

1994년 인천 연안역의 열수지

최 용 규 · 윤 흥 주*
서해수산연구소 군산분소 · 기상청 기상연구소
(1999년 2월 1일 접수)

Heat Budget in Incheon Coastal Area in 1994

Yong-Kyu Choi and Hong-Joo Yoon*

Kunsan Lab., West Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Agency,
Kunsan 573-030, Korea

*Remote Sensing Research Lab., Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration,
Seoul 156-720, Korea

(Manuscript received 1 February, 1999)

Based on the monthly weather report of Korea Meteorological Administration (KMA) and daily sea surface temperature (SST) in Incheon harbor of National Fisheries Research and Development Institute, heat budget in Incheon coastal area was estimated.

The temperature differences between the sea surface and near bottom were nearly within 1°C. This indicate the mixing from the sea surface and the bottom. The net heat flux through the sea surface and the advection through the inner and outer bay was affected uniformly to the water body in Incheon coastal area.

The net heat flux was about 110W/m² in maximum value on May, about -80W/m² in minimum on January. The net heat flux through the sea surface from the solar radiation was about 2.35×10⁵W during the year. This heat flux flew out the bay through the advection by the same flux.

Key words : heat budget, advection, heat flux

1. 서 론

인천 연안역은 조석간만의 차이가 크고 해저 경사가 완만한 넓은 조간대가 잘 발달되어 있다. 선박이 출입하는 항로는 수심이 20m 정도이고 그 이외의 해역은 거의 10m 이천으로 되어 있다. 인천 연안을 따라서 시화 방조제, 영종도 신공항, 송도 신도시 건설 등의 연안 개발이 활발히 진행되고 있으며, 인근에는 임해 공단이 조성되어 있다. 이러한 인위적인 해양 환경의 변화는 해수의 유동을 변화시키는 물론, 수산생물 특히 저서생물의 분포에 영향을 미치기도 한다.

이러한 환경 변화중에서 생태계와 가장 큰 관련이 있는 것은 수온의 변화이다.

수온은 태양복사 에너지를 원천으로 장파복사, 현·잠열 등의 에너지 교환을 통하여 결정된다. 대기와 해양의 상호작용에 의해 결정되는 복사량과 현·잠열량의 변동을 조사하는 것은 해양생물 환경 연구에 대단히 중요하다. 이러한 중요성으로 인해 최근에 외양이나 연안역에서의 열속 변동에 관한 연구가 많이 수행되어오고 있다.¹⁻⁴⁾ 특히 인천 연안역과 같은 작은 규모의 만에서 태양 에너지의 유출·유입은 조석 혼합물을 결정하여 성층

과 조석 혼합을 결정하는 중요한 인자로서 작용한다.⁵⁾

태양으로부터 해면을 통해서 들어온 에너지는 수평 및 연직 방향의 이류나 확산에 의해서 해수중으로 재분배된다. 따라서 어떤 해역의 수온 변동은 해면을 통한 열의 유출입과 수평 및 연직 방향의 열의 이동에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 해양 환경의 물성적인 측면에서, 인천 연안역의 수온 계절 변화를 알아보고, 그 원인을 열수지 해석을 통해 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

인천 연안역의 수온의 계절 변화를 보기 위하여, 한국 연안 어장환경 오염조사 결과 보고서⁶⁾의 1994년 인천 연안역의 16개 정점에서의 수온 자료를 사용하였다(Fig. 1). 또한 계절별 표면 수온의 연속적인 변화를 보기위하여, 국립수산진흥원이 인천항에서 관측한 1994년의 일별 표면 수온 자료를 사용하였다. 그리고 대기-해양 상호 작용에 의한 열속항들을 계산하기 위하여 기상월보⁷⁾의 자료를 이용하였다.

해양의 열수지는 다음식으로 나타낼 수 있다.³⁾

$$DH = Q_{sfc} \cdot S_0 + Q_v \quad (1)$$

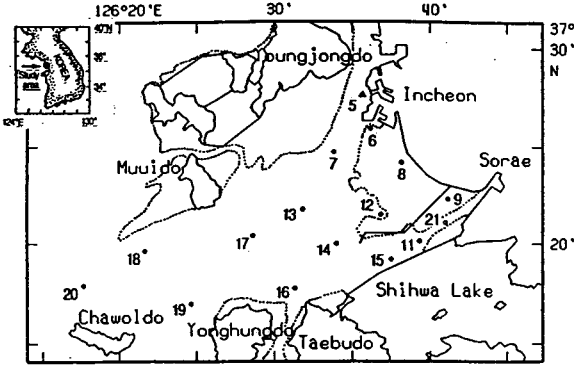


Fig. 1. Hydrographic stations in Incheon coastal area. Dot lines indicate the tidal flat and numerals the station numbers.

여기서 DH는 해양 열용량의 시간 변화이고, Q_{sfc} 는 해면을 통한 열교환이고, S_0 는 조사 해역의 표면적으로 여기서는 $6 \times 10^7 \text{ cm}^2$ 이다. 그리고 Q_v 는 이류에 의한 열수송량이다. 위의 관측 자료들로부터 DH를 구하고, 벌크법(aero dynamic bulk method)에 의해서 $Q_{sfc} \cdot S_0$ 를 계산하여, 두 항의 차로써 Q_v 를 산출하였다.

해면을 통한 순열속 Q_{sfc} 는 단파복사량(Q_s), 장파복사량(Q_b), 현열속(Q_h) 그리고 잠열속(Q_e)으로부터 계산되며, 각 항들은 벌크법에 의해서 다음식으로 나타낼 수 있다.^{1,2,4)}

$$Q_{sfc} = Q_s + Q_b + Q_h + Q_e \quad (2)$$

$$Q_s = Q_i (1 - \alpha) \quad (3)$$

$$Q_b = S\sigma(T_a)^4(0.254 - 0.00495E_a)(1 - 0.6C) + 4S\sigma(T_a)^3(T_s - T_a) \quad (4)$$

$$Q_h = \rho_a C_p C_H (T_s - T_a)W \quad (5)$$

$$Q_e = \rho_a C_E L_v (q_s - q_a)W \quad (6)$$

여기서 Q_i 는 수평면 일사량이고, α 는 알베도(0.06)이다. S 는 해면의 사출율(0.97)이며, σ 는 스테판-볼츠만 상수($5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$), T_s 와 T_a 는 각각 수온과 기온의 절대온도(K), E_a 는 대기의 수증기압, C 는 운량이다. ρ_a 는 공기의 밀도(1.25 kg/m^3)이며, C_p 는 공기의 비열($1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}/\text{K}$), C_H 는 스테판계수(1.1×10^{-3}), W 는 풍속(ms^{-1}), C_E 는 달톤계수(1.1×10^{-3}), L_v 는 물의 증발 잠열($2.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$), q_s 와 q_a 는 각각 수온에서의 공기의 비습, 기온에서의 공기의 비습으로 다음식으로 계산된다.

$$q_s = \frac{0.62E_s}{(P - 0.38E_s)} \quad (7)$$

$$q_a = \frac{0.62E_a}{(P - 0.38E_a)} \quad (8)$$

$$\log_{10} E_s = (0.7859 + 0.03477T_s)/(1 + 0.00412T_s) \quad (9)$$

$$E_a = \text{RHE}_s \quad (10)$$

여기서 E_s 는 해면의 포화 증기압(hPa)이고 P 는 대기압(hPa), RH는 상대습도(%)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온의 계절변화

인천 연안역의 수온의 계절 변화를 보기위하여 2월, 4월,

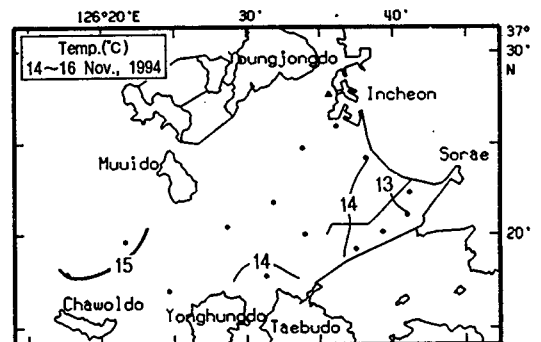
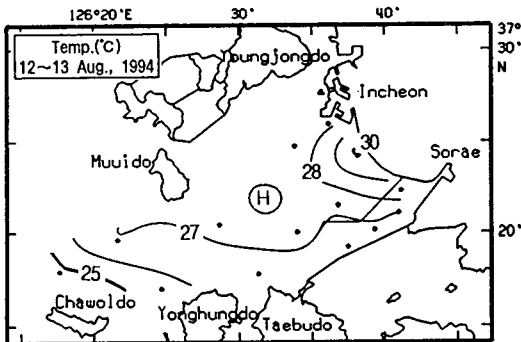
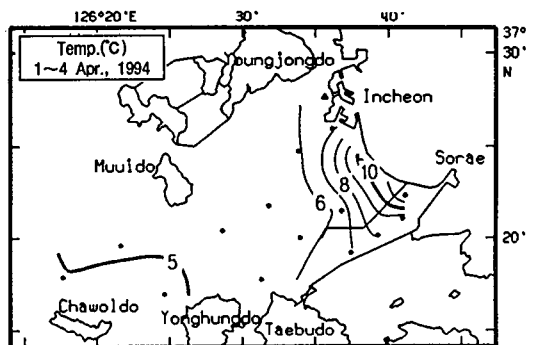
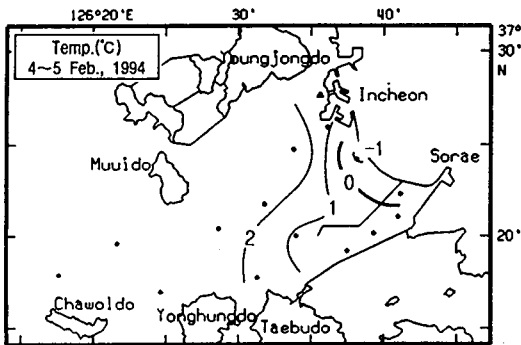


Fig. 2. Seasonal variations of the sea surface temperature in February, April, August and November in 1994, respectively.

8월 그리고 11월의 표면 수온의 수평 분포도를 Fig. 2에 각각 나타내었다. 수온이 가장 낮은 2월과 수온이 가장 높은 8월의 연교차는 인천과 소래 연안의 조간대에서 약 30°C에 이르며, 만구역인 자월도 근해에서는 약 23~25°C에 이른다. 인천과 소래 연안은 승온기인 4월에 약 10°C 이상으로 만구역인 자월도의 약 5°C보다 높고, 강하기인 11월에 인천과 소래 연안은 약 13°C로 만구역인 자월도의 약 15°C보다 낮다. 이러한 수온 분포는 인천과 소래 연안의 조간대역과 만입구역인 자월도 해역의 수심차에 의한 저열량의 차이에 기인한다고 할 수 있다. 즉 순열속을 Q , 해수 밀도를 ρ , 해수의 비열을 C , 수심을 H 라고 하면, 수온 상승률 $\Delta T = \Delta Q / \rho CH$ 로 나타낼 수 있다.⁵⁾ 수온 상승률은 수심에 반비례하기 때문에, 수심이 얇은 조간대역은 수심이 깊은 만입구역인 자월도 해역보다도 여름에는 수온이 더 높고, 겨울에는 수온이 더 낮게 나타난다.

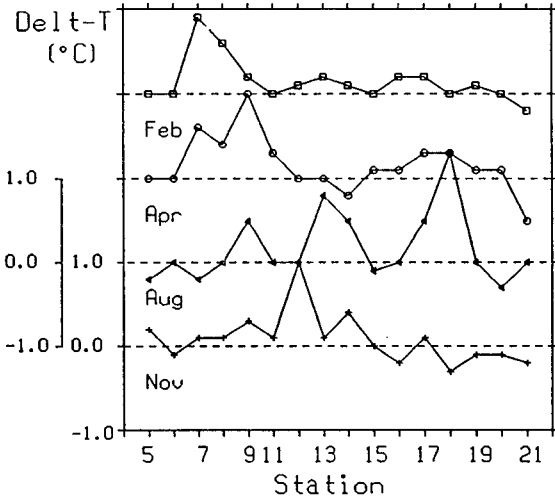


Fig. 3. Temperature differences between the sea surface and the bottom on February, April, August and November for each stations. Positive values denote higher in temperature of the sea surface than that of the bottom.

이러한 표면 수온의 계절 변화에 대해서 저층 수온은 어떻게 변하는가를 보기 위하여, Fig. 3에 각 정점에서의 2월, 4월, 8월 그리고 11월의 표면 수온과 저층 수온과의 차이를 나타내었다. 여기서 양의 값은 표면 수온이 저층 수온보다도 높음을 나타낸다. 8월에 정점 18에서 표면과 저층간의 수온차가 약 1.2°C로 표면 수온이 다소 높지만, 표면 수온과 저층 수온과의 차이는 전 정점에서 거의 1°C 이내이다. 이것은 표면과 저층 수온의 차이가 1°C 이상을 넘지 않고 표층과 저층간에 거의 혼합 상태를 이루고 있다고 할 수 있다. 따라서 인천 연안역에서 해면을 통한 열의 유출입이나 이류에 의한 열의 수송이 전 수층에 걸쳐서 일정하게 영향을 미치고 있음을 보이고

있다.

수온의 연속적인 변화를 보기 위하여 인천항에서 관측한 일별 수온 변화를 월별 평균과 함께 Fig. 4에 나타내었다. 또한 인천항에서 얻어진 일별의 수온 변동과 인천항에서 가장 가까운 갑문 앞에 위치한 정점 5에서 2월, 4월, 8월, 11월의 표면 수온을 함께 나타내었다. 정점 5에서의 표면 수온은 2월과 4월에는 인천항보다 약 2°C 정도 낮게 나타나지만, 인천항에서 관측한 표면 수온의 변화와 거의 유사하다. 인천항에서의 수온의 상승과 강하가 반월만에서의 수온의 상승과 하강을 그대로 나타낸다고 할 수 있다.

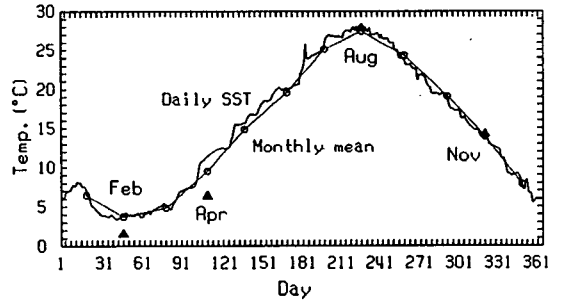


Fig. 4. Daily variations of the sea surface temperature (solid line) and monthly mean of the sea surface temperature (dotted line with open circles) of Incheon in 1994. Triangles denote the sea surface temperature in station 5.

3.2. 열수지

인천항에서의 단파복사량(Q_s)과 순열속(Q_{sc}) 그리고 장파 복사량(Q_b), 현열속(Q_h), 잠열속(Q_e)의 일변화를 Fig. 5에 나타내었다. 이러한 열속들의 일변화를 월평균 값으로 하여 Fig. 6에 나타내었다. 각 해면 열속들의 양의 값은 대기에서 해양으로의 열의 전달을 나타낸다.

단파 복사량 Q_s 는 5월에 최대 약 180W/m²에 달하고 1월에 약 70W/m²에 이른다. 장파 복사량 Q_b 는 항상 해양에서 대기로 전달되고, 1월에 약 -80W/m²로 최소이고 7월에 약 -30W/m²로 최대로 된다. 현열속 Q_h 는 4월에서 8월의 기간 동안 해양에서 대기로 전달되며, 5월에 약 10W/m²로 최대로 되고, 9월에서 3월의 기간 동안 대기에서 해양으로 전달되며 1월에 약 -40W/m²로 최소를 나타낸다. 잠열속 Q_e 는 항상 해양에서 대기로 전달되며, 12월에 약 -40W/m²로 최대를 나타내고, 8월에 약 -70W/m²로 최소를 나타낸다.

그 결과, 순열속 Q_{sc} 의 계절 변화를 보면, 3월에서 10월까지 대기에서 해양으로의 열수송이 있고, 5월에 최대 약 110W/m²에 이른다. 이것은 장파 복사량과 잠열속으로 인하여 해양이 잃어버리는 열보다도 대기에서 해양으로 들어오는 단파 복사량이 약 4배 이상 많기 때문이다. 그리고 11월에서 2월까지의 해양에서 대기로의 열전달이 있고, 1월에 최소 약 -80W/m²에 이른다.

관측 일별의 열속항들에 관한 자료를 월별로 평균하

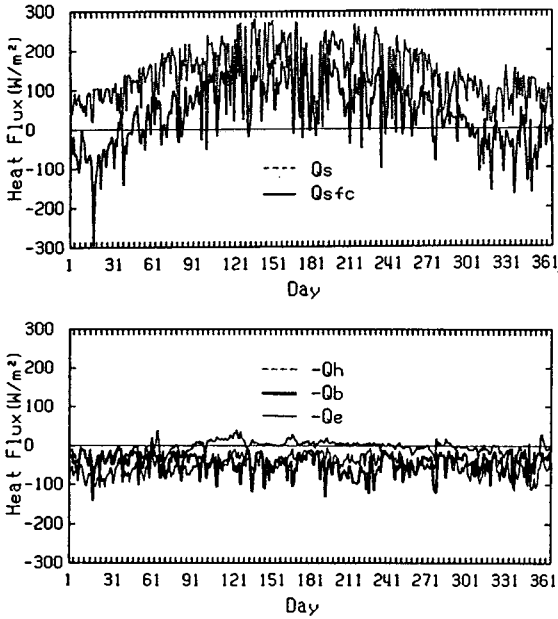


Fig. 5. Daily variations of short-wave radiation Q_s and net heat flux Q_{sfc} (upper), long-wave radiation Q_b , sensible heat flux Q_h and latent heat flux Q_e (lower) of Incheon in 1994.

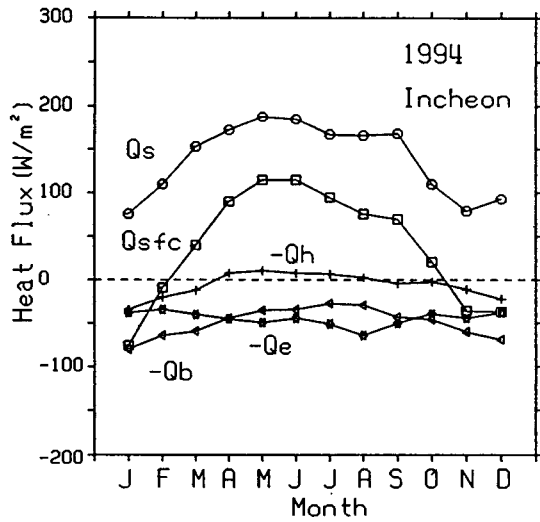


Fig. 6. Same as in Fig. 5, but for the monthly mean values.

여 계절 변화를 살펴보았는데, 만월만의 월별 열용량 SH는 다음식으로 산정하였다.³⁾

$$SH = aC\rho VT \quad (11)$$

여기서 a 는 calorie단위를 Watt단위로 바꾸는 계수로 4.186으로 하였다. C 는 해수의 비열, ρ 는 해수의 밀도, V 는 만월만의 용적으로 $9 \times 10^{10} \text{cm}^3$ 으로 하였다. T 는 Fig. 4에서 점선으로 나타낸 월별 평균 수온값으로 하였

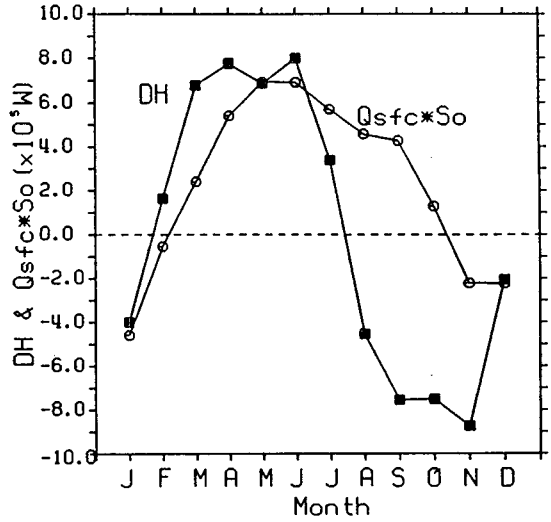


Fig. 7. Monthly variations of time change of heat content DH (full squares) and heat transfer $Q_{sfc} \cdot S_o$ (open circles) through the sea surface.

다. 이러한 월별 열용량 SH로부터 인천 연안역내의 열용량의 시간 변화 DH를 구할 수가 있다. 즉,

$$DH_{i-1/2} = (SH_{i-1} - SH_i)/d_{i-1/2} \quad (12)$$

여기서 i 는 i 번째의 값, $i+1/2$ 은 월간의 일수를 초의 단위로 환산한 값으로 1개월을 30일로 하였다.

(12)식으로부터 계산된 열용량의 시간 변화와 Fig. 6에서 계산된 순열속에 연구 해역의 표면적을 곱한 값의 월별 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 1월에서 6월까지 열용량의 시간 변화와 인천 연안역 전체 해면을 통한 순열속의 변화는 거의 유사하게 증가하다가, 7월부터는 만내의 열용량이 해면을 통한 순열속보다 급격히 감소하고 있다. 이것은 1월에서 5월까지의 수평 이류에 의해서 만외에서 만내로의 열수송이 일어나고, 7월에서 11월까지의 만내에서 만외로 열수송이 많이 일어나고 있음을 나타낸다.

이러한 결과를 계절별로 나누어서 나타낸 것이 Fig. 8이다. 여기서 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 12~2월로 하였다. 봄과 여름동안 수온 상승에 기여하는 열용량(약 $9.41 \times 10^5 \text{W}$)은 가을과 겨울 동안에 이류에 의한 열손실과 해면을 통한 대기로의 열손실(약 $10.41 \times 10^5 \text{W}$)과 거의 같았다. 그리고 여름과 가을 동안에는 이류에 의한 열손실(약 $12.48 \times 10^5 \text{W}$)이 봄과 겨울 동안 이류에 의한 열획득(약 $3.09 \times 10^5 \text{W}$)보다 약 4배나 많았다. 이것을 연평균하여 보면, 해면을 통해서 유입된 열(약 $2.35 \times 10^5 \text{W}$)은 모두 이류에 의해서 만외로 유출(약 $2.35 \times 10^5 \text{W}$)되고 있었다. Isoda and Hasegawa³⁾는 최대 수심이 약 100m에 이르는 펀카만(Funka Bay)은 여름철에 쓰가루 난류(Tsugaru Warm Current)의 만내 유입에 따라서 열공급이 크지만, 겨울철의 해면 냉각에 따라서 열적 균형을 이룬다고 하였다.

또한 겨울과 봄철의 오야시오 해류(Oyashio Current)의 만내로의 유입에 의한 열적 영향은 무시할 수 있다고

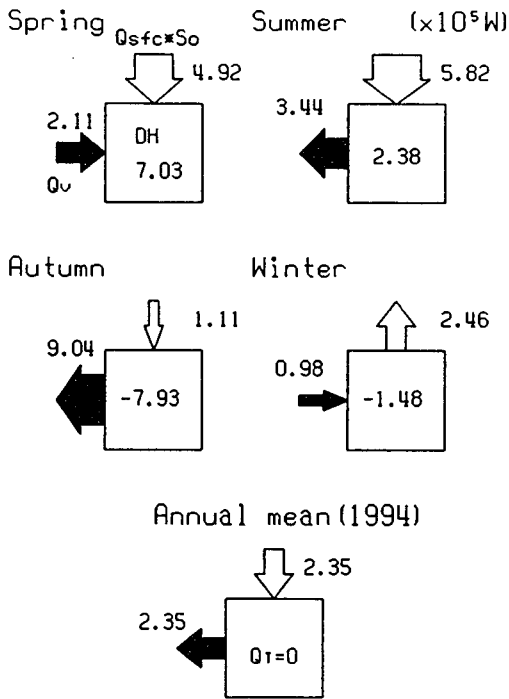


Fig. 8. Heat budget in Incheon coastal area for each season and annual mean.

하였다. 이처럼 편차만은 수심이 깊고 한류수 혹은 난류수의 유출입이 계절적으로 변하고 있다. 그러나 인천연안역은 조석간만의 차이가 큰 경기만에 속해있고 수심이 20m 이천으로 얕다. 이러한 인천연안역은 해면을 통한 열의 유출과 유입뿐만 아니라 조류에 의한 수평 확산도 만내의 열적 균형을 이루는데 영향을 미치리라 생각된다. 태양 에너지와 조석 혼합은 연안역의 성층과 혼합을 결정하는 주요한 인자이다. 앞으로의 연구 진행은 이러한 태양 에너지의 유출입과 관련하여 조석 혼합물이 어떻게 되는가를 파악하는데 있다고 생각된다.

4. 요약 및 결론

국립수산진흥원의 일별 수온 자료와 기상청의 기상 자료를 이용하여 인천 연안역에서 수온 분포에 영향을 미치는 열수지를 산정해 보았다. 표면과 저층의 수온 차이는 연중 약 1℃ 이내로 상하층이 혼합된 상태를 나타내며, 해면을 통한 열의 유출입이나 이류에 의한 열의 수송이 표면에서 저층까지 일정하게 영향을 미치고 있었다.

순열속의 분포를 보면, 3월에서 10월까지 대기에서 해양으로의 열전달이 있고 5월에 최대 약 110W/m²에 이른다. 11월에서 2월까지는 해양에서 대기로의 열전달이 있고 1월에 최소 약 -80W/m²에 이른다. 1994년 전체의 열수지를 보면, 반월만내에서 해면을 통해서 유입되는 열은 약 2.35×10⁵W로 이것은 모두 이류에 의해서 만외로 유출되고 있었다.

감사의 글

본 논문을 검토하여 조언을 해주신 심사자들에게 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Elliott, A. J. and T. Clarke, 1991, Seasonal stratification in the northwest European shelf seas, Cont. shelf Res., 11(5), 467~492.
- 2) Hirose, N., C. H. Kim, and J. H. Yoon, 1996, Heat Budget in the Japan Sea, J. Oceanogr. Soc. Japan, 52, 553~574.
- 3) Isoda, Y. and N. Hasegawa, 1997, Heat Budget of Funka Bay, Umi to Sora, 72(3~4), 93~101(in Japanese).
- 4) Kim, Y. S., 1996, Estimate of Heat Flux in the East China Sea, J. Korean Fish. Soc., 29(1), 84~91.
- 5) Mann, K. H. and J. R. N. Lazier, 1991, Dynamics of Marine Ecosystems, Biological-Physical Interaction in the Oceans, Blackwell Scientific Publications, Inc., U.S.A., 466pp.
- 6) National Fisheries Research and Development Agency, 1996, Environmental Survey to Assess the Water Quality of the Korean Coastal Area (1989~1994), National Fisheries Research and Development Agency, Pusan, ROK, August 1996, 255pp.
- 7) Korea Meteorological Administration, 1994, Monthly Weather Report, 1~12, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea.