

2006년 동해안 감포의 열수지

최용규 · 한인성 · 서영상 · 고우진 · 김상우

국립수산과학원 해양연구과

(2008년 4월 4일 접수; 2008년 11월 12일 수정; 2009년 1월 9일 채택)

Heat Budget at Gampo in the Eastern Coast of Korea in 2006

Yong-Kyu Choi, In-Seong Han, Young-Sang Suh, Woo-Jin Go and Sang-Woo Kim

Ocean Research Team, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 609-712, Korea

(Manuscript received 4 April, 2008; revised 12 November, 2008; accepted 9 January, 2009)

Abstract

Based on the monthly weather report of Korea Meteorological Administration (KMA) and daily sea surface temperature (SST) data from National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI) in 2006, heat budget was estimated at Gampo in the eastern coast of Korea, the region occurring the cold water known as upwelling in summer. Net heat flux was transported from the air to the sea surface during February to November, and it amounts to 345 Wm^{-2} in monthly mean value. During December to January, the transfer of net heat flux was conversed from the sea surface to the air with -56 Wm^{-2} in minimum of monthly mean value in January. Long wave radiation was ranged from 6 Wm^{-2} to 106 Wm^{-2} . Sensible heat was varied from -36 Wm^{-2} (June) to 61 Wm^{-2} (February) and showed negative values from April to August. Latent heat showed 20 Wm^{-2} (July) with its minimum in July and 49 Wm^{-2} with its maximum in March in monthly mean value. The annual mean of net heat flux is 129 Wm^{-2} , giving an annual heat surplus of 22 Wm^{-2} . Thus, during summer, the upwelled cold water at Gampo, appears to compensate the heat gain. However the ways in which these compensations are accomplished remains to be clarified.

Key Words : Heat flux, Upwelling, Sensible heat, Latent heat

1. 서 론

지표면에 도달하여 흡수되는 태양에너지는 전체 지구에 도달하는 태양에너지의 50%에 달한다. 해양이나 육지로 유입된 50%의 태양에너지중에서 20%는 장파복사로, 6%는 현열로, 그리고 24%는 잠열로 방출된다. 해양에서 수온의 분포는 해면을 통한 열교환과 인접 해역으로부터의 이류나 와류 확산에

의해서 결정된다. 해류의 저층 마찰에 의해서 발생되는 에너지나 혹은 지구 내부로부터 해저를 통해서 들어오는 에너지는 태양복사에 비해서 아주 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 태양복사열이 해양의 열수지를 결정하는 주요한 인자이다^{1,2)}.

환경 변화 중에서 생태계와 가장 큰 관련이 있는 것은 수온의 변화이다. 수온은 태양복사 에너지를 원천으로 장파복사, 현·잠열 등의 에너지 교환을 통하여 결정된다. 대기과 해양의 상호 작용에 의해서 결정되는 복사량과 현·잠열량의 변동을 조사하는 것은 해양 생물 환경 연구에 대단히 중요하다고

Corresponding Author : Yong-Kyu Choi, Ocean Research Division, NFRDI, Busan 619-712, Korea
Phone: +82-51-720-2221
E-mail: ykchoi@nfrdi.go.kr

할 수 있다. 또한 해양의 열수지(heat budget)들은 연안역에서 해수의 성층을 결정하는 주요한 요소로 작용한다. 이러한 중요성으로 인해 최근에 외양이나 연안역에서 열수지 변동에 관한 연구가 많이 수행되어오고 있으며, 또한 열수지 분포는 해양과 대기간의 상호 작용으로 인한 해양 환경의 변동을 추정하는 방편으로 유용하게 사용되고 있다²⁻⁶⁾.

한편, 우리나라 동해안은 서해안이나 남해안에 비해서 해안선이 단조롭고 대륙붕이 거의 없는 것이 특징이다. 그러나 한국 동해 연안은 한류수와 난류수와의 상호 작용에 의해서 복잡한 해황을 나타낸다. 동해 중부 해역은 남하한 한류계수에 의해서 냉수괴의 출현이 빈번하며^{7,8)}, 동해 남부 해역은 하계 연안용승에 의해서 냉수괴가 출현하고 있다⁹⁻¹²⁾. 본 연구는 감포에서 관측된 연안 정지 관측 수온 자료를 이용하여 용승이 발생하는 해역인 감포의 열수지를 계산하였다. 연안 용승이 발생하면 연안의 수온이 차가워져 안개가 종종 발생한다. 이러한 안개는 선박의 항해에 큰 장애를 주기도 한다. 따라서 연안 용승이 발생하는 해역에서 열수지를 관찰하여 열수지 항들의 변화를 살펴보고자 하였다.

2. 자료 및 방법

감포에서의 연안 정지 수온 관측은 1967년부터 시작되어 현재까지 계속되고 있다(<http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata?id=shorelineObserList2&sv=&cPage=4>). 감포의 연안 정지 수온은 감포항에서 관측되고 있다. 이 자료들 중 관측 자료의 누락이 적은 2006년의 수온과 기온 자료를 이용하였다. 기상 자료는 기상 월보¹³⁾로부터 운량, 기압, 상대습도, 풍속 등을 정리하여 열수지를 계산하였다. 그리고 단파복사량을 계산하기 위한 수평면 일사량은 감포에서는 관측되지 않아서 감포로부터 직선 거리로 약 30 km 떨어져 있는 울산 기상대의 값을 사용하였다. 또한 감포에서의 연안정지 관측중 결측 자료는 연안정지해양관측성적¹⁴⁾으로부터 평년평균값을 자료로 사용하였다. 감포 연안은 하계 연안용승 해역으로 기초 생산력이 아주 높아 수산업의 활동이 활발한 해역이기도 하다(Fig. 1).

해면을 통한 순열수지 Q_{sfc} 는 단파복사량(Q_s), 장

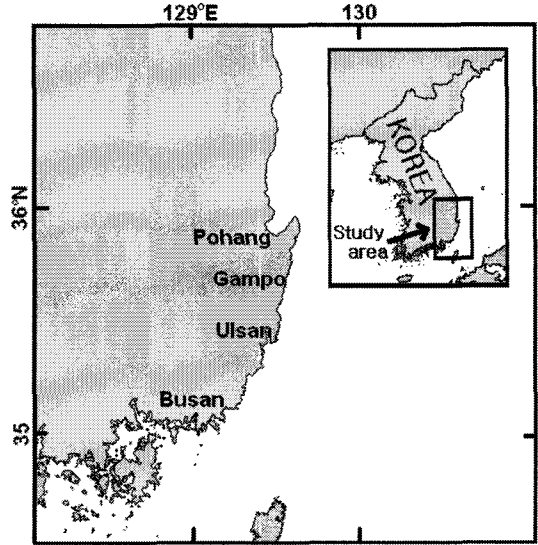


Fig. 1. Locations of observation sites for sea surface temperature at Gampo and meteorological factors at Ulsan.

파복사량(Q_b), 현열(Q_h) 그리고 잠열(Q_e)로부터 계산되며, 각 항들은 다음식으로 나타내어진다^{3,15)}.

$$Q_{sfc} = Q_s - (Q_b + Q_h + Q_e) \quad (1)$$

$$Q_s = Q_i(1-a) \quad (2)$$

$$Q_b = E_M \sigma (T_s)^4 (0.39 - 0.05E_A^{1/2})(1 - 0.6C^2) \quad (3)$$

$$Q_h = C_H \rho_A C_p W (T_s - T_A) \quad (4)$$

$$Q_e = C_E \rho_A W (Q_w - Q_A) L_T \quad (5)$$

여기서 Q_i 는 수평면 일사량이고, a 는 알베도(0.06)이다. E_M 은 해면의 사출률(0.985)이며, σ 는 스펙트럼볼츠만 상수($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), T_s 는 수온의 절대온도이다. E_A 는 대기의 수증기압(mb), C 는 운량이다. 그리고 C_H 는 스테톤 계수(1.1×10^{-3}), ρ_A 는 공기의 밀도(1.25 kgm^{-3}), C_p 는 공기의 비열($1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-4}$), W 는 풍속(ms^{-1}), T_A 는 기온의 절대온도이다. 그리고 C_E 는 달톤 계수(1.1×10^{-3}), Q_w 와 Q_A 는 각각 해면에서의 공기의 비습, 공기중에서의 비습이며, L_T 는 물의 증발잠열($2.5 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온과 기온, 기상 인자들의 변화

감포의 수온과 기온의 평균 변화를 보기 위하여

Fig. 2에 감포의 수온과 기온 그리고 수온과 기온의 차이를 각각 나타내었다. 감포에서 수온의 연교차는 17°C 내외로 최저 수온은 3월 중순(73일)에 10.0°C 였고, 최고 수온은 8월 하순(238일)에 27.0°C였다. 기온의 평균 연교차는 33°C 내외로 최저 기온은 2월 초순(33일)에 -3.3°C였으며, 최고 기온은 30.3°C로 8월 중순(233일)이었다. 수온과 기온의 차이를 보면, 4월 초순(92일)부터 9월 초순(247일)까지 기온이 수온보다 더 높았고, 수온과 기온의 최고 차이는 7월 중순(196일)에 13.1°C였다. 그리고 9월 중순부터 3월 하순까지는 수온이 기온보다 더 높았고, 최고 차이는 1월 초순(6일)에 14.8°C였다. 이와 같이 계절에 따른 수온과 기온의 차이는 대기(해양)에서 해양(대기)으로 잠열이나 현열의 이동을 예상할 수 있다. 열수지의 각 항들을 계산하기 전에 감포에서 열수지에 영향을 주는 인자들의 변화를 파악하고자, Fig. 3에 운량, 기압, 상대습도, 풍속 그리고 운량의

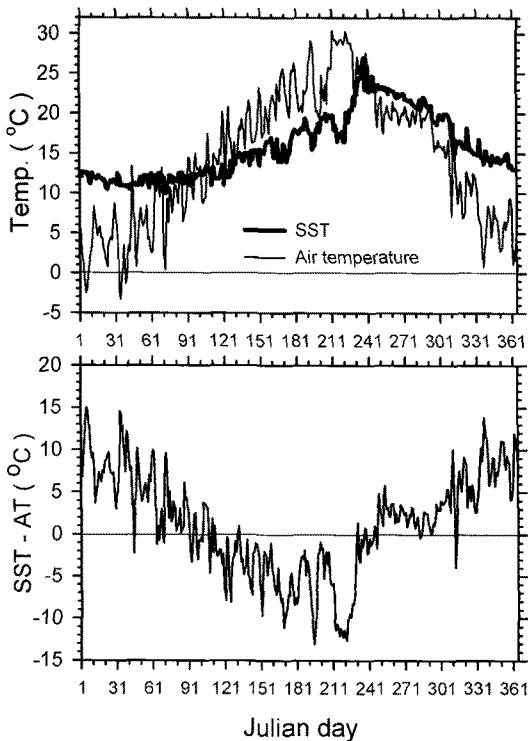


Fig. 2. Sea surface temperature (thick line) and air temperature (thin line) at Gampo (upper), and the difference of sea surface temperature and air temperature (lower).

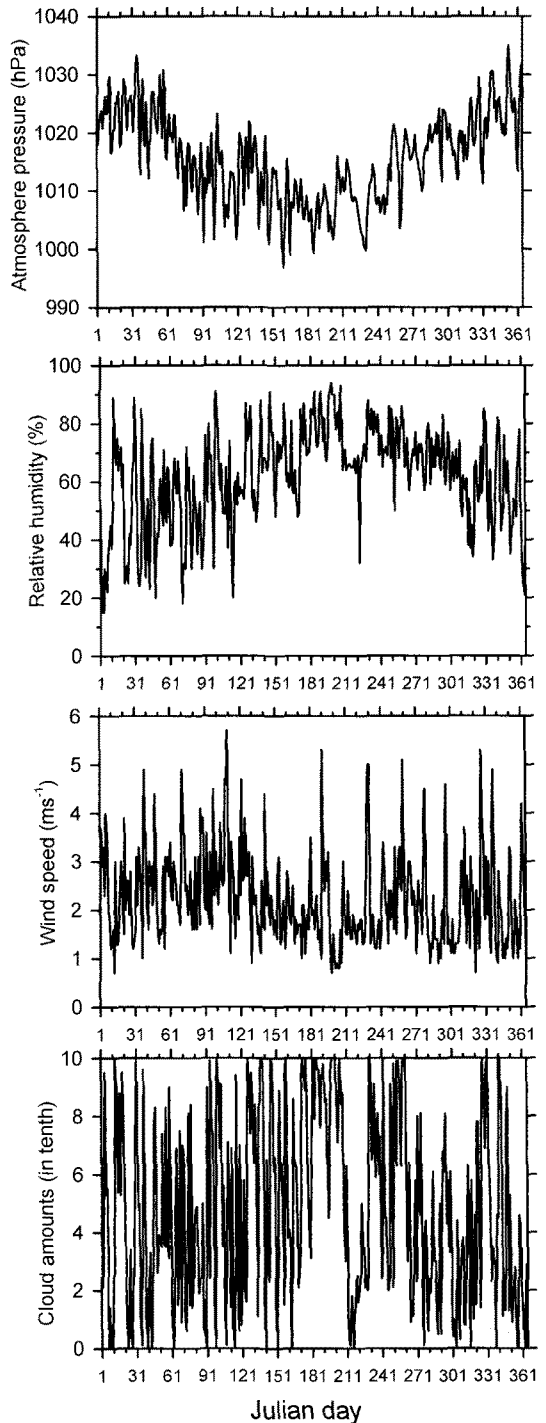


Fig. 3. Atmosphere pressure (upper most), relative humidity (upper), wind speed (lower) and cloud amount (lower most).

일변화를 각각 나타내었다.

기압은 1035-996.9 hPa로 변동하며, 6-7월(151-191 일)경에 가장 낮아서 996.9-1003 hPa을 나타내었다. 상대 습도는 약 15-94%로 변화였으며, 1-2월경에도 상대 습도가 대체로 높은 값을 나타내었다. 여기서 가장 높은 상대 습도는 6-7월(181-211일)경에 60-90%이었다. 일평균 풍속은 0.7-5.7 ms⁻¹로 변동하며, 4월 중순(110일)경에 풍속이 5.7 ms⁻¹로 가장 컸다. 평균 운량은 7월(182-212일)에 월 평균 8.2로 가장 많았으며, 그 외의 계절은 평균 3.5(3월)-6.0(5월)을 나타내었다. 이처럼 6-7월경에 운량이 많고, 평균 기압은 낮으며, 상대 습도가 높게 나타나는 것은 우리나라의 장마철이 이 시기에 해당되기 때문으로, 우기로 인한 영향을 반영하는 것이라 생각된다.

3.2. 열수지의 변화

단파 복사량(Q_s)의 일변화를 Fig. 4에 나타내었다. 단파 복사량은 약 1-557 Wm⁻²로 변화하며, 8월(214-244일)경에 단파 복사량이 월평균 360 Wm⁻²로 가장 많았다. 그러나 7월(183-213일)경에는 단파 복사량이 월평균 155 Wm⁻²로 6월(153-182)의 월평균 304 Wm⁻²보다도 훨씬 작았다. 이것은 Fig. 3에서와 같이 태양으로부터 입사하는 수평면 일사량에 영향을 주는 운량이 7월에 8.2이상으로 가장 많았기 때문이다.

열수지들의 각 항들 즉, 순열수지(Q_{sfc}), 장파 복사량(Q_b), 현열(Q_h) 그리고 잠열(Q_e)의 일변화를 Fig. 5에 각각 나타내었다. 단, 순열수지(Q_{sfc})에서 양의 값은 대기에서 해양으로의 열의 전달을 나타내며, 장파 복사량(Q_b), 현열(Q_h) 그리고 잠열(Q_e)에서 양의

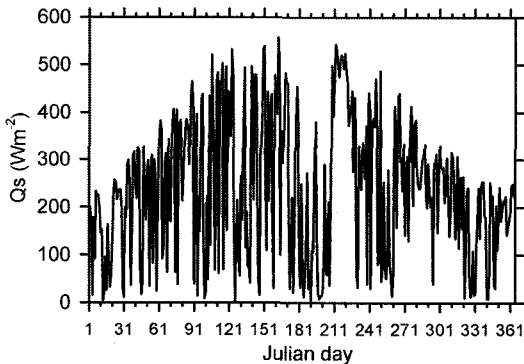


Fig. 4. Short-wave radiation at Ulsan.

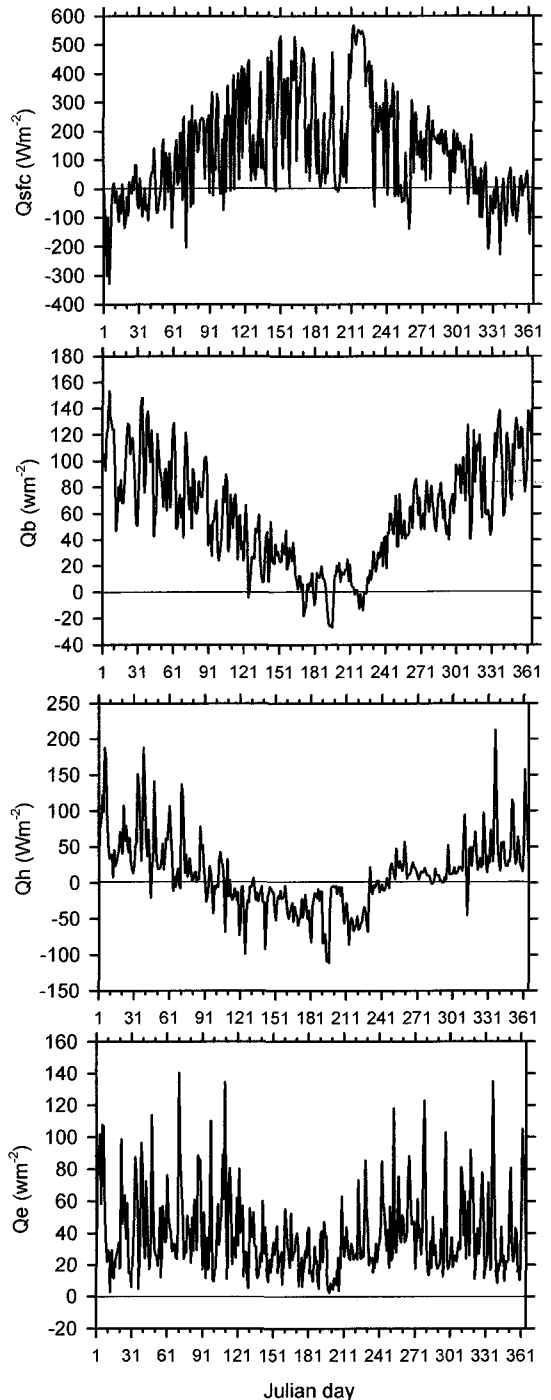


Fig. 5. Same as in Fig. 4, except for net heat flux (upper most), long-wave radiation (upper), sensible heat flux (lower), and latent heat flux (lower most) at Gampo.

값은 해양에서 대기로의 열의 전달을 나타낸다.

순열수지는 2월부터 11월까지 대기에서 해양으로 열의 전달이 있으며, 8월(214-244일)경에 월평균 345 Wm^{-2} 에 이른다. 그리고 12월과 1월은 해양에서 대기로 열의 전달이 있으며, 최저 순열수지는 1월에 월평균 -56 Wm^{-2} 를 나타내었다. 장파 복사량은 6-106 Wm^{-2} 로 변하며, 7월(183-213일)에 월평균 6 Wm^{-2} 로 가장 작았다. 장파 복사량은 열수지항들 중에서 시간이나 지역에 따라서 변화가 가장 작은 항목으로 수온이 상승함에 따라서 장파 복사량은 증가한다. 현열은 월평균 $-36-61 \text{ Wm}^{-2}$ 의 범위이며, 6월과 12월에 각각 최소와 최대를 나타내었다. 그리고 4-8월(92-244일)에 월평균 $-7--36 \text{ Wm}^{-2}$ 로 음의 값을 나타내었다. 이 기간 동안에는 현열에 의해서 해양이 대기로부터 열을 흡수한다. 증발에 의한 잠열은 20-49 Wm^{-2} 로 변하며, 7월과 3월에 각각 최소와 최대를 보였다. 2006년 중에 6월(28 Wm^{-2}), 7월(20 Wm^{-2}) 그리고 8월(34 Wm^{-2})에 현열의 월 평균값이 작게 나타났다. 이것은 일반적으로 여름에 잠열속이 서서히 증가하여 가을에 가장 큰 값을 보이며 겨울 동안 지속되는 잠열속의 특성을 나타낸다. Elliott과 Clarke³⁾는 현열은 겨울에 최대이고 봄부터 여름까지 최소를 나타내며, 장파 복사량은 겨울에 최대, 여름에 최소를 나타낸다고 하였다. 또한 Gill¹⁵⁾은 현열이 7월에 최소이고 1월에 최대를 나타내며, 이는 여름철에 대기가 해양으로 열을 공급하지만, 그 크기는 여름철이 겨울철에 비해 작다고 하였다. 또한 잠열은 대기가 건조해지고 바람이 강해지는 가을철에 최대가 나타나서 겨울철까지 지속된다고 하였다. 이창래 등¹²⁾도 수온과 기온의 차이가 작은 7월에 현열의 이동이 작고, 대기에서 해양으로 현열이 이동한다고 하였다. 또한 Hirose 등¹⁹⁾은 동해에서 5월에 일사량이 가장 많다고 하였다. 본 연구에서도 Fig. 5에 나타나 것과 같이, 장파 복사량은 여름에 최소이고, 가을부터 겨울 동안 최대를 나타내었다. 또한 현열은 4-8월 동안에 음의 값을 나타내지만, 현열의 교환량은 여름철에 비해서 겨울철이 훨씬 크다. 잠열은 1-3월에 최대를 나타내고 있다.

이와 같은 열수지들의 월평균값을 계산하여 Table 1에 순열수지(Q_{net}), 장파 복사(Q_b), 현열(Q_h), 잠열(Q_e), 그리고 총열수지(Q_T)를 나타내었다. 열수지들

Table 1. Monthly average of net heat flux (Q_{net}), long-wave radiation (Q_b), sensible heat flux (Q_h), latent heat flux (Q_e) and total heat flux (Q_T)

Month	Surface heat flux (Wm^{-2})				
	Q_{net}	Q_b	Q_h	Q_e	Q_T
1	-56	98	61	43	-259
2	7	95	61	46	-195
3	130	81	32	49	-32
4	187	52	-7	44	97
5	236	29	-25	31	201
6	297	14	-36	28	291
7	162	6	-33	20	169
8	345	13	-33	34	330
9	111	56	18	46	-10
10	151	67	11	36	35
11	8	84	36	44	-156
12	-31	106	58	39	-236
Annual mean	129	58	11	38	22

연간 평균하여 계산하면 총열수지에서 22 Wm^{-2} 의 열량이 남는다. 일정한 해역이나 일정한 시기에 열속은 평형을 이루지 못하는 경우가 있다. 아라비아만의 북서 해역에서는 열속에 의한 가열이 이루어지고 있으며¹⁶⁾, 이러한 가열은 만의 다른 해역에서 용승으로 인한 표층수의 냉각으로 열적 평형을 이루고 있음을 보였다¹⁷⁾. 이러한 용승의 발달기와 소멸기에 따라서 단파 복사량, 장파 복사량 그리고 잠열속이 크게 변하고 있다⁹⁾. 여름철 동해의 감포 해역은 용승에 의한 표층 냉각이 발생하고 있다. 이러한 남은 열수지는 남동해안에서 용승에 의한 표층 냉각으로 보상이 되어 열적 평형이 이루어진다고 생각된다. 즉, Fig. 6¹⁸⁾에서와 같이 감포 연안은 여름철에 용승으로 인하여 외양의 해수보다도 약 5°C 이상 낮은 표층 냉수괴가 발생한다. 이러한 표층 냉수괴는 여름철 고온 다습한 기상의 영향과 더불어 해무의 발생에 영향을 주게 되어 선박의 항해나 어업 활동에 지장을 주기도 한다. 열수지는 특히 연안에서 조석, 바람 그리고 담수 유입과 함께 연안역의 성층과 혼합을 결정짓는 주요한 인자이다. 또한 표층 냉수괴가 발생하는 해역에서의 해양 환경은 해무의 발생으로 인하여 안전 항해나 어업 활동 등, 산업적으로도 영향을 끼치고 있다. 본 연구에서는 표층 냉수괴가 발생하는 동해 연안의 감포 연안역의 성층과 혼합 현상을 정량적으로 산정하기 위한

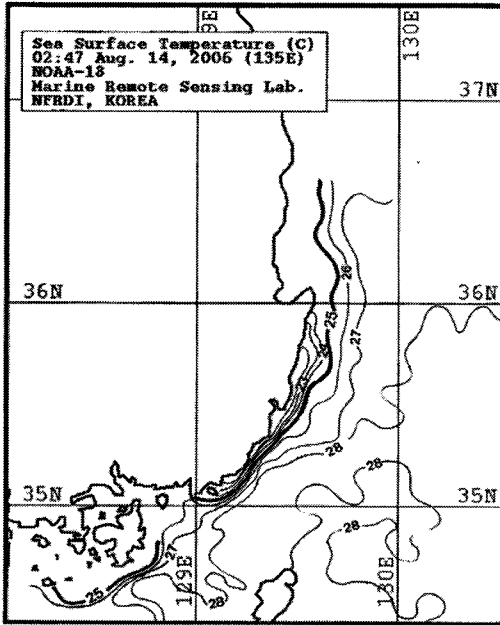


Fig. 6. Sea surface temperature through satellite image of NOAA on August 14, 2006.

첫 단계로서 우선 열수지들을 계산해 보았다.

4. 결 론

국립수산과학원의 연안정지 관측수온 자료와 기상청의 기상월보를 이용하여 용승 발생 해역인 동해안 감포에서 2006년의 열수지를 산정해 보았다. 2월부터 11월까지의 대기에서 해면으로 순열의 이동이 있었으며, 12월부터 1월까지 해면에서 대기로 순열의 이동이 있었다. 장파 복사는 $6\sim 106 \text{ Wm}^{-2}$, 현열은 $-36\sim 61 \text{ Wm}^{-2}$, 잠열은 $20\sim 49 \text{ Wm}^{-2}$ 의 범위였다. 연평균 순열은 129 Wm^{-2} 이었으며 22 Wm^{-2} 의 순열이 남았다. 이것은 감포 연안에서 여름철에 용승으로 인하여 발생하는 냉수에 의해서 보상되고 있음을 시사하고 있었다. 그러나 열의 보상 과정에 대해서는 앞으로 연구하여야 할 과제이다.

한반도의 동, 서 남해는 각각 그 특성을 달리하고 있다. 따라서 연안과 외양간의 해수 유동에 의한 열교환도 또한 특성이 다르리라 예상된다. 이러한 해역별 열교환과정을 연구하는 것도 앞으로 남은 과제이다.

감사의 글

우리 나라 연안에서 정지 관측을 수행하고 계시는 관계자분들께 감사드립니다. 본 연구는 국립수산과학원의 '한국해양자료센터 운영(RP-2008-ME-064)' 및 '기후변화가 해양생태계 및 수산자원에 미치는 영향', 그리고 한국해양연구원의 '위성영상을 이용한 하계 이상해황 발생해역의 변동특성'의 일부 연구로 수행 되었습니다.

참고 문헌

- 1) Knauss J. A., 1997, Introduction to physical oceanography, 2nd ed., Prentice Hall, U.S.A., 309pp.
- 2) Yanagi T., 1982, Heat Budget of Uwajima Bay, Umi to Sora, 58(1), 13-20.
- 3) Elliott A. J., Clarke T., 1991, Seasonal stratification in the northwest European Shelf Seas, Contin. Shelf Res., 11(5), 467-492.
- 4) Park W., Oh I. M., Shim T., 1995, Temporal and spatial distributions of heat fluxes in the East Sea (Sea of Japan), J. Korean Soc. Oceanogr., 30(2), 91-115.
- 5) Beardsley R. C., Dever E. P., Lentz S. J., Dean J. P., 1998, Surface heat flux variability over the Northern California Shelf, J. Geophys. Res., 103(C10), 21553-21586.
- 6) Choi Y. K., Jo Y. J., Choi O. I., Yang W. S., 2003, Mean heat flux at the Gunsan Harbor, J. Kor. Fish. Soc., 36(5), 535-540.
- 7) 김철호, 김구, 1983, 한국 동해안에 출현하는 냉수의 특성과 기원, J. Oceanol. Soc. Korea, 18(1), 73-83.
- 8) 최용규, 조규대, 1997, 1994년 11월 동해 중층수의 분포, J. Korean Fish. Soc., 30(1), 119-127.
- 9) Lee J. C., 1983, Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer, J. Oceanol. Soc. Korea, 18(2), 149-160.
- 10) Lee J. C., Na J. Y., 1985, Structure of Upwelling off the Southeast Coast of Korea, J. Oceanol. Soc. Korea, 20(3), 6-19.
- 11) Byun S. K., 1989, Sea Surface Cold Water near the Southeastern Coast of Korea: Wind Effect, J. Oceanol. Soc. Korea, 24(3), 121-131.
- 12) 이창래, 박철, 문창호, 2004, 울산-감포 해역의 냉수 출현의 동물 플랑크톤, 'The Sea', J. Korean Soc Oceanogr., 9(2), 51-63.
- 13) KMA, 2006, Monthly Weather Report, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea.

- 14) 국립수산과학원, 2002, 연안정지 해양관측 성적(일별누년평균치 및 표준편차), 한국해양편람(제4판) 부록, 11-1520174-000082-14, 국립수산과학원, 585pp.
- 15) Gill A. E., 1982, Atmosphere-ocean dynamics, Academic Press Inc., New York, 662pp.
- 16) Sultan S. A. R., Ahmad F., 1994, Heat budget of the coastal water of Kuwait: a preliminary study, Estuar. Coast. Shelf Sci., 38, 319-325.
- 17) Sultan S. A. R., Ahmad F., 1993, Surface and oceanic heat fluxes in the Gulf of Oman, Cont. Shelf res., 13(10), 1103-1110.
- 18) 국립수산과학원, 2007, 2006년 한국근해 해양정보, 과학원 간행물 번호 SP-2007-ME-002, 국립수산과학원, 211pp.
- 19) Hirose N., Kim C. H., Yoon J. H., 1996, Heat budget in the Japan Sea. J. Oceanogr. Soc. Japan, 52, 553-574.