

CALPUFF와 HYSPLIT의 방사성물질 대기확산 특성 비교

Comparison of CALPUFF and HYSPLIT Models for Atmospheric Dispersion Simulations of Radioactive Materials

안혜연 · 강윤희¹⁾ · 송상근²⁾ · 김유근*

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경연구원, ²⁾제주대학교 지구해양과학과
(2015년 6월 25일 접수, 2015년 9월 15일 수정, 2015년 10월 26일 채택)

Hye Yeon An, Yoon-Hee Kang¹⁾, Sang-Keun Song²⁾ and Yoo-Keun Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University

¹⁾*The Institute of Environmental Studies, Pusan National University*

²⁾*Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University*

(Received 25 June 2015, revised 15 September 2015, accepted 26 October 2015)

Abstract

In this study, the atmospheric dispersion of radioactive material (¹³⁷Cs) was simulated with regard to its impact within a 50-km radius from the Kori Nuclear Power Plant (NKPP) based on two different types of models (the non-steady-state puff model CALPUFF and the lagrangian model HYSPLIT) during the spring of 2012 (May 2012). The dispersion distribution of ¹³⁷Cs calculated in the CALPUFF model was similar to that of the HYSPLIT model, but the magnitudes of differences in its spatio-temporal concentrations between the two models were different. The ¹³⁷Cs concentrations simulated by the CALPUFF were significantly lower than those of the HYSPLIT due to a limitation of puff models (e.g. puff size growth over time). The CALPUFF had the advantage of determining the dispersion of radioactive materials and their impacts on the surrounding regions, compared with the HYSPLIT that had high concentrations of ¹³⁷Cs in only small local areas with the movement of air masses along the local winds.

Key words : CALPUFF, HYSPLIT, Atmospheric dispersion, Radioactive material

1. 서 론

2011년 발생한 후쿠시마 사고 이전에는 원전의 용량 증대 및 효율화가 원자력사업 추진에 있어 주요 논점이었던 반면, 사고 이후에는 원자력정책 결정에 있

어 원자력 안전성 문제가 핵심이 되었다. 원자력안전의 중요성이 부각됨에 따라 만일의 원전재난 발생시 신속하고 정확한 판단을 지원하기 위한 국가 원자력 재난관리 시스템 (AtomCARE)이 운영 중에 있다 (Nuclear safety and security commission, 2015). 그러나 후쿠시마 원전사고와 국내 원전의 안전성에 대한 문제가 끊임없이 제기되고 있는 현실 속에서 국내의 원전 규모와 국민의 관심도에 비해 방사성유출물의 확산 예

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-510-2282, E-mail : kimyk@pusan.ac.kr

측에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

최근 상세 바람장 예측을 위한 3차원 기상모델과 기상/배출 조건을 입력받아 방사성물질의 대기 중 거동을 수치적으로 계산할 수 있는 대기확산모델을 통하여 방사성물질의 확산에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. Päsler-Sauer (2010)은 라그랑지안 퍼프모델(Lagrangian puff model)인 ATSTEP, 가우시안 퍼프모델(Gaussian puff model)인 RIMPUFF(Risø Mesoscale PUFF model)와 라그랑지안 입자확산모델(Lagrangian particle dispersion model)인 DIPCOT(DIsPersion over COMplex Terrain)을 대상으로 여러 조건별(배출고도, 기상조건, 토지피복도 등) 방사성물질 확산모델링 결과, DIPCOT 모델은 복잡한 기상 조건에서 풍향의 변화와 그에 따른 입자의 이동을 정확하게 계산하는 특성을 보였고, ATSTEP과 RIMPUFF 모델은 최고농도가 나타나는 지역을 유사하게 모의하는 특성을 확인하였다. 또한 Connan *et al.* (2013)은 RIMPUFF, 라그랑지안 입자확산모델인 HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), 가우시안 플룸 모델(Gaussian plume model)인 ADMS(Atmospheric Dispersion Modelling System)을 이용하여 ^{85}Kr 에 대한 대기확산 및 침적량을 계산한 결과, RIMPUFF와 HYSPLIT은 ^{85}Kr 최고농도의 분포를 모의하는데 적절한 반면 ADMS는 ^{85}Kr 농도를 과소모의하는 특성을 확인하였다. 국내의 경우, Kim and Song(2003)은 1999년에 발생한 일본 방사능누출 사고를 대상으로 라그랑지안 입자확산모델링(연구자 개발 모델, 독일 기상청의 LPDM, HYSPLIT) 결과를 비교하였고, Ministry of Science and Technology(2007)는 대기방사선 피폭해석시스템인 LADAS(Long-range Accident Dose Assessment)를 개발하여 LADAS와 ATMES(Atmospheric Transport Model Evaluation Study)에 참가한 다양한 라그랑지안 및 오일러리안 모델과 비교하였다.

이상의 연구결과에서 각 대기확산 모델들은 서로 다른 계산방식으로 인해 정도의 차이는 있으나 상이한 예측 결과가 제시될 수 있음을 보여주었다. 특히 방사성물질은 인체에 노출되었을 경우 유전자 손상, 신경이상, 장기적으로는 암 발생 등 인체에 미치는 영향이 크며, 이러한 방사성물질의 확산 및 피해범위 예측은 모델의 예측특성을 바탕으로 한 모델링 결과의 이해와 해석이 필수적이다. 국내에서는 방사성물질의 대기 중

확산에 관한 다양한 연구가 수행되었으나, 대부분 특정 모델을 사용한 방사성물질의 확산 특성 연구가 많았고 대기확산모델에 따른 방사성물질 확산을 분석한 연구는 거의 없음을 확인하였다. 또한, 연구 대상사례일의 경우 단기적인 기상사례일에 대한 분석이 주를 이루었고, 격자 해상도가 대부분 지역규모로 국지지역에 대한 분석이 부재하였다. 이에 본 연구에서는 국내 원전 중 원전 인근에 가장 많은 인구가 밀집한 고리원전을 대상으로 중관장이 상대적으로 약해 국지기상 현상이 잘 발달할 수 있는 2012년 5월 한 달에 대해 가우시안 퍼프모델과 라그랑지안 입자확산모델의 대표적 모델인 CALPUFF와 HYSPLIT을 이용한 방사성물질의 대기확산모델링을 수행하고, 두 모델의 확산특성을 비교·분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 CALPUFF와 HYSPLIT

CALPUFF(California Puff model)는 가우시안 퍼프 모델로 미국 EPA의 권장 모델의 하나로 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 잘게 나누어진 연기덩어리(Puff)의 형태로 배출된다고 가정하고, 배출된 퍼프들이 3차원 공간 해상도를 갖는 바람장을 따라 이동, 확산하면서 수용지점에 미치는 영향을 농도 형태로 나타내는 모델이다(Koo *et al.*, 2007). CALPUFF는 비정상상태(Non-steady-state) 모델로 점·면 오염원에 대한 시간적인 농도 변화 계산이 가능하고, 오염원으로부터 수십 m~수백 km까지 모델링, 1시간~1년까지의 평균화 시간에 대한 농도 예측, 거칠고 복잡한 지형 상황에 대한 모델링이 가능하다. CALPUFF 모델링 시스템은 기상관측자료 및 중규모 기상모델의 수행 결과를 처리하는 CALMET과 오염물질 확산과 농도를 계산하는 CALPUFF, 후처리 프로그램인 CALPOST로 구성되어 있다. CALMET 모델의 입력자료는 지형자료와 토지피복지도를 모델링에 적용하기 위한 전처리 작업(TERREL, CTGPROC, MAKEGEO) 수행 결과 생성된 자료와 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델과 같은 중규모 기상 모델의 수행결과를 처리하는 전처리 작업(CALWRF)을 수행하여 생성된 자료로 구성되어 있다. 전처리 작업에서 생성된 자료를 이용하여

3차원 바람장을 생성하기 위한 CALMET을 수행하고, CALMET 모델링 결과 생성된 3차원 바람 및 온도장과 2차원의 혼합고, 지표특성, 확산특성은 배출입력자료와 함께 CALPUFF 모델링을 수행하게 된다. CALPOST는 CALPUFF 모델링 수행 결과 파일을 처리하기 위해 사용되며 지점별 또는 시간별 농도 등을 확인할 수 있다.

또 다른 대기확산모델인 HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델은 NOAA/ARL (National Ocean and Atmospheric Administration/Air Resources Laboratory)에서 개발된 라그랑지안 입자확산모델로 라그랑지안 방법에 기초한 수송·확산 과정을 계산하여 (Kim and Song, 2003) 오염물질의 농도뿐만 아니라 오염물질의 전방향 및 역방향으로의 궤적 추적이 가능하다. HYSPLIT과 같은 라그랑지안 입자 확산 모델은 연속적으로 배출되는 가상적인 입자들의 위치를 계속적으로 결정하며, 어느 주어진 시간의 농도 계산은 분석 영역을 격자화하여 격자체적내에 들어있는 입자의 수로 계산이 된다 (NOAA, 2014). HYSPLIT은 하나 또는 여러 개의 배출원에서 배출된 입자의 확산과 침적과정 계산이 가능하며, 다른 대기확산모델과 비교해 볼 때 계산용량과 모델링 시간이 적게 소요된다는 장점이 있다 (An et al., 2015).

2.2 방사성물질 대기확산 모델링 방법

대상지역은 원전 4곳(고리, 월성, 영광, 울진) 중 부산, 울산과 같은 대도시와 인접하여 원전재난에 대한 관심이 매우 높은 고리원전을 선택하였다. 고리원전은 대한민국 최초의 상업용 원자로로 2014년 기준 총 6기의 상업용 원자로가 가동 중이며 인근 지역에 신고리 3, 4호기가 건설 중에 있다. 원자로는 모두 가압 경수로 형이며 농축 ²³⁵U를 연료로 사용하고 있고 설비 용량은 500kW급이다 (Korea Meteorological Administration (KMA), 2014)). 그림 1은 고리원전의 위치와 주변 지형을 제시한 것으로, 고리원전 (129.3°E, 35.3°N)은 부산광역시 북쪽 기장을 연안에 위치하고 있으며 동쪽으로 동해, 서쪽으로 양산 및 김해, 북쪽으로 울산광역시와 접해 있다. 고리원전 인근에는 복잡한 해안선과 함께 해발고도 500m 내외의 구릉성 산지가 분포하며 고리원전에서 북서쪽 약 30km 떨어진 곳에 태백산맥의 말단이 위치해 해발고도 약 500~1000m의 고지대가 북동/남서방향으로 길게 형성되어 있다. 본 연구에서는 국지규모에서 방사성물질의 대기 중 이동 및 확산을 보기 위해 고리원전 중심 반경 50 km 영역을 대상지역(100km×100km)으로 설정하였다.

CALPUFF와 HYSPLIT의 기상입력자료를 생성하

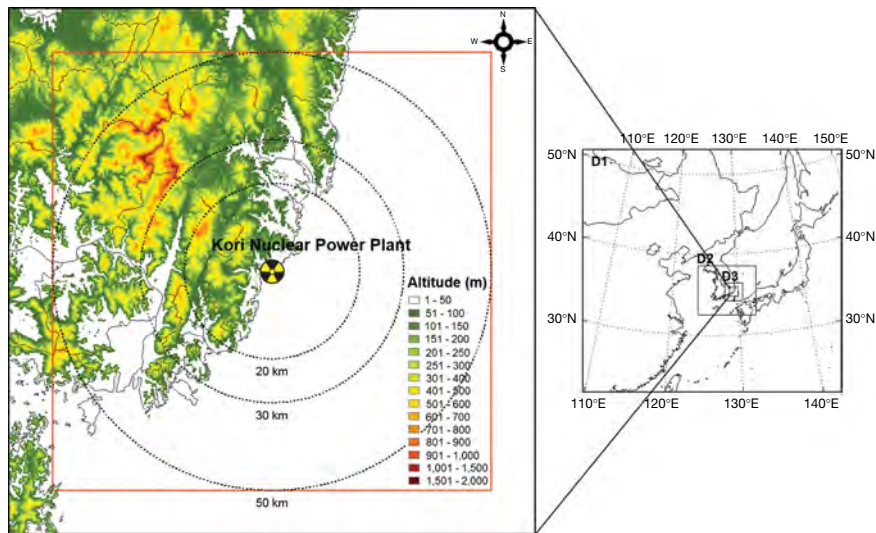


Fig. 1. Configure of WRF domains. The left figure is enlarged details of the target areas of D4 and orange line indicate the atmospheric dispersion model domain boundaries. The inset figure in the left figure shows the location of Kori nuclear power plant (KNPP) (☢).

기 위해 3차원 기상모델인 WRF version 3.5 모델을 이용하였다. WRF 모델은 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 모델로 수평격자는 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 연직격자로는 오일러리안 질량좌표계를 사용한다(Skamarock *et al.*, 2008). 모델링 영역은 Nesting 기법을 이용하여 동아시아 영역의 첫 번째 도메인(27 km 격자)에서부터 한반도를 포함하는 두 번째 도메인(9 km 격자), 경남 영역을 포함하는 세 번째 도메인(3 km 격자), 그리고 최종 분석도메인인 1 km 수평해상도의 고리원전 영역으로 구성하였다(그림 1). 연직층은 총 43개 층으로 대기경계층 내에서의 공기괴의 연직적 흐름과 국지바람의 발달을 정확히 모의하기 위하여 대기하층 1 km 고도 이하 11개 층(Sigma level = 0.996, 0.990, 0.980, 0.970, 0.960, 0.950, 0.940, 0.930, 0.920, 0.910, 0.895)으로 조밀하게 구성하였다.

WRF 모델의 초기 및 경계조건은 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 FNL (Final) 전구 재분석 자료와 SST (Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였다. FNL자료는 6시간 간격 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 격자 해상도이며, SST자료는 일 간격 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 격자 해상도이다. 이와 함께 모델의 오차를 줄이기 위하여 객관분석기법인 OBSGRID 프로그램을 이용하여 자료동화를 수행하였다. 자료동화에 사용된 자료는 NCEP에서 제공하는 지상관측자료(ds461.0)와 고층관측자료(ds351.0)이다. WRF 모델의 물리옵션은 National Institute of Environmental Research (2014)를 참고하여 WRF Single-Moment 3-class (WSM3) (D1), WRF Double-Moment 6-class (WDM6) (D2~D4) microphysics scheme (Hong and Lim, 2006), Kain-Fritsch cumulus parameterization scheme (D1) (Kain, 2010), RRTMG long wave, RRTMG short wave scheme (Skamarock *et al.*, 2008; Malwer *et al.*, 1997), Yonsei University PBL scheme (Hong and Lim, 2006)으로 설정하였다.

WRF 모델링 기간은 2012년 5월 한 달을 포함한 35일(2012년 4월 27일 00 UTC~6월 1일 00 UTC)이며 표 1은 WRF 모델링 결과와 고리원전 영역(D4) 내 지역의 기상현상을 대표할 수 있는 곳에 위치한 ASOS 6개 지점과 AWS 22개 지점에서 관측된 기온, 풍속 자료를 비교한 IOA (Index Of Agreement), MBE (Mean

Table 1. Model performance statistics calculated for temperature and wind speed at 28 monitoring sites (6 ASOS sites and 22 AWS sites) for D4 simulation.

Variables	Statistics (Benchmark)	
Temperature	IOA (≥ 0.8)	0.93 ± 0.04
	MBE ($\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)	0.19 ± 0.70
	RMSE	1.77 ± 0.33
	MAGE ($\leq 2.0^{\circ}\text{C}$)	1.36 ± 0.36
Wind speed	IOA (≥ 0.6)	0.67 ± 0.09
	MBE ($\leq \pm 0.5 \text{ ms}^{-1}$)	-0.30 ± 0.57
	RMSE ($\leq 2.0 \text{ ms}^{-1}$)	1.37 ± 0.44
	MAGE	1.07 ± 0.36

Table 2. Simulation settings for atmospheric dispersion model.

Parameter	CALPUFF	HYSPLIT	
Total emission (Bqh^{-1})	1.0×10^7		
Release height (m)	20		
Output layer height (m)	10		
Top of model (m)	5000		
Radioactive decay half-life (days)	10960		
Dry deposition	Dry deposition velocity (ms^{-1})	-	0.002
	Aerodynamic diameter (μm)	0.4	
	Particle density (kgm^{-3})	-	1900
Wet deposition	Scavenging coefficient (s^{-1})	5.0×10^{-5}	

Bias Error), RMSE (Root Mean Square Error), MAGE (Mean Absolute Gross Error)이다. 전반적으로 기온과 풍속 기상요소의 결과가 미국 EPA에서 제시하는 중규모 기상모델 평가 기준지표 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있다(U.S. EPA, 2007). 기온의 경우 모델계산 결과가 전반적으로 큰 차이 없이 관측치와 비교적 잘 일치함 (IOA: 0.93)을 보였고, MBE, RMSE가 각각 $+0.19^{\circ}\text{C}$, $+1.77^{\circ}\text{C}$ 로 계산되어 모델링 결과해석에 유의한 수준의 신뢰성을 나타내었다. 풍속의 경우 모델 계산 결과가 전반적으로 약하게 과소평가되는 경향 (MBE: -0.30 ms^{-1})을 보였으나, 유의한 오차수준과 일치도 (RMSE: $+1.37 \text{ ms}^{-1}$, IOA: 0.67)를 가졌다.

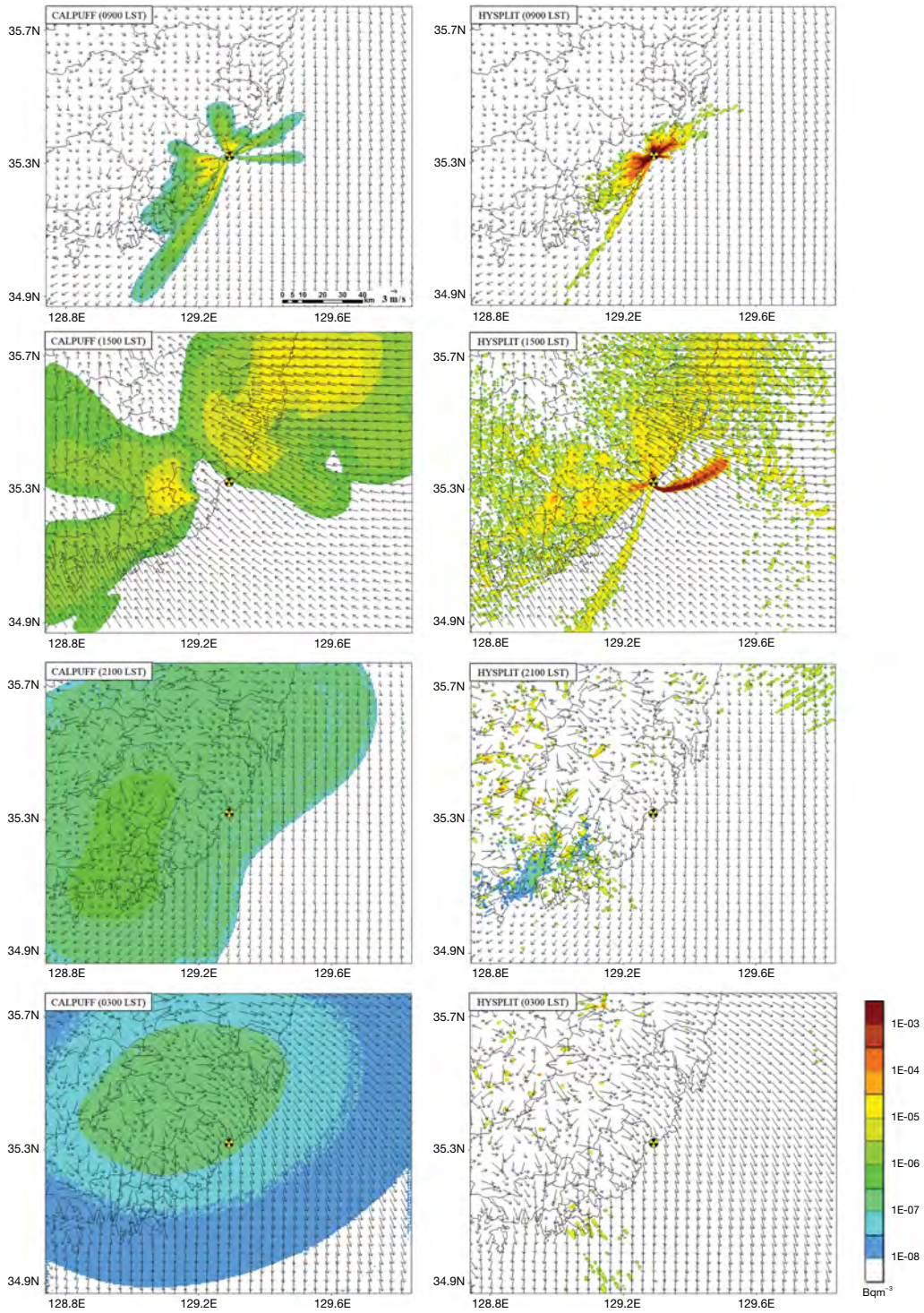


Fig. 2. Horizontal distributions of the one month mean ^{137}Cs concentrations (Bqm^{-3}) simulated in CALPUFF and HYSPLIT model at 0900 LST, 1500 LST, 2100 LST and 0300 LST of May 2012.

WRF 모델에서 계산된 기온, 바람(u, v 성분), 지상기압, 대기경계층(PBL) 고도, 혼합비 등은 CALPUFF와 HYSPLIT의 입력자료로 사용하였다.

CALPUFF와 HYSPLIT에 입력되는 배출량과 배출조건, 침적과정 옵션 정보는 표 2에 제시하였다. 본 논문의 목적인 CALPUFF와 HYSPLIT 특성에 따른 모델링 결과 차이를 확인하기 위해 배출조건과 모델 내 선택 가능한 파라미터는 최대한 동일하게 설정하였다. CALPUFF와 HYSPLIT은 입자상 방사성물질인 ¹³⁷Cs에 대하여 6시간(0900~1500 LST) 동안 일정하게 배출되도록 모델을 수행하여 1시간 간격의 지상 10m 고도에서의 ¹³⁷Cs 농도를 비교분석하였다. 배출량은 $1.0 \times 10^7 \text{ Bqh}^{-1}$ 으로 가정하였고 HYSPLIT의 경우 6시간 동안 1분에 1개씩 가상의 입자를 계속 배출시켰다. ¹³⁷Cs의 공기 역학적 평균직경은 $0.4 \mu\text{m}$ 로 설정하였고, 침적과정은 선행연구(Korsakissok *et al.*, 2013; Stohl *et al.*, 2012)를 참고하여 HYSPLIT의 경우 설정 가능한 파라미터로 입자 밀도를 $1,900 \text{ kgm}^{-3}$, 건성침적속도를 0.002 ms^{-1} 로 설정하였고, CALPUFF와 HYSPLIT 모두 공통적으로 구름 아래 세정 계수(Below-cloud scavenging coefficient)는 $5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 로 설정하고 나머지 요소에 대해 내정값을 적용하였다.

¹³⁷Cs의 가상적인 배출지점은 고리원전이 위치한 129.3°E, 35.3°N으로 설정하였고 모델링 영역은 고리원전을 중심으로 500 수평해상도의 200×200 격자로 구성하였다(그림 1). 또한 고리원전 주변의 복잡한 해안선과 산악지형을 고려하기 위해 고해상도 환경부 EGIS (Environmental Geographic Information System) 중분류 토지피복지도와 SRTM (Shuttle Radar Topo-

graphy Mission) 3초 지형자료를 입력하여 지표면 상태와 지형정보를 상세하게 개선하였다.

3. 대기확산 모델링 결과 비교

3.1 월평균 방사성물질 확산 비교

CALPUFF와 HYSPLIT의 평균적인 ¹³⁷Cs 확산 특성을 분석하기 위하여 2012년 5월 한 달간의 모델링 결과를 바탕으로 고리원전 인근지역의 ¹³⁷Cs의 확산특성을 비교하였다. 그림 2는 ¹³⁷Cs이 배출되는 0900 LST부터 6시간 간격으로 CALPUFF와 HYSPLIT로 계산한 지표 부근(10m 고도) 시간별 한 달 평균 ¹³⁷Cs 농도장을 나타낸 것이다. 또한 ¹³⁷Cs의 공간분포를 결정짓는 주풍을 확인하기 위해 한 달 동안 WRF에서 계산된 시간당 격자별 바람벡터를 함께 나타내었다.

먼저 0900 LST를 살펴보면, CALPUFF와 HYSPLIT은 고리원전을 중심으로 북동/남서쪽으로 ¹³⁷Cs이 확산되었고, 고리원전 중심 약 6.1 km 내에서 CALPUFF는 $1\text{E-}05 \sim 1\text{E-}04 \text{ Bqm}^{-3}$, HYSPLIT은 $1\text{E-}03 \text{ Bqm}^{-3}$ 이상의 ¹³⁷Cs 최고농도가 나타났다. 이후 1500 LST에는 남동풍이 주풍으로 나타났고 이로 인한 내륙으로의 공기괴 유입이 나타나 두 모델은 고리원전에서 남서~북서쪽/북~동쪽으로 넓게 ¹³⁷Cs이 확산되었다. CALPUFF는 부산지역과 울산 연안을 포함한 해상에서 ¹³⁷Cs 최고농도 ($1\text{E-}05 \sim 1\text{E-}04 \text{ Bqm}^{-3}$)가 나타났고, HYSPLIT은 고리원전에서 동북동쪽 17.6 km까지 최고농도 ($1\text{E-}03 \text{ Bqm}^{-3}$ 이상)가 나타났다. 이때 HYSPLIT에서 나타난 고리원전에서 남남서 방향으로 길게 확산된 ¹³⁷Cs과

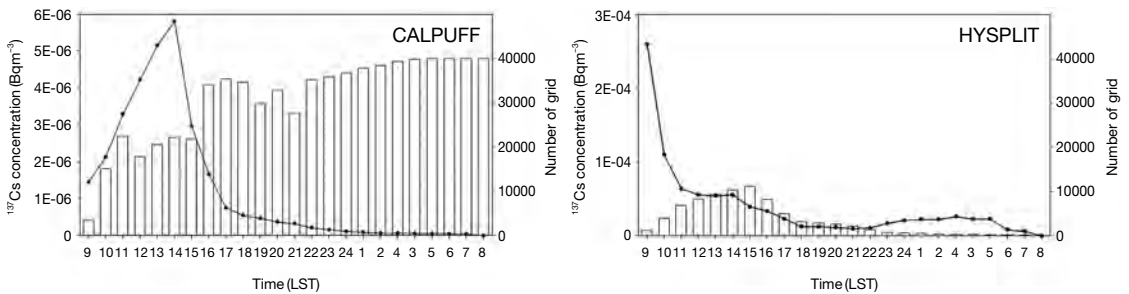


Fig. 3. Time series plot of simulated monthly average ¹³⁷Cs concentrations (Bqm^{-3} , left axis) for grid value calculated over 0 Bqm^{-3} in both CALPUFF and HYSPLIT. The bar represents the number of grid (right axis) for grid value calculated over 0 Bqm^{-3} .

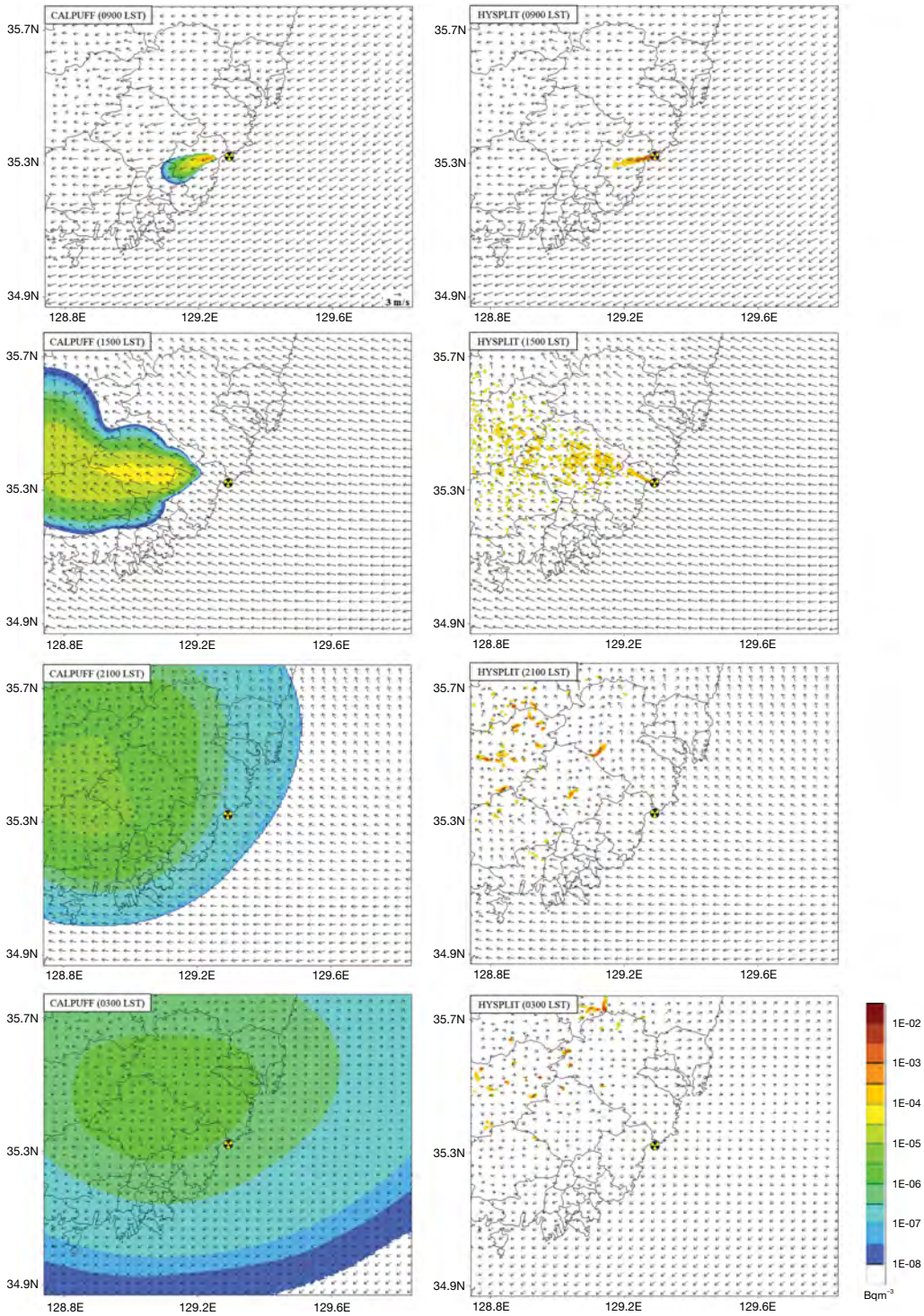


Fig. 4. Horizontal distributions of the one hour mean ^{137}Cs concentrations (Bqm^{-3}) simulated in CALPUFF and HYSPLIT model at 0900 LST, 1500 LST, 2100 LST and 0300 LST of 12 May 2012.

고리원전 중심에서 나타난 고농도 ^{137}Cs 은 1시간 전인 1400 LST에 계산된 CALPUFF 모델링 결과와 유사하였고 이에 HYSPLIT이 CALPUFF보다 ^{137}Cs 이동속도가 다소 느리게 나타나는 것을 확인하였다.

1900 LST부터 해풍에서 육풍으로 풍계전환이 나타나 2100 LST에는 연안에서 해상으로 향하는 육풍이 발달하였고, 내륙에는 풍속이 약하고(평균풍속 1.1 ms^{-1}) 복잡한 지상풍계가 형성되었다. 그 결과, CALPUFF는 시간이 흐름에 따라 성장한 퍼프 크기와 지상 풍계의 영향으로 내륙 전체를 포함한 넓은 영역에서 ^{137}Cs 이 계산된 반면, HYSPLIT은 바람이 수렴하는 구간에서 입자들이 밀집하여 부산지역과 내륙 일부지역, 고리원전의 북동쪽 해상에서 ^{137}Cs 이 계산되었다. CALPUFF는 부산과 양산, 김해지역에서 ^{137}Cs 최고농도($5\text{E-}07 \sim 1\text{E-}06 \text{ Bqm}^{-3}$)가 나타났고, HYSPLIT은 내륙 일부 지역에서 산발적으로 ^{137}Cs 최고농도($1\text{E-}04 \sim 5\text{E-}04 \text{ Bqm}^{-3}$)가 나타났다. 이후 0300 LST에는 육풍이 뚜렷이 나타나 바람이 수렴하는 구간이 감소하였고, 그 결과 CALPUFF는 대상영역 전반에서 ^{137}Cs 이 계산된 반면, HYSPLIT은 2100 LST에 대상영역 내 위치한 입자들이 영역을 벗어나고 남은 소량의 입자들이 바람이 수렴하는 지역에 존재했다. CALPUFF는 울산과 양산, 부산 일부를 포함한 지역에서 ^{137}Cs 최고농도($1\text{E-}07 \sim 5\text{E-}07 \text{ Bqm}^{-3}$)가 나타났고, HYSPLIT은 밀양과 경주 일부 지역에서 ^{137}Cs 최고농도($1\text{E-}04 \sim 5\text{E-}04 \text{ Bqm}^{-3}$)가 나타났다.

그림 3은 0 Bqm^{-3} 을 초과하는 격자에 대해 CALPUFF와 HYSPLIT의 ^{137}Cs 평균농도와 격자수 시계열 분포를 제시한 것이다. CALPUFF의 경우, 배출이 끝나

는 1400 LST 이후 시간이 지날수록 평균농도는 감소하는 반면 0 Bqm^{-3} 을 초과하는 ^{137}Cs 이 계산된 격자수는 계속해서 증가하여 0700~0800 LST에는 모든 격자에서 0 Bqm^{-3} 을 초과하였다. HYSPLIT은 0900 LST에 고리원전 인근의 약한 풍속으로 인해 좁은 영역에 입자가 밀집하여 최대 평균농도가 나타난 후 감소하였고, 격자수는 1500 LST까지 증가한 후 1600 LST부터 감소하였다. 전반적으로 ^{137}Cs 평균농도는 HYSPLIT이 10~400배 높게 모의한 반면, 격자수는 CALPUFF가 약 2~200배 많이 모의하였다. 전반적인 농도수준은 후쿠시마 원전사고를 대상으로 대기확산 모델링을 수행한 선행연구(Srinivas *et al.*, 2012; Stohl *et al.*, 2012)와 비교하여 CALPUFF는 과소모의하는 경향이 나타난 반면, HYSPLIT은 유사하게 모의하였다. 이러한 결과는 CALPUFF의 경우 퍼프모델의 특성상 시간이 흐름에 따라 퍼프크기가 성장하고 HYSPLIT은 입자모델의 특성상 바람이 약하고 수렴하는 지역에 입자가 밀집하는 경향으로 CALPUFF는 HYSPLIT에 비해 낮은 농도의 넓은 확산분포를 계산한 반면, HYSPLIT은 고농도의 좁은 확산분포를 계산한 것으로 해석된다.

3.2 해풍일과 비해풍일 사례의 방사성물질 확산 비교

연안에 위치한 지리적 요인으로 인해 고리원전에서 빈번히 발생하는 해풍의 발생유무에 따라 해풍과 비해풍 사례일을 선정하여 동일한 기상조건에 따른 CALPUFF와 HYSPLIT의 방사성물질의 확산특성을 비교하였다. 해풍과 비해풍 사례일은 지상일기도와 WRF 모델링 결과 대상영역 내 일중 바람장 변화를 바탕으로

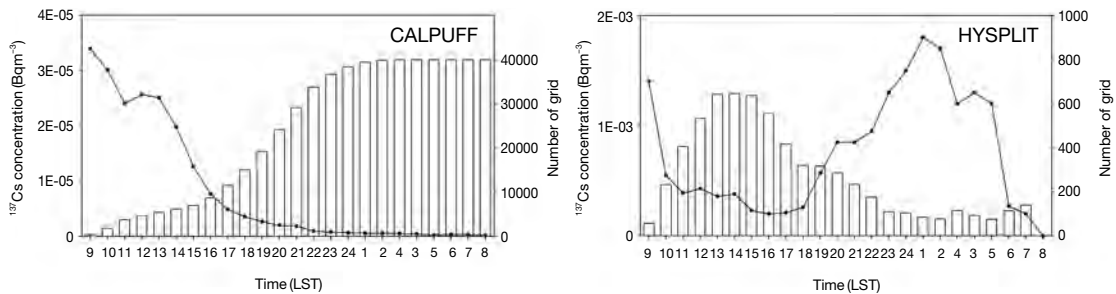


Fig. 5. Time series plot of simulated hourly average ^{137}Cs concentrations (Bqm^{-3} , left axis) for grid value calculated over 0 Bqm^{-3} in both CALPUFF and HYSPLIT during the sea breeze day. The bar represents the number of grid (right axis) for grid value calculated over 0 Bqm^{-3} .

로 선정하였다. 먼저 해풍 사례일로는 2012년 5월 12일을 선정하였고, 비해풍 사례일로는 2012년 5월 2일을 선정하였다.

그림 4는 해풍 사례일(2012년 5월 12일)의 WRF에서 계산된 바람벡터와 함께 CALPUFF와 HYSPLIT으로 계산한 지표 부근(10m 고도) 한 시간 평균 ^{137}Cs 의 농도장을 나타낸 것이며, 그림 5는 0 Bq m^{-3} 을 초과하는 격자에 대해 두 모델에서 계산된 ^{137}Cs 평균농도와

격자수 시계열 분포를 제시한 것이다. 해풍일의 경우, 일중 해륙풍 순환으로 인하여 ^{137}Cs 이 24시간 동안 대상영역 내에 분포하였고 그 결과 한 달 평균 ^{137}Cs 의 공간분포와 유사하게 나타난 반면, 시계열 분석 결과는 한 달 평균값과 다른 양상을 보였다. CALPUFF의 경우, 시간이 흐름에 따라 퍼프 크기가 성장함에 따라 격자수는 계속해서 증가하여 0300 LST부터는 모든 격자에서 ^{137}Cs 이 계산되었고, ^{137}Cs 의 평균농도는 전반적

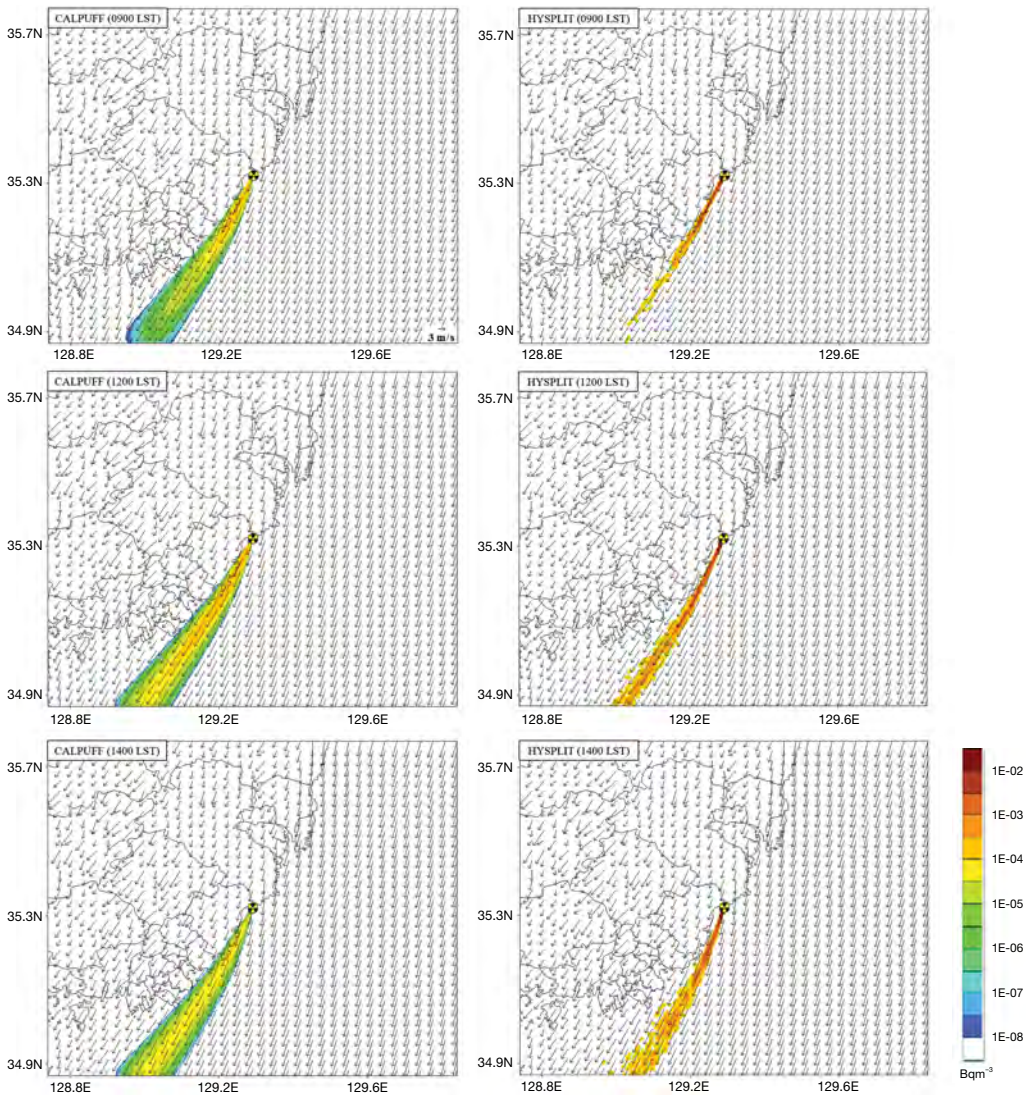


Fig. 6. Horizontal distributions of the one hour mean ^{137}Cs concentrations (Bq m^{-3}) simulated in CALPUFF and HYSPLIT model at 0900 LST, 1200 LST, 1400 LST of 2 May 2012.

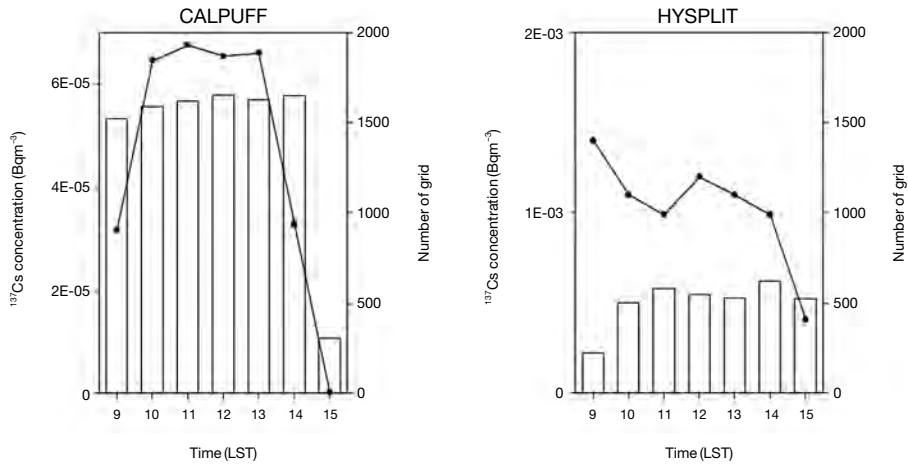


Fig. 7. Time series plot of simulated hourly average ¹³⁷Cs concentrations (Bqm⁻³, left axis) for grid value calculated over 0 Bqm⁻³ in both CALPUFF and HYSPLIT during the non-sea breeze day. The bar represents the number of grid (right axis) for grid value calculated over 0 Bqm⁻³.

으로 계속해서 감소하였다. HYSPLIT의 경우, 격자수는 CALPUFF에 비해 약 6~500배 적게 계산되었고 시간분포는 1400 LST까지 격자수가 증가한 후 감소하였다. ¹³⁷Cs의 평균농도는 CALPUFF와 같이 배출이 시작되는 0900 LST 이후 감소한 후 해풍과 육풍의 풍계 전환이 나타난 1900 LST부터 바람이 수렴하는 지역이 증가함에 따라 평균농도가 증가하였다. 이후 육풍이 뚜렷하게 나타남에 따라 다시 감소하는 시간분포를 보였다. 이러한 CALPUFF와 HYSPLIT의 농도분포와 수준의 차이는 3.1절에서 확인한 두 모델의 ¹³⁷Cs 확산 특성에서 알 수 있듯이 HYSPLIT은 바람변화에 따른 입자 이동이 민감하게 나타나 바람이 수렴되는 특정지역으로 입자들이 밀집됨에 따라 시간이 흐를수록 퍼프의 크기가 성장하여 넓은 확산분포를 계산하는 CALPUFF보다 좁은 농도장과 고농도가 계산된 결과로 보인다.

일중 다양한 풍계가 나타난 해풍 사례일과 비교하기 위해 풍속이 강하고 일중 영역 내 풍계 변화가 크게 나타나지 않은 사례를 비해풍 사례일(2012년 5월 2일)로 선정하였고, CALPUFF와 HYSPLIT 모델링 결과를 비교하여 그림 6에 제시하였다. 또한 0 Bqm⁻³을 초과하는 격자에 대해 두 모델에서 계산된 ¹³⁷Cs 평균농도와 격자수 시계열 분포를 그림 7에 나타내었다. 비해풍일의 경우, 강한 북서풍(5 ms⁻¹ 이상) 계열의 국지바람의

영향으로 ¹³⁷Cs 농도가 고리원전의 남서쪽 해상으로 빠르게 확산되었다. 그 결과, 배출 후 24시간 동안 ¹³⁷Cs 농도가 대상영역 내에서 계산된 해풍일과 달리 1600 LST부터 ¹³⁷Cs 농도가 분석도메인을 벗어나 계산되지 않았다. 특히 1200 LST와 1400 LST에서 나타난 미세한 풍향의 변화에 따라 HYSPLIT은 0900 LST에 비해 1400 LST에 오른쪽으로 ¹³⁷Cs 농도장이 이동한 반면, CALPUFF는 ¹³⁷Cs 확산분포의 시간변화가 나타나지 않았다. 시계열 분석 결과는 CALPUFF와 HYSPLIT의 평균농도가 정량적인 차이는 있으나 일변화가 유사하였고, ¹³⁷Cs이 계산된 격자수는 한 달 평균값, 해풍일 사례와 같이 CALPUFF가 HYSPLIT보다 높게 계산되었다. 전반적으로 CALPUFF와 HYSPLIT의 ¹³⁷Cs 확산 분포는 유사하나 HYSPLIT이 미세한 바람변화에 따른 ¹³⁷Cs의 확산변화를 잘 모의하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고리원전 인근지역(고리원전 중심 반경 50km 이내 지역)을 대상으로 2012년 5월 한 달과 해풍일(2012년 5월 12일), 비해풍일(2012년 5월 2일)에 대해 CALPUFF와 HYSPLIT의 ¹³⁷Cs 확산 특성을 비교·분석하였다.

시간별 한 달 평균 ^{137}Cs 농도를 분석한 결과, 전반적으로 CALPUFF와 HYSPLIT 모두 바람변화가 ^{137}Cs 농도의 확산분포에 중요한 영향을 주었다. 0900 LST와 1500 LST에 CALPUFF와 HYSPLIT은 고리원전에서 내륙 쪽으로 향하는 바람의 영향으로 내륙으로 넓게 ^{137}Cs 농도가 확산되었다. 이후 해풍에서 육풍으로 풍계 전환이 나타나 2100 LST와 0300 LST에 CALPUFF는 내륙전체를 포함한 넓은 확산분포가 나타난 반면, HYSPLIT은 바람이 수렴하는 내륙과 해상 특정 지역에서 입자가 밀집하였다. ^{137}Cs 의 최고농도의 경우, HYSPLIT이 CALPUFF 보다 약 10~1000배 높게 나타났고 격자수는 CALPUFF가 HYSPLIT보다 약 10~100배 높게 계산하였다. 이러한 결과를 통해 CALPUFF는 시간이 흐름에 따라 퍼프의 크기가 성장하여 넓은 확산분포와 낮은 ^{137}Cs 농도가 계산되고, HYSPLIT은 바람이 약하고 수렴하는 지역에 입자가 밀집하여 좁은 확산분포와 높은 ^{137}Cs 농도가 계산되는 것으로 판단된다.

해풍/비해풍 사례일 분석 결과, 해풍일에는 일중 해풍과 육풍의 풍계 변화에 따라 다양한 풍계가 나타나 ^{137}Cs 배출 후 24시간 동안 대상영역 내에서 ^{137}Cs 이 계산된 반면, 비해풍일에는 풍속이 강하고 일중 영역 내 풍계 변화가 크게 나타나지 않아 풍하측으로 수시간 내에 ^{137}Cs 이 대상영역을 벗어나는 차이를 보였다. 특히, 해풍일의 ^{137}Cs 평균농도의 일변화를 분석한 결과 HYSPLIT은 해륙풍 전환에 따른 평균농도의 일변화가 크게 나타났고, 비해풍일의 ^{137}Cs 농도의 공간분포를 분석한 결과 HYSPLIT이 미세한 바람변화에 CALPUFF 보다 민감함을 보였다. 이러한 결과를 통해 HYSPLIT은 CALPUFF 보다 풍계변화에 따른 입자 이동이 민감하게 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구에서 CALPUFF와 HYSPLIT에서 계산된 ^{137}Cs 은 확산경향은 비슷하였으나, 지역과 시기에 따라 농도수준에 큰 차이가 있을 수 있음을 확인하였고 이러한 모델링 결과의 차이는 모델특성이 반영된 것으로 이해될 수 있다. 두 모델의 특성을 요약하면 CALPUFF는 방사성물질의 확산분포나 경향을 파악하기에 유리하나 농도수준에서는 퍼프모델의 특성상 HYSPLIT보다 과소모의 되는 경향이 있었고, HYSPLIT은 바람에 따른 입자의 이동방향을 명확히 파악할 수 있었으나 입자가 존재하는 국소영역에서만 고농도가 계

산되어 인근지역에 대한 방사성물질의 영향을 파악할 수 없었다. 이는 CALPUFF와 HYSPLIT 중 하나의 모델을 이용한 방사성물질 확산예측만으로는 정확한 평가가 어려움을 의미한다. 따라서 만일의 원전사고를 대비한 정확한 방사성물질의 대기확산 예측·평가를 위해서는 하나의 모델에 의존한 예측결과보다는 다양한 모델을 이용한 확산평가가 필요하다. 향후 기존 다양한 모델을 이용한 방사성물질 확산평가를 수행한 선행연구(Katata *et al.*, 2015; Connan *et al.*, 2013; Päsler-Sauer, 2010)와 본 연구결과를 바탕으로 원전 주변지역의 기상특성과 다양한 방사성물질의 유출상황에 따른 대기질 모델에 따른 방사성물질의 대기 중 확산 비교가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2013R1A1A4A01012837).

References

- An, H.Y., Y.-H. Kang, S.-K. Song, J.-H. Bang, and Y.-K. Kim (2015) Atmospheric dispersion of radioactive material according to the local wind patterns around the Kori nuclear power plant using WRF/HYSPLIT model, JESI, 24(1), 81-96. (in Korean with English abstract)
- Connan, O., K. Smith, C. Organo, L. Solier, D. Maro, and D. Hébert (2013) Comparison of RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS atmospheric dispersion model outputs, using emergency response procedures, with ^{85}Kr measurements made in the vicinity of nuclear reprocessing plant, J. Environ. Radioact., 124, 266-277.
- Hong, S.-Y. and J.O. Lim (2006) The WRF Single-Moment 6-class Microphysics scheme (WSM6), KJAFM, 42, 129-151.
- Kain, J.S. (2010) The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, J. Appl. Meteor., 43, 170-181.
- Katata, G., M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M.C. Hort, A. Malo,

- T. Torri, and Y. Sanada (2015) Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 1029-1070.
- Kim, C.-H. and C.-K. Song (2003) Lagrangian particle dispersion modeling intercomparison: Internal versus foreign modeling results on the nuclear spill event, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19(3), 249-261. (in Korean with English abstract)
- Koo, Y.-S., J.-H. Choi, S.-T. Kim, and S.J. Park (2007) A real-time odor monitoring and modeling system, *JOIE*, 6(4), 254-258. (in Korean with English abstract)
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2014) Development of a radioactive substance dispersion model in East Asia, Korea.
- Korsakissok, I., A. Mathieu, and D. Didier (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.
- Malwer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *J. Geophys. Res.*, 102, 16663-166682.
- Ministry of Science and Technology (2007) Radiological dose assessments through the atmospheric environment, Korea.
- National Institute of Environmental Research (2014) Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling, Korea.
- NOAA (2014) HYSPLIT4 user's guide, USA.
- Nuclear safety and security commission (2015) 2014 Nuclear safety yearbook, Korea, 242 pp.
- Päsler-Sauer, J. (2010) Comparison and validation exercises of the three atmospheric dispersion models in RODOS, *Radioprotection*, DOI:10.1051/radiopro/2010018.
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.M. Grill, D. Baker, M.G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR, Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Srinivas, C.V., R. Venkatesan, R. Baskaran, V. Rajagopal, and B. Venkatraman (2012) Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor, *Atmos. Environ.*, 61, 66-84.
- Stohl, A., P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J.F. Burkhart, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas, and T.J. Yasunari (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.
- U.S. EPA (2007) Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, PM2.5, and regional haze, Tech Rep., EPA-454/B-07-002, Research Triangle Park, NC.