해양부이 자료를 이용한 황해 남동부 해역 표층 열속 산출

김선복 · 장경일*

서울대학교 지구환경과학부/해양연구소

Calculation of Surface Heat Flux in the Southeastern Yellow Sea Using Ocean Buoy Data

SUN-BOK KIM AND KYUNG-IL CHANG*

Research Institute of Oceanography/School of Earth and Environmental Sciences,
Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

황해 남동부 해역에 설치한 해양부이(YSROB)에서 약 27개월간 관측된 장파, 단파 복사량을 포함한 대기, 해양 변수와 COARE 3.0 알고리즘을 이용하여 월평균 해양-대기간 열속을 산출하고 기존 연구결과와 비교하였다. YSROB 위치에서 열속은 순 단파복사(Q_i)에 의해 해양은 대기로부터 열을 얻고 순 장파복사(Q_b), 현열(Q_h), 잠열(Q_e)에 의해 열손실이 일어난다. 전체 열손실 중 Q_e 에 의한 손실이 51%로 가장 크게 나타났으며 Q_b 와 Q_h 에 의한 손실은 각각 34%, 15% 이다. 순열속(Q_n)은 Q_i 가 최대인 5월에 최대(191.4 W/m^2)이며 모든 열속 성분이 최소인 12월에 최소(-264.9 W/m^2)이다. 연평균 Q_n 은 1.9 W/m^2 이지만 관측기기의 정확도에 의한 오차산정 결과(최대 $\pm 19.7 \text{ W/m}^2$)를 고려하면 무시할 정도로 작다. YSROB과 동일한 위치에서의 기존 월별 열속 산출 결과는 YSROB에서 실측값에 기반한 열속에 비해 여름철 Q_i 가 약 $10\sim 40 \text{ W/m}^2$ 과소 평가된 반면에 겨울철에는 Q_e 와 Q_h 에 의한 열 손실이 각각 약 50 W/m^2 , $30\sim 70 \text{ W/m}^2$ 과다하게 산출되었다. 이로 인하여 해양이 열을 얻는 4월~8월에는 기존 연구에서의 열 획득량이 본 연구 결과보다 적게 나타나며, 해양이 열을 잃는 겨울철에는 기존 연구에서의 해양으로부터의 열 손실이 본 연구 결과에 비해 크게 나타난다. 특히, 12월과 1월의 Q_n 차이는 약 $70\sim 130 \text{ W/m}^2$ 에 달한다. 장기적인 재분석장(MERRA) 분석 결과에 의하면 이와 같은 월평균 열속의 차이는 연변동 등 시간 변동에 의한 것이 아니라 열속 산출 시 사용된 자료의 부정확성에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구 결과로부터 기존의 기후적인 열속을 연구에 활용하거나 수치모델에 사용함에 있어 주의가 요망된다.

Monthly mean surface heat fluxes in the southeastern Yellow Sea are calculated using directly observed air-sea variables from an ocean buoy station including short- and longwave radiations, and COARE 3.0 bulk flux algorithm. The calculated monthly mean heat fluxes are then compared with previous estimates of climatological monthly mean surface heat fluxes near the buoy location. Sea surface receives heat through net shortwave radiation (Q_i) and loses heat as net longwave radiation (Q_b), sensible heat flux (Q_h), and latent heat flux (Q_e). Q_e is the largest contribution to the total heat loss of about 51 %, and Q_b and Q_h account for 34% and 15% of the total heat loss, respectively. Net heat flux (Q_n) shows maximum in May (191.4 W/m^2) when Q_i shows its annual maximum, and minimum in December (-264.9 W/m^2) when the heat loss terms show their annual minimum values. Annual mean Q_n is estimated to be 1.9 W/m^2 , which is negligibly small considering instrument errors (maximum of $\pm 19.7 \text{ W/m}^2$). In the previous estimates, summertime incoming radiations (Q_i) are underestimated by about $10\sim 40 \text{ W/m}^2$, and wintertime heat losses due to Q_e and Q_h are overestimated by about 50 W/m^2 and $30\sim 70 \text{ W/m}^2$, respectively. Consequently, as compared to Q_n from the present study, the amount of net heat gain during the period of net oceanic heat gain between April and August is underestimated, while the ocean's net heat loss in winter is overestimated in other studies. The difference in Q_n is as large as $70\sim 130 \text{ W/m}^2$ in December and January. Analysis of long-term reanalysis product (MERRA) indicates that the difference in the monthly mean

heat fluxes between the present and previous studies is not due to the temporal variability of fluxes but due to inaccurate data used for the calculation of the heat fluxes. This study suggests that caution should be exercised in using the climatological monthly mean surface heat fluxes documented previously for various research and numerical modeling purposes.

Key words: Surface heat flux, Bulk formula, Ocean buoy data, Yellow Sea

서 론

해양-대기 열 교환은 해양 상층의 수층 구조와 수온 변동에 중요하며(Lie and Cho, 2002), 또한 현열과 잠열 방출을 통해 대기에 수증기를 공급하여 날씨와 기후에 중요한 영향을 미친다(Ahn *et al.*, 1997; Cho *et al.*, 2000). 해양-대기 간 열 교환은 해수면에서의 열속(heat flux)을 통해 이해 할 수 있으며 정확한 열속의 산출은 해양-대기 상호작용의 이해, 수치모델의 입력 자료로의 활용 및 재분석장과 기존 연구 결과의 검증 등을 위하여 중요하다(Konda *et al.*, 2010; Nonaka and Xie, 2003; Song *et al.*, 2006).

지금까지 황해를 포함한 한반도 주변 해역에서 장기 평균된 열속을 산출하는 연구들이 많이 진행되었으며, 이를 위하여 주로 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)에 의한 장기 평균된 해양, 대기 변수 자료와 벌크식(bulk formula)이 사용되었다. Ahn *et al.*(1997)은 COADS 자료(격자간격: $2^{\circ} \times 2^{\circ}$)를 이용하여 12년 평균(1982~1993년) 열속을 산출하였고, Hirose *et al.*(1999)과 Chu *et al.*(2005)은 COADS 자료(격자간격: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)를 이용하여 각각 30년 평균(1960~1990년) 및 45년 평균(1945~1989년) 열속을 산출하였다. 이 외에 Kang *et al.*(1994)은 지표층 플럭스 모델을 통해 3년 평균(1985~1987년) 열속을 산출하였으며, Na *et al.*(1999)은 기상청 일기도 자료(격자간격: $1/2^{\circ} \times 1/2^{\circ}$)를 이용하여 18년 평균(1978~1995년) 열속을 산출하였다.

황해에서 (Fig. 1) 기존 연구 결과들은 장기 평균된 기후적인 계절별 열속을 산출하였음에도 불구하고 열속 성분별 정량적인 수치에 있어 큰 차이를 보인다. Chu *et al.*(2005)의 결과는 다른 연구 결과에 비해 4월부터 9월까지 30 W/m^2 이상 높은 단파 복사값을 보이며 여름철의 경우 최대 약 90 W/m^2 의 차이를 나타내며(Fig. 2b), Hirose *et al.*(1999)의 결과는 5월을 제외한 다른 계절에서 타 결과에 비해 높은 장파복사 값을 보이면서 겨울철에는 최대 약 38 W/m^2 의 차이를 나타낸다(Fig. 2c). Na *et al.*(1999)의 결과는 다른 연구에 비해 전 계절에 걸쳐 잠열속이 작아 겨울철에는 최대 103 W/m^2 의 차이를 보이며(Fig. 2d), 현열속도 4월부터 6월을 제외한 전 계절에 걸쳐 다른 연구 결과에 비해 낮은 값을 보인다(Fig. 2e). 월별 순열속의 경우 Chu *et al.*(2005)의 결과는 다른 연구에 비해 여름철에 높은 값을 보이며 최대 약 141 W/m^2 의 차이를 보이는데, 이는 다른 연구에 비해 여름철 단파 복사값이 크기 때문이다(Fig. 2a). Na *et al.*(1999)의 경우 전 계절에 걸쳐 타 결과에 비해 낮은 순열속을 보이며 겨울철에 최대 205 W/m^2 의 차이를 보인다(Fig. 1a). 황해 전체 해역에 걸쳐(Fig. 1) 평균된 연평균 순열속은 Hirose *et al.*(1999)과 Chu *et al.*(2005)에 의하면 각각 10.4 W/m^2 , 15.4 W/m^2 로 해양이 대기로 부터 열을 얻는 결과를 보인 반면에 Na *et al.*(1999)의 연구 결과에서는 -90.4 W/m^2 로 해양이 대기로 열을 빼앗기는 것으로 나타난다. 이러한 기후적 열속의 차이는 열속의 연

변동, 입력 자료에 의한 오차, 사용한 벌크식의 차이 등에 의해 발생 할 수 있다. 기존 연구에서는 이러한 열속의 차이가 주로 사용한 자료의 차이에 의해 발생한 것으로 간주하였으나(Hirose *et al.*, 1999; Na *et al.*, 1999), 실제 어떤 자료가 보다 정확한지에 관해서는 실측값의 부재로 판단하기 어렵다(Hirose *et al.*, 1999; Kang *et al.*, 1994). 또한, 장·단파 복사량도 운량으로 부터 경험식을 이용하여 산출하여 입력한 운량의 오차 등으로 인하여 실제 복사량과는 차이를 보일 것으로 사료된다.

해양 부이를 이용한 관측은 장기간 연속적으로 해양, 대기 변수를 얻을 수 있는 방법으로서 관측된 해양, 대기 변수를 이용하여 비교적 정확한 열속을 산출 할 수 있다(Brunke *et al.*, 2003; Fairall *et al.*, 2003). 한반도 주변해에서는 Kang *et al.*(2001)이 황해 중부와 남부 연안에 위치한 기상청 부이에서 관측한 자료를 이용하여 해양, 대기 변수를 분석하고 현열속과 잠열속을 산출한 바가 있는데,

Fig. 1. Locations of the Yellow Sea Real-time Ocean Buoy (filled triangle: 34.7°N 125.0°E), and grid points of MERRA reanalysis product (filled circles). Boundaries of the Yellow Sea in previous studies (Hirose *et al.*(1999), solid line; Chu *et al.*(2005), dashed line) are also shown.

복사계 자료의 부재로 인해 단파복사와 장파복사량 및 순열속은 산출하지 못하였다.

본 연구에서는 최초로 황해 남동부 해역에 설치한 해양 부이 (Yellow Sea Real-time Ocean Buoy, YSROB)에서 실측된 해양, 대기 변수와 벌크식을 이용하여 열속을 산출하여 그 특성을 분석하였고, 그 결과를 기존 연구결과와 비교하였다.

자료 및 방법

자료처리

황해 남동부 해역에서의 해양-대기 상호작용을 이해하기 위하여 해양 부이(YSROB)를 황도 서방 해역(북위 34도 43분, 동경 124도 57분) 수심 약 80 m 지점에 계류하여 2011년 7월부터 2013년 9월 까지 2분 간격으로 해양, 대기 변수를 관측하였다(Figs. 1, 3). 기존 연구에 의하면 황해 남동부 해역에서는 여름철 흑산도 저온수역과 조석전선이 나타나는데(Lie, 1989; Cho *et al.*, 1995), YSROB 계류 기간 중인 2012년 6월 한국해양자료센터(KOREA Oceanographic Data Center, KODC)에서 제공하는 격월 간격 정선해양관측자료의 표층 수온 관측자료에 의하면 흑산도를 중심으로 수온 14 °C 이하의 냉수가 분포하며 흑산도부터 동경 125도까지 표층수온 구배가

Fig. 3. Location of the YSROB (filled black circle: 34.7°N 125.0°E) and sea surface temperature distribution in the southeastern Yellow Sea in June 2012 using data from Korea Oceanographic Data Center. CTD stations are shown with diamonds.

급한 수온 전선이 형성되고 YSROB는 수온 전선의 외측에 위치한다(Fig. 3). YSROB에서 관측한 해양, 대기 변수 중 열속 산출을 위하여 사용된 변수는 풍속(U), 기온(T_a), 표층수온(T_s), 상대습도(RH), 해면기압(P), 단파복사(I_{sw}) 및 장파복사(I_{lw})이며 (Table 1), T_s 센서를 제외한 모든 센서는 중복 설치하여 한 개의 센서가 오작동 되는 경우를 대비하였다.

YSROB는 계류된 이래 2번의 재계류와 정기 점검을 포함하여 총 12회 부이 점검을 실시하였다. 이 중 2011년 8월 7일 태풍에 의해 센서 파손과 더불어 부이의 위치가 북서쪽으로 약 6.6 km 이동하였고 2012년 8월 26일 태풍에 의해 계류라인이 절단되어 부이가 표류하여 각각 2011년 9월 27일과 2012년 11월 25일에 부이 재계류를 실시하였다. 2013년 5월 8일부터 2013년 10월 28일까지 기간에는 부이가 북서쪽으로 약 3.0 km 이동하였으며 원인은 파악하지 못하였다. YSROB는 장착된 센서값 뿐만 아니라 배터리 전압도 실시간으로 송신하여 2011년 12월 20일부터 2012년 5월 12일까지는 일조시간 축소 등으로 인해 배터리 전압이 감소한 경우가 있었으며, 이때 연속적인 관측을 위하여 양방향 통신을 이용하여 관측 간격을 2분부터 3시간까지 총 8회에 걸쳐 변경한 바가 있다.

YSROB에서 관측한 해양, 대기 변수는 악기상이나 인위적인 부이 훼손으로 인한 오류 자료가 포함되어 있어 원시자료를 Beardsley *et al.*(1998)의 방법과 유사하게 다음과 같은 단계를 거쳐 처리하여 최종 자료를 구성하였다. 1) 각 센서별 관측 범위를 벗어난 자료와 센서 파손 및 부이점검 기간의 자료를 제거하였고, 2) 관측값의 실시간 모니터링과 부이 현장점검 시 작성된 보고서를 통해 각 센서별 작동 여부, 수리 및 점검 내역을 파악하여 각 센서별 사용 가능한 자료의 기간을 정리하였으며, 3) 복수로 설치한 동종의 센서는

Fig. 2. Seasonal variation of heat flux components in the Yellow Sea from three previous studies of Hirose *et al.*(1999), Na *et al.*(1999), and Chu *et al.*(2005). a) net heat flux, b) net shortwave radiation, c) net longwave radiation, d) latent heat flux, e) sensible heat flux.

Table 1. Meteorological and oceanographic instruments used in the YSROB

	Model	Manufacturer	Accuracy	Range	Height
Wind	05106	R.M. YOUNG	Direction: $\pm 3^\circ$ Speed: ± 0.3 m/s	Direction: $0\sim 360^\circ$ Speed: $0\sim 60$ m/s	3 m
Air temperature/ Relative humidity	HMP155	VAISALA	Temp: ± 0.2 $^\circ\text{C}$ Humidity: $\pm 2\%$	Temp: $-80\sim 60$ $^\circ\text{C}$ Humidity: $0\sim 100\%$	3 m
Sea level pressure	PTB210	VAISALA	± 0.6 hPa	$500\sim 1100$ hPa	3 m
Insolation short wave radiation	PSP	EPLAB	$\pm 1\%$	$0\sim 2800$ W/m ²	3.5 m
Downward long wave radiation	PIR	EPLAB	$\pm 1\%$	$0\sim 700$ W/m ²	3.5 m
Water temperature	SBE37 SM	Sea-Bird Electronics	Temp: ± 0.002 $^\circ\text{C}$	Temp: $-5\sim 35$ $^\circ\text{C}$	1.5 m (depth)

Fig. 4. Periods of available data measured at the YSROB are shown with black bars. U, T_a, RH, P, I_{sw}, I_{lw}, T_s denote wind speed, air temperature, relative humidity, sea level pressure, downward shortwave radiation, downward longwave radiation, and sea surface temperature.

주 센서(primary sensor)를 지정하여 주 센서 자료를 주로 이용하였고, 1, 2 단계를 통해 주센서(primary sensor)에 이상이 발생한 경우에는 부센서(secondary sensor)의 자료로 대체하여 사용하였다. 4) 복수로 설치한 센서의 경우 값의 차이가 큰 경우에는 1, 2, 3 단계를 통해 자료의 이상 여부를 우선 판단하였고, 결정이 어려운 경우에는 YSROB 인근에 위치한 흑산도 기상대에서 관측한 자료와 비교를 통해 연구에 사용 할 수 있는 자료를 선정하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 처리된 YSROB에서 관측한 해양, 대기 변수 자료의 이용 가능한 기간을 Fig. 4에 나타내었다.

YSROB에서 관측된 전 기간 자료 중 열속 산출을 위해 필요한 모든 해양, 대기 변수가 공통적으로 존재하는 기간의 자료를 선정 후 모든 변수를 연도에 관계없이 월별로 평균하여 월별 변수의 특성을 파악하였다. 월평균 열속을 산출하기 위하여 2분 간격으로 측정된 해양, 대기 변수를 이용하여 벌크식으로부터 2분 간격의 열속을 계산 후 역시 연도에 관계없이 월별로 평균하였다. 전체 관측 기간 중 4월에 획득된 자료는 자료의 기간이 10일 미만(7.8 일)으로서 해당 월의 해양, 대기 변수 및 열속의 특성을 충분히 반영하지 못한다고 사료되어 YSROB 위치에서의 월별 열속 성분 설명시 포함하지 않았다. 다만, 황해에서 열속을 산출한 기존 연구 결과와 비교하는 경우, 4월 평균 수치 및 연평균 열속값을 타 연구 결과와 비교하기 위하여 사용하였다. 4월 중에 관측이 이루어진 기간은 2012년 4월 23일부터 30일까지 이다.

벌크식에 의한 열속 산출

해수면에서 열속은 YSROB에서 실측된 해양, 대기 변수를 입력 자료로 하여 벌크식인 TOGA-COARE(Tropical Ocean Global Atmosphere - Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) 3.0 알고리(Brunke *et al.*, 2003; Fairall *et al.*, 2003)을 이용하여 아래와 같이 순 단파복사(net short wave radiation, Q_i), 순 장파복사(net long wave radiation, Q_b), 잠열속(latent heat flux, Q_e), 현열속(sensible heat flux, Q_h) 및 순열속(net heat flux, Q_n)을 계산하였다. 음의 열속값은 해양에서 대기로 열이 이동하는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 Q_b &= (1-\alpha)I_{sw} \\
 Q_b &= \varepsilon(I_{lw}-\sigma T_s^4) \\
 Q_e &= \rho L_e C_e \Delta q U \\
 Q_h &= \rho C_p C_h \Delta T U \\
 Q_n &= Q_i - Q_b - Q_e - Q_h
 \end{aligned}$$

여기서 I_{sw}와 I_{lw}는 각각 단파복사계와 장파복사계에서 관측한 대기에서 해양으로 향하는 방향(downward)의 단파복사량과 장파복사량, α와 ε은 해수면에서 단파 알베도 및 장파 복사율로 각각 0.055와 0.97이며, σ는 스테판-볼츠만 상수, T_s와 T_a는 각각 수심 1.5 m에서 관측한 표층 수온과 해수면으로부터 3 m 높이에서 관측한 기온이다. ρ와 U는 각각 공기의 밀도 및 풍속, Δq는 표층수온에 대

한 포화 비습(q_s)과 대기의 비습(q_a) 차이, ΔT 는 T_s 와 T_a 의 차이, L_e 와 C_p 는 각각 증발계수와 정압비열, C_e 와 C_h 는 각각 잠열속과 현열속의 교환계수이다.

재분석장 자료

본 연구에서 YSROB에서 관측된 해양, 대기 변수 및 열속과의 비교를 위해 사용한 MERRA(Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications)는 자료동화 된 대기모델을 근간으로 NASA(National Aeronautics and Space Administration)가 제공하는 재분석장 자료이다(Bosilovich *et al.*, 2011). MERRA는 1979년부터 현재까지 수평적인 격자간격 $1/2^\circ \times 2/3^\circ$ 에서 전 지구적 해양, 대기 자료를 제공하며, 특히 실시간으로 생산된 라디오존데, 항공 및 항해 자료 등 관측 자료를 자료동화하여 준 실시간으로 분석된 자료를 제공한다(Rienecker *et al.*, 2011). MERRA의 각 격자점은 Fig. 1에 나타내었고, 본 연구에서는 YSROB 위치를 둘러싼 4개 MERRA 격자점의 평균값을 YSROB에서의 값으로 간주하였다.

결 과

해양, 대기 변수 특성

YSROB에서 관측한 해양, 대기 변수의 계절적인 특성은 여름철(6~8월)에 높은 T_a (20.6 °C 이상), T_s (21.3 °C 이상) 및 RH(85.0% 이상)와 낮은 P(1008.0 hpa 이하)와 U(5.7 m/s 이하)를 보이며, 겨울철(12~2월)에는 낮은 T_a (5.8 °C 이하), T_s (12.0 °C 이하) 및 RH(69.6% 이하)와 높은 P(1025.5 hpa 이상)와 U(6.5 m/s 이상)를 보인다(Fig. 5). 각 변수의 월평균 최대값과 최소값은 T_a 는 8월(27.4 °C)과 2월(3.9 °C), RH는 7월(91.9%)과 12월(65.6%), U는 12월(7.6 m/s)과 5월(3.5 m/s), P는 1월(1026.6 hpa)과 7월(1006.2 hpa), T_s 는 8월(28.2 °C)과 3월(7.8 °C)에 나타났다.

Q_e 와 Q_h 에 영향을 미치는 T_s 와 T_a 의 차이(ΔT)와 q_s 와 q_a 의 차이(Δq)의 계절 분포에 의하면(Figs. 5d, 5i), ΔT 는 5월부터 8월에 1 °C 미만이며 11월부터 2월까지 3.4 °C 이상을 보인다. Δq 는 8월부터 10월에 3.0 g/kg 이상으로 높은 값을 보이고 12월부터 7월까지 1.9 g/kg 이하의 낮은 값을 보여 ΔT 와 Δq 의 계절 변화가 차이를 보인다. 이는 q_s 와 q_a 는 각각 T_s 와 T_a 이외에도 RH와 P의 영향을 받기 때문으로서 COARE 3.0 알고리즘에 의하면 q_s 와 q_a 는 아래와 같이 계산된다.

$$e = c \exp(aT/(b+T))$$

$$q_s = 0.98 \times 1000(\epsilon e / (P - ((1-\epsilon)e)))$$

$$q_a = 0.01 \times RH \times 1000(\epsilon e / (P - ((1-\epsilon)e)))$$

여기서 e 는 증기압, T 는 T_a (또는 T_s), a , b , c 는 각각 17.502, 204.97, 0.622 이며 c 는 $6.1121 \times (1.0007 + 3.46 \times P \times 10^{-6})$ 이다. q_s 와 q_a 는 T 에 비례하지만 P에는 반비례하며, q_a 는 RH에 비례하지만 q_s 는 염수(salt water)에서 98%로 가정된 고정된 값(Beardsley *et al.*, 1998)이다. 5월부터 7월까지 T_s 와 T_a 는 급격히 증가하고 P는 1010 hpa 이하의 낮은 값을 보여 q_s 와 q_a 는 9.6 g/kg 이상으로 높은 값을 보이지만 ΔT 는 0.6 °C 미만으로 작고 RH는 85% 이상으로 높기 때문에 Δq 는 1.7 g/kg 이하로 비교적 작은 값을 보인다. 8월부터 T_s 와 T_a 의 급격한 감소와 P의 급격한 상승으로 인해 10월중 q_s 와

Fig. 5. Observed monthly mean values of air and sea variables with standard deviation at the YSROB. a) wind speed (U), b) air temperature (T_a), c) sea surface temperature (T_s), d) ΔT ($T_s - T_a$), e) relative humidity (RH), f) sea level pressure (P), g) saturated specific humidity at T_s (q_s), h) specific humidity (q_a), i) Δq ($q_s - q_a$).

q_a 는 8월에 비해 2배 정도 감소하고 ΔT 는 1.8 °C 이하의 값을 보이지만 8월과 10월 사이에 15% 이상 급격하게 감소한 RH에 의해 Δq 는 3 g/kg 이상의 연중 최대값을 보인다. 반면, 12월부터 2월중에 ΔT 는 4.5 °C 이상, P는 1025 hpa 이상의 높은 값을 갖고

Fig. 6. Monthly mean heat flux components at the YSROB. Q_i , Q_b , Q_e , Q_h , and Q_n denote net shortwave radiation, net longwave radiation, latent heat flux, sensible heat flux, and net heat flux, respectively. Dashed line indicates that the heat fluxes in April are only based on data obtained less than 10 days.

RH는 70% 이하의 가장 낮은 값을 보이지만 T_s 와 T_a 는 12 °C 이하로 가장 낮은 값을 보이기 때문에 q_s 와 q_a 의 온도에 대한 지수 함수적인 특징에 의해 여름철과 비슷한 값을 보인다(Fig. 5d, i).

월평균 열속 특성

황해 남동부 YSROB 위치에서의 열속 산출 결과는 연중 Q_i 에 의해 대기로부터 해양이 열을 얻고 나머지 열속 성분들에 의해 해양에서 대기로 열을 잃고 있음을 보여준다(Fig. 6, Table 2). 복사 성분의 계절변화를 살펴보면 Q_i 는 5월에 최대(237.7 W/m²), 12월에 최소(62.8 W/m²)이며 Q_b 는 7월에 최대(-23.2 W/m²), 12월에 최소(-72.4 W/m²)이다. Q_e 가 여름철보다 5월에 최대값을 보이는데, 이

는 여름철 한반도 주변해역의 불안정한 대기상태에 의해 7월부터는 장마를 동반한 많은 구름이 발생하는 것(Kang *et al.*, 1994)과 여름철 황해 남동부 해역에서 해무가 빈번하게 발생하기 때문인 것으로 사료된다(Cho *et al.*, 2000; Won *et al.*, 2000).

Q_e 는 연중 음의 값을 보이며 5월부터 7월 사이에 -36 W/m² 이상의 높은 값을 보여(5월에 -8.3 W/m²로 최대) 증발 잠열에 의한 해양 표면의 열손실이 가장 적은 시기이며, 9월부터 12월까지의 증발 잠열에 의한 열손실이 -119 W/m² 이하로 큰 시기이다(12월에 -165.6 W/m²로 최소). 9월의 Q_e 는 12월에 이어 두 번째로 작은 값을 보이는데 이는 9월의 Δq 가 최대값을 보이기 때문이다(Fig. 5i). Q_h 는 5월에 최대값(1.9 W/m²), 12월에 최소값(-89.7 W/m²)을 보이며, 겨울철인 12월부터 2월에는 -49.3 W/m² 이하의 해양 표면으로부터의 비교적 큰 현열 방출이 발생하는데 이는 이 시기에 ΔT 및 U 가 크기 때문이다(Fig. 5a, d). Q_e 는 연중 음의 값을 갖는 반면에 Q_h 는 5월과 7월에 적지 않은 양의 값을(각각 1.9 W/m², 0.7 W/m²)을 보이는데 이는 이 시기에 T_a 가 T_s 보다 높기 때문이다(Fig. 5b, c, d).

Q_n 은 3월부터 8월까지 양의 값을 보여 이 시기에 해양 표면이 대기로부터 열을 받으며, 일사량이 가장 강하고 Q_e 와 Q_h 에 의한 열손실이 가장 작은 5월에 최대값(191.4 W/m²)이 나타난다. 8월부터 Q_e 에 의한 열 손실이 커지고 9월 이후로 Q_i 도 급격히 감소함에 따라 Q_n 은 9월부터 2월에 걸쳐 음의 값을 보이며, 모든 열속 성분이 최소값을 갖는 12월에 최소값(-264.9 W/m²)을 보인다(Fig. 6, Table 2).

연평균 열속의 경우 Q_i 에 의해 해양 표면이 164.7 W/m² 열을 얻고 Q_b , Q_e 및 Q_h 에 의해 각각 55.9 W/m², 82.7 W/m², 24.2 W/m² 만큼 열 손실이 일어나 전체 열손실 중 Q_e 에 의한 열손실은 51 %를 차지하며 다음으로 장파복사에 의한 열손실(34%)이 현열에 의한 열손실(15%)보다 크다. 연평균 Q_n 은 1.9 W/m²로서 대기변수 측정 기기의 오차를 고려한 Q_n 오차 산정 결과(최대 ± 19.7 W/m²)를 감안하면 연평균 Q_n 은 무시할 정도로 작아 YSROB 위치에서 해양-대기 경계면을 통한 열교환이 평형 상태에 있음을 보여준다(Table 2).

표피수온과 벌크 수온에 의한 열속 차이

YSROB에서 관측한 T_s 는 수심 1.5 m에서 관측한 벌크 수온이지만 실제 해양과 대기 사이에서 발생하는 열교환은 해표면에서 일

Table 2. Monthly mean values of each heat flux component at the YSROB. Units are W/m².

		1	2	3	4*	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual Mean (error)
Q _i	MEAN	77.4	115.1	175.5	232.0	237.7	228.2	205.8	220.6	195.0	140.9	85.9	62.8	164.7 (±3.5)
	STD	146.1	206.7	263.1	301.4	322.0	307.3	286.3	307.7	291.3	214.3	151.2	125.1	
Q _b	MEAN	-70.1	-62.6	-58.8	-64.5	-39.9	-39.4	-23.2	-38.0	-59.6	-71.7	-70.8	-72.4	-55.9 (±3.6)
	STD	30.2	34.5	35.5	31.7	31.0	23.0	18.4	18.2	28.7	27.9	33.8	28.2	
Q _e	MEAN	-110.7	-87.5	-58.4	-29.6	-8.3	-36.0	-23.9	-85.6	-134.5	-119.7	-132.4	-165.6	-82.7 (±10.0)
	STD	56.5	57.3	56.5	39.9	15.0	31.3	23.2	59.1	110.3	79.1	83.4	69.7	
Q _h	MEAN	-63.0	-49.3	-18.2	6.3	1.9	-4.0	0.7	-6.2	-11.9	-16.8	-40.3	-89.7	-24.2 (±2.5)
	STD	46.6	50.3	33.8	13.9	8.6	6.6	7.4	9.2	15.4	19.0	36.7	55.3	
Q _n	MEAN	-166.4	-84.3	40.1	144.3	191.4	148.7	159.5	90.7	-11.0	-67.3	-157.5	-264.9	1.9 (±19.7)
	STD	182.3	236.4	279.9	304.8	321.1	309.5	290.7	319.3	307.9	241.4	201.5	177.1	
Available days (Total days)		31.6(62)	28.0(57)	28.2(62)	7.8(60)	44.5(62)	58.7(60)	69.4(70)	64.2(93)	27.6(90)	28.5(62)	21.1(60)	52.0 (62)	

*Month with data obtained less than 10 days.

STD denotes standard deviation.

Table 3. Monthly mean values of cool skin, warm layer effects and their sum at YSROB. Units are $^{\circ}\text{C}$

Cool skin	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mean
	-0.28	-0.23	-0.14	-0.07	-0.06	-0.12	-0.06	-0.18	-0.22	-0.29	-0.27	-0.31	-0.18
Warm layer	0.00	0.01	0.02	0.04	0.07	0.07	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.00	0.03
Cool skin + Warm layer	-0.28	-0.22	-0.12	-0.03	0.01	-0.06	-0.04	-0.15	-0.18	-0.27	-0.26	-0.31	-0.15

어니는 현상으로서 벌크식을 이용하여 Q_b , Q_e 및 Q_h 를 정확히 산출하기 위하여는 벌크 수온보다 표피 수온(skin temperature)을 사용하여야 한다. 벌크 수온과 표피 수온의 차이는 cool skin, warm layer 효과에 의해 발생한다(Fairwell *et al.*, 1996). Cool skin 효과는 해표면으로부터 약 0.1~1 mm에서 Q_b , Q_e 및 Q_h 에 의해 주야간에 0.1~0.3 $^{\circ}\text{C}$ 표층수온이 감소하는 효과이며, warm layer 효과는 주간에 강한 일사량에 의해 평균 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 정도 표층수온이 상승하는 효과로서 일사량이 강한 주간에는 최고 5 $^{\circ}\text{C}$ 까지 수온차이가 발생하는 경우가 있어 벌크 수온과 표피 수온을 이용하여 Q_n 산출 후 비교할 경우 최고 50~60 W/m^2 까지 차이가 날 수 있다(Fairall *et al.*, 1996; Kawai and Wada, 2007). 본 연구에서는 YSROB에서 관측한 벌크 수온을 COARE 3.0 알고리즘에 포함된 변환식에 의해 표피 수온으로 변환 후 열속 산출 시 사용하였다.

YSROB 위치에서 관측 기간 중 표피수온과 벌크 수온의 차이를 발생시키는 cool skin과 warm layer 효과는 전체 관측 기간 평균 각각 -0.18 $^{\circ}\text{C}$, 0.03 $^{\circ}\text{C}$ 로서 Kawai and Wada(2007)의 연구 결과와 비교 시 cool skin 효과는 평균 범위에 속하며 warm layer 효과는 YSROB에서 0.05 $^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 나타났다(Table 3). 월평균 결과에 의하면 YSROB 위치에서 warm layer 효과는 가을철과 겨울철에 비해 상대적으로 봄철과 여름철에 강한 일사량으로 인해 5월과 6월에 월평균 0.07 $^{\circ}\text{C}$ 정도로 상대적으로 크게 나타나며, cool skin 효과는 수온과 기온의 차이가 커지는 12월에 월평균 최소값(-0.31 $^{\circ}\text{C}$)을 보

인다(Table 3). 전 기간 평균한 벌크 수온과 표피 수온 차이는 0.15 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 월평균 벌크 수온과 표피 수온의 차이는 4월부터 7월까지 0.06 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 작고 가을과 겨울철인 10월부터 2월까지 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 이상으로 크게 나타난다. 4월부터 7월까지의 warm layer 효과는 증가하지만 cool skin 효과가 감소하여 서로 상쇄되어 그 크기가 작아지며, 가을철과 겨울철은 cool skin 효과가 큰 반면에 warm layer 효과는 미미하여 벌크 수온과 표피수온의 차이가 크게 나타난다. 이러한 벌크 수온과 표피수온 차이의 계절 변화는 북동아시아에서 인공위성을 이용하여 차이를 연구한 Park *et al.*(2008)의 결과와 유사하다.

월평균 표피수온과 벌크 수온 차이는 연중 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 미만으로 나타나는 반면에 순간적인 차이는 시기에 따라 크게 나타날 수 있다. 예로써 2013년 5월 6일 주간에 두 효과에 의한 수온 차이는 최고 3.1 $^{\circ}\text{C}$ 를 보였으며(Fig. 7a), 이 경우 표피수온과 벌크 수온을 이용하여 산출된 Q_e 는 14.9 W/m^2 의 차이를 보인다(Fig. 7b). 이러한 결과는 일정 기간 평균한 열속을 산출하는 경우 벌크 수온과 표피수온에 의한 열속의 차이는 10 W/m^2 미만으로 비교적 작은 반면에 봄철과 여름철 주간과 같이 강한 일사 조건하에서 순간 관측값을 이용하여 열속을 산출하는 경우에는 벌크 수온과 표피수온에 의한 오차가 15 W/m^2 이상으로 크게 발생 할 수 있으므로 반드시 표피 수온을 이용해야 함을 의미한다.

Fig. 7. Time series of a) cool skin and warm layer effects and combined effect from 5 May to 10 May, 2013 and b) differences in latent and sensible heat fluxes based on skin and bulk temperatures from 5 May to 10 May, 2013.

Table 4. Sensitivity of heat flux components to individual measurements uncertainty in the YSROB. Units are W/m^2 .

		Total	$I_{sw} (\pm 1\%)$	$I_{lw} (\pm 1\%)$	$T_s (\pm 0.002\ ^\circ C)$	$U (\pm 0.3\ m/s)$	$T_a (\pm 0.2\ ^\circ C)$	RH ($\pm 2\%$)
Q_i	Mean	3.5	3.5					
	STD	± 2.8	± 2.8					
Q_b	Mean	3.6		3.6	0			
	STD	± 0.6		± 0.6	0			
Q_e	Mean	10.0			0	2.9	2.8	3.9
	STD	± 6.0			0	± 2.2	± 2.0	± 3.3
Q_h	Mean	2.5			0	0.7	1.7	0
	STD	± 2.0			0	± 1.2	± 1.1	0

기기 오차에 의한 열속 산출의 오차

실측된 해양, 대기 변수와 벌크식을 이용하여 열속을 산출하는 경우, 계산된 열속은 해양, 대기 변수를 관측하는 센서의 정확도와 사용한 벌크식에 의한 오차를 포함한다. 본 연구에서는 해양, 대기 변수를 측정하는 센서의 정확도에 의한 열속 산출의 오차를 계산하였다(Table 4). YSROB에 장착된 풍속, 기온, 상대습도, 해면기압, 단파복사, 장파복사, 수온 센서의 정확도는 각각 $\pm 0.3\ m/s$, $\pm 0.2\ ^\circ C$, $\pm 2\%$, $\pm 0.6\ hpa$, $\pm 1\%$, $\pm 1\%$, $\pm 0.002\ ^\circ C$ 로서(Table 1) 각 센서의 최대 오차값을 적용하여 열속 산출 시 센서의 정확도에 의해 발생할 수 있는 최대 오차를 산정하였다(Beardsley *et al.*, 1998).

YSROB에 장착된 센서의 정확도를 반영한 민감도 실험을 통하여 기기 오차에 의한 열속 오차를 산출한 결과, Q_i 와 Q_b 는 단파복사계와 장파복사계 정확도를 고려 시 각각 최대 $\pm 3.5\ W/m^2$, $\pm 3.6\ W/m^2$ 까지 오차가 발생할 수 있으며, 풍속, 상대습도, 기온 센서의 정확도를 고려 시 Q_e 와 Q_h 는 각각 최대 $\pm 10\ W/m^2$, $\pm 2.5\ W/m^2$ 까지 오차가 발생할 수 있다(Table 4). 수온 센서의 정확도에 의한 Q_b , Q_e 및 Q_h 의 오차는 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다. 모든 기기 오차를 고려 시 Q_n 은 최대 $\pm 19.7\ W/m^2$ 까지 오차가 생길 수 있다.

기존 연구결과와 비교

기존의 열속 산출 연구에서는 최소 10년 이상의 장기 자료를 이용한 반면 YSROB 위치에서의 월평균 열속은 27개월에 걸친 관측 자료로부터 산출한 결과이다. 기존 연구와 YSROB 자료를 이용하여 산출한 열속 비교 시 시간 변동으로 인한 열속의 변동에 의하여 차이가 나타날 수 있다. 이를 파악하기 위하여 재분석장(MERRA: Modern-Era Retrospective-Analysis for Research and Application) 자료를 이용하여 YSROB 위치에서 31년(1982~2012년) 장기 평균된 열속과 관측 기간이 주로 포함된 2012년 열속을 비교하였다(Fig. 8). YSROB에서의 관측이 주로 이루어진 2012년의 경우 장기 평균된 열속에 비해 5월부터 7월의 Q 가 최대 약 10% 큰 값을 보였으며, 2012년 겨울철(12~1월) 잠열속에 의한 열 손실은 장기 평균된 잠열속에 비해 약 10~20% 큰 값을 보였다(Fig. 8b). 즉, MERRA에 의하면 2012년의 경우 봄철과 여름철 해양으로 유입되는 Q 는 평년에 비해 큰 값을 보인 반면(Q 가 최대인 5월의 경우 $24.9\ W/m^2$ 열속 차이) 겨울철 열 손실은 평년에 비해 컸던 연도였으며(Q_e 가 최소인 12월의 경우 $15.9\ W/m^2$ 열속 차이), Q_n 의 경우 2012년 겨울철에는 평년에 비해 약 20% 큰 열손실이 있었으며(12월의 경우 $43.2\ W/m^2$ 열속 차이), Q_i 가 최대인 5월의 Q_n 은 2012년이 평년에 비해 약 12%($20.5\ W/m^2$) 크게 나타났다(Fig. 8a, b).

기존 연구에서 제시된 열속 분포도에서 YSROB 위치와 가장 인

Fig. 8. Comparison between long-term mean heat flux components for 31 years (1982~2012) and those in 2012 at the YSROB location. The heat flux components are all archived from MERRA reanalysis product. a) net heat flux, b) net shortwave radiation, c) net long wave radiation, d) latent heat flux, e) sensible heat flux.

접한 위치의 열속값을 추출하여 본 연구를 통해 산출한 월평균 열속과 기존 연구 결과(Hirose *et al.*, 1999; Na *et al.*, 1999; Chu *et al.*, 2005)를 비교하였으며, 이 외에도 YSROB 위치에서 MERRA에 의한 2012년 월평균 열속을 본 연구 결과와 비교하였다(Figs. 9, 10; Table 5). 열속의 차이가 열속의 연변동 등 시간 변동에 의한 것인지 판단하기 위하여 MERRA에 의한 30년 장기 평균된 열속과 2012년 평균 열속을 Fig. 10에 함께 나타내었다.

전반적으로 MERRA를 제외한 기존 결과는 5월부터 7월의 Q 가 본 연구 결과에 비해 작으며, 최대 약 $40\ W/m^2$ 의 차이를 보여 시

Fig. 9. Comparison of monthly heat flux components calculated with data from the YSROB (line) and those from previous studies and MERRA near the YSROB location. a) net heat flux with uncertainty due to instrumental accuracies (gray shading), b) net shortwave radiation, c) net longwave radiation, d) latent heat flux, e) sensible heat flux.

간 변동에 의한 차이로 보기 어렵다(Figs. 9b, 10b). 이와 반대로 MERRA의 경우는 본 연구 결과에 비해 약 18~25 W/m² 정도 크게 나타난다. MERRA의 경우 Q_b 는 본 연구 결과에 비해 작은 값을 보이며, 특히 겨울철(11~2월) 차이가 40 W/m²로 크다(Figs. 9c, 10c). 이는 동 시기에 MERRA의 표층수온이 실측치에 비해 높아 대기로 방출되는 장파 복사량이 많았던 것으로 확인되었고, 이 외에 MERRA의 경우 중위도 해역에서 운량의 과소 평가로 인하여 해양으로 유입되는 장파 복사량을 과소 평가하는 것으로 알려져 있다(Wang and Dickinson, 2013). Q_e 의 경우 MERRA를 제외한 타 연구 결과는 본 연구에 비해 여름을 제외한 전 계절에 걸쳐 열 손실을 보다 크게 산출하였으며, 최대 50 W/m²의 차이를 보여 역시 연변동에 의한 차이(최대 23.7 W/m²)에 비해 2배 이상 크다(Figs. 9d, 10d). MERRA의 경우 Q_e 는 본 연구에 비해 겨울철 ±20 W/m² 이하의 차이를 보이는 반면에 8월과 9월의 열손실의 경우 본 연구에 비해 40~50 W/m² 작게 나타난다.

순열속 (Q_n)의 경우 기존 연구 결과는 본 연구 결과에 비해 겨울철 열 손실은 크고 5월부터 7월은 열을 받는 양이 작게 산정되었다(Figs. 9a, 10a). 이는 앞서 살펴본 바와 같이 기존 연구가 여름철 Q_n 는 작게 산정하였고 겨울철 열 손실은 과다하게 산출하였기 때

Fig. 10. Differences in monthly mean heat flux components between those calculated with data from the YSROB and those from previous studies and MERRA near the YSROB location. a) net shortwave radiation, b) net longwave radiation, c) latent heat flux, d) sensible heat flux, (e) net heat flux. Difference in long-term mean monthly heat fluxes for 31 years and the monthly mean fluxes in 2012 from MERRA is also shown as an indication of inter-annual variation of heat fluxes (line). Note that heat loss components (Q_b , Q_e , Q_h) are negative all the year round, hence negative values in the figure indicate that previous studies or MERRA overestimate the heat losses as compared to those based on the YSROB data. For Q_i , opposite is the case.

문이다. 겨울철 Q_n 의 차이는 50 W/m²부터 최대 130 W/m²로 그 차이가 크며, 특히 Na et al.(1999)의 결과와 본 연구 결과가 겨울철 열 손실에 있어 큰 차이를 보인다. 본 연구 결과와 비교 시 MERRA의 Q_n 은 1월과 2월에 약 50~60 W/m²의 큰 차이를 보였다.

결론 및 토의

황해 남동부에서 27개월에 걸쳐 해양 부이를 이용하여 관측한 장, 단파 복사량을 포함한 해양, 대기 변수와 벌크식을 이용하여 최초로 동 해역에서 관측 자료에 기반한 월평균 표층 열속을 산출하였다. 재분석장 자료(MERRA)에 의하면 관측이 주로 이루어진 2012년의 경우 봄철과 여름철인 4월부터 7월에 해양으로 유입되는 단파 복사량 Q_n 는 평년에 비해 큰 값을 보인 반면에(최대 24.9 W/m²) 11월부터 2월에 열 손실은 평년에 비해 컸던 연도로서(최대 15.9

Table 5. Monthly mean heat flux components based on observed data at the YSROB, from MERRA reanalysis product, and from previous studies by Hirose *et al.* (1999), Na *et al.* (1999), and Chu *et al.* (2005). The heat fluxes from MERRA and previous studies are all those near the YSROB location

		1	2	3	4*	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual Mean
Q_i	YSROB	77.4	115.1	175.5	232.0	237.7	228.2	205.8	220.6	195.0	140.9	85.9	62.8	164.7
	MERRA	109.8	134.4	170.5	221.7	255.2	247.8	229.9	211.2	195.1	167.4	120.2	95.9	179.9
	Hirose <i>et al.</i>					208	190	195						145
	Na <i>et al.</i>	85			170			165			130			135
Q_b	YSROB	-70.1	-62.6	-58.8	-64.5	-39.9	-39.4	-23.2	-38.0	-59.6	-71.7	-70.8	-72.4	-55.9
	MERRA	-118.8	-105.2	-85.1	-62.9	-58.0	-57.0	-33.1	-37.3	-72.6	-97.3	-113.3	-119.7	-80.0
	Na <i>et al.</i>	-95			-38			-28			-75			-60
	YSROB	-110.7	-87.5	-58.4	-29.6	-8.3	-36.0	-23.9	-85.6	-134.5	-119.7	-132.4	-165.6	-82.7
Q_c	MERRA	-129.7	-105.9	-66.1	-22.6	-14.2	-42.4	-23.2	-47.5	-84.0	-116.8	-153.1	-150.9	-79.7
	Hirose <i>et al.</i>	-160									-135			-90
	Na <i>et al.</i>	-160			-80			-40			-160			-115
	YSROB	-63.0	-49.3	-18.2	6.3	1.9	-4.0	0.7	-6.2	-11.9	-16.8	-40.3	-89.7	-24.2
Q_h	MERRA	-79.9	-70.7	-26.4	2.4	0.5	-1.7	0.0	2.6	-6.0	-18.9	-48.9	-92.2	-28.3
	Hirose <i>et al.</i>	-95									-20			-28
	Na <i>et al.</i>	-130			10			8			-50			-45
	YSROB	-166.4	-84.3	40.1	144.3	191.4	148.7	159.5	90.7	-11.0	-67.3	-157.5	-264.9	1.9
Q_n	MERRA	-218.6	-147.3	-7.0	138.7	183.6	146.7	173.6	129.0	32.6	-65.6	-195.2	-266.9	-8.0
	Chu <i>et al.</i>		-160			180			140			-220		
	Hirose <i>et al.</i>	-240			90			155			-125			-10
	Na <i>et al.</i>	-300	-200	-60	60	110	150	120	20	-80	-160	-200	-350	-80

*means that the data in April were obtained at YSROB less than 10 days.

W/m^2), 이로 인하여 순열속(Q_n)은 평년에 비해 겨울에 열 손실이 컸고(12월의 경우 $43.2 W/m^2$ 열속 차이), 일사량이 최대인 5월의 Q_n 은 2012년이 평년에 비해 $20.5 W/m^2$ 크게 나타났다.

현열 방출에 영향을 미치는 표층수온과 기온의 차이(ΔT)는 5월부터 8월에 $0.6^\circ C$ 미만의 작은 값을 보이고 11월부터 2월에 $3.4^\circ C$ 이상의 높은 값을 보인다. 잠열 방출에 중요한 해양-대기 비습차이(Δq)는 상대습도가 15% 이상 급격하게 감소하는 8월부터 10월에 $3.0 g/kg$ 이상으로 높은 값을 보이고, 겨울철 $1025.5 hpa$ 이상 높은 대기압과 5월부터 7월까지 87.2% 이상의 높은 상대습도에 의해 1월부터 7월까지 $1.7 g/kg$ 이하의 낮은 값을 보인다.

YSROB 자료를 이용하여 산출한 열속에 의하면 Q_e 에 의해 대기로부터 해양이 열을 얻고 나머지 열속 성분들에 의해 해양에서 대기로 열 손실이 일어나며, 전체 열 손실에서 Q_b 에 의한 열 손실은 34%, Q_c 에 의한 열 손실은 51%, Q_h 에 의한 열 손실은 15%이다. Q_i 는 장마를 동반한 많은 구름과 빈번한 해무 발생으로 인해 5월에 최대($237.7 W/m^2$)를 보이고 Q_c 와 Q_h 는 12월에 각각 $-165.6 W/m^2$, $-89.7 W/m^2$ 로 최소값을 보인다. Q_c 가 9월에 두 번째 작은 최소값($-134.5 W/m^2$)을 보이는 것은 앞서 설명한 높은 Δq 에 의한 것이다. Q_n 은 일사량이 가장 강한 5월에 최대($191.4 W/m^2$)로서 3월부터 Q_i 가 증가하고 나머지 열속 성분들에 의한 열 손실이 작아짐에 따라 8월까지 해양표면은 열을 얻지만 9월부터 Q_i 의 감소와 Q_c 에 의한 열 손실로 인하여 2월까지 Q_n 은 음의 값을 보이며, 모든 열속 성분이 최소값을 갖는 12월에 최소값($-264.9 W/m^2$)을 보인다. YSROB 위치에서 연평균 Q_n 은 $1.9 W/m^2$ 로서 센서 정확도를 고려한 오차 산정 결과를 감안할 때 무시할 정도로 작게 계산되었다.

YSROB 위치에서 산출한 열속과 기존 열속 산출 연구 결과를 비교한 결과, 기존 연구에서 여름철 Q_n 은 과소 평가되었으며, 겨울철에는 Q_c 와 Q_h 에 의한 해양으로부터의 열 손실이 실측값에 기반한 열 손실보다 크게 산출되었다. 이로 인하여 순열속 Q_n 은 전 계절에 걸쳐 YSROB 자료에 기반한 Q_n 에 비해 작게 나타난다.

YSROB에서 산출한 열속과 기존 연구 결과의 차이는 연변동에 의한 차이를 상회하여 이미 기존 연구에서 언급되었듯이 이러한 차이가 주로 기존 연구에서 사용된 자료의 부정확성에 기인하는 것으로 사료된다(Hirose *et al.*, 1999; Na *et al.*, 1999). 그러나 열속 산출에 사용되는 자료 중 특별히 어떤 자료에 의해 계절별로 열속의 큰 차이를 나타내는지는 판단하기 어렵다. 일본기상청 자료로부터 바람을 산출하여 열속 산출에 사용한 Na *et al.*(1999)은 이러한 방법으로 산출한 풍속이 COADS 자료에 의한 풍속에 비해(Hirose *et al.*, 1999) 약 50% 정도 크다는 것을 언급한 바 있다.

열속 성분 중 복사량도 본 연구와 기존 연구 결과가 큰 차이를 보여 Hirose *et al.*(1999)과 Na *et al.*(1999)의 연구에서 5월부터 7월의 Q_i 는 YSROB에서 산출한 Q_i 에 비해 $10\sim40 W/m^2$ 정도 낮게 산출되었다. YSROB에서는 복사계를 이용하여 단파복사량을 측정하여 열속 산출에 사용한 반면에 두 연구에서는 맑은 하늘의 단파 복사량과 운량을 경험식에 대입하여 계산한 결과로서 운량에 의한 오차가 컸을 것으로 사료된다. 이러한 열속 성분의 차이로 Q_n 의 경우 겨울철에 최대 $140 W/m^2$ 의 차이를 보인다. COADS에서 제공되는 열속 자료를 분석한 Chu *et al.*(2005)의 결과도 Q_n 은 겨울철인 2월과 11월에는 $60 W/m^2$ 이상 낮게 나타났다.

재분석장 MERRA의 경우 본 연구 결과에 비해 Q_i 는 과대 평가

되었으며 특히 11월부터 1월에 30 W/m^2 이상의 높은 월평균 값을 보였다(Fig. 10). 반면에 겨울철 Q_e 에 의한 열 손실은 본 연구에 비해 40 W/m^2 이상 크게 나타난다. 겨울철 Q_e 와 Q_h 에 의한 열손실은 본 연구와 20 W/m^2 이하로 적은 차이를 보인 반면에 Q_e 에 의한 열 손실의 경우 순열속이 양의 값에서 음의 값으로 바뀌는 8월과 9월에 본 연구에 비해 약 $40\text{--}50 \text{ W/m}^2$ 적었다.

실측값을 이용한 열속 산출과 기존 연구결과와의 비교는 수치모델 입력 등 기존 연구의 기후적인 열속값을 사용 시 주의해야 함을 제시한다. 역시 수치모델에 입력하거나 해양-대기 상호작용을 파악하기 위하여 재분석장을 사용하는 경우에도 재분석장의 검증이 우선적으로 이루어져야 한다. 현재 사용 가능한 재분석장이 많이 유용하나 황해와 같은 반폐쇄성 연해에서의 정확도가 체계적으로 검증된 바가 없어 이에 대한 연구가 시급하다. 특히 기후 변화를 이해하고 예측하기 위하여는 열속의 시·공간적인 변화를 파악하여야 하며, 이를 위하여 향후 재분석장 자료가 많이 활용될 것이므로 보다 많은 위치에서 복사량을 포함한 실측값을 이용한 열속 산출을 통해 재분석장의 정확도를 평가하는 연구가 필요하다. 또한 단기 기상현상에 중요한 열속의 일변화를 포함한 단주기 변화 파악을 위하여도 지속적인 해양에서의 시계열 관측이 필요하다.

사 사

이 연구는 해양수산부가 지원하는 “해양기인 중장기 기후변동의 역학적 연구와 예측기술 개발”의 일환으로 수행되었다. 본 연구에 사용된 해양부이의 관리와 유지에 많은 도움을 주신 (주)오토로닉스 직원 여러분들께 감사드립니다. 논문을 세심하게 심사해 주시고 조언을 해 주신 두 분의 심사위원과 담당편집위원께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌(References)

Ahn, J. B., J. H. Ryu and Y. H. Yoon, 1997. Comparative analysis and estimates of heat fluxes over the ocean around Korean peninsula. *Asia-Pacific. J. Atmos. Sci.*, **33**: 725–736 (in Korean with English Abstract).

Beardsley, R. C., E. P. Dever, S. J. Lentz and J. P. Dean, 1998. Surface heat flux variability over the northern California shelf. *J. Geophys. Res.*, **103**: 21553–21586.

Bosilovich, M. G., F. R. Robertson and J. Chen, 2011. Global energy and water budgets in MERRA. *J. Climate*, **24**: 5721–5739.

Brunke, M. A., C. W. Fairall, X. Zeng, L. Eymard and J. A. Curry, 2003. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? *J. Climate*, **16**: 619–635.

Cho, Y. K., B. H. Choi and H. W. Chung, 1995. Variation of tidal front in the southwestern sea of Korea. *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, **7**: 170–175 (in Korean with English Abstract).

Cho, Y. K., M. O. Kim and B. C. Kim, 2000. Sea fog around the Korean Peninsula. *J. Appl. Meteor.*, **39**: 2473–2479.

Chu, P., Y. Chen and A. Huninaka, 2005. Seasonal variability of the Yellow Sea/East China Sea surface fluxes and thermohaline structure. *Advances in Atmospheric Sciences*, **22**: 1–20.

Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. S. Godfrey, G. A. Wick, J. B. Edson and G. S. Young, 1996. Cool-skin and warm-layer effects on sea

surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **101**: 1295–1308.

Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev and J. B. Edson, 2003. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *J. Climate*, **16**: 571–591.

Hirose, N., H. C. Lee and J. H. Yoon, 1999. Surface heat flux in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**: 401–417.

Kang, I. S., M. K. Kim and T. Shim, 1994. Seasonal Variation of surface heat budget and wind stress over the seas around the Korean peninsula. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **29**: 325–337 (in Korean with English Abstract).

Kang, Y. J., S. O. Hwang, T. H. Kim and J. C. Nam, 2001. Estimation of air-sea heat flux exchange using buoy data at the Yellow Sea, Korea. *J. Korean Earth Science Society*, **22**: 40–46 (in Korean with English Abstract).

Kawai, Y. and A. Wada, 2007. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: a review. *J. Oceanogr.*, **63**: 721–744.

Konda, M., H. Ichikawa, H. Tomita and M. F. Cronin, 2010. Surface heat flux variations across the Kuroshio Extension as observed by surface flux buoys. *J. Climate*, **23**: 5206–5221.

Lie, H. J., 1989. Tidal fronts in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea). *Cont. Shelf Res.*, **9**: 527–546.

Lie, H. J. and C. H. Cho, 2002. Recent advances in understanding the circulation and hydrography of the East China Sea. *J. Fish. Oceanogr.*, **11**: 318–328.

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.*, **55**: 257–270.

Nonaka, M. and S. P. Xie, 2003. Co-variations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmospheric feedback. *J. Climate*, **16**: 1404–1413.

Park, K. A., F. Sakaida and H. Kawamura, 2008. Error characteristics of satellite-observed sea surface temperatures in the Northeast Asian Sea. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **29**: 280–289 (in Korean with English Abstract).

Rienecker, M. M., M. J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M. G. Bosilovich, S. D. Schubert, L. Takacs, G. K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. D. Silva, W. Gu, J. Joiner, R. D. Koster, R. Lucchesi, A. Molod, T. Owens, S. Pawson, P. Pegion, C. R. Redder, R. Reichle, F. R. Robertson, A. G. Ruddick, M. Sienkiewicz and J. Woollen, 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, **24**: 3624–3648.

Song, Q., P. Comillon and T. Hara, 2006. Surface wind response to oceanic fronts. *J. Geophys. Res.*, **111**: C12006.

Wang, K. and R. E. Dickinson, 2013. Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalyses. *Rev. Geophys.*, **51**: 150–185, doi:10.1002/rog.20009.

Won, D. J., S. Y. Kim, K. E. Kim and K. D. Min, 2000. Analysis of meteorological and oceanographic characteristics on the sea fog over the Yellow Sea. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **36**: 631–642 (in Korean with English Abstract).

2014년 3월 27일 원고접수

2014년 7월 31일 수정본 접수

2014년 8월 5일 수정본 채택

담당편집위원: 이호진