국내 원자력 발전소 부지의 바람 특성에 관한 연구

Study of the Characteristics of Wind over Nuclear Power Plants in Korea

오수빈* · 김춘지** · 이상현*** · 이현하**** · 진천실***** · 정승영*****

Oh, Su-Bin*, Kim, Chun-Ji**, Lee, Sang-Hyun***, Lee, Hyun-Ha****, Jin, Chun-Sil*****,
and Jeong, Seung-Yeong*****

Abstract

To establish a strategy for public protective action from radioactive leakage in the event of Nuclear Power Plant (NPP) accidents, long-term records of wind data collected at the Korean NPPs were analyzed. Wind characteristics related to the advection and diffusion of radioactive pollutants were examined by analyzing the wind direction, speed, and land-sea breezes for NPPs (Hanbit, Hanul, Wolsong, Kori, and Shin-Kori) in Korea. The study also analyzed the characteristics of calm winds causing the accumulation of radioactive materials. The wind characteristics of each NPP differ depending on the seasonal and daily variabilities; thus, a detailed time-scaled airflow database is required. In addition, the findings, through continuous updates of the airflow database, will contribute to improving preparedness.

Key words : Nuclear Power Plants, Wind Data, Airflow Database, Public Protective Actions

요 지

원전사고 발생 시 방사성물질의 누출에 따른 주민보호조치 전략 수립을 위한 기반연구로 원전부지 바람의 발생 특성을 분석하였다. 국내 5개 원전부지(한빛, 한울, 월성, 고리, 신고리)의 최대 10년의 장기간 관측자료를 이용한 풍향·풍속 및 해륙풍 분석을 통해 각 부지에서의 방사성물질 이류·확산 방향 및 속도와 관련된 기류 특성과 방사성물질의 축적을 초래하는 무풍 발생 특성을 분석하였다. 각 부지별 바람은 계절·시간별로 다른 발생 특성을 보이므로, 세분화된 시간 규모로 작성된 기류분석 데이터베이스가 필요하며, 계속된 업데이트를 통해 만일의 사고에 대비한 방재훈련 및 대책마련의 객관적인 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 원전부지, 바람 자료, 기류분석 데이터베이스, 주민보호조치

1. 서 론

전 세계 총 전력 생산량에서 원자력 발전이 차지하는

비중은 2019년 기준 10.35%로 전 세계 저탄소 배출 전력의 약 3분의 1을 생산하고 있다(Schneider and Froggatt, 2020). 국내의 경우, 1977년을 시작으로 원자력발전량은 꾸준한

*정회원, bom인사이언스컨설팅 책임연구원(E-mail: obsubin112@gmail.com)

Member, Senior Researcher, BomIn Science Consulting

**bom인사이언스컨설팅 대표

President, BomIn Science Consulting

***공주대학교 대기과학과 교수

Professor, Department of Atmospheric Science, Kongju National University

****교신저자, 정회원, 한국원자력안전기술원 안전연구단 방사선안전연구실 선임연구원(Tel: +82-42-868-0955, Fax: +82-42-868-0406, E-mail: lhh@kins.re.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Radiation Safety Research, Korea Institute of Nuclear Safety

*****한국원자력안전기술원 비상대책단 원자력비상대책실 선임연구원

Senior Researcher, Department of Nuclear Emergency Preparedness, Korea Institute of Nuclear Safety

*****한국원자력안전기술원 비상대책단장 책임연구원

Director, Division of Emergency Preparedness, Korea Institute of Nuclear Safety

증가추세를 보여 2019년에는 24기 원자로에서 23 GWe의 전력이 생산되었고(WNA, 2020a), 이는 국내 전체 전력 생산량의 26.2%를 차지하였다(WNA, 2020b). 이러한 원자력 발전 이용의 증가와 더불어 1986년 체르노빌, 2011년 후쿠시마 원전사고 등을 거치며 원자력 안전에 대한 국민의 관심 또한 높아졌다(KINS, 2020).

현재 국내의 원전사고 시 주민보호조치 시행은 1단계에서 예방적 보호조치구역(원전 중심 반경 3~5 km) 내 주민들을 즉시 구호소로 소개, 2단계에서 긴급보호조치 계획구역(반경 20~30 km) 기상 및 지형 등을 고려한 방사성물질 농도 예측 결과를 바탕으로 보호조치 결정, 3단계에서 환경감시 결과를 반영하여 방사능의 영향이 미치기 전 보호조치를 수행한다(NSSC, 2019). 이러한 조치과정에서 방사성물질의 확산 방향 및 속도 등에 대한 정보가 필수적이다.

대기 중 방사성물질의 확산은 사고 규모뿐만 아니라 기상 상황에 의존적이다. 이에 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)는 원전사고 위험에 대비하기 위해 기상 자료 수집의 필요성을 강조하였고, 활용에 관한 방향성을 제시하였다(IAEA, 2004, 2011a, 2011b). 미국 원자력규제 위원회(United States Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC)는 규제지침(Regulatory Guide, RG) 1.23을 통해 미국 원전부지의 기상 시스템과 자료에 관해 규제·감독을 수행하고 있다(U.S. NRC RG-1.23, 2007). 국내의 경우, 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)은 원전사고 시 의사결정단계에서의 활용을 위해 기상예측모델과 기상관측자료를 입력자료로 하는 확산예측모델 Accident Dose Assessment and Monitoring (ADAMO)을 개발하여 운영하고 있다(Lee et al., 2016).

기상자료 중에서도 바람은 대기 중 방사성물질의 확산 반경, 방향 및 속도에 영향을 주는 중요한 요소이기 때문에(Lee et al., 1997; Kim and Song, 2003; Srinivas et al., 2012), 원전부지의 방사성물질 확산 특성을 파악하기 위해서는 바람 특성 분석이 선행되어야 한다. 이에 실제로 바람 특성을 대기 중 유해물질에 대한 방재에 활용한 연구들이 수행된 바 있다. Jeon et al. (2017)은 화학사고로 인한 대기 유해물질 누출 시 주민보호를 위해 연·월 평균풍속 및 주풍을 분석하여 대피 이동경로와 장소가 오염 영향 범위에 들지 않는 대피 시나리오를 구상하였다. Kim, Jeon, et al. (2018)은 기상조건에 따른 방사능 테러 시나리오의 영향을 살펴보기 위해 서울 도심의 평균 풍속과 풍향을 분석하여, 바람 발생 특성에 따라 안정성 등급 변화가 발생함을 보였다. 따라서 원전사고 시 대기 중 방사성물질 확산에 대한 방재계획 수립 시에도 각 원전부지의 바람 분석 결과는 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

국내 원전부지에서의 방사성물질 확산과 관련하여 바람 자료를 활용한 연구들도 이루어져 왔다. An, Kang, Song, Bang, et al. (2015)은 고리 원전 인근 28개 기상관측소의

1년간 바람관측자료를 군집분석하여 국지 바람 패턴 특성을 추출하고, Weather Research and Forecasting (WRF)와 HYbrid Single-Particle Lagrangian Intergrated Trajectory (HYSPLIT) 모델링을 통해 패턴별 방사성물질의 대기확산 특성을 분석하였다. Kim et al. (2017)은 HYSPLIT을 이용하여 3년 간(일 4회)의 한빛 원전 부지의 공기과 궤적을 모의하고, 이를 군집분석하여 기류 유형 별 계절적 발생 특성을 분석하였다. Kim, Lee, et al. (2018)은 고리 원전 주변에서 관측된 2년간의 바람 발생 빈도를 산출하고, 빈도가 높은 바람장을 입력한 방사성물질 확산모델을 통해 원전 주변의 방사능 확산 가능 지도를 생산하였다. 그러나 이러한 선행연구들은 특정 원전부지만을 고려하였고, 단기간의 자료를 이용하여 최소 계절 단위의 분석만을 수행했다는 점에서 아쉬움이 있다.

국내 원전부지에서는 각각 기상탑이 설치되어 있고 최대 10년 이상의 바람 관측 자료가 축적되고 있어, 이 자료들을 통합하여 분석한다면 앞선 선행 연구들의 한계를 극복할 수 있을 것이다. Suh et al. (2004)은 대기 중으로 방출된 방사성물질의 농도분포를 예측하는 확산모델의 검증을 위해 고리 원전 주변에서의 야외 확산실험을 수행한 결과, 실험기간 중 관측된 바람 자료를 모두 고려하여 대기 확산 모델을 수행할 경우 모델의 확산 결과가 실제 관측값과 유사해진다는 결과를 보였다. 따라서, 많은 바람 자료를 사용한 장기간 바람 통계는 각 원전부지에서의 방사성물질 확산 특성을 이해하는데 더 효과적일 것이다.

따라서, 국내 원전부지들의 장기간 바람 자료를 활용하여 시간·월·계절 별 기류 특성을 체계적으로 정리하는 기류 분석 데이터베이스 구축이 필요하다. 이는 환경감시망, 방재 자원, 구호소 등 방재 인프라의 효율적 배치를 위한 객관적인 근거자료로 활용할 수 있으며, 주민 소개 방향 및 경로 등의 주민보호조치 전략 수립 및 개선을 위한 기초자료로 사용함으로써 만일의 원전사고에 대한 초기 대응능력을 강화할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국내 원전부지의 최대 10년 동안의 장기간 관측자료를 이용한 바람 분석을 통해, 원전부지의 바람 특성에 대한 이해를 제고하고, 기류분석 데이터베이스 구축의 방향성을 제시하고자 한다. 바람의 시공간적 특성은 한반도 내에서의 위치(위·경도, 지형 및 고도 등), 계절, 시간에 따라 다르므로(Kim and Byun, 2008), 각 부지에 대한 다양한 시간 규모 별 바람 특성 분석을 수행하였다. 모든 부지는 냉각수의 원활한 공급을 위해 해안에 위치하므로 해안지역의 두드러진 국지적 순환인 해륙풍 특성을 살펴보고, 방사성 물질 축적을 초래할 수 있는 무풍에 대한 분석도 이루어졌다.

2. 자료 및 방법

이 연구에서 사용된 국내 원전 부지(한빛, 한울, 월성, 고리, 신고리)의 위치를 Fig. 1에 나타냈다. 한빛은 서해안,

Fig. 1. The Locations and Satellite Maps of Five Nuclear Power Plants (NPPs)

나머지 부지들은 동해안에 위치한다(Fig. 1(a)). 한울의 위도가 가장 높고, 고리와 신고리는 동해안의 가장 남쪽에 위치한다. 각 부지별 해양과 육지의 지리적 형태는 위성사진으로 확인할 수 있다(Figs. 1(b)~(e)). 모든 부지가 해안에 인접해있으나 해안선의 형태에 따라 해양과 육지의 방향이 다르고, 주변 지형 또한 다른 특성을 보인다.

현재 국내 원전부지의 기상 관측에 관한 지침은 원자력안전위원회고시 제2017-26호(원자로서설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준, 2017년 12월 26일 시행)에 법제화되어 있으며, 한국원자력안전기술원은 이 고시를 실제로 적용하고 규제·감독하는 역할을 수행하고 있다. 그러나 이 연구에서 사용된 과거 바람 자료는 최장 2007~2016년으로 관측 시기에 따라 과학기술부고시 제2003-11호(2003년 7월 24일), 교육과학기술부고시 제2008-8호(2008년 4월 18일 시행)/제2009-37호(2009년 8월 24일 시행), 원자력안전위원회고시 제2011-19호(2011년 11월 11일 시행)/제2012-19호(2012년 1월 20일 시행)/제2014-25호(2014년 11월 21일 시행)로 법제화된 지침이 적용되었다. 본 연구에서는 이 고시들에 의해 측정 및 수집된 5개 원전부지 기상탑에서의 10 m 고도 풍향(degree) 및 풍속(m/s) 자료를 한국수력원자력으로부터 제공받아 사용하였다.

바람 관측 장비의 기동값, 정확도, 해상도는 Table 1에 정리하였다. 이는 원자력안전위원회고시 제2011-19호/제2012-19호/제2014-25호와 이에 따른 한국원자력안전기술원의 ‘경수로형 원자력발전소 규제기준 및 규제지침’ 중 1.3(원자로서설 부지의 기상 및 대기확산특성에 관한 조사·평가, KINS/RG-N01.03 및 KINS/RG-N01.03 Rev. 1)에서 인용한 것이며, 이 내용은 기상청고시 제2006-30호/제2007-1호/제2009-1호/제2010-5호/제2014-9호/제2016-9호의 ‘자동기상관측장비의 표준규격’을 준수한다.

Table 1. Specifications of Wind Sensor

Observation parameter	Starting threshold	Accuracy	Resolution
Wind speed (U)	0.5 m/s	0.2 m/s ($U \geq 2.0$ m/s)	0.1 m/s
Wind direction	0.5 m/s	$\pm 5^\circ$ ($U \geq 2.0$ m/s)	1°

Source: KINS/RG-N01.03 and KINS/RG-N01.03 Rev. 1 (Investigation and evaluation for meteorological and atmospheric dispersion characteristics for nuclear facilities)

분석 기간은 한빛, 한울, 월성은 2007~2016년(10년), 고리는 2010~2016년(7년), 신고리는 2011년 7월~2016년(5년 6개월)이다. 원전 바람 관측자료는 기상청과 동일한 기상관측자료 실시간 품질관리시스템(Real-time Quality control system for Meteorological Observation Data, RQMOD)이 적용되었고(KMA, 2006), 추가적으로 이상값을 판별하는 품질검사를 수행하였다. 부지의 시간·월·연별 바람 변수의 최솟값, 중위수, 최댓값을 검토하였고 결측 패턴을 분석한 결과, 각 부지별로 풍향 및 풍속의 특이한 경향은 없었으나, 한빛, 월성, 고리 부지에서 풍향 또는 풍속이 결측된 경우가 존재하였다. 이때, 전체 데이터에 대한 결측 비율은 약 1.1% 미만으로 추정치에 대하여 편향되지 않는 결과를 보여 분석결과에 영향을 주지 않는 것으로 판단하였다(Graham, 2009).

풍향과 풍속은 매 3초마다 관측되며, 돌출값 제거를 위해 180회 이상의 순간관측값을 이용하여 10분 이동평균 처리하며(과학기술부고시 제2003-11호, 교육과학기술부고시 제2008-8호/제2009-37호, 원자력안전위원회고시 제2011-19호/제2012-19호/제2014-25호), 본 연구에서는 1시간 간격의 풍향·풍속 자료를 사용하였다. 일정 분석 기간의 풍속 중

최대값을 최대 풍속, 발생 빈도가 가장 높은 풍향을 주풍으로 정의하였다. 무풍은 기상청 기후통계지침(KMA, 2019)에서 정의한 0.5 m/s 미만의 풍속을 나타낼 경우로 정의하였다. 이후, 정의된 값을 이용하여 원전부지의 바람 발생 특성을 분석하였다.

3. 바람 발생 특성 분석

3.1 풍향·풍속 발생 특성

품질검사가 완료된 바람 자료를 이용하여 각 원전부지에서의 풍향·풍속 특성을 살펴보았다. 먼저 분석 기간 동안의 연·월 평균풍속 분포도를 작성하였다(Fig. 2). 이는 각 부지에서 발생한 과거 풍속 특성을 한눈에 살펴볼 수 있을 뿐만 아니라 과거 대기오염 사고 분석 시의 사례 선정 및 참고 자료로도 활용할 수 있다. 분포도를 살펴보면, 한빛은 다른 부지에 비해 모든 연·월에서 비교적 약한 월 풍속이 나타났다(Fig. 2(a)). 특히 여름(6~8월)을 제외한 나머지 월 평균 풍속은 다른 부지에 비해 확연히 낮은 값을 보였다. 이러한 현상은 한빛 기상탑 부근의 지형과 관련 있다. 한빛의 북쪽에는 구릉(고도 약 60 m)이 존재하고 남동쪽에 봉대산(고도 약 284.2 m)이 위치하여, 북동-남서 방향의 골짜기 내에 부지가 위치해있다. 북쪽의 구릉으로 인해 한반도의 주풍인 북서풍의 영향을 적게 받아 약한 풍속이 나타난 것으로 보인다.

한빛의 여름동안 월 평균 풍속은 다른 계절에 비해 강했으나, 타부지의 여름과 비교하였을 때는 유사하거나 오히려 낮은 값을 보였다. 한울은 2007~2010년 동안에는 5~10월이 다른 월에 비해 풍속이 약했고, 1월과 12월의 풍속이 비교적 강했다(Fig. 2(b)). 그러나 2011년 7월 이후에는 모든 월의 평균풍속이 이전 해들에 비해 강해진 것을 볼 수 있다. 이는 한울 기상탑이 2011년 7월에 기존의 위치보다 남동쪽 해안가로 이동된 영향으로 설명할 수 있다. 이후, 풍향 분석에서도 이러한 기상탑 위치 변경으로 인한 영향을 고려한 해석이 필요하며, 이전 전후의 바람의 상세 특성 변화 및 원인에 대해서는 추후 연구가 필요하다. 월성과 고리는 여름이 다른 계절에 비해 비교적 약한 풍속을 보여 한빛과는 반대 양상을 보였다(Figs. 2(c)-(d)). 신고리는 계절에 크게 의존하지 않고 다른 부지에 비해 강한 풍속 값을 보였으나, 2016년 7월 이후에는 비교적 약한 풍속이 나타났다(Fig. 2(e)). 각 부지별 풍속은 해마다 발생한 기상 현상과 연관 있어 연 변동성이 존재하기는 하나, 매년 유사한 계절 변동성을 보였다. 이는 풍속이 계절 변화에 지배적인 영향을 받음을 의미한다.

각 부지 풍속의 계절적 변화를 살펴보기 위하여 분석기간 동안의 전체, 계절별 평균풍속과 최대풍속을 살펴보았다(Fig. 3). 부지별 전체 평균풍속은 한빛 2.0 m/s, 한울 2.6 m/s, 월성 2.6 m/s, 고리 2.7 m/s, 신고리 3.0 m/s로, 한빛에서 가장 약하게 나타났고 신고리가 가장 강한 값을 보였다

Fig. 2. Monthly Average Wind Speed for NPPs

Fig. 3. Annual and Seasonal (a) Average and (b) Maximum Wind Speed

(Fig. 3(a)). 연-월 평균풍속 분포도에서와 마찬가지로 한빛의 평균풍속은 여름에 강하게(2.1 m/s), 가을에 약하게(1.7 m/s) 나타났다. 이때, 한빛에서 다른 계절에 비해 비교적 강했던 여름 평균 풍속이 다른 부지 여름 풍속에 비해서는 약한 값을 재차 확인할 수 있었다. 한울, 월성, 고리, 신고리에서는 다른 계절에 비해 여름에 뚜렷하게 약한 평균풍속이 나타났고(2.1, 2.1, 2.4, 2.8 m/s), 한울, 월성, 고리는 겨울에(모든 부지에서 2.8 m/s), 신고리는 봄에 가장 강한 평균 풍속 값을 보였다(3.2 m/s). 전체 기간의 최대풍속은 한빛 16.5 m/s (2012년 8월 28일 1300 LST), 한울 17.9 m/s (2012년 9월 17일 1000 LST), 월성 13.6 m/s (2016년 10월 5일 1000 LST), 고리 16.7 m/s (2012년 8월 28일 1100 LST), 신고리 20.0 m/s (2016년 10월 5일 1100 LST)로, 평균풍속과 마찬가지로 한빛에서 가장 약하고 신고리에서 가장 강했다(Fig. 3(b)). 한빛과 고리의 최대풍속은 여름에, 나머지 부지들은 가을에 나타났다. 한빛은 여름에 가장 강한 평균풍속과 최대풍속이 나타나 일관성을 보였지만, 나머지 부지들은 가장 강한 평균풍속이 나타난 계절(겨울 또는 봄)과는 관계 없이 여름 또는 가을에 최대풍속이 나타났다. 이러한 여름과 가을에 발생하는 강한 풍속은 태풍과 연관 있을 것으로 보이며, 이 연구에서 나타난 각 부지 별 최대풍속 발생일은 기상청 태풍 기록과 대조 결과, 한빛과 고리는 태풍 볼라벤(2012년 8월 20일 1600 LST 발생~2012년 8월 29일 0600 LST 소멸), 한울은 태풍 산바(2012년 9월 11일 0900 LST 발생~2012년 9월 18일 0900 LST 소멸), 월성과 신고리는 태풍 차바(2016년 9월 28일 0300 LST 발생 ~2016년 10월 6일 0000 LST 소멸)로 인해 강풍이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

풍속의 일 변동성을 살펴보기 위하여 전체 및 월 평균한 시간별 풍속을 살펴보았다(Fig. 4). 모든 부지에서 일출시각 경에 풍속이 강해지기 시작하여 일몰 경에 다시 약해지는 양상을 보였다. 특히, 한울, 월성, 고리, 신고리 풍속의 일 변동은 Kim and Byun (2008)의 한반도 연안지역의 평균 풍속 일변동과 유사하여, 이 부지들에 연안지역이 가지는 풍속 특성이 반영되었음을 확인할 수 있다. 한빛은 다른 부지에 비해 약한 풍속이 나타났는데, Kim and Byun (2008)에서도 주간과 야간의 지표 바람장을 분석한 결과 한빛이

위치한 서해안 지역이 동해안에 비해 비교적 약한 풍속이 발생함을 확인할 수 있었다. 특히 서해안의 야간에 약한 풍속이 나타남을 확인하였는데, 이는 한빛에서도 나타나는 특성이다. 선행연구에서는 이러한 원인을 서해안의 편서풍과 야간 육풍의 방향이 반대이며, 동해안에 비해 산악 지형이 적어 산풍의 영향이 없기 때문으로 판단하였으며, 이 연구의 한빛 풍속에서도 같은 원인이 작용한 것으로 보인다.

한빛은 다른 부지들에 비해 풍속의 일 변동성이 크지 않았고, 여름의 풍속은 다른 계절에 비해 강했으나 변동 폭은 가장 좁았다. 특히 7월의 풍속이 전 시간에서 월등히 강하여, 한빛의 여름 평균풍속 값이 크게 나타나는데 일조하였다. 여기에는 앞서 살펴본 연-월 평균풍속 분포도의 2013년 7월에 나타난 비교적 강한 풍속도 영향을 주었을 것이다(Fig. 2(a)). 강한 풍속의 원인을 간단히 살펴본 결과, 한빛의 2013년 7월 풍속 자료 4,464개 중 상의 100개의 자료에서 16일(44%), 8일(40%)의 빈도가 가장 높았으며, 이는 강수 직전(16일) 및 동반(8일)한 강한 남서풍 유입에 의한 것으로 판단되었다. 반면 나머지 한울, 월성, 고리, 신고리는 전 기간 평균된 풍속의 일 변동성이 한빛보다 컸다. 한울과 월성은 야간은 약 2.2 m/s, 주간은 최대 약 3.5 m/s로 시간별 풍속 값이 유사하게 나타났다. 고리와 신고리는 야간에는 약 2.5 m/s의 유사한 풍속이 나타났으나, 주간의 최대풍속은 고리에서 약 3.3 m/s, 신고리에서 약 3.9 m/s 값을 보여, 신고리에서 더 큰 일 변동이 나타났다. 한울, 월성, 고리, 신고리의 여름 풍속은 다른 계절에 비해 약했지만, 일 변동성은 가장 컸다. 겨울의 풍속은 일몰 이후에 약해졌다가 다시 강해지기 시작하고 일출 전까지 유지되어, 2000 LST 경에서 다음날 0800 LST 경까지의 풍속이 다른 계절에 비해 강하게 나타났다.

이러한 풍속 특성은 방사성물질의 확산 속도 특성과 연관 지어 해석 가능하다. 풍속이 강할 경우 방사성물질의 이동속도는 빠르지만 주민 피폭에는 단시간 영향을 주므로 풍속이 적을 때보다 더 낮은 피폭 영향을 준다고 판단하여, 원전 방사능 누출 사고를 대비한 주민 보호 훈련 시나리오에서 약한 평균 풍속값을 가진 원전부지에 대해 ‘야간 불안’의 조건을 반영한 바 있다(Kim et al., 2019). 이 연구에 따르면, 약한 풍속 값을 가지는 부지 및 계절, 시간의 경우 높은

Fig. 4. Hourly Average Proportions of Annual and Monthly Average Wind Speed

피폭 영향을 받을 확률이 높다고 해석할 수 있으므로, 방재계획에 있어 비교적 주의를 더 기울여야 하는 부지 및 구간을 선정하는데 참고자료로 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 부지들 중 가장 약한 풍속이 나타난 부지는 한빛으로 분석되었다. 계절 중에서는 한빛은 가을, 나머지 부지들은 여름에 가장 약한 풍속 값을 보였고, 모든 부지에서 주간보다는 야간에 약한 풍속 값이 나타났다. 이러한 비교적 낮은 풍속이 나타난 부지와 계절, 시각은 만약의 사고 시 피폭 영향이 다른 부지 및 계절, 시각에 비해 높을 수도 있다는 확률적 가능성을 보여주지만, 바람 특성 이외에 기상조건, 주변 환경, 지리적 특성 등의 여러 조건 또한 피폭 영향성에 영향을 줄 수 있으므로 해석에 있어 주의가 필요하다.

다음으로 각 부지의 풍향 특성을 살펴보기 위해, 매년 16방위 풍향 별 발생빈도를 살펴보았다(Fig. 5). 한빛은 북동풍에서 남동풍까지(시계방향)의 빈도가 높아 주로 동풍 계열의 바람이 발생하였으며, 특히 동북동풍이 매년 우세하게 나타났다(Fig. 5(a)). 다른 방위에 비해 북서풍 계열의 빈도는 낮았다. 한울은 남풍 또는 남서풍 계열의 빈도가 높았다(Fig. 5(b)). 2014년을 제외한 2011~2016년은 남서풍 계열뿐만 아니라 북풍계열의 빈도도 다른 방위에 비해 비교적 높았는데, 이 또한 앞서 설명한 2011년 7월의 기상탑 위치 변경에

의한 영향으로 보인다. 월성은 서~북서풍 계열의 빈도가 높았고, 동~남동풍 계열의 빈도는 낮게 나타났다(Fig. 5(c)). 위치가 유사한 고리와 신고리는 북북서풍의 빈도가 월등히 높았고, 고리는 남동풍, 신고리는 남동동풍의 빈도가 낮았다(Figs. 5(d)~(e)).

풍향에 따른 풍속 특성을 함께 살펴보기 위하여 각 부지에서 우세한 풍향·풍속을 한눈에 살펴볼 수 있는 바람 장미(wind rose)를 작성하였다(Fig. 6). 앞서 풍향과 풍속은 계절별로 다른 특성을 보였으므로, 전체 분석 기간뿐만 아니라 계절로도 나누어 작성하였다. 풍향별 빈도(%)를 방위선의 길이로 표현하였고, 가장 빈도가 높은 주풍은 빨간색 방위값으로 표시하였다. 각 풍향의 풍속 계급별 빈도를 함께 나타냈으며, 이때 풍속 계급은 보퍼트 풍력계급(Beaufort Scale, BFS)을 사용하였다(WMO, 1962). 무풍 비율은 그래프의 중심에 표시하였다.

전체 기간 동안 한빛에서 발생한 주풍은 동북동풍이고 0.5~3.3 m/s의 풍속 범주가 높은 비율로 나타나 동풍 계열의 약한 바람이 주로 발생함을 확인할 수 있고, 이러한 특성은 봄, 가을, 겨울에서도 나타났다(Fig. 6(a)). 한빛은 북동-남서 방향의 골짜기 내에 위치하므로, 한반도에서 우세한 북서풍 기류가 골짜기 지형에 의해 동북동풍 기류로 바뀐 것으로

Fig. 5. Frequency (Hours) of Wind Directions

보인다. 여름의 주풍은 남남서풍으로 남서풍 계열의 풍향이 주로 발생하였는데, 다른 계절의 주풍 풍속에 비해 더 강한 범주(3.3~5.5 m/s)의 비율이 높았다. 이때, 북서풍 계열의 바람은 거의 발생하지 않았다. 한울의 전체 기간 주풍은 서남서풍으로, 여름을 제외한 계절에서 유사한 풍향 분포가 나타났고, 특히 겨울은 주풍이 우세하여 비교적 강한 풍속 값의 비율이 높았다(Fig. 6(b)). 이는 태백산맥의 동편의 경우, 여름을 제외한 계절에서 나타나는 북서풍이 태백산맥으로 인해 반시계 방향으로 전향되어 서남서풍 혹은 남서풍으로 되기 때문으로 판단된다(Lee et al., 2010). 특히 한울 인근의 서남서 방향으로 뻗는 골짜기 지형도 영향을 준 것으로 보인다. 여름에는 남남동풍의 유입이 큰 것을 볼 수 있다. 월성은 전체 기간 주풍이 북서풍이며, 봄, 가을, 겨울에서도 북서풍 계열의 발생이 많았고 특히 겨울 풍속은 강하게 나타나 일반적인 계절풍의 영향을 받은 것으로 보인다(Fig. 6(c)). 여름의 주풍은 북동풍으로 다른 양상을 보였으며, 모든 계절에서 남동풍은 거의 나타나지 않았다. 고리와 신고리의 전체 주풍은 북북서풍으로 다른 풍향에 비해 20.0% 이상의 높은 발생 비율을 보였다(Figs. 6(d)~(e)). 이는 위성사진(Fig. 1(e))에서 보이는 고리와 신고리 사이 구릉 지형의 영향으로 보인다. 고리는 가을과 겨울에 강한 북북서풍이 우세하였고, 봄과 여름에는 남남서풍이 주로 나타났다. 신고

리는 모든 계절에서 북북서풍이 우세하였으나, 봄과 여름에는 강한 남남서풍의 비율이 높아졌다. 이러한 주풍에 대한 이해는 방사성물질의 확산이 확률적으로 적게 되는 방향에 대한 정보를 제공하여 방재 전략을 수립하고 개선하는데 주요하게 활용될 수 있다.

각 부지별 풍향·풍속 특성은 방사성물질 확산 방향과 속도에 영향을 주므로, 이러한 장기 자료를 이용한 바람 분석은 방사성물질 누출 시 대피 시나리오를 작성하는데 참고자료로 활용 가능하다. 예를 들어 한빛의 전체기간 주풍은 동북동풍이며, 이는 봄, 가을, 겨울에도 동일하게 나타나고 여름에는 남남서풍이 주풍으로 나타난다. 이는 한빛의 바람이 주로 북동-남서 방향으로 불어 들어가거나 나온다는 것을 의미한다. 따라서 만약에 대비한 방재훈련 시에 북동-남서의 직각 방향인 북서-남동 방향으로 주민소개를 한다면 실제 사고 시에 활용할 수 있는 확률이 높을 것이다. 하지만 이 분석결과들은 전체 또는 계절적 평균된 바람을 분석한 것으로, 실제 사고 시의 바람을 대변할 수는 없어 해석에 있어 주의가 필요하다. 따라서 이 연구에서의 주풍은 방사성물질 확산 확률이 높은 방향으로 해석할 수 있으며, 이를 환경감시망 및 구호소의 위치와 소개 방향 및 경로 등의 주민보호조치 전략 수립 및 개선에 대한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

Fig. 6. Wind Roses of Annual and Seasonal Wind Data

3.2 해륙풍 발생 특성

해안지역에 나타나는 가장 두드러진 바람 특성은 해양과 육지의 차등가열 및 비열차이에 의한 기온경도 때문에 발생하는 해륙풍이다. 이는 중관규모의 일기계와 결합되어, 국지적인 바람의 일 변동성에 영향을 미친다. 해륙풍은 대기오염 물질의 수송(Chang et al., 1989), 농도 급증(Simpson, 1994), 재순환(Güsten et al., 1988) 등에 영향을 주어 내륙과는 다른 대기 확산 특성이 나타나게 하는 요소로, 원전 사고 시에도 중요하게 고려되어야 한다(An, Kang, Song, Kim, 2015). 특히, 국내 원전부지는 모두 해안지역에 위치하고 있기 때문에 해륙풍과 연관된 국지 순환은 방사성물질의 수송과 확산에 영향을 미칠 것이다.

해륙풍은 뚜렷한 일변화를 나타낸다. 일출시각 이후에 육지와 해양의 비열차이로 인한 기온경도가 점점 커지며, 최대 가열 시간인 1500 LST 경에 육지와 해양의 온도차가 최대에 달하게 되어 일 중 가장 강한 해풍이 나타나고, 그 이후 점차 약해지며 일몰 이후에는 서서히 육풍으로 전환된다(Zhong and Takle, 1992). 따라서 시간별 풍향 변화를 통한 해륙풍 발생 특성 분석이 필요하다. 이 연구에서 보여주지는 않았지만, 각 부지의 시간별평균 바람장미 분석 시, Zhong and Takle (1992)의 결과와 유사한 해륙풍 일변화가 나타나, 국내 원전 부지 바람 분석에서도 해륙풍에 대한 고려가 필요함을 확인하였다(Figures not shown).

각 부지별 해륙풍 발생 특성을 살펴보기 위하여 해풍이

우세한 낮 시간(1200~1400 LST)과 육풍이 우세한 밤 시간(0000~0200 LST)의 바람장미를 작성하였다(Fig. 7). 이때, 각 부지의 위성지도를 참고하여(Figs. 1(b)~(e)), 해양과 육지 방위를 표시하였고, 해당 방위에서 불어오는 바람을 각각 해풍과 육풍으로 정의하여 해석에 활용하였다. 해풍의 방위는 한빛은 남남서~북북동(시계방향), 한울은 북서~남동, 월성은 북북동~남남서, 고리와 신고리는 북동~서남서로 정의하였고, 나머지 풍향은 육풍으로 정의하였다.

한빛은 낮에는 서남서풍의 해풍, 밤에는 동북동풍의 육풍이 주로 나타났고, 육풍은 0.5~1.5 m/s 범주의 풍속이 높은 비율을 보였으나 해풍은 1.5~3.3 m/s 범주의 비율이 높고 육풍에서 나타나지 않은 3.3 m/s 이상의 풍속이 나타나, 육풍보다 해풍에서 비교적 강한 풍속 비율이 높았다(Fig. 7(a)). 한울, 월성, 고리, 신고리는 모두 동해안 지역에 위치하지만 상세한 지리적 특성에 따라 각각 다른 방향의 해륙풍이 발생한다. 한울과 월성은 낮에는 북동풍 계열의 해풍, 밤에는 각각 서남서풍과 북서풍의 육풍이 나타났다(Figs. 7(b)~(c)).

한울은 계절별 바람장비 해석 시에 언급되었던(Fig. 6(b)) 서남서방향의 골짜기 지형으로 인해 서남서풍의 육풍이 발생하였으며, 야간에는 산풍의 영향도 받은 것으로 보인다. 고리와 신고리는 낮에는 남풍계열의 해풍, 밤에는 북북서계열의 육풍이 우세하게 나타났다(Figs. 7(d)~(e)). 이 4개 부지에서는 한빛보다 더 강한 풍속의 해륙풍이 발생하여, 동해안의 경우 산맥이 해안선을 따라 위치하여 해륙풍 순환이 더 강화된다는 선행연구의 결과와 일치하였다(Lee and Shin, 1989).

각 부지의 시간별 바람장비를 살펴본 결과, 0900~1800 LST에는 해풍, 1900~익일 0800 LST에 육풍의 빈도가 높았으며, 이러한 특성은 모든 부지에서 나타났다(그림 미제시). 따라서 각 부지별 해풍과 육풍의 특성을 살펴보기 위하여 주간(0900~1800 LST)과 야간(1900~익일 0800 LST)으로 시간대를 구분하여 전체와 계절별 해륙풍 비율을 살펴보았다(Fig. 8). 해풍과 육풍은 각각 Fig. 7에서 표시한 해양과 육지 방위에서 불어오는 바람으로 정의하였다. 전체 분석

Fig. 7. Wind Roses of 1200-1400 LST and 0000-0200 LST

(a) Daytime

(b) Nighttime

Fig. 8. The Proportions of Sea and Land Breezes During (a) 0900~1800 LST and (b) 1900~Next Day 0800 LST

기간을 살펴보면 모든 부지에서 주간에는 해풍이, 야간에는 육풍이 우세하게 나타났다. 주간에 발생하는 해풍은 한울에서 가장 높은 비율을 보였고(65.6%), 한빛에서 가장 낮게 나타났다(49.2%). 야간에 발생하는 육풍은 한빛에서 가장 높고(81.0%), 한울에서 가장 낮게 나타났다(58.8%).

계절 별 특성을 살펴보면, 봄은 모든 부지에서 주간과 야간의 해륙풍 특성이 뚜렷하게 나타났다. 여름의 주간에는 해풍이 우세하게 나타났고, 야간에는 육풍의 비율이 늘어나기는 했지만 다른 계절에 비해 해풍 비율이 높았다. 이는 여름 주간 동안 강한 태양복사로 인해 지표면 온도 상승폭이 커서 해풍이 강화된 것으로 보이며, 다른 계절에 비해 긴 일사시간도 영향을 준 것으로 보인다. 가을은 여름보다 주간 해풍 비율이 낮아졌으며, 특히 한빛은 주간동안 해풍보다 육풍이 더 우세하게 나타났다. 가을 야간 동안에는 모든 부지에서 육풍이 우세하게 발생하였다. 겨울에는 주간의 한울을 제외하고는 주간, 야간 모두에서 육풍이 우세한 비율로 나타났고, 야간에는 약 80.0% 이상의 높은 비율을 보였다. 모든 부지에서 봄·여름보다 가을·겨울에 주·야간의 육풍 비율이 높는데, 이는 앞서 작성한 계절별 바람장미(Fig. 6)에서 나타난 계절풍과도 연관된 것으로 보인다. Fig. 6에서 한빛, 한울, 월성, 고리는 봄·여름보다 가을·겨울에 계절별 주풍 비율이 다른 풍향에 비해 뚜렷하게 높았으며, 이는 모두 육지 방향으로부터 불어온 것을 볼 수 있다. 따라서 이 부지들의 가을·겨울에 야간뿐만 아니라 주간에도 육풍 비율이 봄·여름에 비해 높게 나타난 것으로 보인다. 신고리의 경우에도 가을·겨울에 육지방향인 북북서풍의 주풍 비율이 높게 나타났으며, 따라서 다른 부지들과 마찬가지로 가을·겨울에 주·야간 육풍 비율이 높게 나타난 것으로 보인다. 그러나 이러한 북북서풍의 비율은 봄·여름에도 높게 나타났다. 다만 해풍방향의 남남서풍의 비율이 두 번째로 높은 값을 보여 가을·겨울에 비해 육풍 비율이 높지는 않은 것으로 보인다.

본 연구에서는 이러한 분석을 통해 각 부지의 해륙풍

영향 여부를 살펴보고, 주간과 야간의 풍향 차이 발생을 확인함으로써 기류 데이터베이스 구축 시 해륙풍 특성에 대해 각 부지별로 세밀화된 분석이 필요함을 시사하였다. 이러한 국지적 해륙풍은 시간 및 계절별 발생 특성이 뚜렷하므로, 사고 발생 시기 및 시각에 따른 구체적인 주민 소개 시나리오 작성에 참고 가능할 것으로 보인다. 다만 향후 연구에서는 해륙풍의 세밀한 특성을 파악하기 위해 종관규모 바람 영향을 제외하는 사전작업을 수행하고, 계절별 평균적인 기압배치를 고려하는 등의 심도 있는 분석이 추가로 요구된다.

3.3 무풍 발생 특성

앞서 살펴본 풍향·풍속은 방사성물질의 대기확산 방향 및 속도에 큰 영향을 미치므로 원전사고 대응에 있어 필수적인 정보이다. 그러나 바람이 거의 불지 않는 무풍 또한 피해를 증가시키는 중요한 요소이다(Pissimanis et al., 1991). 역사적인 대기오염 사건들이 가지는 공통적인 기상환경은 기온 역전과 무풍상태로(Schimmel et al., 1974), 특히 무풍은 대기 중 오염물질의 축적으로 좁은 지역에 오염도를 증가시키는 직접적인 원인이 되므로 방사성물질 확산의 위험도를 평가할 수 있다. 이에 따라, 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)에서 실시한 방사선 환경영향평가에도 무풍을 고려한다(KAERI, 2002). 따라서 이 연구에서도 각 부지의 계절 및 시간별 무풍 특성을 살펴보고자 한다.

Fig. 9는 각 부지의 전체 및 계절별 무풍 발생 비율이다. 전체 무풍 발생 비율은 앞서 연중 풍속이 낮았던 한빛(8.4%)에서 가장 높았고, 한울(5.9%), 월성(5.1%), 고리(3.5%), 신고리(3.4%)의 순서로 낮아졌다. 모든 부지의 여름은 다른 계절에 비해 높은 무풍 비율이 나타났으며, 월성(11.0%)이 가장 높고, 한빛(10.4%), 한울(10.3%), 고리(6.1%), 신고리(5.6%)의 순서로 낮아졌다. 고리는 가을, 나머지 부지는 겨울에 가장 낮은 무풍 비율을 보였다.

Fig. 9. Annual and Seasonal Proportions of Calm Winds

Fig. 10은 무풍 비율의 일 변화를 나타낸다. 무풍 비율은 모든 부지에서 1200~1500 UTC 경에 가장 낮은 비율을 보이고, 서서히 높아졌다. 한빛은 2200 LST 경 가장 높은 비율이 나타나 야간 동안 큰 값이 유지되었다. 한울, 월성, 고리, 신고리는 최소 비율을 나타냈던 시각으로부터 서서히 비율이 증가하여 약 0700~0800 LST 경에 가장 높은 비율을 보였다. 공통적으로는 주간보다는 야간의 무풍 비율이 높았는데, 이러한 비율 변화는 지표와 대기의 비열차이로 설명할 수 있다. 일몰 이후 지표면의 빠른 냉각으로 인해 대기 역전층이 발생하여 대기가 안정되면서 무풍 비율이 높아진 것으로 보인다. 일출 이후에는 지표면의 가열로 서서히 역전층이 해소되며 무풍 비율 또한 점차 낮아진 것으로

보인다. 여름은 야간 동안 다른 계절에 비해 높은 무풍 비율을 보여, 일변동성이 가장 높았다. 겨울은 다른 계절에 비해 무풍 비율이 낮았고 일 변화도 크지 않았다. 부지별 특성을 살펴보면, 1200~1500 LST에는 모든 부지의 무풍이 낮은 비율로 나타나지만, 야간 무풍 비율의 크기로 인해 한빛의 일 변동 폭이 가장 컸고, 한울, 월성, 고리, 신고리 순서로 작아졌다.

결과적으로 무풍 빈도가 높을수록 방사성물질의 침적 발생 확률이 높다고 하였을 때, 다른 부지들에 비해 근소한 차이로 한빛의 위험 확률이 높았고, 계절 중에서는 여름, 하루 중에서는 야간의 위험도가 높았다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 위험도 판별에는 무풍 이외의 요소들도 반드시 고려되어야 하므로 선불리 최고 위험 부지, 계절, 시간을 이 연구에서 판단하기에는 무리가 있다. 다만, 본 연구에서는 방사성물질의 침적을 초래할 수 있는 무풍이 부지, 계절, 시간별로 다른 특성을 보이므로, 무풍 요소 또한 기류분석 데이터베이스 구축에서 중요하게 고려되어야 함을 시사한다. 세분화된 무풍 특성을 포함하여 기류분석 데이터베이스를 구축함으로써 환경영향평가 또는 재난대비 훈련에 참고할 수 있을 것이다.

Fig. 10. Hourly Average Proportions of Annual and Monthly Average Calm Winds

4. 결 론

국내 원전사고로 인해 방사성물질이 대기로 누출될 경우, 이류 및 확산에 따른 주민보호조치 전략 수립 시 참고할 수 있는 기반연구로 원전 부지의 바람 특성 분석을 수행하였다. 국내 5개의 원전 부지 기상탑(한빛, 한울, 월성, 고리, 신고리)의 장기간(최대 10년) 풍향·풍속 자료를 수집하여 정규성 측정, 시간 및 측정 단위 통일, 결측 검사 등을 통해 품질검사를 수행하였고, 각 원전 부지의 풍향·풍속, 해륙풍, 무풍 발생 특성을 부지·계절·시간별로 분석하였다. 여기서 정리된 장기간 바람특성분석결과는 원전 부지에서의 바람 특성에 대한 이해 제고에 기여할 것이다. 주풍 분석을 통해 방사성물질 확산 확률이 높은 방향에 대한 정보를 얻을 수 있고, 더 심각한 피해를 초래할 수 있는 무풍과 육풍 특성을 제공함으로써 방사능 방재 훈련 시나리오 작성 시 참고 자료로 활용 가능할 것이다.

또한, 이 분석 결과를 바탕으로 방사능 방재대책에 활용할 수 있는 기류분석 데이터베이스의 구축 방향성도 제시하였다. 앞서 분석한 풍향·풍속은 방사성물질의 확산 방향 및 속도에 영향을 주기 때문에 기류분석 데이터베이스 구축 시 필수 요소이며, 이때 해안지역에서 두드러지게 나타나는 특성인 해륙풍 또한 고려되어야 한다. 무풍은 방사성물질의 축적으로 인해 위험도를 증가시키므로, 이 또한 기류분석 데이터베이스에 포함되어야 하는 정보이다. 이러한 바람 특성은 각 부지의 지형적 위치 및 특성으로 인해 각각 다르게 나타나므로, 각 부지에 따른 데이터베이스 구축이 필요하다. 또한, 바람 특성이 매년 변화함에도 불구하고 계절 및 시간적 발생 특성이 뚜렷하므로, 기류분석 데이터베이스 구축 시 다양한 시간 규모에 대해 세밀화하여 정리할 필요가 있다.

이처럼 원전 부지별 바람 특성의 통계적인 분석을 수행하고, 이를 기반으로 하여 기류분석 데이터베이스를 구축한다면, 원전 방사성물질 누출 사고 시 광역비상대응체계 수립 및 주민보호조치 수행전략 마련을 위해 객관적인 참고자료로 활용 가능할 것이다. 기류의 기후적 통계분석에서는 기상청의 기후통계 지침에 근거하여 통계 항목을 결정하고 분석을 진행한다면 더 체계적인 자료 생산이 가능할 것이다. 장기(10년), 중기(5년), 단기(1년)의 기류 특성을 정리하며, 이때 기상청 관측 기후자료들과 비교 가능한 10년 주기 평년값 및 합성풍향·풍속 산출과 원전 인근 지역 바람과의 비교분석을 통해, 만일의 사고로 인한 기상탑 자료 손실 시 활용 가능한 주변 바람 관측 자료에 대한 추가 연구도 수행 가능할 것이다. 또한 이러한 통계자료를 월별, 주별, 시간별로 업데이트할 수 있는 준실시간 기류분석 데이터베이스를 구축하여 방사성물질의 이동경로 소개 가이던스에 적용한다면, 원전부지의 국지적 계절·시간별 기류특성이 현실적으로 반영된 방재대비훈련을 실시할 수 있을 것이다. 또한 정확한 방재기상정보 제공을 통해 기상 시나리오별

대피장소 확인 및 비상용품 준비 등의 사고초기단계 대응능력을 강화할 수 있다. 따라서 원전부지의 특성이 반영된 계절·시간 별 통계자료는 국민보호 전략 및 사고초기단계의 신속한 대응능력 향상에 기여할 수 있으므로 만일의 원전사고에 대한 국민의 불안감을 경감할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805018). 또한 본 연구의 개선을 위해 유익한 의견을 제시해주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

- An, H.Y., Kang, Y.H., Song, S.K., Bang, J.H., and Kim, Y.K. (2015). Atmospheric dispersion of radioactive material according to the local wind patterns around the Kori nuclear power plant using WRF/HYSPLIT model. *J. Environ. Sci. Int.*, Vol. 24, No. 1, pp. 81-96.
- An, H.Y., Kang, Y.H., Song, S.K., and Kim, Y.K. (2015). Comparison of CALPUFF and HYSPLIT models for atmospheric dispersion simulations of radioactive materials. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, Vol. 31, No. 6, pp. 573-584.
- Chang, Y.S., Carmichael, G.R., Kurita, H., and Ueda, H. (1989). The transport and formation of photochemical oxidants in central Japan. *Atmos. Environ.*, Vol. 23, No. 2, pp. 363-393.
- Graham, J.W. (2009). Missing data analysis: making it work in the real world. *Annu. Rev. Psychol.*, Vol. 60, pp. 549-576.
- Güsten, H., Heinrich, G., Cvitaš, T., Klasinc, L., Rušič, B., Lalas D.P., et al. (1988). Photochemical formation and transport of ozone in Athens, Greece. *Atmos. Environ.*, Vol. 22, No. 9, pp. 1855-1861.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2004). *Safety standards series: Format and content of the safety analysis report for nuclear power plants*. Safety standards series No. GS-G-4.1. Vienna, Austria: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2011a). *Meteorological and hydrological hazards in site evaluation for nuclear installations*. Safety standards series No. SSG-18. Vienna, Austria: IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2011b). *Prepar-*

- edness and response for a nuclear or radiological emergency. Safety standards series No. GS-R-2. Vienna, Austria: IAEA.
- Jeon, B.H. Kim, H.S. Oh, S.B., and Kim, H.T. (2017). A study on improvement plan for selection of evacuation site through analysis of meteorological data: focus on Incheon-Siheung-Ansan. *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.*, Vol. 18, No. 11, pp. 16-22.
- Kim, C.H., and Song, C.K. (2003). Lagrangian particle dispersion modeling intercomparison: Internal versus foreign modeling results on the nuclear spill event. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, Vol. 19, No. 3, pp. 249-261.
- Kim, D.W., and Byun, H.R. (2008). Spatial and temporal distribution of wind resources over Korea. *Atmoephore*, Vol. 18, No. 3, pp. 171-182.
- Kim, J.S., Lee, S.H., Park, K.W., Lee, S.G., Choi, S.Y., Cho, K.C., et al. (2018). Numerical estimates of seasonal changes of possible radionuclide dispersion at the Kori nuclear power plants. *J. Environ. Sci. Int.*, Vol. 27, No. 6, pp. 425-436.
- Kim, M.K., Jeong, S.Y., Kim, W.J., Lee, H.H., and Jin, C.S. (2017). Cluster analysis of airflow at Hanbit nuclear power plant. *Korean Association for Radiation Protection Autumn Meeting 2017*, pp. 626-627.
- Kim, T.W., Jeon, Y.R., Chang, S., and Kim, Y. (2018). Study on influence analysis of radioactive terror scenarios by weather conditions. *J. Korean Soc. Radiol.*, Vol. 12, No. 6, pp. 719-725.
- Kim, T.Y., Lee, K.H., Chae, S., Ha, S.H., Chung, S.W., and Lee, U.J. (2019). Development of training system for radiation exposure reduction and protection of local residents against radioactivity release accidents at nuclear power plants. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 2, pp. 79-90.
- Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). (2002). *Environmental report for nuclear fuel R&D building*. No. KAERA/TR-2250/2002.
- Korea Institute of Nuclear Safety (KINS). (2020). *Nuclear safety yearbook 2019*. No. 11-1079960-000001-10.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2006). *Real-time quality control system for meteorological observation data (I) Application*. Tech. Note 2006-2 (11-1360000-000205-01).
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2019). *2019 Climatological statistics guide* (January 1, 2019). Retrieved from <https://book.kma.go.kr/viewer/MediaViewer.ax?cid=33349&rid=5&moi=5240>
- Lee, G.B., Lee, M.C., and Song, Y.I. (1997). A study on mesoscale atmospheric dispersion of radioactive particles released from nuclear power plants. *J. Radiat. Prot. Res.*, Vol. 22, No. 4, pp. 273-288.
- Lee, H.H., Jeong, S.Y., Park, S.H., and Lee, K.H. (2016). New nuclear emergency prognosis system in Korea. *EGU General Assembly Conference*, Vienna, Austria, Bibcode: 2016EGUGA..1812191L
- Lee, J.S., Ahn, K.H., Kim, D.G., and Park, J.J. (2010). Distribution properties of airborne chlorides in Korea. *J. Korea Concr. Inst.*, Vol. 22, No. 6, pp. 769-776.
- Lee, T.Y., and Shin, D.B. (1989). A numerical study of the air flow over South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, Vol. 25, No. 4, pp. 276-288.
- Nuclear Safety and Security Commission (NSSC). (2019). *Standard manual for crisis management in nuclear safety field (radioactive leakage)*.
- Pissimanis, D.K., Karras, G.S., and Notaridou, V.A. (1991). On the meteorological conditions during some strong smoke episodes in Athens. *Atmos. Environ.*, Vol. 25, No. 2, pp. 193-202.
- Schimmel, H., Murawski, T.J., and Gutfled, N. (1974). Relations of pollution to mortality, New York City, 1963-1972. *Air Pollution Control Accoc. Annual Meeting*, Denver, CO, USA, Paper No. 74-220.
- Schneider, M., and Froggatt, A. (2020). *The world nuclear industry status report 2020*. A Mycle Schneider Consulting Project, Paris, France.
- Simpson, J.E. (1994). *Sea breeze and local winds*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Srinivas, C.V., Venkatesan, R., Baskaran, R., Rajagopal, V., and Venkatraman, B. (2012). Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor. *Atmos. Environ.*, Vol. 61, pp. 66-84.
- Suh, K.S., Kim, E.H., Whang, W.T., Jeong, H.J., and Han, M.H. (2004). Numerical simulation for the field tracer experiment over the Kori nuclear power plant. *J. Korea Asso. Radiat. Prot.*, Vol. 29, No. 3, pp. 205-212.
- U.S. NRC RG-1.23. (2007). *Meteorological monitoring programs for nuclear power plants*. Retrieved from <https://www.nrc.gov/docs/ML0703/ML070350028.pdf>
- World Meteorological Organization (WMO). (1962). *Abridged final report of the third session of the commission for instruments and methods of observation*. WMO-No.

116 R.P. 48, Geneva, Swiss.

World Nuclear Association (WNA). (2020a). *Nuclear power in South Korea*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea.aspx>

World Nuclear Association (WNA). (2020b). *World nuclear performance report 2020*. Report No. 2020/008. Wales, UK: WNA.

Zhong, S., and Takle, E.S. (1992). An observational study

of sea- and land-breeze circulation in an area of complex coastal heating. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 31, No. 12, pp. 1426-1438.

Received	■	November 13, 2020
Revised	■	November 16, 2020
Accepted	■	November 23, 2020