아리랑위성 2호의 삼축자력계로부터 관측된 지구자기장 모델 연구

김형래^{1*} · 황종선² · J. W. Kim³ · 이선호⁴

¹공주대학교 지질환경과학과, ²한국수력원자력 중앙연구원, ³Univ. of Calgary, ⁴한국항공우주연구원

A Study on the Geomagnetic Reference Field Modeling from the Triaxial Magnetometer Data Onboard KOMPSAT-II

Hyung Rae Kim^{1*}, Jong Sun Hwang², Jeong Woo Kim³ and Seon Ho Lee⁴

¹Dept. of Geoenvironmental Sciences, Kongju National Univ., Korea

²Central Research Institute, Korean Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Korea

³Dept. of Geomatics Engineering, Univ. of Calgary, AB T2N1N4, Canada

⁴Korean Aerospace Research Institute, Korea

The main field component of the Earth's magnetic field was modeled from the tri-axial magnetometer onboard KOREAN MultiPurpose SATellite-II (KOMPSAT-II) for the purpose of satellite attitude control. The model computed by the KOMPSAT-II magnetometer measurement data is compared with the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model of a degree of up to 13 in spherical harmonic coefficients. The previous study with KOMPSAT-I (Kim *et al.* 2004) indicated a good correlation of power spectrum of spherical harmonic coefficients with respect to the degree up to 5. This study, however, showed an agreement of the degree up to 8-9 of the coefficient power spectrum and a discrepancy between degrees 10 and 13. We have concluded that relevant data selection process, removal of the external field from the data in the high latitude region, an accuracy of the magnetometer all play an important role in finding a coherence with the IGRF model. This study will be extended to the secular variation model of geomagnetism if longer-period data become available.

key words : geomagnetism, KOMPSAT-II, tri-axial magnetometer, spherical harmonics, power spectrum

다목적위성인 아리랑 2호 (KOMPSAT-II)에 장착된 위성의 자세제어를 위한 삼축자력계(Triaxial Magnetometer, TAM)에서 측정된 지구자기장의 삼성분 자료로부터 지구 외핵에서부터 오는 주지구자기장 (main geomagnetic field)의 모델을 계산하였다. 일반적으로 지자기 표준모델이라고도 일컫는 IGRF(International Geomagnetic Reference Model)과의 비교를 통해 제작된 모델과의 상관성을 연구하였다. 선행연구에서는 KOMPSAT-I의 3일 자료만을 통해 제작한 것과 달리 2007년 11월과 12월 자료를 항공우주연구원의 협조를 받아 모델에 활용하였다. 선행 연구에서는 구면조화함수의 차수가 5까지의 유사성을 보인 반면 이번 연구에 얻은 모델은 차수 8-9까지 유사성을 보이며 그 이후 차수 13까지 계산에서는 국제표준모델과 많은 차이를 나타내었다. KOMPSAT-II 자료를 통한 지구자기장 모델을 제작하는 데 있어서 적절한 자료선별과정과 이와 관련된 극지방자료의 포함여부와 외부자기장성분의 적절한 제거 및 위성 탑재한 측정자력계의 정확도가 국제지자기표준모델과의 유사성 여부에 중요한 요소로 작용하였다. 수년간의 자료입수가 가능할 경우 지구자기장의 영년변화연구에도 지상의 지자기관측자료와 함께 KOMPSAT-II 자료의 활용이 기대된다.

주요어 : 지구자기장, 아리랑 2호, 삼축 자력계, 구면조화함수, 파워스펙트럼

1. 서 론

IGRF는 지구 외핵에서 지오다이나모(Geodynamo)

가설을 통해 발생하는 지구자기장의 성분을 구면조화함수로 표현한 국제공인의 지구자기장 모델이다. 이러한 지구자기장은 외핵의 움직임과 이에 대한 맨틀대류

*Corresponding author: kimhr@kongju.ac.kr

에 의한 전도성에 의해 조금씩 변화하며 따라서 매 5년마다 국제 지자기 및 초고층대기학 협회(International Association of Geomagnetism and Aeronomy)의 조약에 의거하여 새로 제작된다.

1969년 IAGA에 의해 처음 제작된 IGRF는 전 세계의 지구자기장 양상을 보기 위한 것도 있지만 항해도(navigational chart)가 필요한 사람들의 관심도 끌었다. 하지만, 이렇게 제작된 편각 및 복각의 정보로 항해도에는 그들이 원하는 만큼의 정확도는 가지고 있지 못했다. 현재는 지구자기장을 연구하는 그룹 외에도 지구물리탐사와 관련하여 지각자기이상을 얻기 위해 자료값에서 외핵에서 오는 자기장의 성분을 제거하기 위해 이용되고 있고, 이온권(ionosphere)이나 자기권(magnetosphere)을 연구하는 초고층대기학이나 우주환경을 연구하는 그룹에서도 지구자기장과의 영향을 연구하기 위해 IGRF를 사용하고 있다(MacMillan, 2007).

IGRF는 IAGA에서 전 세계의 지구자기장 관련 연구기관으로부터 IGRF 후보모델들을 접수 받아 자세한 평가절차를 걸쳐 해당 년도에 IAGA 총회에서 결정되며 그렇지 않을 경우에서 IAGA 활동그룹(Working Group)에 의해 결정된다. 일반적으로 최종평가는 선택된 후보모델들의 구면조화함수계수의 평균값 또는 가중값으로 결정하며 이러한 내용들을 자세히 정리하여 발표한다(MacMillan, 2007).

처음 IGRF를 제작했을 때는 구면조화함수의 차수(degree)가 10 까지를 (약 4,000 km 파장거리) 계산하여 발표하여왔으나, 기존의 자기관측소 및 지자기 관측점뿐만 아니라 1999년부터 제공된 고정밀의 자기위성자료(예로 rsted, CHAMP)들의 출현으로 2000년도의 결정된(Definite) IGRF에서부터는 차수를 13까지 하여 총 195개의 계수로 발표하였고, 시간에 따라 변화하는 영년변화를 표현하기 위해 시간도함수 계수(time-derivative or secular variation coefficients)는 차수를 8까지 하여 발표하기 시작했다. 특히, 최근 들어 보간법 중에 하나인 B-스플라인방법을 이용하여 5년 간격보다 더 짧은 간격의 위성자료로부터 얻은 자료를 활용하여 영년변화 모델을 제작하여 지구자기장의 변화를 좀 더 자세히 관찰하려는 연구들이 늘어나고 있다(Lesur *et al.*, 2008, Olsen *et al.*, 2009, 2010).

본 연구에서는 다목적위성 아리랑 2호의 자체제어를 위한 자력계 자료로부터 이 자료측정 시기의 지구자기장 모델을 계산하고 이를 IGRF와 비교함으로써 모델의 유사성과 아리랑 2호의 자력계 자료의 정확도를 알아보고자 한다. 이를 위해 선행연구(Kim *et al.*, 2004)

에서 외부자기장 성분을 최소화하기 위해 수행한 필터링 기법대신 선행연구보다 많은 양의 자료획득으로 여러 기준(criteria)들을 통해 적절한 자료선별을 수행하였고 이를 모델에 반영하고자 한다. 이렇게 함으로써 필터링하기 위해 수행하던 자료의 격자화(griding) 및 FFT과정에서 오는 오차성분들을 최소화할 수 있으므로 보다 개선된 모델을 기대할 수 있다.

여기서 얻어진 아리랑 2호에서의 지구자기장 모델은 보다 장기간의 자료 확보가 가능할 경우 지구자기장의 영년변화(secular variation) 연구를 위한 모델 제작에도 사용될 수 있겠다.

2. 자료선별

약 2달간 2007년 11월 1일부터 12월 31일까지 자료를 항공우주연구원에서부터 제공받아 자료처리를 수행하였다. 위치와 자기장측정간의 sampling 비가 다른 관계로 1분당 resampling하여 총 86,419개의 측정값을 계산하였다. 아리랑-2호 위성은 2006년 7월에 발사된 태양동기궤도위성으로 지구자전축으로부터 약 8.1° 기울어져 지구를 돌고 있으며 따라서 위도 80.9° 보다 높은 지역의 자료는 얻을 수 없다. 얻어진 자료의 고도 범위는 674 ~ 716 km (지구평균반지름을 6371.2 km로 가정한 지심고도 geocentric altitude)이며 평균고도는 685 km이다. 북극으로 갈수록 고도가 내려가며 남극으로 갈수록 이와 반대이다.

지구자기장은 특히, 태양의 활동에 크게 영향을 받기 때문에 지구 외핵으로부터의 자기성분만을 추출하기 위해서는 이러한 태양의 활동으로 변화는 대기 및 고층대기에서 발생하는 외부자기장의 성분을 제거하거나 최소화해 주어야 한다. 이를 위해 일반적으로 다음과 같은 선별기준으로 외부자기장의 영향을 최소화하는 자료들을 선택한다.

2.1. 선별기준

1. 지방시간(local time) - 태양의 활동은 각 지역의 주간에 활발하며 야간일 때는 상대적으로 줄어든다. 따라서 각 지역의 야간 및 이른 새벽자료만을 선별 취합한다. 본 연구에서는 오전 4시 이전 자료와 오후 8시 이후 자료로 하루 8시간동안의 자료만을 사용하였다.

2. Kp 지수(Kp index) -중위도에 위치한 전 세계의 지자기관측소중 8군데에서 얻은 수평성분의 자기장 측정값을 토대로 하여 지구의 지자기활동의 정도를 지수화하여 나타낸 것(Bartels *et al.*, 1939)으로 가장

활동이 없을 때를 0 으로 하여 $0^{+1}, 1^{-1}, 1^0, 1^{+1}, 2^{-1}, 2^0, 2^{+1}, \dots$ 로 올라가 최고 8^{+1} 로 활동이 극대화 되는 것을 표시한다. Kp 지수는 3시간마다 정하며 하루 8개의 지수를 계산한다. 위성자기자료를 통한 Kp지수에 대한 선별 기준은 조금씩 다르며 보통 엄격한 선별일 경우 1^0 이하의 시간대 자료를 선별하며 일반적으로 2^0 이하의 시간대 자료를 선별할 경우가 많다. 본 연구에서는 2^0 이하에 해당하는 자료만을 선별하였다.

3. Dst 지수 (Disturbed storm index) - 주로 자기적도에 위치한 지자기관측소에서 측정된 수평성분의 지자기값을 매시간 평균하여 기록한 것(Hamilton *et al.*, 1989)으로 자기권에서 자기적도 주변을 도는 환전류(ring current)의 세기와 연관 있으며 $|Dst| < 20$ 이하일 경우 자기장의 혼란의 시작을 의미한다.

이와 같은 지수들을 통한 자료선별은 중·저위도 지역에서는 효과적이나 상대적으로 지자기관측소가 드문 고위도 및 극지방에서는 외부자기장의 영향을 받은 자료의 선별이 어렵다. 특히, 자기극지방 주변을 흐르는 오로라 제트류(auroral electrojet current)나 자기권과 이온권을 연결하여 흐른 연자기력선 전류(field-aligned currents)등에 의해 발생하는 자기장의 혼란은 위성측정값에 직접적인 영향을 주며 동시에 외핵으로부터의 지구자기장 성분만을 추출하는 데 큰 어려움을 준다. 또한 위성자료의 기간에는 남극지방의 경우 백야(white night)에 해당되어 24시 내내 태양에 의한 자기혼란이 가능하므로 본 연구에서는 극지방에 해당되는 자료를 제한시켜 남북 위도 70° 이하인 지역에 한정하여 사용하도록 하였다.

2.2. 유도자기장 제거

KOMPSAT-II 위성에 장착된 자력계는 지구자기장을 관측하기 위해 계획된 위성이 아니므로 다른 지구자기관측위성처럼 붐(boom)이나 테더(tether)등을 통한 자력계 설치가 아닌 위성본체에 장착되어 있다. 이로 인해 자력계에서는 위성본체에서 발생하는 여러 자기교란(magnetic disturbance)의 영향을 받으며 지구자기장을 측정하고 있다. 위성본체에서 오는 이러한 자기교란의 성분을 제거하는 방법으로 궤도 기하학 기반의 바이어스 추정기법(Lee *et al.*, 2007)이 이용되고 있으며, 이러한 방법을 통해 바이어스 값을 추정하고 이를 측정값에서 제거하여 주었다. 하지만, 특별한 위성기동을 수행하지 않고서는 수직성분(B_r)의 바이어스값은 구할 수 없는 관계로 본 연구에서는 지구자기장 모델링에서 수직성분의 자료를 제한하고 수평성분의 자료만

을 이용하여 모델링을 하고자 한다.

3. 구면조화함수

지구 내부를 중심으로 하는 구면좌표계(spherical coordinate system)에서 자기포텐셜을 만족시키는 라플라스 방정식의 해는 구면조화함수로 표현되며 이는 식 (1)과 같다(Langel, 1987).

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

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = (n+1) \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta),$$

$$B_\theta = -\frac{\partial V}{\partial \theta} = -\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta},$$

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

여기서, V 는 라플라스 방정식을 만족시키는 자기포텐셜(magnetic scalar potential)을 의미하며, θ, ϕ, r 는 각각 여위도(colatitude), 경도 및 지구중심으로부터 측정거리를 나타내며, a 는 지구 평균 반지름인 값을 사용했으며, n, m 는 함수의 차수(degree) 및 계수(order)이며, $P_n^m(\cos \theta)$ 는 해당하는 차수와 계수의 부르장드르 다항식(associated Legendre polynomials)으로 표현하며, g_n^m, h_n^m 는 구면조화함수의 계수(coefficient)들로 가우스계수(Gauss Coefficients)라고도 한다. 또한 B_r, B_θ, B_ϕ 은 자기포텐셜 V 에 방향도함수($\nabla V = -B$)를 취하여 얻어진 자기유도(magnetic induction)값으로 각각 지구자기장의 수직(radial)방향, 남북(latitudinal)방향, 동서(longitudinal)방향의 성분들이다. 이 값들은 KOMPSAT-II의 자력계에서 측정되는 값이기도 하다.

Kim *et al.* (2004)는 수직성분을 취해 구면조화함수를 구한 반면, 본 연구에서는 위성체에서 오는 바이어스 성분에 의한 오차로 인해 보정이 된 수평성분만을 이용하여 모델링을 하고자 한다.

4. 토 론

위에서 선별한 자료의 두 수평성분 (B_θ, B_ϕ)의 자료

를 이용하여 역산(inversion)을 통해 구면조화함수의 계수를 구하였다 (Aster *et al.*, 2005).

$$\begin{aligned} b &= AX \\ A &= [A_\theta \quad A_\phi]^T, \quad b = [B_\theta \quad B_\phi]^T \\ X &= [g_0^1, g_1^1, h_1^1, \dots, g_m^n, h_m^n]^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 b 는 KOMPSAT-II에서 측정한 두 수평성분에 해당하며, A 는 식 (1)에서 유도된 각각의 차수(degree)와 계수(order)에 따른 구면조화함수로 구성된 관계행렬(design matrix)이며 X 는 역산을 통해 구하고자 하는 구면조화함수의 계수의 벡터이다.

계산된 계수들을 통해 모델을 비교했을 때 얻은 상관관계수들의 값은 0.99이상이었으며 이에 대한 RMS(Root Mean Squares)값은 289.1 nT 이었다.

계산된 모델과 IGRF를 비교하기 위해 우선 지구자기장 모델을 차수 10까지 계산하여 이를 차수(degree)에 따른 파워스펙트럼(Power Spectrum)으로 표현하였다. 파워스펙트럼을 계산하는 식은 다음과 같다(Langel and Hinze, 1998).

$$R^n = (n+1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \quad (3)$$

이를 해당 년도에 가장 가까운 지구자기장 모델인 IGRF11 (시기(epoch), 2007년 12월, 또는 2007.917)의

Fig. 1. Power spectrum curves of spherical harmonic coefficients with respect to the degree up to 10 among the different models: Blue - Model 1 (from both EW and NS components used); Red - IGRF11 at 2007.917; Black - Model 2 (from only NS component used).

차수 10까지의 가우스계수를 구하여 파워스펙트럼을 비교하여 Fig. 1에 표현하였다. Fig. 1 와 같이, 차수 1부터 8까지 거의 일치하다시피 차수별 파워스펙트럼 값을 나타내다가 차수 9와 10에서부터 IGRF11(epoch, 2007.917)와 차이를 보이기 시작한다. 이러한 불일치의 주요원인들로는 삼축자력계자료의 정확도에 따른 불확실성에 의한 것과 자료내의 외부자기장의 성분의 영향에 의한 것으로 볼 수 있다.

삼축 자세제어용 자력계인 만큼 전문위성자력계가 가지고 있는 높은 정확도(~1 nT, CHAMP의 fluxgate 자력계의 경우)와 비교할 때 낮은 정확도를 가질 수밖에 없다. 알려져 있는 삼축자력계의 정확도와 관련된 사항은 주변 온도 조건에 따라 오차가 약 1 mGauss(~1,000 nT) 미만이면 자세제어 자력계의 임무를 수행할 수 있는 내용뿐이다.

만약 극지방에서 심각하게 발생하는 외부자기장의 성분을 제한시키기 위해 자료값을 현재의 위도 70° 보다 낮은 위도의 자료만을 선정한 경우에는 자료의 분포에 영향을 주어 올바른 역산을 할 수가 없으므로 보다 효율적인 외부자기장의 제거방법이 요구된다. 하지만, 현재까지 자료시기에 적합한 외부자기장의 모델이 없고 이에 대한 연구는 본 논문외의 주제이므로 여기에서는 최대 위도 70°의 자료만을 사용하기로 한다.

삼축자료 성분 중 두 수평성분을 포함한 역산은 식 2에서 보는 바와 같이 행렬 A 와 벡터 b 에 포함된 부행렬(submatrix), $A_\theta A_\phi$ 와 부벡터(subvector)인 $B_\theta B_\phi$ 로 계산되었으며 이중 한 성분만을 통해서도 역산이 가능하다(Kim *et al.*, 2004). 계수(order)가 0일 때 성분값이 존재하지 않아 역산에 특이점(singularity)이 발생되는 동서방향(ϕ) 성분을 제외하고 남북방향(θ)의 성분만을 가지고 모델링을 시도하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 이렇게 제작된 모델(One-Comp., Model 2)과 IGRF11(epoch 2007.917)를 비교했을 때 이전 모델(Two-Comp., Model 1)보다 차수가 높은 8-10에서 스펙트럼의 값이 더 유사하게 제작되어진 것을 볼 수 있다. 또한 RMS 값도 23.2 nT로 모델과의 오차도 상대적으로 작게 나타났다. 만약 동서성분의 자료값의 오차가 남북성분의 자료의 오차보다 작을 경우 두 개의 수평성분을 통한 모델링 결과는 남북방향의 자료만을 가지고 한 모델링보다 좋은 결과를 가져올 것이라 기대할 수 있지만, 결과는 반대로 나타나 동서성분의 자료의 오차가 더 크다는 것을 짐작할 수 있다. 이는 두 성분을 모두 포함한 Model 1에서 남북방향성분과 동서방향 성분 각각의 상관계수(Correlation Coefficient)

Table 1. Table of correlation coefficients (CC) and root-mean-squares (RMS) values (nT) between the models when the inversions were performed.

MODEL	Overall		NS Component		EW Component	
	CC	RMS	CC	RMS	CC	RMS
Model 1 (n = 10)	0.997	281.9	0.999	54.4	0.9997	405.1
Model 2 (n = 10)	0.999	23.6	0.999	23.6		
Model 2+(n = 13)	0.999	26.2	0.999	26.2

Fig. 2. Field and angle differences between the two designated models (Model 1 & 2; refer to the text) and IGRF11(at 2007.917) up to degree 10. From the top, radial, NS, EW, total field, Inclination and Declination, respectively (Field differences at 685 km; angle differences at the surface level).

값은 모두 0.999 와 0.997 로 높게 나타나지만, RMS 의 값은 54.4 nT와 405.1 nT로 남북방향의 자료값이 모델과의 오차가 더 작은 것을 볼 수 있다 (Table 1). 이는 저위도 지역에서의 외부자기장의 영향으로 볼 수 있으며 이러한 경우 남북방향의 자료만을 사용하여 모델링을 시도하는 것이 적절하다고 판단된다. 모델에 사용된 성분의 개수에 따른 각각의 모델과 IGRF11(epoch 2007.917)모델의 성분별 차이값을 Fig. 2에서 표현하였다.

2005년 이후 제작된 IGRF모델의 차수는 13까지 계산이 되었으므로 Model 2를 통해 얻어진 차수 10까지의 역산 결과의 residual값으로부터 $n = 11-13$ 에 해당하는 관계행렬(design matrix)을 구성하여 이에 대한 조화함수계수 11-13을 구하고 이를 차수 10까지의 Model 2에 추가하여 파워스펙트럼으로 표현하였다(Fig. 3). Fig. 3에서와 보는바와 같이 10이상의 차수에서는 IGRF11(epoch 2007.917) 모델과 파워(power)에서 크게 차이를 볼 수 있으며 이는 삼축자력계자료의 정확도 및 외부자기장의 영향으로 보여진다.

Fig. 4에서는 KOMPSAT-II의 차수 13까지의 모델과 IGRF11(epoch 2007.917)과의 차이를 성분별로 표현하였다. Model 2 (Fig 2)와 비교했을 때 차이값에 차수 (degree) 11-13에 해당하는 파장대의 특징이 나타나며,

Tables 1과 2에서 보는 바와 같이 RMS값은 약간 올라갔으나 전체적인 차이값의 통계는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서는 각각 차수 13의 IGRF11와 KOMPSAT-

Fig. 3. Power spectrum curves of spherical harmonic coefficients with respect to the degree up to 13 of spherical harmonics between the different models: Red - IGRF11; Black - Model 2+ with degree 13.

Fig. 4. Field and angle differences between the model from only NS component used and IGRF11(at 2007.917) up to degree 13. From the top on the left to the bottom on the right, radial, NS, EW, total field, Inclination and Declination, respectively (Field differences at 685 km; angle differences at the surface level).

Table 2. Statistics from the differences between Model 2 minus IGRF11 and Model 2+ minus IGRF11.

MODEL Differences	Component	Statistics (unit: nT)			
		Max.	Min.	Std. Dev.	Mean
Model 2 - IGRF11 ($N_{max} = 10$)	ΔB_r	579.4	-480.3	215.8	10.8
	ΔB_θ	192.4	-233.6	74.0	-88.8
	ΔB_ϕ	202.5	-246.8	77.6	-0.19
	ΔF	570.2	-38.5	107.7	204.0
Model 2+ - IGRF11 ($N_{max} = 13$)	ΔB_r	569.0	-457.1	216.0	11.1
	ΔB_θ	163.5	-236.5	74.0	-89.4
	ΔB_ϕ	202.8	-244.1	77.4	-0.1
	ΔF	558.0	-47.5	107.6	204.2

Fig. 5. Correlation coefficient curve of power spectrum with respect to the degree up to 13 of spherical harmonic coefficients between the models: IGRF11 at 2007.917 and Model 2+ from only NS component used.

II의 모델의 차수별 상관계수(correlation coefficient)를 표현하였다. 여기서는 차수 8부터 차이가 나타나면서 이 후 차수의 상관계수값은 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인들 중 하나로는 차수 8에 상응하는 파장길이가 거의 5,000 km ($\lambda \approx 2\pi a/n$) 정도에 해당되므로 자료에서의 이러한 파장특징을 지닌 외부자기장성분의 영향에 의한 오차를 염두해 볼 수 있겠다. 이후 차수가 커지면서 나타나는 불일치의 원인으로서는 자료의 정확도에 따른 오차로 간주할 수 있으며 이에 따라 차수 8~9 이상의 값은 국제기준인 IGRF와 상당한 차이를 보인다.

5. 결 론

다목적 인공위성인 아리랑 2호에 자세제어를 위한

삼축자력계 자료를 통해 지구자기장모델을 제작하여 이를 국제표준인 지구자기장모델인 IGRF와 비교 분석하였다. 현재 활용되는 IGRF11에서 자료획득기간에 해당되는 시기의 모델계수값 IGRF11(epoch 2007.917)값을 얻어 KOMPSAT-II의 2007년 11월 12월 자료로부터 제작된 차수 10과 차수 13까지의 모델을 제작하여 비교해 보았다. 모델에 사용될 자료를 선별하기 위해 여러 가지 자기장의 활동과 관련있는 Kp 와 Dst 지수 자료를 활용했으며 태양활동에 기인한 외부자기장의 효과를 최소화하기 위해 각 측정지역에서의 지방시(local time)가 늦은 밤과 새벽에 해당되는 (20시~4시) 자료만을 사용했으며, 극지방에서 지방시와 상관없이 활동하고 있는 외부자기장의 성분을 극소화하기 위해 남북 위도 70°이상의 지역의 자료를 제외하였다. 이렇게 선별된 자료를 최소자승법을 통한 역산을 하여 차수 10인 120개의 구면조화함수의 계수를 계산하였고, 상대적으로 외부자기장의 영향을 많이 받은 동서방향의 성분을 제거하여 제작된 모델에서는 비교한 IGRF11(epoch 2007.917)과 차수 10까지 유사성을 보였다. 차수 13까지의 제작된 KOMPSAT-II의 삼축자력계자료를 통한 모델링에서는 차수 11부터 상당한 차이를 나타냈으며 상관계수분석을 통해 이러한 차이는 차수 8부터 시작되는 것을 확인했다. 이러한 차이는 주로 외부자기장의 불완전한 제거와 자료 자체의 정확도에 기인되며 보다 정확한 모델링과 시간에 따른 지구자기장의 영년 변화(secular variation) 연구를 위해 보다 장기간의 자료가 필요하며 지상의 지자기관측소 자료 역시 모델제작에 유용하게 사용될 것이라 기대된다.

사 사

본 연구를 위해 자료를 제공해 주신 항공우주연구원 위성연구부에 감사드립니다. 본 연구는 2010년도 정부

(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2012-0003941) 지원을 받아 수행되었습니다. 저자중 JWK은 캐나다 과학기술연구의회(National Science and Engineering Research Council, NSERC)의 Discovery Grant #355477-2008의 지원을 받았습니다. 아울러 본 본문의 향상을 위해 수고해주신 두 분의 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- Aster, R.C., Thurber, C.H. and Borchers, B. (2005) Parameter estimation and Inverse problems, Elsevier, Boston, 301p.
- Bartels, J., Heck, N.H. and Johnston, H.F. (1939) The three-hour range index measuring geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, v.44, p.411-454.
- Hamilton, D.C., Gloeckler, G., Ipavich, F.M., Stedemann, W., Wilken, B. and Kremser, G. (1988) Ring current development during the great geomagnetic storm of February 1986, *J. Geophys. Res.*, v.93, p.14343.
- Langel, R.A. (1987) The main geomagnetic field, In Jacobs, J. (ed.) *Geomagnetism* 1, Academic Press, p.249-512.
- Langel, R.A. and Hinze, W.J. (1998) The magnetic field of the Earth's lithosphere: The satellite perspective, Cambridge Univ. Press, p.429.
- Lee, S.H., Yong, K.-L., Choi, H.-T., Oh, S.-H., Yim, J.-R., Kim, Y.-B., Seo, H.-H., Lee, H.-J. (2007) Analysis of induced magnetic field bias in LEO satellite using orbital geometry-based bias estimation algorithm, *J. Korea Aeronaut. Space Sci.*, v.36, p.1126-1131.
- Lesur, V., Wardinski, I., Rother, M. and Mandea, M. (2008) GRIMM - The GFZ Reference Internal Magnetic Model based on vector satellite and observatory data, *Geophys. J. Int.*, v.173, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03724.x.
- MacMillan, S. (2007) IGRF, International Geomagnetic Reference Field, In Gubbins, D. and Herrero-Bervera, E. (ed.) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Springer, p.411.
- Kim, J.W., Hwang, J.S., Kim, S.Y., Lee, S.H., Min, K.D. and Kim, H.R. (2004) Analysis of Geomagnetic Field measured from KOMPSAT-1 Three-Axis Magnetometer, *Econ. Environ. Geol.*, v.37, p.301-411.
- Olsen, N., Mandea, M., Sabaka, T.J. and Tøffner-Clausen, L. (2010) The CHAOS-3 Geomagnetic Field Model and Candidates for the 11th Generation IGRF, *Earth, Planets, Space*, v.62, p.719-727.
- Olsen, N., Mandea, M., Sabaka, T.J. and Tøffner-Clausen, L. (2009) CHAOS-2 A Geomagnetic Field Model Derived from one Decade of Continuous Satellite Data, *Geophys. J. Int.*, v.179, p.1477-1487, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04386.x

2012년 6월 11일 원고접수, 2012년 6월 29일 게재승인