

연구논문

기상장의 종류와 해상도에 따른 HY-SPLIT 모델의 결과 비교

이종범 · 박상진 · 김재철 · 장윤정

강원대학교 환경과학과

(2010년 1월 11일 접수, 2010년 5월 9일 승인)

Comparison of Model Results for Variation and Resolution of Meteorological Field Using HY-SPLIT

Chong Bum Lee · Sang Jin Park · Jea-Chul Kim · Yun Jung Jang

Department of Environmental Science Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

(Manuscript received 11 January 2010; accepted 9 May 2010)

Abstract

Trajectory dispersion models are used for the dispersion calculations in air quality assessments, Yellow-sand modeling, environmental planning and the emergency response. Meso-scale forcing and coastal circulations are calculated by trajectory model in the East Asia region. In this study the meteorological fields (GDAS and MM5) coupled to the trajectory model (HY-SPLIT) are applied to simulate the transport and the dispersion. Seoul is selected as a starting point of the HY-SPLIT. The sensitivity studies are performed by conducting an ensemble of simulations using the GDAS and the MM5 model for the same dispersion cases.

The results in this study show a significant difference depending on the resolution of meteorological models. Additionally, in most cases of the compared tionally, results from MM5 and GDAS, the absolute and relative distance, shows significant difference and the difference increased with the increasing distance of HY-SPLIT. Therefore, for the case of small domain field distribution over complex terrain, should be used only high model temporal or spatial resolution to improve the HY-SPLIT model results.

Keywords : HY-SPLIT, MM5, GDAS, absolute distance, relative distance

1. 서론

특정 지점에서 관측된 오염물질의 발원지를 규명하는 것은 대기오염 파악과 예측에 매우 중요하다. 편서풍의 기후적 특징을 갖는 우리나라는 봄철 중국 사막지역에서 발생하는 황사의 영향을 크게 받고 있다. 최근 중국에서 발생하는 황사는 중국의 경제발전과 함께 단순 모래입자뿐만 아니라 중금속을 포함한 유해한 물질을 많이 포함하고 있기 때문에 그 경로 및 오염원을 파악하는 것은 매우 중요하다(Gehui Wang *et al.*, 2009). 유적선 모델(Trajectory model)은 대기오염물질과 황사 등의 이동 경로 및 발생원 추적 등에 유용하게 쓰인다(이종범, 2000; 정관영, 1996; Nancy I *et al.*, 2009; Eun-Mi Choi *et al.*, 2008; Jarkko V. Niemi *et al.*, 2008). 대표적 유적선모델인 미국 해양 대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 HY-SPLIT_4(Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model, Version 4 : www.ready.noaa.gov/ready)는 사용자가 원하는 지점에서 특정 날짜의 역궤적을 산출하여 지도상에 나타낼 뿐만 아니라, 시간 변화에 따른 궤적의 위치 정보를 손쉽게 나타내 주는 편리한 구조로 되어 있다(Draxler and Hess, 2004).

A.G. Wain *et al.*(2006)은 오스트레일리아 동부 지역의 dust-storm을 모사하기 위하여 HY-SPLIT과 AAQFS(Australian Air Quality Forecasting System)을 이용하였고, 위성자료와 비교한 결과 AAQFS가 HY-SPLIT보다 정확한 결과를 나타냈다. Yerramilli *et al.*(2008)은 미국 미시시피만 해안지역을 대상으로 WRF(Weather Research & Forecasting) 기상모델의 혼합층 고도 등 물리적 옵션을 수정한 기상장을 이용하여 입자확산 모듈을 이용한 HY-SPLIT을 실행한 결과 기상장 차이에 따라 확산과 수송에 큰 차이를 나타냄을 보였다. 또한, Draxler, R. R(1987)은 CAPTEX(Cross-Appalachian Tracer Experiment) 실험 기간에 기상자료의 시공간 해상도가 HY-SPLIT에 미치는 민감도를 분석한 결과 시공간적 해상도가

좋을수록 HY-SPLIT의 결과가 향상됨을 보였다. A.STOHL(1998)은 여러 확산 실험 및 기상모델 결과를 이용하여 해상도에 따른 절대·상대적인 trajectory 모델 에러를 조사하였다. Rolph and Draxler (1990)는 다양한 시·공간 해상도의 기상 입력 자료에 따라 거리차이가 나타남을 밝혔다.

현재 NOAA HY-SPLIT 홈페이지에서 이용 가능한 3차원 기상 자료는 크게 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 GDAS(Global Data Assimilation System)와 EDAS(Eta Data Assimilation System)가 있다. EDAS의 경우 대상 영역을 미국 대륙으로 제한하고 있으며, 공간 해상도는 약 0.4°로써 비교적 고해상도의 자료를 제공하며, 시간 해상도는 6시간 간격의 기상자료를 제공하고 있다. 반면 GDAS의 경우 전 지구를 대상지역으로 설정한 전구모델 자료로서 동아시아 지역의 경우 이 자료를 사용하고 있고, 이 자료는 HY-SPLIT 홈페이지를 통하여 이용 가능하다. GDAS의 공간 해상도는 1°이며, 시간 해상도는 6시간 간격의 기상자료를 제공하고 있기 때문에 EDAS 기상자료에 비하여 공간 해상도가 낮은 편으로 자세한 지역에 대한 역궤적을 분석하기에는 다소 무리가 있다.

국내의 경우 기상청에서 기상예보를 위해 사용하는 MM5(The PSU/NCAR mesoscale model) 3차원 기상 모델이 중국과 일본을 포함하는 동아시아 영역에 해당되어 국내의 황사 및 확산 연구를 위한 HY-SPLIT 모델의 기상 입력 자료로 사용이 가능하다. 이종범 등(2009)은 MM5의 자료동화에 따라 향상된 기상자료 결과가 광화학모델의 농도결과에 큰 영향을 미침을 밝혔고, 송은영(2007)은 지형자료의 공간해상도와 MM5 모델의 연직층 세분에 따라 기상모델의 결과가 향상됨을 보인바 있다. 기상청에서 제공하는 MM5 모델의 공간 해상도는 30km이며, 시간 해상도는 3시간 간격으로 비교적 세밀한 기상장을 제공하기 때문에 국지적인 바람장을 나타내는데 적당하다. 따라서 본 연구에서는 동아시아 지역을 대상으로 비교적 사용하기 쉬운

HY-SPLIT모델의 입력 자료인 기상모델의 시·공간적인 초기 경계장을 다르게 사용하였을 때 나타날 수 있는 역궤적 결과를 정량적으로 비교하는 방법을 제시하였다. 또한 특정 대상일을 기준으로 기상 입력 자료 차이에 따라 발생할 수 있는 HY-SPLIT 모델결과와의 차이를 비교·검토하고자 한다.

II. 연구 방법

본 연구에 사용한 유적선 모델은 NOAA의 HY-SPLIT 모델로서 버전 4를 사용하였다. 대상 기간은 2006년 3월 5일부터 5월 31일까지 88일간 실행하였으며, 출발 지점은 서울(동경 127°, 북위 38°)로 하였다.

대상지역은 한반도를 중심(동경 126°, 북위 38°)으로 중국 동부지역과 일본 전체를 포함하는 동아시아 지역을 설정하였다. 본 연구의 대상영역은 그림 1에 나타내었다. GDAS 기상자료는 HY-SPLIT 홈페이지에서 제공되는 자료를 사용하였고, MM5 기상자료의 경우 기상청(KMA, Korea Meteorological Administration)에서 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System) 기상 자료를 이용하였다.

여기서 MM5 모델의 경우 동아시아 지역의 상층 관측지점에서의 실제 측정된 값을 사용하여 4차원 자료동화(FDDA, Four Dimensional Data Assimilation)를 실행하였으며, 재계산된 1시간 단위의 기상장을 HY-SPLIT 모델의 입력 자료로 사용하였다. 자료동화는 기상모델의 오차를 개선하는 중요한 방법이다(Stauffer and Seaman, 1994). 자료동화에 이용될 수 있는 기상측정 자료는 기상 관측소 자료와 무인기상 관측소(AWS, Automatic Weather Station), SONDE로 측정되는 상층기상 자료 등이 있으며, 최근 위성자료를 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다(이종범 등, 2009). 자료동화의 입력 자료로 사용된 실측 관측지점의 위치는 그림 1에 나타내었다. 표 1은 각 기상모델에 대한 입력 변수를 나타낸 것이다.

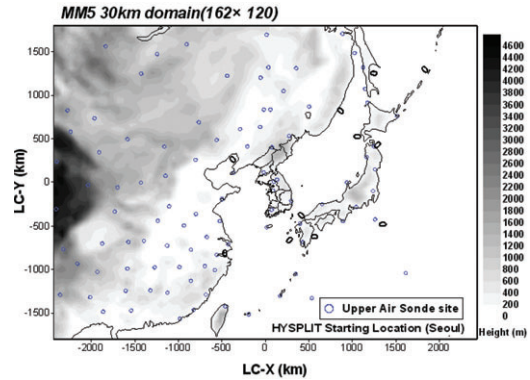


Figure 1. MM5 modelling domain(Lambert Conformal Projection). Circles describe the upper-air observation stations used for FDDA input data

Table 1. Details of the physics options of GDAS and MM5 model

	GDAS	MM5
Vertical Layer	23 layer (top : 20hPa)	35 layer (top : 50hPa)
Horizontal Resolution	1°(110km)	30km
Time step	6 hour	1 hour
Scale	Global model	Meso-scale model
Radiation scheme	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)	

Lee 등(2007)은 HY-SPLIT 모델 실행 시 출발 지점의 고도에 따라 Receptor에서의 농도가 틀려지며 지역적 특징과 기후에 따라 여러 가지 결과가 나올 수 있음을 연구한 바 있다. 본 연구는 HY-SPLIT 모델 실행 시 출발지점의 고도를 500m (AGL, Above Ground Level)와 1000m(AGL)로 설정하였고, backward trajectory를 96시간(4일) 실행하여 역 궤적의 거리를 충분히 고려하였다. 또한 두 가지 기상자료에 의해 계산된 HY-SPLIT 모델의 역 궤적 결과 차이를 비교하기 위하여 다음과 같은 식을 적용하였다. 먼저 절대적인 거리차이를 분석하기 위해 MM5 기상장을 이용하여 계산한 역 궤적 좌표(X_{MM5} , Y_{MM5})와 GDAS 기상장을 이용하여 계산한 역 궤적 좌표(X_{GDAS} , Y_{GDAS}) 사이의 거리차이(Absolute Distance : AD)를 구하였다. 그리고 AD를 출발지점(X_0 , Y_0)으로부터 MM5 기상장을 이용하여 계산한 역 궤적 위치까지의 거리 D_{MM5} 로 나누어 다음 식과 같이 상대적인 거리차이(Relative Distance : RD)를 구하였다.

$$AD = \sqrt{(X_{MM5} - X_{GDAS})^2 + (Y_{MM5} - Y_{GDAS})^2} \quad (1)$$

$$D_{MM5} = \sqrt{(X_0 - X_{MM5})^2 + (Y_0 - Y_{MM5})^2} \quad (2)$$

$$RD = AD / D_{MM5} \quad (3)$$

HY-SPLIT 모델에 의해 산출된 실행 결과는 시간별 자료를 사용하여 AD와 RD를 구하였다. 또 24시간, 48시간, 72시간, 96시간의 결과를 사용하여 각각의 시간에 대하여 AD와 RD의 백분위수 값(5, 25, 50, 75, 95 percentiles)을 계산하였으며, HY-SPLIT 모델의 기상장으로 사용한 MM5와 GDAS 기상모델의 수치모의 결과를 실제 궤적이 지나간 관측지점의 측정결과와 비교하였다. 마지막으로 모델링 기간 중 유적선이 지나간 실제 상층기상 관측 지점에서 측정된 자료(풍향, 풍속)를 이용하여 실측에 대한 기상모델 결과의 정합도를 비교·평가하였다. 여기서, 각 기상모델의 풍향·풍속 자료와 상층기상 관측지점에서 실제 측정된 자료를 비교한 결과는 HY-SPLIT 모델의 계산 정확도와 오차를 판단 할 수 있다.

III. 결 과

1. MM5와 GDAS 기상장에 의한 HY-SPLIT 모델의 결과 비교

GDAS와 MM5 기상장을 이용하여 대상기간(88일) 동안 HY-SPLIT 모델을 실행한 결과 두 기상 자료의 역궤적 결과는 작지 않은 차이를 나타내었다. 그림 2는 MM5와 GDAS의 결과를 이용하여 출발지점 고도 1000m에서 실행한 HY-SPLIT 모델 결과를 나타낸 것으로서 72시간을 기준으로 역궤적 결과가 큰 차이를 보이는 6개의 경우를 각각 나타냈다. 5월 6일의 경우 MM5 기상장을 이용한 HY-SPLIT 결과 중국 북경에서 시작된 궤적이 우리나라의 서해안을 거쳐 서울로 궤적이 이동하였다. 하지만, GDAS 기상장을 이용한 HY-SPLIT 결과는 일본 남동쪽에서 시작된 궤적이 일본의 남쪽 해양 지역을 거쳐 서울로 불어오는 것을 알 수 있다. 또한 5월 30일의 경우 GDAS 기상장을 이용한 HY-SPLIT 결과 몽고의 북쪽 러시아 지역을 출발한 궤

적이 중국을 거쳐 서울로 이동하지만, MM5의 기상장을 이용한 HY-SPLIT 결과의 경우 우리나라 동해안에서 시작된 궤적이 중국과 북한을 거쳐 서울로 이동하는 결과를 나타냈다. 여기서 두 기상장의 HY-SPLIT 결과가 중국과 러시아의 국경지역까지는 비슷한 궤적을 보이지만 36시간 경과한 후에는 서로 상반된 궤적으로 이동하였다. 따라서 서로 다른 기상 모델의 결과를 사용한 HY-SPLIT 모델의 역궤적 결과는 기상장의 시·공간 해상도 차이에 따라 오염원의 발생원을 역추적 하는데 큰 차이를 나타낼 수 있음을 보였다.

2. 상층기상 관측소의 실측값과 기상모델의 바람장 비교

HY-SPLIT 모델링 기간 중 유적선이 지나간 실제 상층기상 관측 지점에서 측정된 자료(풍향, 풍속)를 이용하여 실제 관측값에 대한 기상모델 결과의 정합도를 비교·평가하였다. 그림 3은 그림 2에서 보인 6가지 경우 중에서 상대적인 거리차이가 크게 나타난 2006년 4월 5일과 5월 30일을 대상으로 MM5와 GDAS 기상 모델의 풍향, 풍속 결과를 상층관측지점에서 측정된 관측값과 비교하였다. 비교 시점은 4월 5일의 경우 72시간 기준이며, 5월 30일의 경우 48시간을 기준으로 12시간 전·후의 연직 바람장을 비교하였다. 4월 5일의 경우 MM5 기상장의 풍향, 풍속은 시·공간적 실측변화에 비교적 관측 값과 유사한 모델결과를 보이고 있다.

하지만, GDAS 기상장의 경우 시간변화에 따라 실제 바람장과 다소 큰 차이를 보였으며, 고도에 따른 바람의 경우 실제 측정된 관측 값과 큰 차이를 보였다. 특히 역궤적이 서로 어긋나는 -72시간의 경우 실측값과 MM5 기상장의 풍향은 북서풍 계열이 우세하지만 GDAS 기상장의 경우 남서풍 계열의 바람을 보였다. 또한, 5월 30일의 경우 역시 MM5 기상장의 시·공간적 바람장은 관측값과 유사한 패턴을 보이지만, GDAS 기상장의 결과는 관측값과 차이를 보였다.

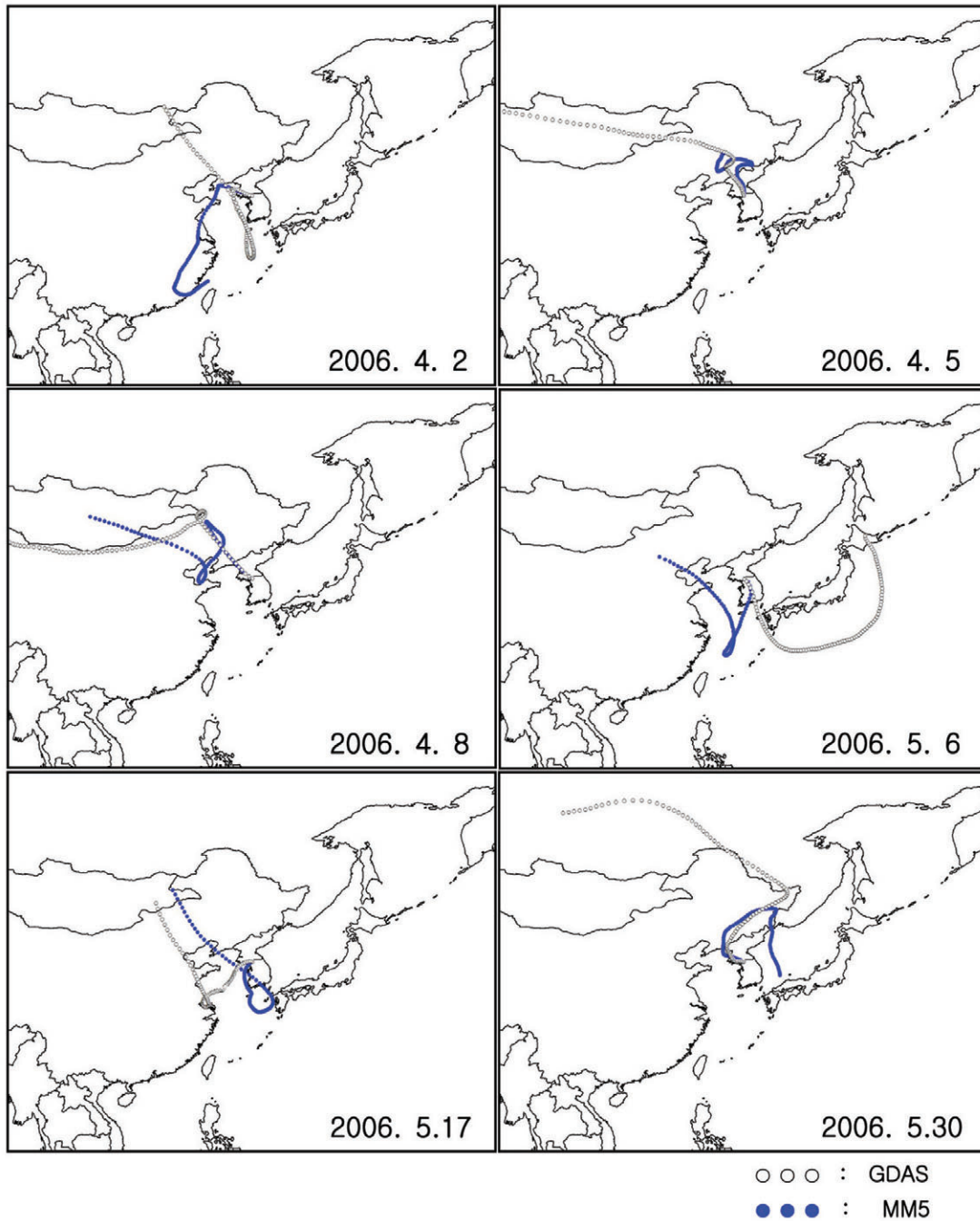


Figure 2. Selected cases of backward trajectories. Each case shows the difference between two models trajectory starting at 1000m(AGL)

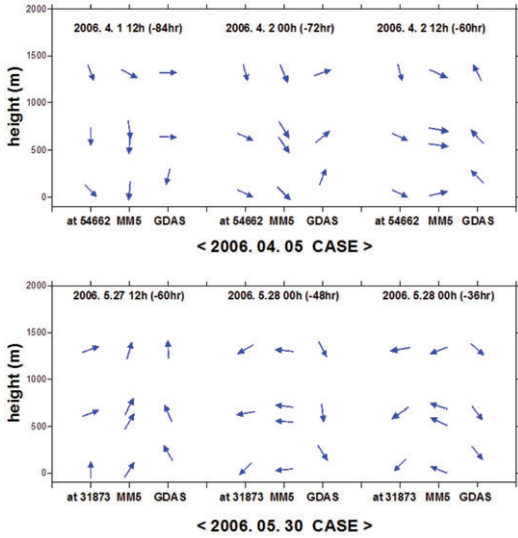


Figure 3. Comparison of wind profiles between the observation and models (MM5 and GDAS) at the grid near upper air observation station

3. 역궤적의 절대적인 거리차이와 상대적인 거리차이

서로 다른 기상 모델을 입력 자료로 사용한 HY-SPLIT 모델의 시간별 결과를 이용하여 절대적인 거리차이(AD)와 상대적인 거리차이(RD)를 비교하기 위하여 대상기간 동안 일별 역 궤적을 식1과 3을 이용하여 계산하였다. 그림 4는 대상기간 동안 MM5와 GDAS 기상장을 이용한 HY-SPLIT 결과의 AD를 나타낸 것으로서 시간 변화에 따라 24시간 간격으로 각각 4지점(24시간, 48시간, 72시간, 96시간)의 거리차이를 비교하였다.

그 결과 HY-SPLIT 모델의 출발지점 고도를 500m와 1000m에서 시작한 모델의 결과가 모두 24시간 지점에서 약 250km, 96시간 지점에서 약 1500km의 절대적인 거리차이가 나타났으며, 시간이 지날수록 각각의 기상장을 이용한 HY-SPLIT 모델 결과의 거리차이가 크게 증가하였다. 그림 5는

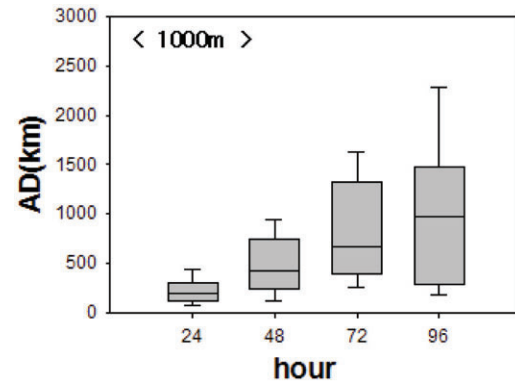
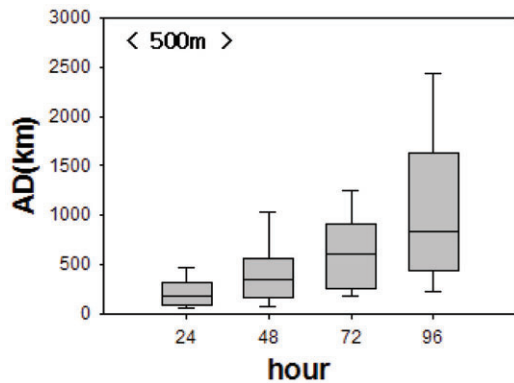


Figure 4. Percentile values(5, 25, 50, 75, 95 percentile) of absolute distance(AD) between trajectories calculated using of MM5 and GDAS

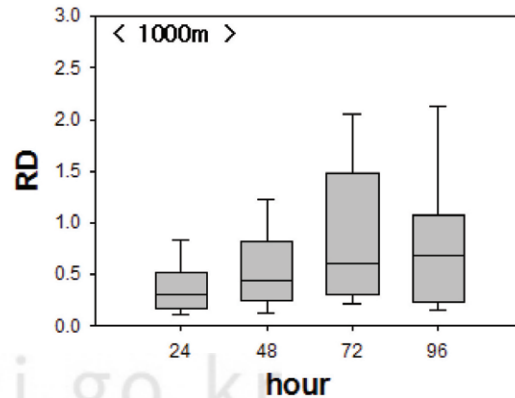
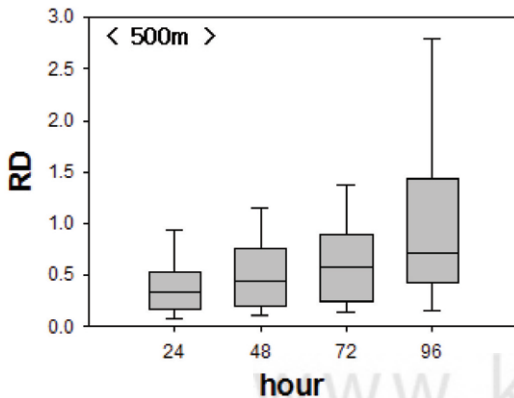


Figure 5. Percentile values(5, 25, 50, 75, 95 percentile) of relative distance(RD) between trajectories calculated using of MM5 and GDAS

Table 2. Median values of absolute and relative distance between trajectories calculated using of MM5 and GDAS

	500m(AGL)				1000m(AGL)			
	24hr	48hr	72hr	96hr	24hr	48hr	72hr	96hr
AD (km)	176.71	346.97	608.66	831.30	190.03	428.71	667.54	967.75
RD	0.340	0.436	0.585	0.708	0.300	0.444	0.608	0.676

서로 다른 기상장을 이용한 HY-SPLIT 모델 결과의 RD를 나타내었다. 그 결과 절대적 거리차이와 유사한 결과를 보이며, 시간이 지날수록 상대적인 거리차이가 크게 증가하는 경향을 보였다.

표 2는 AD와 RD의 중위수(Median Values)값이다. 그림 4, 5의 결과와 같이 500m와 1000m의 HY-SPLIT 모델의 결과는 시간이 지나며 값이 모두 증가하는 경향을 나타내었다.

IV. 결론

최근 황사와 더불어 광역적인 오염으로 인한 대기오염 물질의 발원지를 추정하고 기단의 이동경로를 분석하는데 NOAA에서 개발한 HY-SPLIT 모델이 범용 적으로 사용되고 있다. 동아시아 지역의 HY-SPLIT 모델링을 위해 일반적으로 사용되는 기상장은 전 지구 모델로서 격자 간격이 약 1°인 GDAS 기상자료가 주로 쓰인다. 그러나 비교적 대상영역이 좁고 상세한 지역의 역궤적 모델링의 경우 기상장의 공간분포가 다양하므로 GDAS 기상자료를 사용하는 것보다 시·공간 해상도가 좋은 국지 규모 모델인 MM5 기상자료가 HY-SPLIT 모델의 기상장으로 적합하다고 생각된다.

이에 2006년 3월부터 5월에 걸쳐 3차원 기상장인 MM5와 GDAS를 이용하여 HY-SPLIT 모델을 실행하였다. HY-SPLIT 모델 결과 궤적이 큰 차이를 보인 2개 사례를 궤적이 통과하는 상층기상 관측소 지점의 상층 바람자료로 비교한 결과 MM5 기상장이 실측 바람을 더 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 또한 대상기간 동안 MM5와 GDAS 기상자료로 계산한 역궤적을 비교한 결과 대부분의 경우 절대·상대적인 거리차이가 크게 나타났으며, 역궤적의 시간이 길어질수록 그 차이는 더욱 크게 나타났다.

미국 NOAA HY-SPLIT 모델은 기상장으로 GDAS를 사용하는바 실제의 공기의 이동 궤적과는 크게 차이가 날수 있음을 확인하였다. 따라서 대상영역이 비교적 좁고, 바람장의 분포가 복잡한 지역의 경우 시·공간 해상도가 높은 기상모델을 선택하여 사용하는 것이 HY-SPLIT 모델 결과의 신뢰도 향상에 매우 중요하다고 사료된다. 또한 대기환경 연구에 유적선 분석결과를 바르게 적용하고 해석하는데 있어 이 연구의 결과는 도움이 될 것으로 생각된다.

사 사

이 논문의 일부는 2008년도 강원대학교 학술연구 조성비로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 송은영, 2007, 광화학 모델을 이용한 수도권 및 주변지역의 오존 시공간거동 모사, 강원대학교 대학원 이학박사논문.
- 이종범, 2000, 대기오염기상학, 신평문화사, p.171-176.
- 이종범, 김재철, 천태훈, 2009, 위성자료를 이용한 MM5 4차원자료동화가 광화학모델의 정확도에 미치는 영향 고찰, 한국대기환경학회지, 25(4), 264-274.
- 정관영, 1996, 퍼프 유적선모델에 의한 대기오염물질의 장거리수송량의 평가, 한국대기보전학회지, 12(2), 167-177.
- A. STOHL, 1998, Computation, Accuracy and Applications of Trajectories - A Review and Bibliography, Atmospheric

- Environment, 32(6), 947-966.
- A. Yerramilli, V. S. Challa, J. Indracanti, H. Dasari, J. Baham, C. Patrick, J. Young, R. Hughes, L. D. White, M. G. Hardy, and S. Swanier, 2008, Some Observational and Modelling Studies of the Atmospheric Boundary Layer at Mississippi Gulf Coast for Air Pollution Dispersion Assessment, *Environmental Health Research*, 5(5), 484-497.
- Draxler, R. R., 1987, Sensitivity of a Trajectory Model to the Spatial and Temporal Resolution of the Meteorological Data during CAPTEX.
- Draxler, R. R. and Hess, G. D., 2004, Description of the Hysplit_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, 25.
- E. M. Choi, S. H. Kim, T. M. Holsen, and S. M. Yi, 2008, Total gaseous concentrations in mercury in Seoul, Korea: Local sources compared to long-range transport from China and Japan, *Environmental Pollution*, In Press, Corrected Proof, Available online
- G. Wang, K. Kawamura, and M. Lee, 2009, Comparison of organic compositions in dust storm and normal aerosol samples collected at Gosan, Jeju Island, during spring 2005, *Atmospheric Environment*, 43, 219-227.
- HYSPLIT_4(2003) NOAA ARL HYSPLIT Model, < <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>>
- J. V. Niemi, S. Saarikoski, M. Aurela, H. Tervahattu, R. Hillamo, D. L. Westphal, P. Aamio, T. Koskentalo, U. Makkonen, H. Vehkamäki, and M. Kulmala, 2008, Long-range transport episodes of fine particles in southern Finland during 1999-2007, *Atmospheric Environment*, In Press, Accepted Manuscript, Available online.
- N. I. R. Rivera, T. E. Gill, K. A. Gebhart, J. L. Hand, M. P. Bleiweiss, and R. M. Fitzgerald, 2009, Wind modeling of Chihuahuan Desert dust outbreaks, *Atmospheric Environment*, 43, 347-354.
- Rolph, G. D. and Draxler, R. R., 1990, Sensitivity of three dimensional trajectories to the spatial and temporal densities of the wind field. *Journal of Applied Meteorology*, 29, 1043-1054.
- S. Lee, L. Ashbaugh, 2007, The impact of trajectory starting heights on the MURA trajectory source apportionment (TSA) method, *Atmospheric Environment*, 41, 7022-7036.
- Stauffer, D. R. and Seaman, N. L., 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 416-434.
- Wain, A. G., Lee, S., Mills, G. A., Hess, G. D., Cope, M. E., and Tindale, N. W., 2006, Meteorological overview and verification of HYSPLIT and AAQFS dust forecasts for the duststorm of 22-24 October 2002, *Australian Meteorological Magazine* 55:1.