

KOSEF F01-2007-000-10018-0

한국/일본 해역에 분포하는 산호의 군집구조 및 골격의 성분을
이용한 기후변동 해석

Analysis of environmental changes with mid-latitude coral
communities and massive coral skeletons around Korea and Japan

2009. 8. 14.

한 국 과 학 재 단

제 출 문

한국과학재단 이사장 귀하

본 보고서를 한국/일본 해역에 분포하는 산호의 군집구조 및 골격의 성분을 이용한 기후변동 해석 연구의 연구결과보고서로 제출합니다.

2009년 8월 14일

연구 책임자 : 소속 한국해양연구원
성명 형 기 성 (인)

연구계획서 요약 (국문)

중위도 지역은 조초성(造礁性, hermatypic) 산호가 분포하는 북방한계이며, 이로 인해 중위도 지역 조초성 산호의 군집구조는 환경변화에 매우 민감하게 반응한다. 또한 이들 산호의 골격은 나무의 나이테에 같은 연륜을 가지고 있으며, 골격 내에 해수 온도, 화학성분, 염분, 그리고 일조량과 같은 주변 환경 변화를 시간의 함수로 기록한다.

대한해협은 쿠로시오해류의 지류인 대마난류와 동한난류가 지나는 지역으로 전 지구적 기후변화 및 우리나라 근해의 기후 변화를 모니터링하기에 적합한 장소이다. 하지만 기후 지시자로서의 산호의 잠재성과 지역적 중요성에도 불구하고 대한해협 주변에 분포하는 산호에 대한 체계적인 기술 및 비교분석은 거의 이루어지지 않았으며, 산호 골격을 이용한 고해양 환경 변화에 대한 연구 또한 전무한 실정이다.

이 연구의 목표는 대한해협 양안에 분포하는 경산호의 군집구조와 경산호 골격의 물리적·화학적 특성 분석을 통해 환경변수와의 관계성을 해석하고 이를 기초로 대한해협 주변의 수온변화 양상 및 환경변화 양상을 규명하기 위함이다.

이 연구에서는 대한해협을 가로질러 한국과 일본의 5개 연구지역을 대상으로 산호 분포 조사를 실시할 예정이다. 또한 이를 통해 채취된 산호 골격의 밀도, 성장률, 동위원소, 및 화학조성 등 물리/화학적 특성의 시계열 분석을 통하여 대한해협 주변의 과거 해수특성 및 기후변화를 복원할 수 있는 추적자 개발을 완료할 계획이다.

작성양식 3 : 연구결과요약문(국문)

분 야	지구 및 우주	성 명	형 기 성
과제번호	F01-2007-000-10018-0	소 속	한국해양연구원
중 심 어	고기후복원, 대한해협, 해수온도변화, 산호골격특성, 산호군집구조		
연구과제명	한국/일본 해역에 분포하는 산호의 군집구조 및 골격의 성분을 이용한 기후변동 해석		

본 연구는 대한해협 양안에 분포하는 산호의 군집구조와 경산호 골격의 물리적·화학적 특성 분석을 통해 환경변수와의 관계성을 해석하고 이를 기초로 대한해협 주변의 과거 수온 변화 및 환경변화를 복원하기 위해 수행되었다.

이를 위해 제주, 쓰시마, 이끼, 고시끼지마 지역을 대상으로 괴상 조초성 산호의 분포에 대한 현장조사를 실시하였으며, 그 결과 제주 지역에서는 *Alveopora jp*가 그리고 쓰시마, 이끼섬 등 쓰시마해류 영향해역에서는 *Favia spp*가 고환경 복원 연구에 가장 적합한 종으로 선정되었다. 특히 *Favia*는 4,000년 이상의 기간에 걸쳐 형성된 6m 높이의 산호초를 쓰시마와 이끼섬 지역에 형성하고 있다. 이러한 점은 *Favia*가 추적자로서 개발될 경우, 대한해협을 중심으로 최대 4,000년 정도의 고해양환경 및 고기후 복원이 가능함을 시사한다.

*Alveopora*와 *Favia* 골격은 여름동안 형성된 고밀도 띠와 겨울동안 형성된 저밀도 띠의 쌍으로 구성된 연성장밴드를 보인다. 또한 두 종의 Sr/Ca값은 연구지역 표층 수온의 변화와 유사한 계절적 변화양상을 보인다. 이러한 결과는 두 종의 산호가 주변 해양환경을 시간의 함수로 골격에 기록하고 있으며, 고해양환경의 복원을 위한 추적자로서 사용 가능성을 지시하고 있다.

쓰시마해역 다량 분포하는 *Favia*의 산소/탄소동위원소조성은 수온변화와 유사한 연변화 양상을 보이며, 이를 이용한 고기후 복원이 가능함이 밝혀졌다. 이끼섬에서 채취한 90cm 길이의 현생 시추코아의 상부 28cm 구간은 약 41번의 연변화주기를 보이며, 이는 이 산호가 과거 41년동안 연 7mm의 속도로 성장했음을 지시한다. 분석결과는 과거 41년 동안 지구온난화로 수온이 상승(또는 강우증가)했음을 지시하고 있으며, 또한 과도한 화석연료의 사용으로 해수의 탄소동위원소조성이 감소했음을 보인다. 이끼섬에서 채취한 약 2,820년 전 *Favia* 산호 화석의 동위원소조성 또한 현생 산호와 유사한 연변화 양상을 보인다. 이는 쓰시마섬과 이끼섬에서 획득한 산호초 시료를 이용할 때 과거 수 천년 간의 고해양환경 복원이 가능함을 지시한다.

이번 연구는 전 지구적으로 발생하고 있는 지구온난화가 한반도 인근에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 기틀을 마련하였으며, 확보시료의 지속적인 분석을 통해 한반도 인근 과거 해양환경변화의 복원이 가능함을 확인하였다. 이 연구 결과는 향후 미래 기후의 예측 모델의 개발이나 우리나라 기후에 맞는 예측 모델의 선정에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

작성양식 3 : 연구결과요약문(영문)

Field	Earth and Space	Author	Hyeong, Kiseong
Project No.	F01-2007-000-10018-0	Organization	Korea Ocean Research & Development Institute
Keywords	Paleoclimatic Reconstruction, Korea Strait, Sea Surface Temperature Variation, Coral Skeletal Properties, Coral Community Structure		
Title	Analysis of environmental changes with mid-latitude coral communities and massive coral skeletons around Korea and Japan		

This cooperative study was carried out for comparative, quantitative and systematic description of coral communities across the national border of the Korea/Tsushima Strait, along with coral sampling and geochemical analysis of the skeletons, in order to examine the relationships between environmental variables and the community structure/skeletal properties.

The field survey undertaken at Jeju, Tsushima, Iki, and Koshiki-jima revealed that *Alveopora* and *Favia* are the most suitable species for paleoclimate reconstruction. Especially, *Favia* forms 6-m-high reef-like structures with a maximum age of 4,000 years in Tsushima and Iki. The field survey and collected coral samples allow paleo-environmental reconstruction of the past thousand years upon the successful development of *Favia* proxy.

Alveopora and *Favia* show light and dark annual growth banding in soft x-ray images. In addition, Sr/Ca ratios of both species show cyclic seasonal variation similar to that of sea surface temperature (SST). These results indicate that both species record surrounding environmental conditions in its skeletons, suggestive of their potential as a paleoclimatic proxy.

Oxygen/carbon isotopic ratios also show cyclic seasonal variation caused by seasonal environmental changes. The top 28cm interval of the 90cm long living *favia* core revealed 41 annual cycles in oxygen isotope ratios, which indicates that it has been grown for the past 41 years at an average growth rate of 7mm. The measured oxygen and carbon isotope ratios decrease gradually to the present, indicative of SST increase and addition of light carbon from fossil fuel to the ocean during the last 41 years. Fossil *Favia* sample with an age of 2,820 years also shows cyclic annual fluctuation in its isotopic ratios similar as in living coral. These preliminary results imply that it is possible to reconstruct paleo-climate for the past thousand years using the *Favia* fossil cores.

This preliminary study confirmed the possibility of high resolution (seasonal to annual) paleoclimate reconstruction in the Korea Strait region using coral proxies, which enables the quantitative evaluation of global warming in the region. The study results can be useful for the development and/or selection of climate prediction model that is suitable for the Korean climate system.

목 차

1) 서 론	1
2) 연구방법 및 이론	3
가. 연구 지역 및 산호 분포 조사	3
나. 연엑스선 분석	4
다. 탄소 및 산소동위원소 분석	4
라. Sr/Ca 값	5
3) 결과 및 토의	6
가. 현장 조사 결과	6
(가) 제주해역의 경산호 분포	6
(나) 쓰시마해역의 경산호 분포	7
(다) 이끼지역의 경산호 분포	8
(라) 고시끼지마지역의 경산호 분포	9
(마) 산호초 분포 및 시료획득	10
나. 지화학 조성 분석	11
(가) 산호골격의 연성장밴드	11
(나) 산호골격의 Sr/Ca와 Mg/Ca 값	12
(다) <i>Favia</i> sp. 동위원소조성의 고기후 추적자 가능성 연구	17
(라) 이끼 <i>Favia</i> 의 산소 및 탄소동위원소조성	18
(마) 고시끼지마 <i>Favia</i> 와 <i>Porites</i> 산호골격의 산소 및 탄소동위원소 조성	19
(바) 이끼섬 화석 <i>Favia</i> 골격의 산소 및 탄소동위원소조성	20
다. <i>Favia</i> sp. 전밀도의 고기후 추적자 가능성 연구	21
4) 결 론	23
5) 인용문헌	24

1) 서론

해양의 표층 수온이나 염분은 가까운 지역의 기온이나 습도뿐 아니라 전 지구적인 기후에 영향을 미치는 해류 순환에 중요한 인자로 작용한다. 특히 저위도의 표층수 조건은 국지적인 생태계의 변동에서부터 엘니뇨(El niño), 라니냐(La Niña)와 같은 광범위한 규모의 변화까지 반영한다. 이와 연결된 중위도, 고위도 지역의 해양 환경 변화 역시 지역 생태계에 방대한 영향을 미치는 만큼, 해양환경의 변화에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다.

괴상(massive) 조초성(hermatypic) 산호는 열대/아열대 지역에 광범위하게 분포하며, 쉽고 정확한 연령 결정, 그리고 골격 내에 존재하는 과거의 해수 환경을 지시하는 다양한 지화학 추적자 때문에 과거 기후 복원 연구에 많이 이용되고 있다 (Gagan *et al.* 2000; Corregge 2006; and references therein). 특히, 과거 수온변화 및 몬순과 관련하여 산호 골격의 산소동위원소 조성과 Sr/Ca 및 Mg/Ca 값에 대한 많은 연구가 수행되었다 (Quinn *et al.* 1993; Cole *et al.* 1993; Mitsuguchi *et al.* 1996; Boisseau *et al.* 1998; Asami *et al.* 2004; Sun *et al.* 2004). 하지만, 고기후 복원 연구에 가장 일반적으로 사용되는 *Porites*(인도-태평양), *Panova*(동태평양 적도 지역), *Montastrea*(카리비안해) 등의 괴상 조초성 산호는 위도 25° 이북과 이남의 중위도 지역에는 분포가 미약하기 때문에 우리나라를 포함한 중위도 지역에서 산호를 이용한 고해상도 (계절/연 단위) 과거 수온 복원 및 환경 복원 연구는 미미한 실정이다.

현재 우리나라의 해양환경에 영향을 직·간접적으로 주는 것으로 알려진 서태평양 워풀지역과 쿠로시오해류의 영향 해역에서 산호를 이용한 활발한 고환경 복원연구가 진행되어오고 있으며 (Gagan *et al.* 2000; Shimamura *et al.* 2005; Suzuki 2007 (personal communication)), 인간의 화석연료의 사용과 대기 CO₂ 증가에 따른 환경 충격을 이해할 수 있는 과거 150년 이상의 기간에 걸친 수온 변화 역사가 여러 지역에서 복원된 바 있다 (Gagan *et al.* 2000 and references therein; Asami *et al.* 2005) (그림 1). 이러한 전 지구적인 기후변화에 관한 괄목할만한 성과에도 불구하고 현재 우리나라 근해에서 이에 상응하는 계절/연 단위의 과거 수온변화 복원 연구는 전무한 실정이며, 이는 전 지구적 기후변화가 한국 근해의 해양환경에 미치는 영향에 대한 정량적 평가를 어렵게 한다.

산호를 통한 과거 수온 및 기후(몬순)의 계절/연 단위 복원은 지역 간 시간별 기후변화 양상의 직접 비교가 가능하기 때문에 적도 지역의 수온 및 기후변화가 연구 대상 지역에 미치는 영향에 대한 정량적 평가가 가능하다. 예를 들면, 엘니뇨 동안

서태평양 워풀지역은 북동무역풍의 약화로 동쪽으로 이동하게 되며, 그 결과 괌 인근 지역은 지역적으로 수온이 낮아지는 현상을 보이게 된다 (Asami *et al.* 2004, 2005). 하지만, 엘니뇨동안 동태평양 지역은 심층수의 용승이 약해져 상대적인 수온 증가를 보이게 된다 (Cane 1983; Eugen and Wallace 1983; Philander 1983). 이와 같이 동일한 전 지구적 현상에 따른 기후변화는 각기 다른 지역에서 변화의 방향이나 변화의 크기가 다르게 나타나며 (e.g. Cole *et al.* 1993; Evans *et al.* 1998, 2000; Gong and Luterbacher 2008) (그림 2), 따라서 한국 근해의 해양환경이 전 지구적 기후변동 요인에 대해 반응하는 변화의 크기 및 방향을 이해하기 위해서는 한국 연안에서의 과거 해양환경 복원이 필수적이다.

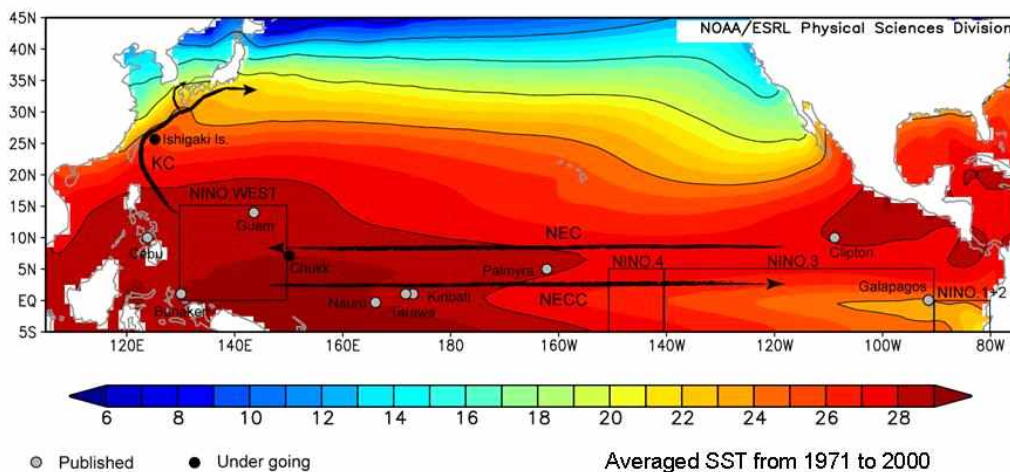
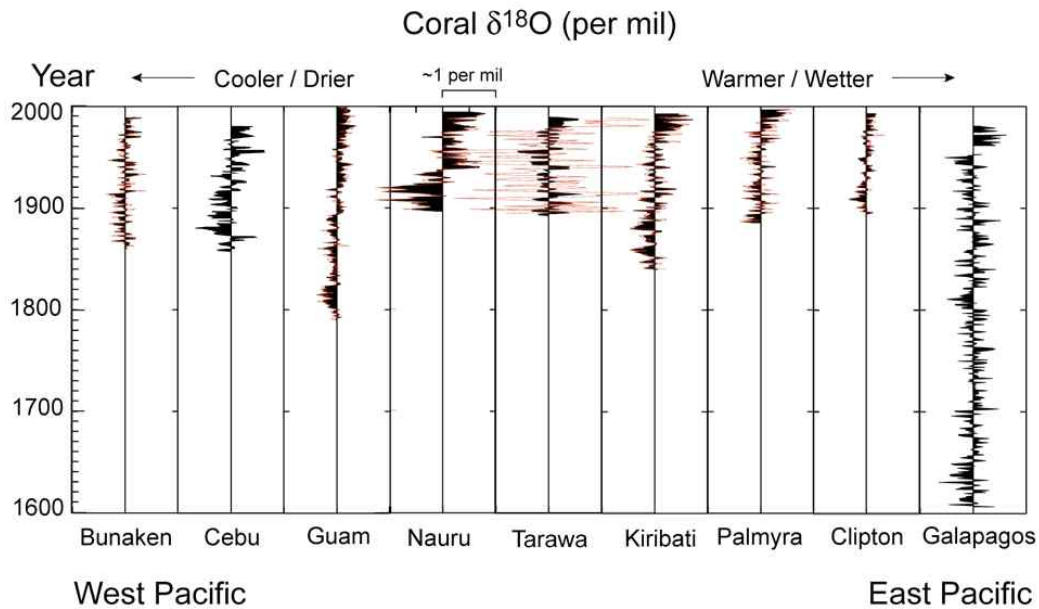


그림 1. 태평양지역의 연평균 수온분포와 산호를 이용해 100년 이상의 기간에 걸친 고기후 복원 연구가 수행된 지역

대한해협은 쿠로시오해류의 지류인 대마난류와 동한난류가 지나가는 지역으로 전 지구적 기후변화 및 우리나라 근해의 기후 변화를 모니터링 하기에 적합한 장소이다 (그림 3). 하지만 기후 지시자로서의 산호의 잠재성과 지역적 중요성에도 불구하고 대한해협 주변에 분포하는 산호에 대한 체계적이고 정량적인 연구 및 한국/일본 산호분포에 대한 비교분석은 거의 이루어지지 않고 있다. 대한해협 인근은 조초성 산호가 분포하는 북방한계에 해당하며, 산호가 서식하는 극한 환경에 해당하기 때문에 조초성 산호의 군집구조는 주변의 환경변화에 매우 민감하다. 따라서 산호의 군집구조 및 그 변화를 조사하면, 조사지역의 기후 변화의 과거 역사 및 방향의 예측이 가능하다.



Asami *et al.* (2005), Charles *et al.* (2004), Cobb *et al.* (2001), Cole *et al.* (1993), Dunbar *et al.* (1994), Guilderson *et al.* (1999), Linsley *et al.* (2000), Patzold (1986), Urban *et al.* (2000)

그림 2. 태평양 적도지역에서 분석된 산호 골격의 시대별 산소동위원소 조성변화

이 연구는 대한해협 지역에서 조초성 산호의 분포를 조사하고, 이 지역에 분포하는 조초성 산호가 계절/연 단위의 고수온 및 몬순 복원에 활용이 가능한 지를 평가하기 위하여 수행되었다. 제주도와 일본의 쓰시마 주변에서 괴상 조초성 산호를 찾기 위한 현장 조사를 실시하였으며, 발견된 괴상 조초성 산호의 수온 기록자로서의 가능성을 평가하기 위하여 골격의 연엑스선 촬영, 산소 및 탄소동위원소 조성분석, 그리고 지화학 분석(Mg/Ca 및 Sr/Ca)을 실시하였다.

2) 연구방법 및 이론

가. 연구 지역 및 산호 분포 조사

산호의 분포를 조사하고 고기후 복원에 필요한 산호 시료 확보를 위해 쓰시마해류 영향해역에 속하는 제주, 쓰시마, 이끼, 고시키지마 등 지역에 대한 현장 조사를 실시하였다 (그림 3). 거제도의 현장조사는 시도되었지만, 당시의 기상악화로 실시되지 못했다. 대신 거제도지역의 산호분포를 확인하기 위해 인근 해변의 퇴적물 중 산호 파편의 존재여부를 조사하였다. 현장조사를 통해 거제도를 제외한 전 지역에

서 경산호의 분포를 확인하였으며, 추적자 개발을 위한 시료를 확보하였다.

나. 연엑스선 분석

채취된 산호 시료는 산호의 성장 속도나 성장축의 확인을 위해 성장 방향에 평행한 0.5cm 정도의 슬랩으로 제작하여 연엑스선 촬영을 실시하였다. 연엑스선 사진은 산호의 성장조건의 변화에 따라 발생한 골격의 밀도변화 때문에 밝고 연한 성장선이 교호되는 패턴을 보이게 되며, 이를 통해 산호의 연령, 성장 속도 등을 판단할 수 있다. 연엑스선 사진은 M-40 (SOFTEx Co.)를 이용하여 획득하였다.

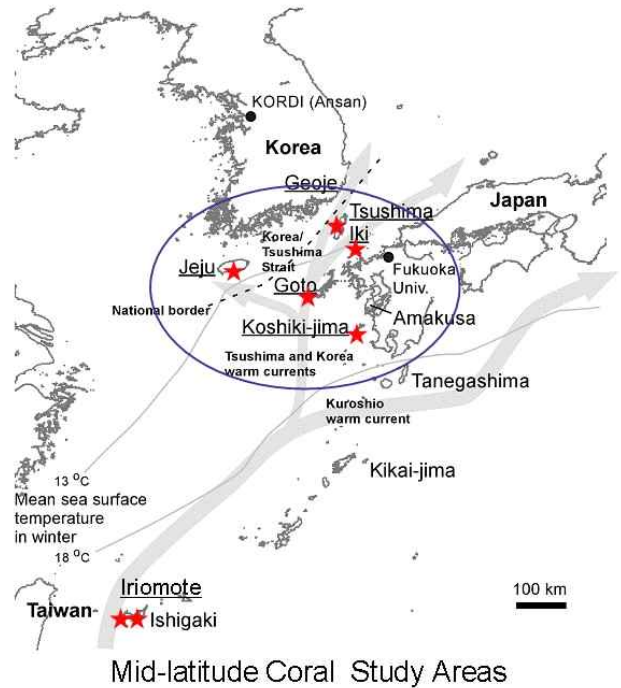


그림 3. 대한해협에 영향을 미치는 해류시스템과 산호분포조사 및 산호시료를 확보한 지점

다. 탄소 및 산소동위원소 분석

산호골격은 탄산염(CaCO_3 , 아라고나이트)으로 구성되며 이 골격 내의 산소($\delta^{18}\text{O}$) 및 탄소동위원소($\delta^{13}\text{C}$) 조성은 주변 해수의 산소 및 탄소동위원소 조성 및 온도에 의해 결정된다. 이는 산호가 골격을 형성할 때 동위원소적 준평형상태를 유지하며 골격을 형성하기 때문이다. 따라서 산소동위원소 조성은 해수와 산호 골격의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 평형을 이룬다는 전제 하에서 평형식에 의해 SST 복원에 이용될 수 있다. 하지만 산호골격의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 온도 뿐 아니라 해수의 산소동위원소 조성에 영향을 주는 강수량과 증발량에도 좌우되는 만큼, 산호 골격내 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 해수의 염도에 영향을 받게 된다. 증발은 ^{18}O 를 배제하여 해수 중 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 높이고, 강수량이 크면 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 낮아지는 결과를 초래한다. 따라서 산호골격의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 단독으로 고수온복원에 사용될 수 없으며, 온도를 반영하는 다른 proxy (e.g. Sr/Ca)와 함께 사용되어야만 한다. Beck *et al.* (1992)의 연구에서 Sr/Ca값이 오로지 온도에 의해서만 결정되는 값을 밝혔을 때, 그들은 이 사실을 이용하여 $\delta^{18}\text{O}$ 값과의 비교를 통해 온도의 영향을 상쇄하면 표층수의 염도, SSS(Surface Sea Salinity),의 복원에 사용할 수 있음을 주장하였으며, 이 주장은 여러 연구에 의해 그 가능성이 증명되었다 (Gagan *et*

al., 2000 for a review).

산호골격의 탄소동위원소 조성은 온도변화에 매우 미미하게 반응하며, 산호의 성장률과 공생조류의 광합성에 의해 크게 변화하는 것으로 알려져 있다. 이는 성장률의 변화가 야기하는 동위원소 비평형현상(kinetic isotope effect)과 산호 공생조류가 광합성 시 상대적으로 가벼운 ^{12}C 를 선택적으로 사용하여 골격 형성에 필요한 탄소풀의 탄소동위원소 조성을 변화시키는 현상(metabolic isotope effect)의 크기가 온도변화가 야기하는 동위원소 조성변화에 비해 매우 크기 때문이다 (McConnaughey, 1989). 현재까지 산호골격의 탄소동위원소 조성에 영향을 미치는 요소는 명확히 밝혀지지 않았으며, 앞서 설명한 두 현상이외에도 섭식원(공생조류 vs. 외부플랑크톤) 또한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Grottoli and Wellington, 1999; Grottoli, 2002). 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 정량적인 분석은 아직 이루어지지 않았으나 $\delta^{13}\text{C}$ 는 산호의 광합성이나 섭식 등과 같은 생태적인 환경을 지시해 줄 수 있는 가능성을 가지고 있다.

이번 연구에서 산소 및 탄소동위원소 조성은 부시료를 100% 인산에 70°C 에 녹여 발생하는 CO_2 가스를 분석하여 결정하였다. 분석은 Finnigan MAT 251 질량분석기를 이용하였다.

라. Sr/Ca 값

앞서 기술한 바와 같이 산호 골격 내의 산소 동위원소비 ($\delta^{18}\text{O}$)는 해수의 동위원소 조성에 따라 달라질 수 있다. 해수의 산소 동위원소비는 장기적으로는 극지방의 빙하량에 의해, 그리고 단기적으로는 강수나 증발에 의해 변화할 수 있다. 그러나 해수 중 Sr, Ca의 체류 시간(residence time)은 매우 길어(~5 Ma, 1 Ma) 그 농도가 쉽게 변하지 않고, 담수가 유입된다 해도 그 비인 Sr/Ca값은 변하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 주변 농도비가 일정하다고 가정하고 Sr과 Ca가 산호 골격으로 온도의 함수로 선택적으로 침전되면 이를 수온계로 이용할 수 있다. 70년대부터 Sr/Ca값이 수온계로서 이용될 수 있음이 알려져 있었으나 Beck *et al.* (1992)이 산호골격 내의 Sr/Ca값이 담수의 희석 등에 영향을 받지 않고 온도만의 함수로 변함을 보인 후 신뢰할 수 있는 추적자로서 널리 이용되기 시작했다.

Ca, Mg, Sr 등의 농도 분석은 해양연구원이 보유한 ICP-OES(*Perkin-Elmer Optima DV3300*)를 이용하여 실시하였다. 획득한 부시료를 이차증류수에 담아 초음파 세척을 실시하였으며, 원심분리기를 이용하여 잔류 용액을 제거하였다. 그 후 Optima Grade 질산용액(1.2N)을 이용하여 시료를 용해한 후, 0.1N 질산용액으로

회석하였다.

3) 결과 및 토의

가. 현장 조사 결과

쓰시마해류 영향해역에 속하는 제주, 쓰시마, 이끼, 고시키지마 등 총 5개 지역에 대한 현장 조사를 실시하였다 (그림 3). 거제도의 현장조사는 시도되었지만, 당시의 기상악화로 실시되지 못했다. 대신 거제도지역의 산호분포를 확인하기 위해 인근 해변의 퇴적물 중 산호 파편의 존재여부를 조사하였으며, 그 결과 거제도 인근은 경산호의 분포가 전혀 없거나 매우 미약한 것으로 확인되었다. 현장조사를 통해 거제도를 제외한 전 지역에서 경산호의 분포를 확인하였으며, 추적자 개발을 위한 시료를 확보하였다.

(가) 제주해역의 경산호 분포

제주 서귀포항 주변, 범섬, 그리고 차귀도 일대의 현장조사를 통해 *Alveopora japonica*, *Oulastrea crispata*, *Montipora millepora*, *Psammocora superficialis*, *Psammocora nierstraszi*, *Goniopora sp.* 등 총 6개의 경산호 종의 분포가 확인되었다 (그림 4). 이 중 *Alveopora*와 *Goniopora*만이 괴상(massive) 형태를 보이며, 나머지 4개의 종은 기반암을 피복하는 형태로 서식하고 있다. *Alveopora*와 *Goniopora*는 그 형태가 매우 유사하여 현장에서 모두 *Alveopora*로 기술되었지만(촉수 12개), 실험실에서 사진 판독 결과 촉수의 수가 24개인 종의 분포가 확인되었으며, 이를 *Goniopora*로 따로 분류하였다.

Alveopora(또는 *Goniopora*)는 기후 복원에 사용하는 *Porites*와 같이 괴상 골격구조를 가지며, 연엑스선 확인 결과 밝은 부분과 어두운 부분이 교대되는 연 성장띠를 보이는 것으로 확인되었다 (그림 4). 기초 조사 결과 제주 지역에서는 이 *Alveopora*가 고기후 복원에 사용될 수 있는 유일한 종으로 판단되며, 이 종이 해양환경의 변화를 골격의 동위원소 및 지화학조성에 기록하는지 여부를 확인하기 위하여 채취 시료에 대한 부시료 채취작업과 원소성분 분석 작업을 실시하였다.

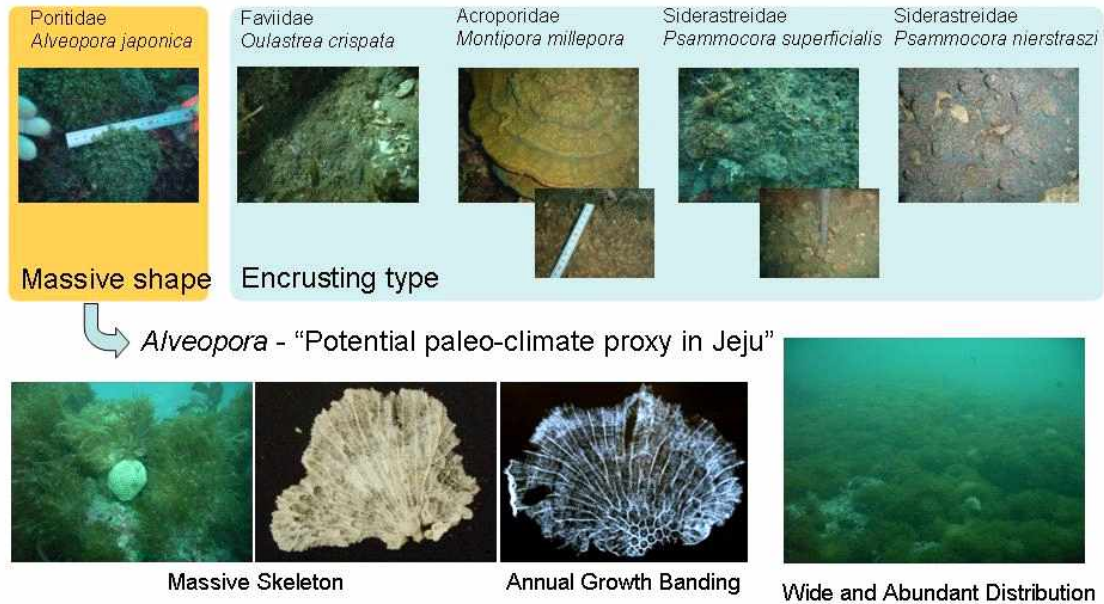


그림 4. 제주해역에 분포하는 경산호와 괴상을 보이는 *Alveopora*의 수중사진 및 골격 단면의 모습 (검은색 단면사진은 연 성장밴드를 보이는 연엑스선 사진)

(나) 쓰시마해역의 경산호 분포

일본의 쓰시마섬은 대마난류의 영향을 받는 지역으로서 이번 연구에서는 우리나라에 가까운 서쪽 해안에 위치한 만 지역을 대상으로 산호 분포 조사를 실시하였다 (그림 3). 그 결과 Favid 산호 종류인 *Favia sp.*의 다량 분포가 확인되었다 (그림 5). 그 외에 제주에서도 분포가 확인된 *Alveopora japonica*와 *Goniopora sp.* 등 괴상 산호가 분포하였다. 이 지역에서는 특히 성장 속도가 매우 느린 가지상의 형태를 지닌 *Stylocoeniella guentheri*의 분포가 확인되었으며, 전문가에 따르면 이번에 확인된 개체는 300년 이상 성장한 것으로 추정된다 (Sugihara, K., personal communication, 2007).

이 중에서 *Favia sp.*는 육안 관찰에서도 공극의 분포가 다른 연 성장띠의 확인이 가능하며, 연엑스선사진에서는 보다 선명한 연 성장띠를 확인할 수 있다 (그림 5). 이 종은 쓰시마를 비롯한 이끼, 고토 등의 대마난류 해역은 물론 쿠로시오 해역의 아열대 해역에도 광범위하게 분포하며, 뒤에 추적자 개발분야에서 설명된 바와 같이 산소/탄소안정동위원소 조성에 있어서 계절적 변화를 보이는 것으로 보아, 중위도 지역의 고기후 복원에 가장 적합한 종으로 판단된다.

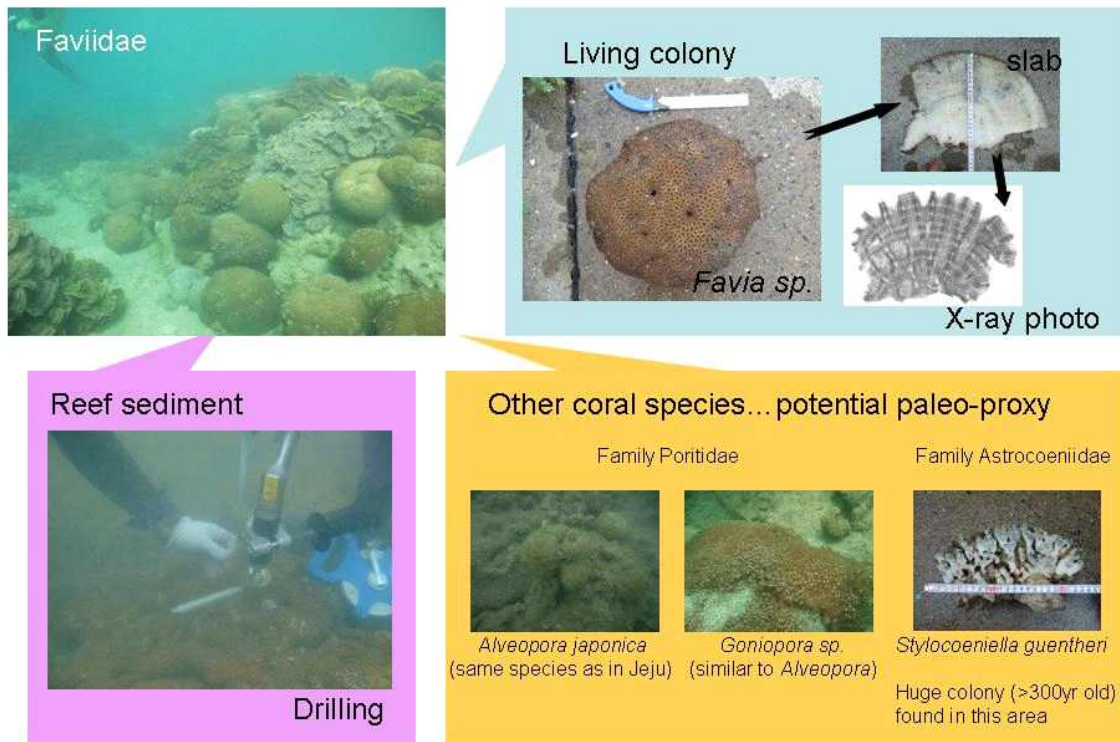


그림 5. 쓰시마섬 인근에 분포하는 경산호와 분포가 많은 *Favia*의 개체사진 및 단면 사진

(다) 이끼지역의 경산호 분포

이끼섬은 쓰시마섬으로부터 약 80km 남쪽에 위치하며(그림 3), 현장조사는 서쪽 해안에 위치한 Kurosaki 만에서 실시하였다. 쓰시마섬에서 발견된 *Favia sp.*가 가장 우세하게 분포하고 있으며, *Goniopora sp.*와 *Caulastra tumida* 등의 다른 경산호도 발견되었다 (그림 6). 이곳에서도 *Favia*는 육안 관찰을 통하여 연 성장띠를 확인할 수 있었으며, 연엑스선 촬영 결과에서도 선명한 연 성장띠의 존재가 확인되었다.

쓰시마섬의 *Favia*가 20cm 미만의 작은 개체가 우세한 반면, 이끼섬에서는 보다 큰 개체가 흔히 관찰되었다. 그 중 직경이 약 1 m에 달하는 개체를 발견하였으며, 이 개체의 상부와 측면에서 시추코아를 획득하는 데 성공하였다 (그림 7). 채취한 90cm 길이의 시추코아는 연엑스선 사진에서 약 90개의 어둡고 밝은 연 성장띠의 판별이 가능했으며, 이는 이 산호가 약 90년에 걸쳐 성장했음을 지시한다. 따라서 이 시추코아의 분석을 통하여 최소한 과거 90년간에 걸친 과거 해양환경변화의 연속적 복원이 가능할 것으로 예상된다.

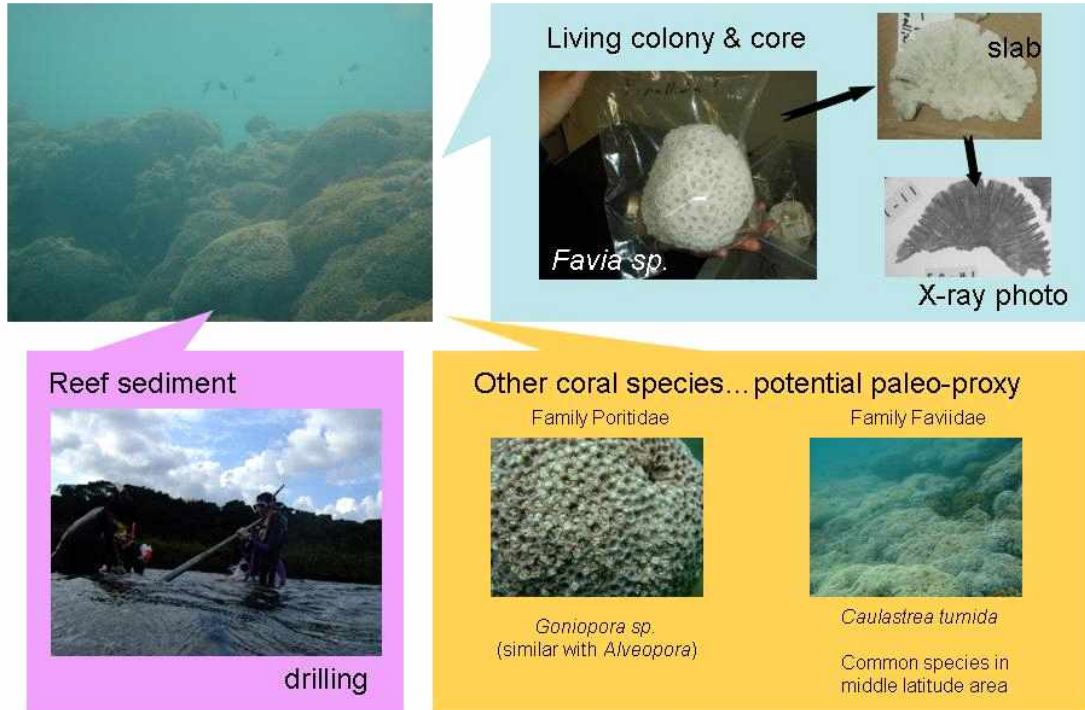


그림 6. 이끼섬 인근에 분포하는 경산호 및 *Favia*의 다면 및 연엑스선 사진

(라) 고시끼지마 지역의 경산호 분포

고시끼지마 인근 해역은 열대/아열대 해역에 대량 분포하며 고기후 복원에 가장 흔하게 사용되는 *Porites* 군집이 다수 관찰되었으며, 중위도해역인 쓰시마/이끼섬에서도 흔히 관찰되는 *Favia* 또한 대량 분포하였다. 이 지역에서는 고기후 해석에 사용하기 위해 *Porites*와 *Favia* 개체에서 최대 1.5m 길이의 시추시료를 확보하였다. 이들 시료는 연엑스선 사진은 약 5mm 두께로 반복되는 연성장밴드를 보이고 있으며, 평균성장속도 5mm를 고려할 때 최대 200년 이상에 걸쳐 성장한 것으로 판단된다. 또한 시료의 채취정점에는 Sr/Ca-Temperature 및 $\delta^{18}\text{O}$ -Temperature 관계식 정립을 위해 향후 2년간 20분 간격으로 수온변화를 측정할 수 있는 연속 온도기록장치를 설치하였다.

Underwater Drilling of *Favia* Colony



▶Continuous Paleo Environmental Record of ~ 100 years

그림 7. *Favia* 개체의 수중사진 및 시추모습, 그리고 시추한 주상시료의 모습. 아래쪽 사진은 채취한 시료의 연엑스선 사진으로 약 90개의 연성장밴드를 보임

(마) 산호초 분포 및 시료 획득

2007년도 현장조사를 통하여 쓰시마와 이끼섬에서 최대 6m 높이의 산호초가 발견되었다. 보다 장기간에 걸친 우리나라/일본해역의 고기후 복원을 위해 쓰시마 산호초에서 각각 480cm와 525cm 길이의 시추 코어를 획득하였으며, 이끼섬에서는 555cm 길이의 산호초 시추코어를 획득하였다 (그림 8). 모든 시추 코어는 경산호 구간과 경산호의 파편 및 이질퇴적물로 구성된 구간으로 구성된다. 동정이 가능한 구성 경산호는 *Favia*, *Cyphastrea*, *Echinophylia*, *Hydnophora* 등이며, *Favia*와 *Cyphastrea*는 피상 경산호이며, *Echinophylia*는 기반암을 피복하는 형태, 그리고 *Hydnophora*는 가지 형태를 보인다. 산호파편과 이질퇴적물로 구성된 구간은 시추코어 회수 도중 많은 구간이 유실되었다 (그림 8).

총 4종의 경산호가 산호초 시추 코어에서 발견되었지만, 경산호 구간의 90% 이상은 현재 쓰시마와 이끼섬에서 가장 우세하게 관찰되는 *Favia* sp.로 구성되어있다(그림 8). 이는 현재 이 지역에 분포하고 있는 *Favia*의 동위원소/지화학 조성 분석 자료와 실관측자료와의 비교를 통하여 해양환경 조건이 어떤 관계를 가지고 산호에 기록되는 지에 대한 연구가 완료될 경우 고기후 복원이 가능함을 지시하고 있다. 현재 획득한 시추 코어는 불연속적이며 따라서 불연속적인 고기후 복원이 불가피 하지만,

추후 추가 시추를 통하여 보다 연속적인 고기후 복원이 가능할 것이다. C-14 연령측정 결과 현재 이들 산호초는 최대 4,000년전에 성장한 것으로 밝혀졌다(그림 8).

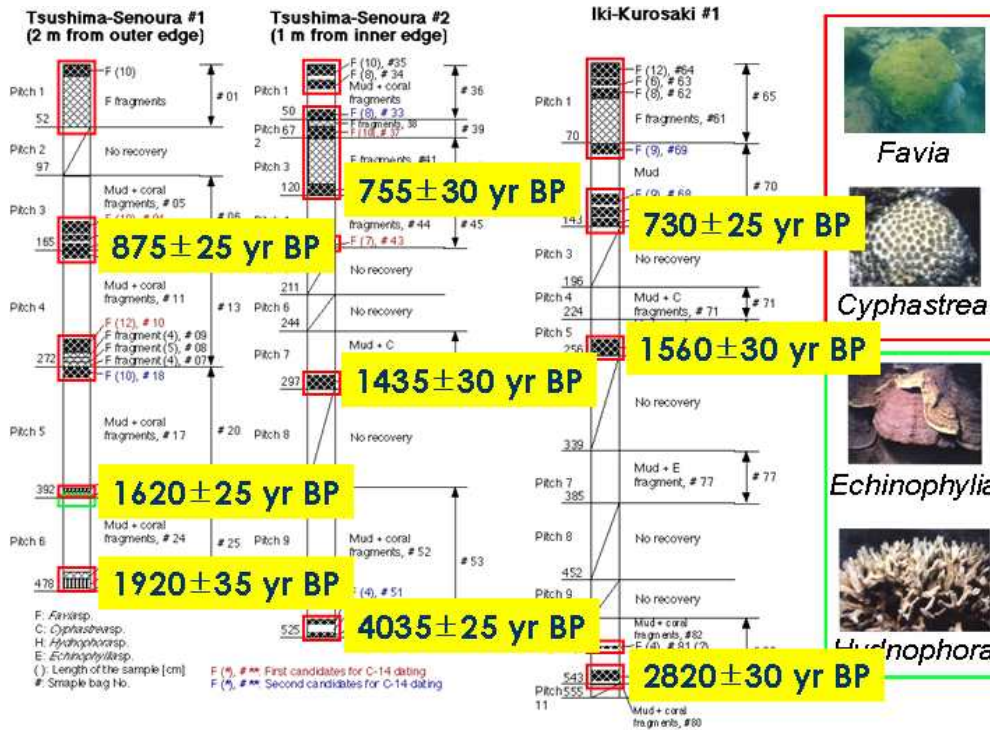


그림 8. 쓰시마섬과 이끼섬에서 획득한 산호초 시추코어의 암상 및 성장 연령. 빨간상자로 표시된 부분은 대부분 현재 이 지역에 가장 우세하게 분포하고 있는 *Favia*로 구성간 구간임.

나. 지화학 조성 분석

대한해협 인근에서 계절/연 단위의 고수온 및 몬순 복원을 위한 연구 도구의 개발을 위해 제주도에서 채취한 *Alveopora*와 쓰시마섬 해역에서 채취한 *Favia* 산호를 대상으로 골격의 연엑스선 촬영과 부시료 채취를 통한 Mg/Ca 및 Sr/Ca 분석을 실시하였다.

(가) 산호골격의 연성장밴드

*Alveopora*와 *Favia*는 모두 연엑스선 사진에서 어두운 띠와 밝은 띠가 교호하는 연

성장밴드를 명확히 보여준다 (그림 9). 부시료 채취를 실시한 *Favia* 개체는 성장방향에 경사를 가지고 잘렸으며, 그 때문에 명확한 연 성장밴드가 불명확하다 (그림 9a). 하지만, 그림 9b에서 보듯이 성장방향에 평행하게 잘린 *Favia* 암판에서는 연 성장밴드가 명확히 관찰된다. 이러한 명확한 연 성장밴드의 존재는 두 산호종이 주변 환경 조건의 변화에 따라 성장이 영향을 받았음을 의미하며, 고기후 복원에 사용되고 있는 다른 산호종과 같이 주변 해양 환경의 변화를 시간의 함수로 골격에 기록하고 있을 가능성을 지시한다.

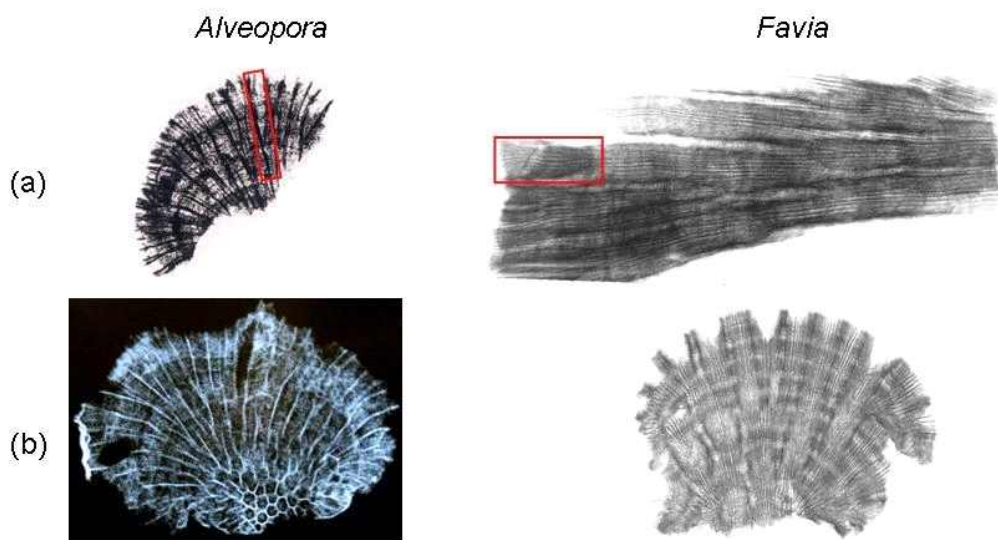


그림 9. *Alveopora*와 *Favia*의 연엑스선 사진. a) 부시료 채취에 사용된 암판. 성장방향에 비스듬하게 잘려 연 성장밴드가 불명확함. b) 성장방향에 수직으로 잘린 암판의 연엑스선 사진. 명확한 연 성장밴드를 보여줌. 빨간색 상자로 표시된 부분이 부시료가 채취된 구간으로 *Alveopora*는 23mm, *Favia*는 18mm 길이에 걸쳐 부시료를 채취함.

(나) 산호골격의 Sr/Ca와 Mg/Ca 값

해수의 동위원소조성과 온도의 함수로 변화하는 산호 골격의 산소동위원소조성과는 다르게, 산호 골격의 Sr/Ca값은 해수 내 Sr/Ca값이 담수의 희석 등에 영향을 받지 않기 때문에 온도만의 함수로 변하는 것으로 밝혀져 있다 (Beck *et al.* 1992; Corregge 2006 and references therein). 이는 Sr/Ca값이 갖는 장점으로서, 이에 의해 복원된 해수온도와 산소동위원소조성을 비교할 경우 해수의 염분 또는 강우량의 해석에 유용하게 사용될 수 있다 (e.g. Hendry *et al.* 2002; Shen *et al.* 2005). 또한 산호골격의 Sr/Ca값은 온도의 함수로서 변화하기 때문에 측정된 Sr/Ca값이 주기적으

로 변화할 때 이는 계절적인 온도변화를 기록한 것으로 해석할 수 있다. 산호 골격의 Mg/Ca값도 Sr/Ca값과 같이 온도 복원을 위해 많은 연구가 진행되었지만, Sr과는 다르게 Mg의 상당부분(최대 40%, Watanabe *et al.* 2001)이 결정구조가 아닌 치환이 가능한 위치, 즉 흡착되거나 결정의 결함구조, 또는 유기물 내에 존재하기 때문에 그 신빙성에 의문이 제기된 바 있다 (Mitsuguchi *et al.* 2001, 2003; Quinn and Sampson 2002; Fallon *et al.* 2003).

분석된 *Alveopora*와 *Favia*의 Sr/Ca값은 각각 9.21~10.62 (avg. 9.51) mmol/mol과 9.19~10.42 (avg. 9.57) mmol/mol의 범위를 보였으며, Mg/Ca값은 각각 2.93~5.33 (avg. 3.80) mmol/mol과 3.60~7.17 (avg. 4.73) mmol/mol의 범위를 보였다 (Fig. 10). *Favia*의 Mg/Ca 값은 표면으로 부터 중심으로 가면서 전반적으로 값이 감소하는 경향을 보이는 반면, *Alveopora*의 Sr/Ca와 Mg/Ca값과 *Favia*의 Sr/Ca 값은 표면으로 부터의 거리에 따라 증가하고 감소하는 계절적 변화 양상을 나타냈다 (Fig. 10). 산호 골격의 Sr/Ca값은 온도와 음의 상관관계를 보이고, 반대로 Mg/Ca는 온도와 양의 상관관계를 보이기 때문에 이들은 서로 역위상(out-of-phase) 관계를 가지게 된다 (Fig. 10). 특히 *Alveopora*의 Sr/Ca와 Mg/Ca 값의 변화양상은 서로 유사하며, 이는 Sr/Ca와 Mg/Ca에 동시에 영향을 줄 수 있는 환경요인, 즉 온도의 변화 양상을 반영한 것으로 해석할 수 있다. *Favia* 골격의 Mg/Ca값은 Sr/Ca값과 다르게 계절적 변화 양상을 전혀 보이지 않으며, 이는 *Favia* 골격의 Mg/Ca값이 과거 수온의 복원에 부적합함을 지시한다. 하지만 앞에서 토의하였듯이 Mg/Ca의 추적자로서의 이용 가능성에 대해 많은 연구들이 의문을 제기한 바 있기 때문에 *Alveopora*의 Mg/Ca값이 Sr/Ca와 잘 일치하는 계절변화를 보임에도 불구하고 이를 추적자로 이용하기 위해서는 많은 추가 연구가 필요하다.

산호 골격의 Sr/Ca 값은 온도의 함수로서 변화한다 (Beck *et al.* 1992). 따라서 측정된 Sr/Ca값이 보이는 변화 양상은 해수의 온도를 반영한 결과로서 해석된다. 따라서 Sr/Ca의 평균값을 기준으로 상대적으로 낮은 값을 보이는 골격은 따뜻한 계절에 그리고 높은 값을 보이는 부분은 상대적으로 추운 계절에 성장한 것으로 해석할 수 있다 (Fig. 10). 측정된 Sr/Ca의 평균값을 기준으로 평균값보다 낮은 값을 보이는 구간을 여름, 높은 값을 보이는 구간을 겨울에 성장한 것으로 판단하면, 시료의 분석 구간은 두 시료 모두 2003년 여름부터 2007년 여름까지의 성장환경을 기록한 것으로 해석된다 (Fig. 5). 이에 근거하여 계산한 성장률은 두 종 모두 대략 4~8mm/yr의 성장속도를 보이며, 따라서 이번 연구에서 사용한 400 μ m의 부시료 채취 간격은 약 3주~5주 간격의 해상도를 갖는 것으로 해석될 수 있다. 이와 같이 산호의 성장률이 계절 또는 성장 연도에 따라 큰 폭으로 변화하는 것은 아열대 지

역에서도 일반적으로 관찰되며, 이는 산호의 성장환경이 계절적으로 크게 다르기 때문이다(Shimamura *et al.* 2005). 또한 위에서 설명한 바와 같이 중위도 지역에서 나타날 수 있는 저수온과 저염분 조건이 산호의 성장을 저해하는 요인 및 그 영향 정도가 연별로 다르기 때문이다. 연성장밴드, 광학밀도지수와 원소비의 비교는 연성장밴드의 밀도가 높은 부분(연엑스선 사진의 밝은 부분과 높은 광학밀도지수에 해당)이 여름 동안 형성된 것을 관찰할 수 있다 (그림 10). 이러한 분석 결과와 골격에서 관찰되는 연성장밴드는 분석에 사용된 두 종이 모두 시료 채취 지역의 과거 해양온도 복원 및 환경복원에 사용될 수 있음을 지시한다.

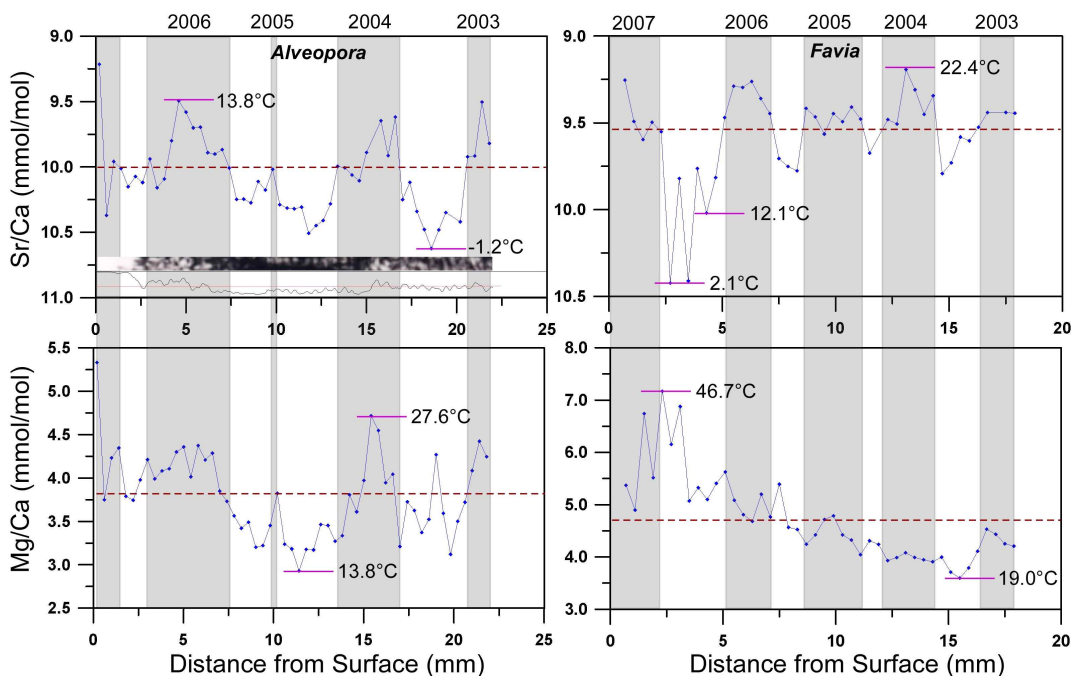


그림 10. *Alveopora*와 *Favia*의 Sr/Ca and Mg/Ca 값. 수평 점선은 측정된 Sr/Ca과 Mg/Ca 값의 평균값임. 성장연도는 Sr/Ca값이 지시하는 여름(회색상자)과 겨울(흰색상자)의 주기적 변화에 근거하여 2003-2007 기간에 걸쳐 성장한 것으로 판단함. 수온은 최고값과 최저값에 대해 Correge (2006) 과 Mitsuguchi *et al.* (1996)에 주어진 수식을 이용하여 계산함.

측정된 값들의 전반적으로 양호한 계절적 변화양상에도 불구하고, 이번 연구 결과는 분석방법 및 결과의 해석과 관련한 몇 가지 개선점 및 문제점을 지시하고 있다. 첫 째는 유기물 제거의 필요성이다. *Alveopora*의 최상부에 해당하는 0~0.2 mm 구간과 *Favia*의 2.3~2.7 mm, 3.1~3.5 mm 구간에서 측정된 Sr/Ca 및 Mg/Ca값은 다른 측정 구간에 비하여 매우 높거나 낮은 값을 보인다 (그림 10). 두 시료는 모두

상부의 5 mm 구간에서 유기물로 판단되는 갈색 또는 녹색의 물질을 포함하고 있었으며, 이는 살아있는 개체의 채집에 따라 산호 개체의 표면에 서식했던 산호의 흔적으로 판단된다. 현재까지 유기물의 잔류가 분석된 산호 골격의 분석 원소비에 미치는 영향이 개별적으로 평가된 바가 없기 때문에, 분석 전 시료 내 유기물의 제거 작업은 연구자의 선택에 따라 결정된다. Sr/Ca를 고해양온도의 지시자로서 다시 관심을 불러일으킨 Schrag(1999)은 유기물 제거를 하지 않고 분석을 실시하였다. 이후의 많은 연구들은 Schrag(1999)의 방법을 따라 유기물 제거를 실시하지 않았으며, 제거 작업을 실시한 연구는 전통적인 탄산염 분석방법을 이용하였기 때문이다. 하지만, 이번 연구에서 나타난 유기물의 잔류 구간의 측정 이상치들은 이 연구에서 유기물이 분석값에 미치는 잠재적 영향과 최상부 구간 시료에 대한 유기물 제거가 실시되어야 할 필요성을 지시하고 있다. 특히 산호 골격 내 유기물은 Mg를 다량 포함한 것으로 알려져 있기 때문에 Mg/Ca 값의 연구를 위해서는 유기물의 제거가 반드시 필요할 것으로 생각된다. 해양의 오염 및 미량금속원소의 연구에 있어서도 이들 금속원소 들이 유기물에 농집되는 경향이 강하기 때문에 반드시 유기물의 제거가 선행되어야 한다(Shen and Boyle 1988).

둘째는 열악한 성장환경에 따른 불연속적 성장과 이에 따른 결과 해석의 문제이다. Shimamura *et al.*(2005)은 *Porites* 골격의 고해상도(~2 days) 분석 및 환경모니터링 연구를 통하여 저온(<22°C)이나 고온(>30°C), 또는 저염분 (<27ppt) 환경에서 산호가 성장하지 않는다는 것을 입증하였으며, 이는 산호 골격을 이용한 과거 해양 환경의 복원이 불완전할 수 있음을 지시하고 있다. 연구대상 시료는 중위도 지역에 광범위하게 분포하기 때문에 열대와 아열대지역에 주로 분포하는 *Porites* 보다 낮은 온도에 대한 저항성이 높을 것으로 판단된다. 예를 들면, *Alveopora*의 경우 북위 ~36°에 위치하는 동해의 오키섬에서도 그 분포가 확인된 바 있다 (Yamano 2004). 하지만, 연구 지역의 겨울 수온은 산호가 일반적으로 성장할 수 있는 온도로 알려진 18°C(Fallon *et al.* 1999) 보다 훨씬 낮은 평균 13°C 정도의 낮은 온도를 보이기 때문에 (그림 3), 이러한 온도 조건하에서 *Alveopora*와 *Favia*가 연속적인 성장을 보이기는 불가능할 것으로 판단된다. 따라서 중위도 지역의 해수온도 추적자 개발을 위해서는 저온 환경 하에서 발생할 수 있는 성장의 중단 가능성이 반드시 고려되어야 한다 (Shimamura *et al.* 2008).

성장에 영향을 주는 또 하나의 문제점은 Shimamura *et al.*(2005)이 하이난섬에서 관찰한 바와 같은 여름 장마나 태풍의 영향에 따른 해수 염분의 감소이다. 2005년 여름 동안 Sr/Ca 값은 *Alveopora*와 *Favia* 두 종 모두 예년 여름에 비하여 매우 낮은 값을 보였다 (그림 10). 2005년 8월과 9월은 중국 양자강 유역과 쓰시마섬에 태풍

맛사(Matsa)와 나비(Nabi)가 상륙했던 시기이다 (기상청자료 www.kma.go.kr). 그 당시 모슬포 해역에서 관측된 8월 일일 염분은 최저 21.5ppt로 나타났으며, 월평균 염분 또한 26.2ppt로서 2006년과 2007년의 8월 평균 염분인 27.9ppt와 28.4ppt에 비하여 현저히 낮은 값을 보였다. 이는 Shimamura *et al.*(2005)이 *Porites*의 성장 저해 요인으로 제시한 염분인 27ppt 보다 훨씬 낮은 값이다. 이러한 저염분 조건에서는 산호의 성장이 멈출 수 있으며, 결과적으로 여름 동안의 수온이 산호 골격에 기록되지 않았을 가능성이 있다. 당시 모슬포 지역의 수온이 예년과 큰 차이를 보이지 않은 점을 고려할 때, 당시 산호 골격이 낮은 Sr/Ca값을 보이는 점은 염분의 감소에 따라 산호 성장이 영향을 받았을 가능성을 지시하고 있다. 따라서 중위도 지역에서 흔히 관찰되는 저수온과 저염분에 따른 산호 성장의 중단 가능성은 Sr/Ca(Mg/Ca)-SST(Sea Surface Temperature) 관계식 정립 시 반드시 고려되어야 한다 (형기성 외, 2008).

마지막으로 이번 연구에서 측정된 *Alveopora*와 *Favia*의 Sr/Ca와 Mg/Ca값은 기준에 보고된 다른 산호종의 값들과 큰 차이를 보이며, 이는 해수온도 복원을 위해서는 연구 대상 종과 연구지역에 적용할 수 있는 새로운 Sr/Ca-SST 및 Mg/Ca-SST 관계식의 필요성이 요구된다. 그림 10은 가장 많은 연구가 수행된 *Porites*의 Sr/Ca-SST 관계식($Sr/Ca(\text{mmol/mol}) = 10.533 - 0.0607 \times SST(^{\circ}\text{C})$, Corregge 2006)과 Mg/Ca-SST 관계식($Mg/Ca(\text{mmol/mol}) = (1.15 + 0.129 \times SST(^{\circ}\text{C})) / 1000$, Mitsuguchi *et al.* 1996)을 *Alveopora*와 *Favia*에 적용하여 계산한 해수 온도를 보여주고 있다. 관측 온도에 가장 가까운 온도를 보이는 것은 *Alveopora*의 Mg/Ca값으로 복원온도는 $13.8^{\circ}\text{C} \sim 27.6^{\circ}\text{C}$ 로서 제주도의 모슬포에서 측정된 온도범위인 $13.3^{\circ}\text{C} \sim 24.8^{\circ}\text{C}$ 와 2°C 이내에서 일치한다. 하지만, 보다 일반적으로 사용되는 Sr/Ca값으로 복원된 온도 범위는 $-1.2^{\circ}\text{C} \sim 13.8^{\circ}\text{C}$ 로서 실측값과 큰 차이를 보일뿐 아니라 중위도 지역에서는 관측이 불가능한 영하의 온도 범위를 보인다. *Favia*의 Sr/Ca값 또한 상부의 유기물에 의한 오염이 의심되는 2점을 제외할 때, 복원된 온도는 $12.1 \sim 22.4^{\circ}\text{C}$ 범위로, 관측 온도 범위인 $11.2^{\circ}\text{C} \sim 27.5^{\circ}\text{C}$ 와 상당한 차이를 보인다. 따라서 복원 온도와 관측 온도 간의 큰 차이는 현장 장기 관측을 통한 종별 Sr/Ca-SST 및 Mg/Ca-SST 관계식의 정립 필요성을 지시한다.

몇 가지의 문제점에도 불구하고, 이번 연구는 두 산호종 골격의 지화학성분 분석을 통한 과거 수온 복원의 가능성을 지시하고 있으며, 이는 현재까지 열대/아열대 지역에서 가능했던 계절/연단위의 과거 수온 복원을 우리나라를 포함한 중위도 지역까지 확대할 수 있음을 시사한다.

다) *Favia* sp. 동위원소조성의 고기후 추적자 가능성 연구

쓰시마난류 영향해역에 광범위하게 분포하는 *Favia* sp.의 몬순 또는 고수온 추적자로서의 사용가능성을 확인하기 위하여 앞서 설명한 Sr/Ca, Mg/Ca 분석과 함께 이끼섬에서 채취한 *Favia* sp. 골격의 동위원소 조성을 분석하였다. 고기후 연구에 많이 사용되는 *Porites*는 산호의 개체가 살고있는 polyp의 크기가 평균 1mm 정도에 불과하기 때문에 분석을 위해 corallite의 theca wall, columellae, septa의 구분없이 하나의 corallite를 대상으로 부시료를 채취한다. 하지만 *Favia*는 하나의 corallite의 크기가 약 5mm 정도로서 theca wall, columellae, septa를 구분없이 부시료를 채취할 경우, 서로 다른 시기 다른 해양환경에서 생성된 성분이 섞일 가능성이 많다. 따라서 이번 연구에서는 *Favia*의 theca wall과 columellae를 구분하여 부시료를 채취 분석하여 계절적 변화를 조사하였다 (그림 11).

Favia theca wall의 산소/탄소안정동위원소 조성비($\delta^{18}\text{O}$ 과 $\delta^{13}\text{C}$)는 모두 1.5~2.0‰의 범위에서 일정 주기로 변화하는 명확한 계절 변화를 보였다. 이는 *Favia* sp.가 중위도지역의 고기후 복원에 사용될 수 있음을 지시한다. $\delta^{13}\text{C}$ 의 최대치는 $\delta^{18}\text{O}$ 의 최대치에 비해 1mm 정도의 편차를 두고 관찰된다. 이는 최고 수온과 최대일사량의 불일치에 기인하며, 이는 $\delta^{18}\text{O}$ 가 주로 수온변화를 기록하는 반면 $\delta^{13}\text{C}$ 은 일사량의 변화를 기록하기 때문이다. 반면, columellae는 동위원소의 최대와 최소치가 theca wall에 비해 적고, 계절적 변화도 명확하지 않은 양상을 보였다. 이는 columellae의 경우 다른 시기에 형성된 골격이 부시료 획득시 섞였을 가능성을 나타내며, *Favia*의 분석시 theca wall만을 분리하여 부시료를 채취하는 것이 해석의 신뢰성을 높일 수 있음을 시사하고 있다. 현재 연구해역에서 수온변화를 20분 간격으로 기록 중이며, 차후 관측기록과 산호의 기록을 비교함으로써 *Favia*로부터 수온변화를 복원할 수 있는 관계식의 정립이 가능할 것으로 예상된다.

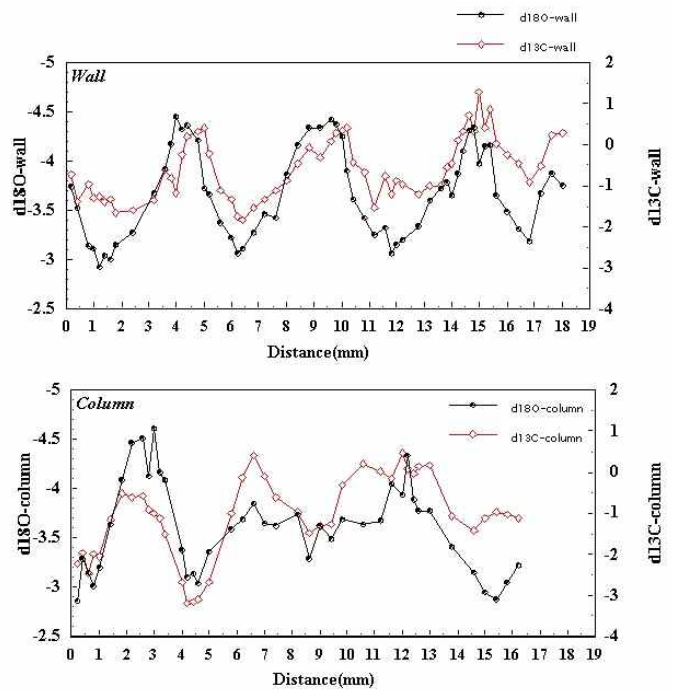


그림 11. 이끼섬 *Favia*의 산소 및 탄소동위원소 조성

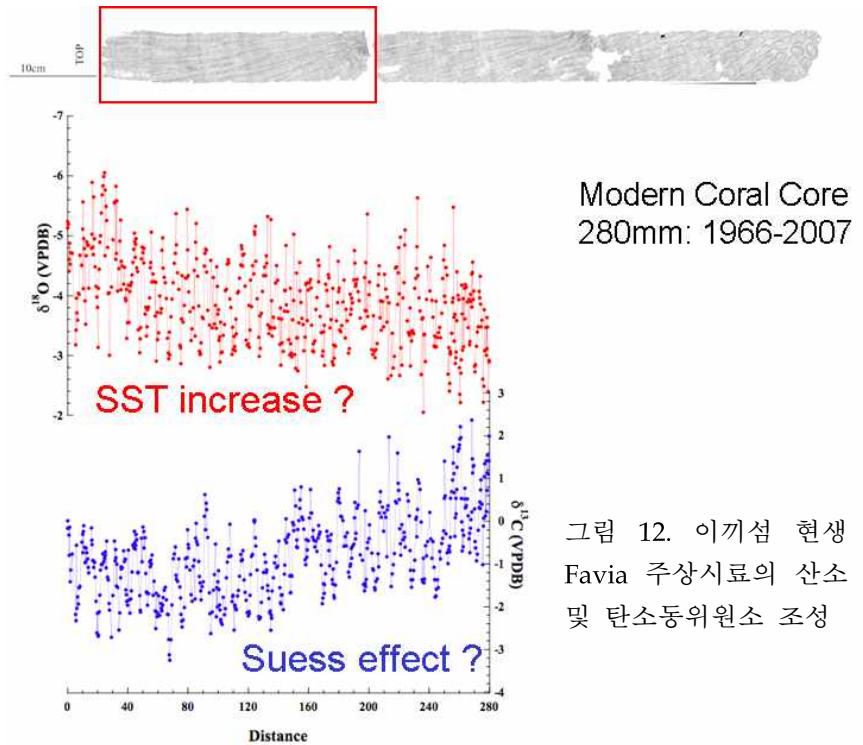
(라) 이끼 *Favia*의 산소 및 탄소동위원소 조성

이끼섬에서 획득한 90cm 길이의 현생 *Favia* 주상시료 중 상부 28cm 구간에 대한 산소 및 탄소동위원소 조성 분석을 실시하였다. 대략 200 μ m 간격으로 채취된 2,000 개의 부시료 중 약 800 개의 부시료를 분석하였으며, 그 결과 산소동위원소 조성은 41개의 주기성을 가진 peak를 보였다 (그림 12). 이는 이 구간이 1966년부터 산호가 채취된 2007년까지 41년 동안 약 연당 7mm의 속도로 성장했음을 지시한다.

분석된 산소동위원소 조성은 1966년부터 현재로 오면서 점차 감소하는 경향을 보인다 (그림 12). 산호의 산소동위원소 조성은 성장온도가 증

가함에 따라 1 $^{\circ}$ C 당 대략 0.2‰씩 감소하는 특성을 보인다(Gagan et al., 2000; 절대적인 크기는 산호의 속에 따라 변화함). 따라서 분석값에서 관찰되는 점차적인 산소동위원소 조성의 감소는 현재 우리나라 인근에서 관찰되는 수온 증가를 지시할 가능성이 있다. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 산호 골격의 산소동위원소 조성은 온도뿐만 아니라 해수의 산소동위원소 조성에 의해서도 영향을 받기 때문에, 강우의 증가에 따른 해수 산소동위원소 조성의 감소의 가능성도 배제할 수 없다. 현재 산소동위원소 조성만으로 강우 효과와 온도효과를 분리하는 것은 불가능하며, 향후 온도만의 함수로 변하는 산호 골격의 Sr/Ca값의 분석을 통해 이들 두 변수가 영향을 미친 크기를 해석할 예정이다.

탄소동위원소 조성 또한 산소동위원소 조성과의 뚜렷한 주기성을 보이지 않지만 1966년부터 현재로 오면서 그 비가 점차 감소하는 경향이 뚜렷하다. 화석 연료의 과도한 사용과 이에 따른 이산화탄소의 대기 중 방출은 해수의 탄소동위원소 조성의



Modern Coral Core
280mm: 1966-2007

그림 12. 이끼섬 현생 *Favia* 주상시료의 산소 및 탄소동위원소 조성

변화를 야기한다. 화석연료는 생물체로부터 기원하기 때문에 대기의 이산화탄소 조성과의 비교할 때 ^{13}C 가 ^{12}C 에 비하여 현저히 낮으며, 따라서 화석연료로부터 유래된 이산화탄소는 대기에 비하여 낮은 탄소동위원소 조성을 갖는다. 대기의 이산화탄소는 해수와 교환작용을 일으키고, 결국 해수의 탄소동위원소조성을 낮추는 결과를 초래한다. 이와 같이 화석연료로부터 기원한 이산화탄소가 해수의 탄소동위원소 조성을 낮추는 현상을 Suess Effect라 칭하며, 그 변화 폭은 위도에 따라 10년당 0.1 ~ 0.2 % 정도 변화하는 것으로 보고되고 있다. 이끼 현생 산호 골격의 탄소동위원소조성이 과거 41년 동안 발생한 탄소동위원소조성의 감소폭은 약 1% 정도(0.25%/10년)로 일반적으로 보고되는 범위보다 약간 크지만 그 일부는 Suess Effect에 의해 발생했을 가능성이 크다.

현재 시료가 채취된 지역에서 수온변화를 20분 간격으로 측정하고 있으며, 추가 분석 작업을 통해 $\delta^{18}\text{O}$ -SST 관계식을 정립할 계획이다. 이 관계식을 이용하여 현재 측정된 동위원소값을 절대 온도변화로 복원하는 것이 가능하다. 현재 상부의 28cm 구간에 대해서 분석이 실시되었으며, 향후 그 하부 구간에 대한 분석을 실시할 예정이다. 상부 구간의 성장 기간을 고려할 때 이들 분석이 완료될 경우 상부 구간을 포함 최대 과거 80년간의 고기후 복원이 가능할 것으로 예상된다.

(마) 고시끼지마 *Favia*와 *Porites* 산호골격의 산소 및 탄소동위원소조성

고시끼지마 인근 해역은 열대/아열대 해역에 대량 분포하며 고기후 복원에 가장 흔하게 사용되는 *Porites* 군집이 다수 관찰되었으며, 중위도해역인 쓰시마/이끼섬에서도 흔히 관찰되는 *Favia* 또한 다량 분포한다. 이번 연구에서는 이 지역에서 채취된 1.5m 길이의 *Porites*와 *Favia* 주상시료가 고기후복원에 사용 가능한 지를 판단하기 위하여 상부 5cm 구간에 대한 산소동위원소조성 분석을 실시하였다.

*Porites*와 *Favia*의 산소동위원소조성은 둘 다 성장기간 동안 기록된 표층수온변화와 잘 일치하는 주기적인 변화를 보인다(그림 13). 주기적인 변화양상을 고려할 때 분석된 상부 5cm 구간은 대략 9년 기간 동안 성장한 것으로 해석된다. 특히 *Favia*의 동위원소조성이 열대/아열대지역의 고기후 복원에 가장 일반적으로 사용되는 *Porites*와 잘 일치하는 점은 중위도 지역에 많이 분포하는 *Favia*가 고기후 대리기록자로서의 유용성이 높음을 시사한다.

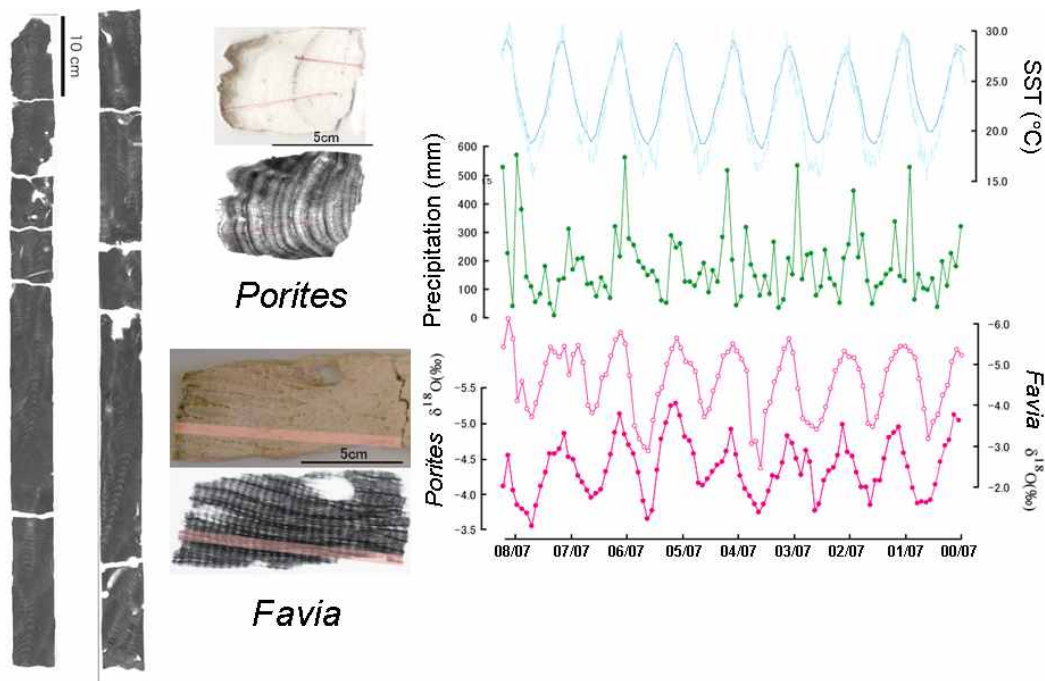


그림 13. 고시끼지마에서 채취된 *Porites*와 *Favia* 주상시료 상부 5 cm 구간의 산소동위원소조성. 왼쪽 그림은 채취된 *Porites* 주상 시료의 연속사진이며, 가운데 그림은 분석된 *Porites*와 *Favia* 주상시료 상부 5cm 구간의 암편사진 및 연속사진. 산호가 성장한 기간의 표층 수온과 강우량이 산소동위원소 조성과 함께 도시됨.

(바) 이끼섬 화석 *Favia* 골격의 산소 및 탄소동위원소조성

보다 장기적인 기간에 걸친 고기후복원 가능성을 확인하기 위하여 이끼섬 산호초 시추코아에서 채취한 2820년 전에 성장한 5cm 길이의 *Favia* 암편에 대한 산소 및 탄소동위원소조성 분석을 실시하였다 (그림 14). 분석이 실시된 *Favia* 암편은 대략 15번의 주기적 변화가 관찰되는 것으로 판단할 때, 약 15년 동안 성장한 것으로 해석되며 현생 산호의 동위원소값보다 약 0.5‰ 정도 높은 값을 보인다 (그림 12와 14). 이는 이때 당시의 기온이 현재보다 약간 낮아거나 강우가 현재보다 적었던 것으로 해석할 수 있다.

엑스선회절장치를 이용하여 분석한 결과 이들 화석 산호는 재결정작용을 받지 않고 성장 당시의 광물상(Aragonite)을 간직하고 있는 점을 고려할 때 이번에 분석된 동위원소값이 2820년 전에 성장했던 당시의 과거 기후를 잘 기록하고 있는 것으로 판단되며, 이는 이들 시료를 이용하여 보다 장기간에 걸친 고기후 복원이 가능함을 시사한다.

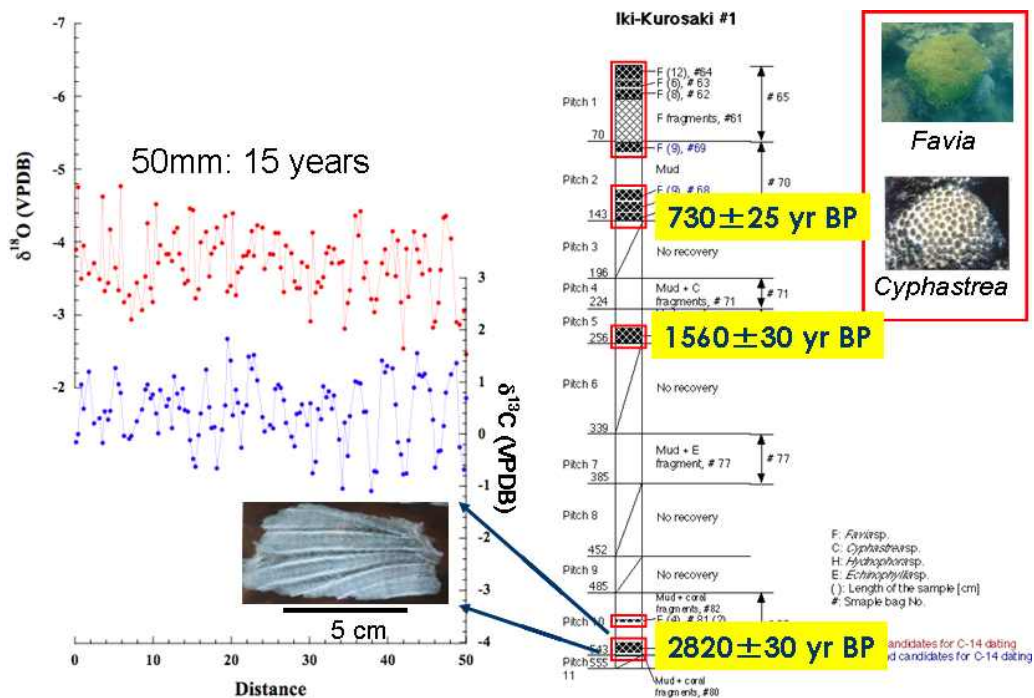


그림 14. 약 2,820년전 성장한 *Favia* 산호 골격의 산소 및 탄소동위원소 조성.
노란색 상자안의 연령은 C-14를 이용하여 결정함.

다. *Favia* sp. 전밀도의 고기후 추적자 가능성 연구

Favia sp.는 지역에 따라 골격밀도의 큰 차이를 보인다. 이러한 골격밀도의 차이와 해양환경과의 관계성을 규명하기 위한 기초 작업으로써 아열대와 중위도해역에 분포하는 *Favia* sp.의 전밀도를 측정하고 이를 위도에 따라 비교하였다. 북위 20° 정도에 위치한 이리오모테에서 채취한 *Favia*는 1.5~2.3 g/cm³로 중위도 해역의 0.9~1.6 g/cm³ 보다 월등히 큰 값을 보인다. 또한 중위도 해역에서도 고토섬에서 쓰시마섬으로 위도가 올라가면서 밀도가 1.6 g/cm³에서 0.9 g/cm³까지 점차 감소하는 경향을 보인다 (그림 15).

이러한 위도에 따른 밀도의 감소는 해양환경, 특히 연 평균 해수온도와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 해수온도의 감소는 산호의 성장에 불리한 환경임에 틀림없으며, 골격의 형성 속도(calcification rate)가 수온 감소와 함께 비례적으로 감소하여 상대적으로 약한 골격을 형성하는 것으로 여겨진다. 쓰시마, 이끼, 코토 등의 중위도 지역에서 채취한 산호 시료는 밀도가 0.2 g/cm³의 적은 편차를 보이는 반면, 아열대 지역에 속하는 이리오모테의 산호 시료는 0.8 g/cm³의 큰 편차를 보

인다. 이러한 요인은 중위도 해역의 경우, *Favia*가 성장할 수 있는 조건을 갖춘 해역이 매우 제한되어 있어서 시료를 채취한 지역의 환경 차이가 크지 않았을 가능성이 있으며, 아열대의 경우 *Favia*가 성장할 수 있는 조건을 갖춘 지역이 광범위하여 다양한 해양조건을 갖는 지역에서 시료가 채취된 결과로 판단된다. 즉 아열대 해역은 온도나 채광 조건이 다른 다양한 해역 및 수심에서 산호가 서식할 수 있기 때문이다. 따라서 *Favia* 밀도의 조절요인에 대한 보다 종합적인 결론을 내리기 위해서는 아열대해역의 산호 시료 채취 해역에 대한 보다 면밀한 환경조건 분석이 요구된다. 앞서 설명한 *Favia*의 위도에 따른 체계적인 밀도변화는 밀도 또한 해양환경, 특히 해수의 온도를 유추해 낼 수 있는 좋은 추적자로서 사용할 수 있는 가능성을 보여준다. 이 자료는 특히 화석 산호의 연구에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각되며, 계절 또는 연변화의 기후 복원 보다는 장주기 즉 수 백 ~ 수 천년에 걸친 장주기 기후 변화 해석에 유용할 것으로 판단된다.

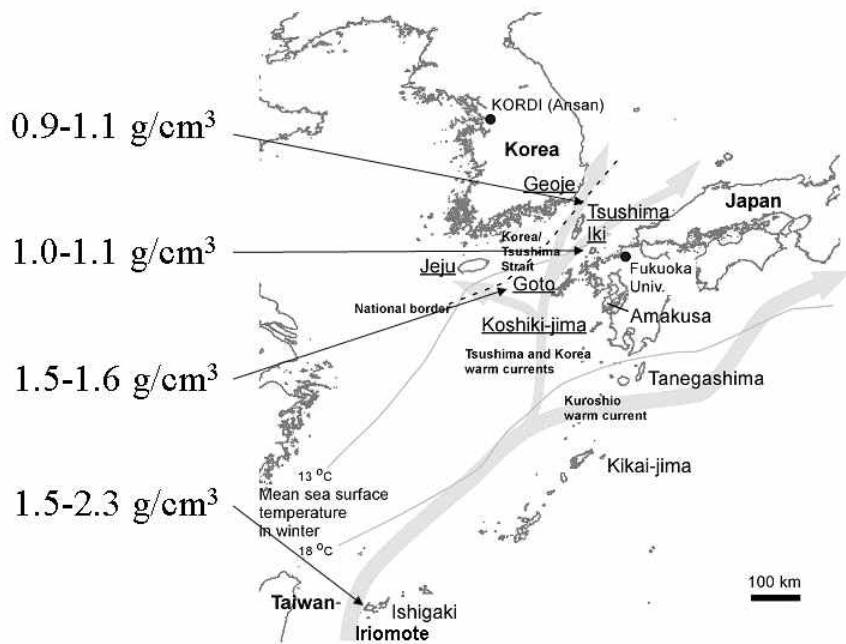


그림 15. *Favia* 산호 골격의 성장 위치에 따른 밀도 변화

4) 결 론

우리나라를 포함한 중위도 지역에 응용할 수 있는 고해양온도 추적자 개발을 위해 제주, 쓰시마, 이끼, 고시끼지마 지역을 대상으로 괴상 조초성 산호의 분포에 대한 현장조사를 실시하였으며, 그 결과 제주 지역에서는 *Alveopora jp.*가 그리고 쓰시마섬에서는 *Favia spp.*가 고환경 복원 연구에 가장 적합한 종으로 선정되었다. 특히 *Favia*는 4,000년 이상의 기간에 걸쳐 형성된 6m 높이의 산호초를 쓰시마섬 지역에 형성하고 있다. 이러한 점은 *Favia*가 추적자로서 개발될 경우, 대한해협을 중심으로 최대 4,000년 정도의 고해양환경 및 고기후 복원이 가능함을 시사한다.

*Alveopora*의 골격은 여름동안 형성된 고밀도 띠와 겨울동안 형성된 저밀도 띠의 쌍으로 구성된 연성장밴드를 보이며, *Favia* 또한 이와 유사한 연성장밴드를 보인다. 또한 두 종의 Sr/Ca값과 *Alveopora*의 Mg/Ca값은 연구지역 표층 수온의 변화와 유사한 계절적 변화양상을 보인다. 이러한 연성장밴드의 존재와 지화학성분의 주기적 변화양상은 두 종의 산호가 주변 해양환경을 시간의 함수로 골격에 기록하고 있으며, 고해양환경의 복원을 위한 추적자로서 사용 가능성을 지시하고 있다.

이번 연구 결과는 또한 중위도 지역 겨울철에 관찰되는 낮은 수온과 몬순 기간 동안 발생하는 해수의 낮은 염분이 산호의 성장을 멈출 수 있으며, 중위도 지역의 고해양환경 추적자 개발 시 이점이 반드시 고려되어야 함을 지시하고 있다. 또한 성공적인 고환경의 복원을 위해 연구지역과 연구 대상 종에 맞는 Sr/Ca-온도 관계식의 정립이 필요하다.

쓰시마해역 다량 분포하는 *Favia theca wall*의 산소 및 탄소동위원소조성은 수온 변화와 유사한 연변화양상을 보이며, 이의 분석을 통하여 고기후복원이 가능성이 밝혀졌다. 이끼섬에서 채취한 90cm 길이의 현생 시추 코아의 상부 28cm 구간은 약 41년의 연변화주기를 보이며, 이는 이 산호가 과거 41년동안 연 7mm의 속도로 성장했음을 지시한다. 분석결과는 과거 41년 동안 지구온난화로 수온이 상승(또는 강우증가)했음을 지시하고 있으며, 또한 과도한 화석연료의 사용으로 해수의 탄소동위원소조성이 감소했음을 보인다. 향후 $\delta^{18}\text{O}$ -온도 관계식의 정립을 통하여 측정값의 절대 해수온도로의 변환이 가능하다.

이끼섬에서 채취한 약 2,820년 전 *Favia* 산호 화석의 동위원소조성 또한 현생 산호와 유사한 연변화양상을 보인다. 이는 쓰시마섬과 이끼섬에서 획득한 산호초 시료를 이용할 때 과거 4,000까지의 고해양환경복원이 가능함을 지시한다.

또한 이번 연구에서 관찰된 *Favia*의 위도에 따른 체계적인 밀도변화는 밀도 또한 해양환경, 특히 해수의 온도를 유추해 낼 수 있는 좋은 추적자로서 사용할 수 있는

가능성을 보여준다. 이 자료는 특히 화석 산호의 연구에 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각되며, 계절 또는 연변화의 기후 복원 보다는 장주기 즉 수 백 ~ 수 천년에 걸친 장주기 기후 변화 해석에 유용할 것으로 판단된다.

5) 인용문헌

- Asami, R., T. Yamada, Y. Iryu, C.P. Meyer, T.M. Quinn, and G. Paullay. 2004. Carbon and oxygen isotopic composition of a Guam coral and their relationships to environmental variables in the western Pacific. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **212**, 1-22.
- Asami, R., T. Yamada, Y. Iryu, T.M. Quinn, C.P. Meyer, and G. Paullay. 2005. Interannual and decadal variability of the western Pacific sea surface condition for the years 1787-2000: Reconstruction based on stable isotope record from a Guam coral. *J. Geophys. Res.*, **110**, C05018, doi: 10.1029/2004JC002555.
- Beck, J.W., R.L. Edwards, E. Ito, F.W. Taylor, J. Recy, F. Rougerie, P. Joannot, and C. Henin. 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science*, **257**, 644-647.
- Boiseau, M., A. Juillet-Leclerc, P. Yiou, B. Salvat, P. Isdale, and M. Guillaume. 1998. Atmospheric and oceanic evidences of El Nino-Southern Oscillation events in the south central Pacific Ocean from coral stable isotopic records over the last 137 years. *Paleoceanogr.*, **13**, 671-685.
- Cane, M.A. 1983. Oceanographic events during El Nino. *Science*, **222**, 1189-1195.
- Cole, J.E., R.G. Fairbanks, and G.T. Shen. 1993. Recent variability in the Southern Oscillation: isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science*, **260**, 1970-1973.
- Correge, T. 2006. Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **232**, 408-428.
- Eugen, M.R. and J.M. Wallace. 1983. Meteorological aspects of the El Nino/Southern Oscillation. *Science*, **222**, 1195-1202.
- Evans, M.N., R.G. Fairbanks, and J.L. Rubenstone. 1998. A proxy index of ENSO teleconnections. *Nature*, **394**, 732-733.
- Evans, M.N., A. Kaplan, and M. Cane. 2000. Intercomparison of coral oxygen

- isotope data and historical sea surface temperature (SST): potential for coral-based SST field reconstructions. *Paleoceanogr.*, **15**, 551-563.
- Fallon, S.J., M.T. McCulloch, and C. Alibert. 2003. Examining water temperature proxies in *Porites* corals from the Great Barrier Reef: a cross-shelf comparison. *Coral Reefs*, **22**, 389-404.
- Gagan, M.K., L.K. Ayliffe, J.W. Beck, J.E. Cole, E.R.M. Druffel, R.B. Dunbar, and D.P. Schrag. 2000. New views of tropical paleoclimates from corals. *Quat. Sci. Rev.*, **19**, 45-64.
- Gong, D. and J. Luterbacher. 2008. Variability of the low-level cross-equatorial jet of the western Indian Ocean since 1660 as derived from coral proxies. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L01705, doi:10.1029/2007GL032409
- Grottoli A. G., 2002. Effect of light and brine shrimp on skeletal $\delta^{13}\text{C}$ in the Hawaiian coral *Porites compressa*. A tank experiment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**, 1955-1967.
- Grottoli, A. and Wellington, G.M., 1999. Effect of light and zooplankton on skeletal $\delta^{13}\text{C}$ values in the eastern Pacific corals *Pavona clavus* and *Pavona gigantea*. *Coral Reefs*, **18**, 29-41.
- Hendry, E.J., M.K. Gagan, C. Alibert, M.T. McCulloch, J.M. Lough, and P.J. Isdale. 2002. Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at the end of Little Ice Age. *Science*, **295**, 1511-1514.
- McConnaughey, T.A., 1989. ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**, 151-162.
- Mitsuguchi, T., E. Matsumoto, O. Abe, T. Uchida, and P.J. Isdale. 1996. Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science*, **274**, 961-963.
- Mitsuguchi, T., T. Uchida, E. Matsumoto, P.J. Isdale, and T. Kawana. 2001. Variations in Mg/Ca, Na/Ca and Sr/Ca ratios of coral skeletons with chemical treatments: implications for carbonate geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2865-2874.
- Mitsuguchi, T., E. Matsumoto, and T. Uchida. 2003. Mg/Ca and Sr/Ca ratios of *Porites* coral skeleton: evaluation of the effect of skeletal growth rate. *Coral Reefs*, **22**, 381-388.
- Philander, S.G.H. 1983. El Nino Southern Oscillation phenomena. *Nature*, **302**, 295-301.
- Quinn, T.M., F.W. Taylor, and T.J. Crowley. 1993. A 173 year stable isotope

- record from a tropical south pacific coral. *Quater. Sci. Rev.*, **12**, 407-418.
- Quinn, T.M. and D.E. Sampson. 2002. A multiproxy approach to reconstructing sea surface conditions using coral skeleton geochemistry. *Paleoceanogr.*, **17**, 1062. doi:10.1029/2000PA000528.
- Shen, G.T. and E.A. Boyle. 1988. Determination of lead, cadmium and other trace metals in annually-banded corals. *Chem. Geol.*, **67**, 47-62.
- Shen, C.-C., T. Lee, K.-K. Liu, H.-H. Hsu, R.L. Edwards, C.-H. Wang, M.-Y. Lee, Y.-G. Chen, H.-J. Lee, and H.-T. Sun. 2005. An evaluation of quantitative reconstruction of past precipitation records using coral skeletal Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **237**, 370-386.
- Shimamura, M., T. Oba, G. Xu, B. Lu, L. Wang, M. Murayama, K. Toyoda, and A. Winter. 2005. Fidelity of $\delta^{18}\text{O}$ as a proxy for sea surface temperature: Influence of variable coral growth rates on the coral *Porites lutea* from Hainan Island, China. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **6**, Q09017, doi:10.1029/2005GC000966.
- Shimamura, M., L. Hyeong, C.M. Yoo, T. Watanabe, T. Irino, and H.-S. Jung. 2008. High resolution stable isotope records of scleractinian corals near Ishigaki Island: Their implication as a potential paleoclimatic recorder in middle latitude regions. *Geosci. J.*, **12**, 25-31.
- Shrag, D.P. 1999. Rapid analysis of high-precision Sr/Ca ratios in corals and other marine carbonates. *Paleoceanogr.*, **14**, 97-102.
- Sun, Y., M. Sun, G. Wei, T. Lee, B. Nie, and Z. Yu. 2004. Strontium contents of Porites coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century. *Paleoceanogr.*, **19**, PA2004, doi:10.0007/s00338-004-0467-x.
- Watanabe, T., M. Minagawa, T. Oba, and A. Winter. 2001. Pretreatment of coral aragonite for Mg and Sr analysis: implications for coral thermometers. *Geochem. J.*, **35**, 265-269.
- Yamano, H. 2004. Oki Islands and Goto Archipelago. p. 248. In: *Coral Reefs of Japan*. ed. by Ministry of the Environment and Japan Coral Reef Society, Ministry of the Environment, Tokyo.
- 형기성, Shimamura, M., Watanabe, T., Yamano, H., Sugihara, K., 김종욱, 2008. 제주/쓰시마 조초성 산호의 수온 기록자료로서의 가능성 평가. *Ocean and Polar Research*, 30(3), 351-359.

작성양식 4 : 연구수행관련 논문발표목록서

연구수행관련 논문발표목록서

재단사업명	과제번호	소 속	성 명
국제협력연구	KOSEF F01-2007-000-10018-0	한국해양연구원	형기성

가. 논 문

저자명 First Author 기타 Author(s)	제 목	게재지명 (Full Name)	집,권,호 (Vol.,No)	수록면 PP. ~PP.	출판 년도	출판국가 또는 기관	출판 여부
Shimamura, M, Hyeong K, Yoo CM Watanabe T, Iriho T, Cheong H.S.	High resolution stable isotope records of scleractinian corals near Ishigaki Island: Their implication as a potential paleoclimatic recorder in middle latitude regions	Geosciences Journal	12(1)	25-31	2008	Springer	①
형기성, Shimamura M, Watanabe T, Yamano H, Sugihara K, 김종욱	제주/쓰시마 조초성 산호의 수온 기록자로서의 가능성 평가	Ocean and Polar Research	30(3)	351-359	2008	한국	①

※ 저자명은 First Author 을 제일먼저 기재

※ 출판여부 : ①출판(published) ②승인, 인쇄중 (accepted, in press) ③ 제출중(submitted) ④작성중(in progress)

※ 대학 및 연구소에서 발행되는 학술지는 제외함.

나. Proceedings

저자명 First Author 기타 Author(s)	제 목 (발표내용)	회의명/게재지명	집,권,호 (Vol., No)	수록면 PP. ~PP.	발표 년/ 월/일	발표장소/ 출판국가/ 기관
Yamono H, Sugihara K, Watanabe T, Shimamura M Hyeong K	Analysis of environmental changes using communities and skeletons of hermatypic corals distributed around Japan and Korea	10th Japanese Coral Reef Society Annual Meeting	10 (1)	68-68	2007	Japanese Coral Reef Society
Shimamura, M, Oba T., Irino T, Hyeong, K, Lu B.Q, Xu G.Q, Wang L.J., Toyada K.	Coral skeletal carbon isotope composition as a proxy for solar intensity and turbidity	9th International Conference on Paleocceanography		245-245	2007	Tongji University
Shimamura M, Hyeong K, Watanabe T, Irino T, Yoo C.M, Kim W.S.	Opposed trend of skeletal carbon isotopic ratios found in two different coral species collected from the same site: genus-dependent responses	11th International Coral Reef Symposium 2008		115-115	2008	International Society for Coral Studies
Yamano H, Sugihara K, Watanabe T, Shimamura M, Hyeong, K.	Reef building at High Latitudes (34N, Japan)	11th International Coral Reef Symposium 2008		57-57	2008	International Society for Coral Studies
형기성, Shimamura M, Watanabe T, Yamano H, Sugihara K.	제주/쓰시마 산호의 고해상도 수온 기록자로서의 가능성 평가	2008 한국해양과학기술협의회 공동학술대회		250-250	2008	한국해양과학기술협의회
Shimamura M, 형기성, Watanabe T, Irino T, 김웅서	Coral skeletal carbon isotopic ratios of Porites and Platygyra: out-of-phase seasonality resulting from species-specific responses to the same environmental conditions	2008 한국해양과학기술협의회 공동학술대회		246-246	2008	한국해양과학기술협의회

자 체 평 가 서

과제번호	KOSF F01-2007-000-10018-0	연구과제명	한국/일본 해역에 분포하는 산호의 군집구조 및 골격의 성분을 이용한 기후변동 해석
소 속	한국해양연구원		
성 명	형 기 성		
평가항목	우선순위	※ 좌측 평가항목 우선순위는 예시와 같이 1, 2, 3으로 표시함.	
연구수행	3		
연구결과	1		
연구효과	2		
자체평가내용	<p>본 연구를 통해 대한해협 인근 및 쓰시마난류 영향해역에 서식하는 경산호의 분포 및 군집이 확인되었다. 또한 괴상산호의 동위원소 및 지화학분석을 통해 이들이 주변환경변화를 시간의 함수로 골격내에 기록하고 있는 점이 확인되었으며, 향후 과거 해양환경변화를 복원하기 위한 대리기록자로서의 활용성이 확인되었다. 이로써 지구온난화가 우리나라 인근 해역에 얼마마한 크기로 나타나고 있는 지를 평가하기 위한 고해상도 고해양환경복원이 가능하게 되었다.</p>		
연구결과의 향후 기대효과	<p>본 연구를 통해 과거 150년 동안 성장한 현생 산호 시료를 확보하였으며, 이 시료의 분석을 통해 화석연료의 사용에 따라 발생했던 지구온난화의 영향이 대한해협인근에서 어떤 크기로 발생했는 지에 대한 정량적 연구가 가능하다. 또한 최대 4,000년에 성장한 산호 시료를 통해 보다 장기간에 걸친 고해양환경 및 고기후 복원이 가능할 것으로 판단된다.</p> <p>이렇게 복원된 고기후 자료는 미래기후 예측을 위한 모델의 개발이나 우리나라 기후조건에 맞는 기후 예측 모델의 선택에 활용될 수 있다.</p>		

이 보고서는 한국과학재단에서 지원한
국제협력연구 보고서입니다.