



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

무작위 잡음이 포함된
탄성과 트레이스에서의 Q-factor 산출

Q-factor estimation of seismic trace
including random noise



지도교수 신성렬

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

권준석

공학석사 학위논문

무작위 잡음이 포함된
탄성과 트레이스에서의 Q-factor 산출

Q-factor estimation of seismic trace
including random noise



지도교수 신성렬

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

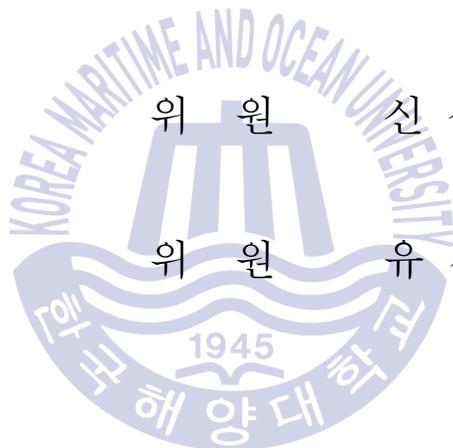
권준석

본 논문을 권준석의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 정 우 근 (인)

위 원 신 성 렬 (인)

위 원 유 경 근 (인)



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	ix
1. 서 론	1
1.1 개요	1
2. 탄성과 감쇠 이론	3
2.1 탄성과 감쇠의 정의	3
2.2 탄성과 Q-factor(Quality factor)	7
2.3 Spectral ratio method(SRM)	12
2.4 Peak frequency shift(PFS)	16
3. 탄성과 감쇠 수치모형실험 및 적용	22
3.1 탄성과 감쇠 수치모형실험	22
3.1.1 탄성과 감쇠 수치모형실험 구성	22
3.1.2 탄성과 감쇠 수치모형실험 방법	24
3.1.3 탄성과 감쇠 수치모형실험 결과	27
3.1.3.1 심도에 따른 Q-factor 증가 모델	27
3.1.3.2 심도에 따른 Q-factor 감소 모델	50
3.1.3.3 급격한 변화가 있는 Q-factor 모델	58

3.2 현장 자료 적용	65
3.2.1 현장 관측자료 취득 및 처리	65
3.2.2 현장 관측자료 적용 및 분석	71
4. 결론	74
감사의 글	76
References	78
Bibliography	82



List of Tables

Table 1 Seismic survey parameter for offset 0m	25
Table 2 Seismic survey parameter for offset 20m	25
Table 3 A schematic of layered No.1 model with physical properties	27
Table 4 Experimental result of Q-factor for No. 1 model in case of offset 0m and offset 20m by SRM	32
Table 5 Experimental result of Q-factor for No. 1 model in case of offset 0m and offset 20m by PFS	35
Table 6 Experimental result of Q-factor for No. 1 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by SRM	39
Table 7 Experimental result of Q-factor for No. 1 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by PFS	39
Table 8 A schematic of layered No.2 model with physical properties	50
Table 9 Experimental result of Q-factor for No. 2 model in case of offset 0m and offset 20m by SRM	53
Table 10 Experimental result of Q-factor for No. 2 model in case of offset 0m and offset 20m by PFS	53
Table 11 Experimental result of Q-factor for No. 2 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by SRM	55
Table 12 Experimental result of Q-factor for No. 2 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by PFS	56
Table 13 A schematic of layered No.3 model with physical properties	58
Table 14 Experimental result of Q-factor for No. 3 model in case of offset 0m and offset 20m by SRM	61

Table 15 Experimental result of Q-factor for No. 3 model in case of offset 0m and offset 20m by PFS 61

Table 16 Experimental result of Q-factor for No. 3 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by SRM 63

Table 17 Experimental result of Q-factor for No. 3 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by PFS 63

Table 18 Single channel seismic survey parameter of field data 67

Table 19 Result of calculated Q-factor for field data 71

Table 20 Q-factor according to sediment classification(Hamilton, 1972) 72



List of Figures

Fig. 1	The progressive diminution of energy per unit area caused by spherical propagation from an energy source at E	4
Fig. 2	Partitioning of energy of a normally incident ray with amplitude A_0 into reflected and transmitted rays with respective amplitude A_1 . Z_1 and Z_2 are the acoustic impedances of the two layers	5
Fig. 3	Classification of Q-factor estimation method	8
Fig. 4	Wave amplitude for a attenuated harmonic oscillator	11
Fig. 5	The time domain expressions (a) and frequency spectra (b) of a Ricker wavelet with 30Hz dominant frequency at time 0(red) and time $t=0.1s$ in different attenuating mediums with different Q values	17
Fig. 6	The peak frequencies of a reflection at two different time location	19
Fig. 7	Geometrical ray tracing (a)elements of kinematic ray tracing and (b)elements of dynamic ray tracing	23
Fig. 8	A schematic diagram of survey type (a)offset 0m (b)offset 20m	26
Fig. 9	A schematic of layered No.1 model with physical properties, (a)P-wave velocity, (b)density and (c)Q-factor value	29
Fig. 10	Time domain waveform amplitude of resulting from No.1 model (a)offset 0m (b)offset 20m	30
Fig. 11	The spectral ratio between layers and linear regression analysis for offset 0m; (a)1st layer and 2nd layer, (b)2nd layer and 3rd layer, and (c)3rd layer and 4th layer	31
Fig. 12	The spectral ratio between layers and linear regression analysis for offset 20m; (a)1st layer and 2nd layer, (b)2nd layer and 3rd layer, and (c)3rd layer and 4th layer	31

Fig. 13 Q-factor estimation using PFS (a)time domain signal (b)time-frequency spectrogram from offset 0m	33
Fig. 14 Q-factor estimation using PFS 1st event exclude (a)time domain signal (b)time-frequency spectrogram from offset 0m	34
Fig. 15 Comparison between SRM and PFS for synthetic data No. 1 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m	36
Fig. 16 Time domain waveform amplitude add noise S/N=30dB of resulting from No.1 model (a)offset 0m (b)offset 20m	38
Fig. 17 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=30dB No. 1 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b) Q-factor estimation result of offset 20m	40
Fig. 18 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 0m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer	43
Fig. 19 Comparison between estimation error of SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 0m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer	45
Fig. 20 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 20m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer	47
Fig. 21 Comparison between estimation error of SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 20m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer	49
Fig. 22 A schematic of layered No.2 model with physical properties, (a)P-wave velocity, (b)density and (c)Q-factor value	52

Fig. 23 Comparison between SRM and PFS for synthetic data No. 2 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m	54
Fig. 24 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=30dB No. 2 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m	57
Fig. 25 A schematic of layered No.3 model with physical properties, (a)P-wave velocity, (b)density and (c)Q-factor value	60
Fig. 26 Comparison between SRM and PFS for synthetic data No. 3 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m	62
Fig. 27 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=30dB No. 3 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m	64
Fig. 28 Map of the survey area	66
Fig. 29 Flow chart for single channel seismic data processing	68
Fig. 30 Seismogram obtained from the Geoje (a)raw data (b)after data processing	70

Q-factor estimation of seismic trace including random noise

Kwon, Jun Seok

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Division of Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Recently, there are various seismic explorations to develop resources like oil and gas. The existence of resources can be analyzed through interpreting the data which is obtained in the seismic explorations, and the seismic section of high resolution is necessary for the analysis.

The seismic section of high resolution is the most important element about the interpretation of the data such as seismic property analysis, and there are many researches about the seismic section of high resolution. Especially, there are researches to obtain the seismic section of high resolution by the analysis of seismic attenuation. The analysis of seismic attenuation is used to recognize the increase of resolution of the seismic section and the existence of hydrocarbon.

On this study, I would like to analyze the seismic attenuation by the estimation of Q-factor because Q-factor is the important element to recognize the existence of resources in the reservoir, it is used for analysis of characters of medium, and it is the effective method for analysis of quality of the seismic section resolution and AVO.

To estimate Q-factor I simulate the real geological structure, add random noise and employ Spectral ratio method and Peak frequency shift. Spectral ratio method is often used for the estimation of Q-factor because it is less effected by S/N. Also, it estimates Q-factor by analysis ratio of amplitude spectrum between reference data and sample data. Peak frequency shift is the method to estimate Q-factor through frequency variation which is reflected.

I set different geological structures in many times and add random noise in two methods. In the result of the research, the deviation of Q-factor through Peak frequency shift is less than the other and it appears the accuracy in research of the seismic attenuation. Thus, I assume that Peak frequency shift is the more effective method to obtain the seismic section of high resolution.

KEY WORDS: Q-factor; Peak Frequency Shift; Spectral ratio method; 무작위 잡음; 탄성파 감쇠

제 1 장 서 론

1.1 개요

최근 석유/가스 및 자원개발 목적의 탄성과 탐사가 활발히 이루어지고 있다. 자원개발의 탄성과 탐사는 거대한 규모와 자료처리로 인한 경제적, 시간적 영향을 많이 받는다. 일련의 자료처리과정을 거친 뒤 자료해석의 단계에서 부존여부의 파악은 고해상도의 탄성과 단면도가 필요하고 이는 탄성과 속성분석 등과 자료해석 분야에서 중요한 요소이다. 이러한 이유로 전 세계와 관련업계에서는 고해상 탄성과 단면도를 얻기 위해 탄성과 감쇠에 관한 연구가 주목되고 있으며, 이는 탄성과 자료에 대한 해상도의 증가와 직접적인 탄화수소를 파악할 수 있는 도구로써 유용하게 사용되어진다. 석유 및 가스의 지시자인 탄화수소가 매장된 지하내부의 저류층은 음향학적으로 볼 때 물로 포화된 다공질 암석보다 부드러운 경향을 보이며, 특히 부분적으로 유체로 충전된 암석의 경우보다 감쇠현상이 더 잘 일어난다(이진우, 2014). 지하구조를 구성하는 퇴적물과 암석 등은 공극과 공극 내부에 포함된 공극수를 가지고 있으며, 이러한 매질을 통과하는 탄성과의 속도와 진폭의 감쇠는 지각을 구성하는 매질, 공극내부의 공극성, 그 상호 간의 작용에 의하여 영향을 받는다(Toksöz, et al., 1979; Purnell, 1986).

현재 탄성과 감쇠의 영향에 대한 연구는 축소모형실험과 수치모형실험 뿐만 아니라 현장 자료처리에 대한 적용을 통해 연구가 수행되고 있다. 국외에서는 석유 및 가스 등 지하자원탐사, 메탄 하이드레이트의 포화율과 탄성과 속도사이의 정량적 관계를 추정하여 자원량을 평가하는 방법(Dasgupta & Clarck, 1998; Matsushima, 2005, 2006), 빙하퇴적상의 분석(Alessio, et al., 2010) 등에 대하여 탄성과 감쇠와 관련된 다양한 연구가 이루어지고 있다. 국외의 경우 탄성

과 감쇠의 관한 연구는 활발히 이루어지고 있으며 새로운 방법 또한 개발되고 있는 상황이다. 반면에 국내의 경우 Spectral ratio method를 이용한 탄성과 감쇠연구(이진우, 2014; 김민영 등, 2014)가 이루어지고 있으며, 메탄 하이드레이트 부존층에서의 지진과 감쇠치 산출(이광호 & Matsushima, 2009)이외에는 탄성과 감쇠에 관한 연구는 미비한 실정이며, 무작위 잡음이 포함된 자료에서의 탄성과 감쇠의 연구 또한 이루어지고 있지 않은 상황이다.

본 연구에서는 무작위 잡음이 포함된 탄성과 트래이스에서의 탄성과 감쇠에 영향을 미치는 요인들을 확인하고자 하였으며, 주로 감쇠특성을 파악하기 위해 사용되는 Spectral ratio method와 주파수 변화량을 통하여 분석하는 Peak frequency shift방법을 이용하여 Q-factor를 산출한 뒤 비교분석 실시하였다. 사용된 모델은 지층의 심도가 깊어짐에 따라 Q-factor가 증가하거나 감소하는 모델과 지층 중간의 가스층을 모사한 낮은 Q-factor 값을 삽입하여 실제 지질구조에 가까운 모델로 구성하여, 진폭의 역전현상과 진폭변화를 통해 탄성과가 해당 지층 하부층을 전파할 때의 탄성과 자료에 대한 영향을 확인하였다. 그리고 동일한 모델에 대하여 음원-수진기의 간격이 0m인 탐사와 음원-수진기의 간격을 20m로 설정하여 얻어진 탐사자료에 대하여 무작위 잡음의 포함유무에 따라 Q-factor를 계산한 뒤 기존의 설정 값과 계산된 값의 정확도를 파악하고 이에 대한 원인을 분석하였다.

제 2 장 탄성파 감쇠 이론

2.1 탄성파 감쇠의 정의

음원에서 발생된 탄성파가 지표면 방향으로 전파되고 퇴적물 내에서 전파하는 동안 탄성파의 진폭이 감소가 되는데 이때의 손실은 다음과 같은 영향에 의하여 발생한다. 전파거리에 따른 기하학적 확산손실(Spherical divergence or Geometrical spreading loss) 즉, 구형발산의 효과는 매질의 특성에 관계없이 탄성파의 전파과정 중 탄성파 에너지가 송신점으로부터 방사상으로 전파하면서 거리가 멀어짐에 따라 단위 면적당 발생된 탄성파 에너지가 감소하는 현상을 일컫는다. 탄성파의 강도는 탄성파의 진행방향과 수직인 면적에 대하여 단위 시간당 탄성파에 의해 전달되는 에너지의 양으로 정의되며, 에너지의 밀도는 부피당 에너지의 비로 정의되어진다. 따라서 속도 V 로 진행하는 파의 강도는 진폭의 제곱과 주파수(frequency, f)의 제곱에 비례한다(Kuster & Toksöz, 1974). 3차원 무한 매질의 중심에서 파를 발생시켰을 때, Fig. 1과 같이 파의 생성 순간 총 에너지(E)는 시간에 따라 반경 r 이 증가하는 구형의 형태로 퍼져나간다. 이상적인 경우, 음원에 의해 탄성파 에너지가 발생하게 되면 특정 시간에 대해 구형의 표면에 분포되어 있는 에너지는 파원으로부터 발생한 총 에너지를 나타낸다. 발생한 총 에너지는 구형의 표면적 S 로 나누어 계산하여 그 값을 구할 수 있다. 구형의 표면적은 $4\pi r^2$ 이기 때문에 에너지의 밀도는 파원으로부터의 거리 r 의 함수로써 표현할 수 있다. 따라서 거리를 제외하고는 모두 상수이기 때문에 단위 면적당 에너지는 거리의 제곱에 반비례하여 $E/4\pi r^2$ 가 되며, 더 멀리 전파하여 반경이 R 이 될 때의 단위면적당 에너지는 $E/4\pi R^2$ 가 된다. 반경은 $R > r$ 이므로 단위면적당 에너지는 $E/4\pi r^2 > E/4\pi R^2$ 가 된다. 즉, 전파 반경이 증가함에 따라 $1/r^2$ 의 비율로 감소하게 되며, 따라서 에너지의 공급근으로

표현되는 진폭은 $1/r$ 의 비율로 감소한다(이진우, 2014).

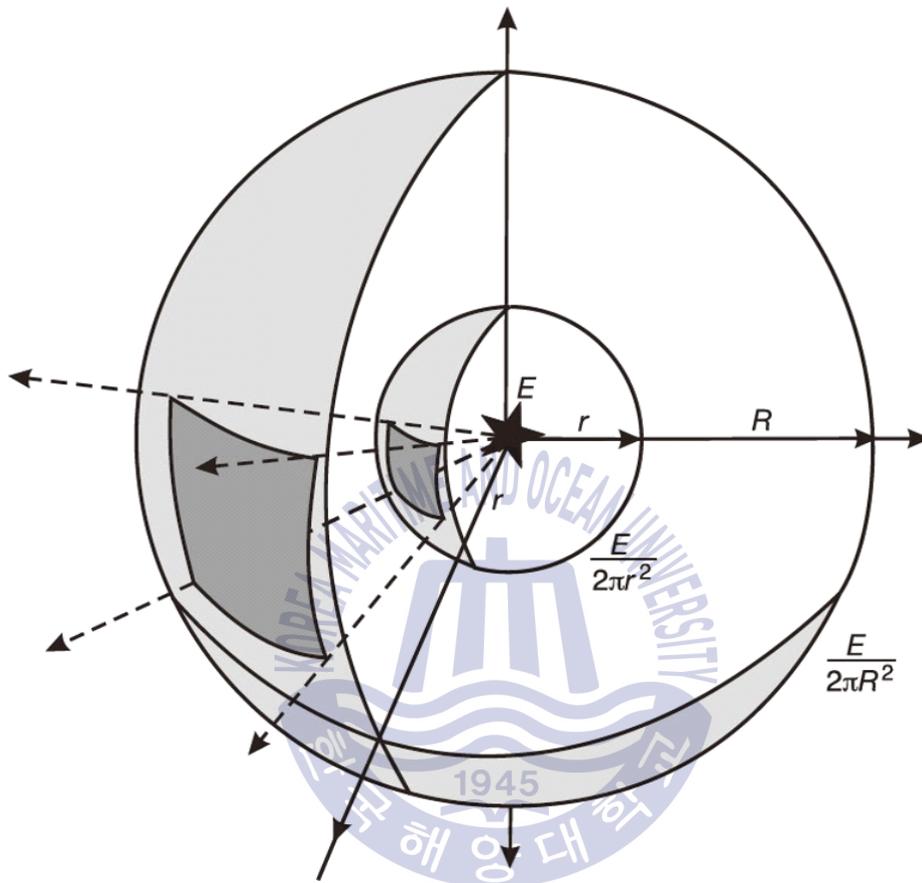


Fig. 1 The progressive diminution of energy per unit area caused by spherical propagation from an energy source at E

탄성과 탐사를 수행할 때, 측정되어지는 값들은 에너지 밀도가 아닌 진폭 또는 입자의 변위로서, 단위 면적당 에너지는 진폭의 제곱에 비례, 진폭은 에너지의 제곱근에 비례, 파원으로부터의 거리에 따라 반비례한다.

탄성과의 에너지량은 Fig. 2와 같이 층마다 해당하는 탄성과속도 V 와 밀도 ρ 의 곱으로 표현할 수 있는 음향임피던스(acoustic impedance, Z)로 정의할 수 있다. 일반적으로 경고한 굳은 대상매질일수록 임피던스 값이 크며, 두 매질의

임피던스의 차이가 작을수록 에너지는 경계면을 잘 투과한다. 입사파가 경계면을 지날 때 감소하게되는 투과손실(transmission losses)은 각층 매질의 물리적인 성질과 밀접한 관계를 가진다. 그리고 단기간의 다중 반사(Short period multiples), 모드 전환(mode conversion)과 같은 인터페이스 효과로 인하여 진폭이 감쇠된다. 또한 매질 내에서의 마찰에 의한 발열 등과 같은 에너지 손실을 흡수(absorption)라 하며, 매질의 공극률이 좋은 경우에 크게 영향을 미친다(신성렬 등, 2011).

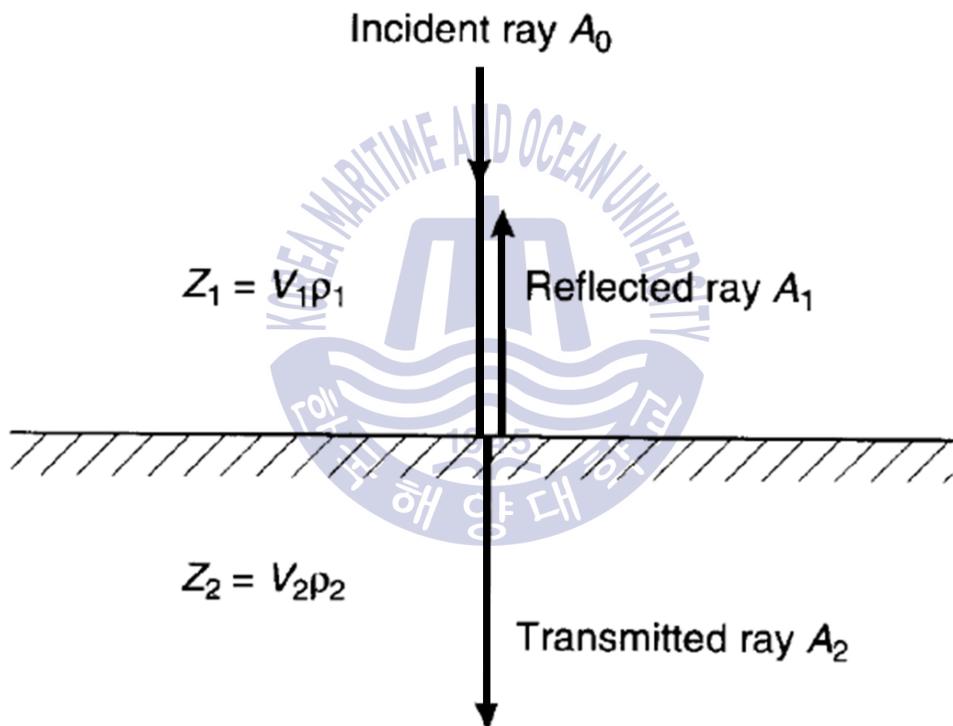


Fig. 2 Partitioning of energy of a normally incident ray with amplitude A_0 into reflected and transmitted rays with respective amplitude A_1 . Z_1 and Z_2 are the acoustic impedances of the two layers

탄성파의 감쇠는 에너지의 흡수, 고유감쇠, 반사, 굴절, 회절에 의해 나타나는 산란으로 발생한다(John, 1997; Kinsler, et al., 2000). 이와 같은 탄성파 감쇠를

나타내는 특성을 감쇠계수(attenuation coefficient, α)와 같이 나타낼 수 있으며, 기하학적 확산손실($1/r$)과 흡수손실($\exp(-\alpha r)$)을 조합하여 거리에 따른 진폭감쇠의 현상을 나타낼 수 있다. 그리고 감쇠계수는 단위거리당 해당하는 에너지의 손실률로 표현할 수 있고, 파장에 대한 손실률이라 할 수 있다. 따라서 주파수가 증가하면 증가할수록 감쇠계수가 증가하고, 고주파수에 비해 저주파수는 느리게 감쇠한다. 이는 주행거리가 증가함에 따라 진폭의 폭이 길어지는 현상과 일치하는 것으로 알 수 있다(John, 1997).



2.2 탄성과 Q-factor(Quality factor)

탄성과 투과손실(transmission losses, TL)은 기하학적 확산손실(geometrical loss)와 매질의 구성 물질 및 조직에 따라 달라지는 흡수(absorption), 산란(scattering) 등 이외의 기타 손실효과(losses)로 구분하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Kinsler, et al., 2000).

$$TL = TL(\text{geometrical losses}) + TL(\text{losses} = \text{absorption} + \text{scattering} + \text{etc}) \quad (1)$$

기하학적 손실 이외의 손실효과를 감쇠량으로 구분할 수 있으며, 특정주파수 대역에서의 감쇠량을 감쇠계수(attenuation coefficient)로 정의한다. 감쇠계수는 탐사 조건이나 해당 매질의 특성 등 외부 조건에 따라 값이 달라지기 때문에 실제로 일어나는 탄성과 감쇠만을 수치화하여 나타내기는 어렵다. 따라서 탄성과의 감쇠를 표현하기 위하여 무차원의 변수인 Q-factor, Q, Q⁻¹를 통하여 표현하고 감쇠계수와 반비례관계를 가진다. Q-factor가 크면 클수록 감쇠는 적게 일어나고, 작을수록 감쇠가 크게 일어나는 특성을 가지고 있다(이진우, 2014).

일반적으로 Q-factor를 산출하는 방법에는 다양한 방법이 존재한다. 시간영역에서는 Amplitude decay method(Peselnick & Zietiz, 1959), Rise-time method(Galdwin & Stacey, 1974), Pulse amplitude decay(Brzostowski & McMechan, 1992), Pulse broadening(Wright & Hoy, 1981) 등의 방법이 존재한다.

주파수 영역에서는 Spectral ratio(Hauge, 1981; Raikes & White 1984; Sams & Goldberg, 1990; White, 1992), Peak frequency Shift(Zhang & Ulrych 2002), Improved peak frequency shift(Hu, et al., 2013), Gabor-Morlet joint time frequency analysis(Singleton, et al., 2006)이 존재한다.

최근에는 순간주파수(Instantaneous frequency)를 이용한 Q-factor산출에 관한 연구가 진행되고 있다. Q-factor 산출에 대하여 시간영역, 주파수영역으로 나누어 Fig. 3과 같이 나타내었다.

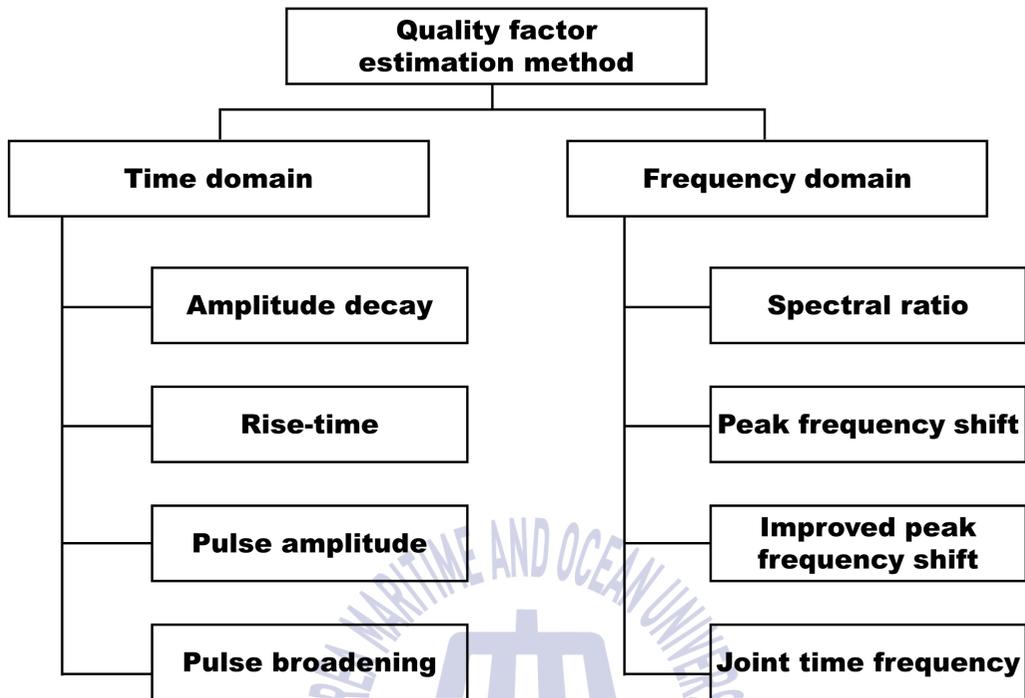
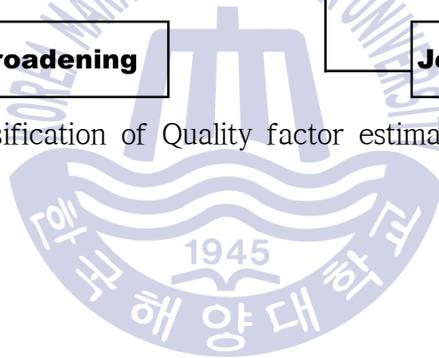


Fig. 3 Classification of Quality factor estimation method



감쇠계수는 탄성과 에너지의 사이클 당 마찰 에너지의 손실로 정의될 수 있다(Knopoff, 1964; Toksöz, et al., 1979; Sheriff & Glendart, 1995). 특정의 각 주파수 w 에서의 응력이 매질에 주기적으로 주어질 때, 무차원 단위의 내부 마찰을 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{Q(w)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (2)$$

식 (2)에서 E 는 매질에 저장되어 있는 최대 응력 에너지, 탄성매질 내에서 결함에 의해 발생하는 $-\Delta E$ 는 각 주기당 에너지의 손실이며, Q^{-1} 는 1주기 동안 감소된 에너지에 비례하고 Q 는 감쇠와 반비례 관계를 가지게 된다. 보다 일반적으로 (i)고정된 주파수에서 정상파의 일시적인 진폭의 감쇠나 (ii)고정된 주파수에서 공간적인 진폭의 감쇠 중 하나를 관찰한다면, 가장 일반적인 상황은 감쇠된 신호로 구성된 주파수 범위를 포함하는 것이고, 감쇠는 선형현상으로 나타나며 이에 대한 탄성과 진폭 신호는 고속 후리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)로 확인할 수 있다. (i)과 (ii) 각각에 대해 후리에 합성(Fourier synthesis)을 통해 실제 탄성과 신호에서의 정확한 감쇠 효과를 확인할 수 있다. 선형 응력-변형률 관계에서 (i)과 (ii)의 경우 진폭 A 는 \sqrt{E} 에 비례 관계를 가진다(이진우, 2014; Aki & Richards, 1980). 따라서

$$\frac{1}{Q(w)} = \frac{-\Delta A}{\pi A} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 감쇠에 의한 진폭 변동을 얻을 수 있으며, (i)의 경우는 $A = A(t)$ 라면, 초기 진폭이 $A = A_0$ 이라 주어지고, A 는 $\frac{2\pi}{w}, \frac{4\pi}{w}, \dots, \frac{2n\pi}{w}, \dots$ 만큼 $\frac{\pi}{Q}$ 동안 감소한다면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A(t) = A_0 \left(1 - \frac{\pi}{Q}\right)^n \left(t = \frac{2n\pi}{w}\right) \quad (4)$$

식 (4)는 $\exp(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n$ 을 이용하여 식 (5)와 같이 재정립할 수 있다.

$$A(t) = A_0 \left[1 - \frac{wt}{2Qn}\right]^n \rightarrow A_0 \exp\left[-\frac{wt}{2Q}\right] \quad (5)$$

지수함수 적으로 감소하는 값 $A(t)$ 로부터 식 (5)를 이용하여 시간에 따른 Q 의 값을 정의할 수 있다. 식 (5)는 탄성파의 자유 진동의 감쇠를 묘사할 때 사용되어지며, 이산 시간을 이용하여 결과를 얻을 수 있어야 하므로, (i)을 기반으로 한다. 그렇지 않은 경우, 거리 x 에 대하여 $A = A(x)$ 의 형태로 유도하는 것이 쉽기 때문에 입자 파동의 최고치는 다음의 거리 dx 에 따라 전개할 수 있고, 점진적으로 A 의 공간적인 감쇠를 확인할 수 있다. 최대 감쇠의 방향을 x 축으로 가정하였을 때, x 축이 파의 전파방향이다.

$\Delta A = \lambda \frac{dA}{dx}$ 일 때, $\lambda (\lambda = \frac{2\pi v}{w})$ 는 각속도 w 와 위상속도 v 에 관한 파장이다.

식 (3)으로부터 $\Delta A = \lambda \frac{dA}{dx}$ 와 $\lambda (\lambda = \frac{2\pi v}{w})$ 를 이용하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(x) = A_0 \exp\left[-\frac{wx}{2vQ}\right] \quad (6)$$

지수함수 적으로 감소하는 값 $A(x)$ 로부터, 식 (6)을 이용하여 공간적인 Q 의 값을 Fig. 4와 같은 형태로 정의할 수 있다.

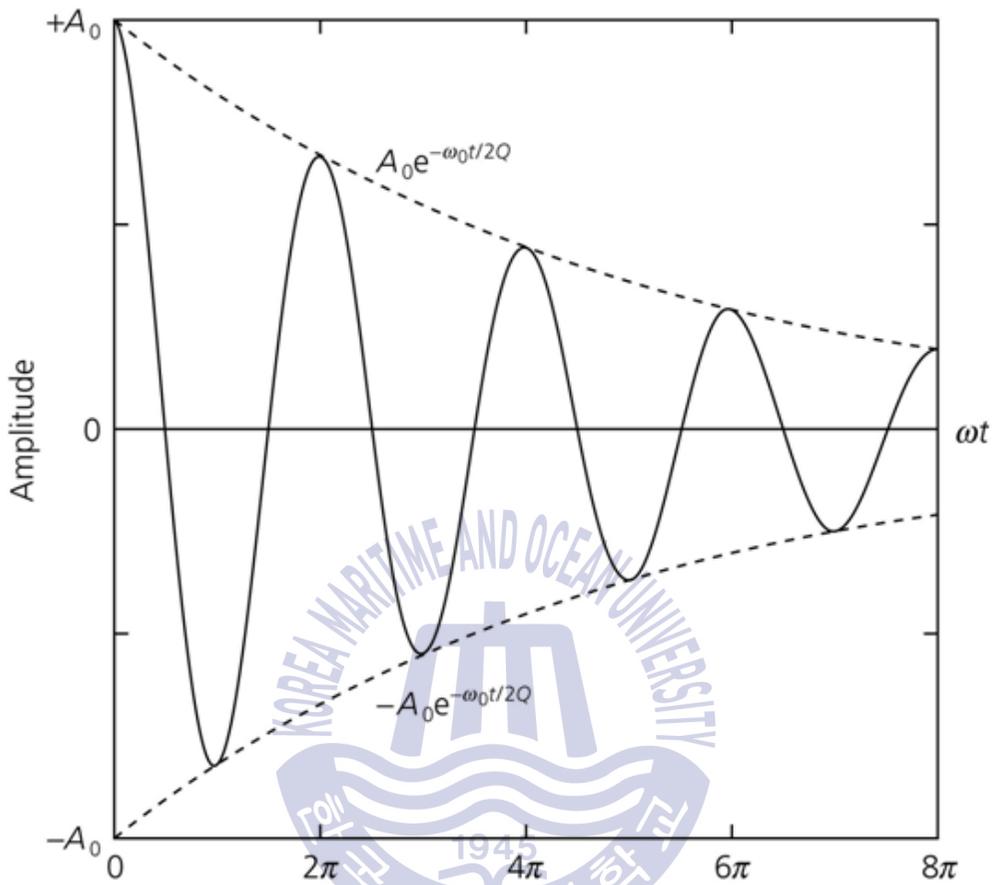


Fig. 4 Wave amplitude for a attenuated harmonic oscillator

2.3 Spectral ratio method(SRM)

Spectral ratio method를 이용하여 진폭감쇠 현상을 도출하기 위하여 뉴턴의 제2법칙($F=ma$)와 감쇠조화진동($F=-ku$)으로부터 고유감쇠가 발생하는 메커니즘으로 표현하여 식 (7)과 같이 표현할 수 있다. 이때의 k 는 스프링 상수, u 는 평형상태시의 변위이다.

$$F=ma=m\frac{d^2x}{dt^2}=-ku \quad (7)$$

감쇠가 일어나지 않는 경우 식 (8)과 같이 2계 미분방정식의 일반해 형태로 표현할 수 있으며,

$$m\frac{d^2u(t)}{dt^2}+ku(t)=0 \quad (8)$$

식 (8)을 식 (9)와 같이 무한 조화진동의 형태로 표현할 수 있다.

$$u(t)=Ae^{iw_0t}+Be^{-iw_0t} \quad (9)$$

식 (9)에서 매질의 입자가 진동을 할 때의 자연주파수(natural frequency)는 각속도 $w_0=(k/m)^{1/2}$ 이며, 반대로 감쇠가 발생하는 경우는 순간적인 입자가 운동과 반대방향인 복원력이 매질 내의 속도 $\frac{du(t)}{dt}$ 에 비례한다고 가정하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\frac{d^2u(t)}{dt^2}+\gamma m\frac{du(t)}{dt}+ku(t)=0 \quad (10)$$

식 (10)에서 γ 는 감쇠인자로서, Q-factor인 $Q=\frac{w_0}{\gamma}$ 로 정의할 수 있으며 복소지수함수의 실수부로 대체하면 다음과 같이 식 (11)과 식 (12)로 표현할 수 있다.

$$u(t) = A_0 e^{ipt} \quad (p \text{는 복소수}) \quad (11)$$

$$u(t) = A_0 e^{i(\omega_0 t + i b t)} = A_0 e^{-bt} e^{i\omega_0 t} = A_0 e^{-\omega_0 t / 2Q} \cos(\omega_0 t) \quad (12)$$

식 (12)에서 실수부는 감쇠, 허수부는 진동하고 Fig. 4와 같이 실수부는 포락선이나 전체 진폭의 감쇠를 나타낸다. 식 (12)에 상수인 파수(wave number, k)와 시간 t 를 대신하여 $(t - \frac{x}{v})$ 을 대입하여, $x > 0$ 인 위치의 운동을 표현하는 함수의 형태로 표현할 수 있다.

이때의 파수를 복소함수의 형태인 $k = k_n + ia$ 로 대입하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(x, t) = e^{i(\omega t - kx)} = e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - k_n x)} \quad (13)$$

이후 기하학적 확산손실 효과와 함께 나타내면 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_n(f) = G_n(f, x) e^{-\alpha_n x} e^{i(2\pi f t - k_n x)} \quad (14)$$

Spectral ratio method를 이용하여 Q-factor을 산출하기 위한 방법은 다음과 같이 이루어진다. 감쇠효과에 의한 진폭은 식 (15)와 식 (16)과 같이 표현되며

$$A_r(f) = G_r(f, x) e^{-\alpha_r x} e^{i(2\pi f t - k_r x)} \quad : \text{reference data} \quad (15)$$

$$A_s(f) = G_s(f, x) e^{-\alpha_s x} e^{i(2\pi f t - k_s x)} \quad : \text{sample data} \quad (16)$$

여기서 A 는 진폭, f 는 주파수, x 는 거리, $k(k = 2\pi f / v)$ 는 파수, v 는 위상 속도, $G(f, x)$ 는 기하학적 확산효과에 관한 인자, a 는 주파수에 따른 감쇠계수이다. 아래첨자 r 과 s 는 기준데이터와 산출이 필요한 비교데이터를 의미한다. 식 (15)와 식 (16)의 진폭의 비율로 표현하면 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_r}{A_s} = \frac{G_r}{G_s} e^{-(\alpha_r - \alpha_s)x} \quad (17)$$

이후 자연대수로그를 적용하면 식 (18)과 같이 나타낼 수 있고 주파수의 선형 함수인 감쇠계수는 식 (19)과 같이 1차식으로 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{A_r}{A_s}\right) = \ln\left(\frac{G_r}{G_s}\right) + (\alpha_s - \alpha_r)x \quad (18)$$

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (19)$$

이때 γ 는 감쇠계수와 관계를 가지는 상수로써, Q-factor와는 식 (20)과 같은 관계식을 가지게 된다.

$$Q = \frac{\pi}{\gamma v} \quad (20)$$

식 (18)과 식 (19)를 종합하여 정리하면 식 (23)과 같은 최종식을 얻을 수 있다.

$$\ln\left(\frac{A_r}{A_s}\right) = (\gamma_s - \gamma_r)xf + \ln\left(\frac{G_r}{G_s}\right) \quad (21)$$

G_r 과 G_s 는 기하학적 확산 계수로써 주파수의 영향을 받지만, $\ln\left(\frac{G_r}{G_s}\right)$ 는 기하학적 보정량으로써 상수로 남게 되어 독립적인 축척계수이다. 따라서 식 (21)은 식 (22)와 같이 1차함수의 형태로 볼 수 있다.

$$y = ax + b \quad (22)$$

기준데이터와 비교데이터의 진폭 스펙트럼을 구하여 그 비율에 대한 자연대수를 취한 값 $\ln\left(\frac{A_r}{A_s}\right)$ 와 주파수 f 와의 관계를 최소자승법에 의한 1차회귀방정

식을 구하고 해당하는 기울기 a 는 $(\gamma_s - \gamma_r)$ 의 값이 된다.

이를 탄성과 트레이스에 적용을 하여 Q-factor를 산출하는 과정의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. Q-factor에 영향을 받은 탄성과 트레이스는 식 (23)과 같이 표현 될 수 있다.

$$A(f,t) = A(f)e^{-\frac{\pi ft}{Q}} \quad (23)$$

식 (24)는 초기파형과 일정시간 t 를 전파한 후의 비를 나타낸 것이다. $A_1(f,t_2)$ 과 $A_2(f,t_1)$ 은 각각 $A_r(f)$ 과 $A_s(f)$ 를 뜻한다.

$$\frac{A_1(f,t_2)}{A_2(f,t_1)} = \frac{A(f)e^{-\frac{\pi ft_2}{Q}}}{A(f)e^{-\frac{\pi ft_1}{Q}}} \quad (24)$$

이후 식 (24)에 자연대수를 적용하여 나타내면 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \left[\frac{A(f,t_2)}{A(f,t_1)} \right] = -\frac{\pi(t_2 - t_1)}{Q} f \quad (25)$$

식 (25)의 $\ln \left[\frac{A(f,t_2)}{A(f,t_1)} \right]$ 에 대하여 최소자승법에 의한 1차회귀방정식을 구한 뒤 기울기 a 값을 구한다. 이후 식 (26)에 적용하여 최종 Q-factor 값을 산출한다.

$$Q = \frac{-\pi(t_2 - t_1)}{p} \quad (26)$$

본 연구에서 사용되어진 Spectral ratio method는 간략하게 SRM으로 표현하였다.

2.4 Peak frequency shift(PFS)

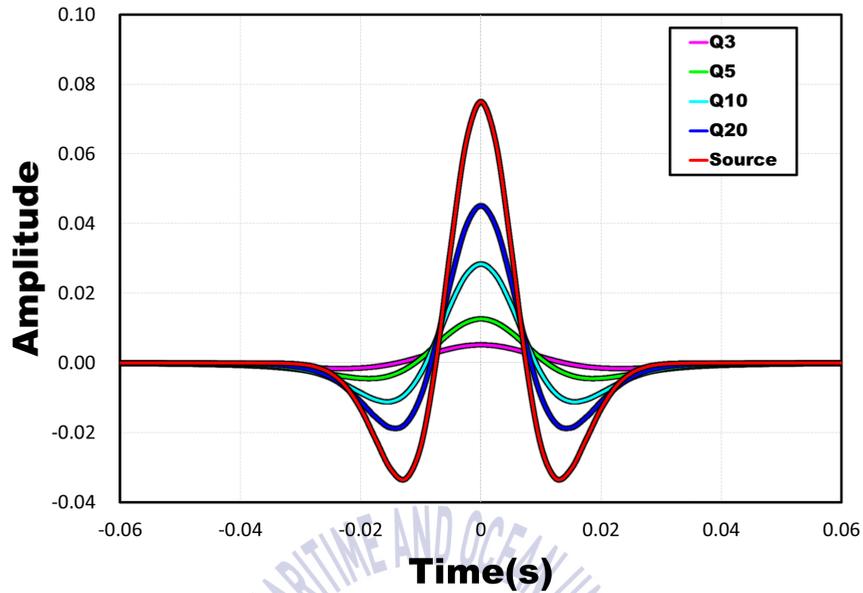
탄성파의 진폭스펙트럼은 흡수 이외의 많은 요인에 의하여 영향을 받는다. 이러한 요소들은 기하학적 확산손실, 반사 및 투과효과, 진폭 복구에 의해 일어나며 탄성파 자료처리를 통하여 트레이스 진폭의 균형을 맞춰줄 수 있다.

Q-factor에 의하여 웨이블릿 스펙트럼의 형상에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있으며, 식 (27)을 통하여 계산할 수 있다(Ricker, 1953).

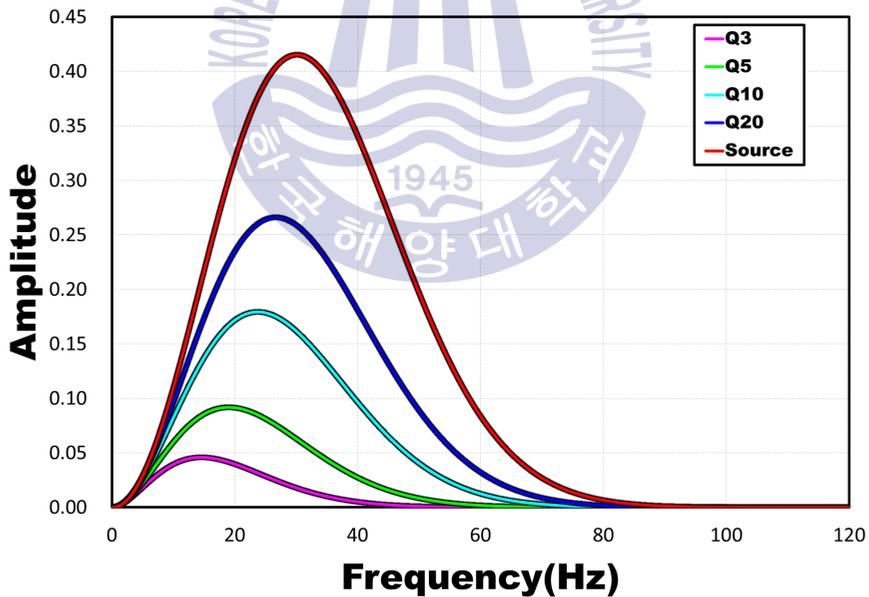
$$A(f,t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_m^3} e^{-\frac{f^2}{f_m^2}} e^{-\frac{\pi ft}{Q}} \quad (27)$$

여기서 f_m 은 사용된 음원의 최대 진폭을 가지는 주파수, f 는 사용된 주파수이며, Q 는 시간 t 에 해당하는 Q-factor이다.

Fig. 5는 Q-factor 값에 따라 변경되는 시간영역에서의 신호와 진폭 스펙트럼을 나타낸 것이다. 사용된 최대 진폭을 가지는 주파수(dominant frequency)는 30Hz로 설정하였으며, 시간에 따른 진폭의 크기와 설정된 Q-factor 값의 설정에 따라 주파수 성분이 감소하는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 The time domain expressions (a) and frequency spectra (b) of a Ricker wavelet with 30Hz dominant frequency at time 0(red) and time $t=0.1s$ in different attenuating mediums with different Q values

Zhang and Ulrych(2002)는 반사되어 돌아오는 탄성파의 주파수 변화량을 통하여 Q-factor 산출하는 법을 개발하였다. 진폭 스펙트럼을 나타내는 식은 다음과 같이 식 (28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(f,t) = M(t)B(f)e^{-\frac{\pi ft}{Q}} \quad (28)$$

여기서 $M(t)$ 는 주파수 및 흡수의 독립적 진폭인자이다. 최대 진폭을 가지는 주파수 f_p 는 식 (29)와 같이 스펙트럼의 미분식으로 정의 될 수 있다.

$$\frac{\partial B(f,t)}{\partial f} = M(t)\frac{\partial B(f)}{\partial f}e^{-\frac{\pi ft}{Q}} + M(t)B(f)e^{-\frac{\pi ft}{Q}}\left(-\frac{\pi t}{Q}\right) = 0 \quad (29)$$

다음과 같은 Ricker wavelet을 나타내는 기본 식 (30)을 이용하여 식 (29)에 대입하여 나타내면 식 (31)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_m^2} e^{-\frac{f^2}{f_m^2}} \quad (30)$$

$$\frac{\partial B(f)}{\partial f} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2f}{f_m^2} \right) e^{-\frac{f^2}{f_m^2}} + \frac{2}{f^2} \left(\frac{f^2}{f_m^2} \right) e^{-\frac{f^2}{f_m^2}} \left(\frac{-2f}{f_m^2} \right) \quad (31)$$

이후 식 (31)을 식 (29)에 대입하여 얻어진 시간 t 에 대한 최대 진폭을 가지는 f_p 의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_p = f_m^2 \left[\sqrt{\left(\frac{\pi t}{4Q} \right)^2 + \left(\frac{1}{f_m} \right)^2} - \frac{\pi t}{4Q} \right] \quad (32)$$

식 (32)를 Q 에 의한 관계식으로 나타내면 식 (33)과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \frac{\pi t f_p f_m^2}{2(f_m^2 - f_p^2)} \quad (33)$$

Peak frequency shift 방법을 이용하여 Q-factor를 산출할 때 사용된 음원의 최대 진폭을 가지는 주파수 정보 f_m 이 존재하지 않을 경우 식 (34)를 통하여서 간단하게 구할 수 있다.

$$f_m = \sqrt{\frac{f_{p1}f_{p2}(t_2f_{p1} - t_1f_{p2})}{t_2f_{p2} - t_1f_{p1}}} \quad (34)$$

여기서, t_1, t_2, f_{p1}, f_{p2} 는 반사된 신호에서의 두 개의 다른 위치에 대한 시간 정보와 주파수 정보이며 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

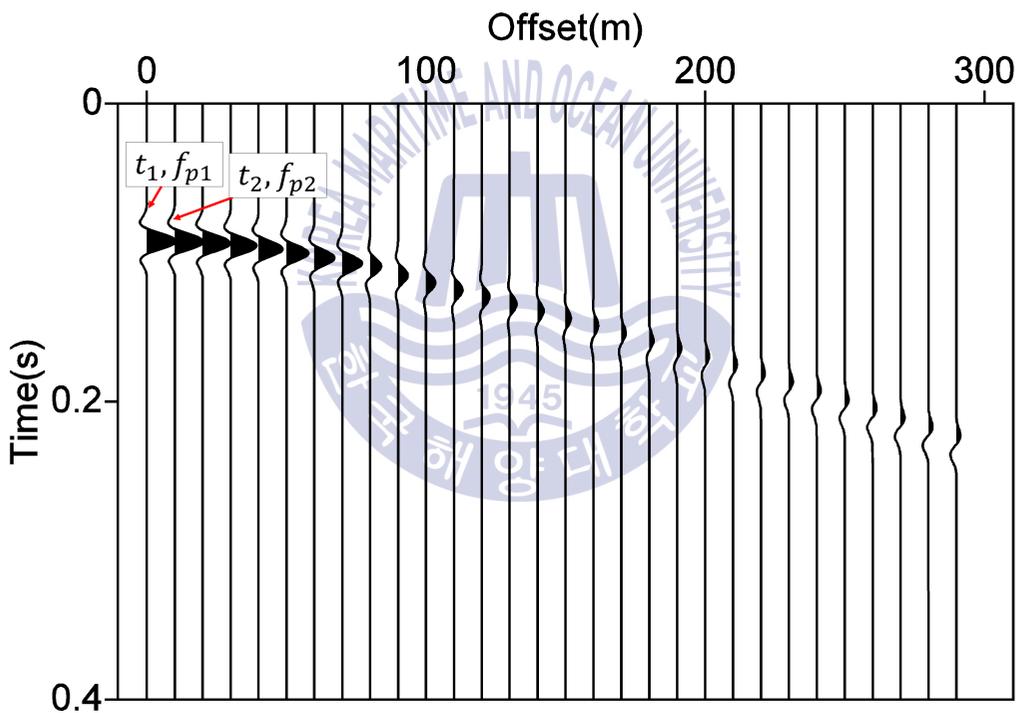


Fig. 6 The peak frequencies of a reflection at two different time location

수평 2층 구조의 경우 Q_1, Q_2, t_1, t_2 는 각각의 층에 해당하는 정보를 이용하여 식 (35)를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(f,t) = A(t)B(f)e^{-\frac{\pi ft_1}{Q_1}}e^{-\frac{\pi ft_2}{Q_2}} \quad (35)$$

식 (35)에서 $B(f,t)$ 와 연관된 f_p 로부터 Q_2 는 식 (28)부터 식 (33)의 과정을 통하여서 추정할 수 있다. 만약, Q_1 과 첫 번째 층의 f_p 를 알 경우 Q_2 는 다음과 같은 식을 통하여서 산출이 가능하다.

$$Q_2 = \frac{\pi t_2 Q_1}{\alpha Q_1 - \pi t_1} \quad (36)$$

여기서 α 는 식 (39)과 같이 나타낼 수 있다. 이는 이후 여러 개의 층이 존재할 경우 Q-factor를 산출할 때 필요하다.

$$\alpha = \frac{2f_m^2 - 2f_p^2}{f_p f_m^2} \quad (37)$$

여러 개의 층이 존재할 경우 식 (28)을 이용하여 식 (38)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(f,t) = A(t)B(f)\exp\left(\sum_{i=1}^N -\frac{\pi f \Delta t_i}{Q_i}\right) \quad (38)$$

여기서 Q_i 와 Δt_i 는 i 번째 층에서의 Q-factor와 주시정보를 각각 나타낸다. 속도 추정에 사용되는 방법에 따라, 직선으로 가정하고 특정 거리에서 반사면의 층 도달시간을 다음과 같이 계산한다.

$$\sum_{i=1}^N \Delta t_i = t_N \quad (39)$$

식 (39)는 다음과 같이 식 (40)으로 새롭게 정의할 수 있다.

$$\Delta t_i = \frac{t_N}{t_0(N)} [t_0(i) - t_0(t-1)] \quad (40)$$

$t_0(N)$ 은 N 번째 반사면의 제로-오프셋 주시정보이고 Q_N 은 N 번째 층에 대한 Q-factor 값이고, $t_0(i)$ 는 N 번째 반사면에서의 제로-오프셋 주시정보이다.

또한, 식 (38)의 진폭 감쇠 연산자는 다음과 같이 두 가지 요소로 분할 할 수 있다.

$$B(f,t) = A(t)B(f)\exp\left(\sum_{i=1}^{N-1} \frac{-\pi f \Delta t_i}{Q_i}\right)\exp\left(\frac{-\pi f \Delta t_N}{Q_n}\right) \quad (41)$$

다음 식 (44)를 통하여서 N 번째 층에 해당하는 Q-factor 값을 산출할 수 있다.

$$Q_N = \frac{\pi \Delta t_N}{\alpha - \beta} \quad (42)$$

여기서 β 는 $\beta = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\pi \Delta t_i}{Q}$ 이다.

본 연구에서 사용된 Peak frequency shift 방법은 간략하게 PFS라고 표현하였다.

제 3 장 탄성파 감쇠 실험 및 적용

3.1 탄성파 감쇠 수치모형실험

3.1.1 탄성파 감쇠 수치모형실험 구성

본 연구에서는 수치모형실험을 파선추적 알고리즘(ray-tracing algorithm)을 기반으로 한 탄성파 모델링프로그램인 NORSAR-2D를 사용하였다. 파선추적 알고리즘은 제작된 속도 모델에서 직접 지정한 위치에 대한 음원과 수신기에 대하여 도달하는 파의 경로 및 도달 시간을 스넬의 법칙(Snell's law)이나 또는 페르마의 원리(Fermat's principle)를 이용하여 결정하는 방식으로, 층서구조를 주행하는 탄성파 전파 과정을 계산하기 위한 알고리즘이다. NORSAR-2D 프로그램에서 구현되는 탄성파의 이론적 배경은 기하학적 파(geometrical rays)인 반사파와 투과파는 각각의 층마다 존재하는 경계면에서 발생하는 반사와 투과의 기하학적인 법칙을 따르며, 층간의 교차지점에서 발생되어지는 굴절파는 Keller의 법칙을 따른다. 기하학적 파선추적은 Fig. 7(a)에 나타낸 운동학적 파선추적(kinematic ray tracing)과 Fig. 7(b)에 나타낸 역학적 파선추적(dynamic ray tracing) 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저 첫 번째로 운동학적 파선추적의 방식은 파선의 주행시간과 파선경로의 위치에 따라 계산하고, 모델 내에서의 탄성파 속도만을 필요로 한다. 두 번째로 역학적 파선추적의 경우 파선의 기하학적 확장 요소, 파면의 곡률, 진폭의 계수에 따라 파동장의 역학적 요소를 계산하게 된다. 또한 지층의 속도 뿐 만 아니라 밀도, P파와 S파의 Q-factor 등을 입력하여 수치모델로 구현할 수 있고, 실제 탄성파의 운동역학적 거동과 관련된 반사 계수, 투과계수, 기하학적 확산효과, 비탄성 감쇠 등에 따라 탄성파가 지층을 주행하면서 발생하는 진폭의 변화를 구현 할 수 있다(이진우, 2014).

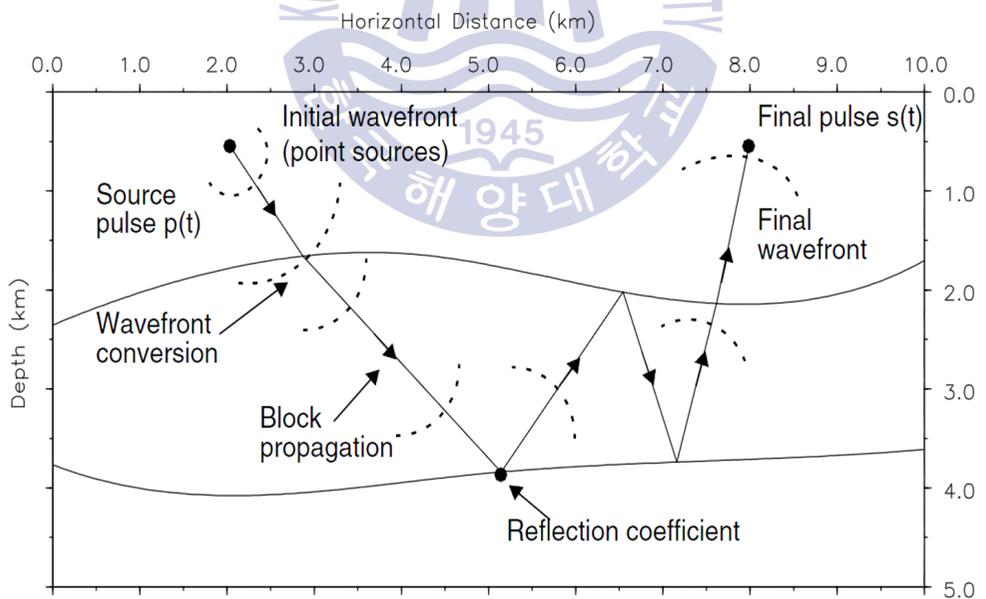
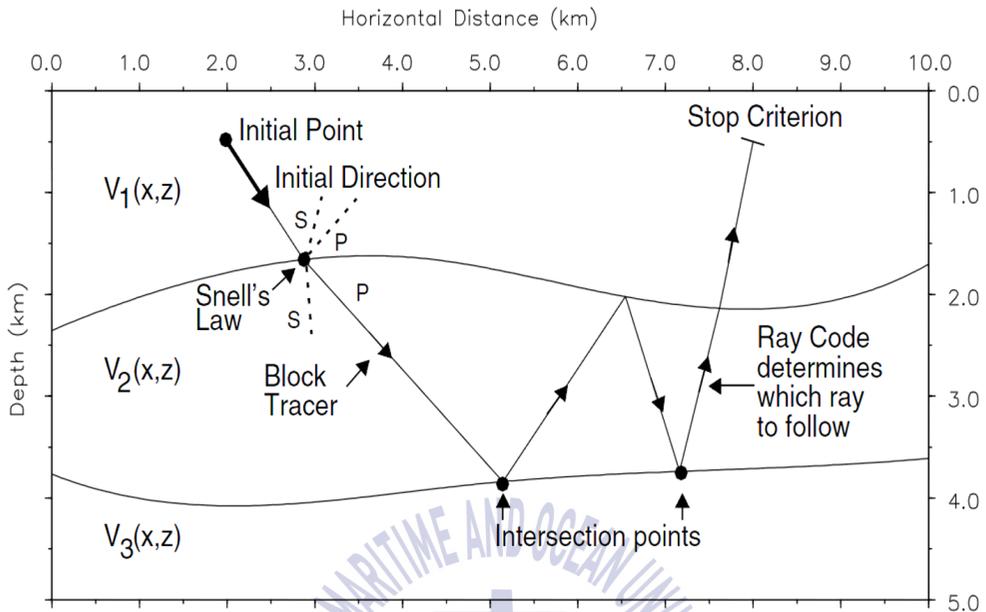


Fig. 7 Geometrical ray tracing (a)elements of kinematic ray tracing and (b)elements of dynamic ray tracing

3.1.2 탄성과 감쇠 수치모형실험 방법

본 실험에서는 5층 수평모델에 대하여 음원-수진기 간격이 0m인 탐사와 음원-수진기의 간격이 20m로 설정한 탐사를 통해 음원의 중심 주파수와 탄성과 P파의 지층간 감쇠 영향에 대한 수치모형실험을 수행하였다. 수치모형실험을 진행할 때에 기하학적 확산손실 및 추가적인 감쇠의 영향을 부여하고, 실제 현장과 같은 확장된 형태로 적용하여 Q-factor의 산출이 가능한지 확인하였다. 수치모형실험에 사용된 음원-수진기의 간격이 0m일 때와 20m일 때의 탐사변수는 Table 1과 Table 2에 나타내었으며 모식도는 Fig. 8과 같다. 수치모형실험에 사용된 모델은 심도가 깊어짐에 따라 Q-factor의 값이 증가하는 모델, Q-factor의 값이 감소하는 모델, Q-factor의 급격한 변화가 있는 총 3가지의 모델을 사용하였다.

본 실험에 사용된 탐사 변수는 중심주파수 50Hz인 Ricker 파형을 사용하였으며 취득된 데이터로 SRM과 PFS 방법을 이용하여 Q-factor를 산출하였다.

이후 탄성과 자료처리 프로그램인 SeismicUnix(SU)를 이용하여 무작위 잡음을 생성한 뒤 각각의 방식을 적용하여 최종 Q-factor를 산출한 뒤 비교분석을 실시하였다. 무작위 잡음의 추가 기준은 육안으로 탄성과 트레이스에 대하여 초동시간을 선택할 수 있을 정도로 추가하였다.

Table 1 Seismic survey parameter for offset 0m

Parameter	Value
Number of sample	1001
Sampling interval(s)	0.001
Shot location(X,Z)	250, 0
Receiver location(X,Z)	250,0
Source wavelet	Ricker wavelet
Central frequency	50Hz

Table 2 Seismic survey parameter for offset 20m

Parameter	Value
Number of sample	1001
Sampling interval(s)	0.001
Shot location(X,Z)	700,0
Receiver location(X,Z)	680,0
offset(m)	20
Source wavelet	Ricker wavelet
Central frequency(Hz)	50

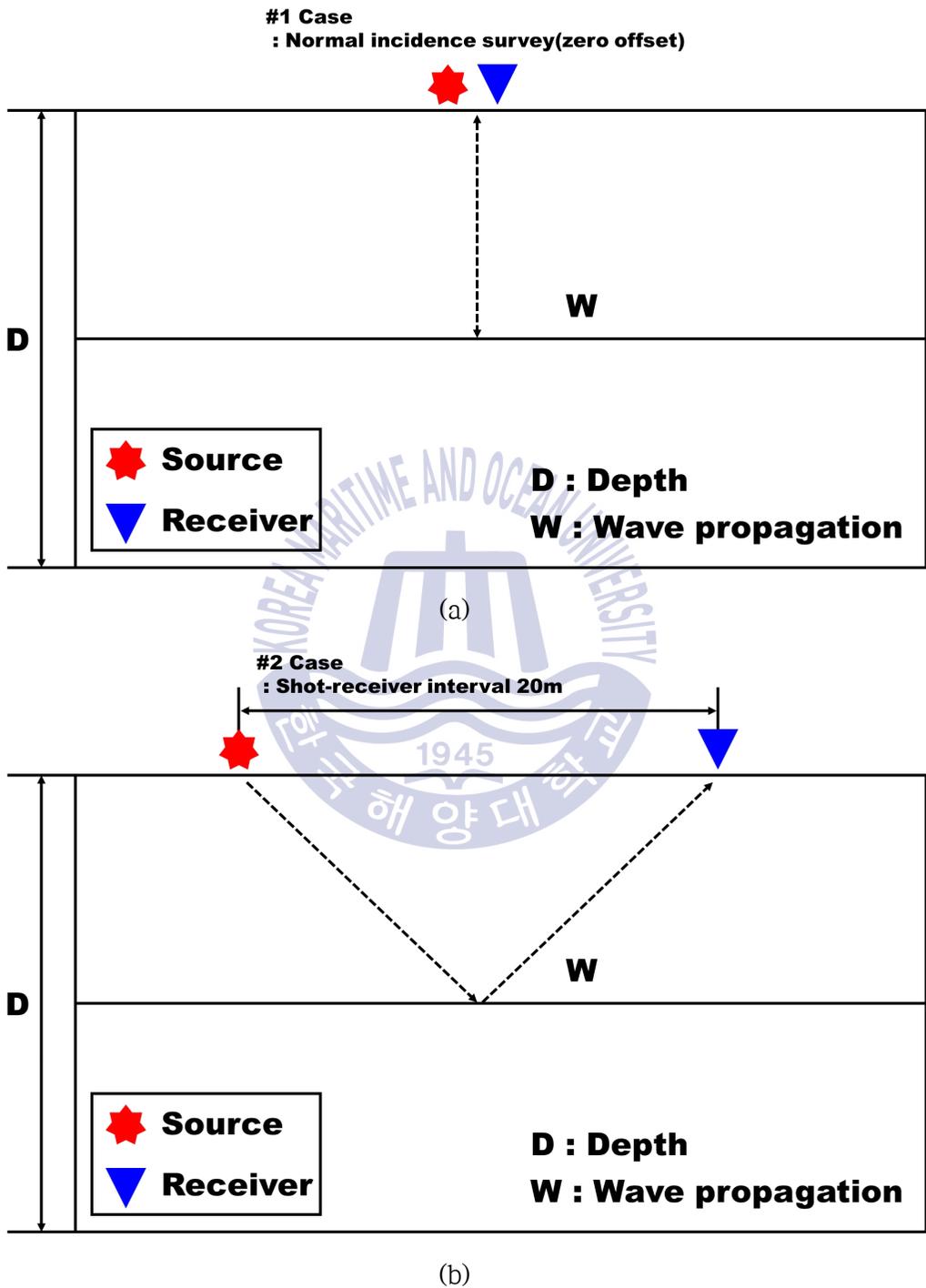


Fig. 8 A schematic diagram of survey type (a)offset 0m (b)offset 20m

3.1.3 탄성과 감쇠 수치모형실험 결과

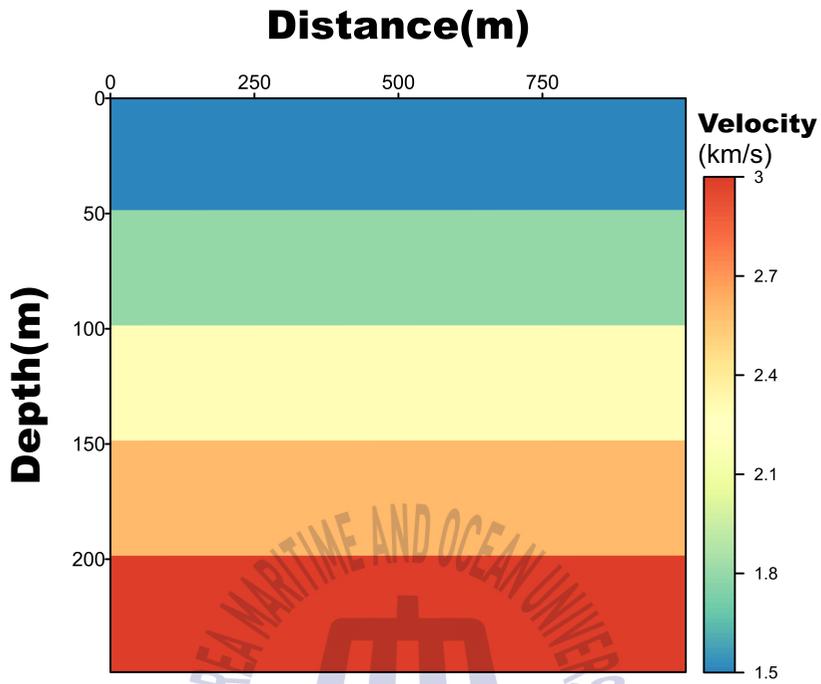
3.1.3.1 심도에 따른 Q-factor 증가 모델

3.1.3.1.1 무작위 잡음 미포함

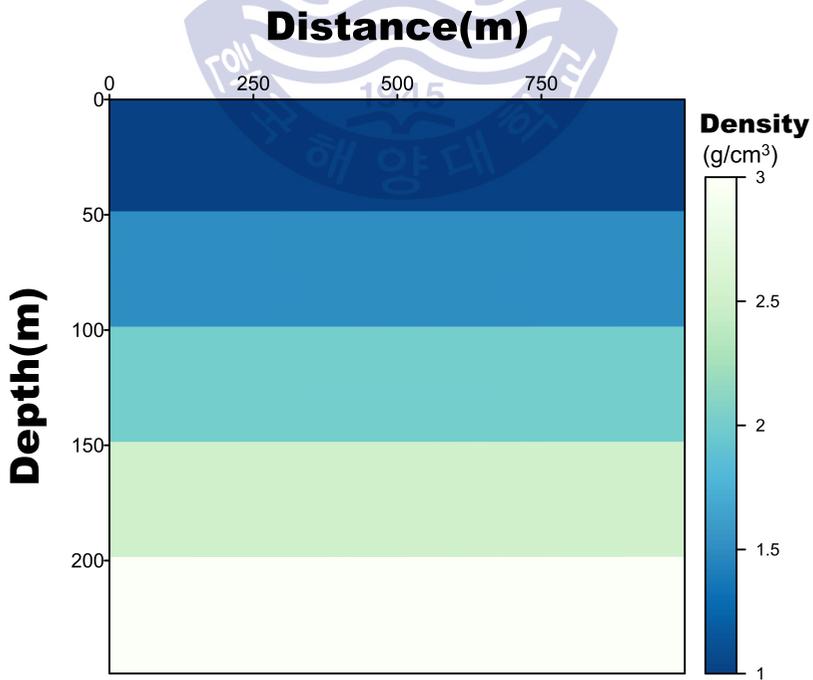
지층 심도가 깊어짐에 따라 Q-factor의 값이 증가하는 모델로 구성하였다. 지층에 대한 정보는 Fig. 9와 Table 3과 같이 나타내었으며, 음원-수진기 간격 0m와 20m 일 때 얻어진 데이터는 Fig. 10에 각각 나타내었다. SRM과 PFS의 방법을 이용하여 산출된 Q-factor는 Table 4와 Table 5에 정리하여 나타내었다. 음원과 수진기의 거리가 있을 경우 생기는 직접파(direct wave)는 제거하고 Q-factor를 산출하였다. 직접파가 제거됨에 따라 SRM을 통한 Q-factor산출의 경우 1층에 대한 산출이 불가능하다. Fig. 11(a)과 Fig. 12(a)는 2층과 3층, Fig. 11(b)와 Fig. 12(b)는 3층 4층, Fig. 11(c)과 Fig. 12(c)는 4층과 5층의 진폭 스펙트럼에 대하여 식 (28)을 적용하여 최소자승법에 의한 주파수 변화에 따른 $\ln(A_r/A_s)$ 의 관계곡선과 사용된 중심주파수 50Hz를 중심으로 선형관계를 보이는 부분에서 1차회귀방정식을 구한 결과이며, 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 3 A schematic of layered No.1 model with physical properties

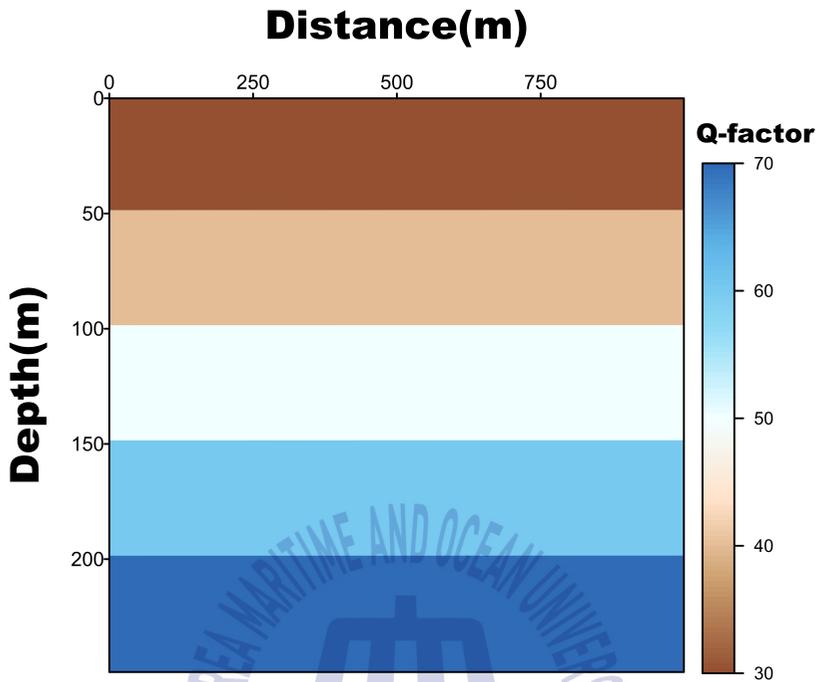
	P-wave(km/s)	Density(g/cm ³)	Q-factor
1층	1.5	1.0	30
2층	1.8	1.5	40
3층	2.3	2.0	50
4층	2.6	2.5	60
5층	3.0	3.0	70



(a)

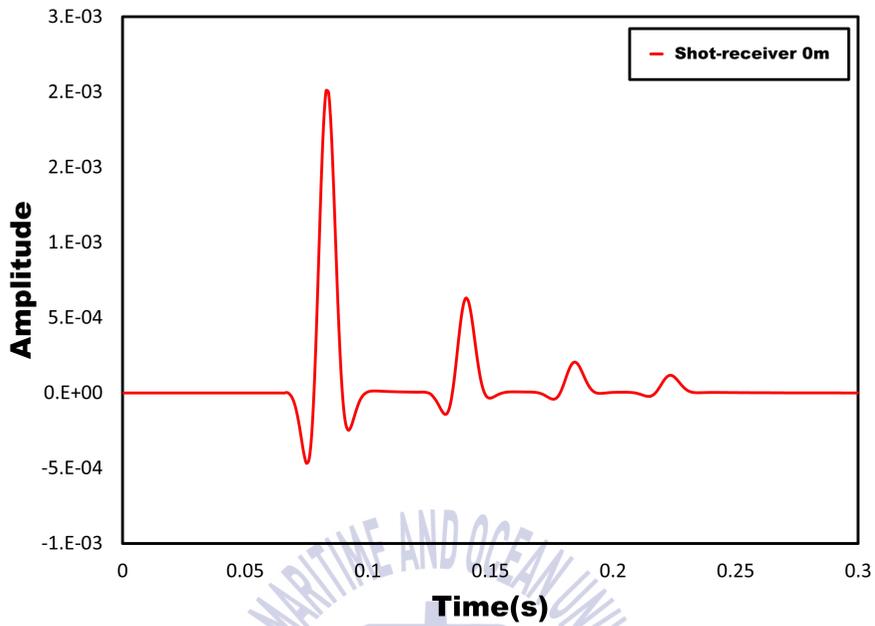


(b)

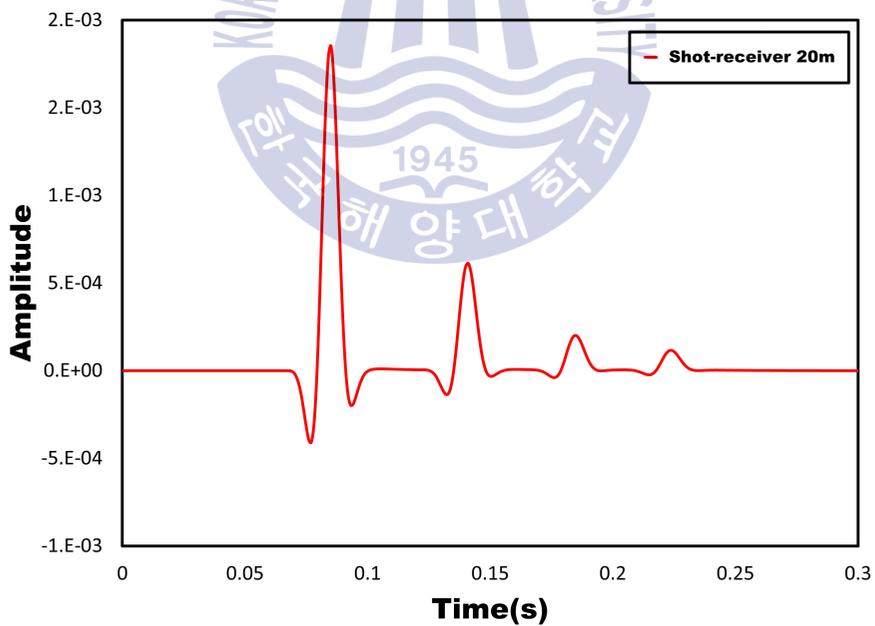


(c)

Fig. 9 A schematic of layered No.1 model with physical properties, (a)P-wave velocity, (b)density and (c)Q-factor value

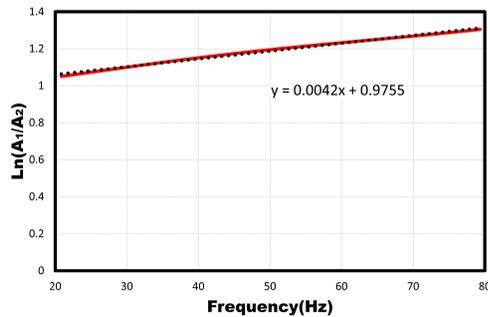


(a)

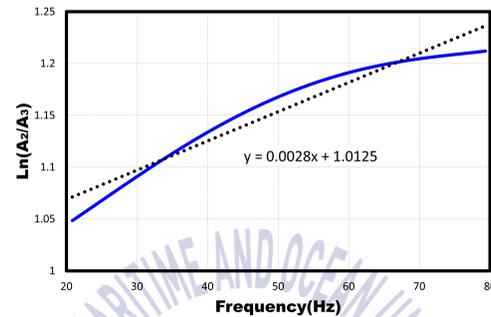


(b)

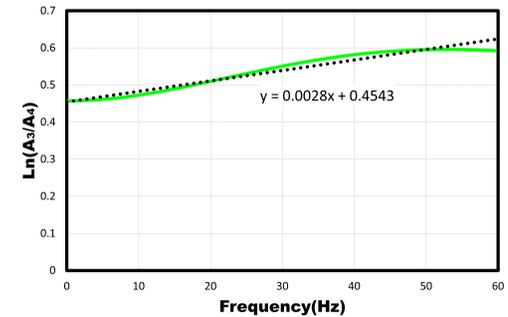
Fig. 10 Time domain waveform amplitude of resulting from No.1 model
 (a)offset 0m (b)offset 20m



(a)



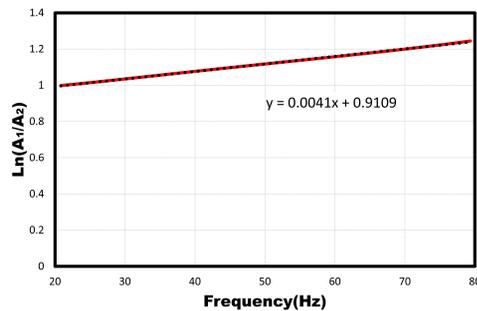
(b)



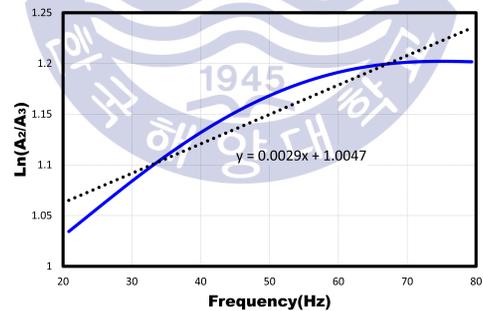
(c)

Fig. 11 The spectral ratio between layers and linear regression analysis for offset 0m

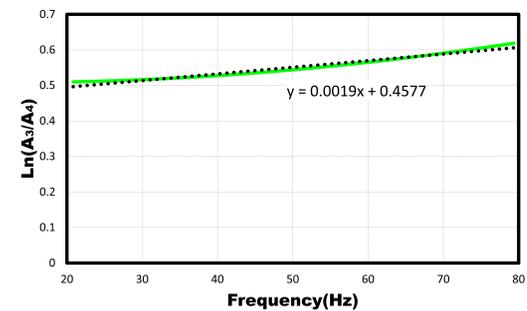
(a) 1st layer and 2nd layer, (b) 2nd layer and 3rd layer, and (c) 3rd layer and 4th layer



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 The spectral ratio between layers and linear regression analysis for offset 20m

(a) 1st layer and 2nd layer, (b) 2nd layer and 3rd layer, and (c) 3rd layer and 4th layer

Table 4 Experimental result of Q-factor for No. 1 model in case of offset 0m and offset 20m by SRM

	offset 0m			offset 20m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	-	30	-	-	30	-
2층	0.0042	40	42.95	0.0042	40	43.30
3층	0.0028	50	50.67	0.0053	50	47.56
4층	0.0029	60	44.52	-0.0066	60	67.36
5층	-	70	-	-	70	-

SRM으로 산출된 Q-factor를 살펴보면 설정된 Q-factor 값과 일치하는 경향을 나타내고 있다. 이후 Fig. 10에 나타난 신호에 대하여 식 (34)를 통하여 최대 진폭을 가지는 주파수를 계산할 수 있으며, 이후 과정을 통하여서 구간별 Q-factor를 산출한다.

정밀한 주파수 정보를 파악하기 위해 wavelet 변환을 수행하였다. Wavelet 변환은 시간-주파수를 동시에 파악하는 분석방법으로서 수중음향 신호처리, 비파괴 검사, 레이더 신호 및 음성 신호처리, 영상자료처리, 자료 압축 등 여러 분야에서 활용되고 있으며(장영수 등, 1999), 해양 탄성파탐사분야에도 적용되고 있는 신호처리 기법이다(Tobback, et al., 1996). 본 연구에서는 wavelet 변환방법 중 단시간 푸리에 변환법(Short Time Fourier Transform; STFT)을 이용하였다. 이는 신호 전체에 대한 푸리에 변환이 시간변화에 대응한 주파수변화를 나타내지 못하는 단점을 보완하여 짧은 간격의 시간 즉, 시간과 주파수영역에서 동시에 존재하는 창함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법이며 Fig. 13은 시간-주파수 평면상에 주파수 성분의 에너지 분포를 나타낸 것이다. 첫 번째 반사이벤트 이후의 신호는 진폭의 값이 상대적으로 작고 감쇠의 영향 때문에 주파수 성분의 에너지 분포는 자세히 나타나지 않는다. 첫 번째 이벤트를 제거한 뒤 나타난 주파수 성분의 에너지 분포는 Fig. 14와 같다.

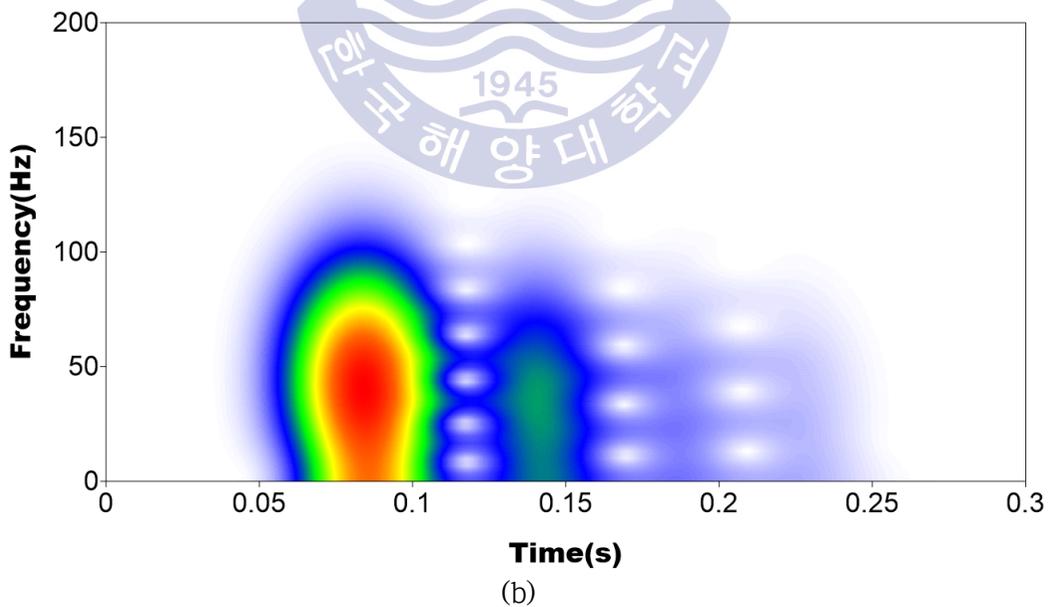
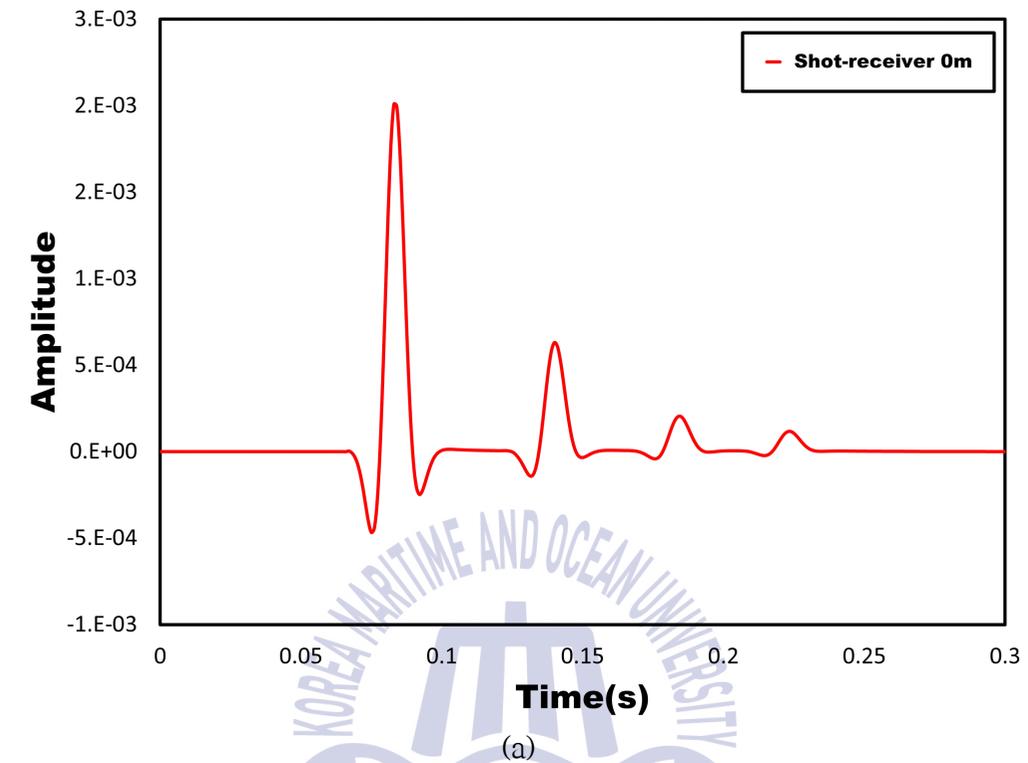


Fig. 13 Q-factor estimation using PFS

(a)time domain signal (b)time-frequency spectrogram from offset 0m

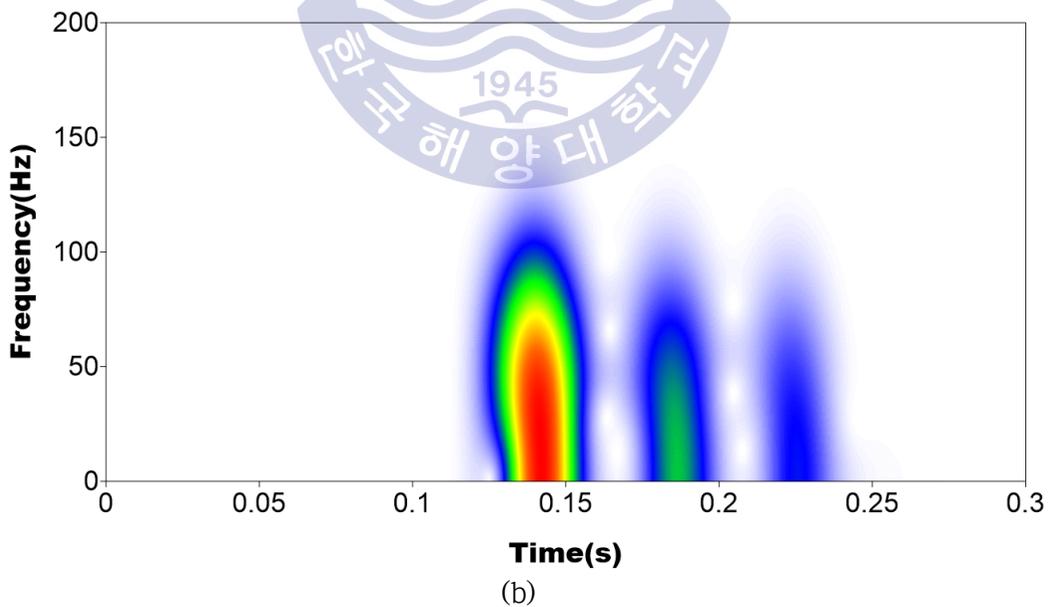
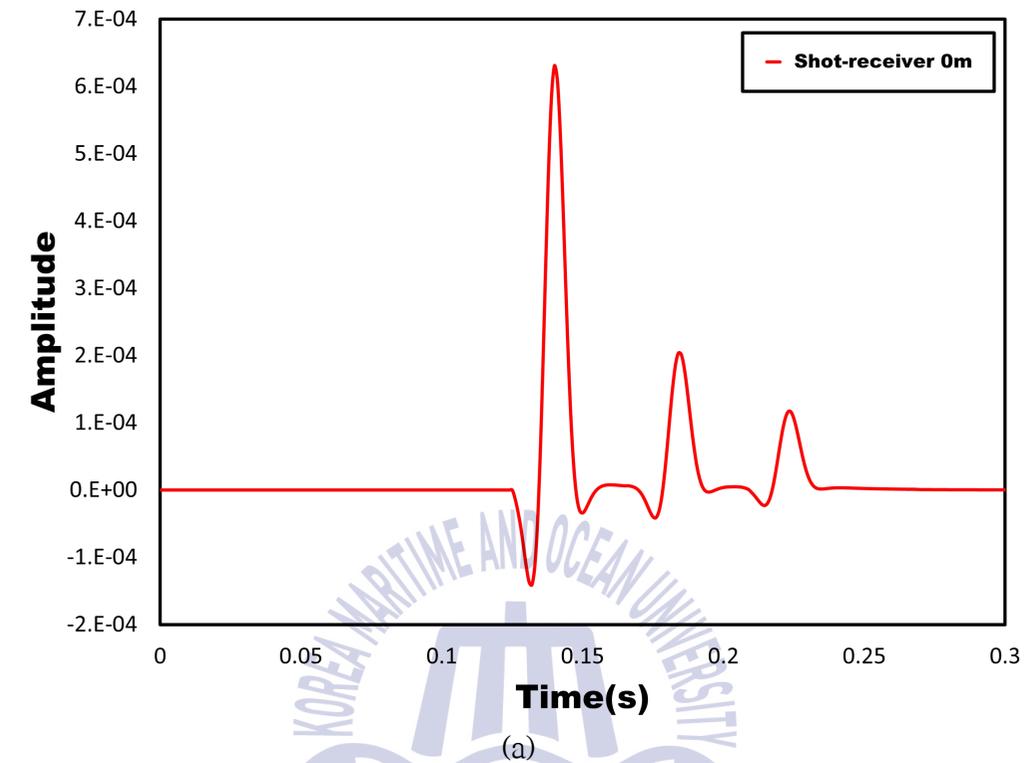


Fig. 14 Q-factor estimation using PFS 1st event exclude
 (a)time domain signal (b)time-frequency spectrogram from offset 0m

시간-주파수 분석을 통하여 얻어진 주파수 정보를 바탕으로 식 (42)에 적용하여 각 층별 Q-factor를 산출하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Experimental result of Q-factor for No. 1 model in case of offset 0m and offset 20m by PFS

	offset 0m		offset 20m	
	theoretical Q	calculated Q	theoretical Q	calculated Q
1층	30	-	30	-
2층	40	42.66	40	41.18
3층	50	52.00	50	52.76
4층	60	63.41	60	57.79
5층	70	-	70	-

PFS 방법을 이용하여 Q-factor 산출 결과 SRM보다 정확한 결과 값을 얻을 수 있었다. SRM과 PFS 방법을 통해 얻어진 결과는 Fig. 15와 같이 나타내었다.

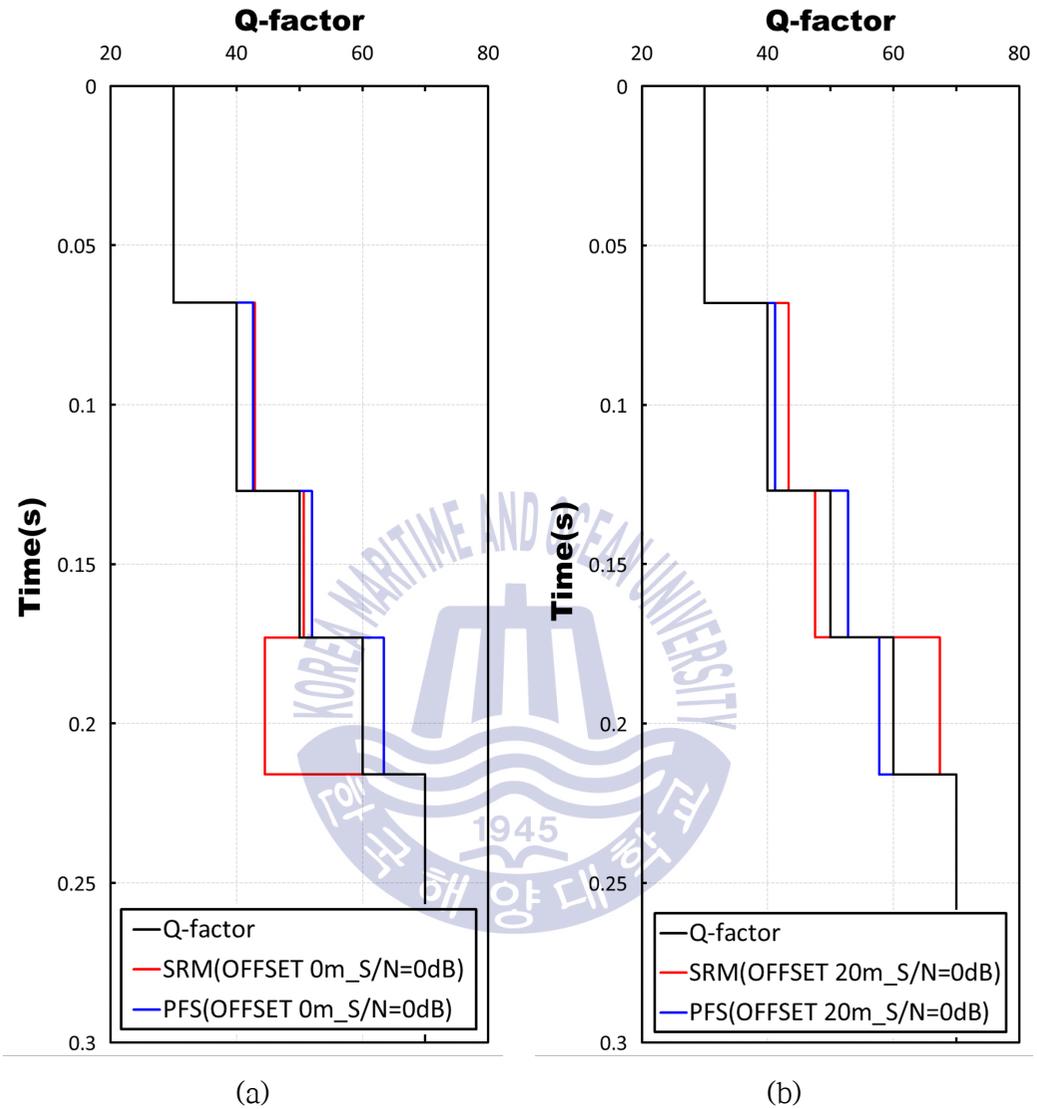
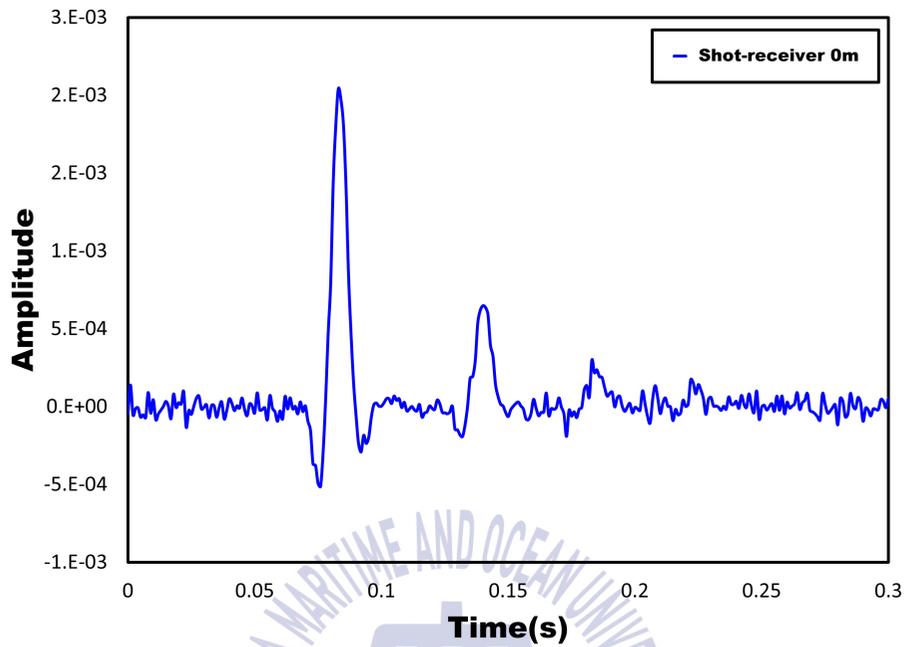


Fig. 15 Comparison between SRM and PFS for synthetic data No. 1
 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation
 result of offset 20m

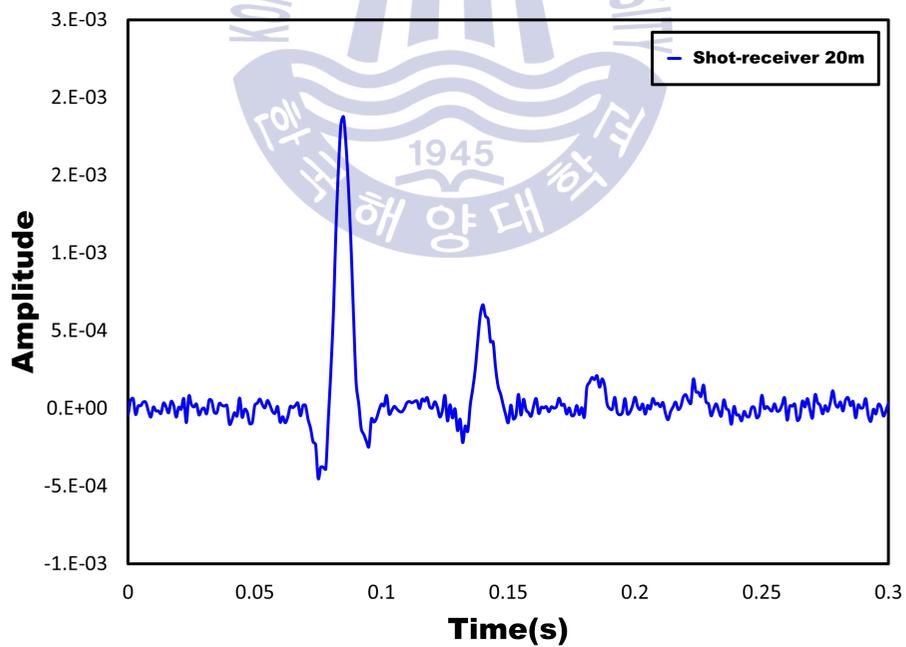
3.1.3.1.2 무작위 잡음 포함(S/N = 30dB)

동일한 모델에서 취득된 모델링 데이터에 탄성과 자료처리 프로그램 SeismicUnix(SU)를 이용하여 무작위 잡음을 추가하였다. 신호대잡음비(S/N)의 값이 크면 클수록 영향이 적으며 값이 작을수록 무작위 잡음이 크게 작용한다. 무작위 잡음을 추가한 탄성과 트레이스 자료는 Fig. 16과 같으며, 동일한 방법으로 Q-factor를 산출하였다. Table 6과 Table 7은 SRM과 PFS 방법을 이용한 Q-factor의 산출 결과를 나타내었다.





(a)



(b)

Fig. 16 Time domain waveform amplitude add noise S/N=30dB of resulting from No.1 model (a)offset 0m (b)offset 20m

Table 6 Experimental result of Q-factor for No. 1 model add noise
S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by SRM

	offset 0m			offset 20m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	-	30	-	-	30	-
2층	0.0042	40	56.10	0.0029	40	52.44
3층	0.0053	50	32.48	0.0077	50	36.03
4층	0.0066	60	15.45	0.0049	60	12.65
5층	-	70	-	-	70	-

Table 7 Experimental result of Q-factor for No. 1 model add noise
S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by PFS

	offset 0m		offset 20m	
	theoretical Q	calculated Q	theoretical Q	calculated Q
1층	30	-	30	-
2층	40	35.17	40	32.24
3층	50	43.39	50	40.57
4층	60	48.22	60	54.23
5층	70	-	70	-

Q-factor 산출 결과 PFS 방법이 SRM보다 정확한 결과를 산출한 것으로 나타났으며, 이는 무작위 잡음으로 인한 주파수 정보의 변경으로 인하여 오차가 생기는 것으로 판단된다. 산출 결과는 Fig. 17과 같이 나타내었다.

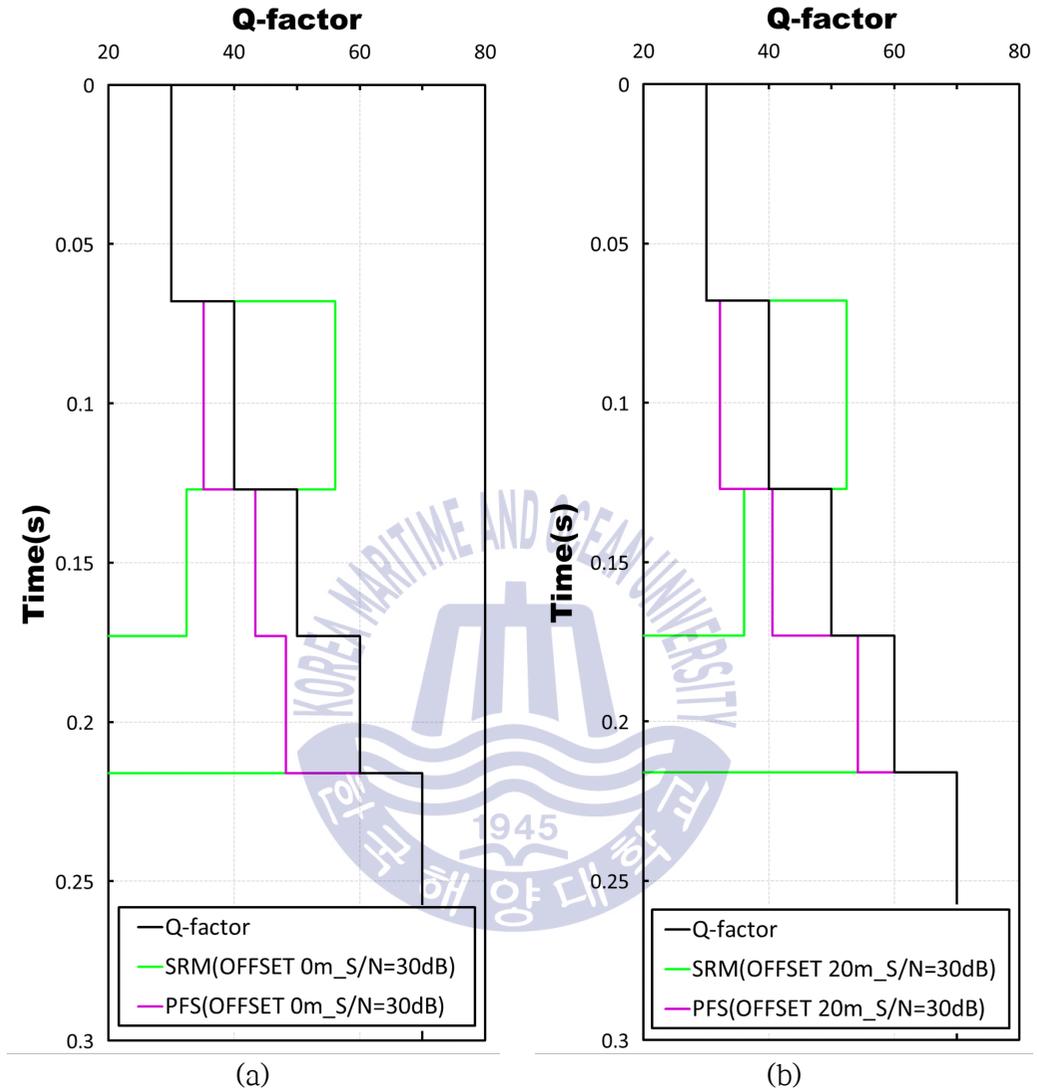
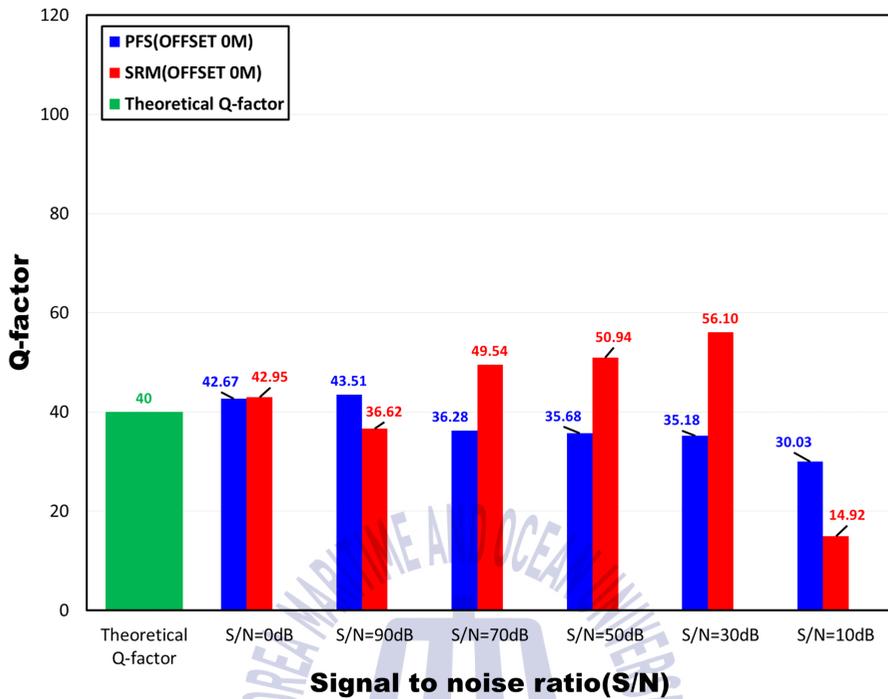


Fig. 17 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=30dB No. 1 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b) Q-factor estimation result of offset 20m

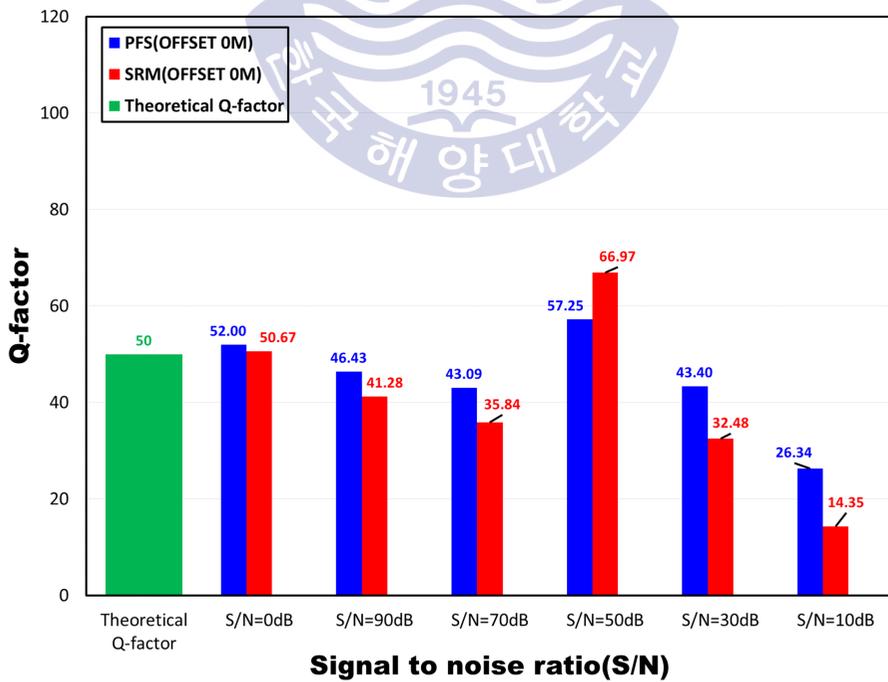
3.1.3.1.1 무작위 잡음의 크기에 따른 산출 결과

심도에 따라 증가하는 Q-factor 모델에서 수직입사탐사와 반사법 탐사를 통하여 얻어진 데이터에 대하여 무작위 잡음 크기별(S/N=10dB, 30dB, 50dB, 70dB, 90dB)추가한 뒤 SRM과 PFS 방법을 이용하여 Q-factor를 산출하고 각 층에 대한 산출 결과와 오차를 나타내었다. Fig. 18과 Fig. 19는 수직입사 탐사로 얻어진 데이터를 각층에 대하여 무작위 잡음의 크기에 따라 계산된 Q-factor를 나타낸 결과와 설정된 Q-factor 값과의 계산 오차를 나타낸 것이다. Fig. 20과 Fig. 21은 음원과 수신기 간격이 20m인 반사법 탐사로 얻어진 데이터를 각 층에 대하여 무작위 잡음의 크기에 따라 계산된 Q-factor를 나타낸 결과와 설정된 Q-factor 값과의 계산 오차를 나타낸 것이다. 먼저, 수직입사 탐사로 얻어진 데이터의 경우 산출된 결과를 살펴보면 SRM은 무작위 잡음의 크기가 크고, 하부층으로 갈수록 부정확한 결과를 얻은 것으로 나타나고, PFS 방법의 경우 S/N=0dB ~ 30dB까지는 20%이내의 정확도를 보이고 있으며, 기존의 방법인 SRM보다 비교적 정확한 결과를 얻은 것으로 나타난다.

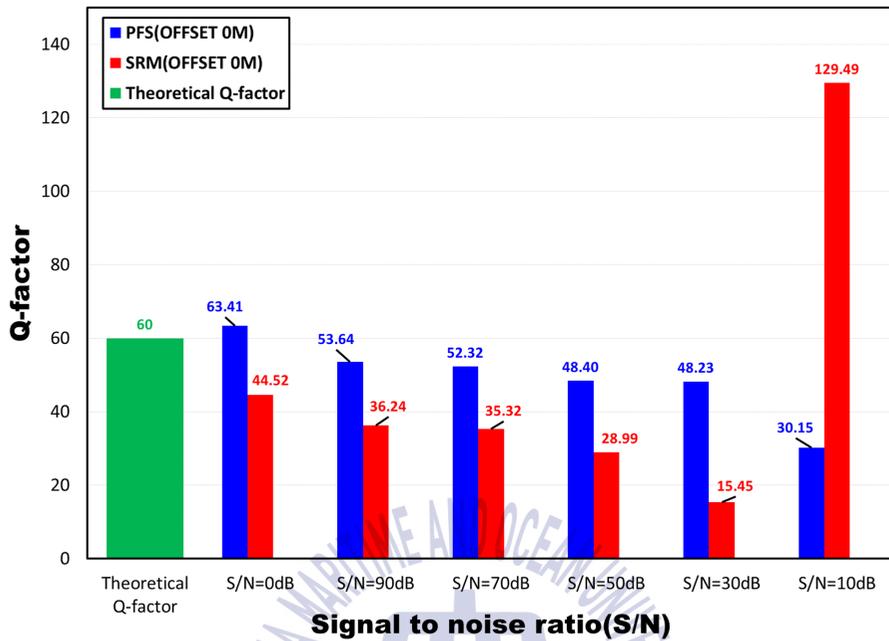
반사법 탐사로 얻어진 데이터의 경우 두 결과를 살펴보면 SRM은 무작위 잡음의 크기가 증가함에 따라 산출 결과가 매우 부정확한 것으로 보아 잡음의 영향에 따라 결과가 달라지는 것을 볼 수 있다. 이는 무작위 잡음으로 인한 주파수 정보의 변경과 Q-factor 계산을 위한 정확한 초등시간을 파악하기 어렵기 때문에 부정확한 결과를 얻은 것으로 판단된다. 반대로 PFS 방법의 경우 각 층에 대한 오차율은 약 20% 이내로 비교적 정확한 결과를 산출할 수 있는 것으로 판단된다.



(a)

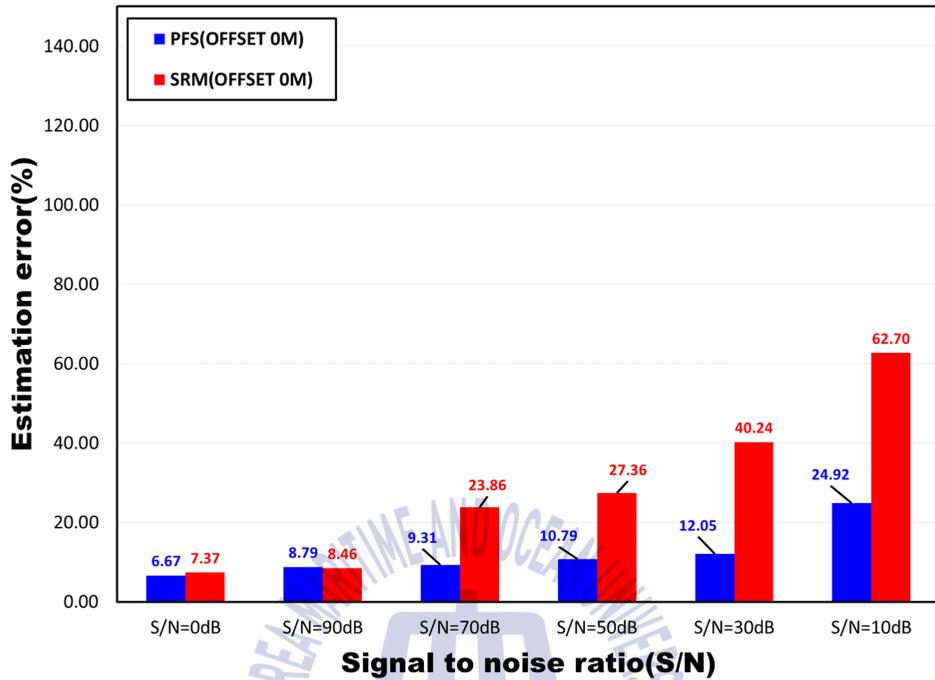


(b)

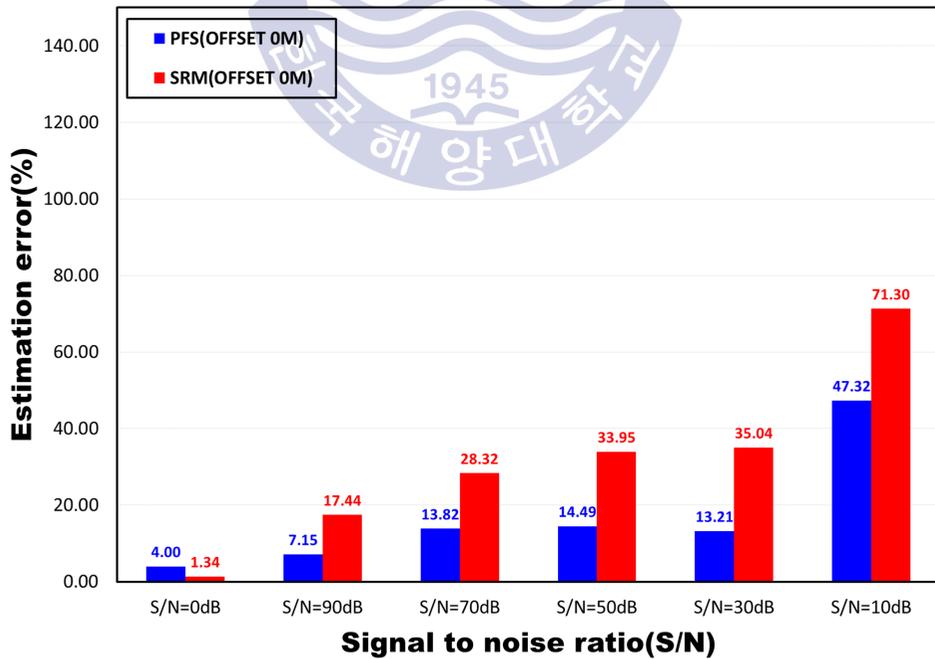


(c)

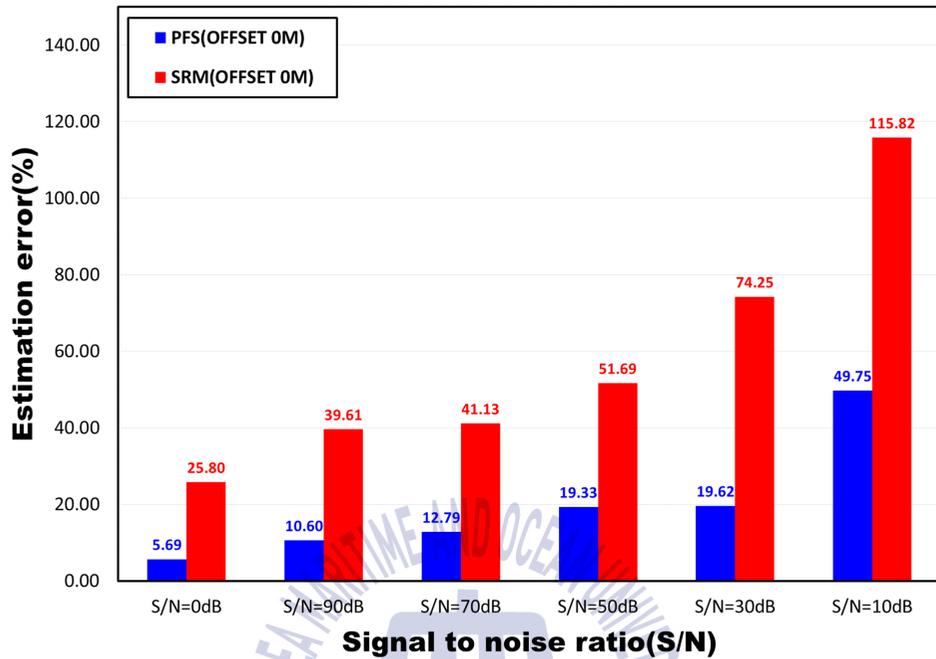
Fig. 18 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 0m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer



(a)

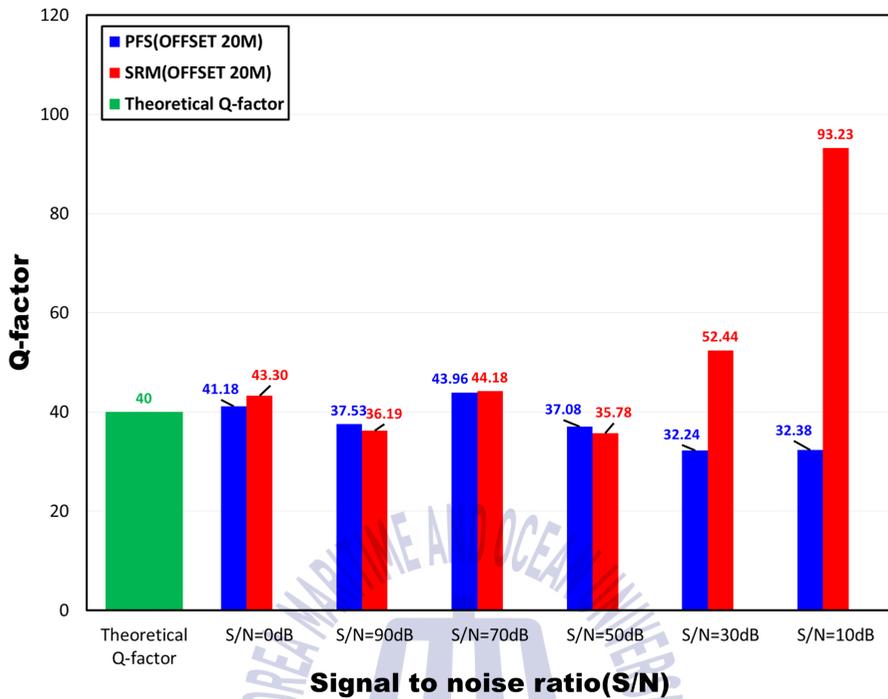


(b)

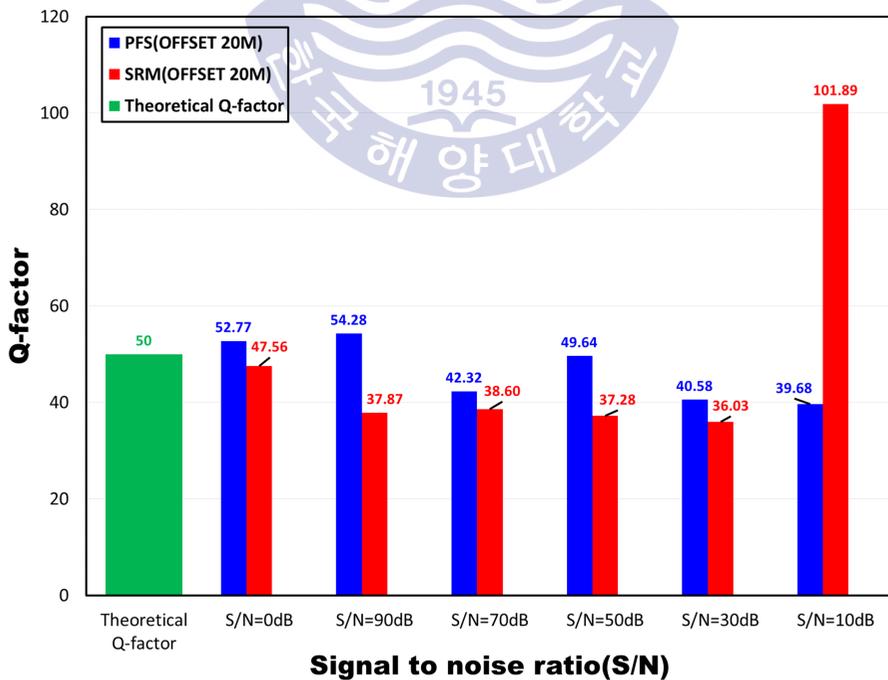


(c)

Fig. 19 Comparison between estimation error of SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 0m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer



(a)



(b)

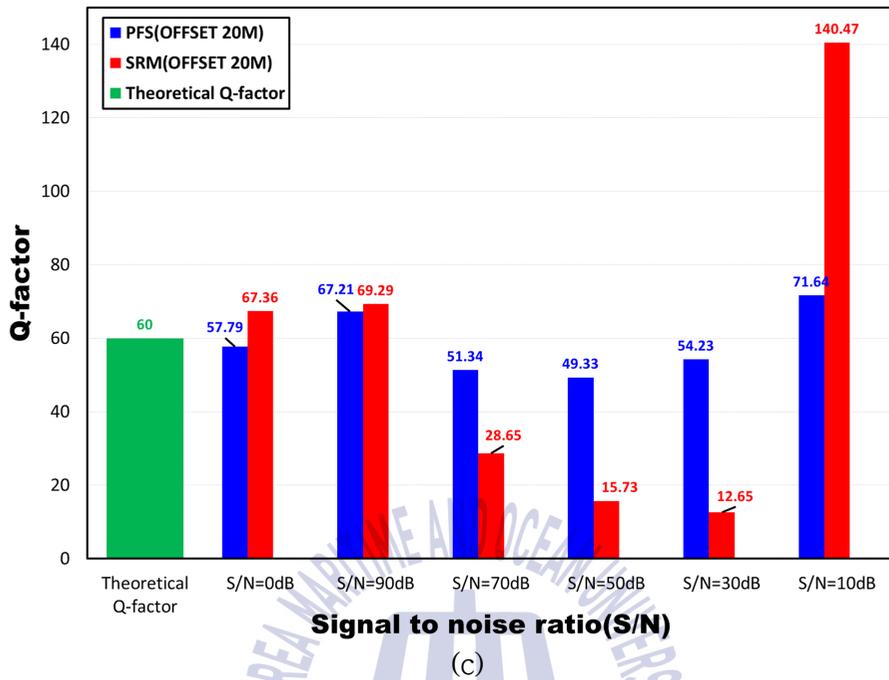
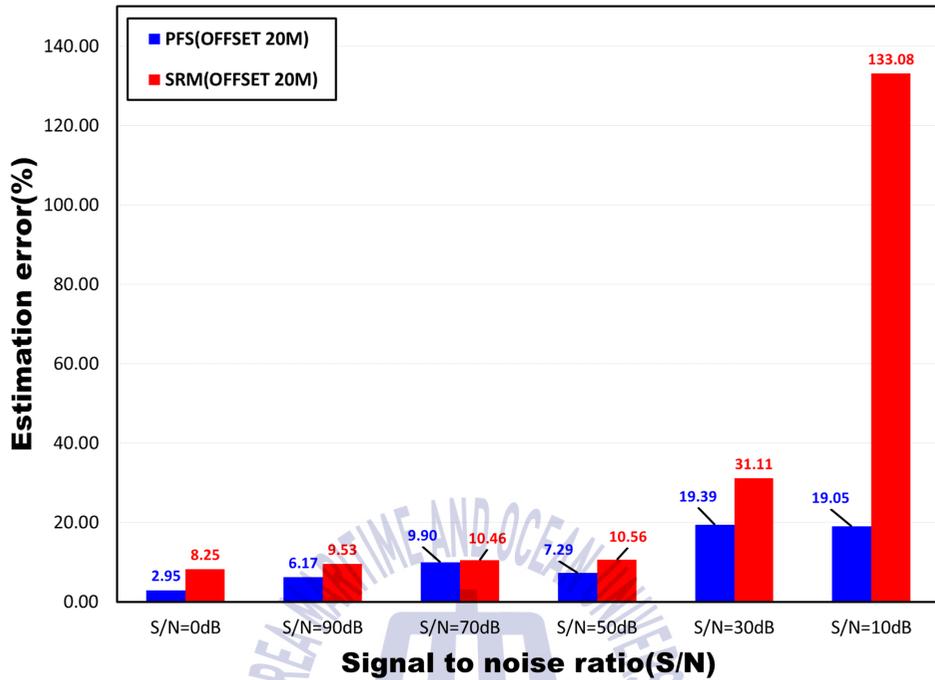
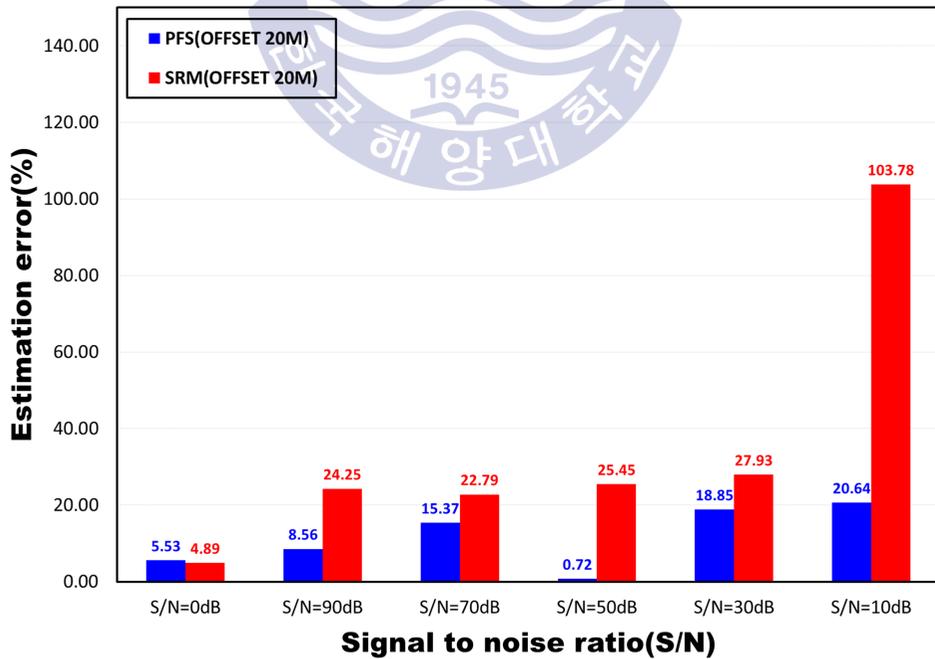


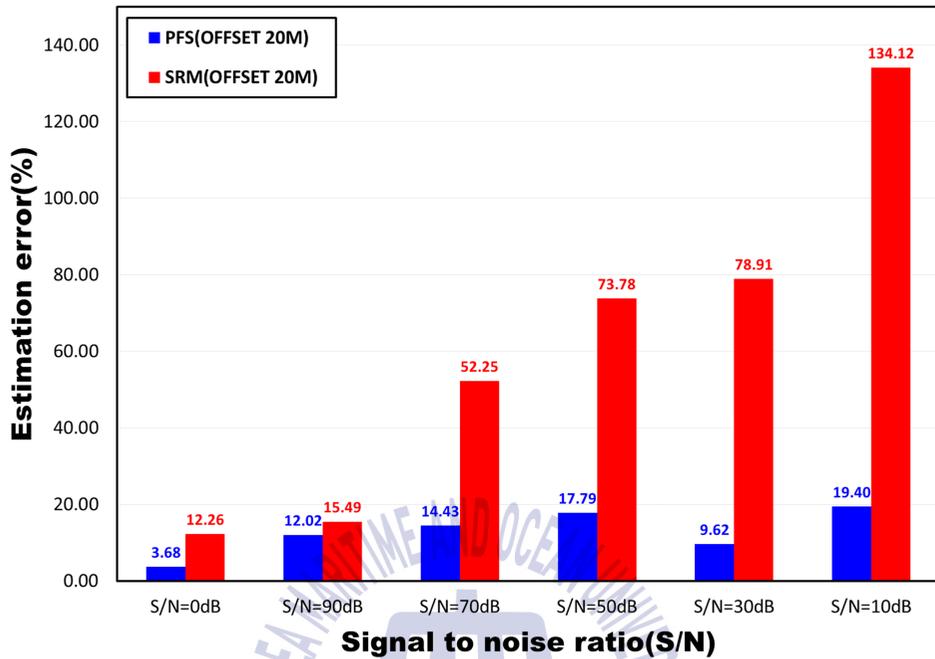
Fig. 20 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 20m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer



(a)



(b)



(c)

Fig. 21 Comparison between estimation error of SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=0, 90, 70, 50, 30, and 10dB No. 1 model in case of offset 20m calculated Q-factor of (a)2nd layer, (b)3rd layer and (c)4th layer

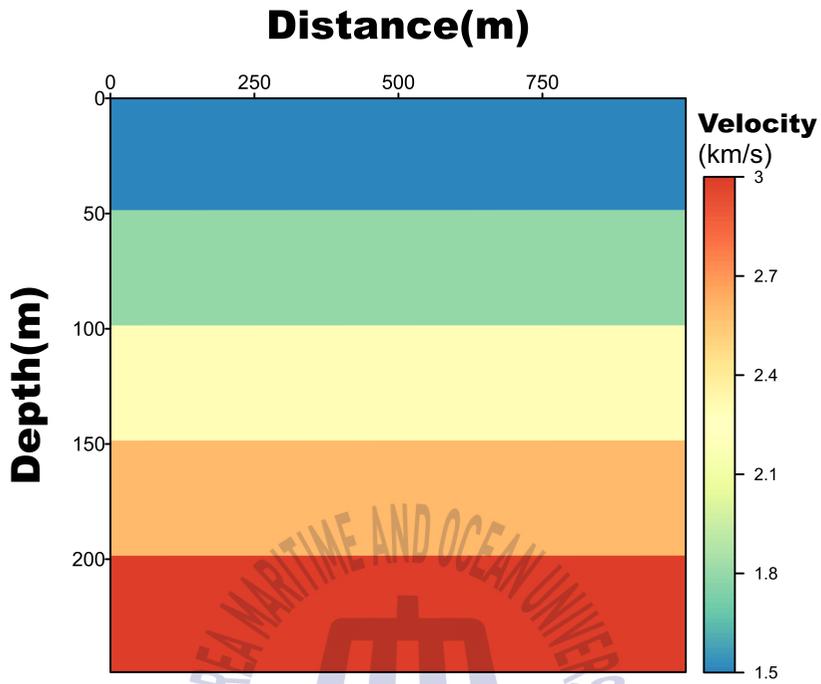
3.1.3.2 심도에 따른 Q-factor 감소 모델

3.1.3.2.1 무작위 잡음 미포함

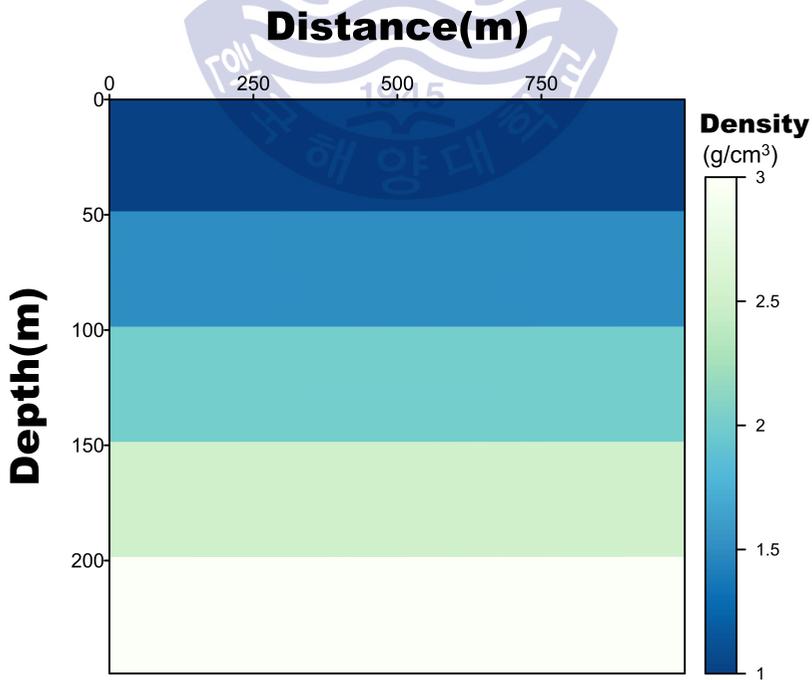
사용된 모델과 반대로 심도가 깊어짐에 따라 Q-factor가 감소되어 지는 모델로써 지층의 물성정보는 Fig. 22와 같이 나타내었으며 상세한 정보는 Table 8에 나타내었다. 모두 동일한 탐사변수를 설정하여 자료를 취득하고 이후 SRM과 PFS 방법을 이용하여 최종 Q-factor를 산출하였다.

Table 8 A schematic of layered No.2 model with physical properties

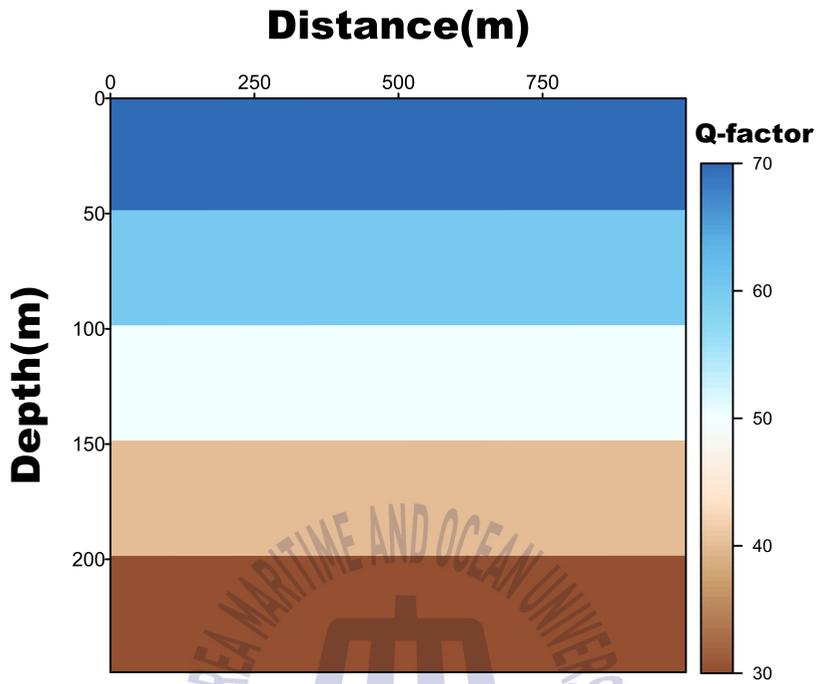
	P-wave(km/s)	Density(g/cm ³)	Q-factor
1층	1.5	1.0	70
2층	1.8	1.5	60
3층	2.3	2.0	50
4층	2.6	2.5	40
5층	3.0	3.0	30



(a)



(b)



(c)

Fig. 22 A schematic of layered No.2 model with physical properties, (a)P-wave velocity, (b)density and (c)Q-factor value

SRM과 PFS 방법을 이용하여 산출된 Q-factor 결과는 Table 9와 Table 10에 나타내었다. 두 가지 방법 모두 설정된 값과 계산된 값이 거의 일치하는 경향을 보이고 있으며, Fig. 23에 나타내었다.

Table 9 Experimental result of Q-factor for No. 2 model in case of offset 0m and offset 20m by SRM

	offset 0m			offset 20m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	-	70	-	-	70	-
2층	0.0029	60	61.08	0.0029	60	60.73
3층	0.0025	50	56.90	0.0024	50	59.21
4층	0.003	40	42.50	0.0032	40	37.95
5층	-	30	-	-	30	-

Table 10 Experimental result of Q-factor for No. 2 model in case of offset 0m and offset 20m by PFS

	offset 0m		offset 20m	
	theoretical Q	calculated Q	theoretical Q	calculated Q
1층	70	-	70	-
2층	60	61.40	60	60.38
3층	50	49.14	50	49.80
4층	40	38.91	40	39.30
5층	30	-	30	-

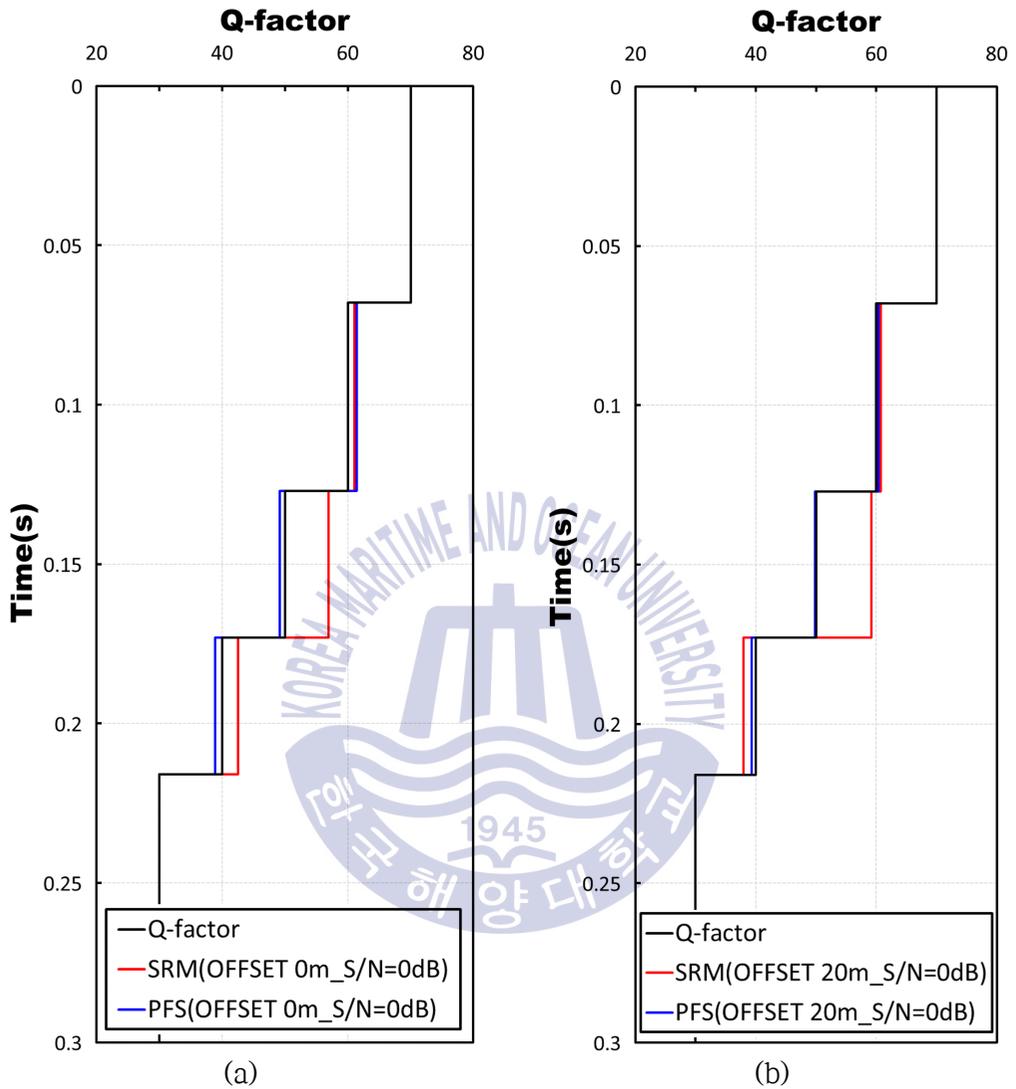


Fig. 23 Comparison between SRM and PFS for synthetic data No. 2 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m

3.1.3.2.2 무작위 잡음 포함(S/N = 30dB)

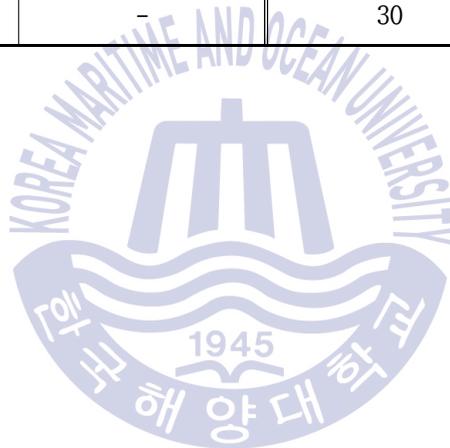
수직입사탐사와 반사법탐사를 통해 취득된 자료에 무작위 잡음을 추가한 뒤 Q-factor 산출을 실시하였다. 산출된 결과는 Table 11과 Table 12에 나타내었다. SRM은 기준자료와 비교자료의 진폭의비를 이용하여 Q-factor 산출하는 방법으로써 무작위 잡음으로 인한 주파수 정보 속성 값과 기준자료 및 비교자료의 선정이 부적합할 경우 산출 결과가 차이나는 것으로 판단된다. 반면에 PFS 방법은 최대 진폭을 가지는 주파수 정보를 가지고 계산함으로써 보다 정확한 결과를 얻은 것으로 판단된다. 두 가지 방법으로 산출된 결과를 Fig. 24에 나타내었다.

Table 11 Experimental result of Q-factor for No. 2 model add noise
S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by SRM

	offset 0m			offset 20m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	-	70	-	-	70	-
2층	0.0029	60	61.43	0.0015	60	100.70
3층	0.0025	50	53.19	0.0017	50	83.24
4층	0.003	40	46.00	0.165	40	56.17
5층	-	30	-	-	30	-

Table 12 Experimental result of Q-factor for No. 2 model add noise
 S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by PFS

	offset 0m		offset 20m	
	theoretical Q	calculated Q	theoretical Q	calculated Q
1층	70	-	70	-
2층	60	61.50	60	58.22
3층	50	48.23	50	51.39
4층	40	41.92	40	41.77
5층	30	-	30	-



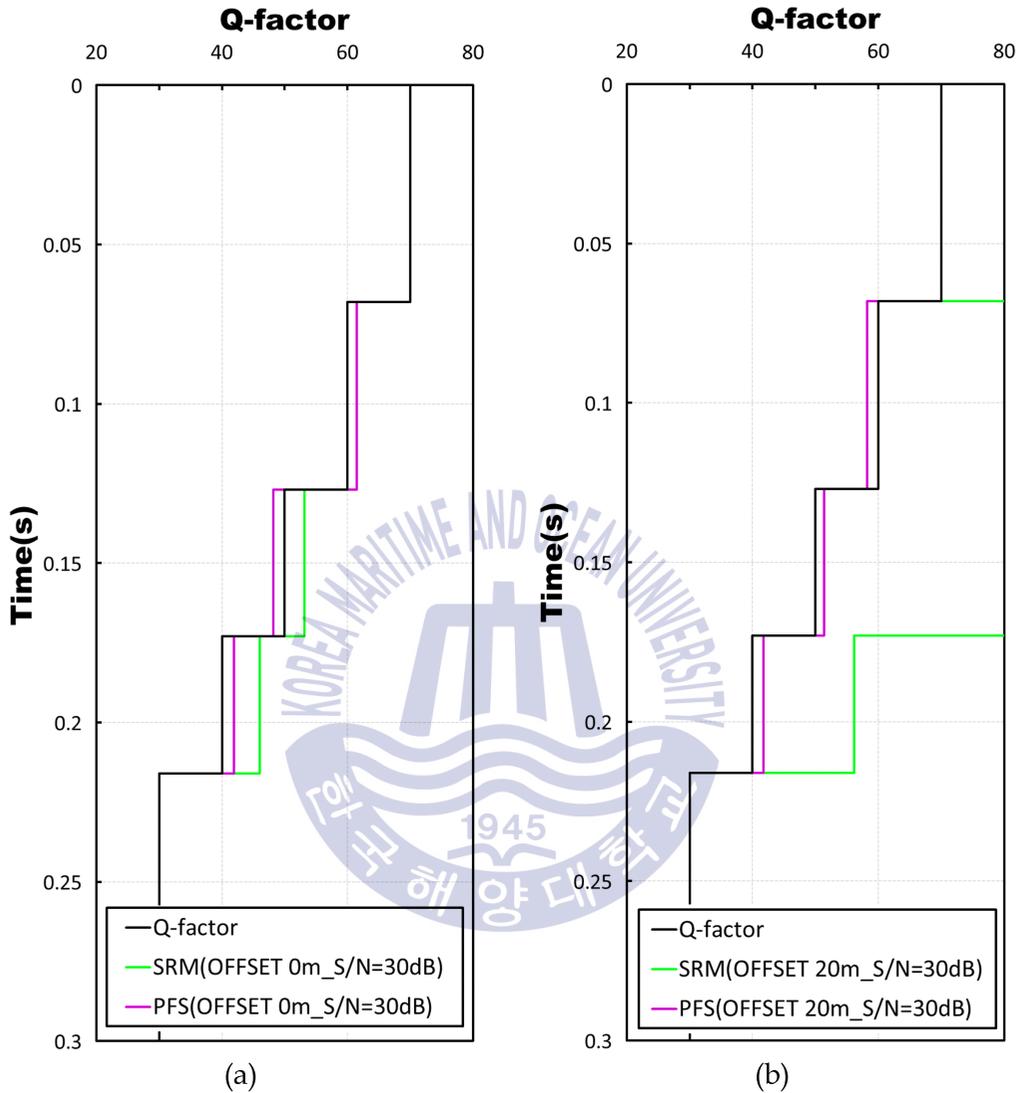


Fig. 24 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise $S/N=30\text{dB}$ No. 2 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m

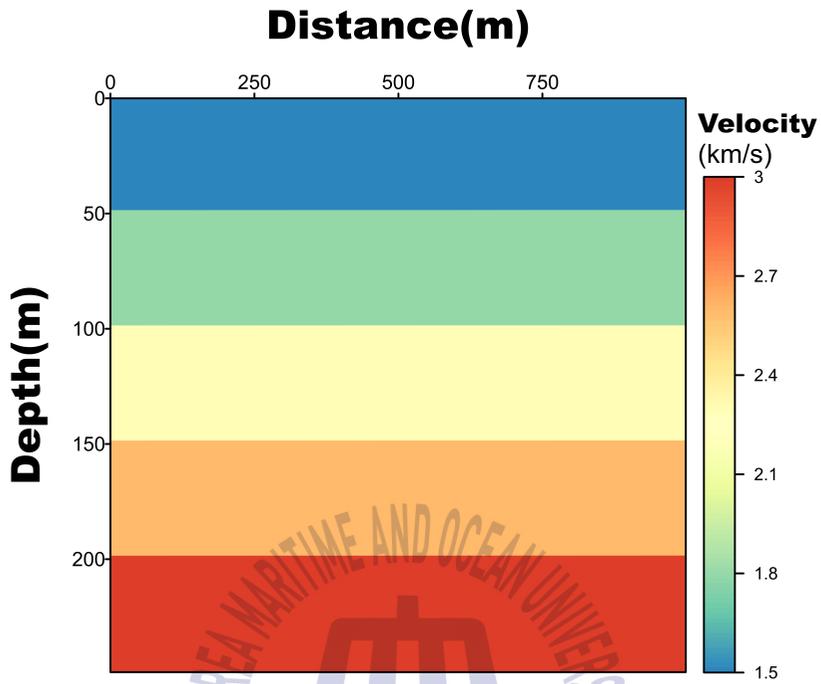
3.1.3.3 급격한 변화가 있는 Q-factor 모델

3.1.3.3.1 무작위 잡음 미포함

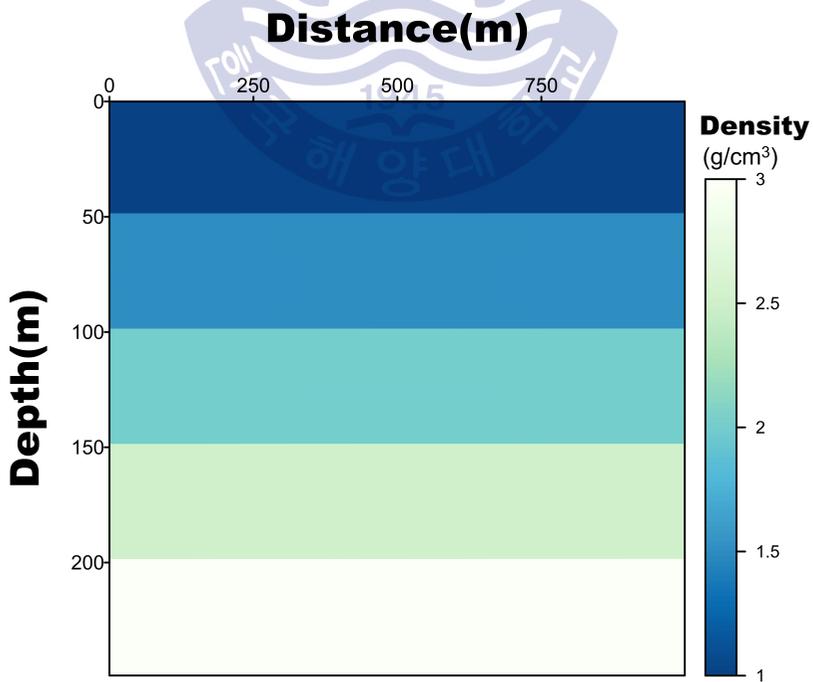
세 번째 모델은 앞선 첫 번째, 두 번째 모델과는 다르게 급격한 변화가 존재하는 Q-factor 모델을 제작하여 수치모형실험을 진행하였다. 동일한 탐사 변수를 설정하여 자료를 취득하였으며, 사용된 물성 정보는 Table 13과 Fig. 25에 나타내었다. 이후 동일한 방법으로 Q-factor 산출을 수행하였으며 산출 결과는 Table 14와 Table 15에 나타내었다.

Table 13 A schematic of layered No.3 model with physical properties

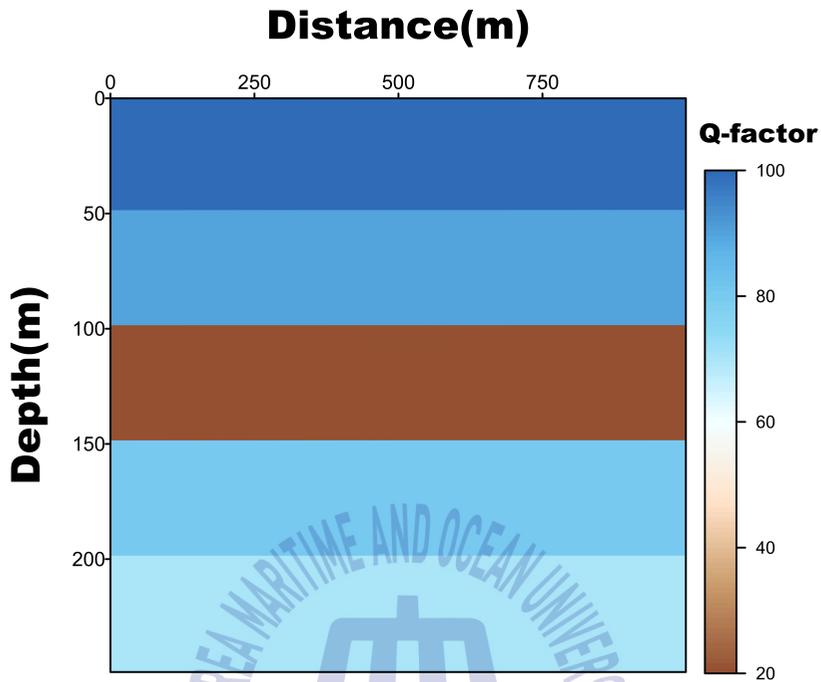
	P-wave(km/s)	Density(g/cm ³)	Q-factor
1층	1.5	1.0	100
2층	1.8	1.5	90
3층	2.3	2.0	20
4층	2.6	2.5	80
5층	3.0	3.0	70



(a)



(b)



(c)

Fig. 25 A schematic of layered No.3 model with physical properties, (a)P-wave velocity, (b)density and (c)Q-factor value

Table 14 Experimental result of Q-factor for No. 3 model in case of offset 0m and offset 20m by SRM

	offset 0m			offset 20m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	-	100	-	-	100	-
2층	0.0021	90	82.43	0.0021	90	79.66
3층	0.0066	20	22.29	0.0065	20	23.92
4층	0.0016	80	77.90	0.0024	80	53.51
5층	-	70	-	-	70	-

Table 15 Experimental result of Q-factor for No. 3 model in case of offset 0m and offset 20m by PFS

	offset 0m		offset 20m	
	theoretical Q	calculated Q	theoretical Q	calculated Q
1층	100	-	100	-
2층	90	95.62	90	94.61
3층	20	22.38	20	20.10
4층	80	80.61	80	82.26
5층	70	-	70	-

Q-factor 산출 결과 음원-수진기의 간격이 0m인 경우 굴절이나 회절에 의해 발생하는 산란의 효과가 거의 발생하지 않기 때문에 설정된 값과 비슷한 경향을 나타내는 것으로 판단되고 음원-수진기의 간격이 20m인 경우 반대로 산란의 영향으로 인하여 결과 값이 차이가 나는 것으로 판단된다. 음원-수진기의 간격이 0m일 때와 20m일 때 취득된 데이터를 통하여 얻어진 Q-factor 산출 결과를 Fig. 26과 같이 나타내었다.

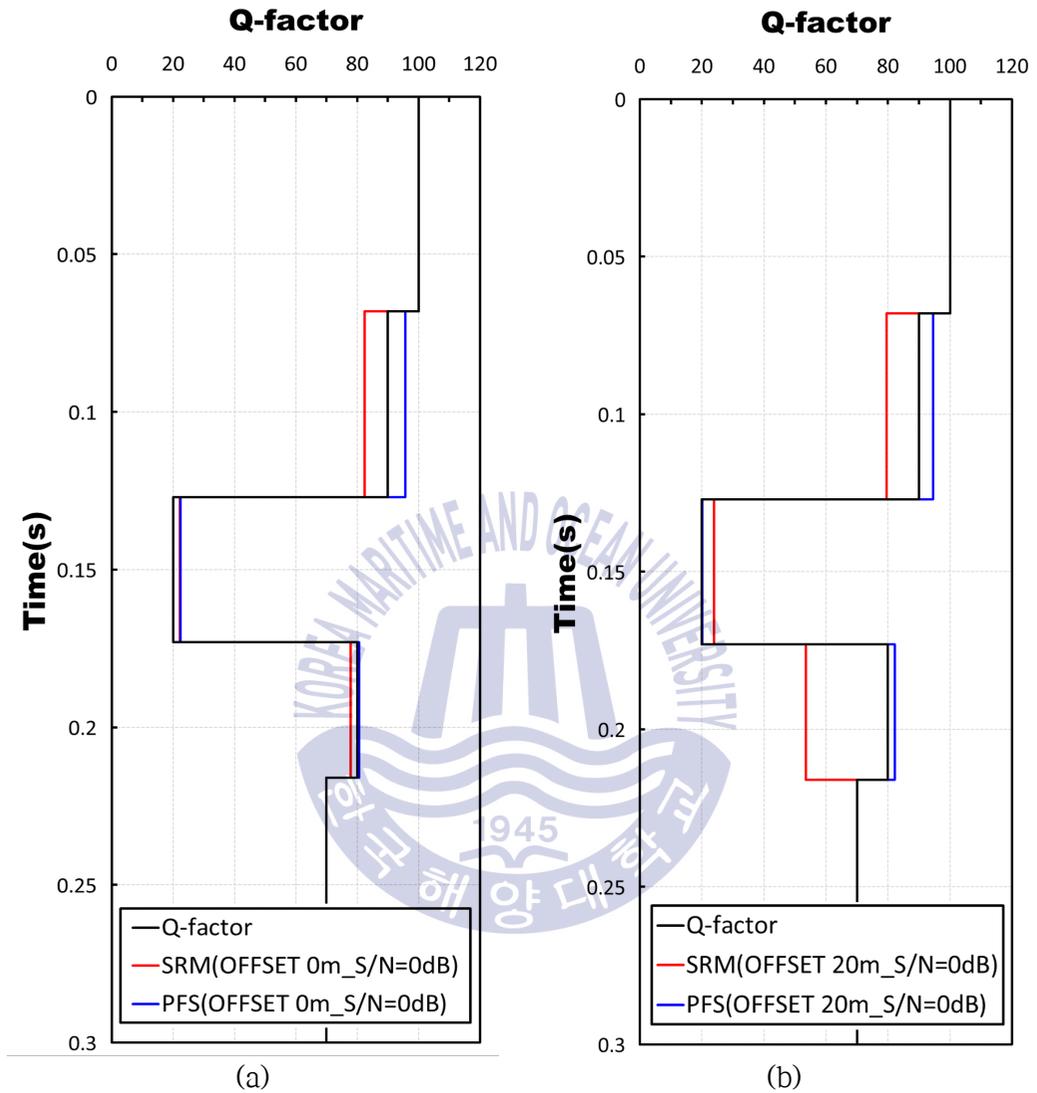


Fig. 26 Comparison between SRM and PFS for synthetic data No. 3 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m

3.1.3.3.2 무작위 잡음 포함(S/N = 30dB)

취득된 자료에 무작위 잡음을 추가한 뒤 Q-factor 산출을 실시하였다. 산출된 결과는 Table 16과 Table 17에 나타내었으며, Fig. 27과 같이 도시화하였다. 앞서 생성된 데이터들의 결과를 살펴보면 대체적으로 음원-수진기의 간격이 0m 일 때의 경우 설정된 값과 일치하는 경향을 보이고 있으며, 음원-수진기 간격이 20m일 경우에는 정확한 결과를 산출하기 어려운 경향을 보이고 있다.

Table 16 Experimental result of Q-factor for No. 3 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by SRM

	offset 0m			offset 20m		
	γ	theoretical Q	calculated Q	γ	theoretical Q	calculated Q
1층	-	100	-	-	100	-
2층	0.0017	90	106.92	0.0039	90	45.04
3층	0.0089	20	17.80	0.0112	20	14.54
4층	0.004	80	29.18	0.0012	80	101.34
5층	-	70	-	-	70	-

Table 17 Experimental result of Q-factor for No. 3 model add noise S/N=30dB in case of offset 0m and offset 20m by PFS

	normal incidence		20m	
	theoretical Q	calculated Q	theoretical Q	calculated Q
1층	100	-	100	-
2층	90	87.64	90	80.89
3층	20	18.662	20	19.07
4층	80	88.24	80	75.39
5층	70	-	70	-

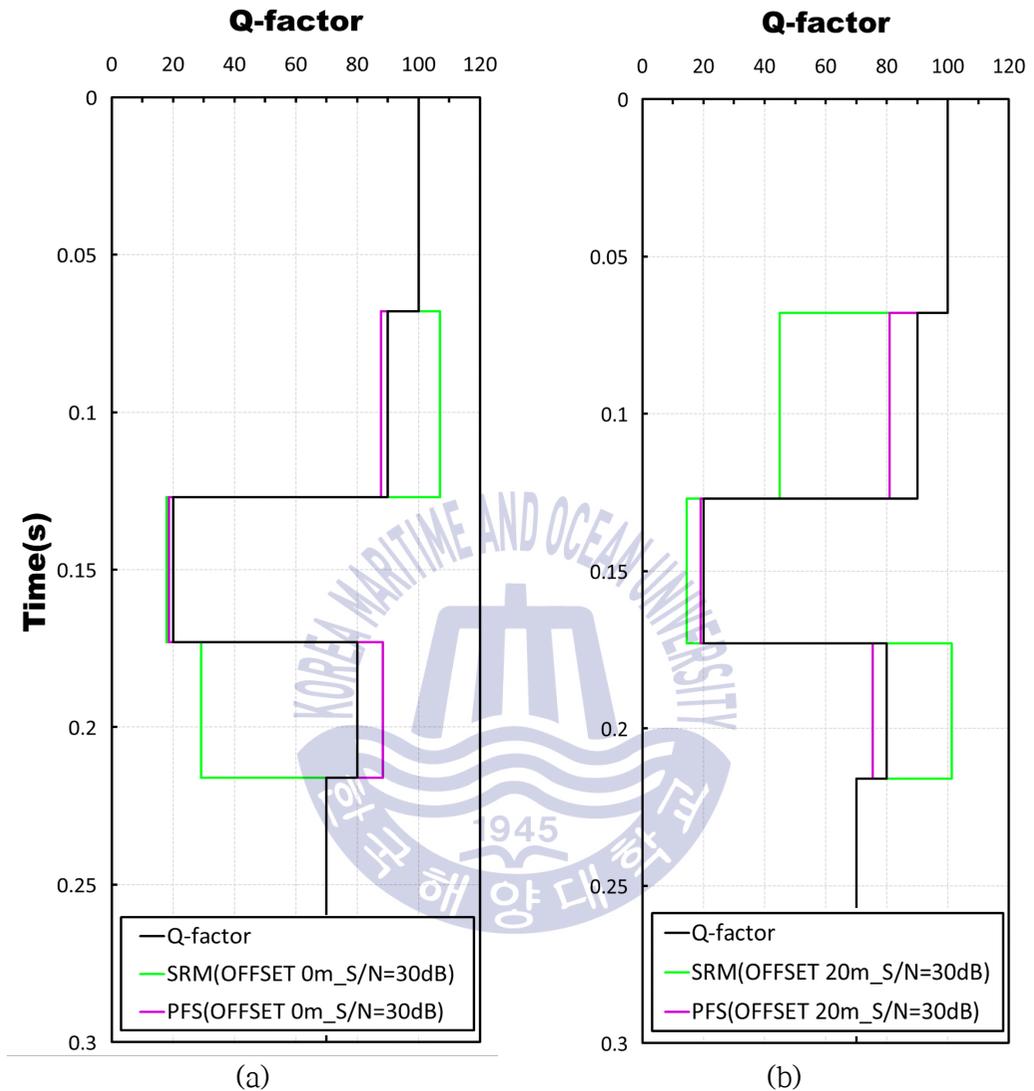


Fig. 27 Comparison between SRM and PFS for synthetic data add noise S/N=30dB No. 3 model (a)Q-factor estimation result of offset 0m (b)Q-factor estimation result of offset 20m

3.2. 현장 자료 적용

3.2.1 현장 관측자료 취득 및 처리

본 연구에서는 경상남도 거제시 다포리에서 남동쪽으로 7km 떨어진 해상에서 단일채널 탄성과 탐사를 통해 취득된 데이터에 SRM과 PFS 방법을 이용하여 Q-factor를 산출하고자 하였다. 취득된 탐사자료는 천부지질구조 분석을 목적으로 한 자료로써, 중심주파수 400Hz인 쿼드펄서 음원과 단일채널 스트리머를 이용하여 현장자료를 취득하였다. 탐사구역은 Fig. 28과 같으며 북동쪽에서 남서방향으로 약 600 m의 축선을 가진다. 취득된 자료의 탐사 변수는 Table 18과 같이 단일채널 탄성과 반사법 탐사를 수행하였으며, 발파간격은 0.5s로써, 이는 탐사선의 이동속도를 4~5노트(knot)라고 가정할 때 약 1m 가 된다. 총 음원의 발파 횟수는 615회, 기록간격은 0.1ms로 설정되었으며 총 기록시간은 0.2s 로 설정되었다. 이와 같은 탐사변수를 설정하고 취득된 자료는 Fig. 29와 같이 고 휘경(2013)이 수직 해상도를 높이기 위해 너울 필터(swell filter), 디지털 필터링(digital filtering), 디콘볼루션(deconvolution) 등의 자료처리 기법을 이용하여 수행한 선행 연구 결과인 탄성과 자료에 대하여 감쇠 효과를 분석하였다.

해양 탄성과 반사법 탐사의 단면도상에는 지하의 각 경계면에서 반사되어 돌아온 단순 반사파(simple reflection)이외에도 다른 종류들의 파들이 함께 나타난다. 이들 중 우리가 원하는 모든 에너지를 신호(signal)이라하며, 이 외의 모든 에너지를 잡음(noise)이라고 하며 무작위잡음(random noise)과 일관성잡음(coherent noise)가 존재한다. 반사파 기록에서는 단순반사파(이차반사파, primary reflection)가 신호이지만, 단층이 포함되어 있는 지역에서 나타나는 회절파와 같이 지질구조에 대한 특정한 정보를 제공하여 주는 경우에는 해석자에 따라 신호로 취급될 수 있다(김찬수, 2007).

단일채널 탄성과 탐사 자료처리는 다중채널 탄성과 탐사 자료처리에 비해 과정이 간편하고 정형적인 자료처리 순서나 방법이 존재하지 않기 때문에 순서와 방법은 기존의 연구 내용(김원식 등, 2009) 및 사용자가 최적의 변수를 확인하

며 각각의 단계를 수행하고자 하였다.

고해상도 단일채널 탄성과 탐사를 통하여 얻어진 현장 관측자료는 Fig. 30(a)와 같으며 고휘경(2013)이 제시한 자료처리 과정을 통하여 얻어진 최종 탄성과 단면도는 Fig. 30(b)와 같다.

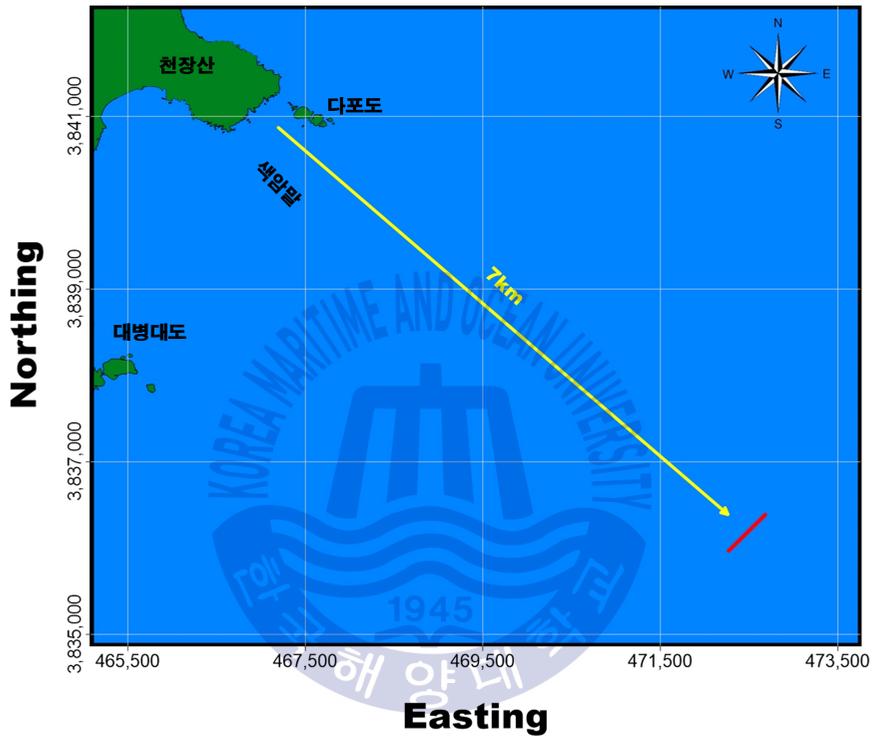
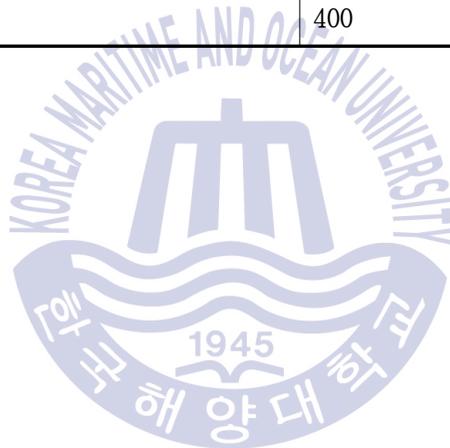


Fig. 28 Map of survey area

Table 18 Single channel seismic survey parameter of field data

Parameter	Value
Survey type	Single channel reflection survey
Number of sample	2048
Sampling interval(ms)	0.1
Number of shot	615
Shot interval(m)	1
Source	Quad-pulser
Central frequency(Hz)	400



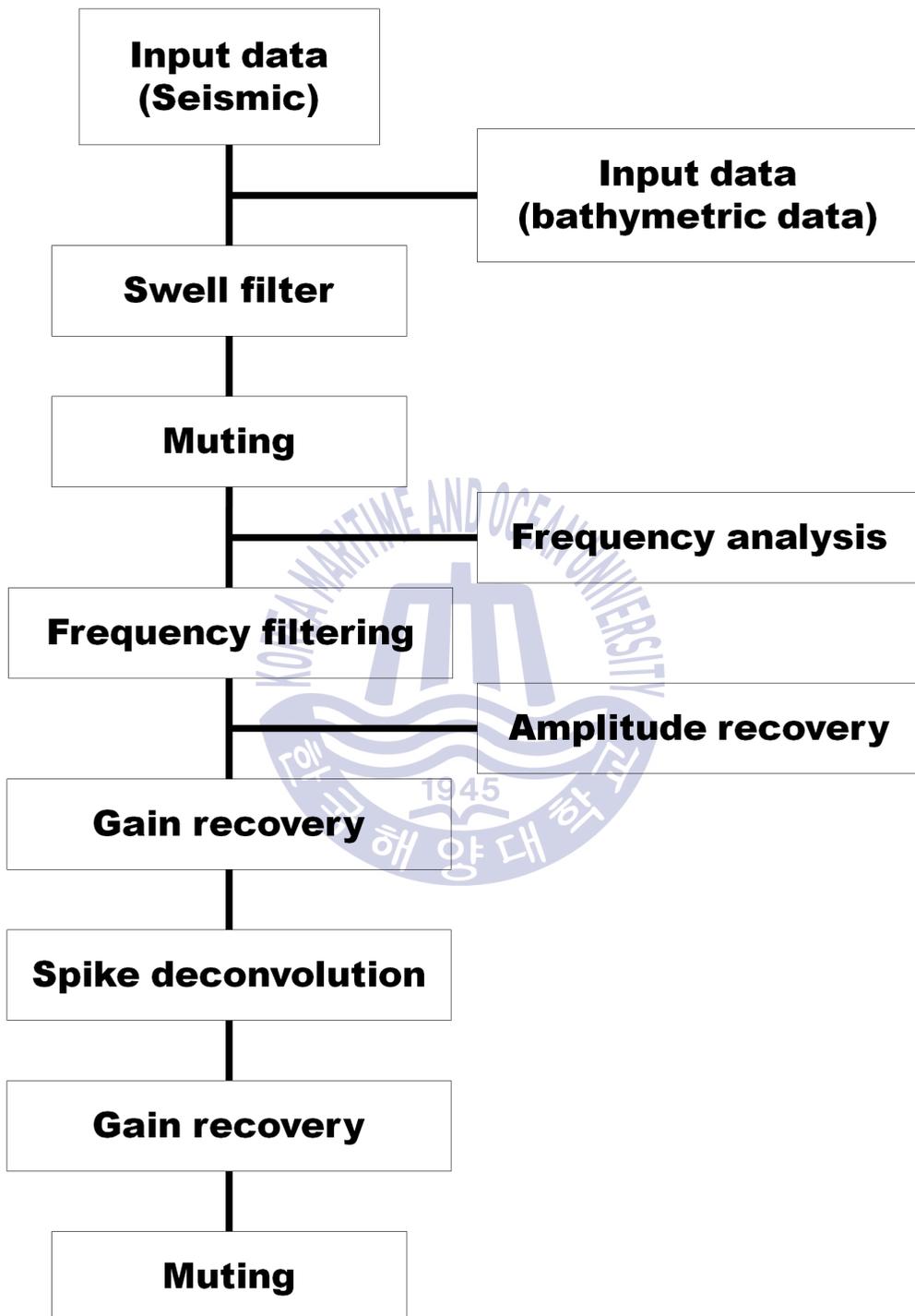
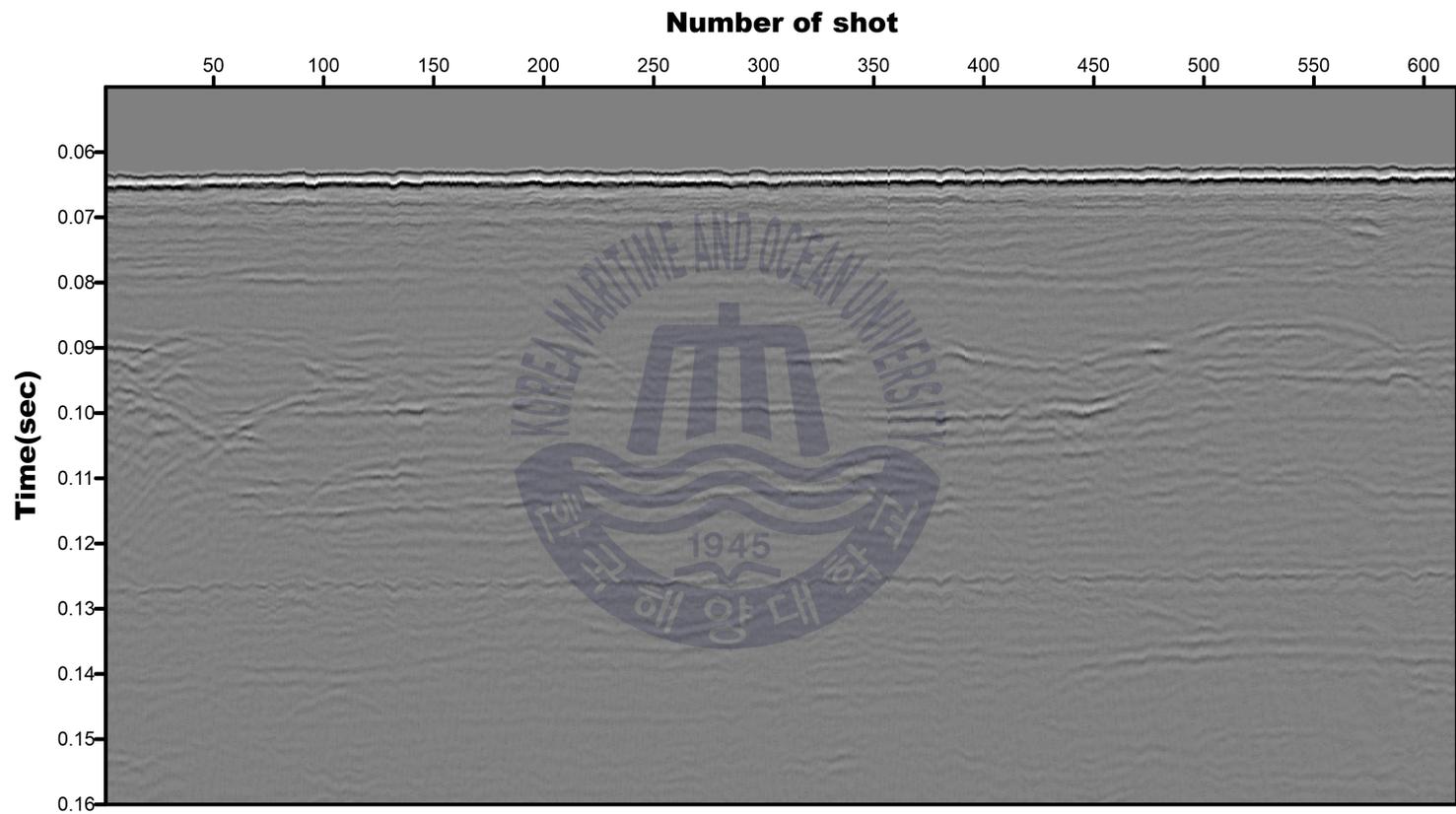
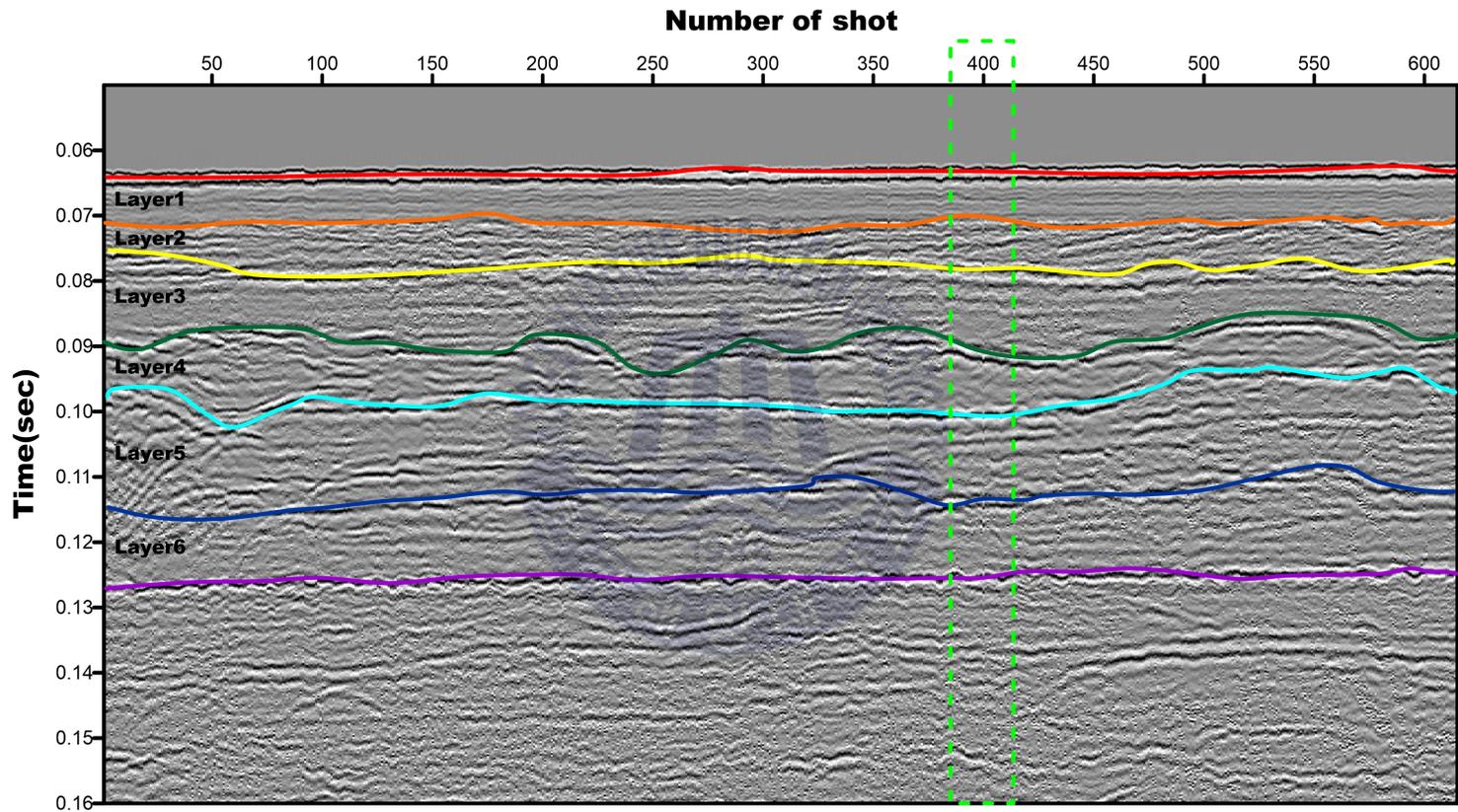


Fig. 29 Flow chart for single channel seismic data processing



(a)



(b)

Fig. 30 Seismogram obtained from the Geoje (a)raw data (b)after data processing

3.2.2 현장 관측자료 적용 및 분석

일반적인 탄성과 감쇠의 정도는 결정질 암석의 경우 Q-factor의 값이 500~1000 정도로 감쇠 정도가 작으며, 균열이 존재하거나 다공질의 암석의 경우 Q-factor의 값이 10~100 정도로 감쇠 정도가 높다(Toksöz, et al., 1979). 또한 지표나 해저면 부근의 미고결 퇴적층 혹은 동토층의 경우 Q-factor는 5~20 정도로 나타나며 감쇠의 정도가 매우 높다(Gusmeroli, et al., 2010). Toksöz and Johnston(1981)에 따르면 해수의 Q-factor는 63,000 정도로 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 해상 탄성과 탐사에서 해수층을 통과하는 탄성과의 감쇠효과는 매우 적으므로 해상 탄성과 탐사 시, 탄성과 음원으로부터 전달된 탄성과 에너지는 적은 감쇠로 해수면 하부의 지층에 도달한다(이진우, 2014).

Table 19는 최종 탄성과 단면도의 400번째 샷의 정보를 SRM과 PFS 방법을 이용하여 산출된 Q-factor 결과이다.

Table 19 Result of calculated Q-factor for field data

	γ	Calculated the Q-factor by SRM	Calculated the Q-factor by PFS
1층	0.003	7.3745	54.451
2층	0.0044	9.2194	29.976
3층	0.0005	36.8836	187.899
4층	0.0003	104.5731	9.826
5층	0.0009	105.3969	5.458

Table 12는 자료처리가 완료된 현장자료로부터 SRM과 PFS 방법을 이용하여 산출한 지층의 Q-factor로, 해당 구역의 지층은 총 7개의 층으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

탄성과 단면도상 1층은 비교적 균질한 물질인 머드 및 실트로 구성된 세립질 퇴적층 일 것으로 사료되며, 2층의 경우 과거에 침식 혹은 퇴적환경에서 구성

된 조립질 모래층일 것으로 판단된다. 3층은 머드와 실트로 구성된 층으로 구성되어 있으며, 상부 퇴적층의 하중에 의한 영향으로 함수율이 낮아졌을 것으로 판단된다. 4층은 모래, 자갈질의 육상기원의 비교적 조립질 퇴적물이 우세하게 퇴적되어 있을 것으로 판단된다(고휘경, 2013).

Table 20은 Hamilton(1972)이 퇴적물 분류에 따라 실내 시험을 통하여 계산된 Q-factor를 요약 정리한 자료이다.

Table 20 Q-factor according to sediment classification(Hamilton, 1972)

Sediment type	Q_p	$1/Q_p$	Δp	
Sand	Coarse	32	0.031	0.099
		29	0.034	0.107
	Medium	31	0.032	0.101
		35	0.028	0.089
	Fine	31	0.032	0.100
		31	0.032	0.101
	Very fine	44	0.023	0.071
		32	0.031	0.093
		29	0.034	0.107
Sandy silt	23	0.044	0.138	
	54	0.018	0.058	
Sand-silt-clay	31	0.033	0.102	
Clayey silt	104	0.010	0.030	
	111	0.009	0.028	
	114	0.009	0.028	
	118	0.009	0.027	
	263	0.004	0.012	
	437	0.002	0.007	
Sand-silt-clay	368	0.003	0.009	

탄성과 전파를 전달하는 매질로써 작용하는 퇴적물은 입자와 공극의 사이에 해수로 충전되어 있으며, 이에 대한 탄성파의 전파 속도는 퇴적물의 탄성특성에 의해 결정된다. 산출된 Q-factor 값을 볼 때 1층과 2층의 경우 미고결 퇴적층으로 구성되어 있는 것으로 판단되며, 머드나 실트질 모래로 구성된 퇴적층 내 입자간의 마찰에 의해 열로 전환되어 에너지가 매질에 흡수되는 고유감쇠와 지층 구성 입자의 공극에 따른 흡수손실 및 해수와 퇴적층의 경계면에서 발생하는 음향손실의 영향이 클 것으로 판단된다. 3층 및 그 하부층의 경우 산출된 Q-factor 값으로 볼 때 머드와 실트로 구성되어 있고, 모래 자갈층으로 구성되어 있을 것으로 사료된다. 산출된 Q-factor만으로 분석하기에는 한계가 존재하며, 시추코어를 채취한 뒤 실내 시험으로 얻어진 결과 값과 비교분석을 통하여 정확한 결과 값을 도출해야 될 필요가 있다.



제 4 장 결 론

본 논문은 무작위잡음이 포함된 탄성과 트레이서에서의 두 가지의 방법 Spectral ratio method와 Peak frequency shift를 이용하여 탄성과 감쇠를 표현하는 Q-factor를 산출하여 그 값에 대하여 비교분석을 실시하였다. 이를 통해 무작위 잡음이 포함된 트레이스의 감쇠특성에 대하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 수치모형실험의 결과, 무작위 잡음이 포함되지 않은 경우에는 SRM과 PFS 방법이 모두 설정된 값과 일치하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있었으며, 음원-수진기 간격의 영향을 받는 것으로 판단된다. 이는 굴절이나 회절에 의해 발생하는 산란의 효과가 발생하기 때문에 정확한 결과 값을 도출하기 어려울 것으로 판단된다.

2. 무작위 잡음이 포함된 경우 SRM보다 PFS의 방법이 정확한 결과 값을 도출할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 무작위 잡음이 추가됨으로써 이벤트 구간의 신호에 해당하는 주파수 정보가 다양하게 삽입이 되어 SRM의 경우 정확한 결과 값을 산출하는데 어려움이 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 무작위 잡음을 크기에 따라 추가시키고 SRM과 PFS 방법을 이용하여서 Q-factor 산출 오차율을 분석한 결과는 다음과 같다. 음원-수진기 간격이 0m일 때 취득된 데이터에 SRM을 이용하여 산출한 Q-factor는 3층까지 20% 이내의 오차율을 보이고 있으며, 음원-수진기 간격이 20m 일 때의 경우 4층까지 20% 이내의 오차율을 보이고 있다. 이에 비해 PFS 방법을 이용하여 산출된 Q-factor의 오차는 무작위 잡음의 크기에 상관없이 20% 이내의 오차율을 보이는 것으로 나타났다.

4. PFS 방법의 경우 주파수의 변화량을 이용하여 Q-factor를 산출하는 방법으로 무작위 잡음의 유무에 따라 영향을 적게 받으며 비교적 정확한 값을 산출할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

5. 급격하게 물성이 변하는 구역에서 이론 값과 계산 값의 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 정밀탐사나 진폭보상이 수반되지 않을 경우 지층의 감쇠특성에 대한 잘못된 정보를 제시할 가능성이 높을 것으로 사료된다.

6. 단일채널 탄성과 탐사를 통해 취득한 현장 자료에 대하여 Q-factor를 산출하였다. 미고결 퇴적층으로 구성된 상부층에서 하부층으로 내려 갈수록 입자간의 압축률과 지층을 구성하는 공극의 크기가 커지고, 공극내에 충전된 해수의 함수율이 감소하므로 전과거리에 따른 기하학적 확산손실보다는 매질의 상태나 지층의 경계조건에 따라 좌우되는 고유감쇠에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

7. 본 연구를 통해 무작위 잡음에서 비교적 정확한 결과 값을 산출할 수 있는 방법을 이용하여 현장자료에 적용한 뒤 정확도 검증이 필요할 것으로 판단된다. 이후 엔지니어링 목적의 탄성과 탐사에서 퇴적물 분류를 하기위한 변수로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 분석한 탄성과 감쇠 특성에 대한 수치모형실험의 자료는 보다 다양한 현장 자료에 대한 적용을 통해 향후 석유, 가스 혹은 가스 하이드레이트 등 지하자원탐사를 위하여 다양하고 심도 깊은 연구를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

2년간의 대학원 생활을 되돌아보면 후회와 많은 아쉬움이 있지만, 좋은 환경에서 좋은 사람들과 함께 지내며 행복했던 적이 더 많았던 것 같습니다. 대학원 생활을 마치며 부족한 논문이지만 도움을 주신 분들께 이 글로써 감사의 마음을 전할까 합니다.

제가 연구실에서 공부를 할 수 있게 물심양면으로 도와주시고, 안식년 중에도 많은 가르침으로 저를 깨우쳐 주신 신성렬 교수님께 감사의 말씀을 드리고자 합니다. 바쁘신 와중에도 항상 걱정해주시고 논문 검토와 많은 조언을 해주신 정우근 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 항상 아버지와 같은 자상함으로 격려해주시고 보살펴주신 장원일 교수님, 열정적으로 강의를 해주시는 임중세 교수님, 항상 밝은 미소를 지으시며 대해주신 유경근 교수님, 많은 가르침을 주신 윤지호 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 교수님들의 걱정 어린 조언과 격려의 말씀을 항상 가슴 깊이 새겨 훌륭한 사회인이 되도록 노력하겠습니다.

아무것도 모르는 저를 처음부터 가르쳐주시고 알려주신 하지호 박사님께 감사의 말씀을 드립니다. 연구실에서 생활하는 동안 선배로써 형으로써 좋은 말도 해주고 모범을 보여준 휘경이형님, 연진이형님 고맙습니다. 대학교 입학할 때부터 같이 조별활동을 하고 석사과정동안 많은 대화를 하며 서로에게 의지해 이겨낼 수 있게 도와주었던 채현이형, 부족한 형들 뒷바라지 한다고 고생한 다운이, 연구실 막내로써 이것저것 허드렛일을 하면서 묵묵히 형들을 도와줬던 대철이, 묵묵히 도와주는 수윤이, 연구실의 홍일점인 예리에게도 감사의 말을 전합니다. 대학원 동기인 승현이, 상훈이, 지유, 유정이, 동훈이형 모두 고맙습니다. 그리고 대학원생활을 하면서 힘들 때 웃음과 도움을 주신 각 실험실의

선배님 및 후배님들과 학교생활을 하는데 있어서 많은 편의를 봐주신 안숙현
조교님, 김민혜 실장님에게도 감사의 말씀을 드립니다. 학창 시절부터 같이 어
울리고 고민을 나눴던 철훈이, 희재, 승준이, 종현이, 학수, 용한이, 준영이, 진
우 모두 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

항상 손자를 위해 기도해주시고 걱정해주시는 외할머니와 응원해주시는 삼
촌, 외삼촌내외분들에게도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

마지막으로 말 안 듣고 사고치고 다녔던 아들을 위해 기도해주시고 걱정해주
신 사랑하는 부모님과, 멘토와 같은 존재인 우리 형, 그리고 형수님, 세아, 힘들
때 응원해준 사랑하는 여자친구에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 지금까
지 부족하지만 여러 가지로 도움을 주신 모든 분들께 이 논문을 바치며, 감사
함으로 살아갈 수 있게 해주신 하나님 아버지께 감사드립니다.



2017년 1월
권준석 드림

References

- 고휘경, 2013. *싱글채널 해양 탄성파 탐사자료의 속성분석 및 정밀해석*. 석사학위논문. 부산 : 한국해양대학교.
- 김민영, 하지호, 신성렬, 정우근, 2014, 자동 Q-factor 산출을 위한 최적 선형구간의 선정, *지구물리와 물리탐사*, Vol. 17, No.4, pp. 253~259
- 김원식, 박근필, 정순홍, 박의섭, 2009. 대천-원산도해역 단일채널 탄성파자료 정밀처리 및 기반암 분포분석. *2009 Korea-Japan joint symposium on rock engineering*.
- 김찬수, 2007. *탄성파 반사법 및 굴절법을 이용한 천해저 지반조사에 대한 연구*. 석사학위논문. 부산 : 한국해양대학교.
- 신성렬 등, 2011, 석유탐사공학 교재개발, 한국지구시스템공학회.
- 이광호, Matsushima, J., 2009, 메탄하이드레이트 부존층에서의 지진파 감쇠치 산출. *한국지구물리·물리탐사학회 학술대회*, 전북대학교, 2009년 12월 21-22일. pp.28-33.
- 이진우, 2014, *Spectral ratio method*를 이용한 탄성파 감쇠 특성 연구, 석사학위논문, 부산 : 한국해양대학교
- 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, 1999, 시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정, *비파괴검사학회지*, 19, 118-128.
- Aki, K. & P. G. Richards, 1980, *Quantitative seismology-theory and methods*. W. H. Freeman and Company.

- Alessio, G. et al., 2010, *Instrument and methods seismic wave attenuation in the uppermost glacier ice of Storglaciären*. Journal of Glaciology, Vol. 56. pp.249-256.
- Brzostowski, M. & McMechan, G., 1992, 3D tomographic imaging of near-surface seismic velocity and attenuation, Geophysics Vol. 57., p. 396-403
- Dasgupta, R. & Clark, R. A., 1998. *Estimation of Q from surface seismic reflection data*. Geophysics, Vol. 63. pp.2120-2128.
- Galdwin, M. T., F. D. Stacey, 1974. *Anelastic degradation of acoustic pulses in rocks*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 28, pp.17-22.
- Gusmeroli, A. et al., 2010, *Seismic wave attenuation in the uppermost glacier ice of Storglaciären*, Journal of Glaciology, Vol. 56. pp.249-256.
- Edwin L. Hamilton., 1972, Compressional-wave attenuation in marine sediments, *Geophysics*, 37(4), 620-646
- Hauge, P. S., 1981, Measurements of attenuation from vertical seismic profiles, *Geophysics*, Vol. 46, p. 1548-58
- Hu, C. H., Tu, N. & Lu, W. K., 2013, Seismic attenuation estimation using an improved frequency shift method, IEEE Geosci.Remote Sens. Lett. 10 p. 1026-30
- John M. R., 1997. *An introduction to applied and environment geophysics*. John Wiley & Sons Ltd. : west sussex
- Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens & J. V. Sanders, 2000. *Fundamentals of Acoustics* 4th ed., John wiley & Sons.
- Knopoff, L., 1964. *Q*. Rev. Geophysics., Vol. 2. pp.625-660
- Kuster, G. T., & Toksöz, M. N., 1974. *Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part II -Experimental results*. Geophysics, Vol. 39. pp.587-606

- Matsushima, J., 2005. *Attenuation measurements from sonic waveform logs in methane hydrate-bearing sediments at the Nankai Trough exploratory well off Tokai, central Japan*. Geophysical Research Letters, Vol. 32. L03306.
- Matsushima, J., 2006. *Seismic wave attenuation in methane hydrate-bearing sediments : VSP data from the Nankai Trough exploratory well off Tokai, central Japan*. Journal of Geophysical Research, Vol. 111. JB004031
- Peselnick, L. & Zietz, I., 1959. *Internal friction of fine grained limestones at ultrasonic frequencies*. Geophysics, Vol. 62. pp.1163-1167.
- Purnell, G. W., 1986. *Observations of wave velocity & attenuation in two-phase media*. Geophysics, Vol. 51. pp.2193-2199
- Raikes, S. A. & White, R. E., 1984. Measurements of earth attenuation from downhole and surface seismic recordings *Geophys.Prospect.* 32 892-919
- Ricker, N., 1953, The form and laws of propagation of seismic wavelets, *Geophysics*, Vol. 18., p.10-40
- Sams, M. S. & Goldberg, D., 1990, The validity of Q estimates from borehole data using spectral ratios, *Geophysics* Vol. 55., p. 97-101
- Sheriff, R. E. & Glendart, L. P., 1995. *Exploration Seismology*. 2nd ed., Cambridge University Press :New York.
- Singleton, S. Taner, M. T. & Treitel, S., 2006, Q estimation using Gabor-Morlet joint time-frequency analysis techniques, *SEGExtended Abstr.* Vol. 25., p. 1610-4
- Toksöz, M. N., D. H. Johnston & A. Timur, 1979. *Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements*. Geophysics, Vol. 44. pp.681-690
- Toksöz, M. N., D. H. Johnston, 1981. *Seismic wave attenuation*. 2nd ed., Society of Exploration Geophysicists : Tulsa

Tobback, T., Steeghs, P., Drijkoningen, G. G., & Fokkema, T.J., 1996, Decomposition of seismic signals via time frequency representations, Proceedings of the 66th SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, USA.

White, R. E., 1992, The accuracy of estimating Q from seismic data, *Geophysics* Vol. 57., p. 1508-11

Wright, C., & Hoy, D., 1981, A note on pulse broadening and anelastic attenuation in near-surface rocks *Phys, Earth Planet, Inter.* 25 p. 1-8

Zhang, C. J., & Ulrych, T. J., 2002, Estimation of quality factors from CMP records, *Geophysics*, Vol. 67 p. 1542-7



Bibliography

현병구, 1995. *물리탐사용어사전*. 선일문화사.

Lee, H. B., Zhao, W. Z., Cao, H., Yao, F. C., Shao, L. Y., 2004. *Characteristics of seismic attenuation in gas reservoirs in the domain of wavelet scales*. Chinese Journal of Geophysics, Vol. 47. pp.1005-1013.

Paul, P., Stephen, B., Adam, D., 2005. Frequency dependent spectral ratio technique for Q estimate. *Proceedings of the 2nd International workshop on Rainbow in the Earth*, Berkeley, August 17-18, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

Sarma, L. P., Ravikumar, N., 2000. *Q-factor by spectral ratio technique for strata evaluations*. Engineering Geology 57. pp.123-132.

