

## 서해안 곰소만 갯벌 온도의 구조 및 변화

이상호<sup>1\*</sup> · 조양기<sup>2</sup> · 유광우<sup>3</sup> · 김영곤<sup>1</sup> · 최현용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 해양학과, 새만금환경연구센터

<sup>2</sup>전남대학교 지구환경과학부

<sup>3</sup>한국수력원자력주식회사 원자력환경기술원

### Structure and Variation of Tidal Flat Temperature in Gomso Bay, West Coast of Korea

SANG-HO LEE<sup>1\*</sup>, YANG KI CHO<sup>2</sup>, KWANG-WOO YOU<sup>3</sup>, YOUNG GON KIM<sup>1</sup> AND HYUN YONG CHOI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Oceanography, SERC, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

<sup>2</sup>Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Institute of Marine Science,

Chonnam National University, Gwangju 500-157, Korea

<sup>3</sup>O & M Support Group, Nuclear Environment Technology Institute, Hydro & Nuclear Power Co. LTD, Daejeon 305-380, Korea

갯벌의 온도구조와 열적 특성변화를 조사하기 위해 서해안 곰소만 갯벌조간대에서 고도가 다른 3개 지점을 설정하여 40 cm 깊이까지 계절별로 1개월간의 온도관측을 수행하였다. 표층에서 평균온도는 하계에 아래층보다 높고 동계에는 낮아져 표층가열과 냉각에 의한 온도구조와 변화 형태를 보여주었으며 표준편차는 아래층으로 갈수록 감소하였다. 주기성이 뚜렷한 일사량과 조위 변화가 주로 단기적 온도변화를 야기하였고, 간헐적으로는 강우와 강한 풍속도 영향을 주었다. 시계열분석에 의하면 24시간, 12시간 그리고 8시간 주기 성분에 강한 에너지 첨두(peak)를 보였으며, 24시간 주기성분이 가장 큰 에너지를 보였다. 24시간 주기 성분은 일사량변화, 12시간 주기는 반일주조 조위변화 그리고 8시간 주기성분은 일사량과 조위변화의 상호작용에 의한 온도파동으로 해석되었다. EOF분석에서 제 1모드와 제 2모드가 수직온도구조 변화의 96%를 차지하였다. 제 1모드는 갯벌 표층에서의 가열과 냉각에 의한 현상으로, 제 2모드는 갯벌내부의 열 전파과정에서 발생하는 지연효과로 해석되었다. 교차스펙트럼 분석에서 24시간 주기성분 온도파동에 의한 열전달위상은 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 평균위상 차이를 보였고, 표층에서 10 cm, 20 cm, 40 cm 깊이까지의 위상 차이에 의한 지연시간은 각각 3.2시간, 6.5시간 9.8시간이었다. 일차원적 열확산모델에서 산출된 24시간 주기성분 온도파동의 수직 확산계수는 깊이와 계절에 걸쳐 평균하였을 때 중부조간대 정점에서는  $0.70 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ , 하부조간대 정점에서는  $0.57 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 의 값을 보였다. 깊이 평균된 확산계수는 봄철에 크고 여름철에 작았고, 계절 평균된 확산계수는 2 cm부터 10 cm 깊이까지 증가하고 10 cm부터 40 cm 깊이까지는 감소하는 수직구조를 보였다. 평균 열확산계수를 사용하여 구한 온도전파 확산속도는 2 cm 깊이로부터 10 cm, 20 cm, 40 cm 까지 각각  $8.75 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$ ,  $3.8 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$ ,  $1.7 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$  정도의 값이 되어 표층에서 깊어질수록 작아졌다.

Soil temperature was measured from the surface to 40 cm depth at three stations with different heights in tidal flat of Gomso Bay, west coast of Korea, for one month in every season 2004 to examine the thermal structure and the variation. Mean temperature in surface layer was higher in summer and lower in winter than in lower layer, reflecting the seasonal variation of vertically propagating structure of temperature by heating and cooling from the tidal flat surface. Standard deviation of temperature decreased from the surface to lower layer. Periodic variations of solar radiation energy and tide mainly caused short term variation of soil temperature, which was also intermittently influenced by precipitation and wind. Time series analysis showed the power spectral energy peaks at the periods of 24, 12 and 8 hours, and the strongest peak appeared at 24 hour period. These peaks can be interpreted as temperature waves forced by variations of solar radiation, diurnal tide and interaction of both variations, respectively. EOF analysis showed that the first and the second modes resolved 96% of variation of vertical temperature structure. The first mode was interpreted as the heating and cooling from tidal flat surface and the second mode as the effect of phase lag produced by temperature wave propagation in the soil. The phase of heat transfer by 24 hour period wave, analyzed by cross spectrum, showed that mean phase difference of the temperature wave increased almost linearly with the soil depth. The time lags by the phase difference from surface to 10, 20 and 40cm were 3.2, 6.5 and 9.8 hours, respectively. Vertical thermal diffusivity of temperature

\*Corresponding author: sghlee@kunsan.ac.kr

wave of 24 hour period was estimated using one dimensional thermal diffusion model. Average diffusivity over the soil depths and seasons resulted in  $0.70 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  at the middle station and  $0.57 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  at the lowest station. The depth-averaged diffusivity was large in spring and small in summer and the seasonal mean diffusivity vertically increased from 2 cm to 10 cm and decreased from 10 cm to 40 cm. Thermal propagation speeds were estimated by  $8.75 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $3.8 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  and  $1.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  from 2 cm to 10 cm, 20 cm and 40 cm, respectively, indicating the speed reduction with depth increasing from the surface.

**Key words:** Soil Temperature Wave, Tidal Flat, Thermal Diffusivity, EOF and Spectrum Analysis, Gomso Bay

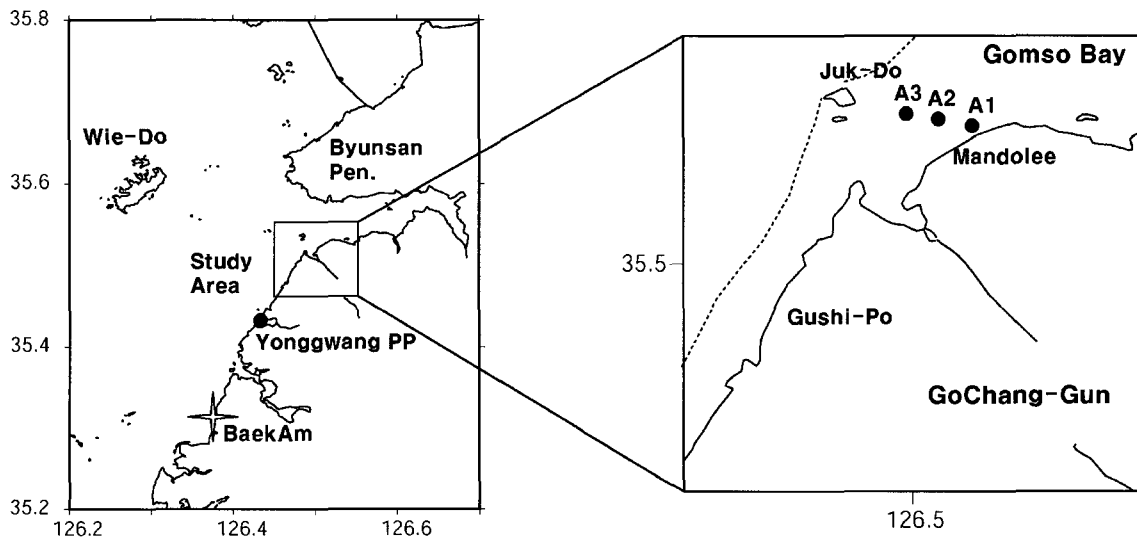
## 서론

서해안에는 넓은 갯벌의 조간대가 발달되어 있으며, 대조차 환경의 반일주조 영향으로 하루에 두 번 대기에 노출되고 또 해수에 잠긴다. 갯벌의 이러한 환경은 육상의 토양과는 상이한 퇴적물의 온도변화가 나타나게 하고 저서생물을 번성시키며, 갯벌 퇴적물의 열적 특성은 저서생물의 생태에 영향을 주게 된다. 갯벌의 온도변화는 갯벌표면을 통한 열 교환과 갯벌내부에서의 열전달 과정에 의해 결정된다(Harrison and Phizacklea, 1985). 특히, 갯벌의 열적 특성은 지표에서 에너지 분배에 영향을 주어 퇴적물의 온도와 열 그리고 수분의 전달에 중요한 역할을 하기 때문에 생물생태학분야 뿐만 아니라 토양물리와 공학에서 많은 연구가 요구되고, 대기경계층 연구에도 중요한 부분을 차지한다(Abu-Hamdeh, 2003; Harrison, 1985).

Harrison and Phizacklea(1985)는 스코틀랜드 니질 갯벌에서 갯벌내부 온도를 관측하여 열속을 계산한바 있으며, 열속이 고조시각과 밀접한 관계가 있음을 보였다. Vugts and Zimmerman(1985)은 독일 갯벌에서 간단한 열수지 모델로 일평균온도의 변화를 모의하고 관측 자료와 비교한 바 있다. Guarini *et al.*(1997)는 프랑스 갯벌에서 수직 열전달방정식을 이용하여 니질 갯벌 조간대의 표면온도를 계산한 바 있다. 우리나라의 경우 나 등(2000)이 서해제부도 갯벌에서 계절별로 1일 미만의 짧은 관측 자료들을 사용

하여 열수지의 변화를 연구한 바 있으며, 최(2002)는 대안반도 조간대 퇴적층의 4계절 온도변화를 연구한바 있다. 하지만 갯벌의 열적 특성은 조위변화, 태양복사 열속 및 기상조건에 따른 표면을 통한 열 교환, 퇴적물의 조성 등의 차이에 의해 달라질 수 있으므로 갯벌의 위치 및 관측지역에 따른 차이를 보일 것으로 예상된다.

갯벌표면에서의 열교환은 조위변화에 따른 노출과 침수의 조건에 따라 대기 혹은 해수와의 열 교환으로 구분할 수 있다. 대기와의 열교환시에는 낮과 밤에 의한 복사열속, 잠열속, 현열속 등의 변화에 의해 결정되고, 침수 동안에는 해수와의 온도차에 의해 결정된다. 갯벌 내부에서의 온도구조 및 변화는 표층을 통한 열 교환과 함께 퇴적물의 조성과 함수율 등에 따라 달라지는 열 용량 계수, 전도 및 확산계수 등에 의해 변화된다(Vugts and Zimmerman, 1985; Matsunaga and Kodama, 2001). 따라서 갯벌 퇴적물의 열적 특성을 파악하기 위해서는 먼저 갯벌내부의 온도구조와 변화 특성이 규명되어야 하며, 이와 함께 기상조건과 조위변화 등이 조사되어야 온도변화 요인들의 기여도를 파악할 수 있다. 특히, 중위도지방에 위치한 우리나라 서해안의 경우 갯벌 표면을 통한 열교환은 계절적으로 차이를 보일 것이 예상되지만 온도구조에 대한 장기적인 관측결과는 아직 보고된 바 없다. 갯벌의 온도구조와 변화는 대조차 환경으로 인해 갯벌의 고도차에 의한 노출과 침수 비율에 따라 달라질 것이므로 상부조간대와 하부조간대를 포함하는 동시적 관측이 요구된다.



**Fig. 1.** Map of study area and locations of temperature measurement stations in tidal flat in Gomso Bay. AWS (autonomous weather station) was installed in BaekAm and sea level was observed in Yonggwang tide station.

서해안 갯벌의 온도구조와 변화특성을 알아보기 위하여 전라북도 고창군인 곰소만 갯벌에서 조간대 높이에 따라 3개 지점을 선정하여 갯벌내부 온도를 관측하였다(Fig. 1). 연구지역인 곰소만 입구 갯벌은 북서쪽 연안으로 넓게 펼쳐져 있으며 완만한 경사를 이루고 있고 사질이 많이 포함된 퇴적물로 이루어져 있다(장, 1995; 장과 최, 1998). 조사지역은 대조차가 5.8 m 정도이고, 조사정점들에서 약 15 km 떨어진 만의 상류에 출포천이 있어 육수가 유입되고 있으며, 소규모 수로들이 해안선을 따라 분포하고 있다. 본 연구에서는 관측된 갯벌온도의 평균온도와 표준편차 구조를 알아보고, 온도변화를 유발하는 환경요인들을 파악하였으며, 시계열분석을 통하여 온도구조와 변화특성을 알아보았다. 열확산 모델을 이용하여 조사지역 갯벌의 열적 특성 중에서 일차적으로 수직 열확산계수를 구하였고 확산속도를 추정하였으며 이를 시계열분석에서 파악된 수직 열전달속도와 비교하였다.

**자료 및 방법**

조사정점은 3개 정점(A1, A2, A3)으로 설정하였고, 정점사이의 거리와 고도차이는 Fig. 2a와 같다. 가을철에는 세 정점에서 50cm 까지 퇴적물을 채취하여 분석한 결과 sand가 평균적으로 80% 포함된 Silty-sand로 구분된다. 각 정점에서 Fig. 2b와 같이 길이 50 cm, 직경 13 cm의 원통형 플라스틱 프레임에 갯벌에 설치하였다. 갯벌 시추장비를 이용하여 프레임 내의 갯벌을 모두 제거한 후, 프레임 안쪽에서 바깥쪽으로 구멍을 내어 2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm에 각각 온도센서를 설치하고 플라스틱 프레임에 다시 파낸 갯벌로 채워 넣었다. 표층의 경우 갯벌이 노출되었을 때는 갯벌표층에 온도계가 위치하도록 설치하였다. 온도계는 미국 Onset사의 Hobo water Temp Pro를 사용하였고, 정확도와 해상도는 각각 0.2°C와 0.02°C이다.

2004년에 4계절에 걸쳐 각 1개월씩 갯벌 퇴적물의 온도를 측정하였다. 관측기간은 겨울: 1월 11일~2월 10일, 봄: 4월 19일~5월 22일, 여름: 6월 23일~7월 24일, 가을: 9월 14일~10월 15일이다. 온도센서의 관측간격은 3분으로 설정하였으며, 겨울부터 여름까지는 각 조사시기마다 2차로 나누어 2주일 간격으로 온도계를 회수하여 자료를 획득하였고 1차 관측자료 회수 1일 후 온도계를 다시 설치하였다. 가을철에는 1 개월 동안 연속적으로 관측하였다.

조사기간 동안 영광군 백암리(Fig. 1참조) 해안선에 자동기상관

측기(AWS)를 설치하여 풍향, 풍속, 기온, 상대습도, 기압, 일사량 등이 10분 간격으로 관측되었으며 영광검조소에서는 조위가 매 10분 간격으로 측정되었다. 기상관측 위치가 조사정점에서 20 km 정도의 거리에 있어 조사지역의 미세기상 구조(바람, 기온 등)와 동일한 자료가 기록되었다고 하기는 어렵지만 조사지역 기상의 전반적 변화는 충분히 반영될 수 있는 위치에 있다. 조위관측지점도 조사지역에서 9 km 정도 떨어져 있지만 조사정점들의 조위변화를 표현하기에는 충분히 가까운 거리에 있다.

관측된 자료는 먼저 시간에 대한 변화를 그려 각 자료의 신뢰도를 검토하고 편집하였다. 갯벌온도와 기상요소 및 조위변화를 갯벌온도구조의 시간변화에 맞추어 갯벌 온도변화가 노출과 침수에 따른 타당한 변화를 보이는지 검토하였다. 조사정점의 고도차이를 감안하고 갯벌온도의 급속한 변화 시기를 조위변화와 비교하여 각 정점에서 노출 및 침수 조위를 결정하였으며, 노출동안의 조위는 제시된 그림들에서 표시하지 않았다. 침수조위를 이용하여 노출과 침수기간을 산출하였고, 관측기간에 대한 노출과 침수기간의 비율을 노출율로 설정하였다. 조석의 변화에 따라 각 시기별, 정점별로 노출율이 다소 다르지만 각 정점의 평균적인 노출율은 A1: 75%, A2: 60%, A3:40% 정도이다. 연안 쪽 정점 A1의 고도가 높아 노출율이 크다.

관측된 갯벌온도가 계절과 노출율에 따라 변화되는 특징을 파악하기 위하여 각 관측기간 동안의 관측 깊이별 평균온도와 표준편차를 구하였다. 수직구조 특성과 구조변화의 강도와 발생원인 등을 파악하기 위하여 관측시기별로 EOF 분석을 시행하였다. 각 관측기간 동안 시계열 변화특성을 파악하기 위하여 자료들에 대한 스펙트럼을 분석하고 교차스펙트럼에서 분석된 온도파동의 깊이에 따른 위상차이로부터 온도파동의 전달속도를 구하였다. 또한 수직적으로 일차원 온도확산모델을 수립하여 자기스펙트럼에서 구해진 주요 주기별 온도파동의 에너지로부터 진폭을 구하고 이를 이용하여 갯벌 내 열확산계수를 구하였다(Harrison and Phizacklea, 1985; Piccolo et al., 1993).

**결 과**

**통계적 특성**

기상요인들의 변화는 매일 달라질 수 있지만 2주일 이상의 기

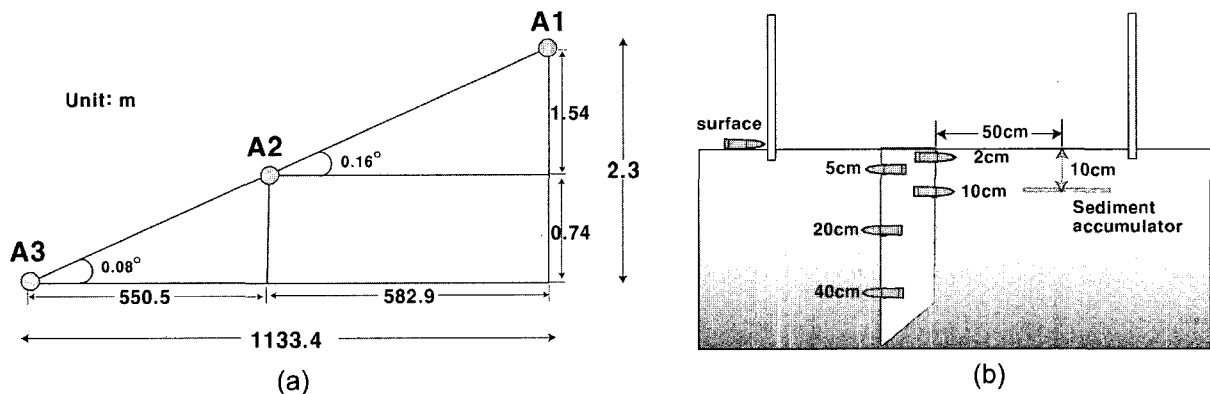


Fig. 2. (a) Distance and vertical height between the stations in Gomsu tidal flat. (b) Schematic figure of temperature sensors installation in a station.

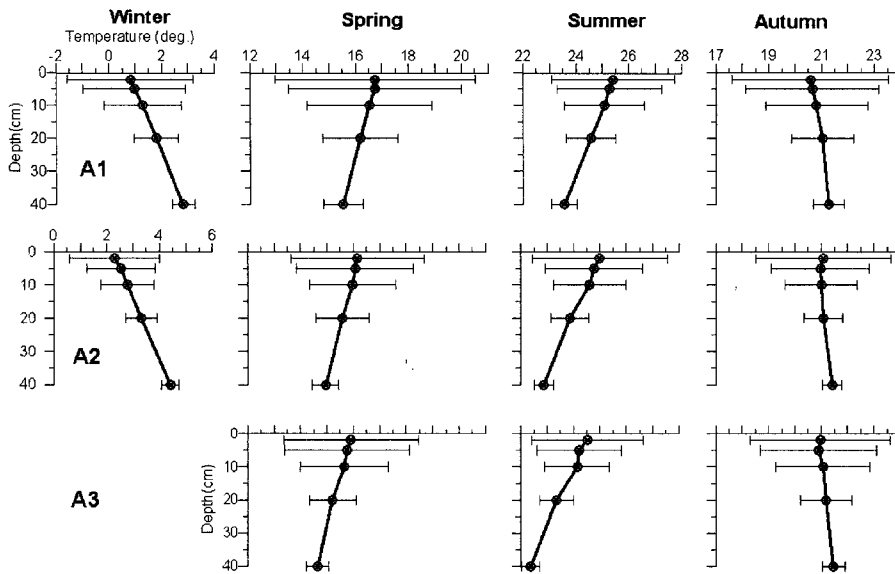


Fig. 3. Vertical structures of mean (circle) and standard deviation (horizontal bar) of sediment temperature in observed stations.

간에 걸쳐 갯벌 각 층에서 평균온도와 표준편차를 구한다면 이 값들은 단기간의 기상변화 요인에 의한 교란은 배제된 것으로 볼 수 있다. 가을철에는 1개월 동안의 평균온도와 표준편차를 구하였고 그 외 계절에는 각 정점에서 2주일 동안 관측된 층별 온도에서 평균온도와 표준편차를 구하였다. Fig. 3은 각 계절에 2주일씩 두 번 관측에서 구해진 층별 평균온도와 표준편차를 다시 평균하여 구한 세 정점의 계절별 평균온도구조와 표준편차를 보여준다. 층별 평균온도는 겨울과 가을철에 표층에서 저층으로 갈수록 높아지고 봄과 여름철에는 낮아지는 구조를 보이며 대부분 깊이에 따라 선형적으로 증가 혹은 감소하지만 노출율이 감소하는 중·하부조건대의 정점 A2와 A3에서는 선형성이 다소 바뀌는 형태를 보인다. 표층과 40cm 깊이의 평균온도차이는 겨울철에 -2.2°C, 봄철에 1.5°C, 여름철에 2.3°C, 가을철에는 -0.8°C 정도로서 여름철 평균온도의 차이는 봄철보다 크다. 각 층의 온도표준편차는 모든 시기에 표층

에서 크고 저층으로 갈수록 작으며, 노출율이 작은 하부조건대에서 편차가 줄어들는다. 표준편차가 가장 큰 곳은 상부조건대인 정점 A1의 표층으로서 시기적으로는 봄철에 가장 크고 다음이 가을철이다.

넓은 갯벌에서 갯벌온도 변화를 일으키는 기상요인들은 공간적으로는 거의 차이를 보이지 않을 것이므로 갯벌온도변화는 관측 정점의 고도와 조위변화에 따른 침수 및 노출에 의해 차이를 보일 수 있다. 따라서 넓은 갯벌의 시간적 온도변화의 일차적 특성인 평균온도와 표준편차를 갯벌의 노출율에 따라 비교해 보면 갯벌의 열 함량 및 변화의 특징을 짐작할 수 있게 된다. Fig. 4a는 각 정점의 평균 노출율과 계절별 평균온도의 관계를 보여준다. 노출율이 같으면 봄과 여름철에는 평균온도가 표층에서 저층으로 갈수록 낮지만 가을과 겨울철에는 오히려 높아진다. 봄과 여름철에는 노출율이 클수록 평균온도가 거의 선형적으로 증가하지만 겨울철에는 노출율이 클수록 감소한다. 동일 계절에서 노출율에 따

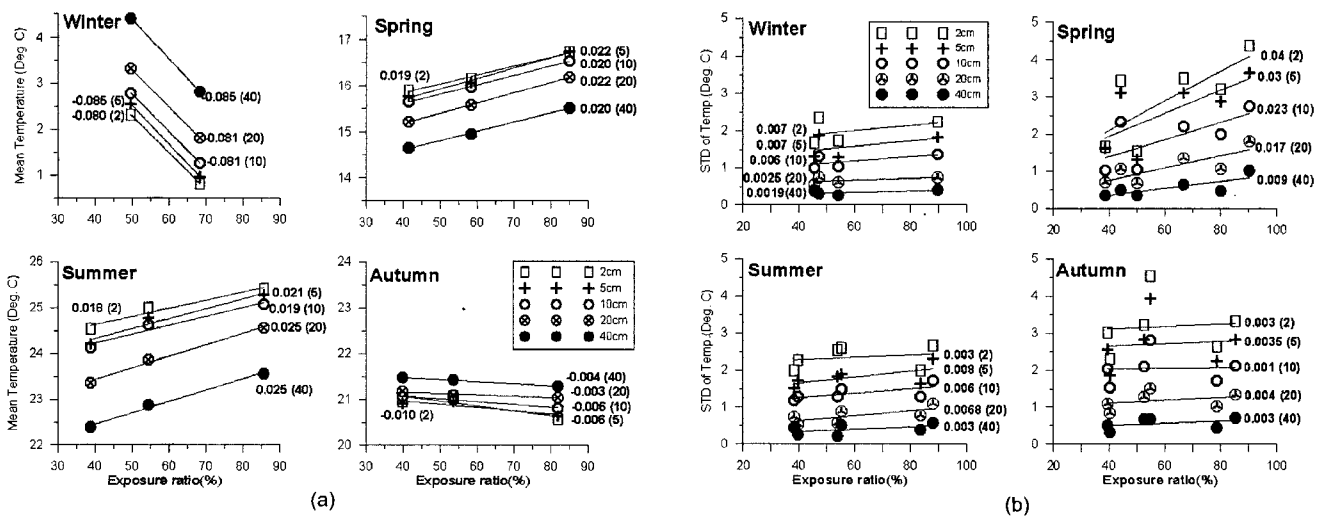


Fig. 4. Relationships between exposure ratio and (a) time-mean temperatures and (b) standard deviations of temperature at different depth in three stations. The numbers indicate the fitted slopes (°C/%) of the relation and the number in parenthesis denotes the depth of temperature measurement.

른 평균온도의 증가율은 각 층에서 거의 비슷하여 봄과 여름철에는 0.02°C/% 정도의 값을 보이고, 겨울철에는 감소율이 -0.08°C/% 정도로 오히려 크다. 다만 가을철에는 표층에서 노출율에 따른 평균온도 감소율이 저층보다 다소 크다.

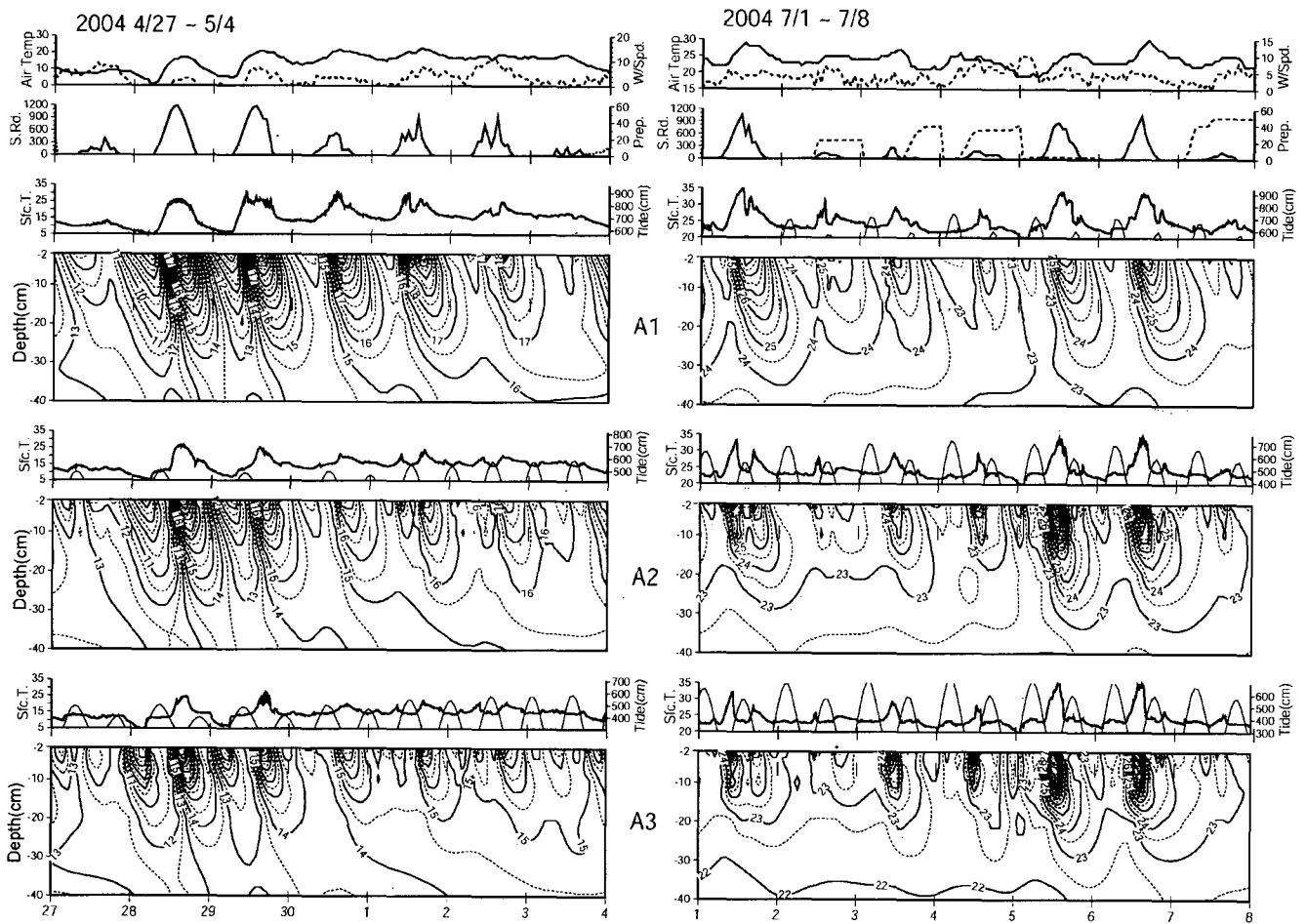
갯벌온도의 변화특성을 살펴본 Fig. 3에서 표층은 저층보다 현저히 큰 온도변화 폭을 보여 주었다. 2주일 동안의 평균온도에 대한 표준편차를 동일기간의 노출율에 대해 표현하면(Fig. 4b) 모든 계절에 걸쳐 노출율의 증가에 따라 온도 표준편차가 각 층에서 증가하는 관계를 보여준다. 가장 큰 표준편차 증가율은 봄철 갯벌표층으로 0.04°C/% 정도의 값을 보이고 가장 낮은 증가율은 가을철에 나타난다. 겨울철에 비해 가을철의 노출율에 따른 온도 편차의 증가율은 오히려 작지만 동일 노출율에서 표층과 저층의 표준편차 차이는 가을철이 현저히 크다.

**온도변화와 환경요인**

봄과 여름에 조사된 온도구조의 변화특성을 발췌하여 살펴보면(Fig. 5), 갯벌온도는 각 관측점의 밤낮에 따라 급격한 변화를 보이고 변화의 주기성이 1일인 뚜렷한 온도파동을 보인다. 또한 조위변화는 관측점점의 고도에 따라 갯벌의 침수와 노출시기를 결

정하는데 침수가 발생되지 않은 정점에서는 침수가 발생한 정점에 비해 온도구조가 현저히 단순한 변화를 보인다. 갯벌 내 온도 변화 세기는 표층에서부터 깊이가 증가할수록 감소하는 특징을 보인다. 하지만 깊이에 따라 최고, 최저온도가 나타나는 시기는 표층에 비해 깊이가 증가할수록 늦어지는 경향을 보인다. 관측기간 동안의 기온, 풍속, 태양복사 열속과 강수량, 조위의 변화를 살펴보면 풍속과 강수량을 제외하고 다른 환경변수들은 대부분 주기적인 변화를 보인다. 따라서 갯벌온도 변화는 주기성을 갖는 온도변화 유발요인(기온, 태양복사, 조위 등)들의 지배를 받고 있음을 알 수 있다. 한편, 여름에는 잦은 강수에 의해 소폭의 온도변화를 보이기도 한다. 7월 5일과 6일의 경우 정점 A1에서는 표층부근 온도가 갯벌 노출시에도 정점 A2 혹은 A3과 비교하였을 때 현저히 낮았다(Fig. 5b), 노출기간이 긴 상부조건대의 정점 A1에서 갯벌온도가 작게 증가된 이러한 현상은 인근 소규모 개울을 통하여 농지 혹은 마을로부터 담수가 유입되어 발생한 현상으로 판단되었다.

봄철인 4월 말부터 5월 초순에 걸쳐 일주일 동안은 일사량과 기온 및 바람 등의 변화에 의해 갯벌표층 온도 및 수직적 온도구조가 변화되는 과정을 잘 보여준다(Fig. 5a). 4월 27일에는 일사량이 매우 적었으며 7 m/sec 이상의 바람이 지속되었고 기온의 변화폭



**Fig. 5.** Examples of depth-time plots of temperature variations in three stations during one week in spring (left) and summer (right). Variations of sediment surface temperature (thick line) and sea level (thin) are plotted above the depth-time plot in a station. Variations of air temperature (solid), wind speed (dashed), solar radiation (solid) and precipitation (dashed) measured by AWS in BeakAm are plotted above the plots.

도 현저히 작았다. 작은 일사량과 강한 바람에 의한 표층 열손실로 갯벌 내 수직적 온도차이가 현저히 감소하였다. 4월 28일과 29일에는 기온의 변화가 심하고 일사량이 크게 증가하여 온도파동의 세기가 증가하였지만 노출기간이 상대적으로 작은 정점 A3에서 온도변화는 정점 A1보다 작다. 이 시기의 수직적 온도구조의 변화를 살펴보면, 일사량이 있을 때 갯벌이 노출되어 갯벌 저층에서 표층으로 온도가 증가하는 구조를 보이고, 일사량이 없는 밤 동안 노출되었을 때는 낮은 기온으로 인하여 표층에서 온도가 현저히 감소하고 아래쪽 온도보다 낮아지는 구조로 변화되며 침수가 되어도 이 구조는 지속되고 있다(정점 A2와 A3참조).

규칙적 현상인 조위변화에 따른 갯벌표층온도의 변화특징을 자세히 살펴보면, 하계에 조위변화에 의해 낮 동안 갯벌이 노출되면 갯벌 온도는 상승하며, 표층온도는 침수와 노출이 전환되는 시기에 큰 변화율을 보인다(Fig. 6). 5월 1일과 2일의 경우 정점 A2에서는 일사량이 있는 낮 동안에 침수되어 표층부근 온도파동의 주기가 현저히 짧아졌으며 침수전과 노출후에 온도상승이 발생하고, 밤중에 침수전과 후에 다시 소폭의 온도상승이 발생하였다. 이러한 노출과 침수과정으로 인하여 하루에 3~4회의 온도상승 첨두가 관측되었다. 10월 9일부터는 정점 A3에서 일사량이 없는 밤 동안 노출되었을 때 갯벌표층 온도가 현저히 낮아지지만, 조위의 증가로 해수에 침수되면 표층부근 온도는 급속히 증가하고 새벽에 노출이 일어날 때까지 거의 온도변화가 없었다. 낮 동안의 노출에 의한 온도상승 첨두와 야간 침수에 의한 온도상승에 의해 하루에

대략 2회 상승하는 온도파동을 보인다. 가을철 야간 침수시의 갯벌표층 온도변화는 봄철에 침수기간에 나타나는 온도변화와는 다른 형태를 보였는데, 이러한 차이는 계절에 따른 갯벌과 해수의 온도차이, 해수 내 공간적 온도차이 등에 기인한 현상으로 해석될 수 있다.

**시계열 분석**

**EOF 분석:** 관측지역의 대표적 위치인 정점 A2에서 갯벌온도의 수직구조를 알아보기 위해 갯벌 표층온도를 포함하여 EOF 분석을 하였으며, Fig. 7a는 eigenvector의 수직구조를 보여준다. 모든 계절에 걸쳐 제 1모드와 2모드가 수직구조 변화의 96%이상을 차지한다. 제 1모드가 가장 크며(77% 이상) 각 계절 모두 수직적으로 같은 방향의 값을 보인다. eigenvector의 크기는 표층에서 저층으로 감소하고 감소율은 겨울부터 여름까지 크고, 가을에는 작다. 특히, 겨울과 봄철에는 eigenvector가 갯벌표면과 2 cm 깊이 사이에서 크게 감소한다. 제 2모드는 수직적으로 eigenvector의 부호가 한번 교차하는 모드이다. 이 모드가 차지하는 비율은 7%~20% 정도이다. 갯벌내부에서 표층과 반대되는 부호의 값이 나타나는 깊이는 겨울과 봄철에는 2 cm; 여름과 가을철에 5 cm~10 cm 사이이고, 가장 큰 값을 보이는 깊이도 겨울과 봄에는 5 cm, 여름과 가을에는 20 cm 깊이이다.

정점 A2 갯벌온도구조의 제 1, 2 모드의 계절별 시간변화 형태는 Fig. 7b와 같다. Eigenvector 분석의 모드별 기여율에서도 언급되었지만 제 1모드 진폭이 제 2모드보다 현저히 크다. 1월과 10월에는 제 1모드의 변화에서 관측 후반부가 전반부에 비해 온도가 낮은 쪽으로 치우쳐 있어 일주일 이상 장주기의 변화(혹은 계절변화의 일부)가 포함되어 있음을 알 수 있다. 제 1모드의 진폭이 크게 증가하는 시기는 모든 계절에서 낮 동안 갯벌이 노출되었을 때이고, 밤 동안에 노출되었을 때에는 현저히 낮아진다. 제 2모드는 봄, 여름, 가을철에 제 1모드가 급격히 증가할 때 현저히 감소하는 변화를 보이며 제 1모드와는 반대의 위상을 보인다. 하지만 겨울철의 경우에는 제 1모드와 유사한 위상을 보였다.

봄철 1차시기에 관측된(Fig. 7b 위에서 두 번째 경우) 온도변화의 모드에서 주기성을 분석하면 Fig. 8과 같다. 자유도 8, 진동수 분해 폭을 0.011 cph로 하였을 때 제 1, 2모드에서 모두 24시간, 12시간, 8시간 주기대의 온도변화 에너지 첨두가 뚜렷하다. 6시간 주기도 에너지 첨두가 나타나지만 에너지 밀도는 8시간 주기에 비해 10% 정도이다. 본 연구에서 2주일 관측기간의 자료로서는 낮은 에너지 첨두의 현상을 밝히기에는 부족하다고 판단되어 다음절의 스펙트럼 분석에서는 8시간 보다 짧은 주기대의 온도파동은 분석 및 논의에서 제외하였다.

**스펙트럼 분석:** 갯벌 온도파동의 주된 주기와 에너지 정도를 분석하기 위하여 관측된 온도의 자기스펙트럼을 구하였다. 세 정점의 중간에 해당하는 정점 A2에서 계절별로 관측된 온도변화의 자기스펙트럼은 Fig. 9와 같다. 10월의 경우 1개월의 자료에서 자유도(degree of freedom)를 다르게 하여 스펙트럼 분해 폭을 비교하였으며 자유도 8, 진동수 분해 폭 0.0055 cph의 경우에도 에너지 첨두의 신뢰도가 충분하였다. 2주일 동안 관측된 경우에는 진동수 분해 폭을 0.011 cph로 하였다. 전 관측 깊이에 걸쳐 뚜렷한 스펙트럼 에너지(온도파동 진폭의 제곱에 비례) 첨두를 갖는 주기는

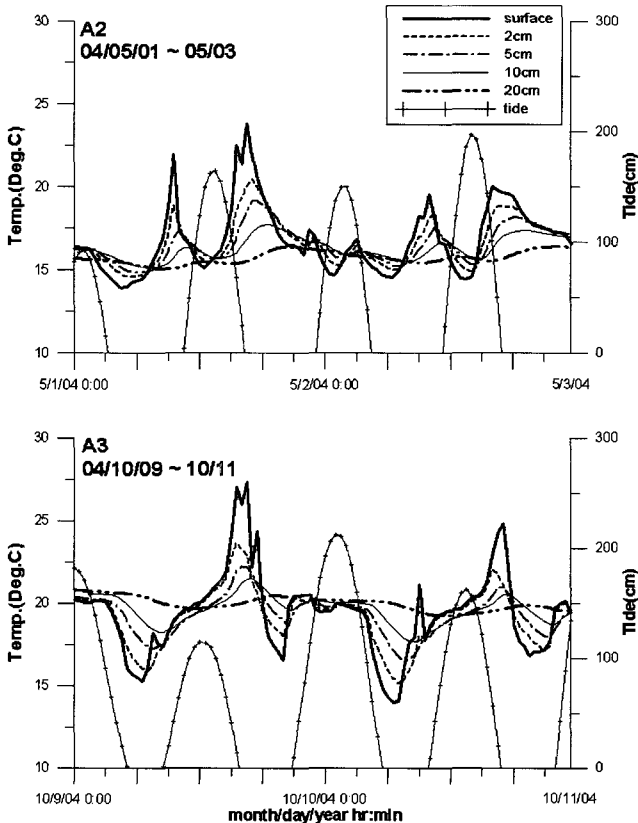


Fig. 6. Variations of sediment temperature and sea level (tide) at station A2 in May (upper) and at station A3 in October (lower), 2004.

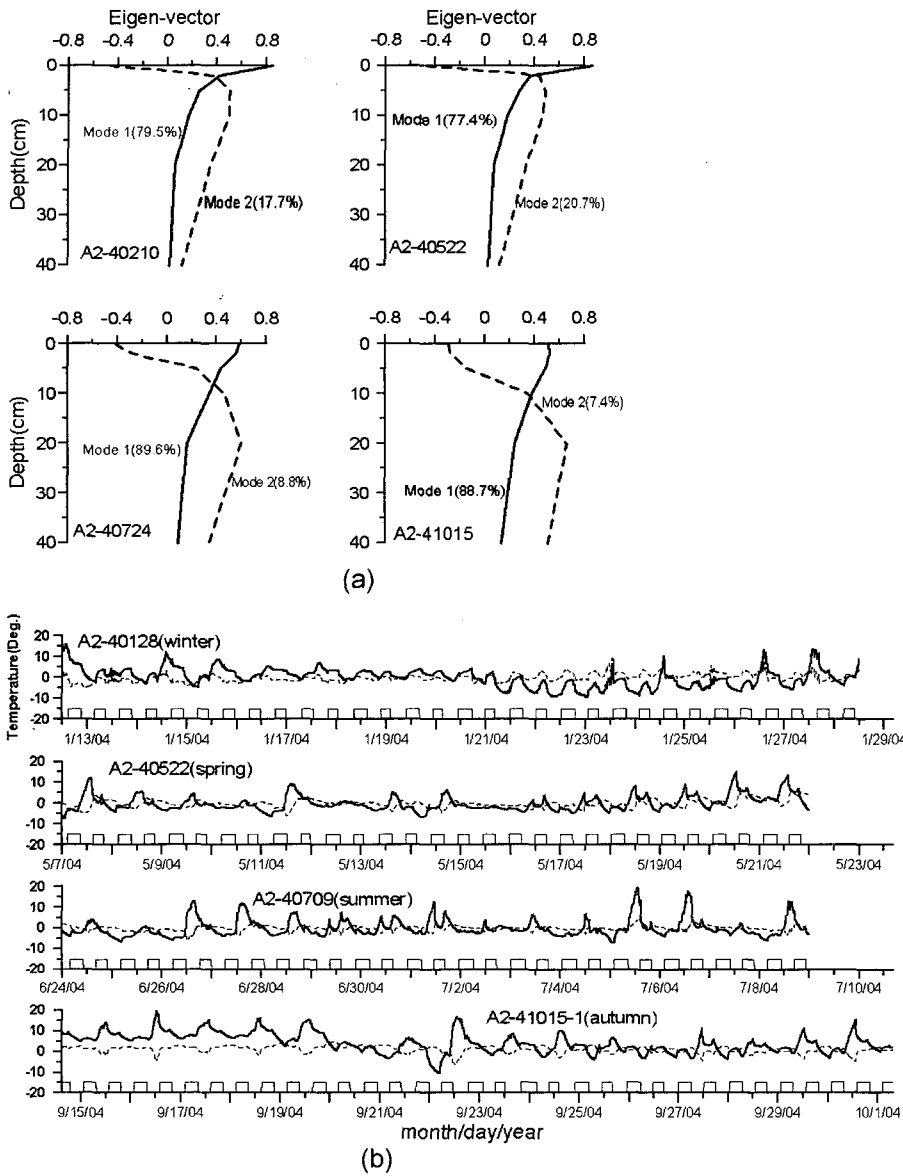


Fig. 7. (a) Vertical profiles of eigen-vector of sediment temperature variations at station A2 and (b) examples of time variations of the first (solid line) and second (dashed line) mode of EOF. Square in (b) denotes the tidal inundation period.

EOF 분석에서 나타난 바와 같이 24시간, 12시간 그리고 8시간대이며, 더 짧은 주기의 에너지 침투도 표층부근에서는 나타나지만 20cm보다 깊은 곳에서는 구분되지 않았다. 4 계절에 걸쳐 24시간대 주기에서 가장 큰 에너지를 보이고, 8시간 주기성분 에너지가 12시간 주기성분 에너지보다 큰 경우가 많았다.

EOF 분석에서 수직적으로 반대 부호를 갖는 제 2모드 eigenvector를 보였다. 이는 수직적으로 온도변화 위상이 다르다는 것을 의미한다. 수직적 온도변화의 관련성과 온도의 수직 전달과정을 보기 위하여 정점에서 각 관측 시기별로 표층온도와 갯벌 내부온도의 교차스펙트럼을 구하였다. 교차스펙트럼은 에너지가 큰 주기대가 공존할 경우 에너지 침투를 보이게 되며, 각 층에서 일어나는 주기적 변화의 위상차이도 구할 수 있다. Fig. 10은 정점 A2의 봄철과 가을철 교차스펙트럼이다. 갯벌표층과 내부온도의 교차스펙트럼에서도 24, 12, 8시간 주기성분 온도변화가 큰 에너지를 가지고 공존하고 있음이 나타났으며, 자기스펙트럼에서 작은 에너지 침투를 보이는 깊이에서도 표층과의 교차스펙트럼에서는 에너지 침투

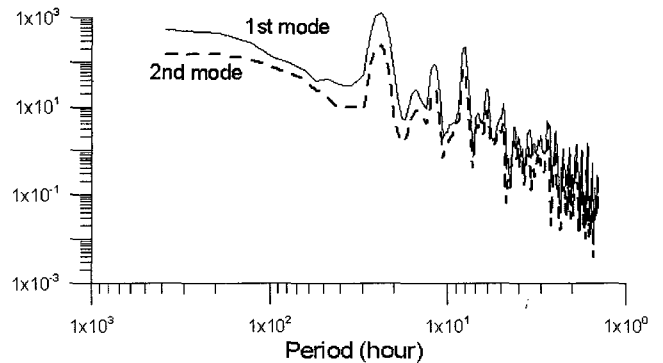


Fig. 8. Power spectrum of the first (solid line) and second (dashed line) mode variation in sediment temperature of station A2 for the observation period from May 7 to 22.

(상관성)가 대부분 높게 나타났다. 하지만 에너지 침투가 상대적으로 낮은 경우는 2004년 겨울 첫 번째 관측에서 표층과 40cm에서

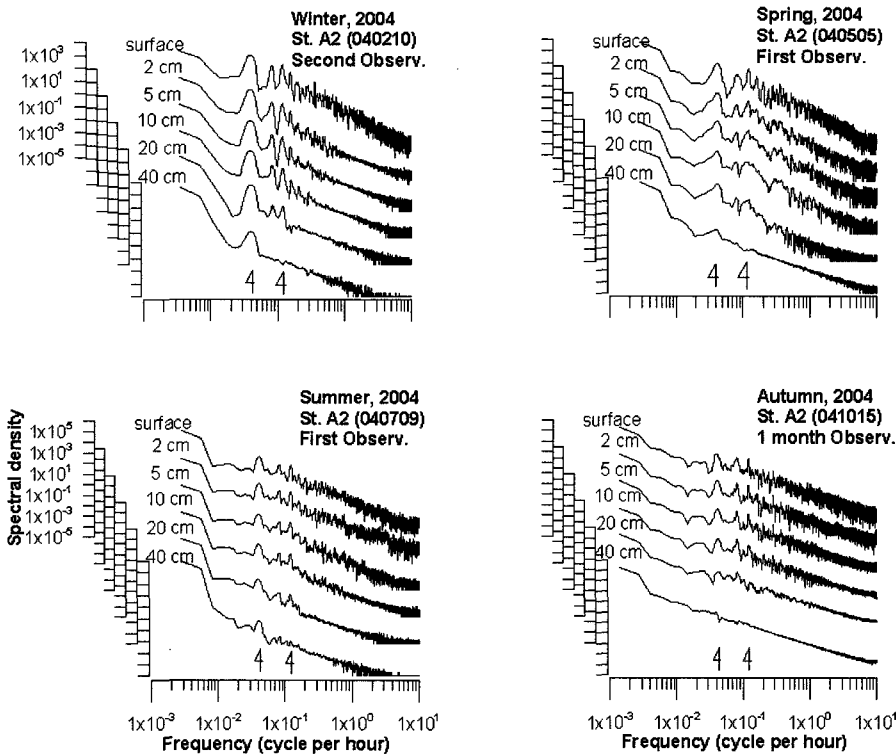


Fig. 9. A spectral density of sediment temperatures at station A2 for two weeks in winter, spring and summer and for one month in autumn. The arrows denote periods of 24h and 8h.

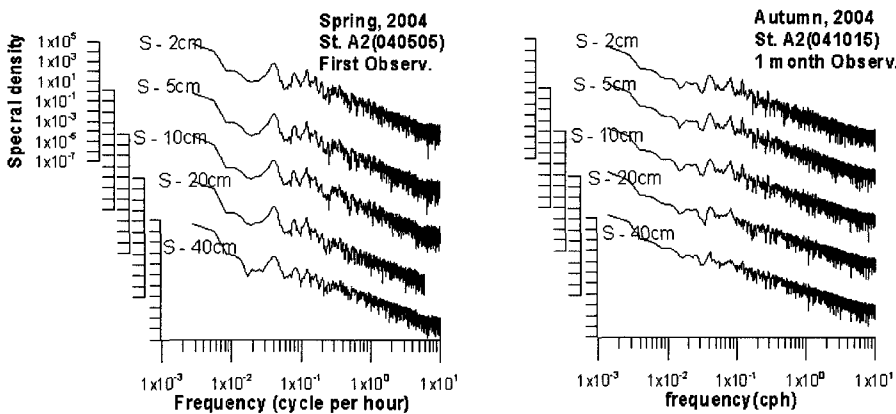


Fig. 10. Cross-spectral density of sediment temperatures between surface and different depths at station A2 for two weeks in spring and for one month in autumn.

12시간 주기, 가을철 표층과 20 cm의 스펙트럼에서 8시간 주기성분이었다.

정점 A2에서 관측된 온도파동의 24시간 주기성분이 갯벌표층과 내부 각 층 사이에서 나타나는 위상 차이를 Table 1에 정리하였다. Fig. 11은 24시간, 12시간 그리고 8시간 주기성분의 위상 차이를 보여준다. 여기서 위상차이는 온도파동 전달의 시간차이(지연시간)를 의미하고 위상차이가 90° 일 때 각 주요 주기별 온도변화 발생시간 차이(지연시간)는 24시간 주기의 온도파동은 6시간, 12시간 주기 파동은 3시간 그리고 8시간 주기는 2시간이 된다.

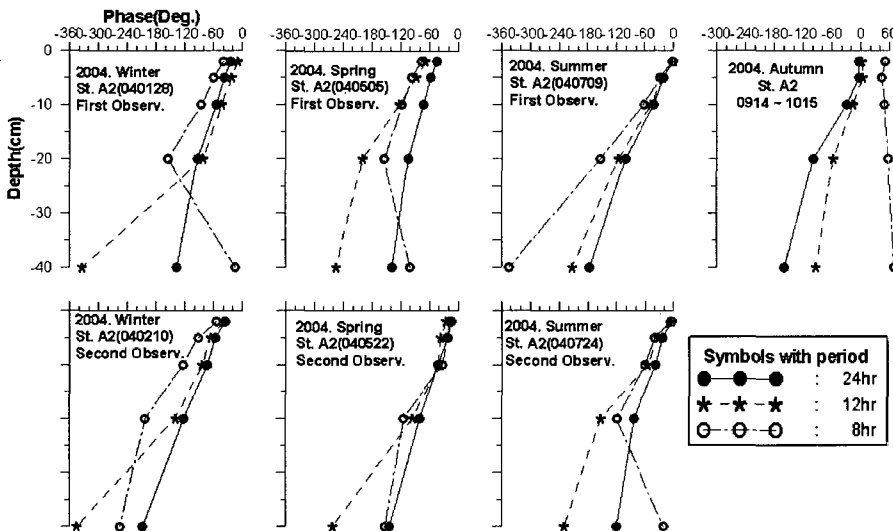
가장 큰 에너지를 가지는 24시간 주기의 온도파동은 표층에 대하여 2 cm부터 40 cm까지 위상 차이가 증가하며, 각 관측시기에 증가율은 20 cm까지 거의 선형적으로 볼 수 있지만 40 cm 깊이에서는 증가율이 다소 차이난다(Fig. 11). 이러한 지연시간의 증가는 표층에서 가해지는 24시간 주기성분의 온도변화가 갯벌내로 파급

되어 40 cm 깊이까지 도달하고 있음을 의미한다. 각 주기 파동의 위상차이는 계절별로 그리고 동일 계절 내 관측기간에 따라 변동을 보이지만 24시간 주기 온도파동의 평균적 위상차이는 갯벌표층과 10cm 깊이에서 -48°, 20 cm 깊이에서는 -98°, 40 cm 깊이에서는 -148° 정도이다. 이는 온도파동이 표층에 비해 10 cm 깊이에서는 평균적으로 3.2시간, 20 cm 깊이에서는 6.5시간, 40 cm 깊이에서는 9.8시간 정도 지연되고 있음을 의미한다. 평균적 위상차이에서 온도파동의 수직전달속도를 구하면 표층부터 10 cm까지는  $8.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ , 20 cm까지는  $5.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  정도가 된다. 하지만 표층에서 40 cm 깊이까지 온도파동이 전달되는 평균 속도는  $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  정도로서 10 cm 혹은 20 cm 깊이까지의 속도에 비해 오히려 크다. 이러한 수직 온도전달속도의 깊이에 따른 차이는 갯벌내부의 퇴적물 특성 및 함수율의 차이 등에 의해 발생할 수 있는 현상으로 보이지만 본 연구에서 원인을 알아보기 위한 자료가 부족



**Table 1.** Phase differences of temperature wave of 24 hour period between surface and subsurface depths at station A2 (unit: degrees)

Layer	Period	Winter	Spring	Summer	Autumn	Average
0 cm to 2cm	1st	-24.0	-44.8	-2.2		
	2nd	-35.7	-14.9	-4.5	-3.4	-15.8
	average	-29.85	-29.85	-3.35		
0 cm to 5 cm	1st	-37.4	-56.7	-20.9		
	2nd	-56.6	-22.1	-23.7	-3.9	-28.1
	average	-47.00	-39.40	-22.30		
0 cm to 10 cm	1st	-53.5	-72.7	-40.9		
	2nd	-73.8	-41.6	-38.4	-30.7	-47.8
	average	-63.65	-57.15	-39.65		
0 cm to 20 cm	1st	-93.3	-104.4	-102.3		
	2nd	-121.5	-79.7	-84.1	-100.2	-98.2
	average	-107.40	-92.05	-93.20		
0 cm to 40 cm	1st	-137.7	-137.6	-176.9		
	2nd	-152.1	-143.5	-120.6	-159.3	-148.4
	average	-144.90	-140.5	-148.75		



**Fig. 11.** Phase differences (in degree) of main-component temperature waves between surface and subsurface depths at station A2.

하고 앞으로 연구되어야 할 과제이다.

12시간과 8시간 주기에서는 표층에서 20 cm 깊이까지는 위상 차이에 의한 온도변화의 지연이 비교적 선형적인 증가를 보인다 (Fig. 11). 20 cm 깊이까지 이 주기성분 온도파동들이 표층에 대해 대략적으로  $120 \pm 30^\circ$ 와  $140 \pm 30^\circ$  정도의 위상 차이를 보이고, 평균적 지연시간이 각각 4시간과 3시간 정도가 된다. 하지만 40 cm 깊이에서는 선형적 증가를 보이지 않는 경우가 많다. 한편, 가을철에는 12시간 주기의 온도변화 위상 차이가 봄과 여름에 비해 절반정도이며 8시간 주기의 경우 전 층에서 거의 일정한 값을 보이며 표층보다 온도변화가 오히려 앞서 발생한다. 이는 갯벌의 내부 특성 차이와 함께 낮은 교차스펙트럼 밀도에 의해 발생하는 오차에 의한 결과일 수도 있으므로 보다 명확한 열전달 특성을 규명하기 위해서는 장기간에 걸친 관측이 요구된다.

**수직 열확산계수**

갯벌 퇴적물의 조성과 함수율 그리고 고화정도는 깊이에 따라

달라진다. 퇴적물에서의 열전달 과정은 분자적 확산, 공기와 물의 이동, 복사와 증발 등에 의해 동시적으로 일어난다(Oke, 1978). 따라서 퇴적물의 열확산계수를 현장에서 정밀하게 측정하는 데는 어려움이 있다. 관측된 온도변화에서 퇴적물의 열확산계수를 구하는 여러 가지 방법 중에 수직적 일차원 열전도모델을 적용하면 (1)과 같은 모델을 세울 수 있다(Harrison and Phizaklea, 1987; Piccolo et al., 1993).

$$\partial T / \partial t = \partial (\kappa \partial T / \partial z) / \partial z \tag{1}$$

여기서 T: 갯벌온도,  $\kappa$ : 열확산계수( $m^2/s$ ), t: 시간, z: 퇴적물 깊이이다. 갯벌 깊이로 평균된 온도를 기준으로 상층에서 정현 함수적인 온도변화가 가해진다고 가정하면 (1)은 (2)와 같은 해를 갖는다 (Monteith, 1973; Piccolo et al., 1993).

$$T(z, t) = T_m + A_0 e^{-z/D} \sin(2\pi t/P - z/D) \tag{2}$$

여기서  $T_m$ : 퇴적물 평균온도,  $A_0$ : 표층 온도파동의 진폭, P: 온도

**Table 2.** Seasonal and annual thermal diffusivities estimated in the layers between observed depths at station A2 (unit:  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )

Season	Period	2 cm-5 cm	5 cm-10 cm	10 cm-20 cm	20 cm-40 cm	Depth Averaged
Winter	1st	0.598	1.242	0.565	0.379	0.559
	2nd	0.259	1.049	0.696	0.856	0.793
Spring	1st	1.637	0.529	1.125	0.681	0.853
	2nd	1.027	1.093	1.079	0.568	0.808
Summer	1st	0.209	0.615	0.392	0.590	0.511
	2nd	0.412	1.383	0.632	0.593	0.693
Autumn	1 month	0.961	0.463	0.740	(2.39)	0.700
Seasonal Mean		0.729	0.911	0.747	0.61	0.702

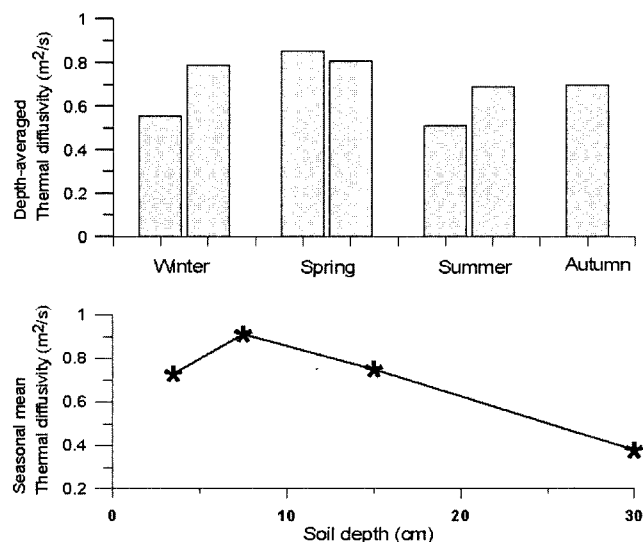
파동 주기,  $D$ : 파동감쇄 깊이이며,  $D=(\kappa P/\pi)^{1/2}$ 와 같다. (2)를 이용하면 관측된 층간의 평균 열확산계수는 다음과 같이 구해진다.

$$\kappa = \pi(z_2 - z_1)^2 / [P \times \ln^2(A_1/A_2)] \quad (3)$$

여기서  $A_1, A_2$ 는  $z_1, z_2$  깊이에서 온도파동 진폭이다.

관측된 갯벌온도는 계절에 따라 층별 평균온도가 달라(Fig. 3참조) 평균온도의 수직적 구배가 있었지만 열확산계수 추정모델에서는 이를 무시하였다. 또한 관측된 온도파동은 완전한 정현함수로 표현되지는 않지만 각 층의 시계열분석에서 24시간 주기 대에 가장 큰 에너지 peak를 보였으므로 이 주기성분 온도파동을 정현함수로 보았다. 자기스펙트럼의 에너지 밀도로부터 각 층의 24시간 주기 대( $P=86400 \text{ s}$ ) 온도파동 진폭비율로 (3)의  $A_1/A_2$ 를 구하고 이를 이용하여 정점 A2의 관측 층간 열확산 계수를 구하면 Table 2와 같다. 정점 A2에서 관측시기에 따라 깊이로 평균된(depth-averaged) 열확산계수를 다시 관측횟수로 평균하였을 때  $\kappa=0.70 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이며, 정점 3에서는  $0.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로서 비슷한 값을 보였다. 열확산계수로부터 계산된 감쇄계수  $D$ 는 각각 0.138 m, 0.125 m이다.

Fig. 12는 정점 A2에서의 깊이로 평균된 열확산계수의 계절변화(Table 2참조)와 정점 A2와 A3에서의 깊이별로 계절 평균된 열



**Fig. 12.** Depth-averaged thermal diffusivity in different season at station A2 (upper) and seasonal mean thermal diffusivity at different depths using thermal diffusivity in station A2 and A3 (lower).

확산계수의 평균적 수직구조를 보여준다. 열확산계수는 계절적으로는 봄철이 크고, 깊이별로는 5 cm와 10 cm 사이에서 큰 값을 보이고 깊어질수록 감소하였다. 한편, Table 2에서 열확산계수의 변동범위를 살펴보면 동일계절에 깊이 구간에 따라 평균치로부터 30-200%까지 변하고, 동일 깊이구간에서 계절에 따라서도 같은 변동범위를 보인다. 열확산계수가 가장 큰 변동을 보인 깊이는 20 cm-40 cm 구간의 가을철로서 정점 A2와 A3에서 각각  $2.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 큰 값이 나타났으며, 정점 A2의 평균 확산계수 산출에 이 값은 포함되지 않았다.

## 토 의

곰소만 입구 갯벌 조건대에서 관측된 갯벌온도는 계절에 따라 평균온도구조가 달라지며 봄과 여름철에는 수직적으로 감소하고 겨울과 가을에는 수직적으로 증가하는 구조를 보였다. 모든 계절에 온도표준편차는 표층에서 크고 저층으로 갈수록 감소하였다. 이는 계절에 따라 우세해지는 표층가열 혹은 열손실에 의한 결과로 해석된다. 갯벌에서 조위변화에 의한 노출과 침수의 영향을 보기 위한 노출율에 따른 평균온도와 표준편차의 관계에서는 노출율이 증가할수록 평균온도가 겨울과 가을철에 감소하였으며 봄과 여름철에는 증가하였다. 평균온도의 증가 혹은 감소율은 전 층에 걸쳐 유사한 값을 보였다. 표준편차는 모든 계절에서 노출율이 증가함에 따라 편차가 증가하였으며, 봄철 표층에서 증가율이 가장 크고, 가을철에 가장 낮은 값을 보였다. 이러한 결과는 대기에 갯벌 표면이 노출되는 기간이 클수록 갯벌표면에서 열손실과 열 획득이 증가함을 의미한다(최, 2002). 따라서 평균온도구조와 표준편차 분석으로부터 중위도 지역에서 기대할 수 있는 일반적인 계절적 온도변화 형태가 갯벌의 경우에도 나타나고 있음을 알 수 있다.

한편, 갯벌의 온도변화에 영향을 주는 환경요소들에서는 가장 뚜렷한 변화요인이 일사량의 변화이며, 다음으로 조위변화에 의한 노출과 침수시기로 나타났다. 기온의 변화는 일사량의 변화와 거의 중복되는 요인이었지만 본 연구에서는 갯벌 표면에서의 열이동(현열, 장파복사, 잠열 등)을 정량적으로 산출하지는 못하였다. 불규칙적인 요인으로는 여름철에 침수되는 강수(혹은 유입유수)로서 갯벌내부까지도 온도변화를 유발하였다. 바람의 세기도 불규칙적 요인이지만 기온변화와 다소 중복되는 변화요인으로 나타났다. 따라서 단기적인 갯벌온도변화의 주된 요인은 일사량(기온)변화에 의한 가열·냉각과 침수·노출로 볼 수 있고, 이러한 변화요인은 뚜렷한 주기성을 가진 현상이다.

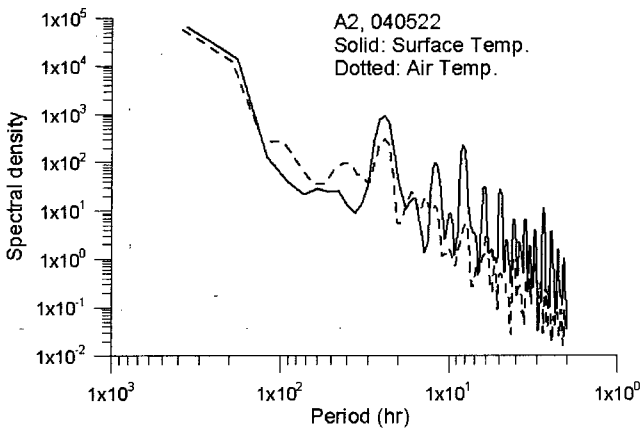


Fig. 13. Spectral densities of sediment surface temperature at station A2 for two weeks period (solid line) and air temperature at BaekAm AWS for one month (dashed line) in spring.

갯벌 온도구조와 변화특성을 보기위한 EOF 분석에서 제 1모드의 eigenvector가 표층에서 가장 크고 저층으로 갈수록 작아지는 구조로서 낮과 밤에 갯벌이 노출되었을 때 큰 증감을 보여 뚜렷한 에너지 침투를 보이는 주기성이 있었다. 따라서 제 1모드는 표층에서 가해지는 열 공급과 손실에 기인한 현상을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 수직적으로 반대부호를 보이는 제 2모드도 제 1모드와 동일한 주기에서 에너지 침투를 보였고, 갯벌표면에서 가해지는 온도의 상승과 하강이 내부로 전달 혹은 확산될 때 나타나는 구조로 해석된다. 즉, 온도파동이 깊이에 따라 전파되는데 시간이 소요될 것이므로 갯벌내부에서의 온도상승 혹은 하강은 지연되어 표층과는 반대방향으로 온도가 변화되는 현상을 나타내는 것으로 해석할 수 있으며, 이는 교차스펙트럼에서도 확인되었다.

스펙트럼에서 나타나는 온도변화의 주된 주기성의 원인을 살펴보면 24시간 주기는 일사량(혹은 기온)의 변화로 판단된다(Fig. 13 참조). 12시간 주기성분은 기온의 스펙트럼 에너지가 작은 반면 갯벌표면온도에서는 뚜렷한 에너지를 보여 조사해역에서 우세한 반일주 성분들의 조위변화에 의한 침수와 노출의 주기로 볼 수 있다(최, 2002). 본 논문에서는 보여주지 않았지만 노출율이 큰 정점 A1에서 12시간 주기성분의 에너지가 하부조간대 정점들에 비해 낮았으며, 이러한 해석을 뒷받침하였다. 최(2002)는 장기간 관측된 갯벌 표층의 일교차 온도변화에서 15일 주기의 스펙트럼 에너지 침투를 보여 주었으며, 봄과 가을에 관측지역의 대조-소조 주기와 잘 일치함을 보여 주었다. 본 연구에서는 2주일의 관측기간으로 이러한 장주기 온도변화를 볼 수는 없었다.

한편, 8시간 주기성분의 온도변화를 직접 유발할 수 있는 가능한 요소로써 기온(일사량)변화와 조석의 주기성을 살펴보자. 먼저, 기온 스펙트럼에서 8시간 주기대의 에너지는 갯벌표면온도 스펙트럼 에너지에 비해 10% 미만의 수준이다(Fig. 13). 이러한 결과는 기온이 오히려 갯벌표면 온도변화의 영향을 받고 있는 것으로 해석되어야 한다. 다음으로 조석의 주기성을 살펴보면  $M_3$  분조가 8시간대의 주기를 갖는다. 조사지역인 갯벌에서는 밀물과 썰물시 수심이 매우 낮아 해저면 마찰이 해면변화에 크게 작용하고 이로 인하여 천해분조들의 진폭이 증가될 수 있다. 하지만 천해분조의

진폭이  $M_2$  분조의 진폭보다 클 수는 없으며, 일반적으로  $M_3$  분조는  $M_4$  분조(6시간 주기 대)보다도 진폭이 작다. Fig. 13에서 8시간 주기대의 갯벌표면온도 에너지 침투는 12시간 혹은 6시간 주기 대 에너지 침투보다 현저히 크다. 따라서  $M_3$  분조가 8시간 주기 대 온도변화의 원인이 될 수는 없다.

8시간 주기의 갯벌온도 변화를 발생시키는 요인은 갯벌표면에서 밤낮의 가열·냉각과정과 조위변화의 상호작용에서 파생되는 온도파동 성분으로 다음과 같이 해석할 수 있다. 하루 24시간 동안에 일사량이 있는 기간은 12시간 정도이다. 갯벌의 침수주기는 12시간 반 정도이지만 침수기간은 갯벌의 고도와 대조와 소조 그리고 일조부등 등에 의해 달라진다. 일사량이 있는 동안 갯벌이 침수된 후 노출되면 갯벌의 온도는 대부분 침수전과 노출후, 두 번에 걸쳐 온도가 상승하는 현상이 발생한다(Fig. 6참조). 하계의 경우 밤에는 노출이 상당기간 지속되며 냉각되어 갯벌온도가 많이 낮아지는데 조석주기에 의해 갯벌이 다시 침수되면 수온이 높아 갯벌표층 온도는 대부분 상승한다. 낮 동안 두 번 온도 상승의 시간간격과 밤 동안 침수에 의한 온도상승까지의 시간간격은 일정하지 않을 수 있다. 하지만 표면 가열·냉각 주기와 조위변화의 상호작용으로 온도 상승현상은 하루에 세 번 발생할 수 있으며 이러한 경우 온도상승의 평균적 주기는 8시간이 된다. 2주일간의 관측기간 동안이지만 이러한 상호작용은 여러 번 반복적으로 나타나게 되어 온도스펙트럼 분석에서 8시간 주기에서 에너지 침투를 보이게 된다. 에너지 침투는 약하지만 6시간 주기대의 온도파동도 위의 상호작용에서 파생되는 것으로 유추할 수 있다. 또한 낮 동안 침수에 의해 온도상승이 나누어져 나타나면 12시간 주기 에너지 침투는 작아지고 8시간 주기로 에너지가 전이(transfer)되므로 오히려 8시간 주기에서 에너지 침투가 크게 나타날 수 있다.

교차스펙트럼 분석에서 얻어진 표층과 갯벌내부 층간의 온도파동 주기별 위상차는 갯벌 내에서 복합적인 과정에 의해 표층에서부터 온도가 전달되는 소요시간이다. 24시간주기 성분의 온도파동이 가장 큰 에너지를 보였지만, 표층부터 10 cm 사이에서는 겨울과 봄철의 위상차이가 여름과 가을철보다 현저히 컸다(Table 1). 12시간과 8시간 주기성분을 포함하여(Fig. 11참조) 온도파동의 위상차가 계절과 깊이에 따라 많은 변화를 보인 원인으로서는 표층부근의 침식과 퇴적작용, 계절과 깊이에 따른 퇴적물의 조성 및 함수율 변화, 열의 이류과정과 확산계수 차이, 생물에 의한 갯벌 내 교란(bioturbation) 등을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 위상차의 원인이 될 수 있는 요소들에 대해 계절 혹은 깊이별로 조사하지 못하였기 때문에 주된 원인을 분석할 수는 없었다. 하지만 장과 최(1998)에 의하면 곰소만 중부 조간대에서는 여름보다 겨울에 퇴적이 우세하고 태풍 때 간헐적으로 침식되며, 하부 조간대에서는 주로 겨울에 퇴적되었고 여름과 태풍 때 침식된다고 한다. 이러한 연구결과에 의하면 본 연구에서 나타난 겨울과 여름의 표층부근 수직 온도전달 위상차이는 주로 계절적으로 나타나는 퇴적과 침식작용에 의한 것일 수 있다.

한편, 24시간 주기성분 온도파동의 평균된 위상차로부터 산출된 전달속도를 보면 표층에서 40 cm 깊이까지 평균전달속도가 20 cm 깊이까지 보다 빠르게 나타났고, 이는 20 cm와 40 cm 깊이 사이에서 온도파동의 전달이 상층부보다 현저히 빨라졌음을 의미한다. 이러한 결과는 40 cm 깊이에서 비교적 작은 값을 보이는 교

차스펙트럼 밀도에 의해 발생하는 오차에 기인할 수도 있지만 앞으로 규명되어야 할 연구지역 갯벌의 온도변화 특성중의 하나이다. 2004년 가을에는 12시간 주기의 온도변화 위상 차이가 봄과 여름에 비해 절반정도이며 8시간 주기의 경우 전 층에서 거의 일정한 값을 보이며 표층보다 온도변화가 오히려 앞서 발생하였다 (Fig. 11). 이러한 결과도 앞으로 해석되어야 할 조사지역의 갯벌 온도변화 특성이다.

정점 A2와 A3에서 일차원 수직 열확산모델에서 산출된 평균 열확산계수는  $0.70 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 와  $0.57 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 이다. 이 값은 Monteith (1973), Oke(1978), Harrison and Phizaklea(1987), Piccolo *et al.* (1993) 등이 사질이 40%정도 포함된 갯벌에서 산출된  $0.41 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 보다 약간 크고 Vugts and Zimmerman(1985)이 제시한 값들의 최대치인  $3.63 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 보다는 작지만 기존 연구들과 비슷한 규모의 값을 보였다. 또한 온도감쇄계수 0.138 m, 0.125 m는 Piccolo *et al.*(1993)가 구한 0.106 m의 값보다 다소 크다. 열확산계수는 퇴적체의 열전도계수/(밀도\*비열)로 주어진다(Guarini *et al.* 1997). 따라서 퇴적물의 조성비와 공극율, 함수율과 함기율 등에 의해 확산계수는 달라질 수 있으며(Ochsner *et al.*, 2001) 함수율이 높을수록 확산계수가 증가하는 율은 사질 퇴적물이 니질 퇴적물의 경우보다 높다. 본 연구지역에서 가을철에 조사된 퇴적물 조성에 의하면 평균적으로 사질이 80%를 차지하고 있어 기존 연구들에 비해 사질이 많은 갯벌에 속한다. 따라서 본 연구에서 산출된 평균적 열확산계수는 퇴적물 조성비의 차이에 견주어 보면 타당한 결과를 보였다.

정점 A2에서 구해진 24시간 주기성분 온도파동의 평균 열확산계수를 사용하여 2 cm 깊이부터 10 cm, 20 cm, 40 cm 깊이까지 열이 확산되는 속도를 구해보면 각각  $8.75 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $3.8 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $1.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 정도이며, 표층에서부터 깊어질수록 작아진다. 각 층까지의 확산속도는 교차스펙트럼에서 구한 24시간 주기 온도파동이 표층부터 10 cm 혹은 20 cm 깊이까지 전파되는 속도인  $8.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $5.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 와 매우 가까운 값을 보인다. 하지만, 2 cm에서 40 cm 깊이까지의 평균열확산 속도  $1.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 는 교차스펙트럼에서 계산된 표층에서 40 cm 깊이까지 수직 온도파동 전파속도인  $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 에 비해 약 1/7정도로 작다. 이러한 차이는 40 cm 깊이까지의 열확산속도와 열전파속도가 모두 평균치로 계산되었기 때문에 각각의 속도에 상당한 오차가 포함되어 나타난 결과일 수도 있다. 또한 퇴적물에서의 열전달과정에는 열의 확산과 이류과정도 함께 포함되어 있으므로 열전달속도가 20 cm와 40 cm 깊이 사이에서 매우 빠르게 나타난 본 연구의 결과에 대해서는 앞으로 연구되어야 할 부분이다.

## 결 론

곰소만 입구에서 관측된 갯벌온도의 구조와 변화는 평균온도와 표준편차 분석에서 표층가열과 열손실에 의한 계절적 온도구조와 변화 형태를 보여주었다. 갯벌온도변화의 주된 요인은 일사량변화(가열·냉각)와 조위변화로서 온도변화의 뚜렷한 주기성에 직접적 영향을 주었으며, 그 외 비 주기성 요인인 강우와 풍속도 온도변화에 영향을 주고 있었다. 갯벌은 낮에 노출되면 온도가 상승하고 밤에 노출되면 온도가 하락하였으며, 일사량과 조위변화의 상호작용에 의해 주기적인 변화형태가 달라졌다.

시계열분석에 의하면 24시간, 12시간 그리고 8시간 주기 성분의 온도파동이 가장 많은 에너지를 갖고 있었으며, 24시간 주기성분은 일사량변화, 12시간 주기성분은 조위변화 그리고 8시간 주기성분은 갯벌표면에서의 가열·냉각과 조위변화의 상호작용에 의한 것으로 해석되었다. 수직구조에서 EOF의 제 1모드와 제 2모드가 온도변화의 96%를 차지하였다. 제 1모드는 갯벌 표층에서의 가열과 냉각에 의해 발생하는 현상이며 제 2모드는 갯벌내부의 열전과과정에서 발생하는 지연효과로 해석되었다. 교차스펙트럼 분석에서 갯벌내부의 가장 뚜렷한 24시간 주기성분의 열전달은 깊이에 따라 거의 선형적으로 증가하는 평균 위상 차이를 보였고, 표층에서 10 cm, 20 cm 40 cm 깊이까지의 위상 차이에 의한 지연시간은 각각 3.2시간, 6.5시간 9.8시간이었으며, 평균 온도파동 전파속도는 각각  $8.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $5.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 산출되었다.

수직 일차원적 열확산모델에서 산출된 24시간 주기성분 온도파동의 확산계수는 깊이와 계절에 걸쳐 평균하였을 때 중부조간대에서는  $0.70 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ , 하부조간대에서는  $0.57 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 의 값을 보였다. 중부조간대에서 계절적으로는 봄철에 크고 여름철에 작았으며, 깊이에 따라서는 2 cm부터 10 cm 깊이까지 증가하고 다시 40 cm 깊이까지는 감소하는 구조를 보였다. 평균 열확산계수를 사용하여 구한 확산속도는 2 cm 깊이로부터 10 cm, 20 cm, 40 cm 까지 각각  $8.75 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $3.8 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,  $1.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  정도의 값이 되며 표층에서 멀어질수록 작아지는 평균 확산속도를 보였다. 이를 온도파동의 수직 위상차에서 구한 평균 열전달속도와 비교하면 20 cm 깊이까지는 유사한 값이었지만 40 cm 깊이까지는 열전달속도가 열확산속도보다 7배정도 빨랐다.

스펙트럼 분석과 열확산모델에서 구해진 40 cm 깊이에서의 열전파속도의 차이는 퇴적물 특성(입도와 공극율) 및 함수율 등의 차이에 기인할 수 있으나 본 연구에서는 자료가 미비하여 속도차이의 원인을 밝힐 수 없었다. 앞으로 갯벌의 온도파동 수직전파 특성과 함께 열적 특성인 열용량계수, 열전도계수 등을 규명하기 위해서는 보다 많은 지역에서의 장기관측 자료축적이 필요하며, 퇴적물 특성분석과 아울러 수직적인 열 이동과정에 대한 연구가 요구된다.

## 사 사

본 연구는 한국수력원자력주식회사 원자력환경기술원의 지원으로 수행되었다. 현장관측에 참여하여 자료생산에 기여한 군산대학교 대학원 손 영태, 권 효근, 김 창수, 이 광희 군들에게 감사한다. 또한 자료 분석에 프로그램과 기기 등을 지원한 군산대학교 새만금환경연구센터에도 감사드리며, 자료의 해석이 명확해지고 논문이 잘 정리되게 의견을 준 심사위원들께도 감사드린다.

## 참고문헌

- 나정열, 유승협, 서장원, 2000. 서해 제부도 해역의 간조시 갯벌 퇴적층내 지온 및 열수지의 계절변화. 한국해양학회지 「바다」, 5(1): 1-9.
- 장진호, 1995. 한국 서해안 곰소만 조간대 퇴적작용. 서울대학교 박사학위 논문. 192 pp.

- 장진호, 최진용, 1998. 조간대 퇴적물의 계절적 집적양상과 보존: 한국 서해안의 곰소만. 한국해양학회지 「바다」, 3(3): 149-157.
- 최용석, 2002. 서해안 조간대 (태안) 표층 퇴적층의 사계절 온도 변화에 관한연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- Abu-Hamdeh, N.H. 2003. Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosystems Engineering*, 86(1): 97-102.
- Guarini, J.M., G.F. Blanchard, Ph. Gros and S.J. Harrison, 1997. Modelling the mud surface temperature on intertidal flats to investigate the spatio-temporal dynamics of the benthic microalgal photosynthetic capacity *Marine Ecology Progress series*, 153: 25-36.
- Harrison, S.J., A.P. Phizacklea, 1985. Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mud-flats of the Forth estuary. *J. Climate, Scotland*, 5: 473-485.
- Harrison, S.J., 1985. Heat Exchanges in Muddy Intertidal Sediments: Chichester Harbour, West Sussex, England. *Estuarine, Coastal and shelf Science*, 20: 477-490.
- Harrison, S.J., A.P. Phizacklea, 1987. Vertical temperature gradients in muddy intertidal sediments in the Forth estuary. *Limnol. Oceanogr. Scotland*, 32: 954-963.
- Matsunaga, N. and M. Kodama, 2001. Thermal Environment Properties on a tidal Flat. The 4th International conference on hydro-science and engineering, CD-Rom, Korea.
- Montheith, J.L. 1973. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London.
- Ochsner, T.E., R. Horton and T. Ren, 2001. A new perspective on soil Thermal Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1641-1647.
- Oke, T.R. 1978. *Boundary Layer Climates*. Methuen & Co Ltd. London, pp. 372.
- Piccolo, M.C., G.M.E. Perillo and G.R. Daborn, 1993. Soil Temperature Variations on a Tidal Flat in Minas Basin, Bay of Fundy, Canada. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 35: 345-357.
- Vugts, H.F., J.T.F. Zimmerman, 1985. The heat Balance of a Tidal Flat Area. *Netherlands Journal of Sea Research*, 19(1): 1-14.

---

2004년 12월 30일 원고접수

2005년 2월 15일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학