

PXI를 이용한 LabVIEW기반 해양퇴적물의 음향특성 측정시스템 개발

박기주¹ · 김대철^{2,*} · 이광수¹ · 배성호¹ · 김길영¹

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부

²부경대학교 에너지자원공학과

Implementation of Acoustic Properties Measurement System Based on LabVIEW Using PXI for Marine Sediment

Ki-Ju Park¹, Dae-Choul Kim^{2,*}, Gwang-Soo Lee¹, Sung Ho Bae¹ and Gil Young Kim¹

¹Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요 약

기존의 자동음파전달속도 측정시스템을 이용하여 해양퇴적물의 음향특성을 측정하는 경우 최초도달신호시간의 결정에 발생하는 오류와 측정 절차의 번거로움 등의 몇 가지 문제점들이 존재한다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 PXI 모듈을 이용한 LabVIEW기반의 측정 시스템을 개발하였다. 새로운 측정시스템을 검증하기 위해 동일한 시료와 실험 환경에서 기존 시스템과 병행하여 측정하였다. 그 결과 1~2%의 음파전달속도 측정오차를 보였으며 음파감쇠 역시 기존 시스템과 유사한 결과 값을 도출하였다. 새로이 개발된 PXI(PCI eXtensions for Instrumentation)를 이용한 LabVIEW 기반 음향특성 측정시스템은 퇴적물의 음향특성을 보다 신속하고 효율적으로 측정할 수 있고 측정 자료뿐만 아니라 분석된 신호의 원시자료에 대해서도 지속적인 데이터베이스를 구축할 수 있다.

Abstract – A previous velocity measurement system for marine sediment had several problems such as the errors occurred when picking first arrival time and the inconvenient measurement procedure. In order to resolve these problems, we developed a new acoustic properties measurement system by using PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) module based on LabVIEW. To verify the new system, we measured the velocity and attenuation of sediment using the new system in a parallel with the previous system under the same experimental environment. The result of measurement showed 1~2% margin of error for the velocity as well as similar attenuation values. We concluded that the new system can efficiently measure the acoustic properties of marine sediment. It also has an advantage to construct the database of acoustic data and raw signal.

Keywords: LabVIEW, PXI, Acoustic properties measurement system(음향특성 측정시스템), Marine sediment(해양퇴적물), Velocity(음파전달속도), Attenuation(감쇠)

1. 서 론

해양퇴적물은 기원지, 침식과정, 고화작용 등 퇴적환경 및 변화에 따라 서로 다른 입자 조성 및 물리적 특성을 가지며 이들의 차이는 가변적인 음향반응(acoustic response)으로 나타난다. 따라서 해양 퇴적물의 음향특성(음파전달속도와 음파감쇠)은 퇴적물의 물리적 특성 중 하나로써 퇴적물의 특성과 퇴적환경 등을 반영하는 중요한 속성이다(Kim *et al.*[1985]). 특히 음향특성값은 퇴적물의 타물성값과 뚜렷한 상호관계를 가지며 타물성값에 비해 미세한 퇴적

물 특성까지도 잘 반영하기 때문에 해양자원탐사 분야에서 석유 및 가스 그리고 가스하이드레이트와 같은 지하자원의 부존유무를 파악하는데 필수적으로 사용된다(Kim *et al.*[2009]). 또한 최근엔 지음향을 활용한 군사방어체계 등의 국방 분야에서도 해양퇴적물의 음향특성이 매우 중요하게 사용되고 있다(Hahn *et al.*[2007]).

해양퇴적물의 음향학적 성질에 관한 연구는 측정방법에 따른 기술적인 문제로 활발하지 않았으나 심해저 시추사업(DSDP: Deep Sea Drilling Project)이 시작된 이후 심부 시추코어가 얻어지면서 본격적으로 착수되었다. 이후 컴퓨터와 계측기가 발달함에 따라 음향특성 측정에 관한 활발한 연구가 시도되어 왔다(Birch[1960]; Shumway [1960]; Hamilton[1972]; Boyce[1976]; Kim[1989]; Kim *et al.*[1999];

*Corresponding author: dckim@pknu.ac.kr

Seo and Kim[2000]).

실험실 내 음향특성 측정은 Birch[1960]가 처음으로 수은기둥을 이용하여 암석에 대한 음파전달속도를 측정한 후 Boyce[1976]가 이 방법을 약간 변형시켜 해양퇴적물에 적용하였다. 그 후 실험실에서 수은기둥 방법을 응용한 방법으로 2000년대 초반까지 해양퇴적물의 음파전달속도를 측정해왔다(Kim and Kim[1991]; Kim *et al.*[1994]; Kim *et al.*[2001]). 그러나 이 방법은 육안 관찰을 통해 이루어지기 때문에 측정에 숙달이 필요함은 물론 측정자의 주관적인 견해가 많이 개입되어 측정결과와 정확성과 신뢰성에 한계가 있었다.

이러한 전통적인 방법의 단점을 해결하기 위해 Kim *et al.*[1999]은 알루미늄을 표준시료로 사용하는 자동음파전달속도 측정시스템을 개발하였으며 이후 지금까지 실험실에서 자동음파전달속도 측정시스템을 사용하여 왔다(Kim *et al.*[2001]; Kim *et al.*[2005]; Kim *et al.*[2011]). 하지만 이 시스템은 최초도달신호시간을 결정함에 있어 간혹 오류가 발생하며, 번거로운 측정 절차로 인하여 측정시간이 지연되고, 측정 결과값만을 저장하도록 되어있어 이미 분석된 시료에 대해서는 재분석할 수 없다. 또한 휴대가 용이하지 않아 측정 장소에 대한 제약이 따르는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기존 시스템의 음향특성 측정 시 발생하는 문제점과 개선이 필요한 사항들을 보완하여 새로운 시스템을 구현하는데 그 목적이 있다.

2. 측정원리

2.1 음파전달속도

신호 발생기에서 발생한 펄스가 두 개의 채널(Ch1, Ch2)로 나누어 입력되며 첫 번째 채널(Ch1)에는 시료를 거치지 않은 신호(이하 Pulse 신호)가 입력되고 또 다른 채널(Ch2)에는 시료를 통과한 신호가 입력된다. Ch2를 통해 표준시료와 퇴적물 시료를 통과한 신호의 최초도달시간을 각각 측정한 후 그 차를 이용하여 속도를 계산한다(식 (1)). 음속은 시간과 거리에 대한 함수이므로 정밀한 시료길이의 측정과 신호파형의 최초신호도달점(first arrival point)의 정확한 선택이 음파전달속도 측정의 핵심이다(Kim[1989]).

$$V_p = \frac{L_s}{(T - \Delta t)} \quad (1)$$

여기서 V_p , L_s , T 는 각각 p파속도, 시료의 길이, 시료를 통과한 신호의 지연시간이며 지연시간 보정치(Δt)는 Pulse 신호와 퇴적물 시료를 통과한 최초신호간의 지연시간 중 케이블이나 증폭기와 같은 시료 이외의 부분에서 통과하는 지연시간을 보정해주기 위한 것으로 음파전달속도를 이미 알고 있는 표준시료(Aluminum: 6260 m/s)를 이용하여 계산한다. 알루미늄을 통과한 음파의 속도를 6260 m/s로 이미 알고 있다면 1 inch(2.54 cm)의 알루미늄을 통과한 시간은 이론적으로 4.0575 μ sec 가 된다. 실제로 같은 길이의 알루미늄을 음파가 통과한 시간을 측정하여 이론적인 시간과 측정된 시간의 차이를 계산하며 전기회로의 시간지연에 의한 것으로 간주하여 이를 보정한다.

2.2 음파감쇠

해저퇴적물 시료에 대한 음파감쇠를 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 그 중 진폭 스펙트럼 비율법(amplitude spectral ratio)을 이용하여 감쇠계수를 산출할 수 있다(Toksöz *et al.*[1979]).

음파가 매질을 통과할 때 진폭은 매질의 물리적 성질 및 전파 거리에 따라 감소하며 그에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$A_1(f) = G(f, x)e^{(-\alpha_1(f)x + i(2\pi f t - k_1 x))} \quad (2)$$

$$A_2(f) = G(f, x)e^{(-\alpha_2(f)x + i(2\pi f t - k_2 x))} \quad (3)$$

여기서 A 는 진폭, f 는 주파수, x 는 시료의 길이, $k = 2\pi f/v$ 는 파수, $G(f, x)$ 는 전파 거리에 따른 기하학적 감쇠, $\alpha(f)$ 는 주파수에 따른 감쇠계수, 그리고 아래 첨자 1과 2는 각각 표준시료와 비교시료를 의미하며 표준시료와 비교시료의 길이는 같다고 가정한다. 위의 식 (2)를 식 (3)으로 나누어 진폭의 비율로 나타내면

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{G_1}{G_2} e^{-(\alpha_1 - \alpha_2)x} \quad (4)$$

이 되며 양변에 자연로그를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = (\alpha_2 - \alpha_1)x + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (5)$$

$\alpha(f)$ 가 주파수에 선형적으로 비례하는 함수라고 가정하면 식 (6)으로 표현된다(Jackson and Anderson[1970]; Hamilton[1972]).

$$\alpha(f) = \gamma f \quad (6)$$

여기서 γ 는 감쇠계수와 관련된 상수로서 Q(Quality factor)와는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{\pi}{\gamma V} \quad (7)$$

여기서 V 는 매질의 음속이다. 위의 식 (5)에서 $\ln(G_1/G_2)$ 는 기하학적 감쇠함수로서, 표준시료와 분석시료의 모양이 같으므로 측정주파수 범위에서 일정한 상수값을 갖는다고 가정하면 식 (5)와 (6)을 정리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = (\gamma_2 - \gamma_1)fx + C \quad (8)$$

x 와 C 모두 상수이며 γ_2 와 γ_1 는 각각 비교시료와 표준시료의 감쇠계수이다. 표준시료로 Q값이 매우 높은 매질을 이용하면 γ_1 은 0으로 근사할 수 있다(Sears and Bonner[1981]). 따라서 식 (8)은 $y = ax+b$ 와 같은 일차함수 형태로 주파수와 상대적인 진폭의 비가 선형관계를 가진다. 그러므로 일정한 주파수 구간에서 $\ln(A_1/A_2)$ 의 기울기, 즉 $(\gamma_2 - \gamma_1)x$ 를 구하여 시료의 길이를 소거하면 식 (6)과 (7)에서, 비교시료의 감쇠계수와 Q값을 산출할 수 있다. Quality factor는 무차원의 값으로서 시료를 통과한 탄성파의 감쇠정도를 나타낸다. 매질의 감쇠계수와는 역상관계가 있으며 감쇠가 적을수록 Q값은 증가한다(Toksöz and Johnston[1981]).

3. 기존 음파전달속도 측정시스템

기존 시스템은 데스크탑, 오실로스코프, 펄스발생기, 음파증폭기, 압전변환기로 구성되며 오실로스코프와 PC를 General Purpose Interface Bus(GPIB)로 연결하여 아날로그 데이터를 디지털로 변환한 후 C언어로 제작된 자체 프로그램을 통해 데이터를 분석한다 (Fig. 1). 이 프로그램에서는 수신된 신호를 μsec 단위로 샘플링한 후 일정 진폭 이상이 발생할 때의 시간을 최초도달신호시간으로 발체하여 음파전달속도를 측정한다. 이때 일정 진폭의 차이는 수신된 파형으로부터 잡음수준에 따라 측정자가 결정하게 된다. 일반적으로 실내에서 실험할 경우 10 mV 내외로 설정하게 된다. 음파감쇠는 spectral ratio analysis(진폭 비율 분석법)을 이용하지만 표준시료로 알루미늄을 사용함으로써 수신되는 파형에서 파장의 1.5배의 구간을 FFT 처리하여 음파감쇠를 구한다.

기존 시스템은 2% 이내의 오차 범위로 음파전달속도를 정확히 측정할 수 있지만 아래와 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

- 1) 자동으로 최초도달신호시간을 결정함에 있어 오류가 발생함 (수신된 신호의 진폭이 낮을 경우 최초도달신호시간이 실제 신호가 수신된 시간보다 이후 시점에 선택됨)
- 2) 음파감쇠 측정 과정 중 FFT 분석 시 사용되는 구간이 적어 측정값의 편차가 심함
- 3) 번거로운 측정 절차로 인한 측정 시간지연
- 4) 결과값만을 저장하여 이미 분석된 시료에 대해서는 재분석이 불가함
- 5) 규모가 큰 고가 범용 장비들을 구성하여 사용함으로써 휴대가 용이하지 않음

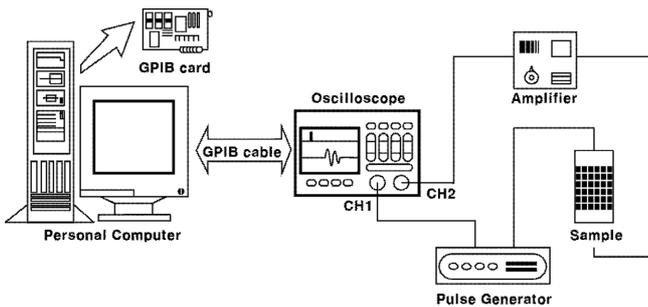


Fig. 1. Schematic diagram of the previous velocity measurement system.

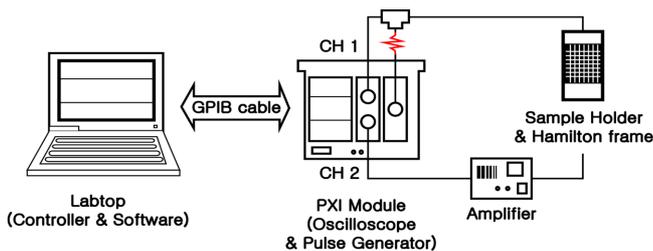


Fig. 2. Schematic diagram of the new system for measuring acoustic properties of marine sediment.

4. LabVIEW 기반 음향특성 측정시스템

4.1 하드웨어 구성

측정 장비는 Laptop, PXI chassis(NI PXI-1033), PXI module (PXI-5114, PXI-5402), 신호증폭기, 중심주파수 1 MHz의 Piezoelectric transducers(PZT; Panametrics V103, 0.5 in diameter)로 구성된다 (Fig. 2). PXI-5402는 100 MS/s로 20 MHz까지의 임의함수 생성이 가능하다. PXI-5114는 초당 250 MS로 실시간 동시 샘플링이 가능하며 아날로그 입력 채널 2개, 분해능 8비트의 성능을 가진다. Laptop과 PXI chassis 간은 ExpressCard MXI(Measurement eXtensions for Instrumentation)로 연결함으로써 PXI chassis에 장착된 모듈들을 통해 수집되는 디지털 및 아날로그 자료를 저장할 수 있도록 하였다.

4.2 측정 소프트웨어 개발

음향특성을 효율적으로 측정하고 PXI모듈을 운용하기 위하여

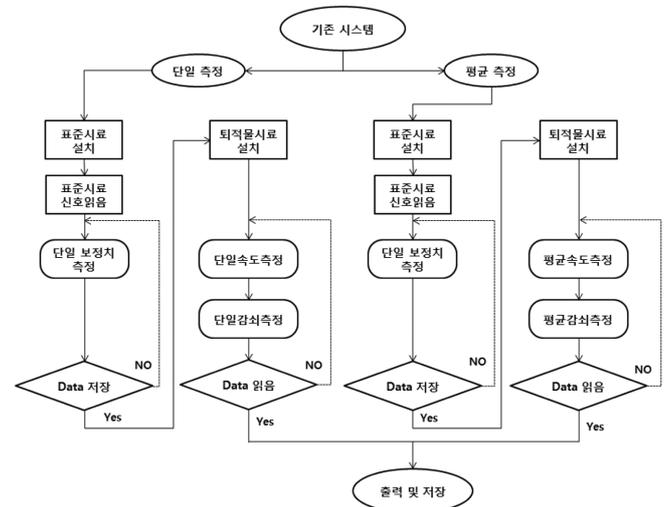


Fig. 3. Flow chart of the previous velocity measurement system.

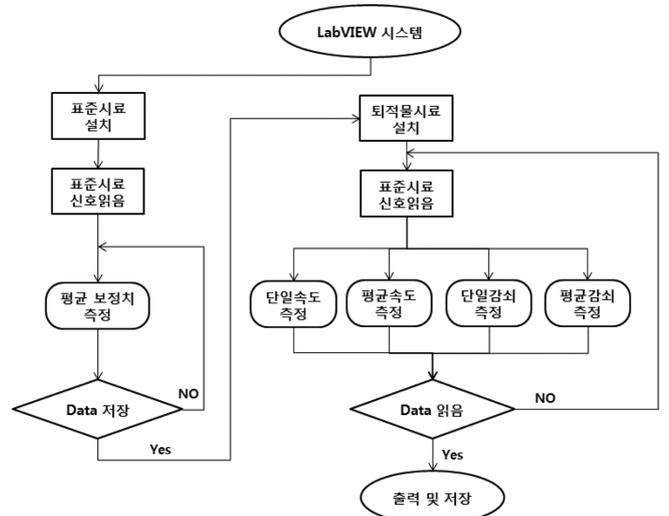


Fig. 4. Flow chart for measuring acoustic properties using the new system.

National Instruments 사의 LabVIEW(Ver. 12.0.1)를 이용하여 측정 소프트웨어를 개발하였다. LabVIEW는 그래픽기반의 언어로서 기본적으로 프론트패널과 블록다이어그램 두 가지의 작업공간이 제공되며 블록다이어그램에서 소스를 작성하면 그에 대응하는 그래픽 인터페이스가 프론트패널에 구성된다.

직렬구조로 프로그래밍 된 기존 시스템(Fig. 3)과는 달리 본 시스템은 병렬구조로 프로그래밍하여 같은 신호에 대한 음파전달속도 및 음파감쇠를 동시에 측정할 수 있도록 하였으며 그 절차는 Fig. 4와 같다.

LabVIEW기반 시스템의 음파전달속도 측정 시 표준시료와 퇴적물 시료를 번갈아 거치하여 측정하더라도 처음 시스템을 이용하는 측정자가 손쉽게 분석할 수 있도록 코딩되었으며, 최초도달신호시간을 결정하는 화면이 Fig. 5b에 도시되어있다. Fig. 5a는 Fig. 5b의 블록다이어그램이다. 초동주시는 신호가 수신되기 전에 계속해서 변동하는 평균 잡음의 진폭을 상회하는 수준에서 자동으로 결정되도록 함으로써 기존 시스템의 초동주시 발취방법에 있어서 발생하는 문제, 즉 수신되는 신호의 진폭이 낮은 경우 실제 초동주시보다 더 지연된 시점이 선택되는 문제가 개선되었다.

음파감쇠 측정 시에는 기계적인 잡음을 제외한 신호를 분석하기 위하여 Bandpass filter를 적용하였다. 필터된 신호는 시료의 양쪽 압전변환기 사이에서 여러 번 반사와 굴절을 반복하여 수신된 것으로 신호가 처음 도달하는 지점에서부터 잡음이 섞이기 전까지의 신호를 사용하여 진폭스펙트럼을 구하였다. 이 때 시료의 음파전달 속도에 따라 Fast fourier transform(FFT) 처리 시 가용한 파장수가 달라진다. 가령, 표준시료인 증류수에 1 MHz 주파수를 가진 음파가 전달될 때, 상온 21 °C에서 음파전달속도가 약 1500 m/s이고 시

료의 길이가 2.54 cm이면 처음 신호가 도달하는 시간은 약 16.9 μ sec 이다. 그리고 정육면체 시료의 가장자리 면에서 반사 또는 굴절되어 가장 빨리 도착할 수 있는 최단거리는 $2.54\sqrt{2}$ cm 이므로 첫 신호로부터 교란 직전까지의 시간차이는 약 6.9 μ sec가 된다. 주파수가 1 MHz이면 한 파장의 주기 T는 1 μ sec이므로 진폭 스펙트럼 분석에 사용할 수 있는 음파신호의 구간은 파장의 약 6.5배가 된다. 해양퇴적물의 경우 음파전달속도는 약 1450~1800 m/s의 다양한 범위를 가지며 음파전달속도가 1800 m/s로 빠른 매질의 경우 교란 직전까지의 시간차이는 약 5.5 μ sec가 된다. 그러나 1 MHz의 고정

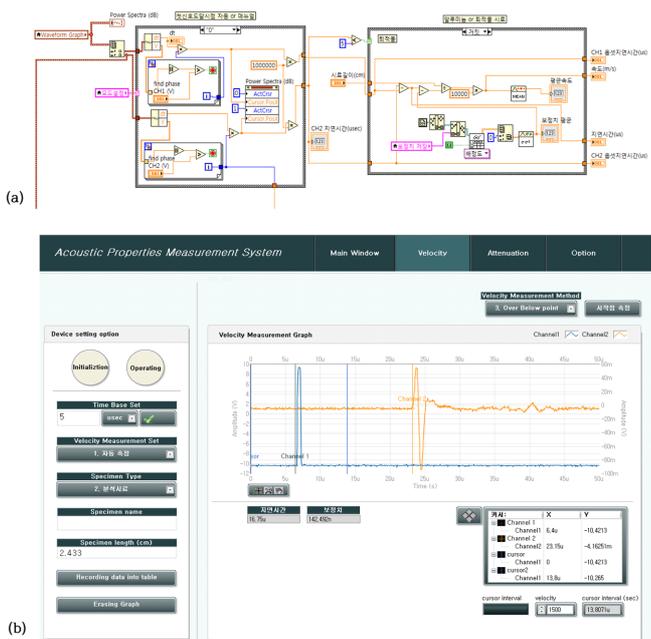


Fig. 5. (a) Block diagram and (b) Front panel for peaking first arrival in LabVIEW.

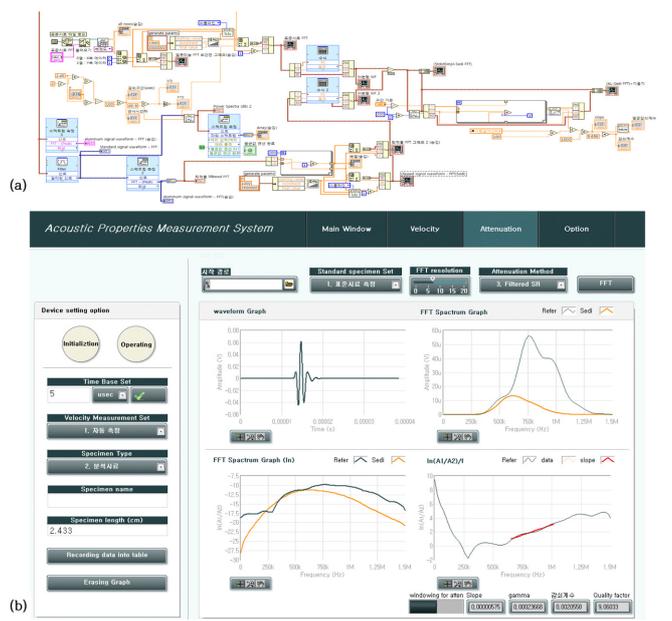


Fig. 6. (a) Block diagram and (b) Front panel for estimating quality factor in LabVIEW.

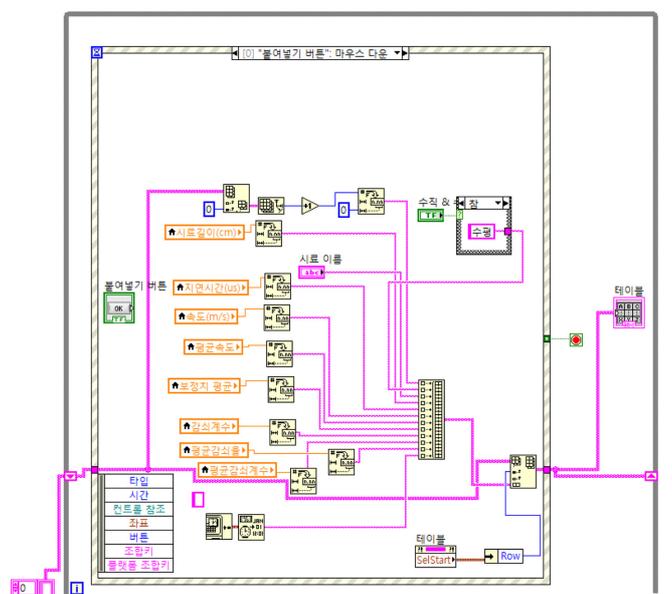


Fig. 7. Block diagram for saving data and signals into disk.

주파수를 사용한다 할지라도, 에너지가 매질을 통과한 거리에 따라 최대 진폭이 나타나는 주파수는 저주파 쪽으로 편향한다(Kim and Suk[1985]). 따라서 이러한 주파수 편향성을 감안하여 750 kHz 주파수로 표준시료, 퇴적물시료 모두 일괄적으로 네 파장에 해당하는 신호를 FFT 처리에 사용하였다. Fig. 6은 상기 기술한 과정을 통해 감쇠계수를 측정하기 위한 코드와 측정화면을 보여준다.

Fig. 7는 음파전달속도 및 음파감쇠를 측정한 자료와 퇴적물을 통과한 신호파형을 ASCII 형식으로 디스크에 저장하기 위한 코드이다. 데이터는 엑셀파일로 확인할 수 있으며 저장된 신호는 다시 응용프로그램을 통해 음향특성을 재분석할 수 있다.

5. 측정 및 검증

새로 개발된 LabVIEW기반 시스템을 검증하기 위해 기존의 시스템과 병행하여 동일한 시료 및 실험 환경에서 음파전달속도와 음파감쇠를 측정하였다. 실험은 황해 남동해역의 흑산 니질대 해역에서 피스톤 시추기로 채취한 2개의 코어시료를 이용하였으며 수직적인 조직변화에 따라 여러 깊이에서 측정하였다. 퇴적물의 입도는 Folk[1968]의 모멘트 방법에 의해 평균입도(Mz)를 산출하였으며 객관적인 자료검증에 유리한 5~8 ϕ 의 다양한 입도범위를 가진다. 두 시스템을 이용하여 코어깊이에 따라 측정된 음파전달속도와 감쇠는 Table 1에 도시하였다. 기존 시스템의 음파전달속도는 1504~1643 m/s의 범위를 가지며 LabVIEW기반 시스템은 1509~1632 m/s의 범위를 보인다. 두 시스템의 음파전달속도 측정값의 차이는 1~2% 이내로 미미하고 두 시스템의 측정값 간의 상관관계(Fig. 8) 역시 뚜렷한 것으로 보아 새로 개발된 LabVIEW기반 시스템의 신뢰도는 인정된다고 볼 수 있다.

Table 1. Results of velocity and attenuation from two different systems with the mean grain size

Core name	Previous system		New system		Mean grain size
	Velocity	Quality factor	Velocity	Quality factor	
Core 1	1571.03	6.2	1581.81	3.0	6.17
	1536.36	6.6	1547.33	4.3	6.39
	1643.59	2.1	1632.12	2.4	6.66
	1504.88	7.5	1509.19	6.7	7.34
	1574.28	4.5	1571.5	2.3	6.48
	1604	5.4	1600.78	2.1	6.37
	1592.1	3.6	1576.94	2.3	6.41
	1614.21	4.6	1591.35	1.6	5.5
	-	-	1576.29	1.7	5.3
Core 2	1542.68	18.5	1551.2	11.3	8.06
	1550.57	14.5	1560.87	12.6	7.43
	1539.93	11.3	1548.95	11.9	7.74
	1543.72	15.7	1555.36	15.5	7.46
	1545	15.6	1554.53	18.4	7.8
	1547.61	13.5	1562.04	22.3	7.64
	1519.33	9.8	1527.61	7.1	7.64

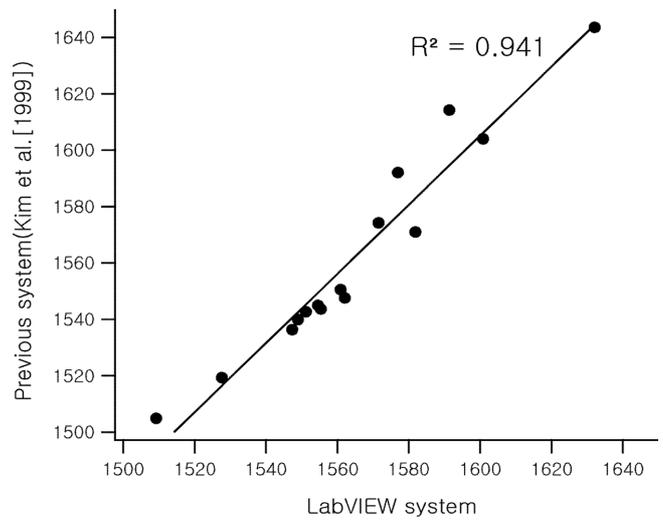


Fig. 8. Comparison of data obtained by the two different systems. Note the almost linear relationship.

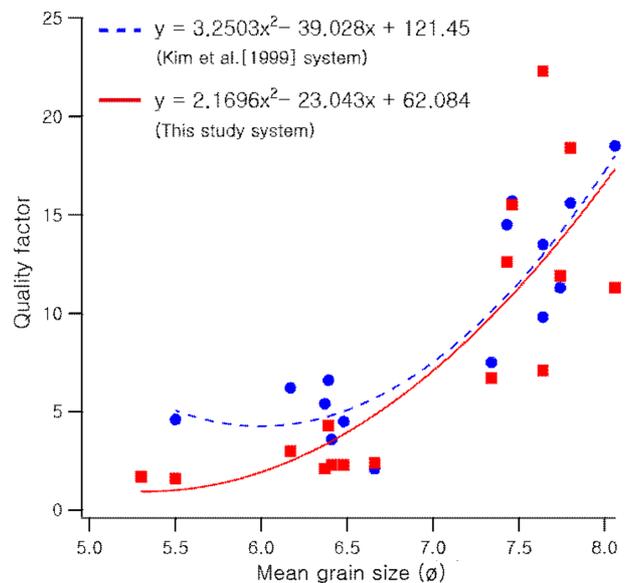


Fig. 9. Quality factor versus mean grain size (ϕ) with two different systems. Dotted line represents polynomial regression for previous system data (solid circle) and solid line indicates the regression of new system data (solid square).

해양퇴적물의 경우 1 MHz의 주파수 대역에서 약 70~400 dB/m의 감쇠계수 범위와 1450~1800 m/s의 속도를 가지므로(Hamilton[1980]), Quality factor(Q)는 약 30 이하의 값으로 계산될 수 있다. 본 연구에서 두 시스템을 이용하여 측정된 Q값은 일반적인 해양퇴적물에서 나타날 수 있는 Q값의 범위에 있으며 비교가 용이하도록 Quality factor와 입도의 상관관계를 회귀곡선으로 나타내었다(Fig. 9). 두 시스템의 결과 모두 전반적으로 입자크기가 조립해 질수록 감쇠가 커지는 양상을 보이며 6.5 ϕ 이상의 세립질 퇴적물의 경우 그 차이가 미미하다. 그러나 입자크기가 조립해 질수록 점점 큰 차이를 보인다. 기존의 연구에 따르면 해양퇴적물의 경우 4 ϕ 전후의 입도에

서 감쇠가 가장 큰 것으로 알려져 있다(Hamilton[1972]). 이 점을 미루어 볼 때 LabVIEW기반 시스템의 측정 자료가 40 보다 세립한 퇴적물에서 입자크기가 증가할수록 감쇠가 커지는 양상을 더 잘 반영한 것으로 판단된다.

6. 결 론

해양퇴적물의 음파전달속도 측정 시 최초신호(first arrival) 선택 방법에 따른 정확성에 대해서는 본 연구에서 논할 수 없으나 두 시스템으로 측정된 자료를 비교한 결과 음파전달속도의 측정오차는 1~2% 이내로 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 차후 최초도달신호시간 발췌 방법에 따른 해양퇴적물의 속도 측정의 정확성에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 음파감쇠는 40 전후 에서 감쇠가 가장 크다는 기존의 연구에 따라 새로운 시스템의 결과가 이를 잘 반영한 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 해양퇴적물 음향특성 측정시스템을 새로이 개발하여 기존 시스템에서 야기된 문제점들을 해결할 수 있게 되었다. 특히 기존 시스템의 최초도달신호시간 발췌방법에 있어서 발생하는 문제가 개선되었으며 자료의 결과값만을 저장하는 기존 시스템의 일회성 측정 방식을 PXI기반인 LabVIEW를 이용하여 보완함으로써 실험실에서 측정되는 방대한 음향특성자료들을 더욱 신속하고 효율적으로 측정할 수 있게 되었다. 더불어 계측자료들의 파일링이 가능한 것은 물론 분석된 신호의 원시자료까지 지속적으로 데이터베이스화할 수 있는 큰 이점을 갖게 되었다. 또한 장비의 규모를 축소함으로써 차후 퇴적물 시료 채취 직후 선상에서의 측정이 용이 하도록 후대의 편의성이 제공되었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2014년)에 의하여 연구되었습니다. 본 논문을 자세히 심사하여 주신 심사위원들께 감사드립니다.

References

- [1] Birch, F., 1960, "The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 1", J. Geophys. Res., Vol. 65, No. 4, 1083-1102.
- [2] Boyce, R.E., 1976, "Definitions and laboratory techniques of compressional sound velocity parameters and wet-water content, wet-bulk density, and porosity parameters by gravimetric and gamma-ray attenuation techniques", Init. Repts. DSDP, Vol. 33, 931-958.
- [3] Folk, R.L., 1968, "Petrology of sedimentary rocks", Hamphill's Austin, Texas, 170.
- [4] Hahn, J.Y., Lee, H.U. and Lee, B.K., 2007, "Influence of the geoacoustic parameters of seabed appearing in the broadband interference pattern by moving targets", Journal of the KIMST, Vol. 10, No. 3, 43-50.
- [5] Hamilton, E.L., 1972, "Compressional-Wave Attenuation in Marine Sediments", Geophys., Vol. 37, No. 4, 620-646.
- [6] Jackson, D.D. and Anderson, D.L., 1970, "Physical mechanisms of seismic-wave attenuation", Rev. Geophys., Vol. 8, No. 1, 1090-1098.
- [7] Kim, D.C., Manghnani, M.H. and Schlanger, S.O., 1985, "The role of diagenesis in the development of physical properties of deep-sea carbonate sediments", Mar. Geol., Vol. 69, No. 1, 69-91.
- [8] Kim, S.R. and Suk, B.C., 1985, "The sound velocity and attenuation coefficient of the marine surface sediments in the near-shore area", J. Kor. Soc. Ocean., Vol. 20, No. 2, 10-21.
- [9] Kim, D.C., 1989, "Laboratory determination of compressional wave velocity for unconsolidated marine sediment", J. Kor. Fish. Soc., Vol. 22, No. 3, 147-153.
- [10] Kim, D.C. and Kim, G.Y., 1991, "Physical and acoustic properties for unconsolidated sediment in the Kwangyang Bay: In comparison with the continental terrace sediment in the North Pacific", J. Kor. Fish. Soc., Vol. 24, No. 5, 289-302.
- [11] Kim, G.Y., Sung, J.Y., Kim, D.C. and Kim, J.C., 1994, "Physical and acoustic properties of sediment around the Yeosu sound", J. Kor. Fish. Soc., Vol. 27, No. 4, 434-444.
- [12] Kim, D.C., Kim, G.Y., Seo, Y.K., Ha, D.H., Ha, I.C., Yoon, Y.S. and Kim, J.C., 1999, "Automated velocity measurement technique for unconsolidated marine sediment", J. Kor. Soc. Ocean., Vol. 4, No. 4, 400-404.
- [13] Kim, D.C., Park, S.C. and Seo, Y.K., 2001, "Characteristics of velocity and electrical resistivity in gassy sediments: Results of mudbelt sediments in the southeastern inner shelf of Korea", J. Kor. Soc. Ocean., Vol. 6, No. 4, 249-258.
- [14] Kim, D.C., Sung, J.Y., Park, S.C., Lee, G.H., Choi, J.H., Kim, G.Y., Seo, Y.K. and Kim, J.C., 2001, "Physical and acoustic properties of shelf sediments, the South Sea of Korea", Mar. Geol., Vol. 179, No. 1, 39-50.
- [15] Kim, G.Y., Kim, D.C., Shin, B.K., Seo, Y.K. and Lee, G.H., 2005, "Geoacoustic model of surface sediments in the east of Geoje Island, the south sea of Korea", J. Kor. Soc. Ocean., Vol. 10, No. 2, 129-138.
- [16] Kim, G.Y., Yoo, D.G. and Ryu, B.J., 2009, "Sound velocity property of sediment containing gas hydrate in the Ulleung Basin", J. Acoust. Soc. Kor., Vol. 28, No. 5, 424-431.
- [17] Kim, G.Y., Kim, D.C., Yoo, D.G. and Shin, B.K., 2011, "Physical and geoacoustic properties of surface sediments off eastern Geoje Island, South Sea of Korea", Quat. Int., Vol. 230, No. 1, 21-33.
- [18] Sears, F.M. and Bonner, B.P., 1981, "Ultrasonic Attenuation Measurement by Spectral Ratios Utilizing Signal Processing Techniques", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. GE-19, No. 2, 95-99.
- [19] Seo, Y.K. and Kim, D.C., 2000, "Acoustic property of sandy sediment in the Korea strait using sediment sound velocimeter", J.

Acoust. Soc. Kor, Vol. 19, No. 3, 77-85.

[20] Shumway, G., 1960, "Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method", *Geophys.*, Vol. 25, No. 2, 451-467.

[21] Toksöz, M.N. and Johnston, D.H., 1979, "Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements", *Geophys.*, Vol. 44, No. 4, 681-690.

[22] Toksöz, M.N. and Johnston, D.H., 1981, "Seismic wave attenuation", No. 2, *Soc. Explor. Geophys.*

Received 8 July 2015

Revised 29 July 2015

Accepted 31 July 2015