

Article

한반도 동남해와 남동해 표층수에서 알케논 수온계산식의 비교

신경훈* · 윤숙희

한양대학교 과학기술대학 해양환경과학과
(426-791) 경기도 안산시 상록구 사1동 1271번지

Comparison of Alkenone Equations for Surface Water Temperature Estimation in the Eastern South Sea and Southern East Sea, Korea

Kyung-Hoon Shin* and Suk Hee Yoon

Department of Environmental Marine Science, College of Science & Technology
Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

Abstract : A series of long chain unsaturated ketone (alkenone) was identified in the particulate organic matter sampled from surface water of the eastern South Sea, Korea. The seawater temperature based on the C_{37} alkenone was calculated by using several different equations of unsaturation index (U_{37}^K), compared with *in situ* CTD temperature. Among the previously reported equations, the equation (0.044T-0.204) which was proposed by Sawada *et al.* (1996) seems to be the most useful for the calculation of C_{37} alkenone temperature, showing average 0.51°C difference between U_{37}^K temperature and *in situ* CTD temperature. This result suggest that alkenone should be a useful molecular biomarker for reconstructing paleo-environmental change in the South and East Sea, Korea. However, it is required to establish more reliable equation for the calculation of C_{37} alkenone temperature.

Key words : alkenone, unsaturation index ; U_{37}^K , paleo-temperature, paleoceanography, eastern South Sea, southern East Sea

1. 서 론

식물플랑크톤 Prymneisiophyte의 세포내에 세포벽(cell membrane)을 구성하는 중성지질(neutral lipid)중 탄소수가 많고 복수의 이중결합을 갖는 직경탄화수소(alkane)의 말단 부근에 산소가 붙어 있는 케톤, 일명 알케논(alkenone)은 Volkman *et al.*(1980)에 의해 처음 보고된 후 Prymneisiophyte만이 생성을 하는 기원생물의 특이성과 수층과 해저퇴적물 내에서도 잘 분해되지 않는 보존성 등으로 일찍이 식물플랑크톤 Prymneisiophyte의 바이오마커(biomarker)로서 알려져 왔다(Prahl *et al.* 1989). 더욱이 탄소수가 37개 알케논(C_{37})은 이중결합이 2개,

3개, 4개로 구성되어 있는데 이들 이중결합수의 상대적인 분포를 나타내는 지표 $\{U_{37}^K = (C_{37.2} - C_{37.4}) / (C_{37.2} + C_{37.3} + C_{37.4})\}$ 가 수온에 의해 결정되는 것이 밝혀지게 되면서(Brassell *et al.* 1986), 이들의 조성비(U_{37}^K)는 Prymneisiophyte가 생식하는 표층 해수의 평균 온도를 계산하는 온도계가 될 수 있다는 가능성이 제기되었다.

그 후 알케논(C_{37})의 이중결합수의 상대적인 분포와 배양된 수온의 관계를 나타내는 지표(U_{37}^K)는 Prahl and Wakeham(1987)에 의해 성장온도 8°-25°C의 범위에서 보다 간단한 지표 $U_{37}^K = C_{37.2} / (C_{37.2} + C_{37.3})$ 로 수정되었다. 이들은 Prymneisiophyte(*Emiliania huxleyi*)를 10°C와 25°C의 수온 조건에서 각각 배양하여 얻어진 *Emiliania huxleyi*의 세포들로부터 추출한 알케논(C_{37})중 이중결합이 2개인 $C_{37.2}$ 와 3개의 이중결합을 갖는 $C_{37.3}$ 의 농도비가 성

*Corresponding author. E-mail : shinkh@hanyang.ac.kr

장온도에 따라 크게 바뀌었다는 것을 보여주었다. 상대적으로 낮은 수온에서 성장한 *Emiliania huxleyi*의 세포에서는 $C_{37:2}$ 보다 $C_{37:3}$ 의 농도가 높게 나오는데, 이것은 수온 변화로 인한 환경 스트레스로부터 세포막의 유동성을 유지하기 위해 세포막을 구성하는 지질의 분자 조성(불포화도)을 변화시키는 것으로 해석되고 있다(Prahl and Wakeham 1987).

이와 같은 Prymneisiophyte의 수온에 관한 적응성과 그로 인한 유기분자화합물의 조성변화를 이용하여 기후변동을 평가하기 위한 새로운 방법으로서 알케논이라고 하는 독특한 중성지질의 분자화합물을 이용한 많은 연구들이 전 세계의 여러 해양에서 수행되어 왔다(Ternois *et al.* 1997; Sikes *et al.* 1997; Sawada *et al.* 1998; Bentalab *et al.* 1999; Harada *et al.* 2001; Lee and Schneider 2005). 세계의 주요해양(태평양, 대서양, 인도양)에서 이제까지 측정된 알케논의 이중결합분포 지표(U^{K}_{37})와 연평균 표층수온을 비교한 결과를 보면 해역에 따라 상관관계의 기울기에는 약간의 차이가 있으나 전체적인 상관성은 어느 해역에서나 상당히 높음을 알 수 있다(Prahl *et al.* 2003).

본 연구에서는 우리나라 동남해와 남동해에 서식하는 식물플랑크톤 Prymneisiophyte에 의해 생성된 알케논(alkenone)을 해수 중 현탁입자로부터 분리 추출하여 분석하는 방법을 확립하려고 한다. 그리고 탄소 수 37개 알케논(C_{37})의 이중결합분포(U^{K}_{37})가 수온에 의해 결정되는 것을 이용하여 많은 연구자들에 의해 여러 해역에서 채취한 시료로부터 얻어진 계산식들을 사용하여 계산한 알케논의 U^{K}_{37} 온도와 현장 수온을 비교함으로써 우리나라 동남해와 남동해에 보다 적합한 계산식을 추정해 보려고 한다. 따라서 본 연구의 결과는 향후 연근해 수온의 변화와 이로 인한 해양생태계에의 영향을 파악하기 위한 방법으로 해저퇴적물에 함유된 알케논을 분석함으로써 장기간에 걸친 Prymneisiophyte 생산의 축적된 분포를 복원하고 기후변화에 따른 해양환경 및 생태계 변화를 규명하기 위한 알케논의 활용 가능성을 검토하는데 도움이 될 것이다.

2. 재료 및 방법

관측 해역 및 시료 채취

대한해협은 지리적으로 한반도 남동 해안과 일본 열도 연안을 사이에 두고 황해, 남해 및 동중국해와 동해를 연결하는 좁은 해협이다. 대한해협을 통해 동해로 유입하는 해류는 대부분 쿠로시오의 지류로부터 기원하는 대마난류이다. 본 연구의 조사 해역은 동남해와 남동해에 위치한 9개의 정점으로 Fig. 1에 표시되어 있다.

본 연구 관측 정점 중 정점 10은 마산만 북쪽으로부터

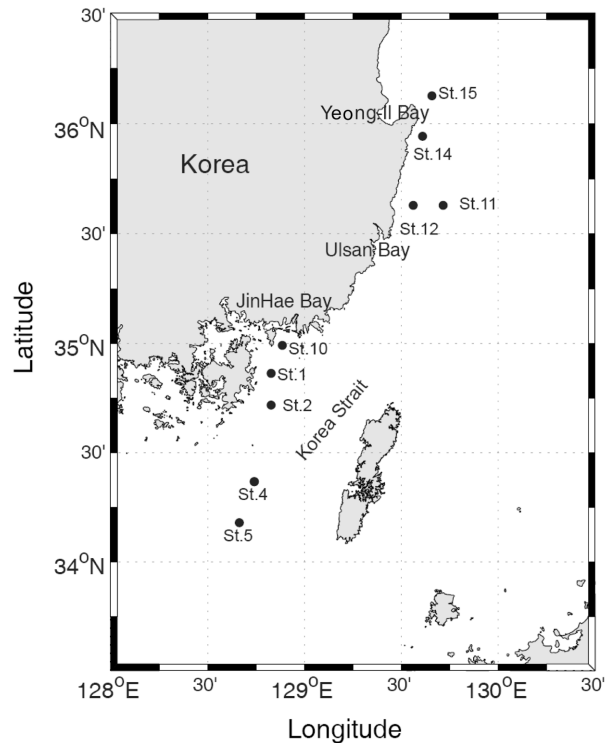


Fig. 1. Station locations in the eastern South Sea, Korea.

내려오는 남동천과 동쪽으로 창원시를 가로질러 유입되는 남산천, 그리고 부산으로부터 유입되는 낙동강의 영향으로 부영양화와 적조가 많이 발생하는 해역으로 보고되어 있다(양 1992). 정점 1, 정점 2, 정점 4, 정점 5는 정점 10보다 육지로부터 떨어져 있으므로 육지에 의한 영향은 덜하며 대마난류의 영향을 받고 있는 해역으로 알려져 있다.

본 연구를 위한 시료는 2003년 5월 19일~23일까지 진해만과 대만해협일대와 영일만과 울산만 주변 해역에서 부경대학교 해양과학 공동연구소 조사실습선 탐양호를 통해 각 정점의 표층에서 니스킨 채수기를 사용하여 표층해수를 채수한 후, 선상에서 GF/F(47 mm) 여과지로 여과하여 획득하였다. 각 정점의 표층해수 중에 존재하는 입자물질이 채집된 여과지는 분석 전까지 -20°C 이하에서 냉동 보존하였다.

알케논 추출 및 분석

냉동 보존된 여과지 시료는 내부표준물질(2-nonadecanone)을 넣고 디클로로메탄:메탄올(99:1, v/v)의 혼합유기 용매에 넣어 지질(lipids) 성분을 3회 반복하여 추출하였다(Fig. 2). 추출된 지질은 0.5 N KOH/ CH_3OH 로 처리된 후 Hexane을 사용하여 중성지질을 분리하고 농축하여 silica gel(Biorad, 100-200 mesh) column 크로마토그래피(Rapid Trace SPE workstation, Zymark)에 넣고 Harada *et al.* (2003) 방법에 의해 용매의 극성을 증가시키며 4가지 부

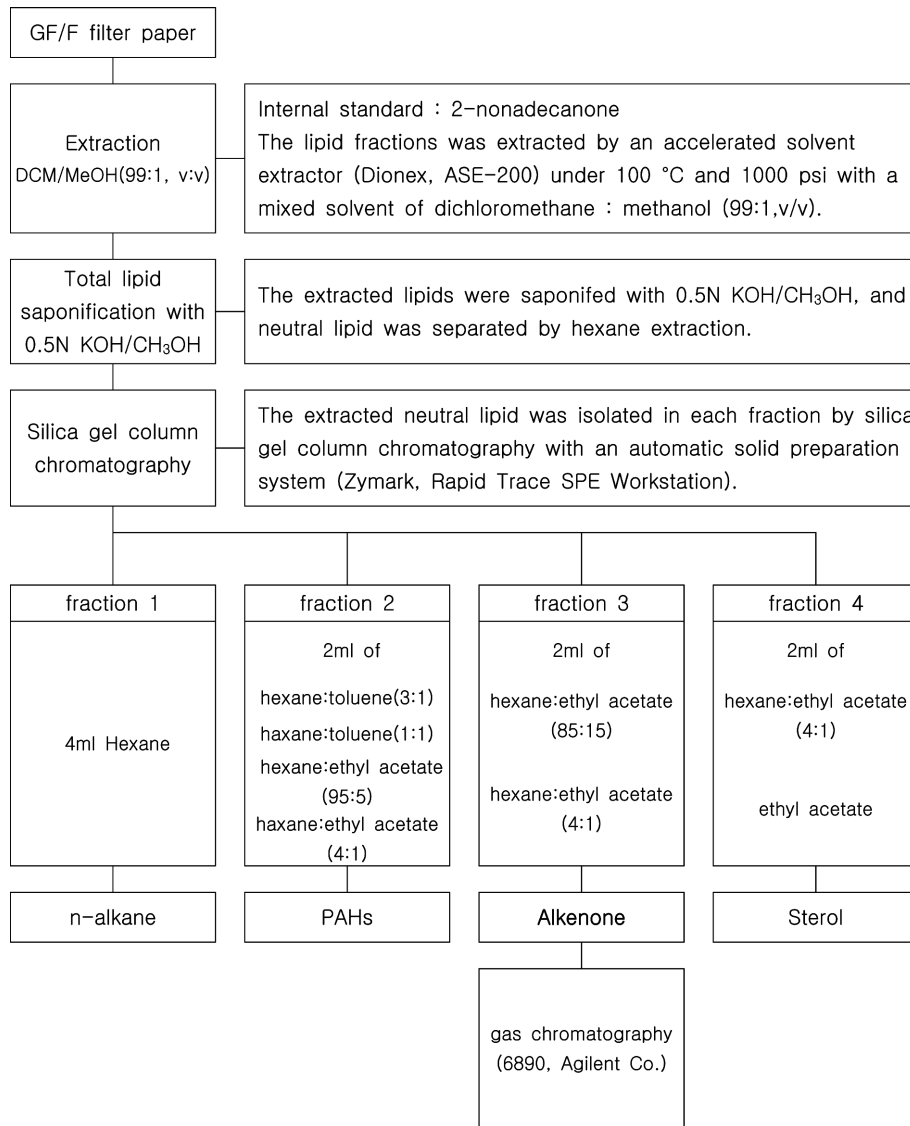


Fig. 2. Analytical procedure of long-chain unsaturated ketones (alkenones).

분(fraction)으로 분리하였다(Fig. 2). 분리된 알케논(F3) 부분은 농축되어 온칼럼 주입구(on-column injector)와 후레임 이온화 검출기(flame ionization detector)가 부착된 가스크로마토그래피(Gas chromatography; HP 6890 series II)를 사용하여 정량적으로 분석하였는데, 가스크로마토그래피에서 시료의 분리를 위해 사용하는 캐필러리 칼럼(capillary column)은 fused silica capillary column(길이 50 m, 직경 0.32 mm, CPSil 5, Chrompack)을 사용하였고 운반가스(carrier gas)로는 헬륨(He)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

물리 화학적 해양환경과 알케논 농도

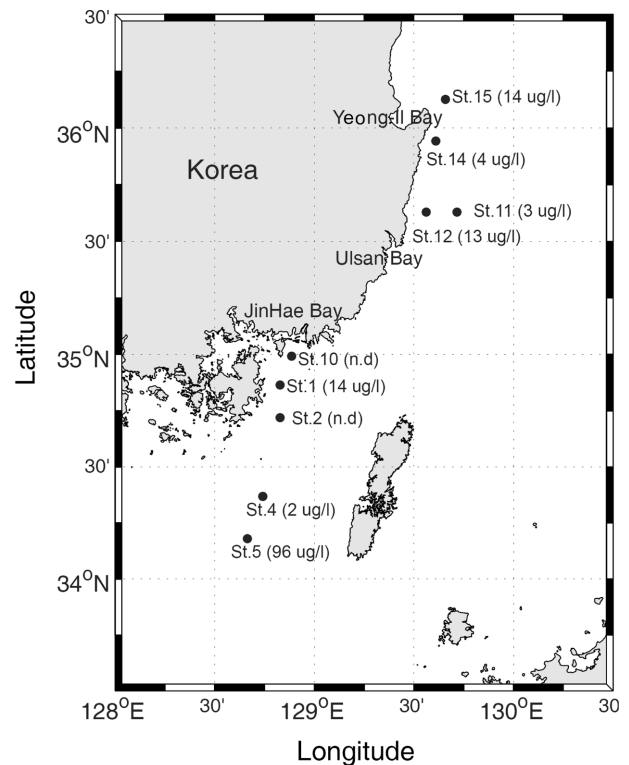
각 정점에서 CTD로 측정된 표층 수온의 범위는 15.6°C

~19.2°C이며 정점 11에서 19.2°C로 가장 높은 수온과 정점 2에서 가장 낮은 수온을 나타냈다. 이와 같은 수온의 범위는 본 연구해역에서 이전에 봄철에 보고된 수온에 유사하며(강 등 2000; Lee and Kim 2003; Ahn *et al.* 2005), 정점 5와 정점 11에서는 다른 정점에 비해 2~3°C 높았다. 염분의 분포를 보면 대략 33 PSU를 나타내고 있으나 정점 10은 하천수의 영향으로 다소 낮은 31.26 PSU를 보이고 정점 5와 정점 11은 각각 34.41 PSU와 34.39 PSU의 다소 높은 염분을 보여 상대적으로 높은 수온을 고려할 때 대마난류의 영향을 받는 해역으로 사료된다. 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)는 진해만과 가장 근접한 정점 10에서 8.2 ppm의 가장 높은 농도를 보였으며 정점 10을 제외한 나머지 정점들은 1.8(정점 12) ppm~3.1(정점 1) ppm의 농도범위로 비교적 유사한 경향을 나타내었다(Table 1).

Table 1. Physicochemical condition in the surface water at the observational stations.

Station	Temperature (°C)	DO (ppm)	Salinity (psu)	Nutrients (μM)					Chl. <i>a</i> ($\mu\text{g/l}$)
				PO ₄	SiO ₂	NO ₃ + NO ₂	NH ₄	TN	
1	16.1	3.1	33.07	3.3	3.8	1.75	3.7	5.45	3.58
2	15.6	1.9	33.43	3.4	1.5	2.32	2.5	4.82	3.24
4	15.8	2.8	33.53	3.3	5.5	2.10	0.7	2.80	0.46
5	18.2	2.1	34.41	3.2	3.0	2.55	0.4	2.95	0.12
10	15.9	8.2	31.26	3.0	5.8	5.64	6.0	11.64	4.39
11	19.2	2.0	34.39	3.4	2.0	1.94	5.3	7.24	0.25
12	-	1.8	-	-	-	-	-	-	1.67
14	15.7	2.0	33.07	0.2	1.0	1.86	3.3	5.16	2.52
15	16.5	1.9	33.76	0.3	1.0	2.18	2.8	4.98	2.14

한편 해수 중 인산염의 평균 농도는 진해만에서부터 대한해협에 이르는 정점 1~정점 10에서 3.2 μM 의 농도를 보이고 영일만에서 울산만에 해당하는 정점 11~정점 15에서는 1.3 μM 의 농도를 나타낸다. 특히 정점 14와 정점 15에서 0.2~0.3 μM 의 낮은 농도를 나타냈다. 규산염의 농도는 정점 1~정점 10에서 평균 3.9 μM , 정점 11~정점 15에서 1.5 μM 의 평균값을 보였다. 정점 10에서 5.8 μM 의 최대값을 보이고 정점 14와 정점 15에서 1.0 μM 의 최소값을 나타내고 있다. 질산염(아질산염 포함)의 농도는 1.7(정점 1)~5.6(정점 10) μM 의 범위를 보이며 정점 10을 제외한 대부분의 정점에서 유사한 농도를 갖는다. 암모니아염은 연안으로부터 다소 멀리 있는 정점 4와 정점 5를 제외하고 평균 3.4 μM 의 농도를 갖고 정점 4와 정점 5에서 0.4~0.7 μM 의 매우 낮은 농도를 나타낸다. 정점 10에서 암모니아염의 농도가 최대 6.0 μM 의 농도로 총질소(TN)의 농도는 11.64 μM 로 다른 정점에 비해 뚜렷하게 높은 값을 나타냈다. Chl. *a*의 농도는 평균 2.0 $\mu\text{g/l}$ 의 농도를 보이고 연안과 비교적 멀리에 위치하는 정점 4와 정점 5 그리고 정점 11에서 농도가 0.12~0.46 $\mu\text{g/l}$ 의 범위로 매우 낮은 농도를 나타내고 있다. 그러나 해수 중 영양염(총질소와 규산염)의 농도가 높은 정점 10에서는 Chl. *a*의 농도가 4.39 $\mu\text{g/l}$ 의 최대 농도를 보였다. 정점 10은 상대적으로 낮은 염분(31.26 PSU)을 고려할 때 하천으로부터 영양염의 유입이 있고 이로 인해 Chl. *a*의 농도가 최대치를 나타내며 식물플랑크톤의 현존량이 가장 많을 것으로 추측된다. 그러나 정점 10에서 표층해수를 여과한 현탁입자 중 C₃₇ 알케논은 검출되지 않았고 또한 정점 2에서도 표층해수를 여과하여 알케논을 분석한 결과 전혀 검출되지 않았다(Fig. 3, Table 2). 그 외의 다른 정점에서는 매우 다양한 농도의 알케논이 검출되어 알케논을 생산하는 Prymnesiophyte와 같은 식물플랑크톤이 해역에 따라 크게 다른 현존량을 보이고 있는 것으로 판단된다. 정점별 C₃₇ 알케논의 농도 분석 결과를 보면 C_{37:4} 알케논은 모든

Fig. 3. Concentration of C_{37:2} + C_{37:3} ($\mu\text{g/l}$) at each sampling station (in parentheses).

정점에서 검출되지 않았고, C_{37:2}와 C_{37:3} 알케논을 합한 농도는 정점 5에서 96 $\mu\text{g/l}$ 로 가장 높았고 정점 4에서 2 $\mu\text{g/l}$, 정점 11에서 3 $\mu\text{g/l}$, 정점 14에서 4 $\mu\text{g/l}$ 로 낮은 농도를 나타냈다. C₃₇ 알케논이 검출된 7개 정점에서 분석된 9개 시료의 평균적인 C_{37:2}와 C_{37:3} 알케논을 합한 농도는 18.1 $\mu\text{g/l}$ 로서 정점 간에 큰 농도 차이를 볼 수 있었으며, 대마난류의 영향을 받고 있는 곳으로 여겨지는 정점 5에서 7개 정점의 평균 농도의 5배 정도의 높은 농도를 보인 것은 난류성 식물플랑크톤인 Prymnesiophyte가 대마난류

Table 2. C₃₇ alkenone composition in suspended particulate matter collected at the observational stations.

Station	Filtered water L	Weight (mg)				C ₃₇ conc. mg/l
		C _{37:4}	C _{37:3}	C _{37:2}	C _{37:4} +C _{37:3} +C _{37:2}	
1	6.3	n.d	0.041	0.047	0.089	0.014
	8.2	n.d	0.058	0.065	0.123	0.015
2	5.7	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	9	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
4	12	n.d	0.016	0.011	0.027	0.002
	10	n.d	0.011	0.010	0.021	0.002
5	10	n.d	0.370	0.591	0.961	0.096
10	6	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
11	9.4	n.d	0.012	0.015	0.027	0.003
12	9.5	n.d	0.070	0.052	0.122	0.013
14	9	n.d	0.020	0.020	0.040	0.004
15	9	n.d	0.059	0.064	0.123	0.014

에 많이 분포하기 때문에 판단된다(Park *et al.* 1999; Furuya *et al.* 2003).

남동해와 동남해역의 표층해수 알케논을 이용한 수온계산식의 비교

기존의 해양환경변화를 감시하는 bio-indicator들은 주로 최근 몇 년 또는 몇 십년간의 해양생물 종의 변화, 개체 수의 증감 또는 군집구조 변화들과 같이 환경변화에 의한 지표생물들의 생리화학적 또는 생태화학적 특성에 주목되어 선택되어 왔다. 그러나 본 연구에서는 식물플랑크톤 세포벽을 구성하는 중성지질화합물중 C₃₇ alkenone

이라는 분자단위의 bio-indicator를 사용하여 현재의 해양 환경에 대한 모니터링뿐만 아니라 과거로부터 현재까지의 해양환경(수온과 식물플랑크톤 Prymneisophyte의 생산성) 변화를 복원하기 위해 기존에 여러 연구자들에 의해서 보고되어온 수온방정식들을 비교 검토하였다. 우선 본 연구에서는 한반도 남 동해의 관측 정점에서 채수한 표층해수의 현탁입자 중 C₃₇ 알케논을 분석하여 농도를 결정하고 아래와 같이 C_{37:2}와 C_{37:3} 알케논 농도의 상대적인 비(U^K₃₇)를 이용하여 이제까지 세계 여러 해역에서 널리 사용되어온 9개의 관계식을 사용하여 U^K₃₇에 기초한 수온을 계산해 보았다(Table 3).

$$U^{K}_{37} = C_{37:2}/(C_{37:2} + C_{37:3})$$

U^K₃₇로 계산된 알케논 온도와 CTD에 의해 측정된 현장 수온 값을 비교해보면 현장 CTD 측정 수온과의 차이가 0.51°C에서 5.17°C로서 각 정점에 따라 크게 차이를 보였다. 이들 중 Prah1 and Wakeham(1987), Prah1 *et al.* (1988), Sike *et al.*(1997)이 발표한 수온계산식을 사용해 얻은 U^K₃₇ 수온이 CTD 현장 측정 수온과 비교해 각각 평균 1.98°C, 2.30°C, 4.97°C의 뚜렷이 낮은 수온을 보였으며, Volkman *et al.*(1995)과 Conte *et al.*(1998)^c이 보고한 상관식을 이용한 결과는 CTD 수온과 비교해 각각 평균 4.63°C와 5.17°C로 크게 높았다. 그러나 다른 세 개의 Conte *et al.*(1998)^a, (1998)^b, (1998)^d의 계산식은 비교적 CTD 수온에 근접한 수온들을 나타냈으며(Table 3), 무엇보다 Sawada *et al.*(1996)이 일본 북부(41°N, 141°E)의 Great Barrier Reef와 무쯔만(Mutsu Bay)에서 분리 동정한 *Emiliania huxleyi*(strain EH2)와 *Gephyrocapsa oceanica*

Table 3. Comparison between the calculated temperatures based on several equations of U^K₃₇ and *in situ* CTD temperature.

U ^K ₃₇ based temperature (°C)						Average of ΔT (°C)	Regression line of U ^K ₃₇ vs. growth temp.	Refs.
St.1	St.4	St.5	St.11	St.14	St.15			
14.67	13.45	17.33	15.79	13.85	14.52	1.98	0.033T + 0.043	Prah1 and Wakeham (1987)
14.35	13.18	16.94	15.44	13.56	14.21	2.30	0.034T + 0.039	Prah1 <i>et al.</i> (1988)
17.49	16.44	19.63	18.42	16.79	17.36	1.03	0.151 + 0.004T + 0.001T ²	Conte <i>et al.</i> (1998) ^a
17.73	16.81	19.63	18.55	17.12	17.62	1.21	0.053 + 0.009T + 0.001T ²	Conte <i>et al.</i> (1998) ^b
21.91	21.00	23.80	22.72	21.30	21.80	5.17	0.025 + 0.001T + 0.001T ²	Conte <i>et al.</i> (1998) ^c
17.10	15.77	20.03	18.33	16.20	16.93	0.78	0.014 + 0.03T	Conte <i>et al.</i> (1998) ^d
21.37	20.55	23.16	22.12	20.82	21.27	4.63	0.049T - 0.52	Volkman <i>et al.</i> (1995)
16.61	15.70	18.61	17.45	16.00	16.50	0.51	0.044T - 0.204	Sawada <i>et al.</i> (1996)
11.71	10.66	14.03	12.68	11.00	11.58	4.97	0.038T - 0.082	Sikes <i>et al.</i> (1997)
<i>In situ</i> CTD temperature (°C)								
16.1	15.8	18.2	19.2	15.7	16.5			

dT: difference between C₃₇ alkenone based temperature in particulate matter and *in situ* temperature.

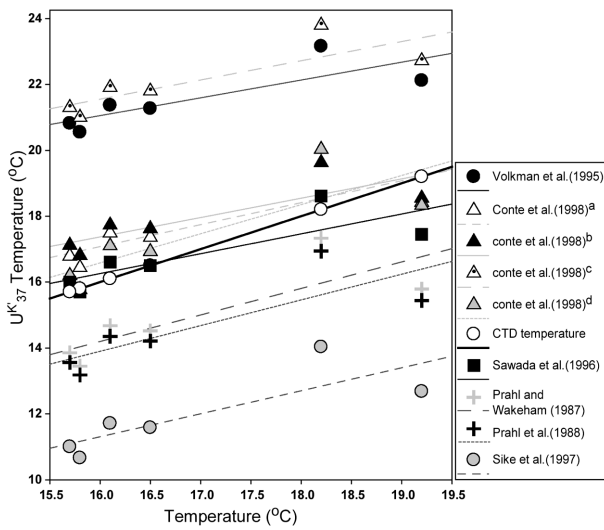


Fig. 4. The comparison between *in situ* CTD temperature and U^{K}_{37} temperature estimated by 9 different calibration equations.

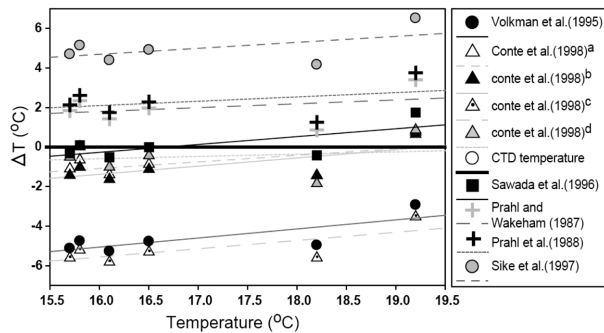


Fig. 5. The difference between alkenone-based temperature and *in situ* CTD temperature.

(strain GO1)을 실험실에서 성장온도 조건(10°C, 15°C, 20°C, 22°C, 25°C, 28°C)에서 배양 후 추출한 C_{37} alkenone을 분석하여 보고한 상관식(0.044T-0.204)을 사용하여 계산한 알케논 온도와 현장 CTD 수온이 평균 0.51°C의 차이를 보여 가장 근접한 상관식으로 추정할 수 있었다 (Fig. 4, Fig. 5).

그러나 정점 11에서는 Sawada *et al.*(1996)이 보고한 상관식을 이용한 알케논 수온도 현장 CTD 수온과 비교해 1.75°C 낮은 수온을 보였다. 이와 같이 해수중 현탁입자 알케논에 기록된 온도와 현장 CTD 수온이 차이를 보이는 이유로는 아래와 같은 요인들에 의해서 설명될 수 있다. Epstein *et al.*(1998)은 *Emiliania huxleyi*를 실내에서 등온 조건에서 배양실험을 실시한 결과, 수온 이외에도 질산염 농도와 성장속도의 변화가 알케논 불포화조성(U^{K}_{37})에 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. 한편 Popp and Kenig (1998)은 영양염 제한으로 인한 성장속도의 변화는 알케

논 온도에 뚜렷한 영향을 주지는 않았다고 발표하였으나 최근 다시 질산염의 감소와 빛이 알케논의 불포화조성(U^{K}_{37})에 영향을 줄 수 있다는 결과가 Prah *et al.*(2003)에 의해 추가로 보고되었다. 이와 같이 *Emiliania huxleyi*의 생리적인 변화가 U^{K}_{37} 에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 다소 논란이 있다고 볼 수 있으며 더욱이 본 연구에서처럼 표층수에서 질산염이 고갈되어 있지 않고 정점에 따라 크게 차이를 보이지 않는 해역에서 U^{K}_{37} 로 계산된 수온과 현장 CTD 수온의 차를 생리적인 요인으로 설명하기에는 충분하지 않다고 판단된다. 따라서 그 외의 다른 요인으로는 부유물질의 이동성이 고려될 수 있다. 예를 들면 상대적으로 저온인 저층수의 용승에 의해 공급된 영양염을 사용하여 생산된 알케논이 표층에서 이동되거나 수온이 증가하는 환경에 있다면 알케논 수온과 현장 CTD 수온이 크게 다르게 나타날 수 있다(Shin *et al.* 2002). 특히 본 연구해역의 일부(정점 5와 정점 11)에는 대마난류와 같은 강한 표층 해류의 흐름이 있어서 대마난류가 주변의 연안수나 동해의 다른 수괴와 혼합된다면 알케논 수온과 현장 CTD 수온이 크게 차이를 보일 수 있게 된다.

한편으로 Lee and Kim(2002)이 동해 울릉분지의 남동부 수심 1867 m에서 채취한 퇴적물 코어의 상부 시료에서 알케논을 분석하여 Prah *et al.*(1988)이 발표한 상관식에 넣어 계산한 결과에 의하면 18°C로 코어 채취 지점으로부터 가까운 곳에서 측정된 11월의 평균 표층수온과 일치하고 있다. 이는 Hong *et al.*(1996)이 동해에서 sediment trap을 설치하여 얻어낸 결과인 알케논을 생산하는 haptophyte microalgae의 최대 생산 시기가 10월과 11월이라는 것과 일치하고 있어 주목할 만하다. 그러나 본 연구에서 Prah *et al.*(1988)이 발표한 수온상관식을 사용하여 현장온도와 비교를 해 본 결과 U^{K}_{37} 로 계산된 알케논 온도와 현장 수온이 모든 정점에서 큰 차이를 보여 이에 대한 검토가 필요하다 할 수 있다.

따라서 앞으로 보다 정확하고 신뢰성 높은 상관식을 얻기 위해서는 우리나라 남동해와 동남해에 서식하는 Prymnesiophyte를 동정 후 분리하여 실험실에서 다양한 수온에서 배양한 뒤 Prymnesiophyte 세포내의 알케논(C_{37})을 분석하여 수온과 $C_{37:2}$ 와 $C_{37:3}$ 의 상대적 농도 비(U^{K}_{37})의 변화를 비교함으로써 한반도 연근해에 적용할 수 있는 상관식을 정립할 필요성이 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한반도 동남해와 남동해에서 채취한 표층해수 현탁입자 중 알케논을 분석하여 이제까지 보고된 여러 상관식을 이용하여 계산한 알케논 수온과 현장 CTD 수온을 비교 검토한 결과, Sawada *et al.*(1996)이 보고한

C_{37:2}와 C_{37:3} 알케논 농도의 상대적인 비(U^K₃₇)와 수온과의 상관식(0.044T-0.204)이 현장 CTD 수온과 평균 0.51°C의 가장 적은 차이를 보였다. 본 연구의 결과는 C₃₇ 알케논(alkenone) 분자생체지표가 한반도 주변 연근해의 고해양 환경복원을 위해 유용하게 활용될 수 있을 가능성을 제시하고 있다고 할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 보다 신뢰할 수 있는 상관식을 검증하는 것이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구의 시료 채취에 도움을 주신 부경대학교 해양과학공동 조사선 탐양호의 선장님을 포함한 선원 분들과 한양대학교 해양환경과학과 석동우 교수님과 김민섭 조교에게 그리고 시료의 분석에 협조를 해주신 일본해양과학기술센터 Harada Naomi 박사께 감사를 드립니다. 본 연구는 한국학술진흥재단의 2004년도 신진교수연구지원 사업(C00198)과 한양대학교 과학기술분야 특별 교비장학생 지원으로 수행되었음을 밝힙니다. 또한 본 논문의 심사를 맡아 주시고 귀중한 조언을 해주신 현상민 박사님과 한 분의 심사위원께 감사를 전하고 싶습니다.

참고문헌

- 강영실, 조영조, 고우진, 김성수, 전경암, 오현주. 2000. 한국 남해안에서 살파류(Tunicata: Thaliacea)의 대번식과 해양 생태계에 미치는 영향. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 5, 47-58.
- 양동범. 1992. 1986년 하계 마산만의 각종 질소 화합물 분포와 산소 소비율에 대한 연구. *한국해양학회지*, 27, 303-310.
- Ahn, Y.H., P. Shanmugam, K.I. Chang, J.E. Moon, and J.H. Ryu. 2005. Spatial and temporal aspects of phytoplankton blooms in complex ecosystems off the Korean coast from satellite ocean color observations. *Ocean Sci. J.*, 40, 67-78.
- Bentaleb, I., J.O. Grimalt, F. Vidussi, J.C. Marty, V. Martin, M. Denis, C. Hatté, and M. Fontugne. 1999. The C₃₇ alkenone record of seawater temperature during seasonal thermocline stratification. *Mar. Chem.*, 64, 301-313.
- Brassell, S.G., G. Eglinton, I.T. Malowe, U. Pflaumann, and M. Sarnthein. 1986. Molecular stratigraphy: a new tool for climate assessment. *Nature*, 320, 129-133.
- Conte, M.H., T. Anthony, L. David, and P.H. Roger. 1998. Genetic and physiological influences on the alkenone/alkenoate versus growth temperature relationship in *Emiliania huxleyi* and *Gephyrocapsa Oceanica*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 51-68.
- Epstein, B.L., S. D'Hondt, J.G. Quinn, J. Zhang, and P.E. Hargraves. 1998. An effect of dissolved nutrient concentrations on alkenone-based temperature estimates. *Paleoceanography*, 13, 122-126.
- Furuya, K., M. Hayashi, Y. Yabushita, and A. Ishikawa. 2003. Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. *Deep-Sea Res. II*, 50, 367-387.
- Harada, N., N. Handa, K. Harada, and H. Matsuoka. 2001. Alkenones and particulate fluxes in sediment traps from the central equatorial Pacific. *Deep-Sea Res. I*, 48, 891-907.
- Harada, N., K.H. Shin, A. Murata, M. Uchida, and T. Nakatani. 2003. Characteristics of alkenones synthesized by a bloom of *Emiliania huxleyi* in the Bering Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 1507-1519.
- Hong, G.H., S.-M. Choe, M.-S. Suk, J.-Y. Na, I.C. Sin, C.S. Chung, and S.H. Kim. 1996. Annual biogenic particle fluxes to the interior of the East/Japan Sea, a large marginal sea of the Northwest Pacific. p. 300-321. In: *Biogeochemical processes in the North Pacific*. ed. by S. Tsunogai. Proceedings of the International Marine Science Symposium held on 12-14 November 1996 at Mutsu, Aomori, Japan.
- Lee, K.E. and R. Schneider. 2005. Alkenone production in the upper 200 m of the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. I*, 52, 443-456.
- Lee, K.E. and K.R. Kim. 2002. Past sea surface temperature of the East Sea inferred from alkenone. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 37, 27-34.
- Lee, T. and I.N. Kim. 2003. Chemical imprints of the upwelled waters off the Coast of the Southern East Sea of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 38, 101-110.
- Park, M.O., C.H. Moon, H.S. Yang, and J.S. Park. 1999. Distribution of phytoplankton pigments in the Korea Strait. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 34, 95-112.
- Popp, B.N. and F. Kenig. 1998. Does growth rate affect ketone unsaturation and intracellular carbon isotopic variability in *Emiliania huxleyi*?. *Paleoceanography*, 13, 35-41.
- Prahl, F.G. and S.G. Wakeham. 1987. Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for paleotemperature assessment. *Nature*, 330, 367-369.
- Prahl, F.G., L.A. Muehlhausen, and D.L. Zahnle. 1988. Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2303-2310.
- Prahl, F.G., G.J. DeLange, M. Lyle, and M.A. Sparrow. 1989. Post-depositional stability of long-chain alkenones

- under contrasting redox conditions. *Nature*, 341, 434-437.
- Prahl, F.G., G.V. Wolfe, and M.A. Sparrow. 2003. Physiological impacts on alkenone paleothermometry. *Paleoceanography*, 18, 2002PA000803.
- Sawada, K., N. Handa, Y. Shiraiwa, A. Danbara, and S. Monatni. 1996. Long-chain alkenones and alkyl alkenoates in the coastal and pelagic sediments of the northwest North Pacific with special reference to the reconstruction of *Emiliania huxleyi* and *Gephyrocapsa oceanica* ratios. *Org. Geochem.*, 24, 751-764.
- Sawada, K., N. Handa, and T. Nakatsula. 1998. Production and transport of long-chain alkenones and alkyl alkenoates in a sea water column in the northwestern Pacific off central Japan. *Mar. Chem.*, 59, 219-234.
- Shin, K.H., N. Tanaka, N. Harada, and J.C. Marty. 2002. Production and turnover rates of C₃₇ alkenones in the eastern Bering Sea: Implication for the mechanism of a long duration of *Emiliania huxleyi* bloom. *Prog. Oceanogr.*, 55, 113-129.
- Sike, E., J.K. Volkman, L.G. Robertson, and J.J. Pichon. 1997. Alkenones and alkenes in surface waters and sediments of the Southern Ocean: Implications for paleotemperature estimation in polar regions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 1495-1505.
- Ternois, Y., M.A. Sicre, A. Boireau, M.H. Conte, and G. Eglinton. 1997. Evaluation of long-chain alkenones as paleo-temperature indicators in the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Res. I*, 44, 271-286.
- Volkman, J.K., G. Eglinton, E.D.S. Corner, and J.R. Sargent. 1979. Novel unsaturated straight-chain C₃₇-C₃₉ methyl and ethyl ketones in marine sediments and a coccolithophorid *Emiliania huxleyi*. p. 219-227. In: *Advances in Organic Geochemistry*. ed. by A.G. Douglas and J.R. Maxwell. Pergamon Press, Oxford.
- Volkman J.K., G. Eglinton, E.D.S. Corner, and T.E.V. Forsberg. 1980. Long-chain alkanes and alkenones in the marine coccolithophorid *Emiliania huxleyi*. *Phytochemistry*, 19, 2619-2622.
- Volkman, J.K., M.B. Stephanie, I.B. Susan, and L.S. Elisabeth. 1995. Alkenones in *Gephyrocapsa oceanica*: Implications for studies of paleoclimate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 513-520.

Received Sep. 5, 2006

Accepted Jan. 19, 2007