

백령 · 대청 · 소청도 국제적 지질학 가치 규명 용역 최종보고서



2026. 6.

제 출 문

인천광역시청 귀하

본 보고서를 “백령·대청·소청도 국제적 지질학 가치 규명 용역”
사업의 최종보고서로 제출합니다.

2026. 6.

수 행 기 관 : 한국교원대학교 산학협력단

연구 책임자 : 김 태 환

참여 연구원 : 최 승 순

남 원 학

유 지 훈

요 약 문

□ **용역명 : 백령·대청·소청도 국제적 지질학 가치 규명 용역**

□ **과업 배경 및 목적**

- 백령·대청·소청도는 서해 최북단 도서지역으로, 중원생대-신원생대 저변성 퇴적암과 이를 관입한 고철질 암맥이 발달하며, 소청도 분바위에는 국내에서 가장 오래된 화석인 스트로마톨라이트(천연기념물 제508호) 산출
- 2019년 백령·대청 국가지질공원 지정 후, 2024년 유네스코 세계지질공원 국내 후보지로 확정(기후에너지환경부)
- 세계지질과학연맹(IUGS)의 평가 기준 강화(2023.7.)에 따라 SCI(E)급 국제학술논문 확보 필수
- 명소별 변형작용과 지질구조를 학술적으로 규명하여 국제적 지질학 가치를 입증하여 유네스코 세계지질공원 지정 기반을 마련하는 것을 목적으로 함

□ **연구 방법**

- 문헌조사(1:50,000 지질도 도폭설명서, 국내외 학술지·보고서), 야외지질조사 및 암석 시료 채취
- 전자현미경 분석 : 주사전자현미경(SEM) 및 후방산란전자(BSE) 관찰, 전자현미분석기(EPMA) 광물화학 분석
- 후방산란전자회절(EBSD) 미구조 분석: 소청도 스트로마톨라이트 탄산염암의 결정방위·CPO·입자 내부 변형 정량 분석

□ **주요 연구 결과**

- **(지질개요)** 세 섬은 북한 상원누층군(북중국지괴)에 대비되는 저변성 퇴적암으로 일차 퇴적구조를 양호하게 보존

- **(지질구조)** 지질도 규모의 단층은 백령도, 섬 규모 습곡은 대청도, 노두 규모 습곡은 소청도가 우세(조등룡 외, 2021)
 - **공통사항** : NE/ENE 침강 습곡축 + 우세한 북서 버전스 → 단일 압축 변형장 가능성, 페름기-트라이아스기 변형작용으로 추정(Kim et al., 2019)
 - **백령도** : 연화리(E-W 역단층)와 삼각산(N-S 우수향), 화동(NE-SW 총상단층) 일대 단층 발달, 남포리층 내 북서 버전스 비대칭 습곡 수반
 - **대청도** : 섬 전체를 제어하는 광역규모 역전습곡(습곡축 약 32°/054°), 정밀분석 결과 완만 침강 개방 과습곡으로 해석(박정영 외, 2024)
 - **(소청도)** 동북동-서남서 주향의 노두 규모 비대칭 습곡(습곡축 약 28°/080°) 발달
- **(소청도 스트로마톨라이트 EBSD 미구조) * 핵심성과**
 - 방해석이 주 구성 광물이며, 세립질(약 10 μm) 및 조립질(약 40 μm) 영역으로 구분
 - 세립질 방해석 : 약한 CPO·낮은 입자 내부 방위차 → 변형 기록 미약
 - 조립질 방해석 : 변형쌍정, 아입자 경계, 국소 재결정 및 c축 엇리 수직, a축 거들 CPO 발달 → 결정소성 변형을 효과적으로 기록
 - 석영은 입자 내부 변형이 약함 → 변형의 주된 기록자는 조립질 방해석으로 해석
 - 본 성과를 2026. 6. 6. 구조지질학 분야 SCI(E)급 국제학술지 Journal of Structural Geology에 투고 완료(Choi et al., submitted)

□ 활용방안

- **(학술)** 스트로마톨라이트 방해석을 변형 기록자로 활용, EBSD 기법을 백령도 단층암 및 대청도 과습곡으로 확장하여 변형사 종합
- **(후속연구)** 단층점토와 운모류, 방해석 세맥의 절대연령 측정으로 변형시기를 직접 규명하여 SCI(E)급 논문 추가 확보
- **(지구조)** 북한 상원누층군의 접근 가능한 자료와 비교 활용, 한반도 중서부 조산운동사 규명 도움
- **(지질공원)** IUGS 명소별 국제가치 평가 대응 및 현장실사 증빙 자료화, '생성-변형' 스토리텔링 기반 해설 및 교육 등 지오투어 콘텐츠로 가공하여 세계지질공원 인증과 지역 지속가능 발전에 기여

목 차

제 1 장 배경 및 목적	1
제 1 절 과업의 배경.....	1
제 2 절 과업의 목적.....	2
제 2 장 연구 방법	3
제 1 절 문헌 조사.....	3
제 2 절 야외지질조사 및 암석 시료 채취.....	3
제 3 절 전자현미경을 이용한 분석.....	4
1. 주사전자현미경(SEM) 관찰.....	4
2. 전자현미분석기(EPMA) 광물화학 분석.....	4
3. 후방산란전자회절(EBSD)을 이용한 미구조 분석.....	5
제 3 장 연구 결과	8
제 1 절 백령·대청·소청도 지질개요.....	8
제 2 절 백령·대청·소청도 지질구조.....	10
1. 백령도.....	10
2. 대청도.....	12
3. 소청도.....	13
4. 종합 및 변형시기.....	16
제 3 절 소청도 스트로마톨라이트의 후방산란전자회절 미구조.....	17
1. EBSD 분석 영역의 광물상 분포.....	17
2. 방해석 입도 분포와 세립질-조립질 영역 구분.....	17
3. Band contrast map에서 확인되는 입자 경계와 변형쌍정.....	19
4. 확대 EBSD map에서 확인되는 방해석 결정방위와 입자 내부 변형.....	20
5. 추가 EBSD map에서 확인되는 입자 크기별 변형 양상의 반복성.....	21
6. 방해석의 결정선호배향과 미소오리엔테이션 분포.....	23
7. 석영의 EBSD 미구조 특징.....	26
8. EBSD 미구조 결과의 종합.....	27
9. 소청도 스트로마톨라이트 변형미구조의 지구조적 의의.....	28
제 4 장 활용방안	29
부록 1. 참고문헌 목록.....	31
부록 2. 투고 논문에서 인용한 참고문헌 목록.....	34
부록 3. 논문 투고 확인서.....	41

제 1 장 배경 및 목적

제 1 절 과업의 배경

백령·대청·소청도는 서해 최북단, 인천광역시 옹진군 백령면·대청면에 위치한 도서지역으로, 중원생대-신원생대 퇴적암류와 이를 관입한 고철질 암맥이 잘 발달한다. 이 퇴적암류는 우리나라 내륙의 신원생대 퇴적암류와 달리 퇴적구조가 양호하게 보존되어 있는 것이 특징이며, 특히 소청도 분바위에는 국내에서 가장 오래된 화석으로 알려진 스트로마톨라이트가 매우 좋은 보존상태를 유지하며 산출하여 2009년 천연기념물로 지정된 바 있다. 이러한 지질학적 중요성과 더불어 수려한 해안지형, 휘록암 주상절리, 신생대 현무암·맨틀포획암 등 자연유산적 가치를 인정받아 2019년 7월 10개 지질명소를 포함한 국가지질공원으로 인증되었고, 이후 기후에너지환경부 지질공원위원회에서 유네스코 세계지질공원 국내 후보지로 확정되었다.

유네스코 세계지질공원 지정은 백령·대청 국가지질공원의 브랜드 가치를 높이고, 유네스코 브랜드를 활용한 관광 활성화와 지역의 지속가능한 발전을 도모할 수 있는 핵심 수단이다. 그러나 지질명소의 국제적 가치를 심사하는 세계지질과학 연맹(IUGS)의 평가 기준이 강화되면서(2023년 7월 기준, 공원 전체 단위 → 명소별 국제가치 규명), 대상 지역의 국제적 지질학 가치를 입증할 SCI(E)급 국제학술 논문 확보가 필수적인 실정이다.

또한 서해 5도라는 지리적 특수성으로 인해 접근성과 현지 연구환경에 제약이 있어 국내 연구자의 자발적 연구 참여가 충분하지 못하였다. 북한 황해도 일대에 넓게 분포하는 상원누층군(북중국지괴)과의 지구조적 대비 등 학술적 쟁점이 존재함에도 북한 현지 조사가 사실상 불가능하여, 그 차선책으로 이에 인접한 백령·대청·소청도 지질 연구의 중요성이 더욱 증대되었다. 이에 접근성과 연구환경의 제약을 감수하고 연구에 참여할 수 있는 국내 연구진의 참여를 유도하여 국제학술 논문을 확보할 필요가 있다.

최근 북한의 이의제기로 인해 유네스코 세계지질공원 현장실사가 잠정 중단된 상태이나, 향후 여건 개선 등에 따라 있을 현장실사를 대비할 필요성은 여전히

크다. 따라서 현장평가 및 평가 결과에 따른 사전 준비를 체계적으로 추진함으로써 최종 지정까지 소요되는 기간을 단축할 필요가 있다. 이러한 배경에서 인천광역시는 본 학술연구용역(사업비 97,000,000원 / 사업기간 2025.6.26. ~ 2026.6.25.)을 추진하게 되었다.

제 2 절 과업의 목적

본 과업은 백령·대청·소청도의 지질학적 특성을 국제적으로 인정받기 위한 학술적 기반을 확보하고, 유네스코 세계지질공원 지정에 요구되는 국제 수준의 지질학 가치를 규명하는 것을 목적으로 한다. 세부 목적은 다음과 같다.

첫째, 유네스코 세계지질공원 지정의 기본 필수조건인 지질공원의 국제적 지질학 가치 규명을 충족한다. 백령·대청·소청도 지질명소의 변형작용과 지질구조를 학술적으로 규명하여, 해당 지역이 지니는 국제적 지질학 가치를 객관적으로 입증한다.

둘째, 강화된 세계지질과학연맹(IUGS)의 국제적 지질학 가치 평가에 대응하기 위하여 SCI(E)급 국제학술논문을 확보한다. 평가 단위가 공원 전체에서 명소별 국제가치 규명으로 강화(2023년 7월 기준)됨에 따라, 명소별 단층·습곡 등 변형 암석의 미구조에 대한 정량분석과 해석을 토대로 SCI(E)급 국제학술논문 1편 이상을 투고하여 IUGS의 평가 기준을 충족한다.

셋째, 2025년 유네스코 세계지질공원 지정 현장실사에 효과적으로 대응하고, 이를 통해 2026년 최종 지정 목표를 달성한다. 현장평가자를 대상으로 백령·대청·소청도의 국제적 가치를 체계적으로 설명·제시함으로써 지정 절차의 원활한 진행과 기간 단축을 도모한다.

요컨대 본 과업은 백령·대청·소청도의 국제적 지질학 가치를 학술적으로 규명하여 유네스코 세계지질공원의 성공적 지정을 위한 핵심 기반을 마련하기 위해, SCI(E)급 국제학술지에 논문을 투고하는 것을 최종 목표로 한다.

제 2 장 연구 방법

제 1 절 문헌 조사

조사한 문헌은 국제학술지, 국내학술지와 학회발표자료, 연구기관 보고서 등에 해당한다. 지질도를 작성하여 보고한 국립지질조사소, 한국자원연구소(현 한국지질자원연구원)의 발간지 및 보고서와 한국지질자원연구원의 1대 5만 도폭설명서를 기초로 세 문헌에서 인용한 문헌 자료들을 포함, 폭넓게 조사하였다. 문헌자료는 대부분 pdf 형태의 파일로 웹에서 내려받을 수 있었으며, 도폭설명서처럼 필요한 경우 출판본을 구매하였다. 본 과업의 가장 중요한 목표 중 하나인 SCI(E)급 국제학술지 발간에 참고하기 위해 백령·대청·소청도의 암석들을 주제로 기발간된 SCI(E)급 논문을 탐색한 결과, SCI(E)급 국제학술지에 11편이 출판되었다. 수집한 문헌들을 정독하고 일반지질, 구조지질학적 내용들을 습득하였으며 필요한 경우 암석 시료가 기재된 위치를 야외지질조사에 참고하였다.

제 2 절 야외지질조사 및 암석 시료 채취

야외지질조사는 한국지질자원연구원에서 발간한 백령·대청·소청도의 1대 5만 축척 지질도(조등룡 외, 2021)를 기초로 하였다. 백령도의 경우, 이 공식 지질도폭 발간 전에 임순복 외(1999)에 의해 제작된 지질도 역시 참고하였다. 백령·대청·소청도는 대부분 일부 변형구조를 가진 퇴적암이므로 야외에서 습곡, 압쇄암화 등 변형구조가 뚜렷한 노두와 지질명소를 위주로 조사하였으며, 노두 규모에서 엽리, 선구조 등을 파악한 후 박편 제작을 위한 암석 시료를 채취할 때 정향(oriented) 시료 채취하였다. 소청도 스트로마톨라이트를 포함한 천연기념물, 지질명소 방문과 암석 시료 채취는 미리 국가유산청의 허가를 받았다. 추가로 주상절리가 발달한 소청도 노화동 휘록암(dolerite), 소청도 분바위층원 퇴적암 등 저어콘 광물 연령 측정을 위해 다수의 시료를 채취하였다. 야외지질조사는 사업 수행기간 동안 총 4회 실시되었다(25.7.9.-7.12.; 25.12.16-12.17.; 26.2.3.; 26.4.30.-5.1.).

제 3 절 전자현미경을 이용한 분석

1. 주사전자현미경(SEM) 관찰

채취한 암석 시료의 조직 및 광물의 미구조(microstructure)를 관찰하기 위하여 연마된 암석편, 즉 박편을 제작하였다. 박편은 변형 구조의 기하학적 관계를 효과적으로 관찰할 수 있도록 대표적인 구조 단면을 고려하여 제작하였으며, 광물 입자의 형태, 입자 경계, 쌍정, 재결정 조직 및 결정방위 분포를 함께 분석할 수 있도록 준비하였다. 박편을 전계방사형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)을 이용하여 분석하였다. 시료 표면의 전하 축적을 방지하기 위하여 탄소 코팅을 실시하였다. 후방산란전자(back-scattered electron, BSE) 영상을 획득하여 광물 간 평균 원자번호 차이에 따른 명암 대비를 확인하였으며, 이를 통해 광물의 산상, 조직적 관계 및 변형 미구조를 관찰하였다. 또한 필요에 따라 에너지분산형 X선 분광기(energy dispersive spectrometer, EDS)를 이용하여 광물의 정성 원소분석을 수행하여 광물 동정에 활용하였다.

2. 전자현미분석기(EPMA) 광물화학 분석

광물의 화학조성을 정량적으로 분석하기 위하여 한국해양과학기술원부설 극지연구소에 설치된 전계방사형 전자현미분석기(electron probe microanalyzer, EPMA; JEOL JXA-8530F)를 이용하였다. 가속전압 15kV, 전류세기 10nA, 직경 3 μ m의 전자빔을 사용하였다. 분석은 탄소 코팅된 연마 박편을 대상으로 수행하였으며, 집속된 전자빔을 시료 표면에 조사하여 발생하는 특성 X선을 파장분산형 분광기(wavelength dispersive spectrometer; WDS)로 측정하였다. EPMA는 수 μ m 규모의 미세 영역에 대한 비파괴 정량분석이 가능한 장비로, 광물 내 주요 원소 및 미량 원소의 분포를 높은 공간분해능과 우수한 검출한계(detection limit)로 분석할 수 있다. 특히 광물 입자 내 조성 누대구조(zoning), 반응연(reaction rim), 재평형화(re-equilibration)에 따른 화학 조성 변화를 정밀하게 규명할 수 있어 변성 및 변형 과정을 해석하는 데 널리 활용된다.

정량분석은 국제 표준시료 및 천연·합성 광물 표준시료를 이용하여 수행하였으며, 측정된 X선 강도는 MAN(mean atomic number) 배경(background) 보정 과정을 통해 정량화하였다. 각 분석 지점에서 주요 원소의 산화물 함량을 측정하였으며, 분석 결과는 wt.% 단위의 산화물 조성으로 산출하였다. 또한 분석 과정 중 발생할 수 있는 전자빔 손상(beam damage) 및 알칼리 원소의 휘발 효과를 최소화하기 위하여 적절한 빔 조건을 유지하였다.

광물의 화학조성 변화와 누대구조를 파악하기 위하여 광물 입자의 중심부(core)와 가장자리(rim)를 따라 점분석(point analysis)을 수행하였으며, 필요에 따라 맵핑(mapping)을 활용하였다. 맵핑 조건은 가속전압 15kV, 전류세기 30-40nA, 드웰타임(dwel time) 40-50ms, 빔 간격 0.76 μ m이다. 획득된 화학 조성 자료는 광물의 생성 및 성장 이력, 변성/변형 과정, 유체-암석 상호작용, 그리고 변성·변형작용 동안의 평형 조건 변화를 해석하는 데 활용하였다. 또한 광물 조성 자료를 기반으로 광물 화학식 계산 및 광물 분류의 기초 자료로 이용하였다.

3. 후방산란전자회절을 이용한 미구조 분석

연구 대상 시료의 결정학적 미구조와 변형 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 후방산란전자회절(electron backscatter diffraction, EBSD) 분석을 수행하였다. EBSD 분석은 광물 입자의 결정방위, 결정선호방향(crystal preferred orientation, CPO), 입자 내부의 방위차, 재결정 조직 및 입자 경계 특성을 파악하는 데 효과적인 방법으로, 본 연구에서는 소청도 스트로마톨라이트 탄산염암에 기록된 변형 미구조를 해석하기 위해 활용하였다. 일반적인 박편 연마 이후에는 EBSD 패턴의 획득률과 품질을 높이기 위해 콜로이드 실리카(colloidal silica, SYTON)를 이용한 정밀 최종 연마를 실시하였다(그림 1). 이러한 최종 연마 과정은 시료 표면의 미세한 기계적 손상층을 제거하고, 방해석과 같은 탄산염 광물에서 선명한 Kikuchi 패턴을 확보하기 위해 필수적이다.

EBSD 분석은 서울대학교 지구환경과학부에 설치된 JEOL사의 JSM-7100F FE-SEM에 부착된 Oxford Instruments사의 Symmetry EBSD 검출기를 이용하여

수행하였다(그림 2). 분석은 주로 가속전압 20kV, 작업거리(working distance) 약 25mm, 시료 기울기 70° 조건에서 수행하였다. 분석 대상 영역의 입자 크기와 미구조적 특징을 고려하여 적절한 스텝 크기를 설정하였으며, 방해석 입자의 결정방위, 입자 내부 변형, 쌍정 및 재결정 조직을 관찰할 수 있도록 EBSD 맵을 획득하였다.



그림 1 (a) 미구조 분석을 위한 고품질 표면을 얻기 위해 시료 준비 과정에 사용된 연마기. (b) EBSD 데이터의 품질 향상을 위해 최종 연마 단계에서 사용된 SYTON(콜로이드 실리카) 용액.

수집된 EBSD 자료는 Oxford Instruments사의 AZtec 및 AZtecCrystal 소프트웨어를 이용하여 처리하였다. 원자료에는 측정 과정에서 발생할 수 있는 비지수화 픽셀과 국소적인 오지수화 자료가 포함될 수 있으므로, 자료의 신뢰도를 높이기 위한 후처리 과정을 수행하였다. 후처리 과정에서는 고립된 비정상적인 스파이크 신호(wild spike)를 제거하고, 주변 픽셀과의 관계를 바탕으로 일부 픽셀을 보정하였으며, 분석 목적에 적합한 결정립 경계와 입자 내부 방위차 자료를 산출하였다. 다만, 실제 미구조를 과도하게 변형하지 않도록 후처리는 최소한의 범위에서 수행하였다.

후처리된 EBSD 자료를 바탕으로 밴드 대비(band contrast, BC) 맵, 상 분포(phase) 맵, 역극점도(inverse pole figure, IPF) 맵, 평균 국소 방위차(kernel average misorientation, KAM) 맵, 입자 내 방위 분산을 나타내는 입자기준방위편차

(grain reference orientation deviation, GROD) 맵을 작성하였다. BC 맵은 Kikuchi 밴드의 선명도 차이를 이용하여 입자 경계, 균열, 쌍정 및 미세조직의 형태를 시각적으로 확인하는 데 사용하였다.

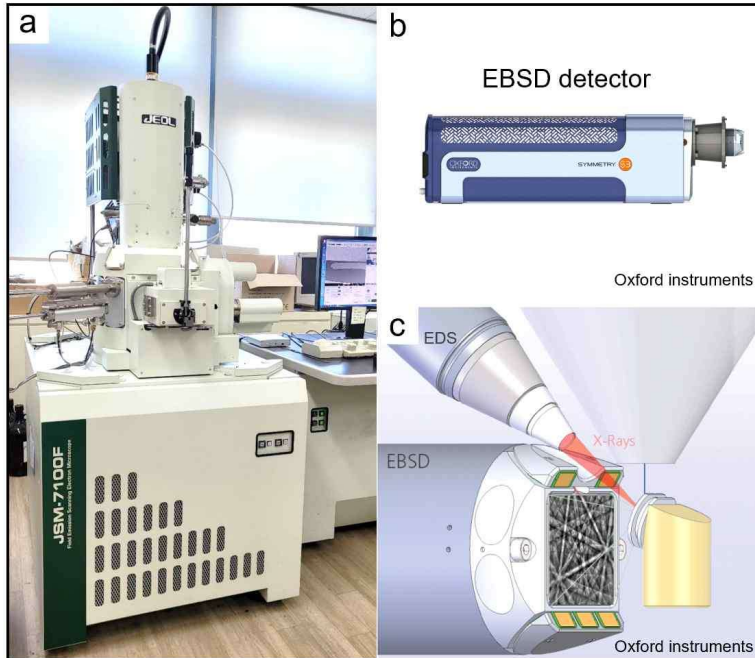


그림 2. (a) 미구조 및 EBSD 분석에 사용된 전계방출형 주사전자현미경 (JEOL JSM-7100F). (b) 결정학적 분석을 위해 FE-SEM에 장착된 EBSD 검출기(SYMMETRY, Oxford Instruments). (c) 주사전자현미경 챔버 내 EBSD 검출기의 위치 및 배치(configuration)를 나타낸 모식도로, 시료와 에너지분산형 X선 분광기(EDS)에 대한 상대적 방향을 보여줌.

Phase 맵은 방해석과 부수 광물의 분포를 구분하는 데 활용하였으며, IPF 맵은 개별 입자의 결정학적 방향과 입자 간 방위 관계를 파악하는 데 사용하였다. KAM 및 GROD 계열의 방위차 맵은 입자 내부의 국소 변형 집중, 전위 축적, 아입자 발달 및 재결정 가능성을 평가하는 데 이용하였다.

방해석의 CPO를 분석하기 위해 EBSD 자료로부터 극점도(pole figure)를 작성하였다. 극점도 작성 시에는 특정 대형 입자가 전체 결정방위 분포에 과도한 영향을 주지 않도록, 필요한 경우 각 결정립을 동일한 가중치로 처리하여 분석하였다. 이를 통해 스트로마톨라이트를 구성하는 방해석 입자들의 결정선호배향 발달 정도와 변형 조직 사이의 관계를 검토하였다. 특히 세립질 영역과 조립질 영역, 그리고 변형 정도가 다른 시료 간의 EBSD 자료를 비교함으로써 입자 크기와 암상 차이에 따른 변형기작의 차이를 평가하였다.

제 3 장 연구 결과

제 1 절 백령·대청·소청도 지질개요

대한민국 최북서단에 위치한 백령도, 대청도, 소청도는 인천에서 북서쪽으로 약 200 km 떨어져 있으며, 낭림육괴의 남서부 연안에 해당한다(Cho et al., 2017, 2021). 이들 섬의 원생누대 저변성 퇴적암층은 일반적으로 북한 평남분지의 북중국지괴 친화적인 상원누층군이 남서쪽으로 연장된 지층으로 해석되어 왔다(Paek et al., 1996; Kim and Kim, 1999; 임순복 외, 1999; 김명정 외, 2016, 2021). 상원누층군은 하위에서 상위로 직현층군, 사당우층군, 묵천층군, 멸악산층군으로 구분된다(Paek et al., 1996; Oh et al., 2023). 상원누층군과 이에 대비되는 서해 3도 지층에서 산출된 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령은 주로 후기 고원생대~후기 중원생대(약 18~11억 년)에 집중되며, 북중국지괴 기반암의 특징적인 약 18.5억 년 및 25억 년 연령 첨두(peak)가 결여되어 있다. 이에 따라 Park et al. (2025)은 세 섬을 북중국지괴가 아닌 남중국지괴 친화적인 “황해지구(Hwanghae District)”에 속하는 것으로 재해석한 바 있다.

서해 3도의 암층서 체계는 조등룡 외(2021)가 수행한 1:50,000 지질도 작성 사업을 통해 정립되었다(그림 3). 백령도의 경우 임순복 외(1999)는 백령층군을 하위에서 상위로 중화동층, 장촌층, 두무진층으로 구분하고, 심해 대륙붕 환경에서 천해 대륙붕을 거쳐 조간대 환경으로 이행하는 전반적인 천해화 퇴적 경향을 제시하였다. 이후 조등룡 외(2021)는 이를 수정하여 백령층군을 남포리층, 중화동층, 두무진층으로 재구분하였으며, 대청도의 대청층군을 지두리층과 독바위층으로 구성되는 대비 지층으로 설정하였다. 두 층군의 퇴적상한은 쇄설성 저어콘 연령 측정 결과(김명정 외, 2016, 2021, Kim et al., 2019)에 의해 약 11.9~10.3억 년으로 제한되며, 평남분지의 사리원 휘록암 암상(sill; 약 9.5억 년)과 대비되는 휘록암 암상의 관입 연령 역시 이를 뒷받침한다(Cho et al., 2023). 백령도 북동쪽에는 맨틀포획암을 가진 제3기 현무암(진촌리현무암)이 산출한다. 알칼리현무암과 맨틀포획암에 관한 다수의 논문이 출판된 바 있다(Choi and Kwon, 2005; Choi et al., 2005, 2006, 2012, 2024; Kil, 2006; Kil et al., 2016; Ahn and Yamamoto, 2019; Kim and Choi, 2021).

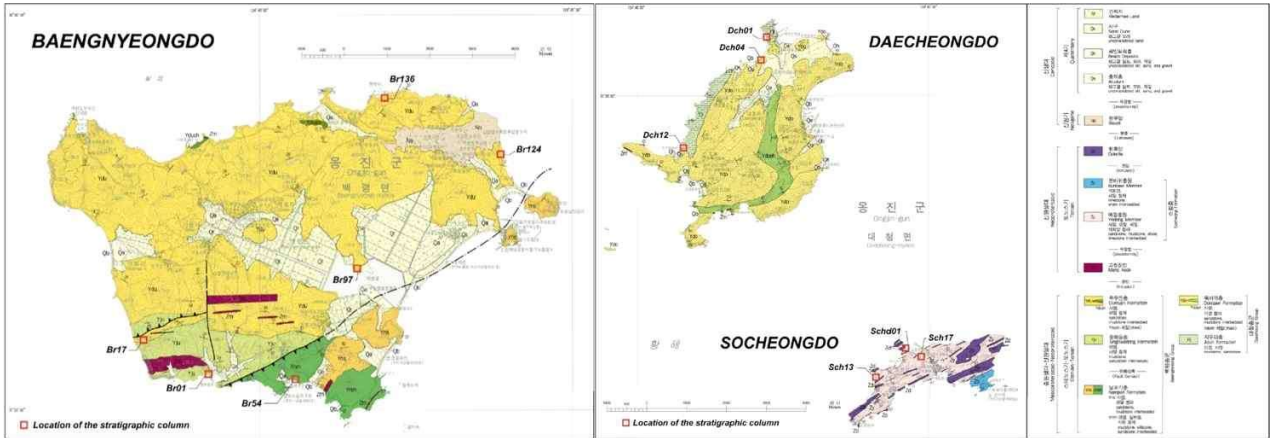


그림 3 백령·대청·소청도 1:50,000 지질도와 범례. 조등룡 외(2021)에서 일부 수정하였음.

소청도의 소청층은 예동층원(Yedong Member)과 분바위층원(Bunbawi Member)으로 구분된다(그림 4; 조등룡 외, 2021). 예동층원은 주로 사암-실트암-셰일의 호층으로 이루어지며, 소량의 석회암 협층이 포함된다. 반면 상위의 분바위층원은 자색 셰일 박층을 수반하는 두꺼운 석회암층으로 구성되며, 신원생대 스트로마톨라이트 화석을 포함한다. 이 화석은 대한민국에서 가장 오래된 생물기원 천연기념물로 지정되어 있다. 스트로마톨라이트 군집은 *Baicalia*, *Inzeria*, *Linella*, *Jinshanzhaiella* 등을 포함하며, 중국 북부 청백구계(Qingbaikou System)의 군집 VI 및 VII과 대비된다. 이는 상원누층군 상부의 묵천층군 및 멸악산층군과의 층서 대비를 지지한다(Kim and Kim, 1999; 김정률과 한성희, 2010). 또한 *Siphonophycus*와 *Obruchevella*를 포함하는 세균성 미화석 역시 후기 원생누대 연령을 지시한다(이성주 외, 2003). 소청층의 퇴적 시기는 예동층원의 최연소 쇄설성 저어콘 연령(약 9.4~9.0억 년)과 휘록암 암상의 연령(약 8.9~8.8억 년)에 의해 토노스기(Tonian, 약 9.0~8.8억 년)로 제한된다(그림 4; Cho et al., 2023; Yun et al., 2024).

서해 3도는 구조양식의 차이에도 불구하고 운동학적으로 연관된 압축 변형을 공통적으로 보여준다. 백령도는 총상단층과 이에 수반된 습곡이 우세한 반면, 대청도와 소청도는 북서 방향으로 버전스(vergence)를 가지며 북동~동북동 방향으로 완만하게 플런지하는(plunging) 습곡이 우세하다(조등룡 외, 2021; 박정영 외, 2024). 세 섬에서 일관되게 나타나는 버전스 및 플런지 방향은 공통의 광역 압축 응력장을 지시하며, 이는 서부 한반도의 고생대 이후 지체구조 진화 과정,

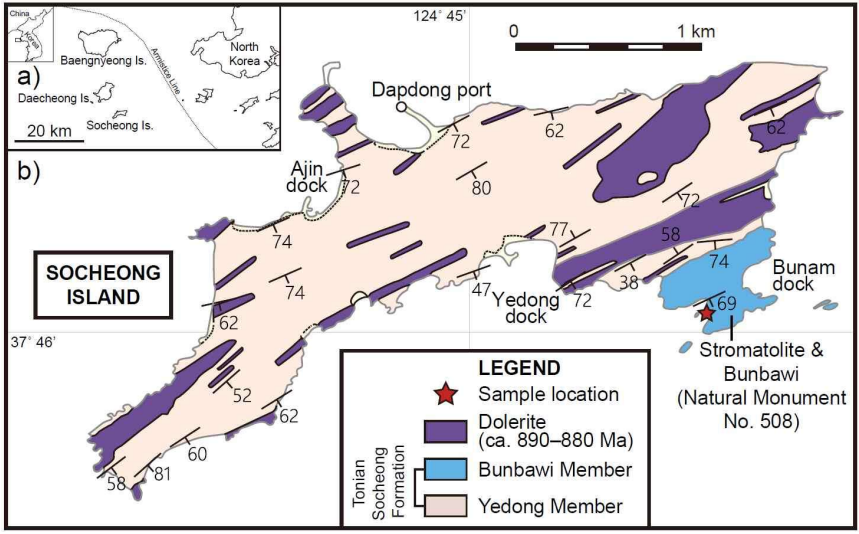


그림 4 소청도 지질도(Choi et al., submitted)와 스트로마톨라이트 시료 위치.

특히 페름기-트라이아스기의 송림조산운동 및/또는 쥐라기의 대보조산운동과 관련 되었을 가능성이 높다(Cho et al., 2017; 박정영 외, 2024). 따라서 이러한 변형의 정확한 시기를 규명하는 것은 이 지역 총상구조의 형성과정을 이해하는 데 핵심적인 과제로 남아 있다(박정영 외, 2024).

제 2 절 백령 · 대청 · 소청도 지질구조

1. 백령도

지질도 규모의 단층은 백령도에 집중되며, 연화리단층·삼각산단층·화동단층의 세 단층으로 구성된다(조동룡 외, 2021). 백령도 남서부의 연화리단층은 동-서 방향의 저각 단층으로, 두무진층과 중화동층을 반복적으로 분포시키며 이들의 층리에 저각으로 발달한다. 단층 노두에 발달하는 단층끝림 습곡은 상반이 남쪽 내지 남동쪽으로 상승하는 역이동성 운동감각을 지시한다. 삼각산단층은 백령도 남서부 삼각산 능선을 따라 발달하는 남-북 방향의 고각 단층으로 단층대를 따라 파쇄암이 산출하며, 단층 양측에서 두무진층-중화동층 경계가 이격된 양상은 우수향 주향이동 운동을 지시한다. 연화리단층은 동쪽으로 이 삼각산단층에 의해 절단되어 더 이상 연장되지 않는다.

백령도 남동부의 화동단층은 북동-남서 방향의 총상단층으로, 남포리층을

북서쪽으로 이동시켜 두무진층 및 중화동층의 구조적 상위에 놓이게 한다. 단층대 내에는 여러 매의 단층이 반복적으로 발달하여 접촉면을 직접 확인하기 어려우나, 인접 퇴적암체의 강한 변형과 남포리층 층리의 남동 경사를 근거로 그 자취가 추적된다(조등룡 외, 2021). 단층 상반의 남포리층 내에는 비대칭 습곡과 이에 수반되는 축면 벽개(axial plane cleavage)가 잘 발달하며(그림 5), 이들은 상반이 북쪽 내지 북서쪽으로 상승하는 운동감각을 지시한다. 특히 장촌포구 일대에는 변형작용에 의한 습곡구조(천연기념물 제507호 남포리습곡구조)가 잘 나타난다(임순복 외, 1999; 조등룡 외, 2021). 이 밖에 북서-남동, 남-북, 동-서 방향의 소단층들이 지층 내에 발달한다. 종합하면 백령도의 변형은 북동-남서 방향의 충상 단층과 이에 수반된 북서 버전스의 비대칭 습곡으로 특징지어진다.

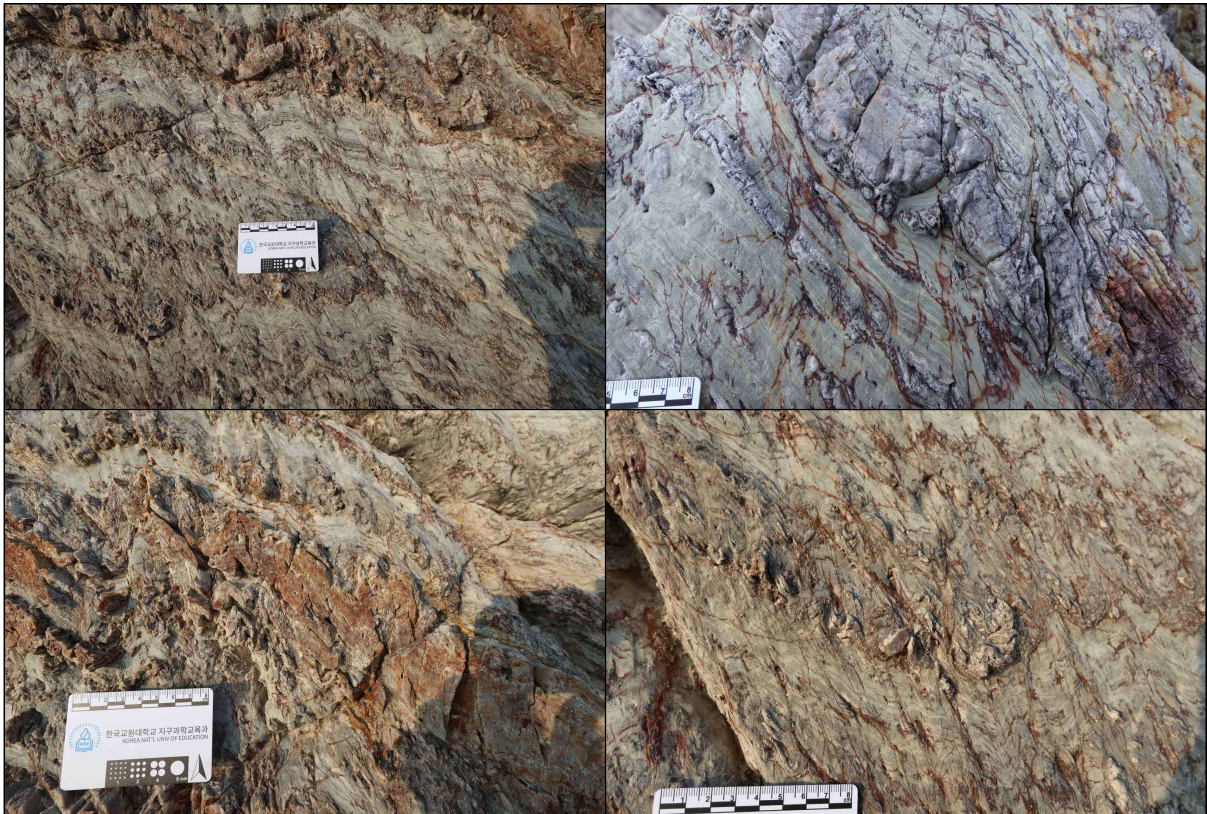


그림 5. 백령도 남포리 습곡구조 주변 노두 사진. 노두 규모 배사구조의 서쪽 습곡날개에 해당하며, 밝은색 실트암-붉은색 사암이 교호하는 부분이 층리에 평행한 압축운동(layer-parallel shortening)을 경험하여 습곡축면을 따라 파랑벽개(crenulation cleavage)가 잘 발달함(좌상). 변형 작용 동안 입자가 작은 실트암이 일부 교란되기도 함(우상). 입자가 상대적으로 큰 붉은색 사암 레이어는 습곡 변형작용에 다르게 거동함(하).

2. 대청도

대청도에 분포하는 대청층군(지두리층, 독바위층)의 층리는 섬 전체 규모의 습곡작용에 의해 교란되어 있으며, 사암 내 사층리와 점이층리 같은 일차 퇴적 구조가 지층의 역전 여부를 잘 지시한다(조등룡 외, 2021; 박정영 외, 2024). 도폭설명서에 따르면, 섬의 북동부-중남부-서부에서는 층리가 동북동-서남서~동남동-서북서 방향의 주향과 북북서~북북동 방향의 경사를 가지며 사층리를 통해 역전되었음이 확인되고, 북서부-중동부에서는 층리가 북북동-남남서~북북서-남남동 방향의 주향과 동남동~동북동 방향의 경사를 가지며 정상위로 나타난다(조등룡 외, 2021). 정상위 날개부에는 남동 버전스의 비대칭 습곡이, 역전된 날개부에는 북서 내지 서쪽 버전스의 비대칭 습곡이 발달하며, 두 경우 모두 습곡 축면에 평행한 벽개가 뚜렷하다. 남부지역은 동-서 방향의 단층에 의해 구분되어 동북동-서남서 주향과 남남동 경사를 보인다. 도폭설명서는 이 습곡을 역전 습곡이자 익간각(interlimb angle)에 따른 급사습곡(close fold)으로 분류하였다(조등룡 외, 2021)(그림 6).



그림 6. 대청도 나이테바위 주변 광란두해변 노두 사진. 사암, 세일을 포함한 다양한 색깔의 퇴적암류 레이어들이 습곡 변형구조를 보임. 암상, 즉 물성에 따라 다양한 정도의 습곡 변형구조를 기록함. 특히 밝은색 사암층의 습곡구조가 뚜렷함.

후속 연구(박정영 외, 2024)는 지층의 방향과 역전 여부를 기준으로 네 개의 구조 영역을 설정하여 이 광역규모 습곡의 기하·운동학적 특성을 정량화하였다. 영역 1-3은 습곡의 서로 다른 날개에 해당하고 영역 4는 동-서 방향 단층으로 구분되는 남단부에 해당한다. 영역 1과 3에는 북서 버전스, 영역 2에는 남동 버전스의 비대칭 기생습곡이 발달하는 반면, 날개 사이 힌지부(영역 1-3 경계)에는 대칭

형태의 기생습곡이 나타난다(박정영 외, 2024). 날개부 벽개는 대체로 $N30^{\circ}$ - $60^{\circ}W$ 주향에 40° - $55^{\circ}NE$ 경사를 보이고, 힌지부에서는 벽개가 패닝(fanning)하여 넓은 주향 범위를 가지며, 점성 차가 큰 사암-이암 호층에서는 힌지 붕괴와 발산형 벽개 패닝, 이암의 썸기형(cusp) 구조가 관찰된다. 이 습곡은 완만하게 침강된 개방 과습곡(gently-plunging open overturned fold)으로 분류된다(박정영 외, 2024). 변형된 지층이 비교적 일정한 두께를 유지하는 점, 날개부의 비대칭 기생 습곡과 힌지부의 대칭 기생습곡이 공존하는 점은, 층리에 평행한 압축운동(layer-parallel shortening)을 먼저 경험한 뒤 요굴흐름(flexural flow) 기작에 의해 광역규모 습곡이 발달하였음을 지시하는 것으로 해석된다(Park et al., 2024).

3. 소청도

소청층의 층리는 동북동-서남서 방향의 주향을 가지며 대체로 남남동 방향으로 고각 경사하나, 일부 층리는 북~북북서 방향으로 경사한다(조등룡 외, 2021). 이러한 층리 방향성은 습곡의 발달을 지시한다. 소청도 남동부 분암포구 인근 노두는 이러한 습곡구조의 기하학적 특성을 잘 보여준다. 소청도에 발달하는 습곡은 비대칭 습곡이자 익간각에 따른 급사습곡으로 분류된다(조등룡 외, 2021). 대청도와 달리 소청도에서는 섬 규모의 단일 습곡이나 총상단층보다 비교적 익간각이 작은 노두 규모의 비대칭 습곡이 우세하다.

소청도 분바위층원의 스트로마톨라이트는 학술적으로 가장 흥미로운 구조와 조직을 보여준다. 자색 셰일층과 교호하거나 블록 형태로 산출하는 함스트로마톨라이트 석회암층은 개별 스트로마톨라이트 마운드의 돔형(domal) 구조가 압축-신장되어 디스크 모양으로 변형되는 구조와 조직을 연속적으로 보여준다(그림 7). 유동학적으로 강한 물성의 스트로마톨라이트가 약한 물성의 자색 셰일과 접한 곳에서만 상대적으로 강한 변형과 변형 집중을 겪었음을 알 수 있다(그림 8).

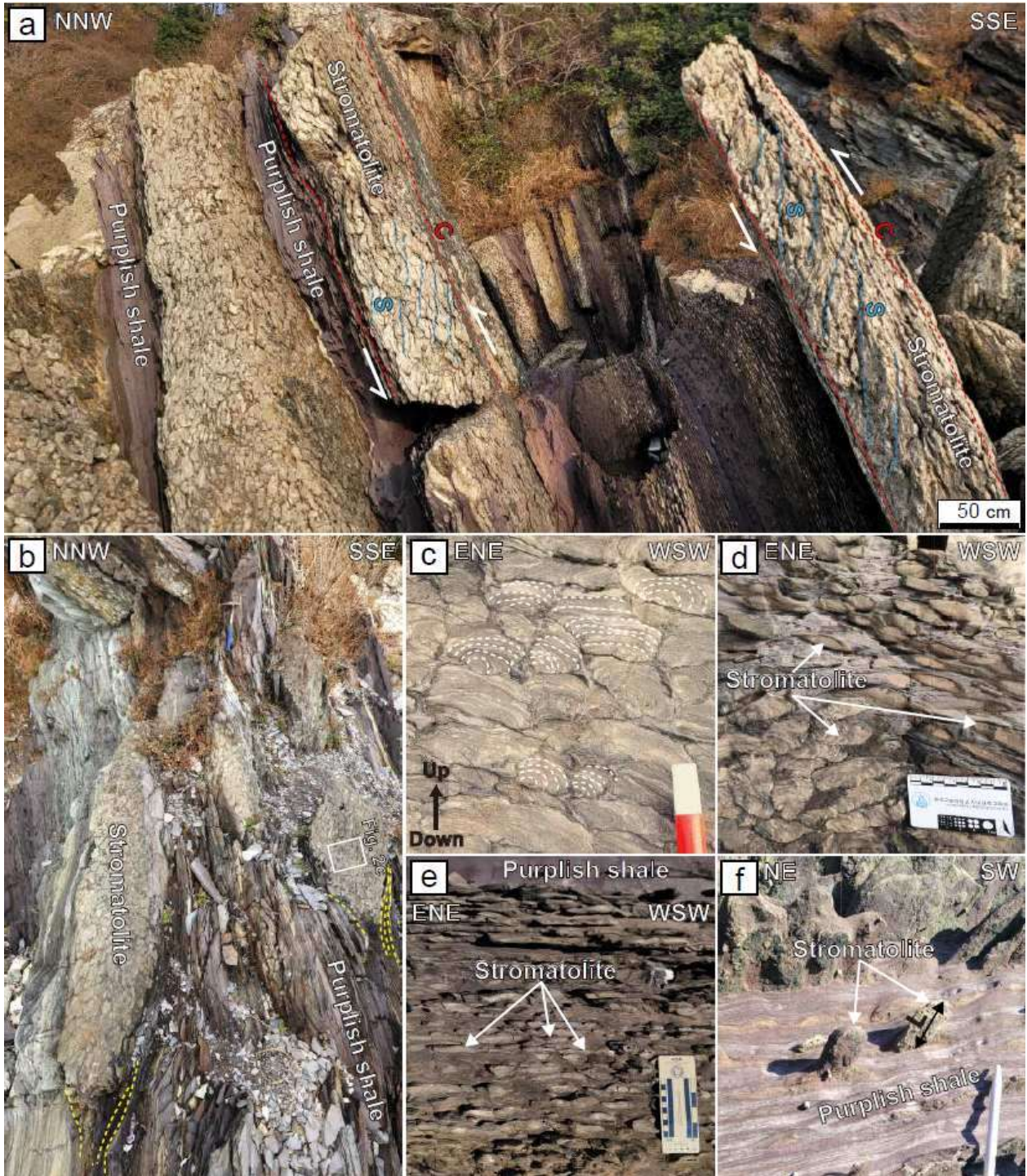


그림 7. 소청도 분바위층원에 산출하는 변형 스트로마톨라이트의 노두 사진(Choi et al., submitted). (a) 함스트로마톨라이트 석회암으로, 스트로마톨라이트 개체가 비대칭적인 S-C 구조를 정의함(S: 파란색 점선, C: 빨간색 점선). (b) 자색 셰일층에 둘러싸인 함스트로마톨라이트 석회암 블록. 자색 셰일 엮리는 석회암 블록의 경계를 따라 굴절됨(노란색 점선). (c) 원래의 곡선형 내지 반원형 층리를 보존하고 있는 돔형(domal)~주상형(columnar) 형태의 비교적 약하게 변형된 스트로마톨라이트. (d) 자색 셰일이 풍부한 영역 인근에서 다양한 변형을 보이는 스트로마톨라이트. (e) 자색 셰일층과 교호하며 산출되는 강하게 변형된 스트로마톨라이트. (f) 선구조(lineation, L)를 정의하는 신장된 스트로마톨라이트 개체.

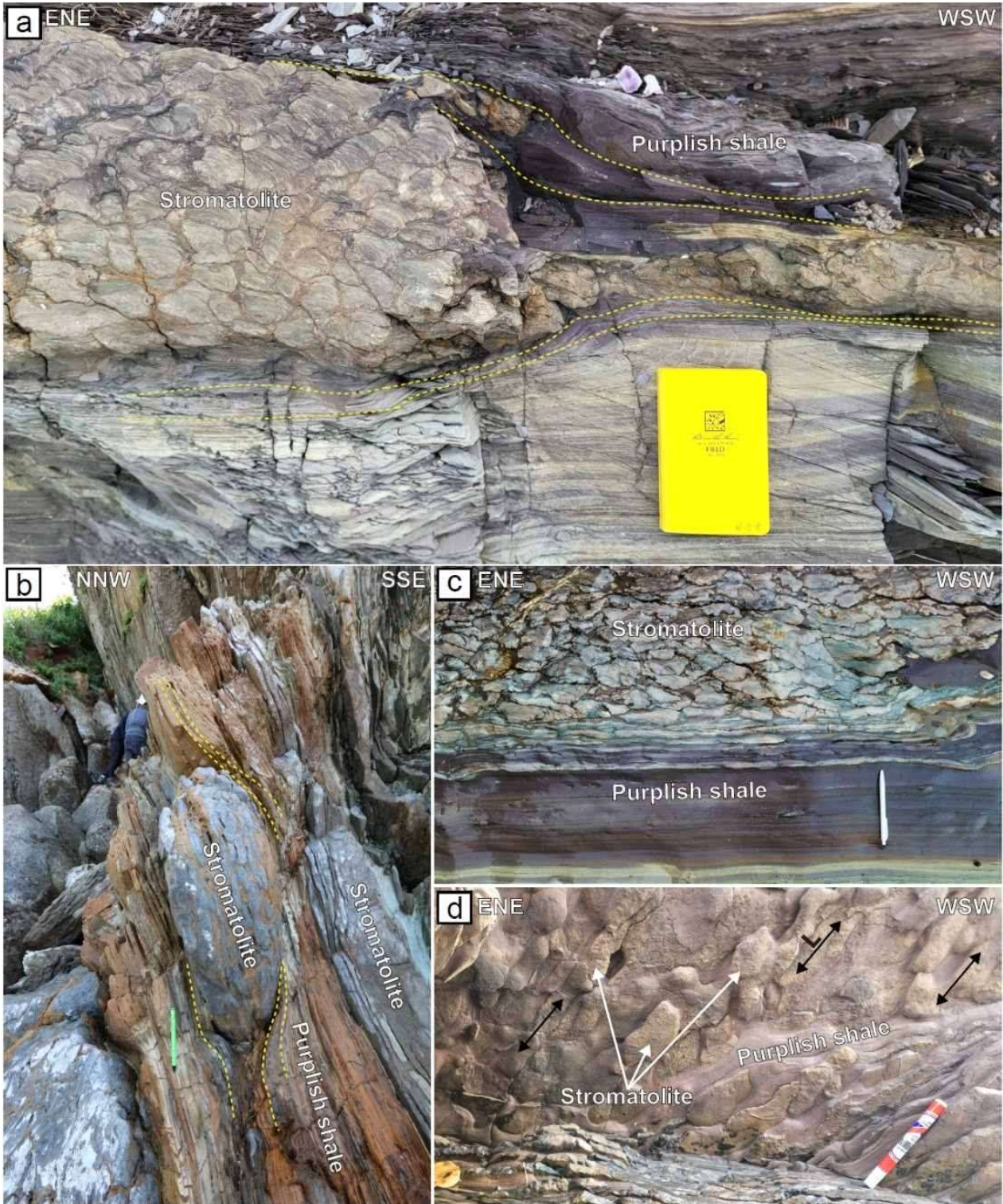


그림 8. (a, b) 자색 셰일층에 둘러싸인 함스트로마톨라이트 석회암 블록 경계를 따라 셰일에 발달한 엽리가 굴절됨(노란색 점선; Choi et al., submitted). (c) 자색 셰일이 풍부한 영역 인근에서 다양한 정도의 신장 및 편평화를 보이는 스트로마톨라이트. (d) 자색 셰일층과 교호하는 강하게 변형된 스트로마톨라이트로, 노두 규모에서 신장된 스트로마톨라이트 개체들이 선구조를 정의하는 모습을 보여줌.

4. 종합 및 변형시기

백령·대청·소청도에 산출하는 저변성 퇴적암은 층리와 사층리 같은 일차 퇴적 구조를 잘 보존하고 있다. 특징적인 지질구조는 지층을 변위시키는 단층과 저변성 퇴적암 내에 발달하는 습곡으로 대표되며, 지질도 규모의 단층은 주로 백령도에, 섬 전체의 지층 분포를 제어하는 습곡은 대청도에, 노두 규모의 습곡은 소청도에 우세하게 나타난다(조등룡 외, 2021). 이와 같은 구조지질학적 요소가 세 섬에서 인지되지만, 주어진 과업 기간(1년) 내에 SCI(E)급 논문 작성을 위한 테마로는 다소 무리가 있다고 판단하였다. 천연기념물이자 국내 최고령 화석인 소청도 스트로마톨라이트가 단연코 학술적 가치가 가장 높으며, 기발간된 11편의 SCI(E)급 논문들은 소청도 스트로마톨라이트를 주제로 삼지 않았기에 본 과업에서 논문 테마로 정하여 집중 연구했음을 밝히는 바이다. 투고 완료한 논문(Choi et al., submitted)이 출판된다면 소청도 스트로마톨라이트에 관한 첫 SCI(E)급 논문이 될 것이다. 이러한 당위성과 함께 퇴적암 내 화석을 퇴적학-고생물학적 접근이 아닌 구조지질학 측면에서 연구한 사례는 전세계적으로도 매우 드물다. 이는 화석이 단순한 고생물학적 기록을 넘어, 변형 및 지각진화 과정의 아카이브로 활용될 수 있음을 보여준다. 향후 지질유산 해설의 핵심 자료로 활용될 것이 분명하다.

백령도, 대청도, 소청도는 각기 다른 변형 양상을 기록하지만, 이들에 발달하는 습곡은 대체로 북동 내지 동북동 방향으로 완만하게 침강하는 습곡축과 우세한 북서 버전을 공유한다(조등룡 외, 2021; 박정영 외, 2024). 백령도에서는 이러한 습곡이 북동-남서 방향의 총상단층(화동단층)에 수반되어 나타난다. 세 섬이 바다로 격리되어 구조적 연속성을 직접 추적하기는 어려우나, 방향적 유사성은 세 섬의 압축성 변형구조가 기원적으로 연결될 가능성, 그리고 대청도 지층의 역전을 야기한 회전 요소가 대규모 총상단층과 관련될 가능성을 시사한다(박정영 외, 2024). 이들 변형구조의 형성시기를 규명하기 위해서는 단층점토·운모류·방해석 세맥 등을 이용한 절대연령 측정 등 추가 연구가 필요하나, 서해안 일대에서 보고되고 있는 원생누대 변성퇴적암류 연구(Kim et al., 2019)에 미뤄볼 때 페름기-트라이아스기로 추정된다.