

우리나라 산악분지의 여름철 기온감률 변화*
- 2009년 양구 편치볼을 사례로.

Variations of Summertime Temperature Lapse Rate within a
Mountainous Basin in the Republic of Korea *
- A case study of Punch Bowl, Yanggu in 2009 -

* 본 연구는 한-독 국제 협력 사업(TERRECO)의 관측 자료 제공과 기상청 기후변화 감사·예측 및 국가정책지원 강화사업(Grant RACS 2010-4014)의 지원으로 수행되었다.

최광용** · 이보라*** · 강신규**** · 존 텐후넨*****
Gwangyong Choi** · Bora Lee*** · Sinkyu Kang**** · John Tenhunen*****

** 강원대학교 환경과학과 연구교수 (Research Professor, Department of Environmental Science, Kangwon National University, email: tribute@hanmail.net)

*** 독일 바이루트 대학 식물생태학과 박사수료 (Ph.D. Candidate, Department of Plant Ecology, University of Bayreuth, Germany, email: puplebr@gmail.com)

**** 강원대학교 환경과학과 부교수 (Associate Professor, Department of Environmental Science, Kangwon National University, email: kangsk@kangwon.ac.kr)

***** 독일 바이루트 대학 식물생태학과 교수 (Professor, Department of Plant Ecology, University of Bayreuth, Germany, email: john.tenhunen@uni-bayreuth.de)

요약: 본 연구에서는 2009년 여름 강원도 양구군 해안분지(편치볼)에 구축한 자동기상관측망 기온자료를 분석하여 여름철 하루 중 시간진행 또는 일기패턴에 따른 산간분지 내 기온감률 변화 특징을 밝히고자 한다. 산정부와 분지 내 사이에 형성되는 여름철 일평균 기온감률은 $-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이나, 일변화에 의해 새벽 6시경에 $-0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 의 최저, 오후 4~5시 경에 $-0.85^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 의 최고값을 나타낸다. 종관일기 패턴 별 일평균 기온감률은 강수일($-0.63^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), 집중호우일($-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), 약간 구름 낀 날($-0.47^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), 맑은날($-0.39^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) 순으로 높게 나타난다. 여름철 맑은날 새벽에는 분지 내에서 기온역전현상으로 냉기호가 형성되는 반면, 호우일에는 구름에 의한 복사냉각효과 감소로 온기호가 형성된다.

주요어: 산지기후, 기온감률, 종관일기패턴, 해안분지(편치볼)

Abstract

In this study, diurnal and intra-seasonal variations of summertime temperature lapse rate (TLR) by synoptic weather conditions in a mountainous basin are examined based on hourly temperature data observed in 2009 summer at an Automatic Weather Station (AWS) network deployed in Haeon basin (called Punch Bowl), Yanggu basin in the Republic of Korea. Summertime average TLR between the top and bottom of the basin is $-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Due to its diurnal variations, TLR shows the lowest by $-0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ at 6AM, while it maximizes up to $-0.85^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ between 4PM~5PM. Comparisons of daily average TLRs by synoptic weather patterns reveal that the magnitude of TLRs is greatest in the order of rainy days ($-0.63^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), heavy rainfall days ($-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), partly cloudy days ($-0.47^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), and sunny days ($-0.39^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). At dawn on sunny days in summer, strong cooling pools accompanying temperature inversion layers are formed within the basin, while on heavy rainfall days, warming pools are observed due to relatively low TLRs associated with the reduction of surface radiation cooling by clouds.

Key words: Mountain climate, temperature lapse rate, synoptic weather patterns, Haeon basin (Bunch Bowl).

1. 서론

우리나라 63% 이상은 산지지역으로 산지기후에 대한 정보는 농업, 토양, 산림자원 경영에 매우 중요하다. 1970년대에 들어서 우리나라 정규 기상관측소는 약 80개 이상으로 증가하였으나, 주로 도시지역을 중심으로 수 백 킬로 간격으로 설치되어 복잡한 한반도 산악지역의 기상 예보를 하는 데에는 많은 어려움이 있었다. 이러한 점을 보완하기 위하여 1990년대 초반부터 우리나라 기상청에서는 자동기상관측 장비(Automatic Weather System; AWS)를 설치하여 국지 지역의 실시간 기상현황을 파악하고자 노력해왔다. 그 결과 현재 약 400개 이상의 설치된 자동기상관측소로 구성된 국지기상 관측망을 통해서 수 십 킬로 공간간격의 고해상도 기상자료를 확보할 수 있게 되었다. 그러나 이러한 자동기상관측 장비들도 대부분 거주지 주변에 설치되었고, 상대적으로 산악지역에 설치된 자동기상관측 지점 수는 매우 적은 편이다. 또한 우리나라 자동기상관측망은 관측환경 측면에서도 표준화가 되어 있지 않은 경우도 많고, 전문 관리 인력의 부족으로 자료가 누락된 경우도 많다. 가령, 관리상 이유로 기온관측 센서가 관공서 옥상에 설치된 경우에는 자료의 지역대표성 문제점이 있으며, 집중호우 시 잦은 강수 관측기기의 고장과 수리의 지연에 의해 자료가 누락되어 국지지형과 집중호우와의 관련성을 밝히는 데에는 많은 한계점이 있다. 그러나 국가기관이 운영하는 관측망 이외에 개인 연구자가 직접 산지지역에 직접 고해상도 자동기상 관측망을 설치·운영하는 데에는 많은 비용이 든다. 따라서 지금까지 우리나라 산지기후 연구는 매우 제한적으로 이루어질 수밖에 없는 상황에 처해져 있었다.

이와 같은 어려운 여건에도 불구하고 국내 일부 연구자들은 직접 관측장비를 산악지역에 설치하여 산악기후의 특징을 밝히려는 노력을 해오고 있다. 지리학계 기후학 분야에서는 처음으로 송호열(2000)이 경기도 양수리 산간곡지의 20여 개 지점에서 관측한 겨울철 기온 자료를 바탕으로 날씨별 동계 산간곡지의 기온분포 특징에 관하여 보고하였다. 농업기상학 분야에서는 우리나라 농작물의 생육기후환경에 대한 고해상도 전자기후도를 만들기 위해 국지기상관측을 시도하였다(윤진일 등, 1999, 2000, 2001; Chung *et al.*, 2006, 2009; 서희철 등, 2008; 윤진일, 2009). 특히 본 연구에서 핵심주제로 삼고 있는 산간분지의 기온분포와 관련하여 윤진일 등(2000), Chung *et al.* (2006, 2009), 서희철 등(2008)은 제주도의 오름 내부나 우리나라 남부지역의 산간계곡 내 기온역전현상을 관측하여 한반도 산악지역 상세 기온자료 추정을 위한 경험적 모수값들을 산출하였다. 그러나 이 연구들에서는 산악기후에 큰 영향을 미치는 종관기후 변화를 고려하지 않고 단일 통계모형을 개발하려 했기 때문에 추정된 기온 감률에는 많은 불확실성이 내포되어 있을 것으로 판단된다. 종합적으로 보면 국내에서는 산지기후학 또는 농업기후학 분야의 전문가들이 매우 부족하며, 연구자들도 거의 한 두 개의 연구실에 집중되어 있다. 또한 일부 이루어진 산지기후 관련 연구주제 측면에서도 기존 연구들은 주로 산악지역의 농작물 재배와 관련된 미기상학적 접근방법을 취하였기 때문에 지형과 같은 정적요소 이외에 종관규모 이상의 대기흐름과 같은 동적 기후인자를 고려한 산지기후에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다.

해외에서는 이러한 산지기후와 정적 또는 동적 기후인자와의 관련성에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다(Chickering, 1884; Dunbar, 1966; Jiang, 1981; Yoshino, 1984; Kondo *et al.*, 1989; Barr and Orgill, 1989; Kuwagata and Kimura, 1995; Dodson and Marks, 1997; Iijima and Shinoda, 2000; Lundquist and Cayan, 2007). 해외 연구자들은 실제 산악지역에 기상관측시스템을 설치하고 이를 모니터링하여 기온, 강수, 습도 등 다양한 기후요소들 간의 관련성에 대해서 연구를 하였다. 최근에는 중규모 기상조건에

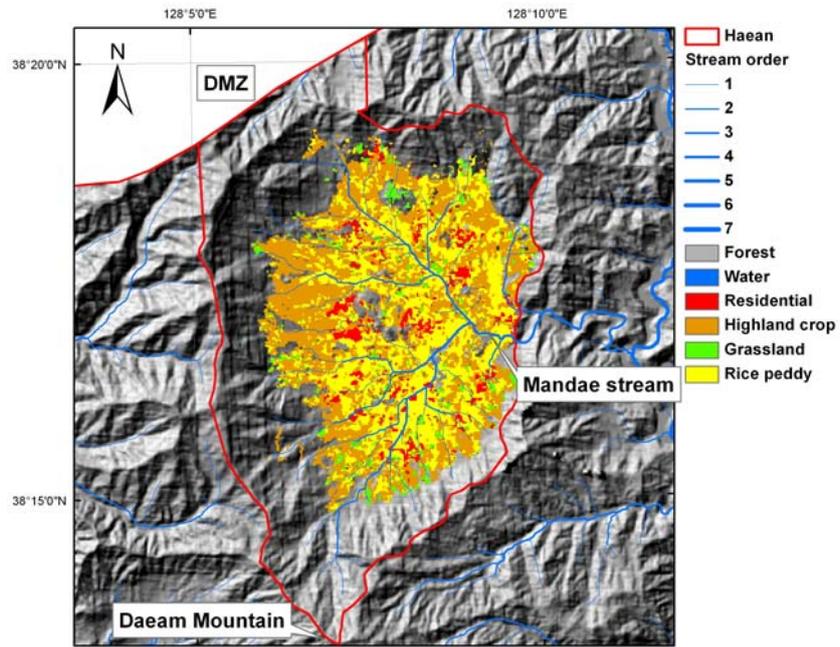
다른 산악 미기상 변화를 추정하기 위한 노력들이 활발하게 이루어지고 있다(예, Iijima and Shinoda, 2000). 해외에서는 관측자료 기반 연구 이외에도 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM)자료를 이용하여 관측이 이루어지지 않은 산악지역의 기후자료를 추정하는 다양한 역학적 또는 통계적 내삽모형들이 개발되어 오고 있다. 미국 오레곤 주립대에서는 주정부의 지원으로 공간분석청을 설립하고 관측이 이루어지지 않은 산악지역 기후를 추정하기 위해 관측자료 기반 회귀경험 내삽방법 알고리즘인 Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM)을 개발하여 연속적인 기후도를 제작하기에 이르렀다(Daly *et al.*, 1994). 미국 몬태나 대학 Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG)도 한 지점의 일 최고, 최저기온, 강수량 실측자료를 토대로 주변 산악지역의 기온, 강수량, 일사량, 습도를 추정하는 Mountain Climate Simulator (MT-CLIM)를 개발하였다(Running *et al.*, 1987; Thornton *et al.*, 1997). 이러한 기후자료 추정 모델들이 정확한 산악 분지내 기온변화를 추정하기 위해서는 입력 자료로 사용되는 해발고도 상승에 따른 기온변화, 즉 기온감률의 정확도가 중요하다(Running *et al.*, 1987). 산지지역의 기온감률은 위도, 해발고도, 지형과 같은 정적요소 이외에도 종관일기 등의 동적요소에 따라 변하지만, 기존 모델들에서는 중규모 이상의 종관일기패턴에 따른 차이에 대해서는 고려하지 못하고 있어 개선의 여지를 남겨두고 있다(Glassy and Running, 1994).

2009년 한국(강원대학교)-독일(바이루이트 대학) 교류사업의 일환으로 “복잡한 산악지형과 생태계 이질성(Complex TERRain and ECOlogical heterogeneity; TERRECO)” 프로젝트(<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/terreco/>)에 관한 국제 학술 교류 및 연구 조사팀이 구성되었다. TERRECO 사업에서는 강원도 양구 해안분지(편치볼)내 생지화학 순환 특성을 밝히기 위해 다양한 분야의 연구자들이 참여하여 자료 관측망을 형성해 가고 있다. 본 연구에서는 제 1차년도 TERRECO 프로젝트를 통해 설치된 국지기상 자동관측망에서 수집한 2009년 여름철 기상자료를 분석하여 해발고도 상승에 따른 우리나라 산악분지 내 여름철 기온감률의 변화 특징을 밝히고자 한다. 본 연구에서는 수 킬로미터 간격의 시간별 고해상도 국지기상관측망의 기온자료를 분석함으로써 여름철 종관기상별 하루 중 시간진행에 따른 기온감률의 상세한 변화양상을 밝히고자 한다.

2. 연구지역 및 연구자료

1) 연구지역

강원도 양구군 해안면은 태백산맥 기준 북부영서 비무장지대(DMZ)에 인접한(해안면 마을회관 기준 127°E 38°N) 우리나라의 대표적인 타원형 형태의 산악분지이다(Figure 1a). 해안분지 내 저지대의 해발고도는 약 450m의 내외이며, 분지를 둘러싼 산 능선의 해발고도는 대체로 1,000~1,300m의 범위를 이룬다. 해안분지 능선 북서쪽에 위치한 을지전망대(1,049m)에서 반시계 방향으로 가칠봉(1,242), 대우산(1,179m), 도솔산(1,148m) 등이 분지를 둘러싸고 있고, 남쪽으로는 대암산(1,304m)이 자리 잡고 있다. 한국전쟁 당시 미군 중군기사가 해안분지 모양을 보고 처음 편치볼(Punch Bowl)이라고 부른 이래 다른 나라에는 이 명칭으로 더 잘 알려져 있다. 이 지역의 분지형성 매커니즘과 관련하여 지금까지는 경암과 연암의 차별 침식과정이 가장 개연성 있는 가설로 이해되고 있다(김봉균 · 박용안, 1967; 권영식 등, 1990). 해안분지 내 저지대 하천주변 퇴적물에서는 쥐라기 화강암이 화학적 풍화된 새프롤라이트(saprolite)가 관찰된다. 해안분지를 둘러싸고 있는 주변 산지지역에서는 풍화에 강한



(a)



(b)

Figure 1. Topography, land cover/land use, and stream systems in Haeon basin, Yanggu in the Republic of Korea (a) and the landscape of the basin including an Automatic Weather Station (AWS #1) installed at Ulchi Observatory (1,050m from mean sea level) (b).

선캄브리아기의 변성암 복합체가 흔히 관찰된다.

해안분지를 둘러싼 산정부에서 분지 내 저지대까지는 전형적인 산록완사면이 발달되어 있다(Figure 1b). 해안분지의 총 면적은 44.7km²로 동서 거리는 약 8.5km이고, 남북 거리는 약 7km으로 거의 원형에 가까운 모습을 보여준다. 해발고도 500m이하에서는 서쪽에서 발원하여 동쪽으로 흘러나가는 만대천 주변지역을 중심으로 벼농사가 이루어지고 있다. 해발고도 500~750m의 산록완사면을 따라서는 배추, 무, 감자 등의 고랭지 농업활동이 대부분 이루어지고 있다(Figure 1a). 해발고도 750m이상에서는 사면경사가 증가하여 개간이 되지 못한 채 주로 혼합림으로 덮여 있다. 해안분지 지역은 고산기후의 영향을 주로 받으며 고랭지 채소는 주로 5월에 파종되어 7월말에는 모두 수확된다. 고랭지 작물 수확 이후에는 대부분의 산록완사면이 나지로 드러나 최근에는 집중호우가 발생할 때에는 많은 토양 유실로 인하여 소양강에는 탁류 문제가 발생하기 시작하였다(이진용, 2009).

2) 자동기상 관측망

TERRECO 학술교류사업에는 2009년 여름철 이래 약 50여명의 한국-독일 연구자들이 참여해 강원도 양구 해안면 편치불의 생지화학순환에 관한 다양한 관측망을 구축해 나가고 있다. 본 연구에서는 한국-독일 TERRECO 프로젝트에서 수 킬로 이내의 공간해상도로 구축한 고해상도 자동기상 관측망에서 수집한 여름철 기온, 강수, 상대습도, 풍향, 풍속 등 기상자료를 분석하였다. 해안면은 우리나라에서 유일하게 민간인 출입통제선 안에 위치한 지역이기 때문에 기상관측 지점의 선정에도 많은 군사적 제약을 받았다. 군부대와 마을 주민과의 협의 하에 5월 초~6 월초 사이에 주로 경작지 주변 및 산림지역, 산정부 등 12개 지점에

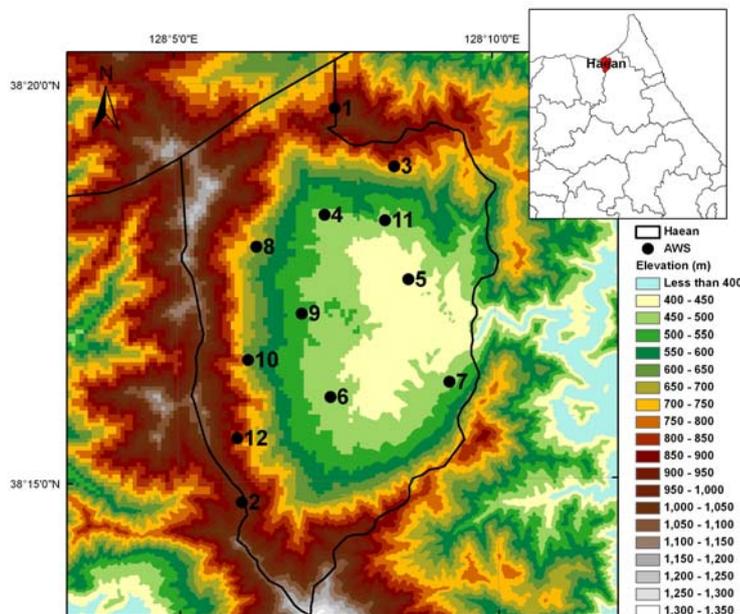


Figure 2. Locations of 12 Automatic Weather Stations (AWS) deployed in Haean basin, Yanggu in the Republic of Korea through the TERRECO project in 2009.

Table 1. Observational environments at the Automatic Weather Systems (AWS) installed in the Haean basin, Yanggu in the Republic of Korea through the Korea-Germany TERRECO project in 2009.

AWS #	Nick name (Elevation)	Date/ Missing	Latitude /Longitude	Environments
1	Ulchi observatory (1,050m)	June 1 /No	38.3279°N 128.1253°E	Northernmost highland. Open with less vegetation. Frequent shuddering due to strong wind
2	Dosol military base (977m)	July 6 /No	38.2457°N 128.0998°E	Southernmost highland. Covered with grassland. A flat land facing a cliff in the northern side. Now military base is being built nearby.
3	Sapflow site (653m)	May 6 /No	38.3156°N 128.1407°E	Mixed forest area with more deciduous at 600m of elevation. Water amount is observed in a small stream nearby.
4	TERRECO house (483m)	May 6 /No	38.3056°N 128.1223°E	Flat grassland
5	Punch Bowl guest house (432m)	May 6 /No	38.2919°N 128.1440°E	In the middle of highland crop. Moved to # 12 at the end of July.
6	Han's rice field (477m)	May 7 /No	38.2676°N 128.1233°E	On the banks between rice paddy covered with weeds.
7	Professor Ock's site (561m)	July 8 /No	38.2705°N 128.1545°E	On the hill. Covered with trees but not higher than the AWS. Soy bean field nearby.
8	Glass area (648m)	May 29 /No	38.2991°N 128.1044°E	No vegetation within 2 meters, but farther covered with forest and highland crops.
9	Fruit area (495m)	May 30 /No	38.2850°N 128.1161°E	Shrub area near the road. Tall shrub was trimmed in summer.
10	Western forest (631m)	May 30 /No	38.2755°N 128.1019°E	Inflection point area between forest and highland crop field.
11	Kang's rice field (504m)	June 10 /No	38.3043°N 128.1381°E	On the bank between rice paddy.
12	Top south military (802m)	July 31 /No	38.2591°N 128.0988°E	Forest areas near the road. Tall trees were removed. Data missing occurred frequently.

기상관측 장비를 설치하게 되었다(Figure 2). 12개 지점 중 AWS #1(1,050m)과 #2(977m)는 각각 울지전망대의 개활지와 도솔산의 군부대 앞 등 산정부에 설치되었다. AWS #5(432m),

#6(477m), #4(483m), #9(495m), #11(504m)는 상대적으로 해발고도가 낮은 분지중앙의 저지대 전담 주변의 풀밭에 주로 설치되었다. 이외의 AWS #3(653m), #8(648m), #10(631m)는 주로 산록완사면의 고랭지 채소밭 주변이나 산림지역에 설치되었다. 연구자들이 머물렀던 숙소의 고랭지 채소밭 주변에 설치되었던 AWS #5(432m)의 경우에는 7월말에 산악도로 주변의 산림지역에 위치한 #12 지점(821m)으로 이동 설치되었다. 각 자동기상관측 지점의 상세한 관측환경 및 자료 관측기간에 대한 설명은 Table 1에 요약되어 있다.

본 연구에서는 해안면에서 일평균기온이 20°C 이상 되는 기후학적 여름철에 해당하는 6월 초순부터 9월 중순 사이에 자동기상지점에서 관측된 기온자료를 주로 분석하였다. 12개 지점에 설치된 Delta-T 사의 WS-GP1 weather station (Figure 2)에서는 기온 이외에도 강수, 풍향 및 풍속, 상대습도, 일사량 등을 1분 간격으로 실시간으로 관측한다. 기온 센서의 경우 최대 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 강수 센서 최대 0.2mm/tip, 풍속센서 최대 기록된 값의 1.1%, 풍향 센서 $\pm 4^{\circ}$, 상대습도 센서 최대 2.5%, 일사량 센서 최대 $\pm 5\%$ 의 오차 범위를 가진다 (<http://www.delta-t.co.uk/>). GP1 데이터 로거를 이용하여 1개월에 한번 정도로 자료를 다운로드 받아 데이터베이스를 구축해 오고 있다. 본 연구에서는 1분 간격으로 관측한 자료를 0시부터 매 30분 간격으로 평균한 자료를 사용하였다. 특히 분지 내 해발고도가 낮은 지역에 위치한 관측 지점들(AWS #4, #6, #9) 평균 기온값과 산정부에 위치한 지점(AWS #1; Figure 2)의 평균 기온의 차이를 해발고도 차로 나누어 기온감률($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)을 산출하여 시간별 또는 일별로 종관 기상상태에 따라 비교하였다.

연구기간 동안의 일별 종관기상 상태는 기상청 산하 춘천과 인제 정규관측소에서 수집한 강수량 일평균 자료를 사용하여 2009년 여름철을 크게 맑은날, 약한 구름이 낀 날, 강수일, 집중 호우일로 구분하였다. 여름철 강수 시계열에서 일별 총 강수량이 0~80mm과 80mm 이상일 때를 각각 강수일 및 집중 호우일로 구분하였다. 강수발생일의 하루 전후의 경우에는 약간 구름이 낀 날로 간주하였으며, 그 이외의 연속 무강수일은 모두 맑은날로 간주하였다.

3. 여름철 시간 별 기온감률 변화

산정부의 울지전망대(해발고도 1,050m)와 분지 내 저지대에 위치하고 연구기간 내 자료 누락이 없는 AWS # 4, #6, #9 지점들(평균 해발고도 485m)의 평균기온을 비교하면, 여름철 산정부의 일평균기온은 16.3°C 이고, 분지 내 저지대의 일평균기온은 19.4°C 로 해발고도 증가에 따른 여름철 전 기간 평균 기온감률은 $-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 나타난다(Table 2). 여름철 평균 산정부(분지 내 저지대) 일 최저기온은 14.4°C (15.8°C)이고, 일 최고기온은 19.0°C (23.6°C)으로 분지 내 저지대의 하루 중 일교차는 7.8°C 로 나타난다. 산정부와 분지 내의 일 최고기온 차이(4.6°C)는 일 최저기온 차이(1.3°C)의 약 3.5배에 달한다. 분지 내 저지대의 일교차(7.8°C)는 산정부의 일교차(4.6°C)보다 약 1.8배 높게 나타난다. 이와 같이 산정부보다 해발고도가 낮아지는 분지 내부일수록 일교차가 커지는 현상은 대기 중 공기분자의 양이 증가하는 패턴과 관련이 깊다고 알려져 있다(Barry, 2008). 특히 분지 내에서는 주간엔 지표가 가열되면 공기분자들의 운동이 제한된 분지 공간 내에서 활발해져 주간엔 일 최고기온이 뚜렷하게 증가한다.

하루 중 기온변화 곡선을 살펴보면, 야간에는 산정부와 분지 내 저지대 모두 기온이 서서히 낮아져서 유사한 기온변화폭을 보이거나, 주간에는 분지 저지대의 기온상승 정도가 산정부 기온변화폭에 비하여 훨씬 더 크게 나타남을 알 수 있다(Figure 3). 분지 내 저지대의 경

Table 2. Comparisons of summer average daily maximum (Tmax), mean (Tmean) and minimum (Tmin) temperatures (°C), diurnal temperature range (DTR; °C), and temperature lapse rate (TLR; °C/100m) between the bottom (A; 485m from m.s.l) and top (B; 1,050m from m.s.l.) in Haeon basin, Yanggu in the Republic of Korea. Time indicates when the Tmax and Tmin are recorded. N/A: data is not available.

Variable	Bottom (A) (485m)	Time (A)	Top (B) (1,050m)	Time (B)	Difference (A-B)	TLR (°C/100m)
Tmax	23.6	15:00	19.0	14:00	4.9	-0.86
Tmean	19.3	N/A	16.3	N/A	3.0	-0.53
Tmin	15.7	05:00	14.4	06:00	1.3	-0.23
DTR	7.8	N/A	4.6	N/A	3.5	0.63

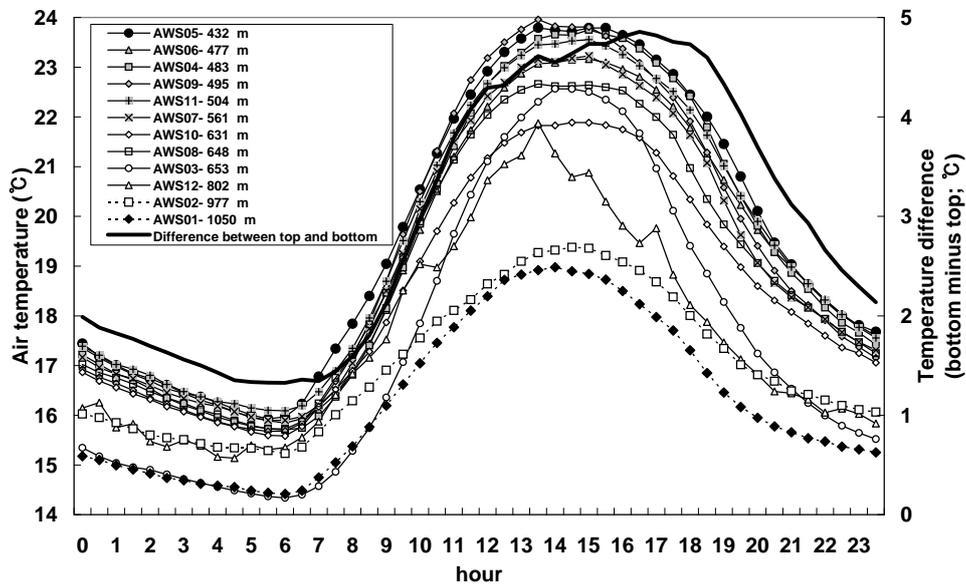


Figure 3. Diurnal progression of summertime (June 1-September 15) air temperature (thin curve with symbols) and differences of temperature (thick curve without symbols) between top (AWS #1) and bottom (AWS #4, #6, and #9) of Haeon basin, Yanggu in the Republic of Korea.

우에는 일출~정오 사이, 일몰~자정 사이에 빠른 기온상승과 하강현상이 각각 나타난다. 오전 7시~정오 사이에 산정부에서는 시간에 따른 기온상승률은 $+0.8^{\circ}\text{C}/1\text{시간}$ 이지만, 분지 내 저지대의 기온상승률은 $+1.4^{\circ}\text{C}/1\text{시간}$ 으로 1.8배 이상 높게 나타난다. 그 결과, 정오의 분지 내 저지대와 산정부의 기온차는 오전 7시 기온차에 비하여 3.5 배 이상 증가한다. 주간 산정부의 경우에는 직접 자유대기와의 혼합효과가 탁월하지만 분지 내의 공기는 중위도 편서풍의 직접적인 영향을 덜 받아 일 최고기온이 나타나는 시각이 지연된다(Richner and Phillips, 1984). 해안분지에서 산정부에서는 여름철 일 최고기온이 오후 2시경에 나타나지만 분지 내 저지대에서는 오후 3시경에 나타난다. 또한, 분지 내 저지대의 기온은 서서히 하강하기 때문에 산정부와 분지 내 저지대 지역의 기온차가 가장 큰 시각도 오후 4~5시경의

로 더 늦게 나타난다. 산정부에서는 오후 5시~저녁 7시 사이에, 분지 내 저지대의 경우에는 일몰이 시작되는 저녁 7~9시 사이에 빠른 기온하강 현상이 관찰된다.

산정부와 분지 내 저지대의 해발고도에 따른 여름철 기온차이를 표준화하면 해안분지의 여름철 일평균 기온감률은 $-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로, 널리 알려진 전 지구 평균 환경단열감률 ($-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)보다는 약간 작게 나타난다. 우리나라는 여름철에 동아시아 몬순기후의 영향 하에서 대기 중 습도가 높기 때문에 고도에 따른 기온변화도 다른 계절에 비하여 다소 둔화될 수 있다. 특히 이러한 습도의 영향은 2009년 강수일의 기온감률을 살펴보면 더욱 뚜렷하게 나타난다. 여름철 기온감률은 하루 중에도 시각에 따라 최대 0.62°C 의 차이를 보였다(Figure 4). 아침 7시~정오사이에 기온감률은 뚜렷한 증가경향을 보이며 정오~오후 4시에는 서서히 증가하여 오후 4~5시 사이에 $-0.86^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 최대치를 나타낸다. 저녁 6시 이후에 기온감률은 빠르게 감소하다가 야간자정을 지나면서 점차 서서히 그 감소경향이 둔화되고 새벽 5시 30분경에는 $-0.19^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 최소치를 나타낸다. 새벽에는 태양복사에너지의 유입 없이 산정부와 분지 내 저지대 모두 지표복사냉각에 의해 기온이 하강하고 특히 식어서 무거워진 냉기가 사면을 따라 분지 내 저지대로 유입된다. 그 결과, 분지 내 기온하강은 더 빠르게 진행되어 산정부와 분지 내 사이의 기온차가 감소한다.

연구지역 여름철 약 100일 동안(6월 1일~9월 15일) 시간별로 기온감률의 변화폭을 살펴보면 전반적으로 여름철 주간보다는 야간에 계절 내 기온감률 변동성이 높게 나타남을 알 수 있다(Figure 4). 가령, Figure 4에서 시간별 변동성 관련하여 상하위 사분위 값과 평균으로

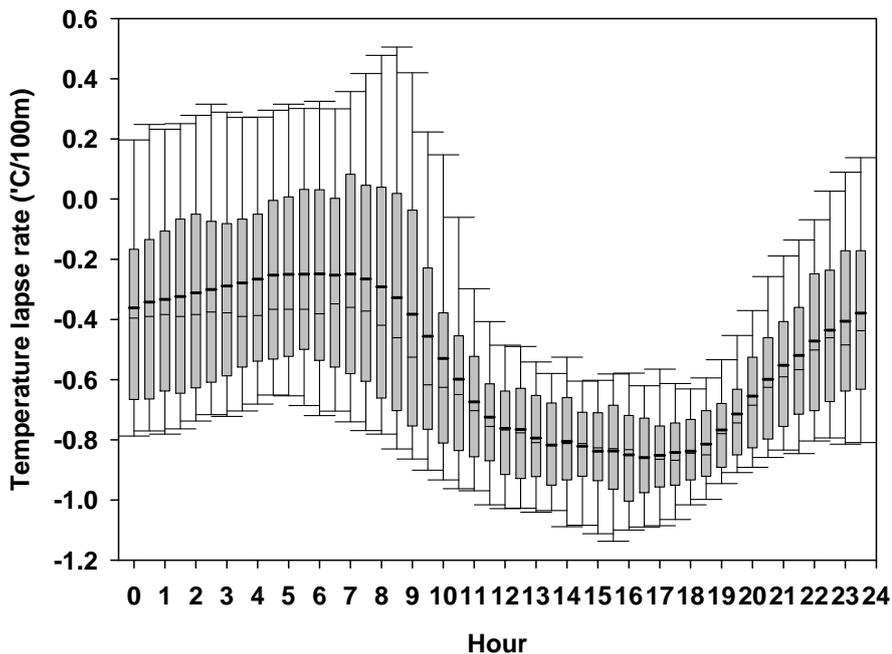


Figure 4. Diurnal variations of means (thick lines), median (thin lines) and variability (box plots and whiskers) of summertime (June 1-September 15) temperature lapse rate ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) in Hae-an basin, Yanggu in the Republic of Korea. Edges of each box plot (whiskers) indicate upper and lower 25th (10th) percentiles.

부터 10퍼센타일 값의 변화를 살펴보면, 주간보다는 야간에 그 차이가 약 2배 이상 크게 나타난다. 이 변동성 시계열에서 하루 중 최고 계절 내 기온감률 변동성은 아침 8~9시에

관찰되며, 가장 작은 변동성은 오후 6시에 나타난다. 여름철 아침 8~9시의 기온감률 +1.0 표준편차(0.5)는 최저 변동성을 나타내는 오후 6시 기온감률 표준편차(0.16)의 약 3배 이상에 달한다. 이러한 결과들은 여름철 기온감률의 변동은 새벽에 가장 크게 나타남을 잘 보여준다. 여름철 일별로 종관일기 상태가 새벽의 높은 기온감률 변동성에 어떠한 역할을 미치는지 다음 장에서 살펴보기로 한다.

4. 여름철 종관일기 별 기온감률 변화

2009	June	July	August	September
1	0.0	1.5	1.0	0.0
2	37.3	1.3	0.0	0.0
3	50.0	7.8	0.0	0.0
4	0.0	7.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.4	0.0
7	0.3	1.7	3.3	0.3
8	0.0	0.0	0.5	0.1
9	23.0	175.3	0.0	0.0
10	18.3	0.0	0.0	0.0
11	0.9	1.3	52.5	0.1
12	3.8	129.8	165.8	7.8
13	6.0	1.3	0.0	0.0
14	0.4	171.3	0.0	0.0
15	7.5	0.1	0.0	0.0
16	1.8	0.0	0.0	
17	1.5	4.3	0.2	
18	0.0	32.3	0.0	
19	0.0	0.3	0.1	
20	17.8	0.1	25.5	
21	0.4	0.0	0.0	
22	0.0	0.0	0.0	
23	0.0	0.0	2.8	
24	0.0	0.1	0.0	
25	0.0	25.0	0.0	
26	0.0	0.0	11.0	
27	0.0	0.0	43.5	
28	0.0	0.0	0.0	
29	2.5	0.2	0.1	
30	2.5	0.0	0.5	

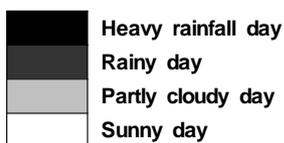


Figure 5. A weather calendar during 2009 summer in the northern Kangwon province in the Republic of Korea estimated from average rainfall (numbers in each cell as mm) of Chuncheon and Inje

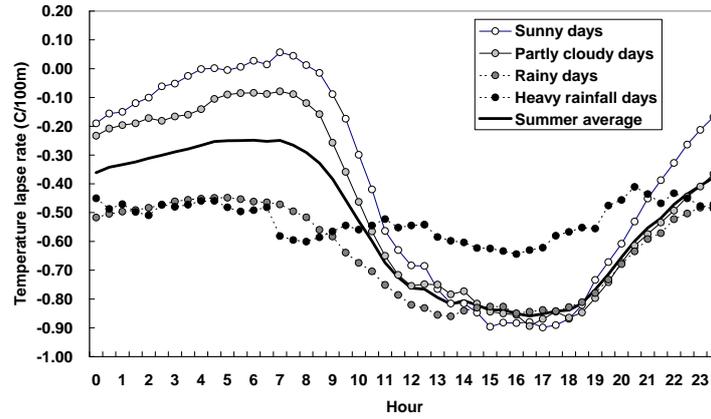
Table 3. Summertime average maximum (Max), mean (Mean) and minimum (Min) Temperature Lapse Rates (TLRs) and the recorded time over the course of a day by synoptic weather patterns in the Punch Bowl, Yanggu in the Republic of Korea.

Synoptic weather patterns	Max TLR (°C/100m)	Max time	Min TLR (°C/100m)	Min Time	Mean TLR (°C/100m)
Sunny days	-0.90	17:00	+0.06	07:00	-0.39
Partly cloudy days	-0.89	16:30	-0.08	07:00	-0.43
Rainy days	-0.86	16:00	-0.45	05:00	-0.63
Heavy rainfall days	-0.64	16:00	-0.41	20:30	-0.53
Summer average	-0.86	16:30	-0.25	06:00	-0.53

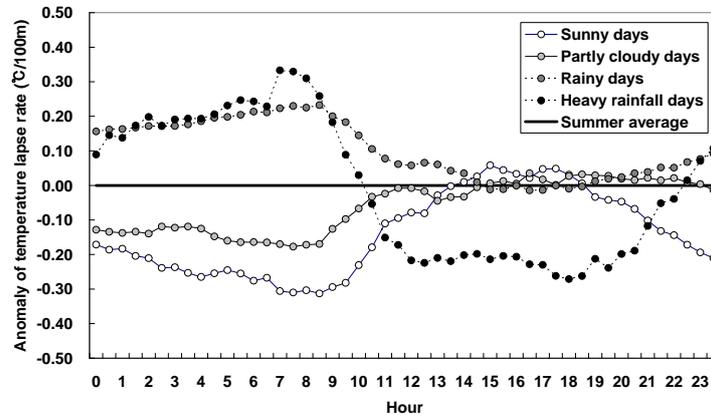
2009년 기상학적 여름철(6~8월) 평균 춘천과 인제 두 지역의 일평균기온은 22.5°C로 장기간(1971-2000) 평균값(22.7°C)과 거의 차이가 없었다. 일 최고기온과 일 최저기온도 평년 대비 2009년 6~8월 평균으로부터의 편차는 각각 -0.9°C, -0.3°C이었다. 반면 여름철(6~8월) 총 강수량은 2009년에 1,041mm로 평년값(708mm)에 비하여 약 47%이상 증가하였다. 두 지역의 기온과 강수량에서 추정된 해안면 지역의 여름철 일별 종관기상 상태를 살펴보면 (Figure 5), 2009년 여름철(6월 1일~9월15일) 무 강수일은 6월에 6일, 7월에 2일, 8월에 4일, 그리고 9월 초·중순 사이에 6일을 기록하였다. 5일 이상의 연속 무 강수일은 6월 하순(6월 22~28일)과 9월 초순(8월 31일~9월 7일)에 나타났다. 6월말에서 7월 중순에는 장마기의 연속적인 강우로 인하여 맑은날이 거의 없었다. 특히, 7월 중순에는 일 강수량이 130~175mm 이상인 집중호우일도 3회 발생하였다.

해안분지 지역의 여름철 일평균, 일 최대, 일 최저 기온감률은 종관일기 상태에 따라 그 값과 나타나는 시각이 상이하게 나타난다(Table 3). 일평균 기온감률은 강수일에 -0.63°C/100m, 여름철 전 기간 평균 기온감률보다 높고, 집중호우일에는 -0.53°C/100m로 여름철 평균값과 유사하게 나타난다. 맑은날과 약간 구름이 낀 날에는 기온감률이 각각 -0.39°C/100m와 -0.47°C/100m로 상대적으로 낮게 나타난다. 즉, 여름철 일평균 기온감률은 강수일, 집중호우일, 구름이 약간 낀 날, 맑은날 순으로 높음을 알 수 있다. 그러나 일 최고 기온감률은 맑은날(-0.90°C/100m), 약간 구름 낀 날(-0.89°C/100m), 강수일(-0.86°C/100m), 집중호우일(-0.64°C/100m) 순으로 높게 나타난다. 일 최저 기온감률은 강수일(-0.45°C/100m), 호우일(-0.41°C/100m), 약간 구름이 낀 날(-0.08°C/100m), 맑은날(+0.06°C/100m) 순으로 나타난다. 맑은날의 일 최저값은 심지어 기온감률이 양의 값을 보이기도 한다. 즉, 맑은날에는 해발고도가 상승하면 오히려 기온이 증가하는 기온역전현상이 발생하는 것이다. 대체로 대부분의 종관일기 상태에서는 일 최고 기온감률은 오후 4~5시에, 일 최저 기온감률은 오전 5~7시에 관찰된다. 그러나 2009년 여름철 집중호우일에는 일 최저 기온감률이 저녁 8시 30분경에 관찰되었다. 집중호우일에는 하루 중 기온감률 변화가 상대적으로 크지 않기 때문에 호우발생 시각에 따라 일 최저 기온감률이 기록되는 시간은 바뀔 수 있다(Figure 6a).

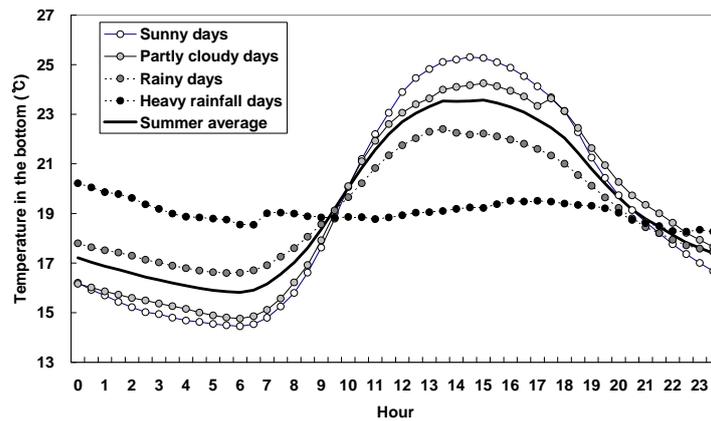
종관 일기별로 하루 시간진행에 따른 기온감률의 변화를 살펴보면, 호우일에는 기온감률의 변동범위가 -0.41~-0.64°C/100m로 주·야간 사이에 차이가 뚜렷하지 않다(Figure 6a). 그 결과, 집중호우일의 기온감률은 여름철 야간 평균값에 비하여 더 높고, 분지 내 저지대의 기온도 더 높게 나타나 온기호(warming pool)를 형성한다. 집중호우일 새벽에는 구름의 영향으로 분지 내 저지대의 사면 복사냉각현상이 약화되고, 주간에는 태양복사에너지의 유입을 감소시켜 지표복사사열이 잘 이루어지지 않기 때문이다(Oke, 1988; Barry, 2008). 자료 분석결



(a)



(b)



(c)

Figure 6. Diurnal variations of summertime averages (a) and anomalies (b) of temperature lapse rate, and surface air temperature in the bottom (485m from m.s.l) of the basin (c) by synoptic weather patterns in the Punch Bowl, Yanggu in the Republic of Korea.

과, 해안분지에서도 집중호우일 새벽에는 저지대의 기온이 여름철 평균보다 $+2.5\sim+3.0^{\circ}\text{C}$ 높게 나타난다(Figure 6c). 집중호우일에는 하루 중 기온감률 변화가 뚜렷하지 않기 때문에 반대로 주간에는 기온감률이 여름철 평균값보다 $-0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이상 낮게 나타난다. 또한 분지 내 저지대의 평균 기온도 여름철 평균값에 비하여 4°C 이상 낮게 나타난다. 그러나 기온감률은 음의 값을 나타내어 여름철 평균에 비하여 상대적으로 약한 온기호를 유지하게 된다.

맑은날에는 주·야간 기온감률의 하루 중 변화범위가 $+0.06\sim-0.90^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 그 변동폭이 상대적으로 커진다(Figure 6a). 맑은날에는 대기의 간섭효과가 거의 없기 때문에 야간에 지표복사냉각이 활발하게 나타나 지면의 인접대기의 온도가 뚜렷하게 하강하는 반면, 주간에는 상대적으로 더 많은 태양복사에너지가 유입되어 지표상의 공기가 쉽게 가열되기 때문이다(Geiger *et al.*, 2009). 여름철 맑은날 새벽의 기온감률은 여름철 평균과 비교하여 $0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이상 작게 나타난다(Figure 6b). 맑은날 야간에는 사면을 따라 냉각된 무거운 공기가 흘러내려 저지대로 모여져 냉기호(cooling pool)를 형성한다. 해안분지에서도 여름철 맑은날 새벽에는 분지 내 저지대의 기온이 여름철 전체 평균 새벽 기온에 비하여 평균 $-1.0\sim-1.4^{\circ}\text{C}$ 까지 낮아지고, 기온감률도 양의 값을 보인다(Figure 6c). 맑은날 분지의 산록완사면을 따라서는 냉기호가 형성된 저지대보다 높은 온도를 보이는 온난대(thermal belt)가 흔히 형성된다(Chickering, 1884; Dumbar, 1966; Yoshino, 1984). 이러한 냉기호의 형성에는 맑은날 활발한 지표 복사냉각작용도 중요하지만 분지지역의 경우에는 산록완사면을 따라 냉각된 공기의 무게로 인해 흘러내리는 활강작용도 중요한 역할을 한다. 해안분지 여름철 맑은날과 호우일의 하루 각 시각 별 주풍향을 살펴보면, 대체로 집중호우일에는 복잡한 양상을 보이나 맑은날

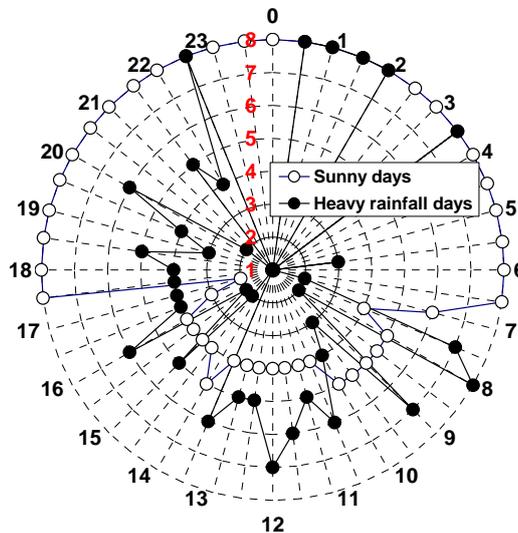
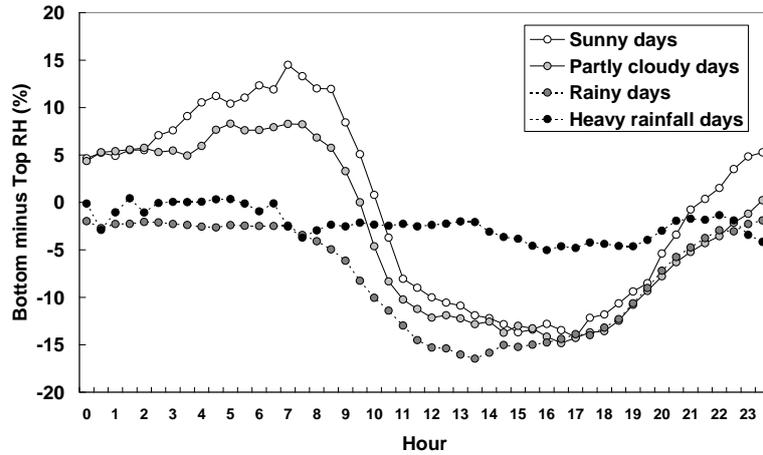
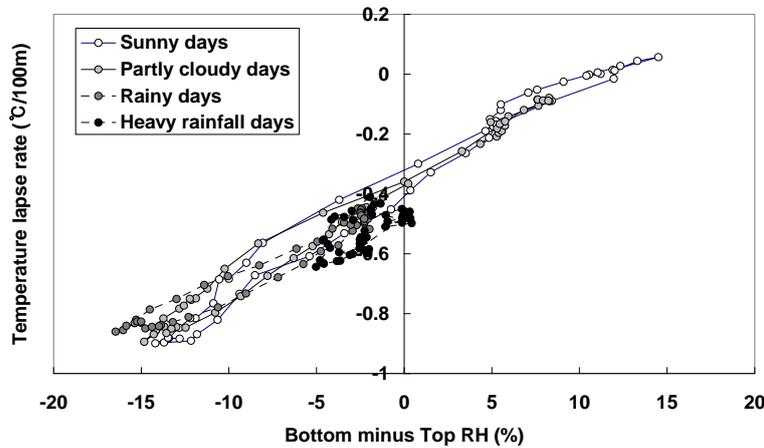


Figure 7. Diurnal variations of prevailing wind direction on sunny days (open circles) and on heavy rainfall days (filled circles) in summer in the pedimont (AWS #8; see Figure 2 and Table 1) of the Haean basin in Yanggu in the Republic of Korea. The numbers along the outer of the radial graph denote the time during a day, while the numbers in the y-axis indicate the wind direction as follows; 1=northerly, 2=northeasterly, 3=easterly, 4=southeasterly, 5=southerly, 6=southwesterly, 7=westerly, 8=northwesterly.



(a)



(b)

Figure 8. Diurnal variations of bottom (485m from m.s.l) minus top (1,050m from m.s.l) relative humidity (RH; %) (a) and their association with temperature lapse rate (b) by synoptic weather patterns in Haean basin in the Republic of Korea.

야간에는 산 사면을 따라 공기가 분지 내 저지대로 흘러내리고 있음을 알 수 있다. 해안분지의 북서쪽 산록완사면에 설치된 AWS #8(681m)에서의 주풍향을 살펴보면, 저녁 6시 이후부터 새벽 6 시까지는 주로 북서풍이 불고, 야간에는 주로 남동풍이 분다(Figure 7). 즉, 야간에는 주로 산록완사면을 따라 분지내로 바람이 불어 내려오고, 주간에는 반대로 분지 내 저지대에서 산정부를 향하여 바람이 분다. 이 때 야간에 산록완사면을 따라 부는 바람은 차가운 냉기가 사면을 따라 활강하는 패턴을 가리킨다. 집중호우일에는 이러한 주·야간의 패턴이 불분명하고 특히 야간 새벽에는 주풍향이 일정치 않다.

지금까지 냉기호는 주로 겨울철에 형성되는 것으로 알려져 왔으나(Barry, 2008; Geigar *et al.*, 2009), 이 연구의 분석 결과들은 여름철에도 종관일기 패턴에 따라 냉기호가 형성될 수 있음을 잘 보여주고 있다. 2009년 여름철 동안 연구지역의 산정부와 분지지역의 기온역전 현상을 동반한 냉기호는 6월과 7월에 각각 6회씩, 8월 10회, 9월 초·중순에 11회 발생하였다. 여름철 6~8월 동안 19~73%의 발생확률을 보이며 6월에서 9월로 여름철이 진행될수록

냉기호의 발생빈도는 증가하는 패턴을 보인다.

집중호우일의 산정부의 상대습도는 주야간 모두 거의 100%이며, 강수일의 경우에도 90%이상을 나타낸다(Figure 8). 맑은날과 약간 구름 낀 날에는 산정부의 상대습도는 약 80~90%의 범위 값을 보이며, 낮에도 최소 70~80%의 상대습도를 나타낸다. 반면 분지 내 저지대의 경우에는 집중호우일과 강수일뿐만 아니라 구름이 약간 낀 날과 맑은날 모두 새벽 1시~아침 8시 사이에 약 90% 이상의 상대습도를 나타낸다. 주간에는 일조량이 증가하면서 맑은날 일수록 상대습도가 하강하는 폭이 증가하여, 맑은날 오후 3시에는 상대습도가 60% 이하로 떨어지게 된다. 그러나 집중호우일의 경우에는 분지 내의 경우 주간에도 상대습도가 약 95%로 하루 중 차이가 뚜렷하지 않고 유사하게 유지된다. 그 결과, 맑은날에는 새벽 4시~아침 8시 사이에 산정부에 비하여 분지 내 상대습도가 10% 이상 높게 나타나고, 약간 구름이 낀 날의 경우에도 5~10% 정도 더 높게 나타난다. 특히 맑은날에는 분지 내 저지대에는 냉각된 공기가 사면활강작용과 지표복사냉각 작용에 의해 기온이 하강하여 대기 중 수증기가 응결하면서 두꺼운 안개층이 형성된다(Figure 9). 연구지역은 DMZ와 인접하여 야간 시간에 출입이 통제되기 때문에 새벽이나 아침시간에 찍은 이 지역 전체 경관 사진의 확보에 많은 어려움이 있다. 연구기간과 일치하지는 않지만 2007년 8월 23일 여름 맑은 날 새벽에 해안면의 북서쪽에 위치한 을지전망대에서 찍은 분지 내 사진에 따르면 맑은날 이른 아침 분지 내에 잘 발달된 안개층을 확인할 수 있다.

주간에는 집중호우일의 경우에는 산정부와 분지 내 저지대의 상대습도가 모두 유사하나, 강수일, 약간 구름이 낀 날, 맑은날 정오~오후 6시에는 분지 내 저지대의 상대습도가 산정부에 비하여 모두 15%이상 작게 나타난다(Figure 8). 분지 내 저지대와 산정부의 상대습도의 차이와 기온감률의 상관관계도 종관일기 상태별로 다르게 나타난다. 집중호우일의 경우에는 하루 중 상대습도 차의 변동이 거의 없고, 기온감률도 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 강수일, 약간 구름이 낀 날, 맑은날로 종관상태가 바뀌면 상대습도의 변동폭과 기온감률의 변동폭이 모두 증가하는 패턴을 보인다. 특히 분지 내 저지대 상대습도가 산정부보다 10%이상 높게 나타나는 맑은날 새벽에는 기온감률이 양의 값을 가지면서 기온역전현상이 발생한다.

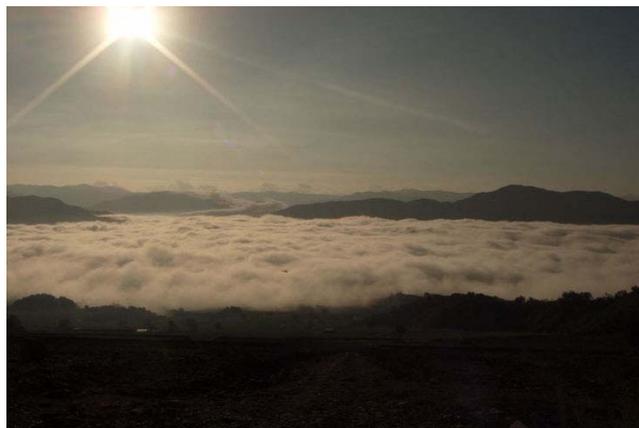


Figure 9. Fog formation in a cooling pool at dawn on a sunny day in summer within the Punch Bowl in Yanggu in the Republic of Korea. This photo was taken by Kyungsoo Min at 7AM on 23 August in 2007.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 TERRECO 한-독 국제 학술교류사업을 통하여 강원도 양구군 해안분지(핀치볼)에서 2009년 여름철 동안 수집한 기상자료를 바탕으로 우리나라 산간분지 지역의 여름철 종관일기 패턴별 하루 중 기온감률의 변화 특징을 살펴보았다. 주요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 핀치볼의 여름철 평균 기온감률은 $-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이나 종관일기 패턴에 따라 그 값은 달라진다. 여름철 일평균 기온감률은 강수일($-0.63^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), 집중호우일($-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), 약간 구름 낀 날($-0.47^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), 맑은날($-0.39^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) 순으로 점차 감소한다.

둘째, 일반적으로 여름철 하루 중 기온감률은 주간에 높아지고 야간에 낮아지는 일변화를 보인다. 기온감률은 새벽 6시에 $-0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 최저, 오후 4~5시에 $-0.85^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 최고값을 나타낸다. 또한 기온감률의 하루 중 변동폭은 종관기상 상태별로 차이를 보인다. 맑은날 하루 중 기온감률은 $+0.06 \sim -0.90^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 범위 값을 보여 주야간 차가 다소 뚜렷하지만, 집중호우일에는 $-0.41 \sim -0.64^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 의 범위의 변화폭을 보여 주야간 차가 뚜렷하지 않다. 여름철 계절 내 기온감률 변동이 가장 큰 시각은 하루 중 아침 8~9시이다.

셋째, 맑은날 새벽의 기온감률은 여름철 전 기간 평균 새벽의 기온감률과 비교하여 $0.25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이상 감소하나, 집중호우일에는 $0.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 이상 증가한다. 그 결과, 여름철 맑은날 새벽에는 지표복사냉각에 의해 발생하는 기온역전현상에 의해 분지 내에서 여름철 평균 기온보다 $-1.0 \sim -1.4^{\circ}\text{C}$ 낮은 냉기호(cooling pool)가 형성된다. 대조적으로 호우일 새벽에는 구름에 의한 장파복사의 간섭에 의해 복사냉각이 줄어들어 분지 내 저지대에는 여름철 평균 야간기온보다 $+2.5 \sim +3.0^{\circ}\text{C}$ 높은 온기호(warming pool)가 형성된다.

넷째, 집중호우일 새벽에는 그 패턴이 뚜렷하지 않으나, 맑은날 야간에는 분지의 산록완사면을 따라 냉각된 공기가 흘러내리는 패턴이 바람장에서 확인된다. 즉, 야간의 냉각풀 형성에는 지표의 장파복사냉각 이외에도 지형의 영향으로 비고가 높은 산지의 냉각된 무거운 공기가 중력에 의해 산사면을 따라 흘러내리는 활강작용도 냉기호를 형성시키는 중요한 매커니즘임을 알 수 있다.

다섯째, 집중호우일에는 하루 중 상대습도의 변화가 거의 없고, 기온감률도 거의 일정하게 유지된다. 그러나 강수일, 약간 구름이 낀 날, 맑은날로 종관상태가 바뀌면 하루 중 상대습도의 변동폭과 기온감률의 변동폭이 모두 증가하는 패턴을 보인다. 특히 맑은날 새벽에는 분지 내 저지대 상대습도가 산정부보다 10%이상 높게 나타나고 기온역전현상에 의해 짙은 안개가 분지 내 저지대에 두껍게 발생한다.

본 연구에서 밝혀진 해안면 산악분지의 종관일기에 따른 하루 시간별 기온감률에 대한 정보들은 현재 개발 중인 산악기상 예측모델개선 및 정밀기후도 제작을 위한 기초자료로 활용 가능하다. 이러한 고해상도 산악기상 자료들은 궁극적으로는 우리나라 산악지역의 고랭지 농업활동에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 차후에는 이 연구에서 밝혀진 여름철 새벽의 온기호 또는 냉기호가 고랭지 채소의 작황에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구도 필요하다고 판단된다. 이 연구는 TERRECO 1차년도 사업에서 관측한 2009년 여름철 자료에 국한하여 분석되었기 때문에, 앞으로 지속적인 기상관측자료 확보를 통해서 계절별로 나타나는 기온감률의 연변화 특성을 밝히는 것도 필요하다. 공간적으로는 이 연구에서 밝혀진

해안분지 내의 기온감률이 태백산맥을 따라 형성된 다른 산간계곡 지역의 기온감률과 어떤 유사성과 차이점을 가지는지에 관한 비교 연구도 필요하다. 이러한 노력들이 지속된다면 우리나라 전역에 걸친 정밀한 산지기후 지도를 생산하는 데 큰 기반이 될 것이다.

사사

저자들은 본 연구논문의 진행과 관련하여 경비를 지원해 준 한국연구재단(한국-독일 학술 교류 TERRECO 프로젝트)과 기상청(기후변화 감시-예측 및 국가 정책지원 강화사업, Grant RACS 2010-4014)에 진심으로 감사드린다.

참고문헌

- 권영식, 이형호, 한옥, 김원형, 김동진, 김두일, 염승준, 1990, 해안분지의 지구과학적 분석, 한국지구과학회지, 11(3), 236-241.
- 김봉균 · 박용한, 1967, 편치불의 생성원인, 대한지질학회지, 3, 61-66.
- 서희철, 전승중, 윤진일, 2008, 제주도 초지피복 기생화산(“오름”)의 방위별 일 최고기온 분포, 한국농림기상학회지, 10(1), 25-31.
- 송호열, 2000, 산간곡지의 동계기온 분포 특성, 한올아카데미.
- 윤진일, 2009, 지형보정계수를 이용한 복잡지형의 일 적산일사량 분포 추정, 한국농림기상학회지, 11(1), 13-18.
- 윤진일, 이동석, 최재연, 조성인, 박은우, 황현, 1999, 고도보정 공간내삽에 의한 전국의 1 km단위 기상실황 추정, 농업정보과학, 1(1), 28-33.
- 윤진일, 최재연, 안재훈, 2001, 일별 국지기온 결정에 미치는 관측지점 표고영향의 계절변동, 한국농림기상학회지, 3(2), 96-104.
- 윤진일, 최재연, 윤영관, 정유란, 2000, 산악지대의 일 최저기온 공간내삽모형, 한국농림기상학회지 2, 175-182.
- 이진용, 2009, 양구군 해안분지 지역에 대한 수리지질 및 수문학적 연구의 중요성, 45(4), 405-414.
- 정유란, 윤경담, 조경숙, 이재현, 윤진일, 2009, 복잡지형 고해상도 격자망에서의 PRISM 기반 강수추정법, 한국농림기상학회지, 11(2), 72-78.
- Barr, S. and Orgill, M.M., 1989, Influence of external meteorology on nocturnal valley drainage winds, *Journal of Applied Meteorology*, 28, 497-517.
- Barry, R.G., 2008, *Mountain Weather and Climate* (3rdeds.), Cambridge University Press, New York.
- Chickering, J.W. Jr., 1884, Thermal belts, *American Meteorological Journal*, 1, 213-218.
- Chung, U., Seo, H.C., Yun, J.I., Jeon, S.J., Moon, K.H., Seo, H.H., and Kwon, Y.S., 2009, Extrapolation of daily maximum temperature in a mountainous terrain, *Asia Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45(4), 473-482.
- Chung, U., Seo, H.H., Hwang, K.H., Hwang, B.S., Choi, J., Lee, J.T., and Yun, J.I., 2006, Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential, *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 15-24.
- Daly, C., Neilson, R.P., and Phillips, D.L., 1994, A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied*

- Meteorology*, 33, 140–158.
- Dodson, R. and Marks, D., 1997, Daily temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region, *Climate Research*, 8, 1–20.
- Dunbar, G.S., 1966, Thermal belts in North Carolina, *Geographical Review*, 56, 516–526.
- Geiger R., Aron R.H., and Todhunter P., 2009, *The Climate Near the Ground* (7theds.), Rowman & Littlefield Publishers, Inc., New York.
- Glassy, J.M. and Running, S.W., 1994, Validating diurnal climatology of the MT-CLIM model across a climatic gradient in Oregon, *Ecological Applications*, 4(2), 248–257.
- Iijima, Y. and Shinoda, M., 2000, Seasonal changes in the cold-air pool formation in a subalpine hollow, central Japan, *International Journal of Climatology*, 20, 1471–1483.
- Jiang, A., 1981, Temperature inversion and vegetation inversion in Xishuangbanna, Southwestern Yunnan, People's Republic of China, *Mountain Research and Development*, 1, 275–280.
- Kondo, J., Kuwagata, T., and Haginoya, S., 1989, Heat budget analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin, *Journal of Atmospheric Science*, 46, 2917–2933.
- Kuwagata, T. and Kimura, F., 1995, Daytime boundary layer evolution in a deep valley. Part I: observations in the Ina valley, *Journal of Applied Meteorology*, 34, 1082–1091.
- Lundquist, J.D. and Cayan, D.R., 2007, Surface temperature patterns in complex terrain: Daily variations and long-term change in the central Sierra Nevada, California, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 112, D11124, doi:10.1029/2006JD007561, 2007.
- Oke, T.R., 1988, *Boundary layer climates* (2ndeds.), Routledge, New York.
- Richner, H. and Phillips, P.D., 1984, A comparison of temperature from mountaintops and the free atmosphere – their diurnal variation and mean difference, *Monthly Weather Review*, 112, 1328–1140.
- Running, S.W., Nemani, R.R., and Hungerford, R.D., 1987, Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evaporation and photosynthesis, *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 472–483.
- Thornton, P.E., Running, S.W., and White, M.A., 1997, Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain, *Journal of Hydrology*, 190, 214–251.
- Whiteman, C.D., Bian, X., and Zhong, S., 1999, Wintertime evolution of the temperature inversion in the Colorado Plateau Basin, *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1103–1117.
- Yoshino, M.M., 1975, *Climate in a Small Area*, University of Tokyo Press, Tokyo.

Yoshino, M.M., 1984, Thermal belt and cold air drainage on the mountain slope and cold air lake in the basin at quiet, clear night, *GeoJournal*, 8, 235-250.

<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/terreco/>

<http://www.delta-t.co.uk/>

교신: 최광용, 강원도 춘천시 효자동 강원대학교 환경과학과 환경원격탐사 연구실(우편번호: 200-701), 전화: 010-5040-3915, 이메일: tribute@hanmail.net

#Correspondence: Gwangyong Choi, Environmental Remote Sensing Laboratory, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Hyoja-dong, Chuncheon, Gangwon-do, 200-701, Republic of Korea

TEL: 010-5040-3915, email: tribute@hanmail.net