



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Evaluation of Jeju/Tsushima Hermatypic Corals as Sea Surface Temperature (SST) Recorders
Author(s)	Hyeong, Ki-Seong; Shimamura, Michiyo; Watanabe, Tsuyoshi et al.
Citation	Ocean and Polar Research, 30(3), 351-359 https://doi.org/10.4217/OPR.2008.30.3.351
Issue Date	2008
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57399
Type	journal article
File Information	OPR_30_351-.pdf



Note

제주/쓰시마 조초성 산호의 수온 기록자로서의 가능성 평가

형기성^{1*} · Michiyo Shimamura¹ · Tsuyoshi Watanabe² ·
Hiroya Yamano³ · Kaoru Sugihara⁴ · 김종욱¹

¹한국해양연구원 심해 · 해저자원연구부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

²호카이도대학교 과학대학원
(060-0810) N8W10, Kita-ku, Sapporo, Japan

³일본환경연구소
(305-8506) 16-2 Onogawa, Tsukuba, Kbaraki, Japan

⁴후쿠오카대학교 지구시스템과학과
(814-0180) 8-19-1 Nanakuma, Jonan-Ku, Fukuoka, Japan

Evaluation of Jeju/Tsushima Hermatypic Corals as Sea Surface Temperature (SST) Recorders

Kiseong Hyeong^{1*}, Michiyo Shimamura¹, Tsuyoshi Watanabe², Hiroya Yamano³,
Kaoru Sugihara⁴, and Jonguk Kim¹

¹Deep-sea & Marine Georesources Research Department
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Graduate School of Science
Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan

³Social and Environmental Systems Division
National Institute for Environmental Studies, Kbaraki 305-8506, Japan

⁴Department of Earth System Science
Fukuoka University, Fukuoka 814-0180, Japan

Abstract : In an effort to develop high-resolution sea surface temperature (SST) proxies for mid-latitude regions, two massive reef-building coral species, *Alveopora* and *Favia*, were collected from Jeju and Tsushima Islands, respectively. Their skeletons were subsequently analyzed for annual growth banding, Sr/Ca and Mg/Ca ratios. Hermatypic corals are thinly distributed in the waters of Jeju Island, where *Alveopora japonica* was the only dominant coral species. A higher diversity of hermatypic corals were observed in the waters of Tsushima Island, where *Favia* sp. was the most common coral species and even forming an about 6-m-high reef structure. Both *Alveopora* and *Favia* showed annual growth layers consisting of couplets of high- and low-density bands. Sr/Ca ratio of both species and Mg/Ca ratio of *Alveopora* also showed seasonal variation, likely reflecting SST variation. These results suggest the possibility that *Alveopora* and *Favia* species can be used as potential SST proxies. However, this study also highlights the potential growth disturbance of middle latitude corals due to high rainfall during monsoon and low SST during winter. This possibility should be taken into account in the investigation of Sr/Ca(Mg/Ca)-SST relationships.

Key words : paleo-SST proxy, *Alveopora*, *Favia*, Jeju, Tsushima

*Corresponding author. E-mail : kshyeong@kordi.re.kr

1. 서 론

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 직간접적으로 주는 것으로 알려진 서태평양 워폴지역과 쿠로시오해류의 영향 하에서 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). 이러한 전 지구적인 기후변화에 관한 광범위한 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 연구대상 지역에 미치는 영향에 대한 정량적 평가가 가능하다. 예를 들면, 엘니뇨 동안 서태평양 워폴지역은 북동무역풍의 약화로 동쪽으로 이동하게 되며, 그 결과 팜 인근 지역은 지역적으로 수온이 낮아지는 현상을 보이게 된다(Asami *et al.* 2004, 2005). 하지만, 엘니뇨 동안 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), 따라서 한국 근해의 해양환

경이 전 지구적 기후변동 요인에 대해 반응하는 변화의 크기 및 방향을 이해하기 위해서는 한국 연안에서의 과거 해양환경 복원이 필수적이다.

중위도 지역은 산호의 분포가 미미하여 현재 이 지역에서 고기후 복원에 사용할 수 있는 산호 추적자는 개발되어 있지 않으며, 고수온을 계절/연 단위로 복원해 낼 수 있는 다른 추적자도 아직 개발되어 있지 않다. 고수온의 추적자로 사용할 수 있는 퇴적물 주상시료 내 알케논의 구조와 유공충의 Mg/Ca 비와 산소동위원소 조성 연구는 퇴적물에 따라 다르지만 해상도가 일반적으로 수천 년에 불과하다(e.g. Bradley 1999; Rosenthal 2007). 육상의 나이테(tree-ring)나 동굴 중유석의 연구를 통해 고해상도의 고환경 복원이 가능하지만, 수온이 아닌 육상의 수온 및 강수변화를 복원할 수 있다는 한계를 가지고 있다(Bradley 1999). 탄산염 골격으로 이루어진 이매패류의 경우 성장 기간 동안 다른 수심대로 이동하는 성질과 그 생존 기간이 불과 수년~수십 년에 불과하다는 점, 그리고 한 지역의 수온변화를 장시간 복원할 수 있는 연속적인 기록을 얻기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 이에 비하여 산호 추적자는 골격 내에 다수의 지화학 추적자가 존재한다는 점, 한 곳에 정착하여 주변 환경을 장기간에 걸쳐 연속적으로 기록한다는 점, 그리고 무엇보다도 전 지구적 환경변화를 보여주는 적도 지역의 자료와의 직접 비교가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 우리나라 인근에 적용할 수 있는 산호 추적자의 개발은 우리나라 과거 기후 이해에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 우리나라를 포함한 중위도 지역에서 계절/연 단위의 고수온 및 몬순 복원을 위한 연구 도구의 개발을 위한 기초 연구로 수행되었다. 제주도와 일본의 쓰시마 주변에서 괴상 조초성 산호를 찾기 위한 현장 조사를 통하여 발견된 괴상 조초성 산호의 수온 기록자료로서의 가능성을 평가하기 위하여 골격의 연엑스선 촬영과 Mg/Ca 및 Sr/Ca 분석을 실시하였다.

2. 연구지역, 현장조사 및 연구 방법

괴상 조초성 산호의 분포 조사는 2007년 10월 4일~10월 14일까지 제주도의 서귀포와 차귀도 일대 및 대마도 중부의 서쪽 해안(대한해협 쪽)에 위치한 시타우라만에서 실시되었다(Fig. 1). 제주도 인근에서는 총 5종의 조초성 산호의 분포가 확인되었으며, 그 중 괴상을 보이는 *Alveopora japonica* 개체를 차귀도 해역(33°19.25'N, 126°09.78'E) 약 10 m 수심에서 채집하였다. 쓰시마섬의 시타우라만에서는 총 3종의 괴상 조초성 산호의 분포가 확인되었으며, 이 중 분포가 가장 우세한 *Favia sp.* 개체를 34°24.88'N, 129°16.67'E 정점, 약 2 m 수심에서 채취하였다.

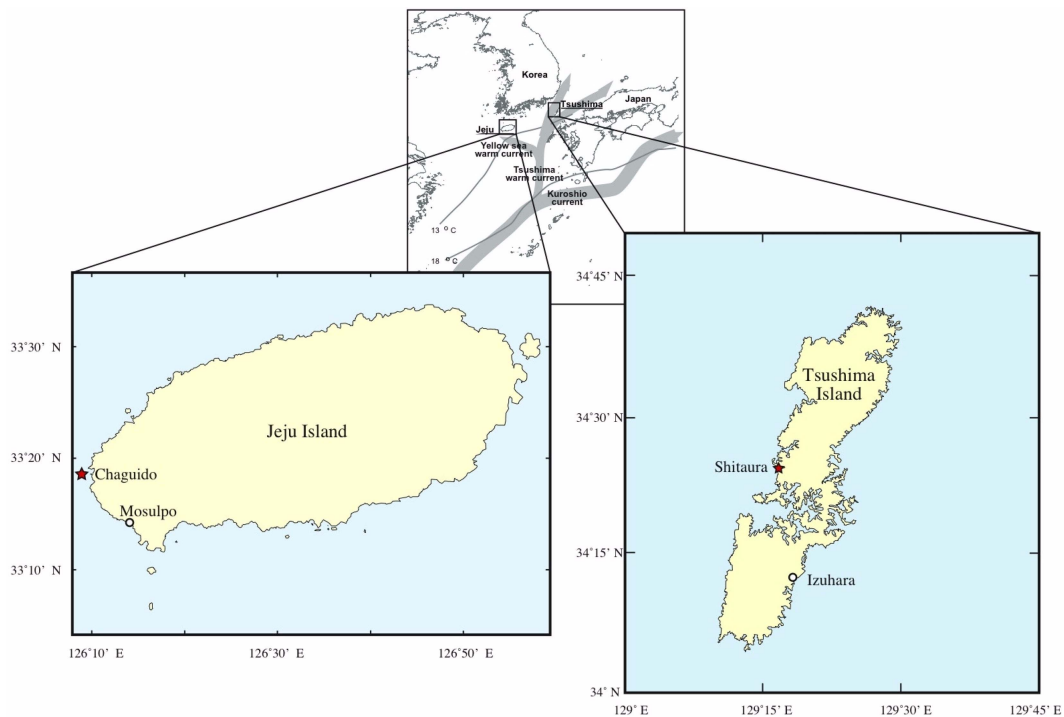


Fig. 1. Location map showing the coral collection sites (star marks) and environmental monitoring stations (open circles). Contours of the winter sea surface temperatures (an average of the coldest months) were given for 13°C and 18°C in the index map.

이번 연구에서는 다양한 산호종을 이용한 고기후 복원의 가능성을 평가해보기 위해 각 섬에서 가장 우세한 분포를 보이는 *Alveopora*와 *Favia*를 대상으로 분석을 실시하였다. 특히 쓰시마지역에서는 *Favia*로 구성된 6 m 높이의 산호초의 분포가 확인되었으며, *Favia*를 추적자로 개발하기 위해 *Favia*의 분석을 실시하였다.

차귀도에서 약 20 km 남서쪽에 있는 모슬포(Fig. 1)에서 2003년부터 국립해양조사원이 관측한 월평균 표층 수온은 최저 13.3°C~24.8°C 범위에서 변화하였으며, 최저 수온은 2월과 3월에 그리고 최고 수온은 8월과 9월에 관측되었다(Fig. 2). 염분은 26.2~33.4 ppt 사이의 범위를 보였으며, 7월에서 9월 사이에 낮은 값을 보였다(Fig. 2). 연구지역으로부터 약 30 km 남부에 있는 쓰시마의 이즈하라항(Fig. 1)에서 1985년에서 1995년까지 일본 기상청이 관측한 자료에 따르면 월평균 표층 수온은 11.2°C~27.5°C 범위를 보였으며, 제주도과 마찬가지로 최저 및 최고 수온은 각각 2월과 3월 그리고 8월과 9월에 관측되었다(Fig. 2).

채취된 시료는 5 mm 두께로 성장 방향에 평행하게 절단된 후 M-40(SOFTEX Co.)를 이용하여 연엑스선 촬영을 하였다(Fig. 3a). 하지만, *Favia* 시료는 성장방향에 비스듬히 잘려 연엑스선 사진에서 성장밴드를 관찰할 수 없었다. 연엑스선으로 촬영한 사진에서 골격의 밀도변화는 명암의 변화로 표현된다. 이번 연구에서는 산호 골격의

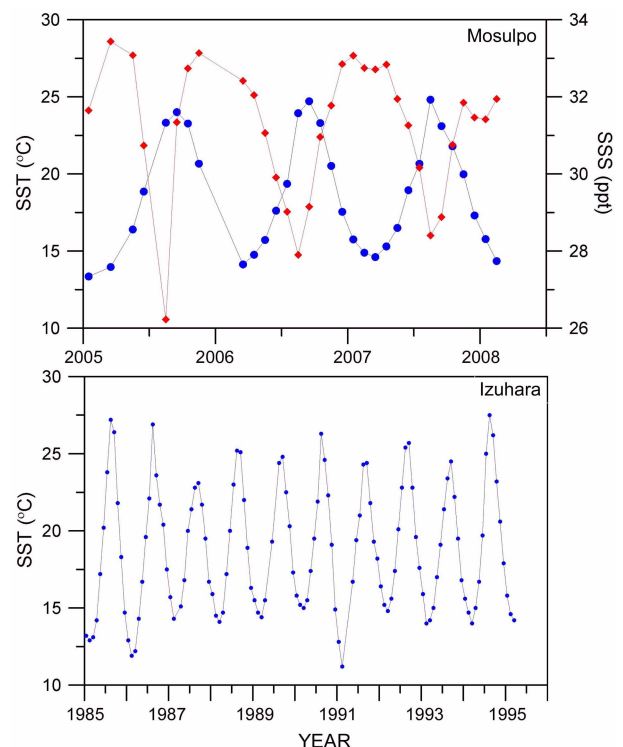


Fig. 2. The observed sea surface temperatures (solid circles) and salinities (solid diamonds). Salinity data are not available in the Tsushima Island.

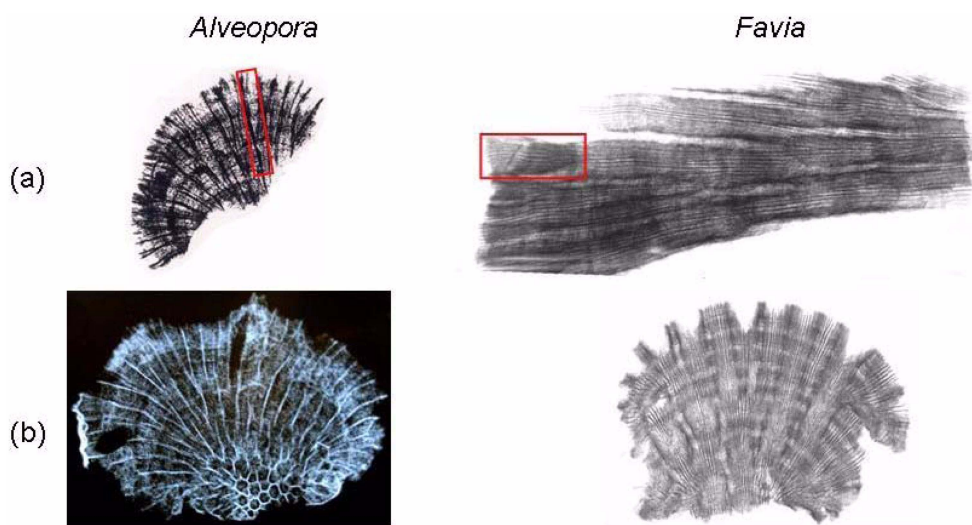


Fig. 3. Soft x-ray positive prints of *Alveopora* and *Favia*. (a) Slabs used for subsampling. *Favia* slab does not show growth banding because of the cutting plane oblique to the growth direction. (b) X-ray photos of other slabs showing growth banding more clearly. Rectangles in the soft x-ray photos show the parts of corallites subjected to subsampling. Length of rectangles are 23 mm in *Alveopora* and 18 mm in *Favia*.

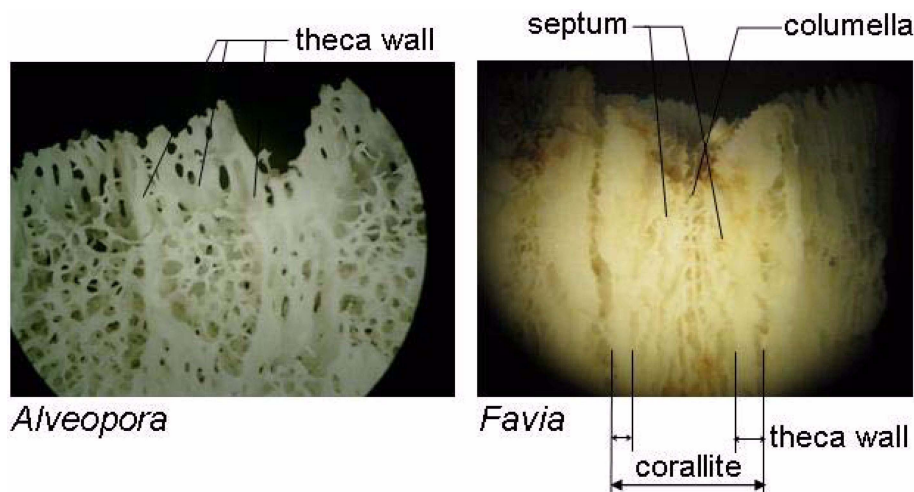


Fig. 4. Magnification of *Alveopora* and *Favia* skeletons. The diameter of a corallite is around 5 mm in *Alveopora* and 10 mm in *Favia*.

성장방향에 따른 밀도변화를 보다 명확히 알기 위하여, *Alveopora* 엑스선 사진의 명암을 광학밀도지수(ODI, Optical Density Index)로 환산하였다. 이 과정은 ImageJ 응용프로그램을 이용하였으며, 이 프로그램은 엑스선 산란 영상에 밝기에 따라 골격의 밀도를 256개의 등급(0~255)으로 표시한다.

*Alveopora*와 *Favia* 개체는 각각 5 mm와 10 mm 직경의 corallite(폴립(Polyp))에 해당함 집합체로서 구성되며, 한 개의 corallite는 theca wall, columella와 septum으로 구성된다(Fig. 4). 하지만, *Alveopora*는 암판(rock slab)에서 명확한 columella 구조를 보여주지 않았다. 부시료의

채취는 한 개의 corallite를 산호 개체에서 분리한 후 상대적으로 강한 구조를 가진 theca wall 만을 대상으로 실시하였으며, columella와 septum 부분은 부시료 채취 전 dental drill을 사용하여 제거하였다. 분리된 단일 corallite의 theca wall은 부시료 채취 전 초음파를 이용하여 부착된 잔류물을 제거하였다. 부시료 채취는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 간격으로 거리 조절이 가능한 시료 이동판을 장착한 micro-milling machine을 사용하였으며, 시료의 양을 고려하여 $400 \mu\text{m}$ 간격으로 부시료를 채취하였다.

채취된 부시료는 Ca, Mg, Sr의 농도 분석을 위해 이차 증류수에 담아 초음파 세척을 실시하였으며, 원심분리기

를 이용하여 잔류 용액을 제거하였다. 그 후 Optima Grade 질산용액(1.2N)을 이용하여 시료를 용해한 후, 0.1N 질산용액으로 희석하였다. 희석된 용액은 해양연구원이 보유한 ICP-OES(Perkin-Elmer Optima DV3300)를 이용하여 Ca, Mg, Sr 농도 분석을 하였다. JCp-1 아라고나이트 표준시료(Inoue *et al.* 2003)와 보정시료의 반복 분석 결과 측정된 Mg/Ca와 Sr/Ca 값은 모두 0.5% 이내의 오차범위를 보였다.

3. 결과 및 토의

조초성 산호 분포

제주도 서귀포와 차귀도 해역을 대상으로 조초성 산호 분포 조사를 한 결과, *Alveopora japonica*, *Oulastra crispata*, *Montipora millepora*, *Psammocora superfilialis*, *Psammocora nierstraszi* 등 총 5종의 조초성 산호가 발견되었다. 서귀포 해역에서는 이 5종의 산호가 수심 20 m 까지 다양한 깊이에 분포하며, 차귀도 해역에서는 *Alveopora* 단일종이 수심 10 m 정도에 광범위하게 분포한다. 이중 고기후의 시계열 복원이 가능한 피상 산호는 *Alveopora*가 유일하며(Fig. 3), 다른 종들은 모두 기반암이나 해저면을 피복하는 형태를 보인다.

쓰시마섬의 시타우라만에는 *Alveopora japonica*, *Goniopora sp.*, *Favia sp.* 등 3종의 피상 조초성 산호와 가지상을

보이는 *Sylocoeniella guentheri* 종의 분포가 확인되었다. *Favia sp.*는 약 10~20 cm 크기의 개체를 형성하며, 모든 수심대에 걸쳐 가장 우세한 분포를 보인다. 특히 이 지역에는 약 6 m 높이의 산호초가 분포하며, 약 5 m 길이의 2 개 시추 코아를 획득하여 관찰한 결과, 산호초의 90% 이상이 *Favia* 개체로 구성된 것으로 확인되었다.

산호골격의 연성장밴드

*Alveopora*와 *Favia*는 모두 연엑스선 사진에서 어두운 띠와 밝은 띠가 교호하는 연성장밴드를 명확히 보여준다(Fig. 3a and 3b). 부시료 채취를 한 *Favia* 개체는 성장방향에 경사를 가지고 잘렸으며, 그 때문에 명확한 연성장밴드가 불명확하다(Fig. 3a). 하지만, Fig. 3b에서 보듯이 성장방향에 평행하게 잘린 *Favia* 암판에서는 연성장밴드가 명확히 관찰된다. 이러한 명확한 연성장밴드의 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.

산호골격의 Sr/Ca와 Mg/Ca 값

해수의 동위원소조성과 온도의 함수로 변화하는 산호골격의 산소동위원소조성과는 다르게, 산호 골격의 Sr/Ca 값은 해수 내 Sr/Ca 값이 담수의 희석 등에 영향을 받지

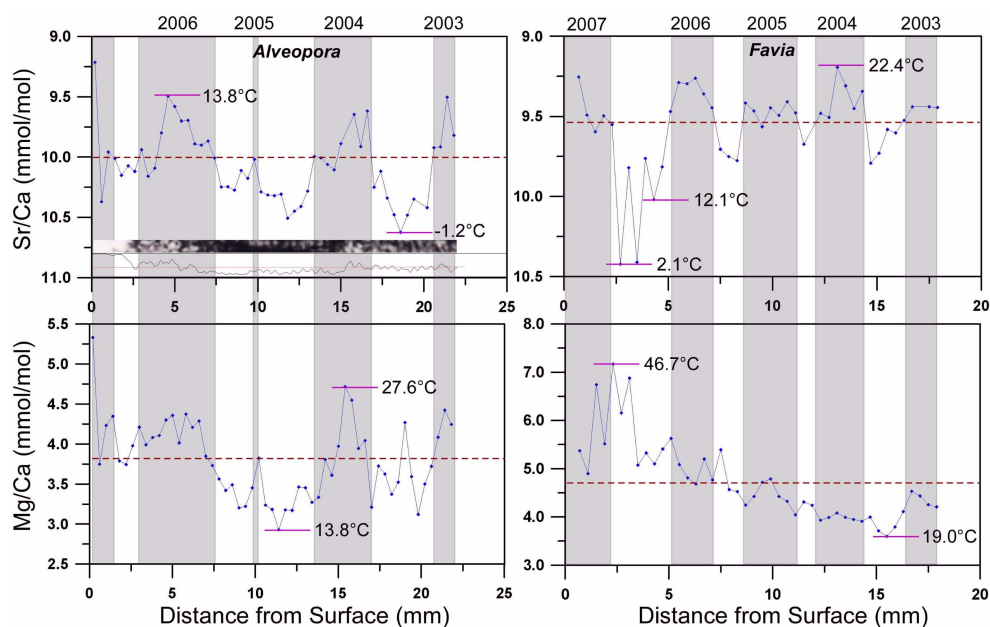


Fig. 5. Sr/Ca and Mg/Ca ratios of *Alveopora* and *Favia* skeletons with X-ray photo and ODI of *Alveopora*. Horizontal dashed lines are the average values of Sr/Ca and Mg/Ca ratios. The growth periods were assigned on a yearly base from 2003 to 2007 based on warm (gray boxes) and cold seasons (white boxes) determined from the average values of Sr/Ca ratios. SSTs were estimated for maxima and minima using the equations taken from Corregre(2006) and Mitsuguchi *et al.*(1996).

않기 때문에 온도만의 함수로 변하는 것으로 밝혀져 있다(Beck *et al.* 1992; Correge 2006 and references therein). 이는 Sr/Ca 값이 갖는 장점으로서, 이에 의해 복원된 해수 온도와 산소동위원소조성을 비교할 경우 해수의 염분 또는 강우량의 해석에 유용하게 사용될 수 있다(Hendry *et al.* 2002; Shen *et al.* 2005). 또한, 산호골격의 Sr/Ca 값은 온도의 함수로서 변화하기 때문에 측정된 Sr/Ca 값이 주기적으로 변화할 때 이는 계절적인 온도변화를 기록한 것으로 해석할 수 있다. 산호 골격의 Mg/Ca 값도 Sr/Ca 값과 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 제기된바 있다(Mitsuguchi *et al.* 2001, 2003; Quinn and Sampson 2002; Fallon *et al.* 2003).

분석된 *Alveopora*와 *Favia*의 Sr/Ca 값은 각각 9.21~10.62 (avg. 9.51) mmol/mol과 9.19~10.42 (avg. 9.57) mmol/mol의 범위를 보였으며, Mg/Ca 값은 각각 2.93~5.33 (avg. 3.80) mmol/mol과 3.60~7.17 (avg. 4.73) mmol/mol의 범위를 보였다(Fig. 5). *Favia*의 Mg/Ca 값은 표면으로부터 중심으로 가면서 전반적으로 값이 감소하는 경향을 보이는 반면, *Alveopora*의 Sr/Ca와 Mg/Ca 값과 *Favia*의 Sr/Ca 값은 표면으로부터의 거리에 따라 증가하고 감소하는 계절적 변화 양상을 나타냈다(Fig. 5). 산호 골격의 Sr/Ca 값은 온도와 음의 상관관계를 보이고, 반대로 Mg/Ca는 온도와 양의 상관관계를 보이기 때문에 이들은 서로 역위상(out-of-phase) 관계를 가지게 된다(Fig. 5). 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/Ca 값은 Sr/Ca 값과 다르게 계절적 변화 양상을 전혀 보이지 않으며, 이는 *Favia* 골격의 Mg/Ca 값이 과거 수온의 복원에 부적합함을 지시한다. 하지만, 앞에서 토의하였듯이 Mg/Ca의 추적자로서의 이용 가능성에 대해 많은 연구들이 의문을 제기한 바 있기 때문에 *Alveopora*의 Mg/Ca 값이 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/Ca 값이 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. 5). 측정된 Sr/Ca의 평균값을 기준으로 평균값

보다 낮은 값을 보이는 구간을 여름, 높은 값을 보이는 구간을 겨울에 성장한 것으로 판단하면, 시료의 분석 구간은 두 시료 모두 2003년 여름부터 2007년 여름까지의 성장 환경을 기록한 것으로 해석된다(Fig. 5). 이에 근거하여 계산한 성장률은 두 종 모두 대략 4~8 mm/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 지역에서도 일반적으로 관찰되며, 이는 산호의 성장환경이 계절적으로 크게 다르기 때문이다(Shimamura *et al.* 2005). 또한, 뒤에서 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(Fig. 5). 이러한 분석 결과와 골격에서 관찰되는 연성장밴드는 분석에 사용된 두 종이 모두 시료 채취 지역의 과거 해양 온도 복원 및 환경복원에 사용될 수 있음을 지시한다.

측정된 값들의 전반적으로 양호한 계절적 변화양상에도 불구하고, 이번 연구 결과는 분석방법 및 결과의 해석과 관련한 몇 가지 개선점 및 문제점을 지시하고 있다. 첫째는 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/Ca 값은 다른 측정 구간에 비하여 매우 높거나 낮은 값을 보인다(Fig. 5). 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 하였다. 이후의 많은 연구는 Schrag(1999)의 방법을 따라 유기물 제거를 하지 않았으며, 제거 작업을 한 연구는 전통적인 탄산염 분석방법을 이용하였기 때문이다. 하지만, 이번 연구에서 나타난 유기물의 잔류 구간의 측정 이상치들은 이 연구에서 유기물이 분석 값에 미치는 잠재적 영향과 최상부 구간 시료에 대한 유기물 제거가 시행되어야 할 필요성을 지시하고 있다. 특히 산호 골격 내 유기물은 Mg를 다량 포함한 것으로 알려졌기 때문에 Mg/Ca 값의 연구를 위해서는 유기물의 제거가 반드시 필요할 것으로 생각된다. 해양의 오염 및 미량금속원소의 연구에서도 이들 금속원소가 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(<27 ppt) 환경에서 산호가 성장하지 않는다는 것을 입증하였으며, 이는 산호 골격을 이용한 과거 해양환경의 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 있는 동해의 오기섬에서도 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(Fig. 1), 이러한 온도 조건 하에서 *Alveopora*와 *Favia*가 연속적인 성장을 보이기는 불가능할 것으로 판단된다. 따라서 중위도 지역의 해수 온도 추적자 개발을 위해서는 저온 환경하에서 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(Fig. 5). 2005년 8월과 9월은 중국 양쯔강 유역과 쓰시마섬에 태풍 Matsa와 Nabi가 상륙했던 시기이다(기상청자료 www.kma.go.kr). 그 당시 모슬포 해역에서 관측된 8월 일일 염분은 최저 21.5 ppt로 나타났으며, 월평균 염분 또한 26.2 ppt로서 2006년과 2007년의 8월 평균 염분인 27.9 ppt와 28.4 ppt에 비하여 현저히 낮은 값을 보였다(Fig. 2). 이는 Shimamura *et al.*(2005)이 *Porites*의 성장 저해 요인으로 제시한 염분인 27 ppt 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(Fig. 2), 당시 산호 골격이 낮은 Sr/Ca 값을 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.

마지막으로 이번 연구에서 측정한 *Alveopora*와 *Favia*의 Sr/Ca와 Mg/Ca 값은 기존에 보고된 다른 산호종의 값

들과 큰 차이를 보이며, 이는 해수 온도 복원을 위해서는 연구 대상 종과 연구지역에 적용할 수 있는 새로운 Sr/Ca-SST 및 Mg/Ca-SST 관계식의 필요성이 요구된다. Fig. 5는 가장 많은 연구가 수행된 *Porites*의 Sr/Ca-SST 관계식($\text{Sr/Ca}(\text{mmol/mol})=10.533-0.0607\times\text{SST}(\text{°C})$, Correge 2006)과 Mg/Ca-SST 관계식($\text{Mg/Ca}(\text{mmol/mol})=(1.15+0.129\times\text{SST}(\text{°C}))/1000$, 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/Ca 값으로 복원온도는 13.8°C~27.6°C로서 제주도의 모슬포에서 측정된 온도범위인 13.3°C~24.8°C와 2°C 이내에서 일치한다. 하지만, 보다 일반적으로 사용되는 Sr/Ca 값으로 복원된 온도 범위는 -1.2°C~13.8°C로서 실측 값과 큰 차이를 보일 뿐 아니라 중위도 지역에서는 관측이 불가능한 영하의 온도 범위를 보인다. *Favia*의 Sr/Ca 값 또한 상부의 유기물에 의한 오염이 의심되는 2점을 제외할 때, 복원된 온도는 12.1~22.4°C 범위로, 관측 온도 범위인 11.2°C~27.5°C와 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 산호 종 골격의 지화학성분 분석을 통한 과거 수온 복원의 가능성을 지시하고 있으며, 이는 현재까지 열대/아열대 지역에서 가능했던 계절/연 단위의 과거 수온 복원을 우리나라를 포함한 중위도 지역까지 확대할 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

우리나라를 포함한 중위도 지역에 적용할 수 있는 고해상도 추적자 개발을 위해 제주도와 쓰시마섬에서 괴상 조초성 산호의 분포에 대한 현장조사를 하였으며, 그 결과 제주 지역에서는 *Alveopora jp.*가 그리고 쓰시마섬에서는 *Favia spp.*가 고환경 복원 연구에 가장 적합한 종으로 선정되었다. 특히 *Favia*는 6 m 높이의 산호초를 쓰시마섬 지역에 형성하고 있다.

*Alveopora*의 골격은 여름 동안 형성된 고밀도 띠와 겨울 동안 형성된 저밀도 띠의 쌍으로 구성된 연성장밴드를 보이며, *Favia* 또한 이와 유사한 연성장밴드를 보인다. 또한, 두 종의 Sr/Ca 값과 *Alveopora*의 Mg/Ca 값은 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 중위도 지역 겨울철에 관찰되는 낮은

수온과 몬순 기간에 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(Mg/Ca)-온도 관계식의 정립이 필요하다.

사 사

현장조사 및 시료 분석에 도움을 주신 이창호, 김형직, 김정훈님께 감사를 드립니다. 이 연구는 한국과학재단의 한일국제공동연구사업(PN61200)과 한국해양연구원의 POSEIDON(PP00690) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 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.
- Bradley, R.S. 1999. Paleoclimatology: Reconstructing climates of the quarternary. International Geophysics Series 64. Academic Press, San Diego. 613 p.
- Boisau, 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, R. van Woesik, and D.J. Sinclair. 1999. Corals at their latitudinal limits: Laser ablation trace element systematics in *Porites* from Shirigai Bay, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **172**, 221-238.
- 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.
- 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.
- Inoue, M., M. Nohara, T. Okai, A. Suzuki, and H. Kawahata. 2003. Trace element concentrations in carbonate reference materials: Coral JCp-1 and giant clam JCT-1 by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Goldschmidt Conf. Abstr.*, A173.
- 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.
- Rosenthal, Y. 2007. Elemental proxies for reconstructing Cenozoic seawater paleotemperatures from calcareous fossils. p. 765-797. In: *Proxies in late cenozoic paleoceanography*, ed. by H.-M. Claude and A.D. Vernal. Elsevier, Amsterdam.
- 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 Japanese Coral Reef Society and Ministry of the Environment. Ministry of the Environment, Tokyo.

Received May 22, 2008

Revised Jun. 16, 2008

Accepted Jul. 28, 2008