

원자력시설 부지 병치 기상탑의 상호 대표성 정량 판정: 하나로 본기상탑·임시기상탑 비교관측

윤주열* · 장미

한국원자력연구원 원자력환경실

(접수일: 2026년 7월 23일, 수정일: 2026년 8월 4일, 게재확정일: 2026년 8월 10일)

Quantitative Assessment of Mutual Representativeness between Collocated Meteorological Towers at a Nuclear Facility Site: A Comparative Observation of the Main and Temporary Towers at the HANARO Site

Juyeol Yun* and Mee Jang

Nuclear Environment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

(Manuscript received 23 July 2026; revised 4 August 2026; accepted 10 August 2026)

Abstract Meteorological observation at a nuclear facility supports its safety assessment. As a tower ages it must be replaced, inevitably interrupting the record. A temporary tower covers the interruption; substituting it requires a criterion for homogeneity with the existing record. Regulations and standards prescribe instrument accuracies and siting conditions, but not the agreement required between two towers. To judge equivalence, we compared one month (June 2026) of paired 10-min observations from two towers 15 m apart at HANARO. At the element level, an allowable difference was formed by combining instrument uncertainty with siting-class representativeness uncertainty. Conformity, regression, offsets, and condition dependence were then examined for each variable. At the application-input level, the joint frequency distribution (JFD) feeding dispersion assessment was compared by the Perkins skill score (PSS). The acceptance line came from Monte Carlo propagation of allowable instrument errors (JCGM 101). Mutual representativeness was strongly supported at 67 and 27 m (conformity 82.3–98.0%; stability within ± 1 class 95.1%), and 10-m temperature and wind speed stayed within the allowable difference. Observed PSS exceeded the acceptance line at every height. At 10 m a spatial component beyond instrument noise remained, but it is acceptable for the canopy environment of the site. Within June 2026 and the dispersion-input level examined, the towers were equivalent. Because these limits are rebuilt from site-specific specifications, the procedure should be useful at other sites facing tower replacement, though validated at one site.

Key words: Meteorological tower, Representativeness, Parallel observation, Joint frequency distribution, Uncertainty propagation

*Corresponding Author: Juyeol Yun, Nuclear Environment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Korea.
Phone: +82-42-866-6515, Fax: +82-42-868-2196
E-mail: juyeol@kaeri.re.kr

1. 서 론

원자력시설 부지의 기상관측은 정상운전과 사고 시 방사성물질의 대기 중 확산과 희석 특성을 평가하는 기초자료를 확보하기 위해 수행되며, 이 자료는 시설의 안전성 평가에 쓰인다. 하나로(HANARO) 부지의 본기상탑은 노후화로 신규 기상탑 구축이 계획되어 있으며, 구축과 전환 기간의 관측 공백을 막기 위해 본기상탑 인근에 임시기상탑이 설치되어 운영되고 있다. 임시기상탑이 본기상탑을 대체하려면 두 탑이 같은 대기를 대표한다는 것(상호 대표성)이 확인되어야 한다. 본기상탑은 부지의 대표 관측점으로 운영되어 왔으므로, 상호 대표성이 확인되면 본기상탑에 부여된 부지 대표성이 임시기상탑으로 이어지는 것으로 볼 수 있다. 부지 전역에 대한 대표성 자체는 단일 지점 관측으로 정량 확인하기 어려워, 본 연구에서는 정량 확인이 가능한 두 지점의 상호 대표성으로 범위를 한정하였다.

미국 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)와 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)의 규제지침은 부지 기상탑의 관측요소, 정확도, 입지 조건을 규정하며, 관측자료는 풍향, 풍속, 안정도의 결합빈도분포(joint frequency distribution, JFD)로 집계되어 확산평가의 기상 입력이 된다(ANSI/ANS, 1984; U.S. NRC, 2007; KINS, 2024). 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 측기와 관측법 지침도 단일 장비의 정확도 요건과 관측환경등급을 정한다(WMO, 2024). 그러나 두 지점의 관측이 얼마나 일치해야 하는지에 대한 정량 기준은 이들 문서가 정해 두는 대신 관측 현장에 맡겨 두고 있다. 기상청 지상기상 관측지침은 관측소 이전 시 근거리에서 1개월 이상의 비교관측을 요구하되, 어느 수준에서 일치를 인정할지는 특정하지 않는다(KMA, 2026). 관측 환경과 지형이 지점마다 다르고 이전하는 지점의 조건도 미리 정해지지 않으므로, 하나의 임계값을 일률적으로 규정하기보다 부지 조건에 맞게 구성하도록 여지를 둔 것으로 볼 수 있다. 따라서 그 기준은 각 부지에서 규정과 표준이 제공하는 요소를 조합해 세우게 된다.

한 지점의 관측이 주변을 대표하는 정도는 지표 조건에 따라 달라진다. 접지층 상사이론(Monin and Obukhov, 1954)과 수평 균질성 가정이 성립하는 조건에서는 한 지점이 주변을 대표하지만, 캐노피 등 거칠기 요소가 있는 실제 부지에서는 거칠기 아층(roughness sublayer) 내부의 흐름이 지표 형상에 따라 공간적으로 변동하며, 이 변동은 캐노피 상부로 갈수록 감소한다(Kaimal and Finnigan, 1994; Giometto et

al., 2016). 대규모 와동모사 연구는 단일 탑 관측이 공간 변동 때문에 지역 대표값과 체계적으로 어긋날 수 있음을 보였다(Steinfeld et al., 2007). 따라서 병치된 두 탑이라도 관측 차이에는 기기 불확도와 함께 두 지점의 자연적 공간 변동, 곧 대표성 불확도가 정상적으로 포함된다.

병치 관측과 다지점 관측을 비교한 선행연구들은 편향, 산포, 상관과 조건의존성을 표준 지표로 사용해 왔다. Knoop et al. (2021)은 신규 측기의 성능 검증을 위해 213 m 마스트와 라이다를 2년간 비교하며 전체 편향이 작아도 조건별 편차가 커질 수 있음을 보였고, Barbieri et al. (2019)은 관측 플랫폼들의 정확도 평가를 위해 다수 플랫폼을 기상탑 기준으로 비교하며 변수별 편향과 허용밴드를 사용했다. 관측소 이전과 자동화에 따른 병행관측 문헌은 기후 시계열의 균질화(보정)를 목적으로 하며(WMO, 2020), 국내에서는 관측환경 등급화를 위한 WMO 기준 적용(Kang and Kim, 2020), 설치 환경 차이에 따른 기온 편차(1°C 안팎)의 규명(Park, 2021), 측기의 활용성 평가(Hwang et al., 2025), 원자력 부지 기상자료의 품질관리 체계 수립(Park et al., 2020)이 보고되어 있다. 이처럼 비교관측의 지표와 절차는 여러 분야에 축적되어 있으나, 그 목적은 측기 성능 검증, 시계열 보정, 관측환경 등급화, 품질관리에 있어 병치된 두 관측탑의 대체 가능성을 판정하는 일과는 초점이 다르다.

여기서는 이들 선행연구의 비교 지표와 기존 규제, 표준의 요소를 토대로 하나로 부지에 약 15 m 간격으로 병치된 본기상탑과 임시기상탑의 2026년 6월 동시 관측 자료를 두 수준에서 대조하였다. 관측요소 수준에서는 기기 불확도와 관측환경등급 기반 대표성 불확도를 합성한 관측 불확도 바닥선을 세우고 적합률, 회귀, 오프셋 구조, 조건 의존성의 네 축으로 판정하였다. 활용 입력 수준에서는 두 탑의 결합빈도분포를 Perkins skill score (PSS)로 비교하고, 허용 기기 오차를 몬테카를로로 전파하여 만든 판정선에 대조하였다. 판정에는 기존 규제와 표준을 적용하였으므로, 관측탑 교체나 이전 국면의 다른 부지에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 자료 및 방법

판정은 두 수준으로 구성하였으며, 전체 흐름을 Fig. 1에 정리하였다. 첫째, 관측요소 수준(2.3절)은 관측 불확도 바닥선을 구성하고 풍속, 풍향, 온도, 안정도 각각에서 두 탑의 일치를 네 축으로 진단하여, 차이의 원인이 기기 편향인지 두 지점의 공간 차이인지를 규명한다. 둘째, 활용 입력 수준(2.4절)은 관측자료의 실제 용도인 대기확산 평가의 기상 입력(JFD)을 구성

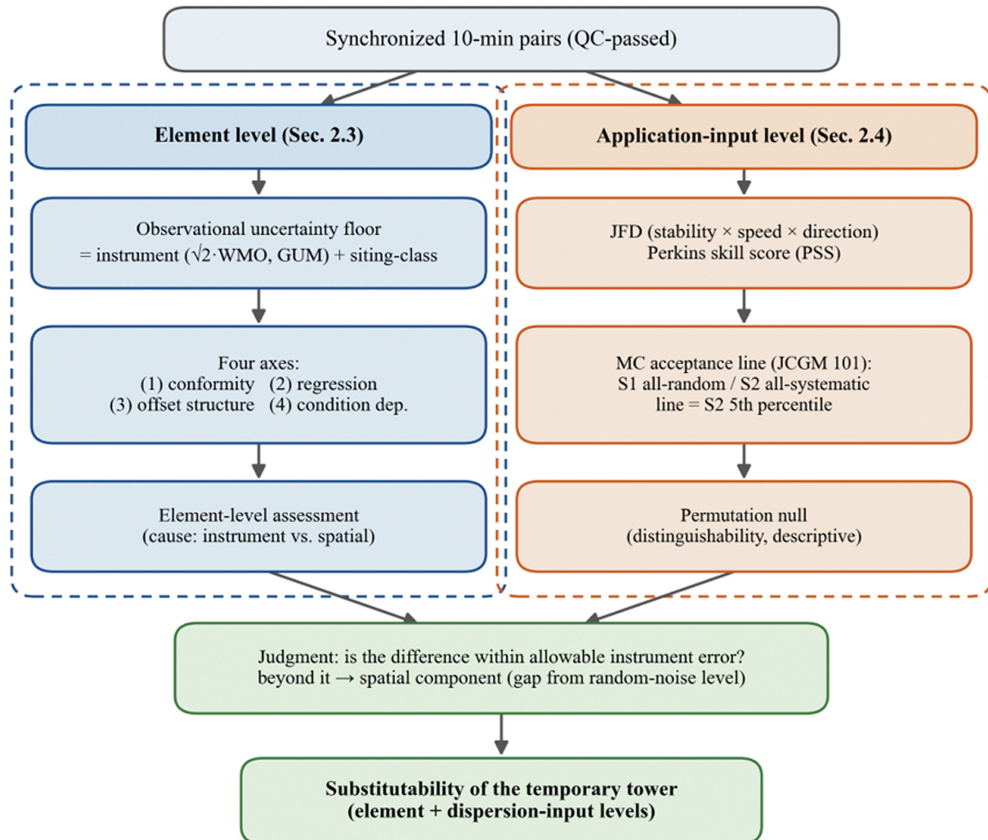


Fig. 1. Workflow of the two-level substitutability assessment. At the element level (Sec. 2.3), an observational uncertainty floor is built from the instrument uncertainty ($\sqrt{2} \times \text{WMO accuracy, GUM}$) combined with the siting-class representativeness uncertainty, and the two towers are compared along four axes. At the application-input level (Sec. 2.4), the joint frequency distribution (JFD) is compared by the Perkins skill score (PSS) against a Monte Carlo acceptance line (JCGM 101; S1 all-random, S2 all-systematic), with a permutation null used descriptively. The final judgment attributes any difference beyond the allowable instrument error to the spatial component.

하고, 허용 기기 오차의 몬테카를로 전파로 만든 판정선에 대조하여 동등성을 판정한다. 최종 대체가능성은 활용 입력 수준의 판정을 기준으로 하며, 관측 요소 수준의 비교는 차이의 존재와 원인을 확인하는 근거로 삼는다.

2.1 부지와 기상탑

하나로 부지에는 본기상탑(부지 복측)과 임시기상탑(부지 남측)이 약 15 m 이격되어 운영되며(Fig. 2), 두 탑 모두 67, 27, 10 m 세 고도에서 풍향, 풍속, 온도를 관측하고 67–10 m 기온차로 대기안정도(stability from vertical temperature difference, StDT)를 7등급으로 산출한다. 원자력 부지 규제는 연직 기온차(기온감률 $\Delta T/\Delta z$)가 대기 연직 혼합의 강도를 직접 반영하고 주야 구분 없이 연속 산출이 가능하다는 점에서 이를

안정도 분류의 원칙적 방법으로 규정하며, 측정 고도는 지상 10 m와 방출고도에 대응하는 상층으로 정한다(U.S. NRC, 2007; KINS, 2024). 본 부지에서는 67 m와 10 m의 기온차가 이에 해당한다. 등급 경계와 명칭을 Table 2에 보이며, 이는 규제 확산평가의 안정도 분류와 동일하다.

두 탑의 관측 체계를 Table 1에 보인다. 두 탑은 세 고도 모두 동일 모델의 통합기상센서(Lufft WS500-UMB, 초음파 풍향과 풍속, 통풍형 온도 측정)를 사용한다.

두 탑의 검·교정 체계는 동일하다. 모든 센서는 기상관측표준화법에 따른 기상청 기상측기 검정(3년 주기)을 유효기간 내로 보유하고, KINS 규제지침의 정확도 유지 조항에 따른 자체교정(6개월 주기)이 수행되며(KINS/RG-N01.03 Annex 1; KAERI, 2026), 두

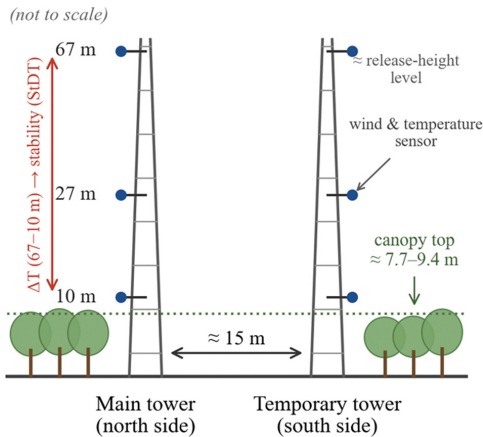


Fig. 2. Schematic layout (not to scale) of the main and temporary meteorological towers at the HANARO site. Both towers observe wind and temperature at 67, 27, and 10 m, and atmospheric stability (StDT) is derived from the 67–10 m temperature difference following the regulatory practice for nuclear sites (lower level at 10 m and upper level corresponding to the release height). The towers are approximately 15 m apart and surrounded by a tree canopy of about 7.7–9.4 m.

탑 모두 비교관측 개시 전에 교정을 완료한 상태로 운영되었다. 특히 안정도 산출에 쓰이는 67–10 m 온도 페어는 단일 센서 요건과 별도로 기온차 요건 ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)을 만족하도록 페어 단위로 보정되어 있다.

두 탑이 동일 모델과 동일 검·교정 체계를 공유하므로, 관측 차이에서 기기 이질성에 의한 편향 성분은 최소화되어 있다. 허용공차(tolerance)는 검정과 교정에서 기기가 만족해야 하는 오차의 한계로, 관측요소마다 규격이 정해 둔 값이다. 검정을 통과한 기기의 오차는 이 한계 안에 있다고 본다.

부지는 나무 캐노피로 둘러싸인 비균질 지형이다. 공기역학적 거칠기 길이 z_0 는 동일 부지의 장기 관측(부지 30년 기상관측자료 분석 결과)에서 중립조건 로그 풍속 프로파일 적합으로 산출된 값으로 중앙값 1.15 m(최근 약 1.4 m)이며, 여기에 통상적 환산 관계($z_0 \approx 0.15h$)를 적용하면 캐노피 높이 h 는 약 7.7~9.4 m이다. 거칠기 아층 상단을 캐노피 높이의 2~3배로 보면(Kaimal and Finnigan, 1994) 67 m와 27 m는 거칠기 아층 위, 10 m는 캐노피 상면 근처의 거칠기 아층 내부에 해당한다. 이 고도 구분은 뒤에서 고도별 대표성 불확도를 부여하는 근거가 된다.

Table 1. Observation systems of the two towers at the HANARO site.

Item	Main tower	Temporary tower
Location	North side of the site	South side of the site (≈ 15 m apart)
Observation heights	67, 27, 10 m	67, 27, 10 m
Sensor (all heights)	Lufft WS500-UMB compact weather sensor	Lufft WS500-UMB compact weather sensor
Wind measurement	Ultrasonic	same
Temperature measurement	NTC in ventilated housing	same
Data logger / averaging	Campbell Scientific CR1000X /10-min mean	same
Verification / calibration	KMA instrument verification (valid); periodic multi-point calibration per KINS/RG-N01.03 (incl. ΔT pair correction to $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)	same
Stability (StDT)	ΔT between 67 and 10 m, 7 classes	same

Table 2. Atmospheric stability classification by the vertical temperature gradient ($\Delta T/\Delta z$ between 67 and 10 m), identical to the regulatory classification for dispersion assessment (U.S. NRC, 2007; KINS, 2024).

Class (StDT)	Pasquill category	Stability	$\Delta T/\Delta z$ ($^{\circ}\text{C}/100$ m)
1	A	Extremely unstable	$\Delta T/\Delta z \leq -1.9$
2	B	Moderately unstable	$-1.9 < \Delta T/\Delta z \leq -1.7$
3	C	Slightly unstable	$-1.7 < \Delta T/\Delta z \leq -1.5$
4	D	Neutral	$-1.5 < \Delta T/\Delta z \leq -0.5$
5	E	Slightly stable	$-0.5 < \Delta T/\Delta z \leq +1.5$
6	F	Moderately stable	$+1.5 < \Delta T/\Delta z \leq +4.0$
7	G	Extremely stable	$\Delta T/\Delta z > +4.0$

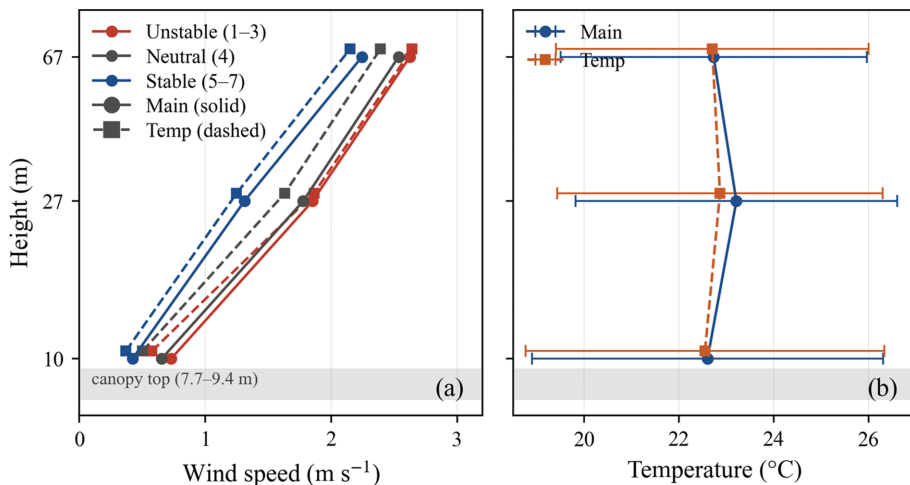


Fig. 3. Mean vertical profiles at the two towers during June 2026: (a) wind speed by stability group (unstable, classes 1–3; neutral, class 4; stable, classes 5–7; circles with solid lines, main tower; squares with dashed lines, temporary tower) and (b) temperature (mean $\pm$ standard deviation). The shaded band marks the canopy-top range (7.7–9.4 m) derived from the site roughness length; note the logarithmic height axis.

2.2 자료

자료는 2026년 6월 1일부터 30일까지 두 탑이 같은 시각에 기록한 10분 평균값 4,320쌍으로, 부지의 관측 절차에 따른 품질관리를 거친 값이다(KAERI, 2026). 품질관리는 요소별 물리한계 범위 검사, 연속한 10분 자료의 변화율을 이용한 스파이크 검사, 운영기록에 등록된 이상구간 마스킹으로 구성된다. 변화율 검사는 시간 일관성 검사의 개념을 따르되 임계값은 표준이 정한 공통 기준이 아니라 고빈도 관측자료에 맞추어 부지에서 정한 운영 기준이며, 본 연구가 사용하는 요소에서는 10분당 기온 5°C, 풍속 20 m s⁻¹, 풍향 120°이다. 풍향은 원형 최소 각도차로 검사한다. 임계값을 이렇게 느슨하게 둔 것은 정상적인 기상 변화를 이상자료로 잘못 걸러내지 않기 위한 것이며, 임계를 넘은 자료는 곧바로 결측으로 처리하지 않고 검토 대상으로 표시하여 전후 관측값과 다른 고도의 자료 및 운영기록을 확인한 뒤 이상으로 확정된 구간만 결측으로 둔다. 기간 자료수집률은 풍향과 풍속(세 고도), 온도(67 m와 10 m), 안정도에서 두 탑 모두 100%이고, 27 m 온도만 99.3%이다. 결측이 포함된 짝은 해당 요소의 분석에서 제외하였다.

기간의 대기 개황(본탑 기준)은 다음과 같다. 평균 풍속은 고도 67 m에서 2.4 m s⁻¹, 27 m에서 1.5 m s⁻¹, 10 m에서 0.5 m s⁻¹로 캐노피를 향해 급감하며(기간 최대 9.7 m s⁻¹), 10 m 기온은 평균 22.6°C (12.2~30.8°C)이다. 비정온 주풍향은 67 m에서 ESE (13.2%), E (10.0%), 10 m에서 NNW (14.0%)로 고도에 따라 다르다. 안정도는 불안정(1~3등급) 24.3%, 중립(4등급)

19.4%, 안정(5~7등급) 56.3%로 안정 조건이 우세하다. 고도별 평균 프로파일(Fig. 3)에서 안정도군별 풍속 프로파일은 로그 고도축에서 거의 선형으로 로그법칙과 정합하며, 두 탑의 프로파일이 전 안정도 조건에서 나란히 간다. 근지표의 낮은 평균 풍속과 고도 간 주풍향 차이는 캐노피 부지의 특성으로, 근지표 결과(3장) 해석의 배경이 된다. 모든 차이는 임시탑 - 본탑으로 정의하고, 부지 대표 관측점으로 운영되어 온 본기상탑을 기준으로 삼는다. 조건별 재평가에 쓰는 주야는 부지 좌표로 계산한 태양고도각으로 구분하며, 주간은 0° 초과, 야간은 -6° 미만으로 두고 그 사이의 박명은 양쪽에서 제외하였다. 풍향은 저풍속에서 대표성을 갖지 않으므로 각도 비교는 비정온 관측에 한정한다. 비정온은 두 탑 풍속의 짝 평균이 정온 기준 (0.22 m s⁻¹, ANSI/ANS-2.5 풍속 계급 경계) 이상인 짝을 말하며, 정온은 발생 비율로 별도 비교한다. 관측소 이전 시 비교관측 요건(근거리 1개월 이상; KMA, 2026)과 견주면, 본 비교(15 m 이격, 해발고도차 없음, 1개월)는 근거리 병행관측(parallel observation; WMO, 2020)에 해당하며 기간 요건을 충족한다.

2.3 관측요소 수준 판정 기준

두 탑이 같은 대기를 관측해도 차이는 0이 되지 않는다. 각 센서의 기기 불확도와, 두 지점이 물리적으로 다른 위치라는 데서 오는 대표성 불확도가 남기 때문이다. 판정 기준을 세우려면 이 두 성분이 허용하는 차이의 크기를 먼저 정해야 한다.

기기 성분은 관측으로 확인하지 않고 규격에서 가

저온다. 두 탑의 차이에서 기기에서 비롯되는 부분은 허용공차 이내이므로, 그 크기가 두 지점 차이의 허용 하한이 된다. 이렇게 두면 판정의 관심은 기기의 오차 크기가 아니라 같은 사양의 장비로 관측한 두 지점이 같은 대기를 대표하는지에 놓이고, 하한을 넘는 차이가 두 지점의 공간 차이에 해당한다.

허용공차는 규격에서 $\pm 5^\circ$ 나 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 처럼 부호를 함께 붙인 한계로 주어진다. 요소별 허용공차를 $\pm a$ 로 적으면 기기 오차 e 는 $-a$ 부터 $+a$ 까지의 구간 안에 있고, 규격이 알려주는 것은 이 구간의 양 끝뿐이다. 구간 안에서 오차가 어느 값에 몰리는지는 알려져 있지 않다. 하한과 상한만 알려진 양에는 최대 엔트로피 원리에 따라 그 구간의 직사각형 밀도를 부여하며, 이는 국제 측정학 지침 합동위원회(Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM)의 불확도 전파 지침에 따른 것이다(JCGM, 2008b). 이에 따라 오차 e 의 확률밀도를 식(1)로 둔다.

$$g(e) = 1/(2a), |e| \leq a; g(e) = 0, \text{ 그 밖에서} \quad (1)$$

두 탑의 오차가 서로 독립이면 두 탑 차이 $d = e_1 - e_2$ 의 밀도는 폭이 두 배인 삼각형이 된다. 독립인 두 측정값 차이의 불확도가 $u(A - B) = \sqrt{[u(A)^2 + u(B)^2]}$ 를 만족하므로(JCGM, 2008a), 같은 사양 센서 두 대의 차이에 대한 기기 바닥선 F_1 을 WMO 운영 측정 불확도(WMO, 2024)를 허용공차 a 로 삼아 식(2)로 정한다.

$$F_1 = \sqrt{2} a \quad (2)$$

식(2)의 바닥선은 허용공차를 표준불확도 자리에 대입한 값이므로 식(1)의 모형에서 계산되는 차이의 표준불확도보다 크다. 이 바닥선이 차이를 얼마나 포함하는지를 식(1)의 모형에서 구하면 식(3)이 되며, 이 비율은 허용공차 a 의 크기와 무관하다.

$$P(|d| \leq F_1) = (4\sqrt{2} - 2)/4 \approx 0.91 \quad (3)$$

즉 기기 오차가 허용공차 안에 경계까지 고르게 퍼져 있고 두 지점의 공간 차이가 전혀 없더라도, 두 탑 차이의 약 91%는 바닥선을 넘는다. 따라서 개별 짝이 바닥선을 넘었다는 사실은 그 자체로 공간 차이의 근거가 되지 않는다. 판정은 짝을 하나씩 보는 대신 바닥선 이내인 짝의 비율로 하고, 그 비율이 식(3)의 기대수준에 못 미치는 만큼을 두 지점의 공간 차이로 본다.

다음으로 대표성 불확도는 관측환경등급(siting classification; ISO, 2014; WMO, 2024)이 등급별로 제시하는 관측환경에 의한 추가 불확도로 부여한다. 관측환경등급은 관측점과 장애물의 이격거리를 장애물 높이의 배수로 정하고(1등급 30배, 2등급 10배, 3등급 5배, 4등급 2.5배), 등급마다 추가 불확도를 함께 제

시한다. 풍속은 2등급이 30% 이내, 3등급이 50% 이내, 4등급이 50% 초과이며, 온도는 3등급이 1°C , 4등급이 2°C , 5등급이 5°C 이다. 1등급은 기준 조건이므로 추가 불확도를 두지 않는다.

이 등급 체계는 지상 10 m 관측을 전제하지만, 같은 표준은 장애물이 많은 부지에서 센서를 장애물 평균 높이보다 높게 설치하는 방법을 인정하고, 이때 고려할 장애물 높이를 센서보다 10 m 아래의 면을 기준으로 환산하도록 정한다. 이 규정을 본 부지에 적용하면 다음과 같다. 67 m와 27 m 센서의 기준면은 각각 57 m와 17 m이고 앞서 산출한 캐노피 높이(약 7.7~9.4 m)는 두 기준면보다 낮으므로, 이 두 고도에서는 캐노피가 장애물로 계산되지 않아 1등급 조건을 만족한다. 따라서 67 m와 27 m에는 대표성 불확도를 두지 않고 기기 바닥선을 그대로 쓴다.

10 m 센서의 기준면은 지표면이므로 캐노피 전체가 장애물로 계산되며, 관측점은 캐노피 상면 근처에 있다. 기상탑 주위는 약 10 m 거리의 펜스로 둘러싸여 있고 캐노피는 그 밖에 있으므로, 최근접 장애물까지의 이격거리는 4등급이 요구하는 캐노피 높이의 2.5배(약 19~24 m)에 미치지 않는다. 이격거리 기준으로 10 m 고도는 5등급에 해당한다. 표준은 풍속의 5등급에 대해서는 추가 불확도를 정의하지 않고, 온도의 5등급에는 5°C 를 제시한다.

따라서 10 m의 대표성 불확도는 3등급의 값, 즉 풍속에 풍속의 50%와 온도에 1°C 를 채택하였다. 풍속에서 3등급의 50%는 표준이 상한으로 제시한 값 가운데 가장 큰 값이며, 4등급 이하의 상한이 주어지지 않는다. 온도에서 3등급의 1°C 는 5등급 값 5°C 보다 작다. 두 요소 모두 부지의 실제 등급에 대응하는 추가 불확도보다 작은 값을 취한 것이므로, 이 채택은 대표성 불확도를 작게 두는 보수적인 방향이어서 판정에 문제가 되지 않는다.

풍향은 관측환경등급이 대표성 불확도를 정량화하지 않으므로 기기 바닥선($\pm 7.1^\circ$)을 유지하며, 이는 근 지표에서 엄격한 쪽의 판정이 된다. 안정도는 바닥선을 두지 않고 두 탑이 산출한 등급의 일치 정도로 판정한다.

이렇게 부여한 고도별 대표성 불확도 F_2 와 기기 바닥선 F_1 을 제곱합 제곱근으로 합성한 값이 관측 불확도 바닥선 F 이다. 요소별 값은 Table 3에 정리하였다.

$$F = \sqrt{[F_1^2 + F_2^2]} \quad (4)$$

판정은 네 축으로 수행한다. 1) 바닥선 대비 적합률(같은 시각 차이가 바닥선 이내인 짝의 비율), 2) 응답 일치도(회귀 기울기와 결정계수; 풍향은 원형 변수이므로 각도차 분포와 방위 빈도 분포 상관), 3) 오픈셋 구조, 4) 조건과 고도 의존성(안정도, 주야, 고도별

Table 3. Observational uncertainty floors by element, following Eqs. (2) and (4). The instrument floor F_1 is $\sqrt{2}$ times the WMO operational measurement uncertainty taken as the tolerance; at 10 m the representativeness uncertainty F_2 , adopted from siting class 3, is combined in quadrature to give the composite floor F . U denotes the pairwise mean wind speed of the two towers (m s^{-1}).

Element	WMO accuracy	Instrument floor F_1	10 m F_2	10 m composite floor F
Wind speed ($\leq 5 \text{ m s}^{-1}$)	0.5 m s^{-1}	$\pm 0.71 \text{ m s}^{-1}$	50% of speed	$\pm \sqrt{[0.71^2 + (0.50U)^2]}$
Wind speed ($> 5 \text{ m s}^{-1}$)	10%	$\pm 14\%$	50% of speed	$\approx \pm 0.52U$
Wind direction	5°	$\pm 7.1^\circ$	not quantified	$\pm 7.1^\circ$
Temperature	0.2°C	$\pm 0.28^\circ\text{C}$	1°C	$\pm 1.04^\circ\text{C}$

Table 4. Decision thresholds for the element-level assessment (set a priori).

Metric	Strong support	Conditional	Limited
Conformity ($ \Delta \leq \text{floor}$)	$\geq 90\%$	75–90%	$< 75\%$
Regression slope	0.9–1.1	0.8–1.2	otherwise
Coefficient of determination R^2	≥ 0.95	0.80–0.95	< 0.80
Residual SD (offset removed)	$\leq \text{floor}$	$\leq 2 \times \text{floor}$	$> 2 \times \text{floor}$
Stability agreement (± 1 class)	$\geq 90\%$	80–90%	$< 80\%$

재평가)이다. 측 3)은 두 탑 차이(임시 - 본)를 상수 성분과 변동 성분으로 나눈다. 차이의 평균을 상수 오프셋(offset)으로 추정하고, 이를 제거한 잔차의 표준편차를 변동 산포로 본다. 두 성분을 각각 같은 바닥선에 대조하여, 바닥선을 넘는 상수 오프셋은 검·교정으로 배제되지 않은 두 지점 미세환경의 정적 차이로, 바닥선을 넘는 잔차 산포는 두 지점의 순간적 공간 변동으로 귀속한다. 판정 임계는 Table 4에 정리하였으며, 적합률 90% 이상, 회귀 기울기 0.9~1.1, 결정계수 0.95 이상을 강한 지지로 한다.

적합률은 같은 시각에 기록된 두 탑의 값의 차이가 해당 요소의 바닥선 이내인 짝의 비율로 정의한다. 두 지점의 공간 차이가 없고 두 탑의 차이가 기기 요인만으로 생긴다면, 적합률의 기댓값은 식(3)의 포함확률과 같아진다. 식(1)은 오차가 허용공차 안에서 경계까지 고르게 나타나는 경우이므로 식(3)의 약 91%는 이 모형에서 기대되는 적합률이며, 실제 기기의 오차가 허용공차보다 작으면 적합률은 이보다 높아진다. 병행관측에는 두 지점의 공간 차이가 정상적으로 포함되므로 임계는 식(3)의 값보다 낮아야 한다. 공간 차이의 크기를 미리 알 수는 없으므로, 식(3)의 값을 내려 90%를 임계로 한다. 이 임계는 기기 바닥선을 쓰는 요소에 적용되는 값이다. 대표성 불확도를 합성한 복합 바닥선을 쓰는 요소에서는 기기 성분만으로도 대부분의 짝이 바닥선 안에 들어오므로, 임계 90%는 두 지점의 공간 차이가 관측환경등급이 허용하는 범위에 머무는지를 묻는 기준이 된다.

회귀 기울기 범위 0.9~1.1은 풍속 정확도 규격(> 5

m s^{-1} 에서 $\pm 10\%$)과 정합하도록 정한 것이다. 결정계수 임계 0.95는 동일 지점(같은 위치, 같은 높이) 상호비교에서 보고되는 수준(기울기 0.99, 결정계수 0.995 이상; Knoop et al., 2021)을 공간 성분이 정상적으로 포함되는 병행관측에 맞게 완화한 판단 기준이며, 규격에서 유도되는 값은 아니다.

임계에 미달하는 항목은 그 원인이 기기 편향인지 두 지점의 공간 차이인지를 측 3)과 측 4)로 구분해 명시한다.

2.4 결합빈도분포(JFD) 수준 판정 기준

관측자료의 실제 용도는 대기확산 평가이며, 그 기상 입력은 안정도 × 풍속 계급 × 16방위의 JFD이다(U.S. NRC, 1977; ANSI/ANS, 1984). 본 연구는 안정도 7등급 × 풍속 12계급(Table 5) × 16방위에 안정도별 정온을 더한 규제 형식의 JFD를 두 탑 자료로 각각 구성하고, 그 유사도를 PSS [$\min(p, q)$]로 측정한다(Perkins et al., 2007). 방위는 진북을 중심으로 $\pm 11.25^\circ$ 를 N으로 하여 22.5° 폭으로 구획하고, p 와 q 는 각 탑의 유효 관측수로 나눈 상대빈도이므로 각각의 합은 1이다. PSS는 두 확률분포의 겹침 계수(overlapping coefficient; Inman and Bradley, 1989)로, 1이면 완전 일치이다.

관측된 PSS가 “충분히 높은지”를 판단할 기준선은 허용 기기 오차의 몬테카를로 전파(JCGM, 2008b)로 구성한다. 절차는 다음과 같다. 본탑 관측열 하나에 규격 허용 오차를 서로 독립으로 두 번 입혀 가장 탑 두 개를 만들고, 이 둘의 JFD로 PSS를 계산한다. 두

Table 5. Wind-speed classes of the joint frequency distribution (JFD), following the regulatory format for atmospheric dispersion assessment (ANSI/ANS, 1984; KINS, 2024). The JFD is composed of 16 wind-direction sectors (22.5° each), the 12 wind-speed classes listed here, and the 7 stability classes of Table 2; calm (wind speed $< 0.22 \text{ m s}^{-1}$) is counted separately by stability class. The low-speed range is finely divided in accordance with the regulatory wind-speed classes.

Class	Wind speed (m s^{-1})	Class	Wind speed (m s^{-1})
1	0.22–0.5	7	3–5
2	0.5–0.75	8	5–7
3	0.75–1	9	7–10
4	1–1.5	10	10–13
5	1.5–2	11	13–18
6	2–3	12	> 18

가상 탑은 같은 관측열(같은 대기)에서 나오므로, 이 PSS는 두 기기가 동일한 대기를 관측할 때 기기 오차만으로 벌어질 수 있는 겹침을 뜻한다. 이를 여러 번 반복해 그 분포를 판정선의 근거로 삼는다. 반복 횟수는 200,000회로 두었다. 몬테카를로 전과 지침은 시행 횟수를 포함확률에 따라 정하도록 하며, 포함확률 0.95에 대해서는 2×10^5 이상을 권고한다(JCGM, 2008b). 난수 시드는 고정하고, 오차 섭동과 라벨 순열, 부트스트랩 재표집에 서로 다른 난수열을 사용하여 판정선이 시드와 반복 횟수만으로 결정되도록 하였다.

입히는 오차는 식(1)의 모형에서 추출한다. 허용 한계는 풍향과 풍속에 WMO 운영 측정 불확도($\pm 5^\circ$, $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ ($\leq 5 \text{ m s}^{-1}$), $\pm 10\%$ ($> 5 \text{ m s}^{-1}$)), 안정도 산출용 기온차에 KINS 페어 정확도 요건($\pm 0.1^\circ\text{C}$; KINS, 2024)을 쓴다. 가상 탑의 안정도는 섭동된 67–10 m 기온차로 기온감률을 다시 구하고 Table 2의 경계로 재분류하여 산출한다. 이 재분류는 관측 로거가 산출한 등급과 두 탑에서 각각 99.6%와 99.9% 일치하므로, 섭동 전 상태를 그대로 재현한다. 판정선에는 기기 오차만 전파하고 대표성 불확도는 포함하지 않는다. 이 판정은 두 JFD의 차이가 허용 기기 오차만으로 설명되는지를 묻는 것이며, 이를 넘는 성분을 두 지점의 공간 성분으로 해석하기 위함이다.

오차 구조는 두 극단을 모두 둔다. 전-무작위(S1)는 관측 시각마다, 가상 탑마다 독립으로 오차를 추출해 무작위 잡음 수준에서 기대되는 겹침의 상한을 주고, 전-편향(S2)은 가상 탑마다 한 개의 편향을 뽑아 전 관측에 고정 적용해 최악의 편향을 표현한다. 판정선은 S2 분포의 하위 5%로 둔다. 이는 단측 95% 허용수준에 상당하는 관례적 선택으로, 관측 PSS가 이보다 낮을 확률이 편향만으로는 5% 미만임을 뜻한다. 관측 PSS가 이 판정선 이상이면 두 JFD의 차이는 허용 기기 오차 범위 이내로 판정한다(적합성 판정 프레임: JCGM, 2012). 보조적으로 순열 영분포(permutation null distribution; Efron and Tibshirani, 1993)를 함께 제시한다. 이는 같은 시각에 기록된 두 탑의 관측을 하나

의 짝으로 두고 짝마다 두 탑의 라벨을 절반의 확률로 맞바꾼 뒤 같은 방식으로 JFD 쌍을 구성해 PSS를 반복 계산한 분포로, “두 관측이 사실상 같은 모집단에서 나왔다면 표본 잡음만으로 기대되는 겹침”의 기준이다. 관측 PSS가 이 영분포보다 낮으면 두 JFD의 차이가 표본 잡음으로 설명되지 않는다는 것, 즉 두 분포가 통계적으로 구별됨을 뜻한다.

그러나 이 순열 영분포는 대체 가능성의 판정 기준으로 쓰지 않고, 두 JFD의 구별성을 서술하는 용도로만 쓴다. 표본 수가 클 때(본 연구 $n = 4,320$) 현실의 두 관측 분포는 미세한 차이까지 유의하게 검출되어 거의 항상 통계적으로 구별되기 때문이다. 순열 기준을 합격과 불합격 기준으로 삼으면 실질적으로 동등한 경우에도 “구별됨”으로 귀결되어 판정이 무의미해진다. 다시 말해 순열 영분포는 “차이가 검출되는가”에만 답할 뿐, “그 차이가 대체를 배제할 만큼 큰가”에는 답하지 못한다. 후자, 즉 차이가 허용 기기 오차 범위 이내인가는 앞의 몬테카를로 판정선이 답하며, 대체 가능성 판정은 이 판정선을 기준으로 한다.

본 판정이 확인하는 것은 확산평가에 쓰이는 기상 입력자료, 곧 두 탑이 산출하는 결합빈도분포(JFD)가 서로 동등한가이다. 이 JFD로부터 확산평가가 산출하는 상대농도(χ/Q), 곧 단위 방출률당 공기 중 농도까지 두 탑에서 동등한지는 본 연구에서 다루지 않으며, 그 까닭은 다음과 같다. JFD를 이루는 각 셀(안정도, 풍속계급, 방위의 조합)이 상대농도에 미치는 영향은 서로 크게 다르다. 대기확산은 대기가 안정하고 풍속이 낮을수록 약해져 지표 부근 농도를 높이므로, 안정하고 저풍속인 소수의 셀이 상대농도를 크게 좌우한다. 따라서 두 탑의 JFD가 전체적으로 잘 겹쳐 PSS가 높더라도, 하필 이 영향이 큰 셀에서 빈도 차이가 있으면 상대농도는 그에 민감하게 달라질 수 있다. 요컨대 JFD의 높은 겹침이 상대농도의 동등성을 보장하지는 않으며, 상대농도 수준의 동등성은 두 탑의 JFD를 각각 확산평가에 입력해 그 결과를 직접 비교해야 확인되는 별도의 과제이다.

이와 관련하여 PSS 자체의 두 가지 성질도 밝혀 둔다. 첫째, PSS는 모든 셀을 같은 비중으로 합산하므로 위와 같은 셀별 영향 차이를 반영하지 못한다. 둘째, PSS는 한 탑에서 다른 탑으로 확률질량이 옮겨갈 때 그것이 바로 옆 계급으로 옮겨갔는지 멀리 떨어진 방위나 계급으로 옮겨갔는지를 구분하지 않고, 겹치지 않는 양만을 센다. 이 두 성질 때문에 PSS는 두 JFD의 유사도를 실제보다 후하게 평가하지 않는 엄격한 지표이며, 본 연구는 이를 유사도의 하한 눈금

으로 사용한다.

3. 결 과

3.1 관측요소 수준

고도별, 관측요소별 두 탑의 1:1 대응(풍속과 온도)과 풍향 각도차 분포를 Fig. 4에, 안정도 등급 혼동행렬을 Fig. 5에 보이며, 판정 임계(Table 4) 적용 결과의 종합을 Table 6에 보인다.

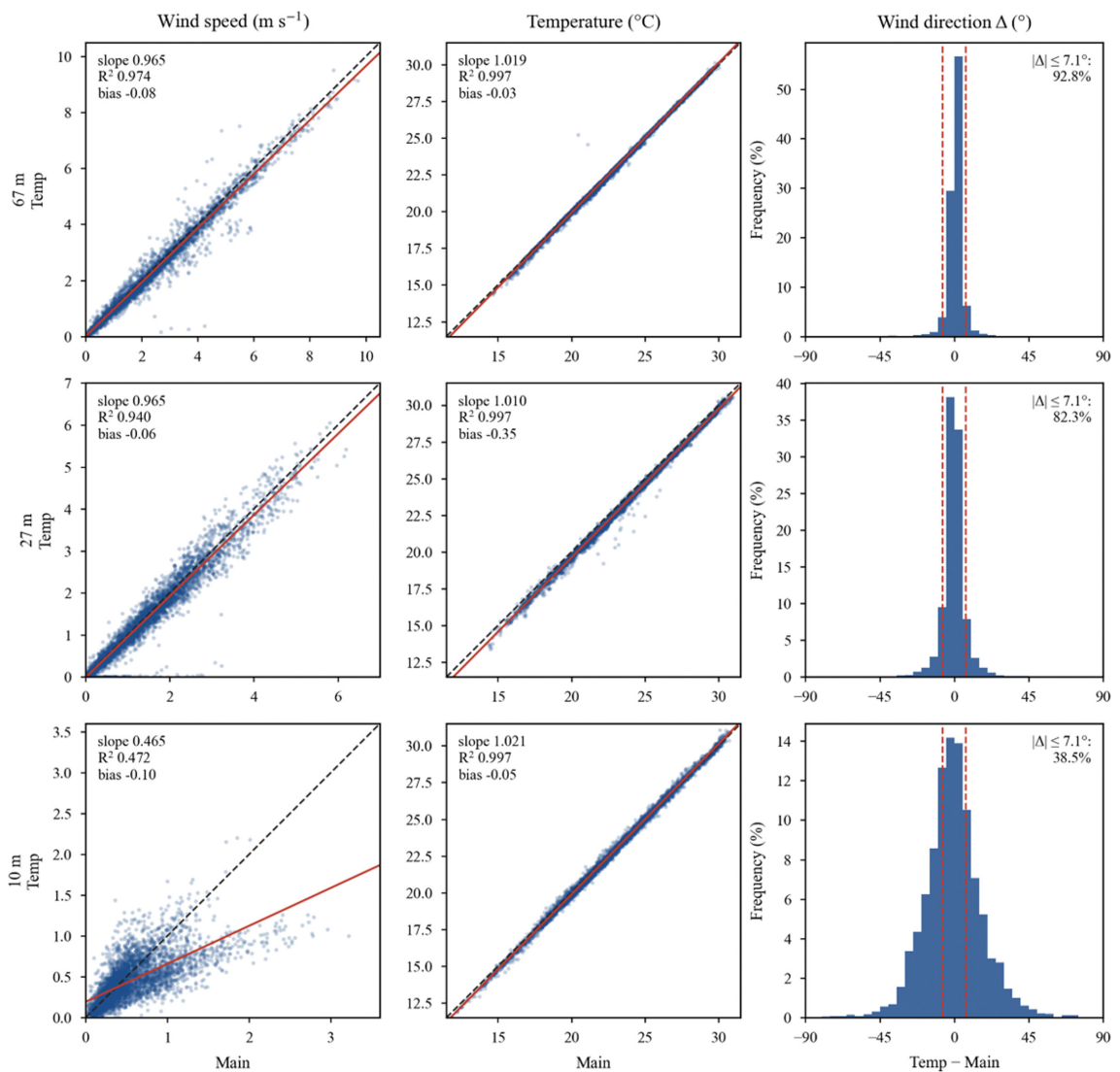


Fig. 4. One-to-one comparisons of the two towers at 67, 27, and 10 m (top to bottom), June 2026: (left) wind speed and (center) temperature scatter plots with the 1:1 line (black dashed), least-squares fit (red), and regression statistics; (right) wind-direction difference distributions for non-calm pairs (pairwise mean wind speed $\geq 0.22 \text{ m s}^{-1}$) with the instrument floor of $\pm 7.1^\circ$ (red dashed).

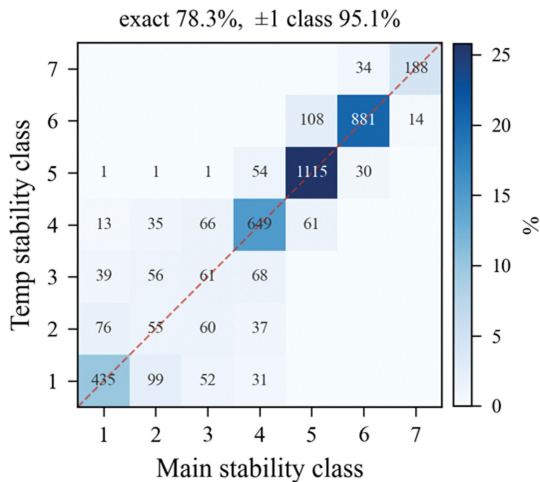


Fig. 5. Confusion matrix of the stability classes (StDT, classes 1–7) derived at the two towers (numbers, pair counts; shading, percent of all pairs). The dashed line marks exact agreement.

3.1.1 풍속과 온도

67 m 풍속은 적합률 97.7%, 회귀 기울기 0.965, 결정계수 0.974로 강하게 일치한다. 27 m 풍속은 적합률 98.0%, 기울기 0.965이며 결정계수 0.940으로 기준(0.95)에 근접한다. 10 m 풍속은 크기 자체가 서로 가깝고(합성 바닥선 적합률 97.9%, 평균 오프셋 -0.10 m s^{-1} , 잔차 표준편차 0.29 m s^{-1}) 순간 변동을 함께 추종하는 정도는 약하다(기울기 0.47, 결정계수 0.47). 오프셋이 작으므로 이는 기기 편향이 아니라 캐노피

후류에 의한 공간 변동으로 판단된다. 온도는 67 m와 10 m 모두 기울기 1.02, 결정계수 0.997, 상관 0.999로 거의 완전히 함께 움직이고 평균 오프셋(-0.03 , -0.06°C)이 바닥선 이내이다. 67 m 적합률은 96.4%이고, 10 m는 기기 바닥선($\pm 0.28^\circ\text{C}$)으로 83.0%이나 근지표 대표성 불확도를 합성한 바닥선($\pm 1.04^\circ\text{C}$)으로 99.8%로 강하게 일치한다. 27 m 온도는 기울기 1.010, 결정계수 0.997로 함께 움직이나 상수 오프셋 -0.35°C 가 있어, 오프셋 제거 후 적합률 92.0%, 잔차 0.20°C 이다. 잔차가 작으므로 두 지점 근방 미세환경의 정적 차이로 특정된다. 이 크기는 국내 이중 관측 비교에서 설치 환경 차이로 보고된 기온 편차 1°C 안팎(Park, 2021)보다 작다.

3.1.2 풍향

67 m는 적합률($|\Delta| \leq 7.1^\circ$) 92.8%, 방위 빈도 분포 상관 0.984로 방위 분포까지 일치한다. 27 m는 적합률 82.3%(평균절대차 4.8° , 중앙값 2.9°)로 조건부 수준이나 방위 빈도 분포 상관 0.982로 방위 분포는 일치한다. 10 m 순간 풍향은 적합률 38.5%(주간 34.1%, 야간 46.5%)로 제한 수준이며 주간 대류 시 산포가 다소 크다(평균절대차 주간 14.6° , 야간 10.6°). 다만 차이의 크기를 보면 90° 이상 어긋나는 경우가 사실상 없고(0.2%), 92%가 30° 이내(중앙값 9.7°)로 두 탑은 같은 방향을 공유하며 국지적으로 산포한다. 10 m 방위 빈도 분포 상관은 0.720이다. 정온 발생 비율은 본탑/임시탑이 67 m에서 1.6/1.9%, 27 m에서 5.0/7.3%, 10 m에서 14.4/19.9%로 임시탑이 근지표에서 다소 많다.

Table 6. Summary of the element-level assessment against the thresholds in Table 4.

Element (height)	Conformity ^a (%)	Slope / R^2	Mean offset	Assessment
Wind speed, 67 m	97.7	0.965 / 0.974	-0.08 m s^{-1}	Strong support
Wind speed, 27 m	98.0	0.965 / 0.940	-0.06 m s^{-1}	Strong support (R^2 marginal)
Wind speed, 10 m	97.9 ^b	0.465 / 0.472	-0.10 m s^{-1}	Magnitude within floor; weak co-tracking attributed to canopy-driven spatial variability
Wind direction, 67 m	92.8	0.984 ^c	—	Strong support
Wind direction, 27 m	82.3	0.982 ^c	MAE 4.8°	Conditional; sector distribution agrees
Wind direction, 10 m	38.5 ^d	0.720 ^c	MAE 13.2°	Limited for instantaneous angles; same prevailing direction with local scatter
Temperature, 67 m	96.4	1.019 / 0.997	-0.03°C	Strong support
Temperature, 27 m	92.0 ^e	1.010 / 0.997	-0.35°C	Static microenvironment offset; strong support after offset removal
Temperature, 10 m	99.8 ^b	1.021 / 0.997	-0.05°C	Strong support
Stability (StDT)	95.1 ^f	—	-0.003 class	Practically identical classes

^aFraction of pairs within the floors of Table 3 (instrument floor unless noted). ^bComposite floor including the representativeness uncertainty adopted from siting class 3. ^cSector-frequency correlation (16 sectors, non-calm). ^dInstrument floor only (strict side; representativeness of wind direction is not quantified). ^eAfter removing the static offset. ^fWithin ± 1 class (exact agreement 78.3%).

3.1.3 안정도

두 탑의 안정도 등급은 정확 일치 78.3%, ± 1 단계 이내 95.1%이며(Fig. 5) 평균 등급차 -0.003 단계로 편향이 없다. 정확 일치가 낮은 구간은 등급 폭이 좁은 ($0.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) 불안정 중간등급(2등급과 3등급)에 국한되며, 경계에서 인접 등급으로 넘어가는 효과이다. 조건별로도 일치가 유지된다. 정확 일치는 주간 70.1%와 야간 91.0%, ± 1 단계 이내는 주간 91.9%와 야간 100%이다. 확산평가가 사용하는 안정도 분류에서 두 탑은 사실상 동일한 등급을 산출한다.

관측요소 수준의 결과에는 두 가지 성질이 함께 나타난다. 첫째, 기기 바닥선을 쓰는 요소의 적합률 다수(풍속 67 m 97.7%, 온도 67 m 96.4%)가 식(3)의 기대치인 약 91%를 넘는다. 이는 두 탑의 실제 기기 차이가 허용공차를 가득 채우는 경우보다 작음을 시사한다. 반면 임계에 미달한 27 m 풍향(82.3%)과 10 m 순간 풍향(38.5%)은 이 기대치보다 낮아, 기기 요

인만으로는 설명되지 않는 성분이 있음을 보여준다. 둘째, 판정은 임계의 세부 선택에 대체로 안정적이다. 적합률 임계를 $\pm 5\%$ p, 회귀 기울기 허용폭을 ± 0.05 , 결정계수 임계를 ± 0.02 (결정계수는 상한이 1이므로 폭을 좁게 두었다) 변화시켰을 때 Table 6의 판정이 달라지는 항목은 27 m 풍속의 결정계수(0.940)와 27 m 온도의 적합률(92.0%) 두 건이고, 둘 다 위에서 값과 사유를 함께 밝힌 항목이다. 나머지 항목은 임계를 어느 방향으로 옮겨도 판정이 유지된다.

3.2 결합빈도분포(JFD) 수준

두 탑의 6월 JFD ($n = 4,320/4,320$)에 대한 관측 PSS와 판정선을 Table 7과 Fig. 6에 보인다. 세 고도 모두 관측 겹침(67 m 0.814, 27 m 0.806, 10 m 0.709)이 전·편향 시나리오(S2)의 하위 5% 판정선(0.610, 0.522, 0.138) 이상이므로, 두 JFD의 차이는 허용 기기 오차 범위 이내이다. 동시에 관측 PSS는 순열 영

Table 7. Observed PSS of the two-tower JFDs and Monte Carlo acceptance criteria (June 2026, $n = 4,320$ pairs; $N = 200,000$ Monte Carlo trials). S1: all-random instrument error; S2: all-systematic instrument error (acceptance line = 5th percentile); permutation: label-reassignment null distribution (descriptive).

Height	Observed PSS	S1 5th pct	S2 5th pct / median	Permutation 5th pct	Gap from S1
67 m	0.814	0.826	0.610 / 0.757	0.846	0.011
27 m	0.806	0.826	0.522 / 0.727	0.841	0.019
10 m	0.709	0.859	0.138 / 0.501	0.865	0.150

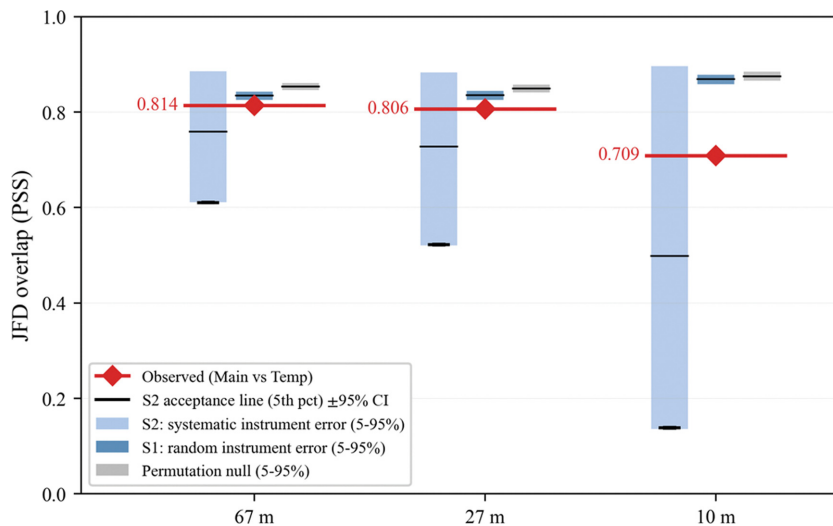


Fig. 6. Observed PSS of the two-tower joint frequency distributions (JFDs) at three heights, compared with Monte Carlo acceptance criteria derived by propagating allowable instrument errors (JCGM 101, $N = 200,000$): all-random (S1) and all-systematic (S2) scenarios, and the permutation null distribution (descriptive). Boxes span the 5th to 95th percentiles of each Monte Carlo distribution and horizontal bars mark the medians. Black markers give the acceptance line, the 5th percentile of S2, with its bootstrap 95% confidence interval; the interval is narrower than 0.002 and therefore smaller than the marker.

분포의 하위 5% (0.846, 0.841, 0.865)보다 낮아 두 JFD는 통계적으로는 구별된다. 관측값은 세 고도 모두 전-무작위 시나리오(S1)의 하한보다 낮고 S2 중앙값보다 높다. 즉 세 고도가 같은 판정 구조를 공유하며, 고도 간 차이는 범주가 아니라 S1(무작위 잡음 수준)과의 간격으로 나타난다. 그 간격은 67 m 0.011, 27 m 0.019로 무작위 잡음 수준에 근접하고, 10 m는 0.150으로 기기 무작위 오차를 뚜렷이 넘는 공간 성분이 존재한다. 이 간격을 기기 오차가 아니라 공간 성분으로 귀속하는 근거는 관측요소 수준(3.1절)에 있다. 규격 이내의 기기 편향도 관측 PSS를 S1 하한 밑으로 낮출 수 있으나, JFD를 구성하는 관측요소의 평균 오프셋이 허용 편향 규격에 크게 못 미치는 것으로 실측되어(풍속 $\leq 0.10 \text{ m s}^{-1}$, 풍향 -0.8° , 기온차 산

출용 온도 67 m와 $10 \text{ m} \leq 0.05^\circ\text{C}$) 그러한 편향의 여지가 배제되기 때문이다. 한편 10 m의 S2 포락선은 저풍속 환경에서 $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ 편향이 정온 경계를 대량으로 넘나들어 매우 넓으므로(하위 5% 0.138), 10 m의 판정 통과는 변별력이 약하며 의미 있는 진술은 S1 초과이면서 S2 이내라는 위치이다. 판정선 자체의 수치적 안정성도 확인된다. 판정선의 부트스트랩 95% 신뢰구간은 몬테카를로 표본을 1,000회 재표집하여 각 재표집의 5백분위수를 구한 분포의 2.5백분위수와 97.5백분위수로, 67 m [0.610, 0.611], 27 m [0.521, 0.523], 10 m [0.137, 0.139]이다. 세 고도 모두 폭이 0.002 이내이고 관측 PSS와 겹치지 않으므로, 이 반복 횟수에서 판정은 몬테카를로 표본의 우연에 좌우되지 않는다.

JFD의 구조를 보면(Fig. 7), 67 m와 27 m는 본탑과

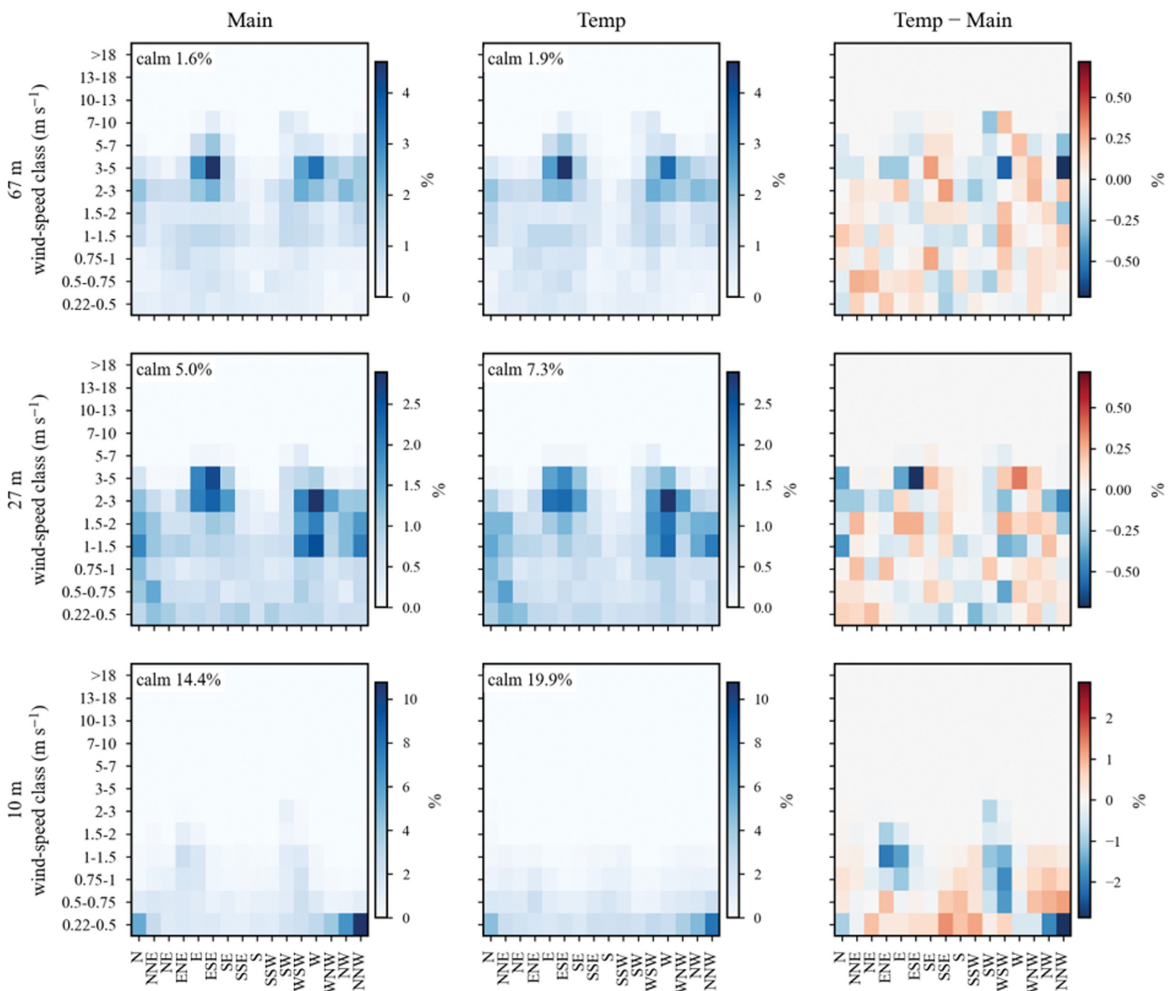


Fig. 7. JFDs (stability-integrated wind-speed class $\times$ sector, %) of the main (left) and temporary (center) towers and their difference (right; Temp – Main) at 67, 27, and 10 m, June 2026. Calm fractions are annotated in the Main and Temp panels.

임시탐의 분포 형상이 사실상 같고 차이 패널의 극값도 $\pm 0.72\%p$ 에 그친다. 10 m는 차이 극값이 $\pm 2.87\%p$ 로 커진다. 임시탐은 전반적 풍속 저하로 정온이 $5.6\%p$ 많고, 최저 풍속계급($0.22\sim 0.5 \text{ m s}^{-1}$) 내부에서는 북서군이 줄고(NNW -2.87 , NW $-1.85\%p$) 남동군이 늘는(SSE $+1.32$, SSW $+1.13\%p$) 방위 재배치가 나타난다. 주변분포별 PSS는 10 m에서 방위 0.852, 풍속 0.909로, 전체 PSS 하락(0.709)의 원인이 방위와 풍속 차원임을 보인다(안정도 차원은 두 탐 각자의 StDT로 전 고도 공통이며 주변분포 PSS 0.970).

표본 크기를 맞춘 대조로, 두 탐의 짝수일 자료 간 PSS는 같은 탐의 짝/홀수일 분할 PSS보다 67 m에서 0.772 대 0.591, 27 m에서 0.758 대 0.620으로 높다. 같은 날의 다른 탐이 다른 날의 같은 탐보다 유사하다. 10 m는 0.684 대 0.760으로 역전되어 공간 차이가 표본 잡음을 초과하며, 위 판정 구조와 일관된다.

4. 논 의

4.1 판정 체계의 구성 원리

본 절차의 모든 요소는 기존 규제와 표준에서 왔다. 바닥선의 기기 성분은 WMO 운영 측정 불확도와 측정 불확도 표현 지침의 합성 법칙, 대표성 성분은 관측환경등급이 정한 불확실도, 결합빈도분포 판정선은 규격 허용 오차의 몬테카를로 전파, 판정 틀은 적합성 판정 지침에서 가져왔다. 새로운 기준을 자체 개발하지 않고 기존 표준을 조합해 공백을 메웠으므로, 규제 환경에서 받아들여지기 쉬울 것으로 기대된다. 절차를 다른 부지로 옮길 때에는 그 부지 기기의 규격에서 요소별 허용공차를 취해 식(2)와 식(4)로 바닥선을 다시 구성하면 된다. 식(3)의 포함확률은 허용공차의 크기에 의존하지 않으므로 적합률 임계는 그대로 쓸 수 있고, 바닥선의 값만 부지마다 달라진다.

4.2 고도 의존의 물리

판정 결과의 고도 구조는 거칠기 아층 이론과 정합한다. 거칠기 아층 위(67 m와 27 m)에서는 수평 균질성이 회복되어 공간 성분(S1과의 간격 0.011과 0.019)이 무작위 잡음 수준에 접근하고, 캐노피 상면 근처(10 m)에서는 개별 거칠기 요소의 영향이 남아 공간 성분(0.150)이 뚜렷하다(Kaimal and Finnigan, 1994; Giometto et al., 2016). 10 m의 차이가 정온 비율과 최저 풍속계급의 방위 재배치로 나타나는 것도 캐노피 후류의 국지성으로 이해된다. 중요한 것은 전 요소에서 평균 오프셋이 바닥선 이내라는 점으로, 차이는 기기 편향이 아니라 두 지점의 공간 특성이다. 따라서 10 m의 공간 성분이 기기 무작위 오차를 넘더라도, 근지표 관측환경등급이 반영된 합성 바닥선 이

내이고 판정선을 통과하므로 이 부지의 캐노피 조건에서 받아들일 수 있는 수준으로 판단된다.

4.3 한계

첫째, 비교 기간은 1개월(6월)이다. 본 비교는 기상 탐 교체공사에 앞선 사전 분석으로 수행되어 관측 기간이 사업 일정에 종속되었다. 국내 지침의 근거리 비교관측 기간 요건은 충족하나, 연중 대표성을 논하기에는 기간이 짧다. 계절에 따라 엽면적과 안정도 빈도 분포, 난류 구조가 달라지므로 두 지점의 공간 차이도 달라질 수 있으며, 계절이 다른 기간으로의 확장은 별도 확인이 필요하다. 6월은 캐노피 엽량이 연중 최대에 가까운 시기이다. 낙엽수림에서 거칠기길이와 변위높이는 엽면적지수와 함께 계절에 따라 변하고 착엽기에 거칠기 아층의 난류 교환이 달라지므로(Maurer et al., 2013), 이 기간은 캐노피의 영향이 상대적으로 큰 조건의 표본으로 판단된다. 엽량이 적은 시기의 비교는 후속 관측으로 확인할 과제로 남는다. 한편 병행관측 기간의 연장은 두 관측계통의 이중 운영과 공사 일정의 조정을 요구하여 실무에서 장기간 확보가 쉽지 않다. 기후 시계열의 균질화를 목적으로 하는 병행관측(WMO, 2020)이 상정하는 장기 관측과 달리, 교체공사 국면에서는 지침이 정한 최소 기간의 자료로 판정할 수 있는 절차가 요구되며, 본 절차는 이 요구에 대응한다. 둘째, PSS는 확률질량 이동의 거리, 곧 인접한 셀로 옮겨갔는지 멀리 떨어진 셀로 옮겨갔는지를 구분하지 않으므로 유사도를 실체보다 과대 평가하지 않는 지표이다. 셋째, 본 판정은 확산평가에 쓰이는 기상 입력자료(JFD)의 동등성이며, 이로부터 산출되는 상대농도(χ/Q)의 동등성 확인은 본 연구의 범위 밖이다(2.4절). 같은 이유로 JFD로 집계되지 않는 순간값 활용(예: 실시간 풍향 감시)의 대체는 본 판정의 대상이 아니며, 특히 10 m 순간 풍향은 주간 대류 시의 산포(3.1절)를 별도로 고려해야 한다. 넷째, 단일 부지 사례이므로 일반화되는 것은 수치가 아니라 절차이다. 본 연구가 검증한 범위는 하나로 부지에서의 적용 사례이다.

장기 기상관측에서 관측탑과 관측장비의 노후화는 피하기 어려우며, 교체 또는 이전이 필요한 시기는 어느 관측 지점에서든 도래한다. 이때 관측 기록의 연속성을 확보하려면 기존 관측과 새 관측이 같은 대기를 대표하는지를 정량적으로 판정하는 일이 선행되어야 하며, 본 기술노트의 비교는 이를 위한 선행 비교 사례로 볼 수 있다. 이 절차를 일반적 판정 체계로 발전시키기 위해서는 다음 보완이 필요할 것으로 판단된다. 첫째, 이격거리와 지형 조건이 다른 부지의 적용 사례가 필요하다. 본 사례의 15 m 이격은 공간 성분이 가장 작은 조건이므로, 이격이 커지거나 지형이

복잡한 부지에서는 관측환경등급 기반 대표성 불확도가 공간 성분을 충분히 담는지 확인되어야 한다. 둘째, 서로 다른 기종의 장비가 병치되는 일반적 교체 국면에서는 기기 이질성 성분을 바닥선에 추가하는 확장이 필요하다. 셋째, 앞서 기술한 계절 한계와 같은 맥락에서, 계절이 다른 기간의 병행관측으로 판정의 계절 안정성을 확인할 필요가 있다. 이러한 사례가 축적되면 판정선의 부지 의존성이 정량화되어, 절차를 관측탑 교체 국면의 표준 절차로 정식화하는 근거가 될 것으로 기대된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 원자력시설 부지에 병치된 두 기상탑의 상호 대표성을 정량 판정하기 위해, 기존 규제와 표준의 요소만으로 2수준 판정 절차를 구성하여 하나로 부지의 한 달 동시 관측에 적용하였다. 관측요소 수준에서는 기기 불확도와 관측환경등급 기반 대표성 불확도를 합성한 관측 불확도 바닥선을 세우고 네 축으로 진단하였으며, 활용 입력 수준에서는 확산평가의 기상 입력인 JFD를 PSS로 비교하고 허용 기기 오차의 몬테카를로 전파로 만든 판정선에 대조하였다.

두 수준의 판정은 일관되게 임시기상탑의 대표성을 지지하였다. 67 m와 27 m의 바람과 온도는 강하게 일치하였고, 근지표 10 m의 온도와 풍속도 대표성 불확도를 반영한 바닥선 이내에서 일치하였으며, 안정도는 두 탑이 사실상 동일한 등급을 산출하였다. 전 요소에서 평균 오프셋이 바닥선 이내여서 기기 편향은 확인되지 않았고, 결합빈도분포의 검침도 세 고도 모두 허용 기기 오차 판정선 이상이였다. 두 탑의 차이는 기기 오차가 아니라 캐노피 부지의 자연적 공간 변동으로 특징되며, 그 크기는 근지표로 갈수록 커져 거칠기 아층 이론과 정합하였다.

종합하면, 2026년 6월 조건에서 확산평가의 기상 입력 수준까지 확인한 범위에서 임시기상탑은 원자력시설 부지의 대표 기상관측에서 본기상탑과 동등한 대표성을 가지며 본기상탑을 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 근지표 10 m 순간 풍향의 산포는 캐노피 미세환경에 의한 공간 특성으로 보이며, 기기 문제로 보기는 어렵다. 본 연구가 검증한 범위는 하나로 부지에서의 적용 사례이며, 절차를 다른 부지에 적용할 때에는 그 부지의 기기 허용공차와 관측환경등급으로 바닥선과 판정선을 다시 구성하여야 한다. 관측 기간이 1개월이므로 기기 이질성의 반영과 계절 안정성의 확인이 남아 있으나, 판정에 쓰인 요소가 모두 기존 규제와 표준에서 왔으므로 이 절차는 기상탑 교체가 필요한 다른 부지에서도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국원자력연구원 기관고유사업(과제번호 522610-26)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- ANSI/ANS, 1984: *Standard for Determining Meteorological Information at Nuclear Power Sites*. ANSI/ANS-2.5-1984, American Nuclear Society.
- Barbieri, L., and Coauthors, 2019: Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign. *Sensors*, **19**, 2179, doi:10.3390/s19092179.
- Efron, B., and R. J. Tibshirani, 1993: *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall, 436 pp.
- Giometto, M. G., A. Christen, C. Meneveau, J. Fang, M. Krafczyk, and M. B. Parlange, 2016: Spatial characteristics of roughness sublayer mean flow and turbulence over a realistic urban surface. *Bound.-Layer Meteor.*, **160**, 425-452, doi:10.1007/s10546-016-0157-6.
- Hwang, S.-E., Y.-T. Lee, S.-R. In, and K.-H. Kim, 2025: Assessing the meteorological utility of precipitation detectors through comparative observation analysis. *Atmosphere*, **35**, 577-584, doi:10.14191/Atmos.2025.35.4.577.
- Inman, H. F., and E. L. Bradley, 1989: The overlapping coefficient as a measure of agreement between probability distributions and point estimation of the overlap of two normal densities. *Commun. Stat. Theory Methods*, **18**, 3851-3874, doi:10.1080/03610928908830127.
- ISO, 2014: *Meteorology — Siting Classifications for Surface Observing Stations on Land*. International Organization for Standardization, ISO 19289:2014 (Adopted in Korea as KS I ISO 19289).
- JCGM, 2008a: *Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008.
- _____, 2008b: *Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the GUM: Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method*. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101:2008.
- _____, 2012: *Evaluation of Measurement Data — The Role of Measurement Uncertainty in Conformity Assessment*. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 106:2012.

- KAERI, 2026: *Meteorological Observation Procedure*. Korea Atomic Energy Research Institute, internal procedure Rev. 5 (in Korean).
- Kaimal, J. C., and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, 289 pp.
- Kang, J.-E., and J.-J. Kim, 2020: Assessment of observation environments of automated synoptic observing systems using GIS and WMO meteorological observation guidelines. *Korean J. Remote Sens.*, **36**, 693-706, doi:10.7780/kjrs.2020.36.5.1.4.
- KINS, 2024: *Investigation and Evaluation of Meteorological and Atmospheric Dispersion Characteristics of Reactor Facility Sites*. KINS/RG-N01.03 Rev. 3, Korea Institute of Nuclear Safety, [Available online at <https://www.kins.re.kr/nussam/>] (in Korean).
- KMA, 2026: *Guidelines on Surface Meteorological Observation*. Korea Meteorological Administration, [Available online at <https://data.kma.go.kr/data/publication/publicationGIList.do>] (in Korean).
- Knoop, S., F. C. Bosveld, M. J. de Haij, and A. Apituley, 2021: A 2-year intercomparison of continuous-wave focusing wind lidar and tall mast wind measurements at Cabauw. *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 2219-2235, doi:10.5194/amt-14-2219-2021.
- Maurer, K. D., B. S. Hardiman, C. S. Vogel, and G. Bohrer, 2013: Canopy-structure effects on surface roughness parameters: Observations in a Great Lakes mixed-deciduous forest. *Agric. Forest Meteorol.*, **177**, 24-34, doi:10.1016/j.agrformet.2013.04.002.
- Monin, A. S., and A. M. Obukhov, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst.*, **24**, 163-187.
- Park, H., 2021: Comparison of temperatures and spatial resolutions between urban sensors and national weather observations (ASOS, AWS) for urban heat island intensity analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **21**, 39-48, doi:10.9798/KOSHAM.2021.21.3.39.
- Park, K., B.-I. Min, S. Kim, J. Kim, and K.-S. Suh, 2020: Quality control and management for the onsite meteorological data at nuclear facilities. *J. Radiat. Ind.*, **14**, 287-298.
- Perkins, S. E., A. J. Pitman, N. J. Holbrook, and J. McAneney, 2007: Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *J. Climate*, **20**, 4356-4376, doi:10.1175/JCLI4253.1.
- Steinfeld, G., M. O. Letzel, S. Raasch, M. Kanda, and A. Inagaki, 2007: Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance problem with eddy-covariance fluxes: Results of a large-eddy simulation study. *Bound.-Layer Meteorol.*, **123**, 77-98, doi:10.1007/s10546-006-9133-x.
- U.S. NRC, 1977: *Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water-Cooled Reactors*. Regulatory Guide 1.111, Rev. 1.
- _____, 2007: *Meteorological Monitoring Programs for Nuclear Power Plants*. Regulatory Guide 1.23, Rev. 1, ML070350028.
- WMO, 2020: *Guidelines on Homogenization*. World Meteorological Organization, WMO-No. 1245, 63 pp.
- _____, 2024: *Guide to Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 8 (CIMO Guide), Vol. I — Measurement of Meteorological Variables, 2024 ed., World Meteorological Organization, 601 pp., doi:10.59327/WMO/CIMO/1.

Appendix

기호

a — 관측요소별 기기 허용공차. 규격이 $\pm a$ 형태로 정하는 값이며, 검정을 통과한 기기의 오차는 $-a$ 부터 $+a$ 까지의 구간에 있다[2.1절, 식(1)].

e — 한 탑의 기기 오차. 구간 안의 분포를 달리 알 수 없으므로 직사각형 밀도 $g(e) = 1/(2a)$ 를 부여한다[식(1)].

d — 두 탑의 차이 $d = e_1 - e_2$. 두 오차가 서로 독립이므로 밀도는 폭이 두 배인 삼각형이 된다(2.3절).

F₁ — 기기 바닥선. 같은 사양 센서 두 대의 차이에 허용되는 크기로 $F_1 = \sqrt{2} a$ 이다[식(2)]. 기기 오차가 허용공차를 채우는 경우에도 두 탑 차이의 약 91%가 이 안에 든다[식(3)].

F₂ — 대표성 불확도. 두 지점이 물리적으로 다른 위치라는 데서 오는 성분으로, 관측환경등급이 고도별로 제시하는 추가 불확도에서 부여한다(2.3절).

F — 관측 불확도 바닥선. 두 성분을 제곱합 제곱근으로 합성한 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ 이며, 요소별 값은 Table 3에 있다[식(4)].

약어

JFD (joint frequency distribution) — 결합빈도분포. 안정도, 풍속 계급, 풍향 방위의 결합빈도로, 대기확산평가의 기상 입력이 된다(2.4절, Table 5).

PSS (Perkins skill score) — 두 확률분포가 겹치는 정도를 재는 지표. 두 분포의 각 칸에서 작은 쪽 확률을 모두 더한 $PSS = \sum \min(p, q)$ 이며, 1이면 완전 일치이다(2.4절).

StDT — 연직 기온차에 의한 대기안정도 등급. 67 m와 10 m의 기온차를 기온감률 $\Delta T/\Delta z$ 로 환산해 7등급으로 분류한다(2.1절, Table 2).

S1, S2 — 몬테카를로 판정선을 만드는 두 오차 구조. S1은 관측 시각마다 오차를 독립으로 추출하는 전-무작위, S2는 탑마다 한 개의 편향을 뽑아 전 관측에 고정 적용하는 전-편향이다(2.4절).

X/Q — 상대농도. 확산평가가 산출하는 단위 방출률당 공기 중 농도이다(2.4절).

MAE (mean absolute error) — 평균절대차. 풍향의 각도차 크기를 요약할 때 쓴다(3.1절, Table 6).