Research Paper

A Study on Particulate Matter Footprint Calculation on Transportation Modes

Junbeum Kim^{1,*} · Seungjun Jeon² · Jaeryoung Song³ · Gayoung Choi³

¹ CREIDD Research Center on Environmental Studies & Sustainability, Department of Humanities, Environment & Information Technology, University of Technology of Troyes, France

² InfoShare Co., Ltd, Ulsan, South Korea

³ Green Technology Center, Seoul, South Korea

(Received November 21, 2019; Revised December 30, 2019; Accepted January 2, 2020)

Objective : In this study, we proposed the concept of the particulate matter footprint (PM Footprint) and assessed the PM Footprint in transportation modes (road, rail, and water transportation). In addition, we assessed the contribution of secondary particulate matter formation gas emissions, which contribute to particulate matter formation.

Method : To calculate the PM Footprint in the transportation sector, the ReCiPe life cycle impact assessment method in life cycle assessment (LCA) was used. For the PM Footprint of each transportation mode, the life cycle inventory data were multiplied by the characterization factors of PM₁₀, PM_{2.5} and secondary particulate matter formation emissions such as NO_x, SO_x, NH₃. The PM Footprint values were shown in kg PM_{2.5} eqv. value.

Results and Discussion : The road transportation (trucks) had a much higher PM Footprint value than rail and water transportation in tkm unit based. In the road transportation mode, small size truck such as 3.5 tons (1.37E-03 kg PM_{2.5} eqv./tkm), 3.51~5 tons (9.65E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm), 1.25 tons (8.38E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm), and 1 ton (7.83E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm) had higher PM Footprint value than big size trucks. In the rail transportation mode, the diesel rail transportation had the highest PM Footprint value, followed by electric + diesel rail transportation and electric rail transportation. In the water transportation mode, the tanker LNG_100 dwt had the highest PM Footprint value, followed by ro-ro ship coastal, and tanker coastal 500~20,000 dwt. The secondary particulate matter formation emissions (NO_x, SO_x, NH₃) contributed to PM Footprint value with 59% in road transportation, 80% in rail transportation, and 61% in water transportation.

Conclusions : The PM Footprint values, which shown in this study and the results of the directed polluted PM and secondary gas emissions should be considered for national PM reduction policy and planning. Finally, a certification system using the PM Footprint in this study should be developed and settled down for national PM reduction.

Key Words : *Fine Particulate Matter, Condensable Particulate Matter, Particulate Matter Footprint, Transportation Modes, Life Cycle Inventory*

* Corresponding author E-mail: junbeum.kim@utt.fr Tel: +33-03-25-71-80-06 Fax: +33-03-25-71-76-98

연구논문

교통수단별 미세먼지 발자국 산정에 관한 연구

김준범^{1,*} · 전승준² · 송재령³ · 최가영³

¹ 프랑스 트루아공과대학교, 환경정보기술학과, 환경 및 지속가능성연구센터

² (주)인포웨어

³ 녹색기술센터

목적: 본 연구에서는 미세먼지 발자국에 대한 개념을 제시하고, 교통수단별(도로 및 철도, 해상운송) 미세먼지 발자국을 산정하고자 하였으며, 미세먼지 발자국 산정에서 미세먼지 형성에 영향을 주는 2차 미세먼지 형성 가스상 물질들의 기여도를 평가하였다.

연구방법: 국내 교통산업분야에서 미세먼지 발자국을 산정하기 위해 전과정평가(life cycle assessment)과정에서 수행되어지는 전과정영향평가(life cycle impact assessment) 방법론 중에서 ReCiPe 방법론을 사용하여 산정하였다. 이 방법에서 미세먼지형성 가능성(particulate matter formation) 영향범주에서 활용되어지는 관련된 물질들의 특성화 계수를 활용하여 미세먼지 및 NOx, SOx, PM₁₀, NH₃ 오염물질들의 배출량에 특성화 계수를 곱하여 미세먼지 발자국을 산정하였으며 미세먼지 발자국에 대한 단위는 kg PM_{2.5} eqv.로 나타낼 수 있다.

결과 및 토의: 대부분의 육상교통(트럭운송)이 다른 철도나 해상교통보다 더 높은 미세먼지 발자국을 가지는 것으로 나타났다. 육상교통(트럭운송)에서는 3.5톤 트럭의 경우가 1.37E-03 kg PM_{2.5} eqv./tkm로 가장 높은 미세먼지 발자국을 가졌으며, 다음으로는 3.51~5톤 트럭(9.65E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm), 1.25톤 트럭(8.38E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm), 1톤 트럭(7.83E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm)순으로 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌다. 철도수송에서는 디젤기관차 수송이 가장 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌으며, 다음으로는 전기+디젤기관차 수송과 전기기관차 수송 순으로 높은 것으로 나타났다. 해상운송에 있어서는 탱커 LNG_100 dwt 수송이 가장 높은 미세먼지 발자국을 나타냈다. 그 다음으로는 로로선 내항 1,200~20,000 dwt, 탱커 외항 500~20,000 dwt 등의 순으로 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌다. 미세먼지 형성에 기여하는 2차 미세먼지 형성 가스상물질들은 육상수송에 59%, 철도수송에 80%, 그리고 해상수송에는 61%으로 기여하는 것으로 나타났다.

결론: 본 연구에서 제시하는 교통수단별 미세먼지 발자국 결과값과 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질 기여도 결과들은 향후 미세먼지 저감 및 관련 정책 수립 시 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 최종적으로 미세먼지 발자국 인증제도의 정착을 통해 국내 미세먼지 발생저감에 기여해야할 것이다.

주제어: 미세먼지, 응축성 미세먼지, 미세먼지 발자국, 교통수단, 전과정목록분석

1. 서론

최근 들어서 대기오염 및 미세먼지 문제가 인간에게 큰 위협으로 다가오고 있다. 많은 매스컴 뉴스들을 통해서 미세먼지에 대한 기사들이 다루어지고 있으며, 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5}) 측정 및 모니터링을 통한 미세먼지 주의보 및 경보 발령으로 인해서 많은 사람들이 마스크 착용과 호흡기 건강에 신경을 곤두세우고 있다.¹⁾ 2013년 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 미세먼지 및 초미세먼지를 석면 및 비소 등의 물질과 같은 등급인 1급 발암물질로 지정하였으며, 최근에 들어서 미세먼지 및 초미

세먼지, 대기오염물질과 공기질에 대한 전 세계적인 관심과 연구들이 계속적으로 높아지고 있다.²⁻⁵⁾ 국내에서도 미세먼지 및 대기오염물질들의 국내 배출량 및 국외에서의 영향(특히 중국에서 넘어오는 미세먼지 양과 이에 대한 호흡기 영향)에 대한 연구들이 활발히 수행 중이며, 우리나라에서도 미세먼지 국가전략프로젝트 사업단 등 국가 프로젝트들의 진행이 활발하게 되고 있다.⁶⁻¹¹⁾

국내에서 배출되는 미세먼지에 대한 연구로, 김준범(2017)은 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질(NOx, SOx, PM₁₀, NH₃)들의 배출량에 특성화 계수를 곱하여 미세먼지형성 가능성에 대한 잠재적 기여도를 kg 또는 ton PM₁₀ eq.로 나타내었으

Fig. 1. Cause-and-effect chain from fine dust formatting emissions to damage to human health.¹⁶⁾

며, 이로 인한 인간 호흡기영향도 DALY (Disability adjusted life years, 장애보정손실년수)로 산정하여 보여주었다. 2013년도 국내에서 발생되어지는 미세먼지 중에서 국내 전체 산업부문에서는 536,181 ton PM₁₀ eqv.가 미세먼지형성에 기여를 한 것으로 산정되었으며, 좀 더 세부 산업별로 살펴보면, 제조업 연소부분이 139,603 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 26%로 가장 많이 미세먼지 형성에 기여한 산업으로 나타났다. 도로이동 오염원에서는 89,148 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 17%를 차지하며 두 번째로 미세먼지 형성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 결론적으로 제조업 산업부문과 도로이동 부문이 전체의 43%를 차지하는 것으로 나타나, 이 두 산업부문에서 발생되어지는 미세먼지 저감 및 감축에 많은 연구와 정책적인 접근들이 필요하다고 할 수 있다.¹²⁾

정승우 외(2019)는 전주시, 익산시 및 창원시를 대상으로 미세먼지 흡입으로 인해서 발생할 수 있는 인간호흡기 건강영향에 대해서 DALY(장애보정 손실년수)를 정량화하고, 대기오염 배출원 및 기여도를 분석하여 보여주었다.¹³⁾ 또한, 도로이동원에 대한 미세먼지 배출과 관련된 내용으로 이임학 외(2014)의 연구에서는 도로 이동원에서의 미세먼지의 배출량 산정을 위한 배출계수와 활동도 적용의 타당성에 대한 연구를 수행하였으며 미세먼지 제어를 위한 법제도 시행의 타당성에 대하여 분석하고 고찰하였다.¹⁴⁾

국립환경과학원 대기오염물질 배출계수 관리위원회 배출계수 자료집(2015)을 보면 연료별 자동차 연식 및 크기별로 배출되어지는 PM_{2.5} 및 PM₁₀과 같은 미세먼지, 그리고 CO, VOC, NO_x와 같은 대기오염물질 배출계수 산정방법을 보여주고 있다. 활동자료 등의 관련 자료를 활용하여 각 대기오염물질들의 배출계수들을 산정하고 있으며 정기적으로 업데이트 하고 있다. 여기에서의 배출계수는 연료생산단계를 제외(전과정 배출이 고려되지 않은)한 교통수단이 이동 시 배출되는 배출량만을 제시하고 있다고 할 수 있다.¹⁵⁾

Goedkoop et al. (2009)¹⁶⁾ 연구에서는 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질(NO_x, SO_x, PM₁₀, NH₃)들의 배출량에 특성화 계수 및 인간 호흡기 영향부분까지 산정하는 부분들을 상세히 보여주고 있다(Fig. 1 참조). 본 논문 및 WHO¹⁷⁻¹⁹⁾에서는 2차 미세먼지 형성 가스상물질은 SO₂, NH₃, NO_x 및 다른 가스상물질들에 의해서 형성되어진다고 나타내고 있다. 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 미세먼지화 되어지는 전환율은 대기환경조건 및 시간적 공간적인 문제를 포함하여 상당히 다양한 변수에 의해서 결정되어지

기 때문에 많은 불확도를 포함하고 있다고 할 수 있다. 이러한 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 미세먼지화 되어지는 전환율에 대한 부분을 Lelieveld et al. (2015)²⁰⁾, Lippmann et al. (2013)²¹⁾, Tuomisto et al. (2008)²²⁾ 연구에서 충분히 자세한 내용들을 보여주고 있다.

Goedkoop et al. (2009)¹⁶⁾ 연구에서도 European Commission Joint Research Centre (JRC)에서 제시한 TM5 global chemical transport model과 이를 바탕으로 한 TM5-FASST (FAst Scenario Screening Tool for Global Air Quality and Instantaneous Radiative Forcing)를 활용하여 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질의 특성화 값들을 산정하여 제시하고 있다.^{23,24)}

선행연구 고찰 결과, 도로이동 산업부문의 미세먼지 및 대기오염물질 배출량 산정에 대한 연구와 온실가스배출량 및 탄소발자국 산정에 관한 연구들은 활발하게 수행되고 있으나, 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질들을 포함한 배출량 및 발자국에 대한 연구들은 많이 부족하다고 할 수 있다. 도로 이동수단에서의 탄소발자국 산정에 대한 연구들은 많이 진행되고 있듯이, 이동 수단별 탄소발자국을 산정할 때는 연료생산단계와 사용단계에서 발생되어지는 CO₂, CH₄, NH₃ 등의 관련 물질들을 탄소환산값(또는, CO₂ eqv. 값)으로 환산하여 전체 탄소배출량을 합산하여 탄소발자국으로 정의하여 보여주고 있다. 이에 본 논문에서는 미세먼지 발자국 개념을 제안하고자 하였다. 본 논문의 저자들이 정의하는 “미세먼지 발자국(PM Footprint)”은 이동 수단별 연료생산단계와 사용단계에서 발생되어지는 Ammonia (NH₃), Nitrogen Dioxide, Nitrogen Oxides, Sulfur Dioxide, PM₁₀, PM_{2.5}, 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질 물질들을 kg 또는 ton PM_{2.5} eqv.값으로 환산하여 전체 미세먼지 형성 가능성량을 합산하여 나타낸 값이다. 이와 같이 정의한 미세먼지 발자국 개념을 적극적으로 활용해야 되는 좀 더 명확한 근거는 전기자동차의 사례에서 찾을 수 있다. ‘운행되는 전기자동차에서 배출되는 미세먼지는 없다’라고 많은 사람들은 인식하고 있지만, 전기를 사용하여 전기자동차가 운행되어질 때에는 미세먼지 발생이 없을 수 있지만 운행 시 사용되는 전기를 생산할 때는 상당히 많은 양의 미세먼지와 미세먼지를 형성하는 2차 미세먼지 형성 가스상물질들이 배출되어지기 때문에 이들에 대한 값들도 고려가 필요하다고 할 수 있다.

이와 같은 연구배경을 바탕으로 본 연구에서는 국내 교통수단별(Rail transportation, Air transportation, Transit/Ground

Transportation, water transportation)로 원료취득에서 운행단계까지의 배출되는 전과정 목록분석(life cycle inventory)자료에서 ton-km 당 배출되는 Ammonia (NH₃), Nitrogen Dioxide, Nitrogen Oxides, Sulfur Dioxide, PM₁₀, PM_{2.5} 배출물질 자료들을 활용하여 교통수단별 미세먼지 발자국(kg PM_{2.5} eqv.)을 산정하여 비교평가 및 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1. 연구자료

교통수단별 미세먼지 발자국을 산정하기 위해 국내 환경부 한국환경산업기술원 및 산업통상자원부 국가청정생산지원센터에서 제공하고 있는 전과정 목록분석 자료(<http://www.epd.or.kr> 및 <https://www.kncpc.or.kr>)를 활용하였다.^{25,26)} 두 기관에서 제공하고 있는 국가 LCI 데이터베이스정보망에는 수송부분을 포함하여 물질 및 부품제조(예를 들면, 건축자재, 고무, 금속, 기초부품 제조 등), 가공공정(예를 들면, 금속가공, 부품가공, 플라스틱 가공 등), 폐기단계(예를 들면, 매립, 소각, 재활용 등)에서의 투입물 및 환경배출물자료들을 제공하고 있다. 수송부분 자료를 보면 16개의 기차 및 육상수송 및 11개의 해상수송자료를 제공하고 있다. 위에서 나타난 바와 같이 국내 수송자료에는 해상수송과 관련된 자료가 많은 반면에, 대중교통, 버스 및 승용차운송과 관련된 자료가 부족한 상황이기 때문에 이 부분은 제외하고 산정하였다. 본 연구에서 활용된 자료들을 3개의 철도교통수단, 11개의 해상교통수단, 그리고 13개의 도로교통수단에 대해서 각 교통수단별 자료를 분석하여 연구를 수행하였다.

2.2. 미세먼지 발자국 산정방법

국내 교통산업분야에서 미세먼지 발자국을 산정하기 위해 전과정평가(life cycle assessment)과정에서 수행되어지는 전과정영향평가(life cycle impact assessment) 방법론 중에서 ReCiPe 방법론을 사용하여 산정하였다.^{16,27)} 이 방법에서 미세먼지형성 가능성(particulate matter formation) 영향범주에서 평가방법은 식 (1)에서 나타난 바와 같이 활용되어지는 관련된 물질들의 특성화 계수를 활용하여 미세먼

Table 1. Emission characterization factors in particulate matter formation.

PM division	Substance name	Unit	Midpoint (kg PM _{2.5} eq.)
CPM parts	Ammonia (NH ₃)	kg	0.32
	Nitrogen Dioxide	kg	0.22
	Nitrogen Oxides	kg	0.22
	Sulfur Monoxide	kg	0.2
	Sulfur Dioxide	kg	0.2
FPM parts	PM ₁₀	kg	1
	PM _{2.5}	kg	1

지 및 2차 미세먼지 형성 가스상 물질인 NO_x, SO_x, PM₁₀, NH₃ 오염물질들의 배출량에 특성화 계수를 곱하여 미세먼지 발자국을 산정하였으며 미세먼지 발자국에 대한 단위는 kg 또는 ton PM₁₀ eq.로 나타낼 수 있다.

$$I_m(\text{midpoint impact}) = \sum_i CF_{mi} \times m_i \quad (1)$$

where m_i is the magnitude of intervention i (e.g., the mass of NO_x released to air), CF_{mi} the characterization factor that connects intervention i with midpoint impact category m (here, particulate matter formation) (De Schryver and Goedkoop 2009; Goedkoop et. al. 2009, Kim et.al 2016)

다음의 **Table 1**에는 ReCiPe 전과정영향평가 방법론에서 고려되어지는 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질들의 특성화계수를 나타내고 있다. 예를 들면, 1 kg PM₁₀ 물질은 1 kg PM_{2.5} eq.값을 가지며, 1 kg NO_x는 0.22 kg PM_{2.5} 형성에 영향을 준다고 할 수 있다. 이 계수들을 활용하여 각각의 교통수단에서 배출되는 PM₁₀, PM_{2.5} 미세먼지 배출량(여과성 먼지 FPM, filterable particulate matter)과 2차 미세먼지 형성 가스상물질들(응축성 미세먼지 CPM, Condensable Particulate Matter)의 배출량을 기준으로 미세먼지 발자국이 산정되어질 수 있다.

예를 들어, 철도 교통 인벤토리를 가지고 산정하는 과정들을 살펴보면 다음과 같다. **Table 2**에는 한국 LCI자료에서 철도 교통 20,250 ton-km를 기능단위로 하는 미세먼지

Table 2. Railroad transportation data and structure from Korea LCI database.

Numbers	Direction	Group	Environment	Name	Unit	Value
124	OUTPUT	Emission	Air	Dust (PM _{2.5} +PM ₁₀)	kg	1.109
168	OUTPUT	Emission	Air	Sulfur dioxide (SO ₂)	kg	0.422
155	OUTPUT	Emission	Air	Nitrogen oxides (NO _x)	kg	16.605
118	OUTPUT	Emission	Air	Nitrogen dioxide (NO ₂)	kg	0.001
98	OUTPUT	Emission	Air	Ammonia (NH ₃)	kg	0.001
263	OUTPUT	Product	Technosphere	Railroad transportation	ton. km	20,250

Table 3. PM Footprint in railroad transportation LCI data.

Emission	Value, 1 ton·km	Midpoint (kg PM _{2.5} eq.)
Ammonia (NH ₃)	3.857E-08	1.23E-08
Nitrogen Dioxide	1.067E-03	1.16E-08
Nitrogen Oxides	8.200E-04	1.80E-04
Sulfur Monoxide	5.612E-05	1.12E-05
Sulfur Dioxide	2.082E-05	4.16E-06
PM _{2.5+10}	2.738E-05	2.74E-05
PM Footprint		2.51E-04 kg PM _{2.5} eq./tkm

및 미세먼지 형성 2차 미세먼지 형성 가스상 물질들의 배출량을 보여주고 있다.

철도 교통에서의 전과정 목록분석값과 ReCiPe 전과정영향평가 방법론에서 고려되어지는 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질들의 특성화계수를 각각 곱해서(식 1 참조) 미세먼지 발자국을 다음의 **Table 3**과 같이 산정하여 나타낼 수 있다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 교통 수단별 미세먼지 발자국 산정결과

총 16개의 철도수송과 육상수송(트럭운송 부분), 그리고 11개의 해상수송 자료를 ton-km를 기능단위로 하여 각각의 교통운송에 대한 미세먼지 발자국(kg PM_{2.5} eqv.)을 산정하였다. 미세먼지 발자국 산정결과를 Fig. 2와 Table 4에 나타내었듯이 1 ton-km를 기능단위로 했을 경우 대부분의 육상교통(트럭운송)이 다른 철도나 해상교통보다 더 높은 미세

먼지 발자국을 가지는 것으로 나타났다. 육상교통(트럭운송)에 대해 좀 더 세부적으로 살펴보면 3.5톤 트럭의 경우가 1.37E-03 kg PM_{2.5} eqv./tkm로 가장 높은 미세먼지 발자국을 가졌으며, 다음으로는 3.51~5톤 트럭(9.65E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm), 1.25톤 트럭(8.38E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm), 1톤 트럭(7.83E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm)순으로 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌다. 23.1~25톤 트럭 및 18.1~23톤 트럭의 경우는 2.19E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm으로 작은 크기의 트럭에 비해 낮은 미세먼지 발자국 결과를 가졌다.

세 가지 종류의 기차수송(전기+디젤기관차 수송, 디젤기관차 수송, 전기기관차 수송)의 경우에는 디젤기관차 수송이 2.71E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm으로 가장 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌으며, 다음으로는 전기+디젤기관차 수송이 2.51E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm, 그리고 전기기관차 수송이 1.17E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm의 미세먼지 발자국이 산정되었다.

마지막으로 11개의 해상운송에 있어서는 평균적으로 1.47 kg PM_{2.5} eqv./tkm의 미세먼지 발자국이 산정되었다. 좀 더 세부적으로 살펴보면, 탱커 LNG_100 dwt 수송이 6.39E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm으로 가장 높은 미세먼지 발자국을 나타냈다. 그 다음으로는 로로선 내항 1,200~20,000 dwt 해상 운송이 2.86E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm, 탱커 외항 500~20,000 dwt 해상 운송이 1.29E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm, 탱커 외항 10,000~300,000 dwt이 1.27E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm, 컨테이너선 외항 27,500 dwt 해상운송이 1.12E-04 kg PM_{2.5} eqv./tkm순으로 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌다.

1 ton-km를 기능단위로 한 각각의 교통수단에서 미세먼지(PM₁₀ + PM_{2.5})로 배출되어지는 양과 미세먼지 형성에

Fig. 2. PM Footprint (kg PM_{2.5} eqv.) of transportation mode.

Table 4. PM Footprint (kg PM_{2.5} eqv.) in transportation mode.

Category	Data name	PM Footprint (kg PM _{2.5} eq./tkm)
Rail Transportation	Railroad transportation (Electricity and diesel)	2.51E-04
	Railroad transportation-diesel	2.71E-04
	Railroad transportation-electricity	1.17E-04
Water Transportation	LNG_100 dwt [tanker_LNG_100 dwt]	6.39E-04
	500~20,000 dwt [tanker_oceangoing_500~20,000 dwt]	1.29E-04
	10,000~300,000 dwt [tanker_oceangoing_10,000~300,000 dwt]	5.41E-05
	500~20,000 dwt [tanker_coastal_500~20,000 dwt]	6.00E-05
	10,000~300,000 dwt [tanker_coastal_10,000~300,000 dwt]	1.27E-04
	27,500 dwt [container ship_oceangoing_27,500 dwt]	1.24E-04
	1,500~20,000 dwt [bulkcarrier_oceangoing_1,500~20,000 dwt]	2.30E-05
	10,000~200,000 dwt [bulk carrier_coastal_10,000~200,000 dwt]	5.65E-05
	10,000~200,000 dwt [bulk carrier_10,000~200,000 dwt]	5.65E-05
	1,500~20,000 dwt [bulk carrier_coastal_1,500~20,000 dwt]	5.85E-05
	1,200~20,000 dwt [ro-ro ship_coastal_1,200~20,000 dwt]	2.86E-04
	8.1-15 ton truck	3.32E-04
Road Transportation	5.1-8 ton truck	6.16E-04
	4.5 ton truck 80 km/h	4.33E-04
	4.5 ton truck 60 km/h	3.42E-04
	3.5 ton truck	1.37E-03
	3.51-5 ton truck	9.65E-04
	23.1-25 ton truck	2.19E-04
	2.5 ton truck	4.29E-04
	1 ton truck	7.83E-04
	18.1-23 ton truck	2.19E-04
	15.1-18 ton truck	2.80E-04
	11.5 ton truck 60 kmh	2.30E-04
	1.25 ton truck	8.38E-04

기여하는 2차 미세먼지 형성 가스상물질로 배출되는 양을 각각 산정하여 Fig. 3에 나타내었다. 육상수송의 경우에는 1톤 트럭, 3.5톤 트럭, 3.51~5톤 트럭, 그리고 5.1~8톤 트럭을 제외하고는 대부분의 운송수단에서 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 미세먼지 발자국에 60% 이상 기여하는 것으로 나타났다. 기차수송의 경우에는 전기기차수송에서 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 약 84%를 전기+디젤기차수송이 78%, 디젤기차수송이 77%를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 국내 전과정 목록분석에는 전기를 생산하는 단계도 포함되어 있기 때문에 전기 생산단계에서 발생하는 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 포함되어져 산정되었기 때문이다. 탱커 내항 500~20,000 dwt, 탱커 내항 10,000~300,000 dwt, 로로선 내항 1,200~20,000 dwt, 탱커 외항 10,000~300,000 dwt, 그리고 탱커 외항 500~20,000 dwt를 제외한 그 외 해상운송수단에서는 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 91% 이

상 미세먼지 발자국 결과값에 기여하는 것으로 나타났다.

3.2. 연구고찰

본 연구 결과에서 볼 수 있듯이 대부분의 육상, 해상, 및 철도 교통수단에서 2차 미세먼지 형성 가스상물질들이 미세먼지 발자국 결과값에 크게 기여하고 있는 것으로 나타났다. 기차수송의 경우에도 미세먼지 발자국 결과값의 77% 이상을 미세먼지 형성에 영향을 주는 2차 미세먼지 형성 가스상물질이 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이 부분이 본 논문에서 제시하고자 하는 미세먼지 발자국 개념 제시와 산정 및 적용이 필요한 부분이라고 할 수 있다. 앞서 서론에서 제시하였듯이 전기자동차의 경우에는 운행단계에서는 미세먼지 및 미세먼지 형성 2차 미세먼지 형성 가스상물질들이 발생하지 않지만 운행을 위해 사용되는 전기는 화력발전 등의 전력시설에서 생산됨에 따라 이 단계에서 많은 미세먼지

Fig. 3. The percentage of particulate matter and secondary gas emissions, which contribute to the particulate matter formation in each transportation mode.

및 2차 미세먼지 형성 가스상물질들이 발생되어진다. 그렇기 때문에 미세먼지 저감을 위해서는 미세먼지 발자국 개념을 통한 산정 및 적용을 통해 보다 통합적 차원에서 정책수립이 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 교통부문의 미세먼지 발자국을 산정하기 위해서 국내 LCI자료에서 수송부분의 자료들을 활용하였다. 대중교통, 버스, 가솔린 및 디젤 승용차운행과 관련된 자료들은 없기 때문에 이 부분에 대해서 연구의 한계가 있다. 버스 및 승용차의 연식에 따라서 배출량이 달라지기 때문에 이에 대한 연구도 필요할 것으로 사료된다(본 연구에서 산정된 도로교통수단 미세먼지 발자국에서도 트럭의 연식에 대한 고려들은 이루어지지 않았음). 이와 관련해서는 미국 National Renewable Energy Laboratory에서 제공하고 있는 U.S. Life cycle inventory database와 Ecoinvent 국외 자료들도 활용하여 더 많은 교통수단들의 미세먼지 발자국을 산정 및 제시하여 보여줄 수 있을 것으로 사료된다.^{28,29)}

특히, 미국 National Renewable Energy Laboratory에서 제공하고 있는 U.S. Life cycle inventory database자료는 재료, 부품, 제품 생산과 관련된 각각의 프로세스 및 전과정에 있어서 물질 및 에너지 투입과 이를 통해서 배출되는 대기, 수질 및 폐기물 등의 환경오염 배출물질에 대한 정보를 제공하고 있다(U.S. Life Cycle Inventory Database, 2012). 교통수단과 관련된 자료들은 항공운송(1개 자료), 철도운송(1개 자료), 트럭운송(주별, 트럭종류별 등의 102개 자료), 대중교통, 버스 및 승용차운행(46개 자료), 그리고 해상운

송(6개 자료)을 제공하고 있다. Ecoinvent에서는 항공운송(6개 자료), 철도운송(23개 자료), 트럭운송(18개 자료), 그리고 해상운송(5개 자료)을 제공하고 있으며, 향후 본 자료들을 활용하여 더 많은 교통수단에 대해서 미세먼지 발자국을 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 이와 더불어, 국내 LCI자료들도 지속적인 업데이트와 새로운 DB를 구축하여 활용되어야 할 것이다.

앞서 고찰하였듯이 현재 국내에서는 탄소발자국 개념을 이동수단별로 적용하여 활용하고 있다. 특히 한국철도공사는 최근 공공 운송 서비스 저탄소 제품 인증을 획득하여 KTX의 경우 서울~부산 노선의 탄소배출량(9.6 kg CO₂/인.노선)을 기존(10.20 kg CO₂/인.노선)보다 약 6% 감소해 저탄소 제품 인증을 받았다고 밝히고 있다.³⁰⁾ 이와 같이 탄소발자국에 대한 산정과 인증뿐만 아니라 미세먼지 발자국 또한 미세먼지 저감에 대한 산정과 인증에 대한 부분도 향후 계속적으로 고려되어야 할 것으로 사료된다. 다음의 **Fig. 4**는 향후 활용되어질 수 있는 미세먼지 발자국 인증 및 미세먼지 저감 인증의 한 예를 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국내의 미세먼지의 심각성과 문제를 바탕으로 교통수단에서 미세먼지 발자국에 대한 개념을 “이동 수단별 연료생산단계와 사용단계에서 발생되어지는 Ammonia (NH₃), Nitrogen Dioxide, Nitrogen Oixdes, Sulfur Dioxide,

Fig. 4. Example of PM Footprint and reduction certification.

PM₁₀, PM_{2.5}의 미세먼지 및 미세먼지 형성 관련 2차 미세먼지 형성 가스상물질 물질들을 PM_{2.5} eqv.값으로 환산하여 전체 미세먼지 형성가능성량을 합산하여 나타낸 값”으로 제시하였다. 위 개념과 산정 방법을 활용하여 국내 육상(트럭 및 철도교통) 및 해상교통수단을 대상으로 전과정 목록분석(life cycle inventory)자료에서 관련 배출물질들을 활용하여 교통수단별 미세먼지 발자국을 산정하여 나타내었다. 연구결과 육상교통(트럭운송)의 경우가 다른 철도운송이나 해상교통보다 더 높은 미세먼지 발자국을 가지고 있었으며, 작은 크기의 트럭이 큰 트럭보다 더 큰 미세먼지 발자국 결과값을 가지는 것으로 나타났다. 철도수송의 결과에서는 디젤기관차 수송이 가장 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌으며, 다음으로는 전기+디젤기관차 수송 및 전기기관차 수송 순으로 미세먼지 발자국이 높은 것으로 나타났다. 해상운송의 경우 11개의 운송수단에 적용결과, 탱커 LNG_100 dwt 수송이 가장 높은 미세먼지 발자국을 나타냈다. 그 다음으로는 로로선 내항 1,200~20,000 dwt, 탱커 외항 500~20,000 dwt, 탱커 외항 10,000~300,000 dwt, 컨테이너선 외항 27,500 dwt 해상운송 순으로 높은 미세먼지 발자국 결과를 가졌다. 또한, 본 연구에서는 철도가 평균 80%, 육상 트럭수송은 평균 59%, 해상운송은 평균 61% 이상이 2차 미세먼지 형성 가스상물질들로 인해서 미세먼지 발자국 결과값에 크게 기여하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 향후 미세먼지 저감 정책 및 대책 수립 시에는 교통수단에서 직접 배출되는 미세먼지와 2차 미세먼지 형성 가스상물질에 대한 구분을 통해 보다 체계적인 대응이 이루어져야 할 것이다. 또한, 추후에는 미세먼지 및 2차 미세먼지 형성 가스상물질로 인한 인간 호흡기 영향 및 위해성 부분과 이로 인한 비용편익 모델 및 분석들이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 도출된 교통수단 미세먼지 발자국 결과값들은 향후 이동오염원의 미세먼지 저감 정책 및 대책 수립 시 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 미세먼지 발자국 인증제도의 정착을 통해 국내 미세먼지 발생 저감에 기여해야 할 것이다.

Acknowledgements

본 연구는 2019년 녹색기술센터 ‘해외 선진기관과의 기후기술협력 체계구축 기획연구’의 협동연구 및 2018년 중소기업 기술혁신 개발사업 혁신형기업 기술개발사업(S2684969)으로 수행되었습니다.

References

1. AirKorea, www.airkorea.or.kr(2019).
2. World Health Organization, Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide; report on a WHO working group, Bonn, Germany(2003).
3. IARC (International Agency for Research on Cancer), List of Classifications, 1-117(2016).
4. Ministry of Environment, When we know right away, we can see, What is the particulate matter?(2016).
5. Ministry of Environment, Development and Application of Comprehensive Air-Quality Index for Air Emission Assessment(2016).
6. S. Y. Gong, H. Bae, S. Hong, H. Park, A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea (I), Korea Environment Institute(2012).
7. S. Y. Gong, H. Bae, S. Hong, H. Park, A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea, Korea Environment Institute(2013).
8. S.-O. Baek, Y.-K. Heo, Y.-H. Park, Characterization of Concentrations of Fine Particulate Matter in the Atmosphere of Pohang Area, J. Korean Soc. Environ. Eng., 30(3), 302-313(2008).
9. Particulate Matter Center, <http://pmcenter.kist.re.kr/main/>, May (2019).
10. H. C. Kim, S. Kim, B.-U. Kim, C.-S. Jin, S. Hong, R. Park, S.-W. Son, C. Bae, M. A. Bae, C.-K. Song, A. Stein, Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Scientific Reports, 7, 4710(2017).
11. Ministry of Environment, Joint research project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1095660&menuId=286>, November(2019).
12. J. Kim, Assessment and estimation of particulate matter formation potential and respiratory effects from air emission matters in industrial sectors and cities/regions, J. Korean Soc. Environ. Eng., 39(4), 220-228(2017).
13. S.-W. Jung, G.-T. Seo, Estimation of the Local Human Health Burden Due to Inhalation of Fine Particulate Matter and Identification of Major Emission Sources Using A Life Cycle Impact Assessment Method, J. Korean Soc. Environ. Eng., 41(7), 361-371(2019).
14. I. H. Lee, J. S. Kim, S. Lee, S. D. Kim, Validity Analysis of the Fine Particle Emission Calculating by Cars, Appl. Chem. Eng., 25(2), 222-226(2014).
15. National Institute of Environmental Research, Emission

- Factor Data book, Air emission factor management committee(2015).
16. M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. D. Schryver, J. Struijs, R. Zelm, ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level First edition Report I: Characterisation, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment(2009).
 17. WHO, Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide; report on a WHO working group. World Health Organization, Bonn, Germany(2003).
 18. WHO, Health aspects of air pollution - answers to follow-up questions from CAFE, Report on a WHO working group meeting, World Health Organization, Bonn, Germany(2004).
 19. WHO. Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution, World Health Organization, Copenhagen, Denmark(2006).
 20. J. Lelieveld, J. S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, A. Pozzer, The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, *Nature*, 525, 361-371(2015).
 21. M. Lippmann, L.-C. Chen, T. Gordon, K. Ito, G. D. Thurston, National Particle Component Toxicity (NPACT) initiative: integrated epidemiologic and toxicologic studies of the health effects of particulate matter components, *Res. Rep. Health Eff. Inst.*, 177, 5-13(2013).
 22. J. T. Tuomisto, A. Wilson, J. S. Evans, M. Tainio, Uncertainty in mortality response to airborne fine particulate matter: Combining European air pollution experts, *Reliab Eng Syst Safe.*, 93(5), 732-744(2008).
 23. R. V. Dingenen, F. J. Dentener, F. Raes, M. C. Krol, L. Emberson, J. Cofala, The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation, *Atmospheric Environment*, 43(3), 604-618(2009).
 24. M. Krol, S. Houweling, B. Bregman, M. van den Broek, A. Segers, P. van Velthoven, W. Peters, F. Dentener, P. Bergamaschi, The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 417-432(2005).
 25. Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea National Cleaner Production Center, <https://www.kncpc.or.kr>, May(2019).
 26. Ministry of Environment, Korea Environmental Industry & Technology Institute, <http://www.epd.or.kr>, October(2019).
 27. M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. D. Schryver, J. Struijs, R. Zelm, ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level First edition Report I: Characterisation, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment(2009).
 28. Ecoinvent, www.ecoinvent.org, October(2019).
 29. U. S. Life Cycle Inventory Database, National Renewable Energy Laboratory, <https://www.lcacommons.gov/nrel/search>, November(2019).
 30. KORAIL, <http://info.korail.com/>, September(2019).

Authors

Junbeum Kim

CREIDD Research Center on Environmental Studies & Sustainability, Department of Humanities, Environment & Information Technology, University of Technology of Troyes, France, Ph.D., Professor, ORCID[®] 0000-0003-0665-7989

Seungjun Jeon

InfoShare Co., Ltd, Ulsan, South Korea, CEO, ORCID[®] 0000-0002-1192-8555

Jaeryoung Song

Green Technology Center, Seoul, South Korea, Senior Researcher, ORCID[®] 0000-0003-3885-8590

Gayoung Choi

Green Technology Center, Seoul, South Korea, Researcher, ORCID[®] 0000-0001-6979-0213