

# 경험적 예측모형을 통한 한반도 주요 도시의 대기청명도 평가

조덕기\*, 강용혁\*

\*한국에너지기술연구원(dokkijo@kier.re.kr / yhkang@kier.re.kr)

## A Study on the Atmospheric Clearness Estimation of Major Cities in Korea Peninsula Using Empirical Forecasting Models

Jo, Dok-Ki\*, Kang, Young-Heack\*

\*Korea Institute of Energy Research(dokkijo@kier.re.kr / yhkang@kier.re.kr)

### Abstract

Since the atmospheric clearness index is main factor for evaluating atmosphere environment, it is necessary to estimate its characteristics all over the major cities in Korea Peninsula. We have begun collecting clearness index data since 1982 at 16 different cities in South Korea and estimated using empirical forecasting models at 21 different stations over the North Korea from 1982 to 2006. This considerable effort has been made for constructing a standard value from measured data at each city. The new clearness data for global-dimming analysis will be extensively used by evaluating atmospheric environment as well as by solar PV application system designer or users.

From the results, we can conclude that

- 1) Yearly mean 63.5% of the atmospheric clearness index was evaluated for clear day all over the 37 cities in Korea Peninsula,
- 2) Clear day's atmospheric clearness index of spring and summer were 64.6% and 64.8%, and for fall and winter their values were 63.3% and 61.3% respectively in Korea Peninsula.

Keywords : 청명도(Cleaness Index), 수평면 전일사량 (Horizontal Global Insolation)

## 기 호 설 명

- $K_t$  : 청명도 (Clearness Index)  
 $E_x$  : 대기권밖 일사량  
 $H_o$  : 수평면 전일사량  
 $G_{sc}$  : 태양상수 (1,353 W/m<sup>2</sup>)  
 $n$  : 통산일 (julian date)  
 $\phi$  : 해당지방의 위도  
 $\delta$  : 일적위 =  $23.45 \sin(360 \cdot 284n/365)$   
 $\omega_s$  : 일몰시간각 ( $\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta$ )  
 $\omega_{1,2}$  : 시간각 ( $\omega_2 > \omega_1, 15^\circ = 1hr : AM-, PM+$ )

## 1. 서 론

대기권도시에 입사되는 일사는 그 도시지역을 중심으로 한 특수기후가 형성되는 과정과 도시기후를 변화시키는 중요한 역할을 한다. 즉, 도시지역 내에는 매연이나 부유분진, 배기가스 등 대기오염물질을 많이 포함하고 있어 이것들에 의해 도시지역 내에 입사하는 태양복사선의 투과를 방해하기 때문에, 대기오염이 심화되고 있는 대도시나 공업도시에 입사하는 일사량을 도시외곽 내지 전원지역, 소도시에 입사되는 일사량과 비교하여 볼 때 현저히 적게 나타나고 있다. 이와 같은 오염물질의 대기권 축적에 따른 일사의 감쇄현상은 주민건강 생활의 유지와 환경보존에 있어서도 매우 중요한 문제가 아닐 수 없다.

그러나 일사량 측정을 위한 측정네트워크<sup>1)</sup>가 일부 남한지역에만 국한됨에 따라 북한지역을 포함한 한반도 전 지역에 대기환경 평가는 현실적으로 불가능 실정이다.

본 연구는 한반도 내에서 대기오염 상태가 도시지역에서 일사량을 얼마나 차단하는지를 알아보고자, 한반도 북한지역과 일부 특정지역에 대하여 선진국에서 이미 임의의 지점의 청명일사량 예측을 위한 경험적 분석기법을 적용하였으

며, 남한지역은 전국 주요 도시지역에서 1982년부터 2006년 사이에 구름의 영향을 거의 받지 않는 청명한 날에 한국에너지기술연구원에서 측정된 평균 일사량 자료를 정리하여 분석하고, 그 결과를 통하여 한반도 주요 도시의 도시지역별 혹은 도시지역간의 대기의 청명도, 즉 청명한 날에 측정된 수평면 전일사량에 대한 대기권밖 일사량 비율을 산출 분석하여 전반적인 한반도 해당 도시의 대기환경을 평가하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 대기청명도의 산출

태양광에너지인 일사량은 대기권내의 여러 가지 작용을 거쳐 지표면에 도달하게 되므로 대기권 밖 일사량의 값은 지표면에 입사하는 수평면 전일사량에 비해 현저한 차이를 보이게 된다. 그러므로 청명한 날이나 대기상태가 오염되지 않은 조건 하에서의 일사량은 보다 증가할 것이며, 흐린 날이나 오염된 대기에서는 대기권내에서 흡수되는 일사량이 증가하여 상대적으로 지표면에 도달하는 일사량은 감소된다. 따라서 일사량은 태양광발전시스템의 설계자로서의 이용뿐만 아니라 대기상태의 분석에도 필연적인 것으로서 이에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 대기권 밖 일사량의 산출 역시 필수 불가결한 것이다.

청명도,  $K_t$ 는 청천일, 즉 청명한 날에 측정된 수평면 전일사량,  $H_o$ 을 대기권밖 일사량,  $E_x$ 으로 나뉘어 그 값을 구하며, 다음 식에 의하여 산출할 수 있다.

$$K_t = H_o / E_x \quad (1)$$

청명도는 값이 1에 가까울수록 천공상태가 맑다고 할 수 있으며, 구름의 영향을 전혀 받지 않는 청명한 날에 측정지역들간의 청명도를 서로 비교하여 봄으로써 이들 지역의 매연, 부유분진, 배기가스 등에 의한 대기오염 상태를 예측할 수

1) The Kenneth E. Johnson Environmental and Energy Center, Solar Radiation Data Sources-Applications and Network Design, DOE, U.S.A., (1978).

있다.

여기서, 청명한 상태의 정의는 하늘에 구름이 완전히 덮은 상태를 운량 1로 보고, 운량이 0~0.1 사이인 경우로서 기상청이 발표한 지역별 기상 자료에 의한다.

한편, 대기권밖 일사량의 해석에 있어 Liu와 Jordan의 해석방법은 Klein Duffie와 Beckman<sup>2)</sup>에 의해 발전되어 시간별 및 일별에 따른 대기권밖 일사량을 식 (2)와 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$I_o = 12 \times 3600/\pi G_{sc} [1 + 0.033 \cos (360n/365)] \times [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + 2\pi (\omega_2 - \omega_1)/360 \sin \phi \sin \delta] \quad (2)$$

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

또한, 월별 대기권밖 일사량은 일별 대기권밖 산출식인 식 (3)을 이용하며, 이때,  $n$ 과  $\delta$ 의 값은 표 1에 제시된 각 달마다 선정된 평균일의 대표 값을 적용한다.

표 1. 월별 평균일에 따른 통산일 및 일적위 값

월	평균일	통산일 (n)	일적위 ( $\delta$ )
1	17	17	-20.9
2	16	47	-13.0
3	16	75	-2.4
4	15	105	9.4
5	15	135	18.8
6	11	162	23.1
7	17	198	21.2
8	16	228	13.5
9	15	258	2.2
10	15	288	-9.6
11	14	318	-18.9
12	10	344	-23.0

\* Klein (1976)

2. Duffie John A. and Beckman William A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 73-76, (1991).

## 2.2 청명일사량의 산출

1976년 Hottel은 4가지 기후형태에 대하여 표준 대기상태의 고도나 천정각을 고려한 청명한 대기 중을 통과하는 직달일사량을 평가하는 편리한 방법을 제시하였다.

직달일사량의 대기투과율  $\tau_b$ 는

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos \theta z} \quad (4)$$

와 같은 형태로 주어진다.

시도(visibility) 23 km의 표준 대기상태의 상수  $a_0, a_1, k$ 는 다음에 제시된 고도 2.5 km 미만에서의 상수  $a_0^*, a_1^*, k^*$ 로 부터 산출할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} a_0^* &= 0.4237 - 0.00821 (6 - A)^2 \\ a_1^* &= 0.5055 - 0.00595 (6.5 - A)^2 \\ k^* &= 0.2711 - 0.01858 (2.5 - A)^2 \end{aligned}$$

여기서,  $A$ 는 관측치의 고도(km)이다.

기후형태가 변화하는 것을 참작하여 상수  $a_0^*, a_1^*, k^*$ 에 보정계수가 적용된다. 즉, 보정계수는  $r_0 = a_0/a_0^*, r_1 = a_1/a_1^*, r_k = k/k^*$ 로 표시되며, 표 2에 제시하였다.

따라서, 직달일사량에 대한 이와 같은 표준 대기상태하의 투과율이 2.5 km 이상인 임의의 고도나 천정각에 대하여 결정될 수가 있다. 그러므로 청명한 상태에서 수직으로 입사되는 법선면 직달일사량은

$$G_{amb} = G_{an} \tau_b \quad (5)$$

여기서,  $G_{an}$ 은 법선면상에서의 대기권밖 일사량으로 다음과 같은 일반식으로 계산한다.

$$G_{an} = G_{sc} [1 + 0.033 \cos (360 n/365)] \quad (6)$$

$G_{sc}$  : 태양상수 (1,353 W/m<sup>2</sup>)

$n$  : 통산일

표 2. 기후형태에 따른 보정계수

기 후 형 태	$r_0$	$r_1$	$r_k$	비 고
열 대	0.95	0.98	1.02	
중위도 여름	0.97	0.99	1.02	우리나라 여름철
아북극 여름	0.99	0.99	1.01	우리나라 봄, 가을철
중위도 겨울	1.03	1.01	1.00	우리나라 겨울철

\* Hottel (1977)

따라서, 같은 조건하에서 수평면상에 입사되는 직달일사량은

$$G_{cb} = G_{on} \tau_b \cos \Theta_z \quad (7)$$

이다. 다시 이 수평면상의 직달일사량을 시간당으로 계산하면,

$$I_{cb} = I_{on} \tau_b \cos \Theta_z \quad (8)$$

여기서,  $\Theta_z$ 은 천정각으로 다음 식과 같다.

$$\cos \Theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi$$

$\delta$  : 일적위

$$= 23.45 \sin[360(284 + n/365)]$$

$\phi$  : 해당지방의 위도

$\omega$  : 시간각( $\omega/hr = 15^\circ$ , AM -, PM +)

또한, 앞에서와 같이 청명한 조건하에서 수평면이 실제로 받는 전체 일사량을 알기 위해서는 같은 조건하에서 산란일사량을 평가해야 할 필요성이 따른다. 이미 1960년에 Liu와 Jordan은 이미 청명한 날에 대하여 직달일사의 투과계수와 산란일사간의 관계를 다음과 같은 경험식으로 나타내었다.

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \tau_b$$

한편, 청명한 날 산란일사량은 다음과 같은 일

반식으로 계산한다.

$$G_{cd} = G_{on} \tau_d \cos \Theta_z \quad (9)$$

또한, 입사되는 시간별 산란일사량  $I_{cd}$ 는

$$I_{cd} = I_{on} \tau_d \cos \Theta_z \quad (10)$$

이다.

따라서, 청명한 날의 수평면일사량의 산출은

$$G_c = G_{cb} + G_{cd} \quad (11)$$

$G_c$  : 청명일 수평면일사량

$G_{cb}$  : 청명일 직달일사량

$G_{cd}$  : 청명일 산란일사량

가 되며, 같은 조건하에서 청명일 시간별 수평면 일사량은  $I_c$ 는,

$$I_c = I_{cb} + I_{cd} \quad (12)$$

$I_c$  : 청명일 시간별 수평면일사량

$I_{cb}$  : 청명일 시간별 직달일사량

$I_{cd}$  : 청명일 시간별 산란일사량

으로 표현된다.

### 3. 예측치와 실측치와의 비교

임의의 지역의 청명일 수평면 전일사량을 예측하기 위하여 일부 특정지역에 대하여 Hottel의 청명일사량 산출 예측기법을 적용한 예측치와 '82.1~2006.12 기간 사이에 실제로 청명한 날에 측정된 평균일사량과 비교하였으며, 그 비교결과는 표 3에 제시하였다.

표에서 보는바와 같이 Hottel에 예측모형에 의한 예측치와 실측치를 비교하여 보면, 연평균 오차가 서울을 포함한 일부지역을 제외 하고는

표 3. 각 지역별 청명일사량 예측치와 실측치와의 비교

(단위 : kWh/m<sup>2</sup>/day)

지역명		월 별												연평균
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
춘천	실측치	10.15	13.39	18.24	21.23	24.43	25.97	25.74	24.03	19.69	14.4	11.15	8.92	18.11
	예측치	9.95	13.48	17.91	22.45	25.40	26.54	25.87	23.68	19.34	14.79	10.78	8.79	18.25
	오차(%)	-2.0	+0.7	-1.8	+5.7	+4.0	+2.2	+0.5	-1.5	-1.8	+2.7	-3.3	-1.5	+0.8
강릉	실측치	10.7	13.65	18.28	23.34	26.01	27.62	26.95	25.14	19.73	14.91	11.39	9.43	18.93
	예측치	9.93	13.44	17.84	22.34	25.26	26.39	25.73	23.56	19.26	14.74	10.76	8.78	18.17
	오차(%)	-7.2	-1.5	-2.4	-4.3	-2.9	-4.5	-4.5	-6.3	-2.4	-1.1	-5.5	-6.9	-4.0
서울	실측치	9.61	12.64	16.92	21.28	24.04	25.55	24.54	22.97	17.95	13.57	10.05	7.99	17.26
	예측치	10.12	13.64	18.04	22.54	25.45	26.57	25.91	23.75	19.46	14.94	10.95	8.96	18.36
	오차(%)	+5.3	+7.9	+6.6	+5.9	+5.9	+4.0	+5.6	+3.4	+8.4	+10.1	+9.0	+12.1	+6.4
원주	실측치	10.53	13.8	17.83	22.01	24.45	25.14	25.75	24.09	19.83	14.58	11.01	9.13	18.18
	예측치	10.33	13.86	18.27	22.76	25.65	26.76	26.1	23.96	19.68	15.17	11.16	9.16	18.57
	오차(%)	-1.9	+0.4	+2.5	+3.4	+4.9	+6.4	+1.4	-0.5	-0.8	+4.0	+1.4	+0.3	+2.1
서산	실측치	11.09	14.22	18.56	23.15	26.04	27.59	26.15	24.52	19.96	15.48	11.59	9.66	19.00
	예측치	10.39	13.86	18.18	22.55	25.34	26.41	25.77	23.71	19.55	15.15	11.21	9.24	18.45
	오차(%)	-6.3	-2.5	-2.0	-2.6	-2.7	-4.3	-1.5	-3.3	-2.1	-2.1	-3.3	-4.3	-2.9
청주	실측치	9.83	13.89	18.07	22.49	25.66	26.76	26.15	23.09	19.72	15.10	11.34	9.30	18.45
	예측치	10.5	13.98	18.30	22.66	25.44	26.50	25.87	23.81	19.66	15.27	11.32	9.35	18.56
	오차(%)	+6.8	+0.6	+1.3	+0.8	-0.9	-1.0	-1.1	+3.1	-0.3	+1.1	-0.2	+0.5	+0.6
대전	실측치	10.90	14.80	19.24	23.20	25.27	25.93	25.34	24.19	19.43	14.88	11.73	9.65	18.71
	예측치	10.64	14.11	18.41	22.75	25.49	26.53	25.91	23.88	19.76	15.4	11.46	9.49	18.65
	오차(%)	-2.4	-4.7	-4.3	-1.9	+0.9	+2.3	+2.2	-1.3	+1.7	+3.5	-2.3	-1.7	-0.3
포항	실측치	11.02	14.26	18.75	22.9	25.67	27.16	25.34	23.13	19.81	15.23	11.67	9.77	18.73
	예측치	10.68	14.11	18.37	22.64	25.31	26.34	25.72	23.74	19.70	15.39	11.49	9.53	18.59
	오차(%)	-3.1	-1.1	-2.0	-1.1	-1.4	-3.0	+1.5	+2.6	-0.6	+1.1	-1.5	-2.5	-0.7
대구	실측치	10.57	13.66	17.66	21.87	24.88	25.91	25.74	23.15	18.93	14.33	11.01	9.20	18.08
	예측치	10.86	14.30	18.56	22.82	25.49	26.50	25.89	23.92	19.88	15.58	11.67	9.70	18.76
	오차(%)	+2.7	+4.7	+5.1	+4.3	+2.5	+2.3	+0.6	+3.3	+5.0	+8.7	+6.0	+5.4	+3.8
전주	실측치	10.38	14.09	17.35	21.87	24.49	25.09	24.13	22.41	18.92	14.80	10.80	9.19	17.79
	예측치	10.87	14.31	18.57	22.82	25.48	26.49	25.88	23.91	19.88	15.59	11.68	9.72	18.77
	오차(%)	+4.7	+1.6	+7.0	+4.3	+4.0	+5.6	+7.3	+6.7	+5.1	+5.3	+8.1	+5.8	+5.5
광주	실측치	11.54	15.02	18.99	23.74	26.09	26.71	26.14	24.68	20.32	16.00	12.00	10.10	19.28
	예측치	11.21	14.20	18.64	23.23	26.36	27.36	26.75	24.29	20.31	15.29	11.23	9.57	19.04
	오차(%)	-2.9	-5.5	-1.8	-2.1	+1.0	+2.4	+2.3	-1.6	-0.1	-4.4	-6.4	-5.2	-1.2
부산	실측치	11.01	14.12	18.42	22.68	25.69	26.30	25.33	23.95	20.02	15.28	12.02	9.95	18.73
	예측치	11.23	14.22	18.65	23.23	26.35	27.35	26.74	24.29	20.32	15.30	11.25	9.59	19.04
	오차(%)	+2.0	+0.7	+1.2	+2.4	+2.6	+4.0	+5.6	+1.4	+1.5	+0.1	-6.4	-3.6	+1.7
목포	실측치	11.30	14.91	20.25	24.49	27.67	28.34	27.34	25.08	21.34	16.85	12.51	10.06	20.01
	예측치	11.31	14.27	18.67	23.2	26.28	27.26	26.66	24.24	20.32	15.35	11.31	9.67	19.05
	오차(%)	+0.1	-4.3	-7.8	-5.3	-5.0	-3.8	-2.5	-3.3	-4.8	-8.9	-9.6	-3.9	-4.8
제주	실측치	10.83	14.18	18.82	23.25	26.51	26.64	26.11	24.46	20.67	19.57	12.6	10.53	19.51
	예측치	11.87	14.75	19.05	23.4	26.28	27.18	26.62	24.35	20.63	15.81	11.83	10.21	19.33
	오차(%)	+9.6	+4.0	+1.2	+0.6	-0.9	+2.0	+2.0	-0.4	-0.2	-19.2	-6.1	-3	-0.9
진주	실측치	12.24	15.23	19.86	23.73	26.08	25.89	25.33	23.57	20.31	16.48	12.75	10.91	19.37
	예측치	11.11	14.09	18.51	23.09	26.21	27.21	26.6	24.15	20.18	15.17	11.13	9.48	18.91
	오차(%)	-9.2	-7.5	-6.8	-2.7	+0.5	+5.1	+5.0	+2.5	-0.6	-7.9	-12.7	-13.1	-2.4
영주	실측치	10.37	13.53	17.39	21.03	23.67	25.12	24.14	22.31	19.32	13.77	11.00	9.3	17.58
	예측치	10.64	13.77	18.38	23.25	26.65	27.77	27.10	24.43	20.16	14.89	10.72	9.02	18.90
	오차(%)	+2.6	+1.8	+5.7	+10.6	+12.6	+10.5	+12.3	+9.5	+4.3	+8.1	-2.5	-3.0	+7.5
평균	실측치	10.78	14.12	18.48	22.75	25.53	26.44	25.74	23.9	19.78	15.43	11.57	9.59	18.68
	예측치	10.73	13.77	18.28	22.98	26.24	27.31	26.67	24.11	20	14.87	10.79	9.12	18.74
	오차(%)	-0.5	-2.5	-1.1	+1.0	+2.8	+3.3	+3.6	+0.9	+1.1	-3.6	-6.7	-4.9	+0.3

대부분 지역에서 실측치에 대한 예측치의 오차 범위가 년 평균 -4.8~+7.5% 내에서 나타나 예측치는 실측치와 상당히 근접한 값을 나타내었다. 대도시 지역인 서울, 대구를 비롯한 해안지역인 강릉, 목포, 그리고 공단이 위치한 전주지역은 타 지역에 비해 예측치는 실측치와의 편차가 다소 높게 나타나는 경향을 보였다.

% 정도로 나타났으며, 북한지방은 하루에 63.6% 남한지방은 하루에 63.4% 정도로 나타났다. 그러나 남한지방의 대도시지역이 북한의 도시지역들에 비해 상대적으로 낮게 나타나고 있어, 태양복사선의 투과방지가 이들 도심지역에서의 대기오염과 가장 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수가 있다.

#### 4. 한반도 대기청명도 분석

표 4. 대기청명도 분석지역의 명세

##### 4.1 분석지역 선정

본 연구에서는 본 연구에서는 한반도의 일사량 광역분포 상태를 분석하기 위하여 관측시간의 평균거리를 약 100 km로 설정하고 전반적인 데이터의 정확도 평가를 위해 표 4에서 보는바와 같이 한반도 내에서 37개 지역, 즉 북한에서는 평양을 비롯한 21개 지점과 남한에서는 한국에너지기술연구원 관측지 16개소를 대상으로 한반도 대기청명도 분석 지역으로 선정하였다. 한반도 태양에너지 자원분석을 위한 분석지역 선정 작업에 고려된 사항은 우선, 분석지역 상호간의 거리는 가능한 균등하게 유지하고, 내륙, 해안 등 지역적 특수성에 따른 청명일사량 변동 형태를 연구할 수 있도록 분석지역 선정에 반영한 것이다.

##### 4.2 양적비교

표 5는 1982년 1월부터 2006년 12월까지 기간 동안 한반도 남한지방 16개소에서 한국에너지기술연구원이 청명한 날<sup>3)</sup>에 측정해 온 수평면 전일사량 실측자료와 Hottel의 청명일사량 산출 예측기법을 적용한 북한지방 21개소에서의 예측치를 가지고 한반도 주요 도시지역별로 대기청명도를 산출하여 서로 비교한 것이다.

분석결과에서 나타난바와 같이 한반도(남북한) 주요 37개 전 지역에서의 대기청명도는 연평균치로 계산하였을 때, 한반도는 하루에 63.5

지역명	위도 (deg)	경도 (deg)	고도(m)
나진	42.32	130.40	3
청진	41.78	129.00	43
성진	40.67	129.20	23
장진	40.37	127.25	108
신포	40.03	128.18	19
함흥	39.93	127.55	38
혜산	41.40	128.17	714
풍산	40.82	128.15	1206
강계	40.97	126.60	306
희천	40.17	126.25	155
신의주	40.10	124.38	7
구성	39.98	125.25	99
양덕	39.17	126.83	279
평양	39.03	125.78	38
남포	38.72	125.37	47
사리원	38.52	126.77	52
해주	38.03	125.70	81
개성	37.97	126.57	705
원산	39.18	127.43	36
평양	38.40	127.30	371
장전	38.73	128.18	35
춘천	37.90	127.73	76.8
강릉	37.75	128.90	25.9
서울	37.57	128.97	85.5
원주	37.33	127.95	149.8
서산	36.77	126.50	25.9
청주	36.63	127.45	57.4
대전	36.37	127.37	58.3
포항	36.03	129.38	1.9
대구	35.88	128.62	57.6
전주	35.82	127.15	53.5
광주	35.17	126.90	70.5
부산	35.10	129.03	69.2
목포	34.82	126.38	37.9
제주	33.52	126.53	20.0
진주	35.20	128.12	21.3
영주	36.87	128.52	210.2

3. 기상청, "기상년·월보", (1982~2006).

표 5. 우리나라 주요 도시지역의 월별 연평균 1일 대기청명도

(단위 : %)

도시 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	HP 평균	전년
나 진	57.1	61.0	61.9	63.2	63.4	63.4	63.3	63.9	62.3	61.5	58.7	55.1	59.2	61.2
청 진	57.9	61.6	62.4	63.6	63.8	63.7	63.6	64.3	62.7	62.1	59.4	55.8	59.9	61.7
성 진	58.5	61.9	62.6	63.7	63.8	63.7	63.6	64.3	62.8	62.3	59.9	56.6	60.3	62.0
장 진	59.5	62.8	63.4	64.4	64.4	64.3	64.3	65.0	63.6	63.2	60.9	57.7	61.3	62.8
신 포	58.9	62.1	62.8	63.7	63.8	63.7	63.7	64.3	62.9	62.5	60.2	57.0	60.6	62.1
함 흥	59.1	62.3	62.9	63.9	64.0	63.9	63.8	64.5	63.1	62.7	60.4	57.3	60.8	62.3
혜 산	64.4	67.6	67.6	68.4	68.3	68.1	68.0	68.9	67.7	67.7	65.7	62.4	65.9	67.1
풍 산	68.4	71.2	70.7	71.2	70.9	70.6	70.6	71.6	70.7	71.1	69.6	66.6	69.6	70.3
강 계	61.0	64.4	64.8	65.7	65.7	65.6	65.6	66.3	65.0	64.7	62.4	59.1	62.7	64.2
희 천	60.1	63.3	63.8	64.7	64.8	64.7	64.6	65.3	64.0	63.7	61.4	58.3	61.8	63.2
신의주	58.7	61.9	62.6	63.6	63.7	63.6	63.6	64.2	62.8	62.4	60.0	56.8	60.4	62.0
구성	59.7	62.9	63.4	64.3	64.4	64.3	64.3	65.0	63.6	63.2	61.0	57.9	61.4	62.8
양덕	62.0	64.8	65.1	65.8	65.8	65.6	65.6	66.4	65.1	65.0	63.1	60.2	63.4	64.5
평양	59.7	62.7	63.2	64.0	64.1	64.0	63.9	64.6	63.3	63.0	60.9	57.9	61.2	62.6
남포	60.0	62.9	63.4	64.1	64.2	64.1	64.0	64.7	63.4	63.2	61.2	58.3	61.5	62.8
사리원	60.2	63.0	63.4	64.2	64.2	64.1	64.1	64.8	63.5	63.3	61.3	58.4	61.6	62.9
해주	60.7	63.4	63.8	64.5	64.5	64.4	64.3	65.1	63.8	63.7	61.8	59.1	62.1	63.3
개성	66.4	66.7	67.8	69.5	70.7	70.5	70.5	69.9	69.0	66.0	62.9	61.7	65.3	67.6
원산	59.6	62.6	63.1	64.0	64.0	64.0	63.9	64.6	63.3	62.9	60.8	57.8	61.1	62.6
평양	63.3	65.9	66.0	66.6	66.5	66.3	66.3	67.1	66.0	66.0	64.3	61.6	64.5	65.5
장진	59.9	62.7	63.3	64.1	64.1	64.0	63.9	64.6	63.3	63.1	61.0	58.1	61.4	62.7
<b>북 평 관</b>	<b>60.7</b>	<b>63.7</b>	<b>64.2</b>	<b>65.1</b>	<b>65.2</b>	<b>65.1</b>	<b>65</b>	<b>65.7</b>	<b>64.4</b>	<b>64</b>	<b>61.8</b>	<b>58.7</b>	<b>62.2</b>	<b>63.6</b>
춘천	62.3	62.9	64.5	61.4	62.3	63.4	63.9	66.2	65.1	61.5	63.6	59.6	62.4	63.1
강릉	64.8	64.4	65.2	66.7	65.9	67.0	66.9	68.6	65.2	64.4	65.0	62.8	64.4	65.6
서울	57.5	59.3	60.4	60.7	61.1	61.5	60.5	63.0	59.2	58.3	56.8	52.6	57.5	59.2
원주	62.7	63.9	63.3	63.2	62.1	61.5	64.0	66.1	65.3	61.9	61.8	59.6	62.2	63.0
서산	65.2	65.4	65.2	66.5	66.0	66.8	64.6	66.8	64.8	65.2	64.1	62.2	64.6	65.2
청주	56.6	63.0	63.0	63.9	65.4	65.3	64.9	63.4	64.2	63.0	61.8	59.2	61.1	62.8
대전	63.2	66.6	66.7	65.9	63.9	63.2	62.8	66.2	62.7	62.2	63.7	61.0	63.9	64.0
포항	63.3	63.7	64.6	65.2	65.1	65.5	63.3	63.2	64.2	62.7	63.4	61.4	63.2	63.8
대구	60.2	60.6	60.7	62.5	63.1	63.0	64.1	62.7	61.3	58.7	58.6	56.6	59.2	61.0
전주	58.6	63.0	60.5	61.8	62.3	60.6	59.9	61.2	60.6	60.6	58.4	56.8	59.7	60.4
광주	63.7	65.8	65.2	66.6	66.0	65.4	65.3	67.1	64.7	64.6	63.3	61.2	64.0	64.9
부산	61.1	61.9	63.3	63.5	65.3	64.3	63.1	64.6	63.5	62.3	63.0	60.0	61.9	63.0
목포	62.1	65.4	68.8	68.8	69.5	68.9	67.7	67.9	67.6	67.5	65.2	60.1	64.9	66.6
제주	56.9	59.9	62.7	65.4	67.0	65.0	64.7	65.9	65.1	77.2	62.9	60.4	63.3	64.4
진주	68.1	66.8	67.6	67.4	65.6	62.7	63.4	64.2	64.8	66.5	67.2	66.4	67.1	65.9
영주	61.1	62.2	61.4	60.1	60.5	60.8	60.1	60.6	62.7	57.5	61.0	60.0	60.5	60.7
<b>남 평 관</b>	<b>61.7</b>	<b>63.4</b>	<b>63.9</b>	<b>64.4</b>	<b>64.4</b>	<b>64.1</b>	<b>63.7</b>	<b>64.9</b>	<b>63.8</b>	<b>63.4</b>	<b>62.5</b>	<b>60.0</b>	<b>62.5</b>	<b>63.4</b>
<b>한 반 도 평 관</b>	<b>61.1</b>	<b>63.6</b>	<b>64.1</b>	<b>64.8</b>	<b>64.9</b>	<b>64.6</b>	<b>64.5</b>	<b>65.3</b>	<b>64.1</b>	<b>63.7</b>	<b>62.1</b>	<b>59.3</b>	<b>62.3</b>	<b>63.5</b>

한편, 한반도(남북한)의 월별 대기청명도를 일년을 기준으로 볼 때, 표 5에서 보는바와 같이 대기청명 조건이 가장 좋은 달은 5월로 하루에 65.3%인 것으로 나타났으며, 가장 낮은 달은 12월로 하루에 59.3%로 나타났다. 계절별로는 연중 여름철의 대기청명 조건이 가장 좋으며, 가을철과 겨울철은 연 평균치에도 훨씬 못 미치는 낮은 수준인 것으로 나타났다.

### 4.3 분포형태

그림 1은 한국에너지기술연구원에서 운영하는 태양광측정네트워크(남한지방 16개소)에서 25여년간(1982.1~2006.12)에 걸쳐 청명한 날에 측정된 수평면 전일사량 자료의 평균치와 Hottel의 청명일사량 산출 예측기법<sup>2)</sup>을 적용한 북한지방 21개소에서의 예측치를 가지고 한반도 주요 도시지역별로 대기청명도를 산출하여 미국 Golden Software사에서 개발한 Surfer 8.0 프로그램을 사용하여 근접지역간의 대기청명도를 거리에 따라 균등하게 배분하여 임의 지점의 대기청명도를 산출하는 전산 시뮬레이션 기법으로 그린 전국적인 한반도 대기청명도이다.

한반도 연평균 분포상의 특징을 대기청명도 조건이 좋은 순으로 지역대를 나누면, 그림에서 보는바와 같이 북한지방의 함경남도 개마고원과 그 인접지역인 백두산 일대, 강원도 평강과 개성을 잇는 일원, 평양남도 언진산 일대, 남한지방의 광주-목포-진주를 잇는 남해중서부 및 제주도, 그리고 태안반도와 설악산 일대의 대기청명 조건이 한반도에서 가장 좋은 곳으로 나타났으며, 그 다음은 호남 및 김해평야 일대, 중부이남, 그리고 북부 동해안 및 서해안 지방, 중부이북지방, 북부내륙지방 순으로 나타났고, 그리고 대구와 같은 대도시 지역과 전주와 같은 밀집된 공단지역, 나진-청진-성진을 잇는 최북단 동해안지역은 한반도에서 낮은 대기청명도 분포를 나타내고 있으며, 대기오염이 심각한 서울지방은 한반도 내에서 가장 낮은 대기청명도를 기록하였다.

한편, 같은 기간 난방기간(10~3월) 동안에 산출된 대기청명도의 한반도 분포특징을 살펴 보면, 그림 2에서 보는바와 같이 그림 1과 거의 유사한 분포를 나타내어 이 난방기간 동안의 대기상태가 전년에 걸쳐 영향을 미치고 있음을 짐작할 수 있다.

그림 3~그림 6은 같은 기간동안 계절별 한반도 대기청명도의 분포특성을 나타낸 것이다. 즉, 우리나라 대기의 청명도는 겨울을 제외한 모든 계절에서 유사한 지역적 특성을 나타내 주고 있다. 분포특성을 좀 더 세분화하면, 그림에서와 같이 봄철은 북한은 해안지방 지역보다는 내륙지방 지역이 좋으며, 반면에 남한지방은 대체로 내륙지방의 지역보다는 해안지방의 지역이 높은 것으로 나타났다.

또한, 여름철은 남한 중부 내륙지역을 제외하고는 한반도 전국이 고른 분포를 나타내었으며, 가을철은 전국 연평균 분포와 거의 유사한 분포를 보였고,

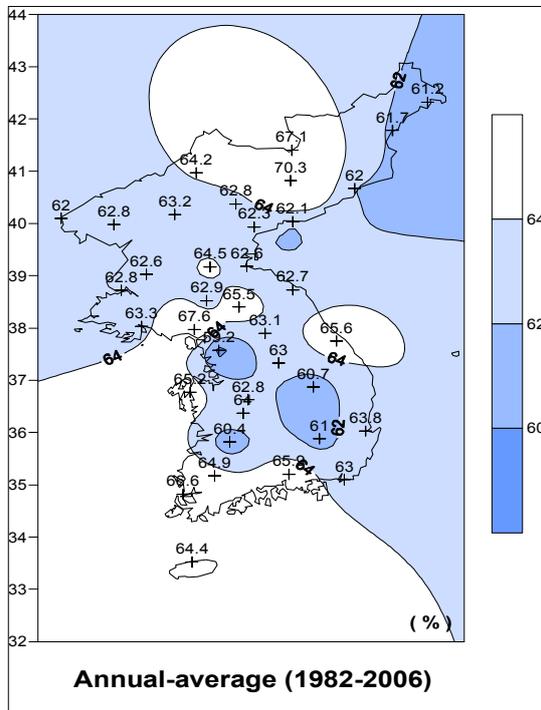


그림 1. 전국 연평균 1일 대기청명도 분포도

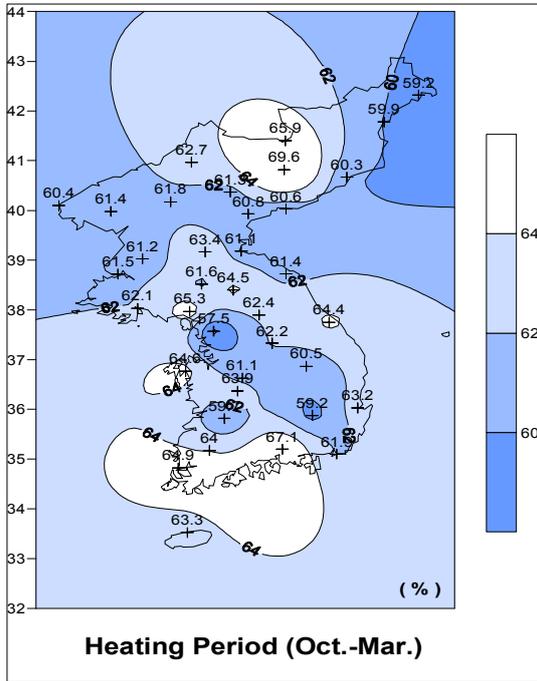


그림 2. 전국 연평균 1일 난방기간 대기청명도 분포도

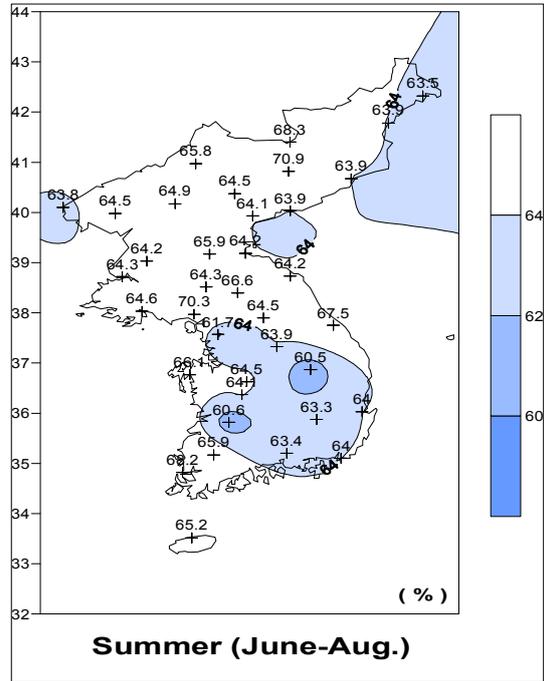


그림 4. 전국 여름철 일평균 대기청명도 분포도

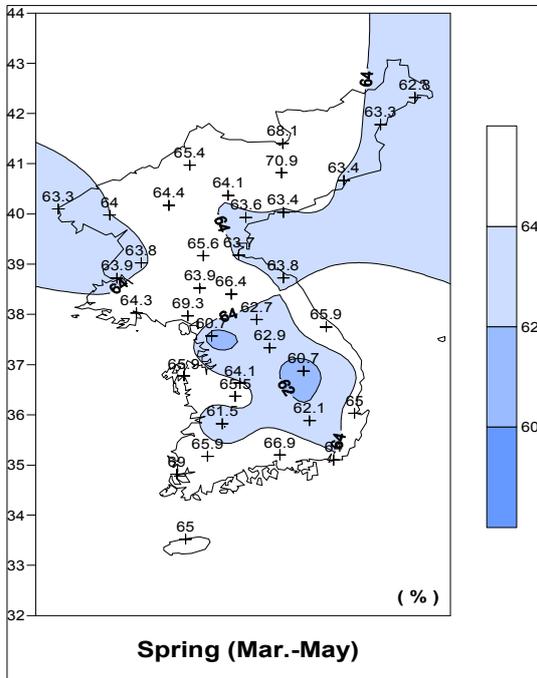


그림 3. 전국 봄철 일평균 대기청명도 분포도

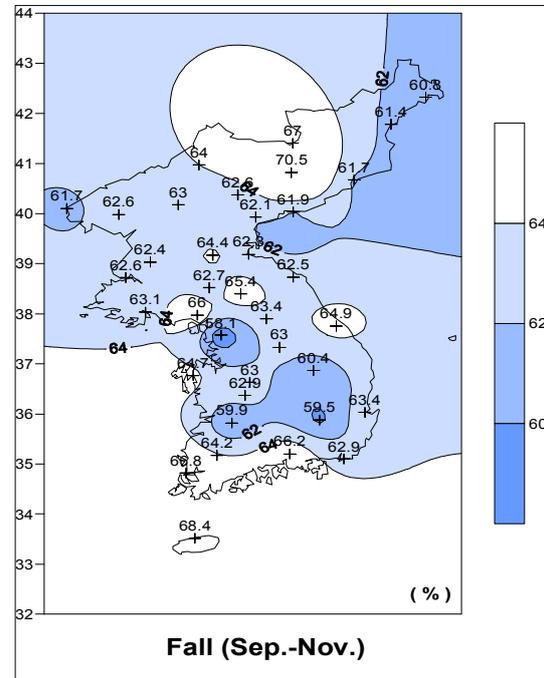


그림 5. 전국 가을철 일평균 대기청명도 분포도

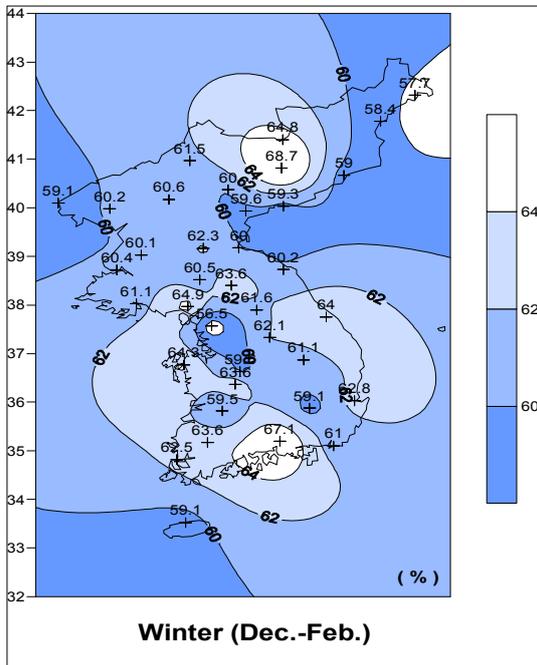


그림 6. 전국 겨울철 일평균 대기청명도 분포도

겨울철은 남해 중부지역과 북한지방의 함경남도 개마고원과 그 인접지역인 백두산 일대를 제외하고는 대부분 지역이 낮게 나타나는 현상을 보였다.

### 5. 결 론

본 연구는 대기오염 상태가 도시지역에서 태양광에너지를 얼마나 차단하는지를 알아보기 위하여 도시지역 내에서 태양광에너지 측정과 예측을 통해 대기청명도를 분석하고, 그 결과를 통하여 도시지역별 혹은 도시지역간의 대기의 청명도를 분석하여 해당도시뿐만 아니라 한반도 전 지역에 대한 전반적인 대기환경을 평가하고자 하였다.

그러나, 본 연구의 경우에 일사량의 고저에 따라 해당 도시지역의 대기오염 상태를 정확히 평가할 수 있는 것은 아니다. 일례로 구름이 많은 날은 청명도는 떨어지나 이것은 대기오염 뿐만

은 아니라 오히려 황사가 심한 날은 대도시 지역의 청명도 평가에는 유리할 것으로 사료된다. 또한 같은 시간대라 하더라도 운량에 따라 다르다는 것을 계산한다면 구름이 자주 출몰하는 지역이 대기오염이 심각한 지역보다 더욱 대기오염이 심각한 지역으로 오인될 소지가 있다. 따라서 이와 같은 작업은 앞으로 측정도시의 확대와 이에 따른 지속적인 측정과 분석사업이 계속되어야 하며, 더불어 도시지역 대기오염에 의한 일사량의 변동형태 등 각종 관련 기후조건과의 연관성도 규명해 나아가야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비지원으로 수행되었음 (과제번호 : 2007-N-NC04-P-02).

### 참 고 문 헌

1. *The Kenneth E. Johnson Environmental and Energy Center, Solar Radiation Data Sources-Applications and Network Design*, DOE, U.S.A., 1978.
2. *Duffie John A. and Beckman William A., Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 73-76, 1991.
3. 기상청, “기상년·월보”, 1982~2006.