

## 수중 음향학의 대잠전 응용 고찰 (The Application of Underwater Acoustic Theory in ASW Area)

허 대 범\*

### 제1장 서론

제1차 대전시 독일의 U-BOAT 출현으로 영국은 고전을 면치 못하였으며 미국의 참전으로 전세가 역전당할 사태에서 겨우 구출되었다. 2차대전시 또다시 영국에서는 독일 U-BOAT의 공격때문에 대잠전 해결문제가 큰 난제로 또다시 부각되었다. 이는 영국의 관계자들이 1차대전시의 뼈저린 교훈을 망각하고 평소 대잠전 준비를 소홀히 하였기 때문이다. 다행히도 전쟁중 BLACKETT 교수를 중심으로 한 과학자들의 꾸준한 대잠전의 이론적 뒷받침으로 인하여 U-BOAT 공격을 격퇴시키고 2차대전을 승리로 이끌 수 있는 원동력이 되었다. 미국도 2차대전시 많은 전문가들이 대잠전 분야에 종사하여 수중음향학의 이론과 적용을 상당한 수준으로 끌어 올렸던 것이다.

그러나 북극과 주변국의 잠수함 위협이 증대되고 있는 현 실정에서 우리는 대잠전 분야에서 외국의 전술교리에 지나치게 의존한다든가 우리의 무관심, 자료수집의 등한시 등으로 수중음향학 분야에 지대한 관심을 갖지 않는다면 외국으로 부터 장비를 도입하거나 혹은 체제 설립시 제시할 장비 특성에 대한 탐지거리 예측이나 탐지확률에 의거할 SYSTEM DESIGN을 요구하고 정확히 평가, 분석하는 문제도 전문이론의 부족으로 고도로 발전되는 이론과 기술에 낙후되는 실정에 놓일 것이다. 또한 한국연안해역에 맞는 환경예보체제와 전문지식이 미비하다면 실무자들은 대잠전에 많

은 어려움에 봉착하게 될 것이다. 이러한 문제점을 해결하는데 도움이 될 수 있는 수중음향학의 기초이론을 파악하고 한국해안과 같은 천해에 미치는 영향을 고려해 보고 대잠전과 관련을 시켜 수중을 탐지하는 적의 각종 수단을 탐지하기 위하여 음파의 전달형태, 음영과 최소 탐지거리와 효과적인 탐지위치 예측을 모의해 보며 SONAR 방정식과 FIGURE OF MERIT에 대한 최대 탐지거리를 구하는 방법을 연구하고자 한다.

해양은 공기와 달라 전자파 및 광파에 있어서는 매우 나쁜 매질이지만 음파에 있어서는 훌륭한 매질이 된다. 해수중에서 음파가 진행해 나갈 때에는 해수의 온도와 염분도 및 압력에 따라서 속도가 변화하여 이에따라 굴절이 발생하고 경계면에서의 성질에 따라 반사하는 음파의 강도도 변화한다. 이러한 음의 성질을 이용하면 수중에서 임의의 물체의 위치와 그 속도를 알아낼 수 있다. SONAR는 해수중에서 음파의 전달이론을 적용하여 주로 적 잠수함을 탐지하는 수단으로 쓰는 대표적인 군사적인 적용의 예라고 할 수 있다. 그러나 실질적인 문제로서 해수중의 음파의 전달이론은 매우 복잡하며 간단히 해결되는 것이 아니다. 음파의 전달형태, 소음 수준 및 타 해양환경 요인등 수많은 변수등에 의해 원하는 표적의 위치와 속도를 산출해 낼 수가 있지만 이러한 인자들에 의한 음파의 전달경과는 매우 복잡한 관계식을 거쳐서만 알아 낼 수 있는 것이다. 특히 대잠전에서는 음영구역(SHADOW ZONE)의 존재에 따라 적 잠수함이 이 구역에 위치하면 SONAR로써 탐지하는 것

\* 해군본부 체제분석실

은 불가능하므로 우리가 특정구역의 환경 인자와 각종 변수들을 정확히 파악하여 음파의 전달경로, 음영구역 등을 예측할 수 있다면 대잠 탐지 활용은 정확도를 높일수가 있을 것이며, 이를 바탕으로 한 한국근해에 적합한 환경예보체제를 갖출수 있을 것이다. 본 논문에서는 이 연구를 위하여 다음과 같은 순서에 의거 논하고자 한다.

첫째로 수중음향학 발달의 역사적 고찰을 논하고 둘째 수중음파에 영향을 미치는 요인들을 열거해 보겠다. 셋째 SONAR 방정식을 소개해서 이들의 특성을 살펴보고, 넷째 파동이론을 소개하고, 다섯째 해양예보체제의 소개와 예보의 전망에 관하여 논하고 마지막으로 파동방정식에 의한 모델을 설정하여 수확을 통한 접근방식으로 음의 전파경로를 컴퓨터에 의거 예측하고, 4장에서 소개한 SONAR 방정식을 이용하여 잠수함의 최대탐지거리를 구하고 이들을 서로 비교 분석하고자 한다. 또한 대잠전에서 이 결과가 어떤 중요성을 갖는가를 논하고 문제점과 해결책을 논하고자 한다.

## 제2장 역사적 고찰

음향이 공기 중에서 뿐만 아니라 수중에서 존재한다는 가장 오랜 기록의 하나는 LEONARDO DA VINCI 수첩속에서 찾아 볼 수가 있다. 1490년 콜롬버스가 미대륙을 발견하기 2년전에 "만약 배를 정지시켜 놓고 긴 PIPE의 한쪽 끝을 물속에 넣고 그 반대쪽 끝에 귀를 갖다 댄다면 멀리 떨어져 있는 배의 소리를 들을 수 있다."라고 기술하고 있다.

1차대전 중기까지 수중음향을 듣는 방법은 공기가 든 튜브를 물속에 넣고 탐지자의 귀를 이용하는 것이었으며 튜브가 여러개이면 소리의 방향까지 알아낼 수 있었다. 그러나 수중음향의 최초 정량측정은 1827년 스위스 물리학자 DANIL COLLADON과 불란서의 수학자 CHARLES STURN에 의해서 이루어졌다.

이후 19세기에도 많은 사람들이 이 분야에 관심을 갖고 연구를 계속하였지만 그 성과는 대단한 것이 못되었다. 1912년 여객선 TITANIC호가 북대서양에서 처녀 항해중 빙산에 충돌하여 침몰했던 참사를 계기로 항해의 안전을 위하여 초음파를 사용해서 수중물체를 식별할 수 있다는 이론이 제안되었으며 C.V. DRYSDALE (2)은 1918년 수중물체에 의해 반사된 초음파의 반향음을 검출했다고 학회에 보고한 바 있다.

제1차 세계대전중 미국의 잠전기운이 고조될 즈음 미해군은 잠수함의 탐지방식이 국가이익에 중대함을 인식하게 되었으며 많은 사람들이 수중물체 탐지를 위한 연구에 참여하게 되었다.

전쟁기간중 독일의 U-BOAT가 연합국의 함선에 심각한 위협이 되자 수중음향의 체계적인 연구에 대한 군사적 필요성이 더욱 요구되었다. 이에 따라 R. A. MILLIKAN이 주도하는 미국의 연구팀은 수중음향학의 이론적 정립과 아울러 여러가지 실험도 같이 하였던 결과 잠수함의 탐지는 자장, 전자파, 빛 또는 열 현상보다 음향을 이용하는 것이 더 효과적이라는 결론을 얻었다. 초기의 수중음발생원으로 사용해 온 TRANSDUCER는 비용이 많이 들고 또 원시적인 기구이었지만 LANGEVIN이 결정체에서 PIEZO 전기효과가 발견된 후부터는 수중음을 송수신용으로 사용되는 TRANSDUCER가 크게 발전되었으며 1917년 이후 PIEZO 전기효과를 갖는 결정체에 대한 연구가 박차를 가하게 되었다 (3), (4). 두번의 세계대전을 치루는 동안 구미의 선진국에서는 다양한 잠수함 (5), (6) 탐지기술이 수없이 쏟아져 나왔고 몇 차례의 개선을 거쳐 오늘의 음파기가 만들어 지게 되었다.

최근에 레이저를 이용하여 수중통신 및 잠수함의 탐지를 시도하는 노력이 경주되고 있으나 그 실현에는 많은 문제점과 함께 비용과 시간이 필요하며 잠수함에서는 아직도 수중음파 탐지가 중요한 탐지기로 존재하고 있다.

### 제 3 장 수중음파에 영향을 미치는 요인

#### 제 1 절 수온 · 염분도 · 수심

파동이 매질속을 진행해 나갈 때에 그 전달 속도는 파동의 특성을 결정해 주는 중요한 요인이 된다. 파동은 매질내에서 전달속도가 서로 다른층에 도달하면 그 경계면에서 굴절을 하게 된다. WILSON의 이론에 따르면 수중을 지나는 음파는 수온, 염분도 및 압력에 따라 영향을 받는다고 하였다. 그는 실험을 통하여 이와같은 사실을 입증하고 있는데

$$C = 1449.2 + 4,623t - 0.0546t^2 + 0.00035t^3 + (1.391 - 0.012t)(s - 35) + 0.017d \dots\dots\dots (1)$$

이 된다고 하였다. 여기에서 C는 음속, t는 온도, s는 염분도, d는 수심(m)을 나타낸다. 상기(1)에서 보면 음속의 가장 주된 변화요인은 수온이며 수온분포가 음파의 굴절에 큰 영향을 미친다는 것을 알수 있다.

선박해양연구소의 해양조사보고서 Vol. 1에 의하면 우리나라 해수의 염분도는 33%와 35% 사이에서 거의 큰 차를 나타내지 않으며 연안의 강하구 등에서만 심한 차이(29% 정도)를 보이고 있지만 수온은 수심에 따라 그리고 지역에 따라 매우 다양한 분포를 이루고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 음속은 온도가 1°F 증가함에 따라 4-8 FEET/SEC 증가하고 염분도가 1% 증가할때 약 2FEET/SEC 정도 증가하게 된다. 또한 해저 저질의 종류와 구조에 따라 음파를 반사하는 정도에 많은 영향을 주므로 해저 저질의 분포상태를 알아내는 것은 중요한 일이다. 이외에 음파의 주파수에 따라서는 전달효과가 달라지는데 저주파는 수중침투거리가 매우 길지만 반면에 분석효과가 불량하고 DEFLECTION이 매우 높은 반면 초음파는 수중침투거리가 짧아서 탐지거리가 제한되는 반면 분석효과가 높고 DEFLECTION 효과가 적어 물체의 탐지, 식별에 도움이 된다. 일반적으로 분석효과는 음파의 파장과 같은 비율로 나간다.

기후조건은 음파의 전달에 그렇게 큰 영향을 미치지 못하지만 심한 바람이라든가 강우현상, 파도, 해저, 저질 등은 다소 영향을 주고 있다.

#### 제 2 절 전달손실

바다는 수면과 해저의 경계를 포함해서 음파의 전달에 매우 복잡한 매질이 된다. 수중을 음파가 진행해 나갈 때 신호음은 지연이 되고 왜곡되며 주어진 경로를 따라 전파되어 갈때 에너지 손실이 일어나게 되고 이에 따라 음압이 약해진다. 이러한 여러가지 현상중에서 신호음이 약해지는 것을 전달손실이라고 하며 음원으로부터 1야드 떨어진 거리에 있어서의 음압에 대한 주어진 점의 음압의 상대비로서 나타낸다. 전달손실의 양이 많고 적음은 수중표적의 최대 접촉거리를 알아내는데 수단을 제공하고 각 해역의 환경인자에 따라 변하는 양이므로 대잠전에서는 주어진 해역의 전달손실을 사전에 밝혀둌으로써 접촉거리를 산출할 수 있다.

우리나라 연근해는 대부분 천해지역이므로 음파가 원통형으로 전파해 나간다고 볼 수 있다. 따라서 전달손실을 TL이라 하였을때

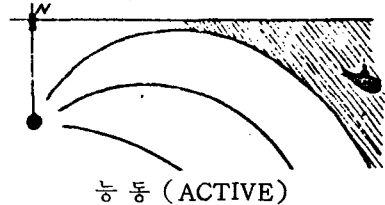
$$TL = 10 \log r + \alpha r + \alpha r \times 10^{-3} \dots\dots (2)$$

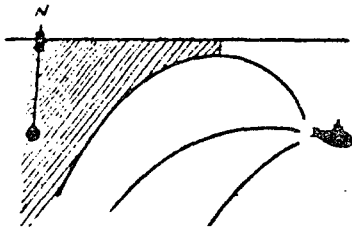
로 표시할 수 있으며 r는 진행한 거리이고 α는 Attenuation 계수이며 f는 주파수라고 하면

$$\alpha = \frac{0.1 f^2}{1 + f^2} + \frac{40 f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 \dots\dots\dots (3)$$

으로 주어진다.

대잠전에서 TL을 안다면 식(2)에 의해 잠수함의 접촉거리 r을 알 수 있지만 잠수함의 위치를 알아 내려면 음파의 경로를 같이 알아야 된다. (그림 1)





수동 (PASSIVE)

그림 1. 음파의 상호관계  
(Homogeneous Ocean)

즉 그림(1)에서 보면 잠수함의 탐지거리 밖에 잠수함이 있으면 표적을 탐지하지 못하므로 전후 거리를 산출하여 그 거리를 유지해야 되고 그림(2)에서 처럼 음파의 경로를 모르면 잠수함의 위치에 대해 오차가 생기게 된다. (그림 2)

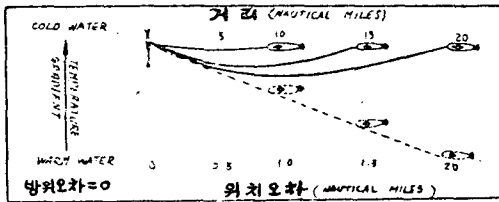


그림 2. 수평 경사로—쓰나  
방위구역

제 3 절 온도경사도

대양의 온도는 태양으로부터 받는 총 열량과 반사나 복사에 의한 열손실의 균형에 의해서 결정되어지고 변화한다. 대양의 어떤 지역에서 표층온도의 년중 변화는 흡입되는 복사량의 변화와 대양해류의 특성과 강한 영향을 주는 바람들에 기인한다. 일정한 기간에 대양은 태양과 우주로부터의 복사열 흡수, 지구내부로부터 해저를 통해 전달되는 열대류, 운동에너지를 열환원, 화학과정에 의한 가열, 대기

로부터 오는 현저한 열의 대류, 수증기의 액화 ( $Q_v$ ), 지역적 해수의 온도변화에 대한 열량 ( $Q_Q$ ), 등은 해수온도를 가열시켜 주고 해수면으로 부터의 재복사 ( $Q_b$ ), 대기로부터 방출되는 열대류 ( $Q_h$ ), 증발 ( $Q_e$ ) 은 대양을 냉각시키는데 이를 식으로 표시하면

$$Q_s - Q_b - Q_e - Q_h + Q_v + Q_Q = 0 \dots\dots (4)$$

이 된다.

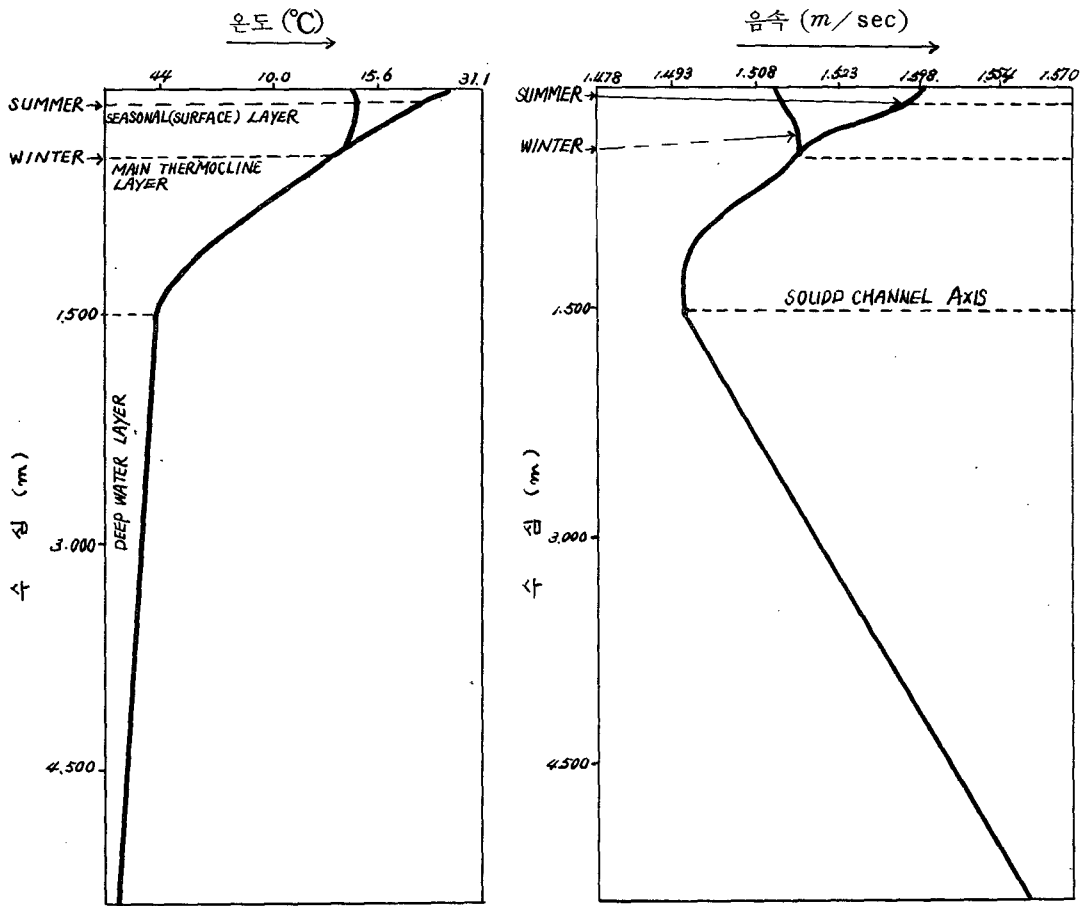
대양 심층부에서의 온도변화는 네가지 요인 즉 ① 각기 다른 깊이에서 직접 흡수하는 열량의 변화, ② 열전도 효과, ③ 수개의 측면과 접해 있는 해류의 변화, ④ 해수의 수직운동 효과, 등에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 위에서 열거한 것 들은 대양해수층에 특이한 온도분포를 만들어 주는데 수온의 1일변화와 계절변화, 년변화 등에 대한 온도분포를 온도경사라고 한다.

수중음은 이 온도 경사도에 따라 그 전파경로가 주로 결정되어 지는데 대양에 나타나는 대표적인 온도경사도와 이에 따른 음속을 그림 (3)에 나타냈다.

그림 (4), 그림(5) 그리고 그림(6)에는 대표적인 음속경사도와 이에 따른 음의 전파경로를 나타냈다.

특히 극동 연안과 같은 천해에서는 여름과 겨울 계절에 따른 일정 깊이의 수면과 그 이하의 온도차가 현저하여 음파경로에 복잡성을 주어 탐지거리에 많은 영향을 준다.

만약 온도경사도와 음속경사도가 복잡해지면 그 경로는 복잡하여 지며 음영구역이 형성된다. 이와같이 온도경사도는 음영구역과 Echo Ranging 을 알려주기 때문에 대잠전에서 매우 중요한 요소가 되며 원하는 시각에 있어서 온도경사도와 음파경로를 아는 것은 대잠 음향 탐지장비의 효과적 운영에 필수적 요소가 된다.



심해에서 기본온도 구조

그림 3

심해에서 음속구조

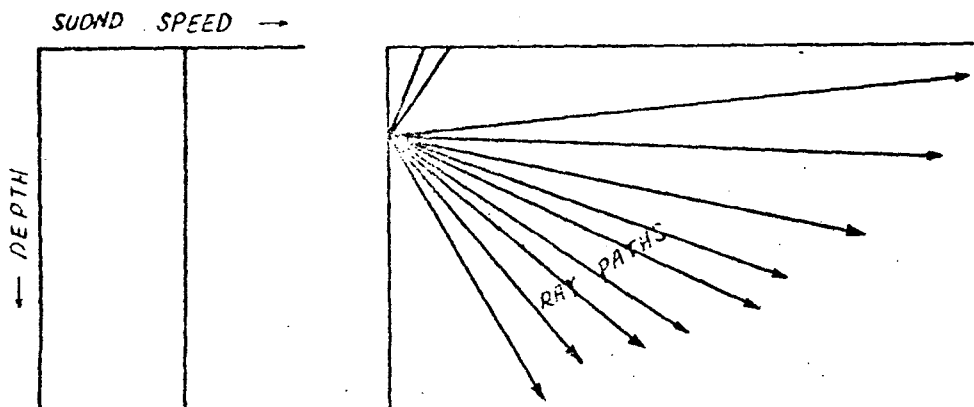


그림 4. Isovelocity-Straight Line Ray Transmission

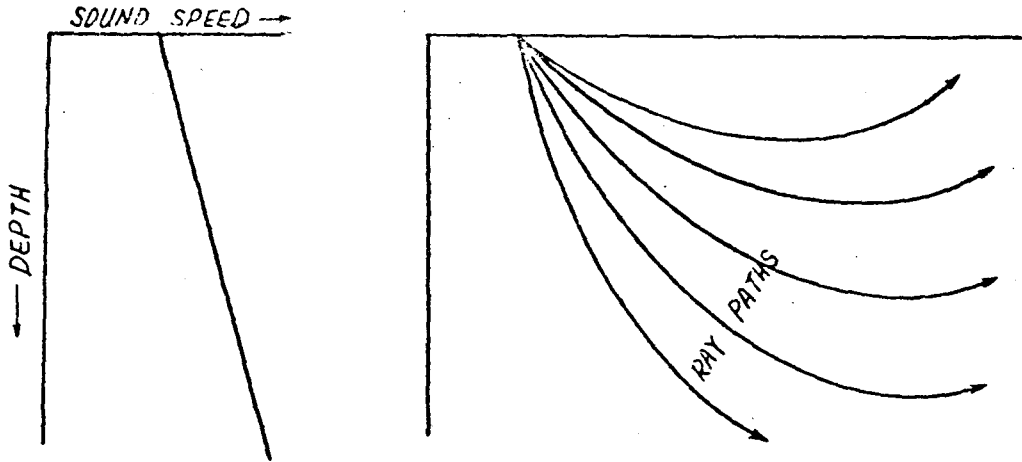


그림5. Positive Sound Speed Gradient and Ray Curvature.

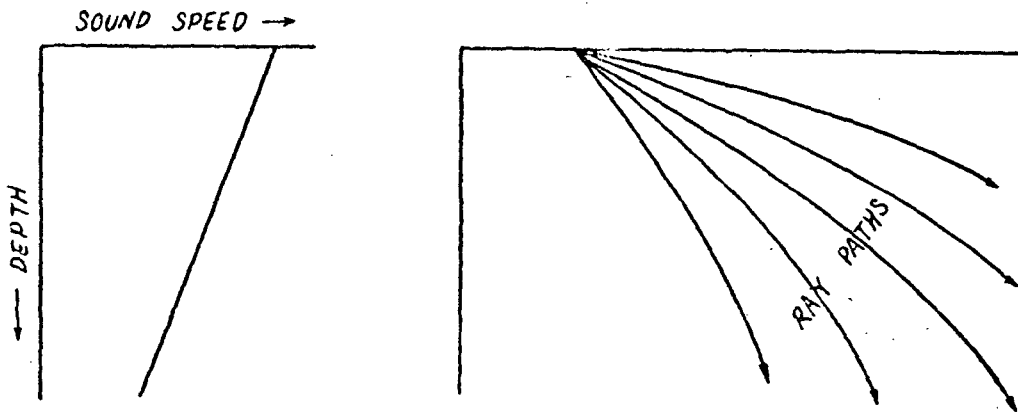


그림6. Negative Sound Speed Gradient and Ray Curvature

제 4 절 환경소음(Ambient Noise)의 영향

해수층의 압력은 일정하지 않다. 뚜렷하게 발생된 음파는 없지만 압력의 자연변화에 따른 음파를 환경소음이라 부른다. 환경소음은 산호음을 측정할 때 간섭을 일으키게 되며 신호음 분석에 많은 어려움을 주는 성가신 존재가 된다. 조류와 물의 Hydrostatic 한 효과에 의해 생기는 음파는 압력에 반응하는 수중 청음기에 환경소음을 일으키게 되고 해저 저질과 대양의 강한 표층파도와 분자운동, 열적 효과 등에 의해 생기는 음파도 저주파와 고주파 영역에서 환경소음을 일으킨다.

특히 대잠작전시 수중 청음기에 들어오는 신호음에 많은 지장을 주는 환경소음으로 수중생물이 내는 소음과 해상 교통량에 따른 배의 소음이 있다 [1]. Wenz [10] 와 Marsh [11] 는 대양에서의 환경소음의 스펙트럼을 연구하고 각 주파수대에 따른 근원을 밝혔으며 이외에도 배의 항해에 따른 소음의 특성과 그 분포 [12], 심해 [13] 와 천해 [14] 에서의 환경소음 등도 많은 사람들에 의해 연구대상이 되어 왔다. 수중생물이 내는 소리는 10 Hz 에서 100 Hz 까지 다양한 것으로 알려져 있으며 특정해역에서는 멀치어장이 형성될 때

소음은 10 Hz ~ 100 Hz 사이의 저주파대에서 소음수준이 심각히 높다.

각종 배의 환경소음 스펙트럼은 배의 크기와 엔진의 출력, 속도 및 종류에 따라 다양하고 독특하다. 해상의 풍속도 환경소음 수준에 영향을 미치고 있고 풍속과 환경소음 수준과의 관계에도 많은 연구가 있다 (1). 특히 항만은 적의 잠수함으로부터 보호하기 위해서는 환경소음 수준과 스펙트럼 특성을 필수적으로 알아야 한다.

스펙트럼 분석기로서 환경소음과 신호음은 분간해 낼 수는 있지만 이것을 작전에 응용하기 위해서는 각 주파수에 걸쳐서 스펙트럼 Level 특성과 Real-Time 주파수 분석을 선행하여야 하며 수중음 분석에 대한 자료가 많이 축적되어 있어야만 효과적으로 이용할 수가 있다. 각 지역의 환경소음 수준 측정자료는 항만 방어체제 수립에 사용되며 매우 중요한 요소가 된다. 환경소음의 측정 정확도 여하에 따라 항만방어체제의 성공여부가 결정된다. 특히 항만방어의 필요성이 요구되는 나라에서는 중요성이 더욱 강조된다. 미국에서는 스펙트럼 분석과 컴퓨터에 의거 적 잠수함의 유형까지 탐지하고 있으며 각 함정의 스펙트럼 특성을 일일이 분석 기록하여 피아를 식별하는데 사용하고 있다. 이처럼 심해와 천해를 막론하고 환경소음의 특성 분포에 대한 관측 및 분석자료는 군 작전뿐만 아니라 타분야에서도 매우 유익하게 이용될 수 있다.

### 제 5 절 산란(Scattering)과 흡수(Absorption)의 영향

수중물체의 탐지를 위하여 음파를 발사했을 때 기록되는 물체에서 오는 반사파와 환경소음을 구분하여 기록해야 한다. 음파는 작은 부유물체로부터 산란이 되는데 고체 상태가 기체 상태, 무생물과 생물에 무관하게 산란된다.

산란된 음파는 교란된 대기때문에 빛이 반짝이는 것과 같이 반사해 오는 음 파장에 환경소음으로 교란을 주게 된다. 산란중 특히 공

기방울에 의해 산란되는 것은 잠수함 탐지에 혼란을 가져오게 되며 Sonar의 효율을 극단적으로 저하시키는 요인이 된다.

이 공기 물방울 들은 물고기들이 발생시키거나 혹은 표면의 파도에 의해 생기기도 하고 배의 추진기에 의해 물이 강제 혼합될 때 발생이 되기도 한다.

단 한개의 음파가 산란되었다고 가정하면 산란파의 세기는

$$I_s = \delta I / 4 \pi r^2 \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $I_s$  : 음원으로부터  $r$ 만큼 떨어진 곳에서의 산란파의 세기

$I$  : 입사 평면파의 세기

$\delta$  : 산란 단면적

실제로 음원은 파장에 비해 매우 작으므로 구형태가 된다. 이 때 음파의 세기는 거리의 제곱에 반비례하게 되므로

$$I = I_0 / r^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $I_0$ 는 음원에서의 음파의 세기를 뜻한다. 따라서 식 (5)는 아래와 같이 표현된다.

$$I_s = \delta I_0 / 4 \pi r^4 \dots\dots\dots (7)$$

특정한 주파수를 가진 음파는 적당한 크기의 공기 방울내에서 공명현상을 일으켜 산란 단면적  $\delta$ 를 최대로 크게 해준다.

이 공명 주파수는

$$f_r = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3r\rho_0}{\rho}} \dots\dots\dots (8)$$

로 주어지며,

$r$  : 공기에서의 비열비

$a$  : 공기방울의 반경

$\rho_0$  : Hydrostatic 압력

$\rho$  : 물의 밀도

공기의 비열비는 1.4 이므로 수심  $d$ 인 곳에서의 공명주파수는

$$f_r = \frac{326}{a} \sqrt{1 + 0.03 d} \dots\dots\dots (9)$$

음파가 공명주파수로 공기방울에 의해 산란되는 산란파의 세기는 급격히 커져서 잠수함에서 반사되어 오는 음파와 식별하기 어렵게 된다. 공기방울에 의해 음파가 산란되는 것

이외에 물체가 어떤 것이건 면으로부터 산란된 음파는 특별한 환경소음을 발생시키는데 Sonar의 효율을 극단적으로 제한시킬 수 있는 반향 (Reverberation)이라 부르는 Ringing이다.

흡수의 주요한 원인들은 점성적 흡수 (Viscous Absorption), 열에 의한 완화 (Thermal Relaxation) 그리고 화학적인 완화 (Chemical Relaxation)에 기인되고 있다.

흡수의 이러한 세가지 모든 형태는 음향파와 전달될 때 매개체에서 반복되는 압력의 쇠퇴에 의하여 원인이 생기는 것이다.

음향파의 주파수, 물의 온도 그리고 유산마그네슘 ( $Mg\ SO_4$ )은 흡수에 의하여 야기되는 손실량 (Magnitude of Loss)의 변화에 영향을 주는 중요한 요인처럼 나타난다. 이런 세가지 요인들 중에서 음향파의 주파수는 감쇄 (Attenuation)에서 가장 뚜렷한 변화를 야기시킨다. 다행히도 주파수는 능동적인 Sonar 장치의 설계에 있어서 조정 가능한 변수다.

### 제 6 절 경계면에서의 반사

음파는 물의 깊이에 따른 음속변화와 해양 조건의 변화요인으로 빛이 굴절하게 되며 특히 경계면 (해수면, 해저)에서의 반사, 굴절은 음의 전파에 크게 영향을 미친다. 경계면이 아주 매끄럽다면 반사된 음파는 한 방향으로 반사법칙에 따라 나가지만 만약 경계면이 거칠다면 난반사를 일으키게 되고 반향음을 만들게 된다. 반사된 음파의 세기는 경계면을 중심으로한 두 매질간의 밀도, 음속, 입사각에 따라 결정되어지며 두 매질간의 밀도차가 클수록 반사음파의 세기는 강해진다.

음속과 밀도를 곱한 값은 특성 인피던스 (Characteristic Impedance)로써 인피던스 맞춤 (Impedance Matching)에 의해 굴절파와 반사파의 세기를 결정짓는다.

① 심해에서는 경계면에서의 반사가 큰 영향을 주지 않으나 심각하게 대두된다. 천해에서 음파가 진행해 나갈 때 해저 매질과 해수의 밀

도차가 그렇게 크지 않으면 음파의 전달거리를 축소시켜 주므로 저질의 종류에 따라 대잠전 모델을 각각 세워야 한다.

해수의 특성 인피던스는 공기보다 3,700 배나 크기 때문에 수중음파의 에너지가 해수면을 뚫고 공기중으로 나가는 비율은 대략 111,000 정도 밖에 안되므로 해수면은 좋은 반사체로 볼 수 있다. 파도가 심하게 일거나 기포가 많이 생기는 지역에서는 해수면에서의 반사조건이 매우 악화된다. 해저 저질에서 반사파의 세기는 빨에서 가장 약하고 물결자국이 나있는 모래, 패각부스러기, 왕자갈 순으로 강해지며 암반인 경우 가장 세다. 반향음의 세기는 빨에서 가장 약하고 암반, 패각부스러기, 왕자갈, 모래층의 순으로 강해진다.

따라서 대잠전에서는 해저저질의 분포도를 중요시 해야 하며 해저저질의 종류에 따라 반사여건이 달라지므로 대잠전 모델에서는 이점을 고려해야 한다.

우리나라의 연해역의 대부분이 저질은 반사율이 매우 나쁜 빨로 되어 있으며 특히 서해의 경우 완전히 빨로 되어 있다. 이런 이유로 인하여 (천해관계로 수심이 얇은 이유에서) 성능이 우수한 음탐기라도 이런 해역에서는 탐지거리가 매우 짧아지게 된다. 수심이 탐지거리를 짧게 하는 이유는 수심이 제한인자가 되어 Cut-off Freq가 생기기 때문이다.

### 제 4 장 Sonar 방정식

Sonar란 Sound Navigation and Ranging의 준말이며 음을 이용한 수중물체 탐지기이다. 수중음의 발생원으로 초기에는 수중에서 종을 울리는 방법을 사용해 왔으나 Piezo 전기효과를 갖는 Transducer의 개발로 결정체로 쓰게 됐다. Transducer에는 작동상의 원리와 목적에 따라 크게 능동 Transducer와 수동 Transducer로 나눌 수 있다. 또한 능동, 혹은 수동 Sonar의 Power와 탐지효과를 높이기 위한 Sonar Array도 있다.



Sonar 방정식은 2 차대전중에 Sonar의 작동거리, 효과 등을 예고하거나 Sonar를 고안하는데 기준을 두는 식으로 고안되었었다.

Sonar 방정식은 어떤 종류의 Sonar를 작동했을 때 들어오는 신호음중 원하는 부분과 원치 않는 부분과의 기본 등식 관계에서 구할 수 있다. 수신기에서의 전체 음파장은 신호

음과 잡음으로 구분할 수 있으며 신호음은 원하는 부분이라 할 수 있고 잡음은 그 이외의 모든 음파장이라고 할 수 있다. 결국 신호대 잡음의 비율을 높이는 목적으로 방정식을 만들어 졌다. Sonar 방정식에 쓰이는 각종 매개변수의 정의와 그 위치들을 표 (1)에 수록하였다.

( 표 1 ) Sonar 방정식 용어

매개변수	기준위치	정의
1) 음원수준 (Source Level) : SL	음원의 음향축으로부터 1yd 떨어진 곳	$10 \log \frac{\text{음의 세기}}{\text{기준음 세기}}$
2) 전달손실 (Transmission Loss) : TL	표적이나 수신기에서 음원으로부터 1yd 떨어진 곳	$10 \log \frac{\text{표적이나 수신기에서의 1yd 떨어진 곳의 신호음 세기}}{\text{신호음 세기}}$
3) 표적강도 (Target Strength) : TS	표적이 음향중심에서 1yd 떨어진 곳	$10 \log \frac{\text{표적에서 1yd 떨어진 곳의 반사음 세기}}{\text{입사음의 세기}}$
4) 소음수준 (Noise Level) : NL	Hydrophone 위치	$10 \log \frac{\text{잡음의 세기}}{\text{기준음의 세기}}$
5) 수신감도지수 (Receiving Directivity Index) : DI	Hydrophone Terminal 위치	$10 \log \frac{\text{동등한 무지향 Hydrophone 에 의해 생기는 잡음의 Power}}{\text{동작되고 있는 Hydrophone 에 의해 생기는 잡음의 Power}}$
6) 반향수준 (Reverberation Level) : RL	"	$10 \log \frac{\text{Hydrophone Terminal 에서의 반향음 Power}}{\text{기준음 세기의 신호음에 의해 생기는 Power}}$
7) Detection Threshold : DT	"	$10 \log \frac{\text{어떤 장비를 작동할 때의 신호음의 Power}}{\text{Hydrophone Terminal 의 잡음의 Power}}$

Sonar 방정식에는 능동 Sonar 방정식과 수동 Sonar 방정식이 있는데 능동 Sonar 방정식은

$$SL - 2TL + TS = (NL - DI) + DT \dots (10)$$

수동 Sonar 방정식은

$$SL - TL = (NL - DI) + DT \dots (11)$$

능동 Sonar 방정식중 반향음이 존재할 때에는

$$SL - 2TL + TS = RL + DT \dots (12)$$

Sonar 성능을 측정하는 훌륭한 방법으로서 Figure of Merit (FOM)를 사용한다. FOM은 거리의 종속변수가 아니다.

능동 음탐기에서 Signal Excess 는

$$SE = FOM - 2TL \dots (13)$$

이고, 수동 음탐기에서는

$$SE = FOM - TL \dots (14)$$

로 표시하며 음탐 최대 탐지거리를 예측한다.

위의 Sonar 방정식은 일반적인 Sonar에 항상 적당한 형태는 되지 못한다. 짧은 pulse 형태의 Sonar에서는 반사음이 계속되는 동안의 항목을 첨가해 처야하며 이것을 Correlation Loss 라고 한다.

또한 바다는 다양하고 Inhomogeneous 매질이며 불규칙한 경계를 갖고 있고 항상 움직이고 있기 때문에 많은 Sonar 매개변수 들은 상수가 안되고 시간에 따라 그리고 환경에 따라 계속 변한다. 실제 Sonar 설계시 Sonar 방정식의 이용은 매개변수 들의 요동 때문에 정확성을 기할 수 없게 되고 아주 근사적인 값만을 취하기 때문에 수중음향학에 대한 이론적 발전과 더불어 계속적인 수정과 수식을 기재해야 된다.

### 제 5 장 파동 방정식

유체 매질내에서 음원이 음파를 발생할때 파동 방정식은 아래와 같이 이루어 진다.

$$\nabla^2 \varphi (R, t) = \frac{1}{C^2} \frac{\alpha^2 \varphi (r, t)}{\alpha t^2} \dots\dots(15)$$

여기서  $r$ 는 거리,  $t$ 는 시간,  $C$ 는 음속,  $\varphi (r, t)$ 는 시간과 거리에 의존하는 파동 함수이다.

파동방정식의 해는 좌표계의 종류와 근사방법에 따라 여러가지가 있으나 그중 대표적으로 Normal Mode 이론과 Ray 이론이 있다.

#### 제 1 절 Normal Mode이론

Normal Mode 는 심해의 구형에서 사용되며, 이 이론은 음원근처에서 파동의 해를 정확히 구할 수 있으나 해를 구하는 수학적 표시가 까다로운 단점이 있다. 음원이 구의 형태라면

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \dots\dots\dots(16)$$

로 표시하고 그 해는 Spherical Hankel 함수와 Legendre 함수의 곱으로 나타내 진다.

이때 System 의 적절한 진동주파수를 결정해 주고 System 이 여러개의 조화 진동수의 합으로서 해의 상수들을 결정해 준다. 음원이 원통형의 형태일때 그 해도 1차 종류의 Hankel 함수와 Legendre 함수의 곱으로 나타난다.

#### 제 2 절 Ray이론

Ray 이론 [17] 에 의해 파동방정식의 해를 구하는 방법은 고주파 영역과 파면의 곡률반경 변화가 적을 때에만 좋은 근사방법이 되는 단점이 있다.

3 차원 파동방정식은 직교 좌표계에서

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

로 표시되며 단 하나의 조화 진동수만 갖는 해는 아래와 같다.

$$\varphi = A (x, y, z) e^{i\theta(x, y, z, t)} \dots\dots\dots(17)$$

$$\theta = 2\pi f \{ ct - \rho (x, y, z) \} \dots\dots\dots(18)$$

여기서  $\rho$ 는 주파수이며  $\theta = \theta_0$  일 때 각점에서의 Wave Front 는 시간  $t$  때

$$\rho (x, y, z) = t - \frac{\theta_0}{2\pi f} \dots\dots\dots(19)$$

$C_0$ 를 표준조건에서의 음속이라 하고

$$\rho = \frac{W (r, y, z)}{C_0} \dots\dots\dots(20)$$

로 하면 식 (17) 은

$$\varphi = A (x, y, z) \cdot e^{2\pi i f (t - \frac{W}{C_0})} \dots\dots\dots(21)$$

여기서  $W$ 와  $t_0$  는

$$W (x, y, z) = C_0 (t - t_0),$$

$$t_0 = \frac{\theta_0}{2\pi f}, \quad t_0 = \frac{\theta_0}{2\pi f} \dots\dots\dots(22)$$

로 된다.

굴절계수 (Index of Refraction)  $n$ 을 정의 하면,

$$n (x, y, z) = \frac{C_0}{C (x, y, z)} \dots\dots\dots(23)$$

그러므로

$$\left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 = n^2 (x, y, z) \dots\dots\dots(24)$$

식 (24)를 Eikonal 방정식이라 하며 Ray 이론에서의 기본식이 된다. Ray 이론을 사용할때는 식 (24)의 해를 구하면 된다. 음속  $C$ 가 수평면에서는 어디서나 같은 속도라고 가정하고 수직길이  $y$ 에만 의존하는 함수라고 할 때 식 (24)의 해를 구해보자. Ray가 수평축  $x$ 와 이루는 각을  $\theta$ 라 하고 Projector가 ( $cy$ )

=  $C_0$  되는 지점에 놓여 있으며  $\theta_0$  가 이 지점에서의 Ray 방향이라면 한 점에서 곡선의 Curvature 는  $d\theta/ds$  로 정의된다.

여기서  $ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$  이므로

$$\frac{d\theta}{ds} = - \frac{d(\log c)}{dy} \cos \theta \dots\dots\dots (25)$$

식 (25) 은 Ray가 서로 다른 음속층의 바로 윗부분으로 진행해 나갈 때 ( $dy < 0$ ), 새로운 층이 높은 음속을 갖고 있으면  $d\theta/ds$  는 양수가 되어 Ray는 아래로 굽어지고, 새로운 층이 낮은 음속을 가지면  $d\theta/ds$  는 음수가 되어 Ray는 위로 굽어진다. 만약 Ray가 층 아래로 진행해 나갈 때에는 ( $dy > 0$ ) 반대 결과를 얻는다.

일반적으로 높은 음속층으로 들어가는 Ray는 층으로부터 밀어지는 쪽으로 굽어지며 낮

은 음속층으로 들어가는 Ray는 층안으로 굽는다.

한편 Ray가 수평까지 전달된 거리를 구하면 수평 전파거리  $R$ 은

$$R = \cos \theta \int_{y_0}^{h_0} \frac{C dy}{\sqrt{C_0^2 - C^2 \cos^2 \theta_0}} \dots\dots\dots (26)$$

이다. 여기서

- $h_0$  : 수심
- $y_0$  : 수평면 (탐지기 위치)
- $C_0$  : 최초 음속
- $C$  : 구하는 거리에서의 음속
- $\theta$  : 수평축과 이루는 투사각
- $R$  : 수평도달 거리

Ray 이론을 적용하여 Ray 경로를 구했을 때 그림 (7) 에서와 같이 음속이 서로 다른 층에서 굴절을 예측할 수 있고 해저에서 반사한 후의 수렴구역을 알 수 있다.

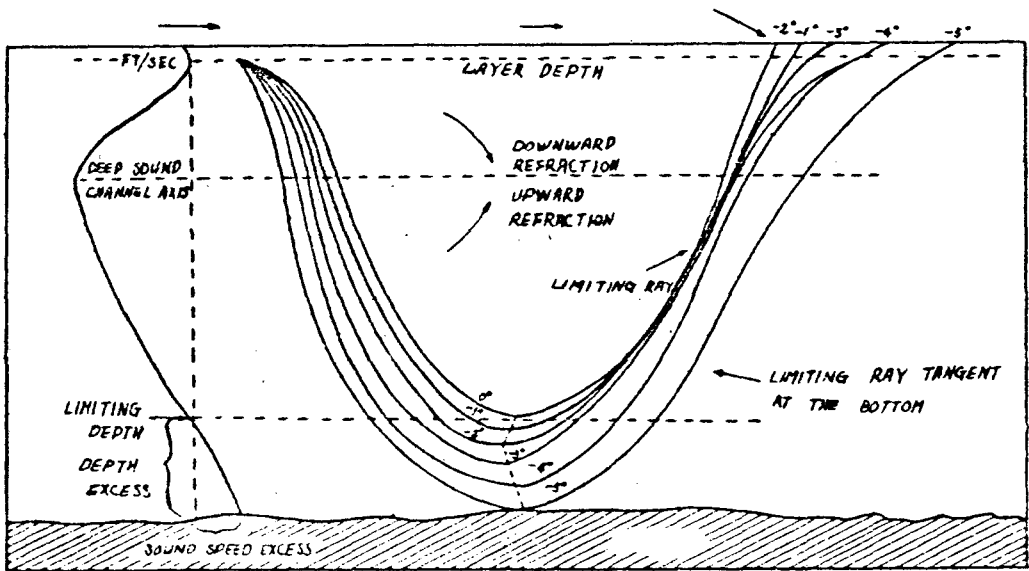


그림 7. Convergence Zone Propagation and Terminology

이와같이 수렴구역이 생길 경우 음파는 상당히 먼 곳까지 진행해 나갈 수 있고 잠수함을 보다 장거리까지 탐지할 수 있게 만든다. 다른 한편 음속 경사도가 그림 (8) 과 같이

주어질 때는 Ray가 층밖으로 벗어나지 못하는 Sound channel 이 형성되며 Sound channel 이 형성된 층의 수심에다 Sonar 를 장치하면 아주 먼 거리까지 탐지가 가능하다. 이런

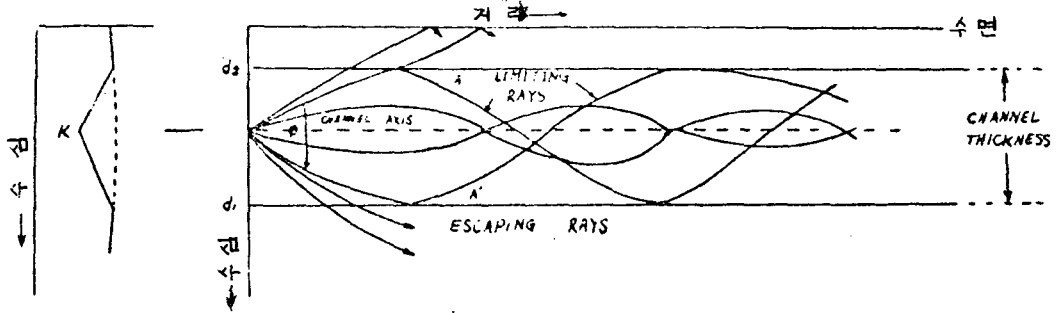


그림 8. Shallow Sound Channels

점을 고려할 때 온도변화가 심한 연안에서의 Variable depth sonar의 사용효과가 더 크다는 이론적인 뒷받침이 되며 이 점을 우리가 찾아 Variable Depth Sonar를 위치시키면 탐지거리가 증가될 것이다.

## 제 6 장 해양환경 예보와 전망

수중음향학은 군사학적으로 이용함에 있어서도 하나의 중요한 것이 해양환경의 예보를 신속하고 정확하게 하는 것이다.

해양환경예보는 해양의 수온분포, 염분도, 음탐기 종류 및 특성, 파고, 풍속등 제반환경자료를 입력자료로 하여 여기에 맞는 각종 음탐기의 유효 음탐거리를 예측함으로써 ① 대잠전 혹은 대잠 훈련시 훈련구역에서의 정확한 정보를 갖게 되며, ② 대잠함의 탐지 간격과 대잠 항공기에서 쓰는 Sono Buoy의 간격을 결정하며, ③ 작전 해역에 진입할 때 Sonar의 작동시기를 결정하며 (작동시기가 너무 빠르면 잠수함에겐 먼저 탐지되므로 탐지가 불가능하다), ④ 잠수함의 활동영역을 예측하고, ⑤ 음영구역을 예상하여 탐지거리를 확보하여 조합하는 등 (Best Depth) 대잠전을 과학적이고 효율적으로 수행하는 데에 목적이 있다. 해양환경예보는 미국 Naval Wea-

ther Service, FNWC (Fleet Numerical Weather Center) FWF (Fleet Weather Facility)가 있어 예보업무를 담당하고 있으며 이들은 800여개의 인공위성, 세계 각지의 해양관측소, 세계의 각 해역에 있는 미해군 함정으로 부터 하루에 몇회씩 모든 해양환경 자료를 보고받아 이것을 입력자료로 세계를 여러개의 구역으로 나누어 그 구역을 평균치로서 예고해 주고 있다.

이들의 예보로는 ASRAP (Acoustic Sonar Range Prediction) 등이 있다.

해양환경자료가 우리의 자료를 제공치 않고 자체의 자료로써 예보하게 되며 신뢰도는 떨어지게 된다. 이런 점으로 판단할 때 더욱더 우리 해역에 맞는 대잠전 탐지장비들의 예보가 중요한 것을 느끼게 된다. 우리나라에 해양자료가 보관되고 있는 곳으로는 국립수산진흥원, 교통부 수로국 등이 있으나 사용될 자료는 상세하고 세분화 되어야 한다. 이러한 점에 비추어 우리나라와 같은 연해에 적합한 모델을 개발하고 해양환경 자료를 축적하여 스스로 개발하여야 하겠다. 앞으로 해야 할 일은 해양환경조사가 전 해역에 대해 철저히 실시되어야 하고 모든 함정은 규정에 의거 철저한 B/T Report를 활용하여 모델 연구를 실시하여 조속히 더 섬세한 한국적 환경예

보체제를 갖는 것이 선결문제일 것이다.

## 제 7 장 시뮬레이션

### 제 1 절 환경 및 Ray이론시뮬레이션

특정 해역에서 대 잠수함 작전을 실시할 경우 가장 문제되는 것은 음탐기의 유효 탐지 거리 계산 및 음영구역이 형성되는 위치를 결정짓는 것이다. (그림 9)

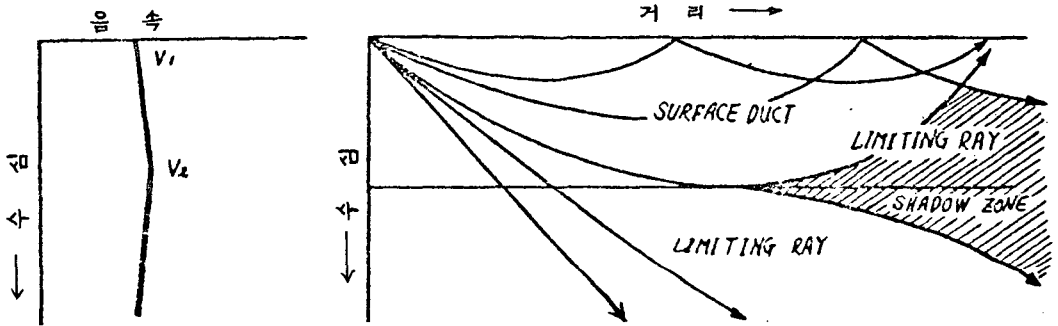


그림 9. Limiting Rays와 음영구역

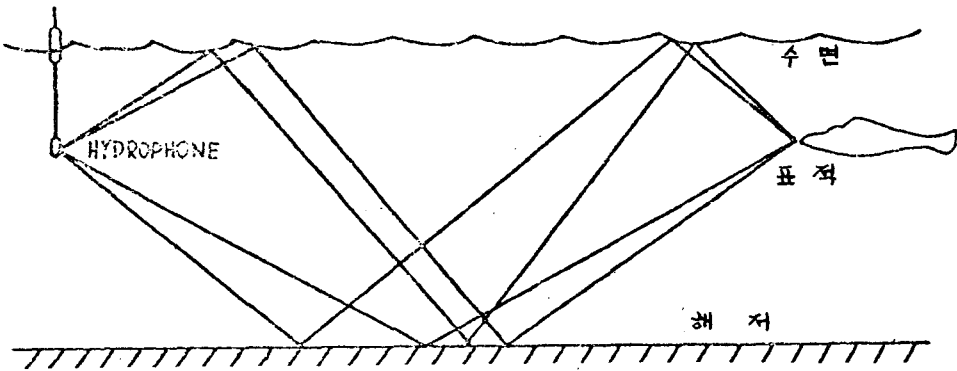


그림 10. 해저반사 경로도

이와같은 효과를 고려하여 적당한 DATA 를 가정하여 환경자료를 시뮬레이션하여 탐지 가능한 영역과 탐지거리 그리고 문제점들을 검토해 보았다.

환경 시뮬레이션을 위하여 다음 사항들을 가정하였다.

1. 해저는 평탄하며 반사조건이 좋은 저질로 되어 있다. (해저를 5° 경사시와도 비교함)
2. 수심은 500 m 및 50 m 해역이다.

그림 (4), (5), (6)에서 처럼 온도 경사도가 단순하면 음영구역의 존재도 쉽게 알아낼 수 있지만 그림 (9)에서 처럼 온도와 속도 경사도가 조금만 복잡해도 빗금친 부분과 같은 음영구역이 생기므로 잠수함 탐지에 문제가 생긴다. (그림 10)

또한 음파의 경로를 안다면 해저와 수면에 의한 중복반사로 잠수함의 탐지거리를 넓힐 수도 있다.

3. 표층의 온도는 25°C, 바닥의 온도는 5°C로 일정하게 감소하며 온도 경사도가 -4°C/100 m 이다.

4. 음파가 진행하는 동안 수중에서 산란은 없다.

5. 환경 소음은 바람에 의한 것과 기타에 의한 것까지 합하여 70 db 이다.

6. 반향 (Reverberation)은 무시할 만큼 작으며 음파의 경로를 구할 때 각 수심에서의 곡률반경은 일정하다.

먼저 환경에서 가정한 환경모델을 이용하여 식 (1)과 식 (26)의 해를 구해보자.

본 연구에서는 Simpson 공식을 써서 구간적분법으로 Computer Model을 만들어 음파 발사각 ( $\theta$ )에 따라 거리와 Ray 경로를 알아냈다. 이때 소구간을 100으로 했다.

Computer는 Wang Computer - 2200을 이용하였으며 그림 13에 Computer program과 결과를 나타냈다. 도표 7-1은 계산결과이며 각 수심에서 입사각에 따라 Ray가 진행해간 거리를 미터단위로 표시했다.

그림 (11)은 그림 (13) Flow Chart를 이용하여 Plotting 해 본 결과이다. 그림 (11)에는 입사각에 따라 해저에서 최초 반사할 때까지를 나타낸 것이며 단위는  $m$ 로 나타냈다.

통상 Sonar 주사각은  $20^\circ$ 로 가정하므로  $20^\circ$ 와  $30^\circ$  사이에 음파를 주사했을 때에 500  $m$ 의 수심을 갖는 바닥에 도달한 때까지 음파는 수평거리 약 1,100  $m$ 를 진행하며 해저에서 반사하여 다시 표층으로 진행한다. 한편  $30^\circ$  각도로 음파를 발사했을 때는 약 768  $m$ 까지 진행한 후 해저에서 반사한다.

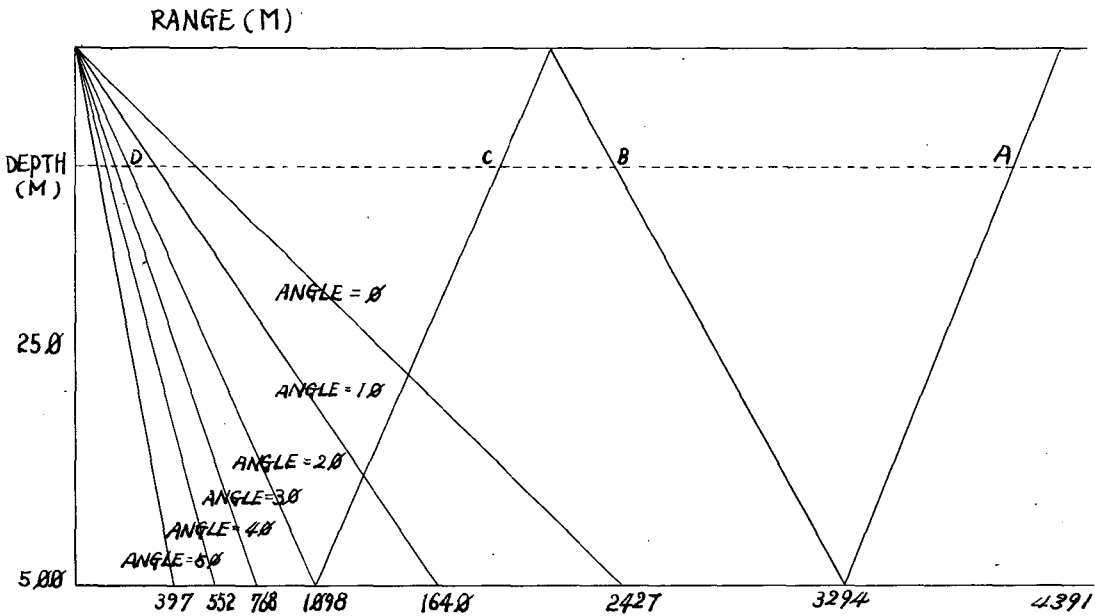


그림 11. RAY PATH

또한 해저면의 경사도가 평면이냐 혹은 파도를 갖는 경사면이냐에 따라서 음파의 진행 경로는 두드러진 차이를 보일 것이다. 그래서  $5^\circ$ 의 경사면 해저에 반사하는 음의 전달 거리를 비교해 보자.

그림 (12)에서와 같이 음파의 해저면 도달 거리는 1, 2 차 반사에서 평탄면에서는 128.1

$m$ 와 362.8  $m$  그리고 경사면에서는 164.8  $m$ 와 898  $m$ 로 나타난다.

이것의 계산은 Program 1(그림 13)을 개선 보완한 Prog. 2(그림 14)의 유통도가 나타난다.

도표 (2)에서는 음파의 진행경로의 중요사항이 나타나 있다.

반사 순서	평탄면		경사면		수평거리비 (평탄/경사)
	수평거리 (m)	수직거리 (m)	수평거리 (m)	수직거리 (m)	
1 <sup>st</sup> 해저면 반사	128.1	50	164.8	64.4	1 : 1.3
2 <sup>nd</sup> 수면 반사	247.6	50	345.3	88.9	1 : 1.4
2 <sup>nd</sup> 해저면 반사	362.8	50	898	137.3	1 : 2.5
3 <sup>rd</sup> 수면 반사	470.8	50	1,832.7	219	1 : 4.0

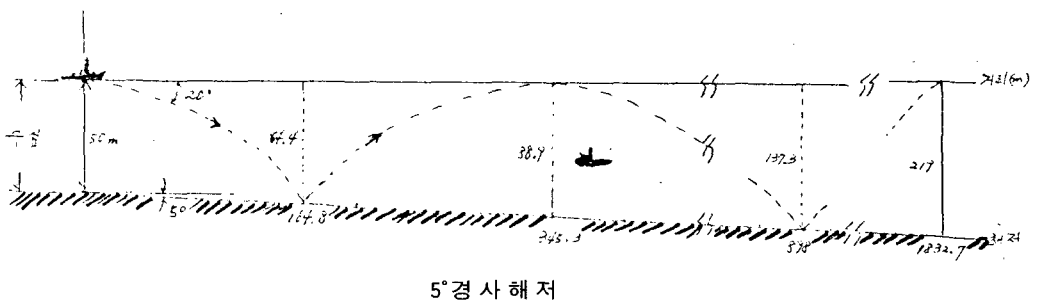
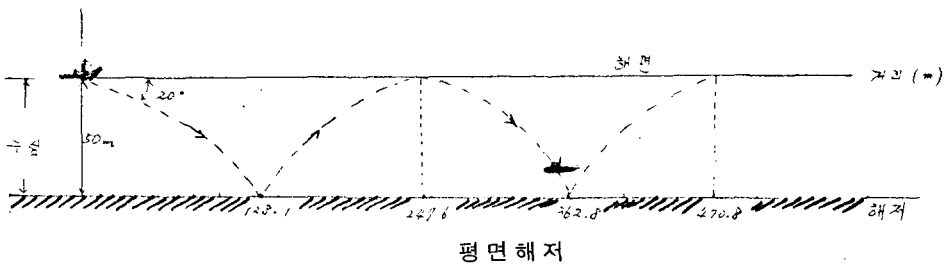
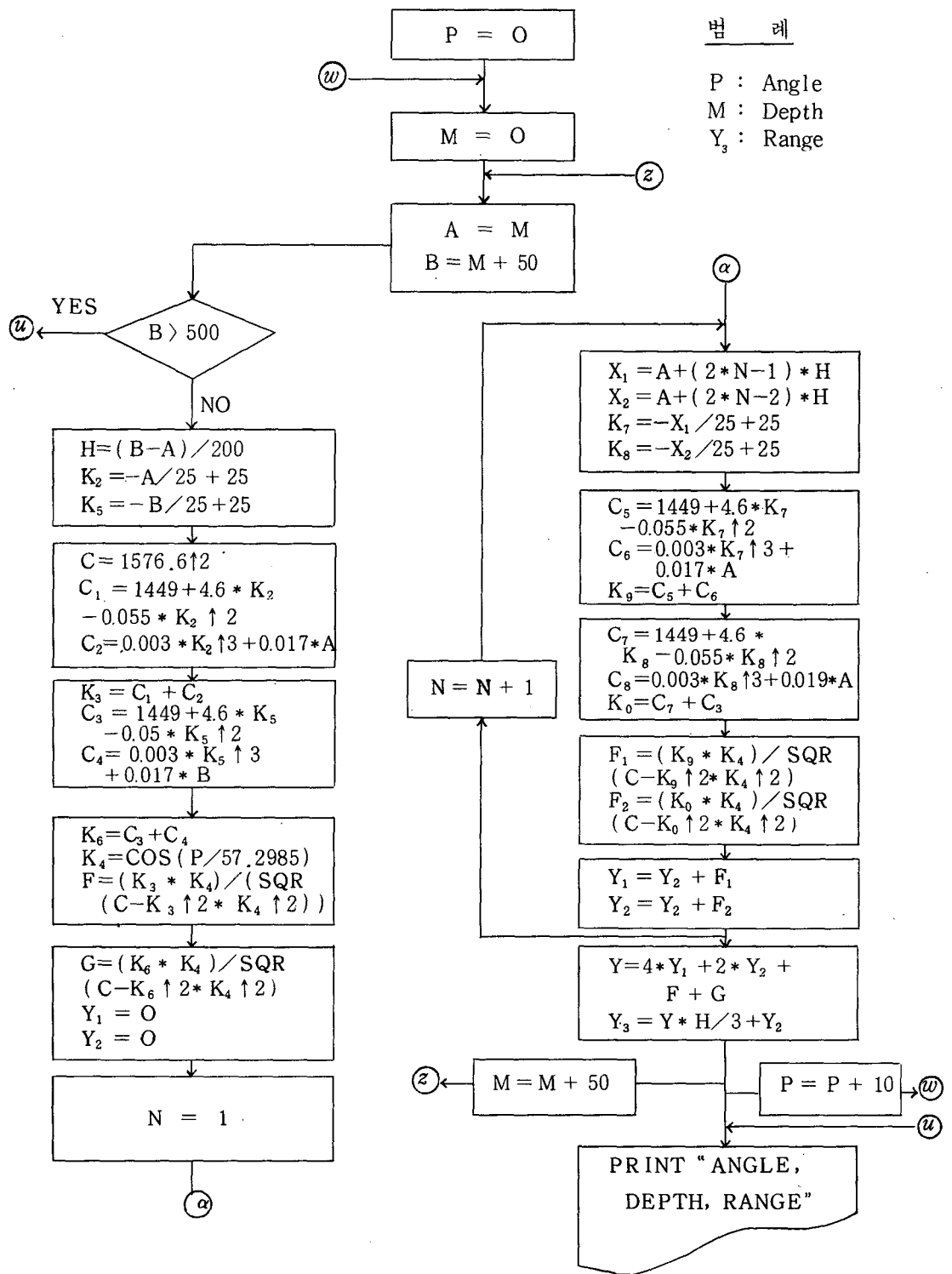


그림 12. 경사면과 음의 전달거리

이상에서 보는 바와같이 경사가 있는 해저를 평탄하게 본다면 상당한 차이가 있으며 특히 불규칙한 해저에 대한 반사경로 예측은 실

제로 상당히 어려운 문제이다. 그러므로 사전 해저 탐사의 중요성과 해저면 모의의 중요성을 한번 더 인식하게 된다.



그림(13) FLOW CHART(1)



도표 7 - 1 계산결과

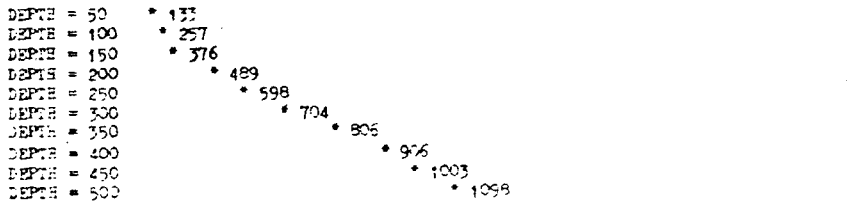
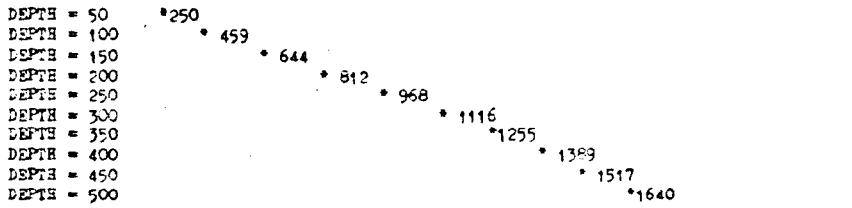
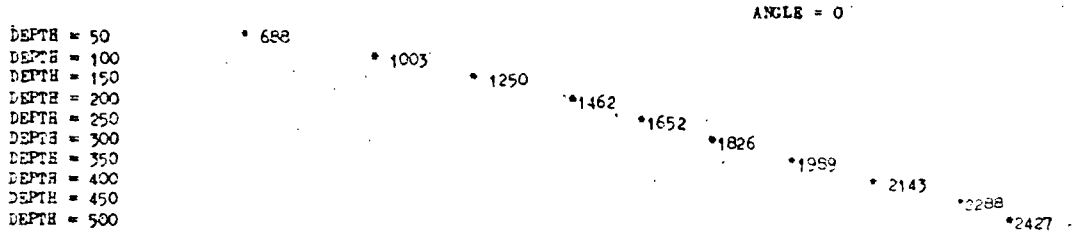


도표7-1 계산결과(계속)

ANGLE = 30

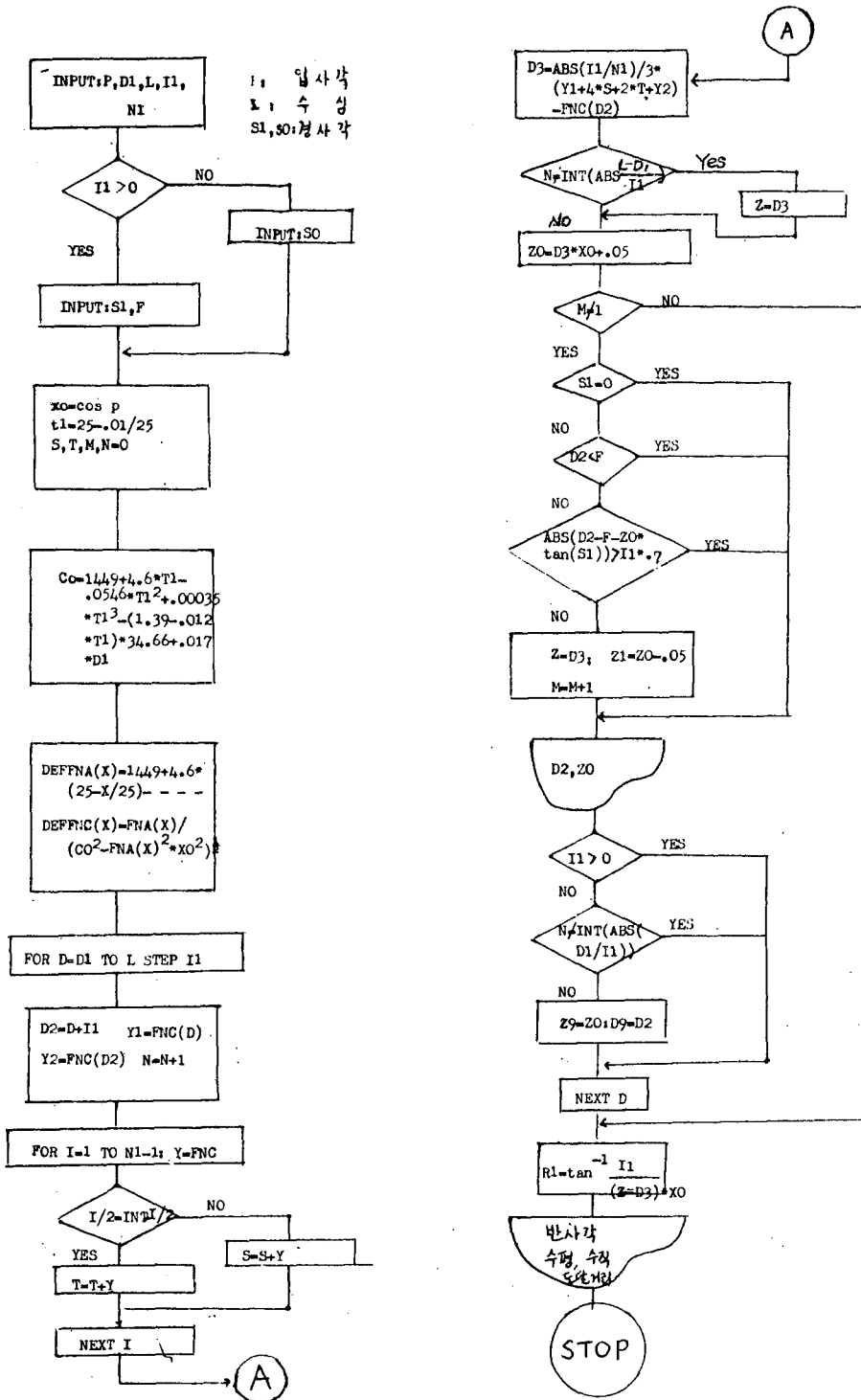
DEPTH = 50	* 85
DEPTH = 100	* 168
DEPTH = 150	* 248
DEPTH = 200	* 328
DEPTH = 250	* 404
DEPTH = 300	* 479
DEPTH = 350	* 553
DEPTH = 400	* 626
DEPTH = 450	* 697
DEPTH = 500	* 768

ANGLE = 40

DEPTH = 50	* 59
DEPTH = 100	* 117
DEPTH = 150	* 174
DEPTH = 200	* 230
DEPTH = 250	* 286
DEPTH = 300	* 340
DEPTH = 350	* 394
DEPTH = 400	* 447
DEPTH = 450	* 500
DEPTH = 500	* 552

ANGLE = 50

DEPTH = 50	* 42
DEPTH = 100	* 83
DEPTH = 150	* 124
DEPTH = 200	* 164
DEPTH = 250	* 204
DEPTH = 300	* 243
DEPTH = 350	* 282
DEPTH = 400	* 321
DEPTH = 450	* 359
DEPTH = 500	* 397



그림(14) FLOW CHART(2)

제 2 절 Sonar방정식에 의한 탐지거리 시뮬레이션

이제 Sonar 방정식에 의한 탐지거리를 예측해 보기 위하여 특성중 Source Level = 185 db/upa at 1 Meter, Probability of False Alarm =  $4.4 \times 10^{-5}$ , System Freq = 35 KHz Band Width = 1.5 KHz, 음파발사 수평각 =  $60^\circ$ , 음파발사 수직각 =  $20^\circ$ , Ambient Noise Level for Beaufort Wind Strength 4 = 40db 이라고 가정을 해 본다. 그리고 잠수함 수심은 100 m, Noise Level (NL) = 40db + 10 log B·W = 70 db, Directivity Index(DI) = DI (Horizon) + DI (Vertical) =  $10 \log 360/60 + 10 \log 360/20 \approx 20 \text{ db}$ , DT=0~-5 db 이므로 (여기서는 DT=0 이라 가정하자) 식 (14) 에 의거 FOM을 구하면 FOM=185 - 70 + 25 + 20 = 160 db, 2 TL = 160db 이므로 TL = 80 db 이다. 식 (3)에서 탐지거리  $P_0 = 0.5$  이면 유형 Sonar 가 35 KHz 이므로  $\alpha = 9.638671 \text{ db/Km}$  이다. 따라서 식 (2) 에 의거

$$80 = 10 \log r + 9.638671 \text{ db} \times 10^{-3} r \quad \dots\dots\dots (27)$$

된다.

Graph를 이용하여 식 (27) 해를 구하면 거리  $r = 4,500$  미터이다.

이 결과는 유형 Sonar 를 앞에서 제시한 특성하에서 작동시킨다면 최대 탐지거리 ( $P_0 = 0.5$ ) 는 4,500 m 이다. 여기서 각 거리에 대한 확율을 구하는 문제를 고려하자. 앞에서 언급한 바와같이 파동이 직진만 하는 것이 아니기 때문에 어떤 거리에서 Signal Excess 에 대한 탐지확율 예측을 Graph 를 구하여 측정하는 방법이 있지만 그림 (15) 거리로 표시되지 않으며 그림 (15) 에서 본바와 같이 특히 천해에서 온도의 음향과 반사 방향 등으로 가까운 거리에 있는 표적이 먼 거리보다 항상 더 탐지되는 확률이 높다고 할 수 없기 때문에 일정한 거리에 따라 Probability Density Function 을 예측하는 문제는 실제 좌표

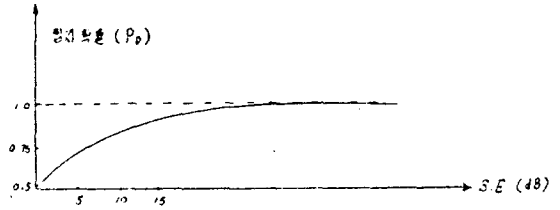


그림 15.

를 일일이 측정하여 Regression 하기 전에는 식을 도표하기 곤란하고 시시각각으로 변하는 조건하에서는 너무나 가변적인 것이 되기 쉽다.

제 3 절 시뮬레이션 (Simulation) 결과 분석

파동 방정식에 의거 음탐기의 발사 각도에 따른 음파 진행 형태를 구하였다.  $0^\circ$  로 발사하면 2,427 m 전진후 바닥에 반사하여 자행하고  $50^\circ$  인 경우 397 미터에서 반사한다. 일반적으로 많이 사용되는  $20^\circ$  각도의 경우 1,098 m 전진하고 해저에서 반사한 후 표면에서 다시 반사하고 3,294 미터 거리인 바닥에서 재 반사하여 표면 4,391 미터에서 반사한 것이다.

이렇게 볼 때 잠수함이 100 m 수심으로 접근한다면 탐지가 좋은 구역은 그림 (11) 의 A 점 (4,000 미터), B 점 (2,500 미터), C 점 (2,000 미터), D 점 (250 미터) 근해가 탐지가 가능하고 기타 지역은 음영 구역으로 탐지가 불가능하다. 또한 실제 잠수함 거리와 음파의 진행 거리 차이를 예측한다.

이를 이용하여 잠수함을 일정 거리에 두고 접촉은 계속 유지하기 좋은 위치를 선택할 수 있으며 반사의 영향으로 잠수함이 가까운 거리에서도 접촉이 되지 않는 구역과 원거리에서도 접촉 가능한 구역을 발견할 수 있다는 결과이다. 이는 잠수함을 일정거리에 두고 접촉을 계속 유지할 수 있는 좋은 위치를 선택할 수 있고 이 결과 Sound channel을 통한 음탐기의 설치 수심 위치와 잠수함의 활동 구역을 예측할 수 있다. 이러한 모델을 발전시켜 복합적인 요소를 고려하여 전산화시킬 경우 환경예보체제의 수단으로서 사용될 것이며

효과적인 대잠전 수행이 예상된다. Sonar 방정식은 최대탐지거리를  $P_0 = 0.5$ 로 본다면 이를 Figure of Merit 와 전달손실 (Transmission Loss) 에 의하여 구할 수 있으며 음탐기의 성능 측정에 효과적인 기준이 된다. 그러나 Sonar 방정식만으로는 최대 탐지거리를 예측하나 음영구역이 어디서 생기는지 혹은 음파의 진행상태를 알지 못하며 표적의 실제 위치와 탐지거리 사이의 오차가 있게 되므로 파동방정식을 이용하여 수직음파 각도에

따른 최소 탐지거리의 예측과 음영구역의 형태를 볼 수 있는 이점을 보장해 준다. 그러나 파동방정식에서는 거리에 대한 탐지여부를 계산하기 복잡하므로 본 논고에서는 Sonar 방정식에서 최대 탐지거리를 줄으로써 최대 거리를 비교 검토할 수 있을 것이다. 그러나 해저의 반사각도와 해저 손실의 영향은 매우 크다. 환경에 따라 1회 반사에서 5 - 30 db 의 손실이 있다고 하니 해저의 사전탐사가 중요하다.

	최대손실 (30 db)		최대손실 (5 db)		평균손실 (12db)	
	TL(db)	탐지거리 (m)	TL(db)	탐지거리 (m)	TL(db)	탐지거리 (m)
직진	80	4,500	80	4,500	80	4,500
1회반사	50	1,800	75	4,000	68	3,400

도표(3) 해저 손실의 감도분석

또한 해저의 경사도에 따른 음의 반사에 의한 전달거리에 많은 차이가 있다는 것을 역역히 보았다. 그러므로 해저면의 가정도 중요한 영향을 끼친다.

다시 말해서 탐지거리에 영향을 주는 요소는

가) Bottom Loss

- Bottom Loss 측정치
- 경사도와 반사면
- 해저 저질의 분포도

나) Transmission Loss

- 수온, 염분도, 공기방울, 산란
- Ray path
- Surface duct 유무
- B/T 에 의한 매체의 시간적 변화 측정

다) FOM 의 정확도

- 함정기기의 Parameter 측정
- SL 및 Self Noise 정확도

라) Ambient Noise Level 정확도

- 각 해역 Sea State, 시간 공간적 소음 측정

- 생물 소음 측정
- 어선 및 함정의 Spectrum 분석 등이다.

일반적으로 실제 문제에서는 매우 복잡한 온도 경사도와 기타 해양환경요인이 작용되기 때문에 그 해를 구하기 위하여는 아직도 더 많은 노력과 시간이 우리 실정에 맞는 천해 모델을 시급히 개발해야 하며 본 논고가 아직 미숙하더라도 이와같은 접근으로 개발을 시도해야 한다는 원칙을 제시할 수 있다.

대잠전은 이처럼 이론과 기술의 조화로써 수행해야 되는 바 체계적이고 철저한 이론탐구가 우리의 대잠전 향상의 선결과제이다.

제8장 결론

수중음향학의 이론과 이 분야의 군사적 적용은 2 차대전 이후 괄목한 만한 발전을 이루고 있다. 그러나 한국해군은 20 여년간 대잠전을 실시해 왔으나 일부 수중음향학 이론에 바탕을 둔 연안 특성에 맞는 대잠전술의

보다 적극적인 연구가 요구된다.

특히 북괴와 주변국의 잠수함 위협에 직면하고 있는 한국해군으로서는 교리의 개발, 환경예보체제연구, 대잠 무기체계의 성능평가 등이 분야에 지대한 관심과 지속적인 노력이 이루어져야 한다. 수중음향학은 수온, 염분도, 압력, 저질 등 복합적인 요소에 의거 지대한 영향을 받으나 음속에 가장 큰 효과를 미치는 요소는 수온이다. 수온 경사도에 따른 음파의 변화는 전진거리와 형태에 결정적인 변화를 주며 Sonar의 위치에 따라 표적 탐지거리가 변화되므로 환경조사나 B/T에 의한 정확한 자료가 매우 중요시 되며 Sound Channel을 찾아 Variable Depth Sonar와 같은 음탐기를 사용하면 변화가 많은 천해에서 유용하다.

대잠전 능력향상을 위하여는 환경자료의 계속적인 수집과 평가를 함으로서 탐지에 영향을 주는 해저손실, Transmission Loss 등의 정확한 정보획득이 중요하다. 또한 복합요소를 전신화한 한국적 환경에 맞는 예보체제를 갖기 위한 꾸준한 연구와 부단한 노력이 요구된다.

끝으로 대잠전에 종사하는 함정승조원 교육과 관심도 전문요원의 양성과 전문연구기관의 장려가 요망된다.

### REFERENCES

1. Robert J. Urick, "Principles under — water sound," McGraw Hill, INC. (1967)
2. C. V. Drysdale, J. Inst. Elec. Engr. 58, 568 (1920)
3. R. W. Moore, "A method of growing Large perfect crystals from solution" J. Am. Chem. Sec. 41, 1061 (1919)
4. A. M. Nicholson, "The piezo electric effect in the composite Rochelle crystal" Trans, Am. Lee. 38, 1313 (1919)
5. H. A. Wilson. "The theory of receivers of

- sound in water?" Phys, Rev. 15., 178(1920)
6. E. Klein and T.F. Tones. "Use of Sonar in harbor defense and Amphibious landing Operations" Alee. Electrical Engi — neering, 68, 107 (1949)
7. Wilson; W. D. "Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure and salinity" J. Acoust soc. Am. 34, 866 (1962)
8. H. U. Soerdrup, Martin W. Johnson, and Richard H. Fleming "The Oceans" 11th Ed. Prentice — Hall Inc. Englewood cliff. N.J. (1975)
9. John, J. Mgers, Call H. Holm, R. F. McAllister "Handbook of Ocean and under — water Engineering" McGraw—Hill(1969)
10. Wenz, G. M. "Acoustic Ambient noise in the Ocean : Spectra & Source" J. Acoustics. Soc. Am. 34, 1936 (1962)
11. Marsh, H. W. "Origin of the Rundsen Spectra" J. Acoust. Soc. Am. 35, 409 (1963)
12. Dyer, I. "Statistics of distant shipping noise" J. Acoust, Soc. Am. 35, 564(1973)
13. Wilken Shaw, H. M. "Low frequency Spectrum of deep ocean ambient noise" J. Acoust. Soc, Am. 32, 1497 (1960)
14. Willis, J. and F. T. Dietz "Some characteristics of 25 cps shallow water ambient noise" J. Acoust. Soc, Am. 37, 125(1965)
15. Schevill, W. E. "W. A. Watkins, and R. H. Backns Marine bioacoustics" Pergamon press, New York (1964)
16. Morse and Ingard "Theoretical acoustics" McGraw—Hill. New York (1968)
17. R. Bruce, Lindsay "Physical acoustics" Dowden, Hutchinson & Ross Inc. Pennsylvania (1974)
18. "Naval Operations Analysis." U.S. Naval Institute, Annapolis, Maryland.