

국지풍이 내륙의 안개발생에 미치는 영향

심화남^{1),2)} · 이영희^{1)*}

¹⁾경북대학교 천문대기과학과, ²⁾해군 항공 6 전단 항공기상과

(접수일: 2017년 3월 10일, 수정일: 2017년 5월 27일, 게재확정일: 2017년 6월 14일)

Influence of Local Wind on Occurrence of Fog at Inland Areas

Hwa-Nam Shim^{1),2)} and Young-Hee Lee^{1)*}

¹⁾Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

²⁾Aviation Meteorological Office, ROK Navy 6 Air Wing, Korea

(Manuscript received 10 March 2017; revised 27 May 2017; accepted 14 June 2017)

Abstract We have examined the influence of local wind on occurrence of fog at two inland areas, Chuncheon and Andong, in Korea. The surrounding topography of two inland areas shows significant difference: Chuncheon is located in the basin surrounded by ridges with north-south axis while Andong is located in the valley between the ridges with east-west axis. Occurrence of fog shows maximum in October at both sites but high occurrence of fog at Chuncheon is also noted in the winter. Occurrence of fog at Andong in October is much larger than that at Chuncheon. High occurrence of fog in October is due to favorable synoptic condition for fog formation such as weak wind, clear day and small depression of the dew-point. Fog occurrence at Chuncheon is closely related to very weak wind condition where wind speed is less than 0.5 m s^{-1} . The weak wind at Chuncheon in winter is due that pressure driven channeling wind (southerly) cancels out partly downslope northerly flow during nighttime. On the other hand, fog at Andong occurs well when wind is southeasterly which is thermally forced flow during nighttime. Southeasterly provides cold, moist air from the narrow valley to Andong during nighttime, leading to favorable condition for formation of fog.

Key words: Fog, local wind, topography

1. 서 론

안개는 지표면 근처에서 발생하는 기상현상으로 수증기의 응결에 의해서 형성된 작은 물방울이 대기 중에 떠 있어 수평시정이 1 km 미만인 경우를 일컫는다(Ahrens, 2009). 안개에 의한 시정 장애는 교통사고들을 유발한다. 국내뿐만 아니라 미국, 유럽 등 선진국에서도 안개로 인한 교통사고가 빈번하게 발생하고 있으며 상당수가 대형사고로 확산되고 있다. 시야가

확보되지 않은 안개 속 도로에서는 다른 기상상태에 비해 사고발생 가능성이 크며 치사율도 높다(KoROAD, 2015). 그러므로 안개 관련 사고를 줄이기 위해서는 안개의 예측성을 높이는 것이 필요하며 이를 위해서는 안개의 발생에 영향을 미치는 요인들에 대한 연구가 필요하다.

안개 생성에 우호적인 종관적 요인과 지역적인 요인에 따라 안개 발생빈도는 계절별 지역별 차이를 보인다. Jhun et al. (1998)은 우리나라는 안개 다발 구역이 뚜렷하게 나타나며, 연평균 안개일수가 50일이 넘는 관측소는 대부분 내륙에 위치하고 있다고 분석하였다. 안개는 전반적으로 가을에 가장 많이 발생하고 겨울에 가장 적게 발생하지만 일부 지역에서는 안개일수의 최대 빈도가 나타나는 계절이 다르게 나타

*Corresponding Author: Young-Hee Lee, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-7353, Fax: +82-53-950-6359
E-mail: young@knu.ac.kr

Table 1. List of meteorological stations used in this study.

Station	Latitude	Longitude	Height (m)	Observation type
Chuncheon	37°53'60"	127°43'48"	75.6 m	ASOS
Andong	36°34'12"	128°41'60"	140.1 m	ASOS
Gilan	36°27'30"	128°53'24"	130.0 m	AWS
Osan	37°07'12"	127°02'60"	52.0 m	Rawinsonde

나기도 한다. 예를 들면, 대관령은 여름철에 안개가 제일 많이 발생한다(Jhun et al., 1998). Belorid et al. (2015)은 내륙과 해안에서 안개 최대 빈도의 계절 차이가 뚜렷한데 해안 안개는 7월에 최대 빈도를 보이고 내륙안개는 10월에 최대 빈도를 보인다고 보고하였다. 내륙안개가 이러한 월별 빈도 특성을 보이는 것은 우리나라의 경우 늦여름부터 가을에 걸쳐서 대기 중의 수증기가 많고 일교차가 커서 내륙지방을 중심으로 복사무의 발생에 우호적인 조건이 형성되기 때문이다(Lee and Ahn, 2013; Belorid et al., 2015). 반면, 춘천은 겨울철에 안개 빈도가 높은 특성을 보이는데 이에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 내륙안개의 월별 발생 빈도가 지역별로 다르게 나타나는 것과 관련하여 국지적인 지형특성과 지형에 의해서 발달하는 국지풍에 대한 분석이 필요하다.

국지풍은 국지적으로 형성되는 수평 기압 경도에 의해 생성되는 바람으로, 대부분의 국지풍은 지표의 비균질 가열의 결과로 나타나는 기온과 기압의 차이와 연관된다(Whiteman, 1990). 지표면 비균질 가열에 의해 유발되는 국지풍에 대하여 많은 연구들이 진행되었다(e.g., Raasch and Harbusch, 2001; Prabha et al., 2007). 수평규모가 대기 경계층의 두께보다 작은 규모의 비균질에 의해 발생하는 국지풍은 주간에는 비교적 약하게 나타나는데 이는 주간에 대기 경계층에 존재하는 큰 에디의 혼합이 비균질 요인을 약화시키므로 국지풍을 유발하는 수평 기압 경도가 약화되기 때문이다(Vidale et al., 1997). 반면, 야간에는 비균질 요인을 약화시키는 큰 에디의 혼합이 없으므로 강한 비균질 효과에 의해 국지풍이 뚜렷이 나타날 수 있다(Sun et al., 1998). 종관 규모의 흐름이 약한 맑은 날에는 주·야간에 국지풍이 뚜렷하게 형성된다. 내륙 지역은 복잡한 지형으로 되어 있어 비균질 가열에 의한 국지풍의 발달이 빈번이 나타난다. 또한 야간에 분지지역에 강한 역전층이 형성되는 경우 지상풍과 종관풍의 관련성이 매우 작아져 지상풍은 국지풍에 의해 지배될 수 있다.

풍계는 수증기를 이류시킴으로써 안개의 형성에 영향을 미친다. Lee (1998)은 충주지역에서 댐 건설 이후 복사풍 계열의 바람의 불 경우 안개의 빈도가 증가함을 보였다. 풍계와 풍속에 따른 안개 발생 빈도

에 대한 통계적인 분석들은 이루어졌지만(Lee, 1998; Lee and Ahn, 2013) 국지풍의 발달이 안개 형성에 미치는 영향에 대한 연구는 적게 이루어졌다.

본 연구의 목적은 1) 지형적 특성이 다른 춘천(분지)과 안동(동서 방향 계곡축)의 안개의 월별 발생빈도 특성을 분석하고 2) 지형적 특성과 관련된 지상풍의 특성과 형성 메커니즘을 분석하고 3) 열적 국지풍의 발달이 이들 지역의 안개형성에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

2. 자료 및 분석방법

본 연구에서는 지상 종관 기상 관측소인 춘천과 안동의 자료를 사용하였다. 각 지점별 총 5년(2010. 1~2014.12) 간 기온, 이슬점 온도, 풍향, 풍속, 운량, 시정, 강수량, 기상현상 자료를 사용하였다. 지상 관측 기상 변수 중 시정, 운량, 강수량은 1시간 또는 3시간 마다 관측되는 변수이며, 그 외 변수는 1시간 간격 자료이다. 안동과 주변 계곡의 기온 비교를 위해서 자동 기상 관측소인 길안 지점의 기온자료를 사용하였다. 계곡 위의 종관 바람을 분석하기 위하여 오산 관측소에서 레윈존데(Rawinsonde)로 관측된 850 hPa 면 지온풍을 사용하였다. 850 hPa 등압면은 전형적으로 약 1.5 km 고도에서 나타나는데 안동과 춘천 주변지역의 산의 높이는 1.5 km 보다 낮으므로 850 hPa 면 지온풍은 지형의 영향을 반영하지 않는다. 주간 자료 분석에는 0600 UTC (1500 LST) 자료를 사용하였고 야간 자료 분석에는 1800 UTC (0300 LST)의 자료를 사용하였다. 0600 UTC (1500 LST)의 상층풍 자료는 지상 관측소의 1400 LST부터 1600 LST까지 주간의 상층풍을 나타내는 것으로 1800 UTC (0300 LST)의 상층풍 자료는 0300 LST부터 0500 LST까지의 야간의 상층풍을 나타내는 것으로 사용하였다. Table 1에 본 연구에서 사용된 관측지점들의 위치와 고도를 제시하였다.

Figure 1은 춘천과 안동의 주변 지형도로 SRTM (shuttle radar topographic mission)의 90 m 해상도 자료를 이용하여 작성한 것이다(Reuter et al., 2007). 춘천은 분지에 위치해 있으며, 강이 분지의 북동쪽과 북서쪽에서 흘러 분지 안에서 합류하여 남서쪽으로 흐

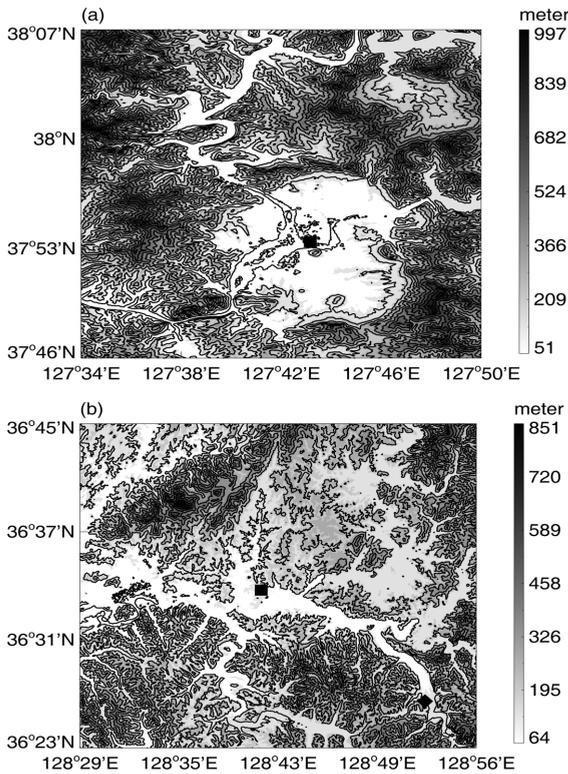


Fig. 1. Topographical map of study sites: (a) Chuncheon (square), (b) Andong (square), Gilan (diamond).

르고 있다. 안동은 동서방향으로 뺏은 계곡에 위치해 있으며 북쪽에는 높은 산지가 솟아 있고, 남서쪽은 산지가 병풍 모양으로 둘러싸고 있다. 따라서 북동쪽은 높고, 이들 산지 사이에 흐르는 강이 서쪽으로 흐른다. 안동 관측소는 상대적으로 폭이 넓은 계곡의 도시지역에 위치해 있고 길안 관측소는 폭이 좁은 계곡의 산지에 위치해 있다.

본 연구에서 안개현상은 시정 값이 1 km 미만이고 강수가 없으면서 기상 현상이 안개(낮은 안개, 땅 안개, 얼음 안개)로 보고된 경우로 정의하였다. 안개 현상은 지속적으로 나타나기도 하지만 하루에 여러 번 없어졌다가 나타나기를 반복하기도 한다(Tardif and Rasmussen, 2007). 본 연구에서는 하나의 안개 사례를 안개 현상들 사이에 안개가 없는 시간이 두 시간 이내인 경우로 정의하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 안개의 월별 발생 빈도 특성

춘천과 안동의 월별 안개의 발생 빈도 특성을 분석하기 위해서 2010년부터 2014년까지 5년간 발생한 안

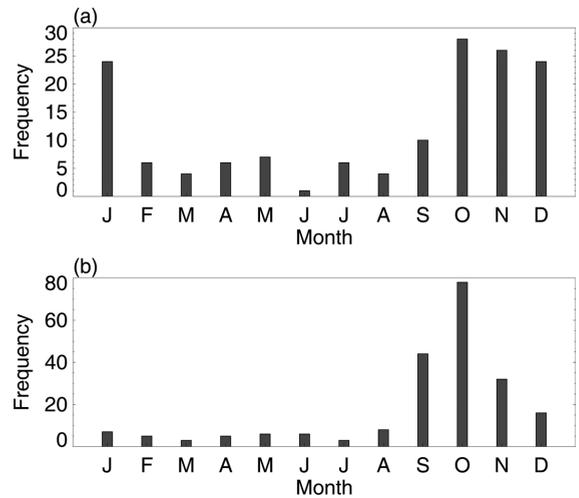


Fig. 2. Monthly frequency distribution of non-precipitation fog events at (a) Chuncheon, (b) Andong for the period 2010-2014.

개 사례의 월별 총 빈도수를 Fig. 2에 제시하였다. 춘천은 10월부터 1월까지 높은 안개 발생 빈도를 보이며, 안동은 10월에 가장 높은 빈도를 보이고 11월부터 급격히 감소하는 특징을 보인다. 이러한 빈도 특성은 Jhun et al. (1998)에서 보고된 것과 일관된다. 안동의 경우 전형적인 내륙 안개의 월별 빈도특성을 잘 나타내고 있으며 이는 가을철에 종관적으로 안개 형성에 우호적인 조건이 잘 형성되는 것과 밀접히 관련되어 있다. 춘천의 경우 10월에 최대 발생빈도를 보이지만 겨울철인 12월과 1월에 발생빈도가 높은 것이 다른 내륙과 차이점이며 이는 겨울철 안개 발생이 이 지역의 국지적인 요인과 밀접히 관련되어 있음을 시사한다. 총 안개의 발생 빈도는 안동(213회)이 춘천(146회)보다 더 높게 나타났고 특히 10월의 안개 발생 빈도는 안동(78회)이 춘천(28회)보다 3배 정도 더 높게 나타났다. 이 또한 안동의 국지적인 요인이 10월에 안개 발생 빈도를 높이는데 기여했음을 시사한다. 이에 대해서는 3.5장에서 더 자세하게 분석하였다.

두 지역의 안개 발생 빈도의 월별 특성과 기상요소와의 관계를 분석하기 위해서 두 지역의 5년간 평균 일교차, 습수, 평균 풍속, 평균 운량의 월별 분포를 조사하였다(Fig. 3). 두 지역에서 공통적으로 볼 수 있는 특징은 다른 계절에 비해 가을철에 일교차가 크고 풍속이 작으며 습수가 작고 운량이 작아 내륙 안개 형성에 좋은 조건을 제공해주고 있다는 점이다(Park et al., 2010; Lee and Suh, 2011). 이러한 특징은 두 지역에서 공통적으로 10월에 높은 안개 발생빈도가 나타나는 것을 설명한다. 여름철의 경우 습수가 작지만

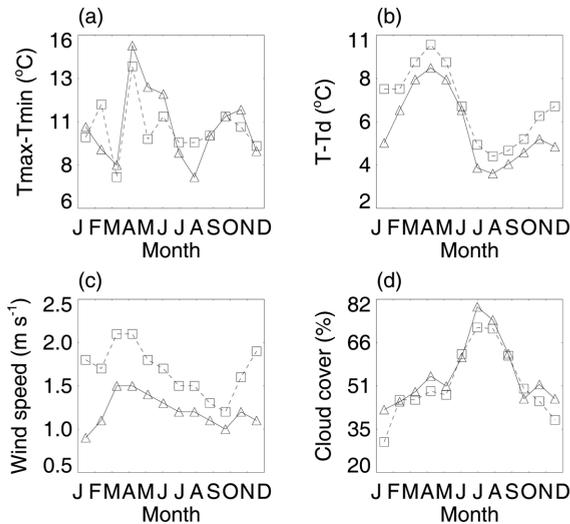


Fig. 3. Monthly variation of mean (a) daily range of temperature, (b) difference between air temperature and dew point, (c) wind speed, (d) cloud cover at Chuncheon (triangle) and Andong (square) for the period 2010 to 2014.

운량이 많아 야간에 포화에 도달할 만큼 충분한 냉각에 도달하지 못하므로 안개형성이 이루어지지 못한다. 봄철의 경우 일교차는 크지만 풍속이 크고 습도가 커서 포화에 도달하기 어려운 조건을 형성한다. Clark and Hopwood (2001)는 1차원 모델을 사용하여 지면에서 복사 냉각이 일어날 때 풍속과 습도가 안개형성에 미치는 역할을 분석하였다. 이들은 민감도 실험을 통해 초기 습도가 높으면 냉각이 일어날 때 더 빨리 포화 상태에 도달하여 안개가 형성되기 용이한 반면 풍속이 크면 기계적 난류가 더 많이 형성되어 연직 혼합 작용으로 지면이 냉각되어지는 것을 막아 주어 안개 형성을 억제함을 보였다.

두 지역의 주요한 차이점은 겨울철의 습수와 풍속이다. 안동은 겨울에 습수가 증가하는 반면 춘천은 겨울에 습수가 감소하여 두 지역의 습수의 차이는 12월과 1월에 크게 나타난다. 풍속 또한 안동에서는 10월에 최소값을 보인 이후 증가하는 반면 춘천에서는 10월에도 풍속이 약하지만 최소값은 1월에 나타난다. 겨울에 춘천 지역의 낮은 풍속이 지면 부근의 혼합을 약화시켜 습수를 감소시켰을 것으로 사료된다. 결과적으로 춘천의 경우 낮은 습수와 풍속 모두 겨울철 안개형성에 유리한 조건을 제공해 준다. 안동과 춘천에서 겨울철에 풍속의 현저한 차이를 보이는 것은 두 지역의 국지적인 요인에 기인한 것으로 사료된다. 춘천지역의 낮은 풍속과 국지풍과의 관련성을 3.4장에서 분석하였다.

3.2 춘천의 지상풍 특성

높은 안개 발생 빈도를 보인 계절의 바람 특성을 살펴보기 위하여 바람장미를 분석하였다. Figure 4는 2010년부터 2014년까지 가을철(9, 10, 11월)과 겨울철(12, 1, 2월) 춘천에서 주간(1400~1600 LST)과 야간(0300~0500 LST)의 바람장미와 안개 형성 시 바람장미를 나타낸 것이다. 주간과 야간의 풍속을 비교하면 주간의 풍속이 야간보다 더 크게 나타난다. 이는 지면 부근 풍속의 전형적인 일변화 특징으로 주간에 운동량의 하향 수송이 더 활발한데 기인한다(Arya, 2001). 주간의 주풍은 남서풍이고 야간의 주풍은 북풍이다.

지상풍의 메커니즘을 분석하기 위하여 지상풍과 종관풍의 관계를 분석하였다. Figure 5는 2010년부터 2014년까지 5년간 가을과 겨울철 주·야간에 춘천의 무풍이 아닌 지상풍과 850 hPa 면 지국풍의 풍향 결합 빈도 분포(joint frequency distribution)를 제시한 것이다. 여기서 무풍은 풍속이 0.5 m s⁻¹ 미만인 경우로 정의하였다. 가을철 주간을 보면 최대빈도는 종관풍이 북서풍일 때 지상풍이 남서풍인 곳에서 나타난다. 종관풍이 북동풍일 때에는 지상풍은 동풍계열과 서풍계열로 나누어서 나타난다. 계곡풍이 운동량의 하향 수송에 의해서 나타나는 경우 계곡풍의 방향은 종관풍과 유사하며 하층 바람이 저기압쪽으로 향하여 약 25° 정도의 풍향차이를 갖는 특징을 보인다(Whiteman and Doran, 1993). 그러므로 종관풍이 북서풍과 동풍계열일 때 지상에서 유사한 풍향을 띠는 것은 운동량에 하향 수송에 기인한 것임을 나타낸다. 반면 종관풍이 동풍일 때 지상에서 남서풍이 나타나는 경우는 다른 메커니즘에 기인한 것이다.

가을철 주간과 야간을 비교하면 야간에 종관풍이 동풍일 때 지상풍이 서풍인 경우가 없어진 것을 볼 수 있다. 반면 야간에는 종관풍이 서풍일 때 지상풍이 남서풍과 함께 북풍이 우세하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 지상풍의 북풍은 종관풍과 상관없이 나타나고 있다. 지상 풍향이 주·야간에 따라 변화하며 지상 풍향이 종관 풍향과 관계없이 일정하게 나타나는 것은 열적 강제력에 기인한 계곡풍의 특징이다(Whiteman and Doran, 1993). 겨울철의 경우 종관풍이 북서풍에 한정되어 있지만 종관풍과 지상풍과의 관계는 가을철과 유사한 특징을 보인다. 그러므로 춘천지역의 지상풍은 운동량의 하향수송과 열적 강제력의 두 가지 메커니즘에 기인하고 있음을 알 수 있다.

주간에는 종관풍이 북서풍일 때 지상풍의 남서풍에서 최대빈도를 보여 운동량 하향 수송이 뚜렷하지만, 야간에는 이들의 빈도수가 현저히 감소한다(Fig. 5). 이는 서풍이 불 경우 춘천 분지는 서쪽에 위치한 산맥의 풍하측 꼬리흐름(wake)에 위치하고 있어 지면 부근에 약한 풍속대를 형성하고(Arya, 2001) 야간에

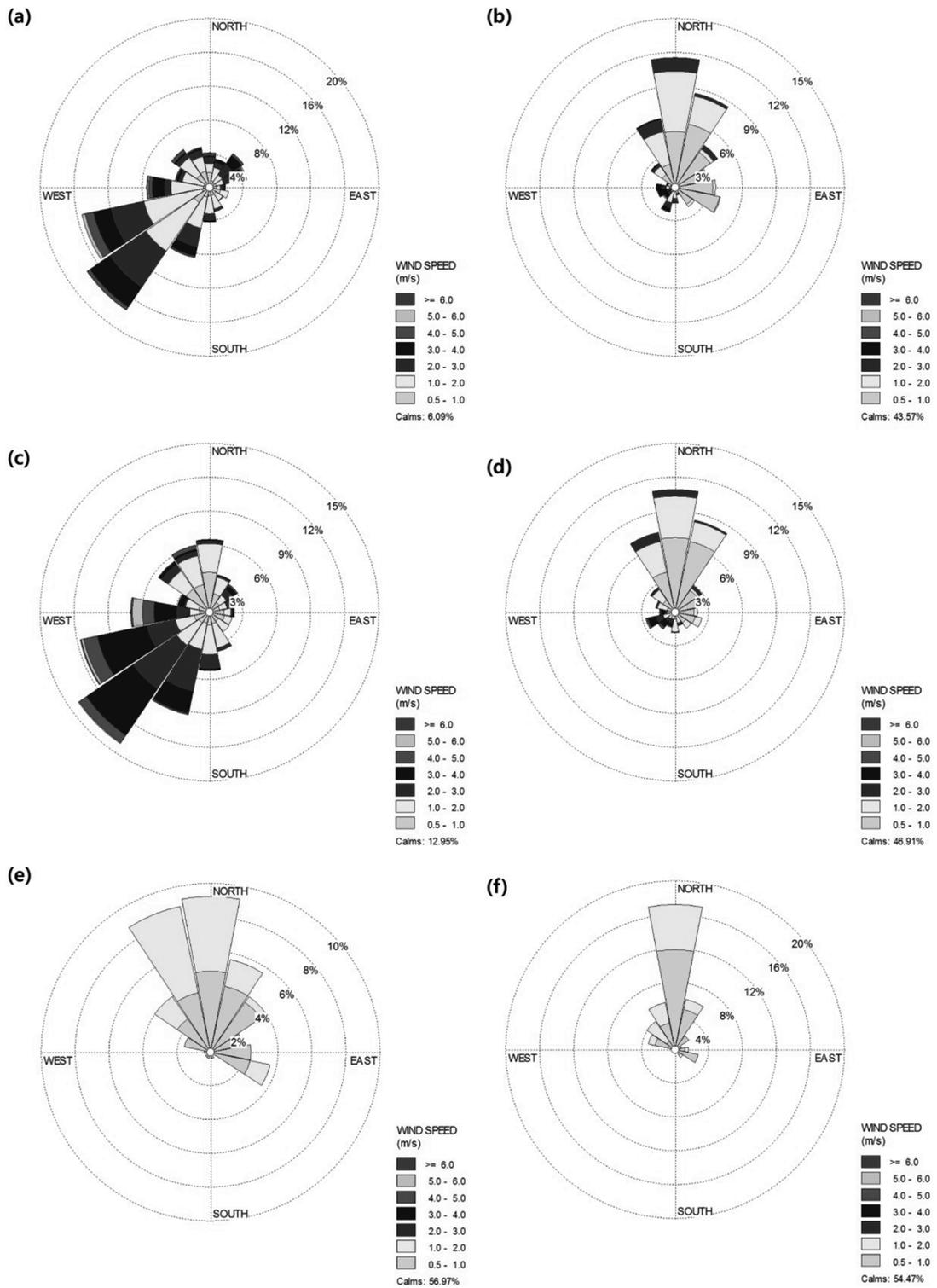


Fig. 4. Windrose at Chuncheon for (a) daytime in autumn, (b) nighttime in autumn, (c) daytime in winter, (d) nighttime in winter, (e) non-precipitation fog events in autumn, and (f) non-precipitation fog events in winter.

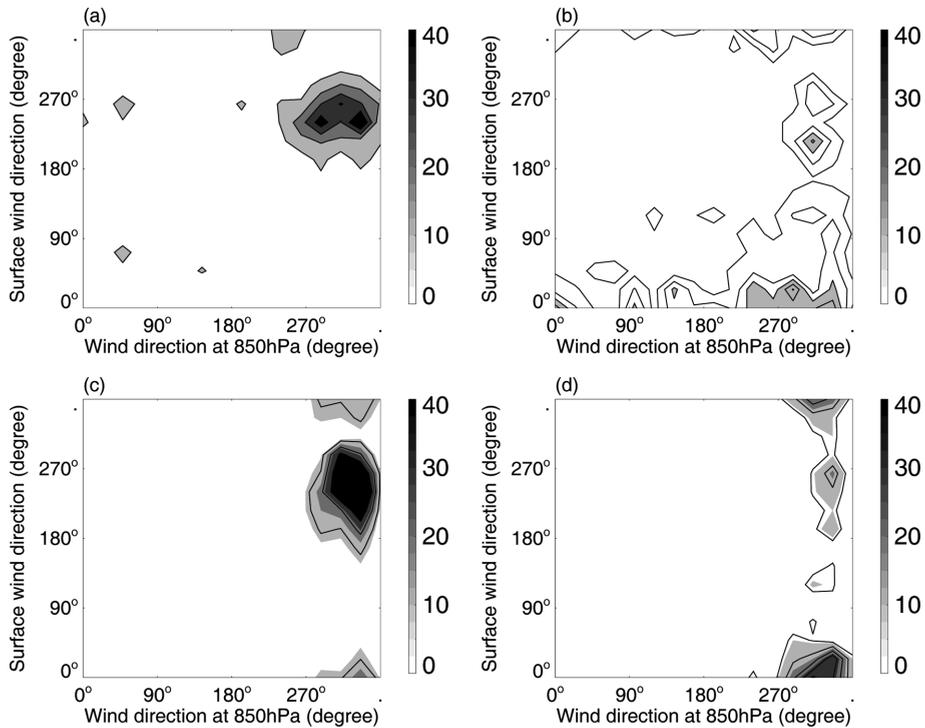


Fig. 5. Joint frequency distributions of surface wind directions (ordinate) at Chuncheon vs 850 hPa geostrophic wind directions (abscissa) for (a) daytime in autumn, (b) nighttime in autumn, (c) daytime in winter, (d) nighttime in winter.

분지 지형에 형성된 역전층이 서풍 운동량의 하향 전달을 막는데 기인한다. 운동량의 하향 수송은 주로 중립이나 불안정한 조건에서 잘 일어나는 것으로 알려져 있다(Carrera et al., 2009).

춘천지역의 바람장미의 또 다른 특징은 야간에 무풍의 비중이 상당히 높다는 점이다. 또한 야간의 무풍 비중은 겨울철(46%)에 가을철(43%)보다 더 높게 나타난다(Figs. 4b, d). 춘천 지역 안개 발생 시 바람의 특징은 무풍이 높은 비중을 차지하는 것으로 무풍이 가을철과 겨울철에 각각 56%와 54%를 차지한다(Figs. 4e, f). 그러므로 춘천지역 안개 발생 빈도의 월별 특징을 이해하기 위해서는 무풍의 발생빈도가 높은 이유를 분석하는 것이 필요하다. 춘천지역 야간의 약한 풍속과 국지풍의 관계를 3.4장에서 분석하였다.

3.3 안동의 지상풍 특성

Figure 6은 안동의 바람장미를 나타낸 것이다. 안동의 지형적 특징은 동서방향으로 계곡 축이 형성되어 있으며, 동서 방향으로 뻗어 있는 능선들 사이로 동에서 서쪽방향으로 흐르는 강이 있다(Fig. 1b). 가을과 겨울철 주간의 바람장미를 살펴보면 모두 서풍계열의 바람이 우세하다. 가을에 비해 겨울철 주간 풍

속이 더 강하게 나타난다. 이는 종관풍이 가을보다 겨울에 더 강한데 기인한다. 한반도의 겨울에 종관풍이 더 강한 특성은 선행 연구들에서도 보고된 바 있다(Kim and Byun, 2008). 가을과 겨울철 야간의 바람장미를 살펴보면 모두 남동과 북서풍 계열의 바람이 우세하게 나타나며, 주간에 비해 풍속은 약하다. 북서풍 계열의 풍속이 남동풍계열의 풍속보다 강하게 나타나고 있다. 야간에 풍향 빈도를 살펴보면 가을철은 약한 풍속의 남동풍의 빈도가 높게 나타나고, 겨울철은 상대적으로 강한 북서풍의 빈도가 높게 나타난다.

가을철 주간에 지상풍과 종관풍의 결합 분포를 보면 대각선상에 자료들이 분포하고 있어 운동량의 하향 수송이 우세함을 알 수 있다. 반면 가을철 야간이 되면 종관풍이 서풍일 때 지상풍은 서풍과 함께 남동풍에서 높은 빈도를 보인다. 가을철 야간의 지상 남동풍은 종관 풍향과 상관없이 나타나 열적 강제력에 기인한 것임을 시사한다. 겨울철에는 종관풍이 북서풍에 한정되어 있지만 가을철에 나타나는 특징을 여전히 반영하고 있다. 그러므로 안동 지역의 지상풍의 메커니즘도 춘천과 같이 열적 국지풍 발달과 운동량 하향 수송에 기인한다(Fig. 7). 춘천의 경우 야간에 운동량의 하향 수송의 역할은 현저히 감소하는 반면 안

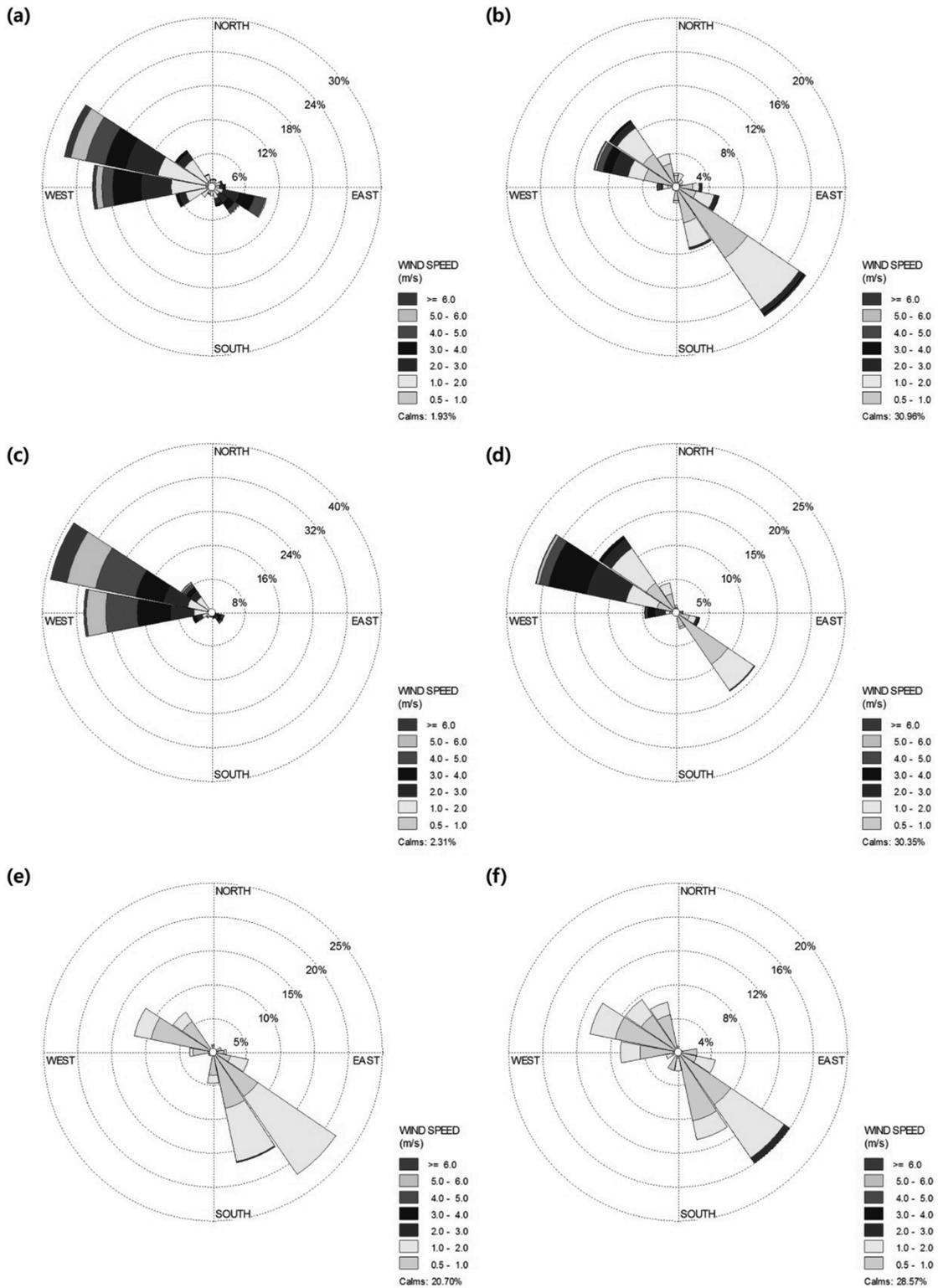


Fig. 6. Same as Fig. 4, but for station located at Andong.

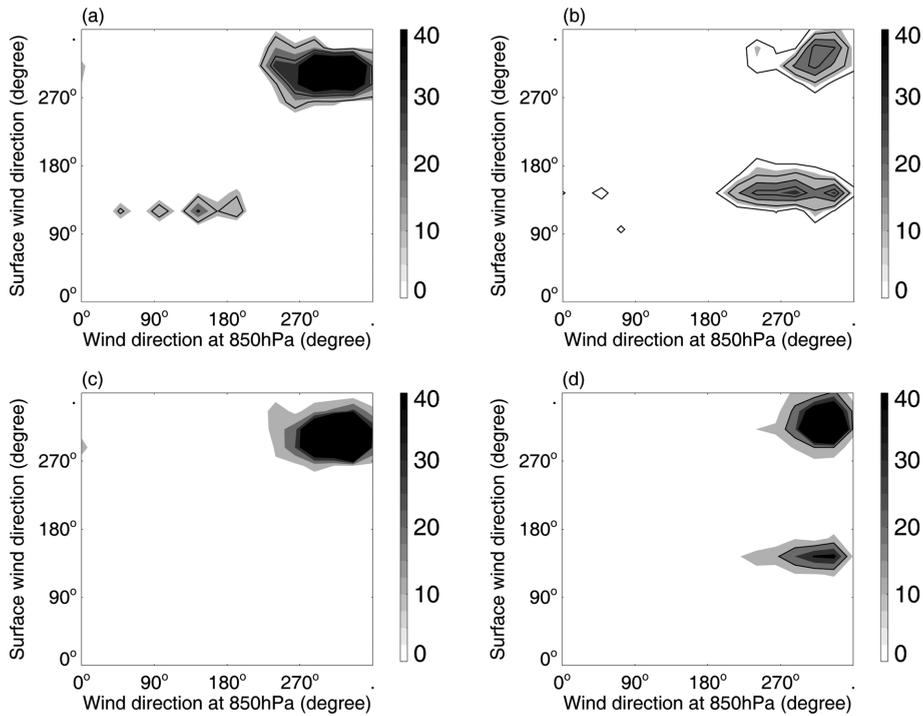


Fig. 7. Same as Fig. 5, but for station located at Andong.

동의 경우 야간에도 종관풍이 북서풍일 때 지상풍이 북서풍으로 나타나는 빈도가 여전히 높게 나타나 운동량의 하향 수송이 야간에도 중요한 메커니즘임을 알 수 있다. 춘천과 안동의 이러한 차이는 지형적인 특징에 기인한다. 춘천은 분지지역으로 서풍이 불 때 산의 풍하층의 꼬리흐름(wake) 지역에 위치하고 있어 운동량의 하향 수송이 원활하지 않은 반면 안동의 계곡 축은 동서 방향이기 때문에 서풍의 하향 전달이 좀 더 잘 이루어질 수 있다.

야간에 부는 남동풍은 계곡과 평지의 기온차이에 의해 발달한다. 야간에 도심지역이면서 상대적으로 폭이 넓은 계곡에 위치한 안동은 남동쪽의 계곡 내부보다 냉각이 더 적다. Figure 8은 2010년부터 2014년까지 5년 동안 안동과 길안 관측 지점에서 가을과 겨울철 기온의 일변화를 비교하여 나타낸 것이다. 계곡내부에 위치하고 있는 길안 관측 지점의 기온 일변화가 안동 관측 지점보다 크게 나타난다. 이는 계곡내에 가열 냉각되는 공기의 부피가 평지보다 더 작은 데 기인한다(Whiteman, 1990). 결과적으로 야간에는 계곡으로부터 평지로 부는 남동풍이 발달한다. 풍속이 상대적으로 더 큰($> 1 \text{ m s}^{-1}$) 남동풍의 빈도가 가을철에 높게 나타나는 것은 계곡과 평지 사이의 온도차가 가을철이 겨울철보다 더 크며 종관풍은 더 약한데 기

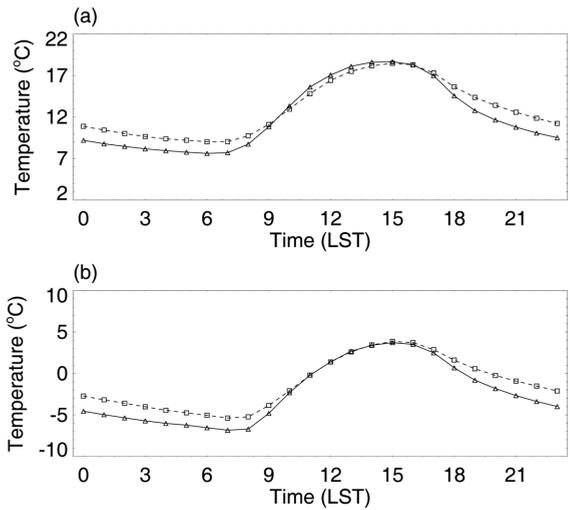


Fig. 8. The mean diurnal variation of temperature at Andong (square) and Gilan (triangle) during (a) autumn and (b) winter for the period 2010 to 2014.

인한다. 야간에 무풍의 비중은 가을철과 겨울철에 30%로 춘천 지역보다 작게 나타난다. 안동에서 안개 발생시 풍속은 대부분 2 m s^{-1} 이하로 약하지만 춘천과

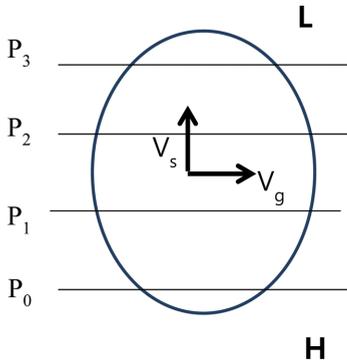


Fig. 9. Schematics of pressure driven channeling wind V_s over Chuncheon basin (ellipse) when geostrophic wind V_g is westerly.

다르게 무풍 비중은 30% 이하로 작다. 한가지 주목할 점은 남동풍이 부는 경우 북서풍이 부는 경우보다 상대적으로 풍속이 더 큰 조건($>1 \text{ m s}^{-1}$)에서 안개가 발생한다는 점이다(Figs. 6e, f). 이는 안동에서 안개 발생에 풍향의 중요성을 시사한다.

3.4 춘천지역 야간의 약한 풍속과 국지풍의 관계

춘천지역은 안동지역에 비해 야간에 무풍 발생비율이 10% 이상 높다. 또한 겨울철에 종관 풍속이 증가함에도 불구하고 가을철에 비해 겨울철 야간에 무풍 발생빈도는 오히려 3% 더 높게 나타났다. 이는 춘천지역 야간의 무풍 발생에 지형적인 요인과 함께 종관풍의 계절변화가 영향을 미치고 있음을 시사한다. 계곡풍의 메커니즘 중 하나인 기압 유도 채널링은 종관 규모 기압 경도력에 의해 계곡풍이 발달하는 것으로 계곡축의 방향과 종관풍의 방향의 수직일 때 현저하다(Whiteman and Doran, 1993). Figure 9는 종관풍이 서풍일 때 춘천 분지에서 나타나는 기압 유도 채널링 효과의 모식도를 제시한 것이다. 종관풍이 서풍인 경우 다른 국지풍이 없는 경우 춘천 분지에는 종관 기압 경도에 의해 남풍이 발달함을 알 수 있다. 국지풍의 존재는 방향에 따라 종관 기압 경도에 기인한 계곡풍을 강화시키거나 약화시킬 수 있다. 3.2장에서 춘천지역 야간에는 열적 강제력에 의한 북풍의 국지풍이 나타남을 보였다. 그러므로 춘천지역의 국지 기압 경도력의 방향은 북쪽에서 남쪽으로 향한다.

종관 기압 경도력과 지상풍의 관계를 분석하기 위하여 850 hPa의 동서 성분 u 의 크기에 따른 지상풍의 남북성분 v 의 크기를 분석하였다. 여기서 850 hPa의 동서 성분 u 의 크기는 남북 방향의 종관 기압 경도력의 크기를 나타낸다. Figure 10은 가을철과 겨울철 야간에 850 hPa 면의 u 의 크기별 지상풍의 v 의 크기를

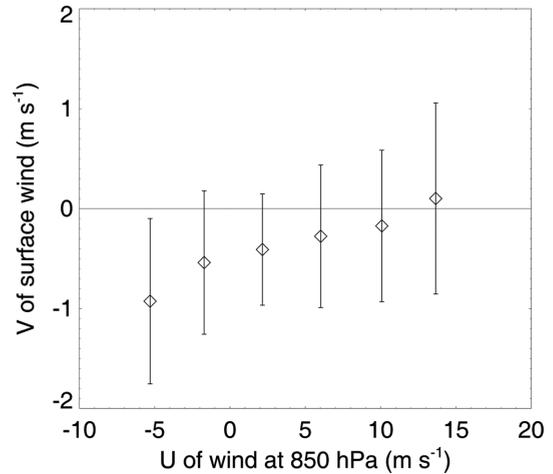


Fig. 10. The dependence of v component of surface wind on u component of geostrophic wind at 850 hPa.

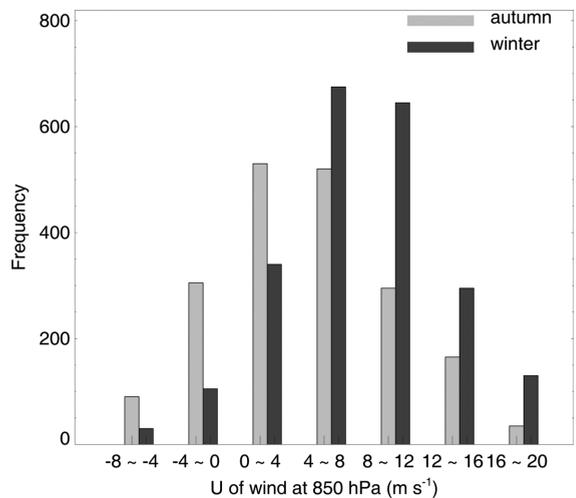


Fig. 11. Histogram of u component of geostrophic wind at 850 hPa for nighttime in autumn and winter.

나타낸 그림이다. 서풍이 강할수록 지상의 북풍 성분이 감소하는 특징을 보인다. 즉, 종관풍이 동풍인 경우 종관 규모의 기압 경도력의 방향은 북쪽에서 남쪽으로 작용하므로 북풍을 유발하고 이 경우 종관 규모 기압경도력과 국지 기압경도력은 같은 방향을 갖는다. 그러므로 지상에서 북풍 성분을 강화하는 방향으로 작용한다. 반면 종관풍이 서풍이 되면 국지 기압 경도력과 종관 기압 경도력은 서로 반대 방향으로 작용하면서 수평 기압 경도력은 감소하고 이로 인해 지상에서의 풍속도 약하게 나타나게 된다. 그러므로 춘천에서 종관풍이 서풍일 때 야간에 풍속이 약한 이유는

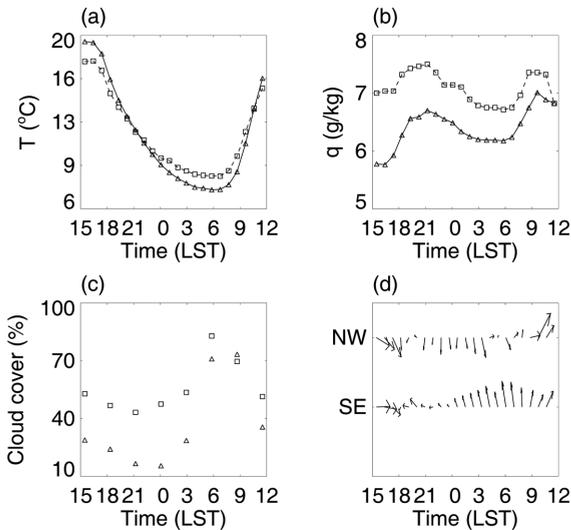


Fig. 12. Comparison of the mean diurnal variations of (a) air temperature, (b) specific humidity, (c) cloud cover, (d) wind for non-precipitation fog event days at Andong in autumn and winter for the period 2010 to 2014 between northwesterly (square) and southeasterly (triangle) cases. NW and SE in (d) indicate northwesterly and southeasterly, respectively.

국지 기압 경도력과 중관 규모 기압 경도력이 반대로 나타나고 분지에 위치하고 있어 서쪽에 위치한 산의 풍하층의 꼬리흐름에 위치하고 있으며 야간에 분지에 형성된 역전층이 중관풍 운동량의 하향 수송을 억제하기 때문이다(Arya, 2001).

무풍의 발생 빈도가 겨울철에 가을철보다 더 높게 나타나는 이유로는 겨울철의 서풍 풍속의 증가가 원인일 수 있다. Figure 11은 총 5년간 야간의 850 hPa 지균풍의 동서 성분의 히스토그램을 가을철과 겨울철에 대해 비교하여 나타낸 것이다. 히스토그램(Histogram)을 통해서 가을철보다 겨울철에 서풍 발생 빈도가 높고 또한 서풍의 크기도 더 큰 것을 알 수 있다. 결과적으로 겨울철에 중관 기압 경도력에 의해서 국지 기압 경도력에 의해 발생하는 북풍을 더 많이 감소시킴으로써 낮은 풍속의 발생 빈도를 높이고 있음을 나타낸다.

3.5 국지풍이 안동의 안개 발생에 미치는 영향

남동풍의 국지풍이 안동의 안개 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 안개 사례가 많은 가을과 겨울철 안동에서 안개 발생 전후의 기온과 비습, 운량, 풍향의 변화를 분석하였다(Fig. 12). 안개 발생 전 풍향이 북서풍(NW)인 경우와 남동풍(SE)인 경우로 안개를 분류하였고 풍속에 따른 차이를 줄이기 위해서 풍속이

0.5 m s^{-1} 이상에서 2.0 m s^{-1} 미만인 사례들만 사용하였다. 안개 발생 전 상대적으로 강한 남동풍이 부는 경우 북서풍이 부는 경우보다 기온이 더 빠르게 감소한다(Fig. 12a). 냉각되는 정도는 운량과 밀접히 관련되어 있는데 안개 발생 전의 운량은 남동풍이 부는 경우가 더 작게 나타나 북서풍이 부는 경우보다 야간의 복사냉각이 더 큼을 알 수 있다(Fig. 12c). 이는 맑은 날에 열적 국지풍이 잘 발달하는 것과 일관된다. 비습의 변화를 살펴보면 비습은 대기경계층의 두께와 증발의 일변화에 따라 일변화 형태를 보여 일몰 직후에 증가했다가 감소하고 일출 후 다시 증가하는 형태를 띤다. 남동풍이 부는 경우가 북서풍이 부는 경우보다 비습이 낮은 조건에서 안개가 발생하였고 1500 LST와 0000 LST의 비습을 비교해보면 남동풍이 부는 경우에 비습이 증가하는 반면 북서풍이 부는 경우 비습의 변화가 거의 없다. 이는 남동풍이 부는 경우 수증기가 공급되고 있음을 시사한다(Fig. 12b). 남동풍이 부는 경우 강으로부터 바람이 불지만 북서풍이 부는 경우에는 산으로부터 바람이 분다. 안개 발생 전 남동풍이 부는 경우, 중간에 북서풍이 불고 야간에 남동풍으로 변화되어 전형적인 열적으로 강제된 국지풍의 형태를 띤다. 북서풍이 부는 경우 북서풍의 풍향 변화가 거의 없고 야간에 풍속이 약해지는 특징을 보이는데 이 경우는 열적 국지풍이 발달하지만 중관풍이 강해서 풍향의 변화까지는 나타나지 않는데 기인한다(Fig. 12d). 요약하면 남동풍의 국지풍이 발달하는 경우 야간의 복사냉각이 더 크고 강으로부터 수증기가 유입되어 안개 발생에 우호적인 조건을 형성한다. 또 계곡내부가 안동보다 온도가 더 낮기 때문에 계곡으로부터 찬 공기의 이류도 안개 형성에 우호적인 조건을 제공할 수 있다. 결과적으로 중관풍이 약한 가을에 안동지역에서 야간에 발달하는 국지풍은 안개 형성에 우호적인 조건을 형성함으로써 가을철 안개 발생빈도를 증가시키는데 기여한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2010년부터 2014년까지 5년간 춘천과 안동의 정규 기상 관측자료와 오산 고층 기상 관측자료를 사용하여 춘천과 안동의 안개 발생과 국지풍과의 관련성을 분석하였다. 본 연구에서 안개는 시정 값이 1 km 미만이고 강수 없이 기상 현상이 안개(낮은 안개, 땅 안개, 얼음 안개)로 보고된 경우로 정의하였다.

5년간 춘천과 안동에서 발생하는 안개의 월별 빈도 분포를 조사한 결과 춘천은 10월부터 1월까지 안개 발생 빈도가 높은 특징을 보이는 반면 안동은 10월에 안개 발생의 최대 빈도 분포를 보이고 이후 현저히

감소하였다. 춘천은 안동과 달리 12월과 1월에 낮은 풍속과 습수를 보였다.

춘천과 안동에서 국지풍과 안개 발생의 관계를 분석하기에 앞서 먼저 두 지역의 지상풍의 특징을 분석하였다. 가을철(9, 10, 11월)과 겨울철(12, 1, 2월)에 춘천과 안동에서 주간(1400~1600 LST)과 야간(0300~0500 LST)의 바람장미 특징을 분석한 결과 주·야간에 풍향의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 분지에 위치한 춘천은 주간에 남서풍이 우세한 반면 야간에 무풍이거나 북풍이 분다. 안동은 동서방향으로 뺨은 계곡에 위치해 있는데 주간에 북서풍이, 야간에 남동풍 또는 북서풍이 분다. 안개 형성 시 겨울철 춘천의 무풍 비중은 가을철과 겨울철에 각각 56%와 54%로 풍속이 약한 경우 안개가 주로 발생하는 반면, 안개 형성 시 가을철 안동의 무풍의 비중은 30% 이하로 작으며, 남동풍이 부는 경우 상대적으로 풍속이 더 큰 조건($> 1 \text{ m s}^{-1}$)에서 안개가 발생하였다.

춘천에서 야간 안개형성에 우호적인 조건인 약한 풍속과 국지풍의 관계를 분석하였다. 춘천에서 야간에 지상의 북풍은 850 hPa 면의 서풍이 증가할수록 감소하는 특징을 보인다. 이는 종관풍과 수직으로 위치하고 있는 남북방향의 분지에서 종관 기압 경도력에 의한 채널링 효과가 반대 방향으로 작용하는 국지 기압 경도력에 의해 일부 상쇄되어지기 때문이다. 춘천 지역에서 야간에 발달하는 국지풍은 종관 규모 기압 경도력을 상쇄시켜 약한 풍속을 형성하는데 기여함으로써 안개 형성에 우호적인 조건을 형성한다.

동서 방향의 계곡에 위치한 안동은 종관 기압 경도력에 의한 채널링 효과는 거의 없다. 야간에 안개 형성 시 국지풍(남동풍)이 발달하는 경우와 종관풍(북서풍)이 우세한 경우를 비교 분석한 결과 남동풍이 불 때 야간의 기온의 감소가 더 크고 수증기량이 증가하여 안개형성에 우호적인 조건을 형성하였다. 안동에서 야간에 발달하는 국지풍은 류효과를 통해서 안개 형성에 우호적인 조건을 형성하여 종관풍이 약한 가을철 안개 발생 빈도를 증가시키는데 기여한다.

국지풍이 안개 형성에 미치는 영향은 지형적 특성에 따라 다르게 나타난다. 본 연구의 결과는 춘천이나 안동과 비슷한 지형적 구조를 갖는 지역에서 안개 형성에 대한 국지풍의 역할을 설명하는데 적용할 수 있으며 안동과 춘천 지역에 안개 발생의 경험적 예보 모델의 개발에도 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

Ahrens, C. D., 2009: *Meteorology today*. 9th Ed. Brooks/Cole, 549 pp.
 Arya, S. P., 2001: *Introduction to micrometeorology*. 2nd

Ed. Academic Press, 420 pp.
 Belorid, M., C. B. Lee, J.-C. Kim, and T.-H. Cheon, 2015: Distribution and long-term trends in various fog types over South Korea. *Theor. Appl. Climatol.*, **122**, 699-710, doi:10.1007/s00704-014-1321-x.
 Carrera, M. L., J. R. Gyakum, and C. A. Lin, 2009: Observational study of wind channeling within the St. Lawrence River Valley. *J. Appl. Meteor. Climatol.* **48**, 2341-2361.
 Clark, P. A., and W. P. Hopwood, 2001: One-dimensional site-specific forecasting of radiation fog. Part I: Model formulation and idealised sensitivity studies. *Meteor. Appl.*, **8**, 279-286.
 Jhun, J.-G., E.-J. Lee, S.-A. Ryu, and S.-H. Yoo, 1998: Characteristics of regional fog occurrence and its relation to concentration of air pollutants in South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 486-496.
 Kim, D.-W., and H.-R. Byun, 2008: Spatial and temporal distribution of wind resources over Korea. *Atmosphere*, **18**, 171-182 (In Korean with English abstract).
 KoROAD, 2015: Fog zone - Road traffic safety management measures, Report 2015. 3, 17 pp.
 Lee, H.-D., and J.-B. Ahn, 2013: Study on classification of fog type based on its generation mechanism and fog predictability using empirical method. *Atmosphere*, **23**, 103-112, doi:10.14191/Atmos.2013.23.1.103 (In Korean with English abstract).
 Lee, K.-M., and M.-S. Suh, 2011: A study on the characteristics of fog and development of prediction technique in the Chung-Cheong area. *J. Clim. Res.*, **6**, 200-218.
 Lee, S., 1998: The impacts of the Chungju lake on the fog characteristics of its surrounding area. *J. Korean Geographic. Soc.*, **33**, 165-177 (in Korean with English abstract).
 Park, S.-Y., H.-W. Lee, D.-H. Kim, and S.-H. Lee, 2010: Numerical study on wind resources and forecast around coastal area applying inhomogeneous data to variational data assimilation. *J. Environ. Sci. Int.*, **19**, 983-999, doi:10.5322/JES.2010.19.8.983 (in Korean with English abstract).
 Prabha, T. V., A. Karipot, and M. W. Binford, 2007: Characteristics of secondary circulations over an inhomogeneous surface simulated with large-eddy simulation. *Bound.-Layer Meteor.*, **123**, 239-261, doi:10.1007/s10546-006-9137-6.
 Raasch, S., and G. Harbusch, 2001: An analysis of secondary circulations and their effects caused by small-scale surface inhomogeneities using large-eddy simulation. *Bound.-Layer Meteor.*, **101**, 31-59.

- Reuter, H. I., A. Nelson, and A. Jarvis, 2007: An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *Int. J. Geogr. Inf. Sys.*, **21**, 983-1008.
- Sun, J., R. Desjardins, L. Mahrt, and I. MacPherson, 1998: Transport of carbon dioxide, water vapor, and ozone by turbulence and local circulations. *J. Geophys. Res.*, **103**, 25873-25885.
- Tardif, R., and R. M. Rasmussen, 2007: Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1141-1168.
- Vidale, P. L., R. A. Pielke Sr., L. T. Steyaert, and A. Barr, 1997: Case study modelling of turbulent and meso-scale fluxes over the BOREAS region. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29167-29188.
- Whiteman, C. D., 1990: Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. In W. Blumen Ed., *Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteorological Monographs*. No. 23, *Amer. Meteor. Soc.*, 5-42.
- _____, and J. C. Doran, 1993: The relationship between overlying synoptic-scale flow and winds within a valley. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 1669-1682.