

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 2, 2001

일사량 측정을 통한 국내 주요 도시의 대기청명도 분석

조덕기*, 전일수*, 전명석*, 강용혁*, 오정무*

* 한국에너지기술연구원

Atmospheric Clearness Analysis of Major Cities in Korea Using Solar Radiation

D.K.Jo*, I.S.Chun*, M.S.Jeon*, Y.H.Kang*, C.M.Auh*

*Korea Institute of Energy Research

Abstract

Atmospheric clearness index is one of the main factors in the evaluation of the atmospheric condition. The work presented here is the evaluation and comparison of atmospheric conditions using clearness factor for 15 cities in Korea. Clearness factor was computed with the assumed clear day, where clear day model was obtained using average global insolation, cloud amount and duration of sunshine measured for 18 years (1982-1999). The clearness index proposed in this work could be used by the atmospheric circumstance analysts, solar designers and users.

1. 서론

도시에 입사되는 일사는 그 도시지역을 중심으로 한 특수기후가 형성되는 과정과 도시기후를

변화시키는 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 즉, 도시지역 내에는 매연이나 부유분진, 배기가스 등 대기오염물을 많이 포함하고 있는데, 이것들이 도시지역 내에 입사하는 태양복사선의 투과

를 방해하기 때문에, 대기오염이 심화되고 있는 대도시나 공업도시에 입사하는 일사량을 도시의 광 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.

본 연구에서 주요 15개 도시에서 '82 ~ '99년 사이에 측정된 18년간의 평균 일사량, 운량, 일조 시간 자료를 월별로 정리·분석하여 예측모형에 의해 구름의 영향을 전혀 받지 않은 청명한 날에 있어서 도시별 혹은 도시간의 대기의 청명도를 분석해 봄으로써 해당도시의 대기환경을 평가하고자 하는데에 그 목적을 두고 있다.

2. 이론적 배경

본 논문에서는 일반적으로 대부분의 대기현상을 설명하는 데 있어서 어떤 종속변수의 변화는 두 개 이상의 독립변수에 의하여 영향을 받으므로, 독립변수를 여러 개 선택하여 이들의 함수로서 종속변수의 변화하는 특성을 설명하여 단순회귀에 비하여 좀 더 정확한 예측을 할 수 있도록 하였다. 여기서는 해당 도시의 지표면에 입사하는 대기권밖 일사량(H_0)에 대한 수평면 전일사량(H)의 비, 즉 청명도를 종속변수로 잡고 여기에 영향을 주는 독립변수로 일조율, 즉 일조시간을 가조 시간으로 나눈 값과 구름의 양인 운량을 선택하는 중회귀모형의²⁾ 도출을 식 (1)과 같이 시도하였다.

$$H/H_0 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (1)$$

H/H_0 : 해당 관측지의 월별 일평균 청명도

X_1 : 해당 관측지의 월별 일평균 일조율

X_2 : 해당 관측지의 일별 운량

또한, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 미지의 모수이며, ε 는 측정오차로서 $N(0, \sigma^2)$ 의 분포에 따르고 오차항간에는 상호 독립이라고 가정한다.

한편, 대기권밖 일사량의 해석에 있어 Liu와 Jordan의 해석방법은³⁾ Klein Duffie와 Beckman³⁾에 의해 발전되어 월별에 따른 대기권밖 일사량을 식 (2)와 같이 제시하였다.

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

G_{sc} : 태양상수 ($1,353 \text{ W/m}^2$)

n : 통산일

ϕ : 해당지방의 위도

δ : 일적위 = $23.45 \sin(360 \cdot 284 n/365)$

ω_s : 일몰시간각 $\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta$

$\omega_{1,2}$: 시간각 ($\omega_2 > \omega_1, 15^\circ = 1\text{hr} : \text{A.M.}, \text{P.M.}$)

청명도(clearness index) K_T 는 청명한 날에 측정된 수평면 전일사량 H 를 대기권밖 일사량 H_0 로 나눈 값으로 식 (3)과 같다.

$$K_T = H/H_0 \quad (3)$$

청명도 값이 1에 가까울수록 천공(天空)상태가 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 있다.

여기서, 청명한 상태의 정의는 하늘에 구름이 완전히 덮은 상태를 운량 1로 보고, 구름이 전혀 없는 운량(雲量)이 0인 경우이다.

3. 측정도시 선정과 장치구성

전국 주요 도시의 도시간 청명도 분포특성을

알기 위해서는 반드시 각 측정지점은 서로 이상적인 거리간격을 유지하여야 한다. 본 연구는 이와 같은 점을 고려하여 측정지 상호간의 거리를 가능한 균등하게 유지하기 위하여 전국을 위도와 경도로 등분하여 측정지 분포를 고르게 하였다.

또한, 실질적으로 평가하고자 하는 도시의 지리적 혹은 환경적인 요소들을 감안할 수 있도록 소도시와 대도시 혹은 내륙과 해안, 그리고 산악지형의 차이 등 주위환경에 따라 적절하게 측정지를 분포하여 전체적인 공간시스템에 대한 이해를 도출하고, 특수성에 따른 해당도시의 청명도 변동 형태를 분석할 수 있도록 측정지 선정에 반영하였다.⁴⁾ 이에 따른 각 측정도시는 서울을 비롯한 14개소로 춘천, 강릉, 서울, 서산, 청주, 대전, 포항, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 제주, 진주로 하였다.

청명도 측정을 위한 일사량 측정장치로는 미국 Eppley사가 제작한 PSP (Precision Spectral Pyranometer) 수평면일사계와 미국 Handar사에서 제작한 DCP(Data Collection Platform) 데이터수집장치를 사용하였으며, 운량과 일조시간은 기상청에서 목측과 조르단 일조계에 의해 측정하였다.

4. 국내 주요 도시의 대기청명도 분석

전국 주요 도시지역에서 측정된 일사량과 기상 매개변수인 운량, 일조율과의 상관관계를 중회귀식으로 분석하였으며, 구름의 영향을 전혀 받지 않는 청명한 날에 도시별 대기청명도를 산출하여 해당 도시지역의 대기환경 평가를 할 수 있도록 하였다. 예측기법에 적용되는 인자로서는 대기권 밖 일사량, 수평면 전일사량, 일조율, 운량이 있으며, 이들 각 인자의 예측에는 전국 주요 15개 도시지역을 선정하여 이들 도시지역에서 '82. 1 ~ '99. 12 기간동안 측정된 18년간의 월별 일평균자

료를 사용하였다. 이들 인자중 수평면 전일사량은 한국기술에너지연구원에서 관측된 자료를, 일조율과 운량 인자는 동 기간동안에 기상청에서 발행한 "기상년·월보"¹⁾로부터, 대기권밖 일사량 산출은 식 (2)에 제시된 경험식으로부터 계산된 값을 이용하여 예측하였다.

따라서, 식 (1)을 토대로 해당 도시지역의 대기권밖 일사량에 대한 지표면에 입사하는 수평면 전일사량의 비, 즉 대기청명도를 종속변수로 잡고 여기에 영향을 주는 독립변수로 일조시간을 가조시간으로 나눈 값인 일조율과 운량을 선택하여 독립변수와 종속변수간의 관련성을 함수의 형태로서 각 도시지역별로 Table 1과 같이 중회귀모형식으로 제시하였으며, 각 주요 도시지역에 대하여 월별로 청명일인 경우의 일평균 일조율(X_1)과 운량(X_2)을 산출하고, 이들 모형식에 입력하여 청명한 날 각 도시의 지표면에 입사하는 월별 연평균 1일 대기청명도를 Table 2와 같이 도출하였다.

여기서, 청명한 날의 상태 정의는 하늘에 구름이 완전히 덮은 상태를 운량 1이라고 할 때, 구름이 전혀 없는 운량이 0인 경우와 태양이 일출 시각부터 일몰시각까지 구름이나 안개 등에 전혀 차단되지 않고 지표면에 비치는 최대 시간 즉, 최대 일조시간 값을 가조시간으로 나눈 값인 일조율을 산출하였으며, 각 도시지역별 월별 일평균 대기권밖 일사량은 식(2)를 사용하여 산출하였다.

주요 도시지역별로 따른 평균 대기청명도를 살펴보면, Table 2에서 보는바와 같이 서울, 대구, 부산, 광주와 같은 대도시지역과 공업단지가 위치한 전주, 청주, 그리고 제주에서는 타 도시지역에 비해 대기청명도가 상당히 감소되어 이들 지역이 대기오염에 의한 태양복사선의 투과방지가 타 지역에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 반면에 대전과 서산, 포항, 진주, 목포 등 대부분 해안 지역에 위치한 도시지역이 전국에서 가장 대기상태가 좋은 곳으로 나타났으며, 다음으로는 역시

Table 2. 국내 주요 도시지역의 월별 연평균 1일 대기청명도

(단위: %)

도시	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	HP평균	전년
춘천	66.3	69.6	72.9	63.8	76.0	76.6	78.3	72.7	76.4	68.9	70.6	62.4	68.5	71.2
강릉	72.2	71.4	73.6	76.2	72.0	71.4	69.1	73.0	72.3	74.6	75.0	64.4	71.9	72.1
서울	67.3	74.2	74.4	74.2	72.3	75.2	62.3	58.5	64.2	60.3	63.1	67.1	67.7	67.8
서산	69.7	72.3	81.1	72.1	83.9	79.0	77.5	73.0	73.7	72.8	58.7	75.0	71.6	74.1
청주	78.5	77.2	81.3	68.7	57.2	63.5	72.5	64.7	65.2	68.4	70.8	68.7	74.2	69.7
대전	82.7	82.1	75.2	80.4	65.5	73.2	73.1	80.0	71.2	74.3	74.9	90.9	80.0	77.0
포항	83.2	82.4	79.7	69.1	69.1	70.2	66.3	71.6	87.5	74.4	71.8	70.0	76.9	74.6
대구	68.3	64.8	79.3	67.6	63.9	73.5	66.1	67.6	71.3	64.9	58.2	56.2	65.3	66.8
전주	60.2	60.6	73.4	62.8	58.6	65.9	69.6	75.4	62.1	72.9	59.1	60.9	64.5	65.1
광주	67.2	67.4	71.7	65.3	70.4	75.2	71.5	67.2	69.2	70.3	65.0	57.3	66.5	68.1
부산	75.0	80.1	73.7	58.5	66.5	76.4	68.4	65.2	71.4	68.9	64.8	65.6	71.4	69.5
목포	85.1	82.0	80.9	78.3	79.7	79.0	77.3	72.4	72.1	76.6	67.4	61.4	75.6	76.0
제주	71.1	86.0	75.9	64.2	73.1	60.4	66.4	65.2	68.3	66.6	66.8	65.0	71.9	69.1
진주	75.7	76.9	73.7	76.2	68.8	83.5	76.7	76.4	73.9	75.4	73.3	62.5	72.9	74.4
영주	77.0	77.8	70.5	73.2	67.0	80.3	75.2	69.7	78.3	63.3	66.4	65.5	70.1	72.0
평균	73.3	75.0	75.8	70.0	69.6	73.6	71.4	70.2	71.8	70.2	67.1	66.2	71.3	71.2

* HP : Heating Period (10월~3월)

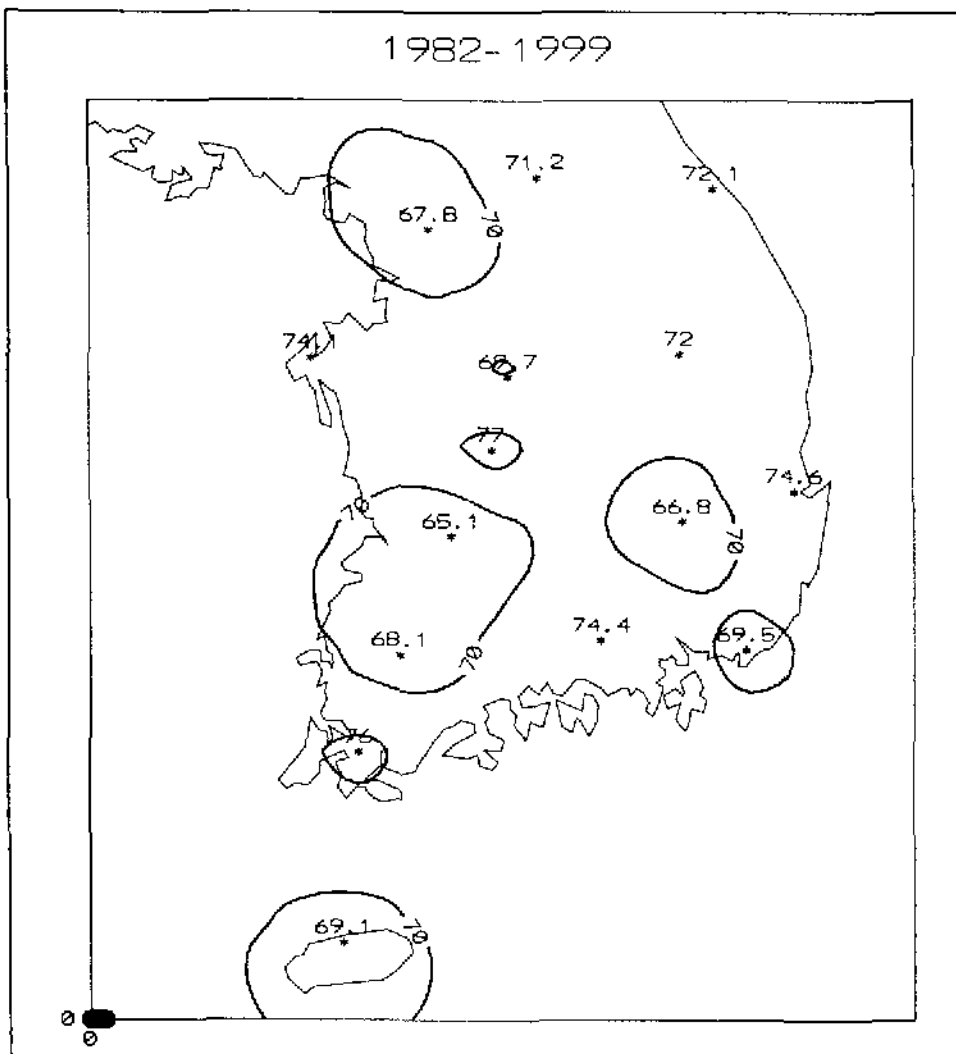


Fig. 1. 경험적 예측모델에 의한 전국 연평균 1일 대기청명도 분포도(%)

해안지역인 강릉, 산간지방인 영주, 춘천 등으로 나타났다. 또한 우리 나라 15개 전 도시지역에서의 월별 일평균 대기청명도는 대략 11~12월을 제외하고는 전년을 통하여 69~76% 정도로 나타나는 경향을 보였다.

Fig. 1은 지난 '82.1~'99.12 기간동안 구름이 전혀 없는 매우 청명한 날에 예측된 자료의 평균치를 가지고 전산시뮬레이션 기법으로⁵⁾ 도해한 전국적인 대기청명도 분포현황도로, 이 기간동안 연평균치로 계산하였을 때, 전국이 대략 71% 정도의 대기청명도를 나타내고 있다. 이 중에서도 수도권지역과 부산, 대구, 광주와 같은 대도시지역과 전주, 청주와 같은 밀집된 공단지역에서 전국에서 가장 낮은 대기청명도 분포를 나타내고 있는 반면에 태안반도 일대와 남해중서부지방, 그리고 동해남부지방 및 중부내륙지방에 위치한 도시지역은 74% 이상으로 전국에서 가장 좋은 곳으로 나타났으며, 이 중에서도 대전과 목포는 전국에서 가장 높은 대기청명도를 기록하였다.

한편, 중북부 산간지방에 위치한 도시지역에서는 대략 71~72% 내외로 비교적 대도시지역이나 공단지역이 위치한 도시지역에 비해 대기가 청명한 것으로 나타났다.

5. 결 론

최근 전국 주요 15개 도시에서 '82~'99년 사이에 측정된 18년간의 평균 일사량, 일조율, 운량 시간 자료를 정리·분석하여 예측모형에 의해 매우 청명한 날에 도시지역별 혹은 도시지역간의 대기의 청명도를 분석하여 해당 도시지역의 대기환경 평가를 수행하였다. 본 연구에서 수행된 결과를 살펴보면,

- 1) 전국 주요 15개 도시지역에서 측정된 대기청명도와 기상매개변수인 일조율, 운량과의 상관관계를 각 도시지역별로 중회귀식으로 모형식을

도출하여 구름의 영향을 전혀 받지 않는 매우 청명한 날의 기상조건들을 이들 모형식에 입력하여 청명한 날 각 도시지역의 지표면에 입사하는 월별 연평균 1일 수평면 일사량을 도출하였으며, 또한 각 도시지역별로 경험식을 사용하여 월별 일평균 대기권밖 일사량을 산출하고, 이에 대하여 각 도시지역의 지표면에 입사하는 월별 연평균 1일 수평면 일사량과의 비율인 월별 연평균 1일 대기청명도 값을 산출하였다.

- 2) 위의 결과를 가지고 전국 주요 도시지역의 대기환경을 예측한 결과, 전국적인 대기청명도의 연평균치는 전국이 대략 71% 정도의 대기청명도를 나타내었다. 이 중에서도 수도권지역과 부산, 대구, 광주와 같은 대도시지역과 전주, 청주와 같은 밀집된 공단지역은 70% 이하로 전국에서 낮은 대기청명도 분포를 나타낸 반면에, 태안반도 일대와 남해중서부지방, 그리고 동해남부지방 및 중부내륙지방에 위치한 도시지역은 74% 이상으로 전국에서 가장 좋은 곳으로 나타났다. 이 중에서도 대전과 목포는 전국에서 가장 높은 대기청명도를 기록하였다. 또한 중북부 산간지방에 위치한 도시지역에서는 대략 71~72% 내외로 비교적 대도시지역이나 공단지역이 위치한 도시지역에 비해 대기가 청명한 것으로 나타났다.

그러나, 전국 도시지역중 15개 도시지역만을 대상으로 측정하였기 때문에 현재까지 만의 결과를 가지고 우리 나라 도시의 전반적인 대기환경의 특징을 정확하게 평가한다는 것은 불가능한 실정이다. 또한 국내에서는 이 분야에 대한 실험적 관측을 통한 연구사례가 전혀 없기 때문에 분석과정의 오류를 검증하는 데에도 많은 제약이 따를 수밖에 없었다. 따라서 이와 같은 작업은 앞으로 측정 도시의 확대와 이에 따른 지속적인 측정과 분석사업이 계속되어야 하며, 더불어 도시지역 대기오염에 의한 일사량의 변동형태 등 각종 관련 기후조

건과의 연관성도 규명해 나아가야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 기상청, 기상년·월보, (1982-1999).
2. Montgomery Douglas C., Design and Analysis of Experiments (Third Edition), John Wiley & Sons, Inc., 1981
3. J.A. Duffie and W.A Beckman, Solar engineering of thermal process, Wiley New York, pp.3~145, 1991.
4. Jurado M., Caridad J.M. and Ruiz V., Statistical Distribution of the Clearness Index with Radiation Data Integrated Over Five Minute Intervals, Solar Energy, Vol. 55, No. 6, pp. 469~473, 1995.
5. Beyer, H.G., Czeplak G., Terzenbach U, and Wald L., Assessment of the Method Used to Construct Clearness Index Maps for the New European Solar Radiation Atlas, Solar Energy, Vol. 61, No. 6, pp. 389~397, 1997.