creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000264038

2013년 8월
박사학위 논문

우리나라의 기후변화와 산불발생의 방재적 방안 연구

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

강 성 태

2013년 8월 박사학위논문 우리나라의 기후변화와 산불발생의 방재적 방안 연구 강 성 태

우리나라의 기후변화와 산불발생의 방재적 방안 연구

A Study on the Climate Change and Disaster Prevention Plan for Forest Fires in Korea

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

강 성 태

우리나라의 기후변화와 산불발생의 방재적 방안 연구

지도교수 류 찬 수

이 논문을 이학 박사학위 신청논문으로 제출함.

2013년 4월

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

강 성 태

강성태의 박사학위 논문을 인준함

위원장	에코브레인 연구소장	오 완 탁	(인)
위 원	기상전문인 협 회 위 원	이 충 태	(인)
위 원	군장대학교 교 수	정 병 옥	(인)
위 원	조선대학교 교 수	정 효 상	(인)
위 원	조선대학교 교 수	류 찬 수	(인)

2013년 6월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables ····· v
List of Figures ····· vi
ABSTRACT ····· ix

제1장 서론 ····· 1
제1절 국외 기술개발 현황 ····· 1
제2절 국내 기술개발 현황 ····· 4

제2장 연구 대상지역과 자료 및 분석방법 ····· 7
제1절 연구대상지역과 자료 ····· 7
1. 연구대상지역 ····· 7
2. 연구자료 ····· 7
제2절 연구방법 ····· 8

제3장 산불과 기상 ····· 10
제1절 산불 ····· 10
1. 산불의 정의 ····· 10
2. 산불의 기본원리 ····· 10
3. 산불의 발생 요인 ····· 11
4. 우리나라 산불의 특성 ····· 11
가. 산불의 연소 특성 ····· 11

나. 산불의 연소 유형 ····· 12
다. 산불의 구분 ····· 12
제2절 목재와 연소 ····· 13
1. 목재의 연소 ····· 13
가. 목재의 건조과정 ····· 13
나. 목재의 열분해와 발화 ····· 14
2. 함수량과 연소 ····· 15
가. 목재의 함수량 ····· 15
나. 함수량과 연소 ····· 16
다. 함수량과 연소실험 ····· 17
제3절 대기의 상태와 연소 ····· 18
1. 습도의 영향 ····· 18
2. 기온의 영향 ····· 19
3. 풍속의 영향 ····· 20
제4절 산불과 기상 ····· 22
1. 산불과 기상 ····· 22
2. 산불과 지형 ····· 24

제4장 우리나라의 기후변화와 산불발생 ····· 25
제1절 우리나라의 자연 및 인문환경 ····· 25
1. 자연환경 ····· 25
2. 인문환경 ····· 26
제2절 우리나라의 기후변화 ····· 28
1. 기온 ····· 30

2. 강수 ····· 32
3. 현상일수 ····· 33
가. 일강수량 80mm 이상 연간일수 ····· 33
나. 연간눈일수 ····· 34
다. 일최저기온 25℃ 이상 연간일수 ····· 36
라. 연간황사일수 ····· 37
마. 연간서리일수 ····· 39
바. 연간얼음일수 ····· 40
4. 극값 ····· 42
5. 극한기후지수 ····· 44
가. 최고기온 99퍼센타일 ····· 44
나. 최저기온 1퍼센타일 ····· 45
다. 일최저기온 0℃ 미만 연간일수 ····· 46
제3절 강원지역 기상환경변화 ····· 47
제4절 강원지역의 산불발생 ····· 52
1. 연도별 산불발생 현황 ····· 52
2. 월별 산불발생 현황 ····· 53
3. 지역별 산불발생 현황 ····· 54
4. 임상별 산불발생 현황 ····· 54
5. 기상자료의 다변량분석 및 기상대별 기상인자의 평균차 검정 ····· 55

제5장 산불예방을 위한 산불위험지수 제안 ····· 60
제1절 우리나라의 산불위험지수 ····· 60

제2절 산불위험지수(FFDI) 제안 ····· 61
제3절 결과 및 고찰 ····· 64
1. 산불발생과 산부위험지수 관계 ····· 64
2. 산불위험지수 회귀분석 결과 ····· 69

제6장 결론 및 제언 ····· 70

References ····· 74

List of Tables

Table 3.1. Table of forest fire risk. ····· 11
Table 3.2. Analysis of Large and Small forest fire. ····· 13
Table 3.3. Ignition point of the wood. ····· 14
Table 3.4. Flash point of the wood. ····· 15
Table 3.5. Moisture contents and combustibility of leaves. ····· 17
Table 3.6. Air relative humidity and burning time of the joss stick. ····· 19
Table 3.7. Air relative humidity and forest fire risk. ····· 23
Table 4.1. The population and population density of Korea. ····· 27
Table 4.2. Land use of Korea. ····· 27
Table 4.3. Temperature change in Korea. ····· 31
Table 4.4. Change of annual precipitation amounts in Korea. ····· 32
Table 4.5. The climate change at Gangwon province. ····· 51
Table 4.6. Annual incidence frequency of forest fires. ····· 52
Table 4.7. Monthly incidence frequency and rate of forest fires. ····· 53
Table 4.8. The significant test of air temperature and air relative humidity in Gangwon area. ····· 57
Table 4.9. The significant test of wind speed and meteorological data associated with rainfall in Gangwon area. ····· 58
Table 5.1. The categories by FFDI (Forest Fire Danger Index). ····· 63
Table 5.2. Annual data of FFDI, forest fire frequency, and damage area. ····· 64
Table 5.3. Monthly data of FFDI, forest fire frequency, and damage area. ····· 67

List of Figures

Fig. 2.1. Topography of the Gangwon area. ····· 8
Fig. 3.1. The relationship between moisture content of joss stick and the burning time. ····· 18
Fig. 3.2. The burning time of joss stick by air temperature and air relative humidity. ····· 20
Fig. 3.3. The wind speed and burning speed of joss stick. ····· 21
Fig. 3.4. Distribution of the time line of burning. ····· 22
Fig. 3.5. The rate(%) of forest fire by slope direction of the mountain. ····· 24
Fig. 4.1. Topography of Korea. ····· 25
Fig. 4.2. Population distribution of metropolitan city and Provinces. ····· 26
Fig. 4.3. The climograph of each stations in Korea. ····· 29
Fig. 4.4. Interannual variation of annual mean temperature in Korea. ····· 30
Fig. 4.5. Interannual variation of annual mean maximum temperature in Korea. ···· 31
Fig. 4.6. Interannual variation of annual mean minimum temperature in Korea. ····· 31
Fig. 4.7. Interannual variation of annual mean precipitation in Korea. ····· 32
Fig. 4.8. The rate of annual variation of more than 80mm/day rainfall day in each station. ····· 33
Fig. 4.9. Interannual variation of more than 80mm/day rainfall day in year. ····· 34
Fig. 4.10. The rate of interannual variation of annual snowfall day in each station. ····· 35
Fig. 4.11. Interannual variations of annual snowfall days. ····· 35
Fig. 4.12. The rate of interannual variation of more than 25C of daily minimum temperature day in each station. ····· 36
Fig. 4.13. Interannual variation of more than 25C of daily minimum temperature day in year. ····· 37

Fig. 4.14. The rate of interannual variation of annual asian dust day in each station. ····· 38
Fig. 4.15. Interannual variation of annual asian dust day in each station. ····· 38
Fig. 4.16. The rate of interannual variation of annual frost day in each station. ····· 39
Fig. 4.17. Interannual variation of annual frost day in each station. ····· 40
Fig. 4.18. The rate of interannual variation of annual icing day in each station. ····· 41
Fig. 4.19. Interannual variation of annual icing day in each station. ····· 41
Fig. 4.20. Interannual variation of annual most rainfall in Korea. ····· 42
Fig. 4.21. Interannual variation of annual daily highest temperature in Korea. 43
Fig. 4.22. Interannual variation of annual daily minimum temperature in Korea. ····· 43
Fig. 4.23. The rate of interannual variation of 99 percentile for maximum temperature in each station. ····· 44
Fig. 4.24. The rate of inter annual variation of 1percentile for minimum temperature in each station. ····· 45
Fig. 4.25. The rate of interannual variation of 0℃ less day for daily Minimum temperature per year in each station. ····· 46
Fig. 4.26. The effects of climate change at Gangneung and Chuncheon. ····· 48
Fig. 4.27. Annual incidence frequency of forest fires. ····· 52
Fig. 4.28. Monthly incidence frequency and rate of forest fires. ····· 53
Fig. 4.29. The incidence frequency of forest fire in Gangwon region. ····· 54
Fig. 4.30. The incidence frequency of forest fire by the trees. ····· 55
Fig. 4.31. Distribution of air temperature in the Gangwon area. ····· 59
Fig. 4.32. Distribution of wind speed in the Gangwon area. ····· 59
Fig. 5.1. Annual frequency of the forest fire. ····· 65
Fig. 5.2. Annual damage areas of the forest fire. ····· 65

Fig. 5.3. Annual FFDI of the forest fire. ····· 66
Fig. 5.4. Monthly frequency of the forest fire. ····· 67
Fig. 5.5. Monthly damage areas of the forest fire. ····· 68
Fig. 5.6. Monthly FFDI of the forest fire. ····· 68
Fig. 5.7. The relationship between FFDI and forest fire ratio ····· 69
Fig. 5.8. The relationship between FFDI and forest fire damage areas. ····· 69

ABSTRACT

A Study on the Climate Change and Disaster Prevention Plan for Forest Fires in Korea

Kang, Seong-Tae
Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su, Ph.D.
Department of Atmospheric Sciences
Graduate School of Chosun University

In this study, the general characteristics of forest fires, the changes in the meteorological environment of the Gangwon area due to climate change and the relationship between the occurrence of forest fires and the meteorological elements were analyzed to propose a new forest fire danger index (FFDI) using a new meteorological element and to verify it.

On the general characteristics of forest fires, wood always contains some moisture, combustion depends on the moisture content of the wood, and the drying time of wood in a forest is determined by the soil moisture content. In addition, the moisture content of wood varies according to the air temperature and the type of wood. Therefore, a combustible can be ignited with small embers when its moisture content is less than approximately 15% of its total weight, but it cannot be ignited when its moisture content is greater than 15%. However, in a large fire, the moisture content does not matter, and a combustible with a 50% or higher moisture content burns well.

The moisture content of fallen leaves also influences forest fires. A 10% or lower leaf moisture content is a good condition for a forest fire, and a forest fire rarely occurs with a 25% or higher moisture content. In addition, the production of fire and the ignition temperature vary according to the type of forest. Because the type of forest is determined by the weather, it can be said that a change in the weather environment affects the occurrence and spread of fires.

The combustion speed is also influenced by the air temperature. When the air temperature is high, the combustion speed significantly varies according to the moisture content; but when the air temperature is approximately 0°C, the change in the combustion speed according to the moisture content is small. In addition, high air humidity leads to a slower combustion speed; and in the case of combustion as large

as a forest fire, a higher wind speed leads to a more active combustion.

The topography of a mountain also significantly influences the development of forest fires. A different slope direction leads to a different amount of sunshine, wind direction, wind velocity and degree of dryness of fuel materials. Therefore, the Yeongdong area, the slope of which is steeper than that of the Yeongseo area, has a larger damaged area than other sites.

The changes in the climate in the Gangwon area are characterized by a clear rise in the air temperature and the amount of precipitation, and a fall in the relative humidity and the wind velocity. The wind velocity significantly varies according to seasonal changes. Among the changes in the climate elements, the decrease in the relative humidity is an important factor of the frequency of forest fires.

Multiple examinations via one-way ANOVA using the daily weather data of the 10 observatories in Gangwon-do and significance verification showed that the meteorological elements such as the air temperature, humidity and wind velocity varied according to the area. The meteorological elements of the east coast area in Gangwon-do (Gangneung, Samcheok, Donghae and Sokcho), which has been the most damaged by forest fires, were compared with those of the other areas in the Yeongseo area. The daily mean temperature and wind velocity were higher in the east coast area than in the inland areas such as Wonju and Chuncheon. Thus, the air temperature and the wind velocity were higher in Gangneung, Sokcho and Donghae, which were severely damaged by large-scale forest fires in the 2000s, than in the other areas.

Considering that forest fires from a military firing range are significantly related to the soil moisture content, a new FFDI was proposed via indexing through correlation analysis by including the soil moisture content, which had not been considered for the FFDI.

The new FFDI was evaluated and was found to be highly correlated with the number of forest fires and the size of the damaged area in Gangwon-do for the last 10 years, from 2003 to 2012.

제1장 서론

산불은 자연적, 인위적 발생 원인에 의하여 발생하며, 대규모 인명 및 재산의 피해를 유발하고 있어 많은 국가에서 산불 피해를 최소화하기 위하여 다각적인 연구와 노력을 하고 있다. 우리나라의 경우, 산림이 전국토의 65%를 차지하고 있어 산불의 영향을 받기 쉽고, 대형화 가능성이 높음에도 사회적 관심과 과학적 접근이 미진한 실정이다.

자연발화가 산불발생원인중 대부분을 차지하는 미국과 캐나다 등과는 달리, 우리나라의 산불발생은 담뱃불로 인한 실화, 논·밭두렁 태우기, 쓰레기 소각과 같은 인위적인 원인으로 인한 불씨가 지상의 연료건조 정도와 강한 바람 등, 산불이 발생하기 쉬운 기상조건에 의해 대형 산불로 발전하는 경우가 대부분이다.(이시영 등, 2001).

산불은 큰 피해에 비해 그 원인은 매우 사소한 부주의로 발생하므로, 이를 사전에 예방하는 것이 무엇보다도 중요하며, 기상환경을 고려한 산불예방과 피해를 저감하기위하여 산불위험지수의 개발은 매우 중요하다. 선진 여러 나라에서는 이미 각국의 실정에 맞게 기상환경을 고려한 산불예측 및 감시기술을 개발하여 운용하고 있는 실정이다.

제1절 국외 기술개발 현황[1)]

미국에서는 1940년대부터 산림 내 가연성물질의 함수율을 중심으로 하는 모델이 개발되었다. 1972년 Deeming 등에 의하여 개발된 Fire-Danger Rating System은 산불진행에 따른 물리적 습성을 근거로 9개의 Fuel Model을 구분하고, 기본적인 몇 가지 구조를 중심으로 지수화 하여 완성되었다. Deeming(1977)은 Ponderosa 소나무로 만든 연료습도봉(fuel moisture stick)을 이용하여 지피물의 건조과정 예측법을 발표한 후, 이를 기초로 1978년 NFDRS (National Fire Danger Rating System)를 계량하여 산불위험도 예측에 실용화 하고 있으며, 가연성 지피물의 연료습도변화와 산불위험도 평가에 관하여 많은 연구를 수행하고 있다.

---

1) “산불예측 및 감시기술 개발”에서 인용하였음.(과학기술부, 2003).

또한, NFDRS (National Fire Danger Rating system)에 건조 상태를 나타내는 여러 지수를 개선하고 11개 이상의 Fuel Model을 추가하여 더욱 세분화하였으며, 인위적 요인과 자연적 요인에 의한 산불발생의 지수를 분리하여 현존하는 식생들의 수분함유상태에 대한 예측모형을 추가·개발 하였다. Haines et al.(1978)은 NFDRS의 Spread Index를 보완하여 NFDRS의 유효성을 확인하였다.

Boychuck (1987)는 산림화재의 진화를 위한 효율적인 인원 및 장비의 배치를 위해 Markov Chain Model을 개발하여 모의시험을 통해 산불방제요원 및 장비의 기회비용을 30%까지 절감할 수 있다고 보고하였다. Warren et al.(1981)은 '산불에 기상요소들이 가장 큰 영향을 미친다'는 가정 하에서 중서부 지방의 임내 기상을 자동 측정할 수 있는 무인기상관측소(Remote Automatic Weather Station)를 설치하여 산불위험도를 분석하였다. 1992년에는 James A. Woods와 Franklin Gossette가 캘리포니아주 산타모니카 산림지역에서 GIS[2)]를 이용한 산불관리 방안을 제시하였다. 산림지대 내의 도시가 계속적으로 확장되면서 산불발생 건수 당 피해규모가 대규모화 되는 것을 방지하기 위해서 식생, 지형, 기후, 산불발생 기록, 교통망, 인간 활동과 산불발생과의 관계를 규명하고자 하였으며, 산불 재해 모델을 개발하여 산불관리과정을 체계화하였다.

최근 들어 고해상도 원격탐사자료의 획득, 영상처리기술, GIS기술의 급속한 발달, 하드웨어 성능의 향상과 같은 기반환경이 구축됨에 따라, 컴퓨터과학 기술을 가미하여 방대한 양의 공간 데이터 및 속성 데이터를 관리하고, 처리하여, 동적인 시뮬레이션을 할 수 있는 연구를 체계적으로 수행하고 있다.

미국의 USDA Forest Service에서 개발한 FARSITE(Fire Area Simulator : 전문적인 화재 시나리오 모델링 프로그램)는 GIS기술을 접목시켜 개발한 산불 시뮬레이션 응용프로그램으로, 지형자료(고도, 경사 및 향), 연료분포도, 수관도, 토양도 등의 공간자료와 기상, 풍속, 풍향, 연료습도 등의 속성자료를 활용하여 산불의 강도, 확산예상경로, 확산속도 등을 산출해 낼 수 있다. 또한, 현재 산림화재 평가시스템(Wildland Fire Assessment System, WFAS)을 개발하여, 미국 전 지역을 대상으로 인터넷을 통하여 산불위험도, 산불기상관측자료, 연료습도, 가뭄지수 등 산불관련 정보를 서비스하고 있으며, 산불관리 업무에 활용하고 있다(http://www.fs.fed.us/land/wfas/).

---

2) GIS(geographic information system) : 지리정보시스템

캘리포니아 대학의 Yue(1990)는 지형, 식생, 기온, 강수량, 건물접근도, 도로 접근도에 대한 정보를 통합하여 산불발생 확률모델을 개발하였다. 산불확산예측 모델로서 FARSITE 외에 Green et al.(1995)이 개발한 FIRE!, Clarke et al.(1994)과 Clarke & Olsen(1996)이 개발한 산불확산모델 및 Vasconcelos(1988), Periera & Zeigler(1994) 등이 개발한 FIREMAP 등을 들 수 있다. 이러한 모델들은 대개 GIS 공간분석기능을 응용하여 개발한 것으로, 이 중 FARSITE는 FIRE!와 함께 대표적인 백터기반의 모델로 볼 수 있고, 산불확산모델은 Cellular Automata 방식의 모델이다.

캐나다는 1920년대부터 Wright와 Bell이 기상, 연료습도, 산불연소 동태를 연구하여 캐나다 산불위험도시스템(Canadian Forest Fire Danger Rating System: CFFDRS)을 발표한 후 이를 계속적으로 수정·보완하고 있으며, 1993년 Garcia & Lee는 앨버타 지역의 Whitecourt 산림지역의 산불발생 위험이 있는 요인을 평가하여 산불 발생 위험지도를 작성하였다.

또한, 과거 75년간의 산림 생태계연구와 산불연구결과를 바탕으로 Spatial Fire Management System(SFMS)을 개발하여 캐나다뿐 만 아니라, 말레이지아, 아르헨티나, 인도네시아 등에 관련기술을 보급하고 있다(http://fms.nofc.cfs.nrcan.gc.ca-/sfms/index.html).

British Columbia주의 FTS(Fire Technology System)사는 산림기상정보를 실시간으로 네트워크를 통해 기상상태를 원격측정 할 수 있는 AWS(Automatic Weather Station)의 일종인 FWS(Fire Weather Station)를 개발하여 캐나다와 미국 등에 보급하고 있다. 또한, 산불감시 및 맵핑을 위한 전용 NOAA AVHRR 위성자료 수신소를 설치하여, 여기서 수신된 자료를 GEOCOMP-N 전용 영상처리시스템을 통해 준-실시간으로 처리하여 그 결과를 활용하고 있다.

호주는 1962년 산불발생과 연소확산속도를 지수화한 Forest Fire Dnager Meter를 개발하여 실용화하고 있으며(Luke et al, 1978 ; Van Wagner, 1987), Stephen & Judith(1990)는 과거 수십 년 간의 산불 발생 기록 자료를 근간으로 7백만ha 면적의 산불 취약지역을 대상으로 모델을 수립하였는데, 이러한 모델을 이용하여 산불예측, 식생 유형 및 산불확산의 기록, 산불확산 형태분석, 환경영향평가, 산불 억제정책 결정, 토지이용계획에 걸친 다양한 정보를 제공하였다.

일본에서는 松本由友(1951)가 기상과 산불발생과의 관계를 분석하였으며, 林野聽(1978)에서는 산림 화재와 기상관계를 분석하여 지역별 발생상황도를 작성하였

다.

Nakayama et al.(1999)는 1997년 인도네시아에서 발생했던 대규모 산불 지역을 NOAA-AVHRR band 3 영상을 이용하여 탐지하였고, Roy et al.(1999)은 다중시기 AVHRR 영상을 이용해 산불지역을 탐지하는 알고리즘을 개발하였다. AVHRR 자료는 공간해상도가 약 1km/pixel에 달해 산림 면적이 넓고, 대형 산불이 빈번히 발생하는 국가에서 광역적인 산불감지 및 맵핑을 위해 많이 활용하고 있다.

제2절 국내 기술개발 현황[3)]

국내에서는 임업 연구원에서 수종별, 영급별, 지피물량과 임내의 기상 및 연료습도 변화를 조사하여 산불위험도를 분석하였으며(정연하 등,1989), 이시영(1990, 1992)은 환경인자가 산불의 온도 및 연소 속도에 미치는 영향을 밝혔고, 실내 실험을 통하여 연료와 풍속, 경사와 산불확산율에 대해서 연구한바 있으며, 정연하(1992)는 낙엽의 연소특성과 기상조건에 따른 산화 위험예측 모델을 개발하였다. 또한, 최관 등(1996)은 기상자료와 산불발생과의 관계를 로짓과 프로빗 확률 모형(logistic & probit regression model)을 적용하여 산불발생확률식을 개발하였다. 한편, 박은경(1996)은 래스터 기반으로 산불확산 모델링에 관한 연구를 수행하였으며, GIS를 이용한 연구로는 산불예측모델 개발(김윤정, 1996) 및 산불 진화용 저수탱크 적지분석모델을 개발(이기철 등, 1998), 산불방재방안(안상형, 2000) 및 산불예보시스템 개발을 위한 인터넷 개발(조영희 등, 2000), 김응식 등(1995)은 GIS를 이용한 산불확산 Simulation 알고리즘을 개발하였다. 또한, 이시영 등(1998)은 습도측정봉 자료와 기상자료를 이용하여 산불위험예측식을 개발하였으며, 김응식 등(1998)은 산불확산 인자 중 풍속, 풍향 인자 추출을 위해 유동장 이론을 이용한 산불확산예측에 관한 연구를 수행한 바 있다.

이시영 등(1996)은 강원도 고성에서 발생한 산불에 대하여 산불의 확산속도 및 연소유형을 분석하여 고성산불의 확산특성을 구명하기 위한 연구를 수행하였으며, 1999년에는 강원도 홍천에서 산불연소 실연시험을 실시하여 산불의 진행속도와 화염온도 그리고 산불주변에서 일어나는 기상변화를 측정하였다.

한편, 산림청(2003)은 중점국가연구개발사업(2000. 7. 12 ~2003. 4. 30)으로 일

3) “산불예측 및 감시기술 개발”에서 인용하였음(과학기술부, 2003).

별기상지수(DWI : Daily Weather Index), 임상위험지수(FMI: Fuel Model Index), 그리고 지형위험지수(TMI : Topography Model Index)를 통합한 전국산불발생위험지수(NFFDRI: National Forest Fire Danger Rating Index) 모형을 개발하여 전국단위(도별)의 광역 및 세부지역(시·군별)까지 모두 포함한 실시간 및 6, 12, 24시간 예보가 가능하도록 하였으며, 전국 산불위험지수 예보를 위한 수치지형도 등 기본자료 구축과 웹상에서 산불위험지수 자동 산출 및 그리드 분석기법을 적용할 수 있는 산불위험지수 예보시스템을 개발하였다

또한, 기상청에서는 2004년 11월 1일부터 산림청과 공동으로 지형지수(고도, 방위), 임상지수(침엽수, 활엽수, 혼효림), 기상지수(온도, 습도, 풍속)를 종합하여 4단계의 경보단계로 봄철의 2월 ~ 5월15일, 가을철의 11월 ~ 12월15일까지 한시적으로 제공하고 있다.

그러나 외국의 사례와 같이 기상, 임상, 지형 등을 상세하게 고려한 산불위험예측 모형과 비교해 볼 때 다소 미흡하고, 산불에 대한 사회과학적 접근을 국내에서는 학문적으로 정립되어 있지 않은 현실이다. 더구나 산불확산 관련 연구는 매우 부진한 실정이며, 특히 산불확산 알고리즘 개발에 필요한 자료 및 정보가 매우 제한적이다.

한편, 지구 온난화로 인한 임상의 변화와 이로 인한 산불 발생 가능성의 변화가 예상되고 있으며, 가뭄 기간의 연장(임종환 등, 2006)과 이로 인한 지상 연료의 발화 가능성 변화도 예상되고 있다. 또, 기후 변화로 인한 강풍 발생에 의해 산불의 대형화 가능성이 높아지고 있고, 지구 온난화와 기후변화로 인한 산불의 피해는 증가할 것으로 예측하고 있다(Stocks et al., 1998). 이로 인해 선진국에서는 전 국가적인 산불 관리 정책의 개선과 관심을 촉구하고 있으며, 기후 변화가 산불에 미치는 영향에 대한 연구가 증가하고 있는 추세이다(Flanigan et al. 2005; Stocks, 2000)

기후 변화로 인해 다가올 미래의 기상 조건들은, 아직까지 한반도에서 경험하지 못한 새로운 기상 환경을 제공할 것으로 예측되며, 이는 강우량의 급격한 증가와 집중호우, 비정상적인 가뭄 시기의 증가와 이로 인한 한반도의 산림 식생의 변화를 가져올 것으로 예측된다.(임종환 등, 2006; 한국환경정책평가연구원, 2005).

이러한 기후 변화에 따른 산불 발생 가능성의 변화를 파악하고, 예측함으로써, 산불의 대형화를 미연에 방지하는 기술의 개발과 적용이 더욱 필요하다고 할 수 있다.

최근 지구온난화로 인해 우리나라를 비롯한 중위도 지역을 지배하는 기압계의 변동성이 커지고 있으며, 본 논문의 연구지역인 강원 영동과 영서지역은 기압계의 변동성으로 인해 위도 상으로는 같은 지역일지라도 지형(태백산맥)의 영향으로 기압배치에 따른 기류의 방향에 따라 두 지역의 강수량 차이가 커지고 있다. 이로 인해 산불발화와 확산의 주 연료가 되는 낙엽, 잡목 등의 수분지수를 결정하는 토양수분량의 차이 또한 크고 산불발생과 확산에도 영향을 주는 것으로 판단된다.

이러한 산불 환경의 변화는 산불의 발생 빈도와 대형화 가능성의 변화를 가져올 것이 필연적인 상황이지만, 현재 우리나라에서 운용 중인 산불 예보 시스템의 발생 예측 모형은 과거의 산불발생 자료와 단기간의 기상 자료를 이용한 확률적 모형에 근거함으로서 다소 미흡한 부분이 있고, 보다 정확한 산불의 발생과 확산 예측은 물론 미래의 변화된 기상 환경의 적용성에 대한 문제점이 예상되고 있다.

본 연구에서는 미래의 변화된 기상환경의 적용성에 일반적으로 적용해도 무리가 없는 기상인자에 초점을 맞추어, 산불발화와 확산의 결정적인 인자로 작용하는 실효 및 상대습도, 풍향, 풍속 외에 지형적인 원인에 의한 강수량의 차이로 생기는 토양수분량을 추가하여 강원지역의 새로운 산불위험지수를 제안하고자 한다.

제2장 연구 대상지역과 자료 및 분석방법

제1절 연구대상지역과 자료

1. 연구대상지역

연구대상지역은 강원지역(Fig. 2. 1)을 대상으로 하였다.

강원도 18개 시·군 지역의 최근 10년간(2003 ~ 2012) 산불발생 현황은 379건으로 매년 증가 추세를 보이고 있으며, 특히 봄철에 집중적으로 대형 산불이 발생하는 경향을 보이고 있다(산림청, 2003). 이는 서고동저나 남고북저의 기압배치 하에서 태백산맥 풍하측에 위치한 영동지역 특유의 건조하고 강한 바람이 대형 산불의 원인으로 작용하기 때문이다. 이 외에도 태백산맥을 중심으로 동서에 위치한 영동과 영서지역의 기압배치에 따른 강수량의 차이 등 대형 산불발생 원인의 기상학적 요인분석의 여지가 많으며, 지난 10년간 전국에서 발생한 산불 피해 면적 중 약 73%를 차지한 지역으로 기상을 고려한 산불발생과 확산 연구의 적정 지역으로 판단되기 때문이다.

2. 연구자료

2003년부터 2012년까지 10년간 강원지역 산불발생지점 및 시기별 통계자료는 산림청 자료를 이용하여 발생횟수와 피해면적을 산출하였으며, 산불발생일의 기상자료는 기상청에서 관측한 기온, 바람, 습도의 자료를 사용하였다.

관측 자료가 존재하지 않는 토양수분자료는 군기상전대 연구부에서 2005년부터 2007년까지 군(軍)사격장의 산불연구를 위해 한시적으로 관측한 강원 영서지역 춘천, 영월과 영동지역 양양, 강릉 관측자료 일부와 상대적으로 많은 관측 자료가 존재하는 군사격장 자료를 사용하였다.

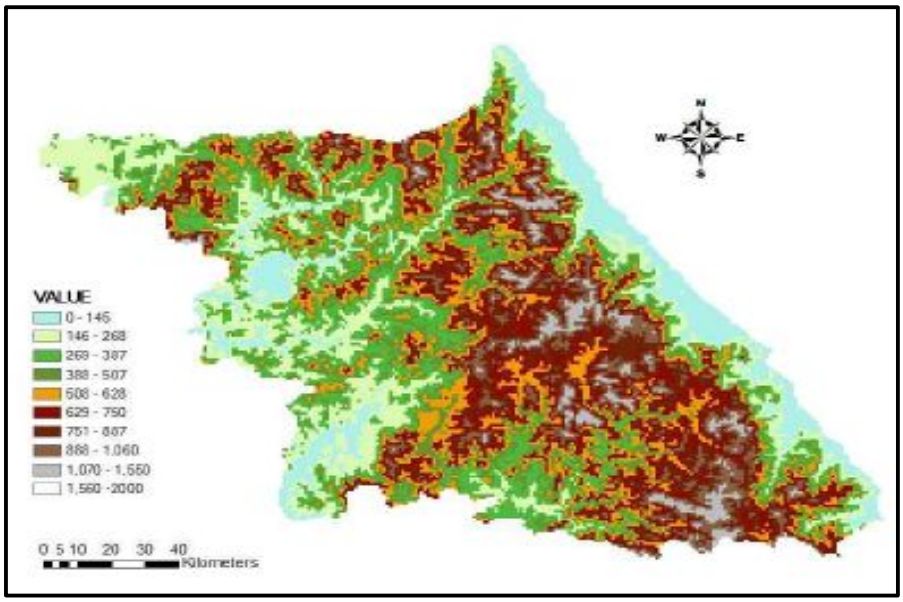


Fig. 2. 1. Topography of the Gangwon area.

제2절 연구방법

연구와 실험을 통해 일반화된 산불에 대한 일반적인 특성, 즉 산불의 발생과 확산에 영향을 미치는 기상요소(기온, 습도, 바람 등)와 임상 및 지형에 대해 분석하였으며, 강원지역에서 발생한 산불과 기상요소와의 상관관계를 통계적 방법으로 분석하였다.

강원지역 산불과 기상요소와의 상관관계 분석 방법으로, 강원지역 18개 시 · 군 모두에 대하여 산불에 영향을 주는 기상요인이 동일하게 높다고 가정하면 모든 지역은 동일한 날에 산불이 발생할 확률이 매우 높다고 할 수 있다. 이와 반대로 모든 지역에서 산불발생에 영향을 주는 기상요인이 낮다고 한다면 모든 지역에서 동시에 산불이 발생할 확률은 낮다고 할 수 있다. 이와 같은 맥락에서 강원지역 18개 시 · 군의 산불 발생일을 근거로 유사성을 수량화하여 강원지역 산불발생의 유형화를 시도하였으며, 이 때 토양수분량이 발화와 확산에 미치는 영향을 교차분석(cross tab analysis)과 사회과학에서 일반적으로 적용하고 있는 대응일치분석(correspondence analysis)을 통해 알아보았다.

이를 토대로 기존의 기상청과 산림청의 산불위험지수에서 고려하지 않았던 토양

수분량을 이용한 산불위험지수(FFDI, Forest Fire Danger Index)를 새롭게 제안하였다. 새롭게 제안한 산불위험지수의 계산은 산불과 기상요소간의 상관관계를 분석하여 회귀분석(산불확율분포 계산 → 누적분포 변환 → 추세선 로그함수 fitting) 을 통해 가중값을 결정한 지수식을 산출한 후, 이를 계산식에 대입하여 산불위험지수를 구했다. 이렇게 구해진 산불위험지수와 산불발생과의 민감도를 통계적인 방법으로 검증 한 다음 Category를 정하였다.(Table 5. 1)

제3장 산불과 기상[4)]

제1절 산불

1. 산불의 정의

산불(山火, 山林火災, forest fire, wildland fire)은 산림 내에서 낙엽, 낙지, 초류, 임목 등이 연소되는 화재로서 인간의 부주의로 인한 실화 또는 방화 그리고 낙뢰 및 기타 폭발물 등으로 인하여 발생되는 불씨가 산림 내의 가연물을 연소시키는 것을 말하며, 또 "산불이란 산림이나 산림에 잇닿은 지역의 나무, 풀, 낙엽 등이 인위적으로나 자연적으로 발생한 불에 타는 것을 말한다"라고 정의하였다(산림보호법 제1장 제2조 7항).

2. 산불의 기본원리

산불도 일반 화재와 마찬가지로 연료와 열 그리고 공기의 3요소가 화학반응을 일으켜 발생한다. 일단 발생된 산불의 연소 진행속도는 연료, 기상, 지형에 따라 결정된다.

산불의 연료는 경연료, 중연료 및 녹색연료로 나눌 수 있다.

경연료는 낙엽, 건초, 관목의 죽은 가지 등과 같이 발화하며, 곧바로 타버리는 것들이다. 중연료는 원목, 나무둥치, 큰 나뭇가지, 고주백이 등과 같이 발화하여 서서히 타는 것들이지만, 이들 중연료는 일단 발화하면 장시간 강렬하게 연소하므로 진화하기에 매우 어려운 연료들이다. 녹색연료는 푸르게 자라고 있는 임목(林木), 나뭇가지, 잎, 풀들로서 건조된 후가 아니면 연소하지 않는 연료들이다.

산불에서 연료의 습도는 계절 및 연료 형태(경연료, 중연료, 녹색연료)에 따라 다르다. 연료의 함수량(습도)에 따른 산불발생의 위험도는 Table 3.1에서와 같이 연료의 습도가 25%보다 낮을 때 발화 가능성이 있다.

---

4) "산림통계분석을 통한 산림정책 변천 및 대응방안"(산림청, 2010). "기상과 화재"(홍성길, 1987)에서 인용하였음.

Table 3.1. Table of forest fire risk.

Moisture content of the fuel	Forest fire risk
< 10%	very well
10~17%	easy, rapid burning
17~25%	forest fire, slow burning
25% ≦	no forest fire

3. 산불의 발생 요인

산불은 연소 환경 내에서 발생하여 열, 산소, 연료 등 산불발생의 3요소에 의해 상호작용하며, 산불의 행태 결정은 바람, 연료, 지형 등의 매개변수에 의해 영향을 받는다. 또한, 대형 산불에서의 기상인자는 연료와 산소의 결합을 유도하고 열보다는 전체적인 산불의 행동을 결정하는 주요인자로 변한다.

산불의 작용은 연료, 지형, 기상 등의 환경 인자에 영향을 받는다. 이 3개의 인자는 자연 상태에서 산불의 강도, 진행방향, 진행속도 등을 결정하는 산불작용의 주요인자이다. 따라서 산불을 진화할 때는 이러한 산불작용 인자의 특성을 잘 알고 있어야만 안전하고 효율적으로 산불을 진화할 수 있다.

4. 우리나라 산불의 특성

가. 산불의 연소 특성

우리나라는 전 국토의 65%가 산지이며, 이 중 97%가 임목지이고, 최근 산림자원의 증가로 인해 가연성 지피물이 많이 쌓여 있고, 산림상태로 보아 불에 잘 타는 침엽수가 43%로 가장 많아 산불발생의 위험성이 높으며, 대륙성 계절풍으로 인하여 봄, 가을 건조기가 전국적으로 지속되고, 해풍, Fohn 현상 등 바람의 영향으로 전국 동시다발적인 경향이 상존하고 있다.

또한, 우리나라는 경사가 급한 산악형 산림으로서 연소진행 속도가 평지보다 약

8배 정도나 급속히 확산되며, 산불발생시 고온 및 지형이 불규칙하여 난기류가 발생되고, 산불진행 방향의 급변 및 비산화가 발생하여 근접 진화 및 산불확대의 위험성이 있고, 산악형 산림인데다 산불의 대부분이 차량진입이 곤란한 농산 촌에서 발생하는 경우가 많아 지상접근이 곤란하며, 특히, 농산 촌 인구감소 및 노령화로 인하여 초동진화에 실패함으로써 산불의 대형화를 유발시키는 연소특성을 가지고 있다.

나. 산불의 연소 유형

산불의 연소는 바람, 연료, 지형 등의 환경 인자에 영향을 크게 받는다. 우리나라와 같이 산지의 경사도가 급한 지형조건에서의 연소형태는 산록부에서 발생한 산불이 능선부위까지 진행하는 단순사면형이 대부분으로 부채꼴 모양을 하고 있는 것이 특징이다.

특히, 우리나라 산불은 구릉지기 많고 경사가 급한 지형조건 때문에, 능선까지 매우 빠르게 진행하지만, 일단 능선에 오른 산불은 급경사지에서 하향사면으로 진행할 때 상향사면 연소속도보다 무려 16배 늦게 하향으로 연소 진행하는 특징이 있어, 연소진행방향 반대 8내지 9부 능선이 산불진화를 가장 용이하게 할 수 있는 적정지점으로 판단되며, 이러한 우리나라 산불의 연소유형을 지형형태를 고려하여 단순사면형, 골짜기막장형, 능선사면형, 구릉형, 비산화발생형으로 구분할 수 있으며, 이러한 우리나라 연소유형에 알맞은 효과적인 진화방법을 강구하여야 할 것으로 판단된다.

한편, 동해안 지역의 바람장을 보면, 야간에는 대기가 안정되어 있어 지형을 따라 바람이 거의 같은 방향으로 불고, 주간에는 일사량의 증가에 따라 대기가 불안정하여 난기류가 발생하며 급기야는 산불의 확산방향이 바뀌어 산불진화가 더욱 어렵게 되면서 산불이 대형화되는 경우가 많았다.

다. 산불의 구분

Table 3.2는 우리나라의 주요 대형 산불 및 소형 산불에 대하여 대형과 소형의 구분인자를 분석한 결과 수종, 연료의 연속성, 최대풍속, 풍속, 최대고도, 사면장 6개 인자가 선정되었고, 선택된 6개 인자의 특징에 대해 특히, 소나무림에 연료의 연속성이 있었고, 최대풍속은 9m/s 이상, 최대고도 420m 이상에 사면장 650m 이

상일 경우에 대형 산불로 확산되었다.

Table 3.2. Analysis of Large and Small forest fire.

Division	study sites	main trees	fuel continuity	wind speed (m/s)	max wind speed (m/s)	height (m)	inclined length(m)
Small <30ha	15	mixed broadleaf tree	Nothing	< 3	< 5	< 200	< 200
Large 30ha≦	16	pine trees	In	5 ≦	9 ≦	420 ≦	650 ≦

제2절 목재와 연소

1. 목재의 연소

가. 목재의 건조과정

목재의 성분은 나무의 종류에 따라서 약간의 차이는 있지만 주성분은 셀룰로오스이며, 기타 여러 가지 다른 성분을 함유하고 있다. 또한 목재는 일반적으로 수분을 함유하고 있으며, 수분의 함유량은 상황에 따라 크게 변한다. 건조한 목재의 경우는 수분을 불과 몇 %정도만 포함하고 있지만 물에 잠겨 있는 목재나 생나무의 경우는 50% 이상 90%까지도 수분을 포함하고 있다.

목재가 수분을 함유하는 형태는 세 가지이다. 첫째, 수분이 목재의 세포와 세포 사이에 들어 있는 형태(이 수분은 공기의 습도 변화에 따라 변한다), 둘째는 수분이 세포 속에 들어 있는 형태이며, 셋째는 수분이 결정수가 되어 함유되는 형태이다.

목재의 발화온도는 나무의 종류에 따라 약간 다르다. 이때의 발화온도는 목재를 가열했을 경우에 나오는 혼합기체인 분해성분 가스의 발화온도에 해당되는 것이다. 참고로 10 가지 나무에 대한 발화온도를 나타낸 것이 Table 3.3이며, 후박나무(Silver magnolia)가 가장 낮은 480℃이고, 너도밤나무(Beech)가 가장 높은 505℃이다.

목재에 열을 가해주면 목재의 온도가 높아진다. 그러면 처음에는 앞서 설명한 첫 번째 수분함유 형태인 세포와 세포 사이에 끼어 들어갔던 수분이 증발하면서

건조된다. 목재의 온도가 100℃에 달하면 공급된 열은 모두 수분을 증발시키는데 사용되므로 두 번째 함유형태인 목재의 세포 속에 들어 있는 수분과 세 번째 함유형태인 결정수까지 증발된다. 증발이 계속되는 한 온도는 100℃를 계속 유지한다. 수분이 모두 증발해 버리면 그 때부터 100℃ 이상으로 목재의 온도가 상승하기 시작한다.

Table 3.3. Ignition point of the wood.

Wood	Ignition point(℃)	Wood	Ignition point(℃)
silver magnolia	480	walnut	490
paulonia	485	white birch	490
cedar	485	oak	495
euonymus sachalinensis	485	zelkova	495
lauan	485	beech	505

나. 목재의 열분해와 발화

목재의 온도가 100℃ 정도에 달하면 단순히 수분만의 증발에 그치지 않고 목재의 성분 중 휘발성분이 증발하기 시작한다. 이러한 상태에서 열이 계속 가해지면 목재의 온도는 더욱 높아진다. 온도가 170℃ 정도에 달하면 목재의 성분은 분해되기 시작하고, 200 ~ 350℃ 정도로 온도가 높아지면 건조생성물의 상태, 즉 목탄 직전의 상태에 달하게 된다. 이 상태에서 온도의 상승을 멈추게 하면 목재는 열분해되어 검은 색의 숯이 된다.

열분해가 이루어질 때에는 목재로부터 분해가스가 발생한다. 분해가스는 온도가 높을수록 많이 발생한다. 공기 중에 어느 정도 이상으로 분해가스의 농도가 증가되면 이러한 혼합기체는 인화성을 가지게 된다.

인화온도는 Table 3.4와 같이 물질의 종류에 따라 다르다. 목재라 하더라도 여섯가지 나무 종류에 따라 인화온도가 약간씩 다르게 나타난다.

Table 3.4. Flash point of the wood.

Wood	Flash point (℃)	Wood	Flash point(℃)
cedar	240	zelkova	264
euonymus sachalinensis	253	paulonia	269
red pine	263	beech	272

침엽수가 활엽수보다 인화온도가 낮아, 침엽수 쪽이 더 쉽게 인화된다. 인화온도는 목재가 스스로 연소하기 시작하는 온도가 아니다. 목재는 인화온도 정도에서는 아직 연소가 시작되지 않는다. 연소가 시작되려면 발화온도에 달하여야 한다.

화재로 연소중인 장소 부근에 있는 산림은 강한 복사열을 받아 열분해를 일으켜 가스가 발생한다. 이러한 경우에는 화기의 접촉도 없고, 더욱이 연소 장소의 풍상측에 있다 하더라도 불이 옮겨 붙지 않을 것이라고 안심할 수 없다. 조그마한 불씨가 떨어져도 즉시 인화되어 연소되기 시작하는 경우도 있기 때문이다.

인화성의 혼합가스가 일단 인화되면 가스가 연소할 때의 연소열 때문에 온도가 크게 상승하여 목재의 온도가 발화온도에 달하여 연소를 시작하게 된다. 화재시에는 인화온도가 발화온도보다 훨씬 낮다는 사실에 유의해야한다.

2. 함수량과 연소

가. 목재의 함수량

목재를 연소시키려면 목재의 온도를 그 목재의 발화온도에 이르기까지 외부에서 열을 공급해주지 않으면 안 된다. 이러한 열의 공급 즉, 가열에 열이 많이 필요하면 연소는 쉽게 일어나지 않는다. 그리고 목재는 항상 수분을 다소 포함하고 있으므로 연소는 목재의 함수량에 따라서 크게 좌우된다.

목재의 건조 정도는 주로 공기 중의 습도에 따라 좌우된다. 물에 젖은 목재나 생나무는 수분을 많이 포함하고 있으므로 그늘에 놓아두면 수분이 점차 증발되어 가벼워진다. 그러나 어느 정도까지 수분이 증발되어 버리면 그 후에는 주위에 있는 공기의 습도에 따라 함수량이 달라지므로 목재의 중량이 공기의 습도에 따라 달라진다. 이러한 사실은 공기의 습도와 목재의 함수량 사이에는 밀접한 관계가 있음을

나타낸다. 즉 목재의 함수량이 적은 경우에 습도가 높으면 목재는 공기 중의 수분을 흡수하여 함수량이 증가한다.

물에 침수되었던 목재나 생나무에 함유되어 있는 수분 중 그늘에서도 쉽게 증발될 수 있는 수분은 목재의 세포와 세포 사이의 틈에 들어 있는 수분이다. 일단 목재의 함수량이 공기의 습도 정도에 도달된 이후에 공기의 습도에 따라 목재 바깥의 습도에 맞추어 출입하는 수분은 세포의 벽에 흡착된 상태에 있던 것이다. 목재의 세포와 세포 사이에 들어 있는 수분은 대수곡선적으로 건조하는 성질을 가지고 있어서 수분이 건조되는 속도가 그때 가지고 있는 수분의 양에 따라 결정되며, 세포벽에 흡착되어 있는 수분은 그 출입속도가 목재의 흡착력의 영향을 받는다.

항습조를 사용하여 공기의 습도 상태에 따라 목재나 섬유질의 함수량 특성의 변화를 조사한 결과, 습도 0 ~ 10% 부근에서는 재료의 함수량이 급격히 낮아지는 경향이 있고, 중간 정도의 습도인 20 ~ 60% 부근에서는 함수량이 습도에 대체로 비례한다. 그리고 높은 습도인 70 ~ 100% 부근에서는 함수량의 변화가 다시 급격히 증가한다. 즉 목재의 함수량은 기온에 따라서도 달라지고 목재의 종류에 따라서도 달라지지만 그 특성은 대체로 비슷하다.(홍성길, 1987)

나. 함수량과 연소

물은 비열이 높기 때문에 목재가 수분을 많이 함유하고 있으면 목재의 온도를 높이기 위하여 많은 열을 필요로 하게 된다. 건조한 목재의 비열은 0.33인데 물의 비열은 1.00이다.

물의 비열이 건조한 목재의 비열의 3배에 달하므로 목재의 함수량이 증가되면 증가될수록 같은 온도를 상승시키는데 필요로 하는 열량이 많아진다. 건조한 목재라면 1g의 목재의 온도를 100℃로 상승시키는데 33cal가 필요하지만, 20% 함수량을 가진 목재는 같은 100℃로 상승시키는데 건조한 목재보다 40% 정도 증가된 46cal가 필요하며, 40% 함수량을 가진 경우는 60cal가 필요하다. 더욱이 물 1g을 증발시키는데 필요한 열량은 그 때의 온도에 따라서 약간의 차이가 있지만, 대체로 560cal이다. 이것을 물의 증발열이라 한다. 이와 같이 목재가 수분을 함유하게 되면 목재의 온도를 높일 때 수분의 온도를 함께 높일 뿐만 아니라 수분을 증발시키기도 하여야 하기 때문에 더욱 많은 양의 열이 소모된다. 마르지 않은 장작은 태우려 애를 써도 잘 타지 않는다. 또한 일단 타기 시작했다 하더라도 그냥 놓아두면

저절로 소화되는 경우가 많다. 이러한 현상은 부분적으로 연소에 의하여 연소열이 공급되어도 공급된 열의 대부분이 수분을 증발시키는데 쓰여 연소를 계속하기에 필요한 열이 부족해지기 때문이다.

가연물질의 함수량이 가연물질 전체 중량의 약 15% 이하인 경우에는 성냥불과 같은 불씨로도 불을 붙일 수 있지만 함수량이 15% 이상이 되면 작은 불씨로는 불을 붙일 수 없다. 그러나 일단 큰 화재가 시작되면 함수량 자체는 중요하지 않게 되어 50% 이상의 함수량일 때에도 잘 연소된다.

산불의 경우에는 삼림 중의 낙엽의 함수량이 큰 문제가 된다. 낙엽의 함수량과 산불과의 관계는 비교적 상세히 알려져 있다. 낙엽의 함수량과 연소성을 나타낸 것이 Table 3.5이다. 즉, 목재나 섬유질은 그 함수량이 25% 이상 클수록 연소가 어렵다.

Table 3.5. Moisture contents and combustibility of leaves.

Moisture contents	Combustibility	Remark
2 ~ 7 %	very big	all risks
8 ~ 10 %	big	enough to match the fire risk
11 ~ 13 %	medium	small fire risk
14 ~ 18 %	low	smoked fire risk교
19 ~ 25 %	very low	-
26 %	no combustion	-

다. 함수량과 연소실험

앞에서 다룬 것은 우리들이 보통 경험하거나 또는 상식적으로 알고 있는 것으로서, 목재나 섬유질의 함수량이 큰 경우에는 연소되기가 어렵다는 이론에 관한 것이었다. 여기서는 수량적인 연소실험 결과에 대하여 알아보자.

선향(joss stick, 線香, 萬壽香이라고도 함)을 사용한 실험 결과에 의해 함수량과 연소 속도의 관계를 나타낸 것이 Fig. 3.1이다. 선향은 가늘기 때문에 공기의 습도가 그대로 선향의 함수량에 대응된다고 생각할 수 있다. 선향의 함수량이 크면 연소속도가 느려져 선향이 모두 타기까지 소요되는 시간이 길어진다.

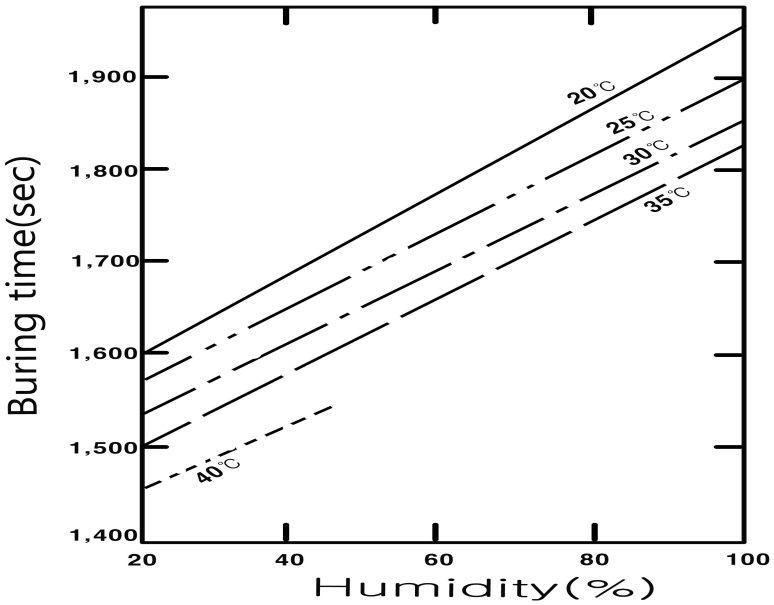


Fig. 3.1. The relationship between moisture content of joss stick and the burning time. (by Tsuzuki, 1979)

이때 선향의 연소속도는 기온의 영향도 받는다. 기온이 높을 때는 함수량에 따른 연소속도의 차이가 현저히 크지만 기온이 0℃ 정도일 때는 함수량에 따른 연소속도의 차가 적어진다.

제3절 대기의 상태와 연소

1. 습도의 영향

공기 중의 수증기량, 즉 습도가 직접 연소에 어떠한 영향을 주는지를 알려면 전혀 습기를 포함하고 있지 않는 물질을 공기의 습도를 바꾸어가며 연소시켜보고, 또한 습기를 잘 흡수하는 물질을 여러 가지 다른 함수량별로 여러 가지 다른 습도의 공기 중에서 연소시켜보는 실험을 해 볼 필요가 있다.

양초를 큰 통 속에서 태우면서 그 통 아래로부터 습한 공기와 건조한 공기를 각각 보내어 그 양초가 일정한 길이만큼 타 없어지는데 걸리는 시간을 측정한 실험에 의하면, 습도가 33%로 비교적 건조한 공기를 보내었을 때는 15.7분이 걸렸고,

습도가 90%로 습한 공기를 보내었을 때는 같은 길이만큼 타는데 20.2분이 걸렸다. 이 실험에서 공기 중의 수증기가 직접 연소속도에 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 즉 습도가 높을수록 연소속도는 느려진다.

또한 건조한 선향을 건조한 공기 중에서와 습한 공기 중에서, 또 습한 선향을 건조한 공기 중에서와 습한 공기 중에서 연소시키는 실험의 결과로 Table 3.6과 같은 결과가 발표되었다.

이에 의하면 건조한 선향이라도 습한 공기 중에서는 연소속도가 분명히 늦다. 일반적으로 습한 공기 중에서 선향의 연소가 느려지는 것은 선향이 습해진다는 사실과 공기가 습하다는 사실과의 두 가지 원인이 겹쳐서 나타나는 결과이다. 선향의 경우 이들 두 가지 원인은 그 효력이 비슷하다고 생각된다.

선향은 훈향을 빻아서 설탕, 빻은 밀, 송진 등으로 결합시켜 만든 것으로서 본질적으로 목재와 다를 바가 없으므로 목재가 연소하는 경우에도 대체로 같은 결과를 얻게 된다고 생각할 수 있다. 다만 선향은 매우 가늘기 때문에 공기에 노출되면 재빨리 선향의 함수량이 공기 중의 습도와 같아지는 성질이 있지만 일반 목재의 경우는 공기 중의 습도에 빠르게 적응되지 못한다는 점이 다를 뿐이다.

Table 3.6. Air relative humidity and burning time of the joss stick.

Joss stick humidity(%)[5]	Air relative humidity	
	34%	100%
34	3.12mm/min	2.94mm/min
100	2.90mm/min	2.70mm/min

2. 기온의 영향

습도를 일정하게 유지할 때 온도 변화에 따른 연소속도의 변화를 조사하기 위하여, 앞서 나타낸 Fig. 3.1~2와 비슷하게 각각 다른 습도에 대하여 공기의 온도, 즉 기온을 20℃부터 40℃까지의 5℃ 간격으로 선향의 연소속도를 각각 측정하여 그 결과를 나타낸 것이 Fig. 3.3 이다.

이 그림은 습도가 일정할 때 기온이 높으면 연속속도가 커져서 연소소요시간이

5) 선향의 습도는 선향을 해당 습도의 공기 중에 적당한 시간동안 노출시켜 놓은 상태를 나타냄.

짧아지는 경향이 있음을 나타내고 있다. 또한 건조하여 습도가 낮은 경우에 연소 속도가 커서 연소 소요시간이 짧아진다고 하는 사실은 앞서 얻은 결과와 같다.

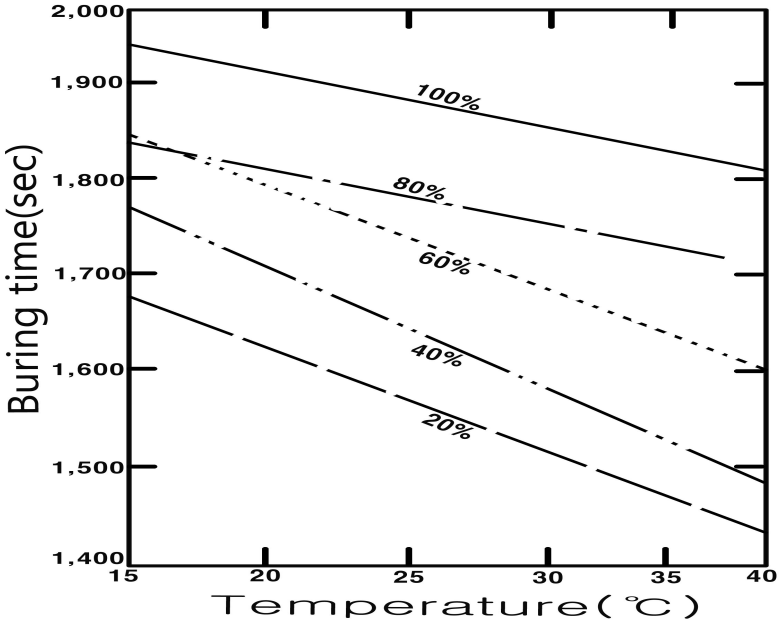


Fig. 3.2. The burning time of joss stick by air temperature and air relative humidity. (홍성길, 1987)

기온이 높을 때에 연소가 활발하게 일어나는 이유는 기온이 높을수록 가연물질의 발화온도에 접근하기가 용이하기 때문이다. 선향은 가늘기 때문에 선향의 온도는 기온과 큰 차가 없다고 볼 수 있다. 또한 목재를 태우는 경우에도, 목재의 발화온도는 약 490℃ 이므로 기온이 0℃ 일 때 연소가 시작되도록 하자면 490℃까지 목재의 온도를 높여 주지 않으면 안 된다. 그런데 기온이 30℃라면 목재의 온도를 460℃만 높여 주면 발화온도에 달한다. 기온 0℃ 의 경우는 기온 30℃ 의 경우보다도 7%의 열을 더 많이 필요로 하고 있다. 따라서 연소시키기에 그만큼 더 어렵다.

3. 풍속의 영향

물질이 연소할 때에는 산소를 필요로 한다. 따라서 연소 장소의 부근에 있는 산소는 점차로 감소되므로 공기가 이동하여 새로운 산소가 공급되지 않으면 연소는

중단되고 만다. 예를 들어 잘 타던 불도 항아리에 넣어 뚜껑을 닫아두면 새로운 공기가 차단되므로 불은 꺼지고 만다는 원리와 같다. 반대로 난로의 연통은 대류를 촉진시켜 새로운 공기의 공급을 촉진시키는 역할을 하여 연소를 가속시킨다고 볼 수 있다.

풍동(風洞)[6] 속에 선향을 놓고 바람의 속도를 조절하면서 연소시키면 풍속과 선향의 연소속도의 관계를 Fig. 3.3과 같이 얻을 수 있다.

즉, 풍속이 약할 때는 풍속이 증가됨에 따라 선향의 연소속도로 점차로 증가하여 풍속이 1.0m/sec 정도에서 최대 연소속도에 달한다. 이때의 연소속도는 무풍시에 비하여 약 10% 정도 더 빠르다. 풍속이 점차 더 증가되면 연소속도는 반대로 점차 느려져서 풍속 2.2m/sec 정도에서 꺼져버리고 만다. 이러한 현상은 풍속이 증가하면 산소의 공급이 증가하겠지만 이와 동시에 서늘한 공기가 다량으로 들어가 냉각작용을 일으켜 선향의 온도를 발화온도 이하로 떨어뜨리기 때문이다.

불꽃을 내는 물질이 연소하는 경우에도 바람의 영향은 마찬가지여서 어느 정도 이상으로 강한 바람이 불면 불꽃이 날려가므로 불이 꺼진다. 이러한 현상은 우리가 성냥을 켤 때 보통 경험할 수 있는 일이다. 그러나 연소의 규모가 산불화재처럼 커지면 발열량이 크므로 바람에 의한 냉각작용의 영향은 무시된다. 따라서 화재의 경우는 보통 부는 정도의 풍속에서는 풍속이 증가될수록 연소가 더욱 왕성해진다.

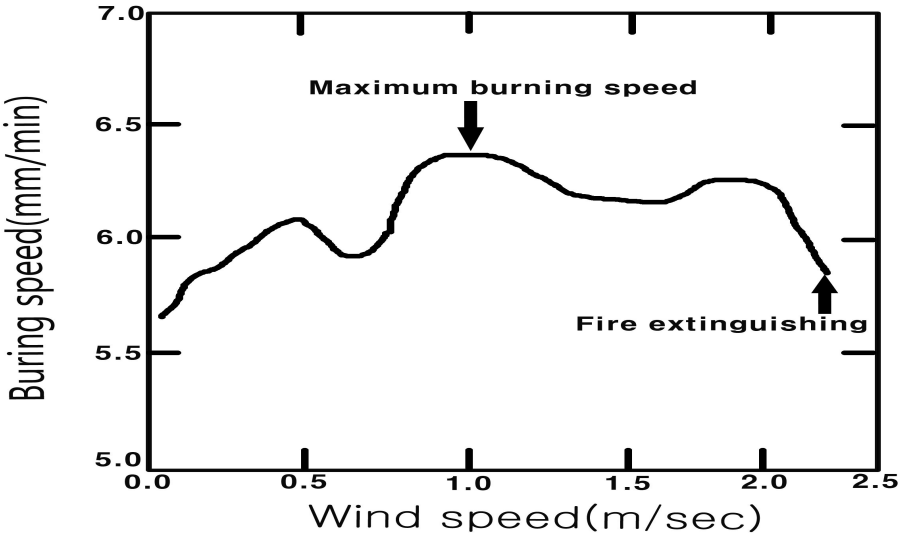


Fig. 3.3. The wind speed and burning speed of joss stick. (홍성길, 1987)

6) 풍동(風洞, wind tunnel) : 공기의 흐름을 인공적으로 조절할 수 있는 터널 모양의 장치.

실험실 안에서 여러 가지 재료로 여러 가지 풍속 상태에서 연소하는 모양을 조사한 실험은 많이 있다. 그 중 풍동 안에서 두꺼운 석면 받침 위에 두께 0.5mm, 넓이 5cm × 50cm의 셀룰로이드 판을 올려놓고 태워 Fig. 3.4와 같은 모양의 연소 결과를 얻은 실험도 있다. 즉 풍속이 약한 경우에는 연소 자국이 풍상측으로는 원형이고, 풍하측으로는 약간 타원형을 이루고 있어, 전체적으로 보면 계란과 비슷한 모양이지만, 풍속이 강해지면 점차 좁고 긴 타원형을 이룬다.

이때 풍하측에서는 풍속이 약할 때에는 연소속도가 처음에 천천히 증가한 후 다음에는 급히 증가하고, 그 다음에는 재차 천천히 증가한다. 위로 솟구치는 불꽃이 기류를 따라 기울어지는 경사각은 풍하측으로의 연소속도를 어느 정도 증가시킨다. 풍상측으로의 연소속도는 풍속증가와 함께 감소한다.

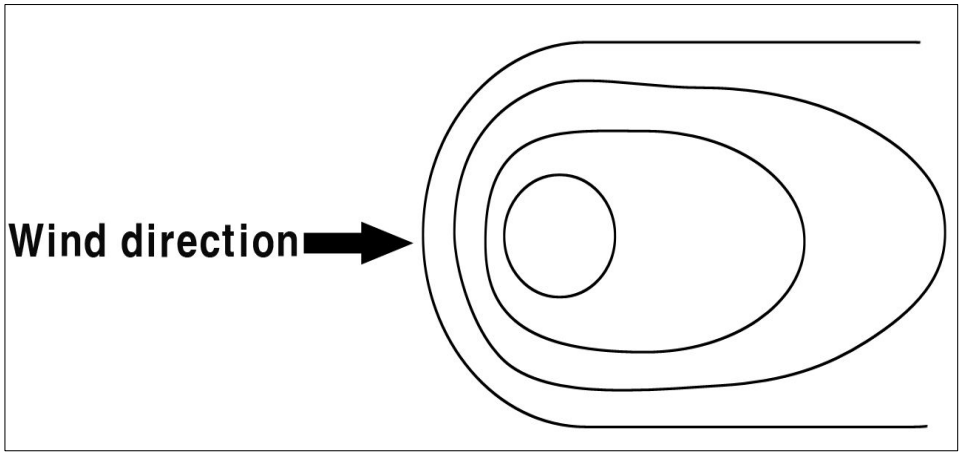


Fig. 3.4. Distribution of the time line of burning. (by Kanehara , 1971)

제4절 산불과 기상

1. 산불과 기상

산불에 영향을 주는 기상 요소는 강수량, 상대습도, 온도, 바람 등이다. 건조기에는 강우가 적고 계속적으로 맑은 날이 많아 연료가 건조하여 산불발생 위험도가 커진다. 반대로 우기에는 강수량이 많으므로 연료가 습하여 산불발생의 위험이 적다. 아울러 공기의 습도(상대습도)에 따라 연료의 건습정도가 결정되므로 상대습

도의 변화와 산불발생 위험도의 관계를 Table 3.7과 같이 표시할 수 있다.

기온은 습도의 변화와 밀접한 관계를 가지고 있다. 낮에는 기온이 높아지는 10시부터 해 질 때까지 상대습도가 내려가 연료가 점차 건조해지면서 이미 발생한 산불의 화세가 증가한다. 해가 지고부터 밤이 깊어질 때까지 연료는 아직 건조한 상태이지만 바람은 멈추어져서 무풍상태가 되므로 화세가 점차 약화된다. 한밤중부터 다음날 해 뜰 때까지는 공기가 냉각되고 상대습도가 높아 연료(경연료)가 습해지므로 화세는 점점 약해진다. 그리고 바람은 산정으로부터 골짜기로 내려 부는 산바람이기 때문에 불의 연소방향은 낮과는 반대로 산 아래 쪽으로 진행한다.

그러나, 깊은 골짜기가 아니면 산풍(산바람)은 매우 약하므로 이때가 진화작업에 가장 좋은 때이다. 다시 해가 돋으면 잠시 바람이 멈추었다가 이내 기온이 높아지면서 곡풍(골바람)이 불어오고 연료도 다시 건조해지면서 산불이 활성화되기 시작한다.

산불이 대형화 하여 며칠 계속 연소할 경우에는 산불의 하루 중의 변화과정을 이해하여 화세가 약한 때를 골라 진화작업을 집중적으로 시행하는 것이 좋다.

바람은 연료의 수분을 증발시키며, 산소 공급을 증가시켜 연소 진행을 가속시킨다. 또한 돌풍을 일으키면서 연소물질을 상승시켜 타 지역으로 비화(飛火)시킨다. 산불이 연소할 때 강풍, 돌풍 등에 의해 비화하는 경우 9m/sec 정도의 강풍에 의한 최대 비화거리는 800m나 되며, 돌풍에 의한 비화거리는 5km나 되기도 한다.

풍향이 변하는 경우에는 산불의 연소 진행방향을 변경시켜 여러 갈래가 되기도 한다.

산의 계곡에서는 산곡풍이 낮과 밤사이에 방향을 바꾸어 불기 때문에 시각에 따라 풍향 풍속의 변화를 유의할 필요가 있다. 즉 낮에는 골짜기로부터 산 위를 향해 바람이 불고, 밤에는 이와 반대로 산 위쪽에서 계곡 아래쪽으로 바람이 내려 분다.

Table 3.7. Air relative humidity and forest fire risk.

Humidity	Forest fire risk
< 25%	crown fire (樹冠火) occur
25 ~ 40%	well occur, Forest fire does not turn off
40 ~ 50%	well occur, rapid burning
50 ~ 60%	occur, slow burning
≦ 60%	no forest fire

2. 산불과 지형

산의 지형은 산불 진행에 큰 영향을 준다. 경사의 방위에 따라서 햇빛을 받는 양이 다르므로 풍향·풍속이 다르고, 연료의 건습 정도가 달라진다. 즉 남향 경사는 북향 경사보다 햇빛을 많이 받아 온도가 높다. 따라서 상대습도가 낮아 연료가 건조하여 산불발생 위험도가 높다. 경사방위별로 산불발생률을 나타내면 Fig. 3.5 와 같다.

산불은 해발고도에 따라서도 다르다. 이는 고도에 따라 눈 녹는 시기, 식물의 생장활동 시기가 다르기 때문이다. 발생빈도의 순위를 보면, 산경사의 시작부분에서 산불이 가장 많이 발생하고, 다음이 평지, 중산간부분, 산정의 순서이다.

산불 중 급경사에서 발생한 것은 복사열, 대류열 등의 영향과 급경사가 굴뚝과 같이 연기를 빨아들이는 역할을 하기 때문에 산불의 진행속도가 평지에서 발생한 것보다 빠르다. 급경사지에서 발생한 산불은 골짜기의 골바람을 받아 화두가 쐐기 모양의 다두화 산불이 된다. 경사지의 아랫부분에서 산불이 발생하여 능선으로 진행하여 능선을 넘어갈 경우에는 능선 너머 골짜기로부터 불어 오르는 골바람의 영향으로 산불 진행방향이 반대방향으로 확산 진행된다.

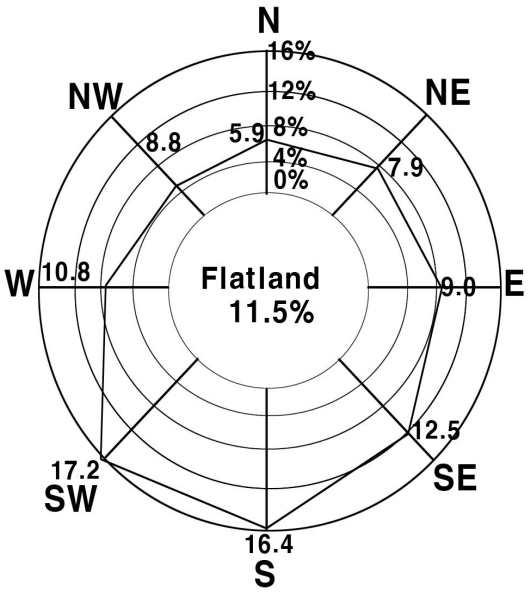


Fig. 3.5. The rate(%) of forest fire by slope direction of the mountain. (홍성길, 1987)

제4장 우리나라의 기후변화7)와 산불발생

제1절 우리나라의 자연 및 인문환경

북반구 중위도의 유라시아대륙 동안에 위치하는 우리나라는 경위도 상으로 33° ~ 43 °N, 124° ~ 132 °E 사이에 놓여 있다.

우리나라의 동·서 폭은 약 300km , 남 · 북 폭은 약 1,100km이고, 3,400 여 개의 부속 도서(섬)로 구성되어 있다. 총면적은 약 22만km^2이고, 그 중 남한의 면적은 약 10만km^2이다. 남한은 1개의 특별시, 6개의 광역시, 8개의 도, 1개의 특별자치도로 구성되고, 특별시는 자치구로, 광역시는 자치구와 군으로, 도는 자치시와 군으로 각각 다시 나뉜다.

1. 자연환경

우리나라는 산지가 국토의 약 70 % 이상을 차지하지만, 산지의 고도가 상대적으로 높지 않다. 북쪽과 동쪽의 산지가 높고, 서쪽과 남쪽으로 가면서 고도가 낮아진다(Fig. 4.1).

우리나라의 하천은 낙동강, 섬진강 등 일부를 제외하고는 대부분 동쪽에서 서쪽으로 흐른다. 높은 산맥들이 동쪽으로 치우쳐 있기 때문에 황해로 유입되는 하천들은 대체로 유로가 길고, 유역면적이 넓어 유량이 많은 특징이 있다.

이로 인해 규모가 큰 평야나 분지는 황해로 유입되는 하천을 따라 분포한다. 이에 반해 동해로 유입되는 하천들은 유로가 짧고, 유역면적 이 좁아 유량이 적은 특징이 있다. 우리나라의 서해안과 남해안은 수심이 낮고, 해안선이 복잡한 반면에 동해안은 수심이 깊고, 해안선이 단조롭다.

Fig. 4.1. Topography of Korea.

7)“한국기후변화백서”에서 인용하였음.(기상청, 2011)

우리나라는 겨울철에 한랭, 건조한 시베리아고기압의 영향을 강하게 받고, 여름철에는 주로 고온, 다습한 북태평양고기압의 영향을 받는다. 우리나라는 대기활동이 활발한 중위도에 위치하여 전선, 고기압, 저기압 등의 영향을 많이 받는 지역이다. 우리나라는 유라시아대륙의 동안에 위치하여 대륙 서안에 위치한 지역보다 대륙성 기후가 뚜렷하게 나타난다. 그러나 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 남부지역에서는 해양성 기후의 특성이 나타나기도 하며, 지형이 복잡하기 때문에 지역별로 기후의 차이가 뚜렷하다.

2. 인문환경

2013년도 우리나라의 총인구는 약 5,100만 명이다[8]. 광역시·도별로는 경기도가 약 1,216만명으로 가장 많고, 서울(약 1,076만명), 부산(약 353만명) 순으로 나타났다(Fig. 4. 2).

수도권의 인구가 전체의 약 49 %를 차지하고, 서울을 비롯한 광역시의 인구가 전체에서 약 46 %를 차지하여 뚜렷한 도시 인구집중현상을 보인다.

우리나라의 인구변화를 보면 1990년에 약 4,300만명에서 2000년에 약 4,600만명으로, 2010년에 약 4,800만명으로 증가하였다(Table 4. 1).

이에 따른 인구밀도도 1990년에 단위면적당약 438명에서 2000년에 약 464명으로, 2010년에 약 486명으로 증가하였다.

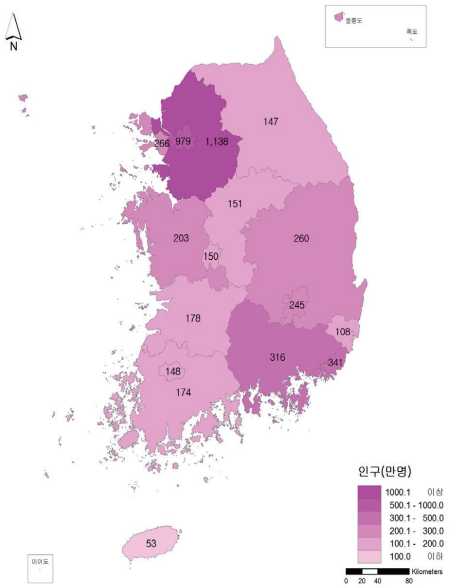


Fig.4.2. Population distribution of metropolitan city and Provin ces. (by Statistics Korea, 2010)

우리나라의 산업구조는 1960년대 경제개발 5개년 계획의 시작과 더불어 기존의 1차산업 중심에서 제조업을 중심으로 2차산업이 발달하였다. 2차산업은 1990년대 초에 정점에 달하였으며, 이후 2차산업은 쇠퇴하고 서비스업을 중심으로 3차산업이

8) 현재 우리나라 인구는 5,100 만 명이다(안전행정부, 2013).

지속적으로 성장하는 추세이다.

Table 4.1. The population and population density of Korea. [9]

Division \ Year	1990	1995	2000	2005	2010	2013
Population (×10,000)	4,341	4,461	4,614	4,728	4,858	5,100
Population density (peoples / km^2)	438	449	464	475	486	543

자료: 인구주택총조사보고서(통계청)

우리나라에는 약 330만개의 사업체에서 약 1,700만 명의 종사자가 근무하고 있다. 사업체 중에서는 도·소매업이 약 26.2%를 차지하여 가장 많고, 숙박 및 음식업(19.1%), 기타 개인서비스업(11.2%), 운수업(10.4%) 등이 10%이상의 비중을 차지하고 있다. 1, 2, 3차 산업으로 보면 1차 산업은 매우 적고, 2차 산업은 12.9% 사업체에서 25.7% 종사자가 근무하고 있으며, 3차 산업은 87.1% 사업체에서 74.2% 종사자가 근무하고 있다.(한국통계연감, 2010)

우리나라의 총 토지면적은 약 99,897km^2이고, 지목별 면적에서는 임야가 차지하는 비율이 약 64.5%로 가장 많고 전·답(19.7%), 도로·철도(2.9%), 하천(2.8%) 순이었다(Table 4.2).

Table 4.2. Land use of Korea.

Use / Division	Forestry	Paddy	Road	River	House ground	Factory	Etc.	Total
Area (km^2)	64,472	19,716	2,930	2,837	2,706	720	6,516	99,897
Rate (%)	64.5	19.7	2.9	2.8	2.7	0.7	6.7	100

자료 : 한국통계연감(통계청, 2010)

9) 안전행정부, 2013

제2절 우리나라의 기후변화

우리나라의 기후변화 경향을 파악하기 위하여 기온, 강수를 포함한 기후요소, 현상일수, 극한기후지수 등을 분석하였다. 우선, 클라이모그래프(climograph)를 통하여 지역별, 기간별로 평균기온과 강수량을 이용하여 기후 특성을 소개하고자 한다.

클라이모그래프는 월별 평균기온과 강수량의 장기간 평균값을 이용하여 해당지역의 기후 특성을 제공한다. 우리나라의 시・도별 1971 ~ 2000년, 1981 ~ 2010년 클라이모그래프(Fig. 4. 3)[10]를 보면, 모든 지점에서 기온은 1월에 가장 낮고, 8월에 가장 높다. 기온이 가장 낮은 1월에는 남해안과 제주도·울릉도 등 섬 지방을 제외한 전국이 영하권에 포함된다. 기온이 가장 높은 8월에는 울릉도를 제외하고 24 ~ 27℃의 분포를 보이고 있다. 기간별로 보면 대부분의 지역에서 모든 월의 평균기온이 1971 ~ 2000년 평년값보다 1981~2010년 평균값이 높았다(부산과 대전 7월, 춘천 1월 제외).

우리나라의 강수는 여름철에 대부분 집중되고, 겨울철에는 강수량이 매우 적다. 그러나 울릉도는 겨울철 북서계절풍의 영향으로 풍상측 사면에 눈이 많이 내려서 겨울철도 강수량이 많았다. 기간별로 보면 대부분의 지역에서 1981 ~ 2010년 평균값이 1971 ~ 2000년 평년값보다 여름철의 강수량이 증가하고, 봄철과 가을철의 강수량은 감소하였다.

10) 특별시 및 광역시, 도청소재지에 위치한 관측지점 사용(도청소재지에 관측지점 미 존재 또는 광역시와 중복 시 생략)

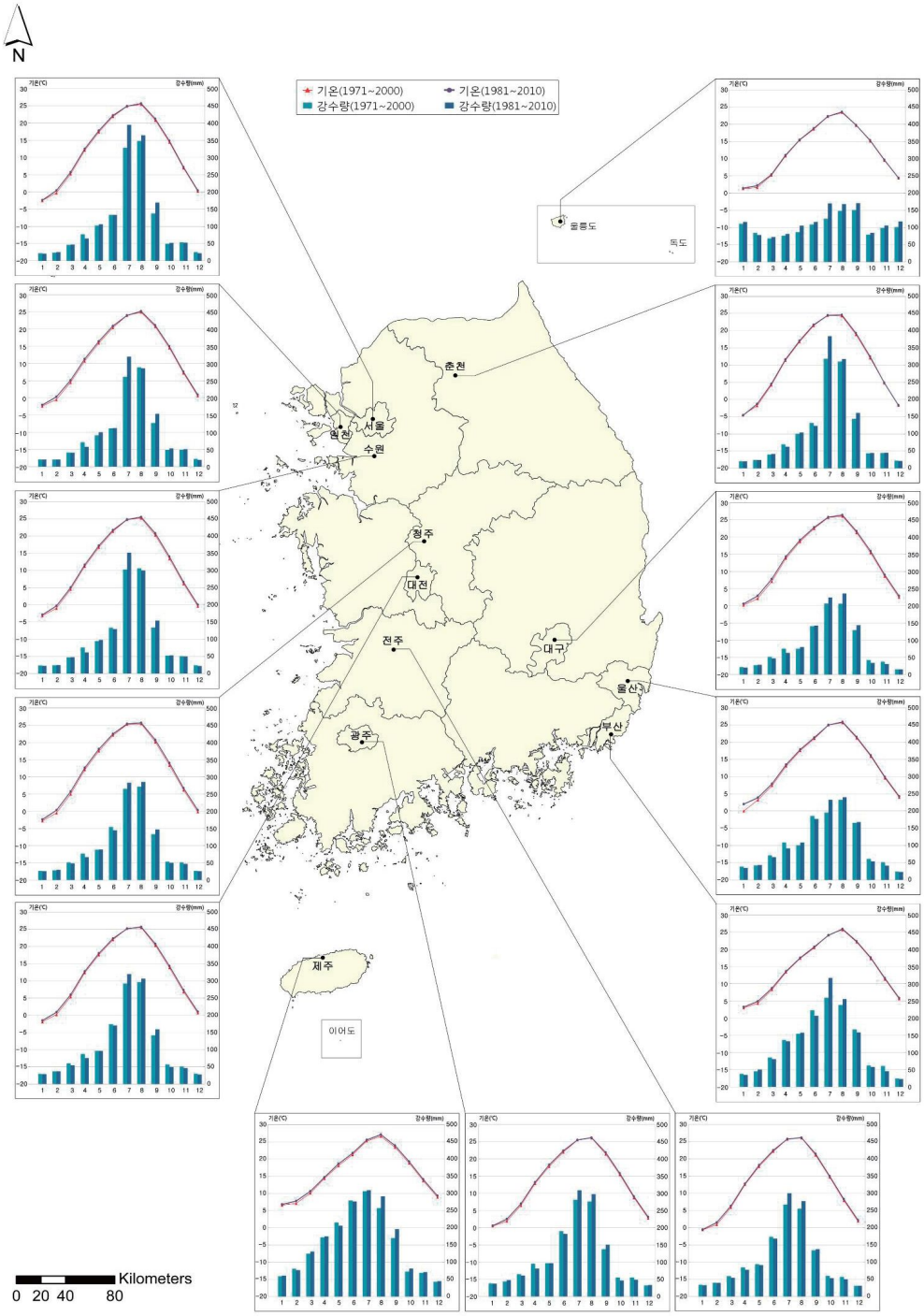


Fig. 4.3. The climograph of each stations in Korea (1971 ~ 2000, 1981 ~ 2010).

1. 기온

기온은 전 세계적으로 가장 일관성 있는 변화경향을 보여주는 기후요소이다. 우리나라의 연평균기온(Fig. 4. 4)은 1998년에 13.5℃로 가장 높았고, 1980년에 11.2℃로 가장 낮았다. 10년 평균값은 지속적으로 상승하여 2001 ~ 2010년에 12.8℃로 가장 높았고, 변화율은 0.27℃/10년으로 상승하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(Table 4. 3)

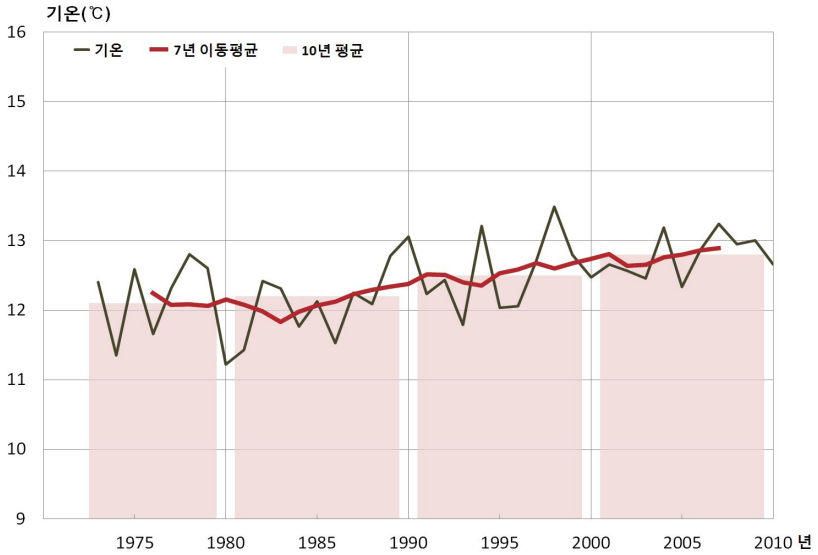


Fig. 4. 4. Interannual variation of annual mean temperature in Korea (1973 ~ 2010).

연평균최고기온(Fig. 4. 5)은 1994년에 19.1℃로 가장 높았고, 10년 평균값은 지속적으로 상승하여 2001 ~ 2010년에 18.3℃로 가장 높았다. 그리고 연평균최고기온 변화율이 연평균기온 변화율(0.27℃/10년)과 같고, 상승하는 경향 역시 뚜렷하게 나타났다(Table 4. 3).

연평균최저기온(Fig. 4. 6)은 1998년에 8.9℃로 가장 높았고, 1981, 1980년에 6. 4℃로 낮았다. 그리고 10년 평균값은 지속적으로 상승하여 2001 ~ 2010년에 8.1℃로 가장 높았다. 또한 연평균기온 및 연평균최고기온과 대비하여 연평균최저기온의 변화율이 0.30℃/10년으로 가장 큰 폭으로 상승하는 경향을 보였다(Table 4. 3). 즉,

우리나라의 평균기온 상승에 최저기온의 변화가 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

계절별 기온 변화율은 여름철을 제외하고 모두 통계적으로 유의한 상승경향이 나타났으며, 겨울철의 변화율은 10년에 0.5℃ 이상씩 상승하는 경향으로 사계절 중 가장 많이 상승했다.

Table 4.3. Temperature change in Korea. (1973 ~ 2010, unit : ℃/10years)

Element \ Period	Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
Mean Tem.	0.27**	0.24**	0.10	0.31**	0.53*
Max. Tem.	0.27**	0.26**	0.08	0.29*	0.51*
Min. Tem.	0.30**	0.25*	0.18	0.38**	0.52*

* level of significance α=0.05, **level of significance α=0.01

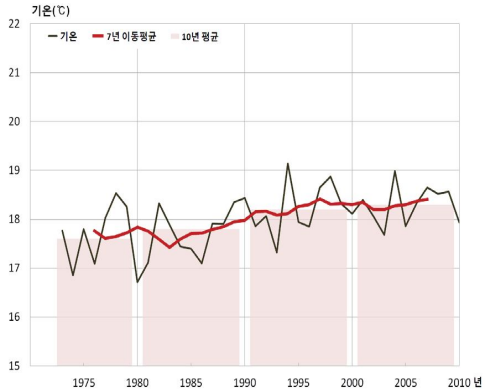


Fig. 4.5. Interannual variation of annual mean maximum temperature in Korea (1973 ~ 2010).

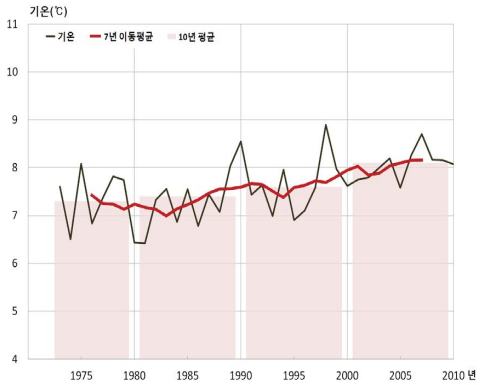


Fig. 4.6. Interannual variation of annual mean minimum temperature in Korea (1973 ~ 2010).

2. 강수

우리나라의 10년별 연평균 강수량은 2001 ~ 2010년에 1,359mm로 가장 많은 것으로 나타났다. 변화경향은 증가와 감소를 반복하고 있으며, 우리나라의 연강수량(Fig. 4. 7)은 2003 년에 1,861mm 로 가장 많았고, 1988 년에 849mm 로 가장 적어서 분석기간(1973 ~ 2010 년) 동안 그 변동성이 매우 크다. 변화율(Table 4. 4)은 여름철(55.20mm/10 년)을 제외하고 통계적으로 유의한 변화경향이 나타나지 않았다.

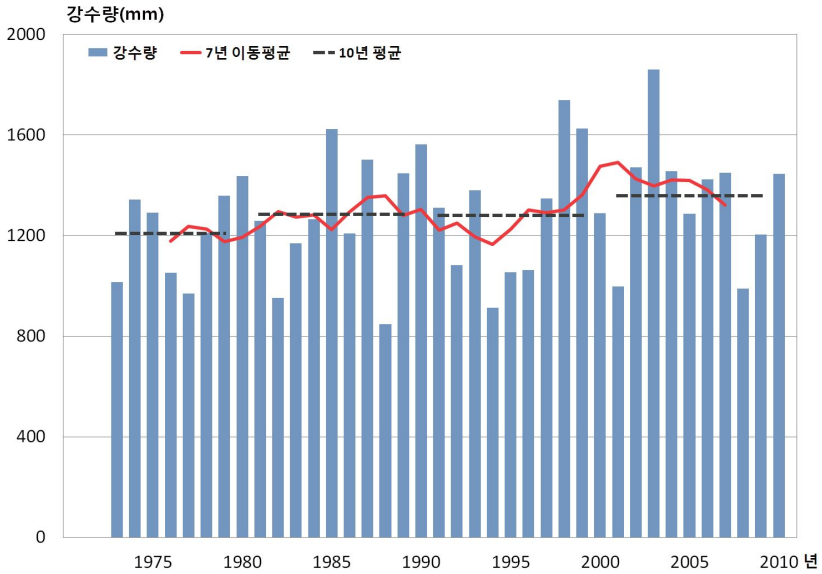


Fig. 4. 7. Interannual variation of annual mean precipitation in Korea. (1973 ~ 2010).

Table 4. 4. Change of annual precipitation amounts in Korea. (1973 ~ 2010, unit : mm/10years)

Division	Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
Precipitation	55.45	- 5.75	55.20*	6.89	0.15

* level of significance α=0.05, **level of significance α=0.01

3. 현상일수

가. 일강수량 80mm 이상 연간일수

61개 지점별 일강수량 80mm 이상 연간일수 변화율(Fig. 4.8)을 보면, 서울, 인천, 수원, 서산 등 중서부지역에서 증가경향이 비교적 크고 임실, 완도, 영주, 울릉도 등에서도 증가경향이 컸다. 나머지 지역도 증가경향이 나타났지만 통계적으로 유의하지 않았다(Fig. 4.9). 일강수량 0.1mm 이상 연간일수 변화율보다 일강수량 80mm 이상 연간일수 변화율이 보다 많은 지점에서 통계적으로 유의한 증가경향을 보이고 있다.

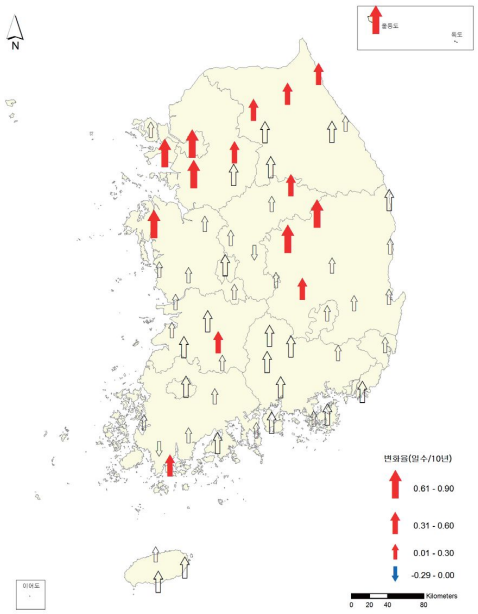
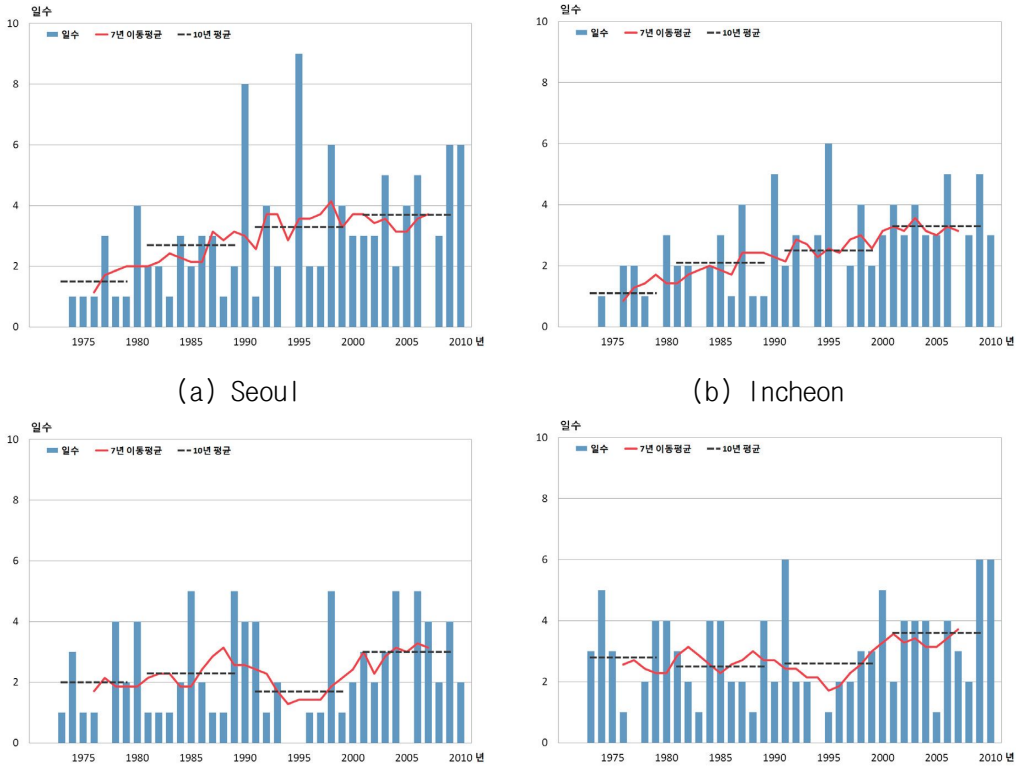


Fig. 4.8. The rate of annual variation of more than 80mm/day rainfall day in each station (1973 ~ 2010).



(a) Seoul (b) Incheon

(c) Youngju (d) Ulleungdo

Fig. 4.9. Interannual variation of more than 80mm/day rainfall day in year. (1973 ~ 2010).

나. 연간눈일수

지구온난화로 기온이 상승하면 일반적으로 눈일수[11]는 감소할 것으로 예측된다. 29개 지점별 연간눈일수 변화율(Fig. 4.10)을 보면, 대부분의 지점에서 통계적으로 유의한 경향이 나타나지 않았다. 충주에서 통계적으로 유의한 증가경향이 나타났고 울릉도, 제주, 서울, 대구, 진주 등 5개지점에서 통계적으로 유의한 감소경향이 나타난다 (Fig. 4.11).

11) 눈일수 : 눈, 진눈깨비, 소낙눈, 소낙성진눈깨비, 싸락눈, 가루눈, 눈보라가 포함된 현상일수

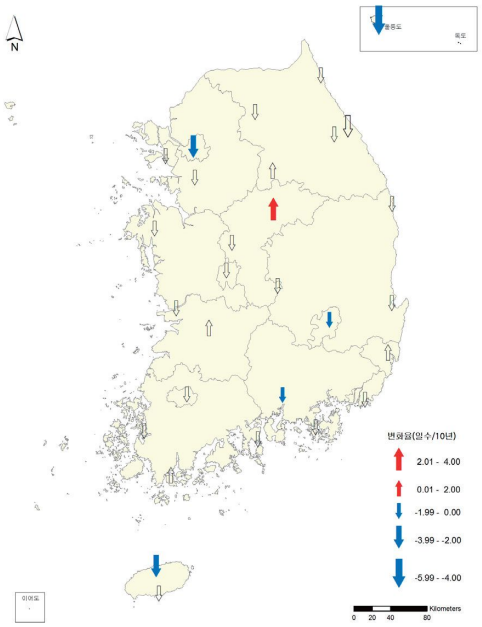
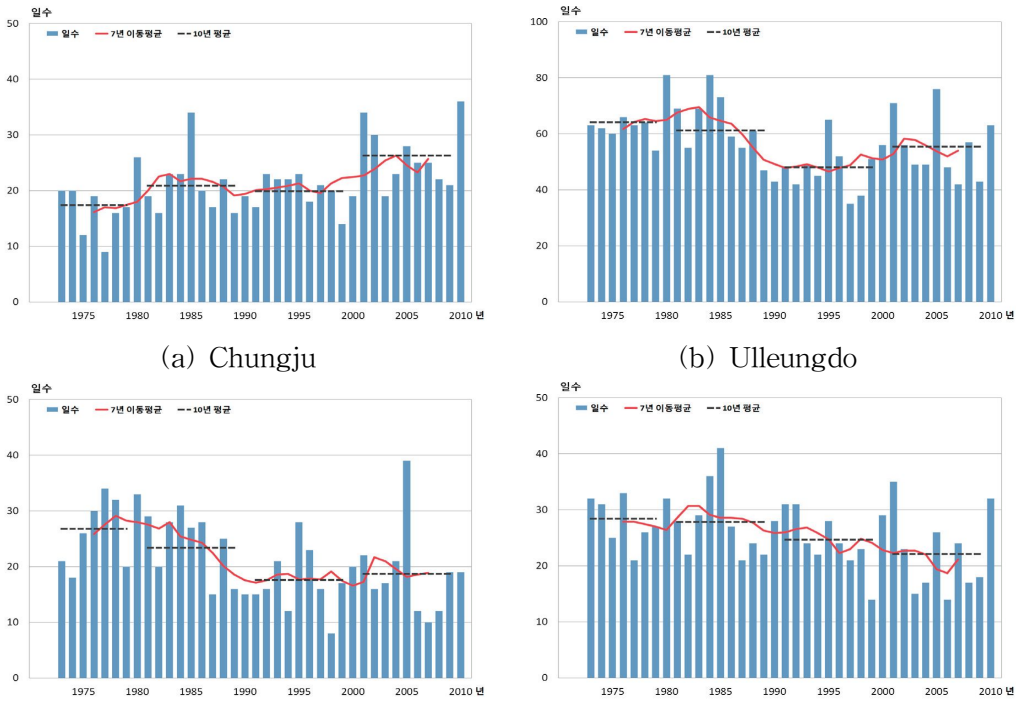


Fig. 4. 10. The rate of inter -annual variation of annual snowfall day in each station (1973 ~ 2010).



(a) Chungju (b) Ulleungdo

(c) Jeju (d) Seoul

Fig. 4. 11. Interannual variations of annual snowfall days (1973 ~ 2010).

다. 일최저기온 25℃ 이상 연간일수

기후변화로 인해 나타나는 현상 중에 가장 탁월한 현상은 야간기온의 상승이다. 일최저기온 25 ℃ 이상 일수는 주로 7~9월에 발생한다. 하지만 제주, 강릉, 포항, 대구 등 10 개 지점에서는 6월에도 발생한 기록이 있다. 61 개 지점별 일최저기온 25 ℃ 이상 연간일수 변화율(Fig. 4. 12)을 보면, 서귀포, 제주, 포항, 대구, 광주, 보령 등 12 개지점에서 증가경향이 나타난 것을 제외하면 대부분의 지점에서 통계적으로 유의한 경향이 나타나지 않는다(Fig. 4. 13).

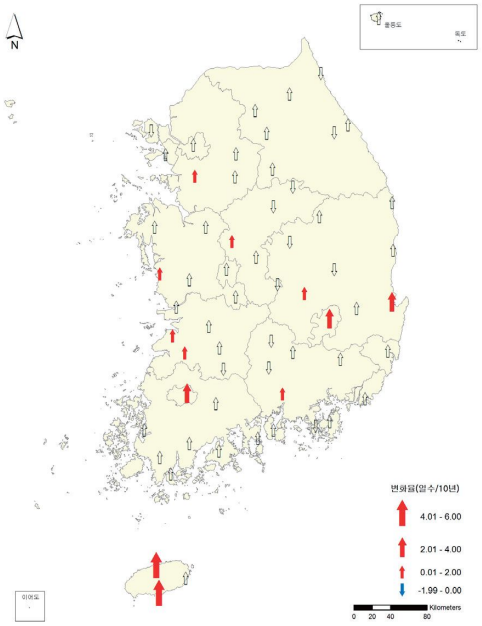
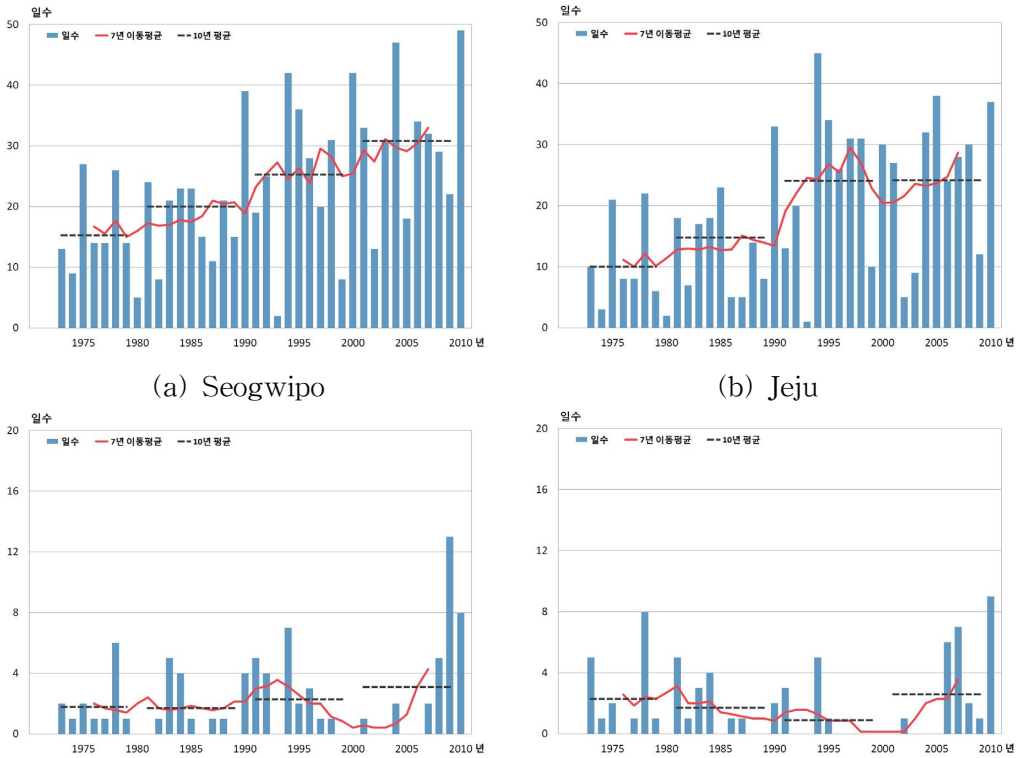


Fig. 4. 12. The rate of interannual variation of more than 25C of daily minimum temperature day in each station (1973 ~ 2010).



(a) Seogwipo (b) Jeju

(c) Pohang (d) Daegu

Fig. 4.13. Interannual variation of more than 25C of daily minimum temperature day in year (1973 ~ 2010).

라. 연간황사일수

황사는 보건 분야뿐만 아니라 생태, 정밀산업 등에 상당한 영향을 미치는 주요한 현상이다. 29개 지점별 연간황사일수 변화율(Fig. 4.14)을 보면 강릉, 제주, 서귀포, 여수 등 4개 지점을 제외한 대부분의 지점에서 통계적으로 유의한 증가경향이 나타났다. 인천, 수원, 충주, 서울 등 중서부 지역에서 증가경향이 비교적 크게 나타난다(Fig. 4.15).

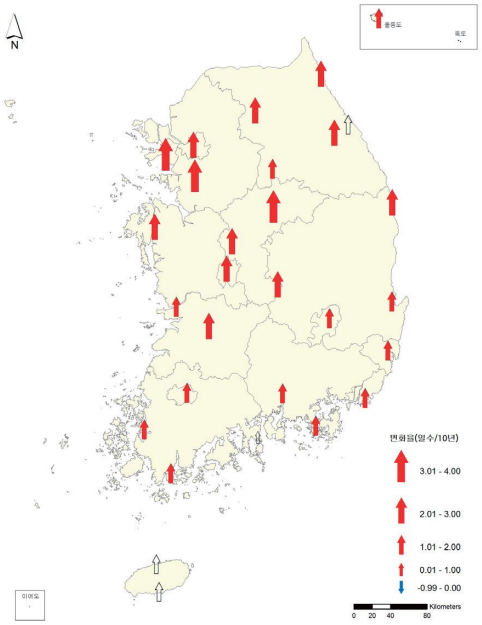
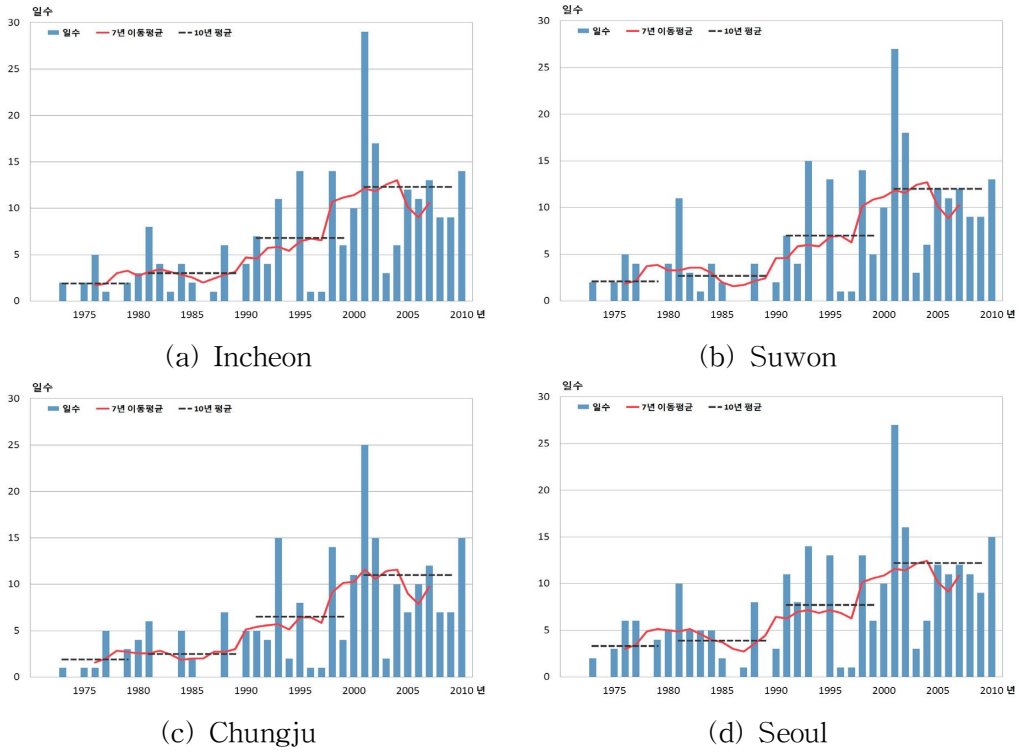


Fig. 4. 14. The rate of interannual variation of annual asian dust day in each station (1973 ~ 2010).



(a) Incheon (b) Suwon

(c) Chungju (d) Seoul

Fig. 4. 15. Interannual variation of annual asian dust day in each station (1973 ~ 2010).

마. 연간서리일수

지구온난화로 나타나는 기온상승으로 뚜렷하게 관측되는 현상 중에 하나가 서리일수의 감소이다. 29 개 지점별 연간서리일수 변화율(Fig. 4. 16)을 보면, 17 개 지점에서 통계적으로 유의한 감소경향이 나타났다. 수원, 청주 등에서 감소경향이 비교적 크게 나타났다(Fig. 4. 17). 속초는 증가하는 경향을 보이지만 통계적으로 유의하지 않는다.

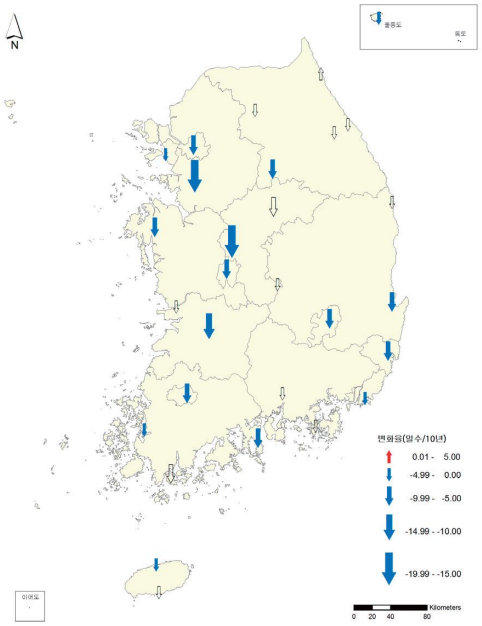
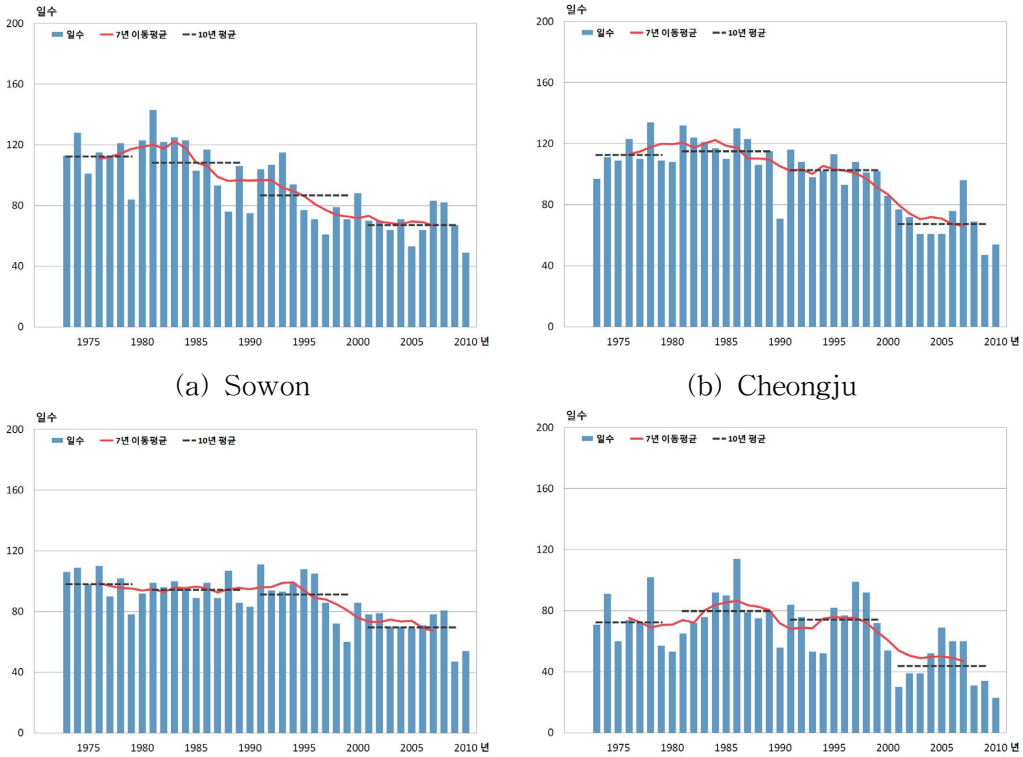


Fig. 4. 16. The rate of interannual variation of annual frost day in each station (1973 ~ 2010).



(a) Sowon (b) Cheongju

(c) Jeonju (d) Daegu

Fig. 4. 17. Interannual variation of annual frost day in each station (1973 ~ 2010).

바. 연간얼음일수

서리일수와 함께 얼음일수도 기온상승으로 인해 감소하는 경향이 보고되고 있다. 29 개 지점별 연간얼음일수 변화율(Fig. 4. 18)을 보면, 17 개지점에서 통계적으로 유의한 감소경향이 나타났다. 특히 강릉, 수원, 청주, 여수 등에서 감소경향이 비교적 크게 나타났다(Fig. 4. 19). 추풍령, 진주, 군산 등에서 증가하는 경향을 보이지만 통계적으로 유의하지 않는다.

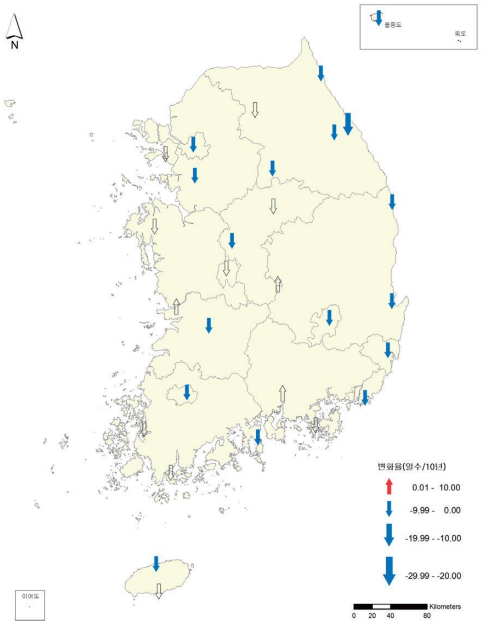
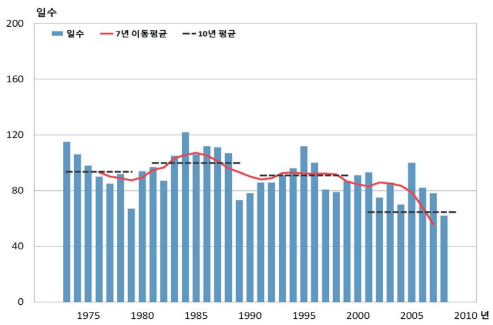
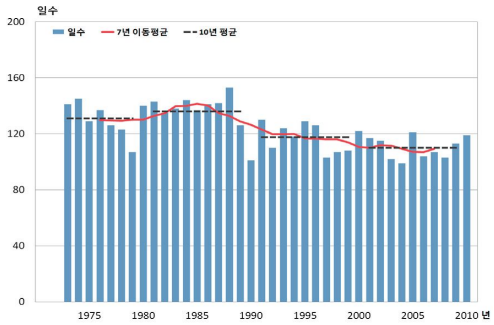


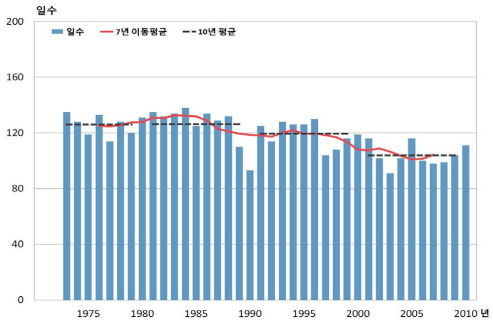
Fig. 4. 18. The rate of interannual variation of annual icing day in each station (1973 ~ 2010).



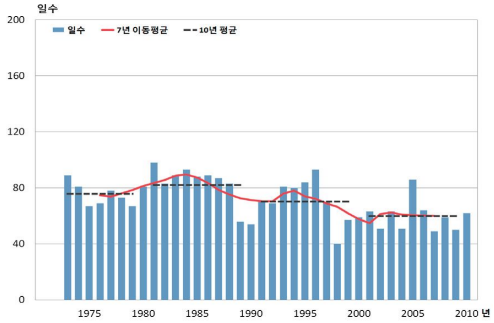
(a) Gangneung



(b) Suwon



(c) Cheongju



(d) Yeosu

Fig. 4. 19. Interannual variation of annual icing day in each station (1973 ~ 2010).

4. 극값

1973 ~ 2010 년 기간 동안 각 연도마다 우리나라에서 발생한 일강수량의 연최다값 변화(Fig. 4. 20)를 보면, 2002년 8월 31일에 강릉에서 870.5mm로 가장 많았다. 10년 평균값은 2001 ~ 2010년에 362.1mm로 가장 많은 것으로 나타났다.

지점별로 보면, 대관령에서 2008년(212.5mm), 1993년(349.0mm), 1990년(330.8mm), 1982년(303.0mm)로 총 4회를 기록하여 가장 많이 나타났고, 거제(1973년, 1985년, 1999년)와 부산(1983년, 1991년, 2009년)에서 각 3회를 기록하였다.

우리나라의 연도별 일최고기온의 연최고값(Fig. 4. 21)을 보면, 1977년 7월 31일에 대구에서 39.5℃로 가장 높았다. 10년 평균값은 1981 ~ 1990년에 37.6℃로 가장 높은 것으로 나타났다.

지점별로 보면, 대구에서 1995년(39.2℃), 1994년(39.4℃), 1992년(37.8℃), 1990 (38.5℃) 등 총 12 회를 기록하여 가장 많이 나타났다.

우리나라의 연도별 일최저기온의 연최저값(Fig. 4. 22)을 보면, 1981년 1월 5일에 양평에서 -32.6℃로 가장 낮았다.

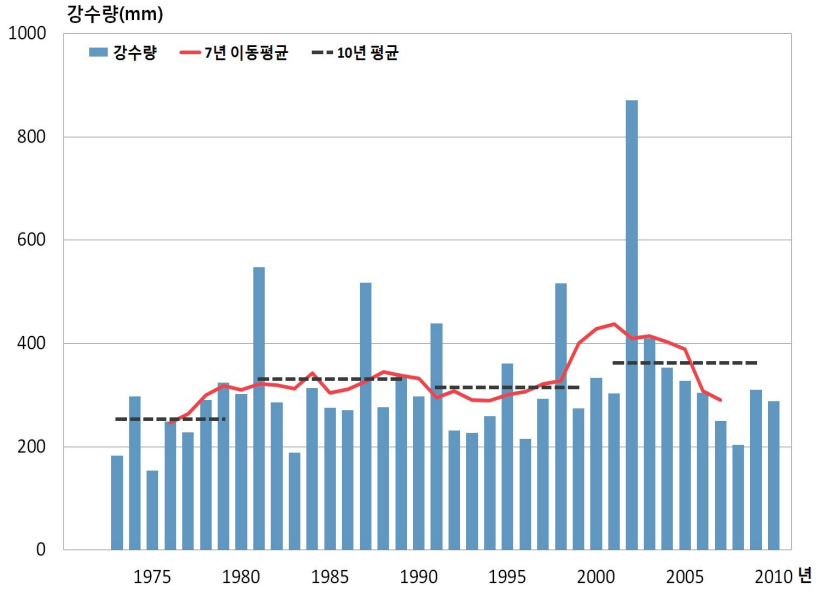


Fig. 4. 20. Interannual variation of annual most rainfall in Korea (1973 ~ 2010).

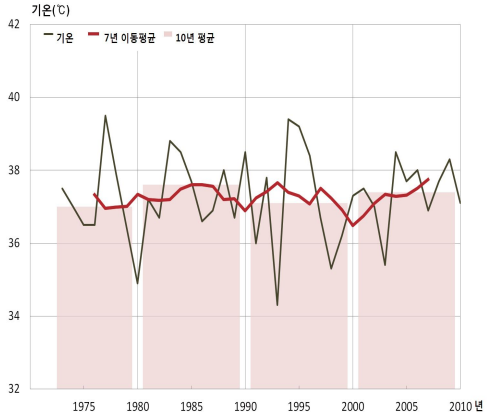


Fig. 4. 21. Interannual variation of annual daily highest temperature in Korea (1973 ~ 2010).

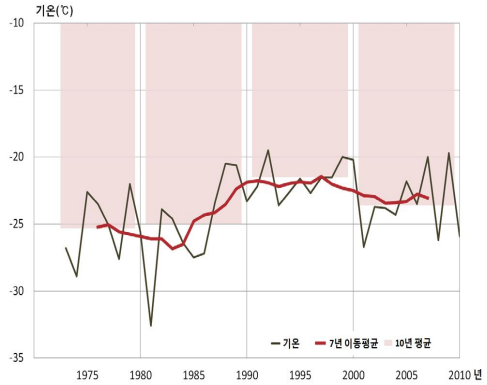


Fig. 4. 22. Interannual variation of annual daily minimum temperature in Korea (1973 ~ 2010).

10년 평균값은 1973 ~ 1980 년에 -25.3℃로 가장 낮은 것으로 나타났다. 지점별로 보면, 대관령에서 2008년(-26.2℃), 2007년(-20.0℃), 2006년(-23.5℃), 2004년(-24.3℃), 2000년(-20.2℃) 등 총 19 회를 기록하여 가장 많았고, 주로 최근에 많이 나타났다.

5. 극한기후지수

가. 최고기온 99퍼센타일

최고기온 99 퍼센타일은 낮 최고기온 중에 값이 큰 상위 1%에 해당된다. 61 개 지점별 최고기온 99퍼센타일 변화율(Fig. 4.23)을 보면, 대부분의 지점에서 통계적으로 유의한 경향이 나타나지 않았다. 완도, 서귀포에서 상승경향이 나타나고, 문경, 고흥에서 하강경향이 나타났다. 평균최고기온은 상승경향이 뚜렷하지만 최고기온 99 퍼센타일은 변화가 탁월하지 않다.

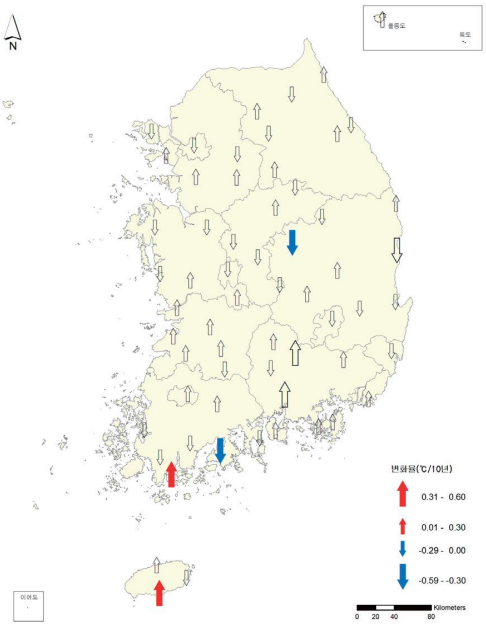


Fig. 4.23. The rate of interannual variation of 99 percentile for maximum temperature in each station (1973 ~ 2010).

나. 최저기온 1퍼센타일

61개 지점별 최저기온 1퍼센타일 변화율(Fig. 4.24)을 보면, 이천, 제천, 춘천 등 23개 지점을 제외한 대부분의 지점에서 통계적으로 유의한 상승경향이 나타났다. 양평, 원주, 청주, 수원 등에서 상승경향이 비교적 크게 나타났다.

해남, 진주는 하강하는 경향을 보이지만 통계적으로 유의하지 않았다. 평균최저기온의 상승으로 인해서 최저기온 1퍼센타일도 상승하였다.

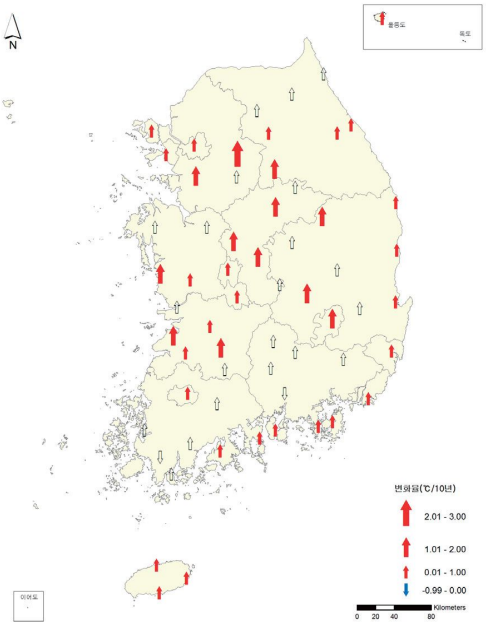


Fig. 4.24. The rate of inter annual variation of 1percentile for minimum temperature in each station (1973 ~ 2010).

다. 일최저기온 0℃ 미만 연간일수

최저기온의 상승으로 일최저기온 0℃ 미만 일수는 감소할 것으로 예상된다.

61개 지점별 일최저기온 0℃미만 연간일수 변화율(Fig. 4.25)을 보면, 통계적으로 유의한 경향을 보인 지점은 대부분 감소하는 경향으로 나타났다.

포항, 대구, 청주, 울산, 수원 등에서 감소경향이 비교적 크게 나타났다.

해남을 제외하고 증가경향이 나타난 지점은 통계적으로 유의하지 않았다.

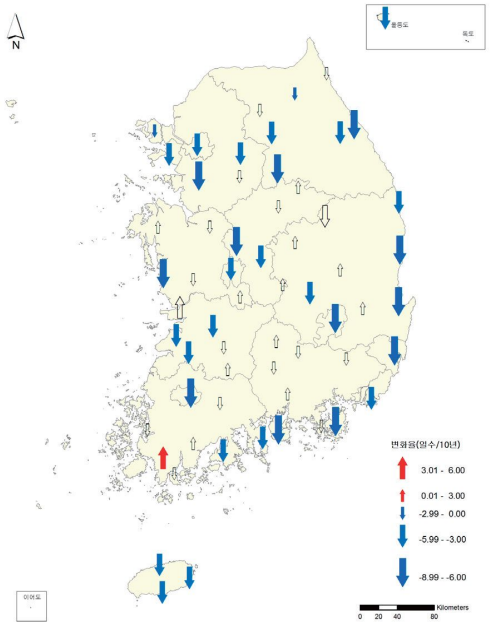


Fig. 4.25. The rate of interannual variation of 0℃ less day for daily minimum temperature per year in each station (1973 ~ 2010).

제3절 강원지역 기상환경변화12)

강원도의 총면적은 20.569km^{2}이며 이 가운데 휴전선 이남이 82%인 16,873.61km^{2}로 남한 면적의 16.8%에 해당하며, 총 면적 중 81.0%인 13,665.66km^{2}가 임야이며

12) "기후변화 이해하기"(국립기상연구소, 2010)와, "지역기후변화보고서"(강원지방기상청, 2011)를 인용하였음.

농경지는 9.9%에 해당하는 1,668.69km^{2}이고, 기타는 9.1%인 1,539.25km^{2}로 구성되어 있다.

강원도는 태백산맥이 남북으로 길게 뻗쳐 있어 이 산맥을 중심으로 영동지방과 영서지방으로 나누어지고 이들 지역의 기후 또한 매우 다른 특성을 보이고 있으며, 일반적인 기상특성을 보면 산맥의 급한 경사면을 따라 내려와 바다로 연결되는 영동지방은 해양성기후에 가까운 기상특성을 많이 보이고 있는 반면, 영서지방은 한반도의 중앙내륙에 위치해 있어 대륙성기후에 가까운 특성을 보이고 있다. 또한 산맥의 정상부를 중심으로 한 산악지방은 산악기후의 특성을 가지고 있어 복잡한 기상현상을 나타내고 있다.

영동지방은 산맥의 급경사면이 바다와 접해있어 평야지역은 거의 없으며, 해안선을 따라 좁고 길게 형성되어 있다. 이러한 지형적 여건에 따라 영동지방은 위도에 비하여 겨울철은 온난하고 여름철은 비교적 시원한 편이어서 연 기온의 교차가 적은 편에 속한다.

기상청에 따르면 1912년부터 2010년까지 약 100년간 지구 평균온도는 0.75℃ 상승하였지만 우리나라 6대 도시(강릉, 서울, 인천, 대구, 부산, 목포)의 100년간 연평균기온은 1.8℃ 상승했다. 강원도 역시 1988년 12.8℃였던 강릉의 연평균기온이 2009년은 13.4℃로 0.6℃ 상승했으며 춘천은 10.6℃에서 11.5℃로 0.9℃ 상승하였다. 강수량도 크게 늘어 1997년 강릉에서 측정된 연간 총 강수량은 1,273.9㎜에 불과했지만 2002년 2,066.2㎜, 2003년 2,095.4㎜의 비가 내린 것을 비롯해 2006년 1,852.7㎜, 2008년 1,342.7㎜등으로 10년 전에 비해 20 ~ 70% 가량 증가했다.

지구 온난화로 인한 무름병과 뿌리혹병, 멸강나비, 주홍꽃매미 등 병해충의 증가와 주로 남부지역에 나타났던 미국외풀 등 외래 잡초의 북상으로 피해가 증가했으며, 2011년 2월 11일에는 강원 영동지방에 100cm가 넘는 폭설이 왔고, 특히 강릉은 11일 77.7cm의 눈이 내려 하루 적설량으로는 1911년 기상 관측 이후 100년 만에 가장 많았다.

강릉의 기상관측은 1911년 10월부터 시작하여 현재까지 102년 이상의 기상관측 역사를 가지고 있으며, 춘천은 1966년 1월부터 현재까지 47년의 기상자료를 보유하고 있다. 이 연구에서는 장기간 관측 자료가 있고 강원의 영동과 영서를 대표하는 강릉과 춘천의 기후변화 영향을 살펴보았으며, 요약하면 Fig. 4.26 및 Table 4.5와 같다

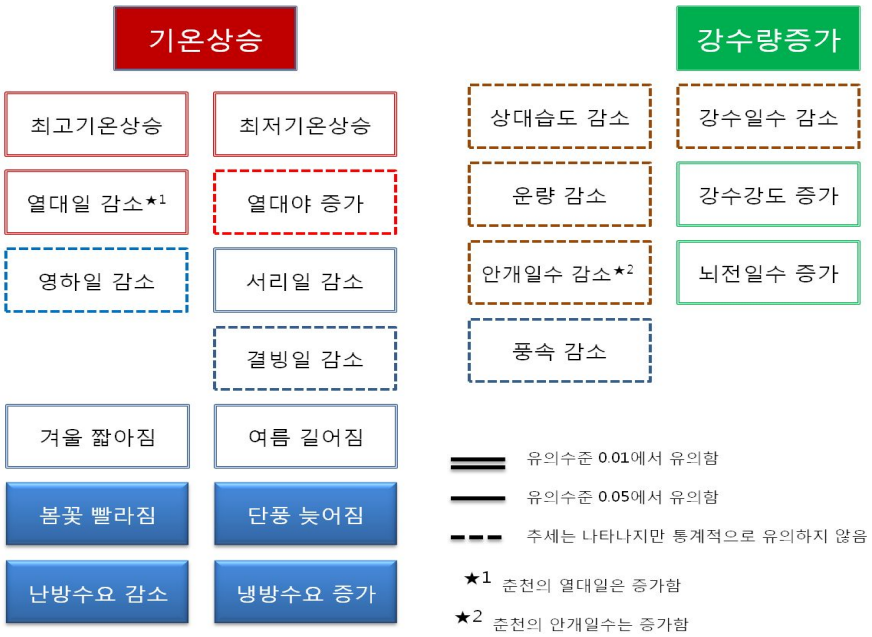


Fig. 4. 26. The effects of climate change at Gangneung and Chuncheon.

1912년부터 2008년까지 97년간 강릉의 연평균 기온은 12.7℃, 연평균 최고기온은 17.2℃, 연평균 최저기온은 8.3℃이며, 연평균 기온, 연평균 최고기온, 연평균 최저기온의 변화율은 각각 0.16℃/10년(유의확률 $p < 0.01$)[13], 0.08℃/10년($p < 0.01$), 0.24℃/10년($p < 0.01$)으로 뚜렷한 상승 경향을 보인다. 이러한 최저기온의 상승은 강릉의 열대야 일수와 영하 일수에 영향을 미쳤으며, 열대야 일수는 최저기온의 상승으로 지난 97년 동안 0.50일/10년의 변화율로 증가하였다. ($p < 0.01$). 영하 일수는 -4.25일/10년의 변화율로 감소하였으나 통계적으로 유의하지 않다.

강릉의 기온 상승은 난방도일과 냉방도일에도 영향을 미쳐 -54.0도일/10년의 변화율로 난방도일이 감소하였다($p < 0.05$). 또한 강릉의 안개일수와 결빙일수는 각각 -2.43일/10년, -2.78일/10년의 변화율로 감소하는 경향을 보인다. 기온의 상승으로 인하여 계절에도 변화가 발생하였다. 봄과 여름의 시작일은 각각 23일과 16일이 빨라졌으며, 가을의 시작일의 변화로 계절의 지속기간은 봄, 여름의 경우 각각 7일, 25일 길어졌으며, 가을과 겨울은 각각 1일, 31일 짧아졌다. 식물계절의 경우 봄철

13) pearson의 상관분석을 통해 얻은 상관계수로 유의 확률은 0.01, 0,05, 0,10을 기준으로 작다, 크다고 판단한다.

식물(매화, 벚꽃, 개나리, 진달래, 복숭아, 아카시아)의 발아일 및 개화일은 10년당 - 0.2 ~ -2.0일의 변화율로 점차 빨라지는 경향이 있는 반면에 가을철 식물(은행나무, 단풍나무)의 단풍시작일 및 단풍절정일은 10년당 0.4 ~ 6.5일의 변화율로 점차 늦어지고 있다.

지난 97 간의 강릉의 강수량은 32.89 mm/10년의 변화율로 증가하고 있으며($P < 0.01$), 강수일수는 - 0.66일/10년의 변화율로 감소하지만 통계적으로 유의하지 않다. 강수강도는 10년에 0.18mm/일의 변화율로 증가하는 경향을 보인다($P < 0.01$). 강릉의 지난 66년 (1944 ~ 2009년) 동안의 연평균 풍속과 최대 풍속은 각각 10년당 - 0.06m/sec 와 - 0.28m/sec의 변화율로 감소하지만 통계적으로 유의하지 않다. 그밖에 강릉의 연평균 상대습도와 운량은 각각 - 1.10%/10년, -0.38%/10년의 변화율로 감소하는 추세이다.

지난 44년 동안(1966 ~ 2009년) 춘천의 연평균 기온은 10.9℃, 최고기온 17.0℃, 최저기온은 5.7℃이며, 연평균 기온, 연평균 최고기온, 연평균 최저기온의 변화율은 각각 0.29℃/10년($P < 0.01$), 0.35℃/10년($P < 0.01$), 0.26/10년($P < 0.01$)으로 뚜렷한 상승 경향을 보인다.

강릉은 지난 44년간(1966 ~ 2009년)의 관측값의 분석결과, 연평균기온은 0.33℃/10년, 연평균최고기온은 0.28℃/10년, 연평균최저기온은: 0.39℃/10년, $P < 0.01$). 열대야 일수는 44년 동안 2.5일이며, 0.16일/10년의 변화율로 증가하였으며, 영하일수는 127.2일이며 - 0.84일/10년의 변화율로 감소하였으나 통계적으로 유의하지 않았다. 춘천의 냉방도일과 난방도일은 각각 3149.0도일, 74.9도일이며, 난방도일은 - 84.1도일/10년의 변화율로 감소하며, 냉방도일은 4.12도일/10년의 변화율로 증가한다.

또한, 지난 44년간(1966 ~ 2009년) 춘천의 연평균 강수량, 강수일수, 강수강도는 각각 1320.8mm, 135.2일, 9.8mm/일이며, 연강수량은 증가(28.97mm/10년)하였고, 강수일수는 감소(1.98일/10년)하였으며, 강수강도는 증가 경향을 보였다. 같은 기간 동안 강릉은 연강수량은 증가(62.73mm/10년)하였고($P < 0.01$), 강수일수는 1.34/10년의 비율로 증가 하였다.

최근 37년(1973 ~ 2009년)동안 강릉을 포함하는 강원의 7개 관측지점 기온과 강수량의 자료를 이용하여 강원지방의 기후 분포 특성을 분석하였다.

연평균기온은 10.6℃이며, 지형적 영향으로 해안에 위치한 지역일수록 기온이 높

게 나타나고, 고도가 높은 산간지역일수록 기온이 낮게 나타난다. 강수량의 분포를 살펴보면 강원의 연평균 강수량은 1397.3mm이다. 고도가 높은 지역으로 갈수록 강수량이 많아지며, 내륙지역으로 갈수록 강수량이 적어진다.

이 연구에서는 강원도 강릉과 춘천을 중심으로 장기 기후자료 분석 값을 사용하였다. 장기적인 관측 자료 분석은 미래 기후변화를 예측하는데 중요하기 때문이다. 그러나 강원의 산불관련 기후특성 연구를 위해서는 지역특성에 맞게 고도별 기상관측망 구축과 비교적 도시화가 뚜렷하고 숲지가 잘 보존된 지역에서의 국지 기후변화에 대한 자료가 고려되어야 할 것이다.

Table 4.5. The climate change at Gangwon province.

Elements \ Year & station			1912 -1921 (A)	2000 -2009 (B)	B-A	Change/decade		
						Gangneung		Chuncheon
						1912-2009	1966-2009	1966-2009
Climatic elements	Temp	Mean Temp.(℃)	12.3	13.7	1.4	0.16***	0.33***	0.29***
		Max. Temp. (℃)	16.8	17.7	0.9	0.08***	0.28***	0.35***
		Min. Tem. (℃)	7.7	9.6	1.9	0.24***	0.39***	0.26***
		Tropical days	27.8	32.4	4.6	-0.32***	0.15	2.59**
		Tropical night	3.1	8.8	5.7	0.5***	0.47	0.16
		≦ 0℃	94.4	63.0	-31.4	-4.25	-7.45	-0.84
	Prec	Precipitation(mm)	1318.5	1546.6	228.1	32.89***	62.73***	28.97
		Prec. days	149.9	144.0	-5.9	-0.66	1.34	-1.98
		Prec. intensity (mm/day)	8.0	9.0	1.0	0.18***	0.24	0.33
		Heavy rain days (80mm/day)	2.3	3.1	0.8	0.11**	0.27	0.32
	Wind	Mean Win speed (m/sec)	3.0[1)]	2.8	-0.2	-0.06[2)]	-0.06***	0.17
		Max win speed (m/sce)	7.4[1)]	5.9	-1.5	-0.28[2)]	-0.19***	-0.59
	RH (%)		67.6	43.8	-23.8	-1.1	-2.11***	-3.01
Phenomenon	Fog days		15.9[3)]	4.7	-11.2	-2.44[4)]		3.01[5)]
	Frost days		8.8[3)]	10.1	1.3	2.13***[4)]		5.75***[5)]
	Thunderstorm days		10.5[3)]	13.0	2.5	0.94***[4)]		1.06[5)]
	Freezing days		93.4[3)]	82.4	-11.0	-2.78[4)]		-0.20[5)]
	Asian dust days		1.6[3)]	9.5	7.9	1.84[4)]		2.16***[5)]
Season	Starting (date)	Spring	Mar. 16	Feb. 21	-23			
		Summer	Jun. 4	May 19	-16			
		Fall	Sep. 11	Sep. 20	9			
		Winter	Nov. 27	Dec. 5	8			
	Duration (days)	Spring	80	87	7			
		Summer	99	124	25			
		Fall	77	76	-1			
		Winter	109	78	-31			

[1)]1944-1953년 [2)]1944-2009년 [3)]1960-1969년 [4)]1960-2008년 [5)]1966-2009년

* $P < 0.10$ ** $P < 0.05$ *** $P < 0.01$

제4절 강원지역의 산불발생

1. 연도별 산불발생 현황

강원도 18개 시군지역의 최근 10년간(2003 ~ 2012) 379건의 산불발생 현황은 Table 4.6 및 Fig. 4.27과 같다. Table 4.6에서 보는 바와 같이 2004년 57건 발생 이후 매년 감소하다가 2009년 최다 발생하였고, 매년 적게는 11회 많게는 60회의 산불이 발생하였다.

Table 4.6. Annual incidence frequency of forest fires.

Year	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	Total
Frequency	11	57	41	30	26	25	60	46	39	44	379

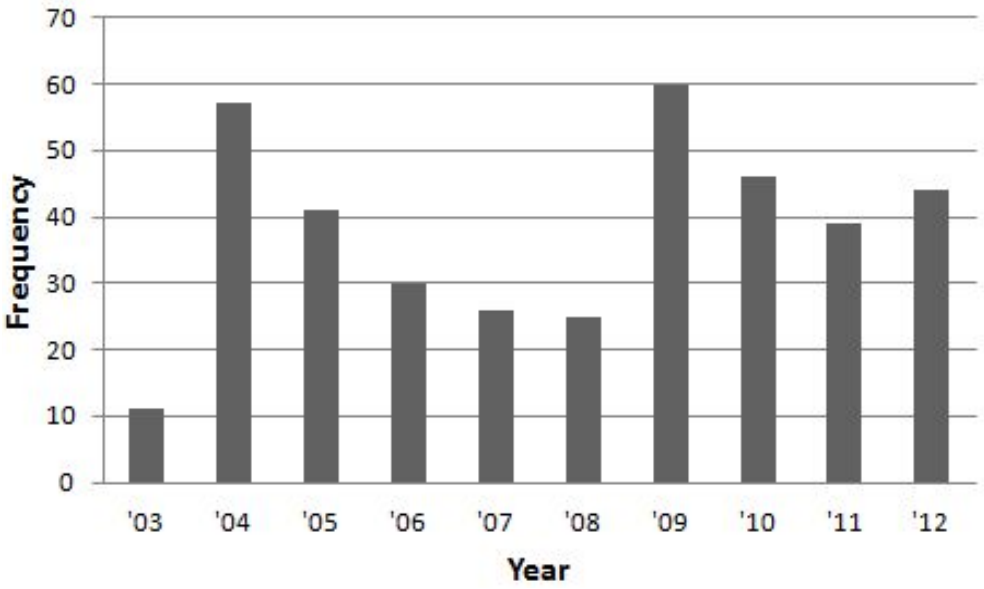


Fig. 4.27. Annual incidence frequency of forest fires.

2. 월별 산불발생 현황

월별 산불발생 현황으로는 Table 4.7 및 Fig. 4.28에서와 같이 4월이 153건(40.3%)으로 가장 많은 산불이 발생한 것으로 나타났으며, 다음으로 3월(21.8%), 2월(12.9%) 순으로 나타났다. 2, 3, 4월에 발생한 산불 누적 건수는 전체 산불발생의 75%로 대부분을 차지하고 있다.

Table 4.7. Monthly incidence frequency and rate of forest fires.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Frequency	16	49	83	153	31	3	1	1	1	9	11	22	380
Rate (%)	4.4	12.9	21.8	40.3	8.2	0.8	0.3	0.3	0.3	2.4	2.9	5.8	100

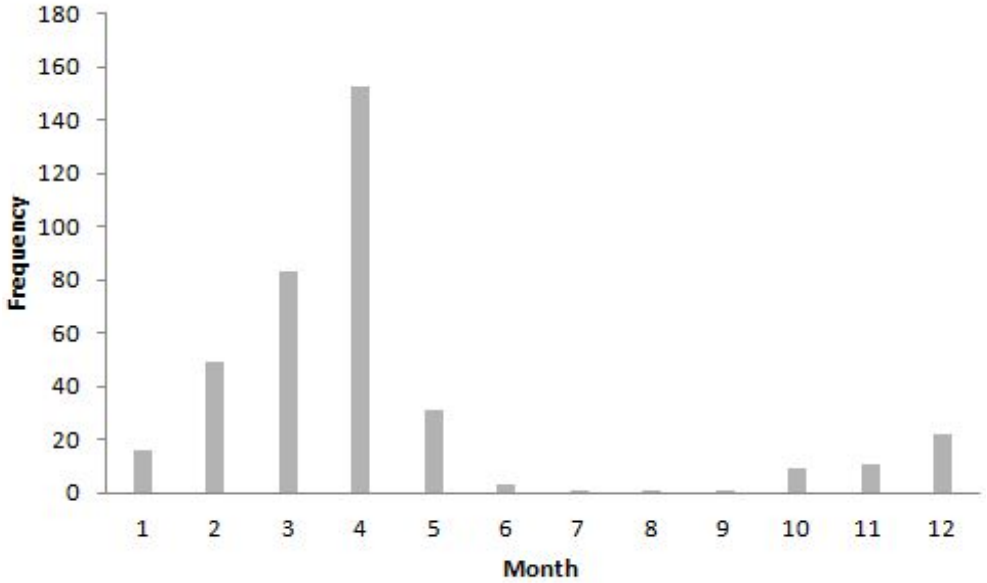


Fig. 4.28. Monthly incidence frequency and rate of forest fires.

3. 지역별 산불발생 현황

강원도 18개 시·군별 산불발생 현황은 Fig. 4.29에서와 같이 강릉이 54건으로 가장 많이 발생했으며, 다음으로 춘천 41건, 홍천 35건 순으로 나타났다. 한편, 영동과 영서의 지역별 산불발생 빈도 및 피해면적은 영동 지역이 130건(33.5%), 영서가 249건(66.5%)으로 영서 지역이 발생빈도는 높았지만 피해면적은 2.8ha 차이로 비슷하였다. 이는 영동지역이 태백산맥 풍하측에 위치하여 산불확산에 있어 바람의 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다.

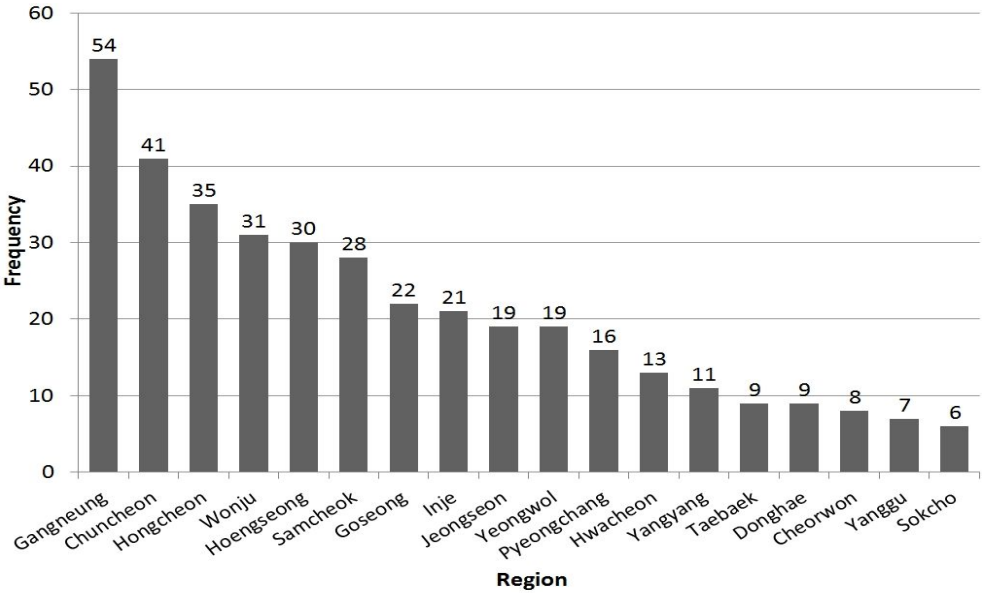


Fig. 4.29. The incidence frequency of forest fire in Gangwon region.

4. 임상별 산불발생 현황

임상(林相)별 산불발생 빈도는 Fig. 4.30에서와 같이 소나무 단순림의 경우가 80건(21%)으로 가장 높게 나타났으며, 시초[14] 54건(14.2%), 소나무 활잡목 48건(12.6%), 활잡목 40건(10.5%), 잣나무림 38건(10.0%) 순으로 나타났다. 이러한 결과는 강원도 지역의 대부분의 산림이 소나무 중심의 침엽수림으로 구성되어 있는 이

14) 시초(柴草) : 땔나무로 쓰는 풀과 나무

유와 산불이 침엽수림에서 보다 강도 높게 발생하고 있다는 이유로 해석된다.

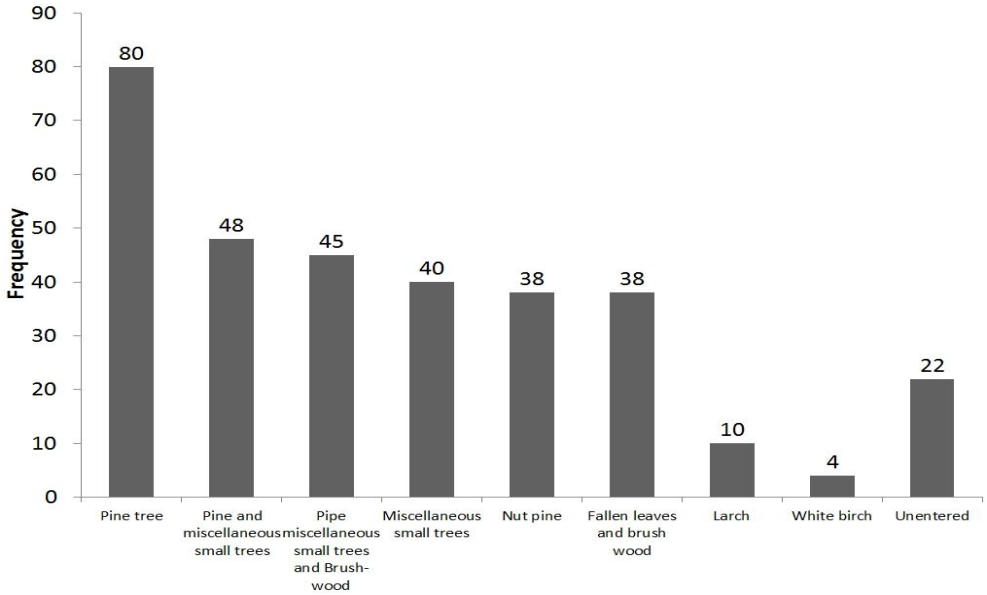


Fig. 4.30. The incidence frequency of forest fire by the trees.

5. 기상자료의 다변량분석 및 기상대별 기상인자의 평균차 검정

산불발생과 기상과의 관계는 계절변화와 일변화를 통하여 관련성을 확인할 수 있다. 그러나 산불에 영향을 미치는 기상요인들은 온도, 습도, 풍속, 등 다양한 여러 가지 요소들로 구성되어 있으며 이들 각각의 요소들은 서로 밀접한 관련성을 가지고 있다. 따라서 각각의 기상요소들 간의 관련성을 파악하기 위하여 강원도에 소재한 11개 기상청 소속기관의 2003년부터 2012년까지 10년간 자료 중에서 산불발생 빈도가 가장 높은 2 · 3 · 4월의 기상요소(기온, 습도, 풍속, 강우관련 기상인자)들에 대하여 각각의 기상요소들이 서로 어떻게 관련되어 있는가를 Pearson의 상관계수 상관분석(correlation analysis)을 통하여 살펴보았다.

분석결과 모든 기상요소들은 통계적으로 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 기온과 습도, 그리고 일조시간과 운량, 강우량이 음(-)의 상관관계를 보이는 것으로 나타나 일반적인 기상상식에 부합하고 있다. 이외 기상요소들은 모두 양(+)의 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다.

다음으로 강원도 10개 지역 기상대(속초, 철원, 춘천, 강릉, 동해, 원주, 영월, 인

제, 홍천, 태백)의 일일기상자료를 이용하여 분산분석(one-way ANOVA)의 다중검정을 실시하고 지역 간의 유의성 검증을 실시하였다. 분석에 이용된 기상인자는 앞에서 검토한 바와 같이 산불발생빈도가 높은 봄철의 2 · 3 · 4월의 자료를 적용하였다. 그 이유는 산불발생빈도가 높은 기간의 자료 분석을 통하여 보다 정확한 지역 간 기상정보의 특성을 규명하기 위해서다.

그 결과 운량(雲量)과 강우량, 그리고 일조시간이 1% 유의수준에서 유의성이 없는 것으로 나타나 지역 기상대간 차이가 존재하지 않는 것으로 해석된다. 이외 기온, 습도, 풍속관련 기상인자는 Table 4.8 및 Table 4.9에서와 같이 모두 지역간에 차이가 있는 것으로 나타났다.

한편, 도출된 결과들 가운데 강원도 동해안산불의 최대피해지역인 강릉, 삼척, 동해, 속초지역의 기상요인과 타지역간의 기상요인에 차이가 있는지를 검토한 결과, 통계적으로 유의한 특성을 나타내는 기상요인들을 파악할 수 있었다. 일일평균기온과 최고기온, 최저기온에서는 강릉, 동해. 속초지역이 원주, 춘천 등 내륙지역보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 4.31과 Fig. 4.32에서 보다 명확히 파악할 수 있다.

따라서 2000년대 들어 초대형 산불피해지역인 강릉, 속초, 동해 지역은 타 지역보다 기온이 높고, 강한 바람이 부는 것으로 해석할 수 있다.

Table 4.8. The significant test of air temperature and air relative humidity in Gangwon area.

Elememts / Stations	Temperature (0.1 ℃)					Humidity (0.1%)	
	Mean temperature	Maximum temperature	Minimum temperature	Grass upper temperature	Dew point temperature	Relative humidity	Minimum humidity
Gangneung	77.02a	125.6a	30.4a	-22.3b	-26.8b	522.3f	33.6d
Donghae	70.96ab	115.3bc	26.0a	-14.5ab	-21.7ab	565.1cd	35.8c
Sokcho	66.76ab	110.6cd	23.8a	-12.6a	-20.9ab	581.2bc	39.8a
Wonju	53.04c	119.8ab	-9.7b	-41.1c	-16.5a	655.5a	36.6bc
Chuncheon	49.80cd	121.3ab	-15.2bc	-56.0d	-18.5ab	659.8a	38.1ab
Yeongwol	46.57cde	118.1abc	-21.7cd	-51.4d	-38.4c	592.4b	30.1e
Hongcheon	49.80def	122.4ab	-22.2de	-51.5d	-53.0e	539.7ef	28.7e
Inje	46.57ef	110.9cd	-26.8de	-64.7e	-44.1cd	592.9b	32.8d
Cheorwon	43.07f	104.4d	-27.1de	-67.2e	-47.3de	599.7b	29.0e
Taebaek	25.10g	85.3e	-31.4e	-65.9e	-65.4f	556.4de	33.3d
F-value	37.45**	16.27**	85.83**	55.43**	33.09**	43.65**	30.92**

a, b, c, d, f, g 는 Durcan Grouping을 나타냄. ** 1%에서 유의성 있음.

Table 4. 9. The significant test of wind speed and meteorological data associated with rainfall in Gangwon area.

Elememts / Stations	Wind speed (unit :0.1m/sec)		Cloud amount (unit : %)	Precipitation (0.1mm)	Sunshine duration (30minute)
	Mean wind speed	Maximum wind speed			
Gangneung	29.1b	67.8c	45.2a	21.0a	49.1ab
Donghae	30.0b	71.9b	41.5ab	16.3abc	49.5a
Sokcho	33.2a	80.9a	43.8ab	18.7ab	48.7ab
Wonju	14.1e	46.3f	43.5ab	14.3abc	43.1ab
Chuncheon	14.1e	52.1e	41.2ab	12.5bc	47.4ab
Yeongwol	16.6d	59.5d	43.2ab	14.8abc	49.2ab
Hongcheon	11.9f	41.5g	41.5ab	13.1bc	44.6ab
Inje	18.7c	52.3e	40.7b	11.5c	42.8b
Cheorwon	18.2c	61.9d	43.2ab	12.5bc	46.1ab
Taebaek	18.6c	52.1e	43.6ab	18.5ab	48.7ab
F-value	304.5**	164.0**	1.13N/S	2.18*	1.70N/S

a, b, c, d, e, f, g는 Duncan grouping을 나타냄.

** 1%에서 유의성 있음. * 5%에서 유의성 있음. N/S 유의성 없음.

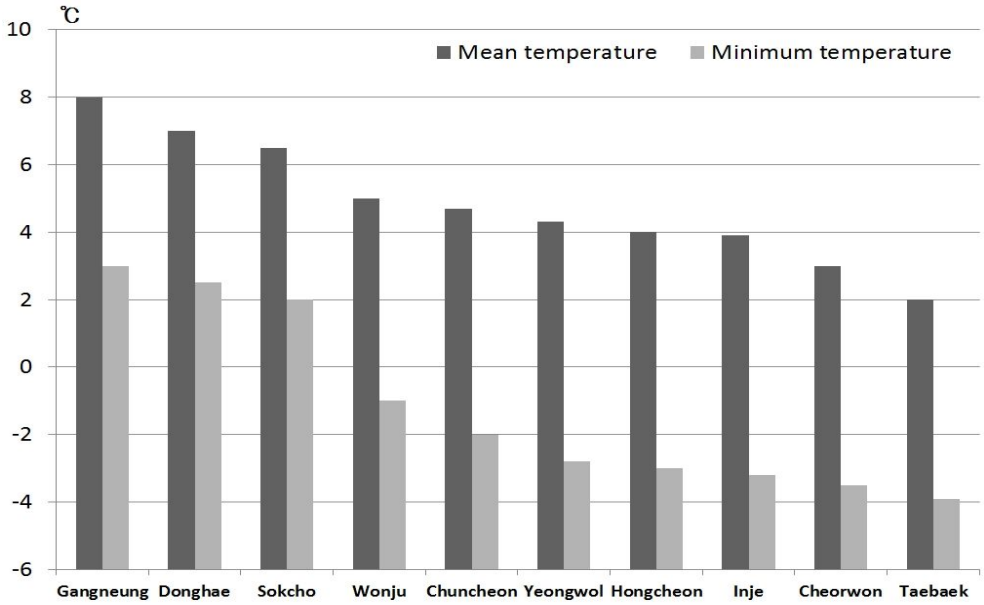


Fig. 4.31. Distribution of air temperature in the Gangwon area.

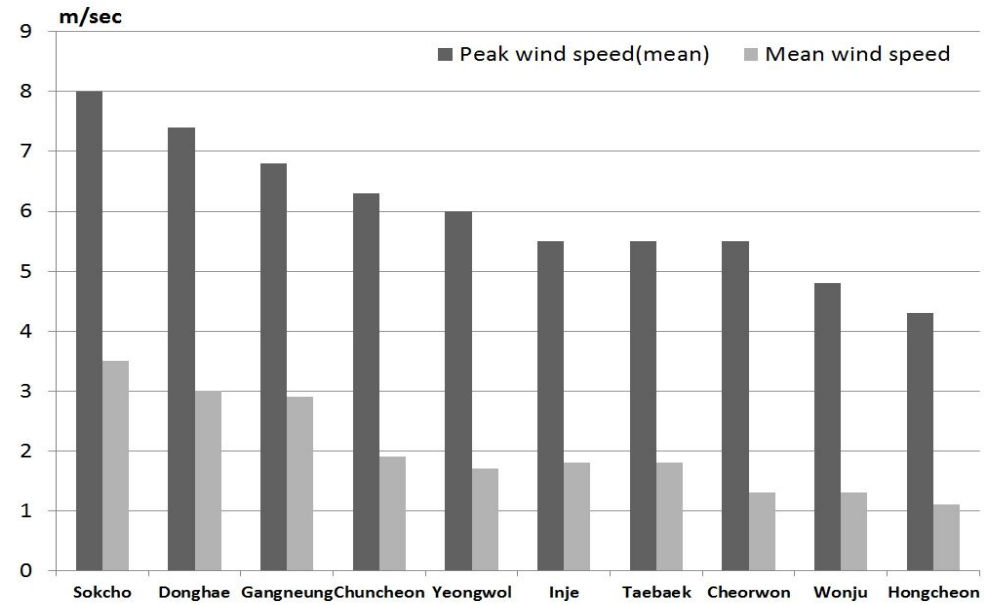


Fig. 4.32. Distribution of wind speed in the Gangwon area.

제5장 산불예방을 위한 산불위험지수 제안

제1절 우리나라의 산불위험지수

최근 우리나라 산불은 42%가 입산자 실화에 의한 것이며(산림청, 2003 ~ 2012) 그 외에도 논·밭두렁 태우기, 쓰레기 소각, 담뱃불 실화, 성묘객 실화 등 85% 이상 이 인위적인 산불에 해당한다. 그러나 이러한 인위적 요인만으로 산림에 피해를 줄 정도의 산불이 발생되는 것은 아니다. 여기에 습도, 풍속, 연료 함수율 등의 산불위험인자가 산불 발생을 촉진시킬 수 있는 조건을 가질 때 가능한 것이다.

실제로 최근 3년간(2010 ~ 2012) 국립공원 이용객 현황과 산불 발생 건수를 보면, 휴가철인 8월과 단풍철인 10월의 이용객 수가 전체의 30%로 가장 많지만 산불은 3, 4월이 전체의 60% 이상을 차지했다. 이는 3, 4월이 맑은 날이 많아 상대습도가 낮고 산림에 건조한 낙엽이 많기 때문이다. 따라서 효과적인 산불 예방을 위해서는 지속적인 산불 예방 교육과 함께 정확한 산불위험지수를 통한 산불위험예보가 필요하다.

여기서 산불위험예보란 산불이 발생할 수 있는 위험 정도를 기상, 지형, 임상, 연료 등의 산불위험인자를 분석하여 지수 또는 등급 형태로 예보하는 것을 말한다(Kim et al., 2005). 산불위험인자 중 지형인자와 임상 인자는 기상이나 연료인자에 비해 시간에 따른 변화의 폭이 작고, 변화의 속도 또한 느리기 때문에 산불위험지수는 기상인자와 연료 인자를 이용해서 분석하는 것이 일반적이나 임상이나 지형인자 또한 소홀이 하거나 간과해서는 안 된다.

기상청 산불위험지수는 대기 중의 습도를 측정하는 습도측정봉의 무게를 이용하여 산불이 발생할 수 있는 확률을 아래 계산식 5-1과 같이 계산해 내는 것으로, 습도측정봉의 무게가 무거울 경우 발생확률은 낮게, 측정봉의 무게가 가벼울 경우에는 발생확률이 높게 나타난다. 측정봉의 기본 무게가 100 이므로 만약 계산값이 100보다 클 경우는100을 뺀 값을 습도측정봉의 무게로 결정하고 이를 산불위험지수로 환산한다. 그러나 계산값이 100보다 작은 경우에는 그 값을 그대로 측정봉의 무게(Y)로 결정하고 이를 산불위험지수로 환산하여 지수값을 결정하였다.

$$Y = 6.87 + 0.64P + 0.15EF + 1774.94/CS \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5\text{-}1)$$

여기서 EF 는 실효습도(%), CS는 적산일사량(MJ/㎡), P는 강수량(mm)을 나타낸다.

그러나 이 방법은 수작업으로 분석하다보니 산불위험지수의 부정확과 전달체계의 미흡으로 실효성이 다소 떨어지는 경향이 있던 중 2000년 동해안 초대형 산불을 계기로 보다 정확하고 과학적인 산불위험지수 산출과 위험지수 전달체계 개선의 필요성이 대두되어 현재의 개선된 웹기반의 산불위험예보시스템을 개발하였다[15].

따라서 2004년 11월 1일부터 기상청에서는 산림청과 공동으로 지형지수(고도, 방위), 임상지수(침엽수, 활엽수, 혼효림), 기상지수(온도, 습도, 풍속)를 종합하여, ① 매우 높음 (86 ~ 100) : 동시다발적 발생, 대형 산불로 확산될 개연성이 높다고 인정되는 경우, ② 높음 (66~86) : 대형 산불로 확산될 우려가 인정되는 경우, ③ 보통 (51~ 66) : 산불발생 위험이 높아질 것으로 예상되는 경우, ④ 낮음 (0 ~ 50) : 산불발생 위험이 낮음, 등의 4단계의 경보단계로 봄철의 2월 1일~5월 15일, 가을철의 11월 1일~12월 15일까지 한시적으로 제공하고 있다.

제2절 산불위험지수(FFDI) 제안

본 연구에서 제안하고자하는 산불위험지수(FFDI, Fores Fire Danger Index)는 우리나라 산불위험지수식 5-1에 대응하여, 군사격장에서의 산불발생과 토양수분량과의 유의할 만한 결과에 착안하여 상관관계 분석을 통해 지수화 하였다. 군사격장의 산불 발생일을 대상으로 분석한 결과 상대습도, 실효습도, 바람자료가 비슷하거나 거의 동일한 날인데도 어떤 날은 산불이 발생하고, 어떤 날은 발생하지 않았다. 이는 토양수분량의 차이 때문으로 산불의 연료가 되는 낙엽, 잡목 등의 건조도에 토양수분이 영향을 주기 때문이다. 따라서 새로운 산불위험지수는 기존의 산불위험지수에서 고려되지 않았던 토양수분량을 지수계산에 포함하는 것을 특징으로 식 5-2와 같이 계산되었으며, 각 지수는 산불발생일을 대상으로 통계적인 방법으로 분석하여 도출하였다.

$$FFDI = 0.4RHI + 0.1EHI + 0.3WSI + 0.2SMI \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}2).$$

15) "산불통계 분석을 통한 산불 정책 변천 및 대응방안(산림청, 2010)

여기서 *RHI*는 상대습도지수(relative humidity index), *EHI*는 실효습도지수(environmental humidity index), *WSI*는 풍속지수(wind speed index), *SMI*는 토양수분지수(soil moisture index)를 나타낸다.

산불발생일 기상요소들과 산불발생간의 상관관계는 아래 식 5-3[16]에 의해 계산되고, 분산분석은 식 5-4[17]에 의해 계산 분석되었다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\ \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}3)$$

여기서, x와 y는 각각 산불발생과 기상요소를 나타내고 $\bar{x}$와 $\bar{y}$는 그 평균을 나타낸다. 도출과정으로, 두 변수의 편차를 곱해 평균을 구한다음 공분산을 통해 양과 음의 상관관계 방향과 강도를 구하고, 이 방향과 강도를 x와 y의 표준편차로 나누어 단위 보정을 해주면 각 기상요소들의 상관계수의 크기를 알 수 있다. 더불어서 식 5-4의 분산분석을 이용하여 기상요소들의 평균간 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하였다.

$$Y_i - Y_M = (Y_i - Y_i^e) + (Y_i^e - Y_M)$$

$$\sum i(Y_i - Y_M)^2 = \sum i(Y_i - Y_i^e)^2 + \sum i(Y_i^e - Y_M) \cdots\cdots (5\text{-}4)$$

여기서, Y_i는 집단의 요소이고, Y_M은 집단의 평균값이며, Y_i^e는 각 요소의 측정값이다. 이를 통해 상관관계가 높은 기상요소는 상대습도, 실효습도, 풍속, 토양수분 순이지만 습도 관련 변수의 중복(실효습도 안에 이미 상대습도 포함)이 있어 보정 하였으며, 회귀분석{산불확율분포 계산 → 누적분포 변환 → 추세선 로그함수(fitting)}으로 지수식을 산출한 후 이를 산불위험지수 계산식에 대입하여 산불위험지수를 구하였다. 이렇게 계산된 위험지수와 산불발생과의 민감도를 통계적인 방법으로 검증 한 다음 수준별로 Category(주의: notice, 위험 : danger, 매우위험 : very dangerous)를 정하였다.(Table 5.1)

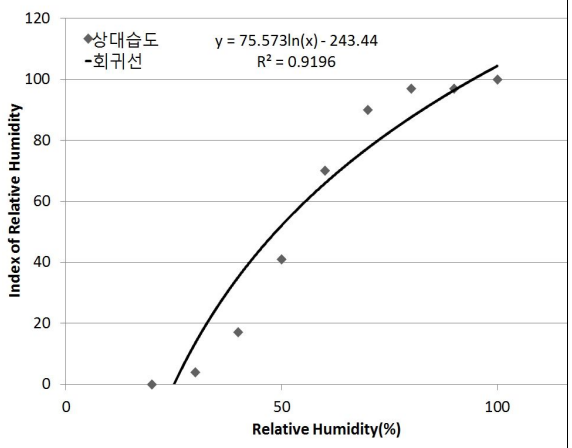
16) 상관관계의 정도를 수량적으로 표시한 것으로서, 보통 r로 표시된다. 상관계수 r는 항상 부등식 $-1 \le r \le 1$을 만족시키며, 양의 상관관계가 있을 때는 $r>0$, 음의 상관관계가 있을 때는 $r<0$이다. 또 무상관일 때는 $r=0$이 된다.

17) 두 개 이상 집단들의 평균간 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하는 방법임.

예) 지수식의 산출

· 상대/실효습도/토양수분 : 100 – 추세선

· 풍속 : 지수식 = 추세선



▶ 상대습도

: 지수식 = 100 – 추세선

= 343 – 75.6 × ln(상대습도)

▶ 실효습도

: 지수식 = 100 – 추세선

= 488 – 114.4 × ln(실효습도)

▶ 풍속

: 지수식 = 추세선

= – 60 + 62.2 × ln(풍속)

위와 같은 지수 변환식을 사용하지 않더라도 지수계산에 포함된 각 기상요소와 산불발생의 상관관계는 큰 결정계수를 보이므로 상대습도와 실효습도, 토양수분량은 100에서 관측값을 뺀 후 지수계산값을 곱하여 계산하고, 풍속은 1~10m/s 까지는 각 풍속 값에 10을 곱한 후 지수계산값을 곱해주고, 10m/s를 초과하는 풍속에서는 10m/s를 적용하여 계산해도 계산식의 로그함수와 큰 차이는 나지 않는다. 예를 들어 어떤 특정일의 최소 상대습도가 35%, 실효습도가 25%, 평균풍속이 6m/s, 토양수분량 30%가 예상된다면 이날의 FFDI는 (100 – 35) × 0.4 + (100 – 25) × 0.1 + (6 × 10) × 0.3 + (100 – 30) × 0.2 = 65.5로 간단하게 계산하여 산불위험정도(danger)를 예보할 수 있다.

Table 5.1. The categories by FFDI (Forest Fire Danger Index).

Categories		Forest fire danger index
3	Notice	53 < FFDI ≦ 63
2	Danger	63 < FFDI ≦ 88
1	Very dangerous	88 < FFDI

제3절 결과 및 고찰

1. 산불발생과 산불위험지수 관계

2003년부터 2012년까지 10년간의 연평균 산불위험지수는 42.1이었으며 2008년이 35.4로 가장 낮았고 2006년과 2007년도 37.3와 37.9로 낮은 값을 보였으며, 가장 높은 해는 2004년으로 48.2를 보였고 2005년과 2010년도 46.2과 46.1로 높은 값을 보이며, Table 5.2와 Fig. 5.1, 2, 3의 산불발생건수와 피해면적 통계자료와도 함수적으로 높은 상관관계를 보였다.

Table 5.2. Annual data of FFDI, forest fire frequency, and damage area.

Year	Frequency	Damage area (ha)	FFDI
2003	11	6.40	40.2
2004	57	705.28	48.2
2005	41	1,168.95	46.2
2006	30	4.51	37.3
2007	26	11.32	37.9
2008	25	5.08	35.4
2009	60	57.04	42.4
2010	46	91.37	46.1
2011	39	110.06	43.6
2012	44	4.48	43.7
average	37.9	216.46	42.1

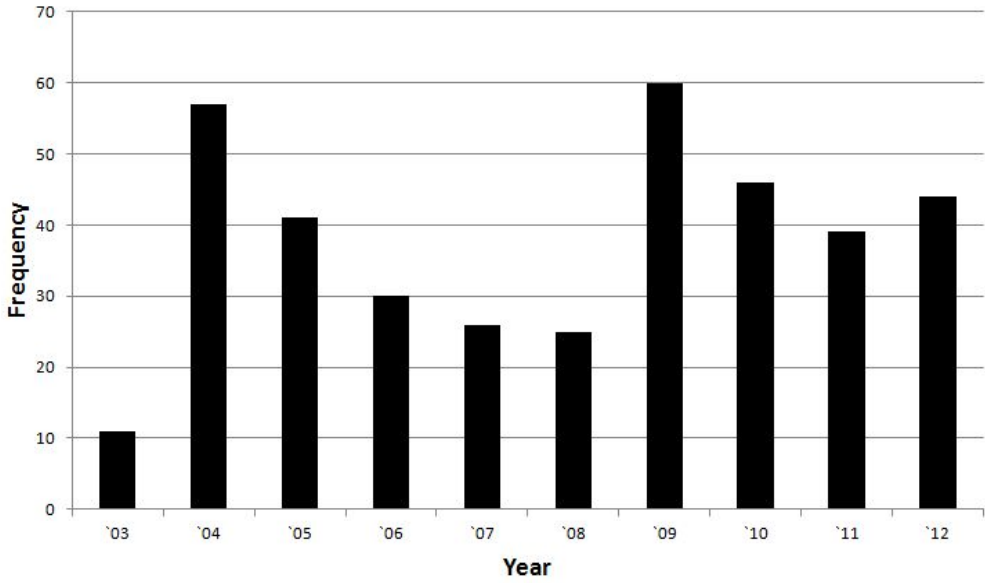


Fig. 5. 1. Annual frequency of the forest fire.

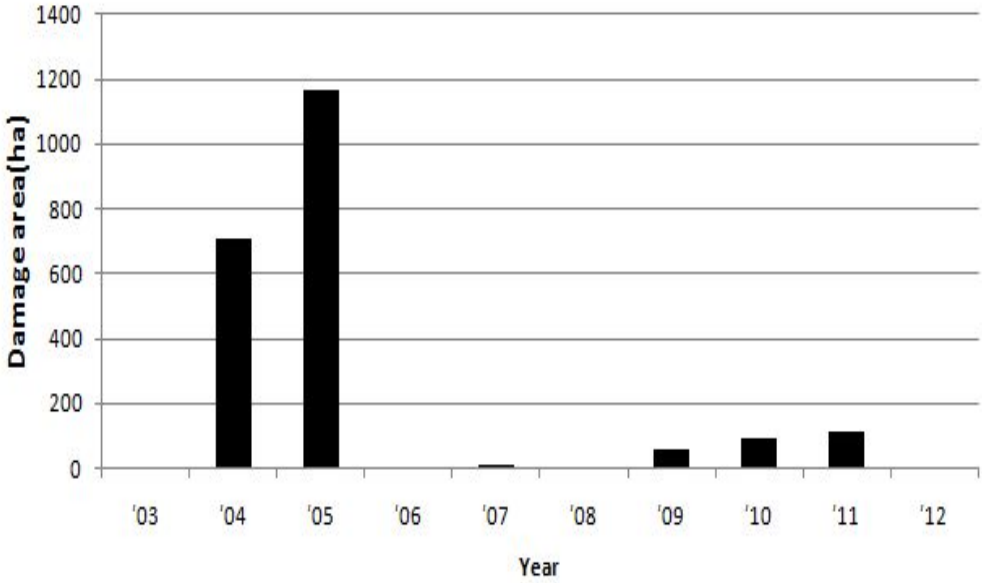


Fig. 5. 2. Annual damage areas of the forest fire.

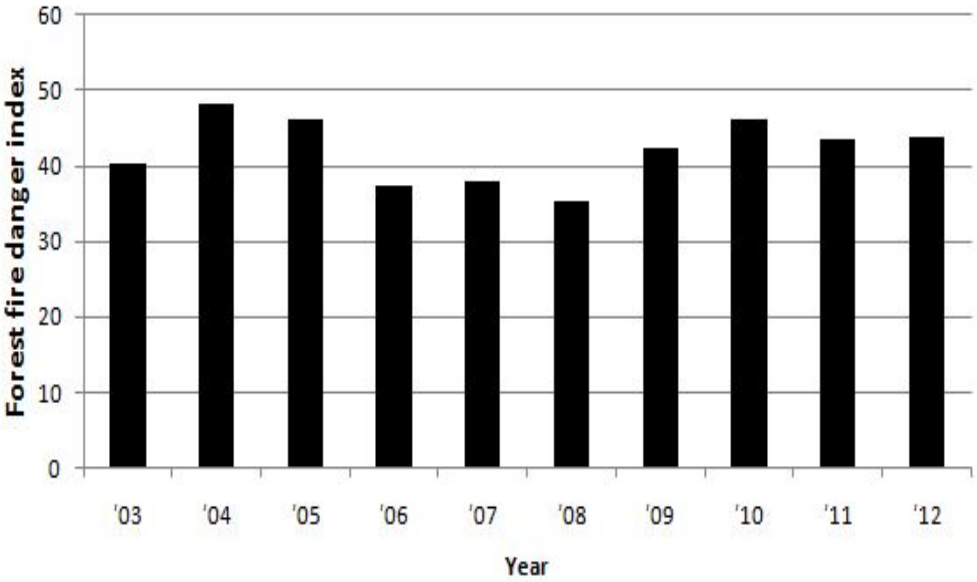


Fig. 5.3. Annual FFDI of the forest fire.

월평균 산불위험지수는 4월이 57.3으로 가장 높았고 3월과 2월도 54.3과 53.7로 높은 값을 보였다. 이 기간은 연중 산불발생이 가장 많은 기간으로, 월평균 산불위험지수와 월별 산불발생건수 역시 함수적으로 높은 상관관계를 보였다. 또, 4월의 산불피해면적은 1,910ha(88.2%)이고, 3월의 산불피해면적은 104ha(4.8%)로, 이 두 달의 피해면적을 합하면 2,014ha로 전체 피해면적 2,165ha의 93%에 가까운 압도적인 비율을 나타내고 있다(Table 5.3, Fig. 5.4, 5, 6).

이는 봄철에 건조하고 바람이 강하게 부는데다가 영동지역은 푄현상으로 대기의 습도 뿐 아니라 토양수분 역시 더욱 건조해지기 때문으로 판단된다.

Table 5. 3. Monthly data of FFDI, forest fire frequency, and damage area.

Month	Frequency	Damage		FFDI
		Area (ha)	%	
Jan	16	21.0	1.0	48.9
Feb	49	55.0	2.5	53.7
Mar	83	104.0	4.8	54.3
Apr	153	1910.0	88.2	57.3
May	31	18.0	0.8	46.0
Jun	3	4.0	0.1	36.4
Jul	1	0.0	0.0	23.9
Aug	1	0.1	0.0	24.1
Sep	1	0.1	0.0	28.6
Oct	9	9.0	0.4	41.2
Nov	11	23.0	1.1	45.1
Dec	22	21.0	1.0	47.3
Total	380	2,165.2	100.0	42.2

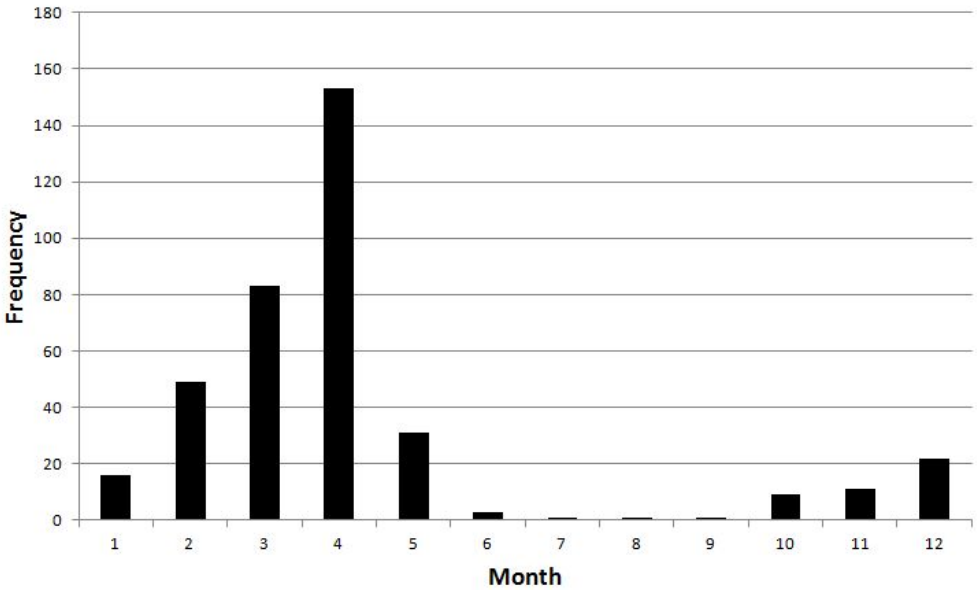


Fig. 5. 4. Monthly frequency of the forest fire.

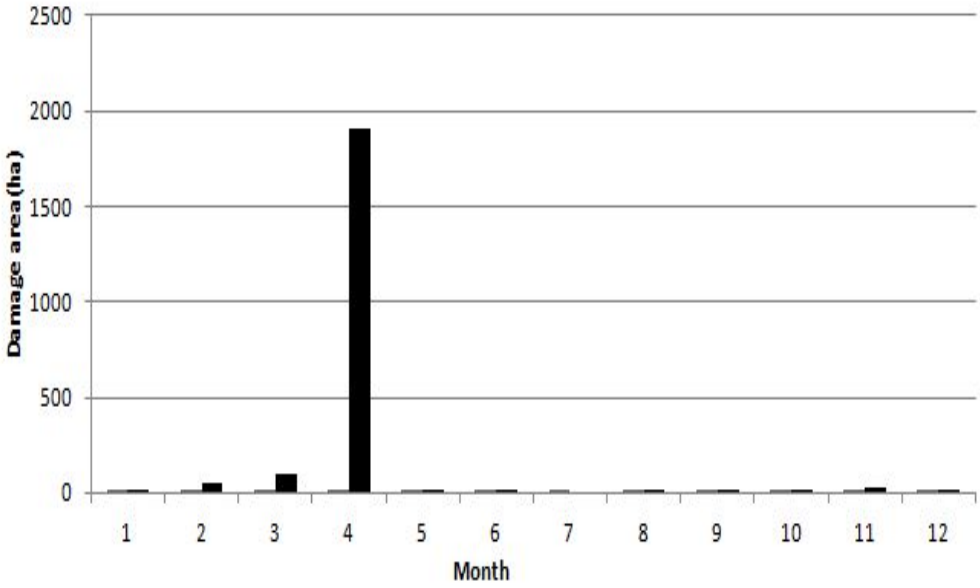


Fig. 5.5. Monthly damage areas of the forest fire.

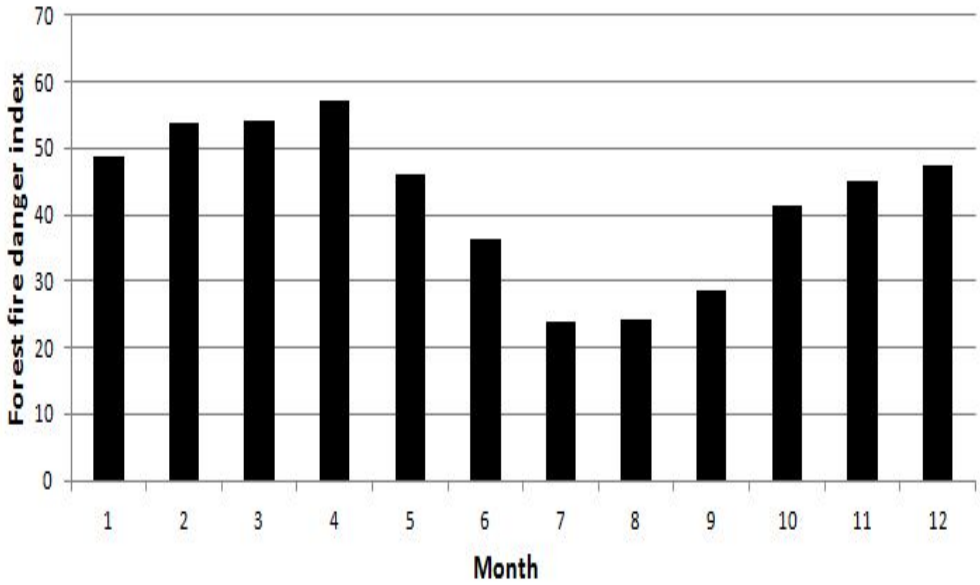


Fig. 5.6. Monthly FFDI of the forest fire.

2. 산불위험지수 회귀분석 결과

산불위험지수(x)와 산불발생 건수(비율, y)의 관계를 분석하기 위하여 10단위로 다중회귀분석을 실시한 결과, 추정된 회귀식은 $y = 0.00846e^{0.8078x}$ 이고, 이때 R^2 은 약 0.97로 산불위험지수와 산불발생 건수는 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.(Fig. 5. 7)

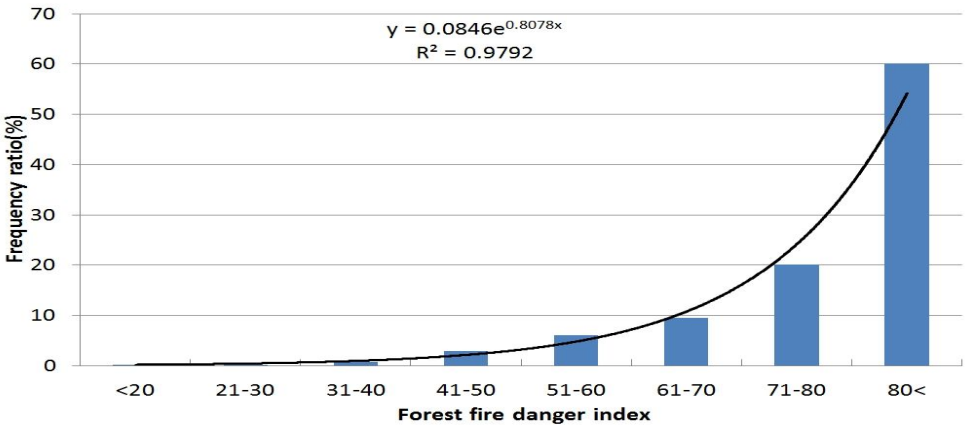


Fig. 5. 7. The relationship between FFDI and forest fire ratio(%).

또, 산불위험지수와 산불발생 피해면적(ha) 사이에서도 통계적으로 유의한 관계가 분석 되었다. 산불위험지수(x)와 산불 피해면적(y) 사이에 추정된 회귀식은 $y = 4.6887e^{0.0288x}$ 이고, R^2은 0.51로 산불위험지수가 커질수록 최대 피해면적은 급격히 증가하는 것으로 나타났다.(Fig. 5. 8)

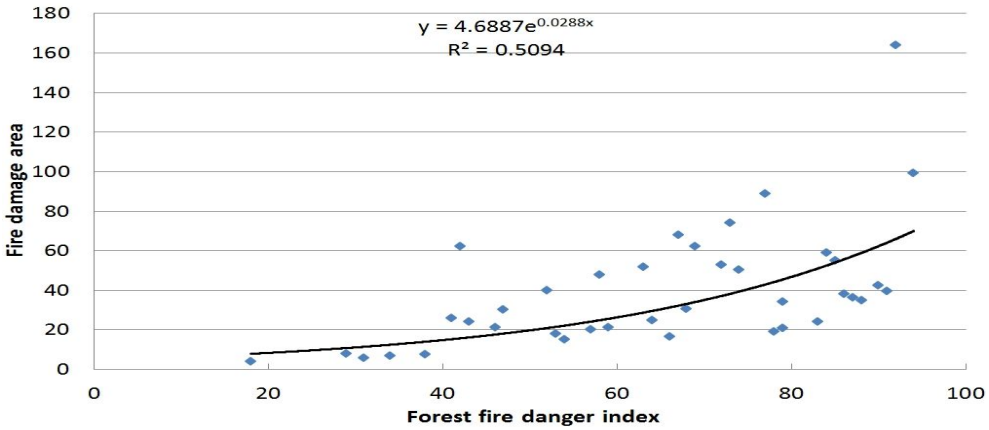


Fig. 5. 8. The relationship between FFDI and forest fire damage areas.

제6장 결론 및 제언

본 연구는 산불에 대한 일반적인 특성과 산불과 기상요소와의 상관관계를 알아본 후 우리나라의 대표적인 산림 지대이며, 산불의 가장 많은 피해를 보았던 강원도를 대상으로 최근 10년간의 기상자료와 산불발생 자료를 바탕으로 기상환경변화와 산불발생현황 분석을 하였다.

산불의 발생과 확산에 불가분의 관계가 있는 습도와 풍속의 기상요소와 산불의 연료가 되는 낙엽 및 잡목의 건조도에 절대적으로 영향을 미치는 토양수분량을 이용한 새로운 산불위험지수(FFDI)를 제안하고 이를 검증하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 목재는 항상 수분을 다소 포함하고 있으므로 연소는 목재의 함수량(含水量)에 따라서 크게 좌우된다. 목재의 건조 정도는 주로 공기의 습도에 따라 좌우되고 건조되는 시간은 산림의 경우 토양수분량에 의해 좌우된다. 또 목재의 함수량은 기온에 따라서도 달라지고 목재의 종류에 따라서도 달라지지만 그 특성은 대체로 비슷하다.

2. 가연물질(可燃物質)의 함수량이 가연물질 전체 중량의 약 15% 이하인 경우에는 성냥불과 같은 불씨로도 불을 붙일 수 있지만 함수량이 15% 이상이 되면 작은 불씨로는 불을 붙일 수 없다. 그러나 일단 큰 화재가 시작되면 함수량 자체는 중요하지 않게 되어 50% 이상의 함수량일 때에도 잘 연소된다. 산불의 경우에는 삼림 중의 낙엽의 함수량이 큰 문제가 된다. 낙엽의 함수량이 10% 미만일 때 산불발생이 용이하며, 25% 이상이 되면 산불이 발생하는 경우는 드물다.

3. 산불의 발화와 인화온도는 임상의 종류에 따라 480℃ ~ 505℃와 240℃ ~ 272℃까지 차이가 있다. 그러나 지역별 임상의 종류와 형태는 기상환경에 의해 결정되므로, 기상환경의 변화는 산불발생과 확산에 영향을 미친다고 말할 수 있다.

4. 연소속도는 기온의 영향도 받는다. 기온이 높을 때는 함수량에 따른 연소속도

의 차이가 현저히 크지만 기온이 0℃ 정도일 때는 함수량에 따른 연소속도의 차가 적어진다. 또, 공기 중의 습도가 높을수록 연소속도는 느려지고, 연소의 규모가 산불화재처럼 커지면 발열량도 커지므로 풍속이 증가될수록 연소가 더욱 왕성해진다.

5. 산불에 영향을 주는 기상 요소는 강수량, 상대습도, 온도, 바람, 등이다. 건조기에는 강우가 적고 계속적으로 맑은 날이 많아 연료가 건조하여 상대습도가 40% 미만일 때 산불발생 위험도가 커진다. 기온은 습도의 변화와 밀접한 관계를 가지고 있다. 낮에는 기온이 높아지는 10시부터 해 질 때까지 상대습도가 내려가 연료가 점차 건조해지면서 이미 발생한 산불의 화세가 증가한다. 또한, 바람은 연료의 수분을 증발시키며, 산소 공급을 증가시켜 연소 진행을 가속시키며, 돌풍을 일으키면서 연소물질을 상승시켜 타지역으로 비화(飛火)시킨다.

6. 산의 지형은 산불 진행에 큰 영향을 준다. 경사의 방위에 따라서 햇빛을 받는 양이 다르므로 풍향·풍속이 다르고, 연료의 건습 정도가 달라진다. 즉, 남향 경사는 북향 경사보다 햇빛을 많이 받아 온도가 높고, 따라서 상대습도가 낮아 연료가 건조하여 산불발생 위험도가 높다. 또 산불은 해발고도에 따라 눈 녹는 시기, 식물의 생장활동 시기가 다르기 때문에 산불 발생빈도의 순위를 보면, 산경사의 시작부분에서 산불이 가장 많이 발생하고, 다음이 평지, 중산간부분, 산정의 순서이다. 또 급경사에서 발생한 산불은 복사열, 대류열 등의 영향과 급경사가 굴뚝과 같이 연기를 빨아들이는 역할을 하기 때문에 산불의 진행속도가 평지에서 빠르다. 이런 이유로 강원 영서지역 보다 경사가 급한 영동지역이 산불발생건수에 비해 피해면적이 크다.

7. 강원지방의 기후환경 변화는 기온과 강수량은 뚜렷한 상승 경향을 보이고, 상대습도와 풍속은 감소하는 경향을 보이고 있으나 풍속의 경우 계절별 변동폭이 다소 크게 나타났다. 이 중 상대습도의 감소는 산불발생 빈도와 관련하여 중요한 변화이다. 임상의 종류와 형태의 변화는 기후환경 변화에 의해 다소의 변화가 있었을 것으로 사료되나, 신뢰할만한 통계자료는 얻을 수 없었다.

8. 강원도 18개 시·군지역의 최근 10년간(2003 ~ 2012) 산불은 379건으로 매년 적게는 11건, 많게는 60건의 산불이 발생하였으며, 월별 산불발생현황으로는 4월이

153건으로 가장 많은 산불이 발생한 것으로 나타났으며, 다음으로 3월, 2월 순으로 나타났다. 2,3,4월에 발생한 산불 누적 건수는 전체 산불발생의 75%로 대부분을 차지하였다. 18개 시·군별 산불발생현황은 강릉이 54건으로 가장 많은 산불이 발생했으며, 다음으로 춘천 41건, 홍천 35건 순으로 나타났다.

한편 영동과 영서의 지역별 산불발생빈도 및 피해면적은 영동 지역이 130건(33.5%), 영서가 249건(66.5%)으로 영서 지역이 발생빈도는 높았지만 피해면적은 2.8ha 차이로 비슷하였다. 이는 영동지역이 태백산맥 풍하측에 위치하여 산불확산에 있어 바람과 지형의 영향을 많이 받기 때문으로 사료된다. 또 임상(林相)별 산불발생빈도는 소나무 단순림의 경우가 80건(21%)으로 가장 높게 나타났으며, 시초 54건(14.2%), 소나무활잡목 48건(12.6%), 활잡목 40건(10.5%), 잣나무림 38건(10.0%) 순으로 나타났다. 이러한 결과는 강원도 지역의 대부분의 산림이 소나무 중심의 침엽수림으로 구성되어 있는 이유와 산불이 침엽수림에서 보다 강도 높게 발생하고 있다는 이유로 해석된다.

9. Pearson의 상관계수 분석결과 모든 기상요소들은 통계적으로 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 기온과 습도, 그리고 일조시간과 운량, 강우량이 음(-)의 상관관계를 보이고 이 외 기상요소들은 모두 양(+)의 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다.

다음으로 강원도 10개 지역 기상대(속초, 철원, 춘천, 강릉, 동해, 원주, 영월, 인제, 홍천, 태백)의 일일기상자료를 이용하여 분산분석(one-way ANOVA)의 다중검정을 실시하고 지역 간의 유의성 검증을 실시한 결과 운량(雲量)과 강우량, 그리고 일조시간이 1% 유의수준에서 유의성이 없는 것으로 나타나 지역 기상대간 차이가 존재하지 않는 것으로 해석된다.

이 외 기온, 습도, 풍속관련 기상인자는 모두 지역 간에 차이가 있는 것으로 나타났다. 도출된 결과들 가운데 강원도 동해안산불의 최대피해지역인 강릉, 삼척, 동해, 속초지역의 기상요인과 타지역간의 기상요인에 차이가 있는지를 검토한 결과, 일일평균온도와 풍속에서는 강릉, 동해. 속초지역이 원주, 춘천 등 내륙지역보다 기온은 5 ~ 6℃, 풍속은 2 ~ 3m/s 높은 것으로 나타났다. 따라서 2000년대 들어 초대형 산불피해지역인 강릉, 속초, 동해 지역은 타 지역보다 기온이 높고, 강한 바람이 부는 지역임을 알 수 있었다.

본 연구에서 군사격장에서의 산불발생과 토양수분량과의 유의할 만한 결과에 착안하여 상관관계 분석을 통해 산불위험을 새롭게 지수화 하였는데 이의 실용화를 위해 다음과 같이 제안한다.

1. 지수화한 산불위험지수 수식은 다음과 같다.

$$FFDI = 0.4RHI + 0.1EHI + 0.3WSI + 0.2SMI$$

2. 제안한 산불위험지수를 검증한 결과, 2003년부터 2012년까지 총 10년간 강원도 지역의 산불발생건수와 피해면적은 산불위험지수와 함수적으로 높은 상관관계를 보였다(Fig. 5.8). 즉 산불위험지수가 높을수록 산불발생건수와 산불피해면적이 뚜렷이 증가하였다.

기후변화, 특히 지구의 온난화와 함께 지역에 따라 습도가 하강하거나, 대기의 불안정으로 강한 바람이 발생할 가능성이 높아지고 있다. 이에 따라 산불의 발생가능성 및 규모가 확대될 가능성이 점증하고 있다. 따라서 향후 전국을 대상으로 한 조사와 개발 및 검증이 이루어져야 할 것이다.

또한, 본 연구를 통해 개발된 새로운 산불위험지수가 적극 활용되어 산불로 인한 인명 및 재산피해를 저감하는데 기여하고, 더 많은 연구를 하는데 초석이 되기를 기대한다.

참고문헌

강원지방기상청, 2011, 지역기후변화보고서. 4-5.

과학기술부, 2003, 자연재해방재기술사업 -산불예측 및 감시기술 개발-. 임업연구원, 19-114

국립기상연구소, 2010, 기후변화 이해하기. 77-81.

김선명, 이병두, 이시영, 정주상, 2005, 산불 통계 자료를 이용한 산불 위험 지수 고찰. 한국농림기상학회지, 7(4), 235-239.

김응식, 1995, GIS를 이용한 산불확산 Simulation 알고리즘의 개발. 안전추계학술논문발표회 논문집, 33-39.

김응식, 이시영, 정연하, 이봉수, 1998, 유동장 해석을 통한 산불확산예측 프로그램의 개발. 한국임학회지, 87(4), 528-534.

동해안 산불피해지 공동조사단, 2000, 동해안 산불지역 정밀조사 보고서 Ⅱ. 산림청, 7-44.

부기동, 1999, OLE 자동화를 이용한 GIS의 사용자 인터페이스 개발에 관한 연구. 한국지리정보학회지, 2(1), 63-72.

산림청, 2001, 봄철 산불방지종합대책. 산림청 내부자료, 38pp.

산림청, 2010, 산불통계 분석을 통한 산불정책 변천 및 대응방안. 6-11,

원명수, 구교상, 이명보, 2006, 우리나라의 봄철 순평년 온습도 변화에 따른 산불발생위험성 분석. 한국농림기상학회지, 8(4), 250-259.

이기철, 김승환, 남정칠, 박승범, 강영조, 옥진아, 1998, GIS를 이용한 산불 진화용 저수탱크 적지분석에 관한 연구. 한국지리정보학회지, 1(2), 1-13.

이시영, 1990, 환경인자가 산불의 온도 및 진행속도에 미치는 영향. 동국대학교 석사학위논문, 44pp.

이시영, 2009, 산불과 기상, 한국방재학회지, 9(2), 19-23.

이시영, 이봉수, 임주훈, 1997, 습도측정봉을 이용한 산불 발생위험율 예측. 산림과학논문집, 55, 150-157.

이시영, 한상렬, 안상현, 오정수, 조명희, 김명수, 2001, 강원도 지역 산불 발생인자의 지역별 유형화. 한국농림기상학회지, 3(3), 135-142.

이시영, 한상열, 원명수, 2005, 산불발화지점의 임상과 지형특성을 이용한 산불발생

위험지수 개발. 한국화재소방학회 논문지, 19(4), 75-79.
이시영, 한상열, 원명수, 이명보, 2004, 기상특성을 이용한 전국 산불 발생 확률 모형 개발. 한국농림기상학회지, 6(4), 242- 249.
이학식, 임지훈, 2006 , SPSS 12.0 매뉴얼. 법문사. 4-17.
임종환, 신준환, 이돈구, 서승진, 2006, 기후변화에 따른 산림생태계 영향 - 우리나라 연구현황과 과제-. 한국농림기상학회지, 8(3), 199-207.
정연하, 이시영, 염육철, 1994, 산불위험율 예측에 관한 연구. 임업연구원 연구보고, 38, 117-123.
최관, 한상열, 1996, 기상 자료를 이용한 산불 발생 확률 모형의 개발. 한국임학회지, 85(1), 15-23.
한국환경정책평가연구원, 2005, 기후변화영향평가 및 적응시스템 구축 Ⅲ. 101-112.
홍성길, 1987, 기상과 화재. 교학연구사, 13-27.
松本由友, 1951, 森林火災の發生と濕度の關係に就に. 日本誌, 59, 179-181.
Alan Juvenbille, and M. W. Twight, 1993, Outdoor Recreation Management : Theory and Application. Venture Publishing Inc., 99-124
Alexander M.E., and W.J. De Groot, 1988, Fire behavior in jack pine stands as related to the Canadian Forest Fire Weather Index(FWI) System. Can. For. Serv. North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Poster, 8-45
Alexander M.E., B.J. Stocks and B.D. Lawson, 1989, Fire behavior in black spruce-lichen woodland : the Porter Lake project. For. North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Poster. 36-68
Alexander M.E., Stocks, B.J., and Lawson, B.D., 1996, The Canadian Forest Fire Danger Rating System. Initial Attack, Spring, 5-8.
Amiro B.D., Logan K.A., Wotton B.M., Flanigan M.D., Todd J.B., Stocks, B.J., and Martell D.L., 2004, Fire Weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest. International Journal of Wildland Fire, 13, 391-400.
Anderson H.E., 1983, Predicting wind-driven wildland fire size and shape. Research Paper INT-305, U. S. Forest Service, 12-32

Beatriz P., and M.M. José, 1998, Methods for quantifying fie severity in shrubland-fires. Plant Ecology, 139, 91-101.

Bonham-Carter G.F., 1994, Geographic Information System for Geoscientists: modeling with GIS, Pergamon. 13-43.

Cheong, Yeon Ha. 1992, Burning Behavior of Forest Litter and Forest Fire Danger Rating in Relation to Weather Conditions. Seoul national University Ph.D. thesis, 48-49.

Chung ChangJo, F. Adrea and G. Fabbri, 1999, Probabilistic Prediction Models for Landside Hazard Mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 65(12), 1389-1399.

Countryman C. M., 1972, The fire environment concept(Pacific Sauthwest Forest and Range Experiment Station. U. S. Forest Service, 7-34

Deeming J.E., Burgan R.E., and Cohen J.D., 1977, The national fire-danger rating system-1978. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT. 39-63.

Deeming J.E., R.E., Burgan and J.D. Cohen 1977, The national fore-danger rating system-1978. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT39, 63pp.

Ezequiel V. Albanp, 1995, Spreading analysis and finite-size scaling study of the critical behavior of a forest fire model with immune trees. PHYSICAL A. 1995(216), 213-226.

Flanigan M.D., Logan K.A., Amiro B.D., Skinner W.R., and Stocks B.J., 2005, Future area burned in Canada. Climatic Change. 72, 1-16.

Garcia C.V., and Lee B.S., 1993, Mapping risk of wildfires from human source of ignition with a GIS. Proceedings of the Thirteenth Annual ESRI User Conference, 1, 15-84

Jo Myung-Hee, Jo Yun-Won, Oh Jeong-Soo, and Lee Si-Young, 2001, The Design and Implantation of Dynamic Load Balancing for Web-Based GIS Services. Asian Conference on Remote Sensing 2001.

José R.A., M.F. José, J.J. Maria and G. Pascual, 2001, The effect of fire inten sity on the understory species composition of two Pinus canariensis refor ested stands in Tenerife. Forest Ecology and Management. 148(2001), 21-29.

KIM S.Y., Lee B.D., and Chung J.S., 2005, Evaluation of the Forest Fire Danger Rating Index Based on National Forest Fire Statistics Data. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 7(4), 235-239.

Kustanta B. P., 1999, The use of geographic information system for forest fire management in indonesia. 지방자치단체의 GIS활용에 관한 국제 세미나. 국토연구원. 21-44

Lee B.S., Alexander M.E., Hawkes B.C., Lynham T.J., Stocks B.J., and Englefield P., 2002, Information systems in support of puter and Electronics in Agriculture. 37.

Lu Phillip Feng and Ping An, 1999, A Metric for Spatial Data Layers in Favorability Mapping for Geological Events. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(3), 1194-1198.

Roy D.P., L. Giglio, J.D. Kendall and C.O. Justice, 1999, Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm. International Journal of Remote Sensing, 20, 1031-1038.

Stocks B.J., 2000, Climate change : implication for forest fire management in Canada. Initial Attack, Autumn, 2-5.

Stocks B.J., Fosberg M.A., Lynham T.J., Merns L., Wotton B.M., Yang Q., Jin J. Z., Lawrence K., Hartley G.R., Mason J.A., and Mckenney D.W., 1998, Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forest. Climate Change, 38, 1-13.

Stocks B.J., Lawson B.D., Alexander M.E., Van Wagner C.E., AcAlpine R.S., Lynham T.J., and Dube D.E., 1989, The Canadian forest fire danger rating system : an overview. For. Chron, 65, 450-457.

Sunar F., and C. Ozkan, 2001, Forest fire analysis with remote sensing data. International Journal of Remote Sensing, 22(12), 2265-2277.

Van Nest T.A., and Alexander M.E., 1996, System for Rating Fire Danger and Predicting Fire Behavior Used in Canada. National interagency Fire Behavior Workshop Report, 17-38.

Van Wager C.E., 1987, Development and structure of Canadian Forest Fire Weather Index System. C.E. Canadian Forest Service, Ottawa, Ontario.

111-147.

Web site

Canada Fire Research Network Homepage : http://www.nofc.forestry.ca/fore/frn/English/frames.htm

USFS, 2000, An agency strategy for fire management : http://www.fs,fed.us/fire/planning/USDA_Report. pdf.

USFS. 2000. National Fire Plan. : http://www.fireplan.gov/president.cfm