

경사계와 GNSS 나침반을 이용한 3성분 자력 탐사자료의 측지 좌표계로의 변환 방법

전태환¹ · 임형래^{1,2*} · 박영수^{1,2} · 임무택² · 신영홍²

¹과학기술연합대학교

²한국지질자원연구원

Conversion of 3-Component Magnetic Data into Geodetic Coordinate System by Using Clinometer and GNSS Compass

Tae-Hwan Jeon¹, Hyoungrea Rim^{1,2*}, Young-Sue Park^{1,2}, Muteak Lim², and Young-Hong Shin²

¹University of Science and Technology

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약: 이 연구는 탐사 중 흔들리는 측정기기의 기울어짐을 2축 경사계와 GNSS 나침반으로 보정하는 방법에 관한 연구이다. 3성분 자력탐사와 같이 벡터로 측정하는 경우에는 관측 장비의 이동, 기울어짐, 요동 등에 따라 기울어진 관측 좌표계 위에서 측정된다. 이 측정값들을 측지 좌표계 위의 값으로 바꾸기 위해서는 측정면의 회전각이 필요하다. 이 논문에서는 2축 경사계로 얻은 두 방향의 경사각과 GNSS 나침반으로 얻은 방위각을 이용하여 관측 좌표면의 경사를 얻은 후, 이것을 회전 변환에 직접 쓰이는 성분각으로 변환할 수 있도록 유도하였다. 이 연구에서 개발한 2축 경사계와 GNSS 나침반을 이용하여 측지 좌표계로 변환하는 방법을 이용하여 실제로 배 위에서 측정한 3성분 자력 탐사 값을 측지 좌표계로 변환하였다.

주요어: 3성분 자력탐사, 좌표 변환, 측지 좌표계

Abstract: This study proposes a method to correct inclination of instrument during exploration with a biaxial clinometer and GNSS compass. In 3-component magnetometry, measured vectors are ordinarily described in randomly inclined observation coordinate system due to movement, vibration, and shaking of instrument. Therefore, rotation angles of observation plane are needed to transform it into geodetic coordinate system. In this study, we measured inclination angles of observation plane by using 2-axis clinometer and GNSS compass, and derived proper parameters for rotational transform from them. We applied the conversion method to on-board 3-component magnetometry, and then transformed raw data into proper values on geodetic coordinate system.

Keywords: 3-component magnetometry, coordinate transformation, geodetic coordinate system

서 론

지구물리 탐사는 측정하고자 하는 물성을 각 관측 지점별로 3차원 공간 좌표계에 표시하여 나타내는 경우가 많다. 특히 그 값이 벡터로 얻어지는 값이라면 매 측정마다 임의로 기울어진

측정 기기의 기울기 자체가 벡터 성분에 포함된다. 비행기, 선박, 차량, 때로는 도보로 탐사하는 과정에서 탐사장비의 센서를 한결같이 고정된 자세로 유지하기란 불가능하며, 측정 기기는 매번 임의의 방향으로 기울어진 좌표계에서 벡터 성분을 측정하게 된다. 이 경우에 제 각각의 좌표계 속에서 측정된 자료들은 반드시 서로 비교할 수 있을 만한 공통 좌표계로 변환하는 과정이 필수적이다. 따라서 이 연구의 최종 목적은 매 측정마다 달라지는 측정 좌표계를 보편적으로 물리탐사에서 사용하는 북쪽을 X, 동쪽을 Y, 연직 아래를 Z로 둔 측지 좌표계로 변환하는 것이다.

어떤 좌표계를 다른 좌표계로 변환한다는 것은 회전 변환을 연속적으로 수행한다는 것을 의미한다. 이때 회전하는 각도들은 각각 회전축에 수직인 평면 위의 각으로 정의되고 매 측정마다 측정 센서의 자세에 해당하는 성분 각들을 구하는

2013년 1월 21일 접수; 2013년 5월 10일 수정; 2013년 5월 14일 채택

*Corresponding author

E-mail: rhr@kigam.re.kr

Address: Mineral Resources Research Division, KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

©2013, 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.

것이 핵심적이다.

일반적으로 움직이는 측정 센서의 자세를 측정하는 장비로는 자이로스코프가 있으며 이를 이용하면 측지 좌표계로 변환하는 데에 필요한 회전각을 쉽게 측정할 수 있다. 측지 좌표계의 축과 일치되도록 설치된 자이로스코프는 그로부터 이탈한 정도를 축에 대한 각으로 표현하기에 유리하다. 공학에서는 자이로 효과를 통해 기준 축에서부터 물체가 기울어지는 속도를 각속도의 변화로 인식한 후, 반대로 보상을 넣어 자세를 보정하는데(이건영, 권만오, 2000), 이를 통해 보행로봇의 자세를 수정하거나(정확상 등, 2010) 위성의 기울어짐을 측정하는 등(Lappas *et al.*, 2002) 공간에서의 강체 방향을 표현하는 데에 이용하고 있다. 이 변화율은 자이로스코프 내에서 회전중인 로터의 각속도에 관련되어 있기 때문에 회전축에 대한 회전각으로도 나타낼 수 있는 것이다.

하지만 이 연구에서 사용한 장비는 상대적으로 고가인 자이로스코프를 대체하기 위하여 두 개의 GNSS (Global Navigation Satellite System) 나침반 세트르 이루어진 GNSS 측정 장비와 2축 경사계(biaxial clinometer)로 구성하였다. 따라서 이 연구의 목적은 GNSS 측정 자료로 얻어지는 센서의 방위각과 경사계로부터 얻어지는 경사각으로부터 임의의 방향으로 기울어진 좌표계의 회전 성분을 모두 얻어내어 일반적인 물리탐사에서 사용하는 측지 좌표계로 변환하는 것이다.

장비의 원리와 측정 조건

해상에서 3성분 자력 탐사를 수행하기 위하여 배에 3축 플럭스게이트 자력계(3-axis fluxgate sensor)를 설치하여 벡터 자력을 측정하였다. 3축 자력계는 정면이 X, 우측이 Y, 아래쪽이 Z로 직교하는 3개 성분을 nT 단위로 재도록 되어 있어 각 방향의 벡터 성분을 알기에 유리하다. 하지만 매 측정마다 3축 자력계가 놓인 자세에 따라 측정 좌표계 위에서의 지자기 성분값(벡터 자력값)이 측정된다는 문제가 있다. 이렇게 측정된 벡터 자력 값을 기준 값으로 변환하기 위해서는 3축 자력계의 자세에 해당하는 회전각을 측정해야 하므로 이를 위하여 2축 경사계와 두 개의 GNSS 나침반을 같이 설치하였다.

2축 경사계는 정면이 X, 좌측이 Y로 된 2개의 축이 평면에서부터 기울어진 각을 재도록 되어 있는데, 내장된 두 축은 경사계의 기울기에 상관없이 항상 직교하도록 설계되어 있다. 출력되는 값은 축이 평면에서 내려가는 것이 양의 값으로 커지고, 올라가면 음의 값으로 커진다.

GNSS 나침반 시스템은 내부에 두 개의 GNSS 수신기를 이은 측정 기준 축이 있어서 그 축이 지리상의 북쪽(geographical north)에서 돌아간 방위각을 잰다. 이 연구에서 사용한 GNSS 나침반의 측정 오차 범위는 최대 $\pm 0.75^\circ$ 이며 (Hemisphere Inc), 해상 3성분 자력 탐사의 방위각을 측정하기에는 충분한 정확도를 가지고 있다. 또한 이 각도는 나침반이 수직성분(Z 성분)을 따라 기울어져 있더라도 항상 그 수평성분(X, Y 성분)

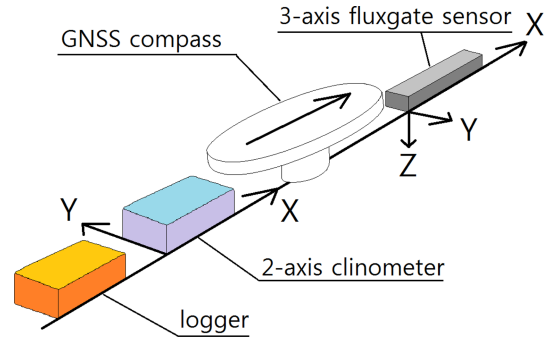


Fig. 1. Alignment of instruments. All X axes of instruments are aligned with the heading of survey ship. Putting 3 instruments on same plane, we can regard the arrangement as an observation plane.

과 지리상의 북쪽 사이의 각만을 재기 때문에, 수평면 위에서 지리상의 북쪽을 기준으로 한 방위각(azimuth)을 재는 것과 같다.

이 세 가지 측정 장비는 모두 X축이 일치하도록 일렬로 배열되었다(Fig. 1). 그리고 그 X축의 연장선상은 배의 중심축에 나란히 선수를 향하도록 설치되었다. 따라서 이 모든 기기는 같은 평면 위에, 같은 축선 상에 놓였다고 볼 수 있다. 또한, 기울어진 좌표계에서 측정하는 벡터 성분과, 그 기울어진 좌표계의 각도를 동시에 기록하도록 자력계가 자력 벡터를 측정할 때에 맞춰 경사계와 나침반도 동시에 각도를 재도록 동기화되

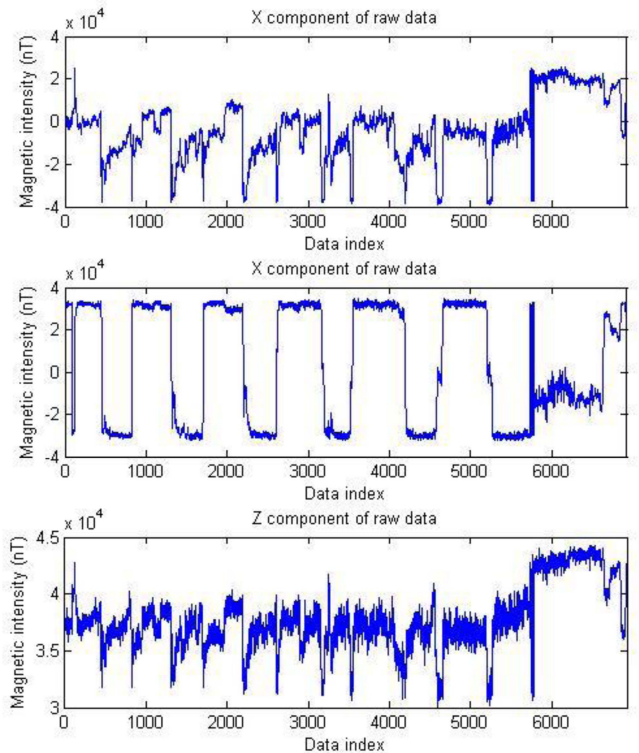


Fig. 2. 3-directional components measured by 3-axis fluxgate sensor. Data are plotted without any correction. They look disorderly due to heading direction and vibration of survey ship.

었다.

이와 같은 조건으로 전남 완도군 청산면의 남쪽 근해상에서 자기 탐사를 수행하였다. 측정된 자력 벡터의 3개 성분이 Fig. 2에서 그래프로 나타나 있다. 자료의 수는 7천여 개이며 측정 간격은 2초에 1회씩이다. 자력 성분 값을 아무런 보정도 하지 않고 그랬기 때문에 배의 방향이나 기울어짐에 상당한 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 이 자료를 2축 경사계와 GNSS 나침반이 측정한 값을 이용하여 측지 좌표계 위에서의 값들로 변환해야 한다.

회전 변환

3차원상에서 3축 직교 좌표계 $X_1Y_1Z_1$ 을 다른 좌표계 $X_fY_fZ_f$ 로 바꾸는 변환은 일반적으로 3개의 축을 한 번씩 회전하는 것으로 나타낼 수 있다. 3개의 오일러 각(Euler angles)을 조합한 12가지의 경우 중에서, Z-X-Z순으로 회전하는 것이 가장 적절하다(Diebel, 2006). 이 순서는 내적 회전(intrinsic rotation)에 따른 순서로, 회전하는 좌표계의 축이 기울어진 상태 그대로 다음 회전의 축이 되는 것을 의미한다. 즉 Z축을 중심으로 좌표계를 회전하면 X와 Y의 축은 처음의 위치와 다른 곳으로 움직여 가지만, 그 상태에서 그대로 X축을 기준 삼아 회전하는 것이다(Arfken, 1971). 엄밀하게 말하면 두 번째 회전하는 X축은 초기 위치의 X축과는 전혀 다른 방향을 가진 새로운 축으로 볼 수 있다. 어떤 벡터 $V_i(x_i, y_i, z_i)$ 을 Z, X, Z축을 중심으로 회전각 γ, δ, ϵ 만큼 순차적으로 변환하여 새로운 위치벡터 $V_f(x_f, y_f, z_f)$ 로 나타낼 때, 좌표변환 계수 행렬을 연속으로 곱한 다음의 식으로 표현된다.

$$V_f = R_z(\epsilon)R_x(\delta)R_z(\gamma)V_i$$

$$\begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\epsilon & -\sin\epsilon & 0 \\ \sin\epsilon & \cos\epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & -\sin\delta \\ 0 & \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 R_x, R_z 는 각각 괄호 안의 각만큼 X, Z축을 중심으로 회전시킬 때의 좌표변환 계수 행렬이다.

회전각의 계산

이와 같은 좌표계의 회전을, 수행한 탐사에서 사용한 3축 자력계의 축이 회전하는 것으로 적용할 수 있다. X_1 축은 배의 선수방향으로 정렬된 측정 기기들의 X축과 일치시키고, Y_1 은 직각 오른쪽을 향한다(Fig. 1). 임의의 방향으로 기울어진 X_1Y_1 평면은 기울어진 감판이 만드는 평면으로, 곧 관측 평면으로 볼 수 있다. 이 X_1 축은 3번의 변환을 거친 후에 X_f , 즉 지리상의 북쪽과 일치하도록 변환된다.

2축 경사계와 GNSS 나침반으로 측정된 값은 관측 평면의 기울기에 대한 정보를 담고 있으나 그 상태 그대로 식 (1)의 회전각인 γ, δ, ϵ 에 사용할 수는 없다. 따라서 이 회전각들을

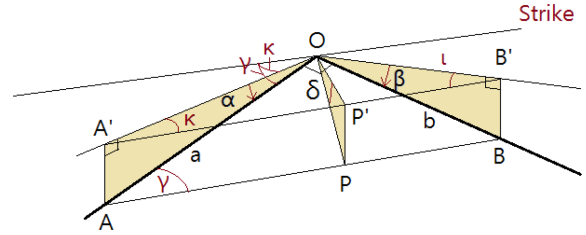


Fig. 3. Various angles calculated from slope α and β .

측정한 값으로부터 유도하는 과정이 필요하다.

우선 2축 경사계의 도해는 Fig. 3과 같이 나타나는데, 진하게 표시된 선분 OA와 OB가 경사계에 내장된 축을 가리킨다. 두 개의 축 중에 OA가 X_1 축과 일치하도록 정렬되었으므로 이를 X_1 축으로 볼 수 있다. 두 개의 축은 항상 직각을 유지하고, 평면의 정상영인 OA'와 OB'로부터 이 선분에 이르는 각도를 각각 측정하여 두 개의 성분 α 와 β 를 표시한다. 이때 각 α, β 가 회전각으로 쓰일 수 없는 이유는 기하학적 특징을 생각해 보면 명확하게 알 수 있다. OB를 회전축으로 α 만큼 회전시키려면 각 α 를 만드는 선분 OA와 OA'가 회전축 OB에 직각이어야 한다. OA는 경사계 내부에서 OB와 직각으로 유지되고 있지만 OA의 수평 정상영 OA'는 그렇지 않으므로 α 는 OB를 회전축으로 한 회전각이 될 수 없으며, 같은 원리로 β 또한 OA의 회전각이 될 수 없다.

식 (1)에서 첫 번째 변환에 필요한 각 γ 는 X_1 와 X_2 사이의 각이었고, X_2 는 기울어진 관측 평면과 지리학적 평면이 만나는 선으로 정의되었다. 여기서 X_2 는 마치 지질학에서의 주향(strike)과 그 기하학적 의미가 동일하다. 따라서 OA로부터 관측 평면의 주향 사이의 각 γ 를 구하는 것이 첫 번째 과정이 된다.

선분 OA를 a, 선분 OB를 b로 두고, 삼각형 OAB는 직각삼각형, 삼각형 OA'B'는 제 2 코사인 법칙을 만족하므로 다음 관계식이 성립한다.

$$a = \overline{AA'}\csc\alpha, \quad b = \overline{BB'}\csc\beta$$

$$AB^2 = a^2 + b^2$$

$$\overline{A'B'}^2 = \overline{OA'}^2 + \overline{OB'}^2 - 2 \cdot \overline{OA'} \cdot \overline{OB'} \cdot \cos(\angle A'OB')$$

삼각형 OA'B'에서 각 A'와 각 B'를 각각 κ 와 ι 로 두면 다음의 식이 성립한다.

$$(\kappa + \iota) = \cos^{-1} \left(\frac{(\csc\alpha)^2 + (\csc\beta)^2 - (\csc\alpha\cos\alpha)^2 - (\csc\beta\cos\beta)^2}{2(\csc\alpha\cos\alpha)(\csc\beta\cos\beta)} \right) \equiv C \quad (2)$$

한편, 최대 경사인 δ 와 측정된 경사 α, β 사이의 관계식은 위경사(apparent dip)로부터 진경사(true dip)를 구해내는 과정과 동일하며, Park and West (2001)는 식 (3)과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\tan \delta = \frac{\tan \alpha}{\sin \kappa} = \frac{\tan \beta}{\sin \iota}, \quad \frac{\tan \alpha}{\sin \kappa} = \frac{\sin \kappa}{\sin \iota} \quad (3)$$

이 식에서 $\frac{\tan \beta}{\tan \alpha} = T$ 로 정의하면 각 κ 와 ι 는 식 (4)의 관계식을 만족한다.

$$\iota = \sin^{-1}(T \cdot \sin \kappa) \quad (4)$$

식 (4)을 식 (2)에 대입하면, 다음의 결과를 얻는다.

$$\kappa = \tan^{-1}\left(\frac{\sin C}{T + \cos C}\right) \quad (5)$$

식 (5)에서 구한 각 κ 는 X_1 축의 수평성분인 OA' 에서 관측 평면의 주향까지의 각도이다. 다시 Fig. 3를 참조하면, 각 κ 는 각 γ 에 대해 다음과 같은 관계를 가지고 있음을 발견할 수 있다.

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos \kappa \cos \alpha) \quad (6)$$

또한, 두 번째 회전에 필요한 각 δ 는 앞선 식 (3)에서 보이는 진경사 δ 와 동일하다. 위의 Fig. 3에서 나타나는 진경사의 경사선 OP 와 그 정상영인 OP' 가 Fig. 4에서 나타나는 Y_2 와 Y_3 에 각각 대응되는데, 두 번째 회전축인 X_2 에 수직이어야 하고, 동시에 기울어진 평면과 수평인 지리학적 평면과의 경사이어야 한다는 회전각의 두 조건을 관측평면의 진경사라는 개념으로써 정확하게 만족하고 있기 때문이다. 각 δ 는 식 (3)으로부터 유도된다.

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \alpha}{\sin \kappa}\right) \quad (7)$$

한편, 각들의 방향, 즉 부호를 일치시키는 과정이 필요하다. 계산상의 편의를 위해, 각의 방향은 식 (1)에서 정의하는 양의 회전방향으로 동일하게 조정하였다. 각 κ 의 경우 식 (6)에 의해 나오는 값에서 부호를 바꾸어 주어야만 X_1 에서 X_2 로 재는 각의 방향이 회전방향과 일치된다. 특히 각 γ 은 코사인 함수로만 이루어져 있으므로 X_1 과 X_2 의 상대적 위치가 반대방향에 있는 경우에도 부호가 같아 위치에 대한 정보가 무시되기 쉽다. 회전각 δ, ϵ 도 모두 각 κ 를 변수로 가지도록 유도되고 그 부호에 의해 좌우되므로, 각 κ 의 부호를 정확히 잡아줌으로써 모든 회전각의 방향을 보정할 수 있게 된다. 부호를 고려하여 식 (5)과 (6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\kappa = -\tan^{-1}\left(\frac{\sin C}{T + \cos C}\right) \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\kappa}{| \kappa |} \cos^{-1}(\cos \kappa \cos \alpha) \quad (9)$$

여기서 C 와 T 는 앞선 식 (2)와 식 (4)에서 정의된 것과 동일하다.

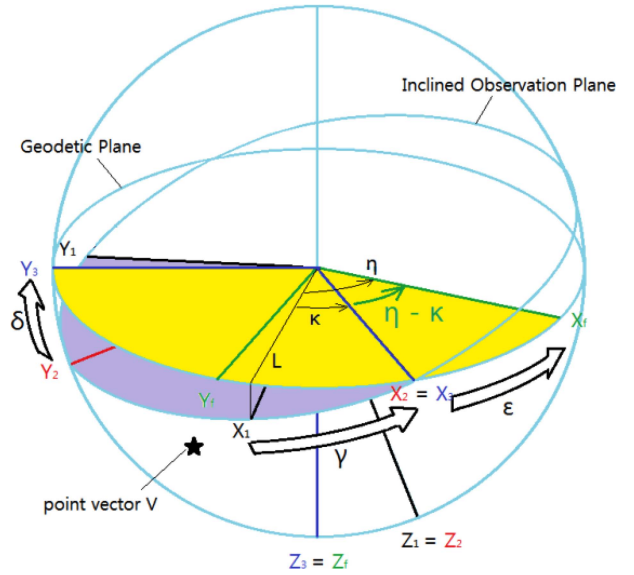


Fig. 4. Geodetic plane (yellow) and observation plane (light purple), and angles lying on them. X_2 is a strike of observation plane, and an angle between Y_2 and Y_3 is true dip of observation plane (δ).

마지막으로 필요한 회전각인 ϵ 은 GNSS 나침반이 측정된 방위각 η 와 위에서 계산한 κ 를 통해 계산된다. GNSS 나침반의 회전각 η 는 X_1 의 수평 정상영인 L 에서부터 지리상의 북쪽까지의 각이고 각 ϵ 는 L 에서부터 X_2 까지의 각이다(Fig. 4). 세 번째 회전에서 필요한 각 ϵ 은 다음 식과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \eta - \kappa \quad (10)$$

이로부터 3번의 회전에 필요한 회전각 γ, δ, ϵ 가 2축 경사계로 측정된 두 성분 경사각 α, β 와 GNSS 나침반으로 측정된 방위각 η 로부터 모두 유도되었다. 이 값들을 바탕으로, 각각의 관측 지점에서 측정된 자력 벡터 $V_1(x_1, y_1, z_1)$ 을 식 (1)에 따라 지리학적 좌표계 안에서의 벡터 $V_1(x_6, y_6, z_6)$ 로 변환할 수 있다.

변환 전후의 자료 대비

흔들리는 감판 위에서 측정된 3성분 자료를 위 과정을 통해 변환한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 정확한 비교를 위해 측정 범위는 통일되었으며 성분 별로 나누어 표시하였다. 보정 이전의 자료인 좌측과 보정을 거친 우측의 결과를 비교하면 관측 좌표계의 방향이나 기울기가 큰 폭으로 반영되었던 것이 제거되었음을 확인할 수 있다. 변환 후에도 나타나는 적은 폭의 기록은, 탐사 경로상 배가 동서방향으로 주기적으로 왕복했기 때문에 배 자체의 유도자기가 포함되어 측정된 결과로 보이는데, 본 연구에서는 계산하지 않았다. 동서로 규칙적으로 움직인 경로는 1번부터 약 5000번 자료까지인 것을 쉽게 확인할 수 있다. 1번부터 5000번 자료까지의 평균을 내어 보면 x성분이 약

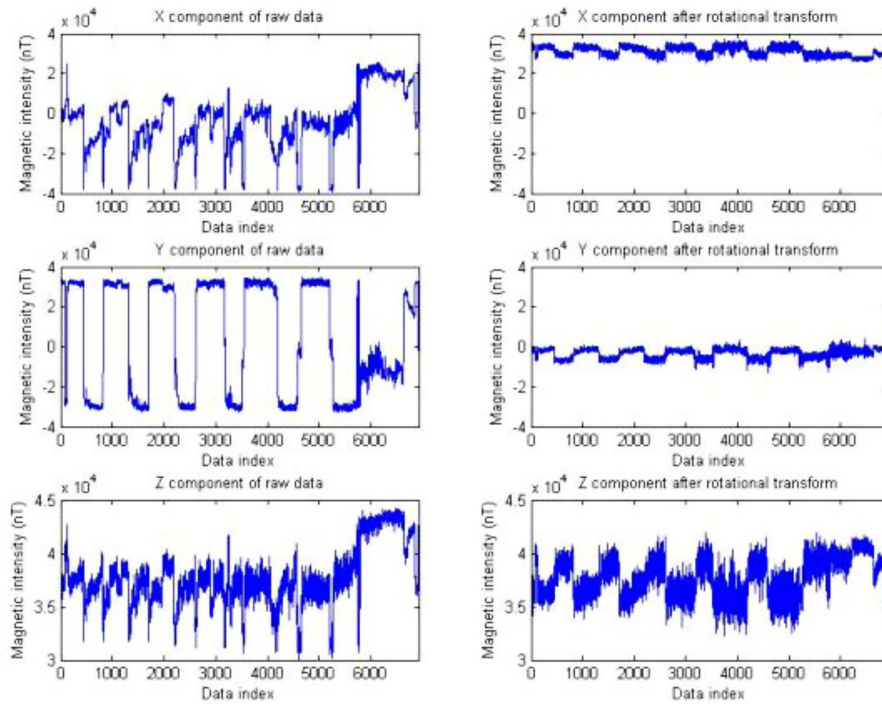


Fig. 5. Comparison of 3 components data before (left) and after rotational transform (right). Data after correction process shows smaller range of fluctuation and reasonable average.

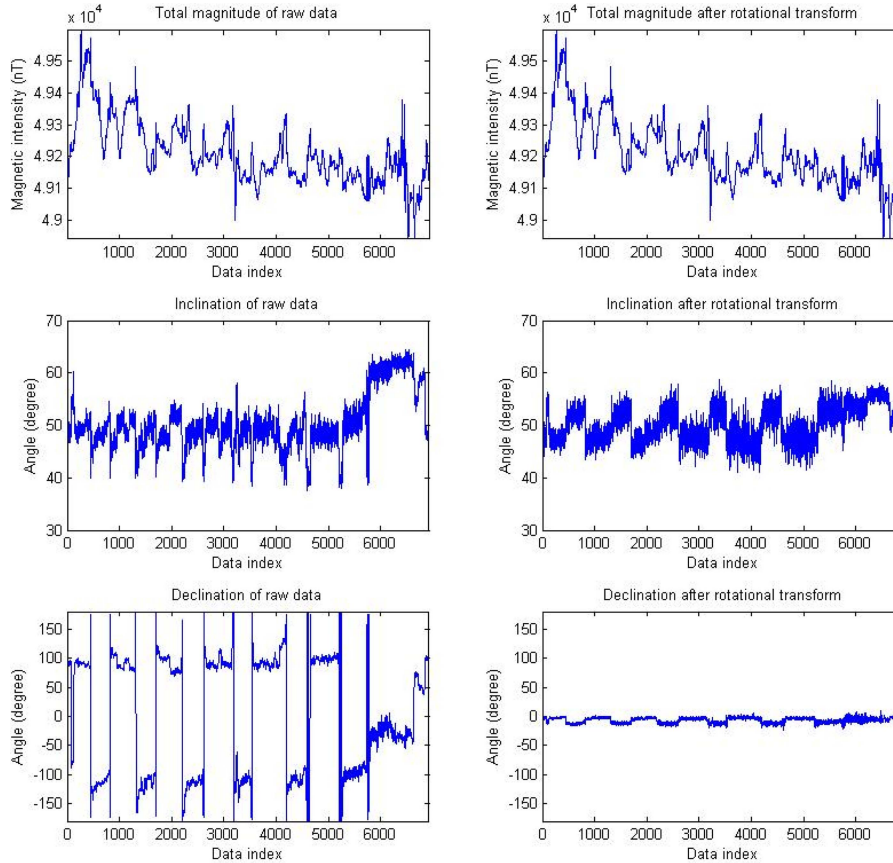


Fig. 6. Raw data (left) and converted data (right) of total magnitude, inclination, and declination. We made downward positive inclination from horizon and clockwise positive declination from north as a choice of sign.

31,780 nT, y성분은 약 -3,540 nT, z성분은 약 37,257 nT의 값을 보인다. 직교 좌표계로 표현된 결과를 총 자기장 세기, 북각, 편각으로 바꾸어 변환 전후를 비교한 것이 Fig. 6으로, 같은 범위의 평균 편각은 약 -6.56° , 평균 북각은 약 49.26° 로 나타났다. IGRF를 참고한 탐사 지역의 2012년 표준 자력값은 고도 0 m를 기준으로 총 자기장 세기가 48,985 nT, x성분이 31,467 nT, y성분이 -3,828 nT, z성분이 37,346 nT이며, 편각과 북각은 각각 -6.937° , 49.675° 이다. 좌표 변환한 후 자력 값은 작은 양의 편차를 가지는데 이는 주로 동서 방향으로 향해 한 자료를 모은 것은 동서 방향으로 배의 방향이 바뀔 때 따라 배가 가지고 있는 고유의 자력 이상값이 더해진 영향을 보여 준다. 배의 자력 효과를 고려하면 이 논문에서 고안한 좌표 변환 방법이 표준 자력값과 잘 일치하는 결과라는 것을 확인할 수 있다.

결 론

물리탐사에서 이동하는 센서로 측정된 결과는 매 측정마다 센서의 자세가 변하므로 이를 공통적인 측지 좌표계로 변환하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 GNSS 나침반으로 측정된 센서의 방위각과 2축 경사계로 측정된 경사각을 이용하여 3축 자력계에서 얻어진 벡터 자력값을 측지 좌표계에서의 자력값으로 변환할 수 있음을 보였다.

이 연구에서 측지 좌표계로 변환한 3축 자력값을 얻는 방법을 요약하면 다음과 같다.

1) 3축 자력계, 2축 경사계, GNSS 나침반을 모두 같은 평면 위에 놓고 이들의 X축을 모두 일렬로 정렬한 시스템을 구성한 후, 자력 벡터의 성분 3개와 경사각 2개(α , β)와, 방위각 1개(η)를 측정한다.

2) 변환에 필요한 회전각 γ , δ , ϵ 를 2축 경사계와 GNSS 나침반이 잰 3개 각도 성분으로부터 식 (2)에서 식 (10)까지의

과정을 거쳐 유도한다.

3) 측정된 자력값을 측지 좌표계인 지리 좌표계 위의 값들로 식 (1)과 같이 Z_1 - X_2 - Z_3 순서의 회전 변환에 따라 변환한다.

이와 같은 과정을 거친 자료들은 관측 지역인 전남 완도군 청산면 지역의 평균 북각과 편각을 상당히 정확하게 반영한 자료들로 변환이 되어, 위 과정이 성공적으로 이루어졌음을 보여주었다. 2축 경사계와 GNSS 나침반과 같은 비교적 운용하기 쉬운 장비들로도 충분히 정확한 좌표계의 변환이 가능하다고 볼 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 “지구물리이상도 작성 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 이건영, 권만오, 2000, 자이로 구동장치를 이용한 공중물체의 자세 제어 및 안정화, 전기학회논문지, **49D-8-7**, 459-466.
- 정학상, 최윤호, 박진배, 2010, 자이로 센서를 이용한 4족 보행 로봇의 자세 제어, 2010년도대한전기학회 하계학술대회 논문집, 대한전기학회, 2010년 7월 14-16일, 1836-1837.
- Arfken, G., 1971, *Mathematical Methods for Physicists*, 2nd ed., Academic Press, Inc.
- Diebel, J., 2006, *Representing Attitude: Euler Angles, Quaternions, and Rotation Vectors*. Tech. rep., Stanford University.
- Hemisphere Inc., 2010. *SSV-100 manual*.
- Lappas, V. J., Steyn, W. H., and Underwood, C. I., 2002, Attitude control for small satellite using control moment gyros. *Acta Astronautica*, **51**, 101-111.
- Park, H. and West, T. R., 2001, Development of a probabilistic approach for rock wedge failure, *Engineering Geology*, **59**, 233-251.