

(초)미세먼지에 의한 부산지역 건강취약성 평가

○ (초)미세먼지 농도저감에 따른 조기사망률 변화를 추정하고 경제성을 분석하여 정책시행의 가치를 추정하고자 함

1. 조사개요

○ 조사기간 : 2022년 1월 ~ 12월

○ 조사대상

- 건강 영향함수 개발

2015-2021년간 사망원인별 사망자수, 기상자료, 대기오염도자료를 활용하여 부산지역 일평균 (초)미세먼지 농도의 단위변화량에 따른 사망자수 변화를 추정하였다. 사망원인은 한국표준질병사인분류 코드에 따라 구분하였으며 전체 사망자 중 외인 또는 사고사를 제외한 자연사망, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환에 의한 사망으로 구분하였고 산정된 초과사망률을 BanMAP에 입력하였다.

- 부산형 BenMAP 구축

미국 EPA에서 공개되는 BenMAP을 부산지역을 대상으로 운영하기 위하여 부산지역에 맞는 입력자료를 구축하고 지속적인 자료갱신이 가능하도록 하였다.

- (초)미세먼지에 의한 지역별 건강영향 및 경제성 추정

○ 조사현황

대기 중 입자상물질과 관련한 질환이나 사망률 사이의 역학적인 관계를 밝히는 다양한 연구가 진행되어 왔다 (Brunekreef and Forsberg, 2005; Adar et al., 2014). 입자상물질의 건강에 대한 영향은 관련 질환의 증가 또는 사망률의 증가 등으로 나타날 수 있는데 그 중 일평균 농도와 초과사망률과의 관계를 규명하는 연구가 활발하게 진행되었으며 호흡기계 질환으로 인한 사망률 뿐만 아니라 심혈관계 질환에 의한 사망률 또는 이와 관련한 입원률의 증가도 가져오는 것으로 나타나고 있다(Analitis et al., 2006; Atkinson, et al., 2013). 우리원에서도 2021부터 대기오염에 의한 건강 취약성 평가 업무를 신설하고 부산지역 (초)미세먼지 (PM-10, PM-2.5)에 의한 구, 군별 초과사망률 분석하여 위해성 평가를 수행한 바가 있다. 이들 연구들은 기존의 농도 모니터링 및 저감을 위한 대책이 실제 피해양상을 파악하고 피해저감을 위한 방향으로 전환되어야 함을 강조하고 있다.

○ 조사목적

본 조사에서는 2021년 조사결과를 확장하여 (초)미세먼지와 관련 질환에 의한 초과사망률을 최근의 사망률 자료를 활용하여 개선하고 이를 인구분포와 연계하여 농도개선에 따른 조기 사망자수의 감소효과를 규명하였다. 또한 확률적 인간생명가치(value per statistical life, VSL) 활용하여 사망자수 감소의 경제적인 효과를 추정하였다. 미국 EPA에서 제공되는 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)을 우리시에 맞도록 구성하고 입력자료의 개선과 세분화된 파라미터들을 개발하여 정기적으로 건강영향평가가 수행도록 기초자료를 구성하였으며 대기질 개선정책의 결과인 농도감소가 시민의 건강에 미치는 영향을 지역별로 분석하고 유발되는 건강편익을 추정하여 대기질 개선정책의 필요성을 제시하고자 하였다.

2. 조사방법

○ 활용자료

- 건강 영향함수 개발

부산지역의 일평균 (초)미세먼지에 의한 건강영향은 관련질환에 의한 사망자수와의 관계를 활용하여 추정하였으며 대기오염도 및 기상관측자료와 사망자수 통계자료를 활용하였다.

표 1. 건강영향 함수 개발 활용자료

활용자료	출처
2015-2021년간 부산지역 도시대기측정소 (초)미세먼지 농도	부산광역시 보건환경연구원
2015-2021년간 부산지역 종관기상관측자료	기상자료개방포털 https://data.kma.go.kr/
2015-2021년간 전국 사망원인별 사망자수	통계청 마이크로데이터통합서비스 https://mdis.kostat.go.kr/

- 부산형 BenMAP 구축(건강영향 및 경제가치 추정)

U.S. EPA에서 공개되는 BanMAP을 부산에 적용하기 위하여 활용된 입력자료의 구성은 아래와 같다.

표 2. BenMAP 입력을 위한 활용자료

활용자료	출처
도시대기측정소 위치정보 및 구군 지리정보	부산광역시 보건환경연구원
전국 주민등록 인구 및 세대현황	행정안전부 연령별인구현황, https://jumin.mois.go.kr/
확률적 인간생명가치	The Benefits and Costs of the Clean Air act 1990 to 2010, 1999, U.S. EPA
1인당 국내총생산	THE WORLD BANK, https://data.worldbank.org/
구매력평가지수	OECD, https://data.oecd.org/
소비자물가지수	FRED ECONOMIC DATA, https://fred.stlouisfed.org/

○ BenMAP 프로그램

- 프로그램 개요

BenMAP은 미국 EPA에서 대기질 변화에 따른 건강상의 편익분석을 위하여 개발한 프로그램으로 대기질 관련 규제나 정책수립의 근거를 제시할 목적으로 사용되어왔다. 대기오염물질의 농도변화에 관련된 건강영향을 예측하고, 그에 따른 경제적인 가치를 추정하는 것이 주 기능으로 국내에서도 이미 사용된 바가 있다. 본 조사는 2021년 공개된 BenMAP-Community Edition 1.5(U.S. EPA)를 부산지역에 맞도록 수정하였으며 지속적으로 사용할 예정이다.

- 입력자료

BenMAP의 기본적인 입력자료는 분석대상지역의 위치정보, 분석대상 물질의 농도, 인구분포, 초기 사망률 자료이며, 사전에 도출된 건강 영향함수를 적용하여 농도변화에 따른 사망자수 감소를 계산한다. 사망자수 감소에 따른 경제적 가치는 인간생명의 가치를 간접적으로 추정하는 확률적 인간생명가치를 활용하는데 본 조사에서는 미국 EPA 산정된 값(1990)을 물가와 환율변동을 반영하여 2021년 국내값으로 환산하여 프로그램에 입력하였다. 국내의 확률적인간생명가치를 산정하는데 사용된 변수들은 앞에 표에 제시하였으며 BanMAP 프로그램의 운영과정은 다음 그림과 같다.

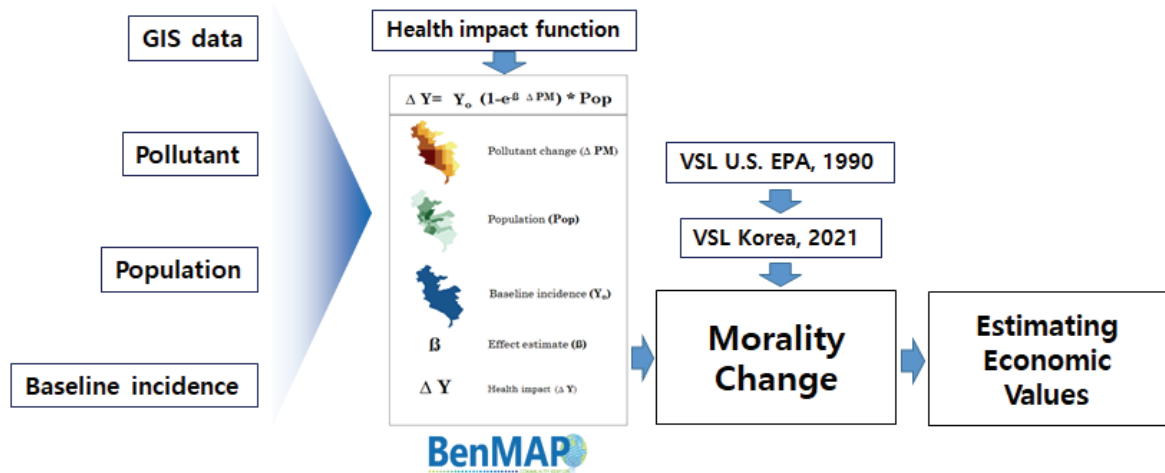


그림 1. BenMAP 프로그램 수행 흐름도

○ 건강 영향 함수

- 일반화가법모형(Generalized Additive Model, GAM)

특정질환 또는 사망자수는 시간에 따른 변화를 가지는 시계열 자료이며, 시계열자료는 일반적으로 장기변동, 계절변화에 의한 추세 또는 시간이나 월변화 등 시간요소에 의한 변동성과 기온 또는 습도와 같은 기상요인들에 의한 변동성을 포함한다. GAM은 변수 사이의 관계를 함수형태가 아닌 실제자료의 변화량에 근거하여 계산하며 설명변수들을 비모수적인 평활함수로 통제하기 때문에 변수의 관계가 선형적이지 않을 때 적용할 수 있는 회귀모델이다(Choi et al., 2000; Bae, 2014). 사망원인별 사망자수를 종속변수로 하고 기온, 상대습도, 해면기압의 일평균, 일최고 기온 등 기상요소에 의한 변화와 년, 월, 일 등 시간요소에 의한 변화를 통제하기 위하여 평활함수를 적용하였고 요일과 계절은 더미변수를 생성하여 선형항으로 추가하여 최종적으로 (초)미세먼지의 일평균을 독립변수로 하는 회귀식을 구축하였다. 회귀식 구축을 위하여 본 조사에서는 R 4.0.0 프로그램의 mgcv 패키지에서 제공되는 GAM의 함수를 사용하였다.

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

Base model
PM-10, PM-2.5 model

그림 2. GAM 회귀모형의 구조

- GAM 회귀모델의 구축

사망원인별 사망자수를 종속변수로 하는 회귀모형에 입력변수들을 하나씩 추가 투입하면서 모델의 적합성을 의미하는 AIC(akaike information criterion)값이 최소가 되는 변수조합으로 기본모델을 구성하였다. 각 케이스별로 모델의 적합성을 최대화하는 변수들은 차이가 있으며 최종적으로 선정된 변수들은 아래표와 같다. 각 사망원인별 구축된 회귀모델에서 예측되는 사망자수와 실제 일별 사망자수 간의 잔차의 정규성을 확인하였으며 예측된 값과 실측값의 일치도를 분석하여 회귀모델의 적정성을 확인하였다.

표 3. 사망원인별 GAM 회귀모델 구축에 사용된 변수

사망원인별 case 구분		사용변수
선택된 입력변수	전체 자연사망	일평균 상대습도, 일평균 해면기압, 년, 월, 일, 요일
	심혈관계 질환	일평 균기온, 일평균 상대습도, 년, 요일, 계절
	호흡기계 질환	일평균 기온, 일최고 기온, 일평균 해면기압, 년, 월, 요일
전체 입력변수	기상요소	일평균 기온, 일최고 기온, 일평균 해면기압, 일평균 상대습도
	시간요소	요일, 계절, 년, 월, 일,
	대기오염요소	일평균 초미세먼지, 일평균 미세먼지 농도

- 분석방법

회귀식에서 기상과 시간요소에 의한 영향을 통제하고 있기 때문에 (초)미세먼지함의 계수는 종속변수(사망자수)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 가지므로(Lin et al., 2017; Qiu et al., 2012) 당일에서 5일전 까지의 일평균 농도를 기본모델에 입력하고 그 영향이 최대가 되는 날을 선택하여 최종적인 모델을 구축하였다.

$RR = 10^\beta$, β : Regression coefficient of PM-10, PM-2.5(초)미세먼지 농도에 따른 사망자수의 변화량
 $ER(\%) = (RR - 1) \times 100$ 농도증가에 따라 기존 사망자수보다 증가하게 되는 비율

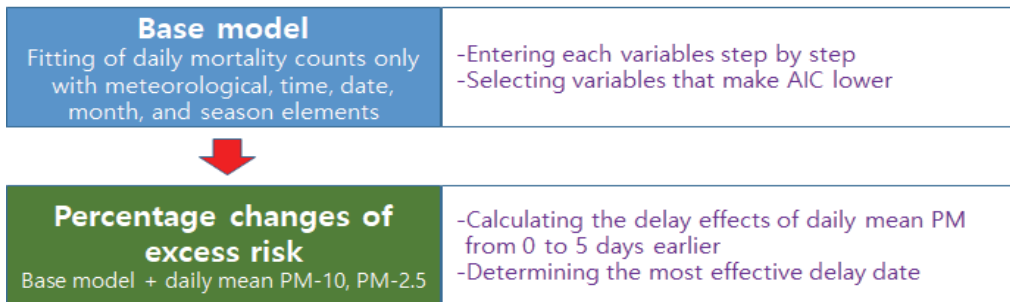


그림 3. GAM 회귀모델의 구축 과정

○ 확률적 인간생명가치(value per statistical life, VSL)

- 기본개념

조기사망 감소에 따른 경제적인 효과는 사망위험 감소에 대한 지불의사금액을 의미하며 이는 확률적 인간 생명가치로 환산할 수 있다. 확률적 인간생명가치는 개인에게 적용되는 사망가능 확률의 감소에 부여하는 지불의사금액을 사망가능성의 감소가 1이(사망) 될 때까지 합한 금액을 의미한다. 개인에 따라 차이는 있지만 사망가능성을 피하기위한 지불의사금액을 사망하기까지 합한 값은 개인생명의 가치로 볼 수 있다. 인간 생명가치의 추정에는 다양한 방법과 많은 변수들을 고려해야 하므로 기존의 연구결과를 활용하였다(신영철, 2006; 박정임 외, 2007; U.S. EPA, 1999).

- 확률적 인간생명가치 추정

경제성 추정을 위한 확률적 인간생명가치는 미국 EPA에서 산정된 값을 환률과 국내물가 등을 반영 추정하였다. 1990년 기준 미국 EPA의 추정된 확률적 인간생명가치는 \$4,800,00이며(U.S. EPA, 1999) 2021년 국내 수준으로 환산하면 약 6,868백만원으로 계산되었다. 환산을 위해 사용된 각 변수들의 출처는 표에 제

시하였다.

$$VSL_{Korea,2021} = VSL_{US,1990} \times \left(\frac{Y_{Korea,2021}}{Y_{US,1990}}\right)^\epsilon \times PPP_{1990} \times \frac{CPI_{Korea,2021}}{CPI_{Korea,1990}}$$

$VSL_{Korea,2021}$: 2021년 소득수준이 반영된 국내 확률적 인간생명가치 추정액(원)

$VSL_{US,1990}$: U.S. EPA에서 산정한 1990년 미국 확률적 인간생명가치(\$4,800,000)

Y : 해당국가와 연도별 1인당 국내총생산(\$), ϵ : 상수(0.4)

PPP_{1990} : 1990년 기준 구매력평가지수(원/\$)

CPI_{Korea} : 해당연도의 국내 소비자 물가지수

3. 조사결과

○ (초)미세먼지 및 사망자수 현황

- (초)미세먼지 농도

부산지역은 2022년 말 현재 28개의 도시대기측정소가 운영되고 있으며 연평균 미세먼지는 2015년 46에서 2022년 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연간 대기환경기준(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 하회하는 수준에서 감소추세이다. 초미세먼지는 26에서 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소 추세이며 2021년부터 연간 대기환경기준(15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 만족하고 있다. 2020년 세계적인 코로나 팬데믹으로 전년보다 감소폭이 높았으며 이후 2022년에 가장 낮은 수준이다. 부산지역의 (초)미세먼지 모두 연간 대기환경기준을 만족하고 있으므로 건강영향을 추정하기 위한 목표농도는 WHO 가이드라인인 미세먼지 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하고 각각 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소될 경우를 대상으로 하였다.

표 4. (초)미세먼지 연평균 농도변화($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
PM-10	46	44	44	41	36	30	32	27
PM-2.5	26	27	26	23	21	17	15	15

2015년에서 2021까지 (초)미세먼지 일평균 시계열자료에서 계절변동 성분과 단기변동 성분을 제외한 장기 추세를 (초)미세먼지 모두 감소추세이며 2020년에 가장 낮았다. 장기추세의 기울기를 고려하면 일평균 미세먼지는 연간 2.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지는 연간 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하고 있는 것으로 추정된다.

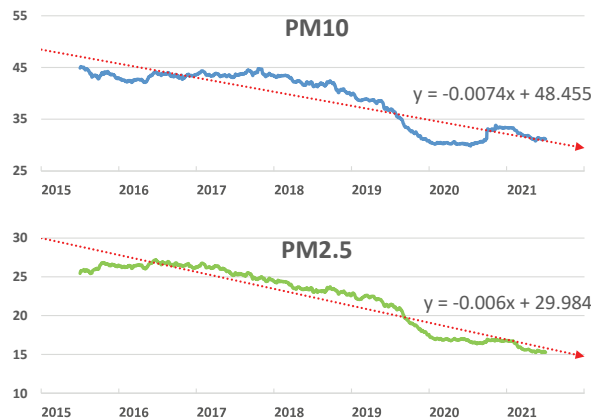


그림 4. 일평균 (초)미세먼지의 장기추세 분석

- 사망자수

2015년에서 2021년간 부산지역에서 사고나 외인을 제외한 사망자수(자연사망)는 18,870에서 21,539명이었으며 전반적으로 증가추세이다. 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 4,899에서 5,507명, 호흡기계 질환에 의한 사망자수는 1,999에서 2,596명이며 7년간 일평균 사망자수는 자연사망 55.3, 심혈관계 질환 14.2, 호흡기계 질환 6.1명으로 심혈관계 질환에 의한 사망자수가 호흡기계 질환보다 다소 높았다.

2015년부터 2021년간 누적 자연 사망자수에 대한 질병분류코드상의 대분류(22개 항목) 항목의 분포를 살펴보면 중앙 등 신생물(C00-D48)에 의한 사망이 32% 가장 높았고 심혈관 등 순환기계 질환(I00-I99)에 의한 사망이 26%, 호흡기계 질환(J00-J99)에 의한 사망이 11%로 부산지역의 주요 사망원인이었다.

선행연구에 의하면 호흡기나 심혈관계 질환은 대기중 입자상물질과 관련성이 높으며 이 두 질환은 부산지역 사망원인에서 높은 비중을 차지하고 있어 (초)미세먼지에 의한 건강상의 영향을 파악하는 대상으로 타당할 것으로 판단된다.

표 5. 원인별 사망자수 변화, 누적(일평균)

	자연사망	심혈관	호흡기
2015	18,870(51.7)	4,899(13.5)	1,999(5.5)
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	21,086(57.6)	5,507(15.0)	2,240(6.2)
2021	21,539(59.0)	5,412(14.8)	2,220(6.1)
누적	141,496(55.3)	36,173(14.2)	15,645(6.1)

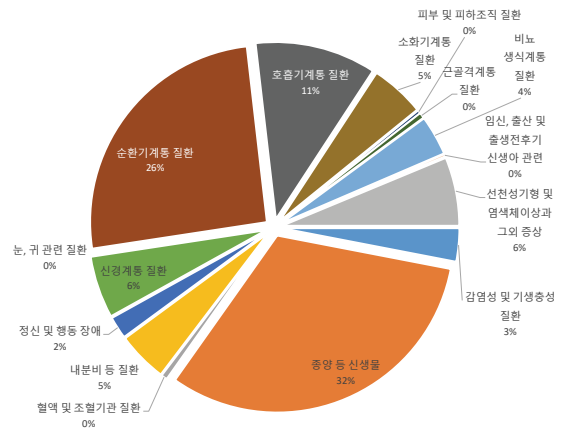


그림 5. 사망원인별 구성비율(누적)

○ 건강 영향 함수

- 미세먼지의 건강영향

부산지역 자연사망과 심혈관 및 호흡기계 질환의 사망자수는 3일 전의 평균농도에 가장 많은 영향을 받는 것으로 조사되었다. 이는 대기오염에 의한 단기영향이 수일의 지연시간을 가진다는 기존의 연구와 같은 결과이다. 3일 전의 일평균 미세먼지 농도가 10 ug/m³ 증가하게 되면 자연 사망자수는 0.53%, 심혈관 질환에 의한 사망자수는 1.24%, 호흡기계 질환에 의한 사망자수는 2.27% 증가하는 것으로 나타났다. 심혈관계 질환보다는 호흡기계 질환에 더 많은 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

- 초미세먼지의 건강영향

초미세먼지도 미세먼지와 동일하게 3일 후에 그 영향이 가장 높았다. 3일 전의 일평균 초미세먼지가 10 ug/m³ 증가하면 자연 사망자수는 0.85%, 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 1.72%, 호흡기계 질환에 의한 사망자수는 4.49% 증가하였다. 일평균 (초)미세먼지 농도가 10 ug/m³ 증가하면 심혈관계 및 호흡기계 질환에 의한 사망자수를 평상시 대비 각각 약 1%, 2% 이상 증가시키며, 미세먼지보다는 초미세먼지의 위험성이 더 높았고 특히 초미세먼지에 의한 호흡기계 질환에 의한 사망자수의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 본 과정에서 도출된 사망자수의 증가 비율은 건강영향 함수로 변환되어 부산형 BanMAP에 입력하였다.

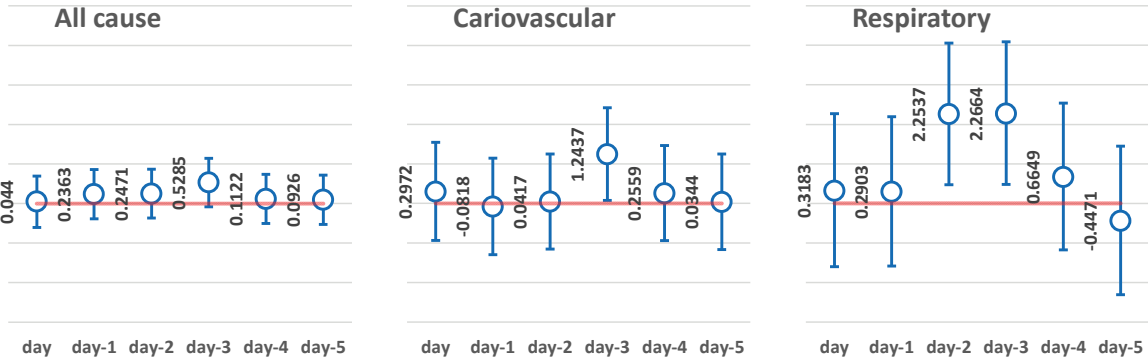


그림 6. 일평균 미세먼지 지연일자별 초과사망률 분포(%)

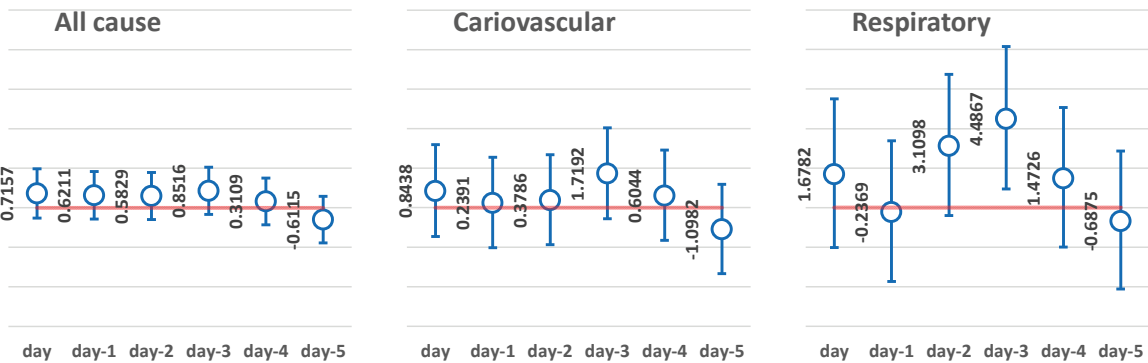


그림 7. 일평균 초미세먼지 지연일자별 초과사망률 분포(%)

- ※ 서울(배현주, 2014), PM-10, 자연사망: 0.44%, 심혈관: 0.76%, PM-2.5, 자연사망: 0.95%, 심혈관: 1.63%
- ※ 네덜란드(Janssen et al., 2013), PM-10, 자연사망: 0.6%, PM-2.5, 자연사망: 0.8%
- ※ 유럽(Samoli et al., 2013), PM-10, 자연사망: 0.32%, PM-2.5, 자연사망: 0.55%
- ※ 중국(Lin et al., 2017), PM-2.5, 자연사망: 0.9%, 호흡기: 0.7%, 심혈관: 1.2%

○ BenMAP 수행결과

- 부산형 BanMAP 구축

건강영향 및 경제성 추정을 위한 부산형 BanMAP에 입력되는 자료는 행정구역의 지리정보와 2021년 도시 대기측정소별 (초)미세먼지 일평균 농도, 2021년의 구군별 인구통계, 기준 사망률 자료이다. 2021년 구군별 인구수는 해운대구에서 약 396,000명으로 가장 많았고 중구에서 약 40,000명으로 가장 적었으며 부산진구 약 353,000명, 사하구 306,000명 순이었다. 2021년 말 부산지역의 도시대기측정소는 28개소가 운영중이며 일평균 농도의 연간평균을 구군별로 산정하면 (초)미세먼지는 각각 사상구 36.37, 18.93 ug/m³에서 금정구 26.82, 13.19 ug/m³ 범위였으며 강서구와 사하구 등 서부지역에서 높았다.

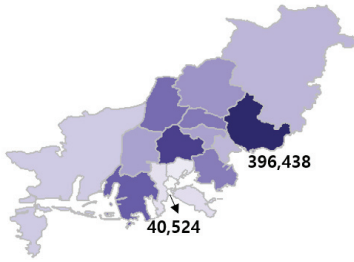


그림 8. 인구분포(명)

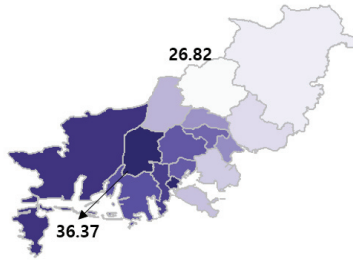


그림 9. 일평균 PM10 분포(ug/m³)

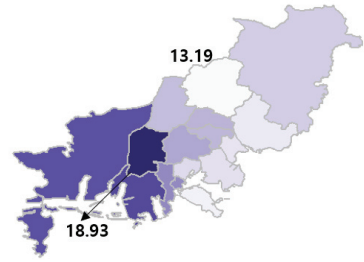


그림 10. 일평균 PM2.5 분포(ug/m³)

BanMAP에 입력되는 기준 사망률은 장기적인 추세를 반영하기 위하여 2015년에서 2021년간 누적 인구수에 대한 사망자로 산정하였으며 인구 10만명당 자연 사망자수는 약 1,176명, 심혈관계 질환 사망자수 약 300명, 호흡기계 질환 사망자수는 약 130명 수준이었다. 건강 영향함수는 앞에서 산정된 사망자수에 대한 3일전 평균농도의 계수에 의한 초과사망률로 계산되도록 하였고 건강편익 분석을 위한 확률적 인간생명가치는 1990년 미국 EPA값을 2021년 국내 수준으로 환산값인 약 6.868백만원을 입력하였다.

- 미세먼지에 의한 건강영향 및 편익분석

2021년 부산지역의 미세먼지 연간평균농도는 27 ug/m³이며 WHO 가이드라인(20 ug/m³)을 달성하기 위하여 7 ug/m³의 저감이 필요하다. WHO 가이드라인을 달성할 경우 부산지역의 조기 사망자수 감소는 자연 사망이 74.4명, 심혈관계 질환 44.4명, 호흡기계 질환 34.8명으로 추정되었다. 이는 2021년 같은 원인에 의한 사망자수의 각각 약 0.3%, 0.8%, 1.6%에 해당되며, 2015년에서 2021년간 일평균 사망수와 비교할 경우 각각 1.3일, 3.1일, 5.7일 동안 발생하는 사망자수에 해당된다. 원인별 초과사망률과 조기 사망자 감소는 반대의 결과를 보이는데 이는 기준 사망률의 차이가 반영된 결과이다. 구군별 사망자수 감소는 인구가 많은 지역에서 적은 지역의 순서로 나타나고 있어 대기오염 저감정책의 실제적인 효과는 인구분포가 높은 지역에서 그 효율이 높은 것을 알 수 있다. 조기 사망자수 감소에 확률적 인간생명가치를 적용하여 경제적 가치를 계산하면 자연 사망자수 감소는 약 5,122억원, 심혈관계 질환 약 3,059억원, 호흡기계 질환 2,398억원의 가치로 추정된다.

- 초미세먼지에 의한 건강영향 및 편익분석

2021년 부산지역의 초미세먼지 연간평균농도는 15 ug/m³이며 WHO 가이드라인(10 ug/m³)을 달성하기 위하여 5 ug/m³의 저감이 필요하다. WHO 가이드라인을 달성할 경우 부산지역의 조기 사망자수 감소는 자연사망이 84.6명, 심혈관계 질환 43.3명, 호흡기계 질환 48.1명으로 추정되었다. 이는 2021년 같은 원인에 의한 사망자수의 각각 약 0.4%, 0.8%, 2.2%에 해당되며 2015년에서 2021년간 일평균 사망자수와 비교할 경우 각각 1.5일, 3.0일, 7.9일 동안 발생하는 사망자수에 해당된다. 미세먼지의 경우와 마찬가지로 기준 사망률의 차이가 반영되어 조기 사망자수와 초과사망률이 차이가 나고 있으며 구군별 사망자수 감소도 인구가 많은 지역에서 적은 지역의 순서를 보인다. 조기 사망자수 감소에 확률적 인간생명가치를 적용하여 경제적 가치를 계산하면 자연 사망자수 감소는 약 5,825억원, 심혈관계 질환 약 2,982억원, 호흡기계 질환 3,309억원의 가치로 추정된다.

표 6. 미세먼지 감소에 의한 조기 사망자수 감소와 경제가치 추정

	조기사망 감소(명)			건강편익 추정(백만원)		
	자연사망	심혈관	호흡기	자연사망	심혈관	호흡기
해운대	9.78	5.84	4.58	67,368	40,219	31,524
부산진	7.64	4.56	3.58	52,664	31,440	24,644
사하	6.62	3.95	3.10	45,616	27,232	21,345
북	6.12	3.65	2.86	42,158	25,168	19,727
동래	5.78	3.45	2.70	39,807	23,764	18,627
남	5.67	3.39	2.65	39,070	23,325	18,282
연제	5.20	3.10	2.43	35,790	21,366	16,747
금정	4.92	2.94	2.30	33,897	20,236	15,862
사상	4.51	2.69	2.11	31,095	18,563	14,550
기장	3.83	2.28	1.79	26,364	15,739	12,337
수영	3.79	2.26	1.77	26,125	15,596	12,225
강서	3.09	1.85	1.45	21,305	12,719	9,969
영도	2.39	1.43	1.12	16,490	9,844	7,716
서	2.28	1.36	1.06	15,675	9,358	7,335
동	1.90	1.13	0.89	13,069	7,802	6,115
중	0.88	0.52	0.41	6,031	3,601	2,822
합계	74.4	44.4	34.8	512,254	305,972	239,827

* 부산(환경정책평가연구원, 2008), PM-10에 의한 따른 자연사망감소 효과 2,340억원

* 울산(환경정책평가연구원, 2008), PM-10에 의한 따른 자연사망감소 효과 247억원

표 7. 초미세먼지 감소에 의한 조기 사망자수 감소와 경제가치 추정

	조기사망 감소(명)			경제성 추정(백만원)		
	자연사망	심혈관	호흡기	자연사망	심혈관	호흡기
해운대	11.07	5.67	6.29	76,277	39,045	43,326
부산진	8.69	4.45	4.94	59,870	30,646	34,006
사하	7.57	3.88	4.30	52,172	26,705	29,632
북	6.98	3.57	3.97	48,092	24,617	27,315
동래	6.60	3.38	3.75	45,436	23,258	25,806
남	6.42	3.29	3.65	44,237	22,644	25,127
연제	5.93	3.04	3.37	40,851	20,911	23,202
금정	5.52	2.83	3.14	38,021	19,463	21,598
사상	5.17	2.64	2.93	35,585	18,215	20,210
기장	4.37	2.23	2.48	30,075	15,395	17,082
수영	4.29	2.20	2.44	29,580	15,141	16,801
강서	3.52	1.80	2.00	24,269	12,422	13,784
영도	2.67	1.37	1.52	18,405	9,422	10,456
서	2.60	1.33	1.48	17,892	9,158	10,162
동	2.17	1.11	1.23	14,917	7,636	8,472
중	1.00	0.51	0.57	6,908	3,536	3,923
합계	84.6	43.3	48.1	582,587	298,214	330,902

4. 결론 및 제언

○ 조사결과

호흡기계 및 심혈관계 질환이 대기중의 입자상물질과 관련이 있음은 이미 알려진 사실이며 부산지역의 조기 사망자수 증가에 호흡기계 및 심혈관계 질환은 주요한 원인이 되고 있다. 일평균 (초)미세먼지와 호흡기계 및 심혈관계 질환 사망자수와 비선형 회귀모델을 구축한 결과 미세먼지 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하게 되면 자연 사망자수는 0.53%, 심혈관계 질환에 의한 사망자수는 1.24%, 호흡기계 질환에 의한 사망자수는 2.27%

증가하였고 초미세먼지는 각각 0.85%, 1.72%, 4.49%의 사망자수 증가를 가져왔으며 미세먼지보다는 초미세먼지의 위험성이 더 높고 특히 호흡기계 질환에 의한 사망자수의 증가가 뚜렷하였다.

BenMAP은 미국 EPA에서 대기질 변화에 따른 건강상의 편익분석을 위하여 개발한 프로그램으로 대기오염 물질의 농도변화에 관련된 건강영향을 예측하고, 그에 따른 경제적인 가치를 추정하는데 활용된다. BenMAP의 적용을 위하여 부산지역에 맞는 입력자료를 구축하였으며 경제성 분석을 위한 확률적 인간생명가치를 EPA 값을 활용하여 2021년 국내 값으로 재산정한 결과 6,868백만원으로 산정되었다.

미세먼지 연간 평균농도가 WHO 가이드라인(20 ug/m^3)을 달성할 경우 조기사망자수 감소는 자연사망이 74.4명, 심혈관계 질환 44.4명, 호흡기계 질환 34.8명으로 2021년 기준 사망자수의 각각 약 0.3%, 0.8%, 1.6%가 감소되며, 초미세먼지의 경우(10 ug/m^3) 자연사망이 84.6, 심혈관계 질환 43.3, 호흡기계 질환 48.1명 감소하고 2021년 같은 원인에 의한 사망자수의 각각 약 0.4%, 0.8%, 2.2%에 해당된다. 조기 사망자수 감소에 따른 경제적효과는 미세먼지의 경우 2,398억원에서 5,122억원, 초미세먼지의 경우 2,982억원에서 5,825억원으로 추정되었다.

○ 정책제언

대기환경 개선을 위한 다양한 정책으로 부산지역의 (초)미세먼지는 연간 환경기준을 만족하고 있지만 호흡기계 및 심혈관계 질환은 여전히 조기사망의 주요 원인이 되고 있다. 대기오염물질 농도 저감으로 이러한 사망자를 최고 2.2%까지 감소시킬 수 있으며 이에 따라 약 2,000억원 이상의 경제적인 효과가 있는 점은 농도개선을 위한 노력이 지속적으로 추진되어야 함을 의미한다.

(초)미세먼지는 농도는 사상구, 사하구, 강서구 등 서부 공업지역을 중심으로 높게 나타나지만 농도저감에 따른 건강개선 효과는 인구가 많은 지역을 중심으로 높게 나타나고 있다. 한정된 재원에서 정책 시행의 효율성을 최대화 하기 위해서는 인구밀집지역이 우선순위가 되어야 할 것으로 판단된다.