

# 서해 제부도 해역의 간조시 갯벌 퇴적층내 지온 및 열수지의 계절변화

나정열 · 유승협 · 서장원<sup>1</sup>

한양대학교 지구해양과학과, <sup>1</sup>기상연구소 해양기상연구실

## Seasonal Variations of the Heat Flux in Muddy Intertidal Sediments near the Jebu Island during the Ebb Tides in the West Coast of Korea

JUNGYUL NA, SUNGHYUP YOU AND JANGWON SEO<sup>1</sup>

*Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea*

*<sup>1</sup>Marine Meteorology Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration, Seoul 110-360, Korea*

한국 서해안 제부도 갯벌에서 낮 동안에 일어난 간조시에 갯벌층의 수직적인 지온을 측정하였다. 갯벌층의 지온측정은 온도계 프로브를 통해 2 cm 간격으로 18 cm 층까지 계절별로 5회 실시하였다. 갯벌층 지온의 시간적 변화는 주로 대기온도, 측정전의 만조시간과 간조시간에 의해 좌우된다. 갯벌표면(0~2 cm)에서의 열수지의 크기는 깊은 퇴적층(8~12 cm)보다 크게 나타났으며 시간적인 변화는 반대양상을 보였고 계절적인 변화는 나타나지 않았다. 일반적으로 갯벌표층은 열이득을, 깊은 퇴적층에서는 열전도에 의한 열손실을 보이고 있다. 1차원 확산방정식에 의해 계산된 시간적인 온도 변화를 측정된 지층온도와 비교하였다. 4 cm 이하 퇴적층에서 열이동은 주로 분자확산에 의해 나타났다. 낮동안 갯벌층이 대기에 노출되는 간조시의 0~18 cm 퇴적층에서 열수지의 평균값은 4.1~28.9 W/m<sup>2</sup> 범위이다.

Vertical temperature distributions in muddy intertidal sediments near the Jebu Island on the west coast of Korea were obtained during the period of ebb tide which occurred in day time. The observations of mud temperature were made with thermistor embedded probe at 2 cm interval for 18 cm-layer of sediment for five different months of the year. Temporal changes in the vertical profile of the sediment temperature are strongly depend on the air temperature, the previous time of flood tide and the time of ebb tide. Heat exchanges in the surface layer (0–2 cm) in terms of magnitude and direction are greater than and opposite to those in the deeper sediment layer (8–12 cm), respectively and do not show any significant seasonal variations. In general, the surface layer gains heat while the deeper layer loses the heat. By using the 1-D diffusion equation temporal vertical profiles of the sediment temperature were obtained and were compared with the observed ones. The results show that in the sediment layer below 4 cm-depth the heat transport is predominantly by molecular diffusion. The average magnitude of heat flux into the sediment layer (0–18 cm) during the ebb tide when the mudflats were exposed in the middle of the day were between 4.1 and 28.9 W/m<sup>2</sup>.

### 서 론

한국 서해안에 발달한 넓은 갯벌은 그 기능의 다양성에 대한 가치가 재인식되면서 관심대상으로 부각되고 있다. 특히 수산물의 생산지 이외 정화작용, 홍수조절, 산란과 성육장소등 여러 가지 기능을 가지고 있는 갯벌은 주로 생태계에 관한 연구대상으로 각광을 받아왔다(이, 1998; 안 등, 1998). 한편 서해의 넓은 갯벌은 반일주조의 영향으로 하루에 두 번씩 대기에 노출되고 또 해수에 잠긴다. 이러한 조건하에서 갯벌표면과 대기 혹은 해수와의 열교환이 이루어지며 이로 인해 갯벌 퇴적층내의 온도가 변하는 과정을 되풀이하게 된다. 일반적으로 갯벌표면에서 열수지

균형은 다음 식으로 표시된다(Harrison and Phizacklea, 1985).

$$Q_{Net} + Q_a = Q_e + Q_h + Q_g + Q_f \quad (1)$$

즉,  $Q_{Net}$ 은 순복사열(Net radiation),  $Q_a$ 는 퇴적층내에서 생물학적, 화학적으로 발생되는 열속이며,  $Q_e$ 는 대기와의 잠열속,  $Q_h$ 는 대기와의 현열속,  $Q_g$ 는 퇴적층내로의 열이동,  $Q_f$ 는 고조시 해수와 교환되는 현열속을 나타낸다. 이중  $Q_a$ 의 값은 니질갯벌의 경우 0.005 W/m<sup>2</sup>의 크기를 보이므로 다른 항과 비교하여 거의 무시되고 있다(Patamat, 1982). 한편  $Q_g$ 는 갯벌층의 가열과 층 경계를 통한 열전도를 포함하고 있다. 이는 해수면에서의 열수지 균형이 해수층의 가열 및 해류에 의한 열수송을 고려하는 경우

와 같은 의미를 갖는다.  $Q_{Net}$ 은 태양과 대기로부터의 복사량과 갯벌표면에서 방출되는 장파복사량의 차이로 여름철 낮동안 간조시 갯벌이 받는 열량은  $340\sim 540\text{ W/m}^2$  정도로 당시의 구름의 양, 갯벌표면의 알베도(albedo), 방사율, 대기온도등에 따라 변하게 된다(Harrison and Phizacklea, 1985).

최근에 발표된 한국근해의 열수지특성에 나타난 서해연안의 해수면  $Q_{Net}$  값은 여름철에 대략  $130\text{ W/m}^2$ (Na et al., 1999)로 갯벌표면에서의 열흡수량이 해면에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다. 한편 만조시 갯벌이 탁한 해수로 덮여질 때는 태양복사에너지의 투과가 여의치 않고 장파복사 역시 해수면에서 발생하므로 갯벌퇴적층과 해수와의 열교환은 두 층간 온도 차이에 의한 현열속에 의해 이루어진다. 더구나 니질의 갯벌층에 생물체에 의한 공기구멍들이 존재시 만조와 더불어 해수의 침투는 퇴적층내의 온도를 급격히 변화시켜 거의 등온구조를 갖게 하기도 한다. 결국 간조시 대기에 노출된 갯벌 표면에서의 열교환은 순열속( $Q_{Net}$ )과 현열속, 잠열속, 그리고 퇴적층 내로의 열이동이 주요 인자들이며 현열속과 잠열속은 대기인자에 의한 영향을 직접 받는 반면 퇴적층 내에서의 열속( $Q_g$ )은 갯벌표면의 온도, 퇴적층의 열용량에 의해 주로 좌우된다. 그러나 갯벌표면의 온도가 순열속, 잠열속, 현열속에 의해 결정되므로  $Q_g$  역시 대기의 직접영향으로 볼 수도 있으나 전도 및 확산을 고려한 시차관점에서는 간접적이라 할 수 있다. 간조시 퇴적층이 받은(혹은 잃은) 열량은 만조시에서 해수와의 교환에 의해 잃게 되고(혹은 얻게 됨) 이로 인한 해수의 온도변화는 대조차가 매우 큰 서해연안의 수온분포에도 영향을 줄 수 있을 것이며 혼합된 저온의 연안수와 외해수

간의 경계인 조석전선(Seung and Shin, 1996) 형성에도 영향을 미칠 수도 있을 것이다.

생태학적 조사가 주를 이룬 서해안 갯벌 연구는 갯벌표면 혹은 표층 1~2 cm 내의 온도와 염분을 측정하여 저서생물의 환경특성에 따른 분포를 다루고 있다(Koh and Shin, 1998; 김 등, 1998). 더구나 저서생물의 활동이 가장 활발한 층이 표층 10 cm 이내(Warnes, 1981)인 점을 감안할 때 퇴적층내 온도변화와 동시에 퇴적층 내에서의 열수지 값을 파악해야 할 필요성은 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 태양열에 의한 영향이 큰 대낮에 발생하는 간조시 갯벌퇴적층내 온도의 변화를 계절에 따라 관측하고 이를 근거로 퇴적층내 열수지 특성을 파악코자 함이다. 동시에 갯벌층내 온도의 수직분포를 갯벌표면에서 관측한 온도를 근거로 산출하여 관측치와 비교함으로써 퇴적층 내 온도의 수직분포를 야기하는 열이동과정의 특성을 분석하였다.

### 갯벌퇴적층의 온도관측

현장관측이 실시된 제부도 갯벌(Fig. 1)은 세립질의 니질층이 우세한 갯벌로 니질이 62.2% 사질이 37.8%로 구성되어 있다. 더구나 간조시 연안에서 약 424 m까지 대기에 노출되므로 낮동안 갯벌표면과 대기와의 열교환 시간도 비교적 길기 때문에 간조시의 열수지특성 연구에 적합한 해역이다. 1998년 10월에 시작한 현장관측은 맑은 날을 택하여 제부도의 간조시각보다 약 30~40분 이른 시간에 같은 장소에서 수행되었으며 1998년 12월,

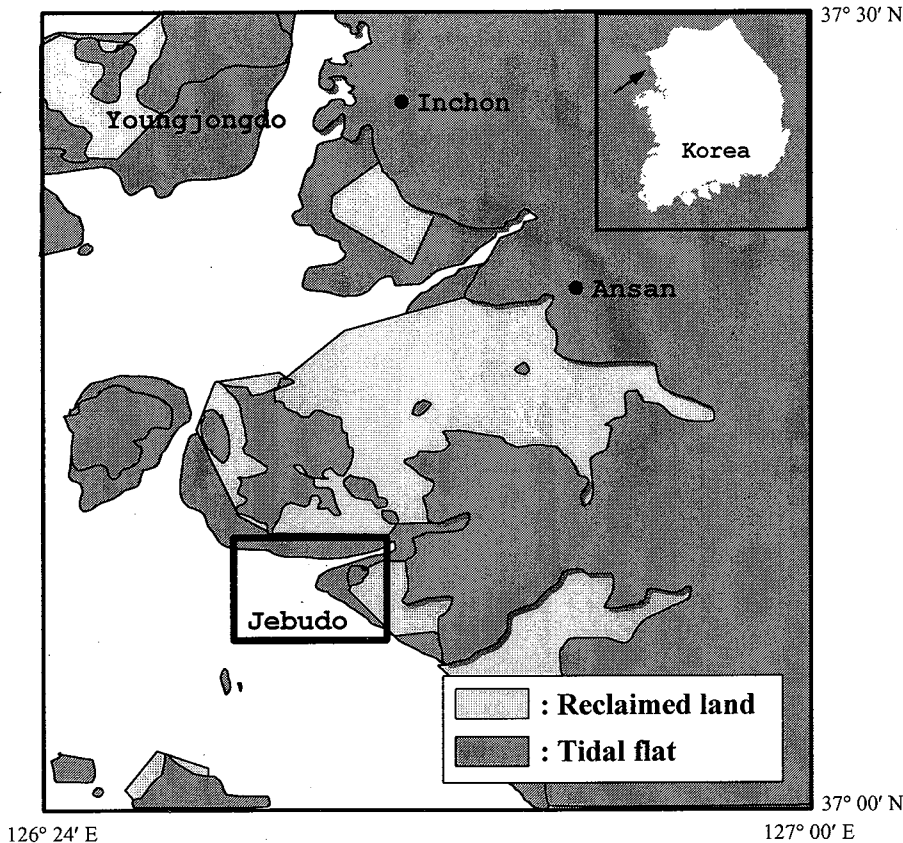


Fig. 1. Site map of the Jebu Island tidal flat.

1999년 3월, 1999년 5월, 그리고 1999년 8월에 3~4시간 동안 정오시간을 전후하여 관측하였다. 단, 1999년 3월의 관측은 간조 시각이 오후 2시였으므로 오후 1시부터 관측하였고 1999년 8월은 온도계 파손으로 단시간 관측에 그쳤다. 그러나 온도계 수리 후 1999년 8월 20, 21일의 양일간 관측은 우천시(20일) 및 구름 낀 날 사리후 영향(21일)을 파악키 위해 수행되었다. 관측에 사용된 디지털 온도계는 온도감응부를 최소화시키고 테플론(Teflon)으로 열전도를 차단시켜 제작한 것으로 갯벌표면에서부터 2 cm 간격으로 지층 18 cm까지 지온관측을 하였다. 관측시간 간격은 30분이며 온도계가 갯벌에 꽂힌 자국에 물이 찰 경우를 대비하여 매회 관측점을 옮겨 수행하였다.

5회 관측결과는 대기온도 및 갯벌표면온도에서 계절변화를 뚜렷하게 보이고 있으며 특히 3월의 측정치는 대기온도저하에 의한 지층온도의 대응변화를 보여주고 있다(Fig. 2). 12월 관측치를 제외한 모든 관측결과에서 대기온도보다 갯벌표면온도가 항상 높게 나타났으며 또한 갯벌 표면온도의 증가폭이 대기온도의 증가폭보다 훨씬 큼을 알 수 있다. 낮은 대기온도를 보여준 12월 경우는 관측시작후 한시간 이내에 갯벌표면온도와 대기온도가 같아지는 경향을 보여주면서 이후 퇴적층 내로의 열의 이동이 발생됨을 알 수 있다. 대기온도가 갯벌표면온도 보다 낮았던 10월의 경우에도 최초 관측된 지온의 음의 기울기(즉 퇴적층 깊

이 증가시 지온증가를 나타냄)는 30분 후 관측결과에서는 등온 구조를 보여줌으로써 표층에서의 열의 이동이 빠른 시간에 이루어지고 있음을 나타내고 있다. 5회 관측치 중 갯벌표면, 18 cm 깊이의 지온 그리고 대기온도의 최대값을 비교하였다(Table 1). 우선 갯벌표면온도와 대기온도의 차이는 10월에 제일 크며 갯벌표면온도와 18 cm 깊이의 온도차이는 8월이 제일 크게 나타나고 있다. 대기온도가 가장 높았던 8월에는 갯벌표면 및 18 cm 깊이의 온도 역시 최대값을 보였으나 갯벌과 대기사이의 온도차이에서는 10월, 5월보다 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 관측시의 바람, 습도 등에 의한 잠열과 현열에 의한 갯벌과 대기와의 열교환에 의한 결과로 사료된다.

특히 3월의 경우 최초 관측시각이 간조가 시작되는 13시로 태양의 고도가 비교적 높은 때이나 오후로 갈수록 대기온도가 낮아져 0~2 cm 층의 지온이 2°C 이상 감소되는 경향을 보여주고 있다. 그러나 같은 시간에 6 cm 이하의 층에서는 계속 지온이 상승함을 나타내고 있어 6 cm 이내 층에서의 열손실 그리고 6 cm 이하에서는 열이득 현상을 보여주고 있다. 5월의 관측치에서도 대기온도의 감소에 의한 2 cm 층에서의 온도역전 현상은 갯벌표면에서의 열손실이 매우 큼을 알 수 있다. 대기온도, 4개의 지층에서 관측한 지온 그리고 시간별 조위를 비교한 결과(Fig. 3) 간조시각 전부터 관측된 지온의 상승은 대부분 대기온도가 최대가

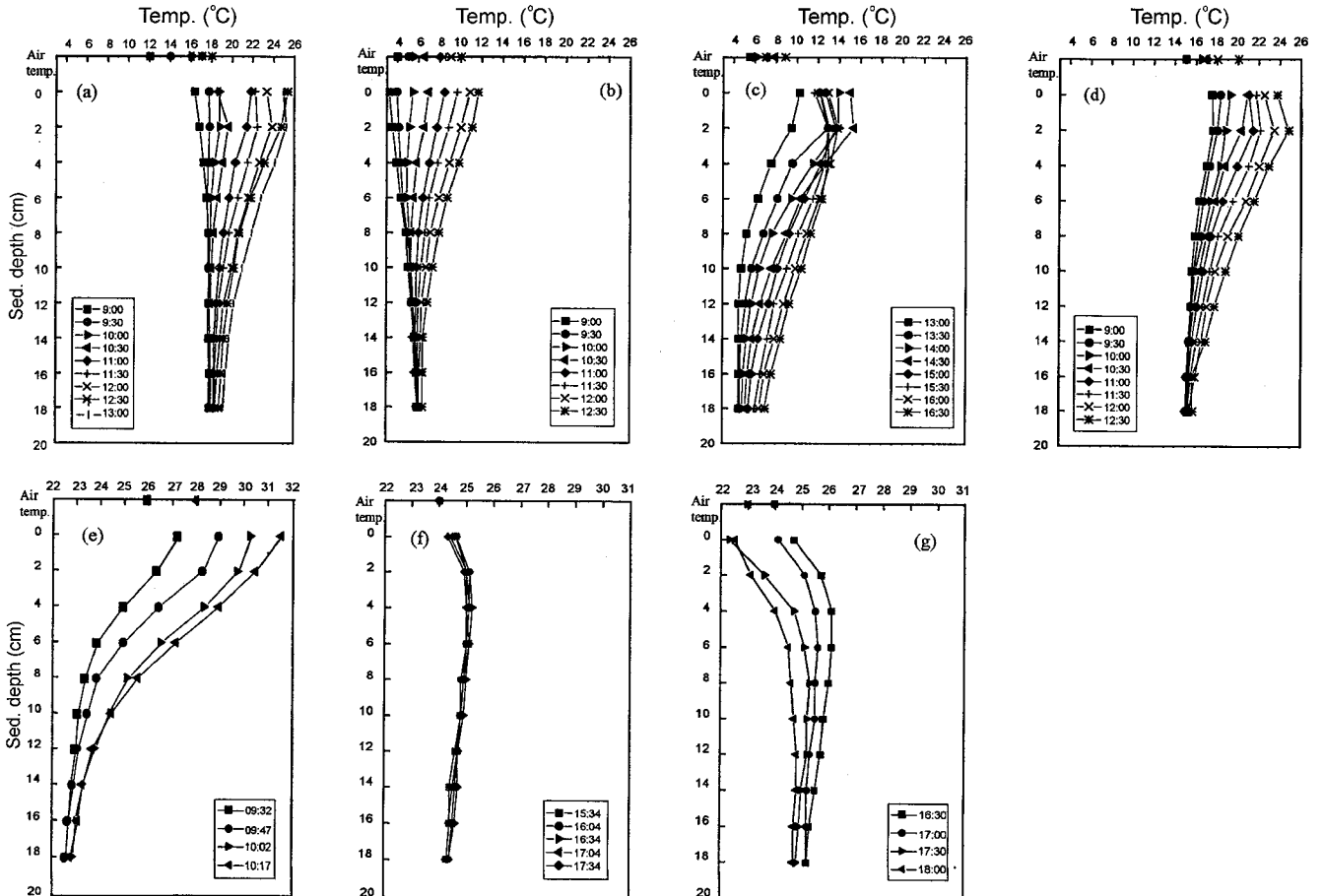
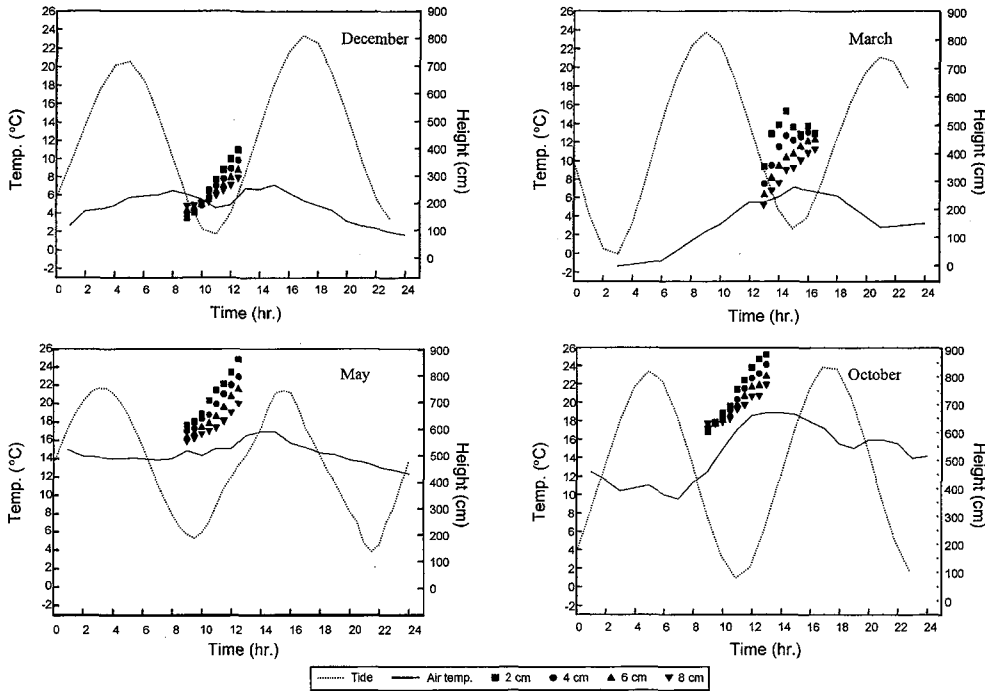


Fig. 2. Observed subsurface vertical temperature profiles in the Jebu Island tidal flat with the air temperatures[(a) 20 Oct. 1998, (b) 18 Dec. 1998, (c) 23 Mar. 1999, (d) 28 May. 1999, (e) 11 Aug. 1999, (f) 20 Aug. 1999 (rainy day), (g) 21 Aug. 1999 (cloudy day)].

**Table 1.** Seasonal variations of the observed maximum values of  $T_M$ : mud surface temperature,  $T_a$ : air temperature and  $T_{18}$ : Temperature at 18 cm depth.

Parameters	Season	October	December	March	May	August
$T_M$ (°C)		24.9	11.6	12.2	23.7	31.6
$T_{18}$ (°C)		19.2	6.4	7.0	15.7	22.6
$T_a$ (°C)		18	10	8.8	19	28
$T_M - T_a$ (°C)		6.9	1.6	3.4	4.7	3.6
$T_M - T_{18}$ (°C)		5.7	5.2	5.2	8.0	9.0

**Fig. 3.** The observed sediment temperatures at four different depths were plotted with the tide and the air temperature to show that both the time of pervious high tide and the temporal gradient of the air temperature affect the sediment temperatures.

되는 저조후 1~2시간까지 지속되나 3월의 경우는 표층의 지온이 감소되는 경향을 보이고 있다. 따라서 지온의 변화상과 조위를 비교할 때 고조시 지층의 온도가 거의 균일하였음을 추측케 하며 이는 2 cm와 8 cm 깊이의 지온 차이가 증가하는 경향을 역으로 추정하여도 쉽게 알 수 있다. 또한 관측시작이 만조시각과 관련되어 있음을 간과 할 수 없는 사항인 바 3월의 경우 만조시각이 09시인 반면 그 외 관측시 만조시각은 새벽 03시에서 05시이었음을 고려시 3월의 지온분포가 다른 시기의 것과는 차이가 나는 원인으로도 연관이 있음을 알 수 있다. 특히 8월에 관측한 우천시 지온분포는 2시간동안 대기온도와 더불어 변화가 없었으며 이는 대기온도 변화가 갯벌층내 열수지를 결정함을 뚜렷이 보여주는 하나의 예가 될 수 있을 것이다. 또한 구름간날 간조시각이 사리로 인해 오후 늦은 시각(3시30분)인 경우 태양 고도의 저하로 대기온도가 감소됨으로 인한 지온의 감소 경향이 전층에서 나타나는 경향을 보여주고 있다.

### 갯벌퇴적층내 열수지( $Q_g$ ) 변화

층의 두께가  $z$ 인 갯벌층을 고려시 이층을 중심으로 한 열수

지( $Q_g$ )는 두 가지 과정을 포함한다. 즉 갯벌층내 온도와 열수지가 정상상태(steady state)인 경우 온도의 수직기울기에 의한 열전도 효과와 갯벌층내 온도의 시간적인 변화에 따른 열저장(heat storage) 변화 효과를 고려하여 다음과 같이 표시할 수가 있다 (Harrison, 1985).

$$Q_g = C \frac{dT}{dt} z + \lambda \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

즉 식(2)의 첫째 항은 갯벌층의 시간적인 온도 변화에 따른 열저장효과로 이는 갯벌층내 온도, 조석현상, 주야간의 태양복사에너지 변화 등의 주기적인 외적요인에 의해 변화함에 기인하며 두 번째 항은 고전적인 열이동인 정상상태의 열수지 효과이다. 식(2)에서  $C$ 는 퇴적물의 열용량,  $dT/dt$ 는 퇴적층(두께:  $z$  m)내 온도의 시간변화율,  $\lambda$ 는 퇴적물의 열전도 그리고  $dT/dz$ 는 퇴적층의 수직적인 온도 기울기를 나타낸다. 특히 본 조사지점의 니질갯벌이 해당하는  $C$ 의 값은  $1.87 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ 와  $\lambda$ 의 값으로  $0.88 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 을 사용하였다(Harrison, 1985). 따라서  $Q_g$ 의 계산을 위해서 갯벌층내 일정한 퇴적층을 선택하여 관측된 지온을 근거로  $dT/dt$ 와  $dT/dz$ 를 결정하였다. 우선  $Q_g$  값을 얻기 위해서 갯벌표

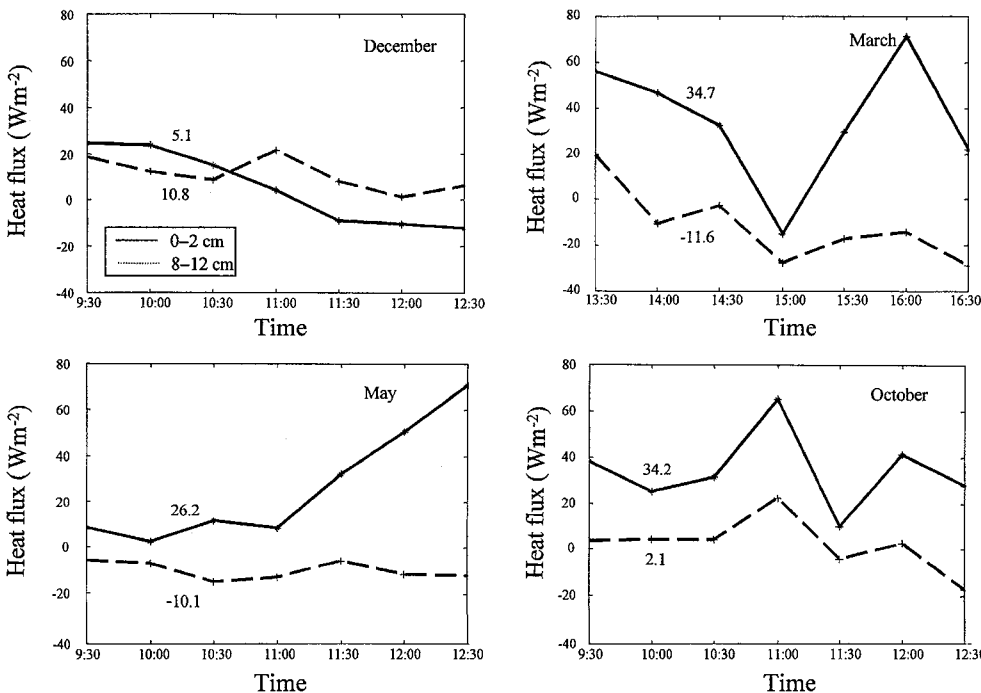
면으로부터 일정한 깊이까지의 두께( $z$ )를 갖는 퇴적층을 선정해야 한다. 일반적으로 10 cm 깊이까지의 층이 생물학적 활동이 활발한 층으로 알려져 있으나 본 연구에서는 표면으로부터 2 cm 되는 갯벌 표층과 갯벌 심층(8~12 cm) 그리고 전 층(0~12 cm)에 대한 열수지를 고려하였다. 따라서 각 층별  $Q_s$  값은 그 해당 층 경계면을 통한 열수지를 의미하므로  $Q_s < 0$  인 경우는 그 해당 층의 열이득을  $Q_s > 0$ 인 경우는 해당 층의 열손실을 나타낸다.

총 5회 관측 중 8월을 제외한 각 월별  $Q_s$  값을 표층(0~2 cm)과 심층(8~12 cm)대하여 계산하였다(Fig. 4). 표층에서의  $Q_s$ 는 모든 관측을 통해 양의 부호를 갖고 시간에 대한 평균값은 3월과 5월에 34 W/m<sup>2</sup> 이상을 보이며 12월에는 5.1 W/m<sup>2</sup>로 최소값을 나타내고 있다. 즉 갯벌표층은 간조시에 열이득을 경험하고 있으며 그 결과 표층의 지온이 상승하는 경향을 보이고 있다. 상승된 갯벌표층의 온도로 인해 갯벌표면으로의 열의 방출과 동시에 하층으로의 열전도가 발생할 수 있음은 쉽게 짐작할 수 있다. 한편 심층(8~12 cm)에서는 10월과 12월에는 2~10 W/m<sup>2</sup>의 열이득을 3월과 5월에는 10~11 W/m<sup>2</sup>의 열손실을 보이는 바 이는 온도기울기의 부호가 시간에 따라 양에서 음으로 변하거나(10월, 12월) 음의 부호만을 유지하기(3월, 5월) 때문이며 주로 열전도에 의해 이루어지고 있다(Fig. 2). 한편 갯벌층 10 cm이하의 심층에서의 열수지특성은 열저장 효과보다 열전도에 의한 열의 손실이 우세하나 그 크기는 매우 미약하여 열수지특성을 잘 나타내는 갯벌층은 10 cm 이하임을 확인할 수 있다(Fig. 5). 표층과 심층의 시간적인 열수지 변화 및 그 요인을 파악키 위해 열저장항과 열전도항의 크기를 분리하여 표시하였다(Figs. 6, 7).

간조시 표층과 심층의 열수지( $Q_s$ )의 시간적인 변화양상의 특징은 열저장항과 열전도항의 크기 변화가 서로 반대의 위상을 갖는 점이다. 즉, 열저장항의 크기가 증가함(양의 부호)은 해당 갯

벌층의 지온의 상승을 의미하여 따라서 인접층과의 지온차이를 야기시켜 열전도항의 크기를 증가시키는 결과를 초래하여 해당 층으로부터의 열이동 즉 열손실을 가져오게 되는 것이다. 따라서 12월의 경우 평균적으로 18.5 W/m<sup>2</sup>의 열수지가 표층에서 하층으로 발생되고 이는 23.5 W/m<sup>2</sup>의 크기를 갖는 표층의 열저장 효과에 기인한다(Fig. 6). 특히 3월에 나타나는 14시 30분에서 15시 사이의 표층에서의 열저장항의 급격한 변화는 주로 갯벌 표면온도의 변화에 의한 것으로 이에 따라 열저장 및 열전도항의 동반 변화가 발생되고 있음을 보여주고 있다. 결국 갯벌표층은 간조시 태양복사에너지의 흡수에 따른 열저장 효과가 우세하며 갯벌표면온도와 대기온도 변화에 매우 민감한 반응을 보임으로써 두 항간의 위상변화를 지배하는 특성을 보이고 있다. 심층(8~12 cm)에서의 열수지특성(Fig. 7)은 열전도항의 크기가 열저장항보다 약 10 W/m<sup>2</sup> 더 크게 나타나는 3월과 5월 그리고 열저장효과가 우세한 10월, 12월로 구분되고 있다. 특히 심층에서의 열전도 특성은 하층으로의 열이동을 보여 주며 양의 부호를 갖는 열저장효과와는 상층으로부터의 열의 유입을 나타내고 있다. 그러나 두 가지 효과를 모두 고려한 경우(Fig. 4) 심층은 10월과 12월에는 열이득을 3월과 5월에는 열손실을 경험하고 있다.

표층과 심층의 열수지 특성이 열저장효과와 열전도효과와 시간에 따른 변화에 매우 민감하게 나타나고 있으므로 표면에서 12 cm 깊이까지의 층에 대한 열수지를 계산하였다(Fig. 8). 이러한 계산을 위해 12 cm 두께층의 평균 지온변화량과 평균 지온기울기를 고려하였다. 계절적인 특성은 3월을 제외한 모든 관측치에서 갯벌층이 열이득을 보이고 있으며 그 최대값은 12월의 28.9 W/m<sup>2</sup>이며 5월에는 4.1 W/m<sup>2</sup>로 열이득의 최소값을 보이고 있다. 한편 유일하게 열손실을 보인 3월의 경우 그 값은 -4.5 W/m<sup>2</sup>로 관측시간동안 하강한 기온에 따른 갯벌표층의 지온 감소 및 갯벌이 대기에 노출되기 시작한 시각이 오후인 때문으로



**Fig. 4.** Temporal variations of the total subsurface heat fluxes in the surface layer (0-2 cm; solid) and in the deeper layer (8-12 cm; dotted). The numbers are the temporal average of the heat flux in Wm<sup>-2</sup> and the positive number means the heat flux out of the sediment and the negative sign corresponds to the heat flux into the sediment.

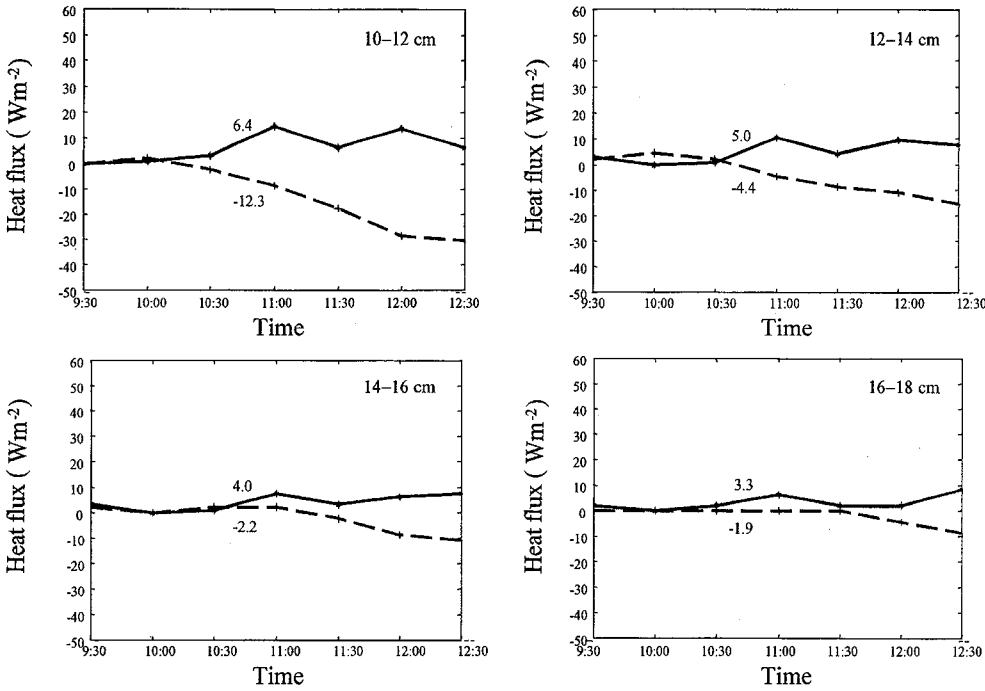


Fig. 5. Temporal variations of the separated components of heat fluxes below the 10 cm layer in October. The rate of change of temperature within a layer of sediment (solid) and the conduction gain or loss (broken) with their temporal averages are shown at each layer.

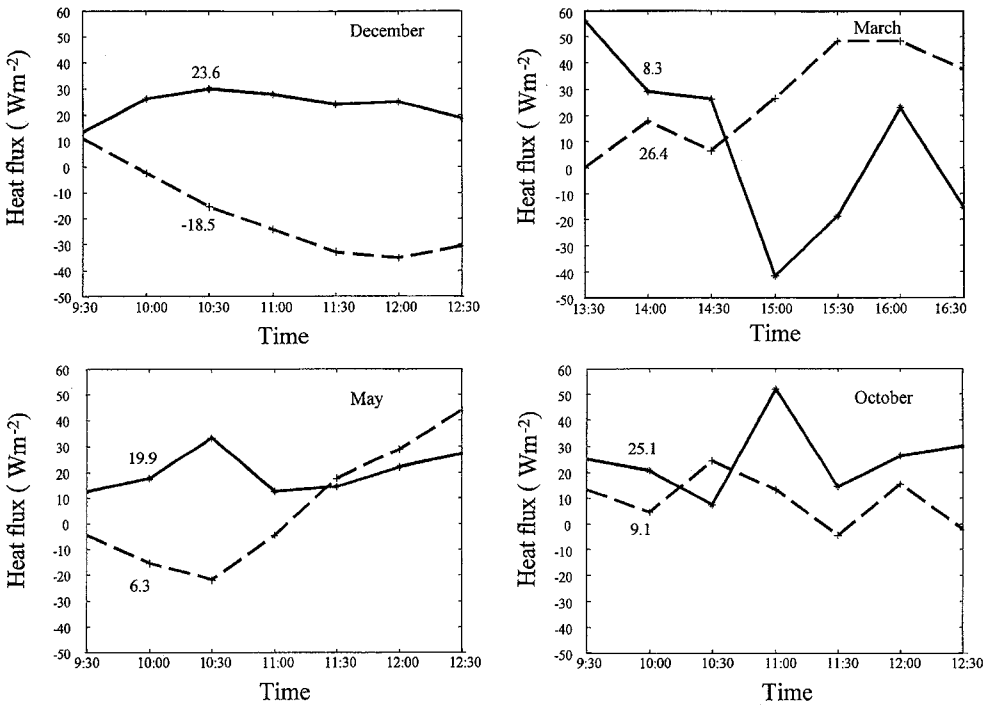


Fig. 6. Temporal variations of the separated components of the heat fluxes in the surface layer (0–2 cm). The rate of change of temperature within a layer of sediment (solid) and the conduction gain or loss (broken) with their temporal averages are shown at each month.

판단된다(Fig. 3). 즉 관측시작전의 고조시각이 일출시각에 따라 간조시 열수지값이 차이가 나는 것을 Harrison *et al.*(1985)도 관측한 바 있다. 그들의 여름철 간조시의 관측결과에 의하면 고조시각이 낮 12시55분인 경우  $Q_s$ 는  $8 \text{ W/m}^2$  인 반면에 고조시각이 06시인 경우  $59 \text{ W/m}^2$ 의 크기를 보여줌으로써 대기에 오래 노출된 간조시 갯벌이 복사에너지를 더 많이 받고 있음을 증명하고 있다.

### 갯벌퇴적층 온도의 수직분포 모델링

갯벌퇴적층의 열수지( $Q_s$ )를 결정짓는 요인이 퇴적층의 열저장 변화율과 열전도이나 앞장에서 설명한 대로 갯벌표층(0~2 cm)에서는 열저장변화가 우세하고 심층(8~12 cm)에서는 열전도가 대체적으로 우세한 요인으로 나타나고 있다. 따라서 퇴적층내 온도의 시간적인 변화요인을 파악키 위해 확산방정식을 이용한 온

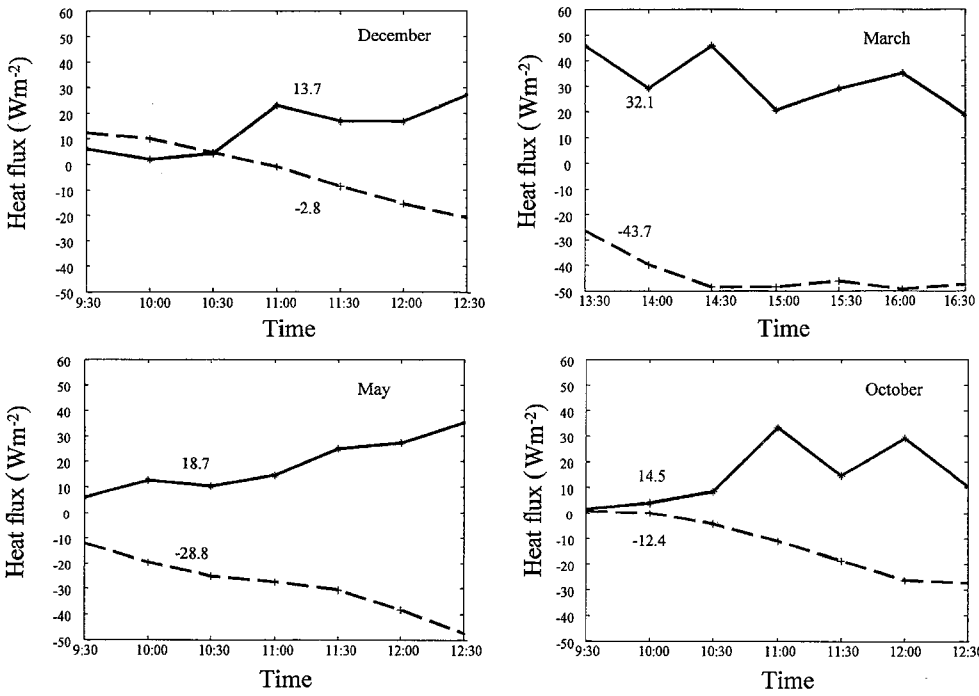


Fig. 7. Temporal variations of the separated components of the heat fluxes in the deeper layer (8–12 cm). The rate of change of temperature within a layer of sediment (solid) and the conduction gain or loss (broken) with their temporal averages are shown at each month.

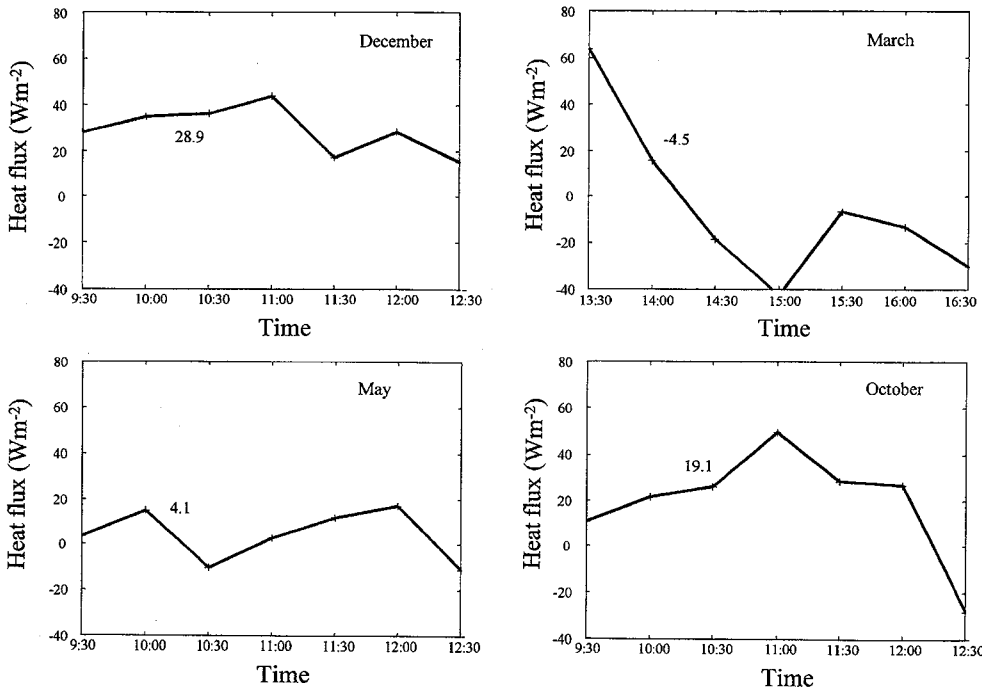


Fig. 8. The seasonal variations of the total subsurface heat flux in the sediment layer (0–12 cm) with the mean values. In March, the temporal fluctuation reflects the atmospheric condition during the observation.

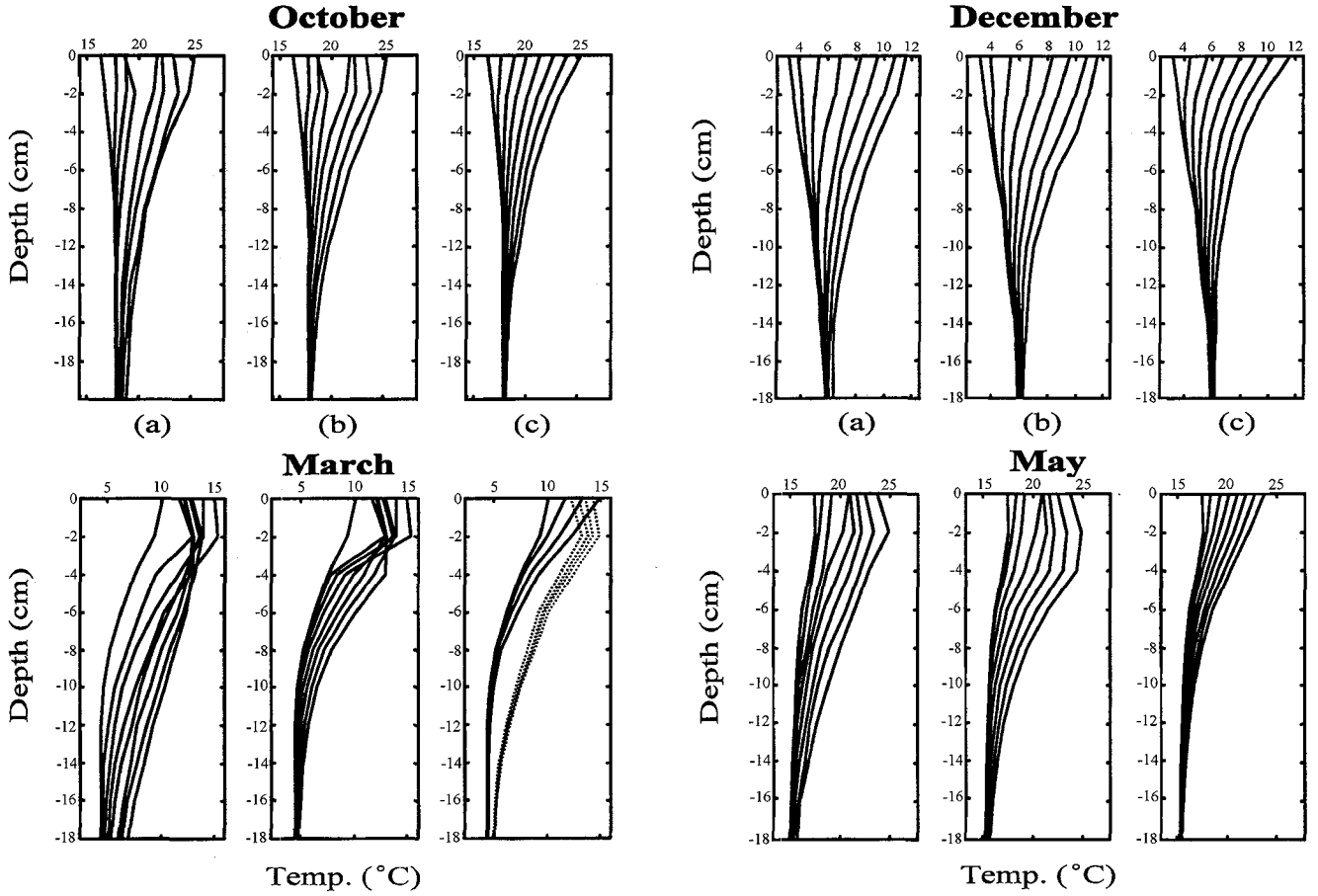
도 분포를 계산하였다. 우선 두 가지 경계조건을 고려하였는데 그 하나는  $z=0$ , 즉 갯벌표면에서 온도의 시간변화를 준 경우이고 또 다른 조건은  $z=4$  cm 인 퇴적층내 온도의 시간변화를 경계조건으로 택한 경우로 이는 앞서 언급한 대로 심층에서는 열전도가 우세하게 관측되었기 때문이다. 초기조건 역시  $z=0$ ,  $z=4$  cm 깊이에서의 지온을 각각 사용하였다. 이미 잘 알려진 1차원 확산방정식에서  $T$ 는 온도,  $\kappa$ 는 확산계수이며

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

식(3)에 대한 첫번째 경계조건은

$$\begin{aligned} T &= T_0, & t &= 0 \\ T &= \psi_0, & z &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $T_0$ 은  $z=0$ 에서의 최초 관측온도,  $\psi_0(t)$ 는  $z=0$ 에서의 관측



**Fig. 9.** Temporal variations of the observed (a) and calculated (b, c) vertical temperature profiles for four different months. In (b), the observed temperatures at the 4 cm-depth were used as the boundary condition while in (c) the sediment surface temperatures were used. In March, two different boundary conditions in terms of time variation of temperature at the surface were employed as the solid line ( $\frac{dT}{dt} > 0$ ) and the dashed line ( $\frac{dT}{dt} < 0$ )

된 시간별 온도이다.  
두 번째 경계조건은

$$\begin{aligned} T &= T_4, & t &= 0 \\ T &= \psi_4(t), & z &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $T_4$ 는  $z=4$  cm에서 관측된 지온의 초기값,  $\psi_4(t)$ 는  $z=4$  cm에서의 관측된 시간별 온도이다.

또한 관측된 온도에 따라

$$\begin{aligned} \psi_0(t) &= k_0 t \\ \psi_4(t) &= k_4 t \end{aligned} \quad (6)$$

이며  $k_0, k_4$ 는 상수이다.

각각의 경계조건에 따른 해는(Carlsaw and Jaeger, 1959)

$$\begin{aligned} T &= 4k_0 t \, i^2 \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{2\kappa t}} \\ &= 4k_4 t \, i^2 \operatorname{erfc} \frac{z-4}{\sqrt{2\kappa t}} \end{aligned} \quad (7)$$

이며,

$i^2 \operatorname{erfc} x = \int_x^\infty i \operatorname{erfc} \zeta \, d\zeta$ ,  $i \operatorname{erfc} x = \int_x^\infty i \operatorname{erfc} \zeta \, d\zeta$ 을 의미한다.

경계조건 (4)와 (5)에서  $z=0$ 에서의 관측치와  $z=4$  cm에서의 관측치를 이용 퇴적층에서의 온도를 계산하기 위해 니질의 깃벌에 해당하는 확산계수( $\kappa$ )를  $0.47 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 을 사용하고(Harrison and Phizacklea, 1985)  $\kappa$ 는  $z=0$  및  $z=4$  cm 깊이에서 관측한 최종온도와 최초온도를 관측시간으로 나눈 값으로 대체하였다. 따라서 두 가지 경계조건, 즉  $z=0$ 에서 관측한 온도 및  $z=4$  cm에서의 온도를 이용한 계산결과와 실측치를 비교하였다. 단  $z=4$  cm에서의 온도를 이용할 경우는  $z=0, z=2$  cm에서의 온도는 실측치로 대체하였다. 이는 이미 언급한대로 4 cm 이내의 퇴적층에서는 확산 이외의 열이동이 발생하므로 1차원 확산방정식이 부적합했기 때문이다(Fig. 9). 8월을 제외한 4회 관측치와 두 경계조건에 따른 온도의 수직분포 중 3월을 제외하면 4 cm 이하에서의 수온분포는 확산방정식의 해와 잘 일치됨을 알 수 있다. 3월의 경우는 깃벌표면온도가 관측시간동안 상승 및 하강을 보임으로써 시간에 선형적으로 반응하지 못한 표면온도 때문이다. 한편  $z=0$ 에서의 관측온도를 경계조건으로 사용시 계산결과는 관측치와 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 표층에서의 열이동이



비확산경로를 이용한 때문으로 소위 열저장량의 시간변화가 매우 우세한 경우라 할 수 있겠다. 따라서 계산된 온도의 수직분포가 4 cm 이하에서는 관측치와 대체로 일치함은 4 cm 이하에서는 열전도의 역할이 중요함을 입증한다고 할 수 있을 것이다.

### 결론 및 토의

서해안의 제주도 갯벌에서 낮 동안 일어난 간조시에 갯벌층의 수직적인 지온분포를 측정하였다. 측정시기는 계절적인 특성을 나타낼 수 있도록 3월, 5월, 8월 그리고 10월, 12월 등 5회 실시하였으며 매 측정시마다 2 cm 간격으로 18 cm 층까지의 지온을 매 30분 간격으로 수시간동안 반복하였다. 퇴적층내 지온의 수직분포는 계절, 관측시작전 만조시각, 그리고 대기온도에 의해 크게 좌우되는 양상을 보이고 있으며 예로 관측된 지온의 기울기 중 퇴적층 깊이에 따른 지온의 증가를 보였던 수직분포는 최초의 관측시각이 관측전 만조시각과의 차이가 제일 작을 때 나타나고 있다. 이러한 관측결과는 만조시 갯벌층을 덮고 있는 해수로 열을 빼앗기고 있음을 의미하며 갯벌이 대기에 노출되는 간조시에 갯벌층은 열이득을 경험하게 되는 과정을 되풀이하고 있음을 보여주고 있다. 본 연구의 범위가 갯벌층내의 열수지만을 고려한 제한적인 것으로 간조시 갯벌표면에서의 잠열속과 현열속을 관측하지 못하였으나 갯벌층내의 열수지를 결정짓는 두 요소, 즉 갯벌층의 지온변화에 따른 열저장효과 및 열전도효과를 관측치로부터 파악할 수 있었다. 갯벌표층(0~2 cm)의 열수지는 주로 태양복사에너지에 의한 지온의 상승에 기인한 열저장효과가 우세한 반면 심층(8~12 cm)은 열전도효과가 우세하게 나타나고 있다. 관측기간 중 기온의 하강이 있었던 경우를 제외하고는 전 층(0~12 cm)의 열수지 특성은 갯벌이 4.1~28.9 W/m<sup>2</sup>의 열이득을 경험하고 있다. 특히 강우 및 구름량에 따른 지온분포의 민감한 반응은 갯벌내 열수지변화가 기상조건에 의해 크게 좌우되고 있음을 반영하고 있다.

### 사 사

본 논문은 1998년 한양대학교 교내연구비에 의해 연구되었다. 갯벌의 수직적 온도를 측정하기 위해 현장에서 애쓴 대학원생 김

형수, 이창원의 노고에 감사한다.

### 참고문헌

- 김동성, 최진우, 제종길, 이재학, 1998. 서해 대부도 갯벌에 서식하는 중형저서 생물의 군집구조. 해양연구, 한국해양연구소, 20: 81-87.
- 안동만, 이용희, 이원희, 박소영, 제종길, 1998. 갯벌의 보전과 현명한 이용을 위한 입법 방안에 관한 고찰. 해양연구, 한국해양연구소, 20: 209-219.
- 이홍동, 1998. 갯벌 보전과 농업생산의 가치에 대한 비교연구. 해양연구, 한국해양연구소, 20: 145-152.
- Koh, C.H. and H.C. Shin, 1988. Environmental characteristics and distribution of macrobenthos in a mudflat of the west coast of Korea(yellow sea). *J. Sea Res. Netherlands*, 22: 279-290.
- Carlsaw, H.S. and J.C. Jaeger, 1959. Conduction of Heat in Solids. Oxford Univ. Press., London, pp. 50-64.
- Na, J.Y., J.W. Seo and H.J. Lie, 1999. Annual and Seasonal Variations of the Sea Surface Heat Fluxes in the East Asian Marginal Seas. *J. Oceanogr. Japan*, 55: 257-270.
- Harrison, S.J. and A.P. Phizacklea, 1984. Thermal properties of muddy inter-tidal sediments. Univ. of Stirling, IMRP Report, No. 7-8 pp.
- Harrison, S.J., 1985. Heat Exchange in Muddy Intertidal Sediments: Chichester Harbour, West Sussex, England, Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, 20: 477-490.
- Harrison, S.J. and A.P. Phizacklea, 1985. Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mudflats of the Forth estuary. *J. climato. Scotland*, 5: 473-485.
- Harrison, S.J. and A.P. Phizacklea, 1987. Vertical temperature gradients in muddy intertidal sediments in the Forth estuary. *Limnol. Oceanogr. Scotland*, 32: 954-963.
- Seung, Y.H. and S.I. Shin, 1996. A simple model of the formation of the thermohaline front in southeastern part of the Yellow Sea in winter. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 31: 23-31.

1999년 9월 16일 원고접수

1999년 12월 13일 수정본채택