다용도 실시간 경사각과 방위각 연속 측정 시스템 개발연구

김규현^{1,2} · 조성호^{1,2} · 정현기^{2,*} · 이효선^{1,2} · 손정술²

¹과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학과, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

²한국지질자원연구원 자원탐사개발연구실, 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124

A Study on the Development of Multifunctional Real-Time Inclination and Azimuth Measurement System

Gyuhyun Kim^{1,2}, Sung-Ho Cho^{1,2}, Hyun-Key Jung^{2,*},
Hyosun Lee^{1,2}, and Jeong-Sul Son²

¹Department of Geophysical Exploration, University of Science and Technology, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Exploration Geophysics and Mining Engineering,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Abstract: In geophysics and geophysical exploration fields, we can use information about inclination and azimuth in various ways. These include borehole deviation logging for inversion process, real-time data acquisition system, geophysical monitoring system, and so on. This type of information is also necessarily used in the directional drilling of shale gas fields. We thus need to develop a subminiature, low-powered, multi-functional inclination and azimuth measurement system for geophysical exploration fields. In this paper, to develop real-time measurement system, we adopt the high performance low power Micro Control Unit (made with state-of-the-art Complementary Metal Oxide Semiconductor technology) and newly released Micro Electro Mechanical Systems Attitude Heading Reference System sensors. We present test results on the development of a multifunctional real-time inclination and azimuth measurement system. The developed system has an ultra-slim body so as to be installed in 42 mm sonde. Also, this system allows us to acquire data in real-time and to easily expand its application by synchronizing with a depth encoder or Differential Global Positioning System.

Keywords: inclination, azimuth, Micro Electro Mechanical Systems, Attitude and Heading Reference System, borehole deviation logging

요 약: 최근 지구물리·물리탐사 분야에서 경사각과 방위각 정보는 시추공 물리검층 및 물리탐사 자료보정을 위한 시추공 편차검층, 이동형 실시간 자료획득 시스템, 기타 지구물리 모니터링 시스템 등 다양하게 활용되면서 그 중요성이 높아지고 있다. 특히 최근 셰일가스의 개발이 가능하게 한 방향시추 기술에서도 경사각과 방위각 정보는 필수일 정도로 그 응용범위가 매우 넓다. 따라서 여러 분야에 응용될 수 있는 경사각과 방위각 측정 시스템의 초소형 옥외 저전력 운용이 절실했다. 본 논문에서는 최신 CMOS 저전력, 고성능 MCU 및 멤스(MEMS) 자세방위기준장치(AHRS)를 도입하여 초소형, 저전력으로 제작된 다용도 야외시험용 실시간 경사각과 방위각 연속 측정 시스템 개발 연구의 결과를 제시하고자 한다. 시스템은 최소 지름 42 mm의 존데 내에 설치될 수 있도록 초슬림 형태로 제작되었으며 실시간 데이터 획득이 가능할 뿐만 아니라 엔코더, DGPS 연동으로 운용 확장이 가능하여 다양한 응용이 기대된다.

주요어: 경사각, 방위각, 멤스, 자세방위기준장치, 시추공 편차검층

*Corresponding author: hkjung@kigam.re.kr

Tel: +82-42-868-3180

Fax: +82-42-868-3411

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.

서 론

지구물리·물리탐사 분야에서 양질의 현장자료 획득은 성공적인 해석결과를 도출하기 위한 필수 요건이며, 정밀하고 현장사용이 용이한 장비의 적합한 투입 및 운용은 탐사 적중률 향상을 위해 매우 중요하다(Jung, 2008). 따라서 이를 가능하게 하는 측정기술의 중요성이 증대되고 있으며, 그 중 하나가 시추공, 실시간 이동형 자료획득 시스템, 기타 지구물리 모니터링 등 다양한 응용이 가능한 경사각과 방위각 측정 시스템이다.

지구물리·물리탐사 분야에서 경사각과 방위각 측정 기술은 시추공 물리검층 혹은 시추공 물리탐사에 서부터 발전해왔다. 시추공의 기울기는 불균질한 지반조건, 시추기의 자세 불균형으로 인해 생기는데 작은 각도라도 깊어질수록 오차가 누적되기 때문에 수백 m 심도의 자원탐사용 시추공에서 이 오차는 무시할 수 없는 수준이 된다(Kang et al., 2006). 따라서 정확한 경사각과 방위각의 측정은 중요한 문제이다. 특히 지하에는 GPS 신호가 닿지 않아 위치의 추정 에 어려움이 있었기 때문에 경사각과 방위각에 근거한 위치 추정 기술에 대한 많은 연구가 선행되었다.

경사각과 방위각 측정기술은 지구물리·물리탐사분야에서 시추공, 실시간 이동형 자료획득 시스템, 기타 지구물리 모니터링 기술 등 다양한 응용이 가능하다. 특히 셰일가스의 본격적인 생산이 가능하게 한 가장 중요한 기술인 방향시추(Directional drilling)와 수압파쇄(Hydraulic fracturing) 중에서 방향시추기술에 있어 시추공 편차 및 기울기 측정 기술은 매우 중요하다. 또한 전자탐사 분야에서는 지하에 대한 정밀한 입체 정보 획득을 위해 시추공 3차원 시간영역 전자탐사법(TEM, Time domain Electromagnetic Method)을 수행하고 있으며 이 때 시추공 편차 및 기울기 정보의 정밀한 결합은 필수적이다. 본 논문에서는 범위가 가장 넓은 시추공 응용에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 시추공 응용의 경우 자원탐사뿐만 아니라 지하공동탐지, 지반침하 모니터링(Choi et al., 2013; Song et al., 2011), 토목 구조물 조사(Lee et al., 2010) 등과 같이 안전문제와 밀접하게 연관된 분야에서도 널리 활용된다.

지구물리탐사 현장측정기술은 근래 전자공학 및 IT기술의 급속한 발전에 힘입어 과거 대비 눈부시게 향상되었으며 이러한 경향은 향후 더욱 가속화될 것

이다. 특히 반도체 공정기술 기반의 초소형 정밀기계 제작기술인 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)의 발달로 다양한 센서의 초소형화, 초경량화, 저전력 동작이 가능하게 되었다. 따라서 다점 고밀도 초정밀 탐사측정과 초소형 고성능 자기, 지진동 등의 MEMS 센서들의 도입에 의한 실시간 분산 수집형 현장자료 획득시스템이 예견된다. 앞으로의 현장탐사, 자료처리, 해석기술의 연구방향은 이러한 발전 추세를 적극 고려하지 않을 시 금방 낙오될 소지가 크다(Jung et al., 2012).

이러한 배경에서 탐사시스템에 USN(Ubiquitous Sensor Network) 도입(Jung et al., 2011a), 스마트 디바이스 등 최신 IT기술을 지구물리탐사에 접목시켜 탐사 효율성을 극대화 하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다(Jung et al., 2011b; Cho et al., 2011).

이러한 시도는 한국뿐만 아니라 세계 물리탐사 시장에서 IT 기반으로 획기적인 진화를 이끌어 내는 기회가 될 수 있기 때문에 매우 중요하다. 본 논문에서는 이러한 노력의 일환으로 산업용 제어계측에 주로 활용되고, 원칩 컴퓨터 혹은 마이컴으로 불리는 CMOS 초저전력·고성능 MCU를 도입하여 지구물리·물리탐사 장비에 유용하게 사용될 수 있는 야외 시험용 다용도 실시간 저전력 경사각과 방위각 측정 시스템 개발에 관한 연구결과를 제시하고자 한다.

기초이론 및 기술동향

지구물리·물리탐사용 경사각과 방위각 측정 센서의 발달은 시추공 편차검층기술의 발달과 그 역사를 같이 한다. 최초의 시추공 편차검층용 경사각과 방위각 측정 센서는 1933년 Fig. 1과 같이 공내에 전극을 설치하여 전기비저항의 비등방성 효과를 이용하여 기울어진 정도를 추정하는 electromagnetic teleclinometer에서 시작되었다(Crain, 2005). 그 후 1940년대부터는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 존데 내부에 약간 오목한 그릇을 장착하고 그 위에 구슬을 얹어 카메라로 구슬이 이동한 정도를 촬영하여 경사각과 방위각을 측정하는 photoclinometer (Answers, 2003)와 가변저항을 응용하여 경사각을 알아내는 potecclinometer와 같은 기계적인 방법이 고안되었다.

이 방법들은 모두 중력방향을 기준으로 존데의 기울어짐에 대한 유체 혹은 고체의 물리적 특성변화로 경사각과 방위각을 측정한다. 하지만 시추공의 크기

Fig. 1. Mechanism of electromagnetic teleclinometer.

Fig. 2. Mechanism of photoclinometer.

는 매우 작기 때문에 제한된 공간 내에 물리적 기구를 설치하는데 한계가 있고 정밀도 또한 신뢰하기 어려웠다. 하지만 최근 반도체 기술 발전에 힘입어 MEMS 기술이 소개되면서 수십mm 크기의 초소형 정밀 기울기 센서의 제작이 가능해져 시추공 편차검 측기술도 한층 발달할 수 있게 되었다.

최근에 지구물리·물리탐사에서 사용되는 경사각과 방위각 센서의 측정 방식에는 크게 자이로스코프를 이용한 non-magnetic method와 자력센서와 가속도센서를 이용한 magnetic method가 있다. 자이로스코프를 기반으로 한 non-magnetic method는 자이로스코프의 각 방향에 대한 각속도를 적분하여 경사각과 방위각을 측정하는데 매우 정밀하며 주변 자기장의 영향을 받지 않아 철재 케이싱이 되어있는 시추공에서도

사용이 가능하고 연속계측을 할 수 있다는 장점이 있다. magnetic method는 가속도센서로 각 축방향의 가속도를 알아내어 중력방향을 기준으로 어느 정도 기울어져 있는지를 알아낸다. 이 방법은 자력센서로 방위각을 측정하기 때문에 내부 계산이 용이하다는 장점이 있다. Table 1에 시추공 응용을 위해 근래 출시된 지구물리·물리탐사용 경사각과 방위각 측정 센서들의 성능을 비교해 보았다. 이들의 정확도는 경사각에 대해서 0.1° - 0.5° 수준이며 방위각에 대한 정확도는 1° - 1.2° 정도로 경사각보다는 상대적으로 낮다.

기존 방법의 한계

Table 1에 보인 바와 같이 근래 출시된 지구물리·

Table 1. Comparison of commercially available borehole deviation modules

Sensor	Gyroscope	Tilt meter, Compass	3axis magnetometer, 3accelerometer
Inclination Range	0° - 180°	$\pm 40^{\circ}$	0° - 180°
Inclination accuracy	$\pm 0.1^{\circ}$	$\pm 0.2^{\circ}$	$\pm 0.5^{\circ}$
Azimuth range	0 - 360°	0 - 360°	0 - 360°
Azimuth accuracy	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 1.2^{\circ}$
Resolution		$0.01/0.1$	
Solution	Non-Magnetic	Magnetic	Magnetic

Fig. 3. DOF(Degree of freedom) of each sensor. (a) measurement of Euler degree with 3 axis accelerometer, (b) measurement of Euler degree with 3 axis magnetometer, (c) measurement of 3 axis gyroscope.

물리탐사용 경사각과 방위각 센서의 측정 방법은 크게 non-magnetic method와 magnetic method가 있다. 하지만 이러한 기존 방법들에는 각각 한계가 있다.

첫 째, non-magnetic method는 자이로스코프로 각도를 계산한다. 자이로스코프는 각속도를 측정하므로 변위각을 구하기 위해서는 각속도를 적분해야만 한다. 이 때 낮은 주파수의 잡음이 존재한다면 그 오차는 계속 적분되어 큰 오차를 동반한다는 한계가 있다. 또 매우 고가이며 수 시간 지속 측정 시 drift가 발생한다는 결정적인 단점이 있다.

반면 자력센서와 함께 가속도센서를 기반으로 기울기를 측정하는 magnetic method의 경우 센서가 외부 원인에 의해 충돌하거나 가속 운동을 하고 있는 경우 큰 오차를 동반한다. 또 자력센서가 방위각 측정에 이용되기 때문에 센서 근처의 자화된 물체에 의한 hard iron 효과나 쇠붙이 같은 강자성체에 의한 soft iron 효과로 인한 장의 왜곡 때문에 방위각 오차를 수반할 수 있다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서 개발할 시스템에는 이러한 기존 기술의 단점들을 보완하기 위해 자력센서, 가속도센서, 자이로스코프를 모두 사용한 자세센서 AHRS (Altitude Heading Reference System)를 도입하여 지구물리·물리탐사용 다용도 경사각과 방위각 측정 시스템을 개발하기로 하였다.

MEMS 기반 AHRS

본 논문에서 선정된 MEMS 기반 AHRS가 기존 기술의 단점을 보완할 수 있는 이유는 내장된 칼만 필터 때문이다. 칼만필터는 선형 시스템에서 실시간으로 상태를 추정 하는 알고리즘으로써 자력센서, 자

이로스코프, 가속도센서 세 종류의 센서값을 신뢰도 있게 결합시켜준다. 예를 들어 센서 운용 중 시변 자기장 간섭이 관측된다면 필터는 자력센서의 경중률을 낮게 설정하여 가속도센서와 자이로스코프의 값으로 자세를 추정하고, 외부의 충격이 감지될 때는 가속도센서의 경중률을 낮게 설정하여 자이로스코프와 자력센서로 자세를 추정한다. 또 자이로스코프 drift를 효과적으로 제거할 수 있기도 하다. 이런 알고리즘을 통해 non-magnetic, magnetic method를 나누지 않고서도 하나의 시스템으로 자세를 추정할 수 있다는 것이 장점이다.

가속도센서, 자이로스코프, 자력센서들은 각각 최대 3축을 가질 수 있다. 예를 들어 3축 가속도센서는 X, Y, Z 각각 3방향의 가속도를 측정할 수 있다는 것을 뜻한다. AHRS의 A는 altitude로써 roll과 pitch를 뜻하며 H는 heading으로 방위각을 뜻한다. 센서의 각 축의 개수에 따라 DOF (Degree of Freedom)가 정해지는데 자유도라고도 불리는 이 수치는 센서 혹은 구동기가 얼마나 다양한 축으로 움직일 수 있는가를 나타낸다(Fig. 3). 센서의 경사각은 roll과 pitch를 이용해 계산이 가능하며 방위각은 heading을 사용할 수 있다. 최초 존테의 방향으로 단위 벡터를 설정한 후 단위 이동 거리마다 DCM (Direction Cosine Matrix)을 이용해 좌표를 알아낼 수 있다. 자세한 계산 방법은 부록에 상세히 기술하였다.

시스템 설계 및 제작

개발 시스템의 상세 개념도를 Fig. 4에 나타내었다. 전체 시스템은 크게 센서 모듈과 데이터 통합 및 제

Fig. 4. Conceptional diagram of developed system.

어용 MCU 모듈로 나누어진다. 사용자는 측정을 원하는 곳에 센서 모듈을 위치시키고 데이터 통합 및 제어용 MCU 모듈을 통해 측정값을 받아온다.

센서 모듈은 길이 560 mm, 직경 42 mm의 폴리프로필렌 재질 초슬림 원통형 플랫폼에 전원 소자와 초소형 MCU 보드, 선정된 AHRS 센서를 장착하여 구성한다. 본 논문에서는 최근 시중에 출시된 3종류의 AHRS를 선정하여 센서 모듈에 장착하였다. 센서들은 디지털로 데이터를 출력하고 MCU와는 UART로 통신하며 baud rate은 115200bps로 설정하였다.

데이터 통합 및 제어용 MCU 모듈은 다양한 응용으로의 확장을 위해 사용자와 센서 모듈의 가운데에 위치한다. 센서 모듈에 장착된 초소형 MCU 보드와 동일한 MCU 보드를 사용했으며 센서 모듈과는 RS-485통신으로 데이터를 교환하여 최대 1200 m 장거리 통신이 가능하다. MCU간의 통신 속도 또한 115200 bps로 설정하였다.

전체적으로 야외 장시간 운용, 원거리 통신을 위해 저전력으로 구성하였고 다용도, 실시간 처리기능을 위해 폴리프로필렌 재질의 플랫폼과 초소형 MCU 보드, 센서 제어용 임베디드 펌웨어를 직접 설계 및 제작하였다. 각 핵심 구성요소와 시스템의 설계 및 제작에 관하여 아래에 상세히 기술한다.

초슬림 폴리프로필렌 플랫폼

센서와 MCU 보드를 장착할 플랫폼을 제작하기 위해 자기장 간섭을 일으키지 않는 폴리프로필렌을 선정하였다. 플랫폼의 형태는 센서 모듈을 시추공, 이동형 측정 등에 사용할 수 있게 CNC 선반으로 정밀 가공하여 길이 560 mm, 직경 42 mm의 원통형으로 제작하였다. 본 논문에서 진행될 실험을 위해 MCU 모듈을 상부에 부착하였고 센서들을 설치할 목적으로 각각의 크기에 맞도록 소켓 형태로 공간을 마련하였다. 센서들의 중심축을 플랫폼의 가운데에 정렬하였기 때문에 상하 위치가 다르더라도 기울어졌을 때 닳은꼴 삼각형의 원리로 동일한 각도를 가진다.

야외 장시간 운용을 위한 저전력, 초소형 MCU 보드 설계 및 제작

센서들의 효율적인 데이터 획득을 위해 저전력 고성능 MCU를 선정하여 기존 임베디드 보드로는 구현할 수 없는 크기와 성능으로 보드를 설계하였다. 제한된 공간 내에 설치될 수 있도록 주변 소자를 최소화하여 17×64 mm 크기로 제작하였으며, 완성된 회로의 layout을 Fig. 5에 나타내었다. 4층 기판형태로 제작되었으며 전원과 그라운드 층이 차폐 역할을 하여 노이즈 저감 효과를 주면서 리턴 경로를 최소화

Fig. 5. Four layer PCB Layouts of developed MCU board.

화하여 전자기 방사를 최소화하였다.

선정한 MCU소자의 성능명세를 Table 2에 나타내었다. 1.8-3.6V의 저전압으로 동작하면서도 전력소모가 32 kHz로 구동 시 75 μ A로 극도로 낮아 야외 장

Table 2. Important specifications of adopted MCU IC

High-performance, Low-power 8/16-bit Microcontroller
<ul style="list-style-type: none"> • Non-volatile Program and Data Memories <ul style="list-style-type: none"> 64 kBytes of In-System Self-Programmable Flash 2 kBytes EEPROM 4 kBytes Internal SRAM • Peripheral Features <ul style="list-style-type: none"> - Four-channel DMA Controller with support for external requests - Five 16-bit Timer/Counters - Five USARTs - Two Two-Wire Interfaces (I2C and SMBus compliant) - Two SPIs (Serial Peripheral Interfaces) - AES and DES Crypto Engine - 16-bit Real Time Counter with Separate Oscillator - One 12-channel, 12-bit, 2 Msps ADCs - One 2-channel, 12-bit, 1 Msps DACs - Two Analog Comparators - External Interrupts on all General Purpose I/O pins - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator • Speed performance <ul style="list-style-type: none"> - 0-12 MHz @ 1.8-2.7 V - 0-32 MHz @ 2.7-3.6 V • Power consumption @Active MODE <ul style="list-style-type: none"> - 75 μA @ 3.0 V, 32 kHz - 11.4 mA @ 3.0 V, 32 MHz • 7×7 mm MLF (Micro Lead Frame)

시간 운용에 적합하다. 또한 내부 클럭으로 32 MHz 까지 사용 가능하여 동시에 여러 센서 데이터를 처리하기에 적합하다.

외부 인터페이스용으로 2개 SPI, 2개 TWI, 5개 USART 통신 포트를 기본으로 가지고 있어 다양한 센서를 구동하기 적합하며 야외 장거리 통신이 가능하도록 2개의 RS-485포트를 추가하였다. 선정한 RS-485 송수신 드라이버는 자동으로 송수신 방향제어가 가능하며 최대 16 Mbps까지 송수신이 가능하고 ± 15 kV의 정전기 보호를 제공한다.

Fig. 6에 완성된 보드의 사진과 회로도를 도시하였다. 제작된 보드는 센서 모듈과 데이터 통합 및 제어 모듈에 장착된다.

센서 제어용 임베디드 펌웨어 설계

시스템의 블록다이어그램을 Fig. 7에 도시하였다. 사용자가 데이터를 요청하면 데이터 통합 및 제어 MCU 보드가 엔코더와 센서 모듈의 데이터를 획득하여 사용자에게 데이터를 반환하는 구조이다. 이 기능을 구현하기 위해 데이터 통합 및 제어 MCU 보드와 센서 모듈에 설치된 MCU 보드의 펌웨어를 각각 설계하였다.

데이터 통합 및 제어 MCU 보드의 펌웨어는 사용자가 데이터를 요청했는지 여부를 지속적으로 확인하다가 명령 수신이 확인되면 엔코더와 센서 모듈에 데이터를 요청하고 돌려받은 데이터를 취합하여 다시

Fig. 6. (a) Developed MCU board, (b) Schematic of developed MCU board.

Fig. 7. Block diagram of the system.

사용자에게로 돌려준다(Fig. 8a).

센서 모듈에 설치된 각 센서들은 3.3 V 레벨의 UART와 RS-232 인터페이스로 ASCII코드의 데이터를 출력한다. 이 센서들은 특별한 제어신호 없이도 연속적으로 경사각과 방위각 정보를 출력하기 때문에 센서 모듈의 MCU 보드에 저장된 펌웨어는 시리얼 수신 인터럽트를 사용하여 동시에 입력되는 3개의 센서 문자열을 유실 없이 버퍼에 저장하도록 하였다. 버퍼의 데이터는 실시간으로 업데이트 되다가 데이터 통합 및 제어 MCU 보드에서 데이터 획득 명령을 받으면 그 순간의 버퍼데이터를 출력하도록 하였다(Fig. 8b).

센서 모듈

센서 모듈은 내경 42 mm의 존데에 삽입이 가능하도록 길이 560 mm, 직경 42 mm의 원통형 플랫폼을 사용하였고, 케이블을 장착하여 외부와 통신이 가능하도록 하였다(Fig. 9). 센서 모듈 플랫폼에는 3종류의 선정한 AHRS 센서와 센서제어를 위한 MCU 보드를 장착하였고 외부와는 RS-485로 통신하여 최대 1200 m, 최대 16 Mbps의 속도로 데이터를 전송할 수 있도록 하였다. 본 논문에서 개발된 시스템에서 센서 모듈은 2개의 3.3 V 레벨 UART와 1개의 RS-232 인터페이스로 센서들과 115200 bps의 속도로 데이터를 주고받고 RS-485 인터페이스를 통해 115200 bps의

Fig. 8. Flow charts of embedded firmware of MCU board (a) on data integration & control module, (b) on sensor module.

Fig. 9. Developed sensor module with slim type MCU board.

속도로 외부와 통신하도록 하였다.

또 현재 상용화되어 출시되는 AHRS 센서들의 공급전압은 주로 5 V 혹은 3.3 V이다. 따라서 단일 공급 전원을 분배하면서 동시에 여러 센서를 구동할 수 있을 만큼 강력한 출력의 전원소자가 필요하다. 개발된 장비는 야외 장시간 운용을 고려하여 효율이 최대 93%에 달하는 SMPS (Switched Mode Power Supply)를 선정하였다. SMPS는 전압 강하가 되는 만큼 전력이 손실되는 LDO (Low Drop Out) 레귤레이터에 비하여 월등한 전력 효율을 보이기 때문에 이 시스템에 적합하다. 이 전원은 9.9×13.0×2.9 mm의

초소형 크기에 5V를 3.3V로 낮추어 주며 최대 1.5A 까지 출력이 가능하다.

데이터 통합 및 제어용 MCU 모듈

데이터 통합 및 제어부에 사용된 MCU 모듈은 센서 모듈의 신호를 획득할 뿐만 아니라 카운터 IC를 장착하여 엔코더의 값도 받아 올 수 있다. 이는 시추공 물리검층 및 시추공 물리탐사 응용에 확장할 수 있도록 하기 위함이다. 또한 DGPS 연동을 위해 별도의 시리얼 포트를 할당하여 실시간 이동형 계측 확장이 가능하게 하였다.

Table 3. Specifications of MEMS AHRS modules

Name	A	B	C
Sensor	3Axis Magnetometer, 3Axis Accelerometer, 3Axis Gyroscope 1 Pressure Sensor	3Axis Magnetometer, 3Axis Accelerometer, 3Axis Gyroscope	3Axis Magnetometer, 3Axis Accelerometer, 3Axis Gyroscope
Size XYZ	36×33×9 (mm unit)	27×35×11 (mm unit)	23×33×8 (mm unit)
Power @5V	70 mA	52 mA	30 mA
DOF	10	9	9
Feature	Extended-Kalman Filter, Quaternion	Extended-Kalman Filter, Quaternion	Kalman Filter, Quaternion
Heading, Roll Range	±180°	±180°	±180°
Heading accuracy	2.0°	5.0°	
Pitch range	±90°	±90°	±90°
Pitch/Roll accuracy	0.5°	2°	
Resolution	0.05°	0.01°	16bit resolution

AHRS선정

선정한 세 종류의 각 성능상세를 Table 3에서 확인할 수 있다. AHRS 센서는 시중에 판매되는 수많은 센서들 중 직경 42 mm의 존테에 설치될 수 있는 크기 이면서 측정 범위가 heading과 roll에 대해서 ±180°, pitch는 ±90°를 보장하고 2010년 이후에 출시된 제품으로 선정하였다. 선정된 센서들은 기본적으로 DOF (Degree of Freedom)가 9 이상이고 쿼터니언 연산을 통해 각도를 계산한다. 가격적인 측면에서는 센서 A가 고가의 제품군에 속하며 센서 B는 중가, 센서 C는 저가에 속한다. 자이로스코프, 가속도센서, 자력센서 등 여러 개의 센서 데이터를 효과적으로 결합하기 위해 칼만필터를 적용하여 오차를 최소화 시킨다. 센서 A와 센서 B는 비선형 시스템에도 적용할 수 있는 확장형 칼만필터를 내장하고 있는데 비해 센서 C의 경우 일반 칼만필터를 적용하였으며 데이터시트에서 각 방향에 대한 정확도를 제공하지 않는다.

비교실험 결과 및 토의

실험을 위한 정밀 회전자 제작

개발한 시스템의 성능을 평가하기 위해 정밀 측정

장비를 제작하였다. 실험을 위해 제작된 장비는 roll, pitch용 정밀 눈금자와 yaw 시험용 정밀 눈금 회전자이다. 분해능 0.025 mm, 반복 정밀도 ±0.01 mm의 2축 CNC 정밀 레이저 가공기로 아크릴 소재를 조각하여 제작하였다. 제품은 사용된 볼트 및 너트까지 모두 자장의 왜곡을 일으키지 않는 비자성 소재를 사용하였다.

Fig. 10a는 ±180° 회전각 측정장비의 모습으로 5° 단위로 걸개를 제작하여 실험할 수 있게 하였다. Fig. 10b는 roll, pitch 측정 장비이며, 반지름 1 m 기준으로 1° 마다 걸개를 만들어 벽이나 나무에 걸어 사용할 수 있게 하였다. 실험은 수준계로 평형을 확인해가면서 자동차나 건물이 최소 100 m 이상 이격된 잔디 운동장의 중심에서 실시되었다(Fig. 11).

Steady state condition

개발한 시스템을 수직으로 세우고 정상상태에서 50회 반복 측정한 결과를 Fig. 12에 도시하였다. 전체적으로 Fig. 12a의 센서 A는 yaw, pitch, roll의 표준편차가 0.01552°, 0.00394°, 0.0041°로 가장 안정하며 Fig. 12b의 센서 B에서는 0.12321°, 0.06839°, 0.04584° 수준의 표준편차를 보이지만 지속적인 드리

Fig. 10. Developed verification systems. (a) $\pm 180^\circ$ range yaw verification system, (b) $\pm 10^\circ$ range roll and pitch verification system.

Fig. 11. Photo of outdoor experiment with developed system.

프트 현상을, Fig. 12c의 센서 C에서는 0.07887° , 0.7559° , 0.08551° 수준으로 무작위한 잡음을 관찰할 수 있었다.

Roll, pitch 센서값 비교

지구물리·물리탐사 응용에서 센서의 roll과 pitch는 좁은 범위에서 정밀하게 측정되는 경우가 많다. 따라서 개발한 시스템의 roll과 pitch를 범위 $\pm 10^\circ$ 에서 1° 단위로 정밀하게 왕복 측정하였고 센서들의 측정값을 비교한 그래프를 Fig. 13에 도시하였다. 결과를 기준값과 비교하여 본 결과 roll에 대해서는 센서 C에 최대 1.1° 의 오차가 존재하였다. 센서 A는 roll의 최대오차가 0.167° 를 나타내었고 센서 B는 최대 오차가 0.3° 이었다.

(a)

(b)

(c)

Fig. 12. Repeated test results in steady state condition. (a) sensor A, (b) sensor B, (c) sensor C.

Pitch를 비교 실험한 결과 센서 A의 최대오차는 0.4° , 센서 B는 1.4° 를 나타내었고 센서 C는 1.9735° 이었다. 실험결과 센서 C는 roll, pitch에 대해서 모두 1° 이상의 가장 큰 오차를 나타낸 것을 확인하였다.

Fig. 13. Comparison results of $\pm 10^\circ$ range pitch and roll range with three sensors. (a) roll, (b) pitch.

Fig. 14. Comparison result of 360° yaw range with three sensors.

Yaw값 비교

Yaw 실험은 롤을 측정하였다. 실험결과 센서 A는 최대 오차가 2.41° 를 나타내어 상대적으로 가장 정확한 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 14). 또한 센서 B는 최대 오차 5.428° 를 나타내어 센서 A, 센서 B 모두 방위각 정확도가 성능명세에 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 센서 C는 최대오차가 16.693° 로 센서의 성능이 실전 응용에 어려운 수준이었다.

센서 A의 캘리브레이션 후 측정결과

센서 A는 자력센서에 대해 자체적으로 soft iron 효과와 hard iron 효과를 보정해주는 캘리브레이션 기능이 탑재되어있다. 따라서 센서 A를 가능한 모든 방향으로 회전시켜 센서 보정 변수를 획득하는 캘리브레이션 과정을 거친 후 360° 범위에서 다시 5° 간

격으로 측정하였다. 실험결과를 Fig. 15a에 도시하였다. 이전 실험에 비해서 기준값에 더욱 일치하는 것을 확인할 수 있다. 기준값과 측정값의 편차를 Fig. 15b에 도시하였다. 오차는 $\pm 1^\circ$ 를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 자세히 분석한 결과 최대오차 0.795° , 최소오차 -0.859° 를 나타내어 정확도가 1.65° 로 나타나 성능명세를 상회함을 알 수 있었다.

센서들을 정상상태에서 측정한 결과 상대적으로 센서 A의 안정도와 정확도가 가장 높다는 것을 알 수 있었다. 고전적인 기존의 시추공 편차검층용 경사각과 방위각 측정 센서 모듈과 비교할 때 본 논문에서 실험한 3가지 모듈 중에서 센서 A가 그에 준하는 성능을 보임을 검증하였다. 또한 센서 A의 자체 캘리브레이션을 수행한 후 성능 명세 이상의 결과를 얻어 무자장공간이 아니라 실제 야외현장 응용에서도 개발된 시스템을 신뢰할 수 있다는 것을 확인하였다. 개발 센서 모듈은 기존의 것보다 초소형, 저전력의 장점을 살려 운용될 것이다.

개발된 경사각과 방위각 측정 센서 모듈은 존재 내에서 시추공 중요 정밀 계측모듈과 일체화되어 시추공 편차의 동시측정으로 탐사효율을 극대화시킬 수 있다. 여기서 시추공 정밀 계측모듈이란 여러 물리검층장비 혹은 시추공 물리탐사장비를 말한다. 물리검층은 공벽 부근의 물리적 성질을 심도에 따라 측정하는 방법으로 측정모듈 일체화를 통해 검층이 이루어진 위치에 대한 정확한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 시추공 간 토모그래피, 지표면-시추공간 탐사와 같은 시추공 물리탐사에서 시추공의 편차 정보는 탐사자료의 역산 및 모델링 수행 시 보

Fig. 15. Measurement results of 360° yaw range with calibrated sensor A. (a) comparison with reference, (b) deviation of test result.

정을 위해 이용된다. 그 외 3성분 자력탐사, 시추공 TEM 탐사에서 최신 기술 응용을 위해서는 시추공의 편차 및 기울기 정보가 반드시 결합되어야 한다. 시추공 탐사 역산 과정에 편차를 보정하지 않으면 분해능이 떨어지기 때문에(Kang et al., 2006) 이는 아주 중요한 응용이다. 시추공 편차 계산은 Wells (2004)와 Pei et al. (2013)에 자세히 소개되어 있다.

결 론

지구물리탐사 현장계측기술은 근래 전자공학 및 IT기술의 급속한 발전에 힘입어 과거 대비 눈부시게 향상되었으며 이러한 경향은 향후 더욱 가속화될 것이다. 본 논문에서는 이러한 발전 추세를 적극 고려하여 지구물리·물리탐사 분야에 다양하게 응용될 수 있는 다용도 야외시험용 실시간 저전력 경사각과 방위각 측정 시스템 개발 연구를 진행하였다. 특히 개발 모듈은 시추공 편차검출용 경사각과 방위각 측정 모듈 응용사례에 초점을 맞추어 실험결과를 제시하였는데, 기존의 것보다 초소형, 저전력으로 제작되어 더욱 정밀하고 다양한 응용이 기대된다.

개발된 시스템은 지름 42 mm의 존데 안에 전원, 센서, MCU 제어 모듈이 모두 장착될 수 있도록 제작되었다. 또한 CMOS 저전력, 초소형 MCU를 도입하여 기존 임베디드 보드로는 구현할 수 없는 크기로 제어 보드를 제작하였다. 외부와는 RS-485통신으로 최대 1200 m까지 통신이 가능하도록 하였고, 데이터 통합 및 제어 모듈을 따로 설계하여 시추공용

으로 확장이 가능하도록 하였다. MEMS AHRS를 도입하여 개발된 시스템의 성능과 AHRS 자체의 성능 또한 검증할 수 있었다. 특히 센서의 캘리브레이션을 통해 성능 명세 이상의 결과를 얻어 개발한 시스템이 무자장 공간에서만 아닌 야외환경에서도 기존 요구 범위 내에서 측정 가능함을 확인하였다.

경사각과 방위각 측정정보는 위성항법보정시스템(SBAS)인 일본의 MSAS와 같은 DGPS 정보와 결합되어 소형 선박 이동측정, 헬기를 이용한 항공 물리탐사 혹은 무인 비행선을 이용한 실시간 공중 자료 획득 시스템에 응용할 수 있다. 또한 지하구조물의 설치 시 공동현상 및 지하수위의 변화 등의 영향으로 인한 수평방향의 이동속도 모니터링이나 지반의 함몰을 막기 위해 벽체에 일어나는 응력을 모니터링할 때에도 사용된다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 다용도 야외시험용 실시간 저전력 경사각과 방위각 측정 시스템은 지구물리·물리탐사분야에서 응용범위가 넓기 때문에 앞으로의 다양한 응용이 기대된다.

사 사

본 논문은 지식경제부에서 지원한 한국지질자원연구원 기관고유사업인 “심부 금속광체 정밀물리탐사 및 채광기술 개발” 및 민군겸용기술개발사업인 “이상체 정밀 탐지용 고감도 전/자기장 통합 모니터링 시스템 기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다. 논문을 세밀히 심사해주시고 귀중한 의견을 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

- Answers, 2003, McGraw-Hill Science & Technology Encyclopedia: Photoclinometer, <http://www.answers.com/topic/photoclinometer> (July 22th 2013)
- Choi J.R., Kim S.S., Park S.K., Shin K.S., and Kang B.C., 2013, A case study of electrical resistivity and borehole imaging methods for detecting underground cavities and monitoring ground subsidence at abandoned underground mines, Jour. Korean Earth Science Society, 34, 3, 195-208. (in Korean)
- Cho S.H., Jung H.K., Lee H.Y., and Lee H.S., 2011, Development of DGPS SP exploration system based on iOS App, 2011 Spring Joint Annual Conference of the Geological Societies in Korea, 183-184. (in Korean)
- Crain E.R., 2005, Crain's petrophysical handbook, Dipmeter Logs, <http://www.spec2000.net/07-diplog.htm> (July 23th 2013)
- Jung H.K., 2008, Future and present state of geophysical data acquisition system for field exploration measurement technology, 2008 Joint Conference of the International Year of Planet Earth, p. 123. (in Korean)
- Jung H.K., Bang E.S., Cho S.H., Lee H.S., Lee H.Y., and Bae J.H., 2011, USN based measurement system development and field applicability for mineral resources exploration, 2011 Fall Conference of the Korean Earth Science Society, 57-58. (in Korean)
- Jung H.K., Cho S.H., Lee H.S., Bae J.H., and Lee H.Y., 2011, Smart device App. for Geophysical exploration, 2011 Fall Joint Annual Conference of the Geological Societies in Korea, p. 113. (in Korean)
- Jung H.K., Cho S.H., Lee H.S., and Park S.G., 2012, Evolution of geophysical exploration field measurement for mineral resources exploration, 2012 Fall Conference of the Korean Earth Science Society, 186-188. (in Korean)
- Kang J.S., Cha Y.H., Jo C.H., Choi C.H., Shim W.H., and Park Y.S., 2006, A case of seismic crosshole tomography applying borehole deviation correction, 2006 Conference of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysics, 221-224. (in Korean)
- Lee H.S., Rim H.R., Jung H.J., Jung H.K., and Yang J.M., 2010, Detecting steel pile using bore-hole 3-components fluxgate magnetometer, Jour. Korean Earth Science Society, 31, 7, 673-680. (in Korean)
- Pei H.F., Yin J.H., and Jin W., 2013, Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures, Measurement Science and Technology, 24, 10-24.
- Song S.H., Lee G.S., Um J.Y., and Suh J.J., 2011, Resistivity imaging using borehole electrical resistivity tomography: A case of land subsidence in karst area due to the excessive groundwater withdrawal, Jour. Korean Earth Science Society, 32, 6, 537-547. (in Korean)
- Wells B., 2004, The latest developments in laser profiling, borehole deviation and laser enhanced videometry, Measurement Devices Ltd, <http://alpageofisica.com.br/mdl/download.htm> (July 22th 2013)

2013년 9월 30일 접수
 2013년 10월 8일 수정원고 접수
 2013년 10월 10일 채택

부록: 회전행렬과 오일러각

오일러각은 roll, pitch, yaw 등 3가지 성분으로 이루어지며 직교하는 3축을 중심으로 한 회전각의 크기를 나타낸다. 회전행렬은 DCM (Direction Cosine Matrix)이라 불리기도 하는데 3차원에서는 3*3 행렬로 나타난다. 기준 벡터를 중심으로 3개의 각 축에 대한 좌표계의 회전을 의미한다. yaw의 각도가 Φ 일 때 회전 행렬을 $R(\Phi)$, pitch의 각도가 θ 일 때 $R(\theta)$, roll의 각도가 Ψ 일 때 $R(\Psi)$ 이라고 하면 각각은 아래와 같이 나타난다.

$$R(\Phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & -\sin \Phi \\ 0 & \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix}, R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, R(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

각 성분에 대해 3번의 회전을 하는데 그 순서에 따라 다른 결과를 가져오기 때문에 시스템 별로 회전 순서에 주의해야한다. 일반적으로 많이 사용되는 ZYX (roll-pitch-yaw)각으로 나타내면 다음과 같으며 XYZ, YXZ 등 회전 순서에 따라 다르게 표시가 가능하다.

$$R = R(\Psi)R(\theta)R(\Phi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \Psi \sin \Phi \sin \theta \cos \Psi - \cos \Phi \cos \sin \theta \cos \Psi + \sin \Phi \sin \Psi \\ \cos \theta \sin \Psi \sin \Phi \sin \theta \sin \Psi + \cos \Phi \cos \sin \theta \sin \Psi - \sin \Phi \cos \Psi \\ -\sin \Phi & \sin \Phi \cos \theta & \cos \Phi \cos \theta \end{bmatrix}$$