

초저고도 바람예측을 위한 WRF의 물리과정 및 초기조건 민감도 평가

Sensitivity Evaluation of Physics and Initial Condition of WRF for Ultra Low Altitude Wind Prediction

권재일¹ · 김기영^{1*} · 구성관² · 홍석민³

¹주식회사 포디솔루션

²한서대학교 항공산업공학과

³한서대학교 무인항공기학과

Jaell Kwon¹ · Ki-Young Kim^{1*} · SungKwan Ku² · SeokMin Hong³

¹4D SOLUTION CO., LTD., Seoul 08511, Korea

²Department of Aviation Industrial and System Engineering, Hanseo University, Chungcheongnam-do 32158, Korea

³Department of Unmanned Aircraft System, Hanseo University, Chungcheongnam-do 32158, Korea

[요 약]

최근 드론 등의 무인비행체에 대한 관심과 활용이 높아지고 있다. 본 연구에서는 고도 150 m 이하 초저고도의 정확한 바람예측 정보를 제공하기 위해, 물리과정 모수화와 초기조건에 따른 민감도를 평가하여 최적의 물리과정 및 초기조건을 선정하고자 하였다. 이를 위해 GFS 및 LDAPS 자료를 초기 및 경계조건으로 사용하였고, YSU, RUC, ACM2 등의 대기경계층 모수화 방안과 Noah, RUC, Pleim 등의 지면모델을 조합한 7개의 실험을 구축하여, 2018년 4월의 1개월에 대해 수행하였다. 그 결과 GFS 초기자료를 사용한 RUC-YSU 물리과정 조합이 가장 우수한 성능을 나타냈다. 본 연구는 다양한 물리과정의 조합과 초기 및 경계자료를 사용한 실험을 통해 초저고도 바람예측을 위한 최적 모델링 방안을 설정한 것에 의의가 있을 것이라 판단된다.

[Abstract]

Recently, interest in and use of drones is increasing. In this study, to provide accurate wind prediction at ultra low altitudes of 150 meters or below, the sensitivity of the physical process parameterization and initial conditions was assessed to select the optimal physical process and initial conditions. For this purpose, GFS and LDAPS data were used as initial and boundary conditions, and 7 experiments were constructed using a combination of PBL schemes such as YSU, RUC, ACM2, and LSM such as Noah, RUC, and Pleim. The experiment conducted for 1 month in April 2018. As a result, the RUC-YSU physical process combination using the GFS initial data showed the best performance. This study is meaningful in establishing an optimal modeling method for ultra low altitude wind prediction through experiments using different initial conditions and combination of physical processes.

Key word : Planetary boundary layer, Initial condition, Weather research and forecasting, Ultra low altitude, Wind prediction.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.6.487>



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.

Received 22 November 2019 Revised 23 November 2019

Accepted (Publication) 7 October 2014 (30 December 2019)

*Corresponding Author; Ki-Young Kim

Tel: +82-2-878-0126

E-mail: kiyoungkim3@4dsolution.co.kr

I. 서론

최근 드론 등의 무인비행체에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 따라 다양하게 활용되고 있다. 경찰의 도난 차량 추적, 재난 지역의 실종자 수색 등의 공공적인 측면에서 뿐만 아니라, 미디어 업계에서 드론을 활용한 촬영 및 레저용으로도 활용되고 있다. 또한 미국의 아마존, 월마트 등은 드론을 활용한 무인 배달 서비스를 발표하였다[1].

이러한 드론을 운행하기 위해서는 드론의 고도 유지 기능이 필수적이며, 일정한 고도를 유지하지 못할 경우 문제가 발생할 수 있다. 그러나 드론은 바람에 의해 유지해야 하는 고도에서 멀어질 수 있다[2]. 또한 드론 등의 무인비행체에 대한 항법 정확도 및 무결성이 안정성에 중요한 역할을 하는데, 이 중 위치 정확도는 바람 등의 외부원인에 의한 영향을 받을 수 있다[3].

따라서 드론 등의 무인비행체의 안전한 운항을 위해서는 바람에 대한 예측정보가 필요하다. 현재 공역의 기상 정보를 확인할 수 있는 항공기상 서비스는 대형항공기의 고고도 비행을 위해 제공되며, 일정 높이 이상 상공의 기상 상태와 공항의 이착륙 기상을 확인할 수 있다. 드론 등의 무인비행체의 경우 고도 150 m 이하의 초저고도 운행하는 경우가 많으나, 현재 이러한 고도의 기상예측정보를 제공하는 기관이나, 이에 관련된 연구는 존재하지 않는다.

고도 150 m 이하의 초저고도 영역은 대기 경계층 (planetary boundary layer)에 포함되는데, 대기 경계층은 태양복사에 의한 기온 변동이 급격하게 나타나는 지표면과 맞닿아 있어서 대기 환경이 급격히 변화하는 경향이 있다[4]. 기상정보를 예측하기 위한 수치모델은 이러한 대기경계층의 난류를 물리과정 모수화를 통해 예측한다. 이러한 대기경계층 모수화 방안은 여러 가지 방법이 있으며, 모수화 방안에 따라 지표층 바람 패턴 민감하게 반응하여 다르게 나타난다[5].

임아영 외 3명은 수도권 지역의 고해상도 수치실험을 진행할 때 연직 해상도와 대기경계층 모수화 방안의 민감도에 대해 연구한 바 있으며[6], 서범근 외 2명은 전국을 대상으로 지표층의 풍향과 풍속에 대해 대기경계층 모수화와 지면모델의 민감도를 평가하는 연구를 진행한 바 있다[5]. 물리모수화 방안 외에 초기 및 경계조건 또한 수치모델링에 영향을 미친다. Siuta 외 2명은 풍력발전기의 높이를 예측하는데, 초기조건, 격자크기, 대기경계층 모수화 방안의 민감도를 평가하여 초기조건 또한 수치모델링 결과에 영향을 미친다는 것을 밝혔다[7]. 이러한 연구들은 기상학에서 수치모델링을 연구할 때 일반적으로 사용하는 WRF (weather research and forecasting) 모델을 사용하여 연구를 진행하였다.

그러나 현재 무인비행체를 위해 초저고도 예측정보를 생산하기 위한 연구는 존재하지 않으며, 이에 대한 정확도 높은 정보는 드론의 안전한 운항을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 고도 150 m 초저고도의 정확한 바람예측 정보를 제공하기 위해, 물리과정 모수화와 초기조건에 따른 민감도를 평가하여 최적

의 물리과정 및 초기조건을 선정하고자 한다. 연구수행에 대한 세부사항은 다음 장에서 설명하였다.

II. 실험 구축 및 검증방법

2-1 수치모델 및 도메인 설정

본 연구에서는 미국 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 중규모 수치모델인 WRF 모델을 사용하였다. WRF 모델은 완전 압축성 비정수계 모델이며, 수평격자는 Arakawa-C 격자를, 연직격자는 지형에 근거한 정역학 기압 연직 좌표를 사용하는 모델이다. 사용된 버전은 2017년 8월에 배포된 3.9 버전이다.

본 연구에서는 초저고도 바람예측을 모델링하는 것이 목적이므로, 초기조건 및 경계조건으로 미국 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)의 전구모델인 GFS (global forecasting system) 모델의 예측자료와 우리나라 기상청의 현업모델인 UM (unified model)의 국지예보모델인 LDAPS (local data assimilation and prediction system)의 예측자료를 사용하였다. GFS는 전구모델, LDAPS는 국지모델로 차이가 있지만 자료를 얻을 수 있는 한계로 인해 이 두 가지 자료를 사용하였다. GFS와 LDAPS는 모두 자료동화과정이 포함된 모델자료이며, GFS 및 LDAPS의 세부 정보는 표 1과 같다.

실험을 진행한 지역은 전라남도 보성군이다. 본 연구에서는 고도 150 m 이하의 바람을 예측하는 것이 목적이므로, 저고도의 고도별 관측자료가 존재하는 보성글로벌표준기상관측소를 기준으로 도메인을 설정하였다. GFS와 LDAPS 자료는 해상도가 각각 약 28 km, 1.5 km이므로 도메인을 각각 설정하였다. GFS의 경우 4.5, 1.5, 0.5 km의 해상도를 갖는 3개의 도메인의 등지격자로 구성하였고, LDAPS의 경우 0.5 km의 해상도를 갖는 하나의 도메인을 구성하였다. 지형 및 토지이용자료는 지표면 거칠기에 큰 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 가능한 고해상도의 고품질 자료를 사용하였다. 지형자료는 1 각초 (arc second, 약 30 m) 해상도의 미국 SRTM (shuttle rader

표 1. GFS 및 LDAPS 세부 정보

Table 1. Details of the GFS and LDAPS.

| Category | GFS | LDAPS |
|------------------|------------------------------------|----------------------|
| Resolution | 0.25°(28 km) | 1.5 km |
| Number of grids | 1440(WE)×721(SW) | 781(WE)×602(SW) |
| Vertical layer | 31 | 24 |
| Spatial coverage | Global | the Korean Peninsula |
| Forecasting time | 384 hours | 36 hours |
| Data interval | 3 hours(~240) 12 hours(240~384) | 1 hour |
| Data format | grib2 | grib2 |

표 2. GFS 및 LDAPS 실험 도메인 설정

Table 2. Domain configuration of the GFS and LDAPS.

| Category | GFS | LDAPS |
|------------------------|--|--|
| Resolution | Domain 1: 4.5 km Domain 2: 1.5 km Domain 3: 0.5 km | 0.5 km |
| Number of grids(WE×SW) | Domain 1: 79×41 Domain 2: 121×41 Domain 3: 121×67 | 131×77 |
| Center point | 34.7637°N, 127.2124°E | 34.7637°N, 127.2124°E |
| Projection | Lambert | Lambert |
| Topographic data | SRTM 1 s | SRTM 1 s |
| Land use data | Domain 1,2: USGS 24-Category Domain 3: Land use data provided by Korean Ministry of Environment | Land use data provided by Korean Ministry of Environment |

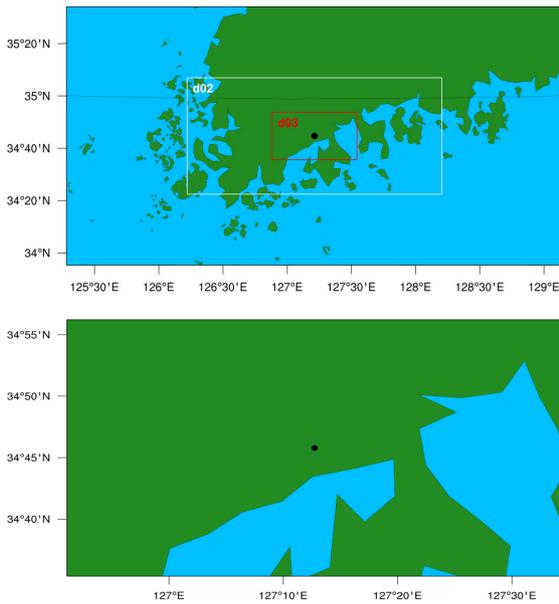


그림 1. GFS(위) 및 LDAPS(아래) 실험 도메인
Fig. 1. Domain of GFS(up) and LDAPS(down) experiment.

topographic mission) 자료를 사용하였고, 토지이용도의 경우 환경부에서 제공하는 1:25,000 축척의 토지피복자료를 사용하였다(표 2).

2-2 실험설정 및 검증방법

초저고도 바람예측을 위한 물리과정 및 초기조건 선정을 위해 지면모델과 대기경계층 모수와 과정을 조합하여 각 초기조건 별로 실험을 수행하였다. 대기경계층 모수화 방안으로는 YSU (Yonsei university scheme)[8], MYJ (Mellor-Yamada-Janjic scheme)[9], ACM2 (asymmetric convection model 2 scheme)[10]을 사용하였고, 지면모델은 Noah (unified noah land surface model)[11], RUC (rapid update cycle)[12], Pleim (Pleim-

표 3. 물리과정 실험 설정

Table 3. Experiment configuration of physics scheme.

| Physics scheme | test1 | test2 | test3 | test4 | test5 | test6 | test7 |
|--------------------------|------------------|---------------------|-------|-----------|-------------|-------|-------|
| Microphysics | Thompson graupel | WSM 6-class graupel | | | | | |
| Cumulus parameterization | Tiedtke | off | | | | | |
| Longwave radiation | RRTMG scheme | | | | | | |
| Shortwave radiation | RRTMG scheme | | | | | | |
| Land surface | Noah | | | | Pleim | | RUC |
| SurfaceLayer | Monin-Obukhov | Revised MM5 | | Pleim-Xiu | Revised MM5 | | |
| Planetary boundary layer | MYJ | YSU | ACM2 | | YSU | | |

Xiu land surface model)[13] 방안을 사용하였다. 대기경계층 모수화와 지면모델을 조합하여 7개 실험 (이하 test)을 진행하였다. test1은 전체 물리과정을 CONUS (cotinental US) physics suite로 진행하였다. 이는 NCAR convection-permitting suite에 해당하는 물리과정 세트로 미국 대륙의 대류성 일기 (convective weather)에 초점을 맞춘 것이다. test2-7은 지면모델과 대기경계층, Land surface를 제외하고 동일하게 설정하였다. 물리과정 실험 설정에 대한 세부적인 사항은 표 3과 같다.

실험은 2018년 4월의 1개월 동안 00 UTC와 12 UTC의 초기 시간에 36시간 예측을 수행하였고, 초기시간 및 test 대해 각각 60개의 실험 (30일×2개 초기시간)을 진행하였다.

실험결과에 대한 검증은 풍속과 풍향에 대해 각각 진행하였으며, 10 m와 100 m 풍속을 대상으로 하였다. 실험검증을 위한 관측자료는 보성글로벌표준기상관측소의 풍속, 풍향자료를 사용하였다. 예측자료는 보성글로벌표준기상관측소와 가장 가까운 격자의 값을 추출하여 사용하였다. 풍속의 검증을 위한 지표로는 RMSE (root mean square error)와 Bias를 사용하였다. 이는 식(1)과 같이 표현되며, 여기서 F_i 는 예측, O_i 는 관측이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (F_i - O_i)^2}$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_1^N (F_i - O_i)$$

(1)

풍향의 검증을 위한 지표로도 RMSE를 사용하였으나, 풍속과는 다른 식을 적용하였다. 풍향의 경우 360°로 값이 제한되는 각도값이기 때문에 예측값과 관측값의 내각에 대한 풍향의 차이를 계산하기 위해 식(2)를 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (F'_i - O'_i)^2}$$

$$F'_i = F_i, O'_i = O_i \quad \text{if } |F_i - O_i| \leq 180$$

$$F'_i = F_i + 360, O'_i = O_i \quad \text{if } |F_i - O_i| > 180 \text{ and } F_i < O_i$$

$$F'_i = F_i, O'_i = O_i + 360 \quad \text{if } |F_i - O_i| > 180 \text{ and } F_i > O_i$$

(2)

여기서도 F_i 는 예측, O_i 는 관측을 의미한다. RMSE와 Bias는 0에 가까울수록 모델과 관측이 유사하다는 것을 의미하며, Bias의 경우 양의 값은 모델이 관측에 비해 과대모의함을 의미하고, 음의 값은 모델이 관측에 비해 과소모의함을 의미한다. 검증을 수행할 때는 00 UTC와 12 UTC를 나누어 값을 산출하였다.

III. 실험 결과

3-1 관측자료 분포

실험기간인 2018년 4월에 대한 보성글로벌표준기상관측소의 10 m 및 100 m 풍속의 분포를 파악하였다. 10 m 풍속의 경우 2018년 4월 시간별 풍속의 평균은 3.5 m/s, 표준편차는 2.4 m/s로 나타났으며, 최대풍속과 최소풍속은 각각 13.3, 0 m/s였다. 10 m 풍속의 경우는 평균, 표준편차, 최대, 최소풍속이 각각 4.4, 3.1, 17.0, 0.1 m/s로 나타났다. 고도 100 m의 풍속이 10 m보다 평균풍속과 표준편차가 모두 크게 나타난다. 높은 고도일수록 지표면의 마찰력을 적게 받아 이러한 결과가 나타난 것으로 보인다(그림 2).

3-2 고도 10 m 실험 결과

00 UTC 초기시간의 고도 10 m 풍속 결과를 보면 RMSE는 1.65~2.36 m/s, Bias는 -0.47~1.05 m/s의 분포를 보인다. 초기 및

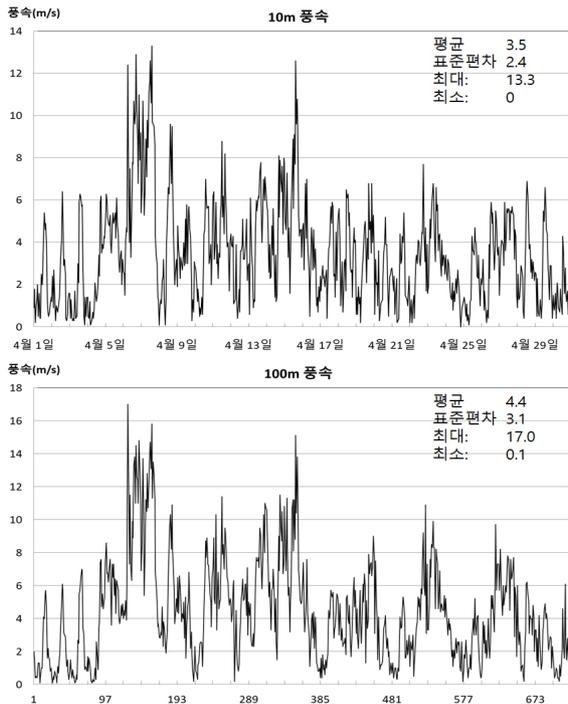


그림 2. 2018년 4월의 고도 10 m 및 100 m 풍속 시계열
Fig. 2. 10 m and 100 m wind speed time series for Apr. 2018.

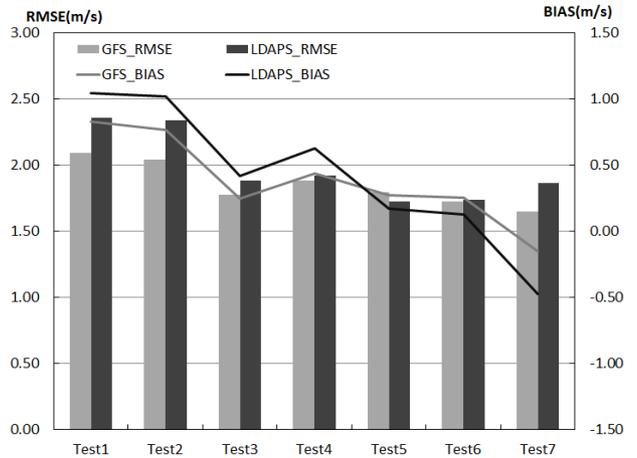


그림 3. 00 UTC의 고도 10 m 풍속 실험 결과

Fig. 3. Results of 10 m height wind speed experiment in 00 UTC.

경계자료에서 볼 때, test6을 제외한 나머지에서 LDAPS가 GFS에 비해 RMSE 값이 높게 나타는 모습을 보이고 있다. 또한 Bias에서도 test5와 test6을 제외한 나머지는 LDAPS가 GFS에 비해 0에서 멀리 떨어진 모습을 보인다(그림 3). 이는 GFS를 초기 및 경계자료로 사용했을 때의 결과가 더 우수함을 나타낸다.

각 test 별로 보았을 때는 GFS의 경우 test7의 RMSE가 1.65 m/s로 가장 우수한 성능을 보였다. test7의 경우 다른 실험들이 풍속을 과대모의하는데 비해 약간 과소모의하는 경향을 보이며, GFS test7은 가장 Bias 값이 0에 가까게 나타난다. GFS에서는 YSU 대기경계층 모수화 방안을 사용한 test3 (1.78), test6 (1.72), test7 (1.65)이 다른 대기경계층 모수화 방안을 사용한 test에 비해 성능이 우수한 것으로 나타났다. LDAPS의 경우 ACM2를 사용한 test5의 RMSE가 1.73 m/s로 가장 우수한 성능을 보였다. 이를 제외하면 LDAPS에서도 YSU를 사용한 test3 (1.88), test6 (1.74), test7 (1.86)이 나머지 test보다는 우수한 성능을 보였다. 공통적으로 MYJ를 사용한 test1과 test2는 GFS와 LDAPS에서 공통적으로 성능이 가장 떨어지는 것으로 나타났다(그림 3).

12 UTC 초기시간의 고도 10 m 풍속 결과에서는 RMSE가 1.72~2.27 m/s, Bias는 -0.36~0.74 m/s의 분포를 나타냈다. 12 UTC도 00 UTC와 마찬가지로 RMSE를 보면 GFS가 LDAPS보다 전반적으로 우수한 성능을 보이고 있다. 그러나 Bias를 보면 test7을 제외하면 LDAPS가 과대모의하는 경향이 약간 적은 것으로 나타난다(그림 4).

각 test 별로 보았을 때 12 UTC에서도 GFS test7이 가장 우수한 성능을 보였으며, 다른 test와 달리 약간 풍속을 과소 모의하는 모습을 보였다. 또한 00 UTC와 마찬가지로 MYJ를 사용한 test1, 2는 12 UTC에서도 성능이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 00 UTC와는 달리 같은 지면모델을 사용한 test3과 4, test5와 6을 비교해봤을 때 YSU가 ACM2보다 성능이 우수하게

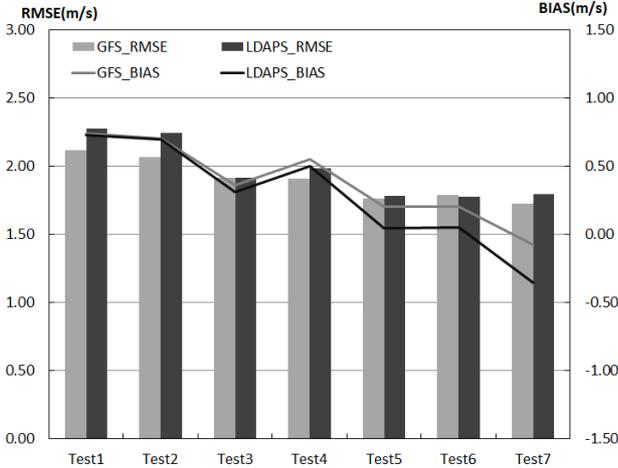


그림 4. 12 UTC의 고도 10 m 풍속 실험 결과
 Fig. 4. Results of 10 m height wind speed experiment in 12 UTC.

나타나지는 않았다(그림 4).

고도 10 m 풍향의 00 UTC RMSE 결과는 그림 5에 나타났다. 전체적으로 RMSE는 55.8~62.1°의 분포를 보이고 있다. 풍향은 풍속과 달리 각 test 별로 성능이 우수한 초기 및 경계조건이 다르게 나타나고 있다. GFS의 경우 test1 (55.8), test7 (56.8), test2 (57.5) 순으로 성능이 우수한 것으로 나타났으며, LDAPS의 경우 test 2 (57.2), test5 (57.3), test1 (57.8) 순으로 성능이 우수한 것으로 나타났다. 공통적으로 test1과 test2가 우수한 축에 속했으며, 이는 MYJ 대기경계층 모수화 방안을 사용한 test들이다.

12 UTC에서는 RMSE가 64.5~70.0°의 분포를 보이고 있어 00 UTC 보다 전체적으로 약간 RMSE가 높게 나타났다. 12 UTC에서는 test4와 test6을 제외한 나머지 test에서 LDAPS 보다 GFS의 성능이 더 우수하게 나타났다. test 별로는 GFS의 경

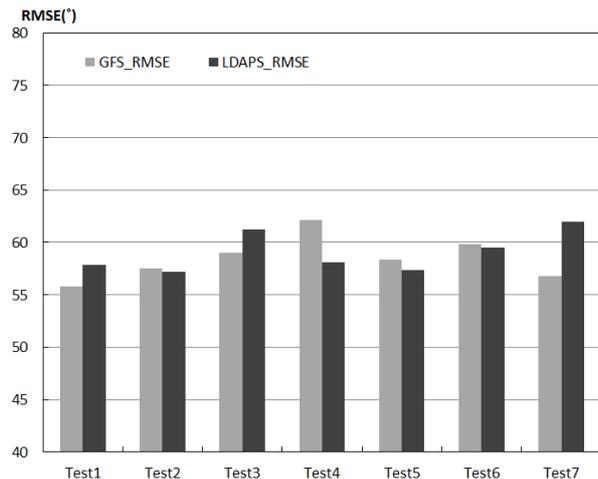


그림 5. 00 UTC의 고도 10 m 풍향 실험 결과
 Fig. 5. Results of 10 m height wind direction experiment in 00 UTC.

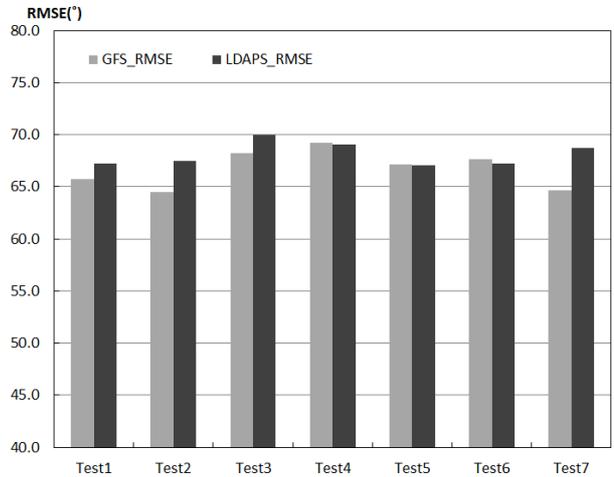


그림 6. 12 UTC의 고도 10 m 풍향 실험 결과
 Fig. 6. Results of 10 m height wind direction experiment in 12 UTC.

우 test2 (64.5), test7 (64.7), test1 (65.7) 순으로 성능이 우수한 것으로 나타나 00 UTC와 같은 test들의 성능이 우수했다. LDAPS의 경우 test5 (67.1), test1 (67.2), test6 (67.2) 순으로 성능이 우수한 것으로 나타나 test1과 test5가 00 UTC와 12 UTC에서 모두 우수한 성능을 보였다(그림 6).

풍속에서는 GFS test7이 00 UTC와 12 UTC에서 모두 가장 우수한 성능을 나타낸 것과 달리, 풍향에서는 00 UTC와 12 UTC에서 각각 GFS test1, GFS test2가 가장 우수한 성능을 보였다. 그러나 풍향에서도 GFS test7은 00 UTC와 12 UTC에서 각각 2번째, 3번째로 우수한 성능을 보여 풍속과 풍향에서 모두 우수한 성능을 나타냈다.

3-3 고도 100 m 실험 결과

00 UTC 초기시간의 고도 100 m 풍속 RMSE는 2.31~2.77 m/s의 분포를 보여 10 m 풍속보다는 예측오차가 큰 것으로 나타났다. 초기 및 경계조건 별로 볼 때, RMSE의 경우 test5와 test6을 제외한 나머지 test에서 GFS가 LDAPS에 비해 더 우수한 성능을 나타냈다. 그러나 Bias는 test2를 제외하면 GFS가 LDAPS에 비해 풍속을 약간 과대모의하는 모습을 보인다(그림 7).

각 test 별로 보았을 때는 GFS test7 (2.31)이 가장 우수한 성능을 보였으며, LDAPS에서도 test7 (2.43)이 다른 test에 비해 우수한 성능을 보였다. 또한 같은 지면모델을 사용한 test1~4, test5와 test6중에서 YSU를 사용한 test3과 test6이 우수한 성능을 보였다(그림 7).

12 UTC 초기시간의 결과에서도 마찬가지로 GFS의 RMSE가 LDAPS보다 모든 test에서 낮게 나타나 우수한 성능을 보였고, test1과 test2를 제외한 나머지 test에서 GFS가 약간 과대모의하는 모습을 보였다. test7의 경우는 GFS의 Bias는 0 m/s이고, LDAPS가 과소모의하는 것으로 나타났다(그림 8).

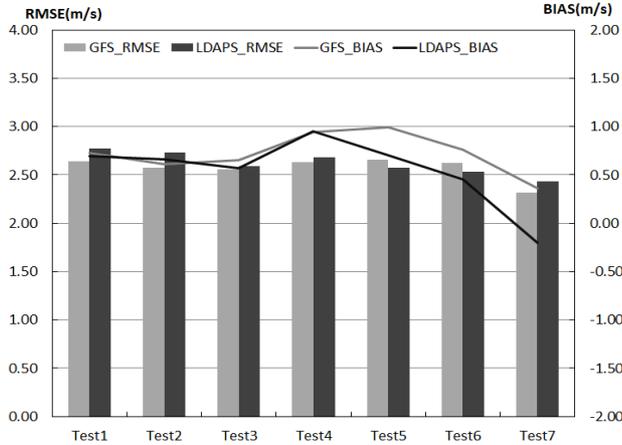


그림 7. 00 UTC의 고도 100 m 풍속 실험 결과
 Fig. 7. Results of 100 m height wind speed experiment in 00 UTC.

각 test 별로 보았을 때 test7이 GFS (2.42)와 LDAPS (2.58)에서 모두 가장 우수한 성능을 보였다. 같은 지면모델을 사용한 test5와 test6을 비교해봤을 때는 YSU를 사용한 test6이 우수하게 나타났으나, test1~4 중에서 보면 LDAPS는 test3이 가장 우수하게 나타났고 GFS에서는 test3보다 test2와 test4가 우수하게 나타났다(그림 8).

풍속의 결과를 놓고 보았을 때, 고도 10 m와 100 m에서 모두 GFS 초기 및 경계조건을 사용한 test7이 가장 우수한 성능을 나타냈다. 같은 지면모델을 사용한 test 중에서도 YSU가 비교적 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

00 UTC 초기시간의 고도 100 m 풍향을 보면 전체적으로 RMSE가 53.0~57.2°의 분포를 보이고 있어, 00 UTC 고도 10 m 풍향의 결과 보다 약간 낮게 나타난다. 초기 및 경계조건 별로 보면 test6과 test7을 제외한 나머지 test는 LDAPS의 RMSE가 GFS보다 낮게 나타난다. 전체적으로 가장 우수한 성능을 나타

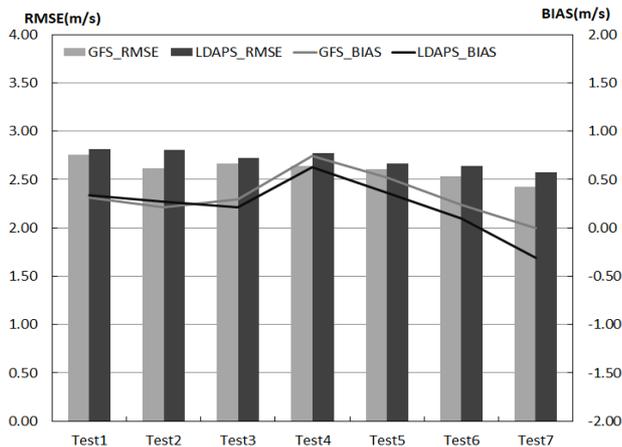


그림 8. 12 UTC의 고도 100 m 풍속 실험 결과
 Fig. 8. Results of 100 m height wind speed experiment in 12 UTC.

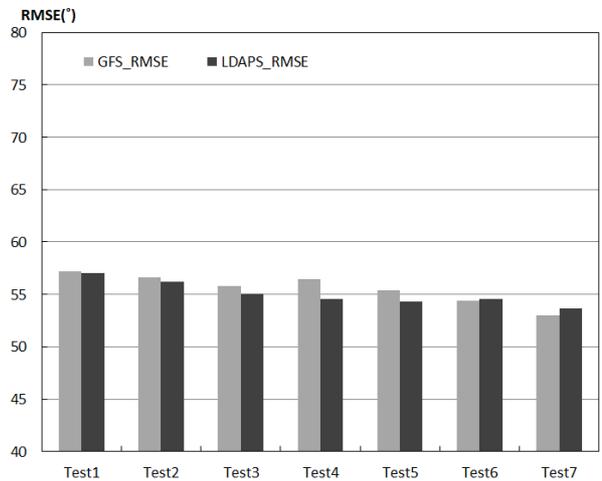


그림 9. 00 UTC의 고도 100 m 풍향 실험 결과
 Fig. 9. Results of 100 m height wind direction experiment in 00 UTC.

낸 것은 고도 10 m 풍향에서와 달리 GFS test7 (53.0)이며, 또한 LDAPS에서도 test7 (53.7)이 가장 우수한 성능을 나타냈다. 전체적으로 고도 10 m 풍향에서 우수한 성능을 보인 test1과 test2는 여기서 가장 성능이 떨어지는 것으로 나타났다(그림 9).

12 UTC 초기시간의 고도 100 m 풍향의 RMSE는 56.9~63.6°의 분포를 보이고 있어, 00 UTC와 마찬가지로 고도 10 m 풍향의 결과 보다 약간 낮게 나타난다(그림 10). 이러한 결과는 고도가 높아질수록 지표면의 영향을 덜 받아 마찰력으로 인한 풍향의 변동이 비교적 적어지기 때문인 것으로 판단된다.

초기 및 경계조건 별로 보면 00 UTC와 달리 모든 test에서 GFS의 성능이 LDAPS보다 우수했다. 가장 성능이 우수한 test는 GFS test7 (56.9)이었으며, LDAPS에서는 test7 (61.3)이 test6 (60.3)을 제외하고 가장 우수하게 나타났다(그림 10).

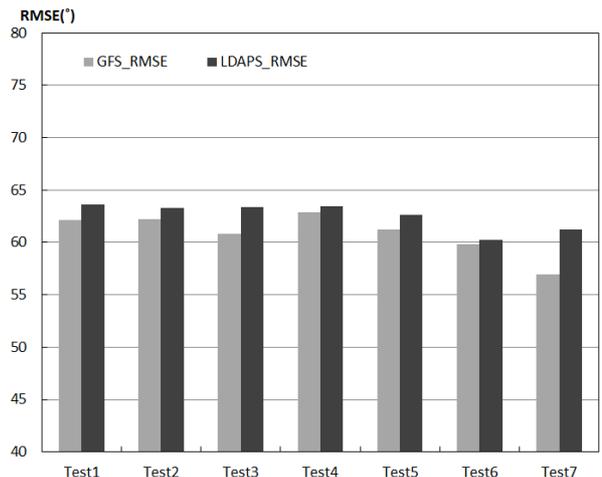


그림 10. 12 UTC의 고도 100 m 풍향 실험 결과
 Fig. 10. Results of 100 m height wind direction experiment in 12 UTC.

IV. 결 론

본 연구에서는 드론 등의 무인비행체를 위한 고도 150 m 이하 초저고도 바람 예측정보를 보다 정확히 생산하기 위한 목적으로 진행되었다. 초저고도의 바람에 영향을 미치는 물리과정 모수화와 초기 및 경계조건의 민감도를 평가하여 최적의 물리과정과 초기 및 경계조건을 선정하고자 하였다. 기상학에서 일반적으로 사용하는 WRF를 사용하여 민감도를 평가하였으며, 지표에서 150 m의 자료가 존재하는 보성글로벌관측소를 중심으로 한 도메인을 설정하여 실험을 진행하였다. 도메인 설정 시 지표면 거칠기에 큰 영향을 미치는 지형 및 토지이용자료는 1각초 해상도의 SRTM 자료와 1:25,000 축척의 환경부 토지피복 자료를 사용하였다. 초기 및 경계자료로는 GFS와 LDAPS를 사용하였고, 대기경계층과 지면모델을 조합하여 7개의 test를 4월의 1개월에 대해 00 UTC와 12 UTC를 초기시간으로 하여 36시간의 예측실험을 진행하였다.

고도 10 m의 풍속에서는 전반적으로 GFS를 사용한 test의 성능이 LDAPS에 비해 우수한 것으로 나타났으며, GFS test7의 성능이 모든 test 중에서 가장 우수한 것으로 나타났다. 고도 10 m 풍향에서는 test 별로 우수한 성능을 보인 초기 및 경계조건이 다르게 나타났고, 00 UTC와 12 UTC에서 각각 GFS test1, GFS test2가 가장 우수한 성능을 보였다. GFS test7은 00 UTC와 12 UTC에서 각각 2번째, 3번째로 우수한 성능을 보여 풍속과 풍향에서 모두 우수한 성능을 나타냈다.

고도 100 m의 풍속에서도 10 m와 마찬가지로 전반적으로 GFS를 사용한 test의 성능이 LDAPS에 비해 우수한 것으로 나타났으며, 전체 test 중에서 GFS test7의 성능이 가장 우수하게 나타났다. 고도 10 m 풍향에서와 같이 100 m에서는 어떤 초기장이 우수하다고 판단하기 어려웠다. 그러나 가장 성능이 우수한 test는 풍속과 마찬가지로 GFS test7로 나타났다.

전반적으로 풍속에서는 GFS 자료를 사용하였을 경우 LDAPS보다 우수한 성능을 보였다. 또한 YSU를 사용한 test가 동일조건의 다른 대기경계층 모수화 방안을 사용한 test에 비해 우수하게 나타났고, 그 중에서도 RUC와 조합한 test7이 가장 우수한 성능을 보였다. 풍향에서는 우수한 초기장과 물리과정 모수화 방안이 일관적으로 나타나지는 않았으나, GFS test7이 전반적으로 우수한 성능을 보였다. 따라서 보성지역에 대해서는 GFS 초기자료를 사용한 RUC-YSU 물리과정 모수화 방안 조합이 바람예측을 위한 최적의 모델링 방법이라고 판단할 수 있다.

본 연구는 방대한 수의 모델 실험 결과를 통해 결론을 도출하였다. 다양한 물리과정의 조합과 초기 및 경계자료의 실험을 통해 초저고도 바람예측을 위한 최적 모델링 방안을 설정한 것에 의의가 있을 것이라 생각된다. 그러나 고해상도의 모델 실험을 여러 가지 조합에 따라 방대하게 수행하는 데는 많은 시간을 필요로 한다. 이러한 물리적인 시간의 제약 때문에 추가적인 지역과 물리과정 모수화 방안 조합의 실험을 진행하지 못한 점이

본 연구의 한계점이다. 차후 추가적인 지역에 대한 실험을 진행한다면, 보다 의미있는 결과를 보여줄 수 있을 것이라고 생각한다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 연구비 지원(18CTAP-C143284-01)에 의해 수행되었습니다. 지원 기관에 감사드립니다.

References

- [1] S. J. Kim, J. H. Bae and C. Y. Choi, "A study on introduction of drone delivery service policies and development plans in countries," *Korea Logistics Review*, Vol. 26, No. 1, pp. 27-28, Feb. 2016.
- [2] D. Y. Kim, B. R. Yun, S. H. Lee and W. J. Lee, "Improvement of altitude measurement algorithm based on accelerometer for holding drone's altitude," *KIPS Transactions on Software and Data Engineering*, Vol. 6, No. 10, pp. 473-478, Oct. 2017.
- [3] Y. H. Ju, K. K. Moon, B. S. Kang, J. W. Jeong, H. G. Son and J. H. Cho, "Feasibility study on the methodology of test and evaluation for UAV positioning," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 530-536, Dec. 2018.
- [4] W. B. Jeon, H. W. Lee and S. H. Lee, "Numerical study on characteristics of turbulence scheme in planetary boundary layer," *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 19, No. 2, pp. 137-148, Feb. 2010.
- [5] B. K. Seo, J. Y. Byon and Y. J. Choi, "Sensitivity evaluation of wind fields in surface layer by WRF-PBL and LSM parameterizations," *Atmosphere*, Vol. 20, No. 3, pp. 319-332, Sep. 2010.
- [6] A. Y. Lim, J. W. Roh, J. B. Jee and Y. J. Choi, "Sensitivity experiments of vertical resolution and planetary boundary layer parameterization schemes on the Seoul metropolitan area using WRF model," *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 36, No. 6, pp. 553-566, Oct. 2015.
- [7] D. Siuta, G. West and R. Stull, "WRF hub-height wind forecast sensitivity to PBL scheme, grid length, and initial condition choice in complex terrain," *Weather and Forecasting*, Vol. 32, No. 2, pp. 493-509, Apr. 2017.
- [8] S. Y. Hong, Y. Noh and J. Dudhia, "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes," *Monthly Weather Review*, Vol. 134, No. 9, pp.

2318-2341, Sep. 2006.

- [9] G. L. Mellor and T. Yamada, "A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers," *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 31, No. 7, pp. 1791-1806, Oct. 1974.
- [10] J. E. Pleim and J. S. Chang, "A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer," *Atmospheric Environment*, Vol. 26, No. 6, pp. 965-981, Apr. 1992.
- [11] F. Chen and J. Dudhia, "Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn state – NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity," *Monthly Weather Review*, Vol. 129, No. 4, pp. 569-585, Apr. 2001.
- [12] T. G. Smirnova, J. M. Brown, S. G. Benjamin and D. S. Kim, "Parameterization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. D3, pp. 4077-4084, Feb. 2000.
- [13] A. Xiu and J. E. Pleim, "Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 40, No. 2, pp. 192-209, Feb. 2001.



권재일 (Jaeil Kwon)

2014년 : 건국대학교 지리학과 대기환경전공 (이학석사)
 2014년 2월 ~ 2015년 7월 : 기상청 기후예측과 위축연구원
 2015년 8월 ~ 현재 : 주식회사 포디솔루션 기업부설연구소 선임연구원
 2017년 2월 ~ 현재 : 건국대학교 지리학과 기후학전공 박사 과정
 ※ 관심분야 : 기상, 기후, 계절길이, 날씨경영



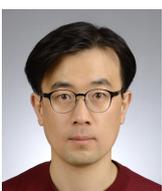
김기영 (Ki-Young Kim)

2006년 : 부산대학교 대기과학과 (이학박사)
 1998년 1월 ~ 2003년 12월 : ㈜첨성대 연구팀장
 2006년 9월 ~ 2007년 2월 : 부산대학교 BK21연안환경시스템사업단 박사 후 연수연구원
 2008년 7월 ~ 2013년 1월 : ㈜환경예측연구소 책임연구원
 2013년 2월 ~ 현재 : 주식회사 포디솔루션 대표이사
 ※ 관심분야 : 기상, 기후, 수치예측



구성관 (Sungkwan Ku)

2017년 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 (이학박사)
 2009년 9월 ~ 2014년 2월 : 한국산업기술시험원 기계시스템본부 연구원
 2015년 6월 ~ 2016년 8월 : Virginia Tech 방문 교수
 2014년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공산업공학과 조교수
 ※ 관심분야 : 항공교통, 시스템분석, 안전성평가, 시뮬레이션, 시험평가인증



홍석민 (Seokmin Hong)

2014년 : 과학기술연합대학원대학교 (공학박사)
 2014년 3월 ~ 2015년 12월 : 한국과학기술연구원 박사후과정
 2016년 1월 ~ 2017년 3월 : 인체감응솔루션연구단 연구원
 2017년 4월 ~ 현재 : 한서대학교 무인항공기학과 조교수
 ※ 관심분야 : 로봇자세제어, 휴머노이드 보행제어, 로봇동작제어