

## 한국 영덕 풍력단지 사례 연구를 통한 풍력 발전의 환경 영향 평가

이준현 · 류준형<sup>†</sup>

동국대학교 WISE 캠퍼스 창의융합공학부  
38066 경북 경주시

(2022년 7월 4일 접수, 2022년 7월 18일 수정본 접수, 2022년 7월 22일 채택)

### Life Cycle Assessment (LCA) of the Wind Turbine : A case study of Korea Yeongdeok Wind Farm

Jun Heon Lee and Jun Hyung Ryu<sup>†</sup>

Division of Creative Convergence Engineering, Dongguk University, WISE Campus,  
123, Dongdae-ro, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, 38066, Korea

(Received 4 July 2022; Received in revised form 18 July 2022; Accepted 22 July 2022)

#### 요 약

전세계적으로 환경의 중요성이 부각되면서, 원재료 준비, 생산 공정, 운송 및 설치 등 산업 전체 기간에 걸친 기후 변화 주요 물질인 탄소 배출량을 계산하고, 저감해야 한다는 필요성이 강조되고 있다. 이를 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)라 정의되면서 전세계적으로 다양한 산업들에 시도되고 있다. 국내에도 일부 관련 시도들이 있었지만, 국내 재생에너지 산업에 대해서는 거의 발표되지 않았다. 이러한 연구 중요성에도 불구하고, 부진한 관련 연구의 격차를 메꾸기 위해 본 연구는 국내 육상 풍력발전 단지의 한 사례인 경북 영덕 발전에 대하여 LCA 연구를 관련 시스템 중 가장 많이 사용되는 SimaPro를 이용하여 수행하였다. 연구 결과 풍력 터빈 1대의 에너지 회수기간(EPT)은 약 10개월이며, 1 kwh의 전력을 생산하는데 배출되는 온실가스 배출량(Green House Gas, GHG)은 15 g CO<sub>2</sub>/kWh로 다른 에너지원과 비교해서 경쟁력 있음을 보였다. 부품 별 환경 영향 평가에서는 풍력 터빈의 타워가 여러 환경 영향 부문에 영향이 가장 크다는 결과를 보였다. 본 연구에서 얻어진 경험은 향후 신재생 에너지 보급 및 확대 정책의 강화와 대중의 인식 제고에 도움이 될 것이라고 사료된다.

**Abstract** – As the importance of the environment has been recognized worldwide, the need to calculate and reduce carbon emissions has been drawing an increasing attention throughout various industrial sections. Thereby the discipline of LCA (Life Cycle Assessment) involving raw material preparation, production processes, transportation and installation has been established. There is a clear research gap between the need and the practice for Korean Case of renewable energy industry, particularly wind power. To bridge the gap, this study conducted LCA research on wind power generation in the Korean area of Yeongdeok, an example of a domestic onshore wind power complex using SimaPro, which is the most widely used LCA system. As a result of the study, the energy recovery period (EPT) of one wind turbine is about 10 months, and the GHG emitted to generate power of 1 kwh is 15 g CO<sub>2</sub>/kWh, which is competitive compared to other energy sources. In the environmental impact assessment by component, the results showed that the tower of wind turbines had the greatest impact on various environmental impact sectors. The experience gained in this study can be further used in strengthening the introduction of renewable energy and reducing the carbon emission in line with reducing climate change.

Key words: Onshore wind turbine, Life cycle assessment, Environmental impacts, Green energy

#### 1. 서 론

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jhyu@dongguk.ac.kr

\*이 논문은 광운대학교 교재목 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지구 평균 표면 온도(GMST)는 2006년부터 10년동안 약 100년전 (1850~1900년)에 비교하여 약 0.85 °C 증가했다[1]. 이와 같은 지구 온도의 증가는 세계적으로 가뭄과 폭우와 같은 심각한 이상 기후들을 초래하고 있다. 이러한 심각성을 인지한 세계 각국은 기후 협약들을

맺어 대응하고 있다. 2015년에 지구 온난화를 방지하기 위해 지구의 평균 온도 상승을 2 °C 이하로 낮추며, 1.5 °C를 제한하도록 노력하는 것을 목표로 체결된 파리 기후협약이 그 대표적인 예이다[2].

IEA 조사 결과에 의하면, 대한민국은 2019년 총 CO<sub>2</sub> 배출량은 585.7Mt로 7위, 1인당 CO<sub>2</sub> 배출량은 11.3ton으로 17위를 기록했다[3]. 대한민국 정부는 2019년 출범한 제3차 에너지기본계획(EMP)에서 재생 에너지 발전 비중을 현행 6.5%에서 2030년까지 20%, 2040년까지 30~35%로 높이려고 하고 있다. 풍력 기반 발전량을 2025년까지 9.2GW, 2030년까지 16GW로 증가시킬 계획을 가지고 있다. 다만 배출량 목표 자체가 강화되지 않아 기후 행동 추적 분석기는 한국의 국가결정기여 온실가스 감축 목표(NDC, Nationally Determined Contribution)가 지구 온난화를 2 °C로 제한하기에는 ‘매우 부족하다’는 평가를 유지했다[4].

Pacala와 Socolow (2004)를 비롯한 많은 학자들은 세계 에너지 수요 안정의 해결책은 재생 에너지이며, 풍력 에너지는 그 중에서 최우선 해결 방안 중 하나라고 강조하였다[5,6]. 물론 풍력 에너지는 소음, 시각 오염, 야생 동물의 안전과 같은 생태학적 문제, 바이오 시스템의 교란, 전자파 간섭 및 국지적 기후변화 등 인간 생활에 부정적인 영향을 주는 측면도 있다[7,8]. Sebestyen (2021)의 연구에 의하면 풍력 에너지의 가장 빈도 높은 영향으로 “해상 풍력 발전 단지에 대한 서식지 영향”, “풍력 발전 장치 동결에 의한 얼음 조각 비산 사고”, “기후 변동”, “박쥐 사망”, “조류 교란”을 지적하였다[9]. 이러한 부정적인 영향에도 불구하고, 풍력 에너지는 깨끗하고 환경 친화적인 에너지로 화석 연료를 대체 가능한 대표적인 재생 에너지원으로 주목받고 있다[7,10,11].

전세계적으로 경제적 이익 추구의 중요성을 인정하면서도, 동시에 환경 보호의 중요성과 제조 및 소비되는 제품과 그 생산에 관련된 공정이 환경에 미치는 영향에 대한 인식이 높아지고 있다. 이는 환경에 미치는 부정적 충격을 체계적으로 계산하는 방법에 대해 관심으로 이어졌으며, 우선 순위를 정하고 의사 결정 전략 및 프로세스와 관련된 결정을 위한 지표로 정성적인 평가와 정량적 평가의 중요성이 더욱 높아졌다[12,13,14].

전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)는 제품과 서비스를 원료 채취부터 폐기까지 생애 모든 기간에 걸쳐 제품이 환경에 미치는

영향을 정량적으로 평가하는데 사용되는 유용한 방법이다[15,16]. 에너지 시스템에 대한 LCA는 생산 누적 에너지 수요(Cumulative Energy Demand, CED)와 전 과정 동안 탄소 배출량 등을 얻기 위한 유용한 수단이다. 전체 설비는 부품과 하위 구성 요소로 나뉘며, 이를 통한 모든 에너지 및 재료 흐름을 조사할 수 있다[17].

한국형 신재생 에너지 자원 기반 에너지 공급 체제의 경제적 최적 설계 및 운전 전략에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다[18,19]. 이에 비해 전 과정 동안 한국형 신재생 에너지 공급 체제가 환경에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 미비하다.

본 논문은 한국형 육상 풍력 터빈이 제조부터 폐기까지 전 과정 동안 환경에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다. 이를 통해 환경 영향에 기여하는 주요 오염 물질과 주요 프로세스에 대해 식별할 것이다. 풍력 에너지 발전 시스템의 환경 영향에 대한 과학적이며 객관적인 참고 자료로 활용 가능하여 전체 그린 에너지 시스템의 친환경성을 평가하는데 활용될 수 있을 것이다[16].

## 2. 문헌 조사

### 2-1. LCA 관련 주요 연구

LCA는 원자재 획득에서 폐기물의 처리까지 제품 및 서비스의 잠재적인 환경 영향을 정량화 하는데 사용되는 체계적인 연구 방법이다(Fig. 1 참조). 국제 표준 기구 ISO (International Standards Organization)에서 지침과 원칙을 수립했으며, ISO 14040 및 ISO 14044 시리즈에 의해 정의된다. LCA에 대한 개념은 1990년대 초에 제시되었고, 다양한 LCA에 관련 연구들이 진행되었다[16,17]. ISO14040에서 LCA의 효율적인 수행을 위해 다음의 4단계 구성 원칙으로 나눈다: 1) 목적 및 범위 정의 단계(Goal and scope definition phase), 2) 인벤토리 분석 단계(Inventory analysis phase), 3) 영향 평가 단계 (Impact assessment phase), 4) 결과 해석 단계(Interpretation phase). Fig. 2는 이를 개괄적으로 보여준다.

LCA를 통해 제품의 수명 주기의 다양한 시점에서 제품의 환경적 성능을 개선할 수 있는 기회를 식별할 수 있으며, 환경 성과의 관련 지표로 이용될 수 있다. 정부 또는 기업의 의사 결정자에게 관련 정보를 제공하거나 마케팅 측면에서 활용 가능하다[15,16]. 또한, 에너

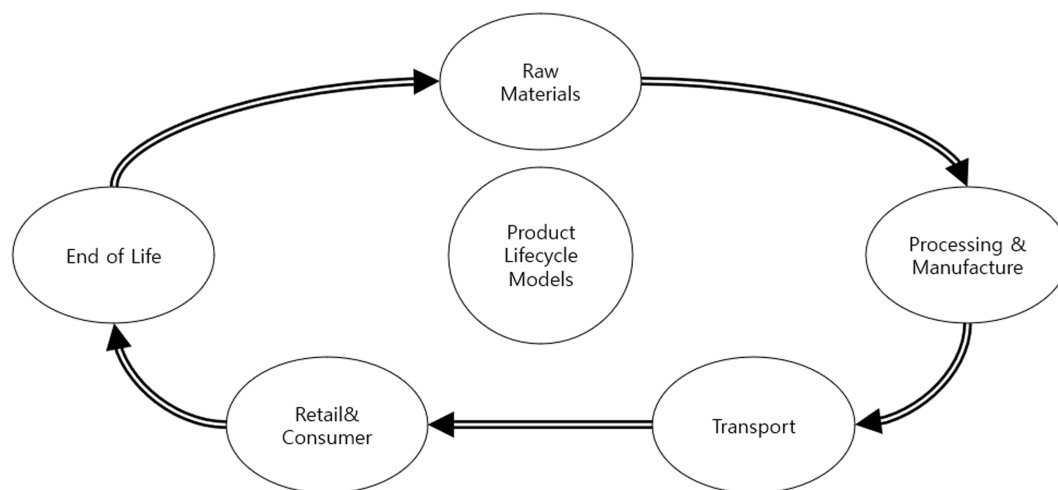


Fig. 1. Schematic of product lifecycle models.

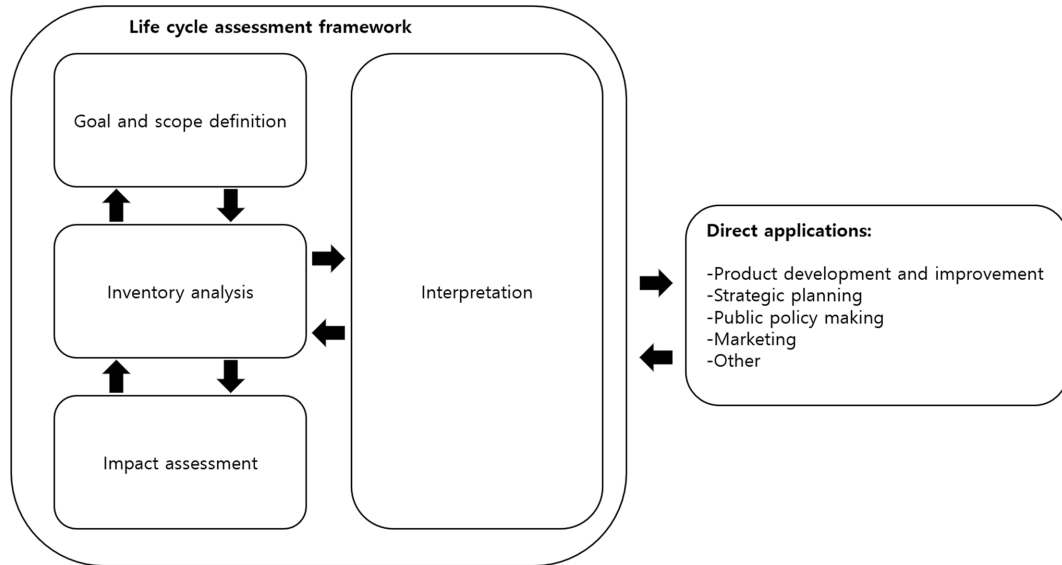


Fig. 2. Stage of an LCA [16].

지 시스템의 지속 가능성을 평가하기 위한 도구로 광범위하게 사용되고 있으며, 제품과 관련된 평가를 하기에 가장 확립되고 잘 개발된 도구로 평가받는다[20].

## 2-2. 풍력 관련 LCA 선행 연구

풍력 발전의 LCA에 대해서도 연구들이 진행되었다. Martinez 등은 2MW 정격 전력 풍력 터빈의 환경 영향을 풍력 터빈이 운영되는 20년 기간 및 해체 후에 걸쳐서 환경 영향을 연구했다(2009). 재활용하지 못하는 재료들로 인해 초래되는 환경 영향이 크며, 풍력 발전기의 전 과정 동안 발생하는 환경 오염은 1년 이내에 회복이 가능하다는 주장하였다[21].

Varun와 Ravi (2009)는 LCA를 이용하여 재생 에너지 발전과 화석 연료 발전의 생애 주기 배출(LCE; life-cycle emission, g-CO<sub>2</sub>/kWh)을 비교했다. 이들 연구에 의하면, 각 발전원별 배출량은 석탄 발전은 975.3 g-CO<sub>2</sub>/kWh, 석유는 742.1 g-CO<sub>2</sub>/kWh, 원자력은 24.2 g-CO<sub>2</sub>/kWh, 풍력은 9.7~123.7 g-CO<sub>2</sub>/kWh, 태양광 발전은 53.4~250 g-CO<sub>2</sub>/kWh, 바이오매스 발전은 35~178, 태양열 발전은 13.6~202 g-CO<sub>2</sub>/kWh, 수력 발전은 3.7~237 g-CO<sub>2</sub>/kWh이다. 재생에너지는 용량에 따라 LCE의 변동이 컸으며, LCE가 가장 작은 발전은 소규모 수력 발전과 풍력 발전이라고 주장하였다[22].

Oebels와 Pacca (2013)는 브라질의 육상 풍력 발전 단지에 대해 LCA를 실시했다. 이들의 연구 결과에 의하면 이산화탄소를 가장 많이 발생시키는 단계는 제작 단계로 총 이산화탄소 90%를 발생시켰으며, 운송 단계에서 6%를 발생한다는 보고하였다. 특히 제작 단계에서 발생하는 이산화 탄소의 절반 이상이 타워를 제작하는 동안 발생한다고 지적하였다[23].

Awan과 Khan (2014)도 제조 단계가 주요한 환경 영향원이 되며 해체 단계는 상대적으로 저조한 환경 영향력을 가지고 있다고 지적하였다[24].

Hanne 등(2014)은 하부 구조가 다른 5종류의 부유식과 1개의 고정형 해상 풍력 터빈의 LCA 연구를 수행하였다. 온실 가스 배출을 비교한 결과 MIT Tension-Leg-Buoy (TLB)형 하부 구조물을 가진

해상 풍력 터빈의 온실가스 배출이 가장 적은 결과를 가진다고 보고하였다[25].

Bonou 등(2016)은 해상 풍력 발전소와 육상 풍력 발전소의 LCA 연구를 진행하였다. 육상 풍력 터빈과 해상 풍력 터빈의 온실 가스 배출량이 각각 7g CO<sub>2</sub>-eq과 11g CO<sub>2</sub>-eq이라고 계산하였다. 해상 풍력 터빈이 육상에 비해 더 많은 자재와 관리 비용을 요구하기 때문에 육상 풍력 터빈에 비해 높은 에너지 출력의 이점이 상쇄된다고 지적하였다[26].

Martínez 등(2018)은 오래된 풍력 발전 단지의 현대화에 대한 환경 영향성 평가 LCA모형을 연구하였다. 660 kW 풍력터빈 37개로 구성된 기존의 풍력 단지를 2MW 풍력터빈 17개 풍력터빈으로 대체하는 것에 대한 환경 영향을 비교하여, 풍력 발전 단지의 현대화는 환경 개선에 도움이 된다고 주장하였다. 환경에 큰 영향을 미치는 주요 요소로는 풍력 터빈과 변전소, 배전선을 지적하였다[27].

Gkantou 등(2020)은 여러 재질의 185 m 높이의 풍력 터빈과 기존의 150 m 높이의 풍력터빈 및 105 m 높이의 풍력터빈의 LCA 후 환경에 미치는 영향을 비교했다. 환경에 큰 영향을 미치는 단계는 제조(~80%), 설치(~10%)였으며, 부품 별로는 타워(~50%), 하부구조물(~20%), 나셀(~17), 로터(~13%) 순으로 큰 영향을 미쳤다. 연구 결과 185 m 타워와 기존의 타워의 LCA 결과 에너지 회수 시간 및 탄소 발자국이 비슷함을 보였다[28].

## 2-3. LCA Software

환경 영향을 정확하게 산출하기 위해서는 다양한 항목들의 매우 많은 양들의 데이터들을 체계적으로 처리해야 한다. 매우 복잡한 메커니즘을 처리해야 하는 전과정평가에 대한 연구 개발 및 산업 현장에서 활용에 대한 많은 관심과 노력들이 진행되었고, 이의 결과로 전문적 소프트웨어 시스템들이 개발되고 이용되어 왔고 몇몇은 상용화되었다. LCA 분야에 직접적으로 활용되는 대표적인 소프트웨어로 GaBi와 OpenLCA, SimaPro, Umberto가 있다. Fig. 3은 Scopus에서 매년 이들 소프트웨어를 사용하여 발표된 관련 논문들을 검색한 결과를 보여준다. LCA에 대한 연구들은 해마다 증가하는 추세를 보여

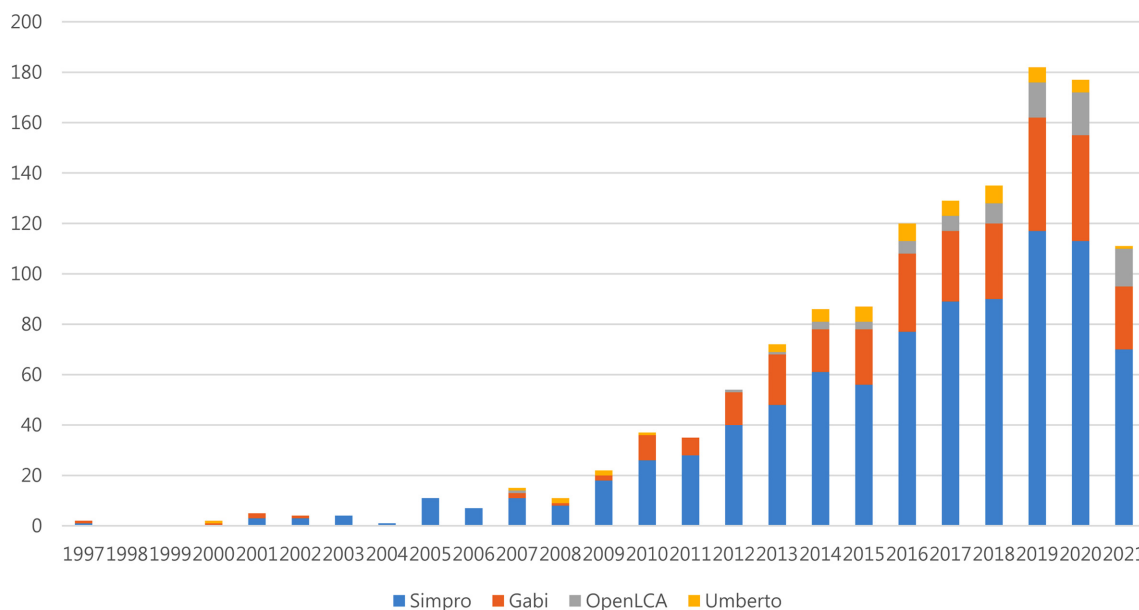


Fig. 3. LCA Articles according to used software.

Table 1. Comparison of LCA software features [12,29]

Analysis criteria	GaBi	OpenLCA	SimaPro	Umberto
Developer	ThinkStep, Sphera Company	GreenDelta	PRé Consultants	iFu Hamburg GmbH
Website	<a href="https://gabi.sphera.com/">https://gabi.sphera.com/</a>	<a href="https://www.openlca.org/">https://www.openlca.org/</a>	<a href="https://simapro.com/">https://simapro.com/</a>	<a href="https://www.ifu.com/umberto/">https://www.ifu.com/umberto/</a>
Format of datasets	ILCD, EPD, ecoSpold v1, GPR, gbx.	ILCD, ecoSpold v1, v2, csv, Excel, JSONLD.	ecoSpold, csv	Excel.
Data base	Gabi databases, Ecoinvent, U.S. LCI, EF Database v 2.0	Includes various databases	Includes various databases	Ecoinvent and GaBi databases among others
User interface perception	Uses process modelling and diagrams for each unit process.	Uses process modelling and diagrams for each unit process.	Uses of matrixes for modelling of unit process.	Uses Petri nets for LCA modelling.
Presentation of LCA results	Uses Sankey diagram and bar charts to show LCA results. Tables and automatic flow balances are used for inventory analysis.	Uses Sankey diagram and bar charts to show LCA results, and tables for inventory analysis.	Uses Sankey diagram and bar charts to show LCA results, and tables for inventory analysis.	Uses Sankey diagram to show LCA results and tables for inventory analysis. The results can be exported to Dynamic Excel Pivot Table and Dashboard Chart
Uncertainty and sensitivity of results	Scenario analysis. Monte Carlo test. Percentage deviations can be used for inventory flows.	Pedigree matrix. Tests of uncertainty distribution -		The Umberto's support team can provide some Excel based-tools to enable sensitivity analysis.
Positive modelling aspects	-Good documentation of datasets. -Costs and social aspects can be modelled too. -It is possible to import/export datasets easily. -Professional database with hundreds of datasets and there are also dozens of extension databases too. -Possibility to generate EPDs.	-Costs and social aspects can be modelled too. -Free for users. -Open source. -It is possible to import/export datasets easily. -Possibility to share datasets online. -Possibility to generate EPDs.	-Good documentation of datasets. -Social aspects can be modelled too. -Integrated with ecoinvent database. -Most of datasets are unit processes.	-Costs aspects can be modelled too. -Integrated with ecoinvent database and/or GaBi database. -Good integration with Excel features.
Negative modelling aspects	-High cost of investment -Most of datasets are aggregated	-Lack of datasets freely available -Many datasets are poorly documented -Normalization and weighting factors are not available for ILCD/PEF method	-High cost of investment -Limited number of dataset formats	-High cost of investment. -Does not have Monte Carlo analysis and uncertainty analysis. -It is not possible to import/export datasets to traditional LCA formats (e.g., ecoSpold, ILCD). -Normalization and weighting factors are not available on the analyzed software version.

준다. 가장 많이 발표된 논문과 관련된 소프트웨어는 SimaPro임을 알 수 있다. Table 1은 각 소프트웨어별 특징들을 정리하였다[12,29].

가장 활발하게 사용되고 있는 SimaPro는 다양한 분야의 LCA에 사용되고 있으며, 풍력 터빈의 LCA 연구를 하는데도 많이 사용되었다.

Tremeac와 Meunier (2009)는 250W와 4.5MW의 소형과 대용량을 가진 풍력터빈 시스템의 전과정평가에 대한 연구를 수행하였다. 4.5MW 풍력 터빈이 단위 발전량 대비 이산화탄소 배출량이 낮다고 보고하였다. 또한 운송 수단과 거리에 따라 배출되는 CO<sub>2</sub> 양에 대한 민감도를 분석하였다. 기차역이 목적지에서 멀지 않을 경우, 트럭으로 운송하는 것보다 기차로 운송하는 것이, 거리가 더 짧을 때가 CO<sub>2</sub> 배출이 적다는 것을 보였다[30].

Martinez 등(2009)은 스페인 북부에 있는 풍력 발전 단지를 대상으로 LCA를 진행했다. 연구에 사용된 풍력 터빈의 높이는 70 m이며, 풍력 터빈 1대가 연간 4Gwh의 전력을 생산한다고 가정했다. 하부 구조물, 특히 시멘트가 SO<sub>2</sub>와 NOX 배출의 주요 문제로 지적되는 IR(Inorganic Respiration) 범주에서 주요 원인임을 지적하였다[31].

Vargas 등(2015)은 멕시코를 대상으로 서로 다른 브랜드인 2MW 풍력 터빈의 LCA를 진행했다. 두 터빈의 정격 용량은 같았지만 작동에 필요한 재료와 전기의 양이 달라 환경에 미치는 영향이 다르다고 지적하였다. 연구 결과로 풍력 터빈의 나셀과 타워가 환경에 가장 큰 영향을 준다고 주장하였다. 따라서 풍력 터빈의 재료와 디자인을 개선하여 환경에 미치는 영향을 줄일 수 있다고 발표하였다[32].

Uddin과 Kumar (2014)는 태국의 수직 축과 수평축 풍력 터빈에 대한 LCA 했다. 태국의 Phuket Island, Surat Thani Island and Chiangmai의 서로 다른 지역들을 대상으로 비교하여 Chiangmai에서 가장 효율적인 결과를 보인다고 발표하였다. 수직축과 수평축 풍력 터빈의 GWP (Global Warming Potential)는 각각 0.27 kg CO<sub>2</sub>-eq와 0.09 kg CO<sub>2</sub>-eq로 수직축 풍력터빈 보다 수평축 풍력 터빈의 탄소 배출이 집약적임을 보였다. 또한, 팬의 재료를 열가소성 플라스틱으로 변경하면 36%, 유리 섬유 플라스틱으로 변경하면 40%의 체화 에너지를 감소시킬 수 있는 것을 보였다[33].

Huang 등(2017)은 정격용량이 2MW인 풍력터빈 V-80가 52개로 이루어진 해상 풍력 발전단지에 대해 해상 변전소의 유무에 따른 환경 영향과 에너지 편익을 분석했다. 연구 결과 해상 변전소가 있는 경우 없는 경우보다 환경 영향이 높은 것을 보였다. 환경 영향은 풍력 터빈의 강철 소재, 제조 단계의 전기 소비량, 해상 운송 및 건설 중 연료 소비량과 대기 배출, 해상 변전소용 콘크리트 재료 등 요소들이 가장 실질적인 환경 영향의 원천임을 보였다[34].

Alsaleh와 Sattler (2019)는 텍사스에 위치한 200개의 Gamesa 2MW 풍력 터빈에 대한 LCA를 진행했다. 본 연구에서는 설치와 유지 단계에 특히 주의를 기울여 연구를 진행되었다. 환경 영향이 가장 큰 단계는 제조 단계였으며, 설치, 운송, 유지보수, 원자재 취득이 2위부터 5위까지를 차지했다. 풍력터빈의 수명을 25년에서 30년으로 늘리면 터빈이 소비하는 에너지보다 4.2배에서 5.1배로 더 많은 에너지를 생산할 수 있어 kWh당 발생하는 환경영향을 줄일 수 있다. 대양 횡단 선을 통한 운송은 트럭운송보다 km당 환경 영향이 더 큰 것을 보였으며, 터빈의 주요 부품 중 철이 타워의 제조와 운송에 가장 큰 영향을 주는 것을 보였다[35].

Stavridou 등(2020)은 영국의 정격 용량 2.0MW의 76.16 m 높이 풍력 터빈의 타워 종류에 따른 LCA를 비교했다. 타워가 관형일 경

우와 격자인 경우를 비교했으며, 격자 구조가, 사용된 재료와 적용된 운송 및 설치 방법 모두에서 더 유리함을 보였다[36].

Nagle 등(2020)은 아일랜드에 위치한 정격 용량이 850 kW의 풍력 터빈 Vestas V52의 블레이드의 폐기물 처리에 대해 LCA를 진행하였다. 독일의 시멘트 가마에서 공동처리(Co-processing)을 하는 시나리오와 아일랜드에서 공동처리하는 방법, 아일랜드에서 매립하는 방법 등 서로 다른 세 가지의 방법들에 대해 환경에 미치는 영향을 비교했다. 연구 결과를 볼 때, 공동 처리가 매립보다 훨씬 환경에 이롭다는 것을 보였다[37].

Upadhyayula 등(2022)은 유럽에 위치한 정격 용량 3MW 풍력 터빈에 장착된 재생 탄소 섬유(RCF)-하이브리드 블레이드에 대한 LCA를 진행했다. 연구 결과 재생 탄소 섬유 하이브리드 블레이드는 유리 섬유 블레이드에 비해 평가된 대부분의 환경 성능에서 12~89%정도 더 우세함을 보였고, 탄소 회수 시간은 기존 시장보다 5%~13% 낮은 것을 보였다[38].

Chipindula 등(2022)은 미국에서 서로 다른 3종류(1, 2, 2.3MW)의 육상 풍력 터빈, 얇은 물 위에 설치된 풍력터빈 2종류(2MW, 2.3MW), 심해에 설치된 2종류(2.3MW, 5MW) 해상 풍력터빈에 대한 LCA를 진행했다. 전 과정 동안 소비된 에너지의 회수 시간과 탄소 회수 시간은 육상 풍력 터빈이 가장 짧다고 발표하였다. 수치적으로 온실가스 배출량은 육상 풍력은 5~7 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, 얇은 물 위의 풍력 터빈은 6~9 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, 심해의 풍력 터빈은 6~8 g CO<sub>2</sub> eq/kWh라고 보고하였다[39].

풍력 터빈에 대한 LCA에 관련된 이전 연구들을 분석해 볼 때, 다음의 두 가지 사항을 도출할 수 있다. 첫째, 풍력 발전은 여러 발전 원들에 비해 생애주기 동안 이산화탄소 배출량이 적은 편에 속한 친환경적인 에너지원임을 알 수 있다. 여러 연구들에서 풍력터빈의 전 과정 중 제조에서 발생하는 환경 영향이 가장 크며, 특히 타워 제조 단계에서 발생하는 영향이 크다는 결과를 보인다. 또한, 풍력 터빈의 디자인과 재료로 인한 환경 영향의 비교 분석 결과를 보여 환경 영향이 적은 풍력 터빈의 설계 가능성을 제시하는 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다.

둘째, 풍력 터빈의 LCA 관련 연구는 대부분 해외를 대상으로 진행되고 있으며, 국내 풍력 발전소를 대상으로 한 연구는 미비한 현황이다. 몇몇 논문들은 약 10년 전에 출판된 논문들이며 수소와 연계되어 분석된 논문들이 주를 이루고 있다.

풍력발전은 재생에너지원 중에 가장 가격 경쟁력이 있는 재생에너지 발전으로 화석연료를 대체할 수 있다고 여겨져, 전세계적으로 대규모로 설치되고 있다. 풍력 발전으로 인한 전기 에너지 판매를 통한 경제적 이익만을 추구하는 것이 아니라, 산업 전반적 과정을 포함하여 탄소 배출을 통한 환경 영향을 평가하는 것은, 해외 수출 중심의 우리나라 경제 발전을 위해서 매우 중요하다. 또한 화석 연료를 대체하기 위해 보급되고 있는 풍력 발전에 대한 LCA 연구는, 피상적이며 맹목적인 화석연료 회피가 아니라, 풍력 에너지가 실질적 탄소 저감 효과가 있음을 보여줌으로 화석연료 시스템을 실질적으로 대체할 수 있음을 보여준다는 측면에서 매우 중요하다.

하지만 국내에서 풍력에너지에 대한 관련 환경 영향 연구는 매우 미비한 상황이다. 이러한 차이(gap)을 없애기 위하여 본 논문은 한국의 영덕 풍력 발전 단지에 대한 LCA를 진행하여, 한국형 풍력 터빈 및 풍력 단지의 환경영향성을 조사하였다.

### 3. 연구방법

본 연구에서는 육상 풍력 발전시스템에 대한 LCA 연구는 국제 표준화 기구의 기준인 ISO 14040s에서 제시하고 있는 1) 목적 및 범위 정의 단계(Goal and scope definition phase) 2) 인벤토리 분석 단계(Inventory analysis phase) 3) 영향 평가 단계(Impact assessment phase) 4) 결과 해석 단계(Interpretation phase)의 4 단계를 반영하여 수행하였다.

#### 3-1. 목적 및 범위 정의

##### 3-1-1. 목적

본 연구에서는 풍력 터빈 중 영덕에 설치된 Vestas 사의 V-82를 대상으로 부품 생산, 운반, 조립 및 설치, 운영 및 유지보수, 해체 및 수명 종료까지의 전 과정에서 발생하는 환경 영향을 SimaPro를 통해 정량화하고 분석하였다. V-82의 전 과정에 걸친 주요 부품 별 발생하는 환경 영향을 평가함으로써, 주요 원인을 파악하는데 도움될 것이다. 이는 친환경성 향상을 위한 정책의 판단 근거 및 대중의 인식 제고를 위한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

LCA는 환경 영향의 정량적 지표가 되어주는 도구로 다른 발전 시스템에도 적용 가능하다. 이는 2025년에 설계 수명이 끝나 리파워링 계획을 세우고 있는 영덕 풍력 발전 단지 및 향후 신재생 에너지 보급 및 확대 정책의 강화와 대중의 인식 제고에 큰 도움이 될 것이다.

##### 3-1-2. 기능 단위 및 시스템 경계

본 연구 대상인 풍력 터빈의 기능 단위(Functional Unit)는 정격 용량 1.65MW의 Vestas사 V-82 1대 기준이다. 기준 흐름은 전력 생산량 1 kwh로 정의했다. 풍력 터빈의 전 과정은 부품 생산, 운반, 조립 및 설치, 운영 및 유지보수, 해체 및 수명 종료 단계로 나눌 수 있으며, 연구 목적에 따라 포함되는 단위 공정들이 달라질 수 있다.

부품 생산에는 풍력 터빈의 각 부품 제조에 필요한 원자재 공급 및 가공이 포함되며, 운반에는 풍력 발전기의 제조를 위한 제조된 부품의 운송을 포함한다. 조립 및 설치는 풍력 발전기 설치 및 설치에 필요한 작업이 고려되며, 운영 및 유지보수에는 윤활유 교체 및 예방 및 수정 유지보수를 포함한다. 해체 및 수명 종료에는 풍력 발전 단지의 해체, 폐기물의 재활용 및 재활용을 위한 운송 포함된다.

본 연구는 원자재 채취부터 해체 및 수명종료까지 분석하는 C2G(Cradle-to-Grave)로 시스템 경계를 설정했다. 무게가 무거운 타워와 기초 부분, 전선은 한국에서 생산하여 200 km를 운반하는 것으로 가정하였으며, 로터와 나셀은 중국 Vestas 공장에서 생산 후 중국 톈진 항구까지 도로로 운송 된 후 해상 운송을 통해 한국 인천으로 수입되어 풍력 터빈이 세워질 영덕 풍력 터빈 단지로 운반하며, 윤활유는 영덕 시내에서 구매하여 운송하는 것으로 가정하였다. 운영 기간 20년 동안 부품 교체가 없으며, 윤활유는 3년 마다 교체해주는 것으로 가정했다. 폐기 및 재활용은 미국 EPA를 참고로 작성된 시나리오가 사용되었다[40].

Table 2. Input value of wind turbine

Component	Material	Unit	Amount
Land use	Occupation, industrial area	m <sup>2</sup> a	184,317
	Transformation, from pasture, man made	m <sup>2</sup>	9,215.86
	Transformation, to industrial area	m <sup>2</sup>	9,215.86
	Excavation, hydraulic digger	m <sup>2</sup>	12,937.1
Tower	Steel plate	ton	126.1
	Aluminum	ton	2.6
	Electronics	ton	2.2
	Plastic	ton	2
	Copper	ton	1.3
	Oil	ton	1
	Cast iron	ton	18
Nacelle	Steel, engineering	ton	13
	Stainless steel	ton	7.8
	Steel	ton	6.3
	Fiberglass	ton	1.8
	Copper	ton	1.6
	Plastic	ton	1
	Aluminum	ton	0.5
	Electronics	ton	0.3
	Oil	ton	0.3
	Cast iron	ton	11.3
Rotor (consisting of three blades and a spinner)	Steel	ton	4.3
	Steel, engineering	ton	1.5
	Concrete	m <sup>3</sup>	805
Foundation for the wind turbine	Steel	ton	27
	Aluminium	ton	0.25
Cables	Plastic	ton	0.22
	Copper	ton	0.12
Electricity	Electricity, medium voltage	kWh	3,392,042

**Table 3. Transport of wind turbine parts and lubricating oil**

	Transport	Unit	Amount	Path
Rotor, Nacelle	Transport, freight, sea, transoceanic ship	km	852	Tianjin Port - Incheon Port
	Transport, freight, lorry >32 metric ton	km	22.9	Vestas Wind Technology (China) Co., Ltd. Blades Factory, 9 Xinxing Rd, Binhai, Tianjin, China 300462 --> Port of Tianjin, XPMV+74M, Binhai, Tianjin, China 300456
Lubricating oil replacement	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton	km	5.9	Dong-Hae Lubricant Co., Ltd. --> Yeongdeok Wind Power Plant
Tower, Foundation, Cables	Transport, freight, lorry >32 metric ton	km	200	

### 3-2. 목록 분석

#### 3-2-1. 데이터 품질 요건

풍력 터빈의 환경영향을 정량화 하기 위한 데이터는 Vestas사에서 제공하는 데이터를 참고하였으며, 설치 및 기타 데이터는 Eco-invent Inventory 3.7.1 DB를 적용한 SimaPro9.3에 내장된 2MW 풍력 터빈 모델을 참고하여 진행했다. 터빈 모델에 데이터에 대하여 글로벌 기준을 적용했으며, 글로벌 기준의 데이터가 없는 일부 데이터는 '기타 국가'로 구분하여, 데이터를 구축하였다. 투입물에 대한 데이터들은 Table 2에 정리하였다. 운송 거리는 상용 지도 서비스(네이버 지도)의 값을 이용했고 Table 3에 나타냈다. 조사한 내용들을 바탕으로 환경 배출물에 대해 목록 분석을 수행하였으며, 총 2300여 개의 환경 배출 목록 항목이 도출되었다.

#### 3-2-2. 기능 단위 별 환경 부하[41]

목록 분석 단계에서는 정의한 연구 범위를 대상으로 총 투입된 에너지량과 이산화탄소 배출량을 수집하고 계산하였다. 그 후 그리고 이를 통해 EPT(Energy Payback Time)와 단위 이산화탄소 배출량의 두 가지 지표를 산정하였다. EPT는 풍력 발전 시스템 구축 전 과정 동안에 투입된 전력량을 자체 생산된 전력을 통해 회수하는데 걸리는 시간을 의미한다. EPT가 짧을수록 투입된 에너지 관점에서 해당 시스템이 효과적이라고 할 수 있다. 1kWh 단위당 이산화탄소 배출량은 풍력 발전 시스템 전 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 시스템 수명 동안 생산한 전력량으로 나눈 값이다. 이는 지구 온난

화 측면에서 얼마나 효과적인지 판단 근거가 된다.

두 가지 지표는 식 (1)과 (2)으로 정의된다.

$$EPT = \frac{\text{Total input power over the life cycle (kWh)}}{\text{Annual Energy Output from a Wind Turbine } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{year}}\right)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ emission } \left(\frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}}\right) \\ = \frac{\text{Total CO}_2 \text{ emissions during the life cycle(kWh)}}{\text{Annual Energy Output } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{yr}}\right) * \text{System life(yr)}} \quad (2) \end{aligned}$$

영덕 풍력 발전소에서 V-82 풍력 터빈 한 대의 예상 연간 발전량은 4,028.3 MWh이다. 풍력 터빈의 전 과정 동안 소모된 전력량은 3,392,042 kWh로 측정되었다. 이는 풍력 터빈의 운영 후 약 10개월이면 회수할 수 있음으로 보인다. 풍력 터빈의 1kWh당 총 이산화탄소 발생량은 15 g CO<sub>2</sub>/kWh임을 알 수 있다.

#### 3-2-3. 데이터 할당

본 연구에는 에너지 모델 평가에 널리 사용되는 잘 확립된 LCIA 데이터 베이스인Ecoinvent v3.7.1 데이터 베이스가 사용되었다[42]. ISO에서 제공하는 대표적인 LCA 접근법에는 귀인적 접근법 (Attributional approach)과 결과론적 접근법(Consequential approach)이 있다[43,44]. 귀인적 접근법은 제품의 현재 환경 영향을 정량화하는 데 초점을 맞춘 방법으로 전 과정 및 그 하위 시스템의 환경에 관

**Table 4. Overview of the ReCipe 2016 Midpoint(E) impact categories[45]**

Midpoint impact category	Indicator	CFm	Unit
Climate change	Infrared radiative forcing increase	Global warming potential (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -eq to air
Ozone depletion	Stratospheric ozone decrease	Ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-eq to air
Ionising radiation	Absorbed dose increase	Ionising radiation potential (IRP)	kBq Co-60-eq to air
Fine particulate matter formation	PM2.5 population intake increase	Particulate matter formation potential (PMFP)	kg PM2.5-eq to air
Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems	Tropospheric ozone increase	Photochemical oxidant formation potential: ecosystems (EOFP)	kg NOx-eq to air
Photochemical oxidant formation: human health	Tropospheric ozone population intake increase	Photochemical oxidant formation potential: humans (HOFP)	kg NOx-eq to air
Terrestrial acidification	Proton increase in natural soils	Terrestrial acidification potential (TAP)	kg SO <sub>2</sub> -eq to air
Freshwater eutrophication	Phosphorus increase in freshwater	Freshwater eutrophication potential (FEP)	kg P-eq to freshwater
Human toxicity: cancer	Risk increase of cancer disease incidence	Human toxicity potential (HTPc)	kg 1,4-DCB-eq to urban air
Human toxicity: non-cancer	Risk increase of non-cancer disease incidence	Human toxicity potential (HTPnc)	kg 1,4-DCB-eq to urban air
Terrestrial ecotoxicity	Hazard-weighted increase in natural soils	Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	kg 1,4-DCB-eq to industrial soil
Freshwater ecotoxicity	Hazard-weighted increase in freshwaters	Freshwater ecotoxicity potential (FETP)	kg 1,4-DCB-eq to freshwater
Marine ecotoxicity	Hazard-weighted increase in marine water	Marine ecotoxicity potential (METP)	kg 1,4-DCB-eq to marine water
Land use	Occupation and time-integrated land transformation	Agricultural land occupation potential (LOP)	m <sup>2</sup> × yr annual cropland-eq
Water use	Increase of water consumed	Water consumption potential (WCP)	m <sup>3</sup> water-eq consumed
Mineral resource scarcity	Increase of ore extracted	Surplus ore potential (SOP)	kg Cu-eq
Fossil resource scarcity	Upper heating value	Fossil fuel potential (FFP)	kg oil-eq

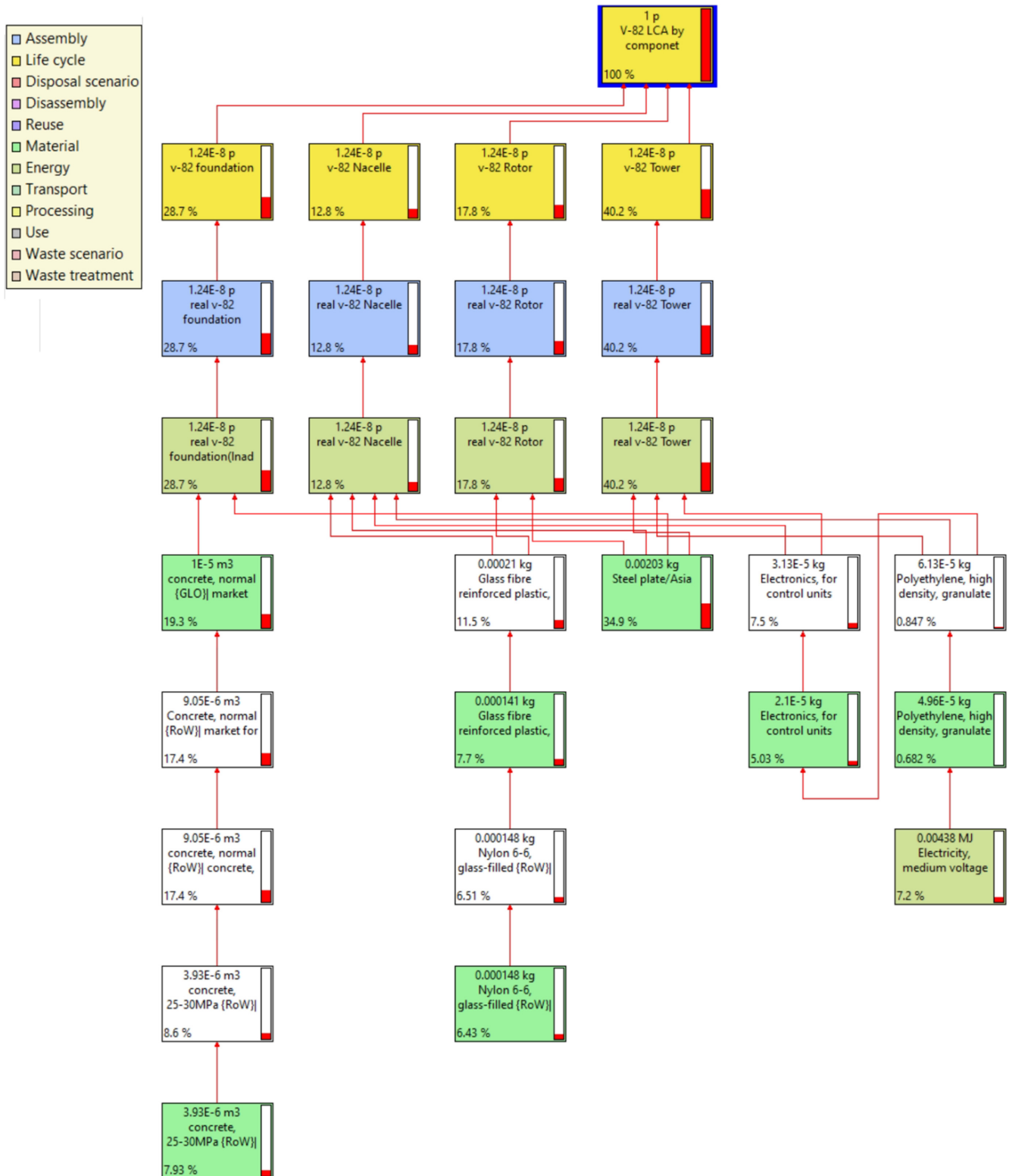


Fig. 4. Result of wind turbine LCA (Global warming Node cut-off 5%).

계된 물리적 흐름을 설명하는 목적으로 정의된다. 이론적으로 모든 제품에 대한 귀인적 접근법을 실시하면 전세계적으로 관찰되는 환경 영향을 알 수 있으며, 주로 미시적 수준의 의사 결정 지원 연구에 사용된다. 결과적 접근법은 결정 가능한 변화가 환경에 미치는 영향이 어떻게 변화하는 것인지 설명하는 목적으로 정의되며, 주로 원자

재 전략이나 기술 시나리오나 정책에 대한 연구에 사용된다. 본 연구에서는 귀인적 접근법에 속하며, 자체 재활용을 지속적으로 고려하는 방법으로 재활용의 중요성이 높아지는 미래 에너지 시스템을 평가하는데 유용한 방법인 APOS (allocation at the point of substitution) 접근법을 사용했다.



### 3-3. 영향 평가 및 해석

목록 분석 단계에서 수집한 데이터를 바탕으로 영향 평가를 시행하였다. SimaPro 9.3에 내장된 Eco-invent Inventory 3.7.1 DB를 이용하였으며, ReCipe 2016 Midpoint (E) 방법론의 17가지 영향 범주로 분류되었다. ReCipe 2016 Midpoint (E)에 대한 개요는 Table 4에 나타냈다[45]. Fig. 4은 풍력터빈 전체 시스템의 LCA의 결과 중 기후변화에 미치는 영향이 전체의 5%이상인 요소들의 상호 관계를 도표로 나타낸 결과이며, Table 5는 Fig. 4에 표시한 네트워크를 표로 정리한 것이다. 부품 제조에 동일한 재료가 사용된 경우 미치는 영향은 합하여 표시한다. Fig. 5는 풍력 터빈의 LCA 결과를 분류화를 통해 부품 별 영향을 나타낸 결과이다.

#### 3-3-1. 기후변화(Climature change) [45]

기후 변화 영향에 대한 특성화 계수는 널리 사용된 지구 온난화 지수(Global warming potential; GWP)로 온실 가스의 복사 강제력

증가를 kg CO<sub>2</sub> eq로 표현된다. 기후변화에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 타워로 40.2% (0.00581 kg CO<sub>2</sub> eq)의 영향을 차지하며, 기초 부분이 28.7% (0.00414 kg CO<sub>2</sub> eq)로 타워 다음으로 큰 영향을 보임을 알 수 있다.

#### 3-3-2. 오존층 파괴(Ozone depletion) [45]

오존층 파괴 영향에 대한 특성화 계수는 kg CFC11 eq로 표현되는 오존 파괴 지수(Ozone depletion potential; ODP)가 사용되었으며, 무한한 시간 동안 성층권 오존 농도의 총 감소를 의미한다. 오존층 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 로터로 36.2% (2.88E-9 kg CFC11 eq)의 영향을 차지하며, 타워가 25.8% (2.05E-9 kg CFC11 eq)로 로터 다음으로 큰 영향을 보였다.

#### 3-3-3. 전리 방사선(Ionizing radiation) [45]

전리 방사선 퍼텐셜(Ionizing radiation potential; IRP)을 특성화

**Table 5.** Result of wind turbine LCA network (Global warming Node cut-off 5%)

V-82										
100%										
Foundation			Nacelle			Rotor			Tower	
28.70%			12.80%			17.80%			40.20%	
Steel plate/Asia	concrete, normal {GLO}  market group for concrete, normal APOS, U	Steel plate/Asia	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}  market for APOS, U	Electronics, for control units {GLO}  market for APOS, U	Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for APOS, U	Steel plate/Asia	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}  market for APOS, U	Steel plate/Asia	Electronics, for control units {GLO}  market for APOS, U	Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for APOS, U
34.90%	19.30%	34.90%	11.50%	7.50%	0.85%	34.90%	11.50%	34.90%	7.50%	0.85%
-	Concrete, normal {RoW}  market for APOS, U	-	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RoW}  production APOS, U	Electronics, for control units {RoW}  production APOS, U	Polyethylene, high density, granulate {RoW}  production APOS, U	-	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RoW}  production APOS, U	-	Electronics, for control units {RoW}  production APOS, U	Polyethylene, high density, granulate {RoW}  production APOS, U
-	17.40%	-	7.70%	5.03%	0.68%	-	7.70%	-	5.03%	0.68%
-	concrete, normal {RoW}  concrete, all types to generic market for concrete, normal strength APOS, U	-	Nylon 6-6, glass-filled {RoW}  market for nylon 6-6, glass-filled APOS, U	Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for APOS, U	Electricity, medium voltage {RAS}  market group for APOS, U	-	Nylon 6-6, glass-filled {RoW}  market for nylon 6-6, glass-filled APOS, U	-	Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for APOS, U	Electricity, medium voltage {RAS}  market group for APOS, U
-	17.40%	-	6.51%	0.85%	7.20%	-	6.51%	-	0.85%	7.20%
-	concrete, 25-30MPa {RoW}  market for concrete, 25-30MPa APOS, U	-	Nylon 6-6, glass-filled {RoW}  production APOS, U	Polyethylene, high density, granulate {RoW}  production APOS, U	-	-	Nylon 6-6, glass-filled {RoW}  production APOS, U	-	Polyethylene, high density, granulate {RoW}  production APOS, U	-
-	8.60%	-	6.43%	0.68%	-	-	6.43%	-	0.68%	-
-	concrete, 25-30MPa {RoW}  concrete production 25-30MPa APOS, U	-	-	Electricity, medium voltage {RAS}  market group for APOS, U	-	-	-	-	Electricity, medium voltage {RAS}  market group for APOS, U	-
-	7.93%	-	-	7.20%	-	-	-	-	7.20%	-

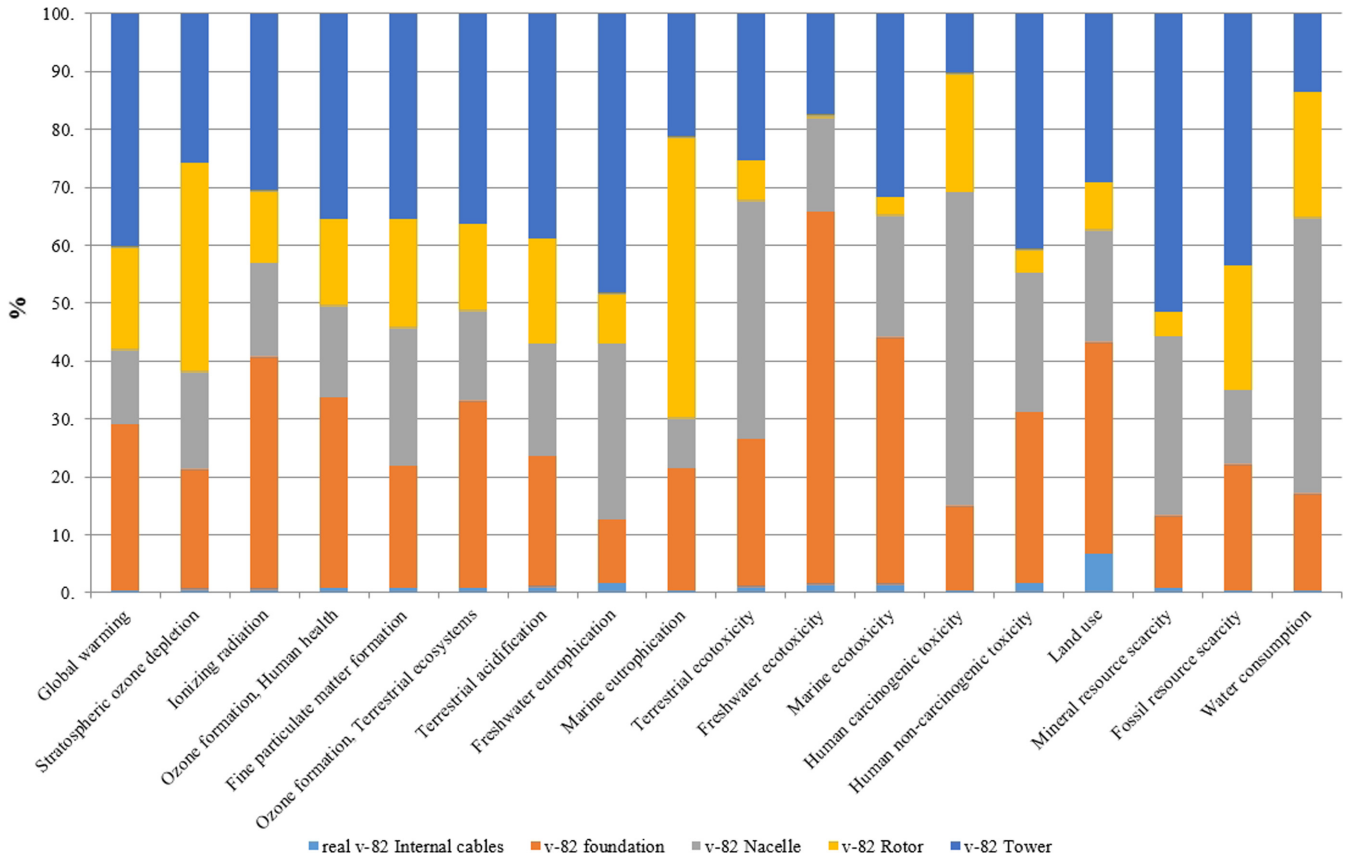


Fig. 5. Show chart of wind turbine impact assessment.

계수이며, kBq CO-60 eq로 정량화 된다. 전리 방사선에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 기초부분이 40.1% (0.000432 kBq CO-60 eq)의 영향을 차지하며, 타워가 30.6% (0.00033 kBq CO-60 eq)로 기초 다음으로 큰 영향을 보였다.

3-3-4. 광화학 산화제 형성: 인간 건강(Photochemical oxidant formation: human health) [45]

광화학적 오존 형성에 의한 인간의 노출은 인간의 오존 섭취량을 고려했다. 인체 건강 오존 형성 퍼텐셜(HOFP)은 kg NO<sub>x</sub> eq로 표현된다. 인간 건강에 영향을 미치는 광화학 산화제 형성에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 타워가 35.5% (1.33E-5 kg NO<sub>x</sub> eq)의 영향을 차지하며, 기초부분이 33.1% (1.24E-5 kg NO<sub>x</sub> eq)로 타워 다음으로 큰 영향을 보였다.

3-3-5. 미세먼지 발생(Fine particulate matter formation) [45]

초 미세먼지 형성의 특성화 계수로 2.5 마이크론 이하인 PM2.5의 인구 섭취가 고려되었다. 미립자 물질 형성 퍼텐셜(Particulate matter formation potentials; PMFP)은 kg PM2.5 eq로 표현된다. 미세 먼지 발생에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 타워가 35.4% (6.98E-6 kg PM2.5 eq)의 영향을 차지하며, 나셀이 23.8% (4.7E-6 kg PM2.5 eq)로 타워 다음으로 큰 영향을 보였다.

3-3-6. 광화학 산화제 형성: 토양 생태계(Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems)

광화학 산화제 형성으로 인한 토양 생태계에 대해 가장 큰 영향을

미치는 요소인 타워가 36.2% (1.4E-5 kg PM2.5 eq)의 영향을 차지하며, 기초부분이 32.4% (1.26E-5 kg PM2.5 eq)로 타워 다음으로 큰 영향을 보였다.

3-3-7. 토양 산성화(Terrestrial acidification) [45]

산성화 퍼텐셜은 kg SO<sub>2</sub> eq로 표현된다. 토양 산성화에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 타워가 38.9% (1.71E-5 kg SO<sub>2</sub> eq)의 영향을 차지하며, 기초부분이 22.7% (0.97E-6 kg SO<sub>2</sub> eq)로 타워 다음으로 큰 영향을 보였다.

3-3-8. 담수 부영양화(Freshwater eutrophication) [45]

담수 부영양화 퍼텐셜(Freshwater eutrophication potentials; FEP)은 kg p eq로 표현된다. 담수 부영양화에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 타워가 48.3% (2.35E-6 kg p eq)의 영향을 차지하며, 나셀이 30.3% (1.48E-6 kg p eq)로 타워 다음으로 큰 영향을 보였다.

3-3-9. 토양 생태독성(Terrestrial ecotoxicity) [45]

토양, 담수, 해양 생태 독성 및 동성으로 인한 인체 손상은 kg 1,4-DCB로 표현된다. 토양 생태독성에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 나셀로 41% (0.028 kg 1,4-DCB)의 영향을 차지하며, 기초부분이 25.5% (0.0174 kg 1,4-DCB) 타워가 25.3% (0.0173 kg 1,4-DCB)로 나셀 다음으로 많은 영향을 보였다.

3-3-10. 담수 생태독성(Freshwater ecotoxicity) [45]

담수 생태독성에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 기초부분으로

64.4% (0.0128 kg 1,4-DCB)의 영향을 차지하며, 타위가 17.5% (0.00347 kg 1,4-DCB)로 기초 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-11. 해양 생태 독성(Marine ecotoxicity) [45]

해양 생태독성에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 기초부분으로 42.7% (8.8 kg 1,4-DCB)의 영향을 차지하며, 타위가 31.6% (6.52 kg 1,4-DCB)로 기초 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-12. 독성으로 인한 인체 손상: 암(Human toxicity: cancer) [45]

인체 독성 영향 계수는 물질 섭취량의 변화에 따른 평생 질병 발생률의 변화를 반영 후 발암성과 비 발암성 영향을 별도로 도출한다. 암 발생과 관련된 독성으로 인한 인체 손상에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 나셀로 54.2% (0.152 kg 1,4-DCB)의 영향을 차지하며, 로터가 20.5% (0.0571 kg 1,4-DCB)로 나셀 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-13. 독성으로 인한 인체 손상: 비 발암성(Human toxicity: non-cancer) [45]

암 이외의 질병 발생에 관한 독성으로 인한 인체 손상에 가장 큰 영향을 미치는 부품은 타위가 40.7% (4.74 kg 1,4-DCB)의 영향을 차지하며, 기초부분이 29.5% (3.43 kg 1,4-DCB)로 타위 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-14. 토지 사용(Land use) [45]

토지 이용은 특정 토지 사용유형으로 인한 상대적 종 손실이 특성화 계수로 사용되며,  $m^2 \text{ crop eq}$ 로 표시된다. 토지 사용 부문에서 가장 큰 영향을 미치는 부품은 기초 부분으로 36.4% (0.00046  $m^2 \text{ crop eq}$ )의 영향을 차지하며, 타위가 29.1% (0.000368  $m^2 \text{ crop eq}$ )로 기초 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-15. 광물 자원 고갈(Mineral resource scarcity) [45]

잉여 광석 퍼텐셜(Surplus ore potential; SOP)이 특성화 계수로 사용되며, kg Cu eq로 표시된다. 잉여 광석 퍼텐셜은 광물자원의 향후 모든 생산을 고려한 광물 자원의 추출로 인해 미래에 생산되는 광석의 평균 추가 양을 말한다. 광물 고갈 부문에서 가장 큰 영향을 미치는 부품은 타위가 51.5% (0.00019 kg Cu eq)의 영향을 차지하며, 나셀이 31.1% (0.000115 kg Cu eq) 타위 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-16. 화석 연료 고갈(Fossil resource scarcity) [45]

특성화 계수가 화석 연료 퍼텐셜(Fossil Fuel Potential; FFP)로 결정되는 화석 자원 사용지표는 화석 자원의 고위 발열량(HHV)과 원유의 에너지 함량 사이의 비율로 정의되며, kg oil eq로 표시된다. 화석 연료 고갈 부문에서 가장 큰 영향을 미치는 부품은 타위가 43.4% (0.00173 kg oil eq)의 영향을 차지하며, 로터가 21.6% (0.000862 kg oil eq), 기초부분이 21.6% (0.000858 kg oil eq)로 타위 다음으로 많은 영향을 보였다.

### 3-3-17. 물 소비(Water use) [45]

물 소비에 대한 특성화 계수는 추출된 물  $m^3$ 당 소비되는 물의  $m^3$ 이며,  $m^3$ 으로 표시된다. 물 소비 부문에서 가장 큰 영향을 미치는 부품은 나셀로 47.8% (0.000138  $m^3$ )의 영향을 차지하며, 로터가 21.7% (6.24E-5  $m^3$ )로 나셀 다음으로 많은 영향을 보였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 영덕 풍력 발전 단지에 설치된 1.65MW급 풍력 터빈 시스템을 대상으로 환경영향평가를 수행하였다. 주요 결과를 다음과 같이 정리 할 수 있다.

첫째, 연간 발전량과 시스템의 수명과 연계하여 에너지 회수기간과 기능 단위당 이산화탄소 배출량을 산출하였다. 풍력 터빈 시스템의 전과정분석 결과 풍력 터빈 시스템에서 타위가 미치는 환경 영향이 다른 부품들과 비교해서 가장 크다는 결과를 보였다. 타위인 경우 steel plate가 주된 원인으로 steel plate를 친환경적인 재료로 대체할 경우, 풍력 터빈이 기후 변화 영향성을 확연히 저감하여, 궁극적으로 친환경적인 에너지 생산이 가능할 것이다.

둘째, 본 연구에서 얻어진 한국형 풍력 발전 시스템의 에너지 회수기간(EPT)은 약 10개월이었으며, 온실 가스 배출량(GHG)은 15 g CO<sub>2</sub>/kWh로 기존의 석탄과 석유 발전(898~1,129 g CO<sub>2</sub>/kWh)이나, 지열(11~78 g CO<sub>2</sub>/kWh), 태양열(30~150 g CO<sub>2</sub>/kWh), 태양광(9~300 g CO<sub>2</sub>/kWh), 수력(2~75 g CO<sub>2</sub>/kWh), 바이오매스(35~178 g CO<sub>2</sub>/kWh)와 같은 다른 재생 발전 시스템 혹은 원자력(24.2 g CO<sub>2</sub>/kWh) 등 과 비교했을 때, 한국형 풍력 터빈은 환경 관점에서 볼 때 충분히 큰 경쟁력을 가지는 것을 확인할 수 있다[20,46].

셋째, 정밀한 LCA를 적용하기 위해서는 풍력 터빈 시스템 구축 전 과정에서의 상세하고 직접적인 데이터 수집이 필요하다. 보다 구체적인 목록 분석 작업이 이루어져야 할 것이다. 이는 풍력 발전 value chain의 구성원들 모두의 협력과 많은 시간이 요구된다. 좀 더 정확하고 실재적인 환경 영향 분석을 위해서는 다양한 오염 물질의 데이터 수집이 요구될 것이며, 국내에 적합한 방법론이 개발 및 목록 구축이 선행되어야 할 것이다.

본 논문에서 다룬 풍력발전의 환경영향 평가라는 주제는 기존 전통적인 화학공학의 학문 영역과 연계성이 없어 보일 수 있다. 하지만, 화학공학은 석유화학 공정과 제품은 물론, 체계적이며 고도화된 기술들을 발전시켜 관심 영역을 에너지, 환경과 같은 다양한 이슈들 까지도 확대하고 있다. 또한 단순한 대상의 확대뿐만 아니라, 상황이 발생한 후에 정성적, 정량적 분석을 통한 결과론적 분석에만 치우치는 것이 아니라, 문제 발생 이전에 피해를 최소화할 수 있는 영역도 확장하고 있다. 에너지, 자원의 소비를 줄이고, 환경에 미치는 영향을 정량적 수치화를 하는 것도 화학공학의 중요한 분야라고 판단된다.

## 감 사

이 논문은 2020년도 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2020R1-I1A3A04038008)의 지원을 받았음. 류준형은 2020년 동국대학교 DG선진연구강화사업에서 일부 지원을 받았음.

## Nomenclature

약어	: 전체 명칭 (단위)
LCA	: 전과정평가
C2G	: 원자재 생성부터 폐기까지의 전 과정
GHG	: 온실가스
EPT	: 에너지 회수기간

GWP	: 지구 온난화지수
ODP	: 오존 파괴 지수
IRP	: 전리 방사선 퍼텐셜
HOFP	: 오존 형성 퍼텐셜
PMFP	: 미립자 물질 형성 퍼텐셜
FEP	: 담수 부영양화 퍼텐셜
SOP	: 잉여 광석 퍼텐셜
FFP	: 화석 연료 퍼텐셜

## References

1. <https://www.ipcc.ch/>.
2. Agreement, P., "Paris Agreement," Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, **4**, 2017(2015).
3. <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/1378539487>.
4. Council, G. W. E., "GWEC Global Wind Report 2021," Glob. Wind Energy Counc(2021).
5. Pacala, S. and Socolow, R., "Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies," *Science*, **305**, 968-972(2004).
6. Nazir, M. S., Mahdi, A. J., Bilal, M., Sohail, H. M., Ali, N. and Iqbal, H. M. N., "Environmental Impact and Pollution-related Challenges of Renewable Wind Energy Paradigm – A Review," *Sci. Total Environ.*, **683**, 436-444(2019).
7. Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R. and Solangi, K. H., "Environmental Impact of Wind Energy," *Renew Sustain Energy Rev.*, **15**, 2423-2430(2011).
8. Dhar, A., Naeth, M. A., Jennings, P. D. and El-Din, M. G., "Perspectives on Environmental Impacts and a Land Reclamation Strategy for Solar and Wind Energy Systems," *Sci. Total Environ.*, **718**, 134602(2020).
9. Sebestyén, V., "Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental Impact Networks of Renewable Energy Power Plants," *Renew Sustain Energy Rev.*, **151**, 111626(2021).
10. Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S. S., Devabhaktuni, V. K., Lee, J. W., Nikolaidis, E., Andersen, B. and Afjeh, A., "Wind Energy: Trends and Enabling Technologies," *Renew Sustain Energy Rev.*, **53**, 209-224(2016).
11. Guangul, F. M. and Chala, G. T., "SWOT Analysis of Wind Energy as a Promising Conventional Fuels Substitute," 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), 1-6(2019).
12. Silva, D. A. L., Nunes, A. O., Moris, V. A. S., Piekarski, C. M. and Rodrigues, T. O., "How Important Is the LCA Software Tool You Choose Comparative Results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto," VII Conferencia Internacional de análisis de Ciclo de Vida En Latinoamérica(2017).
13. Chang, R. D., Zuo, J., Zhao, Z. Y., Zillante, G., Gan, X. L. and Soebarto, V., "Evolving Theories of Sustainability and Firms: History, Future Directions and Implications for Renewable Energy Research," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **72**, 48-56(2017).
14. Waas, T., Hugé, J., Block, T., Wright, T., Benitez-Capistrós, F. and Verbruggen, A., "Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-making Strategy for Sustainable Development," *Sustainability*, **6**, 5512-5534(2014).
15. ISO, ISO 14044. "Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines," British Standards Institution(2006).
16. ISO, ISO 14040. "Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework," British Standards Institution(2006).
17. Bhat, I. K. and Prakash, R., "LCA of Renewable Energy for Electricity Generation Systems—a Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **13**, 1067-1073(2009).
18. Hwang, H., Mun, J. and Kim, J., "Economic Benefits of Integration of Supplementary Biopower and Energy Storage Systems in a Solar-Wind Hybrid System," *Korean Chemical Engineering Research*, **58**(3), 381-389(2020).
19. Kim, K. and Kim, J., "The Optimal Design and Economic Evaluation of a Stand-Alone RES Energy System for Residential, Agricultural and Commercial Sectors," *Korean Chemical Engineering Research*, **54**(4), 470-478(2016).
20. Strantzali, E. and Aravossis, K., "Decision Making in Renewable Energy Investments: a Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **55**, 885-898(2016).
21. Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jimenez, E. and Blaco, J., "Life-cycle Assessment of a 2-MW Rated Power Wind Turbine: CML Method," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **14**, 52-63(2009).
22. Varun, Bhat, I. K. and Prakash, R., "LCA of Renewable Energy for Electricity Generation Systems—a Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **13**, 1067-1073(2009).
23. Oebels, K. B. and Pacca, S., "Life Cycle Assessment of An Onshore Wind Farm Located at the Northeastern Coast of Brazil," *Renew. Energy*, **53**, 60-70(2013).
24. Awan, A. B. and Khan, Z. A., "Recent Progress in Renewable Energy—Remedy of Energy Crisis in Pakistan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **33**, 236-253(2014).
25. Raadal, H. L., Vold, B. I., Myhr, A., Jonkman, J. M., Robertson, A. N. and Nygaard, T. A., "GHG Emissions and Energy Performance of Offshore Wind Power," *Renew. Energy*, **66**, 314-324(2014).
26. Bonou, A., Laurent, A. and Olsen, S. I., "Life Cycle Assessment of Onshore and Offshore Wind Energy-From Theory to Application," *Appl. Energy*, **180**, 327-337(2016).
27. Martínez, E., Latorre-Biel, J. I., Jiménez, E., Sanz, F. and Blanco, J., "Life Cycle Assessment of a Wind Farm Repowering Process," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **93**, 260-271(2018).
28. Gkantou, M., Rebelo, C. and Baniotopoulos, C., "Life Cycle Assessment of Tall Onshore Hybrid Steel Wind Turbine Towers," *Energies*, **13**, 3950(2020).
29. Pollini, B. and Rognoli, V., "Early-Stage Material Selection Based on Life Cycle Approach: Tools, Obstacles and Opportunities for Design," *Sustain. Prod. Consum.*, **28**, 1130-1139(2021).
30. Tremeac, B. and Meunier, F., "Life Cycle Analysis of 4.5 MW and 250 W Wind Turbines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **13**, 2104-2110(2009).
31. Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E. and Blanco, J., "Life Cycle Assessment of a Multi-Megawatt Wind Turbine," *Renew. Energy*, **34**, 667-673(2009).
32. Vargas, A. V., Zenón, E., Oswald, U., Islas, J. M., Güereca, L. P. and Manzini, F. L., "Life Cycle Assessment: a Case Study of Two Wind Turbines Used in Mexico," *Appl. Therm. Eng.*, **75**, 1210-1216(2015).

33. Uddin, M. S. and Kumar, S., "Energy, Emissions and Environmental Impact Analysis of Wind Turbine Using Life Cycle Assessment Technique," *J. Cleaner Prod.*, **69**, 153-164(2014).
34. Huang, Y. F., Gan, X. J. and Chiueh, P. T., "Life Cycle Assessment and Net Energy Analysis of Offshore Wind Power Systems," *Renew. Energy*, **102**, 98-106(2017).
35. Alsaleh, A. and Sattler, M., "Comprehensive Life Cycle Assessment of Large Wind Turbines in the US," *Clean Technol. Environ. Policy*, **21**, 887-903(2019).
36. Stavridou, N., Koltsakis, E. and Baniotopoulos, C. C., "A Comparative Life-cycle Analysis of Tall Onshore Steel Wind-turbine Towers," *Clean Energy*, **4**, 48-57(2019).
37. Nagle, A. J., Delaney, E. L., Bank, L. C. and Leahy, P. G., "A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of Waste from decommissioned Irish Wind Turbine Blades," *J. Cleaner Prod.*, **277**, 123321(2020).
38. Upadhyayula, V. K. K., Gadhamshetty, V., Athanassiadis, Tysk-lind, D., M., Meng, F., Pan, Q., Cullen, J. M. and Yacout, D. M. M., "Wind Turbine Blades Using Recycled Carbon Fibers: An Environmental Assessment," *Environ. Sci. Technol.*, **56**, 1267-1277 (2022).
39. Chipindula, J., Botlaguduru, V. S. V., Du, H., Kommalapati, R. R. and Huque, Z., "Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas," *Sustainability*, **10**, 2022(2018).
40. <https://www.epa.gov/>.
41. Choi, B. H., Park, S. U. and Lee, D. K., "Environmental Effect Analysis for PV System Using LCA," *New & Renewable Energy*, **3**, 11-16(2007).
42. Reinert, C., Deutz, S., Minten, H., Dörpinghaus, L., von Pfingsten, S., Baumgärtner, N. and Bardow, A., "Environmental Impacts of the Future German Energy System from Integrated Energy Systems Optimization and Dynamic Life Cycle Assessment," *Comput. Chem. Eng.*, **153**, 107406(2021).
43. De Camillis, C., Brandão, M., Zamagni, A. and Pennington, D. W., "Sustainability Assessment of Future-oriented Scenarios: a Review of Data Modelling Approaches in Life Cycle Assessment," Towards Recommendations for Policy Making and Business Strategies (2013).
44. Ekvall, T., Azapagic, A., Finnveden, G., Rydberg, T., Weidema, B. P. and Zamagni, A., "Attributional and Consequential LCA in the ILCD Handbook," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **21**, 293-296(2016).
45. Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Veronesi, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. and Zelm, R. V., "ReCiPe2016: a Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **22**, 138-147(2017).
46. Amponsah, N. Y., Trolldborg, M., Kington, B., Aalders, I. and Hough, R. L., "Greenhouse Gas Emissions from Renewable Energy Sources: a Review of Lifecycle Considerations," *Renew Sustain Energy Rev*, **39**, 461-475(2014).

#### Authors

**Joon Heon Lee:** PhD Course, Division of Creative Convergence Engineering, Dongguk University, WISE Campus, 123, Dongdae-ro, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, 38066, Korea; wnsj95@dongguk.ac.kr  
**Jun-Hyung Ryu:** Professor, Division of Creative Convergence Engineering, Dongguk University, WISE Campus, 123, Dongdae-ro, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, 38066, Korea; jhryu@dongguk.ac.kr