

연구논문

장파복사 모형의 매개변수 추정

조홍연* · 이길하** · 이정미***

한국해양연구원 해양환경보전연구부*, 대구대학교 토목공학과**, 기상청 기후변화감시센터***
(2012년 1월 17일 접수, 2012년 2월 28일 승인)

Parameters Estimation in Longwave Radiation Formula

Hongyeon Cho* · Khil-Ha Lee** · Jungmi Lee***

Marine Environment & Conservation Research Department, Korea Ocean R&D Institute*
Department of Civil Engineering, Daegu University**, Korea Global Atmosphere Watch Center (KGAWC), KMA***
(Manuscript received 17 January 2012; accepted 28 February 2012)

Abstract

Daily net radiation is essential for heat budget analysis for environmental impact assessment in the coastal zone and longwave radiation is an important element of net radiation because there is a significant exchange of radiant energy between the earth's surface and the atmosphere in the form of radiation at longer wavelengths. However, radiation data is not commonly available, and there has been no direct measurement for most areas where coastal environmental impact assessment is usually most needed. Often an empirical equation, e.g., Penman and FAO-24 formulae is used to estimate longwave radiation using temperature, humidity, and sunshine hour data but local calibration may be needed. In this study, local recalibration was performed to have best fit from a widely used longwave equation using the measured longwave radiation data in Korea Global Atmospheric Watch Center (KGAWC). The results shows recalibration can provided better performance $AE=0.23(W/m^2)$ and $RMSE=14.73(W/m^2)$. This study will contribute to improve the accuracy of the heat budget analysis in the coastal area.

Keywords : Longwave radiation, heat-budget analysis, calibration, Penman and FAO-24 formulae, net radiation

1. 서론

연안에서 기온과 수온을 결정하는 가장 중요한 인자는 순 복사(net radiation)이다. 순복사는 단파 복사에 해당하는 태양복사와 장파복사에 해당하는 지구복사의 차이로 정의된다. 정확한 기온과 수온을 결정하기 위해서는 대기와 해수의 이동 및 현열, 증발잠열 등도 영향을 미치지만 순복사가 전체적인 변화 양상을 주도한다(Hsu, 1988; Csanady, 2001; Frederick, 2008). 따라서 연안의 기온과 수온변화를 정확하게 예측하기 위해서는 순복사를 정확하게 관측 또는 추정하여야 한다. 바다에서는 태양복사 및 지구복사 관측 자료가 없기 때문에 대부분의 열수지분석이 기온 및 수온자료를 이용한 추정에 의존하는 실정이다. 최근에는 인공위성 자료를 이용한 지구복사 추정 및 기상인자와의 관계를 탐색하는 연구가 추진되고 있으나(Christian *et al.*, 2007; Long and Turner, 2008; Gui *et al.*, 2010) 이 경우에는 태양복사 자료가 부족하기 때문에 여전히 순복사는 상당부분이 추정에 의존하게 된다. 육지와 가까운 바다에 해당하는 연안에서도 같은 상황이지만 가까운 육지에서의 태양복사 관측 자료를 활용할 수 있기 때문에 적당한 공식 또는 모형을 활용하여 지구복사를 추정하여 열수지 분석(heat budget analysis)을 수행한다. 그러나 지구복사는 태양복사와 같이 대기 중의 구름에 의한 영향 등을 크게 받기 때문에 추정에만 의존하는 경우 큰 오차를 포함할 수 있다. 기존의 지구복사 추정 공식 등은 제안된 공식에 지역특성이 반영되어 있기 때문에 공식에서 사용하는 매개변수를 다시 추정·검토하는 과정이 요구된다. 이를 위해서는 가용한 지구복사 측정자료가 필요하다. 지구복사 관측자료는 매우 제한되어 있기 때문에 지구복사 추정공식의 매개변수 지역특성 분석도 매우 제한되어 있는 상황이다.

Penman(1928)은 장파복사의 물리적 특성을 고려하여 장파 에너지를 계산하는 경험식을 제시하였다. 여기에는 일조시간, 수증기압, 지표면 최고온도, 최저온도 등을 입력자료로 포함하고 있다.

Doorenbos and Pruitt(1977)는 Penman 공식의 원형은 그대로 유지하면서 매개변수만을 보정한 FAO-24 공식을 제시하였다. Penman 공식과 FAO-24 공식은 지표면 장파 에너지를 계산할 때 가장 널리 이용되는 공식이 되어왔으며, 연안 수표면 장파복사 추정에도 이용되고 있다. 그러나 이러한 공식은 매개변수에 따라 추정치의 변화가 크기 때문에 지역적인 특성을 고려한 보정이 필요하며, 이와 관련된 연구가 다양한 목적으로, 다양한 지역에서, 다양한 방법(공식 또는 모형)을 이용하여 추진되어 왔다(Breon *et al.*, 1991; Skartveit *et al.*, 1996; Josey *et al.*, 1997; Niemela *et al.*, 2001; Sridhar & Elliott, 2002; Yin *et al.*, 2008).

본 연구에서는 우리나라의 지역특성에 맞는 해수면(또는 지표) 장파 에너지 공식을 완성하기 위하여 Penman(1948) 공식을 기초로 재보정(re-calibration) 과정을 거쳐 매개변수를 결정하였다. 최근 인공위성 등을 이용한 OLR(outgoing longwave radiation) 등 장파 추정자료는 많이 축적되어가고 있으나 육상 또는 해상에서 연속적으로 장기간 직접 측정된 장파복사자료는 전세계적으로도 태양복사 관측자료에 비하여 매우 미흡하기 때문에 장파복사 연구에 매우 큰 제한이 따른다. 그러나 본 연구에서는 우리나라 기상청에서 기후변화감시사업의 일환으로 충청남도 안면도에 설치한 기후변화감시센터에서 관측한 2008년부터 2010년 까지 매분 측정된 3년 동안의 장파복사 자료를 일자료로 변환한 관측 자료를 이용하여 기존의 장파복사 추정공식을 이용하여 추정한 결과와 매개변수 재보정을 수행한 경우의 결과를 비교·분석하였다. 보다 정확한 장파 추정공식을 사용하여 보다 정확한 기온 및 수온 추정자료를 도출하게 되면, 기온 및 수온과 관련된 다양한 환경영향 평가에서 보다 개선된 추정결과를 도출할 수 있다. 환경영향 평가와 관련된 중요한 입력변수는 관측 자료를 이용한 매개변수 추정 및 관측 자료를 이용한 보정·검증 과정이 요구된다.

II. 지구 장파복사 관측자료

WMO(World Meteorological Organization) GAW (Global Atmosphere Watch) 프로그램의 일환으로 기상청에서는 안면도에 기후변화감시센터터를 운영하고 있다. 기후변화감시센터는 충청남도 태안군 안면을 승언리(36.53° N, 126.32° E, 고도 45.7m)에 위치하며, 온실가스를 포함한 에어로졸, 반응가스, 강수화학, 오존 및 자외선 복사 등 다양한 기후변화감시 요소를 관측하고 있다. 이곳은 북반구 편서풍대인 한반도 서해안 중심에 있으며, 주변 수십 km 이내에 대도시와 산업시설 등 국지적 오염원이 없는 청정 지역에 위치하고 있다(기상청, 2010). 이곳에서는 지구복사도 관측하고 있으며, 관측 자료는 상향복사, 하향복사로 각각 제시되고 있다. 순 지구복사는 지표면을 기준으로 부호를 정하는 경우, 하향이 입력이기 때문에 하향복사-상향복사로 정의할 수 있다. 본 연구에서 사용한 지구복사 자료는 일단위 자료로 처리하였으며, 그림 1에 제시된 것과 같다. 전체적으로 연변화가 뚜렷하게 발생하고 있음을 알 수 있으며, 지구복사의 정점은 태양복사와는 달리 우리나라의 기온이 가장 높은 시기에 해당하는 8월에 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 상향복사에너지가 하향복사 에너지보다 크기 때문에 지표면에서의 순 장파복사는 태양복사 에너지와는 달리 순 방출(-)이 된다.

한편 기존의 지구복사 추정공식을 적용하기 위해서는 기상자료를 필요로 한다. 필요한 기상자료는 습도, 일조시간 및 일 최대기온, 일 최소기온 및 일 평균기온이다. 본 연구에서는 안면도에 인접한 서산지점의 기상자료를 이용하였다(그림 2 참조). 기상자료는 인자에 따라 공간적인 변화가 크게 나타날 수도 있기 때문에 인접한 지점의 자료를 이용하는 경우에는 공간 상관관계(spatial correlation) 분석이 필요하다. 그러나 가용한 자료가 매우 미흡하거나 없는 경우가 대부분이기 때문에 공간 상관관계가 크다는 가정을 하고 이용하는 것이 불가피하다. 따라서 추후 자료가 확보되는 경우에는 공간 상관관계 분석을 통한 가정 검증과정이 필요할 것으로 판단된다.

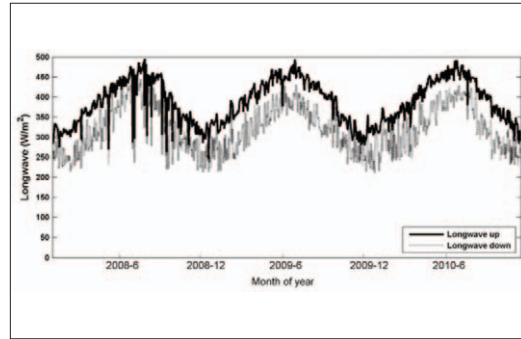


그림 1. 기후변화감시센터에서 측정된 장파복사 변화 양상 (2008~2010)

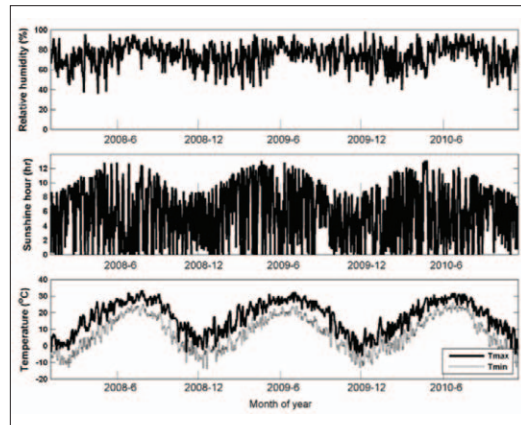


그림 2. 서산지상대의 습도, 일조시간 및 기온변화 양상 (2008~2010)

III. 이론적 배경

1. 복사에너지

일반적으로 순(net) 복사에너지는 단파복사에너지와 장파복사에너지의 차이로 다음과 같이 구성된다.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (1)$$

여기서, R_n = 순복사(net radiation, MJ/m²/day; 이하 복사에너지 단위는 모두 동일), R_{ns} = 순 단파복사(net shortwave radiation), R_{nl} = 순 장파복사(net longwave radiation)이다. 순 단파복사는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{ns} = R_s (1 - \alpha) \quad (2)$$

여기서, α = 반사도(albedo)($0 \leq \alpha \leq 1$)이며, R_s = 단

파 입사에너지(태양복사에너지, incoming solar radiation, MJ/m²/day)로 관측자료를 이용하거나 일조시간의 함수로 표현되는 Angstorm 공식(1924) 또는 수정 Angstrom 공식(Lee, 2010)을 이용하여 추정할 수 있다.

한편 Penman(1948)은 순 장파복사에너지를 계산하기 위하여 지표면 온도(바다의 경우 해수면 온도), 방사율(emmissivity), 구름(cloud factor) 등 3가지 성분의 조합으로 표현되는 공식을 제시하였다.

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right) (c + d\sqrt{e_a})(e + f(\frac{n}{N})) \quad (3)$$

여기서, σ =Stefan-Boltzman 상수, T_{max} , T_{min} =각각 절대온도로 표시되는 일 최대온도 및 일 최소온도(K), e_a =수증기압(kPa)으로 온도와 습도자료를 이용하여 계산할 수 있으며, n/N =최대가능일조시간(위도와 Julian Days의 함수)에 대한 실제 일조시간의 비율이다. 또 c , d , e , f 는 공식의 매개변수로서 과거의 가용한 관측자료를 이용하여 결정할 수 있다. Penman 공식에서는 $c=0.56$, $d=-0.25$, $e=0.1$, $f=0.9$ 가 제시되고 있다. Penman은 위의 장파에너지 추정공식을 사용하여 수자원 분석에서 매우 중요한 인자인 잠재 증발산량을 계산하는데 이용하였다. Doorenbos & Pruitt(1977)는 FAO-24 보고서에서 Penman에 제시한 것과는 다른 값의 매개변수 ($c=0.34$, $d=-0.14$, $e=0.1$, $f=0.9$)를 제시하였다. 지역에 따라 매우 다양한 매개변수 값이 제시되고 있다.

한편, 일반적으로 일교차(Diurnal Temperature Range, DTR)가 크지 않은 경우(10℃ 일교차 조건에서 최대 3% 오차) 또는 일평균 기온자료만이 가용한 경우에는 다음과 같은 관계식이 유효하기 때문에 보다 간략화된 공식이 이용되기도 한다(Thomann & Mueller, 1987).

$$\begin{aligned} (T_{max}^4 + T_{min}^4)/2 &\approx [(T_{max} + T_{min})/2]^4 = T_m^4, T_m = (T_{max} + T_{min})/2 \\ R_{nl} &= \sigma T_m^4 (c + d\sqrt{e_a})(e + f(\frac{n}{N})) \end{aligned} \quad (4)$$

대기 전층을 대상으로 장파모형을 이용하여 추정하는 경우도 있으며, 실제로 구름의 연직분포가 장파복사에너지에 미치는 영향분석 연구가 수행되고

있다(손병주, 1996; 김맹기, 1999). 그러나 이러한 추정방법은 보다 많은 모형 입력자료를 요구하고 있기 때문에 시간적으로나 공간적으로 입력자료 수요를 만족하지 못하는 경우가 빈번하다. 따라서 본 연구는 가용한 자료 또는 최소한의 자료를 이용하여 장파복사에너지를 추정하는 연구로 광역 기상모형에서 제공되는 자료의 Downscaling 목적 및 지역적인 재보정 관점에서 추진하였다.

2. 매개변수의 결정 및 오차추정

식 (3) 또는 (4) 형식의 순 장파에너지 추정공식은 4개의 매개변수를 가진다. 기상자료를 이용하여 장파복사를 추정하기 위해서는 4개의 매개변수 값을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 장파에너지 관측자료로부터 4개의 매개변수를 결정하기 위하여 다변수 최적화기법을 사용하였다. 다변수 최적화 기법은 수문(hydrology) 및 기상분야와 같은 수자원 관련 비선형 모형의 광역(global) 최적화 매개변수를 추정하기 위하여 흔히 사용하는 방법이다(Duan *et al.*, 1993, 1994). 이 기법은 가능한 매개변수 공간에서 여러 변수를 선택하여 최적의 해를 이끌어 내기 위하여 임의로 표본 선정을 반복한다. 다변수 최적화 기법에서는 $n(=4)$ 개의 매개변수에 대해서 실질적으로 가능한 일정 정도의 범위를 미리 선정(c , d , e , f 에 대하여 초기치는 0.25, -0.5, 0.5, 0.1로, 범위는 각각 0~1, -1~0, 0~1, 0~1로 지정)하여 놓고, 그 범위 내에서 오차가 최소가 되는 매개변수를 결정한다. 또한, 여러 개의 해를 구한 후 오차가 가장 작은 매개변수를 최적해로 선정한다.

최적화 기법으로 구한 지역 매개변수가 기존의 Penman 공식이나 FAO-24 공식보다 우수함을 보이기 위하여 Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSC) (Nash and Sutcliffe, 1970) 값과 RMS 오차를 이용하여 계산하였다. NSC 값의 최대값은 1이며, 1에 접근할수록 추정 정확도가 높음을 의미하며, RMS 오차는 오차의 크기를 나타내므로 작을수록 추정 신뢰도가 좋은 것을 의미하며, 계산식은 다음과 같다.

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_D} (Re_i - Ro_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_D} (\bar{Ro} - Ro_i)^2} \quad (5)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} (Re_i - Ro_i)^2} \quad (6)$$

여기서, Re_i , Ro_i 는 각각 추정자료, 관측자료이며, N_D =자료의 개수를 의미한다. 본 연구에서는 윤년(2008년)이 포함된 3년 동안의 일 자료에 해당하기 때문에 $N_D=1,096$ 이다.

IV. 분석결과

장파복사 에너지공식은 지표면, 대기, 구름에서 각각 발생한 장파에너지가 흡입, 반사, 산란 등을 거치는 복잡한 광학적 현상을 하나의 수학적 식으로 표현하므로 많은 가정이 숨어있고 간소화되어있다. 특히 장파복사 추정공식의 두 번째 항은 방사율(emissivity)을 나타내는 항으로서 그 지역의 수증기압에 지배를 받기 때문에 지역의 기상특성이 반영되는 다른 매개변수를 사용하여왔다. 이는 장파복사 추정공식의 적용에 있어 매개변수의 지역적인 재보정 과정이 필요함을 시사한다고 할 수 있다. 그러나 지금까지는 가용한 장파복사에너지 관측 자료가 없어 불가피하게 다른 지역에서 제시한 매개변수를 그대로 사용하여 추정하여 왔다. 표 1은 지역에 따른 방사율 항의 매개변수 차이를 보여준다.

이 연구에서는 연안에서의 열수지분석 정확도를 향상하기 위한 목적으로 장파에너지 공식의 지역적 보정을 시도하였다. 앞서 언급하였듯이 세 가지의 방법에 대해 분석이 이루어진 후 서로 상대비교 하였다. Penman 공식과 FAO-24 공식은 원형 그대로 사용하였으며, 안면도에서 수집된 장파자료를

표 1. 방사율 항의 지역적인 매개변수 차이 (Bras, 1989)

Investigator/site	c	d (in $mb^{-1/2}$)
Kimball (Washington, D.C.)	0.44	0.061
Angstrom (California)	0.50	0.032
Anderson (Oklahoma)	0.68	0.036
Eckel (Austria)	0.47	0.063
Goss and Brooks (Davis, California)	0.66	0.039

이용하여 지역적 재보정을 실시하였다. 다변수 최적화 기법을 이용하여 식 (3), (4)에 대하여 다음과 같은 매개변수를 얻었다.

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right) (0.594 - 0.123\sqrt{e_a}) \left(0.207 + 0.392\left(\frac{n}{N}\right) \right) \quad (7)$$

또는

$$R_{nl} = \sigma T_m^4 (0.594 - 0.123\sqrt{e_a}) \left(0.207 + 0.392\left(\frac{n}{N}\right) \right) \quad (8)$$

위의 3가지 방법을 이용한 장파복사 추정오차의 비교결과는 표 2에 제시하였다.

재보정하여 장파복사를 추정한 경우의 절대오차는 0.23, RMS 오차는 14.73이며, NSC는 0.7, 결정계수는 0.702로 다른 두 방법과 비교하여 매우 우수한 추정결과를 보여주고 있다. 그림 3은 3가지 방법에 의한 추정치를 산포도(scatter plot)로 보여

표 2. 추정오차에 대한 기본적인 통계정보

	Penman	FAO24	재보정	관측치
절대오차	-11.36	-30.84	0.23	-
RMS 오차	25.94	35.35	14.73	-
NSC	0.080	-0.710	0.700	-
결정계수	0.551	0.591	0.702	-
평균	56.15	36.69	67.73	67.50

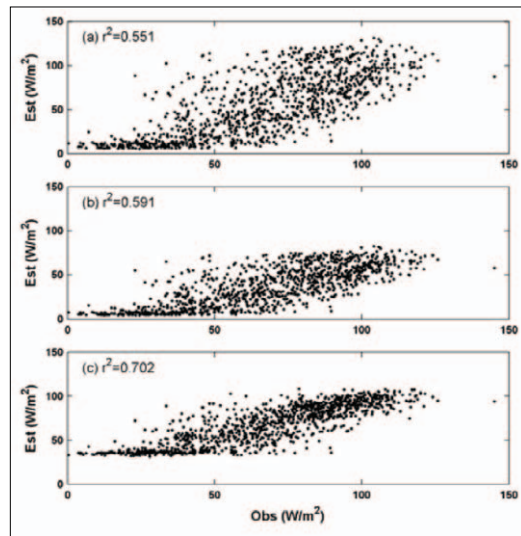


그림 3. 장파복사 추정치와 관측치 비교: (a) Penman 공식, (b) FAO-24 공식, (c) 본 연구에서 사용한 공식

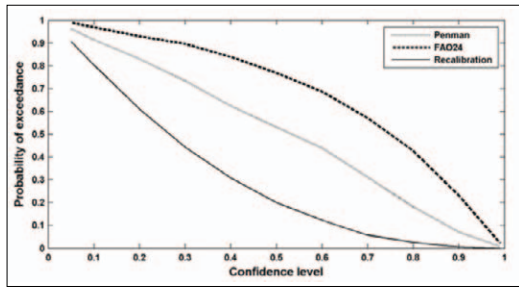


그림 4. 장파복사 추정공식의 신뢰수준에 따른 초과확률 변화

준다. 그림에서 보듯이 재보정 후의 추정치가 결정 계수가 0.7로 훨씬 더 우수함을 알 수 있다. 또 이 지역에서는 FAO-24가 Penman보다 상대적으로 우수함을 볼 수 있으나, 두 방법 모두 지역적인 재보정을 수행하여 추정한 경우에 비하여 추정수준이 낮음을 알 수 있다. 연안의 정확한 열 수지 분석을 위해서는 보다 많은 지점의 장파복사 추정공식에 대한 재보정과정의 필요함을 알 수 있다.

그림 4는 주어진 신뢰수준구간에 해당하는 초과 확률(probability of exceedance; 이하 POE)을 보여준다. 즉 추정결과가 주어진 신뢰수준을 벗어나는 확률로 추정결과가 우수할수록, 신뢰구간이 증가하면 신뢰수준을 벗어나는 확률이 급격하게 감소하는 경우가 바람직하다. 이러한 변화양상은 3가지 방법이 현저하게 다른 거동을 보여준다. FAO-24 공식을 이용한 경우 신뢰수준이 높아지면서 POE가 서서히 감소함을 알 수 있다. Penman 공식을 이용한 경우 신뢰수준이 높아지면서 POE가 거의 직선에 가까운 양상을 보인다. 반면에 재보정하여 추정한 경우에는 신뢰수준이 높아지면서 POE가 급격히 감소함을 볼 수 있다. 신뢰수준이 90%에 이를 때에도 재보정한 경우는 신뢰수준이 높아지면서 POE가 거의 0(0.01 이하 수준)에 가까우나 Penman 공식을 이용한 경우는 여전히 0.1 수준이며 FAO-24 공식을 이용한 경우에는 0.3 정도에 이르고 있다.

V. 결론 및 제언

신뢰성 있는 연안에서의 열수지 분석을 위해서는

순복사 에너지는 필수요소이며, 그 중에서 지표면과 대기의 상호작용의 결과물로서 장파는 중요한 요소로 작용한다. 그러나 장파에너지 자료는 구하기가 어려우며, 실제로 연안의 대부분의 지역은 장파에너지 자료가 없는 실정이다. 온도, 습도, 일조 시간을 근간으로 하는 경험식을 이용하여 장파에너지 추정을 하는 경우가 일반적이지만 지역적인 매개변수 보정을 필요로 한다. 이 연구에서는 가장 널리 사용되는 장파에너지 추정식에서 최적해를 얻어내기 위하여 지역의 관측 자료를 이용하여 재보정하였으며, 재보정 결과는 다음과 같다.

$$R_{nl} = \sigma T_m^4 (0.594 - 0.123\sqrt{e_a}) (0.207 + 0.392(\frac{n}{N}))$$

추정공식의 최적 매개변수는 기존 연구에서 제시한 것과 크게 다르게 나왔으며 지역적 재보정을 거친 후 절대오차(AE)가 0.23, RMS 오차가 14.73, NSC가 0.70, 결정계수가 0.702로서 기존의 방법과 비교해서 더 우수한 추정결과를 보여주었다. 이 연구는 향후 보다 정확한 연안 열수지분석 수준의 향상에 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구에서 사용한 장파복사를 제공해 주신 기상청 기후변화감시센터에 감사드립니다.

참고문헌

- 김맹기, 1999, 상층운량이 지상기온의 계절적 변동에 미치는 영향, 한국기상학회지, 35(4), 475-490.
- 기상청, 2010, 지구대기감시보고서.
- 손병주, 1996, 구름이 지표 장파복사 수지에 미치는 영향, 한국기상학회지, 32(2), 229-242.
- Angstrom, A., 1924, Solar and Terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Society, 50, 121-125.
- Bras, R.L., 1989, Introduction to Hydrologic

- Science, Addison-Wesley, USA
- Breon, F.-M., Fouin, R. and Gautier, C., 1991, Downwelling longwave irradiance at the ocean surface: An assessment of in situ measurements and parameterizations, *Journal of Applied Meteorology*, 30, 17-31.
- Christian, R., Philipona, R., Morland, J. and Ohmura, A., 2007, Observed relationship between surface specific humidity, integrated water vapor, and longwave downward radiation at different altitudes, *Journal of Geophysical Research*, 112(D03302), 1-7.
- Csanady, G.T., 2001, *Air-Sea Interaction, Laws and Mechanisms*, Cambridge Univ. Press.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977, *Guideline for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Duan, Q.Y. and Gupta, V.K., Sorooshian S. 1993, Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization, *J. of Optimization Theory and Applications*, 76, 501-521.
- Duan, Q.Y., Sorooshian, S., Gupta, V.K., 1994, Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, 158, 265-284.
- Frederick, J.E., 2008, *Principles of Atmospheric Science*, Jones and Bartlett Publishers.
- Gui, S., Liang, S. and Li, L., 2010, Evaluation of satellite-estimated surface longwave radiation using ground-based observations, *J. of Geophysical Research*, 115, D18214, 1-16.
- Hsu, S.A., 1988, *Coastal Meteorology*, Academic Press.
- Josey, S., Oakley, D. and Pascal, R.W., 1997, On estimating the atmospheric longwave flux at the ocean surface from ship meteorological reports, *J. of Geophysical Research*, 102(C13), 27, 961-972.
- Lee, K., 2010, Constructing a Nonlinear Relationship Between Incoming Solar Radiation and Bright Sunshine Duration, *International Journal of Climatology*, 30, 1884-1892.
- Long C.N. and Turner, D.D., 2008, A method for continuous estimation of clear-sky downwelling longwave radiative flux developed using ARM surface measurements, *J. of Geophysical Research*, 113, D18206, 1-16.
- Martin, J.L. and McCutcheon, S.C., 1999, *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, Lewis Publishers.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models, I-A Discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Niemela, S., Raisanen, P. and Savijarvi, H., 2001, Comparison of surface radiative flux parameterizations, Part I: Longwave radiation, *Atmospheric Research*, 58, 1-18.
- Penman, H.L., 1948, Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society, Series A* 193, 454-465
- Skartveit, A., Olseth, J.A., Czeplak, G. and Rommel, M., 1996, On the estimation of atmospheric radiation from surface meteorological data, *Solar Energy*, 56(4),

- 349-359.
- Sridhar, V. and Elliott, R.L., 2002, On the development of a simple downwelling longwave radiation scheme, *Agricultural and Forest Meteorology*, 112, 237-243.
- Taylor, F.W., 2005, *Elementary Climate Physics*, Oxford Univ. Press.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987, *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper Collins Publishers.
- Yin, Y., Wu, S., Zheng, D. and Yang, Q., 2008, Radiation calibration of FAO56 Penman – Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China, *Agricultural Water Management*, 95, 77-84.

최종원고채택 12. 03. 02