

아두이노를 활용한 무선 탄성파 자료취득 모듈 구현 실험

김찬일¹ · 조상인² · 편석준^{2*}

¹에이에이티

²인하대학교 에너지자원공학과

Experimental Implementation of a Cableless Seismic Data Acquisition Module Using Arduino

Chanil Kim¹, Sangin Cho², and Sukjoon Pyun²

¹AAT

²Department of Energy Resources Engineering, Inha University

요약

석유가스 탐사 분야에서는 자료 취득 효율성을 개선하기 위한 대안으로 다양한 무선 탄성파 탐사 장비들이 개발되었다. 그러나 현재 상용화된 무선 탄성파 탐사 장비는 높은 가격대를 형성하고 있으므로 작은 규모의 연구용 장비 구축이 어렵다. 이 때 비교적 적은 비용으로 탐사 장비 제작 및 구현이 가능한 오픈소스 하드웨어를 통해 직접 장비를 만들어 실험하는 것이 무선 탄성파 장비의 학술적 활용을 위한 한가지 대안이 될 수 있다. 이 연구에서는 오픈소스 하드웨어 중 아두이노를 이용하여 무선으로 탄성파 자료를 취득하기 위한 모듈을 개발하였다. 무선 탄성파 탐사 장비는 하나의 수신 장비에서 신호 감지, 간단한 전처리, 저장이 모두 이루어져야 한다. 탄성파 신호를 감지하는 센서로는 육상 탄성파 탐사에서 사용되는 지오폰을 활용하였으며, 이를 아두이노 회로와 연결하여 감지된 신호를 처리하고 저장하는 모듈을 구현하였다. 아두이노를 사용하여 구축된 모듈에는 전처리, 아날로그-디지털 변환, 자료저장 등 크게 3가지 기능이 포함된다. 제작한 단일 채널 모듈은 여러 송신원으로부터 취득한 신호를 취합하여 공통 수신점 모음을 구성할 수 있다.

주요어

무선 탄성파 탐사, 아두이노, 아날로그-디지털 변환, 자료취득, 지오폰

ABSTRACT

In the oil and gas exploration market, various cableless seismic systems have been developed as an alternative to improve data acquisition efficiency. However, developing such equipment at a small scale for academic research is not available owing to highly priced commercial products. Fortunately, building and experimenting with open-source hardware enable the academic utilization of cableless seismic equipment with relatively low cost. This study aims to develop a cableless seismic acquisition module using Arduino. A cableless seismic system requires the combination of signal sensing, simple pre-processing, and data storage in a single device. A conventional geophone is used as the sensor that detects the seismic wave signal. In addition, it is connected to an Arduino circuit that plays a role in implementing the processing and storing module for the detected signals. Three main functions are implemented in the Arduino module: preprocessing, A/D conversion, and data storage. The developed single-channel module can acquire a common receiver gather from multiple source experiments.

KEYWORDS

cableless seismic survey, Arduino, A/D conversion, data acquisition, geophone

Received: 29 June 2023; Revised: 19 July 2023; Accepted: 20 July 2023

*Corresponding author

E-mail: pyunsj@inha.ac.kr

Address: Department of Energy Resources Engineering, Inha University, 100 Inharo, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

©2023, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

탄성과 탐사 신호는 시간에 대해 연속적으로 변화하며 그 변화의 범위가 넓기 때문에 빠르고 정밀한 측정이 필수적이다. 따라서 탄성과 신호의 변화를 정확하게 감지하기 위해서는 충분히 작은 측정 시간 간격을 사용해야 하고, 지층에서 전파하는 거리에 따라 취득한 자료의 신호 감쇠를 보정해야 한다(Gao *et al.*, 2016). 이와 같이 탄성과 탐사로 자료를 취득할 때는 단순히 지반의 진동으로 유도된 전기적 신호를 기록하는 것 외에도 자료 품질을 높이기 위한 노력이 필요하다. 따라서 일반적인 탄성과 탐사 장비에는 연속적인 물리량을 전기적인 이산 신호로 변환하기 위한 전자회로 뿐만 아니라, 정밀한 신호 증폭 및 변환을 위해 내부 잡음을 최소화하는 설계가 포함되어 있다(Dan *et al.*, 2021). 이로 인해 다양한 성능을 갖춘 탄성과 탐사 장비의 제작 비용은 증가하게 된다. 또한, 현장 운용 측면에서는 하나의 장비에서 여러 채널의 신호를 수집해야 하므로 이를 연결하기 위한 많은 수의 케이블이 필요하다. 따라서 탐사 규모가 크고 설계가 복잡할수록 필요한 케이블의 개수와 케이블을 연결에 필요한 장비의 수가 기하급수적으로 증가하게 된다. 이러한 이유로 탄성과 자료취득 비용은 매우 높은 편이고, 이는 비용 절감을 위한 새로운 장비 개발의 주요한 동기가 되어 왔다.

자료취득의 효율성을 개선하기 위한 대안으로 무선 탄성과 탐사 장비가 개발되었고, 그와 관련한 이론연구 및 기술개발이 최근까지 꾸준히 이루어져 왔다(Reddy *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2015; Crice *et al.*, 2015). 일반적으로 무선 탄성과 탐사 장비는 개별 수신기 단위로 작동하며, 신호를 자체적으로 측정하고 저장하는 것이 가능하도록 센서, GPS, 저장장치, 배터리 등이 한 수신기 내에 모두 장착되어 있다(Lee *et al.*, 2016). 이러한 형태의 무선 탄성과 탐사 장비는 트리거 신호를 이용하지 않고 기록을 동기화하기 위해 절대적인 기준점으로 GPS 시간을 이용해야 한다(Makama *et al.*, 2021). 또한, 신호의 정상적 측정 여부나 자료 품질을 실시간으로 확인하는 것이 제한적이다. 이러한 문제점에도 불구하고 소재와 전자회로 설계 기술의 발전에 따라 무선 탄성과 탐사 장비의 성능이 개선되고 있으며 다양한 현장에서 수요가 꾸준히 증가하는 추세이다(Dean *et al.*, 2018; Dai *et al.*, 2015). 그러나 현재 상용화된 장비들의 경우 아직 높은 단가를 형성하고 있어 제한된 예산으로 대규모 장비를 구축하는 데에는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 무선 탄성과 탐사 장비의 비용 대비 효율성 개선이 더욱 필요하다.

무선 탄성과 탐사 장비의 비용 대비 효율성 개선을 위해서는 오픈소스 하드웨어가 활용될 수 있다(Soler-Llorens *et al.*, 2016). 오픈소스 하드웨어는 “누구든지 제작, 수정, 배포하고 사용할 수 있도록 디자인이 공개되는 물리적 인공물(기계, 장

비 및 기타 실체가 있는 물건)을 나타내는 용어”라고 정의된다(Open Source Hardware Association, 2023). 좁은 의미로는 해당 제품과 똑같은 모양 및 기능을 가진 제품을 만드는 데 필요한 모든 것(회로도, 자재 명세서, 인쇄 회로 기판 도면 등)을 대중에게 공개한 전자제품을 이야기하며, 현재 다양한 제품이 공개되어 있다(Kang *et al.*, 2016). 특히, 2013년부터 다품질 소량생산 또는 DIY (Do it yourself) 디지털제조 열풍을 타고 보급형 3D 프린터, 레이저 프린터들과 함께 오픈소스 하드웨어를 이용한 제조자 운동(Maker's Movement)이 미국을 중심으로 확산되어 왔다(Yoo, 2013). 이를 통해 다양한 ICT (information and communication technology) 기기의 설계도들이 여러 분야에 걸쳐 쉽게 공유되고 개량되었다.

오픈소스 하드웨어의 대표적인 예로 아두이노(Arduino)와 라즈베리 파이(Raspberry Pi)가 있는데, 두 모델 모두 소형 마이크로 컨트롤러(micro control unit, MCU)이며 다양한 분야에 사용되고 있다. 아두이노는 컨트롤러 기능에 집중하여 펄스폭 변조(pulse with modulation, PWM) 또는 디지털 통신을 이용한 기기 제어 및 아날로그 신호 측정을 통한 신호 수집의 기능에 집중하는 반면, 라즈베리 파이의 경우 싱글 컴퓨팅 보드라는 기능에 중점을 두어 그래픽, 오디오, 네트워크 등의 기능을 통합적으로 구현하기 위해 다양한 기능이 구축되어 있다(Ryu and Choi, 2016). 이러한 차이로 인해서 아두이노가 상대적으로 간단한 회로를 구성하는데 적합하고, 다양한 센서를 이용한 신호 측정 및 제어 장비 개발에 활용될 수 있다. 또한, 아두이노 공급자들 간의 경쟁으로 기기 가격이 매우 낮게 형성되어 있고, 국내외 온라인 커뮤니티가 활성화되어 초보자가 접근하기 쉬운 플랫폼이다. 물리탐사 분야에서도 천해저 환경의 지질학적 조사(D'Alessandro *et al.*, 2016), 전기 비저항 탐사를 통한 식물 뿌리 감지(Gerea and Mihai, 2018) 등 특수한 목적이나 환경에서의 자료 취득을 위한 장비 개발에 아두이노를 활용하는 연구가 수행되었다(Dezord *et al.*, 2021; Trysnyuk *et al.*, 2022).

이 연구에서는 아두이노를 사용하여 소규모 실험실에서 제작 가능한 독립형 무선 탄성과 탐사 모듈을 개발하였다. 이를 구현하기 위해서 측정 센서는 일반적인 육상 탄성과 탐사에서 사용하는 지오폰(geophone)을 활용하였고, 아두이노 모듈에 아날로그-디지털 변환장치(analog-to-digital convertor, ADC)를 연결하여 지오폰에서 측정한 아날로그 신호를 디지털 자료로 변환하고자 하였다. 특히 정밀한 측정을 위해 아날로그 신호의 전처리 회로를 설계하여 신호 증폭 및 필터링 기능을 추가했고, 자료 저장은 일반적인 SD 카드를 아두이노에 장착하는 방식으로 구현하였다. 또한, 제작한 무선 탄성과 탐사 모듈을 검증하기 위해 기존 상용 유선 탄성과 탐사장비로 취득한 탄성과 자료와 비교하였다.

이 론

무선 탄성파 탐사 장비

무선 탄성파 탐사 장비는 유선 탄성파 탐사 장비의 단점을 해결하여 효율적인 탐사를 수행할 수 있도록 개발된 장비이며, 상용화된 제품으로는 Geospace Technology 사의 GCL connectorless recorder (Fig. 1a), Smartsolo scientific 사의 IGC (Fig. 1b), Inova 사의 Quantum (Fig. 1c), Geophysical Technology 사의 NRU (Fig. 1d), Sercel 사의 WiNG (Fig. 1e) 등이 있다.

무선 탄성파 탐사 장비는 신호 감지와 저장이 동시에 수행되어야 하므로 탄성파를 감지하는 센서, 디지털 변환 장치, 데이터 저장장치가 통합되어 구성된다(Lee *et al.*, 2016). 따라서 일반적으로 무선 탄성파 탐사 장비는 센서에서 감지된 신호의 전처리와 변환, 그리고 저장 과정을 수행하도록 구성된다. 이러한 단계들은 신호의 처리/변환과 자료 저장을 위한 2개의 모듈을 통해 각 회로에서 독립적으로 수행하도록 설계된다(Attia *et al.*, 2020). 첫번째 회로는 신호의 처리 및 변환을 담당하는 회로로서 간단한 전처리를 통해 취득된 신호의 진폭과 주파수 대역을 보정하고, 디지털 자료로의 변환을 수행한다. 이 회로를 통과하여 변환된 신호는 두번째 회로로 전달된 후 기존 회로에서는 삭제된다. 두번째 회로는 신호를 저장하고, 시간에 대한 동기화를 수행한다. 이때 시간 동기화는 GPS 시간을 이용하여 자체적인 기록 시간에 상응하는 절대시간 정보를 부여하는 것을 의미한다. 일정 시간동안 자료를 기록하는 작업이 반복되며 이를 통해 최종적인 탄성파 탐사 자료를 취득하게 된다.

유선 탄성파 탐사장비는 수신기 사이의 연결을 통해 신호를 공통 송신원 모음 형태로 기록하기 때문에 자료 회수를 위한 추가적인 과정이 필요하지 않다. 그러나 무선 탄성파 탐사 장비의 경우 한 지점에서 시간에 대해 연속적인 형태로 기록되므로 각 수신기에 저장된 자료에서 얻고자 하는 자료를 추출하고 장비 간의 위치 및 시간 기준을 동기화하는 과정이 필요하다. 이러한 과정은 장비에 따라 수행하는 방식이 다르다. 장

비의 저장 장치만 회수하여 소프트웨어를 통해 최종 자료를 취득하는 경우가 일반적인 반면(Ellis, 2014), 추가적인 기기를 활용하여 모든 수신기에서 취득된 정보를 일괄적으로 처리하는 과정을 수행하기도 한다(Crice, 2014).

아날로그/디지털 변환

아날로그 신호는 물리적인 현상 그 자체를 표현하는 연속적인 값으로 매우 방대한 저장 공간이 필요하다. 이를 디지털 신호로 변환하면 매우 효율적인 자료 저장이 가능하므로 아날로그 형태의 탄성파 신호를 취득할 때 디지털 신호로 변환하는 과정이 필수적이다. 아날로그 신호는 시간에 대한 샘플링(sampling)을 통해 디지털 신호로 변환된다. 변환된 디지털 신호는 일정한 시간 간격을 가지므로 나타낼 수 없는 주파수 성분이 존재하게 된다. 이 때, 표현 가능한 주파수 한계를 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)라고 한다. 디지털 신호에서는 그 이상의 주파수 성분에 해당하는 정보를 포함할 수 없으며 낮은 주파수 대역으로 알리아싱(aliasing)되어 나타난다. 나이퀴스트 주파수 값과 샘플링 간격의 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다(Kearey *et al.*, 2013).

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1)$$

여기서 f_N 은 나이퀴스트 주파수 값을 나타내고 Δt 는 샘플링 간격을 나타낸다.

디지털 변환을 위한 회로를 설계할 때 가장 중요한 두가지 요소는 샘플링 간격과 아날로그 신호의 주파수 대역이다. 샘플링 간격은 식 (1)로 표현되는 샘플링 이론에 따라 주어진 아날로그 신호가 디지털화 된 후 다시 아날로그 형태로 복원되었을 때, 정보의 누락을 최소화하기 위한 값을 선정한다. 두번째 요소인 아날로그 신호의 주파수는 타겟이 되는 주파수 대역을 보존하기 위해 디지털 변환 전에 변환에 적합한 대역이 선택되어야 한다. 타겟 주파수 대역을 제외한 주파수 성분을 제거함으로써 표현이 불가능한 주파수로 인한 디지털 신호의 변형을 방지한다(Kim, 2019). 따라서 디지털 변환을 수행하기 전

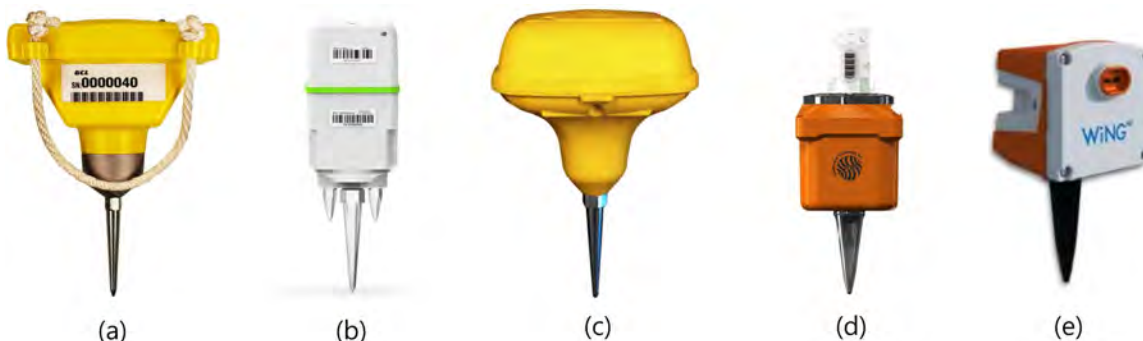


Fig. 1. Wireless geophone: (a) GCL connectorless recorder (Geospace Technology, 2023), (b) IGC (Smartsolo scientific, 2023), (c) Quantum (Inova, 2023), (d) NRU (Geophysical Technology, 2023) and (e) WiNG (Sercel, 2023).

에 적절한 주파수 영역의 필터를 설계하여 회로를 구성해야 한다(Xie, 2016).

샘플링 이론을 고려하여 적절한 디지털 변환 회로를 설계한 후 ADC를 통해 변환이 수행된다. ADC의 성능은 디지털 변환의 해상도와 변환속도(conversion rate)에 따라 구분된다. 결정된 샘플링 간격에서 디지털 신호 값을 추출하는 단계를 양자화 단계라고 하는데, 이러한 양자화 단계에서 발생하는 정밀도는 디지털 코드의 비트에 따라 결정된다. 따라서 디지털 변환의 해상도를 나타내는 단위는 비트로 표현을 하며, 비트가 클수록 해상도가 높은 신호를 얻을 수 있다(Proakis and Manolakis, 2001). 변환속도는 디지털 변환이 수행되는 최소 주기를 의미하며 샘플링 간격과 밀접한 관계가 있으므로 변환된 신호의 주파수 대역을 결정한다. 즉, 변환속도가 높을수록 넓은 주파수 대역의 신호를 얻을 수 있다. 그러므로 아날로그-디지털 변환 시 해상도와 변환속도를 고려하여 적절한 칩셋을 선택하는 것이 매우 중요하다. 변환의 해상도를 높이기 위해서는 내부 회로를 더 정밀하게 구성해야 하므로 더 높은 차수의 연산을 필요로 하는 반면, 변환을 빠르게 수행하기 위해서는 단순하고 유동적인 회로가 유리하다. 결론적으로 ADC의 성능 선택은 해상도와 변환속도 사이의 상관성을 고려하여 두 가지 목표를 적절히 절충하는 것이 필요하다.

아날로그 신호의 전처리

ADC로 변환을 수행할 때는 처리할 수 있는 데이터 양의 제한 때문에 해상도와 변환속도 사이에 트레이드-오프(trade-off) 문제가 존재한다. 즉, 디지털 변환 속도를 높이면 샘플 개수가 많아지므로 양자화할 수 있는 출력전압의 단계가 줄어들고 해상도가 낮아지게 된다. 이 문제는 ADC의 처리 용량 한계에서 비롯된 것이지만 아날로그 신호의 전처리를 통해 어느정도 보완할 수 있다. 측정하는 물리적 신호의 크기가 작아 ADC의 동적 범위(dynamic range)를 충분히 활용하지 못하는 경우 아날로그 신호를 증폭하면 주어진 동적 범위를 최대한 활용하게 되고, 하드웨어적으로 동일한 해상도 조건에서도 실질적으로 더 높은 해상도의 디지털 자료를 샘플링하는 효과가 나타난다. 이러한 방법을 전처리 과정에 적절히 병합하여 빠르고 안정적인 디지털 변환을 수행할 수 있다(Abrams and Elder, 2013). 특히, 탄성파 신호는 벌림(offset)에 따라 진폭의 크기가 매우 급격하게 변화하기 때문에 벌림 거리가 멀어질수록 변환 과정에서 유의미한 신호 변화를 표현하기 어려우므로 신호 증폭을 위한 전처리가 중요하다.

디지털 신호로 변환할 때 음(-)전압 정보 소실 문제가 발생하는데, 이 또한 아날로그 신호의 전처리로 해결할 수 있다. 수신기에서 감지되는 아날로그 신호를 그대로 디지털 신호로 변환할 경우 음(-)전압 정보가 무시되고 변환 과정에서 잡음이 증폭되거나 진폭의 변화를 적절히 표현하지 못할 수 있다. 이는 아날로그 신호가 교류전원으로서 음(-)전압과 양(+)

보를 모두 포함하기 때문이다. 특히, 아두이노를 이용한 디지털 변환으로 아날로그 신호를 변환하고자 할 때 아두이노의 내부회로는 양(+)전압만을 인식하도록 설계되어 있기 때문에 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해서는 양극(bipolar) 전압인 아날로그 신호를 단극(unipolar) 전압으로 변환해야 한다. 대표적인 방법으로는 일정한 전압을 추가로 공급하여 출력 전압을 양(+)의 범위만으로 편향(bias)시키는 방식이 있다. 이때 편향을 위해 사용되는 전압 값을 오프셋 전압(offset voltage)라고 하며, 정보 손실을 방지하기 위해 적절한 오프셋 전압을 선정하고 이를 공급하는 회로를 안정적으로 설계하는 것이 필요하다(Lee, 2013).

또한, 디지털 변환 과정에서 생성될 수 있는 불필요한 잡음을 최소화하기 위해 아날로그 필터가 활용된다. 아날로그 필터는 저항, 콘덴서, 코일로 이루어진 회로로서 아날로그 신호의 주파수에 따른 감쇠를 적용하는 필터이다. 이러한 필터는 감쇠가 이루어지는 주파수에 따라 저역 통과(low pass), 고역 통과(high pass), 띠통과(band pass) 등으로 구분되며, 아날로그 신호가 가지는 잡음을 제거하고 필요한 신호를 상대적으로 도드라지도록 처리하는 효과를 위해 사용된다. 특히, 저역 통과 필터를 사용하는 경우에는 나이퀴스트 주파수 이상의 주파수 성분을 제거하여 알리아싱 현상을 방지하는 역할을 한다. 아날로그 필터 회로는 저항, 콘덴서, 코일의 소재 특성을 이용하여 신호의 주파수 성분을 제어하는 방식이며 감쇠가 발생하는 주파수 값은 소재의 특성 값을 조합하여 설계할 수 있다.

아두이노 회로 연결을 위한 디지털 연결 방식

아두이노 회로는 여러가지 모듈의 조합으로 구성되며 이를 위해 다양한 디지털 연결 방식을 활용한다. 다양한 디지털 통신 방식 중, 직렬(serial) 연결을 통해서 신호를 전달하는 UART (Universal asynchronous receiver/transmitter) 방식과 SPI (Serial Peripheral Interface) 버스, 그리고 I2C (Inter-Integrated Circuit) 버스가 대표적이며(Wikipedia, 2023), 이들은 아두이노에서 기본적으로 제공하는 유선 디지털 연결방식이다. UART 방식은 구현이 가장 간단하다는 장점이 있지만, 통신 속도나 데이터 패킷 수준이 제한적이어서 고속의 데이터 통신에서 활용이 어렵다. 따라서 추가적인 모듈을 사용할 경우 일반적으로 I2C나 SPI 방식을 이용하여 구현한다(RF Wireless World, 2023).

다양한 기기에서 사용되는 I2C와 SPI는 직렬 데이터 통신방식이라는 공통점을 가지고 있지만 구현 방식에 큰 차이가 있다. I2C 통신의 경우 SDA (serial data)와 SCL (serial clock)로 불리는 두 개의 선을 사용하여 통신을 구축하게 된다. 따라서 구현이 간단하고 확장성이 좋다는 장점을 가지고 있으며, 다수의 마스터(master) 및 슬레이브(slave) 노드를 활용한 그물망 형태의 연결이 가능하다. 또한 통신 주기는 슬레이브 노드에서 직접 변경이 가능하여 다양한 기기를 연결하는 사용에 유리하

다. 그러나 이는 반이중(half duplex) 통신 방식으로 이루어지므로 데이터 송수신이 따로 수행되며, 연결해야 하는 기기의 개수와 종류가 많아질수록 하드웨어 구성이 어려워진다는 단점이 있다. 또한 통신의 시작과 끝이 추가로 표시되어야 하고 통신 속도가 약 4 Mhz 정도로 제한적이다. 이와 달리, SPI 통신의 경우 네 가지 종류의 선을 사용하여 연결을 구축하게 되어 확장성이 상대적으로 떨어지지만 송수신을 동시에 수행하는 전이중(full duplex) 방식의 통신이 이루어지므로 속도가 빠르고 안정적으로 구현이 가능하다는 장점이 있다.

무선 탄성파 자료취득 모듈 구현

아두이노를 이용해 탄성파 자료취득 모듈을 구축하기 위해서는 전처리, 아날로그-디지털 변환, 자료저장의 세 가지 기능이 필요하다. 이 기능들은 각각 전처리 회로, ADC, SD 카드를 통해 구현된다. 이 연구에서는 취득된 아날로그 신호가 전처리 회로를 지나 ADC에서 디지털 신호로 변환되고 이를 SD 카드에 저장하는 흐름으로 모듈을 구성했고, 이러한 일련의 과정을 아두이노를 통해 제어했다. 일반적으로 상업용 탄성파 탐사장비는 24 비트(bit) ADC를 사용하지만 이 연구에서 제작한 모듈에서는 처리 속도를 고려하여 16 비트 모듈을 선택하였다.

아두이노의 역할

디지털 변환을 위한 ADC와 자료를 저장하는 SD 카드의 경우, SPI 통신 규약을 이용하여 아두이노와 연결하였다. SPI를 사용한 이유는 I2C보다 빠른 통신을 설정할 수 있고, 아두이

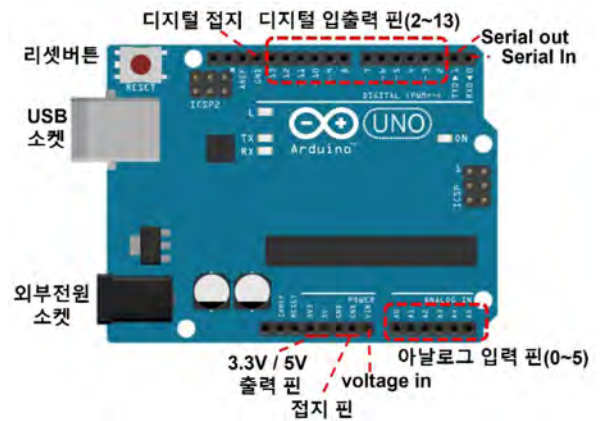


Fig. 2. Structure of Arduino Uno.

노 Due를 사용할 경우 다수의 연결을 유지하며 기능을 구현하는 것이 가능하다는 장점이 있기 때문이다(Kim, 2019). 여기서는 장비 제작을 위해 아두이노 우노 모델을 사용했으며 각 핀과 단자들에 대한 설명은 Fig. 2와 같다. USB 소켓을 통해 아두이노를 컴퓨터와 연결한 후 아두이노 프로그램에서 코드를 컴파일하여 업로드 해주면 코딩된 내용에 따라 아두이노가 작동하게 된다. 무선 탄성파 자료취득 모듈 생성을 위한 아두이노 코드에는 ADC나 기타 모듈과의 연결을 세팅하고 확인하는 명령과 취득된 신호를 전압 형태의 자료로 바꾸고 이를 가공하여 SD 카드에 저장하는 명령이 포함된다.

전처리 회로 구성

전처리 회로는 아날로그 신호를 다루는 회로로서 아날로그

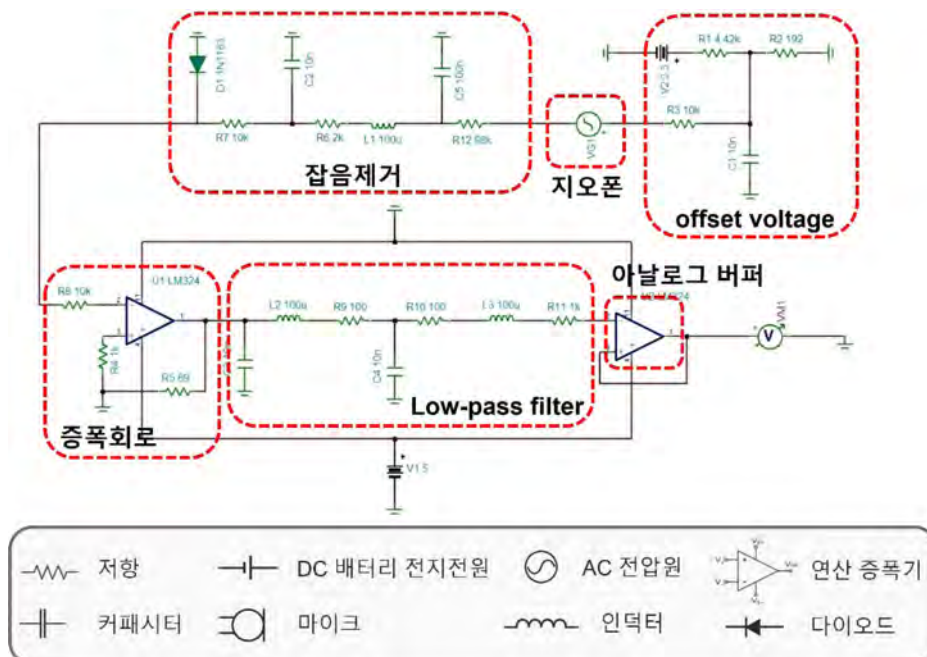


Fig. 3. Analog filter and amplification circuit design.

필터와 증폭회로 그리고 버퍼를 포함한다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 전처리 회로는 오프셋 전압 부여, 잡음 제거, 신호 증폭, 아날로그 필터, 아날로그 버퍼의 기능을 수행하도록 제작되었다. 오프셋 전압을 부여하기 위해 1.5 V 건전지 두개를 연결하여 총 3 V의 전압을 지오폰에 공급했다. 잡음제거 회로는 고역 통과 필터(high-pass filter) 역할을 하여 취득된 신호 중 진폭이 큰 저주파수 잡음을 제거하고자 하였다. 그 후, 증폭회로를 통과한 신호는 또다른 아날로그 필터로 전달되는데, 이는 고주파수 잡음을 제거하기 위한 저역 통과 필터(low-pass filter, LPF)이다. 마지막으로 LPF에 버퍼를 연결하여 회로의 안정성을 확보하고자 하였다. 아날로그 신호에 적용되는 고역 및 저역 통과 필터는 저항, 인덕터, 커패시터를 이용해 구현하였다. 아날로그 증폭회로는 OP Amp (operational amplifier)를 사용하여 디지털 변환에 적합하도록 신호를 처리하고자 하였다. 구체적으로 OP Amp 사용을 통해 구현 가능한 다양한 전압 증폭회로 중, 비반전 증폭기(noninverting amplifier) 개념을 이용하여 구축하였다. 이 연구에서는 전압이득 100 dB인 OP Amp와 추가 저항을 조합하여 약 20 dB 전압이득을 갖는 증폭회로를 구성했다. LPF가 적용되어 고주파수 성분이 제거된 신호는 이 회로를 통해 진폭이 증폭되지만 그 위상은 유지된다.

전체 회로 연결

마지막으로 모든 회로를 연결하여 무선 탄성파 자료 취득을

위한 모듈을 완성하였다. 각 요소 간 충돌이나 임피던스 불일치로 인한 문제가 발생하지 않도록 주의해야 하며 각종 잡음을 최소화하는 것이 회로 연결에 가장 중요하다. 이러한 점들을 고려하여 구성된 최종 회로는 센서에서 감지한 아날로그 신호가 전처리 회로를 통과하고 안정화를 거친 후 ADC로 전달되어 변환된 디지털 신호를 아두이노에서 수신하여 처리하도록 구성하였다. 이 때, ADC를 통해 디지털 신호로 변환된 신호가 가지는 전압의 최대 값은 5 V이며, 약 0.1526 mV의 간격으로 표현된다. Fig. 4는 제작한 장비를 구성하는 전체 회로도를 나타내는데, 전처리 회로는 일부 생략하여 표현하였다. 이는 OP Amp와 연결된 회로가 전처리 회로에서 일부 역할을 수행하지만 모든 회로를 연결하여 표현하는 것은 매우 복잡하여 완벽히 구조를 나타내는데 한계가 있기 때문이다. 외부 신호를 감지하기 위한 센서로는 전자기 유도에 의해 생성된 전류를 취득하는 기존 지오폰 센서를 활용하므로, 취득된 탄성파 자료에는 파동의 입자 속도가 기록된다. 전체 회로를 나타낸 회로도(Fig. 4)에서 지오폰을 나타낼 기호가 없기에 원리와 구조에 유사성이 있는 마이크로 표기했다.

디지털 자료 기록

일반적으로 유선 탄성파 탐사 장비로 기록된 기존의 탐사자료는 SEG (Society of Exploration Geophysicists)에서 개발한 형식에 맞추어 저장하며 이 형식을 SEG Y 포맷이라 한다.

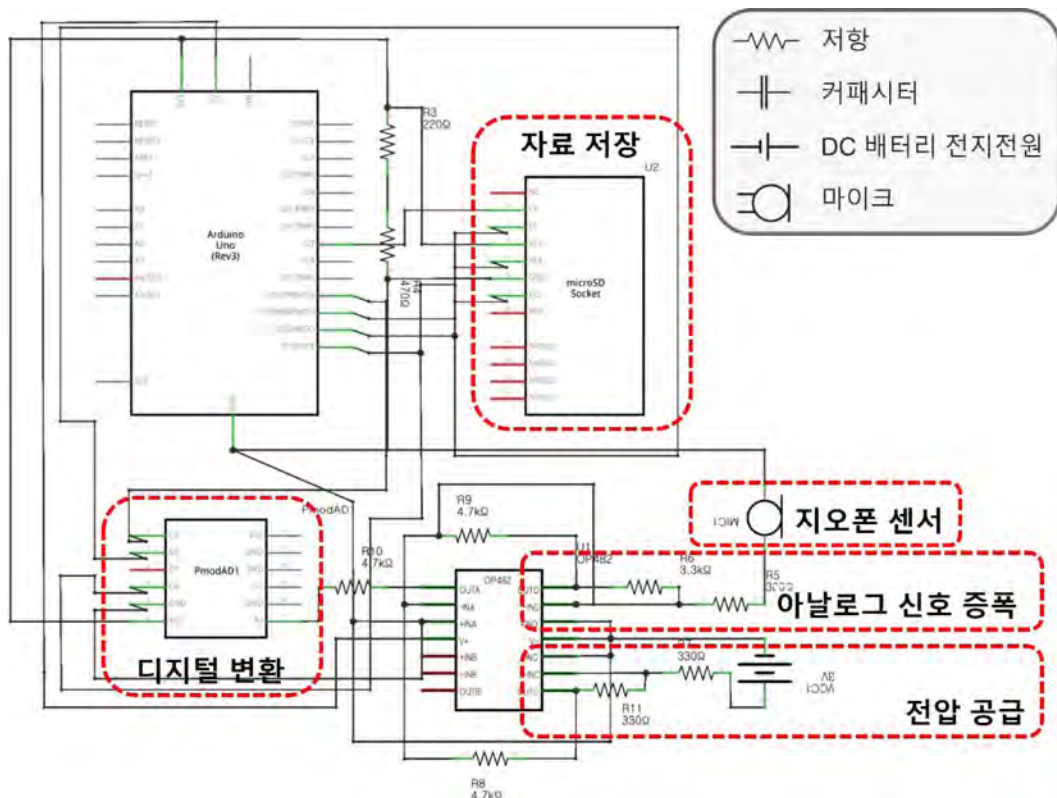


Fig. 4. Schematics of cableless seismic data acquisition module.

SEGY 자료 형식은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 탐사의 전반적인 설계 정보와 변수들을 포함하는 부분으로 파일 헤더(file header)라 불린다. 두번째 부분은 특정 수신기 신호에 대한 정보를 저장하는 부분으로 트레이스 헤더(trace header)이고, 마지막 부분은 이진(binary) 형태로 신호가 기록되는 부분(trace data)인데, 이 트레이스 헤더와 트레이스 데이터는 한 쌍을 이뤄 트레이스 개수만큼 반복되는 형태로 자료에 저장된다. 이러한 자료 형식은 탄성과 자료와 같이 실시간으로 측정된 물리량(입자 속도)을 체계적으로 저장하기에는 좋지만, 무선 탄성과 탐사 장비에 적용하기에는 적절하지 않다. 그 이유는 SEGY 포맷이 일정한 길이의 자료를 형식에 맞추어 변환하는 방식을 사용하는데 무선 탄성과 탐사 장비를 이용하여 자료를 기록할 때 이 변환 과정에서 자료가 누락될 수 있기 때문이다.

무선 탄성과 탐사 장비에서는 측정 신호와 시간에 대한 정보만 획득하므로 이를 효율적으로 저장할 수 있는 방식을 사용하고자 하였다. 아날로그 신호로 측정 후 변환된 디지털 신호의 경우 16 비트 정보만을 사용하고 있으므로 이를 바이트(byte) 형식의 자료로 나열하여 저장한다. 시간 정보의 경우 디지털 신호가 일정한 시간 간격에 따라 샘플링 되므로 샘플링 간격을 이용하여 시계열 정보를 구할 수 있고, 초기 시간정보가 주어질 경우 정확한 시간 값을 계산할 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 생성되는 파일의 이름에 초기 시간정보를 명시하여 추후에 시간 정보를 추정할 수 있도록 하였다.

여러 수신기에서 취득된 신호를 정렬하여 하나의 자료를 구성하기 위해서는 취득 시 시간정보의 정밀도가 매우 중요하다. 이 연구에서는 하나의 프로토타입 무선 탄성과 자료취득 모듈을 제작하여 그 활용 가능성을 확인하고자 하였으므로 아두이노 내부 타이머만을 사용하였다. 그러나 아두이노 내부 타이머의 시간 정밀도는 매우 떨어지기 때문에 실질적으로 활용하기는 어렵다. 보다 정밀한 시간을 측정하기 위해서는 회로에 GPS 모듈을 추가하여 GPS 시간으로 자료취득 모듈 내부의 시간을 보정해 줌으로써 아두이노 내부 타이머의 오차를 줄일 수 있다.

결 과

ADC 해상도에 대한 결과 비교(내장 ADC와 외부 ADC 모듈)

아두이노의 내장 칩셋은 자체적인 ADC 모듈을 탑재하고 있어 내부적으로 간단한 아날로그-디지털 변환 기능 구현이 가능하다(Kim, 2019). 하지만 내장 칩셋은 저해상도(10 비트) 모듈이므로 해상도가 매우 떨어진다. 해상도의 선정이 중요한 요소임을 검증하기 위해 24 비트 해상도를 가진 추가적인 모듈을 이용하여 취득한 디지털 신호와 비교하였다. Fig. 5는 서로 다른 두 변환 해상도의 디지털 신호를 함께 도시한 것이다. 비교적 낮은 해상도를 가진 내장 칩셋으로 디지털 신호를 표

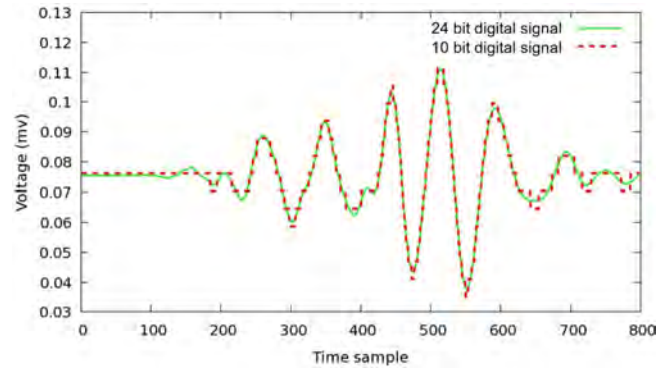
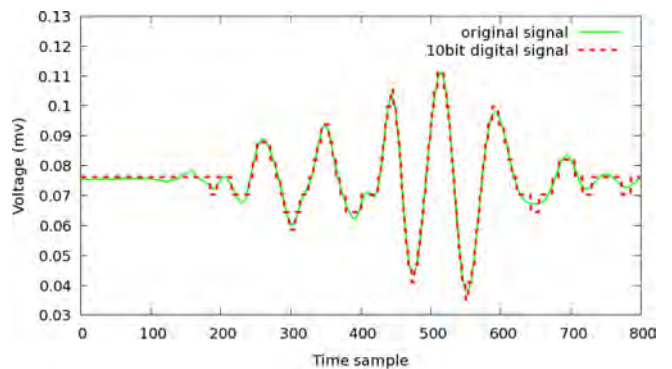


Fig. 5. Comparison of digitized seismic signals with 10-bit resolution (red dotted line) and 24-bit resolution (green solid).

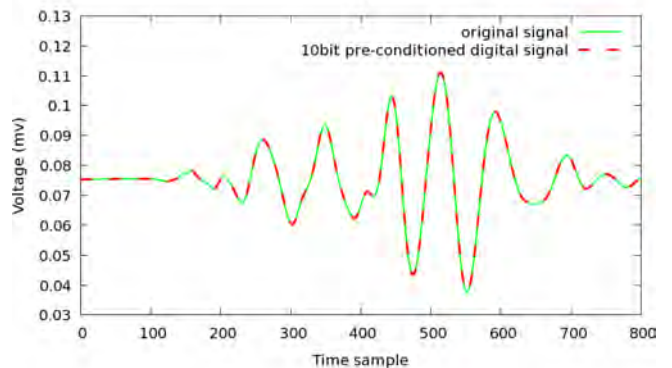
현한 경우, 높은 변환 해상도를 가진 추가 모듈을 사용한 경우에 비해 미세한 차이를 표현하는 데 한계가 있음을 확인하였다. 그러나 24 비트 ADC 모듈은 자료처리 속도 문제로 해상도 비교에만 한시적으로 사용하였으며 실제 제작에는 해상도와 속도를 모두 고려한 16 비트 ADC를 사용했다.

전처리 유무에 따른 결과 비교

아날로그 신호의 전처리 효과를 확인하기 위해 전처리 과정 없이 디지털 변환한 결과(Fig. 6a)와 비반전 증폭기를 사용하



(a)



(b)

Fig. 6. Seismic signal and 10-bit digitized signal (a) without pre-conditioning and (b) with pre-conditioning.

여 전처리한 결과(Fig. 6b)를 비교하였다. 아날로그 신호를 디지털 컴퓨터로 도시하는 것은 불가능하기 때문에 가장 정밀한 신호를 취득할 수 있는 24 비트 ADC로 변환한 디지털 신호를 아날로그 신호로 가정하여 전처리 결과 비교를 수행하였다. 신호 비교를 위해 디지털 변환 후 전처리 과정에서 증폭된 비율을 고려하여 디지털 신호를 스케일링한 후 도시하였다. 전처리 과정 없이 디지털 변환한 경우 아날로그 신호가 증폭되지 않아 매우 작은 진폭을 양자화하는 과정에서 해상도가 낮게 나온 것을 볼 수 있다(Fig. 6a). 반면 동일한 변환 해상도 조건(10 비트 내장 ADC 모듈)에서 전처리를 수행하였을 때에는 증폭된 아날로그 신호를 양자화하기 때문에 원래의 아날로그 신호와 가까운 디지털 신호를 출력함을 알 수 있다(Fig. 6b).

실제 탐사 결과 비교

제작한 장비가 실제 자료 취득에 활용될 수 있는지 확인하기 위해 현장 탐사를 수행하였다. 탐사는 대학 캠퍼스 내 보도 블록 옆의 비포장 평지에서 이루어졌으며, 잡음이 포함되지 않도록 사람이나 차량이 지나가지 않는 상황에서 자료를 취득하였다. Fig. 7은 탐사배열과 과정을 간략히 나타낸다. 그림에서 R1은 유선 탄성과 시스템과 연결한 지오폰, R2는 이 연구에서 제작한 모듈과 연결한 지오폰을 의미하며, 두 장비는 모두 동일하게 4.5 Hz 지오폰을 사용하였다. 송신원으로는 8-lb 해머를 사용하였으며, 0 m 위치에 두 수신기(R1, R2)를 고정된 후 0 m 부터 11 m까지 1 m 간격으로 송신원을 옮겨가며 총 12 번 자료를 취득하였다.

제작한 장비에는 신호 기록 시간을 제어하는 기능이 없기 때문에 무선 탄성과 신호 기록은 10 초 단위로 수행하였다. Fig. 8은 송신원이 3 m 위치에 있을 때, 아두이노를 통해 기록된 10 초 길이의 신호를 도시한 결과이다. 송신원에 의해 전파된 탄성과 신호를 제외한 기타 신호(노이즈)도 연속적으로 측정되어 나타난다. 따라서 임의의 송신원으로부터 얻어진 신호만을 취득하기 위해서는 신호가 시작되는 시간을 정확하게 특정하고 그 지점으로부터 원하는 만큼의 길이를 결정하여 신호를 편집하는 과정이 필요하다.

연속적인 저장 기록으로부터 탄성과 탐사 자료를 생성하는 과정은 일반적으로 별도의 하드웨어와 자료처리 소프트웨어가

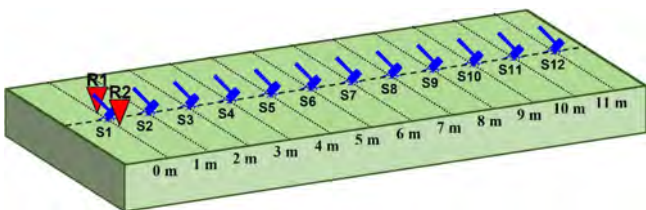


Fig. 7. Acquisition geometry for comparing the existing wired acquisition system and the developed wireless acquisition system.

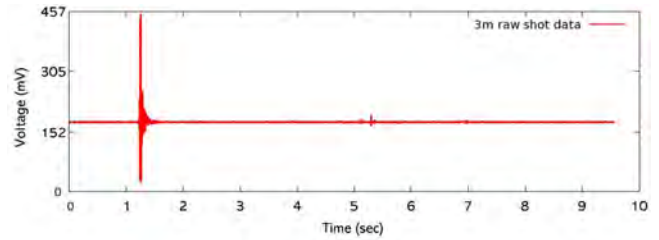


Fig. 8. Recorded signal of cableless seismic data acquisition module.

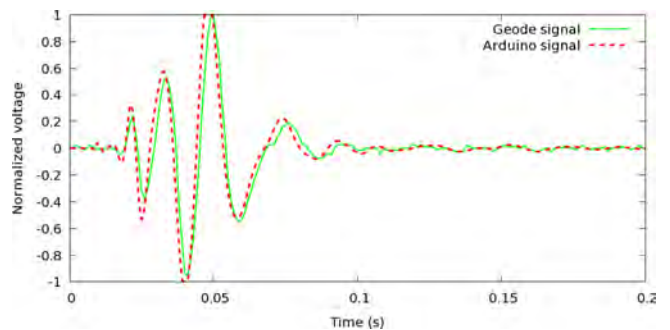


Fig. 9. Signal using Geode (red) and Arduino (green).

필요하다. 따라서 이 실험에서는 동일한 조건에서 유선 탄성과 탐사 장비를 사용하여 취득한 신호를 이용하여 편집을 수행하였다. 유선 탄성과 탐사기로는 Geometrics 사의 Geode를 사용하였다(Geometrics, 2023). Geode로 취득한 자료와 같은 시작점을 가지는 신호를 선별하기 위해 교차 상관(cross-correlation)을 이용하여 아두이노 자료에서 신호의 시작점을 특정하였다. 이러한 계산을 통해서 Geode의 신호와 같은 시작점을 가지는 신호를 추려낸 결과는 Fig. 9과 같다.

Fig. 9의 두 신호는 모두 송신원이 3 m 위치에 있을 때 얻어진 것으로 빨간색 점선은 기존 유선 탄성과 탐사 장비를 이용해 얻어진 신호이고 초록색 실선이 아두이노를 이용하여 획득한 신호이다. 두 신호의 진폭을 정규화하여 도시한 결과, 위상이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 두 신호 간에는 약간의 시간지연과 진폭차이가 있는 것처럼 보이지만 이는 두 개의 다른 시스템으로 취득한 신호이므로 다음과 같은 이유로 충분히 발생 가능한 차이로 볼 수 있다. 먼저 상용 유선 탐사 장비의 회로와 이 연구에서 개발한 무선 탄성과 자료취득 모듈의 회로는 구성 부품이나 회로 설계가 매우 다르기 때문에 동일한 진동에 대해 완벽하게 동일한 파형 신호를 출력하기 어렵다. 그 이유는 전혀 다른 회로의 구성을 가지고 있는 Geode와 무선 탄성과 자료취득 모듈의 동적 범위가 다르기 때문이다. Geode의 동적 범위는 110 dB, 이 연구에서 제작한 모듈의 동적 범위는 약 70 dB이므로 동일한 신호의 진폭이 다르게 표현될 수 있다. 또한, 제작한 무선 탄성과 자료취득 모듈은 트리거 시간 측정을 위한 GPS 모듈을 구현하지 않았기 때문에 기존 자료와의 교차 상관을 통해 시작점을 특정했다.

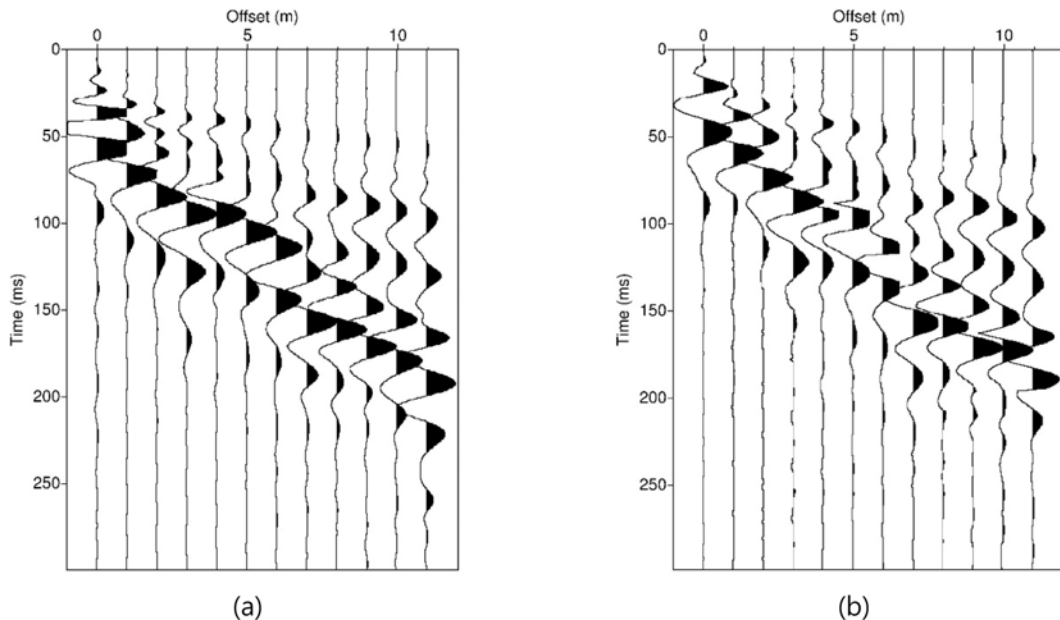


Fig. 10. Common receiver gathers of (a) Geode data and (b) cableless seismic data acquisition module.

따라서 기존 자료와 파형이 약간이라도 다르면 위상지연이 생기는 것처럼 보일 수 있고, 이는 제작된 장비의 오류는 아니다. 이러한 원인들에 더해 사용한 지오폰의 차이가 측정 신호의 차이를 가져올 수 있다. 두 개의 다른 지오폰을 다른 위치에 설치했기 때문에 지오폰 센서 고유의 차이와 송수신기 간격의 미세한 차이, 위치에 따른 물성(속도) 차이, 지면과의 결합(coupling) 정도의 차이가 Fig. 9에서 나타난 위상차이를 충분히 발생시킬 수 있다.

다음으로 다채널 탄성파 탐사 자료 취득을 모사하는 것이 가능한지 확인하기 위해서 공통 수신점 모음을 만들어 비교하였다. 모든 송신원 위치에서 얻어진 신호를 오프셋 순으로 나열하여 공통 수신점 모음을 구성했다. 취득한 공통 수신점 모음(Fig. 10)은 일부 파형과 에너지 분포가 상이하지만, 이는 아날로그-디지털 변환과 전처리 과정에서의 설정 값으로 인한 증폭 값 차이에 의한 것으로 전체적인 파형이나 위상은 잘 일치하는 것으로 보인다. 따라서 아두이노를 이용한 무선 탄성파 탐사 모듈에서 얻어진 신호가 충분히 신뢰할 수 있다고 판단할 수 있다.

토 의

완성된 자료취득 모듈이 기존 상업용 장비와 비교하였을 때 유사한 파형을 보이고 있지만 약간의 시간지연이 발생한 것처럼 보인다. 이는 제작한 무선 취득 시스템에서 트리거 시간을 결정하는 기능이 빠져 있기 때문이며, 이를 보완하더라도 여러 장비를 구성하는 회로 자체의 차이로 인해 파형을 완전히 일치시키는 것은 한계가 있다. 그러나 장비를 혼용하여 사용하지

않는 이상 큰 문제는 없을 것으로 예상된다. 더 중요한 점은 기존 유선 자료 취득 시스템과 비교했을 때 표현 범위의 차이가 있고 제작한 장비의 동적 범위가 더 떨어진다는 것이다. 이러한 차이는 장비의 효율성과 직결되므로 이를 해결하기 위해서 좀 더 정밀도 높은 부품을 사용하거나 효율적인 알고리즘을 사용할 필요가 있다. 이를 해결할 수 있는 방법 중 하나는 고해상도 ADC를 사용하는 것이다. 이 연구에서 사용한 ADC는 16 비트 해상도를 가지는 부품이므로 이를 20 비트 또는 24 비트 해상도를 가지는 부품으로 개선하게 될 경우 해상도가 약 16 배에서 256 배 상승하는 효과를 기대할 수 있다. 하지만 고해상도 ADC를 사용할수록 처리 시간 때문에 샘플링 간격이 넓어져야 하고 이를 방지하려면 고가의 부품을 사용하게 되어 비용 대비 효율성이 낮아지게 된다. 따라서 추가적인 성능 개선을 위해 고 사양 부품을 사용하는 것과 더불어 실제 자료의 진폭 범위를 바탕으로 동적 범위를 결정하는 등의 전략들이 고려될 수 있다. 만약 성능 개선을 위한 부품 및 기술 개발을 위한 비용이 과다하여 상업용 장비 가격을 초과한다면 당초 개발 취지를 벗어나므로, 제한된 성능의 장비를 이용하여 굴절법 탐사 등 단순한 탐사법에 적용하는 것이 현실적인 활용방안으로 생각된다.

결 론

이 연구에서는 오픈소스 하드웨어인 아두이노를 이용하여 무선 탄성파 자료취득 모듈을 구현하고 테스트하였다. 제작한 모듈을 이용하여 취득한 탄성파 자료를 기존 유선 탄성파 탐사장비로 취득한 자료와 비교한 결과 상당히 유사한 파형과

위상을 확인할 수 있었다. 제작한 모듈은 부품 성능과 표현범위 차이를 고려할 때, 실용적인 수준의 무선 탄성과 자료취득에 활용 가능성을 확인하였다. 제작한 모듈의 총 부품가격은 약 \$104로 상업용 무선 지오폰 장비들이 약 \$480 이상인 것과 비교하여 저렴한 비용으로 무선 수신 시스템을 구현할 수 있음을 보여준다. 이를 통해 아두이노를 활용하여 물리탐사 교육 또는 연구 목적으로 무선 탄성과 탐사 장비 개발이 가능하고, 간단한 회로나 부품을 추가하여 무선 탄성과 자료 취득에 도움을 줄 수 있는 기능을 테스트할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20226A10100030, 고성능 해양 CO₂ 모니터링 기술개발).

References

- Abrams, M. L., and Elder, A. K., 2013, Dynamic range in a seismic channel, *First Break*, **31(1)**, 79-87. doi: 10.3997/1365-2397.31.1.66025
- Attia, H., Gaya, S., Alamoudi, A., Alshehri, F. M., Al-Suhaimi, A., Alsulaim, N., Al Naser, A. M., Eddin, M. A. J., Alqahatani, A. M., Rojas, J. P., Ak-Dharrab, S., and Al-Dirini, F., 2020, Wireless geophone sensing system for real-time seismic data acquisition. *IEEE Access*, **8**, 81116-81128. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2989280
- Crice, D., 2014, A cable-free land seismic system that acquires data in real time. *First break*, **32(1)**, 97-100. doi: 10.3997/1365-2397.32.1.72600
- Crice, D., Flood, P., and Walthinsen, E., 2015, Cableless seismic systems for near surface geophysics. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2015* (pp. 465-468). Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society. doi: 10.4133/SAGEEP.28-066
- Dai, K., Li, X., Lu, C., You, Q., Huang, Z., and Wu, H., 2015, A low-cost energy-efficient cableless geophone unit for passive surface wave surveys, *Sensors*, **15(10)**, 24698-24715. doi: 10.3390/s151024698
- D'Alessandro, A., Bottari, C., Bucalo, F., Capizzi, P., Cocchi, L., Coltelli, M., Costanza, A., D'Anna, G., D'Anna, R., Fagiolini, A., Fertitta, G., Martorana, R., Passafiume, G., Speciale, S., and Vitale, G., 2016, A Low Cost Customizable Micro-ROV for Environmental Research-Applications, Advances and Challenges. In *Near Surface Geoscience 2016-Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference* (Vol. 2016, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. doi: 10.3997/2214-4609.201602151
- Dan, W., Hongtao, W., Guowang, G., and Fei, W., 2021, Research on a high-precision and high-resolution seismic wave signal acquisition system. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1894, No. 1, p. 012059). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1894/1/012059
- Dean, T., Tulett, J., and Barnwell, R., 2018, Nodal land seismic acquisition: The next generation, *First Break*, **36(1)**, 47-52. doi: 10.3997/1365-2397.N0061
- Dezord, C., Micolau, G., Abbas, C., Mesgouez, A., and Di Borgo, E. P., 2021, Original experimental bench based on a large loop for environmental measurements at LSBB. In *NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. doi: 10.3997/2214-4609.202120083
- Ellis, R., 2014, Current cabled and cable-free seismic acquisition systems each have their own advantages and disadvantages—is it possible to combine the two?. *First Break*, **32(1)**, 91-96. doi: 10.3997/1365-2397.32.1.72599
- Gao, S., Xue, B., Li, J., Lin, Z., Chen, Y., and Zhu, X., 2016, High-resolution data acquisition technique in broadband seismic observation systems, *Science China Technological Sciences*, **59(6)**, 961-972. doi: 10.1007/s11431-016-6057-7
- Geometrics, 2023, <https://www.geometrics.com/product/geode-exploration-seismograph/> (June 22, 2023 Accessed).
- Geophysical Technology, 2023, <https://geophysicaltechnology.com/categories/nru-1c/> (June 22, 2023 Accessed).
- Geospace Technology, 2023, <https://www.geospace.com/products/land-exploration/gcl/> (June 22, 2023 Accessed).
- Gerea, A. G., and Mihai, A. E., 2018, Geophysics Applied in Precision Agriculture—Experimental Resistivity Studies for Plant Root Detection and Analysis. In *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (Vol. 2018, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. doi: 10.3997/2214-4609.201802472
- Inova, 2023, <https://www.inovageo.com/products/quantum> (June 22, 2023 Accessed).
- Kang, K., Lee, J. and Hong, J., 2016, Framework for efficient development of embedded software in open source hardware, *Smart Media Journal*, **5(4)**, 49-56 (in Korean with English abstract). <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002185607>
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I., 2013, *An introduction to geophysical exploration*, John Wiley & Sons. https://books.google.co.kr/books?id=hcWkltTxdC8C&printsec=frontcover&hl=ko&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Kim, C., 2019, *Development of cableless seismic data acquisition module using Arduino*, Master's thesis, Inha University. https://inha.primo.exlibrisgroup.com/permalink/82KST_INH/rooeid/alma991009145846205086
- Lee, C., 2013, *Digital signal processing*, Hanbit Publishing Network. <https://books.google.co.kr/books?id=fJvzDwAAQBAJ>
- Lee, D., Kim, B.-Y., and Jang, S., 2016, Cable-free seismic acquisition system, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **19(3)**,

- 164-173 (in Korean with English abstract). doi: 10.7582/GGE.2016.19.3.164
- Makama, A., Kuladinithi, K., and Timm-Giel, A., 2021, Wireless geophone networks for land seismic data acquisition: A survey, tutorial and performance evaluation, *Sensors*, **21**(15), 5171. doi: 10.3390/s21155171
- Open Source Hardware Association, 2023, <https://www.oshwa.org/definition/> (June 22, 2023 Accessed).
- Proakis, J. G. and Manolakis, D. G., 2007, *Digital Signal Processing: Principles Algorithms and Applications 4th ed*, Pearson. https://www.academia.edu/28449859/J_G_Proakis_D_G_Manolakis_Digital_signal_processing_Principles_algorithms_and_applications_pdf
- Reddy, V. A., Stüber, G. L., and Al-Dharrab, S. I., 2018, Energy efficient network architecture for seismic data acquisition via wireless geophones. In *2018 IEEE international conference on communications (ICC)* (pp. 1-5). IEEE. doi: 10.1109/ICC.2018.8422687
- RF Wireless World, 2023, <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/UART-vs-SPI-vs-I2C.html>, (June 22, 2023 Accessed).
- Ryu, D. and Choi, T., 2016, Development of Open IoT platform based on Open Source Hardware & Cloud Service, *Journal of the KIECS*, **11**(5), 485-490 (in Korean with English abstract). doi: 10.13067/JKIECS.2016.11.5.485
- Sercel, 2023, <https://www.sercel.com/products/Pages/WiNG.aspx> (June 22, 2023 Accessed).
- Smartsolo scientific, 2023, <https://smartsolo.com/xl-IGU.html> (June 22, 2023 Accessed).
- Soler-Llorens, J. L., Galiana-Merino, J. J., Giner-Caturla, J., Jauregui-Eslava, P., Rosa-Cintas, S., and Rosa-Herranz, J., 2016, Development and programming of Geophonino: A low cost Arduino-based seismic recorder for vertical geophones. *Computers & Geosciences*, **94**, 1-10. doi: 10.1016/j.cageo.2016.05.014
- Trysnyuk, V., Ehorov, V., Trysnyuk, T., Prystupa, V., Nahornyj, Y., and Marushchak, V., 2022, Improvement of The System of Automated Pointing of the Antenna to the Satellite. In *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. doi: 10.3997/2214-4609.2022580098
- Wikipedia, 2023, <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino> (June 22, 2023 Accessed).
- Xie, S., 2016, Practical Filter Design Challenges and Considerations for Precision ADCs, *Analog Dialogue*, **50**(2), 1-5. <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/practical-filter-design-precision-adcs.html>
- Yoo, J., 2013, Open Source Hardware Platform (OPHW) Trends and Forecasts, *Internet & Security Focus*, 24-50. <https://www.kisa.or.kr/20302/form?postSeq=76&page=1#fnPostAttachDownload>
- Zhang, Z. F., Chen, B. G., and Liu, N., 2015, Application of AdHoc Wi-Fi and 4G communication in wireless seismic data acquisition station. *Progress in Geophysics*, **30**(5), 2337-2341. <http://en.dzcx.org/article/doi/10.6038/pg20150547>