산림지역과 기상대의 기상인자를 활용한 산림연료의 수분 함량 변화 분석

The Analysis on Moisture Contents of Forest Fuel Using Weather Factors in Forest Land and Weather Station

채희문*

Chae, hee mun*

Abstract

The moisture contents of forest fuel are very important roles in behavior and ignition of forest fire. Fuel moisture contents are determined by various weather factors around forest fuel, therefore research on the relationship between the change of fuel moisture contents and weather should be carried. This study was conducted to analysis on the change of forest fuel moisture contents by weather factors into forest land during forest fire danger seasons(spring and fall) at chuncheon area of Gangwon in 2013 year. The leaves of *Quercus dentata* Thunb. ex Murray, and needles of *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. that drop in the forest land were used to analysis on forest fuel moisture contents. The moisture contents of forest fuel were measured daily during forest fire danger seasons. Weather recording device(HOBO data logger) was installed in forest land in order to analyze the change of fuel moisture contents within the forest land by weather factors. Meteorological data obtained in the forest and meteorological data of chuncheon weather station were analyzed. Among the results of correlation analysis on fuel moisture contents and meteorological data of forest land and weather station, the maximum temperature(°C) and relative humidity(%) were significant during the forest fire danger season(spring and fall) in the meteorological data of forest land and only the maximum temperature(°C) was significant during the spring forest fire danger season in meteorological data of weather station. The fuel moisture contents of forest fuel after precipitation during forest fire danger seasons(spring and fall) were decreased sharply within 20~30% in one or two day after rainfall.

Key words : Forest fuel, Fuel moisture contents, Forest fire danger season, Weather factors

요 지

산림연료의 수분함량은 산불의 발화 가능성 및 산불의 행동에 매우 중요한 인자이다. 산림연료의 수분 함량을 결정하는 중요한 인자들은 기상인자이고 기상인자와 산림연료의 수분함량 변화의 관계를 밝히는 것은 산불에 매우 중요하다. 본 연구는 강원도 춘천지역의 봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 기상인자에 따른 임지내 산림연료의 수분함량 변화를 분석하기 위하여 수행되었다. 산림연료의 수분함량 분석은 임지내에 낙하한 활엽수인 떡갈나무 잎과 침엽수인 소나무 잎을 사용하였으며, 산불조심기간 동안 매일 측정하였다. 임지내와 임지외의 기상현상의 차이에 따라서 산림연료의 수분함량의 변화를 분석하기 위하여 임지내에 기상기록장치(HOBO data logger)를 설치하여 이들의 자료와 기상대의 자료를 비교 분석 하였다. 기상인자와 산림연료의 수분함량 변화에 대한 상관분석을 실시한 결과 임지내에서는 두 수종 모두에서 최고온도(°C)와 상대습도(%)가 유의성이 높은 것으로 분석되었으며, 임지외의 기상인자와의 관계에서는 봄철 산불 조심기간 동안 최저온도가 유의성이 높은 것으로 분석 되었다. 강우 후 산림연료의 수분함량 변화를 측정한 결과 강우 후 1일내지 2일정도가 지나면 20~30% 이내로 수분함량이 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 산림연료, 수분함량, 산불조심기간, 기상인자

1. 서 론

산불은 산림에 있어서 생태학적 피해 뿐 만 아니라 사회 경

제적으로 그 피해가 매우 다양하게 나타난다. 식물의 수분은 산불의 발화 가능성에 매우 커다란 역할을 하기 때문에 산불 발생과 강도를 예측하는데 있어서 매우 중요한 인자로서 다

*교신저자. 정희원. 강원대학교 산림환경관학대학 산림환경보호학과 교수(Tel: +83-33-250-8367, Fax: +82-33-259-5620, E-mail: cheemun@kangwon.ac.kr)
Corresponding Author: Member. Professor, Department of Forest Environment Protection. Kangwon National University

루어지고 있다(Mutch, 1907). 산림연료의 수분함량의 존재가 연소의 속도와 발화에 상당한 영향을 준다는 사실은 이미 잘 알려져 있으며, 산불의 확산 및 산불 발생 가능성은 산림에 축적되어 있는 산림연료와 매우 밀접한 관련이 있다. 산림연료의 수분함량과 산불 발생 및 확산사이에서의 관련성은 오늘날 산불 예보시스템을 구축하는데 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 세계의 많은 산림들은 산불에 적응되어 발생 되어온 생태계 내에서 적응되어 오고 있으며, 산림내에서 산불의 잠재성은 산림연료의 수분함량과 매우 밀접한 관련이 있다(Weise *et al.*, 1998, Carlson and Burgan 2003, Chandler *et al.*, 1983, Van Wagner, 1977). 국내외에서 개발되고 발달 되어 오고 있는 산불 위험예보시스템은 기후적 data를 활용한 산림연료의 수분적 상태를 기반으로 하고 있다(stocks *et al.*, 1989). 산림연료의 수분함량에 영향을 미치는 인자는 기상적인자(온도, 강우, 습도, 이슬 등)와 연료자체가 가지고 있는 내적인자(열의 탈착(heat of desorption), 비열, 평형수분 함량, 수분확산율, 연료의 타입과 크기 등)로 크게 구분된다고 할 수 있다(Simard, 1968). 산림연료의 수분 함량에 대한 연구는 크게 생연료(live fuel)와 사연료(dead fuel)로 구분되어 산불의 확산과 발화의 가능성에 대하여 연구되어 오고 있다. 일반적으로 산불위험지수내의 기상학적 지수들은 산림하층이나 지피물의 고사한 물질들의 수분함량을 평가하는 것으로, 고사한 산림연료들은 발화 가능성을 나타내는 중요한 지표들이다. 고사한 산림연료들은 토양위쪽에 축적된 건조된 잔가지, 건조된 침엽수나 활엽수 잎, 초화류 등으로 구성되어 있다(Aguado *et al.*, 2007). 고사한 연료의 수분 함량 변화는 주로 대기 현상(온도, 습도, 강우 등)의 결과이고 연료의 수분 상실과 획득은 연료의 물리 화학적 특성에 의존하고 다양한 대기 활동의 변화에 기인한다(Simard, 1968). 대기활동의 변화에 따라서 고사한 산림연료의 수분함량 변화에 대한 연구는 미국 및 캐나다의 산불기후지수(fire weather index)의 연료의 수분함량 지수에서 이미 다양하게 연구되어 오고 있으며, 산불 예보시스템(fire danger rating system)에서 오랫동안 활용되고 있는 실정이다(Jack and John. 1985, Van Wagner, 1974). 또한 우리나라 산불 위험예보시스템에서도 연료의 수분 함량과 관련된 연료지수를 사용하여 산불조심기간 동안 산불 위험 예보를 실시하고 있는 중이다(이시영 등 2004, 박홍석 등 2009). 그러나 기존의 산불 위험 예보를 위한

연료 지수의 산출은 기상청의 기후자료를 활용하여 분석하고 있기 때문에 실제 임지에서의 연료의 수분 함량 변화를 제대로 반영하지 못하고 있는 실정이다. 고사한 산림연료들은 일반적으로 산림하층에 존재하기 때문에 실질적으로 임지내의 기상인자 변화에 민감할 수밖에 없으며, 임지내의 산림연료의 수분함량 변화와 임지내의 기상인자사이의 관계를 분석하여야 향후 보다 정확한 산불 예보시스템을 구축할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 우리나라 봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 임지내의 기상인자 변화에 대한 현황을 분석하고, 이러한 임지내의 기상인자가 산림내에 축적된 고사한 산림연료의 수분 함량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 선정

임지내의 산림연료의 수분함량을 측정하기 위하여 봄철 산불 조심기간인 2013년 3월 1일부터 2013년 5월 15일까지, 가을철 산불 조심기간인 11월 1일부터 12월 15일까지 매일 임지내에 낙하한 활엽수종인 떡갈나무잎과 침엽수종인 소나무잎의 수분함량을 측정 하였으며, 조사기간 동안 매일 같은 시간(15:00)에 측정하였으며, 실험실과 인접하여 상대적으로 조사가 용이한 강원대학교 내 구내림을 조사지역으로 선정하였다. 조사지역으로 선정된 강원대학교 내 구내림은 침엽수와 활엽수가 혼효된 지역으로 상층부는 소나무와 신갈나무로 구성되어 있으며, 하층부는 활엽수로서 참나무류중의 하나인 떡갈나무가 우점하는 지역이다. 따라서 본 연구에서는 조사지역에 우점하고 있는 소나무에서 낙하한 소나무의 잎과 떡갈나무의 고사한 잎을 사용하였다. 조사지역의 일반적 현황은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 조사방법 및 내용

2.2.1. 산림연료의 수분함량 조사

임지내 산림연료의 수분함량을 조사하기 위하여 봄철 산불 조심기간인 2013년 3월 1일부터 5월 15일까지, 가을철 산불 조심기간인 11월 1일부터 12월 15일까지 낙하된 침엽수인 소나무의 잎과 활엽수인 떡갈나무의 잎을 채취하여 분석 하였다. 낙하된 잎은 매일 같은 시간(15:00)에 각 소나무와 떡갈나

Table 1. The general conditions of study area

Location (GPS)	Mean height (m)	Mean DBH (cm)	Mean Crown With (m)	Mean clear-length (m)
N 37°52' 01. 33" E 127°44' 48. 15"	12	22	6	6
Slope (°)	Aspect (°)	Depth of ground cover (cm)	tree/ha	Altitude (m)
21	250	2.5	700	128

무 잎으로 구분하여 10 g 씩 3반복으로 채취하였다. 낙엽의 채취는 가능한 토양 바로 위쪽에서 채집하도록 하였다. 채취된 잎은 드라이오븐(dry oven)에 건조 전 무게를 측정 후 105°C 조건에서 48시간 방치한 후 건조 후 무게를 측정 하였다.

산림연료의 수분함량(Fuel Moisture Content, FMC, Viney, 1991)은 일반적으로 연료의 건조무게를 비율로서 표현하며 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 사용하였다(Viegas *et al.*, 1992, Aguado *et al.*, 2007, Desbois *et al.*, 1997).

$$FMC = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad (1)$$

여기에서 W_w 는 연료의 건조 전 무게, W_d 는 연료의 건조 후 무게(건조기 105°C에서 48시간 경과 후).

2.2.2. 기상인자 측정

기상인자가 산림 연료의 수분 함량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 조사지역(임지내)에 수목의 흉고높이에 기상측정장비(HOBO Data Logger, U12-012)를 설치 후 2013년 1월 1일부터 부터 2013년 12월까지 31일까지 매일 1시간 간격으로 온도(°C), 상대습도(%), 토양온도(°C), 조도(lux)를 측정하였다. 기상측정장비에 저장된 기상인자는 매일 기상측정장비로부터 직접 downloading 하여 분석 하였다. 측정된 각 기상인자는 일별, 월별 평균값으로 산출하여 산림연료의 수분함량 변화와의 관계를 분석 하였다. 또한 임지내의 기상인자와 비교하기 위하여 춘천기상대의 기상대 자료(기상

청, 2014)를 동일한 기간 동안 온도(°C), 상대습도(%), 토양온도(°C), 일조시간(hr/day), 평균풍속(m/sec), 강수량(mm)를 분석하여 임지내의 기상인자 자료와 비교 분석하였다. 또한 임지내의 기상자료와 기상대의 기상자료와 조사된 연료의 수분함량 변화에 대한 상관관계는 SPSS(SPSS Statistics ver.20) 통계프로그램을 활용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산림내와 기상청 기상인자 분석

기상측정장비가 설치된 산림 내 기상인자와 춘천지역 기상대의 기상자료를 분석한 결과(Table 2), 춘천기상대의 경우 월 평균온도(°C), 월평균 최고온도(°C), 월 평균 최저온도(°C), 월 평균 상대습도(%), 월별 평균 풍속(m/sec), 월 평균 일조시간(hr/day) 및 월 누적 강수량(mm)을 분석하였으며, 조사기간인 2013년의 춘천지역의 년 평균온도는 11.1°C로 분석되었고, 누적 강수량은 1,740.6mm의 분포를 보이고 있었다. 조사지역의 임지내에서는 월 평균온도(°C), 월 평균 최고온도(°C), 월 평균 최저온도(°C), 월 평균 상대습도(%), 월 평균 조도(lux), 월 평균 토양온도(°C)가 조사되었다. 조사지역의 년 평균온도는 11.7°C이었으며, 상대습도는 73.3%를 나타내고 있었다.

봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 조사지역인 산림내 지역과 기상대의 기상인자를 분석하여 보면 평균온도(°C)는 봄철의 경우에는 3월을 제외하고 기상대의 온도가 다소 높은 경향을 보이고 있었으며 가을철의 경우에는 두 지역 모두 유사한 경향을 보이고 있었다. 최고온도(°C)의 경우 임지내의 온

Table 2. The comparison of weather factors in study area(forest land) and chuncheon weather station in 2013 year

Year	month	Study area						Weather station						
		T (°C)	MA. T (°C)	MI.T (°C)	RH (%)	LI (lux)	ST (°C)	T (°C)	MA.T (°C)	MI.T (°C)	RH (%)	WS (m/sec)	DS (hr/day)	P (mm)
2013	1	-5.9	0.3	-10.6	73.5	959.4	-0.8	-7.3	-1.1	-12.3	79.5	0.9	4.2	33.3
	2	-1.6	10.3	-7.4	62.5	518.0	-0.9	-2.9	3.0	-8.4	65.3	1.2	6.2	60.6
	3	6.1	22.1	-1.7	52.1	4,381.2	3.8	4.4	11.8	-2.5	58.5	1.5	7.6	35.5
	4	10.4	23.6	3.2	59.5	4,329.8	8.4	9.1	15.4	2.8	62.3	1.7	5.5	69.1
	5	19.7	28.1	14.3	59.3	1,644.0	16.9	17.9	24.4	11.8	64.3	1.4	6.7	109.8
	6	25.3	27.7	23.1	64.9	331.1	24.7	23.8	29.6	18.8	67.6	1.3	7.2	71.1
	7	24.4	27.8	22.3	93.6	393.9	23.4	25.3	28.4	22.8	81.8	1.2	3.1	871.3
	8	25.8	30.9	22.6	88.6	725.2	24.4	26.7	31.3	23.1	82.1	1.2	6.6	214.1
	9	19.5	25.2	15.9	88.0	619.6	19.2	20.3	25.2	16.5	82.0	1.1	5.8	172.1
	10	13.6	21.7	8.3	82.0	1,399.5	13.6	13.8	20.5	8.6	77.2	1.2	6.7	7.9
	11	4.5	11.3	0.1	74.9	1,285.6	5.1	4.5	9.8	-0.1	73.3	1.5	5.4	65.1
	12	-2.0	4.22	-6.2	80.3	1,263.7	-0.5	-2.5	2.6	-7.0	80.1	1.2	4.3	30.7
Average		11.7	19.4	7.0	73.3	1,487.6	11.5	11.1	16.7	6.2	72.8	1.3	5.8	1,740.6

*T : Mean Temperature, MA.T : Mean Max. temperature, MI.T : Mean Min. temperature, RH : Mean Relative Humidity, LI : Mean Light intensity, ST : Mean Soil temperature, WS : Mean Wind Speed, DS : Mean Duration of Sunshine, P : Accumulated Precipitation

Table 3. The relationship of fuel moisture contents and weather factors during forest fire danger seasons(spring and fall) in study area(forest land) and chuncheon weather station

	FMC(%)		Study Area						Weather Station						
	Species														
Month	Qd	Pd	T (°C)	MA.T (°C)	MI.T (°C)	RH (%)	LI (lux)	ST (°C)	T (°C)	MA.T (°C)	MI.T (°C)	RH (%)	WS (m/sec)	DS (hr/day)	P (mm)
3	29.8	29.6	6.6	22.7	(1.4)	51.8	4676.6	4.2	4.8	12.5	(2.2)	58.7	1.4	7.4	30.5
4	30.4	35.7	10.4	23.6	3.2	59.5	4329.8	8.5	9.1	15.4	2.8	62.3	1.7	5.5	30.7
5	25.0	24.3	17.3	28.7	10.7	60.4	2439.1	13.4	16.6	23.4	10.3	61.3	1.4	7.3	35.7
11	28.2	25.3	4.5	11.3	0.1	74.9	1285.6	5.1	4.5	9.8	(0.1)	73.3	1.5	5.4	35.7
12	23.7	26.3	1.6	6.8	(2.0)	87.2	1033.4	2.0	1.2	6.1	(2.2)	88.8	0.8	2.6	35.2

*FMC : Fuel Moisture Contents, Qd: *Quercus dentata* Thunb. ex Murray, Pd : *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. FMC : Fuel Moisture contents, T : Mean Temperature, MA.T : Mean Max. temperature, MI.T : Mean Min. temperature, RH : Mean Relative Humidity, LI : Mean Light intensity, ST : Mean Soil temperature, WS : Mean Wind Speed, DS : Mean Duration of Sunshine. P : Accumulated Precipitation

Fig. 1. The comparison of weather factors(mean temperature(°C) and mean relative humidity(%) of each month) in forest land and weather station during the 2013 year.

도가 봄철 및 가을철 산불 조심기간동안 기상대의 온도보다 높은 경향을 보이고 있는 것으로 분석되었으며, 최저온도(°C)의 경우 두지역이 유사한 경향을 보이고 있었다. 상대습도(%)는 조사지역이 봄철기간동안은 상대적으로 낮은 경향을 보이고 있으며, 가을철 기간은 유사한 경향을 보이고 있었다. 춘천지역의 강우량은 봄철이 가을철에 비하여 상대적으로 많았다 (Table 3).

월별 평균온도와 월 평균 상대습도를 비교하여 보면(Fig. 1), 월 평균 온도는 1월부터 7월까지의 산림내의 온도가 임지외(기상청)의 온도보다 상대적으로 높은 경향을 보이고 있었지만, 8월을 기준으로 산림내가 약간 낮은 경향을 보이고 있었으며, 상대습도의 경우에는 1월부터 6월까지 조사(임지내)지역이 임지외(기상청)보다 낮은 경향을 보이다가 7월부터는 상대적으로 임지내(조사지역)가 높은 경향을 보이고 있었으며, 겨울철이 시작되는 11월, 12월에는 비슷한 경향을 보이고

있는 것으로 분석 되었다.

3.2. 산림연료의 수분함량 분석

봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 활엽수인 떡갈나무와 침엽수인 소나무에서 낙하한 잎을 수거하여 수분 함량을 매일 측정하였으며, 수분함량 분석은 식 1)의 건조중량식을 활용하였다. 2013년 산불 조심기간 동안 산림내 떡갈나무 잎과 소나무의 잎의 월별 수분함량 변화는 Fig. 2와 Table 4에서와 같이 봄철 산불 조심기간에 비하여 가을철 산불 조심기간이 상대적으로 적은 것으로 나타나고 있으며, 가장 많은 수분함량의 변화를 보인 달은 4월로 분석 되었다. 이러한 낙하한 잎의 계절별 수분함량의 변화는 계절에 따른 기상인자와 밀접하게 관련이 있는 것으로 우리나라의 산림청의 통계자료(산림청, 2014)에 의하면 봄철인 3월과 4월에 산불이 가장 많이 발생하고 있으며, 본 연구에서의 결과와 같이 3월과 4월에 낙

Fig. 2. The change of fuel moisture contents(%) of two species leaves at each month during two forest fire danger seasons(spring and fall) in 2013 year.

엽에서 가장 많은 수분함량의 변화가 보이는 것과 일관성이 있을 것으로 판단되지만 산불의 발생은 인위적인 요인과 더불어 기상학적인 요인에 많은 영향을 받을 것이기 때문에 보다 정확하고 세밀한 연구는 오랜 기간을 두고 점차적으로 하여야 할 필요가 있을 것이다. 본 연구의 결과로 판단해 보면 3월과 4월에 임지내 지피물의 수분함량이 다른 달에 비하여 상대적으로 많이 변하기 때문에 이 기간 동안 임지내 지피물에 대한 관리 방안을 통하여 산불 발생을 저감시킬 수 있는 대책이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 산림연료의 수분함량과 기상인자와 관계

3.3.1 산불조심기간 동안 임지내 지피물의 수분함량변화와 기상인자와의 관계

봄철 및 가을철 산불조심기간 동안 임지내에 낙하한 활엽수종인 떡갈나무와 침엽수종인 소나무 낙엽의 수분함량 변화와 조사지역인 임지내와 임지외인 춘천기상대의 기상인자와의 관계를 비교 분석하기 위하여, 본 연구에서는 봄철 산불조심기간 동안인 3월 1일부터 5월 15일까지, 가을철 산불조심기간 동안인 11월 1일부터 12월 15일까지 임지내의 기상인자(일 평균온도(°C), 일 최고온도(°C), 일 최저온도(°C), 일 평균 상대습도(%), 일 평균 조도(lux), 일 평균 토양온도(°C))와 춘천기상대의 기상인자(일 평균온도(°C), 일 최고온도(°C), 일 최저온도(°C), 일 평균 풍속(m/sec), 일 평균 상대습도(%), 일 강수량(mm))를 분석하였고 이들과 산림연료의 수분함량과 관계를 상관분석을 실시하였다(Table 4).

조사지역의 봄철 산불조심기간 동안 산림내 기상인자와 기상청 기상인자와 두 수종의 수분함량 변화의 상관관계를 분석한 결과, 산림내 기상인자 중 일 최고온도(°C)와 상대습도(%)가 타 인자에 비하여 유의성이 높은 것으로 분석되었으며, 기상청 인자의 경우에는 상대습도(%)와 일조시간(hr/day)이 두 수종 모두에서 유의성이 높은 것으로 분석되었으며, 평균 풍속은 활엽수인 떡갈나무에서 침엽수인 소나무보다 유의성이 높게 나타났다. 가을철 산불조심기간동안은 산림내 기상인자 중 일 최고온도(°C), 상대습도(%), 일조량(lux)이 두 수종

Table 4. The comparison of coefficient of correlation to fuel moisture contents of two species leaves and weather factors of study area and weather station during forest fire season

Season	Species	Coefficient of correlation	Study area						Weather Station					
			T (°C)	MA.T (°C)	MI.T (°C)	RH (%)	LI (lux)	ST (°C)	T (°C)	MA.T (°C)	MI.T (°C)	RH (%)	WS (m/sec)	DS (hr/day)
Spring	Qd	Pearson coefficient	-0.117	-.398**	0.049	.398**	-0.172	0.045	0.11	-0.105	.298*	.505**	.250*	-.462**
		P	0.395	0.003	0.723	0.003	0.208	0.747	0.424	0.447	0.027	0	0.066	0
	Pd	Pearson coefficient	-0.097	-.399**	0.05	.357**	-0.242	0.024	-0.042	-0.214	0.096	.761**	0.2	-.385**
		P	0.479	0.003	0.715	0.007	0.075	0.861	0.759	0.116	0.485	0	0.143	0.004
Fall	Qd	Pearson coefficient	-0.03	-.418*	0.018	.374*	-.427*	0.069	0.335	0.205	0.297	-0.128	.557**	-.202*
		P	0.88	0.027	0.929	0.05	0.023	0.726	0.081	0.295	0.125	0.516	0.002	0.302
	Pd	Pearson coefficient	0.059	-.396*	0.15	.479**	-.529**	0.172	0.114	-0.218	0.179	0.285	0.278	-.537**
		P	0.767	0.037	0.447	0.01	0.004	0.382	0.562	0.265	0.363	0.142	0.152	0.003

* The correlation coefficient is significant at the 0.05 level.

** The correlation coefficient is significant at the 0.01 level.

† Qd: *Quercus dentata* Thunb. ex Murray, Pd: *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. FMC: Fuel Moisture contents, T: Mean Temperature, MA.T: Mean Max. temperature, MI.T: Mean Min. temperature, RH: Mean Relative Humidity, LI: Mean Light intensity, ST: Mean Soil temperature, WS: Mean Wind Speed, DS: Mean Duration of Sunshine. P: Accumulated Precipitation

모두에서 유의성이 매우 높은 것으로 분석되고 있으며, 기상청 기상인자는 일조시간(hr/day)만이 매우 유의한 것으로 분석되었다. 일 평균 풍속(m/sec)의 경우는 봄철과 같은 경향을 보이고 있는 것으로 분석된다. 이상의 결과 임지내의 기상인자와 기상청 기상인자 중 산림연료를 보다 정밀하게 측정하기 위해서 산림내의 미기상적인 요인이 매우 중요하다는 것을 밝힐 수 있으며, 실질적으로 산림내 미기후를 측정하여 활용하는 것이 보다 정확한 산림연료의 수분함량을 예측할 수 있는 근거로 사용할 수 있을 것이다. 그러나 산림내 미기후를 측정하는 것은 많은 시간과 인력이 요구되고 있으며 지속적인 장기모니터링이 필요할 것이다. 기상청 기상인자 중 평균

풍속의 경우 활엽수인 떡갈나무가 침엽수인 소나무보다 수분함량 변화에 매우 유의한 것으로 분석되고 있으며 이러한 결과는 잎이 가지고 있는 고유의 특성(면적 대 두께 비율, 낙하한 잎이 임지에 놓여져 있는 상태 등)을 반영한 결과로 분석된다.

봄철 산불 조심기간 동안, 조사지역의 떡갈나무 고사한 잎의 수분함량에 대하여 유의성이 높은 기상인자 중 일 최고온도(°C)과 일 평균 상대습도(%)의 경우(Fig. 3), 일 최고온도가 상승함에 따라서 지피물의 수분함량변화가 빠르게 감소하는 경향을 띠고 있으며, 일 평균 상대습도(%)가 증가함에 따라서 지피물의 수분함량 또한 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러

Fig. 3. The relationship of moisture contents and weather factors(max. temperature(°C) and mean relative humidity(%) of day) of *Quercus dentata* Thunb. ex Murray in forest land during spring forest fire danger seasons.

Fig. 4. The change of fuel moisture contents after precipitation during forest fire danger rating seasons(spring and fall).

한 결과를 살펴볼 때 일 최고온도(°C)과 일 평균 상대습도(%) 변화에 따라서 지피물의 수분함량 또한 영향을 받고 있으며, 특히 임지내의 기상인자 변화가 대기 중의 기상인자변화보다 보다 민감하게 반응하는 것으로 분석된다(Table 4).

3.3.2. 강우 후 산림연료의 수분 함량 변화

산림연료의 수분함량에 미치는 중요한 인자중의 하나는 강우이며, 강우의 강도와 양에 따라서 연료의 수분함량의 양이 결정된다고 볼 수 있다. 일반적으로 5 mm이하의 강우가 임지에 낙하할 경우에는 연료의 수분함량에 미치는 영향이 매우 적지만 강우가 연일 누적될 경우에는 작은 양의 강우가 낙하할지라도 이에 대한 영향을 있을 것으로 판단된다. 봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 임지내에 낙하하여 축적된 소나무와 떡갈나무 잎의 수분함량 변화와 강우의 관계를 파악하기 위한 것으로 강우 후 임지내 축적된 두종의 잎을 수거하여 건조중량을 측정할 결과 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 강우가 내린 날은 급격하게 연료의 수분함량이 증가하다가 강우 후에 급격하게 수분함량이 감소하는 결과를 보이고 있다. 봄철 산불 조심기간인 3월 13일 15.5 mm의 강우 시 떡갈나무 잎의 경우에는 94.9%, 소나무의 경우에는 59.3%의 수분함량이 증가 하였으며, 강우 바로 다음날은 떡갈나무의 경우 17.4%, 소나무의 경우 35.2%로 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있었으며, 4월 6일 19.5 mm의 강우 시에도 이와 유사한 경향을 보이고 있었다. 가을철 산불조심 기간인 11월 24일 18.1 mm, 25일 14.7 mm, 26일 0.6 mm, 27일 2.2 mm로서 4일간의 총 누적 강우량인 35.6 mm의 강우가 임지내에 낙하한 경우 강우 마지막 날 1일 경과 후 30%이하로 수분 함량이 감소하였고 2일후부터 20%이하로 급격하게 감소하고 있었다. 이러한 결과로 볼 때 산불 조심기간 동안 강우량의 양에 따라서 달라지겠지만 우리나라의 경우 봄철 및 가을철의 강우량이 많지 않기 때문에 강우 후 1일이 경과할 때부터 산불 조심에 대한 대응책을 마련할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

임지내에 낙하한 산림연료의 수분 함량 변화를 분석하기 위하여 2013년 봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 활엽수종인 떡갈나무와 침엽수종인 소나무의 잎을 매일 수거하여 이들의 건조중량을 측정하였고, 조사지역인 임지내의 기상인자와 임지 외(기상청) 기상인자가 연료의 수분함량에 미치는 영향을 분석하였다. 춘천기상대의 자료를 분석한 결과 2013년 춘천 지역의 평균온도는 11.1°C, 평균 최고온도는 16.7°C, 평균 최저온도는 6.2°C, 상대습도는 72.8%였으며, 산림내 조사지역의 기상측정장비에 의하여 측정된 평균온도는 11.7°C, 평균 최고온도는 19.4°C, 상대습도는 73.3%로 나타났다. 산림내와 산림외의 기상인자의 차이는 전체적으로 평균온도와 최저평균

온도의 경우 숲속이 약간 높으며, 최고 온도의 경우는 상대적으로 숲속이 산림외보다 높은 경향을 보이고 있었다. 그러나 여름철인 7월과 8월의 경우에는 숲속이 기상청의 온도보다 낮은 경향을 보이고 있었으며, 겨울철인 12월과 2월의 경우에도 이와 유사한 경향을 보이고 있었다. 이와는 반대로 봄철 산불조심기간인 3월, 4월, 5월의 경우에는 숲속의 온도가 상대적으로 높은 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. 또한 상대습도의 경우에는 숲속이 약간 낮은 경향을 보이고 있는 것으로 분석되었다(Table 2와 Table 3). 이러한 경향은 숲이 가지고 있는 특징으로 여름기간 동안의 수목의 잎이 무성하게 자란 결과로 여름기간에 비하여 봄철에 임지에 낙하하는 일조량과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

봄철 및 가을철 산불조심기간 동안(매일의 산림내 및 산림 외인 기상청자료)의 기후 data와 연료의 수분함량 변화와의 관계를 분석한 결과, 기상인자 중 최고온도(°C)와 상대습도(%)가 산림내의 경우 봄철 및 가을철 산불 조심기간 동안 매우 유의성이 있는 것으로 분석되었고 기상청의 기상 data는 봄철기간 동안 상대습도와 일조시간이 유의성이 높은 것으로 분석되었다. 이상의 결과로 볼 때, 산림연료의 수분함량의 변화를 보다 잘 반영할 수 있는 지역의 기후 data는 산림내의 기상인자를 활용하는 것이 보다 정확하게 임지연료의 수분함량을 반영할 수 있을 것이라고 판단되고, 우리나라와 같이 대부분의 지역이 산악형 산림으로 구성되어 있는 지역의 경우에는 산악기상자료를 확보하는 것이 매우 중요할 것으로 보인다. 평균풍속의 경우 활엽수인 떡갈나무의 수분함량 변화를 분석하는데 있어서 매우 중요한 기상인자로 분석되었으며, 임지내의 활엽수종인 떡갈나무 잎의 형태적 요인과 매우 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되지만 향후의 연구에서는 다양한 활엽수 잎을 분석하여 보다 정확한 자료를 구축할 필요가 있을 것으로 판단된다.

강우 후 두 수종 잎의 수분함량 변화는 강우 후 1일 내지는 2일 만에 연료습도가 20%내외로 변화하는 것으로 분석되고 있으며, 이러한 결과는 강우후의 기상인자(일 평균온도, 시간 단위별 온도의 변화, 누적 강우량, 강우강도, 평균풍속 등)에 변화에 따라서 다양하게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 향후의 연구에서는 강우 후 기상인자의 일간변화 등에 따른 다양한 수종을 비교 분석하여 수종별 강우 후의 정확한 수분함량 변화를 분석하여 산불 조심기간 동안의 산불 예보시스템의 정확성을 확보 할 필요성이 있다.

우리나라의 산불예보시스템의 중요한 부분으로 차지하고 있는 산불기후지수를 산출하는데 있어서 산림연료의 수분함량 분석은 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 산림내의 수분함량은 지역적 기상인자의 특성을 민감하게 반응 할 수밖에 없다. 특히 산림내의 기상인자는 산림이 위치하고 있는 외부적인 환경(사면, 고도, 경사도 등)과 산림의 고유의 특성(수종, 임목밀도, 수령 등)에 따라서 변화하고 있으며, 이러한 기상인

자의 변화에 따라서 산림내에 위치하고 있는 연료의 수분 함량이 결정된다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구의 결과들은 지역단위의 산림연료 수분 함량변화를 측정하고 예측할 수 있는 기초 자료를 구축하는데 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 임지내 기상인자와 산림연료의 수분함량 사이의 관계에 대한 보다 구조화되고 체계화된 방법과 기술을 개발하기 위하여 실제 임상에서의 기초적인 data를 통한 지역단위의 산불 예보시스템을 개발하여야 하며, 본 연구는 1년간 연구 결과를 활용하여 분석하고 있으나 장기간의 조사 분석을 통하여 계절별, 시간별, 임지특성별 자료의 구축을 통하여 보다 세분화되고 정밀한 분석이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 “2012년도 강원대학교 학술연구 조성비”의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

References

- Aguado I., Chuvieco E., Boren R., and Nieto H. (2007) Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean area. Applications in fire danger assessment. *International Journal of wildland Fire*, Vol. 16, pp. 390-397.
- Carlson, J.D and Burgan, R.E. (2003) The review of user's need in operational fire danger estimation: the Oklahoma example. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, pp. 1601-1620.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., and Williams, D. (1983). *Fire in Forestry. Forest Fire behavior and effects*. Nueva York. John Wiley and Sons.
- Desbois, N., Deshayes, M., and Beudoin, A. (1997) Protocol for fuel moisture contents measurements. In : *A review of remote sensing methods for the study a large wildland fires* edite by E. Chuvieco. Universidae de Alacala, Alcala de Henares. 61-72.
- Jack, D.C. and John E.D. (1985) *The National Fire Danger Rating System : Basic equations*. United States Department of Agriculture, Forest service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PSW-82. p.16. available at http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr082/psw_gtr082.pdf.
- Korea Forest Service. 2104. 2013 Statistical Yearbook of Forest Fire. p.215.
- Korea Meteorological Administration. 2014. http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_table.jsp?stn=101&yy=2013&obs=07&x=27&y=12.
- Lee, S.Y., Han, S.Y., Won, M.S., An, S.H., and Lee, M.B. (2004) Developing of Forest Fire Occurrence Probability Model by Using the Meteorological Characteristics in Korea. *Korean Journal of Agricultural an Forest Meteorology*, Vol. 6, No. 4, pp. 241-249.
- Mutch, R.W. (1970) Wildland fire and ecosystem - a hypothesis. *Ecology*, Vol. 51, pp. 1046-1051.
- Park, H.S., Lee, S.Y., Chae, H.M., and Lee, W.K. (2009) A Study on the Development of Forest Fire Occurrence Probability Model using Canadian Forest Fire Weather Index -Occurrence of Forest Fire in Kangwon Province. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 3, pp. 95-100.
- Simard, A.J. (1968) The moisture of forest fuels -I. A review of the basic concepts. Forest Fire Research Institute. Department of Forestry and Rural Development. Information Report FF-X-14. 47p.
- Stock, B.J., Lawson, B.D., Alexander, M.E., Van Wagner, C.E., McApine, R.S., Lynham, T.J., and Dub, D.E. (1989) Canadian forest fire danger rating system : an overview. *Forestry Chronicle*, Vol. 65, pp. 258-265.
- Van Wagner, C.E. (1974) Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Department of the environment, Canadian Forestry Service publication No. 1333 Ottawa. p.44.
- Van Wagner, C.E. (1977) Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Fire Research*, Vol. 7, pp. 23-34.
- Viegas, D.X., Viegas, T.P., and Ferreira, A.D. (1992) Moisture contents of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal. *The International Journal of Wildlanf Fire*, Vol. 2, pp. 69-85.
- Viney, N.R. (1991) A review of fine fuel moisture modeling. *International Journal of wildland Fire*, Vol. 1, pp. 215-234.
- Weise, D.R., Hartford, R.A., and Mahaffey, L. (1998) Assessing live fuel moisture for fire management applications. In *Processing 20th Tall Timber Fire Ecology Conference: Fire in Ecosystem Management: Shifting the Paradigm from Suppression to Prescription*. 7-10 May 1996. Boise, ID.(Eds TR Pruden, LA Brennan) Timbrts Research Station, Proceeding FC20, pp 49-55. available at http://www.fs.fed.us/psw/publications/weise/psw_1998_weise000.pdf.

Received	August 7, 2014
Revised	September 1, 2014
Accepted	September 15, 2014