

ORIGINAL ARTICLE

낙동강 구미 보의 수면 열수지 계절 변화

김학윤 · 서광수¹⁾ · 조창범²⁾ · 김해동*

계명대학교 지구환경학과, ¹⁾부산대학교 지구과학교육과, ²⁾국립기상과학원 응용기상연구과

Seasonal Variation of the Surface Heat Budget in the Gumi Reservoir of Nakdong River

Hak-Yun Kim, Kwang-Su Seo¹⁾, Chang-Bum Cho²⁾, Hae-Dong Kim*

Department Of Global Environment, Keimyung University 42601, Korea

¹⁾Department of Earth Science Education, Pusan National University 46241, Korea

²⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, KMA, 63568, Korea

Abstract

The heat budget is investigated in the Gumi Reservoir of the Nakdong river. In warm climate season, solar radiation effects play a important role in the change of water temperature. The features of the surface heat balance are almost derived by the latent heat flux and the solar radiation flux. On the other hand, in cold climate season, change of heat stored in the water is mainly dominated by latent and sensible heat transfer between water and air, since flux of solar radiation and loss of outgoing long wave radiation balance approximately. For the annual averages, net flux of radiation, evaporation(latent heat) loss are dominant in the Gumi reservoir. The evaporation losses are dominant from spring to early winter. This means that the Gumi reservoir rolls like a lake of thermal medium or deep depth.

Key words : Warm climate season, Cold climate season, Evaporation loss, Heat budget

1. 서론

지표면에 도달한 태양복사에너지는 다양한 열적 변환과정을 거쳐서 최종적으로는 장파복사가 되어 우주로 빠져 나간다. 태양복사에너지가 지표면에 흡수되어 열에너지로 전환되면, 그 열에너지는 다시 현열과 잠열로 변환된다. 이 때 지표면의 종류와 상태, 풍속과 기온 등의 기상조건에 따라서 에너지가 분배되는 비율이 달라지며, 그에 따라 대기에 작용하는 열적 효과가 달라진다(Kondo, 1999). 예로서 건조한 지표

면이 넓게 분포한 지역이라면 현열 수송량이 많아져서 기온상승이 발생하고 기압의 공간적 차이가 생긴다. 그 결과로 바람의 순환이 발생하고 그에 따른 각종 기상현상이 유발된다. 즉, 주어진 지역에 대한 열수지 해석은 그 지역에서 발생하는 열적, 역학적 현상을 이해하는 데에 출발점이 된다(Kondo, 1999). 수역 내에서의 수온구조와 연직 순환장의 메커니즘을 이해하는 데에도 수면을 통한 열 플럭스의 유출입 관계의 파악이 대단히 중요하다(Kutswada and Shikama, 1988).

수면 상에서의 열수지 분석은 주로 해양을 대상으로

Received 21 January, 2016; Revised 7 March, 2016;

Accepted 18 March, 2016

*Corresponding author : Hae-Dong Kim, Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea
Phone : +82-53-580-5930
E-mail : khd@kmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

활발하게 수행되어왔는데(Morison and Niiler, 1998; Oort and Vonder, 1976; Scherbina et al., 2003), 이러한 연구들은 주어진 해역에서 얻어진 장기간의 관측 자료를 분석하여, 대기-해양 간의 열수지를 통해 남겨진(또는 부족한) 열이 해류에 실려 수송(또는 보충)되는 과정을 해석하는 것에 초점이 맞춰져 있다. 해양에서의 열수지와 달리 육상의 호소나 하천에서의 열수지 연구는 대부분이 단기간 동안에 수행된 특별 현장 관측 자료를 이용한 열수지 해석이 대부분이고 장기간에 걸쳐 관측된 자료를 분석한 열수지 관계를 다룬 연구는 찾아보기가 어렵다(Kai and Haginoya, 2014; Lee et al., 2013). 최근에 Kim et al.(2013)은 강정(고령)보를 교외 지역으로 하여 대구의 도시열섬 강도를 분석하여, 수면 지역이 교외인 경우의 도시열섬강도의 시간변화 특성을 조사한 바 있다. 그 결과로서, 그들은 강정(고령)보의 여름철 낮 동안의 강한 증발효과로 인하여 대구 서부지역의 최대 도시열섬강도가 겨울철 야간이 아니라 여름철 한낮에 나타난다고 지적하였다. 또 Kim et al.(2015)은 2013년 하계에 낙동강의 강정(고령) 보에서 집중 관측된 자료를 이용하여 보의 열 저장량을 평가한 바 있다. 그러나 4대강 사업 이후의 보 건설 수역을 대상으로 다년간의 관측 자료를 이용하여 열수지 계절변동특성을 평가한 연구는 수행되지 않았다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 4대강 사업으로 건설된 낙동강 구미 보의 수면 상에서 관측된 최근 2년간의 각종 기상요소와 수온자료를 이용하여 수면 상의 열수지에 관계하는 각 열 플럭스 성분을 산출하여 그들의 연간 변동특성을 조사해 보고자한다. 이 연구를 통하여 4대강 사업으로 건설된 보의 열적인 역할을 평가해 볼 수 있을 것이다. 다만 보 건설 이후에 축적된 자료가 2년여에 불과하여 기후학적 특성을 논의하기에는 기간이 짧다는 한계가 존재하는데, 이런 문제는 장래 많은 자료가 축적되어야 해결할 수 있는 문제이다. 또 이들 보 내에서 수심별 수온자료가 연중 연속적으로 관측되고 있지 않기 때문에 열 저장량의 평가는 열수지관계의 잔차 향으로 평가하여야 하는 한계도 존재한다.

2. 자료와 방법

2.1. 자료

국립기상과학원에서는 4대강 사업으로 구미 보가 준공된 이래로 지금까지 구미 보의 상·하류의 수온과 각종 기상요소를 관측해 오고 있다(Fig. 1). 이들 자료 중에서 2013년 4월1일부터 2015년 3월 31일까지 최근 2년간의 자료를 이용하여 구미 보의 수면 열수지를 평가해 보고자 한다. 그리고 열수지 계산에서 요구되는 일사량과 운량자료 및 강수시간은 구미 보에서 가장 가까운 기상관측소인 대구기상지청의 자료를 이용하였다.

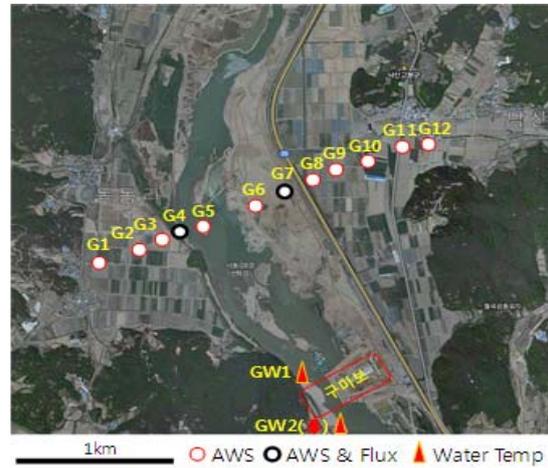


Fig. 1. Observation stations over the Gumi reservoir.

2.2. 연구 방법

수면 상에서 대기와의 열 교환 과정으로 성립하는 열수지 관계를 정리하면 Fig. 2와 같다.

즉, 수면은 태양복사에너지 $((1-\alpha)S)$ 와 대기 장파복사에너지 (L) 를 흡수하고, 현열 (H) , 잠열 (LE) 및 지구 장파에너지 $(\epsilon\sigma T_s^4)$ 의 형태로 대기 중으로 에너지를 재 방출한다. 그리고 남은(부족한) 에너지는 수중 저장열 (G) 로 저장(방출)되거나 강의 하류로 방출 (F) 된다. 이를 관계식으로 나타내면 다음과 같다. 구미 보에서 수심에 따른 수온자료는 관측되고 있지 않기 때문에 수중 저장 열과 하류로의 방출을 직접 계산할 수가 없었다. 그래서 이들 2개 항을 잔차 향으로 처리하였다.

$$(1-\alpha)S + L = H + lE + G + \epsilon\sigma T_s^4 + F \quad (1)$$

여기서, α 는 수면의 알베도인데 Kondo and Miura (1985)를 따라서 중위도 지역의 8월 평균 값인 6%를 가정하여 사용하는 경우가 많다(Kim et al., 2015). 하지만 수면 도달 일사에 대한 알베도는 계절에 따른 차이가 있는 것으로 알려져 있어서, 이 연구에서는 Ishizaki and Saito(1978)에 의해 제안된 값을 사용하였다(Table 1). S 는 수면도달 일사량, L 은 대기 장파복사량, H 는 현열, lE 는 잠열, G 는 수중 저장 열 그리고 $\epsilon\sigma T_s^4$ 은 지면에서 대기 중으로 방출되는 지구장파복사에너지이다. 여기서 수면의 방출율 ϵ 은 Brutsaert (1982)를 따라 0.97을 사용하였다.

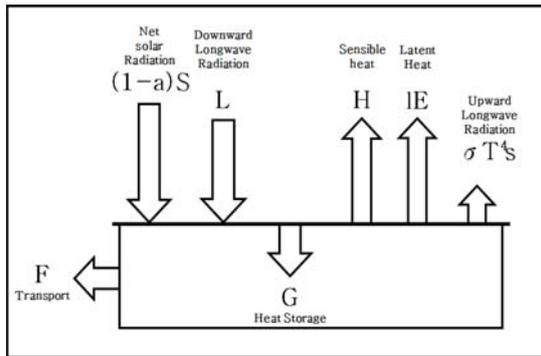


Fig. 2. Conceptual diagram on the heat budget relation over water surface.

대기 장파복사량(L)은 Kondo(1994)를 따라서 다음과 같이 계산하였다.

$$\frac{L}{\sigma T_a^4} = 1 - (0.49 - 0.066 \times e^{0.5})(1 - n \times C \times h) \quad (2)$$

여기서, C 와 h 는 (3)과 (4)로 주어진다.

$$C = 0.75 - 0.005 \times e \quad (3)$$

$$h = [(n_1 + 0.85 \times n_2 + 0.5 \times n_3)/n] + 0.1 \times N_r/N \quad (4)$$

여기서, e 는 일평균의 수증기압(hPa)인데, 아래에서 제시하는 Teten의 방법으로 구하였다. 그리고 N_r/N 은 하루 중에서 강수가 지속된 시간, n , n_1 , n_2 , n_3 는 각각 전운량, 하층, 중층 및 상층운량이다. 중층운과 상층운 자료의 부족을 해결하기 위하여 Ishi and Kondo(1993)는 아래의 근사 관계를 제안하여 적용하였다. 그러나 우리나라 기상청에서는 중하층운량과 전운량만을 측정하므로 이 근사식을 그대로 이용할 수 없다. 본 연구에서는 전운량과 중하층운량의 차를 상층운량으로 적용하고, 중하층운량에서 하층운량과 중층운량을 같은 값으로 간주하였다. 대기 장파복사량에 관한 Kondo(1994)의 근사식에서 임의의 중하층운량에 대해 하층운량과 중층운량 값에 따른 차는 대기 장파복사량의 1~2%에 불과하여 이에 따른 오차는 크지 않다.

$$n_2 = n_3 = (n - n_1)/2 \quad (5)$$

$$N_r/N = 0 \quad \text{for } n_1 < 1 \quad (6)$$

$$= 0.5 \quad \text{for } n_1 = 1$$

현열과 잠열수송량은 bulk식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (7)$$

$$lE = l \rho \beta C_H U (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (8)$$

단, C_p 는 공기의 정압비열(1004 J/(kg·deg)), ρ 는 공기의 밀도(kg/m³) $C_H U$ 는 현열의 수송속도, l 은 증

Table 1. Monthly mean rates of absorption of the global solar radiation on the water surface, (1- α) (Ishizaki and Saito, 1978)

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1- α	0.92	0.93	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.92	0.90

발잠열($2.51 \times 10^6 J/kg$), β 는 지표면의 습윤도(증발 효율), T_s 는 지표면온도(K), T_a 는 기온(K), q_a 는 대기 중의 비습, $q_{sat}(T_s)$ 는 T_s 에 대한 포화비습이다. 비습의 계산은 Kim and Yang(1995)을 포함한 여러 연구에서 널리 사용하고 있는 Tetan의 공식으로 계산된 포화수증기압을 이용하였다. Tetan의 공식은 다소 복잡하여 사용이 불편한 Clausius-Clapeyron의 포화수증기압 계산식 대신에 보다 간단하게 사용할 수 있도록 만든 경험식이다(kim et al., 2003).

$$e_s = 6.11 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T_c}{T_c + 273 - 35.86}\right) \quad (9)$$

여기서, e_s 는 포화수증기압이고, T_c 는 기온에 대한 섭씨온도(°C)이다. 그리고 실제로 공기가 포함한 수증기가 나타내는 수증기압은 위에서 계산한 포화수증기압에 자동기상관측장치(AWS)에서 측정된 상대습도를 곱하여 구할 수 있다.

$$e = e_s \cdot RH \div 100 \quad (10)$$

여기서, e 는 수증기압(hPa), RH 는 상대습도(%)이다. 이렇게 구한 수증기압을 이용하면, 비습은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q \approx 0.622 \frac{e}{P} \quad (11)$$

여기서 P 는 대기압(hPa)이다. 열수지 계산에 이용된 기상관측자료는 일사량, 운량, 기온, 지표면온도, 대기압 및 대기의 상대습도이다. 그리고 수면 파라메타로는, 알베도(α), 현열의 수송속도($C_H U$), 수면의 습윤도($\beta=1$)이다.

3. 결과

3.1. 기온과 수온의 연 변화

관측 시스템의 구축 이래로 지난 2년간 얻어진 기상자료 중에서 구미 보에 가장 근접해 있는 G6 지점의 기온의 월평균 값을 Fig. 3에 나타내었다. 같은 기간에 관측된 구미기상대의 기온도 함께 나타내었다. G6 지점의 월평균 기온은 7월에 26.6°C로 가장 높았고, 1월에 -0.5°C로 가장 낮았다. 구미기상대의 기온과 비교해보면, G6 지점의 기온이 봄철(3-5월)에는 0.2-0.8°C, 가을철(9-11월)에는 0.3-0.6°C, 겨울철(12-2월)에는 0.8-1.2°C 낮게 나타났다. 그러나 여름철(6-8월)에는 G6 지점의 월평균 기온이 구미기상대보다 0.1-0.2°C 정도 더 높았다.

구미 보 상류 지점에서 관측된 수온(GW1)의 월평균 값을 Fig. 4에 나타내었다. 월평균 수온은 1월에 2.7°C로 가장 낮았으며, 8월에 27.8°C로 가장 높았다. 수온이 가장 낮은 달(1월)은 연중 기온이 가장 낮은 달과 일치하였지만, 수온이 가장 높은 달(8월)은 기온이 가장 높은 달(7월)보다 1개월 늦어서 구미 보의 높은 열용량에 따른 시간 지연이 나타남을 알 수 있다.

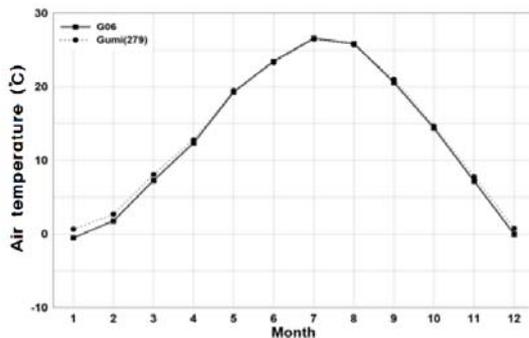


Fig. 3. Monthly mean air temperature observed at G6 observation sites and Gumi(279) station, respectively.

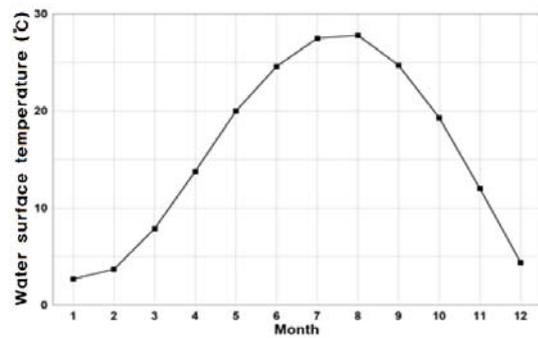


Fig. 4. Same as Fig. 3, but for the water surface temperature observed at GW1 observation site.

3.2. 열수지 각 항의 연 변화

Fig. 5에 수면 흡수 일사량 $((1-\alpha)S)$ 의 연 변화를 나타내었다. 5월에 21.2 MJ/day로 가장 높은 값을 보였고, 12월에 7.5 MJ/day로 가장 낮았다. 태양의 남중고도는 6월에 가장 높지만 운량이 많아 수면에 도달하는 일사량은 5월보다 작았다. 대구기상대의 관측 값에 따르면 월평균 전운량이 5월에는 약 0.4, 6월에는 약 0.7이었다.

Fig. 6은 장파복사량과 순복사량을 나타낸 것이다. 수면에서 방출되는 상향 장파복사량은 수면온도에 의해 결정되므로 수온과 같은 위상을 갖는 변화경향을 나타내었다. 즉, 상향 장파복사량은 8월에 451.7 W/m²로 가장 크고, 1월에 318.4 W/m²로 가장 작았다.

대기에서 방출되는 하향 장파복사량은 기온, 대기 중의 수증기량 및 운량에 의해 주로 변화한다. 따라서 기온, 수증기압 및 운량이 높은 7월에 하향 장파복사량이 412.6 W/m²로 가장 컸다. 1월에는 하향 장파복사량이 218.2 W/m²에 불과하였다. 그래서 일사량이 적은 11-1월에 걸쳐 순복사량은 음의 값을 나타내었다. 특히, 12월에는 순복사량이 -14.5 W/m²로 평가되어 지표면의 복사냉각이 가장 컸다. 봄이 되면서 순복사량은 급속히 증가하여 5월에 168.5 W/m²로 최대 값을 나타내었는데, 이것이 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 5월의 수온 상승 속도가 연중 가장 큰 원인이 된 것으로 판단되며 높은 순복사량은 8월까지 이어지고 수온도 지속적으로 상승하였다.

현열과 잠열 수송량을 Fig. 7에 나타내었다. 잠열

수송량은 봄부터 초가을(4-9월)까지 40 W/m² 이상으로 크고 겨울(1-2월)에는 약 20 W/m²로 작았다. 가을철에는 구미 보의 수온과 기온의 차는 컸지만 습도가 높고 풍속이 작아서 그 값이 작게 평가되었다. 10월의 경우, 수온(19.3℃)과 기온(14.4℃)의 차는 4.9℃로 가장 컸지만 평균 상대습도가 78% 이상으로 높아서 수면 포화비습과 대기 비습 차이가 작고(약 6.1 g/kg) 풍속도 1.7 m/s로 작아서 잠열 수송량이 작게 평가되었다. 반면 5월은 수온(20.0℃)과 기온(19.3℃)의 차는 작았지만 상대습도가 약 60%로 낮아서 수면 포화비습과 대기 비습의 차가 컸고(약 6.7 g/kg) 풍속도 2.4 m/s로 커서 잠열수송량이 55.8 W/m²로 연중 가장 크게 나타났다. 현열 수송량은 가을과 겨울철에 많고 봄과 여름철에 적었다. 특히, 봄철(3-5월)과 기온이 연중 가장 높았던 7월에 현열 수송량이 음으로 나타나 현열이 대기에서 물로 수송되었다. 12월은 수온과 기온의 차가 4.4℃로 크고 풍속도 2.8 m/s로 높아 현열 수송량이 18.0 W/m²로 연중 가장 컸다.

낙동강 구미 보 상류의 열 저장량과 수송량의 합(G+F)의 연간 변동량을 Fig. 8에 나타내었다. 이 값은 식(1)에 제시된 열수지 식의 잔차 항으로 구하였다. G+F의 값은 늦겨울부터 초가을까지 양의 값을 나타내어 열의 저장이 이루어지고 있음을 알 수 있다. G+F의 값이 열 저장량과 수송량의 합이 음으로 전환되는 시기는 10월이며, 음의 값은 다음 해 2월까지 이어졌다. 음에서 양으로 전환되는 시기는 2월 이후이며 10월까지 이어졌다. 양에서 음으로 전환되는 시기는

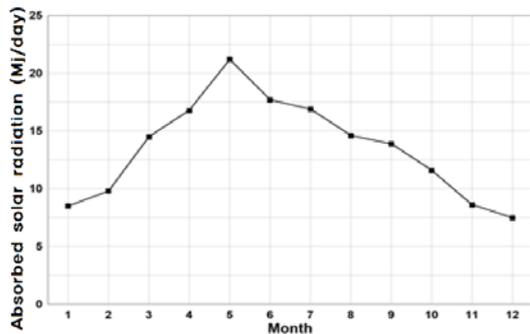


Fig. 5. Annual variations of net flux of short-wave radiation $((1-\alpha)S)$.

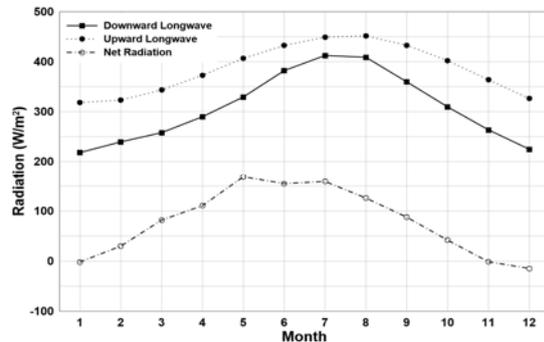


Fig. 6. Same as Fig. 5, but for net flux of long-wave radiation.

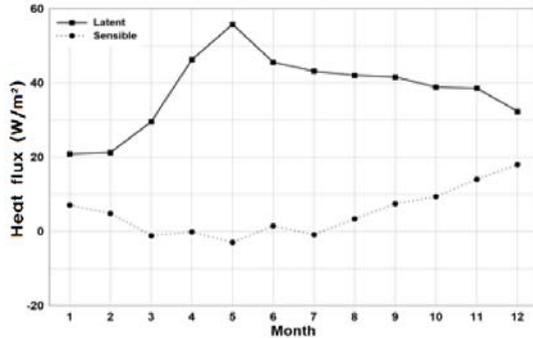


Fig. 7. Same as Fig. 5, but for latent and sensible heat transfer.

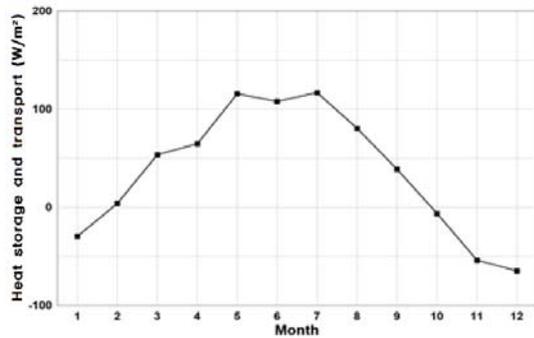


Fig. 8. Same as Fig. 5, but for changes in heat stored and transported in the water, G+F.

각각 수역 전체의 체적 평균 수온이 최저로 나타나는 시기 및 최고수온이 나타나는 시기와 일치하는 것으로 알려져 있다(Kondo, 1994). 그러나 본 연구에서는 G+F가 음에서 양으로 전환되는 시기가 GW1 지점 최저 표면수온보다 1개월 늦게, 양에서 음으로 전환되는 시기는 최고 표면수온 출현시기보다 2개월 늦게 나타났다. 이렇게 차이가 나는 이유는 Fig. 4에 제시한 GW1 지점의 수온이 체적 평균값이 아니라 표층 수온이기 때문으로 판단된다.

4. 결론

최근 2년간 낙동강 구미 보에서 관측된 기상자료와 수온자료를 이용하여 열수지 각 항의 연 변화를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 구미 보와 구미기상대의 기온을 비교해 보면, 여름철을 제외한 모든 시기에 구미기상대의 기온이 구미 보보다 높게 나타나며 그 차이는 한후기(cold climate season)에 크고 난후기(warm climate season)에 작은 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 월평균 표면 수온은 8월에 가장 높고 1월에 가장 낮았다. 2월부터 7월까지 수온이 상승하고, 8월부터 12월까지 수온이 낮아졌다. 순복사량은 겨울철을 제외하고는 양의 값을 보였고, 순복사량의 약 30%는 잠열로 소비되었고 나머지는 수중 저장열로 전환되었다.

셋째, 수면에서 대기로의 현열은 3~7월에 거의 zero에 가까운 음 또는 양의 작은 값을 보였고, 그 이

외의 계절에서는 양의 값을 보였는데, 특히 가을과 겨울철에 큰 값을 나타내었다. 반면에 잠열 수송은 4월에서 11월에 걸쳐 높은 양의 값을 보였고 겨울에는 다소 작아지는 경향을 볼 수 있었다. 특히 5월에 가장 높은 잠열 수송이 추정되었는데, 이는 대기의 낮은 상대 습도와 순복사량이 큰 사실에 기인하는 바가 컸다.

넷째, 대기에서 수중으로의 열저장은 2월 이후부터 10월 이전까지 나타났고, 그 이외의 한후기에는 수중에 저장되었던 열이 대기 중으로 방출되는 것으로 추정되었다.

결론적으로 구미 보의 열적인 역할은 난후기에는 대기의 열을 수중에 저장하고(5~7월에 최대 약 110 W/m²) 한후기에는 저장되었던 열을 방출(11-12월에 최대 약 -60 W/m²)하여 대기를 가열하는 열적 스펀지 역할을 하는 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주관의 응용기상기술개발연구의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Brutsaert, W., 1982, Evaporation into the atmosphere, Kluwer Academic Publishers, 137.
- Ishi, T., Kondo, J., 1993, Seasonal variation of heat balance in the East China Sea and its vicinity - Ocean heat transport and ocean storage of heat -, Tenki, 40, 309-324.

- Ishizaki, H., Saito, M., 1978, On the heat budget in the Seto Inland Sea, *Umi and Sora*, 54, 1-11.
- Kai, T., Haginoya, S., 2014, Seasonal variation heat and water balances and influence of vegetation on grassland, *Tenki*, 61, 777-784.
- Kim, H. D., Yang, S. K., 1995, Surface heat budget of the northern sea of Cheju Island for June-August 1993 and 1994, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 4, 197-206.
- Kim, K. Y., Kim, K. R., Kim, H. D., 2014, Analysis of time variations in relative humidity around a water area using Bowen ratio, *Journal of Environmental Science International*, 23, 1731-1743.
- Kim, K. Y., Byon, J. Y., Kim, H. D., 2013, Heat island intensity in Seongseo, Daegu, South Korea - a rural suburb containing large areas of water, *Journal of Environmental Science International*, 22, 1337-1344.
- Kim, S. R., Cho, C. B., Kim, H. D., 2015, Daily variation of heat budget balance in the Gangjeong-Goryung reservoir for summertime - Concerning around the rate of heat storage -, *Journal of Environmental Science International*, 24, 721-729.
- Kim, Y. S., Kim, K. I., Ha, K. J., Um, H. H., 2003, *Meteorological Dynamics Essence*, Sigma Press, Seoul, 58-61.
- Kondo, J., Miura, A., 1985, Surface heat budget of the western.
- Kondo, J., 1994, *Meteorology for hydro-environmental study*, Asakusa Press, 128-159.
- Kondo, J., 1999, Boundary layer meteorology(III)-Heat budget analysis and meteorology, *Tenki*, 46, 677-685.
- Kutsuwada, K., Shikama, N., 1988, Variability of surface heat budget through the sea surface in Otsuchi Bay, *Otsuchi Marine Research Center Report*, 4, 47-53.
- Lee, J. J., Lee, B. Y., Lee, H. S., Kim, Y. K., 2013, Automatic observation of evaporation amount over a dam, *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference*, 22, 63-65.
- Moison, J. R., Niiler, J. J., 1998, The seasonal heat budget of the North Pacific net heat flux storage rates, *Journal of Physical Oceanography*, 8, 401-421.
- Oort, A. H., Vonder, T. H., 1976, On the observed annual cycle in the ocean-atmosphere heat balance over the northern hemisphere, *Journal of Physical Oceanography*, 6, 781-800.
- Scherbina, A. Y., Talley, L. D., Rudinick, 2003, Direct observations of North Pacific ventilation: Brine rejection in the Okhotsk Sea *Science*, 302, 1952-1955.