

충주 칠금동 392-5번지 일대 제철 유적에 대한 고고지자기학적 연구

동양대학교 성 형미

원리

흙에는 磁鐵鑛(magnetite, Fe_3O_4)이나 赤鐵鑛(hematite, Fe_2O_3)등의 철산화물이 포함되어 있으며 이것들은 자석이 될 수 있는 磁性鑛物이다. 자기적인 성질에 따라 분류하면 자철광은 페리磁性(ferri magnetism), 적철광은 反強磁性(antiferromagnetism)을 가지는 물질이다. 일반적으로 이와 같은 자성광물은 흙 안에 1~3%정도 포함되어 있으며, 이들 자성광물이 가열되어 퀴리점이라고 불리는 그 광물의 고유의 온도에 도달하면 常磁性(para magnetism)으로 변하여 자석이 되는 성질(磁性)을 잃어버리게 된다. 이 반응은 可逆的으로 자성을 잃어버렸던 고온의 常磁性 상태에서부터 식혀져 온도가 퀴리점까지 내려가면, 그 순간 거듭 자성을 되찾아 磁化를 가진 자석으로 돌아온다. 이와 같은 「가열-냉각」의 과정이 지구전체에 작용하고 있는 地球磁場中에서 행하여지면, 가열된 자성광물은 냉각된 그 당시 그 장소의 지구자장(地磁氣) 방향으로 磁化된다. 이와 같은 과정을 통해 획득된 자화를 熱殘留磁化(thermoremanent magnetization, TRM)라고 한다. 열잔류자화는 常溫에서는 자기적으로 상당히 안정된 것이 많으며 수백만 년이 지나도 잔류자화의 방향이나 세기는 변하지 않고 보존된다. 따라서 과거의 어느 시기에 구워진 소토는 그 당시, 그 장소의 지자기 방향이나 강도를 열잔류자화의 형태로써 기억하고 있는 것이 된다. 熱殘留磁化는 말하자면 과거의 지자기를 기록하고 있는 ‘地磁氣의 化石’이라고 말할 수 있는 것이다.

지구상의 장소(위도, 경도)가 다르면 지구자장의 방향과 세기도 달라진다. 또한 상당히 느릿한 변화이지만 시간적으로도 변화하고 있으며, 이것을 地磁氣 永年變化(geomagnetic secular variation)라고 부른다. 지자기는 3차원의 벡터 량이며 수평면에 투영한 水平分力의 방위와 지리학적인 북(眞北)이 이루는 각인 偏角(declination)과 수평면으로부터의 경사각인 伏角(inclination) 및, 벡터의 크기를 나타내는 全磁力(total force)의 3요소로 나타내는 경우가 많다. 지자기를 직접 관측하여 지구자장의 방향(편각 및 북각)을 알 수 있게 된 것은 영국 런던에서 16세기 후반에 시작된 연속적 관측이 가장 오래된 기록이며, 그것에서도 명확하게 지자기 영년변화가 보여진다. 그러나 그 이후 400년 이상의 관측결과를 가지고 볼 때는 그 변동은 그것이상의 긴 주기인 모양으로 변동주기는 알려져 있지 않다.

고고학적인 유적에 남겨져 있는 노지나 요지 등의 소토 유구에서 측정시료를 채취하여 그TRM을 측정한 후에, 고고학이 취급하는 시대의 지자기 변동을 밝히는 연구를 考古地磁氣學(archaeomagnetism)이라고 한다. 일본에서는 北陸・東海지방에서

九州北部에 걸치는 서남일본의 각지에 분포하는 유적으로부터 채취한 소토 시료에 대해 고고지자기 측정이 이루어진 결과, 과거 2000년간에 대해서는 상당히 상세한 고고지자기변동(archeo-secular variation 또는, archeomagnetic secular variation)의 곡선이 구해져 있다(Hirooka 1971; 廣岡 1977). 소성연대를 알 수 없는 소토의 잔류자기 방향을 측정하여 변동곡선과 照合하는 것에 의해, 고고지자기학적으로 연대를 추정하는 것이 가능하다. 이것이 고고지자기 연대추정법이다.

지구자장의 방위는 지역에 따라 다르지만 유감스럽게도 우리나라에는 아직 고고지자기변동곡선이 작성되어 있지 않은 상태이므로, 우리나라와 지리적으로 가장 가까운 서남일본의 고고지자기변동곡선을 어쩔 수 없이 準用한다. 지금까지 이루어졌던 우리나라의 고고지자기 측정결과(성형미 2005)에서 볼 때, 일부의 시대에서 차이를 보이기는 하지만 다행스럽게도 대체적으로 서남일본의 지자기변동과 거의 같은 변화를 하고 있는 것을 알 수 있다.

시료의 채취와 자화측정

시료의 채취는 다음과 같은 순서로 이루어진다. 우선 유구 바닥의 잘 구워진 부분을 골라 소토를 고고지자기 시료채취용 칼로 깎은 후, 18mm×18mm×25mm정도 크기의 기둥모양으로 잘라낸다. 이 때 기둥모양의 소토가 부러지거나 기울어지지 않고 소토의 뿌리 부분이 유구에 붙어있는 그대로의 상태가 유지되도록 주의한다. 다음은 물에 갠 석고를 넣은 시료채취용의 24mm×24mm×24mm 플라스틱 케이스 (plastic cube)를 위에서부터 기둥모양의 소토에 뒤집어 씌운다. 기둥모양 소토의 뿌리 부분에도 물에 갠 석고를 뿌려 보강해 둔다. 석고가 굳어지면 플라스틱 큐브 背面(상자의 底面)의 최대 경사선의 방위(pitch)와 그 경사각(dip)을 고고지자기용의 특제 클리노미터(Hirooka 1971)로 측정하여 야장에 기록한다. 큐브의 背面에는 그 면의 走向(strike)을 나타내는 선과 시료의 번호를 적은 후, 유구로부터 시료를 떼내어 비닐봉투에 넣어 밀봉한다.

보통 한기의 유구로부터 이와 같은 시료를 10개 전후로 채취하여 연구실로 가지고 가서, 큐브의 開口部도 석고로 막아서 측정용 시료로 한다. 충주 칠금동 392-5번지 일대 제철 유적에서는 제련로 7기로부터 70개의 시료를 채취하였다. 고고지자기 시료번호는 표1에 정리되어 있다.

잔류자화의 측정에는 일본 夏原技研製の ring core type spinner magnetometer를 사용하여, 플라스틱 큐브의 여섯 면을 한 면씩 바꿔 놓아서 측정하는 방식으로 이루어졌다. 한번에 자력계의 회전축에 직교하는 평면내의 직교 2성분이 측정 가능하므로 여섯 번 바꿔 놓아 측정하면 합계 12성분 즉, X, Y, Z의 직교 3성분을 각각 4회씩 측정하는 것이 된다. 4개 데이터의 평균치를 각각 X, Y, Z의 성분으로 한다. 이 X, Y, Z와 유적에서 측정한 pitch와 dip의 값을 이용하여 그 시료의 편각, 복각, 자화강도를 계산에 의해 구한다. 이렇게 구해진 시료 각각의 편각은 클리노미터로

측정한 자북을 기준으로 한 방위이므로, 진북을 기준으로 한 편각을 구하기 위해서는 유적이 위치한 장소의 현재 편각(Dp)의 값(-7.0, 충주 1/25000)만큼 보정하지 않으면 안 된다.

측정시료는 여러 가지 자기특성을 가지는 자성광물의 집합으로 이루어져 있으며, 그 중에는 자기적으로 안정적이지 못한 것도 포함되어 있는 경우가 많다. 이러한 불안정한 자화성분에는, 최종소성이 이루어져 열잔류자화를 획득한 이후부터 현재가 되기 까지 지구자장에 계속해서 노출되어 있기 때문에, 후세의 지구자장의 영향을 받아서 자화방향을 바꿔버린 것도 포함되어 있다. 이와 같은 자화성분은 소성 당시의 지자기의 화석이라고 말할 수 없는 것이 되었기 때문에, 그것들을 제거하여 최종소성 당시의 지자기의 방향을 충실히 기록하고 있는 안정된 자화성분만을 골라내는 작업이 필요하다. 이와 같은 불안정한 자화성분을 효과적으로 제거하는 실험적인 수단으로 시료를 交番磁場中에 두어 자기적으로 혼든다고 하는 交流消磁실험이 고안되어 있다. 시료가 처음부터 가지고 있는 잔류자화(自然殘留磁化, natural remanent magnetization, NRM)를 측정 한 후에, 단계적으로 교번자장의 세기를 올려가는 단계교류소자가 가장 일반적으로 이용되는 수법이다.

충주 칠금동 392-5번지 일대 제철 유적의 시료에 대해서도 교류소자실험을 하였는데 교류소자에는 夏原技研製의 교류소자장치를 이용하였으며 각 단계마다 소자실험이 끝나면 잔류자화를 측정하여 자화방향의 분산 정도나 자화강도의 감소 정도를 검토하여, 가장 효과적으로 불안정한 잔류자화성분을 제거할 수 있었던 단계(최적소자단계)를 판정한다. 그런데 아쉽게도 19호 제련로에 대해서는 의미가 있는 고고지자기 측정결과를 구할 수가 없었다. 해당 유구에서 채취한 소토시료의 소성온도가 높지 않거나 지속적으로 소성이 이루어지지 않은 이유 등으로 안정적인 잔류자화가 남아 있지 않았거나, 최종 소성 이후 교란된 소토에서 시료를 채취하였을 가능성을 추정해 볼 수 있다.

잔류자화의 측정결과

표2~7에는 충주 칠금동 392-5번지 일대 제철 유적의 제련로 6기에 대한 최적소자단계의 자화측정결과를 정리하였다. 표에 *印이 붙은 시료는 집중된 자화방향을 나타내는 시료로부터 벗어난 방향을 가지는 시료를 나타내며, 평균 자화방향을 구하는 통계계산 때에는 이들 시료는 제외하였다. 평균자화방향을 구하는 통계처리에는 Fisher의 통계법(Fisher, 1953)을 이용하였다. 각 단계마다 평균편각(D), 평균북각(I), Fisher의 신뢰각(α_{95}), Fisher의 精度係數(K), 평균자화강도를 계산한다. α_{95} 는 측정데이터로부터 생각될 수 있는 진실의 자화방향이 95%의 확률로 존재하는 범위를 나타내는 것이므로 그 범위는 계산에 의해 얻어진 평균자화방향을 중심으로 그 주변 $\pm \alpha_{95}$ 의 각도내인 것을 의미하고 있다. 이 각도는 작으면 작을수록 자화의

집중정도가 좋은 것을 의미하며, 소성 상태가 좋아 자화방향의 집중도가 좋은 요지의 경우에는 α_{95} 의 값이 3°보다 작아 진다. K는 시료 하나하나의 자화의 분산정도를 나타내는 것으로 값이 크면 클수록 자화방향의 분산이 적은 것을 말하며, 요지의 경우는 보통 500이상의 값이 된다.

각 소자단계에서 자화강도, 자화방향 등을 고려하여 과거의 지자기기록이 아니라고 생각되는 시료를 제외하고 D, I, α_{95} , K를 계산하여, α_{95} 가 가장 작고 K가 가장 큰 단계를 최적소자단계로 결정하여 그 측정결과를 고고지자기 데이터로서 채용한다. 측정된 시료의 개수(N)와 그 소자단계에서 통계계산에 사용한 시료의 개수(n)를 덧붙여 그 결과는 표8에 정리되어 있다.

고고지자기연대의 추정

앞에서도 설명하였지만 지자기방위의 지역차 때문에 우리나라의 고고지자기 변동은 일본의 그것과 상당히 다를 수 있다는 가능성을 부정할 수는 없으나, 우리나라의 상세한 고고지자기 변동곡선이 완성되어 있지 않은 현재의 상황에서는 지리적으로 가장 가까운 서남일본의 변동곡선(Hirooka 1971; 廣岡 1977)을 準用하는 것이 가장 적절하다고 생각된다.

표8의 최적소자단계의 결과를 일본의 변동곡선에 plot하면 도1과 같이 된다. 도1에는 충주 칠금동 392-5번지 일대 제철 유적의 제련로 6기에 대한 측정결과를 도면화 하였으며, 검은 점이 각 유구의 평균자화방향을 표시하며 α_{95} (Fisher의 95%레벨의 신뢰각)는 검은 점을 둘러싼 원으로 표시되어 있다. 이 변동곡선이 충주 칠금동 392-5번지 일대 제철 유적 부근의 과거 지자기변동을 올바르게 나타내고 있는 것이라면, 검은 점에서 가장 가까운 변동곡선의 연대가 고고지자기학적으로 추정되는 유구의 연대가 된다. 또한 이 추정연대의 폭(오차)은 α_{95} 의 원에 덮이는 곡선의 선분의 길이로 표시된다. 도1에서 추정되는 고고지자기 연대는,

14호 제련로 : A.D.395 ± 35년

16호 제련로 : A.D.325 ± 30년

17호 제련로 : A.D.250 ~ 360년

18호 제련로 : A.D.385 ± 15년

23호 제련로 : A.D.250 ~ 300년

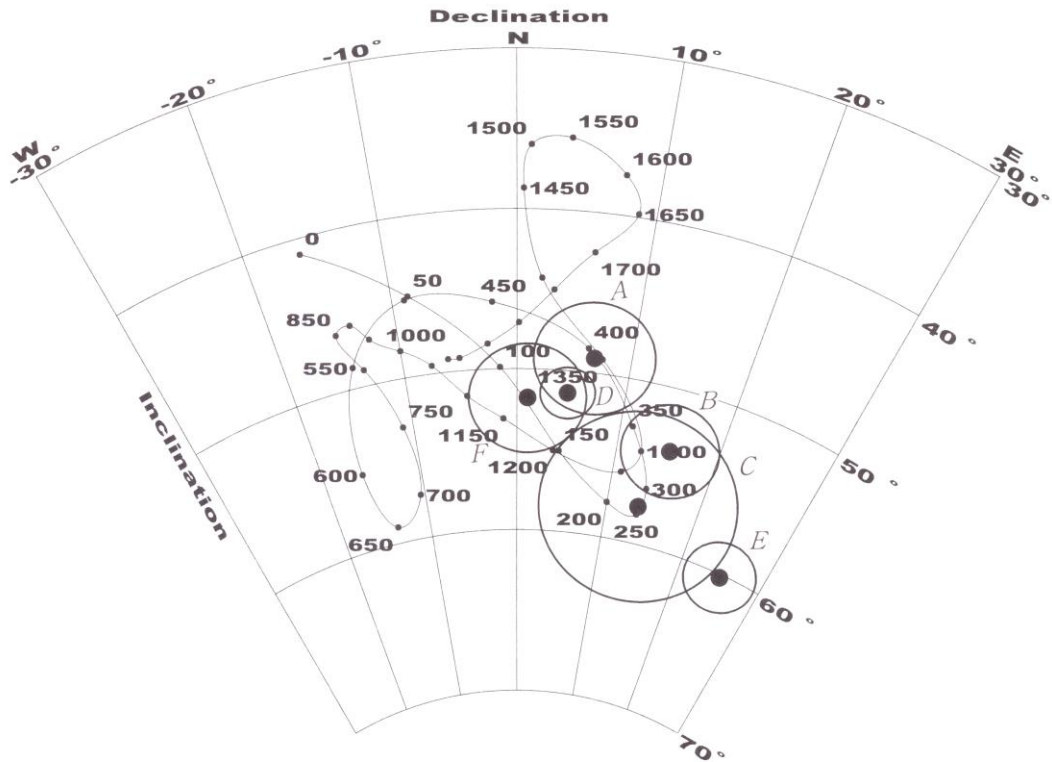
24호 제련로 : A.D.400 ± 35년

이 된다. 마지막으로 본 유적에 대한 고고지자기시료의 채취와 측정의 기회를 주신 국립중앙문화재연구소의 소장님, 한 지선 선생님을 비롯한 발굴조사 관계자 여러분들께 깊은 감사를 드린다.

<참고문헌>

- Fisher, R. A. (1953) Dispersion on a sphere, Proceedings of Royal Society of London, Series A, vol.217, 295-305.
- Hirooka, K. (1971) Archaeomagnetic study for the past 2,000 years in Southwest Japan, Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ., ser. Geol. & Mineral., 38, 167-207.
- 広岡公夫 (1977) 考古地磁気および第四紀古地磁気研究の最近の動向, 「第四紀研究」, vol.15, 200-203.
- 広岡公夫, 成亨美 (2000) 日本と韓国の古代における地磁気永年変化の比較, 「研究年報」, 富山大学環日本海地域研究センター, 第25巻, 193-204.
- 成亨美, 広岡公夫 (2000) 韓国の考古地磁気変動に関する研究とその考古学的応用, 「考古学と自然科学」, 日本文化財科学会誌, 第39号, 15-32.
- 성형미 (2002) 한국에 있어서 지자기 영년변화의 측정, 「한국제사기학회지」, 한국제사기학회, Vol. 16, No. 2, 33-38.
- 성형미 (2003) 고고학에서 이용 가능한 고고지자기 분석법, 「畿甸考古」, 경기문화재단 부설 기전문화재연구원, 제3호, 223-238.
- 성형미 (2005) 韓國考古學 編年研究를 위한 考古地磁氣學의 基本原理 및 適用, 「韓國考古學報」, 韓國考古學會, 55輯, 5-34.
- 성형미 (2006) 고고지자기 데이터의 신뢰도를 높이기 위한 주의와 노력, 「石軒鄭澄元教授 停年退任記念論叢」, 釜山考古學研究會, 793-804.
- 성형미 (2006) 과학적 연대측정법의 진전과 과제, 「韓國先史考古學報」, 韓國先史考古學會, 12, 205-220.
- 성형미 (2010) 고고지자기 연대측정법의 연대값과 오차범위에 대한 이해, 「부산대학교 고고학과 창설20주년 기념논문집」, 부산대학교 고고학과, 1057-1068.

도면의 설명



도1 서남일본의 고고지자기 변동곡선과 충주 칠금동 392-5번지 제철 유적의 고고지자기 측정결과
 A : 14호 제련로, B : 16호 제련로, C : 17호 제련로, D : 18호 제련로, E : 23호 제련로,
 F : 24호 제련로.

표 1 충주 칠금동 392-5 번지 일대 제철 유적의 고고지자기 시료번호

유구명	개수	시료번호
14 호 제련로	10	CC 1~10
16 호 제련로	10	CC 11~20
17 호 제련로	10	CC 21~30
18 호 제련로	10	CC 31~40
19 호 제련로	10	CC 41~50
23 호 제련로	10	CC 51~60
24 호 제련로	10	CC 61~70

Dp = -7.0° (충주, 1/25000)

표 2 14 호 제련로의 5.0mT 소자후의 자화측정결과

시료번호	편각 (° E)	복각 (°)	자화강도 (×10 ⁻³ Am ²)
CC 1	8.6	53.0	4.58
2	4.8	50.1	4.04
3	5.5	48.3	3.20
4	10.0	43.9	3.25
* 5	9.6	40.3	5.12
* 6	-18.3	65.2	21.2
* 7	15.0	57.7	16.1
* 8	1.7	58.0	2.58
9	4.9	50.1	2.50
* 10	16.5	34.8	2.77

* : 통계계산시 제외된 시료.

표 3 16 호 제련로의 5.0mT 소자후의 자화측정결과

시료번호	편각 (° E)	복각 (°)	자화강도 (×10 ⁻³ Am ²)
*CC 11	26.0	34.8	2.73
* 12	-23.8	17.7	21.2
* 13	64.2	11.4	2.92
14	11.9	51.5	1.26
* 15	13.3	61.8	3.61
16	16.2	55.5	14.7
17	18.9	57.9	15.9
18	11.2	54.8	17.6
19	20.3	52.4	21.6
20	13.8	50.8	3.14

* : 통계계산시 제외된 시료.

표 4 17 호 제련로의 NRM 의 자화측정결과

시료번호	편각 (° E)	복각 (°)	자화강도 (×10 ⁻³ Am ²)
*CC 21	-6.9	59.4	1.43
22	4.0	55.0	0.758
23	18.7	54.9	1.04
* 24	-12.2	56.7	1.26
* 25	-24.6	47.8	1.24
26	16.5	62.8	3.69
27	15.3	57.4	13.5
* 28	38.7	57.2	11.8
* 29	52.4	53.5	6.12
* 30	40.2	51.0	6.26

* : 통계계산시 제외된 시료.

표 5 18 호 제련로의 5.0mT 소자후의 자화측정결과

시료번호	편각 (° E)	복각 (°)	자화강도 (×10 ⁻³ Am ²)
*CC 31	23.7	40.9	1.81
* 32	37.6	55.9	1.49
* 33	19.1	48.4	14.2
* 34	24.1	46.8	6.92
* 35	24.7	52.3	15.2
36	2.1	51.1	9.20
37	4.7	50.0	20.7
38	6.9	52.0	32.0
39	4.1	50.7	27.7
40	6.0	53.3	29.1

* : 통계계산시 제외된 시료.

표 6 23 호 제련로의 10.0mT 소자후의 자화측정결과

시료번호	편각 (° E)	복각 (°)	자화강도 (×10 ⁻³ Am ²)
*CC 51	8.7	38.0	5.26
* 52	-41.3	30.8	6.20
53	31.7	60.9	3.54
54	22.0	59.6	3.03
* 55	35.0	49.4	8.66
56	26.9	58.7	7.18
57	21.6	60.1	6.89
58	23.0	61.5	12.0
* 59	-9.7	64.4	13.1
* 60	-29.7	63.3	7.28

* : 통계계산시 제외된 시료.

표 7 24 호 제련로의 10.0mT 소자후의 자화측정결과

.....				
시료번호	편각	복각	자화강도	
	(° E)	(°)	(×10 ⁻³ Am ²)	
.....				
CC	61	5.9	51.1	0.557
	62	-0.8	52.7	0.617
*	63	24.2	44.0	0.466
	64	-0.3	46.9	0.565
*	65	-58.8	60.1	1.92
*	66	54.2	61.6	1.16
	67	-2.7	53.7	25.0
	68	3.0	54.3	9.61
*	69	-41.3	48.8	4.46
*	70	-15.2	54.3	4.51
.....				

* : 통계계산시 제외된 시료.

표 8 충주 칠금동 392-5 번지 일대 제철 유적 제련로의 고고지자기 측정결과

유구	소자단계	n/N	D (° E)	I (°)	α_{95} (°)	K
14 호	NRM	6/10	5.2	53.5	4.4	228.4
	[5.0mT	5/10	6.8	49.1	3.5	478.3]
	10.0mT	4/10	7.6	49.6	3.8	581.6
16 호	NRM	7/10	15.7	55.3	3.4	307.8
	[5.0mT	6/10	15.3	53.9	2.9	537.6]
	10.0mT	5/10	16.3	55.8	3.2	577.1
17 호	[NRM	4/10	13.5	57.7	5.9	245.5]
	5.0mT	5/10	4.5	58.5	6.1	157.1
	10.0mT	5/10	4.0	60.8	7.9	95.9
18 호	NRM	5/10	4.9	51.4	2.3	1069.7
	[5.0mT	5/10	4.7	51.4	1.6	2229.2]
	10.0mT	5/10	4.8	51.6	1.9	1615.5
19 호	NRM	5/10	-10.4	63.4	8.4	83.8
	5.0mT	4/10	-10.2	62.5	9.7	89.9
	10.0mT	3/10	-5.5	64.0	7.1	306.5
23 호	NRM	5/10	25.0	59.3	2.3	1095.5
	5.0mT	4/10	26.2	60.2	4.0	522.1
	[10.0mT	5/10	25.0	60.2	2.2	1159.9]
24 호	NRM	5/10	-2.6	51.2	7.5	106.1
	5.0mT	5/10	1.8	51.9	4.6	274.5
	[10.0mT	5/10	1.0	51.8	3.4	496.9]

n/N : 採擇試料個數/採取試料個數, D : 平均偏角, I : 平均伏角, α_{95} : Fisher 의 信賴角, K : Fisher 의 精度係數. [] : 고고지자기 측정결과로 채택한 데이터(최적소자단계).