

ORIGINAL ARTICLE

고리 원자력 발전 단지 사고 발생에 따른 방사능 물질 확산 가능성의 계절적 특성 연구

김지선 · 이순환* · 박강원¹⁾ · 이성광¹⁾ · 최세용¹⁾ · 조규찬¹⁾ · 이혁우¹⁾

부산대학교 지구과학과, ¹⁾부산과학고등학교

Numerical Estimates of Seasonal Changes of Possible Radionuclide Dispersion at the Kori Nuclear Power Plants

Ji-Seon Kim, Soon-Hwan Lee*, Kang-Won Park¹⁾, Sung-Gwang Lee¹⁾, Se-Young Choi¹⁾,
Kyu-Chan Cho¹⁾, Hyeuk-Woo Lee¹⁾

Department of Earth Science, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

¹⁾Busan Science High School, Busan, 46235, Korea

Abstract

To establish initial response scenarios for nuclear accidents around the Kori nuclear power plants, the potential for radionuclide diffusion was estimated using numerical experiments and statistical techniques. This study used the numerical model WRF (Weather Research and Forecasting) and FLEXPART (Flexible Particle dispersion model) to calculate the three-dimensional wind field and radionuclide dispersion, respectively. The wind patterns observed at Gijang, near the plants, and at meteorological sites in Busan, were reproduced and applied to estimates of seasonally averaged wind fields. The distribution of emitted radionuclides are strongly associated with characteristics of topography and synoptic wind patterns over nuclear power plants. Since the terrain around the power plants is complex, estimates of radionuclide distribution often produce unexpected results when wind data from different sites are used in statistical calculations. It is highly probable that in the summer and autumn, radionuclides move south-west, towards the downtown metropolitan area. This study has clear limitations in that it uses the seasonal wind field rather than the daily wind field.

Key words : nuclear accident, response scenarios, radionuclide distribution, numerical model, WRF/FLEXPART

1. 서론

인구 증가와 경제적 발전을 위한 전력 수요의 급격한 증가로 전력 생산을 위한 발전설비가 확충되고 있다. 특히 원자력 발전은 다른 발전 방법에 비하여 경제

성이 뛰어나고, 대기오염 물질을 방출하지 않는다는 점 때문에 아직도 많은 국가에서 지속적으로 활용하고 있으며, 중국과 같은 신흥 경제 발전 국가에서는 2030년까지 200기의 원자력 발전소 건설을 진행할 예정이다. 우리나라의 경우에도 2015년 기준 1차 에너지

Received 24 April, 2018; Revised 2 May, 2018;

Accepted 5 May, 2018

*Corresponding author: Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Phone: +82-51-510-2706

E-mail: withshlee@pusan.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

공급의 12.8%를 원자력 생산으로 공급하고 있고, 그 공급 비율도 점차 늘어날 전망이다(Korea Energy Agency, 2016). 그러나 1986년의 체르노빌과 2011년의 후쿠시마 원자력 발전소 사고를 기점으로 원자력 발전소의 사고 위험성에 대한 관심이 증가하게 되었고, 중대 원자력 발전소 사고에 대한 방재적인 측면에서의 대책 마련을 위하여 세계 각국 정부가 노력하고 있다. 원전 재난 발생 시 방사능 물질에 의한 피해는 예측이 어려울 뿐 아니라 방사능 물질이 장기적으로 영향을 미치기 때문에 매우 신중하게 접근하여야 한다(Korea Institute of Nuclear Safety, 2012).

우리나라의 원자력 발전소를 비롯한 대부분의 원자로는 냉각수 확보를 위하여 연안에 위치하고 있다. 특히 우리나라는 국토가 복잡한 산악 지역으로 구성되어 원자료가 위치한 연안 지역에서는 산악에 의하여 생성되는 산곡풍이 연안 해륙풍과 결합되어 매우 복잡한 형태의 풍계가 나타난다. 실제 바람 정보는 원자력 발전소 사고 시 방출되는 방사능 물질의 확산 예측에 가장 중요한 요소로 작용하는데, 한반도 지역의 복잡한 풍계는 방사능 물질 확산 예측에 대한 불확실성을 높이는 역할을 한다. 이러한 예측의 어려움 때문에 원전 사고 예측에 수치적인 접근법을 주로 적용한다.

최근 원자력 발전소 사고에 적용된 수치적인 접근은 3차원 기상장과 입자 확산장을 예측하는 수치모형에 기반한다. 수치모형을 활용한 방사능 물질 사고 확산 예측 연구는 체르노빌 사고와 후쿠시마 사고를 중심으로 진행되었으며, 주로 사고 상황의 재현을 중심으로 이루어 졌다(Srinivas et al., 2012; Korsakissok et al., 2013; Saunier et al., 2013; Girard et al., 2016). Sthol et al.(2012)은 방사능 물질의 화학적 특성을 고려한 FLEXPART 모형을 적용하여 후쿠시마 원자력 발전소 사고 시 방출된 제논과 세슘의 확산 및 침적 특성을 분석하였다. 분석 결과 방사능 물질의 방출은 사고 기간 중의 대기 상태에 따라 달라지고 일본뿐 아니라 북반구 전체에 영향을 주었다고 제시하였다. Hsu et al.(2012)는 원전 사고에 따른 방사능 물질의 북반구 전체 확산장을 산출하고 방사능 구름을 관측하여 요오드와 세슘의 이동 특성을 제시하였다. 국내의 경우 Jeong et al.(2013)은 가우시안 플럼 모형을 기준으로

설계한 RADCONS Ver. 1.0 (Radiological Consequence Assessment Program)모형을 제시하고, 이 모형을 이용하여 원전 사고에 의한 영향을 매우 신속하게 산출할 수 있음을 보였다. An et al.(2015)은 한반도 동남부에 위치한 고리 원자력 발전소를 대상으로 특정 사례의 방사능 물질 확산 실험을 실시하여 복잡한 지형에 따른 특성을 제시하였다. 또한 원자력 연구원(2007)에서는 방사능 물질의 장거리 확산을 평가하는 LADAS (Long-range accident dose assessments)를 개발하고 원자력 발전소 사고 시 장거리 수송의 영향을 평가한다.

이와 같이 이전 연구에서의 원자력 발전소 사고에 의한 방사능 확산 예측은 지형적 특성, 대기안정도, 바람, 강수 등의 기상 환경, 방출되는 물질 등에 의하여 매우 높은 불확실성을 가지며, 이러한 불확실성을 제거하기 위해서 가능하면 최선의 바람장 분포를 산출하여야 한다고 결론짓고 있다. 그러나 수치적 방법을 통한 3차원 바람장의 산출은 방대한 양의 계산을 동반하기 때문에 신속한 산출이 현재 전산 기술로는 어렵다.

원자력 발전소 사고의 방재는 방사능 물질의 확산 상태를 정확히 평가하고 인적 피해를 줄이기 위한 소개가 요구된다. 현재 수치적인 접근법은 정확도가 높고 단기적인 확산 특성을 제시하는 장점은 있으나, 방재에서 가장 중요한 결과 산출 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 따라서 본 연구는 먼저 원자력 발전소 주변의 장기적인 바람장 분석을 통하여 바람 발생 빈도를 산출한다. 이후 특정 방향의 바람장을 입력장으로 하여 원자력 발전소 사고 시 예측에 사용되는 방사능 물질의 확산 모델을 통하여 대표적인 확산 사례를 산출한다. 이후 산출된 방사능 물질의 확산 결과와 바람의 발생 빈도를 서로 통합하여 원자력 발전소 주변의 방사능 확산 가능 지도를 생산한다. 이러한 연구 결과는 원자력 발전소 사고 시 1차적인 피해 지역을 판단하는 중요한 자료로 활용될 수 있다.

2. 자료 및 연구 방법

2.1. 연구 대상 지역

본 연구는 한반도의 대표 원자력 발전 단지가 존재하고 주변에 부산과 울산이 위치하여 원자력 발전소

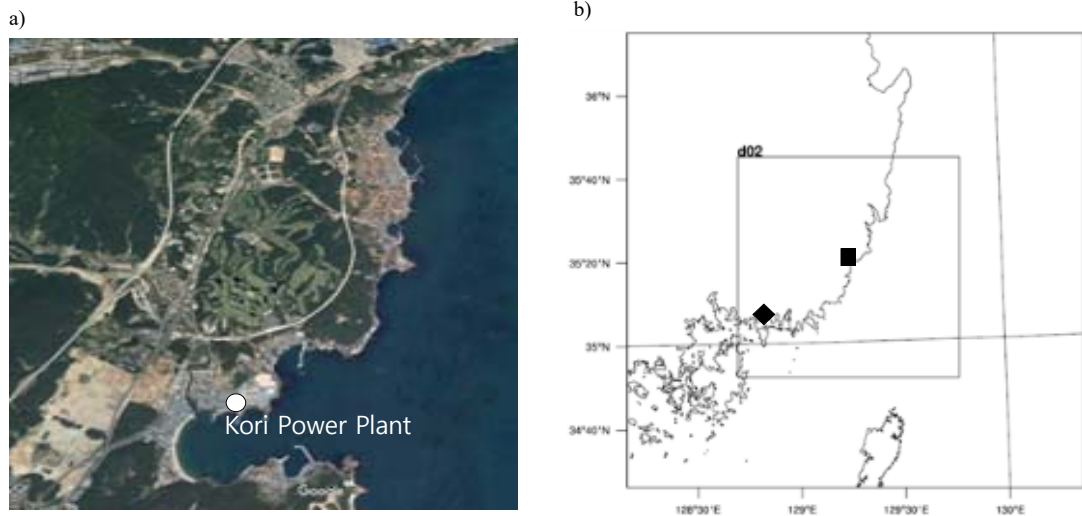


Fig. 1. a) Satellite image around Kori atomic energy power plant and b) model domains in this study, Closed rectangular and diamond indicate the Gijang meteorological site near the power plants and Busan meteorological site.

사고 발생 시 대규모 피해가 예상되는 경상남도 기장군 장안읍 고리 원자력 발전소를 대상으로 설정하였다. Fig. 1a는 고리 원자력 발전소의 위치와 주변의 지형을 나타낸 것이다.

고리 원자력 발전 단지는 현재 6개의 발전기가 가동 중에 있으며, 신고리 3, 4호기가 건설 중이고, 5, 6호기가 계획되고 있다. 2015년 6월에 산업통상자원부에서 발표한 제7차 전력수급기본계획에 따르면 2029년 원자력 발전은 전체 전력 생산의 28.5%를 담당할 것으로 보고 있다. 따라서 고리 원자력 발전 단지 주변은 지속적으로 개발될 가능성이 있다.

행정 구역상 경상남도에 위치한 고리는 부산과 울산의 중간 지역에 위치하며, 냉각수 확보 및 연료 수송을 위하여 남쪽에 바다를 면하고 있다. 또한 백두대간의 마지막 산악인 가지산 등이 북동쪽에 위치하며 남서 방향으로 높은 산악이 위치한다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 복잡한 산악에 의한 산곡풍과 해륙풍이 복합적으로 나타날 가능성이 크다.

2.2. 수치 모델

본 연구의 최종 목적인 방사능 위험 지도 작성을 위하여 고리 원자력 발전소 주변의 바람장을 정확히 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 3차원 대기 역학 모

형 WRF(Weather Research and Forecasting)을 적용하여 바람장을 생성하였다 (Skamarock et al., 2008). WRF는 비정역학 방정식계를 가진 대기 역학 모형으로 현재 우리나라를 비롯하여 많은 국가에서 기상 예보 모형으로 사용하고 있다.

수치모델의 최종 도메인 영역은 고리 원자력 발전소를 중심으로 약 100 km 크기로 설정하였으며, 격자 간격은 1000 m 로 설정하여 총 동서와 남북으로 각각 97개의 격자를 가진다(Fig. 1b). 도메인 경계의 5개 격자는 Davis relaxation을 위한 것으로 현재 분석에는 적용하지 않았다. 연직 격자는 지표면의 급격한 열적, 역학적 변동에 대응하기 위하여 하층일수록 조밀하게 설정하여, 1 km 이하에 총 15개 층의 격자를 설정하였다. 모델에 적용한 물리 옵션은 Table 1에 제시하였다.

본 연구에서 생성되는 바람장은 특정일의 바람장이 아닌 8개 방위의 일반적인 기상 상태를 중심으로 작성된다. 따라서 특정 방향에서 바람이 지속적으로 유입되는 이상적인 초기 및 경계조건을 적용하였다. 기본 풍향은 8방위의 서로 다른 방향으로 설정하였다. 이 때 초기 풍속은 부산 지역의 연평균 바람인 1.5 m/s로 하고, 8개의 서로 다른 유입 방향을 가진 각각의

Table 1. Descriptions of WRF simulations

WRF	d01	d02
Horizontal grid	67 × 67	97 × 97
Resolution	3 km	1 km
Vertical layers	30 Layers	
Physical process	Morrison double-moment scheme	
	RRTMG Radiation scheme	
	Noah Land Surface Model	
	YSU PBL scheme	
Options	Kain-Fritsch scheme	
	Grid nudging (6 hours)	
	RTG SST (0.083deg x 0.083deg)	

바람장을 산출하였다.

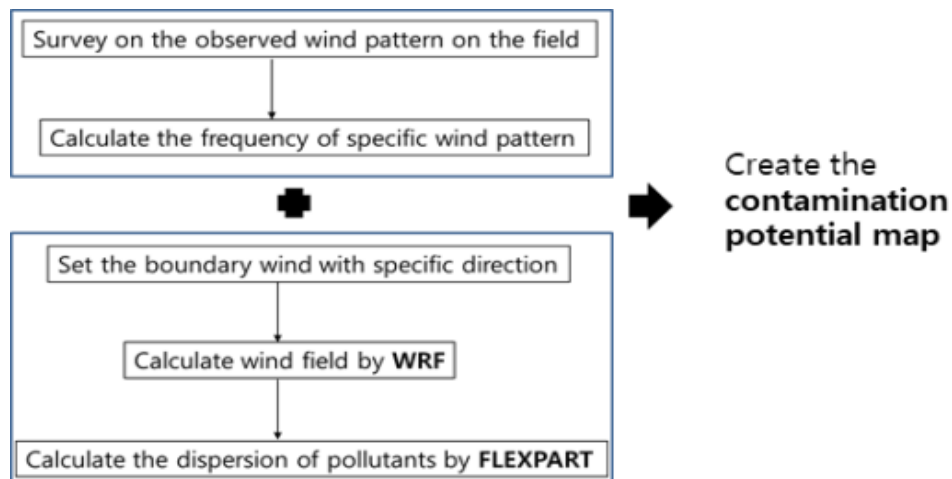
또한 방사능 물질의 확산을 계산하기 위하여 라그랑지안 입자 확산 모형인 FLEXPART를 사용하였다. FLEXPART는 노르웨이 기상연구소에서 개발한 방사능 물질의 확산을 계산하는 수치모형이다. 라주벵 방정식을 바탕으로 입자의 이동을 산출하며, 본 연구에서는 WRF에서 계산된 바람장을 적용하여 입자 확산을 산출한다. FLEXPART의 격자는 WRF 격자와 동일하게 설정하였다.

본 연구에 적용한 방사능 물질은 보편적인 원전 사고 시 관측되는 세슘 137을 산정하였다. 세슘 137은 반감기가 30.7년으로 길기 때문에 본 연구에서는 자

연 반감기에 의한 양적인 감소는 없는 것으로 판단한다. 또한 중력 낙하를 고려하여 입자 밀도는 1.9 g/mL, 건성 침적 속도는 0.002 m/s 로 설정하였다(Stohl et al., 2012). 방사능 물질의 방출은 분당 1000개를 지상에서 20 m 고도까지 균일하게 방출한다고 가정하였으며, 총 방출은 2시간으로 설정하였다.

긴급 방재 목적의 방사능 확산 가능 지도는 순간적인 확산장에 중점을 두는 것이 아니라 보편적인 확산 가능성을 중점을 둔다. 따라서 계절별 바람장의 특성을 종합적으로 평가하여야한다. 바람지도 작성을 위한 기본 계산 흐름도는 Fig. 2에 제시하였다.

먼저 관측 바람장 자료의 장기 분석을 바탕으로

**Fig. 2.** Flow chart for the estimation of each assembled wind fields.

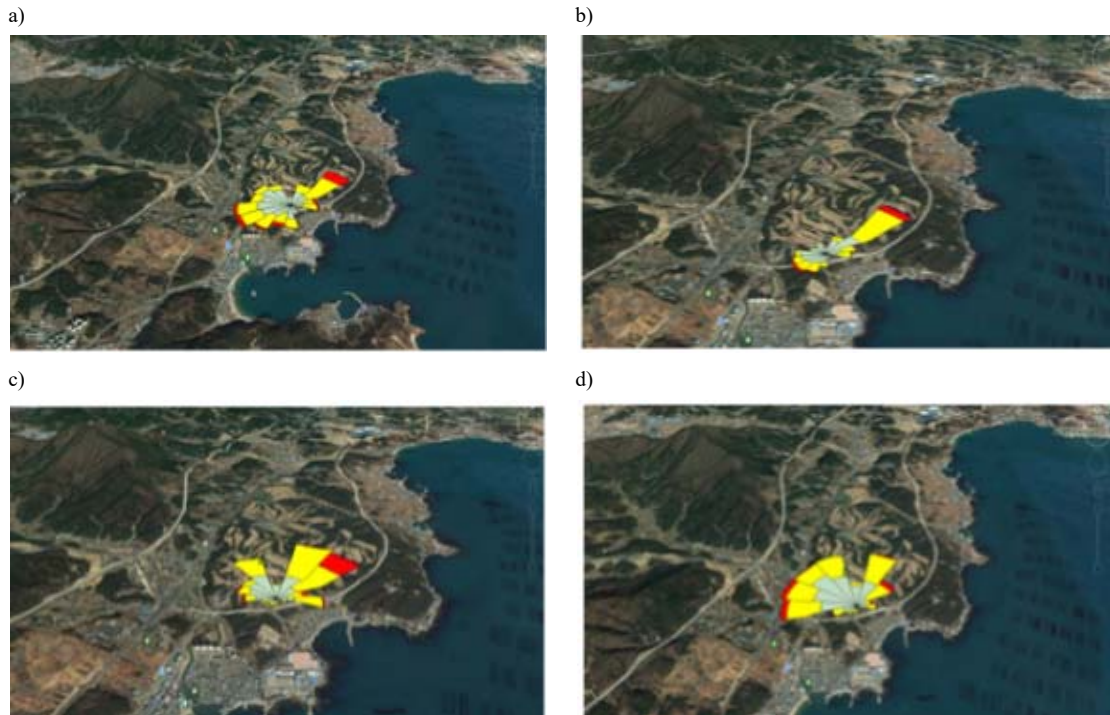


Fig. 3. Wind roses for a) spring, b) summer, c) autumn, and d) winter. The data used in the roses are observed at Gijang meteorological site for two years from 1 January, 2013. The center of wind roses indicate the location of observation site.

연구 대상 지역의 바람 특성을 분석한다. 특히 대상 지역 주변에서 관측된 풍향의 발생빈도를 산출한다. 방사능 사고의 확산은 풍향이 매우 중요한 인자이며 이에 따라 풍상과 풍하 지역이 결정되어 바람의 방향에 따라 인적, 물적 피해 정도가 달라진다.

두 번째로 3차원 대기 역학 모형을 통하여 특정 방향의 경계 바람자료를 가진 조건에서 바람장을 산출한다. 본 연구에서는 8개의 서로 다른 풍향을 가진 경계조건을 적용하였다. 경계에서 유입되는 바람은 연구 대상 지역의 평균 바람인 1.5 m/s로 설정하였으며, 연직적으로 1 km 고도까지 동일하다고 설정하였다. 오염물질의 확산은 대기 안정도가 매우 중요한 요소이다. 본 연구의 목적은 보편적이며 일반적인 상태에서의 확산 가능성을 평가하는 것이기 때문에 열적인 대기 안정도는 약한 안정 상태를 가정하여 연직 온도 기울기를 설정하였다.

이후 WRF에서 산출된 3차원 바람장을 입자 확산

모형인 FLEXPART에 적용하여 고리 원자력 발전소에서 방출된 입자의 분포를 평가한다. 입자는 원자력 방사능 물질을 상징하고 입자 1개당 일정 정도의 방사능을 포함한다고 가정하여 입자의 개수로 방사능강도를 평가한다.

세 번째로 첫 번째 단계에서 산출한 풍향의 발생 빈도와 각 방향별 확산장을 고려하여 연구 대상 지역에서의 긴급한 원자력 발전소 사고가 발생할 경우 방사능의 확산 가능성을 평가하는 분포도를 작성한다. 이 확산 가능성 지도는 바람이 발생할 수 있는 계절 및 연중 풍향 및 풍속을 고려하여 작성된 것으로 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 국지 바람장 분석

방사능 오염물질의 확산예측은 바람장을 정확히

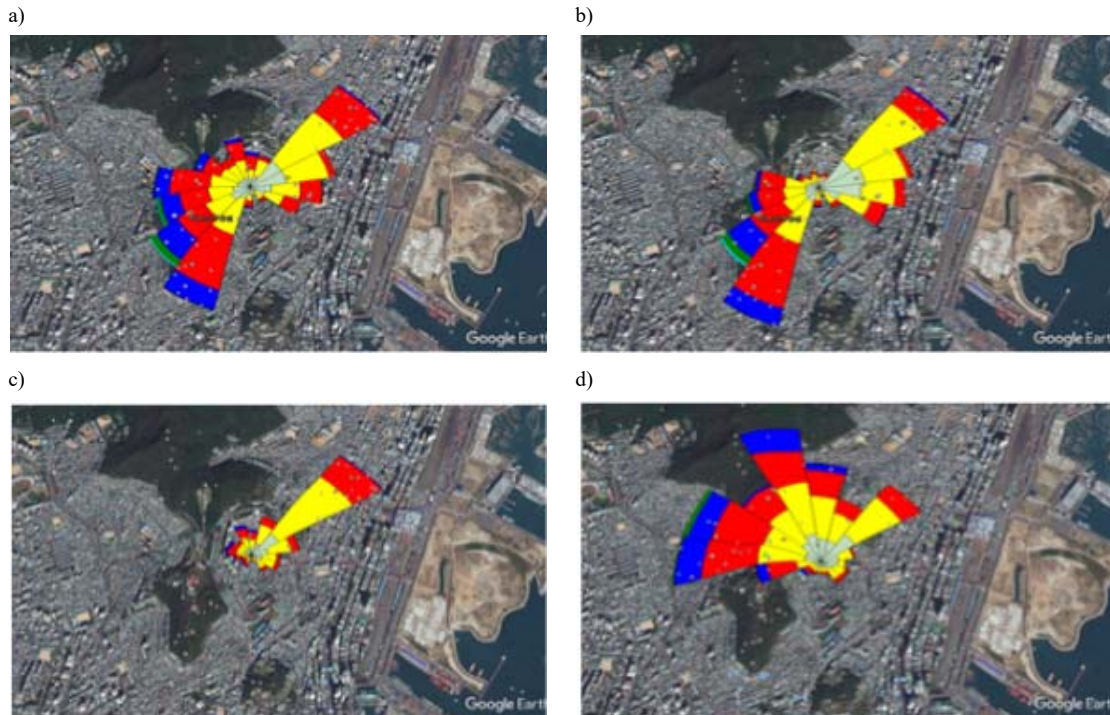


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for Busan meteorological site, the location of Busan observation site is in Fig.1(b).

분석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구는 특정일에 대한 확산장을 평가하는 것이 아니라 고리 원자력 발전소에서 사고가 발생했을 경우 주변 지역의 방재적 측면에서 원자력 발전소 사고에 따른 피해가능성을 평가한다는 측면에서 장기적인 바람장의 분석이 필수적이다.

Fig. 3은 2013년부터 2015년까지 2년간 고리 원자력 발전소에서 가장 근접한 기상청 관측소인 기장에서 관측한 바람장미를 계절별로 나타낸 것이다. Fig. 1에서 제시한 바와 같이 해안선을 따라 산악이 북동-남서 방향으로 발달하여 있기 때문에 대체적으로 바람은 북동 또는 남서풍이 주를 이루고 있다. 따라서 방사능 물질은 이 두 방향으로 확산될 가능성이 높다고 판단된다. 또한 풍속 면에서 보면 겨울철을 제외하고 북동풍이 불 때 풍속의 강도가 높게 나타난다. 따라서 고리 원자력 발전소의 남서쪽 방향으로 방사능 물질이 멀리 이류할 가능성이 높다.

반면 고리 주변 지역의 대표적인 바람정보를 제공

한 부산 기상청 관측소의 바람장미를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 부산 관측소 북쪽에 위치한 산악에 의하여 남서풍의 빈도가 높게 나타난다. 또한 남쪽에 바다가 위치하고 있기 때문에 해풍 유입의 빈도가 높은 것으로 판단된다. 종관기상학적으로 동일한 지역에 위치하기 때문에 전체적인 바람장미의 분포, 즉 북동풍과 남서풍의 빈도가 높다는 측면에서 유사성을 가지지만 지형적인 특성에 따른 풍속 및 다른 방향의 바람 빈도의 차이가 나타난다.

이러한 바람의 차이를 정량적으로 보기 위하여 부산과 기장 관측소의 8개 바람 방향의 빈도를 구하였다. Table 2는 각각 부산과 기장에서 산출한 풍향별 바람 빈도를 나타낸 것이다. 앞서 살펴본 바와 같이 편서풍 지대에 위치한 영향으로 북풍과 서풍 계열의 바람이 두 지역 모두 지배적으로 나타난다. 그러나 풍향의 최빈값은 부산과 기장 관측소에서 차이가 나타나는데, 부산은 서풍, 남풍, 북풍 등 계절에 따른 차이가 큰 것에 비하여 기장의 경우 겨울을 제외하고 북동풍의

Table 2. Rate of occurrence of specific wind direction observed at Gijang and Busan sites

Gijang site								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Spring	0.06	0.21	0.09	0.02	0.10	0.15	0.18	0.17
Summer	0.06	0.30	0.11	0.03	0.10	0.17	0.15	0.08
Autumn	0.17	0.33	0.12	0.01	0.03	0.04	0.12	0.18
Winter	0.17	0.16	0.05	0.01	0.03	0.04	0.23	0.31
Total %	0.46 (12%)	1.00 (25%)	0.37 (9%)	0.07 (2%)	0.26 (6%)	0.40 (10%)	0.68 (17%)	0.74 (19%)
Busan site								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Spring	0.16	0.13	0.17	0.02	0.15	0.10	0.23	0.03
Summer	0.08	0.16	0.18	0.08	0.19	0.13	0.16	0.01
Autumn	0.26	0.25	0.17	0.03	0.06	0.03	0.16	0.04
Winter	0.39	0.09	0.06	0.02	0.05	0.02	0.28	0.08
Total %	0.89 (22%)	0.63 (16%)	0.58 (15%)	0.15 (4%)	0.45 (11%)	0.28 (7%)	0.83 (21%)	0.16 (4%)

빈도가 가장 많이 나타난다. 특히 종관기상학적으로 편서풍 지대에 위치한 기장에서 북동풍의 빈도가 크다는 것은 부산 관측소에 비하여 지형에 의한 영향이 고정적으로 작용한다는 것을 의미한다. 즉 기장은 지형적인 영향으로 종관기상학적인 바람보다는 지형에 의하여 특정 방향의 바람이 주로 발생하고 있다. 따라서 기장에서 원자력 발전소 사고에 따른 방사능 확산은 매우 제한적인 방향으로 이루어질 가능성이 있다.

3.2. 계절별 오염물질 이동 특성

긴급 방재 목적의 방사능 확산 가능성은 앞 절에서 산출된 바람 발생 빈도와 특정 방향에 따른 입자 확산 분포를 바탕으로 산출된다. Fig. 5는 WRF 모델을 이용해 특정 방향으로만 바람이 불도록 설정한 2시간 뒤의 바람벡터 값에 기장, 부산 지점의 계절별 풍향 비율을 반영하여 계산한 바람장이다. 즉, 각 계절별로 발생하는 보편적인 바람장을 의미한다. 봄철 기장의 풍계를 적용한 경우, 육지에서 바다로 나가는 바람이 약간 강하게 나타나지만 풍속 자체는 크지 않다.

반면 부산의 풍계를 적용한 경우 전체적으로 특정한 방향성을 가지지 않으며 풍속이 매우 약하다. 여름의 경우 봄철 풍계와 유사한 경향을 가지지만 풍속이 봄철에 비하여 강해지는 특징이 있다. 특히 부산 풍계

를 적용한 경우에 바다에서 육지로 유입되는 비율이 증가한다.

가을철에는 약간의 풍향의 차이는 있지만 기장과 부산의 풍계 모두 북동풍이 강하게 나타나고 있다. 이는 Table 2에서 제시한 북동풍의 높은 발생 비율과 일치하는 결과이다. 이러한 풍계 분포에 따라 고리 지역의 방사능 물질은 해안선을 따라 이동할 가능성이 크다.

겨울철의 평균 바람은 강한 시베리아 고기압의 영향을 받아 북서풍이 전체적으로 강하게 나타난다. 이는 기장 및 부산 풍계 모두에서 동일하게 나타난다. 따라서 겨울철의 방사능 물질의 이동은 강한 북서풍에 의하여 해상으로 확산될 것으로 예상된다. 따라서 여름철과 가을철의 경우 동풍 계열, 북동풍의 바람이 불면서 부산 도심 지역으로 방사능 물질이 확산될 것으로 예측할 수 있기 때문에 여름, 가을철의 방재대책이 중요할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 기장과 부산 관측소의 바람 발생 빈도를 바탕으로 계절별 방사능 물질의 확산 가능성 지도를 나타낸 것이다. 관측 지점별로 방사능 물질의 농도가 높게 나타나는 겨울철의 농도 최댓값을 기준으로 농도를 나타내었다. 먼저 모든 계절에서 북서 지역의 산악

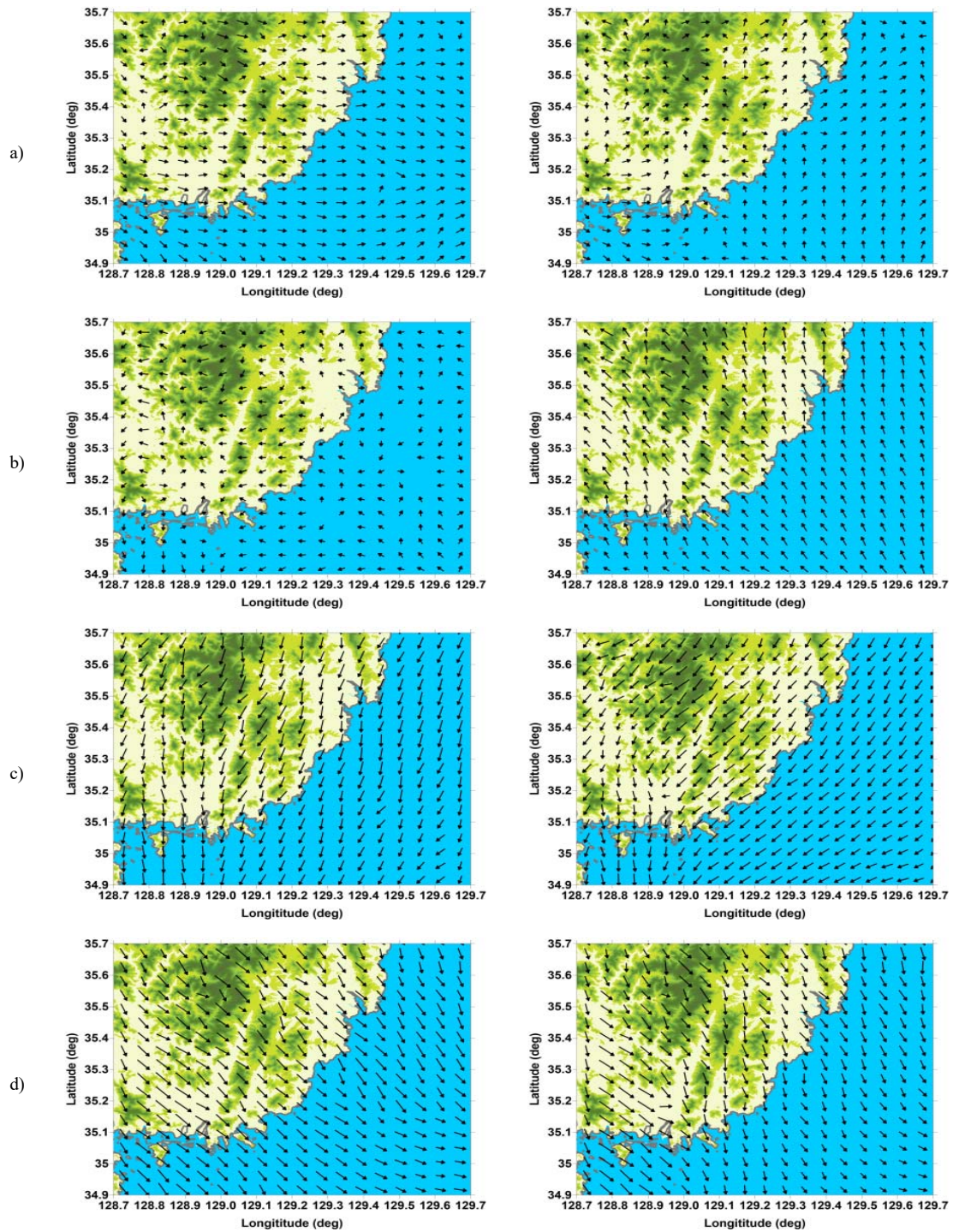


Fig. 5. Estimated wind vectors at a) spring, b) Summer, c) autumn, and d) winter . Wind data are calculated with the consideration of wind direction occurrence rate at Gijang (Left panels) and Busan (Right panels) site at Table 2.

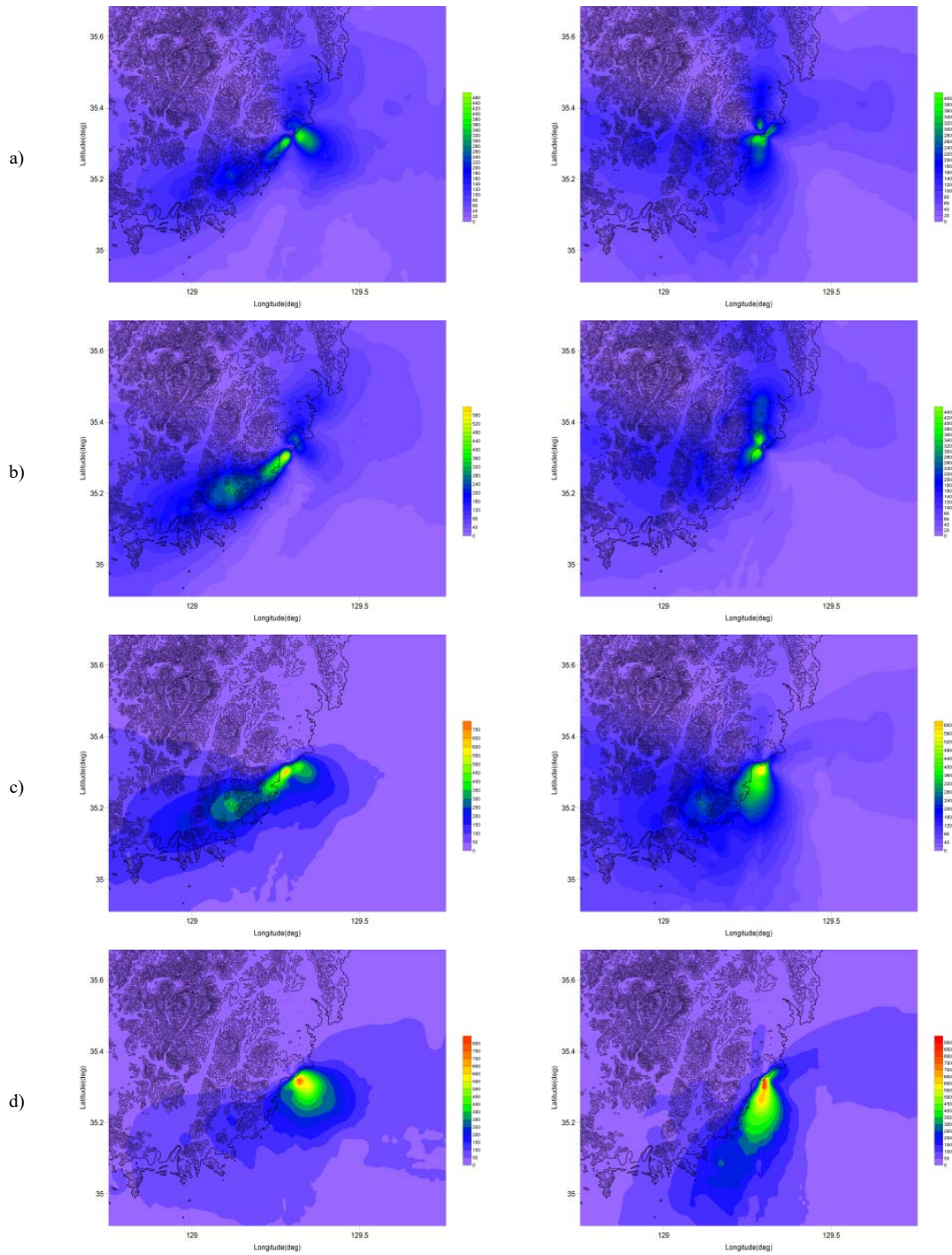


Fig. 6. Estimated concentration of radioactivity material after two hours release at a) spring b) summer, c) autumn, and d) winter. These concentrations are based on wind occurrence rate observed at Gijang (left panels), and Busan (right panels) sites. The core of concentration indicates the release point of materials.

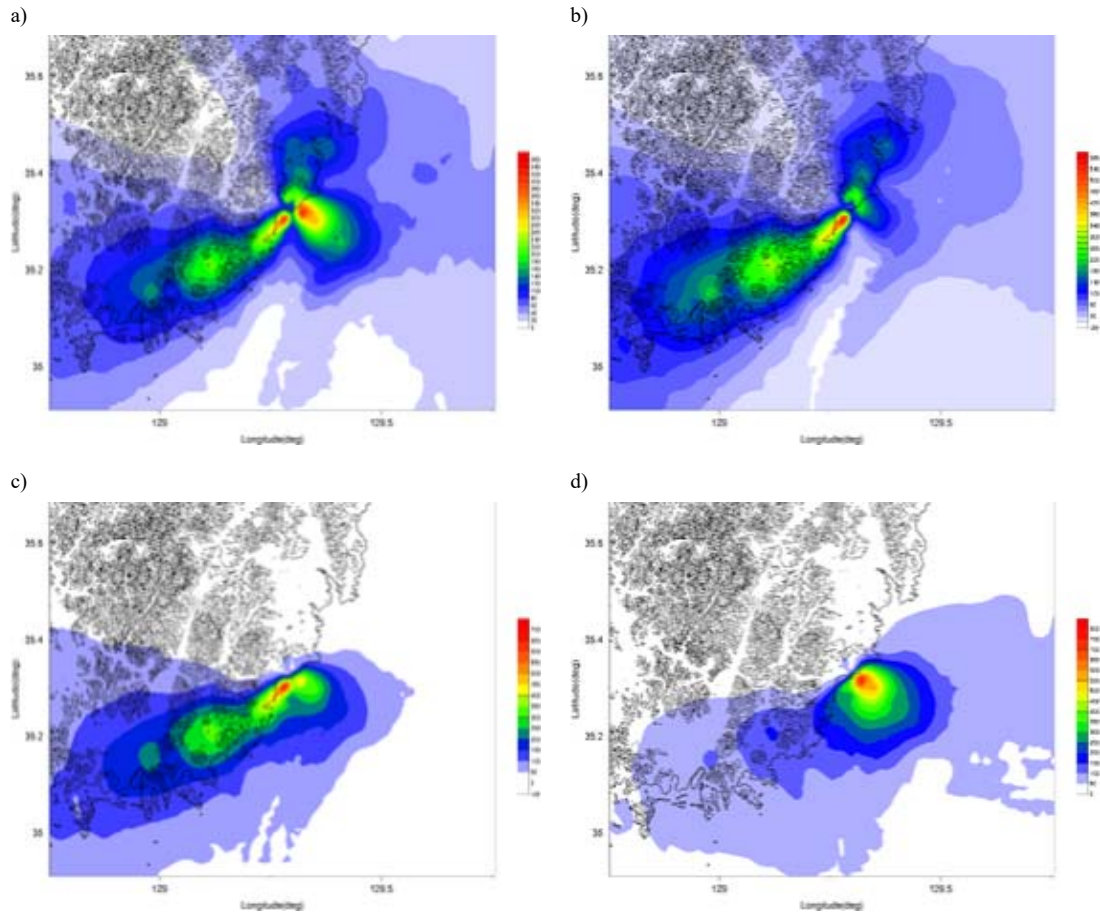


Fig. 7. Estimated concentration of radioactivity material after four hours release at a) spring b) summer, c) autumn, and d) winter. Wind data in this concentrations are based on the data observed at Gijang site.

방향으로 방사능 물질이 확산될 가능성은 크지 않다. 이는 한반도 동남부 산악 지형이 북동-남서 방향으로 위치하기 때문으로 판단된다. 봄철 기장의 바람을 적용한 경우, 오염 물질의 확산은 해안선을 따라서 주로 나타나며, 북쪽 방향보다는 남쪽 방향으로 확산이 나타나는 것을 볼 수 있다.

또한 해상으로 확산이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 봄철 북동풍과 서풍의 발생 비율이 각각 21%와 18%로 높기 때문이다. 반면 부산의 바람을 적용한 경우, 기장에 비하여 해상에서의 확산 영역이 좁고 북쪽으로 이동 비율이 더 높은 것으로 나타난다. 이는 기장에 비하여 남풍의 빈도가 높기 때문이다. 여름의 경우

기장의 바람은 전체적으로 봄철과 매우 유사한 경향을 보이지만 북동풍의 빈도와 풍속이 증가하면서 남서쪽으로 방사능 확산 정도가 크게 나타난다. 반면 부산의 바람을 적용한 경우 고농도 지역이 매우 제한적이다.

가을철 기장 바람을 적용한 경우 북동풍의 빈도가 33%로 매우 높기 때문에 고리 원자력 발전소 주변의 해안선을 따라서 고농도가 나타나고 있으며, 부산의 바람을 적용한 경우 다양한 풍속이 나타나기 때문 원자력 발전소 주변을 중심으로 고농도가 나타난다. 겨울철 기장 바람은 북풍과 서풍 계열이 비슷한 빈도로 나타나기 때문에 대부분의 오염 물질이 해상으로 이

동하는 것을 볼 수 있다.

따라서 봄철, 여름철, 가을철의 경우 부산 중심부로 방사능 물질의 확산 가능성이 크게 나타난다. 특히 가을철에는 고리 원자력 발전소에서 방출된 방사능 물질의 많은 부분이 부산 도심으로 유입될 가능성이 크다. 따라서 가을철에 사고가 발생할 경우 부산 지역의 방재 시나리오를 면밀히 검토할 필요가 있다. 반면 겨울철의 경우 강한 북서풍에 의하여 방출된 방사능 입자는 해상으로 이동할 가능성이 크며, 육상의 피해는 다른 계절에 비하여 크지 않을 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 7은 기상 바람정보를 적용한 방사능 확산 4시간 후의 오염 물질 분포 가능성을 평가한 것이다. 방출 4시간 뒤의 분포를 보면 전체적으로 방출 2시간 뒤의 분포와 거의 유사하지만 바람에 의한 이류와 확산의 확대로 인하여 오염 지역이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 특히 방출 2시간 뒤의 분포보다 부산 도심지로 유입되는 방사능 물질의 양이 증가한다. 또한 입자 확산에서 뚜렷한 특징은 고농도의 플럼이 부산 지역의 중심부에 출현한다는 점이다. 고리 원자력 발전소의 남서쪽에 위치한 부산 지역에 방사능 물질이 유입되면 해안선을 따라 유입되지만, 부산 지역 서쪽에 위치한 백양산, 승학산, 금정산 등에 의하여 서쪽으로의 이류가 제한된다. 따라서 고농도 플럼이 부산 중심부 지역에 나타나게 된다. 따라서 방재적인 측면에서 연안 지역과 도시 중심부 유입에 따른 대책방안을 준비하여야 할 것이다.

4. 결론 및 토의

원자력 발전소 사고에 대한 방재적인 측면에서 고리 원자력 발전 단지 주변의 긴급 확산 사고에 따른 방사능 물질 확산 가능성을 수치모델을 통하여 분석하였다. 본 연구는 원자력 발전소 주변의 기상 기상 관측소에서 측정한 2013년부터 2015년까지 2개년 동안의 자료 분석을 통하여 바람 발생 빈도를 분석하였다. 또한 3차원 대기역학모형 WRF와 입자 확산 모형 FLEXPART를 통하여 각 바람별 3차원 바람장 및 입자 확산장을 생산하였다. 바람장 분석 자료와 입자 확산장 자료를 통합하여 원자력 발전소에서 사고가 발생하였을 때 방사능 물질의 계절별 확산 가능성 지도

를 작성하였다. 지도 분석 결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 해안과 나란한 방향으로 발달한 산악 지형의 영향으로 고리 원자력단지 주변의 바람은 주로 북동-남서 방향으로 형성된다. 이러한 바람장은 실제 방사능 물질의 확산에 중요한 요인으로 작용한다.

2) 가장 관측 지점의 바람은 영남 지역의 대표 관측소인 부산 관측소와 비교하여 비슷한 주풍을 가지지만 방향에 따라 발생빈도가 다르게 분포한다. 따라서 동일한 행정구역에 위치하지만 실제 바람의 발생 경향은 지형에 따라 다르게 나타날 수 있다.

3) 봄철에는 고리 원자력 발전 단지의 남서쪽 지역과 해상으로 확산될 가능성이 높게 나타난다. 그리고 여름철과 가을철에는 해상으로의 확산이 줄어드는 반면 남서쪽으로의 확산량이 늘어나고 특히 가을의 경우 남서 방향으로 확산되는 양이 크게 증가한다. 따라서 방재적 측면에서는 여름철과 가을철에 긴급사태가 발생할 경우 피해 규모가 크게 나타날 가능성이 있다.

4) 발생 4시간 후의 방사능 물질 농도분포를 살펴 보았을 때, 부산 서부에 위치한 산악 지형의 영향으로 인하여 확산된 방사능 물질이 부산 중심부에 고농도로 집중될 가능성이 있다. 따라서 지형과 방사능 물질의 이류 특성을 면밀히 분석할 필요가 있다.

본 연구는 계절적인 평균 바람 정보를 바탕으로 작성된 결과이기 때문에 발전소 주변의 실제 바람은 평균 바람 정보와 다르게 나타날 수 있으며, 특히 중관 강제력과 중규모 강제력이 복합적으로 나타나는 한반도 동남 지역의 경우 일중 바람 변동이 크기 때문에 실제 바람과 평균 바람 분포와 차이가 클 것이다. 따라서 본 연구 결과와 실제 물질 확산을 예측한 방사능 물질의 확산 특성은 다르게 나타날 가능성이 있다.

그러나 방재적 측면에서 방사능 물질의 누출에 따른 대책은 발생과 동시에 이루어져야 함에도 정확한 확산량 및 바람장 계산에 정보수집 및 계산 시간이 많이 소요되기 때문에 신속한 예측에 어려움이 있다. 따라서 사고 발생 시점에 대한 방사능 물질의 확산 특성 정보를 미리 파악하고 이에 대처하는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 본 연구는 평균적인 바람특성을 적용하여 방사능 물질의 계절별 확산 가능성 지도를 작성함으로써 신속한 피해예측 및 분석에 도움이 될 것

으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 기본 연구지원 사업(2년)에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, H. Y., Kang, Y. H., Song, S. K., Bang, J. H., 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.*, 24, 81-96.
- Girard, S., Mallet, V., Irène Korsakissok, I., Mathieu, A., 2016, Emulation and Sobol' sensitivity analysis of an atmospheric dispersion model applied to the Fukushima nuclear accident, *J Geophys. Res.*, 121(7), 3484-3496.
- Hsu, S. C., Huh, C. A., Chan, C. Y., Lin, S. H., Lin, F. J., Liu, S. C., 2012, Hemispheric dispersion of radioactive plume laced with fission nuclides from the Fukushima nuclear event, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L00G22.
- Jeong, H., Park, M., Hwang, W., Kim, E., Han, M., 2013, Development and application of radiological risk assessment program RADCONS, *J. Environ Imp. Assess.*, 22(1), pp.89-97.
- Korea Atomic Energy Research Institute, 2007, Radiological dose assessments through the atmospheric environment. KAERI/RR-2769/2006, Ministry of Science and Technology.
- Korea Energy Agency, 2016, Energy statics handbook, 310p.
- Korea Institute of Nuclear Safety, 2012, 2011 Nuclear safety yearbook, 11-1410000-00273-10. Ministry of Trade, Industry and Energy.
- Korsakissok, I., Mathieu, A., Didier, D., 2013, Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima nuclear power plant accident: A Local scale simulation and sensitivity study, *Atmos Environ.*, 70, 267 - 279.
- Saunier, O., Mathieu, A., Didier, D., Tombette, M., Quélo, D., Winiarek, V., Bocquet, M., 2013, An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima nuclear power plant accident using gamma dose rate observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11403-11421.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech Notes-475+STR.
- Srinivas, C. V., Venkatesan, R., Baskaran, R., Rajagopal, V., Venkatraman, B., 2012, Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor, *Atmos. Environ.*, 61, 66-84.
- Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhart, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., Yasunari, T. J., 2012, Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2313-2343.