

지형보정계수를 이용한 복잡지형의 일 적산일사량 분포 추정

윤진일*

경희대학교 생명과학부

(2009년 3월 16일 접수; 2009년 3월 17일 수정; 2009년 3월 19일 수락)

A Simple Method Using a Topography Correction Coefficient for Estimating Daily Distribution of Solar Irradiance in Complex Terrain

Jin I. Yun*

Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

(Received March 16, 2009; Revised March 17, 2009; Accepted March 19, 2009)

ABSTRACT

Accurate solar radiation data are critical to evaluate major physiological responses of plants. For most upland crops and orchard plants growing in complex terrain, however, it is not easy for farmers or agronomists to access solar irradiance data. Here we suggest a simple method using a sun-slope geometry based topographical coefficient to estimate daily solar irradiance on any sloping surfaces from global solar radiation measured at a nearby weather station. An hourly solar irradiance ratio (W_i) between sloping and horizontal surface is defined as multiplication of the relative solar intensity (k_i) and the slope irradiance ratio (r_i) at an hourly interval. The k_i is the ratio of hourly solar radiation to the 24 hour cumulative radiation on a horizontal surface under clear sky conditions. The r_i is the ratio of clear sky radiation on a given slope to that on a horizontal reference. Daily coefficient for slope correction is simply the sum of W_i on each date. We calculated daily solar irradiance at 8 side slope locations circumventing a cone-shaped parasitic volcano (c.a., 570m diameter for the bottom circle and 90m bottom-to-top height) by multiplying these coefficients to the global solar radiation measured horizontally. Comparison with the measured slope irradiance from April 2007 to March 2008 resulted in the root mean square error (RMSE) of 1.61MJ m^{-2} for the whole period but the RMSE for April to October (i.e., major cropping season in Korea) was much lower and satisfied the 5% error tolerance for radiation measurement. The RMSE was smallest in October regardless of slope aspect, and the aspect dependent variation of RMSE was greatest in November. Annual variation in RMSE was greatest on north and south facing slopes, followed by southwest, southeast, and northwest slopes in decreasing order. Once the coefficients are prepared, global solar radiation data from nearby stations can be easily converted to the solar irradiance map at landscape scales with the operational reliability in cropping season.

Key words : Solar radiation mapping, Sun-slope geometry, Topography correction

I. 서 론

식물의 성장, 발육, 수량형성 구동력은 태양에너지로서 '일사량'에 의해 그 값을 가늠할 수 있다. 일사관

측은 다른 기상요소에 비해 까다롭기 때문에 일사량 대신 일조시간을 측정하여 식물반응을 간접적으로 평가해 왔다. 하지만 하루 동안의 일조시간이 그 날의 일사량과 반드시 직접적인 관계에 있는 것은 아니기

* Corresponding Author : Jin I. Yun (jiyun@khu.ac.kr)

때문에 식물반응의 정확한 평가를 위해서는 일조시간 대신 일사량을 측정해야 한다. 최근에는 고가의 정밀 일사기준측기에 대해 5% 이내의 오차를 갖는 간이 일사계가 저렴하게 공급되고 있어 일사량을 이용한 직접평가가 가능해졌고, 따라서 작물생장모형의 입력변수로서 일조시간의 합 대신 일적산일사량(단위: MJ m⁻² day⁻¹)이 보편적으로 쓰이고 있다.

기상대에서 측정하는 일사량은 소위 '수평면전천일사량'으로서 수평의 지면에 도달하는 0.3~3.0 마이크로미터 파장범위의 복사에너지이며, 측정단위는 단위 시간(1초)-단위면적(1m²) 당 에너지량(J)이다. 일반 사용자에게 제공하기 위해서는 이것을 일사측정장비에 의해 24시간 동안 연속측정하고 그 값을 적산하여 제곱미터 당 MJ(=10⁶ J) 단위로 표현한다. 이렇게 만들어진 '일적산수평면일사량'은 농림업은 물론 건축, 토목, 태양에너지 산업 등에 유용하게 사용된다.

우리나라 농경지 가운데 담수상태로 작물을 재배하는 벼논의 경우 대부분 평야지에 자리 잡고 있어 벼의 생육반응을 추정하는 데는 당연히 수평면일사량을 사용한다. 하지만 밭, 과수원, 삼림의 경우 평야지보다는 경사지에 위치하는 경우가 많아 전작물, 과수, 수목의 생육반응은 수평면일사량 대신 경사면의 일사수광량(solar irradiance)을 사용하는 것이 더 합리적이다. 실제로 우리나라 국토를 사방 30m의 정방형 격자점으로 표현할 경우 전체 국토의 평균경사도가 14.3도이며, 국토면적 가운데 평지로 간주되는 경사도 5도 이하는 28.2%에 불과하다. 반면 국토의 58.8%는 경사도 10도 이상이며, 15도 이상이 45.2%, 20도 이상도 30.7%에 달한다. 즉 현실적으로 더 많은 농작물과 수목이 수평면이 아니라 일정 기울기(경사도)와 기울어진 방향(경사방향)을 가진 경사면에서 자라고 있는 것이다. 따라서 경사면의 일사수광량을 정확하게 알아내는 일은 우리나라 농림업 발전의 기본과제이다.

경사면에 도달하는 일사에너지 혹은 경사지에서 재배되는 농작물 군락이 이용할 수 있는 최대한의 일사량, 즉 '일적산경사면일사량'을 알아내기 위해서는 기상청에서 발표하는 '일적산수평면일사량'을 해당토지의 경사도와 경사방향은 물론, 그 날의 태양고도와 방위각에 따라 적절하게 보정해야 한다. 그런데 토지의 경사도와 경사향은 고정되어있지만 태양의 고도와 방위각은 연중 날짜뿐 아니라 하루 중 시간대에 따라 변화하므로 정확한 '일적산경사면일사량'을 추정하기

위해서는 시간대별 '수평면전천일사량' 자료를 수집해야 하며, 그 시간대의 태양위치를 계산해야 하는 등 일반인에게는 수행하기 어려운 작업이 필요하다.

본 단보에서는 기상대에서 측정된 '일적산수평면일사량'에 적용하여 임의 경사면(경사도×경사방향)의 '일적산경사면일사량'을 비교적 정확하고 간편하게 알아낼 수 있는 지형보정계수를 고안하여 실제 지형에 적용한 결과를 보고한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 경사면 일사량 추정을 위한 지형보정계수

주어진 시간대 i 에서 수평면 일사량에 대한 경사면 일사량의 비율을 '매시일사보정계수' (W_i)라 정의하고 다음 식으로 표현한다.

$$W_i = k_i r_i \quad (1)$$

여기서 k_i 는 시간대별 상대일사강도(relative solar intensity), r_i 는 같은 시간대의 사면일사수광비(slope irradiance ratio)를 가리킨다. k_i 는 수평면의 일적산 청천일사량(clear sky radiation, x_i)에 대한 해당 시간대의 수평면 청천일사량의 비율로 정의되는데, 일사량 실측값이 아닌 청천일사량의 매시간 적산값을 이용하여 다음 식으로 계산된다.

$$k_i = \frac{x_i}{\sum x_i} \quad (2)$$

r_i 는 수평면 청천일사량(x_i)에 대한 경사면 청천일사량(y_i)의 비율로서 역시 실측일사량이 아니라 청천일사량을 이용하여 다음 식에 의해 계산된다.

$$r_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에 의해 식 (1)을 정리하면 다음과 같다.

$$W_i = \frac{y_i}{\sum x_i} \quad (4)$$

하루 동안 얻어진 시간대별 일사보정계수(W_i)를 모두 합치면 해당 날짜 d 의 누적보정계수(W_d)가 되며, 그 값은 수평면에서의 값 1.0에 대한 경사면의 상대적인 지수로서 일사량 보정에 이용될 수 있다.

$$W_d = \sum W_i \quad (5)$$

연중 날짜별, 시간대별 청천일사량의 계산법은 잘

알려져 있는데, 대기가 없다는 가정 하에 수평의 지표면에 도달하는 일사량, 즉 대기외일사량의 한 시간 적산값을 X_0 라 두면, 실제 대기를 투과해서 지면에 도달하는 일사량은 관측시점의 태양고도(a)에 따라 직달성분(X_{b0})과 산란성분(X_{d0})으로 배분되며, 각각 다음 식에 의해 추정할 수 있다(Gates, 1980).

$$X_{b0} = X_0 \tau^{\frac{1}{\sin \alpha}} \sin \alpha \quad (6)$$

$$X_{d0} = X_0 \left(0.271 - 0.294 \tau^{\frac{1}{\sin \alpha}} \right) \sin \alpha \quad (7)$$

여기서 τ 는 태양복사의 대기투과율 상한값으로서 0.8로 알려져 있는데, 청천조건에서 연직상방으로부터 입사할 경우 대기외일사의 80%까지 산란 혹은 흡수되지 않고 직접 지구표면에 도달한다는 의미이다. $1/\sin \alpha$ 은 대기투과율 상한값이 태양고도가 낮아짐에 따라 함께 낮아져 직달일사 성분을 감소시키는 것을 모의한다. 이들 식으로 계산된 직달 및 산란 두 가지 일사성분을 합치면 수평의 지면에 도달하는 시간대별 청천일사량이 된다.

연중 날짜별 경사면 청천일사량(Y_b)의 계산법 역시 잘 확립되어 있다. 예를 들어 관측시점의 태양고도각과 방위각이 각각 a, β 일 때 경사향이 b 이고 경사도가 α 인 지면이 받는 직달일사량은 다음 식으로 표현된다(Kondratyev and Federova, 1977).

$$Y_b = X_{b0} \frac{\{ \cos \alpha \cos(\beta - b) \sin \alpha + \sin \alpha \cos \beta \}}{\sin \alpha} \quad (8)$$

경사면이 받는 산란일사수광량은 다음 식에 의해 추정할 수 있다(Gates, 1980).

$$Y_d = X_{d0} \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (9)$$

여기서 $\cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ 는 1을 최대값으로 하는 천공개방도 (sky view factor)이다. 매 시간대별 Y_b, Y_d 두 가지 성분을 합친 것이 청천조건에서 경사면이 받는 일사수광량이다.

2.2. 일사보정계수의 실용성 평가

일사보정계수가 실제 상황에서 쓰임새가 있는지 확인하기 위해서는 다양한 지형조건에서 사계절을 포함하는 장기간에 걸쳐 얻은 경사면 일사측정자료가 필요하다. 특히 실험실이 아닌 자연상태에서 이러한 자료를 얻는 것이 실용성 확보에 필수적이다. 제주도 한라



Fig. 1. A satellite image of the parasitic volcano (top) and locations of 8 solar irradiance measurement points (circle) and 1 reference solar radiation site (triangle) on the elevation map of the volcano (bottom).

Table 1. Slope, aspect and elevation of the 8 observation sites

SITE #	Slope (deg)	Aspect (deg)	Elevation (m)
1	29	7	359
2	26	68	359
3	20	126	361
4	28	186	362
5	30	219	357
6	21	272	364
7	26	301	370
8	27	359	364

산 기슭에는 많은 기생화산이 존재하는데 본 연구를 위해 그 중 하나인 ‘높은오름’(제주시 구좌읍 송당리 소재)을 실험장소로 선정하였다. ‘높은오름’은 밑면 지름이 약 570m이며 바닥에서 정상까지 고도차는 90m 정도로서 그 형상이 원추에 가까워 동일고도에서 각

방위별로 경사도가 거의 비슷하며 지표는 초지로 덮여 있다(Fig. 1, Table 1).

바다으로부터 연직상방 70m 지점에 등고도면 8 방위마다 지면경사도와 동일한 각도로 일사센서(Model SP-100, Apogee Instruments Inc., USA)를 설치하고 자료기록기(Model STL, STA, Korea)와 결합하여 1분 간격으로 자료를 수집하였다. 제작사에 의하면 SP-100의 측정오차는 천정각 45°에서 $\pm 1\%$, 75°에서 $\pm 5\%$ 이며, 절대오차는 기준측기의 $\pm 5\%$ 범위에 든다고 한다. 현장 설치 전에 경희대학교 국제캠퍼스 생명과학대학(경기도 용인시 기흥구 서천동 소재) 옥상에서 3일간 에플리 일사계(Model 8-48, Eppley Laboratory Inc., USA)와 비교측정하여 오차범위에 이상이 없음을 확인하였다. 실험장소의 수평면 전천일사량을 측정하기 위해 주변에 장애물이 없는 기생화산의 정상에 수평으로 에플리형 일사계를 설치하고, 자료기록기(Model CR10X, Campbell Scientific, USA)에 의해 1분 간격으로 측정하여 매시 적산값을 저장하였다.

국토지리정보원으로부터 '높은오름'을 포함하는 지역의 1:5,000 수치지형도(도엽번호 33608072)를 입수하여 주곡선 정보로부터 TIN(triangulated irregular network) 표면을 생성하고, 해상도 1m의 DEM(digital elevation model)으로 변환하였다. 이 DEM으로부터 일사계가 설치된 8 지점의 경사도와 경사방향을 계산한 다음, 식 (4)와 (5)를 이용하여 1월 1일부터 12월 31일까지 일별 일사보정계수(W_d)를 추정하였다. 기준점(정상 부근)에서 측정된 2007년 4월 14일부터 2008년 4월 13일까지 일간 적산 전천일사량 자료에 일별 일사보정계수를 적용하여 8개 지점의 일적산사면 일사량을 추정한 다음, 각 지점에서 SP-100에 의해 얻은 실측 일사량과 비교하여 추정값의 신뢰도를 검증하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 추정오차의 시공간적 특성

지형보정계수를 적용하여 추정한 8개 지점의 1년간 일별 일사수광량을 실측자료와 비교한 결과 둘 사이에 결정계수 0.97의 선형관계가 확인되었다(Fig. 2).

편차평방근오차(RMSE)는 봄(3, 4, 5월) 1.47, 여름(6, 7, 8월) 0.88, 가을(9, 10, 11월) 1.74, 겨울(12, 1, 2월) 2.11MJ m⁻²로서 연평균은 1.61MJ m⁻² 이었

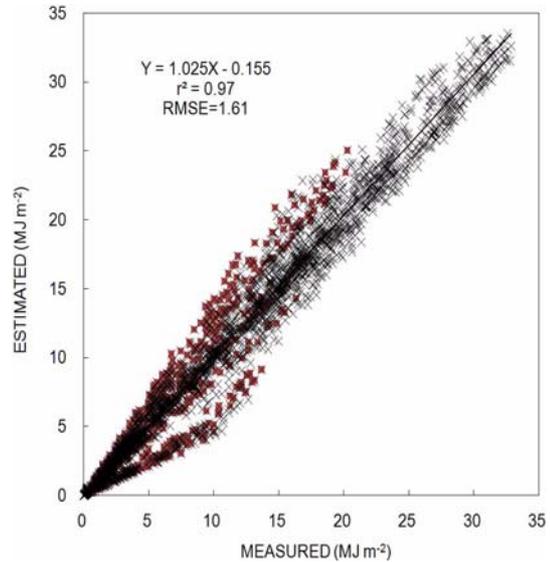


Fig. 2. Relationship between the observed and the estimated daily solar irradiance at 8 sites for a full year from 14 April 2007 to 13 April 2008. Shaded dots indicate the data obtained from low sun angle days in winter.

다. 기상청에서 발간한 한국기후표(KMA, 2001)에 의해 우리나라 22개 일사관측기상대에서 1981년부터 2000년까지 20년간 관측된 자료를 토대로 계산해보면, 연평균 일 적산일사량은 11.02MJ m⁻²(강릉)에서 21.42MJ m⁻²(충주) 범위이다. 한편 1971년부터 1980년까지 10년간 19개 농업기상관측소에서 측정된 일사량은 이보다 값이 커서 16.46MJ m⁻²(거제)에서

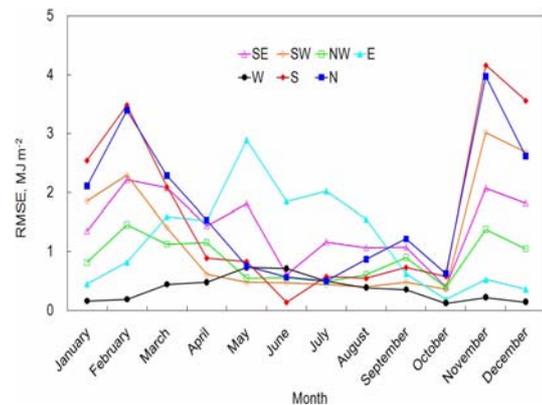


Fig. 3. Seasonal variation in the root mean square error for the estimated daily solar irradiance at sloping surfaces with various aspect. Approximate aspect for each site is: N (North)=1 and 8, E (East)=2, SE (Southeast)=3, S (South)=4, SW (Southwest)=5, W (West)=6, and NW (Northwest)=7.

27.41MJ m⁻²(강화)에 이른다. 따라서 본 실험에서 확인된 추정오차 1.61MJ m⁻²은 일 평균 일사량의 10% 정도에 해당한다고 볼 수 있다. 일반적으로 농업용으로 쓰이는 일사측기의 허용오차가 표준측기(에플리일사계)의 ±5%인 점을 감안하면 일단 10%의 RMSE는 실용성이 떨어지는 것으로 판단할 수 있다.

추정오차를 월별로 분석해보면 대체로 4월부터 10월 사이에는 RMSE가 0.5에서 1.0 정도로 평균에 비해 오차가 작고 나머지 계절에는 평균에 비해 오차가 크다는 사실을 확인할 수 있다(Fig. 3). 4월부터 10월 사이는 우리나라에서 주로 재배하는 여름작물의 재배기간에 해당하므로 이 시기의 추정오차가 작다는 사실은 지형보정에 의한 일사량 추정값이 연평균값에 무관

하게 실용성이 있다는 것을 보여준다.

경사향별로는 동향과 서향 경사면을 제외한 모든 경사면에서 이처럼 4월에서 10월까지의 추정신뢰도가 높고 11월에서 이듬해 3월까지의 신뢰도가 떨어지는 양상을 보인다. 동향사면과 서향사면에서는 이와는 반대로 추정오차가 재배기간에 높고 겨울철에 낮아진다.

월별로는 경사향에 무관하게 10월에 가장 오차가 작은 반면, 11월은 경사향에 따른 오차의 변동폭이 가장 컸다. 서향사면에서는 연중 지속적으로 낮은 추정오차를 보이는데, 겨울보다는 오히려 5월부터 7월까지 작물재배기간 중에 추정오차가 약간 증가하는 특이한 양상을 보였다. 동향사면도 서향과 유사한 양상을 보이지만 전체적인 RMSE 값이 훨씬 크다. RMSE 값

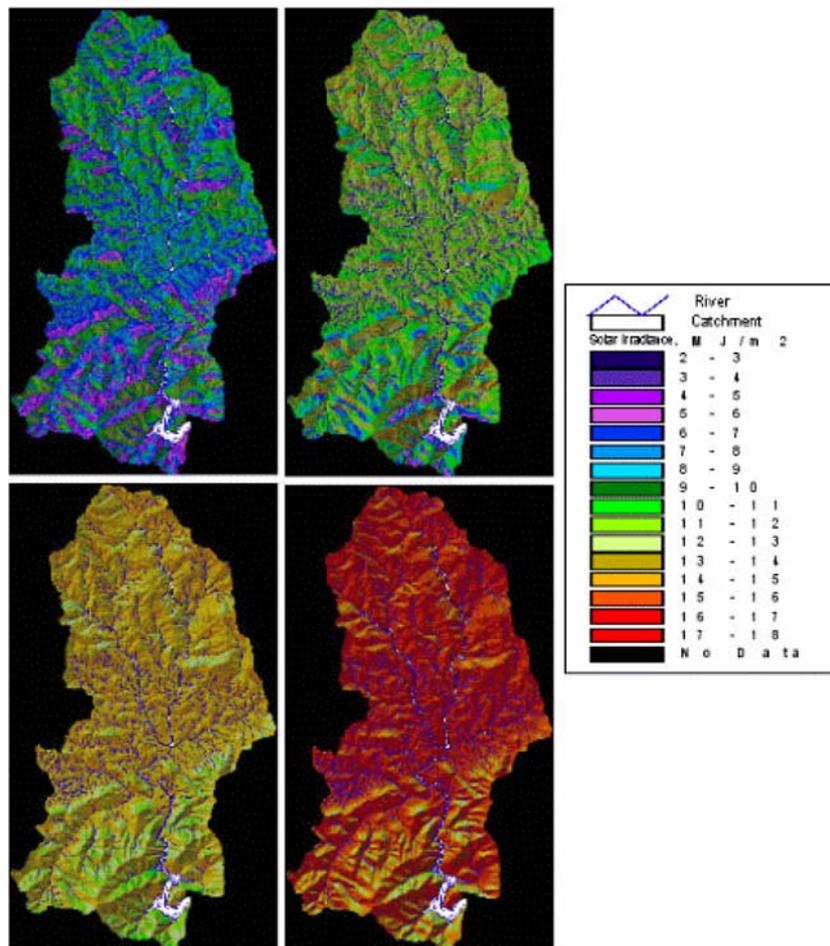


Fig. 4. A topography corrected solar irradiance map at a 30m resolution for Doam catchment (Pyungchang, Gangwon Province). Each panel represents daily sum of solar irradiance on 4 selected days in 2008 (July 22, August 14, September 9, and October 3).

의 연중변동폭으로 보면 남향과 북향사면에서 가장 크고, 남서-남동-북서사면 순으로 줄어든다.

결론적으로, 이 방법은 여름작물의 생장기간인 4월부터 10월까지 적용할 수 있으며, 추정 일사량의 신뢰도는 실측값의 $\pm 5\%$ 범위이다. 태양고도가 급격하게 낮아지는 11월부터 춘분점에 이르기까지 5개월 정도는 추정오차가 크기 때문에 먼저 그 원인을 밝히고 추정법을 개선한 다음 적용해야 할 것이다. 아직 반영되지 않은 문제점 가운데 일출물 시 수평면에서 태양고도가 0일 때 이론상 청천일사량은 0이지만, 동향 혹은 서향 경사면에서는 사면각도에 따라 0이상이 될 수 있는 점이 있다. 앞으로 다양한 환경조건에서 추가적인 검증실험을 거친다면 이 방법의 신뢰도를 개선할 여지는 충분할 것으로 판단된다. 우선 작물재배기간 중 이라도 이 방법을 적용하여 복잡지형 상의 정확한 일사수광량 분포를 알아낸다면 농림업 분야 모델링 연구에 기여할 것으로 기대된다.

3.2. 일사보정계수의 활용

추정오차가 실용상 허용범위인 5%를 초과하지 않는 것으로 보이는 5월부터 10월까지 6개월에 대해 지형이 복잡한 강원도 평창군 도암면에 이 방법을 적용하여 대관령기상대에서 관측된 일 적산일사량을 해상도 30m의 경사면 일사량으로 변환하였다. 제주도에서와 동일한 방법에 의해 국립지리원 수치지형도로부터 30m DEM을 생성하고, 이를 이용하여 각 격자점의 경사도와 경사향을 계산한 다음, 식 (4)와 (5)를 이용하여 5월 1일부터 10월 31일까지 일별 일사보정계수 (W_d)를 추정하였다. 같은 기간 중 기상청 대관령기상대에서 관측한 일별 적산일사량에 일별 일사보정계수를 적용하여 모든 격자점의 일적산사면일사량을 계산하였다. Fig. 4는 그 결과 중 일부로서, 임의로 선정된 4월(7월 22일, 8월 14일, 9월 9일, 10월 3일)에 대한 일적산경사면일사량을 지형음영을 배경으로 표현하였으며, 위치식별을 위해 저수지(도암댐)와 하천을 중첩시켰다.

적 요

기상대에서 측정한 '일적산수평면일사량'을 토대로 임의 경사면 상의 '일적산경사면일사량'을 비교적 정확

하고 간편하게 알아낼 수 있는 지형보정계수를 고안하였다. 주어진 시간대의 수평면 청천일사량에 대한 경사면 청천일사량의 비율을 '매시일사보정계수'라 정의하고, 청천일사량을 기준으로 수평면의 시간대별 상대일사강도와 수평면에 대한 경사면의 일사수광비율의 곱으로 표현하였다. 매시일사보정계수를 하루 단위로 적산한 것이 해당 날짜의 지형보정계수이다.

제주도 내 기생화산 '높은오름'의 등고도면 8 방위에서 사면일사수광량을 1년간 관측하는 한편, 이들 지점의 일사량을 지형보정계수에 의해 추정하여 서로 비교하였다. 지형보정계수에 의한 일사추정값의 편차평방근오차는 연평균 1.61MJ m^{-2} 이었으나, 4월부터 10월 사이 영농기간에는 절반 이하로 줄어들었다. 경사향에 무관하게 10월에 가장 오차가 작은 반면, 11월에는 경사향에 따른 오차의 변동폭이 가장 컸다. RMSE 값의 연중변동폭은 남향과 북향사면에서 가장 컸고, 남서-남동-북서사면 순으로 줄어들었다.

어떤 경사면이든 365일 동안의 지형보정계수를 한번만 계산해 두면 인근 기상대에서 관측한 임의 날짜의 전천일사량에 이 계수를 적용함으로써 그 날의 적산일사량을 실용적인 오차범위 내에서 추정할 수 있어 복잡지형의 일사수광량 분포를 용이하게 파악할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것이며, 실험에 필요한 장소(높은오름)는 제주시 구좌읍 하도리 주민들이 제공하였고, 장비설치와 자료수집에는 온난화대응농업연구센터(국립원예특작과학원)에서 협조하였다. 모두에게 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Gates, D. M., 1980: *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Kondratyev, K. Y. and M. P. Federova, 1977: *Radiation Regime of Inclined Slopes*. WMO Technical Note No. 152.
- Korea Meteorological Administration, 2001: *Climatological Normals of Korea (1971-2000)*. Government Publication Number 11-1360000-000077-14.