

# 태양광입지선정을 위한 지형분석방법 소개 및 영향분석

김영득\*, 안인수, 김민수, 장정호, 장문성\*\*

## Analysis of Effects on Topography for P-V System

Youngdeug Kim\*, Insoo Ahn, Minsu kim, Jeongho Chang and Moonsoung Chang\*\*

### Abstract

In design PV (photovoltaic) system, there are many important factors to consider for best site selection. It is essential to understand to know the amount of sunlight available and how to minimize the shadings. This study presents basic concepts for understanding sun's position and insolation. also it gives easy tools for topography analysis. Finally, this study shows some theoretical calculations of power generation losses by topographic obstacle's elevations and disadvantages in economic feasibility, that is about 7million won loss per year for case of 10 degree topography elevation with assuming average Korea's topography elevation as 5 degree.

### Key words

Topography(지형분석), Photovoltaic(태양광발전), PV system(태양광 시스템), Solar Radiation(태양광 복사), Sun position(태양 위치), Insolation(일사량)

(접수일 2008. 11. 7, 수정일 2008. 12. 3, 게재확정일 2008. 12. 5)

\* 한국수자원공사 에너지사업처

■ E-mail : kikikoko@kwater.or.kr ■ Tel : (042)629-2962 ■ Fax : (042)629-2999

\*\* 한국수자원공사 에너지사업처

■ E-mail : C1025214@hanmail.net ■ Tel : (042)629-2958 ■ Fax : (042)629-2999

### Nomenclature

$\delta$  : solar declination angle, degree

$\alpha$  : solar altitude angle, degree

$\phi$  : solar azimuth angle, degree

$\theta$  : zenith angle

$I_D$  : direct irradiance

$I_G$  : global irradiance

### Subscrip

$HRA$  : Hour angle

$LST$  : Local solar time

$PSA$  : Plataforma Solar de Almería

$AM$  : Air Mass

$S_{module}$  : radiation incident on a titled surface

$S_{horizontal}$  : radiation incident on horizontal surface

$S_{incident}$  : radiation incident on perpendicular to the sun

## 1. 서론

태양광발전 시스템은 발전용량 대비 설치단가가 높으나, 설치 및 유지보수가 용이하다는 장점이 있으며, 현재 가장 빠른 성장을 하고 있다. 발전차액지원 기준단가가 높아 발전량이 발전수익에 미치는 영향이 크므로 발전소 입지선정은 경제성 확보에 매우 중요한 사항이다.

해당 지역의 일사량, 기후(온도, 바람 등), 계통연계조건, 공사여건 등 태양광발전소 입지선정에 있어 고려해야할 여러 가지 요소들이 있으며, 그중 주변 지형여건에 의한 영향에 대해 검토하고자 한다.

## 2. 태양의 위치

지구의 자전축이 23.45° 기울어 공전하기 때문에 일출물의 시각과 위치가 매일 다르고 낮의 길이도 변한다. 태양의 위치는 Fig. 1과 같이 태양적위( $\delta$ ), 태양고도각( $\alpha$ ), 태양방위각( $\phi$ )으로 나타내며, 태양적위( $\delta$ )는 다음과 같다.

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360}{365} (d - 81) \right] \quad (1)$$

여기서, d=연초(1월 1일)로 부터의 일수

태양고도각( $\alpha$ )은

$$\alpha = \sin^{-1} [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos (HRA)] \quad (2)$$

태양방위각( $\phi$ )은

$$\phi = \cos^{-1} \left[ \frac{\sin \delta \cos \alpha + \cos \delta \cos \phi \cos (HRA)}{\cos \alpha} \right] \quad (3)$$

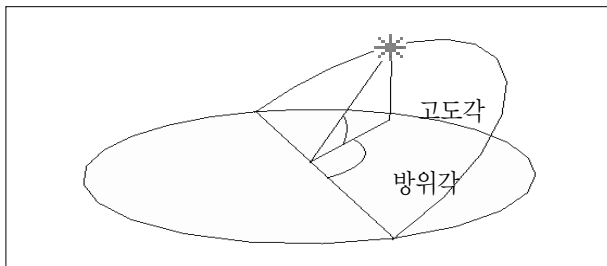


Fig. 1 Concept of sun's position.

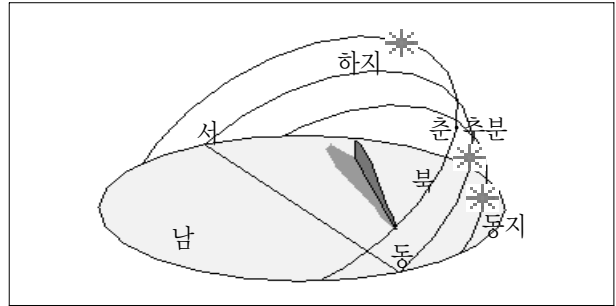


Fig. 2 Solar paths in a year.

이다.<sup>(1)</sup> 시간각(HRA)는 태양시(LST)를 각도로 변환한 값으로, 시간당 태양의 각도는 15도 이므로  $HRA=15^\circ \times (LST-12)$ 로 구해진다.

연중 태양의 위치에 대한 개념도는 Fig. 2와 같으며, 태양의 고도가 0°인 시점이 일출시각이 되고, 180°인 시점이 일몰시각이 된다.

태양위치 추적에 대한 알고리즘 중 PSA 알고리즘은 복잡한 계산과정을 단순화하여 1999~2015년간 태양위치 추적에 대한 오차를 30초 이하로 줄인 것으로 현재 많이 이용되고 있다.

희망하는 시각에 대한 태양의 위치를 구하기 위해, 희망시각을 Julian시각으로 변환한 뒤 황도좌표계(ecliptic coordinates)에서의 위치를 계산하고, 천체좌표계(celestial coordinates)로 변환 후 최종적으로 지역좌표계(Local coordinates)에서의 태양 위치값으로 변환된다.<sup>(2)</sup>

## 3. 시간대별 일사량 분포

지표면 일사량은 태양전지가 활용할 수 있는 직접적인 태양광 에너지를 의미하는 것으로, 이에 대한 수치적 계산 또는 실제 기상자료는 태양광 발전시스템 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 지구의 공전과 천체시스템 등의 수학적 계산에 의한 경사면의 일사량을 산출 하였다.

경사면 일사량(Smodule)은 태양광을 수직으로 받을 때 가장 크며, 수직인 일사량(Sincident)과 수평면 일사량(Shorizontal) 간 관계는<sup>(3)</sup>

$$S_{module} = \frac{S_{horizontal} \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} [W/m^2] \quad (4)$$

이다. Fig. 3은 경사면 일사량에 대한 개념도이며, 수평면 일

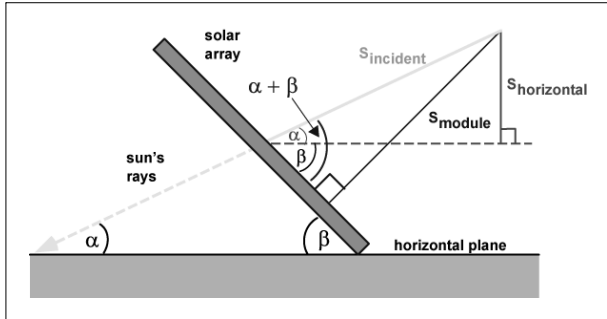


Fig. 3 radiation on a titled surface.

사량을 구하면 특정 방위각의 경사면에 대한 일사량을 구할 수 있게 된다.

AM(Air Mass)는 빛이 지표면에 이르는 가장 짧은 거리를 통해 공기나 먼지 등에 흡수되어 감소된 태양광 에너지의 크기를 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \tag{5}$$

여기서,  $\theta$ 는 천정각(zenith angle)으로, 태양이 바로 머리 위에 있을 때  $\theta$ 는 0이므로 Air Mass는 1이 된다.

AM은 태양광이 지표면에 도착하기 전에 지나가야하는 대기의 양을 가장 단거리인 수직방향 대기의 양과 비교하여 나타낸 것으로 결국 태양 일사 거리간의 비율과 동일하다.<sup>(4)</sup>

지표면에서의 표준 스펙트럼은 AM1.5G(G는 전천일사량(global radiation)을 의미하며, 이것은 직달일사량(direct radiation)과 산란일사량(diffuse radiation) 모두를 포함한다) 또는 AM1.5D(직달 일사량만 포함한다)이며, AM1.5D의 일사강도는 AM0 스펙트럼의 28%(흡수로 인한 18%, 확산에 의한 10%) 정도이고 광역 스펙트럼은 직사광 스펙트럼보다 10%정도 높다.

AM1.5G에 대한 일사량은 약 970W/m<sup>2</sup>이지만 계산상의 편의를 위해 표준 AM1.5G는 1kW/m<sup>2</sup>으로 통용된다. 직달 태양광의 세기는 경험적으로 다음과 같이 AM의 함수로 정의될 수 있다.

$$I_D = 1.353 \times 0.7^{(AM^{0.678})} [W/m^2] \tag{6}$$

여기서,  $I_D$ 는 태양광 입사각에 수직인 수평면에 대한 강도를 의미하고, 1.353은 태양상수를, 0.7은 대기권에 의해 감소되는 복사에너지의 양이다. 그리고 0.678은 기존의 관측된 자료들을 바탕으로 한 보정계수이며 불규칙한 대기층의 두께 등을 고려한 값이다.<sup>(5)</sup>

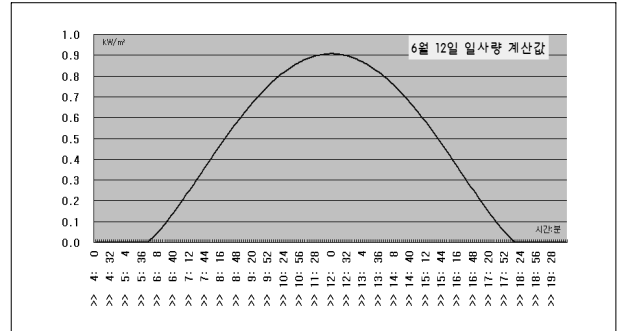


Fig. 4 Solar Radiation on June-12 (Program).

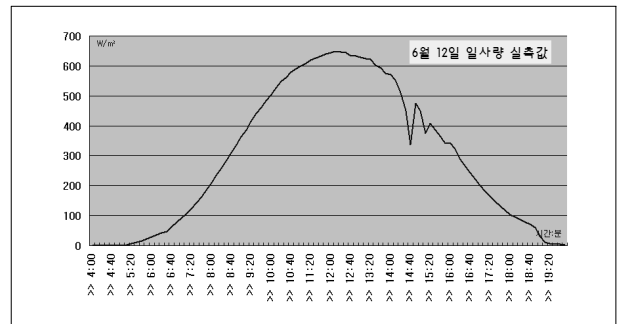


Fig. 5 Solar Radiation on June-12 (real).

또한 일사강도는 해발높이  $h$ 가 높을수록 증가하며, 일반적으로 수식 (6)에서 (1-0.14h)로 곱하여 구할 수 있다. 청명한 날씨에도 산란일사량은 직달일사량의 약 10%정도로 전천일사량  $I_G = 1.1 \times I_D$  이다.<sup>(5)</sup>

앞서 언급한 PSA알고리즘에 의하여 태양의 위치를 추적한 뒤 AM함수에 대입하여 연중 일사량을 산출하였다.

Turbo C++를 이용하여 계산과정을 프로그래밍 하였고, 그 결과를 엑셀시트로 변환하여 분석하였다. 연중 시간대별 기준 일사량의 기초 데이터를 엑셀시트로 변환하면 간단한 조건문과 그래프 등을 용이하게 표현할 수 있다.

매 4분마다(태양의 각도 1°에 해당) 경사면 일사량을 계산하였으며, 대상지역 위도는 누구나 쉽게 위치를 이해할 수 있고 대체적으로 고도각이 높은 지형이 분포하고 있는 38°를 대상으로 선정하였다. 모듈의 방위각은 정남방향이며, 경사각은 30도를 기준으로 하였다.

2008년 6월 12일을 기준으로 Fig. 4는 프로그램에 의해 계산된 일사량[kW/m<sup>2</sup>]이며, 매 4분마다 계산된 값을 그래프로 표현하였다.

Fig. 5는 국내에서 위도 38도와 근접한 곳에 설치된 연구

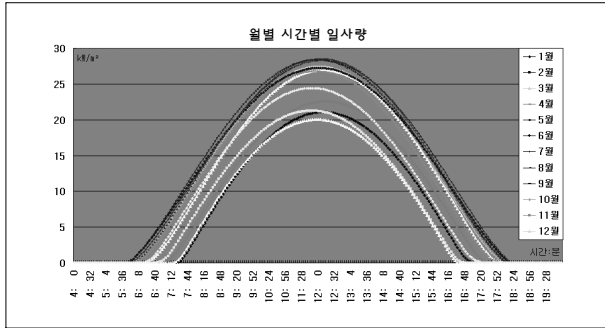


Fig. 6 Calculation of solar Radiation.

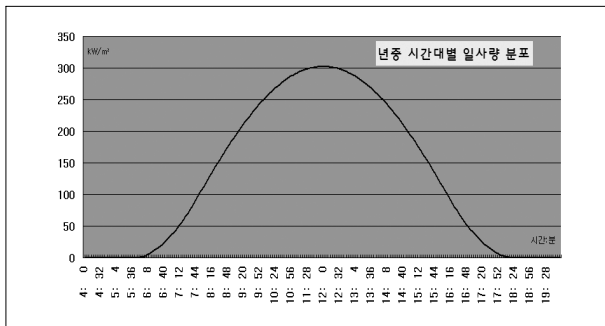


Fig. 7 Solar Radiation in every 4 minutes.

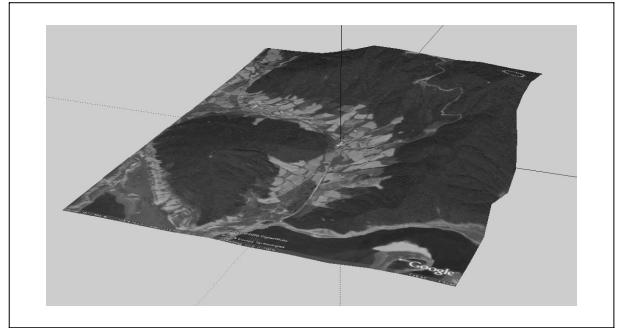


Fig. 8 Importing Google Earth View.

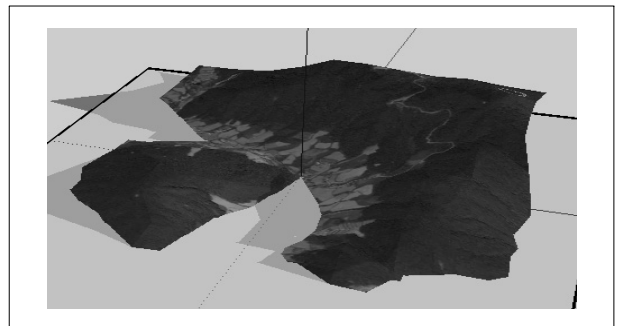


Fig. 9 Sunrise in Summer (June).

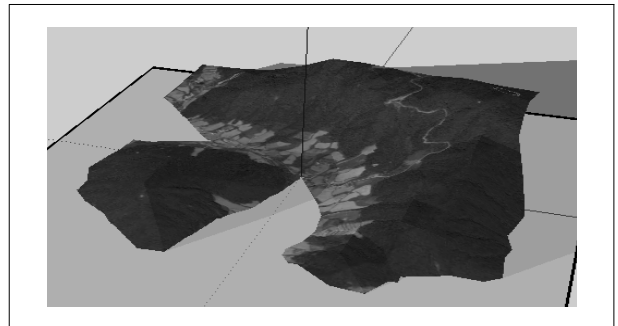


Fig. 10 Sunset in Winter (December).

용 일사량 측정값으로, 시간간격은 20분이다. 하루중 일사량의 분포곡선은 매우 흡사한 유형을 보인다. 계산값이 실측값보다 다소 높으며, 이것은 실측된 일사량계의 위치, 고도, 적용된 보정계수 등의 다양한 원인이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 월별 시간대별 일사량 분포로서, 매월 동일시간대의 일사량을 합산하여 나타내었으며, 월별 일사량의 변화를 쉽게 비교할 수 있다. 여기서 월별 일사량의 중심선이 일치하지 않은 것은 월별 일수가 다르기 때문이다.

Fig. 7은 연중 시간대별 일사량분포도로서 매일의 동일 시간대 일사량을 합산하였다.

이것은 위도 38도에서의 이론적 일사량을 의미하는 것으로, 지형 고도각에 의해 손실이 발생하는 시간대를 환산하여 반영함으로써 기준 발전량 및 발전수익에 대한 손실을 계산하였다.

#### 4. 지형분석 방법소개

주변에서 쉽게 접할 수 있는 Google Earth와 Sketch Up

프로그램을 이용하여 예정지 주변의 지형을 분석할 수 있다. 태양광 발전사업에 대한 비전문가도 손쉽게 활용할 수 있으며, 해그림자 형태를 모의함으로써 발전소 예정지 선정에 필요한 기초조사를 직접 수행할 수 있다.

Google Earth를 실행하여 원하는 지역을 표시하고, Sketch Up의 메뉴중 Tools-Google Earth-Get Current View를 이용하면 Google Earth 지형을 삽입할 수 있다. Terrain 메뉴를 이용하면 Fig. 8처럼 입체적으로 표시할 수 있다.

발전소 예정지 중심을 Sketch Up의 중심점에 위치하게 하고, Shadow setting 메뉴를 이용하면 간단한 그림자의 모의

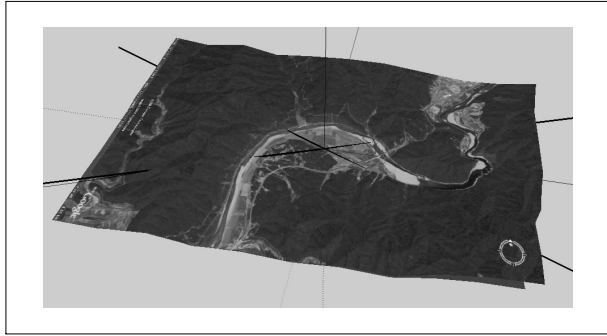


Fig. 11 topography analysis (sample site).

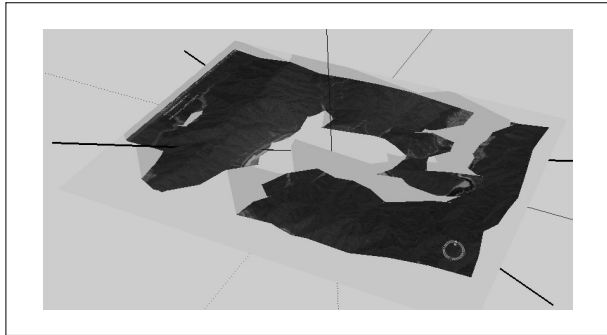


Fig. 12 topography analysis (shadow).

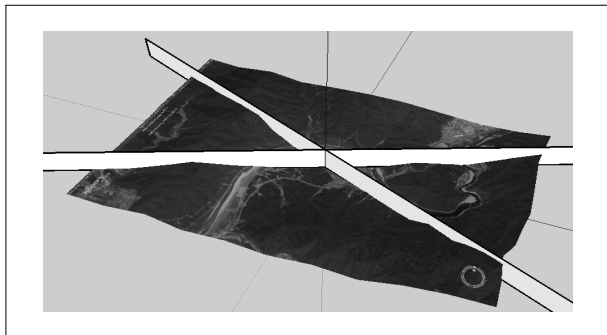


Fig. 13 Angular boundary of sun's position.

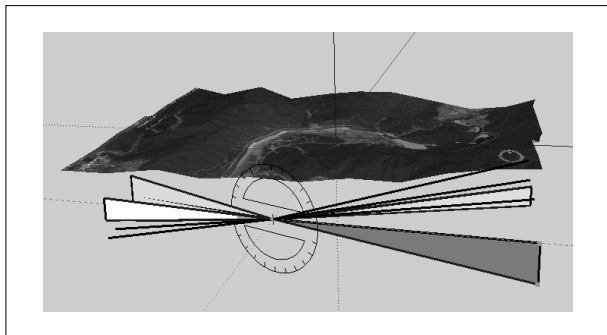


Fig. 14 topography analysis (elevation).

결과를 확인할 수 있다.

Fig. 9는 6월 일출시간대에 대해, Fig. 10은 12월 일몰시간대에 대한 그림자의 유형을 나타낸 것으로, 발전소 예정지와 동일한 레벨의 수평면을 삽입하면 주변지형에 의한 그림자의 유형을 쉽게 구별할 수 있다.

Fig. 11과 같이 일반적인 지형을 선정한 후, Sketch Up을 이용하여 주변 지형의 고도각을 측정하였다. 그 결과를 일사량 계산조건에 적용하여 고도각에 의한 손실을 계산하였다.

앞서 기술한 방법으로 분석한 그림자 유형은 Fig. 12와 같다.

태양이 움직이는 각도의 범위는 Fig. 13과 같이 표시할 수 있으며, 이 범위안에 포함되는 동서방향의 지형 고도각은 Fig. 14처럼 지형의 정점과 중심점과의 각도를 측정하여 구할 수 있다.

## 5. 지형 장애물에 의한 일사량 감소

Fig. 11 예정지의 월별 지형 고도각은 Table 1과 같으며, 서쪽이 약 9~10도, 동쪽이 약 4~7도이다. 태양의 고도가 지형 고도각보다 낮은 경우, 그림자의 영향권이거나 일출·몰시각이 지연되는 것이므로 일사량을 0으로 가정하였다.

Table 1의 지형 고도각을 적용할 경우, 일사량의 총합은 지형 장애물이 없는 이상적인 경우에 비해 약 0.65%가 감소되었다.

발전설비용량 1,000kWp, 설비이용률 15%를 가정할 경우, 지형 고도각으로 인한 손실은 총발전량 1,314MWh의 0.65%인 8.6MWh가 발생한다.

발전차액지원 기준금액인 536.04원/kWh(20년 기준)을 적용시 연간 기준 발전수익인 704,357천원에 비하여 연간 4,590천원의 손실이 발생하고, 20년간 환산 시 91,803천원의 손실을 가져온다.

상기 지형조건을 적용 시 모듈 경사면 일사량 계산 결과는 Fig. 15와 같으며, 일출 및 일몰시간대에서 일사량의 손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 1. elevation (degree) of topography

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
East (°)	7	6	5	4	5	6	7	5	4	5	6	7
West (°)	9	9	9	9	9	10	10	9	9	9	9	9

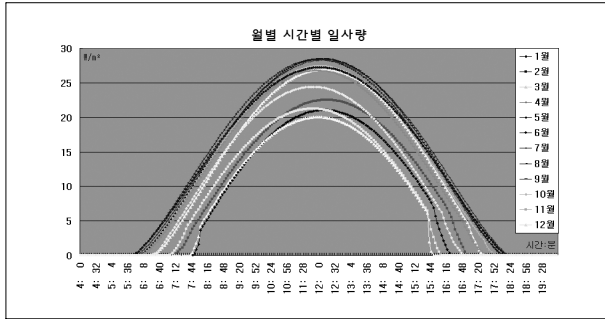


Fig. 15 Radiation with topography condition.

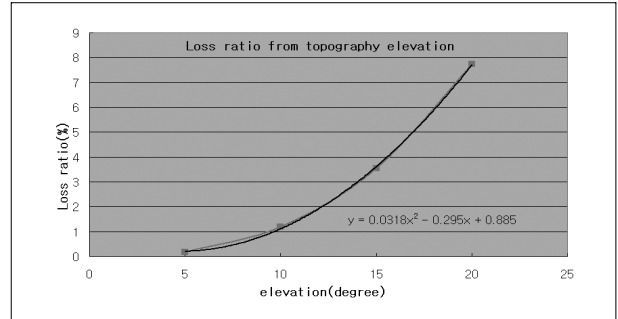


Fig. 16 Loss ratio from topography elevation.

## 6. 결론

본 연구에서는 위도 38°위에서 모듈 경사각 30°에 대한 이론적 연간 일사량을 계산하였다. Google Earth 및 Sketch Up 프로그램을 이용한 간단한 지형분석 방법을 소개하였으며, 이를 이용하여 특정 지점의 지형 고도각을 구하는 방법을 소개했다. 또한 이러한 지형 고도각에 의한 손실비율을 계산하여 발전량과 발전수익에 대한 손실로 환산하여 제시하였다.

태양광 발전량에 영향을 줄 수 있는 기상조건(비, 구름 등)의 분포 양상, 온도에 의한 모듈성능의 영향 등을 고려할 경우, 실제값과 계산값은 차이를 보일 것이다. 하지만 본 연구 결과는 지형 고도각으로 인한 손실의 크기를 이해하는데 필요한 유용한 자료를 제공할 것이다.

몇가지 지형 고도각에 따른 손실 발전량과 손실금액을

Table 2. losses from topography condition

고도각[degree] (elevation angle)	5°	10°	15°	20°
일 손실시간[min/day] (daily loss time)	40	80	120	160
기준 연간발전량[MWh] [basis yearly generation]	1,314	1,314	1,314	1,314
손실률[%] (loss ratio)	0.18	1.19	3.54	7.73
연간 손실 발전량[MWh] (yearly generation loss)	2.3	15.7	46.6	101.6
기준 연간수익[million won] (basis yearly income)	704	704	704	704
연간 손실액[million won] (yearly income loss)	1.2	8.4	25.0	54.4
20년간 손실액[million won] (20 years income loss)	25	168	499	1,089

Table 2에 정리하였다. 동서 방향에 대해 동일한 지형 고도각을 가정하였으며, 기준 발전용량은 1,000kWp를, 설비 이용률 15%를 적용하였다. 그리고 발전차액 기준금액은 536.04원/kWh(20년 기준)을 적용하였다.

동서 방향 지형 고도각이 10도인 경우, 이상적인 지형조건에 비교하여 4분×10°×2=80분에 해당하는 시간동안 발전손실이 발생하게 된다.

국내의 일반적인 지형 고도각을 5도라고 가정할 경우, 40분의 손실이 발생하며, 연간 약 7백만원 정도의 손실 또는 20년간 약 1억 4천만원의 손실을 가져오게 된다.

지형 고도각에 따른 발전 손실률은 Fig. 16과 같으며, 지형 고도각이 클수록 손실액은 2차 함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 주변의 지형여건이 태양광 발전 사업의 경제성 확보에 미치는 영향을 무시할 수 없을 것이다.

특히, 태양의 위치를 추적하여 발전량을 극대화시키는 추적식 태양광 발전설비는 일출 및 일몰 시간대의 발전량이 크므로, 지형 고도각에 의한 발전손실은 경제성 확보에 치명적인 요인이 된다. 따라서, 발전소 예정지 선정 및 추적식 또는 고정식 등의 발전설비 형식 결정에 있어 충분한 지형분석이 선행되어야 할 것이다.

## References

- [1] 박영철, 강용혁, 1998, 태양위치계산, 한국태양에너지학회, pp. 526-533 (8 pages).
- [2] Blanco-Muriel M., Alarcon-Padilla D.C., Lopez-Mratalla D., and Lara-Coira M., 2001, "Computing the Solar Vector", Solar Energy, Vol. 70, No. 5, pp. 431-441.

[3] Meinel A.B. and Meinel M.P., 1976, "Applied Solar Energy", Addison Wesley Publishing Co.

[4] 권순용, 2006. 천문학 용어 사전, 천문노트, 천문학 관련자료실, <http://astronote.org>

[5] John R. Wilson, Griffin Burgh, Energizing Our Future, John Wiley & Sons, Inc. Solar Energy and Photovoltaics, 29 Jan 2008.

### 김 영 득



1998년 건국대학교 전기공학과 공학사  
2000년 건국대학교 전기공학과 공학석사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 에너지사업팀 과장  
(E-mail : kikikoko@kwater.or.kr)

### 안 인 수



1989년 울산대학교 기계공학과 공학사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 에너지사업팀 차장  
(E-mail : ahnis@kwater.or.kr)

### 김 민 수



2003년 숭실대학교 전기공학과 공학사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 에너지사업팀 대리  
(E-mail : londonsu@naver.com)

### 장 정 호



1998년 건국대학교 전기공학과 공학사  
2007년 충남대학교 전기공학과 공학석사

현재 한국수자원공사 수자원연구원 설비에너지팀 과장  
(E-mail : chany@kwater.or.kr)

### 장 문 성



1987년 광운대학교 전기공학과 공학사  
2008년 아주대학교 경영대학원 경영학석사

현재 한국수자원공사 에너지사업처 에너지사업팀장  
(E-mail : C1025214@hanmail.net)