물리탐사
Vol. 7, No. 4, 2004, p. 245~250

연구논문

단일 채널 해양 탄성파탐사 자료의 수평거리 보정

김현도[1] · 김진후[1]

Horizontal Distance Correction of Single Channel Marine Seismic Data

Hyun-Do Kim[1] and Jin-Hoo Kim[1]

요 약 : 단일 채널 해양 탄성파탐사 자료의 2차원 탄성파 단면도에 수평거리 보정을 적용하여 탄성파 단면도의 수평축을 거리 단위로 표현하였다. 수평축을 거리 단위로 표시함으로써 탐사선의 운항 속력이 변할 경우 나타나는 수평 거리 왜곡 현상을 상당히 해소할 수 있었다. 수평거리 보정을 위하여 탄성파 자료의 각 트레이스에 저장된 GPS 위치 정보와 자료 취합 윈도우를 이용하였다. 자료 취합 윈도우의 최소 길이는 탐사선의 속력과 발파 간격에 의해 결정하였으며, 최대 길이는 1차 프레넬대 반경을 이용하여 결정하였다. 자료 취합 윈도우의 길이를 결정함에 있어 수평 해상도와 중합의 효과를 동시에 고려하였다. 수평거리 보정 과정을 적용하여 실제 지층구조와 유사하다고 생각되는 2차원 탄성파 단면도를 작성할 수 있었다.

주요어 : 단일 채널 해양 탄성파탐사, 탄성파 단면도, 수평거리 보정, 윈도우의 길이, 탐사선의 속력

Abstract : Horizontal-axes on the seismic section have been represented in a distance unit by applying horizontal-distance correction transformation on a 2-D seismic section of single channel marine seismic data. By drawing horizontal-axes in a distance unit, distortion of horizontal distances shown on the seismic section when the ship speed varies during a survey can be diminished considerably. Position information obtained by GPS and stored in each trace of seismic data as well as data collection windows were used for horizontal distance correction. The minimum window length was decided by considering ship speed and shot interval, and the maximum window length was determined by reflecting radius of the 1st Fresnel zone. In choosing an optimum window length, horizontal resolution and stacking effect were considered simultaneously. By applying horizontal distance correction we could get a 2-D seismic section which is considered as reflecting the real subsurface structure analogously.

Keywords : single channel marine seismic survey, seismic section, horizontal distance correction, window length, ship speed

서 론

천해저 해양 탄성파탐사는 해양 환경조사 및 해양 구조물의 안전성 확보를 위한 지반조사 등의 목적으로 널리 이용되고 있는 해양탐사 기술 중의 하나이다. 해양 탄성파탐사의 주를 이루던 반사법 탄성파탐사는 석유탐사 분야에서 1960년대부터 발전하여 다중 채널의 디지털 자료를 이용한 보다 높은 해상도의 탄성파 단면이 제작되고 있다. 이에 비해 천해저에서의 환경조사 및 지반조사 등을 위한 목적으로 사용하는 천부해저 탄성파탐사는 단일 채널을 주로 사용하기 때문에 석유탐사용 탐사 시스템을 그대로 적용하는 것은 비효율적이며, 따라서 아날로그 방식의 기록에 의존하는 경우가 많았다. 그러나 1980년대 이후부터 급속히 발전하기 시작한 PC가 고성능·저가격화 됨으로서 이를 이용한 자료 취득 및 처리 시스템의 개발이 본격화 되었으며, 우리나라에서도 1990년대 초 단일 채널 자료에 대한 디지털 기록 및 자료처리가 PC 기반 기록 및 자료처리 시스템으로 처음 시도되었다(이호영 등, 1992; 이호영 등, 1993; 김진호, 김현도, 2001). 이후 6채널 스트리머를 이용한 고해상 다중 채널 디지털 자료의 기록과 자료처리가 수행되기 시작하여 단일 채널 탄성파탐사에 비해 탐사심도 및 해상도의 증대를 기할 수 있었다(McGee, 1995a; McGee, 1995b; Miller *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1996; 이호영 등, 2002).

디지털화 된 탄성파 자료는 여러 가지 전산처리 과정을 거치면서 높은 해상도의 영상을 재현시켜 실제의 지층모양과 가까운 탄성파 단면도를 작성하고 있다(이호영 등, 2003). 최종 결과물인 탄성파 단면도의 수평 축은 발파수(shot number)로 표시되며, 만일 탐사선의 운항 속력이 일정하다면 거리로 환산하여 표시될 수 있다. 그러나 탐사선의 운항 속력이 일정하지 않을 경우에는 탐사선의 운항 속력에 따라 탄성파 단면도의 형상이 실제의 지층과 크게 달라질 수 있다. 일반적으로 단일

*2004년 9월 15일 접수
1) 동아대학교 토목 · 해양공학부(Dong-A University, School of Civil and Ocean Engineering)

채널 해양 탄성파탐사에서는 5톤 이하의 소형 선박을 이용하는데, 이 경우 바람과 조류의 영향으로 등속력으로 운항하기가 매우 어려운 실정이다. 탐사선의 속력이 빠른 경우에는 탄성파 단면도 상에서 수평 거리는 축소되어 표현되고, 반대로 탐사선의 속력이 느린 경우에는 확대되어 표현될 것이다. 이렇게 탄성파 단면도의 수평 스케일이 수시로 변하게 되면 탄성파 단면도는 시각적으로 왜곡된 상태로 표현될 것이며, 탄성파 단면도를 설계 도면에 중첩시킬 수 없는 문제점을 낳는다.

본 연구에서는 불규칙한 속력으로 운항하여 얻은 단일 채널 해양 탄성파탐사 자료의 수평 축을 거리 단위로 변환하여 실제 지층의 형상에 가장 가까운 탄성파 단면도를 작성할 수 있는 방법을 모색하였다.

현장 자료 취득 및 처리

현장 자료 취득

현장 취득 자료의 수평 축 변환을 실시하기 위하여 단일 채널 해양 탄성파탐사를 Fig. 1과 같이 실시하였다.

탐사선은 3.5톤급의 소형 선박을 이용하였으며, 해상의 정확한 위치 정보를 얻기 위해 Trimble사의 DGPS(Model: DSM212)를 탑재하여 실시간으로 탐사 자료와 연동하여 저장하였다. GPS 자료는 1초 마다 갱신되므로 발파위치는 초단위로 절삭된 시각에 따른 GPS 위치가 선택된다. 이 경우 국부적으로 특정 발파점에서의 위치가 갑자기 증가 · 감소하게 된다. 즉 발파 신호와 GPS 사이의 미세차이에 의한 누적 차이가 고르게 반영되지 않고 국부적으로 갑자기 증가 · 감소하면서 오차의 누적이 해소된다. 이러한 오차는 1초 동안 배가 운행한 거리보다 적기 때문에 오차에 대한 고려는 따로 하지 않고 발파점에서의 GPS 위치가 정확하다고 가정하였으며, 시험자료 역시 첫 번째 발파점과 마지막 발파점사이의 GPS 시각차이에 의해 계산된 발파점의 개수가 실제 발파점과 동일한 자료를 선택하여 이러한 오차가 존재하지 않는 구간의 자료를 선택하였다. 그리고 GPS 정보는 1초 주기이며 발파 간격은 0.25초이므로 4회 발파 동안에는 같은 위치 정보를 갖는데 거리보정을 위해서 각 발파점의 위치가 필요하기 때문에 동일 위치 정보에서 첫 번째 위치 정보들을 이용하여 선형보간하여 각 발파에 대한 위치를 정한다.

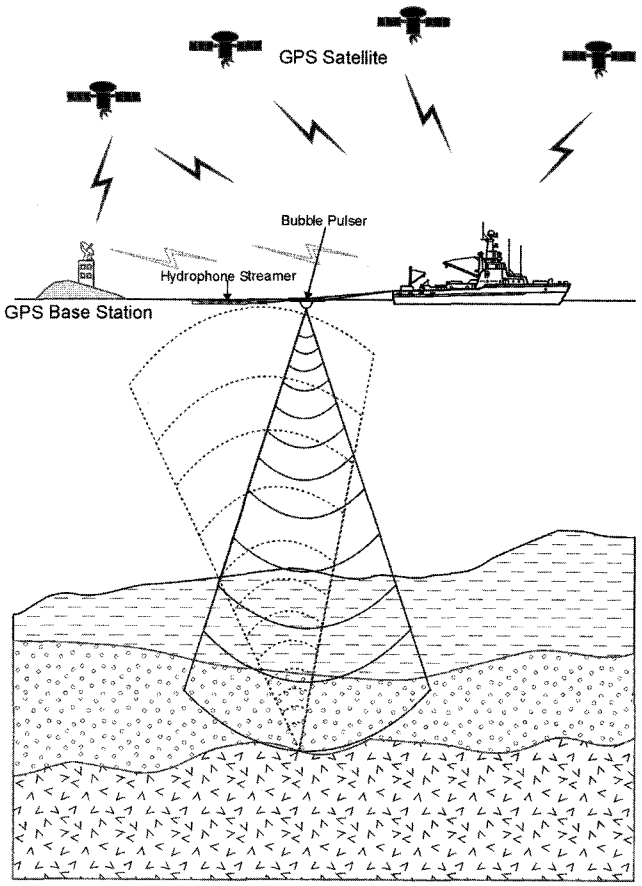

Fig. 1. Layout of shallow single channel marine seismic survey.

탄성파 자료 취득에는 미국 Benthos사의 Bubble Pulser 1200 시스템이 사용되었다. 이 시스템은 중심 주파수 400 Hz의 트랜스듀서를 음원으로 사용하며 16개의 하이드로폰으로 구성된 단일 채널 스트리머로 자료를 수신한다. 디지털 자료 기록 시스템은 국내에서 개발된 MSDAS(Marine Seismic Data Acquisition System, GeoView) Ver. 1.5 시스템이 사용되었으며, 여기에 사용된 A/D 변환기는 16bit의 해상도를 갖는 Data Translation 사의 Model DT321이다. 취득한 탄성파 자료는 PC의 하드디스크에 DGPS 정보와 함께 실시간으로 저장된다.

단일 채널 해양 탄성파 자료는 Table 1에 기재한 바와 같이 샘플링 간격 0.2 ms, 샘플 개수 800개, 발파 간격 0.25 sec로 매개변수를 설정하여 취득하였다.

자료 처리

디지털로 취득한 자료는 해상도 향상을 위하여 자료 처리 과정을 거치게 되는데 본 연구에서 적용한 자료 처리 과정은 Table 2에서 보는 바와 같다.

Table 1. Data acquisition parameters.

Sampling Interval	0.2 msec
Number of samples (Record Length)	800 (160 msec)
Shot Interval	0.25 sec

Table 2. Data Processing flow.

Gain Recovery
Deconvolution
Digital Filtering
Static correction
Muting
Horizontal distance correction

구형발산 및 흡수에 대한 영향을 보상해 주어 전체적으로 신호의 진폭을 조정하는 이득회수를 가장 먼저 적용하였으며, 파형의 압축효과로 지층 단면도의 수직 해상도를 향상시키기 위하여 디콘볼루션 과정을 거쳤다. 디콘볼루션 후에는 고주파 잡음이 증가하는데 1,500 Hz의 저역 통과 필터와 50 Hz의 고역 통과 필터를 적용하여 저 · 고주파 잡음을 제거하였다. 해상에 항상 존재하는 너울과 파도는 소형 선박을 이용한 단일 채널 탄성파탐사에서는 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 정보정을 실시하여 너울효과를 제거하였다. 심도 추출은 이미지 색상 추출법을 사용하였으며(김진후, 김현도, 2004), 너울효과 보정은 인접심도 평균법을 사용하였다(김종천 등, 2003). 그리고 수면으로부터 해저면까지의 잡음을 제거하기 위하여 뮤우팅 과정을 거쳤다.

마지막 자료 처리 과정으로 수평 축 변환을 실시하여 변환 실시 전과 실시 후의 효과에 대해 비교 분석하였다.

수평거리 보정

보정 방법

일련의 자료처리 과정을 마친 후 마지막 단계로 2차원 탄성파 단면도를 작성한다. 일반적으로 탄성파 단면도에서 수평축은 발파수로, 수직축은 왕복 주시로 표현된다. 탄성파 트레이스를 기록함에 있어서 매 발파마다 한 개의 트레이스를 기록하므로 발파 간격이 일정하다면 결국 수평축도 시간 단위의 축으로 볼 수 있다.

배가 등속력으로 운항을 한 경우에 탐사 위치 x는

$$x = V_m \cdot T \tag{1}$$

로부터 구할 수 있다. 여기서 V_m은 등속력으로 운항한 배의 속력이며, T는 탐사 시점으로부터의 경과 시간으로 발파수를 N, 발파 간격을 Δt라 할 때, $T = N \cdot \Delta t$이다.

한편, 배가 등속력으로 운항하지 못한 경우에 탐사 위치 x는

$$x = \int_0^T V \cdot dt \tag{2}$$

로 구할 수 있다. 여기서 V는 미소 시간 dt에 해당하는 배의 속력이다.

위의 식 (1), (2)에서 보는 바와 같이 탐사선의 속력이 일정하지 않은 경우에는 발파수 N에 해당하는 탐사 위치는 속력이 일정한 경우와 달리 계산되며, 따라서 탄성파 단면도의 수평축이 탐사선의 속력에 따라 확대되거나 축소되어 나타나게 된다. 한편, 식 (2)를 이용해 탐사선의 위치를 결정하고 이를 이용해 탄성파 단면도를 작성할 경우, 미소 시간에 해당하는 배의 속력을 정확하게 측정하기가 어렵고, 탐사선의 속력이 변함에 따라 탄성파 트레이스를 등간격으로 표시할 수 없는 등 몇 가지 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 자료취합 윈도우를 사용해 탄성파 트레이스를 등간격으로 표시는 방법을 고안하였으며, 상술하면 다음과 같다.

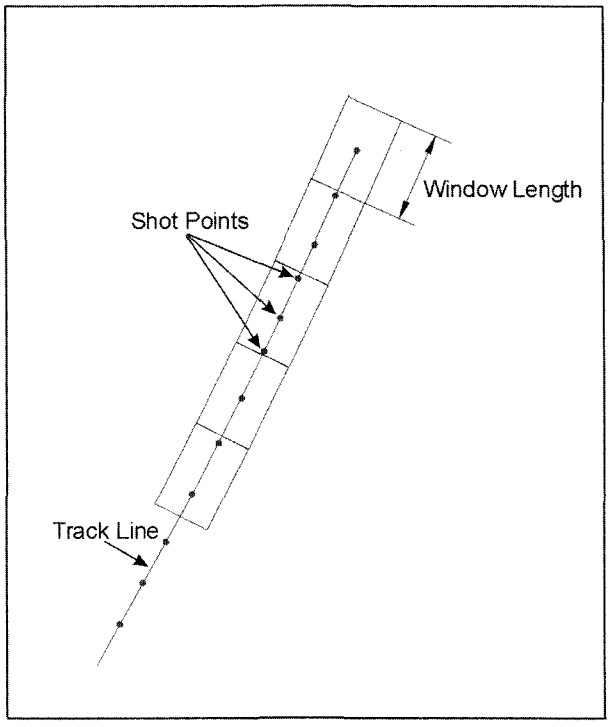

Fig. 2. Principle of scale transformation of single channel marine seismic data.

각 발파점의 위치가 GPS에 의해 결정되면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 이를 이용하여 탐사선의 항적 라인을 작성할 수 있으며, 그 항적 라인을 따라 특정 길이를 갖는 자료 취합 윈도우를 설정한다. 이러한 자료 취합 윈도우가 항적 라인을 따라 결정되면 하나의 윈도우 내에 존재하는 모든 트레이스를 해당 윈도우의 탄성파 자료로 취급하여 중합한다. 이렇게 작성된 새로운 트레이스는 자료 취합 윈도우의 중심에 해당하는 새로운 좌표를 갖게 되며, 윈도우의 길이 간격으로 재배치되면서 항적 라인 상에 등간격의 거리 단위로 수평축에 표시된다.

이와 같은 수평거리 보정 변환에 있어서 고려해야 할 사항 중의 하나는 탐사선의 속력에 맞는 적당한 자료 취합 윈도우 길이의 설정인데, 탐사선의 속력과 발파 간격과의 관계를 고려할 때 자료 취합 윈도우 내에 적어도 하나 이상의 트레이스가 존재하도록 윈도우의 길이가 설정되어야 한다. 탐사선의 속력이 빠르면 윈도우의 길이는 길어지고, 탐사선의 속력이 느리면 윈도우의 길이는 짧아질 수 있다.

자료 취합 윈도우의 길이

자료 취합 윈도우 길이의 최소 길이 $L_{\min}(m)$와 발파 간격 Δt(sec)의 관계는 다음과 같다.

$$L_{\min} = V_{\max} \times \Delta t \tag{3}$$

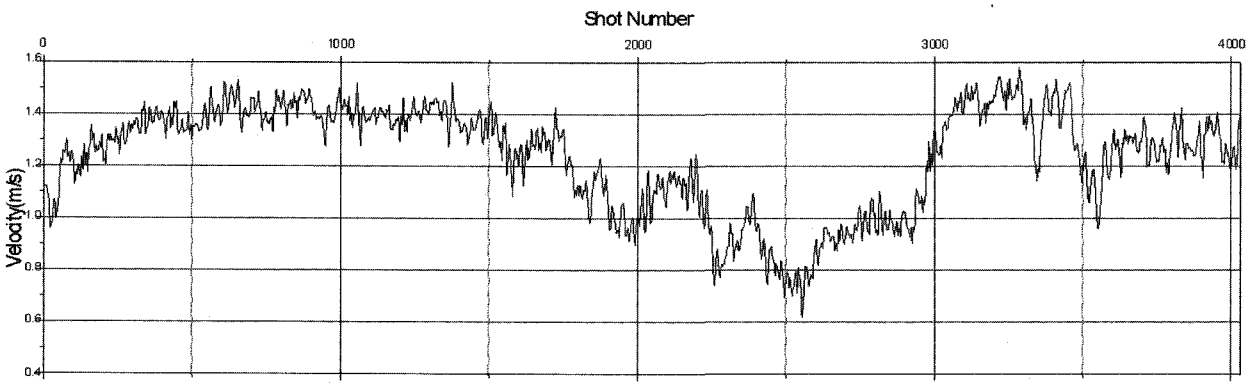

Fig. 3. The variation of ship speeds. The speed varies from 0.6 m/sec to 1.6 m/sec.

여기서 V_{max}(m/sec)는 탐사선의 최대 속력이다. Fig. 3은 자료 취득을 위한 탐사선의 운항 속력을 나타낸 것이며, 이때 발파 간격은 0.25 sec였다. 탐사선의 속력은 약 0.6~1.6 m/s 정도로 불규칙하게 나타나고 있으며, 최대 속도를 식 (3)에 적용하면, 최소 윈도우의 길이는 0.4 m가 된다.

자료 취합 윈도우 길이의 최대값은 탄성파 단면도의 질과 밀접한 연관이 있다. 윈도우의 길이가 클 경우 한 윈도우 내에 많은 트레이스가 포함되어 중합에 의한 신호대 잡음비가 커지는 효과를 얻을 수 있지만, 수평 해상도가 떨어지고 심할 경우에는 지층의 정보가 왜곡될 수 있다.

윈도우 길이의 최대값은 수심 또는 조사 대상 지층의 심도를 고려하여 1차 프레넬대의 반경 R_1을 넘지 않도록 결정하는 것이 바람직하다. 심도가 깊어지면 1차 프레넬대의 반경도 커지므로 윈도우 길이 역시 커지게 된다. 본 연구의 조사지역은 수심이 약 20 m로 R_1은 약 6.2 m이다.

Fig. 4는 윈도우 길이의 변화에 따른 지층 단면도의 변화를 보여준다. 윈도우 길이를 1.0 m에서 10.0 m까지 변화시키면서 비교하였는데, 전체적으로 지층의 수직적 변화는 큰 차이가 없으나 윈도우 길이가 길어지면서 수평 해상도가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 윈도우의 최대 길이는 1차 프레넬대의 반경 내에서 수평 해상도를 고려하여 경험적으로 결정하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

결과 및 고찰

탐사선의 최대 속력 1.6 m/s와 발파간격 0.25 sec를 식 (3)에 대입하면 0.4 m의 최소 윈도우 길이를 결정할 수 있다. 그리고 조사 지역의 수심 20 m를 고려하면 1차 프레넬대의 반경

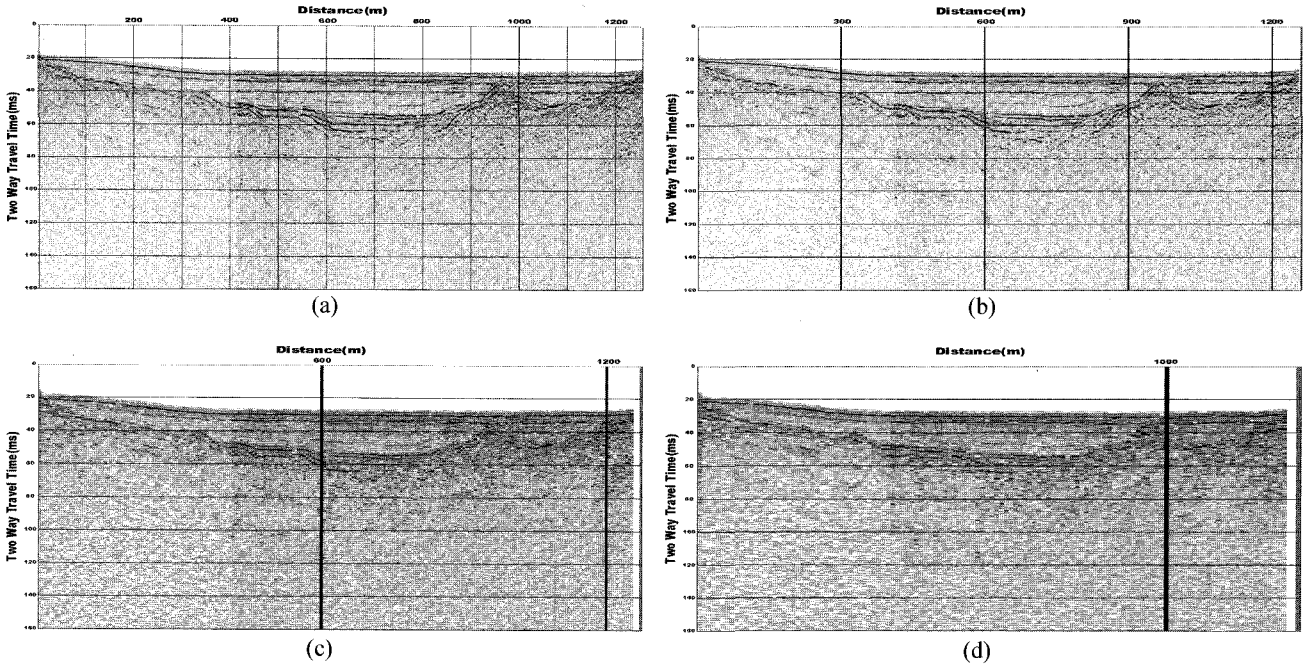

Fig. 4. Seismic sections after horizontal distance correction with various window lengths, (a) L=1 m, (b) L=3 m, (c) L=6 m, (d) L=10 m.

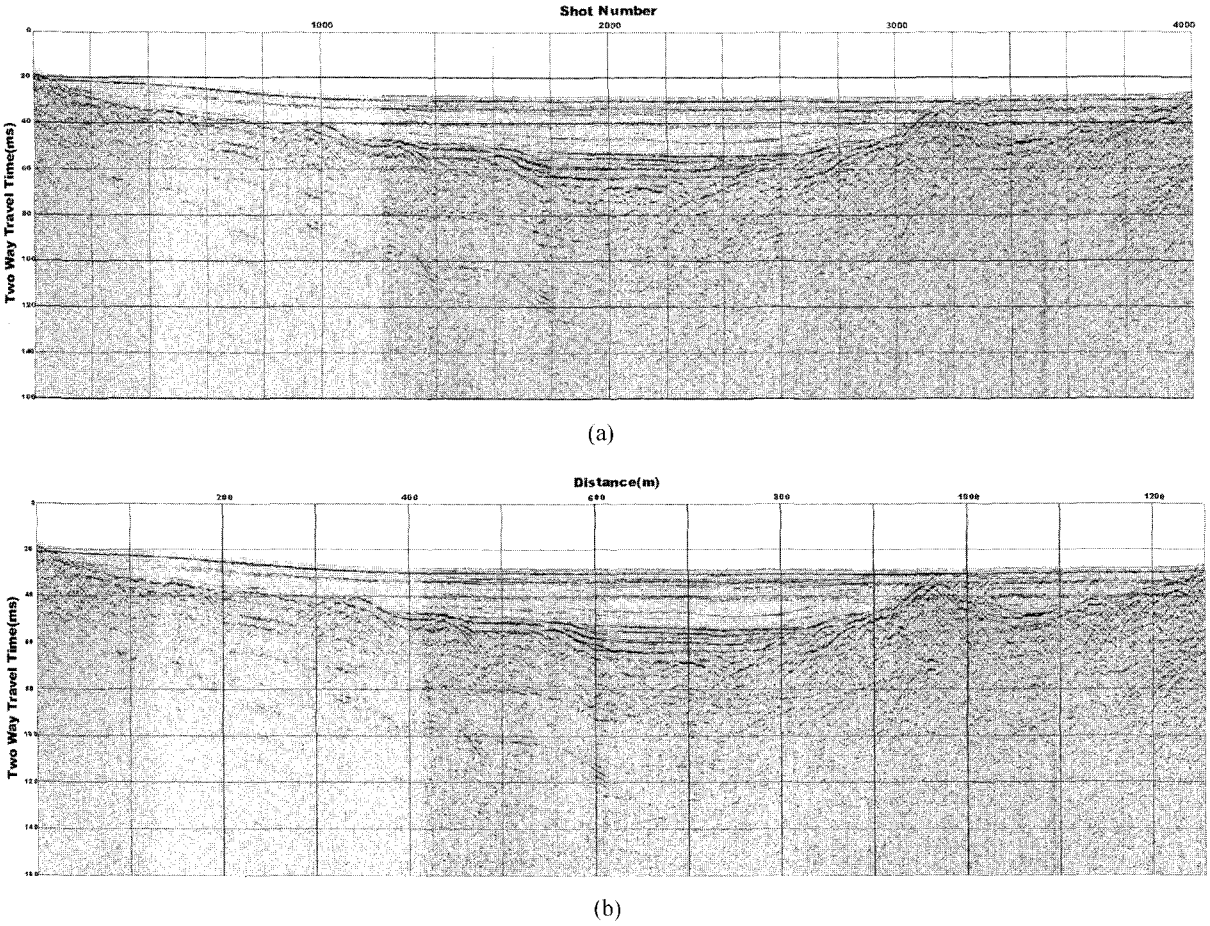

Fig. 5. Seismic sections for comparison of horizontal distance correction. (a) before correction. (b) after correction.

R_1은 6.2 m이다. 따라서 자료 취합 윈도우의 길이는 $0.4\ \mathrm{m} \le L \le 6.2\ \mathrm{m}$ 의 범위 내에서 결정될 수 있으며, 여기서 수평 해상도와 중합의 효과를 동시에 만족할 수 있는 최적의 변환 윈도 길이를 결정하게 된다. 본 연구에서는 최대의 수평 해상도를 얻기 위해 0.5 m의 윈도우 길이를 적용하여 보정을 실시하였다.

Fig. 5는 현장에서 취득한 자료에 대해 수평축 변환 전과 후를 비교한 것이다. 자료처리 과정 중 마지막 단계인 축 변환 과정만 달리 적용하였을 뿐, 기타 자료처리 과정은 모두 동일하게 적용하였다. Fig. 5(a)는 축 변환 과정을 적용하기 전의 2차원 탄성파 단면도로서 수평축이 발파수로 표시되어 있다. 이에 반해 Fig. 5(b)는 축 변환 과정을 거쳐 축평축을 거리 단위로 표현하였다. 축 변환 효과를 살펴보면, Fig. 3의 발파수 2,500 부근에서는 탐사선이 평균속력 1.23 m/s보다 저속인 0.8 m/s의 속력으로 운항한 것으로 나타나는데, 이는 Fig. 5(a) 탄성파 단면도에서 수평적으로 확대되어 나타나고 있다. 이와는 반대로 발파수 3,200 부근에서는 평균속력보다 빠른 1.5 m/s의 속력으로 운항한 것으로 나타나는데, 이 경우에는 지층 단면도가 수평적으로 압축되어 나타나고 있다.

축 변환 과정을 적용하여 작성한 지층 단면도는 Fig. 5(a)에 나타나는 수평 스케일의 불규칙성을 상당히 해소할 수 있으며, 따라서 실제 지층구조와 유사한 탄성파 단면도를 제공할 수 있을 것으로 보인다. 수평축 변환을 통하여 수평 스케일이 등간격을 유지하게 되면 지층 단면도를 분석할 때 실제 지층구조와 탄성파 단면도와의 차이 때문에 발생할 수 있는 오류를 줄여 지층 분석의 정확성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 지층의 경사보정이나 구조보정에도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다.

결 론

단일 채널 해양 탄성파탐사 자료를 디지털로 취득한 후 이득회수, 디콘볼루션, 디지털 필터링, 정보정 등 자료처리를 수행함으로써 수직 해상도가 향상된 기록을 얻을 수 있다. 이 때 얻어지는 탄성파 단면도의 수평축은 일반적으로 발파수로 표시됨으로써 탐사선의 운항 속력이 일정하지 않은 경우에는 탄성파 단면도의 왜곡을 초래한다.

본 연구에서는 이러한 탄성파 단면도의 왜곡 현상을 해소하

기 위하여 수평축을 발파수 또는 시간 단위가 아닌 거리 단위로 표시할 수 있는 수평축 변환을 실시하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 자료 취득시 각 트레이스에 저장된 GPS 위치 정보를 이용하여 발파점의 좌표를 구할 수 있으며 이를 이용하여 탄성파 단면도의 수평축을 거리 단위로 표시할 수 있다.

(2) 수평축을 거리 단위로 표시하더라도 탐사선의 속력이 변할 경우에는 발파점들이 등간격으로 배치되지 않아 도면 작성에 어려움이 따른다. 이를 해소하기 위해 등간격으로 배치된 자료 취합 윈도우를 설정하였으며, 이 윈도우 내에 존재하는 트레이스들을 윈도우 중앙에 해당하는 탄성파 자료로 간주하고 중합하여 새로운 트레이스를 생성하였다. 이렇게 작성된 트레이스를 이용해 단면을 작성함으로써 수평축은 거리 단위로 표시되며, 트레이스는 등간격으로 배치될 수 있다.

(3) 자료 취합 윈도우의 길이(L)는 탐사선의 최대 속력(V_{max})과 발파 간격(Δt), 1차 프레넬대의 반경(R_1)을 고려하여 $V_{max} \times \Delta t \le L \le R_1$ 으로부터 구할 수 있다. 윈도우의 길이를 결정함에 있어 수평해상도와 중합의 효과를 동시에 만족시킬 수 있도록 하여야 하며, 탐사 자료에 잡음이 비교적 적은 경우에는 윈도우의 길이는 최소값에 가깝게 설정하는 것이 바람직한 것으로 보인다.

참고문헌

김종천, 이호영, 김지수, 강동효, 2003, 상호상관을 이용한 고분해능 천부해저탄성파탐사 자료에서의 너울효과 제거, 지구물리, **6**, 31-38.

김진후, 김현도, 2001, PC를 이용한 천해저 탄성파탐사 자료 취득 및 처리에 관한 연구, 2001년도 춘계발표대회논문집, 한국해양공학회, 울산대학교, 2001년 5월 18~19일, 166-171.

김진후, 김현도, 2004, 이미지 색상 추출법에 의한 정밀 심도 추출, 연구논문집, 동아대학교 해양자원연구소, **16**, 1-6.

이호영, 김철민, 김원식, 신원철, 김정기, 김상우, 공영세, 1992, 천해저 고해상 탄성파 자료취득 기술개발연구(I), 과학기술처, KR-92(T)-5.

이호영, 김철민, 김원식, 신원철, 김정기, 김상우, 공영세, 1993, 천해저 고해상 탄성파 자료취득 기술개발연구(II), 과학기술처, KR-93(T)-14.

이호영, 박근필, 구남형, 박영수, 김영건, 서갑석, 황규덕, 김종천, 2002, 에어건과 6채널 스트리머를 이용한 고해상 천부 해저 탄성파탐사, 한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지엄 · 땅과 물이 만나는 곳에서의 물리탐사 · 논문집, 한국지구물리탐사학회, 24-45.

이호영, 구남형, 박근필, 유동근, 강동효, 김영건, 서갑석, 황규덕, 김종천, 김지수, 2003, 고해상 다중채널 탄성파탐사 자료취득 변수에 따른 천부 해저지층영상의 해상도, 물리탐사, **6**, 126-133.

McGee, T. M., 1995a, High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purpose, Part A: Acquiring analogue seismic signals, *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 271-285.

McGee, T. M., 1995b, High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purpose, Part B: Digitizing analogue seismic signals, *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 287-296.

Miller, R. D., Markiewicz, R. D., Merry, C., Xia, J., and Maples, C., 1995, Improvement in shallow high-resolution seismic reflection through PC-based system, *Computer & Geosciences*, **21**, 957-964.

Lee, H. -Y., Hyun, B. -K., and Kong, Y. -S., 1996, PC-based acquisition and processing of high-resolution marine seismic data, *Geophysics*, **61**, 1804-1812.