Journal of Radiation Industry 14(4) : 287~298(2020)

원자력시설 부지기상자료의 품질관리

박기현[1] · 민병일[1] · 김소라[1] · 김지윤[1] · 서경석[1,*]

[1]한국원자력연구원 환경안전평가연구부

Quality Control and Management for the Onsite Meteorological Data at Nuclear Facilities

Kihyun Park[1], Byung-Il Min[1], Sora Kim[1], Jiyoon Kim[1] and Kyung-Suk Suh[1,*]

[1]*Environmental Safety Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - In Korea, basic regulation rules for onsite meteorological data measurements and interpretation at nuclear facilities are enforced by means of the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) notifications and following regulation standards and guides of the Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), which are based on the Regulatory Guides of the United States Nuclear Regulatory Commission (U. S. NRC). Nevertheless of its importance, not yet there are any specified clause on quality control and management for onsite meteorological data in the NSSC's notifications, whereas we already have relatively detailed ones on meteorological instruments. In this study, we used long-term meteorological data which were collected at the Kori nuclear power plant. Quality control for these data were performed utilizing related notifications and detailed guidelines, which were established by the Korea Meteorological Administration (KMA), following the Weather Observation Standardization Act.

Key words : Quality control, Quality management, Onsite meteorological data, Regulation standard, Regulation guide

서 론

원자로시설의 부지적합성 평가와 방사선영향평가를 위해서 원자로시설 부지에서는 주요 기상요소를 관측하고 기록·분석하고 있다. 우리나라에서는 미국원자력규제위원회(United States Nuclear Regulatory Commission; U. S. NRC)의 규제지침(Regulatory Guide; RG) 1.4, 4.2, 1.111, 1.145, 1.76, 1.23, 1.27 등(U. S. NRC 1974, 1976, 1977, 1983, 2007a, 2007b, 2015)을 참고하여 제정된 원자력안전위원회(Nuclear Safety and Security Commission; NSSC)의 고시(원자력안전위원회 2017)와 이를 기준으로 작성된 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety; KINS)의 규제기준과 규제지침(한국원자력안전기술원 2015a, 2015b)에 따라 원자로시설 부지기상자료를 관측·해석하고 있다.

부지기상자료는 정부 관련부처의 고시 및 KINS의 규제기준과 규제지침에 따라 관측·수집되어야 하며 내용에 따라 Table 1에 정리한 것처럼 1) 관측, 2) 자료의 기록 및 품질관리, 3) 자료의 이용에 관련한 사항으로 나누어 볼 수 있다. U. S. NRC의 RG 1.23(U. S. NRC 2007b)과 우리나라의 원자력안전위원회고시(원자력안전위원회 2017) 및 KINS의 규제기준과 규제지침(한국원자력안전기술원 2015a, 2015b)에 관측장비에 관련된 사항은 전반적으로 상세하게 규정되

* Corresponding author: Kyung-Suk Suh, Tel. +82-42-868-4788, Fax. +82-42-868-8943, E-mail. kssuh@kaeri.re.kr

Table 1. Categories for onsite meteorological data

Category	Contents
Measurement/ Acquisition (method and instrument)	① Meteorological parameters ② Siting of meteorological instruments ③ Instrument accuracy and range ④ Measurement period ⑤ Instrument maintenance and servicing schedules
Data recording (quality control and management)	① Record period, data reduction and compilation ② Quality control (period, criteria, and method) ③ Missing data treatment ④ Outlier treatment ⑤ Qualified data acquisition rate (criteria)
Use of data (statistical criteria and method)	① Monitoring and collection period ② Meteorological parameters for statistics ③ Period (unit), criteria (threshold), and method for statistics

어 있으나 기상관측자료의 품질검사 또는 품질관리 기준에 대한 부분은 상대적으로 명확하게 규정되지 않은 편이다.

따라서 본 연구에서는 원자로시설 부지기상자료의 품질관리 방법과 기준에 대해 고찰하기 위해 고리원전 부지의 기상탑에서 1997년 3월부터 2014년 8월까지 관측·수집된 장기간의 기상자료에 관련 기준이 잘 정비된 기상청고시(기상청 2017, 2018, 2019a, 2019b, 2019c)와 이에 기반한 세부지침(기상청 2016a, 2016b; 기상청 국가기후데이터센터 2017)을 준용하여 기상관측자료의 품질검사를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 부지기상자료 관련 규정

본 연구에서는 주로 자료의 기록(품질관리) 측면에서 관련 규정을 검토하였다.

1.1. U. S. NRC 규정

U. S. NRC의 규제지침(RG series)은 매년 갱신되는 미국연방규정집(Code of Federal Regulations; CFR)의 제10권 에너지(Title 10 “Energy” 또는 10 CFR)에 의거하여 U. S. NRC에서 작성하며 기술적인 세부사항에 대해서 NUREG (NUREG series publications)을 발간하여 보조하고 있다(U. S. NRC 2007b). U. S. NRC의 RG 1.4 (U. S. NRC 1974)와 RG 1.111, 1.145 (U. S. NRC 1977, 1983)는 RG 1.23 (U. S. NRC 1972, 2007b)에 따라 관측·수집된 부지기상자료를 입력기상자료로 사용하는 부지의 대기확산평가에 관련된 규제지침이며 실질적인 부지기상자료의 관측과 수집에 대한 세부사항은 RG 1.23에 규정되어 있다. RG 1.23은 10 CFR 및 미국연방환경정책법(National Environmental Policy Act of 1969; NEPA)을 따르며 2007년 개정된 RG 1.23 Revision 1은 미국표준협회/미국원자력학회(American National Standards Institute/American Nuclear Society; ANSI/ANS)의 해당 표준인 ANSI/ANS-3.11-2005 (ANSI/ANS 2005)를 기준(표준)으로 제정되었다(U. S. NRC 2007b). 또한, 규제기관의 이행검토를 위한 RG 1.23의 규정을 뒷받침하는 세부사항은 NUREG-0800 (기존 NUREG-75/087)의 Ch. 2.3.3 (U. S. NRC 1981, 2007c)에 기술되어 있으며 컴퓨터 프로그램에 입력하기 위한 부지기상자료의 품질관리는 NUREG-0917 (U. S. NRC 1982)에 기술된 내용을 따르도록 권고되어 있다.

U. S. NRC의 RG 1.23과 이를 뒷받침하는 ANSI/ANS-3.11-2005, NUREG-0800에는 일부 구체적인 기준만이 제시되어 있으며 이외의 상세한 기준과 방법은 미국에너지부(U. S. Department of Energy; U. S. DOE)의 기술보고서(U. S. DOE 1984)와 미국환경보호청(U. S. Environmental Protection Agency; U. S. EPA)의 관측 지침서(U. S. EPA 2000)에 기술되어 있고 품질보증(Quality Assurance; QA)에 대해서는 QA 핸드북 4권(U. S. EPA 1995, 2008)에 정리되어 있다. 품질관리에 대해서 NUREG-0800의 Ch. 2.3.3에서 과거에는 참고문헌 형태로만 언급되다가 2007년 Revision 3 (U. S. NRC 2007c)에서는 권고형태로 제시되었고 2018년 Draft Revision 4 (U. S. NRC 2018)에서부터는 직접 명시한 강제조항 형태가 제안되었다.

따라서 본 연구에서는 U. S. EPA의 기술보고서(U. S. EPA 1995, 2000, 2008)을 참고하여 부지기상자료의 관측 및 수집에 직접 관련된 RG 1.23 (U. S. NRC 1972, 1980, 1986, 2006, 2007b)을 ANSI/ANS 표준(ANSI/ANS 1984, 2005, 2015) 및 NUREG-0800 (U. S. NRC 1981, 2007c, 2018), NUREG-0917 (U. S. NRC 1982)과 함께 검토하였다.

1.2. 우리나라에서 적용되는 규정

부지기상자료는 정부 관련부처의 고시(과학기술처 1983; 과학기술부 2000, 2003; 교육과학기술부 2008, 2009; 원자력안전위원회 2011, 2012, 2014, 2017) 및 KINS의 규제기준과 규제지침(한국원자력안전기술원 2011a, 2011b, 2015a, 2015b)에 따라 관측·수집되어야 하며 관측시기에 따라 적용되는 정부 고시를 Table 2에 정리하였다. 우리나라 정부 고시에 부지기상 관측에 대한 구체적인 지침이 제시된 것은 2003년 공표된 과학기술부고시 제2003-11호(과학기술부 2003)부터이며 그 이전에는 U. S. NRC의 규제지침 RG 1.4 (U. S. NRC 1974), RG 1.145 (U. S. NRC 1983)을 준용하였다. 한편,

U. S. NRC의 RG 1.4는 2016년에 RG 1.183과 RG 1.195에 병합되어 폐지되었다(U. S. NRC 2016). 과학기술처고시 제83-5호(과학기술처 1983)가 공표된 1983년 10월 20일 이전에는 U. S. NRC의 규제지침을 따랐을 것으로 판단되나 법제처 국가법령정보센터(법제처 국가법령정보센터 2020)의 데이터베이스에서 확인 가능한(정부에서 공표한 공식적인) 기록은 남아있지 않은 것으로 보인다.

과학기술부고시 제2003-11호가 공표된 이후 가장 최근의 원자력안전위원회고시까지 부지기상 관측에 관한 지침은 고시 제6장 제12조~제15조에 제시되어 있으며 사실상 동일하다(과학기술부 2003; 교육과학기술부 2008, 2009; 원자력안전위원회 2011, 2012, 2014, 2017). 관측하여야 하는 기상요소는 ① 풍향·풍속, ② 기온, ③ 대기안정도, ④ 강수량, ⑤ 습도, ⑥ 혼합고(mixing height)이며 관측기간 중 자료의 수집률은 90% 이상이 되도록 권고하고 있다. 이에 따라 풍향 및 풍속 등의 대한 자료처리는 180회 이상의 순간관측값(매 3초 관측)을 이용하여 10분간 이동평균으로 처리하고 대기안정도를 계산할 때는 기본적으로 기온감률에 의한 방법을 적용하나 경우에 따라 풍향의 표준편차에 의한 방법 등을 적용할 수도 있다. 반면 U. S. NRC의 RG 1.23에서 풍향의 표준편차에 의한 대기안정도 분류기준은 기온감률에 의한 대기안정도 분류가 우선할 뿐만 아니라 RG 1.145와 RG 1.194에의 합치성 문제로 2007년 Revision 1에서부터 제외되었다(U. S. NRC 2007b).

Table 2. Notifications of Korean government for onsite meteorological data

Period	Corresponding notification
Oct. 10 1983~ Jun. 22 2000	Ministry of Science and Technology, No. 83-5
Jun. 23 2000~ Jul. 23 2003	Ministry of Science and Technology, No. 2000-8
Jul. 24 2003~ Apr. 17 2008	Ministry of Science and Technology, No. 2003-11
Apr. 18 2008~ Sep. 22 2009	Ministry of Education, Science and Technology, No. 2008-8
Sep. 23 2009~ Nov. 10 2011	Ministry of Education, Science and Technology, No. 2009-37
Nov. 11 2011~ Jan. 19 2012	Nuclear Safety and Security Commission, No. 2011-19
Jan. 20 2012~ Nov. 21 2014	Nuclear Safety and Security Commission, No. 2012-19
Nov. 22 2014~ Dec. 25 2017	Nuclear Safety and Security Commission, No. 2014-25
Dec. 26 2017~ Present	Nuclear Safety and Security Commission, No. 2017-26

우리나라 정부 고시(과학기술부 2003; 교육과학기술부 2008, 2009; 원자력안전위원회 2011, 2012, 2014, 2017)에서는 매 3초 순간관측값의 10분간 평균값을 사용하도록 권고하고 있으며 U. S. NRC의 규제지침(U. S. NRC 2007b)에서는 이와 약간 다르게 매 5초 이내의 연속적인 순간관측값의 15분간 평균값을 사용하도록 권고하고 있고 이는 미국과 우리나라의 기상관측 기준이 다르기 때문이다.

풍향, 풍속, 대기안정도의 연간 결합빈도분포(Annual Joint Frequency Distribution)을 구할 때의 풍속등급(구간)은 부지의 풍속발생빈도별 도수분포량이 균등하게 배분되도록 분류하는 것을 원칙으로 하고 안전성 우선 측면에서 저풍속 구간을 세분화하여야 한다고 규정되어 있다(한국원자력안전기술원 2011b, 2015b; U. S. NRC 2007c, 2018). 따라서 실제 부지별로 연간 기상자료 통계 결과에 따라 풍속등급의 분류가 달라질 수 있다.

1.3. 고리원전 부지기상자료 검토

본 연구에서는 고리원전 부지기상자료를 적용사례로 하여 부지기상자료 품질관리의 방법, 기준 및 필요성에 대해 고찰하였다. 본 연구진은 한국수력원자력으로부터 고리원전 부지의 기상탑에서 1997년 3월 22일부터 2014년 8월 31일까지의 기간 동안에 관측·수집된 기상자료를 제공받아 본 연구에 이용하였다. 이 자료는 지상의 기온, 상대습도, 강수량과 지상 10 m와 58 m 높이에서 각각 측정된 풍향, 풍속, 최대풍속, 기온 및 이들로부터 구한 대기안정도 관련 자료로 정부 고시에 제시된 기상요소 중 혼합고를 제외한 나머지 자료이다. 관측(기록)시간별로 총 14종이 한 세트(set)를 이루며 관측된 11종의 기상요소 및 3종의 대기안정도 자료는 측정위치 및 자료의 연관성에 따라 Table 3과 같이 구분할 수 있다. 여기서 풍향과 풍속은 기본적으로 매 3초 측정값(평균값)의 10분 이동평균값이며, 100 m당 기온감률은 지상 10 m와 58 m 지점의 온도차를 100 m에 해당하는 값으로 환산한 것이다.

Table 2에 제시된 고리원전 부지기상자료의 관측기간에 해당하는 각각의 정부 고시에서는 기상자료를 기록(혹은 측정)하는 시간간격에 대한 명확한 권고가 없다가 2011년에 이르러서야 KINS에서 공표한 경수로형 원전 규제기준 및 규제지침에 "기상자료는 10분 이동평균값을 매 10분 단위로 취득하여야 한다"(한국원자력안전기술원 2011a, 2011b)는 구체적인 지침이 제시되었다. 하지만 "기온, 강수량, 습도에 대한 자료처리는 기상청의 지상기상관측방법에 따른다"(과학기술부 2003; 교육과학기술부 2008, 2009; 원자력안전위원회 2011, 2012, 2014, 2017; 한국원자력안전기술원 2011b, 2015b)는 지침 이외에 기상자료의 품질검사(Quality Control; QC)를 포함한 품질관리(Quality Management; QM)에 대한 구체적인 지침은 없다.

따라서 본 연구에서는 다음과 같이 일반적인 방법으로 고

Table 3. Recorded onsite meteorological parameters at Kori nuclear power plant

Category	Components
Ground measurement	① Temperature (T_g, °C) ② Relative humidity (RH, %) ③ Precipitation (I, mm·day^{-1})
Measurement at 10 m height	① Wind direction (Θ_{10}, degree) ② Wind speed (v_{10}, m·s^{-1}) ③ Maximum wind speed ($v_{max,10}$, m·s^{-1}) ④ Temperature (T_{10}, °C)
Measurement at 58 m height	① Wind direction (Θ_{58}, degree) ② Wind speed (v_{58}, m·s^{-1}) ③ Maximum wind speed ($v_{max,58}$, m·s^{-1}) ④ Temperature (T_{58}, °C)
Atmospheric stability related (calculated)	① Temperature change with height ($\Delta T/\Delta z$, °C/100 m) ② Standard deviation of horizontal wind direction (fluctuation) at 10 m height ($\sigma\Theta_{10}$, degree) ③ Standard deviation of horizontal wind direction (fluctuation) at 58 m height ($\sigma\Theta_{58}$, degree)

리원전 부지기상자료를 검토하였다. 1) 우선 자료 샘플링의 균질성을 확인하기 위해 관측 시간대별 취득 자료의 분포를 확인하고, 2) 부지기상자료의 시계열 그래프를 도시하여 전반적인 패턴을 확인한 후, 3) 자료의 전체 분포를 도시하여 누년간의 누적 분포를 확인하고, 4) 각 연도별로 분포를 도시하여 연도별 차이가 나타나는지 확인하여 정성적으로 부지기상자료의 전반적인 현황을 검토하였다. 그래프에서 너무 작은 기간의 시계열은 보이지 않기 때문에 일, 월, 연도 단위로 그래프의 전체 시간규모를 다르게 하여 확인할 필요가 있으며 반드시 비슷한 시점의 다른 기상요소들을 포함한 자료의 값 자체를(표로) 함께 비교하여 확인해야 한다.

2. 기상관측자료의 품질검사

앞서 언급한 것과 같이, 원자력시설 부지의 장기기상자료 분석을 위해서는 기상관측자료에 대한 품질검사가 우선 수행되어야 한다. 하지만, 현재까지는 원자력시설의 부지기상관측 자료에 대한 품질검사 또는 품질관리 기준이 해당하는 (또는 가장 최신의) 정부 고시와 KINS의 규제기준 및 규제지침에 명시되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 기상관측자료에 대한 품질검사를 관련 기준이 잘 정비된 기상청고시(기상청 2009a, 2009b, 2012, 2014, 2016a, 2016b, 2017, 2018, 2019a, 2019b, 2019c)와 이에 기반한 세부지침(기상청 2016a, 2016b; 기상청 국가기후데이터센터 2014, 2017)을 검토한 후 이를 준용하여 수행하였다.

2.1. 기상청 및 WMO 기준

기상청에서는 ISO 9001을 준용하는 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)의 기준(WCP 1986; WMO 2010, 2011)에 따라 기상관측자료의 품질관리를 수행하고 있다. 품질검사는 기상관측자료의 적절성, 논리성 등과 관련된 오류를 제거하기 위하여 기상관측자료의 이상 여부를 검토하여 양질의 자료를 선별하는 과정이다(기상청 2016a).

기상청에서 준용하고 있는 지침서 WMO-No. 488 (WMO 2010)에서는 자동관측소(Automatic Weather Stations; AWS)에서 측정된 자료의 실시간(real-time) 품질검사를 원시자료(raw data)와 가공자료(processed data)의 경우로 구분하여 제시하고 있다. 원시자료는 관측장비에서 직접 측정한 자료(즉, 샘플링된 자료)이며 가공자료는 원시자료에 어떤 자료처리 과정을 거쳐 얻어진 자료이다.

KINS 규제지침(한국원자력안전기술원 2011b, 2015b)에서 참고하고 있는 기상청고시(자동기상관측장비의 표준규격; 기상청 2009b, 2014, 2019c)의 제9조에(원시자료) 관측센서의 신호 및 자료처리에 대한 표준규격이 제시되어 있고 이 중에서 원자력시설의 부지기상자료에 해당하는 항목은 온도, 습도, 풍향, 풍속 및 강수량이다. 온도와 습도의 경우에는 매 10초 자료(또는 1분 자료), 풍향·풍속에 대해서는 매 0.25초 자료(또는 3초/1분 자료), 강수량에 대해서는 매 1초 자료(또는 1분 자료)가 각각 원시자료에 해당하므로 본 연구에서 활용한 고리원전 부지기상자료는 WMO 기준으로는 모두 가공자료에 해당한다.

WMO-No. 488 (WMO 2010)에서 제시하는 가공자료의 품질검사 과정은 기본검사(basic QC)와 확장검사(extended QC; 또는 추가검사)로 이루어지며 1) 타당성검사, 2) 시간일치성검사(단계검사 및 지속성검사), 3) 내적일치성검사의 순서로 진행된다.(원시자료에 대해서는 기본검사 중 일부만을 수행한다).

또한, WMO-No. 488 (WMO 2010)에서는 지역별로 기후에 따라 기후요소별 한계값과 범위를 조정할 수 있다고 명시하

Table 4. Applicable quality control methods for onsite meteorological data

Method	Component	Dimension	Time scale
Plausible value check	Temperature, relative humidity, wind direction, wind speed, precipitation	Point of single site	Minutely
Climatological outlier check			
Step test	Temperature, relative humidity, wind speed	Time series of single site	
Persistence test			
Internal consistency check	Temperature, relative humidity, wind direction, wind speed, precipitation	several components of single site	
Completeness test	Temperature, precipitation	Point of single site	Daily
Daily temperature difference range check	Temperature		
Duplicate check	Temperature, relative humidity, wind direction, wind speed, precipitation		
Identical value-frequent-value check	Precipitation		
Spatial corroboration check on precipitation		Space of several sites	
Spatial corroboration check on temperature	Temperature		

고 있으며 따라서 본 연구에서는 "기상청 데이터 종합 품질관리 지침"(기상청 2016a)과 "기후통계지침"(기상청 국가기후데이터센터 2017)을 기준으로 부지기상자료의 품질검사를 수행하였다.

기상관측자료의 품질검사 방법에는 결측검사(absence check), 범위검사(range check), 일치성검사(consistency check) 등이 있다.

WMO에서는 지점과 품질검사 방법에 따라 알고리즘을 분류한다(기상청 2016a). 고리원전 부지기상자료의 경우에는 한 지점의 포인트값, 시계열값 및 여러 변수 간 논리적 관계값에 대한 품질검사를 고려해 볼 수 있다. 현재 기상청에서 현업에 적용하고 있는 품질검사 알고리즘은 32가지이며, 그 중에서 원자력시설의 부지기상 관측자료에 적용할 수 있는 검사를 Table 4에 정리하였다.

2.2. 고리원전 부지기상자료에 적용한 방법

기상관측자료의 품질검사에 필요한 범위나 조건을 품질검사 기준값이라고 하며, 기상청에서는 과거 기후자료를 통한 통계값, 최대한의 물리적 한계값, 내적 불일치가 일어나는 조건 등으로 기준값을 설정하고 품질검사에 적용하여 관측자료의 정상과 오류를 판별하고 있다(기상청 2016a). 기상청 국가기후자료품질관리시스템에서 운영하는 품질관리 알고리즘에 설정하는 기준값은 최근 10년간의 자료를 통계분석하여 사용하고 있다(기상청 2016a). 고리원전 부지기상자료의 경우에는 품질관리가 된 과거의 장기기상자료가 확보되어 있지 않고, 직접적으로 다른 관측소들과 비교할 수 없기 때문에 통계자료에 의한 품질검사나 여러 지점의 데이터를 활용한 공간일치성 검사(Durre *et al*. 2010) 등을 수행하기는 어렵다(기온이나 강수량에 대해서는 고리원전 인근의 방재기상관측(AWS) 자료를 포함하면 참고삼아 여러 지점 관측값을 비교할 수는 있다). 따라서 본 연구에서는 한 지점의 분 단위 자료에 적용되는(시계열 자료) 품질검사 방법을 위주로 1) 물리한계검사(plausible value check 또는 tolerance test), 2) 기후범위검사(climatological outlier check), 3) 단계검사(time consistency check 중 step test), 4) 지속성검사(time consistency check 중 persistence test), 5) 내적일치성검사(internal consistency check)의 순서로 부지기상자료의 품질검사를 진행하였다.

2.2.1. 물리한계검사

관측장비가 허용하는 관측 최대값과 최소값 범위에 대한 오류 여부를 검사하는 것으로 물리한계 범위 내에 있으면 정상이고 그 외에는 오류로 판정한다(기상청 2016a; WMO 2010). 지상관측의 기준 높이는 기온과 습도는 지상 1.5 m이고 바람자료(풍향, 풍속)는 지상 10 m이다(기상청 2016b).

2.2.2. 기후범위검사

유사한 환경(일정한 지점과 일정 기간)에서 긴 시간(100개 이상) 관측된 자료는 일정한 평균을 중심으로 정규분포를 보이므로 해당 지점에 대해 과거 자료의 통계분석을 통해 정규

Table 5. Possible limits of a maximum allowed variability for meteorological parameters

Meteorological parameter	Measurement period (minutes)			
	1 or 5	10 or 15	30	60
Temperature	3°C	5°C	6°C	
Relative humidity	10%	20%	30%	60%
Wind speed	$10\ m \cdot s^{-1}$			

분포에 해당하는 평균과 표준편차를 산출하여 범위를 벗어나는 자료는 의심자료(suspect)로 판정한다. 기후범위는 지역에 따라 차이가 나며, 이상기후가 발생하기도 하므로 아주 엄격하게 적용하기는 어렵다. 따라서 2016년 이전까지만 적용된 과거의 기후통계지침(기상청 국가기후데이터센터 2014)에서 제시한 자동기상관측 자료의 요소별 관측값 범위를 기준으로 참고용으로만 확인하였다.

2.2.3. 단계검사

한 지점의 시계열 자료에 대한 시간변동량을 검사하여 바로 이전 값과 현재 값의 변동량이 Table 5에 주어진 최대허용변동량(maximum allowed variability)의 범위(기상청 2019a)를 벗어나면 오류로 판정하고 범위 내에 있으면 정상으로 판정한다. Fig. 3에 도시된 오류들은 대부분 단계검사로 제거할 수 있다.

2.2.4. 지속성검사

한 지점의 시계열 자료의 특정기간 동안 누적변동량이 최소변동량 이내로 지속되는지 여부를 검사하는 것으로 바로 이전 값과 현재 값의 변동량이 주어진 최소허용변동량(minimum allowed variability)보다 작으면 오류로 판정하고 그보다 크면 정상으로 판정한다. 지상관측에서 기온의 경우에는 180분(3시간), 풍향과 풍속의 경우에는 240분(4시간) 이상 변동량이 0이면 오류로 판정한다(기상청 2019a). Fig. 4의 예시와 같은 오류는 지속성검사로 제거할 수 있다. 참고로 WMO-No. 488 (WMO 2010)에서는 60분간 최소허용변동량을 각각 기온(0.1°C), 95% 이하의 상대습도(1%), 풍향(10°), 풍속(2분 평균, $0.5\ m \cdot s^{-1}$; 10분 평균, $0.1\ m \cdot s^{-1}$) 등으로 제시하고 있다(의심값의 기준으로 사용할 수 있다).

2.2.5. 내적일치성검사

기후요소 간의 물리적 불일치, 통계적 기준의 불일치 등을 판별하는 방법으로 기후요소 간의 관계에 대하여 기상현상에서 벌어질 수 없는 상황을 제한조건으로 하는 검사이다. 서로 상관관계가 있는 두 요소를 함께 검사하여 판정하며 자료 간의 논리적 불일치를 판별해낸다. 기상자료를 통계처리할 때에도 활용된다(정온 조건의 경우 풍향의 통계에서 제외 등).

부지기상자료에서 누락된 자료가 많아 연속적인 시계열값이 확보되지 않는 경우에는 단계검사와 지속성검사가 적용되기 어렵고 이런 경우에는 물리적으로 합당한 값인지 별도로 판별할 수 밖에 없다. 중복성검사(duplicate check)는 위의 검사들과 독립적으로 수행이 가능하다.

결과 및 고찰

1. 물리한계검사

물리한계검사는 자료마다 독립적으로 수행할 수 있으므로 관측 시기나 기간에 상관없이 전 기간의 자료를 한꺼번에 검사하였다. 지상관측 자료의 경우에는 전체 부지기상자료 내의 모든 자료가 물리한계 범위 이내의 값을 가지고 있어서 물리한계검사에서는 모든 요소의 모든 자료가 정상으로 판명되었다. 지상 10 m 기온과 지상 58 m 관측자료는 지상관측자료가 아니기 때문에 기상청고시(자동기상관측장비의 표준규격; 기상청 2009b, 2014, 2019c)의 제8조에 제시된 데이터로거의 1차 품질검사 기준과 물리한계기준값을 모두 참고하였다. 대기안정도 관련 자료는 기준이 없어 물리한계검사의 대상에서는 제외하였다.

2. 기후범위검사

기후범위검사는 2016년 이전까지만 적용된 과거 기후통계지침(기상청 국가기후데이터센터 2014)에서 제시한 시기별 기후요소 관측값 범위를 기준으로 진행하였다. 기온, 일강수량, 최대풍속은 모든 자료가 범위 이내의 값을 가지고 있었고 지상 10 m, 58 m 풍속 중 일부와 상대습도 자료 중 일부가 의심값으로 판명되었고 이후의 단계검사와 내적일치성검사에 의해 모두 걸러졌다.

지표면 부근의 풍속은 바람의 멱법칙 관계식(wind profile power law relationship)에 따라 기준 높이의 풍속으로부터 추정할 수 있다(Counihan 1975; Touma 1977). 풍속 중 기후범위를 벗어나는 것으로 보이는 의심값들이 일부 있었으나 기상청의 과거 태풍정보(기상청 날씨누리 홈페이지 태풍 2020)를 조회하여 비교한 결과 의심값의 관측시점이 대부분 과거 우리나라에 영향을 끼친 태풍의 상륙(영향)시기와 일치하고 있어 이 값들은 기후범위를 넘어선 것이 아니라 태풍의 영향으로 판단된다. 이는 Fig. 1과 같이 의심값을 포함한 고리원전 부지의 여름철 지상 10 m 풍속을 도시해 보면 명확하게 드러난다. 기후범위검사에서 의심값 자료로 판명된 경우에는 태풍/폭풍, 폭우/폭설, 폭염 등 극한기상 상황(기록)을 함께 고려하여 확인해야 한다.

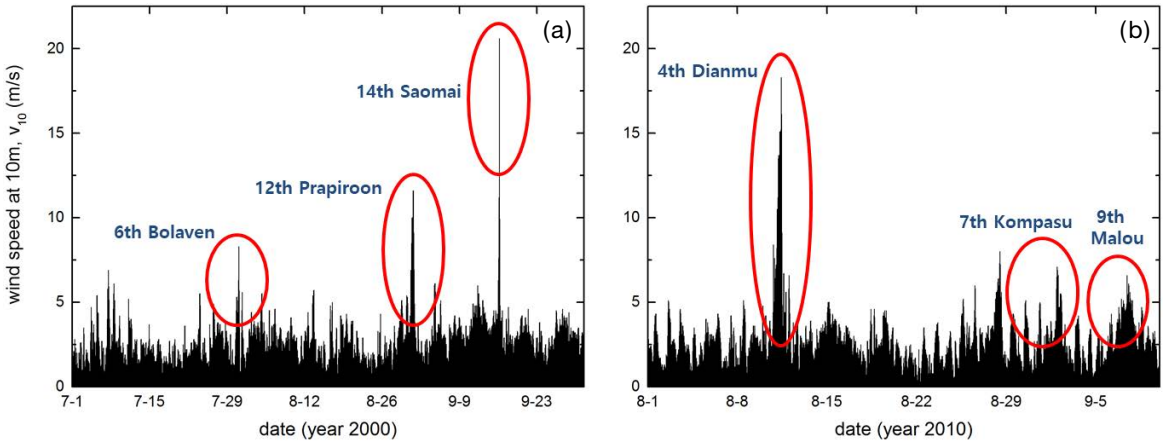

Fig. 1. Effect of typhoon on wind speed at 10 m height during summer in (a) 2000 and (b) 2010 at Kori site.

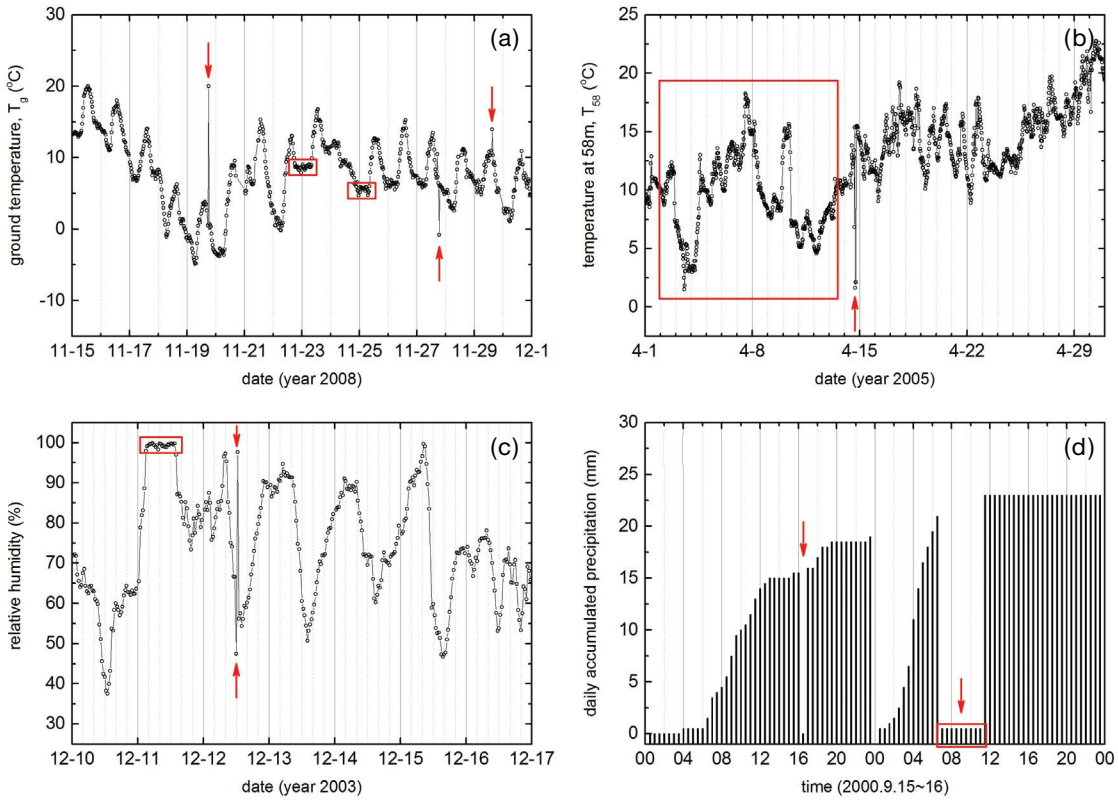

Fig. 2. Examples of outlier in step test for the meteorological data (a) ground temperature, (b) temperature at 58 m, (c) relative humidity, and (d) daily accumulated precipitation at Kori site.

3. 단계검사

단계검사는 Table 5에 주어진 시계열 최대허용변동량을 기준으로 기온, 습도, 풍속자료에 대해 수행하였고 강수량 자료는 일 누적강수량에 해당하므로 강수가 있는 경우 이전 시간대의 자료보다 작은 값을 가지는 경우를 오류로 판정하였다. Fig. 2에 단계검사 과정에서 발견된 이상치(빨간색 화살표) 및 의심자료를 도시하였다. 단계검사에서 오류나 의심값이 발견될 때 인근 시간대의 자료에서 다른 종류의 검사로 걸러질 만한 이상치나 의심값이 함께 존재하는 경우가 많았다.

4. 지속성검사

기온, 풍향·풍속에 대한 지속성 검사는 기상청고시(기상

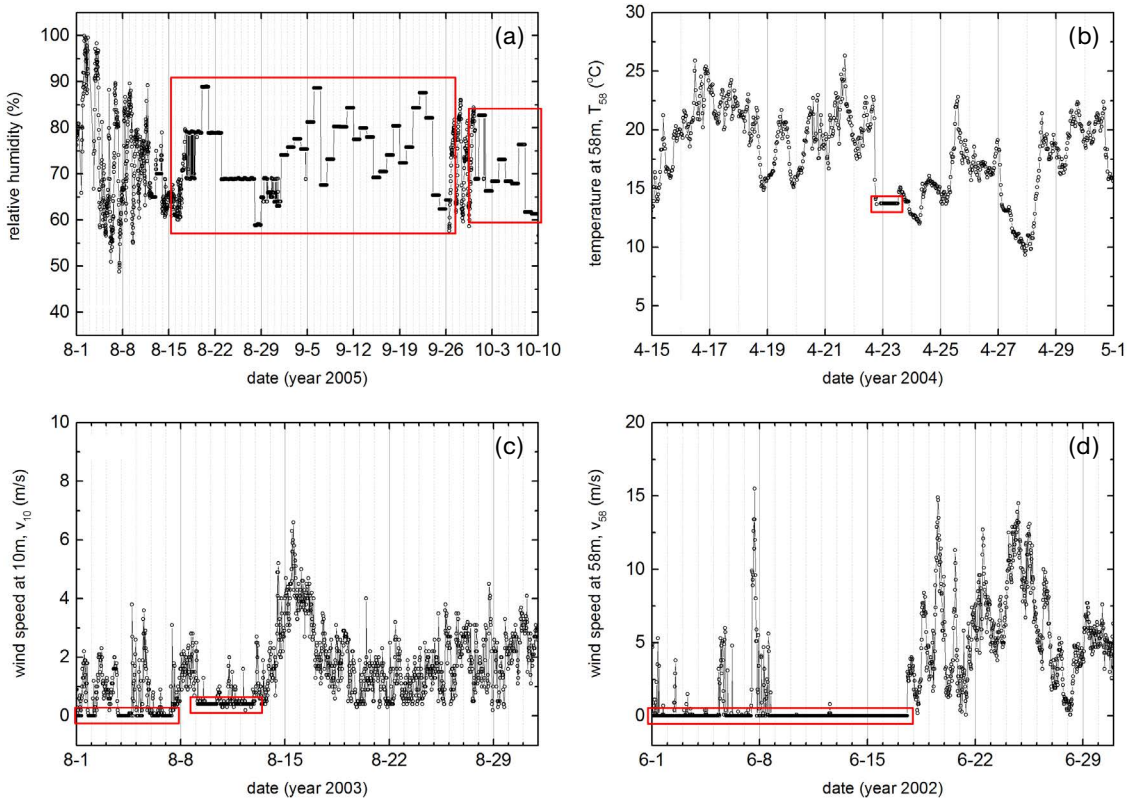

Fig. 3. Examples of outlier in persistence test for the meteorological data (a) relative humidity, (b) temperature at 58 m, (c) wind speed at 10 m, and (d) wind speed at 58 m at Kori site.

관측자료의 품질등급 기준 및 절차; 기상청 2016a, 2017a, 2019a)를 기준으로 진행하였으나 Fig. 3a에 일부 도시된 2005년 이전 상대습도 자료에서 보이는 장시간 지속되는 이상자료들을 판별하기 위해 추가로 WMO 기준(WMO 2010)을 적용하였다. Fig. 3의 예시에 나타났듯이 짧게는 수시간, 수일에서 길게는 수개월까지 지속되는 의심자료들을 발견하였다. 대부분 측정기기의 오류가 상당시간(기간) 시정되지 않아 나타난 것으로 판단되며 장시간 지속되기 때문에 상당히 많은 자료들이 오류로 판명되어 제거되었다.

5. 내적일치성검사

앞서 진행한 단계검사나 지속성검사 등의 품질검사로 걸러지지 않는 의심자료들에 대해서는 두 가지 이상의 기후요소를 함께 검사하여 자료의 논리적 불일치로 인한 오류 여부를 판단하였다. 1) 관측기록이 남아있으나 한 세트 또는 하위세트 관측값이 모두 0인 경우가 있었으며 이는 측정장비 또는 관측의 오류에 따른 결측으로 판단할 수 있다. 일부 자료는 단계검사나 지속성검사로 확인되었으나 일부는 명백한 오류임에도 걸러지지 않았다. 이런 경우는 내적일치성검사가 아니더라도 결측자료로 처리가 가능하다. 2) 특정한 값의 풍향을 가지면서 풍향의 표준편차가 0이거나 특정

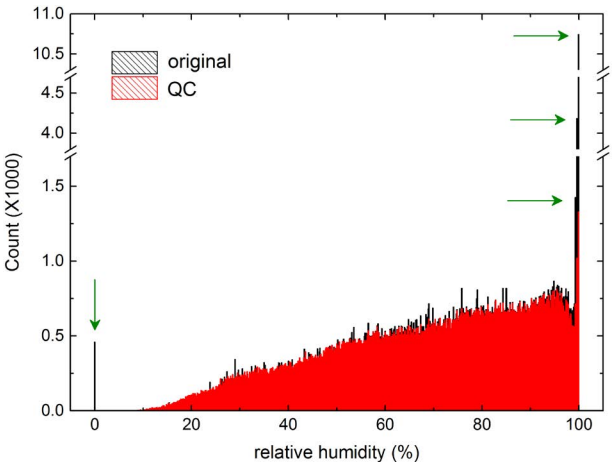

Fig. 4. Distribution of ground relative humidity at Kori site for overall period.

값을 가지고 풍속, 최대풍속이 모두 0 또는 특정값으로 반복되는 자료세트가 발견됐고 일부 자료는 지속성검사로 제거가 가능했으나 지속성검사의 기준에 미치지 못하는 경우가 많았다. 특정 기간에 풍속계 등 측정장비의 고장으로 의심되는 사례가 집중되어 다양한 조합으로 나타났다. 이러한 오류들은 시계열 분석이나 특정 기간에 국한된 부분적인 자

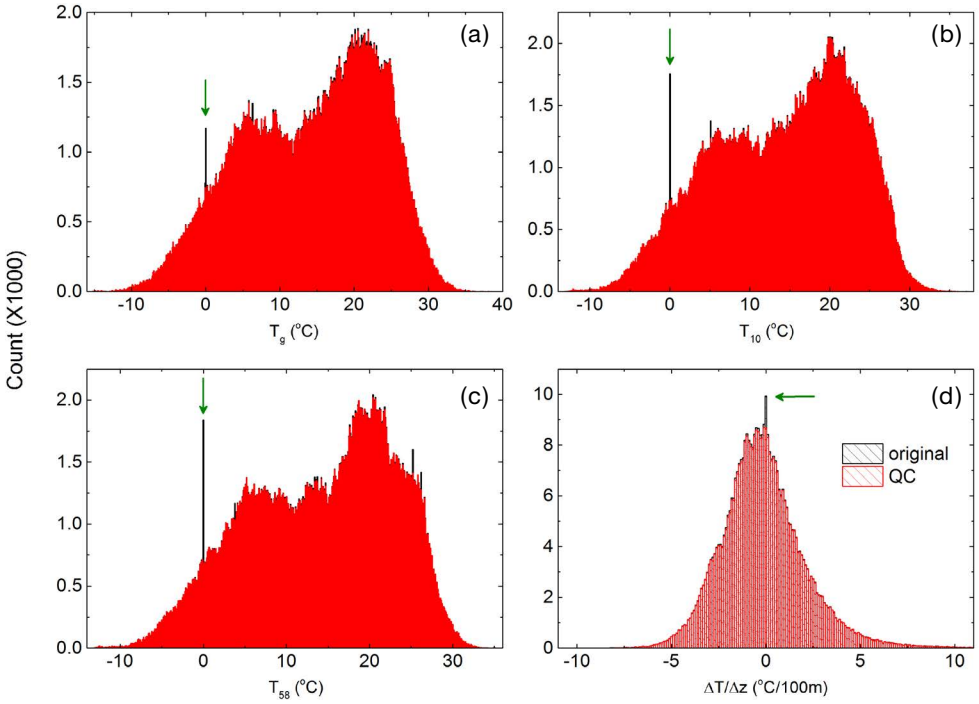

Fig. 5. Distribution of temperature at (a) ground, (b) 10 m height, and (c) 58 m height and (d) temperature change with height at Kori site for overall period.

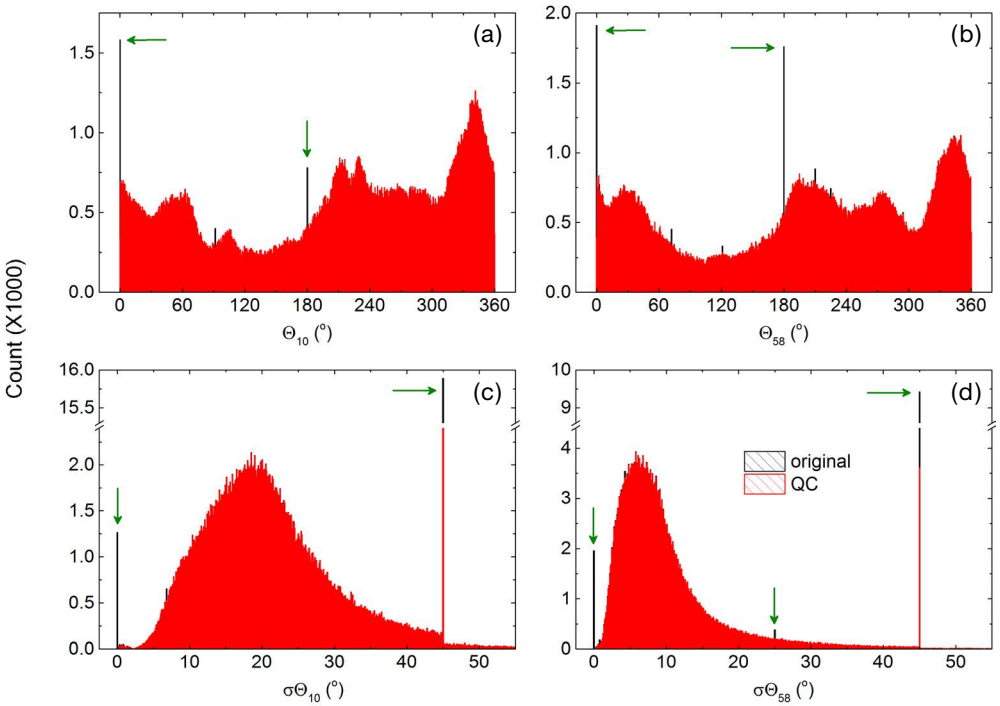

Fig. 6. Distribution of wind direction at (a) 10 m height and (b) 58 m height and standard deviation at (c) 10 m height and (d) 58 m height at Kori site for overall period.

료의 확인으로는 판별하기 어려우나 Figs. 4~7에 제시한 것처럼 각각의 관측요소에 대해 자료의 분포도를 작성해 보면 전체 분포에서 의심스러운 피크의 형태로 나타난다(olive arrow). 이를 토대로 발견된 의심값의 조합을 구성하여 품질

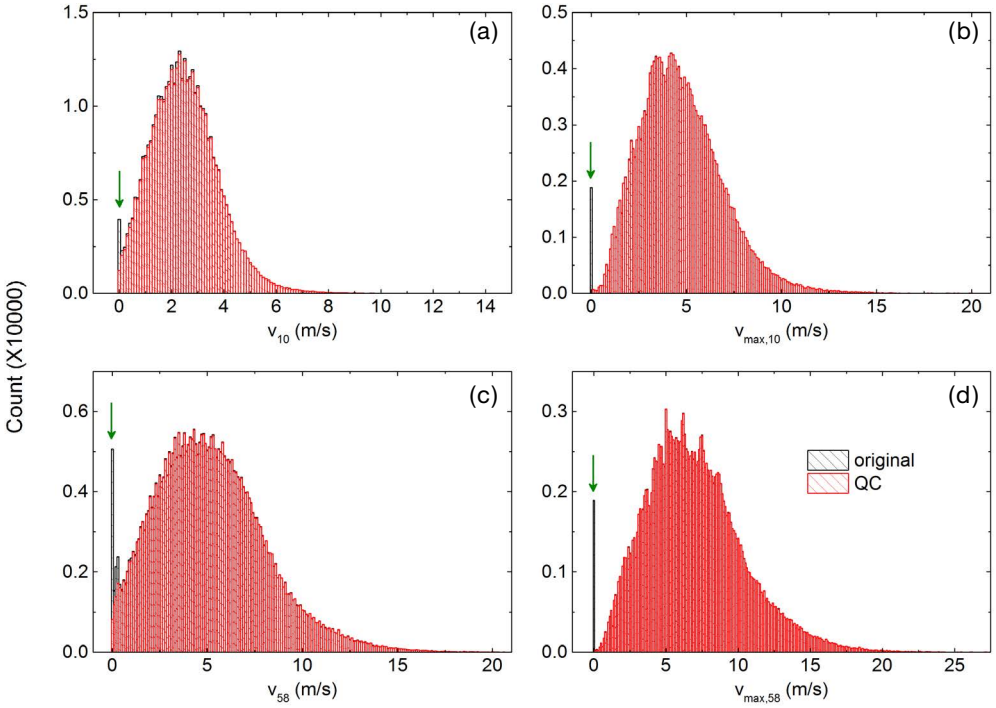

Fig. 7. Distribution of wind speed at (a) 10 m height and (c) 58 m height and maximum wind speed at (b) 10 m height and (d) 58 m height at Kori site for overall period.

검사 과정에서 제거하면 Figs. 4~7에서와 같이 비정상적인 피크(검은색)들이 사라진다.

6. 고찰

일정기간 이상 결측으로 누락되어 연속적인 시계열값이 확보되지 않아 단계검사와 지속성검사 기준이 적용되지 않는 자료들에 대해서는 장기간 얻어진 평균과 표준편차를 이용하여 의심값을 검사하여야 하지만, 품질검사를 거친 평년값 자료가 존재하지 않기 때문에 검사에 한계가 있었다. 기후범위상으로 의심이 가는 자료들은 일단 의심자료로만 분류하고 제거하지 않았다.

품질검사 기준으로는 제거되지 않으나 이상치로 의심되는 (특정 기간에 걸친) 값들은 이후의 통계분석 과정에서(구분이 되는 경우) 확인하여야 한다. 기본적으로 부지기상자료의 품질검사 과정에서 오류나 의심값으로 판명된 자료는 이후의 분석과정에서 제외해야 한다. 특히, 원자력시설 부지의 경우 기상관측자료로부터 풍향, 풍속, 대기안정도의 연간 결합빈도 분포를 구하여 부지평가에 사용하기 때문에 앞서 분류한 지상 10 m 관측 또는 지상 58 m 관측 하위세트 중 어느 하나라도 완전하지 않으면 통계에서 제외해야만 한다.

U. S. NRC의 규제지침과 우리나라 정부 고시에 공통적으로 권고된 "관측기간 중 자료의 수집률이 90% 이상이어야 한다"(과학기술부 2003; 교육과학기술부 2008, 2009; 원자력안전위원회 2011, 2012, 2014, 2017; U. S. NRC 1972, 2007b)는 요건은 상식적으로는 정상자료율을 의미하지만 정상자료의 판정에 대한 구체적인 지침이 없기 때문에 논란의 여지가 있다(정부 고시나 U. S. NRC의 규제지침에는 수집한 관측자료의 품질검사에 대한 규정이 없어 정상자료율이 명시되어 있지 않다). 또한,(연단위의) 1년이나 2년의 특정 전체기간에 대한 자료 수집률만을 규정했는데 정상자료 확보율이 전체기간에 대해서 요건을 만족하더라도 자료의 분포가 균일하지 않아(특정기간에 결손자료가 몰려있어) WMO (WMO 2011)와 기상청(기상청 국가기후데이터센터 2017)의 기준으로 실제 기상자료를 통계처리할 때 일, 순, 월별 기상자료 통계가 불가능한 기간이 일부 발생할 수 있는 문제가 있다(이런 경우에는 해당기간의 통계가 불가능해진다).

품질검사 과정에서 걸러지지 않는 의심자료들은 이후의 통계분석 과정에서 판단해야 하는데 기준값을 구할 수 있는 장기기상자료가 존재하지 않는 경우에는 의심자료들을 배제할 수 없다. 따라서, 향후에 이런 문제들이 생기지 않도록 최소한 10년 이상의 기간 동안 품질검사를 거친 장기기상자료를 축적할 필요가 있다.

결 론

원자로시설의 부지적합성 평가와 방사선영향평가를 올바

르게 수행하기 위해서는 품질검사 과정에서 오류나 의심값으로 판명된 부지기상자료를 통계분석에서 제외해야 한다. 하지만, 품질검사 기준값을 구할 수 있는 장기기상자료가 존재하지 않는 경우에는 시계열에 대한 단계검사, 지속성검사 등의 방법으로 품질검사 과정에서 걸러지지 않는 의심자료들을 통계분석 과정에서 배제할 수 없다. 따라서 향후에 이런 문제들이 생기지 않도록 최소한 10년 이상의 기간 동안 품질검사를 거친 장기기상자료를 축적할 필요가 있다. 과거에는 U. S. NRC의 RG에서조차 부지기상자료의 품질관리가 느슨하게 다뤄졌으나 최근에는 구체적인 기준을 명시하여 규정을 강화하고 있는 추세이다. 당면하여 우리나라의 관련 규정에 원자로시설 부지기상자료의 명확한 품질관리 기준을 마련하는 것이 시급한 과제이다.

우선 원자력안전위원회 고시의 자료의 수집률 기준에 정상자료율을 명시해야 한다. 기준값은 기상청의 기준을 따르거나 원자력안전위원회의 별도 기준을 따로 정하면 된다. 또한, 부지기상자료의 품질검사와 품질관리를 항목으로 명시하고 기상청의 기준을 따르도록 명시하거나 원자력안전위원회의 별도 기준을 마련해야 한다. U. S. NRC와 EPA의 관계에 비추어 우리나라에서 수행하는 부지기상관측은 원자력안전위원회의 별도 기준을 제정하기보다는 기상법 및 기상관측표준화법에 의거하여 품질관리와 기후통계 기준이 모두 체계적으로 마련된 기상청의 법적기준을 따르는 것이 좀 더 합리적이라고 판단된다. 본 논문에서 직접 다루지는 않았으나 원활한 품질검사와 품질관리를 위해서는 부지기상자료에 대한 기후통계 기준 또한 명확하게 제시되어야만 한다.

사 사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: NRF-2017M2A8A4015253, NRF-2015M2A2B2034282, NRF-2020M2C9A1061641). 부지기상자료를 제공한 한국수력원자력(주) 고리원자력본부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

교육과학기술부. 2008. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 교육과학기술부고시 제2008-8호.

교육과학기술부. 2009. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 교육과학기술부고시 제2009-37호.

과학기술부. 2000. 원자로시설의 위치, 구조 및 설비에 관한 기준. 과학기술부고시 제2000-8호.

과학기술부. 2003. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 과학기술부고시 제2003-11호.

과학기술처. 1983. 원자로시설의 위치, 구조 및 설비에 관한 기술기준. 과학기술처고시 제83-5호.

기상청. 2009a. 기상관측자료의 품질관리를 위한 기술기준. 기상청고시 제2009-1호.

기상청. 2009b. 자동기상관측장비의 표준규격. 기상청고시 제2009-1호.

기상청. 2012. 기상관측자료의 품질관리를 위한 기술기준. 기상청고시 제2012-1호.

기상청. 2014. 자동기상관측장비의 표준규격. 기상청고시 제2014-9호.

기상청. 2016a. 기상청 데이터 종합 품질관리 지침. 기상청.

기상청. 2016b. 지상기상관측지침 전문. 기상청.

기상청. 2017. 기후자료 통계의 종류 및 방법. 기상청고시 제2017-2호.

기상청. 2018. 기상관측자료의 품질관리를 위한 기술기준. 기상청고시 제2018-11호.

기상청. 2019a. 기상관측자료의 품질등급 기준 및 절차. 기상청고시 제2019-3호.

기상청. 2019b. 기상청 데이터 품질관리 규정. 기상청훈령 제960호. 기상청.

기상청. 2019c. 자동기상관측장비의 표준규격. 기상청고시 제2019-9호.

기상청 국가기후데이터센터. 2014. 기후통계지침. 기상청.

기상청 국가기후데이터센터. 2017. 기후통계지침 2017. 기상청.

기상청 날씨누리 홈페이지 태풍. 2020. http://www.weather.go.kr/weather/typoon/typhoon_06_01.jsp.

법제처 국가법령정보센터. 2020. http://www.law.go.kr.

원자력안전위원회. 2011. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 원자력안전위원회고시 제2011-19호.

원자력안전위원회. 2012. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 원자력안전위원회고시 제2012-19호.

원자력안전위원회. 2014. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 원자력안전위원회고시 제2014-25호.

원자력안전위원회. 2017. 원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준. 원자력안전위원회고시 제2017-26호.

한국원자력안전기술원. 2011a. 부지. 경수로형 원전 규제기준. 한국원자력안전기술원, KINS/RS-N01.00.

한국원자력안전기술원. 2011b. 원자로시설 부지의 기상 및 대기확산특성에 관한 조사·평가. 경수로형 원전 규제지침. 한국원자력안전기술원. KINS/RG-N01.03.

한국원자력안전기술원. 2015a. 부지. 경수로형 원전 규제기준. 한국원자력안전기술원, KINS/RS-N01.00 Rev. 1.

한국원자력안전기술원. 2015b. 원자로시설 부지의 기상 및 대기확산특성에 관한 조사·평가. 경수로형 원전 규제지침. 한국원자력안전기술원. KINS/RG-N01.03 Rev. 1.

ANSI/ANS. 1984. Standard for Determining Meteorological Information at Nuclear Power Sites. ANSI/ANS-2.5-1984. ANS, La Grange Park, IL.

ANSI/ANS. 2005. Determining Meteorological Information at

Nuclear Facilities. ANSI/ANS-3.11-2005. ANS, La Grange Park, IL.

ANSI/ANS. 2015. Determining Meteorological Information at Nuclear Facilities. ANSI/ANS-3.11-2015. ANS, La Grange Park, IL.

Counihan J. 1975. Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atmos. Environ.* **9**:871-905.

Durre I, Menne MJ, Gleason BE, Houston TG and Vose RS. 2010. Comprehensive automated quality assurance of daily surface observations. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **49**:1615-1633.

Touma JS. 1977. Dependence of the wind profile power law on stability for various locations. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **27**:863-866.

U. S. DOE. 1984. Atmospheric Science and Power Production. Randerson D ed. DOE/TIC-27601, U. S. DOE, Springfield, VA.

U. S. EPA. 1995. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume IV: Meteorological Measurements (As Revised March 1995). EPA/600/R-94/038d. U. S. EPA, Research Triangle Park, NC.

U. S. EPA. 2000. Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications. EPA-454/R-99-005. U. S. EPA, Research Triangle Park, NC.

U. S. EPA. 2008. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume IV: Meteorological Measurements Version 2.0 (Final). EPA-454/B-08-002. U. S. EPA, Research Triangle Park, NC.

U. S. NRC. 1972. Meteorological monitoring programs for nuclear power plants. Safety Guide 23 (later Regulatory Guide 1.23). U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 1974. Assumptions used for evaluating the potential radiological consequences of a loss of coolant accident for pressurized water reactors. Regulatory Guide 1.4 Revision 2. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 1976. Preparation of Environmental Reports for Nuclear Power Stations. Regulatory Guide 4.2 Revision 2. U. S. NRC, Washington DC.

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 Revision 1. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 1980. Meteorological monitoring programs for nuclear power plants. Regulatory Guide 1.23 1st Draft Revision 1, SS 926-4. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 1981. Onsite Meteorological Measurements Programs. In: Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition, Section 2.3.3, NUREG-0800 (formerly NUREG-75/087) Revision 2. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 1982. Nuclear Regulatory Commission Staff Computer Programs for Use with Meteorological Data. NUREG-0917. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 1983. Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants. Regulatory Guide 1.145 Revision 1. U. S. NRC, Washington DC. (1st issued in 1982, reissued in 1983)

U. S. NRC. 1986. Meteorological monitoring programs for nuclear power plants. Regulatory Guide 1.23 2nd Draft Revision 1, ES 926-4. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 2006. Meteorological monitoring programs for nuclear power plants. Regulatory Guide 1.23 3rd Draft Revision 1, DG-1164. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 2007a. Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.76 Revision 1. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 2007b. Meteorological monitoring programs for nuclear power plants. Regulatory Guide 1.23 Revision 1. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 2007c. Onsite Meteorological Measurements Programs. In: Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition, Section 2.3.3, NUREG-0800 (formerly NUREG-75/087) Revision 3. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 2015. Ultimate Heat Sink for Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.27 Revision 3. U. S. NRC, Washington DC.

U. S. NRC. 2016. Withdrawal of Regulatory Guides 1.3, 1.4, and 1.5. Federal Register 81 (236):88710.

U. S. NRC. 2018. Onsite Meteorological Measurements Programs. In: Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition, Section 2.3.3, NUREG-0800 (formerly NUREG-75/087) Draft Revision 4. U. S. NRC, Washington DC.

World Climate Programme (WCP). 1986. Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data. WCP-85, WMO/TD-No. 111, WMO, Geneva.

WMO. 2010. Guide to the Global Observing System. 2010 ed. WMO-No. 488, WMO, Geneva. (updated in 2017)

WMO. 2011. Guide to Climatological Practices. 2011 ed. WMO-No. 100, WMO, Geneva. (updated in 2016)

Received: 24 July 2020
Revised: 11 August 2020
Revision accepted: 2 October 2020