

한반도에서 해상도 변화에 따른 지표면 일사량의 시공간 분포

이규태*, 조일성, 지준범**, 최영진

Temporal and Spatial Distributions of the Surface Solar Radiation by Spatial Resolutions on Korea Peninsula

Kyutae Lee*, Ilsung Zo, Joonbum Jee**, Youngjean Choi

Abstract

The surface solar radiations were calculated and analyzed with spatial resolutions (4 km and 1 km) using by GWNU (Gangneung-Wonju National University) solar radiation model. The GWNU solar radiation model is used various data such as aerosol optical thickness, ozone amount, total precipitable water and cloud factor are retrieved from Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), Ozone Monitoring Instrument (OMI), MTSAT-1R satellite data and output of the Regional Data Assimilation Prediction System(RDAPS) model by Korea Meteorological Administration (KMA), respectively. The differences of spatial resolutions were analyzed with input data (especially, cloud factor from MTSAT-1R satellite). And the Maximum solar radiation by GWNU model were found in Andong, Daegu and Jinju regions and these results were corresponded with the MTSAT-1R cloud factor.

Key words

GWNU Solar Radiation Model(GWNU 태양복사 모델), Surface Solar Radiation(지표면 태양복사), Temporal and Spatial Distribution(시공간분포), Satellite data(위성자료)

(접수일 2011. 1. 17, 1차 수정일 2011. 2. 14, 게재확정일 2011. 2. 14)

* 강릉원주대학교 대기환경과학과

■ E-mail : ktlee@gwnu.ac.kr ■ Tel : (033)640-2324 ■ Fax : (033)640-2324

** 국립기상연구소 응용기상연구과

■ E-mail : jbjee@korea.kr ■ Tel : (02)6712-0365 ■ Fax : (02)834-5922

Nomenclature

θ : Solar zenith angle, degree

subscrip

dir, dif, glo : direct, diffuse, global

I_{dir} : direct solar radiation, W/m^2

I_{dif} : diffuse solar radiation, W/m^2

I_{glo} : global solar radiation, W/m^2

1. 서론

전 세계적으로 두 번의 석유 파동을 겪으면서 고유가에 따른 지속가능한 에너지원의 필요성이 확대되기 시작하였으며 환경문제에 대한 해결책 논의를 위한 정부간 회의 및 IPCC(Intergovernmental panel on Climate Change) 보고서 등으로 기후변화에 대한 전 세계적인 환경관련 규제가 진행되고 있다. 특히 우리나라는 세계 10위의 에너지 소비국으로써 OECD 국가 중 6번째로 많은 탄소를 배출하는 탄소배출국으로 교토 의정서(Kyoto Protocol, 1997)에 근거하여 2013년부터 일정 비율의 온실기체 감축 의무가 부과될 것이며 이에 따른 경제적 부담도 적지 않을 것이다. 그러므로 정부는 저탄소 녹색성장을 국가발전 패러다임으로 선정하였고 기존 화석 에너지를 대체하기 위한 신·재생 에너지 산업에 대한 관심이 집중되고 있다.

정부는 2030년까지 태양광과 풍력 및 수소에너지를 3대 국가 에너지 전략 분야로 집중 육성하기 위해 분야별 비중 확대에 많은 관심을 집중하고 있다(국무총리실, 2008)⁽¹⁾. 특히 태양으로부터 방출된 복사 에너지(65700 TW/year)가 대기를 통과하는 동안 65% 정도 감쇠하여 지표면에 도달하는 양은 약 23,000 TW/year로 다른 어떤 종류의 에너지원보다도 많은 양으로 태양광은 지구상에서 인류가 이용할 수 있는 최대 에너지원임에도 불구하고 지표면에 도달하는 태양광의 활용율은 0.1%도 미치지 못하고 있다(Perez and Perez, 2008)⁽²⁾. 즉 화력 발전의 경우 탄소 비용 부담과 온실 기체 규제 문제 때문에 태양광 발전의 경제성이 상대적으로 부각될 뿐만 아니라 최근 축열 기술 등의 발달과 국내 기업의 태양광 발전 사업의 참여도 증가로 현재 태양광 발전의 성장이 빠르게 진행되고 있다. 그러나 태양광 발전을 계획할 경우 그 경제성 평가를 위해서는 발전소 입지 조건과 부지 비용 그리고 인구 밀도 및 송전 비용 등 많은 요소들이 사전에 검토되어야 하며 이때 지표면에 도달하는 태양광의 시·공간 분포 특성은 가장 우선 분석되어야 할 중요 요소이다. 이때 사용될 수 있는 것이 태양복사 모델을 이용한 태양에너지 분포의 분석이다.

태양복사 모델은 태양으로부터 방출된 에너지가 대기를 통과하여 지표면에 도달하는 동안 가스(오존 및 수증기 등)와 에어로솔 및 구름 등에 의하여 소산되어 지는 과정을 이론적인 모수화(parameterization)로 계산하는 방법이다. 이런 모수화 모델들은 전 지구 및 중규모 모델 등에 중요한 계산 부분이며

특히 신재생에너지의 개발과 함께 기상 선진국에서는 각 나라별 태양-기상자원지도(solar energy map) 제작에 큰 도움을 주고 있다. 기상 선진국인 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)은 CSR(Climatological Solar Radiation) 모델(Maxwell et al., 2002)⁽³⁾에 근거하여 40 km 해상도의 태양광 자원지도를 제작하였고 현재는 부분적으로 10 km까지 해상도를 높이고 있으며 또한 독일 및 호주 기상청에서도 태양복사 모델과 위성 자료를 이용하여 태양광 자원지도를 개발하고 있다(Michale et al., 1978; Weymouth and Marshall, 1999)^(4,5).

이 연구는 태양복사 모델과 위성관측 및 수치예보 자료를 이용하여 한반도의 지표면 태양에너지의 시·공간 분포를 계산 및 분석하였고 특히 기상 선진국의 기술에 뒤떨어지지 않은 모델(GWNU)과 해상도(4 km와 1 km)를 이용하였다. 연구자료 기간 동안 계산된 월 및 연 누적 한반도 지표면 태양에너지는 모델 입력 자료와 연관하여 분석하였다.

2. 연구 방법 및 자료

2.1 연구 방법 및 태양복사 모델

지표면에 도달하는 태양에너지의 계산은 조일성 등(2010)⁽⁶⁾에 의하여 개발된 GWNU(Gangneung-Wonju National University) 태양복사 모델이 사용되었다. 고도별 입력자료의 부족과 계산 시간 및 효율을 고려하여 대기는 단일 기층으로 가정하였으며 Iqbal(1983)⁽⁷⁾ 및 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 SPECTRAL2 모델(Bird, 1984)⁽⁸⁾을 기반으로 개발되었다. 지표면에 도달하는 일사량은 대기 중에서 구름과 에어로솔 및 기체 성분들에 의해 흡수 및 산란되며 각 파장별 특성을 고려하여 태양복사 모델은 파장에 따라 계산되어지며 에너지의 진행성분에 따라 직달 성분(I_{dir})과 산란 성분(I_{dif})으로 나뉘지며 두 성분은 태양 천정각(solar zenith angle, θ)을 고려하여 실제 지표면에 도달되는 전천일사량(I_{glo})으로 계산된다.

$$I_{glo} = I_{dir} \cos \theta + I_{dif} \quad (1)$$

태양복사 모델을 이용하여 실제 대기와 같은 계산을 위해서는 고도 및 기압에 따른 흡수 계수 변화를 고려할 수 있는 다층 모델의 사용이 필수적이나 이 연구에서는 시·공간 분포에 따른 연직 입력 자료 확보 및 계산 시간문제를 해결하기 위하여 단일 기층을 가정하였으며 이로 인한 일정 수준의 오차 유발이 필연적이다. 따라서 단일 기층 모델은 대기 성분 변화에 따라 다층의 상세모델(Line-by-Line Model; Chou and Suarez, 1999)⁽⁹⁾과 비교하여 보정하였으며 정확한 평가를 위하여 Garand et al.(2001)⁽¹⁰⁾의 42 종류의 연직 대기의 입력 자료를 사용하여 보정하였다.

2.2 연구 자료

GWNU 태양복사 모델을 가동하기 위해서는 수증기(또는 가습수량)와 오존 등의 태양복사 흡수 기체량과 에어로솔 및 구름 자료가 요구되고 또한 계산 지점의 지표면 기압과 고도 및 지표면 알베도 자료 등이 필수적이다. 이들 자료 중 기압 및 수증기량(또는 가습수량) 자료는 10 km 해상도의 기상청 지역예보모델(Regional Data Assimilation and Prediction System; RDAPS) 자료를 이용하였고 오존량은 1°×1° 해상도의 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 센서 자료(일평균 및 월평균 자료)가 사용되었으며 에어로솔은 크기와 모양 및 지역적 특성이 매우 강하게 나타나는 자료로서 이 연구에서는 1°×1° 해상도의 MODIS 위성자료를 사용하였다. 그리고 계산 지점의 고도 자료는 NASA(미항공우주국) SRTM(Shuttle Radar Topographic Mission)의 3s(약 90 m) 자료를 이용하였고 지표면 알베도 자료는 월별 MODIS의 고분해능(해상도 0.05°) 자료가 사용되었다. 그리고 지표면에 도달하는 태양복사 에너지 감쇠 요소 중 가장 중요한 구름 자료(전운량)는 MTSAT-1R 위성의 4 km 및 1 km 해상도 자료를 Kawamura et al.(1998)⁽¹¹⁾과 국립기상연구소(2009)⁽¹²⁾의 방법으로 모수화하였다. 이상의 입력자료들은 한반도영역에 대하여 위성자료와 동일한 4 km

와 1 km 격자점으로 내·외삽하여 사용하였다(Table 1).

3. 결과 및 토의

연구 기간(2009년 1월부터 2009년 12월)동안 한반도 지역에 대하여 4 km 해상도(전체 계산 격자: 85591개 지점)와 1 km 해상도(전체 계산 격자: 459571개 지점)에 대하여 지표면 태양에너지를 1시간 간격으로 계산하였다. 1월과 7월의 해상도별 월누적 태양에너지와 두 해상도 차(4 km - 1 km, %)를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 해상도 차는 1 km 계산 결과 값 중 4 km 격자와 가장 가까운 격자점의 계산 값을 4 km 격자점의 계산 값과 비교하였다.

한반도의 월 누적 지표면 태양에너지는 위도별 및 태양 천정각에 크게 의존되기 때문에 여름철의 지표면 태양에너지는 겨울철에 비해 큰 값을 가지며 입력 변수 중 전운량에 따라서 큰 차이를 보인다. 즉 2009년 월누적 자료들은 대부분 저위도 지역이 고위도 지역에 비해 값이 크고 태양의 고도각이 높은 7월이 1월에 비해 2배 이상의 값을 가지지만 월누적 최대 값은 여름철(6~8월)이 아닌 5월에 나타났으며 이는 여름철과 비교하여 5월 월평균 전운량이 작기 때문에 지표면에 도달할 수 있는 태양에너지가 많기 때문으로 분석된다.

해상도 차이에 따른 차이는 Table 2와 같이 4 km의 태양에너지 자원지도에 비교하여 1 km의 경우는 모든 월에서 평균 1% 미만으로 나타났으며 각 격자점의 차이는 최대 5% 이상 발생되기도 하지만 대부분 2~3% 이내의 차이를 유지하였다. 가장 큰 차이가 나타난 월은 6월(1.03%)이었고 7월(-0.01%)은 가장 작은 차이가 나타났으나 다른 월과 달리 음의 편차를 보였다.

이는 지표면 자료와 구름관련 위성자료의 차이에 따른 오차로 지표면 자료들의 경우 MTSAT-1R 위성자료의 격자인 4 km와 1 km로 각각 내삽되었기 때문에 해상도 차이에 따라 오차

Table 1. Input data for GWNU solar model.

Input Data	4 km	1 km
Topography	SRTM 3s (90 m × 90 m)	
Surface Albedo	MODIS (Surface Albedo; 0.05° × 0.05°)	
Aerosol	MODIS (Aerosol Optical Depth; 1° × 1°)	
Ozone Amount	OMI (Total Ozone Amount; 1° × 1°)	
Temperature, Pressure, Total Precipitable Water	RDAPS 10 km × 10 km	
Cloud	MTSAT-1R Asia (≈4 km)	MTSAT-1R Korea (≈1 km)

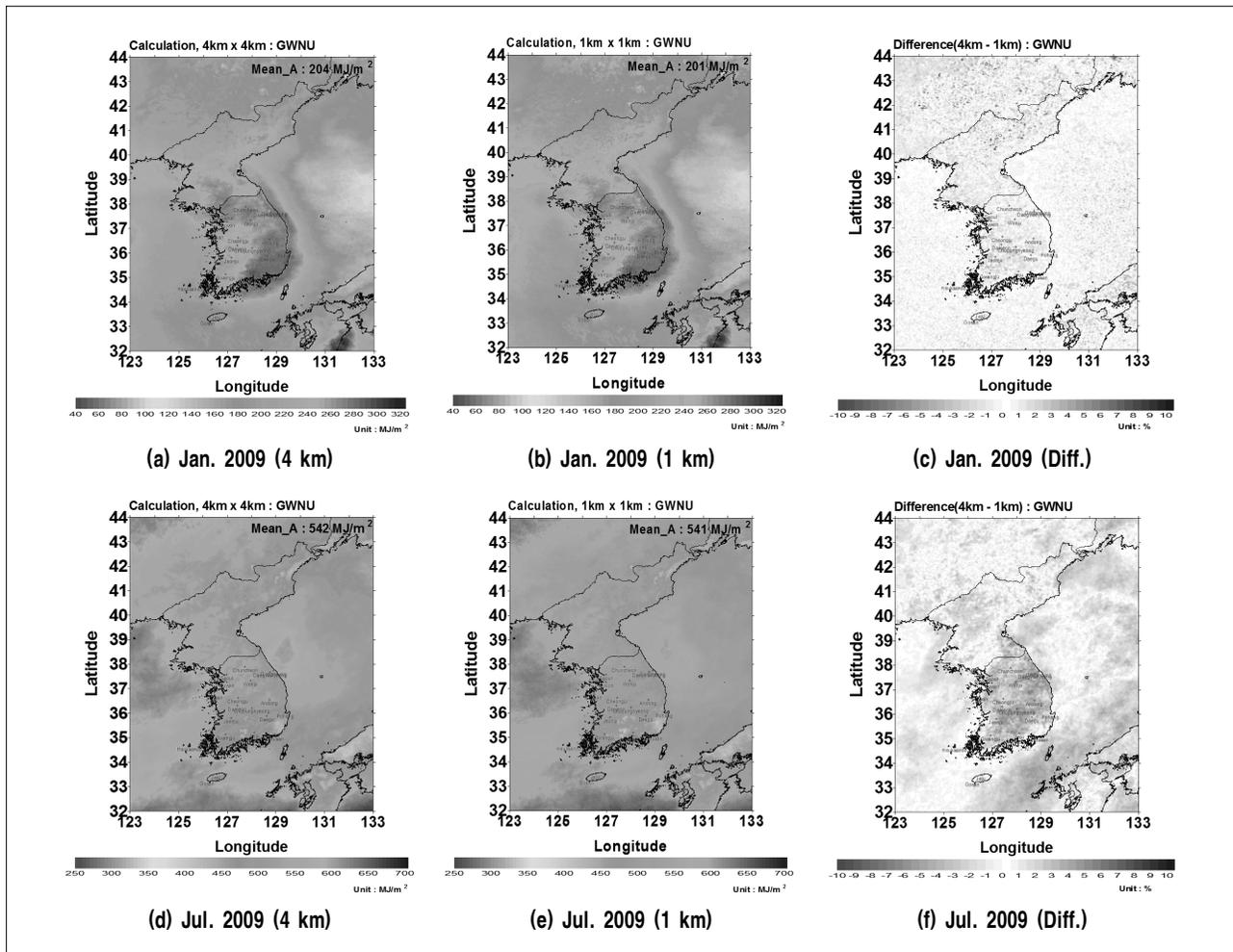


Fig. 1. Monthly accumulated surface solar radiation with 4 km and 1 km resolution and difference between 4 km and 1 km on the Korea at Jan. and Jul., 2009 (left: 4 km resolution, mid: 1 km resolution and right: difference (%) between 4 km and 1 km resolutions).

Table 2. Difference (%) of monthly solar radiation between 4 km and 1 km resolution calculated by GWNU model.

Month	Difference (%)
Jan.	0.89
Feb.	0.79
Mar.	0.77
Apr.	0.65
May	0.76
Jun.	1.03
Jul.	-0.01
Aug.	0.73
Sep.	0.65
Oct.	0.89
Nov.	0.76
Dec.	0.84

가 발생하게 된다. 또 구름 요소 산출을 위한 MTSAT-1R 위성에서 관측되는 값은 가시와 적외 및 근적외 그리고 수증기 채널 등 총 5개(적외 채널 2개) 채널에서 관측되는 밝기 온도 및 가시반사도이며 이 값들을 이용해 구름판별 알고리즘을 통해 구름의 유무를 판별하게 된다. 이 중 가시반사도의 해상도는 약 1 km이며 나머지 4개 채널의 해상도는 4 km이다. 즉 Table 1의 모델 입력자료 중 2종류의 구름자료(MTSAT-1R Asia와 MTSAT-1R Korea)는 모두 MTSAT-1R 위성에서 관측되어진 원시(original) 자료에 의해 만들어진 값이다.

특히 구름의 경우 변화폭이 매우 크기 때문에 모델 계산에서도 가장 큰 오차를 내포하고 있는 입력 자료로 1 km 구름 자료의 경우 각 계산 격자에 대한 구름판별(Cloud detection)이 이루어지지만 4 km 해상도의 경우 1 km에 비해 격자 범위가 넓

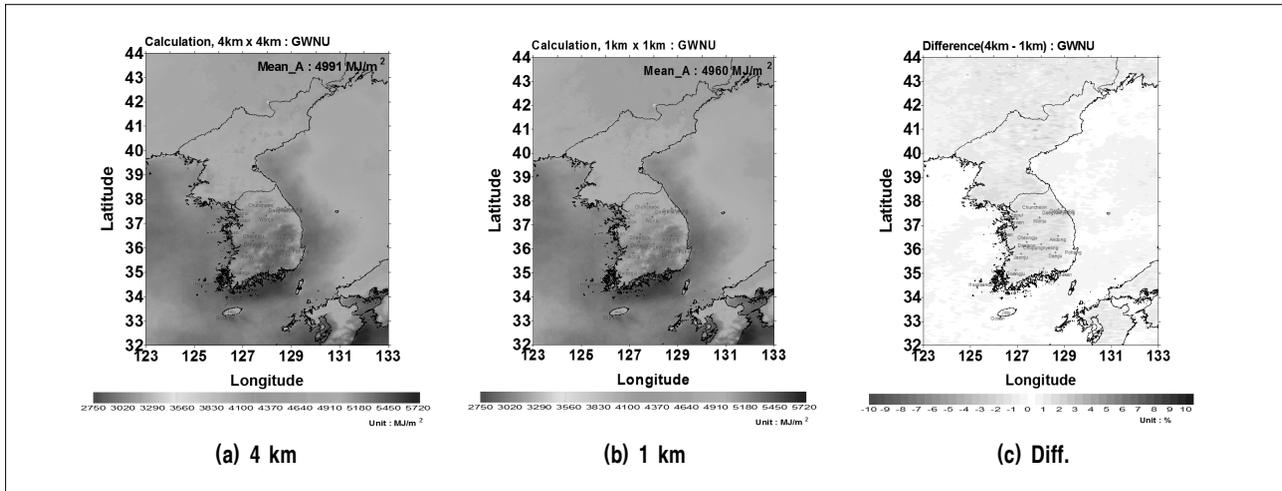


Fig. 2. Same as Fig. 1 except for Annual accumulated surface solar radiation.

어 구름의 판별에 있어서 1 km 해상도 자료보다 정확성이 떨어진다. 즉 4 km 해상도 격자점 하나에는 1 km 해상도 격자점 16개가 유사한 크기이기 때문에 4 km 해상도 격자점에서 구름 판별이 없더라도 4 km 내의 고해상도 자료(1 km)의 격자점 중 구름판별이 있는 것으로 나타날 수 있다. 그렇기 때문에 앞에서 말한 바와 같이 변화폭이 큰 구름의 경우 고해상도 자료의 구름 판별이 저해상도에 비해 실제 대기 현상을 잘 반영 한다고 할 수 있다.

또한 Fig. 1의 (c)와 (f)를 비교해 보면 7월의 경우 해양성 기단의 영향으로 1월에 비해 구름량이 많아 해상도에 따른 오차의 극값이 큰 것을 확인할 수 있다. 대부분 육지 지점에서는 양의 오차가 나타나고 해양에서는 반대로 음의 오차가 나타남을 확인할 수 있는데 이 또한 해상이 육지에 비해 비교적 많은 전운량을 포함하고 있기 때문에 해상도 차이에 따라 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 한반도의 해상도별 연누적(2009년 1월부터 12월까지) 지표면 태양에너지 분포 및 차를 나타낸 것이며 Fig. 3은 Fig. 2와 마찬가지로 기간 동안의 지표면에 도달하는 태양에너지에 영향을 미치는 요소를 나타낸 것으로 지형고도(a), 기온(b), 가강수량(c), 오존(d), 에어로솔(e), 구름(f) 순이다. 먼저 지형고도는 한반도 지형에 관한 정보가 표현되며 기온과 가강수량 및 오존의 경우는 대체로 위도의 함수로 나타나고 에어로솔의 경우는 서해안 지역에서 최대값이 나타나며 구름은 연누적 지표면 태양에너지 분포와 유사하게 나타난다.

지표면 태양에너지는 위도가 낮을수록 크며 한반도 서해안

지역이 다른 지역과 비교하여 에어로솔(Fig. 3(e))과 운량(Fig. 3(f))이 많기 때문에 연 누적 태양광은 상대적으로 작은 반면 안동과 대구 및 진주 등은 소백산맥 풍하 측 위치 등과 관련하여 작은 운량 때문에 태양에너지가 크다. 즉 최대값이 나타난 지역들은 비교적 낮은 위도대에 위치해 고위도에 비해 많은 일사량을 받게 되며 편서풍대에 위치하여 주 풍향이 서풍으로 대부분의 구름은 서쪽에서 동쪽으로 이동하게 되어 소백산맥 풍하측에 위치한 지역들에서 전운량이 적다. 따라서 동일한 위도대 지역들에 비해 강한 태양에너지를 받게 된다. 그리고 제주도의 경우 한반도에서 가장 낮은 위도에 위치하여 입사되는 태양에너지는 가장 많지만 지역적인 영향(도서지역)으로 구름이 자주 발생 또는 이동 및 정체하여 일조량이 작아 지표면에 도달하는 태양에너지는 크지 않다.

그리고 이 계산 결과를 기상청 22개 일사 관측소의 지표면 일사 관측 자료와 비교하였으나 관측 값과 모델 계산값 사이에는 신뢰수준을 넘는 오차가 발생하였다. 이 연구에서 사용된 일사 관측 자료는 최근 장비 보정과 관리 운영 등을 개선하기 위하여 노력하고 있으나 자료의 신뢰성은 높지 못한 편이다. 그 이유로서는 장비 관리 및 분석을 위한 전문가 부족이 절대적이고 정확한 관측자료 분석 및 보정을 위한 지속적인 연구가 요구된다.

4. 결론

이 연구는 태양복사 모델과 입력 자료들을 이용하여 해상도

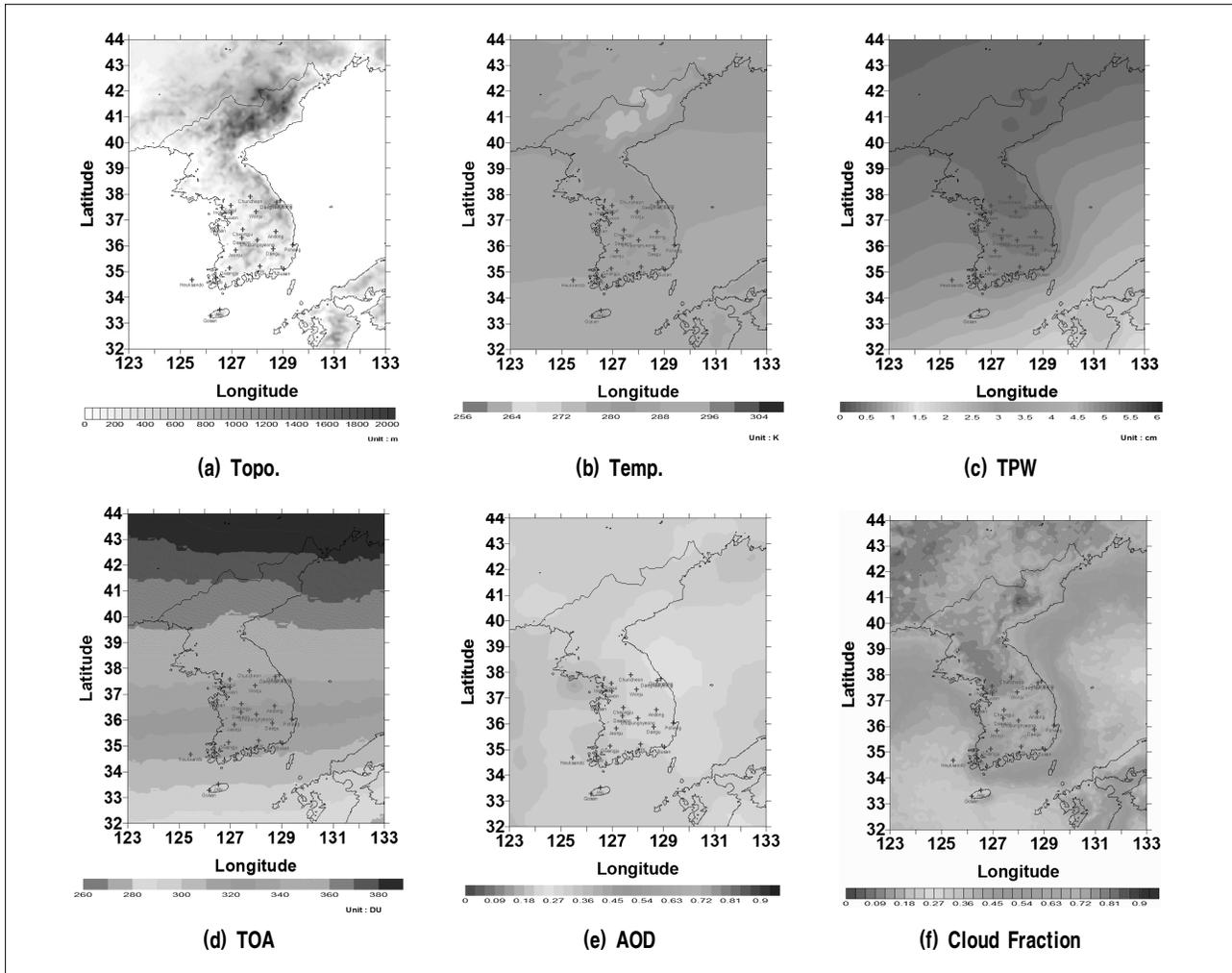


Fig. 3. Input data for GWNU solar radiation model during 2009 (Topography (a), Temperature (b), Total Precipitable Water (c), Total Ozone Amount (d), Aerosol Optical Depth (e) and Cloud Fraction (f)).

차이(4 km와 1 km)에 따른 한반도의 지표면 태양에너지의 시공간 분포를 분석한 것이다. 그 결과 월 및 연 누적 지표면 태양 에너지는 태양 천정각과 구름 분포에 크게 의존하여 나타났고 특히 2009년 5월에 지표면 일사량의 최대값이 나타났으며 그 이유는 태양 천정각이 높은 여름철보다 구름량이 적었기 때문이다.

해상도 변화에 따른 지표면 태양에너지의 차는 지표면 자료와 구름관련 위성자료의 변화에 따른 오차에 의해 나타난 것이다. 또한 시간적으로는 해양성 기단의 영향으로 겨울철에 비해 구름이 많은 여름철에 오차가 크며 공간적으로는 육상에 보다 해상에서 오차가 더 크게 나타났으며 이는 입력 변수 중 일사량에 가장 영향력이 큰 구름 때문이다.

지역적으로 태양에너지의 강도가 가장 강한 지역은 안동과

대구 및 진주 부근으로써 그 원인으로는 위도대가 낮고 에어로솔이 비교적 적으며 특히 소맥산맥 풍하 측에 위치하여 동일한 위도 중에서도 가장 전운량이 작기 때문으로 분석된다.

결과적으로 태양복사 모델과 입력자료들을 이용해 한반도의 태양에너지를 월누적 및 연누적으로 산출하였으며 입력자료의 해상도 차이에 따라 오차가 발생하였고 이들 중 구름의 영향이 가장 크게 작용하였다.

후기

본 연구는 2010년 기상연구소 “기상자원지도 및 국지기상 분석기술 개발”사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 국무총리실, 2008, “제 1차 국가에너지기본계획(2008~2030)”.
- [2] Perez R. and M. Perez, 2008, “Making the Case for Solar Energy”, Daylight & Architecture Magazine by Velux. Autumn 2008, Issue No. 9, pp. 8-17.
- [3] Maxwell, E. L., George, R. L., and Wilcox, S. M., 1998, “A Climatological Solar Radiation Model”, Proc. of the 1998 Annual Conference, ASES.
- [4] Michael, K., P. Ulrichand, and R. Ehrhard, 1978, “A Modified two-stream Approximation for caomputations of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere”, Tellus, Vol. 30, pp. 429-435.
- [5] Weymouth, G. and Le marshall, 1999, “An operational system to estimate global solar exposure over the Australian region from satellite observation”, Aust. Met. mag., Vol. 48, pp. 181-195.
- [6] 조일성, 지준범, 이원학, 이규태, 최영진, 2010, “복사 모델에 의한 남한의 지표면 태양광 분포”, 기후변화학회 Vo1. 1, No. 2, pp. 147-161.
- [7] Iqbal, M., 1983, “An Introduction to Solar Radiation”, Academic Press, New York.
- [8] Bird, R. E., 1984, “A Simple Spectral Model for Direct Normal and Diffuse Horizontal Irradiance”, Solar Energy No. 1, pp. 13-21.
- [9] Chou, M. D. and M. J. Suarez, 1999, “A Solar Radiation Parameterization for Atmospheric Studis”, NASA/TM-1999-104606, 15.
- [10] Garand, L., D. S. Turner, M. Larocque, J. Bates, S. Boukabara, P. Brunel, F. Chevallier, G. Deblonde, R. Engelen, M. Hollingshead, D. Jackson, G. Jedlovec, J. Joiner, T. Kleespies, D. S. McKague, L. McMillin, J. L. Moncet, J. R. Pardo, P. J. Rayer, E. Salathe, R. Saunders, N. A. Scott, P. Van Delst, and H. Woolf, 2001, “Radiance and Jacobian intercomparison of radiative transfer model applied to HIRS and AMSU channels”, J. of Geophy. Res. Vol. 24, pp. 17-31.
- [11] Kawamura, H., S. Tanahashi, and T. Takahashi, 1998, “Estimation of insolation over the Pacific Ocean off the Sanriku coast”, J. of Oceanogr. Vol. 54, pp. 457-464.
- [12] 국립기상연구소, 2009, “통신해양기상위성 기상자료처리시스템 개발”, 최종보고서

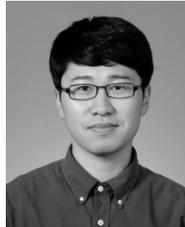
이규태



1981년 연세대학교 대기과학과 이학사
 1983년 연세대학교 대기과학과 이학석사
 1992년 연세대학교 대기과학과 이학박사

현재 강릉원주대학교 대기환경과학과 정교수
 (E-mail : ktleee@gwnu.ac.kr)

조일성



2008년 강릉원주대학교 대기환경과학과 이학사
 2010년 강릉원주대학교 대기환경과학과 이학석사

현재 강릉원주대학교 대기환경과학과 박사과정
 (E-mail : zoilsung@gwnu.ac.kr)

지준범



1999년 강릉원주대학교 대기환경과학과 이학사
 2001년 강릉원주대학교 대기환경과학과 이학석사
 2008년 강릉원주대학교 대기환경과학과 이학박사

현재 국립기상연구소 응용기상연구과 선임연구원
 (E-mail : jbjee@korea.kr)

최영진



1981년 연세대학교 천문기상학과 이학사
 1984년 연세대학교 대기과학과 이학석사
 2003년 연세대학교 대기과학과 이학박사

현재 국립기상연구소 응용기상연구과 과장
 (E-mail : yjchoikma@korea.kr)