

천리포 습지퇴적물을 이용한 제4기 고환경 연구: 고지자기학을 중심으로

박용희¹⁾, 도성재²⁾, 양동윤³⁾, 남옥현³⁾

1. 서 론

고지자기 연구는 암석 또는 퇴적물에 기록된 과거의 지구자기장의 변화 및 자성광물의 함량, 입자크기, 종류 등의 변화 등을 분석하여 다양한 지구과학 및 고고학 분야(예, 지구조 운동, 절대연대 측정, 층서대비, 고환경 복원, 환경오염 지시자 등)에 적용될 수 있다. 특히, 퇴적물 내의 자성광물은 고기후의 변화, 해수면의 변동, 산화 및 환원 환경의 변화, 퇴적물의 유입량 등에 민감하게 반응할 뿐만 아니라, 습지 혹은 호수퇴적층 내 유기물의 함량 변화와도 밀접한 연관이 있기 때문에 제4기 퇴적층기록을 통한 환경변화 연구에 매우 적합한 연구방법이다. 고지자기 연구는 분석 시간 및 비용적인 면에서 매우 효율적인 연구방법으로서, 미국, 유럽, 일본 등 여러 선진국에서는 다양한 해양 및 육성 퇴적물들에 대하여 고지자기를 이용한 제4기환경변화 연구가 활발히 수행되어 많은 자료가 축적되어 있는 반면, 국내의 경우에는 소수의 연구자들에 의해 매우 적은 연구가 수행되어 축적된 연구 자료가 빈약한 실정이다. 본 연구는 천리포 습지퇴적물 코어시료를 이용한 제4기 고환경연구의 일환으로 다양한 자기적 특성을 측정하여 퇴적물의 심도에 따른 자성광물의 함량 변화 및 입자크기의 변화, 그리고 서로 다른 항자기력을 갖는 자성광물의 상대적인 함량비의 변화 등을 바탕으로 하여 퇴적 당시 혹은 퇴적 직후의 고환경 변화 해석에 유용한 자료를 제공하고자 수행되었다.

2. 연구방법

본 연구를 위하여 천리포 습지에서 시추된 길이 5.39 m의 시추공 수직단면에서 내경이 2 cm인 투명한 비자성 플라스틱 박스를 사용하여 수직거리 3 cm 간격으로 총 171개의 퇴적물 시료를 채취하였다. 퇴적물 시료가 건조되면서 플라스틱 박스 내에서 파괴되거나 교란되는 것을 방지하기 위하여 박스를 밀봉하였고, 모든 시료들은 실험 전까지 혹은 실험 도중에 외부 자기장에 의한 이차적인 영향을 제거하기 위하여 외부 자기장이 차단된 μ -metal box 안에 보관하였다.

본 연구에서 사용된 자기적 특성은 대자율(low field magnetic susceptibility, χ_{LF}), 무자기이력잔류자화(anhyseretic remanent magnetization, ARM), 포화등온잔류자화(saturation isothermal remanent magnetization, SIRM), ARM/SIRM, S-ratio 등 이다. 모든 시료에 대

주요어 : 습지퇴적물, 천리포, 제4기 고환경, 고지자기, 자기적 특성

1) 고려대학교 기초과학연구소 (박용희: aegis@korea.ac.kr)

2) 고려대학교 지구환경과학과 (도성재: sjdoh@korea.ac.kr)

3) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 (양동윤: ydy@kigam.re.kr;

남옥현: nahtmwh@empal.com)

하여 Bartington사의 개자율 측정기를 이용하여 χ_{LF} 를 측정하였다. ARM 값은 0.05 mT의 직류를 일정한 방향으로 발생시킴과 동시에 90 mT 단계의 교류소자를 실시하는 방법으로 획득시킨 후 자화강도를 측정하였다. 또한, 시료들에 대해 1000 mT의 직류자기장을 가한 후 획득된 잔류자화강도를 측정하여 SIRM 값을 얻었다. S-ratio ($-IRM_{-100mT}/SIRM$)값은 시료에 특정 방향으로 SIRM을 획득시킨 후, 그 반대방향으로 100 mT의 직류자기장을 가하여 획득되는 등온잔류자화의 세기를 측정하여 두 값의 비로 계산되었다. 이상의 모든 자기특성 값들은 시료의 무게로 나누어 시료의 양적 변화에 의한 영향을 제거하였다.

3. 결과 및 토의

χ_{LF} , ARM, SIRM 값들은 같은 종류의 자성광물이 주로 포함되었을 경우, 일반적으로 자성광물의 함량에 의해 크게 영향 받기 때문에 이들 값의 변화는 자성광물의 함량 변화를 지시한다. 상대적으로 큰 입자(다자기구역)의 자성광물에 의해 주로 기록되는 SIRM값과 작은 입자(단자기구역~위단자기구역)의 자성광물에 의해 영향 받는 ARM값의 비(ARM/SIRM)는 자성광물의 입자 크기 변화를 지시하는 자기적 특성으로 사용된다. 일반적으로 ARM/SIRM 값이 증가할수록 입자크기가 상대적으로 감소함을 의미한다. S-ratio값은 1에 가까울수록 자철석, 자류철석과 같은 항자기력이 작은 웨리자성(ferrimagnetic) 광물이 주로 존재함을 지시하고, 0에 가까울수록 적철석, 침철석과 같은 항자기력이 큰 경사 반강자성(canted antiferromagnetic) 광물이 주로 존재함을 나타낸다(Evans and Heller, 2003).

그림 1은 퇴적물 코어의 깊이에 따른 χ_{LF} , ARM, SIRM, ARM/SIRM, S-ratio의 변화를 나타낸 것으로, 국부적인 변화를 감소시켜 전체적인 변화 양상을 보다 명확히 밝히기 위하여 3-Point Moving Average 결과를 함께 도시하였다. 천리포 습지퇴적물은 χ_{LF} 값이 $-0.8 \sim 66.9$ (10^{-8} m³/kg), ARM값이 $0.004 \sim 2.278$ (10^{-5} Am²/kg), SIRM값이 $0.04 \sim 210.90$ (10^{-5} Am²/kg)의 범위 내에서 변화한다. 자성광물의 함량을 지시하는 χ_{LF} 의 경우, 최하부인 고도 -1.63 m에서부터 0 m 부근까지 비교적 높은 값(평균 3.5×10^{-8} m³/kg)을 보이며, 고도 -0.79 m 부근에서는 특히 상대적으로 높은 값의 peak를 보인다. 고도 0 m에서부터 급격한 값의 감소를 보인 후, 고도 0.30 m부터 0.65 m까지 χ_{LF} 값의 증가와 감소가 나타난다. 고도 0.65 m부터 0.7 (10^{-8} m³/kg) 정도의 낮고 안정된 값이 유지되다가 고도 1.22 m에서 값의 감소를 보인다. 1.22~1.57 m 사이에서 적은 폭의 증가와 감소를 보인 후, 고도 1.57 m에서부터 고도 3.16 m까지 0 근처의 매우 낮은 값이 지속된다. 고도 3.16 m부터 급격한 χ_{LF} 값의 증가를 보이며 고도 3.57 m에서 최대 χ_{LF} 값(66.9×10^{-8} m³/kg)이 나타난다. ARM 및 SIRM의 변화의 경우, χ_{LF} 값의 변화와 대체적으로 유사하였으나, χ_{LF} 값이 0에 가까운 작은 값을 보이는 1.57~3.16 m 구간에서 ARM 및 SIRM은 1.57 m에서부터 2.11 m까지 점진적인 값의 감소를 보이다가 2.11~3.16 m 구간에서 0에 가까운 값을 보인다. 이러한 결과는 1.57~3.16 m 구간에서 χ_{LF} 값의 변화보다는 ARM 및 SIRM값의 변화가 상대적으로 자성광물의 함량 변화를 보다 잘 나타낼 수 있음을 지시한다.

자성광물의 입자크기 변화를 지시하는 자기특성인 ARM/SIRM의 경우, 최하부에서부터 고도 0 m까지 약 0.02정도로 일정한 값을 보이다가 고도 0 m부터 0.30 m 부근까지 값의 증가를 보인다. 이러한 결과는 고도 0~0.30 m 구간에서 자성광물 입자들의 상향 세립화를 지시한다. 고도 0.30 m에서 ARM/SIRM값의 급격한 감소(입자크기의 증가) 이후, 고도 1.22 m 까지 비교적 일정한 값을 보인다. 고도 1.22~2.11 m 구간에서는 점진적인 값의 증가(입자크기의 감소)를 보인 후, 고도 2.11~3.16 m 구간에서는 매우 불규칙적이고 높은 값을 보

이다. 2.11~3.16 m 구간에서의 매우 높은 ARM/SIRM값은 고도 ARM 및 SIRM값 모두 매우 낮기 때문에 생긴 결과로 해석되며, 따라서 이 구간에서의 ARM/SIRM 값은 입자크기의 변화를 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 한편, 고도 3.16 m 이후에는 다시 낮은 값을 보여 입자크기의 증가를 나타낸다.

항자기력이 높은 자성광물과 낮은 자성광물의 상대적인 함량 비를 지시하는 S-ratio값은 최하부에서부터 0 m까지의 구간에서는 -1.31 m, -0.79 m, -0.46 m 부근에서 값의 증가를 보여 세 부분에서 항자기력이 낮은 쉘리자성 광물의 상대적인 양적 증가가 있었음을 지시한다. S-ratio값은 0~0.30 m 구간에서 급격히 감소하여 0.30 m 부근에서는 0.1정도로 매우 낮게 나타나, 항자기력이 높은 경사 반강자성 광물이 주로 존재하고 있음을 반영한다. 이후 2.11 m까지 값이 증가하는 경향을 보여 쉘리자성 광물의 양이 점이적으로 증가하고 있음을 지시한다. 고도 2.11~3.16 m 구간에서의 불안정한 S-ratio값의 변화는 자성광물의 함량이 매우 적기 때문인 것으로 판단된다. 고도 3.16 m에서부터 최상부인 3.60 m까지의 구간에서는 S-ratio값이 다시 증가하여 0.75정도의 높은 값을 보이며, 쉘리자성 광물의 함량이 경사 반강자성 광물에 비하여 상대적으로 증가하였음을 지시한다.

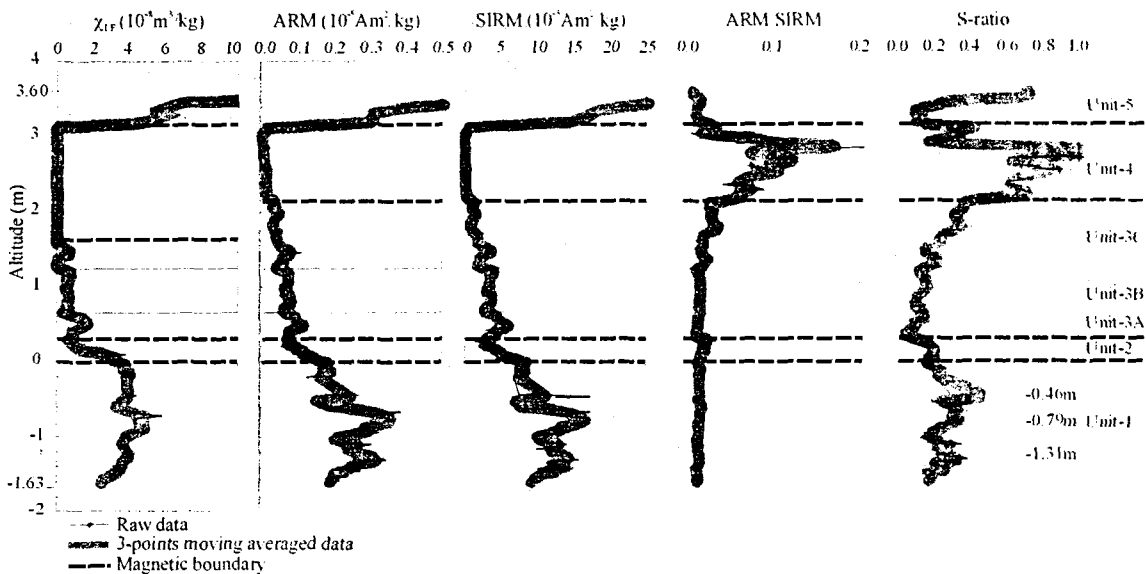


Figure 1. Downcore profiles of paleomagnetic parameters (χ_{LF} , ARM, SIRM, ARM/SIRM, and S-ratio).

자기특성들의 특징적인 변화와 육안으로 관찰된 천리포 코어시료의 퇴적상을 바탕으로 다섯 개의 퇴적환경의 변화를 지시하는 구간들을 설정하였다.

(1) Unit-1 (고도 -1.63~0 m): 자성광물 함량 변화를 지시하는 χ_{LF} , ARM, SIRM값이 높게 나타나고, 고도 -1.31 m, -0.79 m, -0.46 m 부근에서 세 번의 peak를 보인다. χ_{LF} , ARM, SIRM값의 변화와 S-ratio값의 변화가 서로 일치하는 반면, 자성광물 입자 크기 변화를 지시하는 ARM/SIRM값은 변화 없이 약 0.02의 일정한 값을 나타냈다. 이러한 결과는 균일한 입자크기의 자성광물이 유입되는 환경, 혹은 균일한 퇴적물의 기원을 갖는 환경이었음을 지시한다. 또한, 세 번의 자성광물 함량의 증가와 S-ratio의 증가가 잘 일치하는 것은 일정량의 자성광물이 유입되지만, 수위가 높아졌을 때 자성광물의 환원으로 인하여 퇴적물 내 항자기력이 낮은 자성광물의 함량이 상대적으로 증가한 것으로 해석된다.

(2) Unit-2 (고도 0~0.30 m): 하부 구간에 비해 자성광물 함량 지시자들(χ_{LF} , ARM, SIRM)과 S-ratio값이 급격히 감소하는 반면에 ARM/SIRM값은 약 0.01 정도의 증가를 보인다. 이러한 결과는 하부 구간에 비해 자성광물의 공급이 급격히 줄어들 수 있는 환경 혹은 항자기력이 높은 자성광물의 급격한 증가를 유발할 수 있는 환경으로의 변화를 의미한다. 즉, 퇴적물 공급원의 변화가 있었거나 수면의 하강으로 인한 퇴적물의 지표노출과 같은 환경적인 변화의 가능성을 지시한다.

(3) Unit-3 (고도 0.30~2.11 m): 자성광물의 함량을 지시하는 자기특성들의 값이 점이적으로 감소하는 경향을 보이며, 항자기력이 낮은 자성광물이 높은 항자기력을 갖는 자성광물에 비해 상대적인 양적증가를 보이는 구간이다. 이 구간의 전체적인 경향성 내에 세 번의 환경변화가 관찰되는데, 편의상 하부로부터 A, B, C 소구간으로 분류하였다. Unit-3A (고도 0.30~0.65 m)에서는 χ_{LF} , ARM, SIRM값들 모두 부분적으로 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보이나, S-ratio값은 점차 증가하는 경향을 보였다. 한편, 입자크기 변화를 지시하는 ARM/SIRM값의 변화는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 Unit-3A 바로 아래에서 인지되는 지표노출로 인한 산화환경으로부터 환원환경(예, 호수환경)으로 전이되면서 상대적으로 낮은 항자기력을 갖는 체리자성 광물의 증가에 따라 χ_{LF} , ARM, SIRM 및 S-ratio값이 증가하였을 것으로 해석된다. Unit-3B (고도 0.65~1.22 m)에서는 S-ratio값의 증가만 나타나며, 이러한 양상은 유입되는 자성광물의 양이 줄어들었지만, 퇴적물 내에 상대적으로 체리자성 광물의 함량 비율이 증가하였기 때문에 나타난 것으로 해석된다. 즉, 퇴적작용 시 자성광물의 유입량이 감소하였으며, Unit-3A에 비해 환원환경(호수환경)이 보다 진행되었음을 지시한다. Unit-3C (약 1.22~2.11 m)의 경우, ARM 및 SIRM값의 감소를 보이는 반면, ARM/SIRM 및 S-ratio값은 증가를 보인다. 이러한 결과는 퇴적물 내에 유입되는 자성광물의 함량이 감소하고 Unit-3B 보다 환원환경으로 전이된 것으로 해석된다.

(4) Unit-4 (고도 2.11~3.14 m): ARM 및 SIRM은 0에 가까운 매우 낮은 값을 보이고 특징적으로 ARM/SIRM값과 S-ratio가 두드러지게 증가한다. 매우 낮은 ARM 및 SIRM값들을 고려할 때, ARM/SIRM 및 S-ratio가 상대적으로 높은 값을 보이는 것이 자성광물의 입자크기가 감소하거나 체리자성 광물의 상대적 함량비가 증가하였기 때문으로 보기 어렵다. 그러나 이 구간의 퇴적물 내의 자성광물의 함량이 다른 구간에 비하여 매우 적은 것은 자성광물의 유입이 극히 제한적인 퇴적환경(예, 늪지환경)이었음을 지시한다.

(5) Unit-5 (고도 3.14~3.60 m): χ_{LF} , ARM, SIRM값들의 급격한 증가 및 ARM/SIRM의 감소, S-ratio의 감소가 특징적으로 나타난다. 이 구간은 전체적으로 자성광물의 함량의 두드러진 증가가 특징적이며, 입자크기가 증가하였으나, 매우 낮은 S-ratio값이 3.14~3.47 m에 걸쳐 나타나다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 특히, 3.17 m 부근에서 나타나는 0.05 정도의 매우 낮은 S-ratio값을 보이며, 이는 높은 항자기력을 갖는 경사 반강자성 광물의 함량이 급격히 증가하였음을 의미한다. 따라서 늪지환경에서부터 점진적인 환경의 변화가 있었던 것이 아니라 범람이나 해수의 침투와 같은 갑작스런 환경변화가 있었을 가능성을 나타낸다.

본 연구에서 수행된 자기특성 변화의 분석을 바탕으로 한 퇴적환경 변화 해석은 다른 연구팀에 의하여 별도로 수행된 퇴적학적, 유기지화학적, 고생물학적 분석 등의 결과들과 유사 또는 상호 보완적인 것으로 나타났으며, 빠르고 경제적인 고지자기 연구방법이 향후 다양한 종류의 퇴적물을 이용한 고환경 연구에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

Evans, M.E. and Heller, F. (2003) Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics. Academic Press, London, 382 pp.