

제주도 북부해역 해양표면열수지의 계절변동

양성기 · 이병걸

제주대학교 해양토목공학과

The Characteristics of Seasonal Variations of Sea Surface Heat Flux in Northern Cheju Island

Sung-Kee Yang and Byung-Gul Lee

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

To investigate seasonal variations of sea surface heat flux in 1995 and 1996, we calculated the sea surface heat flux based on Elliott's model(1991) using the oceanic and meteorological data given by Marine Research Institute, Cheju National University. The calculated results showed that the plus heat flux happened during summer(June, July, August) while the minus one in winter(December, January, February). The minus value changed to the plus one during spring. However plus value changed to the minus one during autumn. And during observation periods from 1995 to 1996, the averaged minus heat flux was larger than the plus one. It can be explained that the heat flux in Cheju Island are strongly related to the warm current system near Cheju Island.

Key words : sea surface heat flux, the plus heat flux, the minus heat flux, warm current system.

서 론

제주도는 사면이 바다로 둘러싸여, 우리나라의 수산 해양·기상학적으로 매우 중요한 해역에 위치할 뿐만 아니라, 최근에 이르러서는 경제, 통신, 군사학적 측면에서도 그 중요도가 점차 높아지고 있다(양의 3인, 1992). 이러한 제주도의 해양 및 기상요소 중에서 해양의 열수지를 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 왜냐하면 열수지를 파악함으로써 해양에서 대기로의 에너지 전달과정과 역으로 대기에서 해양으로의 에너지 전달과정을 동시에 파악할 수 있을 뿐만 아니라 외해역과 연안해역사이의 해수교환정도를 파악할 수 있기 때문이다.

특히 제주도가 위치하고 있는 동중국해는 한냉기에는 현열 및 잠열 속의 방출을 통해서 대기에 열량을 공급하고, 온난기에는 고온 다습의 남풍이 강하게 불어 해면 온도와 기온의 차가 작아져서 대기로부터는 현열과 잠열이 현저히 작아지

로 해양이 대기로부터 획득하는 순열속이 증가하는 특징이 있다(김·양, 1995). 이러한 위치에 있는 제주도의 기상에 관한 연구로는 김·양(1995)이 제주도 북부 해역의 동계 및 하계때의 열수지 변동의 특성에 관하여 연구한바 있으며, 양(1995)이 해표면의 수온, 기온, 열수지의 월별변동과 해양과의 관계를 연구한 바 있다. 이들의 연구에 따르면, 1993년 하계의 경우는 북태평양 고기압의 발달이 미약하고 오호츠크 고기압이 강하게 발달하여 저온·다우의 해였고, 1994년 하계는 이와 반대로 북태평양 고기압의 세력이 평년치 이상으로 발달하여 고온·소우의 해였음을 밝혔다.

지금까지의 연구는 주로 열수지의 년변동에 관한 연구를 수행하여, 월변동 혹은 년변동과 같은 장주기변동에 중점을 두었으므로 대규모 해수순환이나 해양 대기 상호작용에 초점을 맞추었으나, 매일 또는 매월의 단기적인 열수지가 어떻게 변동되는가에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 1995년 6월부터 96년 5월까지의 제주도 북부 연안 함덕 제주대 해양연구소(AWS : Automatic Weather Station)에서 매시간 관측된 기상 및 해양자료를 이용하여 열수지 일변동과 월변동 및 계절변동에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이러한 연구는 제주도 북부해역의 열수지의 연속적인 매일의 단기변동 뿐만 아니라 열수지의 미세변동을 파악할 수 있다. 또한 미세하고 소규모적인 열수지 변동을 밝힘으로써 매일의 해양변동이나 단기적인 해양변동을 밝힐 수 있는 근거를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

자 료

제주도 북쪽 해안 중앙부 함덕에 위치하고 있는 제주대학교 해양연구소(위치는 Fig. 1 참조)의 해상 기상 종합기록장치(Auto matic Weather System, ANDERRA사)에서 관측된 1995년 6월부터 1996년 5월까지의 수온, 풍속, 상대습도, 해면기압 자료와 관측소로부터 약 10km정도 떨어진 제주도 지방기상대의 순복사량, 기온, 운량 등의 자료를 이용하여 해양표면 열수지를 계산하였다.

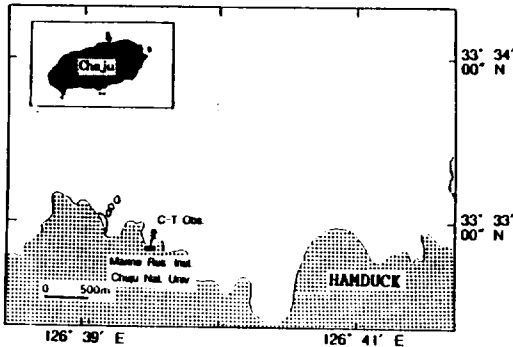


Fig. 1. Ocean and Atmospheric Data Station of Marine Research Institute, Cheju National University.

열수지 방정식

해양표면열수지(Q_T)는 기본적으로 태양으로부터의 단파복사(Q_s), 해면으로부터의 장파복사(Q_l), 기온과 수온차에 의한 현열복사(Q_n), 해면의 상변화에 의한 잠열복사(Q_w)항으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다(Elliott & Clark, 1991).

$$Q_T = Q_s - Q_l - Q_w - Q_e \quad (1)$$

여기서 Q_T 를 파악함으로써, 해양에서 기상으로 혹은 기상에서 해양으로 어느정도의 열에너지가 교환되었는가를 파악할 수 있다.

단파복사(incoming short wave radiation)

단파복사는 알베도를 이용하여 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$Q_s = Q(1 - \alpha) \quad (2)$$

여기서 α 는 알베도로서 0.06이 사용되었다. Q 는 관측된 태양복사에너지를 나타낸다.

장파복사(long wave radiation)

장파복사(Q_l)는 Budyko의 실험식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_l = \sigma T_a^4 (0.39 - 0.05e_a^{1/2}) (1 - 0.6CL^2) + 4\sigma T_a^3 (T_w - T_a) \quad (3)$$

여기서 s 는 0.985, T_s 는 273+기온, T_w 는 273+수온을 나타낸다. σ 는 Stefan's 상수로서 5.7×10^{-8} , $W m^{-2} K^{-1}$ 로 주어지며, CL 은 운량을 나타낸다.

현열복사(sensible heat flux)

현열복사(Q_n)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Yanagi, 1981)

$$Q_n = \rho_a C_p C_H (t_a - t_w) W \quad (4)$$

여기서 ρ_a 는 해수밀도, C_p 는 비열을 말하며, C_H 는 Stanton number를 말한다. t_a 는 기온, t_w 는 수온, W 는 풍속을 나타낸다.

잠열복사(evaporative heat flux)

잠열복사(Q_w)는 다음의 식을 이용하였다. (Yanagi, 1981).

$$Q_w = \rho_a LC_E (e_w - e_a) W \quad (5)$$

여기서 $L = 2.5 \times 10^6 - 2.3 \times 10^6 t_w$ 이다. 그리고 e_w , e_a 는 다음식으로 구해진다.

$$e_x = \frac{0.622E_x}{(P-0.38E_x)}, \quad e_a = \frac{0.622E_a}{(P-0.38E_a)}$$

E_x 와 E_a 는 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$\log_{10} E_x = (0.7859 + 0.03477t_x) / (1 + 0.00412t_x)$$

$$E_a = RHE_x$$

여기서 RH는 상대습도를 나타내며, C_E 는 Dalton number 이다.

이상의 식들을 이용하여 열수지를 일별, 월별로 계산한 후 해양과 기상과의 열교환 관계를 밝히고자 한다.

결과 및 고찰

6, 7, 8월(하계)의 복사에너지 변동특성

Fig. 2는 식(1), (2), (3), (4), (5)식을 이용하여 계산된 6, 7, 8월의 해양표면열수지, 단파복사, 장파복사, 현열복사, 잠열복사를 계산한 결과를 나타낸 그림이다. 6월의 열수지변동을 살펴보면 해양표면열수지는 6월 1일부터 30일까지 모두 양의 수를 나타내고 있다. 이 결과는 대기로부터 해양으로 열에너지의 유입을 나타내는 특성을 보여주고 있는 것이다. 해양표면열수지는 주로 단파복사에 의하여 거의 좌우됨을 알 수 있다. 이에 반해 장파복사, 현열복사, 잠열복사는 매우 작은값을 나타내고 있어 해양표면열수지변동에 그다지 많은 영향을 주지 않는 것으로 사료된다. 7월의 경우 6월과 비슷한 양상을 보이고 있으나, 전반적으로 높은 해면열수지를 나타내고 있다. 그리고 특히 주목되는 것은 잠열이 6월에 비해 높은 값을 보여 주고 있는데 이는 해면으로부터 해수증발에 의하여 해면에서 대기로의 에너지 전달이 강하게 일어나고 있음을 시사하고 있다. 8월은 6월 및 7월과 비슷한 경향을 보여주고 있어, 전반적으로 일정하게 높은 열수지를 보여주고 있으며 잠열복사도 비교적 일정하게 높게 나타나고 있다. 그리고 현열의 경우 거의 0의 값을 나타내어 대기와 해양간의 온도차에 의한 열교환이 약함을 알 수 있다.

9, 10, 11월(추계)의 복사에너지 변동특성

Fig. 3은 9, 10, 11월의 복사에너지들의 변동특성을 나타낸 그림이다. 우선 9월 열수지변동을 살펴

보면 해양표면열수지가 부분적으로 음의 값을 나타내고 있어, 해양과 대기상호간의 에너지가 서로 영향을 주고받는 경향을 보여 주고 있어서, 해양·대기상호작용이 상당히 불안한 형태를 보여 주고 있다. 즉 9월부터는 하계에 발생된 대기에서 해양으로의 열이동이 서서히 해양에서 대기로의 열에너지의 이동이 시작되는 시기임을 알 수 있다. 이 기간 동안 해양표면열수지는 여전히 단파복사가 다른 복사에너지에 비해 영향을 많이 주고 있음을 알 수 있다. 10월은 해양표면열수지가 음의 값으로 상당히 진전되어 있음을 알 수 있다. 즉 해양에서 대기로의 열이동이 강하게 일어나기 시작함을 알 수 있다. 그리고 대부분 단파복사의 영향을 받으나 잠열에 의한 영향도 상당히 강함을 알 수 있다. 즉 현열복사를 제외한 장파복사, 잠열, 현열의 영향이 복합적으로 영향을 주는 시기임을 알 수 있다. 11월은 해양표면열수지가 모두 음의 값을 나타내고 있어서 본격적으로 해양에서 대기로의 열이동이 일어남을 알 수 있다. 그리고 이러한 해양에서 대기로의 열이동은 현열, 잠열, 단파복사보다는 잠열의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

12월, 2월(동계)의 복사에너지 변동특성

Fig. 4는 12, 2월의 복사에너지의 변동특성을 나타낸 그림이다. 12월은 해면열수지가 거의 -200 W/m^2 에 도달하고 있다. 이것은 8월의 해양표면열수지와 거의 상반된 위상값을 나타내고 있어서, 8월과 12월이 가장 극단적인 반대 위상차를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 여기서 주목되는 것은 장파복사에 의한 해면의 열손실이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 하계에 가장 탁월하게 나타난 단파복사에 의한 해면 열손실이 12월에는 매우 적어 태양에너지로부터의 열에너지가 해수면 열수지에 매우 적은 영향을 줌을 알 수 있다. 2월은 해양표면열수지가 전반적으로 음의 값을 강하게 나타내고 있으나, 부분적으로 양의 값을 나타내어 서서히 대기로부터 해양으로의 에너지 전달이 시작되고 있음을 알 수 있다. 이와함께 태양에너지가 점차 강해짐에 따라 단파복사에 의한 영향이 점차 강해지고 있다. 그리고 부분적으로 잠열에 의한 영향이 상당히 큼이 주목된다.

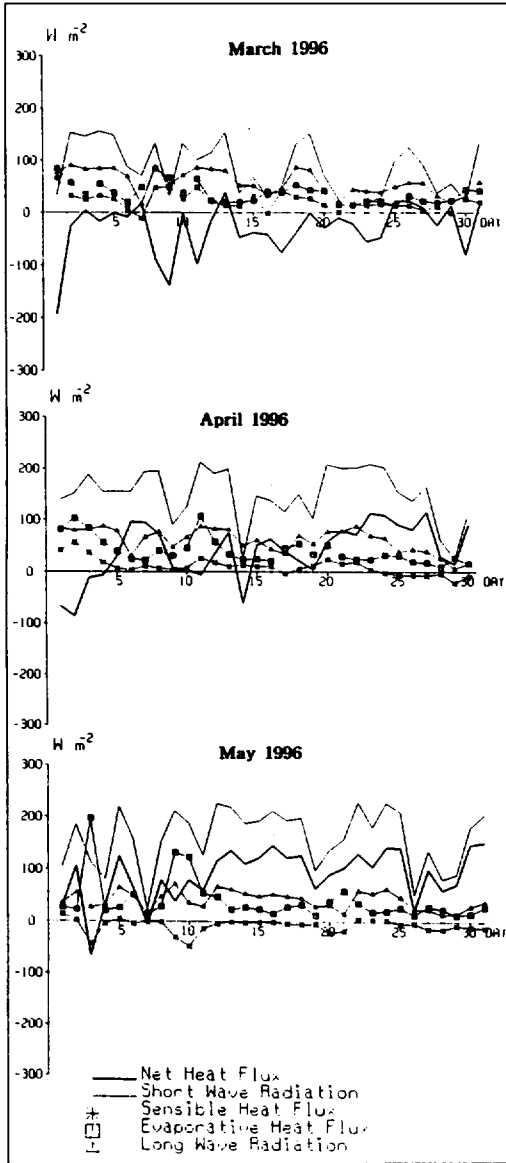


Fig. 2. Daily Heat Flux Variations of June, July and August in 1995.

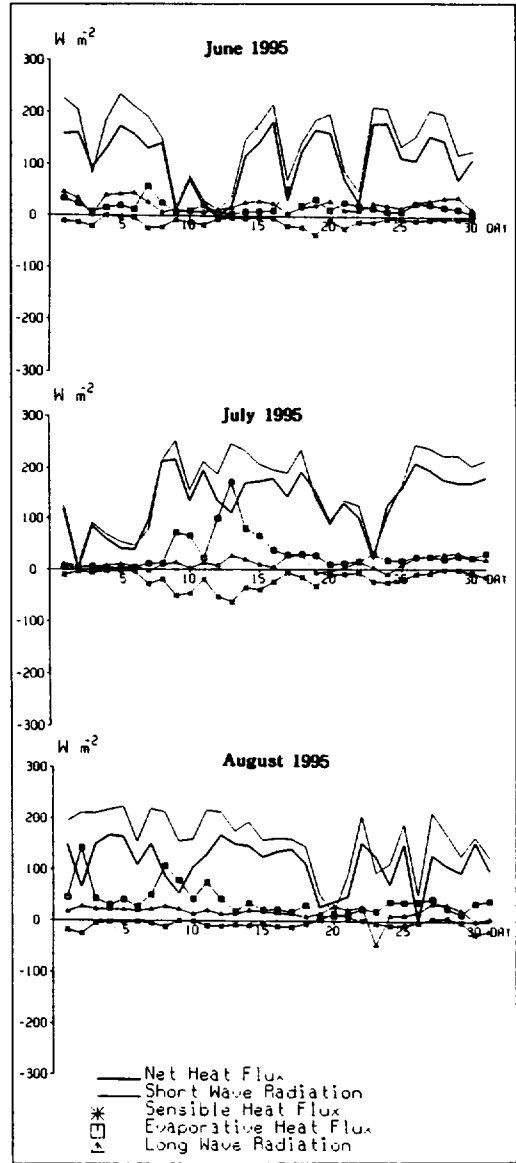


Fig. 3. Daily Heat Flux Variations of September, October and November in 1995.

3, 4, 5월(춘계)의 복사에너지 변동특성

Fig. 5는 3, 4, 5월의 복사에너지의 변동특성을 나타낸 그림이다. 3월은 음의 값과 양의 값이 반복되어 나타나 대기와 해면상호관의 에너지 교환이 거의 같은 비율로 전과됨을 알 수 있다. 그리고 단파복사가 해면열수지의 변동에 점차 영향을 많

이 줄을 알 수 있다. 잠열에 의한 영향도 매우 강한 영향을 미치고 있다. 따라서 해수증발에 의한 복사 에너지손실이 상당히 발생하고 있음을 시사하고 있다. 4월은 해면이 에너지 손실이 거의 양의 값을 나타내고 있어서 4월 중순이 후는 열수지가 대기에서 해양으로 전과되고 있는 양상을 띄고 있다. 그리고 장파복사 및 잠열복사에 의한 에너지

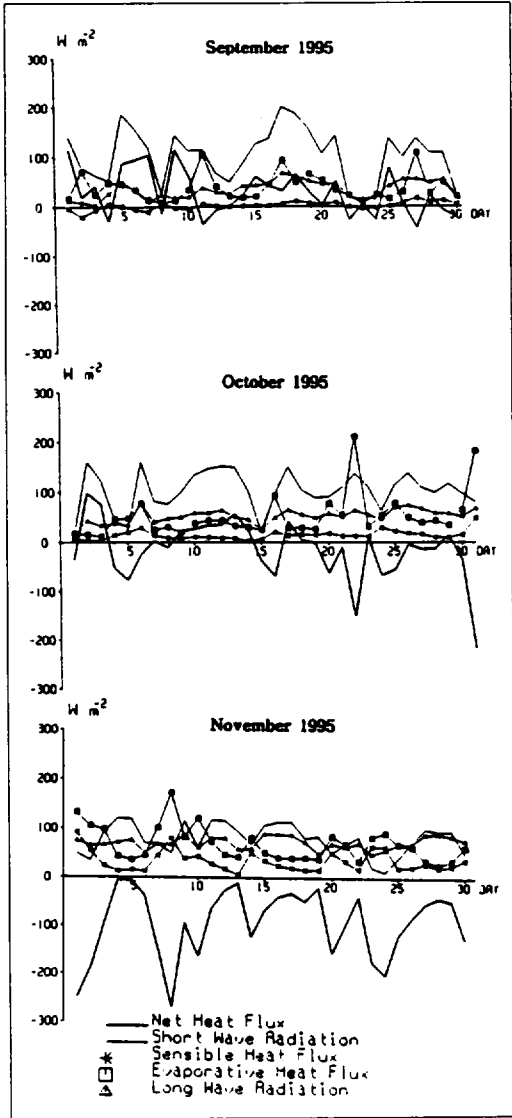


Fig. 4. Daily Heat Flux Variations of December in 1995 and February in 1996.

손실이 큼을 알 수 있다. 이에 비해 현열복사에 의한 에너지 손실이 매우 적게 나타났다. 5월은 해양표면열수지가 양의 값으로 월초이후에는 양의 값으로 바뀌었으며, 이러한 에너지의 변동은 거의 태양에너지에 의한 단파복사에너지에 의하여 좌우됨을 알 수 있다. 그리고 기온과 수온차에 의한 현열복사는 거의 0에 가까운 기온과 수온의 값이 거의 비슷함을 나타내고 있으며, 주로 잠열과 장파복사에너지에 의한 해면 열손실이 발생함을 알 수 있다.

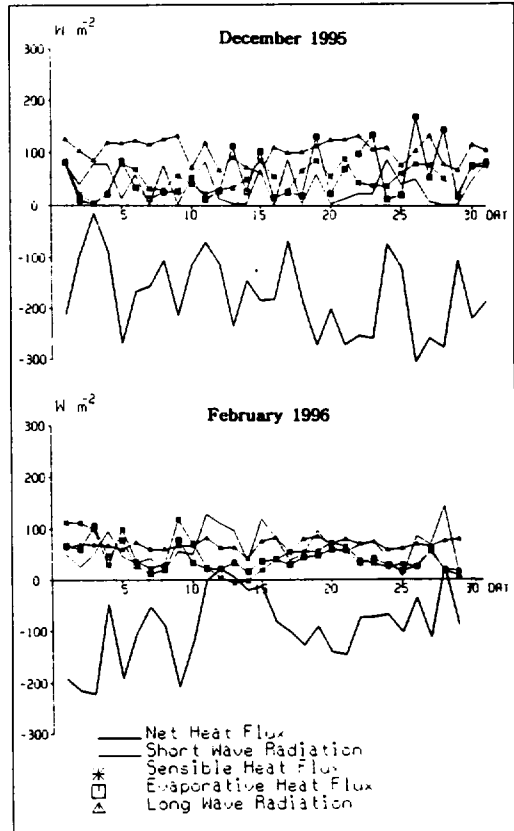


Fig. 5. Daily Heat Flux Variations of March, April and May in 1996.

계절별 복사에너지의 변동특성

지금까지 계산된 95년 6월부터 96년 5월까지의 일변동 열수지 해면열수지, 단파복사, 장파복사, 현열복사, 잠열복사를 각각의 월에 대하여 각각 평균하여 Fig. 6에 나타내었다. 관측되지 않은 96년 1월은 95년 12월과 96년 2월의 값의 평균을 취하여 계산하였다.

우선 해수면 열수지를 살펴보면, 4, 5, 6, 7, 8, 9월 중순까지는 양의 열수지를 나타내고 있는 반면 9월 하순, 10, 11, 12, 1, 2, 3월은 음의 열수지를 나타내고 있다. 따라서 양의 열수지를 나타내는 4-9월 중순까지는 열에너지가 대기에서 해양으로 전파되는데 비해 10-3월까지는 열에너지가 해양에서 대기로 전파된다. 단파복사 즉 태양에너지는 8월에 최대치를 보인 후 12월과 1월에 최저치를 보이고 있음을 알 수 있다. 4월과 5월이 상당히 높

요약 및 결론

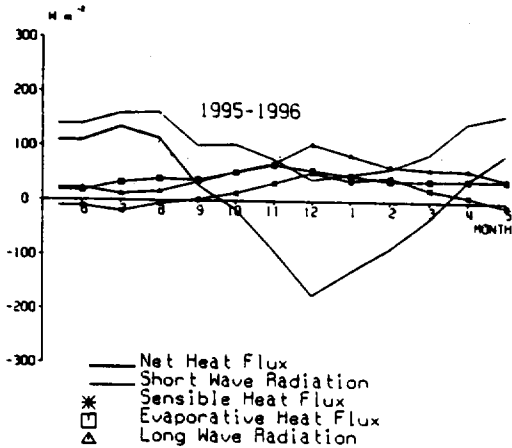


Fig. 6. Monthly Mean Heat Flux Variations in 1995 and 1996.

은값을 나타내는데 이는 구름이 없는 청명한 날이 계속되었기 때문으로 사료된다. 장파복사 해면에 투과된 열에너지가 반사되어 대기로 나가는 열에너지로써 장파복사는 동계인 12월에 최대를 나타내고 춘계와 추계에 가장 낮게 나타났다. 잠열복사는 바람이 강한 동계인 11, 12, 1월에 최대를 나타내어 바람에 의한 해면의 에너지 손실이 강하게 나타남을 알 수 있다. 그리고 주로 해양과 대기의 온도차에 의하여 발생하는 현열복사는 상대적으로 다른 복사에너지에 비하여 적은값이지만 동계인 12월과 1월이 최대이고 춘계인 5, 6, 7, 8월이 최소를 나타내고 있다. 이는 춘계와 하계에는 수온과 기온차가 다른 계절에 비하여 비교적 적음을 나타낸다.

이러한 결과를 미루어 볼 때 제주해역의 열수지는 단파복사, 장파복사, 잠열복사에 의하여 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 특히 주목되는점은 대기에서 해양으로의 에너지는 3월 중순부터 9월까지의 대기에서 해면으로의 열에너지전달이 되며, 9월 중순부터 3월초순까지는 해양에서 대기로의 열에너지가 전달됨을 나타내고 있다. 그리고 양적인 변동을 보면 해면에서 대기로의 열에너지가 나타나는 음의 값은 110W/m^2 인 반면 대기에서 해양으로의 열에너지는 100W/m^2 로서 해양에서 대기로의 열에너지가 대기에서 해양으로의 열에너지보다 많이 발생된다. 이는 제주해역의 따뜻한 해류계가 대기로의 에너지 전달에 많은 영향을 미치고 있음을 시사하고 있다. 이러한 결과는 양 등(1995)이 우리나라 주변의 동해, 황해 및 동중국해는 해양운반열의 계절변동이 크다는 연구결과를 뒷받침해주는 것으로 사료된다.

제주도 북부연안에 위치한 함덕에서 95년 6월부터 96년 5월까지 관측된 수온, 습도, 바람 등의 기상자료와 제주도기상대의 태양복사에너지값 등을 이용하여 1년동안의 열수지의 일변동, 월변동, 계절변동 등에 대하여 연구분석하였다. 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 해양표면열수지는 춘계(3월, 4월, 5월)는 음의 값에서 양의 값으로 변동하는 특성이 있으며, 주로 현열복사에너지와 잠열복사에너지에 의하여 영향을 받는다.
2. 하계(6월, 7월, 8월)은 열수지가 거의 양의 값을 나타내며, 주로 단파복사에너지에 의하여 에너지 변동이 좌우된다.
3. 추계(9월, 10월, 11월)은 열수지가 양의 값에서 음의 값으로 변동하며, 단파복사와 잠열복사, 장파복사 등에 의하여 좌우된다.
4. 동계(12월, 1월, 2월)는 다른계절과는 달리 단파복사보다는 주로 장파복사, 잠열복사, 현열복사에 의하여 복사에너지의 값이 좌우된다.
5. 해면열수지의 값이 해양에서 대기로의 전파되는 복사에너지가 대기에서 해양으로 전파되는 복사에너지값보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 제주해역에 쓰시마해류와 같은 따뜻한 해류의 유입으로 인해 대기로부터 에너지 공급이 발생되기 때문인 것으로 사료된다.

참고 문헌

양성기 · 노홍길 · 손태준 · 박원배(1992) : 제주도 연안해역의 해황 및 기상이 어획생산량의 변동에 미치는 영향. 제주대학교 논문집 34, 51~76.

김해동 · 양성기(1995) : 제주도 북부해역의 표면 열수지 해석-1993년과 1994년 하계의 경우-. 한국환경과학회지 4(3), 197~206.

양성기 · 김해동 · 최찬문(1995) : 제주도 함덕 연안해역의 해황 기상의 계절변동에 관한 연구. 제주 대학교 해양연구소 연구보고 19, 1~10.

Yanagi, T.(1981) : Heat Budget of Uwajima Bay, Umi to Sora 58, 13~20 (in Japanese).

Elliott, A. J. and T. Clark(1991) : Seasonal Stratification in the Northern European shelf seas. Continental Shelf Research 11(5), 467~492.