

협대역 음향신호를 이용한 수중음파의 전파손실 측정

Propagation Loss Measurement of Underwater Sound Wave using Narrow Band Acoustic Signal

나 영 남*, 심 태 보*, 최 진 혁*, 장 덕 흥*, 김 성 일*, 한 정 우*
(Youngnam Na*, Taebo Shim*, Jinheok Choi*,
Duckhong Chang*, Seong-il Kim*, Jeongwoo Han*)

요 약

천해에서 수신과 퇴적물 유형의 변화에 따른 전파손실 양상을 규명하기 위해 한국 동남해역에서 음향실험을 실시하였다. 정해진 경로를 따라서 약 5kts의 속도로 음원기를 예인하고 3개 정점의 해저면에 설치된 수신기에서 동시에 신호를 수신하였다. 음파가 등수심선에 평행하게 진행할 때와 수직으로 진행할 때의 전파손실을 비교해 보면 평행하게 진행할 때 전반적으로 손실이 작다. 이러한 경향은 음원-수신기 사이의 거리가 멀어질 수록 두드러진다. 또한 음파가 등수심선에 수직으로 진행할 때 상향조건과 하향조건 등 진행하는 방향에 따라서도 전파손실의 차이가 발생하며, 전반적으로 하향조건하에서 손실이 작고 거리에 따라서는 10dB 이상 차이가 발생한다. 그리고 해저 표층 퇴적물이 gravelly sand와 sand-silt-clay로 구성된 두 해역에서의 전파손실에서는 뚜렷한 차이를 발견하기 어렵다. 한편, 최적 전파 주파수는 대부분 130-255Hz 범위에 존재한다.

Abstract

In order to examine the propagation loss associated with water depth and bottom sediment type, an acoustic experiment was conducted in the Southeast Sea of Korea. A sound source was towed along the pre-defined tracks in about 5kts and the signal was simultaneously received at three bottom-moored hydrophones. The propagation loss of sound wave traveling along the isodepth was compared with that crossing the isodepth. The former case shows, in general, less loss than the latter. This trend is stronger as the distance between a source and a receiver increases. When sound wave propagates across the isodepth, we also find that the propagation loss is influenced by the upsloping and downsloping conditions of wave propagation. In general, the propagation loss under downsloping condition is smaller than that of upsloping condition, and the differences are as large as 10dB in some cases. However, little difference are found in the propagation loss depending on the bottom types ; gravelly sand and sand-silt-clay. Meanwhile, the optimum propagation frequencies are found within range of 130-255Hz.

I. 서 론

천해에서 음파가 전파될 때는 해표면, 수층 및 해

저면에서의 여러 환경 인자에 의해 영향을 받는다. 즉 음파가 해표면과 해저면 등의 경계면에서 수차례 반사를 일으키므로 경계면 조건에 의해서 음파 에너지의 전파특성이 민감하게 변하며, 수층의 음속구조에 의해서도 이런 경계면 조건의 영향이 조절된다.

그리고 일반적으로 해저면과 해저층에서의 에너지 손실이 해표면에서의 손실보다 훨씬 크다. 여름철에는 수층의 음속구조가 하향굴절 조건을 형성하므로 음파 에너지가 전파되는 과정에서 해저면과 자주 반사를 일으키게 된다. 매 반사시마다 해저층에서의 음파 에너지 흡수가 발생하며, 따라서 음파 에너지의 많은 손실이 초래된다. 이에 비해서 겨울철에는 수층의 음속구조에 의해 상향굴절 조건이 형성되므로 해저면과 덜 접촉하기 때문에 그만큼 해저층에서의 음파에너지 손실이 적게되고, 따라서 전파에 양호한 환경이 이루어진다[Akal, 1980; Ellis and Chapman, 1980].

천해에서는 심해에서와는 달리 해저 퇴적물들이 공간적 분포가 심한 변화를 보이며, 이러한 천해환경에서 음파의 전파손실을 모델을 통해 예측하고자 할 경우 해저층에서의 음파에너지 감쇠계수 결정이 중요한 문제가 되어 왔다. 그중에서도 감쇠계수가 주파수에 따라 어떻게 표시될 수 있는지에 대해 큰 관심이 기울어져 왔는데[Jensen and Kuperman, 1983; Eller and Gershfeld, 1985; Gershfeld and Eller, 1985; Smith, 1986], 이는 음파가 전파 되는데 가장 작은 손실을 일으키는 주파수, 즉 최적 전파 주파수와 관련되어 있다.

천해에서 음파의 전파손실을 조절하는 주요 요인은 그림 1에서 보는 바와 같이 고주파에서는 수층에서의 체적감쇠와 거친 해저면에서의 산란손실이다. 주파수가 낮아질수록 이 두 영향은 점차 감소하고 퇴

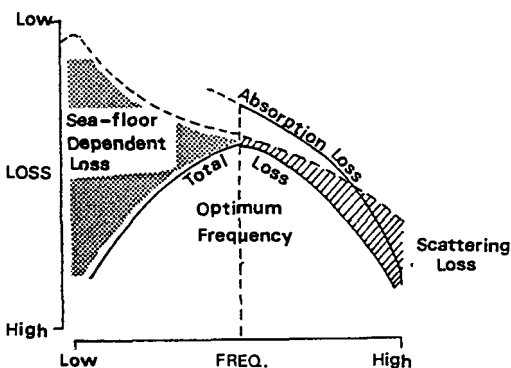


그림 1. 천해에서 전파손실에 영향을 미치는 주요 요인 [Akal, 1980].

Fig 1. Major factors that control propagation loss in shallow water[after Akal, 1980].

적층에서의 감쇠가 주요 요인이 된다[Akal, 1980].

본 연구에서는 한국 근해 천해환경에서 수심과 해저 퇴적물 유형의 변화에 따라서 전파손실 양상이 어느 정도 달라지는지를 규명해 보고자 한다. 또한 1kHz 이하의 저주파 음원 중에서 가장 작은 전파손실을 일으키는 최적 전파 주파수도 결정해 보고자 한다. 이를 위해서 한국 동남해역 3개 정점의 해저면에 수중 청음기를 고정하고, 일정한 속도로 정해진 경로를 따라서 음파 발생기를 예인하도록 하였다. 음파 발생기는 100-805Hz 대역의 10개 주파수에 대해서 협대역 음향신호를 발생하였으며, 이 신호는 3개 정점의 수중청음기에서 동시에 수신하였다.

II. 실험방법 및 자료분석

2.1 실험해역의 해양환경

그림 2는 음향실험이 실시된 해역의 수심 분포이다. 그림에서 ①, ②, ③은 수신기가 설치된 장점을 나타내고 있는데, 이들 정점의 수심은 각각 55, 40, 80m이다. 정점 ①과 정점 ②는 수심의 차이가 약 15m이고, 정점 ②와 ③은 약 40m에 달한다. 정점 ①에서 ②로 향하는 경로는 거의 동수심선과 평행인 반면에 정점 ②에서 ③으로 향하는 경로는 동수심선에 직각이다.

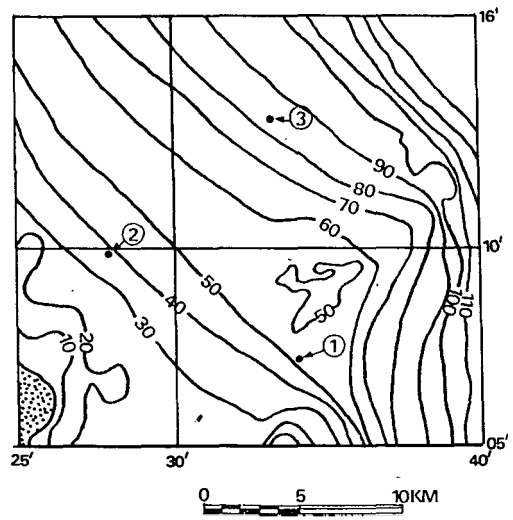


그림 2. 실험해역의 등수심 분포도.

Fig 2. Water depth distributions of experiment area.

한편 실험해역의 표층 퇴적물 분포는 그림 3과 같다. 실험해역에는 외해쪽에 silt-clay가 분포하고 내해쪽에는 sand-silt-clay, gravelly sand 및 clayey silt가 분포한다. 수신기가 설치된 정점에는 sand-silt-clay와 gravelly sand가 분포한다. 그리고 32°-38'E, 07°-12'N 사이에 기반암이 노출되어 있으며[심과 장, 1992], 음원기가 정점 ①로 되돌아 올 때 기반암 위를 통과하게 된다.

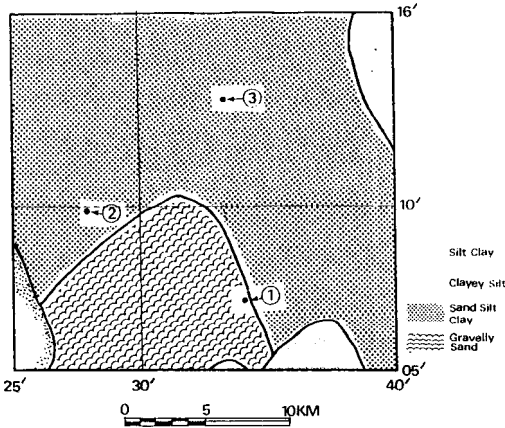


그림 3. 실험해역의 해저 표층 퇴적물 분포[심 등, 1988].
Fig 3. Bottom sediment distributions of experiment area[after Shim et al., 1988].

그림 4는 수층의 음속구조로서 음향실험시 정점 ③ 부근에서 수집된 자료이다. 표층으로부터 수심 10m까지는 수심에 따라 음속이 증가하지만 10-50m 층은 수심에 따라 음속이 급속히 감소한다. 수심 10-50m 층은 수심에 따라 수온이 급격하게 변하는 소위 수온 약층에 해당된다. 그리고 수심 50m 이상에서는 음속이 수심에 따라 약간 증가하는 형태를 이루고 있다.

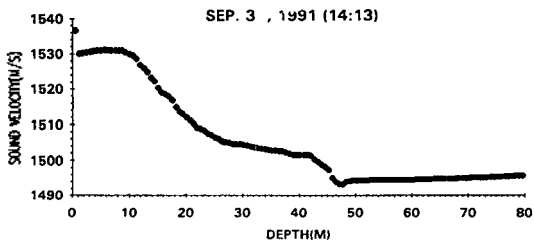


그림 4. 실험해역의 수층 음속구조(1991.9.2).
Fig 4. Sound velocity profile of water column in the experiment area(1991.9.2).

2.2 실험방법

전파손실 측정을 위해 음원을 수상함에서 약 5kts의 속도로 10m 수심을 유지하며 정해진 경로를 따라 예인하였다. 100-805Hz 사이 10개의 주파수에 대해서 각기 다른 음원준위의 협대역 연속파 신호를 발생시켰으며, 이때 발생된 신호는 무지향성이다. 각 주파수별 음원준위는 표 1과 같다. 표에서 볼 수 있듯이 130Hz의 음원준위가 169.45dB로서 가장 높고 805Hz의 음원준위가 144.06dB로서 가장 낮다.

표 1. 전파손실 측정실험에 사용된 각 주파수별 음원준위.
Table 1. Source level of each frequency used in the experiment of propagation loss measurement.

Freq.(Hz)	Source Level (dB/1 μ Pa)	Freq.(Hz)	Source Level (dB/1 μ Pa)
100	166.74	320	162.11
130	169.45	405	157.49
165	168.54	505	153.06
205	159.54	635	156.23
255	157.76	805	144.06

음원을 예인한 시간은 1991. 9.2, 10:30에서 16:45까지이다. 음원과 수신기와의 거리는 매 1분 간격으로 수신된 GPS(global positioning system) 위치 자료를 이용하여 정확하게 계산하였다. 음원의 예인경로를 매 5분 간격으로 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 수신 정점 ①로부터 시작하여 정점 ②와 ③을 지나 뒤 정점 ①로 되돌아 오는 경로를 따라 음원을 예인하였다.

해저면에 설치된 3개 수신기로 부터의 음향신호는 각각 해상의 안테나를 통해 육상으로 전송하였으며, 육상에서는 수신된 음향신호를 녹음/분석하여 음원과 수신기 사이의 전파손실을 계산하였다(그림 6).

2.3 전파손실 산출

해저면의 각 수신기로 부터 수신된 음향신호는 육상의 수신기(AN/ARR-75)를 통해 녹음기(TEAC-5000)에 녹음된 다음, 스펙트럼 분석기(HP-3562A)에 의해 수신기에서의 음압준위(SPL: sound pressure level)가 계산된다(그림 6). 이때 음원과 수신기 사이의 음파 에너지 전파손실(PL: propagation loss)은 다음과 같이 정의될 수 있다.

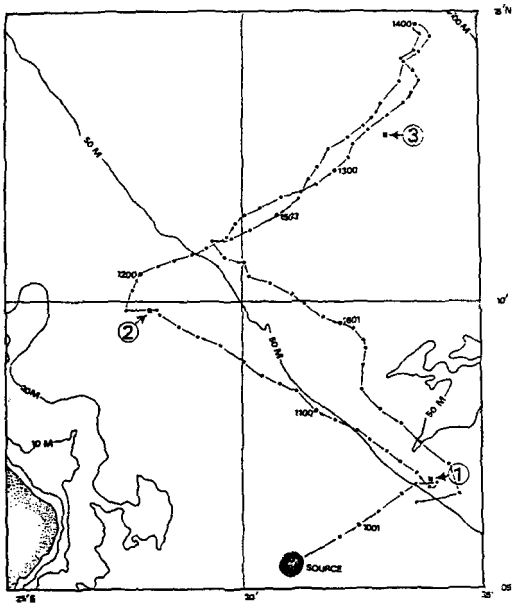


그림 5. 음원 발생기의 예인 경로. 그림에서 ①, ②, ③은 각각 수신기의 설치 정점 번호이다.
 Fig 5. Towing track of sound source. The numbers(①, ②, and ③) on the figure denote the positions of 3 receiving sites, respectively.

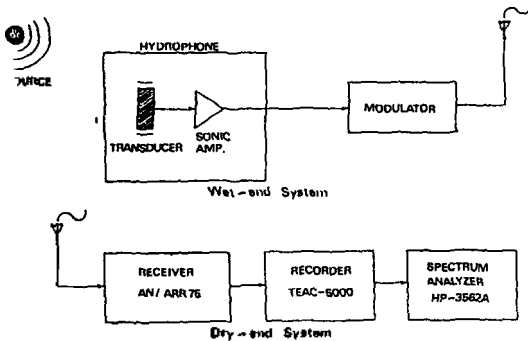


그림 6. 음향신호의 분석 절차.
 Fig 6. Block diagram of the analytical procedures of acoustic signal.

$$PL = 10 \log (I_s/I_r) = SL - SPL \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

여기에서, I_s = 기준 거리에서의 음원의 음향강도,
 I_r = 수신기에서의 음향강도,
 SL = 음원 준위이다.

식 (1)에서 PL 을 계산하기 위하여는 음원준위 SL

과 수신기에서의 음압준위 SPL 을 알아야 하는데, SL 은 표 1에서와 같이 주파수에 따라 일정하므로 결국 수신기에서 수신된 음향신호를 분석하여 SPL 을 알면 PL 을 계산할 수 있다.

스펙트럼 분석기에 의해 측정된 전압준위로 부터 SPL 을 구하면 다음과 같다.

$$SPL = 20 \log (V_s) - H \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

여기에서, V_s = 스펙트럼 측정치(volts),
 H = 측정 시스템의 감도(sensitivity)이다.

측정 시스템의 주파수별 감도는 그림 7에 나타난 곡선을 이용하여 구하였다.

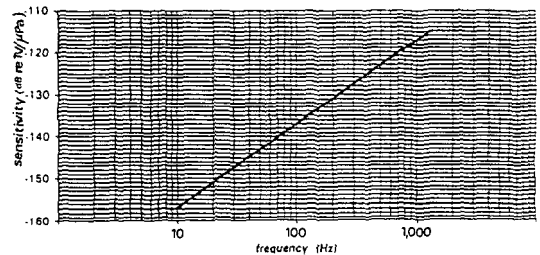


그림 7. 주파수 대비 수신감도.
 Fig 7. Receiving sensitivity vs. frequency.

III. 결과 및 토의

3.1 수심에 따른 전파손실 양상

천해에서 음파가 전파될 때는 필연적으로 해표면과 해저면을 연속적으로 반사하며 진행하게 된다. 그러므로 해저면의 수심변화 양상에 따라 전파손실도 변화가 있으리라 예상된다. 본 음향실험에서는 해저면의 수심변화에 따른 전파손실 차이를 살펴보기 위해 두가지 경로를 택하여 음원기를 예인하였다. 즉, 그림 5에 나타난 바와 같이 정점 ①에서 ②로 향하는 경로와 ②에서 ③으로 향하는 경로를 택하여 음원을 예인하였다.

그림 8은 두 경우의 실험결과로부터 얻은 전파손실을 거리에 따라 비교한 결과이다. 그림에서 전파손실은 편의상 상대치로 나타내었다. 1P는 음원을 정점 ①에서 ② 방향으로 동수심선에 평행하게 예인하는 경우이고, 2P는 정점 ②에서 ③으로 동수심선에 직각으로 예인하는 경우이다. 주파수 100Hz인 경우, 거리 8Km

까지는 두 경우의 전파손실 차이가 뚜렷하지 않으나, 거리 8Km 이후부터는 등수심선에 평행인 경우의 전파손실이 직각인 경우의 전파손실보다 증가율이 작아져서 11.5Km에서 약 10dB 가량 작음을 볼 수 있다. 또한 등수심선에 수직인 경우 거리에 따라 전파손실이 매우 규칙적인 진동을 보이는데, 이는 mode interference 효과에 기인된 것으로 여겨진다. 405Hz인 경우에도 100Hz인 경우와 같이 거리 5.5Km 이후 등수심선에 평행인 경우의 전파손실이 더욱 작다. 그리고 등수심선에 직각인 경우 거리에 따른 진동의 규칙성이 100Hz인 경우에 비해서 작아졌음을 볼 수 있다. 805Hz인 경우에는 등수심선에 평행인 경우의 전파손실이 직각인 경우보다 거리 5Km 이후부터 두드러지게 작아짐을 알 수 있다. 이상과 같이 두 극단적인 수심변화에 따른 전파손실을 비교해 본 결과 전반적으로 등수심선에 평행인 경우의 손실이 더 작으며, 이러한 경향은 음원-수신기 사이의 거리가 멀어지면서 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 또한 주파수에 따라서도 그 차이의 정도가 다른데, 이것은 실험해역에서 최소의 전파손실을 일으키는 주파수가 존재할 가능성을 제시하고 있다.

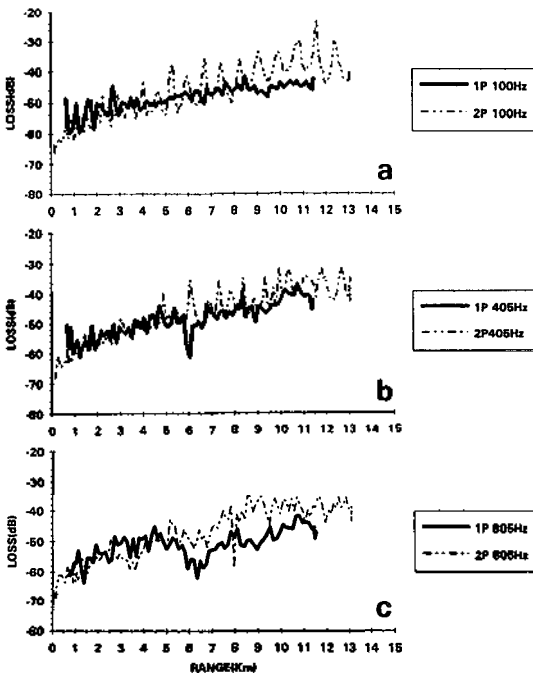


그림 8. 수심변화 양상에 따른 전파손실 비교. 1P : 등수심선에 평행, 2P : 등수심선에 직각. (a) 100Hz, (b)

405Hz, (c) 805Hz.

Fig 8. Comparisons of propagation loss influenced by depth varying patterns. 1P : parallel to isodepth line, 2P : perpendicular to isodepth line. (a) 100Hz. (b) 405Hz. (c) 805Hz

그림 9는 등수심선에 수직인 경우에 대해 음파의 진행방향에 따른 전파손실을 비교한 것이다. 즉, 음원을 수심이 40m인 정점 ②로 부터 수심 80m인 정점 ③으로 예인할 때 두 정점의 수신기로 부터 수집된 전파손실을 비교한 것인데, 그림에서 2PD와 3PA는 각각 정점 ②, ③으로 부터 구해진 전파 손실임을 표시하고 있다. 그러므로 2PD는 음파의 상향조건하에서의 자료이고 3PA는 하향조건하에서의 자료이다. 정점 ②와 ③ 사이에는 수심의 변화가 심한 편이지만 표층 퇴적물의 유형은 거의 sand-silt-clay로서 균일한 편이다(그림 2, 3). 205Hz인 경우 거리 6Km 이상

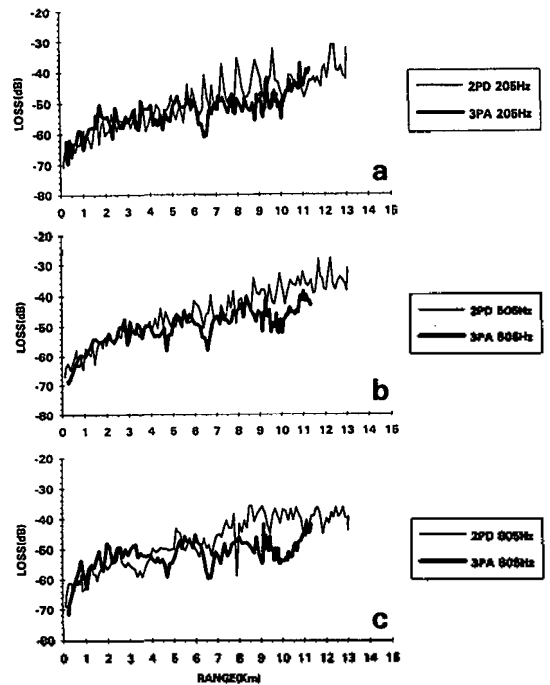


그림 9. 상향조건과 하향조건하에서 음파의 전파손실 비교. 2PD : 상향조건, 3PA : 하향조건. (a) 205Hz, (b) 505Hz, (c) 805Hz.

Fig 9. Comparisons of propagation loss in the conditions of upslope and downslope. 2PD : upslope conditions, 3PA : downslope conditions. (a) 205Hz, (b) 505Hz, (c) 805Hz.

에서 하향조건일 때의 전파 손실이 상향조건일 때보다 작다. 505Hz인 경우에는 이러한 경향이 더욱 뚜렷하여 거리 4Km에서 부터 하향조건일 때의 전파손실이 대체적으로 작다. 거리에 따라서는 두 경우의 전파손실이 10dB 이상까지 차이가 발생한다. 805Hz인 경우에는 거리 4Km까지는 상향조건일 때 전파손실이 작으나, 4Km 이상에서는 대체적으로 하향조건일 때 작다. 특히 8-9Km, 9.5-11Km 사이에서 차이가 약 10dB 이상까지 발생함을 알 수 있다.

위와 같이 수심의 변화가 심한 곳에서 음파의 진행 방향에 따라 전파손실이 발생하는 기작은 주어진 해양환경에서 음파의 진행경로를 시뮬레이션 함으로써 이해가 가능하다. 그림 10은 실험해역의 실제 수심자료와 수층의 음속구조를 입력시켜 얻은 음파 진행경로 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 음원의 수심은 10m로 동일하며, 음파의 진행방향은 좌측에서 우측으로이다. 그림 10(a)는 음파가 수심 80m 해역으로 부터 수심 40m 해역으로 진행하는 경우로서, 상향조건을 이루고 있다. 음파는 해표면과 해저면에 반사되면서 진행하는데, 수신기가 15Km 거리에 위치할 경우 거

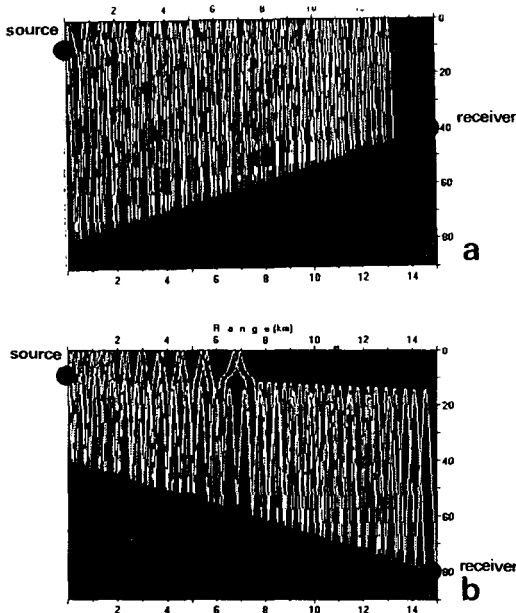


그림 10. 음파의 진행경로 시뮬레이션 결과. (a) 상향조건, (b) 하향조건.

Fig 10. Simulation results of sound wave propagation paths. (a) upslope condition, (b) downslope condition.

의 음파가 도달하지 못함을 나타내고 있다. 이에 비해서 하향조건일 경우(그림 10.b)에는 음파의 진행 양상이 다르다. 즉, 수층의 음속이 수심 10m까지는 증가하고 그 이심에서는 강한 음속 기울기가 존재하므로(그림 4), 그림에서와 같이 7Km까지는 해저면-해표면 반사를 일으키지만 그 이상의 거리부터는 해표면에 반사되는 대신 수층내에서 굴절된다. 그 결과 15Km 거리에까지 음파가 잘 도달하게 된다.

3.2 해저 퇴적을 유형의 변화에 따른 전파손실 양상

실험해역의 해저 표층 퇴적물의 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 크게 3가지로 구분된다. 이 중에서 정점 ①에서 ②로 향하는 경로에는 주로 gravelly sand로 구성되어 있고 정점 ③에서 ①로 향하는 경로에는 sand-silt-clay로 구성되어 있다.

그림 11은 해저 표층 퇴적물이 gravelly sand로 구성되어 있는 해역(1PD)과 sand-silt-clay로 구성되어

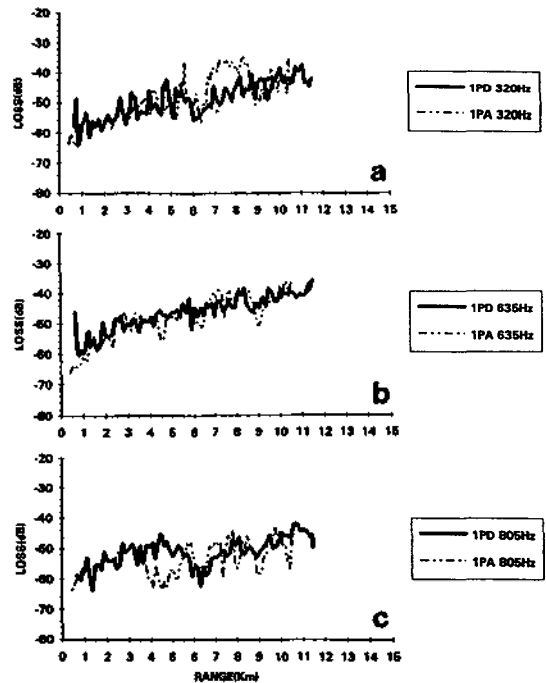


그림 11. 2개 표층 퇴적물 유형에 따른 전파손실 비교. 1PD: gravelly sand, 1PA: sand-silt-clay. (a) 320Hz, (b) 635Hz, (c) 805Hz.

Fig 11. Comparisons of propagation loss in the two surface sediment types. 1PD: gravelly sand, 1PA: sand-silt-clay. (a) 320Hz, (b) 635Hz, (c) 805Hz.

있는 해역(1PA)에서의 전파손실 비교 결과이다. 320Hz인 경우 6-9Km 사이에 sand-silt-clay에서의 전파손실이 약 10dB 이상까지 크나, 그외의 구간에서는 뚜렷한 차이를 볼 수 없다. 635Hz인 경우에도 거리에 따라 두 경우의 전파손실 차이를 거의 볼 수 없다. 그리고 805Hz인 경우의 3.5-5.5Km 구간에서는 오히려 gravelly sand에서의 전파손실이 크다.

본 실험해역에서 표층 퇴적물 유형에 따라 전파손실은 뚜렷한 차이를 보이지 않고 있는데, 이에 대한 원인으로서는 여러가지 면을 고려해 볼 수 있다. 첫째, 실험해역의 해저에 분포하는 퇴적물은 전체적으로 조립하여 모래입자 크기 이상을 가진 퇴적물이 대부분을 구성하고 있다는 점을 들 수 있다[심과 장, 1992]. 즉, 그림 3에서와 같이 서로 비교한 해역의 표층 퇴적물이 sand-silt-clay와 gravelly sand이나, 두 가지 퇴적물 중에 sand 성분이 대부분을 차지해서 실제로 두 퇴적물의 지구 물리적 특성이 유사하다는 점이다. 둘째, 실험해역에 분포하는 기반암은 육지 기반암의 연장으로서 화산암 및 반심성암인 것으로 해석된다. 그리고 실험해역의 일부에는 기반암이 노출되어 있고 노출된 해역 이외에는 퇴적물이 10m 정도의 얇은 두께로 기반암을 덮고 있다[심과 장, 1992]. 이로 인하여 음파 진행시 퇴적층의 영향이 비교적 적게 반영된 것으로도 해석할 수 있다. 셋째, 퇴적층의 특성은 깊이에 따라 크게 다를 수 있으므로 표층의 퇴적물 유형만을 고려하기 보다는 퇴적층 깊이별 지구 물리적 특성을 고려해야 한다는 점이다. 음파가 영향을 미칠 수 있는 퇴적층의 두께는 주파수에 따라서 다르지만 주파수 1600Hz 이하의 음파일 경우 10m 이상에까지 투과가 가능하다[Mitchell and Focke, 1983].

3.3 최적 전파 주파수

그림 12는 수신 정점 ①에서 계산된 전파손실중 거리에 따라 최대 또는 최소 전파손실이 일어나는 주파수를 표시한 결과이다. 주파수는 100, 130, 320, 405, 505, 635, 805Hz 등 7개이다. 음원이 수신 정점 ①에서 멀어져 가는 경우에 5.5Km까지는 130Hz에서 전파손실의 최소(최적 전파 주파수)가 많이 나타나지만 5.5Km에서 10Km까지는 805Hz 주파수에서 전파손실의 최소가 지배적으로 나타남을 알 수 있다. 10km 이상의 거리에서는 다시 130Hz 주파수에서 전파손실의 최소가 나타난다. 한편 전파손실의 최대는 4Km까

지는 635Hz와 320Hz 주파수에서 가끔씩 나타나다가 4Km 이상의 거리에서는 지속적으로 나타남을 볼 수 있다. 음원이 수신 정점 ①에 가까이 다가올 경우, 거리 구간마다 최적 전파 주파수가 변함을 볼 수 있다. 거리 3.4Km까지는 최적 전파 주파수가 130Hz이고, 3.4-4.3Km 구간은 405Hz, 4.3-5.4Km 구간은 850Hz, 5.4-7.0Km 구간은 130Hz, 7.0-8.2Km 구간은 805Hz, 그리고 8.2-10.0Km 구간은 100Hz, 10Km 이상은 다시 805Hz가 최적 전파 주파수임을 알 수 있다. 한편 전파손실의 최대는 320Hz와 635Hz 주파수에서 지속적으로 나타남을 볼 수 있다.

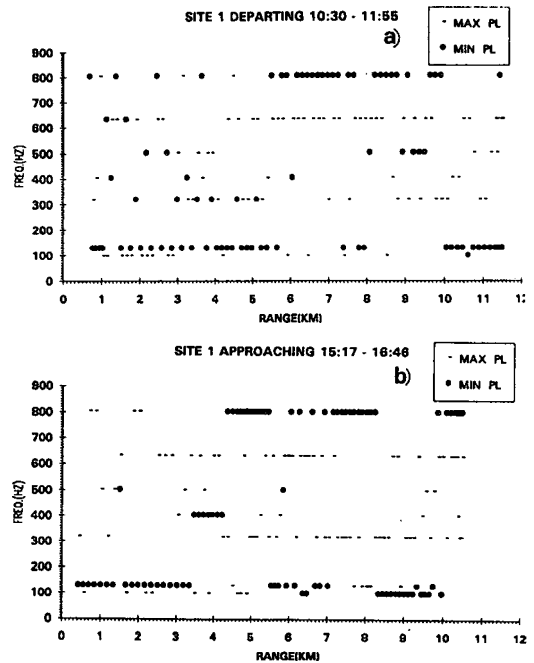


그림 12. 거리에 따라 최소 또는 최대 전파손실이 일어나는 주파수.

- (a) 음원이 1번 정점으로 부터 멀어져 갈 경우(10:30-11:55),
- (b) 음원이 1번 정점에 접근하는 경우(15:17-16:46).

Fig 12. Frequencies where minimum or maximum propagation losses occur in each range. (a) source departs No.1 site(10:30-11:55), (b) source approaches No.1 receiver(15:17-16:45).

수신 정점 ②로 부터 얻은 결과(그림 13)는 수신 정점 ①로 부터의 결과(그림 12)와는 다른 양상을 보

여준다. 즉, 수신 정점 ①의 결과에서는 최소 전파손실이 거리 구간마다 약간의 차이는 있으나 100-130Hz, 805Hz 주파수에서 지속적으로 유지되고 최대 전파손실은 320, 635Hz 주파수에서 지속적으로 유지됨을 알 수 있었다. 그러나 수신 정점 ②에서는 음원이 접근하는 경우(그림 13.a)와 멀어져 가는 경우(그림 13.b) 모두 최소 전파손실이 130, 165, 205, 255Hz 주파수에 산재하여 나타나고 있음을 볼 수 있으며 특정 주파수에 밀집되어 있지는 않다. 그런데 수신 정점 ②에서 획득한 자료는 표 1에서 언급한 10개의 모든 주파수에 대해 분석되었으나 수신 정점 ①에서 획득한 자료는 165, 205, 255Hz 주파수에 해당하는 부분이 누락되어 있다는 점을 유의한다면 수신 정점 ①에서의 최적 전파 주파수 결과도 ②에서의 결과와 유사

하게 130-255Hz 사이에 산재되어 있다고 유추할 수 있다. 음원이 수신 정점 ②에서 멀어져 가는 경우(그림 13.b), 거리에 따라 지속적이지는 못하나 805Hz에서 최소의 전파손실을 보이고 있음도 주목할 만하다.

음원이 수신 정점 3번에 접근하는 경우(그림 14.a) 최적 전파 주파수는 수신 정점 2번의 경우처럼 130-255Hz 사이에 산재되어 있다. 수신 정점 ③에서는 표 1의 10개 주파수중 100Hz에 해당하는 자료가 불량하여 분석대상에서 제외하였다. 분석결과 6.5Km 이상의 거리, 특히 9.5Km 이상의 거리에서는 805Hz 주파수에서 아주 미세하게 전파손실 최소가 나타남을 볼 수 있다. 그리고 전파손실이 최대로 나타나는 주파수는 320-635Hz에 분산되어 있으나 635Hz에서 가장 우세함을 볼 수 있다. 음원이 수신 정점 ③에서 멀어져

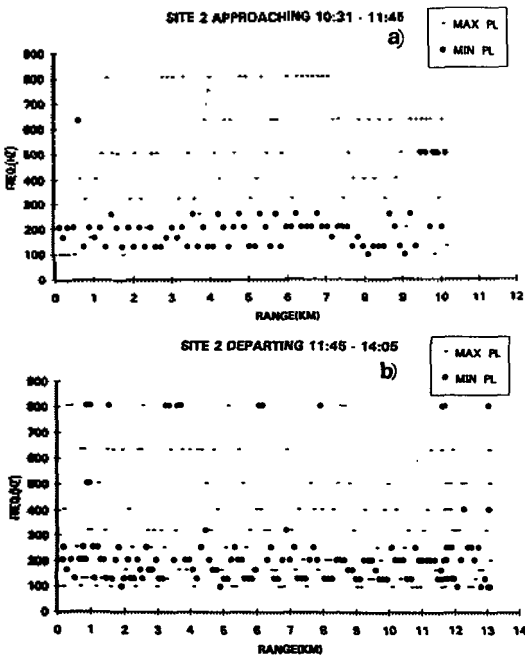


그림 13. 거리에 따라 최소 또는 최대 전파손실이 일어나는 주파수.

- (a) 음원이 2번 정점에 접근하는 경우(10:31-11:45),
- (b) 음원이 2번 정점으로 부터 멀어져 갈 경우(11:45-14:05).

Fig 13. Frequencies where minimum or maximum propagation losses occur in each range. (a) source approaches No.2 receiver (10:31-11:45), (b) source departs No.2 receiver(11:45-14:05).

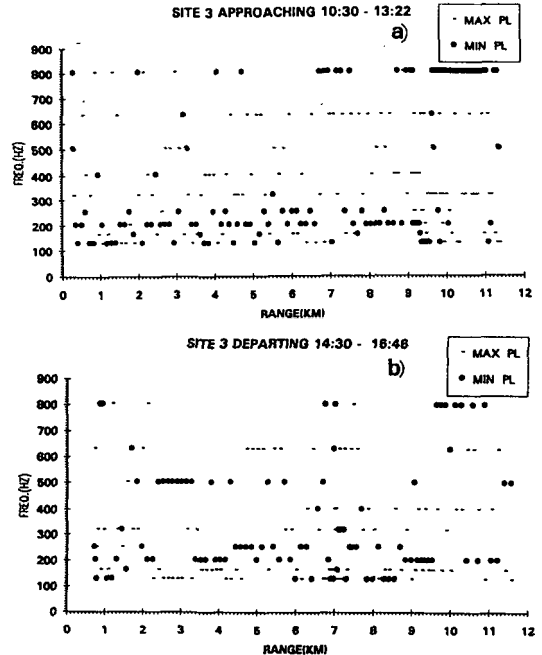


그림 14. 거리에 따라 최소 또는 최대 전파손실이 일어나는 주파수.

- (a) 음원이 3번 정점에 접근하는 경우(10:30-13:22),
- (b) 음원이 3번 정점으로부터 멀어져 가는 경우(14:30-16:46).

Fig 14. Frequencies where minimum or maximum propagation losses occur in each range. (a) source approaches No.3 receiver(10:30-13:22), (b) source departs No.3 receiver(14:30-16:46).

가는 경우(그림 14.b), 최소 전파손실은 여전히 130-255Hz 주파수에 산재되어 있고, 음원이 가까이 접근하는 경우에 비해서 505, 805Hz 주파수 등에 좀 더 분산되어 있는 양상을 보인다. 한편 전파손실이 최대로 나타나는 주파수는 특정 주파수에 밀집되기 보다는 거리에 따라 130, 165, 405, 635Hz 등이 산재되어 있다.

이상 3개 수신 정점에서의 결과를 요약하면 표 2와 같다. 3개 정점 공통으로 130-255Hz 범위에서 최소의 전파손실이 일어나며, 805Hz의 고주파에서도 아주 미세하게 최소 전파손실이 나타남을 알 수 있었다. 또한 주로 주파수 405-630Hz 사이에서 최대의 전파손실이 일어나며, 이는 실험에 이용된 주파수중 중간 부분에 해당된다. 그리고 특이한 점은 10Km 거리내에서도 어느 특정 주파수가 일관되게 최적 전파 주파수인 것이 아니라 작게는 약 2Km 구간에서 그 주파수가 달라짐을 알 수 있었다.

표 2. 한국 동남해역에서의 최소 또는 최대 전파손실 주파수.
Table 2. Frequencies where minimum or maximum propagation losses occur in the Southeast sea of Korea.

Site	Case	Minimum Freq.	Maximum Freq.
1	Departing	130,805Hz	635Hz
	Approaching	130,805Hz	320,635Hz
2	Approaching	130-255Hz	635,805Hz
	Departing	130-255, 805Hz	405,635Hz
3	Approaching	130-255, 805Hz	320, 405, 630Hz
	Departing	100-255, 505, 805Hz	405, 630Hz

Jensen과 Kuperman[1983]이 실제 실험자료를 바탕으로 작성한 수심에 따른 최적 전파 주파수 변화 결과(그림 15)로 판단할 때, 음향실험이 실시된 해역은 수심 40-80m이므로 여름철 수층구조를 적용하면 최적 전파 주파수는 최소한 800Hz 이상에서 나타나야 한다. 그러나 본 실험결과는 구간에 따라 805Hz에서 부분적으로 전파손실의 최소가 나타나기도 하지만 130-255Hz 주파수 대역에서 더욱 미세하고 지속적으로 나타난다. 그런데 Jensen과 Kuperman의 결과는 2개의 균질한 퇴적층을 가정하고 퇴적층내 음속이 일정한 상수(수층 음속 대비 각각 1.02와 1.20) 사이에서 변화한 환경에서의 결과이다. 이는 필연적

으로 해서 퇴적물의 유형에 약하게 관계될 수밖에 없을 것이다[Mitchell and Focke, 1983]

음파가 전파될 때 천해에서는 특히 해저면과의 반사가 빈번하게 일어나므로 해저면의 상태(거칠기, 퇴적물의 분포, 음속구조, 지질학적 구조등)에 따라서 전파손실은 큰 변화를 가져오며, 따라서 최소의 전파손실이 일어나는 주파수도 짧은 거리에서 변할 가능성이 있다[Hamilton, 1972, 1980; Hovem, 1980; Allen, 1980; Zhou and Zhang, 1987]. 그러므로 천해에서의 음파진행 기작을 이해하고 음향모델을 통해 전파손실을 예측하기 위해서는 근본적으로 해저 퇴적층의 음속구조가 밝혀져야 한다. 이와 병행하여 50Km 이상 원거리까지의 전파손실 측정실험을 실시하여 보다 정확한 음파의 진행기작을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

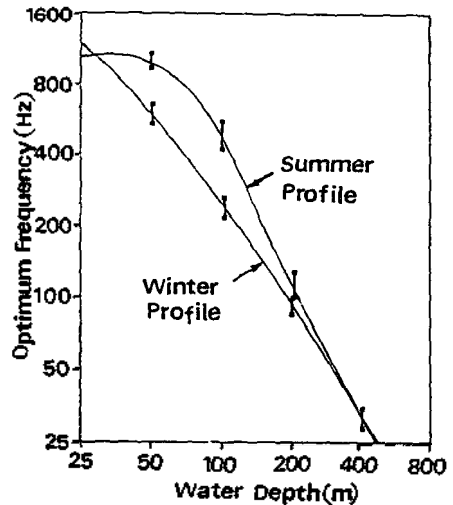


그림 15. 수심과 최적 전파 주파수 함수. 그림에서 막대는 측정 해역의 퇴적물 유형에 따른 변화량을 나타낸다[Jensen and Kuperman, 1983].

Fig 15. Optimum propagation frequency as a function of water depth. Bars indicate observed variation with bottom type [after Jensen and Kuperman, 1983].

IV. 결 론

천해환경인 한국 동남해역에서 10개 주파수 협대역 음향신호를 이용하여 해저 수심과 퇴적물 유형의

변화에 따른 전파손실 양상을 규명하였다. 또한 음향 실험에 이용된 10개 주파수의 전파손실을 서로 비교하여 최적 전파 주파수를 결정하였다.

음파가 등수심선에 평행하게 진행할 때와 수직으로 진행할 때의 전파손실을 비교해 보면 전반적으로 평행하게 진행할 때 전파손실이 작으며, 이러한 경향은 음원-수신기 사이의 거리가 멀어질 수록 두드러진다. 또한 음파가 등수심선에 수직으로 진행하는 경우에도 수심이 감소하는 방향(하향조건)과 증가하는 방향(상향조건)에 따라서 전파손실의 차이가 발생한다. 즉, 하향조건일 때의 전파손실이 상향조건일 때의 손실보다 대체적으로 작으며, 거리 구간에 따라서는 10dB 이상까지도 차이가 발생한다.

해저 표층 퇴적물이 gravelly sand와 sand-silt-caly로 구성된 해역에서의 전파손실을 서로 비교한 결과 뚜렷한 차이점을 발견하기가 어렵다. 이는 두 퇴적물의 성분중에 sand가 공통적으로 대부분을 차지하여 실제로 큰 지구 물리적 특성 차이가 없으며, 퇴적층의 두께도 10m 이하로서 음파가 진행할 때 퇴적층의 영향을 적게 받기 때문으로 여겨진다. 추후에 보다 상세한 퇴적층의 특성이 밝혀질 경우 퇴적층의 특성 변화에 의한 전파손실 양상 규명이 가능하리라 사료된다.

실험에 사용된 10개 주파수의 전파손실을 서로 비교하여 거리마다 최소의 전파손실을 일으키는 최적 전파 주파수를 결정한 결과 각 정점에서 공통적으로 130-255Hz 범위가 우세하며, 805Hz의 고주파도 빈번하다. 그리고 10Km 거리 이내에서도 최적 전파 주파수가 어느 특정 주파수에 일관되게 나타나기 보다는 거리 구간마다 변한다.

참 고 문 헌

1. Akal, T. 1980. Sea floor effects on shallow-water acoustic propagation. *Bottom-interating Ocean Acoustics*, edited by W.A. Kuperman and F.B. Jensen, Plenum, New York.
2. Allen, J. E. 1980. Transmission Loss Variability in Shallow Water. *Bottom-interacting Ocean Acoustics*, edited by W.A.Kuperman and F.B.Jensen, Plenum, New York.
3. Eller, A. I and D. A. Gershfeld, 1985. Low-frequency acoustic response of shallow water ducts. *Acoust.Soc.Am.*78, 622-631.

4. Ellis, D. D and D. M. F. Chapman, 1980. Propagation loss modelling on the Scotian Shelf: Comparison of model predictions with measurements. *Bottom-interacting Ocean Acoustics*, edited by W. A.Kuperman and F.B.Jensen, Plenum, New York.
5. Gershfeld, D. A and A. I. Eller. 1985. Geometric considerarion in determining the optimum frequency of acoustic propagation in shallow water waveguide. *J.Acoust.Soc.Am.*78, 632-641.
6. Hamilton, E. L. 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediments. *Geophysics.* 37, 620-646.
7. Hamilton, E. L. 1980. Geoacoustic modelling of the seafloor. *J.Acoust.Soc.Am.*68, 1313-1340.
8. Hovem, J. M. 1980. Attenuation of Sound in Marine Sediments. *Bottom-interating Ocean Acoustics*, edited by W.A.Kuperman and F.B. Jensen, Plenum, New York.
9. ensen, F. B and W. A. Kuperman. 1983. Optimun frequency of propagation in shallow water environments. *J.Acoust.Soc.Am.*73, 813-819.
10. Mitchell, S. K and K. C. Focke, 1983. The roll of the seabottom attenuation profile in shallow water acoustic propagation. *J.Acoust. Soc.Am.*73(2), 465-473.
11. Urick, R. J. 1970. Shallow-Water Revisited : Further Acoustic Observations at a Site off the Coast of Florida. U.S.Nav. Ord.Lab Rep. 69-234.
12. Zhou, J and X. Zhang. 1987. Effect of frequency dependence of sea-bottom attenuation on the optimum frequency for acoustic propagation in shallow water. *J.Acoust.Soc.Am.*82(1), 287-292.
13. 심태보, 최진혁, 장덕홍, 정문섭, 나영남, 박문호, 박재담, 윤영순. 1988. 한국 항만 해양 환경집 : 제5집. 국방 과학연구소 보고서(SENP-506-88111), 1-68.
14. 심재형, 장덕홍. 1992. 포항만 음향 및 설치환경 조사 연구. 국방과학연구소 보고서(NSRD-517-91651). p66.

사 사

본 논문에 대해서 유익한 조언을 주신 한양대학교의 나정렬 교수님과 해양대학교의 김재수 교수님께 감사드립니다. 그리고 진지하게 심사를 하여 주신 심사위원 여러분에게도 감사를 드립니다.

▲나 영 남

1993년 현재 국방과학연구소 선임연구원
(한국 음향학회지 9권 6호 참조)

▲심 태 보

1993년 현재 국방과학연구소 책임연구원
(한국 음향학회지 9권 6호 참조)

▲최 진 학



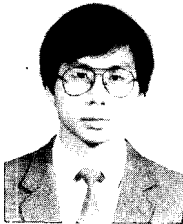
1952년 6월 17일
1978년 2월 : 서울대학교 해양학
과 졸업(B.S)
1981년 8월 : 서울대학교 해양학
과 대학원 졸업(M.S)
1990년 8월 : 서울대학교 해양학
과 대학원 졸업(Ph.D)
1985년 5월 ~ 현재 : 국방과학연
구소 선임연구원

▲장 덕 흥



1955년 12월 27일생
1982년 1월 : 경북대학교 전자공
학과 졸업(B.S)
1993년 3월 ~ 현재 : 경북대학교
전자공학과 대학원
재학중
1982년 1월 ~ 현재 : 국방과학연
구소 선임연구원

▲김 성 일



1963년 4월 21일생
1986년 2월 : 서울대학교 해양학
과 졸업(B.S)
1988년 8월 : 서울대학교 해양학
과 대학원 졸업(M.S)
1990년 3월 ~ 현재 : 국방과학연
구소 연구원

▲한 정 우



1966년 5월 23일
1988년 2월 : 경북대학교 전자공
학과 졸업(B.S)
1990년 2월 : 경북대학교 전자공
학과 대학원 졸업
(M.S)
1990년 3월 ~ 현재 : 국방과학연
구소 연구원