

KITSAT-1과 KITSAT-2에서 관측한 지구자기장의 분포

표유신·이동훈

경희대학교 우주과학과

민경욱

한국과학기술원 물리학과

GLOBAL MAPPING OF NEAR-EARTH MAGNETIC FIELDS MEASURED BY KITSAT-1 AND KITSAT-2

Yoo-Surn Pyo and Dong-Hun Lee

Department of Astronomy and Space Science, Kyunghee University

Kyoung-Wook Min

Department of Physics, KAIST

(Received May 15, 1994; Accepted June 2, 1994)

요 약

KitSat-1과 KitSat-2에서 측정된 자기장 데이터를 IGRF 모델에서 계산한 것과 비교하였다. 자기장 데이터는 KitSat-1과 KitSat-2의 고도인 1,325 km와 820 km에서 3축 fluxgate magnetometer를 사용하여 측정하였다. 극 지방 영역에서 있을 수 있는 magnetic disturbance를 제거하기 위하여 자기장의 관측범위를 위도 $\pm 50^\circ$ 이내로 한정시켰다. 각각의 데이터는 위도와 경도를 $5^\circ \times 5^\circ$ 단위로 해서 평균값을 취하였다. 특히 이 논문에서 사용한 자기장 데이터들은 지구자기장이 매우 조용한 날의 것이며 관측 sampling rate는 30초이었다. 측정된 데이터를 IGRF 모델과 비교하여 그 결과를 global surface map에 나타내었다.

ABSTRACT

The magnetic field measurements from the KitSat-1 and KitSat-2 were tested by comparing with the IGRF model. The magnetic data have been collected by a three-axis fluxgate magnetometer on each satellite at an altitude of 1,325 km and 820 km, respectively. To avoid highly variable magnetic disturbances

at the polar region, the field map has been drawn within the limits of 50 degrees in latitude. Each data is averaged over the square of 5×5 degrees in both latitude and longitude. In these results, the relatively quiet periods were selected and the sampling rate was 30 seconds. It is shown that the results from these measurements are consistent with the IGRF map over the global surface map.

1. 서 론

지구자기장 분포의 비균질성으로 인하여 지구자기장 모델에 의해 계산된 값과 실제 관측된 값 사이에는 어느정도의 차이가 존재하게 된다. 이 차이를 계산하여 지구지도상에 등고선으로 표시한 것을 magnetic anomaly map이라고 한다. 지구자기장을 측정하는 방법은 지구 지표면상의 관측소에서 자력계를 이용하는 방법과 비행기나 위성에 자력계를 부착하여 이용하는 방법이 있다. 지구자기장의 분포를 처음 측정한 위성은 POGO(Polar Orbiting Geophysical Observatories)이며 지구자기장 데이터 수집을 주 목적으로 하는 첫 위성은 1979년에 발사된 MAGSAT 위성이다 (Langel 1979). COSMOS 49 위성을 사용하여 Benkova *et al.* (1973)이 residual geomagnetic field를 구하였고, Regan *et al.* (1975)은 POGO 위성과 COSMOS 49 위성의 자기장 데이터를 사용하여 중앙 아프리카 부근에 존재하는 Bangui anomaly를 확인하였다. 그리고 Langel *et al.* (1982)은 MAGSAT 데이터를 MGST(4/81) 모델과 비교하여 지구 전반에 대한 magnetic anomaly map을 계산하였으며, 특히 Coles *et al.* (1982)은 40°N부터 83°N 내에 해당하는 지역에 대한 magnetic anomaly map을 구하였다.

KitSat-1, KitSat-2호에서는 자세제어를 위해 부착된 외부자력계를 사용하여 지구자기장의 분포와 크기를 계산할 수 있다. KitSat-1호는 1992년 8월 11일 오전 8시(KST)에 아리안 스페이스사에서 제작한 로켓 '아리안 42P'에 의하여 성공적으로 발사되어 약 20분만에 궤도 진입에 성공, 고유 임무를 수행하기 시작했다. KitSat-1호의 외관은 직육면체의 형태를 갖추고 있으며, 내부는 기본 위성 시스템인 버스 시스템과 각종 실험 장치들로 구성되어 있다. 위성체 윗 부분에는 태양 센서(sun sensor), 지평선 센서(earth horizon sensor), 자력계(magnetometer)와 자세 제어에 사용되는 붐(boom)이 있으며, 아래 부분에는 고 분해능 CCD 카메라, 광각 카메라와 지상국과 교신을 위한 안테나가 부착되어 있으며, 위성의 측면 사방에는 태양 전지판(solar cell)이 부착되어 있다. 이러한 센서의 제어 및 자료 교환은 위성체 내부에 모듈 형식으로 구성되어 있는 각종 전자 기판(electronics board)을 통해 이루어진다. KitSat-1호의 고도는 1325 km, 궤도 형태는 극 원 궤도(polar circular orbit), 궤도 이심률은 0.00158이며, 경사각(inclination angle)이 66°인 LEO(Low Earth Orbit) 위성이다. 위성의 자전주기는 약 6분이며, 지구를 한바퀴 회전하는 시간은 약 110분이다. 따라서 지구를 하루에 15회, 한반도 상공은 하루 5회 선회하고 있으며, 같은 지역을 다시 지나는데 9일이 걸린다. 한 궤도당 4번 발생하는 자기토크와 지구중력 경사

도를 이용하는 봄으로써 위성의 자세 제어를 하고 있으며, z축의 지향도는 평균 5°이다. 본 논문에서 사용되는 좌표계의 x축은 동-서(east-west) 방향, y축은 남-북(north-south) 방향, 그리고 z축은 지구 중심 방향이며 자력계의 분해능은 8 nT이다. KitSat-2호는 1993년 9월 26일에 발사되어 고도 820 km, 경사각 98.7°으로 태양 동기궤도를 돌고 있으며 지구자전 주기는 101분이다. KitSat-2호에 부착된 자력계는 KitSat-1과 마찬가지로 분해능이 8 nT이다. 자세 제어용이 아닌 과학실험용 자력계의 경우는 Cesium vapor 자력계등을 사용하고 있으며 분해능은 일반적으로 1 nT보다 작다. 그리고, 과학실험용 자력계 센서인 경우 위성자체의 유도 전류의 영향을 피하기 위하여 위성 본체로부터 1m 이상 떨어져서 설치되지만 KitSat-1호와 KitSat-2호의 경우에는 자력계를 위한 boom이 별도로 설치되어있지 않은 관계로 위성본체에 의한 유도자기장이 완전히 제거되지 못한 문제가 있다. 위 자력계의 용도가 과학용이 아닌 자세제어용이므로 주위 잡음을 완전히 제거하는 것은 어려우며 본 자료분석에 사용된 자료들도 이와 같은 이유로 높은 정밀도를 요구하는 현상보다 비교적 정확도가 떨어지더라도 이용할 수 있는 분야에 적합하다.

그 중의 한가지로서 우리는 IGRF(International Geomagnetic Reference Fields) 모델을 이용하여 지구자기장의 분포를 계산하고 KitSat-1과 KitSat-2의 자력계에서 측정된 자기장 데이터를 비교하여 고도에 따른 자기장 세기의 변화와 anomaly map을 구하였다. 이때 각각의 데이터들은 혹시 있을지도 모르는 미세한 변화를 제거하기 위하여 위도, 경도를 각각 5° × 5°로 나누어 평균치를 취하였으며 magnetic storm과 ring current의 영향을 제거하기 위해 Kp값이 매우 작은 날의 자기장 데이터를 선택하여 사용하였다. 또한 극지방에 존재하는 Birkeland 전류 등의 영향을 피하기 위하여 ±50°내의 위도 안에서만 관측한 데이터를 사용하였다.

2. 지구자기장의 IGRF 모델과 위성관측 자료

지구자기장의 이중극자 능률(dipole moment) 중심은 지구 중심에서 474.2 km 벗어나고 매년 서쪽으로 0.19° 북쪽으로 0.23°씩 움직이고 있다. 지구자기장의 축이 중심에서 비껴있는 관계로 지구표면을 기준으로 자기장의 세기가 비교적 약한 부분이 존재하는데 그곳을 Brazilian anomaly, 혹은 SAA(South Atlantic Anomaly)라고 하며 위치는 브라질 근처의 동경 315° 남위 25°이다. 지구표면에 나타나는 자기 북극은 Greenland의 Thule(78.6°N, 289°E)이고 자기 남극은 남극의 Vostok 기지(78.6°S, 111°E)에 위치한다. 1979년 11월 6일에 MAGSAT위성에서 측정된 지구 적도 표면 자기장의 크기는 30572 nT이며 매년 26 nT씩 지속적으로 감소하고 있다(Langel *et al.* 1980).

IGRF 모델은 IAGA(International Association of Geomagnetism and Aeronomy)에서 5년에 한번씩 발표하는 구면 조화함수 계수를 사용하여 계산되며 자기 포텐셜을 구하는 식은 다음과 같다.

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

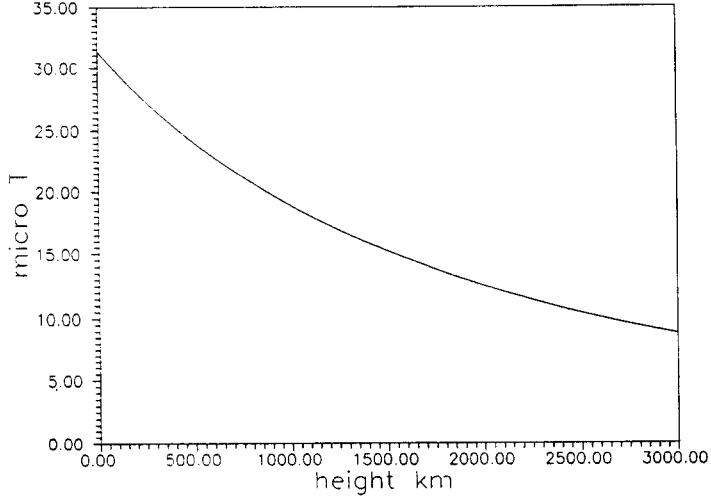


그림 1. 고도의 변화에 따른 자기장의 세기. 위도, 경도가 각각 0°인 지점에서 높이가 증가할수록 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

여기서 r 은 지구의 중심에서 위성까지의 거리, a 는 지구의 평균 반경(6378.160 km), ϕ 와 θ 는 구면 좌표계에서 경도와 위도, g_n^m 와 h_n^m 는 가우스 계수(gaussian coefficient), 그리고 $P_n^m(\theta)$ 는 associated Legendre 함수이다 (IAGA 1992). N 은 이상적인 경우에 무한대이어야 하나 IGRF 모델에서는 10까지 사용한다. 1995년까지의 지구자기장의 세기를 예측하는데 쓰이는 가우스 계수의 갯수는 80개이며, 과거의 지구자기장 세기를 아는데 필요한 계수는 120개이다. 지구자기장은 자기포텐셜을 이용하여 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\vec{B} = -\vec{\nabla}V \tag{2}$$

고도의 변화에 따른 자기장의 세기를 살펴보면 위도, 경도가 각각 0°인 지점에서 높이가 증가할수록 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다(그림 1). 그림 2에서는 IGRF 모델을 사용하여 1994년 1월 1일에 지표면상에서부터 높이가 각각 0 km, 500 km, 1000 km, 1300 km 일 때의 지구자기장의 분포를 나타낸다. 가로축은 경도, 세로축은 위도이며 그림 안의 숫자는 자기장의 세기를 나타내는 것으로 단위는 μT 이다. 그림 2에서 보면 Brazilian anomaly가 뚜렷하게 보이며 지구자기장 분포의 근본적인 형태 변화는 존재하지 않지만 고도가 높아지면서 그 세기가 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 IGRF 모델값과 관측값의 차이는 r 이 커짐에 따라 $1/r^n$ 에 비례하여 작아진다.

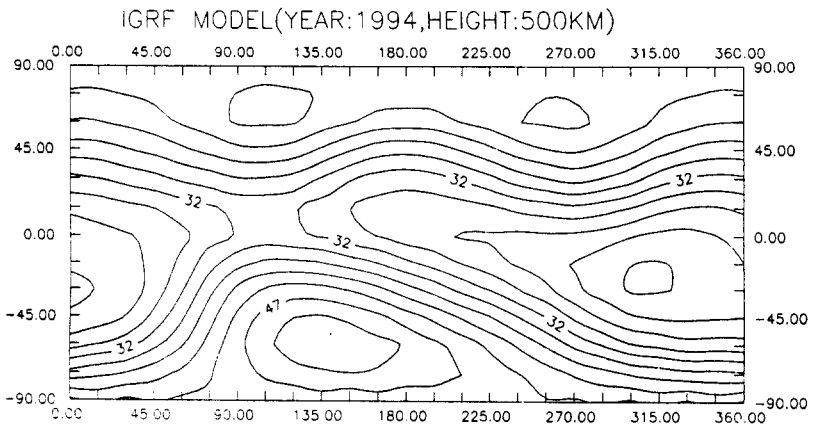
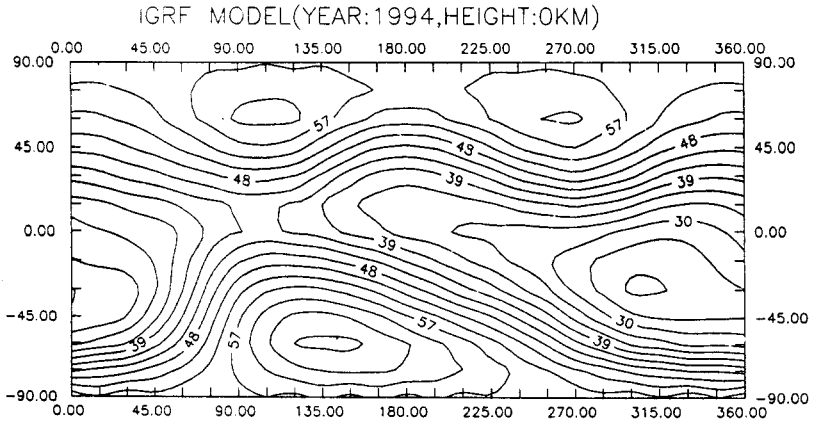


그림 2. IGRF 모델을 사용하여 1994년 1월 1일에 지표면상에서부터 높이가 각각 0 km, 500 km, 1000 km, 1300 km 일 때 계산한 지구자기장의 분포. 가로축은 경도, 세로축은 위도이며, 그림 안의 숫자는 자기장의 세기를 나타내는 것으로 단위는 μT 이다.

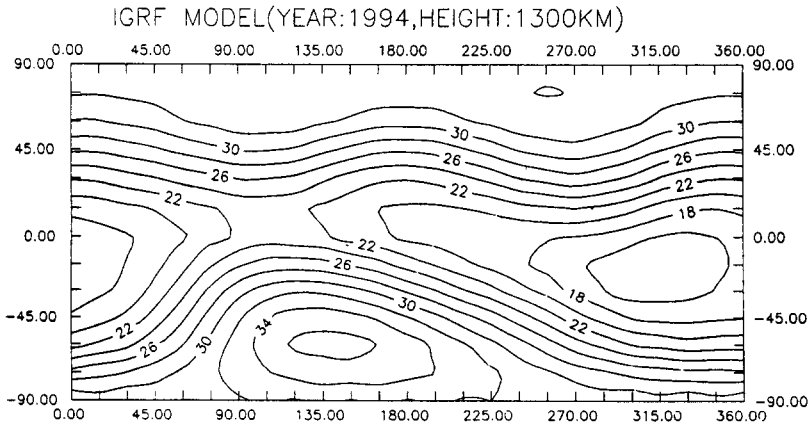
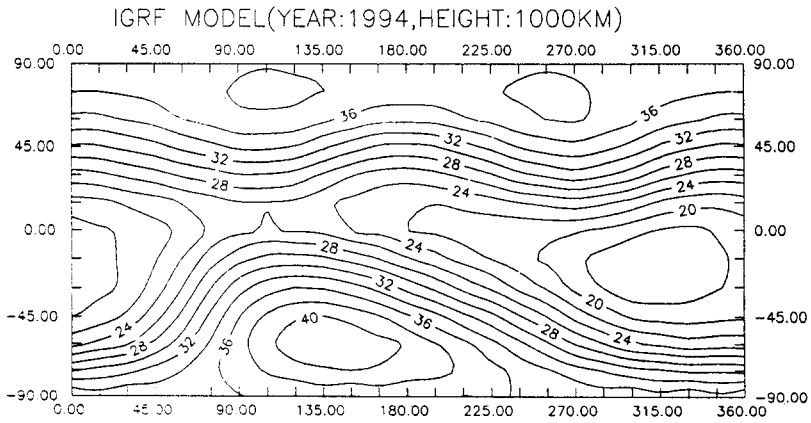


그림 2. 계속.

3. 축 조정과 관측자료의 비교 분석

3.1 축 조정 프로그램 개발

KitSat-1, KitSat-2호의 자력계에서 관측한 자기장값 B_x , B_y , B_z 을 해석하기 위해서 맨 먼저 위성의 회전 성분을 제거해야 한다. 위성은 자세 안정을 위해 약 6분에 1회씩 자전을 하고 있기 때문에, 각각의 자기장 성분에 위성 회전 성분이 포함되어 있다. 이 회전 성분을 제거하기 위해 위성 자체 내에 프로그램화 되어 있는 IGRF 모델 값을 사용하여 보정하였다 (표유선 1994).

먼저 원시 자료(raw data)를 읽어 눈금 조정을 한 다음, x축과 y축을 회전시켜 근사적으로 축을 맞춘다. 이 때 사용한 좌표축 변환은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} B_{xIGRF} \\ B_{yIGRF} \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{xKitSat} \\ B_{yKitSat} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 α 는

$$\alpha = \sqrt{B_{xIGRF}^2 + B_{yIGRF}^2} / \sqrt{B_{xKitSat}^2 + B_{yKitSat}^2} \quad (4)$$

으로 IGRF에서의 B_x , B_y 와 위성에서 관측한 B_x , B_y 의 절대 크기를 같게 해주는 비례상수이다. 이것은 IGRF 모델에 의해 계산된 자기장 값과 위성에서 관측한 값의 절대 크기가 조금씩 틀리므로 곧바로 좌표계 변환을 할 수 없다. 그러므로 비례상수를 도입하여, 절대 크기를 일치시킨 다음에 좌표계 변환을 하고, 좌표계 변환을 한 다음에는 비례상수 값을 제거시킨다. 위 식에서 θ_1 을 구한 다음, 아래 식에 대입시켜 위성 자체 회전을 보정한 $B_{x'}$, $B_{y'}$ 를 얻는다.

$$\begin{pmatrix} B_{x'} \\ B_{y'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{xKitSat} \\ B_{yKitSat} \end{pmatrix} \quad (5)$$

위성의 z축은 지향성이 대개의 경우 5° 이내이고 $\sin 5^\circ \approx 0.087 < 0.1$ 이므로 위 과정을 한번 적용시킨 후에는 각각의 축이 10% 오차 범위 내에서 일치하게 된다. 이제 x축과 z축을 보정하기 위한 θ_2 는 위의 식에서 얻은 $B_{x'}$ 를 사용하여 다음의 식에서 구한다.

$$\begin{pmatrix} B_{xIGRF} \\ B_{zIGRF} \end{pmatrix} = \beta \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{x'} \\ B_{zKitSat} \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 β 는

$$\beta = \sqrt{B_{xIGRF}^2 + B_{zIGRF}^2} / \sqrt{B_{x'}^2 + B_{zKitSat}^2} \quad (7)$$

이며, θ_2 를 사용하여 x축과 z축의 위성자전 성분을 제거한 식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} B_{x''} \\ B_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{x'} \\ B_{zKitSat} \end{pmatrix} \quad (8)$$

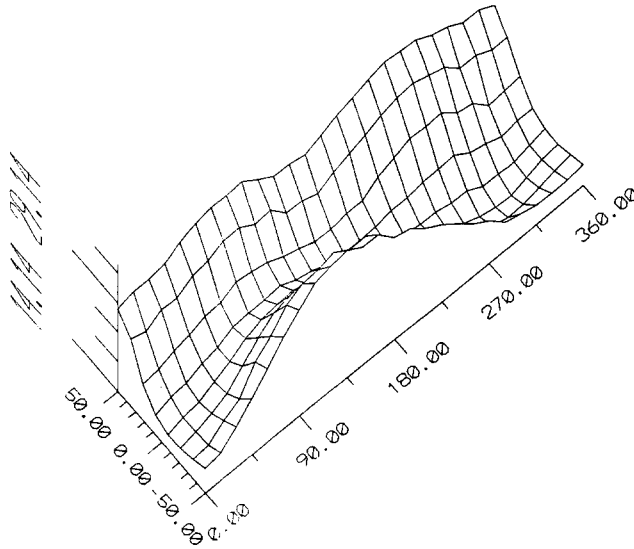


그림 3. 1994년 1월 20일에 관측한 KitSat-1의 지구자기장 데이터를 위도와 경도에 따른 자기장의 세기분포. 긴 가로축은 경도를 나타내며 짧은 세로축은 위도를 나타내다. 높이축은 자기장의 세기를 나타내며 단위는 μT 이다.

마지막으로 y 축과 z 축을 보정하기 위한 θ_3 는 다음의 식에서 구할 수 있으며

$$\begin{pmatrix} By_{IGRF} \\ Bz_{IGRF} \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} By' \\ Bz' \end{pmatrix} \quad (9)$$

이때 γ 는 아래와 같다.

$$\gamma = \sqrt{By_{IGRF}^2 + Bz_{IGRF}^2} / \sqrt{By'^2 + Bz'^2} \quad (10)$$

이제 θ_3 를 사용하여 보정된 y 축과 z 축을 아래의 식에서 얻는다.

$$\begin{pmatrix} By'' \\ Bz'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} By' \\ Bz' \end{pmatrix} \quad (11)$$

식(8)과 식(11)에서 얻은 Bx'', By'', Bz'' 이 1차 보정된 자기장 값이며, 이 값들을 원하는 조건에 맞을 때까지 x 축과 y 축의 조정부터 다시 반복 수행시킨다. 본 프로그램에서는 지구자기장의

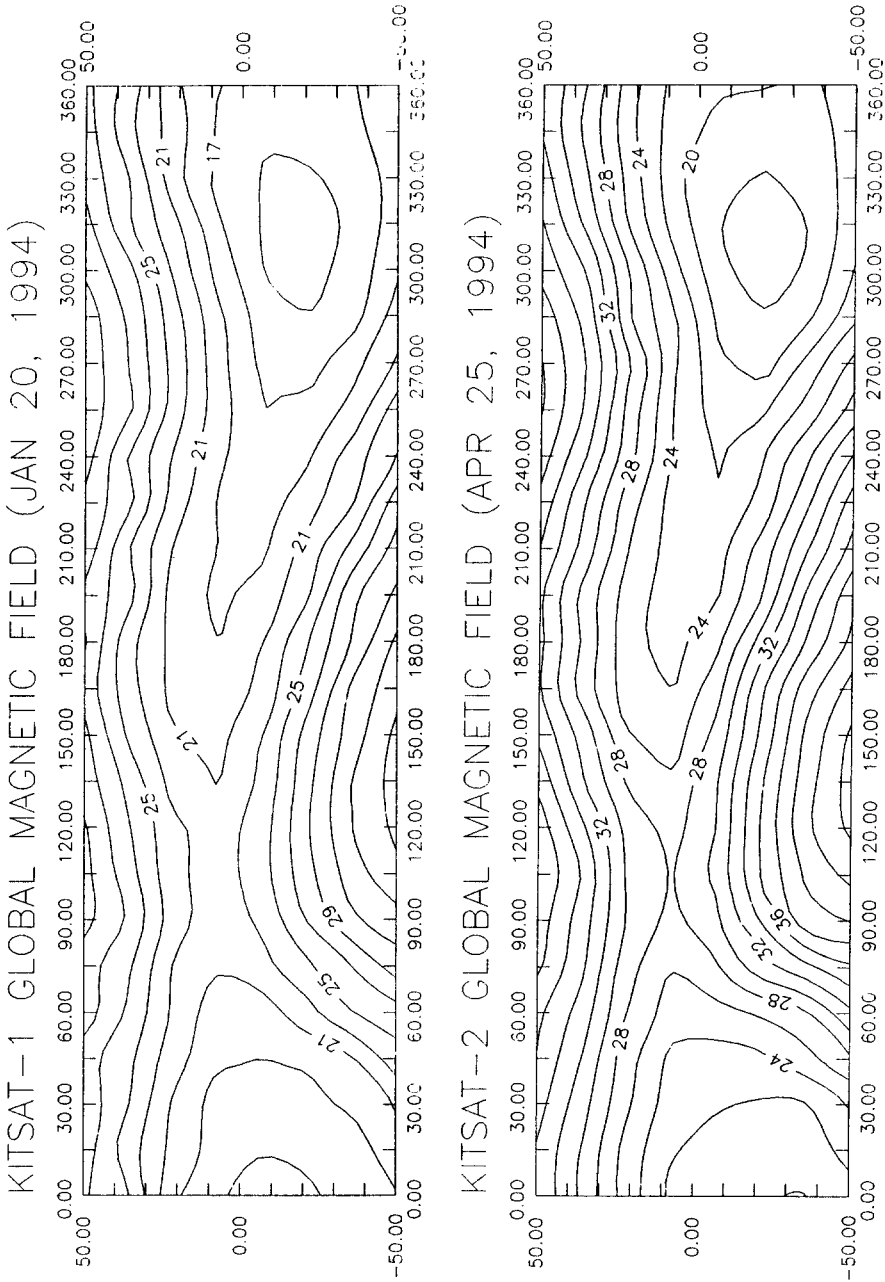


그림 4. 1994년 1월 20일에 KitSat-1에서 관측한 자기장 데이터와 1994년 4월 25일의 KitSat-2 데이터를 사용하여 그린 contour map. 세로축과 가로축은 각 위도와 경도이며 등고선의 단위는 μT 이다.

By 및 Bz 성분을 기준으로 각 방향에 대한 회전성분의 오차 허용 범위를 1%로 정하여 계산하였으며 또한 자세 제어 조정시기를 전후하여 자기토크에 의해 영향을 받은 자기장 자료를 자료 분석 대상에서 제외시켜 비교적 안정된 측정값들을 사용하였다.

3.2 KitSat-1, KitSat-2의 자기장 관측 데이터 분석

1994년 1월 20일에 관측한 KitSat-1의 지구자기장 데이터를 위도와 경도에 따른 자기장의 세기분포를 나타낸 것이 그림 3이다. 긴 가로축은 경도를 나타내며 짧은 세로축은 위도를 나타낸다. 세로축은 자기장의 세기를 나타내며 단위는 μT 이다. 이 그림을 보면 적도 부근에서 자기장의 세기가 전반적으로 작다는 사실을 알 수 있으며 전체적인 분포는 마치 말안장을 뒤집어 놓은 것과 같은 형태를 하고있다. 북반구의 경우에는 위도에 대한 자기장의 세기는 큰 변화가 없는 것처럼 보이지만 남반구의 경우에는 이와달리 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 특히 150° 부근에서는 위도가 높아질수록 큰 값을 가지는데 이것은 근처에 자기남극이 있기 때문이다. 그리고 Brazilian anomaly 부근에서 자기장의 세기가 가장 작다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 1994년 1월 20일에 KitSat-1에서 관측한 자기장 데이터와 1994년 4월 25일의 KitSat-2 데이터를 사용하여 contour map을 그린 것이다. 세로축과 가로축은 각각 위도와 경도이며 등고선의 단위는 μT 이다. 이 그림을 살펴보면 IGRF 데이터를 사용하여 높이에 따른 자기장세기를 구한 것과 형태와 크기가 일치함을 알 수 있다. 경도 100° 부근에서는 위도에 따른 자기장의 세기가 U자 모양으로 급격하게 변화하며 Brazilian anomaly 부근에서 자기장의 세기가 가장 약하다.

그림 5는 위성의 데이터와 IGRF 모델에서 얻은 데이터를 통하여 얻은 residual field의 분포를 그린 것이며 지구자기장의 residual field는 다음과 같은 식에서 구할 수 있다.

$$\Delta \vec{B} = \vec{B}_{KitSat\ 1, 2} - \vec{B}_{IGRF} \quad (12)$$

여기서 $B_{KitSat\ 1, 2}$ 는 KitSat-1과 KitSat-2에서 자력계를 사용하여 관측한 자기장의 세기이며 B_{IGRF} 는 IGRF 모델값에 의해 계산된 자기장의 세기이다. 1993년 12월 27일에 관측한 데이터를 이용하여 얻은 residual field의 분포를 살펴보면 Brazilian anomaly 근처에서 모델에 의한 계산값이 관측값보다 크게 나왔음을 알 수 있고 중북부 아프리카, 지중해와 중동지역 일부분, 히말라야 산맥 부근 그리고 우리나라부근에서 최대 $0.4\ \mu\text{T}$ 크기의 편차가 존재한다는 것을 알 수 있다. 그리고 Residual field의 크기를 살펴보면 전반적으로 - 값을 갖고 있다는 사실을 알 수 있다. 1994년 4월 9일에 KitSat-2에서 관측한 결과를 사용하여 residual field를 구해보면 오히려 + 값을 가지고 분포하고 있으며 그 크기 또한 KitSat-1와 비교해서 커졌음을 알 수 있는데 이것은 앞에서 설명했듯이 IGRF 모델이 고도가 낮을수록 실제 관측한 것과의 오차가 커지기 때문이다. 그림 5에서는 중남미 지역과 오스트레일리아 부근에서 residual field의 값이 $1.2\ \mu\text{T}$ 정도로 상당히 크게 나타난다. 이러한 사실들은 Regan et al. (1975)이 POGO 위성의 데이터를 분석하여 얻은

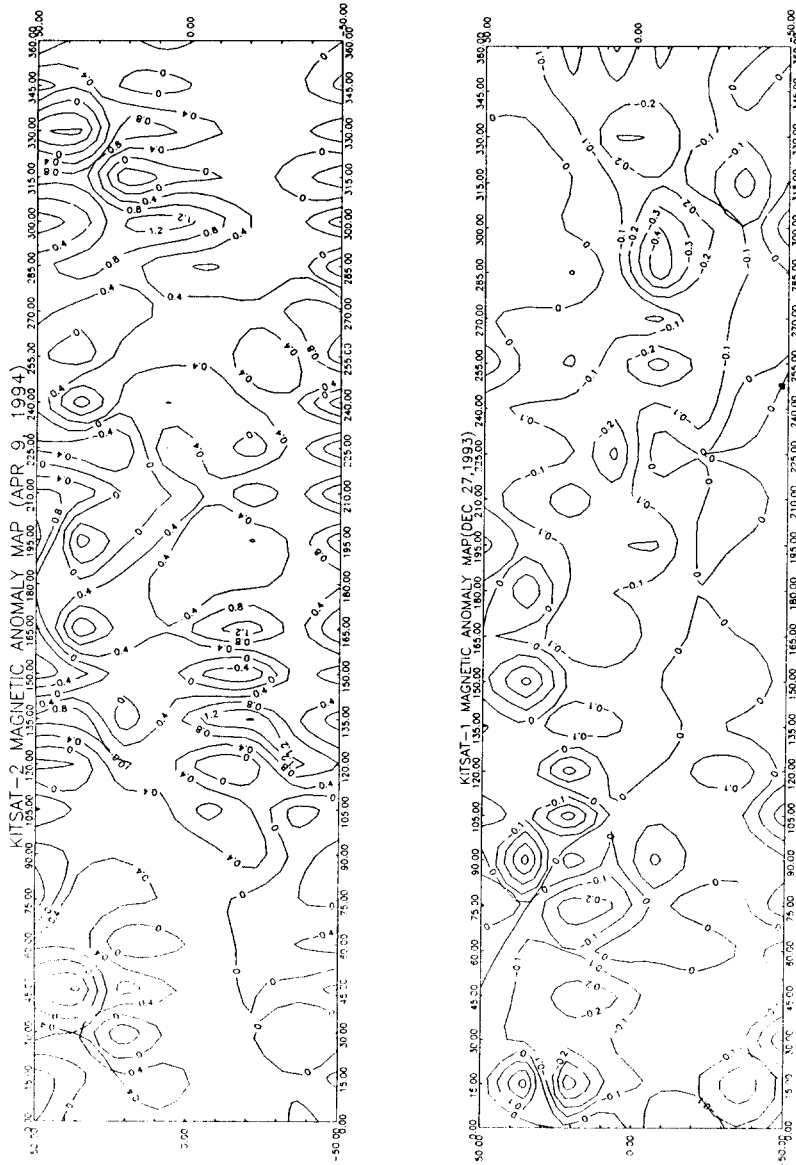


그림 5. 위성의 데이터와 IGRF 모델에서 얻은 데이터를 통하여 얻은 residual field의 분포.

결과와 Langel *et al.* (1982)이 MAGSAT 위성을 통해 얻은 결과를 비교하여 보면 위에서 언급한 중북부 아프리카, 지중해, 중동, 히말라야산맥, 우리나라 부근, 중남미, 오스트레일리아에 나타나는 magnetic anomaly와 지역적으로 일치하였다. 일반적으로 측정자료와 IGRF값의 지역에 따른 오차는 최대 5.0%(1 μ T)보다 작았으며 표준편차는 2.9%로 계산되었다.

4. 결 론

KitSat-1과 KitSat-2에서 측정된 자기장 데이터를 사용하기 위해서 먼저 위성의 회전 성분을 제거한 후에 IGRF 모델에서 계산한 것과 비교하였다. IGRF 모델을 사용하여 고도에 따른 자기장의 분포와 세기를 구하였고 이를 이용하여 global mapping을 하였다. 위성 데이터를 사용하여 3차원 지도를 그려봄으로써 자기장의 분포가 U자 모양의 말안장을 뒤집어놓은 것과 같은 형태를 하였음을 알았으며 위성에서 관측한 자기장값과 IGRF 모델에 의하여 구한 자기장값을 비교하여 residual field를 구하였다. 그 결과 KitSat-1과 KitSat-2의 측정값이 기존의 관측값과 유사한 특징을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 ring current와 같은 외부의 영향을 완전히 제거하지 못하였으므로 이러한 영향을 고려할 수 있는 새로운 모델이 제안되어야 할 것이며 이는 향후 correction model을 고안하여 IGRF 모델과의 비교를 보다 자세히 할 예정이다. 또한 더욱 정밀한 자기장 데이터를 얻기 위해서는 차후에 발사될 위성에 부착되는 magnetometer의 분해능이 개선되어야 할 것이다.

감사의 글: 위 논문에 사용된 자료 수집에 많은 도움을 주신 한국과학기술원 인공위성센터의 이현우, 최경일, 이서림 연구원께 감사드립니다. 이 연구의 일부분은 1993년도 학술진흥재단의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 표유선 1994, 석사학위 논문(경희대학교 대학원)
- Benkova, N. P., Dolginov, S. H. & Simonenko, T. N. 1973, JGR, 78, 798
- Coles, R. L., Haines, G. V., van Beek, G. J. & Walker, J. K. 1982, GRL, 9, 281
- IAGA Division V Working Group 8 1992, EOS, 73, 182
- Langel, R. A. 1979, EOS, 60, 667
- Langel, R. A., Estes, R. H., Mead, G. D., Fabiano, E. B. & Lancaster, E. R. 1980, GRL, 7, 793
- Langel, R. A., Phillips, J. D. & Horner, R. J. 1982, GRL, 9, 269
- Regan, R. D., Cain, J. C. & Davis, W. N. 1975, JGR, 80, 794