

## 풍속 시계열의 지속성 구간이 스펙트럼에 미치는 영향

변규리 · 강성락\*

국립강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2025년 11월 13일, 수정일: 2025년 11월 28일, 게재확정일: 2025년 11월 29일)

### Effects of Persistent Flat-Line Segments in Wind Speed Time Series on Spectra

Gyu-Ri Byun and Song-Lak Kang\*

Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung-si, Korea

(Manuscript received 13 November 2025; revised 28 November 2025; accepted 29 November 2025)

**Abstract** Within the quality control (QC) procedures, this study reassesses the threshold of the persistence test from the perspective of sub-daily timescale analysis, using 1-min mean wind-speed time series from seven Automatic Weather System (AWS) sites in the Ulsan region in 2024. First, we performed preprocessing steps to prevent distortions in spectral analysis arising from temporal discontinuities or nonphysical signals. Next, to quantify the impact of flat-line segments on the spectrum, we randomly selected 21 out of 286 days with no missing values and flat lines shorter than 5 min, and inserted and moved a  $0 \text{ m s}^{-1}$  segment of varying length (6, 10, 15, 20, 30, 120, 240 min) within each time series. As a result, the spectral relative error increased with segment length; in particular, the increase in error was markedly larger for 10~15 min than for 6~10 min. In the 240-min case, the largest error appeared at a timescale of about 8 h, and consistency with the spectrum of the original time series deteriorated substantially across the entire frequency range. In addition, the longer the flat-line segment, the more the daily mean wind speed was underestimated and the more the variance tended to be overestimated. These results suggest that the 240-min threshold used in the KMA persistence test imposes limitations on analyses at sub-daily timescales. Considering the need to minimize spectral and statistical distortions, this study proposes 10 min as a realistic and physically sound threshold for the persistence test applied to 1-min mean wind-speed data.

**Key words:** Sub-daily time scale, Flat-line, 1-min mean wind speed, Spectrum

### 1. 서 론

Urban Air Mobility (UAM)의 주요 항로는 고도 300~600 m로 대기 경계층 내부에 해당하며, 대기 경계층은 지표의 영향을 직접 받아 난류가 강하고 온도나 풍속의 변화가 크며 명확한 일주기를 가진다(KMA, 2021). 이러한 특성은 UAM의 이·착륙 과정뿐 아니라

비행 중 항로 안정성에도 직접적인 영향을 미치므로, 하루 이하의 시간 규모에서 발생하는 바람 변동성을 정확히 분석하는 것은 중요하다. 이를 위해서는 먼저 바람 관측 자료의 품질이 충분히 확보되어야 한다.

우리나라는 종관기상관측장비(automatic synoptic observation system, ASOS)와 자동기상관측장비(automatic weather system, AWS)를 통해 지상 바람을 지속적으로 관측하고 있으며, 이 자료는 다양하게 활용되고 있다. 그러나 장비의 노후화나 센서 오작동 등으로 인해 비정상적인 값이 발생할 수 있으며, 이러한 오류는 분석 결과의 신뢰성을 저하시킬 우려가 있다. 따라서 품질관리(quality control; QC)를 통해 이상

\*Corresponding Author: Song-Lak Kang, Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7, Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea.  
Phone: +82-33-640-2327, Fax: +82-33-640-2320  
E-mail: slkang@gwnu.ac.kr

자료를 식별하고 제거하는 과정이 필수적이다.

세계기상기구(world meteorological organization; WMO)와 미국 해양대기청(national oceanic and atmospheric administration; NOAA)은 다양한 QC 절차를 제안하고 있다(NOAA, 2017; WMO, 2023). 각 기관에서 제시한 QC 항목들은 명칭에서는 다소 차이가 있으나, 실제로는 동일하거나 상호 포함되는 경우가 많다. 예를 들어, WMO의 내부 일관성 검사(internal consistency check)는 NOAA의 변수 간 일관성 검사(inter-variable checks, Test 9)에 대응하며, 시간적 일관성 검사(time consistency check)는 스파이크 검사(spike test, Test 6) 및 지속성 검사(flat-line test, Test 8)에 해당한다.

우리나라 기상청(korea meteorological administration, KMA) 또한 기온, 일 누적 강수량, 기압 등 여러 기상 요소를 대상으로 QC를 수행하고 있다(KMA, 2025). 본 연구에서는 그 중 풍향과 풍속에 대한 기준만을 활용하였다. KMA의 QC 절차는 물리적 한계 검사, 단계 검사, 지속성 검사, 기후범위 검사 그리고 내적 일치성 검사로 구성되어 있다. 물리적 한계 검사는 관측값이 허용 범위에서 벗어나는지 확인하는 단계로, 풍향은 0~360°, 풍속은 0~75 m s<sup>-1</sup> 범위 내에서 유효한 것으로 판단한다. 단계 검사는 1분을 포함한 모든 관측 주기에서 풍속 변화량이 20 m s<sup>-1</sup>를 초과할 경우 오류로 간주한다. 지속성 검사는 일정 시간동안 값의 변화가 없을 경우를 탐지하기 위한 절차로, 풍향과 풍속 모두 240분(4시간) 동안 최소 변화량이 0일 때를 오류로 판정한다. 기후 범위 검사는 기온 자료에만 적용되며, 관측 값이 각 월별 허용 범위를 벗어날 경우 오류로 처리된다. 마지막으로, 내적 일치성 검사는 요소간 물리적·통계적 불일치를 판별하기 위한 절차로, 1분 최대 순간 풍속이 1분 평균 풍속보다 작은 경우 두 값 모두 오류로 판정한다.

이러한 QC 기준들은 시간 영역에서 관측 자료에 뚜렷한 오류가 존재하는지를 판별하는 데에는 유용하다. 그러나 시간 영역의 시계열은 특정 구간에서 바람의 변동성이 전반적으로 크다. 작다 정도만 보여줄 뿐, 수십 분, 수 시간, 하루와 같은 개별 시간 규모의 변동이 전체 분산에서 어느 정도 비중을 차지하는지는 알려주지 못한다. 반면 시계열을 주파수 영역으로 변환한 스펙트럼은 전체 분산을 주기별 성분으로 분해하므로, 어느 시간 규모에서 에너지가 가장 크게 나타나는지를 정량적으로 파악할 수 있다. 특히 UAM 비행체는 크기가 작아 국지적으로 발생하는 강한 바람이나 소규모 난류에 매우 민감하게 반응하므로(KMA, 2021), 운항에 직접적으로 관련된 수십 분~수 시간 이내의 변동성을 다른 시간 규모의 변동성과 분리하여

평가할 수 있다는 점에서 중요하다. 본 연구에서는 이를 고려하여 하루 단위 스펙트럼을 중심으로 분석을 수행하였다.

그러나 스펙트럼 분석 관점에서 보았을 때, 기존 QC 항목 중 지속성 검사는 그대로 적용하기에 다소 제약이 있을 수 있다. 푸리에 해석(Fourier analysis)은 시계열을 여러 개의 사인(sine)과 코사인(cosine) 함수의 합으로 표현하는 방법이다(Stull, 1988). 예를 들어, 240분 동안 동일한 값(0 m s<sup>-1</sup>)이 지속되는 경우, 이를 하나의 저주파 성분으로 인식하여 특정 주파수 대역에서 스펙트럼 왜곡이 유발될 수 있다. 그 결과, 시계열의 분산이 과소 혹은 과대 추정될 가능성이 있다. 또한 관성 아영역(inertial subrange)에서 스펙트럼은 파수의 -5/3 제곱에 비례하는 거듭제곱 법칙(power law)을 따른다(Tennekes, 1978). 이 관계를 주파수 영역으로 변환하면 동일한 -5/3의 스펙트럼 기울기가 유지되어야 하지만, 장시간 동일한 값이 지속될 경우 해당 구간이 왜곡되어 나타날 수 있다.

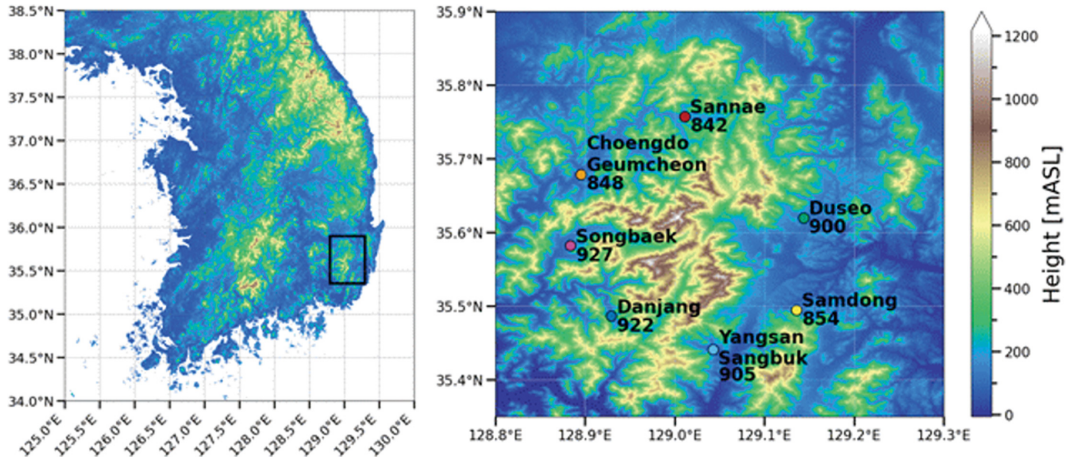
따라서 하루 이하의 시간 규모를 대상으로 하는 스펙트럼 분석 관점에서, 240분보다 짧은 지속성 검사 기준을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 KMA의 AWS 1분 평균 풍속 자료를 대상으로, 기존 QC의 한계를 평가하고 스펙트럼 왜곡을 최소화할 수 있는 기준을 제안하고자 한다.

## 2. 연구 자료

본 연구에서는 Korean Urban Air Mobility (K-UAM) 울산 시험 지역(testbed)에 위치한 7개의 AWS에서 관측된 풍향과 풍속 자료를 활용하였다. 해당 지역은 UAM 운항 환경을 모의하고 검증하는 데 활용되기 때문에, 주변 지상 관측 자료의 품질을 우선적으로 확인할 필요가 있다. 연구 지역은 산지 지형에 해당하며, 각 관측소의 위치와 고도는 Fig. 1 및 Table 1에 제시하였다.

사용된 자료는 2024년 1분 평균 풍향·풍속 자료로, KMA의 기상자료개방포털을 통해 수집하였다. 모든 관측소의 풍향·풍속계는 장애물의 영향이 거의 없는 경우 지면으로부터 10 m 높이에서 설치되며, 건물 옥상에 설치된 경우에는 주변 장애물의 높이와 이격 거리를 고려하여 건물 높이의 1.3배 이상 또는 옥상 바닥면으로부터 건물 폭만큼의 높이에 설치가 된다(KMA, 2022). 또한 풍향·풍속계는 주변 장애물로부터 그 높이의 10배 이상(최소 2.5배 이상)을 이격하도록 규정되어 있다(KMA, 2022).

관측 자료는 KMA에서 정해진 처리 절차를 거쳐 산출된 값으로, 0.25초 간격의 바람 벡터 자료를 10 초 동안 평균을 구한 후, 1분 동안 6개의 자료를 다



**Fig. 1.** Maps of the Korean Peninsula (left) and the target region (right). The black rectangle in the left panel indicates the target region, which is enlarged in the right topographic map. The locations of the seven Automatic Weather System (AWS) in the mountainous region are shown with station names and numbers.

**Table 1.** Basic information on the seven AWS stations. The height represents the elevation above sea level.

Station name	Station number	Latitude [°]	Longitude [°]	Height [mASL]
Sannae (SNA)	842	35.7576	129.011	170.66
Choengdo-Geumcheon (CGC)	848	35.6792	128.8953	104.4
Samdong (SAM)	854	35.4953	129.1357	166.84
Duseo (DUS)	900	35.6203	129.1436	117.49
Yangsan-Sangbuk (YSB)	905	35.4414	129.0429	83.57
Danjang (DAN)	922	35.4865	128.9291	138.03
Songbaek (SGB)	927	35.582	128.8837	126.74

**Table 2.** Basic information on wind observation instruments.

Type	Six AWS stations (excluding Samdong)	Samdong
Sensor type (model)	3-cup anemometer (JS-WS2082) Wind vane (JS-WT2081)	Ultrasonic anemometer (WMT703)
Manufacturer	JinsungENG (Korea)	Vaisala (Finland)
Wind speed Measurement range	0~75 m s <sup>-1</sup>	
Wind direction Measurement range	0~360°	
Operation temperature	-	-40~60°C

시 평균하여 최종 1분 평균 자료가 생산된다(KMA, 2023). 각 관측소에서 사용된 풍향·풍속계의 사양은 Table 2에 요약하였다. SAM 관측소는 2차원 초음파식 풍향풍속계(WMT703)가 설치되어 있으며, 나머지 6개의 관측소에서는 풍향은 vane (JS-WT2081), 풍속은 3-cup anemometer (JS-WS2082)를 사용한다.

### 3. 품질관리 절차

#### 3.1 자료 존재 여부

KMA에서 제공하는 자료는 실제로 수집된 시각의 관측값만을 포함하며, 수집이 누락된 시각은 자료 파일 내에 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 시

각이 누락된 경우, 해당 시각을 생성하고 결측 값으로 채워 넣어, 모든 시각이 균일한 간격으로 정렬된 시계열을 확보하였다.

이러한 과정을 통해 자료 수집 과정에서 발생한 시간 누락을 정량적으로 확인하였다. Table 3은 관측소

별 월별 누락 시간의 개수를 나타낸다. 대부분의 관측소에서는 한달동안 누락된 시각이 5개 이하로 나타나 전반적으로 누락 빈도가 낮았으나, 일부 관측소에서는 특정 달에 집중적으로 누락이 발생하였다. 각 관측소 별로 누락이 가장 많이 발생한 시기와 개수는

**Table 3.** Monthly summary of missing timestamps for the 1 min mean wind speed data at seven AWS stations in 2024. The table reports the number of missing timestamps (i.e., time points absent from the record) for each month and station. Shaded cells indicate the month in which each station records its maximum value among the 12 monthly values.

Station name	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
SNA	2	9	2	1	3	2	2	45 (0.10%)	2	18 (0.04%)	2	3
CGC	0	12 (0.03%)	1	1	2	1	1	2	3	155 (0.35%)	2	5
SAM	1	11 (0.03%)	0	1	1	0	5,511 (12.35%)	1	3	3	3	2
DUS	90 (0.20%)	11 (0.03%)	0	334 (0.77%)	8	0	1	0	3	2	1	2
YSB	1	11 (0.03%)	12 (0.03%)	35 (0.08%)	2	0	1	0	3	2	1	2
DAN	0	11 (0.03%)	141 (0.32%)	64 (0.15%)	2	0	1	0	3	2	1	2
SGB	0	12 (0.03%)	238 (0.53%)	1	3	2	111 (0.25%)	1	3	17 (0.04%)	2	2

**Table 4.** Monthly summary of missing records for the 1 min mean wind speed data at seven AWS stations in 2024. The table reports the total number of missing data points after the missing timestamps were inserted and their corresponding values were filled as missing values to create a continuous dataset. Shaded cells indicate the month in which each station records its maximum value among the 12 monthly values.

Station name	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
SNA	2	9	2	1	3	2	2	409 (0.92%)	2	18 (0.04%)	2	3
CGC	0	12 (0.03%)	1	1	2	1	1	2	3	155 (0.35%)	2	5
SAM	100 (0.22%)	167 (0.40%)	203 (0.45%)	4	1	3	5,668 (12.70%)	31 (0.07%)	181 (0.42%)	363 (0.81%)	498 (1.15%)	327 (0.73%)
DUS	3,167 (7.09%)	32 (0.08%)	0	334 (0.77%)	8	0	1	0	165 (0.38%)	2	917 (2.12%)	2
YSB	1	11 (0.03%)	145 (0.32%)	51 (0.12%)	2	395 (0.91%)	116 (0.26%)	1,123 (2.52%)	758 (1.75%)	148 (0.33%)	259 (0.60%)	65 (0.15%)
DAN	0	121 (0.29%)	141 (0.32%)	64 (0.15%)	10 (0.02%)	0	1	67 (0.15%)	3	2	1	2
SGB	0	12 (0.03%)	238 (0.53%)	1	3	2	111 (0.25%)	1	3	17 (0.04%)	2	2

다음과 같다. SNA과 CGC에서는 8월에 각각 45개 (0.35%), SAM은 7월에 5511개(12.35%), DUS와 YSB는 4월에 각각 334개(0.77%)와 35개(0.08%), DAN과 SGB는 3월에 각각 141개(0.32%)와 238개(0.53%)의 누락이 확인되었다.

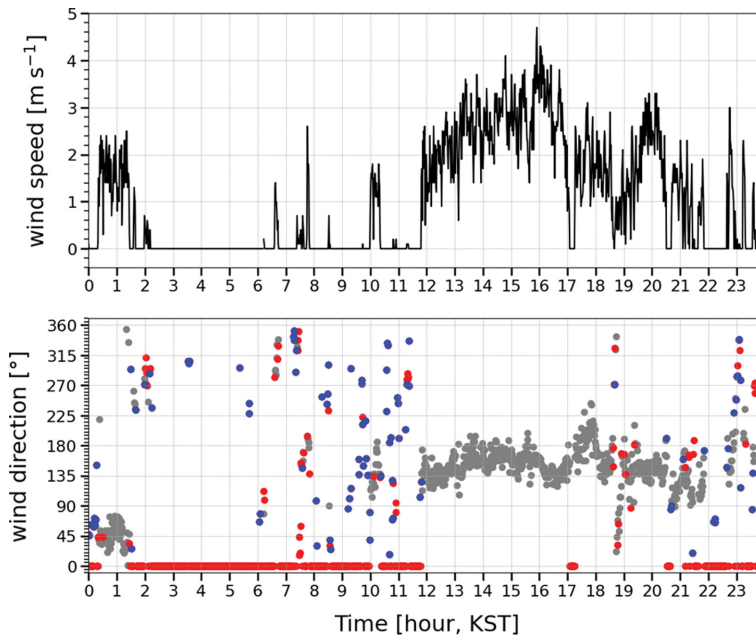
QC 절차 적용 전후의 결측 개수를 비교하기 위해, 앞서 재구성한 균일 간격의 시계열을 기반으로 월별 결측 개수를 산정하였으며, 그 결과를 Table 4에 제시하였다. SAM, DUS, YSB에서는 다른 관측소에 비해 결측이 상대적으로 많았으며, 대부분의 관측소에서 특정 달에 결측 값이 집중되는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 AWS 자료의 시간 누락과 결측이 전반적인 문제가 아니라 일부 시기 또는 특정 관측소에 국한된 현상임을 시사한다.

### 3.2 내적 일치성 검사

내적 일치성 검사는 서로 다른 두 변수 간의 논리적 일관성을 검토하여, 관측값이 물리적으로 모순되지 않는지를 확인하기 위한 절차이다. KMA (2025)는 바람에 대해서 1분 최대 순간 풍속과 1분 평균 풍속 간의 일관성만을 점검하고 있으나, 풍향과 풍속의 관계 역시 검토할 필요가 있다.

KMA (2016)에 따르면, 무풍(calm)은 평균 풍속이 1 kts 미만일 때 보고하며, 이 경우 풍향은 00으로 표기하도록 되어 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 AWS 자료에서는 풍향이 00이 아닌 0으로 표기되어 있으며, Fig. 2는 실제 관측과 기상청 기준 간의 불일치 사례를 보여준다. 파란색 점은 풍속이 0 m s<sup>-1</sup>이지만 풍향이 0이 아닌 경우를, 붉은 색 점은 풍속이 0.5 m s<sup>-1</sup> 미만인 경우의 풍향을 나타낸다.

2024년 전체 기간을 대상으로 분석한 결과, 풍속이 0.5 m s<sup>-1</sup> 미만임에도 풍향이 0이 아닌 비율은 SNA는 13.56%, CGC는 16.64%, SAM은 1.08%, DUS는 9.40%, YSB는 9.57%, DAN은 25.03%, SGB는 21.05%로 나타났다. 반대로 풍향이 0임에도 풍속이 0.5 m s<sup>-1</sup> 이상인 경우는 SNA는 0.01%(39개), CGC는 0.01%(36개), SAM은 0개, DUS는 0.02%(112개), YSB는 0.003%(18개), DAN은 0.005%(24개), SGB는 0.008%(43개)로 확인되었다. 이러한 불일치는 풍향계 (vane), 풍속은 풍속계(anemometer)로 각각 독립적으로 측정되기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이에 따라, 2차원 초음파식 풍향·풍속계를 사용하는 SAM에서의 불일치 비율은 매우 낮았으나, 다른 관측소의 경우 풍향 불일치는 9% 이상, 풍속 불일치는 수십개에



**Fig. 2.** Time series of 1 min mean wind speed (top) and wind direction (bottom) at Yangsan-Sangbuk on 16 July 2024. The wind speed record shows a flat-line sequence lasting 240 min with a minimum variation of 0 m s<sup>-1</sup>, representing a case that meets the KMA persistence test criterion (i.e., durations of up to 240 min are considered valid). In the wind direction record, red markers indicate wind direction values when wind speed is below 0.5 m s<sup>-1</sup>, and blue markers indicate cases where wind speed is 0 m s<sup>-1</sup> but the reported wind direction is not '00' (i.e., internally inconsistent records).

서 많게는 100개 이상으로 나타났다. 이러한 불일치는 풍향·풍속을  $u-v$  벡터로 변환하여 사용할 때 잘못된  $u-v$  성분이 산출될 수 있다.

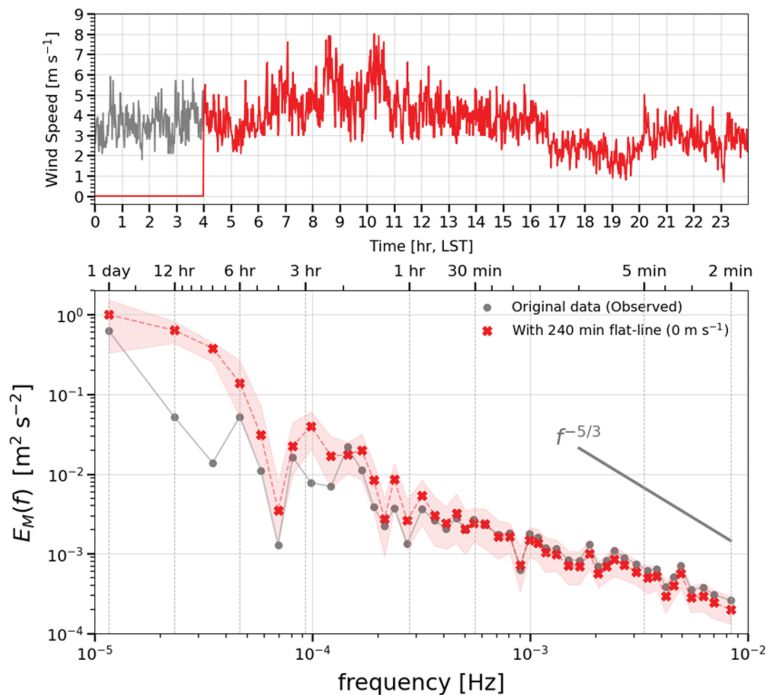
본 연구에서는 불일치 사례 중에서도 물리적으로 불가능한 경우에 대해 결측 처리를 수행하였다. 구체적으로 1) 풍속이  $0 \text{ m s}^{-1}$ 임에도 풍향이 0이 아닌 경우(Fig. 2의 파란색 점)에는 풍향 값을, 2) 풍향이 0임에도 풍속이  $0 \text{ m s}^{-1}$ 가 아닌 경우는 풍속 값을 결측값으로 처리하였다. 풍속이  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  미만으로 매우 약한 경우에는 방향이 존재할 수 있으나, 바람이 완전히 정지한 상태에서는 방향이 존재한다는 것이 물리적으로 불가능하기 때문이다. 첫 번째 경우는 SNA 0개, CGC 4.24%(22,371개), SAM 0.004%(19개), DUS 3.28%(17,288개), YSB 3.96%(20,857개), DAN 7.31%(38,533개), SGB 0개로 나타났다. 두 번째에서는 SNA 0.01%(55개), CGC 0.01%(61개), SAM 0개, DUS 0.03%(162개), YSB 0.004%(20개), DAN 0.01%(40개), SGB 0.01%(62개)로 확인되었다. 이러한 결측 처리 비율은 풍향의 경우 약 4% 이하, 풍속은 0.03% 이하로,

풍향·풍속의 물리적 일관성을 확보하고 스펙트럼 분석의 신뢰성을 유지하기 위한 최소한의 조치로 볼 수 있다.

KMA (2016)에 따르면, 풍향이 0으로 표기된 경우는 북풍을 의미하는 것이 아니라 무풍(calm)을 의미한다. 따라서 풍향·풍속을  $u-v$  성분으로 변환하거나 풍향 자료만을 사용할 경우, 이러한 기록은 계산과정에서 북풍( $360^\circ$ )로 오인될 가능성이 있어 결측값으로 처리하는 것이 필요하다.

### 3.3 지속성 검사

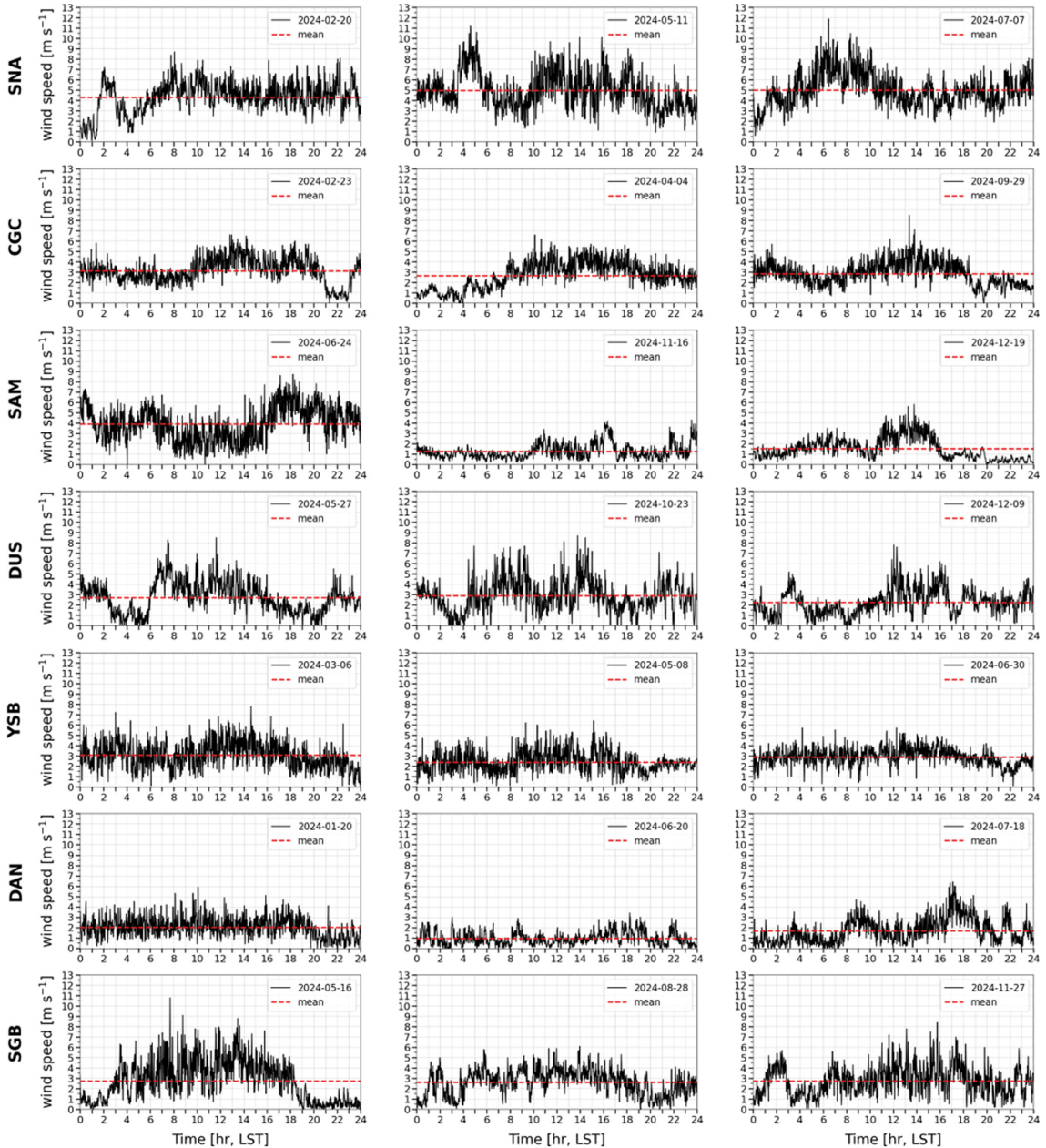
시계열 자료에서 일정시간동안 값의 변동이 거의 없을 경우, 이는 센서의 고장, 데이터 전송 오류 또는 처리 과정의 문제로 인한 비정상적인 값일 가능성이 크다. 예를 들어 풍속이 갑작스럽게  $0 \text{ m s}^{-1}$ 로 떨어진 뒤 유지되거나, 특정값으로 장기간 변동이 없는 구간은 실제 기상현상을 반영하지 않을 수 있다. 이와 같은 구간을 본 연구에서는 연속 동일값 구간(flat line)으로 정의하였다. KMA (2025)는 풍향과 풍속 모두



**Fig. 3.** (top) Time series of 1 min wind speed observations at AWS Cheongdo-Guemcheon on 7 July 2024, and (bottom) the corresponding discrete Fourier spectra. To assess the spectral sensitivity to the persistence test, an artificial 240 min flat-line segment with wind speed fixed at  $0 \text{ m s}^{-1}$  was inserted sequentially—one point at a time—throughout the entire 24 h record (1440 points), so that every possible position of a flat-line of the same length was represented. The spectra were computed for each realization, and the red line denotes the median spectrum, with the shaded area indicating the interquartile range (IQR). The gray line (circles) represents the spectrum of the original observed data. The red time-series in upper panel is shown for illustration only.

240분 동안 최소 변화량이 0일 때를 지속성 검사 기준으로 사용하고 있으며, Fig. 2는 이러한 기준에 해당하는 사례를 나타낸다. 그러나 이 기준은 하루 이하의 시간 규모에서 수행되는 스펙트럼 분석에는 충분히 엄격하지 않을 가능성이 있다.

이를 검증하기 위해, Fig. 3에서는 시계열의 시작 지점부터 240분간  $0 \text{ m s}^{-1}$ 의 일정한 구간을 인위적으로 삽입한 뒤, 이를 1분씩 이동시켜 하루 전체(1,440분)에서 같은 길이의 연속 동일값 구간이 존재하도록 구성하였다. 붉은색 점은 스펙트럼의 중앙값이며, 음



**Fig. 4.** From the 2024 1 min mean wind speed dataset, 21 daily time series were assembled by randomly selecting three days per station (seven stations in total) with no missing data and flat line segments shorter than 5 min. For each station, three daily time series are shown: black lines denote 1 min mean wind speed, and red dashed lines indicate the daily mean wind speed.

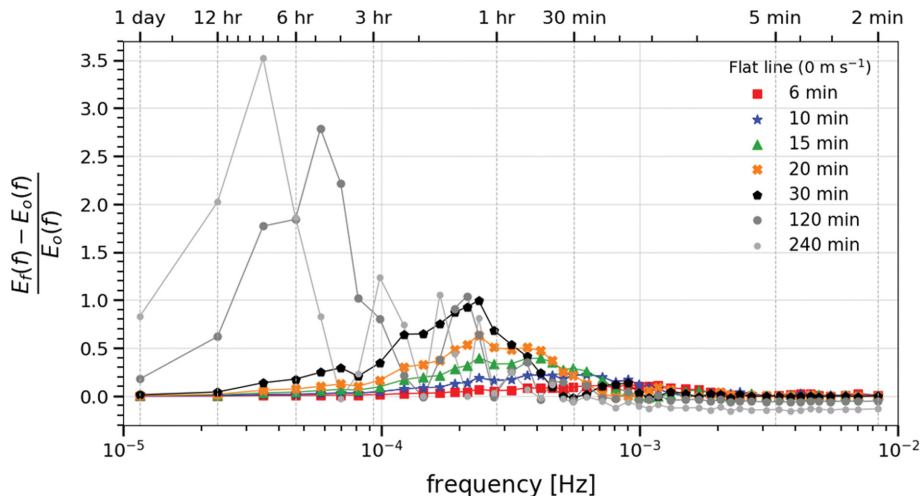
영은 사분위 범위(interquartile range, IQR)을 나타낸다. 240분 동안  $0 \text{ m s}^{-1}$ 가 지속된 시계열의 경우, 원래 스펙트럼(회색)에 비해 1시간 이상의 저주파 영역에서 뚜렷한 왜곡이 발생하였고, 10분 이하의 고주파 영역에서도 상대적으로 작은 차이가 확인되었다. 이러한 결과는 KMA (2025)의 240분 기준이 하루 이하 시간 규모의 분석에 적용될 경우, 스펙트럼 왜곡이 발생할 수 있음을 보여준다.

실제 AWS 자료를 통해 이러한 현상의 발생 빈도를 검토한 결과, 본 연구 대상 7개 AWS 관측소 중 하루에 대해 풍속 값이 240분 동안 지속된 사례는 DUS 11일, YSB 20일, DAN 2일로 확인되었으며, 다른 지점에서는 발생하지 않았다. 한편, 30분 이상 동일한 풍속 값이 유지된 경우는 SNA 53일, CGC 19일, SAM 76일, DUS 139일, YSB 219일, DAN 94일, SGB 17일로 나타나, 특히 YSB와 DUS에서 장기간 일정한 풍속이 유지되는 경향이 두드러졌다. 아울러 30분 이상 연속 동일값 구간이 나타난 날들 가운데, YSB에서는  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ 로 유지된 구간이 포함된 날은 총 5일이었다. 이를 제외한 나머지 날들의 경우, 본 연구 대상인 7개 관측소 모두에서 해당 구간의 풍속이  $0 \text{ m s}^{-1}$ 로 확인되었다.

한편, 기존의 운영 기준 및 선행 연구와 비교하면, NOAA (2017)에서는 Flat Line Test (Test 8)의 예시로, 5개 연속 관측값이 서로 동일하지 검사하되 허용 오차를  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  이하(또는 보다 엄격한 경우  $0 \text{ m s}^{-1}$ )

로 설정하는 방안을 제시하고 있다. Ramon et al. (2020)은  $20 \text{ m}$  이상의 고층 관측 자료를 대상으로, 6개 연속 자료의 풍속 차이가 0인 경우를 연속 동일값 구간으로 정의하였다. NOAA (2017)의 기준은 실시간 품질 관리를 위한 운영 가이드라인으로, 데이터의 시간 해상도는 구체적으로 명시되어 있지 않다. 반면, Ramon et al. (2020)에서 사용한 자료는 대부분 10분 평균 자료로 구성되어 있으며, 15분·20분·30분 및 1시간 자료에도 동일한 기준을 적용하였다. 이처럼 KMA (2025)에서 제시한 240분 기준에 비해 상대적으로 짧은 지속 시간 조건을 적용하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 1분 평균 풍속 자료의 하루 단위 분석에 적합한 지속성 검사의 임계값을 산정하기 위해, NOAA (2017)에서 제시한 5개 연속 관측 값 기준을 최소 기준으로 참고하였다. 결측이 없고 연속 동일값 구간이 5분 미만인 날짜를 선별한 결과, 7개 관측소에서 총 286일이 해당되었다. 이 중 각 관측소별로 무작위로 3일씩(총 21일)을 선정하여 분석에 활용하였다 (Fig. 4). 각 시계열에는 시작 시점부터 길이가 6, 10, 15, 20, 30, 120, 240분인  $0 \text{ m s}^{-1}$  구간을 인위적으로 삽입하였으며, 이를 하루 전체(1,440분)에 걸쳐 순차적으로 이동시켰다. 이러한 구성은 연속 동일값 구간의 길이가 같더라도 삽입 시점에 따라 스펙트럼 왜곡 양상이 달라질 수 있기 때문에, 시점 의존성을 제거하고 지속 시간에 따른 전형적인 영향을 평가하기 위함이다. 이후 각 구간의 스펙트럼을 원래 시계열의 스펙



**Fig. 5.** Relative spectral error from artificially imposed flat-line intervals of  $0 \text{ m s}^{-1}$  with durations of 6–240 min, applied to selected AWS wind speed series in 2024. Days with no missing data and with flat-line segments shorter than 5 min were chosen, and the segments were then sequentially inserted into the daily records. Errors were computed as  $\frac{E_f(f) - E_o(f)}{E_o(f)}$ , where  $E_o(f)$  is the spectrum of the original series and  $E_f(f)$  is the spectrum after flat-line insertion.

트럼과 비교하여 상대오차를 산정함으로써, 지속 시간에 따라 왜곡이 발생하는 시간 규모를 분석하였다.

Figure 5는 위의 과정을 통해 산출된 스펙트럼 상대오차를 나타낸다. 원래 시계열로부터 계산된 이산 푸리에 스펙트럼 에너지(discrete Fourier spectral energy)을  $E_o(f)$ , 연속 동일값 구간이 인위적으로 삽입된 시계열의 스펙트럼을  $E_f(f)$ 로 정의하였다. 그림의 마커는 각 연속 동일값 구간에 대한 상대오차의 중앙값을 나타낸다. 구간이 6분에서 점차 길어짐에 따라 상대오차가 증가하였으며, 최대 오차가 나타나는 시간 규모는 점차 저주파 영역으로 이동하는 경향을 보였다. 즉, 지속 시간이 길수록 중규모 영역에서의 스펙트럼 왜곡이 두드러졌다. 특히 연속 동일값 구간이 240분인 경우, 전체 주파수 영역에서 왜곡이 크게 나타났으며, 약 8시간 규모에서 가장 큰 상대오차가 발생하였다. 이 경우 스펙트럼 분석에 활용하기에는 제한이 있는 자료로 판단된다.

지속성 검사의 허용 기준을 결정하기 위해, Fig. 6에서는 Fig. 5에서 지속 시간이 30분 이하인 경우만을 제시하였다. 스펙트럼에서 관성구간(inertial subrange)은 파수(또는 주파수)의  $-5/3$  제곱에 비례하는 거듭제곱 법칙을 따른다(Tennekes, 1978). 따라서 이 구간의 스펙트럼 왜곡은 난류 구조의 손상 여부를 판단하는 지표로 활용될 수 있다. 연속 동일값 구간이 6분과 10분일 때는 약 10분 이하의 시간 규모에서 상대오차가 0.05 이하로 작게 나타났으나, 15분과 20분으로 길어지면 약 15분 이하의 시간 규모에서 최대 0.1 수준까지 증가한 뒤 일시적으로 감소하였다가 다시 급격히 커지는 양상을 보였다. 이러한 결과는 지속 시간이 길어질수록 스펙트럼 왜곡이 심화되며, 특히 난류가 지

배적인 시간 규모에서도 그 영향이 확인됨을 보여준다. 또한 3시간부터 15분까지의 시간 규모에서 볼 때, 연속 동일값 구간이 6~10분일 때보다 10~15분일 때 상대오차의 증가 폭이 뚜렷하게 증가했다. 이를 종합하면, 구간이 15분 이상 지속될 경우 스펙트럼 왜곡이 유의미하게 증가하는 것으로 판단되며, 이에 따라 본 연구에서는 지속성 검사의 허용 기준을 10분으로 설정하였다.

Figure 7은 연속 동일값 구간으로 인한 스펙트럼 왜곡의 정도를 정량적으로 나타낸 것이다. 여기서 스펙트럼 왜곡 비율은 연속 동일값 구간으로 인한 스펙트럼 에너지 변화의 절대값 합을, 원래 스펙트럼의 합(즉, 원래 시계열의 분산)에 대한 비율로 정의하였다. 이 값이 0이면 원래 스펙트럼과 동일하여 왜곡이 전혀 없음을, 1이면 원래 분산과 같은 크기의 왜곡이 발생했음을 의미한다. 연속 동일값 구간이 6분에서 240분으로 늘어남에 따라 중앙값은 0.13에서 약 0.94까지 약 9배 증가하였으며, IQR도 0.09에서 0.48으로 증가하여 분포 폭이 약 5배 확대되었다. 특히 15분 이상에서는 중앙값이 약 0.2를 초과하고, 아랫수염이 0.009로 1%에 근접하였다. 이는 구간이 15분 이상 지속된 대부분의 사례에서 최소 약 1% 이상의 왜곡이 발생했음을 시사한다. 240분의 경우 왜곡 비율의 중앙값이 약 0.95로 원래 시계열 분산에 근접하며, 중앙값 이상 구간에서는 왜곡 비율이 1을 넘어 분산을 상회하는 스펙트럼 왜곡이 발생하였다. 일부 사례에서는 이 비율이 2에 가까워져, 왜곡 정도가 원래 분산의 거의 두 배에 달한다. 이러한 결과는 연속 동일값 구간이 길어질수록 스펙트럼의 형태가 점차 변형되어 원래 스펙트럼과의 일관성이 점차 감소함을 정량적

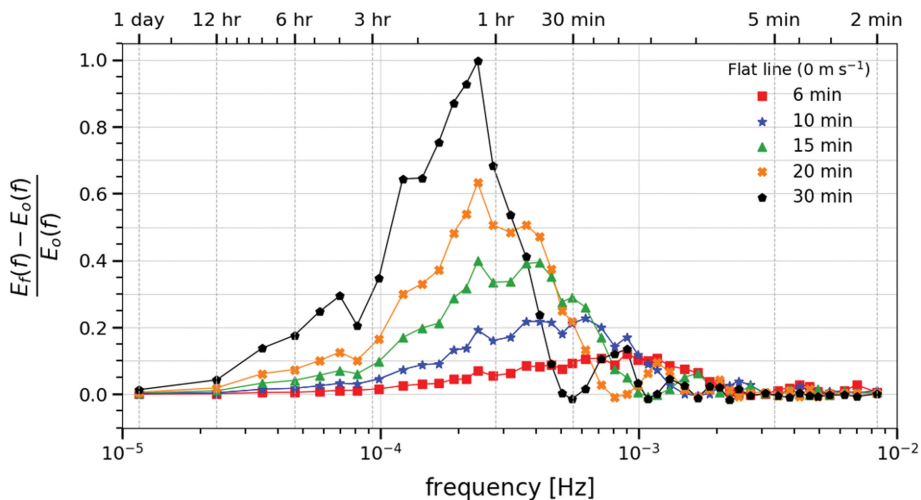
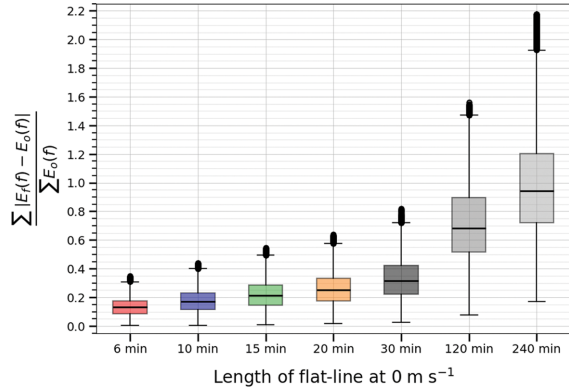


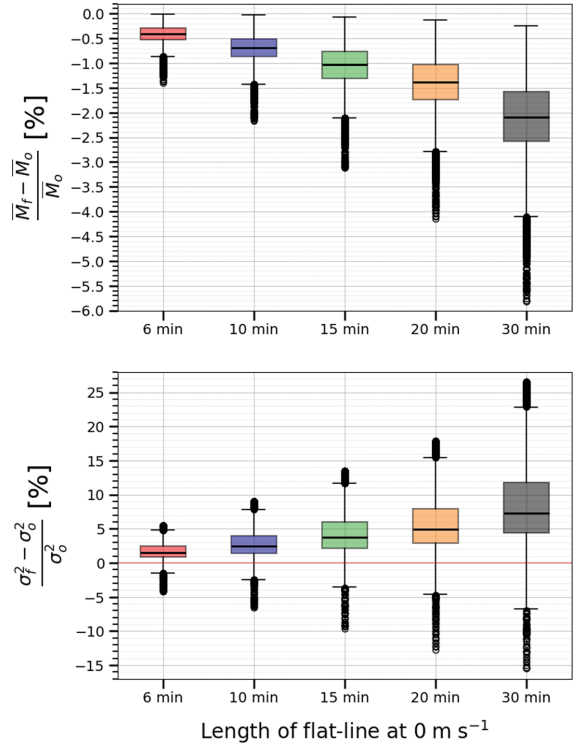
Fig. 6. Same as Fig. 5, but showing results only for flat-line segment durations of 6–30 min.



**Fig. 7.** Relative magnitude of spectral distortion caused by flat-line insertion. From the 2024 1 min mean wind speed dataset, 21 days (three per station) were randomly selected from days with no missing data and flat-line segments shorter than 5 min. For each day, 0 m s<sup>-1</sup> flat-line segments with durations of 6, 10, 15, 20, 30, 120, and 240 min were sequentially inserted across the record, and the discrete spectra were computed. The plotted values represent  $\frac{\sum |E_f(f) - E_o(f)|}{\sum E_o(f)}$ , where  $E_o(f)$  is the spectrum of the original time series and  $E_f(f)$  is the spectrum after flat-line insertion. This ratio quantifies the degree of spectral distortion due to flat-line segments.

로 보여준다.

마지막으로, 연속 동일값 구간이 시계열에 미치는 영향을 평가하기 위해 일평균과 분산의 상대오차를 Fig. 8에 함께 제시하였다. 값이 0이면 원래 시계열과 차이가 없음을 의미한다. 일 평균 상대오차의 경우, 모든 구간에서 음의 값이 나타나 연속 동일값 구간이 포함될 경우 평균 풍속이 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 구간이 6분에서 30분으로 늘어남에 따라 중앙값은 -0.41%에서 -2.09%로 약 5배 감소하였고, IQR도 0.23%에서 1.01%로 분포 폭이 약 4배 확대되었다. 세부적으로 살펴보면, 10분을 넘어서면서 일 평균 상대오차의 감소폭과 변동성이 눈에 띄게 커지는 경향을 보였다. 6~10분 구간에서는 중앙값이 -0.28%p 하락하고 IQR이 0.23%에서 0.37%로 약 1.6배 확대되었으며, 제1사분위수(Q1)는 -0.53%에서 -0.87%로 0.34%p 감소하였다. 반면 10~15분 구간에서는 중앙값이 -1.04%로 0.35%p 감소하였고, IQR 역시 0.54%로 1.5배 확대되었다. 이때 Q1는 -1.31%까지 0.44%p 더 낮아졌다. 아랫수염 또한 -0.87%에서 -1.42%, -2.11%로 변하여 6~10분과 10~15분 구간에서 각각 0.55%p와 0.69%p씩 감소하였다. 즉 연속 동일값 구간이 10분을 넘어서면서 Q1과 아랫수염이 상대적으로 빠르게



**Fig. 8.** Relative errors of the mean (top) and variance (bottom) of 1 min wind speed time series after inserting artificial flat-line segments. From the 2024 1 min mean wind speed dataset, 21 days (three per station) were randomly selected from days with no missing data and with flat-line segments shorter than 5 min. Flat-line segments of 0 m s<sup>-1</sup> with durations of 6, 10, 15, 20, and 30 min were sequentially inserted into the daily records; the subscripts o and f denote the original series and the flat-line-inserted series, respectively.

게 감소하고, 일평균 풍속의 과소추정이 더 뚜렷해졌다. 특히, 15분 이후부터 이러한 왜곡이 두드러지게 증가하였다.

분산의 상대오차 범위는 약 -16~27%로 일평균 (-6~0%)보다 약 7배 넓게 나타나, 연속 동일값 구간에 대해 분산이 평균보다 훨씬 민감하게 반응함을 보여준다. 또한 Q1 이상의 모든 구간에서 상대오차량의 값을 가져, 전체 시계열의 약 75% 이상에서 분산이 과대평가되는 경향이 나타났다. 반면 아랫수염은 구간 길이가 6분에서 30분으로 늘어남에 따라 -1.48%에서 -6.76%까지 낮아져, 일부 시계열에서는 분산이 상대적으로 과소평가되는 경우도 존재함을 보여준다. 이는 0 m s<sup>-1</sup>의 연속 동일값 구간이 삽입되는 위치에 따라, 원래 변동성이 큰 구간을 대체하면서 전체 변동성을 줄이는 경우가 있는 반면, 풍속이 갑작스럽게 0

**Table 5.** Monthly summary of missing data points for the 1 min mean wind speed at seven AWS stations in 2024, after all quality control procedures were applied, including timestamp reconstruction, internal consistency checks, and persistence (flat-line) tests. The table lists the total number of missing records (upper row) and the corresponding missing rate (%) in parentheses for each month. Shaded cells indicate the month in which each station records its maximum value among the 12 monthly values.

Station name	Jan.	Feb	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
SNA	863 (1.93%)	742 (1.78%)	394 (0.88%)	1,026 (2.38%)	352 (0.79%)	171 (0.40%)	95 (0.21%)	1,183 (2.65%)	860 (1.99%)	652 (1.46%)	1,084 (2.51%)	347 (0.78%)
CGC	202 (0.45%)	142 (0.34%)	202 (0.45%)	527 (1.22%)	413 (0.93%)	189 (0.44%)	113 (0.25%)	171 (0.38%)	304 (0.70%)	287 (0.64%)	487 (1.13%)	211 (0.47%)
SAM	813 (1.82%)	614 (1.47%)	1,015 (2.27%)	1,609 (3.72%)	1,377 (3.08%)	1,146 (2.65%)	6,142 (13.76%)	1,587 (3.56%)	2,210 (5.12%)	1,815 (4.07%)	682 (1.58%)	327 (0.73%)
DUS	13,721 (30.74%)	470 (1.13%)	793 (1.78%)	2,111 (4.89%)	1,423 (3.19%)	1,199 (2.78%)	422 (0.95%)	1,139 (2.55%)	5,608 (12.98%)	4,459 (9.99%)	5,450 (12.62%)	166 (0.37%)
YSB	308 (0.69%)	1,361 (3.26%)	1,850 (4.14%)	3,387 (7.84%)	1,805 (4.04%)	6,853 (15.86%)	5,280 (11.83%)	1,1208 (25.11%)	10,651 (24.66%)	9,142 (20.48%)	8,555 (19.80%)	4,638 (10.39%)
DAN	2,276 (5.10%)	1,750 (4.19%)	1,457 (3.26%)	1,777 (4.11%)	899 (2.01%)	1,421 (3.29%)	1,121 (2.51%)	1,971 (4.42%)	774 (1.79%)	601 (1.35%)	1,001 (2.32%)	800 (1.79%)
SGB	108 (0.24%)	41 (0.10%)	290 (0.65%)	185 (0.43%)	155 (0.35%)	701 (1.62%)	437 (0.98%)	250 (0.56%)	423 (0.98%)	194 (0.43%)	168 (0.39%)	42 (0.09%)

m s<sup>-1</sup>로 떨어졌다가 다시 원래 값으로 되돌아오는 급격한 변동이 발생하여 분산을 증가시키는 경우가 나타나기 때문에 판단된다. 구간 길이가 6분에서 30분으로 증가함에 따라 중앙값은 약 1.51%에서 7.25%로 약 5배 커졌으며, IQR 또한 1.57%에서 7.41%로 약 5배 확대되어 분산의 과대평가의 정도와 그 불확실성이 함께 증가하는 양상을 보였다. 이러한 결과는 구간이 길게 지속될수록 평균은 점차 감소하고 분산은 대체로 과대평가되어, 시계열의 통계적 구조를 왜곡하고 관측자료의 신뢰성을 저하시킬 수 있음을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 이러한 분석 결과를 토대로 지속성 검사의 기준값을 10분으로 설정하였다.

도출된 지속성 검사 기준을 7개 AWS의 2024년 1분 평균 풍속 자료에 적용하였다. 동일한 풍속 값이 10회 연속으로 관측된 경우를 연속 동일값 구간으로 판정하고, 열 번째 시점의 자료에 품질관리 플래그(flag)를 부여하여, 이후 해당 값을 결측 값으로 대체하였다. 이 기준을 적용한 결과, 연속 동일값 구간으로 판정된 영역의 비율은 SNA 1.38%, CGC 0.57%, SAM 2.24%, DUS 6.10%, YSB 11.75%, DAN 2.92%, SGB 0.48%로 나타났다.

또한, 모든 품질관리 절차를 적용한 이후의 결측률을 관측소별·월별로 정리하여 Table 5에 제시하였다. 시간 일관성을 확보하기 위해 누락된 시각을 삽입한 뒤의 결측률(Table 4)과 비교한 결과, 전체적으로 결측률이 증가하였다. 이는 연속 동일값 구간 및 논리

적 불일치 자료를 결측으로 처리하면서 표시된 결측 값의 비율이 상승한 결과로, 품질관리 과정이 자료의 신뢰성을 확보하는 동시에 결측률 증가를 수반했기 때문으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 K-UAM 울산 시험 지역의 7개 AWS의 2024년 1분 평균 풍속 자료를 대상으로 QC 절차 중 하나인 지속성 검사 기준의 적정성을 평가하기 위해 수행되었다. WMO (2023)와 NOAA (2017)에서 제시하는 표준 QC 체계는 시간적 일관성(time consistency)과 내부 일관성(internal consistency) 검사를 핵심 항목으로 포함하고 있다. 국내 AWS 운영기준에서는 동일한 풍속이 최대 240분(4시간)까지 연속될 수 있도록 허용하고 있으나, 이러한 설정은 분석 시간 규모에 따라 적성 기준이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구는 1분 간격의 일별 풍속 시계열에서 연속 동일값 구간의 길이가 통계적 특성과 스펙트럼 구조에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 물리적으로 타당한 지속성 검사 기준을 제안하고자 하였다.

먼저, 자료의 시간 연속성을 확보하기 위해 누락 시각 보정을 수행하였으며, 관측 시각이 1분 간격으로 보고되어야 함에도 누락된 경우에는 해당 시점을 결측으로 채워 시계열의 간격을 일정하게 유지하였다. 이후 내부 일관성 검사를 통해 풍속이 0 m s<sup>-1</sup>임에도

풍향이 '00'이 아닌 경우, 또는 반대로 풍향이 00이지만 풍속이  $0 \text{ m s}^{-1}$ 가 아닌 경우를 비물리적 자료로 간주하여 걸출 처리하였다. 이러한 절차는 풍향-풍속 간의 논리적 종속성을 검증하고 기본적인 관측 일관성을 확보하여, 이후 스펙트럼 분석에서 시간 불일치나 비물리적 신호로 인한 왜곡을 방지하기 위한 선행 단계이다.

마지막으로 본 연구의 핵심 절차인 지속성 검사는 동일한 풍속 값이 일정 시간 이상 연속적으로 관측되는 구간, 즉 연속 동일값 구간을 탐지하여 시계열의 비물리적 구간을 식별하기 위해 수행되었다. 연속 동일값 구간은 센서의 고착, 데이터 전송 오류, 또는 저장-처리 과정의 문제로 인해 발생하는 비정상적 신호일 가능성이 높으므로, 실제 대기의 바람 변동성을 정확히 반영하지 못할 수 있다. 따라서 구간의 길이에 따라 통계적 특성이 어떻게 왜곡되는지를 파악하는 것은 지속성 검사 기준을 검증하고, 이를 개선하는 데 중요한 과정이다. 이에 따라, 하루에 대해 걸출이 없고 연속 동일값 구간이 5분 미만인 286일 중 무작위로 선별한 21일의 시계열에 대해 각각  $0 \text{ m s}^{-1}$ 의 일정 구간을 인위적으로 지속시간(6, 10, 15, 20, 30, 120, 240분)을 달리하여 삽입한 뒤 이동시켰다. 그 결과, 구간의 길이가 증가할수록 스펙트럼 상대오차가 점진적으로 증가하였으며, 구간이 6~10분일 때보다 10~15분일 때 상대오차의 증가 폭이 뚜렷하게 증가했다. 특히 240분 동안  $0 \text{ m s}^{-1}$ 가 지속된 경우, 약 8시간 규모에서 가장 큰 상대오차가 발생하였고, 스펙트럼 전체 주파수 영역에서 원래 시계열로부터 계산된 스펙트럼과의 일치성이 크게 저하되었다. 이는 KMA (2025)의 240분 기준이 일변동이나 난류 등 하루 이하 시간 규모 분석에는 적절성이 떨어질 가능성이 있음을 시사한다.

또한 연속 동일값 구간이 시계열의 평균과 분산에 미치는 영향을 분석한 결과, 구간이 길게 포함될수록 평균 풍속은 감소하고 분산은 대체로 과대평가되는 경향을 보였다. 이는 실제 변동성을 손상시켜 시계열의 통계적 구조를 왜곡함을 의미한다.

결론적으로, 스펙트럼 분석을 통해 기준 KMA (2025)의 240분 기준이 하루 이하의 시간 규모 분석에는 다소 제약이 있을 수 있음을 시사하며, 풍속 시계열의 통계적 일관성을 보존하기 위한 현실적 지속성 검사 기준으로 10분이 타당한 수준이라 판단되었다. 본 연구는 시간 영역의 검사 절차를 넘어, 스펙트럼 관점에서 풍속 시계열의 QC 기준을 재검토하였다는 점에서 의미가 있다. 제안된 지속성 검사 기준은 관측자료의 물리적 일관성을 유지하면서도 통계적 신뢰도를 개선시키는 근거를 제안하였으며, 향후 AWS 운영기관의 QC 절차 개선을 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 「한국형 도심항공교통(K-UAM) 안전운용체계 핵심기술 개발」(RS-2024-00404042)와 2025년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학 지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-10-004).

## REFERENCES

- KMA, 2016: Training Textbook for Junior Forecasters: Observation and Analysis of the Atmosphere. Korea Meteorological Administration, 212 pp.
- \_\_\_\_\_, 2021: Meteorological Technology & Policy, Vol. 14, No. 1 (June 2021). Korea Meteorological Administration, 88 pp.
- \_\_\_\_\_, 2022: Standards for Installation of Meteorological Instruments. Korea Meteorological Administration Notice No. 2022-11, 12 August 2022, 3 pp.
- \_\_\_\_\_, 2023: Standard Specifications for Automatic Weather Observing Systems. Korea Meteorological Administration Notice No. 2023-4, 6 March 2023, 2 pp.
- \_\_\_\_\_, 2025: Standards and Procedures for Quality Grading of Meteorological Observation Data. Korea Meteorological Administration Notice No. 2025-3, 17 February 2025, 2 pp.
- NOAA, 2017: Manual for Real-Time Quality Control of Wind Data, Version 1.1: A Guide to Quality Control and Quality Assurance of Coastal and Oceanic Wind Observations. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, U.S. Integrated Ocean Observing System, 47 pp.
- Ramon, J., L. Lledó, N. Pérez-Zanón, A. Soret, and F. J. Doblas-Reyes, 2020: The Tall Tower Dataset: a unique initiative to boost wind energy research. *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 429-439, doi:10.5194/essd-12-429-2020.
- Stull, R. B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 670 pp.
- Tennekes, H., 1978: Turbulent flow in two and three dimensions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **59**, 22-28, doi:10.1175/1520-0477(1978)059<0022:TFITAT>2.0.CO;2.
- WMO, 2023: Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume V – Quality Assurance and Management of Observing Systems. World Meteorological Organization, WMO-No. 8, 125 pp.