

# 대기오염에 의한 부산지역 건강 취약성 평가

○ 전년대비 구·군별 (초)미세먼지 및 오존 농도 변화에 따른 조기 사망자 수 변화와 경제성을 분석하여 정책 시행의 가치를 추정하고자 함

## 1. 조사개요

- 조사기간 : 2023년 1월 ~ 12월
- 조사대상 : 구·군별 전년 대비 질환별 조기 사망자 수 변화, 경제가치
- 조사항목 : 초미세먼지(PM-2.5), 미세먼지(PM-10), 오존(O<sub>3</sub>)  
(심혈관계 질환 : PM-2.5, PM-10 / 호흡기계 질환 : PM-2.5, PM-10, O<sub>3</sub>)

## 2. 조사방법

- BenMAP 프로그램
  - 프로그램 개요

BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)은 미국 EPA에서 대기질 변화에 따른 건강상의 편익분석을 위하여 개발한 프로그램으로 대기질 관련 규제나 정책수립의 근거를 제시할 목적으로 사용되어왔다. 대기오염물질의 농도 변화에 관련된 건강영향을 예측하고, 그에 따른 경제적인 가치를 추정하는 것이 주 기능으로 국내에서도 이미 사용된 바가 있다. 본 조사에서는 2021년 공개된 BenMAP-Community Edition 1.5(U.S. EPA)를 부산지역에 맞도록 수정하여 건강취약성 평가에 활용하였다.

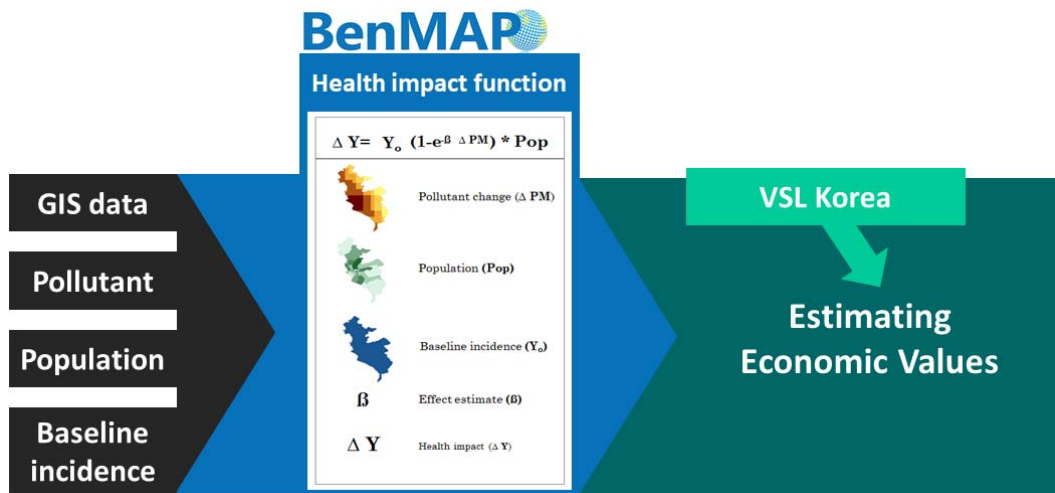


그림 1. BenMAP 프로그램 수행 흐름도

- 입력자료

BenMAP의 기본적인 입력자료는 분석대상 지역의 위치정보, 분석대상 물질의 농도, 인구분포, 초기 사망률 자료이며 건강영향함수를 적용하여 농도 변화에 따른 사망자 수 감소를 계산한다. 건강영향성 평가를 위한

인구집단은 전체연령과 65세 이상으로 구분하였고 사망자 수 감소에 따른 경제적 가치는 인간생명의 가치를 간접적으로 추정하는 사망위험감소가치를 활용한다. BenMAP 프로그램의 운영과정은 아래 그림과 같이 입력자료와 건강영향함수를 바탕으로 대기오염에 의한 초과 사망자 수를 계산하고 사망위험감소가치를 적용하여 경제적 가치를 추정하는 순으로 진행된다. 부산형 BenMAP 구축에 사용된 활용자료는 아래 표에 제시하였다.

표 1. (초)미세먼지 주의보/경보 발령 및 해제기준

	활용자료	출처
지리	도시대기측정소 위치	자체 자료
	구·군 지리정보	국가공간정보포털, <a href="https://nsdi.go.kr/">https://nsdi.go.kr/</a>
인구	주민등록 인구현황	행정안전부 연령별인구현황, <a href="ht센://jumin.mois.go.kr/">ht센://jumin.mois.go.kr/</a>
	사망원인별 사망자 수	통계청 마이크로데이터통합서비스, <a href="https://mdis.kostat.go.kr/">https://mdis.kostat.go.kr/</a>

○ 건강영향함수

- 일반화가법모형(Generalized Additive Model, GAM)

GAM은 변수 사이의 관계를 함수 형태가 아닌 실제 자료의 변화량에 근거하여 계산하며 설명변수들을 비모수적인 평활 함수로 통제하기 때문에 변수의 관계가 선형적이지 않을 때 적용할 수 있는 회귀모델이다(Choi et al., 2000; Bae, 2014). 사망원인별 사망자 수를 종속변수로 하고 기온, 상대습도, 해면기압의 일평균, 일최고 기온 등 기상요소에 의한 변화와 년, 월, 일 등 시간 요소에 의한 변화를 통제하기 위하여 평활함수를 적용하였고 요일과 계절은 더미변수를 생성하여 선형항으로 추가하여 최종적으로 (초)미세먼지의 일평균 및 오존의 8시간 평균의 일최고치를 독립변수로 하는 회귀식을 구축하였다. 회귀식 구축을 위하여 본 조사에서는 R 4.0.0 프로그램의 mgcv 패키지에서 제공되는 GAM의 함수를 사용하였다.

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-10, PM-2.5, O<sub>3</sub> model*

그림 2. GAM 회귀모형의 구조

- 일반화가법모형(Generalized Additive Model, GAM)

사망원인별 사망자 수를 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 아래 표와 같다. 각 사망원인별 구축된 회귀모델에서 예측되는 사망자 수와 실제 일별 사망자 수 간의 잔차의 정규성을 확인하였으며 예측값과 실측값의 일치도를 분석하여 회귀모델의 적정성을 확인하였다.

표 2. 사망원인별 GAM 회귀모델 구축에 사용된 변수

	사망원인별 case 구분	사용변수
전체 입력변수	기상요소	일평균 기온, 일최고 기온, 일평균 해면기압, 일평균 상대습도
	시간요소	요일, 계절, 년, 월, 일
	대기오염요소	국가공간정보포털, <a href="https://nsdi.go.kr/">https://nsdi.go.kr/</a>
선택된 입력변수	심혈관계 질환	일평균 기온, 일평균 상대습도, 년, 월, 일, 요일
	호흡기계 질환	해면기압, 년, 월

- 분석방법

회귀식에서 기상과 시간요소에 의한 영향을 통제하고 있기 때문에 (초)미세먼지항 및 오존의 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 가지므로 (Lin et al., 2017; Qiu et al., 2012) 당일에서 5일 전까지의 농도를 기본모델에 입력하고 그 영향이 최대가 되는 날을 선택하여 최종적인 모델을 구축하였다.

$RR = e^\beta$ ,  $\beta$  : Regression coefficient of PM10, PM2.5, O3·대기오염물질 농도에 따른 사망자 수의 변화량  
 $ER(\%) = (RR - 1) \times 100$  ·농도증가에 따라 기존 사망자 수보다 증가하게 되는 비율

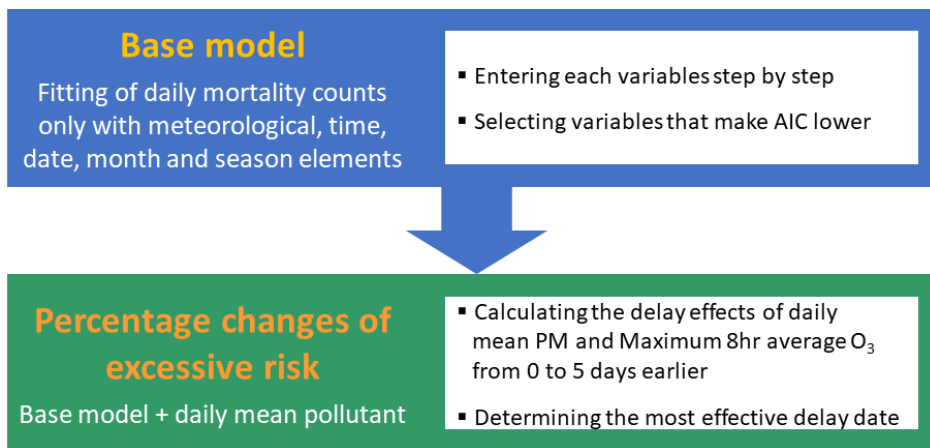


그림 3. GAM 회귀모델의 구축 과정

○ 사망위험감소가치(value of statistical life, VSL)

- 기본개념

조기 사망 감소에 따른 경제적인 효과는 사망위험 감소에 대한 지불의사금액을 의미하며 이는 사망위험감소가치로 환산할 수 있다. 사망위험감소가치는 개인에게 적용되는 사망가능 확률의 감소에 부여하는 지불의사금액을 사망가능성의 감소가 1이(사망) 될 때까지 합한 금액을 의미한다. 개인에 따라 차이는 있지만 사망가능성을 피하기 위한 지불의사금액을 사망하기까지 합한 값은 개인생명의 가치로 볼 수 있다. 인간생명가치의 추정은 다양한 방법과 많은 변수들을 고려해야 하므로 기존의 연구 결과를 활용하였다(신영철, 2006; 박정임 외, 2007; U.S. EPA, 1999; 한국환경연구원, 2023).

- 사망위험감소가치 추정

사망위험감소가치의 추정 방법은 국내 실정에 맞는 경제성 추정을 위하여 미국 EPA에서 산정된 값을 통해 추정하는 방식에서 한국환경연구원에서 평가한 값을 활용하는 것으로 변경하였다. 2020년 기준 대기오염에 의한 사망위험감소가치는 1,378,020,454원으로 추정(2022년 발표)되었고 이 수치를 BenMAP에 입력하여 대기오염에 의한 초과 사망자 수를 경제적 가치로 환산하는데 활용하였다.

$$(VSL)_{K_t} = (VSL)_{F_0} \times \left[ \frac{1\text{인당 } GDP(PPP)_{K_t}}{1\text{인당 } GDP(PPP)_{F_0}} \right]^\epsilon \times (\text{환율})_0 \times (CPI_{K_t} / CPI_{K_0})$$

$(VSL)_{K_t}$  : 정책대상지(policy site) 한국(K)의 t 연도 사망위험감소가치(VSL)

$(VSL)_{F_0}$  : 연구대상지(study site) 국가(F)의 0 년도(기준연도)의 사망위험감소가치(VSL)

1인당 GDP(PPP) : 구매력평가(PPP)를 반영한 1인당 GDP

CPI : 소비자물가지수(2020=100)

$\epsilon$  : 소득탄력성

### 3. 조사결과

#### ○ BenMAP 입력자료

##### - 부산형 BenMAP

부산형 BenMAP에 입력되는 자료는 행정구역의 지리정보와 2022년 도시대기측정소별 (초)미세먼지 일평균 농도 및 오존의 8시간 평균 농도의 일최고치, 2022년의 구·군별 인구통계, 기준 사망률 자료로, 최신 자료를 반영하였다. 2022년 부산시 총인구는 3,317,812명이었고 65세 이상 인구는 712,412명으로 전체 인구 중 21.5%를 차지하였으며 구·군별 인구수는 해운대구에서 약 386,785명으로 가장 많았고 중구에서 39,689명으로 가장 적었다. 2022년 말 기준 부산지역의 도시대기측정소는 28개소 운영되었고 일평균 농도의 2022년 연간평균을 구·군별로 산정하면 미세먼지는 23(영도구)~32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (사상구), 초미세먼지는 11(영도구)~19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (사상구) 범위였고 강서구와 사상구 등 서부지역에서 높았던 반면, 일최고 8시간 평균 오존의 평균치는 41(사상구)~51 ppb(기장군) 범위로 동부지역에서 높았던 것으로 나타났다.

표 3. 2022년 구·군별 65세 이상 연령 인구(명) 및 비율(%)

	해운대	부산진	사하	북	동래	남	연제	금정	사상	기장	수영	강서	영도	서	동	중
65세 이상	76,256	75,685	65,745	55,768	54,881	56,961	44,099	52,128	42,960	31,204	40,697	18,996	32,778	28,432	24,354	11,468
전체 연령	386,785	355,917	301,987	278,857	273,226	256,333	203,536	221,256	203,789	178,614	203,356	143,207	108,156	105,192	86,462	39,689
65세 이상 연령 비율	19.7	21.3	21.7	20.0	20.1	22.2	21.7	23.6	21.1	17.5	21.7	13.3	30.3	27.0	28.2	28.9

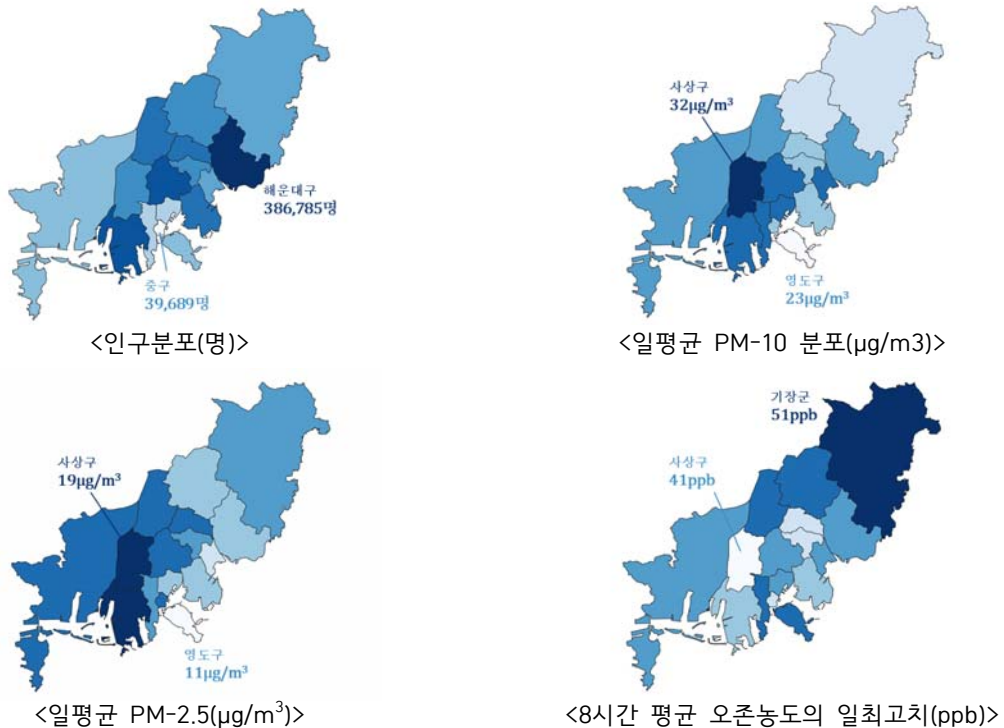


그림 4. 2022년 부산지역 인구분포 및 (초)미세먼지·오존 농도

- (초)미세먼지 기준 농도

부산지역의 연평균 미세먼지는 2015년 46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년 31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 초미세먼지는 2015년 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연간 대기환경기준(50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 비교하면 미세먼지는 하회하는 수준, 초미세먼지는 기준과 유사한 수준에서 감소추세이다. 2020년 세계적인 코로나19 팬데믹으로 전년보다 감소폭이 높았으며 이후 2022년에 가장 낮은 수준이다. 2023년에는 전년대비 황사 일수 증가(3일 → 9일)로 미세먼지 농도는 전년보다 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였고 초미세먼지 농도는 전년보다 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였다.

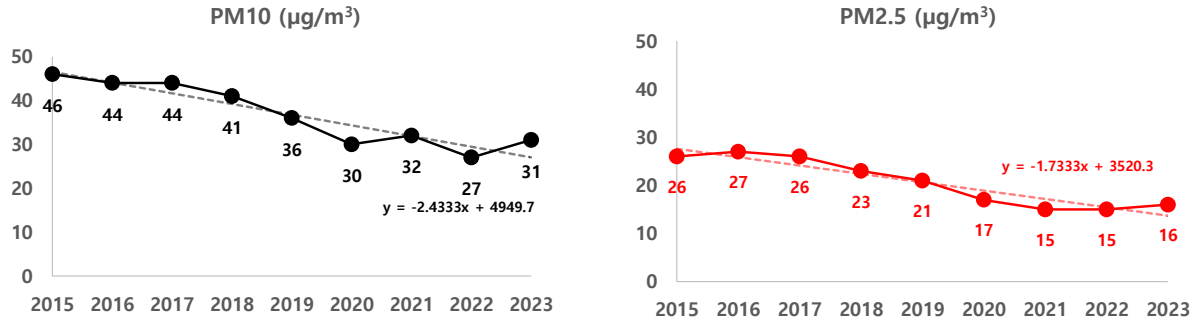


그림 5. 부산지역 (초)미세먼지 농도 변화(µg/m3)

2023년 구·군별 연평균 미세먼지 농도는 28 ~ 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전년과의 농도차가 0 ~ 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 초미세먼지는 13 ~ 19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전년과의 농도차가 -1 ~ 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2023년 건강영향을 추정하기 위한 기준 농도는 각 구·군별 전년과의 연평균 농도차로 하였다.

표 4. 전년대비 구·군별 (초)미세먼지 농도 변화(µg/m³)

	해운대	부산진	사하	북	동래	남	연제	금정	사상	기장	수영	강서	영도	서	동	중
PM10 (농도차)	+3	+4	+4	+3	+4	+6	+4	+5	+4	+5	+4	+5	+5	+3	0	+4
PM10 (2022)	27	30	30	28	25	26	26	23	32	24	29	28	23	30	30	25
PM10 (2023)	30	34	34	31	29	32	30	28	36	29	33	33	28	33	30	29
PM2.5 (농도차)	+1	+1	-1	0	+2	+2	+1	+1	0	0	+2	+2	+2	0	+2	-1
PM2.5 (2022)	14	17	18	16	16	14	15	14	19	15	13	17	11	15	14	16
PM2.5 (2023)	15	18	17	16	18	16	16	15	19	15	15	19	13	15	16	15

- 오존 기준 농도

부산지역의 연평균 오존 농도는 2015년 29 ppb에서 2023년 33 ppb로 연도에 따라 등락은 있지만 소폭 상승 추세이며, 8시간 평균 농도의 일최고치 연평균 또한 2015년 41 ppb에서 2023년 45 ppb로 소폭 상승 추세로 낮 시간대 농도가 일평균 농도 대비 11 ~ 13 ppb 높은 것으로 나타났다. 2023년 8시간 평균 오존 농도의 일최고치의 연평균은 전년보다 1 ppb 감소하였다.

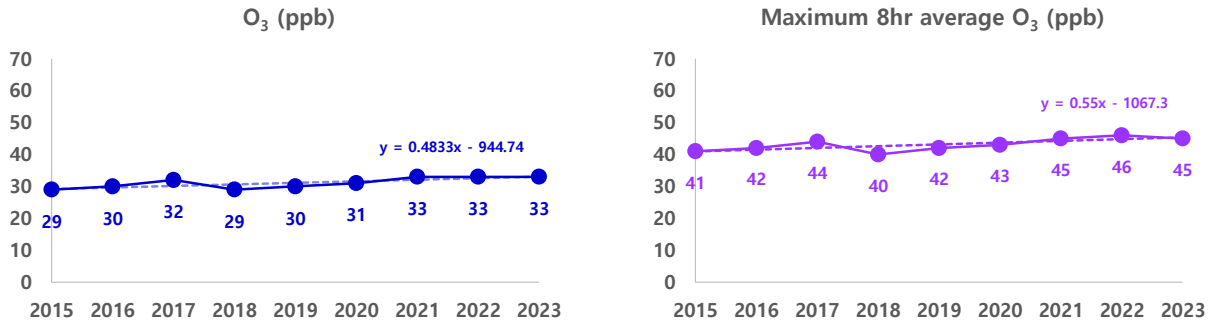


그림 6. 부산지역 오존 농도 변화(ppb) 및 추세분석

2023년 구·군별 8시간 평균 오존 농도의 일최고치 연평균은 40~51 ppb로 전년과의 농도차가 -3~5 ppb로 나타났다. 2023년의 건강영향을 추정하기 위한 기준 농도는 (초)미세먼지와 동일하게 구·군별 전년과의 연평균 농도차로 하였다.

표 4. 전년대비 구·군별 오존(8시간 평균 농도의 일최고치) 농도 변화(ppb)

	해운대	부산진	사하	북	동래	남	연제	금정	사상	기장	수영	강서	영도	서	동	중
O <sub>3</sub> (농도차)	0	-2	+1	-2	0	0	-2	-3	+1	0	+5	-2	-1	+1	+1	+2
O <sub>3</sub> (2022)	45	45	44	47	42	44	42	45	41	51	46	45	49	48	46	42
O <sub>3</sub> (2023)	45	43	45	45	42	44	40	42	42	51	51	43	48	49	47	44

- 사망자 수

2015년에서 2022년간 부산지역 사망자 수를 질병분류코드로 분류하였고 그 결과는 아래 표와 같다. 사고나 외인을 제외한 사망자 수(자연사망)는 18,870명에서 25,924명으로 전반적으로 증가하는 추세이고 심혈관계 질환에 의한 사망자 수는 4,999명에서 5,965명, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 2,037명에서 2,799명으로 8년간 일평균 사망자 수는 자연사망 57.4명, 심혈관계 질환 14.5명, 호흡기계 질환 6.3명으로 심혈관계 질환에 의한 사망자 수가 호흡기계 질환보다 다소 높았다. 65세 이상 연령의 심혈관계 질환에 의한 사망자 수는 4,495명, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 2,143명으로 각각 전체 사망자 수의 85.0%, 92.7%를 차지하였다.

BenMAP에 입력되는 기준 사망률은 장기적인 추세를 반영하기 위하여 2015년에서 2022년간 누적 인구수에 대한 사망자로 산정하였으며 65세 이상 인구나 65세 미만 인구로 구분하여 입력하였다. 65세 이상 인구 10만 명당 심혈관계 질환 사망자 수는 약 737명, 호흡기계 질환 사망자 수는 약 351명, 65세 미만 인구 10만 명당 약 26명, 호흡기계 질환 사망자 수는 약 7명 수준이었다.

표 5. 원인별 사망자 수 변화, 누적(일평균)

	자연사망	심혈관	호흡기
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)

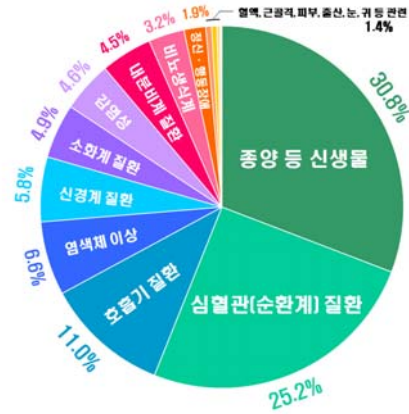


그림 7. 사망원인별 구성비율(누적)

○ 건강영향함수

- (초)미세먼지의 건강영향

(초)미세먼지의 건강영향함수는 입력자료 및 함수 인자를 재검토하여 개선하였다. 부산지역 심혈관 질환의 사망자 수는 3일 전 미세먼지 평균 농도와 당일의 초미세먼지 평균 농도에 가장 많은 영향을 받았고 호흡기계 질환의 사망자 수는 2일 전 미세먼지 평균 농도와 3일 전 초미세먼지 평균 농도에 가장 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 일평균 미세먼지 농도가 1 µg/m<sup>3</sup> 증가하면 심혈관 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.045%, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.079% 증가하고 일평균 초미세먼지가 1 µg/m<sup>3</sup> 증가하면 심혈관계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.048%, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.128% 증가하는 것으로 나타나 심혈관계 질환보다는 호흡기계 질환에 더 많은 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 65세 이상 연령에 한해서는 일평균 미세먼지가 1 µg/m<sup>3</sup> 증가하면 심혈관계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.035%, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.080% 증가하고 초미세먼지가 1 µg/m<sup>3</sup> 증가하면 심혈관계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.065%, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 최대 0.126% 증가하는 것으로 전체연령과 유사한 경향으로 나타났다. 미세먼지에 의한 심혈관계 질환 초과 사망률은 전체연령 > 65세 이상, 호흡기계 질환 초과 사망률은 65세 이상 > 전체연령, 초미세먼지에 의한 심혈관계 질환 초과 사망률은 65세 이상 > 전체 연령, 초미세먼지에 의한 호흡기계 질환 초과 사망률은 전체연령 > 65세 이상으로, (초)미세먼지 농도 변화에 따른 초과 사망률의 고저는 연령에 따라 일정한 경향을 보이지 않았고 질환별 사망자 수 변화의 수치 상관성에 따라 다르게 나타났다.

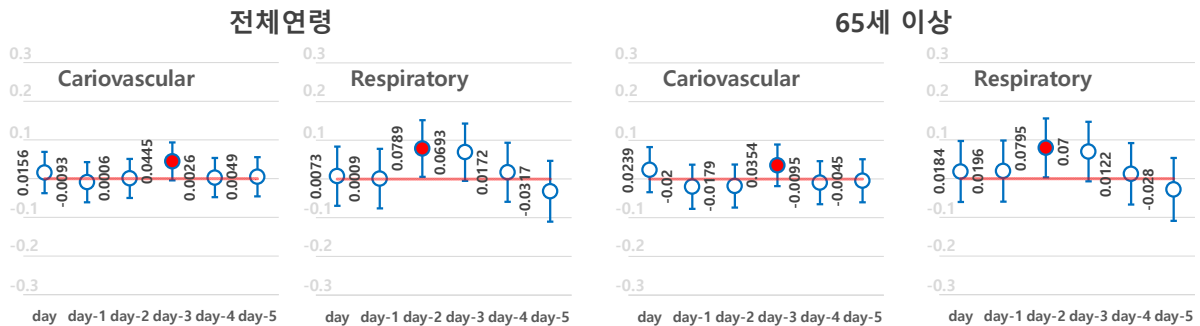


그림 8. 일평균 미세먼지 자연인자별 초과 사망률 분포(%)

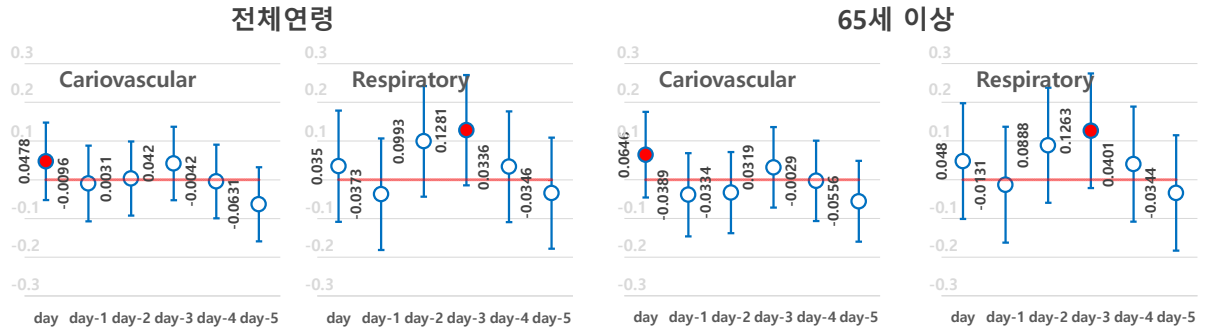


그림 9. 일평균 초미세먼지 자연인자별 초과 사망률 분포(%)

- 오존의 건강영향

오존의 건강영향함수를 산정한 결과, 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 3일 전 8시간 평균 오존농도의 일최고치에 가장 많은 영향을 받았다. 3일 전의 8시간 평균 오존농도의 일최고치가 1 ppb 증가하면 호흡기계 질환에 의한 사망자 수는 0.065% 증가하는 것으로 나타났고 65세 이상 연령에 한해서는 0.088%로 전체 연령에 비해 초과 사망률이 높은 것으로 나타났다.

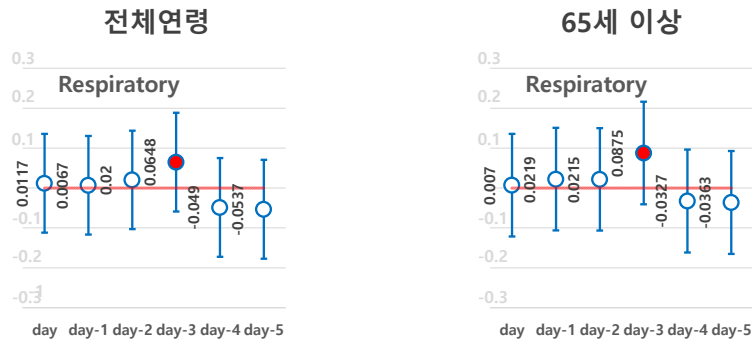


그림 10. 오존(8시간 평균 농도의 일최고치)에 의한 호흡기계 질환 초과 사망률 분포(%)

- 기준 농도 변화에 따른 건강영향

(초)미세먼지의 변화 농도가 1 ~ 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준에서 동일한 경우 전체연령의 심혈관계 질환에 의한 초과 사망률은 미세먼지가 0.044 ~ 0.446%, 초미세먼지가 0.048 ~ 0.479%, 호흡기계 질환에 의한 초과 사망률은 미세먼지가 0.079 ~ 0.792%, 초미세먼지가 0.128 ~ 1.288로 초미세먼지의 초과 사망률이 상대적으로 높았으며 호흡기계 질환에 의한 초과 사망률이 심혈관계 질환 대비 미세먼지가 1.8배 초미세먼지가 2.7배 높은 것으로 나타났다. 65세 이상 연령에서는 1 ~ 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 변화에 따라 심혈관계 질환에 의한 초과 사망률이 미세먼지가 0.035 ~ 0.354% 초미세먼지가 0.065 ~ 0.648%, 호흡기계 질환에 의한 초과 사망률이 미세먼지가 0.079 ~ 0.797%, 초미세먼지가 0.128 ~ 1.288%로 전체 연령과 유사한 경향을 보였다. 오존의 경우 8시간 평균 농도의 일최고치가 1 ~ 10 ppb 변화함에 따라 호흡기계 질환에 의한 초과 사망률은 전체연령에서 0.065 ~ 0.650%, 65세 이상에서 0.087 ~ 0.878%로 나타났다.



표 6. (초)미세먼지 및 오존(8시간 평균 농도의 일최고치) 변화에 따른 초과 사망률(%)

		변화 농도[(초)미세먼지( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 오존(ppb)]										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
전체연령	심혈관	PM10	0.044	0.089	0.134	0.178	0.223	0.267	0.312	0.356	0.401	0.446
		PM2.5	0.048	0.096	0.144	0.192	0.239	0.287	0.335	0.383	0.431	0.479
	호흡기	PM10	0.079	0.158	0.237	0.316	0.395	0.474	0.554	0.633	0.712	0.792
		PM2.5	0.128	0.256	0.385	0.513	0.642	0.771	0.900	1.029	1.159	1.288
		O <sub>3</sub>	0.065	0.130	0.195	0.259	0.324	0.389	0.455	0.520	0.585	0.650
65세 이상	심혈관	PM10	0.035	0.071	0.106	0.142	0.177	0.213	0.248	0.283	0.319	0.354
		PM2.5	0.065	0.129	0.194	0.259	0.324	0.388	0.453	0.518	0.583	0.648
	호흡기	PM10	0.079	0.159	0.239	0.318	0.398	0.478	0.558	0.637	0.717	0.797
		PM2.5	0.126	0.253	0.379	0.506	0.633	0.760	0.887	1.015	1.142	1.270
		O <sub>3</sub>	0.087	0.175	0.263	0.350	0.438	0.526	0.614	0.702	0.790	0.878

○ BenMAP 수행결과

- 미세먼지에 의한 건강영향 및 편익분석

2023년 부산지역의 구·군별 전년대비 미세먼지 연평균 농도 변화는 0 ~ +6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  범위로 전체적으로 상승 추세인 것으로 나타났으며, 이를 기준으로 한 조기 사망자 수는 심혈관계 질환이 8.851명, 호흡기계 질환이 9.025명 증가하는 것으로 추정되었다. 이는 2015 ~ 2022년 같은 원인에 의한 연간 사망자 수의 평균 대비 각각 약 0.17%, 0.39%에 해당되고 일평균 사망자 수와 비교할 경우 각각 0.61일, 1.42일 동안 발생하는 사망자 수에 해당된다. 구·군별 조기 사망자 수는 심혈관계 질환이 0 ~ +1.010명, 호흡기계 질환이 0 ~ +1.025명으로 상승 농도가 높은 지역(남구)과 인구가 많은 지역(해운대)에서 조기 사망자 수가 높게 나타났다. 조기 사망자 수 증가에 사망위험감소가치를 적용하여 경제적 가치를 계산하면 심혈관계 질환은 약 122억원, 호흡기계 질환 약 124억원의 손실로 추정되며 65세 이상 인구 대상으로는 심혈관계 질환이 약 105억원(7.603명), 호흡기계 질환이 약 116억원(8.438명)으로 각각 전체 연령의 조기 사망자의 85.9%, 93.5%를 차지하는 것으로 나타났다.

표 7. 미세먼지 변화에 의한 조기 사망자 수 변화와 경제가치 추정

	조기 사망 변화(명)				경제가치 추정(만원)			
	심혈관		호흡기		심혈관		호흡기	
	전체연령 [65세 이상]	[65세 이상]	전체연령 [65세 이상]	[65세 이상]	전체연령 [65세 이상]	[65세 이상]	전체연령 [65세 이상]	[65세 이상]
해운대	+1.010	[+0.860]	+1.025	[+0.955]	-139,161	[-118,520]	-141,262	[-131,549]
부산진	+0.746	[+0.640]	+0.760	[+0.710]	-102,750	[-88,171]	-104,733	[-97,872]
사하	+0.779	[+0.671]	+0.795	[+0.745]	-107,316	[-92,477]	-109,620	[-102,637]
북	+0.596	[+0.506]	+0.604	[+0.561]	-82,157	[-69,704]	-83,230	[-77,369]
동래	+0.673	[+0.572]	+0.682	[+0.635]	-92,804	[-78,803]	-94,048	[-87,460]
남	+0.987	[+0.853]	+1,009	[+0.947]	-135,965	[-117,584]	-139,100	[-130,453]
연제	+0.615	[+0.529]	+0.627	[+0.587]	-84,729	[-72,889]	-86,468	[-80,897]
금정	+0.779	[+0.671]	+0.760	[+0.716]	-101,758	[-88,879]	-104,687	[-98,627]
사상	+0.518	[+0.444]	+0.528	[+0.493]	-71,415	[-61,185]	-72,721	[-67,907]
기장	+0.488	[+0.403]	+0.487	[+0.447]	-67,228	[-55,511]	-67,109	[-61,597]
수영	+0.507	[+0.442]	+0.521	[+0.490]	-69,865	[-60,900]	-71,806	[-67,588]
강서	+0.296	[+0.229]	+0.286	[+0.254]	-40,800	[-31,578]	-39,381	[-35,042]
영도	+0.465	[+0.422]	+0.488	[+0.468]	-64,065	[-58,098]	-67,275	[-64,468]
서	+0.314	[+0.280]	+0.327	[+0.311]	-43,218	[-38,567]	-44,994	[-42,805]
동	-		-		-		-	
중	+0.119	[+0.108]	+0.125	[+0.119]	-16,449	[-14,820]	-17,216	[-16,449]
합계	+8.851	[+7.603]	+9.025	[+8.438]	-1,219,681	[-1,047,686]	-1,243,652	[-1,162,719]

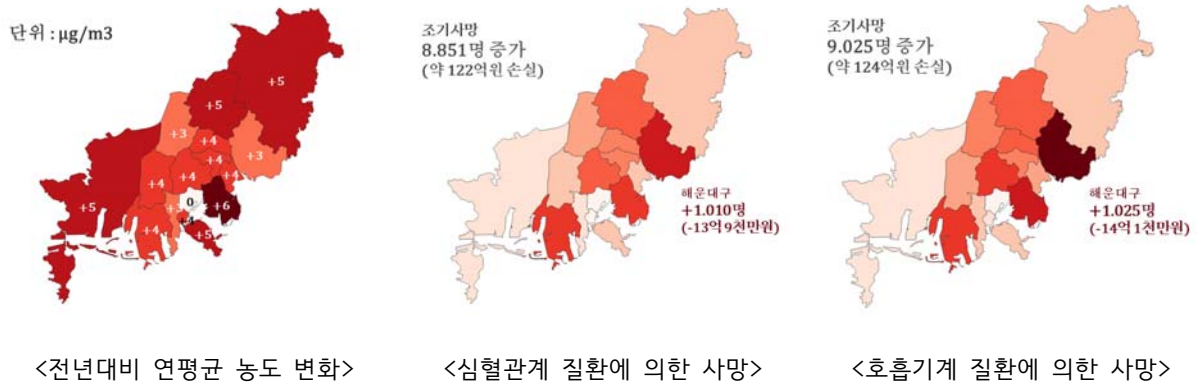


그림 11. 미세먼지 증가에 의한 조기 사망자 수 변화와 경제가치 추정

- 초미세먼지에 의한 건강영향 및 편익분석

2023년 부산지역의 구·군별 전년대비 초미세먼지 연평균 농도 변화는  $-1 \sim +2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체적으로 상승 추세인 것으로 나타났으며, 이를 기준으로 한 조기 사망자 수는 심혈관계 질환이 3.068명, 호흡기계 질환이 2.895명 증가하는 것으로 추정되었다. 이는 2015~2022년 같은 원인에 의한 연간 사망자 수의 평균 대비 각각 약 0.06%, 0.13%에 해당되고 일평균 사망자 수와 비교할 경우 각각 0.21일, 0.46일 동안 발생하는 사망자 수에 해당된다. 구·군별 조기 사망자 수는 심혈관계 질환이  $-0.255 \sim +0.586$ 명, 호흡기계 질환이  $-0.241 \sim +0.554$ 명 으로 미세먼지와 유사하게 인구분포의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 조기 사망자 수 증가에 사망위험감소가치를 적용하여 경제적 가치를 계산하면 심혈관계 질환은 약 42억원, 호흡기계 질환 약 40억원의 손실로 추정되며 65세 이상 인구 대상으로는 심혈관계 질환이 약 39억원(2.804명), 호흡기계 질환이 약 37억원(2.707명)으로 각각 전체 연령의 조기 사망자의 91.4%, 93.5%를 차지하는 것으로 나타났다.

표 8. 초미세먼지 변화에 의한 조기 사망자 수 변화와 경제가치 추정

	조기 사망 변화(명)				경제가치 추정(만원)			
	심혈관		호흡기		심혈관		호흡기	
	전체연령 [65세 이상]	65세 이상	전체연령 [65세 이상]	65세 이상	전체연령 [65세 이상]	65세 이상	전체연령 [65세 이상]	65세 이상
해운대	+0.500	[+0.454]	+0.471	[+0.438]	-68,948	[-62,561]	-64,971	[-60,413]
부산진	+0.419	[+0.382]	+0.395	[+0.369]	-57,759	[-52,655]	-54,489	[-50,847]
사하	-0.255	[-0.233]	-0.241	[-0.225]	+35,102	[+32,085]	+33,154	[+30,999]
북	-	-	-	-	-	-	-	-
동래	+0.323	[+0.293]	+0.304	[+0.283]	-44,535	[-40,334]	-41,946	[-38,949]
남	+0.586	[+0.537]	+0.554	[+0.519]	-80,796	[-74,014]	-76,292	[-71,454]
연제	+0.344	[+0.314]	+0.324	[+0.303]	-47,364	[-43,246]	-44,697	[-41,758]
금정	+0.240	[+0.221]	+0.227	[+0.214]	-33,084	[-30,494]	-31,297	[-29,448]
사상	-	-	-	-	-	-	-	-
기장	-	-	-	-	-	-	-	-
수영	+0.371	[+0.342]	+0.351	[+0.330]	-51,163	[-47,099]	-48,372	[-45,473]
강서	+0.143	[+0.122]	+0.133	[+0.118]	-19,661	[-16,787]	-18,260	[-16,210]
영도	+0.226	[+0.213]	+0.215	[+0.206]	-31,161	[-29,392]	-29,643	[-28,380]
서	-	-	-	-	-	-	-	-
동	+0.186	[+0.175]	+0.177	[+0.168]	-25,654	[-24,048]	-24,365	[-23,219]
중	-0.017	[-0.016]	-0.016	[-0.015]	+2,302	[+2,163]	+2,189	[+2,089]
합계	+3.068	[+2.804]	+2.895	[+2.707]	-422,719	[-386,382]	+398,990	[+373,062]



<전년대비 연평균 농도 변화>      <심혈관계 질환에 의한 사망>      <호흡기계 질환에 의한 사망>

그림 12. 미세먼지 증가에 의한 조기 사망자 수 변화와 경제가치 추정

- 오존에 의한 건강영향 및 편익분석

2023년 부산지역의 구·군별 전년대비 8시간 평균 농도의 일최고치 연평균 변화는 -3~+5 ppb로 전체적으로 감소 추세인 것으로 나타났으며, 이를 기준으로 한 호흡기계 질환 조기 사망자 수는 0.587명 감소하는 것으로 추정되었다. 구·군별 호흡기계 질환에 의한 조기 사망자 수는 -0.498~+0.393명으로 (초)미세먼지와 유사하게 인구분포의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 조기 사망자 수 감소에 사망위험감소가치를 적용하여 경제적 가치를 계산하면 호흡기계 질환 약 8억원의 이익으로 추정되며 65세 이상 인구 대상으로는 약 7억 6천만원(0.552명)으로 전체 연령의 조기 사망자의 94.0%를 차지하는 것으로 나타났다.

표 9. 오존 변화에 의한 조기 사망자 수 변화와 경제가치 추정

	조기 사망 변화(명)		경제가치 추정(만원)	
	호흡기	호흡기	호흡기	호흡기
	전체연령 [65세 이상]	전체연령 [65세 이상]	전체연령 [65세 이상]	전체연령 [65세 이상]
해운대	-	-	-	-
부산진	-0.382 [-0.363]		+52,690 [+50,078]	
사하	+0.216 [+0.205]		-29,710 [-28,278]	
북	-0.411 [-0.389]		+56,677 [+53,654]	
동래	-	-	-	-
남	-	-	-	-
연제	-0.096 [-0.091]		+13,237 [+12,592]	
금정	-0.498 [-0.476]		+68,608 [+65,610]	
사상	+0.061 [+0.058]		-8,451 [-8,028]	
기장	-	-	-	-
수영	+0.393 [+0.376]		-54,175 [-51,771]	
강서	-0.068 [-0.062]		+9,385 [+8,593]	
영도	-0.029 [-0.028]		+3,972 [+3,847]	
서	+0.120 [+0.116]		-16,534 [-15,928]	
동	+0.052 [+0.051]		-7,233 [-6,982]	
중	+0.055 [+0.053]		-7,573 [-7,319]	
합계	-0.587 [-0.552]		+80,893 [+76,068]	

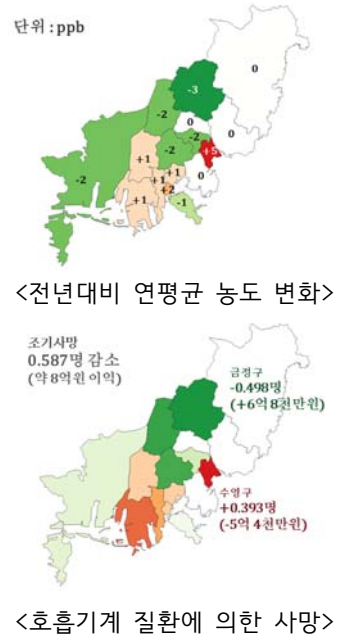


그림 13. 오존 변화에 의한 조기 사망자 수 변화와 경제가치 추정

#### 4. 결론

##### ○ 조사결과

- 건강영향함수의 입력자료를 개선하여 일평균 (초)미세먼지와 호흡기계 및 심혈관계 질환 사망자 수와 비선형 회귀모델을 구축한 결과 미세먼지 농도 1~10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  변화에 따른 초과 사망률은 심혈관계 질환에 의한 사망이 0.044~0.446%, 호흡기계 질환에 의한 사망이 0.079~0.792%로 나타났으며, 초미세먼지는 동일한 변화에서 심혈관계 질환에 의한 사망이 0.048~0.479%, 호흡기계 질환에 의한 사망이 0.128~1.288%로 나타났다. 또한 오존의 8시간 평균 오존농도의 일최고치의 연평균 1~10 ppb 변화에 따른 호흡기계 질환 초과 사망률은 0.065~0.650%로 나타났다.
- 부산형 BenMAP의 입력자료를 최신화하고 사망위험감소가치를 국내 자료(한국환경연구원)인 1,378,020,454원으로 적용한 결과, 미세먼지로 인한 전년대비 조기 사망자 수 증가는 심혈관계 질환이 8.851명, 호흡기계 질환 9.025명 증가하여 경제적 손실은 약 246억원, 초미세먼지의 경우 심혈관계 질환 3.068명, 호흡기계 질환 2.895명 증가하여 경제적 손실이 약 82억원, 오존의 경우 호흡기계 질환에 의한 조기 사망자 수가 0.587명 감소하여 경제적 이익은 약 8억원으로 추정되었다. 전체 연령의 조기 사망자 중 65세 이상 연령이 차지하는 비율이 85.9~94.0%로 대부분을 차지하였고 질환별로 비교해보면 호흡기계 질환의 관여율이 비교적 높은 것으로 나타났다.

#### 5. 의견

- 대기오염에 의한 조기 사망자 수는 전년대비 대기오염 농도 변화가 높은 지역과 인구가 많은 지역에서 큰 폭으로 증가하므로 대기오염 저감 정책의 효과를 높이기 위해서는 농도 저감을 위한 노력이 필요하며 한정된 재원에서 정책 시행의 효용성을 최대화 하기 위해서는 인구밀집지역이 우선순위가 되어야 할 것으로 판단된다.
- 또한 조기 사망자의 대부분이 65세 이상 연령이 차지하므로 인구밀집지역 선정에는 연령분포가 고려되어야 할 것으로 판단된다.