일사 관측 자료에 의한 남한의 태양복사 시공간 분포

지준범^{1,*} · 김영도² · 이원학³ · 이규태⁴

¹강릉원주대학교 자연과학연구소, 210-702, 강원도 강릉시 지변동 대학로 120

²한국기후변화에너지연구소, 136-713, 서울특별시 성북구 안암동 126-16

³강원발전연구원, 200-041, 강원도 춘천시 중앙로 9

⁴강릉원주대학교 대기환경과학과, 210-702, 강원도 강릉시 지변동 대학로 120

Temporal and Spatial Distributions of Solar Radiation with Surface Pyranometer Data in South Korea

Joon-Bum Jee^{1,*}, Yeong-Do Kim², Won-Hak Lee³, and Kyu-Tae Lee⁴

¹Research Institute of Natural Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangwon 210-702, Korea

²Korea Climate Change & Energy Institute, Seoul 136-713, Korea

³Research Institute of Gangwon Development, Gangwon 200-041, Korea

⁴Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangwon 210-702, Korea

Abstract: This study is to analyze the temporal and spatial distributions of solar radiation in South Korea. Solar radiation data is observed every minute at 22 KMA (Korea Meteorological Administration) stations using pyranometer from January 2000 to August 2007. These data were calibrated using intensive comparative observation and solar radiation model. Intensive comparative observations are accomplished at 22 KMA stations between KNU (Kangnung (Gangneung-Wonju) National University) standard and station instruments during the month of August 2007. The solar radiation of a clear sky mainly is affected by precipitable water, solar altitude and geological height. Also old (raw) data is corrected by the solar radiation model only about clear day and is revised based on the temporal trend of instrument's sensitivity decrease. At all periods and all stations, differences between raw data (13.31 MJ/day) and corrected data (13.75 MJ/day) are 0.44 MJ/day. So, the spatial distribution of solar radiation is calculated with seasonal and annual mean, and is the relationship with cloud amount is analyzed. The corrected data show a better consistency with the cloud amount than the old data.

Keywords: solar radiation model, pyranometer, corrected data, cloud amount

요 약: 이 연구는 남한지역의 시·공간 태양복사 분포를 분석하는 것이다. 2000년 1월부터 2007년 8월 까지 1분 간격으로 저장된 기상청 관할 22개 관측소의 전천일사 관측자료를 이용하였다. 수집한 일사량 관측자료는 시간에 대하여 변화하는 일사계 감도정수에 대한 불확실성을 제거하기 위하여 비교관측 결과와 태양복사 모델을 이용하여 보정을 하였다. 보정을 수행하기 위하여 강릉대학교 전천일사계를 22개 관측소의 일사계와 2007년 8월 동안 비교 관측을 하였다. 과거자료는 맑은 날에 대하여 태양복사 모형을 이용하여 시간에 대해 감소하는 일사계의 감도정수를 토대로 보정하였다. 모든 지점 및 모든 기간에 대한 평균은 13.31 MJ/day이며 보정을 통하여 13.75 MJ/day가 되어 0.44 MJ/day의 차이가 나타났다. 보정된 자료로 계절평균 및 연평균 태양복사 분포를 계산하였으며 전운량, 오존전량, 에어로솔 광학 두께, 지표면 알베도, 가강수량과 관계성을 분석하였다. 가장 큰 영향을 미치는 전운량 자료를 보정된 자료와 비교한 결과 과거(원시)자료보다 일관성이 더 높게 나타났다.

주요어: 태양복사, 전천일사, 일사계, 보정자료, 전운량

*Corresponding author: rokmc717@gwnu.ac.kr

Tel: 82-33-640-2876

Fax: 82-33-640-2320

서 론

태양복사는 지구 대기를 움직이는 1차적인 원천으로 지구상의 모든 생명체들의 에너지원이다. 태양복사 에너지와 관련된 다양한 관측자료(전천, 산란, 직달, 자외선 등)들은 복사 분야뿐만 아니라 기후학 및 위성기상학 등과 관련된 연구의 기본 자료가 된다. 또한 이들 자료를 이용하여 환경, 생물, 농·수산업 등의 연구 및 산업 활동에서 활용되어진다. 특히 태양에너지는 가장 확실한 미래의 신재생에너지원으로 국내외적으로 현재 광범위한 분야에 걸쳐 이를 활용하기 위한 연구 사업이 진행되고 있으며, 이미 여러 분야에서 그 경제성과 장래성이 입증되고 있다. 이에 따라 태양에너지의 이용이 늘어나고 있으며 그에 따른 각종 시스템의 개발 및 최적화 사업이 활발하여짐에 따라 일사량 자료의 정확성에 대한 관심도 한층 높아지고 있다(산업자원부, 2006). 2007년 1월 스위스 다보스에서 열린 세계경제포럼 및 IPCC 4차 보고서(IPCC, 2007) 등에서 신재생 에너지의 지속적인 발전을 위한 정책과 방안 등이 발표되고 있다.

일사 관측이 어려운 이유 중 하나는 까다로운 관측 장소, 환경 및 관리에 있다. WMO에서는 설치 장소로서 가장 중요한 것은 빈번한 점검을 위하여 접근하기가 용이해야 한다는 것이며 장비와 자료 수집 장치는 적어도 매일 혹은 더 자주 점검되는 것을 권고하고 있다(WMO, 2008). 또한 일사 관측은 그 지역의 특징(보편적인 대기 상태 및 지표 상태 등)이 잘 나타나는 곳에 설치하여야 한다(Ohmura et al., 1998). 관리 상태의 불량 및 측정 장비의 운영 미숙은 관측자료에 큰 오차를 발생시킨다(조덕기와 강용혁, 2007). 기상청은 2000년부터 전국 22개의 관측소에서 전천일사계로 자동 관측을 실시하고 있으나 자동 관측으로 인하여 수시로 점검이 이루어지지 않아서 자료의 정확도가 떨어지기 때문에 자료의 정확도를 향상시켜 더욱 현실적인 남한의 태양복사 분포를 밝히고자 하였다. 또한 기상청에서는 전국의 일조 시간과 일사 관측 자료의 공간 상관성 분석에 대한 연구를 수행하였고(부경은 외, 2005), 이 연구에서 일사 관측 지역들 사이의 상관계수가 0.59로서 지역들의 상관성이 낮음을 밝혔다.

조덕기와 강용혁(2005)은 ETR(Extraterrestrial ratio)을 이용하여 관측 오차를 보정하는 연구를 수행하였다. 그러나 이들 연구의 목적은 신재생 에너지인 태

양열 에너지에 대한 연구이기 때문에 매시간 매분 관측소에서 측정된 자료가 아니라 월평균된 일 누적 일사량 자료를 사용하여 연구하였다. 그러나 기상 분야에서는 정밀한 일사 관측자료를 필요로 하기 때문에 월평균 일누적 자료가 아닌 매분 자료에 대하여 보정을 수행한다.

이 연구에서는 일사 관측자료를 보정하기 위하여 강릉원주대에서 보유한 일사계와 기상청 일사계의 비교관측을 통하여 보정을 실시하였다. 2007년 8월 약 한달 동안 비교 관측을 수행하였으며 과거자료의 경우는 비교 관측이 불가능하며 과거의 관측소 환경 상태를 파악하기 어렵기 때문에 수집한 자료의 기간 동안 맑은 날을 선별하여 태양복사 모형과 비교하여 시간에 따른 관측 장비의 센서 반응도 변화 경향을 토대로 보정하였다. 과거 일사량 관측자료의 복원은 완벽하지는 않으나 보정 후에 전운량 분포와 비교하여 일관성이 크게 향상되어 현실적인 복사 분포를 나타낼 수 있다.

자료 및 방법

태양복사(일사) 관측

기상청은 기상과 기후 및 여러 분야에 활용할 목적으로 1969년 수원과 진주에서 전천일사계를 이용하여 일사 관측을 시작하였다. 미국 신재생 에너지 연구소(NREL: National Renewable Energy Laboratory)에서는 최소한 100 km 간격 이내의 일사 관측망 구축을 추천하고 영국과 유럽 및 일본의 관측망들도 대부분 100 km 이내로 배치되어 있으며 현재 우리나라 기상청 또한 이 규정을 만족하고 있다. 기상청은 2000년부터 Fig. 1과 같이 전국 22개의 관측소에서 전천일사계를 자동 종관 관측 시스템(ASOS: Automatic Synoptic Observing System)에 포함되어져 운영 중에 있다. 관측자료는 1분 단위로 저장되며 1초에 1회씩 관측하여 60회 평균일사량이 저장되어진다. 각 관측소에서는 1분 단위의 전천일사 평균(W/m^2)과 1시간 누적 일사량(MJ/m^2) 자료로 저장된다. 설치 및 운영 중에 있는 장비들은 Kipp & Zonen의 CM21이 16기, CM6b가 5기이며 YES(YANKEE ENVIRONMENTAL SYSTEM)의 TSP-700이 1기이다. 위도 분포를 살펴보면 춘천이 가장 높은 위도에 위치하며 고산이 가장 낮은 위도에 위치한다. 경도별로는 포항이 가장 동쪽에 위치하며 흑산도가 가장 서쪽에 위치하였다.

Fig. 1. Solar radiation observation station of KMA.

고도는 대관령이 772.4 m로 가장 높으며, 포항이 1.3 m로 가장 낮다. 장비를 설치한 높이는 지표로부터 1.5 m에서 10 m 사이에 설치되어져 있다.

태양복사 모형

대기 구성 성분에 의한 태양복사의 산란, 반사 및 흡수는 기온과 기압의 함수이고 기온과 기압은 대기 공간에서 연직으로 크게 변화한다. 따라서 기온과 기압의 변화를 고려하기 위해서 복사 과정은 여러 개의 기층으로 나누어 계산되는 것이 일반적이다 (Barker, 1996; Chou and Suarez, 1999; Liou, 1992). 그러나 이 경우 각 기층에 대한 기압과 기온 및 흡수기체 자료가 필요하나 이들에 대하여 각 관측소들의 정확한 자료를 얻기는 쉽지 않다. 따라서 이 연구에서는 대기를 한 개의 기층으로 간주하여 태양복사 모형을 구성하였다. 이 경우 모형의 입력자료로서 기상 관측소 자료를 사용할 수 있는 장점이 있다. 이 같은 단층의 태양복사 모형은 여러 개의 기층으로 나누어 계산할 경우보다 정확성은 다소 떨어지지만 관측소 사이의 상대적인 일사량 차이 및 분포를 분석하는 데 매우 유용하게 쓰일 수 있다.

대기를 한 개의 기층으로 가정하였을 경우 자외선과 가시광선을 흡수하는 오존의 흡수계수는 기온 및 기압의 변화가 매우 적어 무시될 수 있다. 또한 공기 분자 및 에어로솔 산란계수도 기온과 기압의 함수가 아니다. 적외선 영역에 큰 영향을 미치는 수증기의

경우 기온과 기압에 따라 크게 변화하지만 가시광선 영역에 가까울수록 기압과 기온의 영향을 덜 받는다. 따라서 대기를 한 개의 기층으로 간주하고 경험적인 기법을 동원할 경우 수증기 흡수계수 또는 투과율 계산은 큰 오차 없이 계산할 수 있다. 따라서 이 연구에서 한 개 기층의 태양복사 모형은 Iqbal(1983)의 방법을 근거하였고 이 모형을 다층(75층 모형: Chou and Suarez, 1999)모형과 민감도 테스트 및 보정함으로써 정확성을 향상시켰다.

지표면에 도달하는 직달 태양복사 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \cos \theta \exp(-\tau_{\lambda}) \quad (1)$$

여기서 λ 는 파장을 의미하며 I_{λ} 와 $I_{0\lambda}$ 는 각각 지표에 도달하는 직달 태양복사와 대기의 일사량(extraterrestrial radiation)을 나타낸다. E_0 는 이심률(eccentricity), θ 는 태양 천정각(zenith angle), 그리고 $\exp(-\tau_{\lambda})$ 는 흡수 기체 등에 따른 투과율로서 다음과 같다.

$$t_{\lambda} = t_{r\lambda} t_{a\lambda} t_{o\lambda} t_{wa\lambda} t_{g\lambda} \quad (2)$$

$t_{r\lambda}$, $t_{a\lambda}$, $t_{o\lambda}$, $t_{wa\lambda}$, $t_{g\lambda}$ 는 각각 공기 분자, 에어로솔, 오존, 수증기, 혼합 기체에 대한 투과율로서 이 연구에서는 아래와 같은 경험식들을 사용하였다(Bird, 1984; Bird and Riordan, 1986; Leckner, 1978; Vigro, 1953).

$$t_{r\lambda} = \exp(m_a' / \lambda^4 (115.6406 - 1.335 / \lambda^2)) \quad (3)$$

$$t_{a\lambda} = \exp(-AOD(\lambda / 0.55)^{-a} m_a) \quad (4)$$

$$t_{o\lambda} = \exp[-0.2385 k_{wa\lambda} W m_a / (1 + 20.07 k_{wa\lambda} W m_a)^{0.45}] \quad (5)$$

$$t_{wa\lambda} = \exp(-k_{o\lambda} O_3 m_o) \quad (6)$$

$$t_{g\lambda} = \exp[(-1.41 k_{g\lambda} m_a) / (1 + 118.93 k_{g\lambda} m_a)^{0.45}] \quad (7)$$

공기 분자에 의한 투과율은 파장과 지표 기압으로 보정한 공기 질량으로 계산되어진다(Kneizys et al., 1980). m_a' 은 지표 기압으로 보정한 공기 질량이며 이 식은 Kasten(1966)의 상대적 공기 질량(relative air mass, m_a)을 이용하여 구할 수 있다.

$$m_a = [(\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta))^{-1.253}]^{-1} \quad (8)$$

$$m_a = m_a p / p_0 \quad (9)$$

에어로솔 경험식은 에어로솔 광학 두께를 이용하여 계산된다(Bird, 1984). AOD는 에어로솔 광학 깊이이며 입력자료에 사용된 AOD는 0.55 μm 의 파장에서

관측한 값이기 때문에 파장에 따른 가중치를 주었다. α 는 파장지수(wavelength exponent)로 일반적으로 적용되는 평균값인 1.3을 사용하였다(Iqbal, 1983).

$k_{wa\lambda}$, $k_{g\lambda}$, $k_{o\lambda}$ 는 수증기와 혼합 기체 및 오존에 대한 파장별 흡수계수(Leckner, 1978)이며 W , O_3 는 각각 가강수량(precipitable water)과 오존전량(total ozone)이다. 오존 흡수계수를 구하는데 필요한 오존량(ozone mass, m_o)은 오존 농도가 최대를 보이는 고도(h_o)와 천정각의 함수로 구해지며 오존의 최대 농도 고도는 Iqbal(1983)이 사용한 22 km로 하였다.

$$m_o = (1 + h_o/6370) / [\cos^2\theta + 2(h_o/6370)]^{0.5} \quad (9)$$

직달 성분 이외에 지표면에 도달하는 산란 태양복사 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{g\lambda} \quad (10)$$

여기서 $I_{s\lambda}$ 는 지표에 도달하는 산란 태양복사 에너지이며 $I_{r\lambda}$, $I_{a\lambda}$ 와 $I_{g\lambda}$ 는 각각 레일리산란, 에어로솔 산란 그리고 대기와 지표에 의한 다중산란을 나타낸다.

$$I_{r\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \cos\theta t_{o\lambda} t_{m\lambda} t_{w\lambda} t_{a\lambda} (1 - t_{r\lambda}^{0.95})^{0.5} \quad (11)$$

$$I_{a\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \cos\theta t_{o\lambda} t_{m\lambda} t_{w\lambda} t_{a\lambda} t_{r\lambda}^{1.5} (1 - t_{as\lambda}) F_s \quad (12)$$

$$I_{g\lambda} = (I_{a\lambda} \cos\theta + I_{r\lambda} + I_{a\lambda}) r_{s\lambda} r_{g\lambda} (1 - r_{s\lambda} r_{g\lambda}) \quad (13)$$

여기서 $r_{s\lambda}$, $r_{g\lambda}$ 는 각각 지표면 알베도와 대기 반사도(sky reflectivity)이고 $t_{a\lambda}$, $t_{as\lambda}$ 는 각각 에어로솔 흡수와 에어로솔 산란에 대한 투과율로서 다음과 같은 식들을 사용하였다.

$$t_{a\lambda} = \exp[-(1 - w_{\lambda}) AOD(\lambda/0.55)^{-a} m_a] \quad (14)$$

$$t_{as\lambda} = \exp[-w_{\lambda} AOD(\lambda/0.55)^{-a} m_a] \quad (15)$$

w_{λ} 는 파장의 함수로 에어로솔 단일 산란 알베도이며 방정식에서 사용된 $w_{0.4}$, w' 은 각각 $0.4 \mu m$ 파장의 단일 산란 알베도와 파장 변동 계수(wavelength variation factor)이며 Bird and Riordan(1986)에서 사용된 0.945와 0.095를 사용하였다.

$$w_{\lambda} = w_{0.4} \exp[-w' [\ln(\lambda/0.4)]^2] \quad (16)$$

식 (12)에서 사용된 F_s 는 에어로솔 산란에 의하여 하향되는 비율을 나타내며 아래의 방정식에서 사용된 ASF 는 에어로솔 비대칭 요소(aerosol asymmetry factor)이다.

$$F_s = 1 - 0.5 \exp[(AFS - BFS/1.8)/1.8] \quad (17)$$

$$AFS = ALG[1.459 + ALG(0.1595 + 0.4129 ALG)] \quad (18)$$

$$BFS = ALG[0.0783 + ALG(-0.3824 - 0.5874 ALG)] \quad (19)$$

$$ALG = \ln(1 - ASF) \quad (20)$$

모형의 입력자료로서 오존전량은 2004년 10월 이전 자료는 Earth Probe TOMS의 일평균 자료를 사용하였으며 격자는 $1.00^\circ \times 1.25^\circ$ 이다. 2004년 10월 이후에는 AQUA 위성에 탑재되어 있는 OMI 관측센서의 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 자료를 관측소 지점의 위·경도로 내삽하였다. 에어로솔 광학 깊이($0.55 \mu m$) 자료는 Terra와 Aqua위성에 탑재되어 있는 MODIS 관측센서 자료의 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 로부터 오존전량과 같은 방법으로 관측소별 일평균 자료를 계산하였다. 관측 자료가 없는 날에 대해서는 다른 연도들의 같은 날에 대하여 평균값을 적용하였다. Fig. 2는 강릉 지역의 오존전량과 에어로솔 광학 깊이를 나타낸 것이다. 오존전량은 대부분 250에서 450 DU(Dobson Unit) 사이로 계절 변화가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 에어로솔 광학깊이는 계절적으로 봄철과 여름철이 다른 계절과 비교하여 높은 값을 나타내고 있다.

지표면 알베도는 MODIS에서 8일마다 제공하는 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 해상도의 MCD43C3 자료를 내·외삽하여 사용하였다. 시간에 대한 분해능이 다른 자료들에 비하여 작기 때문에 이를 보완하기 위하여 각 관측소에 대하여 4차 다항식을 만들어 일별 지표면 알베도를 계산하였다. Fig. 3은 강릉 지역의 지표면 알베도 계산결과로 X축은 날 수(1월 1일은 1이고, 12월 31일은 365)를 의미하고 Y축은 지표면 알베도이다. 계절적으로 봄과 가을이 다른 계절에 비하여 작은 값을 나타내었다.

가강수량은 대기의 수증기량을 재는 척도로서 전 세계적으로 많은 관측을 실시하고 있으며 지역마다 경험식에 의한 계산식을 작성하는 연구가 많이 진행되어왔다(Choudhury, 1996; Hann, 1906; Lowry and Glahn, 1969). 최근에는 GPS(Global Positioning System)나 MWR(MicroWave Radiometer)을 이용하여 가강수량을 측정에 관한 연구가 진행 중이다(하지현 외, 2007; Deblonde et al., 2005). 가강수량은 복사 모형에 입력되는 변수 중 시간에 대한 변동성이 크며 여러 파장영역에 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 변수이다. 위성자료를 이용하여 사용하기에는 시간 분해능 및 해상도 문제가 발생할 수 있다. 따라서 각 관측소의 기압과 기온 및 상대습도 자료로부

Fig. 2. Time series of daily (a) total ozone and (b) aerosol optical depth in the Gangneung for period Jan. 2000. to Aug. 2007.

Fig. 3. Time series of surface albedo and regression equation at Gangneung.

터 계산하였다. Jensen et al.(1990) 방법을 통하여 식 (21)을 이용하여 포화 수증기압을 계산하였으며 이를 토대로 Leckner(1978)의 방법에 근거하여 식 (22)에 의하여 가강수량을 계산하였으며 Paltridge and Platt (1976)의 방법으로 계산된 가강수량을 식 (23)을 이용하여 기압과 온도에 대하여 보정하였다. 마지막으로 가강수량은 기후적인 측면에서 지역에 따라 편차가 심하기 때문에 같은 방법으로 계산된 가강수량의 경우라도 지역에 따라 정확도가 다르다. 따라서 우리나라에 맞게 보정을 하기 위하여 청주와 대관령 및 합천의 MWR에 의하여 관측된 가강수량 자료와 비교하여 Fig. 4 및 식(24)의 2차 회귀식을 적용하였다.

$$e_s = \ln(9.324 - 2340/T) \quad (21)$$

$$TPW = 0.493 \times \frac{RH}{100} \times \frac{e_s}{T} \quad (22)$$

Fig. 4. The relationship between calculated and measured precipitable water.

$$TPW1 = TPW \times \left(\frac{p}{1013.25} \right)^{3/4} \left(\frac{273}{T} \right)^{1/2} \quad (23)$$

$$NTPW = 0.15 \times TPW1^2 + 0.6 \times TPW1 - 0.09 \quad (24)$$

여기서 T , p , RH 는 각 관측소들의 기온, 기압, 상대습도이고, e_s 는 포화수증기압이며 $NTPW$ 는 이 연구에서 사용한 최종적인 가강수량 계산식이다. 계산은 1분 단위로 계산하였으며 Fig. 5는 강릉 지역의 일평균 가강수량이다. 여름철 가강수량이 다른 계절에 비하여 높은 값을 나타냈으며 계절적 변화가 뚜렷하게 나타났다.

태양복사(일사) 관측자료 보정

정확한 일사 관측 자료를 얻기 위해서는 외부에 노출되어 관측하고 있는 관측 장비의 정기적인 점검

Fig. 5. Time series of daily mean precipitable water at Gangneung during Jan. 2000. to Aug. 2007.

이 필요하다. 일사 관측 장비는 매일 혹은 수시로 점검이 이루어져야 하며 또한 수시로 품질관리를 실시해야 한다. 장비의 검정은 1년 미만의 주기로 비교 관측 및 연구실 복사 램프 검정이 필요하다. 기상청

에서 주로 쓰이는 CM21과 CM6b 경우 1년 동안 장비가 0.5%와 1.0% 이하의 불안정한 변화가 있다고 설명한다. 이러한 변화를 보정해주지 않으면 시간이 지남에 따라 자료의 불확실성이 발생할 수 있으며 자료의 신뢰성이 떨어지게 된다. 따라서 2000년부터 수집된 일사량 자료들의 적절한 검정을 통하여 과거 자료의 신뢰성 향상 및 불확실성 감소를 통하여 더 정확한 남한의 태양복사 분포를 확인하였다.

비교 관측을 이용한 자료 보정: 기상청의 일사장비 검정은 비교 관측을 통한 방법을 사용하고 있다. 일사 기준기는 기상청에서 보유하고 있으며 지역 표준 센터인 일본에서 매 5년마다 검정을 수행한다. 검정이 수행된 기준기는 지방 기상청에서 보유하고 있는 기준기와 다시 검정을 수행하며 지방 기상청의 기준기는 각 관할 관측소들의 일사 장비와 비교 관측을 토대로 검정을 실시한다. 그러나 기상청에서 실시하고 있는 비교 관측은 아무런 전제조건 없이 오차가 50 W/m^2 이상의 경우에만 장비의 보정을 실시하기

Table 1. Specification of instrument and observation start date for KMA solar station on South Korea. Results of intensive comparative observations are represented the difference (%) and standard deviation (%) between KNU standard and KMA station instruments

지점	모델	관측 개시일	비교 관측 결과		
			오차(%)	표준편차(%)	
서울	CM21	2003. 10. 01	+15.0	±8.16	
부산	부산	CM21	2003. 03. 15	-10.0	±1.03
	대구	CM6b	1998. 12. 10	0.0	±4.15
	안동	CM6b	1998. 12. 01	+25.0	±1.31
	진주	CM6b	1998. 12. 10	-2.0	±2.24
	포항	CM21	2007. 01. 22	-0.5	±2.88
제주	제주	CM21	2004. 08. 01	0.0	±0.77
	고산	CM21	2007. 03. 01	-3.0	±8.54
강원	강릉	CM21	2005. 01. 01	-1.0	±0.97
	대관령	CM21	2006. 11. 07	+1.0	±1.26
	춘천	CM21	2007. 01. 17	-1.5	±1.58
	원주	CM21	2004. 08. 24	0.0	±3.03
광주	광주	CM21	2002. 11. 01	-1.0	±6.27
	흑산도	TSP-700	1999. 10. 01	+8.0	±3.96
	전주	CM6b	1998. 12. 01	+2.0	±2.60
	목포	CM21	2007. 02. 01	-1.0	±1.86
대전	대전	CM21	2006. 01. 01	-0.5	±0.84
	청주	CM6b	1999. 09. 13	-3.0	±3.37
	추풍령	CM21	2000. 01. 01	+5.0	±6.92
	인천	CM21	2005. 10. 20	+3.0	±1.59
	수원	CM21	2007. 01. 17	+5.0	±10.92
	서산	CM21	2005. 10. 20	+5.0	±2.78

Fig. 6. Solar radiation data and Difference error between Gangneung-Wonju standard (KNU) and KMA solar station pyranometer from comparison observation at Andong on 28. Aug. 2008. (a), Wonju 03. Aug. 2008. (b), Seoul on 30. Aug. 2007 (c) and Heuksando on 20. Aug. 2008. (Right).

때문에 주변 관측소들과의 세밀한 차이를 나타내는데 문제가 있다. 따라서 이 연구에서는 전국 22개의 관측소에서 관측중에 있는 일사계들과 강릉대학교 대기복사연구실에서 보유하고 있는 일사계(Eppley의 PSP)와 비교 관측을 통한 검정을 실시하였다. 비교 관측 기간은 2007년 7월 30일부터 8월 30일까지 약 한 달에 걸쳐 22개 관측소의 일사계와 실시하였다.

기상청 일사계는 계속 관측 중에 있기 때문에 일사계의 관측을 중단하여 연구실 일사계와 비교 관측은 불가능하다. 그러므로 기상청 일사계가 관측 중인 상태에서 주변에 연구실 일사계를 설치하여 비교 관측을 실시하였다. 그러나 이러한 방식으로 관측을 하면 1분 자료를 생성하는데 있어서 1분 이내의 시간 오차가 발생한다. 즉 1분 평균을 만드는데 있어서 몇 초의 시간이 어긋나게 되면 정확한 비교가 어려워진다. 이러한 시간오차는 구름에 의하여 짧은 시간에 관측자료의 변동이 크게 나타나는 경우에 더 큰 오

차를 발생시킨다. 따라서 이러한 시간오차를 줄이기 위하여 3분 이동평균을 하고 5분 평균값으로 계산하여 표준편차를 구하였다. Table 1은 비교 관측 결과이며 오차(%)의 경우는 산술적으로 평균하게 되면 시간오차에 의하여 정확한 일치가 되지 않아 0.5% 단위로 눈으로 조절하였다. 표준편차가 크게 나타나는 지역은 구름에 의하여 일사량의 변동이 큰 경우이거나 장비의 일관성이 부적합한 곳이다. 비교 관측 결과 안동에서 25%의 최대 오차를 보였으며 서울과 부산에서도 각각 15%와 -10%의 오차가 나타났으며 원주, 제주 그리고 대구에서 오차가 거의 나타나지 않았다. Fig. 6은 비교 관측 결과와 비교 관측을 이용한 보정결과와 편차를 분석한 그림이다. 그림에서 Mean Diff.는 시간별 관측 보정에 의한 편차들의 산술 평균을 나타낸 것이며 SD는 표준편차이다(참조 Appendix 1-3). 안동(Fig. 6a)과 원주(Fig. 6b) 지점은 관측자료의 편차가 크지 않고 일사계의 성능이 우수

Fig. 7. Differences (%) between model calculation and observation at Gangneung. (a) raw data and (b) corrected data, respectively.

한 것으로 분석되었다. 그러나 일부 관측소의 일사계는 장비의 반응도가 불안정하여 강릉원주대 기준일사계와의 오차가 일정하지 않았다. 특히 서울(Fig. 6c)과 흑산도(Fig. 6d)의 비교 관측의 편차는 서울의 오차를 보정한 결과 7시 경에는 강릉원주대 일사계의 관측이 컸으며 10시 부근에서는 작은 값을 보이고 있어 일사계의 일관성이 결여되어 있었다. 흑산도의 경우도 이와 비슷하게 13시부터 관측소 장비의 일사량이 작게 관측되기 시작하였다.

태양복사 모형을 이용한 보정: 맑은 날을 선별하는 방법으로는 BSRN에서 개발되어 미 항공우주국(NASA)의 Aerosol Robotic Network(AERONET) 프로그램에서 사용하고 있는 CSA(Cloud Screening Algorithm)를 활용하여 선별할 수 있다(민희경 외, 2002; Smimov et al., 2000). 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 연속적으로 관측되는 에어로솔 자료가 필요하기 때문에 이 방법은 사용할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 맑은 날을 선별하기 위하여 새로운 방법을 적용하였다.

수집한 일사량 자료의 경우 1분 단위로 저장되지만 기상청에서 관측하는 전운량은 3시간 간격이므로 매 분마다의 하늘 상태를 대표하기엔 부족하다. 따라서 전운량이 맑음(0-2)인 경우에 대하여 몇 가지 선별 과정이 더 필요하다. 우선적으로 일사계와 함께 관측되는 일조계를 이용하여 선별하였다. 일조계는 1초 마다 태양을 탐지하기 때문에 1분 자료의 경우 최대값이 60이다. 따라서 맑은 날 선별을 위하여 저

장되는 값이 60인 경우를 선별하였다. 또한 관측자료가 부정확하게 큰 오차를 보이는 경우를 제거하기 위하여 모형과의 오차를 이용하였다. 비교 관측 당시 최대 오차인 25%를 포함하는 범위로 30%를 설정하였다. 대기 상태 이외의 다른 원인으로 인하여 급변하는 자료가 나올 수 있기 때문에 연속적인 자료의 변화가 $\pm 1\%$ 이하인 경우에 대하여 고려하였다. 모형으로 맑은 날에 대하여 실험을 한 결과 대기가 일정한 상태에서 평균적으로 1분 동안 $\pm 0.2\%$ 의 변화가 나타나지만 지속적으로 변화하는 대기의 상태를 고려하기 위하여 몇 번의 실험을 거친 결과 $\pm 1\%$ 의 오차가 적당하였다. 마지막으로 관측 환경의 정확한 파악이 어렵기 때문에 차폐에 대한 불확실성을 제거하기 위하여 지표면과 태양의 고도각이 45° 이상의 경우를 선별하였다.

각 구간의 시간에 따른 변화 경향을 확인하였다. Fig. 7a는 강릉 지역의 시간에 따른 오차 경향을 나타낸 것이다. 2003년 5월에 장비의 감도정수 변경이 있었으며 2005년 1월에는 장비 교체가 있었다. 따라서 총 3개의 구간으로 나누었으며 복사 모형에 의한 계산 결과와 관측자료의 차이는 시간에 따라 $2.79\%/year$, $-3.38\%/year$ 그리고 $0.62\%/year$ 의 경향이 나타났다(Fig. 7은 모형을 중심으로 오차를 구하였기 때문에 관측 장비에 대한 기울기가 반대로 나타남). 이러한 경향은 장비 노후에 따른 반응도의 변화로 판단된다. 따라서 각 구간의 경향을 시간에 따라 보정을 실시하였다. 다음 Fig. 7b는 시간에 따른 경향을 강릉 지역에 적용한 결과이다. 적용 결과 장비의 노

Fig. 8. Raw (a) and corrected (b) global solar radiation at the Gangneung.

후에 대한 과거자료의 경향이 감소하였다. Fig. 8은 과거자료의 경향을 보정 전과 후를 나타낸 것이다. Fig. 8a에서 2000년부터 2004년까지는 관측자료가 다른 연도와 비교하여 평균적으로 작게 나타났다. 그러나 Fig. 8b에서 보정을 마친 후에는 다른 연도와 비슷한 값을 나타내고 있다. 이러한 방법을 토대로 22개 지점의 과거자료에 대하여 보정을 실시하였다.

결 과

과거자료에 대해서는 모형을 통하여 보정을 실시하였다. 과거 관측 기간에 대한 관측 환경 정보가 부족하며 비교 관측 등을 통한 정확한 검정이 불가능하기 때문에 과거자료에 대해서는 매일의 정확한 복사 분포를 파악은 쉽지가 않다. 따라서 복사 모형과 비교를 통하여 보정을 실시한 이후에 계절별 분포를 파악하기 위하여 전운량과 비교를 통하여 복사 분포를 파악하였다. 비록 전운량 효과 이외에 다른 요인과 복합적으로 영향을 미쳐 일사량의 분포가 결정되지만 가장 큰 효과를 주는 것이 위도와 구름이기 때문에 전운량을 선택하였으며 그 이외의 요인(오존전량, 에어로솔 광학 두께, 지표면 알베도, 가강수량 등)은 효과가 작기 때문에 이 연구에서는 비교하지 않았다. 2000년부터 2007년 8월까지 1분 단위를 일사량을 월평균 일누적하여 계절 평균과 연평균의 복사 분포를 분석하였다(Fig. 9-Fig. 13). 단위는 MJ/day를 사용하였고 원시자료(a)와 보정자료(b), 구름자료(c) 그리고 보정자료와 원시자료의 차이(d)를 나타내었다.

봄철의 경우 보정 이전에는 안동 지역과 서울부근에서 일사량이 작게 나타났다(Fig. 9). 그러나 보정 후에는 대구, 안동 그리고 진주에서 일사량이 높게 나타났다. 전운량의 경우 이와 상응되게 같은 지역에서 주변보다 작은 전운량 분포를 보였으며 춘천을 중심으로 강원도 지역과 남해안의 목포, 광주 지역은 일사량이 작게 나타났으며 전운량 분포도 유사한 분포를 보였다. 모든 지점에 대하여 정확하게 분포가 일치하지 않았으나 인근 주변의 관측소와 큰 차이가 사라졌으며 대체적으로 구름자료와 일치하는 분포로 보정되었다.

여름철의 경우 전운량은 전국적으로 약 7정도(전운량의 최대값은 10)의 값을 보이고 있으며 봄철과 비교하여 전운량이 2이상 높기 때문에 태양 고도 각이 높아도 일사량의 차이는 크게 나타나지 않았다(Fig. 10). 보정된 일사량과 전운량의 분포가 다소 다르게 나타났으며 강원도 지역을 중심으로 전운량이 높았으며 보정 후의 분포에서 일사 최저값은 강원도 지역에 나타났다. 부산과 포항 부근에 전운량이 낮게 나타났으며 일사량은 크게 나타났다.

가을철의 경우에는 원시자료에서 안동 지역을 제외하면 대체적으로 전운량과 비슷한 분포를 나타내고 있었으며 보정을 통하여 안동의 부적절한 낮은 일사량의 분포가 사라졌다(Fig. 11). 위도와 낮은 전운량으로 남해안 지역의 일사량이 크게 나타난 것으로 분석된다.

겨울철의 경우에는 서울과 부산 지역에 전운량이 작게 나타났다(Fig. 12). 원시자료에서는 부산 지역에

Fig. 9. Spatial distribution of spring for the period Jan. 2000 to Aug. 2007, (a) raw insolation (MJ/day), (b) corrected insolation (MJ/day), (c) cloud amount and (d) difference (MJ/day) between raw and corrected data.

일사량이 크게 나타났고 서울 지역은 반대로 일사량이 작게 나타났다. 또한 강릉과 대관령의 일사량이 주변보다 크게 나타났으나 전운량 자료에서는 이러한 분포를 나타나지 않았다. 그러나 보정자료는 서울, 강릉 그리고 대관령 지역의 전운량과 일사량이 서로 일관성 있게 나타났다.

Figs. 9-12에서 원시자료와 보정자료의 차이를 통하여 보정된 수치를 살펴보면 계절별로 약간의 차이가 있으나 일반적으로 안동지역에서 최대 약 3 MJ/day의 오차가 보정되고 대부분의 지역에서 약 1 MJ/day의 보정이 이루어졌다.

일 누적 연평균을 22개 지점에 대하여 평균을 하

였을 때 원시자료는 13.31 MJ/day 였고 보정자료에서는 13.75 MJ/day로 0.44 MJ/day의 차이가 나타났다(Fig. 13). 가장 큰 보정이 이루어진 곳은 안동지역으로 비교 관측 결과에서도 가장 큰 오차를 보인 지역이었다. 보정자료를 살펴보면 저위도가 고위도 지역보다 일사량이 크게 나타났으며 구름의 영향으로 인하여 부산을 중심으로 남해안 지역에 일사량이 크고, 강원도 지역에 이 작게 나타났다. 서울의 경우는 도시화로 인한 오염물질 때문에 일사량이 작을 것으로 예상하였으나 모형과의 경향을 토대로 보정하였기 때문에 이러한 효과가 제대로 반영되지 못하여 분석은 제외하였다.

Fig. 10. Same as Fig. 9 except for summer.

결론

기상청에서 관측되어진 일사량 자료를 이용하여 남한의 태양복사 분포를 분석하였으며 정확한 분석을 위하여 일사량 자료의 보정을 실시하였다. 맑은 날에 대하여 여러 가지 태양복사에 영향을 미치는 요인들 중 태양 고도각이 가장 큰 영향을 미쳤으며 이 밖에 가강수량과 지형고도 또한 큰 영향을 미쳤다. 구름을 포함 시킬 경우에는 구름에 의한 효과가 지배적이어서 다른 요인들의 효과가 작았다.

과거자료의 보정은 비교 관측을 통하여 보정을 할 수 없기 때문에 태양복사 모형과의 오차를 통하여 보정을 실시하였다. 과거자료에 대하여 정확한 보정

은 불가능하지만 계절평균 및 연평균에 대해서는 보정 이전보다 더 현실적인 분포를 나타내었다. 이를 확인하기 위하여 전운량 자료와 비교하였다. 보정을 마친 후 전운량과 비교한 결과 전반적으로 저위도가 고위도 보다 큰 일사량을 보였으며 안동의 경우 주변 관측소와의 큰 일사량 차이가 감소되었다. 이 밖에도 부산, 진주 등의 지역에서 전운량이 작게 나타났으며 일사량은 크게 나타났다. 강원도 지역은 주변에 비하여 전운량이 주변 지역보다 크게 나타났으며 일사량은 작게 나타났다.

이 연구 결과로 얻은 보정된 일사량 자료 및 태양복사 분포는 최근 주목을 받고 있는 신재생 에너지 중 하나인 태양열 에너지 분야와 기후 변화 및 다른

Fig. 11. Same as Fig. 9 except for autumn.

학문 분야의 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2008년 기상청의 “최적 일사관측망 구축·운영에 관한 연구” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

민희경, 김지영, 최병철, 오성남, 2002, Sunphotometer 관측을 통한 서울 대기 중 파장별 에어러솔 광학 깊이의 특성: Cloud Screening Algorithm (CSA) 적용. 한국기상학회지, 38, 25-38.

부경은, 권원태, 조주영, 양진관, 2005, 한반도 일조시간과 일사관측자료의 공간 상관성 분석. 기상기술, 1, 33-41.
 산업자원부, 2006, 신재생에너지 자원조사·종합관리시스템 구축사업. 산업자원부, 161 p.
 조덕기, 강용혁, 2005, 국내 태양에너지 측정데이터의 신뢰성 평가 및 보정에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 25, 11-18.
 조덕기, 강용혁, 2007, 품질관리시스템을 활용한 태양에너지자원 신뢰성 향상에 관한 연구. 한국태양에너지학회 논문집, 27, 19-27.
 하지현, 박관동, 장기호, 양하영, 2007, MWR 관측치와 비교를 통한 GPS 가강수량 정밀도 검증. 대기, 17, 291-298.
 Barker, H.W., 1996, A Parameterization for computing grid-averaged solar fluxes for inhomogeneous marine boundary layer clouds. Part I: Methodology and homo-

Fig. 12. Same as Fig. 9 except for winter.

geneous biases. *Journal of Atmospheric Sciences*, 53, 2289-2303.

Bird, R.E., 1984, A simple spectral model for direct normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy*, 1, 13-21.

Bird, R.E. and Riordan, C.J., 1986, Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 87-97.

Chou, M.-D. and Suarez, M.J., 1999, A solar radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA/TM-1999-104606*, 15, 40 p.

Choudhury, B.J., 1996, Comparison of two models relating precipitable water to surface humidity using globally distributed radiosonde data over land surfaces.

International journal of climatology, 16, 663-675.

Deblonde G, Macpherson, S., Mireault, Y., and Héroux, P., 2005, Evaluation of GPS precipitable water over Canada and the IGS network. *Journal of Applied Meteorology*, 44, 153-166.

Hann, J.V., 1906, *Lehrbuch der Meteorologie* Vienna, S. Hirzel, Leipzig, 171 p.

IPCC, 2007, *Climate change 2007, The physical science basis*, Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 p.

Iqbal, M., 1983, *An introduction to solar radiation*. Academic Press, NY, USA, 390 p.

Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G., 1990, *Evapotranspiration and irrigation water requirements*.

Fig. 13. Same as Fig. 9 except for annual daily mean (MJ/day).

ASCE Manuals and Report on Engineering Practice No. 70, American Society Civil Engineers, NY, USA, 322 p.

Kasten, F., 1966, A new table and approximate formula for relative optical air mass. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, B14, 206-223.

Kneizys, F.X., Shettle, E.P., Gallery, W.O., Chetwynd, J.H., Jr., Abrea, L.W., Selby, J.E.A., Fenn, R.W., and McClatchey, R.W., 1980, *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN5*. Technical Report AFGL-TR-80-0067, 228 p.

Leckner, B., 1978, The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface Elements of a Model. *Solar Energy*, 20, 143-150.

Liou, K.-N., 1992, *Radiation and cloud processes in the atmosphere*. Oxford University Press, NY, USA, 487 p.

Lowry, D.A. and Glahn, H.R., 1969, Relationships between

integrated atmospheric moisture and surface weather. *Journal of Applied Meteorology*, 8, 762-768.

Ohmura, A., Gilgen, H., Hegner, H., Muller, G., Wild, M., Dutton, E., Forgan, B., Frolich, C., Philipona, R., Heimo, A., Konig-Langlo, G., McArthur, B., Pinker, R., Whitlock, C., and Dehne, K., 1998, Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WRMC), a new precision radiometry for climate research. *Bulletin of American Meteorological Society*, 79, 2115-2136.

Paltridge, G.W. and Platt, C.M.R., 1976, *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*. American Elsevier, NY, USA, 318 p.

Smirnov, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Dubovik, O., and Slutsker, I., 2000, Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sensing Environment*, 73, 337-349.

Vigroux, E., 1953, Contribution a l'etude experimentale de l'absorption de l'ozone. Annual Physics, 8, 709-762.
WMO, 2008, WMO guide to meteorological instruments

and methods of observation. WMO-NO. 8, ISBN 978-92-63-10008-5, 681 p.

2010년 8월 11일 접수
2010년 10월 12일 수정원고 접수
2010년 11월 18일 채택

Appendix 1. Correction of solar radiation using comparative observation at Busan on 19. Aug. 2007 (a), Chuncheon on 17. Aug. 2007 (b), Cheongju on 25. Aug. 2007 (c), Chupungyeong on 25. Aug. 2007 (d), Daegu 18. on Aug. 2007 (e), and Daejeon on 28. Aug. 2007 (f).

Appendix 2. Same as Appendix 1 except for Daegwallyung on 17. Aug. 2007 (a), Gwangju on 21. Aug. 2007 (b), Gangneung on 31. Jul. 2007 (c), Gosan on 23. Aug. 2007 (d), Incheon on 29. Aug. 2007 (e) and Jeju on 23. Aug. 2007 (f).

Appendix 3. Same as Appendix 1 except for Jinju on 19. Aug. 2007 (a), Jeonju on 24. Aug. 2007 (b), Mokpo on 21. Aug. 2007 (c) and Pohang on 31. Aug. 2007 (d), Seosan on 30. Aug. 2008. (e) and Suwon on 26. Aug. 2008. (f).