

위성과 부이자료를 이용한 현·잠열 추정에 관한 연구
Estimation of Sensible and Latent Heat Fluxes
Using the Satellite and Buoy Data

홍기만¹, 김영섭², 윤홍주³, 박경원¹

Ki-Man Hong, Young-Seup Kim, Hong-Ju Yoon and Kyoung-Won Park
부경대학교 환경대기과학과¹, 부경대학교 위성정보과학과²,
여수대학교 해양공학과³

Tel : 051-620-6271, Fax : 051-626-9635

E-Mail : hongkm@mail1.pknu.ac.kr, kimys@pknu.ac.kr

ABSTRACT

Ocean heat fluxes over a wide region are generally estimated by an aerodynamic bulk formula. Though a remote sensing technique can be expected to estimated global heat flux, it is difficult to obtain air temperature and specific humidity at sea surface by a remote sensor. In this study present a new method with which to determine near-sea surface air temperature from in situ data. Also, These methods compared with other methods. A new method used a linear regression equation between sea surface temperature and air temperature of the buoys data. In this study new method is validated using observed monthly mean data at the Japan Meteorological Agency(JMA), National Data Buoy Center(NDBC) and Tropical Ocean-Global Atmosphere(TOGA)-Tropical Atmosphere Ocean(TAO) buoys. The result that bias and rmse are 0.28, 1.50°C respectively. The correlation coefficient is 0.98.

Also, to retrieve near-sea surface specific humidity(Q) from good nonlinear regression relationship between vapor pressure(Ea) of buoy data and air temperature, after obtained the third-order polynomial function, compared with that of estimated from SSM/I empirical equation by Schussel et al(1995). The result that bias and rmse are -1.42 and 1.75(g/kg).

I. 서론

잠열(Latent Heat)과 현열(Sensible Heat)은 대기와 해양의 상호작용에 의한 열이동으로, 단파 및 장파복사와 함께 대기의 열평형을 지배하는 요소이다. 잠열은 증발과정을 통한 해양에서 대기로의 열전달을 의미하고, 현열은 해수면과 그 위를 덮고 있는 공기와의 직접적인 열교환을 의미한다. 대기와 해양의 상호작용으로 교환된 에너지는 대기 및 해양의 순환에 의해 재분배된다. 그러므로, 대기-해양간 열교환의 시·공간적인 분포 특성을 밝히는 것은 종관기상현상과 기후변화는 물론 해양의 각종 물리적 현상을 예측하고 연구하는데 매우 중요하다.

대기-해양간의 열교환 또는 열저장에 관한 연구는 과거부터 많은 연구자들에 의해 수행된 바 있다(Talley, 1984; Hsiung, 1986). 그리고 최근의 몇몇 연구들은 해수면 온도(SST)의 연변화가 현·잠열의 교환에 지배되고 있음을 보였고, 특히 열대태평양의 ENSO(Elnino-Southern Oscillation) 현상을 대기-해양 상호작용에 의한 열교환 과정으로 해석한 바 있다(Shibata et al, 1996). 그러나, 이러한 연구의 가장 근본적인 문제점은 주로 선박에서 보고된 해양기상 요소들을 사용함으로써 시·공간적인 오차를 포함한 많은 오차를 내포하고 있다는 것이다(Kubota et al, 1995).

이에 반해, 자료의 시·공간적인 균일성과 반복성이 좋은 위성관측 자료의 이용은 대기-해양의 상호작용을 연구하는데 가장 바람직한 것으로 평가되고 있다(Shibata et al, 1996). 이러한 위성관측 자료는 센서기술의 발달에 따라 더욱 다양해지고 또한 그 정확도도 크게 향상되고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지는 위성을 이용하여 대기-해양간의 열교환량을 직접 측정할 수 없기 때문에, 전통적인 방법인 벌크법을 이용하여 열교환량을 간접적으로 추정할 수밖에 없다. 벌크법으로 열교환량을 추정하기 위해서는 해양기상요소 중 해수면 온도, 기온,

기압, 풍속 그리고 비습 등이 정확도 높게 관측되어야만 한다. 결과적으로 위성을 이용하여 이들 해양기상 요소들을 얼마나 정확하게 관측할 수 있는가 하는 것이 대기-해양간의 열교환 추정 과정의 오차를 줄이는데 가장 중요하다.

그러나, 열교환 추정에 필요한 비습과 해수면 근처의 기온 요소는 여러 가지 복잡한 문제들로 인해 위성에 의한 관측이 쉽지 않다. 비습은 SSM/I로 관측되는 가장수량을 이용하여 경험적으로 얻어지고는 있으나 아직까지 정확한 오차평가가 되어 있지 않은 상태이다. 그리고, 해수면 근처의 기온을 측정하기 위한 과거 몇 가지 경험적 접근, 예를 들면 Liu(1988), Tahdathil et al(1993), Shibata(1996), 에도 불구하고 큰 오차가 있어 실용적으로 사용하기에는 문제가 있는 것으로 알려져 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 해양기상 buoy 자료와 위성에서 얻어지는 자료들을 이용하여 비습과 기온을 정확도 높게 얻을 수 있는 방법을 연구하는 데 있다. 그리고, 이들 요소와 SST, 풍속 등을 이용하여 벌크법에 의한 대기-해양간의 현·잠열 교환량을 추정하여 이전 연구 성과와의 비교를 통해 열교환량 추정의 정확도를 평가하고자 한다.

II. 자료 및 방법

2.1. 자료

2.1.1. 위성자료와 NCEP/NCAR 자료

풍속과 비습은 각각 Goodberlet et al(1989), Schlüssel et al(1995)의 방법에 따라 DMSP의 SSM/I 휘도온도를 이용하여 추정하였다. SSM/I는 지표면과 대기로부터 방출되는 마이크로파를 동시에 관측하는 7개의 채널로 구성되어 있다. 채널은 19.35GHz, 22.235GHz, 37.0GHz 그리고 85.5GHz로 구성되어 있고, 22.235GHz는 연직 편광 관측만 가능하다. SSM/I 채널의

분해능은 69km(19.35GHz)~13km(85.5GHz) 이고, 공간 분해능은 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 이다. 자료 기간은 1996년 1월부터 1997년 12월까지의 2년동안의 자료를 사용했다.

해수면온도는(이하 SST라 함) JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하는 MCSST(Multi Channel Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였다. MCSST 격자는 경도 2048 픽셀과 위도 1024 픽셀로 전지구를 커버하고 있으며, 한 픽셀의 크기는 19.55km^2 이다. 해면 기압자료는 위성의 직접적인 관측 자료가 없기 때문에, NCEP/NCAR 재분석 자료의 월평균 해면 기압을 사용하였다. 그리고 NCEP/NCAR 자료의 기온과 습도는 추정된 기온과 비습의 검증에 이용되었다. .

2.1.2. 부이 자료

해양 기상 요소의 검증은 물론 추정된 현·잠열의 검증을 위해 해상에 설치되어 있는 buoy 자료를 이용하였다.

JMA(Japan Meteorological Agency) buoy 자료는 3시간간격(0, 3, 6, 9, 12, 18, 21 UTC)으로 관측된 풍속(7.5m 높이), 기온(4m 높이) 및 SST 자료를 이용하였다. 자료의 기간은 1996년 1월부터 1997년 12월까지였다. 그리고, 많은 NDBC(National Data Buoy Center) buoy 중, 육지의 영향과 자료의 충실성 등을 고려하여 북미 주변에 설치되어 있는 9개의 buoy 자료를 이용하였다. 자료의 기간은 1996년과 1997년의 2년간이었다. 그리고 같은 기간 동안의 TOGA-TAO buoy 자료도 수집하여 이용하였고 각 buoy의 풍속은 Roland et al(1995)의 방법에 따라 10m 높이에서의 풍속으로 보정하여 이용하였다.

2.2. 방법

2.2.1. 기온의 추정

본 연구에서는 해수면 위의 기온을 추정

하기 위해서 3가지 방법으로 접근했다. 첫 번째는 벌크 공식과 Bowen Ratio와의 관계를 이용한 Bulk 치환법, 두 번째는 현열속을 구하는 방정식에서 해수면온도와 기온 그리고 풍속과의 상관관계에 의한 SAW(Sea surface temperature - Air temperature - Windspeed)법, 세 번째는 해수면온도와 기온사이의 선형 회귀식에 의한 SA(Sea Surface Temperature - Air Temperature)법에 의해서 기온을 추정하였다.

2.2.2. 비습의 추정

해면상의 비습은 위성에서 직접 관측이 어려우므로 Schlüssel et al(1995)은 SSM/I의 휘도온도 값과 sonde 관측자료 값을 이용하여 해면상의 비습을 간접 추정할 수 있는 경험식을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 이의 결과는 물론, JMA buoy 자료를 이용하여 비습과 기온과의 관계로부터 회귀식을 만들고 이를 이용한 추정 결과를 다른 buoy 자료와 NCEP/NCAR 자료 등과 비교·검증하였다.

2.2.3. 현·잠열의 추정

대기와 해양 사이의 현·잠열 이동은 지금까지 널리 이용되고 있는 이른바 벌크법으로 추정하였다. 벌크법에 의한 잠열속(E)와 현열속(H)는 다음 식으로 추정된다.

$$E = \rho L_v C_E U (Q_s - Q) \quad (1)$$

$$H = \rho C_p C_H U (T_s - T) \quad (2)$$

여기서, ρ 는 대기밀도, L_v 는 증발잠열, C_p 는 비열 그리고 C_E 와 C_H 는 벌크계수이다. U , T , 그리고 Q 는 각각 해면상 10m 높이에서의 풍속, 기온, 비습이다. Q_s 와 T_s 는 해면에서의 비습과 SST를 나타낸다.

풍속 U 는 SSM/I 휘도온도를 이용한 Goodberlet et al(1989)의 경험식을 이용하

여 구하고, 나머지 변수들은 앞서 설명한 여러 방법으로 구한 값을 이용하였다. 벌크 계수 C_E 와 C_H 는 풍속과 대기 안정도에 의존하는 것으로 알려져 있는데, Kim and Kimura(1995)에 따라 Kondo(1975)의 방법을 채택하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 추정된 기온의 검증

본 연구에서는 다음과 같이 3가지 방법을 의해서 추정된 기온을 검증하였다.

(1) Bulk 치환법 검증

Bulk 치환법은 벌크법과 보엔비 관계에 의한 방법으로 그 분석 결과, 상관계수는 0.97로써 아주 좋은 관계를 보였으며, BIAS와 RMSE(root-mean square error)는 각각 -1.49°C 와 2.14°C 로 나타났다. Fig. 1(a)에서 알 수 있듯이 20°C 이하의 온도에서보다, 20°C 이상에서 좋은 관계를 보이고 있다. 그러나, 실제의 buoy 자료에서 얻어진 기온보다 다소 과대평가되는 경향을 보였다.

(2) SAW법 검증

SAW 분석 방법을 이용하여 SST와 풍속, 기온과 풍속에 의한 상관 관계로부터 기온을 추정한 결과, Fig. 1(b)에서 보는 것처럼 상관계수는 0.98로 아주 좋았으나, BIAS와 RMSE는 각각 4.61°C 와 4.82°C 로 나타났다. 따라서, 오차가 $4\sim 5^\circ\text{C}$ 정도의 오차를 보이고 있는 이 방법을 본 연구에 적용하기에는 다소 무리가 따랐다.

(3) SA법 검증

마지막으로 SA방법인 buoy 자료로부터 얻어진 SST와 기온의 상관 관계에 의한 선형 회귀식을 구하여 여기에서 얻어진 회귀식으로부터 해수면 위의 기온을 추정하였다. 이 회귀식을 이용하여 얻어진 값을 비교·분석한 결과, Fig. 1(c)에서 보여지는 것처럼 상관계수는 0.98, BIAS와 RMSE는

각각 0.28°C 와 1.5°C 로 아주 좋은 결과 값을 얻었다. 이 값은 McClain et al(1985)이 MCSST를 보정하기 위해 계산했던 값 (BIAS: $0.3^\circ\text{C}-0.4^\circ\text{C}$)보다 더 좋은 결과이다.

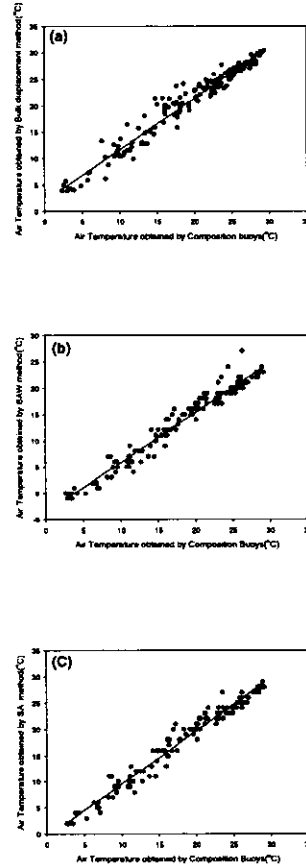


Fig. 1. Comparison of the air temperature derived from (a) Bulk displacement method, (b) SAW method, and (c) SA method with that obtained from buoys.

3.2. 추정된 비습의 검증

추정된 비습을 검증하기 위해서 실제 관측된 부이 자료로부터 1997년 1년동안의 기온의 월평균과 수증기압(E_a)사이의 관계식을 이용하여 비습을 추정하였다. 여기서 수증기압의 비선형 회귀식은 기온의 3차다중함수로서 아래의 (3)식으로 표현되어졌고, 이들 값사이의 훌륭한 관계는 Fig. 2에서 보였다.

$$E_a = 0.0007 \times (T_a)^3 + 0.0079 \times (T_a)^2 + 0.3504 \times (T_a) + 4.5980 \quad (3)$$

Fig. 2는 buoy에서 얻어진 비습(Q)과 수증기압(E_a) 회귀식에 의해서 얻어진 비습을 나타낸 산점도이다. 비교 결과 BIAS(-1.42g/kg)와 RMSE(1.75g/kg) 두 값 모두 아주 좋은 결과를 보여주었고, 상관계수도 0.97로서 아주 좋은 일치를 보여주었다. 이 값은 Jang et al(1999)이 제시한 상관계수(0.95)와 RMSE(1.77g/kg) 값보다 더 좋은 결과를 나타내었다. Fig. 3은 buoy에서 얻어진 비습(Q)과 SSM/I 위성에서 얻어진 비습을 비교하여 나타낸 산점도이다. Fig. 3(b)의 회귀식에 의해서 나타난 값들보다 다소 산만한 형태를 보이고 있고, RMSE에서도 큰 차이를 보이고 있어 위성에서 경험식에 의해 추정하는 방법보다는 수증기압과 기온사이의 관계에 의해서 얻어진 비선형 회귀식에서 훨씬 더 좋은 양질의 자료를 얻을 수가 있었다.

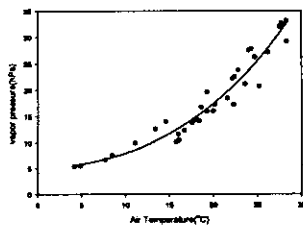


Fig. 2. Statistical regression between vapor pressure and air temperature obtained from buoy data. The correlation coefficient is 0.97.

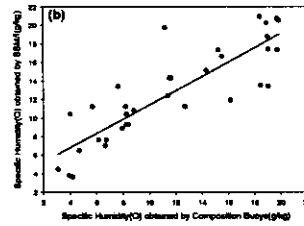
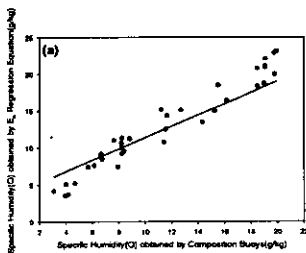


Fig. 3. Comparison of the Specific Humidity obtained by buoy data and that of estimated from (a) E_a regression equation, (b) SSM/I satellite data.

3.3. 한반도 주변의 현·잠열속 추정

다음은 이들 검증된 값들을 이용해서 현열속과 잠열속을 추정하였다. 본 연구에서는 한반도와 일본 주변의 영역($20^{\circ} \text{N} \sim 50^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \text{E} \sim 150^{\circ} \text{E}$)을 선정하여 JMA(1996-1997년) 3개의 buoy에서 실제 관측하여 얻어진 SST, 풍속, 기압의 월평균으로 얻어진 현·잠열속값과 위성으로부터 얻어진 현·잠열속값을 비교·분석하였다. Fig. 4는 위성에서 얻어진 현·잠열속과 부이에서 얻어진 현·잠열속을 비교해서 나타낸 그림이다. JMA 부이자료에 비교된 월평균 잠열속과 현열속의 자료수는 각각 36개이고, 추정된 잠열속과 현열속의 RMSE는 각각 32.5W/m^2 과 2.8W/m^2 이고, 상관계수는 각각 0.93과 0.89이다.

또한, 이들 추정된 현·잠열속을 이전에 연구되었던 자료들과 비교·분석하였는데, Chou et al(1995)은 EOF방법을 사용하여 습도자료를 추정해서 월평균 잠열속을 추정했다. 그들의 결과에 있어서, 잠열속은 BIAS가 $20 \sim 60 \text{W/m}^2$ 의 범위로 나타났다. 이와는 달리, 본 연구에서는 월평균 잠열속의 BIAS가 14.6W/m^2 이고 본 연구의 오차는 Chou et al(1995)의 오차보다 훨씬 더 작았다. 그리고, Konda et al(1996)은 잠열과 현열사이의 보엔비를 이용하여 위성자료로부터 열속을 추정했는데, 그들은 본 연구

에서의 값보다 훨씬 높은 열속을 추정했다. 또한, Jang et al(1999)은 SSM/I와 MCSST의 위성자료를 이용하여 한반도 주변의 현·잠열속을 추정했는데 이 결과 역시 본 연구에서 추정한 값보다 더 높은 값을 나타내었다. 특히, 현열 추정에서 본 연구의 방법으로 추정된 값은 Konda et al(1996)와 Jang et al(1999)의 결과에 비해 상당히 작은 오차에 접근했음을 보여주었다.

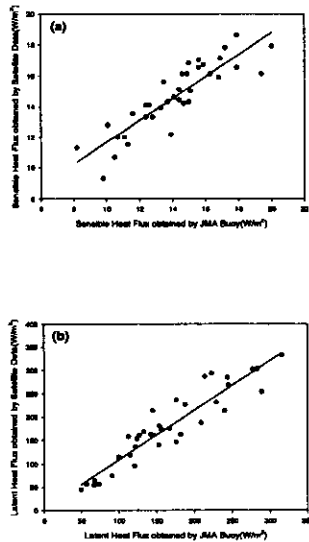


Fig. 4. Comparison of (a) Sensible Heat Flux, (b) Latent Heat Flux derived from satellite data with that from JMA buoys.

IV. 결론 및 요약

위성에서 직접 관측할 수 없는 해수면 위의 기온을 추정한 결과 본 연구에서는 buoy 자료로부터 얻어진 SST와 기온사이의 선형 회귀식을 이용한 SA법으로부터 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그 값은 BIAS가 0.28°C이고 RMSE는 1.5°C, 그리고 상관계수도 0.98로서 아주 좋은 값을 얻을 수 있었다.

또한 해수면 위의 비습(Q)을 추정하기 위해 buoy 자료의 수증기압(E_a)과 기온간의 비선형 회귀식의 훌륭한 관계로부터 3차다중함수를 얻은 후 Schlüssel et al(1995)에 의한 SSM/I 경험식으로부터 얻은 값과 비

교·분석하였다. 이 결과 역시 수증기압과 기온간의 비선형 회귀식으로 분석한 값이 BIAS(-1.42g/kg)와 RMSE(1.75g/kg) 모두 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

또한 한반도와 일본 주변의 현·잠열속 추정에 있어서도 월평균 잠열속과 현열속의 RMSE 값은 각각 32.5W/m²과 2.8W/m²으로 나타났고, 이 값들은 Chou et al(1995), Konda et al(1996), 그리고 Jang et al(1999)이 발표한 현·잠열속보다 훨씬 더 작은 오차이다.

자료의 기간이 짧아서 새로운 방법을 통해 얻어진 해수면 위의 기온과 비습, 열속의 기후학적 변동성은 규명할 수 없었지만, 장기간의 자료가 모아지면 연변동성을 분석하여 전지구상의 해양 기상 인자 및 열속 등에 관해서 더욱 더 심도있게 연구할 수 있을 것으로 생각되며, 앞으로 본 논문에 의해서 추정된 해수면 위의 기온과 비습을 통한 열속 추정은 ENSO의 연구, 대기 및 해양 순환의 이해, 대기·해양 순환 모델의 개선 등에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Chou, S. H., R. M. Atlas, C. L. Shie, and J. Ardizzone, 1995: Estimates of surface humidity and latent heat fluxes over oceans from SSM/I data. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2405-2425.
- Dyer, A. J., and B. B. Hicks, Flux-gradient relationships in the constant flux layer, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 96, 715-721, 1970.
- Goodberlet, M. A., C. T. Swift, and J. C. Wilkerson, 1989: Remote Sensing of ocean surface winds with the Special Sensor Microwave/Imager. *J. Geophys. Res.*, vol. 94(C10), 14,547-14,555.
- Hsiung, J., 1986: Mean surface energy fluxes over the global ocean. *J.*

- Geophys. Res., 91, 10,585-10,606.
- Jang, J. D., Kim, Y. S., Kang, S. C, and Chung, H. S, 1999: Evaluation of Latent and Sensible Heat Fluxes over the Oceans around the Korean Peninsula Using Satellite Data. *J. Korean Meteor. Soc.*, 2, 29-34.
- Kim, Y. S. and R. Kimura, 1995: Error evaluation of the bulk aerodynamic method for estimating heat flux over the sea. *J. Korean Meteor. Soc.*, 31, 399-413.
- Konda, M., 1996: Air-sea heat flux near Japan determined by satellite observations(in Japanese), M. S. thesis, Kyoto Univ., Kyoto, Japan.
- Kondo, J., 1975: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Boundary Layer Meteorol.* 9, 91-112.
- Kubota, M. and Mitsumori, S, 1995: Sensible Heat Flux Estimated by using Satellite data over the North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*
- Liu, W. T., 1988: Moisture and latent heat flux variabilities in the tropical Pacific derived from satellite data. *J. Geophys. Res.*, 93, 6749-6760.
- McClain, E. P., W. G. Pichel, and C. C. Walton, 1985: Comparative Performance of AVHRR-Based Multichannel Sea Surface Temperature. *Journal of Geophysical Research*, 92, 11,587-11,601.
- Roland et al, 1995: "Meteorology Today for Scientist and Engineers", West Publishing Company, p. 164
- Schlüssel, P., L. Schanz, and G. Englisch, 1995: Retrieval of latent heat flux and lonwave irradiance at the sea surface from SSM/I and AVHRR measurements. *Adv. Space Res.*, 16, 107-116.
- Shibata, A. and Konda, M., N., 1996: A new method to determine near-sea surface air temperature by using satellite data. *J. Geophys. Res.*, 101, 14,349-14-360
- Talley, L. D., 1984: Meridional heat transport in the Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 231-241.
- Thadathil, P., A. Shikauchi, Y. sugimori, and M. Kubota, 1993: A statistical method to get surface level air-temperature from satellite observations of precipitable water, *J. Oceanogr.*, 49, 551-558.