

# 도로인접성에 따른 육상 풍력자원 잠재량 평가

김현구\*, 황효정, 강용혁, 윤창열

## Evaluation of Onshore Wind Resource Potential According to the Road Proximity

Hyun-Goo Kim\*, Hyo-Jung Hwang, Yong-Heack Kang and Chang-Yeol Yun

### Abstract

Wind turbines should generally be installed at a certain distance from a road to ensure passengers' safety. In Korea, there is no clear guidance as the Ministry of Environment first proposed a road setback distance of 400 m in the Onshore Wind Farm Siting Guidelines draft proposed in July 2012, and then modified it to 1.5 times the height of the wind turbine in October of the same year. This study analyzed the dynamic range of onshore wind resource potential according to how the road setback distance is set using the Korea Wind Atlas with 100m spatial resolution made by the Korea Institute of Energy Research, the transportation network of the Ministry of Construction and Transportation, and the forest road network of the Korea Forestry Service. Owing to the geographical characteristics of Korea, where mountainous terrain accounts for 70% of the total territory, the wind resource potential within 1 km from forest roads are estimated to be 14.3 GW, 14% of Korea's total wind resource potential. In addition, the construction distance of new road for transporting wind turbines from the existing road to a wind farm site is estimated as less than 2 km. Given the limited wind resource potential and geographical constraints, an assessment system that can maximize wind resource utilization and ensure road safety at the same time, and which takes into account the regional characteristics instead of applying the fixed road setback distance across-the-road, is required.

### Key words

Western Resource Potential(풍력자원 잠재량), Road Proximity(도로인접성), Road Setback(도로이격), National Wind Atlas (국가바람지도)

(접수일 2013. 7. 19, 수정일 2013. 7. 19, 게재확정일 2013. 12. 16)

\* 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 (New & Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research)  
■ E-mail : hyungoo@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-337 ■ Fax : (042)860-3462

## 1. 서론

육상 풍력발전 단지개발에 있어서 도로망은 두 가지 측면에서 중요하다. 첫째로 풍력터빈의 수송로 확보 측면에서 중요하며,<sup>(1)</sup> 둘째로 산지지역에 풍력단지를 개발할 경우에는 기

존의 임도(林道, forest road; 임산물의 수송이나 삼림의 관리를 위해 조성한 도로)를 잘 활용하여야 환경훼손의 최소화 및 토목공사 비용절감에 의한 경제성 확보가 가능하기 때문이다.

일반적으로 통행자의 안전확보를 위해 풍력터빈 설치시 도

로이격(road setback)이 필요하다. 캐나다 풍력협회에서는 풍력터빈 파손에 따른 위험성을 고려하여 풍력터빈 최대높이에 10m를 더한 거리를 이격하도록 권고하고 있다.<sup>(2)</sup> 캐나다 온타리오주에서는 동계 블레이드 결빙탈착의 위험권을 회피할 수 있도록 200m의 이격거리를 권고하고 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 이들 기준은 공통적으로 국지적 특성에 따라 다양한 위험요인을 최대한 경감할 수 있는 이격거리를 설정하도록 권고하고 있다. 실례로 미국 캘리포니아주<sup>(4)</sup> 및 미시간주<sup>(5)</sup> 풍력단지 적용된 도로 이격거리 기준은 설치지역의 특성을 고려하여 군(county)마다 모두 상이하게 적용되었다.

우리나라에서는 2012년 7월 환경부에서 풍력발전 입지선정 가이드라인(안)을 제시하면서 기존 도로에서 이격거리 400m 이내 지역을 제척하도록 하였으나, 지나친 환경보전 목적의 가이드라인에 풍력발전 사업자가 반발하자 2012년 10월 발표한 수정안에서는 공공도로와의 이격거리를 풍력터빈 높이의 최소 1.5배로 완화한 바 있다. 그러나 앞서 해외사례에 대하여 검토한 바와 같이 지역 특수성을 무시한 일률적 도로 이격거리 지정은 과소·과대 기준적용에 따른 부작용이 우려된다.

본 논문에서는 안전성 측면보다는 풍력자원 측면에서 도로 이격거리를 분석하고자 한다. 즉, 도로 이격거리에 따른 풍력자원 잠재량의 민감도를 평가함으로써 지역 특수성을 고려한 탄력적인 도로 이격거리 적용의 필요성 및 산지지역 풍력단지 개발시 기존 임도망 활용의 필요성을 검토하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 도로망

본 연구에서는 안전행정부 도로망과 산림청 임도망을 적용하여 분석을 수행하였다(Fig. 1).

안전행정부 도로망은 2011년말 현재 총연장 105,931km 중 왕복 4차선 이상이 85,120km, 왕복 2차선 이하가 62,442km, 그리고 비포장이 9,536km로 구성되어 있다. 산림청 임도망은 2012년말 현재 총연장 16,573km 중 차량통행이 가능한 폭 1.5m 이상이 11,868km, 그 이하가 4,615km로 구성되어 있다.

### 2.2 국가바람지도

국가바람지도란 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」에 의거하여 풍력발전 보급지원을 위해 산업통상자원부 부처임무사업으로 한국에너지기술연구원에서 구축한 풍력자원지도 및 종합적 활용체계이다.<sup>(6)</sup>

풍력자원지도는 중규모(mesoscale) 수치기상예측(NWP; Numerical Weather Prediction) 모델인 WRF(Weather Research and Forecasting)를 이용하여 한반도 전체에 대해 수평면에 대해 1km 공간해상도로 구축한 후<sup>(7)</sup> 미시규모(microscale) 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics) 모델인 WindSim으로 동적축소화(dynamic downscaling)를 통해 100m 공간해상도로 상세화되 지형거칠기 모형과<sup>(8)</sup> 수렴가속화 모듈을<sup>(9)</sup> 적용하였다.

### 2.3 풍력자원 잠재량 산정

미국 재생에너지연구소(NREL; National Renewable Energy Laboratory)의 분류기준에 따라 지상고도 100m 기준으로 풍력밀도 350W/m<sup>2</sup> 이상인 풍력등급 3등급 이상이 되어야 풍력

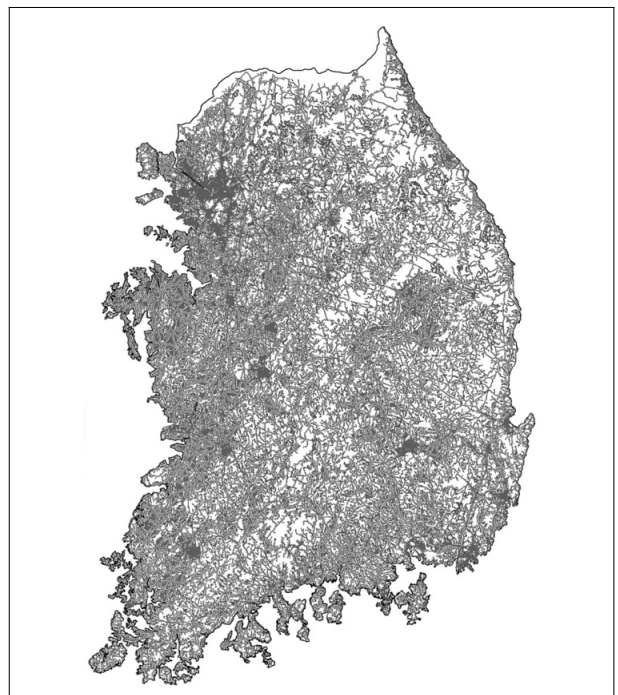


Fig. 1 Road network (■: conventional road, ■: forest road)

발전 단지개발에 필요한 최소한의 경제성이 보장된다고 가정하였다. 그러나 이보다 낮은 풍력등급 2등급이라도 토목공사 및 계통연계 비용절감에 의해 경제성 확보가 가능하며, 현재 풍력단지의 20%인 7여 단지가 풍력밀도 350W/m<sup>2</sup> 이하인 지역에 건설되어 있다.

풍력터빈 설비용량 기준의 풍력자원 잠재량은 Fig. 2의 국가바람지도로부터 산출한 풍력등급 구간별 면적에 미국 NREL에서 제시한 단위면적당 이론적 풍력터빈 설비용량 5MW/km<sup>2</sup>를<sup>(10)</sup> 곱하여 산정하였다. 이때 국가바람지도의 공간해상도(1km 및 100m)에 따른 풍력자원 잠재량 산출의 민감도를 평가하였다.

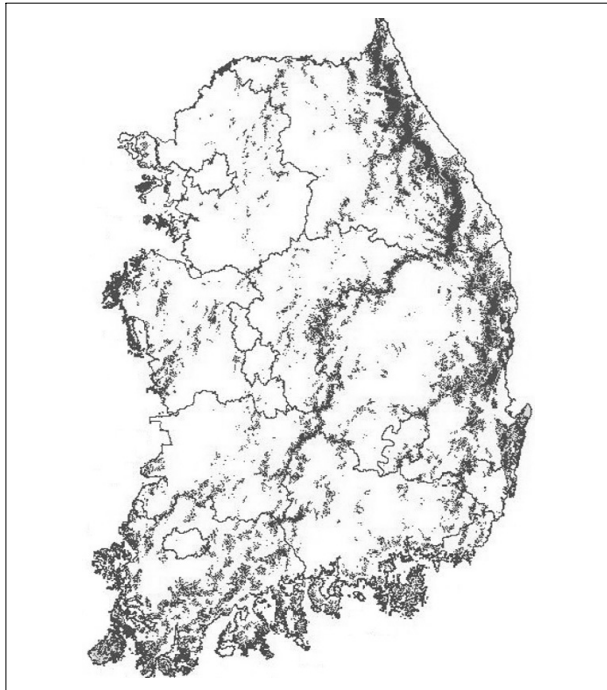


Fig. 2 Korea wind atlas (wind power density at 100 m a.g.l.; ■: 250~350 W/m<sup>2</sup>, □: 350~450 W/m<sup>2</sup>, ▨: > 450 W/m<sup>2</sup>)

도로이격에 따른 풍력자원 잠재량은 안전행정부 도로망과 산림청 도로망에 이격거리 200m, 400m, 600m, 800m, 1000m를 적용하였을 때 대하여 산정하였다. 참고로 MW급 풍력터빈의 허브높이와 블레이드 지름이 모두 80m라고 했을 때 풍력터빈의 최대높이는 80 + 80/2 = 120m이므로, 도로 이격거리 200m는 풍력터빈 최대높이의 1.7배에 해당된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 공간해상도 민감도 평가

Table 1은 1km 및 100m 공간해상도의 국가바람지도를 이용하여 풍력등급 분류에 따른 풍력밀도 구간별 풍력자원 잠재량을 산출한 결과이다.

풍력자원지도의 공간해상도가 1km에서 100m로 100배 상세화 됨에 따라 특히 저풍속 구간인 풍력등급 1등급의 면적이 대폭 증가하였으나 이는 대부분 같은 저풍속 구간인 풍력등급 2등급 중 과대예측된 영역이 저풍속으로 재평가된 것이다. 풍력자원으로 활용 가능한 풍력등급 3등급 이상의 면적은 공간해상도 상세화에 따라 약 7% 감소하였으나 풍력밀도 450W/m<sup>2</sup> 이상의 고풍속 영역은 다소 해당면적이 증가하였다.

100m 공간해상도급 풍력자원지도에 의하면, 풍력등급 3등급 이상인 남한 육상 풍력자원 잠재량은 설비용량 기준으로 46.6GW로 산정되었다.

#### 3.2 도로인접성 민감도 평가

Tables 2와 3은 각각 안전행정부 도로망 및 산림청 임도망

Table 1. Corresponding area by wind power density (at 100 m above ground level)

| Wind class | Wind power density (W/m <sup>2</sup> ) | Wind atlas 1 km         |                           | Wind atlas 100 m        |                           | Difference of wind power potential (GW) |
|------------|--|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---|
|            |  | Area (km <sup>2</sup> ) | Wind power potential (GW) | Area (km <sup>2</sup> ) | Wind power potential (GW) |   |
| 1          | < 250                                  | 70,217                  | -                         | 76,923                  | -                         | -                                       |
| 2          | 250~350                                | 17,215                  | 86.1                      | 11,234                  | 56.2                      | -29.9                                   |
| 3          | 350~450                                | 5,667                   | 28.3                      | 4,756                   | 23.8                      | -4.6                                    |
| 4+         | > 450                                  | 4,347                   | 21.7                      | 4,568                   | 22.8                      | +1.1                                    |
| Total      |  |                         | 136.0                     |                         | 103.0                     | -33.0                                   |

**Table 2. Wind resource potential by setback distance from the conventional road**

| Setback distance | Corresponding area (km <sup>2</sup> ) by wind power density (W/m <sup>2</sup> ) |         |       | Wind power potential (GW)* |
|------------------|---|---------|-------|----------------------------|
|                  | 250~350   | 350~450 | > 450 |                            |
| 200 m            | 2,403   | 417     | 201   | 3.1                        |
| 400 m            | 4,505   | 980     | 475   | 7.3                        |
| 600 m            | 6,274   | 1,603   | 819   | 12.1                       |
| 800 m            | 7,692   | 2,240   | 1,235 | 17.4                       |
| 1000 m           | 8,657   | 2,774   | 1,672 | 22.2                       |
| 1200 m           | 9,242   | 3,167   | 2,074 | 26.2                       |
| 1400 m           | 9,623   | 3,459   | 2,450 | 29.5                       |
| 1600 m           | 9,850   | 3,661   | 2,773 | 32.2                       |
| 1800 m           | 9,989   | 3,792   | 3,042 | 34.2                       |
| 2000 m           | 10,078  | 3,883   | 3,266 | 35.7                       |

\* Wind power potential for 350 W/m<sup>2</sup> above

**Table 3. Wind resource potential by setback distance from the forest road**

| Setback distance | Corresponding area (km <sup>2</sup> ) by wind power density (W/m <sup>2</sup> ) |         |       | Wind power potential (GW)* |
|------------------|---|---------|-------|----------------------------|
|                  | 250~350   | 350~450 | > 450 |                            |
| 200 m            | 865   | 358     | 268   | 3.1                        |
| 400 m            | 1,668   | 716     | 537   | 6.3                        |
| 600 m            | 2,406   | 1,037   | 793   | 9.2                        |
| 800 m            | 3,129   | 1,340   | 1,036 | 11.9                       |
| 1000 m           | 3,796   | 1,609   | 1,261 | 14.3                       |

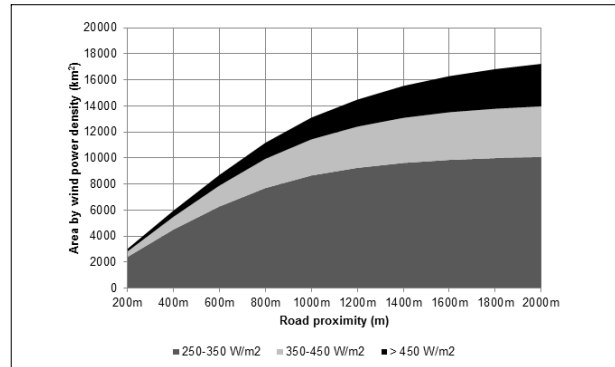
\* Wind power potential for 350 W/m<sup>2</sup> above

의 도로 이격거리에 따른 풍력자원 잠재량 산정결과를 정리한 것으로, 이격거리에 따른 누적값이며 풍력자원 잠재량은 풍력밀도 350W/m<sup>2</sup> 이상(풍력등급 3등급 이상)에 대해 산정된 것이다.

Fig. 3은 안전행정부 도로망에 대하여 이격거리에 따른 육상 풍력자원 잠재량의 관계를 그래프로 도시한 것이다.

안전행정부 도로망은 풍력터빈의 이송경로가 되는데, 도로로부터 이격거리 1km 이내에 육상 잠재량의 47%가, 이격거리 2km 이내에 육상 잠재량의 77%가 포함된다. 즉, 풍력자원의 77%를 개발하기 위해서는 직선거리로 최대 2km의 이송도로 추가건설이 필요하다는 의미이다.

도로망과 임도망으로부터 이격거리 1km 이내에서 풍력등급 3등급 이상의 풍력자원 잠재량은 각각 22.2GW와 14.3GW이며, 이 둘을 합하면 남한 육상 풍력자원 잠재량의 약 80%



**Fig. 3 Sensitivity of the conventional road setback distance on wind resource potential**

에 이른다. 또한 풍력등급 4등급 이상은 각각 8.4GW와 6.3GW이며, 이 둘을 합하면 전체의 65%에 해당한다.

서론에서 언급한 바와같이 환경부 풍력단지 입지선정 가이드라인(안)의 수정에 따라 도로 이격거리가 400m에서 200m로 축소되어 추가로 확보한 풍력자원 잠재량은 풍력등급 3등급 이상이 4.2GW(9%), 4등급 이상이 1.4GW(6%)이다.

안전행정부 전국도로망 주위 부지는 상당부분이 주거지 등의 용도지역이므로 풍력단지 개발에 부적합한 경우가 대부분이며, 실제적으로 활용성이 높은 풍력자원은 대부분 산악지역의 임도망 주위이다.

### 3.3 풍력단지 개발시 임도 활용성

임도는 풍력단지 개발시 이송도로로 활용될 경우 환경훼손과 공사비용을 대폭 절감할 수 있는데, Fig. 4의 영양 풍력단지 항공사진에서 확인할 수 있듯이 통상 풍력터빈은 단지 내 연결도로와는 이격거리 제한을 두지 않는다.

산림청에서 2010년 12월 10일에 고시한 「송전시설 등의 자재운반방법 결정 기준 및 임시진입로 설계·시공 기준」에 따르면, 풍력발전시설 자재를 운반하는 경우, 설치 지역이 생태자연도 1등급에 해당하거나 설치지역과 산자락 하단부까지의 산지사면 평균경사가 25도 이상인 등의 경우 헬기로 부품등을 운반해야 하는 등의 규제를 부과하고 있다.

그런데 2MW급 풍력터빈의 나셀은 그 무게가 60~70톤, 타워는 3단으로 분리할 경우 각각 30톤이다. 반면 현존 운송용 헬기(Mi-26 Halo)의 최대 적재량이 20톤이므로 풍력발전시설 자재의 헬기 운송은 현실적으로 불가능하다. 더욱이 국내



**Fig. 4** Layout of wind turbines along access roads in the Yeongyang Wind Farm (source: Daum map)

산악지역의 대부분이 생태자연도 1등급지에 해당하므로 산림청의 시공기준은 결과적으로 산악지역 풍력단지 개발을 불허하는 것이 된다.

국가에너지기본계획에 의해 제시된 신재생에너지 보급목표 11% 달성을 위해서도 풍력보급이 선도적 역할을 담당하여야 할뿐 아니라 신재생에너지공급의무화(RPS)에 의해 해마다 공급 의무량이 증가하고 있고 그 상당부분을 풍력발전으로 충당하여야 하는 발전사업자의 입장에서는 산림청 산지관리법을 준수하면서 산악지역 풍력단지를 개발한다는 것은 불가능하다는 입장이다. Fig. 2에서 확인되듯이 대부분의 개발 가능 풍력자원이 산악지역에 분포하고 있는 상황과 국가적 신재생에너지 보급목표 달성과 환경보존의 가치가 상충되는 현실점에서 정부차원에서 나서서 이 문제를 해결하여야 할 것으로 사료된다.

한편 Fig. 4의 영양 풍력단지에서는 2012년 12월 강풍으로 인하여 1.5MW급 풍력터빈의 블레이드가 파손되어 지상에 추락한 사고가 발생하였다.<sup>(11)</sup> 다행히 인명피해는 없었으나 풍력단지 내에서는 강풍, 낙뢰, 결빙탈착 등 인명피해로 이어질 수 있는 상황이 발생할 수 있으므로 관광객 또는 관리요원의 안전을 보장하기 위한 지침 및 규정도 반드시 필요하다.

## 4. 결론

본 연구에서는 한국에너지기술연구원 국가바람지도와 안전행정부 도로망 및 산림청 임도망 지리정보를 이용하여 육상 풍력자원 잠재량의 도로인접성 민감도를 평가하였다.

풍력발전시설 자재의 이송 측면에서 풍력단지의 도로인접성은 시공비용과 직접적인 관련을 갖는다. 분석결과에 의하면 육상 풍력자원 잠재량의 77%가 도로망으로부터 직선거리 2km 이내에 분포하고 있으며, 이는 풍력단지까지 풍력터빈을 이송하기 위한 추가적인 도로건설은 2km 이내 임을 의미한다.

산악지형이 국토의 70%를 차지하는 우리나라의 지리적 특성 상 도로망 주변 1km 이내에 육상 풍력자원의 48%인 22.2GW가, 임도망 주변 1km 이내에는 30%인 14.3GW가 분포하는 것으로 분석되었다.

산림청 시공기준을 비롯한 각종 풍력단지 입지규제를 고려할 때 풍력단지 개발시 환경훼손과 공사비용을 대폭 절감할 수 있는 방안으로 임도망을 적극 활용할 필요가 있으며, 완공 이후에는 풍력단지의 특성을 고려하여 보행자 안전성을 확보할 수 있는 방안도 함께 고려되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 부처임무사업인 「신재생에너지 자원지도 활용시스템 구축사업」 및 산업통상자원부의 정책과제인 「육상풍력 보급확대를 위한 중장기 보급전략 수립」의 일환으로 수행되었습니다.

본 연구를 수행함에 있어 산림청 정보통계담당관실로부터 임도망 지리정보를 제공 받았기에 지면을 빌어 감사를 표합니다.

## References

- [1] Nordex Energy GmbH, Transport, Access Roads and Crane Requirements: Nordex N80/2500, N90/2500, N100/2500, Germany, 2009.

[2] Canadian Wind Energy Association, Position on Setbacks for Large-Scale Wind Turbines in Rural Areas (MOE Class 3) in Ontario, 2007.

[3] Watson, I., Betts, S., Rapaport, E., Determining Appropriate Wind Turbine Setback Distances: Perspectives from Municipal Planners in the Canadian Provinces of Nova Scotia, Ontario, and Quebec, Energy Policy, Vol. 41, pp. 782-789, 2012.

[4] California Wind Energy Collaborative, Permitting Setback Requirements for Wind Turbines in California, CEC-500-2005-184, California Energy Commission, 2006.

[5] Klepinger, M., Michigan Land Use Guidelines for Siting Wind Energy Systems, Michigan State University, 19p., 2007.

[6] 김현구, 이화운, 이순환, 한반도 풍력자원지도 및 해상단지

적합성 평가체계 개발, 풍력에너지저널, Vol. 2, No. 2, pp. 17-23, 2011.

[7] 김현구, 강용혁, 한반도 풍력자원지도: 2010년판, 한국풍공학회지, Vol. 16, No. 4, pp. 167-172, 2012.

[8] Kim, H.-G., Atmospheric Flow Simulation Method Considering Terrain Elevation Data Resolution, U.S. Patent No. 8229720, U.S. Patent and Trademark Office, 2012.

[9] 김현구, 전산유체역학을 이용한 대기유동장 수치모의 시스템 및 방법, 특허등록 10-1332559, 특허청, 2013.

[10] Elliott, D., Schwartz, M., Haymes, S., Heimiller, D., Scott, G., Flowers, L., 80 and 100 Meter Wind Energy Resource Potential for the United States, WINDPOWER 2010 Conference & Exhibition, Dallas, Texas, 2010.

[11] 경북매일, 날개 꺾인 영양 풍력발전기 - 성탄절 강풍에 부러져, 2012-12-27.

**김 현 구**



1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사  
 1998년 미국 아이오와대학교 IIHR 연구원  
 2000년 포항산업과학연구원 책임연구원  
 2005년 한국에너지기술연구원 책임연구원  
 2011년 과학기술연합대학원 재생에너지학과 교수

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터  
 (E-mail : hyungoo@kier.re.kr)

**황 효 정**



2006년 군산대학교 해양시스템공학과 공학사  
 2008년 군산대학교 해양산업공학과 공학석사  
 2008년 한국에너지기술연구원 위촉연구원  
 2011년 우림텍 지리정보시스템 팀장

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터  
 (E-mail : hjhwang@kier.re.kr)

**강 용 혁**



1997년 인하대학교 기계공학과 공학박사  
 2007년 IEA SolarPACES 집행위원회(ExCo) 한국대표  
 2010년 한국태양에너지학회 회장  
 2013년 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 센터장

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터  
 (E-mail : yhkang@kier.re.kr)

**윤 창 열**



2005년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사  
 2005년 한국에너지기술연구원 선임연구원  
 2013년 서울대학교 건설환경공학부 공학박사 수료

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터  
 (E-mail : yuncy@kier.re.kr)