

다중벽 탄소나노튜브의 전과정 환경영향평가에 관한 연구

배재성^{1*}, 염윤호²¹한국탄소산업진흥원, ²글래스돔 코리아

A Study on Life Cycle Environmental Impacts of Multi-Wall Carbon Nanotube

Jae-Sung Bae¹, YunHo Yeom²¹Korea Carbon Industry Promotion Agency, ²Glassdome Korea

ABSTRACT

abstract This study conducted a life cycle assessment of the carbon nanotube (CNT) production process, which is widely used across various industries, and explores measures to improve its environmental performance. Additionally, the study conducted an environmental assessment in accordance with the EU PEF methodology to contribute to the establishment of the national LCI (Life Cycle Inventory) database. Among the impact categories, the primary factor contributing to climate change was identified as electricity consumption, the main energy source. To mitigate this, technological development is necessary to reduce carbon dioxide emissions through measures such as utilizing renewable energy, introducing low-carbon processes, and optimizing process efficiency.

Key-words: PEF, Life cycle assessment, Carbon nanotube, Environmental impact, Climate change

요약

본 연구는 다양한 산업 분야에서 활용되는 탄소나노튜브(CNT) 제조 시스템의 환경 영향을 분석하고, 환경 성능을 위한 방안을 모색하며, 국가 LCI (Life Cycle Inventory) DB 구축을 위한 기초 자료로 활용하고자 EU PEF 방법론에 따라 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 수행하였다. 영향범주 중 기후변화는 주 에너지원인 전기 사용에 의해 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이를 개선하기 위해 재생 에너지 활용, 저탄소 공정 도입, 공정 효율 최적화 등 이산화탄소 배출 저감을 위한 기술 개발의 필요성이 확인되었다.

주제어: 제품환경발자국, 전과정평가, 탄소나노튜브, 환경영향, 기후변화

1. 서 론

탄소나노튜브(CNT, carbon nanotube)는 탄소 원자가 육각형 격자를 이루는 흑연면(graphite sheet)^[1] 원통형으로 말린 구조를 가지며, 말림 각도에 따라 금속 또는 반도체적 특성을 나타낸다. CNT는 강철 대비 1/6 수준의 가벼운 무게에도 불

구하고 100배 이상의 기계적 강도를 보유하여 고성능 경량화 소재로 주목받고 있다. 또한, 구리와 유사한 수준의 높은 전기 전도도와 열전도율을 지니며, 나노미터 단위의 구조재여를 통해 구조재료와 기능재료로 활용 가능성이 매우 크다. 이에 따라 CNT는 배터리, 슈퍼커패시터, 반도체 소자 등 다양한 전자 응용 분야에서 활용 잠재력이 높다[1].

Date Received: Oct. 15, 2025, Date Revised: Dec. 15, 2025, Date Accepted: Dec. 24, 2025

*Corresponding author: Jae-Sung Bae, Tel: +82-63-219-3573, E-mail: jsbae@kcarbon.or.kr

© Copyright 2025 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

CNT는튜브를구성하는총의수에따라SWCNT(단일벽CNT),MWCNT(다중벽CNT)로구분된다. 합성방식으로는아크방전,레이저박리,화학증착(CVD,ChemicalVaporDeposition),고압일산화탄소공정(HiPco,High-pressureCarbonMonoxide)등[1,2]이있으며,투입되는전구체(흑연,탄화수소,메탄등),촉매제(니켈,코발트등),산(질산,광산등),그리고정제기법에따라생산제품의수율,순도,구조적안정성이달라지므로수요제품에서요구하는특성에맞는투입물별,공정별조건에서의다양한연구가진행중이다.

그러나나노소재인CNT는인체건강,생태계반응(생태독성),환경내거동(이동성,잔류성)등에서상당한불확실성이존재한다[3,4]. 따라서CNT기반제품의개발과정에서잠재적위험을사전에파악하고통제하기위해전과정평가(LCA)를통한환경영향분석이필수적이다.

현재CNT관련전과정평가는건축자재,고분자복합재,섬유,리튬이온배터리,전계방출디스플레이[5,6]등일부응용제품을중심으로보고되고있으나,다양한합성공정조건과국내생산현장데이터를반영한기초LCA연구는여전히부족하다. 또한,CNT에특화된국가LCI데이터베이스도미비한상황이다.

이에본연구에서는대표적합성방식인화학증착(CVD)공정기반의국내다중벽탄소나노튜브(MWCNT)생산시스템을대상으로전과정평가를수행하였다. 이를통해환경영향특성과주요이슈를규명하고,향후환경성능개선방안을제시함과동시에국가LCIDB구축을위한기초자료로활용하고자한다.

2. 연구방법

2.1 범위 정의

2.1.1 기능 및 기능단위 설정

EU CBAM, 에코디자인규정등글로벌환경규제에대한대응잠재력을진단하기위하여CNT의환경성평가는EUPEF(productenvironmentalfootprint)방법론[7]을선택하였으며기능단위는Table1과같이“MWCNT1kg생산”으로설정하였다.

2.1.2 시스템 경계

데이터수집범위인시스템경계는원료채취단계부터CNT생산까지의CradletoGate로정의하였다. CNT생산에필요한설비제작및건설단계의영향은소재제조의총환경

Table 1. Function and functional unit

Category	Definition
Function	CNTs are widely applied in electrical/electronic, aerospace, and construction industries.
Physical property	Electrical conductivity ($10^4\sim10^6$ S/m), specific surface area, ($200\sim400$ m^2/g), diameter (10~50nm)
Functional unit	1kg of MWCNT produced
Reference flow	1kg

영향중낮은비중(1~5%수준)을차지하므로본연구에서의시스템경계에는포함하지않았다[8].

2.1.3 제외기준

특별한제외기준은설정하지않았으며,모든투입물과산출물을데이터수집범위에포함하였다.

2.1.4 데이터 범주

데이터범주는Table2와같이원료물질,포장재,유틸리티(에너지,연료등),제품,폐기물,대기·수계배출물로구분하였다.

2.1.5 데이터 품질요건

시스템경계설정에서정의한제품제조단계는일차데이터수집을원칙으로하였으며원료채취단계에서의투입물과산출물에대한데이터는이차데이터를수집하였다. 이차데이터

Table 2. Data categories

Category	Name
In put	Raw materials
	Packaging
	Utility
Out put	Product
	Packaging
	Waste
Air emission	Steam, nitrogen, hydrogen, argon, NOx, THC
	Water emission
	Waste water

는 KS I 7004:2016에 따라 품질지표로 시간적, 지역적, 기술적 대표성을 선정하였다. 상위 및 하위 흐름 데이터세트는 데이터 품질평가를 통해 적합한 것을 선정하였다. 데이터 품질평가 시, 품질지표 별로 같은 점수가 나오면, ① 지역적(KR, RoW, RER, GLO, EU, US, JP순), ② 시간적(가장 최근) 순으로 우선순위를 부여하였다.

데이터 품질평가는 단위공정별로 수행하며, 수집 데이터별로 아래 Table 3의 Pedigree 매트릭스를 활용한 데이터별 품질목표는 평균 3.0 이하로 설정하였다.

2.1.6 할당

수집한 생산 공정 데이터가 CNT에 국한한 것이므로 다중산출에 의한 할당은 고려하지 않았으며, 공장에서 발생한 폐기물에 대한 열린고리 재활용 방법은 KS I 7004:2016의 요건에 따라 제외(cut-off) 방법을 적용하였다.

2.1.7 가정 및 한계사항

데이터 수집 과정에서 부득이하게 설정한 가정과 한계사항은 아래 Table 4와 같다.

Table 3. Data quality requirements(Pedigree)

Category	Indicator score				
	1	2	3	4	5
Time coverage	Less than 3 years of difference to year of study	Less than 5 years of difference	Less than 7 years of difference	Less than 10 years of difference	More than 10 years of difference
Geographical coverage	Data that reflects domestic production (KR)	Regional data that closely resembles domestic (RoW, RER, GLO, EU)	(US, JP)	(CN, IN)	Other non-similar data
Technology coverage	Data with the same technique	Data with partially the same technique	Data with similar techniques in principle	Data with different techniques applied in principle	Data with other non-similar techniques

Table 4. Assumptions and limitations

Category	Contents
Commonality	- Direct air emissions from fuel combustion are calculated by applying emission factors from the guidelines of IPCC 2019 and the Ministry of Environment[9].
Production Process	- All utilities except electricity are delivered to the facility via pipeline transportation, including the electricity consumed during transportation. - By-products recycled internally are not allocated and are assumed to have no environment impact.
Up·down stream	- When multiple suitable LCI DB exist, the dataset with the most similar environmental impact is applied conservatively.

3. 목록분석

3.1 단위공정 선정 및 공정흐름도

단위 공정은 MWCNT 생산 공정으로 정의하였으며 투입물·산출물 흐름을 Fig. 1에 도식화하였다. 단위 공정으로의 투입물은 카본 프리커서(전구체), 수소, 질소, 아르곤, 염산, 염화철, 제올라이트, 포장재, 전기, 공정수가 포함되며, 산출물은 CNT와 포장재, 폐기물, 대기배출물, 폐수를 포함한다.

3.2 데이터 수집 및 계산

데이터는 국내 한 생산업체로부터 수집하였으며, 해외 LCI Dataset(Ecoinvent 등)을 보완적으로 활용하였다. CNT 제조 단계에서의 투입물과 산출물에 대한 일차데이터를 수집하여 현장데이터와 합산하였다. CNT 제조공정에서 수집한 일차데이터를 전과정으로 확장하기 위한 상위흐름 LCI Dataset를 사전에 정의한 데이터 품질요건을 고려하여 Table 5와 같이 수집하였다.

4. 연구결과

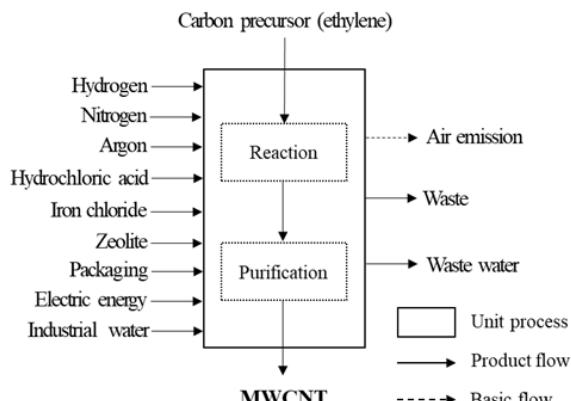


Fig. 1. Process flow of CNT production.

Table 5. LCI database lists

Category	Source
Carbon precursor	RoW: market for ethylene, ecoinvent(v3.1), 2023
Hydrogen	RoW: market for hydrogen, gaseous, low pressure, ecoinvent(v3.1), 2023
Nitrogen	RoW: market for nitrogen, liquid, ecoinvent(v3.1), 2023
Argon	GLO: argon to generic market for inert gas for discharge lamps, ecoinvent(v3.1), 2023
Hydrochloric acid	RoW: hydrochloric acid production, Mannheim process, ecoinvent(v3.1), 2023
Iron chloride	GLO: market for iron(III) chloride, without water, in 40% solution state, ecoinvent(v3.1), 2023
Zeolite	RER: zeolite production, powder, ecoinvent(v3.1), 2023
Aluminum-coated packaging	RoW: packaging film production, low density polyethylene, ecoinvent(v3.1), 2023
Electricity	KR: market for electricity, low voltage, ecoinvent(v3.1), 2023
Industrial water	RoW: tap water production, underground water with chemical treatment, ecoinvent(v3.1), 2023
CNT	-
Waste(PM)	RoW: process-specific burdens, municipal waste incineration, PM, ecoinvent(v3.1), 2023
Waste (synthetic resin)	RoW: process-specific burdens, municipal waste incineration, ecoinvent(v3.1), 2023
Waste (acetylene)	RoW: process-specific burdens, municipal waste incineration, acetylene, ecoinvent(v3.1), 2023

Table 5. Continued

Category	Source
Waste (hydrochloric acid)	RoW: process-specific burdens, municipal waste incineration, hydrochloric acid, ecoinvent(v3.1), 2023
Wastewater	RoW: market for wastewater, average, ecoinvent(v3.1), 2023
Waste (truck transport)	Small lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 7.5 t total weight, 3.3 t max payload, Sphera, 2021

CNT에 대한 전과정 목록 분석 결과를 바탕으로, 영향평가 방법론인 Environmental footprint(EF) 3.1을 활용하여 16대 영향변주별 특성화 결과와 정규화 결과를 산출하였다. 영향평가 결과의 산출을 위해 Sphera (GaBi) LCA Software를 사용하였다.

4.1 특성화 결과

16대 영향변주별 특성화 결과는 Table 7과 같으며 주요 영향변주 결과를 Fig. 2에 도식화하였다. CNT 1kg당 102.75 kgCO₂ eq. 배출이 발생하였으며 기후변화 영향의 주요 요인은 전기 사용에 의한 것으로 전체의 약 83%이고, 그 다음으로 아르곤 (9%), 카본 프리커서 에틸렌(4%) 순으로 나타났다.

또한, 산성화, 생태독성, 부영양화(토양), 인체독성, 화석연료 고갈, 수자원 고갈 등 대부분의 영향변주에 대해서도 전기, 아르곤, 에틸렌 사용에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

본 연구의 MWCNT GWP 값은 동일 나노탄소 소재군과 비교시, Table 6과 같이 SWCNT보다는 낮고, Graphene 보다는 약간 높은 중간 수준의 기후변화 영향을 보인다. 이는 CVD 공정의 에너지 효율과 가스 소비 특성에 기인하며, 대량 생산 또는 저온촉매 적용 등의 공정 선이 배출저감에 유효할

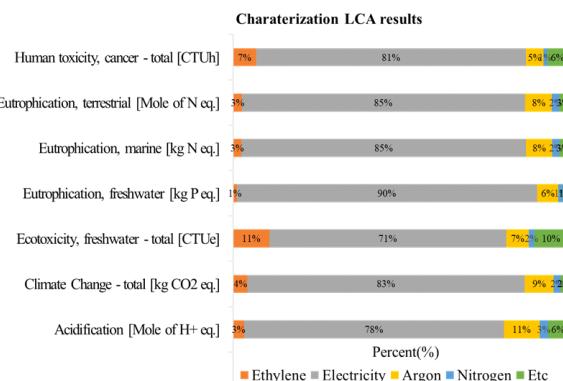


Fig. 2. Characterization LCA results.

Table 6. LCI database lists

Materials	Main process	GWP (kgCO ₂ -eq.)	Ref.
SWCNT	Arc discharge	120-160	[10]
MWCNT	CVD (This study)	102.75	-
Graphene	Chemical oxidation	90	[11]

것으로 분석된다.

4.2 정규화 결과

영향범주별 특성화 결과에 대한 상대적 중요도를 파악하기 위하여 EU 집행위원회(EC)에서 2017년에 개발한 글로벌 정규화기준을 적용하였다. 정규화 기준은 세계 평균 인구 1인당 16대 영향범주별 잠재적 환경영향을 의미하며, 특성화 결과

값을 정규화 기준에서 제시된 기준 값으로 나누어 정규화 결과 값을 산출할 수 있다.

정규화 기준을 통해 산정한 영향범주별 정규화 결과의 단위는 영향을 받은 인구수(pe)로 동일하여, 영향범주별 결과를 상호 비교할 수 있었다. 주요 영향범주 결과를 Fig. 3에 도식화 하였으며 그 결과, 화석연료 고갈 영향이 가장 크고 그 다음으로 생태독성(상수), 기후 변화, 광화학 스모그, 이온화 방사선, 산성화 순으로 나타났다.

4.3 민감도 분석

CNT 제조 공정의 주요 원료 (에틸렌, 아르곤, 수소 등) DB는 해외 Ecoinvent 데이터를 활용하였으므로 지역 차이에 따른 불화실성을 보완하기 위해 원료 및 전력 사용량을 $\pm 10\%$ 범위로 가정하여 민감도 분석을 수행하였다(Table 8). 전력 사용량의 변화가 전체 기후변화 영향에 가장 큰 영향을 주었으며($\pm 10\%$), 에틸렌 투입량 변화에 대한 영향은 $\pm 8\%$, 아르고 ·

Table 7. Characterization LCA results

Impact category	Unit	Characterization results					
		Total	Carbon precursor (ethylene)	Electricity	Argon	Nitrogen	etc
Acidification	mol H ⁺ eq.	4.07.E-01	1.34.E-02	3.16.E-01	4.32.E-02	1.07.E-02	2.32.E-02
Climate change	kg CO ₂ eq.	1.03.E+02	4.44.E+00	8.52.E+01	8.85.E+00	2.19.E+00	2.06.E+00
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3.42.E+02	3.71.E+01	2.42.E+02	2.28.E+01	5.66.E+00	3.46.E+01
Eutrophication, water	kg P eq.	6.18.E-02	6.69.E-04	5.55.E-02	3.92.E-03	8.67.E-04	8.57.E-04
Eutrophication, marine environments	kg N eq.	1.10.E-01	2.78.E-03	9.33.E-02	8.70.E-03	2.21.E-03	2.78.E-03
Eutrophication, land	mol N eq.	1.09.E+00	2.85.E-02	9.22.E-01	8.70.E-02	2.24.E-02	2.88.E-02
Human toxicity, cancerous	CTUh	1.97.E-07	1.35.E-08	1.59.E-07	1.01.E-08	2.44.E-09	1.19.E-08
Human toxicity, non-cancerous	CTUh	9.57.E-07	2.92.E-08	7.79.E-07	5.42.E-08	1.29.E-08	8.11.E-08
Ionizing radiation	kBq U-235 eq.	3.33.E+01	1.07.E-01	3.15.E+01	1.30.E+00	2.09.E-01	8.84.E-02
Land use	pt	3.21.E+02	1.13.E+01	2.77.E+02	1.86.E+01	4.35.E+00	1.06.E+01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq.	1.33.E-06	1.44.E-07	1.08.E-06	5.87.E-08	1.24.E-08	3.05.E-08
Particulate matter emissions	disease incidences	1.82.E-06	1.46.E-07	1.02.E-06	3.72.E-07	9.89.E-08	1.83.E-07
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq.	3.21.E-01	2.04.E-02	2.59.E-01	2.56.E-02	6.55.E-03	9.65.E-03
Resource use, fossil	MJ	2.09.E+03	1.34.E+02	1.75.E+03	1.41.E+02	3.28.E+01	3.10.E+01
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq.	6.90.E-04	2.42.E-05	5.51.E-04	9.04.E-06	2.00.E-06	1.04.E-04
Water usage	m ³	3.74.E+01	9.07.E-01	2.19.E+01	1.03.E+01	2.17.E+00	2.08.E+00

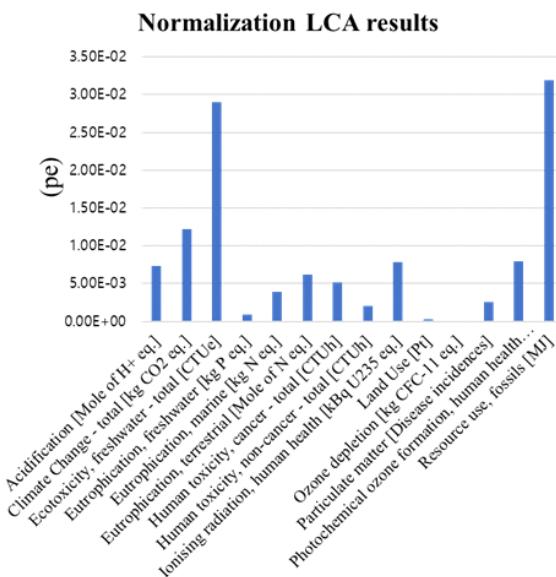


Fig. 3. Normalization LCA results.

수소의 경우 각각 $\pm 3\%$ 미만의 변화가 나타났다. 이러한 결과를 근거로, 데이터 지역성의 영향이 전체 LCA 결과에 미치는 비중이 제한적임을 확인하였으며 CNT 제조 공정의 에너지 효율 향상이 환경영향 저감에 핵심적임을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 국내 MWCNT 제조 시스템을 대상으로 EU PEF 방법론의 전과정평가를 수행하여 주요 환경영향을 도출하고 환경성개선 방향을 도출하였다. 분석 결과, 기후변화 영향의 가장 큰 요인은 고온·고전력 장비 사용으로 인한 전력 소비 임이 확인되었다. 따라서, 전력원을 태양광·풍력 등 재생에너지로 대체하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 또한, 촉매 효율 개선, 반응 조건 최적화, 폐열 회수, 공정 집약화 등 에너지 효율 향상 기술 개발이 필요하다.

Table 8. Results of sensitivity analysis for key input parameters in CNT production

Variable	Change from baseline(%)	Result (kgCO ₂ -eq/kg CNT)	Variation(%)	Key interpretation
Baseline scenario	0	102.75	0	Based on ecoinvent data
Ethylene consumption	+10%	102.75	+7.9%	Major raw material; high impact
	-10%	94.6	-7.9%	Same trend (linear response)
Argon consumption	+10%	103.5	+0.7%	Minor influence
Hydrogen consumption	+10%	105.0	+2.2%	Moderate influence
Electricity use	+10%	113.0	+10.0%	Highest sensitivity

본 연구에서의 주요 원료에 대한 LCI DB를 향후 국내 생산 현장 데이터로 대체한다면 기존 보다 정확하고 대표성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다. 이에 국가 LCI DB 구축은 필수적이며, 이를 위해 정부의 적극적 지원과 학술·산업계의 지속적인 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2025년도 산업통상부의 지원 하에 수행한 “한국 탄소산업진흥원 탄소산업 글로벌 호환형 LCI DB 구축” 사업의 일환으로 작성하였습니다.

References

- Bachtold, A., Hadley, P., Nakanishi, T., Dekker, C. Logic circuits with carbon nanotube transistors. *Science* 294, pp. 1317-1320 (2001).
- Baughman, R.H., Zakhidov, A.A., de Heer, W.A. Carbon nanotubes-the route toward applications. *Science* 297, pp. 787-792 (2002).
- Oberdorster, G., Oberdorster, E., Oberdorster, J. Nano-toxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives* 113, pp. 823-839 (2005).
- Lam, C.W., James, J.T., McCluskey, R., Arepalli, S., Hunter, R.L. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. *Critical Reviews in Toxicology* 36, pp. 189-217 (2006).
- Lee, J., Mahendra, S., Alvarez, P.J. Nanomaterials in the construction industry: A review of their applications and

- environmental health and safety considerations. *ACS Nano* 4, pp. 3580-3590 (2010).
6. Kohler, A.R., Som, C., Helland, A., Gottschalk, F. Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle. *Journal of Cleaner Production* 16, pp. 927-937 (2008).
7. Manfredi, S., Allacker, K., Pelletier, N., Chomkham, K., de Souza, D.M. Product Environmental Footprint (PEF) Guide. European Commission: Brussels, Belgium (2012).
8. Vikas, K., Bhavik, R.B., Lee, L.J. Carbon nanofiber production. *Journal of Industrial Ecology* 12, pp. 394-410 (2008).
9. IPCC. 2019 Guidelines. Ministry of Environment Notice No. 2024-23, Guidelines for the Operation of Greenhouse Gas Target Management in the Public Sector, Article 7, Paragraph 2 (Method for Calculating Greenhouse Gas Emissions, etc.) (2019).
10. Duncan, K., Sanden, B.A. Energy requirements of carbon nanoparticle production. *Journal of Industrial Ecology* 12, pp. 360-375 (2008).
11. Rickard, A., Duncan, K., Sanden, B.A., Sverker, M. Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction. *Environmental Science & Technology* 48, pp. 4529-4536 (2014).