

F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 사용한 파랑잡음 제거

김수관^{1,2} · 홍종국^{1,2*}

¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소
²과학기술연합대학원대학교 극지과학전공

Swell Noise Attenuation Using a Cascade of F-X Filter and Median Filter

Sookwan Kim^{1,2} and Jong Kuk Hong^{1,2*}

¹Korea Polar Research Institute, KIOST
²Department of Polar Science, University of Science and Technology

요약: 파랑잡음과 같은 강한 진폭의 무작위 잡음은 일반적인 해양탄성과 자료처리 과정에서 쉽게 제거되지 않는다. 이 논문에서는 파랑잡음을 제거하기 위하여 F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 적용하였다. 시험자료는 2010년 12월 남극반도의 북쪽에 위치한 남셰틀랜드군도 북부해역에서 획득한 해양탄성과 자료로서 일부 축선의 자료획득 중에 발생한 악천후로 인하여 강한 파랑잡음이 기록되었다. 파랑잡음이 심한 자료를 대상으로 F-X 필터를 시험 적용한 결과, 무작위 잡음이 대부분 제거되었으나 일부 저주파 잡음은 여전히 강하게 남아있었다. 중앙값 필터를 적용한 결과, 저주파 잡음은 효과적으로 제거되었지만 다른 주파수 영역에 존재하는 무작위잡음이 남아있었다. 이에 두 가지 필터를 연속적으로 적용한 결과, 저주파의 잡음과 무작위 잡음이 모두 효과적으로 제거되었다. 잡음제거 이후, 보다 정밀한 속도분포를 얻을 수 있었으며, 겹쌓기 단면의 신호 대 잡음비는 뚜렷이 개선되었다.

주요어: 파랑잡음; F-X 필터; 중앙값 필터; 탄성과 탐사자료; 잡음제거

Abstract: High-amplitude swell noises (HASN) are very difficult to eliminate from the marine seismic data. In this paper, we applied F-X filter and median filter in order to suppress HASN. Test data have been acquired on the northern offshore of the South Shetland Islands in December, 2010. Parts of data have been contaminated by HASN caused by bad weather during the cruise. We applied F-X filter and median filter to test data with HASN. After F-X filtering, most of non-coherent noises and small-amplitude swell noises are eliminated effectively but HASN are still remained significantly. With median filter, HASN was suppressed better than F-X filter, however some of non-coherent noises are still remains. We applied a cascade of two filters and results show HASN and non-coherent noises are suppressed effectively. After the cascade of two filtering, it is possible to define reflection layers clearly on the velocity spectrum and to produce better stacked section with a good signal-to-noise ratio.

Keywords: swell noise; F-X filter; median filter; reflection seismic data; noise attenuation

서 론

해양에서 다중채널 탄성과 탐사 시 해상의 기상상황은 획득한 탐사자료의 품질을 좌우하는 주요한 요소이다. 특히, 황천(rough sea) 시 나타나는 강한 바람, 파도, 파랑 등에 의한 잡음은 탐사자료의 반사파 신호에 큰 영향을 준다. 이들 잡음은 서로 다른 주파수 영역에 나타나는데, 바람에 의한 잡음은 주

로 고주파영역에서 나타나며 높은 진동수 차단 필터(high-cut filter)로 대부분 제거할 수 있다. 파도에 의한 잡음은 중·저주파 영역에서 고르게 나타나며 또한 공통 발파점 자료(common shot gather) 전체에 나타난다. 이들 잡음을 완벽하게 제거하기는 쉽지 않지만 적응필터(adaptive filter), 공통 중간점 겹쌓기(common-midpoint stack) 등으로 상당부분 제거할 수 있다. 그러나 파랑잡음(swell noise)은 이들 중에서 가장 강한 크기를 갖고 있으며 공통 발파점 자료에서 불규칙적(incoherent)으로 나타나기 때문에 일반적인 자료처리 방법으로 감쇄시키는데 어려움이 따른다(Shepherd and McDonald, 2004; Yilmaz, 2001).

파랑잡음은 주로 저주파 영역에 존재하므로 일반적으로 낮은 진동수 차단 필터(low-cut filter)를 적용하지만 저주파 영역

2012년 10월 22일 접수; 2012년 11월 9일 수정; 2012년 11월 24일 채택;
*Corresponding author

E-mail: jkhong@kopri.re.kr

Address: Division of Polar Earth System Science, Korea Polar Research Institute, 12 Gaetbeol-ro, Yeosu-su, Incheon 406-840, Korea

의 파랑잡음을 완전히 제거할 경우 반사파 신호도 함께 제거되는 단점이 있다(Cambois and Frelet, 1995; Elboth *et al.*, 2009). 파랑잡음의 불규칙한 특성을 이용하여 불규칙 잡음 제거법을 파랑잡음 제거에 적용하기도 한다(Watts *et al.*, 1999; Ozbeck, 2003; Soubaras, 1994). Canales (1984)는 무작위 잡음의 제거를 위하여 적용하는 F-X 필터를 파랑잡음이 포함된 자료에 적용한 결과 매우 효과적인 결과를 얻었으나, 파랑잡음이 강한 경우에는 F-X 필터를 적용하더라도 파랑잡음을 완전히 제거되지 않았다(Schonewille *et al.*, 2008).

파랑잡음과 같은 돌출값 형태로 존재하는 잡음을 제거하기 위해 주로 사용하는 방법으로 중앙값 필터(median filter)가 있다. 중앙값 필터는 간단하지만 매우 효과적이며(Bednar, 1983; Duncan and Beresford, 1995), 잡음의 특성에 따라 보다 복잡한 형태의 중앙값 필터도 제시되고 있다(Mi and Margrave, 2000; Liu *et al.*, 2006). 불규칙 잡음을 제거하기 위한 다른 방법으로는 비인과(noncausal) 예측필터를 이용한 잡음제거법(Gulunay, 2000), 적응필터를 통한 잡음제거법(Ristau and Moon, 2001), 복소 트레이스 분석(complex-trace analysis)을 통한 잡음제거법(Karsli *et al.*, 2006) 등이 사용된다.

극지연구소에서는 2010년 12월 남극반도 북서부에 위치한 남셰틀랜드 군도의 인근 해역에서 지체구조 및 가스하이드레이트 특성을 밝히기 위한 탄성과 탐사를 수행하였다. 탐사 기간 중 일부 측선에 대한 자료 획득 시 기상악화로 인한 강한 바람과 함께 파랑이 발생하여 탄성과 자료에 강한 잡음이 포함되었다. 이 논문에서는 탄성과 탐사자료에 기록된 파랑잡음을 제거하기 위하여 여러 가지 잡음제거법 중에서 F-X 필터와 중앙값 필터를 대상으로 실험하였다. F-X 필터와 중앙값 필터는 캐나다 GEDCO사의 탄성과 자료처리 소프트웨어인 VISTA 10.0에 내장되어 있는 처리모듈을 이용하였으며, 각각의 결과를 비교하여 파랑잡음을 최소화시킬 수 있는 자료처리 방법을 제시하였다.

탐사자료

탄성과 자료획득

남극반도 북부에 위치한 남셰틀랜드군도 주변은 남극해에서 가장 활발한 조구조운동이 관찰되는 지역으로서 남극관, 스코시아관, 남미관, 피닉스관의 상호작용에 의해 복잡한 지체구조를 보인다(Fig. 1). 남셰틀랜드군도 북부에 위치한 피닉스관은 새클턴 파쇄대와 히어로 파쇄대 사이에 위치한 삼각형의 작은 판으로 남동방향으로 이동하면서 남극관으로 섭입 중 약 3.3 Ma 경에 이르러 섭입이 중단된 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1995; Larter *et al.*, 1997; Livermore *et al.*, 2000). 피닉스관의 섭입 결과로 남셰틀랜드 군도 북부해역에는 최대 5200 m 수심의 남셰틀랜드 해구가 형성되었다. 또한 남셰틀랜드 군도의 북동부 대륙 사면에서는 가스하이드레이트 기원의 BSR

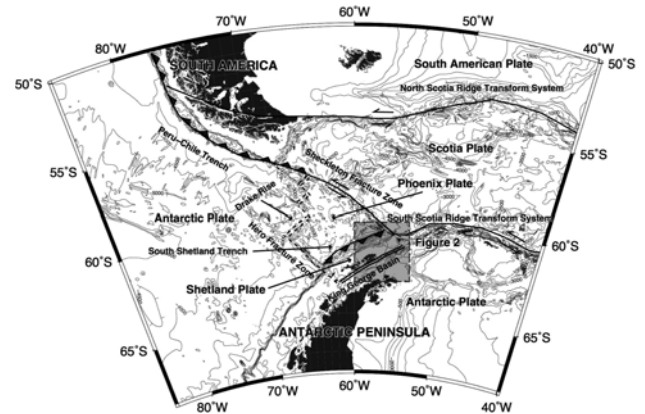


Fig. 1. Regional tectonic setting of the survey area (modified after Klepeis and Lawver, 1996).

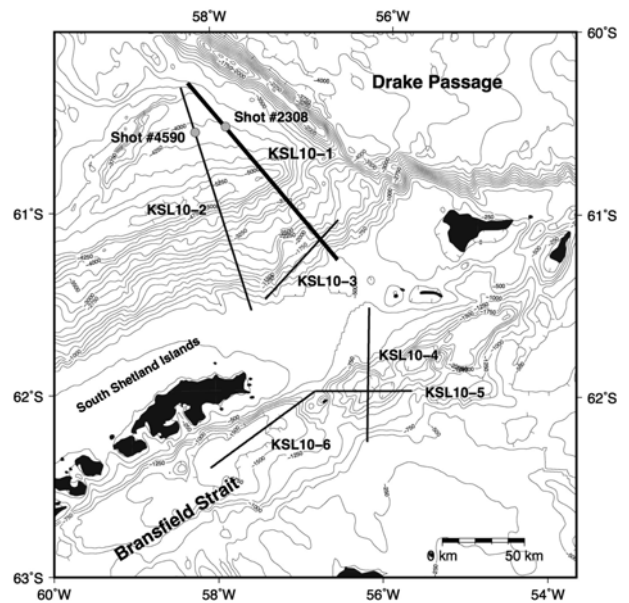


Fig. 2. Ship track chart of the 2010 seismic survey. Thick solid line means Korea Seismic Line 2010-1 (KSL10-1). Gray dots indicate the positions of shot point (SP) 2308 and SP 4590.

이 상당수 발견되고 있다(Jin *et al.*, 2003; Tinivella and Accaino, 2000).

남셰틀랜드군도 북부해역에 대한 지체구조 및 가스하이드레이트 분포를 조사하기 위하여 2010년 12월에 우리나라 최초의 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 120 채널 탄성과 탐사를 수행하였다(Fig. 2). 2010년도에 수행한 탄성과탐사 장비 구성은 프랑스 Sercel사의 BabySeal 시스템을 기반으로 총 1200 m³ 용량의 에어건 시스템, 1.5 km 길이의 120 채널 스트리머로 구성되었다. 자료획득 시, 스트리머의 그룹간격은 12.5 m, 발파간격은 50 m로 유지하였고, 자료기록시간은 10초, 기록간격은 1 ms로 하였다. 주요 획득변수는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Seismic reflection data acquisition parameters of Korea Seismic Line 2010.

Vessel	Icebreaker Araon
Gun array	8 air guns
Total Gun volume	1200 in ³
Gun type	G-Gun
Shot interval	50 m
Air pressure	140 bar
Recording System	Sercel Seal system
Streamer type	Solid streamer
Streamer length	1500 m
Group interval	12.5 m
Number of channel	120 channel
Navigation system	NaviPac
Recording Length	10 sec
Sampling Rate	1 ms

파랑잡음

탐사 도중 일부 측선에서는 거친 해황에 의하여 자료획득 과정이 수월하지 않았다. 특히, KSL10-1 측선의 자료획득 시에는 3~4 m의 파고와 함께 풍속 10 m/s 이상의 북서풍이 강하게 불었으며 또한 수십 미터 길이의 너울에 의하여 획득한 탄성과 자료에 파랑잡음이 강하게 나타났다.

KSL10-1 측선에 기록된 파랑잡음의 특성을 파악하기 위해 KSL10-1측선의 발파점(shot point) 2308과 파랑잡음이 거의 기록되지 않은 KSL10-2측선의 발파점 4590의 공통 발파점 모음자료와 채널별 RMS 진폭자료 그리고 주파수 분석자료를 비교하였다(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5). 자료획득 시 저주파 잡음을 제거하지 않았기 때문에 자료변환 초기단계에서 원시자료에 8~12~120~150 Hz의 모서리 주파수를 갖는 띠통과 필터를 적용하였다. 발파점 2308의 탄성과 자료(Fig. 3(a))는 단면의 약 5.5초에 해저반사면(seafloor)이 나타나며 5.8, 6.0, 6.3초까지 반사파 신호가 뚜렷이 나타난다. 채널 번호 1-30의 자료에는 강한 진폭의 파랑잡음이 나타나며 채널 번호 31-90의 자료에서는 파랑잡음이 약하게 나타났다. 반면 채널번호 91-120의 자료에서는 잡음이 현저하게 약화되었다. 발파점 4590이 포함된 KSL10-2 측선자료(Fig. 3(b)) 획득 시 측선방향이 남서방향이므로 북서풍이 선체후면으로 불면서 파랑잡음이 많이 약화되었다. 발파점 4590 하부의 퇴적구조는 발파점 2308과 유사한 구조를 보이지만 파랑잡음이 약하여 해저면 반사파와 그 하부의 반사경계면들이 명확하게 나타난다.

공통 발파점 자료를 구성하는 120개 채널에서 파랑잡음이 기록된 정도를 파악하기 위하여 발파점 2308과 4590의 채널별 진폭의 RMS값을 제시하였다(Fig. 4). 발파점 2308의 RMS 값 변화는 10.6에서 367.6으로 최대값은 최소값의 약 35배에 해당한다. 반면 발파점 4590에서는 RMS값의 변화폭이 상대적으로 크지 않았으며 13.7에서 62.2의 범위에서 변화하였다. 발파점 모음자료에서 파랑잡음의 분포는 RMS값이 큰 채널과 일치하고 있으며, RMS값이 60 이상이면 파랑잡음이 기록된

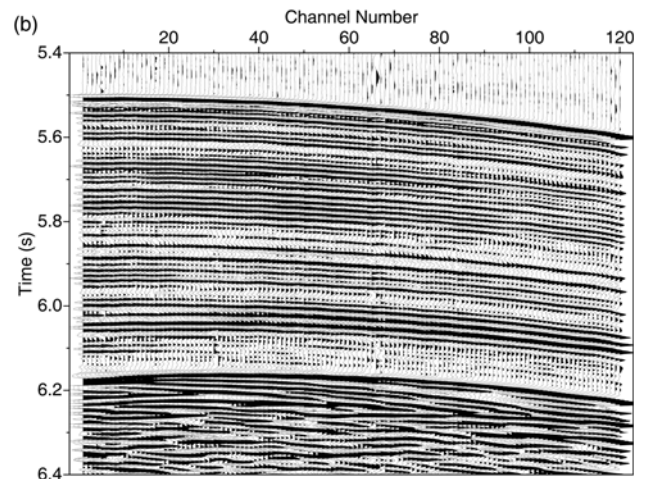
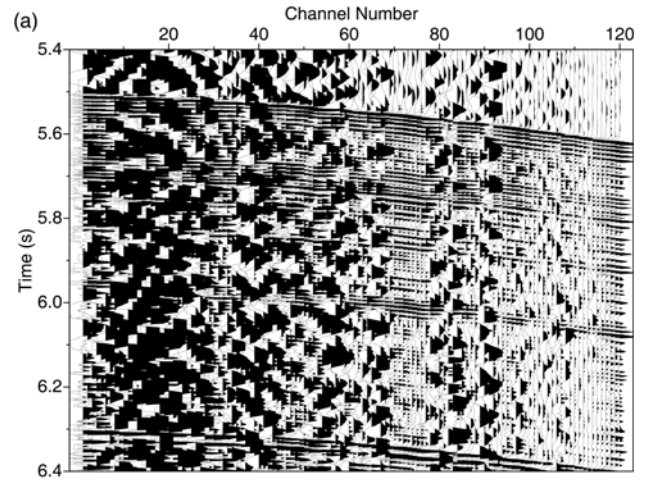


Fig. 3. Shot gathers acquired in different weather conditions. (a) The shot gather acquired on the SP 2308 with high-amplitude swell noise (HASN) and (b) the gather acquired on SP 4590 without serious HASN.

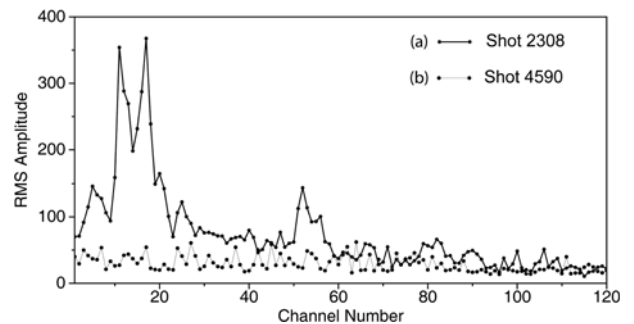


Fig. 4. Variations of RMS amplitudes with respect to channel. (a) RMS values of the shot gather of SP 2308 with HASN and (b) those of the gather of SP 4590 without HASN.

채널, RMS값이 100이상이면 강한 진폭의 파랑잡음이 기록된 채널로 판단하였다.

파랑잡음의 주파수 특성을 비교하기 위하여 발파점 2308과 4590의 자료에서 파랑잡음이 강한 채널번호 17의 자료와 전체

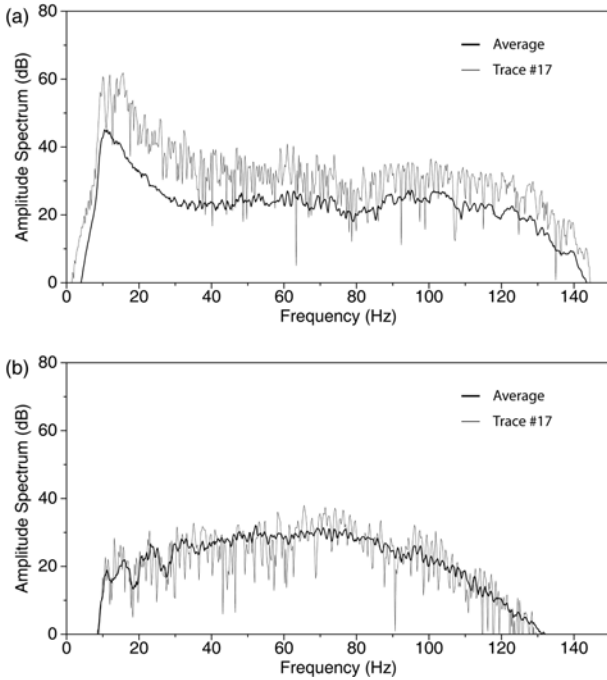


Fig. 5. (a) Amplitude spectra of SP 2308 and (b) those of SP 4590. To compare variations of spectrum between data with HASN and average values, spectra of channel 17 is shown.

채널의 평균 스펙트럼 변화를 제시하였다(Fig. 5). 파랑잡음이 심한 발파점 2308 (Fig. 5(a))의 평균 스펙트럼 변화는 초기 띠풀과 필터에 의하여 3 Hz까지는 0 dB에 가까운 작은 값을 보인 후 급증하기 시작하여 11 Hz에서 가장 큰 45.1 dB값을 보인다. 이후 30 Hz까지는 점차적으로 감소하다가 이후 120 Hz까지는 비교적 큰 폭의 변화가 없는 것으로 나타난다. 파랑잡음이 거의 기록되지 않은 발파점 4590 (Fig. 5(b))의 평균 스펙트럼 변화는 초기 띠풀과 필터에 의하여 제거된 부분을 제외하고 10 Hz부터 이후부터 비교적 완만한 변화를 보이면서 70 Hz 부근에서 가장 큰 값을 나타내며 이후 주파수가 증가할수록 점차 감소하는 양상을 보인다. 두 발파점의 평균 스펙트럼을 비교하면 30 Hz 이하의 구간에서는 발파점 2308이 큰 값을 보이는 반면 30 Hz 이상의 구간에서는 비교적 유사한 변화양상을 보인다. 강한 파랑잡음이 기록된 발파점 2308의 채널번호 17의 스펙트럼 변화는 평균값에 비하여 전체적으로 10 dB 이상 큰 값을 갖는다. 특히 16 Hz에서 61.9 dB의 큰 값을 보인다. 발파점 4590의 채널번호 17의 스펙트럼 변화는 주파수별 변동성은 크지만 평균 스펙트럼 값의 변화와 유사한 양상을 보인다. 이들 주파수 스펙트럼 변화를 비교하면 파랑잡음은 주로 30 Hz 미만의 저주파 영역에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

파랑잡음 제거법

F-X 필터를 이용한 파랑잡음 제거

탄성과 탐사자료에 존재하는 무작위 잡음을 제거하기 위해 Canales (1984)가 소개한 F-X 필터는 탄성과 탐사자료에 무작위로 기록되는 특성을 가진 파랑잡음 제거에 유용하다 (Soubaras, 1994). F-X 필터를 이용한 무작위 잡음 제거법은 공통 발파점 모음자료 또는 공중점 모음자료에 적용할 수 있으며, 필터를 적용하기 위하여 시간-거리(T-X)자료를 주파수-거리(F-X)자료로 변환한 후 개별 주파수별로 Wiener 예측필터를 설계한다. 이후 Wiener 필터를 각각의 트레이스에 적용하면 반사파 신호는 예측값에 해당되어 보존되며 예측값이 아닌 파랑잡음의 성분을 분리해 낼 수 있다(Canales, 1984). 이번 논문에서는 Canales (1984)가 제시한 방법을 기반으로 한 F-X 필터를 공통 발파점 모음 자료별로 0 ~ 150 Hz 영역에 적용하였고, 필터의 길이는 해당 트레이스의 좌우로 3개 트레이스의 묶음 별로 적용하였다.

Fig. 6(a)는 파랑잡음이 심한 발파점 2308의 자료에 대하여 F-X 필터를 적용한 결과이다. F-X 필터 적용전의 자료(Fig. 3(a))에 나타난 상당부분의 파랑잡음이 F-X 필터에 의하여 제거되었다. 특히, 채널번호 30 이후의 자료에서 존재하였던 파랑잡음이 많이 감쇄된 것으로 나타났다. 반면, 파랑잡음이 강한 채널번호 30 이전의 자료에서는 상당한 양의 잡음이 제거되었음에도 불구하고 채널번호 5-25 구간에서 여전히 강한 파랑잡음이 남아있었다. F-X 필터 적용 시 제거되는 파랑잡음과 손실되는 반사파 신호의 정도를 알아보기 위해서 F-X 필터 적용 전 자료(Fig. 3(a))와 F-X 필터 적용 결과(Fig. 6(a))의 차이를 Fig. 6(b)에 나타내었다. F-X 필터에 의해 120개 채널에 존재하는 대부분의 파랑잡음이 제거된 것을 확인 할 수 있다. F-X 필터의 특성상 반사파 신호도 일부 손실되었으나 파랑잡음에 의해 파생된 고주파 잡음이 잘 제거된 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 F-X 필터를 적용한 결과에 대하여 파랑잡음이 심한 채널번호 17에 대한 주파수 스펙트럼과 발파점 자료의 평균 주파수 스펙트럼을 도시한 것이다. F-X 필터 적용 후 주파수 스펙트럼 값을 필터 적용 전(Fig. 5(a))과 비교하면 전반적으로 10 dB 가량 적은 값을 보인다. 구간별로 살펴보면 잡음 구간인 10 Hz 미만 구간과 120 Hz 이상의 구간에서 감쇄정도가 크게 나타났다. 그러나 파랑잡음의 영향이 강한 30 Hz 미만의 구간은 여전히 큰 값을 보인다. 파랑잡음이 심한 채널 17번 자료는 30 Hz 미만에서도 충분히 감쇄되었지만 스펙트럼의 평균값은 감쇄된 정도가 상대적으로 크지 않았다. 두 자료의 변화양상은 주파수 12 Hz 부근에서는 채널 17의 값이 10 dB 이상 큰 값을 보이며 주파수가 증가할수록 그 차이는 점점 감소되다가 40 Hz 이상의 구간에서는 그 차이가 크게 줄어들었다.

중앙값 필터를 이용한 파랑잡음 제거

파랑잡음 제거를 위하여 F-X 필터와 함께 많이 사용되고 있는 중앙값 필터를 시험적용하였다. 중앙값 필터도 F-X 필터와

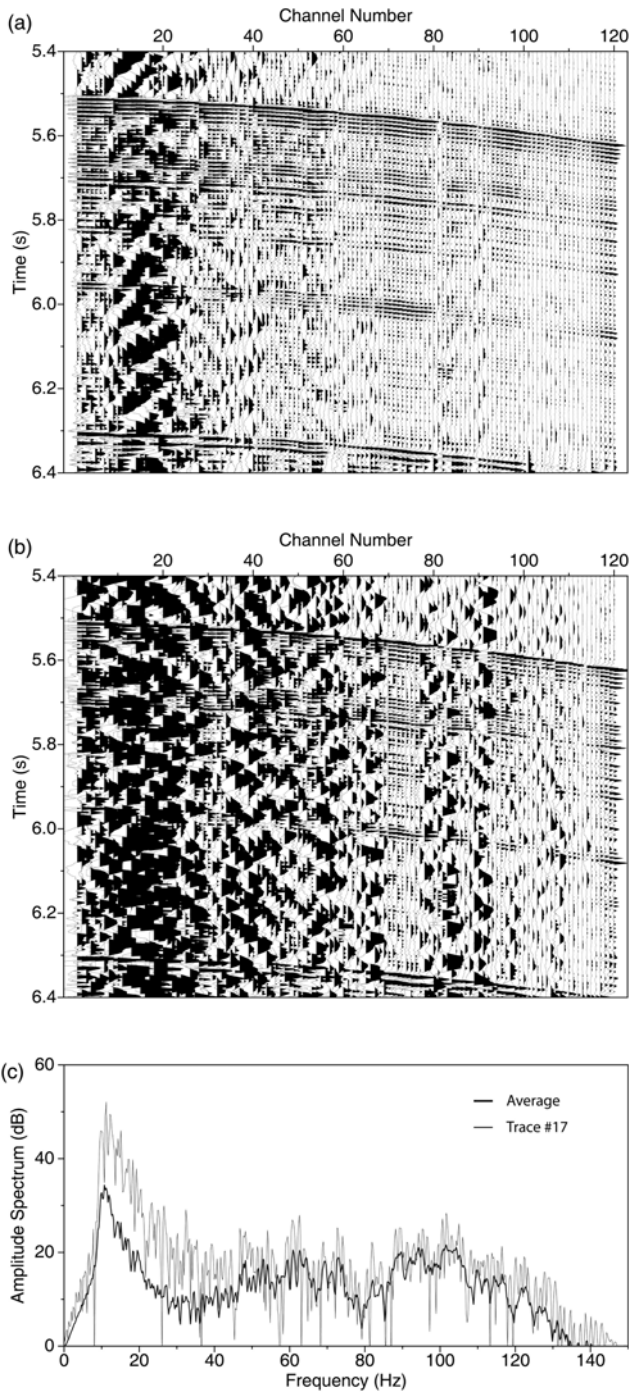


Fig. 6. The result of SP 2308 after applying F-X filter; (a) shot gather, (b) difference between before and after F-X filter and (c) the amplitude spectrum of SP 2308.

마찬가지로 발파점 모음자료나 공중점 모음자료에 적용할 수 있다. 중앙값 필터란 동일한 모음자료를 주파수 영역으로 변환하여 개별 주파수 모음의 중앙값을 구한 후, 중앙값보다 큰 값을 잡음으로 판단하여 중앙값으로 대체하거나 중앙값 부근으로 낮추는 방법이다. 중앙값 필터는 공중점 모음자료 별로 적용하였으며, 125 ms 구간간격으로 주파수 영역으로 변환하여

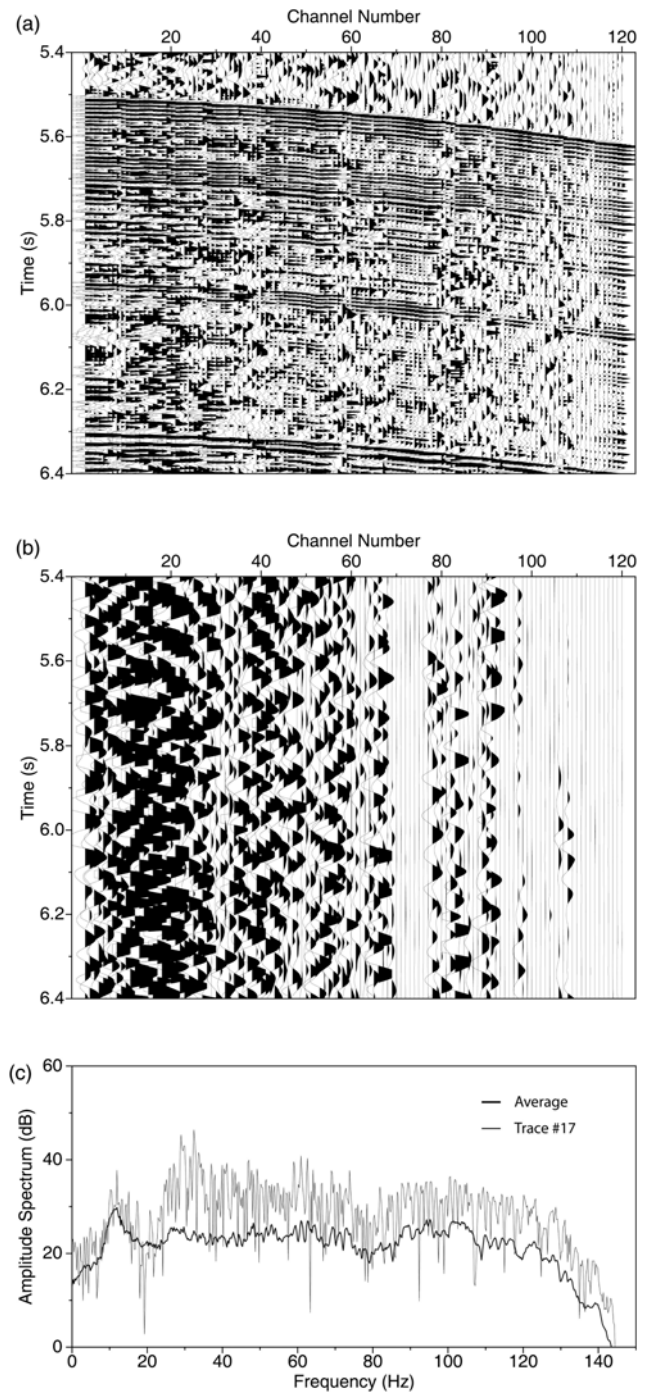


Fig. 7. The result of SP 2308 after applying median filter; (a) shot gather, (b) difference between before and after median filter and (c) the amplitude spectrum of SP 2308.

계산하였다. 중앙값 필터는 과량잡음의 영향이 강한 5~20 Hz 구간에만 적용하였고, 중앙값을 초과하는 돌출값은 중앙값 이하로 감쇄시켰다.

Fig. 7 (a)는 발파점 2308의 자료에 중앙값 필터를 적용한 결과이다. Fig. 3(a)의 필터적용 이전의 자료에 존재하는 강한 과량잡음이 대부분 제거되었으나 중앙값 필터를 적용하지 않은

고주파 영역에 분포하는 작은 진폭의 무작위 잡음들이 상당수 남아있었다. 중앙값 적용결과를 F-X 필터 적용결과(Fig. 6(a))와 비교하면, F-X 필터로도 제거되지 않았던 채널 1-30번의 강한 파랑잡음이 상당히 약화되었다. 하지만 필터 적용구간이 아닌 20 Hz 이상구간에서 나타나는 잡음이 여전히 존재하여 반사면의 연속성을 떨어뜨리고 있다. Fig. 7(b)는 중앙값 필터를 적용하기 전의 발파점 2308 자료(Fig. 3(a))와 적용 후(Fig. 7(a))의 차이를 나타내었다. 중앙값 필터의 적용으로 인해 주파수 영역에서 20 Hz 이하의 강한 진폭의 파랑잡음이 효과적으로 제거되었다. 특히 중앙값 필터를 20 Hz까지만 적용한 결과 고주파 영역의 반사파 신호의 손실이 최소화되었음을 확인할 수 있다. Fig. 7 (c)는 중앙값 필터를 적용한 이후의 주파수 스펙트럼을 도시한 것이다. 필터의 적용 구간이 5~20 Hz 이므로, 중앙값 필터 적용 후 20 Hz 미만의 주파수 구간의 값이 많이 변화하였다. 적용구간에서의 평균 스펙트럼의 변화는 필터 적용 전 최대 45.1 dB에서 적용 후 최대 29.8 dB로 저주파 잡음이 상당부분 제거되었다. 그럼에도 불구하고 파랑잡음의 영향이 적은 30 Hz 이상의 구간에 비하여 10 dB 이상 큰 값을 보인다. 채널번호 17과 평균 스펙트럼의 변화양상을 비교하면, 필터 적용 이전 채널번호 17의 스펙트럼이 평균값보다 거의 20 dB 가량 큰 값이었지만 필터 적용 이후에는 평균값에 근접한 값으로 나타났다. 필터를 적용하지 않은 25 Hz 이상의 구간은 스펙트럼의 변화가 관찰되지 않았다.

F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 적용한 파랑잡음제거

F-X 필터와 중앙값 필터를 각각 적용한 결과, 잡음의 상당 부분이 제거되었지만 일부 영역에서는 잡음이 그대로 잔존해 있었다. 잔존해 있는 잡음의 특성이 서로 다르므로, 두 개의 필터를 연속적으로 사용하면 이들 잔존 잡음을 효과적으로 제거할 수 있을 것이다. F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 사용하는 경우, 파랑잡음의 제거되는 정도에 대하여 고찰하였다. 필터의 적용순서는 F-X 필터를 우선적으로 적용하여 대부분의 불규칙 잡음을 제거한 이후 중앙값 필터를 이용하여 잔존하고 있는 강한 진폭의 저주파 파랑잡음을 제거하였다.

Fig. 8(a)는 발파점 2308 자료에 F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 적용한 결과이다. F-X 필터만을 적용한 결과(Fig. 6(a))와 비하여 채널번호 1-30 구간에 잔존하였던 강한 진폭의 파랑잡음이 대부분 제거되었으며, 중앙값 필터만을 적용한 결과(Fig. 7(a))와 비교하면, 단면에 존재하였던 불규칙한 잡음이 많이 제거되었으며 신호의 연속성도 증가하였다. F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 사용하기 전(Fig. 3(a))과 후(Fig. 8(a))를 비교한 결과 강한 진폭을 가지는 저주파 파랑잡음과 고주파 영역에 분포하는 무작위 파랑잡음이 제거되었음을 확인할 수 있고, F-X 필터만 적용한 결과(Fig. 6(b))와 같이 반사파 신호의 손실도 일부 발생하였다(Fig. 8(b)). Fig. 8(c)는 두 필터를 연속적으로 적용한 이후의 주파수 스펙트럼을 도시한

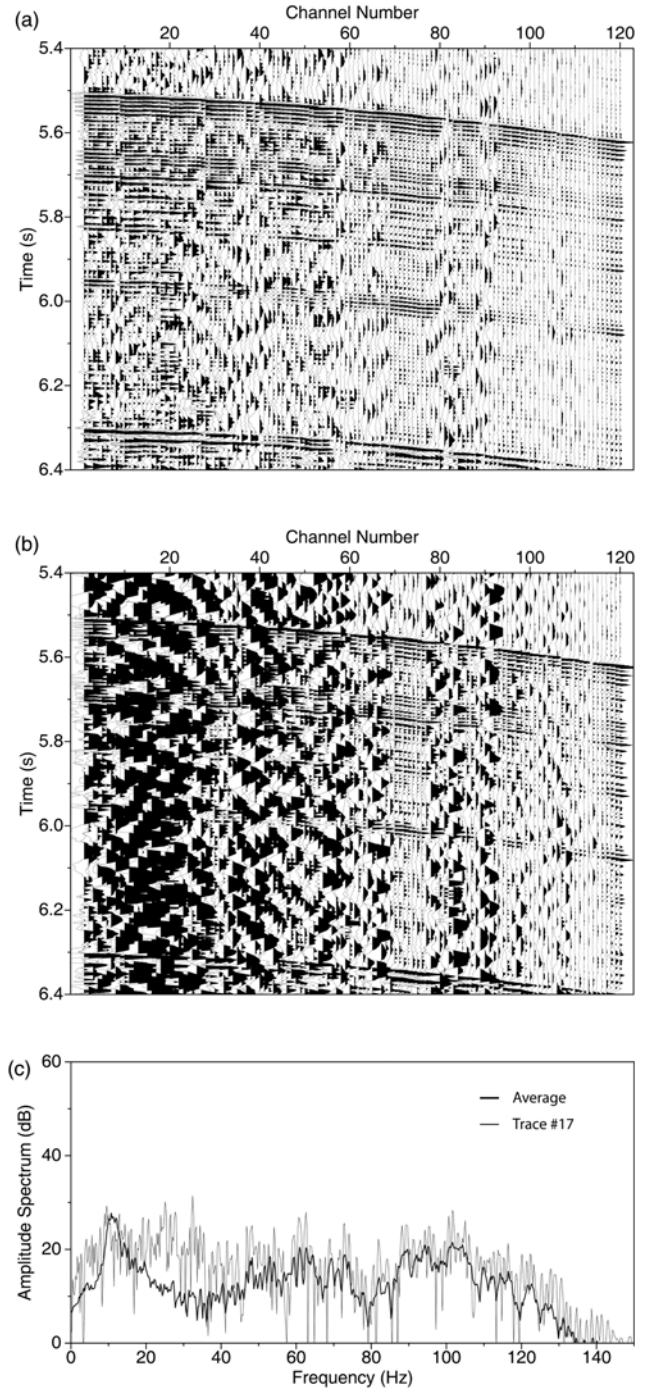


Fig. 8. The result of SP 2308 after applying a cascade of F-X filter and median filter; (a) shot gather, (b) difference between before and after the filters and (c) the amplitude spectrum of SP 2308.

것이다. F-X 필터나 중앙값 필터 중에서 하나만 적용한 결과 (Fig. 6(c), 7(c))에 비해 전반적으로 저주파나 고주파의 잡음이 고르게 감소되었다. 특히 파랑잡음이 심한 채널번호 17의 자료의 경우, 파랑잡음이 상당부분 제거되었고 다른 주파수영역에 나타났던 잡음이 약화되어 양호한 결과를 보인다.

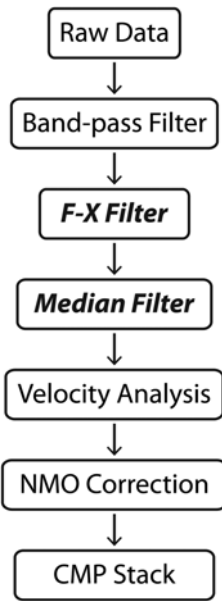


Fig. 9. Flow chart for the suppression of the swell noise.

탐사측선 KSL10-1에 대한 파랑잡음제거

자료처리

측선번호 KSL10-1의 탄성과자료에 포함된 파랑잡음을 제거 하기 위한 자료처리의 첫 번째 순서로 탐사장비에서 기록된 SEG-D 포맷 자료를 자료처리용 소프트웨어인 VISTA에 이용 하기 위하여 획득자료를 VISTA 내부포맷으로 변환하였다. 에 어진 신호의 주된 주파수 영역이 150 Hz 미만이므로 자료처 리 속도의 향상을 위하여 기록간격을 1 ms에서 2 ms로 변환 하였으며 탄성과 신호 이외의 주변잡음을 제거하기 위하여 8, 12, 120, 150 Hz의 모서리 주파수를 갖는 띠통과 필터를 적용 하였다. 이후 공통 발파점 모음 자료별로 F-X 필터를 적용한 후 중앙값 필터를 적용하였다. F-X 필터와 중앙값 필터에 의 해 반사면의 연속성이 향상된 탄성과 자료를 공중점 모음별로 정렬하여 속도분석을 실시하였다. 속도분석은 공중점 모음 번 호 50번 간격으로 실시한 이후, 수직시간차 보정(normal moveout correction)과 공중점 겹쌓기(CMP stack)를 수행하였 다. 마지막으로 겹쌓기자료에 잔류하고 있는 잡음을 제거하기 위하여 8~12~120~150 Hz의 모서리 주파수를 갖는 띠통과 필터를 적용하였다. 이와 같은 파랑잡음 제거를 위한 자료처리 과정을 Fig. 9에 제시하였다.

Fig. 10는 발파점 2308 부근에 위치한 공중점에서 F-X 필터 와 중앙값 필터 적용 전과 후의 속도담음(velocity semblance) 을 보여준다. 속도담음에서는 해저반사면이 5.5초, 음향기반암 은 6.3초에 나타나고 있으며, 5.8, 6.0초에 큰 값의 반사계수를 갖는 퇴적층이 존재한다. 파랑잡음제거 이전의 유사도(Fig. 10(a))에서는 해저면, 음향기반암을 포함하여 강한 반사면은 잘 나타나나 이들 사이에 존재하는 약한 반사면은 명확히 드

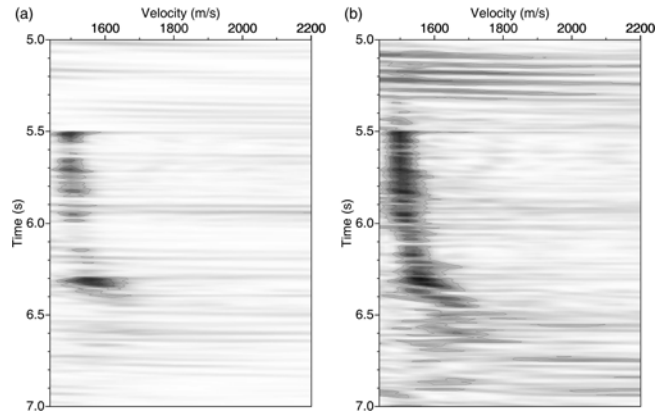


Fig. 10. Velocity spectra of (a) before and (b) after a cascade of F-X filter and median filter.

러나지 않는다. 파랑잡음을 제거한 속도유사도(Fig. 10(b))는 잡음제거 이전에 나타나지 않았던 반사면도 뚜렷이 나타난다. 특히 음향기반암 이전의 6~6.3초 구간에서 반사면에 대한 유 사도가 명확하게 드러나 상세한 속도분석이 가능하였다.

Fig. 11은 발파점 2308 주변의 일부구간의 자료에 대하여 파 랑잡음 제거 필터 적용 전과 후의 겹쌓기단면이다. 이 지역은 남세틀랜드 해구에서 북쪽지역에서 획득한 자료로서 수심은 약 4000 m 이며 음향기반암은 해양지각으로 알려진다. 6.3초 에 나타나는 음향기반암의 표면은 불규칙한 형태를 보이며 이 에 따라 회절파(diffraction)들이 동시에 나타난다. 기반암 상부 의 퇴적층은 원양성의 퇴적물이 퇴적된 것으로 평행한 층상 구조를 보여준다.

파랑잡음을 제거하기 위한 F-X 필터와 중앙값 필터를 적용 하지 않은 겹쌓기 단면(Fig. 11(a))에서는 해저면 하부에 존재 하는 반사층을 구분할 수 있으나 일부 겹쌓기 트레이스들에 남아있는 강한 잔류잡음으로 인해 상세한 단면해석이 용이하 지 않았다. 반면, F-X 필터와 중앙값 필터를 연속하여 적용한 단면(Fig. 11(b))에서는 강한 에너지를 갖는 잡음이 대부분 약 화되어 퇴적층의 미세 구조를 명확히 구분할 수 있었다. F-X 필터와 중앙값 필터를 적용하지 않은 겹쌓기 단면(Fig. 11(a)) 과 적용한 단면(Fig. 11(b))의 차이를 나타낸 Fig. 11(c)에서 파 랑잡음이 효과적으로 제거됨과 동시에 반사파 신호의 손실이 최소화되었음을 확인할 수 있다.

토 의

낮은 진동수 차단 필터를 이용한 파랑잡음 제거

탄성과 탐사자료에 존재하는 저주파 잡음은 낮은 진동수 차 단 필터(low-cut filter)를 적용하여 제거하는 방법이 일반적이 다. 하지만 파랑잡음이 주파수 영역에서 저주파 반사파 신호가 존재하는 15 Hz 이상에도 존재할 경우 필터를 적용하면 파랑 잡음과 함께 반사파 신호도 손실하게 된다(Cambois and

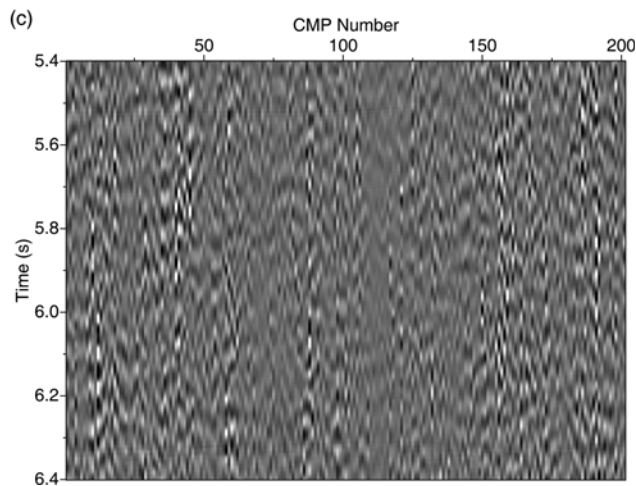
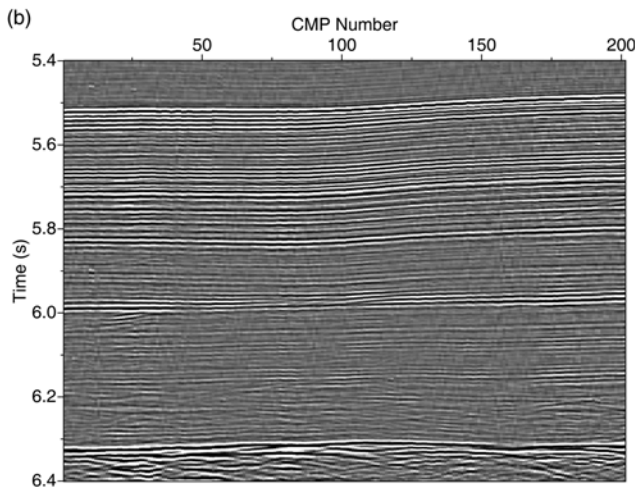
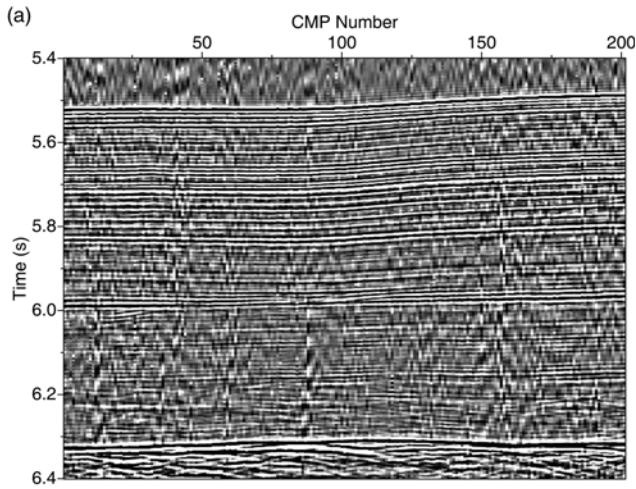


Fig. 11. Stack sections of (a) before and (b) after applying a cascade of F-X filter and median filter. (c) The difference between before and after the filters.

Frelet, 1995). Fig. 12는 F-X 필터와 중앙값 필터를 적용하지 않은 공중점 겹쌓기 단면(Fig. 11(a))에 30 Hz 이하의 자료를 제거하는 낮은 진동수 차단 필터를 적용한 결과이다. 파랑잡음

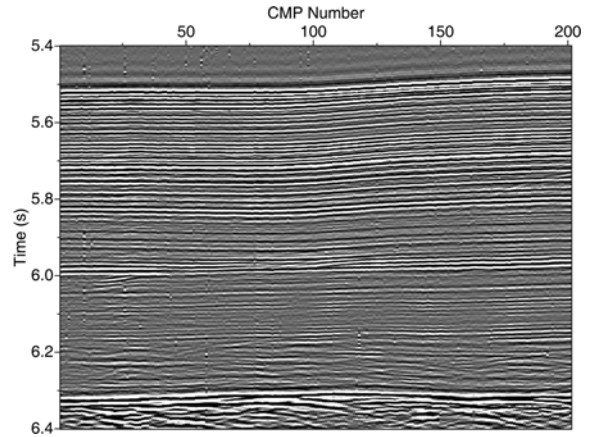


Fig. 12. Stack section of after low-cut filter to remove swell noise under the 30 Hz.

이 주로 존재하는 30 Hz 이하 구간의 에너지가 완전히 제거되어 Fig. 11(a)에서 존재하던 파랑잡음이 완전히 제거된 깨끗한 결과를 보이며, F-X 필터와 중앙값 필터를 적용한 겹쌓기 단면(Fig. 11(b))과 같이 대부분의 파랑잡음이 제거되어 서로 유사한 결과를 보여준다. 하지만 해저반사면과 음향기반암이 각각 위치한 5.5초와 6.3초 부근에서 반사면의 신호가 변형되어 나타나며, 이는 저주파 성분이 지나치게 손상되어 음원의 파형이 변형된 결과로 해석된다.

이와 같이 KSL10-1 자료에 존재하는 파랑잡음은 반사파의 주된 영역인 30 Hz까지 강하게 나타나므로 이를 제거하기 위한 낮은 진동수 차단 필터보다는 파랑잡음 제거만을 위한 전용필터를 적용하여야 탄성과 신호의 손실을 최소화할 수 있다. 또한 파랑잡음이 전체 트레이스가 아닌 일부 트레이스에 존재하고 있으므로, 전체자료에 낮은 진동수 차단 필터를 적용하는 것보다는 파랑잡음을 제거하기 위한 전용필터를 적용하는 것이 신호를 보존하기 위한 최선의 방법인 것으로 생각된다.

F-X 필터의 중복적용

탄성과 탐사자료에 파랑잡음과 같은 무작위 잡음이 기록된 비율이 높을 경우 F-X 필터를 연속적으로 사용하여 파랑잡음을 깎아내듯이 효과적으로 제거할 수 있다(Schonewille *et al.*, 2008). 발파점 2308에 F-X 필터를 1회 적용한 경우 파랑잡음이 대부분 제거되었지만 채널번호 1-30에 존재하는 진폭이 강한 파랑잡음이 상당수 잔류하였다(Fig. 6(a)). 그리고 F-X 필터의 사용에 따른 반사파 신호의 손실도 일부 발생하였다(Fig. 6(b)). Fig. 13은 발파점 2308에 F-X 필터를 연속적으로 2회 적용한 결과이다. F-X 필터를 1회 적용한 자료(Fig. 6(a))에 비하여 반사파 신호의 연속성이 보다 증가하였으나, 강한진폭의 파랑잡음이 여전히 존재하였다.

이와 같이 파랑잡음이 여전히 강하게 남아있는 이유는 파랑잡음의 저주파 성분이 필터에 의하여 제거되지 못하였기 때문이다. 즉, F-X 예측필터인 Wiener필터를 설계하기 위하여 주

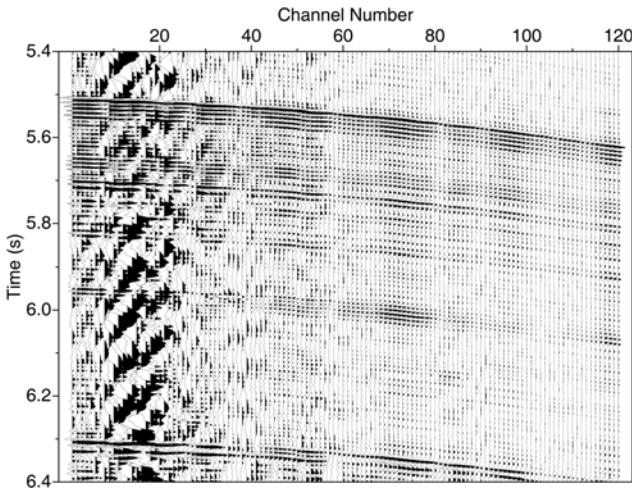


Fig. 13. A shot gather after applying F-X filter twice.

파수 영역의 평균값을 이용하고 있는데, 강한 과량잡음에 의하여 저주파 영역의 평균값이 높게 나타나므로 과량잡음이 완전히 제거되지 못하는 것으로 해석된다. 저주파 영역의 강한 과량잡음을 제거하기 위하여 F-X 필터를 반복하여 사용할 경우 과량잡음이 제거되는 효과에 비해 반사파 신호의 손실이 크게 발생하기 때문에 F-X 필터를 과도하게 사용하지 않는 것이 바람직 한 것으로 생각된다.

신호 대 잡음비 비교

과량잡음 제거를 위한 필터를 적용 전후의 결과를 비교하기 위하여 겹쌓기 단면에서 신호 대 잡음비의 변화를 고찰하였다 (Fig. 14). 특정 트레이스의 영-뒤쳐짐(zero-lag) 자기상관(auto-correlation)은 반사파 신호의 제곱과 잡음의 제곱으로 나타나며, 특정 트레이스와 주변트레이스의 영-뒤쳐짐 상호상관(cross-correlation)은 반사파 신호의 제곱으로 나타난다. 영-뒤쳐짐 자기상관과 영-뒤쳐짐 상호상관 값을 이용하여 다음과 같은 식으로 신호 대 잡음비를 구할 수 있다(GEDCO, 2010).

$$AC/XC = (S^2 + N^2)/S^2 \tag{1}$$

$$= 1 + N^2/S^2$$

$$S/N = 1/\sqrt{(AC/XC - 1)} \tag{2}$$

- AC = the zero-lag value of the auto-correlation
- XC = the zero-lag value of the cross-correlation
- S = the reflection signal
- N = the noise

신호 대 잡음비의 계산과정에서 주변 6개 트레이스를 겹쌓기하여 상호상관에 이용하였으며, 100 ms씩 윈도우를 이동시키면서 값을 구하였다.

과량잡음 제거 전후의 신호 대 잡음비를 Fig. 14에 제시하였다. 단면에서 신호 대 잡음비는 0에서 5 미만의 값으로 계산

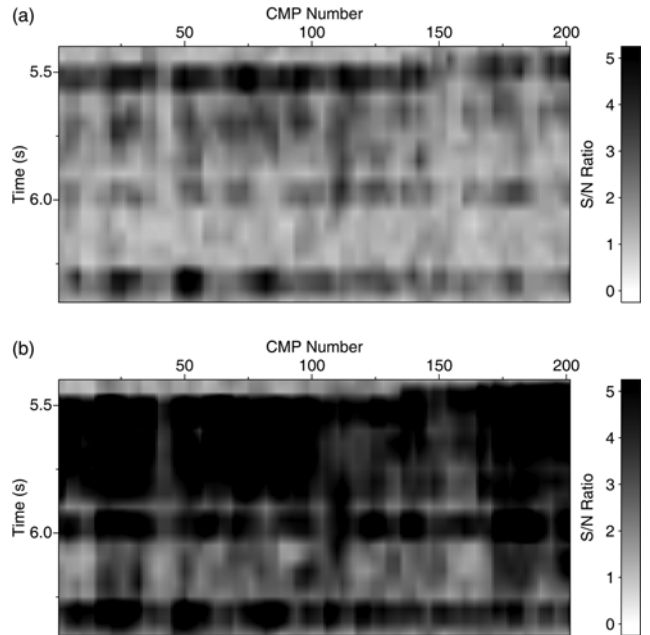


Fig. 14. Comparison of signal-to-noise ratio between stacked data (a) without and (b) with F-X filter and median filter.

되었으며, 신호 대 잡음비가 클수록 신호성분이 우세하고 잡음이 약한 것을 의미한다. 신호 대 잡음비의 변화양상은 반사파가 뚜렷이 나타난 부분에서 높은 값을 보이며, 반사파가 없는 해수층과 기반암 하부에서는 낮은 값을 보인다. 과량잡음을 제거하기 이전의 단면에서는 해수면과 음향기반암층의 구역에서 비교적 높은 신호 대 잡음비를 보이고 연속성이 높으나, 5.8, 6.0초에 존재하는 주요 퇴적층들의 신호 대 잡음비는 이에 비하여 낮고 연속성이 낮게 나타났다. 반면, 과량잡음을 제거한 이후의 겹쌓기 자료의 신호 대 잡음비는 전반적으로 높은 신호 대 잡음비를 보이며, 5.8, 6.0초에 존재하는 반사층에서도 높은 값의 신호 대 잡음비를 보인다.

결 론

2010년도 남극 남세틀랜드군도 북부에서 획득한 탄성과 탐사자료 중 일부 측선에 강한 과량잡음이 기록되었다. 탐사자료에 존재하는 과량잡음을 효과적으로 제거함과 동시에 반사파 신호의 손실을 최소화하기 위하여 여러 가지 잡음제거법 중에서 과량잡음의 특성을 고려한 F-X 필터와 중앙값 필터를 적용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. F-X 필터를 적용한 결과, 원시자료에 존재하였던 무작위 과량잡음들이 상당 부분 제거되어 채널 간 반사파 신호의 연속성이 뚜렷이 향상되었다. 그러나 과량잡음이 강한 경우에는 F-X 필터로는 제대로 제거하지 못하였으며, F-X 필터를 2회 연속 적용하여도 여전히 강하게 잔존하였다.
2. 중앙값 필터를 적용한 결과는 원시자료에 존재하였던 저

주파 파랑잡음을 제거하는데 F-X 필터보다 효과적이었다. 그러나 특정 주파수 범위에서만 적용시켰기 때문에 주파수 영역에 넓게 분포하고 있는 파랑잡음은 그대로 잔존하였다.

3. 파랑잡음이 심한 자료에 F-X 필터나 중앙값 필터 중 하나만을 적용할 경우, 서로 다른 주파수 특성을 지닌 잡음이 잔존하였다. 이에 F-X 필터와 중앙값 필터를 연속적으로 적용한 결과, 반사파 신호의 손실을 최소화함과 동시에 파랑잡음이 효과적으로 제거된 양호한 결과를 얻었다.

4. 파랑잡음을 제거를 위한 두 가지 필터를 연속적으로 적용한 자료를 이용하여 보다 정확한 속도분석 결과를 얻을 수 있었으며, 이를 통해 겹쌓기 단면에서는 잡음이 상당히 약화되어 반사파의 해석에 많은 도움이 되었다. 또한 겹쌓기 단면의 신호 대 잡음비가 F-X 필터와 중앙값 필터를 적용하지 않은 결과에 비해 뚜렷하게 향상되었다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 연구개발과제인 “남극해저지질조사사업(PM10030)”과 “양극해 해양환경변화와 활용연구(PM11080)”, 극지연구소 기본연구사업인 “장보고 과학기지 주변 빙권과 지각권의 상호작용 규명: David Glacier 종합 관측망 구축 및 빙하의 진화연구(PE12050)” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 아울러 연구자료로 활용된 탄성파자료를 획득하기 위하여 추운 남극해에서 탄성파 탐사 작업에 적극 협력하신 쇠빙선 아라온호의 선장 이하 모든 승조원들과 참여연구원들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- Bednar, J. B., 1983, Applications of median filtering to deconvolution, pulse estimation, and statistical editing of seismic data, *Geophysics*, **48**, 1598-1610.
- Cambois, G. and Frelet, J., 1995, Can we surgically remove swell noise?, 65th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1381-1384.
- Canales, L. L., 1984, Random noise reduction, 54th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 525-527.
- Duncan, G. and Beresford, G., 1995, Some analyses of 2-D median f-k filters, *Geophysics*, **60**, 1157-1168.
- Elboth, T., Fugro Geoteam, Hermansen, D., and Fugro Seismic Imaging, 2009, 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract.
- GEDCO, 2010, VISTA processing manual, 1513.
- Gulunay, N., 2000, Noncausal spatial prediction filtering for random noise reduction on 3D poststack data, *Geophysics*, **65**, 1641-1653.
- Jin, Y. K., Lee, M. W., Kim, Y., Nam, S., and Kim, K., 2003, Gas hydrate volume estimations on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula, *Antarctic Science*, **15**, 271-282.
- Karsli, H., Dondurur, D., and Cifci, G., 2006, Application of complex-trace analysis to seismic data for random-noise suppression and temporal resolution improvement, *Geophysics*, **71**, V79-V86.
- Kim, Y., Kim, H. S., Larter, R. D., Camerlenghi, A., Gamboa, L. A. P., and Rudowski, S., 1995, Tectonic deformation in the upper crust and sediments at the South Shetland trench, *Geol. Seis. Strat. Ant. Mar., Ant. Res. Ser.*, **68**, 157-166.
- Klepeis, K. A. and Lawver, L. A., 1996, Tectonics of the Antarctic-Scotia plate boundary near Elephant and Clarence islands, West Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 20211-20220, 20231.
- Larter, R. D., Rebesco, M., Vanneste, L., Gamboa, L., and Barker, P., 1997, Cenozoic tectonic, sedimentary and glacial history of the continental shelf west of Graham Land, Antarctic Peninsula, *Geology and Seismic stratigraphy of the Antarctic Margin*, **2**, 1-27.
- Liu, C., Liu, Y., Yang, B., Wang, D., and Sun, D., 2006, A 2D multistage median filter to reduce random seismic noise, *Geophysics*, **71**, V105-V110.
- Livermore, R., Balanya, J. C., Maldonado, A., Martinez, J. R., Fernandez, J. R., Baldeano, C. S., Zaldivar, J. G., Jabaloy, A., Barnolas, A., Somoza, L., Molina, J. H., Surinach, E., and Viseras, C., 2000, Autopsy on a dead spreading center: The Phoenix Ridge, Drake Passage, *Antarctica. Geol.*, **28**, 607-610.
- Mi, Y. and Margrave, G. F., 2000, Median filtering in Kirchhoff migration for noisy data, 70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 822-925.
- Ozbek, A., 2003, *Adaptive Seismic Noise and Interference Attenuation Method*, U. S. Patent 6 651 007.
- Ristau, J. P. and Moon, W. M., 2001, Adaptive filtering of random noise in 2-D geophysical data, *Geophysics*, **66**, 342-349.
- Schonewille, M., Vigner, A., and Ryder, A., 2008, Swell-noise attenuation using an iterative fx prediction filtering approach, 78th Annual International Meeting, SEG, 2647-2651.
- Shepherd, A. M. and McDonald, J. A., 2004, Quantification of swell noise on seismic lines gathered in rough and calm seas. 66th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, H023.
- Soubaras, R., 1994, Signal-preserving random noise attenuation by the f-x projection, 64th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1576-1579.
- Tinivella, U. and Accaino, F., 2000, Compressional velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data (South Shetland Islands, Antarctica), *Marine Geology*, **164**, 13-27.
- Watts, D. R., Deighan, A. J., and Riedel, C., 1999, Attenuation of marine wave swell noise by stacking in the wavelet packet domain, 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1220-1223.
- Yilmaz, O., 2001, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, Society of Exploration Geophysicists, SEG.