

과거 3000년간 동아시아의 지구 자기장 방향 변화 연구

박종현 · 박응희[‡]

강원대학교 지구물리학과

요 약

고해상도의 지역적 과거 지구 자기장의 영년 변화(PSV) 곡선은 고고학적 유적에 대한 정밀한 연대 측정에 유용한 도구로 이용될 수 있으며 비쌍극자기장 분포, 고지자기 급변(AMJ)과 같은 전 지구적인 지구 자기장의 변화 특성을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 현재까지 개발된 연속적인 과거 지구 자기장 예측 모델 (ARCH, CALS, SED series)은 북유럽 지역을 중심으로 확립된 고해상도의 PSV 곡선의 자료들을 바탕으로 구성되어 있으며 다양한 연구 분야에 활용되고 있다. 이번 연구는 한반도에서 수행된 고고지자기학적 연구결과들과 전 지구적 지자기 예측 모델에 의해 예측된 결과를 시험적 한반도 PSV (t-KPSV) 곡선과 비교하였으며, 모델의 결과를 바탕으로 동아시아 지역(한국, 서남 일본, 동부 중국)에서의 비쌍극자기장 분포와 AMJ 현상에 대해 분석하였다. 연구에 이용된 동아시아 지역의 고고지자기학적 자료들은 다음의 기준에 의하여 수집되었다: (1) 계산된 고고지자기 방향의 신뢰 범위(α_{95}) $\leq 7^\circ$; (2) 방향계산에 사용된 시료 수(N) ≥ 6 ; (3) 추정 연대의 신뢰 범위 ≤ 250 년. 다양한 종류의 지자기 예측 모델 결과들은 수집된 고고지자기학적 실험결과들과 RMS 편차 값을 비교하여 동아시아 지역의 과거 지자기 변화 예측에 가장 적합한 모델을 선별하였고, 이를 t-KPSV 곡선과 비교하였다. 그 결과, 비쌍극자기장이 강하게 분포했던 0 ~ AD 100년과 AD 1,400 ~ AD 1,650년에 t-KPSV 곡선의 정확도가 비교적 낮은 것으로 분석된다. 한편, 동아시아 지역에서 발생한 AMJ 현상은 모델 예측 결과의 속도와 곡률을 계산하여 확인하였다. 동아시아 지역의 AMJ는 유럽 지역에서 발생한 시기와 약 100 ~ 200년 정도 차이가 있으며, AMJ가 지역별로 다른 시기에 발생하였을 가능성을 제시한다.

주요어: 영년 변화, 비쌍극자기장, 고고지자기 급변

Jong-Hyun Park and Yong-Hee Park, 2014, A study of geomagnetic directional change in East Asia during the past 3000 years. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 2, p. 241-256

ABSTRACT: Regional high-resolution paleosecular variation (PSV) curve can be useful as a dating tool for archaeological artefacts and it can provide important information about global geomagnetic field behaviors including non-dipole field distribution and archeomagnetic jerk (AMJ). The existing global magnetic field prediction models (ARCH, CALS and SED series) with ability to predict continuous ancient geomagnetic field's change are constrained mainly by PSV data in Europe and have been used in various geophysical studies. The tentative-Korean PSV (t-KPSV) curve was compared with both the archeomagnetic data obtained from the Korean peninsula and the predicted curves by the available global models. In addition, we analysed the non-dipole field distribution and AMJ in East Asia (Korea, Southwest Japan and eastern China) based on the predicted results of global model. The archeomagnetic data used in this study passed the following reliability criteria: (1) confidence limit of archeomagnetic direction (α_{95}) $\leq 7^\circ$; (2) number of samples (N) ≥ 6 ; (3) uncertainty in age estimation ≤ 250 years. We compared RMS deviation values between the various results of global models and archeomagnetic data in East Asia to select the most appropriate model that are comparable with the t-KPSV curve. The non-dipole field distribution in East Asia derived from the global model shows that the periods of relatively low accuracy in t-KPSV correspond to those of strong non-dipole field, especially in the periods of 0 ~ AD 100 and AD 1,400 ~ AD 1,650. The AMJ phenomena in East Asia are confirmed by the minima of velocity and the maxima of curvature calculated from the global model. There are discrepancies in time between the East Asia and Europe by 100 ~ 200 years, indicating the AMJ phenomena might occur at different times regionally.

Key words: secular variation, non-dipole field, archeomagnetic jerk

[‡] Corresponding author: +82-33-250-8588, E-mail: aegis@kangwon.ac.kr

(Jong-Hyun Park and Yong-Hee Park, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea)

1. 서론

지구 표면에서 관측되는 자기장은 약 90%의 지구 내부의 가상 쌍극자로부터 발생하는 쌍극자기장(dipole field) 성분과 10% 이하의 지역적으로 불규칙하게 발생하는 비쌍극자기장(non-dipole field) 성분으로 구성되어 있다. 이러한 자기장 성분들은 시간에 따라 그 방향과 세기가 지속적으로 변화하는데, 이 때 수십 년에서 수천 년 정도의 주기를 갖는 지구자기장의 변화를 영년 변화(secular variation)라 한다. 특히, 비쌍극자기장의 영향에 의하여 시간뿐만 아니라 지역마다 다른 형태로 변하는 지자기 영년 변화에 대한 기록은 고고지자기학적 연구를 통하여 복원할 수 있다. 고고지자기학 연구는 화산암이나 고고학적 유적지, 호수 퇴적물 등이 주된 연구 대상이 되며 시료에 기록된 잔류자화를 추출하여 과거 지구자기장 방향 및 세기에 대한 연구나 고고학적 유적의 연대 측정 등에 적용되고 있다(Le Goff *et al.*, 2002; Gómez-Paccard *et al.*, 2006).

지구자기장 관측은 17세기 영국에서부터 시작했으며, 그 이전 시기의 지자기 변화에 대한 연구는 고지자기학과 고고지자기학적 연구를 통해 수행되어 왔다. 프랑스에서는 Thellier (1938)에 의해 처음 고고지자기 연구가 시작되었으며, 이후 많은 학자들에 의해 서유럽 지역에 대한 영년 변화 연구가 활발히 수행되어 왔다(Bucur, 1994; Gallet *et al.*, 2002; Evans and Hoye, 2005). 따라서 서유럽의 대표적인 고고지자기학적 연구 결과들을 이용하여 영국(Zananiri *et al.*, 2007), 프랑스(Gallet *et al.*, 2002), 독일(Schnepf and Lanos, 2005), 이탈리아(Tema *et al.*, 2006), 불가리아(Kovacheva *et al.*, 2009), 그리스(De Marco *et al.*, 2008)의 고영년 변화 곡선(Paleosecular Variation Curve; PSVC)은 매우 정밀히 완성되었다. 최근에는 국가나 지역 단위의 고고지자기학적 자료를 종합하여 서유럽 지역의 지자기 변화를 예측하는 SCHA.DI.00 (Pavón-Carrasco *et al.*, 2008)의 개발을 시작으로, SCHA.DIF.3K (Pavón-Carrasco *et al.*, 2009)와 SCHA.DIF.8K (Pavón-Carrasco *et al.*, 2010) 모델들이 이전 모델을 기반으로 개발되었다. 또한 모델

을 구성하는 기본 자료를 세계 여러 나라로부터 축적하여 지난 3천 년간 전 지구적 지자기 예측 모델(global geomagnetic field prediction model)인 CALS3K.1 (Korte and Constable, 2003)과 ARCH3K.1 (Korte *et al.*, 2009), SED3K.1 (Korte *et al.*, 2009)이 개발되었으며, 계속해서 추가되는 자료들을 바탕으로 모델의 해상도를 발전시켜 가고 있다(Korte and Constable, 2011).

한편 국내에는 고고지자기학 연구의 대상이 되는 유적지의 아궁이 및 가마터가 많이 분포하고 있지만 현재 일부 지역의 연구 결과만 학계에 보고된 바 있어(Kim and Bea, 1983; Baag, 1996; Lee *et al.*, 2001; Sung, 2008, 2011; Yu *et al.*, 2010), 주변 국가인 일본과 중국에 비해 자료의 수가 매우 부족한 상황이다. Lee *et al.* (2001)은 서남 일본의 고영년 변화(Japanese Paleosecular Variation; JPSV) 곡선으로부터 시기별 가상 고지자기극(Virtual Geomagnetic Pole; VGP)을 계산하고 이를 다시 한반도의 기준위치(충북 충주; 128°E, 37°N)에서의 고영년 변화 자료로 한반도 시험적 고영년 변화(tentative-Korean Paleosecular Variation; t-KPSV) 곡선을 제시하였으나, 한반도와 서남 일본의 각 지역에서 나타나는 비쌍극자기장 영향의 차이를 반영하지는 못하였다. 이러한 문제로 인하여 고고지자기학적 연대 측정 과정에서 일부 시기에 대한 연대 결정에 오차가 발생하게 되며 자료의 신뢰도도 낮아지게 된다.

전 지구적 지자기 예측 모델의 신뢰도와 해상도는 반영된 기본 자료의 시·공간적인 고른 분포에 따라 그 수준이 향상될 수 있다(Korte *et al.*, 2009). 따라서 고해상도의 한반도 고영년 변화 곡선을 수립하기 위해서는 먼저 신뢰도 높은 자료의 축적이 필요하며, 이러한 노력은 동아시아 지역에 대한 지자기 예측 모델의 해상도를 높이는데 필수적이다. 이번 연구에서는 고고지자기학적 연대측정의 신뢰도가 특히 낮은 시기, 즉 우선적으로 자료 추가가 필요한 시기에 대한 정보를 확보하기 위하여 최신 버전의 전 지구적 지자기 예측 모델들을 비교·분석하였다. 그리고 여러 종류의 지자기 예측 모델들을 동아시아 지역의 고고지자기 결과들과 대비하여 가장 신뢰도

Table 1. Archeomagnetic results in Korea.

Location	Age (yr)	d (yr)	N	D (°)	I (°)	k	α_{95} (°)
Cheongju 2*	-745	80	11	341.7	49.7	225.9	2.9
Boryung	-500	100	48	356.1	53.0	193.8	1.5
Yongin 1	-100	100	8	1.7	55.3	136.5	4.8
Daejeon 1	100	100	25	6.7	57.1	69.7	3.5
Cheongju 3	100	100	62	8.7	54.6	85.5	2.0
Seoul*	150	100	53	1.2	49.7	81.1	2.2
Daejeon 2	200	100	36	13.9	55.3	191.0	1.7
Cheongwon	200	100	45	15.5	54.3	137.9	1.8
Cheonan 1	200	100	27	16.7	55.6	77.8	3.2
Yongin 2	300	100	42	17.0	46.3	85.9	2.4
Cheonana 2	300	100	13	16.7	47.6	111.5	3.9
Osan	350	100	49	7.0	43.7	189.6	1.5
Cheongju 4*	395	75	19	357.7	48.5	146.8	2.8
Cheonan 3	400	100	34	355.7	52.8	324.0	1.4
Hwaseong 1*	420	80	6	357.8	51.6	163.2	5.3
Hwaseong 2	450	100	101	352.5	48.5	131.1	1.2
Jinhea 1	500	200	20	351.0	56.2	157.7	2.8
Changwon 1*	560	70	13	3.5	54.1	121.5	4.0
Cheongju 5	1050	50	26	8.2	50.6	76.2	3.3
Hwasoon 1	1400	20	76	352.1	52.5	99.9	1.6
Hwasoon 2	1400	20	16	352.5	48.5	70.0	4.4
Boeun 1*	1475	25	23	0.1	43.3	311.3	1.7
Boeun 2*	1475	25	23	0.4	41.0	65.2	3.8
Jinhea 2	1600	200	25	5.2	49.7	175.0	1.9
Jinhea 4	1600	200	22	9.3	44.2	135.0	2.0
Jinhea 5	1600	200	17	4.8	48.4	215.6	2.0
Jinhea 6	1600	200	8	5.2	46.1	230.7	2.9
Jinhea 7	1600	200	20	1.3	49.1	131.7	2.4
Jinhea 8	1600	200	16	6.0	49.1	197.3	2.2
Yeongdong 1	1670	25	8	4.7	42.9	95.1	5.7
Jinhea 3	1680	50	26	6.1	49.4	143.6	2.0
Yeongdong 2	1700	25	13	9.1	44.9	251.6	2.6
Yangsan 1	1700	50	20	6.1	43.5	143.5	4.0
Yangsan 2	1700	50	17	359.2	41.5	267.4	2.5
Yeongdong 3	1730	25	21	3.2	49.6	103.2	3.1
Cheongju 6*	1790	40	13	355.7	54.9	273.2	2.5

Positive (negative) values in age represent AD (BC); d (yr) is the uncertainty in age estimation; N: number of samples used in mean calculation; D (°): mean declination; I (°): mean inclination; k: precision parameter; α_{95} (°): 95% confidence angles; asterisks (*) represent ^{14}C dates.

높은 모델을 선별해 t-KPSV 곡선과 비교함으로써 개선 구간을 제시하였으며, 추가적으로 모델의 예측 결과를 바탕으로 동아시아 지역에서의 비쌍극자기장의 변화와 고고지자기 급변(Archeomagnetic Jerk, AMJ) 등의 지자기 변화 특징들을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 전 지구적 지자기 예측 모델

전 지구적인 과거 지구자기장의 변화를 추정하기 위하여 CALS, ARCH, SED 등의 모델들이 개발되었다. 이 모델들은 여러 나라에서 획득한 수많은 고고지자기학적 자료와 퇴적물에 기록된 고지자기 정보 등을 기본 자료로 이용하여 구성되어 있다(Korte *et al.*, 2009). 먼저 Korte and Constable (2003)에 의해 처음으로 제시된 CALS (Continuous model from Archeomagnetic and Lake Sediment data) 모델은 CALS3K.1 (Korte and Constable, 2003)과 CALS7K.2 (Korte and Constable, 2005), 두 종류로 나뉘며 각각 과거 3,000년과 7,000년 동안의 지구자기장에 대하여 예측한 모델이다. 모델 구성에 이용된 자료들은 고고지자기학적 자료와 호수 퇴적물에서 획득한 고지자기 자료가 모두 포함되어 있어 다양한 연구에서 이용되고 있다. ARCH 모델은 CALS 모델과는 달리 고고지자기학적 자료만을 이용한 모델이다. 따라서 고고지자기학적 자료가 풍부한 북반구 지역에 대하여 예측한 모델 결과의 해상도는 매우 높은 것으로 평가된다(Pavón-Carrasco *et al.*, 2011). SED 모델은 퇴적물에 기록된 고지자기 자료만을 이용하여 구성되었다. 퇴적물에 기록된 퇴적 잔류자화는 화산암이나 고고학적 유물에 기록된 열잔류자화보다 오랜 기간 동안 획득되었고 자성광물의 함량이 상대적으로 적은 동시에 복각 오차(inclination error)를 포함할 수 있으므로 자료의 질적인 면에서 신뢰도가 부족한 점이 있다. 따라서 퇴적물 자료만을 이용한 SED 모델은 비교적 낮은 해상도를 보이는 것으로 평가된다(Donadini *et al.*, 2009). 이번 연구에서는 세 종류의 모델 중 과거 3,000년간 지자기 예측에 있어 가장 최근 모델인 ARCH3K.1 (Korte *et al.*, 2009) 모델과 CALS3K.4 (Korte and Constable, 2011) 모델을 연구에 이용하였다. CALS3K.4 모델의 경우 CALS3K.3 모델을 기반으로 하여 추가된 새로운 자

료를 이용해 만든 가장 최근 모델이다. 그러나 CALS3K.4 모델에 의한 예측 결과는 신뢰 구간 자료가 포함되지 않아 이전 모델인 CALS3K.3에 의한 예측 값과 신뢰 범위를 추가적으로 연구에 이용하였다.

2.2 고고지자기학적 자료의 수집

한반도에서의 고고지자기학적 연구 결과들은 유럽이나 아시아의 주변 나라(일본)에 비해 상대적으로 자료의 수가 매우 적어, 현재 한반도 고영년 변화 곡선의 확립에 가장 결정적인 문제로 작용하고 있다. 최근 Yu *et al.* (2010)은 그 동안 국내에서 수행된 고고지자기학적 자료들 중 고고학적 편년 결과나 다른 종류의 절대 연대 측정 방법에 의한 결과가 일치하는 신뢰도 높은 자료들만을 수집하여 분석함으로써 한반도를 포함한 동아시아 지역에서도 AMJ가 존재하였음을 규명하 바 있다. 이번 연구에서는 Yu *et al.* (2010) 자료들을 포함하여, 그 후로부터 현재까지 수행된 고고지자기 연구 결과들 중 고고학적 문헌 또는 유물의 연대와 잘 일치하는 신뢰도 높은 결과들만을 추가적으로 수집하였다(표 1; 그림 1b). 일본의 고고지자기학 연구는 우리나라보다 더 이른 시기부터 시작되었으며 많은 화산들이 분포하고 있어 화산암이나 유적지의 가마 및 아궁이 터로부터 얻은 고고지자기 방향과 세기에 대한 자료가 비교적 풍부하다(Nagata *et al.*, 1963; Sasajima and Maenaka, 1966; Kinoshita, 1970; Hirooka, 1971, 1979, 1980, 1981, 1983; Hirooka and Aoki, 1981; Yoshihara *et al.*, 2003). 따라서 일본 남서부의 지자기 영년 변화 곡선(Hirooka, 1971)의 신뢰도는 매우 높은 것으로 평가된다. 또한 중국에서도 Wei *et al.* (1981, 1983, 1984), Batt *et al.* (1998), Shaw *et al.* (1999) 등의 고고지자기 연구가 수행되었다. 이번 연구에서 사용된 일본과 중국의 자료는 미국 스크립스 해양 연구소(Scripps institution of oceanography)에서 지원하는 전 세계 고지자기 데이터베이스(<http://www.earthref.org>)로부터 국제저널에 발표된 신뢰도 높은 자료만으로 수집되었다. 수집된 각 국의 고고지자기학적 결과들 중에서 95%의 신뢰도 구간(α_{95})이 7° 이하, 이용된 지점별 시료의 수(N)가 6개 이상, 추정 연대의 신뢰 범위가 250년 이하인 자료들만 본 연구에 이용되었다. 각 나라별 자료를 한반도의 충주(Chungju,

128°E, 37°N), 서남 일본의 교토(Kyoto, 135°E, 35°N)와 중국의 뤼양(Luoyang, 112°E, 34°N)의 위·경도를 이용하여 각각 기준점에서의 방향자료들로 변환하여 정리하였으며(그림 1a; 표 2, 3), 본 연구에 사용된 고고지자기 방향 자료의 수는 총 112개(한반도 36개, 일본 53개, 중국 23개)이다. 한편, 한반도에서 연구된 고고지자기 결과는 유적지의 아궁이 및 가마터 등에서 획득한 고고지자기의 방향에 대한 자료에만 한정되어있기 때문에 다른 나라의 호수 퇴적물이나 고고지자기 세기에 대한 자료는 이용하지 않았다.

3. 결과 및 토의

3.1 동아시아 지역에 대한 전 지구적 지자기 예측 모델 유효성

전 세계의 여러 나라에서 수행된 수많은 고고지자기학적 연구 결과들은 전 지구적 지자기 예측 모델을 구성하는 기본 자료로 이용되고 있으며, 특히 서

유럽을 포함한 유럽 대륙에서의 고고지자기학적 결과들이 자료의 수에 큰 비중을 차지하고 있다(Donadini *et al.*, 2009). 모델을 구성하는 자료에는 동아시아 지역에서 수행된 고고지자기학적 결과와 호수 퇴적물에서 얻은 결과들도 일부 포함되어 있으나, 이마저도 대부분 일본과 중국에서 얻은 결과들이 모델에 반영되어 있다. 따라서 모델 구성에 이용된 자료들은 지구상의 모든 지역에 균등하게 분포하지 않기 때문에 위·경도에 따라 모델에 의해 예측된 결과의 해상도나 신뢰도가 다르게 나타날 수 있다. 또한 모델에 이용되는 자료의 종류도 각각 다르게 구성되어 있어 동아시아 지역에 대한 다양한 특징을 갖는 모델들의 유효성을 평가할 필요가 있다. 따라서 한반도, 일본, 중국에서 획득한 고고지자기학적 자료들을 이용하여 지난 3,000년간 전 지구적 지자기 예측 모델인 ARCH3K.1과 CALS3K.3, CALS3K.4 모델의 예측 결과와 비교하였다.

그림 2는 한반도 지역에서 모델에 의한 지자기 변화 예측 곡선으로 지난 3,000년 동안 편각과 복각의

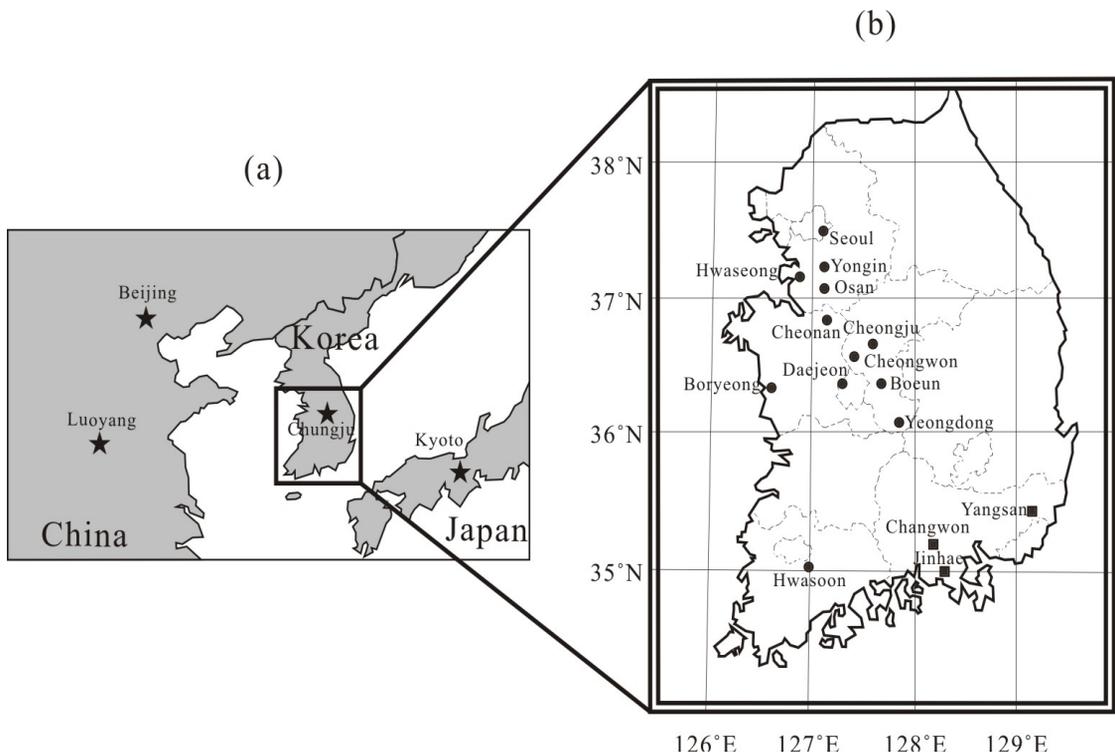


Fig. 1. (a) Location map of reference regions (★) in East Asia and (b) archeological sites at which previous data of Yu *et al.* (2010) (●) and new data in this study (■) were obtained.

Table 2. Archeomagnetic results in Japan.

Lat. (°N)	Long. (°E)	Age (yr)	d (yr)	N	D (°)	I (°)	α_{95} (°)	Reference
36.32	136.37	580	20	9	337.5	56.6	1.5	a
36.32	136.37	580	20	9	337.8	61.8	1.6	a
35.75	139.42	590	95	7	357.5	40.9	5.2	d
36.70	137.07	725	25	13	350.7	54.4	1.5	c
36.70	137.07	725	25	13	350.0	53.0	2.5	c
36.62	136.85	725	25	11	344.5	52.7	1.0	b
34.90	136.53	775	25	11	349.5	52.1	1.9	c
34.90	136.53	775	25	9	349.8	50.9	2.0	c
34.90	136.53	775	25	9	347.5	53.0	2.2	c
36.58	138.87	775	25	13	343.6	55.9	3.2	c
37.40	138.77	790	20	16	337.7	56.2	2.4	c
35.05	135.73	790	10	23	346.5	49.6	1.4	a
35.05	135.73	790	10	9	349.5	48.4	2.2	a
34.69	139.44	838	0	7	347.2	50.9	3.0	d
35.37	137.08	850	50	15	347	50.9	1.7	c
35.37	137.08	850	50	18	346.8	56.6	2.0	c
35.48	138.70	864	0	7	347.9	46.7	5.0	d
35.37	137.08	990	10	13	345.4	50.8	1.8	c
35.37	137.08	1010	10	11	350.4	46.6	4.8	c
35.12	137.10	1025	25	9	340.8	48.8	1.2	a
35.37	137.08	1030	10	19	349.0	51.5	1.9	c
35.37	137.08	1050	10	15	349.5	50.7	0.9	c
35.12	137.12	1062.5	12.5	10	345.9	52.3	3.1	c
35.07	137.07	1075	25	14	342.5	65.5	3.2	c
34.69	139.40	1085	30	8	356.0	33.3	5.5	d
35.37	137.08	1150	25	11	3.5	64.9	1.3	c
35.15	136.98	1162.5	12.5	12	357.0	55.9	3.9	a
35.93	136.72	1175	25	20	357.5	57.9	1.6	a
35.93	136.72	1175	25	19	7.0	58.8	1.6	a
35.93	136.72	1175	25	14	3.6	60.3	1.9	a
35.93	136.72	1175	25	12	359.6	57.7	2.6	a
35.37	137.08	1187.5	12.5	12	0.0	54.6	0.9	c
35.37	137.08	1187.5	12.5	11	358.8	61.2	1.2	c
35.37	137.08	1187.5	12.5	13	2.5	58.4	4.0	c
35.37	137.08	1300	20	12	2.2	56.7	3.6	c
35.37	137.08	1330	30	14	6.7	58.4	1.0	c
34.75	139.35	1330	10	8	3.7	50.5	4.3	d
37.43	137.22	1350	50	40	6.8	56.0	2.0	a
34.69	139.41	1435	15	15	12.0	42.8	3.3	d

Table 2. continued.

Lat. (°N)	Long. (°E)	Age (yr)	d (yr)	N	D (°)	I (°)	α_{95} (°)	Reference
35.30	137.15	1525	25	19	6.2	42.9	1.4	a
35.35	137.17	1530	0	16	6.2	43.5	1.9	a
36.20	136.42	1635	35	19	7.7	47.7	3.0	a
33.18	128.87	1650	50	17	0.6	42.6	2.1	a
33.18	128.87	1650	50	16	356.7	43.8	2.3	a
34.74	139.43	1684	0	7	4.4	40.0	4.0	d
34.63	133.32	1670	10	23	6.6	35.6	2.1	a
34.63	133.32	1700	10	13	359.4	40.2	3.1	a
36.20	136.42	1700	25	10	5.3	41.1	3.9	a
34.73	139.41	1777	0	15	4.3	41.0	4.1	d
36.20	136.42	1830	10	11	358.2	45.9	2.3	a
36.40	136.48	1830	10	20	4.0	46.4	2.7	a
33.18	129.90	1860	20	36	355.9	48.0	1.7	a
34.73	139.38	1950	0	8	350.0	48.1	2.3	d

Abbreviations are same as table 1. Reference: (a) Hirooka (1979), (b) Hirooka and Aoki (1981), (c) Hirooka (1983), (d) Yoshihara *et al.* (2003).

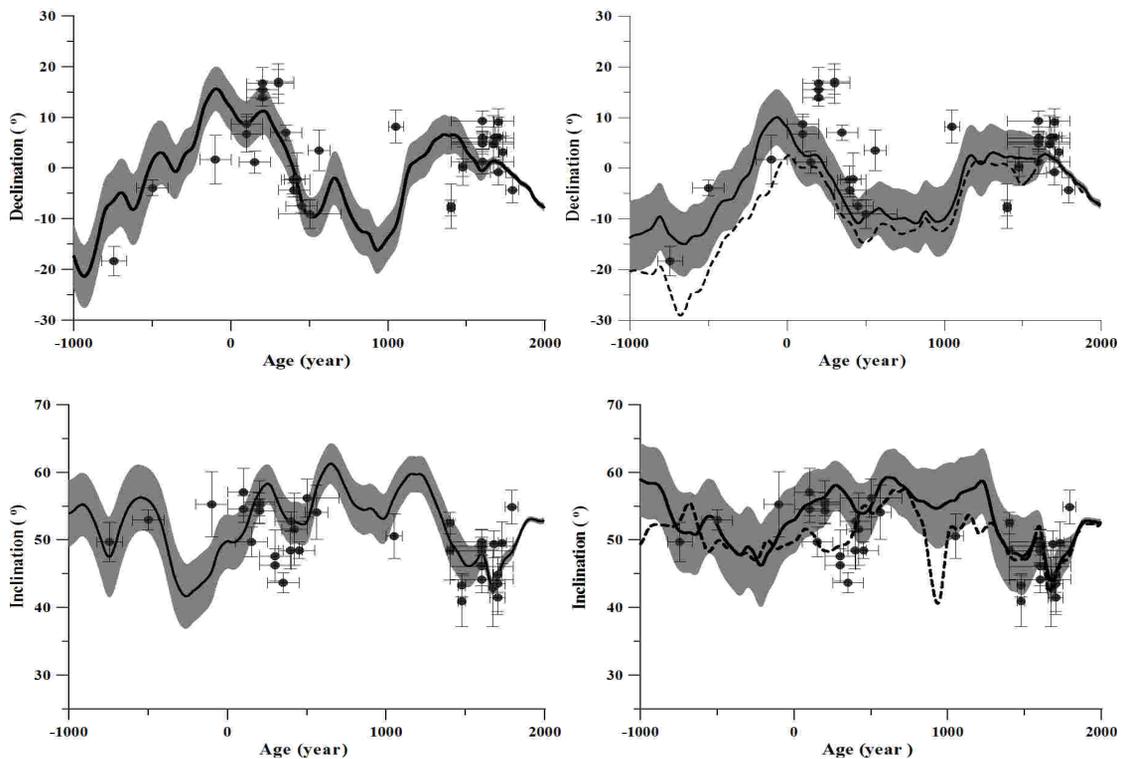


Fig. 2. Comparison between archeomagnetic results (circles) and prediction curves from ARCH3K.1 (left), CALS3K.3 (solid line, right) and CALS3K.4 (dash line, right) during the last 3,000 years in Korea.

Table 3. Archeomagnetic results in China.

Lat. (°N)	Long. (°E)	Age (yr)	d (yr)	D (°)	I (°)	α_{95} (°)	Reference
34.2	117.2	-899	128	339.4	61.4	2.0	b
35.1	109.0	-620	150	2.8	55.6	0.8	c
30.4	113.7	-350	130	335.5	51.3	5.5	b
34.3	109.3	-206	10	343.9	32.2	2.4	c
34.7	107.8	-91	115	2.3	32.9	2.2	b
34.7	112.7	-91	115	0.9	32.7	2.2	a
34.7	113.6	7	213	11.1	40.4	3.7	a
34.8	112.2	7	213	11.4	40.6	3.7	b
34.7	112.4	123	98	2.6	43.7	1.8	b
34.7	109.1	260	40	6.5	49.4	1.8	b
34.7	119.1	460	74	336.5	55.8	1.3	b
34.7	107.8	763	145	348.4	60.1	2.3	b
35.1	109.0	790	170	347.4	56.1	2.1	c
35.1	109.0	900	50	346.2	49.3	3.0	c
35.1	109.0	1000	50	345.6	47.0	4.5	c
34.2	112.4	1044	84	347.6	57.2	2.1	b
35.1	109.0	1100	50	355.0	48.1	5.4	c
35.1	109.0	1170	60	355.7	55.2	3.1	c
35.1	117.2	1175	60	355.6	38.8	1.8	b
29.3	109.0	1203	76	2.6	51.6	1.9	b
35.1	109.0	1300	50	3.7	50.5	3.7	c
28.1	109.2	1320	49	4.3	52.4	1.4	b
29.3	113.5	1506	138	357.2	42.9	2.0	b

Abbreviations are same as table 1. Reference: (a) Wei *et al.* (1981), (b) Wei *et al.* (1984), (c) Batt *et al.* (1998).

변화를 신뢰 범위와 함께 나타내었다. 비교 대상인 모델 예측 결과들의 경우, 편각은 ARCH3K.1 모델이 CALS3K.3와 CALS3K.4 모델에 비해 일부 구간을 제외하면 전체적으로 약간 큰 값(시계방향으로 편향)을 보이며, CALS3K.x 모델 간에는 기원 전 자료의 경우 최대 약 15°의 차이를 보이나 기원 후 자료에서는 매우 유사한 값을 보였다. 복각은 ARCH3K.1과 CALS3K.x가 유사한 변화 형태를 보이지만 ARCH3K.1이 신뢰도 범위와 변화율을 고려했을 때 높은 해상도를 보인다. CALS3K.x 모델들 사이에서는 CALS3K.4 모델의 결과가 전체적으로 낮은 복각을 보이고 AD 900년에 매우 큰 복각의 차이를 보인다. 한반도에서 수행된 고고지자기 결과(검은 점)는 추정연대의 신뢰 범위(가로 막대)와 α_{95} (세로 막대)를 포함하여 나

타내었고, 대부분의 결과는 모델에 의한 예측 결과의 신뢰 범위 안 또는 주변에 분포한다. 그러나 편각에서 0~AD 300년까지의 고고지자기 결과 중 일부 자료는 모델에 의한 예측 곡선에서 뚜렷이 벗어나 있으며, 특히 ARCH3K.1 모델보다는 CALS3K.x 모델들과 더 큰 차이를 보인다. 또한 AD 1,400, 1,600~1,750년의 고고지자기 결과들도 모델의 예측 곡선과 비교하여 대부분의 자료에서 차이가 나타난다. 복각의 경우, AD 300~400년의 고고지자기 결과와 세 종류의 모델들보다 낮게 분포하고 있다. 고고지자기 자료와 모델에 의한 예측 결과들 사이의 차이를 정량적으로 해석하기 위하여 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Deviation, RMSD) 값을 이용하였다. 각 국가별 편각과 복각의 RMSD 값을 표 4에 표시하

였으며, 한반도의 경우 편각은 ARCH3K.1 모델, 북각은 CALS3K.4 모델이 가장 작은 값을 보였다.

한반도의 주변 국가인 일본 남서부와 중국 동부의 고고지자기 자료들을 지자기 예측 모델과 비교한 결과를 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다. 한반도의 경우와 같이 ARCH3K.1 모델이 CALS3K.x 모델에 비해 비교적 좁은 오차범위를 나타내며 더 높은 해상도를 갖는 것으로 보인다. CALS3K.x 모델 사이의 결과에서도 편각과 북각 모두 CALS3K.4 모델의

예측 결과가 비교적 작은 값을 보인다. 고고지자기 자료와 비교해 보았을 때, 일본은 몇 개의 측정값을 제외한 대부분의 자료가 모델에 의한 예측 곡선과 잘 일치하였으며(그림 3) 세 나라 중 가장 작은 RMSD 값을 보였다(표 4). 이는 세 나라 중 일본의 자료 수가 가장 풍부하며 고해상도의 고고지자기학적 자료들이 모델에 잘 반영된 결과로 판단된다. 반면, 중국은 일본에 비해 일치하는 자료의 수가 적으며, 측정치와 예측치 사이의 비교에서는 편각에서 매우 큰

Table 4. RMS (root mean square) deviation values between archeomagnetic data and global geomagnetic prediction models.

		ARCH3K.1	CALS3K.3	CALS3K.4
Korea	Declination (°)	7.63	8.45	10.27
	Inclination (°)	4.60	5.05	4.20
Japan	Declination (°)	3.52	3.66	3.87
	Inclination (°)	3.59	3.77	3.80
China	Declination (°)	8.71	9.17	8.81
	Inclination (°)	5.36	9.49	7.60

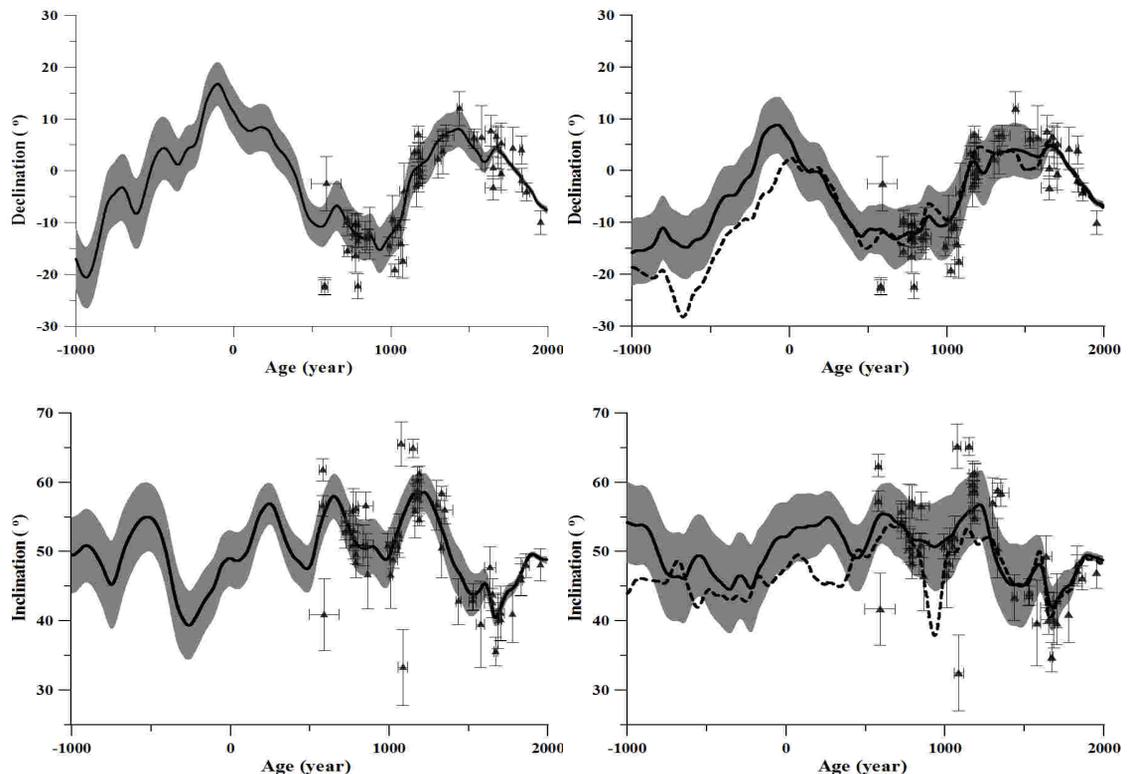


Fig. 3. Comparison between archeomagnetic results (triangles) and prediction curves from ARCH3K.1 (left), CALS3K.3 (solid line, right) and CALS3K.4 (dash line, right) during the last 3,000 years in Japan.

차이를 보인다(그림 4). 각 국가별 비교를 종합하여 보면, 전 지구적 지자기 예측 모델들과의 오차는 한반도의 복각을 제외하고 모두 ARCH3K.1에 의한 예측 결과가 고고지자기학적 자료와 가장 작은 RMSD 값을 보였다(표 4).

3.2 동아시아 지역의 비쌍극자기장 분포

지구자기장은 쌍극자기장과 지역적으로 불규칙하게 발생하는 비쌍극자기장의 상호 영향에 따라 그 방향과 세기가 변하며 회유나 역전 현상이 발생되기도 한다. 특히 자세히 알려지지 않은 비쌍극자기장의 변화는 고고지자기학 연구 과정에서 발생하는 오차에도 영향을 미칠 수 있다. 지구의 총 자기장 벡터는 쌍극자기장 성분과 비쌍극자기장 성분의 합으로 구성되어 있어 총 자기장과 쌍극자기장 성분 간의 차이는 비쌍극자기장의 영향이 크고 작음을 지시한다. 현재 이용 가능한 전 지구적 지자기 예측 모델은 총 지구자기장의 방향과 세기의 결과만 제공한다.

따라서 쌍극자기장 성분만을 추출해 내어 동아시아 지역에서의 시·공간적인 비쌍극자기장 영향을 분석해 보기 위해 GEOMAGIA V.2 (Donadini *et al.*, 2006; Korhonen *et al.*, 2008) 프로그램을 이용하였다(<http://geomagia.ucsd.edu/>). GEOMAGIA V.2 프로그램은 GEOMAGIA50의 자료를 바탕으로 구성되어 있으며 사용자가 지정하는 위·경도에서의 과거 지자기 예측 곡선을 얻어 낼 수 있다. 또한 Gauss 계수(g_l^m)의 등급을 선택하여 쌍극자기장 성분의 결과만을 얻어 낼 수도 있다.

$$g_l^m(t) = \sum_{k=1}^k g_l^{m,k} M_k(t)$$

$M_k(t)$: cubic B-spline basis functions

$g_l^{m,k}$: standard time-dependent Gauss coefficient (g_l^m)

그림 5는 총 자기장 성분과 쌍극자기장 성분의 방

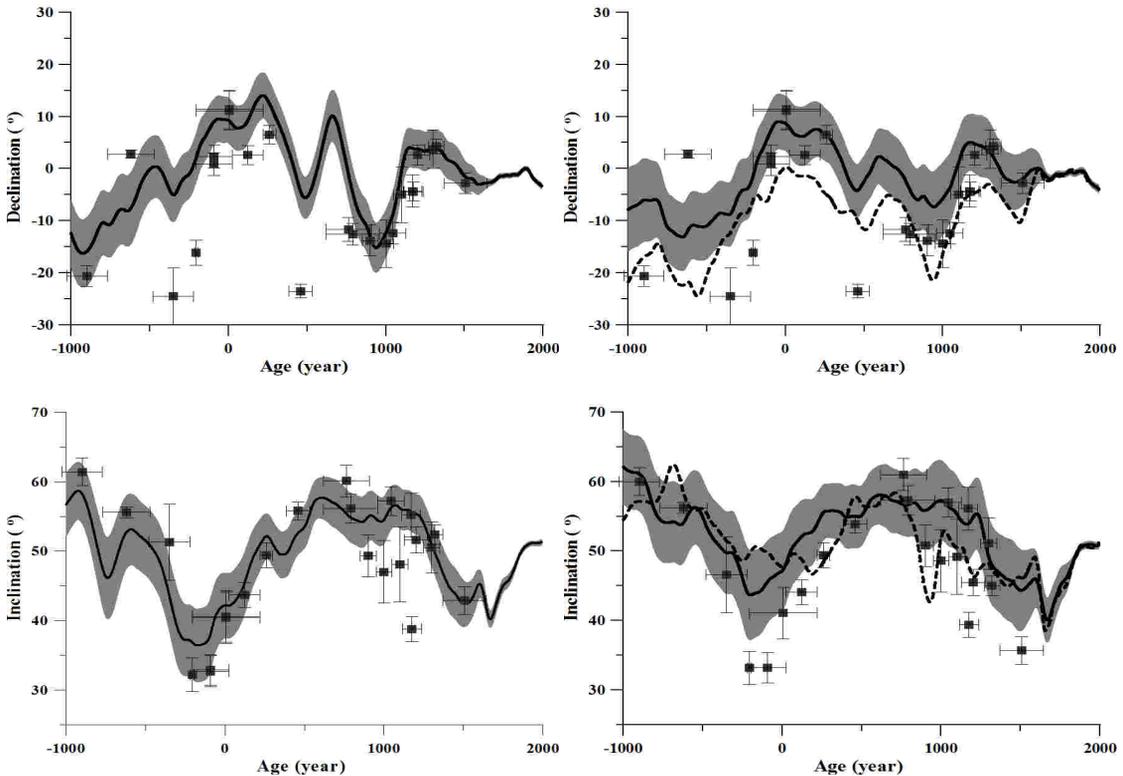


Fig. 4. Comparison between archaeomagnetic results (squares) and prediction curves from ARCH3K.1 (left), CALS3K.3 (solid line, right) and CALS3K.4 (dash line, right) during the last 3,000 years in China.

향적인 차이에 의한 지난 3,000년간의 비쌍극자기장 변화를 나타내었다. 비쌍극자기장의 공간적인 분포에 의한 영향을 고려해보기 위해 한반도의 충주, 서남 일본의 교토, 중국의 베이징(Beijing)과 뤼양 지역에서 비쌍극자기장 변화를 분석하였다(그림 1a). 네 지역 사이에서 비쌍극자기장 분포의 변화는 전체적으로 유사하지만 지리적으로 인접한 지역(충주와 교토, 베이징과 뤼양) 사이에서 더욱 비슷하며 점차 멀어질수록 차이를 보인다(그림 5). 네 지역에서 비쌍극자기장의 영향이 큰 기간은 모두 비슷한 시기인 것으로 분석된다. 특히 BC 400~AD 300년의 시기에 공통적으로 그 영향이 크며 최근 약 200년 동안 비쌍극자기장의 영향이 지속적으로 증가하였다. 또한 0~AD 300년과 AD 700년에는 중국 대륙에서, BC 400, AD 1,000년에는 한반도와 서남 일본에서 비쌍극자기장의 영향이 상대적으로 크게 나타나며, 지역적인 차이에 따른 비쌍극자기장의 영향이 각각 다르게 분포했던 것으로 분석된다. 총 자기장과 쌍극자기장의 방향 차이가 5°이상의 연대를 표 5에 나타내었다. 전체적인 동아시아 지역의 비쌍극자기장 영향은 약 BC 730, BC 500~AD 300, AD 600~

700, AD 1,000, AD 1,400~1,600, AD 1,900년경에 비교적 강했던 것으로 분석되며, 약 500년 정도로 반복되는 주기성을 보인다.

한편 시간에 따른 비쌍극자기장의 세기 변화도 비쌍극자기장의 영향을 반영할 것으로 예상되며 총 자기장의 세기 중 비쌍극자기장의 세기가 차지하는 비율을 시간에 따라 나타내었다(그림 6). 비쌍극자기장 세기의 비율이 증가할수록 방향적인 차이도 커지는 양의 상관성을 보이지만 비쌍극자기장의 세기가 강한 모든 시기마다 방향적으로도 많은 차이를 보이지는 않는다. 이러한 결과는 총 자기장의 방향이 쌍극자기장과 비쌍극자기장의 벡터 합으로 나타나고 두 벡터 각각의 세기가 시기적으로 변하기 때문인 것으로 해석된다. 최근 약 200년 전부터 비쌍극자기장의 세기는 상대적으로 급격히 증가하고 있으며 총 자기장 방향과 쌍극자기장의 방향 차이도 증가하는 것으로 보아 비쌍극자기장의 영향은 계속 증가하고 있는 것으로 판단된다. 동아시아 지역에서 공간적인 비쌍극자기장의 상대적인 영향은 약 BC 500~AD 600년까지 일본이 위치한 해양 쪽에서 한반도를 거쳐 중국 대륙 내부로 향할수록 점차 약해

Table 5. Periods of strong non-dipole field.

(yr)

	BC 735±55	BC 210±290	AD 660±50	AD 980±100	AD 1525±135	AD 1905±95
Chungju	BC 735±55	BC 210±290	AD 660±50	AD 980±100	AD 1525±135	AD 1905±95
Kyoto	BC 745±55	BC 240±280	AD 655±35	AD 975±125	AD 1535±145	AD 1910±90
Beijing	BC 725±65	BC 55±415	AD 665±85	AD 950±90	AD 1520±150	AD 1900±100
Louyang	BC 730±60	BC 65±395	AD 660±70	AD 975±65	AD 1475±55	AD 1895±105

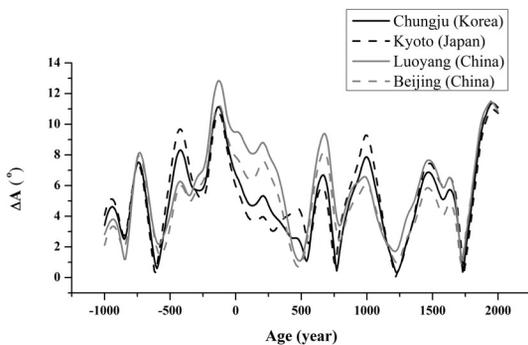


Fig. 5. The variation of non-dipole field inferred from the directional difference (ΔA) between total geomagnetic field and dipole field in Korea (black solid line), Japan (black dash line), Luoyang (grey solid line) and Beijing (grey dash line) during the last 3,000 years.

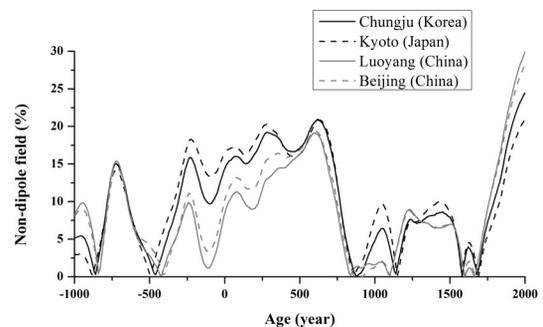


Fig. 6. The variation of non-dipole field intensity inferred from the rate between total geomagnetic field intensity and dipole field intensity in Korea (black solid line), Japan (black dash line), Luoyang (grey solid line) and Beijing (grey dash line) during the last 3,000 years.

지는 반면, 약 AD 1,700년부터 현재까지는 반대의 경향을 나타내며 동아시아 지역에서 시간에 따른 비쌍극자기장의 상대적 영향의 변화를 반영한다.

3.3 t-KPSV 곡선의 유효성 검토

앞서 우리는 현재 고고지자기 연대측정에서 표준 곡선으로 일부 사용되는 한반도의 시험적 영년 변화 (t-KPSV) 곡선의 전체적인 변화 경향은 이 지역의 지자기 영년 변화를 유사하게 표현했다고 할 수는 있지만 불규칙하게 분포하는 비쌍극자기장의 영향까지 고려하지는 못한다고 언급하였다. 한반도에서 수행될 수 있는 고고지자기학적 연구 대상은 일부 고고학적 유적지에 한정되어 있어 이를 단기간에 완성하기는 불가능하므로 전 지구적 지자기 예측 모델을 이용한 동아시아 지역에서 시간에 따른 비쌍극자기장의 분포를 분석하여 t-KPSV 곡선에서 우선적으로 수정이 요구되는 구간을 확인해 보았다.

3.1절에서 기술한 바와 같이 글로벌 모델 중

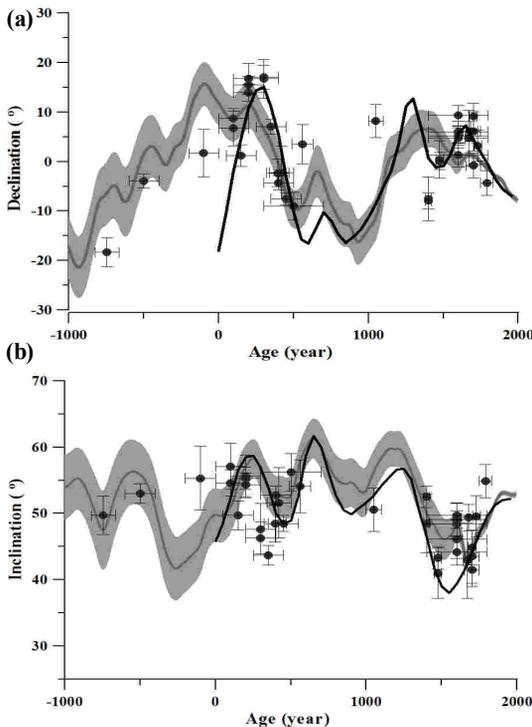


Fig. 7. Comparison among the prediction curve from ARCH3K.1 (grey line), t-KPSV curve (black line) and archeomagnetic data (black circles) in Korea: (a) declination, (b) inclination.

ARCH3K.1 모델이 다른 모델들에 비하여 한반도 영년 변화를 가장 잘 반영하는 것으로 판단된다. 따라서 ARCH3K.1 모델과 그 동안의 고고지자기학적 연구를 통해 얻은 결과들 중 신뢰도 높은 자료들을 t-KPSV 곡선과 비교하였다. 그림 7에서 t-KPSV 곡선(검은 선)은 과거 2,000년 동안의 한반도 지자기 방향의 변화만을 나타내며 기원전의 영년 변화에 대한 정보나 변화에 대한 비교는 불가능하여 기원후의 자료들만 ARCH3K.1 모델의 결과(회색 선)와 비교하였다. 편각에서 모델의 결과와 t-KPSV 곡선 사이는 일부 시기에서 조금씩 차이를 보인다(그림 7a). 0년에 t-KPSV 곡선은 모델의 결과와 큰 차이를 보이지만 AD 200년으로 향하면서 차이가 감소한다. 또한 t-KPSV 곡선은 AD 500~700년에서 모델의 결과보다 작은 편각 값을 보이고, AD 1,200, 1,600~1,750년경에는 큰 편각 값을 보인다. t-KPSV의 복각은 0~AD 800년까지 모델의 신뢰 범위 내에서 변화하여 잘 일치하지만, 그 후로 1,700년경까지는 전체적으로 모델의 결과보다 작은 복각 값을 갖는다(그림 7b). 한반도에서 수행된 고고지자기학적 실험결과(검은 점)들은 추정 연대의 신뢰 범위, α_{95} (검정바)를 포함하여 t-KPSV 곡선과 비교하였다(그림 7). 다수의 고고지자기학적 결과들이 t-KPSV 곡선과 모델 예측 곡선 상에 분포하지만 0~AD 300년 시기에 t-KPSV 곡선은 고고지자기학적 결과보다 약 5° 이상 작은 편각을 나타내며, 이는 이미 선행되었던 연구(Lee *et al.*, 2001)에서도 언급된 바 있다. 복각에서도 이 시기의 고고지자기학적 결과들은 대부분 t-KPSV 곡선과 모델 예측 곡선보다 작은 값을 보인다. 또한 AD 1,400년에 t-KPSV 곡선이 고고지자기 편각 값과 큰 차이를 보이고, 1,600~1,750년 사이는 고고지자기 결과에 비해 작은 복각을 보여 수정이 필요한 시기로 제시된다. 그림 8은 ARCH3K.1 모델의 예측 결과와 t-KPSV 곡선 간에 시간에 따른 지구 자기장의 방향을 차이를 나타내었다. 0~AD 100, AD 1,400~1,650년경에 큰 차이를 보였으며 특히 0~AD 100년에는 최대 약 20°의 큰 차이가 있는 것으로 분석되었다. t-KPSV 곡선이 ARCH3K.1 모델과 큰 차이를 보이는 시기들은 비쌍극자기장의 영향(총 자기장 방향과 쌍극자기장 방향 차이)의 차이가 강했던 시기(그림 5)와 유사하다. 따라서 지역에 따라 다르게 나타나는 비쌍극자기장의 영향이 큰 시기일

수록 t-KPSV의 정확성이 떨어진다는 해석을 뒷받침하며, 향후 이 시기에 대한 고고지자기학적 연대 결정 과정에서 주의가 필요한 것으로 판단된다.

3.4 고고지자기 급변(archeomagnetic jerk, AMJ)

AMJ 현상이란, 지구 자기장의 방향이 지질학적으로 매우 짧은 시기(100년 이하) 동안 매우 급격하게 변하는 현상으로 이때 지구 자기장의 영년 변화 속도는 최저가 되고 방향의 변화는 급격히 일어나는 것으로 알려져 있다(Gallet *et al.*, 2003). 서유럽에서는 Gallet *et al.* (2003, 2005)에 의하여 AMJ 현상은 BC 800, AD 200, 750, 1,400년경에 발생한 것으로 분석되었다. 그 후, 서유럽 지역뿐만 아니라 전 세계 여러 지역에서도 AMJ 현상이 비슷한 시기에 발생된 것으로 보고되었으며(Gómez-Paccard *et al.*, 2006, Pavón-Carrasco *et al.*, 2010), 최근 동아시아 지역에서도 발생된 것으로 제시된 바 있다(Yu *et al.*, 2010). Yu *et al.* (2010)은 한반도에서 도출된 신뢰성 높은 고고지자기 자료를 선별한 후, Bauer plot에 나타내어 방향의 변화 양상이 급격하게 나타나는 구간을 확인하여 한반도에서의 AMJ는 BC 745, AD 300, AD 1,400~1,700년경에 발생하였다고 해석하였다. 이번 연구에서는 보다 보편적이며 정량적인 방법에 의한 AMJ의 발생 시기 분석을 위해 ARCH3K.1 모델의 결과에 의한 한반도, 일본과 중국에서의 영년 변화 속도와 곡률과의 관계를 분석하였다. 그림 9a는 한반도 지역에서 모델이 예측한 곡선으로부터 계산한 지자기 변화의 속도와 곡률의 변화이다. 방향적인 급변은 곡률 변화 그래프(그림 9a, 아래)에서 5 번의 주된 peak가 관찰되었으며 같은 시기에 속도 그래프(그림 9a, 위)의 음의 peak와도 정확히 일치

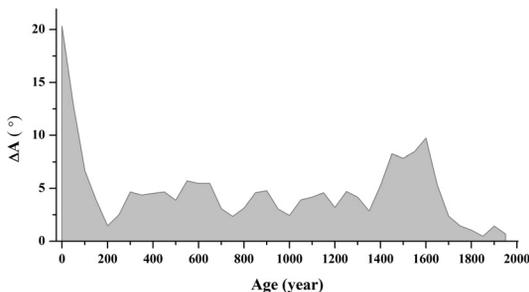


Fig. 8. The directional difference (ΔA) between the prediction curve of ARCH3K.1 and t-KPSV curve.

하였다. 또한 일본과 중국지역에서의 지자기 변화를 같은 방법을 이용하여 분석한 결과(그림 9b, 9c) 방향적인 급변이 있을 때 속도가 가장 느려지는 시기는 일치하며 이 시기에 AMJ 현상이 발생한 것으로 판단된다. 한반도에서 확인된 AMJ의 연대는 BC 940, 280, AD 650, 850, 1,600년으로, Yu *et al.* (2010)의 연구에서 확인된 발생 시기와는 차이를 보인다. 이전 연구(Yu *et al.*, 2010)에서 확인된 AMJ는 고고지자기 자료를 이용하여 부분적인 PSV 곡선을 그린 뒤 판별하였으나, 자료의 수가 충분하지 못하여 해

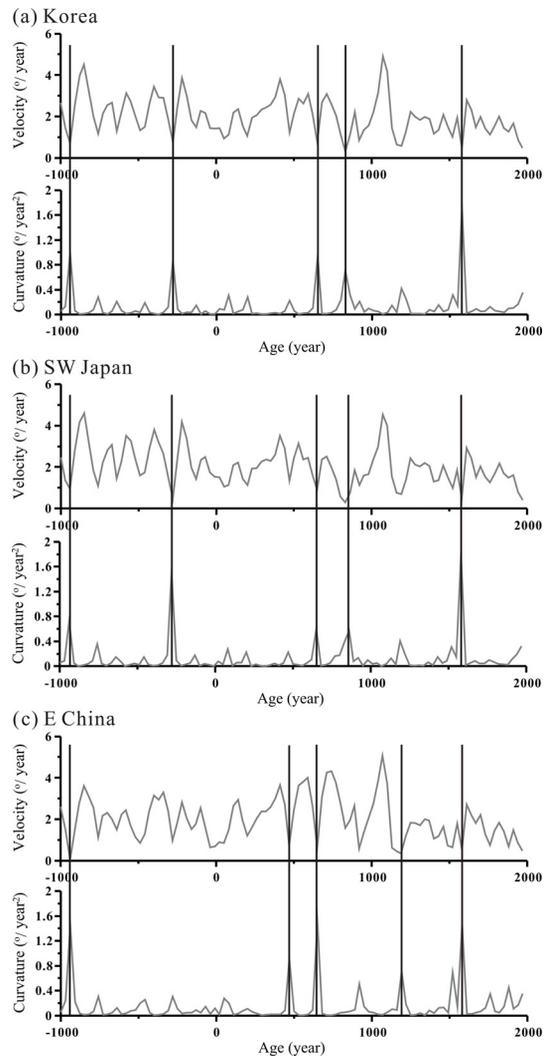


Fig. 9. Changes in velocity and curvature of the prediction curve from ARCH3K.1 model in Korea (a), Japan (b) and China (c). The threshold of Archeomagnetic Jerk: curvature $\geq 0.6^\circ/\text{years}^2$, velocity $\leq 1^\circ/\text{years}$.

상도가 떨어진 것으로 해석된다. 또한 일본에서는 BC 940, 280, AD 650, 870, 1,550년에 발생된 것으로 분석되며(그림 9b) 한반도에서 발생된 시기와 거의 비슷하였다. 그러나 중국의 결과(그림 9c)에서는 한반도와 일본에서 관찰된 BC 280년경의 AMJ가 확인되지는 않았으며 다른 시기에 발생한 AMJ (BC 940, AD 500~650, 1,200, 1,580)도 한반도와 일본과는 부분적으로 차이를 보인다. 따라서 AMJ 현상은 전 지구적으로 동시에 발생하기보다는 지역에 따라 시기적인 차이가 있는 것으로 해석된다.

4. 결론

고고학적 유물에 대한 연대 측정 방법 중 하나인 고고지자기학적 연대 측정법의 정확도를 향상시키기 위해서는 t-KPSV 곡선의 문제점을 파악하고, 이를 점차적으로 개선해 나아가야 한다. 본 연구에서는 전 세계에서 수집한 고해상도의 고고지자기학적 자료를 바탕으로 구성된 전 지구적 과거 지자기 예측 모델과 각 국에서 수행된 신뢰도 높은 고고지자기학적 자료들을 이용하여 동아시아 지역에서의 과거 3,000년 동안 지자기 변화 특성을 분석하고, t-KPSV의 문제점과 수정 구간에 대하여 제시하였다.

다양한 종류의 지자기 예측 모델 중, ARCH3K.1 모델이 각 국에서 수행된 고고지자기학적 결과들과 상대적으로 작은 오차를 보이며 동아시아 지역의 과거 지자기 예측에 가장 적절한 모델인 것으로 판단된다. 또한 동아시아 지역에서의 비쌍극자기장의 영향(총자기장과 쌍극자기장의 방향 차이)은 BC 730, BC 500~AD 300, AD 600~700, AD 1,000, AD 1,400~1,600, AD 1,900년경에 증가하였으며, 이런 현상은 약 500년 정도의 주기를 갖는 것으로 분석된다. 또한 이 시기들은 t-KPSV 곡선에서 우선적으로 수정이 필요한 시기(0~AD 100, AD 1,400~1,650)와도 일치하였다. 즉, 서남 일본의 영년 변화 곡선을 바탕으로 direction-pole-direction 법으로 계산하여 만든 t-KPSV 곡선은 비쌍극자기장의 지역적인 차이를 효과적으로 반영하지 못하였으며 자료들과의 오차가 큰 시기들이 나타난다. 따라서 t-KPSV 곡선은 더 많은 고해상도의 고고지자기학적 자료의 축적을 통하여 더욱 정밀한 수정이 필요하며, 이는 향후 더욱 활발한 고고지자기학적 연구를 통해 가능할

것이다. 한편 ARCH3K.1 모델을 이용하여 AMJ 현상에 대해 분석한 결과, 유럽에서 발생한 시기와의 차이를 보였으며 동아시아 지역 내에서도 서로 다른 시기에 발생한 것으로 나타나 AMJ가 전 지구적으로 동시에 발생하지는 않았을 가능성을 제시한다.

사 사

이 논문은 2010년도 한국연구재단의 일반연구지원사업(NRF-2010-0023036)과 2013년도 강원대학교 학술연구조성비(C1009887-01-01)의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다. 논문을 꼼꼼히 검토하고 발전적인 의견을 제시해주신 충남대학교 김승섭 교수님, 한국해양과학기술원 김원년 박사님, 부산대학교 손문 교수님께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Baag, C., 1996, Archeomagnetic study of white porcelain kiln, Mireog-ri, Jungweon-gun, Chungbuk and Bauer plot from 7 kilns in south Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 32, No. 3, 313-323 (in Korean with English abstract).
- Batt, C., Meng, Z. and Noel, M., 1998, New archeomagnetic studies near Xian, China. *Archaeometry*, 40, 169-175.
- Bucur, I., 1994, The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 87, 95-109.
- De Marco, E., Spatharas, V., Gómez-Paccard, M., Chauvin, A. and Kondopoulou, D., 2008, New archaeointensity results from archaeological sites and variation of the geomagnetic field intensity for the last 7 millennia in Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 578-595.
- Donadini, F., Korhonen, K., Riisager, P. and Pesonen, L., 2006, Database for Holocene geomagnetic intensity information. EOS, *Transactions, American Geophysical Union*, 87 (14), 137.
- Donadini, F., Korte, M. and Constable, C.G., 2009, Geomagnetic field for 0-3 ka: 1. new data sets for global modeling. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 10, doi:10.1029/2008GC002295.
- Evans, M.E. and Hoye, G.S., 2005, Archeomagnetic results from southern Italy and their bearing on geomagnetic secular variation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 151, 155-162.
- Gallet, Y., Genevey, A. and Courtillot, V., 2003, On the pos-

- sible occurrence of 'archaeomagnetic jerk' in the geomagnetic field over the past three millennia. *Earth and Planetary Science Letters*, 214, 237-242.
- Gallet, Y., Genevey, A. and Fluteau, F., 2005, Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change?. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 339-347.
- Gallet, Y., Genevey, A. and Le Goff, M., 2002, Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artefacts. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 131, 81-89.
- Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, Ph., Thiriot, J. and Jiménez-Castillo, P., 2006, Archeomagnetic study of seven contemporaneous kilns from Murcia (Spain). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 157, 16-32.
- Hirooka, K., 1971, Archaeomagnetic study for the past 2000 years in southwest Japan. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University*, 38, 167-207.
- Hirooka, K., 1979, Dating of ancient kilns with archaeomagnetic method. *Japanese Ancient Period* 2.
- Hirooka, K., 1980, Age dating by using the secular variation of the geomagnetic field direction. *Natural Scientific Approaches in Archaeology and Art History*.
- Hirooka, K., 1981, Archaeomagnetism and age dating in History of Earthenwares. *Annals Seto City*.
- Hirooka, K., 1983, Results from Japan, In: K.M. Creer, P. Tucholka and C.E. Barton (eds), *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*. Elsevier, Amsterdam, 150-157.
- Hirooka, K. and Aoki, M., 1981, Archaeomagnetic measurements on kiln Okayama 3 in Hirazakura. *Research Report Buried Cultural Properties of Oyabe City* 5.
- Kim, K.H. and Bea, Y.B., 1983, Archeomagnetism of the pottery of Koryo Celadon, the historic site No. 68. *Korean Society of Economic and Environmental Geology*, Vol. 16, No. 4, 253-256 (in Korean with English abstract).
- Kinoshita, H., 1970, Lists of archeomagnetic and paleomagnetic results: 1950-1970 in Japan. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 22, 507-550.
- Korhonen, K., Donadini, F., Riisager, P. and Pesonen, L., 2008, GEOMAGIA50: an archeointensity database with PHP and MySQL. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 9, doi:10.1029/2007GC001893.
- Korte, M. and Constable, C.G., 2003, Continuous global geomagnetic field models for the past 3000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 140, 73-89.
- Korte, M. and Constable, C.G., 2005, The geomagnetic dipole moment over the last 7000 years: new results from a global model. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 348-358.
- Korte, M. and Constable, C.G., 2011, Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3 ka. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 188, 247-259.
- Korte, M., Donadini, F. and Constable, C.G., 2009, Geomagnetic field for 0-3 ka: 2. a new series of time-varying global models. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 10, doi: 10.1029/2008GC002297.
- Kovacheva, M., Boyadziev, Y., Kostadinova, M., Jordanova, N. and Donadini, F., 2009, Updated archeomagnetic data set of the past 8 millennia from the Sofia laboratory Bulgaria. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 10, doi:10.1029/2008GC002347.
- Le Goff, M., Gallet, Y., Genevey, A. and Warmé, N., 2002, On archeomagnetic secular variation curves and archeomagnetic dating. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 134, 203-211.
- Lee, Y.S., Doh, S.J., Park, Y.H., Seo, K.S. and Kim, J.Y., 2001, Archaeomagnetic study for some historical kiln sites in the western Korea: the application for the t-KPSV (tentative-Korea Paleosecular variation) curve. *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 37, No. 1, 115-132 (in Korean with English abstract).
- Nagata, T., Arai, Y. and Momose, K., 1963, Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years. *Journal of Geophysical Research*, 68, 5277-5281.
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L. and Torta, J.M., 2010, Regional modeling of the geomagnetic field in Europe from 6000 BC to 1000 BC. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 11, doi:10.2029/2010GC003197.
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., Gaya-Piqué, L.R. and Lanos, Ph., 2008, Initial SCHA.DI.00 regional archaeomagnetic model for Europe for the last 2000 years. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 569-608.
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M. and Gaya-Piqué, L.R., 2009, A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: applications to archeomagnetic dating. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 10, doi:10.1029/2008GC002244.
- Pavón-Carrasco, F.J., Rodríguez-González, J., Osete, M.L. and Torta, J.M., 2011, A matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science*, 38, 408-419.
- Sasajima, S. and Maenaka, K., 1966, Intensity studies of the archaeo-secular variation in west Japan, with special reference to the hypothesis of the dipole axis rotation. *Memoirs of the College of Science, University of Kyoto*, 33, 53-67.
- Schnepp, E. and Lanos, Ph., 2005, Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years. *Geophysical Journal International*, 163, 479-490.
- Shaw, J., Yang, S., Rolph, T.C. and Sun, F.Y., 1999, A com-

- parison of archaeointensity results from Chinese ceramics using microwave and conventional Thellier's and Shaw's methods. *Geophysical Journal International*, 136, 714-718.
- Sung, H.M., 2008, Application of dates of Terrestrial Magnetism to archaeological remains: centered on a charcoal kiln with side window at Maegokdong, Ulsan. *Journal of the Korea contents association*, Vol. 8, No. 12, 214-221 (in Korean with English abstract).
- Sung, H.M., 2011, Archaeomagnetic dating of hemp kiln and lime kiln. *Journal of Conservation Science*, Vol. 27, No. 3, 291-300 (in Korean with English abstract).
- Tema, E., Hedley, I. and Lanos, Ph., 2006, Archaeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve. *Geophysical Journal International*, 167, 1160-1171.
- Thellier, E., 1938, Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. Ph. D. thesis, Les Presses universitaires de France.
- Wei, Q.Y., Li, T.C., Chao, G.Y., Chang, W.S. and Wang, S.P., 1981, Secular variation of the direction of the ancient geomagnetic field for Loyang region, China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 107-112.
- Wei, Q.Y., Li, T.C., Chao, G.Y., Wang, S.P. and Wei, S.F., 1983, Results from China, In: Creer, K.M., Tucholka, P., Barton, C.E. (eds.), *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*, 138-150.
- Wei, Q.Y., Li, T.C., Chao, G.Y., Zhang, W.X. and Wang, S.P., 1984, The wandering path of virtual geomagnetic pole during the last 6000 years. *Acta Geophys*, 27, 562-572.
- Yoshihara, A., Kondo, A., Ohno, M. and Hamano, Y., 2003, Secular variation of the geomagnetic field intensity during the past 2000 years in Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 219-231.
- Yu, Y.J., Doh, S.J., Kim, W.Y., Park, Y.H., Lee, H.J., Yim, Y.J., Cho, S.G., Oh, Y.S., Lee, D.S., Lee, H.H., Gong, M.G., Hyun, D.H., Cho, J.K., Sin, Y.S. and Do, M.S., 2010, Archeomagnetic secular variation from Korea: implication for the occurrence of global archeomagnetic jerks. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 173-181.
- Zananiri, I., Batt, C.M., Lanos, Ph., Tarling, D.H. and Linford, P., 2007, Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 160, 97-107.

투 고 일 : 2014년 1월 6일

심 사 일 : 2014년 1월 7일

심사완료일 : 2014년 3월 19일