

강원영동 강풍 관측설계와 예비 관측결과

김지은^{1)*} · 권태영²⁾ · 박균명³⁾ · 한윤덕⁴⁾ · 신동현³⁾

¹⁾강원지방기상청 관측과, ²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과,
³⁾기상청, ⁴⁾강원지방기상청 예보과

(접수일: 2021년 5월 7일, 수정일: 2021년 8월 25일, 게재확정일: 2021년 9월 14일)

Gangwon Yeongdong Wind Experiments (G-WEX) Pilot Study: Downslope windstorms in the Taebaek Mountains, South Korea

Ji-Eun Kim^{1)*}, Tae-Yong Kwon²⁾, Gyun-Myeong Park³⁾, Youn-Deok Han⁴⁾, and Dong-Hyun Shin³⁾

¹⁾Observation Division, Gangwon Regional Office of Meteorology, Gangneung, Korea

²⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,
Gangneung, Korea

³⁾Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

⁴⁾Forecast Division, Gangwon Regional Office of Meteorology, Gangneung, Korea

(Manuscript received 7 May 2021; revised 25 August 2021; accepted 14 September 2021)

Abstract “Gangwon Yeongdong Wind Experiments (G-WEX) Pilot Study: Downslope windstorms in the Taebaek Mountains, South Korea” is promoted based on joint organization by Gangwon Regional Office of Meteorology and National Institute of Meteorological Research and participation by 12 institutions to understand the mechanism in development of Yeongdong wind phenomena. The special observation (G-WEX) involved total of 5 intensive observations in March 2020 and April 2020. To collect the data necessary for the research on Yeongdong wind phenomena, (1) high-resolution surface observation network was used to examine surface wind and (2) atmospheric soundings were observed by using Rawinsonde, Wind profiler, Wind Lidar, and Drone. This study covers the detailed information on the special observational experiments for downslope windstorms in the leeward of the Taebaek Mountains, named as the Yeongdong wind, including the observational strategies, experimental designs, and pilot studies during the Intensified Observing Period (IOPs). According to 2020 G-WEX observation results, downslope windstorms were observed in 2~3 km of upper atmosphere when the strong winds happened around the top of the mountain near Daegwallyeong. Also, dry adiabatic expansion related to downslope windstorms caused temperature rise and led to formation of an inversion layer in altitude below 2.5 km. Bands of strong wind were located right under the altitude where downslope windstorms are observed with temporal rise of the temperature. As these are preliminary observation results, there needs to be continuous related researches and high-resolution weather observation.

Key words: 3-D Wind Experiments project, downslope windstorms, Yeongdong wind, intensive observations, experimental designs

*Corresponding Author: Ji-Eun Kim, Observation Division, Gangwon Regional Office of Meteorology, 130 Gwahakdanji-ro, Gangneung-si, Gangwon-do 25440, Korea.
Phone: +82-33-650-0460, Fax: +82-33-650-0439
E-mail: kimjieun@korea.kr

1. 서 론

백두대간은 설악산의 대청봉을 비롯해 해발 800~1,700 m의 크고 작은 산들이 분포한 길이 600 km의 북서-남동 방향 산맥이다. 강원도 백두대간의 동쪽은 영동지방, 서쪽은 영서지방이라 칭하며 산맥의 서쪽은 완만한 경사면을 이루는 반면 동쪽은 급사면으로 동해에 접해있어 이 지역만의 독특한 자연환경에 기인하는 국지적 기상현상이 빈번하게 나타난다. 대표적인 현상으로 봄철에 나타나는 양강지풍이 있다. ‘양강지풍’이란 양양과 강릉 사이에 부는 국지적 강풍으로 백두대간을 넘어 영동 해안쪽으로 부는 하강풍을 말하며 남고북저형의 지상 기압배치에서 서풍기류가 형성될 때 발생한다. 이러한 국지강풍의 경우 풍속이 강할 뿐만 아니라 고온건조하여 동해안지역 산불대형화나 시설물 파괴 등의 피해에 원인이 되기도 한다.

산악지형과 관련되어 전 세계적으로 나타나는 풍하측 하강풍 발생에 대한 연구는 그동안 꾸준히 지속되어 왔으며 크게 다음의 세가지 발생 메커니즘이 제안되었다. 첫째로 Long (1953)이 처음으로 제안한 물뿔(hydraulic jump) 메커니즘이다. 풍상측에서 입계 이하적 흐름이 산 정상에 넘어가면서 입계초과적 흐름으로 바뀌게 되고 위치에너지가 운동에너지로 지속적으로 전환되어 풍하측에서 강한 바람이 발생한다는 원리이다. 둘째로 Klemp and Lilly (1975)가 제안한 부분반사(partial reflection) 메커니즘이다. 부분반사 메커니즘은 대기안정도가 급격하게 변하는 경계면에서 파동의 부분 반사가 발생하여 상향 전파하는 중력파와 하향 전파하는 중력파의 중첩에 의한 공명으로 풍하측에 강풍이 발생한다는 것이다. 셋째로 Clark and Peltier (1984)가 제안한 입계고도 반사(Critical level reflection) 메커니즘이다. 2차원 흐름의 가정하에 수평 바람의 방향이 역전되는 입계고도에서 리차드슨 수가 0.25보다 작은 값을 가지는 경우 상향 전파되는 파동의 반사가 일어나(Booker and Bretherton, 1967) 풍하측 강풍을 만드는 메커니즘이다.

위 세가지 외에도 많은 연구가 이루어져왔다. Colson (1954)은 산맥의 고도가 높을수록 풍속이 강화된다고 하였다. Brinkmann (1974)은 콜로라도 주 볼더에서 순간 최대풍속이 33 m s^{-1} 이상인 12개의 강풍사례를 연구하였고 관측자료를 통하여 강풍이 발생될 때 산 정상 상공에서 역전층이 존재, 그 부근에 최대 풍속이 위치한다고 하였다. Durran (1986)은 산 정상 근처의 역전층이 풍하측 강풍 발달에 중요한 역할을 담당하고 있음을 수치실험을 이용해 밝혔다. 관련 논문 중 관측관련 연구는 2020년 Santa Ynes 지역의 Sundowner Winds Experiment Pilot (SWEX-P; Carvalho et al., 2020)과 2008년 Sierra Nevada 지역의 Terrain-Induced

Rotor Experiment (T-REX; Grubišić et al., 2008) 관측 등이 있으며 강원영동 강풍과 비슷한 유형은 SWEX-P 관측연구이다.

국내는 수치모델을 이용한 하강풍 연구가 주를 이룬다. Jang and Chun (2008)은 강릉지역의 1971~2005년 봄철 강풍 수치실험을 통하여 물뿔, 부분반사, 입계고도 반사의 풍하측 강풍 발생 메커니즘을 확인하고 풍상측 사운드링 자료가 풍하측 강풍을 이해하는데 충분한 의미가 있다고 하였다. Kim and Chung (2006)은 WRF 모델을 이용하여 2005년 4월 5일 발생한 영동지역 강풍 발생 메커니즘을 연구하였다. 이 연구를 통해 산악이 높아짐에 따라 풍하측 상공에서의 파동 파괴와 이에 동반되는 풍하측 해상에서의 물뿔이 더욱 강화됨을 보여주었으며 풍하측 국지 하강풍의 강도를 결정짓는 중요한 인자는 풍상측 연직 약 2~4 km 상공 유입기류의 풍속이라고 하였다. Lee (2003)는 1996년 2월 11일 수치모의 사례분석을 통해 입계이하적 흐름이 정상에서 입계초과적 흐름으로 바뀌어 풍하측 경사를 따라 내려가면서 가속되어지며 이러한 가속은 난류적 물뿔을 겪으면서 주변의 입계이하적 조건에 기류가 적응될 때까지 지속되어 태백산맥의 풍하측에 위치한 강릉지역에서 강풍이 나타난다고 하였다. 또한 Lee and In (2009)은 2006년 2월 12~13일 강릉사례에 대해 18가지 수치 실험을 실시하여 대기안정도에 따라 역전층이 풍하측 강풍에 미치는 영향을 알아보았다. 역전층의 존재는 대기의 안정도와 관계없이 풍하측 바람을 강하게 모의할 수 있으나 풍하측 풍속을 보다 강하게 하는 역전층 위치는 표준 대기에 비해 안정한 경우 산 정상 고도 부근에 역전층이 존재할 때 가장 강하게 모의되었음을 확인하였다. Cho et al. (2015)는 2005~2010년 태백산맥 풍하측에서 관측된 기상요소를 분석한 결과 기압분포는 남고북저형에 영동지역으로 온도능 위치하며 역전층과 온도능은 하층 강풍대와 함께 산 정상 상의 약 1~3 km 고도에 위치한다고 하였다.

강원영동지역 봄철 대형산불과 밀접한 관계가 있는 국지강풍을 이해하고자 다양한 연구가 진행되었으나 과거 연구사례의 대부분 관측자료 부족으로 수치모델이나 종관적 특성분석에 집중되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 (1) 강원영동과 산지를 포함하는 영역에 있어 다양한 관측기기가 참여하는 입체기상관측을 통한 관측자료의 확보가 요구되며, (2) 관측을 통하여 획득한 시·공간적 고해상도 기상관측자료에 대한 종합적인 분석이 필요하고, (3) 이들 자료를 이용하여 영동강풍의 발생메커니즘을 이해할 필요가 있다. 이를 위하여 강원지방기상청과 국립기상과학원은 강원영동 북잡지형 내 위험기상의 국지순환 발달 메커니즘 이해를 위해 강원지방기상청, 국립기상과학원, 강

릉원주대 등이 참여하여 ‘강원영동 공동 입체기상관측’을 실시하였고 앞으로도 확대·지속해 나갈 예정이다.

본 연구에서는 이 강원영동 강풍 관측에 대한 구체적인 정보와 관측망 구성 전략, 관측자료와 영동강풍 분석에 주로 활용된 고층관측장비에서 나타난 예비관측 결과를 소개하였다. 강원영동지역의 국지기상 특성 분석을 위해 최초로 시도된 집중관측 자료를 기초로 하여 관측망 보완, 관측시기 등을 조정해 나갈 것이며, 또한 확보한 관측자료 분석을 통해 위험기상의 감시와 예측성을 높여 산불 등 자연재해 예방과 지역 안전에 기여하고자 한다.

2. 2020 강원영동 공동 입체기상관측

2.1 관측개요

강원영동지역은 백두대간을 중심으로 동해와 인접해 있어 복잡지형으로 인한 대설, 호우, 강풍 등 특이·위험기상의 발생이 빈번하다. 강원지방기상청에서는 봄철 강원영동지역의 국지강풍 메커니즘을 이해하고자 지상에서 대기상층까지 3차원 관측자료 확보를 위해 강원지방기상청과 국립기상과학원이 공동으로 주관하고 강릉원주대학교, 공군제18전투비행단 등 도내 학·연·관·군 12개 기관(강원지방기상청, 국립기상과학원, 기상청 관측기반국, 국가기상위성센터, 기상레이더센터, 강릉원주대학교, 공군제18전투비행단, 동부지방산림청, 국립산림과학원, 동해안산불방지센터, 국립수산과학원 동해수산연구소, 강원도)이 협업하여 ‘2020 강원영동 공동 입체기상관측’을 추진하였다.

3차원 입체기상관측자료를 확보하기 위해 경제적이고 효율적인 관측망을 구성해야 했다. 이를 위하여 백두대간을 중심으로 풍상측, 정상, 풍하측에서 특히 강릉을 중심으로 30종 720여대의 기상관측장비를 동원하여 강원영동 강풍 관측망을 구성하였다. 강풍이 발생할 가능성이 높은 시기인 2020년 3월 1일부터 4월 30일까지 2개월 동안 강원영동지역에 국지강풍이 예상될 때 강원영동 강풍 관측(Gangwon Yeongdong Wind Experiments, 이하 G-WEX)을 실시하였다. 관측을 위한 사례 선정을 위하여 먼저 종관 예보장의 분석에서 한반도 주변의 기압배치가 남고북저이고, 동해상에 기압골 혹은 온도능이 나타나는 조건에서 예비 사례를 선정하였다. 관측 시·종 결정은 강원지방기상청의 예보과장과 예보관이 판단하여 관측과로 전달하고 관측과에서 관측에 참여하는 국립기상과학원과 강릉원주대에 전화, 전용밴드 등을 활용하여 전파하였으며 실시간 관측결과와 상황도 공유하였다. 관측 기간 내 지상, 해양, 고층, 원격관측 자료 등 집중·정규관측 모든 자료는 수집하여 강원지방기상청 강원국지수치예보모델용 서버에 사례별·일자별로 저장하여

공유하고 있다.

2.2 관측망

기상청은 2018평창동계올림픽의 성공적인 기상지원을 위해 관측망을 구축·운영하였고 대회 종료 후 효율적인 장비 운영을 위해 기상관측장비의 이전, 재배치를 통하여 기상 감시와 지역기상업무에 활용하게 되었다. 강원지방기상청은 평창동계올림픽 기상지원용 통합기상관측장비 24조를 관측공백지역으로 이설·활용하였다. 장소는 강원지역 산악과 해양 등 지형 효과에 의한 기상특성을 이해할 수 있도록 백두대간의 동쪽 사면인 대관령 정상(발왕산 지점; 해발고도 1,439 m)부터 강릉 해안(경포호 지점; 해발고도 2 m)까지 동서로 20 km, 강릉시 연곡면에서 강동면 안인항까지 남북으로 20 km 내 격자체계로 최적의 기상관측망을 구현하고자 하였다. 통합기상관측장비는 독일 Lufft사 WS500 모델로서 지상으로부터 4 m 높이에 설치되었다. 복잡지형 내 관측 부지를 확보하고 이전 설치하는 것에 어려움이 있었으나, 현장실사(2018. 1.~5.), 관측망구축·활용방안에 관한 전문가 자문회의(2018. 5.), 이설 후보지 사용에 관한 관련기관 협의 등을 거쳐 관측장소를 선정하고 이전 설치하였다. 기존 기상청 운영 기상관측장비 10개소, 유관기관 관측장비 20개소의 관측망을 기반으로 관측공백지역에 추가적으로 24개소의 통합기상관측장비가 설치되었고 강원중부 산간에서 동해안까지 4×4 km의 고해상도 지상기상관측망을 구축하게 되었다(2018. 12.). 이는 지역 내 기상관련 협업 연구와 강원영동 공동 입체기상관측의 기반이 되었고 G-WEX 고해상도 지상관측 지점으로 활용하였다.

Figure 1은 ‘2020 강원영동 공동 입체기상관측 강원영동 강풍 기상관측망’이다. 강원영동지역은 지형적인 특성으로 양간지풍 혹은 양강지풍이라고 불려질만큼 강원북부인 양양과 간성, 강원중부인 강릉을 중심으로 국지강풍이 분다. G-WEX는 백두대간을 중심으로 풍상측, 정상, 풍하측의 경계층(PBL; Planetary Boundary Layer)과 기온역전층의 고도분포와 생성시기 등을 집중관측하여 대기의 연직구조를 이해하고자 하였다. G-WEX는 상세한 중규모 관측망을 효과적으로 구성하기 위하여 지형적인 특성을 반영하되 기존의 정규관측망을 최대한 활용하였다. 이를 위하여 강릉을 중심으로 한 강원중부지역인 진부, 대관령에 중점관측망을 구성하였으며 강원북부지역인 인제 지점에 고층기상관측을 추가하여 두 지역간의 상관관계를 확인하고자 하였다.

관측망 설계를 위하여 국립기상과학원 응용기상연구과(현 미래기반연구부)의 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAPP; Korea Meteorological

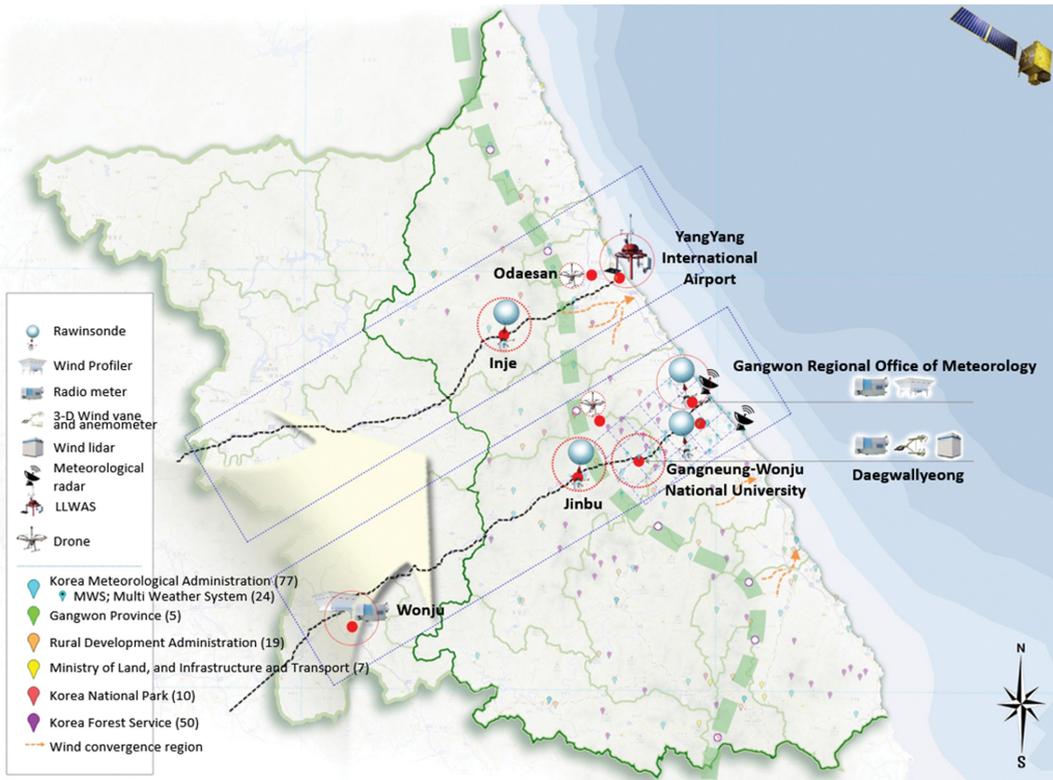


Fig. 1. Network of the observing sites in Gangneung and Daegwallyeong region reporting measurement data during G-WEX.

Administration Post Processing)를 활용하였다. KMAPP는 기상청 현업 국지예보모델(LDAPS)의 1.5 km 격자 간격 기상예측자료에 상세지형 효과를 반영한 기상요소별 특화된 규모상세화 기법과 기계학습 기반 2차 후처리(편차보정) 기법을 적용하여 100 m 수평 해상도의 기상예측정보 및 분석정보를 생산한다. 풍상측 레윈존데 관측을 위한 지점 선정 시 KMAPP 상세 기상분석자료인 강원영동지역의 평균풍속, 수렴·발산, 2019년 고성·속초 산불 발생 시 상세 기상분석 자료 등을 참고하였다. 또한 KMAPP는 관측기간 동안 강원도지역의 ‘2020 강원영동 공동 입체기상관측 지원용 고해상도 기상예측시스템’을 개발하여 위험기상 실태대응과 예보지원에 활용할 수 있도록 지원하였다.

Table 1은 G-WEX 집중관측 자료분석에 활용된 주요 고층기상관측장비의 위치와 정보이다. 고층기상관측은 지상기상관측의 유효고도보다 높게 위치한 자유대기의 상태를 직접 또는 간접적으로 관측하는 것으로서, 관측 지점의 상공에 있는 열역학 구조와 흐름 분포를 밝혀내기 위한 것이다. 이러한 관측은 주로 고층 대기 속으로 측기를 탑재한 기구를 날려 보내서

관측하는 직접 측정방식과 윈드프로파일러, 라디오미터 등과 같은 원격탐사 측정방식으로 크게 구별할 수 있다(KMA, 2018). 상세한 중규모 관측망을 경제적으로 달성하기 위해서는 실측관측망(In-Situ)과 원격관측망(Remote sensing)을 상호 보완적으로 구성해야 한다. Table 1의 관측장비 중 북강릉 레윈존데와 구름물리 관측소의 라디오미터를 제외하고는 모두 이번 G-WEX를 위하여 특별히 추가적으로 투입된 관측장비이다.

레윈존데 관측은 ‘radio-sounding wind observation’의 약어로서 오늘날 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 고층기상관측 방법이다. 라디오존데를 기구에 매달아 비양시키고, 이 라디오존데는 상승하면서 일정한 시간 간격으로 기압, 기온, 상대습도를 관측한다. 이 관측자료는 라디오존데의 무선송수신장치에 의해 지상으로 전송되고 지상수신장치에서 수신처리되어 고도별 기압, 기온, 상대습도 등을 산출한다(KMA, 2018). 레윈존데에 의한 고층기상관측은 실측방식으로 관측자료의 정확성이 높다.

G-WEX에서 레윈존데는 북강릉, 인제, 진부, 강릉원주대학교 4개 지점에서 관측을 수행하였다. 정규관측지점인 북강릉을 제외하고 인제, 진부, 강릉원주대

Table 1. Station name, sensor model, location, observation elements and collecting agency.

Location (sensor model)	Latitude	Longitude	Elevation	Temp.	Air Pressure	Wind Dir.	Wind speed	Humidity	Dew point	Observation Resolution /Period	Instrument	Institution
Bukgangneung (CF-06-A)	37.80456	128.85535	75.24	O	O	O	O	O	O			Gangwon Regional Office of Meteorology
Inje (RSG-20A)	38.05986	128.16714	201.78	O	O	O	O	O	O			
Jinbu (M10)	37.6865	128.6711	846	O	O	O	O	O	O	200 km /6 hour	Rawin sonde	National Institute of Meteorological Sciences
Gangneung-Wonju National University (DFM-09)	37.77113	128.86682	35	O	O	O	O	O	O			Gangneung-Wonju National University
Odaesan (Matrice 600 pro)	37.76630	128.61142	960	O	O	O	O	O	O	1 m /1 sec	Drone	National Institute of Meteorological Sciences
Daegwallyeong (WINDEX-2000)	37.68728	128.75868	842			O	O			50 m /10 min	Wind lidar	National Institute of Meteorological Sciences
Bukgangneung (RPG-HATPRO-G2)	37.80456	128.85535	75.24	O				O	O	50 m /10 min	Radio meter	National Institute of Meteorological Sciences
Daegwallyeong (RPG-HATPRO-G2)	37.68728	128.75868	842	O				O	O			National Institute of Meteorological Sciences

학교는 G-WEX를 위하여 추가로 관측하였으며 그 중 진부 지점은 국립기상과학원의 기상관측차량을 활용하였다. 레원존데 관측은 참여기관 별 기존 관측장비를 활용하였다. 북강릉은 BIRM사의 CF-06-A, 인제는 진양공업의 RSG-20A, 진부는 MODEM사의 M10, 그리고 강릉원주대는 GRAW사의 DFM-09 모델로 관측하였으며 관측요소는 기압, 기온, 습도, 풍향·풍속이다. 관측방법은 강풍 예측 6시간 전부터 종료 후 6시간까지 6시간 간격(0000, 0600, 1200, 1800 UTC)으로 이루어졌으며 강릉원주대에서의 관측은 위치적으로 인접한 북강릉과의 중복 관측을 피하고 산악과 해안 중간지점에서의 시간해상도를 높이고자 다른 지점과 3시간 간격(0300, 0900, 1500, 2100 UTC)을 두고 이루어졌다. 진부와 인제 지점은 산 정상에서 서쪽인 풍상측으로 약 10~20 km 거리에 위치하고 북강릉과 강릉원주대학교는 풍하측에 위치한다. 인제는 영동북부 지역 진부는 영동중부지역에 속하며 두 지점간의 거리는 약 60 km이다.

라이다(LIDAR; Light Detection And Ranging)는 빛을 발사하여 대기 중 에어로졸에 의해서 산란되어 돌아오는 빛을 감지하는 원격탐사 기술을 적용, 기본적으로 대기의 오염물질과 바람·구름·에어로졸의 침적 등과 같은 기상학적 파라미터를 측정하는 장비를 말한다. 윈드라이더는 하강풍의 유무와 진행·전파되는

지역의 대기연직구조를 확인하기 위하여 산 정상부인 대관령 구름물리관측소에 설치하였다. 관측요소는 연직 풍향·풍속이다. 레원존데는 10 km 이상의 높은 고도까지 정확한 관측데이터를 제공하지만 하루에 12시간 간격으로 2번, 집중관측 기간은 6시간 간격으로 4회 관측했기 때문에 자료의 연속성이 떨어진다. 반면 윈드라이더 장비는 연속관측이 가능하기 때문에 급격하게 변화하는 기상인자 관측에 적합하다. 대관령에 설치된 윈드라이더는 G-WEX를 위하여 서울구로관측소 도시기상관측망 집중관측사이트에서 이전 설치하였으며 러시아의 WINDEX-2000 모델로 최대관측고도 2,500 m, 최저관측고도 100 m이며 연직해상도는 60 m이다.

라디오미터는 대기로부터 방출되는 복사에너지의 세기를 측정하여 대기 중 기온, 습도, 액체물량 등을 관측하는 장비다. 대기특성에 따른 복사회도를 주파수별로 측정하여 대기의 연직 관측을 수행한다. G-WEX에서 라디오미터는 대관령 구름물리관측소와 북강릉 2개 지점에서 관측하였다. 북강릉에 설치된 라디오미터는 G-WEX를 위해 추가 설치되었으며 독일 RPG사의 HATPRO G2로 수증기 측정을 위한 20 GHz 대역(K밴드)의 7개 주파수 채널과 기온 측정을 위한 50 GHz 대역(V밴드)에 7개 채널 등 총 14개 채널을 통해 관측을 수행한다. 약 1~2초 간격으로 수행되는

관측은 매 10분마다 취합되어 평균값을 산출한다. 관측해상도는 50 m, 연직해상도는 60 m이다.

기상드론은 고층기상관측자료 중 상대적으로 부족한 대기 최하층부의 관측자료를 확보하고자 오대산(진고개정상휴게소)에서 회전익콥터형 Matrice 600 프로드론을 사용하여 관측하였다. 드론의 제원은 최대속도 18 m s⁻¹, 순항속도 5 m s⁻¹, 실속속도는 1 m s⁻¹이며 무게 9.5 kg으로 최대비행시간은 32분이다. 관측은 Vaisala사의 WXT530 센서를 탑재하여 지상으로부터 약 500 m 고도까지 1 m s⁻¹의 일정속도로 상승·하강 관측하였으며 주간에 1시간 간격으로 고도별 기온, 습도, 풍향·풍속 등을 관측하였다. 드론은 IOP 1과 IOP 4, 두 차례 관측에 참여하였다. 드론을 활용하여 기존 관측망으로 연구가 어려웠던 지표 가까운 최하층 관측자료를 첫 확보한 것은 매우 의미가 있었으며, 관측자료의 신뢰성 확보를 위해 윈드프로파일러, 레인존데, 윈드라이드, 라디오미터 등과 지속적인 비교·검증이 이루어지는 것이 바람직할 것이며 기상드론 관측자료의 현업적용을 위한 해석방법에 대한 연구도 필요하다고 판단된다.

Table 2. Dates of the intensive observing periods during G-WEX.

Dates	
IOP 1	2020.3.12.~13.
IOP 2	2020.3.18.~19.
IOP 3	2020.3.20.~21.
IOP 4	2020.4.24.~25.
IOP 5	2020.4.28.~29.

2.3 관측자료

G-WEX는 2020년 3월과 4월 강원영동지역에 강한 바람이 예상되는 총 5차례 집중관측(Intensified Observing Period, 이하 IOP)을 수행하였다. 2020년 G-WEX에서 관측한 영동강풍 사례는 Table 2에 나타내었다. IOP-1 (2020.3.12.~13.), IOP-2 (2020.3.18.~19.), IOP-3 (2020.3.20.~21.), IOP-4 (2020.4.24.~25.), IOP-5 (2020.4.28.~29.)이다.

Figure 2는 관측기간 중 강풍이 발생한 시간과 가장 인접한 시간대의 지상과 850 hPa과 700 hPa 일기

Table 3. Information of observational schedule for each on air observation instrument.

Instrument	Location (sensor model)	Dates	Observation time (LST) (*Gangneung-Wonju National University)	Observation count
Rawin sonde	Bukgangneung (CF-06-A) Inje (RSG-20A) Jinbu (M10) Gangneung-Wonju National University (DFM-09)	IOP 1 / 2020.3.12.~13.	3.12. / 0900, 1500, 2100	5 (*3)
			3.13. / 0300, 0900(*0000)	
		IOP 2 / 2020.3.18.~19.	3.18. / 2100	5 (*3)
			3.19. / 0300, 0900, 1500 (*0000, 0600, 1200)	
		IOP 3 / 2020.3.20.~21.	3.20. / 1500, 2100(*1800)	4 (*3)
3.21. / 0300, 0900(*0000, 0600)				
IOP 4 / 2020.4.24.~25.	4.24. / 1500, 2100(*1800)	5 (*4)		
	4.25. / 0300, 0900, 1500 (*0000, 0600, 1200)			
IOP 5 / 2020.4.28.~29.	4.28. / 1500, 2100(*1800)	4 (*3)		
	4.29. / 0300, 0900(*0000, 0600)			
Wind lidar	Cloud Physics Center (WINDEX-2000)	IOP 1~5	Routine observation (10 minutes interval)	
Radio meter	Bukgangneung (RPG-HATPRO-G2) Cloud Physics Observation Station (RPG-HATPRO-G2)	IOP 1~5	Routine observation (10 minute interval)	
Drone	Odaesan (Matrice 600 pro)	IOP 1, IOP 4	3.12. / 0900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600	8
			4.24. / 1500, 1600, 1700	3

도이다. 지상일기도의 공통된 특징은 종관규모로 볼 때 남고북저형이며 보다 작은 규모로 볼 때 원산만 부근에서 동해면바다로 저기압이 발달하여 영동지역의 강풍이 발생하는 기압 배치를 보인다. 2차 관측기간에는 지상과 850 hPa 일기도에서 만주지역에 발달한 저기압 중심이 위치하며 영동지역에 강수가 관측되어 IOP-2는 저기압 통과로 인한 강풍사례로 판단된다. IOP-4와 5는 동쪽 방향으로 온도능이 위치하고 영동지역으로 난기이류가 나타난다. 700 hPa 일기도에

서는 온도이류가 나타나지 않고 서풍(IOP-1과 3)과 북서풍(IOP-4와 5)이 분다. 특히 IOP-5 사례의 기압경도는 매우 약하다. 강원영동 강풍 관측 사례 결정 당시에는 모델예측자료를 활용하여 강원영동지역에 강한 바람이 예상되는 경우 집중관측 시행을 결정하였으나, 강풍발생지역에 있어 예측과 실황의 차이가 발생하기도 했다. IOP-1, 3, 5는 강원북부지역에 IOP-2는 전국 그리고 IOP-4는 서해안과 강원산간지역을 중심으로 강풍이 나타났다.

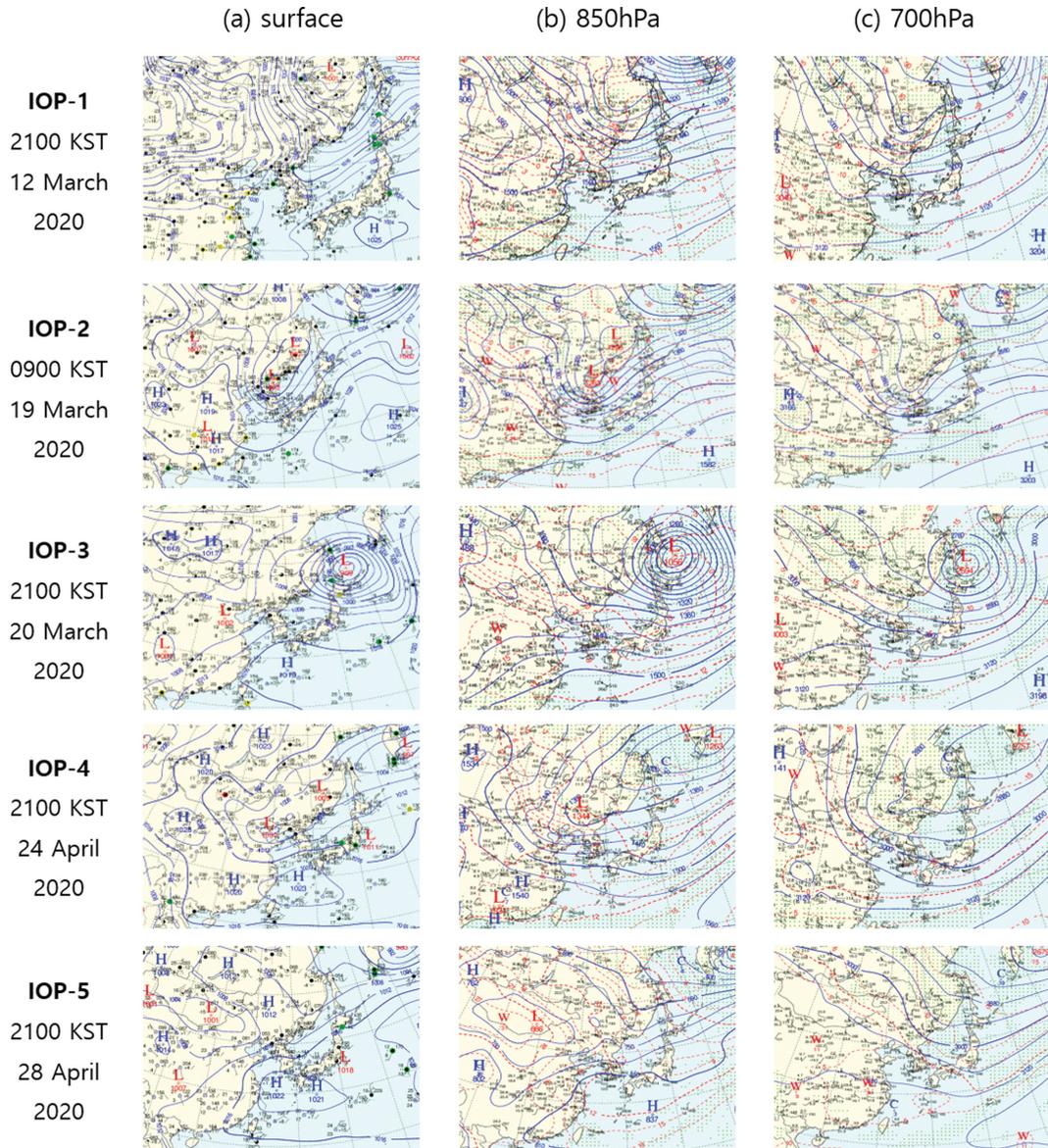


Fig. 2. Synoptic weather charts chosen in the strong windy condition at the mountain top during IOPs: (a) surface, (b) 850 hPa and (c) 700 hPa.

Table 3는 고층기상관측장비의 관측에 관한 정보이다. IOP-1은 2020년 3월 12일 09시부터 3월 13일 09시까지 진행되었다. 3월 11일 12시 강원지방기상청 관측과는 예보과와 IOP-1 시종결정을 위한 업무협의를 진행하고 13시 관련기관·부서에 집중관측을 요청하였다. 레윈존데는 북강릉, 진부, 인제 지점에서는 12일 09시, 15시, 21시, 13일 03시, 09시 5회, 강릉원주대는 12일 12시, 18시, 13일 00시 총 3회 관측하였으며 기상드론은 12일 09시부터 18시까지 1시간 간격 주간 관측하기로 예정하였으나 돌풍으로 인하여 16시까지 오대산(진고개정상휴게소)에서 6회 관측하였다. 강원지방기상청과 국립기상과학원은 레윈존데, 라디오미터, 윈드프로파일러, 윈드라이다 자료 등을 관측상황과 함께 참여자들 간 개설한 카카오톡과 네이버밴드를 통해 실시간으로 제공하였고 공유된 고층기상관측 자료에 대한 역전층과 고도별 기온 변화 경향을 분석하여 공유하였다.

IOP-2는 2020년 3월 18일 21시에 시작하여 3월 19일 15시 종료하였다. 16일 12시 강원지방기상청은 2차 관측 시·종 결정을 위한 업무협의 후 참여기관에 공유하였으나 14시 강풍강도 약화가 예상되어 일정을 취소하였다. 17일 강풍에 대한 모니터링을 계속한 결과 한반도 북쪽의 강한 저기압에 따른 강풍사례로 예상하였으나 16시 30분 강릉원주대에서 영동강풍에 대한 비교사례로 18~19일 집중관측 실시를 제안하였고 18일 10시 강원지방기상청 2차 집중관측 관련 3차 협의를 통하여 관측 수행을 결정하였다. 당초 19일 09시 관측을 종료할 예정이었으나 예상보다 상층 한기의 유입이 강해지면서 강풍 발생이 계속됨에 따라 상황을 반영하여 15시까지 관측을 연장하였다. 대관령 윈드라이다 자료, 레윈존데 예상 단열선도와 실험 비교 분석 자료를 공유하였다. 레윈존데는 북강릉, 인제, 진부지점에서 18일 21시, 19일 03시, 09시, 15시에 5회, 강릉원주대 지점은 19일 00시, 06시, 12시 3회 관측하였다.

3월 19일 15시 IOP-3을 위한 1차 검토를 진행하였다. 20일과 21일 강풍이 예상되고는 있으나 상층 한기지원과 지상 강원도 동쪽 난기유입이 약한 점 등을 고려하여 관측을 보류하였으나 20일 09시 30분 최종적으로 관측을 결정하였다. 레윈존데는 북강릉, 인제, 진부지점에서 20일 15시, 21시, 21일 03시, 09시 4회, 강릉원주대 지점은 20일 18시, 21일 03시, 09시 3회 관측하였다. SNS를 통한 실시간 자료 공유와 분석에서 역전층 고도변화, 상층 대기의 침강고도, 고도별 강풍대의 위치 등 주요 결과를 정리하고 공유하여 예보관의 실시간 예보 분석을 지원하였다. 강원지방기상청 예보과는 집중관측 자료를 근거로 시스템이 예상보다 늦어져서 강풍특보 해제 발표시각을 당초 6시

에서 11시로 변경하였다.

IOP-4는 2020년 4월 22일 17시와 24일 13시 30분 두차례에 걸쳐 사례 결정과 집중관측 수행여부 등을 검토하였다. 당초 4월 24일 15시에 시작하여 4월 25일 09시 종료를 결정하였으나 강풍 실황을 검토하여 15시까지 연장하여 관측하였다. 이번 관측은 레윈존데와 함께 IOP-1에 이어 두번째로 기상드론도 참여하였다. 레윈존데는 북강릉, 인제, 진부지점에서 24일 15시, 21시, 25일 03시, 09시, 15시에 5회, 강릉원주대는 역시 북강릉지점과 3시간의 시간차를 두고 24일 18시, 25일 00시, 06시, 12시 4회 관측하였다. 기상드론은 오대산(진고개정상휴게소)에서 24일 15시부터 1시간 간격으로 17시까지 3회 관측하였다. 강원지방기상청은 SNS를 통해 지속적으로 강풍현황과 전망에 대한 정보를 제공하였고 동해안방지센터는 24일 18시 산불 위험등급정보와 24일 21시 대형산불위험예보를 공유하였다.

2020년 4월 28일 15시부터 4월 29일 09시까지 IOP-5 진행되었다. 27일 14시 30분 관측 수행여부를 결정·공유하였다. 레윈존데는 북강릉, 인제, 진부지점에서 28일 15시, 21시, 29일 03시, 09시 4회, 강릉원주대 지점은 28일 18시, 29일 03시, 09시 3회 관측하였다.

Figure 3는 IOP 1~5차 관측에서 대관령 지점 지상 바람과 대기 하층 바람에서 최대 풍속이 나타났을 때 진부 지점 레윈존데의 이동경로를 보인다. 이동 경로는 수치표고자료, 즉 지형 고도장 위에 레윈존데 풍선의 위·경도와 고도값으로 표시하였다. 레윈존데 풍선의 고도는 화살표의 색깔, 즉 고도 0~1 km를 녹색 화살표, 1~2 km를 보라색 화살표, 2~3 km를 노란색 화살표 그리고 3~4 km를 빨간색 화살표로 표시하였다. 레윈존데 관측은 풍선에 기상 센서를 달아 관측하기 때문에 풍선이 상승함에 따라 바람의 영향으로 수평이동하여 관측 지점이 변하게 된다. 이러한 특징 때문에 비록 풍상측에 속하는 진부에서 레윈존데 관측을 수행했다라도 서풍 계열의 바람이 존재하는 경우 풍선의 고도가 높아짐에 따라 산 정상과 풍하측으로 점점 이동하며 관측하게 된다. 따라서 Fig. 3는 IOP 1~5차 관측에서 진부 레윈존데 풍선의 위치, 즉 위·경도와 고도에 대한 정보를 제공해 줄 것이다.

Figure 3에서 진부 레윈존데의 이동 경로는 IOP 1~4차 관측에서 모두 비슷하다. 레윈존데 풍선은 지상에서 고도 3 km까지 동북동 혹은 동쪽 방향으로 이동하며 풍선이 2~3 km 고도에 도달했을 때 수평면에서는 산 정상을 통과하여 풍하측으로 이동했다. 따라서 IOP 1~4차 관측에서 진부 레윈존데의 2~3 km 고도에서의 관측 자료는 산 정상 부근과 함께 산 정상에 가까운 풍하측에서 관측한 값이다. 그러므로 진부 레윈존데 자료는 산 정상에서 역전층의 형성과정과 그 특

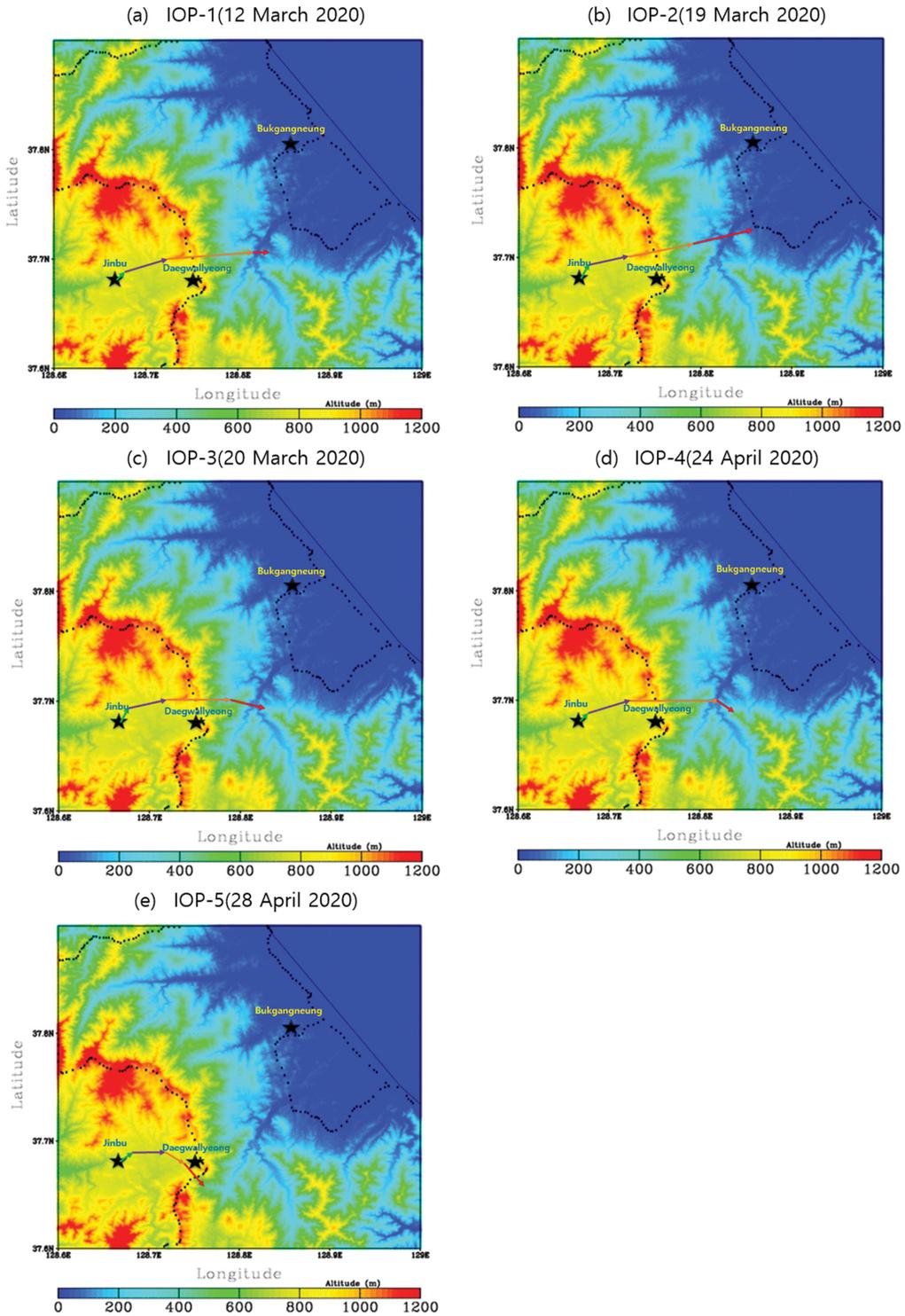


Fig. 3. Trajectories of Rawinsonde balloons at Jinbu station in the cases of IOP 1~5: (a) 12 March 2020 for IOP 1, (b) 19 March 2020 for IOP 2, (c) 20 March 2020 for IOP 3, (d) 24 April 2020 for IOP 4, (e) 28 April 2020 IOP 5 (Altitude of Rawinsonde balloons: green arrow; 0~1 km, purple arrow; 1~2 km, yellow arrow; 2~3 km, and red arrow; 3~4 km).

정을 조사하는데 사용될 수 있고 그리고 산 정상 역전층과 풍속 사이의 관계를 분석하는데 이용될 수 있을 것이다. 그러나 IOP 5차 관측의 경우 진부 레윈존데의 풍선이 고도 3 km에 도달했음에도 여전히 산 정상 부근에 머무르고 있어 풍하층에서 나타나는 특징을 뚜렷하게 볼 수 없을 수도 있다. 이러한 점은 자료를 분석하고 결과를 해석할 때 유의할 부분이다.

이외에도 윈드프로파일러, 윈드라이다, 라디오미터는 산 정상인 대관령과 풍하층인 북강릉 지점에서 수행하였다. 북강릉 지점에서는 윈드프로파일러와 라디오미터, 대관령 지점에서는 윈드라이다와 라디오미터 관측이 이루어졌다. 이들 관측기기는 바람, 기온, 습도의 연직분포를 10분 간격으로 관측하여 대기의 연직분포에 대해 시간적으로 고해상도 자료를 제공한다.

2020년 G-WEX에서는 관측기기의 자료들을 사용하여 산 정상 부근 강풍대의 세기와 하강하는 고도, 기

온상승 구역과 역전층의 변화 등 상층에서 나타나는 현상을 확인하였다. 이러한 상층 기상조건에 따른 지상바람의 변화를 시계열과 공간분포로 나타내 지상으로 내려온 바람을 분석하였다.

3. 예비관측결과

강원영동 강풍 발생 메커니즘을 분석하고 이해하기 위하여 여러 장비를 사용하여 2020년 3월과 4월 강원영동지역에 강한 바람이 예상되는 기간에 총 5차례 특별 관측을 수행하고 관측된 사례들을 분석하였다. 본 연구에서는 관측기기별로 얻어진 예비관측결과를 간단히 소개하고자 한다.

Figure 4는 3월 12일 9시부터 3월 13일 9시까지 수행되었던 IOP-1에 대한 진부 지점 레윈존데의 단열선도이다. 21시 관측자료를 살펴보면 820~750 hPa에서

Skew T - Log P DIAGRAM

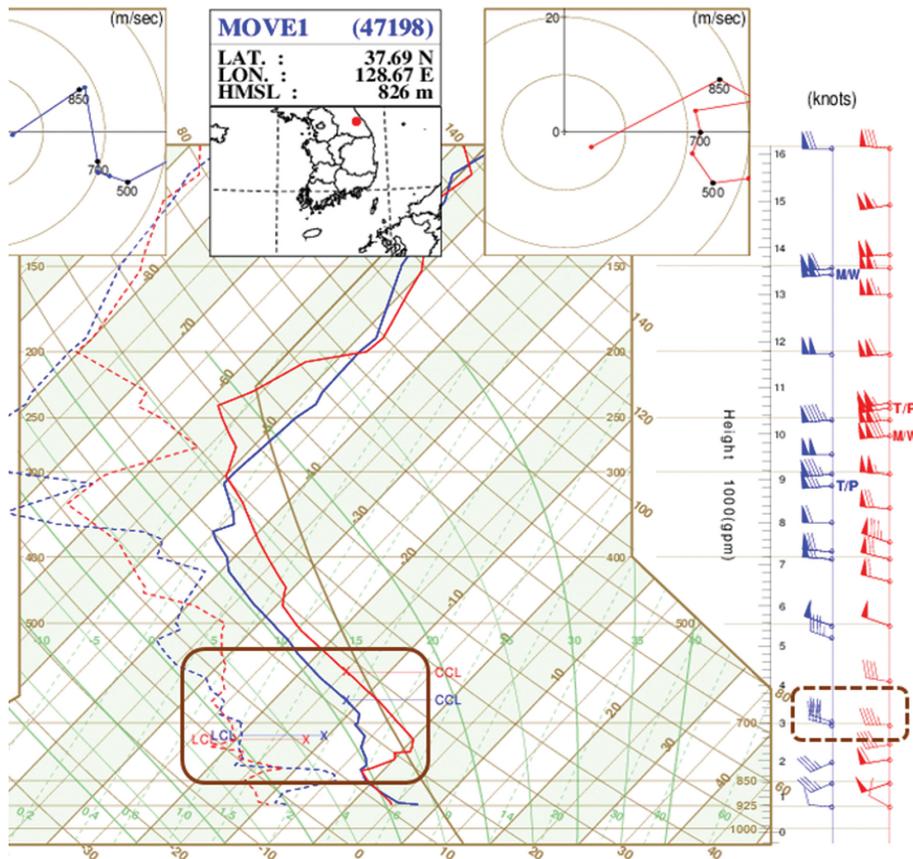


Fig. 4. Skew T-Log P diagram for Rawinsonde measurements obtained at Jinbu site During IOP 1: red line for 1500 LST and blue line for 2100 LST on 12 March 2020.

역전층이 발생하고 800 hPa에서 약 30 m s^{-1} 의 강풍대가 나타났고 단열선도 500~700 hPa에서 다음과 같은 특징을 보인다. 700 hPa 부근 고도(갈색 실선 상자)에서 15시 기온선(파란색 실선)이 건조단열선에 나란히 위치하는 구간이 존재한다. 6시간 후, 21시 기온선(빨간색 실선)은 이전 시간대와(15시; 파란색 실선)과 비교했을 때, 기온이 상승하였다. 그리고 건조단열선을 따르는 기온선이 더 낮은 고도까지 확장되었다. 21시 기온선에서 상층(700 hPa 구간)의 기온상승으로 그

아래 고도에서는 강한 역전층이 형성되었다. 또, 이러한 특징을 보이는 고도에서 풍속이 상대적으로 약화되었다(우측 갈색 점선 상자). 다시 말하면 기온감률이 건조단열기온감률과 비슷하고 혼합비가 일정하며 700 hPa 이하에서 기온상승이 나타나며 이러한 특징이 나타나는 층에서의 풍속이 약하다. 위의 특징을 바탕으로 500~700 hPa 사이에서 공기가 단열적으로 하강하고 있음을 알 수 있다. 이러한 기류의 하강은 진부 레원존데 자료에서 뚜렷하다. 기온상승이 나타나

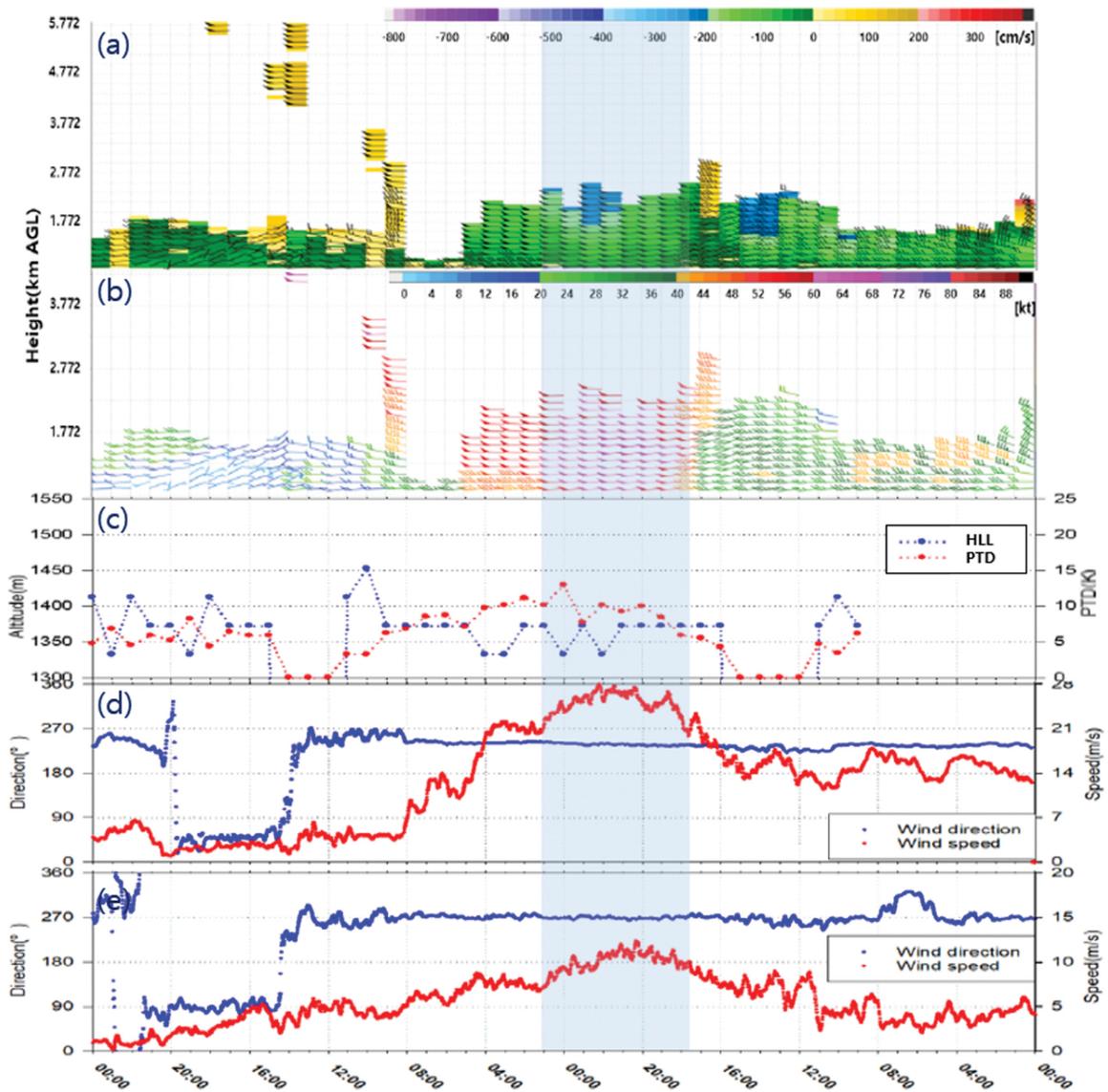


Fig. 5. (a) Vertical wind velocity and (b) horizontal wind velocity of Wind Lidar at Daegwallyeong, (c) height of the low level in the inversion layer and its potential temperature difference, and (d), (e) AWS wind direction & speed at Seonjaryeong and Daegwallyeong.

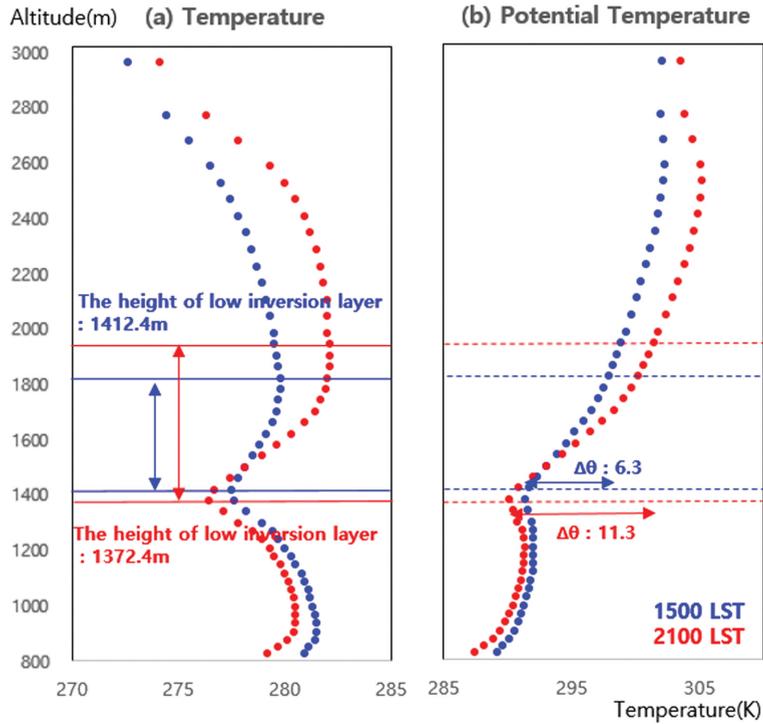


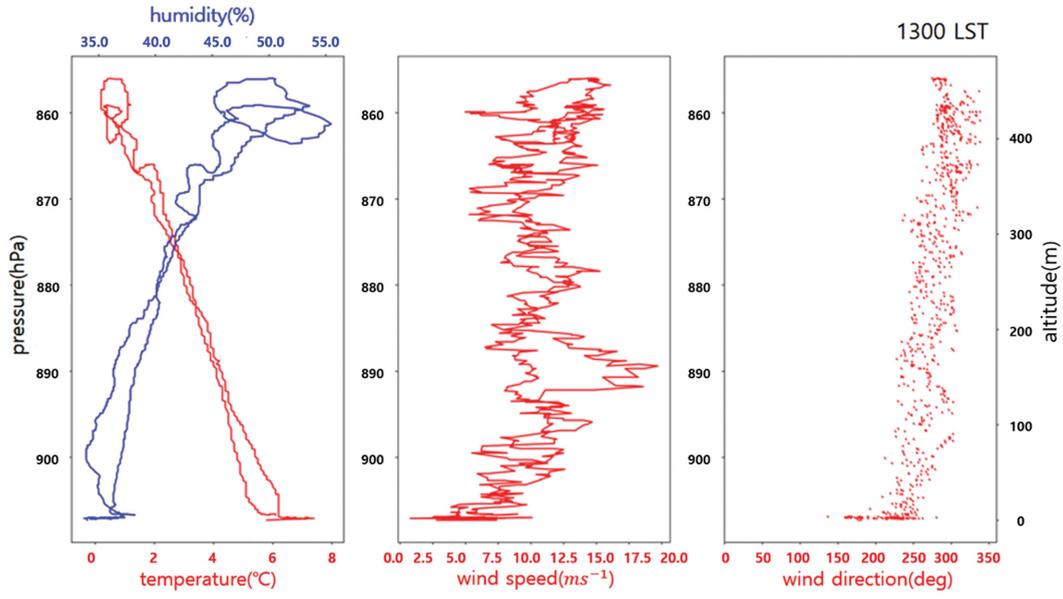
Fig. 6. (a) Temperature (b) Potential Temperature of Radio meter at Daegwallyeong during IOP 5: red line for 1500 LST and blue line for 2100 LST on 28 April.

는 고도는 윈드라이다의 하강풍이 나타나는 고도와 잘 일치하고 하강풍이 나타나는 고도 아래에서 최대풍이 나타남을 확인할 수 있다.

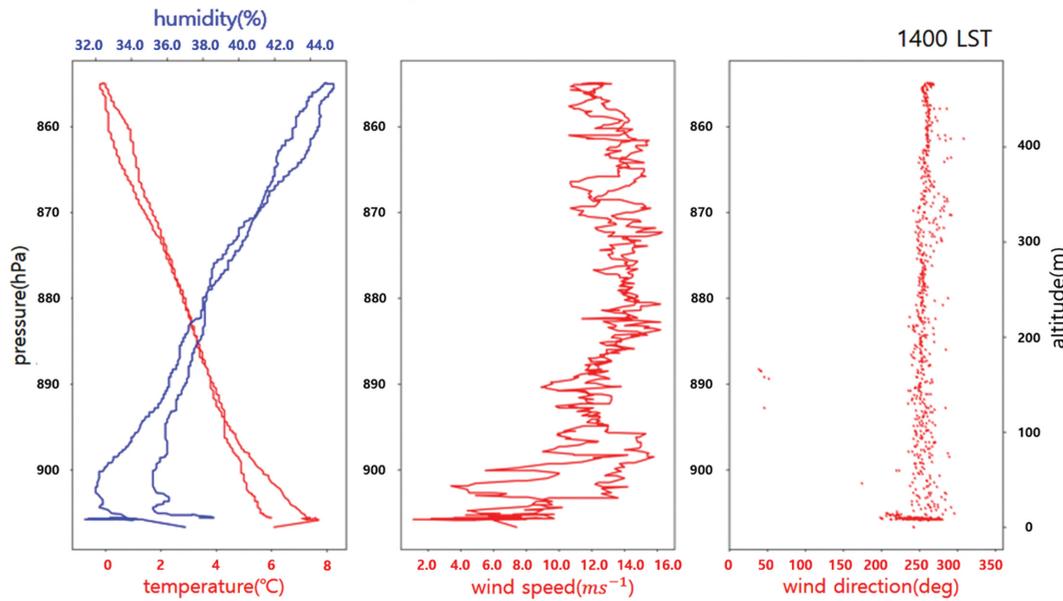
Figure 5는 3월 12일 9시부터 3월 13일 9시까지 수행되었던 IOP-1에 대해 산 정상부근에 설치된 윈드라이다(연직풍 a, 수평풍 b)와 라디오미터에서 관측된 고층 약 1.5~3 km 사이 발달한 역전층의 최하층 고도와 온위차, 선자령 AWS (d), 대관령 AWS (e)의 시계열이다. 여기서 역전층 온위차는 역전층 최상단 고도와 최하단 고도에서 온위의 차이이다. 윈드라이다 연직풍 자료를 살펴보면 3월 13일 08시 이전에 하강풍이 나타났으며 특히 최대풍이 발생한 3월 12일 21시에는 고도 1.5~2.5 km 사이에 강한 하강풍이 발생(파란색 음영 표시 부분)하였다. 이 시간대는 윈드라이다 수평풍 관측에서도 상대적으로 30 m s^{-1} 이상의 강한 서풍이 발생하였으며 대관령(11.5 m s^{-1} , 해발고도 772 m)과 선자령 AWS (26.4 m s^{-1} , 해발고도 1155 m)에 강한 서풍이 나타난 시간 대와도 일치한다. 또한 역전층의 발달로 역전층 최하층 고도가 지상 가까이 형성되었으며 지상에서 최대풍이 나타날 시기에 최하층 고도는 지상으로 최대로 내려오고 그때 온위차가 최대에 가깝다(Fig. 5c). 이러한 과정은 상대적으로 상층

의 공기가 강한 하강류에 의해 단열적으로 온도가 상승하고 이에 따라 그 아래층에서 역전층이 발달한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 단열선도 자료(Fig. 4)에서도 잘 나타나고 있다.

Figure 6은 4월 28일 15시부터 4월 29일 9시까지 수행되었던 IOP-5 사례의 4월 28일 15시와 21시 사례에서 나타난 대관령 지점 라디오미터의 기온과 온위의 연직 분포이다. 파란색 굵은 점선은 15시의 기온과 온위, 빨간색 굵은 점선은 21시의 기온과 온위이다. 가로 파란선과 빨간선은 각각 15시, 21시 역전층의 상층과 하층 경계선을 나타내고 그림의 y축은 해발고도이다. 15시의 역전층 하층 고도는 1,412 m, 21시는 1,372 m이다. 자료에서 15시는 6.3 K이며 21시는 11.3 K이다. 15시와 21시 역전층을 비교해보면 역전층의 하층 고도가 점차 내려오고 있고 온위차는 점차 커지고 있다. 북강릉 라디오미터 기온자료의 정확도 분석에서 봄철의 RMSE (라디오미터와 레원존데의 기온비교)는 850 hPa 이하에서 약 1.5~2°C이고 700 hPa 이상에서 RMSE가 증가한다고 하였다(Kwon et al., 2017). 따라서 고도 약 1.5 km 이하에서는 신뢰할 수 있고 역전층 고도와 온위차의 변화 경향 분석에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.



(a) 1300 LST 12 March 2020

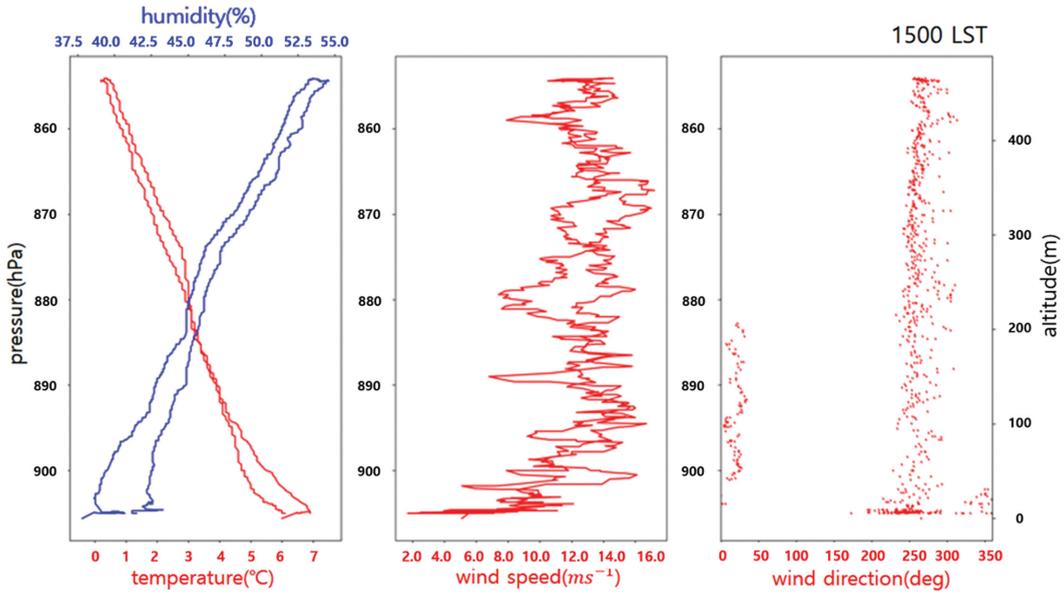


(b) 1400 LST 12 March 2020

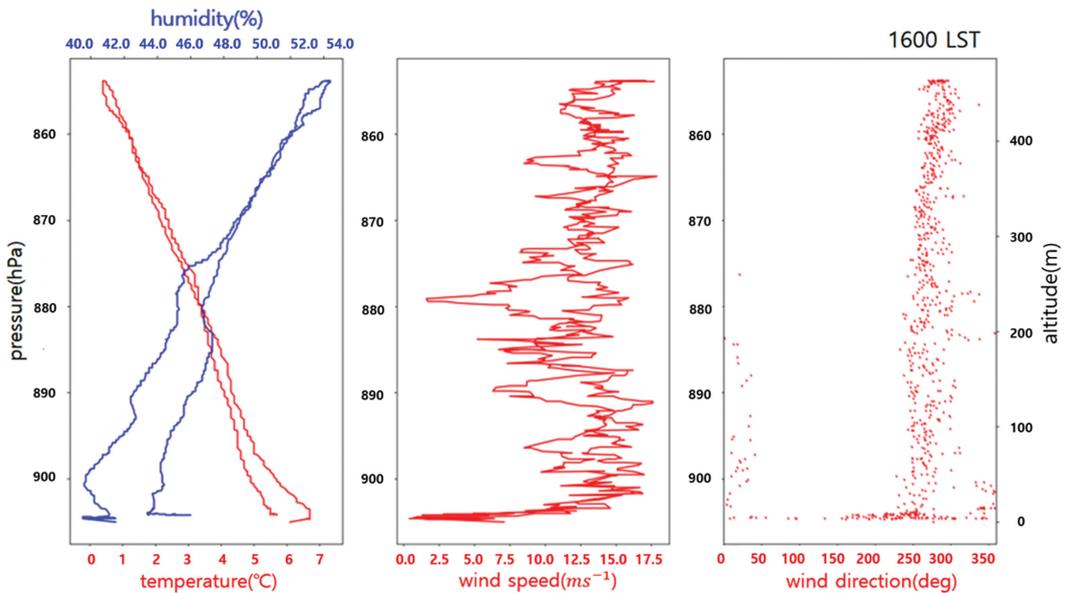
Fig. 7. Temperature, humidity and wind direction & speed collected by Drone at Odaesan site during IOP 1: (a) 1300 LST 12 March 2020, (b) 1400 LST 12 March 2020, (c) 1500 LST 12 March 2020, (d) 1600 LST 12 March 2020.

Figure 7은 IOP-1 사례의 시간별 기상드론 관측 결과이다. 기상드론 관측결과 이미지에 대해 간략하게 설명하면, 첫번째 그림은 고도(회색)에 따른 온도(빨강), 습도(파랑), 두번째 그림은 풍향, 세번째 그림은 풍속을 나타내었다. 2개의 라인이 표시된 것은 하나

는 올라가면서 측정된 것이고 하나는 내려오면서 측정된 값이다. 드론관측은 3월 12일 오대산(진고개정 상휴계소)에서 09시부터 16시까지 한시간 간격으로 8회 관측되었다. 09시와 10시 관측자료가 수신되지 않는 상황이 있었는데, 원인으로는 드론 비양지점에서



(c) 1500 LST 12 March 2020



(d) 1600 LST 12 March 2020

Fig. 7. Continued.

대략 100 m 거리에 통신 타워로 인한 수신 오류로 판단된다. 이후 비양 직후 50~70 m 이동하여 수직 비양하여 관측하였다.

Figure 7에서 관측 자료의 특징은 지상으로부터 약 50 m까지 고도 상승에 따라 급격한 풍속의 증가가 나타나는 것이다. 또한 지상 부근에서는 풍향의 변동성

이 크게 나타나고 상층으로 갈수록 풍향의 변화는 작아지는데 이러한 특징은 특히 Fig. 7의 14시에서 잘 나타나고 있다. 풍속은 고도에 따른 강약층이 존재하며 Fig. 7 13시 관측에서 $20 m s^{-1}$ 로 가장 강한 바람이 나타났다. 16시 이후에는 이 착륙 시 순간돌풍으로 조종이 어려워 관측이 종료되었는데, 최대풍은 아

간에 나타나고 있어 낮 시간에 진행되는 드론관측의 한계가 존재한다. 하지만 윈드라이다 등 다른 기기 관측 자료와 마찬가지로 상층의 강풍대가 관측되며, 풍속의 증가와 함께 일정한 풍향이 나타난다. 지상 바람의 경우 지표마찰 또는 지상 역전층에 의하여 지상 풍속이 크게 감소하고 풍향의 변화가 심하게 나타났다. 이러한 드론 관측 결과들은 앞으로 상층 강풍이 기상조건에 따라 얼마만큼 지상으로 내려올 수 있는지를 조사하고 이해하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다. 이후 관측에서는 자료 정확도 분석과 함께 지표면에 가까운 약 100 m 이하 고도에서 집중 관측이 필요할 것이다. 또한 드론 관측 지점을 선정할 때 자료의 연직 방향의 연속성과 다른 바람 자료와 비교를 위하여 타 바람관측장비(레윈존데, 윈드프로파일러, 윈드라이다, AWS 등)가 설치되어 있는 지점을 고려할 필요가 있다.

Figure 8은 지상풍 지점과 관측자료 분석결과이다. Figure 8에서 아래의 그림은 대관령 강풍 발생 시간대 지상 풍속에 대한 공간분포를 나타낸 그림이다. 관측지점 중 AWS는 10 m, 통합기상관측장비는 4 m에

설치되어 관측고도가 다르다. 이 연구에서는 Cheang et al. (2010)의 국내풍속보정에 적합한 Deacon 방정식의 기하평균높이 산정방법을 이용하여 10 m로 높이 보정을 하였다. 관측지점은 백두대간의 동쪽 사면인 대관령 정상(발왕산 지점; 해발고도 1,439 m)부터 강릉 해안(경포호 지점; 해발고도 2 m)까지 동서로 20 km, 강릉시 연곡면에서 강동면 안인항까지 남북으로 20 km가 포함되어 산악과 평지의 다양한 지형효과가 나타났다.

대관령에 최대풍이 발생한 시간은 3월 12일 20시 20분으로 10분 평균풍속 12.4 m s^{-1} , 최대순간풍속 19.1 m s^{-1} 의 바람이 불었다. 산 정상(선자령), 산 정상부근 골(대관령), 평지(북강릉), 개활지 가까운 평지(강릉 공군비행장) 등 지형적인 특성에 따라 다양한 바람의 변화가 나타났다. 산 정상과 그 부근에서는 강한 바람이 나타나며, 평지로 내려오면서 풍속은 약해진다. 하지만 개활지가 가까운 평지의 경우 대관령과 유사한 특징이 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

강원영동지역에서 나타나는 봄철 국지강풍 관측을 위하여 ‘2020년 강원영동 공동 입체기상관측’을 실시하였다. G-WEX는 영동강풍 사례에서 지상뿐만 아니라 상층까지 3차원 관측자료를 통한 대기의 연직분포를 파악하여 국지순환 메커니즘을 이해하고자 하였다. 효율적인 관측망 구성을 위하여 KMAPP를 활용하여 강원영동지역 상세 기상분석 자료를 활용하여 관측지점을 선정하는데 참고하였다. 강릉을 중심으로 풍상측, 정상, 풍하측에 골고루 관측망을 구성하였으며 정규관측장비인 뿐만 아니라 집중관측을 위한 장비를 추가하였다. 관측망에 포함된 주요장비는 고층기상관측의 경우 레윈존데와 윈드프로파일러, 윈드라이다, 라디오미터, 기상드론이고 지상관측의 경우 AWS와 통합기상관측장비이다. 레윈존데 관측은 4지점(북강릉, 강릉원주대학교, 진부, 인제)에서 라디오미터 관측은 2지점(북강릉, 대관령)에서 윈드프로파일러와 윈드라이다 관측은 각각 북강릉과 대관령 지점에서 수행하였다. 진부지점은 백두대간 정상에서 남남동쪽 약 10 km 거리에 위치하고 있어 이 지점의 레윈존데 관측은 백두대간 정상고도 약 1.5 km에서 역전층을 관측할 수 있도록 설계하였다. 이 연구에서는 관측망의 설계, 관측과정, 관측자료 등을 상세히 기록하여 다음 관측에 활용되고 보완될 수 있도록 하였다.

강원영동 강풍이 발생할 가능성이 높은 시기를 선택하여 집중관측을 5회 실시하였다. 이번 2020년 G-WEX 관측결과에 의하면 대관령 부근 산 정상에서 강풍이 나타났을 때 대기 상층 2~3 km 구간에서 하강

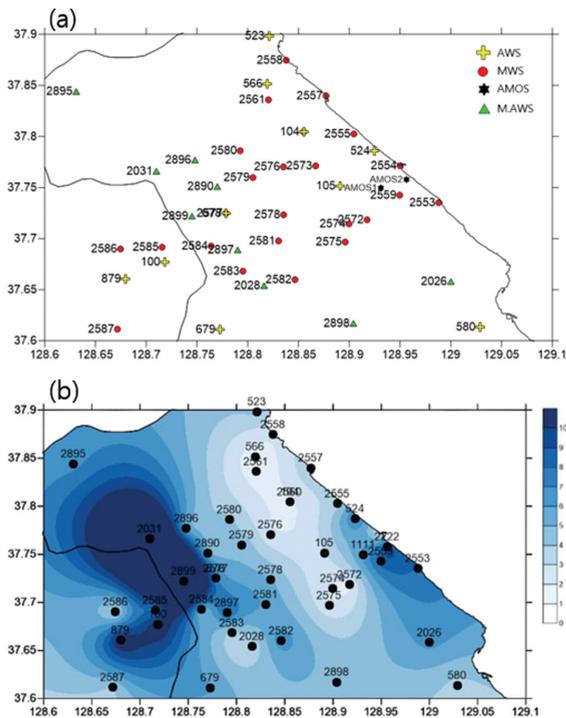


Fig. 8. (a) Network of surface weather observation site and (b) spatial distribution of wind speed at 12 March 2020 that the maximum wind speed occurred at Daegwallyeong during IOP 1.

풍이 관측되었다. 그리고 이 하강풍으로 인해 건조단 열적으로 공기 온도는 상승하고, 이로 인해 약 2.5 km 이하에서는 역전층이 생성된다. 발달하는 역전층이 지상 가까이 형성되었을 때, 서풍은 최대속도에 가까워진다. 역전층의 형성과 발달과정이 강풍대 형성과 맞물리고 기온상승 및 하강류 고도 아래에서 강풍이 나타남을 확인하였다. 이는 5차례의 집중관측 결과분석을 통한 예비관측 결과로 영동강풍 발생 메커니즘을 규명하기 위해서는 관측기와 지점을 보완해가며 보다 정량적이고 개선된 결과를 찾아가야 할 것이다.

감사의 글

이 연구의 예비관측결과는 강원지방기상청 연구개발사업인 “강원영동 동풍·강풍의 특화된 관측·예보기술 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Booker, J. R., and F. P. Bretherton, 1967: The critical layer for internal gravity waves in a shear flow. *J. Flu. Mecha.*, **27**, 513-539.
- Brinkmann, W. A. R., 1974: Strong downslope winds at Boulder, Colorado. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 592-602.
- Carvalho, L., and Coauthors, 2020: The Sundowner Winds Experiment (SWEX) Pilot Study: Understanding downslope windstorms in the Santa Ynez Mountains, Santa Barbara, California. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 1519-1539, doi:10.1175/MWR-D-19-0207.1.
- Cheang, E.-H., C.-J. Moon, M.-S. Jeong, K.-P. Jo, and G.-Y. Park, 2010: The study for calculating the geometric average height of Deacon equation suitable to the domestic wind correction methodology. *J. Kor. Sol. Ener. Soc.*, **30**, 9-14 (in Korean with English abstract).
- Cho, Y.-J., T.-Y. Kwon, and B.-C. Choi, 2015: Characteristics of meteorological variables in the leeward side associated with the downslope windstorm over the Yeongdong region. *J. Kor. Ear. Sci. Soc.*, **36**, 315-329 (in Korean with English abstract).
- Clark, T. L., and W. R. Peltier, 1984: Critical level reflection and the resonant growth of nonlinear mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3122-3134.
- Colson, D., 1954: Meteorological problems in forecasting mountain waves. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **35**, 363-371.
- Durran, D. R., 1986: Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep, continuously stratified fluid. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2527-2543.
- Grubišić, V., and Coauthors, 2008: The Terrain-Induced Rotor Experiment: A field campaign overview including observational highlights. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1513-1534.
- Jang, W., and H.-Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, **18**, 207-224 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-H., and I.-U. Chung, 2006: Study on mechanisms and orographic effect for the springtime downslope windstorm over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **16**, 67-83 (in Korean with English abstract).
- Klemp, J. B., and D. R. Lilly, 1975: The dynamic of wave-induced downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 320-339.
- KMA, 2018: *Guide to Upper air of Observation*. Korea Meteorological Administration, 183 pp (in Korean).
- Kwon, T.-Y., and Coauthors, 2017: An intensive analysis of characteristics of upper air observation datas. Gangwon Regional Office of Meteorology, 11-1360000-001427-01, 84 pp (in Korean).
- Lee, J. G., 2003: A numerical study of the orographic effect of the Taebak mountains on the increase of the downslope wind speed near Gangnung area. *J. Environ. Sci.*, **12**, 1245-1254 (in Korean with English abstract).
- _____, and S.-R. In, 2009: A numerical sensitivity experiment of the downslope windstorm over the Yeongdong region in relation to the inversion layer of temperature. *Atmosphere*, **19**, 331-344 (in Korean with English abstract).
- Long, R. R., 1953: Some aspects of the flow of stratified fluids: I. A theoretical investigation. *Tellus*, **5**, 42-58.