

# KOMPSAT 삼축자력계로부터 관측된 지구자기장 분석

황종선<sup>1</sup>, 김성용<sup>2</sup>, 이선호<sup>3</sup>, 민경덕<sup>1</sup>, 김정우<sup>4\*</sup>

**요약:** 다목적위성 1호(KOMPSAT-1, The first Korea Multi-Purpose Satellite)에 장착된 위성 자세제어용 3축 자력계(TAM, Three-Axis Magnetometer)로부터 2000년 6월 19일에서 21일 사이에 측정된 지구자기장을 분석하였다. TAM Telemetry 값을 지구관성좌표계에서 지구고정좌표계로 우선 변환시킨 후에 다시 구면좌표계로 변환하여 자료를 처리하였다. 지구자기장의 영향 이외의 위성내의 유도 전류나 온도변화로 인한 에러, 태양풍의 영향 등을 제거하였고 태양에 의한 영향을 제거하기 위해 궤도를 지방시에 따라 상승 및 하강과 두 그룹으로 나눈 후 파동수대비법을 이용해 두 그룹 사이에 서로 역으로 대비되는 (inversely-correlated) 성분을 제거하였다. 축선 잡음을 제거하기 위하여 파동수 영역에서 Quadrant Swapping법을 도입하였고, 이로부터 연구 기간 중 최종적인 지구자기장을 추출하였다. KOMSAT TAM 으로부터 추출된 자기장의 주성분(corefield)을 동일 기간 중 KOMSAT과 유사한 고도에서 지구자기장 관측을 전문적으로 수행한 Ørsted 위성 관측값과 비교한 결과 이들 사이의 상관계수는 0.97로 매우 높게 나타났다. 위성 자세보정용 자력계로부터 관측된 자기장으로부터 신뢰도 있는 주성분 추출이 가능해짐에 따라 이로부터 전지구 구면조화계수를 유도할 경우 지구자기장 전문 관측위성이 존재하지 않는 기간 및 고도에 대한 자기장 연구가 가능하다.

**주요어 :** 다목적위성, 삼축자력계, 지구자기장, 자기장, 파동수대비법

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템학과

<sup>2</sup>연세대학교 교육대학원 지구과학전공

<sup>3</sup>한국항공공우주연구원 위성제어실

<sup>4</sup>세종대학교 지구정보공학과(jwkim@sejong.ac.kr)

## 1. 서 론

지구자기장을 측정하는 방법에는 지구지표면에서 자력계를 이용하여 측정하거나 항공기, 인공위성에 자력계를 설치하여 측정하는 방법이 있다. 위성을 이용한 자력측정의 경우, 구소련에서 발사한 Sputnik3에 장착되어 있었던 3축 자력계가 최초이며 극궤도 위성으로 높은 정밀도를 가진 것은 1965년부터 1971년까지 운영된 OGO-2, -4, -6(POGO, Polar Orbiting Geophysical Observatories)이다. 본격적으로 자기장만을 측정하기 위한 위성은 1979년 발사된 Magsat이며, 이후 Ørsted, CHAMP등의 고정밀 자기장 측정 위성들이 발사되었다.

기존의 Magsat, Ørsted, Champ위성을 이용한 자력 측정은 그 공간적, 시간적 해상도에서 한계가 있으므로(Fig. 1) 본 연구에서와 같이 대부분의 소형위성에서 자세 제어용으로 채택하고 있는 3축 자력계를 이용하여 지구자기장을 측정하면 지구 자기장 연구에 유용하게 사용될 수 있다.

다목적 실용위성 1호는 최초의 지구관측용 실용위성으로서 궤도 685km, 태양동기 주기, 적도 통과 지방시 AM 10:50 (남북방향)이며 1999년 12월 21일 미국의 반덴버그 공군기지에서

토러스 발사체에 의하여 발사되었다. 다목적 실용위성 1호에 탑재되어 있는 삼축 자력계는 자세 제어용이므로 위성 본체에 의한 유도 전류등 주위 잡음을 완전히 제거하는 것이 어려우며 이에 따라 높은 정밀도를 요구하는 현상보다는 저주파의 성분을 갖는 지구적인 규모의 연구에 유용하다.

Ørsted위성은 1999년 2월 23일 발사되었으며 638-849km의 궤도를 가지는 극 궤도 위성으로서 다목적 실용위성 1호와 유사한 궤도를 가지며 관측시기도 유사하여 결과를 비교하는데 사용되었다(Olsen et al., 2000). IGRF(International Geomagnetic Reference Field) 모델의 경우, 궤도의 높이가 600km이내일 경우에만 유효하므로 본 연구에서는 사용하지 않았다.

## 2. 지구 자기장

지구 자기장은 지구중심에 쌍극자를 위치시킬때 나타나는 쌍극자장으로 근사시킬 경우 실측 결과와 차이가 있으며 이 비쌍극자장을 구하기 위해 지자기장이 균일하게 자화된 구에 의하여 생성된다고 가정하면 자기 포텐셜은 지구의외부에서 라플라스(Laplace)방정식을 만족시킨다. 구 좌표계에서 라플라스 방정식은

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (1)$$

이 되고 구면좌표계에서 라플라스 방정식의 해는 구면조화함수의 합으로 표현되며 지구내부에 의한 지자기장만을 계산하면

$$V = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} [g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi] P_n^m(\cos \theta) \quad (2)$$

이 된다. 여기서 a는 지구의 반경, r은 지구 중심으로부터의 거리,  $g_n^m, h_n^m$ 은 가우스 계수,  $P_n^m(\cos \theta)$ 은 associate Legendre 함수이며 N은 계수의 개수로서 보통 10이하의 숫자이다.

## 3. 자료처리

### 3.1 좌표변환

TAM 자료의 경우, 위성의 지구중심관성좌표계(Earth centered inertial frame, ECI)에서 지구중심고정좌표계(Earth centered Earth fixed frame, ECEF)로 변환 시킨 후에 다시 구좌표계를 구하였다. 자력값의 경우는 동체좌표계(Body Coordinate)의 X, Y, Z성분으로부터 총자기성분을 추출하였다.

### 3.2 데이터 보정

또한 지구자기장의 영향이외의 위성내의 유도 전류나 온도변화로 인한 에러, 태양풍의 영향

등을 제거하기 위하여 월별로 데이터를 만든 후, 관성좌표계에서 위성좌표에서 측정된 자기장의 X, Y성분이 태양의 방향에 따라 대칭이 되는 성질을 이용하고 롤 기동을 통하여 Z성분을 보정한다. 즉, 동체좌표계 기준으로 X방향으로 970, Y방향으로 -150, 그리고 Z방향으로 900nT의 값을 보정한다(이선희, 2001).

### 3.3 2차원 파동수대비법

파동수영역에서의 스펙트럼대비법 (spectral correlation analysis)은 co-registered된 두 개 이상의 디지털데이터 사이의 상관관계를 파동수 각각에 대한 상관계수로 표시함으로써 두 데이터, 즉, 지형에 의한 중력이상과 후리에어 중력이상 사이의 상관관계를 보다 더 정량, 정성적으로 연구할 수 있는 방법이다(von Frese et al., 1997). 독립적으로 계산된 이 두 성분을 파동수 영역에서 대비하려면 이들 성분의 각 파동수  $k$  사이의 상관계수  $CC$ , 즉  $CC_k$ 를 우선 고려하여야 한다. 이들 wavevector들은 극좌표계에서

$$\overline{X}(k) = |\overline{X}(k)| e^{-j\theta_{\overline{X}(k)}}, \quad \overline{Y}(k) = |\overline{Y}(k)| e^{-j\theta_{\overline{Y}(k)}} \quad (3)$$

로 표현되며, 여기서 성분  $X$ 와  $Y$ 는 각각 지형에 의한 중력이상 및 후리에어 중력이상을 나타내며,  $|\overline{X}(k)|, |\overline{Y}(k)|$ 는 두 성분의 진폭(amplitude)을,  $\theta_{\overline{X}(k)}$ 와  $\theta_{\overline{Y}(k)}$ 는 위상각(phase angle)을 나타낸다. 이로부터,  $\Delta \theta_k = (\theta_{\overline{Y}(k)} - \theta_{\overline{X}(k)})$ 는 위상차(phase difference)이고, 이때  $j = \sqrt{-1}$ 이다. 여기서, 두 벡터 사이의 상관계수  $CC$ 는

$$CC_k = \cos(\Delta \theta_k) = \frac{\overline{X}(k) \cdot \overline{Y}(k)}{|\overline{X}(k)| |\overline{Y}(k)|} \quad (4)$$

가 되고 두 성분 사이의  $CC_k$ 를 이용, 이들을 서로 양으로 대비되는 성분만을 추출한다(von Frese et al. 1997).

### 3.4 축선잡음제거

인공위성이나 항공자료처럼 축선 방향의 해상도가 좋고 축선간의 거리가 긴 경우, 격자화시키면서 축선방향의 알리아싱(aliasing)이 생기게 된다. 위성 자료의 경우 같은 지역을 ascending과 descending방향으로 두 번 측정하게 되므로 이들은 합성하여 격자화 시키게 되면 축선잡음이 증폭되어 나타난다. 이런 경우, 각각 두개의 방향을 격자화 한다음, 주파수영역에서 축선의 영향이 없는 영역만을 조합하여 다시 역푸리에 변환을 실시하면 제거할 수 있다. Fig. 2는 Quadrant Swapping method를 모식적으로 나타낸 것이다(Kim et al., 1998).

## 4. 결과

Fig. 3은 각각 ascending(a), descending(b)일 때 다목적 실용위성의 궤도를 나타낸 것으로 전 지구적으로 골고루 분포하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 ascending과 descending인 경우를 각각 2도 간격으로 격자화 한 결과이며 Fig. 5는 위 두 결과를 통합한 결과이다. (a)

의 경우, ascending과 descending에 관계없이 격자화 한 것으로 측선 방향의 잡음이 증폭되어 나타나는 것을 볼 수 있으며 (b)는 WCA와 quadrant swapping을 같이 적용하여 매우 smooth한 결과를 얻을 수 있다. 이들 결과를 비교하기 위하여 Ørsted 위성으로부터의 결과를 (c)에 나타냈으며 (b)와 매우 유사함을 알 수 있다. 정량적으로 분석하기 위하여 각 결과별로 Correlation coefficients를 구하였으며 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

## 5. 결론 및 토의

다목적 실용위성 1호(Korea Multi-Purpose Satellite, KOMPSAT-1)에 장착된 3축 자력계로부터 지구자기장을 추출하여 Ørsted위성에서 측정한 자기장 값과 비교한 결과 상관계수는 0.97로 매우 높게 나타났다. 그러나 단순히 3일간의 자료만을 가지고 지구자기장을 측정하기에는 한계가 있어, 정확한 지구 자기장을 구하려면 장기적인 관측을 통해 계절적인 변화와 태양에 의한 영향을 고려해야 할 것이다. 위성 자세보정용 자력계로부터 관측된 자기장으로부터 신뢰도 있는 주성분 추출이 가능해짐에 따라 이로부터 전지구 구면조화계수를 유도할 경우 지구자기장 전문 관측위성이 존재하지 않는 기간 및 고도에 대한 자기장 연구가 가능하다.

## 6. 참고문헌

- 이선호, 이승우, 석병석, 용기력, 2000, 다목적 실용위성 1호의 3축 자기장센서 측정데이터 분석, 한국항공우주학회지, vol. 29, no. 3, pp. 97-103, 2001
- 황종선, 이선호, 민경덕, 김정우, 2002, Extraction of Geomagnetic Field from KOMPSAT-1 Three-Axis Magnetometer Data, Proceedings of ISRS, p.242
- Kim, J.W., J.-H. Kim, R.R.B. von Frese, D.R. Roman, and K.C. Jezek, 1998, Spectral attenuation of track-line noise, Geophys. Res. Lett., v.25, No.2, p.187-190.
- N. Olsen, R. Holme, G. Hulot, T. Sabaka, T. Neubert, 2000, Ørsted Initial Field Model, geophysical Research Letters, v. 25, No. 2, P.3607-3610
- von Frese, R.R.B., Jones, M.B., Kim, J.W., and Kim, J.-H., 1997, Analysis of anomaly correlations, Geophysics, v.62, p. 342-351

Table 1. Correlation coefficients between results

Correlation Coefficients	ascending	descending	gridded	WCA + quadrant swapping	Ørsted
ascending	1				
descending	0.98	1			
gridded	0.51	0.47	1		
WCA + quadrant swapping	0.99	0.99	0.49	1	
Ørsted	0.97	0.96	0.62	0.97	1

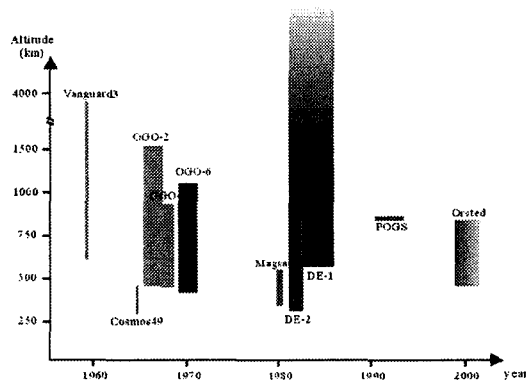


Fig. 1 Altitude and period of magnetic mission satellite.

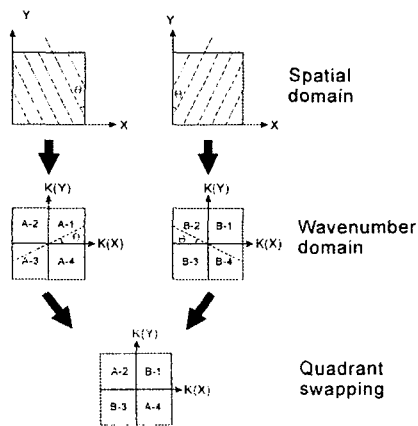
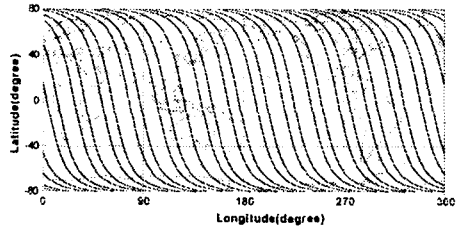
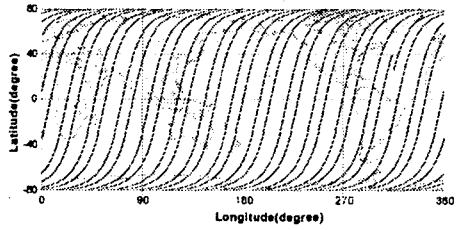


Fig. 2 Schematic outline of quadrant swapping method.

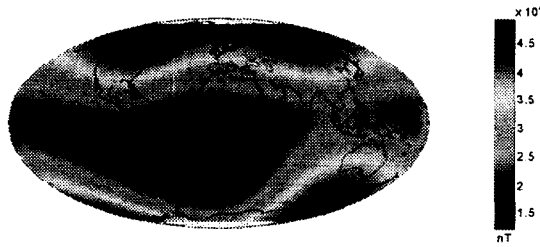


(a)

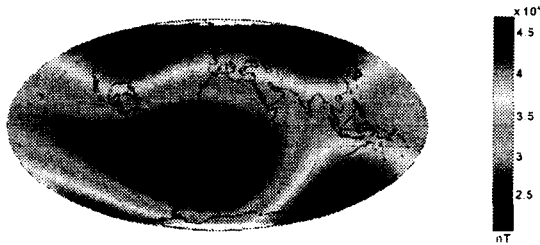


(b)

Fig. 3 Tracks of KOMPSAT-1 (a) ascending mode (b) descending mode



(a)



(b)

Fig. 4 Total magnetic field calculated from ascending mode(a) and descending mode(b) of KOMPSAT-1

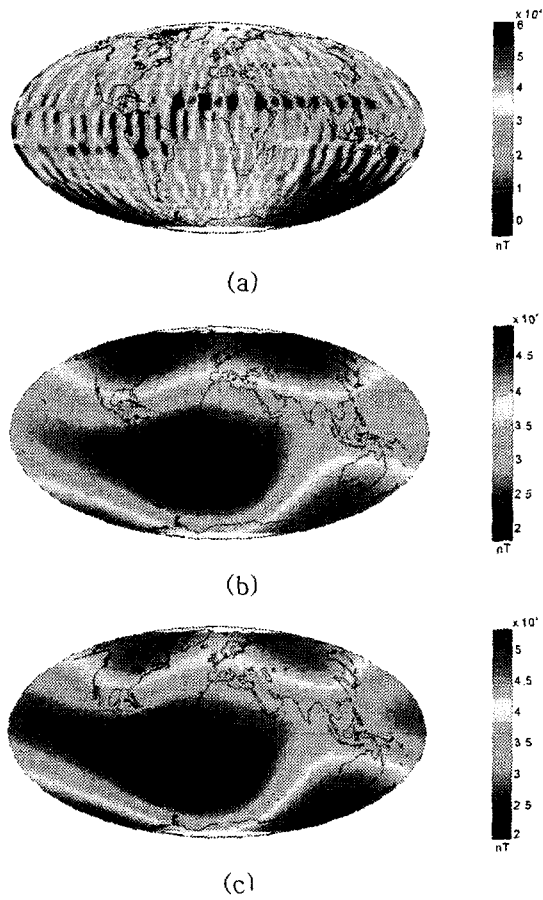


Fig. 5 Total magnetic field calculated from gridded mode(a), WCA and quadrant swapping applied(b) of KOMPSAT-1 and Ørsted satellite(c),