

# 해양음향 토모그래피의 연구동향 및 역산알고리즘에 관한 연구

임 효 승<sup>1)</sup>, 金 載 洙<sup>2)</sup>

## A Study on the Trend and the Inversion Algorithm for Ocean Acoustic Tomography

Hyo-Seung Lim, Jea-Soo Kim

### Abstract

The OAT(Ocean Acoustic Tomography) is a research area which deals with the inversion of the physical properties of the ocean from the observed signal, where the signal is transmitted, refracted, and reflected either from the volume or the boundary of the ocean. In this study, the OAT concerning the sound velocity structure as a function of depth in the semi-meso-scale in the ocean is investigated.

For this purpose, the ray tracing program in a range dependent environment is developed. From the developed model, the path length and arrival time for each eigenray is computed. The result of the ray model is used to set up a system of linear equation, of which optima solution is found by SVD(Singular Value Decomposition). The inversion algorithm is applied to the horizontal and vertical slice of real ocean.

The simulation shows that, in the horizontal slice, the inversion gives good result although the ray path is assumed to be a straight line. However, in the vertical slice, the inversion gives a relatively considerable error. The error is contributed to the assumption of the standard ocean, and the confinement of the ray path in the specific depth. Therefore, it is concluded that the sources and receivers are placed in such positions that the eigenray are well distributed in the cell, which means that the number of independent equations are enough for the inversion. It is suggested that the systematic and quantitative analysis on the sources of the error is necessary.

1) 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 수중음향전공

2) 한국해양대학교 해양공학과 교수

## 1. 서론

해양음향 토모그래피(OAT)는 광범위한 지역에 걸친 해양변화의 관측방법으로 Munk와 Wunsch(1979)에 의해 제안된 이후 해양의 물리적 특성을 파악하는데 효율적인 방법으로 대두되어 많은 실험들이 해양음향 토모그래피 개념의 타당성과 역산알고리즘을 입증하기 위해 서 이루어져왔다. 이러한 해양음향 토모그래피는 광범위한 해양관측시 직접적인 점관측기법에 비해 효과적이고 경제적이므로 대규모 해양의 음속장 구조, 해류의 속도와 지구의 온난화현상등을 규명하는데 까지 적용하고 있다.

해양음향 토모그래피를 수행하는 통상적인 방법은 sound channel에서의 음향음선들의 측정된 전달시간을 사용하는 것[Munk and Wunsch, 1979; Cornuelle et al, 1985; Worcester et al, 1985]이며 음속구조는 역산으로 추론된다. 이러한 개념은 1981년 실험에서 입증되었으며, 상대적인 음선경로를 측정함으로써 해류속도를 얻을 수 있었다. 근래 들어 음선을 이용한 토모그래피보다 wave theory에 의한 mode정보로부터 해를 구하는 모달(modal) 토모그래피, matched-field 토모그래피, Peaks 토모그래피가 대두되어 적용되고 있는 상태이다.

본 논문에서는 이러한 해양음향 토모그래피의 주요 실험 및 연구동향을 살펴보고 통상적인 방법인 음선을 이용한 토모그래피에 관한 수치실험을 수행하였다.

음선을 이용한 해양음향 토모그래피에서는 음원과 수신기간의 다른 경로를 지나는 음향음선에 대한 전달시간과 음선경로의 궤적길이를 정확하게 구할 수 있어야 하며 구한 결과를 이용하여 역산을 하여 역으로 음향음선이 통과한 해양의 특성을 파악할 수 있는 역산알고리즘이 개발되어야 할 것이다. 음원과 수신기간의 매질변동에 따른 음선의 전달시간과 음선경로의 궤적길이를 구하는 것은 forward problem이라고 하며 forward problem이 해결되어야 역산시 정확한 해양특성을 구할 수 있다.

이러한 forward problem을 해결하기 위한 방법으로는 음선이론(ray theory)과 파동방정식에 의한 전달모델 등 여러 가지가 있는데, 본 논문에서는 음속의 변동에 따른 음선의 굴절과 반사를 하는 음선추적모델을 사용하여 forward problem을 해결하였다. 음파전달모델 수치실험에 의거 해양특성에 따라 달라지는 음선경로 파악을 통하여 음선경로를 통과한 전달시간으로 해양의 특성을 역추정하는 역문제도 해결 되어야하며 역문제를 해결하기 위해서는 수신기에 도달하는 각기 다른 음선이 식별되어야하고 식별된 음선경로가 해양특성에 따른 안정성이 있어야 한다. 역문제 해결과정은 1981년의 중규모 실험[Cornuelle et al, 1985]을 성공적으로 증명한 선형최적추정이론(linear optimal estimation theory)을 기초로 한 여러 방법이 있지만 해양음향 토모그래피의 운용에 있어서는 선형화된 역산이론을 사용하여 역문제를 해결해야 할 것이다. 본 연구에서는 수치실험을 위하여 음선추적프로그램의 개발, 역산알고리즘의 개발, 개발된 역산알고리즘에 의한 수평단면에서 역산 그리고 수직단면에서 역산을 시도하여 해양 음향토모그래피의 방법론을 정립하고 수치실험을 통하여 방법론의 타당성을 검증하였다

## 2. 해양음향 토모그래피에 관한 주요 연구

현장실험의 구성 및 실험을 제외하고, 해양음향 토모그래피와 관련된 문제는 측정된 음향 데이터의 초기 처리와 후속적인 해양 특성 매개변수의 추정을 위한 역산과 관련이 있다. 음속과 해류속도는 해양음향 토모그래피 구조에 의해서 직접 복원할 수 있는 주요한 매개변수들이다. 수학적 관점으로부터 해양 특성 매개변수에 대한 토모그래피 데이터를 사용하는 문제는 역산문제이다. 이러한 토모그래피 데이터는 모드(modal) 또는 음선(ray) 도달신호들(arrivals), 모드의 위상구조(modal phase structure), 심지어 수신기 위치에서 수신된 토모그래피 신호의 국부적 최대값(local maxima of tomographic signal)을 말하는 것이다.

현재까지 이루어진 토모그래피에 관한 연구결과를 살펴보면, 토모그래피를 연구하는 방향은 전달시간을 이용하여 역추정하는 방법부터 시작해서, 모드의 전달시간, 모드의 위상을 이용하는 방법에서 최고점의 전달시간을 이용하여 연구하는 방법으로 발전하고 있으며, 현재에는 위의 모든 방법을 합성하여 역추정하는 방법으로 발전하고 있으며 시험되고 있다.

## 3. 수직단면에서의 역산알고리즘 검증을 위한 고유음선추적

통상적인 해양음향 토모그래피를 이용하여 수중음속구조를 역추정하기 위해서는 음파가 지나온 경로 및 도달시간의 파악을 위한 forward problem이 선결과제이다. 이러한 forward problem을 위하여 수중음파의 전달경로에 관한 음선추적프로그램을 개발하였다. 개발된 음선추적프로그램은 수직단면에서의 역산알고리즘을 검증하기 위해서 사용되며 거리독립 및 거리독립 환경에서 거리와 수심에 따른 음속변화에 의한 음선의 궤적거리와 전달시간을 구하여 역문제를 형성하고 역추정을 시도하였다. 이러한 환경에서 수치실험을 한 이유는 복잡한 환경변수를 적용한 정확한 역산보다는 수직단면에서의 간단한 예제를 통하여 역산알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서였다.

이 프로그램에서는 거리독립 및 거리의존 환경에서 음선의 진행을 주로 Snell's law를 사용하여 음속구조에 따른 음선이 굴절 및 반사하며 깊이에 따른 속도의 변화와 각도의 변화에 따른 속도의 변화로 음선이 진행하는 방향이 바뀌게 되는 것이다. 이러한 원리에 의해 이산적인 수심에서의 음속과 이산적인 수심에서의 음선각도 변화를 적용한 적분을 사용하여 음선이 진행한 수평거리  $R$ , 경로의 길이  $S$ , 전달시간  $T$ 를 구하는 알고리즘으로서 음선추적 프로그램을 구성하였다.

$$R = \frac{C_v}{g} |\sin \theta_2 - \sin \theta_1| \quad (1)$$

$$S = \frac{C_v}{g} |\theta_2 - \theta_1| \quad (2)$$

$$T = \left| \frac{1}{2g} \ln \frac{(1 + \sin \theta_2)(1 - \sin \theta_1)}{(1 - \sin \theta_2)(1 + \sin \theta_1)} \right| \quad (3)$$

여기서  $C_v$ 는 정점(vertexing)에 도달한 때의 음속이고  $g$ 는 수심에 따른 음속의 변화를 나타내며  $\theta_1$ 은 이전각도,  $\theta_2$ 는 새로운 각도를 나타내는 것으로 이러한 식들을 이용한 음선추적프로그램으로 음속구조에 따른 균질매질에서의 음선경로 궤적길이 및 전달시간등 고 유음선 정보를 구하였다.

#### 4. SVD에 의한 해양음향 토모그래피에서의 역산알고리즘

수평단면이나 수직단면에서 역문제를 구성하는 방정식들을 행렬식으로 표시하면

$$Ax = b \quad (4)$$

이 된다. 여기서  $x$ 는 미지수벡터,  $b$ 는 알고 있는 자료벡터, 그리고  $A$ 는 계수행렬이다.

식 (4)로 표현되는 연립방정식은 미지수보다 방정식의 갯수가 더 많은 overdetermined 체계인 경우가 되도록 구성하는 것이 우리가 알고자 하는 미지수인 음속 변동량을 추정하는데 유리하다. 그리고 이 경우에 수학적인 유일해(unique solution)가 존재하지 않으므로 방정식의 풀이법에는 많은 통계학적인 기법이 사용되고 있다. 그 중에서 실질적인 계산에서 유용한 방법인 SVD를 이용한 해석법을 도입하였다.

SVD는 식 (4)의 계수행렬인  $A$ 를 다음의 세 행렬로 분해한다.

$$A = U w V^T \quad (5)$$

여기서,  $U$ ,  $V$ 는 직교행렬로서 다음의 성질을 가진다.

$$U^T \cdot U = V^T \cdot V = I \quad (6)$$

$$V \cdot V^T = I \quad (7)$$

$$w = \text{특이값들로 이루어진 대각행렬} \quad (8)$$

따라서  $A$ 의 역행렬은 직교행렬 및 대각행렬의 수학적인 역행렬에 관한 정리에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$A^{-1} = V \cdot [diag(1/w_j)] \cdot U^T \tag{9}$$

그러므로 구하고자 하는 근사해는

$$x = V \cdot [diag(1/w_j)] \cdot (U^T \cdot b) \tag{10}$$

로 표시되며 이는 역모델 식(4)의 해가 된다. SVD는 방정식이 overdetermined, just determined 및 underdetermined인 각각의 경우에 대해서 최적의 해를 구하는 방법으로서 사용되어 왔다[Munk. and Wunsch, 1978, Press, W. H. et al. 1992].

### 5. 수평단면에서의 역산알고리즘의 검증

간단한 음속모델에 대한 고유음선자료로부터 근사적으로 직선경로를 가정하여 역추정을 하였다. 그림 1과 같은 해양의 수평단면구조와 음원 및 수신기의 위치에 대해 해양음향 토모그래피에 의한 역문제를 풀어 보자. 이 문제와 같은 경우 구분한 해양영역이 9개이고 음원과 수신기 사이의 경로가 15개이기 때문에 연립방정식을 구성할 경우 미지수와 선형방정식의 갯수가 각각 9개와 15개가되어 overdetermined한 방정식이 된다.

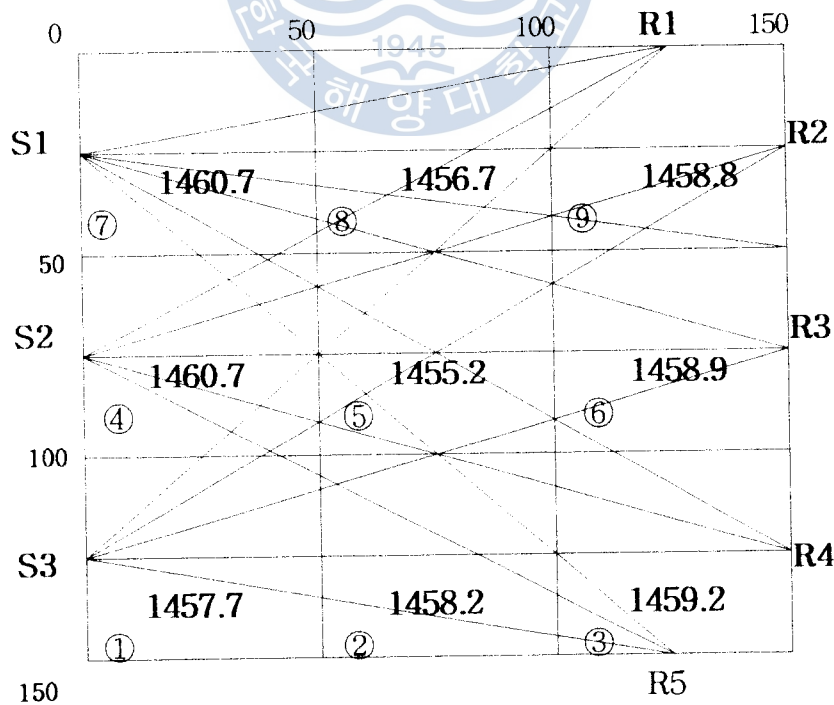


그림 1 수평단면의 역추정을 위한 해양영역의 좌표와 음원 및 수신기 배치도

음원 \ 수신기		수신기				
		R1	R2	R3	R4	R5
S1	CANONICAL TIME(S)	86.8363	102.8948	108.4606	123.6641	123.7117
	PERTURBED TIME(S)	86.7816	102.8291	108.3963	123.6198	123.6310
	PATH LENGTH(KM)	126.58989 (127)	150.0 (150)	158.11389 (158)	180.27756 (180)	180.19689 (180)
S2	CANONICAL TIME(S)	98.2751	108.4606	102.8948	108.4606	101.8209
	PERTURBED TIME(S)	98.2133	108.3988	102.8621	108.4038	101.6965
	PATH LENGTH(KM)	143.26549 (143)	158.11389 (158)	150.0 (150)	158.11389 (158)	148.31822 (148)
S3	CANONICAL TIME(S)	118.8621	123.6641	108.4606	102.8948	88.1805
	PERTURBED TIME(S)	118.8505	123.6782	108.4855	102.8548	88.1564
	PATH LENGTH(KM)	173.27723 (173)	180.27756 (180)	158.11389 (158)	150.0 (150)	128.54960 (129)

표 1 표준해양과 실제해양에서의 도달시간 변위

그림 1에서 보듯이 해역의 좌측 상단을 좌표원점으로 설정하고 아홉 개의 해역에 각각의 번호를 붙였다. 이 그림에서 각각의 해역에 배정된 수치들은 그 해역에서의 실제음속을 나타내고 있으며 각 음원들에서 각각의 수신기에 도달한 음향신호에 대한 자료는 표 1에 와 있다.

가. 표준해양

⑦ 1457.8	⑧ 1457.8	⑨ 1457.8
④ 1457.8	⑤ 1457.8	⑥ 1457.8
① 1457.8	② 1457.8	③ 1457.8

표 2 표준해양에서 해역별 음속분포

⑦ 1457.7965	⑧ 1457.8043	⑨ 1457.7984
④ 1457.7973	⑤ 1457.8041	⑥ 1457.7987
① 1457.7988	② 1457.8016	③ 1457.7997

표 3 표준해양에서 역추정 결과

⑦ 0.0035	⑧ -0.0043	⑨ 0.0016
④ 0.0027	⑤ -0.0041	⑥ 0.0013
① 0.0012	② -0.0016	③ 0.000

표 4 표준해양에서의 역추정오차  
(표준음속분포-역추정결과)

나. 실제해양

⑦ 1460.7	⑧ 1456.7	⑨ 1458.8
④ 1460.7	⑤ 1455.2	⑥ 1458.9
① 1457.7	② 1458.2	③ 1459.2

표5 실제해양에서 해역별음속분포

⑦ 1459.1936	⑧ 1458.2020	⑨ 1458.7985
④ 1459.1948	⑤ 1456.6984	⑥ 1458.8998
① 1456.2001	② 1459.7045	③ 1459.1997

표 6 실제해양에서 역추정 결과

⑦ 1.5064	⑧ -1.5020	⑨ 0.002
④ 1.5052	⑤ -1.4984	⑥ 0.000
① 1.499	② -1.5045	③ 0.000

표 7 실제해양에서의 역추정오차  
(실제음속분포-역추정결과)

표 2-4는 각각 표준해양에서의 가정된 음속분포, 역추정결과, 역추정오차의 순서로 나타내었으며, 표 5-7은 변화된 해양에 대해 같은 표를 작성한 것이다.

각각의 표 4(표준해양에서의 역추정오차)를 보면 정확한 역추정이 되었다고 볼 수 있다. 하지만, 표7(실제해양에서의 역추정오차)을 보면 표4의 경우보다 오차가 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로 실제해양에서의 역추정 문제에 직선경로에 의한 전달경로의 길이와 전달시간을 사용하여 역추정을 하면 오차가 발생한다고 생각된다. 이러한 오차를 해결하기 위해서는 정확한 전달경로와 길이와 전달시간을 구해야 되기 때문에 실제해양에서의 역추정시에는 직선경로가 아닌 실제 음속분포에 의해 전달되는 음속경로를 사용하여야 할 것이다.

## 6. 수직단면에서의 역산알고리즘

### 6.1 거리독립 환경에서의 역산알고리즘 검증

거리독립 환경에서 수직단면의 역추정 알고리즘을 검증하기 위해서 앞에서 언급한 음선추적 수치실험을 실시하여 얻은 고유음선자료로부터 실제적인 음선의 경로와 전달시간으로 역추정을 시도하였다. 그림2와 같은 해양의 수직단면구조에서 해양음향 토모그래피에 의한 역문제를 풀어보았다. 이 문제와 같은 경우는 수직단면이 6개이고 음원1개와 수신기 3개 사이의 경로가 13개이기 때문에 연립방정식을 구성할 경우 미지수와 선형방정식의 개수가 각각 6개와 13개가되어 overdetermined 방정식이 되는 것이다.

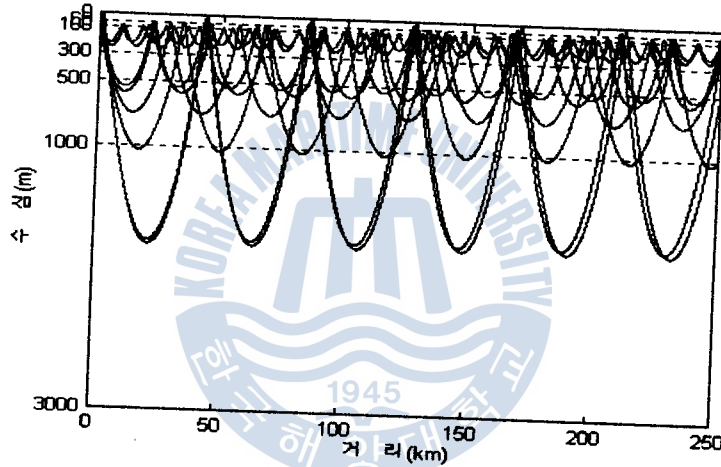


그림 2 거리독립 환경에서의 수직격자와 고유음선경로

ray no	layer no						
	1	2	3	4	5	6	
	0	60	100	300	500	1000	3000(m)
1	8.36535621	3.36465625	13.68035685	15.34064886	48.92332816	162.11900880	
2	8.01157565	3.41213413	15.26719297	17.04720425	50.24833573	158.63421577	
3	3.41346222	7.35644082	25.01617725	31.13746233	143.63884788	41.15596301	
4	0	11.90122053	34.61270242	48.69212283	156.27707368	0	
5	0	12.07806960	47.33599964	77.16557803	115.29306499	0	
6	0	12.84805413	52.96942428	95.22693937	90.54445672	0	
7	0	15.64999648	194.59830078	40.86711697	0	0	
8	0	15.07726810	235.58225588	0	0	0	
9	0	15.66715318	234.86470295	0	0	0	
10	0	15.65889113	234.96895599	0	0	0	
11	0	15.18007137	235.31681884	0	0	0	
12	0	16.03275247	234.64855385	0	0	0	
13	0	15.34603831	235.86130375	0	0	0	

표 8. 거리독립 환경에서 각격자의 음선궤적길이



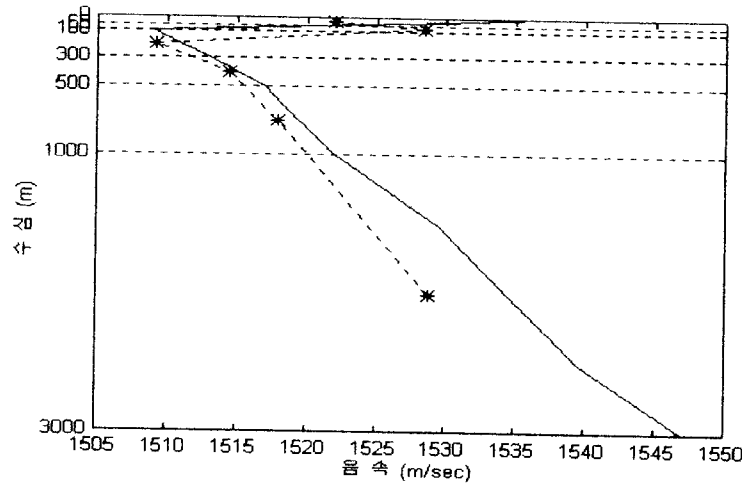


그림 3. 거리독립 환경에서 수직단면의 역추정결과

그림 3은 거리독립 환경에서 수직단면의 역추정한 결과를 나타내는 것으로 실선은 역추정에 사용된 음속구조이고 점선에 \*표시를 한 선은 역추정한 결과를 나타낸다. 역추정 결과는 각 격자대를 통과한 음선의 평균적인 음속을 나타내는데 이러한 이유는 각 음선경로가 지나가는 전환점의 변화에 따라 역추정결과가 많은 영향을 받기 때문이다. 역추정 결과에 대한 평균오차는 1번 수직격자에서 7.9m/s, 2번 수직격자에서 13.4m/s, 3번 수직격자에서 1.7m/s, 4번 수직격자에서 0.5m/s, 5번 수직격자에서 1.5m/s, 6번 수직격자에서 5.7m/s로서 그림 3에 나타나 있다.

이러한 역추정 결과중에 1번, 2번, 6번 수직격자에서 오차가 크게 발생하는 이유는 역모델의 부정확성보다는 음선이 지나가는 경로가 알고자 하는 격자대를 완전히 추정할 수 있게 전체의 수심을 지나가는 것이 아니라 각기 다른 전환점을 가지며 지나가기 때문에 격자대를 지나가는 음선 경로의 평균값을 나타내는 역추정값 오차가 커지게 된다고 볼 수 있다. 그래서 1번, 2번, 6번 수직격자의 전환점이 지정된 격자대의 역추정된 결과에 의한 평균음속값에 좋지 못한 결과를 초래하게 되는 것이라 볼 수 있다. 또한 음속구조 자체가 100m에서 최소음속층을 갖기 때문에 고유음선의 개수가 많지 못하고 수직격자대를 음선이 지나가는 범위가 작아서 역추정시 고유음선이 많더라도 평균음속에 가감이 되어서 오차가 커지게 된다고 생각된다.

## 6.2 거리의존 환경에서의 역산알고리즘 검증

그림 4와 같은 해양의 수직단면구조에서 해양음향 토모그래피에 의한 역문제를 풀어보았다. 이 문제와 같은 경우는 격자수가 10개이고 고유음선의 수가 15개이기 때문에 연립방정식을 구성할 경우 미지수와 선형방정식의 개수가 각각 10개와 15개가되어 overdetermined 방정식이 된다.

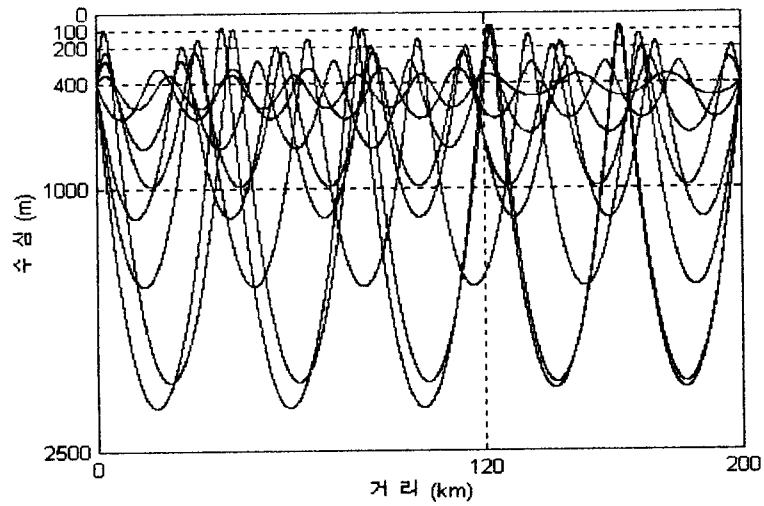


그림 4 거리의존 환경에서의 수직격자와 고유음선경로

가. range 0 - 120 km

ray no	layer no				
	1	2	3	4	5
	0	100	200	400	1000 2500(m)
1	1.91624386	3.39972485	5.21796757	20.19529624	90.55920046
2	1.91336176	5.98586033	7.13307221	22.56565274	85.00097207
3	0	6.13499156	9.39238447	32.18095788	73.59936693
4	0	6.83337159	13.59298712	36.50507755	65.09407798
5	0	3.69450908	20.42398032	51.73834315	44.96047797
6	0	3.29824497	18.59778866	55.22390371	43.90325327
7	0	0	29.52502218	91.16752324	0
8	0	0	28.53671478	93.78655094	0
9	0	0	29.56003741	92.07521142	0
10	0	0	31.03365872	89.85576102	0
11	0	0	37.78716665	83.28595788	0
12	0	0	37.95743461	82.92076035	0
13	0	0	36.28878725	85.46109008	0
14	0	0	33.62736134	87.81732771	0
15	0	0	22.90821583	98.95317296	0

나. range 120 - 200 km

ray no	ray				
	6	7	8	9	10
	0	100	200	400	1000 3000(m)
1	2.37485409	3.07584108	4.20269089	14.66445393	57.57425396
2	2.27169325	3.15434506	4.94945012	15.16397613	56.66731471
3	0	5.22442536	6.03744202	22.98652738	46.76288453
4	0	6.95180026	9.52279695	26.04949763	39.02196079
5	0	2.49020564	13.45125892	66.10162901	0
6	0	3.33994715	8.10071240	36.42460979	32.93565894
7	0	2.97259350	15.09282459	62.31394517	0
8	0	0	27.50928339	53.73377737	0
9	0	0	25.64406925	55.18950728	0
10	0	0	27.56483827	53.75407786	0
11	0	0	22.00250392	58.78914875	0
12	0	0	31.98352476	48.77280523	0
13	0	0	27.66141626	52.84030547	0
14	0	0	27.37129026	54.11046904	0
15	0	0	38.94397356	42.20612678	0

표 9. 거리의존 환경에서 각격자의 음선궤적길이

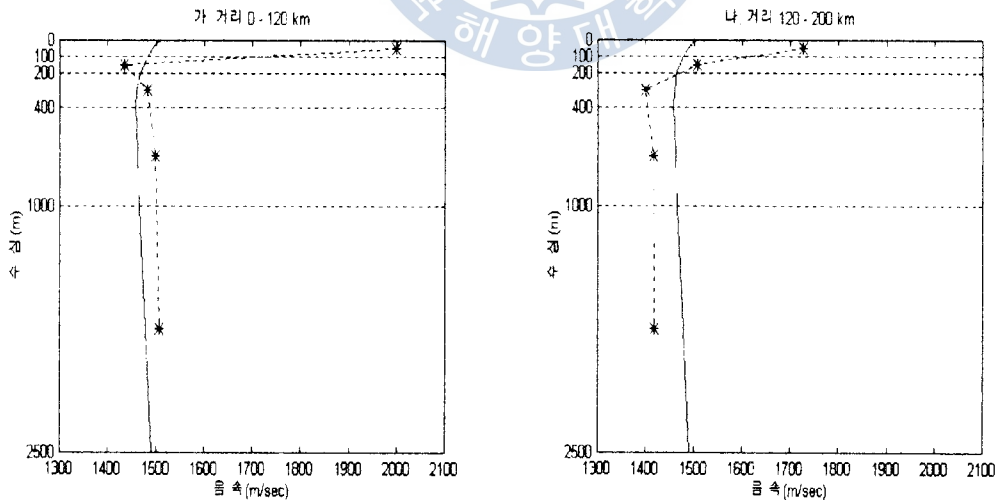


그림 5. 거리의존 환경에서 수직단면의 역추정결과

그림 5는 거리의존 환경에서 수직단면의 역추정한 결과를 나타내는 것으로 실선은 역추정에 사용된 음속구조이고 점선에 \*표시를 한 선은 역추정한 결과를 나타낸다. 역추정 결과에 대한 평균오차는 1번 수직격자에서 505.9m/s, 2번 수직격자에서 39.4m/s, 3번 수직격자에서

22.1m/s, 4번 수직격자에서 37.4m/s, 5번 수직격자에서 29.5m/s, 6번 수직격자에서 236.8m/s, 7번 수직격자에서 37.4m/s, 8번 수직격자에서 59.2m/s, 9번 수직격자에서 45.0m/s, 10번 수직격자에서 59.3m/s로서 그림 5에 나타나 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 최근에까지 이루어진 실험 및 연구논문에 대한 동향을 정리하였으며 수평 단면 및 수직단면에서 해양음향 토모그래피에 적용될 수 있는 역산알고리즘을 문헌조사 및 수치실험을 통하여 요약, 정립하고 시뮬레이션을 통하여 역산알고리즘의 타당성을 검증하였다.

해양음향 토모그래피를 수해하기 위해 전달모델의 설정, 역산방법의 설정, 그리고 어떻게 획득한 자료를 분석할것인지를 결정하는 것이 대단히 중요하다. 앞에서 거론한 연구논문을 살펴보면 음선의 전달시간, 모드의 전달시간 및 위상정보, Peaks의 추적등 여러 가지가 도입되어 해양 관측실험 및 수치실험에 적용되고 있는 상태이다. 그러므로 충분히 이전의 논문에 대한 동향을 살펴보고 가장 적당한 방법을 모색해야 할 것이다.

본 논문에서는 여러 가지 해양음향 토모그래피의 방법중에서 통상적으로 적용하는 음선을 이용한 해양음향 토모그래피 수치실험을 시도하였으며, 이를 위해서 forward model로서 음선추적프로그램을 개발하였고, 개발된 음선추적프로그램을 통해 얻은 고유음선경로의 궤적 길이와 전달시간을 이용하여 선형화 가정에 의한 역문제를 최소자승법에 근거로 연립방정식을 형성하고, 방정식의 해를 구하는 방법으로 SVD기법의 역산알고리즘을 사용하여 수평 및 수직단면에서 수치실험 및 검증을 시도하였다.

이러한 방법으로 역추정을 한 결과 수평단면에서의 실제해양을 역추정시 직선경로로 가정한 경로길이와 전달시간을 사용하면 오차가 발생하므로 고유음선의 실제 경로길이와 전달시간을 사용한다면 오차를 줄일 수 있을 것이다. 수직단면에서는 고유음선의 전환점의 위치와 고유음선의 수에 의해서 정확한 역산이 이루어질 수 있다는 것을 알 수 있었다.

따라서, 본 논문의 수치실험 결과를 종합하면 해양음향 토모그래피는 반사파를 이용하는 지층탐사등과는 달리 굴절 전달된 파를 이용하기 때문에 그 특성상, 역산을 위해서는 상대적으로 관측자료(본 논문에서는 수치실험결과의 입력)의 정확성이 매우 중요하다는 결론을 얻게 되었다. 또한, 수평면에서 역추정시는 직선경로로 가정한 전달경로와 전달시간은 오차를 유발한다는 것을 알 수 있었고 수직면에서 역추정시에는 격자내에서 음선 굴절효과를 고려한 음선의 궤적길이와 전달시간을 이용하여 역추정을 시도하였지만 전환점이 존재하는 격자에서 오차가 크게 나타나므로 고유음선경로와 고유음선의 수에 따라 역추정 결과가 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

그러므로 향후 고유음선의 선정에 있어서의 경험에 의한 수신되는 음선의 도달수심의 오

차범위를 결정해야 되고, 좀 더 정확한 음선경로의 길이와 전달시간을 얻을 수 있는 forward model을 개발해야 되며, 거리의존 환경에서 역산시 오차를 줄일수 있는 방법을 모색해야 할 것이다.

또한 아직까지 국내에서의 해양음향 토모그래피는 초창기의 기술적인 접근에 머무르고 있는 상태에서 여러 실험 및 연구동향을 바탕으로 가상적인 수치실험 및 실제 해양에서 실험을 추진하기 위해서는 여러 가지 토모그래피의 방법을 시도해보고 가장 타당한 방법을 모색해 나가야 하며 공학 및 음향학적인 기술적 접근과 해석을 설정하고 결과를 해석하는 해양학적 접근 그리고 계산과정에 대한 수학적 접근 등이 골고루 수행되어 나가야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] 이재학, 김재수, 해양음향 토모그래피와 역문제, 한국음향학회지, 13, 86-93, 1993.
- [2] W. Munk, and C. Wunsch, Ocean acoustic tomography : a scheme for large monitoring, *Deep-Sea Res*, 26A, 123-161, 1979.
- [3] M. Longuet-Higgins, On triangular tomography, *Dyn..Atm..Oce*, 7, 33-46, 1982
- [4] W. Munk, and C. Wunsch, Up-down resolution in ocean acousitic tomography, *Deep-Sea Res*, 29, 1415-1436, 1982.
- [5] C. W. Spofford, and A. P. Stokes, An iterative perturbation approach for ocean acoustic tomography, *J. Acoust, Soc. Am*, 75, 1443-1450, 1984.
- [6] J. L. Spiesberger, Ocean acoustic tomography : travel time biases, *J. Acoust, Soc. Am*, 77, 1385-1398, 1985.
- [7] D. R. Palmer, L. M. Lawson, D. A. Seem, and Y. H. Daneshzadeh, Ray path identification and acoustic tomography in the Straits of Florida, *J. Geophys. Res*, 90, 4977-4989, 1985.
- [8] P.Malanotte-Rizzoli, Long-range inversion for ocean acoustic tomography, *J. Geophys. Res*, 90, 7098-7116, 1985.
- [9] B. D. Cornelle, Simulation of acoustic tomography array performance with untracked or drifting sources and receiver, *J. Geophys. Res*, 90, 9079-9088, 1985.
- [10] F. Gaillard, Ocean acoustic tomography with moving sources or receivers, *J. Geophys. Res*, 90, 11891-11898, 1985.
- [11] B. D. Cornulle, and B. M. Howe, High spatial resolution in vertical slice ocean acoustic tomography, *J. Geophys. Res*, 92, 11680-11692, 1987.
- [12] F. Gaillard, and B. D. Cornuelle, Improvement of tomographic maps by using surface-reflected rays numerical integration techniques, *J. Phys. Oceanog*, 17, 1458-1467, 1987.

- [13] B. M. Howe, P. F. Worcester, and R. C. Spindel, Ocean acoustic tomography: Mesoscale velocity, *J. Geophys. Res.*, 92, 3785-3805, 1987.
- [14] C. Wunsch, Acoustic tomography by Hamiltonian methods including the adiabatic approximation, *Rev. Geophys.*, 25, 41-53, 1987.
- [15] L. Nghiem-Phu, and H. A. DeFerrai, Numerical modeling of acoustic tomography in the Straits of Florida : Sensitivity to bathymetry, *J. Acoust. Soc. Am.*, 81, 1385-1398, 1987.
- [16] Y. A. Paola. Malanotte-Rizzoli, B. D. Cornulle, J. L. Spiesberger, and R. L. Spindel, The 1984 bottom-mounted Gulf Stream tomographic experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85, 1958-1966, 1989.
- [17] J. H. Miller, J. F. Lynch, and C. Chin-sang, Estimation of sea surface spectra using acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 86, 326-345, 1989.
- [18] J. L. Spiesberger, Remote sensing of western boundary currents using acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 86, 346-351, 1989.
- [19] E. C. Shang, Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85, 1531-1537, 1989.
- [20] A. Tolstoy, O. Diachok, and L. N. Frazer, Acoustic tomography via matched field processing, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, 1119-1127, 1991.
- [21] E. C. Shang, and Y. Y. Wang, On possibility of monitoring El Nino by using modal ocean acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 91, 136-140, 1992.
- [22] A. Tolstoy, Linearization of the matched field processing approach to acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 91, 781-787, 1992.
- [23] R. Hippenstiel, E. Chaulk, and, J. H. Miller, An adaptive tracker for partially resolved acoustic arrivals with application to ocean acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, 1759-1762, 1992.
- [24] V. V. Goncharov, and A. G. Voronovich, An experiment on matched-field acoustic tomography with continuous wave signals in the Norway Sea, *J. Acoust. Soc. Am.*, 93, 1873-1881, 1993.
- [25] J. F. Lynch, H. X. Wu, R. Pawlowicz, P. F. Worcester, R. E. Keenan, H. C. Graber, O. M. Johannessen, P. Wadhams, and R. A. Shuchman, Ambient noise measurement in the *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 1015-1033, 1993.
- [26] J. Goulinang, J. F. Lynch, R. Pawlowicz, and P. Wadhams, Effects of Sea ice cover on acoustic ray travel time with application to the Greenland Sea tomography experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 1044-1057, 1993.
- [27] R. Michael Jones, E. C. Shang, and T. M. Georges, Nonperturbative modal

- tomography inversion Part I theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 2296-2302, 1993.
- [28] J. Guoliang, J. F. Lynch, R. Pawlowicz, and P. Worcester, Acoustic scattering losses in the Greenland Sea marginal ice zone during the 1988-1989 tomography experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 96, 3045-3053, 1994.
- [29] R. M. Jones, B. M. Howe, J. A. Mercer, R. C. Spindel, and T. M. Georges, Nonperturbative ocean acoustic tomography inversion of 1000km pulse propagation in the Pacific ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 96, 3054-3063, 1994.
- [30] G. A. Athanassoulis, and E. K. Skarsoulis, Arrival time perturbations of broadband tomographic signals due to sound-speed disturbances. A wave-theoretic approach, *J. Acoust. Soc. Am.*, 97, 3575-3588, 1995.
- [31] A. G. Voronovich, and E. C. Shang, A note on horizontal-refraction-modal tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 2708-2716, 1995.
- [32] E. C. Shang, Y. Y. Wang, and R. M. Jones, Nonperturbative modal tomography inversion Part II, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 560-567, 1995.
- [33] C. Ching-sang, J. H. Miller, and J. F. Lynch, Forward coupled-mode propagation modeling for coastal acoustic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, 99, 793-802, 1996.
- [34] G. Guoliang, J. F. Lynch, C. Ching-sang, and J. H. Miller, *J. Acoust. Soc. Am.*, 100, 193-205, 1996.
- [35] E. K. Skarsoulis, G. A. Athanassoulis, and U. Send, Ocean acoustic tomography based on peak arrivals, *J. Acoust. Soc. Am.*, 100, 797-813, 1996.
- [36] A. K. Robert, Ocean Acoustic Tomography: A Primer, in *Oceanic Circulation Models: Combining Data and Dynamics*, by L. T. Anderson and J. Willebrand (eds.), 141-188, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [37] W. T. Vetterling, W. H. Teukolsky, H. P. William, B. P. Flannery, Numerical Recipes in C, *Cambridge University Press*, 1992.
- [38] N. R. Draper, and H. Smith, Applied Regression Analysis, 2nd ed. Wiley, New York, 1981.
- [39] W. Menke, Geophysical Data Analysis : Discrete inverse theory, *Academic Press*, 1984.
- [39] A. Tarantola, A., Inverse Problem Theory: Methods for data fitting and model parameter estimation, *Elsevier*, 1987
- [40] G. H Golub, C. F. van Loan, Matrix computations, *The Johns Hopkins Univ. Press*, 1983

