

위도와 해발높이에 따른 태양광발전 효율 분석 연구

(A Study on Solar Power Generation Efficiency Analysis according to Latitude and Altitude)

차왕철* · 박정호 · 조옥래 · 김재철**

(Wang-Cheol Cha · Jung-Ho Park · Uk-Rae Cho · Jae-Chul Kim)

Abstract

To solve the problem of conventional fossil energy, utilization of renewable energy is growing rapidly. Solar energy as an energy source is infinite, and a variety of research is being conducted into its utilization. To change solar energy into electrical energy, we need to build a solar power plant. The efficiency of such a plant is strongly influenced by meteorological factors; that is, its efficiency is determined by solar radiation. However, when analyzing observed generation data, it is clear that the generated amount is changed by various factors such as weather, location and plant efficiency. In this paper, we proposed a solar power generation prediction algorithm using geographical factors such as latitude and elevation. Hence, changes in generated amount caused by the installation environment are calculated by curve fitting. Through applying the method to calculate this generation amount, the difference between real generated amount is analyzed.

Key Words : Solar Power Generation, Latitude, Elevation, Curve-Fitting

1. 서 론

기존의 에너지원인 화석에너지의 탄소배출, 대기오염, 자원고갈과 같은 문제로 인해 이를 대체할 수 있는 신재생에너지원의 개발 필요성이 대두되고 있다. 그중 태양광에너지는 무한 에너지원이며 청정에너지로서 각광을 받고 있다. 하지만 태양광발전소를 건설하기 위해서는 공간, 비용, 발전효율 등의 측면을 고려해야 한다. 즉 최적의 입지조건에 설치해야만 경제적인 측면이나 발전효율성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 이를 위해서는 설치환경에 따른 태양광발전 효율을 정확히 예측할 수 있는 모델의 적용이 필요하다.

* 주저자 : 송실대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 송실대학교 전기공학과 교수
* Main author : Doctor course, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2014년 8월 6일
1차심사 : 2014년 8월 13일, 2차심사 : 2014년 9월 1일
심사완료 : 2014년 9월 13일

기존의 태양광 발전시스템의 예측 모델에서는 일사량 값을 이용하여 발전량을 계산하는 방법이 사용되고 있다[1-3]. 또한 통계적인 수치나 시변 일사량 데이터를 활용하여 단기 일사량만을 예측하는 연구가 주로 진행되었다[4-6]. 그리고 일사량에 영향을 미치는 기상정보에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 즉 태양광시스템에 영향을 미치는 온도, 바람, 운(雲)량을 적용하여 일사량을 예측하는 연구가 진행되었다[7-9]. 여기서 일사량이 실제 태양광발전 효율에 가장 큰 영향을 주지만, 일사량만으로 정확한 발전효율을 예측하는 데는 한계가 있다. 따라서 태양광발전에 영향을 미치는 다양한 요소를 분석하여 이를 적용하는 연구가 필요하다.

태양광발전소의 발전량을 조사해 보면 같은 일사량을 보이는 분포지역에서 동일한 발전량을 보이지 않는다. 이는 기상요소가 아닌 다른 요인이 발전량에 영향을 준다는 것을 의미한다. 실제 지리적요인과 설비요인 등이 발전량에 영향을 주고 있다 [10-11].

기존의 일사량만을 활용하여 발전량을 계산하는 방법은 발전량 예측에 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 발전소를 설치하는 장소의 지리적 요소인 위도와 해발높이의 영향을 적용하여 발전량을 계산하는 방법을 제안한다. 이를 위해 전국에 설치된 태양광발전소의 위치정보와 발전량 정보를 획득하여 활용하였으며, 획득한 데이터를 커브피팅(Curve-fitting) 알고리즘에 적용하여 위도와 해발높이에 따른 발전효율 방정식을 도출하였다. 이 방정식을 적용하여 최종적으로 발전량을 계산하였으며, 기존의 일사량만을 적용한 방법과의 비교분석을 통해 제안한 방법의 성능을 분석하였다.

본 연구에서 제시한 발전량 계산 모델은 발전소 설치 지역의 특성을 분석할 수 있기 때문에 태양광발전 시스템 구축시 경제성 분석에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 국내 태양광 발전량 분석

본 장에서는 태양광발전에 영향을 미치는 요소 중

지리적 요소에 대해 분석하였다[12-14]. 일반적으로 태양광 발전은 크게 기상요소, 지리적 요소, 시스템요소에 영향을 받는다. 그 중 기상요소와 시스템요소는 측정된 값이나 통계적인 데이터 또는 시스템의 사양을 통해 발전에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 하지만 지리적 요소에 대한 연구는 미비한 상태이다. 이는 아직까지 국내 태양광발전소의 발전량 통계치나 설치 위치에 따른 분석 연구가 부족하였기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 전국 태양광 발전소에서 획득한 약 2,000개의 실증데이터를 분석하여 설치 위치에 따른 발전량을 조사하였다.

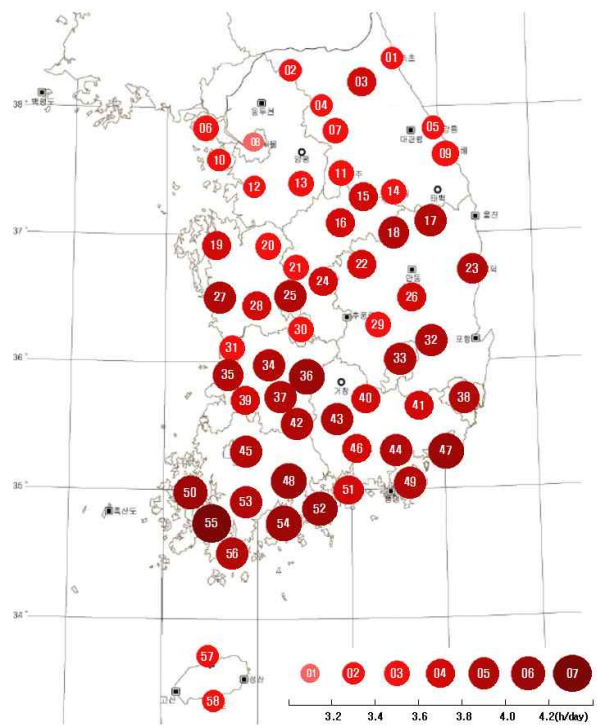


그림 1. 전국 발전량 지표

Fig. 1. Map of the solar power generation to national

그림 1은 전국에서 발전소가 설치된 지역 중 58개 지역을 선별하여 발전효율 표시한 그림이다. 붉은 원이 커지고 색이 진할수록 발전효율이 높은 것을 의미한다. 발전효율이 가장 낮은 지역은 8번 지역이고, 가장 높은 지역은 55번 지역을 나타내고 있다.

2.1 위도에 따른 발전량 분석

국내 지형은 동서간의 거리가 짧고 남북으로 긴 형태를 이루고 있다. 특히 남한지역의 위도 차이는 약 5도 정도이며, 동쪽에서 서쪽방향으로 해발높이가 낮아지는 형태를 보인다[12-14].

전국에 설치된 45개 지역의 약 1,500개 실증 태양광 발전 데이터를 분석하여, 발전효율을 위도에 따라 표시하면 그림 2와 같다.

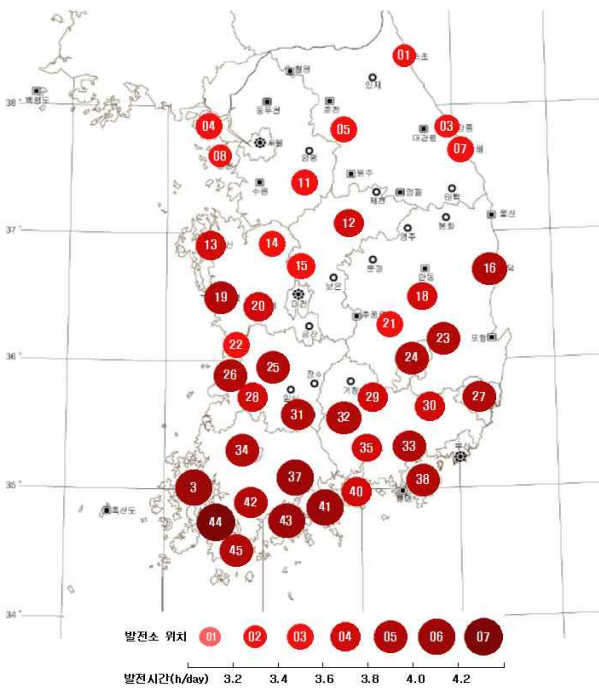


그림 2. 위도에 따른 발전량 지표
Fig. 2. Map of the solar power generation according to latitude

여기서 45개 지역은 해발높이에 따른 영향을 최소화하기 위하여 해발높이 150m 이하 지역으로 선별하였다. 그림에서 보이듯이 위도가 낮아질수록 발전효율이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 위도의 변화에 따라 발전량의 차이가 발생할 수 있는 것을 의미한다. 즉 발전량을 계산하기 위해서는 위도의 영향력을 적용해야 정확한 예측값을 획득할 수 있다는 것이다.

2.2 해발높이에 따른 발전량 분석

해발높이에 따른 발전효율을 분석하기 위해 전국 23개 지역에 설치된 태양광발전소의 약 1,000개의 실증 발전데이터를 분석하여, 해발높이에 따른 발전효율을 표시하면 그림 3과 같다.

여기서 23개 지역은 위도가 북위 35°에서 37°사이의 내륙지역을 선별한 곳이다. 최저 해발높이는 1번 지역으로 11m정도이며 최고 해발높이는 23번 지역으로 406m이다. 분석 결과 해발높이가 높아질수록 발전량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

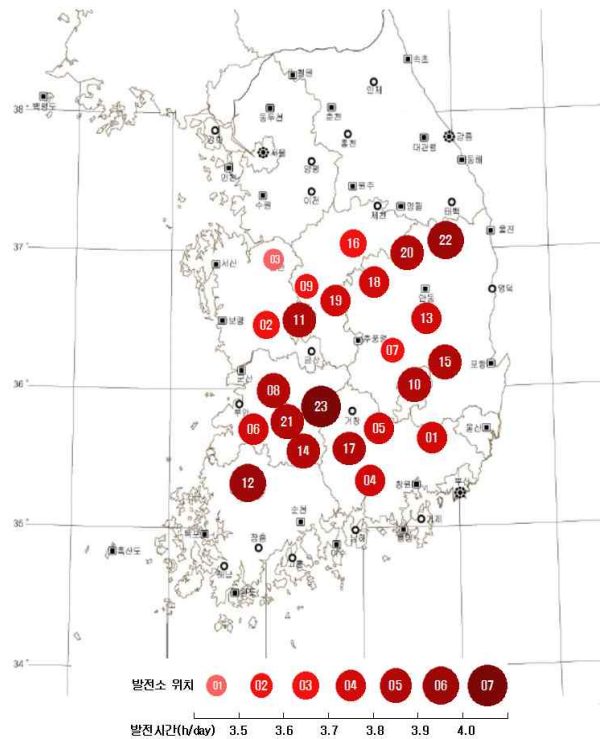


그림 3. 해발높이에 따른 발전량 지표
Fig. 3. Map of the solar power generation according to elevation

이는 해발높이가 높아질수록 온도가 낮아지기 때문에 시스템의 설비요소에 영향을 주는 것으로 분석된다. 결론적으로 동일 시스템 상에서는 고도가 높아질수록 발전효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3. 지리적 계수 방정식

본 장에서는 2장에서 분석한 데이터를 활용하여 각 지리적 요소의 영향력을 수식화하여 발전량 계산에 활용할 수 있도록 하였다. 수식화를 위해 커브피팅 방법을 적용하였으며 다항식 형태의 수식을 유도하였다. 이를 위해 matlab의 cftool(curve fitting)을 활용하였다.

그림 4와 5에 그 결과를 나타내었다. 그림 4와 5의 y축 값은 발전효율지수로 식 (1)과 같이 계산한 수치이다.

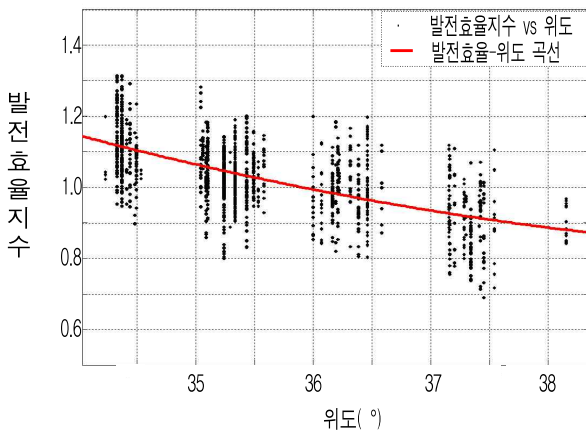


그림 4. 위도에 따른 커브피팅 결과 그래프
Fig. 4. Curve-fitting result graph of latitude

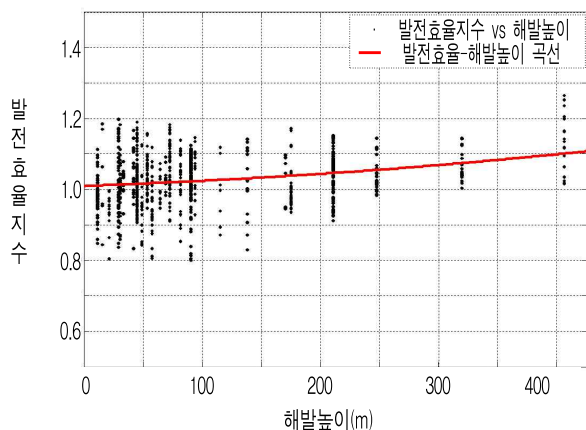


그림 5. 해발높이에 따른 커브피팅 결과 그래프
Fig. 5. Curve-fitting result graph of elevation

$$f_{lat} = \frac{b}{a}, \quad g_{ele} = \frac{b}{a} \quad (1)$$

여기서 a 는 전국 평균 일일 발전시간(h/day)이며, b 는 일일 발전시간(h/day)이다.

그림 4는 2.1절에서 적용한 약 1,500개의 데이터를 바탕으로 커브피팅한 결과 그래프이며 3차 다항식을 적용하여 곡선 방정식을 도출하였다. 계산된 방정식 결과는 식 (2)와 같다.

$$f(x_1) = 0.005673x_1^2 - 0.4733x_1 + 10.68 \quad (2)$$

여기서 x_1 은 위도를 의미하며, 약 95% 정도의 Confidence bounds를 적용하였으며 RMSE(Root Mean Square Error) 값은 0.07943이다. 그림 4에 나타난 것 같이 위도가 낮아질수록 발전효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5의 결과는 약 1,000개의 데이터를 활용하여 해발높이에 따른 발전량을 계산한 커브피팅 결과 그래프이다. 방정식 결과는 위도와 마찬가지로 3차 다항식으로 식 (3)과 같다.

$$g(x_2) = 2.668 \times 10^{-7}x_2^2 - 1.154 \times 10^{-5}x_2 + 1.01 \quad (3)$$

x_2 는 해발높이를 의미하며, RMSE 값은 0.0703이다. 즉 두 방정식 모두 95% 정도의 신뢰값을 가진다. 각 방정식의 출력은 실제 발전량이 아닌 발전효율지수이다.

최종적으로, 두 요소를 적용한 지리적 계수 방정식은 식 (4)와 같다.

$$G_e = w_1f(x_1) + w_2g(x_2) \quad (4)$$

여기서 w_1 과 w_2 는 위도와 해발높이의 가중치로 본 연구에서는 각각 0.5와 0.5를 적용하였다. 가중치는 지역의 특성에 따라 가변하여 적용할 수 있다.

4. 발전량 예측 결과 분석

본 장에서는 제안한 방법의 성능 결과를 보여주기

위해 기존 발전량 계산 방법과 비교분석을 진행하였다. 일반적인 발전량 계산은 식 (5)와 같다.

$$E = H \times P_{as} \times K \tag{5}$$

여기서 H 는 일사량($kwh/m^2/day$)이며, P_{as} 는 태양광 어레이 출력(kw_p/m^2)이다. 그리고 K 는 설계지수로 인버터나 모듈의 효율을 의미한다.

본 연구에서 제안한 방법은 식 (5)에 3장에서 구한 식 (4)를 적용한 방정식으로 다음과 같다.

$$E_g = H \times G_c \times P_{as} \times K \tag{6}$$

비교 분석을 위해 2011년에 측정된 평균 일사량 값과 전국 10개 지역에서 측정된 태양광 발전량을 적용하여 결과를 나타내었다. 비교 결과는 그림 6에 나타내었다.

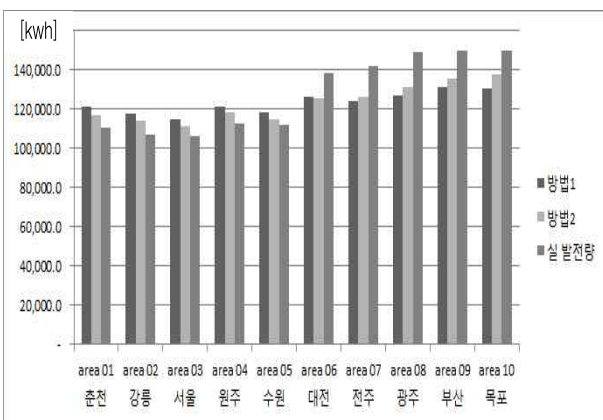


그림 6. 제안한 모델 결과 그래프
Fig. 6. Prediction results using proposed model

그림 6에서 방법 1은 기존의 계산방법으로 식 (5)를 적용한 발전량이고, 방법 2는 본 연구에서 제안한 방법으로 식 (6)을 적용한 발전량이다.

설비용량은 $100kW_p$ 를 기준으로 하였으며 설비효율은 90%로 설정하였다. 운영일수는 1년을 적용하여 계산한 결과값이다. 각 방법에 따른 RMSE(Root Mean Square Error)값과 오차율을 표 1에 나타내었다.

표 1. RMSE와 결과 오차율
Table 1. RMSE value and resulting error rate

발전량 계산 방법	RMSE	평균오차율(%)
방법 1	12714.87	7.95
방법 2	9827.94	5.79

방법 1은 실제 발전량 대비 약 8%정도의 오차를 보였으며, 방법 2는 6%정도의 오차를 보였다. 즉 지리적 계수를 적용하여 오차를 개선할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 발전소의 설비효율이나 특성에 따라 예측 결과는 바뀔 수도 있다. 결과에서 보인 것처럼 제안한 방법을 특정지역의 발전량 예측에 사용하게 되면 기존의 일사량만을 적용한 계산 방법보다 더 정확한 예측을 할 수 있다. 이는 본 논문에서 제안한 위도와 해발높이에 따른 지리적 계수를 태양광발전소의 부지선정과 경제성 분석에 활용이 가능하다는 것을 의미한다.

그러나 본 연구에 적용한 태양광발전소의 표본이 제한적이었기 때문에 더욱 정확한 분석이 필요하다. 그리고 일사량, 일조시간, 운(雲)량과 기온, 풍속, 적설, 강우, 안개, 황사 등의 기상요소 또한 태양광발전도에 미치는 영향이 매우 크다. 하지만 본 연구에서는 적용하지 못하였다. 이들 기상요소와 본 논문에서 제안한 지리적 계수를 함께 적용하게 되면 더욱 정확한 예측 모델 설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 태양광발전소가 위치한 지역의 위도와 해발높이를 적용하여 발전량을 예측할 수 있는 지리적 계수 방정식을 제안하였다. 2,000여개의 태양광 발전 실증 데이터를 커브피팅 알고리즘에 적용하여 위도와 해발높이에 따른 지리적 계수 방정식을 도출하였고, 이 방정식을 적용하여 발전량을 예측할 수 있도록 구성하였다. 비교분석을 통해 제안한 방법이 기존의 방법에 비해 정확도를 향상 시키는 것을 확인하였다. 따라서 제안한 지리적 계수 방정식을 이용하여 태양광발전소 건설에 따른 최적 입지조건과 경제성 분석에 도움을 줄 수 있을 것이다.

향후에는 태양광발전에 가장 크게 영향을 미치고 있는 여러 기상요소를 추가하여 장기간의 데이터를 활용한 예측모델 설계 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] Doo-Hyun Kim, Jin-O Kim, "The solar power with weather and generator scheduling," KIEE Summer Conference 2008, pp 131, 2008.
- [2] Il-Ryong Lee, In-Su Bae, Chang-Ho Jung, Jin-O Kim, Hun Shim, "Photovoltaic Generation System Output Forecasting using Irradiance Probability Distribution Function," KIEE Summer Conference 2004 A, pp 548-550, 2004.
- [3] M. Detyniecki, C. Marsala, A. Krishnan, M. Siegel, "Weather-based solar energy prediction," WCCI 2012 IEEE world cong. on computational intelligence, pp 1-7, June, 2012.
- [4] Kim Dong-Su, Shin U-Cheol, Yoon Jong-Ho, "Annual energy yield prediction of building added PV system depending on the installation angle and in Korea," KIEAE Conference 2014, Vol 4, No. 1, pp 67-74, 2014. 2.
- [5] Ju Jai-Wook, Kim Han-Soo, Oh Se-Jin, Lee Min-Suk, Choi Jeong-Min, "A Study on the Difference of Regional Electricity and Economic Comparative Valuation of the Photovoltaic System," KIAEBS Annual Spring Conference 2008, pp 137-140, 2008. 4.
- [6] A. Prastawa, R. Dalimi, "New Approach on Renewable Energy Solar Power Prediction in indonesia based on Artificial Neural Network technique: Southern region of Sulawesi island study case," 2013 International Conference on Quality in Research, pp 166-169, 2013. 6.
- [7] <http://www.pvsyst.com>
- [8] http://www.retscreen.net/ang/software_and_data.php
- [9] X. yang, F. Jiang, H. Liu, "Short-Term Solar Radiation Prediction based on SVM with similar data," Renewable Power Generation Conference 2013, 2nd IET, pp 1-4, 2013, 9.
- [10] Wang-Cheol Cha, Joung-Ho Park, Uk-Rae Cho, Jae-Cheol Kim, "A Study on Prediction of Photovoltaic Generation Amount through Utilizing Geography, Terrain, Weather Data", KIEE Annual Spring Conference 2014, pp 211-212, 2014.5.
- [11] Wang-cheol Cha, Uk-rae Cho, Joung-ho Park, Jae-Cheol Kim, "A Study on Prediction of Photovoltaic Generation Efficiency through Utilizing Quantity of Solar Radiation Data", KIEE Summer Conference 2014, pp 1114-1115, 2014.7.
- [12] <http://www.kredc.net>
- [13] Korea Meteorological Administration Seoul, Republic of Korea, 1981~2010 Climatological normals of Korea, 2011.
- [14] Korea Meteorological Administration Seoul, Republic of Korea, Weather resource analysis report for optimal use of solar energy, 2008. 12. 3.

◆ 저자소개 ◆



차왕철(車旺哲)

1969년 4월 29일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 1995년~현재 국방부 근무.

Tel : (02)3411-9177

E-mail : chalsking@hanmail.net



박정호(朴廷浩)

1968년 3월 9일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 1992년~현재 한국전기안전공사 근무.

Tel : (02)710-8583

Fax : (02)817-0780

E-mail : pjh051i@kesco.or.kr



조옥래(趙昱來)

1972년 6월 11일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 2000년~현재 한진KDN 근무.

Tel : (02)6262-6391

Fax : (02)6262-6399

E-mail : ukrae@kdn.com



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 숭실대학교 전기공학과 교수. 본 학회 회장.

Tel : (02)817-0647

Fax : (02)817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr