



논문

초미세먼지 중 탄소 성분의 준실시간 관측자료 품질관리 순서도 개발

Development of a Quality Management Procedure for Semi-Continuous Carbonaceous Aerosol Data

이서진¹⁾, 이은아²⁾, 최용주³⁾, 이광열⁴⁾, 김필호⁴⁾, 신수현⁴⁾, 김창혁⁴⁾,
박정민⁴⁾, 임세희^{1),2),*}

¹⁾충남대학교 환경공학과, ²⁾충남대학교 환경IT융합공학과,
³⁾한국외국어대학교 환경학과, ⁴⁾국립환경과학원 대기환경연구과

Seojin Lee¹⁾, Euna Lee²⁾, Yongjoo Choi³⁾, Kwangyul Lee⁴⁾, Pilho Kim⁴⁾,
Suhyun Shin⁴⁾, Changhyeok Kim⁴⁾, Jungmin Park⁴⁾, Saehee Lim^{1),2),*}

¹⁾Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

³⁾Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

⁴⁾Climate and Air Quality research Department, National Institute of Environmental Research, Ansan, Republic of Korea

접수일 2025년 6월 17일
수정일 2025년 7월 30일
채택일 2025년 8월 4일

Received 17 June 2025
Revised 30 July 2025
Accepted 4 August 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)42-821-6678
E-mail : saehee.lim@cnu.ac.kr

Abstract Organic and elemental carbon (OC, EC) have been measured and monitored widely in the world, but a standard optimal procedure is scarce. This study developed a standard procedure for quality assurance (QA) for OC and EC semi-continuous measurements, based on observational data collected in Ansan, Gyeonggi for a year. The QA process consists of a total of eight steps, including limit of detection (LOD) check, internal consistency check, and laser-temperature variation correction check. Negative value check, limit of detection check, and persistence check were applied to OC and EC concentrations, while internal consistency, confidence interval, and step check targeted TC concentrations. Each result was flagged as "valid," "check" or "error." Data that failed the tests were generally marked as "error," while some tests, such as limit of detection check and step checks, allowed for "check" classifications considering aerosol characteristics. Out of a total of 7,958 raw data entries, 1,402 (17.6%) were flagged as potential errors based on this QA procedure, mostly coming from the issues of internal consistency, negative values, or correction factor tests. The internal consistency check had the highest error detection rate. The proposed QA procedure, reflecting the physical constraints, field relevance, and statistical confidence of carbonaceous aerosol measurements, is a foundation for establishing standardized quality management (QM) procedures for consistent and efficient data processing.

Key words: Organic carbon, Elemental carbon, Carbonaceous aerosol, Quality assurance, Quality management

1. 서론

초미세먼지 중 탄소 성분은 도심 지역 초미세먼지 (PM_{2.5})의 상당 부분을 차지하며 (Seinfeld and Pandis, 2016; Cao *et al.*, 2003), 기후변화에 직, 간접적인 영향 (태양빛의 흡수 및 산란, 구름응결핵 작용)을 미치는 것으로 보고되고 있다 (Ghim *et al.*, 2005; IPCC,

1992). 탄소 에어로졸은 다양한 연소 과정에서 직접 배출되기도 하고 (primary aerosols), 대기 중에서 기체-입자 변환 반응을 통해 이차적으로 생성되기도 한다 (secondary aerosols) (Park *et al.*, 2003). 이러한 탄소 에어로졸은 열광학적 방법을 통해 측정할 수 있으며, 유기탄소 (Organic Carbon, OC) 성분과 원소탄소 (Elemental Carbon, EC) 성분으로 분석되어진다.

기상 관측자료의 품질관리는 사용자가 관측자료를 최적으로 사용할 수 있도록 오류자료 검출 및 오차보정을 통해 정확도를 최대한 높이는 것을 의미하는데 (KMA, 2006; WMO, 2004), 이러한 품질관리 (Quality Management, QM) 절차는 측정 및 분석 단계에서 시행하는 품질제어 (QC, Quality Control, QC)와 분석 이후 시행하는 품질보증 (Quality Assurance, QA)으로 나뉜다. QC는 기기 보정, 표준물질을 통한 정도관리 등이 포함되고, QA는 관측값 이상치 점검, 내적일치성 검사 등이 포함된다 (WMO, 2008). WMO (2016)에서는 QA/QC 단계를 거친 초미세먼지 중 탄소 성분 관측자료는 원자료 (Raw data)와 구분되어 표식 (flag)을 부여하여 관리하도록 권고하고 있다. 국내에서는 초미세먼지 중 탄소 성분 관측자료 품질보증 (QA) 절차가 별도의 단독 지침으로 제정되어 있지 않고 PM_{2.5} 성분분석 지침 내에서 기타 성분들과 함께 관리되고 있다 (NIER, 2024a). 부유분진 관측자료에 대한 QA로서 Kim *et al.* (2016)에서는 기후 범위검사, 단계검사, 지속성검사 등을 포함해 일련의 알고리즘을 제시했으며, 국립환경과학원은 1차 선별 (측정기 이상, 오염물질 간섭, 기상 상황 고려 등), 2차 선별 (과년도 측정값 경향 및 특이사항에 대한 확인)의 절차를 따른다 (NIER, 2024a). 반면, 초미세먼지 중 탄소 성분을 다룬 국내 선행연구에서는 시료 반복분석 (최소 1개의 시료, 시료의 5~10%), 외부표준물질 (단당, sucrose)을 이용한 내부표준물질 (메탄) 보정, 분석 종료마다 메탄 혼합가스 (5% CH₄ in He)를 이용한 내부표준물질 (메탄) 보정 등 (Chang and Lee, 2019; Jeong *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2014; Bae *et al.*, 2013) 준실시간 OC-EC 분석기의 제조사 (Sunset) 제공 매뉴얼과 NIOSH 5040 온도 프로토콜 매뉴얼에서 제시하고 있는 품질제어 (QC) (Sunset Lab, 2019; NIOSH, 2016)만을 언급하고 있다. 이러한 초미세먼지 중 탄소 성분 관측자료의 품질보증 시스템의 부재는 신뢰도 있는 연구 자료로 활용하는 데 제약이 따른다.

따라서 본 논문은 이러한 한계점을 개선하고, 분석 단계 이후 해당 관측자료의 효율적인 품질향상과 신

뢰성 확보를 위해 초미세먼지 중 탄소 성분 특성에 맞는 물리적 한계 및 통계적 기법에 기반한 품질보증 방법을 일련의 알고리즘으로 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 관측 장소

경기도 안산시에 있는 경기권 대기환경연구소 (37.32°N, 126.83°E)는 주요 권역별 대기질 현황 및 유입·유출되는 오염물질을 파악하기 위한 목적으로 설립된 대기오염집중측정망 중 하나로, 반응가스 (SO₂, CO, NO_x, O₃), PM₁₀, PM_{2.5}, 탄소 성분, 이온 성분, 금속 성분을 측정하고 있다 (NIER, 2024b). 한편, 경기권 대기환경연구소는 주거 및 상업지역에 위치하지만, 서쪽으로 9 km 거리에 시화산업단지과 시화 멀티테크노밸리, 서쪽으로 5 km 거리에 반월산업단지, 남동쪽으로 6 km 거리에 반월도금산업단지가 있어 산업지역의 영향도 파악할 수 있다 (Kim *et al.*, 2023).

2.2 관측장비

본 연구에서는 2023년 1월부터 2023년 12월까지 관측한 PM_{2.5} 내의 OC와 EC 질량농도 자료를 사용하였다. OC와 EC는 준실시간 OC-EC 분석기 (Semi-Continuous OC-EC Field analyzer, Sunset Laboratory, USA)를 이용하여 1시간 단위로 측정되는데, 45분 동안 에어로졸을 포집하여 약 12분간 분석이 진행되고, 3분간 안정화가 이뤄진다. 측정 온도 및 방식은 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 5040 온도 프로토콜과 열광학적 투과법 (Thermal/Optical Transmittance method, TOT)을 적용하였다. OC와 EC의 분석 과정은 2단계로 구분된다 (표 1). 먼저, 설정한 오븐 온도 (310°C, 480°C, 615°C, 840°C)에 따라 헬륨 (He) 대기에서 OC가 CO₂로 산화된다. 산화된 CO₂는 비분산적외선 검출기 (non-dispersive infrared; NDIR)로 검출되어 OC 농

Table 1. Analytical setting of semi-continuous OC-EC field analyzer at Gyeonggi sampling site.

Gas	Carbon fraction	Temperature (°C)	Time (s)
He	-	1	10
	OC1	310	70
	OC2	480	60
	OC3	615	60
	OC4	840	90
	-	0	45
He/O ₂	EC1	550	40
	EC2	850	105

OC1~4 are OC sub-fractions, and EC1~2 are EC sub-fractions.

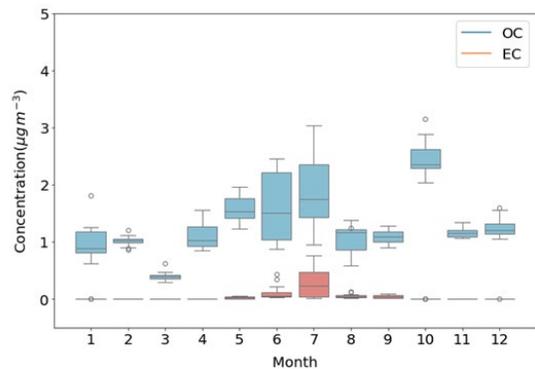
도를 측정한다. OC 분석이 끝나면, 헬륨 대기에 산소를 추가하여 550°C와 850°C에서 EC를 CO₂로 산화시킨다. OC와 같은 방법으로 검출기를 이용하여 EC 농도를 측정한다. OC와 EC는 레이저 값이 감소하다가 다시 증가하여 레이저 초기 투과율에 도달하는 지점으로 구분된다(Lee *et al.*, 2015).

PM_{2.5} 질량농도는 BAM1020 (Metone, USA) 장비로 측정된 자료를 사용하였으며, 16.7 L/min으로 42분간 유리섬유필터에 포집된 PM_{2.5}를 통과한 베타선의 세기와 포집 전 깨끗한 상태의 유리섬유 필터를 통과한 베타선 세기의 비율을 이용하여 1시간 간격으로 농도가 산출된다. 기기의 검출한계는 1 µgC m⁻³이다(Met One, 2020).

2.3 대상 자료 현황

2023년 1월부터 2023년 12월까지 측정한 탄소 에어로졸의 개수는 총 7,958개이며, OC, EC, TC (Total carbon, TC, OC와 EC의 합으로 나타냄)의 질량농도 범위는 각각 $-2.07 \times 10^9 \sim 82.69 \mu\text{gC m}^{-3}$, $-75.15 \sim 6.36 \times 10^8 \mu\text{gC m}^{-3}$, $-1.43 \times 10^9 \sim 111.29 \mu\text{gC m}^{-3}$ 이었다.

현장 바탕시료는 매일 1~2회 기기 검·교정으로 보정 (Calibration), 채취필터 교체, 디누더 필터 교체 및 사이클론 청소를 시행한 전후에 1시간 단위로 생산되었으며, 총 217개의 자료를 사용하여 3단계의 전처

**Fig. 1.** OC and EC concentrations of field blanks after quality assurance at Gyeonggi sampling site. The colors indicate OC (blue) and EC (red).

리 과정을 거쳤다: (1) 결측치 제거 (2) 음수 제거 (OC 및 EC 기준), (3) 단계 검사 (TC 기준). 16개의 음수값과 단계 검사에 해당하지 않는 7개의 자료를 제거하여 총 194개의 현장 바탕시료 자료를 사용하였다. OC와 EC의 현장 바탕농도 범위는 각각 $0.3 \sim 3.2$ (1.35 ± 0.60) $\mu\text{gC m}^{-3}$, $0 \sim 1.2$ (0.06 ± 0.16) $\mu\text{gC m}^{-3}$ 이었으며, OC 농도 구간은 5~7월과 10월에 상대적으로 높았으며, 6월과 7월에 큰 변동성을 보였다. EC 농도는 7월에 최댓값과 큰 변동성이 관측되었다(그림 1). 특히 OC 및 EC 현장 바탕농도의 여름철 변동성은 해당 시기 기상 특성(고온, 혼합고 상승, 외기류 유입 등)의 영향을 받았을 가능성이 있다(Kim *et al.*, 2023).

2.4 검출한계 값 결정

모든 관측·분석 장비는 물리적으로 측정할 수 있는 범위가 존재한다. 검출한계 (Limit of Detection, LOD)는 측정 절차에 의해서 얻어진 측정값 또는 검출 가능한 최소량으로 정의되며, 일반적으로 S/N비의 2.2~5배 농도, 바탕시료의 표준편차 3배, 제조사에서 제시한 기기검출한계 값을 사용한다(Choi and Hong, 2019). 그러나 본 논문에서 사용한 관측자료와 같이 변동성이 큰 현장 바탕농도를 그대로 사용해 검출한계를 산출할 경우, 저농도로 관측된 OC 및 EC

Table 2. Comparison of Limit of Detection (LOD) for OC and EC concentration.

Method	LOD		Valid data	
	OC ($\mu\text{C m}^{-3}$)	EC ($\mu\text{C m}^{-3}$)	(count)	(loss%)
A Instrument	0.4	0.2	6,269	20.8%
B $3 \times$ Standard deviation of blank samples	1.79	0.48	3,996	49.5%
C Seasonal background median (OC) and mean (EC)	May to August 1.42	Other periods 1.10	6,986	11.7%

자료가 검출오류로 판단될 수 있다. 이러한 점을 고려하여 품질보증을 위한 검출한계 값을 결정하기 위해 3가지 경우에 따른 검출한계를 비교하여, 신뢰도를 확보하면서 자료의 손실률이 가장 적은 검출한계 값을 결정하고자 하였다. 비교한 각각의 검출한계는 Sunset사에서 제시한 기기 검출한계(Sunset Laboratory Inc., 2018) (A), 현장 바탕농도의 표준편차 3배 값(B), 그리고 현장 바탕농도의 계절성을 고려한 중앙값 및 평균값(C)이다(표 2). 계절성을 고려한 방법(C)의 경우, 시간에 따른 농도 변화가 급격한 기간과 그렇지 않은 기간으로 구분하였다. 현장 바탕농도 중 OC는 농도 변화가 상대적으로 크게 관측된 연속된 기간인 5~8월과 나머지 기간으로 구분하였으며, 10월에 관측된 OC 농도의 뒤는 현상의 영향을 최소화하기 위해 기간별 중앙값으로 검출한계를 산출하였다. 반면 EC 농도는 7월에 상대적으로 큰 농도 변화를 보이거나, OC보다 비교적 일정한 농도 추이를 보여 기간을 구분하지 않고 평균값으로 검출한계를 산출하였다.

3가지 방법으로 산출한 OC 질량농도의 검출한계는 방법 B(현장 바탕농도 표준편차 3배) > 방법 C(현장 바탕농도 계절성 고려 중앙값 및 평균값) > 방법 A(Sunset사 제공 기기검출한계) 순서로 큰 값을 보였으며, EC 질량농도의 검출한계는 방법 B(현장 바탕농도 표준편차 3배) > 방법 C(현장 바탕농도 계절성 고려 중앙값 및 평균값) 순서로 나타났다(표 2). 방법 A의 OC 검출한계 값이 방법 C보다 작음에도 OC 질량농도의 하위값 변동성보다 EC 질량농도의 하위값 변동성이 더 작아, EC 검출한계가 가장 낮은 방법 C의 자료 손

실률이 가장 작은 결과를 보였다. 검출한계 값이 너무 작으면 농도에 대한 신뢰성을 확보할 수 없으며, 값이 크면 유의미한 자료까지 제거될 수 있다. 따라서 OC의 검출한계는 자료의 손실률이 가장 작고 검출한계 값이 제시된 세 방법 중에 가장 작지 않은 방법 C를 선택하였다. EC의 검출한계는 신뢰성 확보를 고려하여 기기 검출한계의 $\frac{1}{2}$ 이자 자료 손실률이 EC의 전체 기간 평균과 유사한(12.9%) $0.1 \mu\text{gC m}^{-3}$ 로 결정하였다.

3. 결 과

3.1 품질보증 절차

본 논문에서 제시하는 준실시간 OC-EC 분석기의 관측자료 품질보증(QA) 알고리즘은 ‘결측치 검사 - 음수 검사 - 검출한계 만족 검사 - 내적 일치성 검사 - 신뢰구간 검사 - 단계 검사 - 지속성 검사 - 레이저-온도 보정계수 확인’의 총 8단계로 구성된다(그림 2). 각 단계의 검사 결과는 ‘정상’, ‘의심’, ‘오류’로 구분해 표식을 부여하였으며, ‘정상’과 ‘의심’ 자료를 사용 가능한 자료로 판단하였다.

첫 번째 단계인 결측치 검사는 측정되지 않은 자료의 유무를 검사하는 것으로, OC-EC 분석기에서 산출되는 모든 관측값에 대해서 인자(parameter)에 상관 없이 하나라도 결측치인 자료는 오류로 분류하였다.

두 번째 단계인 음수 검사에서는 OC 및 EC 질량농도를 기준으로 양수인 값을 정상 자료로 분류하였다.

세 번째 단계인 검출한계 만족 검사는 OC 및 EC 질량농도가 검출한계보다 낮은 값을 보이는지 확인

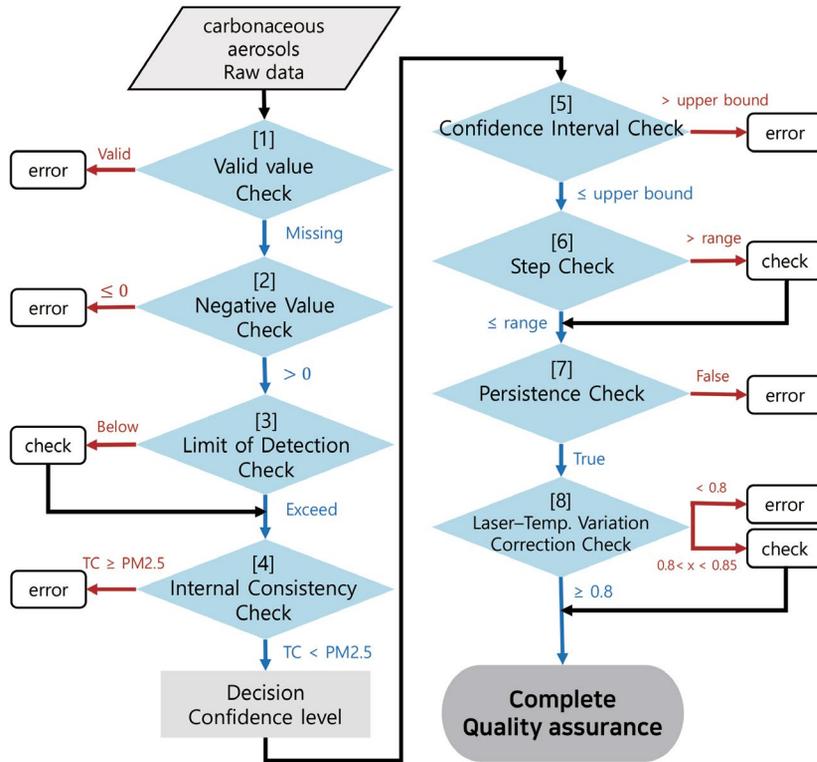


Fig. 2. Flowchart of quality assurance for OC and EC.

하는 검사이다. OC의 검출한계는 현장 바탕농도의 계절성을 고려한 중앙값으로, EC의 검출한계는 기기 검출한계의 1/2값으로 결정하여(자세한 설명은 방법 2.4에서 확인할 수 있다) 검출한계 미만 여부를 판단 하였다.

네 번째 단계는 내적 일치성 검사이다. 내적 일치성 검사는 물리적으로 서로 밀접한 관련이 있는 기상 변수 사이에서 자연적으로 발생할 수 없는 측정값을 판단하는 검사이다(Chae *et al.*, 2014). OC와 EC는 PM_{2.5}의 구성 성분 중 하나이므로, OC와 EC의 합인 TC 질량농도가 PM_{2.5}보다 높으면 이상치로 판단하였다. 그러나 PM_{2.5} 농도가 결측치이면 TC 질량농도보다 크다고 가정하고 의심 자료로 분류하였다.

다섯 번째 단계인 신뢰구간 검사는 TC 질량농도가 신뢰수준에 해당하는 구간 내에 포함되는지 확인하는 검사이다. 신뢰수준이란 실험적으로 얻은 평균(\bar{x})

주위에 모집단 평균(μ)이 존재할 확률을 말하는 것으로(Choi and Hong, 2019), 신뢰구간 검사는 이상치의 영향을 줄이고 표본을 통한 추정치의 신뢰도를 높일 때 활용하는 통계적 기법이다.

여섯 번째 단계인 단계 검사는 서로 다른 단위시간 변동량을 가지고 있는 기상 변수의 품질을 과거 자료의 통계 분석을 이용하여 검사하는 방법이다(Chae *et al.*, 2014). Kim *et al.* (2016)은 시간 연속성 검사를 통과하지 못한 자료를 대상으로 현재 농도의 과거 1시간 평균 농도를 고려하여 정상 및 오류 여부를 판단 하였으며, Heo *et al.* (2005)는 직전 자료 대비 현재 자료의 변동률이 최대 변동률을 벗어나는 경우를 추출하여 이상값이 연속으로 3번까지 나타나는 경우를 오류로 판단하였다. 초미세먼지 중 탄소 성분 관측값이 준실시간 OC-EC 분석기를 통해 1시간 단위로 산출된다는 점과 황사, 연무 등의 기상 이슈의 영향을

Table 3. Data flagged with OC and EC quality assurance.

Date/Time	OC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	EC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	TC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	Laser-Temp. variation correction	QA flag	Final
2023-01-06 10:00:00	1.92	66.27	68.18	0.95	00058888	Error
2023-01-12 21:00:00	11.54	2.47	14.02	0.78	00000107	Error
2023-07-25 22:00:00	1.00	0.13	1.13	0.91	00358888	Error
2023-10-27 13:00:00	4.05	0.20	4.25	0.92	00000000	Normal
2023-11-12 10:00:00	2.87	0.56	3.43	0.87	00000100	Normal

고려해서 단계 검사 정상 자료 범위를 산출하였다. 정상 자료 범위는 TC 질량농도에 대하여 현재 값을 포함한 직전 5시간 자료와 직후 5시간 자료, 총 11시간 평균값의 표준편차 2배에 해당한다.

일곱 번째 단계는 지속성 검사이다. 관측장비의 오류 등으로 일정 기간 관측값에 변화가 없는 현상을 검출하기 위한 검사로 (Chae *et al.*, 2014), Kim *et al.* (2016)을 참고하여 TC 농도를 대상으로 직전 자료와 현재 자료가 동일한 값인지 확인하였다. 동일한 값이 연속되지 않는 경우의 현재 자료를 정상 자료로 분류하였다.

여덟 번째 품질관리 단계는 레이저-온도 보정계수를 확인하는 것이다. OC-EC 분석기는 포집된 에어로졸을 온도 구간에 따라 CO₂로 산화시켜 그 양을 측정한다. 포집된 성분들은 분석 동안 모두 산화되었다고 가정하지만, 시간이 지남에 따라 필터가 오염되어 레이저의 투과도가 저하되는 현상이 발생한다. 레이저-온도 보정계수는 투과도가 저하되는 현상을 파악하기 위해 초기 레이저값과 측정 시의 레이저 투과율을 이용하여 산출되는 값이다 (Park *et al.*, 2015). 필터에 에어로졸이 많이 쌓일수록 레이저의 투과율은 저하된다. 따라서 필터의 오염정도에 따라 OC와 EC 농도를 과대 측정할 수 있다. Sunset 사는 레이저-온도 보정계수를 0.9 이상 유지하는 것을 권고하였으며, 레이저-온도 보정계수가 0.8 이상 0.88 이하는 검토, 0.8 미만은 오류로 분류하였다. Yu *et al.* (2009)는 보정계수가 0.88 이하가 되기 전에 필터를 교체하는 것을 권장하였다. 본 논문에서는 TC, OC 및 EC의 질량농도가 대체로 레이저-온도 보정계수가 0.85 미만에서 농도가 상대적으로 높게 관측된 것과 Sunset사의 분류

조건을 참고하여 0.85 이상이면 '정상', 0.80 이상 0.85 미만이면 '의심', 0.8 미만의 자료는 '오류'로 분류하였다.

초미세먼지 중 탄소 성분의 품질관리 검사를 수행할 때 모든 단계에 대해 이상 여부(정상, 의심, 오류)를 표식(flag, 0~8로 이루어진 8자리)으로 구분하였다(표 3). 0은 '정상', 1은 '의심', 2~5, 7은 '오류', 8은 '미검사'를 의미한다. '오류' 표식인 2~4는 OC와 EC를 기준으로 수행한 품질관리 단계(음수 검사, 검출한계 검사, 동일값 지속성 검사)에 해당하는 표식으로, OC, EC 모두 통과하지 못하면 2, OC만 통과하지 못하면 3, EC만 통과하지 못하면 4로 구분된다. TC를 기준으로 수행한 품질관리를 통과하지 못한 오류자료는 5로 표시하였으며, 레이저-온도 보정계수를 통과하지 못한 자료는 7로 표시하였다.

3.2 품질관리 절차 주요 고려 사항

에어로졸 농도는 측정 장비가 설치된 지역의 환경과 기상 상황에 따라 달라진다. 그러므로 관측 결과에 따라 품질관리 방법이 조금씩 달라질 수 있다. 본 논문에서는 검출한계 검사, 신뢰구간 검사, 단계 검사를 앞서 제시한 방법에서 일부 보완하여 적용하였다.

3.2.1 검출한계 미만값(불검출) 대체

검출한계보다 작게 관측된 값은 불검출로 표시하는 것이 일반적이나 (NIER, 2024), 불검출로 판단하여 해당 자료를 제외하면 평균을 과대 및 과소평가할 수 있다 (OSHRI, 2007). 이러한 점을 방지하기 위해 본 논문에서는 검출한계 미만의 값을 Hornung and Reed (1990)의 식을 사용하여 대체하였다 (OSHRI,

2007). OC와 EC 농도 자료의 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD)가 3 미만이면 식 (1)을, 3 이상이면 식 (2)를 적용하여 산출한 값으로 불검출 자료를 대체하였다.

$$LOD \times \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \quad (1)$$

$$LOD \times \left(\frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

3.2.2 신뢰구간 검사의 신뢰수준 설정

신뢰구간 검사는 기본적으로 정규분포(normal distribution)를 이루는 자료를 대상으로 t-value 기반의 신뢰구간을 산출한다. 그러나 2023년 경기도 안산의 초미세먼지 중 탄소 성분 관측자료는 유의수준 0.05를 기준으로 p-value가 작아 정규분포를 이루고 있지 않으므로(비정규분포, non-normal distribution), 확률밀도함수의 면적으로 신뢰구간을 확인하였다. TC 질량농도에 대해 산출한 신뢰구간은 신뢰수준이 99.9%일 때 상한선 45.32 $\mu\text{gC m}^{-3}$ 이었으며, 99.7%와 99.8%의 상한선의 차이가 가장 컸다(약 12 $\mu\text{gC m}^{-3}$, 표 4). 신뢰수준 결정을 위해 내적 일치성 검사를 통과한 TC 질량농도와 동 시간대 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 비교하여 고농도 사례 영향을 고려하였다. TC 고농도와 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 사례가 함께 관측되어(표 5), TC 농도의 최댓값이 이상치라고 판단하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 신뢰구간 검사를, 자료를 검토하는 용도로만 수행하였다.

3.2.3 단계 검사

에어로졸 관측자료는 황사, 연무 등의 기상 이슈로 인한 영향으로 관측값의 단위시간 변동량이 급격히 변화할 수 있다. 본 논문에서는 TC 질량농도의 과거, 현재, 미래 총 11시간 관측값의 평균의 표준편차 2배 범위로 관측자료를 검토하였으며, 해당 범위를 벗어나는 자료는 내적 일치성 검사에서 확인한 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 사례의 영향으로 수반될 수 있는 급격한 농도 변화에 따른 관측값으로 판단되어 오류로 판단하지

Table 4. Confidence interval of TC concentration. The confidence interval range was calculated based on the area under the probability density function of TC.

Confidence level (%)	Lower bound ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	Upper bound ($\mu\text{gC m}^{-3}$)
99.5	1.05	20.59
99.6	0.97	21.85
99.7	0.89	27.62
99.8	0.83	39.26
99.9	0.83	45.32

Table 5. $\text{PM}_{2.5}$ concentration observed at the same time as the top five TC concentration observed in Ansan.

Date/Time	TC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{gC m}^{-3}$)
2023-04-06 22:00	51.04	145
2023-04-06 19:00	50.68	142
2023-04-06 20:00	46.27	155
2023-04-06 18:00	45.35	137
2023-04-06 21:00	45.29	144

않고 의심 자료로 분류하였다.

3.3 품질관리 결과

총 8단계의 품질관리를 거쳐 분류된 정상 및 의심 자료는 총 6,556개로, 초기 자료의 82.38%가 유효한 자료로 산출되었다(표 6). 그 중 정상자료는 72.27%, 의심자료는 27.73%이며 의심자료의 경우 사용자의 검토가 필요하다. 오류자료가 존재하는 품질관리 검사 단계는 음수 검사, 내적 일치성 검사, 레이저-온도 보정계수 확인 단계로 나타났으며, 각 구간에서 42개, 1,067개, 293개가 제거되었다. 최종 자료의 OC, EC, TC 질량농도 평균과 표준편차는 각각 $4.85 \pm 2.85 \mu\text{gC m}^{-3}$, $0.71 \pm 0.59 \mu\text{gC m}^{-3}$, $5.56 \pm 3.29 \mu\text{gC m}^{-3}$ 로(표 7), 초기 OC 자료의 64.6 퍼센타일, 초기 EC 자료의 68.8 퍼센타일, 초기 TC 자료의 65.4 퍼센타일에 해당하였다.

그림 3은 오류자료가 존재하는 품질관리 절차의 정상 자료 수를 월별로 나타낸 것이다. 자료의 제거율이 높은 달은 4월(38.4%)과 3월(32.4%)로 나타났으며, 해당 월에 최대 제거율을 보인 단계는 약간의

Table 6. Summary of OC and EC quality assurance.

No.	Step	Valid (count)	Error (count)
	Raw data	7,958	
[1]	Valid value check	7,958	0
[2]	Negative value check	7,916	42
[3]	Limit of detection (LOD) check	7,916	0
[4]	Internal consistency check	6,849	1,067
[5]	Confidence interval check	6,849	0
[6]	Step check	6,849	0
[7]	Persistence check	6,849	0
[8]	Laser-temperature variation correction check	6,556	293
	Final data	6,556	
		6,556 (82.38%)	
Total data (percent)		Normal 4,738 (72.27%)	Check 1,818 (27.73%) 1,402 (17.62%)

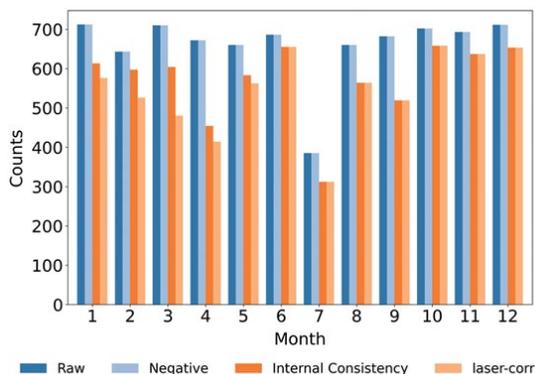
Table 7. Concentrations of OC and EC after quality assurance.

	OC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	EC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)	TC ($\mu\text{gC m}^{-3}$)
Count	6556	6556	6556
Min	1.11	0.1	1.31
5%	1.91	0.16	2.2
10%	2.21	0.21	2.52
25%	3	0.33	3.41
50%	4.22	0.56	4.79
75%	6	0.88	6.89
80%	6.54	1	7.45
95%	9.74	1.83	11.27
Max	46.05	8.3	51.04
Mean \pm std	4.85 \pm 2.85	0.71 \pm 0.59	5.56 \pm 3.29

차이를 보였다. 3월에 최대 제거율을 보인 품질관리 단계는 레이저-온도 보정계수 검사로, 약 25.8%를 차지하였다. 반면 4월은 내적 일치성 검사에서 가장 많이 제거되었다(48.0%). 3월과 4월은 황사 및 연무 사례가 많은 시기로, 필터가 빠르게 오염되어 레이저-온도 보정계수가 낮게 측정되었을 가능성이 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 대기 중 탄소 성분 관측자료의 품질향상을 위한 품질보증(QA) 알고리즘을 개발하기 위해

**Fig. 3.** Monthly counts of 'normal' data after major QA steps: negative value check, internal consistency check, and laser-temperature correction.

2023년 1월부터 12월까지 경기도 안산에서 관측한 초미세먼지 중 탄소 성분 자료를 활용하였다. 품질보증(QA) 절차는 '결측치 검사 - 음수 검사 - 검출한계 만족 검사 - 내적 일치성 검사 - 신뢰구간 검사 - 단계 검사 - 지속성 검사 - 레이저 - 온도 보정계수 확인'의 총 8단계로 구성하였다. 음수 검사, 검출한계 만족 검사, 지속성 검사는 OC와 EC의 질량농도를 기준으로 수행하였고, 내적 일치성 검사, 신뢰구간 검사, 단계 검사는 TC 질량농도를 기준으로 하였다. 검사 결과는 정상, 의심, 오류로 구분되어 표식을 부여하였으며, 각

검사기준을 충족하지 못한 자료는 ‘오류’로, 검출한계 만족 검사와 단계 검사는 에어로졸의 특성을 고려하여 ‘의심’으로 분류하였다. ‘의심’ 자료의 유효성에 대한 최종 결정은 추후 사용자의 판단이 필요하다.

탄소 성분 관측자료에서 ‘오류’로 분류된 자료 수는 총 1,402개로, 전체의 약 17.6%에 해당한다. 오류 자료는 주로 흡수 검사, 내적 일치성 검사, 레이저-온도 보정계수 확인 단계에서 검출되었으며, 내적 일치성 검사에서 오류 검출률이 가장 높았다. 월별 자료 제거율은 4월, 3월 순으로 가장 높았으며, 3월은 레이저-온도 보정계수 확인 단계에서, 4월은 내적 일치성 검사에서 제거율이 가장 높았다. 이는 해당 기간이 황사 및 고농도 사례가 많은 시기이므로 OC-EC 분석기의 시료 채취 필터가 빠르게 오염됨에 따른 결과로 추정된다. 초미세먼지 중 탄소 성분 관측자료는 관측 장소마다 지역의 배출 특성 및 계절별 성분 농도의 특성이 다르므로 원자료에 대한 품질보증 알고리즘의 각 단계를 수정, 보완, 선별하는 과정을 거쳐 채택해야 한다.

본 연구의 초미세먼지 중 탄소 성분 관측자료의 품질보증(QA) 알고리즘은 대기 중 탄소 성분(TC, OC 및 EC) 질량농도의 물리적 한계, 현상성 및 통계적 신뢰도를 고려한 품질보증 절차로서, 관측자료처리의 일관성 및 효율성을 위한 자료 품질관리(QM) 표준 운영 절차 확립에 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였으며(NIER-2024-04-02-011), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행하였습니다(RS-2021-NR061996).

PM_{2.5}와 탄소 성분 자료를 제공해 준 국립환경과학원 경기권 대기환경연구소에 감사드립니다.

References

- Bae, M.S., Park, S.S., Kim, Y.J. (2013) Characteristics of Carbonaceous Aerosols Measured at Gosan- Based on Analysis of Thermal Distribution by Carbon Analyzer and Organic Compounds by GCMS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6), 722-733, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.6.722>
- Cao, J.J., Lee, S.C., Ho, K.F., Zhang, X.Y., Zou, S.C., Fung, K., Chow, J.C., Watson, J.G. (2003) Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period, *Atmospheric Environment*, 37(11), 1451-1460, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01002-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01002-6)
- Chae, J.H., Park, M.S., Choi, Y.J. (2014) The WISE Quality Control System for Integrated Meteorological Sensor Data, *Atmosphere*, 24(3), 445-456, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2014.24.3.445>
- Chang, Y.W., Lee, J.Y. (2019) Characteristics of Temperature-Resolved OC and EC Fractions in PM_{2.5} Measured at Anmyeon Island in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 658-669, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.658>
- Choi, S.H., Hong, T.G. (2019) Environmental Laboratory QA/QC Guide. Freecademy.
- Ghim, Y.S., Moon, K.C., Lee, S.H., Kim, Y.P. (2005) Visibility trends in Korea during past two decades, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55(1), 73-82. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464599>
- Heo, B.H., Lee, J.A., Chu, Y.O., Kim, J.H., Park, N.C., Cho, J.Y., Oh, S.J., Noh, M.S., Lee, Y.J. (2005) Statistical procedure of AWS observation data to determine the threshold value for the RQMOD(realtime quality control system for meteorological observation data), *Proceedings of the autumn meeting of Korean Meteorological Society*, 390-391.
- Hornung, R.W., Reed, L.D. (1990) Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 5(1), 46-51.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1992) Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_wg_i_1992_suppl_report_full_report.pdf

- Jeong, B.J., Bae, M.S., Ahn, J.Y., Lee, J.H. (2017) A Study of Carbonaceous Aerosols Measurement in Metropolitan Area Performed during KORUS-AQ 2016 Campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 205-216, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.205>
- Kim, C.H., Kim, J.H., Hwang, K.C., Kim, P.H., Shin, S.H., Park, J.S., Park, S.C., Lee, G.H., Lee, J.Y., Kim, J.B. (2023) Characteristics Analysis of PM_{2.5} in Industrial Complex Near Area According to Domestic and Foreign Influences in Case of High Concentration PM_{2.5} Episode Occurrence, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 62-76, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.62>
- Kim, S.Y., Lee, H.C., Ryoo, S.B. (2016) Development and Assessment of Real-Time Quality Control Algorithm for PM₁₀ Data Observed by Continuous Ambient Particulate Monitor, *Atmosphere*, 26(4), 541-551, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2016.26.4.541>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2006) Real-time quality control system for meteorological observation data (I) Application, (Tech. Note 2006-2), 157 pp.
- Lee, Y.J., Park, M.K., Jung, S., Kim, S.J., Jo, M.R., Song, I.H., Lyu, Y.S., Lim, Y.J., Kim, J.H., Jung, H.J., Lee, S.U., Choi, W.J., Ahn, J.Y., Lee, M.H., Kang, H.J., Park, S.M., Seo, S.J., Jung, D.H., Hyun, J.K., Park, J.S., Hwang, T.K., Hong, Y.D., Hong, J.H., Shin, H.J. (2015) Characteristics of Particulate Carbon in the Ambient Air in the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 330-344, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.4.330>
- Met One Instruments, Inc. (2020) BAM 1020 PARTICULATE MONITOR OPERATION MANUAL, <https://metone.com/wp-content/uploads/2020/09/BAM-1020-9805-Manual-Rev-C.pdf>
- Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research (NIER) (2024) Air Pollutant Process Test Standards ES 01000.b (General Provisions). <https://www.law.go.kr/>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024a) Guidelines for Installation and Operation of Air Quality Monitoring Networks (NIER-GP2024-001), <https://www.airkorea.or.kr:14443/jfile/readDownloadFile.do?fileId=1960eb694f138&fileSeq=1&useSecurity=&uploadMode=db>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024b) Annual Report of Air Quality in Korea 2023. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (2016) Manual of Analytical Methods (NMAM), Fifth Edition, DIESEL PARTICULATE MATTER (as Elemental Carbon) METHOD 5040, Issue 4, 10 March 2016, <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2014-151/pdfs/methods/5040.pdf>
- Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI) (2007) Detection limit, quantitation limit, and data treatment below these limits in the analysis of trace substances, <https://www.kosha.or.kr/oshri/professionalBusiness/monitoringSystemReferenceRoom.do?mode=view&articleNo=406561&article.offset=40&articleLimit=10#>
- Park, D.J., Ahn, J.Y., Shin, H.J., Bae, M.S. (2014) Characteristics of PM_{2.5} Carbonaceous Aerosol using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(5), 461-476, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.5.461>
- Park, R.J., Jacob, D.J., Chin, M., Martin, R.V. (2003) Sources of carbonaceous aerosols over the United States and implications for natural visibility, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D12). <https://doi.org/10.1029/2002JD003190>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, John Wiley & Sons.
- Sunset Laboratory Inc. (2019) Sunset Semi-Continuous OCEC Carbon Aerosol Analyzer: A Guide to Running and Maintaining the Sunset Laboratory Semi-Continuous OCEC Analyzer. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-05/documents/sunset_manual_0.pdf
- Sunset Laboratory Inc. (2018) Organic Carbon and Elemental Carbon Field Instrument - Model 4 User's Manual, Sunset Laboratory Inc. <https://j-aguirre-sl.com/wp-content/uploads/2024/10/MODEL-4-ETV-REV3.pdf>
- World Meteorological Organization (WMO) (2004) Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations, <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CIMO/OPAGSURFACE/ET-ST&MT-1/Doc>
- World Meteorological Organization (WMO) (2008) Guide to the Meteorological Instruments and Methods of Observation, <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>
- World Meteorological Organization (WMO) (2016) GAW Report No. 227: WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, https://library.wmo.int/viewer/55277/download?file=wmo_1177_en.pdf&type=pdf&navigator=1
- Yu, X.Y., Cary, R.A., Laulainen, N.S. (2009) Primary and secondary

organic carbon downwind of Mexico City, Atmospheric Chemistry and Physics, 9(18), 6793-6814. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6793-2009>

Authors Information

이서진 (충남대학교 환경공학과 학사)
(hoga952@naver.com)

이은아 (충남대학교 환경IT융합공학과 석사과정)
(dmsdk6946@naver.com)

최용주 (한국외국어대학교 환경학과 교수)
(choingjoo@hufs.ac.kr)

이광열 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구사)
(kylee21@korea.kr)

김필호 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(blackkph@korea.kr)

신수현 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(ssh755@korea.kr)

김창혁 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(kimchanghyeok@korea.kr)

박정민 (국립환경과학원 대기환경연구과 과장)
(ilikepaul@korea.kr)

임세희 (충남대학교 환경공학과 및 환경IT융합공학과 교수)
(saehee.lim@cnu.ac.kr)