



Article

건조된 해양 퇴적물 시료의 대자율 신속 측정을 위한 실험방법 제안

유하은¹, 변은지^{1,*}, 김성한^{2,3}, 유규철², 강명일², 하상범²

¹연세대학교 지구시스템과학과

²극지연구소 빙하지권연구본부

³과학기술연합대학원대학교 극지과학

Proposal of an experimental method for rapid magnetic susceptibility measurement of dried marine sediment samples

Haeun Yoo¹, Eunji Byun^{1,*}, Sunghan Kim^{2,3}, Kyu-Cheul Yoo², Myung-Il Kang², Sangbeom Ha²

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

²Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

³Department of Polar Sciences, University of Science and Technology (UST), Incheon 21990, Republic of Korea

Received: June 24, 2026 / Revised: July 22, 2026 / Accepted: July 27, 2026

*Corresponding author: +82-2-2123-2670 / E-mail: eb@yonsei.ac.kr

요약: 본 연구는 아카이브 보관 중인 해양 코어 퇴적물 시료를 대상으로 새로운 대자율(MS) 측정 프로토콜을 제안하고 유효성을 검증하였다. 건조 상태 시료에서 측정된 질량 비 대자율(χ)이 보관 이전 습윤 상태 코어에서 측정된 부피 비 대자율(κ) 변동 추세를 재현할 수 있는지 확인하였다. 또한 분석 시간효율을 높이기 위해 MS2E 포인트 센서를 활용한 ‘바이알-랩-밀착’ 방법을 고안하여 시료를 측정하고 표준 방식(MS2B 센서)으로 측정한 결과와 비교하였다. 포인트 센서 활용을 위한 최적의 시료 사용량을 결정하기 위해 시료 질량 0.1-1.4 g 범위에서 χ 의 변동성을 0.1 g 단위로 확인하는 실험을 우선 수행하였다. 이를 통해 본 실험 조건에서 0.5 g이 포인트 센서 표면에 시료 입자들이 균질하게 도포되며 센서의 χ 측정 감도를 동시에 보장하는 최적 질량임을 확인하였으며, 이는 환경별 최적화가 선행되어야 함을 시사한다. 본 연구에서 활용한 시료는 선행 연구결과가 있는 남극 스코시아해 GC03-C2 코어 퇴적물이며, 새로운 프로토콜로 측정된 건조 MS 값은 기존 측정된 습윤 시료의 MS 값 변동 추세를 $R^2 \geq 0.9394$ 라는 높은 통계적 신뢰도로 재현하였다. 향후 다른 아카이브 코어 시료에 적용할 경우, 측정 조건의 일관성을 확보하여 MS의 상대적 변동을 복원하고 해석하는 데 주목할 것을 권한다. 이러한 접근법은 새로운 코어 확보가 어려운 상황에서 기존 아카이브 시료의 활용도를 높이고, 고해상도 자기 층서 기록을 빠르게 확보할 수 있는 대안을 제공한다.

주요어: 대자율, MS2E 프로토콜, 남극해, 환경자기학

ABSTRACT: This study proposes a procedural framework and a new experimental protocol for magnetic susceptibility (MS) measurement using dried samples and validates its methodological effectiveness for marine sediment cores. First, we aimed to verify whether mass-specific MS (χ) from dried samples can reliably represent the stratigraphic trends of volume-specific MS (κ) from original wet cores, and then tested whether our "vial-wrap-contact" method to utilize MS2E point sensor while improving time efficiency of lab procedures can ensure high analytical consistency with standard MS2B measurement results. To determine the optimal sample mass accounting for the technical characteristics of the point sensor, a mass-loading experiment (0.1-1.4 g) was conducted. This confirmed that 0.5 g is the optimal mass under the current experimental conditions that ensures both uniform sample distribution and the measurement sensitivity for χ , suggesting that optimization for specific environments must precede application. The samples used in this study were sediments from the Scotia Sea, Antarctica, GC03-C2 core, for which prior research results exist. The dry MS values obtained from the current study reproduced the overall stratigraphic trends of the original wet core MS scan data ($R^2 \geq 0.9394$). To apply this protocol for other sediment cores, we recommend maintaining consistent analytical conditions throughout the selected core, aiming for the reconstruction of relative MS variations among the samples. This procedural framework provides a reliable alternative approach for rapidly and precisely obtaining high-resolution magnetostratigraphic records from archive samples, especially useful in research environments where acquiring new fresh sediment cores is challenging.

Key words: magnetic susceptibility, MS2E protocol, Southern ocean, environmental magnetism

1. 서론

해양 퇴적물 코어의 대자율(Magnetic Susceptibility, MS) 측정값은 퇴적물 내 자성 광물의 농도와 조성, 그리고 입자 크기 변화를 신속하게 파악할 수 있는 핵심 지표로, 고지자기 및 고기후 연구에서 광범위하게 활용되고 있다. 특히, 육상기원 물질의 유입정도를 알려주는 지시자로 널리 사용되고 있으며, 최근 남극 스코시아해의 MS 값이 빙하코어에 기록된 먼지 기록과도 매우 잘 일치하는 것으로 알려졌다(Weber *et al.*, 2012). 빙하코어의 먼지 기록과 높은 상관관계를 보이는 MS 변동성을 활용하면, 미화석의 결핍이나 탄소 저장 효과(reservoir effect)로 인해 연대 측정이 어려운 남극 해양 퇴적물의 정밀한 연대 설정이 가능해지며, 이러한 목적으로 코어 MS 기록이 기존 연구들에서 핵심적으로 활용되어 왔다(Pugh *et al.*, 2009; Weber *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018).

극지 해양 탐사를 통해 확보된 퇴적물 코어 중 상당수가 연구에 활용되는 과정에서 용이한 시료 분출과 아카이브 보관을 위해 반으로 갈라진 상태로 보관되고 있다. 코어를 분할하는 즉시 공극수의 증발이 시작되고, 이는 실제 환경 상태에서의 온전한 MS (Fresh MS)를 측정값으로 재현하는 것은 물리적으로 불가능하다는 점을 시사한다. 보통은 코어를 분할하고 얼마 지나지 않아 습윤 상태의 단면에서 MS를 포함한 측정들이 이루어지고 산출된 데이터를 연구에 계속 활용할 수 있게 된다. 그렇지 못한 경우, 또는 기존 측정된 데이터에서 보다 높은 해상도로 측정이 필요하거나 다른 구간으로의 연장이 필요하거나 할 경우, 아카이브로 보관된 시료로부터 원래 퇴적상에서의 MS 변동 추세를 신뢰성 있게 복원할 수 있는지 검증하는 과정이 필수적이다.

건조 시료를 활용한 MS 분석은 퇴적물의 세밀한 자기적 특성을 파악하고자 하는 목적으로 이루어져왔다. Kim *et al.* (2018)은 건조된 해양 퇴적물 시료를 <16, 16-63, >63 μm 세 입도 구간으로 나누어 각각의 입도 구간에서 MS를 측정하였다. 이는 코어의 MS 변동을 해석할 때 깊이 구간별 퇴적물 시료의 물리적 특성 차이를 고려해야 함을 시사하며, 보다 정밀한 MS 측정 실험에서 건조 시료가 유용하게 쓰일 수 있음을 시사한다. 또한 Shin *et al.* (2020)은 입도별로 분획된 건조 이산 시료를 사용하여 질량 비 대자율(χ)을 측정함으로써 퇴적물의 기원 및 운반 기작에 대해 연구를 수행한 바 있다. 또한 Song *et al.* (2018)은 정밀한 자성 분석 및 화학적 전처리에 따른 영향을 규명하기 위해 50°C에서 건조된 분말 시료를 활용하여 질량 비 대자율(χ)을 산출한 바 있다. 그러나 이러한 건조 시료를 활용한 정밀 분석은 시료의 퇴적학적 특성 규명이나 MS 변동 요인 해석에 주목한 것으로, 건조 시료의 MS 측정값이 습윤 코어

의 기록을 얼마나 충실히 재현하는지, 나아가 코어의 MS 변동성을 실질적으로 대변할 수 있는지에 대해서는 체계적으로 검증한 것은 아니었다. 즉, 코어 분석에 앞서 건조 시료에서 측정한 MS 데이터가 아카이브 보관 전 습윤 코어에서 측정한 기록과 일관된 경향성을 보일 수 있는지에 대한 검증이 필요하다. 이와 관련하여 Blumentritt and Lascu (2015)는 호수 퇴적물에서 습윤 코어에서 측정한 loop sensor MS, point sensor MS, 그리고 건조 시료에서 측정한 MS를 각 측정 방식의 장점과 차이점을 탐구하기 위해 비교한 바 있다.

한편, Wet 시료와 Dry 시료의 MS 값을 비교할 때, 시료 내 공극수는 반자성 물질(diamagnetic substance)로서 MS 측정값에 희석 효과(dilution effect)를 유발하므로(Rosenbaum, 2005), 습윤 시료의 MS 값은 일반적으로 건조 시료보다 낮게 나타난다. 실제로 Wet 시료가 Dry 시료에 비해 MS 측정값을 평균적으로 약 -4.95% 정도 낮추는 경향이 보고되었다(Missouri State University and Ozarks Environmental and Water Resources Institute, 2020). 따라서 Wet 시료와 Dry 시료의 MS 값은 절대적인 진폭(Amplitude) 측면에서는 차이가 발생할 수 있으며(Blumentritt and Lascu, 2015), 습윤 시료의 대자율(κ , Volume-specific MS)을 측정한 선행 연구에서는 물 질량에 의한 희석 효과를 보정하면 값이 약 1.7배에서 2배 증가할 수 있다고 계산되었다(Shin *et al.*, 2020).

이러한 물리적 수치 차이는 이미 건조되어 습윤 상태의 재현이 불가능해진 아카이브 시료를 활용하려는 연구자들에게, 산출된 데이터가 원래의 고해상도 습윤 기록을 얼마나 신뢰성 있게 대변할 수 있는지에 대한 근본적인 불확실성을 제기한다. 이와 관련하여 Blumentritt and Lascu (2015)는 호수 퇴적물에서 일부 상관관계를 확인한 바 있지만, 퇴적환경이 상이한 해양 퇴적물 시료를 대상으로 건조 시료의 MS와 기존 습윤 코어 MS 변동 데이터를 직접적으로 비교 및 검증한 사례는 드물다. 특히 수분 증발로 인해 이미 건조된 상태로 보관된 아카이브 시료의 경우, 질량 비 대자율(χ)을 측정하는 것이 분석의 용이성 측면에서 가장 현실적인 대안이 되나, 각 연구 환경(센서 종류, 시료 특성 등)에 따른 최적의 측정 조건을 도출하기 위한 절차적 가이드라인은 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 단일 코어 연구가 가지는 일반화의 한계를 고려하여, 지난 마지막 빙하기 이후의 퇴적기록을 가지고 있는 스코시아해 코어 퇴적물을 대상으로 선정하였다. 본 연구의 목적은 단순한 절댓값 산출이 아닌 층서적 상대 변동 추세의 복원에 두었으며, 시료의 질량 변화가 χ 측정의 신뢰도에 미치는 영향을 분석함으로써 연구자들이 각자의 시료에 적용할 수 있는 실용적인 실험방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 기존 습

윤 코어의 포인트 MS를 기준 데이터로 하여, 표준 큐브 방식(MS2B) 및 본 연구에서 제안하는 포인트 방식(MS2E)의 건조 시료 χ 값을 정밀하게 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 시료 및 전처리

2.1.1. 시료 출처 및 상태

본 연구에 사용된 퇴적물 시료는 남극 Scotia Sea 지역, Elephant Island 북서면에서 채취된 중력 코어 GC03-C2 (60°34'S, 55°55'W, 수심 3,750 m, 총 길이 834 cm; 그림 1)의 이산 시료(discrete samples)이다(Kim *et al.*, 2018). 해당 코어는 2003/2004년 한국 극지연구소(KOPRI) 남극 연구 프로그램(KARP) 항해 기간 중 R/V *Yuzhmorgeologiya* 호를 통해 획득되었다(Kim *et al.*, 2018). GC03-C2 코어는 기존 연구에서 후기 제4기 고기후 변화를 재구성하는 데 사용되었으며, 시료들은 규조류(diatom) 분석을 포함한 고환경 연구 프록시 분석 등을 위해 이미 건조된 상태로 보관되었다(Bak *et al.*, 2014). 본 연구에서 사용된 시료는 해당 코어의 총 38개 지점에서, 주로 약 30 cm 간격(코어 하단부에

서는 약 10 cm 간격)으로 건조된 부시료를 채취하여 질량 비 대자율 측정이 이루어졌다.

2.1.2. 시료 전처리 및 측정 단위

본 연구에 사용된 모든 시료는 이미 건조된 상태로 보관 되어왔으며, MS 측정 전에 40°C 오븐에서 최소 12시간 이상 추가로 건조하였다. 퇴적물 분석에서 건조 과정은 유기물이나 탄산염 제거와 같은 화학적 전처리 과정과 함께 사용되는 표준적인 단계이다(Song *et al.*, 2018). 특히 MS 측정에서는 공극수의 반자성 효과(diamagnetic effects)를 제거하고(Rosenbaum, 2005), 퇴적물의 불균질성으로 인해 부피보다 질량을 더 정확하게 산정할 수 있는 경우가 많으므로, 질량 비 대자율(χ)을 산출하기 위해서는 건조 과정이 필수적이다(Blumentritt and Lascu, 2015). 본 연구에서 보고되는 모든 건조 시료 대자율 값은 질량 비 대자율(χ , 10^{-8} m³/kg 단위)을 기준으로 산출되었다.

2.1.3. 방법론적 검증을 위한 대조군 데이터

본 연구에서 제안하는 건조 시료 측정법의 적용 가능성

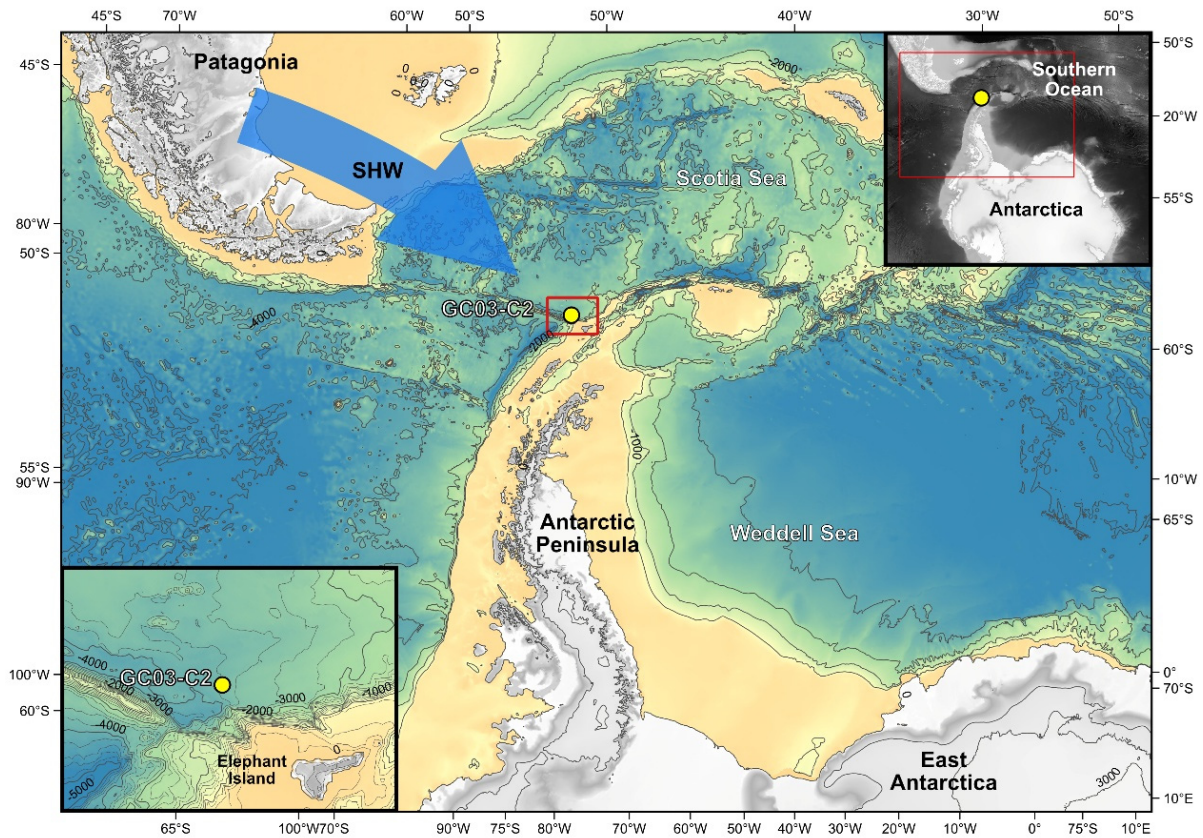


Fig. 1. Map of the study area, showing the location of the studied sediment cores GC03-C2 (yellow circles).

을 검증하기 위한 대조군(reference)으로 원본 습윤 코어 상태에서 측정된 포인트 대자율 데이터를 활용하였다. 이 습윤 MS 기록은 극지연구소(KOPRI)에서 Bartington MS2E 대자율 측정기를 사용하여 분할된 코어 섹션(split half core sections)에 대해 1 cm 간격으로 고해상도 스캔을 수행하여 얻어졌다(Kim *et al.*, 2018). 이러한 1 cm의 측정 간격은 센서의 감지 영역 및 전체 코어 길이를 고려할 때 퇴적층서적 변동의 누락을 최소화하여 포착할 수 있는 충분한 해상도이며, 본 연구에서 분석한 개별 시료의 수치들을 연속적인 변동 기록으로 전환하는 데 있어 신뢰할 수 있는 기준이 된다. 해당 데이터는 CGS 단위로 보고되었으며, 습윤 상태에서 측정된 부피 비 대자율(κ)의 특성을 가진다.

기존 습윤 MS 기록은 스코시아해 지역 퇴적물의 특징적인 변동 패턴을 제공한다. 구체적으로, MS 값은 빙기(예: Marine Isotope Stage 2, MIS 2) 동안은 높다가 홀로세(MIS 1) 동안은 낮게 유지되는 뚜렷한 변동 패턴을 보여준다(Kim *et al.*, 2018). 본 연구의 핵심 목적은 건조된 개별 시료를 이용한 질량 비 대자율(χ) 측정 방식이 기존 습윤 코어 로깅 데이터에 내재된 변동 추세(trend)를 선형적으로 보존하는지 정량적으로 입증하는 것이다. 비교 대상인 두 데이터는 측정 단위(10^{-6} CGS vs. 10^{-8} m³/kg) 및 시료 상태(Wet κ vs. Dry χ)의 차이로 인해 절대적 진폭에서 수치적 차이가 존재한다. 그러나 본 연구의 목적은 이러한 절댓값의 차이(Amplitude discrepancy)보다는, 건조된 시료에서 측정된 χ 값이 기존 표준 기록의 추세를 왜곡 없이 재현할 수 있음을 통계적으로 입증하고자 하였다. 결과적으로 본 연구에서는 동일 깊이의 χ 값과 κ 값을 일대일로 비교함으로써, 원본 습윤 코어 기록에 대한 건조 시료 측정 데이터의 대체 가능성 및 층서적 변동 추세의 재현성을 평가하였다.

2.2. 시료 질량 최적화 실험

본 연구의 표준 측정 질량을 확정하기 위해, 전체 건조 시료 측정에 앞서 질량변화에 따른 대자율 측정 실험을 수행하였다. 해당 실험은 본 연구에서 고안한 MS2E 포인트 센서 기반의 '바이알-랩-밀착' 프로토콜(상세 절차는 2.3.2. 항 참조)을 사용하여 수행되었다.

1) 검증 시료의 선정: 기존 코어 MS 데이터 내에서 자성 광물의 함량이 상대적으로 높아 신호의 변화를 민감하게 포착할 수 있는 세 지점(772 cm, 802 cm, 812 cm)의 건조 시료를 선정하였다. 선정된 지점들의 기존 습윤 MS 값은 각각 293.2, 236.4, 228.9 10^{-6} CGS이다.

2) 실험 절차: 선정된 각 깊이의 시료를 대상으로 0.1 g 부터 1.4 g까지 0.1 g 간격으로 총 14단계의 질량 변화에 따른 MS 값을 '바이알-랩-밀착' 프로토콜을 사용하여 측정하였다. 이때 실험의 정밀도를 확보하기 위해, 0.1 g부터 1.4

g에 이르는 모든 질량 단계에서 실제 계량 오차를 ± 0.01 g 이내로 제한하였다. 이는 시료량이 가장 적은 구간(0.1 g)에서의 10% 오차 허용 범위를 전체 실험 범위에 일관되게 적용한 것으로, 질량 변화에 따른 센서의 미세 응답 차이를 왜곡 없이 포착하기 위함이다. 모든 단계에서 χ 를 3 번 측정 후 평균한 값을 사용하였다.

3) 실험 목적: Bartington MS2E 센서의 얇은 감지 깊이(제조사 기준 50% 응답 깊이 1 mm, 10% 응답 깊이 3.5 mm; Blumentritt and Lascu, 2015에 따르면 약 2 mm) 특성상, 시료 질량 증가에 따른 신호 감쇠 현상이 발생한다. 본 실험은 이러한 '기하학적 효과(geometric effect)'에 의한 오차를 정량화하고, 단일 코어 분석 시 MS 변동 추세의 신뢰도 높은 복원을 위해 필수적인 '실험법의 일관성'을 유지할 수 있는 최적의 임계 질량을 도출하고자 하였다.

2.3. 대자율 측정 장비 및 프로토콜

대자율 측정은 Bartington Instruments사의 MS2 측정 시스템과 두 종류의 센서, 즉 MS2B Dual Frequency Sensor 및 MS2E Core Logging Sensor를 사용하여 병행되었다. 모든 측정은 앞선 질량 최적화 실험(2.2. 항)을 통해 도출된 질량인 0.5 g을 표준 시료량으로 채택하여 일률적으로 진행되었으며, 시료는 0.5 g을 기준으로 $\pm 10\%$ 범위 내에서 취하였다.

2.3.1. MS2B (표준 큐브 방식 활용)

MS2B 센서는 토양, 암석, 퇴적물 샘플의 대자율 측정에 주로 사용되는 표준적인 실험실 장비이다(Missouri State University and Ozarks Environmental and Water Resources Institute, 2020). 본 연구에서는 MS2E 기반의 대안적 프로토콜이 산출하는 결과의 신뢰도를 평가하기 위해, 동일한 건조 시료에 대한 MS2B의 측정값을 기존 데이터로 활용하였다.

1) 시료 준비 및 측정: 건조된 퇴적물 시료 0.5 g을 내측 규모 1.8 cm $\times$ 1.8 cm $\times$ 1.7 cm (약 5.5cm³)의 플라스틱 큐브(sample box)에 일률적으로 평평하게 채운 후 측정했다. 이는 센서 과부하를 방지하기 위해 표준 질량(10 g)보다 작은 시료 질량을 사용하는 방식에 해당한다. 이때, 소량의 시료(0.5 g)가 센서 내부에서 일정한 기하학적 조건(measurement geometry)을 유지할 수 있도록 큐브 바닥면에 얇고 균일하게 도포하여 시료 높이 차이에 따른 감도 왜곡을 최소화하였다. 본 연구에서는 Bartington MS2B 센서의 저주파(LF) 모드를 사용하여 질량 비 대자율(χ)을 SI 단위로 측정하였다.

2) 공백 및 배경 보정: 각 시료 측정 전후에 센서에 아무 것도 놓지 않은 상태(Air)의 공백 측정(Blank Measurement)을 수행하고, 이 측정값의 평균을 시료 측정값에서 차감했다. 또한, 플라스틱 큐브 용기 자체의 반자성 기여(diamagnetic

contribution)를 보정하기 위해(Missouri State University and Ozarks Environmental and Water Resources Institute, 2020), 시료가 없는 빈 큐브의 MS 값을 5 번 측정 후 평균 낸 값을 최종 시료 값에서 차감했다.

3) 질량 정규화: 측정된 MS 값은 Bartington MS2B 센서의 표준 질량(Calibration mass, 10 g)을 기준으로 하여 질량 비 χ 로 정규화되었다(Missouri State University and Ozarks Environmental and Water Resources Institute, 2020). 측정 질량에 따른 편차를 보정하기 위해 다음의 공식에 따라 측정된 MS 값을 정규화하였다.

$$\chi = X_{\text{measured}} \times \frac{\text{Calibration mass}}{\text{Sample mass}}$$

(여기서 Calibration mass = 10 g, Sample mass = 0.5 g ($\pm 10\%$ 의 오차))

2.3.2. MS2E (접촉형 측정 방식 활용)

MS2E 센서는 원래 분할된 코어(split cores) 표면을 고 해상도로 로깅하기 위해 설계된 표면 센서이나, 본 연구에서는 해당 센서를 이용하여 이미 건조된 퇴적물 형태의 개별 시료를 신속하게 분석할 수 있는 '대안적 측정 프로토콜(alternative measurement protocol)'을 도입하였다.

1) 측정 방식: 건조 퇴적물 시료 0.5 g을 직경 2.5 cm인 플라스틱 바이알에 담았다. 이는 본 연구에서 사용한 MS2E 센서 팁의 물리적 규격(직경 2.5 cm, 길이 약 3.7 cm)을 고려하여 선택된 것이다. 바이알과 센서의 직경을 2.5 cm로 동일하게 일치시킴으로써, 센서의 감지 영역 내에 시료가 빈틈없이 균일하게 배치될 수 있도록 설계하였다. 시료를 담은 후, 바이알의 입구에 얇은 플라스틱 필름(랩)을 씌웠

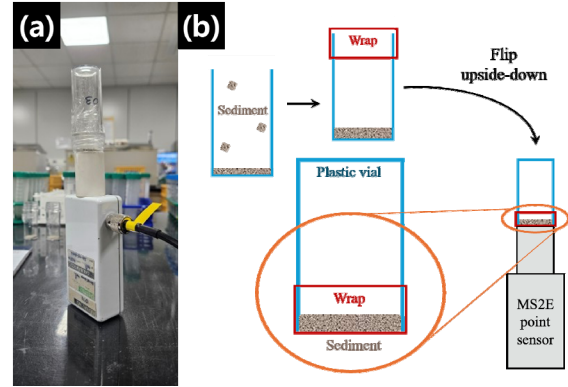


Fig. 2. Photographs of the alternative "vial-wrap-contact" protocol for MS2E measurement. (a) Measurement configuration with the inverted vial, covered by a thin plastic film, in direct contact with the MS2E sensor tip, (b) Simplified schematic illustrating the overall procedure showing even sediment spreading via a thin plastic film to ensure optimal contact with the MS2E sensor.

다. 입구를 랩으로 막은 후 바이알을 뒤집어, 센서 표면과 시료(퇴적물)가 랩만 사이에 두고 거의 맞닿을 수 있도록 밀착시킨 상태에서 MS를 측정했다(그림 2).

2) 측정의 일률화 및 정밀도: 각 깊이별 시료에 대해 3 회 반복 측정 후 평균값을 최종 χ 값으로 사용했다. 본 대안적 방식을 채택한 주요 이유는 표준적인 MS2B 방식 대비 분석 속도를 획기적으로 단축할 수 있기 때문이다. 이때, 얇은 랩을 활용하여 동일한 질량의 시료를 센서 표면에 최대한 균일하게 밀착시키는 과정을 통해 MS2E 센서의 얇은 감지 깊이로 인해 발생할 수 있는 기하학적인 효과를 어느정도 보완할 수 있다. 즉, 시료를 퇴적물입자 단위에서 생각할 때, 일부 시료가 센서 표면으로부터 너무 멀어 감지 깊이 범

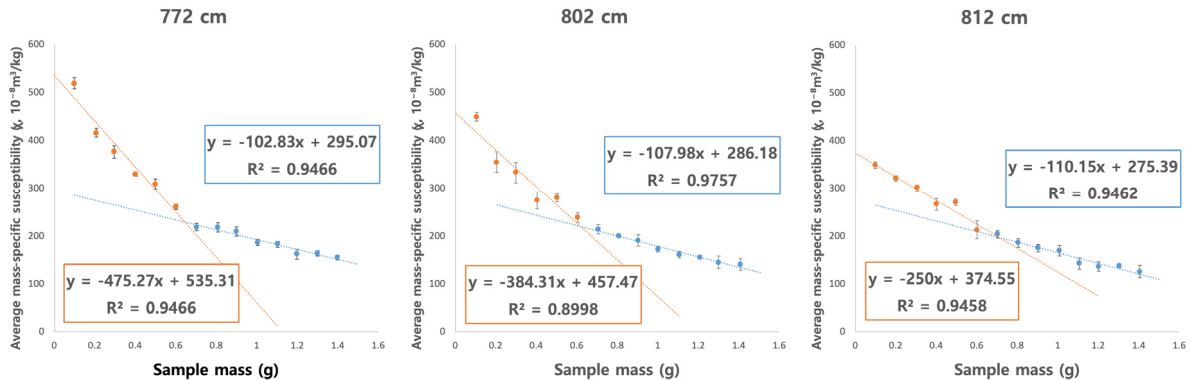


Fig. 3. Precision assessment of the alternative MS2E protocol via mass loading experiments. Variations in χ across a 0.1-1.4 g range for samples from three core depths (772, 802, and 812 cm). Datasets are segmented at a 0.6 g threshold (low-mass: orange; high-mass: blue). High R^2 values in both segments demonstrate the consistent precision of the proposed protocol, despite the systematic χ decrease caused by the MS2E geometric effect (~ 2 mm sensing depth). Error bars represent standard deviation ($\pm 1\sigma$) and are smaller than the symbol size where not visible.

위에서 벗어남에 따라 생기는 측정 정밀도의 오차를 일률적으로 유지할 수 있다. 따라서, 동일 코어에 대해 시료별 측정 조건을 동일 시 함은 깊이에 따른 상대적 MS 변동성을 복원하기 위한 안정적인 측정값을 확보하는 역할을 한다.

3. 결과

본 연구에서는 건조된 이산 시료(Dry discrete sample)에 대한 대자율 측정 방법론이 기존 습윤 코어 기록의 변동 추세를 유효하게 재현하는지 확인하기 위해, 분석 방법의 통계적 유효성 및 내부 일관성을 정량적으로 평가하였다.

3.1. 건조 시료 측정을 위한 최적 질량 설정

건조 시료의 MS를 측정하기 앞서, GC03-C2코어 세 지점(772, 802, 812 cm)의 시료를 대상으로 수행한 질량 최적화 실험을 진행하였다. 그 결과, 모든 깊이에서 시료 질량(g)이 증가함에 따라 질량 비 대자율(χ) 값이 전체적으로 감소하는 경향이 관찰되었다(그림 3). 이러한 감소 추세는 0.6 g을 경계로 기울기가 변하는 양상을 보였으며, 낮은 질량 구간(0.1-0.6 g)의 감소 기울기 절댓값이 높은 질량 구간(0.7-1.4 g)보다 약 3배 이상 가파르게 측정되었다. 그러나 두 구간 모두에서 값은 0.89 이상의 높은 선형성을 유지하였다.

3.2. Dry MS의 추세 일관성 검증

3.2.1. 측정 방식별 대자율의 층서적 변동 대비

본 연구에서 분석한 두 가지 건조 시료 측정 데이터(MS2B 큐브 방식, MS2E 포인트 방식)와 기존 습윤 코어 포인트 대자율(κ) 기록을 깊이에 따라 대비하였다(그림 4). 대조군인 습윤 기록은 그림 4a에서 볼 수 있듯 빙기의 높은 MS 값과 홀로세(MIS 1)의 낮은 MS 값이 대비되는 뚜렷한 상하향 변동 패턴을 나타낸다(그림 4a). 분석 결과, 건조 시료를 이용한 두 방식 모두 측정 단위 및 절대적인 진폭의 차이에도 불구하고 기존 습윤 기록에 나타난 MS 변동 추세를 시각적으로 유사하게 재현하는 것이 관찰되었다(그림 4b, 4c).

3.2.2. Wet MS와 Dry χ 간의 상관관계 분석

기존 습윤 기록(Y축)과 본 연구에서 획득한 건조 시료 MS 측정값(X축) 간의 선형 상관관계를 분석한 결과는 그림 5a 및 5b와 같다. 큐브 방식($R^2 = 0.9402$)과 대안적 포인트 방식($R^2 = 0.9394$) 모두 기존 기록과 0.93 이상의 높은 결정계수가 나타난다. 이 높은 선형성은 Dry 시료를 사용했음에도 불구하고, 공극수의 반자성 효과에 의한 절댓값(amplitude) 차이를 넘어(Rosenbaum, 2005), MS 변동을 주도하는 자성 광물의 농도 변화 추세가 크게 왜곡되지 않았음을 정량적으로 증명한다.

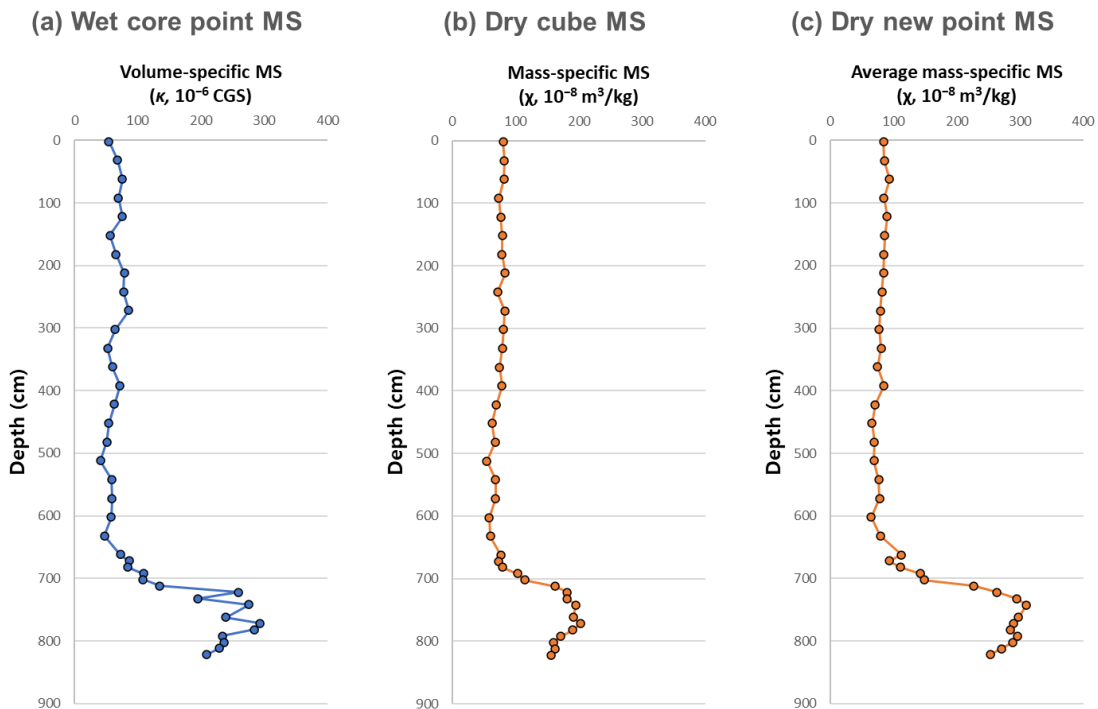


Fig. 4. Comparison of downcore magnetic susceptibility (MS) profiles for core GC03-C2. (a) Original wet split-core point MS (κ , 10^{-6} CGS). (b) Dry mass-specific MS (χ , 10^{-8} m³/kg) measured by the standard MS2B cube method. (c) Dry mass-specific MS (χ , 10^{-8} m³/kg) measured by the proposed MS2E "vial-wrap-contact" protocol. Note that all three records show highly consistent downcore trends regardless of measurement units.

3.2.3. 두 Dry MS 측정 방법 간의 내부 일관성

두 가지 건조 시료 측정 방법(MS2B, 대안적 MS2E) 간의 내부 일관성(Internal Consistency)을 확인하기 위해 상호 상관관계를 분석한 결과, Dry χ (MS2E, 포인트 방식, X축) vs. Dry χ (MS2B, 큐브 방식, Y축)의 R^2 값은 0.9666로 측정되었다(그림 5c). 이는 두 종류의 상이한 센서와 측정 기하학적 구조를 사용했음에도 불구하고, 본 연구에서 채택한 대안적 측정 방식이 표준적인 장비와 일관된 결과값을 산출하고 있음을 보여준다.

4. 토 의

4.1. 질량 변화에 따른 MS 변화와 MS2E 센서의 구조적 특성

질량 최적화 실험 결과, 모든 깊이에서 시료의 질량이 증가할수록 질량 비 대자율이 감소하는 뚜렷한 경향이 관찰되었다(그림 3). 이러한 현상은 MS2E 센서의 매우 얇은 감지 깊이에서 비롯된 기하학적(geometric) 효과로 해석된다.

제조사 사양에 따르면 MS2E 센서는 시료 표면으로부터 1 mm 거리에서 응답률의 50%를, 3.5 mm 거리에서 10%를 감지하는 특성을 가진다(Bartington Instruments Limited, 2023). MS2E 센서는 표면 근처의 자기 신호에 주로 반응하므로(Blumentritt and Lascu, 2015), 바이알 내의 시료의 질량이 증가하여 센서의 유효 감지 범위를 벗어나는 부분이 늘어날수록, 추가된 질량은 측정 신호(MS)에 비례적으로 기여하지 못하게 된다. 결과적으로 질량 비 대자율은 시료의 총 질량이 늘어날수록 실제보다 과소평가되는 양상을 띠게 된다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구에서 제안한 '바이알-랩-밀착' 프로토콜은 시료 사용량을 표준화함으로써 MS

측정값의 변동성을 효과적으로 통제할 수 있는 방안을 제시한다. 모든 검증 깊이에서 시료 증량에 따른 MS 신호의 손실이 관찰되었지만, 이는 선형 관계식으로 설명될 수 있으며(그림 3), 필요에 따라 보정이 가능하다. MS2E 측정 방식에서는 센서의 물리적 한계로 인해 시료 전체 질량이 신호에 기여하지 못할 수 있다. 그러나 본 프로토콜에 따라 모든 깊이에서 동일한 질량의 시료를 균일하게 사용할 경우, 센서 민감도에 따른 측정 편차를 통계적으로 관리할 수 있다. 따라서 본 프로토콜을 활용하여 코어의 MS 변동성을 재현하고자 할 때, 동일한 질량의 시료를 사용하는 것은 데이터의 정밀도와 재현성을 확보하기 위한 중요한 전제 조건이다(Gustavo González and Ángeles Herrador, 2007).

특히, 질량 변화에 따른 기울기 분석 결과는 이러한 필요성을 뒷받침한다. 낮은 질량 구간(0.1-0.6 g)의 감소 기울기 절댓값은 평균 약 370으로, 높은 질량 구간(0.6-1.4 g)의 평균인 약 107보다 2배 이상 크게 나타났다(그림 3). 이는 낮은 질량 구간에서 시료량의 미세한 변화에도 센서가 더 민감하게 반응함을 의미한다. 따라서 0.1-0.6 g 구간은 고민감도 구간(High Sensitivity Zone)으로 볼 수 있으며, 본 연구에서 표준 시료량으로 사용한 0.5 g도 이 구간에 포함된다. 이 구간에서는 시료량을 엄격하게 일치시키지 않을 경우 질량 오차에 따른 MS 신호의 왜곡이 커질 수 있으므로, 방법론적으로 일관된 질량 제어가 필수적이다.

4.2. 최적 질량(0.5 g) 선택의 정당성 확보

본 연구에서는 건조 시료의 MS를 신속하게 측정하기 위해 접촉형 센서를 활용한 '바이알-랩-밀착' 프로토콜을 제안하고, 실험 표준 질량으로 0.5 g을 채택하였다. 이 질량은 센서의 구조적 특성을 고려할 때 MS 변동을 효과적으로 측정할 수 있으며, 적은 양의 시료를 다루는 과정에서 발생

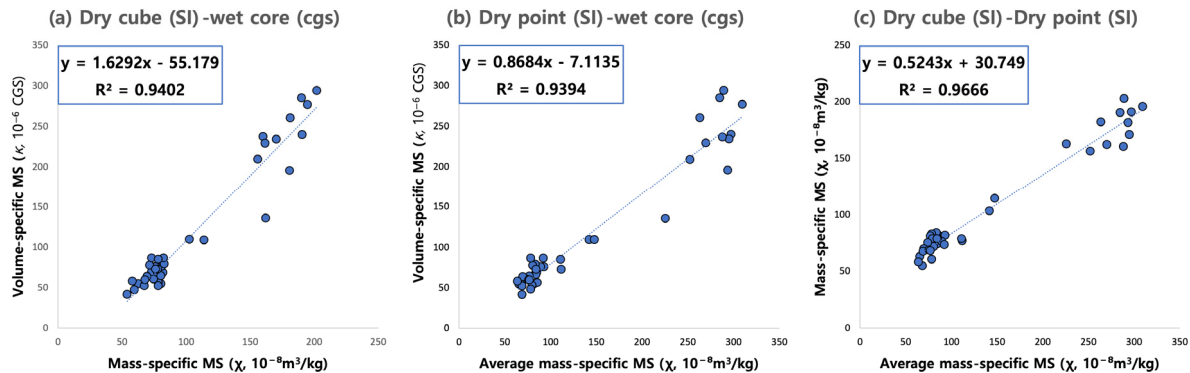


Fig. 5. Linear correlation plots for methodological validation. Correlations between reference wet core MS (Bak *et al.*, 2014) and dry-sample susceptibility (χ) using (a) MS2B (cube mode) and (b) MS2E (contact mode). (c) Internal consistency between MS2B and MS2E protocols. High correlation coefficients ($R^2 \geq 0.93$) in all plots confirm the preservation of primary paleoclimatic trends in dried discrete samples.

할 수 있는 오차를 최소화할 수 있는 조건으로 판단되었다. 또한 산출된 선형 관계식에서 상대적으로 고민감도 구간에 해당한다(그림 3). 따라서 코어 깊이에 따른 MS 변동성을 충실히 재현하면서도 프로토콜의 운영상 안정성을 확보할 수 있는 최적 질량으로 판단된다. 추가 검증은 위해, 기존에 분석된 습윤 코어 MS 기록을 기준 자료로 사용하여 건조 시료 측정 결과와 비교하였다.

첫째, 기존 분석된 습윤 코어 MS 기록 중 세 깊이 지점(772, 802, 812 cm) 값의 비인 1.28:1.03:1.00과 접촉형 방식의 측정값 비를 대조한 결과, 0.5 g 시료로 수행했을 때 1.14:1.04:1.00으로 나타나 기준 데이터와 비교적 유사한 변동 폭을 보였다. 특히 802/812 cm의 비율(1.04)은 장비의 교정 정확도(2%) 이내에서 기준 비율 값(1.03)을 성공적으로 재현하였다(Bartington Instruments Limited, 2023). 반면 0.1 g과 같은 극소량 구간에서는 비율이 1.49:1.29:1.00로 나타나, 습윤 상태의 변동 추세보다 과도하게 증폭된 값이 측정될 가능성이 관찰되었다.

둘째, 각 질량 단계별 측정값과 해당 깊이의 기존 분석된 습윤 코어 MS 기록 간의 선형 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 전체 14구간 중 본 연구의 표준질량이기도 한 0.5 g ($R^2 = 0.9836$) 구간은 전체 질량 범위 중 최상위권의 결정 계수를 나타내어, 소량의 시료를 사용하더라도 기준이 되는 층서적 변동 추세를 통계적으로 유의하게 재현함을 확인하였다.

셋째, 수치상으로는 0.4 g ($R^2 = 0.9997$, 비율 1.24:1.03:1.00)이 기준 데이터에 더 근접한 양상을 보였으나, 실제 실험 과정에서 0.4 g 미만의 시료는 바이알을 뒤집은 후의 센서 표면을 균일하게 덮기 어려워, 측정 기하학적 구조의 불균질성을 초래할 가능성이 확인되었다. 따라서 0.5 g은 센서의 높은 민감도를 유지하면서도, 시료 도포의 균일성과 재현성을 동시에 확보할 수 있는, 본 연구의 실험 환경에서는 방법론적 최적 질량으로 판단된다.

4.3. 센서 사양에 따른 최적 질량의 가변성

본 연구에서 도출된 최적 질량인 0.5 g은 MS2E 센서의 물리적 규격(직경 2.5 cm)과 2 mm의 얇은 감지 깊이(Blumentritt and Lascu, 2015)에 최적화된 수치이다. 만약 본 연구에서 고안한 프로토콜을 다른 형태의 센서에 적용할 경우, 해당 기기의 감지 면적과 투과 깊이에 따라 '고민감도 구간'의 범위와 그에 따른 최적 시료 두께 및 최적 질량은 달라질 수 있다. 예를 들어, 투과 깊이는 같으나 센서의 직경이 2.5 cm보다 작은 센서로 측정하는 경우, 측정 최적 시료 두께는 유지될 수 있지만 측정 최적 질량은 0.5 g보다 낮게 산정될 것이다.

그러므로 해당 연구의 대안적 프로토콜을 다른 센서에

적용하고자 할 경우, 본격적인 MS 측정에 앞서 '질량 최적화 실험'을 수행하여 해당 센서에 적합한 임계 질량(Critical mass)을 우선 결정할 필요가 있다. 또한, 결정된 최적 질량은 단일 코어 분석 전 과정에서 일관되게 유지되어야 한다. 이러한 실험 조건의 일관성은 센서의 구조적 특성에 기인한 측정 오차를 최소화하고, 절댓값의 차이와 관계없이 깊이별 상대적 MS 변동 추세를 신뢰성 있게 재현하기 위한 중요한 전제 조건이다.

4.4. 건조 시료 측정법을 통한 습윤 코어 MS 변동 추세 재현

본 연구에서 획득한 건조 시료의 질량 비 대자율(χ) 데이터는 측정 방식에 관계없이 기존 습윤 코어의 고해상도 기록(κ)의 깊이별 추세를 잘 따라가며(그림 4), $R^2 \geq 0.9394$ 라는 높은 상관관계를 보였다(그림 5a, 5b). 이는 시료 내 공극수 제거에 따른 반자성 희석 효과(Rosenbaum, 2005)로 인해 측정값의 절대적인 진폭 차이는 발생하더라도, 자성 광물 농도 변화에 따른 상대적 변동 패턴은 큰 왜곡 없이 산출될 수 있음을 정량적으로 입증한다. 특히 이러한 높은 데이터 정합성은 Scotia Sea 퇴적물의 지질특성적 배경(Kim *et al.*, 2018)과도 잘 일치하며, 40°C 오븐 건조 과정이 본 연구의 환경 신호를 훼손하지 않으면서도 안정적인 분석을 가능케 하는 유효한 전처리 단계임을 뒷받침한다.

본 연구를 통해 입증된 건조 시료와 습윤 코어 간의 높은 상관관계는 특히 건조된 퇴적물을 특정 입도 구간별로 분리하여 각 구간의 MS 기여도를 파악하고자 했던 Kim *et al.* (2018, 2022), Shin *et al.* (2020) 등과 같은 기존 연구들의 χ 에 대한 학술적 타당성을 뒷받침한다. 건조 퇴적물의 χ 를 측정한 결과, Cube 방식과 point 방식 모두 습윤 코어의 point MS 값과 높은 상관관계를 보였다(그림 5a, 5b). 따라서 건조 시료의 대자율 분석에는 두 측정 방식 모두 적용 가능할 것으로 판단된다. 한편 본 연구에서 제안한 MS2E 기반의 '바이알-랩-밀착' 프로토콜은 표준적인 Cube 방식(MS2B)과 높은 일치성을 보이면서도($R^2 = 0.9666$; 그림 5c), 측정 과정이 신속하고 간편하다는 장점을 가진다. 이러한 결과는 본 방법이 습윤 코어 로깅이 어려운 환경이나 건조 상태로 보관된 아카이브 시료를 활용한 대자율 연구에 유용하게 적용될 수 있음을 시사한다.

4.5. 적용 범위 및 한계점

본 연구에서 검증된 방법론의 통계적 유효성은 스코시아해 퇴적물의 물리적·화학적 특성에 기반하며, 특정 해역의 단일 코어인 GC03-C2 코어를 대상으로 도출된 결과라는 점에서 연구의 보편적 일반화에 한계가 존재할 수 있다. 특히 다양한 함수율과 자성 광물 함량의 변이를 포괄하는

물리적 통제 실험의 부재는, 본 연구의 결과를 보편적인 절대 표준으로 일반화하는 데 현실적인 제약으로 작용한다. 본 연구에서는 40°C 오븐에서 12시간 이상의 충분한 건조 과정을 통해 모든 시료의 함수율을 0에 근접하도록 일관되게 유지함으로써 공극수에 의한 반자성 희석 효과를 최소화하였으나, 함수율의 단계별 조절에 따른 MS 응답의 민감도 변화를 직접적으로 규명하지는 못하였다. 또한, 천연 해양 퇴적물 시료의 특성상 자성 광물의 함량을 인위적으로 조절하는 데 한계가 있어, 자성 광물 농도의 극단적인 차이가 건조 효과의 가변성에 미치는 영향을 완전히 배제할 수 없다. 아울러 건조 시간의 경우 분석의 일관성을 위해 최소 12시간 이상의 하한선을 설정하여 건조하였으나, 건조 시간의 상한선 설정 및 그에 따른 자성 광물의 미세한 물리적 변화에 대한 통제 실험이 병행되지 못한 점은 본 실험 프로토콜을 적용할 때의 경계 조건으로 작용한다.

그러나 본 연구의 목적은 범용적 실험기준의 확립이 아닌, 아카이브 시료를 활용해 동일 코어 내의 층서적 상대변동 추세를 신뢰성 있게 복원하기 위한 단계별 분석 절차를 제안하는 데에 있다. 따라서 본 방법론을 다른 환경에 적용할 경우, 연구자가 각자의 센서와 시료 특성에 맞는 최적화 과정을 반드시 선행해야 하며, 특히 다음과 같은 구체적인 환경적 요인에 따른 데이터 왜곡 가능성을 고려해야 한다.

첫째, SP 입자가 MS 신호를 지배하는 환경에서 적용 범위가 제한될 수 있다. 스코시아해와 달리 χ 의 변동이 성인성(pedogenic) 초상자성 입자(SP)의 농도 변화에 의해 지배되는 퇴적물(예: 일부 황토, 특정 호수 퇴적물(Blumentritt and Lascu, 2015))에서는 문제가 발생할 수 있다. SP 입자는 일반적으로 0.02 μm 미만의 크기를 가지며(Blumentritt and Lascu, 2015), 40°C 오븐 건조 및 장기간 보존 과정에서 열적/화학적 안정성이 낮아 자기적 특성이 변할 위험이 있다. 따라서 Wet 상태에서 관측된 MS 변동 특성이 Dry 상태로 변환되는 과정에서 변형되어 추세 일치도(R^2)가 낮아질 가능성을 배제할 수 없다.

둘째, 화학적 전처리가 필수적이거나 광물 파괴가 쉬운 환경에서 주의가 필요하다. 본 연구에서 사용된 GC03-C2 샘플은 MS 측정 전에 화학적 전처리(예: H_2O_2 , HCl 등)를 거치지 않았다. 그러나 탄산염 함량이 매우 높거나(Song *et al.*, 2018), 유기물 함량이 높아 건조 시료 MS 측정 전에 전처리가 불가피한 퇴적물 환경에서는 유의해야 한다. 특히 HCl 처리와 같은 강한 산 처리는 자성 광물의 철 이온과 반응하여 미세 SP 입자를 분해하고 MS 값을 감소시킬 수 있다(Song *et al.*, 2018). 이러한 환경에서는 Wet MS가 반영하는 원시 신호가 Dry 데이터에서 재현되지 않을 수 있다. 다만, 과산화수소(H_2O_2) 처리는 MS 변화에 미치는 영향이 5% 미만인 경우가 보고되기도 하기에(Song *et al.*, 2018)

상대적으로 안전한 대안이 될 가능성이 있다. 따라서 전처리가 필수적인 시료를 사용하는 경우, 화학적 처리가 추세 재현성에 미치는 정량적 영향에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

셋째, 후퇴적 변화(Post-depositional alteration)가 활발한 환경에서는, 황화 작용 등으로 인해 자철석(magnetite)이 파괴되거나 다른 이차 자성 광물(예: greigite)로 변성될 수 있다(Rosenbaum, 2005). 이러한 이차 광물들은 자철석에 비해 화학적으로 불안정하여, 시료 채취 후 보관 및 건조 과정에서 산화에 의한 자성 손실을 겪기 쉽다(Blumentritt and Lascu, 2015). 이 경우 코어 분할 직후의 Wet MS 값과 건조 시료로 측정된 Dry MS 값 사이에 추세 불일치가 발생할 가능성이 높으므로, 퇴적물 내 자성 광물의 화학적 안정성은 방법론 적용의 중요한 전제 조건이 된다.

5. 결론

본 연구는 남극 스코시아해의 아카이브 보관 퇴적물을 대상으로, 건조 시료를 활용한 대자율 측정 프로토콜을 제안하고 그 실험적 적용 가능성을 성공적으로 평가하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 질량 최적화 실험을 통해 도출된 최적질량 0.5 g은 본 연구의 실험환경(센서의 직경 및 인식범위) 하에서 MS2E 센서의 얇은 감지 깊이에 따른 기하학적 제약을 효과적으로 제어하면서도, 시료 도포의 균질성과 측정의 안정성을 동시에 보장하는 상한값임을 확인하였다. 특히 포인트 MS의 상대적 변동 비율을 장비 오차 범위(2%) 이내에서 성공적으로 재현함으로써 해당 프로토콜의 실험적 신뢰도를 확보하였다.

둘째, 새롭게 제안된 '바이알-랩-밀착' 포인트 방식(MS2E)과 표준 큐브 방식(MS2B) 모두 기존 습윤 코어 스캔 데이터의 MS 변동 추세를 $R^2 \geq 0.9394$ 라는 높은 통계적 신뢰도로 재현하였다. 이는 수분 제거에 따른 반자성 희석 효과로 인해 절댓값의 차이는 존재하되, 퇴적물 내 자성 광물 함량 변화에 따른 상대적 변동 패턴이 왜곡 없이 보존됨을 정량적으로 입증한다.

셋째, 본 연구의 결과는 단일 코어 분석에서 '실험법의 일관성(Consistency)'을 유지하는 것이 아카이브 시료를 활용한 변동 추세 복원의 가장 중요한 전제 조건임을 시사한다. 질량 최적화 실험에서 확인되었듯이, 포인트 센서의 기하학적 특성상 시료의 질량이나 MS 측정 방식에 따라 측정되는 절댓값은 민감하게 변화할 수밖에 없다. 따라서 코어 전체의 층서적 변동을 재현할 때는 모든 측정 지점에 대해 동일한 표준 질량을 적용하고, 한 번 사용한 측정 방식을 고정하여 처음부터 끝까지 일관되게 유지하여야 한다. 해당 연구에서는 최적 질량이 0.5 g으로 도출되었기 때문에

해당 값으로 일관되게 진행하였으나, 다른 연구에서 다른 센서를 적용하는 경우 적절한 질량이 달라질 수 있다. 이러한 일관된 실험 조건의 유지는 기기 고유의 물리적 한계로 인한 오차를 모든 시료에 동일하게 투영시킴으로써, 결과적으로 절댓값의 차이와 상관없이 자성 광물 함량 변화에 따른 상대적 MS 변동 추세를 왜곡 없이 온전히 복원할 수 있게 한다.

본 연구에서 제안한 측정 프로토콜은 신선한 습윤 코어 확보가 어려운 연구 환경에서 아카이브 시료를 활용하여 대자율의 층서적 상대 변동 추세를 복원하기 위한 유효한 대안적 분석 절차와 지침이 될 수 있다. 비록 특정 해역의 단일 코어를 대상으로 한 연구라는 한계가 있으나, 이는 향후 유사한 환경의 아카이브 시료를 활용한 고해상도 자기 층서 기록 확보 및 데이터 통합 연구에 실천적인 절차적 가이드를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 "남극 퇴적물을 이용한 과거 해양기반 빙상 불안정성 기작 연구(PE26090)"과제와 한국연구재단 신진연구지원사업(RS-2026-25470149)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bak, Y.-S., Yoo, K.-C. and Yoon, H.I., 2014, Late quaternary climate changes around the elephant islands, Antarctic Peninsula. *Geosciences Journal*, 18, 495-501.
- Bartington Instruments Limited, 2023, MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment (DS0020/23). <https://bartingtondownloads.com/wp-content/uploads/DS0020.pdf> (June 11, 2026).
- Blumentritt, D.J. and Lasca, I., 2015, A comparison of magnetic susceptibility measurement techniques and ferrimagnetic component analysis from recent sediments in Lake Pepin (USA). *Geological Society, London, Special Publications*, 414, 197-207.
- Gustavo González, A. and Ángeles Herrador, M., 2007, A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles. *Trends in Analytical Chemistry*, 26, 227-238.
- Kim, S., Lee, M.K., Shin, J.Y., Yoo, K.-C., Lee, J.I., Kang, M.-I., Moon, H.S. and Prebble, J.G., 2022, Variation in magnetic susceptibility in the Bellingshausen Sea continental rise since the last glacial period and implications for terrigenous material input mechanisms. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 594, 110948.
- Kim, S., Yoo, K.-C., Lee, J.I., Lee, M.K., Kim, K., Yoon, H.I. and Moon, H.S., 2018, Relationship between magnetic susceptibility and sediment grain size since the last glacial period in the Southern Ocean off the northern Antarctic Peninsula - Linkages between the cryosphere and atmospheric circulation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 505, 359-370.
- Missouri State University and Ozarks Environmental and Water Resources Institute, 2020, Standard Operating Procedure for: Magnetic Susceptibility (Magnetic Susceptibility R02). https://oewri.missouristate.edu/_Files/SOP_Magnetic_Susceptibility_2020.pdf (June 11, 2026).
- Pugh, R.S., McCave, I.N., Hillenbrand, C.-D. and Kuhn, G., 2009, Circum-Antarctic age modelling of Quaternary marine cores under the Antarctic Circumpolar Current: Ice-core dust-magnetic correlation. *Earth and Planetary Science Letters*, 284, 113-123.
- Rosenbaum, J.G., 2005, Magnetic Properties of Sediments in Cores BL96-1, -2, and -3 from Bear Lake, Utah and Idaho. *United States Geological Survey Open-File Report 2005-1203*, 13 p.
- Shin, J.Y., Kim, S., Zhao, X., Yoo, K.-C., Yu, Y., Lee, J.I., Lee, M.K. and Yoon, H.I., 2020, Particle-size dependent magnetic properties of Scotia Sea sediments since the Last Glacial Maximum: Glacial ice-sheet discharge controlling magnetic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 557, 109906.
- Song, Y., Li, Y., Wang, Q., Dong, H., Zhang, Z. and Orozbaev, R., 2018, Effect of chemical pretreatments on magnetic susceptibility of loess from Central Asia and the Chinese Loess Plateau. *Royal Society of Chemistry Advances*, 8, 11087-11094.
- Weber, M.E., Kuhn, G., Sprenk, D., Rolf, C., Ohlwein, C. and Ricken, W., 2012, Dust transport from Patagonia to Antarctica - A new stratigraphic approach from the Scotia Sea and its implications for the last glacial cycle. *Quaternary Science Reviews*, 36, 177-188.
- Xiao, W., Frederichs, T., Gersonde, R., Kuhn, G., Esper, O. and Zhang, X., 2016, Constraining the dating of late Quaternary marine sediment records from the Scotia Sea (Southern Ocean). *Quaternary Geochronology*, 31, 97-118.