

단주기 내부파에 의한 저주파 음파의 전파손실 변동 추정

나영남, 심태보, 김성일
(국방과학연구소)

요 약

해양에서 내부파 (internal wave)는 수직적으로 밀도가 크게 다른 두 층의 경계면에서 생성되는데, 일반적으로 경계면은 수온약층 (thermocline)에 해당된다. 본 연구에서는 간단한 단주기(하나의 주기만을 갖는) 내부파를 가정하고 이 내부파에 의해서 야기될 수 있는 저주파 (100-400 Hz) 전파손실의 변동 정도를 모델링을 통해 추정하였다. 내부파의 파장은 1 km이고 진폭은 25 m이며 수심 50-100 m 사이에 존재하는 것으로 가정하였다. 전파손실 계산은 PE (parabolic equation) 기법을 도입한 모델을 이용하였다. 수층의 두께는 2000 m로 균일하고 퇴적층 및 기반암층의 두께는 각각 500 m로 가정하였다. 모델링 결과 단주기 내부파의 1 파장이 진행되는 동안 고정된 수신 깊이별로 20 km 거리에서 10 dB 이상의 큰 변동이 야기될 수 있음을 확인하였다. 이는 내부파 내에서 큰 굴절률 변화로 인한 음파의 산란 때문으로 볼 수 있다. 실제 해양에서는 내부파가 단주기 파동 형태로 나타나기 보다는 여러 주기의 파동이 중첩되어 나타나므로 정확한 내부파 영향을 추정하기 위해서는 보다 실제에 가까운 내부파를 모델링할 필요가 있다.

I. 서 론

해양에서 내부파 (internal wave)는 수직적으로 밀도가 크게 다른 두 층의 경계면에서 생성된다. 일반적으로 경계면은 수온이 수심에 따라 급격하게 감소하는 수온약층 (thermocline)에 해당된다. 내부파의 크기는 수평적으로 100 m-10 km, 수직적으로 1-100 m 범위이며, 그 주기는 10 분에서 1 일까지 될 수 있다[1]. 내부파는 밀도 경도와 Coriolis 힘에서 기인된 복원력 때문에 발생하므로 그 주파수 스펙트럼은 관성 주파수 (inertial frequency)과 부력 주파수 (buoyancy or Brunt Vaisala frequency)로 제한된다. 내부파는 수중에서 음파가 전파되면서 산란을 일으키게 하는 요인중의 하나인데, 특히 거의 수평으로 전파되는 음선인 경우에는 진폭과 위상에 있어서 매우 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2-4].

한국 동해에는 여름철에 표층으로부터 수심 100m 이내에 강한 수온약층이 빈번하게 형성

되므로 내부파가 충분히 존재할 것으로 여겨진다. 그러나 현재까지 동해에서 내부파를 관측한 예가 거의 없으며, 따라서 내부파에 의한 수중 음파 에너지의 변화 정도를 추정하기가 어려웠다.

본 연구에서는 한국 동해에서 여름철에 나타날 수 있는 전형적인 해양자료를 토대로 간단한 단주기 (하나의 주기를 갖는) 내부파를 가정한 뒤, 이 내부파에 의해서 야기될 수 있는 전파손실의 변동을 추정하였다. 즉, 전형적인 내부파 방정식을 유도하고 동해에서 가능한 내부파의 특성을 가정한 뒤 내부파의 한 주기 동안 굴절에 의해서 변동될 수 있는 음파의 전파손실 정도를 추정하였다. 내부파의 주기는 고정시키지 않고 다만 1 파장을 8 등분하여 시간으로 대체하였다. 사용 주파수는 100 Hz와 400 Hz이다.

II. 선형 내부파 방정식

해수의 밀도를 ρ , 유체의 속도를 \vec{u} , 압력을 p 라 하면, 운동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho g \hat{k}, \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (3)$$

위에서 첫번째 식은 Newton의 제 2 법칙을 나타내고 두번째 식은 연속 방정식이며, 세번째 식은 비압축성 조건을 나타낸다. 밀도와 압력중 시간적으로 변하는 성분을 각각 ρ', p' 라 하면 전체적인 양은 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p = p_0 + p', \quad \rho = \rho_0 + \rho'. \quad (4)$$

식 (1)과 (2)에서 비선형항을 무시하고 운동 방정식을 수평성분과 수직성분으로 나누어 쓰면 다음과 같다.

$$\rho_0 \frac{\partial u_H}{\partial t} = -\nabla_H p', \quad \rho \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + \rho' g, \quad (5)$$

$$\nabla_H \cdot \vec{u}_H + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + w \frac{\partial \rho_0}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

여기에서 H 는 수평성분임을 표시한다.

속도의 평면파 형태의 해를 다음과 같이 가정하기로 한다.

$$w = W(z)e^{i(kx - \omega t)}, \quad \vec{u}_H = \vec{U}_H(z)e^{i(kx - \omega t)}. \quad (8)$$

식 (5)-(7)에서 u 외의 다른 변수를 소거하면 다음과 같이 $W(z)$ 에 대한 2차 미분 방정식이 얻어진다.

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \left(\frac{n^2(z)}{\omega^2} - 1 \right) k^2 W = \frac{n^2(z)}{g} \frac{dW}{dz}. \quad (9)$$

여기에서 $n^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}$ 이다. n 은 부력 주파수로서 전형적으로 표층 근처에서 3 cph (cycle per hour) 정도이고 해저면 근처에서 0.2 cph 정도이다[3]. n 의 값이 실수일 경우에만 해서 유체는 정압적으로 안정하다.

k_V 를 파수 (wave number) k 의 수직성분이라 하면 식 (9)의 오른쪽 항과 왼쪽 첫째 항에 대한 크기의 비교를 다음과 같이 할 수 있다. 즉,

$$\left[n^2(z)/g \right] \frac{dW}{dz} / \frac{d^2 W}{dz^2} \approx n^2 / g k_V \leq 4 \cdot 10^{-4} \quad (10)$$

여기에서 $k_V \sim \nabla_V = \frac{\partial}{\partial z} \sim 1/H$ 이므로,

$k_V = 1 \text{ km}^{-1}$ 를 대입하고 $n = 1 \text{ cph} = 3600 \text{ s}^{-1}$ 을 대입하였다. 식 (10)의 결과에 따라 식 (9)에서 오른쪽 항을 무시하고 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \left(\frac{n^2(z)}{\omega^2} - 1 \right) k^2 W = 0. \quad (11)$$

그리고 지구 자전에 의한 관성 성분까지 고려하면 다음과 같이 수정된 방정식으로 나타낼 수 있다[5].

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \left(\frac{n^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - \omega_i^2} \right) k^2 W = 0. \quad (12)$$

여기에서 ω_i 는 지구 자전에 해당하는 관성 주파수로서 $2\Omega \sin \phi$ ($\phi =$ 위도, $\Omega =$ 지구 각속도)로 주어진다. 위도 30° 인 경우 $\omega_i = 1/24 \text{ cph}$ 이다.

방정식 (12)는 내부파의 주파수가 관성 주파수보다 큰 경우 ($\omega > \omega_i$)의 해에 대해서만 의미가 있다. 식 (12)를 적분하면 내부파의 변위 ξ 에 대한 방정식을 얻을 수 있다. 만약 부력 주파수를 $n(z) = n_0 e^{z/B}$ (B 는 상수)의 형태로 가정할 수 있다면 방정식 (12)의 해는 다음과 같이 Bessel 함수의 형태로 주어진다

$$W(k, j, z) = A Q_n(\beta), \quad a = kB(1 - \omega_i^2/\omega^2)^{-1/2}, \quad \beta = an(z)/\omega. \quad (13)$$

여기에서

$$Q_n(\beta) = J_n(\beta) - [J_n(\beta_h)/Y_n(\beta_h)] Y_n(\beta)$$

이고, J_n, Y_n 는 각각 제 1종, 제 2종 Bessel 함수이다. 모드 j 는 표층에서의 경계조건인 $Q_n[an(0)/\omega] = 0$ 으로부터 구해진다.

한편 식의 전개과정에서 무시하였던 비선형 항의 상대적인 크기는 다음과 같이 비교해 볼

수 있다. 즉, 비선형항 $\vec{u} \cdot \nabla$ 과 시간 변화항 $\frac{\partial}{\partial t}$ 의 크기들 비교하면,

$$\frac{\vec{u} \cdot \nabla}{\partial/\partial t} \sim \frac{V_x k_V}{\omega} \sim \frac{(10^{-3} ms^{-1})(10^{-3} m^{-1})}{5 \cdot 10^{-3} s^{-1}} \sim 10^{-3} \quad (14)$$

그러므로 해양에서 내부파에 대한 운동 방정식은 선형으로 충분히 가정할 수 있다.

III. 모델 입력 조건

3.1 내부파 특성

그림 1은 1993년 9월 동해에서 관측한 수온의 수직 단면도로서 여름철의 전형적인 분포이다. 그림에서 수심 20-50 m 사이에 강한 수온약층이 형성되어 있으며, 수온약층을 경계로 거의 15 °C 이상의 수온 차이가 있음을 볼 수 있다.

내부파에 의한 음파의 산란 효과를 살펴보기 위해서 내부파는 첫번째 모드만 고려하였으며, 그 특성은 파장 1 km, 진폭 10 m로 가정하였다. 수온약층 내에서 수온은 21 °C로부터 6 °C까지 1 °C 간격으로 변한다고 가정하였다. 또한 내부파의 속도를 한정시키지 않고 다만 내부파의 1 파장이 진행되는 동안의 음파 에너지의 변동 정도를 추정하고자 하였다. 내부파의 1 파장을 8 등분하였으며, 진행 방향은 음원에 향하도록 하였다. 내부파 내에서 등온선을 나타내는 수심은 다음과 같이 나타내어진다(그림 2).

$$z(n, j) = (20 + 2n) + 10 \sin(2\pi j/8), \quad (15)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, 15,$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, 160.$$

여기에서 n 은 수온약층 내에서 수직적인 수온 변화론 나타내는 index로서 $n=1$ 일때 21 °C 이고 $n=15$ 일때 6 °C이다. 또한 j 는 수평 거리 격자를 나타내는 index로서 $j=1$ 은 0.125 km, $j=160$ 은 20 km에 해당한다.

3.2 지구 음향 자료

전파손실 모델링을 수행한 해양환경은 그림 2에서 보는 바와 같이 수심 2000 m인 심해로서 퇴적층 및 기반암층의 두께는 각각 500 m

로 가정하였다. 수온은 내부파가 생성되는 수온 약층을 제외하고는 거리에 따라 일정하며 수심에 따라서만 변하도록 하였다. 내부파의 1 파장 (1 km)에서 8 개의 자료가 입력되므로 전체적으로 20 km 거리에서는 160 개의 자료가 필요하다. 내부파 1 주기 동안에 대한 모델링은 파장의 1/8 씩 천이시키면서 8 회를 수행하였다. 사용 주파수는 100 Hz와 400 Hz이며, 음원의 수심은 30, 75, 150 m이다. 모델링에 사용된 음향 모델은 PE (parabolic equation) 기법을 이용한 것이다. 전체적으로 모델링은 2 (주파수) x 3 (음원 수심) x 8 (1 파장) = 48 회를 수행하였다.

IV. 모델링 결과 및 토의

4.1 수층이 성층화된 경우와의 비교

내부파가 존재할 때 전체적으로 음파 에너지가 어떻게 산란되는지 살펴보기 위해 $t=0$ 일 때의 결과와 수층이 단순히 성층화되었을 때의 결과를 비교하였다. 성층화된 경우는 수온약층 (20-50 m)에서 수온이 21 °C로부터 6 °C까지 선형적으로 변한다고 가정한 것이다.

그림 3은 주파수 100 Hz와 400 Hz에 대한 전파손실 모델링 결과를 나타내는데, 음원의 수심은 75 m이다. 먼저 100 Hz인 경우에 수층이 단지 성층화되었을 때는 (그림 3a) 표층 부근에서 3 개의 뚜렷한 음 수렴구역을 형성한다. 그에 비해서 수층에 내부파가 존재할 경우에는 (그림 3b) 내부파에 의해서 음파의 경로가 거리에 따라 길어지는 경향이 있으며, 그 결과 15 km 이상의 거리에서 세번째 수렴구역이 분산되는 등의 분포 차이볼 보인다.

400 Hz인 경우에는 표층 부근의 수렴구역들이 합해져서 구분하기 어렵다(그림 3c,d). 100 Hz인 경우에서와 같이 수층에 내부파가 존재할 때(그림 3d) 단지 성층화되었을 때보다 음파 경로가 길어지며, 특히 15 km 이상의 거리에서 두 분포간에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

4.2 1 주기 동안의 변화 정도

내부파가 1 주기 진행한 동안에 거리별로 음파 에너지가 변하는 정도를 추정하기 위해

주기의 1/8 간격으로 8 회 모델링하였다. 모델 수행시 수층의 입력자료는 식 (15)에서 $j = 0, 1, 2, \dots, 7$ 에 해당하는 자료를 차례로 거리 $r=0$ 에 위치하도록 하였다.

그림 4는 주파수 100, 400 Hz, 음원 수심 75 m, 수신기 수심 80 m에 대한 모델링 결과로서 $t=0$ 일 경우에 대한 $t=nt/8$ ($n=1, 2, \dots, 7$)일 경우의 상대적 변화를 거리에 따라 나타낸 것이다. 100 Hz일 경우 거리 3-10 km 사이에서 5 dB 이내의 변동을 보이며, 그 이후 거의 변동이 없다가 20 km 부근에서 10 dB 이상의 큰 변동을 보인다. 그리고 대부분의 경우 거리 10 km 이내에서는 $t=0$ 에 대한 상대적인 변화가 0 dB 축을 중심으로 거의 대칭인 것을 볼 수 있는데, 이는 내부파의 1 주기 변화인 점을 감안하면 예상되는 결과이다. 그러나 10 km 이후에서는 이러한 대칭성이 보이지 않는다. 그림 3에서 거리 10 km는 대략 음파 에너지가 해저면에 반사되어 표층에 도달하기 시작하는 거리에 해당한다.

주파수 400 Hz인 경우 (그림 4b)는 100 Hz인 경우보다 거리에 따라 훨씬 큰 변동을 보인데, 10 km 이내에서도 부분적으로 10 dB 이상의 차이를 보인다. 그리고 0 dB 축을 중심으로 대칭인 거리가 불과 3 km 정도에 그치며, 그 이후에는 오히려 변동 양상이 서로 일치하는 경우가 많아진다.

그림 5는 주어진 거리에서 1 주기 동안 $t=0$ 일 경우의 전파손실에 비해서 상대적으로 변화는 양을 나타낸 것이다. 그림 4에서 살펴 보았듯이 400 Hz인 경우 10 dB 이상의 변동을 보이는 경우가 많이 있으나 거리 19.8 km, 음원 수심 75 m, 수신기 수심 30 m인 경우처럼 1 주기 동안 3 dB 내외의 작은 변동을 일으키는 경우도 있다.

V. 결론 및 토의

음향 모델링을 통해 단주기 내부파에 의해서 1 주기 동안 10 dB 이상의 큰 전파손실 변동이 야기될 수 있음을 확인하였다. 이러한 변동은 내부파가 음파의 경로를 굴절시키는 효과에 의해서 나타나며, 실제 해양에서 수 시간 단위의 소나를 운용할 때에는 중요한 교란 요인으로 작용하리라 여겨진다. 따라서 소나를 일정 시간 이상 지속적으로 운용하고자 할 경우에는

반드시 내부파에 의한 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 내부파에 의한 전파손실의 변화 정도를 추정하기 위해 가장 간단한 형태의 단주기 내부파를 가정하였다. 그러나 실제 해양에서는 내부파가 하나의 주기만을 갖는 것이 아니라 여러 주기의 파동이 합성되어 나타난다[6-7]. 그러므로 정확하게 내부파 영향을 모델링하기 위해서는 대상 해역에서의 내부파 스펙트럼 분포가 파악되어야 한다. 이를 위해서는 물론 내부파에 대한 실제 관측이 급선무이다. 동해에서 심해인 해역에서는 조석 주기와 같은 장주기 내부파는 무시할 수 있을 것으로 보이나 수심 200 m 이내 천해에서는 내부파의 에너지 스펙트럼에 매우 크게 기여할 것으로 여겨진다. 앞으로 내부파 측정과 아울러 음향 실험을 동시에 실시한다면 내부파에 의한 음파의 변동 양상을 정확히 규명할 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

1. H.B.Ali, "Oceanographic Variability in Shallow-Water Acoustics and the Dual Role of the Sea Bottom," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.18(1), 31-41, 1993.
2. Y.Desaubies, "Statistical aspects of sound propagation in the ocean," in *Adaptive Methods in Underwater Acoustics*, H.Urban, Ed., The Netherlands: Dordrecht, Reidel, 1995.
3. S. M. Flatte, R. Dashen, W. H. Munk, K. M. Watson, and F. Zachariasen Eds, "Sound Transmission Through a Fluctuating Ocean," Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
4. B.J.Uscinski, C.Macaskill, and T.E. Ewart, "Intensity fluctuations Part I: theory, Part II: comparison with the Cobb experiment," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.74, 1474-1499, 1983.
5. C.Eckart, "Hydrodynamics of the oceans and atmospheres," New York: Pergamon Press, 1960.
6. C.Garrett and W. H. Munk, "Space-time scales of internal waves," *Geophys. Fl. Dyn.*, vol.3, 225-264, 1972.
7. -----, "Space-time scales of internal waves: a progress report," *J. Geophys. Res.*, vol.80, 291-297, 1975.

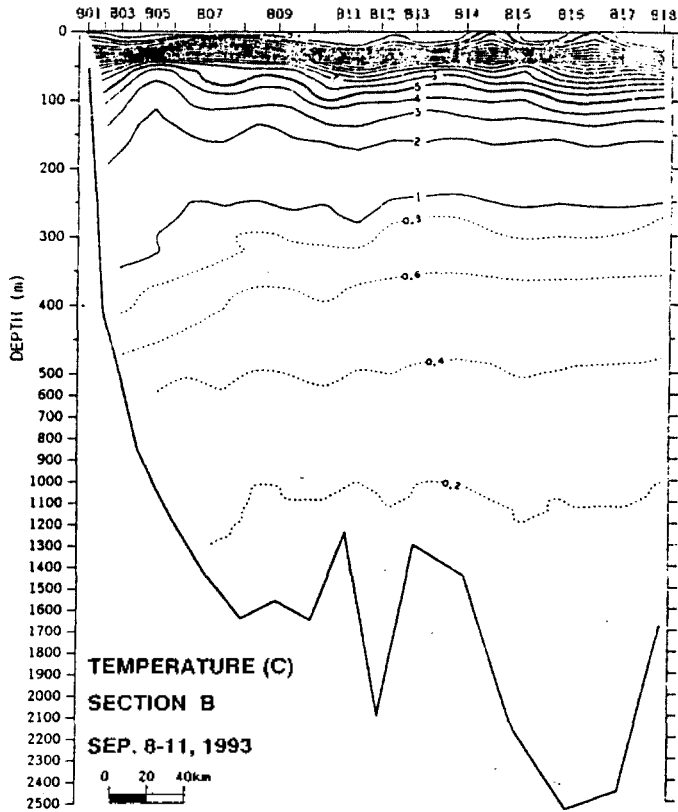


그림 1. 동해에서 1993년 9월 관측된 수온의 수직 분포
(B01: 37°45.1N, 129°00.3'E, B18: 37°44.9'N, 132°30.2'E).

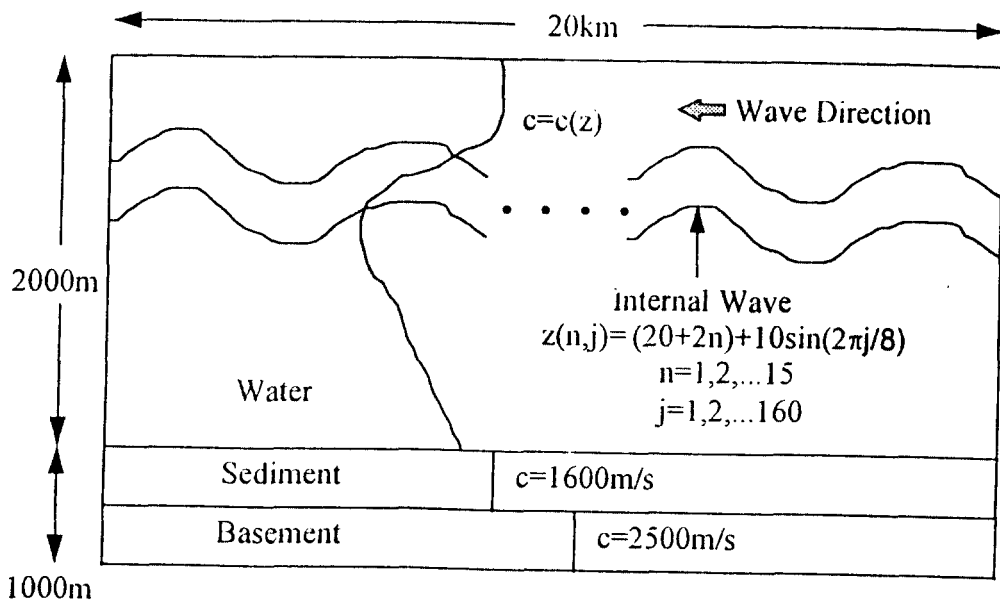
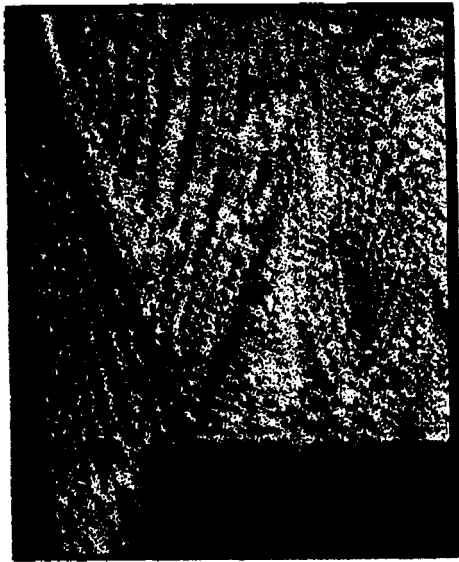


그림 2. 음향 모델 입력자료 모식도.



(a)



(b)

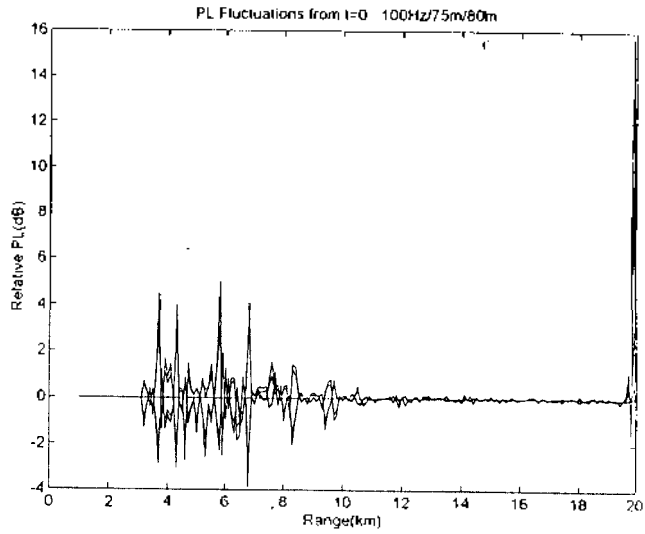


(c)

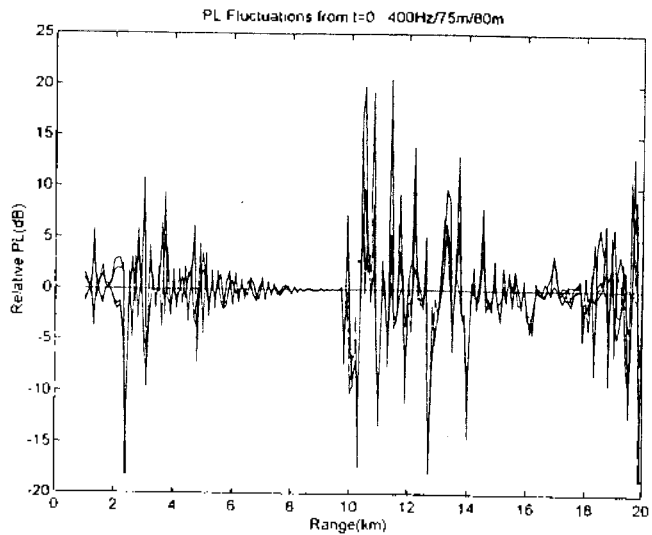


(d)

그림 3. 수층이 성층화되었을 때와 내부파가 존재할 때의 전파손실 분포 비교. (a) 100 Hz, 음원 수심 75 m, 성층화된 수층, (b) 100 Hz, 음원 수심 75 m, 내부파 존재 수층, (c) 400 Hz, 음원 수심 75 m, 성층화된 수층, (d) 400 Hz, 음원 수심 75 m, 내부파 존재 수층.



(a)



(b)

그림 4. 내부파가 1 파장 진행할 동안 $t=0$ 에 대한 전파손실의 상대적 변화. (a) 100 Hz, 음원 수심 75 m, 수신기 수심 80 m, (b) 400 Hz, 음원 수심 75 m, 수신기 수심 80 m.

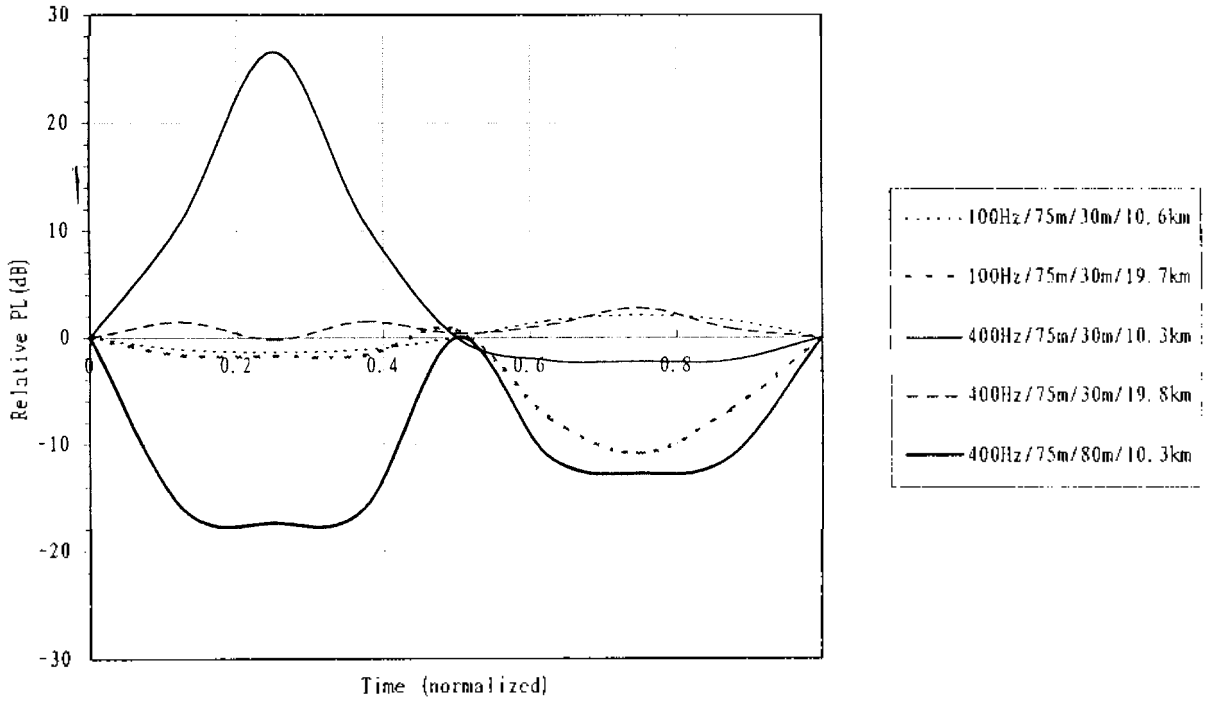


그림 5. 내부파가 1 파장 진행할 동안 일정 거리에서 $t=0$ 에 대한 전파손실의 상대적인 변화.