SUS를 이용한 2회의 실험에서 단시간 투하에 의한

광대역 음원인 SUS를 해양음향 토모그래피에서 이용하는 경우 쉽게 운용할 수 있으며 소요비용이 적게 든다는 등의 장점이 있는 반면에 폭발성 음원인 관계로 반복성 및 투하시간 및 수신시간의 동기화 등이 문제점으로 나타났다. 연구결과를 종합하면 동해에서 중규모 해양변동성을 추적하기 위해 SUS 해양음향 토모그래피 기법을

〈표 2〉 송신신호 특성

	250 Hz	260 Hz	366 Hz	406 Hz	634 Hz
Cycles/digit	8	5	8	8	8
Digit Duration	0.032 sec	0.01923 sec	0.02186 sec	0.01970 sec	0.0126 sec
3 dB Bandwidth	31.25 Hz	32.5 Hz	45.75 Hz		
Sequence Duration	16.352 sec	9.827 sec	11.169 sec	10.069 sec	6.448 sec
Off time	16.352 sec	None	22.338 sec	None	None
Sequence repetition	110	10	107	10	10

응용하는 것은 일정 수준의 오차 범위내에서 가능성을 보여 주었고 이를 해결하기 위해서는 연속관측을 통한 해양현상에 대한 시공간적 변동 특성을 파악하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 이러한 2회의 실험에서 얻어진 경험을 토대로 해양음향 토모그래피 실험 수행시 기술적인 내용을 파악할 수 있었다.

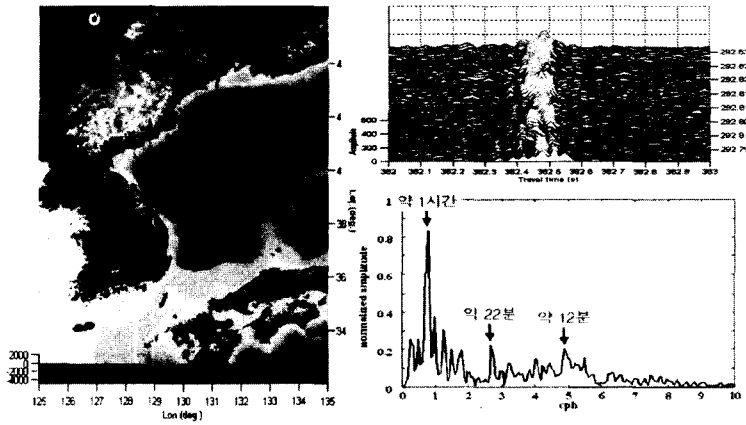
나) ESK(East Sea of Korea)-해양음향 토모그래피 실험

동해에서 저주파수 음원을 이용하여 원거리 음향 신호의 변화 특성을 파악하기 위해 1999년 10월 음향 실험을 실시하였다. 이 실험에서 미국의 워싱턴 주립대학의 응용 물리 연구소 (APL-UW)와 러시아의 태평양 해양 연구소 (POI)와 공동으로 참여하였다. 실험기간 동안 러시아의 블라디보스톡 부근에 음원을 위치시켜 송신하였으며 울릉도 부근해역에 한국과 미국의 수직 선배열 수신기를 계류하여 음향신호를 수신하였다. 음원은 M-시퀀스(sequence)로 각 주파수에 따라 250 Hz와 366 Hz는 4시간마다 1시간씩, 260 Hz는 매 2시간 간격으로 약 2분간, 그리고 406 Hz와 634 Hz는 매 4시간 간격으로 약 2분간 송신하였다 <표 2>. 또한 수신기는 음원으로부터 약 559 km 거리에서 수심 290~300 m에 설치하여

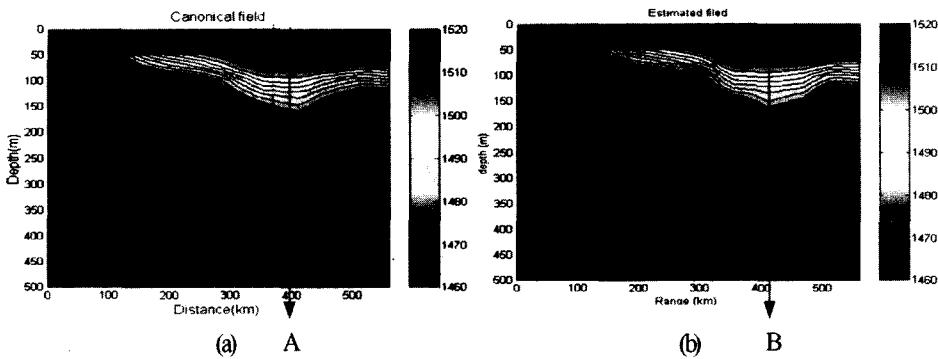
수신하였다. 송신 M-시퀀스에 대한 상관함수 및 누적 평균도달 지속시간을 분석한 결과 도달 신호는 시간대역에서 약 1초 정도의 확산특성을 나타냈으며 이는 모델 결과에서도 나타났다. 해양매질에 의한 음파 도달형태를 1시간동안의 250 Hz와 366 Hz에 대해 분석한 결과 약 15분 내외의 주기적인 도달특성이 관측되었다 [7] <그림 6>.

이러한 단주기성 변화양상은 내부파에 의한 영향이라고 판단할 수 있다. 내부파에 의해 음장의 수직적 변화가 발생하는 경우 음파도달시간의 변동 및 음전달 경로의 변동을 야기시키며 이러한 영향을 파악하기 위해 수치적 모델에 의한 연구가 수행된바 있다. 따라서 측정된 시간동안 해양 매질의 단주기 변화 양상이 음파도달에 영향을 미치는 것이라 할 수 있으며 역으로 음파를 이용하여 주기적인 매질변화를 관측할 수 있다.

그림 7는 음원과 수신기 사이의 음장을 나타낸 것으로 (a)는 10월 한달간에 대한 평균음속구조를 나타내며 이를 이용하여 모델수신신호를 구성하였다. 또한 신호를 수신한 10월 20일에 대한 해양구조 역산결과는 그림 7(b)에 나타내었다. 여기서 상대적인 변동량을 나타내기 위해 음원과 수신기 사이에서의 음속 중 최소 음속층이 가장 깊은 수심에 나타나는 거리 (이 경우 극전선 부근)를 기준으로 표준해양과 역추정된 해양을



〈그림 6〉 ESK 실험 해역 및 수신신호분석 결과



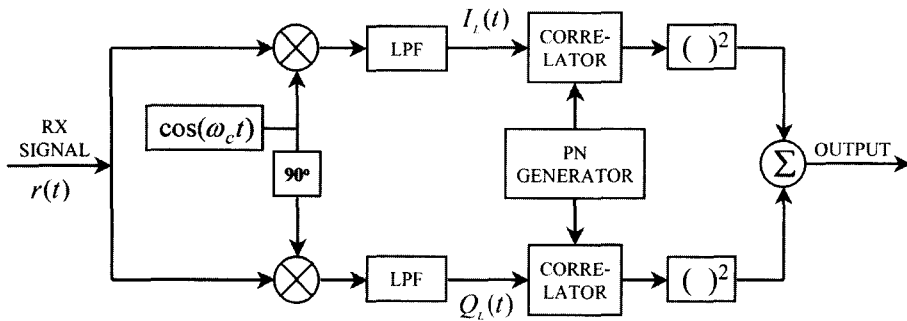
〈그림 7〉 역산을 위해 이용한 표준해양 및 역산결과 (a)러시아 CTD 및 인공위성 표층수온 자료를 이용하여 형성된 10월 한달간 음속구조에 의한 표준해양, (b)파형역산에 의해 추정된 10월 20일의 해양 음속 구조

비교하였다. 최소 음속층이 상대적으로 깊은 수심에서 나타나는 거리는 약 400km 부근이며 표준해양의 경우 그림 7에서 “A”로 표시하였으며 역추정 결과에서는 “B”로 표시하였다. 상대적으로 표준해양에 비해 역추정한 해양의 극전선이 약 20km 남쪽에 위치한 것으로 나타났다 [8].

4. 해양음향 토모그래피 신호 처리

최근 OAT에서 M-시퀀스를 이용한 펄스압축 기술을 이용하여 매질에 의한 다중경로를 식

별한다. 기본적으로 송신기는 M-시퀀스에 의해 위상 변조된 신호를 전송하게 되며 수신기는 정합 필터를 이용하여 송신기에서 전송된 신호를 짧은 지속 시간을 갖지만 높은 에너지를 갖는 펄스로 압축하게 되는 원리를 이용한다 [9]. 또한 수신신호를 적절히 처리함으로써 수신신호에 대한 신호 대 잡음비를 개선한다. 그 예로 ESK 실험에서와 같이 동일한 신호를 일정 간격으로 반복적으로 송신함으로써 수신기에서 연속적인 신호에 대해 동기적 평균을 수행하여 부가적인 신호 처리이득을 얻을 수 있다. 수신신호



〈그림 8〉 수신기 블록 다이어그램

의 신호 대 잡음비는 다중경로에 식별의 정확성을 향상시키는 중요한 파라미터가 된다.

가) 송신 및 수신 처리

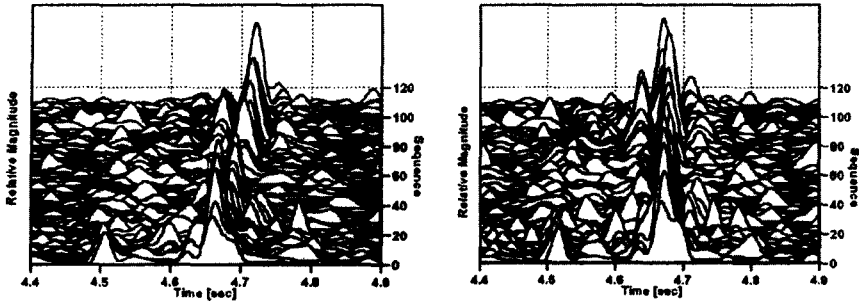
펄스 압축은 수중 음향 분야에서도 최근 활발하게 사용되고 있다. 간단하게 설명하면 송신기는 긴-코드 신호(long coded signal)를 전송하게 되며, 수신기는 정합필터를 이용하여 송신기에서 전송된 신호를 짧은 지속시간을 갖지만 높은 에너지를 갖는 펄스로 압축하게 되는 것이며, 토모그래피에서는 이러한 특성을 이용하여 각각의 지연시간을 갖는 음전달 경로를 찾아내는 것이다. 이와 같은 동작을 할 수 있는 간단한 기술 중에 하나가 M-시퀀스를 이용하는 것이다. 이 방법은 특별한 M-시퀀스를 전송하기 위하여 위상-변조된 반송파 신호(phase-modulated carrier signal)를 사용한다.

M-시퀀스 발생기에 의해 생성된 코드 시퀀스는 전송되기 전에 반송파를 위상 변조하게 된다. 발생된 M-시퀀스는 '0' 또는 '1'의 값을 갖게 되며, 반송파 변조에 앞서 '1' 또는 '-1'의 값으로 할당된다. 예를 들어, 이진 코드 '0'을 '1'로 할당하고 이진 코드 '1'을 '-1'로 할당한다. 반대로 이진 코드 '0'을 '-1'로 할당하고 이

진 코드 '1'을 '1'로 할당할 수도 있다. 이렇게 발생된 시퀀스는 반송파를 위상 변조하고, 변조된 신호는 채널을 통해 전송할 수 있다. 또한 반송파 위상 변조각은 나타내며 M-시퀀스의 주기(M)에 의해 결정된다.

그림 8은 수신신호를 해석하게 될 수신기의 기능 중에서 디지털적으로 신호 해석을 하게 될 부분의 블록 다이어그램을 보인다. 즉 아날로그 신호 처리 부분은 나타내지 않았다. 디지털 신호 해석을 하기 위해서는 수신된 아날로그 신호는 원하는 신호 대역외의 잡음 성분을 제거하기 위해서 먼저 BPF(Band-pass Filter)를 통과하게 되며, 이어서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위해서 ADC(Analog to Digital Converter)를 거치게 된다. 즉 그림8에 보인 블록 다이어그램은 ADC 이후의 수신기 블록이라고 보면 될 것이다. 또한, 그림8은 복조 이후에 나타나는 배-주파수(double-frequency) 성분을 제거하기 위해서 저역 통과필터를 사용한 수신기 블록도이다. 만약 디지털적으로 신호를 처리할 경우에 수신 신호는 먼저 수신 신호의 최고 주파수 성분의 두 배 이상의 샘플링 주파수로 수신 신호를 샘플링 해야 한다.

일반적으로 동기적 평균 이득을 얻음으로써



(a) 샘플링 오차에 의한 기울어짐 현상

(b) 기울어짐 현상 보상 결과

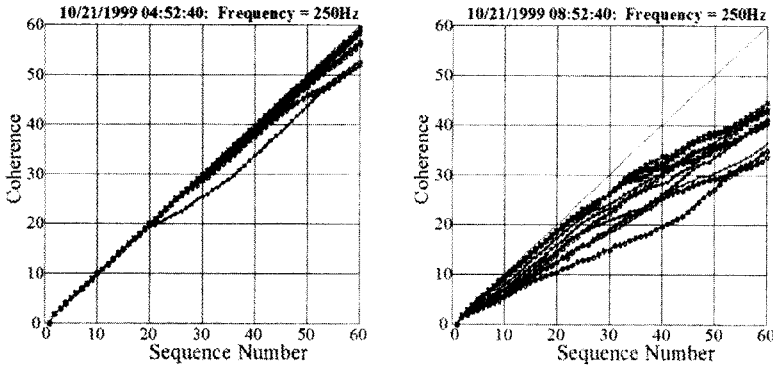
〈그림 9〉 샘플링 오차에 의한 기울어짐 현상 및 보상 결과

신호 대 잡음비를 개선하기 위해 수신신호에 대해 주기적 평균을 취하게 된다. 그러나 수신 신호를 샘플링 할 때, 하드웨어 특성에서 기인하여 샘플링 주파수는 비정수 일 수밖에 없다. 이러한 이유 때문에 샘플링 (sampling)된 이산 수신 신호의 m -시퀀스 주기는 전송 시퀀스의 주기와 항상 부정합이 발생된다. 이러한 부정합으로 인해 지연시간 오차가 발생되며 동기적 평균을 통해 신호 대 잡음비 개선을 얻기 힘들어진다. 이런 현상은 기울어짐 (skew)이라 하며 이를 해결하기 위해 샘플링 속도 변환기를 통해 신호의 칩 (chip)당 샘플수를 정수가 되도록 함으로써 기울어짐 상을 보상할 수 있다. 그림 9는 샘플링 속도 변환을 통해 기울어짐 현상을 보정한 후 수신신호구조를 보인 것이다.

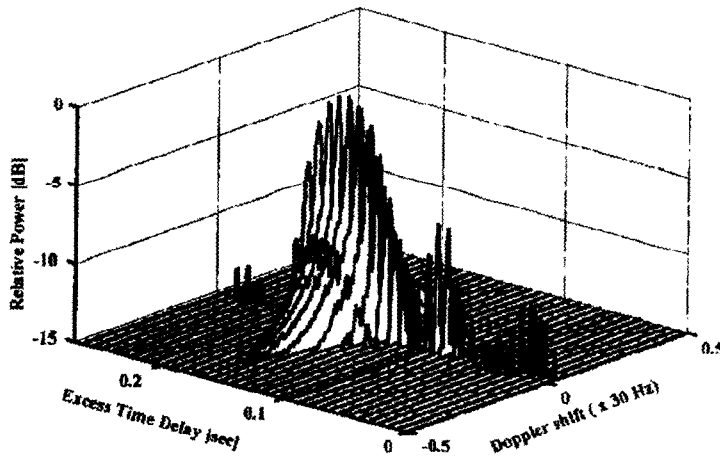
해양 토모그래피 실험에서는 SNR (signal-to-noise ratio) 개선을 위해서 다수의 수신신호 구조를 동기적으로 평균한다. 그러나 동기적으로 더해지는 신호의 개수는 최대 SNR을 얻는데 있어서 필수적이다. 이러한 해양의 변화는 수신신호의 구조를 변화시키게 된다. 이러한 해양의 변화를 고려하여 도달 신호의 평균 이득을 최대한치를 얻기 위해 도달 신호를 동기식으로 평균

하는 시간을 결정해야 한다. 즉, SNR 포화 상태 또는 신호 SNR이 감소하기 전까지 SNR을 증가시키기 위한 다수의 도착 신호 구조들의 동기적으로 평균할 구간은 해양 음향 채널상의 고유 응집 시간으로 결정되어 질 수 있다. 최대 SNR을 얻기 위해 더해져야 할 수신 신호의 개수를 결정하는 방법에는 순간 응집 (temporal coherence)을 이용하는 것과 채널의 응집 시간 (coherence)을 통한 방법 등이 있다. 채널의 응집 시간은 채널이 근본적으로 변하지 않는 시간이므로, 응집 시간 정보를 이용하면 최대 SNR을 얻기 위해 더해져야 하는 시퀀스의 개수를 얻을 수 있다. 즉 채널 응집 시간을 시퀀스의 지속 시간으로 나눠주면 더해져야 할 시퀀스의 개수를 얻게 된다.

그림 10는 수직 선배열 수신기로부터 수신한 신호에 대한 순간 응집의 예를 보인 것이다. 대각 직선은 수신신호의 변화가 전혀 없는 경우이며 기호가 있는 선은 각 수신기 배열에서의 순간 응집 계산 결과이다. 그림에서 시간에 따라 해양 채널이 변화함에 따라 순간응집의 변화가 나타난다. 따라서 동기적 평균을 통해 신호 대 잡음비를 향상시키기 위해서는 해양 채널의 특성을 고려해야 한다.



〈그림 10〉 250 Hz 수신신호에 대한 순간 응집



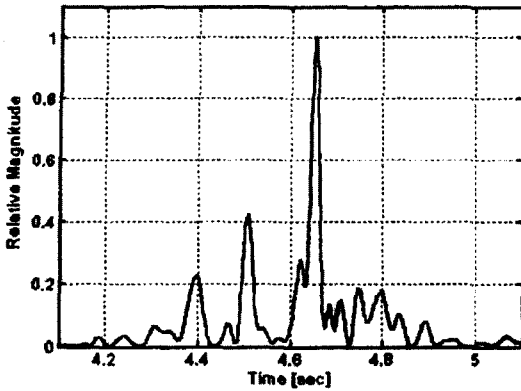
〈그림 11〉 250 Hz 수신신호에 대한 scattering 함수

나) 채널 특성

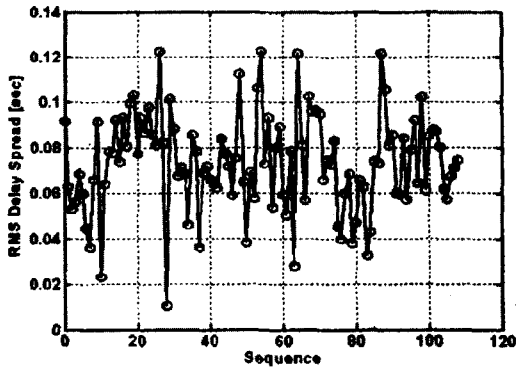
일반적으로 다중경로 채널은 복소 기저 대역 임펄스 (impulse) 응답으로 나타내는 시변 선형 모델로 표현할 수 있다. 따라서 채널을 통과한 수신 신호는 송신신호와 채널의 임펄스 응답의 컨벌루션 (convolution)으로 표시할 수 있다. 만약 채널 임펄스 응답을 WSSUS (Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering)으로 가정하면 이에 대한 자기상관함수의 푸리에 (Fourier) 변환으로 표시할 수 있다. 이러한 scattering 함

수는 랜덤 (random)한 다중경로 채널의 중요한 통계적 특성 중 하나이다. 그림 11은 수신신호에 대한 scattering 함수를 나타낸 것으로 사용된 송신신호의 주파수가 250 Hz로 낮고 수신기의 움직임이 거의 없기 때문에 도플러 (Doppler) 변이가 적은 것으로 해석할 수 있다. 또한 매질에 의한 음파의 속도가 느리기 때문에 초과 시간 지연이 크게 나타난다.

또한 지연 전력 프로파일 (delay power profile)은 채널 임펄스 응답에 대한 자기 상관함수에서



〈그림 12〉 지연 전력 프로파일



〈그림 13〉 RMS 지연확산

시간지연에 따른 평균전력을 나타낸다. 이는 scattering 함수에서 시간지연에 따른 도플러 변이의 함으로 나타낼 수 있다. 그림 12은 수신신호에 대한 지연 전력 프로파일을 나타낸 것이다.

또한 다중경로 성분들의 시간 분산 특성은 평균 초과 지연과 RMS (Root-Mean Square) 지연확산으로 표시할 수 있다. 평균 초과 지연은 지연 전력 프로파일의 일차 모멘트로 정의할 수 있다. 이러한 지연 특성은 수신기에 가장 먼저 도달된 신호를 기준으로 상대적인 지연 시간으로 측정되며 절대적인 전력 강도에 의존하지 않고 단지 다중경로 성분의 상대적인 크기에 의존한다.

그림 13는 그림 12에서의 지연 전력 프로파일에 대응하는 RMS 지연확산을 나타낸 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 해양 탐사를 위해 도입된 기술 중 하나인 해양음향 토모그래피의 기본 원리, 우리나라 해역에서 수행된 해양음향 토모그래피 실험 결과 및 신호처리 기법에 대하여 기술하였다.

수중음향학의 한 분야로 인정되는 해양음향 토모그래피 기술에는 송수신기 설계 및 제작, 신호처리 기술 등을 망라한 복합학문으로서 전기, 전자, 전산, 재료, 기계, 조선, 수학, 물리 및 해양학분야 등으로 구성되어 있다. 해양음향 토모그래피 기술은 관련 과학 및 기술의 적극적 도입을 통해 원격 탐사 기술로 인정되고 있다. 이러한 해양음향 토모그래피 기술은 초기에는 해양을 구성하는 매질 중 하나인 해수의 특성을 파악하는 것이었으나 최근 이 기술을 기반으로 해수면 및 해저면의 물리적 특성 즉, 해저면 거칠기, 해저면 구성성분, 해수면 상태 및 해상풍 등을 역추정하는 기술로 응용되고 있다. 이러한 응용은 현재 시공간적으로 관측하기 어려운 해양을 원격으로 탐사하기 위한 적극적 대응으로 보이며 학제간 등의 연계를 통해 다음 단계의 기술로 발전할 것이라 사료된다.

참고문헌

- [1] Khilko A. I., J. W. Caruthers and N. A. Sidorovskaia, Ocean Acoustic Tomography: A Review with Emphasis on the Russian Approach, Russian Academy of Sciences Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 195pp, 1998.
- [2] Munk, W. M. and C.A. Wunsch, Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring, Deep-Sea Res., 26, pp. 123-161, 1979.
- [3] Diachok, O., A. Caiti, P. Gerstoft, and H. Schmidt, Full-field inversion methods in ocean and seismo-acoustics, Kluwer, Dordrecht, 419pp, 1995.
- [4] 나정열, 확산스펙트럼-해양음향 토모그래피를 이용한 실시간 해양탐사기법 연구, 한국과학재단 연구보고서, KOSEF R01-1999-000-00061-0, 200pp., 2002.
- [5] 나정열, 한상규, 이재학, 심태보, 김구, 동해에서 해양음향 토모그래피에 의한 중규모 현상 관측, 한국해양학회지-바다, 4권 3호, pp. 170-179, 1999.
- [6] S Oh, J. Na, and J. W. Choi, Inverting vertical-slice tomography measurements in the East Sea using explosive charges, The 10th PAMS/JECSS Workshop, Chap. 8, pp. 5-8, 1999.
- [7] 오선택, 나정열, 오택환, 박정수, 나영남, 김영규, 한국 동해에서 토모그래피용 신호를 이용한 음파 도달시간의 시변동성, 한국음향학회지, 제 20권 5호, pp.92-99, 2001.
- [8] Robert C. Spindel, Jungyul Na, Peter H. Dahl, Suntaek Oh, Christopher Eggen, Young Gyu Kim, Victor Akulichev and Yuri Morgunov, Acoustic Tomography for Monitoring the Sea of Japan: A Pilot Experiment, IEEE J. Oceanic Eng., vol, 28, No. 2, April, 2003.
- [9] Peterson, R. L., R.E. Ziemer, and D.E. Borth, Introduction to spread-spectrum communications, Prentice Hall, New Jersey, 695pp., 1995

저자소개



나 정 열

1968년 서울대학교 문리과대학(학사)
 1973년 Florida State University 해양학과 (석사)
 1976년 Florida State University 해양학과 (박사)
 1977년-1986년 국방과학연구소 책임연구원 수중 음향실장
 1996년-1998년 한국음향학회 회장
 2000년-현 재 서태평양지역 음향학술위원회 부회장
 1986년-현 재 한양대학교 지구해양과학과 교수
 주관심분야 해양음향 토모그래피, 수중음향 모델링, 수중음향 신호처리