

2020 강원영동 공동 입체기상관측 기간 강풍 사례에 대한 관측자료와 수치모델 비교 분석

권순범 · 박세택*

강원지방기상청 예보과

(접수일: 2021년 5월 20일, 수정일: 2021년 7월 22일, 게재확정일: 2021년 7월 26일)

Comparative Analysis of Observation and NWP Data of Downslope Windstorm Cases during 3-Dimensional Meteorological Observation Project in Yeongdong Region of Gangwon province, South Korea in 2020

Soon-Beom Kwon and Se-Taek Park*

Gangwon Regional Office of Meteorology, Gangneung, Korea

(Manuscript received 20 May 2021; revised 22 July 2021; accepted 26 July 2021)

Abstract In order to investigate downslope windstorm by using more detailed observation, we observed 6 cases at 3 sites - Inje, Yongpyeong, and Bukgangneung - during “3-D Meteorological Observation Project in Yeongdong region of Gangwon province, South Korea in 2020.” The results from analysis of the project data were as follows. First, AWS data showed that a subsidence inversion layer appeared in 800~700 hPa on the windward side and 900~850 hPa on the leeward side. Second, before strong wind occurred, the inversion layer had descended to about 880~800 hPa. Third, with mountain wave breaking, downslope wind was intensified at the height of 2~3 km above sea level. After the downslope wind began to descend, the subsidence inversion layer developed. When the subsidence inversion layer got close to the ground, wind peak occurred. In general, UM (Unified Model) GDAPS (Global Data Assimilation Prediction System) have had negative bias in wind speed around peak area of Taebaek mountain range, and positive bias in that of East Sea coast area. The stronger wind blew, the larger the gap between observed and predicted wind speed by GDAPS became. GDAPS predicted strong p-velocity at 0600 LST 25 Apr 2020 (4th case) and weak p-velocity at 2100 LST 01 Jun 2020 (6th case) on the lee-side of Taebaek mountain range near Yangyang. As hydraulic jump theory was proved, which is known as a mechanism of downslope windstorm in Yeongdong region, it was confirmed that there is a relationship between p-velocity of lee-side and wind speed of eastern slope of Taebaek mountain range.

Key words: Observation project, downslope windstorm, NWP, mountain gravity wave, P-velocity

*Corresponding Author: Se-Taek Park, Forecast Division, Gangwon Regional Office of Meteorology, 130, Gwahakdanji-ro, Sacheonmyeon, Gangneung-si, Gangwon-do 25440, Korea.
Phone: +82-33-650-0324, Fax: +82-33-650-0343
E-mail: pst9309@korea.kr

1. 서 론

강원 영동지방은 봄철 국지적인 강풍이 자주 나타난다. 양양과 간성 사이에서 나타나는 강풍을 양간지풍, 양양과 강릉 사이의 강풍을 양강지풍이라 통칭하며, 양양에서는 불을 불러오는 바람이라 하여 화풍이라 부르기도 한다. 이렇듯 봄철 강풍은 편서풍대 산맥 풍하측 사면에서 더욱 건조해지는 강원 영동지방의 기후 특성과 결합하여 대형 산불로 이어지기 용이한 조건을 형성한다. 또한 강풍 자체로도 비행·선박·차량 사고를 유발하여 교통을 방해하고 시설물을 파괴하는 등 막대한 재산과 인명 피해를 입힐 수 있다. 따라서 강풍의 메커니즘을 이해하고 예보에 활용하는 것은 강원도 기상방재를 위해 매우 중요하다.

강원 영동지방의 강풍은 중관 환경과 복잡한 산지 지형이 맞물려 나타나는 대규모 현상이다. 그러나 지상에는 산지와 해상 등 관측 공백 지역이 존재하고, 고층 관측망은 중관 규모의 해상도를 가지고 있어 지형에 따라 국지적으로 강하게 나타나는 강풍을 상세히 분석하기에 한계가 존재하므로, 관측 자료에 수치모델을 활용하여 보충하는 방향으로 연구가 진행되었다.

현재까지 산맥 풍하측에서 발생하는 강풍을 설명하는 이론은 물뿔 이론, 부분반사 이론, 공명 증폭 이론이 알려져 있다(Cho et al., 2015). 산악 중력파는 대기가 안정된 상태에서 지형에 의해 강제적으로 상승한 공기 덩어리는 중력이 복원력으로 작용하여 공기 덩어리를 원래의 위치로 되돌리려 하는 과정에서 발생하는 부력 진동이다. 2차원 산악파 이론에 따르면 $N^2 > u_0^2 k^2$ 를 만족하여야 하층 산악파가 상층으로 전파될 때 감쇠하지 않는다[N: Brunt-Vaisala 진동수, u_0 : 수평 풍속, k : 파수(wave number)]. 이 경우 산악파는 에너지를 상층으로, 운동량을 하층으로 전파하여 풍하측에 강풍을 유발하고, 풍하측 상공에서 파의 파괴(Wave Breaking)가 발생하면 난류와 돌풍으로 이어질 수 있다(Durrán, 1990).

물뿔 이론에 따르면, 풍상측의 준임계 흐름(subcritical flow)이 풍하측의 초임계 흐름(supercritical flow)로 바뀌고, 산맥 풍상측에서 유입되는 기류의 위치 에너지가 산맥 정상을 넘어갈 때 운동에너지로 변화되어 풍하측 풍속이 증가하며 물뿔 현상이 나타난다. 중력파 이론에 따르면 산맥의 고도에 상관없이 산악파와 풍하측 풍속 강화가 나타나며, 그 강도는 산맥의 고도에 비례한다. 하지만 물뿔 이론에 따르면 산맥의 고도가 임계치 이상을 만족해야만 물뿔 현상이 발생한다는 점에서 차이가 있다(Long, 1953; Houghton and Kasahara, 1968; Durrán, 1990).

Klemp and Lilly (1975)는 부분반사(partial reflection)

이론을 통해 상층으로 전파되는 파동과, 그 파동이 반사되어 하층으로 전파되는 파가 겹칠 때 강풍이 나타날 수 있음을 설명했다. 부분반사 이론에서 발전한 공명 증폭 이론(Clark and Peltier, 1984)에 따르면, 고도의 상승에 따라 풍향이 반대 방향으로 바뀌기 직전 수평 풍속이 0이 되거나 리차드슨 수(Richardson Number)가 감소하는 임계고도에서 하층으로 반사되는 파동과 상층으로 전파되는 파동이 공명할 때, 풍하측에 강한 수평 바람이 형성된다고 설명하였다.

강풍 메커니즘에 기여하는 기상 및 지형적 조건으로 국외 연구에서 밝힌 요인들은 산맥의 높이, 풍하측 산의 경사, 산 정상에서의 풍속, 역전층의 존재, 지상 습도, 시간대 등이 있다(Colson, 1954; Queney et al., 1960; Brinkmann, 1974; Barcilon et al., 1979; Lilly and Klemp, 1979; Durrán, 1986; Miller and Durrán, 1991). Queney et al. (1960)은 강풍 조건으로 바람이 산맥을 축으로 약 30° 이내로 수직에 가깝게 불고, 산맥 정상에서의 풍속은 약 7~15 m s⁻¹를 초과해야 한다고 하였다. Colson (1954)는 산맥의 고도가 높을수록 풍속이 강화된다고 보고하였고, Lilly and Klemp (1979)와 Miller and Durrán (1991)은 풍하측 경사가 풍상측보다 더 급해야 한다고 보고하였다. Brinkmann (1974)는 강풍이 나타날 때 산 정상 상공에서 역전층 또는 강한 안정층이 존재하고, 역전층 부근에 최대 풍속이 나타남을 보고하였다. Barcilon et al. (1979), Durrán and Klemp (1983)은 하부 대류권에서의 높은 습도는 강풍을 저지하는 요인으로 작용한다고 밝혔으며, Brinkmann (1974)는 Boulder에서 나타나는 강풍의 기후 연구를 통해 콜로라도 주의 강풍은 야간이나 이른 아침에 나타나는 경향이 있음을 찾아냈다(Cho et al., 2015).

국내에서 진행된 강원 영동강풍에 대한 연구는 다음과 같다. Jang and Chun (2008)은 물뿔, 부분반사, 그리고 임계고도 반사 메커니즘의 관점에서 접근하여 영동지역 풍하측 강풍 현상을 설명하였다. 풍상측에 위치한 오산의 고층 관측 자료를 이용하여 프라우드 수(Froude number), 연직 파수 계층의 프로파일, 그리고 리차드슨 수(Richardson number)를 계산하여 물뿔, 부분반사, 임계고도 반사 메커니즘으로 분류한 결과, 부분반사 메커니즘이 가장 많이 발생한 것으로 보고하였다. 또한 2차원 Advanced Regional Prediction System (ARPS) 모형을 이용하여 각 메커니즘별 고유의 특성을 분석하였고, 풍하측 강풍이 잘 모의되었음을 확인하였다. Lee and In (2009)은 산 정상의 역전층이 풍하측 강풍에 미치는 영향을 이해하기 위해 ARPS 모형을 이용하여 2006년 2월 12~13일에 발생한 영동지역 강풍 사례를 분석하였다. 이 연구에서는 대기 안정도, 역전층의 존재 유무와 높이의 변화에 따른 풍하측 풍속의 변화를 조사하였고, 대기의 안정도에 관

계없이 역전층이 존재하면 풍하층 풍속이 증가하였다. 또한 표준 대기에 비해 대기가 안정할 경우, 산 정상 고도와 안정층 하부의 고도간 간극이 좁을수록 풍하층 바람이 강하게 모의되었음을 확인하였다.

Cho et al. (2015)는 2000년대 이후 속초와 북강릉

에서 관측한 고층 및 수직 측풍 자료를 토대로 2005~2010년 영동 지방 강풍 사례 7건의 공통적인 기상 특성을 분석하여 강풍 가이드선으로 정립하였다. 강풍 사례일에 종관 일기도에는 지상에서 남고북저 패턴이고 기압골이 영동 지방과 동한만 일대에 위치한

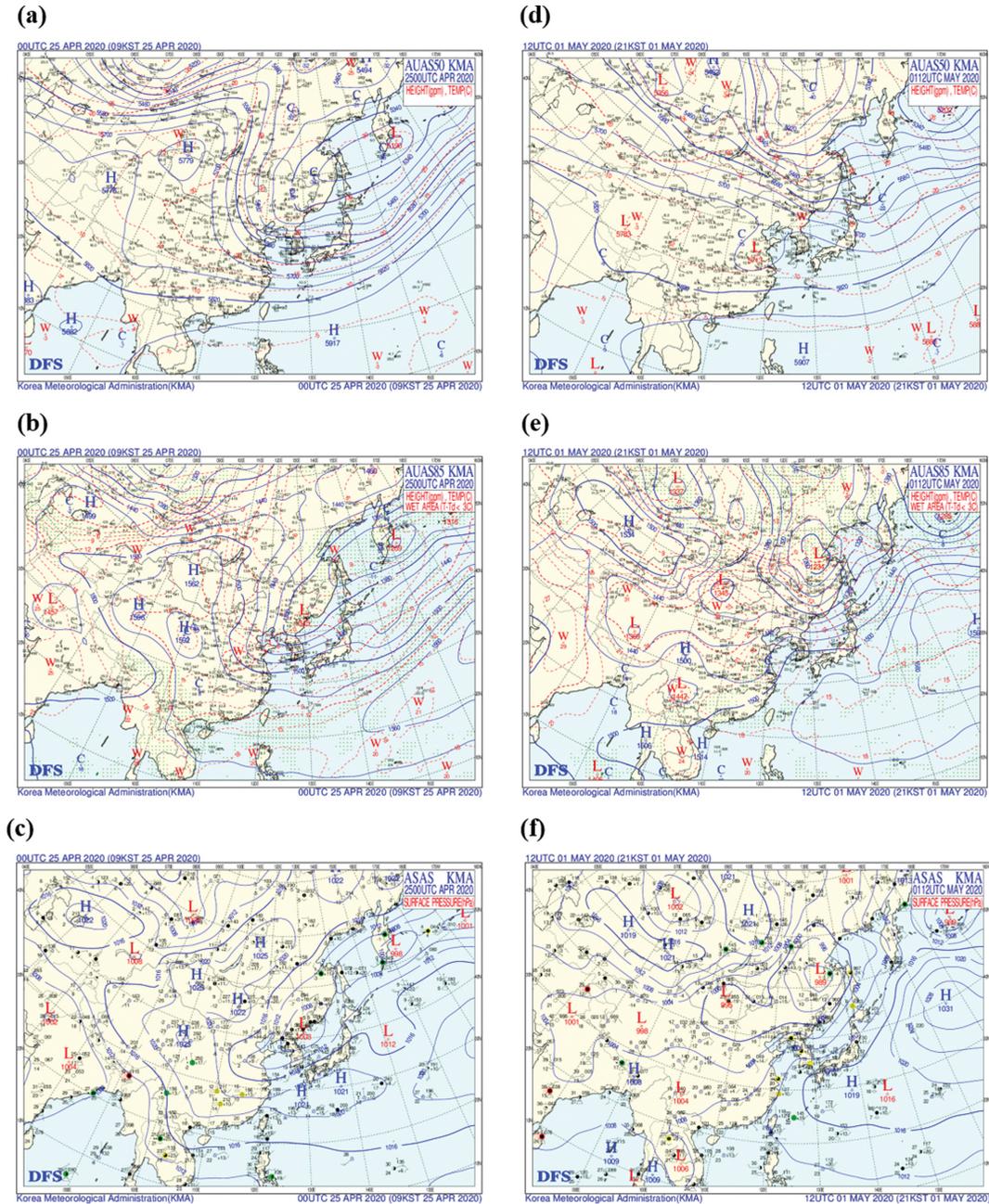


Fig. 1. Synoptic weather maps of (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, and (c) surface of Case 4 (0900 LST 25 Apr 2020), and those of (d) 500 hPa, (e) 850 hPa, and (f) surface of Case 6 (2100 LST 01 May 2020).

다. 850 hPa에는 온도능이 영동 지방에 위치하거나, 태백산맥 정상부에 위치하여 영동 지방으로 온난이류가 유입되는 하층 기온 분포가 나타나고, 850 hPa 수평 온도 경도는 0.10~0.23°C로 나타났다. 태백산맥 풍하측 고층 사운딩에는 역전층 또는 안정층, 그리고 30 m s⁻¹ 이상 하층 강풍대가 1~3 km (925~700 hPa) 고도에 위치하였다.

현재까지 진행된 연구들은 수치모델과 고층 관측자료(윈드프로파일러, 레윈존데 등)를 활용해 강풍 사례를 규명하는 데 초점을 두었다. 그러나 종관 고층 관측망은 태백산맥 풍하측에 위치하여 강풍 발생시 풍상측과 산맥 정상부에서 일어나는 대기 구조의 변화를 알아내기 어려웠다. 영동강풍의 연직구조를 실제 관측을 통해 규명하기 위해, 2020년 강원영동 공동 입체 기상관측 프로젝트 기간 중 영동지방에 강풍이 예상된 총 5회(3.12~3.13, 3.18~3.19, 3.20~3.21, 4.24~4.25, 4.28~4.29)에 걸쳐 백두대간 풍상측(인제), 태백

산맥 정상 근처(평창 진부), 풍하측(강원지방기상청)에서 6시간 주기로 고층 관측을 실시하였고, 추가로 강원지방기상청에서 고층 관측을 1회 더 수행하였다(5.1~5.2).

따라서 이번 연구에서는 강원영동 강풍 관측을 실시한 강풍 사례일에 대해 기상청에서 운영하는 통합 전구 모델(UM GDAPS, Unified Model Global Data Assimilation Prediction System)의 지상 풍속 모의 성능을 확인하고, 통합 전구 모델이 모의하는 연직 p-속도 분포를 통해 영동강풍의 메커니즘으로 알려진 풍하측 물뿔 현상과 산악파의 파괴(wave breaking)를 적절히 반영하고 있는지 살펴보고자 한다.

2. 강풍사례 선정과 실태 분석

2.1 강풍 사례일의 종관 특성과 강풍 실태

영동지역 강풍과 관련된 기압계 등 종관 특성을 조

Table 1. Issued strong wind advisory/warning in Gangwon province during case 1~6 Type: A (= Advisory), W (Warning). Area: mt. (= mountain area).

Case	Type	Area	Valid time (LST)
1	A	Gangwon north · middle mountain area, Yangyang · Goseong · Sokcho flatland	1400 12 Mar ~ 0500 13 Mar
	A	Gangwon mountain area, Jeongseon flatland, Gangwon east coast, Taebaek	0200 19 Mar ~ 1200 19 Mar 0300 20 Mar ~ 0600 20 Mar
	A	Pyeongchang · Hongcheon flatland, Hoengseong, Chuncheon, Wonju, Yeongwol	0600 19 Mar ~ 0300 20 Mar
2	A	Yanggu · Inje flatland, Hwacheon, Cheolwon	0600 19 Mar ~ 1200 19 Mar 1900 19 Mar ~ 0300 20 Mar
	W	Yanggu · Inje flatland, Hwacheon, Cheolwon	1200 19 Mar ~ 1900 19 Mar
	W	Gangwon mt., Jeongseon flatland, Gangwon east coast, Taebaek	1200 19 Mar ~ 0300 20 Mar
3	A	Gangwon south mt., Taebaek, Gangwon east coast	2000 20 Mar ~ 0500 21 Mar
	A	Gangwon north · middle mountain area	2000 20 Mar ~ 1100 21 Mar
	A	Gangwon mountain area, Jeongseon flatland	1300 24 Apr ~ 2100 24 Apr 1500 25 Apr ~ 2000 25 Apr
4	A	Taebaek	1300 24 Apr ~ 1800 25 Apr
	A	Gangwon east coast	1300 24 Apr ~ 2000 25 Apr
	A	Pyeongchang flatland, Hoengseong, Wonju, Yeongwol	1100 25 Mar ~ 1800 25 Apr
	W	Gangwon mountain area, Jeongseon flatland	2100 24 Apr ~ 1500 25 Apr
5	A	Gangwon south mountain area, Jeongseon · Yangyang · Goseong · Sokcho flatland	1400 28 Apr ~ 0500 29 Apr
	A	Gangwon north · middle mountain area	1400 28 Apr ~ 0800 29 Apr
6	A	Gangwon north mountain area	1500 01 May ~ 0900 02 May
	A	Gangwon middle mt., Yangyang · Goseong · Sokcho flatland	2130 01 May ~ 0900 02 May

사하기 위해 강원영동 강풍 관측기간 내 최대 순간 풍속이 나타난 시각에 근접한 정규 관측 시점의 종관 일기도(500 hPa, 850 hPa, 925 hPa, 지상)를 분석하여 중층 기압골, 하층 온도장과 온도이류, 지상 고기압과 저기압의 배치, 수평 기압경도 등을 살펴보았다(Fig. 1).

2.1.1 [1차] 2020년 3월 12일~3월 13일

한반도 상공 중층 대기는 대체로 동서 방향으로 원활하게 이동하는 패턴이었고, 중층 기압골은 북위 50° 근처에 위치하여 우리나라에 영향을 주지 못했다. 850 hPa에서 기압골이 원산만에 위치하나, 한반도로 온난이류가 뚜렷하게 유입되지 않았다. 3월 12일 2100 LST 기준 북강릉에는 서남서풍 16 m s⁻¹가 관측되었다. 한편 지상에서는 발해만까지 시베리아 기단이 확장하고, 남쪽 고기압의 중심이 혼슈 남쪽 해상으로 동진하며 남북간 기압경도가 약화되는 형태로 나타났다. 당시 남북(북강릉~부산) 해면기압차는 5.5 hPa로 약하

였다.

12일부터 13일까지 강원북부·중부산지와 양양·고성·속초평지에 강풍주의보가 발표되었다. 현행 강풍주의보 발표 기준(평지 10분 평균풍속 14 m s⁻¹, 순간풍속 20 m s⁻¹ 이상, 산지 10분 평균풍속 17 m s⁻¹, 순간풍속 25 m s⁻¹ 이상 예상될 때)을 준용할 때, 순간풍속 기준으로 설악산과 미시령은 주의보 이상 강풍이 나타났다(Table 1, 2).

2.1.2 [2차] 2020년 3월 18일~3월 19일

대기 중층 기압골이 요동 반도에 위치하였고, 850 hPa에서는 한랭전선 형태의 강한 수평시어와 경압 불안정 구역이 한반도에 위치하며, 북강릉에는 강한 남서풍이 20 m s⁻¹ 풍속으로 유입되었다. 지상에서는 저기압 중심이 백두산 근처에 위치하고 골 형태의 수평시어가 황해도~서해에 위치하며 시어 전면에 강한 남서풍이 유입되었다. 남북 해면기압차(북강릉~부산)은

Table 2. Daily max instantaneous wind speed of main AWS/ASOS in Gangwon province during case 1 (12~13 Mar), 2 (18~19 Mar), 3 (20~21 Mar), 4 (24~25 Apr), 5 (28~29 Apr), 6 (1~2 May) AWS/ASOS are sorted by location (north to south). Bolded numbers are higher than 20 m s⁻¹.

Area	AWS/ASOS	Max instantaneous wind speed (m s ⁻¹)											
		12 Mar	13 Mar	18 Mar	19 Mar	20 Mar	21 Mar	24 Apr	25 Apr	28 Apr	29 Apr	1 May	2 May
Mountains	Misiryong	30.3	23.8	20.5	33.2	26.8	24.2	27.6	30.9	26.7	24.8	26.0	24.7
	Seoraksan	28.2	29.4	29.2	32.5	30.5	27.9	27.6	32.4	20.8	21.1	24.3	21.8
	Jinburyong	16.5	11.4	15.9	23.9	15.7	15.2	19.0	19.5	16.1	19.0	17.1	16.4
	Yangyang-yeongdeok	18.3	14.1	14.9	20.9	16.7	16.0	20.1	18.4	16.7	15.3	18.8	19.1
	Daegwallyeong	21.2	16.0	12.9	27.7	18.6	18.4	21.2	20.3	17.3	13.6	18.8	14.9
	Gangneungseongsan	17.9	17.3	20.3	20.9	15.8	15.1	17.8	18.8	15.5	13.9	18.8	18.6
	Sabuk (Jeongseon)	18.3	15.7	11.4	29.5	18.8	18.7	22.7	22.2	18.8	14.4	18.4	10.2
Coast	Hyeonnae (Goseong)	13.9	10.8	10.9	21.9	19.2	19.2	14.5	16.3	13.9	13.0	17.0	16.6
	Sokcho	13.7	11.2	9.7	19.8	15.7	12.9	12.9	15.8	13.0	13.0	19.1	11.3
	Yangyang airport	16.8	13.3	13.1	24.2	18.7	18.7	18.6	20.5	16.9	14.9	23.3	20.3
	Bukgangneung	12.3	14.7	8.5	21.8	17.2	11.6	17.2	16.4	9.5	9.2	14.3	15.6
	Donghae	8.8	9.3	9.2	19.2	14.6	15.1	13.1	14.6	10.0	8.8	13.9	12.1
	Cheolwon	8.9	9.2	8.2	19.7	11.8	6.6	13.6	11.5	11.7	8.5	7.5	6.2
	Gwangdeoksan	13.8	8.8	12.8	21.2	16.5	14.9	15.8	17.9	12.7	12.5	13.3	11.1
Inland	Inje	9.1	7.6	7.7	15.3	11.1	7.9	18.7	12.9	15.1	8.2	11.9	6.7
	Bukchuncheon	8.5	10.3	7.4	20.1	13.1	6.6	14.4	14.3	13.0	9.1	9.8	6.4
	Hwachon (Hongcheon)	10.7	11.4	9.5	20.8	14.4	8.2	15.0	14.3	12.3	11.5	10.0	5.0
	Bukpyeong (Jeongseon)	12.7	11.2	9.1	24.3	17.7	9.3	20.0	24.7	17.5	9.0	13.4	9.6
	Sillim (Wonju)	7.5	9.5	8.3	21.2	10.9	7.2	15.4	15.0	11.0	8.2	9.1	6.1

11.8 hPa로 상당히 강하였다.

3월 19일 강원도 전 지역에 강풍주의보가 발효되었고, 강원영동과 철원, 화천, 인제평지, 양구평지, 정선평지에 강풍경보(평지 10분 평균풍속 21 m s^{-1} 또는 순간풍속 26 m s^{-1} , 산지 10분 평균풍속 24 m s^{-1} 또는 순간풍속 30 m s^{-1} 이상)까지 발효될 정도로, 강원영서 지방까지 바람이 매우 강하게 불었던 사례였다. 설악산과 미시령은 강풍경보 수준까지 강풍이 나타났고, 양양공항과 강릉, 북평(정선 소재)에 강풍경보 수준에 근접한 순간풍속이 관측되었다(Tables 1, 2).

2.1.3 [3차] 2020년 3월 20일~3월 21일

500 hPa 고도에서 절리저기압은 홋카이도 근처에 위치하였고, 북쪽 기압골은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 850 hPa에서는 산둥반도 일대 약한 기압골이 나타나며, 서해상의 온도 경도는 강하였으나(칭다오~오산 10.5°C) 북강릉의 850 hPa 풍속은 서풍 10 m s^{-1} 으로 약하였다. 동해상에 중규모 기압골이 나타나며 남고북저 형태는 갖추었으나 남북간 기압차는 약하였다(북강릉~부산 4.6 hPa). 3월 20일부터 21일까지 강원영동 지역에 강풍주의보가 발효되었고, 설악산과 미시령에는 강풍특보 이상 수준의 강풍이, 대관령과 현내(고성 소재), 양양공항에는 강풍특보 수준에 근접하는 강풍이 관측되었다(Tables 1, 2).

2.1.4 [4차] 2020년 4월 24일~4월 25일

대기 상층 소용돌이는 중국 동북지방에서 두만강 하구로 남하하고, 몽골 서쪽 기압능 전면에서 상층의 차고 건조한 공기가 한중 국경까지 남하하였다. 850 hPa 고도에서는 중국 중부지방부터 동해까지 온난핵(warm tongue)¹와 강한 온난이류(북강릉 서풍 20 m s^{-1})가 나타났다. 지상에서는 함경북도 일대 저기압, 북위 30도 근처 동서 고압대가 자리하여 남고북저 패턴으로 나타나, 남북(북강릉~부산) 해면기압차가 9.0 hPa로 강하였다(Fig. 1). 강원영동과 정선평지, 평창평지, 황성, 원주, 영월에 강풍주의보가 발효되었고, 강원산지와 정선평지는 강풍경보로 변경되었다. 4월 25일 강원산지에 경보 수준, 정선평지에는 주의보 수준의 강풍이 관측되었다(Tables 1, 2).

2.1.5 [5차] 2020년 4월 28일~4월 29일

500 hPa 고도 북쪽 기압골이 두만강 하구를 거쳐 남동진하나, 4차 관측 때보단 기압골의 첨도(尖度)가 작고, 그 후면의 풍계는 북풍이 아닌 북서풍이다. 또한 850 hPa의 온난핵도 내몽골~서한만~동한만 축으로 4

차 보다 북편해 있고, 북강릉에 서북서풍 17 m s^{-1} 로 다소 약하다. 지상은 남고북저 패턴이지만 고기압 중심이 제주도 남서쪽 해상에 위치하여 남북간(북강릉~부산) 해면기압차는 6.2 hPa로 약하였다. 이 시기에는 강원산지와 정선평지, 양양평지, 고성평지, 속초평지에 강풍주의보가 발표되었고, 미시령에 주의보 수준의 강풍이 나타났다(Tables 1, 2).

2.1.6 [6차] 2020년 5월 1일~5월 2일(고성 산불)

5월 1일 2010 LST 고성 토성면 도원리에서 발생한 산불은 2일 0730 LST에 주불 진화가 완료되었으며, 주택 및 시설물 6채가 전소되고 산림 85 ha가 소실되는 피해가 있었다.

500 hPa 고도에서 약한 기압골이 연해주 서쪽에, 절리저기압이 산둥반도 서쪽에 위치하여 한반도는 중층 기압능의 영향을 받았다. 850 hPa에서는 온난핵이 몽골 남부~북한에 위치하여 온난이류는 약하나, 북강릉에 20 m s^{-1} 의 강한 서풍이 유입되었다. 지상에서는 서해안을 따라 기압능이, 동해상에는 기압골이 위치하여 남북 해면기압차는 북강릉~부산 7.7 hPa으로 다소 약하나 동서 해면기압차가 강화~북강릉 7.3 hPa로 컸다(Fig. 1). 이 시기 강원북부산지와 강원중부산지, 양양평지, 고성평지, 속초평지에 강풍주의보가 발효되었고, 미시령과 양양공항에 특보 수준 이상의 순간풍속이 나타났다(Tables 1, 2 참고).

이상의 종관 분석에서, 영동 지방 강풍을 유발하기 유리한 조건을 정리하면 다음과 같다. 500 hPa 고도에서는 발해만 또는 중국 동북지방으로부터 건조 공기가 강하게 유입되며, 발해만 일대 저기압성 바람시어가 존재하면 영동 지방의 강풍이 더 강화되었다. 850 hPa에서 온난이류가 산둥반도~한반도 중부지방을 중심축으로 유입되고, 북강릉으로 서풍 또는 서남서풍이 15 m s^{-1} 이상 유입되었다. 만약 850 hPa에서 북서풍이 유입되면 강풍 발생을 억제하는 요인으로 작용하였다. 한편 지상에서는 남쪽 고기압의 중심이 30°N 130.0°E 인근 해상에 위치하고, 북쪽 종관 저기압의 중심이 두만강 하구 근처에 위치하면 남북간 기압경도를 높이는 환경이 조성되었다. 북강릉~부산간 기압경도가 최소 5 hPa 이상은 되어야 하였으며, 10 hPa 내외이면 강풍 경보를 고려하여야 한다.

2.2 강풍 사례일 고층 자료 특성

강원지방기상청 관측과에서 공동 입체관측 자료를 분석한 결과는 다음과 같았다. 우선 침강 역전층은 풍상층 800~700 hPa, 풍하층 900~850 hPa에서 발생하였다. 역전층 고도는 강풍 시작 전 고도가 점차 낮아지다가(882~800 hPa) 지상 역전층이 소멸하면서 상층 역전층의 고도가 반등할 때 강풍이 시작되었다.

¹온난핵: 평면상에서 상대적으로 기온이 높은 구역이 허처럼 돌출된 형태.

산악파의 파괴(Wave breaking)이 발생하면 고도 2~3 km 구간에서 하강풍이 발달하였다. 이 하강풍이 유발하는 단열승은 효과로 인해 침강 역전층이 발달하고, 이 침강 역전층이 지면 가까이 침강할 때 최대풍이 발생하였다. 다만 영동강풍을 예측할 때는 역전층의 구조뿐만 아니라 상층 기압골, 지상 저기압, 고기압의 이동경로 등 종관 기압계를 모두 고려하여야 한다.

3. 결 과

3.1 UM 전구모델 예측과 AWS 관측 풍속 비교

강풍 예측의 참고 자료가 되는 수치모델의 10분 평균 풍속 모의 성능을 진단하고자, 6차 강원영동 강풍 관측기간에 대해 강원북부산지(설악산, 진부령)와 강원북부동해안(현내, 간성, 속초, 양양)에 대해 UM 전구모델의 모의 결과를 비교해 보았다. 당시 고성 산불이 있었기 때문에 고성군 내 현내와 간성을 모두 비교하였다(Fig. 2).

설악산과 진부령은 UM 내 인접 격자에 위치해 있고, 세부 지형을 반영하지 못하는 전구 모델의 특성상 두 지점에 대해 비슷한 풍속을 모의하였다. 반면 직선 거리로 약 19.1 km 떨어져 있는 현내와 간성에 대해서는 모의하는 풍속 값에 차이가 뚜렷하게 나타난다. 6차 관측기간(5월 1일 0900 LST~2일 0900 LST) 내 설악산과 진부령에 대해 UM은 8 m s^{-1} 이내로 모의하였고, 최대값 출현시각은 21일 1800 LST로 모의하였다. 다만 풍속 최대값이 뚜렷하지 않아 10분 평균 풍속만으로 바람이 가장 강한 시간대를 판단하기에는 어렵다. 설악산의 최대값 출현시각은 1일 2100 LST, 진부령은 2일 0300 LST에 나타나 UM 예측보다 늦었다. 설악산은 풍속 최대값을 13.9 m s^{-1} 과소 모의하였다.

UM은 강원 고성의 최대값 출현시각을 1일 1800~2100 LST 사이로 모의하였으나, 실제 10분 풍속 최대값은 2일 0000~0300 LST에 나타나 더 느렸다. 간성은 2일 0000 LST에 2.2 m s^{-1} 과대 모의하였고, 2일 0300 LST 현내는 8.0 m s^{-1} 과소 모의하는 상반된 결과를 보였다. 한편 화재 지점에 가장 가까운 속초 ASOS는 6차 관측기간 내내 3 m s^{-1} 이하로 모의하였고, 풍속도 4 m s^{-1} 이하로 관측되었으며, 양양은 1일 2100 LST에 7 m s^{-1} 까지 풍속이 상승하다가 점차 감소하는 것으로 모의하였다. 실황에서는 같은 시각 5.4 m s^{-1} 로 다소 약하게 관측되었고, 2일 0600 LST 6.7 m s^{-1} 까지 다시 상승했다가 풍속이 감소하였다.

1~5차 관측 기간에 대한 UM 모델 예측 성능은 지면의 제약으로 ‘요약 및 제언’ 부분에 종합하였다.

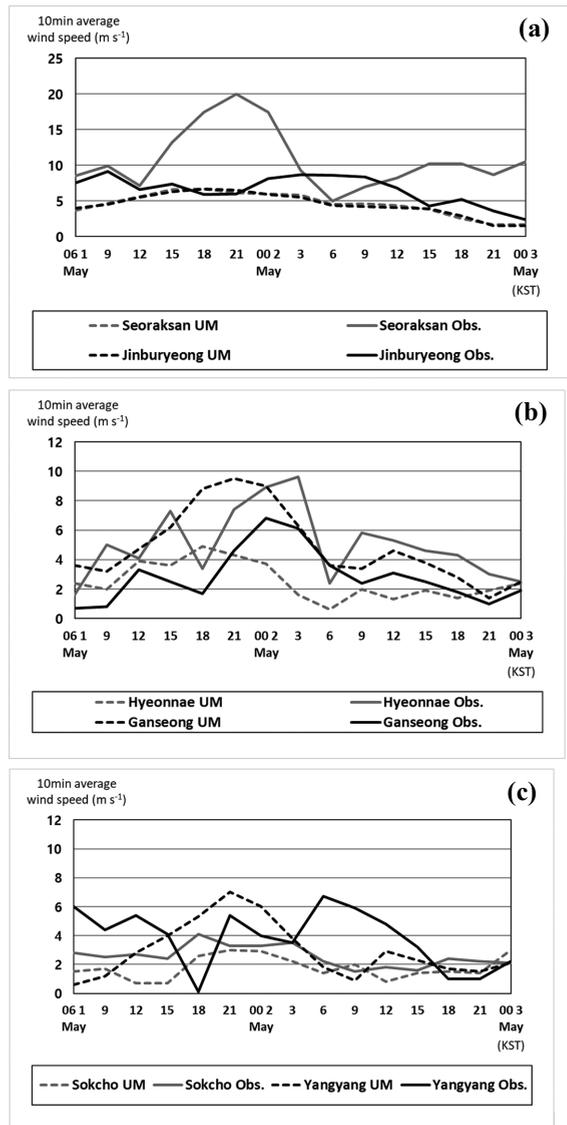


Fig. 2. Comparisons of wind speed observed at (a) Seoraksan and Jinburyeong, (b) Hyeonnae and Ganseong, (c) Sokcho and Yangyang with UM simulations (issued at 2100 LST 30 Apr: Case 6).

3.2 연직단면 P-속도 분석을 통한 강풍 가능성 진단

P-속도를 분석하여 강풍 가능성을 진단하고자 강원 영동 강풍 관측 1차 사례부터 6차 사례까지 풍속 최대값 출현 시간대에 강화도 부근($37.6^\circ\text{N } 126.4^\circ\text{E}$)부터 동해중부북쪽해상($38.4^\circ\text{N } 130.0^\circ\text{E}$)까지 연직단면을 분석한 그림으로 P-속도 하강역은 보라색, 상승역은 적색으로 표시하였다(Figs. 3, 4). KIM, UM 전구, UM 지역, UM 국지, KLAPS, VDAPS, ECMWF (3H25)

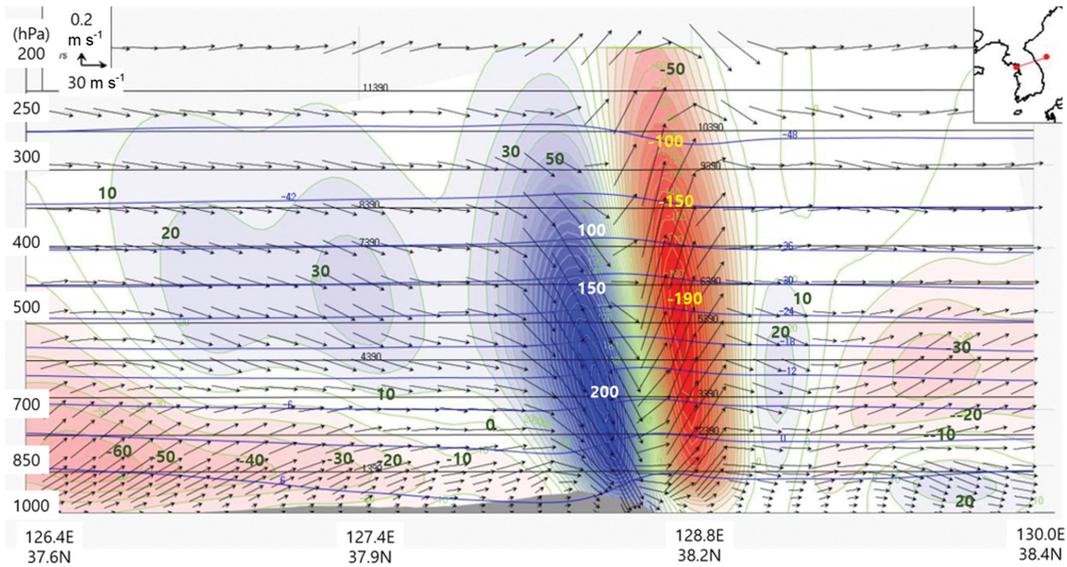


Fig. 3. Vertical section from Gangwhado (37.6N 126.4E) to East sea (38.4N 130.0E) of predicted p velocity (green solid line, downdraft: blue area, updraft: red area), wind vector (black arrow), temperature (blue solid line) and geopotential height (black solid line) by UM RDAPS. Target time is 0600 LST 25 Apr. 2020 when windstorm peak time of Case 4. The strongest p-velocity of downdraft was +200 hPa hr⁻¹ at 700 hPa level.

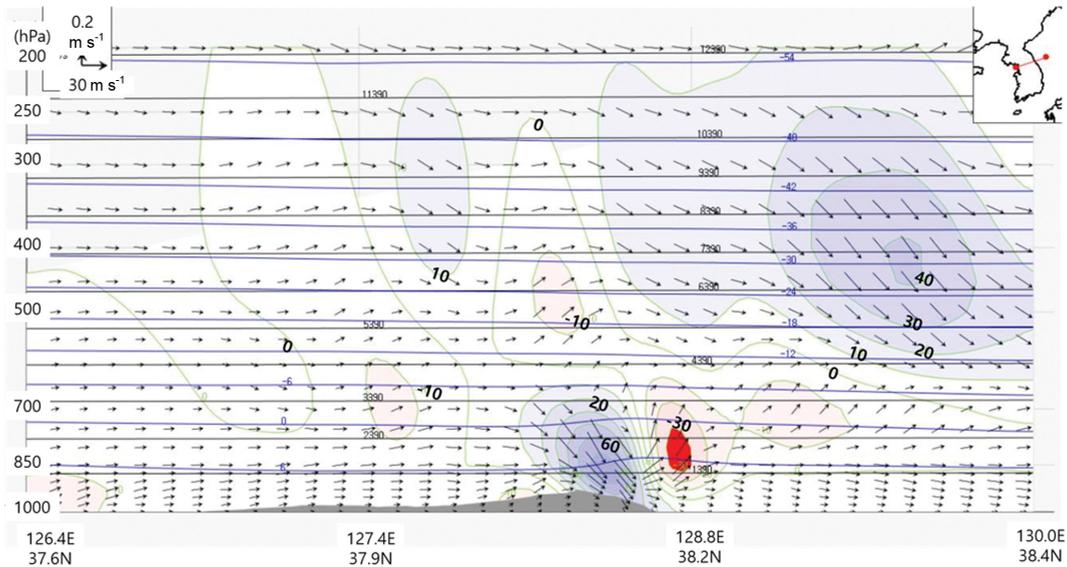


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for target time; 1800 LST 28 Apr. 2020 when windstorm peak time of Case 5. The strongest p-velocity of downdraft was +60 hPa hr⁻¹ at 850 hPa level.

모델 중 P-속도의 하강역과 상승역을 가장 뚜렷하게 묘사하는 UM 지역모델을 사용하였다.

물뿔 이론에 따르면 하강풍의 속도가 강하고, 하강구역이 넓을수록 더 많은 위치 에너지가 운동에너지로 전환되어 풍하측의 풍속이 더 강하게 나타나야 한

다. 강풍이 강하게 나타났던 1~4차 사례에서 P-속도가 백두대간의 동쪽 사면 상공 약 700 hPa에서 150~200 hPa hr⁻¹로 예측되었고(Case 4: Fig. 3), 비교적 강원동해안에 바람이 약하게 나타났던 5~6차 사례에서는 P-속도 중심축이 약 850 hPa에서 60~110 hPa hr⁻¹로 예

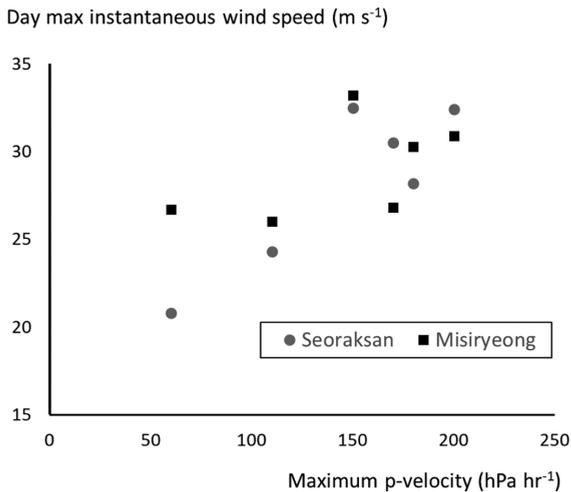


Fig. 5. A Scatter diagram between maximum p velocity (downdraft) and daily maximum instantaneous wind speed of Seoraksan, Misiryong AWS.

측되었다(Case 6: Fig. 4). 사례 수가 많지는 않지만, 설악산 AWS의 일최대 순간풍속은 최대 하강 p-속도와 양의 상관관계를 암시하며, UM 지역모델이 물뿔 효과에 의한 영동 지방의 강풍을 양호하게 모의하고 있음을 의미한다. 다만 미시령 AWS는 두 변수의 상관관계가 뚜렷하지 않다(Fig. 5). 하강풍 p-속도와 강원산지의 순간풍속간 상관관계를 정립하기 위해서는 더 많은 조사가 필요하다.

4. 요약 및 제언

각 강원영동 강풍 관측 사례별 강원영동 내 바람이 가장 강했던 지점을 산지와 해안으로 나누어서 UM 전구모델의 모의 성능을 진단한 결과를 종합하면 다음과 같다. 대체로 강원영동지역 내 가장 풍속이 강한 설악산 AWS는 최대 풍속을 10 m s^{-1} 이상 과소 모의하였고, 6사례 중 3사례는 최대값 출현시각이 적중했으며, 나머지 3사례는 UM 전구모델 예측보다 풍속 최대값이 3~6시간 늦게 나타났다. 반면 대관령 ASOS는 대부분 관측 기간에 대해 $2\text{--}4 \text{ m s}^{-1}$ 과소모의하는 경향을 보여 비교적 정확도가 높았다. 또한 강원산지는 UM 전구모델 풍속의 상승 또는 하강 추세를 예측할 때 실황에서도 대체로 비슷한 추세를 따라갔다.

강원동해안은 UM 전구모델은 전반적으로 풍속을 단조 증가 또는 감소하여 모의하는 반면, 실황에서는 풍속 최대값이 나타날 때까지 변동이 심하게 나타나는 경향을 보인다. 또한 최대값 출현시각은 UM 전구

의 예측보다 3~6시간 지연되어 나타나는 경우가 대부분이었다. 이를 예보 차원에 적용하면, UM 전구모델의 예상 최대값 출현시각 이후 강원동해안에 10분 평균 풍속이 감소하는 추세로 모의하더라도, 실제로는 수치모델 예측 최대값 출현시각보다 3~6시간 이후에도 다소 강한 바람(10 m s^{-1} 내외)이 이어질 수 있음을 의미한다.

강원영동 강풍 관측 기간 중 강풍 최대값이 나타난 시간대의 강화도 부근~동해중부북쪽해상 연직단면 내 최대 하강 P-속도를 분석하였다. 사례 수가 충분하지 않지만, 설악산 AWS의 일최대 순간풍속과 최대 하강 P-속도간에는 양의 상관관계가 존재할 가능성이 있고, 미시령 AWS는 상관관계가 뚜렷하지 않았다. P-속도만으로는 강풍의 시종 신호를 찾기 어렵고, 최대 강풍과 상관 관계가 있다고 단정하기에는 자료가 부족하여, 강풍 예보에 활용하기 위해서는 더 많은 강풍 사례에 대한 조사가 필요하다.

REFERENCES

- Barcilon, A., J. C. Jusem, and P. G. Drazin, 1979: On the two-dimensional, hydrostatic flow of a stream of moist air over a mountain ridge. *Geophys. Astro. Fluid Dyn.*, **13**, 125-140.
- Brinkmann, W. A. R., 1974: Strong downslope winds at Boulder, Colorado. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 592-602.
- 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. Korean Earth Sci. Soc.*, **36**, 315-329, doi:10.5467/JKESS.2015.36.4.315 (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.
- Durrant, D. R., 1990: Mountain Waves and Downslope Winds. In W. Blumen et al. Eds., *Atmospheric Processes over Complex Terrain. Meteorological Monographs, vol. 23*, Amer. Meteor. Soc., 59-81, doi:10.1007/978-1-935704-25-6_4.
- _____, and J. B. Klemp, 1983: A compressible model for the simulation of moist mountain waves. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 2341-2361.
- Houghton, D. D., and A. Kasahara, 1968: Nonlinear shallow fluid flow over an isolated ridge. *Commun. Pur. Appl. Math.*, **21**, 1-23.

- Jang, W., and H.-Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, **18**, 207-224 (in Korean with English abstract).
- Klemp, J. B., and D. K. Lilly, 1975: The dynamic of wave-induced downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 320-339.
- Lee, J. G., 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).
- Lilly, D. K., and J. B. Klemp, 1979: The effects of terrain shape on nonlinear hydrostatic mountain waves. *J. Fluid Mech.*, **95**, 241-261.
- Long, R. R., 1953: Some aspects of the flow of stratified fluids: I. A theoretical investigation. *Tellus*, **5**, 42-58.
- Miller, P. P., and D. R. Durran, 1991: On the sensitivity of downslope windstorms to the asymmetry of the mountain profile. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1457-1473.
- Queney, P., G. A. Corby, N. Gerbier, H. Koschmieder, and J. Zierep, 1960: The airflow over mountains. WMO Tech. Note 34, World Meteorological Organization, 135 pp.