Article

서해 근소만-선유도 갯벌 퇴적층의 지온변화에 관한 연구

송규민*

한국해양과학기술원 해양환경·보전연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Soil Temperature Variations in Intertidal Sediments in Geunso Bay and Seonyu Island, West Coast of Korea

Kyu-Min Song*

Marine Environments & Conservation Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea

Abstract : The vertical structure of sediment temperatures in the tidal flats of Geunso Bay and Seonyu Island in western Korea were measured for more than a year and analyzed. Mean temperature decreased with depth in spring and summer. On the contrary, it increased with depth in fall and winter, faithfully reflecting the seasonal variation resulting from the heating and cooling of the surface sediment. The surface sediment temperatures are shown to be strongly dependent on solar radiation, M2, and M4 tidal components. They are also weakly affected by precipitation. Thermal diffusivity of sediment is estimated at each depth and in each of the four seasons by applying the amplitude equation method. In Geunso Bay, the estimated seasonal-mean values decreased with depth, while they showed little change in Seonyu Island. Depth-averaged thermal diffusivity in Geunso Bay ($1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) was smaller than Seonyu Island ($2.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). The variability of thermal diffusivity is shown to correlate with sediment composition and sorting from the grain-size analysis of intertidal sediments in Geunso Bay and Seonyu-do.

Key words : Tidal Flat, soil temperature, thermal diffusivity, spectrum analysis, Geunso Bay, Seonyu Island

1. 서 론

우리나라 서해안과 남해안에 널리 발달해 있는 갯벌은 육상에서 배출되는 각종 오염물질을 정화하는 기능과 바다생물들의 산란과 생육장소 등 여러 가지 기능을 가지고 있어 해양 생태계 환경에 주요한 가치를 지닌다. 특히 규모가 약 1,980 km²에 달하는 서해안의 갯벌은 반일주조의 영향으로 하루에 두 번씩 대기에 노출되고, 대기와 해수에 반복적으로 접하게 됨으로써 표면을 통한 대기와의 열 교환

과 전달의 과정을 통해 육상의 토양과는 달리 급격한 수직 온도구배를 나타낸다. 이와 같은 환경변화는 퇴적물의 온도구조에 영향을 미치며, 향후 저서생물의 군집특성에 영향을 주게 된다.

일반적으로 갯벌퇴적층의 온도변화는 갯벌표면에서의 열교환과 갯벌내부에서의 열전달과정에 의해 결정된다 (Harrison and Phizacklea 1985). 갯벌표면에서의 열교환은 간조와 만조시에 따라 구별되며, 간조시 열교환은 대기와의 현열속과 잠열속 그리고 태양복사열속의 변화에 의해 영향을 받고, 만조시는 갯벌퇴적층과 해수와의 온도차에 의한 현열속에 의해 결정되어진다. 반면 갯벌내부에서

*Corresponding author. E-mail : min0717@kiost.ac

의 온도변화는 퇴적물의 조성과 함수율 등에 따라 달라지는 열용량계수 및 열확산계수의 변화 등에 의해 결정된다 (Vugts and Zimmerman 1985; 나 등 2000; 이 등 2005).

퇴적물의 온도와 열전달 등 갯벌의 열적특성은 저서생물의 군집특성에 중요한 역할을 하기 때문에 연안생태학에서 여러 연구가 진행되어 왔다. Swinbank and Murray (1981)는 조간대에서의 노출시간을 기준으로 생물분포 구간을 구분하였으며, 1회 노출 시의 연속노출시간과 침수 시간 등을 Lunar day로 표현함으로써 한 정점에서의 노출시간을 정량화하였다. 또한 Harrison and Phizacklea (1987a, 1987b)는 스코틀랜드의 니질 갯벌에서 지온을 관측하여 고조시와 갯벌 지온과의 관련성을 연구하였으며, Piccollo et al. (1993)은 캐나다 Fundy만에서 대기와 물 그리고 토양간의 상호작용에 의한 퇴적물의 연직적 온도 구배 특성을 조석과 연관하여 연구하였다. 국내의 경우 나 등 (2000)은 서해 제주도 갯벌에서 낮 동안에 일어나는 간조 시에 갯벌층의 연직적인 지온을 측정하여 퇴적층 내 열수지 특성을 파악하고 열 이동 과정의 특성을 연구한 바 있으며, 이 등 (2005)은 서해안 곰소만 갯벌에서 조간대 높이에 따라 갯벌 내부 온도를 계절별로 단기간 관측한 후 온도구조와 변화특성을 연구하였다.

중위도지방에 위치한 우리나라 서해안 갯벌의 열적특성은 계절적인 차이를 보일 것으로 예상되지만 장기적인 관측결과에 대한 온도구조의 변화 연구는 다소 부족한 현실이다. 따라서 본 연구에서는 서해안의 환경이 다른 두 곳에 갯벌 퇴적층 내 지온을 1년 이상 연속관측하고, 이를 근거로 퇴적층 내 지온변화 특성을 파악하여 상호비교, 분석하였다.

2. 연구 지역 및 방법

서해안 갯벌의 지온구조와 변화특성을 알아보기 위해 충청남도 태안군의 근흥면과 소원면 사이에 위치하여 근소만이라 명명하는 갯벌과 전라북도 군산시 고군산군도에 속한 선유도 갯벌의 지온을 1년 이상 관측하였다.

근소만은 전체 면적이 30 km²에 이르는 반폐쇄적인 (semi-closed) 만으로(Fig. 1) 평균조차는 6 m이며, 간조 시 전체 면적의 70% 정도가 대기 중에 노출되고, 만조 시에는 2~4 m의 수심을 유지한다. 만 내 퇴적물의 퇴적상은 대부분 모래질 실트(sandy silt)로 구성되어 있다. 또한 육상으로부터 직접 유입되는 하천이 없고 약 2 km 폭의 만 입구를 통해 외해역과 내해역의 해수교환이 이루어져 인위적인 영향이 적은 지역이다(김과 김 2008a).

Fig. 2. Schematic figure of temperature sensors installation in study area

Fig. 1. Map of study area (G and S : research position in Geunso bay and Seonyu Island)

선유도는 크고 작은 여러 섬들로 둘러싸여 복잡한 해저 지형을 보이는 고군산군도를 대표하는 섬으로 동쪽과 서쪽 조간대로 나눌 수 있다. 전반적인 선유도의 퇴적상은 사질퇴적상(sand facies), 니사질퇴적상(muddy sand facies), 사질니퇴적상(sandy mud facies) 등 다양하게 나타나며, 연구지역인 선유도 동쪽갯벌은 서쪽갯벌보다 상대적으로 세립한 퇴적환경을 보인다(국토해양부 2007).

연구지역의 조간대 열수지 특성을 규명하기 위하여 근소만(36° 44.231'N, 126° 10.694'E)과 선유도(35° 48.999'N, 126° 25.236'E)에 조위 및 온도센서를 부착한 관측 프레임을 설치하였다(Fig. 2). 관측 프레임은 지온과 조위관측을 구별하였으며 조위계가 설치된 프레임 상부는 안전을 고려하여 안내 깃발을 설치하였다. 지온측정 센서는 RBR사의 TR-1050 제품(Table 1)으로 갯벌 지면 아래 3 cm부터

Table 1. The specification of temperature and tide sensors

	TR-1050	TDR-2050
measurement	Temperature	Temperature Depth
Range	-5~35°C	-5~35°C. 0~200 m
Accuracy	±0.002°C	±0.002°C ±0.05% full scale
Resolution	< 0.00005°C	< 0.00005°C < 0.001% full scale
Time Constant	< 3 sec (standard) 0.095 sec (option)	< 3 sec (standard) < 10 msec
Drift	< 0.002°C/year	< 0.002°C/year ~0.1%/year-typical
Size (weight)	230 mm × 38 mm (310 g; 30 g in water)

Fig. 3. Time series of measurement data in Geunso bay and Seonyu Island, and meteorological elements (radiation, precipitation) observed with automatic weather observation system of Korea Meteorological Administration near research sites (T-10 cm: Temperature at 10 cm on tidal flat)

53 cm까지 10 cm 간격으로 총 6개 지층을 10분 간격으로 측정하였으며, 갯벌 위 10 cm 지점에는 조위와 온도를 동시에 관측할 수 있는 TR-2050 제품을 사용하였다. 관측기간으로는 선유도가 2007년 11월부터 2008년 12월까지 약 14개월이며, 2009년 3월부터 이듬해 3월까지는 근소만 갯벌을 약 13개월 관측하여 두 연구지역 모두 1년 동안 10분 간격의 연속자료를 수집하였다. 기상관측자료는 연구지역인 근소만과 인접한 서산관측소와 선유도에 인접한 전주관측소에서 제공하는 시간별 기온, 강수, 일사량 자료를 활용하였다.

관측자료의 처리는 자료 수집을 위하여 대략 3개월마다 채설치로 인한 오류값을 제거한 후, 자료의 신뢰도를 검토하고 시계열로 정리하였다(Fig. 3). 본 관측자료를 통하여 환경이 다른 서해안 두 갯벌의 계절별 지온변화 양상과 온도구조에 영향을 미치는 요인을 분석하였다.

3. 결 과

갯벌퇴적층의 지온관측 및 환경요인

관측된 갯벌온도의 계절별 변화 양상을 알기 위하여 4계절인 봄(4~5월), 여름(7~8월), 가을(10~11월) 그리고

겨울철(12월)로 나누어 층별 평균 지온과 표준편차를 구하였다(Fig. 4).

Fig. 4에 나타난 층별 평균지온은 일부 자료를 제외하고는 봄과 여름철에 표층에서 저층으로 갈수록 낮아지는 반면 가을과 겨울철은 다소 증가하는 경향을 보여 표층가열과 냉각에 의한 전형적인 온도구조의 변화 형태를 알 수 있다. 표층과 관측 최저층 깊이인 표층에서 53 cm 아래층의 평균지온 차이는 두 연구지역 모두 여름(G: 2.463°C, S: 2.297°C)과 겨울철(G: -2.076°C, S: -1.772°C)이 봄(G: 0.904°C, S: 0.712°C)과 가을철(G: -0.667°C, S: -0.614°C)보다 크게 나타났으며, 근소만이 선유도보다 조금 더 큰 차이를 보였다.

층별 표준편차는 표층이 가장 크게 나타나며 저층으로 갈수록 감소하였다. 대기에 노출이 많이 되는 표층에서 표준편차가 크다는 것은 외부의 온도변화에 민감하게 반응하고 있음을 의미하며, 저층으로 갈수록 외부 환경변화에 대한 충격완화와 열공급이 줄어들어 40 cm 이하 층에서는 표준편차의 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 하지만 지역에 따른 수심에 대한 계절별 표준편차는 다소 차이가 있다. 2007년 11월부터 2008년 12월까지 관측된 선유도 지온자료에서 수심에 대한 계절별 표준편차의 변화는 크

Fig. 4. Observed subsurface vertical temperature profiles in Geunso Bay (up) and Seonyu Island (down). Vertical structures of mean (circle) and standard deviation (horizontal bar) of sediment temperature in observed station

지 않음을 알 수 있으나, 이듬해 관측된 근소만 지온자료의 층별 표준편차는 계절에 따른 변화를 보이며, 외부환경 영향을 적게 받는 수심 40 cm 이하 층에서도 확연한 차이가 있다.

갯벌 퇴적층의 온도변화를 일으키는 원인은 다양하나

주로 고려되는 것은 갯벌이 대기에 노출되는 시간이 하루 중 어느 때인가, 그 지역의 조석주기와 기상조건은 어떻게 되는가, 퇴적물 조성은 어떻게 이루어졌는가 그리고 갯벌 위에 서식하고 있는 저서생물의 군집형태는 어떠한가 등 (Harrison and Phizacklea 1987a, 1987b; 이 등 2005)으로

Fig. 5. Seasonal variations of soil temperature, solar radiation and sea level in high radiation during low tide (Case1) (Gray line: rainfall event)

Fig. 6. Seasonal variations of soil temperature, solar radiation and sea level in high radiation during high tide (Case2) (Gray line: rainfall event)

다양한 환경 인자를 통해 분석적 접근이 이루어진다.

대조차 환경을 지닌 본 연구지역의 지온변화를 가져오는 인자를 알기위해 일사량과 조석과의 연관성을 고려하여 일사량이 강한 시간에 저조가 되어 퇴적층이 노출되는 경우(Case 1)와 고조가 되어 침수되는 경우(Case 2)로 나누어 분석하였다.

Case 1(Fig. 5)의 경우, 일사량이 많이 공급되는 시간대에 낙조로 인하여 지표면이 대기에 노출되면 태양복사와 표층지온과의 위상 차이는 다소 있으나 태양복사가 강한 시기에 지표면의 온도는 큰 폭으로 상승한다. 반면 Case 2(Fig. 6)와 같이 태양복사가 강한시간대에 창조로 지표면이 해수로 침수되면 직접적인 태양복사의 차단으로 인해 급격한 지온 하강이 나타난다. 하지만 단지 태양복사에너지만이 지표면에 열을 공급하지는 않는다. 봄-여름철은 해수로 표층지온이 낮아지는 반면 가을-겨울철은 저층보다 낮은 온도를 가진 표층 지온이 해수의 유입으로 인해 다소 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 Case1과 2를 고려해 볼 때 계절적인 기온변화와 조석으로 인한 퇴적층의 노출 시기가 다름에도 불구하고 태양복사에너지는 표층퇴적물의 열 공급원으로 작용하였으며, 가을과 겨울철에는 해수의 유입 또한 표층퇴적물의 열공급원으로 작용한다. 또한 Fig. 5, 6에 표시된 회색영역은 지온관측 시 강우가 발생한 시기로 근소만의 4월 15일(봄철)과 1월 20일(겨울철) 그리고 선유도의 8월 20일(여름철)이 이에 속한다. 봄과 여름철은 정오시간대 표층퇴적층이 노출 되었음에도 불구하고 강우로 인해 일사량이 적은 관계로 태양복사가 강한 날보다 지온이 낮게 나타난다. 그러나 겨울철에 발생하는 강우는 표층의 열공급원인 태양복사량이 감소함에도 불구

하고 갯벌의 표층지온이 증가하는 현상은 강우에 의한 열 공급도 간접적인 요인으로 작용한다.

스펙트럼 분석

지역별로 관측된 갯벌 표면온도에 대한 스펙트럼 분석(Fig. 7)을 통하여 갯벌 표면 온도구조 및 변화를 야기시키는 주요원인을 모색하였다.

Fig. 7의 결과에서 근소만은 23.96시간에 가장 큰 에너지 침투를 보이며, 다음으로는 12.39시간, 8.17시간 그리고 6.25시간으로 강한 피크를 보인다. 선유도 또한 23.96시간, 12.38시간, 8.17시간 그리고 6.20시간으로 큰 에너지를 보인다. 이와 같이 스펙트럼 분석 결과 뚜렷한 스펙트럼 에너지 침투를 갖는 주기는 두 연구지역 모두 24시간, 12시간, 8시간 그리고 6시간대로서 유사한 결과를 나타낸다. 결과에서 가장 큰 에너지를 보인 24시간 주기 성분은 일사량의 변화로 갯벌 표면 온도구조에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다. 12시간대 주기성분은 12.42시간 주기를 가지는 M2 분조의 영향을 받았으며, 6시간대 주기성분은 6.21시간 주기를 가지는 M4분조와 일치하였다. 더불어 8시간 주기는 24시간 주기를 가지는 일사량의 변화가 낮과 밤의 현상으로 비대칭 파형으로 변형되고, 이것으로 발생되는 배수 주기인 12, 8, 6시간 주기성분의 한 형태로 해석된다. 이와 같이 Fig. 5, 6의 일사량과 조위, 그리고 갯벌온도의 관계와 Fig. 7의 스펙트럼 분석 결과로 미뤄볼 때 일사량과 조석이 갯벌온도를 변화시키는데 중요한 역할을 하며, 이는 실제로 기상 요인을 고려하지 않은 지온변화 예측모델을 만들어 실측자료와 유사한 결과를 도출함으로써 조석이 조간대지역에서 지온

Fig. 7. The power spectral density of surface sediment temperature in Geunso Bay (left) and Seonyu Island (right)

변화를 이끄는 주요인임을 밝힌 연구결과(Guarini et al. 1997)가 이를 뒷받침 해 준다. 결과적으로 우리나라 서해안과 같은 조간대 갯벌에서 온도변화를 유도하는 주요 원인은 일차적으로 조위변화에 의한 반복적 노출과 침수가 지배적인 원인이며, 대기에 노출되었을 때 일사량 역시 주요한 원인이 됨을 알 수 있다.

연직열확산계수

지온의 변화는 지표면의 온도가 하부로 전달되면서 발생하며, 이러한 열 이동 기작은 퇴적물의 열특성에 의하여 지배된다. 토양의 열특성은 토양입자의 밀도, 비열, 열전도도, 공극률 및 함수비 등에 따라 달라지는데, 열확산계수는 토양의 열특성을 대표하는 물리량으로 이용된다. 이와 같은 열확산계수는 현장에서 측정할 수 있으나, 갯벌퇴적층의 경우 교란되지 않는 시료를 채취하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 현장에서 관측된 지온 관측 자료를 해석하여 열확산계수를 산정한다. 열확산계수를 구하는 방법들은 균질한 매질을 통한 열전도만을 고려하여 단순화된 1차원 열전도 모델(1)의 해석 결과를 이용하여 계산되어지며, 유체의 흐름과 같은 비전도성 열전달은 발생하지 않는 것을 가정한다(Harrison and Phizaklea 1978a; Piccolo et al. 1993). 여기서 T 는 갯벌 온도($^{\circ}\text{C}$), κ 는 열확산계수(m^2/s), t 는 시간(second)이며 Z 는 퇴적물의 깊이(meter)를 의미한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (1)$$

수식 (1)에 갯벌 깊이에 평균된 온도를 기준으로 상층에서 정현 함수적인 온도변화가 가해지는 경계조건 (2)을 적용(Monteith 1973)하면 수식 (3)과 같은 해를 가지고, 그것을 이용하여 열확산계수 (4)를 계산할 수 있다.

$$T(0, t) = \bar{T} + A_0 \sin \omega t, \quad T(\infty, t) = \bar{T} \quad (2)$$

$$T(z, t) = \bar{T} + A_0 e^{-\frac{z}{D}} \sin(\omega t - z/D) \quad (3)$$

$$k = \frac{\pi(\Delta z)^2}{P \ln^2(A1/A2)} \quad (4)$$

$\bar{T}$: 갯벌 평균 온도($^{\circ}\text{C}$), A_0 : 표층 온도파동의 진폭, P : 온도파동 주기(1일 = 86,400 sec), D : 파동감쇄 깊이, ω : 기본 각주파수, z : 퇴적물의 깊이, $A1, A2$: $Z1, Z2$ 에서의 진폭, Δz : $Z2 - Z1$

지역별로 관측된 지온자료를 이용하여 수심과 계절별로 연직열확산계수를 계산하고 Fig. 8, 9에 나타내었다.

Fig. 8에서 보여지는 근소만 열확산계수는 봄철 13~

Fig. 8. Seasonal and mean thermal diffusivity at each depth in Geunso bay (left) and Seonyu Island (right)

Fig. 9. Depth-averaged thermal diffusivity in seasonal changes at Geunso bay and Seonyu Island. Error bars denote standard deviation of means

23 cm 구간에서 $2.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 년중 가장 큰 열확산계수를 나타내는 반면 선유도는 봄철 23~33 cm 구간에서 $1.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 낮은 값을 보였다. 열확산계수의 변동범위를 살펴보자면 근소만은 $1.28 \sim 2.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 범위내에서 산정되었으며, 선유도는 $1.82 \sim 2.69 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 근소만의 변동성이 선유도보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 Fig. 8의 검정색 실선은 계절별로 계산된 열확산계수를 수심에 대해 평균한 값으로 근소만의 경우, 표층(3-13 cm) 구간에서 $2.04 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 보였으며, 13~23 cm 구간에서 다소 증가하였으나, 저층으로 갈수록 감소하는 추세를 보인다. 그에 반면 선유도는 수심에 대하여 평균값이 $2.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 일정하게 나타났으며, 23~33 cm

Table 2. Sedimentary texture and grain size for each station ($\Phi = -\log_2 d$, d : sediment diameter (mm))

Station	Item		0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
Geunso Bay	Composition (%)	Sand	53.4	43.0	61.9	36.5	37.9
		Silt	28.3	35.5	23.7	44.0	38.8
		Clay	18.3	21.5	14.4	19.5	23.3
	Mean (Φ)		5.29	5.76	4.70	5.90	6.23
	Sorting (Φ)		2.60	2.66	2.37	2.65	2.93
	Sediment type		mS	sM	mS	sZ	sM
Seonyu Island	Composition (%)	Sand	3.1	5.6	5.3	9.9	16.3
		Silt	77.7	77.3	74.1	77.7	74.6
		Clay	19.2	17.1	20.6	12.4	9.1
	Mean (Φ)		6.37	6.12	6.31	5.59	5.26
	Sorting (Φ)		2.07	2.08	2.20	2.01	1.86
	Sediment type		Z	Z	Z	Z	sZ

층에서만 일시적으로 증가하는 현상을 보였다.

Fig. 9는 연구지역의 계절별 수심 평균된 열확산계수로 근소만은 평균 $1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 보였으며, 사계절 중 가을철에 $1.80 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 다소 낮게 계산되었다. 그에 반해 선유도의 열확산계수는 평균 $2.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 사계절 중 제일 낮게 나타나는 봄철($2.02 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)의 수치가 근소만의 평균값보다 높음을 알 수 있다.

이와 같이 지역에 따른 두 연구지역의 열확산계수는 수심과 계절에 따라 변동성을 보였으며 이는 퇴적물의 열전달 메커니즘에서 표층 경계를 통한 일사량과 증발량 그리고 퇴적층 내부의 입도 구성의 차이와 퇴적물의 고결작용 등 다양한 원인에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 그 차이를 유발할 수 있다(Oke 1978).

그리하여 근소만과 선유도 갯벌 퇴적물 시료를 입도분석하여 그 결과를 Table 2에 정리하였으며, 지층별 표층퇴적물의 유형을 Folk and Ward (1957)의 삼각다이아그램 분류법에 따라 분류하여 나타내었다(Fig. 10).

근소만 갯벌에 분포하는 퇴적물은 니사질(mS, muddy Sand), 사니질(sM, sandy Mud), 사질실트(sZ, sandy Silt) 등의 유형을 보이며, 분급은 2.37~2.93 ϕ , 평균입도는 5.29~6.23 ϕ 로 지면 하 20 cm층을 제외하고는 표층에서 저층으로 갈수록 세립화 됨을 알 수 있다.

선유도 갯벌퇴적물은 다양한 퇴적상이 나타나는 근소만과 달리 표층에서 지면 하 30 cm까지 실트질이 강하게 나타났으며 40 cm에서는 사질실트(sZ, sandy Silt)로 입도가 조립화 됨을 알 수 있다. 이는 지면 하 30 cm를 기준으로 두 연구지역 만을 비교하였을 때 퇴적물의 평균입도에서 보여주는 바와 같이 근소만은 세립한 양상으로 변화한 반면 선유도는 조립한 양상을 보인다. 하지만 두 연구지역의 퇴적물 구성(composition)을 살펴보면 근소만에 비해 선유

Fig. 10. A ternary diagram of intertidal sediments in Geunso Bay (square) and Seonyu Island (circle)

도는 전체 지층에 실트질인 퇴적상으로 편중되어 구성되어 있으며 분급(sorting) 역시 근소만에 비해 상대적으로 양호함을 보였다(Table 2).

근소만은 선유도에 비해 퇴적물 입도구성이 저층을 제외하고는 상대적으로 조립한 환경임에도 불구하고 근소만의 평균열확산계수는 선유도 보다 낮게 나타났다. 이는 퇴적물의 입경이 일정하게 구성되어있는지를 나타내는 분급(sorting)을 고려해 볼 때 선유도의 퇴적물보다 근소만이 구성하는 퇴적물의 입자들이 고르게 분포되지 못하기 때문이라 사료된다.

4. 결 론

서해안의 환경이 다른 두 연구지역인 근소만과 선유도의 갯벌 퇴적층 내 지온을 계절에 따라 장기관측하고, 이를 근거로 퇴적층 내 지온변화 특성을 비교, 분석하였다.

연구지역의 층별 평균지온은 일반적으로 봄과 여름철에는 표층에서 저층으로 갈수록 낮아지는 반면 가을과 겨울철은 선형적으로 증가하는 경향을 보여 표층가열과 냉각에 의한 전형적인 온도구조의 변화 형태를 알 수 있었다. 수심별 지온에 대한 표준편차는 표층이 가장 크게 나타나고 저층으로 갈수록 감소하여 표층퇴적물이 외부환경에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 이와 같은 년 중 갯벌지온변화의 주요 요인은 일주기 성분을 가진 태양복사에너지가 표층 퇴적물의 주요 열원으로 작용하였으며 12시간과 6시간의 조석주기를 가지는 M2와 M4의 조석변화 또한 주요요소로 작용하였다. 그 외 기상인자와 표층지온과의 관계를 통하여 강우의 요소도 일시적인 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

1차원 열전도 모델의 해석 결과를 이용하여 계산되어진 연직열확산계수를 수심과 계절별로 분석하였다. 수심에 대한 평균 열확산계수는 근소만이 $1.61 \sim 2.15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 범위를 보이면서 저층으로 갈수록 감소하는 추세를 보이는 반면 $2.10 \sim 2.39 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 범위를 나타낸 선유도는 수심에 대하여 평균값($2.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)에서 큰 변동없이 일정하게 나타났다. 또한 연 평균된 연직열확산계수는 근소만이 평균 $1.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 인데 반해 선유도 평균은 $2.19 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 로써 전반적으로 선유도가 근소만보다 높음을 알 수 있었다. 이는 퇴적물의 분급(sorting)을 고려해 볼 때 선유도가 근소만보다 분급이 상대적으로 양호하기 때문이라 사료된다.

본 연구 결과값을 이 등(2005)의 연구에서 산정한 곰소만 갯벌의 연직열확산계수값($0.57 \sim 0.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)과 비교해 볼 때, 곰소만 대비 근소만의 열확산계수값은 대략 30%, 선유도는 약 34% 정도로 나타났으며 이는 퇴적상에서 사질이 80% 분포하는 곰소만과 니질과 실트질로 구성된 두 연구지역의 퇴적물 조성비에 따른 차이로 여겨진다. 이와 같이 연직열확산계수는 갯벌 퇴적물의 조성과 함수율 그리고 유기물함량 등에 따라 변화되므로(Vugts and Zimmerman 1985; 나 등 2000) 동일한 서해안의 갯벌임에도 불구하고 다른 퇴적환경으로 인한 차이로 지역에 따라 차이가 남을 알 수 있다.

본 연구결과는 서해 갯벌 퇴적층내 열적특성에 대한 정량적인 산정자료로서 토양의 열전달 과정을 규명하고, 퇴적물 내 저서 생물생태학분야의 기초 연구자료로 활용될 것이다. 뿐만 아니라 퇴적물의 온도변화가 미생물의 활동과 식물의 생육 및 토양생성작용에 있어 주요한 요소로

미치는 농업기상분야와 지표면에 건설되는 구조물 또는 지중에 매설되는 각종 케이블 및 수송관 등의 설치를 위한 지반공학 분야, 그리고 지하저장시설과 같이 지열을 열원으로 이용하는 에너지공학 분야 등 퇴적층의 지온변화 특성 연구가 요구되는 분야에서도 주요한 기반자료로 활용되리라 여겨진다.

본 연구는 퇴적물의 열적구조변화를 규명하는데 있어 태양복사와 조위변화가 지온구조에 미치는 영향과 더불어 퇴적물 특성 중 한 요소인 분급(sorting)이 갯벌 퇴적층의 지온구조에 영향을 미침을 살펴보았다.

일반적으로 지온의 열확산계수는 퇴적물의 공극률과 함수비에 의한 상관관계를 통해 열적구조특성을 규명하나 본 현장 토양 시료 분석 시 위와 같은 자료를 확보하지 못하여 공극률과 함수율에 따른 관계를 제시하지 못하였다. 앞으로 서해안 갯벌의 열적 구조특성을 규명함에 있어 퇴적물에 관한 공극률, 함수비 및 유기물 함량 등 퇴적물 특성에 관한 접근이 보다 더 진행되길 기대한다. 더불어 본 연구에서 관측된 1년 이상의 장기 관측된 서해안 두지역의 지온자료에 대한 다양한 활용을 기대해본다.

사 사

이 연구는 한국해양과학기술원이 수행하는 “갯벌 조간대환경에서의 해수유동에 따른 열수지 특성 해석”(PE9842E) 및 “새만금 해양환경 실시간 모니터링 시스템 운영”(PO00080)의 일부로 수행되었습니다. 논문이 나오기까지 많은 도움을 주신 이석 박사님과 오경희, 이흥재, 조철호 박사님께 감사드리며, 또한 본 논문을 심사해주신 심사자와 편집위원의 노고에 감사드립니다.

참고문헌

- 김동선, 김경희 (2008a) 서해 근소만에서 영양염의 조석 및 계절 변화. *Ocean and Polar Res* **30**(1):1-10
- 김경희, 김동선 (2008b) 서해 근소만 갯벌에서 영양염 플럭스의 계절 변화. *Ocean and Polar Res* **30**(3):225-238
- 나정열, 유승협, 서장원 (2000) 서해 제주도 해역의 간조시 갯벌 퇴적층내 지온 및 열수지의 계절변화. *한국해양학회지 「바다」* **5**(1):1-9
- 이상호, 조양기, 유광우, 김영근, 최현용 (2005) 서해만 곰소만 갯벌 온도의 구조 및 변화. *한국해양학회지 「바다」* **10**(1):100-112
- 최용석 (2002) 서해안 조간대 (태안) 표층 퇴적층의 사계절 온도 변화에 관한 연구. 이학박사 학위논문, 서울대학교, 95 p
- 국토해양부 (2007) 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(2단계 2차년도)-방조제 외해역 해저환경 이용. 한국해

- 양연구원, BSPM 45704-1959-1, 425 p
- Abu-Hamdeh NH (2003) Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosyst Eng* **86**(1):97-102
- Alongi DM, Tirendi F, Dixon P, Trott LA, Brunskill GJ (1999) Mineralization of organic matter in intertidal sediments of a tropical semi-closed delta. *Estuar Coast Shelf Sci* **48**:451-467
- Callender E, Hammond DE (1982) Nutrient exchange across the sediment-water interface in the Potomac River estuary. *Estuar Coast Shelf Sci* **15**:395-413
- Folk RL, Ward WC (1957) Vrazos River bar. A study in the significance of grain size parameters. *J Sediment Res* **27**:3-26
- Guarini JM, Blanchard G, Gros P, Harrison SJ (1997) Modeling the mud surface temperature on intertidal flats to investigate the spatio-temporal dynamics of the benthic microalgal photosynthetic capacity. *Mar Ecol Prog Ser* **153**:25-36
- Harrison SJ, Phizacklea AP (1985) Seasonal change in heat flux and heat storage in the intertidal mud-flats of the forth estuary. *Int J Climatol* **5**(5):473-485
- Harrison SJ (1985) Heat exchange in muddy intertidal sediments: Chichester harbour, West Sussex, England. *Estuar Coast Shelf Sci* **20**:477-490
- Harrison SJ, Phizacklea AP (1987a) Temperature fluctuation in muddy intertidal sediments, Forth Estuary, Scotland. *Estuar Coast Shelf Sci* **24**:279-288
- Harrison SJ, Phizacklea AP (1987b) Vertical temperature gradients in muddy intertidal sediments in the Forth estuary. *Limnol Oceanogr* **32**:954-963
- Harrison SJ, Morrison P (1993) Temperatures in a sandy beach under strong solar heating: Patara Beach, Turkey. *Estuar Coast Shelf Sci* **37**(1):89-97
- Johnson RG (1965) Temperature variations in the infaunal environments of a sand flat. *Limnol Oceanogr* **10**:114-120
- Meller GL, Yamada T (1982) Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys Space Ge* **20**(4):851-875
- Mellor GG (1996) Users guide for a three-dimensional, primitive equation, Numerical Ocean Model. Princeton University, Princeton, 40 p
- Montheith JL (1973) Principles of environmental physics. Elsevier, New York, 241 p
- Oke TR (1978) Boundary layer climates. Methuen & Co. Ltd., London, 372 p
- Piccolo MC, Perillo GME, Daborn GR (1993) Soil temperature variations on a Tidal Flat in Minas Basin, Bay of Fundy, Canada. *Estuarine Coastal Shelf Sci* **35**:345-357
- Sakamaki T, Nishimura O, Sudo R (2006) Tidal time-scale variation in nutrient flux across the sediment-water interface of an estuarine tidal flat. *Estuar Coast Shelf Sci* **67**:653-663
- Smagorinsky J (1963) General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Mon Weather Rev* **91**:99-164
- Swinbanks DD, Murray JW (1981) Biosedimentological zonation of Boundary Bay tidal flats, Fraser River Delta, British Columbia. *Sedimentology* **28**:201-237
- Vugts, HF, Zimmerman JTF (1985) The Heat balance of a tidal flat area. *Neth J Sea Res* **19**(1):1-14

Received Oct. 30, 2013

Revised Nov. 22, 2013

Accepted Nov. 25, 2013