Research Paper

A Study of CHAMP Satellite Magnetic Anomalies in East Asia

Hyung Rae Kim*

Dept. of GeoEnvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Korea

*Corresponding author : kimhr@kongju.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 15 January 2021

Received in revised form 02 February 2021

Manuscript accepted 05 February 2021

Available online 26 February 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.1.117>

Research Highlights

- CHAMP crustal magnetic anomaly map of East Asia is present by using a track-by-track analysis.
- This regional anomaly model may be less corrupted by choosing the area of interest rather than the global model.
- The regional magnetic features are explained, along with the EMAG2 long wavelength anomalies.

ABSTRACT

Satellite magnetic observations reflect the magnetic properties of deep crust about the depth of Curie isotherm that is a boundary where the magnetic nature of the rocks is disappeared, showing long wavelength anomalies that are not easily detected in near-surface data from airborne and shipborne surveys. For this reason, they are important not only in the analyses on such as plate reconstruction of tectonic boundaries and deep crustal structures, but in the studies of geothermal distribution in Antarctic and Greenland crust, related to global warming issue. It is a conventional method to compute the spherical harmonic coefficients from global coverage of satellite magnetic observations but it should be noted that inclusion of erroneous data from the equator and the poles where magnetic observations are highly disturbed might mislead the global model of the coefficients. Otherwise, the reduced anomaly model can be obtained with less corruption by choosing the area of interest with proper data processing to the area.

In this study, I produced a satellite crustal magnetic anomaly map over East Asia (20° ~ 55°N, 108° ~ 150°E) centered on Korean Peninsula, from CHAMP satellite magnetic measurements about mean altitude of 280 km during the last year of the mission, and compared with the one from global crustal magnetic model (MF7). Also, a comparison was made with long wavelength anomalies from EMAG2 model compiled from all near-surface data over the globe.

Keywords : CHAMP, satellite data processing, crustal magnetic anomaly, long wavelength, tectonism, East Asia

Citation: Kim, H.R. (2021) A Study of CHAMP Satellite Magnetic Anomalies in East Asia, v.54, p.117-126, doi:10.9719/EEG2021.54.1.117.

연구논문

동아시아지역에서의 CHAMP 위성자료에서의 지각 자기이상의 연구

김형래*

공주대학교 지질환경과학과

*책임저자 : kimhr@kongju.ac.kr

요 약

위성고도에 획득한 지각 자기이상값들은 지상부근(near-surface)의 항공탐사나 해양탐사등에서 얻은 자기이상값들에서 얻기 어려운 장파장의 특징을 보이며 이들은 지각의 자기현상이 소멸되는 큐리 등온 깊이선(Curie isotherm)까지의 심부 지각물질의 자기특징 및 위성고도에서도 나타날 수 있는 강한 자기특징들을 반영한다. 따라서 심부 지하구조나 판구조론을 통한 과거 지구구조의 재구성(reconstruction) 및 해석과 최근 지구온난화로 인한 대륙빙하의 해빙과 연관되어 남극 및 그린랜드의 지열분포 연구에 중요한 자료로 이용되고 있다. 이러한 위성 지각 자기이상값은 전지구를 경계조건으로 하는 구면조화함수의 계수모델로 표현되는 것이 일반적이나 많은 계수 계산과 함께 안정적으로 외부자기장을 분리하기 어려운 극지역 및 적도지역의 자료들도 포함되어 이들 자료가 모델 전체에 영향을 줄 수가 있다. 한편, 이와는 달리 관심지역의 자료들만을 가지고 지역에 맞는 몇 단계 자료처리 과정을 거쳐 얻은 지각 자기이상값들은 이러한 영향에서 벗어날 수 있다.

본 연구에서는 한반도를 중심으로 하는 동아시아 지역($20^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$)의 CHAMP 위성에서 최저고도였던 시기의 자료를 획득하여 평균 280 km에서의 지각 자기이상 지도를 제작하고 CHAMP 자료로 만든 전지구 지각 자기이상 모델(MF7)과 비교하여 지각 자기이상 특징들을 파악하고자 한다. 아울러 전세계 지상부근 지각자기이상 자료를 종합하여 제작한 EMAG2에서 장파장 성분을 추출하여 함께 비교하기로 한다.

주요어 : CHAMP, 위성자료처리, 지각 자기이상, 장파장, 지구구조, 동아시아

1. 서 론

위성고도에서 처음으로 지각내부의 자화된 자성체들로 인한 자기이상을 관측하여 지도로 만든 것은 NASA의 인공위성 시리즈인 Polar OGO-2, 4, 6로 대략 400 km 고도에서 위성에 탑재된 자력계를 통해 지각 자기이상의 장파장 성분을 밝혀내었다(Regan *et al.*, 1975). 사실 대부분의 위성들은 자세조정(attitude control)을 위해 자력 측정값을 활용하였으며(Kim *et al.*, 2007) 이를 위해 자력계를 탑재하였으나 높은 정밀도를 갖고 있지는 않았다(Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008). 따라서 전체 측정값의 1-3 %를 차지하는 지각 자기이상성분을 밝히기 위해서는 높은 정밀도를 가진 자력계가 필요하며 이에 따른 자료처리 기술 및 연구등이 필요하다. 1979년에는 보다 향상된 정확도의 자력계를 탑재한 Magsat 위성이 제작되어 평균 고도 400 km 상공에서 자세한 지각 자기이상 연구에 활용되었으며(e.g., Langel *et al.*, 1982; Alsdorf *et al.*, 1994; Ravat *et al.*, 1995) 지각의 평균 깊이 및 지구 자기장의 원인이 되는 외핵까지의 깊이 정보도 Magsat 자료를 통한 구면조화함수의 파워 스펙트럼 분석을 통해 확인되었다(Langel and Estes, 1982).

이 후 1999년 덴마크 주도로 미국과 프랑스가 협력한 Ørsted 위성 역시 고정밀도의 자력계와 GPS로 지각의 자기이상값들을 Magsat 보다 높은 고도인 평균 700 km 이상에서 관측하였으며(Kim *et al.*, 2002) 계속해서 2000년에는 독일과 미국이 주도한 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload) 위성의 진보된 기술로 향상된 자력계를 통해 지각 자기이상지도 제작할 수 있었다. 이 위성들은 앞서 언급한 자세보정용으로 위성에 탑재된 자력계보다 약 1000 배의 정확도를 보이며 지구의 자기성분을 측정하였다. CHAMP 위성이 작동을 멈춘 2010년 이후 2013년 11월 유럽우주항공국(European Space Agency, ESA)에서는 정밀 자력계들을 탑재한 3개의 위성을 동시에 지구 궤도에 올려 지구 자기장의 변화를 관측하는 Swarm 미션(Swarm constellation mission) 프로젝트를 시작했다(Friis-Christensen *et al.*, 2006). 현재까지 지구 주변을 선회하면서 두 개의 위성은 서로 나란히 같은 고도인 약 450 km에서 관측을 수행하며, 또 다른 위성은 이보다 높은 약 530 km 상공에서 측정하며 지구자기장과 지각 자기이상성분을 측정하고 있다.

이러한 위성으로부터의 지각 자기이상성분은 국소적인 광물탐사 및 매장량 탐사등에는 활용이 쉽지 않지만 연

속적으로 큰 규모의 지역을 탐사하기 어려운 항공 및 선박 자력자료에서 얻을 수 없는 파장대인(100 km 이상) 지역규모(regional-scale)의 특징을 포함하고 있어(Ravat *et al.*, 2002) 판구조론적 시각에서 지각의 역사를 밝히거나 과거의 위치를 재구성(reconstruction)하는 데 중요한 자료로 활용된다(Kim *et al.*, 2007; Goodge & Finn, 2010; Hinze *et al.*, 2013; Idoko *et al.*, 2019; Ferré *et al.*, 2020). 또한, 지각 자기성분을 이용한 하부 지각 및 상부 맨틀에서의 큐리 등온선(Curie isotherm) 깊이 추정을 통한(Wang & Li, 2018, Ferré *et al.* 2020) 지열류량(heat flow) 또는 지열 구배(geothermal gradient) 분석으로 최근 지구 온난화(global warming)등으로 인한 그린랜드나 남극대륙의 육지빙하등의 해빙속도와의 관련성 연구에도 활용되고 있다(Leftwich *et al.*, 2005; Maule *et al.*, 2005; Martos *et al.*, 2017).

위성자료에서의 지각 자기이상성분 추출에는 크게 두 가지의 다른 접근법이 활용되는 데 첫 번째는 전 지구(global)를 대상으로 하는 접근법이고 다른 방법은 지역 규모(regional-scale) 대상 지역으로 하는 접근법이다. 첫 번째 접근법은 전 지구범위의 위성자료를 활용하여 구면조화함수(spherical harmonic functions, SH)들을 기저함수(basis function)로 하여 역산(inversion)을 통해 구면조화함수의 가우스 계수들(Gauss coefficients)을 차수(degree)와 계수(order)에 맞게 계산해 낸다. 얻고자 하는 최소 파장길이에 따라 정수인 차수의 크기(N)가 결정되며 차수가 클수록 $N(N+2)$ 만큼의 가우스 계수가 요구된다. 예를 들면, 약 100 km 정도의 파장 특징을 알고 싶다면 $N \sim 400$ ($N \sim$ 지구 평균둘레 $\div$ 파장길이)이며 이 때 필요로 하는 계수들의 크기는 160,800이다. 하지만 일반적으로 이와 함께 표현되는 외핵에서 기인된 지구자기장 성분도 포함되어 이를 표현하는 차수(일반적으로 국제지구자기장표준 모델 (IGRF)는 차수가 13로 제작되고 있다)의 개수를 빼면 160,605개의 가우스 계수가 필요하다. 전지구 자료의 개수와 구하고자 하는 차수의 크기도 연산능력에 어려움을 주지만 이와 더불어 전 지구의 자료를 적절히 선별하는 작업 역시 쉽지 않다. 대부분 자료를 선별할 때 필요한 선별 기준들(selection criteria)이 있는데, Dst, Kp 같은 행성지수들(planetary indices)은 자기권 및 이온권에서 일어나는 지자기 변화를 지시하는 지수들로 값들이 커지면 이곳에서의 지자기 활동도 활발하다는 것을 의미한다. 더불어 현재 위성이 지나가는 지역의 낮시간 동안 이온권에서 활동하는 지자기의 일변화(Sq current) 역시 위성 측정값에서 지각 자기성분을 분리하는 데 방해가 되므로 일괄적으로 낮시간 자료를 제외하여 사용한다. 특히, 자기 적도지역인 경우 특히 낮시간 동안 강한 제트

류의 전자흐름이 이온권 부근(100 – 250 km)에서 발생하는 적도 제트류(equatorial electrojet)가 있는데 밤에는 때로 역전현상도 발견하게 된다(Kim *et al.*, 1999). 또한 자기 극지역에서는 역시 이온권 및 자기권에서의 연자기력선 전류(field-aligned current)등이 불규칙적으로 활동하여 전 지구적으로 볼 때 균일한 오차크기를 가진 위성 자력 자료를 확보하기가 어렵다. 따라서 이러한 연구 지역일 경우에는 특별한 기존의 전류 모델이 없을 경우 좀 더 지수들의 기준을 높이거나 벡터성분이 아닌 상대적으로 오차가 적은 총자기장 성분만을 활용하여 제작하고 있다. 그렇다 하더라도 얻어진 자료들은 이러한 지역들의 자료들의 오차 전파(error propagation)로 인해 전지구적인 자료를 활용하는 구면조화함수 모델에 영향을 준다. Kim *et al.* (2013) 은 극지방의 합성된 위성자료에 작은 크기의 오차를 더한 후 전지구 모델을 제작할 경우 극지방뿐만 아니라 중·저 위도에 걸쳐 오차가 발생된다는 것을 보였다.

다른 접근 방법으로는 전지구 자료가 아닌 원하는 지역의 자료만을 지역 특징에 맞게 선별하여 지각 자기이상성분을 파악하는 방법이 있다(Alsdorf *et al.*, 1994; Ravat *et al.*, 1995; Purucker *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005b). 이 방법은 다양한 자료처리 프로세싱(data processing) 작업을 통해 제작되는 지각 이상성분(Alsdorf *et al.*, 1994; Ravat *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2002) 또는 전지구적 SH가 아닌 선택적 지역에 최적화된 기저함수(basis function)들을 활용하여 지각 자기이상성분을 나타낸다(Kim & von Frese, 2017). 비록 다양한 처리과정들이 요구되지만 전지구 모델에 비해 보다 세심히 지역적인 외부자기장의 오차를 제거할 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 두 번째로 언급한 지역 자료 처리 방법을 통해 CHAMP 위성의 마지막 해인 2010년에 4월 자료부터 최종 임무로 종료된 7월 자료까지의 저고도(<320 km) 자료만을 취득하여 한반도를 중심으로 동아시아 지역의 지각 자기이상 성분의 지도를 제작하는 방법을 설명하고 최종적으로 이와 비슷한 시기의 자료로 제작된 전지구 모델인 MF7(Maus, 2010)에서 나타나는 지각 자기이상 지도와의 여러 지구조적 특징들과 차이점들을 간단히 살펴보고자 한다. Swarm 자료인 경우 CHAMP 위성자료보다 높은 고도인 450 – 500 km에서 측정된 자료라 저고도 자료에 비해 자세한 특징을 얻기 어렵고 아직까지는 위성간의 구배(gradient) 자료는 역산을 통한 모델링을 통해 활용함으로(Olsen *et al.*, 2017) 패스자료를 직접적으로 처리하는 방식을 따르는 본 연구에서는 저고도 자료인 CHAMP자료를 이용하여 지각성분의 자기이상지도 제작하였다.

제작된 지각 자기이상 지도와 MF7 모델로부터 얻은 값들은 전세계 항공 및 해상탐사 자기이상자료를 모두 합쳐놓은 EMAG2 (Earth MAGnetic Model 2, Meyer *et al.*, 2017) 에서의 장파장 성분(파장 길이 300 km 이상) 과 비교하여 자기 이상 특징을 파악하였다.

2. 방 법

위성에서 관측되는 지구자기장 측정값은 외핵에서 발생하는 지구자기장성분과 태양풍으로 인한 대전입자들과 반응으로 지구 대기부분에서 생성되는 외부 자기장성분, 그리고 지각내부의 자철광물 및 여러 작용으로 인한 지각자기성분으로 크게 구분할 수 있다. 이 중 외핵에 의한 지자기성분이 측정값의 95 % 이상을 차지하며 나머지가 5 %를 구성한다. 특히, 여기서 얻고자 하는 지각 자기이상성분은 시간에 따라 변화하지 않는다는 가정으로 자료처리 과정에서 이 점을 활용하여 자료 처리분석에 사용할 수 있다. Fig. 1은 자료획득 후 전반적인 자료처리 과정의 흐름도 (flowchart) 이다.

Fig. 1. Flowchart of data processing for crustal magnetic anomaly map from CHAMP satellite data in this study.

2.1. 자료획득 및 처리

CHAMP 위성자료는 <ftp://isdctp.gfz-potsdam.de>에서 자료를 자유롭게 내려 받을 수 있으며 이들 자료들은 날짜 별로 cdf (common data format) 형식으로 구성되어 있다. 가장 중요한 날짜정보, 연구 지역의 위치정보, 측정값정보를 분류하여 위성의 선회방법에 따라 상승(ascending) 궤도와 및 하강(descending) 궤도(또는 패스)로 나누어 자료처리를 수행한다. 효과적인 자료처리를 위하여 부가자료들을 기준으로 안정된 지자기 활동이 있었던 시기의 자료만을 선별할 필요가 있다. 특히 다양한 자료처리 과정이 들어가는 방법에서 가능한 외부자기장의 영향이 최소인 자료들만 선택된다면 많은 수고스런 작업들을 생략할 수 있다.

본 연구에서는 벡터성분의 측정값을 제외한 총자기장값(total magnetic field, F)만을 처리하였다. 벡터자료인 경우 외부자기장 성분에 크게 변화하기 때문에 자료처리가 복잡하고 그 결과도 많은 오차들이 포함되는 경우가 많으므로 간단한 자료처리만을 위해 총자기 성분만을 처리하였다. 한편으로 같은 지역의 항공자료로 얻은 지상 높이의 자기이상지도와의 비교에 있어서도 같은 총자기 성분이라 비교 역시 용이할 수 있다.

패스들을 상승(궤도)구간과 하강(궤도)구간으로 구분할 때 측정된 F 값에서 외핵의 지구자기장 성분을 IGRF모델(차수는 13)로부터 측정위치와 시간(epoch)를 통해 계산하여 빼주고 또한 외부자기장중 장파장에 해당하는 환전류(ring current) 등에 의한 특징들은 패스별로 경향성을 적용하기 위한 1차식으로 피팅(fitting)을 하여 제거하였다(Ravat *et al.*, 1995; Langel and Hinze, 1998).

다음에는 Kp, Dst 같은 행성지수를 사용하여 자료를 선별하는데 이들 지수들은 지상의 중위도 지역의 지자기 관측소들의 시간 평균자료들을 기반으로 제작된 것으로 정상적인 지자기활동의 지표로 사용된다(Kim *et al.*, 2002; 2005a). 즉, 이들 지수들이 높은 값을 보인다면 시간에 따른 지자기 변동이 크다는 것을 의미하며 주로 외부 자기장의 활동이 활발한 것으로 볼 수 있다. 전지구 위성자료 처리에서와 같이 Kp 지수인 경우 3 이하와 Dst 지수역수 10 nT 이하일 때의 기간에 해당하는 자료들을 우선 선별하였다 (Maus *et al.*, 2008; Olsen *et al.*, 2017).

이렇게 선별한다 하더라도 이온권(ionosphere)에서 낮 동안 활발히 활동하는 일변화 전류(Sq current)로 인한 외부자기장 영향이 여전히 잔여값에 존재하며 특히 이 파장대역은 지각 자기이상 성분의 파장대와 유사한 특징을 보인다 (Langel and Hinze, 1998). 이러한 시·공간적인 변화를 보이는 Sq로 인한 자기장 모델은 모든 시간대에 (계절적 변화를 포함하여) 전지구적 자료를 통해 제작이 가

Fig. 2. Standard deviation (σ) curves of (A) ascending and (B) descending passes reduced by the mode values at the interval of longitudes. Empty circles are σ values of the passes, while crosses are the selected passes within the dashed lines of $\pm\sigma$ of the curves. (C) Two curves above are plotted together along with the selected passes.

능하며(e.g., Sabaka *et al.*, 2015) 이러한 모델 역시 지구 자기장이 가장 안정적일 때의 외부자기장 성분이므로 자기장의 활동이 불규칙한 시기의 외부자기장의 성분을 표현하는 데 한계를 보인다. 따라서 조금이라도 외부자기장이 불규칙하게 활동하는 시간의 자료들을 제거해주는 방법이 가장 간단하다. 자료손실을 있겠으나 이렇게 이를 제거하기 위한 복잡한 모델링이나 자료처리 과정을 생략할 수 있다. 대부분의 전지구 모델 역시 이러한 낮 자료들을 제거하고 모델링을 수행하여 외부자기장의 효과를 최소화 하며 여기서 비교할 MF7 역시 이러한 방법으로 제작되었다(Maus *et al.*, 2008; Maus, 2010).

자료가 잘 선별되었는지 보기 위해 선택된 패스를 경도별로 정렬하여 패스의 자료값의 표준편차값을 Fig. 2에

표현하였다. 즉, 제한된 지역에 대해 거의 남북으로 진행하는 패스의 측정값의 편차를 경도별로 나열하다 보면 지각이상값의 공간적 특징상 급격한 변화를 보인다는 것은 외부자기장의 영향으로 인한 시간적 요소가 포함되어 있다고 볼 수 있기 때문이다. 하강 구간에서는 총 170개의 패스가 보이며 이 중 7 개가 표준편차값을 이용한 피팅곡선에서 1.0 nT 범위 내에서 제외되며 나머지 163 개는 모두 연속적으로 유사한 편차값을 보였다. 상승 구간 자료 역시 159 개의 패스에서 155 개의 패스가 선택되어 두 구간자료에서 총 318 개의 패스를 선별하였다.

위와 같은 과정을 통해 자료처리를 실시하여도 여전히 예측하기 어려운 외부자기장 성분이 존재할 수 있으며 이를 제거하기 위해 파동수 상관 필터링(wavenumber correlation filtering) 방법을 적용하였다(von Frese *et al.*, 1997). 이 방법은 위치적으로 서로 가까운 두 패스 자료를 비교할 수 있도록 같은 수의 자료로 만든 후 이를 푸리에 변환하여 각 패스의 파동수(k) 끼리의 상관계수(correlation coefficient, $CC[k]$)를 구하여 높은 $CC[k]$ 값들의 파동수 특징만 선택하는 일종의 노치필터(notch filter) 형식이다.

파동수에 따른 상관계수값은 식 (1)처럼

$$CC[k] = \cos(\Delta\theta_k), \quad \Delta\theta_k = \theta_{\bar{X}(k)} - \theta_{\bar{Y}(k)} \quad (1)$$

계산이 되며 $\theta_{\bar{X}(k)}$, $\theta_{\bar{Y}(k)}$ 서로 같은 수로 맞춘 인접한 위치(φ , λ 는 위, 경도)인 두 패스 자료인 $\bar{X}(\varphi, \lambda)$, $\bar{Y}(\varphi, \lambda)$ 에서 Fourier 변환에서의 위상(phase) 성분을 의미한다. 시간에 따라 변하는 외부자기장과는 달리 접해있는 위치에서의 지각 자기이상 특징의 유사성을 찾아내어 분별함으로써 외부자기장 성분을 제거하는 방법으로 활용된다. 여기서 사용된 임계(critical) 상관계수(CC)는 +0.8 로 하여 높은 상관성이 있는 특징만을 추출하였다. 만약 자료의 상관성이 높지 않으면 임계 상관계수를 낮게 하여 최대한의 유사한 특징들을 찾아낼 수 있지만, 이럴 경우 비슷한 지역시간(local time)대의 유사한 외부자기장의 특징들도 함께 추출될 수 있다. 또한 너무 높은 임계값(≥ 0.9)일 경우 실질적으로 높은 상관성을 가진 특징들만 추출되므로 필터링의 효과가 떨어진다. 따라서 여러 임계 상관 계수를 사용해 본 후 결과값들의 특징들(i.e., Fig. 3A and 3B)이 전체적으로 smooth하게 연속적으로 보이는 값을 임계값으로 결정하였다.

Fig. 3의 (A), (B)은 필터링 후 얻은 상승 및 하강궤도별 자료들을 자료값 위치에서 값을 표현한 그림으로 안정된 자료값들이 경도별로 연속적으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3 (C), (D) 와 (E)는 이들 자료를 280 km

Fig. 3. Total field anomaly residuals from A) ascending and B) descending passes after wavenumber correlation filtering was processed. Total field anomaly map of C) ascending and D) descending passes with the residuals from (A) and (B), respectively. Solid lines represent tectonic lines or boundaries; a) Yinshan-Yanshan tectonic belts, b) Qinling-Dabie-Tanlu tectonic belts and c) Nanling tectonic belts, modified from Hao *et al.* (1998). Red dashed lines represent the plate boundaries (Bird, 2003). E) Combined anomaly map at 280 km altitude from this study. Numbers are designated as anomaly features explained in the text. F) CHAMP total field anomaly at 280 km from MF7 model. G) Near-surface total field anomaly at 5 km altitude at a 2-arc minute interval from EMAG2. H) Low-pass filtered wavelengths longer than 300 km of Map (G). All the units are nanotesla (nT).

평균 고도로 하여 보간하여 만든 지도들과 이를 병합하여 얻은 지도이다. 비교를 위해 Fig. 3 (G)와 (H)는 EMAG2(Meyer *et al.*, 2017) 에서 얻은 2 arc-min 간격의 자료와 이를 300 km 이상의 파장만을 표현한 지도를 제작하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3에서 지도(A)와 (B)의 특징들은 매우 유사하게 표현되었다. 과거 Magsat의 경우 상향패스와 하향패스의 자료들은 지나가는 지역시간(local time)대가 특징지어 있어 서로 다르게 표현되어 있는 반면(i.e., Langel *et al.*, 1982; Alsdorf *et al.*, 1994; Ravat *et al.*, 1995), CHAMP 는 궤도별로 비교적 다양한 시간대의 자료가 기록되어 궤도별로 밤시간인 자료들은 안정적인 지각 자기이상의 특징을 보였다. 이를 보간하여 제작된 지도 Fig. 3C와 3D 에 보는 것처럼 두 지도의 상관계수는 0.98로 무척 높은 유사성을 보였다.

비교를 위해 Fig. 3F는 280 km 고도에서 비슷한 시기를 포함한 CHAMP위성의 전지구 자료를 유사한 자료 선별과정을 거쳐 SH를 이용하여 만든 MF7 (Maus, 2010) 모델에서 얻은 지각 자기이상 성분으로 0.5° 간격으로 만든 지도이다. 여기서 만든 지도(Fig. 3E)와의 상관계수는 0.7 로서 대체로 유사한 특징을 보이지만 일부 몇몇 지역특징의 위치와 크기가 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 따라서 지도에서 비교가 될 수 있는 몇몇 특징들을 뽑아 표기하여 자기적 특성을 설명하기로 한다.

(1) 송리아오 분지(Songliao Basin)는 약 1억 5천만년에 서 1억 5백만년에 대규모 열곡작용(rifting)으로 분지가 형성된 후 함몰(subsidence)과 분지 역전(basin inversion) 이 중생대 말기까지 이어져 왔다 (Wang and Li, 2018). 또한 Zhang *et al.* (2000)은 Precambrian에 외부기원(allochthonous)으로 생성된 작은 소블럭(microblock)으로 간주하고 있으며 이 후 주변의 조산대가 발달한 형상으로 보고있다. MF7 (Fig. 3F) 지도에서는 송리아오 분지 지역에서 강한 양의 이상대를 보인다. 이번 연구에서 제작된 지도에서는 세기는 좀 낮게 나타나지만 특징이 세분되어 한반도 북쪽과 분지 서쪽의 특징이 나누어지는 모습을 보인다. 항공 자기이상 종합자료인 EMAG-2 (Fig. 3H)에서도 이러한 특징이 보인다. 특히 음의 이상대를 보이는 분지를 둘러싼 3개 높은 양의 이상대(Fig. 4 in Wang and Lu, 2018)가 상향연속 시 위성고도에서는 큰 양의 이상값을 나타낸다. 이 특징들은 공통 기원의 중생대 판입작용에 의해 하부 지각에 위치한(deep-seated) 자력원들에 의한 것으로 볼 수 있다. 한편 지진파자료를 통해 얻은 분지 가운데 암석권-연약권 경계심도(Lithosphere-

Asthenosphere Boundary)는 주변부에 비해 올라와(Guo *et al.*, 2014) 상대적으로 강력한 자력원인 맨틀물질의 상승으로 위성고도에서의 양의 이상대를 보일 수 있으나 자력이 소멸되는 큐리심도(~ 580°C의 등온 깊이)보다 깊게 위치할 경우에 대해서 고려해야 한다.

(2) 보하이 만 분지(Bohai Bay basin) 지역은 본 연구에서 얻은 Fig. 3E에서 높은 양의 이상대를 보이지만 MF7에서는 약한 양의 이상대를 보여 비교가 된다. 이 지역 역시 중생대 중기에서 말기에 두 차례에 걸친 rifting에 의해 생성된 것으로 Yanshanian 조산운동으로 인한 중국 동북지역 전역으로 섭입대 형성에 의한 backarc 확장이 이루어진 것으로 보고 있다(Gilder *et al.*, 1991). 특히, 이 두 분지는 확장 운동에 의해 발생된 분지라는 공통점이 있으며 시기적으로도 유사한 시기에 형성되어 자기이상 역시 비슷한 특징을 보인다.

음의 이상대를 보이는 (3) 지역에서는 양쯔(Yangtze)과 케세이시아(Cathaysia) 블럭을 나누어 주는 경계 밑에 자리잡고 있으며 MF7에서는 음의 이상대가 약하게 나타나는 것을 볼 수 있다. Nanling Orogenic Belt(Hao *et al.*, 1998)가 가로지르며 이 지역은 두 판이 Neoproterozoic 시기에 충돌된 경계로 장파장의 EMAG2 (Fig. 3H) 지도에서도 유사한 특징이 보인다. (Zhang and Wang, 2007)은 탄성과 자료를 통해 육지에서 해안방향으로 케세이시아 블럭의 모호 깊이가 얕아지는 사실을 통해 상대적으로 지각두께의 차이로 인한 낮은 이상대가 나타나는 것을 알 수 있다.

한반도 서해안을 중심으로 놓여있는 음의 이상대(4)는 아직까지 자세히 연구된 문헌들이 부족하지만, Taylor *et al.*(2008)와 Hwang *et al.*(2010)는 한반도 내의 자력모델을 기반으로 Kutina *et al.* (2007)가 주장하는 중국본토를 가로 지르는 Yinshan-Yashan (Fig. 3C) 구조대와 유사한 “40°N 균열대 (Fracture Zone)”의 존재와 연관성이 있다고 보고했다. 또한 중력자료를 통해서(Kim *et al.* 2020) 두꺼운 퇴적층으로 상대적으로 얇은 지각두께를 보이기도 하나 이보다는 보다 깊은 위치의 지구조와 연관되었을 가능성이 높다.

대만 북북동지역의 양의 이상대(5)는 MF7과는 중심의 위치가 다르게 나타나지만 장파장의 항공 자기이상지도에서도 비슷한 지역에서 볼 수 있으며 Sibuet & Hsu (1997)은 부근의 섭입대와 연관있는 과거의 화산호(volcanic arc) 지역과 변성기반암으로 이루어진 지역으로 파악했다. 이러한 장파장 특징은 하나의 화산호가 존재되는 하는 것이 아니라 2,3개의 다른 시기의 형성된, 섭입대와 평행한 방향으로 화산호의 무리가 발달되었을 것이라 볼 수 있다(Doo *et al.*, 2015).

양의 이상대인 (6)은 MF7 지도에서는 상대적으로 세기가 약한 특징을 보이나 주변의 음의 이상대와 비교되어 잘 나타나고 있다. 이 지역은 일본 본토에 위치한 해양지각 성분인 오피오라이트(ophiolites) 지대가 이 주변에 존재하며 약 500 Ma 과거 태평양해(Paleo Pacific Ocean)가 고아시아 대륙(Paleo Asian continent)로 섭입될 때 흔적으로 계속적인 작은 대륙지각(continental fragments)들이 구조대(tectonic belt)를 이루며 발달되었는데(Wakita, 2018) 이러한 변성기반의 육지 지각과 어울려 높은 양의 이상대를 이루는 것으로 보고 있다. 또한 그 원인으로 중생대 후기와 팔레오세(Paleocene)시기에 계속된 섭입작용에서 한반도남부(경상분지)-혼슈 서부해역에 화산대(volcanic arc)를 생각할 수 있으나(Fig. 15 in Maruyama *et al.*, 1997) 위성지도에서처럼 양의 이상대의 일본 본토와의 연결성을 설명하기에는 부족해 보인다.

(7)과 (8)은 대표적으로 섭입대에서 일어나는 전호 맨틀 (forearc mantle)의 사문화(serpentinization)로 볼 수 있으며(Blakely *et al.*, 2005) 경계를 따라 해양지각 쪽으로 높은 양의 이상대를 보여준다.

이러한 지각 자기이상적 특징들은 지각 모델링이나 광물 및 암석학적 자료들을 기반으로 보다 세밀한 지질 및 지구조적 해석들이 필요하며 구체적인 토의 및 해석은 추후 연구에서 기약하기로 한다.

4. 결 론

지각의 자기적 성질에 대해 지역규모(regional-scale)의 특징을 파악하기 위해서는 수많은 탐사자료를 서로 결합하여 장파장 성분이 왜곡되어 제작된 항공 및 선박 자료보다는(Ravat *et al.*, 2002) 정밀한 자력위성에서 얻은 자료를 통한 분석이 요구된다. 특히, 판구조론적 시각에서 지각의 역사를 밝혀 과거의 대륙위치를 재구성(reconstruction)하거나 (Kim *et al.*, 2007; Goodge and Finn, 2010) 하부지각 및 상부 맨틀에서의 큐리 등온선(Curie isotherm) 깊이 추정을 통한 지열 구배(geothermal gradient) 분석으로 남극 및 그린랜드의 해빙속도 연구에도 유용히 활용되고 있다 (e.g., Leftwich *et al.*, 2005; Martos *et al.*, 2017; Maule *et al.*, 2005).

자력 위성에서 측정된 값을 통해 위성 고도에서의 지각 자기이상 지도를 제작하기 위해 전지구적 접근보다 선택된 지역에 해당하는 자료만을 택해 한반도를 중심으로 동아시아 지역의 위성 지각 자기이상 지도를 제작하였다. 위성 자료는 CHAMP 위성의 최저 고도로 운행했던 시기의 자료로 평균고도 280 km 의 자료를 활용하였다. 먼저 궤도의 선회 방향별로 상향패스(ascending passes)

와 하향패스(descending passes)로 분류하고 지자기적으로 가장 안정된 기간의 자료만을 선택하여 패스를 경도별로 나열하여 서로 유사한 특징만을 찾아내었다. 이를 통해 지도를 제작하였으며 전지구적 접근을 통해 만든 구면조화함수 모델(MF7)의 같은 고도의 예측 지도와 비교하였다. 두 지도는 상관계수 0.7로 매우 유사한 특징을 보이나 지역별로 이상대의 위치와 세기에 차이를 보였다. 전반적으로 지역단위로 제작된 지도가 전지구 모델로 얻은 지도에 비해 좀 더 세분화된 특징을 보이며 지상부근의 자기이상지도인 EMAG2에서 장파장만을 선택하여 얻은 지도와도 유사성을 보였다. 또한 지도에서 선택된 몇몇 큰 이상대들에 대해 지구조적 및 지질학적 배경들을 기술하였으며 전반적으로 위성 고도에서 동아시아 지역에서의 자기 이상대들은 주로 하부지각과 같은 심부(deep-seated) 지구조 또는 지각두께에서 오는 경계효과로 인해 발생된 경우로 알려졌다. 이러한 특징들은 판구조론적 해석에 유용하게 활용될 수 있다 (Kim and von Frese, 2017; Gao *et al.*, 2018). 하지만, 보다 자세한 해석을 위해서는 모델링과 같은 밀도있는 분석이 요구되며 본 연구의 주제에 벗어나 후속 연구들을 기약해본다.

특히 지상 부근 자료와 위성 고도 자료가 모두 만족하는 병합 모델을 제작할 때 고도에 따른 이상대의 특징 변화를 파악하는 것이(Kim and von Frese, 2017) 도움이 되겠다.

사 사

이 논문은 2019년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Alsdorf, D.E., von Frese, R.R., Arkani-Hamed, J. and Noltimier, H.C. (1994) Separation of lithospheric, external, and core components of the south polar geomagnetic field at satellite altitudes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.99, p.4655-4668.
- Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.4, 1027, <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Blakely, R.J., Brocher, T.M. and Wells, R.E. (2005) Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geology*, v.33, p.445-448. <https://doi.org/10.1130/G21447.1>
- Doo, W.-B., Hsu, S.-K. and Armada, L. (2015) New Magnetic Anomaly Map of the East Asia with Some Preliminary Tectonic Interpretations. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v.26, p.73. <https://doi.org/10.3319/TAO.2014.08.19.07>
- Ferré, E.C., Kuppenko, I., Martín-Hernández, F., Ravat, D. and

- Sanchez-Valle, C. (2020) Magnetic sources in the Earth's mantle. *Nature Reviews Earth & Environment*, p.1-11. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00107-x>
- Friis-Christensen, E., Luhr, H. and Hulot, G. (2006) Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field. *Earth, Planets and Space*, v.58, p.351-358.
- Gao, G., Shi, L., Kang, G., Wu, Y., Bai, C., Wen, L. and Hou, J. (2018) Analysis of the lithospheric magnetic anomalies and tectonics in continental China and the adjacent regions using CHAMP satellite data. *Studia Geophysica et Geodaetica*, v.62, p.408-426. <https://doi.org/10.1007/s11200-016-0102-7>
- Gilder, S.A., Keller, G.R., Luo, M. and Goodell, P.C. (1991) Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, v.197, p.225-243. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90043-R](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90043-R)
- Goodge, J.W. and Finn, C.A. (2010) Glimpses of East Antarctica: Aeromagnetic and satellite magnetic view from the central Transantarctic Mountains of East Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.115. <https://doi.org/doi:10.1029/2009JB006890>
- Guo, Z., Cao, Y., Wang, X., Chen, Y.J., Ning, J., He, W., Tang, Y. and Feng, Y. (2014) Crust and upper mantle structures beneath Northeast China from receiver function studies. *Earthquake Science*, v.27, p.265-275.
- Hao, T., Liu, Y. and Duan, C. (1998) Characteristics of geophysical field in east China and adjacent regions. *Geosciences Journal*, v.2, p.108-116. <https://doi.org/10.1007/BF02910254>
- Hinze, W.J., von Frese, R.R.B. and Saad, A.H. (2013) *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- Hwang, J.S., Kim, H.R., Suh, M., Taylor, P.T., Kutina, J. and Hu, W.-J. (2010) Long-wavelength geopotential fields study of East Asia from satellite data. *Chinese Journal of Geophysics (Chinese)*, v.53, p.1327-1335.
- Idoko, C.M., Conder, J.A., Ferré, E.C. and Filiberto, J. (2019) The potential contribution to long wavelength magnetic anomalies from the lithospheric mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.292, p.21-28. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.05.002>
- Kim, H.R., Choi, S.-Y., Suh, M., von Frese, R.R.B., Park, K.J. and Yu, H. (2020) Moho modeling of the Yellow Sea (West Sea) from spectrally correlated free-air and terrain gravity data. *Geosciences Journal*, v.24, p.531-540. <https://doi.org/10.1007/s12303-019-0044-5>
- Kim, H.R., von Frese, R., Hong, J. and Golynsky, A. (2013) A regional lithospheric magnetic modeling over Antarctic region. *EGU General Abstract*, p.5491.
- Kim, H.R., von Frese, R.R., Taylor, P.T., Golynsky, A.V., Gaya-Piqué, L.R. and Ferraccioli, F. (2007a) Improved magnetic anomalies of the Antarctic lithosphere from satellite and near-surface data. *Geophysical Journal International*, v.171, p.119-126.
- Kim, H.R. and von Frese, R.R. (2017) Utility of Slepian basis functions for modeling near-surface and satellite magnetic anomalies of the Australian lithosphere. *Earth, Planets and Space*, v.69, p.53.
- Kim, H.R., von Frese, R.R., Kim, J.W., Taylor, P.T. and Neubert, T. (2002) Ørsted verifies regional magnetic anomalies of the Antarctic lithosphere. *Geophysical research letters*, v.29, p.8002-8005.
- Kim, H.R., Gaya-Piqué, L.R., von Frese, R.R., Taylor, P.T. and Kim, J.W. (2005a) CHAMP magnetic anomalies of the Antarctic Crust. pp. 261-266, Springer Berlin Heidelberg. *Earth Observation with CHAMP*.
- Kim, J.W., Hwang, J.S., von Frese, R.R., Kim, H.R. and Lee, S.-H. (2007b) Geomagnetic field modeling from satellite attitude control magnetometer measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.112. <https://doi.org/doi:10.1029/2005JB004042>
- Kim, H.R., von Frese, R.R., Golynsky, A.V., Taylor, P.T. and Kim, J.W. (2005b) Crustal analysis of maud rise from combined satellite and near-surface magnetic survey data. *Earth, Planets and Space*, v.57, p.717-726.
- Kutina, J., Cui, S., Pei, R. and Jiang, M. (2007) A deep-seated EW trending structural boundary indicated as extending across the Korean Peninsula at a latitude close to 40° N. *Global tectonics and Metallogeny*, p.81-102.
- Langel, R.A. and Estes, R.H. (1982) A geomagnetic field spectrum. *Geophysical Research Letters*, v.9, p.250-253.
- Langel, R.A. and Hinze, W.J. (1998) *The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere: The Satellite Perspective*. Cambridge University Press.
- Langel, R.A., Schnetzler, C.C., Phillips, J.D. and Horner, R.J. (1982) Initial vector magnetic anomaly map from MAGSAT. *Geophysical Research Letters*, v.9, p.273-276.
- Lee, S.H., Yong, K.L., Choi, H.T., Oh, S.H., Yim, J.R., Kim, Y.B., Seo, H.H. and Lee, H.J. (2008) Analysis of Induced Magnetic Field Bias in LEO Satellites Using Orbital Geometry-based Bias Estimation Algorithm. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, v.36, p.1126-1131.
- Leftwich, T.E., von Frese, R.R., Potts, L.V., Kim, H.R., Roman, D.R., Taylor, P.T. and Barton, M. (2005) Crustal modeling of the North Atlantic from spectrally correlated free-air and terrain gravity. *Journal of Geodynamics*, v.40, p.23-50.
- Martos, Y.M., Catalán, M., Jordan, T.A., Golynsky, A., Golynsky, D., Eagles, G. and Vaughan, D.G. (2017) Heat flux distribution of Antarctica unveiled. *Geophysical Research Letters*, v.44, p.11,417-11,426.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997) Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island arc*, v.6, p.121-142.
- Fox-Maule, C., Purucker, M.E., Olsen, N. and Mosegaard, K. (2005) Heat flux anomalies in Antarctica revealed by satellite magnetic data. *Science*, v.309, p.464-467.
- Maus, S. (2010) *Magnetic Field Model MF7*. CIRES, Colorado, USA.[Available at www.geomag.us/models/MF7.html].
- Maus, S., Yin, F., Lühr, H., Manoj, C., Rother, M., Rauberg, J., Michaelis, I., Stolle, C. and Müller, R. (2008) Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v.9.
- Meyer, B., Saltus, R. and Chulliat, A. (2017) EMAG2 Version 3-Update of a two arc-minute global magnetic anomaly grid. *EGU*

- General Abstract, p.10614.
- Olsen, N., Ravat, D., Finlay, C.C. and Kother, L.K. (2017) LCS-1: a high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations. *Geophysical Journal International*, v.211, p.1461-1477. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx381>
- Purucker, M.E., von Frese, R.R. and Taylor, P.T. (1999) Mapping and interpretation of satellite magnetic anomalies from POGO data over the Antarctic region. *Annals of Geophysics*, v.42.
- Ravat, D., Langel, R.A., Purucker, M., Arkani-Hamed, J. and Alsdorf, D.E. (1995) Global vector and scalar Magsat magnetic anomaly maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.100, p.20111-20136.
- Ravat, D., Whaler, K., Pilkington, M., Sabaka, T. and Purucker, M. (2002) Compatibility of high-altitude aeromagnetic and satellite-altitude magnetic anomalies over Canada. *Geophysics*, v.67, p.546-554.
- Regan, R.D., Cain, J.C. and Davis, W.M. (1975) A global magnetic anomaly map. *Journal of Geophysical Research*, v.80, p.794-802. <https://doi.org/10.1029/JB080i005p00794>
- Sabaka, T.J., Olsen, N., Tyler, R.H. and Kuvshinov, A. (2015) CM5, a pre-Swarm comprehensive geomagnetic field model derived from over 12 yr of CHAMP, Ørsted, SAC-C and observatory data. *Geophysical Journal International*, v.200, p.1596-1626.
- Sibuet, J.-C. and Hsu, S.-K. (1997) Geodynamics of the Taiwan arc-arc collision. *Tectonophysics*, v.274, p.221-251. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00305-8)
- Taylor, P.T., Kim, H.R., Kutina, J. and Johnson, G.L. (2008) Geohazard assessment from satellite magnetic data modeling—With examples from the Arctic Margin along the Canada Basin and the Korean Peninsula along 40 (degree) N (latitude) parallel. *Earth, Planets and Space*, v.60, p.497.
- von Frese, R.R., Jones, M.B., Kim, J.W. and Kim, J.-H. (1997) Analysis of anomaly correlations. *Geophysics*, v.62, p.342-351.
- Wakita, K. (2018) Geology of the Japanese Islands: An Outline. In *Natural Heritage of Japan: Geological, Geomorphological, and Ecological Aspects* (eds. A. Chakraborty, K. Mokudai, M. Cooper, M. Watanabe & S. Chakraborty), pp. 9-17, Springer International Publishing, Cham. Geoheritage, Geoparks and Geotourism.
- Wang, J. and Li, C.-F. (2018) Curie point depths in Northeast China and their geothermal implications for the Songliao Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, v.163, p.177-193. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.05.026>
- Zhang, M., Suddaby, P., O'Reilly, S.Y., Norman, M. and Qiu, J. (2000) Nature of the lithospheric mantle beneath the eastern part of the Central Asian fold belt: mantle xenolith evidence. *Tectonophysics*, v.328, p.131-156. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00181-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00181-5)
- Zhang, Z. and Wang, Y. (2007) Crustal structure and contact relationship revealed from deep seismic sounding data in South China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.165, p.114-126. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.08.005>