

국내 산업 및 시도별 대기오염물질 배출량자료를 이용한 미세먼지 형성 가능성 및 인체 호흡기 영향 평가추정

Assessment and Estimation of Particulate Matter Formation Potential and Respiratory Effects from Air Emission Matters in Industrial Sectors and Cities/Regions

김 준 범
Junbeum Kim

프랑스 트루아공대, 환경정보기술학과, 환경 및 지속가능성연구센터

CREIDD Research Center on Environmental Studies & Sustainability

Department of Humanities, Environment & Information Technology, University of Troyes, France

(Received January 24, 2017; Revised February 28, 2017; Accepted March 16, 2017)

Abstract : Since the fine particulate matters occurred from mainly combustion in industry and road transport effect to human respiratory health, the interest and importance are getting increased. In 2013, the World Health Organization (WHO) concluded that outdoor air pollution is carcinogenic to humans, with the particulate matter component (PM₁₀ and PM_{2.5}) of air pollution most closely associated with increased cancer incidence, especially cancer of the lung. Therefore, many researches have been studied in the quantification and data development of fine particulate matters. Currently, the Ministry of Environment and cities/regions are developing the fine particulate matter data and air emission information. Particularly just PM₁₀ and PM_{2.5} data is used in the fine particulate matters warning and alert. The data of NO_x, SO_x, NH₃, which have the particulate matter formation potential are not well considered. Also, the researches related with particulate matter formation potential and respiratory effects by industrial sectors and cities/regions are not conducted well. Therefore, the purpose of this study is to evaluate and calculate particulate matter formation potential and respiratory effects in 11 industrial sectors and cities using NO_x, SO_x, PM₁₀, NH₃ data (developed by Ministry of Environment and National Institute of Environmental Research) in 2001 and 2013. The results of this study will be provided the particulate matter formation potential and respiratory effects and will be used for future the fine particulate matter researches.

Key Words : Fine Particulate Matter, Particulate Matter Formation Potential, Respiratory Effects, Air Emission Information, Human Health

요약 : 많은 산업 및 도로이동오염원 등으로부터 발생하는 미세먼지는 인간건강과 호흡기에 큰 영향을 미치고 있으며 이에 대한 중요성이 점차 증가하고 있다. 세계보건기구(WHO)에서도 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5})를 석면 및 비소 등의 물질과 같은 등급인 1급 발암물질로 지정한 이후로 우리나라에서도 지속적인 관심과 연구를 진행해오고 있다. 현재 환경부와 각 지자체별로 미세먼지 및 대기오염정보를 구축하여 제공하고 있지만, 특히 미세먼지 주의보 및 경보발령에 있어서 미세먼지 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 자료만을 활용하고 있고 미세먼지형성에 영향을 주는 NO_x, SO_x, NH₃ 자료는 활용 및 고려를 하지 않고 있다. 또한 국내 산업별 및 지자체별로 세부적인 미세먼지형성 가능성(particulate matter formation potential) 및 발생하는 미세먼지로 인한 인체호흡기 영향평가(respiratory effects)와 관련된 연구는 많이 진행이 되고 있지 않다. 이에 본 연구의 목적은 국내 11개 산업별 및 시도별로 2001년과 2013년 환경부 및 국립환경과학원에서 제시하고 있는 NO_x, SO_x, PM₁₀, NH₃ 자료를 활용하여 미세먼지형성(particulate matter formation potential) 평가와 이로 인한 인체 호흡기 영향을 평가 및 산정하여 비교 제시하고자 하였다. 본 연구결과로는 산업별 및 시도별로 미세먼지형성과 인간건강에 영향을 제시하였으며, 향후 미세먼지 관련 연구에 중요하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 미세먼지, 미세먼지형성 가능성, 호흡기 영향, 대기오염정보, 인체건강

1. 서론

2013년부터 세계보건기구(world health organization, WHO)에서는 호흡기 및 피부로도 침투가 가능해 심장질환 등 인체에 심각한 피해를 끼칠 수 있는 미세먼지(PM₁₀) 및 초미세먼지(PM_{2.5})를 석면 및 비소 등의 물질과 같은 등급인 1급 발암물질로 지정한 이후로 우리나라에서도 지속적인 관심과 연구를 진행해오고 있다.^{1,2)} 미세먼지는 자동차 매연과 산업활동으로 인해서 발생하는 유독물질 및 중금속 등이 대기중에서 광화학 반응을 일으켜 만들어진다.³⁾ 이렇게 만

들어진 미세먼지는 기도를 자극하여 각종 호흡기 질환을 일으키는 직접적인 원인이며, 이외에도 피부질환과 안구질환 등이 발병한다. 특히 초미세먼지는 미세먼지보다 훨씬 작기 때문에 기도에서 걸러지지 못하고 대부분 폐의 말단부 위인 폐포까지 침투해 심장질환과 호흡기 질병 등을 일으키는 것으로 알려져 있다.³⁾ 미세먼지 구성성분은 그 미세먼지가 발생된 지역이나 계절, 기상조건 등에 따라 달라질 수 있지만, 대부분 대기오염물질이 공기 중에서 반응하여 형성된 물질(예를 들면, 황산염, 질산염 등)과 석탄 및 석유 등 화석연료를 태우는 과정에서 발생하는 탄소류와 검댕, 지표

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

면 흙먼지 등에서 생기는 광물 등을 구성하고 있다.⁴⁾ 미세먼지는 산업장의 공장굴뚝, 화력발전소, 자동차 배기가스 등의 발생원으로부터 고체 상태로 배출되는 1차적 발생먼지와 황산염 및 질산염과 같이 발생원으로부터 가스 상태로 나온 물질이 공기 중의 다른 물질과 화학적인 반응을 일으켜 미세먼지로 되는 2차적 발생으로 나누어진다. 또한, 인위적 발생원에는 산업시설 및 자동차 등을 들 수 있으며, 자연적 발생원은 화재, 황사 및 화산폭발 등을 들 수 있다.⁵⁾

일반 시민들에게 미세먼지 및 대기오염문제를 설명 할때 오염물질의 농도만으로 표현하여 나타내는 것에 대한 문제점을 해결하기 위해서 대기질을 종합적으로 평가하기 위한 지수(index)의 필요성이 요구되어, 미국에서는 PSI (pollutant standard index)와 AQI (air quality index)를 사용하고 있으며, 우리나라 환경부는 국내 실정에 맞도록 미국의 AQI 지수(이산화질소를 포함하여 6개의 대기오염물질에 대한 대기지수를 설정 및 표현)를 참고하여 만든 AEI (air environmental index)⁶⁾를 개발하여 사용해오고 있었지만 활용이 미흡한 상태였다. 이에 우리나라 정부에서는 2015년 시행된 대기환경기준 신설과 함께 2차 수도권 대기환경 관리 기본계획을 통해 계속적으로 초미세먼지 관리를 추진하고 있으며, 환경부에서는 통합대기환경지수(CAI, Comprehensive Air-Quality Index)는 기존의 AEI (Air Environmental Index) 지수가 국민들이 느끼는 체감 오염도를 제대로 반영하지 못한다는 문제가 제기됨에 따라, 이에 대한 개선책으로 인체에 대한 유해성, 변별력, 체감오염도를 동시에 고려하도록 개발된 대기오염도 표현방식으로 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 실시간으로 시민들에게 정보를 제공하고 있다.⁷⁾ 지금까지 관련된 몇몇 국내 연구들을 살펴보면 다음과 같다. 공 등⁸⁾은 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 평가 및 관리정책연구(I)에서 PM_{2.5}의 대기환경기준 신설에 따른 건강영향 및 관리정책 마련을 목적으로 PM_{2.5}의 농도분포 및 물리화학적 특성분석, PM_{2.5}의 건강영향 평가 및 건강권의 산정, 그리고 배출량 추정 및 관리정책 로드맵을 제시하였다. 또한, 공 등⁹⁾은 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 평가 및 관리정책연구(II)에서 미세먼지에 의한 호흡기계 질병 유발영향을 분석하고, 지역별로 배출량 기여도가 배출원별로 차이를 감안하여 지역별로 우선되는 필요 관리수단 및 정책방안들을 제안하였다. 김 등¹⁰⁾은 미세먼지 배출원 분석 및 배출자료 개선을 위한 기획연구에서는 국내 대기오염 배출자료의 문제점을 지적하고 CO와 PM₁₀의 배출량이 과소 산정되어 있어 PM₁₀의 배출 부분인 불법 소각, 농업폐기물 소각, 화재, 산불 등에 의한 연소와 포장도로, 비포장 도로 차량 운행에 의한 비산먼지(fugitive dust), 건설활동, 농업활동, 나대지 등에서 발생하는 비산먼지의 발생량을 재산정하는 작업을 수행하여 배출자료의 신뢰도를 향상시키는 연구를 수행하였다. 이외에도 미세먼지의 오염특성과 관련된 연구들을 수행하였다.¹¹⁻¹⁵⁾

이와 같이 수행하여 진행된 국내 연구들과 정부에서 많은 정보를 제공함에도 불구하고 국내 산업별 및 지자체별로

세부적인 미세먼지형성 가능성(particulate matter formation potential) 및 대기오염물질로 인해서 발생된 미세먼지로 인한 인체호흡기 영향평가(respiratory effects)와 관련된 연구는 많이 진행되고 있지 않다. 이에 본 연구에서는 국내 산업별(11개의 산업 대분류) 및 시도별로 2001년부터 2013년까지 환경부 및 국립환경과학원에서 제시하고 있는 NOx, SOx, PM₁₀, NH₃ 자료를 활용하여 미세먼지형성평가와 이로 인한 인체건강 및 호흡기 영향을 평가 및 추정 산정하여 비교 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 연구방법

본 연구를 위해서 환경부와 국립환경과학원에서 제시하고 있는 국가 대기오염물질 배출량 서비스(national air pollution emission service) 자료를 활용하였다.¹⁶⁾ 국가 대기오염물질 배출량 서비스 자료는 대기배출물질별, 산업부문별(에너지 산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소 등 총 11개 산업 대분류, Table 1), 그리고 17개 시도에서 8가지 대기오염물질(CO, NOx, SOx, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃)의 배출량 자료를 연도별로 보여주고 있다. 미세먼지형성 가능성 및 발생된 미세먼지로 인한 인체호흡기 영향을 평가 위해서는 앞서 언급한 대기배출물질에서 미세먼지형성 가능성에 영향을 주는 물질인 NOx, SOx, PM₁₀, PM_{2.5}, NH₃만을 고려하였으며,¹⁷⁾ 여기서 PM_{2.5}는 2011년부터 작성하고 있는 자료이므로 2001년과 2013년도의 일관성 있는 평가결과를 보여주기 위해서 산정시 제외하였다.

미세먼지로 인한 인체호흡기 영향 평가를 위해서 전과정평가(life cycle assessment)과정에서 수행할 수 있는 전과정영향평가(life cycle impact assessment) 방법론 중에서 ReCiPe¹⁷⁾ 방법론을 사용하였다. 전과정평가는 주로 제품이나 서비스 및 시스템을 대상으로 투입되는 물질, 용수, 에너지 등의 투입물질과 배출되는 대기 및 수질 오염물질, 폐기물 등의 배출물질목록을 바탕으로 환경영향을 산정 및 평가하는 방법론을 지금까지 널리 사용하고 있다.^{18,19)} 전과정평가의 세부 단계에서는 구축된 전과정목록분석(life cycle inventory) (본 연구에서는 NOx, SOx, PM₁₀, NH₃ 물질을 대상으로 함)을 가지고 Eco-indicator 99,²⁰⁾ Korean Eco-Indicator,²¹⁾ TRACI,²²⁾ ReCiPe 등²³⁾의 여러 영향평가 방법론을 이용하여 영향평가 값들이 산정된다. ReCiPe 방법에는 지구온난화, 부영양화, 산성화, 미세먼지형성 가능성 등의 영향범주를 포함하여 14개의 영향범주를 포함하고 있다. 식 (1)과 (2)에 나타난 바와 같이 중간영향(midpoint impact)의 경우는 14개의 영향범주에서 미세먼지형성 가능성 영향의 영향정량화 및 특성화 계수를 활용하여 NOx, SOx, PM₁₀, NH₃ 오염물질들의 배출량에 특성화 계수를 곱하여 미세먼지형성 가능성에 대한 잠재적 기여도를 kg 또는 ton PM₁₀ eq.로 나타낼 수 있으며, 최종영향(endpoint)의 경우에도 중간영향의 산정법과 비슷하게 NOx, SOx, PM₁₀, NH₃ 오염물질들의 배출량에 각각의 오염물질들의 DALY (disability adjusted life years, 장애

Table 1. Industry sectors and source classification categories

Industrial sector source classification categories	Source classification categories
Combustion in energy industries	Public power; District heating plants; Petroleum refining plants; Solid fuel transformation plants; Commercial power
Non-industrial combustion plants	Commercial and institutional plants; Residential plants; Plants in agriculture, forestry and aquaculture
Combustion in manufacturing industries	Combustion in boilers, gas turbines and stationary engines; Process furnace; Other
Production processes	Processes in petroleum industries; Processes in iron and steel industries and collieries; Processes in non-ferrous metal industries; Processes in inorganic chemical industries; Processes in organic chemical industries; Processes in wood, paper and pulp industries; Processes in food and drink industries; Ammonia consumption; Processes in other industries
Storage and distribution of fuels	Liquid fuel distribution
Solvent use	Paint application; Degreasing and electronics; Dry cleaning; Other use of solvents and related activities
Road transport	Passenger cars; Taxis; Light-duty vehicles; Buses; Trucks; Special purpose vehicles (SPV); Recreational vehicles (RV); Motorcycles
Other mobile sources and machinery	Military; Railways; Ships; Aircrafts; Agricultural machinery; Construction machinery and equipment
Waste treatment and disposal	Waste incineration, Solid waste proposal on land
Agriculture	Cultures with fertilizers; Enteric fermentation
Other sources & sinks	Others

Source: Statistic Korea, 2016²⁴⁾

보정손실년수; 질병으로 인한 사망과 장애발생을 통합하여 질병에 대한 부담을 측정할 수 있도록 WHO에서 개발된 개념²⁵⁾) 지수를 곱하여 인체건강에 미친 영향을 DALY년도로 나타낼 수 있다.

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

$$I_m(\text{endpoint impact}) = \sum_i DALY_{mi} \times mi \quad (2)$$

where mi is the magnitude of intervention I (e.g., the mass of NOx released to air), CF_{mi} the characterization factor that connects intervention i with midpoint impact category m (here, particulate matter formation), $DALY_{mi}$ the DALY factor that connects intervention i with endpoint impact category m (here, particulate matter formation) and I_m the indicator result for midpoint impact category m .^{17,23,26)}

다음의 Table 2에는 미세먼지형성물질 각각의 특성화계수 및 DALY계수를 나타내고 있다. 예를 들면, 1 kg PM₁₀물질

Table 2. Emissions characterization factor and DALY factor in particulate matter formation

Substance name	Unit	Midpoint (kg PM ₁₀ eq.)	Endpoint DALY* (year)
NOx	kg	0,22	5,72E-05
SOx	kg	0,2	5,20E-05
PM ₁₀	kg	1	2,60E-04
NH ₃	kg	0,32	8,32E-05

Date from ReCiPe²³⁾

* The DALY of particulate matter formation (kg PM₁₀ eq.) is 2,60E-04. For example, 5,72E-05 (DALY of NOx) is calculated like this; the DALY of particulate matter formation (kg PM₁₀ eq.) 2,60E-04 x 0,22 = 5,72E-05.

은 1 kg PM₁₀ eq.값을 가지며, 1 kg NOx는 0.22 kg PM₁₀형성에 영향을 준다고 할 수 있다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 산업부문별 미세먼지형성 가능성 및 인체건강

산업부문별 미세먼지형성 가능성 및 인간건강에 대한 평가부분은 2001년과 2013년 자료들을 비교평가하였다. 1999년과 2000년도 미세먼지형성 관련자료도 구축하여 제시하고 있지만 산업 대분류 항목이 상이함으로 인해서 2013년 자료와 통일성을 가지기 위해 2001년부터 사용하고 있는 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소 등 총 11개 산업 대분류 자료를 활용하여 평가 및 비교하였다. 첫번째로 2001년도 결과를 살펴보면 우리나라 전체 산업에서는 507,164 ton PM₁₀ eq.의 미세먼지형성에 기여를 한 것으로 산정되었으며, 이는 44,090 DALY year의 장애보정손실년수에 영향을 준 것으로 나타났다. 이 값을 2001년 우리나라 전체 인구 48,022천명으로 나누어 산정하면, 0.0009 DALY year의 장애보정손실년수 값을 가지며, 이를 다시 시간으로 환산하면 8.04시간으로, 2001년도 전체산업에서 배출된 대기 오염물질로 인한 미세먼지형성으로 한명당 8.04시간의 수명손실에 영향을 주었다는 것을 의미한다. 좀더 세부적인 산업들을 살펴보면, 도로이동오염원에서 127,749 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 24%로 가장 많은 미세먼지형성에 기여를 하였으며, 이로 인한 인간건강에 대한 부분은 우리나라 전체 인구수에 대해서 12,820 DALY year의 값의 장애보정손실년수에 영향을 주었다. 다음으로는 에너지산업 연소부분으로 120,744 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 23%를 차지하며 미세먼지형성에 영향을 주었으며, 8,184 DALY year의 값의 장애보정손실년수를 가진 것으로 산정되었다. 제조업

연소부분이 66,517 ton PM₁₀ eq. (12%)와 7,085 DALY year, 농업부분이 55,340 ton PM₁₀ eq. (10%)와 4,604 DALY year, 비도로이동오염원부분이 51,906 ton PM₁₀ eq.(약 10%)와 4,477 DALY year 등의 순으로 영향을 준 것으로 나타났다.

2013년도 결과로는 우리나라 전체 산업에서는 536,181 ton PM₁₀ eq.의 미세먼지형성에 기여를 한 것으로 산정되었으며, 이는 57,339 DALY year의 장애보정손실년수에 영향을 준 것으로 나타났다. 앞서 산정한 바와 같이 이 값을 2013년 우리나라 전체 인구수 51,141천명으로 나누어 산정하면, 0.0011 DALY year의 장애보정손실년수 값을 가지며, 이를 다시 시간으로 환산하면 9.82시간으로, 2013년도 전체산업에서 배출되어진 대기오염물질로 인한 미세먼지형성으로 한 명당 9.82시간의 수명단축에 영향을 준 것을 의미한다. 산업별로 세부적으로 살펴보면, 2001년과는 달리 제조업 연소부분이 139,603 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 26%로 가장 많이 미세먼지형성에 기여한 것으로 나타났으며, 이로 인해서 24,322 DALY year의 장애보정손실년수에 영향을 준 것으로 나타났다. 이는 또한, 2001년의 결과값보다 약 73,088 ton PM₁₀ eq.정도로 2배 이상 증가한 것으로 나타났다. 제조업 연소부분에 이어서 2001년에 가장 많은 영향을 주었던 도로이동 오염원에서 89,148 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 17%를 차지하며 두 번째로 미세먼지형성에 영향을 주었으며, 7,635 DALY year의 값의 장애보정손실년수에 영향을 준 것으로 산정되어졌다. 2001년 127,749 ton PM₁₀ eq.에서 2013년 89,148 ton PM₁₀ eq.으로 약 38,601 ton PM₁₀ eq.으로 상당히 많은 양의 미세먼지형성 양이 줄어들었으며, 이는 국내 자동차 등록은 증가되었지만 도로이동 수단의 기술개발(예를 들면 자동차의 매연배출 저감기술 향상)로 인해서 많은 양의 오염물질이 줄어들었기 때문이라고 사료되어

진다. 다음으로 영향을 준 산업부분은 비도로 이동오염원 부분으로 82,387 ton PM₁₀ eq.로 전체 발생의 15%를 차지하며 미세먼지형성에 영향을 주었으며, 7,723 DALY year의 값의 장애보정손실년수를 가진 것으로 산정되어졌다. 농업 부분이 73,957 ton PM₁₀ eq. (14%)와 6,153 DALY year, 에너지산업연소부분이 63,584 ton PM₁₀ eq.(약 12%)와 4,467 DALY year 등의 순으로 영향을 준 것으로 나타났다. 세부 결과값들을 Fig. 1과, Table 3에 상세히 나타내었다.

Table 3. Air emissions from industrial sectors in 2001 and 2013

2001	NOx (ton)	SOx (ton)	PM ₁₀ (ton)	NH ₃ (ton)	ton PM ₁₀ eq.	DALY (year)
Combustion in energy industries	334,425	197,579	7,263	1,224	120,744	8,184
Non-industrial combustion plants	94,791	56,529	2,800	2,091	35,629	2,564
Combustion in manufacturing industries	124,545	110,171	16,687	1,236	66,517	7,085
Production processes	50,029	73,449	6,129	31,245	41,824	3,819
Storage and distribution of fuels	-	-	-	-	-	-
Solvent use	-	-	-	-	-	-
Road transport	437,341	7,209	26,795	10,304	127,749	12,820
Other mobile sources and machinery	162,900	41,537	7,630	408	51,906	4,477
Waste treatment and disposal	14,990	1,259	63	-	3,613	218
Agriculture	-	-	-	172,939	55,340	4,604
Other sources & sinks	-	-	-	12,006	3,842	320
Total	1,219,020	487,734	67,368	231,453	507,164	44,090

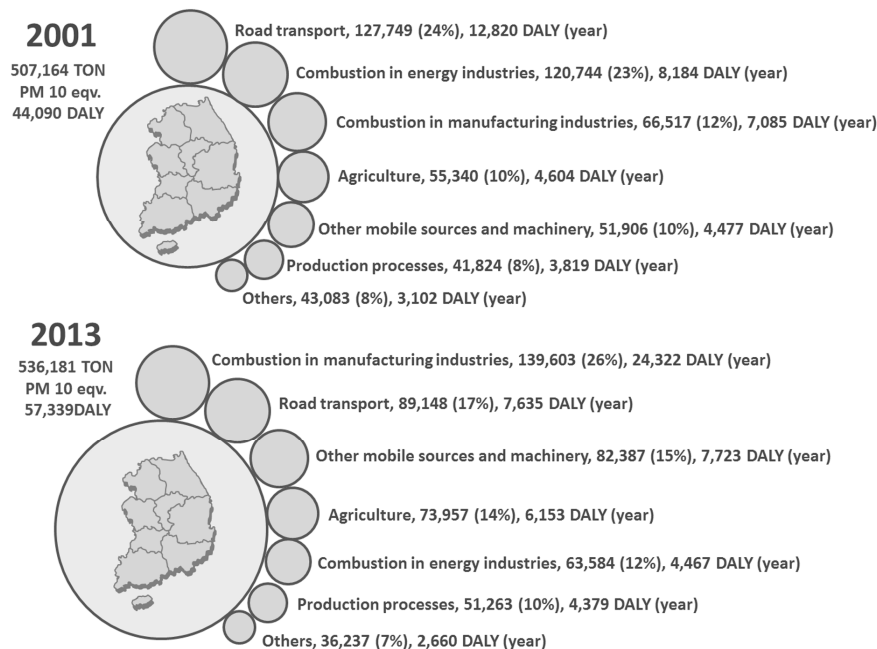


Fig. 1. Comparison of emissions from industrial sectors in 2001 and 2013.

Table 3. Continued

2013	NOx (ton)	SOx (ton)	PM ₁₀ (ton)	NH ₃ (ton)	ton PM ₁₀ eq.	DALY (year)
Combustion in energy industries	177,219	97,565	4,524	1,745	63,584	4,467
Non-industrial combustion plants	88,769	31,101	1,955	1,392	28,150	1,986
Combustion in manufacturing industries	178,034	95,836	81,014	800	139,605	24,322
Production processes	55,151	108,333	6,249	35,051	51,265	4,379
Storage and distribution of fuels	-	-	-	-	-	-
Solvent use	-	-	-	-	-	-
Road transport	335,721	189	12,103	9,839	89,148	7,635
Other mobile sources and machinery	246,027	65,119	15,167	220	82,387	7,723
Waste treatment and disposal	9,529	6,517	243	23	3,650	251
Agriculture	-	-	-	231,117	73,957	6,153
Other sources & sinks	165	-	310	12,785	4,438	423
Total	1,090,614	404,660	121,563	292,973	536,181	57,339

3.2. 국내 지자체별 미세먼지형성 가능성 및 인체건강

국내 지자체별 미세먼지형성 가능성 및 인체건강 부분의 평가결과를 Fig. 2와 Table 4에 나타내었다. 2001년 결과를 살펴보면, 경기도가 69,312 ton PM₁₀ eq. (14%)으로 가장 많이 국내 전체의 미세먼지형성 가능성에 영향을 준 지자체였으며, 다음으로는 경남이 64,010 ton PM₁₀ eq. (13%), 충남 62,606 ton PM₁₀ eq. (12%), 전남 45,924 ton PM₁₀ eq. (9%), 경북 44,017 ton PM₁₀ eq. (9%), 울산 43,604 ton PM₁₀ eq. (9%), 서울 31,296 ton PM₁₀ eq. (6%), 강원 28,520 ton PM₁₀ eq. (6%), 충북 24,014 ton PM₁₀ eq. (5%) 등의 순으로 미세먼지형성 가능성에 영향을 준 지자체로 선정 및 평가되었다. 각 지자체별로 선정되어진 미세먼지형성 가능성 결과를 바탕으로 DALY year의 장애보정손실년수를 산정하였으며, 또한 이 결과들을 지자체별 인구수로 나누어 각 인구

당 DALY year 장애보정손실년수도 산정하였다. 각 인구당 DALY year 장애보정손실년수 부분에서의 결과로는 울산이 가장 높은 값인 전체 4,682 DALY year의 장애보정 손실년수의 결과값을 나타냈으며, 인구당 0.0044 DALY year (38.84시간)으로 산정되었는데, 2001년도에는 울산에서는 인구당 38.84시간의 수명손실에 영향을 준 것으로 나타났다. 다음으로는 충남이 4,684 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0024 DALY year (21.39시간)의 영향을 주었다. 전남이 3,879 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0018 DALY year (16.19시간), 강원이 2,709 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0017 DALY year (15.29시간), 충북이 2,463 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0016 DALY year (14.41시간), 경북 2,463 DALY year의 장애보정 손실년수, 인구당 0.0016 DALY year (13.01시간) 등의 순으로 영향을 준 것으로 나타났다. 서울은 2,745 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0003 DALY year (2.34시간)으로 전체 시도 지자체 중에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

2013년 평가결과를 살펴보면 2001년도에 세번째로 가장 많은 미세먼지형성 가능성에 영향을 주었던 충남이 전체의 17%로 93,584 ton PM₁₀ eq.로 가장 많이 영향을 준 것으로 나타났다. 이는 Fig. 2에서 충남 부분 그래프에서 볼 수 있듯이, 2012년부터 제조업, 에너지산업 및 도로이동 오염원 부문에서의 대기오염물질 배출의 증가로 인한 영향으로 사료된다. 그 다음으로는 경북 74,971 ton PM₁₀ eq. (14%), 전남 70,007 ton PM₁₀ eq. (13%), 경기 62,734 ton PM₁₀ eq. (12%), 경남 45,996 ton PM₁₀ eq. (9%), 울산 33,285 ton PM₁₀ eq. (6%), 강원 28,117 ton PM₁₀ eq. (5%) 등의 순으로 영향을 준 것으로 산정되었다. 이에 반해서 세종 3,036 ton PM₁₀ eq. (1%), 광주 3,772 ton PM₁₀ eq. (1%), 대전 4,055 ton PM₁₀ eq. (1%), 제주 6,341 ton PM₁₀ eq. (1%) 등의 순으로 영향을 적게 미친것으로 산정되었다. 좀 더 세부적인 자료 및 평

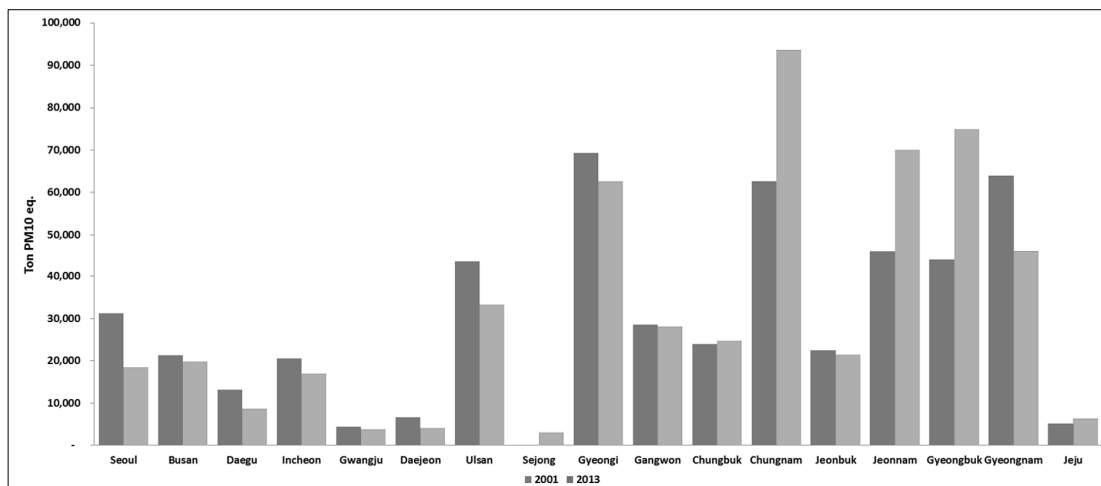


Fig. 2. Comparison of Ton PM₁₀ eq. value from 17 cities/regions in 2001 and 2013.

Table 4. Ton PM₁₀ eq. value in each city from 2001 to 2013

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Seoul	31,296	32,016	32,316	30,249	31,248	25,904	33,752	20,463	19,088	19,935	17,956	17,807	18,500
Busan	21,254	23,433	22,793	24,479	23,537	27,378	24,787	20,778	22,850	22,330	21,972	21,611	19,821
Daegu	13,180	12,395	12,855	13,196	13,570	13,129	12,175	8,846	8,135	8,116	7,690	8,343	8,665
Incheon	20,632	20,241	22,341	22,048	24,183	25,031	22,427	16,641	17,336	19,440	17,705	17,033	17,082
Gwangju	4,495	5,387	5,966	5,326	4,706	4,847	4,777	3,444	3,244	3,649	3,421	3,823	3,772
Daejeon	6,602	6,801	7,469	6,650	6,293	6,143	6,343	5,410	4,599	4,445	4,421	3,922	4,055
Ulsan	43,604	40,571	39,832	41,051	43,823	41,733	42,018	35,618	35,689	36,992	32,048	33,128	33,285
Sejong	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,026	3,036
Gyeonggi	69,312	71,392	74,722	72,342	70,614	68,762	76,382	63,483	62,012	61,986	55,858	60,564	62,734
Gangwon	28,520	28,495	29,988	27,426	26,697	26,501	36,258	48,843	64,985	69,644	81,598	28,716	28,177
Chungbuk	24,014	23,485	23,107	21,542	21,661	21,867	27,191	27,387	25,923	26,699	25,407	25,284	24,733
Chungnam	62,606	65,606	73,658	79,151	73,887	71,492	51,281	53,347	52,514	57,102	59,539	93,873	93,584
Jeonbuk	22,571	20,980	23,761	23,812	21,959	22,352	23,492	20,033	20,843	24,805	23,798	22,009	21,424
Jeonnam	45,924	50,022	47,805	50,951	50,966	51,373	74,139	81,821	67,416	74,476	83,461	71,325	70,007
Gyeongbuk	44,017	39,501	41,168	38,067	40,034	41,182	57,452	58,754	48,934	54,564	55,277	75,156	74,971
Gyeongnam	64,010	58,613	71,804	71,237	57,402	57,136	40,619	39,210	34,449	33,343	38,468	46,507	45,996
Jeju	5,129	5,504	5,572	5,350	5,023	5,183	5,687	5,268	5,439	5,821	6,646	6,036	6,341

Table 5. DALY value (year) in each city from 2001 to 2013

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Seoul	2,745	2,808	2,836	2,666	2,698	2,214	2,805	1,633	1,523	1,567	1,415	1,406	1,444
Busan	1,932	2,099	1,911	2,005	1,993	2,257	2,020	1,582	1,957	1,888	1,879	1,858	1,736
Daegu	1,232	1,141	1,182	1,206	1,263	1,217	1,130	802	747	734	704	766	775
Incheon	1,715	1,704	1,911	1,833	1,976	1,978	1,823	1,340	1,435	1,606	1,496	1,418	1,419
Gwangju	406	487	520	484	422	430	425	300	276	308	293	328	318
Daejeon	571	591	667	602	551	527	544	452	386	372	379	332	338
Ulsan	4,682	4,179	4,134	4,222	4,668	4,265	4,467	3,670	3,418	3,620	2,522	2,669	2,693
Sejong	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	187	268
Gyeonggi	5,999	6,167	6,471	6,325	6,139	5,981	6,496	5,353	5,273	5,204	4,677	5,052	5,261
Gangwon	2,709	2,598	2,794	2,389	2,613	2,487	4,082	6,889	10,452	11,466	14,051	2,503	2,396
Chungbuk	2,463	2,342	2,273	2,000	2,132	2,141	2,702	2,910	2,603	2,683	2,580	2,310	2,189
Chungnam	4,684	4,812	5,343	5,656	5,549	5,449	4,015	4,071	4,071	4,493	4,815	11,947	11,928
Jeonbuk	1,939	1,779	2,043	2,066	1,927	1,965	1,985	1,679	1,769	2,460	2,318	1,872	1,808
Jeonnam	3,879	4,331	4,057	4,314	4,304	4,298	9,640	11,554	8,374	9,404	11,038	8,108	8,427
Gyeongbuk	4,137	3,658	3,811	3,484	3,635	3,729	6,953	7,591	5,580	6,572	7,091	11,196	11,227
Gyeongnam	4,562	4,261	5,122	5,019	4,495	4,462	3,312	3,122	2,858	2,757	3,249	4,693	4,586
Jeju	434	458	463	445	414	410	472	432	453	483	560	504	528

가결과를 Fig. 2와 Table 4에 나타내었다. 2013년도 각 지자체별로 산정되어진 미세먼지형성 가능성 결과를 바탕으로 DALY year 장애보정손실년수를 산정하였으며, 또한 이 결과들을 지자체별 인구수로 나누어 각 인구당 DALY year 장애보정손실년수도 산정하였다. 각 인구당 DALY year 장애보정손실년수 부분에서의 결과로는 충남이 전체 11,928 DALY year 장애보정 손실년수로 가장 높은 결과값을 나타냈으며, 인구당 0.0058 DALY year (51.02시간)으로 산정되었는데, 2013년도에는 충남에서는 인구당 51.02시간의 인

간수명에 영향을 주었다는 의미로 해석되어질 수 있다. 다음으로는 전남이 8,427 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0044 DALY year (38.71시간)의 영향을 주었다. 경북이 11,217 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0042 DALY year (36.44시간), 울산이 2,693 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0023 DALY year (20.41시간), 세종이 268 DALY year의 장애보정 손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0022

Table 6. DALY value (hours) per person in each city from 2001 to 2013

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Seoul	2,34	2,41	2,44	2,30	2,32	1,91	2,41	1,40	1,31	1,33	1,21	1,21	1,25
Busan	4,49	4,93	4,53	4,79	4,80	5,47	4,93	3,89	4,84	4,64	4,64	4,60	4,31
Daegu	4,27	3,96	4,09	4,18	4,41	4,27	3,97	2,82	2,63	2,56	2,46	2,68	2,71
Incheon	5,86	5,79	6,51	6,23	6,66	6,60	5,99	4,36	4,64	5,10	4,68	4,37	4,32
Gwangju	2,57	3,05	3,27	3,03	2,64	2,68	2,63	1,84	1,69	1,86	1,75	1,96	1,89
Daejeon	3,57	3,64	4,08	3,65	3,32	3,15	3,23	2,67	2,28	2,17	2,19	1,91	1,93
Ulsan	38,84	34,38	33,75	34,21	37,59	34,21	35,57	28,91	26,88	28,16	19,45	20,39	20,41
Sejong	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,53	19,26
Gyeonggi	5,51	5,44	5,55	5,30	5,03	4,80	5,12	4,15	4,03	3,87	3,43	3,66	3,77
Gangwon	15,29	14,79	16,03	13,76	15,13	14,48	23,78	39,99	60,55	65,65	80,14	14,25	13,61
Chungbuk	14,41	13,74	13,36	11,77	12,54	12,55	15,71	16,77	14,93	15,17	14,46	12,92	12,19
Chungnam	21,39	22,09	24,47	25,37	24,76	24,18	17,62	17,66	17,51	18,97	20,07	51,58	51,02
Jeonbuk	8,47	7,97	9,16	9,49	8,95	9,21	9,34	7,92	8,36	11,53	10,84	8,76	8,46
Jeonnam	16,19	18,47	17,61	19,03	19,17	19,38	43,76	52,74	38,35	42,95	50,52	37,19	38,71
Gyeongbuk	13,01	11,62	12,27	11,32	11,85	12,15	22,72	24,87	18,31	21,40	23,02	36,35	36,44
Gyeongnam	12,86	11,95	14,30	13,98	12,46	12,32	9,08	8,48	7,70	7,34	8,60	12,39	12,05
Jeju	6,95	7,29	7,35	7,02	6,50	6,43	7,39	6,75	7,06	7,40	8,52	7,56	7,80

DALY year (19.26시간), 강원 2,396 DALY year의 장애보정 손실년수, 인구당 0.0016 (13.61시간) 등의 순으로 영향을 준 것으로 나타났다. 서울은 1,444 DALY year의 장애보정

손실년수를 가진 것으로 산정되었으며, 인구당 0.0001 DALY year (1.25시간)으로 2013년에도 전체 시도 지자체 중에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

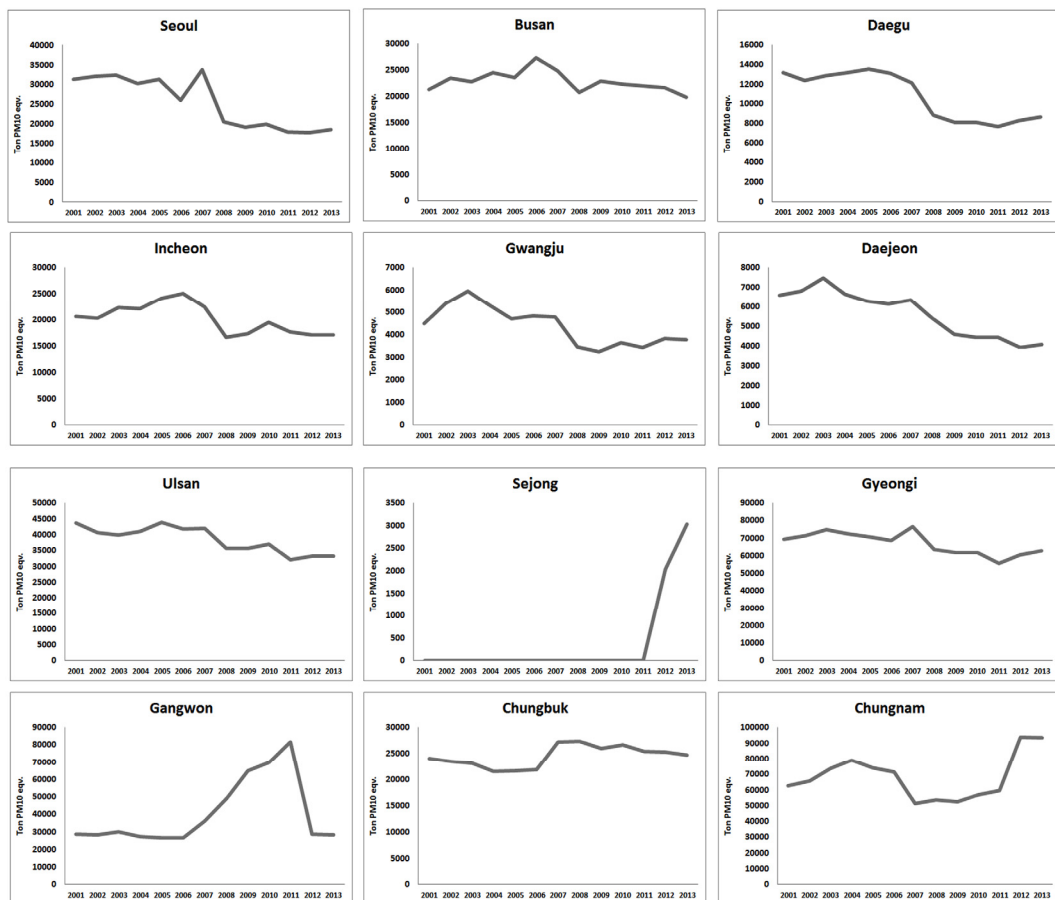


Fig. 3. Ton PM₁₀ eq. value changes in 17 cities/regions from 2001 to 2013.

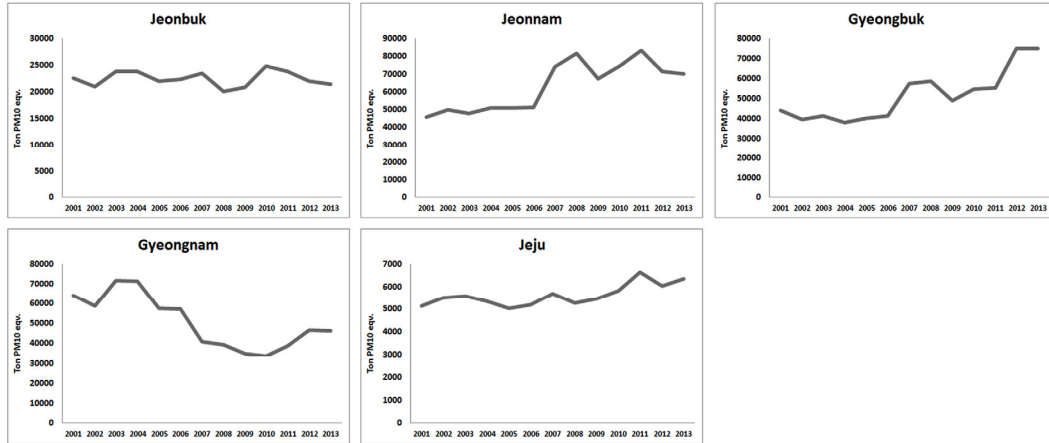


Fig. 3. Continued.

추가적으로 Fig. 3에는 2001년부터 2013년까지 각 지자체별 ton PM₁₀ eq.의 변화추이를 정리하여 나타내었다. 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전 및 울산 등의 대부분의 도시에서는 ton PM₁₀ eq. 값이 점차적으로 낮아졌음을 알 수 있으며, 충남, 전남, 경북 등에서는 계속적으로 대기오염물질 발생으로 인한 ton PM₁₀ eq. 값이 점차적으로 증가된 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 11개 산업별 그리고 국내 시도 지자체별로 2001년과 2013년 국내에서 발생된 NO_x, SO_x, PM₁₀, NH₃ 배출량 자료를 활용하여 미세먼지형성 가능성 평가와 이로 인한 인체 호흡기 영향(DALY year)을 추정 평가하여 비교 제시하였다. 본 논문에서 산정된 DALY year 결과값은 전체 미세먼지형성 가능성(ton PM₁₀ eq.) 값을 전체 인구수로 나눈 값이므로, 노약자나 연소자에게는 더 큰 영향을 줄 수 있으며, 추후에는 나이별로 구분하여 더 세부적으로 산정 및 평가해야 할 것으로 사료된다. 본 연구는 각 지자체, 산업 배출시설 및 도로이동오염원 등에서 에너지 연소 등의 활동에 대한 배출계수, 활동도, 산정식의 산정방법을 활용하여 구축된 환경부와 국립환경과학원 국가 대기오염물질배출량 자료를 바탕으로 산출한 결과이므로, 중국 등 국외에서 날라오는 미세먼지 등은 고려하지 않다고 할 수 있기 때문에 실시간 대기정보 모니터링자료와 관련하여 좀 더 세부적으로 평가할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 연간 대기오염물질 총 배출량값을 사용하여 산정하였지만 이 결과값들은 세부적으로 월별, 계절별, 기후조건에 따라 영향이 달라진다는 것을 고려하여야 할 것이다. 현재 사용하고 있는 미세먼지예보는 기상조건 등을 고려하여 해당지역의 대기자동 측정소에서 PM₁₀만을 고려하여 시간당 평균농도가 150 µg/m³ 이상 2시간 이상 지속인 때 주의보가 내려지며, 기상조건 등을 고려하여 해당지역의 대기자동측정소 PM₁₀

시간당 평균농도가 300 µg/m³ 이상 2시간 이상 지속인 때 경보가 발령된다(서울특별시 대기환경정보, http://cleanair.seoul.go.kr/safety_guide.htm?method=dust).²⁷⁾ 본 연구결과에서 보여주었듯이 미세먼지 주의보 및 경보발령시 미세먼지형성에 기여하는 대기오염 물질인 NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, NH₃ 배출량 자료를 고려하여 미세먼지 경보 및 주의보발령에 활용해야 할 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서는 연도별 비교를 위해서 PM_{2.5}자료를 활용하지 못하여 결과를 산정제시함에 있어서 예측치의 한계가 있다고 할 수 있다. 향후에는 이 자료부분도 추가하여 산정되어 비교평가 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 각 산업 및 각 지자체에서의 결과를 바탕으로 더 세부적인 분석이 필요하겠지만 이러한 부분은 환경부에서 구축된 자료와 분석 보고서²⁷⁾ 자세히 나타나 있기 때문에 본 논문에서는 더 자세하게 설명되어 있지 않다. 미세먼지 형성가능성 및 미세먼지 형성가능성 오염물로 인한 인간영향을 줄이기 위해서는 본 연구에서 제시하고 있는 세부적인 평가를 통해서 주요배출산업 및 지역에서의 미세먼지 저감을 위한 노력들이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

KSEE

References

1. IARC (International Agency for Research on Cancer), List of Classifications, Volumes 1~117, http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php(2016).
2. Ministry of Environment, Development and application of air environment index for integrated air emission assessment (2016).
3. US EPA, Particulate Matter (PM) Basics, [https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM\(2016\)](https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM(2016)).
4. Ministry of Environment, Microdust, <http://www.me.go.kr/issue/finedust2/>(2016).
5. World Health Organization, Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide; report on

- a WHO working group. Bonn, Germany, 13-15 January (2003).
6. Ministry of Environment, What is microdust?(2016).
 7. Air Korea, www.airkorea.or.kr(2016).
 8. Gong, S., Bae, H., Yoon, D., Hong, S. and Park, H., A study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea (I), Korea Environment Institute(2012).
 9. Gong, S., Bae, H., Hong, S. and Park, H., A study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea (II), Korea Environment Institute(2013).
 10. Kim, Y., Lee, h., Jang, Y., Jung, J. and Kang, B., Study for microdust point source analysis and improvement of emission data, National Institute of Environmental Research & Hankuk University of Foreign Studies(2007).
 11. Baek, S., Heo, Y. and Park, Y., "Characterization of Concentrations of Fine Particulate Matter in the Atmosphere of Pohang Area," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **30**(3), 303~313 (2008).
 12. Shin, E., Choi, M., Sunwoo, Y. and Jung, Y., "Characteristic assessment of trace element in PM₁₀," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **18**(5), 363~372(2002).
 13. National Institute of Environmental Research, Study for PM_{2.5} air environment standard(2009a).
 14. National Institute of Environmental Research, Study for the physical and chemical characteristic of PM_{2.5}(2009).
 15. Lee, D. Lee, Y., Jang, K., Yoo, C., Kang, K., Lee, J., et al., "Korean National Emissions Inventory System and 2007 Air Pollutant Emissions," *Asian J. Atmos. Environ.*, **5-4**, 278~291(2011).
 16. National Air Pollutants Emission Service, National Institute of Environmental Research and Ministry of Environment, <http://airemiss.nier.go.kr/mbshome/mbs/airemiss/index.do>
 17. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. D., Struijs, J. and Zelm, R., 2009, 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.
 18. Zhang, X., Shen, L. and Zhang, L., "Life cycle assessment of the air emissions during building construction process: A case study in Hong Kong," *Renew. and Sust. Energy Rev.*, **17**, 160~169(2013).
 19. ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
 20. PréConsultants, 2000. Eco-indicator 99, Manual for Designers: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Netherlands.
 21. Lee, K. M., "A weighting method for the Koran eco-indicator," *The Int. J. LCA*, **4**(3), 161~166(1999).
 22. U.S. EPA, 2009. Sustainable technology systems analysis, TRACI-Tool for Reduction and Assessment of Other Environmental Impacts. Cincinnati, OH, USA: U.S. EPA.
 23. De Schryver, A., Goedkoop, M., Eds. 2009. Climate Change. In ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, edited by M Goedkoop, R Heijungs, MAJ Huijbregts, A De Schryver, J Struijs and R van Zelm. 1st, ed.
 24. Statistics Korea, 2016. www.kostat.go.kr
 25. World Health Organization, 2017. <http://www.who.int>
 26. Kim, J., Yalaltdinova, A., Sirina, N. and Baranovskaya, N., "Integration of Life Cycle Assessment (LCA) and Regional Emission Information (REI) in Agriculture System," *J. Sci. Food and Agric.*, **95**, 2544~2553(2015).
 27. Seoul, Air emission information, 2017. http://cleanair.seoul.go.kr/safety_guide.htm?method=dust.