

미세먼지와 기상정보 기반의 AHP 분석을 통하여 태양광 발전소 최적입지선정에 대한 사례연구

이건주* · 이기현* · 강성우*

*인하대학교 산업경영공학과

A Case Study for Analyzing the Optimal Location for A Solar Power Plant via AHP Analysis with Fine Dust and Weather Information

Geon-ju Lee* · Gi-Hyun Lee* · Sung-Woo Kang*

*Department of Industrial and Management Engineering, INHA University

Abstract

Solar energy has been known as a successful alternative energy source, however it requires a large area to build power generation facilities compared to other energy sources such as nuclear power. Weather factors such as rainy weather or night time impact on solar power generation because of lack of insolation and sunshine. In addition, solar power generation is vulnerable to external elements such as changes in temperature and fine dust. There are four seasons in the Republic of Korea hereby variations of temperature, insolation and sunshine are broad. Currently factors that cause fine dust are continuously flowing in to Korea from abroad. In order to build a solar power plant, a large area is required for a limited domestic land hereby selecting the optimal location for the plant that maximizes the efficiency of power generation is necessary. Therefore, this research analyze the optimal site for solar power generation plant by implementing analytic hierarchy process based on weather factors such as fine dust. In order to extract weather factors that impact on solar power generation, this work conducts a case study which includes a correlation analysis between weather information and power generation.

Keywords : Fine Dust, AHP, Solar Power Generation Plant, Public Data, Location Analysis

1. 서론

세계적인 인구증가와 산업화, 도시화로 인해 환경에 대한 우려는 점차 커져가고 있다. 지표면의 16%를 차지하던 열대우림은 산업혁명 이후 약 7% 정도로 축소되고, 매년 2만5천에서 5만에 육박하는 동식물종이 멸종하고 있다(Ministry of Foreign Affairs et al., 2017). 이러한 국제상황에 발맞춰 대한민국은 2030년

까지 온실가스 배출량을 BAU (Business As Usual) 대비 37% 감축시키는 INDC (Intended Nationally Determined Contribution) 를 설정 하였다 (Ministry of Foreign Affairs et al., 2017). INDC를 만족시키는 온실가스 배출량 감축을 위해서는 화력 발전량을 줄이고, 신재생에너지 등 대체 에너지의 발전량을 높여야 한다(Euichan Jeon, 2016). 더불어 대한민국은 사용에너지의 95% 이상을 수입에 의존하고 있는 상황

† This Study was Supported by Inha University.

† Corresponding Author : Sung-Woo Kang, Industrial Engineering, INHA UNIVERSITY,
100, inha-ro, Nam-gu, Incheon, M-P : 010-6343-9721, E-mail: kangsungwoo@inha.ac.kr
Received April 20, 2015; Revision Received May 11, 2015; Accepted June 11, 2015.

이기에 대체에너지원의 발전이 더욱 시급하다. 신재생 에너지의 하나인 태양광 에너지는 오래 전부터 이러한 대체에너지원의 하나로 주목 받고 있다(Seung-min Lee, 2016). 하지만 태양광 에너지는 원자력 등 타 에너지원에 비해 발전 설비를 짓는데 넓은 면적이 필요하다는 점과 기상요인에 영향을 많이 받기 때문에 일조량, 일사량이 부족한 우천 시나 야간에는 발전이 불가능하다는 단점이 있다(Seung-min Lee, 2016 ; Lee Ki Rim et al., 2016). 또한 태양광 발전은 기온의 변화와 미세먼지 등 외부 오염에 취약하다. 대한민국은 사계절이 존재하며 최근 해외로부터 황사와 같은 미세먼지를 유발하는 요인들이 국내에 지속적으로 유입됨으로써 기상에 따른 태양광 에너지 발전 효율에 대한 연구를 진행하기 위해서는 최소 1년 이상의 시계열 데이터를 활용한 분석이 필요하다. 또한 발전소 설립 시 한정된 국내 토지에 넓은 면적이 필요하므로 발전량의 효율을 극대화 할 수 있는 입지선정 방안이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실제 1년 이상의 발전량과 기상요인 시계열 데이터의 상관분석을 통해 발전량에 영향을 미치는 기상요인을 알아보고 이를 평가기준으로 하는 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 통해 최적입지를 선정하고자 한다.

2. 선행연구

지구로 도달하는 태양광에너지는 인류의 에너지 사용량을 충당하기에 충분한 양이지만, 이를 활용하는 태양광 발전은 에너지 밀도가 낮고 기상요인과 지역 등 환경적인 영향을 많이 받아 효율적인 이용이 어렵다(Sung-Hun Lee et al., 2011). 이러한 비효율성을 없애고 효율적으로 태양광 발전을 하기 위해 여러 방향의 선행 연구들이 진행되어 왔다.

2.1 태양광 발전량 예측에 관한 연구

먼저 태양광 발전의 발전량 예측과 관련된 연구로 HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), SAM (System Advisor Model) 등 다양한 예측 프로그램의 예측 발전량과 실제 발전량의 차이를 비교한 연구가 있다. 비교결과 실제 발전량과 예측된 발전량의 오차는 10% 내외로 예측 프로그램이 높은 정확성을 보인다는 것을 밝혔다(No Sang-Tae, 2014).

2.1.1 앙상블 학습 알고리즘

예측 알고리즘으로 다수의 기저 분류자(분류방법)를 결합한 앙상블 집합을 생성하여 단일 분류자의 예측의 정확도를 개선시키기 위한 목적으로 제안되었다. 앙상블 학습의 목적은 단일 분류자만으로 학습이 어려운 복잡한 패턴을 여러 하위 패턴으로 나누어 효과적인 학습을 가능하게 하고, 하위 패턴의 학습 결과를 결합하여 단일 분류자에 비해 정확한 결과를 얻기 위함이다(Myungjong Kim, 2010).

발전량 예측과 관련된 다른 연구로 섬이나 산과 같이 제한된 상황에서 이미 축적된 데이터에 앙상블 학습 알고리즘을 적용하여 예측모델을 개발한 연구가 있다. 이 연구에서 개발한 예측 모델은 실시간 정보가 아닌 이미 수집된 발전량과 기온데이터를 활용해 실제 태양광 발전량을 단기 예측하였다(Hyun jin Lee, 2016). 하지만, 여러 기상요인에 영향을 받는 발전량을 기온 데이터만으로 예측한 모델이기에 보다 다양한 기상요인이 결합된 예측모델에 비해 정확도가 떨어질 우려가 있고, 장기적인 관점의 예측은 어려울 수 있다는 단점이 있다. 이러한 점을 극복하기 위해 본 논문에서는 기온뿐만 아니라 다른 기상요인을 추가하여 분석을 실시하였다.

2.2 태양광 발전의 경제성에 관한 연구

태양광 발전의 경제성에 관한 연구로 냉각 시스템이 태양광 설비의 발전량과 경제성 증가에 미치는 영향을 분석한 연구가 있다. 이 연구에서는 1MW급 태양광 설비에 냉각 시스템을 적용하면 1년에 약 5.76%의 발전량 증가와 약 4,000만원의 추가이익이 발생한다는 점을 밝혔다(Sung-Bae Yum, 2009).

2.2.1 청명일사분석법

구름이 하늘을 완전히 뒤덮은 상태를 운량이 10인 수준으로 정하고, 운량이 0~1 수준일 때의 일사량만을 고려하여 분석하는 방법이다. 상호간에 일사조건이 비슷한 지역들 중 질적 관리 수준이 높은 관측소의 데이터를 활용하여 질적 관리 수준이 비교적 낮은 관측소가 있는 지역의 일사량 데이터를 표준화할 수 있다(Sung-Hun Lee et al., 2011).

태양광 발전의 경제성에 관한 다른 연구로 청명일사 분석법을 활용하여 국내 두 지역의 일사량 데이터를 분석한 연구가 있다. 이 연구에서는 경제성 분석 프로그램 'RETScreen' 을 이용하여 국내 두 지역의 태양광 발전소 설립 예정지의 경제성을 평가 하였다(Sung-Hun Lee et al., 2011). 하지만 이 연구에서 사용한 청명일사분석법은 운량이 적은 청명상태에서의

측정된 일사량만을 사용하기에 실제 환경에서의 발전량과 차이가 있을 수 있다. 이러한 점을 극복하기 위해 본 논문에서는 실제 환경에서 측정된 일사량을 사용하여 보다 실질적인 분석을 실시하였다.

2.3 발전환경과 발전효율에 관한 연구

발전환경과 발전효율에 관한 선행연구로 기상청과 KIER(Korea Institute of Energy Research) 신재생에너지 데이터센터의 GIS(Geographic Information System)데이터를 활용하여 태양광 발전에 영향을 미치는 발전환경 중 기상조건에 해당하는 일사량과 태양광 발전의 효율을 분석한 연구가 있다. 이 연구에서는 일사량이 일정수준 이상 증가함에 따라 발전효율은 점점 포화 하는 양상을 나타내므로 일정 일사량 이상의 환경에서 일사량은 발전 효율에 영향을 주지 않는다는 점을 밝혔다 (Da-Han Lee et al., 2017). 하지만 이 연구는 일사량만을 활용하여 발전량 효율을 분석하였기 때문에, 대기의 오염상태 등을 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이러한 점을 극복하기 위해 본 논문에서는 기상요인에 미세먼지라는 대기 오염과 관련된 요인을 추가하여 분석을 실시 하였다. 발전효율에 대한 다른 연구로 폐닐의 오염도에 따른 발전효율에 대한 연구가 있다. 관련 연구에서는 태양광 폐닐이 오염되면 태양광 발전의 출력이 저하된다는 점을 밝혔다 (J.K.Kaldellis et al., 2011 ; Jeong Hon Song et al., 2015).

2.4 AHP를 활용한 태양광 발전소 입지선정에 대한 연구

태양광 발전은 원자력, 화력 등 타 발전시설에 비해 시설 설립에 넓은 면적이 필요하고 자연 에너지원인 태양광 에너지를 사용하는 특성상 기상조건에 대한 영향을 많이 받는 발전 방법이다(Lee Yea-Ji et al., 2017). 이러한 제한사항의 문제점을 최소화하고 발전 효율을 높이기 위해 적절한 태양광 발전소 입지선정에 대한 선행연구가 진행되어왔다.

2.4.1 AHP (Analytic Hierarchy Process)

AHP는 1970년대 초반 Satty. T 에 의해 개발된 의사결정지원기법으로 우선순위평가 및 대안선정 등에 유용하게 활용된다. AHP의 활용을 위해서는 통상적으로 계층적 구조 설정, 각 평가요소별 쌍대비교 (pairwise comparison)표 작성, 쌍대비교, 각 대안의

가중치 결정, 최종 의사결정 순의 절차를 거친다. (Saaty. T. 1996; Kim Nam-Hyun et al., 2005).

2.4.2 GIS(Geo-Spatial Information System)

지구, 우주공간 등 인간의 활동공간과 관련된 과학적 현상을 정보화하고, 시공간적 분석을 위해 위치 및 특성정보 등을 이용하는 정보체계를 말한다. Geo-Spatial를 Geospatial로 말할 경우 간단하게 GIS라고도 한다.(Lee Kang-Won et al., 2016)

특히 본 논문의 사례연구에서 사용하는 AHP를 활용한 태양광 발전소 입지분석에 관한 선행연구로 내륙지역의 발전소 설립의 제한사항을 해결하기 위해 수상 태양광 발전소의 입지조건을 분석한 연구가 있다. 이 연구에서는 GIS와 AHP를 활용하여 국내 두 지역의 수상 태양광 발전소 입지조건을 분석하였다(Lee Ki Rim et al., 2016). AHP를 활용한 입지분석에 관한 또다른 연구로 국내 한 지역의 지역 내 태양광 발전시설 최적 입지 선정을 진행한 연구가 있다. 이 연구에서는 토지이용, 표고, 경사향, 경사도, 도로, 하천의 6가지 평가기준을 갖는 AHP 분석과 GIS를 활용해 발전소 설립 후보지를 적절성에 따라 등급화 하였다(Lee Ji Young et al., 2010). 위의 두 사례 모두 특정 지역에서의 최적입지순위를 선정하였으나, 본 논문에서는 보다 넓은 범위의 적용을 위해 광역시, 특별시를 제외한 국내 9개 도의 입지순위를 제시한다.

3. 연구방법론

본 논문의 연구는 태양광 발전에 영향을 주는 기상요인 선정과 최적입지 선정이라는 크게 두 개의 단계로 진행된다. 각 단계는 다시 2~4의 소단계를 거치며, <Table 1> 은 연구절차를 도식화 한 자료이다.

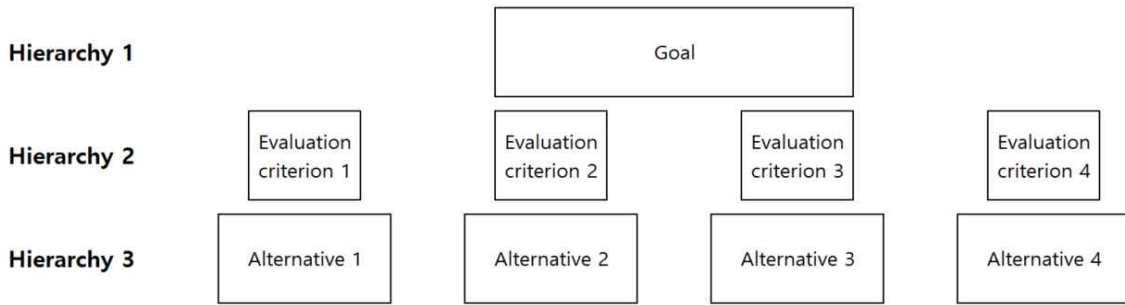
<Table 1> Research procedure

Step 1 : Selection of impact factors
(1) Correlation analyses across average values of weather data
(2) Statistical Validation through correlation analyses between fine dusts and factors of solar power generation
↓
Step 2 : Selection of the optimal location using AHP
(1) Setting up a structure with evaluation factors and location data for AHP
(2) Calculating weights of AHP evaluation factors
(3) Calculating weights of location data
(4) Selecting the optimal location via Matrix product between 'Weight matrix of alternative' and 'Weight matrix of the evaluation factor'

AHP에 관한 선행연구인 ‘계층 분석적 의사결정 과정의 가중치 및 고유치 산출방법에 관한 비교 연구’ (Haeil Ahn, 2007)에 의하면 AHP는 대체로 다음의 5개의 절차로 이루어진다.

3.1 계층적 구조 설정

계층 분석적 의사결정 과정을 위해 문제의 목표, 평가요소, 대안 크게 세가지로 계층을 나누는 절차이며 [Figure 1] 과 같은 구조를 가진다. 문제에 따라 계층 2가 평가기준과 세부요소로 추가 분류 될 수도 있다.



[Figure 1] Example of a hierarchy structure

3.2 각 평가요소별 쌍대비교를 위한 설문조사

객관적인 척도 설정을 위해 평가요소에 대한 상관관계 분석결과를 활용하여 쌍대비교표를 작성하였다. 척도는 9점 척도를 적용하였으며, <Table 2> 는 9점 척도의 척도(중요도)별 의미를 표현한 것이다.

<Table 2> Meaning of scale(weight) in 9-point Hedonic Scale

Scale(Weight)	Meaning
1	Equal
2	between Equal and Moderate
3	Moderate
4	between Moderate and Strong
5	Strong
6	between Strong and Very Strong
7	Very Strong
8	between Very Strong and Extreme
9	Extreme

3.3 평가요소 및 평가요소별 대안간 쌍대비교 실시

작성된 쌍대비교표를 바탕으로 쌍대비교 행렬 (pairwise comparison matrix)을 작성할 수 있다. 이러한 쌍대비교 행렬은 대각선을 중심으로 항상 역수 (reciprocal)가 되는 특성을 갖게 된다. 쌍대비교 행렬로부터 각 평가요소의 상대적인 중요도를 나타내는 가중치는 이 행렬의 고유벡터와 같다(Haeil Ahn, 2007). 쌍대비교 과정에서 각 평가요소에 대한 가중치와 각 평가요소에 대한 대안의 가중치를 얻을 수 있으며, Formula 1, 2 는 각각 평가요소의 쌍대비교행렬과 평가요소별 대안간의 쌍대비교행렬의 예시이다.

$$\begin{array}{c|ccc|ccc|c}
 & \mathbf{E}_1 & \mathbf{E}_2 & \dots & \mathbf{E}_{(n-1)} & \mathbf{E}_n & & \mathbf{Eigenvector} \\
 \mathbf{E}_1 & 1 & \mathbf{W}_1 & \dots & \mathbf{W}_2 & \mathbf{W}_3 & | & \lambda_1 \\
 \mathbf{E}_2 & 1/\mathbf{W}_1 & 1 & \dots & \mathbf{W}_4 & \mathbf{W}_5 & | & \lambda_2 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & | & \dots \\
 \mathbf{E}_{(n-1)} & 1/\mathbf{W}_2 & 1/\mathbf{W}_4 & \dots & 1 & \mathbf{W}_n & | & \lambda_{(n-1)} \\
 \mathbf{E}_n & 1/\mathbf{W}_3 & 1/\mathbf{W}_5 & \dots & 1/\mathbf{W}_n & 1 & | & \lambda_n
 \end{array}$$

\mathbf{E}_n = Evaluation factors
 \mathbf{W}_n = Weights of the evaluation factors
 λ_n = Weight of nth evaluation factor

Formula 1. An example of a pairwise comparison matrix of evaluation factors

	A₁	A₂	....	A_(m-1)	A_m	Eigenvector
A₁	1	W ₁	....	W ₂	W ₃	λ _{E(n,1)}
A₂	1/W ₁	1	....	W ₄	W ₅	λ _{E(n,2)}
....
A_(m-1)	1/W ₂	1/W ₄	....	1	W _n	λ _{E(n,m-1)}
A_m	1/W ₃	1/W ₅	....	1/W _n	1	λ _{E(n,m)}

A_m = Alternatives
W_n = Weights of the alternatives
λ_{E(n,m)} = Weight of the mth alternative to the nth evaluation factor

Formula 2. An example of a pairwise comparison matrix of Alternatives to the nth evaluation factor

쌍대비교의 평가과정에서 평가대상의 수가 늘어나면 평가자는 평가의 일관성을 잃어버리게 될 수 있다. 이를 방지하고 평가자가 내린 판단의 일관성여부를 판단하기 위해 쌍대비교 시 일관성평가를 실시한다. 일관성평가에서는 일반적으로 CR(Consistency ration ; 일관성 비율)의 값을 기준으로 CR 값이 0.1 미만이면 일관성 있는 평가가 이루어졌다고 평가한다. CR은 CI(Consistency Index ; 일관성지수)와 RI(Random Index ; 무작위 지수)를 활용하는데, CR과 CI는 Formula 3, 4 를 통해 얻을 수 있으며, RI값은 표본 크기를 100으로 하고 9점척도를 이용하여 만들어진 역수행렬(Reciprocal Matrix)의 CI 평균값을 사용하며, 역수행렬의 차원 n이 1에서 15까지 일

때 RI 값은 <Table 3>과 같다(Saaty. T, 1996 ; Kil Kon Ko et al., 2001).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Formula 3. Formula for CR

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Formula 4. Formula for CI

<Table 3> RI values of reciprocal matrix dimension

Dimension of reciprocal matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

3.4 각 대안의 가중치 결정

평가요소에 대한 가중치와 각 평가요소에 대한 대안의 가중치를 활용하여 각 대안의 최종 중요도를 구할

수 있다. 이 때, 평가요소에 대한 가중치 행렬과 각 평가요소에 대한 대안의 가중치 행렬의 행렬곱을 사용하며, Formula 5 는 행렬곱의 예시이다.

λ _{E(1,1)}	λ _{E(2,1)}	....	λ _{E(n-1,1)}	λ _{E(n,1)}	•	λ ₁
λ _{E(1,2)}	λ _{E(2,2)}	....	λ _{E(n-1,2)}	λ _{E(n,2)}		λ ₂
....
λ _{E(1,m-1)}	λ _{E(2,m-1)}	....	λ _{E(n-1,m-1)}	λ _{E(n,m-1)}		λ _(n-1)
λ _{E(1,m)}	λ _{E(2,m)}	....	λ _{E(n-1,m)}	λ _{E(n,m)}		λ _n

λ_n = Weight of the nth evaluation factor
λ_{E(n,m)} = Weight of the mth alternative to the nth evaluation factor

Formula 5. An example of matrix product between weight matrix of alternative and weight matrix of evaluation factor

Formula 5 의 행렬곱 결과는 Formula 6 과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\begin{matrix} \sum_{i=1}^n \lambda_{E(i,1)} \times \lambda_i \\ \sum_{i=1}^n \lambda_{E(i,2)} \times \lambda_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \lambda_{E(i,m-1)} \times \lambda_i \\ \sum_{i=1}^n \lambda_{E(i,m)} \times \lambda_i \end{matrix}$$

$\lambda_{E(i,m)}$ = Weight of the mth alternative to the ith evaluation factor

Formula 6. Result of 'Formula 5'

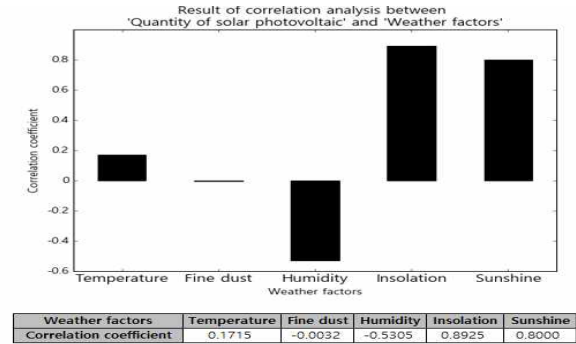
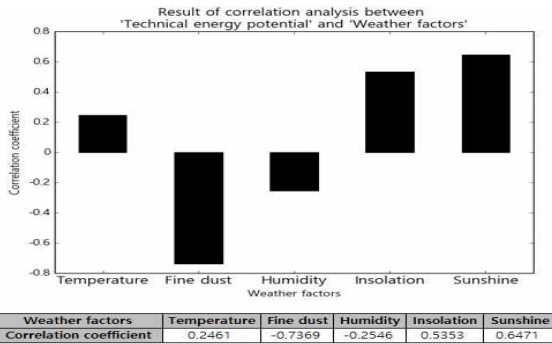
3.5 최종 의사결정

위의 Formula 6 의 결과는 각 대안의 최종 중요도와 같으며, 이를 활용하여 최종 목표에 대한 의사결정을 진행한다.

4. 사례연구

4.1 활용 데이터 소개

연간 우리나라에 도달하는 태양에너지 중 현재의 기술수준(가동율, 에너지 손실요인 등)을 고려할 때 사용 가능한 에너지량을 기술적 에너지 잠재량이라고 한다 Ministry of Trade, Industry and Energy et al., 2016). 본 논문의 연구에서는 태양광 에너지의 기술적 잠재량을 비롯하여 101개의 기상청 관측소의 기상 관측값, 2014년 영암발전소의 발전량 및 설비용량 데이터 등 약 7,000,000개의 CSV셀 데이터를 수집, 분석하였다. 기술적 에너지 잠재량은 '신재생에너지 데이터센터'의 '자원지도시스템', 미세먼지 외 기상요인은 기상청의 '기상자료개방포털', 미세먼지는 '에어코리아'의 데이터를 사용하였으며, 영암발전소의 발전량 및 설비용량은 '공공 데이터 포털'의 데이터를 사용하였다 (Korea Institute of Energy Research New-Renewable Energy Resource Center, 2017 ; Korea Meteorological Administration, 2017 ; Air Korea, 2017 ; Open Data Portal, 2017)



[Figure 2] Results of correlation analyses between 'Weather factors' and 'Technical energy potential' & 'Weather factors' and 'Quantity of solar photovoltaic'

4.2 영향요인 선정

4.2.1 1차 상관분석

먼저 발전량에 영향을 미치는 예상요인으로 태양광 발전과 관련된 선행연구에서 사용한 일조량, 기온, 일사량, 습도 4가지 요인에 대기오염도를 반영하기 위한 미세먼지를 추가하여 총 5가지 기상요인을 선정하였다 (Lee Ki Rim et al., 2016). 선정된 예상요인이 실제로 발전량에 영향을 미치는지 알아보기 위해 이론과 실제 두가지 측면에서 1차 상관분석을 실시하였다. [Figure 2]는 이론적 수치인 '기술적 에너지 잠재량' (A) 과 실제적 수치인 '2014년 영암발전소 실제 발전량' (B) 의 예상요인에 대한 1차 상관분석 결과

이며, 이 때 상관계수는 피어슨 곱적률 상관계수(Pearson's product-moment coefficients of correlation)이다.

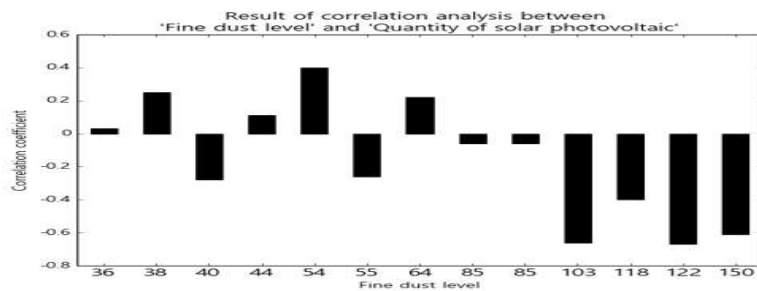
1차 상관분석의 결과를 자세히 살펴보면 '기온' 은 (A)와 (B)에서 모두 상관계수가 |0.3| 미만으로 특별한 상관관계가 없었으며, 상관계수의 차이 또한 0.075 수준으로 크지 않았다. '일사량' 과 '일조량' 은 (A)와 (B)에서 모두 강한 양의 상관관계를 보였으며, '습도' 는 (A)에서 상관계수가 |0.3| 미만으로 특별한 상관관계가 없었지만, (B)를 통해 확인한 결과 실제상황에서 상관계수가 약 -0.53으로 중간정도의 음의 상관관계를 보였다. 또한 (A)와 (B)에서의 상관계수 차이는 약 0.28로 크지 않았다. 하지만 '미세먼지'

는 (A)와 (B)에서 약 0.73의 매우 큰 상관계수 차이를 보여 확실한 상관관계를 특정하기 어려웠다. 이러한 불확실성을 제거하고 명확한 영향요인을 선정하기 위해 미세먼지와 발전량의 상관관계에 대한 2차 상관분석을 실시하였다.

4.2.2 2차 상관분석

미세먼지가 발전량에 미치는 영향을 분석한 선행연구인 ‘SolarCell의 미세먼지 오염 정량화에 관한 연구’에 따르면 농도가 낮을 때 미세먼지는 발전량에 영향을

미치지 않지만, 일정 농도를 넘어서면 태양광 발전량을 감소시킨다(Seung-min Lee, 2015). 이러한 선행연구의 이론을 바탕으로 본 논문에서는 2014년 영암발전소의 발전가능시간(10시~17시)의 발전량과 일 평균 미세먼지 등 약 18,600개의 CSV셀 데이터를 수집하여 일부 일자를 선택해 미세먼지 농도 구간별 2차 상관분석을 실시하였고 결과는 [Figure 3]과 같다. 2차 상관분석에서 상관계수는 선택된 데이터의 수를 감안하여 켄달의 등위상관계수(Kendall's tau)를 사용하였다.



Fine dust level	36	38	40	44	54	55	64	85	85	103	118	122	150
Correlation coefficient	0.03	0.25	-0.28	0.11	0.40	-0.26	0.22	-0.06	-0.06	-0.66	-0.40	-0.67	-0.61

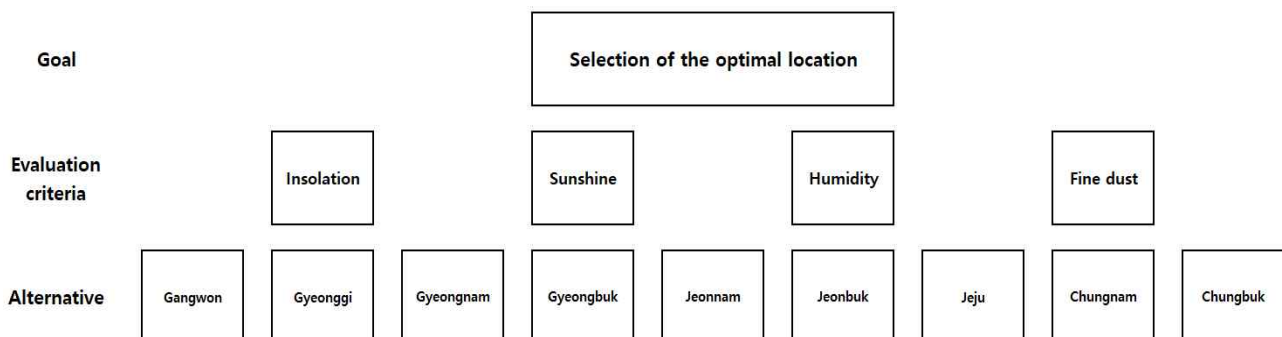
[Figure 3] Results of correlation analysis between 'Fine dust level' and 'Quantity of solar photovoltaic'

2차 상관분석 결과를 살펴보면 미세먼지 농도가 100미만 일 때는 일관성 없는 상관관계를 보이거나 특별한 상관관계가 없지만 100이상의 농도에서 넘어가면 미세먼지와 발전량은 음의 상관관계를 가진다. 결론적으로 (a)와 (b)의 결과를 종합하면 ‘발전량’은 ‘일사량’, ‘일조량’과 높은 수준의 양의 상관관계를 ‘습도’, ‘미세먼지’와는 중간 수준의 음의 상관관계를 가지고 있으며, ‘미세먼지’의 상관관계는 미세먼지의 수치가 100이상일 때 발현된다.

4.3 AHP를 활용한 입지순위 결정

4.3.1 계층구조 설정

AHP를 통한 의사결정을 위해 (2)에서 유의미한 상관관계를 보인 일사량, 일조량, 습도, 미세먼지 4가지 요인을 평가기준으로 선정하고 토지면적과 가격을 고려하여 광역시, 특별시를 제외한 전국 9개 도를 대안으로 선정하였다. 선정한 평가기준과 대안을 포함하여 작성한 의사결정 계층구조는 [Figure 4]와 같다.



[Figure 4] Hierarchy structure of decision making

4.3.2 평가기준 가중치

<Table 4> 는 4가지 평가기준의 가중치(Weight) 를 계산한 결과이다.

<Table 4> Weights of evaluation factors

	Insolation	Sunshine	Humidity	Fine dust	Weight
Insolation	1	1	3	4	0.384457
Sunshine	1	1	3	4	0.384457
Humidity	0.333333	0.333333	1	2	0.143304
Fine dust	0.25	0.25	0.5	1	0.087781

CR Value = 0.007669

계산결과를 살펴보면 평가기준의 가중치는 일사량 (0.38), 일조량(0.38), 습도(0.14), 미세먼지(0.09) 순으로 나타났고, CR Value가 0.1 미만으로 일관성 있는 척도 설정이 이루어졌다.

4.3.3 각 평가요소에 대한 대안의 가중치

<Table 5>부터 <Table 8> 은 2010년부터 2015년 까지 일사량, 일조량, 습도, 미세먼지 4가지 평가기준 의 연평균 데이터를 분석하여 각 평가기준에 대한 대 안의 가중치를 계산한 결과이다.

<Table 5> Location of weights for Insolation

Location of weights for Insolation										
	Jeonnam	Gyeongnam	Jeju	Chungbuk	Gyeongbuk	Jeonbuk	Gangwon	Chungnam	Gyeonggi	Weight
Jeonnam	1	1	1	2	3	3	3	4	6	0.2051228
Gyeongnam	1	1	1	2	2	2	3	3	6	0.1803574
Jeju	1	1	1	1	2	2	3	3	6	0.1687024
Chungbuk	0.5	0.5	1	1	1	1	1	3	5	0.1097529
Gyeongbuk	0.3333333	0.5	0.5	1	1	1	1	2	5	0.0906906
Jeonbuk	0.3333333	0.5	0.5	1	1	1	1	2	5	0.0906906
Gangwon	0.3333333	0.3333333	0.3333333	1	1	1	1	1	4	0.0756263
Chungnam	0.25	0.3333333	0.3333333	0.3333333	0.5	0.5	1	1	4	0.0564763
Gyeonggi	0.1666667	0.1666667	0.1666667	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	1	0.0225808

CR Value = 0.019

<Table 6> Location of weights for Sunshine

Location of weights for Sunshine										
	Gyeonggi	Gyeongnam	Gyeongbuk	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonnam	Jeonbuk	Jeju	Weight
Gyeonggi	1	1	2	2	2	2	2	3	5	0.1943258
Gyeongnam	1	1	2	2	2	2	2	3	5	0.1943258
Gyeongbuk	0.5	0.5	1	1	1	1	1	2	4	0.1055458
Gangwon	0.5	0.5	1	1	1	1	1	2	4	0.1055458
Chungbuk	0.5	0.5	1	1	1	1	1	2	4	0.1055458
Chungnam	0.5	0.5	1	1	1	1	1	2	4	0.1055458
Jeonnam	0.5	0.5	1	1	1	1	1	2	3	0.1020736
Jeonbuk	0.3333333	0.3333333	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	2	0.0564521
Jeju	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3333333	0.5	1	0.0306393

CR Value = 0.003

<Table 7> Location of weights for Humidity

Location of weights for Humidity										
	Jeju	Jeonnam	Chungnam	Jeonbuk	Gyeonggi	Chungbuk	Gangwon	Gyeongbuk	Gyeongnam	Weight
Jeju	1	1	1	1	3	3	4	4	5	0.1885654
Jeonnam	1	1	1	1	3	3	4	4	4	0.1837345
Chungnam	1	1	1	1	3	3	4	4	4	0.1837345
Jeonbuk	1	1	1	1	3	3	3	4	4	0.1784435
Gyeonggi	0.3333333	0.3333333	0.3333333	0.3333333	1	1	2	2	2	0.0713598
Chungbuk	0.3333333	0.3333333	0.3333333	0.3333333	1	1	1	1	1	0.0561874
Gangwon	0.25	0.25	0.25	0.3333333	0.5	1	1	1	1	0.047459
Gyeongbuk	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	1	1	1	1	0.0457755
Gyeongnam	0.2	0.25	0.25	0.25	0.5	1	1	1	1	0.0447403

CR Value = 0.006

<Table 8> Location of weights for Fine dust

Location of weights for Fine dust										
	Chungbuk	Gyeonggi	Jeonbuk	Gangwon	Gyeongbuk	Gyeongnam	Chungnam	Jeju	Jeonnam	Weight
Chungbuk	1	1	1	2	2	3	3	4	6	0.2004276
Gyeonggi	1	1	1	2	2	2	2	3	6	0.1758086
Jeonbuk	1	1	1	1	2	2	2	3	6	0.1643539
Gangwon	0.5	0.5	1	1	1	1	1	2	5	0.1056752
Gyeongbuk	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	2	5	0.0964159
Gyeongnam	0.3333333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	5	0.0863317
Chungnam	0.3333333	0.5	0.5	1	1	1	1	1	4	0.0836862
Jeju	0.25	0.3333333	0.3333333	0.5	0.5	1	1	1	4	0.0644918
Jeonnam	0.1666667	0.1666667	0.1666667	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	1	0.0228091

CR Value = 0.014

상대비중 계산 결과를 살펴보면 일사량은 전라남도 (0.21), 일조량은 경기도(0.19), 습도는 제주도(0.19), 미세먼지는 충청북도(0.20)가 가장 높은 가중치를 보이며, 4가지 결과 모두 CR Value가 0.1 미만으로 일관성 있는 결과를 얻었다.

4.3.4 최적입지 선정

<Table 9> 는 4.3.2와 4.3.3에서 얻은 가중치를 Matrix로 정리한 뒤 Matrix product를 통해 대안의 종합중요도를 계산한 결과이다. 일사량과 일조량은 발전량과 양의 상관관계를 가지므로 가중치를 그대로 사용했고, 습도와 미세먼지는 발전량과 음의 상관관계를 가지므로 가중치를 음의 값으로 보정하여 사용하였다. 종합중요도의 순서는 최적 입지순위와 같다.

<Table 9> Comprehensive results via AHP

Insolation Sunshine Humidity Fine dust					weight of evaluation factor	Comprehensive result	
Gangwon	Gyeonggi	Gyeongnam	Gyeongbuk	Jeonnam		Gyeongnam	Jeonnam
0.075626	0.105546	0.047459	0.105675	0.384457478	0.130060005	0.089771843	
0.022581	0.194326	0.07136	0.175809	0.384457478	0.06042126	0.057732558	
0.180357	0.194326	0.04474	0.086332	-0.143304008	0.057127587	0.053575624	
0.090691	0.105546	0.045776	0.096416	-0.087781036	0.043955074	0.02861468	
0.205123	0.102074	0.183735	0.022809		0.016571282		
0.090691	0.056452	0.178444	0.164354				
0.168702	0.030639	0.188565	0.064492				
0.056476	0.105546	0.183735	0.083686				
0.109753	0.105546	0.056187	0.200428				

본 논문은 기상요소와 발전량의 상관관계를 분석하여 발전량에 주요한 영향을 끼치는 요소를 측정하였으며 이를 태양광 발전소의 최적입지를 결정하는 AHP의 평가기준으로 채택하였다. 이를 바탕으로 경상남도가 태양광 발전소의 입지로 가장 적합하며 전라북도가 가장 적합하지 않은 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 대한민국의 실제 기상데이터와 태양광 발전소의 데이터를 통계적으로 분석하여 각 지역별 (도별) 영향을 끼치는 주요 기상요인을 밝혀냈다. 공통적으로 4가지 기상요인(일조량, 일사량, 습도, 미세먼지)이 발전량과, 기술적 에너지 잠재량과 상관관계가 있으며 일조량과 일사량은 양의 상관관계, 습도와 미세먼지

는 음의 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 특히 미세먼지의 경우 약 100 이상의 미세먼지 농도에서 뚜렷한 음의 상관관계를 가졌다. 상관관계 분석결과를 통해 양의 상관관계를 가지는 일조량과 일사량은 발전량을 증가시킬 수 있는 기상요인이고, 반대로 음의 상관관계를 가지는 습도와 미세먼지는 발전량을 감소시킬 수 있는 요인임을 알 수 있다. 따라서 적절한 입지선정을 위해 일조량과 일사량이 높고 미세먼지 농도와 습도가 낮은 지역을 선택하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 결과를 근거로 각 기상요인을 태양광 발전소 최적입지를 선정하는 AHP의 평가기준으로 채택하였으며, 분석결과경상남도, 전라남도, 경상북도, 경기도, 충청북도, 강원도, 제주도, 충청남도, 전라북도 순으로 높은 입지 적합도를 보였다. 이 결과는 차후 신규 신재생에너지 발전소의 적절한 입지선정에 기여할 수 있을 것이다.

사례연구를 진행하면서 태양광 에너지와 기상관측자료를 수집하는데 많은 어려움이 있었다. 특히 태양광 에너지 발전량과 설비용량의 경우 각 발전소별 자료를 찾기가 매우 어려웠으며, 일부 기상관측자료는 결측이 많아 신뢰도의 문제로 연구에 사용할 수 없었다. 차후 본 연구에서 다른 미세먼지 외에 다른 대기오염요소에 대한 분석이나 산업적인 관점에서 토지가격 등을 고려한 복합적인 입지선정 연구가 진행된다면 입지선정의 적합도를 높일 수 있을 것이다.

6. References

- [1] Ministry of Foreign Affairs Climate Change, Energy & Environmental Affairs Bureau Green Economy & Environmental Diplomacy Division. (2017). Climate Environmental Diplomation Handbook. Preface
- [2] Euichan Jeon (2016). An alternative of thermal power generation through Atmospheric Environment Improvement and greenhouse gas reduction. Journal of Electrical World Monthly Magazine. 475, 48-52.
- [3] Seung-min Lee. (2016). A Study on Fine Dust Quantification of Solar Cell
- [4] Lee Ki Rim, Lee Won Hee. (2016). Floating Photovoltaic Plant Location Analysis using GIS. Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science, 24(1), 51-59.
- [5] Sung-Hun Lee, Hyeong-Cheol Choi, Dong-Keun Lee, Jin-O Kim. (2011). Economic Evaluation Method for Photovoltaic System Development using Insolation Data Analysis. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 25(10), 38-46.
- [6] No Sang-Tae. (2014). Comparison of Measured and Predicted Photovoltaic Electricity Generation and Input Options of Various Softwares. The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, 14(6), 87-92.
- [7] Myungjong Kim. (2010). Optimal Selection of Classifier Ensemble Using Genetic Algorithms. Journal of Intelligence and Information Systems, 16(4), 99-112.
- [8] Hyun jin Lee. (2016). The Development of the Predict Model for Solar Power Generation based on Current Temperature Data in Restricted Circumstances. Journal of Digital Contents Society, 17(3), 157-164.
- [9] Sung-Bae Yum, Hong-Kyoo Choi, Young-Jun Choi, Seong-goo Hong, Tae-Hoon Kim. (2009). Solar Photovoltaic According to Installation of Cooling System). Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 23(5), 66-71.
- [10] Da-Han Lee, Myung-Su Kim, Jong-Bae Park. (2017). Solar Power Generation Difference by Region's Solar Radiation. The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference 2017, 80-81.
- [11] J.K.Kaldellis, P.Fragos, M.Kapsali. (2011) Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations. Renewable energy. pp.2717-2724
- [12] Jeong Hon Song, Taehwan Kim, Won Hyoung Ryu, Hyoung Hee Cho. (2015). Study on Complex Efficiency Reduction by Increasing Temperature and Pollutant of Photovoltaic Module. Spring & Fall Conferences on the Korean Society of Mechanical Engineers
- [13] Lee Yea-Ji, Kim Yong-Shik. (2017). Prediction and Accuracy Analysis of Photovoltaic Module Temperature based on Predictive Models in Summer. Journal of the Korean Solar Energy Society, 37(1), 25-38.
- [14] Saaty. T (1996). The Analytic Hierarchy Process, RWS Publications.
- [15] Kim Nam-Hyun, Kweon Soon-Jo, Cho Moon-Sik. (2005). The Study of Developing Evaluation Standard of Selecting a Tourism Development Project Applying AHP(Analytic Hierarchy Program). Journal of Tourism Sciences, 29(1), 249-266.
- [16] Lee Kang-Won, Shon Howoong. (2016). Geo-Spatial Information System. Goomibook, 388
- [17] Lee Ji Young, Kang In Joon. (2010). A Study of PV System Facilities Using Geo-Spatial Information System. Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science,

18(2), 99-105.

[18] Haeil Ahn. (2007). A Comparative Study on Weight and Eigenvalue Calculation for Analytic Hierarchy Process on Decision Making. Spring joint Conference on Korean Operations Research And Management Society , 953-960.

[19] Kil Kon Ko, Kyoung Jun Lee (2001). Statistical Characteristics of Response consistency Parameters in Analytic Hierarchy

Process. Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society, 26(4), 71-82.

[20] Ministry of Trade, Industry and Energy , Korea Energy Agency New & Renewable Energy Center. (2016). NEW & RENEWABLE ENERGY WHITE PAPER. 104-110.

저 자 소 개

이 건 주



Lee, Geonju is currently a student of Industrial & Management Engineering at School of Engineering, Inha University. His research interests include Data Mining, Management Engineering, Statistics and etc.

이 기 현



Lee, Gi Hyun is currently a student of Industrial & Management Engineering at School of Engineering, Inha University. His research interests include Data Mining, Data Processing, Management Engineering and etc.

강 성 우



Kang, Sung Woo is currently an Assistant Professor of Industrial & Management Engineering at School of Engineering, Inha University. He received his Ph.D. in Harold and Inge Marcus Department of Industrial and Manufacturing Engineering from The Pennsylvania State University in 2016. His research interests include Data Mining, Massive Data Processing, Product/ Service Design that covers intelligent information & knowledge management. Currently he has been converging traditional quality control and reliability engineering with massive data processing hereby suggesting robust product design models.