

# 동해에서 해양음향 토모그래피 수행을 위한 Forward 모의 알고리즘

오선택\*, 나정열\*, 최지웅\*,  
박정수\*\*, 나영남\*\*, 김영규\*\*, 최진혁\*\*  
\*한양대학교 지구해양과학과  
\*\*국방과학연구소(진해)

## Algorithm for Forward Simulation of Ocean Acoustic Tomography in the East Sea of Korea

Suntaek Oh\*, Jungyul Na\*, Jee-Woong Choi\*,  
Jung-Soo Park\*\*, Young-Gyu Kim\*\*, Young-Nam Na\*\*, Jin-Hyuk Choi\*\*

\*Dept. of Earth & Marine Sciences, Hanyang University

\*\*Agency for Defense Development, ChinHae

[ost0204@hymail.hanyang.ac.kr](mailto:ost0204@hymail.hanyang.ac.kr)

### 요약문

해양음향 토모그래피 수행을 위해 필수적인 Forward 모의 알고리즘을 연구를 통해 Forward 문제에서의 선결문제(음파 전달경로의 안정성, 식별능력 및 분해능)를 고찰하였다. 이를 위해 동해의 기존 관측 자료를 이용하여 평균해양에 대한 음속구조 및 EOF 분석을 수행, 재현된 음속구조를 이용, 음선 모델에 의한 고유음선 정보를 파악하여 고유음선의 도달경로 및 도달시간의 비교를 시도하였다.

### I. 서론

해수중에서 매질의 변동과 전달경로 및 도달시간의 변화를 이용한 해양 탐사방법인 해양음향 토모그래피(Ocean Acoustic Tomography, OAT)는 Munk와 Wunsch가 최초로 해양음향 토모그래피를 제안한 이후 많은 실험과 이론의 적용으로 해양탐사 기법으로 발전하였다[1,2]. 최근에는 대규모 및 중규모 해양에서 OAT를 이용하여

수온, 유속관측 및 지구온난화 등의 모니터링에도 적용하고 있다[3-5]. 국내의 경우 동해에서 광대역 음원인 SUS (Signal, Underwater Sound)를 이용하여 OAT를 수행하여 중규모 해양현상인 난수성 소용돌이(Warm Eddy)를 관측한 바 있다[6]. OAT를 수행하기 위해서는 적용해역의 표준해양 설정이 필요하며 이로부터 변동매질에 대한 음파의 전달경로 및 도달시간 변화를 파악하기 위한 선결문제가 선행되어야 한다. 지금까지 선결문제를 수행하기 위해 음선(Ray) 방법 및 모드(Mode) 방법이 제시되었다[7,8]. OAT를 수행하기 위한 선결문제는 첫째 매질의 변화에 따른 전달경로의 안정성, 둘째는 수신신호에서 전달경로를 파악할 수 있는 식별능력 및 셋째로 각 전달경로에서의 신호를 구분하기 위한 분해능의 조건을 만족해야 한다[9]. OAT에 의한 해양탐사는 현장실험에 의해 관측된 수신신호의 분석 및 접근이 필요하나 현재까지 장기간에 걸친 동해에서의 실험이 전무한 상태이다. 본 연구에서는 한국 동해에서 OAT 수행시 고려해야 하는 음파의 전달경로 및 도달시간을 파악하기

위한 순방향 모의 알고리즘을 연구하여 기존 관측자료를 이용, 선결문제를 고찰하였다.

## II. 해양자료 및 표준해양 설정

본 연구에서 이용한 기존 관측자료는 국립수산진흥원에서 정선 관측한 1961-1996년 자료 중 정선 104의 정점 7-10의 2개월 간격으로 관측된 21년치 수심별 수온 및 염분 자료이다. 이 자료는 수심 500m까지 관측되었으며 그 이심에서의 수온 및 염분의 변화는 상층 수심에 비해 변화가 거의 없다고 가정하여 수심에 의한 영향만을 고려하여 수심 1500m까지의 수중음속을 산출하였다(그림 1). 또한 평균적인 음파 전달경로 및 도달시간의 모의를 위해 경험적 직교함수(EOF, Empirical Orthogonal Function)를 수행하여 모드 5까지의 고유벡터 및 시간계수를 이용, 12가지(2년)의 격월별 음속자료를 재현하였다(그림 2). 전체 음속구조 분산에 대한 모드별 기여도로 제 1모드가 전체 분산의 50.6%, 그리고 제 2모드에서 제 5모드까지가 39.8%로 재현된 음속자료는 전체 분산의 90.4%를 재현할 수 있다.

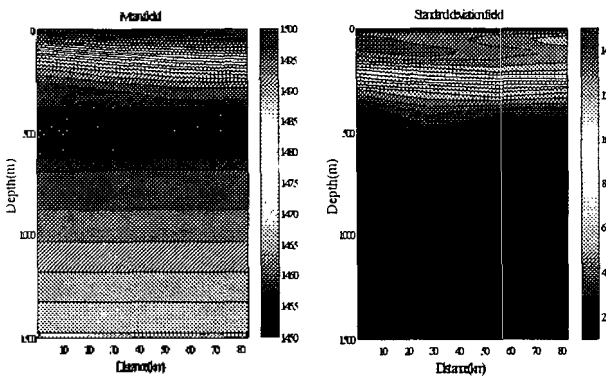


그림 1. 수심별/거리별 음속구조 및 표준편차.

현장에서 관측된 수신신호와 표준해양 수직음속구조로부터 예측된 도달시간에서 도달형태는 시간에 따라 매질이 변동하기 때문에 다중경로는 바뀌게 된다. 그러나 이러한 변화가 큰 경우 예측 도달시간과 비교할 수 없게 되므로 OAT 수행이 어렵게 된다.

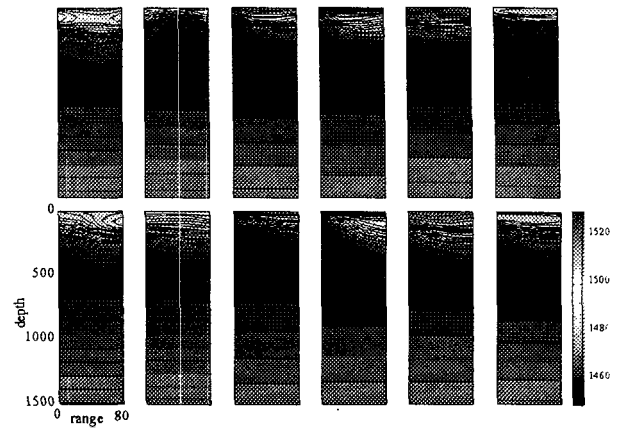


그림 2. EOF에 의한 시간별 재현 음속구조.

## III. Forward 모의 알고리즘

따라서 표준해양 및 재현된 음속구조에 의한 음파의 전달문제를 고찰하기 위해 모의 알고리즘을 이용하여 동해에서의 선결문제인 음파의 식별능력(Identification), 안정성(Stability) 및 분해능(Resolution)을 고찰하였다. 이를 위해 음원을 평균적인 음속구조에 의해 최소 음속층 부근인 수심 350m에 두었으며 수신기는 음원으로부터 82.5km 거리에 5개 수심(310, 330, 350, 370, 390m)에 위치시켜 수신신호를 모의하였다. 음선방법을 이용한 음향 모델 중 MEDUSA를 이용하여 재현된 거리별 음속구조와 그 위치에서의 거리에 따라 평균된 표준해양 음속구조(거리비중속 표준해양 및 거리중속 표준해양)를 이용하여 사용자 입력에 의해 정해지는 음원 및 수신기의 수심에 따른 고유음선과 주파수 및 밴드폭이 고려된 수신 모의 신호를 일괄 처리하여 전시하도록 구성하였다(그림 3)

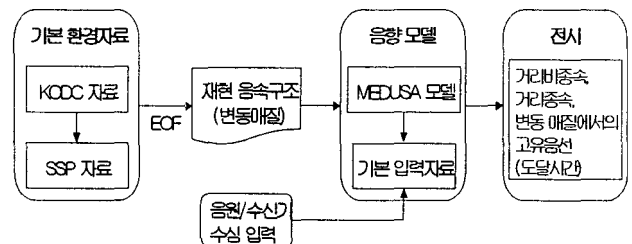


그림 3. 원거리 토모그래피 모의 개념도

표준해양 수직 음속구조에 의한 고유음선은 그림 4와 같이 음파통로축을 중심으로 진행하는 음파와 해저면과 상호작용하면 진행하는 음파로 나누어 구분할 수 있다. 즉 도달된 수신음파로부터 음파의 전달경로를 산출할 수 있는 것이다.

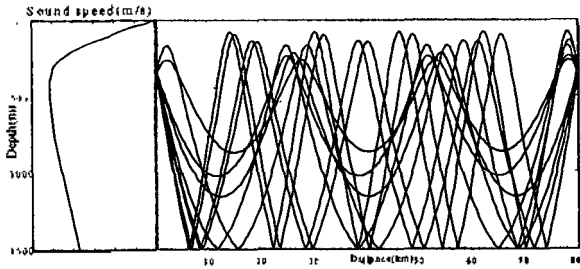


그림 4. 표준해양 및 고유음선 추적

그림 4에서 도달되는 음파는 크게 4가지 그룹으로 나누어 볼 수 있다. 즉 처음 도달되는 고유음선의 경우 음파는 해수면 및 해저면과의 상호작용 없이 거의 음파통로를 따라 수신된 것이며, 두번째 그룹은 해저면에 4회 반사된 신호, 세번째 그룹은 해저면에 5회 반사, 네번째 그룹은 해저면에 6회 반사된 신호이다. 또한 forward 모의 알고리즘에 의해 산출된 결과에서 재현된 거리별 음속구조에 의한 고유음선 수신신호와 거리비중속 및 거리중속에 의한 표준해양 음속구조에 의한 고유음선 수신신호를 산출하여 순서대로 나타내었다(그림 5).

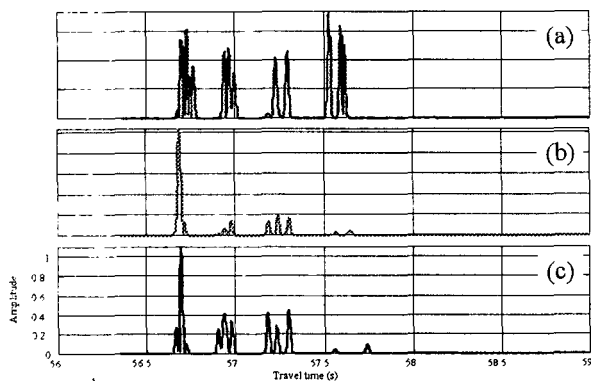


그림 5. 재현 해양 및 표준해양에 의한 고유음선

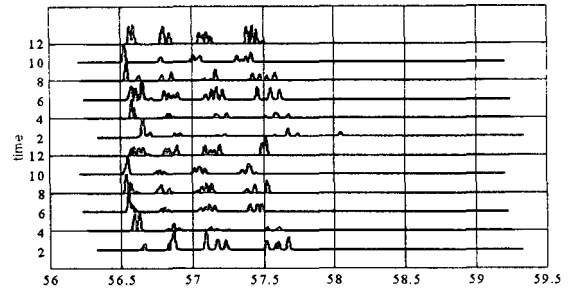


그림 6. 음파의 식별능력 및 안정성

이를 12가지 재현된 음속구조에 의한 고유음선 정보와 비교해 보면 상대적인 도달시간의 차이는 있으나 수신기의 위치가 바뀌어도 그 양상이 거의 같아 적용해역에서의 음파전달 경로는 매우 안정적이며 식별 가능하다고 할 수 있다(그림 6).

수신된 음파의 분해능은 다중경로에 의해 수신된 음파의 도달시간 차이에 의해 결정되며 이는 밴드폭에 의해 좌우된다. 그림 7은 음원과 수신기를 수심 350m에 위치 시켜 밴드폭 32.5Hz인 250Hz 음원과 동일한 위치에서 밴드폭 10Hz인 406Hz 음원을 방사한 경우에 대한 고유음선 정보를 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 도달시간을 나타내며 세로축은 수신기에서의 음압 레벨을 나타낸다.

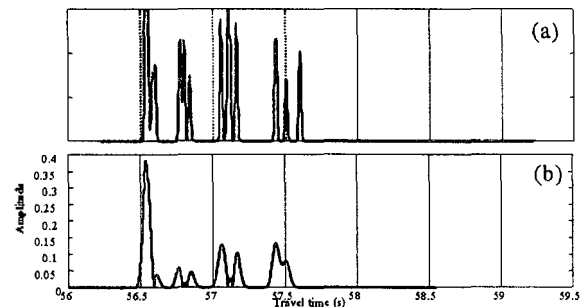


그림 7. 신호의 밴드폭에 의한 수신음 분해능

밴드폭이 상대적으로 좁은 경우(그림 7(b))는 방사되는 펄스의 길이가 길어지므로 인해 도달되는 음파로부터 식별할 수 있는 능력이 감소하게 되는 것이다. 이를

해결하기 위해서는 적용해역에서의 음파 전달경로 및 도달시간 변위에 따른 최적 주파수 및 밴드폭을 적용하기 위한 음원의 설계 및 수신기 배열이 필요하다고 할 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구는 해양음향 토모그래피 수행을 위해 기존의 관측자료 및 음향모델을 이용하여 해양자료 및 음원과 수신기의 위치 등 시스템 변수를 한 모듈에서 입력할 수 있는 Forward 모의 알고리즘을 연구하였다. 이를 위해 동해의 기존 관측자료로부터 표준해양 수직 음속구조와 경험적 직교함수 분석을 통한 12가지(2년)의 격월별 음속자료를 재현하여 음파의 도달 특성을 파악하였다. 표준해양과 재현된 해양에서의 음파 도달경로 및 도달시간을 비교한 결과 상대적인 도달시간의 차이는 있었으나 선결 조건인 음파의 안정성, 식별능력 및 분해능의 조건을 만족하였다. 따라서 차후 Forward 모의 알고리즘을 보완, 이를 이용하여 특정해역에서의 해양음향 토모그래피 수행에 앞서 음파의 도달특성을 예측하며 음원 및 수신기의 시스템 변수를 결정하기 위한 기본 분석 기법으로 발전시켜야 할 것이다.

#### 참고문헌

[1] W. H. Munk, and C. A. Wunsch, "Ocean Acoustic Tomography: A scheme for large scale monitoring," *Deep Sea Res.*, vol. 26, pp. 123-161, 1979.

[2] W. H. Munk, P. F. Worcester, and C. A. Wunsch, *Ocean Acoustic Tomography*, Cambridge Univ. Pres., pp. 433, 1995.

[3] B. M. Howe, P. F. Worcester, and R. C. Spindel, "Ocean Acoustic Tomography: Mesoscale velocity," *J. Geophys. Res.*, vol. 92(C4), pp. 3785-3805, 1985.

[4] J. L. Spiesberger, and K. Metzger, "Basin-scale

tomography: A new tool for studying weather and climate," *J. Geophys. Res.*, vol. 96(C3), pp. 4896-4889, 1991.

[5] P. F. Worcester, R. C. Spindel, and B. M. Howe, "Reciprocal Acoustic transmissions: Instrumentation for mesoscale monitoring of ocean currents," *IEEE J. Ocean. Eng.*, OE-10, pp. 123-137, 1985.

[6] 나정열, 한상규, 이재학, 심태보, 김구, "동해에서 해양음향 토모그래피에 의한 중규모 현상관측, 한국해양학회지-바다, vol. 4, no. 3, pp. 170-179, 1999.

[7] W. H. Munk, and C. A. Wunsch, "Ocean acoustic tomography: Rays and modes," *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 21(4), pp. 777-793, 1983.

[8] E. C. Shang, "Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 85(4), pp. 1531-1537, 1989.

[9] J. L. Spiesberger, J. L. Spiesberger, and K. Metzger, "Stability and identification of ocean acoustic multipaths," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, pp. 2001-2017, 1980.

[10] T. L. Foreman, *Ray modeling methods for range dependent ocean environments*, ARL Tech. Rep., no. ARL-TR-83-41, Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, pp. 100, 1983.

[11] W. H. Munk, R. C. Spindel, A. Baggeroer, and T. G. Birdsall, "The Heard Island feasibility test," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 96(4), pp. 2330-2352, 1994.