

새로운 통합대기환경지수 개발과 호흡기 및 심혈관계 질환 사망에 미치는 영향*

New Comprehensive Air-Quality Index (NCAI) and Its Effects on Respiratory and Cardiovascular Diseases

신재은**

Jaeun Shin

요약: 대기오염과 기상인자가 호흡기 및 심혈관계 질환에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 기존 우리나라에서 수행된 미세먼지와 사망과의 연관성에 관한 연구는 대도시를 중심으로 하였거나, 대기오염물질 각각의 위해성을 분석한 연구에 국한되었다. 이에 본 연구는 대기오염으로 인하여 심혈관 및 호흡기계 질환 사망에 미치는 영향을 종합적으로 고려하고자 통합대기환경지수를 새롭게 제시하였고, 분석대상을 전국으로 확대하였으며, 기상인자를 고려하여 일반화 부가모형(Generalized additive model)으로 분석하였다. 데이터는 환경부 대기환경정보(AirKorea)에서 2015년부터 2018년까지 각 오염물질의 농도자료를 이용하여 통합대기환경지수를 계산하였고 통계청의 사망자료와 기상청의 기상자료를 이용하였다.

첫 번째로 기준값, 구분값, 가산점 적용을 고려하여 적합성이 높은 모델을 선정하였다. 분석 결과 가중치를 제거한 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 모델의 적합성이 높은 것으로 나타났다. 두 번째로, 사망자의 연령과 질환에 따라 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해서 구분하여 통합대기환경지수(CAI)와 새로운 통합대기환경지수(NCAI)를 비교한 결과, 「65세 이상 호흡기계 질환사망자」를 종속변수로 「새로운 통합대기환경지수(NCAI)」를 독립변수로 사용한 모델의 AIC가 6.28로 가장 낮았고, 평균제곱근오차(RMSE) 값도 7.33으로 가장 작게 나타나 적합한 모델로 나타났다. 세 번째로 대기오염이 사망에 영향을 미치는지 알아보기 위해 지연효과(lag effect)를 고려하여 6일전까지 상대위험비(Relative Risk)를 분석하였다. 분석 결과 상대위험비는 통합대기환경지수(CAI)와 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 모두 1일전(lag)이 가장 높게 나타났으며 65세 이상 호흡기계 사망에 대하여 통합대기환경지수(CAI) 28.584 일 때 1.0577 [1.0111, 1.1043]로 초과 사망 위험이 5.7% 증가하며, 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 52.89일 때 1.0784 [1.0421, 1.1146]로 7.84%로 초과사망 위험이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 통하여 새로운 통합대기환경지수의 상대위험비가 높게 나타나며, 65세 이상 호흡기 관련 사망은 하루 전 대기오염 농도와 높은 영향이 있음을 증명하였다.

핵심주제어: 통합대기환경지수, 일반화 부가 모형, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환 사망, 상대위험비

Abstract: Although air pollution and meteorological factors are known to have an effect on respiratory and cardiovascular diseases, previous studies on the relationship between fine dust and death conducted in Korea have only focused on large cities or have been limited to analyzing the risks of each air pollutant. Therefore, this study newly proposed the comprehensive air-quality standard in order to consider the effects of air pollution on cardiovascular and respiratory mortality. The analysis subjects were expanded to be

* 좋은 의견으로 연구에 도움을 주신 익명의 심사자님께 깊이 감사드립니다.

** 충북대학교 경제학과 박사과정

nationwide and analyzed with a generalized additive model in consideration of meteorological factors. Comprehensive air-quality index was measured by using the concentration data of each pollutant from 2015 to 2018 from Airkorea. The analysis was performed using mortality data from the National Statistical Office and meteorological data from the Meteorological Administration.

First, a model with high suitability was selected in consideration of the application of the reference value, distinct value, and additional point. As a result of the analysis, the suitability of the new comprehensive air-quality index model with the weight removed was confirmed to be high. Second, the comprehensive air-quality index (CAI) and the new comprehensive air-quality index (NCAI) were compared to find out how it was affected by factors such as the deceased's age and diseases. As a result, the AIC of the model using the 「Respiratory disease deaths over 65 years of age」 as the dependent variable and NCAI as the independent variable was the lowest at 6.28. The root mean square error (RMSE) value was also the lowest at 7.33, indicating it a suitable model. Third, in consideration of the lag effect, the relative risk was analyzed up to 6 days prior in order to find out whether air pollution affects mortality. As a result of the analysis, relative risk was highest at 1 day before (lag) in both the CAI and NCAI. The respiratory mortality over 65 years of age was 1.0577 [1.0111, 1.1043] when the CAI was 28.584, which increases the risk of excess death by 5.7%. It was 1.0784 [1.0421, 1.1146] when the NCAI was 52.89, which increases the risk of excess death by 7.84%. The results of this study confirmed that the relative risk of the NCAI was high and respiratory mortality over 65 years of age was highly related with air pollution levels one day prior.

Key Words: Comprehensive Air-Quality Index, Generalized Addictive Model, Cardiovascular Mortality, Respiratory Mortality, Relative Risk

I. 서론

대기오염의 악화는 전 세계적으로 많은 영향을 미치고 있다. 세계보건 기구(WHO)에 따르면 대기오염 노출로 6백만 명 이상의 조기 사망이 발생했다고 추정했다(WHO, 2017). 특히 OECD 국가 중 우리나라와 일본에서 가장 큰 조기 사망자 수의 증가가 나타날 것이라고 보고하고 있어 대기오염으로 인한 사망 연구의 중요성이 점차 커지고 있다(OECD, 2016). 대기오염에 의한 건강 영향에 대한 연구는 각종 질환 유병률 증가 연구, 병원 입원 및 응급실 방문에 관한 연구, 건강 영향의 가장 중요한 부분인 사망에 관한 연구로 확장된다. 특히 인구 집단 내에서는 기존의 만성질환자뿐만 아니라 노인 호흡기 및 순환기계 환자, 어린이, 임산부를 대상으로 한

연구결과 일반 인구 집단보다 사망위험이 큰 것으로 보고되었다(Pearson et al., 2010; Ailshire et al., 2014; Cadelis et al., 2014).

대기오염의 특성상 오염된 공기를 호흡 할 때 호흡기 자극, 폐 기능 감소, 천식 악화 등과 같은 질환을 유발하는 등 건강에 직접적이고 즉각적으로 영향을 미치기 때문에, 취약계층은 외출자제 등 오염된 공기를 회피하는 행동 변화만으로도 건강피해를 예방 및 관련 질병 발생을 줄일 수 있다. 따라서 국가 차원에서 제공하는 누구나 이해하기 쉽고 알기 쉬운 대기 오염 현황의 정보 제공은 국민에게 오염된 공기를 호흡할 때 발생할 수 있는 건강 관련 영향을 확인할 수 있도록 하며, 취약 집단의 합병증 및 증상 발생을 미연에 피하게 하는 중요한 역할을 한다. 이에 우리나라는 2018년 8월 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제23조에서 어린이, 노인 등을 대기오염으로부터 취약한 계층으로 지정하고 취약계층의 건강피해를 줄이고 예방하기 위하여 통합대기환경지수(Comprehensive air-quality index: 이하 CAI)를 제시하였다. 그러나 최근 대기오염의 심화로 통합대기환경지수(CAI)의 중요성이 커지면서 국민이 느끼는 체감 오염도를 제대로 반영하지 못한다는 의견이 꾸준히 제기되어 왔다. 또한 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도뿐 아니라 2차 생성물질을 고려하여 종합적으로 건강 영향을 추정해야 한다는 의견도 지속적으로 주장되고 있다(김승도, 2018; 이재운 등, 2018).

이에 본 연구는 현재 우리나라에서 측정되고 있는 6개의 오염물질을 이용하여 산출하는 통합대기환경지수(CAI)를 이용하여 대기오염을 종합적으로 고려하여 건강 영향을 분석하고자 하였으며, 통합대기환경지수의 구간 및 단계, 색상표시에 관한 연구를 통하여 취약계층의 건강 영향에 도움을 줄 수 있는 보다 설명력이 높은 통합대기환경기준을 제시하고자 하였다.

본 연구는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 해외연구사례 및 기준값에 관한 연구를 통하여 새로운 통합대기환경지수(New Comprehensive air-quality index: 이하 NCAI)를 개발하였다. 또한 통합대기환경지수의 각 오염물질을 계산할 때 기준이 되는 기준값(일 평균값, 일 최고값 등)과 가산

점 적용 여부가 적절한지 분석하였으며, 구분값 색상 및 구간명칭을 설정하여 최종적으로 새로운 통합대기환경지수(NCAI)를 제시하였다.

두 번째는 사망자의 연령과 질환에 따라 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해서 전체 사망자, 65세 이상 사망자, 65세 이상 호흡기 및 심혈관계 질환 사망자로 구분하여 통합대기환경지수(CAI)와 새로운 통합대기환경지수(NCAI)를 비교하였다. 대기오염 농도증가에 따른 통합대기환경지수 값이 증가함에 따라 사망에 미치는 영향을 평가하기 위하여 일반화부가모형으로 분석하여 가장 적합한 모델을 선정하였고, 대기오염물질이 어느 정도 기간을 두고 사망에 영향을 미치는지 평가하기 위하여 지연효과(lag effect)를 고려하여 상대위험비(Relative Risk)를 산출하였다.

국내외 연구결과를 종합해보면 인종적, 사회적 차이에도 불구하고 대기오염이 호흡기 및 심혈관계 질환 발생 및 입원에 유의한 영향이 있으며, 일별 및 연 사망률이 증가하는 원인이 되는 것으로 일관적으로 보고되고 있다. 또한, 국내에서 대기오염의 위해성에 관한 연구는 활발히 이루어져 왔지만(양원호, 2019) 사망에 관한 연구는 대도시에 국한되거나 미세먼지, 초미세먼지 등 각각 개별 오염물질이 인체에 미치는 영향을 분석한 연구에 국한되었다(박형준 등, 2020; 김옥진, 2018; 김수인 등, 2018). 이에 본 연구는 분석대상을 전국으로 확대하였으며, 단일 대기오염물질이 아닌 대기오염의 건강 영향을 포괄적으로 고려하고자 통합대기환경지수를 이용하였다는 것에 의미가 있다. 통합대기환경지수에 대한 연구는 정확하고 신뢰성 있는 정보를 전달함으로써 국민 건강 증진에 도움이 될 수 있으며, 향후 취약계층의 정책 적용 및 건강 위해성 평가 및 국민의 건강관리의 기초자료가 될 것으로 생각한다.

II. 통합대기환경지수

1. 통합대기환경지수 개발 필요성

1) 대기오염지수 현황

우리나라의 고농도 미세먼지 발생으로 인한 피해가 커지면서 미세먼지에 대한 국민적 관심이 증가 되었다. 이에 따라 국가 차원의 신속하고 정확한 예보 제공의 필요성이 커짐에 따라 대기 정보 예보제를 도입하게 되었다. 대기 정보 예보제는 국민의 건강과 재산은 물론 동식물 생육 산업 및 경제활동에 미치는 피해를 최소화하기 위하여 도입된 제도이다. 오염된 공기를 호흡할 때 발생할 수 있는 건강 관련 영향이 있는지 확인하는 기준이 된다. 국립환경과학원 대기질통합예보센터에서 대기오염 상황을 사전에 알려 미리 대비할 수 있도록 2014년 2월부터 본격적으로 대기정보 예보를 시작하였다. 대기 정보 예보는 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 오존(O₃)을 기준으로 전국 19개 권역¹⁾에 대해 1일 4회(오전 5시, 오전 11시, 오후 5시, 오후 11시), 4구간(좋음-보통-나쁨-매우 나쁨)의 대기오염 농도 등급으로 알리고 있다. 그러나 대기 정보 예보제도는 대기오염물질 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 오존(O₃)의 3가지 대기오염물질을 대상으로 하였으며 2015년부터 2018년까지 초미세먼지(PM_{2.5}) 예보와 실측농도를 비교한 결과, 초미세먼지(PM_{2.5})의 예보 정확도는 15년 86%, 16년 88%, 17년 88%이었으나 고농도에서는 15년 69%, 16년 72%, 17년 72%로 나타나 전체 예보결과보다 고농도 등급인 나쁨, 매우 나쁨 등급에서 예보 적중률이 낮은 것으로 나타났다.²⁾ 이에 무엇보다 피해가 크고 정확해야 할 고농도 구간 예보에 대한 적절성 및 정확성에 대한 문제가 제기되었다. 국민에게 건강 영향을 전달하고 국가 차원의 대응조치가 적

1) 서울·인천·경기 남부·경기 북부/영동·영서/대전·충북·충남·세종/광주·전북·전남/부산·대구·울산·경북·경남/제주.

2) 환경부(2019).

절하게 이루어지기 위해서는 적절한 예보 정보의 활용이 필요하다. 예보에 활용된 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 오존(O₃) 외에도 6가지 대기오염물질(SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5})에 대하여 이에 나라마다 나라의 실정에 맞는 국가 표준을 설정하여 자국민의 건강을 보호하고 있다.

우리나라는 1980년 대기환경보전법 제3조(상시측정) 및 제11조(대기환경개선 종합계획의 수립)에 따라 통합대기환경지수(CAI)를 제시하였다. 통합대기환경지수(CAI)는 6가지의 대기오염물질의 대기환경 기준을 고려하여 국민들에게 인체 위해성과 행동지침을 알리기 위하여 만들어졌다. 우리나라의 통합대기환경지수(CAI)의 농도 구분 값과 계산방법은 <표 1>과 같다. 대기질지수(AQI)는 4개 구간의 각 대기오염물질 농도 구분 값에 따라 6개 대기오염물질(SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5})을 각각 계산한다. 여러 대기오염물질이 건강에 영향을 미칠 경우 복합적인 위해 가능성을 고려하여 각각의 대기오염물질 대기오염지수 점수에 가산점을 부여하여 대기오염지수 등급을 상향 조정하여 최종값을 산출하며 이때 가장 높게 나온 점수를 대기 오염물질을 대표오염물질로 표시한다. 0에서 500까지의 지수를 4단계로 나누고 점수가 커질수록 대기상태가 좋지 않음을 나타내며 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨 단계로 구분된다. ‘좋음’은 대기오염 관련 질환자군에서도 영향이 유발되지 않을 수준, ‘보통’은 환자군에서 만성 노출 시 경미한 영향이 유발될 수 있는 수준, ‘나쁨’은 환자군 및 민감군(어린이, 노약자)에게 유해한 영향을 유발하고, 일반인도 건강상 불쾌감을 경험할 수 있는 수준, ‘매우 나쁨’은 환자군 및 민감군에 급성 노출 시 심각한 영향을 유발하고, 일반인도 약한 영향이 유발될 수 있는 수준을 나타낸다. 이에 따른 구간별 색상은 좋음(파랑), 보통(초록), 나쁨(노랑), 매우 나쁨(빨강)으로 표시하고 있다.

〈표 1〉 통합대기환경지수(CAI) 대기오염물질 농도 구분 값

지수 구분		좋음 (파랑)		보통 (초록)		나쁨 (노랑)		매우 나쁨 (빨강)	
농도값 구분		0-50		51-100		101-250		251-500	
농도구분	기준값	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}
SO ₂ (ppm)	1 hr	0	0.02	0.021	0.05	0.051	0.15	0.151	1
CO(ppm)	1 hr	0	2	2.01	9	9.01	15	15.01	50
O ₃ (ppm)	1 hr	0	0.03	0.031	0.09	0.091	0.15	0.151	0.6
NO ₂ (ppm)	1 hr	0	0.03	0.031	0.06	0.061	0.2	0.201	2
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 hr ¹⁾	0	30	31	80	81	150	151	600
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 hr ²⁾	0	15	16	35	36	75	76	500

* 측정된 농도값(C_p)이 정의된 농도값(BP_{HI})을 초과하는 경우에 BP_{HI}값은 매우 나쁨의 BP_{HI}값으로 같음

1) 미세먼지(PM₁₀) 24 hr은 미세먼지 PM₁₀ 24시간 예측이동평균임

2) 초미세먼지(PM_{2.5}) 24 hr은 초미세먼지 PM_{2.5} 24시간 예측이동평균임

자료: 에어코리아, https://www.airkorea.or.kr/web/khailInfo?PMENU_NO=129, [2020.4.3]

• 통합대기환경지수 계산 방법

$$I_P = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_P - BP_{LO}) + I_{LO} \quad (1)$$

I_p = 대상 오염물질의 대기지수점수

C_p = 대상오염물질의 대기 중 농도

BP_{HI} = 대상 오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최대 오염도

BP_{LO} = 대상 오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최소 오염도

I_{HI} = BP_{HI}에 해당하는 지수값(구간 최대 지수값)

I_{LO} = BP_{LO}에 해당하는 지수값(구간 최소 지수값)

〈가산점 적용〉

- 1개일 경우: 점수가 가장 높은 지수점수를 통합대기환경지수로 사용
- 2개일 경우: 가장 높은 점수가 나온 오염물질을 영향 오염물질로 표시하고
그 오염물질의 점수에 50점을 가산
- 3개일 경우: 가장 높은 점수가 나온 오염물질을 영향 오염물질로 표시하고
그 오염물질의 점수에 75점 가산

미국 EPA에서는 1970년 청정공기법의 기본구조를 확립하고 1990년에 주요개정을 통하여 이후 공기 정화법(Clean Air Act)을 제정하였다. 제정된 대기질지수 AQI(Air Quality Index: 이하 AQI)는 민감군 영향에 대한 구간을

추가하여 대기질의 건강에 관련된 농도범위를 재조정하고, 오존(O₃(8 hr)), 초미세먼지(PM_{2.5}(24 hr))를 추가하여, 미세먼지(PM_{2.5}), 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO)을 포함하여 총 6가지 오염 물질에 대한 대기 질 표준을 설정하였다. <표 2>는 대기질지수(AQI) 대기오염물질 농도 구분 값을 나타낸다. 0부터 500의 지수 범위를 6개의 구간으로 구분하고 값이 클수록 대기오염이 나쁨을 나타낸다. 구간명칭은 각각 좋음(good), 보통(Moderate), 민감군 영향(Unhealthy for Sensitive Groups), 건강에 해로움(Unhealthy), 매우 건강에 해로움(Very Unhealthy), 위험함(Hazardous)으로 구분하고 단계별 색상은 좋음(초록), 보통(노랑), 민감군 영향(주황), 건강에 해로움(빨강), 매우 건강에 해로움(보라), 위험함(갈색)을 사용하였다.

〈표 2〉 대기질지수(Air Quality Index) 대기오염물질 농도 구분 값

지수구분		good (초록)		Moderate (노랑)		Unhealthy for Sensitive Groups (주황)		Unhealthy (빨강)		Very Unhealthy (보라)		Hazardous (갈색)	
단계값 구분		0-50		51-100		100-150		151-200		201-300		301-500	
농도구분	기준	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}
SO ₂ (ppm)	1 hr	0	0.034	0.035	0.144	0.145	0.224	0.225	0.304	0.305	0.604	0.605	1.004
CO(ppm)	1 hr	0	4.4	4.5	9.4	9.5	12.4	12.5	15.4	15.5	30.4	30.5	50.4
O ₃ (ppm)	1 hr			0.125	0.164	0.165	0.204	0.205	0.404	0.405	0.504	0.505	0.604
O ₃ (ppm)	8 hr	0	0.059	0.060	0.075	0.076	0.095	0.096	0.115	0.116	0.374		
NO ₂ (ppb)	1 hr	0	53	54	100	101	360	361	649	650	1249	1250	2049
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 hr	0	0	54	55	154	155	254	255	345	346	424	425
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 hr	0	12	12.1	35.4	35.5	55.4	55.5	150.4	150.5	250.4	250.5	500.4

자료: Airnow, <https://airnow.gov>, U.S. EPA(2016), Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality - the Air Quality Index (AQI), pp.14 재정리

2. 대기오염지수 비교

대기오염지수의 명칭은 미국의 대기질지수(AQI)를 비롯하여 한국(CAI), 호주(RPI), 홍콩(AQHI) 등 각 나라에 맞는 다양한 명칭을 사용하고 있다. 대기오염지수의 구간도 다양하게 나타나는데 4구간인 나라는 한국, 캐나다, 영국이 있으며 캐나다와 영국은 다시 세부 10구간으로 구분되고, 5구

간인 나라는 프랑스, 6구간인 나라는 일본, 인도, 미국이 있다. 대기질지수는 많은 나라에서 미국 EPA의 대기질지수(AQI)를 참고하고 있으며,³⁾ 우리나라도 미국의 대기질지수(AQI)를 참고⁴⁾하여 통합대기환경지수(CAI)를 개발하였다. <표 3>는 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI)⁵⁾를 비교하였다.

<표 3> 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI)의 비교

	대기질지수(AQI)		통합대기환경지수(CAI)	
지수 범위	0~500		0~500	
대상오염물질	6가지(SO ₂ , CO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5})		6가지(SO ₂ , CO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5})	
등급	6등급		4등급	
세부기준	좋음(0~50)	초록	좋음 (0~50)	파랑
	보통(51~100)	노랑	보통(51~100)	초록
	민감군 영향(101~150)	주황	나쁨(101~250)	노랑
	건강에 해로움(151~200)	빨강	매우 나쁨(251~500)	빨강
	매우 건강에 해로움(201~300)	보라		
	위험(301~500)	갈색		
가산점	개별 대기오염물질 값을 각각 계산하여 가장 높은 점수가 대기질지수 값으로 사용하며 해당 물질을 대표 오염물질로 표시		나쁨 이상의 등급이 2개 물질 이상일 경우 가산점(50~75) 부여하며 값이 높은 오염 물질을 대표 오염물질로 표시	

통합대기환경지수(CAI)는 대기질지수(AQI)와 비교했을 때 몇 가지 차이가 있다. 이는 산출 방법에 대한 차이와 그 외의 차이로 나눌 수 있으며 산출방법에 대한 차이는 구분단계 개수, 가산점 적용 여부, 기준값 적용에 따른 차이로 구분할 수 있다.

첫 번째 구분단계 개수는 통합대기환경지수(CAI)는 4단계, 대기질지수(AQI)는 6단계로 나누어져 있다. 통합대기환경지수의 계산방법에서 대상

3) 한국, 일본, 홍콩, 일본, 중국, 인도 등.

4) 환경부, 2006.9, '대기오염 종합평가를 위한 통합 대기오염지수 개발·보급', 보도자료.

5) 미국은 대기질지수(AQI)로 한국은 통합대기환경지수(CAI)로 표기하고 일반적인 대기오염을 측정하는 지수를 대표하는 용어를 구분하기 위하여 대기오염지수(고려대한국어대사전: 대기가 얼마나 오염되어 있는가를 일반 사람들이 잘 알 수 있도록 나타낸 숫자)를 사용하였음.

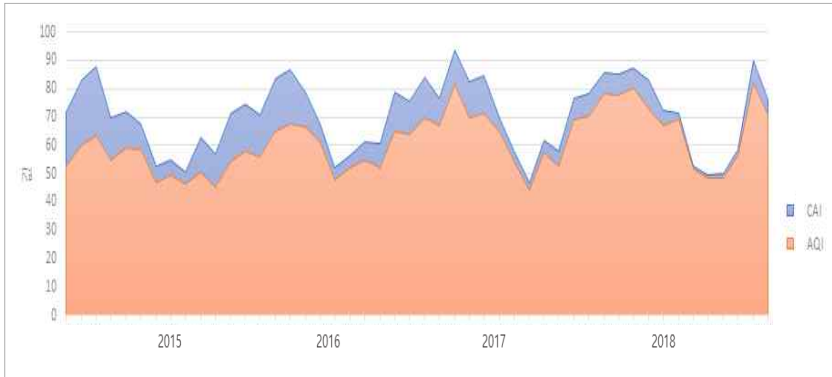
오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최대 오염도와 최저 오염도를 사용하기 때문에 구분단계의 개수와 구분값에 따라서 값이 달라진다. 대기오염물질의 같은 대기오염 농도라 할지라도 대기오염물질의 구간단계와 구분값에 따라 단계가 바뀔 수 있기 때문에 구간단계의 개수와 구분값의 설정이 중요하다.

두 번째는 통합대기환경지수(CAI)는 산출된 각각의 오염물질별 지수점수가 나뉘는 이상의 등급이 2개 물질 이상일 경우 통합대기환경지수(CAI) 값에 가산점(50~75점)을 부여하는데 반해 대기질지수(AQI)는 가산점을 적용하지 않기 때문에 차이가 발생한다. 배현주 등(2017)은 서울, 대전, 대구, 부산, 인천, 광주, 울산 7개 도시의 2005년부터 2015년까지 11년간 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI)의 기준초과 일수를 비교한 결과 지수값 100을 초과하는 나쁨 수준의 일수는 대기질지수(AQI) 보다 통합대기환경지수(CAI)값이 높은 것으로 나타났다. 차이를 파악하기 위하여 <표 4>와 같이 우리나라의 2015년부터 2018년까지 대기오염자료를 한국환경공단(Airkorea)에서 구독하여 일데이터(day)로 변환 후, 각각 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI) 방식으로 계산하여 대표 오염물질의 빈도를 나타내었다. 같은 대기오염값으로 계산하였지만 대표 오염물질이 매우 다르게 나타남을 알 수 있다. 대기질지수(AQI)의 대표 오염물질은 오존(O₃)의 비중이 40.91%로 가장 높게 나타났으며 이어서 초미세먼지(PM_{2.5}) 44.44%, 미세먼지(PM₁₀) 13.71%의 순서로 나타났고, 통합대기환경지수(CAI)는 미세먼지(PM₁₀) 39.83%, 초미세먼지(PM_{2.5}) 31.64%, 오존(O₃) 26.34%, 이산화질소(NO₂) 2.18%의 순으로 나타났다.

<그림 1>에서 보는 바와 같이 2015년부터 2018년까지 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI)의 값을 나타낸 결과 통합대기환경지수(CAI)의 값이 높게 나타나 두 지수 사이의 가산점이 미치는 영향이 있다고 할 수 있다. 대기오염지수는 대기오염의 농도의 정도에 따라 나타나는데, 산출 방식에서 가산점 부여 여부에 따라서 다르게 나타날 수 있기 때문에 가산점이 대기오염을 잘 설명하는지 확인이 필요하다. 따라서 제4장에서는 대

기오염지수를 계산할 때 가산점에 대한 적합성과 필요성을 알아보고자 각 대기오염지수 대기질지수(AQI), 통합대기환경지수(CAI), 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 각각 가산점을 제외 또는 부여하여 적합성을 분석하였다.

〈그림 1〉 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI) 비교(2015~2018년)



〈표 4〉 AQI와 CAI의 대표 오염물질 빈도 및 비율 비교(2015~2018년)

계산방식	오염물질	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂
AQI	빈도(n)	0	1,366	59,425	19,909	64,556	0
	비율(%)	0.00	0.94	40.91	13.71	44.44	0.00
CAI	빈도(n)	8	3,167	38,258	57,859	45,962	2
	비율(%)	0.01	2.18	26.34	39.83	31.64	0.00

세 번째 대기오염지수는 6개의 오염물질의 농도를 모두 알아야 지수 산출 가능한데 산출할 때 기준이 되는 기준값을 설정하는 것이 중요한 문제이다. 특히 대기오염의 단시간 노출에 관한 연구에서 호흡기 및 심혈관계 원인에 의한 사망을 증가시키며(Samet et al., 2000) 만성폐쇄성폐질환 환자의 사망에 미치는 영향이 크며(Romieu et al., 2012), 노인집단에 더 큰 영향이 나타난다고 알려져 있다(Chen et al., 2017). 이에 대기오염에 단시간 노출되어도 건강에 영향을 미칠 수 있다는 연구결과에 따라 대기오염의 급성영향을 고려하기 위하여 하루 중에 일 최고값을 대푯값으로 사

용하여 일 최고값을 사용하였다.

이와 같은 맥락으로 단시간에 노출되었을 때 영향을 고려하기 위하여 인체에 가장 영향이 높은 것으로 알려진 $PM_{2.5}$ 의 농도추이를 2015년부터 2018년까지 시간별로 정리한 결과 10시와 11시에 하루 중 농도가 가장 높은 것⁶⁾으로 나타나 10시와 11시의 평균을 사용하여 분석하였다. 일평균값은 가장 널리 쓰이는 값으로 0~24 hr까지의 24시간 동안의 대기오염 물질의 평균값을 나타낸다. 본 연구에서는 기준값을 일평균값, 일최고값, 10시와 11시의 평균값으로 구분하여 기준값을 다르게 함에 따라 통합대기환경지수가 어떻게 달라지며 건강에 미치는 영향을 얼마나 잘 설명하는지 알아보고자 한다.

계산법의 차이 외에는 단계 명칭, 색상 표기에 차이가 있다.

첫 번째는 구간명칭은 대기질지수(AQI)의 경우 좋음, 보통, 민감군 영향, 건강에 해로움, 매우 건강에 해로움, 위험으로 표기한 반면, 우리나라의 단계 명칭은 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨으로 되어 있다. 우리나라는 구간명칭은 지수값의 높고 낮음만을 제시하므로 실질적인 행동과 건강 영향이 연결되지 않아서 전달효과가 낮다. 이에 구간명칭만으로도 건강 영향을 쉽게 파악할 수 있는 명칭으로의 변경이 필요하다. 특히 대기오염에 취약한 호흡기 및 심혈관계 등 기저 질환자 등을 민감 그룹을 구간에 별도로 표기하면 단순히 대기 오염 농도에 따른 ‘나쁨’ 보다는 ‘민감 그룹에 해로움’ 등 건강 영향으로 표기하는 것이 회피행동에 효과적으로 영향을 미칠 수 있다.

두 번째는 대기오염지수에 있어서 색상은 구간명칭과 함께 지수구간별로 색을 구분하여 표시함으로써 국민에게 대기오염의 상황의 심각성에 대한 전달력을 높일 수 있다. <표 5>와 같이 해외의 대기오염지수의 색상표기를 살펴본 결과 대기질이 좋은 상태인 경우 대부분의 나라에서는 초록색 또는 파란색을 사용하고 있었으며, 나쁨, 높음 단계는 노란색, 진분홍,

6) 0시를 기준으로 10시, 11시에 가장 높았다가 16, 17시에 가장 낮아졌다가 다시 상승하는 형태를 보임.

빨강, 주황을 사용하였다. 매우 나쁨, 위험 단계에서는 빨간색, 보라색, 검정색을 선택하고 있었다. 인도는 파란색을 매우 나쁨의 표시로 선택하기도 하였는데 이는 국민 정서에 따른 차이로 해석할 수 있다.

〈표 5〉 해외 대기오염지수의 색상표기

지수구간	한국	일본	홍콩	인도	미국	캐나다	호주	영국	프랑스
매우 좋음							매우 좋음 (파랑)		매우 좋음 (초록)
양호, 좋음, 나쁨	양호 (파랑)	좋음 (파랑)	나쁨 (초록)	좋음 (초록)	좋음 (초록)	좋음 (파랑)	좋음 (초록)	나쁨 (초록)	좋음 (초록)
보통	보통 (초록)	보통 (하늘)	보통 (하늘)	보통 (노랑)	보통 (노랑)	보통 (초록)	보통 (노랑)	보통 (주황)	보통 (노랑)
민감군 영향		민감군 영향 (초록)			민감군 영향 (주황)				
나쁨, 높음	나쁨 (노랑)	나쁨 (노랑)	높음 (노랑)	나쁨 (진분홍)	나쁨 (빨강)		나쁨 (빨강)	높음 (빨강)	나쁨 (주황)
매우 나쁨, 나쁨	매우 나쁨 (빨강)	매우 나쁨 (주황)	매우 높음 (빨강)	매우 나쁨 (파랑)	매우 나쁨 (보라)	나쁨 (노랑)	매우 나쁨 (검정)	매우 높음 (보라)	매우 나쁨 (빨강)
매우 나쁨, 위험, 위해		위험 (빨강)	위험 (검정)	위험 (검정)	위험 (밤색)	매우나쁨 (빨강)			위험 (빨강)

위에서 살펴본 바와 같이 우리나라의 통합대기환경지수(CAI)는 단계구분, 단계 명칭, 색상 표기 등 대기오염의 심각성을 일반 국민에게 체감하기 어려운 측면이 있다. 본 연구에서는 대기오염물질의 위해성과 인체영향, 행동요령을 종합적으로 고려하여 통합대기환경지수를 개발하여 국민 및 정책 결정자에게 대기오염상황에 대하여 알기 쉽게 전달하고자 새로운 통합대기환경지수를 개발하고자 한다.

3. 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 개발 필요성

대기 오염의 정확한 전달이 취약계층의 행동을 바꿈으로 인하여 국민의 건강증진과도 밀접한 연관이 있기 때문에 보다 올바른 정보 제공을 위하여 전달력이 높은 통합대기환경지수가 필요하다. 2005년 BRFSS(Behavioral

Risk Factor and Surveillance System)에서 6개주(콜로라도, 플로리다, 인디애나, 캔자스, 매사추세츠, 위스콘신)에 대기질지수(AQI)가 활동수준에 영향을 미치는 지 조사한 결과 천식이 있는 사람은 야외활동의 변화할 가능성이 31%에서 57%로 거의 2배에 달했고 천식을 앓지 않은 사람은 16%에서 51%로 3배 이상이었다(Wen et al., 2009). 또한 캘리포니아에서 오존경보가 발령된 날 동물원과 전망대의 방문률이 6-13% 감소하였으며, 특히 어린이와 노인들 사이에 더 큰 차이가 나타나는 것을 확인하였다. 연구는 어린이, 노인, 천식환자와 같이 대기오염에 관련된 건강영향 위험이 큰 취약계층에서 행동이 변화한다는 것을 보여준다. 대기오염이 점점 심각해짐에 따라 국내실정에 맞게 대기오염을 종합적으로 고려하여 국민들이 현재의 대기오염도 현황을 쉽게 이해하고 체감하는 통합대기환경지수를 개발·보급하는 것이 필요하다.

미세먼지는 입경이 작은 미세입자 일수록 입자상 물질 농도에 의한 초과사망자 수는 통계적으로 유의하게 나타난다고 알려져 있지만, 대기오염의 원인이 되는 물질의 종류가 다양하기 때문에 각각 대기 오염물질의 농도만으로는 대기오염의 영향을 평가하는 것은 한계가 있다. 입자상 물질의 건강 영향은 기후 또는 기상 변화의 영향을 받는 것으로 알려져 있고, 기후의 변화는 입자상 물질뿐만 아니라 오존(O₃)과 아황산가스(SO₂), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO) 등과도 중요한 연관성을 가지는 것으로 지속적으로 보고되었다. 대기오염물질과 온실가스를 동시에 배출하는 오염원의 경우 각 물질을 독립적으로 관리하는 것보다 통합관리가 인체 건강에 미치는 영향뿐만 아니라 환경적·경제적 측면에서도 유리하다고 밝혀졌다(UNECE, 2016; Purohit, et al., 2010; Swedish EPA, 2009; OECD, 2009).

따라서 본 연구 구성은 다음과 같다. 앞서 언급한 통합대기환경지수의 단계에 따른 차이는 각 대기오염물질을 인체 영향을 연구결과를 활용하여 대기 오염물질의 위해성과 인체영향을 고려하여 재조정하였다. 가산점에 따른 차이가 어떤 것이 적절한지 알아보기 위해 각각 분석하여 위해성을

비교 분석하고, 단계 명칭, 색상 표기를 연구하였다. 연구결과를 적절하게 반영하여 국민 및 정책 결정자에게 대기오염상황을 알기 쉽게 전달할 수 있도록 새로운 통합대기환경지수(NCAI)를 제시하고자 한다. 대기오염 물질별 위해성과 인체영향은 해외 및 국내 연구를 정리하였으며 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI)의 각 구간값과 농도값을 비교하기 위하여 일산화탄소(CO)의 단위 시간을 8시간에서 1시간으로 조정하고, 아황산가스(SO₂)와 이산화질소(NO₂)는 ppb(parts per billion, 10⁻⁹)는 ppm(parts per million, 10⁻⁶)으로 단위를 표준화하였다.

III. 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 개발

1. 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 설정 근거 및 개발

1) 구간값 분석

새로운 통합대기환경지수(NCAI) 개발은 구간값은 세계보건기구(WHO) 권고 기준과 해외 연구 자료를 종합하여 <표 7>부터 <표 12>까지 위해성 및 인체에 미치는 영향을 정리하였다. 색상 및 구간명칭은 국내외 연구자료를 정리하여 근거를 설정하였다. 구분값과 가산점 적용은 제4장에서 데이터를 이용하여 적합한 기준을 분석하는 것으로 구성하였다. 세계보건기구(WHO)에서는 초미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM₁₀)의 기준을 권고기준, 잠정목표(3), 잠정목표(2), 잠정목표(1)의 4구간으로 제시하고 있으며 권고기준은 일평균 PM_{2.5}(25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), PM₁₀(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 장기노출에 대해 총사망, 심혈관 질환, 폐 질환 사망이 증가하는 것으로 나타난 최저 수준을 말한다. 권고기준을 기준으로 잠정목표(3)은 권고기준보다 사망위험률이 약 1.2%, 잠정목표(2)는 약 2.5%, 잠정목표(1)은 약 5% 높은 수준으로 설정하였다.

〈표 6〉 입자상 물질에 대한 세계보건기구(WHO) 기준(24시간 평균 농도)

구분	목표구간	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	상대적 위험도
24시간 평균	권고기준 (Air quality guideline)	50	25	PM _{2.5} 에 대한 장기적 노출에 대한 95% 이상의 신뢰도로 총 사망, 심혈관질환, 폐질환 사망률이 증가하는 것으로 나타난 최저 수준
	잠정목표 3 (Interim target-3)	75	37.5	권고기준보다 사망위험률이 약 1.2% 높음
	잠정목표 2 (Interim target-2)	100	50	권고기준보다 사망위험률이 약 2.5% 높음
	잠정목표 1 (Interim target-1)	150	75	권고기준보다 사망위험률이 약 5% 높음

자료: WHO, 2006, WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, p.13

〈표 7〉 PM₁₀ 기준 설정 근거

PM ₁₀	24 hr($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기준설정근거	참고문헌
좋음(파랑)	0~30	WHO 제시하고 있는 배경 농도	WHO, 2000
보통(초록)	31~50	30: 연평균 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 만성노출 시 어린이 폐 기능 감소 50: WHO 권고기준	Abbey et al., 1998 WHO, 2014
민감 그룹에 해로움 (주황)	51~150	80: 어린이 COPD 유병률 10% 증가 90: 어린이 급성사망률 10% 증가수준 100: CAI 일평균 기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 100: WHO 잠정목표2 100: 국내 24시간 평균치 기준 150: 병약자, 노인의 사망증가	McConnell et al., 1999 Moolagavkar, 2000 WHO, 2006
모든 사람에게 해로움 (빨강)	151~345	155: 전체 급성 사망률 10% 증가 수준 155: 미국 AQI 민감군 영향 기준값 300 이상: 기관지염 환자의 급성악화 345: 미국 AQI '건강에 해로움' 단계 기준값	Samet et al., 2000 Andrade et al., 2012 Laden et al., 2000
모든 사람에게 매우 해로움(갈색)	346~424	424: 미국 AQI '매우 건강에 해로움' 단계 기준값	WHO, 2014
치명적(검정)	425~604	604: 미국 AQI '위험' 단계 기준값	WHO, 2014

〈표 8〉 PM_{2.5} 기준 설정 근거

PM _{2.5}	24 hr($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기준설정근거	참고문헌
좋음(파랑)	0~12	12: AQI '좋음' 단계 기준값	WHO, 2014
보통(초록)	13~25	15: WHO 배경농도 25: 어린이 급성 사망율 9.1% 증가 25: WHO 권고기준	WHO, 2014
민감 그룹에 해로움 (주황)	25.1~50	35: 국내 24시간 기준 35.6: 만성 노출시 어린이 폐활량 증가율 감소 및 FEV1 3.4% 감소 50: 어린이 급성 사망율 10% 증가 수준 50: WHO 잠정목표1	WHO, 2014 Gauderman et al., 2000 Ostro et al., 1999 Lippmann et al., 2000
모든 사람에게 해로움 (빨강)	50.1~100	51: 일반인 급성 사망률 10% 증가 수준 68: 심혈관계 입원률 10% 증가 수준 70: 일반인 만성 사망률 10% 증가 수준 75: WHO 잠정목표2 80: 일반인 급성 사망률 10% 증가 수준 95: 일반인 급성 CVD 유병율 10% 증가 수준 100: 인구의 10% 보호농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나뉘는 구간 상한 값으로 설정	Kloog et al., 2013 Zanobetti et al., 2009 Pope et al., 1995 Krewski et al., 2000 Moolgavkar, 2000 McConnel et al., 1999
모든 사람에게 매우 해로움 (갈색)	100.1~250.4	108: 배경농도 기준으로 어린이 총 사망률이 10% 증가 117: 사망률 10% 증가 수준 250.4: 미국 AQI '매우 건강에 해로움' 단계 기준값	WHO, 2014
치명적(검정)	250.5~500.4	500.4: 미국 AQI '위험' 단계 기준값	WHO, 2014

〈표 9〉 CO 기준 설정 근거

CO	1 hr(ppm)	기준설정근거	참고문헌
좋음(파랑)	0~2	0.04: 호흡기 질환 환자 증상 악화 2: 비흡연 임산부에 대한 저산소증 및 허혈성 심장 질환 예방을 위한 혈중 COHb 2.5% 미만으로 유지할 수 있는 24시간 평균 농도	WHO, 2000
보통(초록)	2.01~9	4.5: 미국 AQI '보통' 단계 구분값 -만성 노출시 민감군의 혈중 COHb가 정상치보다 다소 증가될 수 있는 농도	WHO, 2014 WHO, 2000
민감 그룹에 해로움 (주황)	9.01~12.4	12.4: 미국 AQI '민감군 영향' 단계 구분값 -8시간 이상 노출시 민감군의 혈중 COHb 증가 -만성 노출시 일반인의 혈중 COHb 증가 유발	WHO, 2014
모든 사람에게 해로움 (빨강)	12.5~15.4	-8시간 이하 노출에서도 민감군의 혈중 COHb 증가 -8시간 이상 노출시 일반인의 혈중 COHb 증가 유발	WHO, 2000
모든 사람에게 매우 해로움 (갈색)	15.5~30.4	30.4: 미국 AQI '매우 건강에 해로움' 단계 구분값 -1시간 이하의 단기 노출로도 민감군에게 저산소증 및 허혈성 심장 질환 유발 가능 -1시간 이상 노출시 일반인의 혈중 COHb 증가 유발	WHO, 2000
치명적(검정)	30.5~50.4	50.4: 미국 AQI '위험' 단계 구분값	WHO, 2014

〈표 10〉 O₃ 기준 설정 근거

O ₃	1 hr(ppm)	기준설정근거	참고문헌
좋음(파랑)	0~0.03	0.02~0.035: WHO 배경농도 0.05~0.1: 불편한 냄새, 운동 신경 기능 저하 0.05~0.3: 학습능력 효과 떨어짐 -호흡기 질환 내원율이 10%를 초과하지 않을 수준 -1시간 평균 일반 노출군의 호흡기 질환 증가 10%에 해당되는 농도 산정	WHO, 2006 WHO, 2000
보통(초록)	0.031~0.09	0.06: 2시간 노출시 호흡기 질환이 유발되는 LOAEL 0.08~0.4: 호흡기 감염에 잘 걸림 0.1~0.3: 호흡기 자극 증가 호흡기 질환 증상 악화 -8시간 노출시 민감군의 FEV1 10% 감소하는 농도	WHO, 2000
민감 그룹에 해로움 (주황)	0.091~0.15	0.1: WHO 8시간 권고치 0.1: 국내 1시간 기준 0.1~1.0: 기도저항 증가 냄새 느끼고 두통 0.12: 국내 오존 주의보 발령 -1시간 노출시 일반인의 천식 발생이 25~50% 증가하는 농도 -FEV1의 5% 변화를 일으키는 농도	WHO, 2006 WHO, 2000
모든 사람에게 해로움 (빨강)	0.151~0.204	0.204: 미국 AQI '건강에 해로움' 단계 기준값	WHO, 2014
모든 사람에게 매우 해로움 (갈색)	0.205~0.404	0.25~0.75: 운동 중 폐기능 감소 0.3: 국내 오존 경보 발령 0.404: 미국 AQI '매우 건강에 해로움' 단계 기준값 -FEV1의 10% 변화를 일으키는 오존 농도 -1시간 노출시 호흡기 세포 염증 반응 증가 -8시간 노출시 일반인의 천식 발생이 10% 증가 -1시간 노출시 일반인의 천식 발생이 50% 증가 -1시간 노출시 일반인의 FEV1 20% 이상 감소	WHO, 2000 WHO, 2014
치명적(검정)	0.405~0.604	0.604: 미국 AQI '위험' 단계 기준값	WHO, 2014

〈표 11〉 NO₂ 기준 설정 근거

NO ₂ ⁷⁾	1 hr(ppm)	기준설정근거	참고문헌
좋음(파랑)	0~0.03	0.02: 만성 노출에 의해서도 어린이 등 민감군의 호흡기 및 폐 기능에 영향을 미치지 않을 수준	WHO, 2000
보통(초록)	0.031~0.1	0.05: 국내 연평균 대기 환경기준 0.06: 국내 24시간 대기 환경기준 0.08~0.1: 아동의 급성 호흡기 질환 발생률 증가 0.1: 국내 1시간 대기 환경기준 0.1: AQI '보통' 단계 기준값	WHO, 2000
민감 그룹에 해로움 (주황)	0.11~0.2	0.11: 기도 과민성 및 알레르기 반응성 증가 (기관지 천식 환자) 0.12: 만성 노출에 의한 65세 이상 노인 사망률 3.2% 증가 0.19: 천식환자의 병원 입원률 증가 0.2: WHO 권고기준	WHO, 2006 Orehek et al., 1981
모든 사람에게 해로움 (빨강)	0.201~0.649	0.2~0.3: 급성 노출시 일반인의 기도 반응성이 5% 증가하는 LOAEL ⁸⁾ 0.5~1.0: 기도 감염 증가 (소아)	Hasselblad et al., 1992 WHO, 2000
모든 사람에게 매우 해로움 (갈색)	0.65~0.1249	0.1249: 미국 AQI '매우 건강에 해로움' 단계 기준값	WHO, 2014
치명적(검정)	0.125~0.2049	1.6~2.0: 기도저항 증가(정상인 및 만성 기관지염환자) 0.2049: 미국 AQI '위험' 단계 기준값	WHO, 2000 Mohensin, 1987

〈표 12〉 SO₂ 기준 설정 근거

SO ₂	1 hr(ppm)	설정 근거	참고문헌
좋음(파랑)	0~0.02	0.018: 만성 노출로 인한 호흡기계 및 만성 폐색성 폐질환으로 인한 병원 내원율이 유의하게 증가하지 않을 수준 0.02: WHO 권고기준	WHO, 2006 WHO, 2000
보통(초록)	0.021~0.05	0.03: 만성기관지염 환자증가(뉴욕) 0.035: 만성 노출시 어린이의 폐 기능(FVC, FEV1)이 5.5% 감소 0.04: 만성 노출시 호흡기 질환의 유병률 증가 및 폐 기능 감소에 대한 LOAEL	Linn et al., 1982 WHO, 2000
민감 그룹에 해로움 (주황)	0.051~0.150	0.5: SRaw의 유의한 증가(민감: 천식) 0.087: 24시간 노출시 천식환자 및 민감군의 호흡기계 증상 유발	WHO, 2014
모든 사람에게 해로움 (빨강)	0.151~0.304	0.24: 급성 호흡기 질환 환자 증가 0.25: 천식환자가 가벼운 운동 중 10분 노출시 기도 저항성 증가 0.304: 미국 AQI '건강에 해로움' 단계 구분값	Sheppard et al., 1980 Sheppard et al., 1981 Linn et al., 1987
모든 사람에게 매우 해로움 (갈색)	0.305~0.604	0.4~0.5: 5분 동안 심한 운동하면 천식증세 나타남 0.4: 일반인이 15분 노출 시 폐 기능(FEV1) 10% 감소 0.6: 일반인이 15분 노출 시 폐 기능(FEV1) 10% 감소 0.604: 미국 AQI '매우 건강에 해로움' 단계 구분값	Linn et al., 1987 WHO, 2000 WHO, 2014
치명적(검정)	0.605~1.004	1.004: 미국 AQI '위험' 단계 구분값	WHO, 2014

7) AQI지수의 NO₂단위는 ppb로 ppm으로 변환함.

8) 역반응이 발견되는 최저농도이며 최소작용량.

2) 가산점 적용

통합대기환경지수(CAI)와 대기질지수(AQI)를 계산함에 있어서 구간값 외에 가장 두드러진 차이가 발생하는 부분은 가산점 적용 여부이다. 통합 대기환경지수(CAI)는 가산점을 적용하기 때문에 대기오염이 나쁜 날일수록 대기질지수(AQI) 보다 점수가 크게 산출된다. 제4장에서는 각각 통합대기환경지수(CAI)의 가산점 삭제 데이터와 대기질지수(AQI) 지수의 가산점 적용 데이터를 산출하여 가산점 적용여부에 따른 타당성을 분석하였다.

3) 색상표기와 단계 명칭 분석

대기오염지수에서 색상표기는 구간명칭과 함께 대기오염의 위험성을 적시적으로 알리는 도구로 활용된다. 기존 구간명칭은 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨으로 되어 있어 건강영향을 파악하기 어렵다는 점을 보완하기 위하여 행동요령과 연결하여 구간명칭을 설정하였다. 구간명칭을 건강영향을 고려하여 좋음, 보통, 민감 그룹에 해로움, 모든 사람에게 해로움, 모든 사람에게 매우 해로움, 치명적으로 설정하였고, 민감군에 대한 영향을 고려하기 위하여 ‘민감군 영향’ 등급을 추가하여 보다 쉽게 대기오염의 심각성을 파악할 수 있도록 하였다.

또한 색상표기는 통합대기환경지수(CAI)는 좋음에서 나쁨으로 갈수록 파랑, 초록, 노랑, 빨강으로 표기되고 있으며, 대기질지수(AQI)는 대기오염이 좋음에서 나쁨으로 갈수록 초록, 노랑, 주황, 빨강, 보라, 갈색으로 표기하고 있다. 보다 직관적으로 건강정보를 전달하기 위하여 산업안전보건법 시행규칙⁹⁾과 관련 서적¹⁰⁾을 참고하여 각 구간에 맞는 색상을 선택하였다. ‘ 좋음’ 구간은 파란색을 배정하고 ‘보통’ 구간은 초록, ‘민감 그룹에 해로움’ 구간은 노란색과 빨간색의 중간색인 주황색을 배정하였다. ‘모

9) 산업안전보건법 시행규칙, [별표7], [별표8], 고용노동부령 제272호[시행 2020. 1. 16.][고용노동부령 제272호, 2019. 12. 26., 전부개정].

10) 색채학(2012), 김덕태 등; 색채심리(2015), 정은주 등.

든 사람에게 해로움' 구간은 빨간색, '모든 사람에게 매우 해로움' 구간은 갈색을 배정하였다. '치명적' 구간은 가장 명도와 채도가 낮은 검은색을 선택하여 건강위험의 위험성을 전달하고자 하였다. 최종적으로 좋음에서 나쁨으로 갈수록 파랑, 초록, 주황, 빨강, 갈색, 검정으로 설정하였다.

위의 내용을 정리하여 <표 13>과 같이 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 농도 구분 값을 제시하였다. 구간값은 세계보건기구(WHO) 권고 기준과 해외 연구 자료를 종합하여 위해성 및 인체에 미치는 영향을 정리하여 구간값을 6단계로 구분하였다. 색상표기는 관련 법령과 연구 자료를 종합하여 좋음(파랑), 보통(초록), 민감 그룹에 해로움(주황), 모든 사람에게 해로움(빨강), 모든 사람에게 매우 해로움(갈색), 치명적(검정)으로 설정하였다.

<표 13> 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 대기오염물질 농도 구분 값

지수구분	좋음(파랑)	보통(초록)	민감 그룹에 해로움 (주황)	모든 사람에게 해로움 (빨강)	모든 사람에게 매우 해로움 (갈색)	치명적 (검정색)
농도값 구분	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301-500
농도구분 기준	BP _{Lo} BP _{Hi}	BP _{Lo} BP _{Hi}	BP _{Lo} BP _{Hi}	BP _{Lo} BP _{Hi}	BP _{Lo} BP _{Hi}	BP _{Lo} BP _{Hi}
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hr 0 0.02	0.021 0.05	0.051 0.15	0.151 0.304	0.305 0.604	0.605 1.004
CO (ppm)	1 hr 0 2	2.01 9	9.01 12.4	12.5 15.4	15.5 30.4	30.5 50.4
O ₃ (ppm)	1 hr 0 0.03	0.031 0.09	0.091 0.15	0.151 0.204	0.205 0.404	0.405 0.604
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hr 0 0.03	0.031 0.1	0.11 0.2	0.201 0.649	0.65 0.1249	0.125 0.2049
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 hr 0 30	31 50	51 150	151 345	346 424	425 604
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 hr 0 12	13 25	25.1 50	50.1 100	100.1 250.4	250.5 500.4

2. 통합대기환경지수(CAI)와 새로운 통합대기환경지수(NCAI)의 비교

새로운 통합대기환경지수(NCAI)는 통합대기환경지수(CAI)와 비교하면 <표 14>와 같다. 2015년부터 2018년까지 대기오염물질 6가지가 모두 있

는 데이터를 일별로 대기오염의 농도를 이용하여 새로운 통합대기환경지수(NCAI)와 통합대기환경지수(CAI) 기준으로 산출하여 각 구간에 해당하는 빈도와 비율을 나타낸 것이다. 빈도(n)는 지자체의 개수는 1년에 각각 92개에서 113개로 4년간 139,769개의 값이며, 비율(%)는 총 빈도값을 100으로 환산하여 해당 구간이 전체에서 차지하는 비율(%)을 계산하였다.

통합대기환경지수(CAI)는 왜도 2.21, 첨도 9.6으로 나타나 첨용(leptokurtic)하며, 새로운 통합대기환경지수(NCAI)는 왜도 0.68, 첨도 2.48로 그에 비하여 고르게 분포되어 있다. 통합대기환경지수(CAI) 보통에 해당하는 2단계가 69.5%로 3분의 2 이상을 차지한다. 이에 반해 새로운 통합대기환경지수(NCAI)는 보통에 해당하는 2단계는 46.35%, 민감그룹에 해로움에 해당하는 3단계가 21.76%, 모든 사람에게 해로움에 해당하는 4단계가 9.77%로 나타났다. 통합대기환경지수가 100을 초과하였을 때 민감그룹과 일반인에 건강 영향이 있다고 알려져 있는데 새로운 통합대기환경지수(NCAI)는 기존의 CAI 구간보다 세분화되어 대기오염에 대한 정보의 강도를 구분하여 전달할 수 있다는 것이 장점이다.

〈표 14〉 통합대기환경지수(CAI)와 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 빈도 및 비율 비교

구분값	통합대기환경지수(CAI)			새로운 통합대기환경지수(NCAI)		
	단계	빈도(n)	비율(%)	단계	빈도(n)	비율(%)
0-50	1	26,767	19.15	1	27,541	19.7
51-100	2	97,145	69.5	2	64,780	46.35
101-150	3	15,818	11.32	3	30,411	21.76
151-200				4	13,667	9.77
201-250				5	3,334	2.39
251-300	4	39	0.03	6	36	0.03
301-350						
351-400						
401-450						
451-500						
합계		139,769	100		139,769	100

IV. 연구자료 및 분석

1. 연구자료 및 연구분석방법

1) 연구자료

본 연구는 2015년 1월부터 2018년 12월까지 4개년의 일일 사망자료와 기상자료 및 대기오염 자료를 이용하여 일반화 부가모형으로 대기오염이 일별사망에 미치는 영향을 추정하였다. 사망은 건강영향에 있어 가장 중요한 부분이며 사망자료는 장기간 데이터가 축적되어 인구학적 특성과 사망원인 등에 대한 정보의 신뢰도가 높다. 사망자료는 통계청 마이크로데이터 통합서비스에서 구하였으며 각각 전체 사망자, 사망원인이 심혈관질환(ICD)¹¹⁾인 사망자수, 호흡기 질환(J코드)인 사망자수로 구분하고, 65세 이상은 각각 65세 이상이고 심혈관질환(ICD)으로 인한 사망자수, 65세 이상이고 호흡기질환(J코드)¹²⁾으로 인한 사망자수로 나누었다. 기상자료는 기상청 자료를 이용하였으며 일별 대푯값으로 평균 기온, 강수량, 상대습도, 평균풍속 자료를 사용하였다. 대기오염자료는 국립환경과학원의 대기 측정망 자료를 이용하였으며, 측정된 대기오염물질은 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO), 오존(O₃), 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5})이다. 초미세먼지(PM_{2.5})는 2015년부터 측정을 시작하였기 때문에 모든 자료는 2015년 이후의 자료를 사용하였다. 통합대기환경지수는 6가지 대기오염물질이 모두 있어야 계산할 수 있으므로 6가지 대기오염물질이 모두 측정된 데이터를 사용하였다. 분석프로그램은 R 3.6.3을 이용하였다.

(1) 사망 자료

사망자료는 통계청의 마이크로데이터 통합서비스에서 구독하였다. 사

11) ICD-11th J00-J99.

12) ICD-11th I00-I99.

망자료는 사망원인이 심혈관 질환(I코드), 호흡기 질환(J코드)으로 사망한 데이터 중에서 사고사와 같은 외인사(ICD-11 V01~Y89)를 제외한 자료를 이용하였다.

(2) 기상 자료

기상자료는 기상청 자료를 이용하였으며 평균 기온(℃), 평균 풍속(m/s), 평균 상대 습도(%), 일 강수량(mm)을 이용하였다.

(3) 대기오염자료

대기오염자료는 한국환경공단의 대기 측정망 자료를 이용하였으며 측정물질은 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}이다. PM_{2.5}는 2015년부터 측정을 시작하였다.

〈표 15〉 데이터 형태 및 출처

분류	변수 종류	자료 형태	출처
사망자료	총사망자수(ICD-11, A00-R00) 호흡기계로 인한 사망자수 (ICD-11, J00-J99) 심혈관계로 인한 사망자수 (ICD-11, I00-I99)	일(day)	통계청 마이크로데이터 통합서비스 (https://mdis.kostat.go.kr/index.do) 자료이용-다운로드서비스)
기상자료	평균 기온(℃), 평균 풍속(m/s), 평균 상대 습도(%), 일 강수량(mm)	일(day)	기상청 기상자료개방포털 (https://data.kma.go.kr/)
대기오염물질 자료	SO ₂ , CO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5}	시간(time)	한국환경공단 에어코리아 (http://www.airkorea.or.kr)

〈표 16〉 변수설명 및 가산점 적용 여부

변수 설명	기준값	가산점 적용여부
대기질지수 일평균 데이터 적용 계산값(AQI_MEAN)	일평균	X
대기질지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(AQI_MEAN_YWEIGHT)	일평균	○
통합대기환경지수 10시와 11시 평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_1011)	낮10,11시의 평균값	○
통합대기환경지수 일최고 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_MAX)	일최고값	○
통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_MEAN)	일평균	○
통합대기환경지수 일평균 데이터 가산점 제거 계산값(CAI_MEAN_NWEIGHT)	일평균	X
통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 계산값(NCAI_MEAN)	일평균	○
통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값 (NCAI_MEAN_NWEIGHT)	일평균	X

〈표 17〉 변수의 기초 통계량

변수	min	1st Qu	Median	Mean	3rd Qu	Max	IQR
총 사망자수	1	38	54	79.84	140	224	16.7
65세 이상 사망자수	0	30	43	59.99	101	174	0.3
65세 이상 호흡기계 및 심혈관계 질환 사망자수	0	11	17	22.28	34	80	1.2
65세 이상 호흡기계 질환 사망자수	0	4	7	8.083	11	40	23.6
65세 이상 심혈관계 질환 사망자수	0	6	11	14.2	22	50	102
총 심혈관계 질환 사망자수	0	7	12	16.96	27	58	71
총 호흡기계 질환 사망자수	0	4	7	8.67	12	43	23
평균 기온(℃)	-19.4	5	14.6	13.46	21.7	34.1	7
일 강수량(mm)	0	0	0	3.17	0.3	308	16
평균 풍속(m/s)	0	1.2	1.7	1.97	2.4	14.9	20
평균 상대 습도(%)	0	56.3	69.1	67.51	79.9	100	8
AQI 일평균값 및 가산점 삭제	2.083	47.257	55.83	61.42	69.27	500	22.01
AQI 일평균값 및 가산점 적용	2.083	47.257	55.83	61.46	69.27	550	22.01
CAI 10-11시 평균값 및 가산점 적용	2.083	56.398	71.781	84.01	97.75	500.4	41.35
CAI 일최고값 및 가산점 적용	13.33	80.83	105.13	125.38	173.18	519.07	92.35
CAI 일평균값 및 가산점 적용	2.083	52.038	62.458	68.52	78.708	500.4	26.67
CAI 일평균값 및 가산점 삭제	2.083	52.626	63.875	69.34	81.21	500.4	28.58
NCAI 일평균값 적용 및 가산점 적용	2.083	53.257	76.181	86.33	105.26	550	52.01
NCAI 일평균값 적용 및 가산점 삭제	2.083	52.419	71.990	77.95	103.16	500	50.75

〈표 17〉은 사망자수, 기상 요인, 대기오염지수값의 변수 기초통계량을 제시하였다. 총 사망자는 평균 79.84명, 65세 이상 사망자의 평균은 59.99명이었으며, 65세 이상 호흡기계 질환 사망자수의 평균은 8.083명, 심혈관계 질환 사망자수의 평균은 14.2명으로 심혈관계 질환으로 인한 사망자수가 많았다. 대기오염지수의 평균을 비교해 보면 작은 값부터 큰 값 순으로 대기질지수 일평균 데이터 적용 계산값, 대기질지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값, 통합대기환경지수 일평균 데이터 가산점 삭제 계산값, 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값, 새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 삭제 계산값, 통합대기환경지수 10시와 11시 평균 데이터 및 가산점 적용 계산값, 새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값, 통합대기환경지수 일최고 데이터 및 가산점 적용 계산값으로 나타났다. 예상했던 것과 같이 대기질 지수에 가산점을 적용하지 않고 일평균을 사용한 대기질지수 일평균 데이터 적용 계산값의 평균이 61.42로 가장 낮게 나왔고 통합대기환경지수의 가산점 적용하고 일 최고값을 기준값으로 적용한 값의 평균이 125.38로 가장 높게 나타났다.

2) 분석 방법

대기오염으로 인한 건강영향을 평가하기 위하여 시계열 연구를 이용하였다. 일반적으로 사망은 매우 드문 사건이므로 일별 사망 자료의 확률모형은 포아송 분포를 가정하여 포아송 회귀 모형(Poisson Regression Model)을 적용하였다. 포아송 회귀 모형의 일반식은 다음과 같다.

$$\ln E(Y) = \beta_0 + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \beta_3(x_3) + \cdots + \beta_i(x_i) \quad (2)$$

$E(Y)$ 종속변수의 기댓값, x_i 예측변수 β_i 회귀계수

대기오염물질과 기상과의 영향을 분석한 연구에서 기상요인이 영향을

미치는 것으로 나타났기 때문에 이런 기상요인을 잘 통제할 방법이 필요하다. 일반화 부가모형(Generalized additive model: GAM)은 계절적 변동, 기상요인, 요일(day) 등의 영향으로 인한 교란작용을 제거하기 위하여 대기오염과 사망에 많은 영향을 미치는 기상요인을 평활화(smoothing)하여 변수를 보정할 수 있기 때문에 분석에 대기 오염이 건강에 미치는 영향을 분석하기 적합한 모형이다.

$$AIC = \frac{D(y; \hat{\mu})}{n} + 2df \frac{\phi}{n} \quad (3)$$

D: deviance, df: 자유도 ϕ 분산모수

AIC(Akaike information criterion)는 변동(Deviance)과 자유도(Degree of freedom), dispersion 모수를 사용하여 위와 같이 정의된다. AIC 값이 작을수록 더 좋은 적합도를 갖는다고 해석한다. 통계모형 선정은 AIC를 확인하여 가장 작은 값을 갖는 모형을 찾았다. 또한 적합된 모형의 $\hat{\mu}$ 의 변동 (Deviance)는 다음과 같이 정의 된다.

$$D(y; \hat{\mu}) = 2l(\mu_{\max}; y) - l(\hat{\mu}; y) \quad (4)$$

$\mu_{\max}$ 는 모수값으로 모든 μ 에 대해서 $l(\mu; y)$ 를 최대로 만드는 값으로 변동(Deviance)은 잔차제곱합을 의미하며 적합도(Goodness-of fit)을 평가하고 모형을 비교한다. 즉 설정된 모형이 완전 정보를 가지고 있는 모형과 비교하여 예측력이 좋다면 D(Deviance)는 작은 값을 가진다. 모형을 선택할 때 AIC와 D가 작은 값을 가진 모형이 더 좋은 적합도를 갖는다고 설명할 수 있다. 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error: 이하 RMSE)는 식 (5)와 같다. 실제값과 예측값의 차이의 제곱시킨 값을 더해서 n으로 나눈 것으로 표준편차가 같은 의미로 작을수록 적합하다고 분석한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

포아송 회귀분석의 회귀계수(β)는 대기오염물질의 농도증가가 사망자 발생에 미치는 영향을 의미한다. 대기오염농도 증가로 인한 건강영향 위험을 알아보기 위하여 상대위험비(Relative Risk, RR)를 계산하였다. $RR = \exp(\beta)$ 로 계산되는데 25%에서 75% 사이의 해당하는 IQR(interquartile range)의 값을 이용하여 사분위수만큼 농도가 증가할 때 사망자가 얼마나 증가하는지 살펴보았다. 상대위험비와 신뢰구간은 식 (6), (7)과 같다.

$$RR = \exp(IQR \times \text{coefficient}(\beta)) \quad (6)$$

$$95\%CI = \exp(IQR \times \text{coefficient}(\beta) \pm 1.96 \times IQR \times \text{Std. Error}) \quad (7)$$

2. 일반화 부가모형(GAM:Generalized Additive Model)을 이용한 분석

1) 통합대기환경지수의 기준값 및 가산점 모델 적합성

대기오염지수를 기준값, 국가별, 가산점 부여에 따라 세 그룹으로 나누었다. 기준값은 앞서 살펴보았듯이 대기오염지수를 산출함에 있어서 데이터의 기준 설정에 대한 적합성을 알아보기 위하여 통합대기환경지수(CAI)의 기준값을 일평균, 일최고, 10시와 11시의 평균값으로 설정하여 분석하였다. 또한 우리나라에 적합한 산출방식이 어떤 것인지 알아보기 위하여 가장 널리 사용하고 있는 대기질지수(AQI)와 통합대기환경지수(CAI)를 비교하였다. 마지막으로 가산점에 대한 유효성을 평가하기 위하여 각각 통합대기환경지수(CAI)(일평균, 가산점삭제), 대기질지수(AQI)(일평균, 가산점부여), 새로운 통합대기환경지수(NCAI)(일평균, 가산점삭제)의 6개의 모델을 비교하였다. 이를 정리하면 <표 18>와 같다.

분석은 일반화부가모형(Generalized Additive Models: GAM)으로 포아송 모형을 적용하였고 각 산출된 지수가 사망과 얼마나 잘 설명하는지 적

절성을 확인하기 위하여 AIC값과 평균제곱근오차(RMSE)를 확인하고 ANOVA를 사용하여 p-값(probability value; p-value)의 유의성이 있는 모델을 가장 적절한 모델로 최종 선택하였다. 분석의 기본식은 다음과 같다.

$$\ln E(Daily\ death) = \beta_0 + \beta_1 (\text{대기오염지수})$$

- Daily death: 호흡기계 질환 또는 심혈관계 일별 사망자수
- 대기오염지수: 각 대기오염지수

〈표 18〉 통합대기환경지수와 호흡기 및 심혈관계 사망과의 적합성을 확인하기 위한 AIC, 평균제곱근오차, 유의수준

기준	통합대기환경지수 모델	호흡기계 질환 사망			심혈관계 질환 사망		
		AIC	RMSE	p-value	AIC	RMSE	p-value
기 준 값	통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_MEAN)	18.1	8.89		74.24	18.5	
	통합대기환경지수 일최고 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_MAX)	16.66	8.89	***	10.56	18.49	
	통합대기환경지수 10시와 11시 평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_1011)	25.82	8.9	***	77.46	8.42	***
구 분 값	통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_MEAN)	18.1	8.89		74.24	18.5	
	대기질지수 일평균 데이터 적용 계산값(AQI_MEAN)	62.87	8.9	***	191.66	18.5	***
가 산 점	통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(CAI_MEAN)	18.1	8.89		74.24	18.5	
	통합대기환경지수 일평균 데이터 가산점 제거 계산값(CAI_MEAN_NWEIGHT)	17.21	8.89		72.62	18.5	
	대기질지수 일평균 데이터 적용 계산값(AQI_MEAN)	62.87	8.9	***	191.66	18.5	***
	대기질지수 일평균 데이터 및 가산점 적용 계산값(AQI_MEAN_YWEIGHT)	64.5	8.9		193.94	18.5	***
	새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가산점 계산값(NCAI_MEAN)	2.74	8.89		3.22	18.49	
	새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값(NCAI_MEAN_NWEIGHT)	1.38	8.89	***	16.64	18.49	
평균		28.03	8.89		89.13	17.58	

〈표 18〉는 대기오염지수와 호흡기계 및 심혈관계 질환 사망으로 구분하여 분석한 것이다. 기준값으로 분석한 결과 호흡기계 질환 사망에서는 통합대기환경지수(CAI)를 기준으로 일평균값, 일최고값, 10시와 11시의 평균값을 적용한 결과 일 최고값을 사용한 모델의 AIC가 16.66으로 가장 낮게 나타났고 평균제곱근오차는 큰 차이가 나타나지 않았으며 유의성은 일 최고값 데이터 적용한 모델과 10시와 11시 평균을 적용한 모델에 나타났다. 심혈관계 질환에서는 일 최고값을 사용한 모델의 AIC가 10.56으로 낮게 나타났으나 평균제곱근오차 값은 가장 크게 나타났고 유의성은 10시와 11시의 평균 데이터를 적용한 모델이 유의성이 있는 것으로 나타났다. 평균제곱근오차값이 높게 나타난 것은 일최고값의 평균 및 제1, 3사분위수, 최고값이 값이 높게 나타났기 때문에 나타난 결과라 생각된다.

통합대기환경지수(CAI)와 대기질지수(AQI)를 분석한 결과는 호흡기계 질환 사망에서는 대기질지수(AQI) 일평균 데이터를 적용한 모델이 AIC가 62.87로 높게 나타났지만 유의성이 있는 것으로 나타났으며 평균제곱근오차는 큰 차이가 나타나지 않았다. 심혈관계 질환에서도 대기질지수(AQI) 일평균 데이터를 적용한 모델의 AIC가 191.66으로 높게 나타났으나 유의성이 있는 것으로 나타났으며 평균제곱근오차는 큰 차이가 나타나지 않았다.

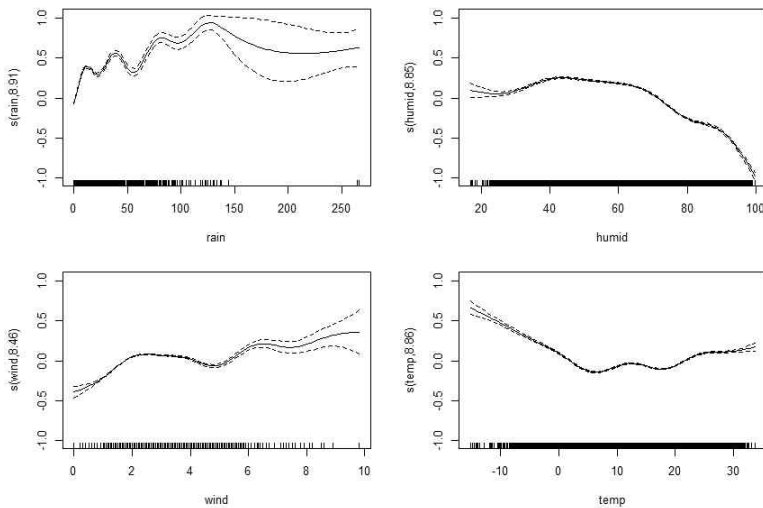
가산점 적용 분석결과는 각 통합대기환경지수(CAI) 일평균 데이터 및 가산점 적용 여부, 대기질지수(AQI) 일평균 데이터 적용 여부, 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 일평균 데이터 및 가산점 적용 여부의 세 그룹을 비교하면, 세 그룹 모두 AIC는 가중치를 제거한 데이터가 근소한 차이로 작았고, 평균제곱근오차에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

호흡기계와 심혈관계 질환 사망을 비교하면 호흡기계 질환 사망 모델의 AIC는 평균 28.03, 심혈관계 질환 사망 모델은 평균 89.13으로 호흡기계 질환 사망 모델의 AIC가 작게 나타나고, 평균제곱근오차 역시 호흡기계 질환 사망 모델 8.89, 심혈관계 질환 사망 모델 17.58로 호흡기계 질환 사망 모델보다 더 적합한 것으로 나타났다. 기준값으로 분석한 결과 10시와

11시의 평균값으로 분석한 모델이 적합하며, 국가 기준 분석결과는 대기 질지수 일평균 데이터를 적용한 모델이 적합하고, 가산점 적용에서는 새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값의 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

최종적으로 모델 선택은 AIC, 평균제곱근오차 값이 작은 모델 중에서 ANOVA 분산분석으로 p-값이 유의한 것을 선택하였다. 따라서 AIC값이 가장 작고(1.38), 평균제곱근오차는 큰 차이가 나타나지 않았으며, 유의성이 있는 것으로 나타난 호흡기계 질환 사망과 「새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값」과의 관계를 추정한 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

〈그림 2〉 호흡기 질환 사망자수에 대한 기상변수의 Loess와 95% 신뢰구간



2) 사망 원인에 따른 적합한 모델 설정 및 상대위험비(Relative risk) 산출

새로운 통합대기환경지수(NCAI)는 일평균데이터 및 가중치를 제거한 계산값을 적용한 모델의 적합성이 높게 나타나 사망과의 영향을 추정하는데 적합한 모형임을 입증하였다. 다만 통합대기환경지수로 사망영향을 분

석한 연구가 없기 때문에 동일 조건에서 분석하여 대기 오염이 사망원인 질환에 어떤 영향이 있는지 비교하고자 하였다. 사망은 각각 사망자의 연령과 질환에 따라 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해서 전체 사망자, 65세 이상 사망자, 65세 이상 호흡기 및 심혈관계 질환 사망자로 구분하였으며 최종 모형은 다음과 같다.

$$\ln E(\text{Death of date}) = \beta_0 + \beta_1 (NCAI \text{ or } CAI) + S_1 (\text{Temperature}) + S_2 (\text{Wind speed}) + S_3 (\text{Humidity}) + S_4 (\text{Rain})$$

Death of date: 65세 이상 호흡기계 질환 사망자(수)

NCAI: 새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값(점)

CAI: 통합대기환경지수 일평균 데이터(점)

Temperature: 일평균 기온(℃)

Humidity: 일평균 습도(%)

Wind speed: 풍속(m/s)

Rain: 강수량(mm)

〈표 19〉 사망구분에 따른 통합대기환경지수 및 새로운 통합대기환경지수의 모델 적합성

대분류	사망 구분	통합대기환경지수 (CAI)		새로운 통합대기환경지수(NCAI)	
		AIC	RMSE	AIC	RMSE
전체	총 사망	37.28	94.45	37.01	92.49
	65세 이상 사망	26.92	94.39	26.74	67.12
	65세 이상 호흡기 및 심혈관계 질환 사망	12.12	93.92	12.06	23.11
호흡기	호흡기계 질환 사망	6.56	92.74	6.54	7.95
	65세 이상 호흡기계 질환 사망	6.30	92.5	6.28	7.33
심혈관	심혈관계 질환 사망	11.40	93.77	11.34	18.45
	65세 이상 심혈관계 질환 사망	9.83	93.57	9.79	15.03
평 균		15.77	93.62	15.68	33.06

** 소수점 셋째자리에서 반올림

사망을 크게 전체, 호흡기, 심혈관 질환 사망으로 세 부분으로 나누었다. 대기오염으로 인한 사망이 연령과 질환에 관련이 있는지 분석하기 위

하여 전체의 사망원인분류를 총 사망, 65세 이상 사망, 65세 이상 호흡기 및 심혈관계 질환사망으로 구분하였다. 호흡기계 질환은 각각 전체 호흡기계 질환사망자와 65세 이상 호흡기계 질환 사망자, 심혈관질환은 심혈관계 질환사망자와 65세 이상 심혈관계 질환 사망자로 분석범위를 설정하여 연령이 영향을 미치는지 알고자 하였다.

〈표 19〉는 통합대기환경지수와 호흡기계 및 심혈관계 사망의 모델 적합성을 비교한 것이다. 총 사망, 65세 이상 사망, 65세 이상 호흡기 및 심혈관계 질환 사망자 순으로 AIC가 37.28에서 12.12로 작아지며, 평균제곱근오차 역시 94.45에서 93.92로 근소한 차이로 감소한다. 새로운 통합대기환경지수도 역시 AIC가 37.01에서 12.06으로 감소하고, 평균제곱근오차 역시 92.49에서 23.11로 감소한다. 호흡기계 질환 사망의 경우 호흡기계 전체 사망자와 65세 이상은 6.56에서 6.30으로 65세 이상 호흡기계 질환 사망자의 AIC와 평균제곱근오차가 작게 나타났다는 것을 알 수 있다. 새로운 통합대기환경지수의 호흡기계 전체 사망자와 65세 이상 호흡기계 질환 사망자를 비교한 결과 각각 AIC는 6.54, 6.28, 평균제곱근 오차는 7.95, 7.33으로 65세 이상 호흡기계 질환 사망자의 값이 작게 나타났다. 평균제곱근오차도 7.95에서 7.33으로 줄어드는 것으로 나타났다. 심혈관계 질환 사망의 경우도 마찬가지로 통합대기환경지수에서는 AIC는 11.40에서 9.83으로 감소, 평균제곱근오차는 93.77에서 93.57로 감소하였다. 새로운 통합대기환경지수와 분석은 AIC 11.34에서 9.79로 감소, 평균제곱근오차는 18.45에서 15.03으로 감소하였다. 새로운 통합대기환경지수의 AIC는 통합대기환경지수보다 근소한 차이지만 모든 항목에서 작게 나타났다. 새로운 통합대기환경지수의 AIC의 평균은 15.68로 통합대기환경지수보다 작게 나타나고, 평균제곱근오차는 33.06으로 큰 차이로 작게 나타나 기존 통합대기환경지수 보다 새로운 통합대기환경지수가 적합한 모델이라고 판단된다. 결과를 종합하면 새로운 통합대기환경지수의 「65세 이상 호흡기계 질환사망자」의 AIC가 6.28로 가장 작게 나타나며 평균제곱근오차 값도 7.33으로 가장 작게 나타나 적합한 모델로 판단된다.

또한 대기오염이 사망에 영향을 미치는데 고려해야 할 부분이 지연효과(lag effect)이다. 대기오염물질이 어느 정도 기간을 두고 사망에 영향을 미치는지 평가하는 것이다. 통합대기환경지수(CAI)의 지연효과에 대해서는 연구된 것이 없기 때문에 통합대기환경지수(CAI)와 새로운 통합대기환경지수(NCAI)를 6일전까지의 지연효과를 분석하여 비교하였다. 각각 통합대기환경지수와 대기오염 농도에 영향을 주는 기온, 습도, 강수, 풍속의 교란변수를 보정하여 일반화부가모형으로 분석한 결과 「65세 이상 호흡기계 질환사망자」를 종속변수로, 「새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값」을 설명변수로 하였을 때 가장 설명력이 높다는 것을 증명하였다.

이에 「65세 이상 호흡기계 질환사망자」를 종속변수로 「새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값」을 독립변수로 하여 기온, 습도, 강수, 풍속의 교란변수를 보정하여 혼란변수들을 비모수적인 평활함수인 LOWESS(Locally Weighted Scatterplot Smoothing)로 통제하였다. 대기오염 농도 증가에 따른 통합대기환경지수 값이 증가함에 따라 사망에 미치는 영향을 평가하기 위하여 지연효과(lag effect)를 고려하여 각각 당일(Lag0), 1일전(Lag1), 2일전(Lag2), 3일전(Lag3), 4일전(Lag4), 5일전(Lag5), 6일전(Lag6)까지의 상대위험비를 산출하였다.

〈표 20〉 통합대기환경지수 및 새로운 통합대기환경지수의 65세 이상 호흡기계 질환 사망과의 상대위험비

지연 \ 분류	통합대기환경지수(CAI)		새로운 통합대기환경지수(NCAI)	
	Relative risk	95% CI	Relative risk	95% CI
Lag 0	1.0358	0.9821-1.0896	1.0631	1.0345-1.0915
Lag 1	1.0577	1.0111-1.1043	1.0784	1.0421-1.1146
Lag 2	1.0309	1.0098-1.0519	1.0376	0.9951-1.0801
Lag 3	1.0429	1.0032-1.0825	1.0712	1.0331-1.1094
Lag 4	0.9252	0.8992-0.9513	0.9301	0.9006-0.9594
Lag 5	1.0253	0.9713-1.0793	1.0323	0.9854-1.0792
Lag 6	1.0519	1.0071-1.0968	1.0714	1.0299-1.1128

〈표 20〉은 통합대기환경지수와 새로운 통합대기환경지수의 65세 이상 호흡기 사망과의 사분위수 범위(Inter Quartile Range, IQR) 증가에 따른 총 사망의 상대위험비와 신뢰구간을 제시하였다. 사분위수 범위(IQR)는 제 3사분위수와 제 1사분위수의 값의 차이로 극단값에 큰 영향을 받지 않으며 왜도, 첨도가 심한 데이터에서 평균보다 유용한 것으로 알려져 있다.¹³⁾

통합대기환경지수에서 가장 상대위험비가 높은 날은 1일전(lag)으로 나타났다. 통합대기환경지수(CAI)의 IQR 값은 28.584 일때 1.0577[1.0111, 1.1043]로 65세 이상 호흡기로 초과 사망 위험이 5.7% 증가하며, 새로운 통합대기환경지수(NCAI)의 IQR 값 52.89점 일 때 1.0784[1.0421, 1.1146]로 초과사망위험은 7.84% 증가한다. 65세 이상 호흡기 관련 사망은 하루 전 대기오염 농도와 관련이 있으며 새로운 통합대기환경지수의 상대위험비가 높게 나타났다.

〈표 21〉 미세먼지(PM₁₀) 호흡기 질환 사망에 미치는 상대위험비 연구결과

순번	저자(연도)	연구기간*	연구지역	분석대상	단위 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	상대위험비(95% CI)
1	양희은, 2004	1999	서울	65세 이상	1	1.0012(0.957, 1.046)
2	이종태, 2008	2001	서울	총 사망	IQR 40.44	2.56(2.46, 2.65)
3	Kim et al., 2003	1995-1999	서울	총 사망	IQR 43.12	1.1390(1.0680, 1.2150)
4	Son et al., 2013	1999-2009	서울	총 사망	10	1.0016(0.9985, 1.0048)
5	Yi et al., 2010	2000-2006	서울	총 사망	10	1.0059(0.9992, 1.0126)
6	Son et al., 2012	2000-2007	서울	총 사망	IQR 41.8	1.0261(0.9941, 1.0591)
7	Kim et al., 2015	2001-2011	서울	총 사망	10	1.0031(0.9991, 1.0071)
8	Choi et al., 2018	2001-2015	서울	총 사망	10	1.0020(0.9966, 1.0075)
9	이용진, 2007	2002-2005	서울	총 사망	IQR 30.1	6.4(1.1, 8.9)
10	Bae et al., 2011	2005-2008	서울	총 사망	10	1.0113(1.0035, 1.0190)
11	김운수, 2013	2006-2011	서울	총 사망	10	1.002(1.001, 1.004)
12	Kim et al., 2019	2006-2013	7개 광역시	총 사망	10	1.0060(1.0010, 1.0110)
	본 연구	2015-2018	전국	65세 이상	IQR 52.89**	1.0784(1.0421, 1.1146)

* 연구기간 순으로 정렬

** 통합대기환경지수

13) CAI(왜도:2.21, 첨도:9.6), NCAI(왜도:0.68, 첨도:2.48).

〈표 21〉은 국내에서 수행된 미세먼지(PM₁₀)가 호흡기 질환 사망에 미치는 상대위험비 연구를 정리한 것이다. 이와 비교하기 위하여 대기 오염물질이 미세먼지(PM₁₀)만 영향을 미친다고 가정할 경우 통합대기환경지수(CAI) 28.58점은 미세먼지(PM₁₀) 농도 약 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 해당하며, 새로운 통합대기환경지수(NCAI) 52.89점은 미세먼지(PM₁₀) 농도 약 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 해당한다. 상대위험비가 높게 나타난 것은 2차 생성물질 및 오염물질간의 상호작용을 고려한 결과라고 할 수 있다.

본 장에서는 적합성 평가를 통해 가장 적절한 모델을 찾아냈으며 이를 기존 통합대기환경지수와 비교하여 대기오염이 연령과 질환 관련이 있는지 분석한 결과 65세 이상 호흡기계 질환과 유의미한 관련이 있는 것으로 나타났다. 대기오염이 상대위험비와 지연효과를 분석한 결과 새로운 통합대기환경지수와 65세 이상 호흡기 사망은 1일전에 가장 높은 영향이 미치는 것으로 분석된다.

V. 결론

대기오염은 삶의 방식과 건강에 영향을 미치기 때문에 대기오염 지수의 역할은 오염된 공기를 호흡할 때 발생할 수 있는 건강 관련 영향이 있는지 확인하는 기준이 된다. 대기 질 지수를 활용하면 합병증이나 증상의 증가를 미연에 피할 수 있기 때문에 대기 오염 지수의 정확하고 적시적인 정보 전달이 국민의 건강영향에 도움을 줄 수 있다. 또한 개별 대기오염 물질이 아닌 종합적으로 고려하여 대기오염을 관리할 때 대기오염물질을 각 대기오염물질의 감축도 달성할 수 있는 순기능이 있으며 각 대기오염물질의 감축정책이 독립적으로 적용되는 정책의 중복성 문제를 해소하여 정책의 효율성을 제고할 수 있다. 따라서 대기오염의 올바른 정보 제공을 위해 여러 대기 오염 물질을 종합적으로 고려한 지표가 필요하다. 본 연구의 주요 목적은 첫 번째로 대기 오염 물질의 위해성과 인체영향을 고려한 새

로운 통합대기환경지수를 개발하였고, 두 번째는 이에 따른 기존 지수와 비교를 통하여 적합한 모델을 찾고, 세 번째는 새로운 통합대기환경지수가 사망에 미치는 영향을 상대위험비를 통해 초과사망위험을 분석하였다.

새로운 통합대기환경지수를 개발은 1)색상표기, 2)구간명칭, 3)구분값, 4)가산점 적용여부로 구분하였다. 색상표기와 단계 명칭은 해외 및 국내의 대기 오염물질별 위해성과 인체영향연구를 정리하여 근거로 삼았으며 <표 7>부터 <표 12>까지 제시하였다.

색상표기는 국민에게 건강정보를 전달하기 위하여 산업안전보건법 시행규칙과 관련 연구를 참고하여 각 구간에 맞는 색상을 선택하였다. 최종적으로 좋음에서 나쁨으로 갈수록 파랑, 초록, 주황, 빨강, 갈색, 검정으로 설정하였다. 구간명칭은 대기오염지수에서 색상표기는 구간명칭과 함께 대기오염의 위험성을 알리는 도구로 활용되기 때문에 건강영향을 파악하기 어렵다는 점을 보완하였다. 행동요령과 연결하여 대기오염의 심각성을 직관적으로 파악할 수 있도록 건강영향을 나타내는 구간명칭으로 변경하였는데 기존 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨을 좋음, 보통, 민감 그룹에 해로움, 모든 사람에게 해로움, 모든 사람에게 매우 해로움, 치명적으로 설정하였다. 구분값은 인체영향을 고려하여 <표 13>와 같이 6단계로 구분한 새로운 통합대기환경지수를 제시하였는데 기존의 통합대기환경지수(4단계)와 대기질지수(6단계)를 비교한 결과 대기질지수값이 설명력이 높은 것으로 나타나 단계가 구분된 지수값의 적합성이 높은 것으로 나타났으며 이는 단계값이 나쁨에 따라 보다 건강영향 및 위험에 대한 자세한 구분이 가능하다는 점이 있다. 가산점 적용에 따른 적절성을 알아보려고 하였으며 분석 결과 새로운 통합대기환경지수 가중치를 제거한 통합대기환경지수 데이터가 가장 AIC가 작고 유의성이 있는 것으로 나타나 가장 적합한 모델로 선정하였다.

사망자의 연령과 질환에 따라 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해서 전체 사망자, 65세 이상 사망자, 65세 이상 호흡기 및 심혈관계 질환 사망자로 구분하여 통합대기환경지수와 새로운 통합대기환경지수를 비교하였

다. 새로운 통합대기환경지수와 「65세 이상 호흡기계 질환사망자」를 종속변수를 사용한 모델의 AIC가 6.28로 가장 낮았고, 평균제곱근오차 값도 7.33으로 가장 작게 나타나 적합한 모델로 나타났다. 이에 「65세 이상 호흡기계 질환사망자」를 종속변수로 「새로운 통합대기환경지수 일평균 데이터 및 가중치 제거 계산값」을 독립변수로 하여 최종적으로 일반화부가 모형으로 사망에 미치는 상대위험비를 분석하였다. 대기오염 농도 증가에 따른 통합대기환경지수 값이 증가함에 따라 사망에 미치는 영향을 평가하기 위하여 지연효과(lag effect)를 고려하여 각각 당일(Lag0), 1일전(Lag1), 2일전(Lag2), 3일전(Lag3), 4일전(Lag4), 5일전(Lag5), 6일전(Lag6)까지의 상대위험비를 산출하였다. 분석결과 통합대기환경지수에서 가장 상대위험비가 높은 날은 1일전(lag)으로 28.584 일 때 1.0577[1.0111, 1.1043]로 65세 이상 호흡기로 인한 초과 사망 위험이 5.7% 증가하며, 새로운 통합대기환경지수가 52.89 일 때 1.0784[1.0421, 1.1146]로 초과 사망 위험은 7.84% 증가하는 것으로 나타나 새로운 통합대기환경지수의 상대위험비가 높게 나타났다. 이로써 65세 이상 호흡기 관련 사망은 하루 전 대기오염 농도와 관련이 있으며 대기오염으로 인한 통합대기환경지수는 65세 이상 호흡기 질환의 1일전에 가장 높은 영향이 미치는 것으로 분석되었다. 새로운 통합대기환경지수로 인한 초과사망발생위험을 분석한 결과, 대기오염의 단기노출로 인하여 전체 사망뿐만 아니라 특히 65세 이상 호흡기계 질환의 초과사망 발생위험이 높아지는 것으로 나타났다.

본 연구는 대기오염물질을 통합적으로 계산하여 적합성과 초과사망위험을 분석한 연구로 2015년부터 2018년까지 최근 4년간 대기측정망 자료, 사망자료, 기상자료를 활용하여 이에 대한 국내 대기질에 대한 위해성 평가를 수행하여 인체 영향을 고려한 통합대기환경지수를 새롭게 제안하였고, 이에 따른 상대위험비를 분석하였다. 이를 통해 새롭게 개발된 통합대기환경지수의 적합성을 입증하였고, 65세 이상 호흡기계 질환의 초과사망 발생 위험이 높다는 것을 증명하였다. 새로운 대기오염 지표의 설정, 환경정책의 개선 및 활용, 시사점 등을 제공하였으며 주요 시사점 및 향후

연구 방향은 다음과 같다.

첫 번째, 통합대기오염물질 중요성을 인식하여 대기관리 저감 대책을 수립하는 것이 필요하다. 단일 물질 뿐만 아니라 대기 중에 오염물질 구성과 2차 생성되는 물질의 관리를 위하여 각 대기오염물질이 상호작용을 고려하여 대기오염물질 기준 및 저감 대책을 수립하는 것이 필요하다.

두 번째, 인구 고령화에 따라 대기오염의 취약한 집단의 규모가 커지므로 이에 따른 인구보건정책 개선 및 추가가 필요하다. 인구 고령화가 급속하게 진행되고 있어서 기저질환 및 65세 이상 고령자에 대한 세분화된 정책 마련이 필요하다.

세 번째, 대기환경 기준에 대하여 보다 다양한 연구와 시도가 필요하며, 각각 단일 오염물질과 새로운 통합대기환경기준의 비교분석을 통하여 정확하고 보건학적인 지수를 제안하여야 할 것이다.

네 번째, 건강영향, 인구 및 산업 집중도, 근무환경 등, 연구범위의 확대가 필요하다. 호흡기계와 심혈관계 관련 질환 뿐 아니라 입원, 내원 등 다양한 건강영향으로 확대하는 것이 필요하다. 또한 지역별, 인구밀도 차이, 산업의 밀집도 등 주거 환경에 대한 연구와 직업, 근무환경 등에 대한 사회적 요소 등 다양하고 지속적인 연구가 필요하다.

■ 참고문헌 ■

- 김덕태·이선하·전현철, 2012, 『색채학』, (5판), 서울: 일진사.
- 김수인·원두환, 2018, '대기질 개선으로 인한 조기 사망률 감소의 편익추정,' 『환경정책』, 26(4), pp.45-69, DOI: 10.15301/jepa.2018.26.4.45.
- 김승도, 2018, '기후변화협약의 신기후체제,' 『오토저널』, 40(2), pp.20-22.
- 김운수, 2013, 『서울시 기후·환경 변화의 건강영향 분석 연구』, (연구보고서: 2013-PR-05), 서울: 서울연구원.
- 김옥진, 2018, '미세먼지 장기 노출과 사망학위논문,' 박사학위 논문, 서울대학교, 서울.
- 박형준·이숙희·장태창·김균무·고승현·서영우, 2020, '대기 오염 물질과 급성심근경색의 상관 관계 연구,' 『대한응급의학회지』, 31(3), pp.275-283.
- 배현주·이승민·정다운·이종태·박주영, 2017, 『수용체 중심의 환경정책 활용을 위한 대

- 기오염의 노출위험인구 산정 연구』, (KEI 정책보고서; 2017-02), 세종: 한국환경정책평가연구원.
- 양원호, 2019, '기후변화에 따른 대기오염물질 농도 변화 및 미세먼지 노출에 의한 건강 영향,' 『보건복지포럼』, 269, pp.20-31.
- 양희은, 2004, '일반화 가법 모형을 이용한 대기오염과 일별 사망자수와의 연관성,' 석사학위 논문, 덕성여자대학교, 서울.
- 이용진, 2017, '미세먼지 입자크기에 따른 급성사망 영향과 경제적 손실 비용,' 박사학위 논문, 연세대학교, 서울.
- 이재운·유이선·김한훤·오인하, 2018, 『대기오염 문제의 국내경제 영향 및 시사점-미세먼지를 중심으로』, (연구보고서; 2018-892), 세종: 산업연구원.
- 이종태, 2008, 『실내·외 환경에 있어서 미세먼지의 인체 위해도 분석: 환경역학 연구에 기초한』, 과천: 환경부.
- 정은주·김종훈, 2015, 『색채심리』, 서울: 학지사.
- 산업안전보건법 시행규칙, 2020, 고용노동부령 제272호, [별표 7] 안전보건표지의 종류별 용도, 설치·부착 장소, 형태 및 색채(제38조제1항, 제39조제1항 및 제40조제1항 관련), [별표 8] 안전보건표지의 색도기준 및 용도(제38조제3항 관련)
- 환경부, 2006.9, '대기오염 종합평가를 위한 통합 대기오염지수 개발·보급,' 보도자료.
- _____, 2019, 『미세먼지 팩트 체크 미세먼지! 무엇이든 물어보세요』, 세종: 환경부 대기환경정책관실.
- Abbey, D. E., R. J. Burchette, S. F. Knutsen, W. F. McDonnell, M. D. Lebowitz, and P. L. Enright, 1998, 'Long-term particulate and other air pollutants and lung function in nonsmokers,' *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 158(1), pp.289-298, DOI: 10.1164/ajrccm.158.1.9710101.
- Andrade, M., R. M. de Miranda, A. Fornaro, A. Kerr, B. Oyama, and P. A. de Andre et al., 2012, 'Vehicle emissions and PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities,' *Air Qual Atmos Health*, 5, pp.79-88, DOI: 0.1007/s11869-010-0104-5.
- Ailshire, J. A. and P. Clarke., 2014, 'Fine particulate matter air pollution and cognitive function among U.S. older adults,' *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 70(2), pp.322-328, DOI: 10.1093/geronb/ gbu064.
- Bae, H. J. and J. I. Park, 2011, 'The effects of fine and coarse particles on daily mortality in Seoul, Korea,' *Epidemiology*, 22(1), S28, DOI: 10.1097/01.ede.0000392386.38968.bd.
- Cadelis, G., R. Tourres, and J. Molinie, 2014, 'Short-term effects of the particulate pollutants contained in Saharan dust on the visits of children to the

- emergency department due to asthmatic conditions in guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean),’ *PLoS ONE*, 9(3), e91136, DOI: 10.1371/journal.pone.0091136.
- Chen, R., P. Yin, X. Meng, C. Liu, L. Wang, and X. Xu et al., 2017, ‘Fine particulate air pollution and daily mortality: A nationwide analysis in 272 Chinese cities,’ *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 196(1), pp.73-81, DOI: 10.1164/rccm.201609-1862OC.
- Choi, Y., H. Kim, and J. T. Lee, 2018, ‘Temporal variability of short term effects of PM10 on mortality in Seoul, Korea,’ *Science of the Total Environment*, 644, pp.122-128, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.275.
- Gauderman, W. J., R. McConnell, F. Gilliland, S. London, D. Thomas, and E. Avol et al., 2000, ‘Association between air pollution and lung function growth in Southern California children,’ *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 162(4), pp.1383-1390, DOI: 10.1164/ajrccm.162.4.9909096.
- Hasselblad, V., D. M. Eddy, and D. J. Kotchmar, 1992, ‘Synthesis of environmental evidence: Nitrogen dioxide epidemiology studies,’ *Journal of the Air: Waste Management Association*, 42(5), pp.662-671, DOI: 10.1080/10473289.1992.10467018.
- Kim, H., Y. Kim, and Y. C. Hong, 2003, ‘The lag-effect pattern in the relationship of particulate air pollution to daily mortality in Seoul, Korea,’ *International Journal of Biometeorology*, 48(1), pp.25-30. DOI: 10.1007/s00484-003-0176-0.
- Kim, H., H. Kim, and J. T. Lee, 2015, ‘Effects of ambient air particles on mortality in Seoul: Have the effects changed over time?,’ *Environmental Research*, 140, pp.684-690, DOI: 10.1016/j.envres.2015.05.029.
- _____, 2019, ‘Spatial variation in lag structure in the short-term effects of air pollution on mortality in seven major South Korean cities, 2006-2013,’ *Environment International*, 125, pp.595-605, DOI: 10.1016/j.envint.2018.09.004.
- Kloog, I., B. Ridgway, P. Koutrakis, B. A. Coull, and J. D. Schwartz, 2013, ‘Long-and short-term exposure to PM2.5 and mortality: Using novel exposure models,’ *Epidemiology*, 24(4), pp.555-561, DOI: 10.1097/EDE.0b013e318294beaa.
- Krewski, D., R. T. Burnett, M. S. Goldberg, K. Hoover, J. Siemiatycki, and M. Jerrett et al., 2000, *Reanalysis of the harvard six cities study and the American cancer society study of particulate air pollution and mortality*, Cambridge,

MA: Health Effects Institute.

- Laden, F., L. M. Neas, D. W. Dockery, and J. Schwartz, 2000, 'Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities,' *Environmental Health Perspectives*, 108(10), pp.941-947, DOI: 10.1289/ehp.00108941.
- Linn, W. S., Y. T. C. Chang, D. R. Julin, C. E. Spier, U. T. Anzar, and S. Fasciano Mazur et al., 1982, 'Short-term human health effects of ambient air in a pollutant source area,' *Lung*, 160, pp.219-227, DOI: 10.1007/BF02719295.
- Linn, W. S., J. D. Hackney, and E. L. Avol, 1987, 'Pulmonary responses of well-characterized asthmatic, atopic, and normal volunteers to sulfur dioxide; Implications for air quality risk assessment,' *Proceedings, Annual Meeting, Air Pollution Control Association: (USA)*, New York.
- Lippmann, M. and R. B. Schlesinger, 2000, 'Toxicological bases for the setting of health-Related air pollution standards,' *Annual Review of Public Health*, 21, pp.309-333, DOI: 10.1146/annurev.publhealth.21.1.309.
- McConnell, R., K. Berhane, F. Gilliland, S. J. London, H. Vora, and E. Avol et al., 1999, 'Air pollution and bronchitic symptoms in Southern California children with asthma,' *Health Perspect*, 107(9), pp.757-760, DOI: 10.1289/ehp.99107757.
- Mohensin, V., 1987, 'Airway responses to nitrogen oxide in asthmatic subjects,' *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 22(4), pp.371-380, DOI: 10.1080/15287398709531080.
- Moolgavkar, S. H., 2000, 'Air pollution and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in three metropolitan areas in the United States,' *Inhalation Toxicology*, 12 Suppl 4, pp.75-90, DOI: 10.1080/089583700750019512.
- OECD, 2009, *Co-benefits of climate change Mitigation policies: Literature review and new results*, (OECD Economics Department Working Papers No. 693), Paris: OECD Publishing, https://www.oecd-ilibrary.org/economics/co-benefits-of-climate-change-mitigation-policies_224388684356.
- _____, 2016, *The economic consequences of outdoor air pollution*, Paris: OECD Publishing.
- Orehek, J., M. M. Nicoli, S. Delpierre, and A. Beaupre, 1981, 'Influence of the previous deep inspiration on the spirometric measurement of provoked bronchoconstriction in Asthma,' *American Review of Respiratory Disease*, 123(3), pp.269-272, DOI: 10.1164/arrd.1981.123.3.269.

- Ostro, B., L. Chestnut, N. Vichit-Vadakan, and A. Laixuthai, 1999, 'The impact of particulate matter on daily mortality in Bangkok, Thailand,' *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49, pp.100-107, DOI: 10.1080/10473289.1999.10463875.
- Pearson, J. F., C. Bachiredy, S. Shyamprasad, A. B. Goldfine, and J. S. Brownstein, 2010, 'Association between fine particulate matter and diabetes prevalence in the US. Diabetes Care,' 33(10), pp.2196-2201, DOI: 10.2337/dc10-0698.
- Pope III, A. C., M. J. Thun, M. M. Nambodiri, D. W. Dockery, J. S. Evans, and F. E. Speizer et al., 1995, 'Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults,' *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 151, pp.669-674, DOI: 10.1164/ajrccm/151.3_Pt_1.669.
- Purohit, P., M. Amann, R. Mathur, I. Gupta, S. Marwah, and V. Verma et al., 2010, *Scenarios for cost-Effective control of air pollution and greenhouse gases in India*, Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Romieu, I., N. Gouveia, L. A. Cifuentes, A. P. de Leon, W. Junger, and J. Vera et al., 2012, 'Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study),' *Research Report Health Effects Institute*, 171, pp.5-86.
- Samet, J. M., F. Dominici, F. C. Curriero, I. Coursac, and S. L. Zeger, 2000, 'Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994,' *The New England Journal of Medicine*, 343(24), pp.1742-1749, DOI: 10.1056/NEJM200012143432401.
- Sheppard, D., W. S. Wong, C. F. Uehara, J. A. Nadel, and H. A. Boushey, 1980, 'Lower threshold and greater bronchomotor responsiveness of asthmatic subjects to sulfur dioxide,' *American Review of Respiratory Disease*, 122(6), pp.873-878, DOI: 10.1164/arrd.1980.122.6.873.
- Sheppard, D., A. Saisho, J. A. Nadel, and H. A. Boushey, 1981, 'Exercise increases sulfur dioxide-Induced bronchoconstriction in asthmatic subjects,' *American Review of Respiratory Disease*, 123(5), pp.486-491, DOI: 10.1164/arrd.1981.123.5.486.
- Son, J. Y., J. T. Le, H. Kim, O. Yi, and M. L. Bel, 2012, 'Susceptibility to air pollution effects on mortality in Seoul, Korea: A case-crossover analysis of individual-level effect modifiers,' *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2(3), pp.227-234, DOI: 10.1038/jes.2012.6.
- Son, J. Y. and M. L. Bel, 2013, 'The relationships between short-term exposure to

- particulate matter and mortality in Korea: Impact of particulate matter exposure metrics for sub-daily exposures,' *Environmental Research Letters*, 8(1), 014015, DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014015.
- Swedish EPA, 2009, *Air pollution and climate change*, Stockholm: The Swedish Environmental Protection Agency.
- UNECE, 2016, *The co-benefits of climate change mitigation*, (Sustainable Development Brief), Geneva: UNECE.
- U.S. EPA, 2016, *Technical assistance document for the reporting of aaily air quality- The air quality index (AQI)*, (EPA- 454/B-09-001), North Carolina: US EPA Office of Air Quality Planning and Standards.
- Wen, X. J., L. Balluz, and A. Mokdad, 2009, 'Association between media alerts of air quality index and change of outdoor activity among adult asthma in six states,' *Journal of Community Health*, 34(1), pp.40-46, DOI: 10.1007/s10900-008-9126-4.
- WHO, 2000, *The World health report 2000: Health systems: improving performance*, Geneva: WHO.
- _____, 2006, *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, Geneva: WHO.
- _____, 2014, *WHO guidelines for indoor air quality: Household fuel combustion*, Geneva: WHO.
- _____, 2017, *Evolution of WHO air quality guidelines: Past, present and future*, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- Yi, O., Y. C. Hong, and H. Kim, 2010, 'Seasonal effect of PM10 concentrations on mortality and morbidity in Seoul, Korea: A temperature-matched case-crossover analysis,' *Environmental Research*, 10(1), pp.89-95, DOI: 10.1016/j.envres.2009.09.009.
- Zanobetti, A. and J. Schwartz, 2009, 'The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: A national analysis,' *Environmental Health Perspectives*, 117(6), pp.898-903, DOI: 10.1289/ehp.0800108.
- 기상청 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/>.
- 에어코리아, n.d., '통합대기환경지수, https://www.airkorea.or.kr/web/khaiInfo?PMENU_NO=129, [2020.4.3]
- 통계청 마이크로데이터 통합서비스, <https://mdis.kostat.go.kr/index.do>.
- Airnow, <http://airnow.gov>.

신재은: 2014년 고려대학교 생명과학대학 응용경제학과에서 경제학 석사 학위를 받았으며 현재 충북대학교 경제학과 박사과정에 재학중이다. 주요 관심분야는 고령화, 환경정책, 조세정책 등 이다(topaz2033@gmail.com).

투 고 일: 2020년 06월 04일
심 사 일: 2020년 06월 09일
게재확정일: 2020년 08월 31일