한라산 지역 열역학적 편 현상 발생 시 종관 기후 패턴

최광용

제주대학교 지리교육전공

(2016년 12월 23일 접수, 2016년 12월 29일 수정, 2016년 12월 30일 게재 확정)

Synoptic Climatic Patterns of Thermodynamic Föhn Phenomenon Across Mt. Halla, Korea

Gwangyong Choi

Major of Geography Education, Jeju National University

(Received 23 December 2016, Revised 29 December 2016, Accepted 30 December 2016)

Abstract : The purpose of this study is to uncover the characteristics of spatio-temporal patterns and synoptic climatic patterns of thermodynamic föhn phenomenon accompanying orographic precipitation across Mt. Halla for the recent several decades. Analyses of surface observational data reveal that thermodynamic föhn days occur mainly between mid-spring and early summer (April-June) particularly in the form of North warm-South wet type across Mt. Halla due to the accelerated moisture advection around a migratory low pressure. In extreme cases of thermodynamic föhn across Mt. Halla, more than 6.0°C of daily mean temperature difference between windward and leeward sides is observed though its spatial patterns vary seasonally. Composite maps of upper synoptic climatic variables for multiple strong föhn days show that the relative position and intensity of a migratory low or high pressure anomaly cores as well as of semi-stationary fronts and air masses affect the seasonal spatial patterns and severity magnitudes of thermodynamic föhn around Mt. Halla. These results provide a scientific basis for developing a proactive föhn prediction system to reduce potential damages of föhn phenomenon to local economic activities in Jeju Island.

Key Words : thermodynamic föhn, orographic precipitation, moisture advection, synoptic climatic patterns, Mt. Halla

주요어 : 편 현상, 지형성 강수, 수증기 이류, 종관 기후 패턴, 한라산

1. 서론

우리나라는 국토의 70%가 산지이지만 대부분의 기상청 산하 종관기상관측소 및 자동기상관측소는 인구가 밀집한 해발고도가 낮은 저지대에 위

치하여 해발고도가 높은 산악 기후에 관한 정보는 적은 편이다. 국내에서는 일부 연구자들이 실제 산지 지역에서 단기간 동안 개별 관측을 한 결과를 바탕으로 일부 산간 곡지의 기온과 바람 분포(Song, 2000), 산간 분지의 기온 감률 및 냉기

호(Choi *et al.*, 2010), 태백산맥 동서사면의 기온 및 지형성 강수(Lee, 1997) 특징을 밝힌 결과들이 있을 뿐이다. 특히, 본 연구의 연구지역인 남한에서 가장 높은 해발고도(1,947m)를 보이는 한라산의 기후학적 특성에 관한 연구 결과도 최근에 와서야 자동기상관측소에서 수집한 10년 자료를 바탕으로 제시되기 시작하였다(Choi, 2011; 2013; Oh and Choi, 2014). 반면, 해외에서는 현대적 관측이 시작된 지난 약 150여 년 이상 기간에 걸쳐 소규모 산지의 기후 특성과 인간 생활에 미치는 영향에 관한 수 많은 사례 연구들을 집대성하여 미기후학 교과서를 출간하기도 하였다(Geiger, 1965; Yoshino, 1975; Oke, 1978; Barry, 2008).

특히 유럽에서는 예로부터 대표적인 산악 국지 기후 현상으로 알프스 산을 넘어 바람의지(leeward) 지역에 고온건조한 특성을 가진 사면활강풍(katabatic wind)이 부는 뫼(Föhn or 영어권에서는 foehn) 현상에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 알프스 지역에서 뫼가 발생하는 과정에 관한 과학적 설명은 19세기 중반부터 제시되기 시작하였다(Hann, 1866). Hann(1866)의 고전적인 뫼(föhn) 발생에 관한 설명에 따르면, 수증기를 머금은 기류가 바람받이(windward) 산사면을 따라 상승할 때에는 건조단열감률($1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)로 기온이 하강하고, 포화점에 이르면 강수현상이 나타나 그 이상의 고도부터는 물의 상변화 시 방출되는 잠열(latent heat)의 영향으로 습윤단열감률($0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)을 따라 고도 상승에 따른 기온 감소율이 줄어들는다. 반면, 수분을 잃은 바람이 산정상부를 넘어 반대쪽 바람의지 사면 아래로 하강할 때에는 건조단열감률에 의해서만 기온이 상승하여 바람받이 지역보다 더 고온건조한 상태가 된다. 오늘날에 와서 뫼(föhn)이라는 용어는 유럽 이외의 지역으로 확대되어 전 세계 산지 지역에서 유사한 메커니즘으로 부는 국지풍을 공통적으로 가리키는 명

칭으로 일반화 되었다.

뫼(föhn) 바람은 전 세계 여러 지역에서 기류가 해발고도가 수천 미터에 달하는 산이나 산맥을 넘어갈 때에는 발생하는 고온건조한 특성을 지닌 가장 흔한 국지풍의 하나이다. 따라서 유럽 알프스 산지와 스칸디나비아 반도 산맥 주변에서 사용되던 뫼(föhn)이라는 용어가 전 세계적으로 범용되기 이전부터 각 지역마다 뫼 바람을 가리키는 고유 명칭들이 존재하였다(Brinkmann, 1771). 가령, 북아메리카 로키 산맥 주변에서는 이 고온건조한 바람을 치누크(chinook) 또는 스노우 이터(snow eater), 남아메리카 안데스 산맥 주변 칠레, 아르헨티나에서는 puelche wind, zonda winds 등의 명칭을 사용하였다. 또한, 뫼(föhn) 바람은 뉴질랜드 남섬에서 nor'wester, 중앙아시아에서 afganet 또는 be, 남아프리카에서는 berg wind 등으로 불리기도 하였다. 이러한 뫼 현상의 범주를 몇 가지로 구분해 보면, 강수를 동반하지 않는 역학적 뫼(dynamic föhn)도 존재 하지만(Hann, 1886; Cook and Topil, 1952; Lockwood, 1962), 오늘날 일반적으로 뫼 현상은 흔히 강수현상을 동반하는 열역학적 뫼(thermodynamic föhn)을 가리킨다.

21세기에 접어들어 해외에서는 뫼 현상에 의한 극심한 산불 확산(Gedalof *et al.*, 2005), 질병 발생(Strauss, 2007), 이른 봄철의 눈 녹은 물에 의한 홍수 피해(Barry, 2008) 등 뫼가 인간 생활에 미치는 다양한 영향에 관한 연구 결과들이 보고되고 있다. 또한, 고온건조한 상태로 인해 큰 피해를 가져오는 강한 뫼의 발생을 예측하기 위한 모델 개발 연구들도 진행되고 있다(Seibert, 1990; Drechsel and Mayr, 2008). 그러나 우리나라에서는 산지지역의 관측망 자료가 부족할 뿐만 아니라 산악 미기후학자도 전무하여 뫼 현상 등의 국지풍에 관한 연구는 일부 제시된 정도이다. 또한 이러한 일부 국내 뫼 현상에 관한 연구들도 대부분 북동쪽에서 태

백산맥을 넘어 영서지역으로 부는 높새바람(Lee, 1994; Choi *et al.*, 1997; Kim, 2001; Kim and Kim, 2013) 또는 영동지역으로 부는 강수를 동반하지 않은 역학적 뒀 바람의 통계학적 특성을 주로 다루었을 뿐이다(Lee, 1980; Kang, 1989). 이 연구들에서 뒀 현상 발생과 관련된 종관 기후 패턴으로 북동풍을 유발하는 오호츠크해 고기압(Lee, 1994), 뒀서풍을 강화시키는 남고북저의 기압패턴(Kim and Hong, 1996)의 중요성을 언급하였으나, 모두 태백산맥 주변의 뒀의 발생 메커니즘에 관한 연구들뿐이다. 그러나 뒀의 명칭이 유래한 유럽 알프스의 사례에서도 알 수 있듯이 뒀은 산지가 70% 이상인 우리나라에서 해발고도가 높은 산지 지역이라면 흔히 발생하는 현상일 것으로 짐작되지만 지금까지 태백산맥 이외 지역에서 발생하는 뒀 현상에 대해서는 거의 알려져 있지 않다.

본 연구에서는 남한에서 해발고도가 가장 높은 제주도 한라산(해발고도 1,947m) 지역에서 강수를 동반하는 열역학적 뒀(thermodynamic föhn)의 시공간적 발생 패턴과 강한 뒀 발생 시 상층 종관기

후장의 특징을 밝히고자 한다. 특히 한라산 지역의 뒀 현상의 연중 발생빈도가 높은 시기와 전형적으로 발생하는 뒀의 지역 유형을 파악하고, 계절별 한라산 뒀 현상 발생일의 전형적인 상층 종관 기후 시스템의 분포 특징을 밝히고자 하였다.

2. 연구 자료 및 연구 방법

1) 한라산 지상 관측 자료 및 상층 종관 기후 자료

한라산의 기후 특성은 섬의 중심에 자리잡은 한라산(해발고도 1,947m)의 영향으로 동서남북 사면별로 상이하게 나타난다(Choi, 2011; 2013). 이에 따라 뒀 현상에 의해 고온현상이 발생하는 지역도 기류 유입 방향에 따라 다양한 사면에 발생할 것으로 판단되어 동-서 또는 남-북 지역의 자료를 비교·분석하였다. 이를 위해 기상청에서 한라산 기준 동(성산) 서(고산) 남(서귀포) 북(제주) 방향에 4개 종관기상관측소(ASOS)에서 약 30년 이상 장기간 관측한 일별 기후 자료를 분석하였다(Figure 1).

Figure 1. Climate observation network around Mt. Halla operated by the Korea Meteorological Administration. The number in the parenthesis indicates the year when first daily climatic data sets were available.

한라산의 20여개 자동기상관측소의 자료는 21세기 초반에 들어와서 가용하므로 본 연구에서 이 자료는 이례적으로 강한 편 현상이 발생한 경우의 한라산 주변의 지상 종관 기상 상태를 파악하기 위해서 제한적으로만 사용하였다.

본 연구에서는 열역학적 편(thermodynamic föhn) 현상은 기류가 해발고도가 높은 산사면을 타고 상승하면서 바람받이(windward) 지역에서는 강수현상을 일으키고, 반대 바람의지 사면에서는 고온건조한 상태로 넘어가는 현상임을 고려하여 서로 상반되는 사면의 일평균기온 차이와 강수 발생 유무 자료를 분석하였다. 제주도의 기상 기후 특성은 한라산 사면별로 상이한 기온 변화 특성을 고려하여(Choi, 2011), 크게 한라산 지역의 열역학적 편 현상을 북사면 고온 발생-남사면 강수 발생 형(North warm-South wet type), 남사면 고온 발생-북사면 강수 발생 형(South warm-North wet type), 동사면 고온 발생-서사면 강수 발생 형(East warm-West wet type), 서사면 고온 발생-동사면 강수 발생 형(West warm-East wet type)으로 세분화하였다. 장기간 지역 유형별 편 현상 발생 자료를 추출하기 위해 북부지역 제주(1924년)-남부지역 서귀포(1961년), 동부지역 성산(1973년)-서부지역 고산(1988년)의 일별 기후 자료의 가용성을 고려하여, 북부-남부 또는 남부-북부 간 편 현상 발생 유무 일별 자료는 1961년 이후 기간에 관해 구축하였고, 동부-서부 또는 서부-동부 간 편 현상 발생 유무 일별 자료는 1988년 이후 기간에 관하여 구축하였다. 이 자료를 바탕으로 장기간 편 현상의 기후학적 특성을 살펴보기 위해서 한국기후표 기후 평균 자료를 사용하고 그 결과를 향후 타 지역과 비교하는데 용이하게 하기 위해 남-북 지역의 경우에는 1981~2010년을 기준으로, 동-서 지역의 경우에는 1988~2010년 자료를 기준으로 월평균 각 지역 유형별 편 현상의 발생빈도를

산출하여 비교·분석하였다.

그 후 각 계절별로 강한 열역학적 편 현상을 유발하는 종관 기후 패턴의 특징을 살펴보기 위해 한라산 북사면-남사면(동사면-서사면) 간 1961년(1988년)이래 일별 열역학적 편 현상 발생일 중 가장 큰 기온 차이를 보이는 상위 10개의 강한 편 현상 발생 사례일들을 추출하였다. 이를 바탕으로 이 4개 지역 유형별로 3개월 단위 기상학적 계절에 속하는 강한 열역학적 편 현상 발생 날짜들의 NCEP-NCAR reanalysis I 상층 자료(Kalney *et al.*, 1996)를 평균한 종관 기후 합성 분포도를 그렸다. 각 계절별 강한 열역학적 편 현상 발생일시 상층 종관 기후장 분석 시 대류권 평균적인 기압 분포 특징을 살펴보기 위해 해당 날짜의 500hPa 지위 고도(geopotential height) 편차값에서 30년(1981~2010년) 기후 평균값을 뺀 아노말리 값의 합성도를 그렸다. 평년 대비 하층 대기 기류의 흐름 패턴과 기류에 의해 수송되는 수증기 양의 특징을 분석하기 위해 850hPa의 바람벡터(Choi(2015) 방법 참조)와 가강수량(precipitable water) 아노말리의 합성도를 작성하였다.

2) 편 발생일 정의

본 연구에서는 Hann(1866)이 제시한 널리 알려진 열역학적 편 현상 조건을 활용하여 바람받이와 바람의지 두 지역의 기온차가 장기간 두 지역 평균 기온차와 두 지역 기후변동성(표준편차)의 합보다 크며, 바람받이 사면 지역에 강수가 발생한 경우로 정의하였다(Table 1). 이를 파악하기 위해 우선, 매일 매일의 자료를 바탕으로 바람의지 지역 사면에 속하는 지역의 관측지점의 평균기온이 바람받이 사면에 속하는 지역의 관측지점의 평균기온보다 높은 날짜를 추출하였다. 또한, 이러한 날짜들에서 바람받이 지역 사면에 속하는 지역의 관측지점에서 강수가 발생한 경우만을 추출하였다.

Table 1. Long-term(1981-2010) average climate variables used to determine the thresholds of four regional föhn phenomenon occurrence around Mt. Halla in this study. T_{cmean} : long-term monthly average of daily mean temperature, T_{csd} : long-term monthly standard deviation of daily mean temperature, $föhn_T^*$: monthly temperature value to check the occurrence of each regional föhn phenomenon (see the detail in equations below).

Variable	Region	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_{cmean} (°C)	North(Jeju)	5.7	6.4	9.4	13.8	17.8	21.5	25.8	26.8	23.0	18.2	12.8	8.1
	South(Seogwipo)	6.8	7.8	10.6	14.8	18.6	21.7	25.6	27.1	23.9	19.3	14.1	9.3
	East(Seongsan)	5.4	6.2	9.3	13.6	17.5	20.8	24.9	26.3	23.1	18.0	12.5	7.6
	West(Gosan)*	6.2	6.7	9.3	13.3	16.8	20.6	24.7	26.2	23.1	18.3	13.3	8.6
T_{csd} (°C)	North(Jeju)	1.0	1.4	1.0	1.0	0.6	0.8	1.2	1.1	1.0	0.9	1.2	1.0
	South(Seogwipo)	1.2	1.6	1.0	0.9	0.7	0.7	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.1
	East(Seongsan)	0.9	1.5	1.0	1.3	0.9	0.8	1.1	1.1	1.1	0.8	1.2	1.4
	West(Gosan)*	0.8	1.3	0.8	0.9	0.6	0.6	1.0	1.1	0.7	0.7	1.0	0.9
$föhn_T^*$ (°C)	North warm-South wet	1.2	1.6	0.8	0.9	0.5	1.3	2.6	1.8	1.1	0.8	1.1	0.9
	South warm-North wet	3.4	4.4	3.2	2.9	2.1	1.7	2.2	2.4	2.9	3.0	3.7	3.3
	East warm-West wet	0.9	2.3	1.8	2.5	2.2	1.6	2.3	2.3	1.8	1.2	1.4	1.3
	West warm-East wet	2.5	3.3	1.8	1.9	0.8	1.2	1.9	2.1	1.8	1.8	3.0	3.3

* observational data is available since the year of 1988.

또한 기온의 지역 평균 기후값이 상이할 뿐만 아니라 다른 복잡한 종관 기후 요인들에 의해 변동성이 포함되어 있기 때문에 한라산 사면 지역마다 기온이 상이하다. 가령, 최근 30년 월별 기후값을 살펴보면 연 중 대부분의 한라산 남사면에 위치한 서귀포의 평균기온이 북사면에 위치한 제주보다 더 높게 나타난다. 또한, 동사면과 서사면 관측지점간의 평균기온 차이도 북사면과 남사면 간의 차이에 비하여 그 값은 작아지나 각 월별로 또는 계절별로 상이하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 매일 매일의 두 지역 평균기온 차가 발생하더라도 이러한 해당월의 기후값 차와 기후변동성을 벗어나는 경우만을 편 현상이 발생한 것으로 간주하였다.

본 연구에서는 이러한 지역 기온 평균과 변동성을 고려하기 위해 바람의지 사면의 해당월 평균기온의 +1.0 표준편차를 더한 값에서 바람받이 사면 해당월 평균기온의 -1.0 표준편차 값을 뺀 값($föhn_T^*$)을 해당 날짜가 속한 월의 편 현상 발생

기준 임계치로 정하였다. 정상분포와 유사한 평균기온 분포에서 ± 1.0 표준편차는 전체 자료의 약 67% 이내에 속하므로 본 연구에서는 한라산 양 사면 관측지점의 표준편차를 모두 고려하여 특정 임계치 이상의 기온차를 보이는 경우에만 편 현상이 발생한 것으로 간주하였다. 최종적으로 한라산의 반대쪽에 위치한 두 지역 간 기온차 값($T_{difference_ith\ day}$)이 이 편 현상 발생 기준 임계치($föhn_T^*$)보다 더 큰 경우를 전형적인 편 현상이 발생한 날로 선택하였다. 이를 식으로 요약하면 아래와 같다.

$$T_{difference_ith\ day} = T_{mean_ith\ day_leeward} - T_{mean_ith\ day_windward\ with\ precipitation}$$

$$föhn_T^* = (T_{cmean_leeward} - T_{cmean_windward}) + (T_{csd_leeward} + T_{csd_windward})$$

$$föhn_ith\ day = \begin{cases} \text{Yes,} & \text{If } (T_{difference_ith\ day} \geq föhn_T^*) \\ \text{No} & \end{cases}$$

이 방법에 따르면 가령, 1월 특정일에 한라산 북사면에 고온현상이 발생한 경우 북사면($T_{\text{mean_ith day_leeward}}$)-남사면($T_{\text{mean_ith day_windward with precipitation}}$) 기온차이값($T_{\text{difference_ith day}}$)이 30년 평균 북사면($T_{\text{mean_leeward}}$)과 남사면($T_{\text{mean_windward}}$)의 1월 평균기온 차이값에 두 지역 1월 평균기온 표준편차를 합한 기후변동성 최대폭($T_{\text{csd_leeward}} + T_{\text{csd_windward}}$)을 합한 값(1.2°C)보다 더 큰 경우($f_{\text{ohn_ith day}} = \text{YES}$)에 북사면 고온-남사면 강수형(North warm-South wet type) 편 현상이 발생한 것으로 볼 수 있다. 이러한 방법은 기준에 두 지역의 기온차가 특정 임계치 이상인 경우(예, 5°C 이상)를 연중 모든 시기에 동일하게 적용하는 사례에 비하여 보다 객관적인 방법으로 판단된다.

3. 결과 및 고찰

1) 한라산 지역 편 현상의 시공간적 패턴

제주도 장기간 평균 강수를 동반한 열역학적 편 현상의 연평균 발생빈도는 약 31일 정도이다(Table 2). 그 중 약 92%(26.9일)는 4개 지역 유형 중 하나만 발생하고, 약 8%(2.2일) 정도만이 2개 지역 유형이 동시에 발생하여 중복일을 고려하면 평균적으로 연중 편 발생일은 약 29.1일임을 알 수 있다. 그러나 실제 바람받이 지역에 강수가 발생한 열역

학적 편 현상 발생 사례 중 약 17%만이 바람의지 사면 저지대에는 강수현상이 발생하지 않았다. 대체로 연중 분포는 모든 강수 사례를 포함한 경우와 비슷하지만 바람의지 지역의 저지대에 강수가 발생하지 않은 경우는 30년 평균 월별 최고 발생빈도도 6월(1.2일)을 제외하면 1일 미만의 발생빈도를 보였다. 시간 자료가 가용하지 않아서 본 연구에서 파악하는데 한계가 있지만, 이는 대체로 한라산의 열역학적 편 현상이 특정 사면 정도의 국지 규모의 지형성 강수 현상 보다는 종관 규모 이상의 저기압 시스템이 접근 시 하루 중 특정 시간대에 집중되어 나타남을 가리킨다. 이와 같이 바람의지 지역에도 강수현상이 나타난 모든 열역학적 편 현상 발생 사례를 포함하여 세부적으로 한라산 사면을 기준으로 나눈 4개 지역 유형별 발생 비율을 살펴보면 북부 고온-남부 강수 형(North warm-South wet type)이 35.6%로 가장 높고, 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 25.4%, 남부 고온-북부 강수 형(South warm-North wet type)이 21.3%, 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type)이 17.7% 등의 순으로 발생빈도가 높음을 알 수 있다. 계절별로 4개 지역 유형 열역학적 편 현상 발생빈도 총합은 봄철(40.6%)>여름철(32.9%)>겨울(14.9%)>가을(11.5%)의 순으로 높아 한라산 지역의 열역학적 편 현상은 주로 봄철과 여름철에 발생함을 알 수 있다. 봄

Table 2. Long-term (1981-2010*) average frequency (days) of annual or seasonal thermodynamic föhn by regional type around Mt. Halla, Korea. Numbers in parenthesis indicate the frequency of thermodynamic föhn without precipitation in the leeward side. *: East-West (1988-2010)

föhn type	Annual	Spring(MAM)	Summer(JJA)	Fall(SON)	Winter(DJF)
North warm-South wet	11.1(1.9)	4.4(0.4)	5.0(1.3)	0.8(0.2)	0.9(0.1)
South warm-North wet	6.7(1.4)	3.0(0.7)	1.8(0.3)	0.9(0.2)	1.0(0.2)
East warm-West wet	8.0(0.9)	2.9(0.2)	2.0(0.3)	1.2(0.2)	1.0(0.2)
West warm-East wet	5.5(1.0)	2.4(0.3)	1.5(0.4)	0.7(0.2)	0.9(0.0)
Total(days)	31.3(5.2)	12.7(1.7)	10.3(2.3)	3.6(0.7)	4.7(0.5)

철과 여름철에는 특히, 북부 고온-남부 강수 형(North warm-South wet type)이 가장 많이 발생하지만, 가을철과 겨울철에는 발생빈도는 모든 유형의 경우에 여름철에 비하여 낮아지지만 4개 지역 유형 중 동부 고온-서부 강수 형(East warm-West wet type)이 주로 발생함을 알 수 있다. 즉, 계절별로 탁월풍이 상이하여 여름철에는 남서풍계열의 기류 유입이 영향을 미치지만, 겨울철에는 주로 북서풍 계열의 기류가 한라산 지역 편 현상을 유발 시킴을 알 수 있다.

한편, 한라산 지역의 열역학적 편 현상의 평균적인 지속기간을 살펴보면 전체 발생의 75%는 1일

동안만 발생하였다가 사라진다. 그러나 일부 특정 사례의 경우에는 편 현상이 최대 6일 정도까지 지속된다(Table 3). 가령, 1987년 7월 6~11일 동안에는 북부고온-남부 강수형(North warm-South wet type) 편히 지속적으로 나타나기도 하였다. 이와 같이 장기간 수일 동안 지속되는 한라산 지역의 열역학적 편은 주로 초여름에 발생하지만, 일부 초겨울에도 드물게 발생한다. 가령, 1978년 6월 15~20일 사이에는 바람의지 지역의 기온이 바람받이에 비하여 1.8~2.8℃ 더 높은 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type) 열역학적 편이 발생하였다. 또한, 2002년 12월 5일에 발

Table 3. Extreme föhn events with the highest intensity (difference of temperature between windward and leeward sides) (upper) or with the longest durations (lower) by each regional type across Mt. Halla, Korea for the period of 1961-2016 (1988-2016) for north-south types (east-west types). T: daily mean temperature, P: daily total precipitation, RH: daily mean relative humidity.

Föhn type	Date (YY-MM-DD)	Intensity ($T_L - T_W$)	Windward (W)			Leeward (L)		
			$T_W(^{\circ}\text{C})$	$P_W(\text{mm})$	$RH_W(\%)$	$T_L(^{\circ}\text{C})$	$P_L(\text{mm})$	$RH_L(\%)$
North warm-South wet	1985-05-05	6.2	18.6	30.7	89.3	24.8	0.0	67.5
South warm-North wet	2010-01-21	6.3	4.9	0.5	70.9	11.2	NO	64.4
East warm-West wet	2003-04-19	6.0	10.5	16.5	93.4	16.5	9.5	88.8
West warm-East wet	2001-11-27	4.2	4.8	0.0	61.4	9.0	0.0	55.4
Föhn type	Period	Duration (days)	Onset temperature($^{\circ}\text{C}$)			Offset temperature($^{\circ}\text{C}$)		
			T_W	T_L	Intensity ($T_L - T_W$)	T_W	T_L	Intensity ($T_L - T_W$)
North warm-South wet	1985-07-06 ~ 1985-07-11	6	24.1	26.9	2.8	25.4	28.7	3.3
South warm-North wet	1978-06-15 ~ 1978-06-20	6	19.9	21.7	1.6	20.6	22.8	2.2
East warm-West wet	2002-12-03 ~ 2002-12-08	6	13.7	16.0	2.3	7.2	8.8	1.6
West warm-East wet	2004-06-16 ~ 2004-06-19	4	21.7	24.2	2.5	22.1	26.0	3.9

생한 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type) 포함 2002년 12월 3~4일, 12월 6~8일 동안 발생한 동부 고온-서부 강수형(South warm-North wet type) 함하여 총 6일 동안 편이 지속하기도 하였다.

월별로 좀 더 세분하여 살펴보면, 한라산 지역의 열역학적 편 현상은 특히 4~6월(한봄~초여름)에 집중하여 발생함을 알 수 있다(Figure 2). 이 시기의 편 발생빈도는 연 전체 발생빈도의 약 54%를 차지한다. 특히, 늦봄(5월) 4가지 지역 유형 편을 모두 합한 발생빈도는 6.9일로 연 평균 발생빈도의 22%를 차지한다. 심지어 특정해(2003년) 5월에는 그 발생빈도가 최대 11일에 달하기도 하였다. 이 시기에 발생하는 열역학적 편 of 지역적 특징을 살펴보면, 4개 지역유형 유형의 발생빈도가 모두 높은 편이다. 30년 평균 5월 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type)은 2.4일 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type)은 1.9일, 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)은 1.3일, 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type)은 1.3일 정도의 발생빈도를 나타낸다.

초여름(6월)에는 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type)의 발생빈도(2.8일)가 더 높아져 다른 지역 유형의 약 2배 이상에 달한다. 또한 특정해(1996년) 6월에는 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type)의 발생빈도가 최대 10일에 달하기도 하였다. 지속기간 측면에서도 1996년 6월 20~24일 동안에는 북부-남부의 기온차가 1.4~3.1℃ 정도인 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type) 편 현상이 5일 동안 지속적으로 발생한 사례도 나타났다. 이러한 결과들을 종합하면, 한라산 편 현상은 장마전선에 의해 한반도 넓은 지역이 강수역에 자주 속하는 여름철 보다는 남풍 계열의 기류가 저위도 아열대 기후대에 속한 제주도에 유입되기 시작되는 늦봄~초여름에 열역학적 편 현상의 발생빈도와 발생강도도 높아지는 것으로 판단된다.

가령, 한라산 산간 지역의 자동기상관측소 자료가 가용한(2003년 이후) 기간 중에 강하게 발생한 여름철 북부고온-남부 강수형(North warm-South wet type)의 편 현상 발생 시(2015년 7월 23일) 위성영상을 살펴보면, 남서-북동 방향으로 저기압

Figure 2. Long-term(1981-2010*) average frequency (days) of monthly thermodynamic föhn phenomena around Mt. Halla. *: East-West (1988-2010).

무리들이 모인 장마전선이 발달한 가운데 그 남부 지역에 자리잡은 제주도로 남풍 계열의 기류가 불어오면서 한라산 산간에 국지적 규모로 구름이 형성되어 있는 것을 알 수 있다(Figure 3a). 이 때 남부 해안에 위치한 서귀포에는 1mm 미만의 약한 강수가 기록되었으나, 산간지역의 진달래밭(해발고도 1,488m)과 윗세오름(해발고도 1,668m)의 경우에는 각각 41.5mm, 37.0mm의 강수가 기록되었다(Figure 3b). 즉, 남풍 계열의 기류가 한라산 남사면을 타고 상승하면서 지형성 강수 현상에 의해 열역학적 편이 발생하였음을 알 수 있다. 그 결과, 북부 해안의 제주지점의 일평균 기온은 남부 해안에 비해 5.2℃ 정도 더 높게 나타났다.

대조적으로 건조한 북풍 계열의 가을철-초봄의 기간에는 한라산 지역 편 현상의 발생빈도가 상대적으로 낮게 나타난다(Figure 2). 특히, 늦겨울(2월)이나 늦가을(11월)에는 한라산 4개 세부 지역 유형 모두 열역학적 편 현상의 발생빈도가 0.3일 이하로 매우 낮은 편이다. 심지어 연구기간 전체 동안 2월 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 편은 1995년 1회를 제외하면 전혀 발생

하지 않았다. 일부 한겨울(1월)에 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type)의 발생빈도가 상대적으로 1.0일 정도로 다른 유형에 비해 높아진다. 2003년과 같은 특정해의 1월 편 현상 발생빈도는 총 8일에 달하였고, 이때 동-서 지역 일평균 기온 차가 1.1~1.6℃에 달하는 편이 4일(1월 25~28일) 지속되기도 하였다. 이는 동아시아 지역에서는 겨울철 시베리아 기단의 영향으로 주로 한랭건조한 북서풍 계열의 바람이 유입되기 때문인 것으로 사료된다.

전체 연구기간 동안 지역 유형별 열역학적 편 발생 시 바람받이-바람의지 지역간 기온차가 큰 상위 기록들을 살펴보면, 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type)과 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type)은 주로 한봄-초여름에 주로 발생한 반면, 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)과 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 편은 주로 겨울철에 발생함을 알 수 있다(Table 3). 즉, 겨울철에 발생하는 강한 열역학적 편은 주로 북풍과 북동풍 계열에 의해서 발생하지만, 봄철~여름철에 발

Figure 3. Satellite imagery (a) and daily mean temperature(upper)/precipitation(lower) (b) around Mt. Halla, Korea for an extreme case of (July 23, 2015) North warm-South wet type of thermodynamic föhn since the AWS-era.

생하는 강한 열역학적 편은 주로 남풍과 남서풍 계열의 바람에 의해서 발생함을 알 수 있다. 한라산 지역의 열역학적 편 발생 시 바람의지와 바람받이 지역 간 기온 차는 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type)과 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type), 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)은 최대 6.0°C 이상의 값을 보이는 반면, 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type)은 4.2°C 정도로 상대적으로 낮다. 이는 대체로 우리나라 계절별로 불어오는 풍계의 특성과 관련성이 있다고 판단된다. 제주도 지역은 중위도 편서풍대에 속하여 늦봄-초여름에는 주로 남서풍 계열의 바람이 불어오고, 겨울철에는 주로 북풍 계열의 바람이 불어 오지만, 상대적으로 연중 북동풍 계열의 바람의 강도는 상대적으로 약하기 때문일 것으로 사료된다.

고전적인 열역학적 편과 한라산 지역의 열역학적 편은 차이점으로는 대체로 강한 편 발생 시 바람받이뿐만 아니라 바람의지 지역에서도 약한 강수가 기록되는 경우도 있다는 것을 들 수 있다(Table 3). 본 연구에서 밝혀진 이러한 강한 편 발생일 기록 대부분은 한라산 산간 지역에서 자동기상관측소가 설치된 연도 이전에 나타나 산간지역의 실제 강수 발생 규모는 알 수 없으나, 양 사면 저지대에 모두 강수가 기록되는 것으로 보아 앞서 언급한 대로 한반도 중부지방에 종관규모의 저기압 시스템이 관통하거나 정체하고 있을 때 발생함을 알 수 있다. 그러나 예상되는 바와 같이 바람의지 지역 저지대 강수가 기록됨에도 불구하고, 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type)을 제외하면 대체로 바람받이 지역 저지대 강수량이 더 많다. 상대습도의 경우에도 대체로 바람받이 사면에 비하여 바람의지 지역에서 20% 이상 감소한다. 즉, 강한 열역학적 편 발생 시 지형성 강우는 주로 바람받이 사면에서 발생하였고, 반대 사

면으로는 다소 건조한 상태로 활강하였다고 추정할 수 있다.

2) 계절별 한라산 지역 강한 편 현상 발생 시 상층 종관 기후 패턴

기상학적 계절별 한라산 기준 4개 종관관측소 기후 자료가 모두 가용한 기간 동안(남-북 사면 간: 1961~2016년, 동-서 사면 간: 1988~2016년) 사면간 기온 차가 큰 상위 10위 열역학적 편 현상일의 종관상태를 합성한 기후도를 살펴보면, 계절별 주요 기단의 배치뿐만 아니라 한반도 지역을 통과하는 이동성 저기압과 이동성 고기압의 상대적인 위치와 강도에 따라 한라산 지역에 발생하는 편 현상의 지역 유형과 편 현상의 강도가 결정됨을 알 수 있다(Figures 4-7).

이동성 저기압과 고기압이 편서풍대를 따라 이동하는 봄철(3~5월)의 경우, 강한 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type) 편 현상 발생 시에는 일본 열도상에 양(+)의 지위고도 아노말리 핵이 발달하고, 하층(850hPa) 대기에서는 이동성 저기압이 한반도 중부 지역을 지나가는 패턴을 보인다(Figure 4a). 이에 따라 한라산 주변에는 반시계 방향의 수렴 패턴과 시계 방향의 발산 패턴에 의해 남풍 계열의 기류가 유입되는 패턴이 나타난다. 또한 이 지역에 양(+)의 가강수량(precipitable water) 아노말리 핵이 나타난다. 특정 경우에는 기류가 한라산 남쪽에서 북쪽으로 기류가 넘어가면서 편 현상의 최대 강도(바람받이-바람의지 지역간 기온 차)가 6.0°C 이상에 이르기기도 한다. 반면, 봄철 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)의 경우에는 한반도 북부에 음(-)의 지위고도 아노말리 핵이 발달하고, 일본 열도의 동쪽 해상에 (+)의 지위고도 아노말리 핵이 자리잡고 있다. 이에 따라 한반도에는 북풍 계열의 바람벡터 아노말리가 이 음(-)의 지위고도 아노말

리의 서쪽 가장자리를 따라 나타난다(Figure 4b).
 다만, 일본 동쪽의 양(+)의 지위고도 아노말리가
 다른 지역 유형에 비하여 약하고, 약한 강수량
 양(+)의 아노말리 구역이 일본 열도 남쪽에만 나
 타나 북부 고온-남부 강수형(North warm-South
 wet type)의 경우에 비하여 편 현상의 강도도 최대
 5.2℃로 낮아진다. 한편, 봄철 동부 고온-서부 강
 수형(East warm-West wet type) 편 현상 발생 시에
 는 일본 열도에 자리잡은 지위고도 양(+)의 핵이
 동-서 방향으로 한반도 남동부 지역까지 확장 발

달하고 서풍 계열의 기류가 유입되고 있음을 알 수
 있다(Figure 4c). 이는 고온건조한 공기가 한라산
 서부 지역에서 동부 지역으로 넘어가기에 유리한
 종관 패턴의 영향으로 이 유형에 의해 동부 지역의
 기온이 최대 6.0℃ 높은 강한 편 현상이 발생하
 기도 한다. 반면 봄철 서부 고온-동부 강수형(West
 warm-East wet type)은 양(+)의 지위고도 아노말
 리 핵이 다소 한반도 북동쪽으로 자리잡고, 제주
 도 남부 해상에는 이동성 저기압이 접근함에 따
 라 반시계 방향의 기류 흐름이 나타날 때 발생한다

Figure 4. Composite of 500hPa geopotential height (solid lines for positive values vs. dotted lines for negative values), 850hPa wind vector (arrows with 5m/s of maximum in a 2.5°by 2.5°grid) and 850hPa precipitable water (shaded grids exceeding + 5 g/kg) anomalies (from 1981-2010 means) for top 10 strong föhn days in spring (March-May) across Mt. Halla, Korea for the period of 1961-2016 (1988-2016): (a) North warm-South wet type, (b) South warm-North wet type, (c) East warm-West wet type, and (d) West warm-East wet type.

(Figure 4d). 이때, 한반도 남쪽에 양(+)의 가강수량 구역이 형성되고, 동풍 계열의 바람이 한반도 남서부지역 방향으로 불어와 한라산 주변 지역에 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 편 현상이 발생에 유리한 조건이 형성됨을 알 수 있다.

여름철에 동아시아 지역에는 장마전선을 포함한 동아시아 여름 몬순 전선대가 대륙과 해양의 경계 지역을 따라 남서-북동 방향으로 발달함에 따라 대체로 하층 제트(low level jet) 형태로 나타나는 남풍 또는 남서풍 계열의 바람벡터 아노말리가 형성될 때 강한 편 현상이 발생한다(Figure 5). 특히, 여름철 북부 고온-남부 강수형(North warm-South

wet type) 편 현상 발생 빈도가 높고, 그 강도는 최대 6.1°C (1964년 7월 15일)에 달하기도 한다. 이 지역 유형의 강한 편 현상이 발생할 때에는 한반도 중부지역에는 장마전선이 자리 잡아 양(+)의 가강수량 구역이 나타나고, 한반도 남쪽에 상대적으로 약한 양(+)의 지위고도 아노말리 핵이 동서 방향으로 길게 발달하는 특징을 보인다(Figure 5a). 특히 남중국 해에는 약한 저기압성 아노말리 핵이 관찰되는데 흔히 태풍이 북상하면서 수증기를 한반도 남부 지역으로 이동시키기도 한다. 즉, 약한 양(+)의 지위고도 아노말리 핵의 북서쪽 가장자리를 따라 남서풍 계열의 기류가 유입될 때 이 유형의 편 현상이 발생함을 알 수 있다. 한편, 여름철 남

Figure 5. Same as in Figure 4, but for in summer (June-August).

부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)의 발생시에는 한반도 남-북 방향으로 음(-)의 지위고도 아노말리 핵이 발달하고, 동쪽 일본 열도 상에는 약한 양(+)의 지위고도 아노말리가 발달한다(Figure 5b). 이때 이 음(-)의 지위고도 아노말리 핵의 서쪽에 위치한 한반도 상에는 북풍 바람벡터 아노말리 구역이 형성된다. 여름철 이 지역 유형 편 현상은 봄철의 경우와 유사하여 최대 5℃ 이상(2014년 7월 10일)의 강도를 보이기도 한다. 한편, 여름철 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 편 현상 발생 시에는 한반도 북서쪽에 음(-)의 지위고도 아노말리 핵의 구역이 동-서 방향으로 발달하여 한반도 중부 지역까지 확장한

다(Figure 5c). 이에 따라 이 지역에 나타나는 저기압성 흐름에 따라 서풍 계열의 바람벡터 아노말리가 형성되지만 양(+)의 가강수량 구역은 일본 열도 남쪽에 나타난 편 현상의 최대 강도는 4.4℃(2005년 6월 11일)로 봄철에 비하여 약한 편이다. 한편, 여름철 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 편 현상이 발생한 경우에는 봄철에 비하여 한반도 북동부 지역에 자리 잡은 양(+)의 지위고도 아노말리 핵의 강도는 약해졌지만, 일본 열도 남쪽에 형성된 저기압성 기류 아노말리 흐름의 강도는 더 커져 강한 동풍이 형성된다(Figure 5d). 그 결과, 연구기간 동안 이 지역 유형 여름철 편 현상 강도는 최대 3.9℃(2005년 6월 11일)로 봄

Figure 6. Same as in Figure 4, but for in fall (September-November).

철보다 더 커진다.

가을철은 앞서 살펴본 바와 같이 연중 한라산 지역에 편 현상 발생빈도가 낮은 기간에 속하는데 주로 이동성 저기압과 고기압의 상대적인 위치에 따라서 편 현상이 발생하는 지역 유형이 달라진다(Figure 6). 강한 가을철 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type)의 편 현상이 발생 시에는 감차카 반도에 지위고도 양(+)의 아노말리 핵이 자리잡고 한반도 중심에는 이동성 저기압이 지나가고 있어 남풍 또는 남서풍 계열의 기류가 한라산으로 유입되는 패턴을 보이고 있다(Figure 6a). 특히 제주도를 포함한 한반도 남부지역에는 동-서 방향으로 양(+)의 가강수량 아노말리 구역

이 자리잡고 있어 한라산 남사면에 지형성 강우현상 발생에 유리한 패턴을 보인다. 반면, 강한 가을철 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)의 경우에는 일본 열대를 거쳐 북동-남서 방향으로 지위고도 양(+)의 아노말리 핵이 동-서로 자리 잡고 있으며, 오호츠크해 주변 지역에 강한 저기압성 음(-)의 지위고도 아노말리 핵이 자리 잡아 황해를 중심으로 약한 북풍 계열의 바람이 한반도 남부 지역으로 불고 있다(Figure 6b). 한편, 가을철 강한 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type)이 발생 시에는 한반도 남부 지역을 중심으로 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 약한 이동성 저기압 핵과 가강수량 양(+)의 구역이 겹쳐져

Figure 7. Same as in Figure 4, but for in winter (December-February).

그 중심에 한라산이 자리 잡고 있다(Figure 6c). 반면, 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type)의 경우에는 캄차카 반도를 중심으로 한반도 지역까지 확장하여 지위고도 음(-)의 아노말리 구역이 넓게 자리 잡고 있으며, 한라산에는 서풍계열의 바람벡터 아노말리가 자리잡고 있어 기존 다른 경우들과는 상이한 패턴을 보이고 있다(Figure 6d).

겨울철에는 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 발달하여 한반도를 경계로 서고동저형의 기압배치가 우세하여 주로 강한 북서풍 계열의 바람이 강하게 분다. 따라서, 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type)을 제외한 다른 3개 지역 유형 편 현상 발생 시 발생빈도가 낮은 편이다. 겨울철에 드물게 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type) 편 현상이 발생한다. 이러한 경우에는 시베리아 기단이 동베이 지역으로 확장하여 이 지역에 동-서 방향의 음(-)의 지위고도 아노말리가 형성된다(Figure 7a). 이때 이 양(+)의 지위고도 아노말리 핵 서부지역에는 양(+)의 강수량 구역에서 발원하는 남풍 계열의 약한 기류가 형성되면서 이 지역 유형 편이 발생한다. 한편 겨울철에 시베리아 고기압이 한반도 방향으로 진출하여 변질될 때에는 강한 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type) 편 현상이 발생한다(Figure 7b). 이때에는 특히 우리나라 남부 지역에 이 음(-)의 지위고도 아노말리 구역이 나타난다. 이 음(-)의 지위고도 아노말리 서쪽을 따라 한랭건조한 북풍 계열의 바람이 상대적으로 따뜻한 황해를 지나면서 한랭습윤한 북풍 계열의 바람으로 변질되어 한라산 북부 지역에 강한 대설이 발생한다. 이러한 종관 기후 조건 하에서는 남동 방향으로 진출하는 한랭습윤한 변질된 기단이 한라산에 의해 차단되어 겨울철 임에도 불구하고 한라산 남-북 지역의 기온 차는 최대 6.3℃에 달하는 편 현상이 발생(2010

년 1월 21일)하기도 한다. 한편 발생 빈도가 가장 높은 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type) 편 현상 발생 시에는 동해 상에 강한 양(+)의 지위고도 아노말리가 자리 잡은 가운데 남서 기류가 유입되고(Figure 7c), 서부 고온-동부 강수형(West warm-East wet type) 편 현상 발생 시에는 일본 열도 상에 약한 음(-) 지위고도 아노말리 구역이 형성되면서 북동풍 계열의 바람벡터 아노말리가 약하게 형성됨을 알 수 있다(Figure 7d).

이를 우리나라 다른 지역에서 발생하는 편과 비교·종합해 보면, 한반도 중부 지역의 편은 탁월풍(편서풍) 또는 기단 접근(오호츠크해 기단)에 의해서 동-서 지역을 중심으로 발생하지만(Lee, 1994; Kim and Hong, 2006), 한라산 지역의 열역학적 편 현상은 주로 여름몬순과 겨울몬순 기단 배치와 종관 규모의 이동성 저기압과 고기압의 상대적인 위치의 영향을 받아 계절별로 상이한 발생지역과 발생강도로 나타남을 알 수 있다. 가령, 태백산맥에서 한랭습윤한 편서풍이나 북동풍이 불 때에는 고위도에서 발원하여 상대적으로 무거워 주로 바람받이 동-서 사면을 중심으로만 강수현상을 나타낸다. 반면, 한라산에 발생하는 열역학적 편 현상은, 고위도에서 발원하는 기류의 영향을 받는 남부 고온-북부 강수형(South warm-North wet type)을 제외하면, 대체로 중위도 남부 지역을 관통하는 중규모 이상의 이동성 저기압의 접근 방향에 따라 한라산 동서남북 다양한 사면을 따라 편 현상이 발생한다. 또한, 한라산 편 현상을 유발시키는 이동성 저기압은 종관 규모 이상이고, 중위도 편서풍을 따라 이동하기 때문에 바람받이 사면 뿐만 아니라, 바람의지 지역에도 시간이 지남에 따라 일부 강수현상이 나타나는 경우도 나타남을 알 수 있다. 21세기 이전에는 장기간 시간자료가 없어 확인하기 어렵지만, 한라산 지역의 편 현상은 하루 전체적으로 나타나는 경우도 있지만 하

루 중 특정 시간대에 집중하여 바람의지 지역에서 만 강수를 유발하여 일자료에서 나타난 강도 이상의 강한 고온현상이 발생할 것으로 짐작된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 약 30년 동안 관측한 지상 및 상층 종관 기후 자료를 분석하여 한라산 지역에서 발생하는 열역학적 썬(thermodynamic föhn) 현상의 시공간적 패턴과 강한 썬 현상이 발생하였을 때의 동아시아 주변 지역의 종관 기후 패턴의 특징을 분석하였다. 특히, 각 계절별로 한라산 지역별 강한 고온현상을 유발하는 열역학적 썬 현상발생 일들의 평년 대비 상층 종관 기후 요소(예, 대류권 중층 지위고도, 대류권 하층 바람, 수증기)의 아노말리를 합성한 기후도를 작성하여 한라산 각 지역 유형별 썬이 발생할 때 전형적으로 형성되는 종관 기후장의 특징을 분석하였다. 그 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 한라산 지역에서 바람받이 지역에서는 강수를 동반하고, 바람의지 지역에서는 고온건조한 조건이 형성되는 열역학적 썬 현상은 연중 한봄~초여름(4~6월)에 주로 발생함을 알 수 있다. 따라서 이 시기에는 한라산 바람받이 지역에 지형성 강수에 의한 하천 범람이 자주 발생하는 반면, 바람의지 지역에는 고온현상이 발생하여 가뭄, 열파 등의 피해를 유발할 가능성이 높으므로 한라산 사면별로 차별화된 위험기상 감시 시스템이 필요하다고 판단된다.

둘째, 사계절 종관 기후장 분석 결과에 따르면, 특히 봄철에 한반도 중부지역에 이동성 저기압이 지나가면서 남서풍 또는 남풍 계열의 기류가 강하게 유입되거나, 여름철에 한반도 중부지역에 자리잡은 장마전선을 따라 발달하는 강한 하층 제

트(low level jet)에 의한 강한 남서풍 계열의 기류가 유입될 때에는 한라산의 바람받이 사면에 국지적 규모의 지형성 호우 현상을 유발시켜 지역간 6℃ 이상의 기온차를 유발하는 강한 썬 현상이 발생함을 알 수 있다. 이 시기에는 4가지 지역 유형 중 북부 고온-남부 강수형(North warm-South wet type) 심지어 동부 고온-서부 강수형(North warm-South wet type)의 고온건조한 썬 현상의 발생빈도가 높아질 뿐만 아니라 썬 현상 강도도 높게 나타남을 알 수 있다. 심지어 장마전선이 남부 지역에 정체할 때에는 최대 6일 정도까지 고온건조한 썬 현상이 한라산 북부 지역에 지속적으로 발생하기도 한다. 따라서 봄철과 여름철에는 특히 한라산 기준 북부와 동부 지역을 중심으로 고온건조한 썬 현상에 의한 피해를 감시하는 것이 필요함을 알 수 있다.

셋째, 서고동저형의 기단배치가 탁월하게 나타나는 겨울철에는 한라산 지역 썬 현상 발생빈도와 발생강도가 전체적으로 감소하지만, 예외적으로 시베리아 기단이 중국 북동부 동베이 지역으로 진출하여 한반도 서부 지역을 중심으로 북풍 계열의 강한 바람이 불 때에는 최대 6℃ 이상의 기온차를 유발하는 남부 고온-북부 강수형(North warm-South wet type) 썬 현상이 발생 가능함을 알 수 있다. 또한, 겨울철 우리나라 남부 지역에 저기압이 지나갈 때에는 강한 북서풍 계열의 바람이 유입되면서 최대 6일까지 지속되는 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type) 썬 현상이 발생하기도 한다. 이 겨울철 남부 고온-북부 강수형(North warm-South wet type) 또는 동부 고온-서부 강수형(East warm-West wet type) 썬 현상은 북부 또는 서부 지역에 폭설, 남부 또는 동부 지역에 겨울가뭄 등의 피해를 유발할 수 있으므로 이에 대한 감시도 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 열역학적 썬 현상이 주요 산맥 주

변 지역뿐만 아니라 해발고도가 높은 한라산과 같은 산악지역에서도 특정 상층 종관 패턴하에서 동적 기후인자(예. 기류의 흐름)와 정적 기후인자(예. 사면, 해발고도 등의 지형요소)의 상호작용에 의해 발생하는 국지기후 현상임을 잘 보여주고 있다. 즉, 지금까지 편 현상에 관한 기존 연구들은 주로 태백산맥 주변의 높새바람에 치중되었지만 이 연구는 향후 한라산뿐만 아니라 우리나라 여러 산간 주변 지역으로 확대 연구될 필요성이 있음을 제시하고 있다. 특히, 남한에서 해발고도가 가장 높은 한라산이 섬의 중심에 자리 잡은 제주도는 21세기 기후변화가 가장 뚜렷하게 나타날 지역으로 알려져 있다. 가령, 온난화가 지속되면 21세기말에는 제주도 해안 저지대에 무더운 여름철 기간이 수개월 이상 늘어나고, 아열대 기후대도 점차 해안 저지대에서 중산간 지역으로 확산될 것으로 전망된다. 따라서 현재 한라산 지역의 열역학적 편 현상이 여름철뿐만 아니라 늦봄과 초가을에도 고온 현상과 관련하여 농업, 보건, 에너지 등 제주도 지역 주민의 의식주 생활에 어떤 영향을 미치고 있으며, 향후 어떤 변화가 전망되는지에 대한 후속 연구들이 필요하다고 판단된다.

사사

이 논문은 2016학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Barry, R.G., 2008, *Mountain Weather and Climate*, Cambridge University Press.
- Brinkmann, W. A. R., 1971, What is a foehn?, *Weather*, 26, 230-239.
- Choi, G., 2011, Variability of temperature lapse rate with height and aspect over Halla mountain, *Journal of Climate Research*, 6(3), 171-186 (in Korean).
- Choi, G., 2013, Spatial patterns of seasonal extreme precipitation events in Mt. Halla, *Journal of Climate Research*, 8(4), 267-280 (in Korean).
- Choi, G., 2015, Asymmetric changes in intra-seasonal means and extreme events of winter temperature in the Republic of Korea, *Journal of Climate Research*, 10(2), 137-151 (in Korean).
- Choi, G., Lee, B., Kang, S., and Tenhunen, J., 2010, Variations of summertime temperature lapse rate within a mountainous basin in the Republic of Korea -A case study of Punch Bowl, Yanggu in 2009-, *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 16(4), 339-354 (in Korean).
- Choi, S. S., Moon, S. E., and Ha, C. H., 1997, Climatological characteristics of the Nopsae wind, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33(2), 349-361 (in Korean).
- Cook, A. W. and Topil, A. G., 1952, Some examples of chinooks east of the mountains in Colorado, *Bulletin of American Meteorological Society*, 33(2), 42-47.
- Drechsel, S. and Mayr, G. J., 2008, Objective forecasting of foehn winds for a subgrid-scale Alpine valley, *Weather and Forecasting*, 23(2), 205-218.
- Gedalof, Z. E., Peterson, D. L., and Mantua, N. J., 2005, Atmospheric, climatic, and ecological controls on extreme wildfire years in the north-western United States, *Ecological Applications*, 15(1), 154-174.
- Geiger, R., 1965, *The Climate Near the Ground*, Harvard University Press.
- Hann, J. V., 1866, Zur frage ueber den ursprung des foehn, *Zeitschrift der österreichischen Gesellschaft*

- für Meteorologie*, 1(1), 257-263.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Kang, M. S., 1989, The climatological characteristics of the Foehn phenomena in winter in the Yeongdong region, *Research Bulletin of Catholic University of Taegu-Hyosung*, 38(1), 209-227 (in Korean).
- Kim, H. D., 2001, Climatological characteristic of Nopsae event in Korea, *Journal of Nakdonggang Environmental Research Institute*, 6(1), 91-97 (in Korean).
- Kim, Y. and Kim, M. K., 2013, A study on Foehn over HongCheon area of Gangwon province in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 48(1), 37-55 (in Korean).
- Kim, Y. S. and Hong, S. G., 1996, A study of quasi-foehn in the Yeongdong-district in late spring of early summer, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 32(4), 593-600 (in Korean).
- Lee, H. Y., 1994, The Nopase, a foehn type wind over the Young Suh region of central Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 29(3), 266-280 (in Korean).
- Lee, J. R., 1980, A study on the regional difference of daily highest temperature during summer in Yeongdong and Yeongseo region, *Journal of the Korean Geographical Society*, 21(1), 1-15 (in Korean).
- Lee, J. R., 1997, A study on the distribution of precipitation with altitude according to the surface pressure type -The case of the east slope of Taegwallyong area-, *Journal of Korean Association of Geographic and Environmental Education*, 5(1), 111-123 (in Korean).
- Lockwood, J. G., 1962, Occurrence of föhn winds in the British Isles, *Meteorological Magazine*, 91, 57-65.
- Oh, Y. S. and Choi, G., 2014, Synoptic characteristics of the spring heavy rainfall events across Mt. Halla by the approach of warm conveyor belts, *Journal of Climate Research*, 9(3), 193-205 (in Korean).
- Oke, T.R., 1978, *Boundary Layer Climate*, Cambridge University Press.
- Seibert, P., 1990, South foehn studies since the ALPEx experiment, *Meteorology and Atmosphere Physics*, 43, 91-103.
- Song, H. Y., 2000, *Characteristics of Temperature Distribution in Mountain Valleys in Winter*, Hanul Academy Press (in Korean).
- Strauss, S., 2007, An ill wind: the Foehn in Leukerbad and beyond, *Journal of the Royal Anthropological Institute*, 13(1), 165-181.
- Yoshino, M., 1975, *Climate in a Small Area*, University of Tokyo Press.

책임편집: 이승호

영문교열: 이은걸