

해양에서의 수평적 수온변화가 음파전달에 미치는 영향에 대한 기초적 연구

하 강 열 · 김 무 준*

*부경대학교 물리학과

(1996년 8월 24일 접수)

A Basic Study for the Propagation Characteristics Due to the Horizontal Water Temperature Variations in the Sea

Kang - Lyeol HA and Moo - Joon KIM*

*Pukyong National University

(Received August 24, 1996)

Abstract

In this paper, the propagation characteristics due to the horizontal water temperature variations in the sea such as thermal fronts is analyzed by the ray theory. Two models for the temperature anomaly layer are chosen. One is a plane type and the other is a cylindrical type. In the plane type, the temperature increases linearly from a isothermal region to 5km with the gradient of about 2°C/km, and decreases with the same gradient in next 5km. In the cylindrical type, water temperature increases only with the same gradient from a half cylindrical thermal boundary surface. The result showed that the gradient of acoustic rays decreases in the temperature increasing region and vice versa in temperature decreasing region. And, the transmission loss due to the temperature variation was less than 0.2dB in the plane type model as well as in the cylindrical one.

서 론

최근, 해양에서의 음파전달을 연구하는 수중음향분야에 있어서는 거리종속(Range - dependent)적인 해양환경하에서 음전달손실의 산출이나 음장의 해석이 활발히 이루어지고 있는데, 그러한 거리종속적인 파라미터의 하나로서 해류나 와동류에 의한 수온전선이 자주 등장하고 있다¹⁻³⁾. 수온전선은 해수의 수평적 수온분포에 급격한 변화를 일으키는 해역이기는 하나, 거리에 대한 수온의 변화도도가 수직적 수온분포에 비하여 매우 작다. 따

라서, 거리비종속(Range - independent)^{4,5)} 해양환경에 익숙해 있던 종래의 연구자들에 의한 예측으로는 음파의 전파에 미치는 수온전선의 영향은 무시될 수 있을 정도로 미약할 것으로 생각되어져 왔다. 그러나, 최근의 Heathershaw 등의 연구⁶⁾에 의하면 수온전선의 존재가 음파의 전달손실에 미치는 영향이 예상외로 큰 것으로 보고되고 있어, 그 연구 결과에 대한 깊은 관심을 불러 일으키고 있다. 하지만, 그의 연구는 수면 및 저면의 경계조건을 비롯한 복잡한 해역환경을 고려한 거리종속 수치모델에 의한 해석에 의존하고 있기 때문에 그 결

과가 수온전선에서의 순수한 수평적 수온변화만에 의한 것인지, 다른 영향이 복합적으로 결합된 것인지는 분명하지 않다.

본 연구는 해양에서의 음전달에 있어서 순수한 수평적 수온변화가 음선경로 및 전달손실에 미치는 영향을 구명하기 위하여 수행된 것이다. 여기서는, 수온전선 해역을 가정한 두가지의 단순한 형태의 2차원 수온변화층모델을 설정한 다음, 음선이론(Ray Theory)^{7,8)}을 이용하여 점 음원에서 방사된 음파의 음선경로가 수온변화 영역에서 어떻게 변하는가를 보이고, 그 변화에 따른 전달손실을 구함으로써 수온변화가 음파전달에 미치는 영향을 기초적으로 검토한 결과를 보고한다.

수온변화층모델 설정

해양에서의 수온전선의 형태는 매우 복잡 다양하다. 동한난류에 의해 형성되는 한국 동해의 수온전선의 경우, 동한난류의 주류가 울진 이북까지 지속되는 경우가 많기 때문에 그 이남, 특히 영일만 외해의 연안쪽에 강하게 형성되는 수온전선은 일부 직선적인 모양을 나타내기도 하나 대부분 해류의 사행으로 인한 곡선형이 된다⁹⁾. 또한, 그 전선은 하계에 강하게 형성되며 전선의 최소폭은 5~15km이고, 거리에 대한 최대변화율은 1.6°C/km 정도인 것으로 보고되고 있다¹⁰⁾.

수온전선의 순수한 수평적 수온변화가 음파의 전파에 미치는 영향을 파악하는데 목적을 둔 본 연구에서는 수온전선의 형태를 Fig. 1과 같이 두가지의 단순한 형태의 수온변화 수층으로 가정하였다. Fig. 1(a)는 폭이 좁은 해류 등에 의한 수온전선의 형태를 모델링한 것으로, 수온이 수심방향으로는 일정하고 음파가 진행하는 방향으로만 변화하는 수층, 즉, 등수온면이 평면인 경우를 나타낸다. 그림에서 음원으로부터 수평거리 y_i 까지(영역 I)는 수온이 일정하고(굴절율 : n_0), y_i 에서 y_μ 까지(영역 II)는 수온이 선형적으로 증가하며, y_μ 에서 y_f 까지(영역 III)는 선형적으로 감소하여 y_f 이후(영역 IV)는 영역 I과 같이 다시 수온이 일정하게 되는 것을 나타낸다. 이것을 굴절율로 나타내면 그림에서와 같이 음원에서 y_i 까지는 n_0 로 일정하다가 y_μ 에

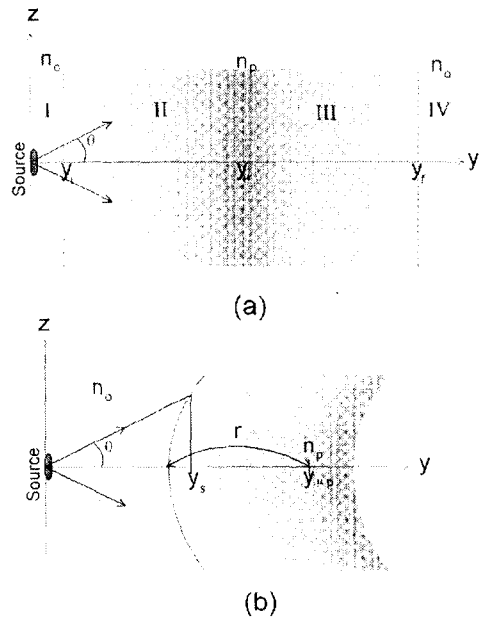


Fig. 1. Two models for the temperature anomaly layer.

- (a) Plane type
- (b) Cylindrical type

서는 최대치인 n_p 가 되고, 다시 감소하여 y_f 이후의 영역에서는 n_0 로 일정함을 나타내고 있다.

Fig. 1(b)는 규모가 큰 와동류나 사행해류에 의한 수온전선의 형태를 모델링한 것으로, 등수온면이 음원으로부터 y_μ 떨어진 점에 중심을 갖는 곡률 반경 r 인 원통면이며, 그 원통면을 경계로 왼쪽은 등수온층, 오른쪽은 y 방향으로 진행할수록 수온이 선형적으로 증가하는 수층을 나타낸다.

평면형 및 원통형 경계의 각 경우에 있어서의 음원으로부터의 음파의 진행방향을 θ 로 나타내었는데, 원통형 경계의 경우 경계면에서의 입사각은 r 및 y 에 따라 달라진다.

음선이론의 적용⁷⁾

1. 음선경로와 전달손실

해양에 있어서 소진폭의 음향신호에 대하여는 다음과 같은 선형 파동방정식이 성립한다.

$$\nabla^2 \psi(t, \mathbf{r}) - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi(t, \mathbf{r}) = 0 \quad (1)$$

여기서, $c(\mathbf{r})$ 는 음속, $\psi(t, \mathbf{r})$ 는 속도포텐셜을 나타낸다. $\psi(t, \mathbf{r})$ 가 시간에 대하여 정현적인 변화를 한다고 가정하여,

$$\psi(t, \mathbf{r}) = \phi(\mathbf{r}) \exp(j\omega t) \quad (2)$$

로 두면, 다음과 같은 Helmholtz 방정식을 얻게 된다.

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{r}) - k^2(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}) = 0 \quad (3)$$

여기서 $k(\mathbf{r})$ 은 파수이다. 음선이론에서는 (3)식의 해를 다음과 같은 형태로 둔다.

$$\phi(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) \exp[-jk_0 W(\mathbf{r})] \quad (4)$$

여기서, $a(\mathbf{r})$ 는 진폭함수, k_0 는 기준파수이며, $W(\mathbf{r})$ 은 위상함수로서,

$$W(\mathbf{r}) = \int_{r'} n(\mathbf{r}) ds \quad (5)$$

로 주어진다. 단, $n(\mathbf{r})$ 은 굴절율로서 기준음속 c_0 와 r 위치에서의 음속 $c(\mathbf{r})$ 에 의해 $n(\mathbf{r}) = c_0/c(\mathbf{r})$ 로 주어진다. 또한, ds 는 음선경로에 따른 미소거리이다. 한편, (5)식의 구배는 다음과 같이 된다.

$$\nabla W(\mathbf{r}) = n(\mathbf{r}) \hat{n}(\mathbf{r}) \quad (6)$$

여기서, $\hat{n}(\mathbf{r})$ 은

$$\hat{n}(\mathbf{r}) = \frac{dx}{ds} \hat{x} + \frac{dy}{ds} \hat{y} + \frac{dz}{ds} \hat{z} \quad (7)$$

인 단위벡터를 나타낸다. 이로부터 파수벡터 $\mathbf{k}(\mathbf{r})$ 은 위치 \mathbf{r} 에서의 파수 $k(\mathbf{r})$ 와 $\hat{n}(\mathbf{r})$ 에 의해

$$\begin{aligned} \mathbf{k}(\mathbf{r}) &= k(\mathbf{r}) \hat{n}(\mathbf{r}) \\ &= k_0 \nabla W(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (8)$$

이 되며, 일반적으로 기준음속 및 기준파수는 음원 위치의 음속과 파수를 적용한다.

이상에서, 주어진 해양환경의 수온분포로부터 굴절률의 공간적 분포를 알게 되면 (8)식으로부터 파수벡터를 계산할 수 있게 되고, 이 파수벡터의 좌표축 성분으로부터 음선의 진행방향, 즉, 음선경로를 구할 수 있게 된다.

한편, 한쌍의 음선이 음원으로부터 미소한 연직 각 $\Delta\theta$ 의 차로 떨어져 갈 때, 음원으로부터 거리 r 인 지점에서의 전달손실은 다음과 같이 구해진다¹⁾.

$$TL = 10 \log \left(\frac{r \Delta h}{\Delta \theta} \frac{c(\mathbf{r})}{c_0} \right) [\text{dB}] \quad (9)$$

여기서, Δh 는 \mathbf{r} 지점에서의 두 음선간의 연직거리이다.

2. 평면형 경계에서의 적용

1) 영역 I ($0 \leq y < y_i$) 및 영역 IV ($y_f \leq y$)

이 영역은 수온의 변화가 없는 영역이므로 음선은 왜곡없이 진행한다. 따라서 y 축에 대하여 θ_i 의 각도로 전파되는 음선에 대하여는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$z = \Gamma_i y, \quad \text{단, } \Gamma_i = \tan \theta_i \quad (10)$$

2) 영역 II ($y_i \leq y < y_\mu$)

이 영역에서는 수온이 거리에 따라 선형적으로 증가하므로 거리 y 에 대한 굴절율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(y) = \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_i} y - \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_i} y_i + 1 \quad (11)$$

단, n_p 는 $y = y_\mu$ 에서의 굴절율이다. (5)식에 있어서 ds 는 음선경로의 미소 진행분으로 2차원 영역에 대하여 표시하면 $ds = \sqrt{(dy)^2 + (dz)^2}$ 과 같이 나타낼 수 있으므로 (10)식의 관계를 이용하여 위상함수 W 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W(y, z) &= \int \left[\frac{n_p - 1}{y_\mu - y_i} y - \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_i} y_i + 1 \right] \sqrt{1 + \Gamma_i^2} dy \\ &= \sqrt{1 + \Gamma_i^2} \left[C_i \frac{y^2}{2} + (1 - D_i) y \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{단, } C_i = \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_i}, \quad D_i = \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_i} y_i$$

또한, (8)식의 관계로부터 이 영역에서의 파수벡터의 y 성분 yy_1 과 z 성분 zz_1 은 다음과 같이 각각 구해진다.

$$yy_1 = \frac{C_i}{2} \sqrt{1+\Gamma_i^2} y + \frac{C_i}{2} y - D_i + 1$$

$$zz_1 = \Gamma_i \frac{C_i}{2} \frac{y - D_i + 1}{\sqrt{1+\Gamma_i^2}} \quad (13)$$

이 식으로부터 각 지점에 대한 음선진행 경로의 기울기 zz_1/yy_1 을 구할 수 있으므로 음선 경로를 표현하는 함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$z = \frac{zz_1}{yy_1} (y - y_i) \quad (14)$$

3) 영역 III ($y_\mu \leq y < y_f$)

이 영역에서는 선형적으로 수온이 감소하므로 y 에 대한 굴절률의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(y) = \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_f} y + n_p - \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_f} y_\mu \quad (15)$$

$$\text{단, } yy_2 = \frac{C_f}{2} \sqrt{1+\Gamma_i^2} y + \frac{C_f}{2} y + n_p - D_f$$

$$zz_2 = \Gamma_i \frac{C_f}{2} \frac{y + n_p - D_f}{\sqrt{1+\Gamma_i^2}}$$

$$C_f = \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_f}, \quad D_f = \frac{n_p - 1}{y_\mu - y_f} y_\mu$$

영역 II와 동일한 방법으로 음선진행 경로의 기울기 zz_2/yy_2 를 구할 수 있으므로, 음선 경로를 표현하는 함수는 다음과 같이 된다.

$$z = \frac{zz_2}{yy_2} (y - y_\mu) \quad (16)$$

따라서 식 (10), (14) 및 (16)으로부터 2차원 모델화한 전영역에 대한 음선의 경로가 구해진다.

3. 원통형 경계에서의 적용

수온 변화층과의 경계가 원통형인 경우에 대하여는 음원으로부터의 방사각도에 따라 수온 변화층까지의 거리가 변하므로 이에 대한 고려를 해주어야 한다. 즉, Fig. 1(b)에서

$$z^2 + (y - y_{\mu p})^2 = r^2 \quad (17)$$

가 되어 음원으로부터 각도 θ 로 방사된 음선이 경계면에 도달하는 거리 y_s 는 다음과 같이 계산된다.

$$y_s = \frac{y_{\mu p} - \sqrt{y_{\mu p}^2 - (\Gamma_i^2 + 1)(y_{\mu p}^2 - r^2)}}{\Gamma_i^2 + 1} \quad (18)$$

수온변화층에서의 수온은 상술한 바와 같이 경계면으로부터 선형적인 증가를 갖는다고 가정하였으므로 음선경로는 (14)식과 동일한 형태로 표현되나, 방사각도에 따른 경계점의 변화를 고려하기 위해 그 식에 있어서의 y_i 는 y_s 로, y_μ 는 $y_s + r$ 로 두었다. 이에 의해 음선경로를 나타내는 식은

$$z = \frac{zz_s}{yy_s} (y - y_s) + \Gamma_i y_s, \quad (y_s \leq y < y_s + r) \quad (19)$$

$$\text{단, } yy_s = \frac{C_s}{2} \sqrt{1+\Gamma_i^2} y + \frac{C_s}{2} y + 1 - D_s$$

$$zz_s = \Gamma_i \frac{C_s}{2} \frac{y + 1 - D_s}{\sqrt{1+\Gamma_i^2}}$$

$$C_s = \frac{n_p - 1}{r}, \quad D_s = \frac{n_p - 1}{r} y_s$$

이 된다.

한편, 평면형 및 원통형의 각 경우에 있어서 전달손실은 (9)식으로부터 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$TL = 10 \log \left[\frac{y[z(y, \Gamma_i) - z(y, \Gamma_{i-1})]}{\theta_i - \theta_{i-1}} \frac{1}{n(y)} \right] [dB] \quad (20)$$

수치해석 결과 및 고찰

1. 평면형 경계

음원으로부터 1km지점에 평면형의 수온변화층이 존재하고, 그 변화층의 폭이 10km인 경우, 즉, Fig. 1(a)에서 $y_i = 1km$, $y_\mu = 6km$, $y_f = 11km$ 인 경우에 대한 수치해석을 행하였다. 한국 동남해의 경우, 수온 변화경도의 최대값은 $2^\circ C/km$ 이내로 불

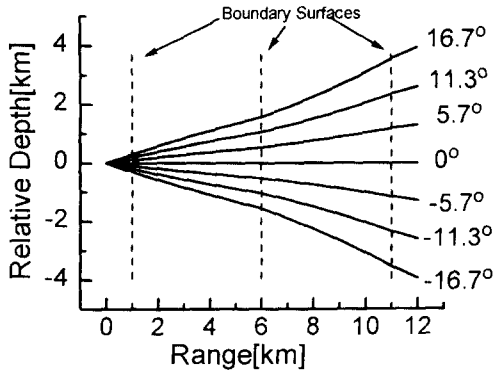


Fig. 2. Acoustic ray path for plane type temperature anomaly layer($n_p=1.32$).

수 있고⁹⁾, 이 경우 굴절율은 $n_p=1.032$ 가 된다. 그러나, 여기서는 음선변화의 양상을 보다 쉽게 파악할 수 있도록 비현실적이기는 하나 $n_p=1.32$ 로 가정하였을 때의 진행각도에 따른 음선경로를 Fig. 2에 나타내었다.

이 결과를 보면 수온변화가 없는 1km까지는 음원으로부터 방사된 방향을 그대로 유지하는 직선적인 경로를 보이나, 그 이후 수온이 증가하는 영역인 6km까지는 진행거리가 증가함에 따라 음선경로의 기울기가 점차 감소하다가 수온이 감소하는 11km까지는 다시 기울기가 증가함을 보이고 있다. 11km이후의 영역에서는 수온의 변화가 없으므로 음원으로부터 처음 방사된 방향을 다시 유지하게 된다. 이와 같은 결과는 Snell의 법칙에 의한 예측과도 일치하고 있다.

Fig. 3은 이 경우에 대하여 전달손실을 계산한

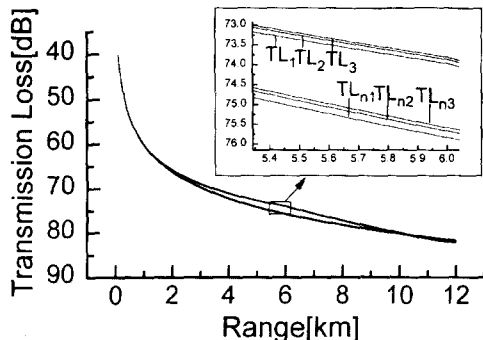


Fig. 3. Transmission losses for plane type temperature anomaly layer($n_p=1.32$).

결과와 전영역에서 수온이 영역 I과 동일할 경우에 대한 전달손실을 계산한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 TL_1 은 방사각이 0° 와 5.7° 인 한쌍의 음선으로 계산한 전달손실, TL_2 는 5.7° 와 11.7° 인 음선에 의해 계산한 전달손실, TL_3 는 11.3° 와 16.7° 인 음선에 의해 계산한 전달손실을 각각 나타내며, 첨자 n 은 각각에 대해 수온의 변화가 없는 경우를 나타낸다.

이 결과로부터 최대온도점 즉, y_{μ} 점에서 수온변화영역내에서의 전달손실은 수온변화가 없을 경우에 비해 최대편차를 보이며 약 1.5dB 작게 나타나고, 수온변화 영역을 통과한 이후는 오히려 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 수온의 변화가 있는 경우에서의 방사각의 차이에 따른 전달손실의 차이는 0.2dB 이하이며, 수온의 변화가 없는 경우는 0.5dB 정도이다. 여기서 방사각의 차이는 임의의 y 지점에서의 수심의 차에 대응하며, 수신기의 위치에 따른 전달손실의 차를 나타내는 것으로서, 그 차이가 적음을 알 수 있다.

Fig. 4는 $n_p=1.032$ 로 한국 동남해의 전형적인 수온변화층에 대한 수치계산 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면 전체적인 경향은 Fig. 3과 유사하나, 수온변화층의 존재에 따른 전달손실의 차이는 최대온도점인 y_{μ} 에서 최대편차로 관측되며 약 0.2 dB 정도로서 대단히 작으며, 수온이 일정한 경우의 수심에 따른 전달손실의 차이도 방사각도에 무관하게 약 0.2dB로서 작은 차이를 나타내고 있다.

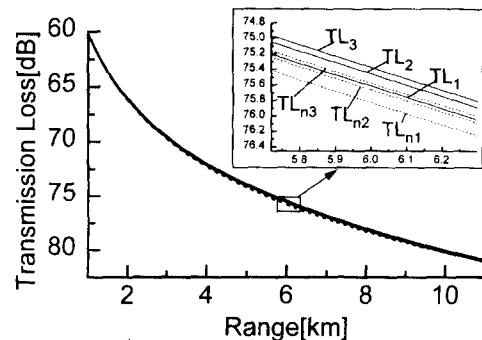


Fig. 4. Transmission losses for plane type temperature anomaly layer($n_p=1.032$).

2. 원통형 경계

음원으로부터 곡률중심까지의 거리가 2km 이고, 곡률반경이 1km 인 원통형 경계면, 즉, Fig. 2 (b)에서 $y_{mp}=2\text{km}$, $r=1\text{km}$ 에 대해 평면형의 경우와 마찬가지로 $n_p=1.32$ 일 경우의 음선경로의 산출결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림으로부터 수온 변화가 있는 영역의 경계면이 음선의 방사각도에 따라 변하므로 음선의 경로 역시 그 방사각도에 따라 변함을 알 수 있다. Fig. 6은 이 경우 있어서의 전달손실을 수온변화가 없는 경우와 함께 도시한 것이다. 여기서도 Fig. 3에서와 같이 방사각도에 따라 전달손실에 첨자를 붙여 구별하였고, 평면경계일때와 구별하기 위하여 첨자 c 를 첨가하였다. Fig. 6의 결과를 보면 원통형 경계면을 지나면서 수온이 증가하는 경우의 전달손실이 수온의 변화가 없는 경우의 전달손실보다 작아지며, 그 차는 전파거리에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 5에서 음선이 경계면을 통과한 후 다소 오프라드는 현상을 나타내는 것과 일치한다. 또한,

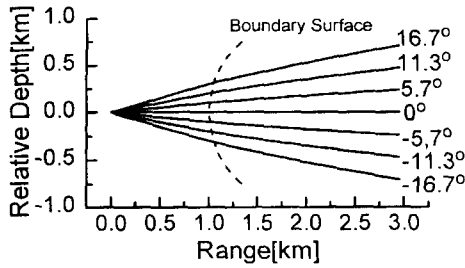


Fig. 5. Acoustic ray path for cylindrical type temperature anomaly layer ($n_p=1.32$).

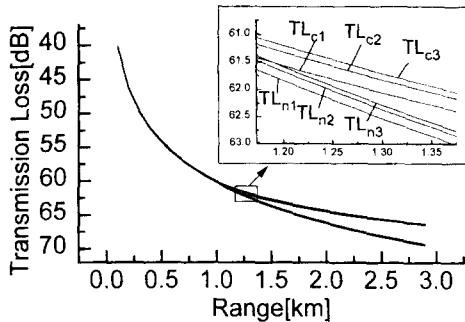


Fig. 6. Transmission losses for cylindrical type temperature anomaly layer ($n_p=1.32$).

Fig. 3의 결과와 유사하게 방사각도에 따른 차이는 수온변화가 있는 경우 최대 0.7dB 정도로서 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 실제 해양환경과 유사한 $n_p=1.032$ 일 때의 전달손실의 수치계산 결과를 나타낸다. 이로부터 수온변화층의 존재에 따른 전달손실의 차이는 거리 5.4km 에서 평면형과 마찬가지로 약 0.2dB 정도로서 대단히 작으며, 수온이 일정한 경우의 수심에 따른 전달손실의 차이도 평면형과 거의 유사함을 알 수 있다.

3. 평면형경계와 원통형경계의 비교

Fig. 8은 경계면의 형태에 따른 변화를 나타내는 것으로, Fig. 4에 나타낸 것과 동일한 수온 조건하에서 경계면이 평면일 때와 원통형일 때를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서는 경계면의 오른쪽 영역에서 전달손실이 일정한 차이를 나타내고 있으므로 1.25km 에서 1.40km 의 국부적인 영역만을

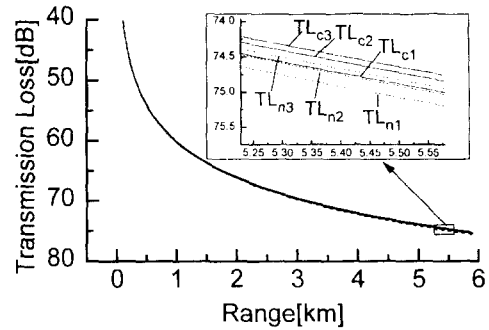


Fig. 7. Transmission losses for cylindrical type temperature anomaly layer ($n_p=1.032$).

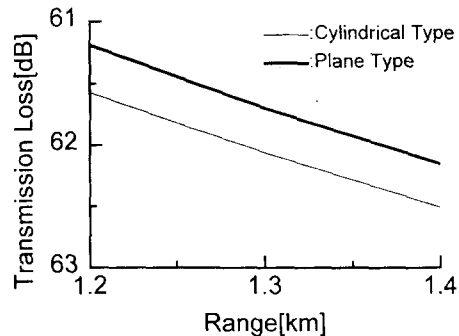


Fig. 8. Effects of two type of temperature boundaries on transmission loss.

나타내었는데, 이때 계산에 사용한 음선은 방사각이 5.7° 와 0° 인 것이다.

이 결과를 보면 평면경계인 경우의 전달손실이 원통형의 경우에 비하여 약 $0.3dB$ 정도 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼, 원통형의 경우 방사각도가 커짐에 따라 경계면과 음선이 만나는 거리가 평면형의 경우에 비하여 멀어지기 때문에 그 만큼 인접한 음선과의 연직거리가 평면형의 경우보다 길어지기 때문인 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 해양에서의 수평적 수온변화가 음파전달에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 평면형과 원통형의 두가지 형태의 수온변화층 모델을 설정, 음선이론을 적용하여 음선경로와 전달손실을 이론적으로 해석하였다. 그 결과, 평면형경계에 있어서 수온이 선형적으로 증가하다가 다시 선형적으로 감소하는 수온변화층이 존재하는 경우, 음선경로의 기울기는 수온과는 반대로 감소하다가 증가하는 현상을 나타내고, 수온변화층 내에서의 전달손실은 수온변화가 있을 때가 수온변화가 없을 때보다 작게 나타나지만, 수온변화층을 통과한 후에는 수온변화가 없을 때가 오히려 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 여기서 설정한 평면형 및 원통형의 각 모델에 한국동남해의 수온전선을 대응시켜 계산한 결과, 수온전선에서의 순수한 수온변화가 전달손실에 미치는 영향은 음파의 방사각도에 무관하게 최대 $0.2dB$ 정도로 작은 값을 나타내었다. 또한, 평면형의 경우의 전달손실이 도달거리의 차이로 인하여 원통형에 비해 $0.3dB$ 정도 작게 나타남을 알았다.

결론적으로, 본 연구에 따르면 순수한 수온전선의 수평적 수온변화가 음파전달에 미치는 영향은 극히 미약한 것으로 나타난다. 그러나, 본 해석에서는 수면 및 저면의 영향이나 수직적 수온변화, 해수유동 등의 영향을 전혀 고려하지 않은 극히 단순한 형태의 2차원 모델을 사용하였기 때문에 금후 그러한 환경조건을 고려할 수 있는 3차원 모델 등을 사용한 해석을 통한 검증이 필요할 것으로 사료 된다.

참고문헌

- 1) W. A. Kuperman, M. B. Porter and J. S. Perkins, "Rapid computation of acoustic fields in three-dimensional ocean environments", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89(1), pp. 125 - 133, 1991.
- 2) J. Perkins, W. A. Kuperman, F. Ingenito and L. T. Fialkowski, "Modeling ambient noise in three-dimensional ocean environments", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 93(2), pp. 739 - 752, 1993.
- 3) L. Goodman, J. Oeschger and D. Szargowicz, "Oceans acoustic turbulence study - Acoustic scattering from a buoyant axisymmetric plume -", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91(6), pp. 3212 - 3227, 1992.
- 4) C. L. Pekeris, "Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 18, pp. 295 - 315, 1993.
- 5) M. A. Pedersen and D. F. Gordon, "Normal-mode theory applied to short-range propagation in an underwater acoustic surface duct", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 37, pp. 105 - 118, 1965.
- 6) A. D. Heathershaw, C. E. Mooney and S. J. Maskell, "The use of coupled ocean-acoustic models in the design of naval forecast systems", Ocean Variability & Acoustic Propagation, pp. 501 - 516, 1990.
- 7) L. Brekhovskikh and Y. Lysanov, "Fundamentals of oceans acoustics", Springer-Verlag Berlin, pp. 42 - 46, 1982.
- 8) L.J. Ziomeck, "Underwater acoustics - A linear systems theory approach -", Academic Press, Inc., pp. 208 - 245, 1985.
- 9) 한미용, "한국 동해 연안에서 발생하는 와동류의 구조와 시간적인 변화", 부산수산대학교 해양학과, 석사학위논문, 1994.
- 10) 국립수산진흥원, 해양연구소 공동연구보고서, "동해 남부해역의 열전선 분포", 1984.
- 11) R. J. Urick, "Principles of underwater sound", McGraw-Hill Book Co, 3rd Ed. pp. 99 - 196, 1983.