

## 한반도 서부의 역사시대의 유적지로부터 구한 고고지자기 연구: 한반도 시험적 고영년변화 곡선에의 적용

이윤수<sup>1,\*</sup>·도성재<sup>2</sup>·박용희<sup>2</sup>·서광수<sup>3</sup>·김주용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질연구부·<sup>2</sup>고려대학교 지구환경과학과·<sup>3</sup>공주대학교 지질환경과학과

### 요 약

한반도에서 발굴된 8개 지역의 유적지의 24개 장소(336 개 정향시료)로부터 고고지자기 연구를 실시하여, 이로부터 구한 잔류자화 방향들을 한반도의 시험적 고영년변화(t-KPSV) 곡선에 대비하여 각 가마의 최후 가동 시기에 대한 고고지자기 연대(archaeomagnetic chronology)를 추정하였다. 가마 시료의 주자성광물은 가단자구의 자철석이며, 그 특성잔류자화는 가마가 마지막으로 가동되었을 때 당시의 지구자기장에 평행한 방향으로 획득한 1차잔류자화로 해석되었다. 22개 장소의 고고지자기 평균잔류자화 방향들은 각각 서기 3세기에서 16세기 사이의 연대에 대비되었으며, 발굴 유물에 근거한 추정 연대와 계통적으로 일치한다. 한반도에서 보고된 고고지자기 자료들을 종합할 때, t-KPSV 곡선은 JPSV(서남일본의 고영년변화) 곡선보다 유용한 것으로 분석되었다. 또한, 한반도 전체의 측정자료들 t-KPSV와 대비할 때, AD. 200-350년과 AD. 1400-1450년의 구간에서 나타나는 편각의 편위는 t-KPSV의 개량의 차원에서 주목된다.

**주요어:** 고고지자기, 한반도 시험적고영년변화곡선, 가마터, 자철석

Lee, Youn Soo, Doh, Seong-Jae, Park, Yong-Hee, Seo Kwang Soo, and Kim, Ju Yong, 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. v. 37, no. 1, p. 115-132

**ABSTRACT:** The archaeomagnetic study is examined to determine archomagnetic ages for 24 historical kiln sites (336 oriented samples) exhumed in the western Korea. The distribution of 22 mean directions obtained from these kiln samples are systematically consistent with the t-KPSV (tentative Korea Paleosecular Variation) curve, corresponding to the 3rd-16th centuries AD. We conclude that these directions were primarily recorded by the geomagnetism in the western Korea. Based on the analysis of this and previous results, the t-KPSV curve is useful for age estimation for the archaeomagnetic data from the western Korea. In a view point of the improvement of the t-KPSV, it is noted that the deviations of declination from the t-KPSV curve found in AD. 200-350 and in AD. 1400-1450.

**Key words:** archaeomagnetism, t-KPSV, kiln, magnetite

(Lee, Youn Soo and Kim, Ju Yong, Div. Geology, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea; Doh, Seong-Jae and Park, Yong-Hee, Department of Earth & Environmental Sciences, Korea University, Seoul, 136-701, Korea; Seo, Kwang Soo, Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea)

### 1. 서 론

영년변화는 수년이상의 주기를 갖는 지구자기

장의 변동을 말하며, 일찍이 선진국에서는 화산 암이나 가마터, 퇴적물 혹은 직접 관측한 자료 등으로부터 그 궤적을 구하여, 고고학 등의 연대

\* Corresponding author: Tel. 82-42-868-3036, E-mail. leeys@ysgeo.yonsei.ac.kr

추정의 수단으로 쓰여 왔다. 영년 변화는 비쌍극자들의 영향이 크기 때문에 국지적으로 밖에 적용할 수 없으며, 정확한 연대 추정을 위해서는 각국에 맞는 표준 곡선을 따로따로 구하여야 한다는 본질적인 단점이 있다.

이윤수 외(1996)는 Hirooka(1971)가 제시한 서남일본의 과거 2000년간의 표준 고영년변화곡선(JPSV, Japanese Paleo Secular Variation)으로부터 각각 가상 고지자기극(VGP, Virtual Geomagnetic Pole)들을 구하고, 이로부터 한반도(기준점 충북 충주; 128°E, 37°N)에 대하여 계산한 시험적 고영년 변화곡선(t-KPSV)을 제안한 바 있다. 그들은 보다 정확도 높은 연대 측정을 이루기 위해서, 한반도로부터 구한 고지자기 자료들이 지속적으로 축적, 보완되어야 한다고 제안하였다.

고고학과 연계된 고지자기학의 세부분야를 고고지자기학이라 한다. 국내에서 실시된 고고지자기 연대추정의 수요는 지질학보다는 먼저 고고학분야에서 요청되어 왔으며, 그 대부분의 결과가 사학계의 보고서로 출판되어 온 관계로 지질학자들이 접할 수 있는 기회가 드문 실정이다. 최근 제4기 지질학 분야가 점차 활성화됨에 따라, 연대, 고환경, 고기후를 규명하고자 하는 측면에서 고지자기 연구 결과의 중요성이 인식되어 왔다. 이 논문에서는 지난 수년간 축적된 고고지자기 연구 결과를 보고하고, 현재 한반도의 고고지자기 연대추정의 문제점과 개선점 등을 토론했고자 한다.

## 2. 지구자기장의 영년변화

지구 자기장의 주요 특성은 시대에 따라 그 방향, 강도 및 극성 변화를 수반한다는 것이다. 지구 자기장의 변화가 수년 이상의 주기를 나타낼 때 영년변화라 한다. 이를 이용한 정확한 연대 추정의 열쇠는 얼마나 오랜 기간의 고지구자기장의 기록을 얼마나 정밀하게 측정하여 표준자료화 하느냐에 달려 있다. 현재, 고지자기학을 이용한 연대 추정은 다음 3가지 방법이 널리 쓰이고 있다. (1) 첫 번째로 지구자기장 방향의 영년변화를 이용한 방법은 정밀도(십수년)는 뛰어나나 최근 만년 이내의 연대결정에 국한되고, (2) 두 번째로 강도의

영년변화를 이용한 방법은 그 대상이 수만년동안 연속적으로 퇴적된 퇴적물로 한정되지만 최근 1백만년 이내의 시대에 대해 수백-수천년의 정밀도로 연대추정을 할 수 있으며, (3) 세 번째로 극성의 영년변화를 이용한 방법은 수십만년의 긴 지질시대에 걸친 지층을 대상으로 하며, 적용 가능한 시대는 2억년 이내의 지질시대에 대하여 가능하지만, 수십만-수백만년의 정밀도를 가지며 상대적으로 전자 둘레에 비하여 분해능이 떨어진다.

지구자기장은 대부분 지구의 자전에 의한 외핵의 회전운동과 전자기적 상호 변환작용에 의해 발생하며(이윤수 외, 1996), 수천년 정도의 시간 규모에서 보면, 지구 회전축과 일치하는 지축쌍극자(geocentric axial dipole field)로서의 거동을 하고 있다. 고지자기학이 판구조나 조구조운동의 연구를 대상으로 할 때는 고지구자기장이 영년변화의 기간이 충분히 평균된 지자기장(time-averaged paleomagnetic field)을 취하며 지구회전축과 일치하는 것으로 가정한다. 하지만, 실제 관측되는 자북(north magnetic pole; 지표상에 북각이 +90°인 지점)과 자남(south magnetic pole; 지표상에 북각이 -90°인 지점)은 지구회전축과 일치되지 않을 뿐만 아니라, 이들을 잇는 축은 지구 중심을 통과하지 않는다. 지자기장 관측 계산으로부터 모델화된 최적지심쌍극자(best-fit geocentric dipole)도 현재의 지구회전축과 일치하지 않고, 그 쌍극자기극의 위치(즉, 지자기북(남)극)은 지구회전축을 중심으로 이동하고 있다. 지구자기장은 구면조화함수로 표현할 수 있으며(Chapman and Bartels, 1940), 이로부터 주어지는 가우스 계수들을 곱함으로써, 지구자기장의 분포를 표시하고, 그 변화도 파악할 수 있다.

지구 쌍극자기장의 강도변화와 비쌍극자장의 서방이동현상은 관측자료로부터 이미 잘 알려져 있다. 영년변화를 일으키는 비쌍극자장의 서방이동에 대해서는 몇가지 설들이 제시되고 있다. 외핵은 전도성이 양호한 액상의 물질로 되어있다. 지구의 자전에 의해 외핵 내의 거동은 회전축에서 멀리 떨어진 외부물질이 내부물질보다 빠르게 이동한다(Bullard *et al.*, 1950). 이 때문에 소규모의 대류들이 발생하고, 외핵의 바깥쪽 경계부(CMB,

Core Mantle Boundary) 가까운 곳에서는 소용돌이가 만들어지게 되며, 비쌍극자장들이 발생하게 된다. 한편, 외핵은 CMB 부근에서 물질 자체의 점성과 맨틀과의 마찰력에 의해서 내부보다 각속도가 지체되어 서쪽으로 늘어지게 되어(지구가 동쪽으로 자전하기 때문), 소용돌이(이동성 비쌍극자)가 서쪽으로 이동하는 현상을 설명할 수 있다. 이 설은 명백히 직관적으로 뛰어나지만, 외핵의 전자유체 상호작용에 기인한 자기응력 효과가 고려되어 있지 않아 이론적으로 받아들이기 어렵다는 단점이 있다. 한편, 맨틀과 외핵 안에서 발생하는 대류 및 플룸운동으로 특히 CMB 주변의 온도 구배가 동일하지 않아(Bloxham and Gubbins, 1987) 이동성 비쌍극자( $g_l^m, h_l^m; l(\neq 1) > m$ )가 발생할 수 있으며, 또한 지표의 표고에도 굴곡이 있는 것처럼 CMB의 웅덩이들에 격리된 자기소용돌이들에 의해 정체성 비쌍극자( $g_l^0, g_l^m, h_l^m; l = m > 1$ )가 만들어질 수 있기 때문에, 이들 비쌍극자들이 갖는 고유진동은 영년변화의 주요 요인으로 작용할 수 있다. 역사시대이래 지구자기장의 방향변화에 대한 영년변화는 이전의 시기보다 상대적으로 좁은 범주에서 일어나는 경향이 있는데, 이는 정체성비쌍극자의 활동이 활발해지는데 기인한 것으로 해석되고 있다(Yukutake and Tachinaka, 1968).

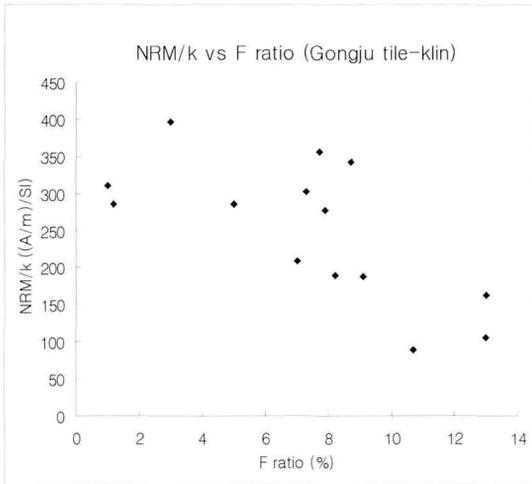
최근의 연구들은 지구자기장을 MHD파(Magnetohydrodynamic wave)로 간주하고, 자기유도방정식(속도장이 미분연속 가능하도록 가정)과 Navier-Stokes 방정식을 연립하여(이들 식에 들어있는 변수들의 경계조건을 차례로 가정), 지구자기장의 주요 거동들을 파악하고 있다. 여기에 외핵의 나선형운동이 만들어내는 효과와 비축대칭의 MAC 파(Magnetic (Lorentz), Archimedean and Coriolis forces)를 고려(Bragisky, 1964)함으로써, 지구자기장과 그 영년변화에 대한 놀라운 성과들이 도출되고 있다. 영년변화의 경우, 30년, 60년, 6백년, 2천년 등의 짧은 주기까지 규명되고 있고, 특히 전자 돌(4극자의 가우스 계수에서 탁월하다)은 기후 변동과 연동되는 인자일 가능성이 제안되고 있다. 이는 간단히 과거와 미래의

지구자기장의 재현과 구현으로 축약될 수 있으며, 고지자기학과 기후환경 예측의 혁신적인 발전을 가져올 것이다. 나아가 장주기의 영년변화 연구는 장단주기의 기후 복원 및 예측, 대륙 이동의 기작 규명, 지구시스템의 기작 규명, 지구탄생의 기원과 진화 연구 등의 지구과학 분야에 있어서 판구조론에 버금가는 또 하나의 위대한 업적이 이룩되는 날이 그리 멀지 않을 것으로 보인다.

### 3. 정향시료 채취

최근 수년간에 걸쳐 한반도의 공주, 논산, 부여, 서산, 천안(이상 충남), 청원, 청주(이상 충북), 화순(전남) 일원에 분포하는 고고학 유적지(가마터, 아궁이터)의 고고지자기 연대 추정을 위하여 고고지자기 연구를 실시하였다. 채취 장소와 시료의 갯수는 공주의 1개 장소(site)에서 18개 시료, 논산의 2개 장소에서 18개 시료, 부여의 1개 장소에서 13개 시료, 서산의 3개 장소에서 41개 시료, 천안의 5개 장소에서 50개 시료, 청원의 2개 장소에서 34개 시료, 청주의 3개 장소에서 57개 시료, 화순의 7개 장소에서 105개로, 총 8개 지역의 24개 장소에서 336개의 정향시료를 채취하였다. 이 연구에서 실시한 시료 채취 방법은 직접 휴대용 시추기를 사용하거나 삼지나침반(tripod compass)을 이용하여 정향 시료를 채취하였으며, 가마 시료가 충분히 고화되지 않은 경우는 특수 제작된 비자성 큐브를 이용하였다.

가마터의 시료를 채취할 때 조심하여야 할 일은 (1) 채취 시료 내에 큰 광물이나 암편이 가능한 한 적게 포함되도록 유의하는 일과 (2) 가마 자체의 잔류자화 강도와 외부 자기장(주로 지구 자기장)의 작용으로 가마 주위에 형성되는 유도 자기장의 영향의 심각성 여부를 점검하는 일이다. 첫 번째의 경우는 특히 가마 시료에서 빈번히 직면하게 되는 문제로 양질의 자료를 구하기 위해서 매우 중요하며, 코아 시료 제작 시에도 암편을 피할 수 있도록 최대한 유의하여야 한다. 만일 불가피한 경우, 자연잔류자화 강도의 성분별 대칭성과 표준 편차가 어느 정도인지를 면밀히 검토하여 자료 해석시 이를 고려하여야 한다. 두



**Fig. 1.** The NRM/k variation diagram for F ratio(%). Note that the higher F ratio of the specimen, the less NRM/k value(multiple correlation coefficient  $R=0.68$ ). See text further explanation.

번째의 경우는 혼하지는 않지만, 가마에 벼락이 떨어졌다가 주변암의 대자율 혹은 잔류자화 강도가 유난히 높은 경우, 나침반에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이에 대해서는 해시계의 원리를 이용한 태양나침반(sun compass)을 이용하지만, 만일 날씨가 흐리거나 해가 비치지 않는 경우는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 야외에서 나침반만으로 이를 간단히 극복하기 위한 효율적인 방법 중 하나는 필자의 연구 그룹에서 애용해 온 방법으로써, 가마 혹은 화산암 노두에서 수 m 떨어진 곳에서의 방향을 동시에 검증해 보는 것이다. 좀 더 자세히 설명하자면, 이 방법에는 세 사람(갑, 을, 병)이 필요하다. 먼저 갑은 대상 시료에 삼지나침반(tripod compass)이나 브란톤콤포스를 이용하여 정향을 표시하고 주향을 읽으면, 을은 삼지나침반 옆에 한쪽 끝을 고정시킨 두꺼운 실을 이용하여, 갑의 나침반의 옆 면과 평행 또는 수직인 방향으로 갑과 수 m 정도 떨어진 곳에서 팽팽히 잡아당긴다. 실은 자연이 일직선이 되며, 이 때 을은 실이 흔들리지 않도록 유지한다. 병은 을쪽에서 다른 나침반을 사용하여 실의 방향을 읽어(세번 이상 읽어 평균을 내는 것이

좋다) 갑이 읽은 값과 비교하여 수정하면 된다(이 때, 을은 실이 두 나침반과 평행한지 확인). 실제 공주, 논산, 부여, 서산(이상 이번 연구)과 보령(이윤수 외, 1996)의 경우 1° 내외에서 수렴하였으며, 다른 가마터에서도 그 영향이 미미하였다. 이 외에도 몇가지 방법이 있겠지만, 어떤 방법을 사용하든, 정향시료를 가능한 여러 방향으로 취하는 것이 중요하며, 이는 실험 과정에서 생길 수 있는 여러 형태의 에러를 통계적으로 랜덤화시킬 수 있기 때문이다.

#### 4. 자성광물학 연구

##### 4.1 실험기기

이번 연구를 위한 실험과정은 한국지질자원연구원과 고려대학교 및 기초과학지원연구소에서 다양한 실험이 이루어 졌다. 잔류자화의 측정에는 초전도자력계(760R, 2G Enterprises사)와 스피너자력계(각각 Schonstead사와 Molspin사)를 사용하였고, 대자율 측정에는 암석대자율 측정기(MS2, Bartington사), 등온잔류자화실험은 DC Impulse Magnetizer(ASC사)를 사용하였다. 또한 자기이력실험은 고려대학교 소재의 진동시료자력계(VSM, Nuvo사)를 사용하였다.

##### 4.2 대자율 분석

대자율(susceptibility)은 암석이 갖는 주요 물성 중 하나로서, 지질학, 고고학, 자원공학, 물리학 등의 광범위한 분야에서 이용되고 있다. 지하에 묻혀있는 가마터의 존재를 신속하고 정확하게 찾기 위한 작업으로 대자율을 이용한 자력탐사(Scollar, 1965)는 좋은 예이다. 외부자기장의 크기가 지나치게 크지 않는 범주에서, 자성광물이 갖는 잔류자화의 강도는 대자율과 외부자기장의 세기에 비례한다. 자성광물 및 상자성광물의 대자율의 크기는 형태나 결정 방향에 따라 다르다. 이의 특성을 이용한 대자율 이방성 연구가 점차 크게 확산되고 있으며, 대자율 특성을 충분히 이용하기 위해서는 고지자기학 기초 이론을 필요로 한다. 대자율에는 여러 종류가 있으며, 우리가 흔히 암석의 대자율이라고 하는 초기 대자율(1 kHz 미만의 저주파수를

사용하여 측정하기 때문에 저주파수 대자율이라고도 한다이다. 그 이외에도 비이력잔류자화(ARM, anhysteric remanent magnetization) 대자율, 등온잔류자화(IRM, isothermal remanent magnetization) 대자율 등이 있으며, 그 물리적 의미와 용도가 전혀 다르기 때문에 주의를 요한다. 여기서 언급하는 대자율은 이방성을 고려하지 않으며, 저주파수를 사용하여 측정한 초기 대자율로 한정한다. 초기잔류자화의 크기는 대자율이 커질수록 증가한다. 대자율은 잘 알려져 있듯이 자성광물의 양이 많아질수록 커지는 시량성 물리량이지만, 자성광물의 입자의 모양과 크기에도 의존한다. 특히 극미립(약  $0.03 \mu m$  이하)의 자성광물은 강자성광물과 구별하여 초상자성광물이라 부르고, 대자율 측정기로 초상자성광물의 상대적 양을 추정할 수 있으며, 이 인자를 F 비율(F ratio) 혹은 F 매개변수(F parameter)라 한다.

$$F \text{ ratio } (\%) = \frac{k_{lf} - k_{hf}}{k_{lf}} \cdot 100$$

(여기서  $k_{lf}$ 와  $k_{hf}$ 는 각각 상대적으로 저주파수(465 Hz)와 고주파수(4650 Hz) 하에서 측정된 대자율 값이다.) 따라서 F 비율의 값이 클수록 초상자성광물들이 상대적으로 많이 들어 있는 시료로 볼 수 있다. 그림 1은 대자율에 대한 자연잔류자화강도를 종축으로 하고, F 비율을 횡축으로 하여 이 연구에서 구한 결과를 도시한 전형적인 예이다. 그림 1의 결과에서 드러난 큰 특징은 F 비율의 값이 클수록 대자율에 대한 잔류자화강도의 비(NRM/k)가 작아지는 경향을 보인다는 것이다. 이는 초상자성광물 자체가 큰 대자율 값을 가짐에도 불구하고, 잔류자화강도가 더욱 급격히 작아지는 특성을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 이윤수 외(1996)는 보령 천방가마터에서 가마 내부물질이 외부물질에 비하여 NRM/k가 크다는 연구 결과를 보고한 바 있다. 이것은 (1) 가마 바깥부근으로 갈수록 초상자성광물이 많고, 상대적으로 강자성광물이 적다는 것을 시사하며, (2) 세립의 강자성광물이 극미립의 초상자성광물의 단계를 거쳐 열화학적 과정으로 형성되었으며, (3) 주요 강자성광물이 가마(혹은 아궁이)의 가열과 직

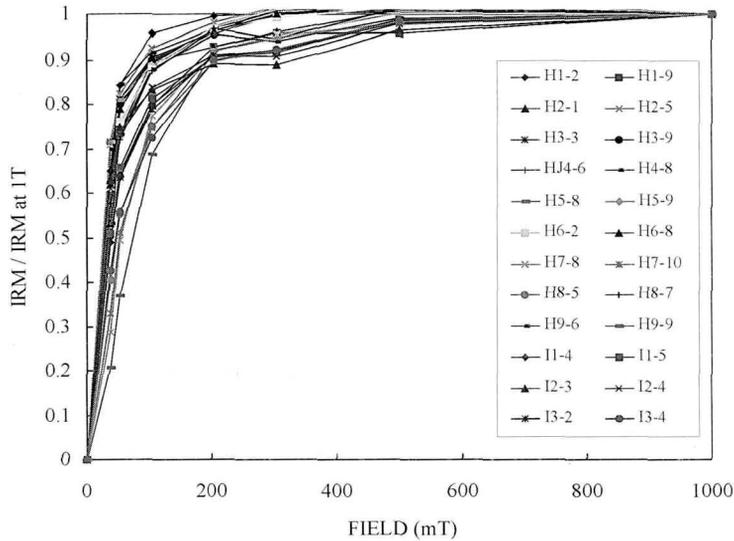
접 관련하여 결정되었음을 지시한다. 이는 NRM/k나 F 비율이 시료의 물리화학적 조건을 파악하는데 유용하다는 것을 시사하며, 장차 고고지자기 시료에 대한 보다 면밀한 자성광물학적 연구가 요구된다. 특히 F 비율은 현장에서 바로 측정할 수 있다는 장점이 있어, 고고지자기 시료 선정에 좋은 지시자로서 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.3 등온잔류자화(IRM, Isothermal Remanent Magnetization) 획득 실험

실험실에서 직류자기장을 시료에 적용할 때 시료 내의 자성광물 실험은 강한 잔류자화를 갖게 되는데 이를 등온 잔류자화라 한다. 이 연구에서는 직류자기장을 최대 1.2 T까지 8-16단계에 걸쳐 실시하였다. 그림 2는 화순군 소재의 공립사 유적지의 시료에 대한 등온잔류자화 획득 실험 결과의 전형적인 예로써, 가로축과 세로축은 각각 외부에서 가한 직류자기장의 세기와 자성광물이 획득한 등온잔류자화의 크기이다. 가마 시료의 등온잔류자화는 0.2 T에서 최대 포화잔류자화의 90% 가까이 포화된다. 이는 잔류자화의 대부분이 낮은 항자력을 갖는 자성광물에 의해 수행되고 있으며, 자철석임을 지시한다. 그림 2에서 시료들에서 나타나는 고향자력 성분은 (1) 동일 가마터에서 가열과 냉각이 반복되면서 획득할 수 있는 점성잔류자화(VRM, Viscous Remanent Magnetization), (2) 자철석의 일부가 고온산화로 형성된 적철석, (3) 가마 가동이 중단된 이후 이차적으로 형성된 수산화철화합물일 가능성도 배제할 수 없다. 우리는 다음 절에 기술하는 자기이력실험의 결과에서 이러한 고향자력 성분이 거의 나타나지 않는 것으로 보아, 점성잔류자화일 것으로 판단한다. 이들의 잔류자화는 자철석과 비교하여 매우 미약하며, 뒤에 실시하는 자연잔류자화의 단계별 소자 결과에서도 원점을 향하는 단일성분이 검출되는 사실이 이를 뒷받침한다.

#### 4.4 자기이력실험

대자율, 잔류자화강도, 포화잔류자화강도, 항자력, 잔류항자력 등 대부분의 자기요소들은 입자



**Fig. 2.** Typical examples of the IRM acquisition curve for archaeological samples in Hwasun area. More than 90% of the maximum saturation remanences for all samples are saturated below 200 mT.

의 크기에 의존한다. 자기이력실험은 자성광물의 자구(magnetic domain)의 종류를 판단하는 데에 가장 유력한 방법 중 하나이며, 시료에 대해 적용한 직류자기장은 -1 T에서 1 T이다. 포화자화( $M_s$ ), 포화잔류자화( $M_{rs}$ ), 항자력( $H_c$ )은 각 자기이력 곡선으로부터 구하였으며, 또한 잔류항자력( $H_{cr}$ )은 단계별로 역자장 등온잔류자화(back-field IRM) 획득실험으로부터 계산되었다. 이들 4개의 매개 변수들은 Day *et al.*(1977)에 의한 자구판별도에 도시하여 자구의 종류를 판단하였다.

그림 3은 화순(공립사) 유적지의 가마터(그림 3A-3C)와 아궁이터(그림 3D) 시료에 대한 전형적인 자기이력실험 결과의 예로써, 모두 0.3 T 이내의 범주에서 자기이력이 나타나는 것으로 보아 시료 내 포함된 자성광물은 자철석임을 시사한다. 0.3 T 이후에 있어서, 잔류자화는 포화되어 더 이상 증가하지 않는데, 이는 운모나 점토광물 등의 상자성물질이 전체에 대한 자기적 기여가 상대적으로 미미하다는 것을 지시한다.

이들의 결과를 자철석의 자구판별도(Day *et al.*, 1977)에 도시하면 그림 4와 같으며, 가로축과 세로축은 각각  $H_{cr}/H_c$ 과  $M_{rs}/M_s$ 를 나타낸다. 이

들 시료의 포화자화에 대한 포화잔류자화의 비( $M_{rs}/M_s$ )는 20-30% 정도로 일정하며, 이는 가단 자구 입자의 특성을 보여주는 것이다. 가단자구의 자성광물은 그 크기는 자성광물의 종류와 형태에 따라 다르지만, 자철석의 경우 약 1-10  $\mu\text{m}$ 의 범주로 알려져 있다(Butler, 1992).

## 5. 고고지자기 측정

### 5.1 교류소자

단계별 소자실험은 잔류자화 방향을 구하기 위하여 실시하는 긴요한 과정으로, 교류소자, 열소자 및 화학소자에 의한 방법이 있다. 교류소자에 의한 방법은 비교적 신속하고 간편하나 적철석이 나 수산화 철화합물과 같은 항자력이 높은 광물에는 적용하기 어렵고, 불안정한 잔류자화를 갖는 일부 광물(예를 들면, 자류철석 등)의 경우 실험도중에 약한 점성잔류자화나 비이력잔류자화를 획득할 수도 있다. 열소자에 의한 방법은 항자력이 높은 자성광물을 대상으로 할 때 사용할 수 있지만 가열 시에 시료를 산화시켜 원래 가지고 있던 광물의 특성을 변질시키거나 물질에 따라서

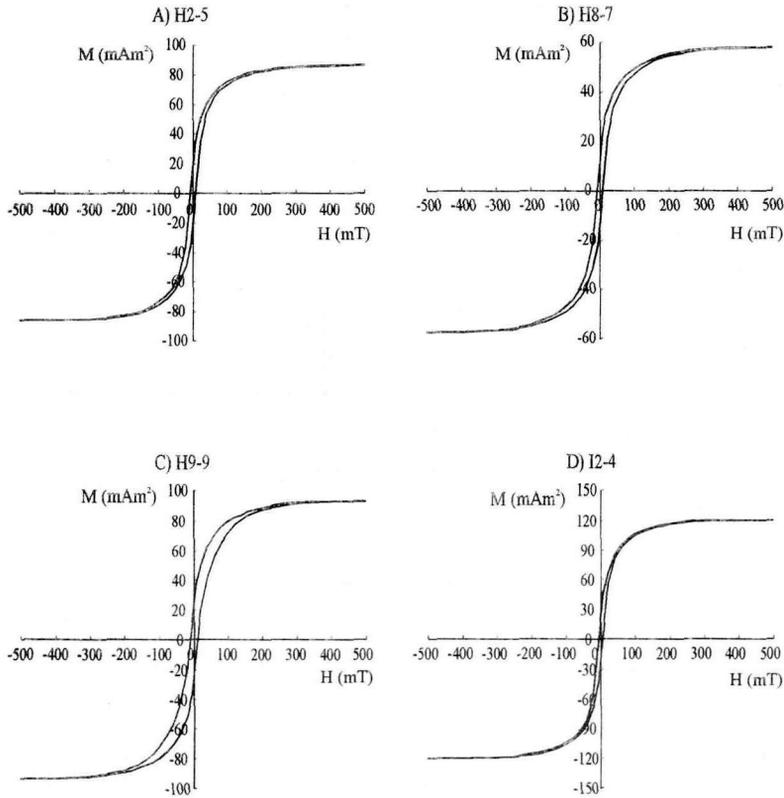


Fig. 3. Magnetic hysteresis loops for archaeological samples in Hwasun area. The magnetizations are completely saturated below 0.3 T DC field. This indicates that magnetite resides in these all samples.

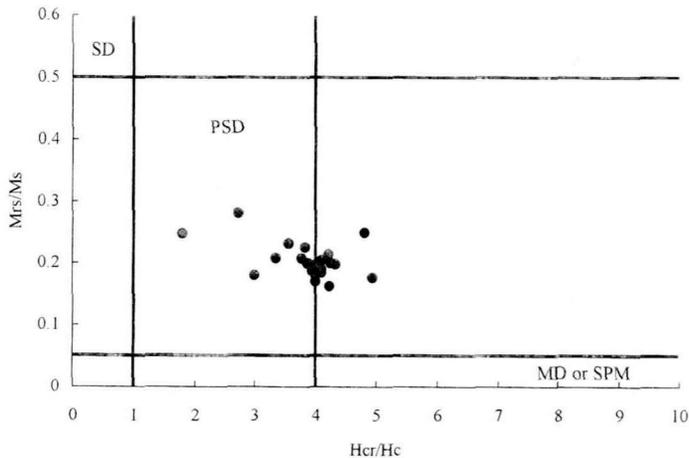


Fig. 4. Magnetic domain classification diagram in magnetic minerals for archaeomagnetic samples in Hwasun area. This indicates that the main magnetic carrier is pseudo single domain in size.

는 새로운 광물이 형성될 수 있는 단점이 있다. 또한 화학소자 방법은 산성용액에 시료들을 넣어 두어, 일정 기간 후에 측정하고, 조금 더 산도와 기간을 높여가면서 시료 안에 포함된 자성광물 자체를 아예 없애 버리는 방법으로, 많은 시료를 한꺼번에 처리할 수 있다는 장점이 있는 반면, 경우에 따라 수개월의 오랜 기간이 걸린다는지, 실험 시 시료의 보관의 어려움, 잔류자화를 갖는 자성광물의 종류를 파악하기 어렵다는 단점이 있어, 오늘날에는 앞의 두 방법에 비하여 상대적으로 잘 쓰이지 않는다.

가마 시료에 포함된 자철석의 Curie온도는 약 580°C로써, 가마가 이 이상의 온도에 노출되었을 때, 가지고 있던 잔류자화를 모두 잃는다. 가마가 다시 식게 되면, 이 온도를 지나면서 그 당시 지구자기장의 방향과 평행한 잔류자화를 획득하기 시작하며, 자철석 입자의 크기와 모양에 따라 안정될 수 있는 온도범위는 다르다. 따라서, 가마 시료 내에 포함된 자철석의 특성잔류자화는 열잔류자화(TRM, Thermal Remanent Magnetization)로써, 가마가 최후에 가열되었을 때의 시기로 제한된 의미를 갖는다(이윤수 외, 1996). 비록 자철석은 항자력이 비교적 약하고, 산화 환경에 안정하지 못한 특성을 갖지만, 수천만년 정도의 오랜 지질시대에 획득한 자철석의 특성 잔류자화도 세계 도처에서 흔히 보고되고 있으며, 이 사실은 특정한 외부 조건(예를 들면, 벼락이나 재가열)이 가해지지 않는 한, 수천년 이내에 만들어진 가마에 포함된 자철석의 특성잔류자화가 보존되는 것은 당연한 것이다

고고지자기 측정용의 시료들은 가마터의 바닥과 테두리를 이루는 부분에서, 시료의 분포, 채취 방향, 구성광물의 입도(작은 것일수록 좋다)를 고려하여 수행하였다. 토양에 열이 가하여 지면, 열화학반응이 일어나게 되며, 그 환경에서 안정한 광물이 결정된다. 가마가 마지막으로 가동되어 고온으로부터 식으면서, 가마 내의 자성광물들은 당시의 주변 지구 자기장에 평행하게 초기잔류자화를 획득하게 된다. 흔한 일은 아니지만, 가마터 혹은 그 주변에 낙뢰 등이 떨어졌을 경우에, 자성광물들의 일부 혹은 전부가 2차적인 방향으로 재

자화 될 수 있다. 이렇게 획득된 등온잔류자화는 잔류자화강도는 크나, 비교적 항자력이 약하고, 국지적 범위에서 복각의 변화가 큰 특징을 보이기 때문에, 대체로 고지자기학자들은 측정과정에서 인지할 수 있다. 이러한 등온잔류자화나 그 외 다른 요인에 의해 2차적으로 형성된 재자화성분을 명확하게 증명하기 위해서는 가능한 단계별 소자 실험을 실시하는 것이 좋다. 이 연구에서 실시한 단계별 소자실험에 있어서, 각 개소마다 1-3개 정도의 파일럿 시료를 택하여 면밀한 단계별 교류 소자실험을 실시하여 소자준위를 결정하였다.

## 5.2 특성잔류자화

가마나 아궁이에 기록된 잔류자화는 가장 마지막으로 자철석의 큐리온도 이상으로 가열되었던 시기의 지구자기장이 기록된 것이다. 자철석은 열 잔류자화로서 비교적 낮은 항자력을 가지고 있지만, 제4기 이래 이 지역의 지구자기장의 강도의 크기가 0.1 mT 미만(2001년 2월 현재 0.050 mT, IGRF)인 것을 감안하면, 지구자기장에 의해 자철석의 특성잔류자화가 자연적으로 바뀌지는 않는다. 그렇다고, 모든 가마터에서의 잔류자화 방향이 특성자화를 보존하고 있는 것은 아니다. 만일 가마 가동이 중단된 이후 가마터 근처에서 벼락이 떨어지면, 잔류자화를 획득하게 되며, 기존에 가지고 있던 특성자화방향의 전부 혹은 일부가 겹쳐질 수 있다. 이때 획득하는 잔류자화를 등온잔류자화라 하며, 지구자기장의 방향과 무관한 기록을 갖게 된다. 또한 시료의 선택 시에 부주의 혹은 부득이하게 커다란 압편 등의 입자를 포함하고 있는 시료를 채취 했을 경우에, 흔히 특성잔류자화 검출에 실패할 수 있다. 이를 미리 검증하는 좋은 방법 중 하나는 단계별로 나누어 소자시켜 보는 일이다. 이 가마 시료는 앞서 기술한 자성광물학 연구를 근거로 하여 교류소자 방법이 가장 적절한 방법으로 판단하였다.

이번 연구에서 행한 교류소자실험 방법은 전 장소에 대하여 1-3개씩의 시험시료(pilot specimen)를 선정하여 0-100 mT까지 단계별 교류소자를 실시하여, 그 결과를 분석하여 최적 소자단계를 결정하였다. (1) 천안 용원리, 청원, 청주, 회순의

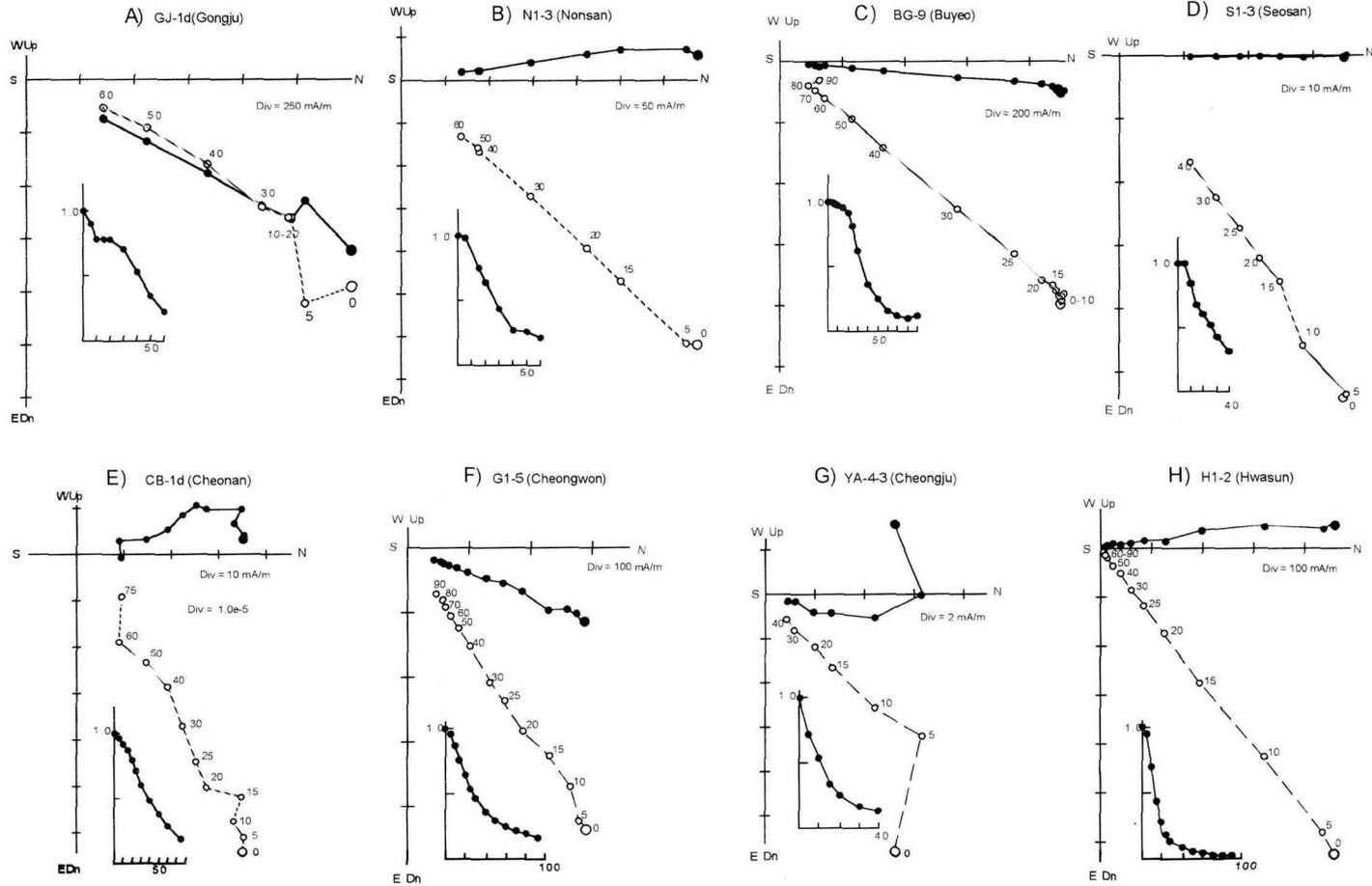
**Table 1.** Archaeomagnetic result in the vicinity of the Chungcheongnam Province.

Area	Site	n/N	D	I	$\alpha_{95}$	k	AFD	Archaeomagnetic chronology (AD)			Estimated time by Remains
								A-chron	B-chron	C-chron	
Gongju Guisanri	GJ	12/18	6.3	52.6	8.4	27.6	10	1345(+50/-90)	1325(±70)	385, 140	JS
Nonsan Weonbugri	N1	8/8	0.5	43.2	3.5	251.1	10	1435(+45/-35)	1440(±40)		JS
	N2	10/10	359.4	44.8	4.2	132.4	10	1420(+50/-35)	1430(±40)		
Buyeo Gatjeom	BG	13/13	3.9	39.4	3.2	166.8	10	1585(+45/-35)	1590(±40)		JS
Seosan Mujangri	S1	22/22	353.8	55.5	4.1	57.7	10	1100(+50/-50)	1100(±50)		KR
	S2	10/10	9.8	54.5	7.2	46.4	10	350(+55/-40)	360(±45)	1310	WS-BJ
	S3	9/9	1.1	48.9	6.3	67.2	10	430(+35/-45)	425(±40)	1785, 1380	WS-BJ
Cheonan Baegseog Yongweon	CB	10/10	340.6	54.4	12.3	16.3	10	565(+95/-70)	575(±80)	800	BJ
	CY	<3/4>	16.3	52.4	4.8	649.9	PAFD	340(+15/-15)	315(±35)	1310	BJ
Cheonweon Gagri	G1	19/20	18.0	57.1	2.2	236.4	PAFD	290(+5/-10)	280(±20)		-
	G2	12/14	19.0	55.7	5.0	76.7	PAFD	300(+10/-45)	285(±30)		-
Cheongju Yongam	YA	29/57	4.3	51.8	2.9	85.4	PAFD	395(+20/-5)	395(±20)		-
Hwasun Gongrimsa	H1	7/7	351.9	53.4	3.6	284.1	PAFD	1060(+40/-60)	1065(±50)		TS-JS
	H2	8/10	350.8	52.2	3.9	198.8	PAFD	1030(+65/-30)	1030(±60)		TS-JS
	H3	10/13	348.3	52.5	3.0	253.5	PAFD	1005(+40/-60)	1010(±50)		TS-JS
	H4	7/8	349.5	55.6	6.2	116.6	PAFD	750(+50/-80)	750(±100)	present	TS-JS
	H5	10/10	350.6	53.2	3.4	202.6	PAFD	1050(+40/-65)	1050(±50)	70	TS-JS
	H6	11/13	351.6	51.7	3.0	237.5	PAFD	1030(+50/-30)	1040(±50)	795	TS-JS
	H9	11/14	359.0	54.2	1.9	567.9	PAFD	1145(+20/-5)	1150(±25)	1070	TS-JS
	I1	7/9	357.6	46.4	4.6	176.7	PAFD	1415(+30/-30)	1385(±50)		TS-JS
	I2	9/10	356.0	45.3	7.6	46.3	PAFD	1420(+80/-45)	1420(±100)		TS-JS
	I3	6/11	359.2	46.9	6.2	117.7	PAFD	1405(+65/-40)	1400(±50)		TS-JS

D, I,  $\alpha_{95}$ , and k denote declination, inclination, 95% cone of confidence, and best estimate of precision parameter. n/N<n/N>, number of calculated/measured samples <sites>; A-chron, archaeomagnetic age by weighted mean; B-chron, archaeomagnetic age by 95% confidential area; C-chron, possible but unaccepted archaeomagnetic age by less reliable direction than A- and B-chrons or by reference historical period from remains; n, number of sample; AFD, alternating demagnetization level applied (unit: mT); PAFD, progressive AFD; JS, Joseon; KR, Korea(Dynasty); TS, Tongil Shilla; BJ, Baegje.

14개 장소의 잔여 시료들에 대해서는 각 장소의 최적 소자단계부터 4단계 이상 높여 가면서 교류소자를 행하여, 각 시료에 대한 단계별 교류소자 결과들에 대해 주성분 분석법(PCA, Principle Component Analysis; Kirschvink, 1980)을 적용하여 특성잔류자화방향을 구하였다(표 1). 또한, (2) 공주, 논산, 부여, 서산, 천안 백석동의 8개 장소의 시료들에 대해서는 각 장소의 최적의 소자단계에 맞추어 소자를 행하였다(표 1).

그림 5는 8지역의 전형적인 단계별 교류소자 연구 결과를 insitu에서의 직각좌표계로 나타낸 것이다. 여기서 각 단계별 벡터의 수평성분과 수직성분은 각각 검은 원과 흰 원으로 표시하였고, 흰원 옆의 숫자는 소자 단계(mT)를 나타낸다. 각 단계별 소자도에 포함된 작은 직각좌표계(1상한만 표시)는 초기잔류자화(Jo, A/m)에 대한 단계별 잔류자화 강도의 비를 나타낸 것으로써, 초기 잔류자화의 50%는 40 mT이하에서 소거되고 있



**Fig. 5.** Orthogonal diagrams for typical progressive alternating field demagnetization in 8 sites. A single magnetic component is revealed after removal of soft component less than 10-20 mT.

다. 그림 5G(YA4-3, 청주) 등의 일부시료에 있어서 초기 교류소자단계에 나타나는 미약한 성분은 현재의 지구자기장이나 실험 시에 실험실내의 자기장에 의해 획득된 점성잔류자화 혹은 실험과정에서 획득된 비이력잔류자화인 것으로 판단되며, 이 교류소자단계 범주의 잔류자화 거동에 대해서는 평균잔류자화 계산 시 제외하였다. 초기 소자단계 이후 저항자력 성분이 제거되고 난 뒤의 특성잔류자화 성분은 원점을 향하여 수렴하는 뚜렷한 단일벡터 성분을 나타내며, 안정된 방향을 가지고 있어, 특성성분의 자화를 획득한 이래로 외부 자기장의 영향을 거의 받지 않았음을 지시한다. 그림 5에서 저항자력 성분이 제거되고 난 후의 특성자화성분의 방향은 역사시대 한반도에서 기대할 수 있는 지구자기장의 영년변화 방향(이운수 외, 1996)의 범주에 속하며, 이후 다른 어떤 고향자력 성분의 잔류자화의 존재는 검출되지 않는다. 이 연구에서는 이 특성자화성분을 가마에 마지막으로 불이 지펴져 식으면서 획득된 일차자화로 해석하였다. 서산지역의 3 장소의 시료에 대해서는 2차 자화성분이 미약하여 단일성분만이 검출되어 별도로 소자를 행하지 않았으며, 다른 7지역의 19 장소의 시료들에 대하여는 결정된 소자 준위에 근거하여, 일괄 소자 하였다.

이상의 과정을 통하여, 측정된 결과는 표 1에 나타나 있으며, 시료제작과정에서 부수어졌거나, 단계별 소자실험에서 불안정한 거동을 나타내거나, 구한 잔류자화방향이 평균에서 30° 이상 동떨어진 것들은 계산 결과에서 제외하였다. 그림 6은 각 장소 별로 시료들의 잔류자화(검은 원)와 평균잔류자화(검은 네모) 방향을 등면적도에 도시한 것이다. 평균방향 주변의 큰 타원은 95% 신뢰구간을 나타내며, 시료가 가지고 있는 참평균값이 이로부터 벗어날 확률은 5%이다.

## 6. 결과 및 토의

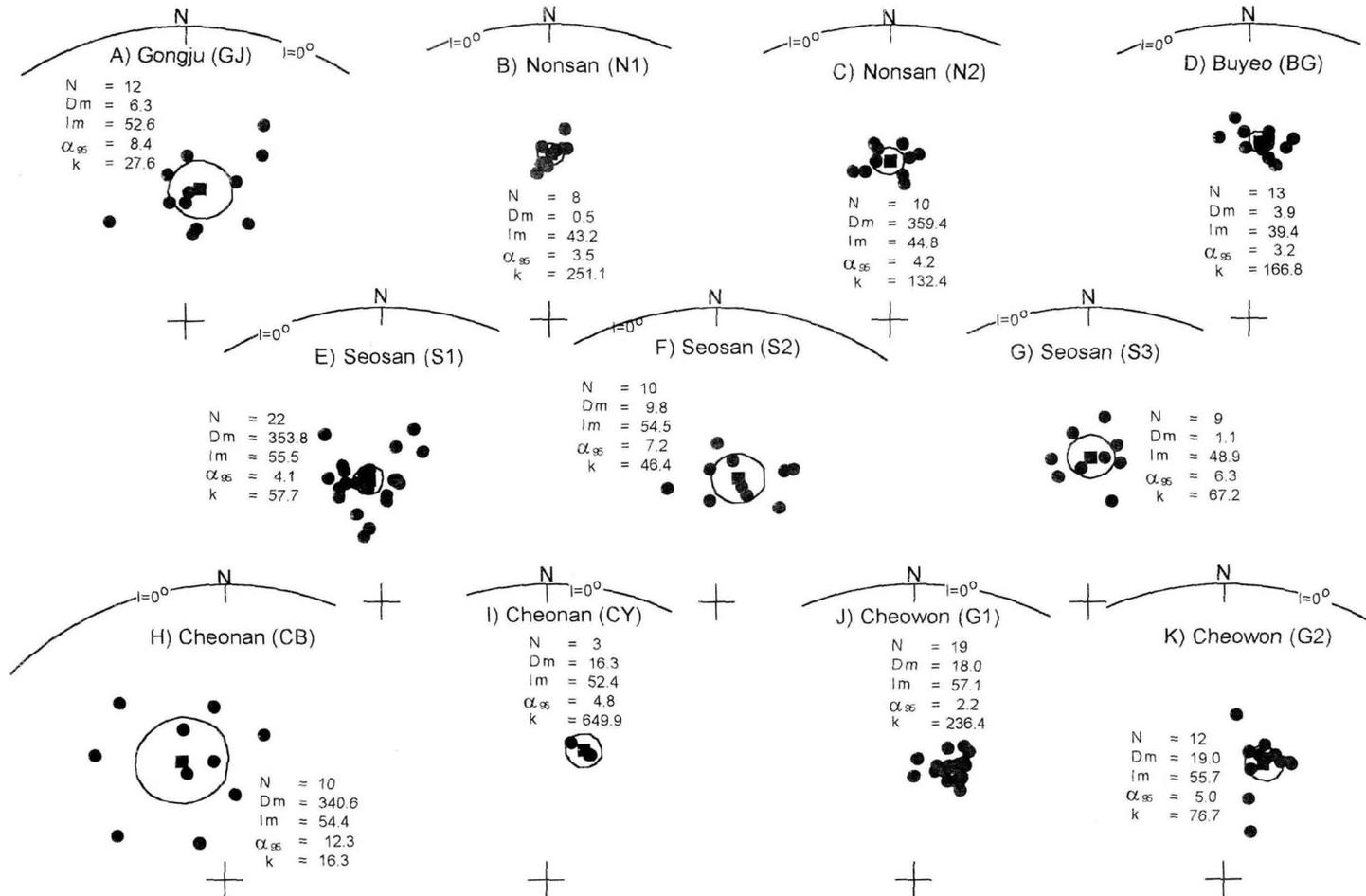
### 6.1 고고지자기 연대

가마(또는 아궁이)에 열이 가해지면 가마에 다량 포함되어 있는 자철석은 약 580°C에서 자성을 완전히 잃게 되며, 고온에서 다시 580°C 이하

로 식으면서 그 당시의 지구자기장의 방향으로 배열되기 시작한다. 따라서 가마터로부터 구한 고고지자기 연대의 정확한 의미는 가마가 마지막으로 가동되어 중단되었던 시점으로 해석되어야 한다.

이 연구에서 평균잔류자화 방향(평균편각과 평균복각)은 측정된 총 8개 지역 336개의 시료를 22개 장소 별로 구분하여 구하였으며, 그 결과를 표 1에 기재하였다. 각 장소에 대한 고고지자기 연대 추정을 실시하기 위하여, 이 평균방향들을 한반도의 시험적 영년변화곡선(t-KPSV; 이운수 외, 1996)에 대비하였으며(그림 7), t-KPSV의 매 50년마다의 시대구간에서는 선형변화를 한다고 가정하였다.

한 장소에서 측정한 고고지자기 잔류자화방향은 Fisher 분포를 하는 것으로 가정한다. 표 1에 나타난 각 평균자화방향에 대한 95%의 신뢰타원 값( $\alpha_{95}$ )은 작을수록(신뢰 계수 k는 클수록) 높은 신뢰도를 나타내며, 미지의 참값이 이 범위를 벗어날 확률이 5% 임을 의미한다. 그림 7에서 각 장소의  $\alpha_{95}$ 는 평균잔류자화 방향(네모)을 중심으로 하는 큰 원으로 도시하였으며, t-KPSV 곡선의 일부(분절, segment)를 포함한다. 이 때, t-KPSV 곡선의 분절에 대한 시대의 상한과 하한을 읽는다. 이 범위가 결정되면, 고고지자기 연대 값을 추정할 수 있으며, 이에는 2가지가 있다. 첫 번째는 평균방향에서 분절에 수선을 긋고, 분절과 만나는 점(평균방향에서 가장 가깝다)에 해당하는 시기를 구하는 방법(minimizing squared deviation from an observed mean)이다. 두 번째는 '신뢰타원 내에 포함된 분절에 해당하는 상하한의 시기를 구하여 그 중앙값(median)을 취하는 방법이다. 이 연구에서는 이들 연대를 편의상 각각 A-chron과 B-chron(표 1)으로 구분하였다. Fisher 분포에서, 참값(당시의 지구자기장 방향)이 존재할 확률분포는 평균값에서 멀어질수록 지수함수적으로 감소하기 때문에, A-chron은 평균자화방향에 무게를 둔 것이다. B-chron은 분절 구간 내( $\alpha_{95}$  내)에서 참값이 존재할 확률이 고르다고 가정하고 구한 것이며, t-KPSV처럼 대비 대상이 부정확할 때 완충된 연대 값을 구할 수 있다는 장점이 있다. 이 두



**Fig. 6.** Site mean direction diagrams for 22 sites in this study. Solid circle and square represent characteristic direction of each specimen and mean direction in a site, respectively. An oval surround the solid square is a solid angle for 95% confidence. Note that different inclination level of the equal area net is at  $0^{\circ}$ (A to K) and at  $30^{\circ}$ (L to V). See table 1.

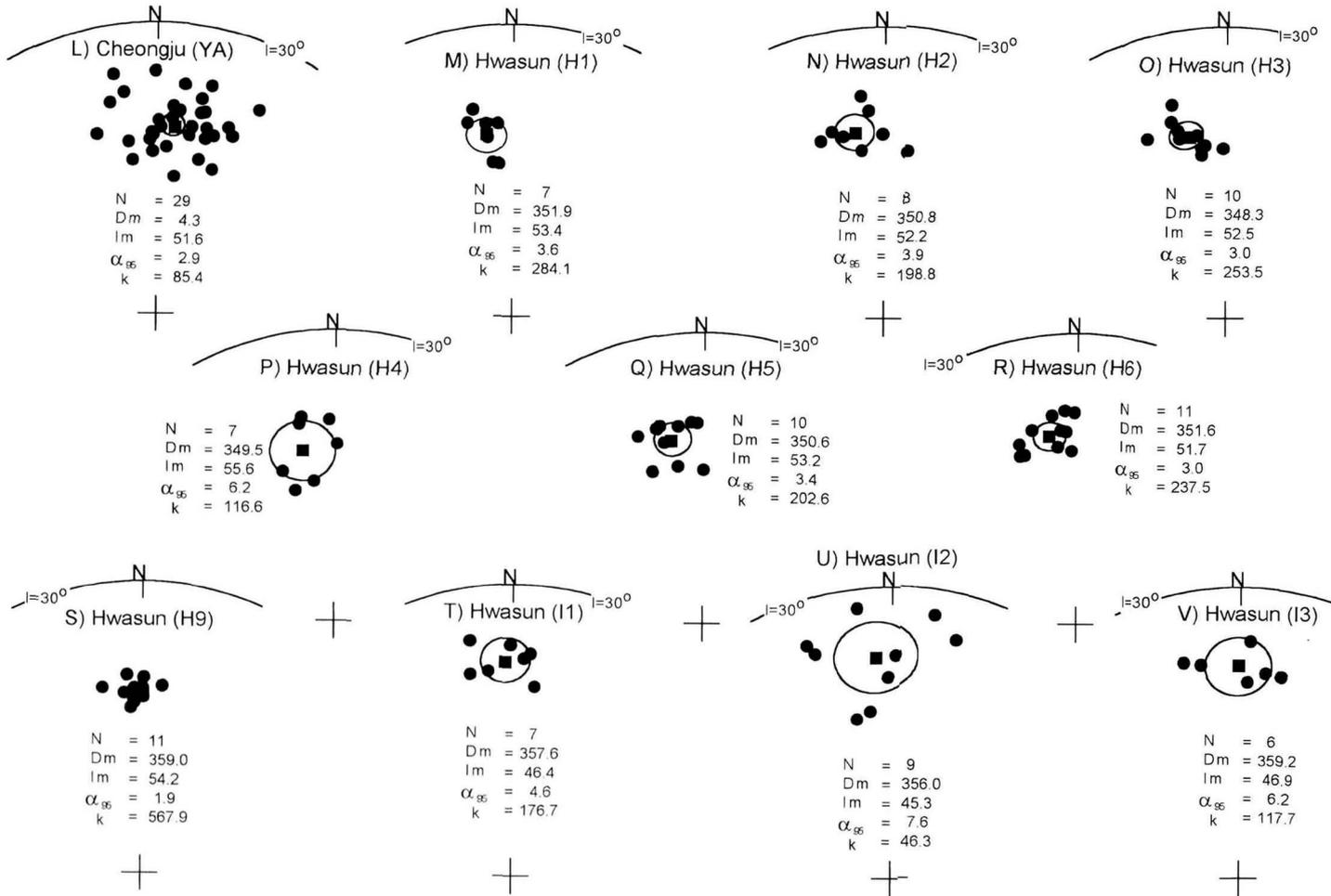
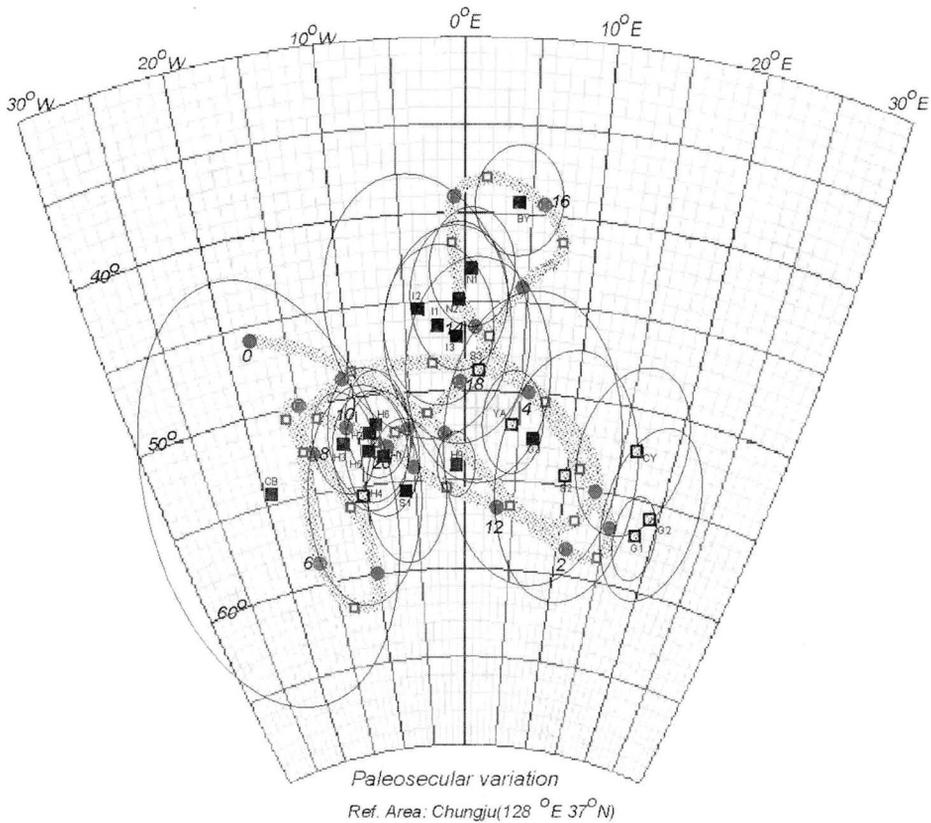


Fig. 6. Continued.



**Fig. 7.** Archaeomagnetic data plotted in t-KPSV(shaded) curve in this study. Gray(solid) square denotes the direction corresponding the periods of AD. 200-450 or AD. 700-900(AD. 0-200, AD. 450-700, and AD. 900-2000) in lower hemisphere. Oval surrounding square is a solid angle for 95% confidence in each site. See text and table 1 for further explanation. Numbers of 0-20 along the shaded zone represent AD. 0-2000, respectively.

값은 서로의 장단점들이 있기 때문에 어떤 것이 더 좋다고 단정지을 수 없으며, 95% 신뢰타원이 적을수록 두 값은 수렴한다. 따라서 A-chron의 경우에 있어서 오차의 상한과 하한은 같지 않을 수 있으나, B-chron의 상하한은 같다. 이 연구의 22개 장소에서 구한 A-chron과 B-chron의 차이는 평균 8년으로, 서로 거의 일치함을 보여준다(표 1).

그림 7에 있어서, t-KPSV에 표시된 검은 원과 작은 빈 네모는 각각 서기 매 100년과 50년에 해당하는 영년변화방향의 위치로써, 매 200년마다 숫자가 붙여져 있다(예를들면, 12는 AD 1200년을 의미함). 과거 2000년간 t-KPSV의 궤적은

편각이  $\pm 20^\circ$ , 복각이 약  $40-60^\circ$ 의 범위를 나타내고 있다. 이 짧은 기간내에도 몇몇 시기의 자화방향은 중복되거나 유사함을 보인다. 이 때문에, 고고지자기 추정연대는 하나 이상의 복수의 연대가 제시될 수 있다(이윤수 외, 1996). 복수의 연대들은 통상 수백년의 차이를 보이며, 유물의 형태나 특징 등에 의해 고고지자기 연대가 결정된다.

표 1에서 제시된 추정 유물연대는 보고서나 유물 발굴에 참여했던 고고학의 전문가로부터 파악한 정보이며, 고고지자기 연대(A-chron과 B-chron)와 좋은 일치를 보이고 있다. 표 1에서 첨부된 C-chron은 상대적으로 평균 잔류자화방향에서 멀리 떨어져 있거나, 추정 유물연대를 고려하여, 이

연구의 고고지자기 연대 해석에서 제외된 것이다.

## 6.2 t-KPSV의 적용의 필요성과 검증 시험

한반도의 고영년 변화곡선은 말할 필요도 없이 한반도로부터 직접 자료를 구하는 것이 최선이다. 이를 위해서는 지구자기장이 충실히 기록된 많은 가마나 화산암, 혹은 퇴적물의 잔류자화 방향과 그에 상응하는 연대측정 연구가 병행되어야 한다. 불행히도 한반도에는 화산 활동이 그리 많지 않았기 때문에, 상기 조건에 맞는 시료를 찾는 것은 어려운 실정이다. 역사시대의 화산활동이 드문 우리나라로서 보다 정확한 유물 연대추정을 위해서는 많은 가마터를 발굴하여 표준 영년변화 곡선 궤적을 만드는 수밖에 없다. 이에 적어도 수 백기의 가마터 혹은 화산암류 등의 잔류자화의 자료가 축적되어야 하는 것이어서, 현실을 냉정히 감안할 때, 적어도 가까운 시일 내에 이루어질 것 같지 않다. 이윤수 외(1996)는 지리적으로 가까운 일본의 자료로부터 한반도(참고점, 충주)의 시험적 영년변화(t-KPSV) 곡선을 계산하였다. 이들은 t-KPSV의 기본 가정과 본질적인 문제점에 대하여 논하고(이윤수 외, 1996), 한반도로부터 직접 구한 고고지자기 자료를 보완하여 조금씩 수정하여 나갈 것을 제안한 바 있다. 왜냐하면 한반도(기준 점: 충주)와 서남 일본(기준 점: 교토오)의 위도와 경도가 각각 약 2°와 8° 정도 떨어져 있는 것을 고려한다면, 한반도의 고고지자기 자료를 JPSV에 그대로 적용하기에는 적절치 않기 때문이다. 따라서 그들은 현재 고지자기 및 연대 측정자료의 절대수가 부족한 우리나라에서 앞의 가정들을 전제로 하여 차선책으로 t-KPSV를 제안하였으며, 한반도의 몇몇 가마터에서 측정된 자화 방향이 t-KPSV에 보다 근접하였음을 보고하였다.

이윤수 외(1996)는 서남일본에서 구한 JPSV의 자화방향(편각 및 복각)으로부터, 가상 고지자기극(VGP, Virtual Geomagnetic Pole)을 구한 뒤, 그 VGP에 대하여 한반도에서 기대할 수 있는 편각과 복각을 구하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 지구자기장의 영년변화가 쌍극자 성분에 의해서만 일어난다고 하면, 위도와 경도의 차이로

인하여 달라질 수 있는 편각과 복각의 주요 편차를 보정해 줄 수 있는 가장 보편적인 방법이다. 하지만, 실제 지구자기장은 쌍극자(다시 지축 및 적도 쌍극자로 세분된다) 성분 이외에도 비쌍극자(다시 정체성과 비정체성으로 세분된다) 성분으로 구성되어 있어 (1) 계산한 VGP가 지구 중심을 지나고, (2) 비쌍극자장이 미치는 영향이 한반도와 일본 사이의 좁은 영역에서 고르다는 가정은 실제와 다르며(이윤수 외, 1996), 따라서 인근 서남일본 지역의 표준 고영년 변화 자료로부터 구한 기대되는 편각 및 복각(expected declination/inclination)이 실제의 한반도의 고영년 변화를 지시할 수 있다고는 할 수 없다. 하지만, 이 방법은 적어도 편각 및 복각 분포에 큰 영향을 일으키는 위도에 기인한 차이의 편차를 줄여줄 수 있기 때문에, 비교적 인접하는 지역들 간의 보정 값으로 쓸 수 있다. 실제로 서남일본의 중심부인 교토와 남한의 충주와의 각거리는 6.8°로써, 같은 일본에 위치한 교토와 북해도 지방과의 각거리 10.1°보다 훨씬 가깝다는 것을 감안한다면, 이 같은 발상 전환은 충분히 고려될 수 있는 것으로 보인다. 그러므로 t-KPSV는 한반도의 영년변화를 구하기 위하여 채택된 하나의 방법이며, 이에 대한 유용성은 고고지자기학 연구(이윤수 외, 1996)에서 입증된 바 있다.

한편 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)에서 발표하는 전세계의 자기분포도를 보면 편각과 복각의 변화 구배가 공히 자기장 축에 가까운 고위도 지방에서 극심하게 나타난다. 이것은 편각과 복각의 값이 모두 경도보다는 위도에 더욱 의존도가 크다는 것을 시사한다. 예를 들어, 1990년 일본 국립 천문대에서 일본의 편각(D°)과 복각(I°)의 분포를 경도(g°E)와 위도(w°N)를 함수로 하는 2차식으로 근사하여 나타낸 것을 보면,

$$\begin{aligned}
 D &= 7^{\circ}22.82' + 21.01' \cdot (w-37) - 7.36' \cdot (g-138) \\
 &\quad - 0.197' \cdot (w-37)^2 + 0.587' \cdot (w-37) \cdot (g-138) \\
 &\quad - 0.961' \cdot (g-138)^2 \\
 I &= 50^{\circ}35.85' + 73.6' \cdot (w-37) - 7.71' \cdot (g-138) \\
 &\quad - 0.781' \cdot (w-37)^2 - 0.806' \cdot (w-37) \cdot (g-138) \\
 &\quad + 0.782' \cdot (g-138)^2
 \end{aligned}$$

**Table 2.** Previous historical archaeomagnetic data in southern part of Korea.

Area	Site	n	D	I	$\alpha_{95}$	k	AFD	B'-chron(AD) by JPSV	Estimated time(AD) by Remains	A-chron(AD) by t-KPSV	RN	
Yuseong	Noeun	Y1	17	22.1	54.1	1.0	1308.0	10	3C late-4C early	-	1	
		Y2	15	20.2	56.4	1.1	1229.0	10	3C late-4C early.	-	1	
Chungju	Mireugri	CM	8	358.5	45.1	6.3	69.7	30	1790(±70)	-	2	
Haenam	Jinsanri	HN	18	355.3	56.5	1.8	332.0	none	1150	11C	1130	3
Gangjin	Yongunri	KJ	21	359.7	52.9	3.0	26.3	none	1170(±30)	10-12C	1135	4
Changnyeong	Yeochori	R1	25	10.7	48.2	4.2	48.3	none	1340(±15)	c. 1400	1395	5
	Sanggogri	R2	13	7.2	51.4	1.9	467.0	10	1340(±15)	c. 1400	1340	6
	Sanggogri	R3	19	2.6	48.0	2.3	210.0	none	1340(±15)	c. 1400	1385	6
	Sanggogri	R4	7	0.7	40.1	3.0	394.7	none	1340(±15)	16C	1485	6
Boryeong	Cheonbang	B1	13	344.6	60.8	6.4	42.8	30	-	JS	625(+25/-60)	7
		B2	19	347.6	53.4	4.0	73.0	30	-	BJ-TS	785(+45/-50)	7
		B3	11	9.1	51.3	3.5	169.0	30	-	-	1340(+15/-30)	7
		B4	8	357.8	38.1	4.3	168.0	30	-	JS	1510(+50/-65)	7
		B5	19	3.6	46.7	3.0	127.0	30	-	JS	1735(+35/-35)	7

RN, reference number; 1, Seong and Hirooka(2000); 2, Baag(1995); 3, Ito *et al.*(1992a); 4, Kim and Bae(1993); 5, Baag(1996); 6, Ito *et al.*(1992b); 7, Lee *et al.*(1996)

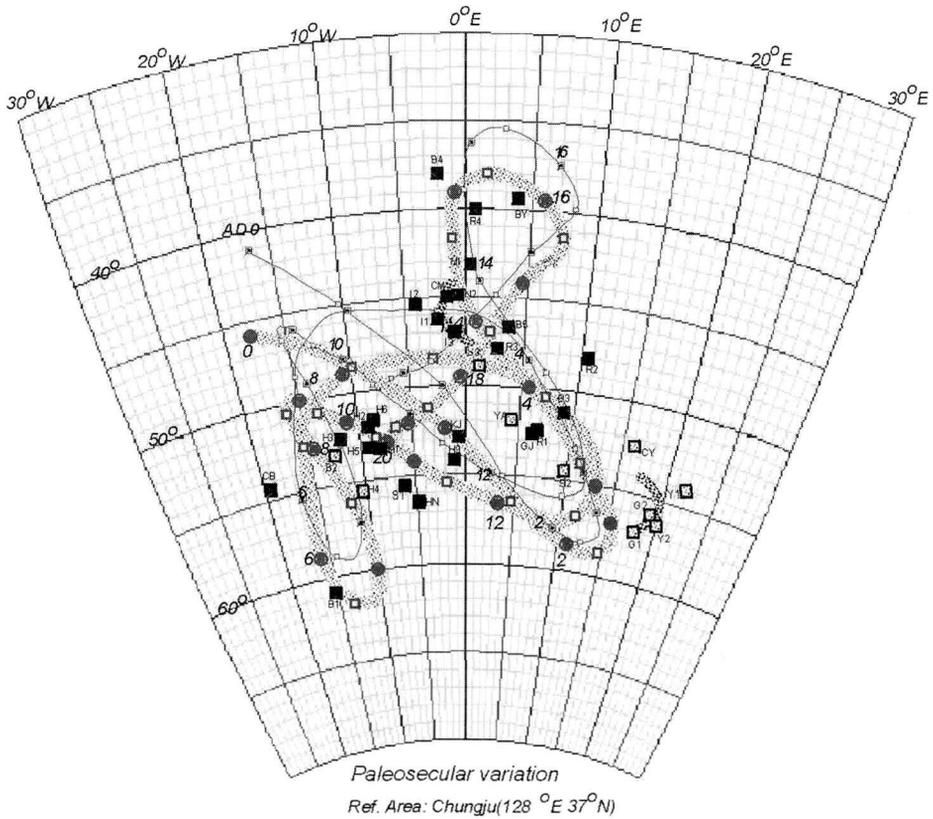
로써, 편각(D)과 북각(I)은 모두 위도(w)에 대한 계수(각각 21.02 및 73.6)가 경도(g)에 관한 계수(각각 7.36 및 7.71)보다 훨씬 크다. 이러한 이유 때문에, 위도 차이가 있는 한반도에서 구한 자료를 서남 일본에 직접 대비하는 것은 정확도가 떨어질 수 있다.

표 2는 기존에 실시된 고고지자기 연구 결과(김광호, 배영부, 1983; 박창고, 1996; 성정미와 廣岡公夫, 2001; 伊藤晴明 외, 1992a, 1992b; 이윤수 외, 1996)를 나타낸 것으로, 이들 중 이윤수 외(1996)의 보령지역(B1-5)을 제외한 나머지 지역의 연구 결과들은 모두 서남일본의 JPSV에 대비하여 고고지자기 연대(편의상, B'-chron이라 하자)를 구한 것이다. 이들 중 이미 추정유물연대가 제시된 6개 장소(Sites HN, KJ, R1-R4)에 대해서, t-KPSV에 의한 A-chron을 각각 구하여 비교하

였다(표 2). 이 6개 장소에 대하여 제시된 B'-chron과 A-chron의 연대 값이 같거나 공히 유물연대에 포함되었던 2개 장소(각각 Sites R2과 KJ)를 제외한 4개 장소(Sites HN, R1, R3, R4) 모두에서, A-chron 값이 B'-chron 값보다 추정 유물연대에 좀 더 근접한 값을 나타낸다. 이는 한반도로부터의 고고지자기 연대추정에 있어서, t-KPSV에 적용하는 것(A-chron, 혹은 B-chron)이 JPSV에 적용하는 것(B'-chron)보다 정확할 수 있음을 시사한다.

**6.3 t-KPSV의 개선점**

이번 연구 결과(22개 장소; 표 1, 그림 7)와 기존의 연구 결과(14개 장소, 표 2)를 종합하여, 한반도에서 구한 총 36개 장소에 대한 평균자화방향을 t-KPSV(이윤수 외, 1996)에 도시하였다(그림 8). 고고지자기 연대가 동떨어져 있지만 자화방향



**Fig. 8.** Archaeomagnetic data plotted in t-KPSV(shaded) and JPSV(solid line) curves in this and previous results. Two dotted zones near 20°E and 0°E are observed deviations of declination in western Korea. See text and table 2 for further explanation.

이 비슷한 분포를 갖는 AD 200-450년과 AD 700-900년에 해당하는 것들에 대해서는 회색 네모로, 나머지 시기의 것들은 검은 네모로 표시하였으며, 그 부근에 장소 명을 기재하였다. 이들의 분포는 명백히 서남일본의 JPSV(Hirooka, 1971; 실선과 그 위의 작은 원)보다 t-KPSV에 높은 일치를 보이고 있다. 이는 6.2절에서도 기술했듯이 국내의 고고지자기 자료를 t-KPSV의 기본 가정이 성립하고 있음을 시사한다.

그렇지만, 특정 시기에 있어서 일부 국내의 자료들은 t-KPSV로부터 편이되어 분포하는데, AD 200-350년과 AD 1400-1450년의 구간에서 나타난다. 즉, t-KPSV에 있어서, 전자의 구간에서는

편각이 동쪽으로 약 5° 편이되어 분포하며(성정미와 廣岡公夫(2001)에서도 논의), 후자의 구간에서는 서쪽으로 약 2-3° 편이되어 분포한다(각각 작은 점무늬의 띠로 도시). 물론, 국내의 고고지자기학 자료들이 연대 측정이 수반되지 않아 t-KPSV의 정확한 연대에 대비할 수 없고, 각 평균자화방향들을 구성하는 장소나 시료의 개수가 부족하여 아직은 t-KPSV와 동등하게 비교할 수 있는 단계는 아니다. 하지만, 서로 독립된 다수의 연구자들에 의해 다수의 지역에서 계통적으로 비슷한 분포를 나타내는 연구 결과가 제시되었다는 점은 매우 주목할 일이며, t-KPSV가 부분적으로 개선되어야 할 유력한 부분임에는 틀림없다.

## 7. 결 론

한반도의 공주, 논산, 부여, 서산, 천안, 청원, 청주, 화순지역에서 발굴된 고고학 유적지(총 24개 장소)로부터 고고지자기 연구를 실시하여, 1차특성 자화를 구하였다. 이들의 주요 자성광물은 단자구의 자철석으로 규명되었다. 이 중 22개 장소로부터 구한 평균잔류자화방향은 3세기에서 16세기 동안 한반도에서의 고영년변화의 기록으로 해석되었으며, 고고학 유물연대와 합치된다. 현재까지 한반도에서 구하여진 고고지자기 자료들은 전반적으로 서남일본의 영년변화 곡선(JPSV)보다 한반도의 시험적 영년변화 곡선(t-KPSV)에 잘 일치하여, 고고지자기 연대추정에 t-KPSV의 유용성이 입증되었다. 또한, AD 200-350년과 AD 1400-1450년의 구간에서 t-KPSV로부터 편각이 각각 동쪽으로 약 5° 및 서쪽으로 약 2-3° 편이되어 분포하는 현상은, 상기 구간의 시기에 t-KPSV가 부분 수정될 가능성이 있어, 주목되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

먼저 이 연구를 위하여 적극적인 지원을 하여주신 고고학계의 많은 선생님들께 깊은 감사를 드립니다. 또한 본 연구에 조언을 아끼지 않으신 민경덕(연세대), 석동우(한양대), 황재하(한국지질자원연구원) 선생님과 이미 고인이 되신 김광호, 이동영 선생님께 고마움을 표합니다. 한반도의 시험적영년변화 곡선(t-KPSV)은 <<http://ysgeo.yonsei.ac.kr>>의 <자료실>에서 download 받으실 수 있습니다.

## 참고문헌

김광호, 배영부, 1983, 사적68호 고려청자도요지의 고고지자기. 광산지질, 16, 253-256.  
 박창고, 1996, 중원군 미륵리 백자가마터에 대한 고고지자기 측정 및 국내 가마터에 대한 고고지자기 측정 결과. 지질학회지, 32, 313-323.  
 성정미, 廣岡公夫, 2001, 노은동 유적요지의 고고지자기학

적 연구. 대전광역시 유성구 노은동 유적발굴조사 사업 보고서, 한창균(ed.), 출판 예정.  
 伊藤晴明, 時枝克安, 윤선, 김영도, 1992a, 진산리7호 요지의 자연잔류자화 측정 결과에 관하여. 해남 진산리 농청자요지, 목포대학교박물관, 제27책, 155-162.  
 伊藤晴明, 時枝克安, 윤선, 김영도, 1992b, 창녕 여초리 잔류자기 측정. 창녕 상곡리 기와 가마터, 창녕 상곡리 와요지의 국립진주박물관 유적조사보고서, 제6책, 국립진주박물관, 55-60.  
 이운수, 이동영, 서광수, 1996, 충남 보령 용수리 천방 와요지의 가마터에 대한 시험적인 영년변화곡선의 적용성에 관한 고지자기 연구. 천방유적, 공주대학교 박물관, 255-276.  
 Bragiskiy, S.I., 1964, Magnetohydrodynamics of the earth's core. Geomagnetizm Aeronomiya, 4, 698-705.  
 Bloxham, J. and Gubbins, D., 1987, Thermal core-mantle interactions. Nature, 325, 511-513.  
 Bullard, E.C., Freedman, C., Gellman, H., and Nixon, J., 1950, The westward drift of earth's magnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A243, 67-92.  
 Butler, R.F., 1992, Magnetic domains to geologic terranes. Blackwell Science, Boston, 319 p.  
 Chapman, S. and Bartels, J., 1940, Geomagnetism. Vols. 1 and 2, Oxford University Press, Oxford.  
 Day, R., Fuller, M., and Schmidt, V.A., 1977, Hysteresis properties of titanomagnetite: grain size and compositional dependence. Physics of the Earth Planetary Interiors, 13, 260-267.  
 Hirooka, K., 1971, Archaeomagnetic study for the past 2000 years in southwest Japan. Memoirs of the Faculty of Science Kyoto University, 38, 167-207.  
 Kirschvink, J.L., 1980, The least square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 62, 699-718.  
 Scollar, I., 1965, A contribution to magnetic prospecting in archaeology. Archaeo-Physica, 1, 91-92.  
 Yukutake, T. and Tachinaka, H., 1968, The non-dipole part of the earth's magnetic field. Bulletin of Earthquake Research Institute, 46, 1027-1074.

투 고 일 : 2001년 3월 10일  
 심 사 일 : 2001년 3월 15일  
 심사완료일 : 2001년 3월 27일