

2-D 웨이블릿 변환을 이용한 해양 탄성파탐사 자료의 잡음 감쇠

김진후† · 김성보* · 김현도** · 김찬수***

(원고접수일 : 2008년 7월 9일, 원고수정일 : 2008년 9월 3일, 심사완료일 : 2008년 9월 29일)

Noise Attenuation of Marine Seismic Data with a 2-D Wavelet Transform

Jin-Hoo Kim† · Sung-Bo Kim* · Hyun-Do Kim** · Chan-Soo Kim***

Abstract : Seismic data is often contaminated with high-energy, spatially aliased noise, which has proven impractical to attenuate using Fourier techniques. Wavelet filtering, however, has proven capable of attacking several types of localized noise simultaneously regardless of their frequencies. In this study a 2-D stationary wavelet transform is used to decompose seismic data into its wavelet components. A threshold is applied to these coefficients to attenuate high amplitude noise, followed by an inverse transform to reconstruct the seismic trace. The stationary wavelet transform minimizes the phase-shift errors induced by thresholding that occur when the conventional discrete wavelet transform is used.

Key words : Marine seismic survey(해양 탄성파탐사), Wavelet transform(웨이블릿 변환), Noise(잡음), Attenuation(감쇠), DWT(이산 웨이블릿 변환)

1. 서 론

해양 탄성파탐사는 해저 지층의 층서 및 구조를 연구하는 데 기초적인 자료를 제공하며, 탐사자료의 분석을 통하여 기반암 심도, 퇴적물의 물성 및 퇴적 주기, 그리고 지층의 경계 등 다양한 정보를 얻을 수 있다. 그러나 현장에서 얻은 원시 자료에는 직접파, 다중 반사파와 같은 일관성 잡음과 무작위 잡음이 어느 정도 포함되어 있기 때문에 적절한 자료처리 과정이 필요하다.

이러한 잡음을 억제하기 위하여 다양한 방법들이 사용되고 있다. 동일 지점에 대한 탄성파 트레이스들을 중합 (CDP stacking) 함으로써 신호 대 잡음비를 높일 수도 있으나 스파커와 같은 음원을 사용하는 경우 장비의 기계적 성능 상 음파를 발생시킬 때마다 트레이스간 파형이 달라질 수 있으므로 무작위 잡음은 감소하지만 신호의 형태는 왜곡되는 단점을 갖는다. 이와 같은 단점을 보완하는 방법으로 SVD (Singular Value Decomposition) 방법^[1] 또는 K-L (Karhunen-Loève) 변환방법^{[2],[3]} 등이 제시되었으며, 이들 방법은 전체적으로

† 교신저자(동아대학교 에너지자원공학과, E-mail: jkim@dau.ac.kr, Tel: (051)200-7790)

* 동아대학교 해양자원연구소

** 동아대학교 해양자원연구소

*** (주)지오뷰

일관된 특성을 갖는 많은 수의 트레이스들로부터 공통적인 신호를 추출하는 데 효과적인 것으로 알려져 있다^[4].

본 연구에서는 1990년대 이후 급속히 발전하여 디지털 신호처리, 이미지 프로세싱, 신호 및 이미지 압축 등에 폭 넓게 사용되고 있는 웨이브릿 변환방법을 이용하여 수평적으로 일관성 있는 신호는 증진시키고, 일관성이 떨어지는 잡음은 제거하고자 한다. 웨이브릿 변환방법을 탄성과탐사 자료의 잡음 감쇠에 이용한 사례는 Ioup and Ioup^[5], Miao and Cheadle^[6], Zhang and Ulrych^[7] 등의 연구에서 찾아볼 수 있으며, 이들은 탄성과탐사 자료처리를 트레이스별로 수행하거나 트레이스의 수평적 배열 평면인 $x-t$ (수평거리-왕복주시) 평면에서 수행하였다.

본 연구의 목적은 $x-t$ 평면으로 표시되는 탄성과탐사 단면을 2차원 행렬로 저장한 후, 여기에 2-D 웨이브릿 변환을 적용하여 해양 탄성과탐사 자료에 포함되어 있는 수직 및 대각선 방향 성분의 잡음을 수평성분의 잡음에 비해 상대적으로 더 많이 감쇠 시킴으로써 지층의 수평 경계면에 대한 반사 신호를 강화시키고자 한다. 이렇게 함으로써 많은 잡음이 포함되어 있는 해양 탄성과탐사 자료 해석의 정확성을 한층 높일 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 2-D 웨이브릿 변환

웨이브릿 변환이란 시계열 신호를 모웨이브릿 (mother wavelet)을 이용하여 분해하여 웨이브릿 계수를 구하는 과정을 말한다. 1-D 웨이브릿 계수 C 는 모웨이브릿 ψ 를 병진(shift)시키거나 신축률(scale)을 달리하면서 연속적으로 또는 2의 승수(dyadic)인 a 와 b ($a=2^j$, $b=k2^j$, $(j,k) \in \mathbb{Z}^2$)를 사용하여 이산적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C(a,b) = \int_{\mathbb{R}} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

그러나 식(1)과 같이 적분이 포함되어 있는 계산은 비용이 많이 드는 단점이 있어 대신에 저역통과 필터와 고역통과 필터를 구한 후 이를 시계열 신호

와 컨벌루션하여 구한다. 이러한 과정을 일반적으로 이산 웨이브릿 변환(discrete wavelet transform)이라 하며, 이 때 저역통과 필터를 거친 웨이브릿 계수를 근사 계수(approximation coefficients), 고역통과 필터를 거친 웨이브릿 계수를 상세 계수(detailed coefficients)라 한다. 근사 계수는 다시 웨이브릿 변환을 거쳐 다음 단계(level)의 근사 계수와 상세 계수로 분해가 가능하다^[8].

웨이브릿 변환에 사용되는 모웨이브릿은 처리하려는 자료에 따라 선택되는데, 본 연구에서는 직교성과 대칭성을 갖는 Coiflet-3 웨이브릿을 사용하였다. Table 1은 웨이브릿 변환에 사용되는 Coiflet-3 웨이브릿의 저역통과 분해(decomposition) 필터의 필터 계수 L_D 를 나타내며, 필터 계수의 길이 N 은 18이다. 고역통과 분해 필터는 저역통과 분해 필터의 QMF(Quadrature Mirror Filter)이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_D(k) = (-1)^{k+1} L_D(N+1-k), \quad k=1, 2, 3, N \quad (2)$$

여기서 L_D 는 길이 N 인 저역통과 분해 필터를, H_D 는 고역통과 분해 필터를 각각 나타낸다.

시계열 신호 $s(t)$ 와 Table 1에 보인 저역통과 분해 필터 L_D 를 식(3)과 같이 컨벌루션하면 근사 계수 cA 를 얻을 수 있다.

$$cA = s(t) * L_D \quad (3)$$

마찬가지로, 시계열 신호 $s(t)$ 와 식(2)에서 얻은 고역통과 분해 필터 H_D 를 식(4)와 같이 컨벌루션하면 상세 계수 cD 를 얻을 수 있다.

$$cD = s(t) * H_D \quad (4)$$

2-D 이산 웨이브릿 변환(DWT)은 저역통과 필터와 고역통과 필터를 2차원 행렬로 구성되어 있는 시계열 자료의 행과 열에 누차 적용함으로써 구할 수 있으며, 이를 통하여 j 단계의 근사 계수는 4개의 $j+1$ 단계 계수(1개의 근사 계수와 수평, 수직, 대각선 등 3개의 상세 계수)로 분해된다.

Table 1 Lowpass decomposition filter coefficients

(L_D) of Coiflet-3 wavelet

k	L_D	k	L_D
1	-0.0000	10	-0.0718
2	-0.0001	11	0.4285
3	0.0005	12	0.7938
4	0.0011	13	0.4052
5	-0.0026	14	-0.0611
6	-0.0090	15	-0.0658
7	0.0159	16	0.0235
8	0.0346	17	0.0078
9	-0.0823	18	-0.0038

그러나 이렇게 구한 DWT는 시불변(time invariant) 변환이 아니라는 단점을 갖고 있다. 이는 비록 신호 $s(t)$ 를 주기적 신호로 확장을 하더라도 병진시킨 신호 $s(t)$ 의 DWT는 일반적으로 DWT를 병진시킨 것과는 다르다는 의미를 갖는다. 본 연구에서는 2차원 탄성파탐사 자료 $s(t)$ 의 DWT를 구함에 있어서 신호의 왜곡을 최소화 하기 위하여 Stationary 웨이브릿 변환(SWT)이라 불리는 시불변 웨이브릿 변환을 사용하였다^[9].

Fig. 1에 2-D SWT 변환과정을 도시하였다. 그림에서 F_j 는 저역통과 필터를, G_j 는 고역통과 필터를 각각 나타낸다. 2차원 행렬로 구성되어 있는 j 단계의 근사 계수(초기치는 원시자료 $s(t)$ 임) cA_j 의 행을 저역통과 필터 F_j 와 컨벌루션하고 이렇게 얻은 행렬의 열을 다시 저역통과 필터 F_j 와 컨벌루션하면 $j+1$ 단계의 근사 계수 cA_{j+1} 을 얻을 수 있다.

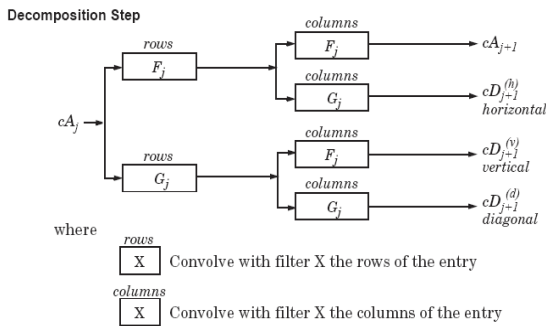


Fig. 1 Decomposition step of the 2-D SWT. 이와 마찬가지로 방법으로 cA_j 의 행을 고역통과 필터

G_j 와 컨벌루션하고 이렇게 얻은 행렬의 열을 다시 고역통과 필터 F_j 와 컨벌루션하면 $j+1$ 단계의 수직 상세 계수 $cD_{j+1}^{(v)}$ 을 얻을 수 있다.

3. 탄성파 자료의 잡음 감쇠

3.1 잡음 감쇠 방법

웨이브릿 변환을 이용하여 잡음을 감쇠하는 기법은 신호(s)에 잡음(e)이 포함되어 있는 측정자료(d)를 웨이브릿 변환을 통해 웨이브릿 계수(cA , $cD^{(h)}$, $cD^{(v)}$, $cD^{(d)}$)를 구하고, 이를 웨이브릿 변환 영역에서 잡음 제거를 위한 상세 계수 필터링 과정을 거쳐 새로운 웨이브릿 계수($cD^{(h)}$, $cD^{(v)}$, $cD^{(d)}$)를 구한 후 이를 근사 계수(cA)와 함께 역변환하여 재구성된 신호(d')를 구하는 방법이다.

본 연구에서는 탄성파 자료의 수평 성분을 강조하기 위하여 웨이브릿 변환에 앞서 트레이스 중합(stacking)을 수행하였으며, 잡음 성분이 포함되어 있는 상세 계수를 조정하기 위하여 문턱값(δ) 이내의 계수를 0으로 하고 문턱값 이상의 계수를 문턱값 만큼 작게하는 Soft Threshold (ST) 기법을 사용하였다. ST를 적용하기 전의 계수를 $C(i, j)$ 라 할 때, 문턱값 δ 를 적용한 후의 계수 $C'(i, j)$ 는

$$C'(i, j) = \begin{cases} \text{sign}[C(i, j)][|C(i, j) - \delta|] & |C(i, j)| > \delta \\ 0 & |C(i, j)| \leq \delta \end{cases} \quad (5)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, 문턱값 δ 는 상세 계수의 표준편차를 이용하여 구할 수 있다. 이것은 상세 계수에 포함되어 있는 상대적으로 작은 잡음에 의한 웨이브릿 계수를 제거하여 잡음이 줄어든 상태의 신호로 재구성된다. ST 기법은 문턱값 이상의 계수를 문턱값 만큼 줄이지 않는 Hard Threshold (HT) 기법에 비해 사이드 로브와 같은 신호 왜곡을 줄일 수 있는 장점이 있다.

웨이브릿 계수를 이용해 신호를 재구성하기 위해서는 역웨이브릿 변환과정이 필요하며, 이 역시 필터를 이용한 컨벌루션을 통해 얻을 수 있다. 역웨이브릿 변환을 위한 저역통과 재구성 필터(L_R)는

역배열된 저역통과 분해 필터(L_R)이며, 고역통과 재구성 필터(H_R)는 식(2)로 표현되는 고역통과 분해 필터를 역배열함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L_R(k) = L_D(N+1-k), \quad (6)$$

$$H_R(k) = H_D(N+1-k), \quad k = 1, 2, 3, N$$

따라서 L_R 과 H_R 역시 QMF임을 알 수 있다.

3.2 합성자료의 잡음 감쇠

Fig.2는 합성자료를 이용한 잡음감쇠 효과를 보여준다. 잡음이 포함되어 있는 얇은 원시 자료 (a)는 3 개의 지층경계면을 보여주고 있으며 두 번째 지층은 단층에 의해 수직으로 분리되어 있다. Fig.2(b)에 보이는 지층 단면은 잡음감쇠 효과를 보기 위하여 원시자료에 S/N비가 5인 백색잡음을 무작위로 포함시킨 것이다.

Fig.2(c)에 나타난 지층단면은 Coiflet-3 모웨이브릿을 이용한 2-D SWT를 과정을 거쳐 잡음을 감쇠시킨 결과이다. 단층을 보이는 제2 지층의 중앙부와 좌우 경계부를 제외하고는 원시자료와 매우 유사하게 잡음이 감쇠되었음을 볼 수 있다. 이와 같이 불연속 지층에서 신호 왜곡 현상이 일부 나타나는 것은 원시 자료가 수평성분이 우세하기 때문에 웨이브릿 변환으로 얻은 근사 계수도 수평적인 연속성을 유지하려는 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 신호 왜곡 현상은 상세 계수에 적용하는 문턱값(δ)을 조정하여 어느 정도 줄일 수는 있으나, 이는 잡음 감쇠 효과를 함께 줄이는 결과를 초래하게 되어 적절한 문턱값의 설정이 중요하게 된다.

잡음이 포함된 합성 자료에서 잡음이 효과적으로 감쇠되었는지는 Fig.2(d)에서 보는 바와 같이 분리된 잡음을 도시함으로써 확인할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 분리된 잡음이 무작위 값을 보이는 것은 원시 자료에 무작위로 포함시킨 백색잡음이 효과적으로 감쇠되었음을 보여준다.

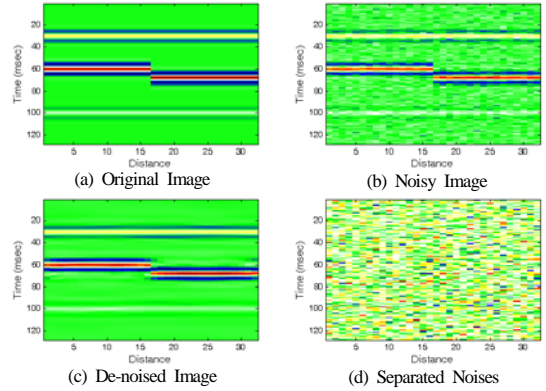


Fig. 2 Comparison of the synthetic seismic image and the de-noised image by soft thresholding

3.3 현장자료의 잡음 감쇠

현장자료의 잡음 감쇠에 사용한 탄성과 자료는 Fig.3a와 같다. 평탄한 해저면이 주시 30 msec 정도에 나타나며, 퇴적층 내에 가스 침투(gas seep)에 의해 생성된 것으로 보이는 잡음이 주시 30~60 msec 내의 여러 곳에서 관찰된다. 탄성과 단면 하부에는 복반사 현상이 간헐적으로 나타나며, 굽은 자갈에서 비롯된 것으로 보이는 회절파도 곳곳에서 확인된다.

Fig.3b는 2-D 웨이브릿 변환을 사용해 잡음을 감쇠시킨 탄성과 단면을 보여준다. 웨이브릿 변환을 위하여합성과 분석에 사용된 Coiflet-3 웨이브릿을 모웨이브릿으로 사용하였으며, 분해 단계도 레벨 3까지로 설정하였다.

웨이브릿 계수를 조정함에 있어 식(3)과 같이 주어지는 ST 기법을 사용하였으며, 원시 자료의 질과 잡음의 정도, 그리고 재구성된 탄성과 단면의 신호왜곡 정도를 고려하여 수직 및 대각선 상세 계수의 문턱값을 수평 상세 계수의 문턱값에 비해 5배 이상 크게 설정하여 탄성과 탐사 단면의 수평성분이 수직 및 대각선 성분에 비해 상대적으로 강조되도록 하였다.

원시 자료인 Fig. 3a와 잡음 감쇠 후의 자료인 Fig. 3b를 비교하여 보면 후자가 전자에 비해 전체적으로 잡음이 감쇠되고, 수평성분이 강조되었음을 볼 수 있다. 잡음 감쇠 과정을 통하여 Fig. 3a

의 ①에 나타나는 수중 잡음이 Fig. 3b의 ①과 같이 거의 제거되었음을 볼 수 있으며, Fig. 3a의 ②와 같이 지층 내에 나타나는 가스 침투에 의한 잡음 역시 상당 부분 제거되었음을 볼 수 있다(Fig. 3b의 ②).

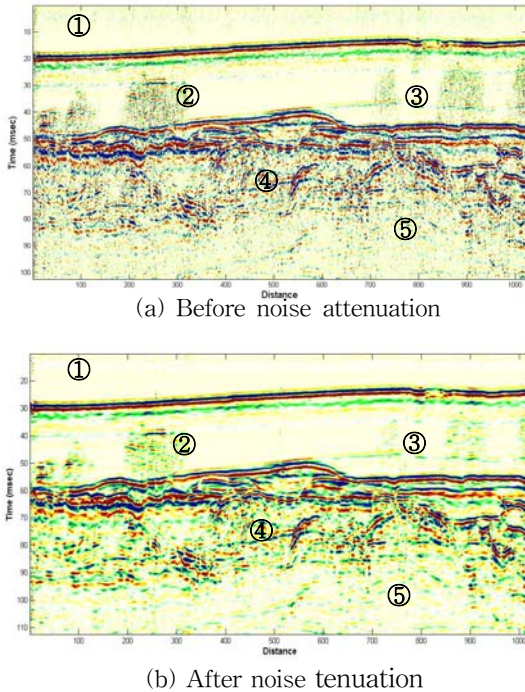


Fig. 3 Comparison of marine seismic sections: (a) Original seismic section, (b) De-noised seismic section by 2-D SWT. The numbered points are compared each other for noise attenuation effect

그러나 Fig. 3a의 ③과 같이 나타나는 해저면의 수면에 대한 복반사 신호는 감쇠의 정도가 미약함을 알 수 있다. 이는 해저면이 거의 수평인데다, 잡음 감쇠 과정에서 수평 성분을 상대적으로 덜 감쇠시켰기 때문에 주로 수평 성분으로 이루어진 복반사 신호는 상세 계수의 ST 기법만으로는 효율적으로 제거될 수 없음을 보여준다. 반면에 천해저 해양 탄성파탐사 단면에 주로 수평적으로 나타나는 복반사 신호는 주변 잡음이 제거됨으로써 오히려 식별이 용이하게 되는 장점도 있다. 이러한 현상은 Fig. 3a의 ④와 같이 반사 신호 및 잡음으로 인해

파악하기 힘든 해저면에 대한 지층의 반향과가 Fig. 3b의 ④에서는 식별이 가능할 정도로 뚜렷이 나타나고 있는 것에서도 확인이 가능하다. 지층 내에 전반적으로 분포하고 있는 무작위 잡음도 Fig. 3a의 ⑤와 Fig. 3b의 ⑤의 비교에서 보는 바와 같이 원시 자료에 비해 상당히 감쇠되었음을 볼 수 있으며, 수평 성분이 훨씬 강조되어 나타나고 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

해양 탄성파탐사 자료에 포함되어 있는 무작위 잡음을 제거하고 수평성분을 강조하기 위하여 2-D 웨이브릿 변환을 적용하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 트레이스 중합된 탄성과 자료에 2-D 웨이브릿 변환을 적용함으로써 각각의 분해 단계마다 1개의 근사 계수와 3개의 상세 계수(수평, 수직, 대각선 상세 계수)를 얻을 수 있었다.

둘째, 이렇게 얻은 상세 계수는 근사 계수에 비해 고주파의 잡음 성분을 많이 포함하고 있어 Soft Threshold (ST)기법을 이용해 무작위 잡음을 제거할 수 있었다.

셋째, ST 기법을 적용함에 있어 수직 및 대각선 상세 계수에 적용하는 문턱 값을 수평 상세 계수에 적용하는 문턱 값에 비해 5배 이상 크게 적용함으로써 역 웨이브릿 변환으로 얻어진 재구성된 탄성파탐사 단면의 수평성분이 수직 및 대각선 성분에 비해 상대적으로 강조되는 효과를 얻을 수 있었다.

넷째, 재구성된 탄성파탐사 단면의 수평성분이 강조되어 나타남으로써 해수면 또는 해저면에 의해 발생하는 복반사와 반향파 신호들 또한 주위 신호에 비해 강조되어 나타나는 경향을 보인다. 이는 복반사 또는 반향과가 지층의 반사파로 오인되어 지층 해석에 오류를 범하는 것을 방지할 수 있으며, 복반사 또는 반향파 위치를 정확히 파악함으로써 이를 제거하는 알고리즘 개발에도 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

다섯째, 본 연구에 사용된 2-D 시불변 웨이브릿 변환은 특정 주파수 대역의 신호만 통과 또는 제거

하는 푸리에 변환 기법만으로는 감쇠시키기 힘든 잡음을 효율적으로 감쇠시킬 수 있을 뿐만 아니라, 종래의 2-D 이산 웨이브릿 변환이 갖는 위상 변화의 문제점을 해결할 수 있었다.

앞으로 2-D 웨이브릿 변환을 이용한 다양한 해양 탄성파탐사 자료분석 방법 개발될 것으로 기대되며, 이는 해저 지층구조 해석에도 많은 도움이 될 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- [1] Sergio L.M. Freire and Tad J. Ulrych, "Application of SVD to vertical seismic profiling", *Geophysics*, Vol. 53, No. 6, pp. 778-785, 1988.
- [2] C.H. Hemon and D. Mace, "Use of the K-L transform in seismic data processing", *Geophysical Prospecting*, Vol. 26, No. 3, pp. 600-626, 1978;
- [3] I.F. Jones and S. Levy, "S/N ratio enhancement in multichannel seismic data via K-L transform", *Geophysical Prospecting*, Vol. 35, No. 1, pp. 12-32, 1987.
- [4] 과학기술처, "한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구(II)", 해양연구원 연구보고서, 1990.
- [5] Juliette W. Ioup and George E. Ioup, "Noise removal and compression using a wavelet transform", 1998 Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1998.
- [6] Xiaogui Miao and Scott Cheadle, "Noise attenuation with Wavelet transforms", 1998 Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1998.

- [7] R. Zhang and T.J. Ulrych, "Physical wavelet frame denoising", *Geophysics*, Vol. 68, No. 1, pp. 225-231, 2003.
- [8] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Pattern Anal. and Machine Intell.*, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693, 1989.
- [9] J.C. Pesquet, H. Krim, H. Carfatan, "Time-invariant orthonormal wavelet representations," *IEEE Trans. Sign. Proc.*, Vol. 44, No. 8, pp. 1964-1970, 1996.

저 자 소 개



김진후 (金鎭厚)

1978년 서울대학교 지구과학과 졸업(이학사). 1986년 미국 Colorado School of Mines 졸업 (Ph. D). 1986년-2006년 동아대학교 토목해양공학부 교수. 2007년-현재 동아대학교 에너지·자원공학과 교수.



김성보(金性甫)

2006년 동아대학교 토목해양공학부 졸업(공학사), 2008년 동아대학교 대학원 해양공학과 졸업(공학석사), 현재 동아대학교 부설 해양자원연구소 전임연구원



김현도(金鉉道)

1998년 동아대학교 해양공학과 졸업(공학사). 2000년 동아대학교 대학원 해양공학과 졸업(공학석사). 2005년 동아대학교 대학원 해양공학과 졸업(공학박사). 현재 동아대학교 해양자원연구소 연구원.



김찬수(金贊洙)

2005년 한국해양대학교 해양개발공학부 졸업(공학사). 2007년 한국해양대학교 대학원 해양개발공학부 졸업(공학석사). 현재 (주)지오뷰 해양탐사부 재직.