

BSPE 98418-0000-0

해저기인 수중음향 신호의
해양환경 변화에 따른 변형 모델링 연구

2012. 1

한 국 해 양 연 구 원

제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “해저기인 수중음향 신호의 해양환경 변화에 따른 변형 모델링 연구”
의 최종보고서로 제출합니다.

2012. 1

연구책임자 : 이성욱

참여연구원 : 이용국, 박요섭, 이신제, 유이선

요 약 문

I. 제목

해저기인 수중음향 신호의 해양환경 변화에 따른 변형 모델링 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 해저기인 수중음향 발생/전달 현상 모델링 및 신호모의/해석 기반구축
- 해저지진 관측/분석 및 지진해일 조기경보체계 설계/구축 등을 위한 수중음향 활용성 평가를 위해서는 현상에 대한 모의/해석이 가능한 모델개발이 필요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 해저에서 수중으로의 음파전달 현상 모의에 대한 기반구축 연구로서 일차적으로 수중에서의 저주파 음파전달 특성에 대한 연구를 수행하였음

IV. 연구개발결과

- 수중에서의 저주파 음파전달 특성 해석에 적합한 모드이론을 적용하여 원거리/근거리 음파전달 성분에 해당하는 정상모드/연속모드 성분을 별도로 또는 함께 고려할 수 있는 주파수영역 알고리즘을 구현하였음
- 주파수영역 모델을 수신신호의 시계열 특성을 모의할 수 있는 시간영역 모델로 확장하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 후속연구를 통해 본 연구에서는 포함되지 않은 해저에서 수중으로의 음향방출 특성에 대한 부분을 포함시켜 해저지진 분석을 위한 모델로 활용될 수 있도록 할 계획임

목 차

요약문	2
목차	3
그림 목차	4
제 1 장 서론	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황	7
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	8
제 1 절 주파수영역 수중 음파전달 모델링	8
제 2 절 시간영역 수중 음파전달 모델링	14
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	19
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	20
제 6 장 참고문헌	21

그림 목차

그림 1. 우리나라 주변 해저지진 발생위치 분포.	5
그림 2. 수중음향 측정체계 모식도.	6
그림 3. 해저기인 수중음향 발생/전달 모식도.	6
그림 4. 수중 음파전달 모식도.	8
그림 5. 음파의 접지각과 모드영역의 관계 모식도.	9
그림 6. Pekeris waveguide 환경 예.	11
그림 7. 그림 6의 환경에 대한 total 전달손실 계산 결과 1.	11
그림 8. 그림 6의 환경에 대한 성분별 전달손실 계산 결과.	12
그림 9. 그림 6의 환경에 대한 total 전달손실 계산 결과 2.	13
그림 10. 그림 6의 환경에 대한 거리-주파수 영역 전달손실 계산 결과.	14
그림 11. 시간영역 신호모의 모식도.	15
그림 12. 음원 신호 특성.	15
그림 13. 음파전달 모의 환경 및 모드 군속도.	16
그림 14. 음원과 수신기 배치 및 모드 도달시간.	16
그림 15. 수심별 모드 진폭 및 수신 신호.	17
그림 16. 거리별 수신 신호.	17

제 1 장 서론

2004년 12월에 인도네시아의 수마트라에서 발생한 재앙은 지진해일 위험의 심각성과 재난대비의 중요성을 확인시켜 주었다. 우리나라는 통상 지진 안전지대로 알려져 왔으나 한편으로는 지진활동이 증가추세에 있다는 보도도 있고 하여 국민들은 원자력 발전소가 있는 동해안의 지진해일 안전성에 대해서는 여전히 의구심을 가지고 있는 실정이다(한국해양연구원, 2009).

최근 보고된 바에 의하면 태평양 지역에서 발생한 지진해일의 87%는 진앙지가 연안으로부터 100km 이내 해역인 것으로 나타났다(Sasorova et al., 2008). 그림 1은 우리나라 주변에서의 해저지진 발생위치 분포를 나타낸 것이다. 서해와는 다르게 동해 해역에서 발생하는 해저 지진의 대부분도 육지로부터 100km 이내의 해역에서 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 보다 큰 규모의 지진이 발생할 경우 지진해일이 발생할 수 있는 여건임을 보여주는 것이라 할 수 있다.

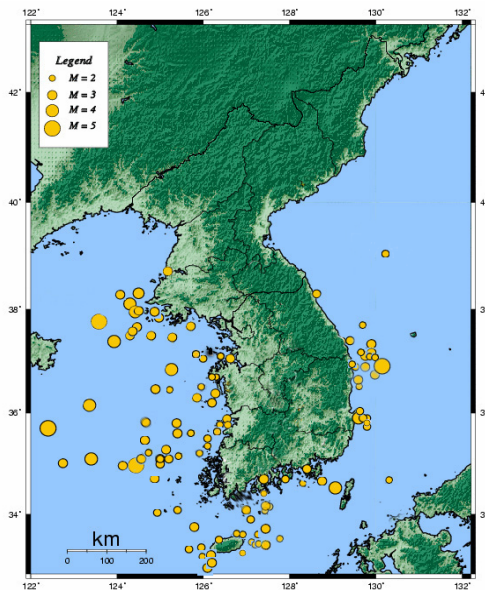


그림 1. 우리나라 주변 해저지진 발생위치 분포
(출처:<http://www.civil.hanyang.ac.kr/coast/>)

해일을 유발하는 지진이 연안 가까이에서 발생할 경우에 피해를 줄이기 위해서는 지진 준비단계를 사전에 포착하여 신속히 대응하는 것이 최선이므로 준비단계에서 나타날 수 있는 특성에 대한 관측과 분석이 중요하다. 해저지진의 특성 관측과 분석을 위해서는 수중을 통해 음파로 전달되어 청음기에 수신되는 성분을 활용하는

것도 한 방안이 될 수 있을 것이다. 그림 2는 수중음향 측정체계 모식도의 예를 나타낸 것이다.

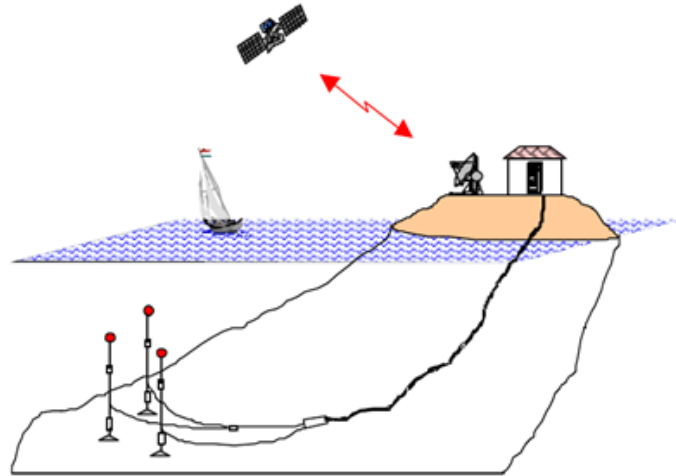


그림 2. 수중음향 측정체계 모식도.

본 연구에서는 향후 수중음향 관측체계 운용 시 직면할 수 있는 신호해석 문제에 대한 기초연구로서 해저에서 수중으로의 음파전달 현상 모델링과 수신신호 모의 및 해석의 기반을 구축하고자 한다. 이를 위해 그림 3에 나타낸 바와 같이 일차적으로 수중에서의 전달특성 부분에 대한 연구를 수행하고자 한다.

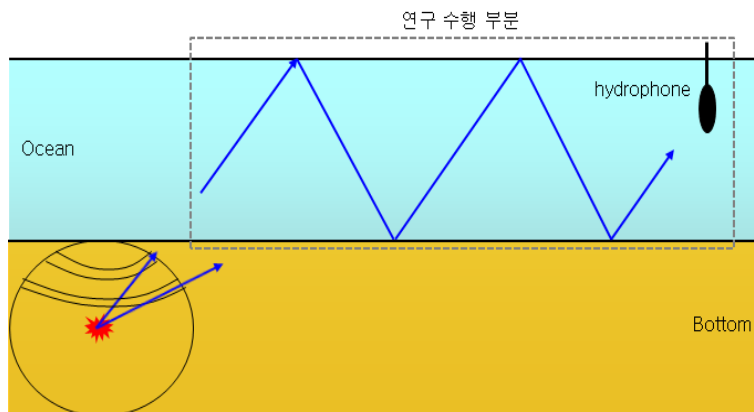


그림 3. 해저기인 수중음향 발생/전달 모식도.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

□ 국외의 경우

○ VENTS Program : 미국 국립해양대기청(NOAA)에서 지속적으로 추진해오고 있는 사업으로 해저 화산폭발 및 지진 등 해저기인 현상의 관측, 분석 및 해석을 위한 수중음향 관측기술과 시뮬레이션기술 개발을 선도해오고 있다.

○ IMS Network : 포괄적핵실험금지조약(Comprehensive Test Ban Treaty) 이행 모니터링을 위해 오스트리아 비엔나에 위치한 사무국에서 운용중인 관측망으로 심해 음향채널에 청음기를 설치하여 핵실험 및 지진 등에 의해 발생하는 수중음향 신호의 관측과 식별을 위한 모델링기술을 개발하고 있다.

□ 국내의 경우

○ 국방과학연구소 주도로 동해 대륙붕 해역에 수중음향감시체계(SOSUS)를 설치하여 운용 중에 있으나 군사적인 목적으로의 사용으로 제한하고 있는 실정이다.

○ 기상청에서 울릉도 남쪽 해저에 지진계를 설치하여 운용 중에 있으나 해저지각을 통해 전달되는 지진파 신호의 관측에 국한하고 있는 실정이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 주파수영역 수중 음파전달 모델링

수중 음파전달 환경은 음파에너지를 완전 반사시키는 해수면과 에너지의 일부만 반사시키는 해저면으로 경계 지워지는 음 도파관(waveguide)이라 할 수 있다. 이러한 도파관 내에서의 음파전달은 모드 이론을 이용하여 설명하면 매우 편리하다. 그림 4는 수심 h 인 해양의 해수면으로부터 z_0 깊이에 위치하는 음원으로부터 수평거리 r 만큼 떨어진 수심 z 에 위치하는 수신기로의 음파전달 모식도를 나타낸 것이다. ρ 와 c 는 수층의 밀도와 음파전달 속도를 나타내고 ρ_1 과 c_1 은 해저의 밀도와 음파전달 속도를 의미한다. 모드 이론은 거리와 수심 변화에 따른 파동 방정식의 해, 즉 음압을 수심 방향으로의 고유한 진동 특성을 나타내는 모드 함수와 거리 방향으로의 변동을 나타내는 함수의 곱으로 나타내는 방법이다.

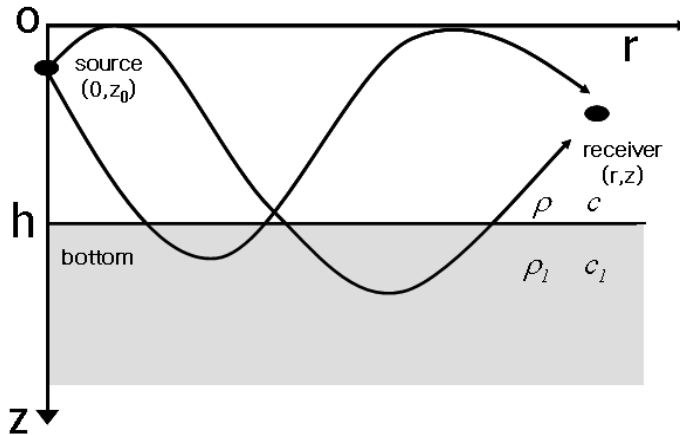


그림 4. 수중 음파전달 모식도.

그림 4의 모식도에서 수심 z_0 에 위치하는 음원으로부터 임의의 거리 r 떨어진 수심 z 에 위치하는 수신기에서의 수신 음압 p 는

$$p(r; z, z_0) = \int_0^{\infty} g(k_r; z, z_0) J_0(k_r r) k_r dk_r \quad (3.1)$$

으로 주어진다. 여기서 $g(k_r; z, z_0)$ 는 Green's function을 의미하고 $J_0(k_r r)$ 는 Bessel

function을 나타낸다. k_r 은 파수 $k(=\omega/c)$ 의 수평방향 성분을 의미한다. 식 (3.1)을 모드 이론의 해로 나타내면

$$\begin{aligned}
 p(r, z, z_0) &= \int_0^\infty g(k_r; z, z_0) J_0(k_r r) k_r dk_r = \frac{1}{2} \int_0^\infty g(k_r; z, z_0) H_0^{(1)}(k_r r) k_r dk_r \\
 &= \frac{i\pi}{\rho} \sum_{n=1}^{n_{\max}} A_n^2 \sin k_{zn} z_0 \sin k_{zn} z H_0^{(1)}(k_n r) \quad \text{Discrete Spectrum} \\
 &\quad \text{(i.e. Normal Mode)} \\
 &+ \frac{2i\rho}{\rho} \int_{c_b}^{k_z} \frac{\sin k_z z_0 \sin k_z z}{\left[\sin^2 k_z h + \frac{\rho^2 k_z^2}{\rho_1^2 k_{1zn}^2} \cos^2 k_z h \right]} H_0^{(1)}(k_r r) dk_z \quad \text{Continuous Spectrum} \\
 &\quad \text{(i.e. Continuous Mode)}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

으로 나타낼 수 있다(Frisk, 1994). 여기서 k_n 및 k_{zn} 은 n 번째 모드 수평 및 수직 방향 파수이고 $H_0^{(1)}(k_n r)$ 은 제 1종 0차 Hankel function을 의미한다. k_z 와 k_{1zn} 은 n 번째 모드 수중 및 해저에서의 수직방향 파수를 의미한다. C_B 는 파수영역에서의 적분을 나타낸다. 모드 진폭 A_n 은

$$A_n = \sqrt{2} \left[\frac{1}{\rho} \left(h - \frac{\sin 2k_{zn} h}{2k_{zn}} \right) + \frac{1}{\rho_1} \frac{\sin^2 k_{zn} h}{k_{1zn}} \right]^{-1/2} \tag{3.3}$$

으로 주어진다.

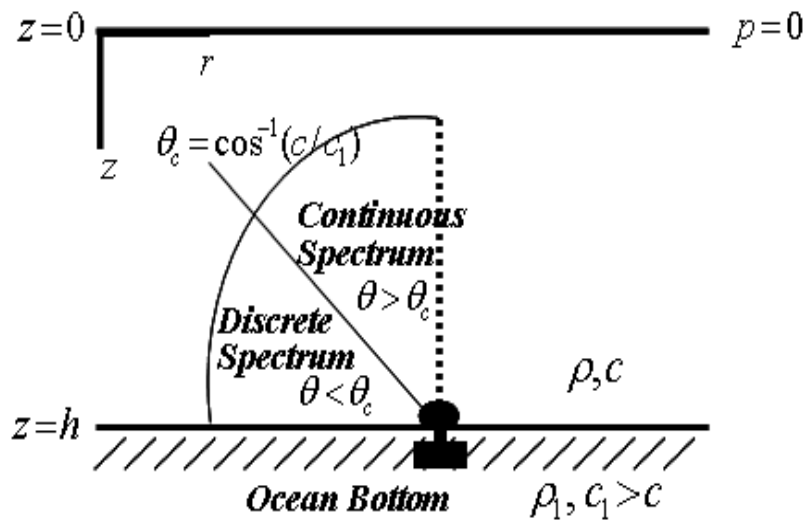


그림 5. 음파의 접지각과 모드영역의 관계 모식도.

식 (3.2)에서 Discrete spectrum은 그림 5에 나타내어진 바와 같이 음파가 전달될 때 해저면과 이루는 각인 접지각이 임계접지각(critical grazing angle, $=\cos^{-1}(c/c_1)$)보다 작은 성분, 즉 정상모드(normal mode) 성분을 나타내고 Continuous spectrum은 해저면과 이루는 각이 임계접지각보다 큰 성분, 즉 연속모드(continuous mode) 성분을 나타낸다. 음원과 수신기 사이가 멀리 떨어진 경우에는 해저면에 입사하는 각이 크기 때문에 감쇠가 큰 연속모드 성분은 음장 계산에서 고려되지 않아도 되지만, 근거리에서 정확한 음장을 계산하기 위해서는 연속모드 성분까지 포함되어야 할 필요가 있다.

Discrete spectrum 영역에 해당하는 각각의 정상 모드에는 도파관의 성질에 의해 결정되는 모드 차단 주파수가 존재하는데 차수가 높은 모드일수록 보다 높은 주파수에서 차단되고 차수가 낮은 모드일수록 보다 낮은 주파수에서 차단되는 성질이 있다. 차단되지 않고 도파관 내에서 전달되는 모드의 수는 음원 주파수와 밀접한 관련이 있는데 음원의 주파수가 높을수록 음장에 기여하는 모드 수는 많아지고 음원의 주파수가 낮을수록 모드 수는 감소한다. 따라서 저 주파수 대역에서의 음파 전달을 정상 모드 이론으로 설명하면 차수가 낮은 몇 개의 모드만으로도 음장을 설명할 수 있는 장점이 있다.

해양음향 환경을 그림 6에서처럼 수중 밀도와 음속은 균일하고 해수면에서는 압력이 소멸하고 해저면은 음속과 밀도가 균일하면서 수중보다는 큰 값을 갖는 반무한 유체면으로 가정하는 Pekeris 도파관이라 할 때, 도파관 즉 음파전달 환경의 특성에 의해 결정되는 모드 차단 주파수 f_n 은

$$f_n = \frac{c(n-1/2)}{2h\sqrt{1-(c/c_1)^2}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.4)$$

으로 주어진다. 여기서 h 는 수심, c 는 수중 음속, c_1 은 해저면 음속을 나타낸다. 수심과 수중 음속을 알고 있는 경우에 모드 차단 주파수는 해저면 음속 c_1 에 의해 결정된다.

그림 7은 식 (3.1)과 식 (3.2)를 이용하여 그림 6의 환경에 대하여 계산한 전달손실 결과를 나타낸 것이다. 오른쪽 그림은 식 (3.1)을 이용하여 음압을 계산하는 파수적분법(wavenumber integration method)의 결과를 나타낸 것이다. 왼쪽 그림은 식 (3.2)를 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 적용한 식 (3.2)를 이용하는 방법의 결과가 파수적분 방법의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

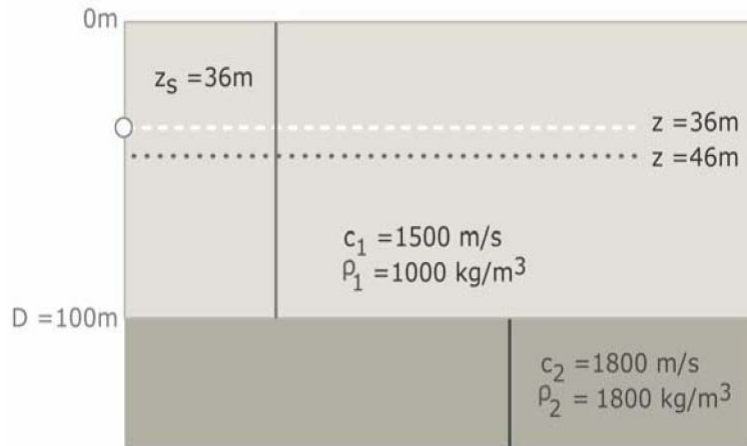


그림 6. Pekeris waveguide 환경 예.

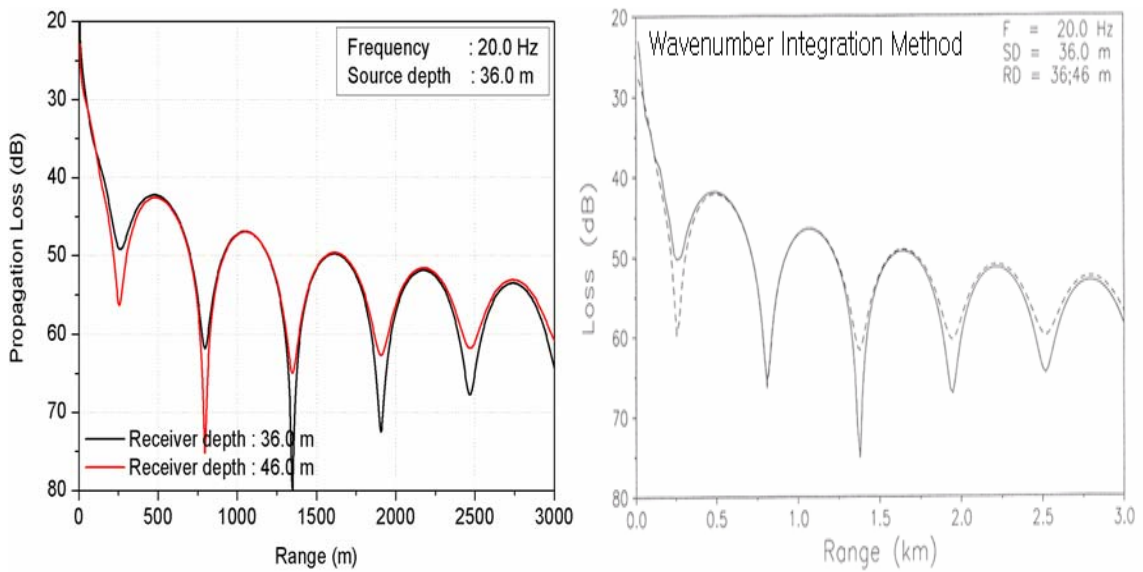


그림 7. 그림 6의 환경에 대한 total 전달손실 계산 결과 1.

파수적분법으로 음장을 계산하는 방법은 파동방정식의 해와 경계조건을 가장 정확하게 나타내는 방법으로 알려져 있다. 하지만 파수적분 방법은 주어진 임의의 환경, 음원과 수신기의 배치에서의 음장 계산 결과는 제공하지만 음장에 기여하는 성분들을 파악할 수 없는 단점이 있다. 하지만 식 (3.2)로부터 음장을 계산하는 경우에는 주어진 환경에 대하여 음장을 Discrete spectrum 성분과 Continuous spectrum 성분으로 구분하여 계산할 수 있을 뿐만 아니라 이들 성분의 합도 구할 수 있는 것이 특징이다.

그림 8은 그림 6에 주어진 환경 및 음원과 수신기 조건에 대하여 20Hz에서의 전달손실을 나타낸 것이다. Discrete spectrum, 즉 정상모드 성분만의 전달손실과 Continuous spectrum, 즉 연속모드만의 전달손실은 거리가 증가함에 따라 손실이 완만히 증가하는 양상을 보이지만 정상모드와 연속모드가 함께 고려된 전달손실은 두 성분 사이의 보강 및 상쇄 간섭으로 인하여 마루와 골이 번갈아 발생하면서 전체적으로는 손실이 증가하는 경향을 나타냄을 볼 수 있다.

그림 8의 정상모드만의 전달손실에서 간섭 효과가 나타나지 않는 이유는 주어진 환경에 대한 제 1모드 차단주파수는 6.8Hz이고 제 2모드 차단주파수는 20.4Hz이어서 20Hz에서는 제 1모드 1개만 존재하기 때문이다. 또한 근거리에서는 연속모드 성분이 정상모드 성분에 비해 손실이 작음을 볼 수 있다. 이것은 근거리 음장계산에서의 연속모드의 중요성을 잘 보여주는 것이라 할 수 있다.

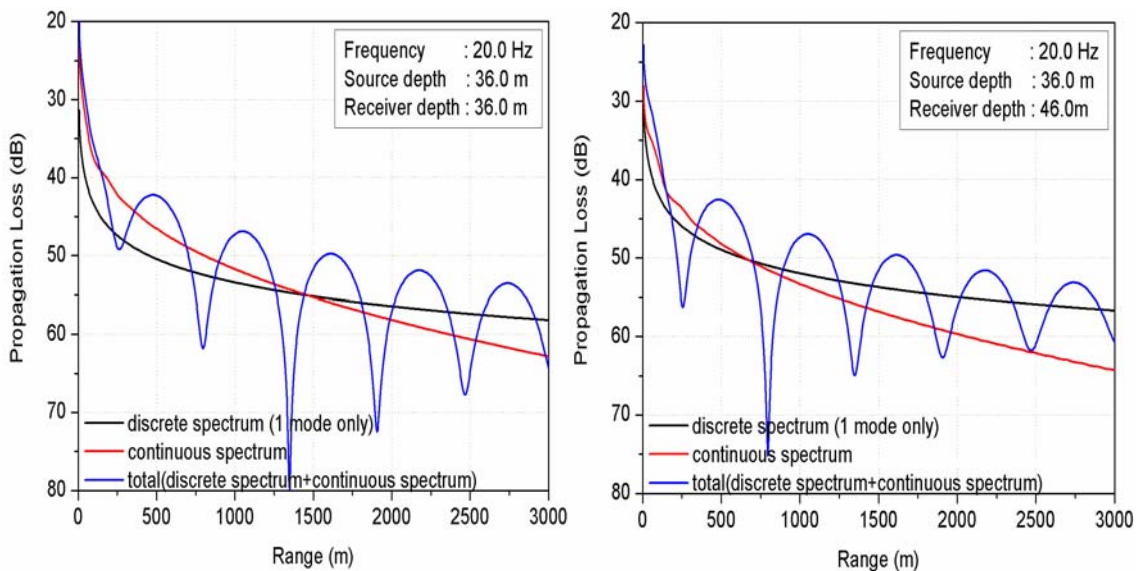


그림 8. 그림 6의 환경에 대한 성분별 전달손실 계산 결과.

그림 9의 상단 왼쪽은 제1 모드 차단주파수보다 낮은 6Hz에서의 전달손실을 나타낸 것이다. 이 경우에는 정상모드는 더 이상 존재하지 않고 차단 주파수가 없는 연속모드만이 음장에 기여하게 된다. 그림 9의 상단 오른쪽은 6Hz에서의 수신기 중심에 다른 전달손실을 나타낸 것이다. 수신기가 경계면, 즉 해저면으로부터 멀어짐에 따라 손실이 증가함을 볼 수 있다. 그리고 그림 9의 하단은 해저면에서의 음파 감쇠 효과가 고려되었을 때의 전달손실 계산 예를 나타낸다. 해저면 감쇠효과는 음파전달 속도를 복소수로 취급하여 복소수의 허수 성분으로 다루어진다. 결과적으로는 해저면에서의 파수($k=\omega/c_1$) 변화로 인하여 마루와 골이 발생하는 위치가 변함

을 볼 수 있다.

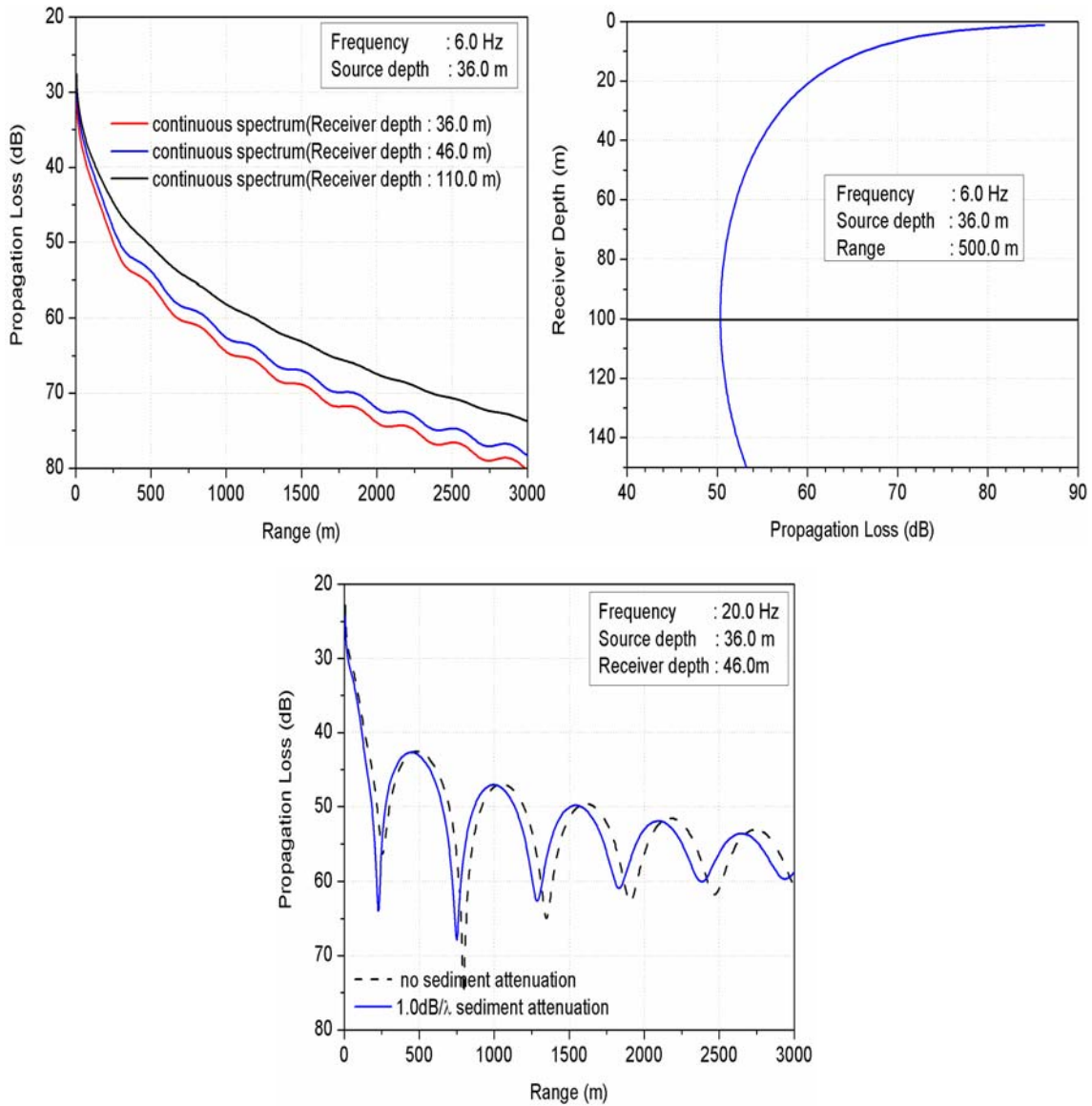


그림 9. 그림 6의 환경에 대한 total 전달손실 계산 결과 2.

그림 10은 광대역 음장 모의의 한 예를 나타낸 것이다. 왼쪽 그림은 정상모드만으로 음장을 계산한 결과이므로 제 1모드 차단 주파수 이하에서는 음장 계산이 불가능함을 볼 수 있다. 오른쪽 그림은 연속모드까지 고려하여 계산한 것을 나타낸 것이다. 제 1모드 차단 주파수 이하에서도 음장 계산이 가능할 뿐만 아니라 제 1모드 차단 주파수 이상에서는 정상모드만 고려할 때 보다 간섭 패턴이 훨씬 복잡하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 음원과 수신기 사이의 거리가 가까운 조건에서는 연속모드가 음장에 끼치는 영향이 클 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

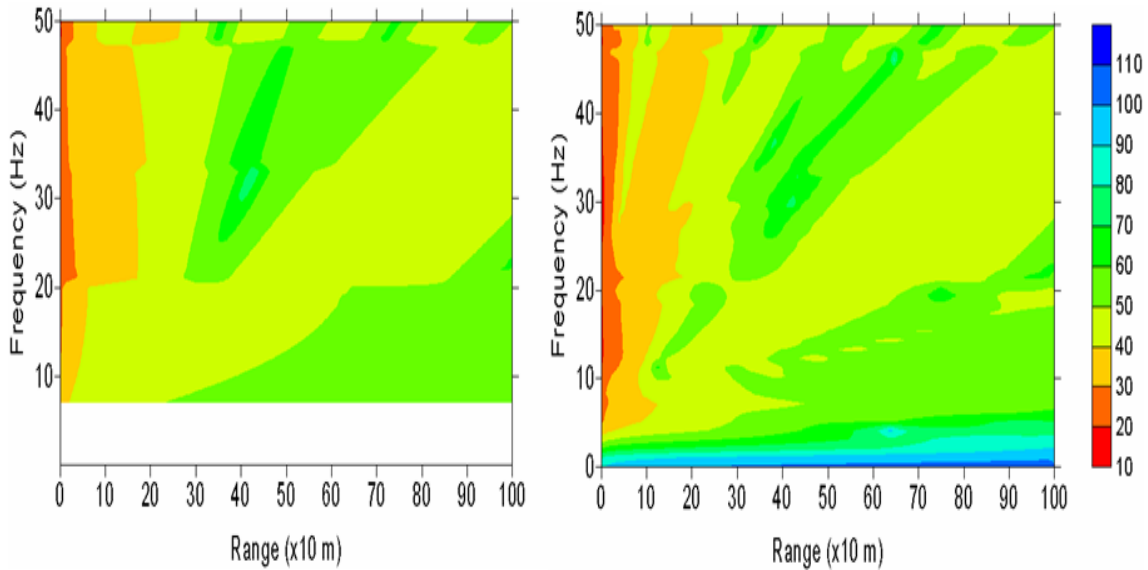


그림 10. 그림 6의 환경에 대한 거리-주파수 영역 전달손실 계산 결과.

제 2 절. 시간영역 수중 음파전달 모델링

일반적으로 수중 음파전달 현상의 모델링 및 해석은 신호의 대역 폭을 포함하는 주파수 영역에서 수행된다. 시간 영역에서의 음파전달 특성을 모의하기 위해서는 그림 11에 나타낸 바와 같이 주파수 영역에서의 결과에 대하여 FFT를 적용하여 얻을 수 있다. 시간 영역 파동 방정식의 해는 식 (3.4)에 나타낸 바와 같이 주파수 영역 해의 푸리에 변환을 통하여 얻을 수 있다(Jensen et al., 2000).

$$p(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(r, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) g(r, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (3.5)$$

여기서 $S(\omega)$ 은 음원의 스펙트럼이고 $g(r, z, \omega)$ 은 공간적 전달함수를 나타낸다.

본 절에서는 제 1 절에서 설명한 주파수 영역 모델을 이용하여 시간영역에서의 음파전달 특성을 모의하였다. 그림 12는 시간영역에서의 음파전달 모의를 위해 사용한 hanning-weighted 사인파의 특성을 나타낸 것으로 중심 주파수는 50 Hz이고 대역 폭과 펄스 길이는 각각 50 Hz와 0.08 s이다.

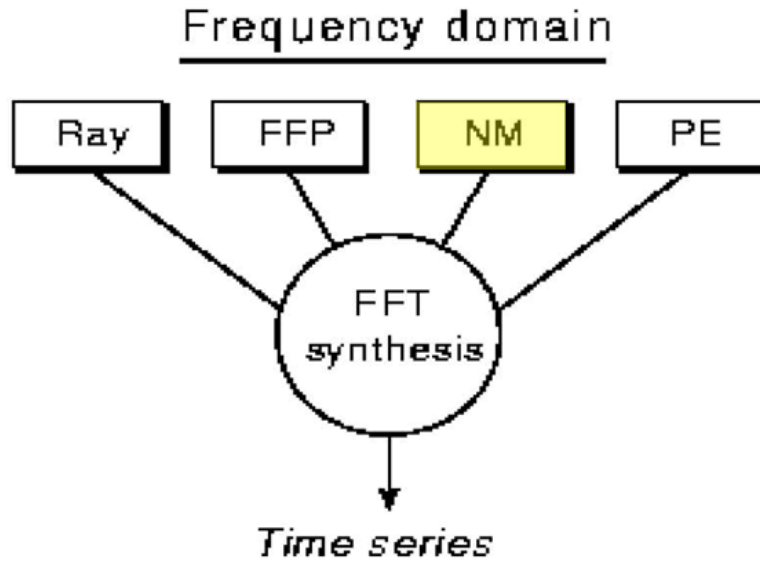


그림 11. 시간영역 신호모의 모식도.

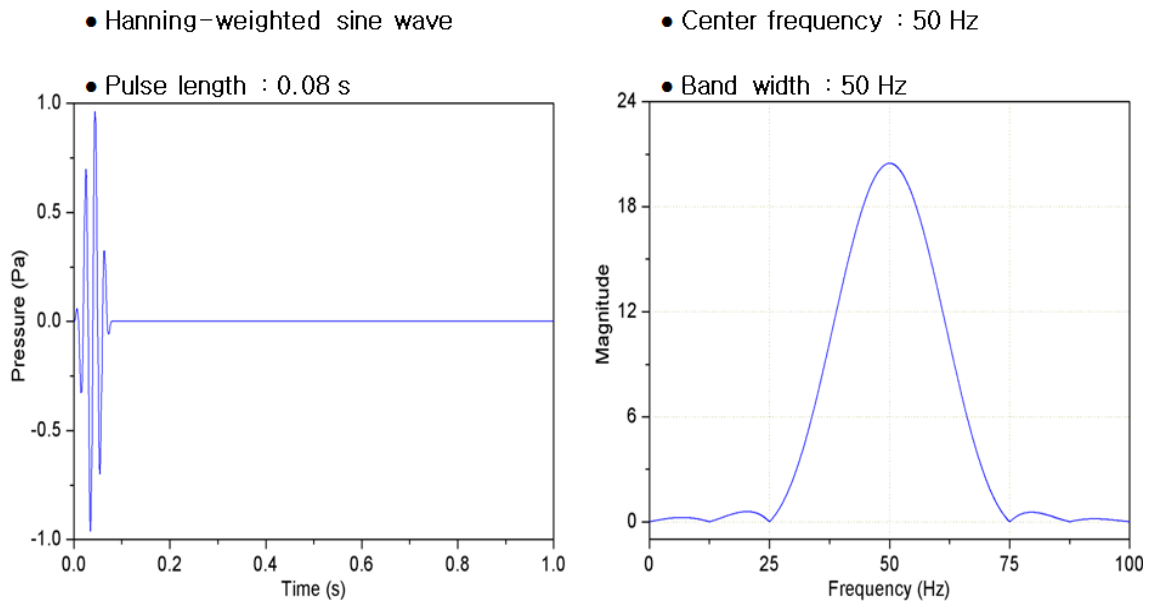


그림 12. 음원 신호 특성.

그림 13은 음파전달 모의환경을 나타낸 것이다. 수심은 100 m이고 수중의 밀도와 음파전달 속도는 각각 1.0 g/cm와 1500 m/s이고 해저의 밀도, 음파전달 속도 및 음파감쇄 계수는 각각 1.5 g/cm, 1600 m/s 및 0.2 dB/λ이다. 오른쪽은 왼쪽의 환경에서 발생할 수 있는 음파전달 모드의 군속도 특성을 나타낸 것이다. 각각의 모드가 존재할 수 있는 주파수 대역은 차단 주파수와 관계가 있다. 모의하고자 하는 신

호의 주파수 대역인 25~75 Hz 대역에서는 1~3번 모드만 존재하고 전달 속도는 1번 모드가 가장 빠르고 3번 모드가 가장 느림을 알 수 있다.

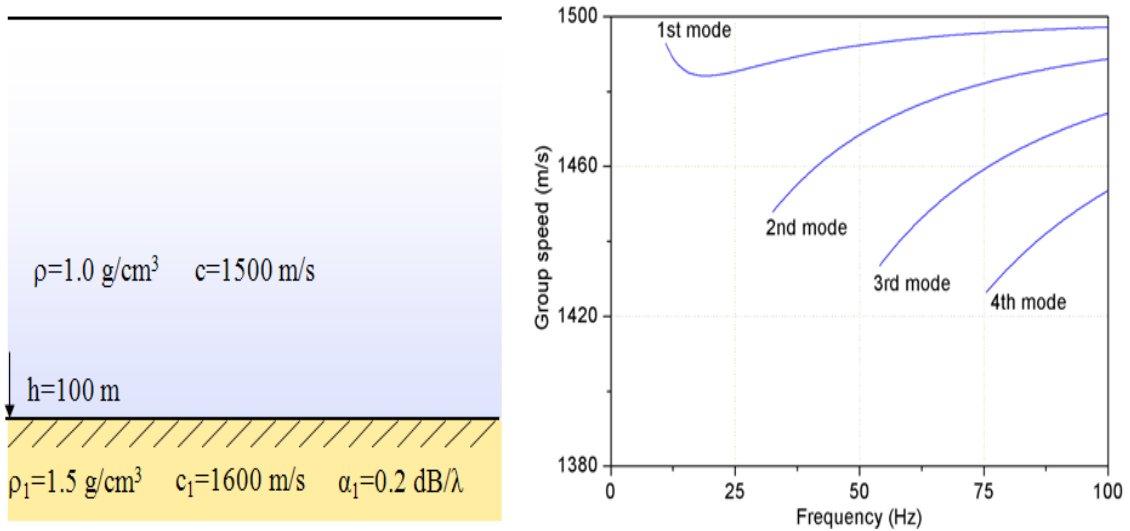


그림 13. 음파전달 모의 환경 및 모드 군속도.

그림 14는 25 m 수심에 위치하는 음원으로부터 30 km 떨어진 거리의 20 m 수심에 위치하는 수신기에 도달하는 음파 신호를 계산한 것이다. 앞의 군속도 특성에서 고찰한 바와 같이 1번 모드가 가장 빨리 도달하고 3번 모드가 가장 느리게 도달함을 알 수 있다.

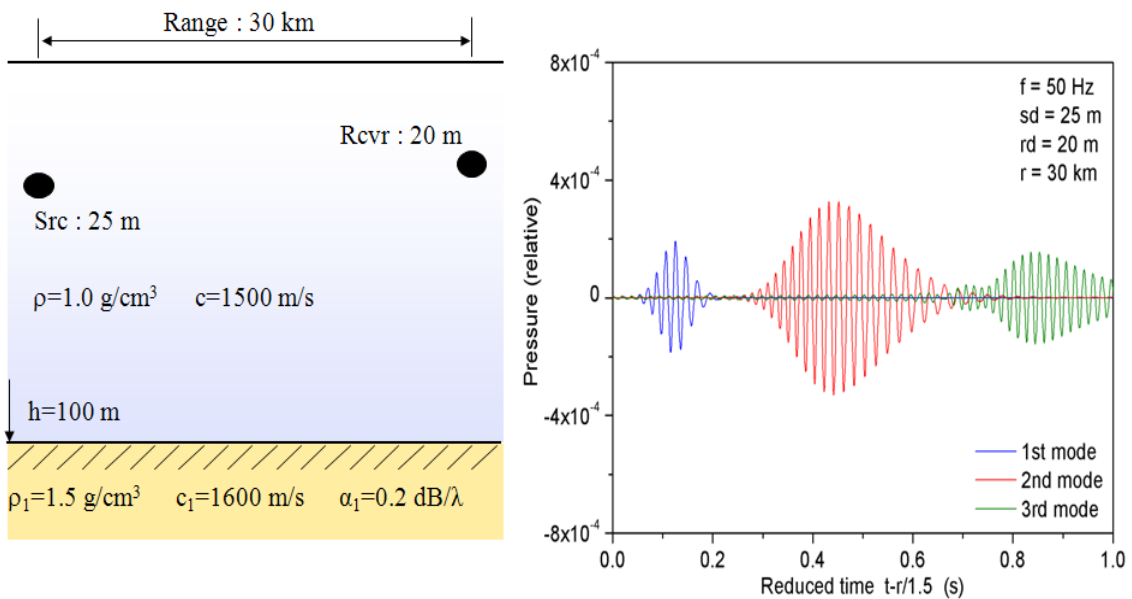


그림 14. 음원과 수신기 배치 및 모드 도달시간.

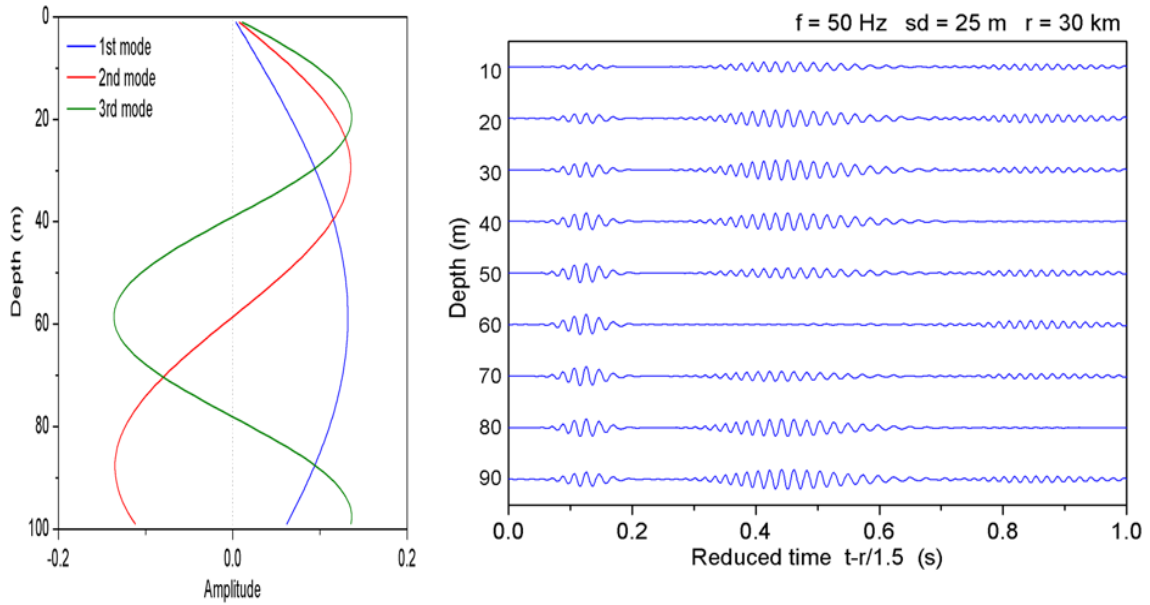


그림 15. 수심별 모드 진폭 및 수신 신호.

그림 15의 오른쪽은 그림 14의 조건에서 수신기 수심이 변할 때의 신호를 나타낸 것이고 왼쪽은 모드 진폭의 수심에 따른 변화를 나타낸 것이다. 제2 모드의 진폭이 영이 되는 수심 60m에서는 2번 모드 신호의 크기가 없음을 알 수 있다.

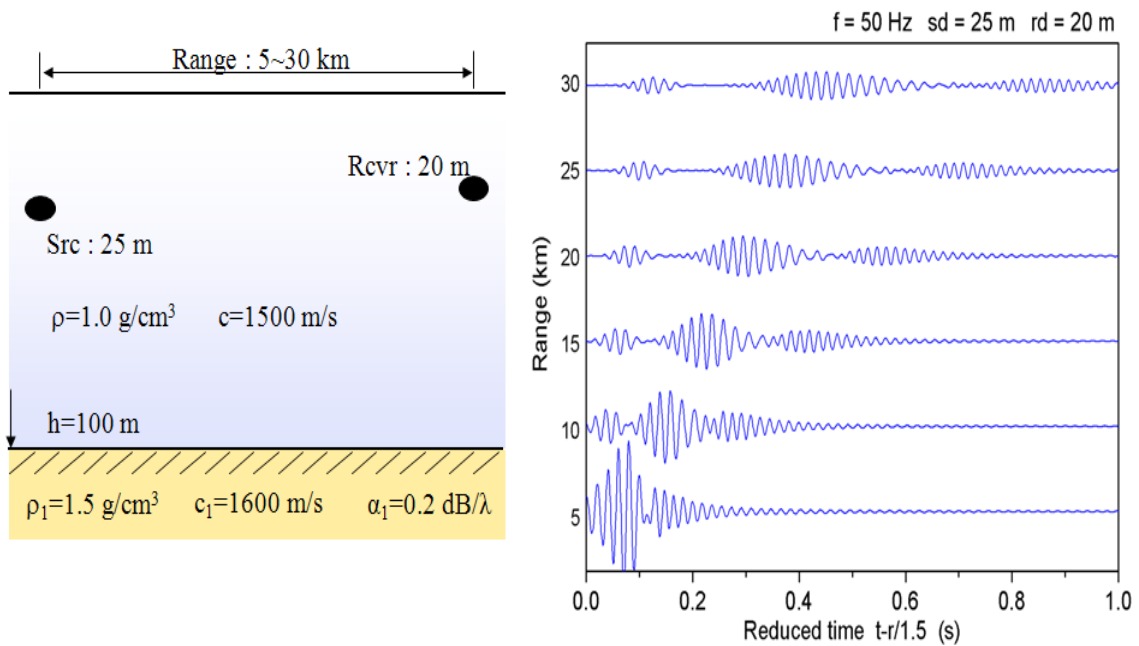


그림 16. 거리별 수신 신호.

그림 16은 음원과 수신기의 수심은 일정하고 음원과 수신기 사이의 거리가 변할 때의 수신신호를 모의한 것이다. 음원과 수신기 사이의 거리가 가까운 경우에는 여러 개의 모드가 거의 동시에 수신되어 모드별 특성을 구분할 수 없는 반면에 음원과 수신기 사이의 거리가 멀어질수록 dispersion에 의해 모드별 도달 특성이 구분되는 것을 볼 수 있다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

○ 본 연구의 목표는 해저에서 수중으로의 음파전달 현상에 대한 모델링과 수신신호 모의/해석의 기반을 구축하는 것이다. 이를 위해 먼저 수중에서의 음파전달 특성에 대한 모델링과 수신신호 모의 알고리즘의 구현을 통해 연구목표를 달성하였다.

○ 해저지진에 의한 수중음향 신호는 주로 100 Hz 미만의 저주파영역에서 나타나므로 이의 해석에 적합한 모드 이론에 근거하여 원거리 및 근거리 음파전달 성분인 정상모드와 연속모드를 모드별로 또는 함께 고려할 수 있는 주파수 영역 모델을 구현하였다. 또한 개발된 주파수영역 모델을 이용하여 시간영역에서의 신호도달 특성을 모의할 수 있는 알고리즘을 구현하였다.

○ 수신신호를 모드별로 모의할 수 있는 알고리즘의 구현은 향후 수중음향 관측신호의 특성 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

○ 수중음향을 이용한 해저지진 관측과 분석을 위해서는 수중에서의 장거리 음파전달 특성뿐만 아니라 해저에서 수중으로의 음파방출 특성이 도달신호의 변형에 미치는 영향에 대한 이해가 필요하다.

○ 이를 위해서는 본 연구의 개발결과를 확장하여 해저에서 수중으로의 음파방출 특성을 포함시키는 후속연구가 필요하다고 사료된다. 예를 들어 본 연구에서는 음원이 수중에 있고 해저의 특성은 탄성이 없는 매질로 고려하였으나, 음원이 탄성이 있는 해저에 위치하는 경우에는 P파에서 수중음파로의 변환뿐만 아니라 S파에서 수중음파로의 변환 영향도 고려되어야 할 것이다.

제 6 장 참고문헌

한국해양연구원, 2009. 해상 탄성과 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석, BSPN 62400-2037-5, 93 pp.

Frisk, G.V., 1994. *Ocean and Seabed Acoustics*, Prentice Hall, New Jersey.

Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B., and Schmidt, H., 2000. *Computational Ocean Acoustics*, Springer, New York.

Sasorova, E.V., Korovin, M.E., Morozov V.E., and Savochkin, P.V., 2008. On the problem of local tsunamis and possibilities of their warning: *Oceanology*, **48(5)**, 634-645.