

● 論 文

# 해저매몰체 탐사를 위한 음향신호의 분석

김진후\* · 한건모\* · 박종남\*\*  
(95년 9월 11일 접수)

Acoustic Signal Analysis for Exploration of Buried Objects in the Ocean

Jin-Hoo Kim\* · Kun-Mo Han\* · Jong-Nam Park\*\*

**Key Words** : Anomaly(이상신호), Exploration(탐사), Diffraction(회절), Anomalous Object(이상체), Stacking(신호중첩), Sub-bottom Profiler(지층탐사기)

## Abstract

The anomalous signal, anomaly, recorded by a sub-bottom profiler is analyzed for exploration of buried objects in the ocean. This anomaly is known as a signal diffracted from the edge of the buried object. Signals obtained from model test and numerical simulation are analyzed for investigating characteristics of the diffracted signal. From this study a diffracted signal and a non-diffracted signal can be identified, and the location of the object can be obtained. In order to identify an object in the seafloor the dimension of the object should be greater than the wave length used for exploration, and the acoustic impedance should be much greater than that of sediments. A 2-trace stacking of the signals can enhance the feature of strongly diffracted signals whereas it can diminish weak signals.

## 1. 서론

해양에서 수행되는 지구물리학적 탐사방법 중의 하나인 탄성파탐사는 탄화수소등 해저자원의 개발과 해저지질구조 연구에 필수적인 탐사방법 중의 하나다. 탄성파탐사 장비중 지층탐사기(Sub-bottom Profiler)는 해저면하 약 30~50m의 퇴적층을 탐사하는 장비로 해양구조물의 설치나 해저 파이프라인의 가설 등에 앞서 해저지질조사

를 수행할 목적으로 사용되고 있으며, 해저매몰체의 탐사에도 활용되고 있다<sup>1)</sup>.

본 연구는 지층탐사 기록지 상에 나타나는 이상신호(anomaly)를 보다 체계적으로 분석하여, 매몰체의 형상과 위치를 파악하는 데 그 목적이 있다. 해저상에 놓여 있거나 일부 노출되어 있는 물체는 측면주사 음파탐사기(side scan sonar)를 이용하여 발견할 수 있으나, 해저에 매몰된 물체는 지층탐사기에 의존할 수 밖에 없는 실정이며, 매몰체의 확

\* 정회원, 동아대학교 해양공학과 부교수

\*\* 정회원, 동아대학교 자원공학과 교수

인은 제토작업 등에 의존할 수 밖에 없는 실정이다<sup>2)</sup>. 그러나 이상반응이 나타나는 모든 곳을 제토할 수는 없기 때문에 이상반응을 사전에 분석하여 확인이 필요한 위치를 선정하는 작업이 요구된다.

지층탐사기에 의한 탐사결과는 기록지에 표시되며, 주로 음향임피던스의 차이에 의한 반사파와 이상체의 물성 및 형상 등의 영향에 의한 회절파가 기록된다. 이상체의 발굴에 직접 활용되는 이상신호는 후자인 회절파(diffraction hyperbola)이기 때문에 회절파의 규모와 진폭, 탐사선의 속도, 기록지 이동속도 등에 대한 정밀한 분석이 요구된다.

이를 위하여 이미 물성을 알고 있는 물체에 대한 모의탐사와 물성을 이용한 수치모의실험 등을 통해 얻은 이상신호의 특성을 토대로 실험적 탐사 자료를 정밀분석할 수 있는 회절파의 형상분석, 이상체의 위치분석, 디지털 자료처리 등을 수행하였다. 또한 회절쌍곡선의 폭과 길이의 비인 W/L비를 이용한 회절파 형상분석을 수행하여 회절파와 비회절파를 구분할 수 있는 근거를 제시하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

회절파의 특성과 모의탐사 및 수치모형실험 결과를 토대로 회절파와 비회절파의 구분, 매물체의 위치추정, 신호의 증진을 위한 자료처리방법의 개발 등에 대한 연구가 수행되었다.

우선 이상체에 의해 발생하는 회절파의 생성원인을 분석하고 기록지 상에 기록되는 회절 쌍곡선의 형태를 왕복주행시간을 이용하여 수식화 하였으며, 이를 바탕으로 탐사선이 이상체의 직상방을 통과할 경우와 약간의 이격거리를 두고 통과할 경우 등 2가지 경우에 대한 회절파의 형상분석을 시도하였다. 회절파의 형상분석에는 퇴적층에서의 파의 전달속도, 송수파기의 지향각, 매물심도, 및 탐사선과 이상체와의 이격거리 등이 변수로 사용되었다.

모의실험을 위하여 이미 물성과 형태를 알고 있는 3 종류의 물체를 확인된 장소에 매물해 놓고 이에 대한 지층탐사기의 탐사자료를 획득하였다. 탐사는 물체를 횡단하는 방향으로 수행하였으며 물성, 물체의 크기, 탐사선의 속도, 탐사환경인자인

송신파의 송신주기, 대역필터, 이득조절 등의 변화가 탐사결과에 미치는 영향 등에 대한 분석을 수행하였다.

가스펙트럼법 알고리즘을 이용한 2차원 수치모의실험<sup>3)</sup>을 통하여 수평다층구조의 퇴적층, 점 형태의 이상체, 수평 판상형의 이상체, 마운드형 이상체 등이 존재할 경우에 대한 탐사결과를 얻어 이를 분석하였다.

수신된 신호를 처리하여 탐사목적에 부합되도록 신호를 증진시키고 잡음을 제거하기 위하여 디지털 자료처리방법을 사용하였다. 자료처리에는 실험적 탐사자료가 사용되었으며, 자료처리를 위하여 영상분석장치인 Sonar Enhancement System(SES)<sup>4)</sup>이 사용되었다. TVG(Time Varied Gain)를 이용한 이득조절, 디지털필터의 대역조절, 트레이스의 중첩(stacking)을 통해 잡음을 제거하는 일련의 자료처리과정을 수행하여 신호증진효과에 대한 분석을 시도하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3-1. 회절파와 왕복주행시간

파의 회절은 파선(rays)이 경계면의 끝이나, 모서리 또는 꼭지점 등에 수직으로 입사할 경우 내지는 사각으로 입사할 경우 생성된다. 회절파와 반사파를 명확히 구분함에 있어 다소 모호한 점이 있으나 Dix<sup>5)</sup>에 의하면 반사란 경계면의 굴곡과 경사에 대한 정보를 제공하는 현상을 일컬으며, 회절이란 이 밖의 모든 현상들로서 경계면의 불연속성을 나타내기도 한다는 것이다. 이와같은 정의를 단절된 경계면에 적용시키면, 수파기에 최단시간에 도달하는 파는 반사에너지에 의한 것이며 이 후에 들어오는 모든 파는 회절에너지에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 탄성파탐사에서 기록되는 회절파의 존재는 지층내에 음향 임피던스의 불연속이 존재함을 가리킨다. 이 회절파는 쌍곡선의 형태를 가지며 회절파의 곡률반경은 회절원과 송수파기의 상대위치 및 지층의 음파전달속도와 깊은 관련이 있다.<sup>6),7),8),9)</sup>

회절파는 일반적으로 지질구조의 이상(structural anomaly) 또는 지질학적인 불연속성에 기인하기도

하는데 지층속에 존재하는 물체 즉 점회절원(point diffractor)에 의해 생성되기도 하며, 해저매몰체의 탐사에서는 점회절원의 위치와 규모파악이 관심의 대상이 된다.

지층에서의 파의 전달 속도가 일정하고 점의 불균질 매질인 회절원이 지층내에 존재할 때 이로인한 회절파는 정확히 쌍곡선의 형태를 가지며, 이는 송수파기의 위치에 따른 회절원까지의 왕복주행시간(two-way traveltime)으로 다음과 같이 표시된다.

$$t = \sqrt{t_0^2 + 4 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{v^2}} \quad (1)$$

여기서  $x, y$  = 송수파기의 위치,  
 $x_0, y_0$  = 회절원의 위치,  
 $t_0$  = 최소 왕복주행시간,  
 $v$  = 지층의 종파속도이다.

Fig. 1은 점회절원 주위에서 탐사를 수행할 때 나타나는 회절파의 형상을 3차원 적으로 보여준다.

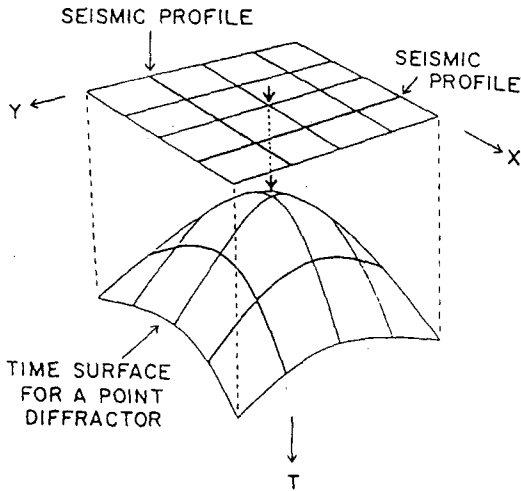


Fig. 1 A diffraction hyperbola generated by a point diffractor.

3-2. 회절파의 형상분석

이상신호가 수신되는 최대 수평거리  $x_{max}$ 는 송수파기의 지향각에 의해 결정된다. 탐사선이 이상

체의 직상방을 통과할 경우 이상체의 매몰 심도에 따른 쌍곡선의 형태변화는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 이 때 회절파가 수신될 수 있는 최대 수신가능 위치,  $x_{max}$ 는

$$x_{max} = x_0 + \frac{t_0 v}{2} \tan \theta \quad (2)$$

이다. 여기서  $\theta$ 는 파의 지향각을 나타낸다. 한편 최대 수신가능위치에서의 왕복주행시간은 식(1)과 (2)로부터

$$t_{max} = t_0 \sec \theta \quad (3)$$

로 표현된다.

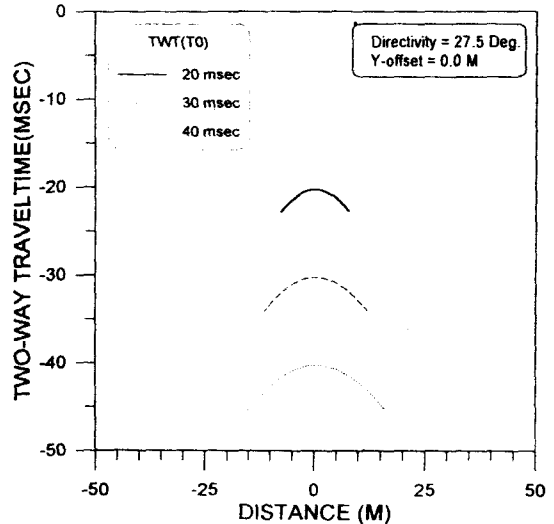


Fig. 2 Variation of diffraction hyperbola with respect to depth of burials.

식(2)와 식(3)에서 보는 바와 같이  $x_{max}$ 와  $t_{max}$ 는 이상체의 심도가 증가할수록, 지향각이 클수록 커짐을 알 수 있으나 심도가 증가할수록 음파 에너지의 감쇠에 의한 효과를 고려할 때  $x_{max}$ 와  $t_{max}$ 가 축소될 수도 있다.

회절 쌍곡선의 폭/길이의 비 W/L비는

$$W/L = \frac{2(x_{max} - x_0)}{t_{max} - t_0} = \frac{v \tan \theta}{\sec \theta - 1} \quad (4)$$

와 같이 계산된다.

이 식에서 보듯이 W/L비는 지층의 속도와 지향각에 의해 결정됨을 알 수 있으며, 특정한 지향각을 갖는 송수파기를 사용할 때 이상체의 심도와 관계없이 동일한 속도층 내에서는 동일한 W/L비를 나타낸다. 또한 W/L비는 지층의 속도에 비례하므로 이상체의 심도에 따라 W/L비가 커지면 지층의 속도가 증가함을 알 수 있다.

즉,

$$v = \frac{WL(\sec \theta - 1)}{\tan \theta} \quad (5)$$

로부터 지층의 종파속도의 예측도 가능하다.

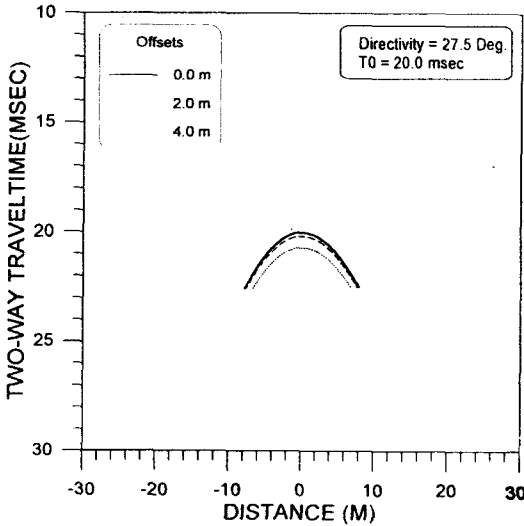


Fig. 3 Variation of diffraction hyperbola with respect to offsets.

탐사선이 이상체의 직상방을 통과하지 않고 이상체로부터 어느 정도의 거리를 두고 통과할 경우, 즉 y방향에 대한 이격거리가 존재할 경우 이격거리에 따른 쌍곡선의 형태변화는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 이 때 회절파가 수신될 수 있는 최대 수신가능 위치,  $x_{max}$ 는

$$(x_{max} - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = z^2 \tan^2 \theta \quad (6)$$

의 관계를 만족한다. 여기서 z는 이상체의 심도이며,  $\theta$ 는 지향각, y는 이격거리다.

이로부터 최대수신 가능위치를 구하면

$$x_{max} = x_0 \pm \sqrt{\frac{t_0^2 v^2}{4} \tan^2 \theta - (y - y_0)^2} \quad (7)$$

이 되며, 최대 수신가능위치에서의 왕복주행시간은  $t_{max} = t_0 \sec \theta$  로 식(3)과 같다.

식(7)에서 보는 바와 같이 최대 수신가능 위치는 이상체의 심도가 증가할수록, 지향각이 클수록 커지며, 반대로 이격거리가 클수록 감소함을 알 수 있다. 한편  $t_{max}$ 는 이상체의 심도와 지향각에 의해 결정될 뿐 이격거리와는 무관함을 알 수 있다. Fig. 3은 이상체와 탐사선의 이격거리가 증가할수록  $x_{max}$ 가 감소함을 보이고 있으며,  $t_{max}$ 는 이격거리에 관계없이 일정함을 보여준다.

이상체와 탐사선 사이에 이격거리가 존재할 때 회절 쌍곡선의 W/L비는

$$WL = \frac{2\sqrt{\frac{t_0^2 v^2}{4} \tan^2 \theta - (y - y_0)^2}}{t_0(\sec \theta - 1)} \quad (8)$$

와 같다. 이 식에서 보듯이 W/L비는 이상체의 심도, 지층의 속도, 지향각 및 이격거리 등 모든 인자에 영향을 받기 때문에 W/L 값으로부터 다른 인자를 유추하기는 힘들다. 그러나, 특정한 지향각을 갖는 송수파기를 사용하고 지층의 속도가 일정하다고 가정하면, 식(8)로부터 이격거리  $y - y_0$ 를 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$y - y_0 = \frac{t_0}{2} \sqrt{v^2 \tan^2 \theta - (WL)^2 (\sec \theta - 1)^2} \quad (9)$$

이상의 회절 쌍곡선의 분석으로부터 이상체의 탐지한계( $x_{max}$ )는 이상체의 심도, 송수파기의 지향각, 지층의 속도에 따라 증가함을 알 수 있으며, 이상체의 탐지한계에 해당하는 왕복주행시간( $t_{max}$ )은 이상체와 탐사선의 이격거리에 상관 없이 동일함을 알 수 있다. 이상체의 심도는  $t_0 = t_{max} \cos \theta$ 로부터 구할 수 있으며, W/L비를 이용하면 이상체와 탐사선간의 이격거리를 구할 수 있다. 한편, 탐사선이 이상체의 직상방을 통과할 때 W/L비는 이

상체의 매몰 심도에 관계 없이 항상 일정하며,  $W/L$ 비의 최대값은  $(W/L)_{\max} = \frac{v \tan \theta}{\sec \theta - 1}$  이므로 이 값보다 큰 값이 측정되었다면 이는 반사파이거나 일종의 잡음으로 취급할 수 있을 것으로 본다.

### 3-3. 모의탐사결과

음향신호 분석을 위해서 우선 물성과 크기를 알고있는 물체를 해저에 놓고 이로 인한 이상신호를 얻었다. 본 연구에서는 통나무와 드럼통 및 원통형의 철구조물 등이 사용되었다.

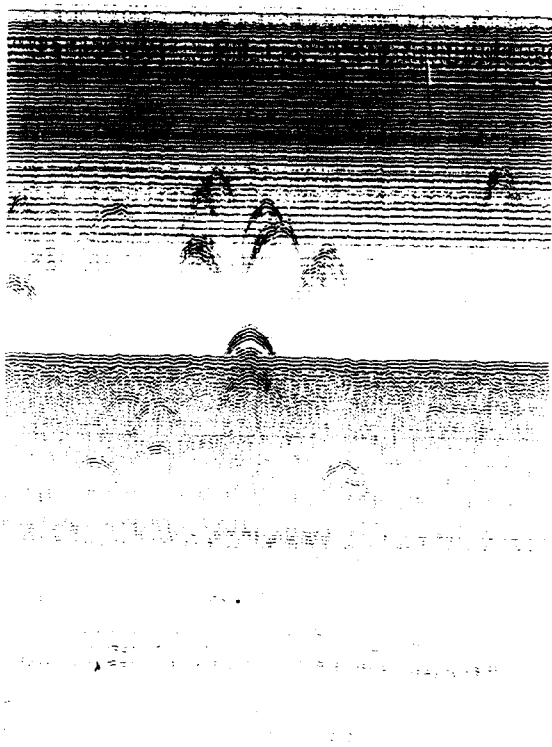


Fig. 4 A seismic section obtained where a steel structure is layed on the seafloor.

Fig. 4는 직경 약 50cm인 철구조물에 대한 모의 탐사 결과이다. 해저면에 뚜렷한 회절 쌍곡선을 볼 수 있는데, 이는 철 구조물의 직경이 송신파의 파장(약 43cm)과 비슷하며 음향임피던스가 퇴적층의 음향임피던스( $2,250 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m}$ )에 비해 약 10배 이상 되기 때문인 것으로 보인다.

통나무나 드럼통의 경우 뚜렷한 회절 쌍곡선을 얻을 수 없었으며, 단지 비약한 이상신호 만이 감지되었다. 이는 이상체의 직경이 송신파의 파장에 비해 작고 이상체의 음향임피던스가 해저 퇴적층의 음향임피던스와 비슷하기 때문인 것으로 보인다. 일반적으로 이상체의 크기가  $1/2 \lambda$  이상이면 감지가 가능하다고 하나 정확한 쌍곡선의 형태를 제공하지는 못하는 것으로 생각된다. 따라서 이상체에 의한 회절 쌍곡선을 얻기 위해서는 최소한 이상체의 크기가 파장인  $\lambda$  정도는 되어야 할 것으로 보인다.

### 3-4. 수치모의실험

수중 및 지층내에서의 음향신호의 복잡한 전파 특성과 상호작용을 이해하고 음향신호에 의한 탐사자료를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 음파 전달에 대한 수치모의실험이 선행되어야 한다. 음향신호에 대한 수치모의실험에는 파동방정식을 이용한 유한차분법, 유한요소법, 가스펙트럼법(pseudo-spectrum method)등이 알려져 있다. 이 중 가스펙트럼법은 공간좌표에 대한 미분을 푸리에 영역에서 곱셈으로 계산하는 방법으로 유한차분법이나 유한요소법에 비해 정확하고 격자의 수가 적게 요구되는 장점을 갖고 있다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 가스펙트럼법을 이용한 2차원 수치모의실험을 통하여 해저매몰체의 탄성특성, 형태 및 매몰심도 등에 따른 음파탐사 결과의 예측 및 분석을 시도하였다.

파원(source)으로는 공간과 시간함수 곱으로 표현되는 변위장을 사용하였으며, 시간함수로는 다음과 같은 가우스함수를 사용하였다.

$$f(t) = (t-t_0)\exp[-\alpha(t-t_0)^2] \quad (10)$$

여기서  $t_0$ 는 파정(波頂)의 중심까지의 시간이며,  $\alpha$ 는 파의 진동수와 관련된 상수이다.

지층탐사기가 사용하는 3.5kHz의 파를 재현하기 위해서 식(10)에 대한 주파수 분석을 통하여 진폭스펙트럼의 중앙 주파수가 3.5kHz내에 들도록  $\alpha$ 를 설정하였다. 식(10)에 대한 푸리에 트랜스폼을 Mathematica<sup>11)</sup>를 이용해 구한 결과

$$F(w) = \frac{e^{it_0w - \frac{w^2}{4a}} \sqrt{\pi t_0}}{\sqrt{a}} + i \frac{e^{it_0w - \frac{w^2}{4a}} \sqrt{\pi(-it_0 + \frac{w}{2a})}}{\sqrt{a}} \quad (11)$$

를 얻었으며,  $\alpha = 2.37 \times 10^8$ ,  $t_0 = 0.0002$ 의 값을 입력 자료로 사용하였다.

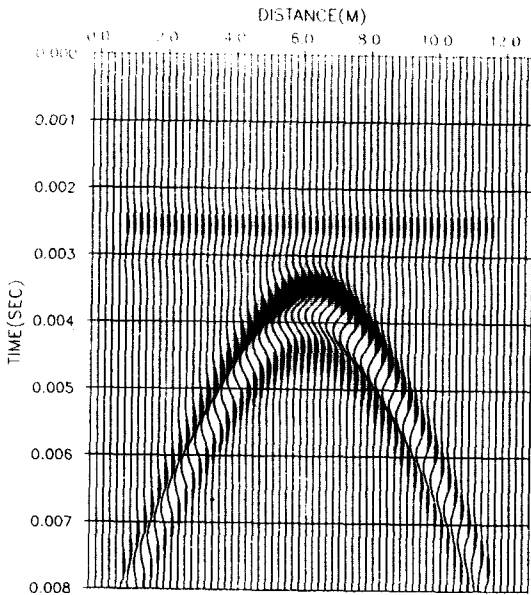


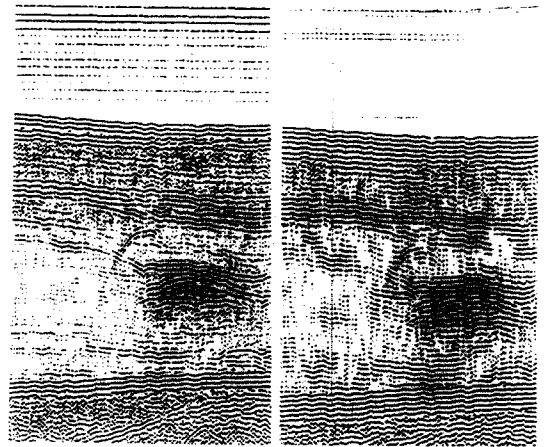
Fig. 5 Seismic signal due to point diffractor.

Fig. 5는은 규모가 매우 작은 점의 이상체가 해저 퇴적층 내에 존재하는 경우에 대한 수치모의실험 결과이다. 해수에서의 파의 전달속도는 1,500m/sec, 퇴적층에서의 파의 속도는 1,550m/sec로 하였으며 이상체의 종파 전달속도는 3,500m/sec로 하였다. 이상체는 사방 40cm의 크기를 가지며, 해저면하 80cm인 곳에 매몰된 것으로 가정하였다. 이 그림에서 점의 이상체가 지층내에 존재할 때 회절 쌍곡선이 이상체를 중심으로 형성됨을 알 수 있으며, 이상체의 전후에서 수신파의 위상은 동일함을 알 수 있다. 이상체의 위치와 회절쌍곡선의 정점에 해당하는 탐사자료의 분석을 통하여, 이상체 상부는 진폭이 최대가 되는 곳보다 약간 하부에 위치하고 있으며 이상체 하부는 진폭이 최소가 되는 곳에 위

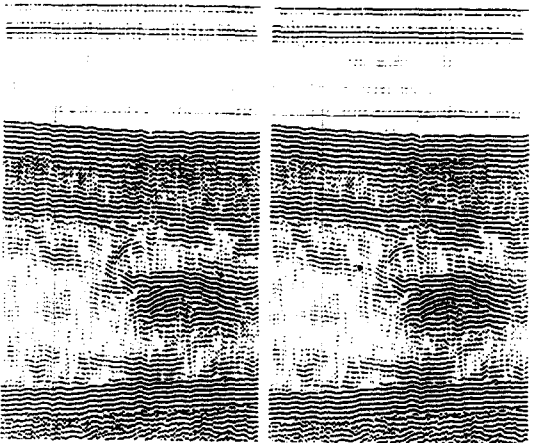
치하고 있음을 알 수 있다.

3-5. 디지털 자료처리

탄성파 탐사자료를 디지털로 취득하는 큰 장점 중의 하나는 자료를 전산처리 할 수 있다는 점이



a b



c d

Fig. 6 a. Sub-bottom profiler section(raw data); b. Signal processed with 2-trace stacking; c. Signal processed with 2-trace stacking, gain recovery, and band pass filtering; d. Signal processed with 3-trace stacking.

다. 일반적으로 탄성과 자료처리에는 여러 종류가 있겠으나 영상분석시스템의 단일 채널 자료에 의한 천해저의 소규모 매몰체를 대상으로 하는 탐사에서는 기본적인 처리과정인 이득조정, 삭제, 필터링, 신호중첩 등이 적용가능하며, 이외에 탐사선의 동요에 의한 효과를 제거하는 평활화 등이 적용가능하다.

Fig. 6a~6d는 지층탐사의 결과로서 직경 약 15cm의 통나무(자료중 점선부)를 설치하고, 이를 횡단하면서 측정한 자료이다. 그 중 Fig. 6a는 원자료를 그대로 출력한 것이며, Fig. 6b는 2개의 신호를 중첩한 결과이다. Fig. 6c는 2개의 신호를 중첩하고 이득조정을 거친 후 3,000~4,000Hz의 대역 필터를 적용한 결과이며, Fig. 6d는 단순히 3개의 신호를 중첩한 결과이다. 중첩을 통하여 고주파의 잡음이 상당히 제거되었음을 알 수 있으나 3개의 신호를 중첩한 경우 중첩의 효과가 다소 과도한 것으로 보인다. 따라서 일반적으로 고주파 특성이 강조되는 천해저 탐사에서는 3개 신호 이상의 중첩은 효과적이지 않은 것으로 생각된다.

Fig. 6b와 Fig. 6c에서 보는 바와 같이 2개 신호 중첩인 경우 원자료보다 고주파의 잡음이 상대적으로 제거되었으며, 큰 규모의 이상신호는 보다 뚜렷하게 나타나는 반면, 명암의 대비가 적거나 불확실한 이상신호는 상당히 소멸되었다. 중첩에 의해 소멸되는 이상신호는 음향 임피던스의 차가 크다고 보기 어려우며, 이러한 현상은 이상체에 의해 형성되기 보다는 오히려 지층의 상변화 등에 기인한다고 볼 수 있다.

Fig. 6b와 Fig. 6c의 비교에서는 거의 같은 특성을 보이는 데, 이는 원자료 기록시 이미 여러 이득조정과 대역필터를 적용한 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

지층탐사 기록지 상에 나타나는 이상신호는 매몰체의 물성 및 형상, 매몰체와 퇴적층의 음향임피던스의 차이에 의한 회절파이다. 따라서 해저매몰체를 탐사하기 위해서는 회절파의 특성을 정밀하게 분석하여 이로부터 매몰체의 위치 및 형상, 물성 등을 역으로 예측하는 음향신호 분석모델 개발

이 요구된다.

음향신호의 분석을 위하여 모의탐사, 수치모의실험, 회절파의 특성 및 형상분석을 수행하였으며, 이를 토대로 실험역 탐사자료를 이용한 디지털 자료처리를 시도하였다.

본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

회절파는 지질구조의 이상이나 지질학적인 불연속 뿐만아니라 매몰체에 의해서도 생성되며 회절파의 곡률반경은 심도가 증가함에 따라 증가한다. 이상체가 송수파기의 직하방에 있을 때 회절파의 정점은 이상체의 위치를 나타내며, 회절파의 곡률은 이상체의 심도와 이상체가 놓여 있는 상부지층의 종파속도에 의해 결정된다.

물성과 형태를 알고 있는 통나무, 드럼통, 철 구조물 등 3 종류의 물체를 이용한 모의탐사결과 이상체의 크기는 최소한 송수파기의 파장(3.5kHz 사용시 약 43cm) 정도는 되어야 선명한 회절 쌍곡선을 얻을 수 있으며 이상체의 음향 임피던스가 퇴적층의 음향 임피던스(약  $2,250 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m}$ )에 비해 수 배 이상 커야 회절 쌍곡선의 감지가 가능하다.

수치모의실험결과 점 이상체가 존재할 경우 강한 회절쌍곡선이 관측되었으며, 수평 판상형 이상체가 있는 경우에도 회절쌍곡선이 수신되었으나 탐사선의 거리가 멀어짐에 따라 수신된 파의 진폭이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

탐사선이 이상체의 직상방을 통과할 경우와 이격거리를 두고 통과할 경우에 대한 회절파의 형상 분석결과 이상체의 탐지한계( $x_{\max}$ )는 이상체의 심도, 송수파기의 지향각, 지층에서의 파의 전달속도에 따라 증가하며, 이상체의 탐지한계에 해당하는 왕복주행시간( $t_{\max}$ )은 이상체와 탐사선의 이격거리에 상관 없이 동일함을 알 수 있었다. 이상체의 심도는 최대왕복주행시간과 지향각을 이용하여 구할 수 있으며, 쌍곡선의 폭과 길이의 비(W/L)를 이용하면 이상체와 탐사선간의 이격거리도 구할 수 있다. 한편, W/L비의 최대값을 이용하면 회절파와 비회절파의 구분도 가능할 것으로 보인다.

수신된 신호를 처리하여 탐사목적에 부합되도록 신호를 증진시키고 잡음을 제거하기 위하여 실시한 디지털 자료처리 결과 고주파의 잡음은 2개 신호 중첩에 의해 효과적으로 제거할 수 있었다. 신

호중첩을 수행한 결과 정밀분석이 요구되는 뚜렷하고 큰 규모의 회절 쌍곡선은 더욱 선명하게 나타나며, 주위 지층과 음향 임피던스가 비슷하거나 소규모의 회절 쌍곡선은 효과적으로 소멸되었다.

이상의 음향신호 분석을 통해 볼 때 이상체의 위치와 규모 등은 어느정도 파악이 가능할 것으로 보이나 정확한 형태와 물성을 파악하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

### 참고 문헌

- 1) Trabant, P. K., "Applied High-resolution Geophysical Methods", IHRDC, Boston, pp. 81~100, 1984.
- 2) 황동환, 김성필, "수중 유물 발굴의 기초", 해군사관학교, pp. 24~57, 1994.
- 3) 김진후, "해저 매물체 탐사를 위한 탄성과 수치모델링", 동아대학교 해양자원연구소 연구논문집, 7권, 1호, pp. 1~6, 1994.
- 4) GeoAcoustics, "Sonar Enhancement System: Operation Manual", GeoAcoustics Ltd., Norfolk, England, 1992.
- 5) Dix, C. H., "Seismic Prospecting for Oil", IHRDC, Boston, pp. 255~261, 1981.
- 6) Hilterman, F. J., "Amplitudes of Seismic Waves - A Quick Look", Geophysics, Vol. 40, No. 5, pp.745-762, 1975.
- 7) Schilt, F. S., Kaufman, S., and Long, G. H., "A Three-dimensional Study of Seismic Diffraction Patterns from Deep Basement Source", Geophysics, Vol. 46, No. 12, pp. 1673-1683, 1981.
- 8) Robinson, E. and Clark D., "A Wave at a Boundary: Reflection, Transmission/Refraction, and Diffraction", The Leading Edge of Exploration, Vol. 6, No. 9, pp. 38-42, 1987.
- 9) Trorey, A. W., "A Simple Theory for Seismic Diffraction", Geophysics, Vol. 35, No. 5, pp.762-784, 1970.
- 10) Huang, B. S., "A Program for Two-dimensional Seismic Wave Propagation by the Pseudo-Spectrum Methods", Comp. and Geosc., Vol. 18, No. 2, pp. 289-307, 1992.
- 11) Wolfram, S., "Mathematica, 2nd ed.", Addison-Wesley Publ. Co. Inc., Redwood City, California, pp. 679-682.