

KOSEF F01-2009-000-10213-0

중위도 산호를 이용한 대한해협/쓰시마해협 인근의 해양환경변화
복원연구

Analysis of environmental changes with mid-latitude coral
skeltons in the Korea and Tsushima Strait region

2011. 8. 30.

한 국 연 구 재 단

제 출 문

한국연구재단 이사장 귀하
본 보고서를 2011년도 국제협력연구 결과보고서로 제출합니다.

2011 년 8 월 30 일

과제번호 : F01-2009-000-10213-0

연구과제명 : 중위도 산호를 이용한 대한해협/쓰시마해협 인근의
해양환경변화 복원연구

연구 책임자 : 소속: 한국해양연구원
성명: 형 기 성 (인)

작성양식 3 : 연구결과요약문(국문)

분 야	지구 및 우주	성 명	형 기 성
과제번호	F01-2009-000-10213-0	소 속	한국해양연구원
중 심 어	고기후복원, 대한해협, 해수온도변화, 산호골격특성, 산호군집구조		
연구과제명	중위도 산호를 이용한 대한해협/쓰시마해협 인근의 해양환경변화 복원연구		

본 국제공동연구는 대한해협 인근의 과거 수온 복원을 위해 이 해역에 분포하는 산호를 이용하여 복원식을 개발하고, 또한 제주 해역의 산호 분포조사를 통해 산호 분포 확인 및 확장속도 정량화를 위한 장기 모니터링 정점의 선정을 위해 수행되었다.

현장조사 결과, 제주 해역에는 *Alveopora japonica*, *Oulastrea crispata*, *Montipora millepora*, *Psammocora sp.*, *Psammocora nierstraszi*, *Goniopora sp.*, *Acanthastrea sp.*, *Psammocora superficialis* 등 총 8개의 경산호 종이 분포하는 것으로 확인되었다. 또한 금번 조사를 통해 경산호의 분포 변화의 장기 모니터링이 가능한 지역을 선택 인근 지역에서 선정하였다.

제주에 분포하는 *Alveopora*의 연령은 평균 4-5년 최대 12.4년으로 나타났으며, 3-4년의 연령을 보이는 산호가 최대로 분포하고 있다. 이는 *Alveopora*가 생태적으로 짧은 기대수명을 가지는 결과 때문인 것으로 확인되었으며, 이는 이 종이 작은 개체로서만 존재하는 이유를 설명한다. 결과적으로 *Alveopora*는 산호초를 형성할 만큼 지속적인 성장을 하지 못하는 것으로 생각된다. 제주지역에서 *Alveopora*가 급격히 증가하는 이유는 수온 상승과 함께 제주해역의 해초지대가 급격히 감소하기 때문이며, *Alveopora*는 해초가 사라진 지역에서 점차 우점생물로 확산하는 것으로 판단된다.

중위도 해역에서 고수온 복원을 위한 추적자를 개발하기 위해 쓰시마해협에 위치한 일본 이끼섬에서 채취한 *Favia* 산호 골격의 Sr/Ca 비를 분석하였다. 14°C 이하에서 산호 골격의 성장이 멈춘다는 가정 하에 얻은 분석된 Sr/Ca 값과 관측한 수온을 관계를 분석한 결과 산호의 Sr/Ca비는 $Sr/Ca \text{ (mmol/mol)} = 10.428 - 0.049 \times SST \text{ (}^\circ\text{C)}$ 의 관계성을 가지고 변화하는 것으로 나타났다. 이 식을 이용하여 현생 산호의 Sr/Ca에 적용하여 복원한 여름 수온은 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ (1s) 범위 내에서 측정값과 잘 일치한다. 이러한 결과는 *Favia* 산호의 Sr/Ca비가 중위도 지역의 연 최고기온의 복원에 이용될 수 있음을 지시한다. 아열대 지방에서 채취된 *Favia*를 이용한 기존 연구에서 제시된 현생산호의 Sr/Ca값과 1만 6천년 전의 화석 *Favia*의 Sr/Ca 값에 이번 연구에서 얻은 식을 적용할 때 현재 실측된 표층수온과 퇴적물코아의 알케논에서 얻어진 1만 6천년 전의 표층수온값과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 *Favia*의 Sr/Ca를 이용한 고수온 복원은 광범위한 지역에서 활용될 수 있으리라 생각된다.

작성양식 3 : 연구결과요약문(영문)

Field	Earth and Space	Author	Hyeong, Kiseong
Project No.	F01-2009-000-10213-0	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 skeltons in the Korea and Tsushima Strait region		

This cooperative study was carried out for the development of paleo-SST proxy in the mid-latitude region using a coral distributed in and around Korea Strait. Also, distribution of hard corals were investigated to select a long-term monitoring station in Jeju, which allows quantitative understanding of hard coral expansion in the northern limits of coral distribution.

The field survey revealed distribution of 8 hard coral species in Jeju: *Alveopora japonica*, *Oulastrea crispata*, *Montipora millepora*, *Psammocora sp.*, *Psammocora nierstraszi*, *Goniopora sp.*, *Acanthastrea sp.*, *Psammocora superficialis*. A potential long-term coral monitoring site was selected near Sup-Sum in Seoguipo, Jeju for the quantitative estimation of expansion rate of coral community.

Alveopora japonica in Jeju showed the maximum age of 12.4 years with an average age of 4 to 5 years. The colony of 3 to 4 years showed the highest abundance. This result indicates that small size of *Alveopora* is due to the small life expectancy of species. As a result, *Alveopora* cannot grow long enough to comprise a coral reef. Rapid increase of *Alveopora* abundance in Jeju is attributed to expansion of barren grounds in accordance with the decline of seaweed forest. *Alveopora* expands by substituting seaweed forest in Jeju area.

Sr/Ca ratios of *Favia* skeleton collected from Iki island, Japan, in the Tsushima Strait, varied depending on the sea surface temperature (SST) of surroundings with the following relationship: $Sr/Ca \text{ (mmol/mol)} = 10.428 - 0.049 \times SST \text{ (}^\circ\text{C)}$, in which *Favia* was assumed to stop its growing under 14°C. The developed equation predicts the measured summer maximum temperature within an error range of $\pm 1.2^\circ\text{C}$ (1s), suggesting its possibility as a paleo-SST proxy. When being applied to Sr/Ca values for living and fossil (~16,000 years) *Favia* reported in a sub-tropical region, the equation also provides the predicted values matching measured SST and alkenone-derived SST values. The results suggest that Sr/Ca ratios of *Favia* can be used for reconstruction of past SST in middle latitude and subtropical regions.

목 차

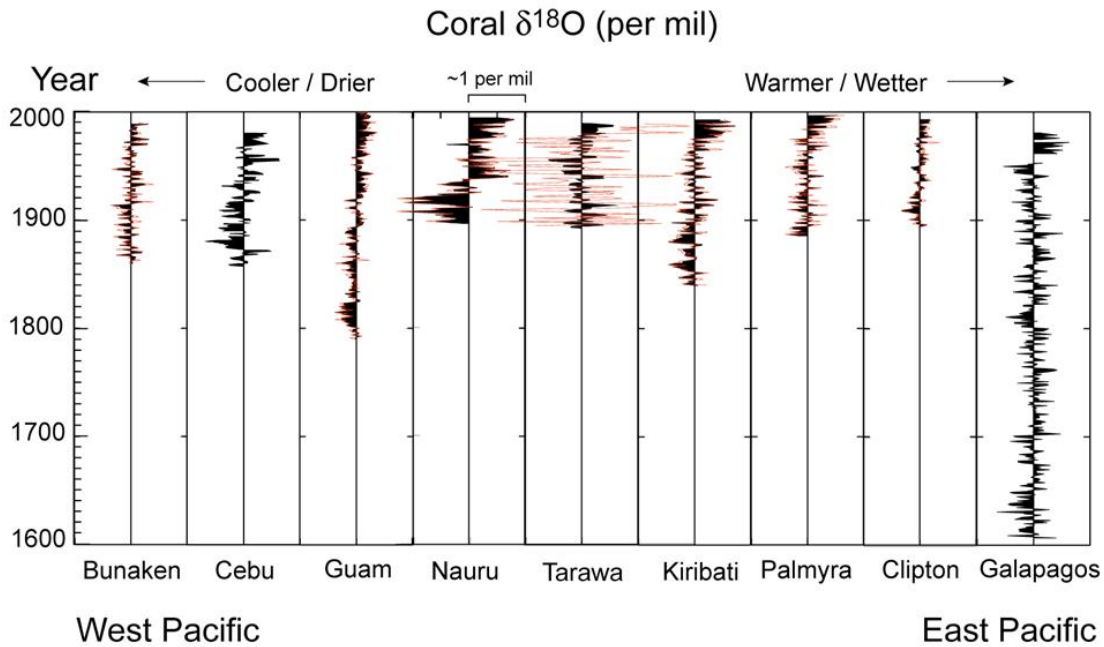
1) 서 론 -----	1
2) 연구방법 및 이론 -----	4
가. 산호 분포 조사 -----	4
나. <i>Alveopora japonica</i> (거품돌산호)의 분포 특성 연구 -----	4
다. 연엑스선 분석 -----	4
라. 현생, 화석 산호의 지화학 분석 -----	6
3) 결과 및 토의 -----	8
가. 제주 해역에 분포하는 경산호종 파악과 모니터링 사이트 선정 -	8
나. <i>Alveopora</i> 의 분포 확장 -----	10
다. 산호의 지화학 조성 -----	13
(가) 산호 골격의 연성장밴드와 화석산호의 변질여부 확인 -----	14
(나) 현생 <i>Favia</i> 산호를 이용한 Sr/Ca-SST 관계식 -----	14
(다) 2,600년 전의 수온 복원 -----	16
(라) 중위도 산호의 표층수온 대리기록자로서의 적용 가능성 -----	17
(마) 산호초 분포 및 시료획득 -----	10
4) 결 론 -----	18
5) 인용문헌 -----	19

1) 서론

최근 기후변화의 심각성이 인식되면서, 현재 일어나는 변화가 미래에 어떠한 결과를 가져올 수 있을 것인지가 중요한 관심사가 되었다. 이 중 해양환경의 변화는 국지적 기후 뿐 아니라 해류 순환에 변화를 가져올 수 있어 기후 인자로서 중요한 의미를 갖는다. 저위도의 표층수는 해류를 따라 연결된 중위도와 고위도 지역의 해양환경과 지역 생태계에 영향을 미치고, 특히 서태평양 워폴 지역은 엘니노나 라니냐 등 전 지구적 기후시스템과 밀접하게 연관된 것으로 알려져 있다. 따라서 서태평양 워폴 지역과 쿠로시오해류의 영향 해역에서는 현재의 해양환경 변화 연구와 함께 과거의 기후변화를 복원하여 미래의 변화를 예측하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

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 1), 따라서 한국 근해의 해양환경이 전 지구적 기후변동 요인에 대해 반응하는 변화의 크기 및 방향을 이해하기 위해서는 한국 연안에서의 과거 해양환경 복원이 필수적이다. 예를 들면, 엘니노 동안 서태평양 워폴 지역은 북동무역풍의 약화로 동쪽으로 이동하게 되며, 그 결과 괌 인근 지역은 지역적으로 수온이 낮아지는 현상을 보이게 된다 (Asami *et al.* 2004, 2005). 하지만, 엘니노동안 동태평양 지역은 심층수의 용승이 약해져 상대적인 수온 증가를 보이게 된다 (Cane 1983; Eugen and Wallace 1983; Philander 1983).

이처럼 전지구적·지역적 기후 변화와 그 상호 관계를 예측하기 위해서는 과거의 변화 양상과 현재 일어나는 환경 변화에 대한 이해가 선행되어야 하나, 관측 데이터는 길어야 몇 백 년에 불과하므로 이를 보완하기 위해 다양한 간접적 기후지시자(proxy)를 이용한 연구가 수행되고 있다. 괴상(massive)의 조초성(hermatypic) 산호는 열대/아열대 지역의 연안에 광범위하게 분포하며, 산호의 군집구조나 분포는 해수의 온도, 염도, 탁도나 수심 등의 조건에 영향을 받아 환경변화를 지시한다. 또한 쉽고 정확한 연령 결정, 그리고 골격 내에 존재하는 과거의 해수 환경을 지시하는 다양한 지화학 추적자 때문에 과거 기후 복원 연구에 널리 이용되고 있다 (Gagan *et al.* 2000; Corrège 2006; and references therein). 특히 산호 골격 내 산소동위원소 조성과 Sr/Ca비는 표층수의 성분과 온도를 반영하여, 이를 통한 과거 수온 및 기후(몬순)의 계절/연 단위 복원이 가능하다(Quinn *et al.* 1993; Cole *et al.* 1993; Boiseau *et al.* 1998; Asami *et al.* 2004; Sun *et al.* 2004).



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 1. 태평양 적도지역에서 분석된 산호 골격의 시대별 산소동위원소 조성변화

조초성 산호는 따뜻하고, 염도가 낮은 깨끗한 연안 지역에 주로 분포하므로 이러한 조건을 만족하는 서태평양 워플 지역, 그리고 워플에서 기원한 쿠로시오 해류의 영향을 받는 북서태평양 주변해 지역의 중요한 환경지시자로서 이용된다. 조초성 산호는 몇 세기에 걸친 해양환경의 고해상도 기록을 제공하므로, 지역 간 시간별 기후변화 양상의 직접적 비교를 가능하게 하며, 이를 통해 적도 지역의 수온 및 환경변화가 연구 대상 지역에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다. 실제로 산호를 이용하여 과거 100년 이상의 기간에 걸친 수온 변화 역사를 복원하는 연구가 다양한 지역에서 활발히 진행되고 있고, 지역 간 기록의 비교 연구 역시 기대된다 (그림 2).

대한해협은 쿠로시오난류의 지류인 대마난류와 동한난류가 지나가는 지역으로, 한반도 근해의 기후 변화를 추적하기 적합하다. 대한해협 등 한반도 근해에서도 조초성 산호가 보고되고 있으나, 이에 대한 체계적이고 정량적인 연구 및 한국/일본 산호 분포에 대한 비교연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 또한 괴상 조초성 산호는 연중 최저 수온이 18°C 미만인 위도 25° 이상의 중위도 지역에는 그 분포가 미약하기 때문에 산호를 이용한 과거 수온 및 환경 복원 연구는 미미한 실정이다. 대한해협 인근은 조초성 산호가 분포하는 북방한계에 해당하며, 산호가 서식하는 극한 환경에 해당하기 때문에 이 지역에서 조초성 산호의 군집구조는 주변의 환경변화에 매우 민감하다. 따라서 산호의 군집구조 및 그 변화를 조사하면, 한반도 근해의 기후 변화의 과거 역사 및 방향의 예측이 가능하다. 최근 제주도에서 보고된

*Alveopora japonica*의 확장은 대한해협 내에서 산호 군집 분포에 실제로 변화가 일고 있음을 보여 주는 사례로, 최근의 해양환경과 생태계 변화의 지속적 모니터링이 필요함을 시사한다.

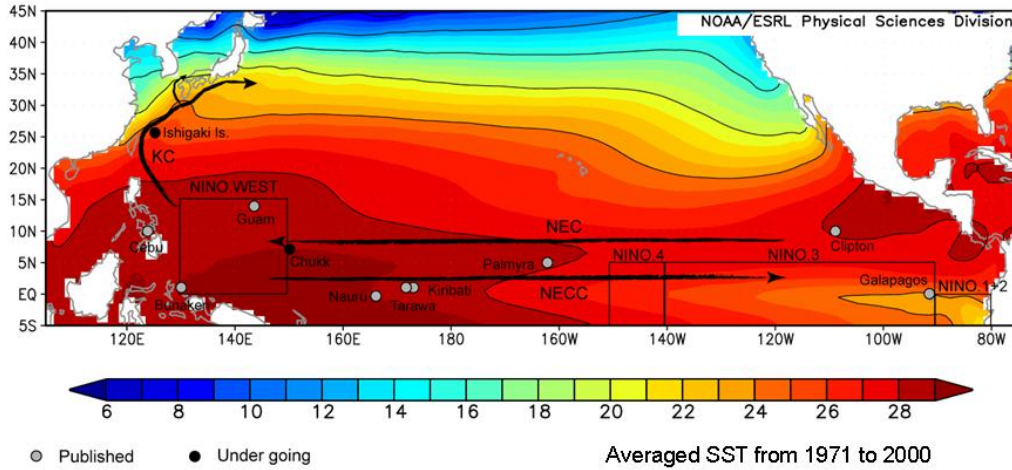


그림 2. 태평양지역의 연평균 수온분포와 산호를 이용해 100년 이상의 기간에 걸친 고기후 복원 연구가 수행된 지역

이 연구는 대한해협 지역에서 조초성 산호의 분포를 조사하고, 이 지역에 분포하는 조초성 산호의 골격이 계절/연 단위의 고수온 및 몬순 복원에 활용할 가능성을 평가하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 대한해협에 위치한 이끼섬에서 채취한 현생 산호와 화석 산호 시료를 대상으로 Sr/Ca 분석을 실시하였다. 또한 산호 군락의 현재 분포와 그 변화를 추적하기 위한 모니터링 지역의 선정을 위해 제주도에서 현장 조사가 이루어졌다. 이 연구는 이 지역이 전 지구적 환경변화에 따라 어떤 변화를 보이는 지에 대한 이해를 증진시킬 것이며, 이를 통해 전 지구적 기후변화에 대응하기 위한 정책 마련을 위한 기초 자료를 제공할 수 있다.

2) 연구방법 및 이론

가. 산호 분포 조사

기존에 보고되었던 산호종 외의 새로운 경산호의 존재 여부를 확인하고, 경산호 군락의 분포 변화를 추적하기 위한 모니터링 사이트 선정을 위해 제주도의 섯섬 일대에서 현장 조사를 실시하였다.

나. *Alveopora japonica*(거품돌산호)의 분포 특성 연구

*Alveopora japonica*는 분포 지역이 매우 한정되어 있어 일본의 태평양 연안해와 대한해협, 대만 인근에서만 발견되며, 기후 변화에 의해 생존에 위협을 받고 있다 (Sheppard *et al.*, 2008). 그러나 제주 해역에서는 90년대 이후 분포가 급격히 확장되고 있음이 해녀들에 의해 목격되었다. 이는 기후 변화로 인한 제주 해역의 수온 상승과 그로 인한 생태계 변화에 의한 결과로 생각된다.

제주 해역의 *Alveopora*의 분포 변화를 생태적으로 이해하기 위하여 2010년 3월 9일 제주도 북쪽 해안의 귀덕리(33°17'44.53"N, 126°46'13.46"E)와 남쪽의 신흥리(33°26'56.60"N, 126°17'33.56"E)에서 거품돌산호의 분포조사가 수행되었다(그림 3). 두 지역의 수심 10 m 지역 1 m x 10 m 면적에 분포하는 모든 거품돌산호를 채취하였으며, 이들 산호의 크기별 연령을 결정하기 위해 0.5 cm 두께의 슬랩을 제작하여 연엑스선 촬영을 실시하였다. 또 *Alveopora*는 골격 밀도가 매우 낮아 연엑스선 사진만으로 연령을 판단하기에는 모호하므로 Sr/Ca의 계절에 따른 주기성을 연령 결정에 함께 이용하였고, 이를 위해 산호 골격의 theca wall만을 이용한 엑스선 형광분석(X-ray Fluorescence, XRF)을 실시하였다 (그림 4). XRF 코어스캐너는 부시료 채취나 전처리 과정의 복잡한 과정 없이 원소의 상대적 함량을 측정할 수 있어, 정량분석에는 적합치 않으나 습식 분석에 비해 빠르게 Sr/Ca의 계절 변화 경향만을 파악하는 데에 효과적이다.

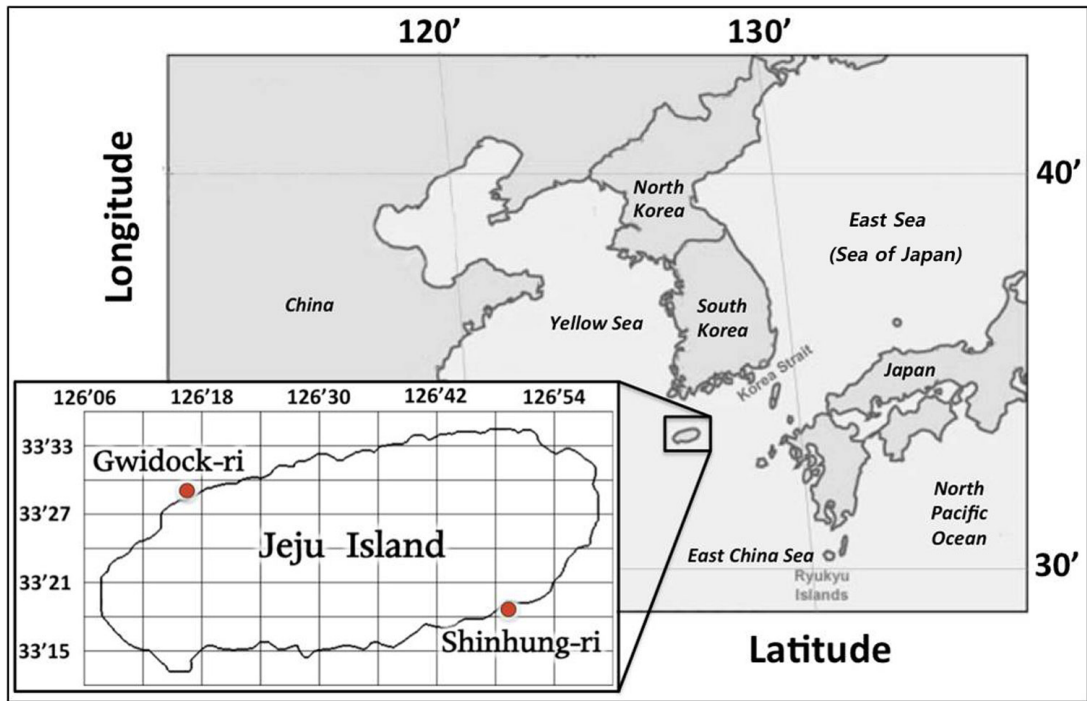


그림 3. 제주 해역 *Alveopora* (거품돌산호) 분포 조사지역

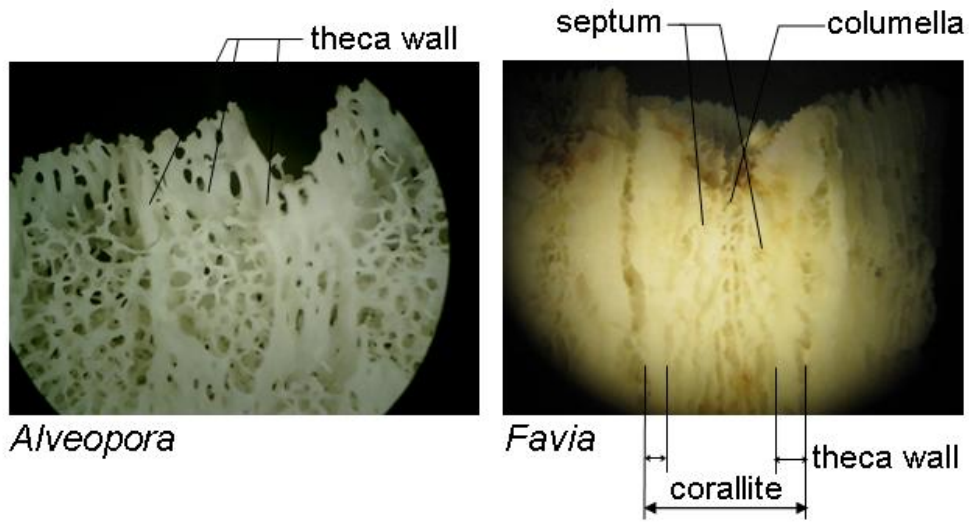


그림 4. *Alveopora*와 *Favia*의 골격사진. Corallite의 직경은 *Alveopora*와 *Favia*가 각각 5mm와 10mm 내외임.

다. 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.

라. 현생, 화석 산호의 지화학 분석

2007년 대한해협 내에 위치한 이끼섬(34°48'N, 129°39'E)에서 90 cm 길이의 현생 *Favia* 산호 코어와 550 cm의 퇴적물 코어 내의 5 cm 화석 *Favia* 시료를 획득하였다 (그림 5). 채취된 산호 시료를 성장 방향에 평행한 0.5cm 정도의 슬랩으로 제작하였고, M-40(SOFTEX Co.)를 이용하여 연엑스선 촬영을 실시하였다. 연엑스선 사진에서 가장 좋은 연속성을 보이는 하나의 corallite를 택해 분석 대상으로 선정하였다. 이 중 현생 산호에 대해서는 실측 수온 기록을 보유한 기간에 자랐다고 생각되는 상부 21 cm에 대한 Sr/Ca 분석을 실시하였다 (그림 6).

전통적으로 산호를 이용한 표층수의 수온 복원에 널리 이용되어 왔던 산호 골격 내의 산소 동위원소비 ($\delta^{18}\text{O}$)는 수온 뿐 아니라 해수의 동위원소조성에 의해서도 결정된다. 해수의 산소 동위원소비는 장기적으로는 극지방의 빙하량에 의해, 그리고 단기적으로는 담수의 유입, 강수, 증발에 의해 변화한다. 그러나 해수 중 Sr, Ca의 체류 시간(residence time)은 매우 길어(~5 Ma, 1 Ma, Broecker and Peng, 1982) 그 농도가 쉽게 변하지 않고, 담수가 유입된다 해도 그 비인 Sr/Ca에 미치는 영향은 무시할만한 수준이라고 알려져 있다(McCulloch and Esat, 2000; Shen et al., 2005). 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 산호 골격 내의 Sr/Ca값이 담수의 희석 등에 영향을 받지 않고 온도만의 함수로 변함을 보인 후 신뢰할 수 있는 추적자로서 널리 이용되기 시작했다.

덴탈 드릴을 이용하여 대상 corallite 내부의 septa를 제거하고 theca wall만을 분석에 이용하였다 (그림 4). 시료는 5 cm 간격으로 절단하여 증류수와 함께 냉동하였고, Cryostat을 이용하여 140 μm 간격으로 부시료를 채취하여 동결건조 하였다. 획득한 부시료는 4 mM 질산과 삼차증류수로 초음파 세척하였으며, Ca 10 ppm 농도로 희석하여 분석하였다. Sr/Ca 분석은 해양연구원이 보유한 ICP-OES(Perkin-Elmer Optima DV3300)를 이용하여 실시하였다.

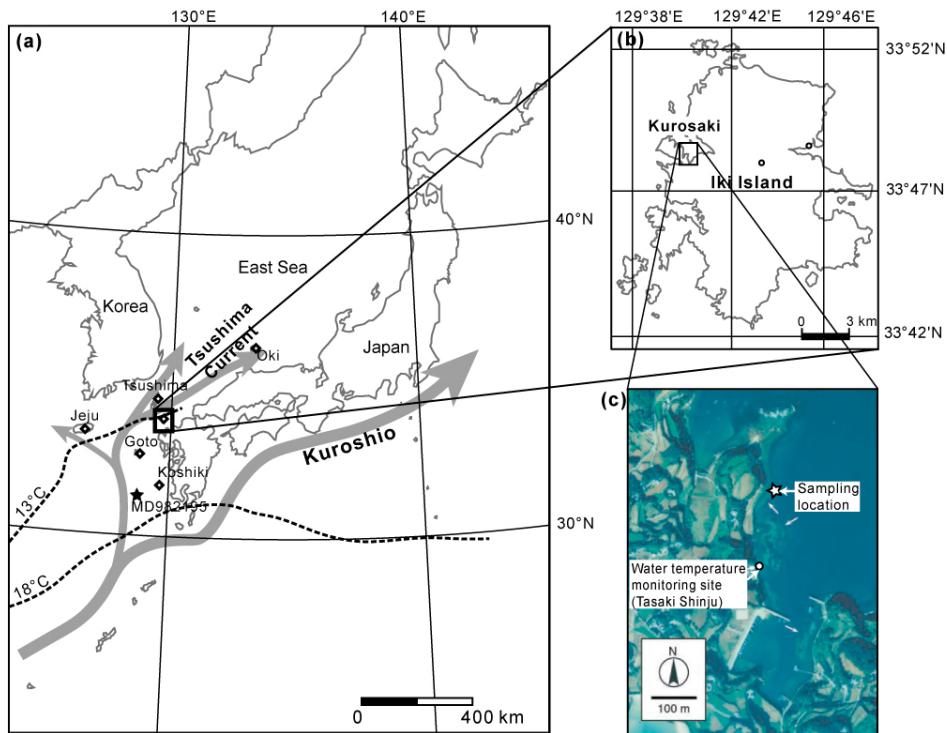


그림 5. 지화학 분석 및 고수온 복원연구에 사용한 Favia 산호의 채취정점

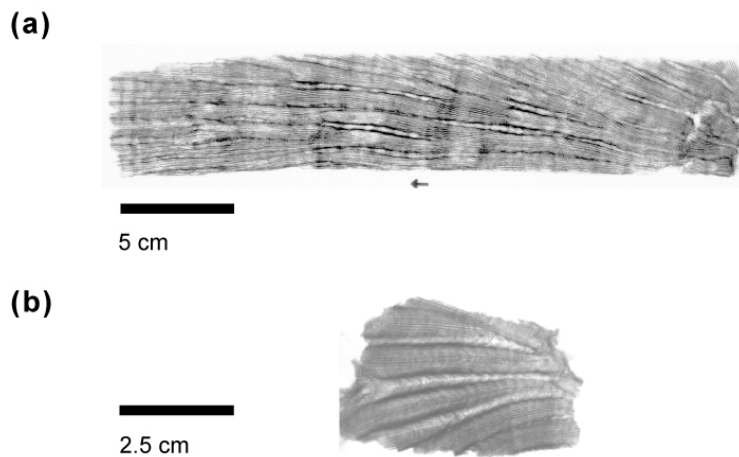


그림 6. (a) 현생 산호와 (b) 2,600년 전의 화석 산호의 연엑스선 사진.

3) 결과 및 토의

가. 제주 해역에 분포하는 경산호종 파악과 모니터링 사이트 선정

2011년 6월 경산호의 기후변화에 따른 경산호의 확산속도를 정량화하기 위한 노력의 일환으로 제주 해역 산호의 장기모니터링 정점 선정을 위한 산호 분포 조사를

서귀포 해역 싹섬지역에서 수행하였다. 2007년 서귀포항 주변, 범섬과 차귀도 일대에서는 *Alveopora japonica*, *Oulastrea crispata*, *Montipora millepora*, *Psammocora sp.*, *Psammocora nierstraszi*, *Goniopora sp.*, *Acanthastrea sp.* 등 총 7개의 경산호 종이 분포하는 것으로 확인되었다(그림 7). 그리고 이번 현장조사에서 *Psammocora superficialis* 가 새롭게 발견되었다.



그림 7. 제주도 해역에서 발견된 경산호

금번 조사를 통해 경산호의 분포 변화의 장기 모니터링이 가능한 지역을 싹섬 지역에서 선정하였다. 수심 약 10m의 평탄한 지역으로 이 지역에는 장기 수온변화를 관측하기 위한 수온측정기 및 3m x 3m 크기의 quadrat가 설치될 예정이다. 이 정점에서는 일년에 한번 내지 두 번의 현장조사가 실시될 예정이며, 체계적인 사진 촬영 및 분석을 통해 이 대표구역에서 산호 군집의 변화 양상에 대한 연구를 수행할 계획이다(그림 8).



그림 8. 제주 섯섬 인근에 설치될 장기모니터링 정점에서 조사활동에 이용될 사진 촬영용 quadrat의 모습

(나) *Alveopora*의 분포 확장

*Alveopora japonica*는 제주 인근 해역에서 발견되는 조초성 산호종들이 대개 기반암 표면을 피복하는 형태로 나타나는 것과는 달리 괴상의 형태를 보이며 서식한다. 따라서 *A. japonica*는 제주에 분포하는 산호종 중 고기후 복원에 사용될 수 있는 유일한 종으로 판단되어 그 가능성을 평가한 바 있다(Hyeong et al., 2008). 이 연구에서 *A. japonica*의 골격 밀도와 골격 내 Sr/Ca비 변화가 수온의 연중 변화를 반영함이 확인되었으므로 이를 이용한 연령 결정이 가능하다.

*Alveopora*의 연엑스선 사진에서 연성장 밴드를 확인할 수 있고 XRF 스캔 결과에서도 Sr/Ca의 변동을 나타내나 이를 근거로 정확한 연령을 결정하기에 어려움이 있다(그림 9). 그림 9의 연엑스선 사진에서, 뚜렷한 성장선이 4-5번 관찰되나 희미하거나 연속성이 작은 성장선 역시 빈번히 나타난다. 희미한 성장선은 낮은 수온에

의한 성장 속도의 감소 뿐 아니라 환경 요인이나 생식 등에 의한 스트레스에 의해서도 나타날 수 있다. Alveopora의 골격 밀도가 매우 낮고 구조가 성기어 계절적 변화가 다른 산호종에 비해 뚜렷하게 나타나지 않는 것도 하나의 원인이 될 수 있다. 또한 이러한 골격 구조 탓에, XRF 코어 스캔 시 산호 시료의 표면이 불균질하여 시료와 슬릿의 접촉에 영향을 받아 분석 오차가 생겼을 수 있다(Jansen *et al.*, 1998; Weltje and Tjallingii, 2008). 이러한 요인들이 연엑스선 촬영 결과와 XRF 스캔 결과에 얼마만큼의 영향을 미쳤을지 평가하는 데에는 어려움이 있고, 따라서 발견되는 모든 성장밴드 그리고 Sr/Ca의 한 주기를 각각 1년간의 기록으로 간주하였다. 따라서 이번 연구에서 제시한 연령은 실제 연령보다 높을 가능성이 크다.

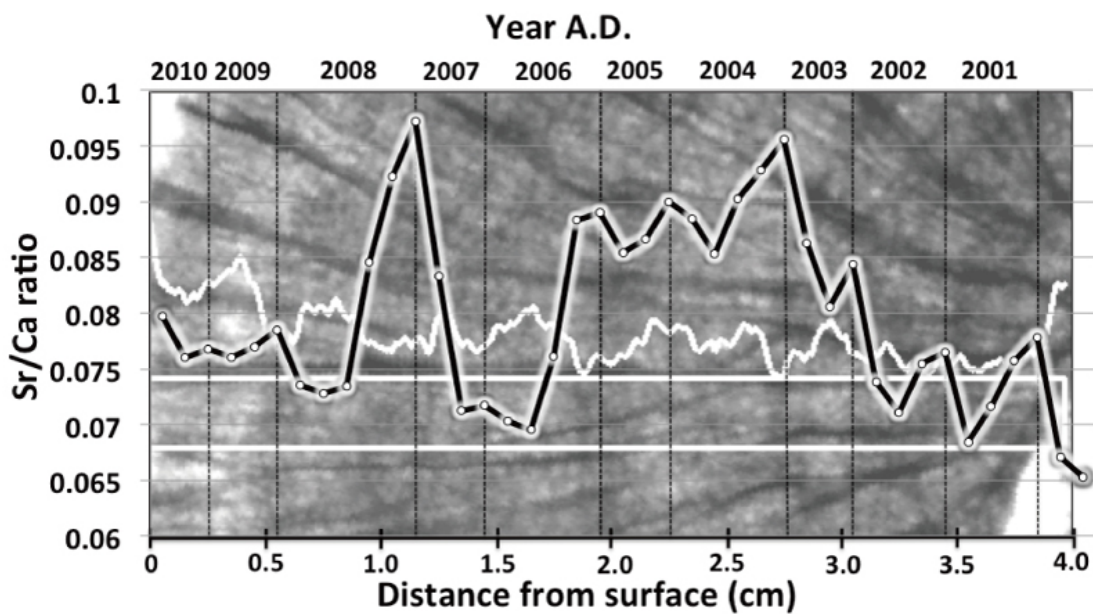


그림 9. XRF로 측정된 Alveopora 대표 시료의 Sr/Ca비(검은 실선) 변화와 골격의 밀도변화 (흰색 실선)

이렇게 산정한 제주 분포 Alveopora의 연령은 평균 4.5년 최대 12.4년으로 나타났으며, 3-4년의 연령을 보이는 산호가 최대로 분포하고 있다(그림 10). 이러한 양상은 기후변화에 따른 산호의 증가 추세를 나타내기 보다는 Alveopora의 생태적인 특성을 반영하는 것으로 판단된다. 또한 Alveopora의 짧은 기대수명은 이 종이 작은 개체로서만 존재하는 이유를 설명하며, 결과적으로 초를 형성할 만큼 지속적인 성장을 하지 못하는 것으로 생각된다.

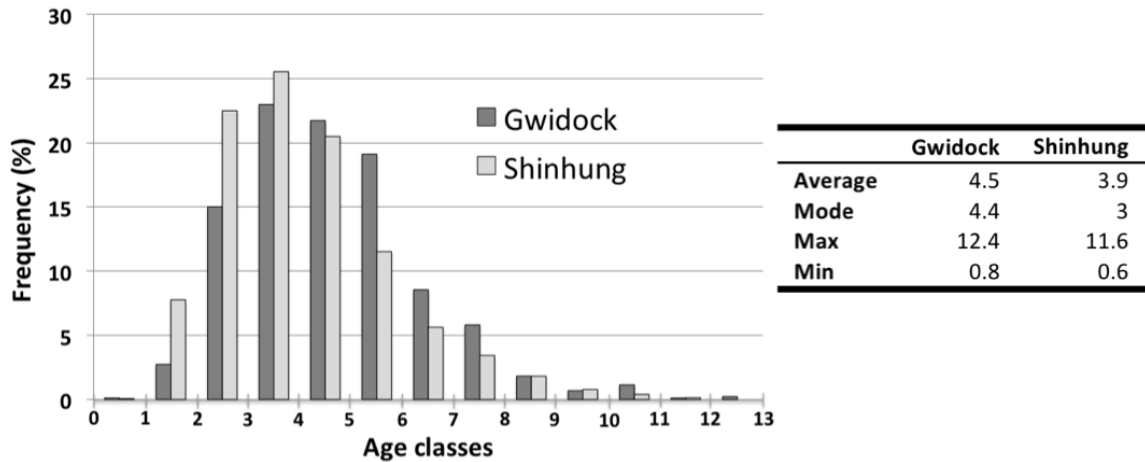


그림 10. 골격 연엑스선 사진과 Sr/Ca로 산정한 제주 분포 Alveopora의 연령 분포

동해, 동중국해와 일본의 태평양 연안 해역에서의 조사 결과, 지난 100년간 수온이 0.7°C에서 1.7°C가량 상승하였고, 이는 지구의 평균 표층수온 상승률인 0.5°C보다 높다(그림 11). 겨울의 표층수온 상승은 이보다 더욱 급격하여 지난 100년간 1.1°C-1.6°C의 변화를 보였고, 조초성 산호 분포의 북방 한계는 연 최저수온에 크게 좌우되므로 이에 따른 일본 주변의 산호 군락의 변화 역시 보고되었다(Yamano *et al.*, 2011). 따라서 Alveopora의 확장 외에도 제주 해역에서의 산호 분포나 종 조성의 변화가 계속 진행되리라 판단되며, 이에 따른 생태계의 변화가 예상되는 만큼 산호 군락의 변화에 대한 지속적 모니터링이 필요하다. 특히, 수온 상승과 함께 제주해역의 해초지대가 급격히 감소하는 것으로 확인되었으며, Alveopora는 해초가 사라진 지역에서 점차 우점 생물로 확산하는 것으로 판단된다.

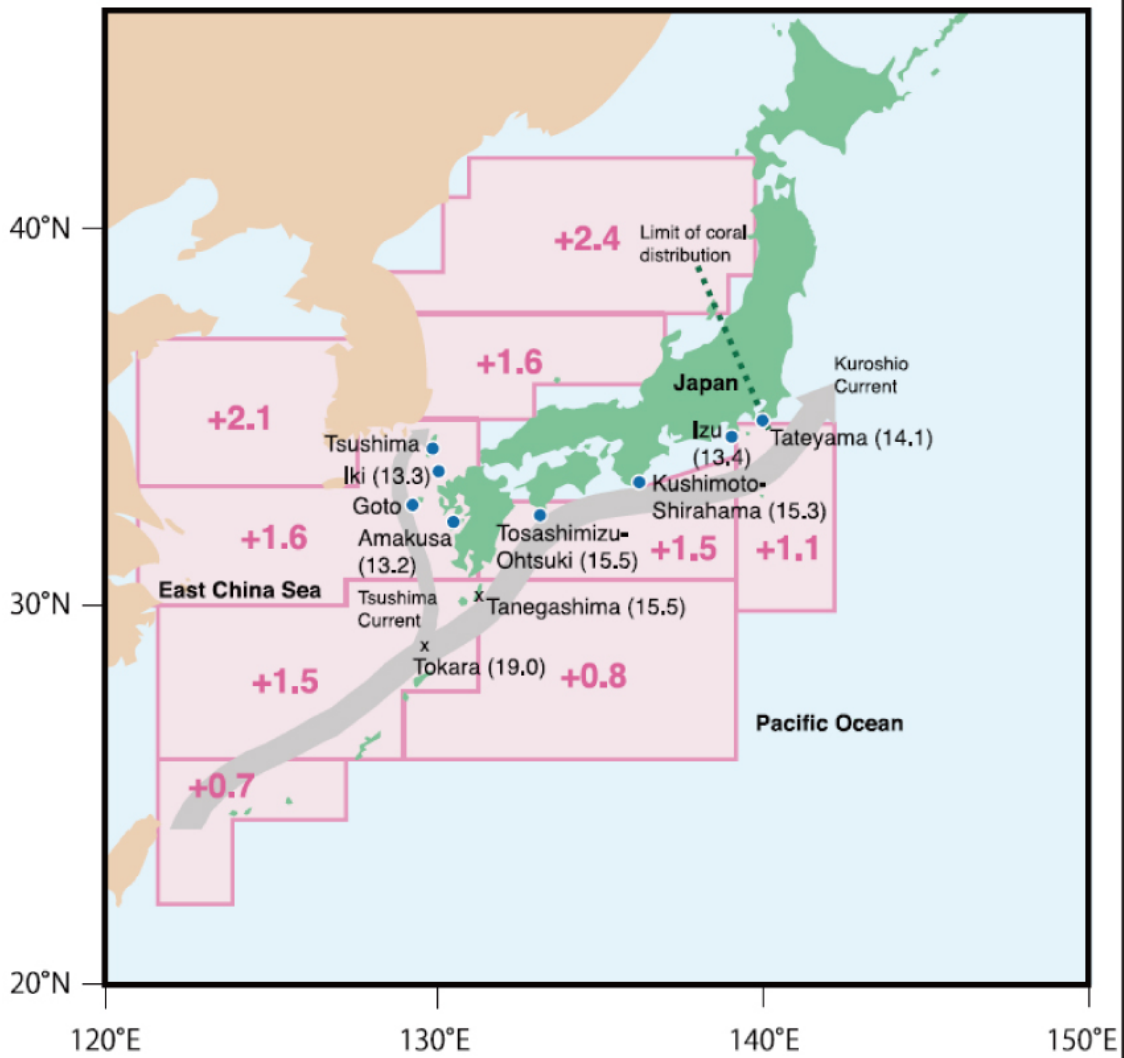


그림 11. 우리나라 인근에서 관측된 지난 100년간의 평균 수온변화 (from Takatsuki et al., 2007)

다. 산호의 지화학 조성

열대-아열대 지역에서 표층수온의 추적자로서 널리 이용되고 있는 석산호의 중위도 적용 가능성을 평가하기 위해, 대한해협에 위치한 일본 이끼섬 (34°48'N, 129°39'E)에서 285mm의 현생 *Favia* 산호와 50mm 길이의 화석 *Favia* 산호 골격을 획득하여 이들의 지화학 분석을 실시하였다(그림 5).

(가) 산호 골격의 연성장밴드와 화석산호의 변질여부 확인

현생 산호와 화석 산호의 연엑스선 촬영 결과, 연성장밴드를 명확히 보임을 확인하였고 속성 작용에 의한 변질을 받은 것으로 추정되는 어떠한 밀도 이상도 발견되지 않았다(그림 6a). 연성장밴드는 산호가 주변 해양환경의 변화를 골격의 침전 속도와 그에 따른 밀도에 반영하고 있음을 의미하며, 수온 등의 환경 조건을 지화학 조성에도 반영할 가능성을 지시한다. 또한 탄소연대측정을 통해 화석산호의 연령을 2,820 14C year(보정연대 2670-2520년)로 결정하였고, 아라고나이트 골격이 방해석으로 치환되지 않았음을 X선 회절분석을 통해 확인하였다.

(나) 현생 *Favia* 산호를 이용한 Sr/Ca-SST 관계식

이러 실시한 지화학 분석에서도 Sr/Ca비가 계절에 따른 변화를 보였다(그림 12). 분석된 상부 150mm 길이의 현생 *Favia*의 Sr/Ca비는 9.01~9.76 mmol/mol (avg. 9.35 mmol/mol)의 범위를 가지며 5cm 길이의 화석 *Favia*는 9.21~9.71 mmol/mol (avg. 9.52 mmol/mol)의 범위를 갖는다. 분석된 현생 산호 골격의 Sr/Ca비는 21회의 연변화 주기성을 보였으며, 1987년부터 시료가 채취된 2007년까지 21년간 성장한 것으로 밝혀졌다. 그리고 화석 산호는 진폭의 변화가 불확실하지만, 약 13회의 주기성을 보이는 것으로 판단할 때 약 13년간 성장한 것으로 파악되었다. 이러한 결과는 연구 지역의 상대적으로 낮은 수온에도 불구하고 골격 성장 과정에서 지화학성분에 주변의 표층수온을 반영함을 지시하며 저위도 지방에서 보고된 바와 같이 시료 골격 내 Sr/Ca비와 연구지역의 표층수온은 강한 음의 상관관계를 나타내었다. 그러나 연최저수온을 기록한 Sr/Ca의 연중 최고값은 실측된 겨울 수온이 일정한 데 비해 변동폭이 크게 나타나며, 이는 연구 지역의 낮은 수온으로 인해 성장이 일정치 못하고 더디게 일어나 야기된 결과로 보인다. 산호의 골격 성장은 공생조류인 zooxanthellae의 활동에 크게 영향을 받는데, 이 공생조류의 광합성은 낮은 온도에서 저해를 받고 이에 따라 산호의 성장이 저지됨이 보고된 바 있다(Jacques *et al.*, 1977; Jacques *et al.*, 1983; Fallon *et al.*, 1999; Cohen *et al.*, 2001). 이에 따라 14°C 이하에서 산호 골격의 성장이 멈춘다는 가정 하에 얻은 관계식 $Sr/Ca \text{ (mmol/mol)} = 10.428 - 0.049 \times SST \text{ (}^\circ\text{C)}$ 을 이용하여 현생 산호의 Sr/Ca에 적용하면 여름 수온의 최대값과 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ (1s) 범위 내에서 잘 일치한다(그림 13). 따라서 *Favia* 산호의 Sr/Ca비는 중위도 지역의 연최고기온의 복원에 이용될 수 있음을 확인하였다.

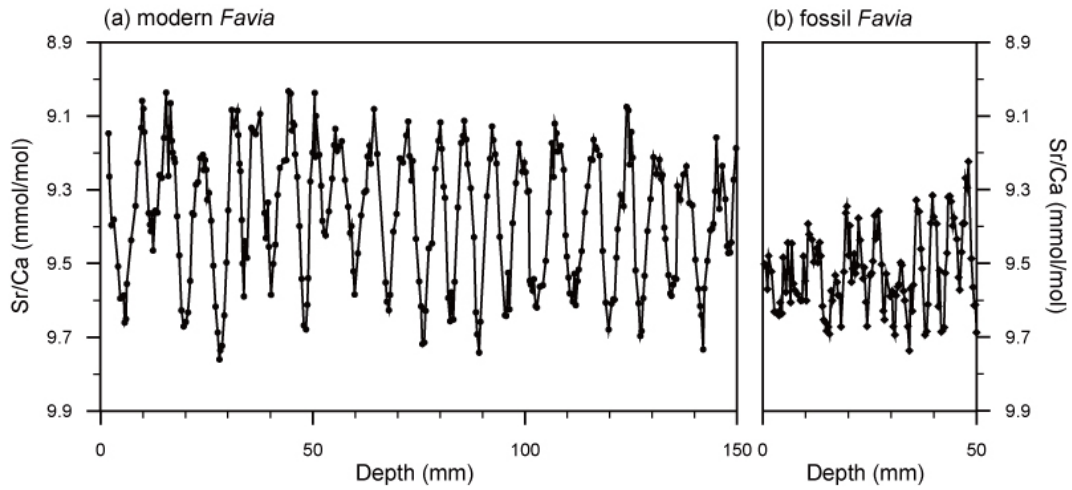


그림 12. 현생 *Favia*와 화석 *Favia*의 Sr/Ca 분석 결과

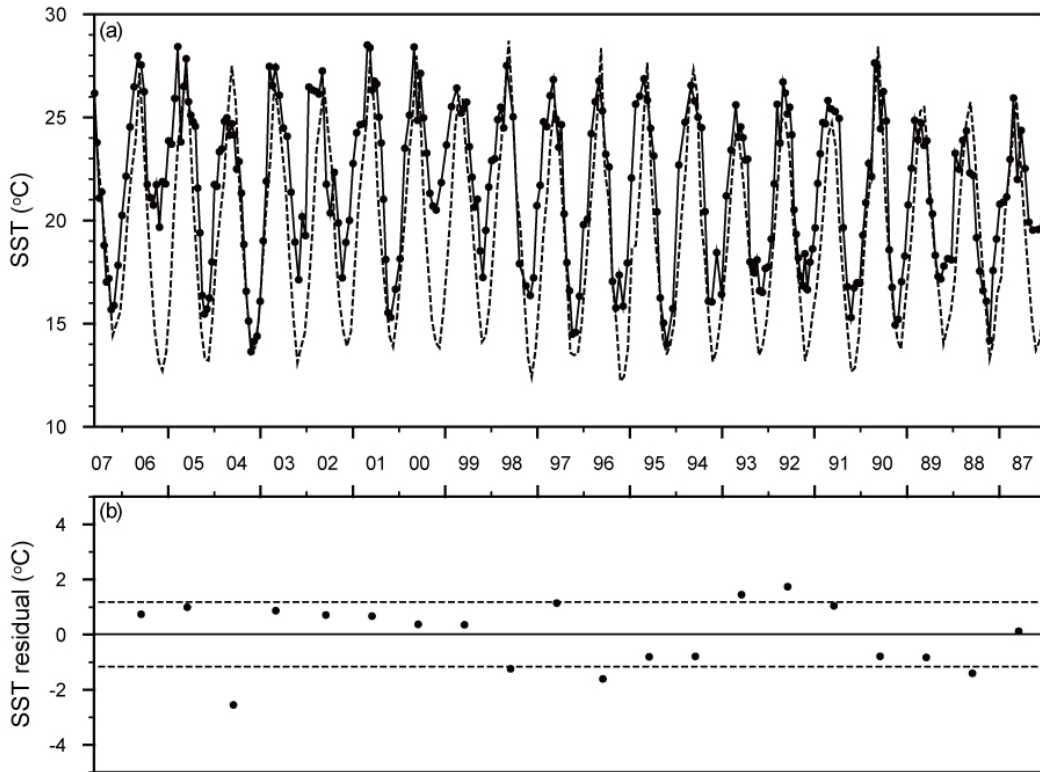


그림 13 (a) 현생산호의 Sr/Ca비를 바탕으로 복원한 표층수온(실선)과 연구지역에서 측정된 표층수온(점선). (b) 복원된 연도별 최고수온과 실측된 연최고수온의 차. 실선은 오차의 평균(0.013°C)을, 점선은 표준편차($\pm 1.17^{\circ}\text{C}$)를 나타낸다.

(다) 2,600년 전의 수온 복원

Favia 화석의 Sr/Ca비 역시 표층수온의 계절변화를 나타내었으나 변화폭이 현생 산호의 그것보다 현저히 작았으며 복원된 여름의 표층수온은 현재보다 약 5°C 작다

(그림 14). 이는 북서태평양 주변해의 마지막 최대빙하기(Last Glacial Maximum)의 수온 감소폭이 현재보다 5°C 미만으로 제시되어 온 점을 고려할 때 받아들이기 어려운 값이다. 그러나 화석 *Favia*의 성장률(3.85mm/yr)은 현생 산호(6.63mm/yr)에 비해 매우 작고, 골격의 Sr/Ca비는 크게 나타난다는 점에서 당시의 표층수온이 현재보다 낮았음은 명백하다고 생각된다. 또한 이 시기는 “Neoglacial”로 불리는 빙하의 확장이 세계 각지에서 나타났음이 알려져 있고(Bond *et al.*, 1999), 시베리아 고기압의 발달에 따른 북반구의 육상온도 감소, 동남아시아에서의 겨울 몬순 강화 및 여름 몬순 약화 등이 보고되어 있다(Wang *et al.*, 2005; Selvaraj *et al.*, 2008; Yancheva *et al.*, 2007). 또한 Ijiri *et al.* (2005)는 이끼섬과 같이 쓰시마 난류의 영향을 받는 동중국해의 북쪽에서 채취한 피스톤코어의 부유성 유공충의 $\delta^{18}\text{O}$ 과 알케논을 이용한 고수온 복원에서 2.3 ~ 2.5 ka 시기 약 1°C의 수온 하강이 있었음을 보고하였다. 따라서 연구 지역에서 ~2.6 ka의 표층수온은 현재보다 낮았으나 온도 하강 폭은 화석산호를 이용하여 복원한 값보다 작았을 것이라 생각된다.

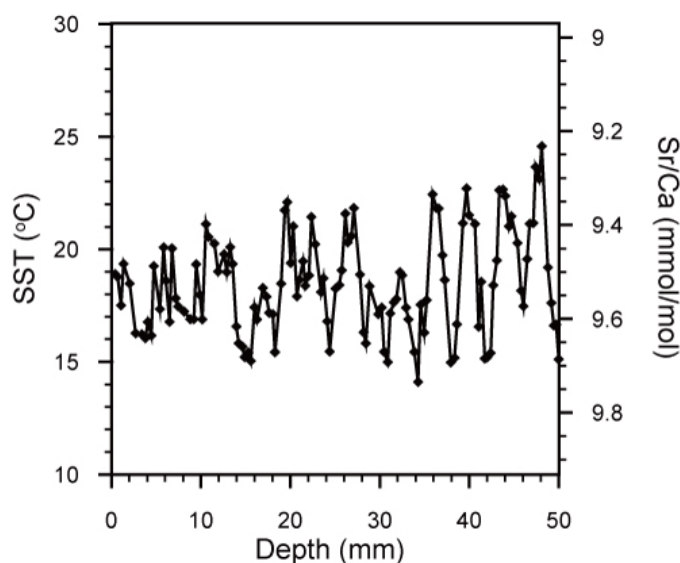


그림 14. 화석산호의 Sr/Ca비와 이를 바탕으로 얻은 2,600년 전의 표층수온

Omata *et al.* (2006)은 산호가 낮은 수온에서 성장에 심각한 피해를 받은 후 이듬해의 여름에도 제대로 성장하지 못했으며, 이러한 영향이 여름의 산소안정동위원소 값에 반영되어 이상치를 보임을 보고하였다. 따라서 2,600년 전의 산호는 현재보다 낮은 수온 조건에서 더 빈번하게 성장이 멈추거나 저해되었을 것이며, 그 이후 여름의 성장에도 영향을 받아 여름의 수온이 실제보다 낮게 복원되었을 수 있다. 이를 고려하여 최고온도를 기록한 지점인 Sr/Ca의 최소값에서 성장 저해의 가능성이 가장 낮다고 간주하였고 현재보다 약 2°C 낮은 24.6°C가 당시의 수온에 가장 가까울 것으로 생각된다.

(라) 중위도 산호의 표층수온 대리기록자로서의 적용 가능성

중위도의 조초성 산호를 이용한 고해양학적 접근이 거의 이루어지지 않은 만큼, 그 위치에 기인한 생태적 특수성을 고려할 필요가 있다. 지금까지 산호를 이용한 고수온 복원에서 지속적으로 제기되어 왔던 문제인 산호의 지화학조성에 대한 생리적 영향이 중위도 산호에서는 계절적 불균일성에 의해 더 복잡하고 크게 작용할 가능성이 높기 때문이다. 앞서 살펴보았듯 화석 산호를 이용한 고수온 복원은 산호 성장의 저해에 따른 오차를 발생시킬 수 있고, 현생 산호의 Sr/Ca를 이용하여 복원된 연구 지역의 여름 수온에서도 2004년과 같이 1°C 이상의 차이를 보이기도 한다. 이는 골격의 아라고나이트에 치환되는 Sr의 양이 단순히 온도만에 의한 함수가 아님을 지시한다.

화석 산호는 흔히 다른 고수온 프록시들에 비해 수온을 낮게 복원한다(Cohen and Hart, 2004; Corrège *et al.*, 2004; de Villiers *et al.*, 1995; Lea *et al.*, 2000; Rosenthal *et al.*, 2003). 해수의 Sr/Ca 변화, 퇴적 후의 속성 작용, 그리고 느린 성장률이 이러한 현상의 원인으로 제시되어 왔다. 이번 연구에서 해수의 Sr/Ca비에 변화를 가져올 수 있는 요인인 해수면 변화나 담수의 유입은 시료의 연령이나 채취 위치를 고려하면 그 영향이 미미했을 것이라 보이나(Martin *et al.*, 1999; Stoll *et al.*, 1999), 화석 *Favia* 시료의 박편에서 퇴적 후 골격 내에 무기적으로 침전된 아라고나이트가 최대 8%에 이르는 것을 관찰하였고, 이는 약 1.3°C의 복원온도 오차를 발생시킬 수 있는 양이다.

골격의 지화학 조성에 영향을 미치는 생물학적 요인은 화석 뿐 아니라 현생 산호에서도 고려되어야 한다. 산호 종에 따른 차이, 성장률, 생태형이나 대사 과정 등이 골격 내 Sr/Ca비에 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있으나(de Villiers *et al.*, 1994; de Villiers *et al.*, 1995; McCulloch and Esat, 2000), 이러한 다양한 요인들은 결국 골격의 성장률에 반영되는 방식으로 Sr/Ca에 영향을 미치는 것으로 생각된다(Jacques *et al.*, 1983; Cohen *et al.*, 2001; Cohen *et al.*, 2002). 골격의 성장이 빠를수록 Sr/Ca비는 낮아지며 이는 공생조류의 광합성이 원인으로 알려져 있다(Cohen *et al.*, 2002; Corrège *et al.*, 2004; de Villiers *et al.*, 1995; Weber, 1973). 이러한 영향은 느리게 성장하는 산호에 더 크게 나타나고 따라서 중위도 산호를 이용한 연구에서 중요하게 고려되어야 한다.

이처럼 중위도 지역에서는 겨울에 산호의 성장률이 급격히 감소하고, 이러한 영향이 Sr/Ca에 반영될 가능성이 현생 산호와 화석 산호 모두에서 나타났다. 따라서 현생 산호를 이용한 Sr/Ca-SST 관계식을 과거 수온 복원에 이용할 때에는 이러한 가능성을 주의 깊게 고려해야 한다. 그러나 아열대 지방에서 채취된 *Favia*를 이용한 기존 연구(Mishima *et al.*, 2009)에서 제시된 현생산호의 Sr/Ca값과 1만 6천년 전의 화석 *Favia*의 Sr/Ca 값에 적용하면 현재 실측된 표층수온과 퇴적물코아의 알케

논에서 얻어진 1만 6천년 전의 표층수온값과 잘 일치한다 (Ijiri *et al.*, 2005). 따라서 *Favia*의 Sr/Ca를 이용한 고수온 복원은 광범위한 지역에서 활용될 수 있으리라 생각된다.

4) 결론

제주 지역에서 경산호의 분포 확산을 정량화하기 위한 장기 모니터링 정점의 선정을 위해 현장조사를 실시하였으며, *Alveopora japonica*, *Oulastrea crispata*, *Montipora millepora*, *Psammocora sp.*, *Psammocora nierstraszi*, *Goniopora sp.*, *Acanthastrea sp.*, *Psammocora superficialis* 등 총 8개의 경산호 종이 분포하는 것으로 확인되었다. 또한 금번 조사를 통해 경산호의 분포 변화의 장기 모니터링이 가능한 지역을 선택 인근 지역에서 선정하였다.

제주에 분포하는 *Alveopora*의 연령은 평균 4-5년 최대 12.4년으로 나타났으며, 3-4년의 연령을 보이는 산호가 최대로 분포하고 있다. 이는 *Alveopora*가 생태적으로 짧은 기대수명을 가지는 결과 때문인 것으로 확인되었으며, 이는 이 종이 작은 개체로서만 존재하는 이유를 설명한다. 결과적으로 *Alveopora*는 산호초를 형성할 만큼 지속적인 성장을 하지 못하는 것으로 생각된다. 제주지역에서 *Alveopora*가 급격히 증가하는 이유는 수온 상승과 함께 제주해역의 해초지대가 급격히 감소하기 때문이며, *Alveopora*는 해초가 사라진 지역에서 점차 우점 생물로 확산하는 것으로 판단된다.

중위도 해역에서 고수온 복원을 위한 추적자를 개발하기 위해 쓰시마해협에 위치한 일본 이끼섬에서 채취한 *Favia* 산호 골격의 Sr/Ca 비를 분석하였다. 14°C 이하에서 산호 골격의 성장이 멈춘다는 가정 하에 얻은 분석된 Sr/Ca 값과 관측한 수온을 관계를 분석한 결과 산호의 Sr/Ca비는 $Sr/Ca \text{ (mmol/mol)} = 10.428 - 0.049 \times SST \text{ (}^\circ\text{C)}$ 의 관계성을 가지고 변화하는 것으로 나타났다. 이 식을 이용하여 현생 산호의 Sr/Ca에 적용하여 복원한 여름 수온은 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ (1s) 범위 내에서 측정값과 잘 일치한다. 이러한 결과는 *Favia* 산호의 Sr/Ca비가 중위도 지역의 연 최고기온의 복원에 이용될 수 있음을 지시한다.

아열대 지방에서 채취된 *Favia*를 이용한 기존 연구 (Mishima *et al.*, 2009)에서 제시된 현생산호의 Sr/Ca값과 1만 6천년 전의 화석 *Favia*의 Sr/Ca 값에 이번 연구에서 얻은 식을 적용할 때 현재 실측된 표층수온과 퇴적물코아의 알케논에서 얻어진 1만 6천년 전의 표층수온값과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 *Favia*의 Sr/Ca를 이용한 고수온 복원은 광범위한 지역에서 활용될 수 있으리라 생각된다.

5) 인용문헌

- Asami, R., Yamada, T., Iryu, Y., Meyer, C.P., Quinn, T.M., Paullay, G., 2004. Carbon and oxygen isotopic composition of a Guam coral and their relationships to environmental variables in the western Pacific. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 212, 1-22.
- Asami, R., Yamada, T., Iryu, Y., Quinn, T.M., Meyer, C.P., Paullay, G., 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. *Journal of Geophysical Research* 110, C05018. doi: 10.1029/2004JC002555.
- Beck, J.W., Edwards, R.L., Ito, E., Taylor, F.W., Recy, J., Rougerie, F., Joannot, P., Henin, C., 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science* 257, 644-647.
- Boiseau, M., Juillet-Leclerc, A., Yiou, P., Salvat, B., Isdale, P., Guillaume, M., 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. *Paleoceanography* 13, 671-685.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G., 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene, *Science* 294 (5549), 2130-2136.
- Broecker W.S., Peng T. H., 1982. *Tracers in the Sea*. Eldigio Press, Palisades, NY.
- Cohen, A.L., Layne, G.D., Hart, S.R., Lobel, P.S., 2001. Kinetic control of skeletal Sr/Ca in a symbiotic coral: Implications for the paleotemperature proxy. *Paleoceanography* 16, 20-26.
- Cohen, A.L., Owens, K.E., Layne, G.D., Shimizu, N., 2002. The effect of algal symbiosis on the accuracy of Sr/Ca paleotemperatures from coral. *Science* 296, 331-333.
- Cohen, A.L., Hart, S.R., 2004. Deglacial sea surface temperatures of the western tropical Pacific: A new look at old coral. *Paleoceanography* 19, PA4031, doi:10.1029/2004PA001084.
- Cole, J.E., Fairbanks, R.G., G.T. Shen., 1993. Recent variability in the Southern Oscillation: isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science* 260, 1970-1973.
- Corrège, T., Gagan, M.K., Beck, J., Burr, G., Gabioch, G., Le Cornec, F., 2004. Interdecadal variation in the extent of South Pacific tropical waters during

- the Younger Dryas event. *Nature* 428, 927-929.
- Corrège T, 2006. Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232, 408-428.
- de Villiers, S., Shen, G.T., Nelson, B.K., 1994. The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite-Influence of variability in $(\text{Sr}/\text{Ca})_{\text{seawater}}$ and skeletal growth parameters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 197-208, doi:10.1016/0016-7037(94)90457-X.
- de Villiers, S., Nelson, B.K., Chivas, A.R., 1995. Biological controls on coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ reconstructions of sea-surface temperatures. *Science* 269, 1247-1249.
- Eugen, M.R., Wallace, J.M., 1983. Meteorological aspects of the El Niño/Southern Oscillation. *Science* 222, 1195-1202.
- Evans, M.N., Fairbanks, R.G., Rubenstone, J.L., 1998. A proxy index of ENSO teleconnections. *Nature* 394, 732-733.
- Evans, M.N., Kaplan, A., Cane, M., 2000. Intercomparison of coral oxygen isotope data and historical sea surface temperature (SST): potential for coral-based SST field reconstructions. *Paleoceanography* 15, 551-563.
- Fallon, S.J., McCulloch, M.T., Woessik, R.v., Sinclair, D.J., 1999. Corals at their latitudinal limits: laser ablation trace element systematics in *Porites* from Shirigai Bay, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 172, 221-238.
- Gagan, M.K., Ayliffe, L.K., Beck, J.W., Cole, J.E., Druffel, E.R.M., Dunbar, R.B., Schrag, D.P., 2000. New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews* 19, 45-64.
- Gong, D. Luterbacher, J., 2008. Variability of the low-level cross-equatorial jet of the western Indian Ocean since 1660 as derived from coral proxies. *Geophysical Research Letters* 35, L01705, doi:10.1029/2007GL032409.
- Hyeong K, Shimamura, M, Watanabe, T, Yamano, H, Sugihara, K(2008) Evaluation of Jeju/Tsushima Hermatypic Corals as Sea Surface Temperature (SST) Recorders. *Ocean and Polar Research* 30(3): 351-359.
- Ijiri, A., Wang, L., Oba, T., Kawahata, H., Huang, C., 2005. Paleoenvironmental changes in the northern area of East China Sea during the past 42,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 219, 239-261.
- Jacques, T.G., Pilson, M.E.Q., Cummings, C., Marshall, N., 1977. Laboratory observations on respiration, photosynthesis, and factors affecting calcification in the temperate coral *Astrangia danae*. In: Taylor, D.L. (Ed.), Third International Coral Reef Symposium 2. University of Miami, Miami, FL, pp.

455-461.

- Jacques, T.G., Marshall, N., Pilson, M.P.Q., 1983. Experimental ecology of the temperate scleractinian coral *Astrangia danae*. *Marine Biology* 76, 135-148.
- Jansen, J.H.F., Van der Gaast, Koster, B., Vaars, A.J., 1998. CORTEX, a shipboard XRF-scanner for element analyses in split sediment cores. *Marine Geology* 151, 143-153.
- Lea, D.W., Pak, D.K., Spero, H.J., 2000. Climate impact of the late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science* 289, 1719-1724.
- Martin, P.A., Lea, D.W., Mashiotta, T.A., Papenfuss, T., Sarnthein, M., 1999. Variation of foraminiferal Sr/Ca over Quaternary glacial-interglacial cycles: Evidence for changes in mean ocean Sr/Ca? *Geochemistry, Geophysics, Geosystem* 1, Paper number 1999GC000006.
- McCulloch, M.T., Esat, T., 2000. The coral record of last interglacial sea levels and sea surface temperatures. *Chemical Geology* 169, 107-129.
- Mishima, M., Kawahata, H., Suzuki, A., Inoue, M., Okai, T., Omura, A., 2009. Reconstruction of the East China Sea palaeoenvironment at 16 ka by comparison of fossil and modern Faviidae corals from the Ryukyus, southwestern Japan. *Journal of Quaternary Science* 24, 928-936.
- Omata, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Nojima, S., Minoshima, K., Hata, A., 2006. Oxygen and carbon stable isotope systematics in *Porites* coral near its latitudinal limit: The coral response to low-thermal temperature stress. *Global and Planetary Change* 53, 137-146.
- Philander, S.G.H., 1983. El Nino Southern Oscillation phenomena. *Nature* 302, 295-301.
- Quinn, T.M., Taylor, F.W., Crowley, T.J., 1993. A 173 year stable isotope record from a tropical south pacific coral. *Quaternary Science Reviews* 12, 407-418.
- Rosenthal, Y., Oppo, D.W., Linsley, B.K., 2003. The amplitude and phasing of climate change during the last deglaciation in the Sulu Sea, western equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters* 30, doi:10.1029/2002GL016612.
- Selvaraj, K., Chen, C.T.A., Lou, J.Y., 2008. Holocene weak summer East Asian monsoon intervals in subtropical Taiwan and their global synchronicity. *Climate of the Past Discussions* 4, 929-953.
- Shen, C.C., Lee, T., Chen, C.Y., Wang, C.H., Dai, C.F., Li, L.A., 1996. The calibration of D[Sr/Ca] versus sea-surface temperature relationship for *Porites* corals, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 3849-3858.
- Shen, C.C., Liu, K.K., Lee, M.Y., Lee, T., Wang, C.H., Lee, H.J., 2005. A novel method for tracing coastal water masses using Sr/Ca ratios and salinity in

- Nanwan Bay, southern Taiwan, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65, 135-142.
- Sheppard, A., Fenner, D., Edwards, A., Abrar, M., Ochavillo, D., 2008. *Alveopora japonica*. In: IUCN 2010. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2010.4.
- Stoll, H.M., Schrag, D.P., Clemens, S.C., 1999. Are seawater Sr/Ca variations preserved in Quaternary foraminifera? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 3535-3547.
- Sun, Y., Sun, M., Wei, G., Lee, T., Nie, B., Yu, Z., 2004. Strontium contents of *Porites* coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century. *Paleoceanography* 19, PA2004, doi:10.0007/s00338-004-0467-x.
- Takatsuki, Y. et al. (2007) Long-term trends in sea surface temperature adjacent to Japan. *Sokko Jiho* 74, S33-S87.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M.J., Dykoski, C.A., Li, X., 2005. The Holocene Asian Monsoon: Links to Solar Changes and North Atlantic Climate. *Science* 308, 854-857.
- Weber, J.N., 1973. Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37, 2173-3190.
- Weltje, G.J., Tjallingii, R., 2008. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth and Planetary Science Letters* 274, 423-438.
- Yamano, H., Sugihara, K., Nomura, K., 2011. Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters* 38, L04601, doi:10.1029/2010GL046474.
- Yancheva, G., Nowaczyk, N.R., Mingram, J., Dulski, P., Schettler, G., Negendank, J.F.W., Liu, J., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Haug, G.H., 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature* 445, 74-77.

작성양식 4 : 연구수행관련 논문발표목록서

연구수행관련 논문발표목록서

재단사업명	과제번호	소 속	성 명
국제협력연구	F01-2009-000-10213-0	한국해양연구원	형 기 성

가. 논 문

저 자 명 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
Lindahl, P., Andersen, M.N., Keith-Roach, M., Worsfold, P., Hyeong, K., Choi, MS., Lee, S.H.	Spatial and temporal distribution of Pu in the Northwest Pacific Ocean using modern coral archives	Environmental International	13				in press
Seo, I., Lee, Y.I., Watanabe, T., Yamano, H., Shimamura, M., Yoo, C.M., Hyeong, K.	Sr/Ca ratios in modern Favia corals from the Korea Strait; implications for application of coral Sr/Ca thermometry in a middle latitude region						in progre ss

나. Proceedings

저자명 First Author 기타 Author(s)	제 목 (발표내용)	회의명/계재지명	집,권,호 (Vol., No)	수록면 PP. ~PP.	발표 년/ 월/일	발표장소/ 출판국가/ 기 관
Shimamura, M, Seo, I., Hyeong, K, Lee, Y.I., Yoo, C.M	High resolution paleoclimate reconstruction in Korea Strait region using Sr/Ca and oxygen isotopic ratios of scleractinian corals	추계지질과학연합학 술발표회		66-66	2009.10.29.	대한지질학회
Seo, I., Shimamura, M., Hyeong K., Lee, Y.I., Yoo, C.M	H i g h - r e s o l u t i o n paleoceanographic reconstruction in the Korea Strait region using Sr/Ca of scleractinian coral	18th International Sedimentological Congress		797-797	2010.10.01.	International Association of Sedimentolog ists
Seo, I., Shimamura, M., Hyeong K., Lee, Y.I., Yoo, C.M	Quantitative reconstruction of sea surface conditions of Korea Strait region using Sr/Ca of scleractinian coral from Iki Island, Japan	추계지질과학연합학 술발표회		153-153	2010.10.28.	대한지질학회

자 체 평 가 서

과제번호	F01-2009-000-10213-0	연구과제명	중위도 산호를 이용한 대한해협 /쓰시마해협 인근의 해양환경변화 복원연구
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 제주해역 경산호(거품돌산호)의 급격한 확산이 확인되었다. 제주 해역에서 총 8종의 경산호 분포가 확인되었으며, 향후 기후변화에 따른 경산호의 분포변화를 정량화하기 위한 기틀을 마련하였다. 또한 중위도 해역에 다량 분포하는 Favia 산호의 고기후 대리기록자로서의 평가작업이 수행되었으며, 이 산호을 고수온 복원에 사용할 수 있는 정량식을 제시하였다. 이식을 이용하면 중위도 해역은 물론 적도해역까지 고수온 복원이 가능하다. 이렇게 복원된 고기후 자료는 미래기후 예측을 위한 모델의 개발이나 우리나라 기후조건에 맞는 기후 예측 모델의 선택에 활용될 수 있다.</p>		
연구결과의 향후 기대효과	<p>본 연구를 통해 제주 해역에 서식하는 경산호의 분포 및 군집이 확인되었다. 이번 연구결과는 향후 제주해역의 산호 군집변화를 위한 정량화하기 위한 장기 모니터링의 기초 자료로 활용될 것이다. 또한 괴상산호의 지화학분석을 통해 이들이 주변환경변화를 시간의 함수로 골격내에 기록하고 있는 점이 확인되었으며, 향후 과거 해양환경변화를 복원하기위한 대리기록자로서의 활용성이 확인되었다.</p>		

연구참여인력목록서

재단사업명	과제번호	소 속	성 명
국제협력연구	F01-2009-000-10213-0	한국해양연구원	형 기 성

연구인력활용					연구인력배출현황				
구분	성 명	연구수행 중 상황	활용 기간 (년)	연구수행 시 임무	취득 학위	학위 지도 여부	현재상황		
							소속기관	학위과정	직 위
1	김형직	박사과정	2	분석		간접	부산대학교	박사	
2	서인아	석사과정	2	분석	석사	간접	서울대학교	박사	
3	김아영	학사	1	분석					
4	제종길	박사	2	현장탐사					

- ☞ 연구수행중 상황 및 취득학위는 ① Post-Doc. ② 박사 ③ 석사 ④ 석사 ⑤ 석사과정 ⑥ 학사 ⑦ 학사과정으로 구분
- ☞ 연구수행시 임무는 간략하게 작성바람.
- ☞ 현재상황은 연구수행기간동안 활용한 연구인력의 이동현황을 파악하기 위한 자료로 학위과정중 또는 취업시 상황으로 구분하여 현재의 상황을 기재바람.
- ☞ 학위지도여부는 연구수행기간동안 학위를 배출한 경우에 학위논문을 직접 지도한 경우는 “직접”, 간접지도한 경우에는 “간접” 으로 표기바람.
(단, “직접”이라고 표기한 경우는 “학위수여증명서 사본”을 첨부바람.

지적소유권 목록서

재단사업명	과제번호	소 속	성 명
국제협력연구	F01-2009-000-10213-0	한국해양연구원	형 기 성

구분	명 칭	국 명	출원일 (출원번호)	등록일 (등록번호)	공동소유자 소속·성명 (해당시)

- ※ 구분란에는 지적소유권의 종류 (특허, 실용실안, 의장 등)를 기입함.
- ※ 해당자만 작성.

연구비 집행내역서

(단위 : 원)

과제명	과제번호	소 속	성 명	총연구비	잔 액
중위도 산호를 이용한 대한해협 /쓰시마해협 인근의 해양환경변화 복원연구	F01-2009-000 -10213-0	한국해양 연구원	형 기 성	24,000,000	290

가. 1차년도 사업비 집행내역

(단위 : 원)

비 목	1차년도			
	당초계획	집행금액	잔액	
			차년도이월액	반납액
1. 인건비				
가. 내부인건비	1,440,000	1,440,000	0	
나. 외부인건비	900,000	900,000	0	
2. 직접경비				
가. 연구기자재 및 시설비	2,300,000	593,200	1,706,800	
나. 재료 및 전산처리·관리비	1,112,500	1,027,360	85,140	
다. 여비 및 교통비	4,670,600	1,757,659	2,912,941	
라. 수송비 및 수수료	152,000	152,000	0	
마. 회의비	120,000	112,120	7,880	
바. 기술정보활동비	0	0	0	
사. 연구활동진흥비	280,800	280,800	0	
3. 위탁연구비	0	0	0	
4. 간접비	1,024,100	1,024,100	0	
합 계	12,000,000	7,287,239	4,712,761	

나. 2차년도 사업비 집행내역

(단위 : 원)

비 목	2차년도				
	당초계획 (A)	전년이월 / 예산변경(B)	계획합계 (C=A+B)	집행 (D)	잔액 (E=C-D)
1. 인건비					
가. 내부인건비	1,440,000	0	1,440,000	1,440,000	0
나. 외부인건비	900,000	0	900,000	900,000	0
2. 직접경비					
가. 연구기자재 및 시설비	300,000	0	300,000	300,000	0
나. 재료 및 전산처리·관리비	2,209,500	6,859,302	9,068,802	9,068,802	0
다. 여비 및 교통비	3,573,600	-2,399,800	1,173,800	1,173,800	0
라. 수송비 및 수수료	652,000	218,459	870,459	870,459	0
마. 회의비	120,000	0	120,000	120,000	0
바. 기술정보활동비	1,500,000	34,800	1,534,800	1,534,510	290
사. 연구활동진흥비	280,800	0	280,800	280,800	0
3. 위탁연구비	0	0	0	0	0
4. 간접비	1,024,100	0	1,024,100	1,024,100	0
합 계	12,000,000	4,712,761	16,712,761	16,712,471	290

○ 연구비 잔액 반납내역

- 반납금액 :
- 반납계좌 :
- 반납일자 :

확인 연구책임자 소 속 : 한국해양연구원
성 명 : 형 기 성 (인)

주요기자재 구입목록

(단위 : 천원)

재단사업명	과제번호	소 속	성 명	총연구비
국제협력연구	F01-2009-000 -10213-0	한국해양연구원	형 기 성	24,000,000

품 명	규 격	구매가	설치장소	활용용도

- ※ 해당 연구수행기간중 연구재단 연구비로 구입한 연구기자재 활용현황을 파악하기 위한 자료임.
- ※ 구매가격이 100만원 이상인 연구기자재 구입 및 활용현황을 기재함.

국제협력연구 연구성과 집계표

과 제 번 호	F01-2009-000-10213-0	
연구책임자	소 속	한국해양연구원
	성 명	형 기 성
연구과제명	중위도 산호를 이용한 대한해협/쓰시마해협 인근의 해양환경변화 복원연구	

1. 연구논문 발표실적

년 차	국 내 학술지	국 외 학술지	국 내 학술회의	국 외 학술회의	특 허	계
1차년도			1			1
2차년도		1	1	1		3
계		1	2	1		

2. 연구인력 활용 및 양성실적

년 차	연구인력활용 (연구에 참여한 인원)			연구인력배출 (연구수행으로 학위를 취득한 인원)		계
	석사과정	박사과정	Post-doc	석사	박사	
1차년도	1	1				2
2차년도	1	1		1		3
계	2	2		1		5

3. 우수연구성과 사례

성과사례명	
사례 내용	
경제적 파급효과	
사회적 파급효과	
국가과학기술 에의 기여도	
언론보도자료 (해당시 첨부)	

이 보고서는 한국과학재단에서 지원한
국제협력연구 보고서입니다.