

초미세먼지 배출량 저감 계획에 따른 부산지역 건강 편익 연구

강남희*, 김현실, 도우곤, 조완철

대기진단평가팀

A Study on Health Benefit in Busan according to the PM-2.5 Emission Reduction Plan

Kang Nam-hee*, Kim Hyeon-sil, Do Woo-gon, Cho Wan-cheoul

Air Quality Monitoring and Assessment Team

Abstract

Particulate matter pollution is a direct factor in causing damage due to air pollution and managing it remains one of the national tasks. Due to the difficulty in quantitative assessment of particulate matter reduction, it is challenging to demonstrate effectiveness during policy objective setting. Previous studies have conducted benefit analyses based on BenMAP and utilized U.S.-based VSL (Value of Statistical Life) and C-R function (health impact function) tailored for South Korea. This study aims to ensure the consistency of statistical and data processing by utilizing the specified VSL and C-R function derived from previous research. It assesses the health impact function and economic benefits based on BenMAP for disease mortality related to particulate matter concentration and reduction targets in Busan Metropolitan City. The benefit analysis, using particulate matter concentration and mortality statistics from 2015 to 2022, revealed that early achievement of the 2024 reduction target resulted in a decrease of 7.47 cardiovascular disease deaths and 8.82 respiratory disease deaths, generating economic benefits of 10.5 billion and 12.4 billion won, respectively. Scenario analysis targeting individuals over 65 showed a decrease of 2.18 cardiovascular and 1.87 respiratory deaths, leading to economic benefits of 3 billion and 2.6 billion won, respectively. Finally, a detailed economic benefit analysis applying the health impact function by district showed a reduction of 36.3 deaths each in cardiovascular and respiratory diseases, resulting in economic benefits of 5 billion and 3.8 billion won, respectively. The proposed methodology can verify policy effectiveness and suggest directions for subsequent policies by deriving economic benefits relative to the budget input. However, as the effects of particulate matter are long-term and it is challenging to eliminate influences such as district-specific income or medical level differences, further research is needed to refine the proposed methodology

Keywords : Health and Environmental Policy Evaluation, Benefit analysis, BenMAP, PM-2.5

I. 서론

산업 혁명 이후 급격한 기술발전은 전세계적인 도시화를 촉진시켰다. 급격한 도시화는 심각한 대기오염을 초래하였으며, 이는 입자상물질의 건강에 대한 위해성과 이에 대한 관리 필요성을 대두시켰다. 입자상물질 중 먼지가 가지는 환경적 영향 때문에 초기 미국에서는 총부유먼지(TSP) 농도를 관리하였고, 유럽에서는 흑연(BS) 농도를 관리하였으며 관련 연구도 활발히 진행되었다. 차츰 보다 작은 먼지의 관리에 대한 필요성이 커지기 시작하면서 미국은 1987년에는 미세먼지(PM-10, particulate matter with an aerodynamic diameter $\leq 10 \mu\text{m}$), 1997년에는 초미세먼지(PM-2.5, particulate matter with an aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$)의 대기기준을 설정하여 현재까지 관리하고 있다. 우리나라의 경우 도시지역에서의 심각한 환경 문제의 원인으로 인식되어 온 초미세먼지를 2011년 환경정책기본법 시행령을 개정하여 대기환경기준을 신설하였으며 2015년부터 시행하여 초미세먼지를 관리하기 시작하였다.¹⁾

초미세먼지는 그 작은 크기 때문에 1급 발암물질로 지정되었으며²⁾, 그와 관련된 위해성 연구도 활발히 진행됐다. 특히 호흡 시 폐로 침투하여 염증을 일으키는 등 호흡기 질환을 유발하고³⁾ 응결하는 성질로 심근경색이나 동맥경화 등 심혈관계 질환을 유발하는 것으로 보고되고 있다⁴⁾. 이러한 위해성에 의해 입자상물질 농도의 증가가 관련 질환 또는 사망률의 증가로 이어짐에 따라 농도와 초과 사망률 사이에 관련성을 규명하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다⁵⁾⁶⁾.

우리 원에서는 2021년부터 자료와 사망률의 인과관계를 기반으로 부산지역에 특화된 건강영향함수(Concentration-Reaction function, C-R function)를 도출하여 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program) 기반의 편익분석 시 분석 신뢰도를 제고하는 연구를 수행 중에 있다. 본 연구에서는 2021~2022년 조사 결과를 바탕으로 초미세먼지 관련 질환에 의한 초과사망률 함수를 구·군별로 세분화하여 개선하였으며 「부산광역시 대기환경관리 시행계획 2020~2024」⁷⁾의 2024년 초미세먼지 목표 농도와 2022년 농도의 차이를 기준으로 하여 시나리오를 설정하였다. 또한 기존 우리 원에서 진행한 연구에서는 BenMAP에서 제공하는 통계적 인간 생명가치(Value per Statistical Life, VSL)를 편익이전

(benefit transfer)을 통해 계산하였으나, 편익이전은 소득 이외 국가별 고유 가치, 사망 등 위험에 대한 인식 등이 반영되지 않는 한계가 있다⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 국내 선행 연구의 메타분석 결과를 이용하여 초과 사망률에 따른 경제적 효과를 추정하였고, 이를 활용하여 최종적으로 부산 시민을 위한 촘촘한 건강영향평가 수행 및 지역별 건강취약성을 정량적으로 평가하고 향후 부산시의 대기관리 시행계획 수립 시 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

2.1. BenMAP 프로그램

미국 EPA는 기존 역학연구의 결과를 이용하여 대기오염으로 인한 질병부담을 도출해 내는 위해성평가와 같은 원리로, 대기오염의 특성을 반영하는 대기오염 건강영향평가 방법인 BenMAP을 개발했다. BenMAP은 대기질 변화에 따른 건강상의 편익분석을 통해 대기질 관련 규제 및 정책수립의 근거를 제시할 목적으로 사용됐다. 대기오염물질의 농도 변화에 관련된 건강 영향을 예측하고, 그에 따른 경제적 가치를 추정하는 것을 주 기능으로 국내 연구에서도 이미 사용된 바가 있다.⁸⁾ 본 연구에서는 2021년 공개된 BenMAP-Community Edition 1.5(U.S. EPA)를 건강취약성 평가에 활용하였다.

BenMAP의 기본 입력자료는 연구 대상 지역의 위치 정보, 연구 대상의 물질 농도, 인구분포, 사망률 자료이며 이를 통해 건강영향함수를 도출하여 농도 변화에 따른 조기 사망자수 감소를 계산한다. 사망자수 감소에 따른 경제적가치를 나타내는 경제가치함수를 통해 최종 편익을 도출하였다.(Fig. 1)

2.2. 건강영향함수

일반화가법모형(Generalized Additive Model, GAM)에서는 변수 사이 관계를 함수의 형태가 아닌 실제 자료의 변화량에 근거하여 계산하고 설명변수들을 비모수적인 평활 함수로 통제하기 때문에 변수의 관계가 선형적이지 않을 때 적용할 수 있는 회귀모델이다⁹⁾. 회귀식 구축을 위해 본 연구에서는 R 4.0.0 프로그램의 mgcv 패키지에서 제공되는 GAM의 함수를 사용하였다. 종속변수로 사망원인별 사망자 수를 설정하였고 일평균 및 일최고 기온, 상대습도, 일평균 해면기압 등

기상요소와 년, 월, 일 등 시간 요소에 의한 변화를 통제하기 위해 평활함수를 적용하였다. 더미변수로서 요일과 계절을 적용하여 선형항으로 추가했으며 최종적으로 초미세먼지의 일평균을 독립변수로 하는 회귀식을 적용하였다.(Fig. 2.)

사망원인별 사망자 수를 종속변수로 하는 회귀모형에 입력변수들을 하나씩 추가하면서 모델의 적합성을 의미하는 AIC(Akaike Information Criterion)값이 최소가 되는 변수조합으로 기본모형을 구성하였다¹⁰⁾. 각 케이스별로 모델의 적합성을 최대화하는 변수들은 차이가 있으며 최종적으로 변수들을 선정하였다.(Table 1.) 각 사망원인별 구축된 회귀모델에서 예측되는 사

망자 수와 실제 일별 사망자 수 사이 잔차의 정규성을 확인하였으며 예측값과 실측값의 일치도를 분석하여 회귀모델의 적정성을 확인하였다.

회귀식에서 기상과 시간요소에 의한 영향을 통제하고 있기 때문에 초미세먼지의 계수는 종속변수(사망자 수)의 변화량이되며 상대위험도(relative risk, RR)와 초과위험도(excessive risk, ER)로 변환할 수 있다. 입자상물질의 경우 그 영향이 당일에 나타나기 보다는 수일에서 수십일의 지연효과를 가지므로¹⁵⁾ 당일에서 14일 전까지의 농도를 기본모델에 입력하고 그 영향이 최대가 되는 날을 선택하여 최종적인 모델을 구축하였다.

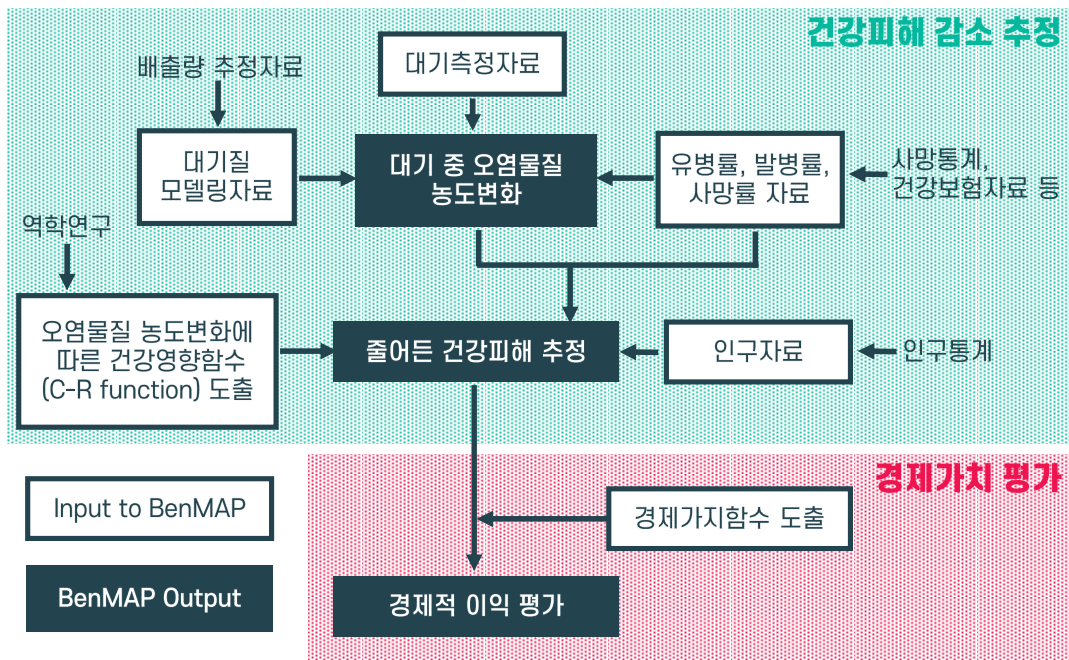


Fig. 1. Flow Diagram of BenMAP⁹⁾

Base model

$$\log E(\text{daily death count}) = S(\text{meteorological elements}) + S(\text{time elements}) + D(\text{day of week}) + D(\text{season}) + \text{Pollutant}$$

PM-2.5 model

Fig. 2. Regression(GAM) Formula

Table 1. GAM Variables Leading Causes of Death¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾

사망원인별 구분		사용변수
전체 입력변수	기상	일평균 기온, 일최고 기온, 일평균 해면기압, 일평균 상대습도
	시간	요일, 계절, 년, 월, 일,
	대기오염	일평균 초미세먼지 농도
선택된 입력변수	전체 자연사망	일평균 기온, 일평균 상대습도, 년, 월, 일, 요일, 계절
	심혈관계 질환	일평균 기온, 일평균 상대습도, 년, 월, 요일, 계절
	호흡기계 질환	일평균 기온, 일최고 기온, 일평균 해면기압, 년, 월, 요일

$$RR = e^{\beta}$$

β : Regression coefficient of PM-2.5

- 대기오염물질 농도에 따른 사망자수의 변화량
- $$ER(\%) = (RR - 1) \times 100$$
- 농도증가에 따라 기존 사망자수보다 증가하게 되는 비율

건강영향함수는 연령 및 지역별 영향에 따른 건강영향 및 편익을 도출하고자 아래의 조건에 따라 계산하였다.(Table 2.)

2.3. 통계적 인간생명가치(Value per Statistical Life, VSL)

조기 사망 감소에 따른 경제적 효과는 사망위험 감소에 대한 지불의사금액을 의미하며 이는 통계적 인간생명가치로 환산할 수 있다. 통계적 인간생명가치는 개인에게 적용되는 사망가능 확률의 감소에 부여하는 지불의사 금액(willingness to pay, WTP)을 사망가능성의 감소가 1(사망)이 될 때까지 합한 금액을 의미한다. 개인에 따라 차이는 있지만

사망가능성을 피하기 위한 지불의사금액을 사망하기까지 합한 값은 개인생명의 가치로 볼 수 있다. 지불의사 금액을 추정하는 방법에는 설문조사를 통한 진술선호방법(stated preference methods)와 개인들의 선택에 대한 관찰을 통한 현시선호방법(revealed preference methods) 등이 있으며 시간과 예산 등의 제약을 감안하여 해외연구 결과를 편익이전하여 활용하기도 한다. 그러나 개별 연구의 대상과 방법 등에 따라 지불의사 금액 추정치의 편차가 크게 나타나는 통계적 생명가치의 연구 특성 상 국내와 문화와 가치관이 다른 해외의 연구를 바탕으로 한 편익이전 시 환경정책의 불확실성이 증가하는 문제점이 있다.¹⁵⁾ 따라서 국내 선행연구 결과를 참고하였으며 대기오염에 대해 특정된 통계적 생명가치인 신영철 외(2017)에서 제시한 1,330백만원을 사용하였다.(Table 3.) 2017년 기준 생명가치를 2022년 기준으로 계산하기 위하여 GDP 디플레이터를 이용하였으며 최종 1,400백만원을 통계적 인간생명가치로 적용하여 편익분석에 사용하였다.

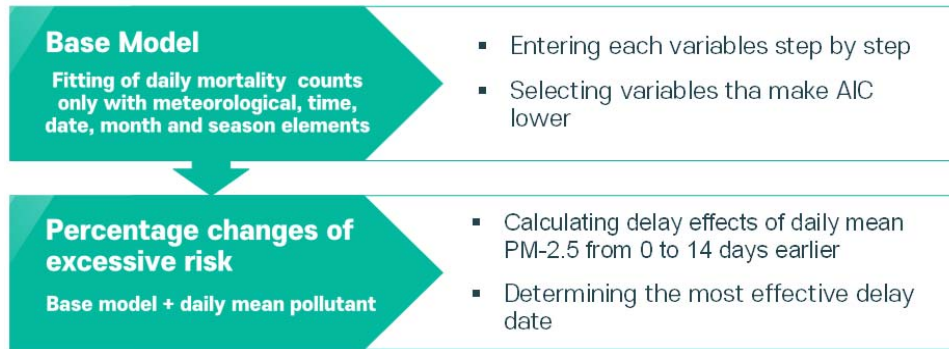


Fig. 3. Optimization of Regression Model

Table 2. Conditions of Calculating C-R Functions

연번	평가 대상 연령	적용된 일 평균 농도	사망원인별 구분
1	전체연령(0~100세)	부산 도시 평균	순환기계 사망, 호흡기계 사망
2	65세 이상(65~100세)	부산 도시 평균	순환기계 사망, 호흡기계 사망
3	전체연령(0~100세)	16개 구·군별 평균	순환기계 사망, 호흡기계 사망

Table 3. Prior Literature of VSL(Domestic)¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾

국내 선행연구	분석방법	통계적 생명가치 추정결과(백만원)
신영철 외(2017)	메타회귀분석(18개 연구, 61개 추정치)	1,330
안소은 외(2018)	메타회귀분석(16개 연구, 66개 추정치)	1,290~1,480
전호철(2020)	확률효용모형(1,528개 표본)	1,320

Ⅲ. 연구결과

3.1. BenMAP 입력자료

BenMAP에 입력되는 자료는 행정구역의 지리정보(시, 구·군, 동)와 2022년 도시대기측정소의 초미세먼지 일평균 농도, 2022년의 구·군별(동별) 인구통계, 2015~2022년 기준 구·군별 사망률 자료를 반영하였다. 2022년 구·군별 인구수는 해운대구에서 약 377,199명으로 가장 많았고 중구에서 41,145명으로 가장 적었다.(Fig. 4.)



Fig. 4. Population Heatmap in Busan

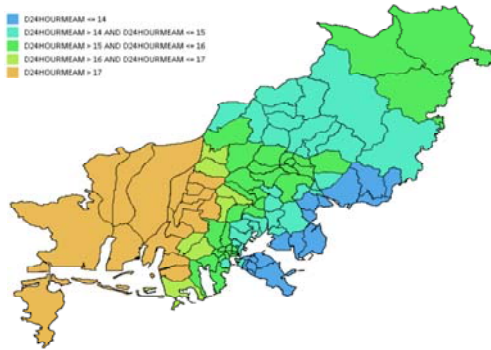


Fig. 5. PM-2.5 Density Heatmap

Table 5. PM-2.5 Concentration('15~'22)

구분	농도 (µg/m³)	구분	농도 (µg/m³)
중구	23	해운대구	19
서구	22	사하구	23
동구	19	금정구	20
영도구	16	강서구	23
부산진구	30	연제구	22
동래구	22	수영구	21
남구	19	사상구	24
북구	20	기장군	19

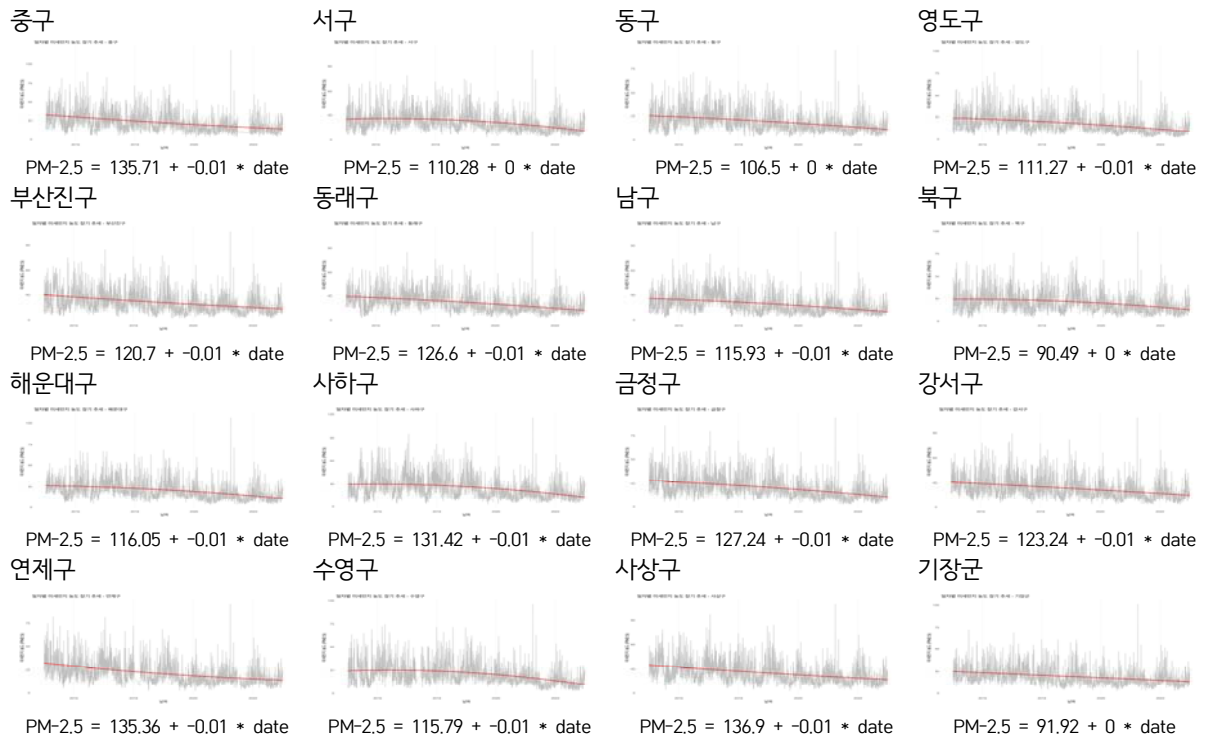


Fig. 6. PM-2.5 Concentraion Trend('15~'22)

2022년 말 기준 부산지역의 도시대기측정소는 28개 소 운영되었고 초미세먼지의 일평균 농도 기준 사상구 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 영도구 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 나타나 강서구와 사하구 등 서부지역에서 높았던 것으로 나타났다.(Fig. 5.)

부산지역의 연평균 초미세먼지는 2015년 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 환경기준(15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 하회하는 수준에서 감소 추세를 보이고 있고 구·군별 장기 추세에서도 꾸준히 감소하고 있다. 「부산광역시 대기환경관리 시행계획 2020~2024」의 2024년 초미세먼지 목표농도인 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 연평균 농도가 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 목표치에서 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 더 낮게 조

사되었다. 구·군별 초미세먼지의 농도 또한 회귀분석 결과, 전체적으로 감소 추세에 있었다.(Fig. 6.)

2015년에서 2022년간 부산지역의 사망자 수는 질병분류코드를 기준으로 분류하였다. 8년간 사고나 외인을 제외한 사망자 수(자연사망)는 18,870명에서 25,924명으로, 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 4,999명에서 5,965명, 호흡기계 질환에 의한 사망자수는 2,037명에서 2,799명으로 증가 추세를 보였고 일평균 사망자 수는 자연사망 57.4명, 심혈관계 질환 14.5명, 호흡기계 질환 6.3명으로 심혈관계 질환에 의한 사망자 수가 호흡기계 질환보다 다소 높았다.(Table 6., Fig. 7.)

Table 6. Cumulative causes of death(day mean)

	자연사망(명)	심혈관(명)	호흡기(명)
2015	18,870(51.7)	5,062(13.9)	2,057(5.6)
2016	19,207(52.5)	4,999(13.7)	2,117(5.8)
2017	19,695(54.0)	5,000(13.7)	2,436(6.7)
2018	20,821(57.0)	5,235(14.3)	2,596(7.1)
2019	20,278(55.6)	5,121(14.0)	2,037(5.6)
2020	21,142(57.8)	5,518(15.1)	2,244(6.1)
2021	21,780(59.7)	5,412(14.8)	2,220(6.1)
2022	25,924(71.0)	5,965(16.3)	2,799(7.7)
누적	167,717(57.4)	42,312(14.5)	18,506(6.3)

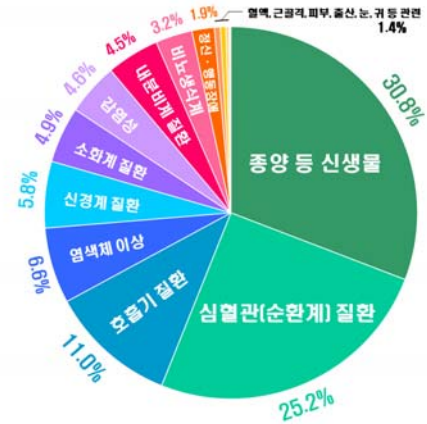
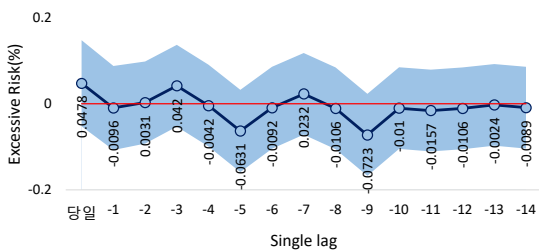
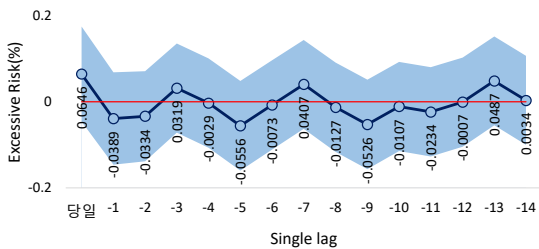


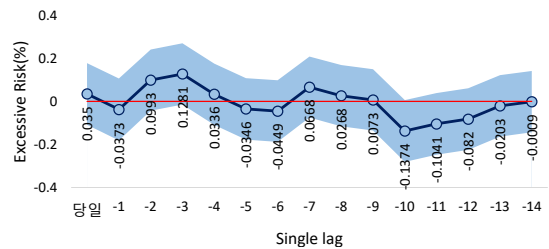
Fig. 7. Cumulative causes of death('15~'22)



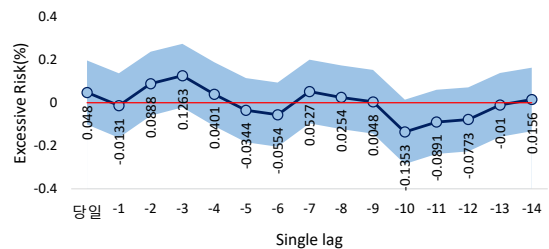
전체연령 - 순환기계 사망



65세 이상 - 순환기계 사망



전체연령 - 호흡기계 사망



65세 이상 - 호흡기계 사망

Fig. 8. Time-lag Windows of Excessive Risk of Cardiovascular and Respiratory Disease

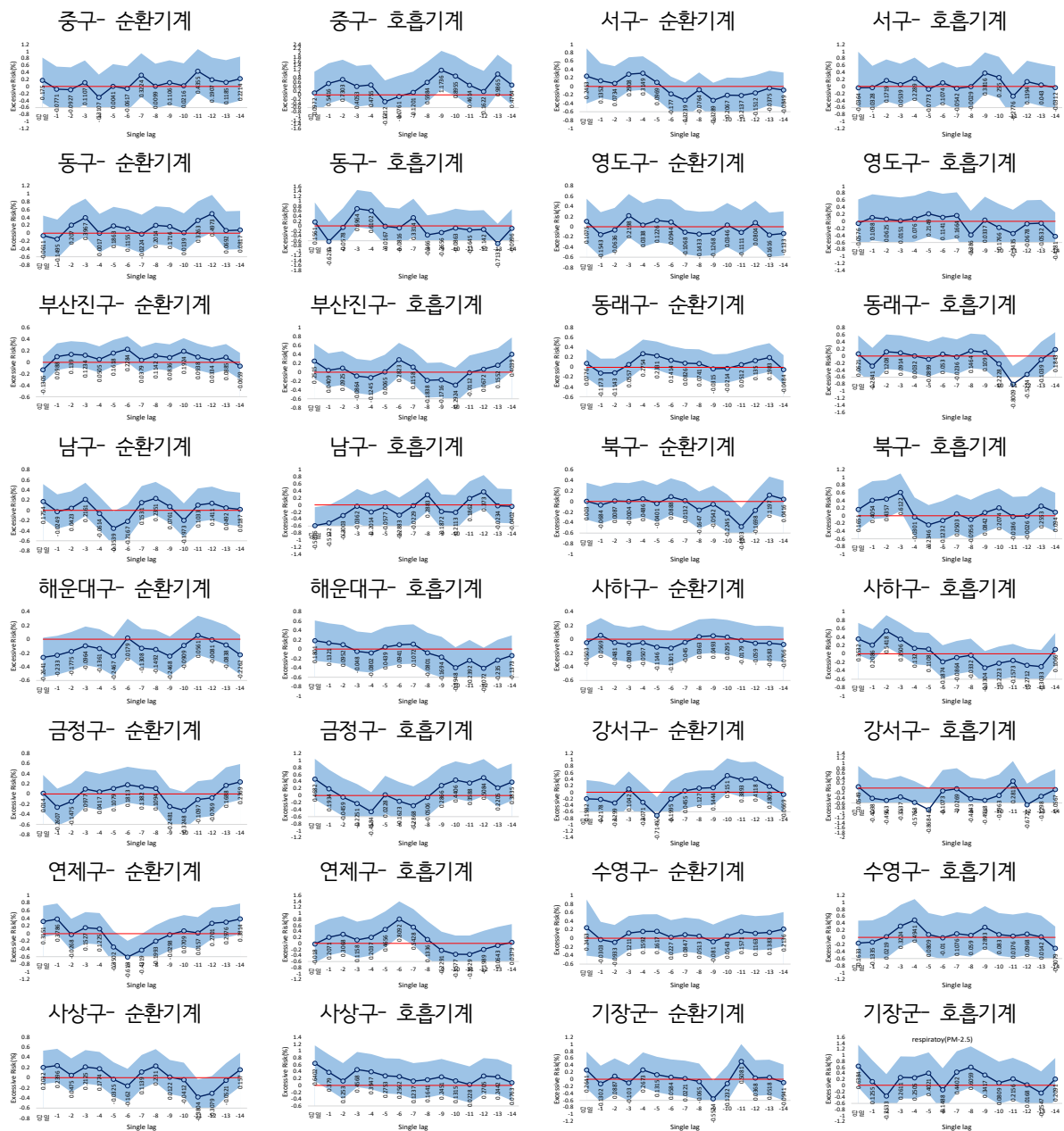


Fig. 9. Time-lag Windows of Excessive Risk by Gu-Gun(%)

Table 7. Adopted Time-lag in CR Function by Gu-Gun

		중구	서구	동구	영도구	부산진구	동래구	남구	북구
지연일자(일)	순환기계	11	4	12	3	6	4	8	13
	호흡기계	9	9	3	5	14	14	12	3
		해운대구	사하구	금정구	강서구	연제구	수영구	사상구	기장군
지연일자(일)	순환기계	11	1	6	10	1	0	8	11
	호흡기계	0	2	12	11	6	4	0	0

3.1. 건강영향함수

초미세먼지의 건강영향함수는 구·군 별로 상세화된 입력자료 및 함수 인자를 검토하여 재구성하였으며, 초미세먼지가 자연사망에 미치는 건강영향관련성이 부족하여 모델 적합성이 상대적으로 떨어질 수 있다고 판단되어 선행연구에서 초미세먼지와 관련성이 있음이 밝혀진 심혈관계 질환과 호흡기계 질환 두 가지 경우를 적용하여 건강영향함수를 도출하였다. 부산지역 전체 연령에서 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 당일 농도에 가장 많은 영향을 받았으며 호흡기계 질환의 사망자수는 3일 전의 평균 농도에 가장 많은 영향을 받는 것으로 조사되었다. 65세 이상 연령에서는 자연사망의 경우 당일 농도에 가장 많은 영향을 받았으며 심혈관계 질환의 경우 1일 전, 호흡기계 질환의 사망자수는 3일 전의 평균 농도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.(Fig. 8.)

또한 건강 편익 계산 시 인구편향에 대한 영향을 최소화하기 위하여 2015~2022년의 구·군별 초미세먼지 농도 및 기상 데이터와 사망원인별 사망자 수를 각각 입력하여 GAM 모델을 수행하였다. 순환기계 질환 및

호흡기계 질환 사망자 수에 영향을 주는 지연 일자에 따른 초미세먼지 평균 농도도 부산 전체 농도와 사망자수에 의한 건강영향함수와 비교했을 때 당일에서 최대 14일까지 다양하게 나타났다.(Table 7., Fig. 9.) 연구 대상이 되는 14일 이내에서 최대 관련성을 가지는 지연 일자를 선택하여 질환별 구·군별 건강영향함수를 도출하였으며 각각의 건강영향함수는 해당하는 구·군에 직접 적용하여 조기 사망자 수와 그에 따른 편익을 계산하였다.

3.2. 연령별 건강영향 및 편익 분석

2022년 부산지역의 연평균 농도가 「부산광역시 대기환경관리 시행계획 2020~2024」에 따른 2024년 목표 농도 대비 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소한 결과, 부산 전체 조기 사망자 수는 심혈관계 질환에 의한 사망이 7.47명, 호흡기계 질환에 의한 사망은 8.82명 감소하는 것으로 추정되었다. 조기 사망자 수 감소에 통계적 인간생명가치를 적용하여 경제적 가치를 계산하면 심혈관계 질환 약 105억원, 호흡기계 질환 124억원의 편익 감소가 나타나는 것으로 추정되었다.(Table 8.) 65세 이상 연령

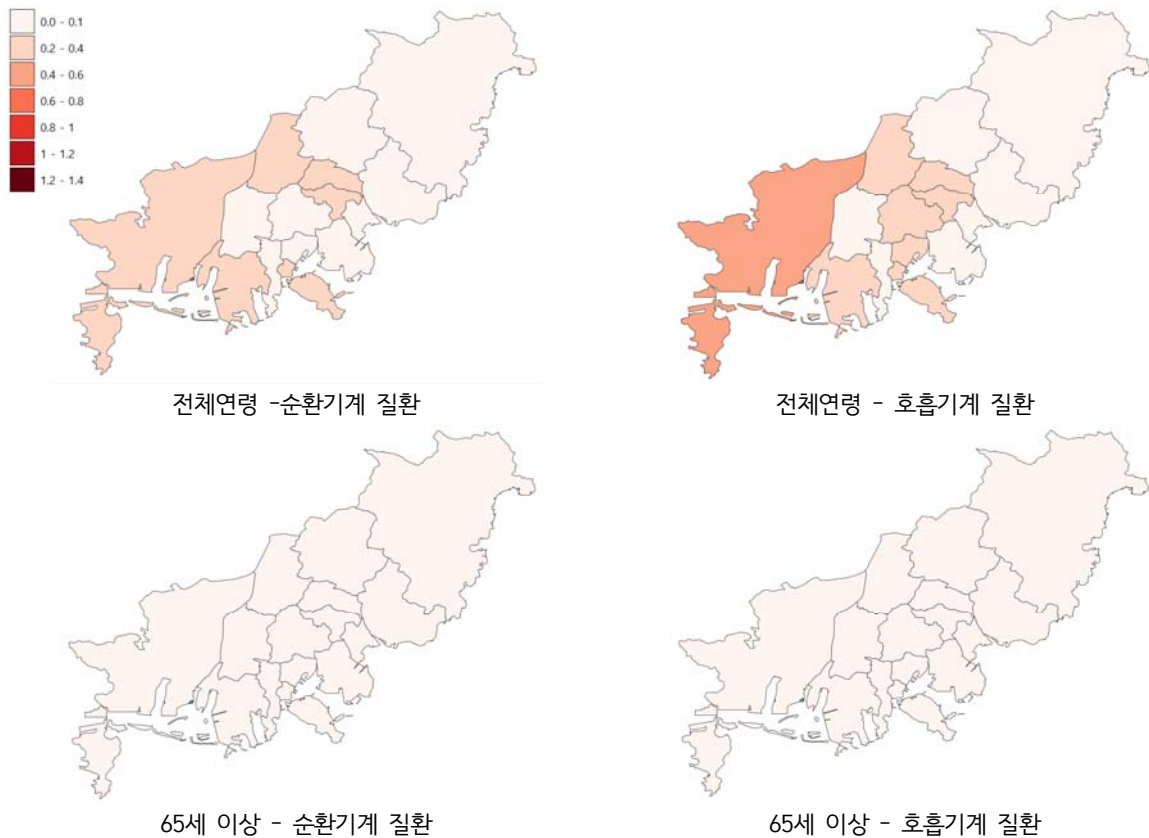


Fig. 10. Premature Deaths Heatmap in Busan

에서는 조기 사망자수는 심혈관계 질환에 의한 사망이 2.18명, 호흡기계 질환에 의한 사망이 1.87명 감소하였으며 전체연령에서의 경우와 마찬가지로 인구가 큰 지역에서 더 큰 사망자수 감소가 나타났다. 65세 이상의 조기 사망자수 감소에 경제가치함수를 적용한 결과, 심혈관계 질환 약 30억원, 호흡기계 질환 26억원

의 편익이 계산되었다. 전체 연령 대비 65세 이상에서 호흡기계 질환 수보다 심혈관계 질환에 의한 사망자수의 감소가 더 크게 추정되었다. 이를 통해 65세 이상에서는 초미세먼지 농도의 증가가 심혈관계 질환에 더 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.(Table 9.)

Table 8. Premature Deaths, Predicted Economic Value Caused by PM-2.5 (All Age)

구·군명	조기 사망 감소(명)		경제가치 추정(원)	
	심혈관	호흡기	심혈관	호흡기
중구	0.562	0.664	121,840,904	144,019,824
서구	0.314	0.371	322,935,296	381,719,840
동구	0.485	0.573	265,426,272	313,742,304
영도구	0.662	0.783	332,032,832	392,473,376
부산진구	0.447	0.528	1,093,097,728	1,292,076,416
동래구	0.781	0.923	839,385,408	992,180,352
남구	0.087	0.103	787,081,664	930,355,584
북구	0.611	0.723	856,141,312	1,011,986,240
해운대구	0.190	0.224	1,353,190,016	1,599,513,856
사하구	0.517	0.611	927,175,296	1,095,950,720
금정구	0.384	0.454	679,281,728	802,932,608
강서구	0.966	1.142	439,684,832	519,721,472
연제구	0.600	0.709	723,228,352	854,878,848
수영구	0.231	0.273	537,178,688	634,962,368
사상구	0.392	0.463	625,672,320	739,564,608
기장군	0.237	0.280	548,347,776	648,164,480
합 계	7.466	8.824	10,451,700,424	12,354,242,896

Table 9. Premature Deaths, Predicted Economic Value Caused by PM-2.5 (Age 65+)

구·군명	조기 사망 감소(명)		경제가치 추정(원)	
	심혈관	호흡기	심혈관	호흡기
중구	0.034	0.029	47,648,316	40,986,416
서구	0.084	0.073	118,146,312	101,627,808
동구	0.072	0.062	101,187,304	87,039,896
영도구	0.097	0.084	136,209,936	117,165,880
부산진구	0.225	0.193	314,663,424	270,669,056
동래구	0.163	0.140	228,243,760	196,332,112
남구	0.169	0.145	236,752,496	203,651,200
북구	0.166	0.142	231,765,712	199,361,616
해운대구	0.267	0.230	373,862,176	321,591,040
사하구	0.195	0.168	273,267,296	235,060,688
금정구	0.155	0.133	216,627,968	186,340,336
강서구	0.056	0.048	78,940,880	67,903,840
연제구	0.151	0.130	211,115,872	181,598,912
수영구	0.121	0.104	169,258,640	145,593,920
사상구	0.128	0.110	178,543,296	153,580,464
기장군	0.093	0.080	129,624,800	111,501,432
합 계	2.176	1.871	3,045,858,188	2,620,004,616

3.3. 구·군별 건강영향 및 편익 분석

연령별 건강영향 및 편익 분석에서와 마찬가지로 「부산광역시 대기환경관리 시행계획 2020~2024」의 2024년 목표농도 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 초과로 감소된 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 대하여 구·군별로 건강영향함수를 달리 적용한 결과, 부산 지역에서 전체 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환에 의한 조기 사망이 각각 36.3명 감소하여 부산 전체에 대한 건강영향함수를 통해 계산된 사망자수에 비해 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다. 두 질환에 의한 조기 사망자수가 크게 감소하며 추정된 경제가치의 이익 또한 심혈관계 질환 약 509억원, 호흡기계 질환 약 379억원으로 편익 이익이 크게 나타났다.(Table 10.) 부산 전체 사망자수 감소에서 두 질환 사이에 차

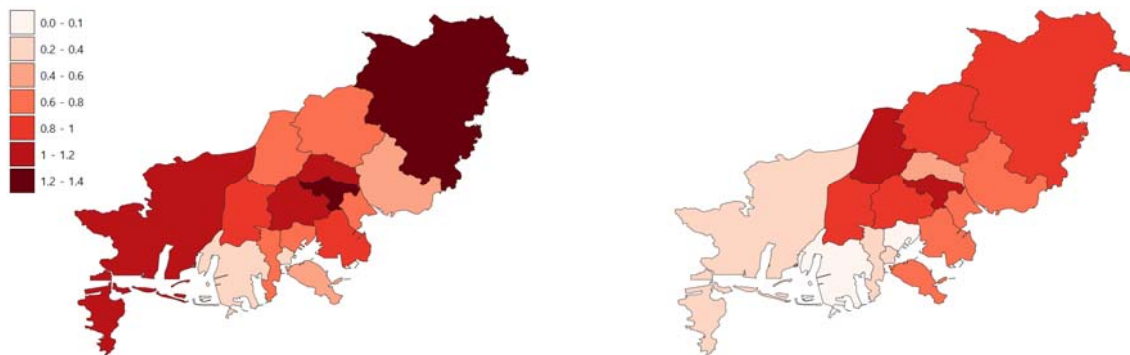
이가 없음에도 편익에는 100억원 이상의 차이가 나는 것은 구·군별로 도출된 건강영향함수가 각기 다른 폭으로 적용된 것으로 보이며 구·군별로 초미세먼지가 두 질환에 미치는 영향이 큰 차이가 보이는 것으로 판단된다. 이에 따라 추후 연구에서는 구·군별로 초미세먼지의 영향이 차이가 나는 것에 대해 구·군별 연령, 농도 및 소득 분포 등 여러 인자를 적용하여 관련성을 분석·평가하는 등 고도화가 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서는 2015~2022년 초미세먼지 측정 결과를 바탕으로 사망원인별 사망자수 등 의료 빅데이터와 기상 및 지리 정보를 활용하여 부산지역의 초미세먼지

Table 10. Premature Deaths, Predicted Economic Value Caused by PM-2.5 (Gu·Gun)

	조기 사망 감소(명)		경제가치 추정(원)	
	심혈관	호흡기	심혈관	호흡기
중구	0.542	0.542	759,412,928	904,425,088
서구	1.531	1.531	2,143,541,248	1,140,496,128
동구	1.994	1.994	2,791,419,392	6,687,449
영도구	1.095	1.095	1,532,819,712	656,361,984
부산진구	3.758	3.758	5,261,716,992	4,092,769,280
동래구	3.480	3.480	4,872,926,208	1,422,182,016
남구	2.781	2.781	3,894,342,400	2,718,026,496
북구	1.528	1.528	2,139,408,384	4,872,803,328
해운대구	1.119	1.119	1,567,091,840	2,241,965,824
사하구	0.780	0.780	1,092,571,392	629,257,280
금정구	1.846	1.846	2,584,274,176	3,205,284,864
강서구	3.421	3.421	4,790,382,592	1,141,179,776
연제구	4.129	4.129	5,780,864,512	5,454,933,504
수영구	1.976	1.976	2,766,522,368	2,464,947,712
사상구	2.171	2.171	3,040,177,152	3,725,302,016
기장군	4.209	4.209	5,893,793,792	3,254,708,480
합 계	36.36	36.36	50,911,265,088	37,931,331,225



순환기계 질환

호흡기계 질환

Fig. 11. Premature Deaths Heatmap by Gu·Gun

감소에 따른 건강영향효과와 경제적 편익을 분석하고자 하였다. 이를 위해 초미세먼지 관련 질환에 의한 초과사망률 함수를 사망 위험에 취약한 65세 이상의 연령 및 구·군별로 세분화하여 도출하였고 「부산광역시 대기환경관리 시행계획 2020~2024」의 2024년 초미세먼지 목표농도를 초과 달성한 부분에 관해 조기 사망자수 감소와 그 경제적 효과의 이익을 분석하였다. 통계적 인간 생명가치 계산 시 국내 선행 연구의 메타분석 결과를 이용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 가. 부산지역 전체연령에서 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 당일 농도에 가장 많은 영향을 받았으며 호흡기계 질환의 사망자수는 3일 전 일평균 농도에 가장 영향을 크게 받아 지연효과가 나타나는 것으로 확인되었다. 65세 이상 대기오염 취약 연령에서 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 하루 전 농도가, 호흡기계 질환의 사망자수는 전체연령과 마찬가지로 3일 전 일평균 농도에 가장 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다.
- 나. 연령 별 건강영향 및 편익 분석 결과, 부산 전체 조기 사망자수는 심혈관계 질환에 의한 사망이 7.47명, 호흡기계 질환에 의한 사망이 8.82명 감소하여 각각 약 105억원, 124억원의 경제적 효과가 나타나는 것으로 나타났으며 65세 이상에서는 심혈관계 질환 사망 2.18명, 호흡기계 질환 사망이 1.87명 감소하여 각각 30억원, 26억원의 경제적 효과가 나는 것으로 추정되었다.
- 다. 구·군별로 세분화하여 건강영향평가를 시행하였을 때 지연 농도는 당일에서 분석 최대치인 14일까지 다양하게 나타났으며 심혈관 질환 및 호흡기계 질환에 의한 조기 사망자수 감소가 36.3명으로 나타나 각각 약 509억원, 약 379억원의 경제적 편익이 추정되어 부산 전체 지역 대상으로 하나의 건강영향함수를 적용했을 때보다 사망자수 감소에 따른 경제적 이익이 큰 것으로 나타났다. 추후 지역별 고유 특성을 나타낼 수 있는 연령대, 소득, 대기오염물질 농도 등 여러 인자를 적용하여 관련성을 평가하는 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 공성용 외, 초미세먼지(PM-2.5)의 건강영향 평가 및 관리정책 연구 I, 한국환경정책·평가연구원, 연구보고서 2012-3, 2012
2. WHO, WHO global air quality guidelines(2021)
3. Brook RD, Brook JR, S. Rajagopalan, Air pollution: the “heart” of the proablern, Current Hypertension Report. 5:32-39., 2003
4. Peters A. et al., Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction, Circulation. 103:2810-2815., 2010
5. Analitis et al., Short-Term Effects of Ambient Particles on Cardiovascular and Respiratory Mortality, Epidemiology, 17(2), 2005
6. Atkinson et al., Long-term exposure to outdoor air pollution and incidence of cardiovascular diseases, Epidemiology, 2013
7. 정장표 외, -동남권 대기환경관리 기본계획 추진을 위한- 부산광역시 대기환경관리 시행계획 2020~2024, 부산광역시, 2021
8. 박정임 외, 한국형 BenMAP을 활용한 대기질 개선 정책의 건강편익 산정 연구, 환경부, 2008
9. Bae, H.J., Effects of short-term exposure to PM10 and PM-2.5 on mortality in Seoul, Journal of Environmental Health, 40(5), p346-354, 2014
10. 노유정, 통계모델링 방법의 비교 연구, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperatiopn Society, Vol. 17, No. 5 pp.642-652, 2016
11. 국가공간정보포털, <https://nsdi.go.kr/>
12. 행정안전부 연령별인구현황, <https://jumin.mois.go.kr/>
13. 통계청 마이크로데이터통합서비스 <https://mdis.kostat.go.kr/>
14. 기상자료개방포털 <https://data.kma.go.kr/>
15. Lin et al., Fine particulate matter constituents and blood pressure in patients with chronic obstructive pulmonary disease: A panel study in Shanghai, China, Environmental Research, 159, p 291-296, 2017
16. 전호철, 선택실험법을 활용한 통계적 생명가치의 추정, 자원·환경경제연구 제29권 제2호, 2020
17. 신영철 외, 화학물질 관리를 위한 사회경제성 기반 구축(I), 국립환경과학원, 2017
18. 안소은 외, 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구 부문별 영향평가 및 가치추정, 한국환경정책·평가연구원, 2017