

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

전문가시스템을 이용한 태양광 어레이의 최적설치 각도에 관한 연구

유권종*, 이요한**, 소정훈*, 성세진**, 유병규*

*한국에너지기술연구원(y-gj@kier.re.kr/jhso@kier.re.kr/bgyuyu@kier.re.kr)

**충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (yohoney@kier.re.kr/sjseong@cnu.ac.kr)

The Study on Optimum Installation angle of Photovoltaic Arrays using the Expert System

Yu, Gwon-Jong*, Lee, Yo-Han**, So, Jung-Hun*, Seong, Se-Jin**, Yu, Byung-Gyu*

*Korea Institute of Energy Research(y-gj@kier.re.kr/jhso@kier.re.kr/bgyuyu@kier.re.kr)

**Chung-nam National University(yohoney@kier.re.kr/sjseong@cnu.ac.kr)

Abstract

The measured solar radiation incident on tilted surfaces has been widely used as important solar radiation data in installing photovoltaic arrays. To optimize the incident solar radiation, the slope, that is the angle between the plane surface in question and the horizontal, and the solar azimuth angles are needed for these solar photovoltaic systems. This is because the performance of the solar photovoltaic systems is much affected by angle and direction of incident rays. The expert system can predict the optimum installation angle of photovoltaic arrays with those factors.

Keywords : 전문가시스템(Expert system), 최적설치 각도(Optimum installation angle)

기 호 설 명

ϕ : 해당지방의 위도
 δ : 일적위
 β : 수평면에 대한 태양전지 어레이의 경사각
 γ : 표면방위각
 ω_s : 수평면 일몰 시간각
 ρ : 지면 반사율
 G_{sc} : 태양 상수 (1,367Wh/m²)
 \bar{H} : 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량

\bar{H}_0 : 해당지방의 월평균 대기권밖 일사량
 \bar{H}_T : 월별 1일평균 경사면일사량
 \bar{H}_d : 월별 1일평균 산란일사량
 \bar{H}_{bT} : 월별 1일평균 경사면 직달일사량
 \bar{K}_T : 월별 1일평균 일사율
 \bar{R}_b : 수평면에서의 총일사량에 대한 경사면직달일사비율

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 따른 미래 에너지의

접수일자 : 2007년 7월 11일, 심사완료일자 : 2007년 9월 8일

교신저자 : 이요한(yohoney@kier.re.kr)

대안으로서 태양광발전 및 풍력발전 등과 같은 대체에너지 연구개발이 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 범 정부차원에서 이루어지고 있다. 특히 대체에너지기술 중에서도 무한정하며 또한 청정한 에너지원으로서 각광을 받고 있는 태양광발전은 에너지원의 다양화 분산화가 추진되는 상황이다. 최근에는 지역에 따른 편중성이 없고 설치 규모의 선정에 자유로운 소규모 주택용 태양광발전시스템의 개발이 활발하게 추진되고 있다. 태양에너지는 에너지 밀도가 저밀도이며, 출력특성이 일사량, 온도 등의 자연조건에 좌우되기 때문에 이를 위한 적절한 설계에 관한 연구가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 태양광발전의 출력특성에 가장 영향을 미치는 요인인 일사량을 최대한 얻을 수 있는 최적 경사각도 산출을 위한 전문가시스템의 개발과 이를 통하여 한국의 최적경사각 분포와 계절별 최적경사각의 분포를 산출할 수 있다.

2. 이론적 배경

태양광발전시스템을 설계할 때에는 필연적으로 수평면에 대한 경사면에서의 월별 1일 평균 일사량 값이 고려되어야 한다. 태양광 어레이의 설치 위치와 각도에 따라 성능이 크게 좌우되기 때문에 추가 비용 없이 가장 쉽게 성능향상을 기대할 수 있기 때문이다. 이 값은 월별 1일 평균 직달일사량과 산란일사량, 그리고 지표면 반사 일사량의 합으로부터 구할 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁾

$$\overline{H_T} = \overline{H} \left(1 - \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}\right) \overline{R_b} + \overline{H_d} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \overline{H_p} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \quad (1)$$

여기에서, $\overline{H_d}/\overline{H}$ 는 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량에 대한 산란일사량의 비율을 말하며, $\overline{R_b}$ 는 해당 달의 월평균 1일 값으로 수평면에서의 총일사량에 대한 경사면 직달 일사 비율인 $\overline{H_bT}/\overline{H}$ 를 의미한다. 이에 대한 공식은 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0.775 + 0.00653(\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455(\omega_s - 90)] \cos(115K_T - 103) \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 해당지방의 월평균 대기권 밖 일사량 H_0 는 다음의 식 (3)으로 정의되어 있다.

$$\overline{H_0} = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right] \times \left[\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi \sin\delta\right] \quad (3)$$

식 (1)의 $\overline{R_b}$ 값은 해당 달의 1일 월평균 일사량 값에 대하여 수평면에서의 월별 1일 평균 총일사량에 대한 경사면 직달일사량의 비율을 말한다.

식 (4)는 북반구에서 적도를 향한 경사면, 즉 방위각이 정남을 향한 경우를 나타내며, $\overline{R_b}$ 값은 다음 식으로 정의된다.

$$\overline{R_b} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos\delta \sin\omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin\phi \sin\delta} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 경사면 일몰시간각인 ω'_s 는 해당월 평균일의 대표적인 일적위 값을 적용하여 다음의 식 (5)에 의해 산출된다.

북반구의 경우,

$$\omega'_s = \min \left| \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \right. \\ \left. \cos^{-1}[-\tan(\phi - \delta) \tan\delta] \right| \quad (5)$$

1) J.A Duffile and W.A Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, Wiley New York, PP.3-145. 1991

방위각이 정남을 향한 경우가 아닐 경우 식(4)는 사용하지 못한다. 그러나 이 경우 Klein (1997)에 의해 정의된 식을 사용하여 Rb값을 구할 수가 있다. 그 식은 다음의 식 (6)에서 식 (9)으로 정의되어 있다.

$$\bar{R}_b = \frac{\begin{cases} (\cos\beta \sin\delta \sin\phi)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) \\ -(\sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma)(\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180) \\ +(\cos\phi \cos\delta \cos\beta)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) \\ +(\cos\delta \cos\gamma \sin\phi \sin\beta)(\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) \\ -(\cos\delta \sin\beta \sin\gamma)(\cos\omega_{ss} - \cos\omega_{sr}) \end{cases}}{2(\cos\phi \cos\delta \sin\omega_w + (\pi/180)\omega_s \sin\phi \sin\delta)} \quad (6)$$

여기에서, ω_{sr} 과 ω_{ss} 는 각각 경사면에서의 일출, 일몰 시간각으로 다음의 식으로 나타낸다.

서쪽방위를 향한 경우 ($r > 0$),

$$\begin{aligned} \omega_{sr} &= -\min\left\{\omega_s, \arccos\left[\frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right]\right\} \\ \omega_{ss} &= \min\left\{\omega_s, \arccos\left[\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right]\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

동쪽방위를 향한 경우 ($r < 0$),

$$\begin{aligned} \omega_{sr} &= -\min\left\{\omega_s, \arccos\left[\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right]\right\} \\ \omega_{ss} &= \min\left\{\omega_s, \arccos\left[\frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right]\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{\cos\phi}{(\sin\gamma \tan\beta)} + \frac{\sin\phi}{\tan\gamma} \\ B &= \tan\delta \left\{ \frac{\cos\phi}{\tan\gamma} - \frac{\sin\phi}{[\sin\gamma \tan\beta]} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

3. 전문가 시스템 구축

앞 절의 이론적 배경을 바탕으로 전문가시스템을 구축하였으며, 이 전문가 시스템은 예측하고자 하는 지역의 정보와 그 지역에 대한 태양광 어레이의 최적의 설치 경사각에 따른 최대 일사량을 예측하기 위해 구축되었다.

그림 1은 대기권 밖 일사량을 계산하기 위한 시스템 산출흐름도이며 계산하고자하는 지역의 위도를 입력받아 전문가시스템의 시뮬레이션을 통해 그 지역의 대기권 밖 일사량을 계산한다.

그림 2는 계산된 대기권 밖 일사량과 측정된 그 지역의 수평면 전일사량 데이터, 위도 등의 데이터를 입력받아 수평면에 대한 경사면의 일사량 데이터를 출력한다.

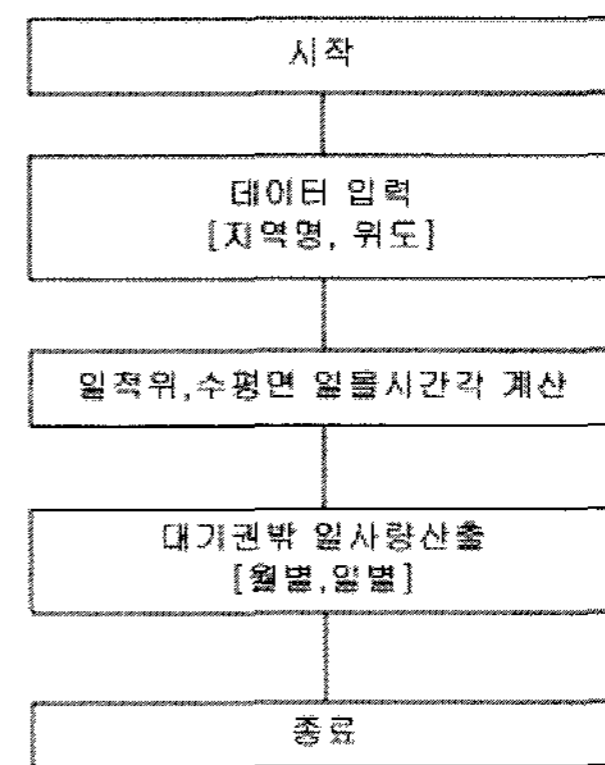


그림 1. 대기권 밖 일사량 예측 전문가 시스템 산출흐름도

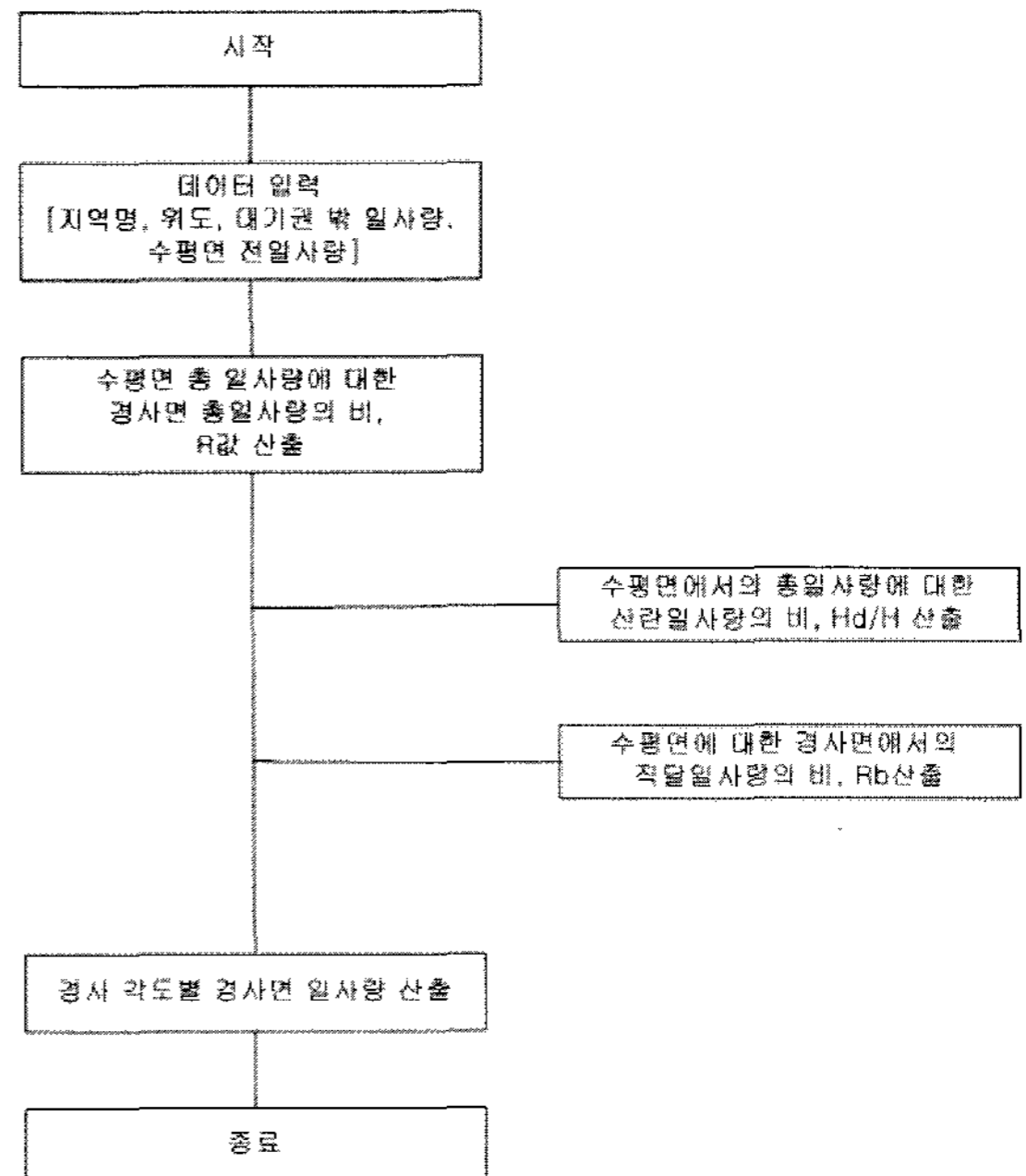


그림 2. 방위별 경사면 일사량 예측 전문가 시스템 산출흐름도

전문가시스템은 데이터 수집 장치로부터 데이터를 수집하거나 부르는 특성을 가지고 있지 않다. 실제 데이터 파일은 전문가시스템이 작업을 시작할 수 있도록, 특정 형태로 저장매체에 저장을 하거나, 직접입력을 해 주어야만 한다. 지역명칭과 위도 데이터가 입력되면 그 데이터는 전문가 시스템을 통해 일적위, 수평면 일몰시간각, 대기권 밖 일사량과 같은 데이터를 산출하고 이 데이터를 특정 형태로 저장매체에 저장한다. 이 데이터는 다시 전문가시스템을 통해 해당지역의 경사면 일사량 값을 예측하여 원하는 형태로 출력하게 된다.

4. 실험 및 결과 분석

제안된 전문가시스템의 예측 데이터는 해당지역의 경사별 실측 데이터와 상호 비교함으로써 오차를 줄이고 신뢰도를 높일 수 있다. 이를 위해 특별한 실험 장비와 이를 설치할 위치의 선정이 매우 중요하다. 또한 실측치와의 결과를 비교하고 고찰하는 작업이 요구된다.

4.1 실험 방법

전문가 시스템을 운용하기 위해선 해당 지역의 위도와 수평면 전일사량 데이터가 필요하다.

해당지역의 수평면 전일사량 데이터를 확보하기 위해서는 장기간 동안의 실측 데이터가 필요하며 현재 전국의 측정네트워크를 통해 실측되고 있다. 그 측정지 명세와 위도는 표 1과 같다.

전문가시스템을 평가하기 위한 실측 데이터 측정을 위해 측정지에서 일사센서를 설치할 입지를 선정할 시에는 일사센서의 감지부 면이 태양광선이 잘 받아들일 수 있도록 주위의 장애물로부터 충분히 떨어진 장소를 물색하여야 한다. 이와 같은 점을 고려하여 측정기기의 설치 위치는 비교적 높아 주변의 장애물의 영향이 적은 한국에너지기술연구원 내 건물의 옥상(36.22, 127.22)으로 정하였다.

표 1. 전국 일사량 측정지 명세

지역명	지역번호	위도	경도	고도
춘천	101	37°54'	127°44'	74.0 m
강릉	105	37°45'	128°54'	26.0
서울	108	37°34'	126°58'	85.5
원주	114	37°20'	127°57'	149.8
서산	129	36°46'	126°28'	19.7
청주	131	36°38'	127°26'	59.0
대전	133	36°22'	127°22'	67.2
포항	138	36°02'	129°24'	2.5
대구	143	35°53'	128°37'	57.8
전주	146	35°49'	127°09'	51.2
광주	156	35°10'	126°53'	70.3
부산	159	35°06'	129°02'	69.2
목포	165	34°49'	126°22'	36.5
제주	184	33°31'	126°32'	22.0
진주	192	35°12'	128°06'	21.5
영주	272	36°52'	128°31'	209.5

또한, 경사면 태양광에너지 측정을 위하여 측정지에 일사센서를 남향 수평면에 대한 경사각도 0°에서 90° 사이에 15°씩 변환하여 7개를 설치하였으며, 또한 동향 및 서향, 그리고 북향면의 경사각도 90°에 각각 1개씩 설치하여 총 10개를 설치하였다. 이와 같이 설치된 시스템에 의하여 측정된 데이터는 통제소에 설치된 데이터 프로세서의 원격제어에 의해 기존 랜통신 인터페이스를 통하여 원거리 전송되며, 전송된 데이터는 다시 데이터 파일로 구분하여 하드디스크에 저장시켜 각종 데이터의 분석 및 전산처리를 행할 수 있다. 이와 같이 통제소에서 전산 처리되고 있는 전산프로그램은 데이터 회수 및 처리용 프로그램을 통해 시간별 일사량 자료를 데이터베이스로 저장하고, 지속적으로 보완할 수 있게 된다.

4.2 결과 분석

한국에너지기술연구원이 위치한 대전지방에서 1996년 1월부터 2004년 12월까지 8년간 매 시간마다 측정된 실측자료와 전문가시스템을 통해 예측된 예측결과와의 비교는 표 2와 같다.

표 2. 대전지방의 각도별 일사량 변동
(kWh/m²/day)

경사각		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
S(15)	실측	2.73	3.56	4.28	4.89	4.80	4.97	3.99	3.89	4.03	3.76	2.82	2.69	3.87
	예측	2.51	3.25	3.94	4.60	4.55	4.76	3.83	3.70	3.75	3.45	2.56	2.42	3.61
S(30)	실측	3.33	4.01	4.60	4.93	4.65	4.76	3.83	3.85	4.21	4.23	3.34	3.29	4.09
	예측	2.92	3.59	4.10	4.52	4.33	4.46	3.62	3.58	3.80	3.74	2.93	2.87	3.70
S(45)	실측	3.54	4.28	4.52	4.54	4.11	4.18	3.35	3.48	4.02	4.33	3.59	3.63	3.97
	예측	3.18	3.75	4.06	4.25	3.94	4.01	3.29	3.31	3.67	3.83	3.15	3.17	3.63
S(60)	실측	3.48	4.03	4.03	3.78	3.26	3.36	2.63	2.85	3.51	4.02	3.48	3.61	3.50
	예측	3.26	3.71	3.82	3.79	3.41	3.43	2.85	2.93	3.38	3.73	3.19	3.28	3.40
S(75)	실측	3.32	3.70	3.49	3.03	2.44	2.60	1.97	2.22	2.94	3.59	3.27	3.45	3.00
	예측	3.16	3.48	3.40	3.19	2.79	2.77	2.35	2.45	2.94	3.44	3.07	3.21	3.02
S(90)	실측	3.14	3.39	3.00	2.33	1.73	1.99	1.39	1.64	2.38	3.19	3.04	3.29	2.54
	예측	2.88	3.06	2.83	2.48	2.12	2.10	1.83	1.91	2.38	2.98	2.78	2.96	2.53

그림 3은 이 시스템을 이용하여 예측한 전국의 연평균 최적 경사각으로 그림에서 보는 바와 같이 전국의 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 약 24°~36°의 분포를 보이고 있으며 제주도를 제외한 전국의 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 약 30°~36°에서 최대의 태양 일사를 받아들이는 것으로 나타났다.

분포상의 특징을 살펴보면 태백산맥, 대관령일대가 36°, 남해 중부지방이 34°, 호남 지방이 31°, 제주도 지방은 24°로 나타났으며 그 외의 대부분지역은 33°인 것으로 나타났다. 또한 북쪽 지방으로 향할수록 최적 경사각도는 높아지는 경향을 보이고 있으며, 지구 자전축의 영향으로 약간 기울어진 형태로 분포하고 있다.

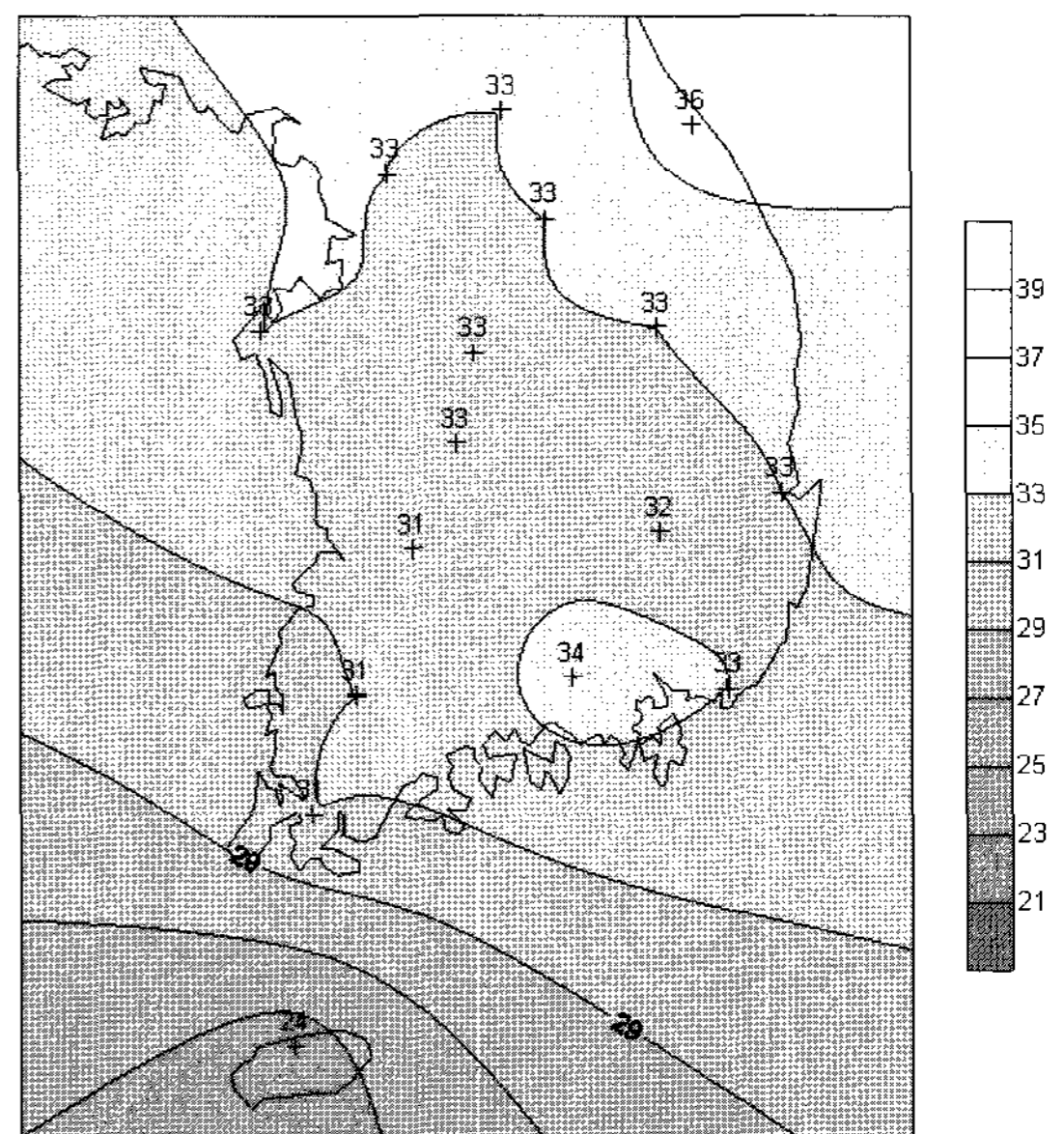
계절별 전국의 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 그림 4에서 그림 7로 나타내었다.

전국의 봄철 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 15°~20°의 분포를 보이고 있으며, 대체적으로 고른 분포를 보이고 있으며 북쪽 지방일수록 최적 경사각도가 높아지는 경향을 보이고 있다.

전국의 여름철 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 1°~5° 사이의 분포를 보이고 있으며, 대체적으로 고른 분포를 보이고 있다. 또한, 북쪽 지방일수록 최적 경사각도가 높아지는 경향을 보이고 있고 여름철의 최적 태양광 어레이 설치경사각이 0°(수평면)에 가까운 경향을 보이고 있다. 이것은 여름철 태양의 고도가 천정과 수직에 가깝다는 것을 의미한다.

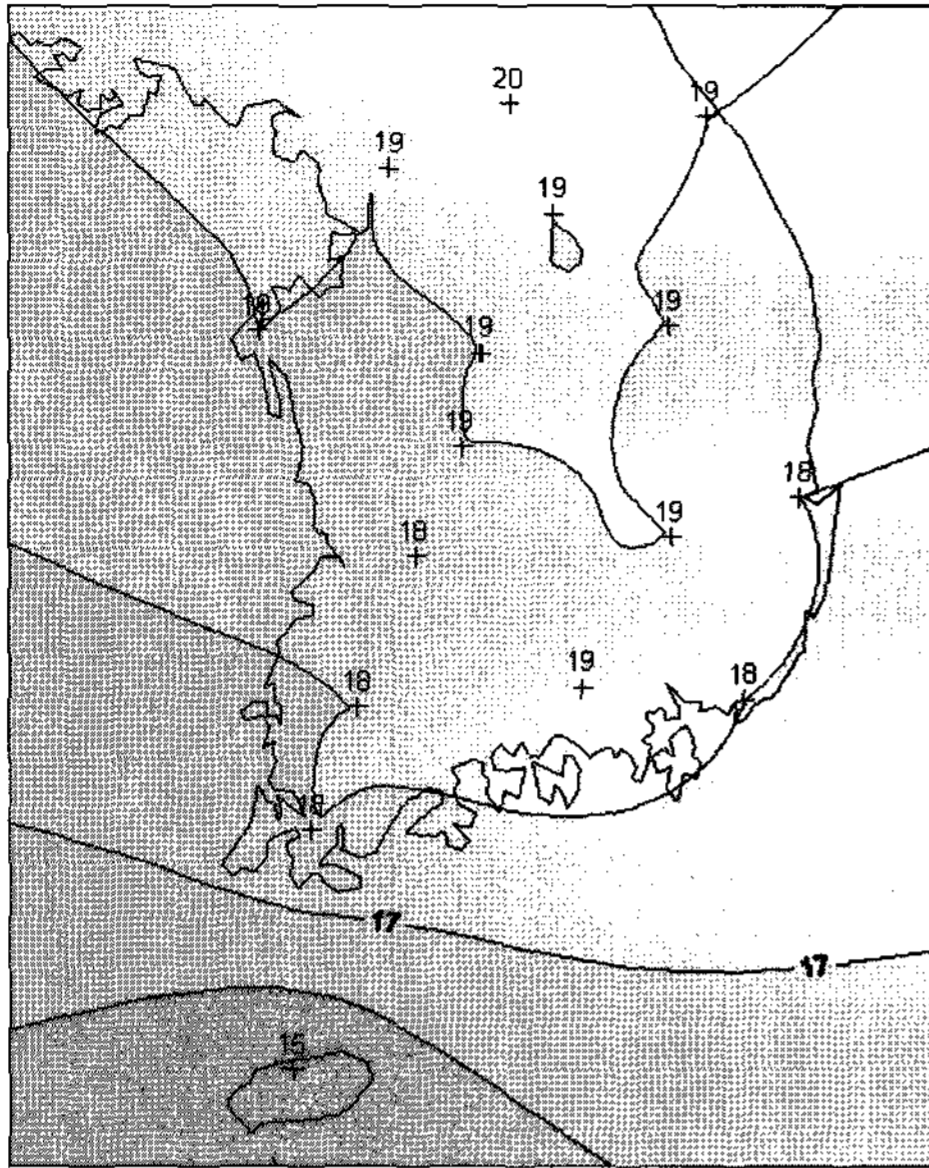
전국의 가을철 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 39°~46° 사이의 분포를 보이고 있으며, 강릉과 같은 동해 북부 해안지방으로 갈수록 최적 태양광 어레이 설치 경사각이 높아지는 경향을 보이고 있다.

전국의 겨울철 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 50°~60° 사이의 분포를 보이고 있으며, 동해 북부 해안지방으로 갈수록 최적 태양광 어레이 설치 경사각이 높아지는 경향을 보이고 있다.



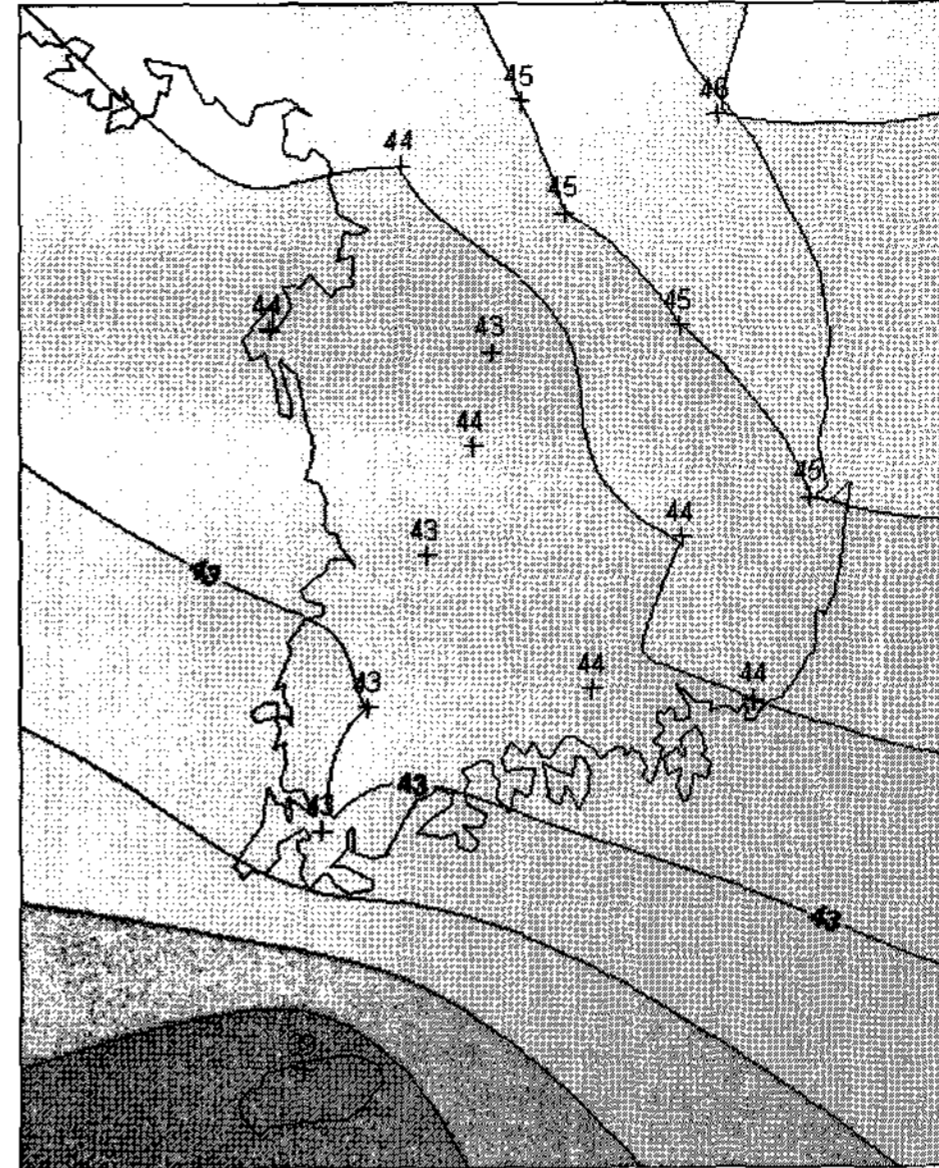
Annual-average(1982-2005)

그림 3. 연평균 최적 경사각 (남향기준)



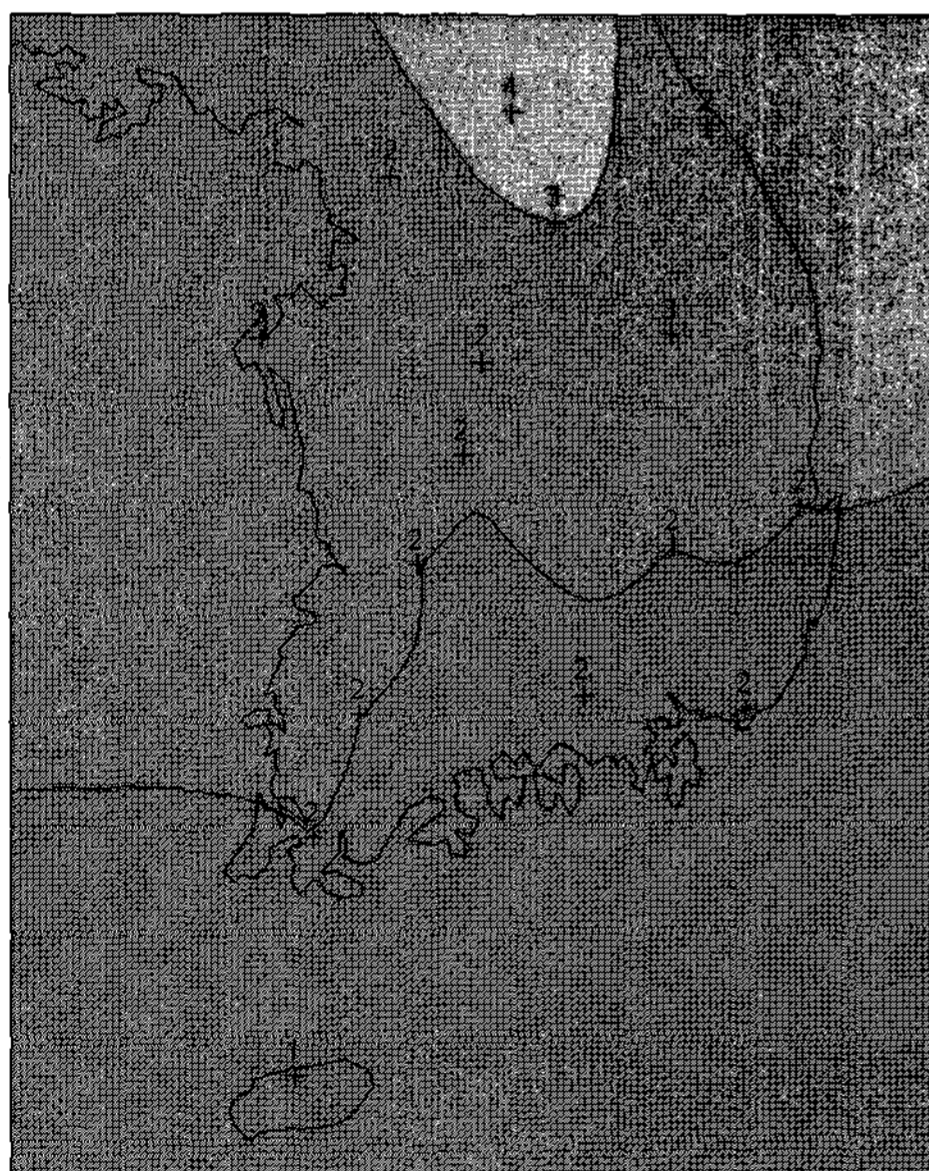
Spring(Mar.- May)

그림 4. 봄철 최적 경사각 (남향기준)



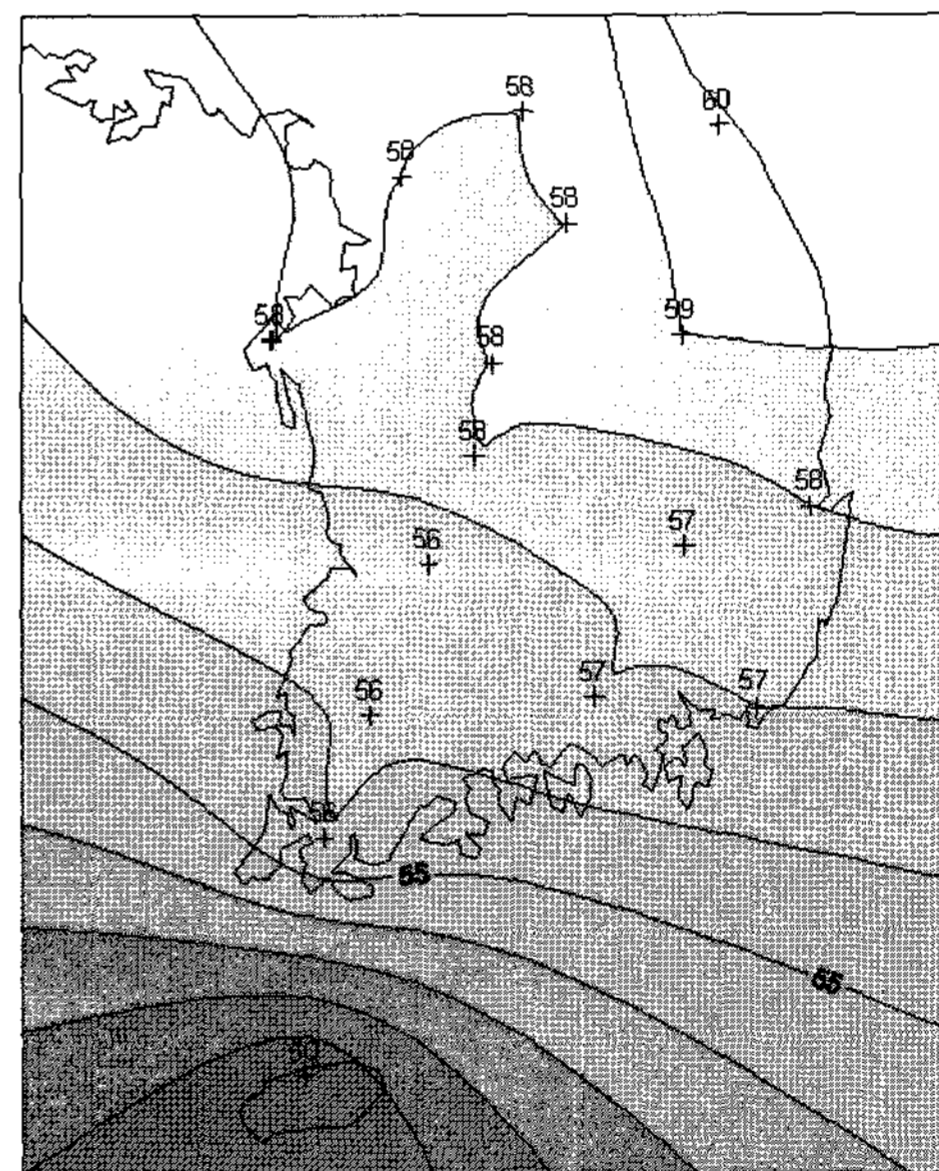
Fall(Sep.- Nov.)

그림 6. 가을철 최적 경사각 (남향기준)



Summer(Jun. - Aug.)

그림 5. 여름철 최적 경사각 (남향기준)



Winter(Dec.- Feb.)

그림 7. 겨울철 최적 경사각 (남향기준)

그림 8은 최적 태양광 어레이 설치 경사각으로 얻을 수 있는 전국의 연평균 최대 일사량을 표시한 것이며, 하루에 3.6kWh/m²에서 4.4kWh/m²의 분

포로 전국적으로 고른 분포형태를 나타내었다. 지역적으로는 남해 중서부 해안 지방과 충청 서부 해안 지방의 일사량이 크게 나타났으며, 반면 전주 지

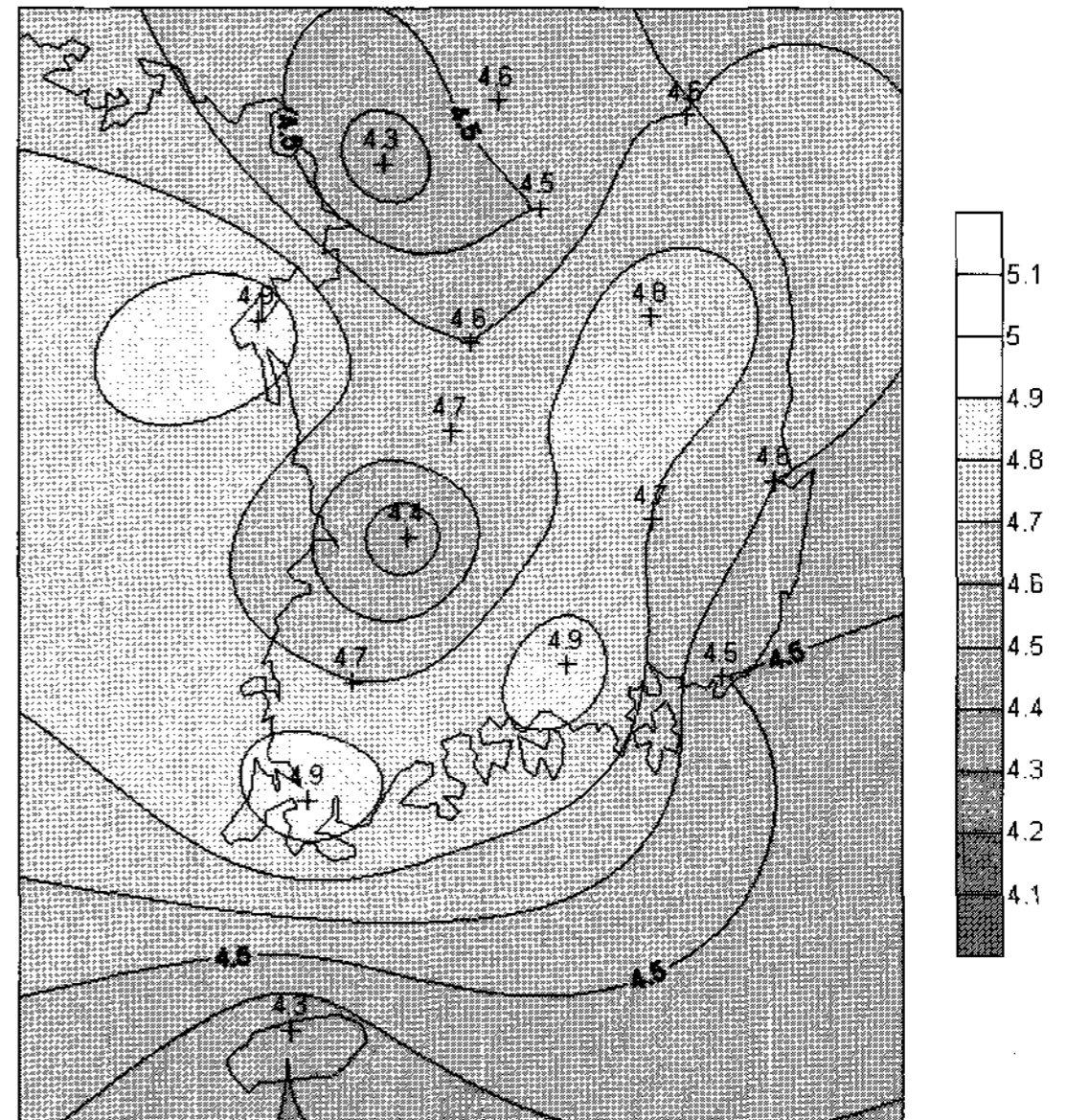
방과 서울 지방의 경우는 낮게 나타났다.

계절별 전국의 최적 태양광 어레이 설치시의 최대 일사량은 그림 9에서 그림 12로 나타내었다.

봄철의 최대 일사량은 $4.3\text{kWh}/\text{m}^2$ 에서 $4.9\text{kWh}/\text{m}^2$ 으로 전국적으로 고른 분포를 나타내었으며 연평균 일사량 분포와 비슷한 형태로 나타났다.

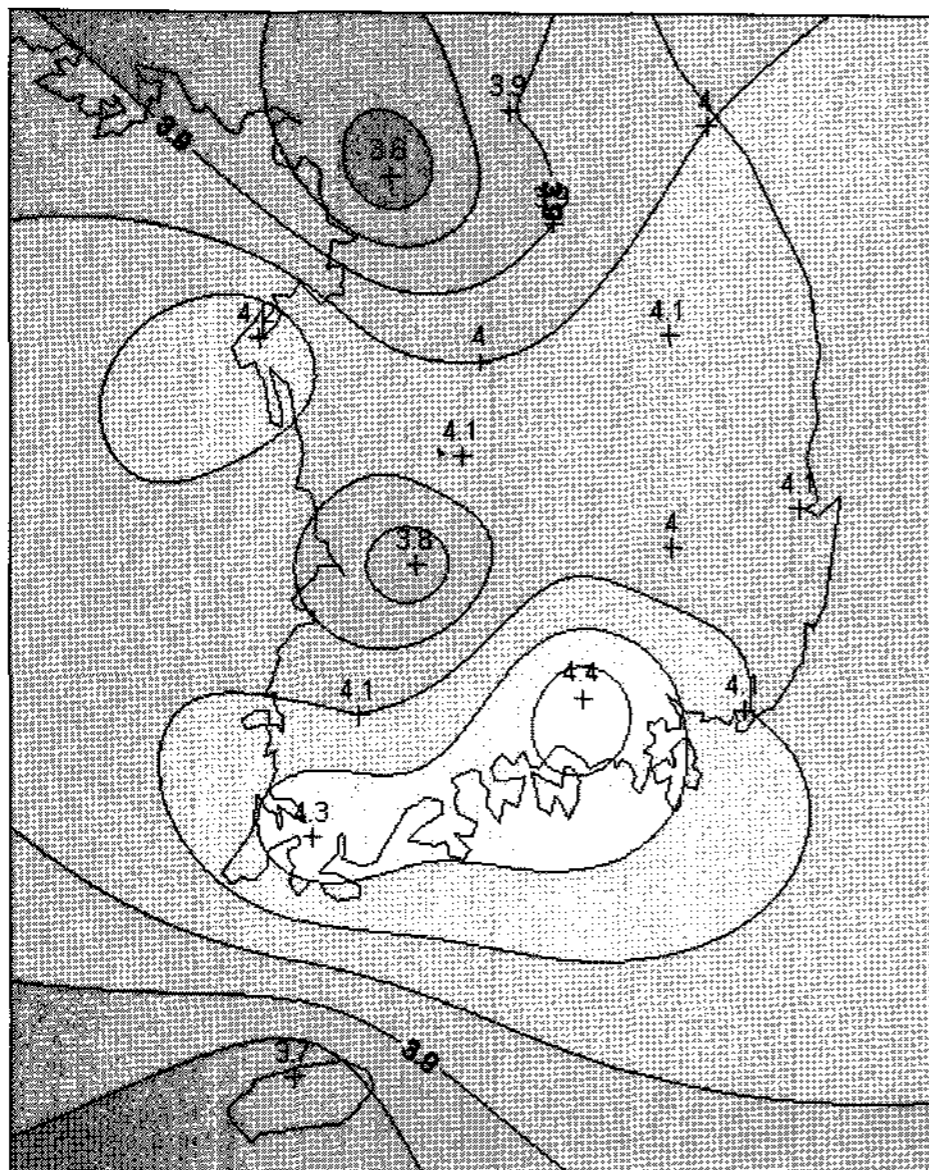
또한 여름철의 최대 일사량은 $3.7\text{kWh}/\text{m}^2$ 에서 $4.7\text{kWh}/\text{m}^2$ 으로 나타났다. 남해 서부 해안지방과 제주도 지방의 일사량분포가 높게 나타났다. 반면에 서울지방과 전주지방의 경우 타 지역에 비해 낮게 나타났으며 특히 서울 지방의 일사량이 타곳에 비해 매우 낮게 나타났다.

가을철 최대 일사량은 $3.7\text{kWh}/\text{m}^2$ 에서 $4.4\text{kWh}/\text{m}^2$ 으로 남해중서부 해안지방으로 갈수록 일사량 분포가 높게 나타나는 경향을 보였으며, 겨울철 최대 일사량을 나타낸 것으로 $2.4\text{kWh}/\text{m}^2$ 에서 $4.7\text{kWh}/\text{m}^2$ 으로 일사량 분포가 나타났다. 동해 해안지방과 남해 동부 해안지방으로 갈수록 일사량분포가 높게 나타났다.



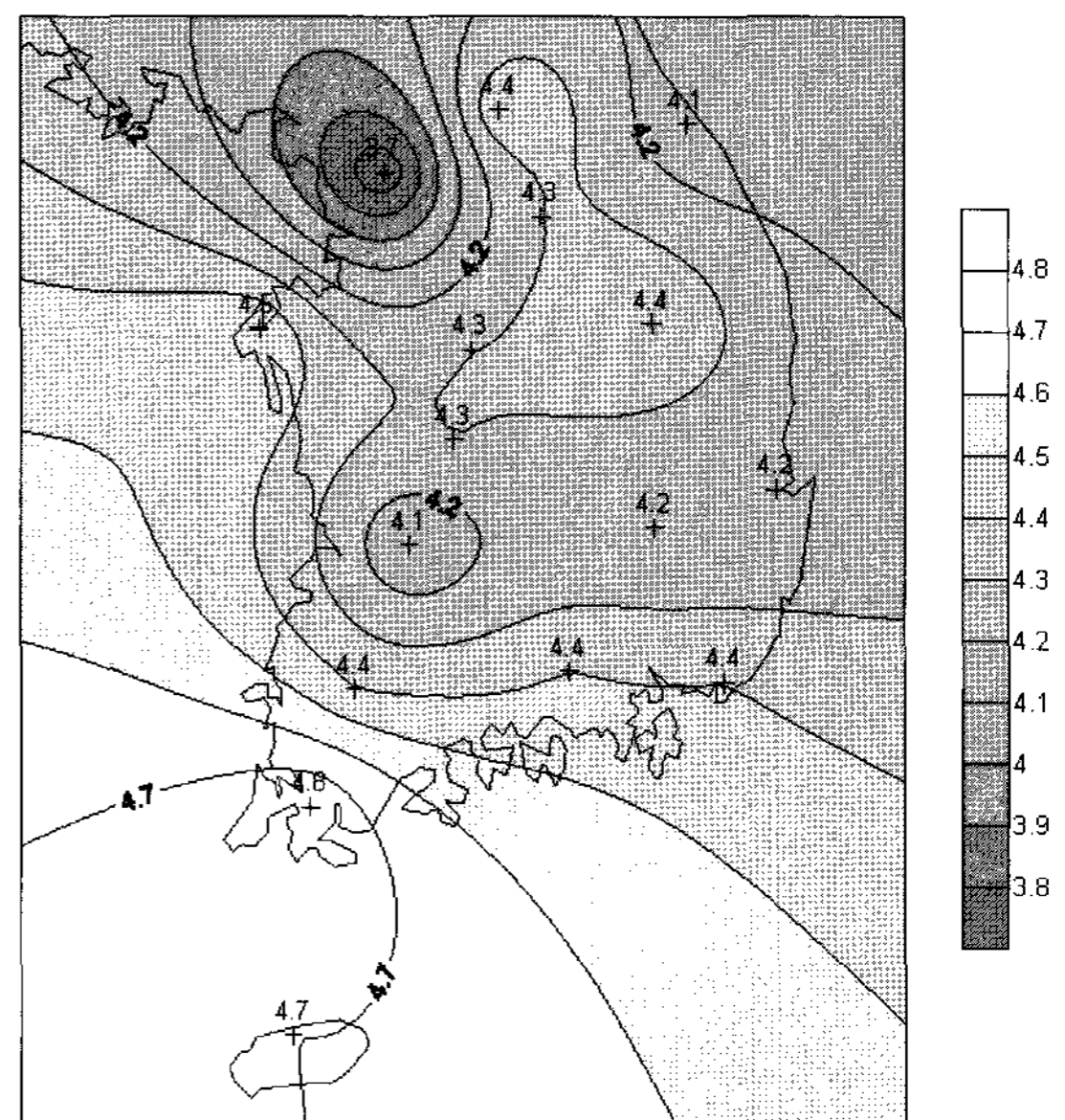
Spring (Mar. - May)

그림 9. 봄철 최대 일사량 (남향기준)



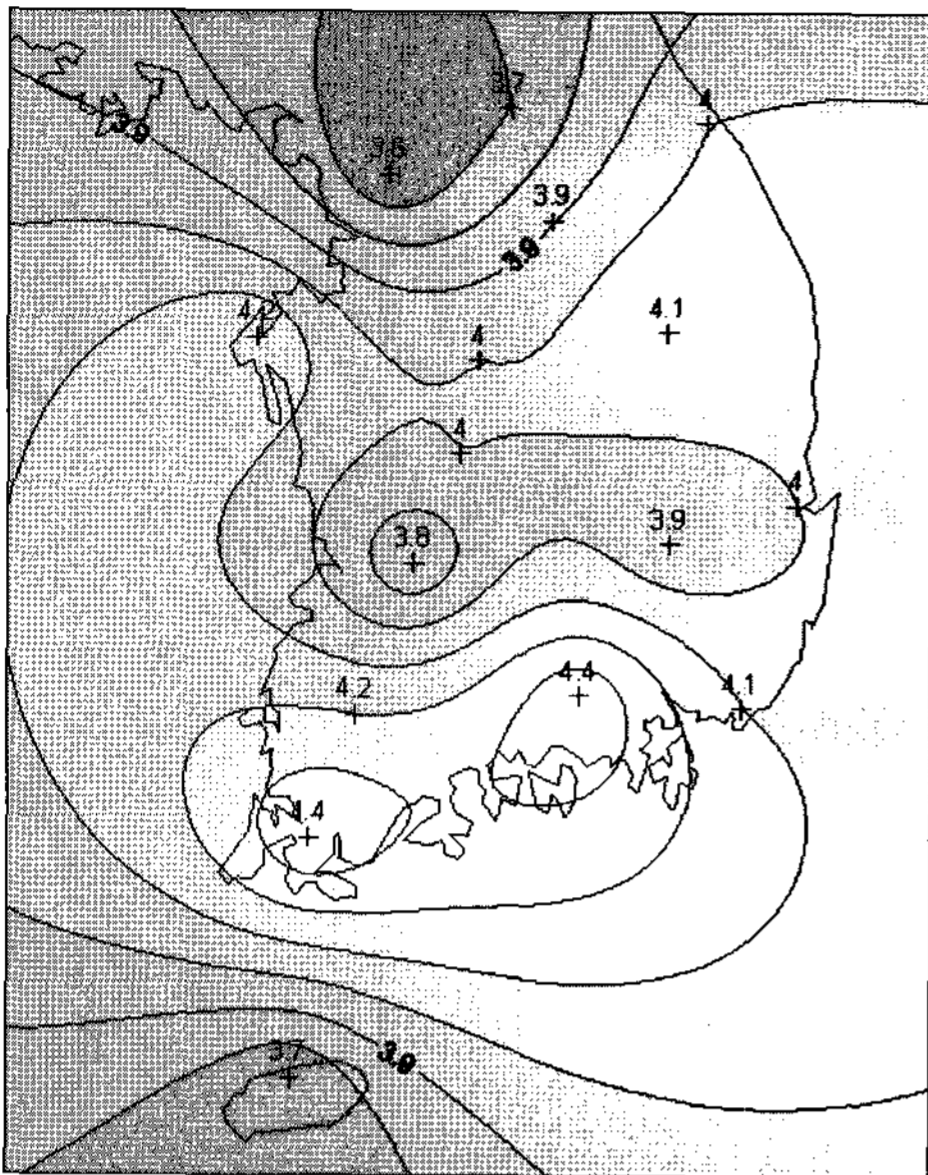
Annual-average (1982-2005)

그림 8. 연평균 최대 일사량 (남향기준)



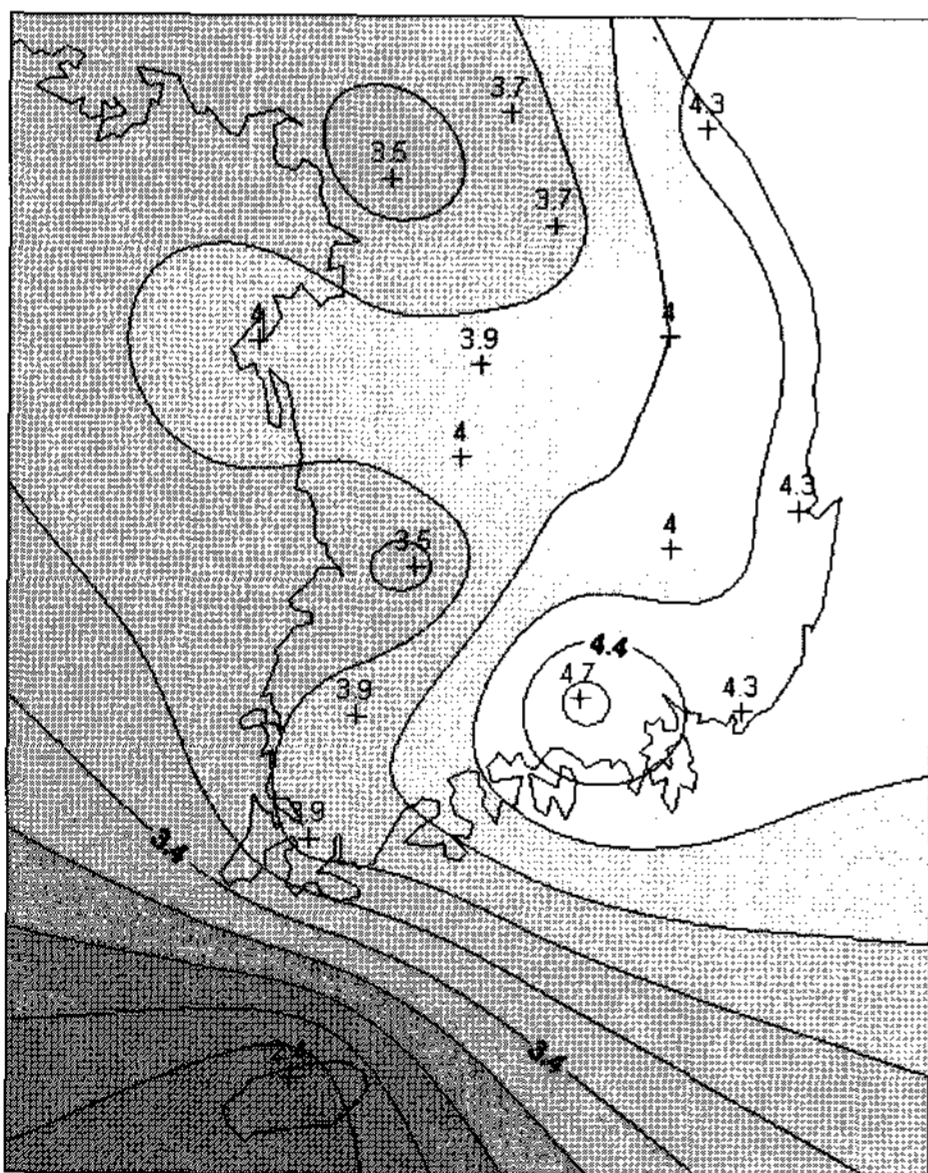
Summer (Jun. - Aug.)

그림 10. 여름철 최대 일사량 (남향기준)



Fall (Sep.- Nov.)

그림 11. 가을철 최대 일사량 (남향기준)



Winter (Dec. - Feb.)

그림 12. 겨울철 최대 일사량 (남향기준)

5. 결론

한국에너지기술연구원이 1982년부터 2005년까지

지 매 시간마다 측정된 실측 자료를 토대로 전문가 시스템을 개발하였으며 이 시스템을 통해 전국의 최적 태양광 어레이 설치 경사각으로 얻을 수 있는 최대 일사량을 예측하고 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 대전지방에서 1996년 1월부터 2004년 12월 까지 8년간 매 시간마다 측정된 실측자료와 전문가 시스템을 통해 예측된 예측결과를 비교해보면 실측 일사량과 예측 일사량은 거의 차이를 나타내고 있지 않았다.
- 2) 전문가 시스템을 이용하여 예측한 전국의 연평균 태양광 어레이 최적 설치 경사각은 24°~36°의 분포를 보이고 있으며, 제주도를 제외한 전국의 최적 태양광 어레이 설치 경사각은 30°~36°에서 최대의 태양 일사를 받아들이는 것으로 나타났다.

분포상의 특징을 살펴보면 태백산맥, 대관령일대가 36°, 남해 중부지방이 34°, 호남 지방이 31°, 제주도 지방은 24°로 나타났으며 그 외의 대부분지역은 33°인 것으로 나타났다.

- 3) 최적 태양광 어레이 설치 경사각으로 설치 시 얻을 수 있는 전국의 연평균 최대 일사량의 분포를 살펴보면, 하루에 3.6kWh/m²에서 4.4kWh/m²으로 전국적으로 고른 분포형태를 나타내었다. 지역적으로는 남해 중서부 해안 지방과 충청 서부 해안 지방의 일사량이 크게 나타났으며, 반면 전주 지방과 서울 지방의 경우는 낮게 나타났다.

제안한 전문가 시스템의 정밀도를 개선하기 위해서는 운량이나 대기오염도, 기후변화에 의한 변수에 대해서도 고려되어야 한다. 따라서 향후에는 신뢰성과 유효성을 가진 우리나라 실정에 맞는 전문가 시스템을 개발할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지 자원기술개발사업 (2006-PV12-P-04)의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. J.A Duffile and W.A Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, Wiley New York, 1991, pp.3-145.
2. Golden Software Inc., Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, 1999
3. 기상청, 기상년 월보 (1982-2005).
4. 조덕기, 강용혁, PV시스템 설치를 위한 경사면 태양광에너지 분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회논문지, Vol 27, No. 1, 2007