

해저지형 · 지층탐사에 적용되는 음파특성

김성렬*, 이용국, 정백훈
한국해양연구원

Acoustic Characteristics Applied to Seafloor and Sub-bottom Survey

Seong-Ryul Kim*, Yong-Kuk Lee, Baek-Hun Jung
Korea Ocean Research and Development Institute

Abstract

The electromagnetic (light) waves are limited to penetrate the media, ie, water and sea-bottom layers, due to high energy attenuation, but acoustic (sound) waves play as the good messenger to gather the underwater target information. Therefore the acoustic methods are applied to almost of ocean equipments and technology in terms of in-water and sub-bottom surveys. Generally the sound character is controlled by its frequency. In case that the sound source is low frequency, the penetration is high and the resolution is low. On the other hand, its character is reversed at the high frequency. The common character at the both of light and sound is the energy damping according to the travel distance increase.

음파는 해저를 보는 도구

관찰(觀察)이란, 자세히 보고 조사를 통해 이해하는 행위라는 뜻일 것이다. 흔히들, 아는 것이 많은 사람을 식견(識見)이 높다고 말한다. 그리고 百聞不如一見(백 번 듣는 것 보다 한 번 보는 것이 낫다)라는 한자성어의 표현에서도 마찬가지로, 알게 된 지식 (또는 터득한 경험)은 “본다(見)는 것”과 결코 무관하지 않다.

우리의 말과 글은 이런 면에서 참으로 과학적이다. 여기에 살구가 하나 있다고 가정 하자. 생각만 해도 벌써 입속에는 침이 고이기 시작한다. 우리는 왜 이렇게도 살구에

대하여 즉각적인 반응을 보이는가. 먹어 본 경험이 있기 때문이다. 우리의 지식은 경험을 통해서 형성되는데, 그 경험은 “본다는 행위”에 기초를 두고 있다. 여기서 본다는 의미는, 시각(눈으로 보는 것)만을 뜻하는 것은 아니다. 넓은 의미로서 포괄적이다. 즉 어떻게 경험하느냐는 접근방법의 차이일 뿐 결국은 보는 것이다. 일상적인 생활언어에서도 “본다”는 표현은 얼마든지 찾을 수 있다. 예를 들면, 생각해 본다, 만나 본다, 읽어 본다, 찾아본다, 공부해 본다, 실험해 본다, 말해 본다, 알아본다,,, 등등. 이 모두가 보는 방법의 다양성을 부연하여 표현하고 있다.

과학(science)은 눈에 보이는 자연현상에 관하여 질문해 보고, 그 대답을 찾아보고, 또 질문에 대해 점검해 보는 체계적인 과정이다. 어떤 자연현상을 항상 변함없이 그렇게 설명할 수 있을 때에 법칙(law, 만유인력의 법칙)이라는 용어를 쓴다. 그러나 과학적인 방법으로 현상(이치)을 설명할 수 있다고 해서 절대 진리(true)라고는 말할 수 없다. 현재까지의 결과에, 새로운 지식이 늘고 관찰방법이 발전한다면, 변할 수도 있기 때문이다. 즉 임시적이며, 현재의 결과가 나중에도 변함없이 적용되는 그 때까지만 진실일 것이다. 그래서 연구(research)한다는 영어단어가 갖는 의미 역시, 다시(re) 되풀이해서 끊임없이 찾아본다(search)는 뜻이 아닐까 싶다.

아래의 표를 보면서 관찰하는(보는) 방법을 한번 생각해 보자. 우리 몸의 허리, 체중 그리고 체온은 줄자, 체중계 그리고 체온계로 알 수 있다. 그렇다면, 지구의 크기, 질량, 그리고 지열은 어떻게, 무엇으로 잴 것인가? 그럼에도 불구하고, 우리는 그 수치를 알고 있다. 이 값은 줄자, 저울, 온도계로 측정한 결과는 분명 아닐 것이다. 몇 가지 관측한 결과와 실험 자료를 근거로 계산한 결과이다. 이견이 없는 우리의 정착화된 지식이다.

OBJECTION	ACTIVITY	LOOK	TOOL	KNOW	KNOWLEDGE
허리의 둘레를 몸의 무게를 몸의 체온을	재어 달아 재어	본다	줄자 체중계 체온계		정착화된 지식
지구의 반경을 지구의 무게를 지구의 온도를	재어 달아 재어	본다	?	6,400 km 6×10^{24} kg 6,000° K	
바다의 수심을 해저의 모양을 해저의 물체를	측량해 조사해 촬영해	본다	음향측심기 음파탐지기 수중카메라		
수중을, 해저를	탐사해	본다	광파, 음파		

우리가 어떤 현상을 이해(know)하고 지식(knowledge)으로 고정관념을 갖기까지는 일단 [본다(see, look)]는 행위자체로부터 시작된다. 눈으로 직접 보고 이해하는 것이 제일 정확하다고 생각하지만, “본다”는 의미를 좀더 폭넓게 수용한다면, 이 세상에는 꼭 시각을 통하지 않고도 이해되는 지식이 훨씬 더 많다는 사실이다. 방법상의 차이일 뿐이다. 예를 들어 깊은 바다의 수심을 알아보려면 음향측심기(echo sounder)를 이용하면 된다. 음향측심기의 원리는 음파를 이용한다. 음파라는 간접적인 수단을 통하여 바다의 깊이를 알게 된다. 즉 어떤 도구(tool)를 이용하여 현상을 보게 되고, 이해가 되면 그것이 우리의 지식으로 남게 된다. 실상 직접 본다는 것 자체도, 광파라는 빛이 정보 전달자의 역할을 하기 때문이다.

음파특성의 이해

해저탐사의 기본적인 도구는 음파(소리)이다. 음파를 소개하기에 앞서, 한 일간지의 과학상식 컬럼에 게재되었던 전파(레이더)에 관한 이야기를 먼저 살펴보고자 한다. 땅(바다) 속을 드러다 보는 원리가 비슷하기 때문이다. 본문의 내용을 요약해 보면 다음과 같다.

빛은 주파수에 따라 적외선, 가시광선(빨주노초파남보), 자외선으로 구분한다. 빨간색이 보라색 보다 낮은 주파수이고, 낮은 주파수 대역일수록 투과력이 우수하다. 따라서 안개 등의 방해물이 있더라도 멀리까지 잘 보이는 적색등을 정지신호로 사용하고 있으며, 적외선은 인체 내부를 투과하므로 진단하는 의료용으로도 사용된다. 또한 빛에

비하여 전파는 저주파이므로, 대기 중의 먼지 등에 의해 방해를 덜 받는 전파 망원경이 광학망원경보다 우주를 정밀하게 관찰할 수 있다. 빛은 구름에 가리지만 전파는 투과하므로, 적외선망원경은 물체를 식별하는데 용이하여 군사용으로 개발되고 있다. 레이더는 좀 더 낮은 전파대역이

재미있는 전파 이야기

레이더로 땅속까지 훤히 본다

가정용 전기는 60Hz(헤르츠)의 주파수를 사용하고 있으며 60Hz란 1초에 60번 양극(+)과 음극(-)이 바뀌고 있다는 것을 말한다. 전파의 주파수 범위는 해석하기에 따라 다를 수 있으나 국제통신법에서는 3THz(테라헤르츠, 초당 3조번 진동) 이하의 전파를 말하며 그 이상의 주파수를 가지는 전파는 빛(光)으로 분류한다. 빛은 그 주파수에 따라 적외선·적외선·가시광선·자외선으로 분류한다. 가시광선은 우리가 잘 알고 있는 바와 같이 그 주파수에 따라 '빨·주·노·초·파·남·보'로 구분한다. 우리가 느낄 수 있는 가시광선의 주파수는 350 ~ 750THz 정도이다.

주파수가 낮은 전파일수록 방해물을 투과하는 성질이 좋으며 주파수가 높은 전파일수록 에너지가 높고 직진성이 강하다.

신호등의 정지 신호로 빨간색을 사용하는 이유는 빨간색의 주파수가 다른 가시광선의 주파수보다 낮아서 안개나 먼지 등의 방해물이 있더라도 멀리까지 잘 보이기 때문이며 하늘이 파랗게 보이는 이유는 주파수가 높은 '파·남·보' 색깔의 빛이 주파수가 낮

지 등에 의해 방해를 덜 받기 때문에 전파망원경을 사용하면 광학망원경을 사용할 때보다 더욱 정밀하게 우주를 관찰할 수 있다.

또한 전쟁영화에서 흔히 볼 수 있는 레이더도 전파를 이용한 관측장비의 일종이다. 구름 등에 가려져 망원경을 통해서 볼 수 없는 물체를 빛보다 주파수가 낮은 전파를 사용함으로써 구름을 뚫고 더 멀리 볼 수 있는 것이다.

전파는 벽이나 땅속을 뚫고 들어갈 수 있으므로 그런 곳을 투시할 수 있다. 지하 투시용 레이더는 아직은 세밀한 영상을 볼 수 있는 수준은 아니지만 차세대 무선통신에 이용될 초광대역 기술이 점목되면 수 년 내에 직접 눈으로 보는 것과 같이 세밀한 영상을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 땅속 투시 기능은 지하에 매설되어있는 전력선·가스관·수도관 등을 미리 확인하여 대형사고를 예방하는 데 사용될 뿐 아니라 건물 붕괴나 화재 등 각종 재해 현장에서 생존자를 구출하는 데 중요한 역할을 하게 될 것이다.

이창석 한밭대 전파공학과 교수

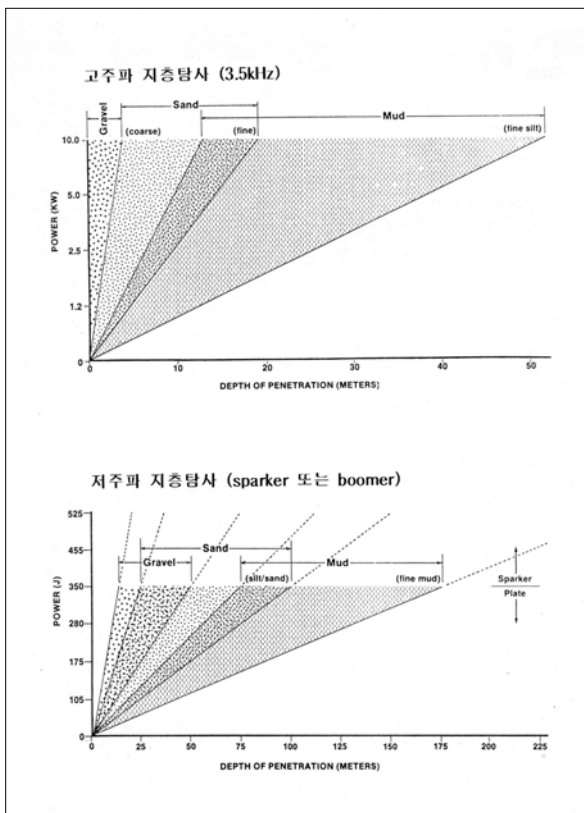
다. 아직은 세밀한 영상을 볼 수 있는 수준은 아니지만, 수 미터 정도까지의 땅속 물체는 감지가 가능하여 지하매설 시설물(전력선, 수도관, 가스관 등)을 확인하고 있다.

이 내용을 좀더 압축하면, 빛보다 전파가 저주파이므로 방해물질이 있더라도 투과력이 강하여 잘 볼 수 있다는 뜻이 된다. 그렇다면, 주파수의 관점에서 볼 때 음파는 전파보다 더 저주파이다. 따라서 음파를 이용하면 해저의 모양과 땅 속의 지층구조를 훤히 볼 수 있다는 지극히 자연스러운 결론에 도달한다. 우리가 알고 있듯이, 지구의 내부구조에 관한 지식 역시 지진파를 이용한 연구결과이다.

광파(또는 전자파)는 물에서 전달에너지의 감쇠(attenuation)가 너무 심하여 수층을 투과하는데 한계가 있지만 음파의 경우는 매우 좋은 전달매체로 작용한다. 따라서 수중 또는 해저탐사에 사용되는 대부분의 탐사장비와 기술들은 음파를 이용하는 방법을 채택하고 있다. 일반적으로 파동의 특성은 주파수에 있다. 음원(sound source)이 저주파일수록 투과력(penetration)은 높아지지만 해상력(resolution)은 낮아진다. 고주파의 경우

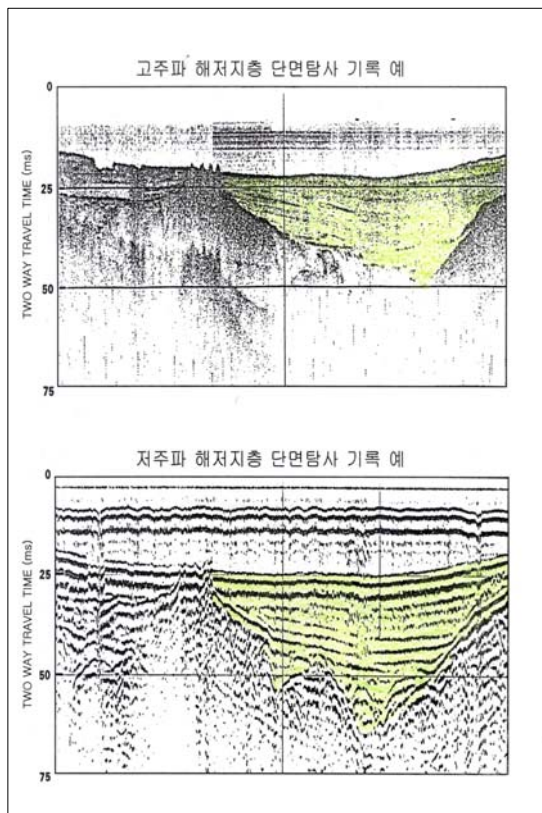
는 그 반대이다. 즉 저주파는 바다 깊은(또는 먼) 곳까지의 정보를 알 수 있지만 해상력은 낮다. 그러나 고주파는 깊이(또는 멀리)까지는 도달할 수 없지만 얕은(또는 가까운) 곳의 정보는 저주파보다 훨씬 상세한 정보를 제공한다.

여기서 또 한 가지 파동의 공통적인 특징은, 전달에너지는 주행거리와 주파수에 비례하여 감소한다. 즉 멀리 갈수록 전달에너지는 감소하며, 고주파 일수록 전달에너지의 감소량은 더 커진다. 따라서 저주파 파동이 고주파 파동보다 더 멀리 갈 수 있는 이유가 여기에 있다. 아무리 깨끗한 해역이더라도 광파(햇빛)는 수면에서 약 200미터 이상을 투과하지 못한다. 심해로 내려가면 캄캄한 밤이다. 그러나 음파를 이용하면 해저의 모양을 훤히 들여다 볼 수 있다.



고주파와 저주파의 지층투과력 비교.

저주파 음원일수록 투과력은 증가하지만 퇴적물을 구분하는 경계구역의 범위가 넓게 겹치고 있다. 이것은 해상력의 감소를 의미한다.



동일한 탐사측선에서 지층해상력 비교.

고주파는 상세한 퇴적구조를 보이지만 투과심도가 깊지 않다. 저주파는 지층구조가 상세하지는 않지만 음향기반암까지 투과하고 있다.

해저탐사에 적용

누구나 지구 내부의 깊은 층에 대한 지식이 어떻게 얻어졌는가 하는 의문을 가질 것이나, 대부분의 경우에는 간접적인 방법으로 구해진 정보이다. 즉 지구(또는 매체)가 가지고 있는 성질을 물리적인 방법으로 그 특징을 밝혀내는 학문이 지구물리학이며 탐사(또는 조사)에 이 학문을 적용할 경우 물리탐사라고 부른다. 주로 사용되는 분야는 지진파(또는 탄성파), 중력 그리고 자력이 대표적인 연구방법이다. 특히 해양에서는 음파를 이용하는 방법이 보편화되어 있으며, 그밖에 최근에는 인공위성을 이용하는 분야(주로 광파)도 급속히 발전되어 왔다. 해저조사에 적용되는 음파탐사방법은 여러 가지가 있으나, 본 논의에서는 해저지형을 조사하는 음향측심, 지층구조와 퇴적층의 형태를 조사하는 지층탐사, 그리고 해저면을 평면적 영상으로 표현하는 측면주사음향탐사 이 세 가지를 간단히 검토해 보자.

음파(약 200kHz)를 바다 밑으로 쏘아 보낸 뒤, 해저면에서 반사되어 되돌아 올 때까지 걸린 주행 왕복시간으로 바다의 깊이를 측정한다. 수중에서 음파전달속도는 약 1,500m/s이다. 음파는 해저까지 2회를 왕복한 시간이므로 음속을 곱하고 2로 나누면 수심을 계산할 수 있다. 그러나 바닷물의 온도, 염분, 수압 등은 깊이에 따라 변하고 지역과 계절에 따라서도 다르다. 이러한 환경요인들은 음속에 영향을 미치므로, 음속을 보정하여야 정확한 수심을 측량할 수 있다. 음향측심기는, 음파를 송신하고 수신하는 송수파기(transducer)가 한 개나 또는 여러 개나에 따라서 단빔(single beam)과 다중빔(multi beam)으로 구분한다. 단빔의 경우 조사선이 진행하는 항로의 직하부에 대한 선개념의 수심을 측량하지만, 다중빔의 경우는 면개념으로 수심정보를 취득한다. 따라서 짧은 시간에 넓은 해역의 해저지형을 파악할 수 있다는 장점이 있으나, 가격 면에서 비교할 수 없을 정도로 고가이다.

음향측심에서는 음파가 지층을 투과할 필요는 없다. 단지 해저에 도달했을 때 반사되어 튕겨 나오면 된다. 그러나 지층탐사에서는 해저퇴적층을 투과해야 한다. 따라서 음향측심에 비해 낮은 음향주파수를 사용한다. 지층탐사는 투과심도에 따라서 천부지층탐사와 심부지층탐사로 구분한다. 천부지층탐사는 일반적으로 1~10kHz 대역의 주파수를 사용하며, 해저면 하부 수m에서 수십m까지의 탐사가 목적이다. 심부지층탐사에 비하여 고주파, 저투과력, 고해상력, 저에너지가 특징이며, 천부의 해저지질구조 및 연안토목, 매몰체 탐사 등에 적용된다. 그러나 심부지층탐사는 100Hz~1kHz 정도의 더

낮은 주파수 대역을 선택하며, 해저면 하부 수백m에서 수km까지가 탐사목표이다. 저주파, 고투과력, 저해상력, 고에너지가 특징이며, 지하 심부의 해저지질구조, 석유 및 가스전 탐사 등에 적용된다.

해저를 평면적 개념에서 음향학적으로 영상화하는 탐사장비가 Side Scan Sonar이다. 탐사장비의 이름에서 알 수 있듯이, 조사선의 항로를 중심으로 좌·우측(side)의 해저면을 음파(sonar)로 훑어(scan) 나가면서 해저의 형태를 영상으로 표현하게 된다. 마치 TV 화면이 여러 개의 주사선(scan line)으로 채워지는 것과 같은 원리를 적용하는 탐사 방법이다. 탐사범위(survey range)에 따라서 협역(狹域)탐사와 광역(廣域)탐사로 구분한다. 협역탐사는 주로 천해용이며, 탐사범위는 조사선의 항로를 중심으로 수백m 이내이고 음향주파수는 100~500kHz 정도의 대역이다. 광역탐사는 주로 심해용이며, 탐사범위는 수km이고 100kHz 이하의 저주파 대역이다. 지층탐사는 해저의 하부를 수직단면(vertical section profile)으로 표현하는 반면, 측면주사음향탐사는 해저면을 평면(horizontal areal mapping) 영상으로 나타낸다는 점에서 차이가 있다. 해저의 지질구조와 형태, 해저광물자원, 그리고 해저의 구조물 설치(예; 광통신케이블, 파이프라인 등)를 위한 지질재해 위험요소(geo-hazards) 탐사 등에 활용되고 있다. 그밖에 연안역 개발에 따른 항만공사의 입지조건, 모래자원 확보를 위한 분포조사, 교각하부의 지반침하 확인 등의 분야에서도 활용되고 있다. 해저(면)에 놓여있는 이상물체(예; 침몰선박, 어초, 해양투기물 등)에 대한 현황과 위치, 모양 등에 대한 상세한 형태까지도 음향영상 모자이크 처리기법으로 표현이 가능하다.

음향측심기의 경우 천해용은 200kHz 이고 심해용은 12~34kHz 대역이다. Side scan Sonar의 주파수 대역은 100~500kHz 정도이다. 주파수 대역이 10kHz 이하로 낮아지면 점차적으로 해상력보다는 투과력이 우세해지면서 해저(면) 하부의 지층을 투과하게 되며, 탐사대상 목표가 수중과 해저면에서 그 하부로 옮겨지게 된다. 주파수 대역이 수십~수백Hz 정도로 낮아지면 지하 수km까지의 지층단면을 조사하는 석유탐사 분야에 해당된다. 여기서 수Hz 이하로 더 낮아지면 지진파의 범주에 속하며 지구의 내부구조를 밝히는데 이용된다.

결 론

이상의 내용을 음파특성과 함께 표로 작성해 보면 아래와 같다. 음향측심에서, 천해

용이라 함은 일반적으로 수심 200m 이하를 뜻한다. 음파가 멀리까지 갈 필요가 없으므로 고주파를 이용한다. 그러나 심해용의 경우 수천m를 가야하므로 전달에너지의 감쇠량이 적은 저주파를 선택하게 된다. 지층탐사의 경우, 해저퇴적층을 투과해야 하므로 음향축심 보다는 주파수가 낮아야 한다. 그리고 심부가 목표인 경우 상대적으로 더 낮은 주파수 대역을 선택해야 한다. 그러나 해상력에 있어서 천부탐사에 비하여 좋지 않을 것이다. 측면주사음향탐사에 있어서도 광역에 비하여 협역에서 탐사범위가 짧으므로 고주파를 사용한다. 따라서 협역 일수록 해저의 정보는 더 상세히 파악된다.

구분	해상력	투과력	감쇠량	음향축심	지층탐사	측면주사탐사
고주파	크다	작다	크다	천해용	고해상(천부)	고해상(협역)
저주파	작다	크다	작다	심해용	저해상(심부)	저해상(광역)
					천해용(고주파)	
					심해용(저주파)	

해양이 지구 표면적의 70%를 차지하고 있지만 우리의 활동무대는 여전히 육지에 국한되어 있다. 해양을 충분히 이해하지 못하고 있기 때문에, 바다에 대한 궁금증을 해결하기 위하여 여러 가지 탐사방법이 끊임없이 개발되어 왔다. 특히 물이 가지고 있는 특수한 성질 때문에 음파를 이용하는 기술분야가 해저탐사에서 핵심적으로 적용되고 있다. 최근에는 IT산업의 발전과 함께 전산시스템의 소형화, 고속화, 대용량화를 위한 기술개발이 빠른 속도로 진행되고 있으며, 해양분야에서는 수중통신기술과 내압기술 등의 분야가 빠르게 발전하고 있다. 이러한 영역들이 해저탐사기술에 접목되는 가까운 미래에는, 광파에 비해 상대적으로 해상력이 절대 부족한 음파를 보완하는 대책의 한 방법으로 광파와 음파를 결합한 형태의 장비개발과 탐사기술이 실용화될 것으로 기대하고 있다.

참고문헌

- [1] 과학자들은 지구를 어떻게 연구할까?, 과학기술홍보대사(엠베서더) 초청강연, 웹사이트 등록자료, 동아사이언스·한국과학문화재단, 2005.
- [2] 음파특성의 쉬운 이해와 해저탐사에 적용, 2005년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회논문집, 630~636.

[3] 재미있는 전파 이야기, 레이더로 땅속까지 훤히 본다, 중앙일보, 제12423호, 2004년12월16일자, 22면.

[4] 해양자원과 해저탐사의 원리, 과학의 날 특강 초청강연자료집, 서울특별시 과학전시관, 2005, 1~15.

[5] 해저탐사에 적용되는 음파특성, 2005년도 한국석유지질학회 제12차학술발표회초록집, 9~16.