

## 영동지역 활엽수림에서의 강우 후 지표연료의 습도변화 분석 Comparison of Surface Fuel and Soil Layer Moisture after Rainfall in Broad-Leaved Forest at Young Dong Region

권춘근 · 이시영<sup>†</sup> · 이해평\*

Chun-Geun Kwon · Si-Young Lee<sup>†</sup> · Hae-Pyeong Lee\*

강원대학교 방재전문대학원, \*강원대학교 소방방재학부  
(2011. 11. 8. 접수/2012. 2. 7. 수정/2012. 2. 10. 채택)

### 요 약

강우 후 경과일수에 따른 연료습도 변화는 산불위험도 예측과 산불감시원 활용에 매우 중요하다. 따라서 이러한 산불발생위험 조건을 구명하기 위해 2008, 2009년 봄·가을철 영동지역 활엽수림에서 임분 밀도별로 5.0 mm 이상 강우 후 낙엽층, 부식층, 토양층, 직경별 지표연료 0.6 cm 이하, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, 6.0 cm 이상에 대한 산불위험도를 분석하였다. 연구결과 봄철 낙엽층의 소임분 지역은 강우 3일 후부터, 중·밀임분 지역은 5일 후부터 산불발생 위험수준인 17 % 정도의 연료 습도를 나타냈다. 반면, 부식층은 계절에 상관없이 6일이 경과 되어도 40 % 이상의 연료 습도를 나타냈으나, 토양 상·하층은 미비한 변화가 있었다. 봄철 직경별 지표연료 0.6 cm 이하의 소임분 지역은 강우 3일 후부터, 중·밀임분 지역은 4일 후부터 산불발생 위험수준 연료습도를 나타냈고, 가을철 직경별 지표연료 0.6~3.0 cm의 소임분 지역은 강우 3일 후부터, 중·밀임분 지역은 5일 후부터 산불발생 위험수준의 연료습도를 나타냈다. 봄·가을철 직경별 지표연료 3.0~6.0 cm의 경우 6일차가 되어도 소, 중, 밀임분 공히 높은 연료습도를 유지하고 있어 산불위험성은 매우 적은 것으로 조사되었으며, 6.0 cm 이상의 경우 계절에 상관없이 6일이 경과 되어도 25 % 이상의 연료 습도를 나타냈다.

### ABSTRACT

The change in fuel moisture in accordance with the number of days after rainfall is an important factor in predicting forest fire dangers and supporting forest fire rangers. Therefore, in order to clear up these forest fire occurrence conditions, forest fire danger levels for surface fuel 0.6 cm or lower, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, and 6.0 cm or above by fallen leaves layer, humus layer, soil layer, and diameter after rainfall of 5.0 mm and higher in accordance with tree density in 2008, 2009 Spring/Autumn Young Dong region have been analyzed. Research showed an approximate 17 % fuel moisture which is a dangerous forest fire occurrence level after 5 days from rainfall in medium-density areas and 3 days after rainfall in loose-density areas of Spring time in the fallen leaves layer. On the other hand, the humus layer showed a 40 % or higher fuel humidity even after 6 days from rainfall regardless of the season, while the upper and lower parts of the soil layer had a little change. In loose-density areas with 0.6 cm or less surface fuel per diameter in Spring time, the fuel humidity displayed a dangerous level in fire forest occurrence after 3 days, and 4days in medium-density areas, and for loose-density areas with 0.6~3.0 cm surface fuel per diameter in Autumn time it showed a dangerous level in forest fire occurrence after 3 days, and for medium-density areas, 5 days. In the case of 3.0~6.0 cm of fuel moisture per diameter in both Spring and Autumn times, even after 6 days, low and medium-density areas showed that they maintain fuel moisture and therefore the dangers of forest fires were very low, and in the case of 6.0 cm or higher, it showed 25 % or higher fuel moisture even after 6 days from rainfall regardless of the season.

**Key words** : Forest fire, Fuel moisture, Forest density

<sup>†</sup>E-mail: lsy925@kangwon.ac.kr

## 1. 서 론

우리나라 산불은 대부분은 봄·가을철 산불 조심기간(2월 1일부터 5월 15일, 11월 1일부터 12월 15일)에 발생하고 있으며, 이 기간동안의 산불 발생건수는 매년 전국 산불 발생건수의 약 80%를 차지하고 있다. 특히, 이 기간 동안 강원도 영동지방의 경우 100 ha 이상의 대형산불 57건 중 44%인 25건이('75~'10년)발생하였는데, 이것은 봄철 중국대륙에서 불어오는 편서풍이 태백산맥을 넘으면서 쉼(foehn)현상을 일으켜 고온 건조한 바람으로 바뀌어 산림연료가 매우 건조해져 발화조건과 확산조건을 모두 만족시키기 때문이다.<sup>1)</sup>

산림연료의 수분 함량은 산불의 발생 및 강도 그리고 확산속도에 영향을 미치게 되는 중요한 인자로서 수분 함량이 많은 경우 산불발생률이 적으며, 수분 함량이 낮은 경우 산불발생률이 높게 나타나고 있다.

연료내의 수분함량은 두가지 형태가 있다. 생(生)연료 수분함량과 사(死)연료 수분함량이다. 생연료 수분함량은 살아있는 식물 내에서 알 수 있는 수분량이며, 살아있는 식생은 사연료 보다 훨씬 많은 수분을 보유하고 있다. 또한, 생연료는 일일의 기후적 변화 보다는 계절적인 변화의 영향을 더 많이 받으며, 연료수분 함량은 잎이 새로 나거나 식물이 성장주기에 있을 때 더 높다가 일반적으로 늦여름이나 가을에 가장 저점을 가진다. 그러나 사(死)연료의 수분함량은 성장주기와 계절성과는 거의 관계없이 강수량, 상대습도, 온도의 변화에 민감하게 반응한다. 만약 비가 온다면 사 연료는 빠르게 포화점에 도달하며, 상대습도가 높을 때는 연료 내로 수분이 바로 유입이 되나, 상대습도가 낮을 때는 연료 내 습도는 공기 중으로 빠져나가는 특징이 있다.<sup>2)</sup> 이러한 연료조건들이 산불발화 조건을 만족하기 위해서는 산림연료의 수분함량이 발화조건 수준까지 떨어지야만 산불이 쉽게 발생하게 된다. 그러나 국내외적으로 산불 발생조건에 대한 연구가 대단히 미흡하며, 특히, 강우 후 산림연료에 대한 수분 함량의 분석이 거의 없는 실정이다.

산림연료의 수분함량 변화는 미국과 캐나다에서 산불위험을 예보시스템의 기본적인 지수로서 사용되어지고 있으며(Stock et al., 1987과 Van Wagner, 1975) 이러한 지수의 변화에 따라 산불발생 확률 및 확산속도 등을 예측하고 있다. 이중 Canadian Fire Danger Rating System은 기상인자에 의한 연료의 수분 변화를 분석하여 매일의 산불 위험율을 예측하는 산불기후지수(Fire Waether Index)로서 이 중 하나인 산림미세연료의 수분 코드(Fine Fuel Moisture Code, FFMC)는 강우, 바람, 온도, 상대습도 등의 변수를 이용하여 각각의 연료

의 수분 변화를 분석하는 방법이 있다. 또한 Van Wagner(1968)는 유사한 기후조건에서의 *Pinus resinosa* 조림지에서 산불발생시 연료의 수분 함량의 차이에 따라서 확산속도는 매우 다르게 나타난다고 보고한 바 있다.<sup>3,4)</sup> Deeming(1977)은 Ponderosa 소나무로 만든 연료습도측정봉(Fuel Moisture Stick)을 이용하여 지피물의 건조과정 예측법을 발표한 후, 이 예측법을 기초로 1978년 NFDRS(National Fire Danger Rating System)의 산불위험도 측정에 실용화하고 있으며, Fosberg et al., (1977)는 가연성 지피물의 연료습도 변화와 산불위험도에 관한 연구를 진행한 바 있다.<sup>5-7)</sup>

이중 특히 산림하층 위에 축적되어 있는 고사한 산림연료는 산불의 잠재성에 대단히 중요한 역할을 하며 산불 발생과 연료의 수분 함량에 관계에 있어서 수분 함량의 증가는 연료를 발화시키기 위한 보다 많은 에너지가 필요하다 하였고(Fons 1946, Xanthopoulos and Wakimoto 1993), 또한 어떤 입지에서의 연료의 수분 함량은 연료의 구조와 양에 의존하며(고사한 연료/생존 연료의 비율, 밀집율, 공극율, 연료의 크기), 기후조건(강우, 상대습도, 온도)과 관련이 많은 것으로 보고되었다.<sup>8-10)</sup>

또한 Catchpole 등(2001)은 야외에서의 수분함량예측을 분석한 결과 연료의 온도와 습도에 의한 수분함량이 변화 된다고 보고한바 있다. 인도네시아에서 William 등(2005)은 초분류(고사, 생존)의 수분함량을 FFMC를 사용하여 8개월 동안 분석한 결과 고사한 초분류의 수분함량이 증가하였으며, 또한 이들의 발화 실험을 실시 한 결과 수분 함량의 차이에 따라 발화의 가능성이 다르게 나타난다고 하였다.<sup>11,12)</sup>

채(2003)는 산림미세연료의 수분 건조 시간에 대한 분석에서 자작나무 등 우리나라 자생수종 27종에 대하여 시간별 수분 변화를 분석을 실시한바 있으나, 주로 실험실내에서 연구가 이루어져 야외에서 일어나는 다양한 조건에서의 수분 함량의 변화 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다.<sup>13)</sup>

특히, 강우후의 입내 연료습도에 대한 논문은 국내 외적으로 더욱 미흡한 실정인데, 일본의 山下邦博(1988)은 강우 후 연료습도 변화에서 강우 직후에는 지피물의 표면으로부터 건조하고, 지피물량이 많은 경우에는 지피물 내부는 표면층 보다 수 시간 늦게 건조하며, 일사와 풍속이 강할 때에는 지피물의 수분건조 속도가 빠르다고 하였다. 또한, 지피물이 적은 장소에서는 강우의 영향이 빠르게 나타나고, 함수율은 빠른 속도로 높아진다고 하였으며, 지피물의 건조속도는 일사, 풍속, 기온, 습도, 지피물의 퇴적밀도 등에 의존한다고 하였다.<sup>14)</sup>

따라서 본 연구는 봄·가을철 산불조심기간 중 영

동지역 활엽수림에 대하여 임분 밀도별로 강우 후 익일부터 6일간 고사한 낙엽, 직경별 지표연료, 토양습도에 대하여 연료습도 변화에 따른 산불위험을 판단의 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 조사지 및 조사방법

본 연구는 2008, 2009년 봄·가을철 산불조심 기간 중 Table 1과 같이 강원도 삼척시에 분포한 활엽수림 중 임분 밀도가 소, 중, 밀인 지역을 선정하여 강우 후 연료습도 변화를 조사하였으며, 조사 기준은 누적강우량이 5.0 mm 이상 내린 날을 기준으로 강우 후 익일부터 6일간 Table 2와 같이 봄철 최소 누적강우량이 10.0 mm, 최대 누적강우량이 44.0 mm를 포함하여 총 4차례 조사하였으며, 가을철의 경우 최소 누적강우량이 9.5 mm, 최대 누적강우량이 40.5 mm 총 3차례, 총 7회에 걸쳐 조사하였다.<sup>15,16)</sup> 단 누적강우량이 5.0 mm 이하의 경우 강우 후 다음날부터 산불이 발생할 수 있을 정도로 건조하기 때문에 제외하였다.<sup>17)</sup>

조사구의 크기는 각각의 임분에 대하여 10 m × 10 m

로 하였으며, 시료채취는 조사구내 0.2 m × 0.2 m 크기의 소조사 plot 3(상, 중, 하) 곳을 설정하여, 낙엽층, 부식층(식물조직을 식별할 수 있는 유기물층, 식물조직을 식별할수 없는 유기물층) 및 토양상층(0~5 cm), 토양하층(5~10 cm), 직경별 지표연료 0.6 cm 이하, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, 6.0 cm 이상의 지표연료에 대하여 매일 동일 시간인 10시에 vinyl 지퍼백에 샘플을 채취하여 무게를 측정후 실험실로 운반하였다. 또한 시료채취와 동일한 시간대에 각 조사구 중앙지점에서 기상측정 장비인 Kestrel 4000을 사용하여 상대습도, 풍속, 온도를 측정하였고, 조도의 경우는 INS-200 장비를 사용하여 측정하였다. Table 3은 봄·가을철 조사 기간 중 측정된 기상자료를 나타낸 것이다.

### 2.2 분석방법

현장에서 채취한 낙엽층, 부식층 및 토양상층(0~5 cm), 토양하층(5~10 cm), 직경별 지표연료 0.6 cm 이하, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, 6.0 cm 이상의 고사한 지표연료를 실험실로 운반 후 105 °C, 24시간 동안 Dry-oven에서 건조시킨 후<sup>18)</sup> 무게를 측정하여 연료습도(Fuel Moisture Contents, FMC)를 산정한 후 강우 후 임분밀도별, 층

Table 1. Stand Investigation and Site Investigation in the Survey Site

Item	Stand Investigation					Site Investigation					Fallen Leaves and Humus Layer Thickness (cm)		
	Species	Average Height (m)	Average DBH (cm)	Degree of Closure (%)	Trees (ha)	Altitude (m)	Direction	Survey Location	Average Slope (°)	GPS	Fallen Leaves Layer	Humus Layer	Total
Loose	Quercus Dentata	1.7	5.3	20	500	27	S20E	Bottom	13°	N 37° 26' 08.9" E 129° 05' 31.7"	1.0	1.8	2.8
Medium	Quercus Variabilis	6.7	11.3	60	1700	38	S30E	Bottom	11°	N 37° 25' 26.0" E 129° 06' 32.3"	2.1	2.8	4.9
Dense	Quercus Variabilis	7.2	12.2	70	2000	40	S20W	Bottom	9°	N 37° 25' 25.2" E 129° 06' 27.7"	2.2	3.0	5.2

Table 2. Survey Period of Fuel Moisture

Investigation	Item	Duration of Rainfall	Survey Period	Accumulation Rainfall
Spring	First Investigation	'08 March 13~14	'08 March 15~March 20	13.0 mm
	Second Investigation	'08 March 23 - 24	'08 March 24~March 28	44.0 mm
	Third Investigation	'08 March 28~31	'08 March 31~April 5	10.0 mm
	Fourth Investigation	'08 April 9~10	'08 April 11~April 16	30.0 mm
Autumn	First Investigation	'08 October 22	'08 October 23~October 27	9.5 mm
	Second Investigation	'09 November 2	'09 November 3~November 8	22.5 mm
	Third Investigation	'09 November 30	'09 December 1~December 6	40.5 mm

**Table 3.** Meteorological Factors of the Investigation Period (Average)

Investigation	Item	Humidity (%)			Wind Velocity (m/s)			Temperature (°C)			Illumination (lux)		
		Loose	Medium	Dense	Loose	Medium	Dense	Loose	Medium	Dense	Loose	Medium	Dense
Spring	1 day	41.9	55.8	53.3	2.0	0.9	0.5	11.4	9.9	8.6	795.0	83.0	68.6
	2 day	22.5	40.5	25.6	2.0	1.4	0.9	14.4	12.9	11.5	314.0	85.4	40.5
	3 day	23.5	38.7	32.1	1.2	0.8	0.2	13.6	11.5	10.7	111.5	69.7	54.1
	4 day	42.0	50.9	49.8	1.4	1.3	1.1	18.8	16.7	15.7	621.0	91.7	53.2
	5 day	50.4	45.8	47.9	1.6	1.0	0.7	14.2	13.6	12.1	535.0	139.3	78.4
	6 day	31.3	46.2	36.9	0.8	0.7	0.7	13.1	11.4	10.3	236.0	83.2	61.2
Autumn	1 day	50	56.7	58.6	1	0.8	0.6	6.7	5.1	4.2	405.0	58.7	21.2
	2 day	58.9	60.3	60.5	1.2	0.9	0.6	5.2	5.2	5.0	309.0	47.8	18.9
	3 day	60.4	64.2	64.5	1.1	0.9	0.6	3.9	3.6	3.6	197.0	19.7	10.5
	4 day	67.5	68.2	68.6	0.2	0.4	0.6	3.1	2.7	1.8	217.0	59.4	27.9
	5 day	56.8	57.1	57.4	0.5	0.6	0.7	7.7	6.7	5.4	198.0	59.6	35.6
	6 day	61.9	63.3	66.5	1	0.9	0.8	10.8	9.5	8.3	189.0	55.4	38.2

위별 연료습도변화를 비교 분석하였다. 다음의 (1)은 연료습도 분석에 사용된 식을 나타낸 것이다.

$$FMC(\%) = \left( \frac{W_w - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 FMC는 연료습도(%),  $W_w$ 는 전중,  $W_d$ 은 후중이다.

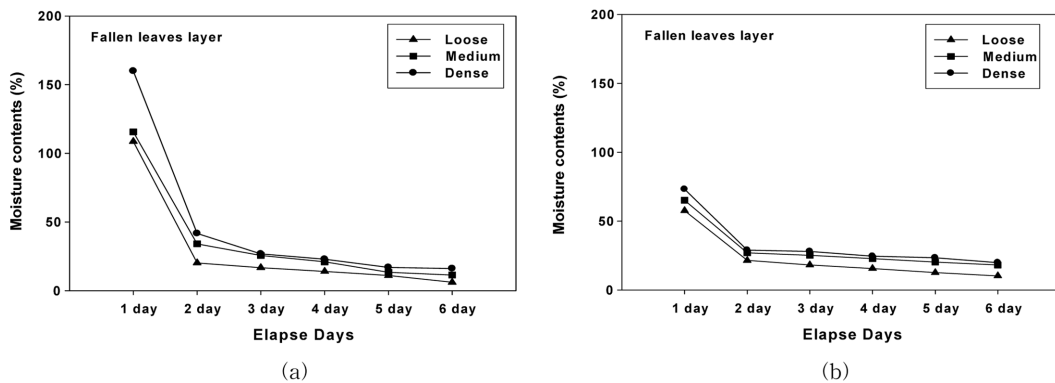
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 봄 · 가을철 강우 후 임분 밀도별 임내 연료습도 및 토양습도변화 비교

##### 3.1.1 낙엽층, 부식층, 토양층 비교

Figure 1~Figure 4는 낙엽층, 부식층의 연료습도와 토

양상층(0~5 cm), 토양하층(5~10 cm)의 토양습도에 대하여 강우 후 봄 · 가을철 경과일수에 따른 습도 변화를 나타낸 결과이다. 즉, Figure 1의 봄철 낙엽층의 연료습도는 강우일일 소임분 108%, 중임분 115%, 밀임분 경우 159%를 나타내다 소임분 경우는 3일차 되는 날 약 17%로 떨어져 산불의 위험성이 높아지는 연료습도를 보이고 있으나 중, 밀임분의 경우는 5일차에 산불 초기발화 위험성이 시작되는 것으로 분석되었다. 가을철 낙엽층의 연료습도의 경우 소, 중, 밀임분은 강우일일 후 58~78%의 범위를 보이고 있으며 소임분의 경우는 4일차 되는 날 약 17%로 떨어져 산불의 위험성이 높아지는 연료습도를 보이고 있으나 이것은 강우 4일 후 침엽수림지에서 지표낙엽의 함수량이 13~17% 사이가 된다는 연구결과와 유사한 결과를 나타냈다.<sup>19)</sup>



**Figure 1.** FMC changes of fallen leaves layer (a: spring, b: Autumn).

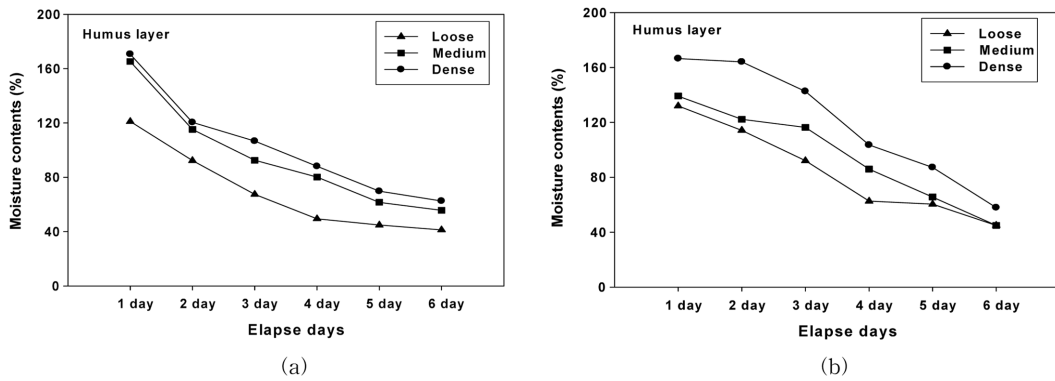


Figure 2. FMC changes of humus layer (a: spring, b: Autumn).

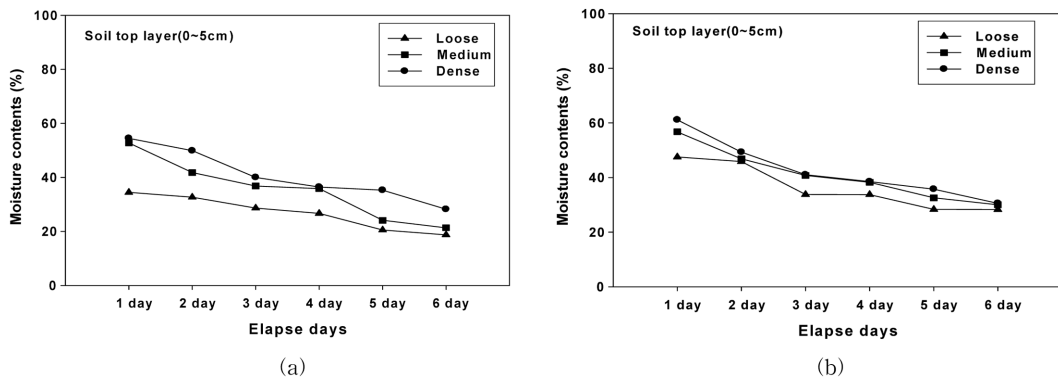


Figure 3. MC changes of soil layer (0~5 cm) (a: spring, b: Autumn).

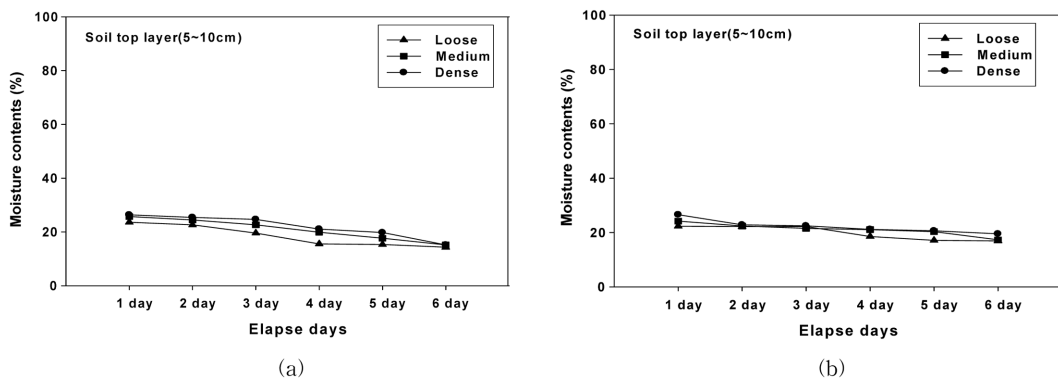


Figure 4. MC changes of soil layer (5~10 cm) (a: spring, b: Autumn).

또한 낙엽의 건조상태와 함수량의 관계에 있어 함수량이 20% 이하로 내려간다면 가연성이 강하고 급속한 산불 위험성이 된다고 하였다.<sup>20)</sup> 반면 중, 밀입분은 6일이 경과하여도 20% 이상의 연료습도를 나타내고 있

어 산불 초기발화 위험성이 낮은 것으로 분석되었다. 또한, Figure 2의 봄철 부식층의 경우 강우 익일 소, 중, 밀입분은 121%, 165%, 170%의 높은 연료습도를 나타내고 있으며 6일이 경과되어도 소, 중, 밀입분 공

히 40% 이상의 연료습도를 유지하고 있어 산불 초기 발화의 위험성은 낮은 것으로 조사되었다. 이것은 부식층이 낙엽층에 덮혀있어 공기중에 노출되지 않아 낙엽층에 비해 습도, 풍속, 조도 등 기상요소의 영향을 덜 받고 있으며 일부는 부식층 아래의 토양층으로부터 수분을 공급받기 때문인 것으로 판단된다. 가을철 부식층의 연료습도의 경우 강우 익일 소, 중, 밀입분 126~169%의 범위를 나타내고 있으며, 6일차가 되어도 51~68% 높은 연료습도를 나타내는 것으로 분석되었다.

Figure 3의 토양상층(0~5 cm)의 경우 봄철 토양상층은 강우 익일 후 경과 일수에 따라서 입분별 토양층의 습도가 점진적으로 감소하는 것으로 조사되었으며, 가을철에는 강우 익일의 연료습도는 50~62% 나타내고 있으며, 6일이 경과한 후에도 20% 이상의 습도를 유지하는 것으로 조사되었다.

Figure 4의 봄철 토양하층(5~10 cm)의 경우 강우 익일 후 경과 일수에 따라 입분별 토양층 습도의 변화는 거의 없는 것으로 조사 되었다. 이는 토양 상층의 경

우 표토 층으로 입내 기상요소에 영향을 받고 있으나 토양 하층의 경우는 표토로부터 5 cm 아래에 위치하고 있어 입내 기상요소에 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다. 가을철 토양하층의 경우 17~26% 정도의 일정한 습도를 유지하는 것으로 조사되었다.

3.1.2 직경별 지표연료 비교

Figure 5~Figure 8은 봄·가을철 강우익일 후 경과 일수에 따른 직경별 지표연료 0.6 cm 이하, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, 6.0 cm 이상의 연료습도 변화를 나타낸 결과이다. Figure 5의 봄철 직경 0.6 cm 이하의 산림연료의 연료습도 감소는 직경종류 중 가장 빠르며 강우 익일의 연료습도는 밀입분 68%, 중입분 66%, 소입분 62%를 나타내다 소입분 경우는 4일차에 중, 밀입분은 5, 6일차에 연료습도가 17% 이하의 정도로 떨어져 산불 초기발화 위험성이 시작되는 것으로 분석되었다. 이것은 낙엽의 건조상태와 함수량과의 관계에 있어 함수량이 20% 이하로 내려간다면 가연성이 강하고 급속

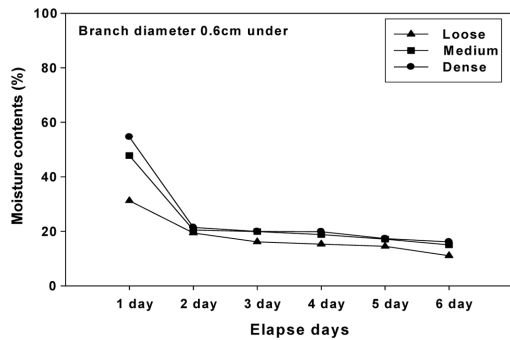
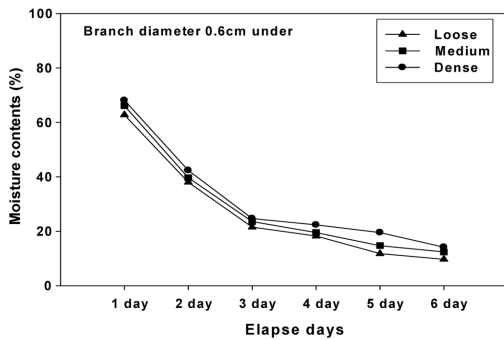


Figure 5. FMC changes of 0.6 cm under (a: spring, b: Autumn)

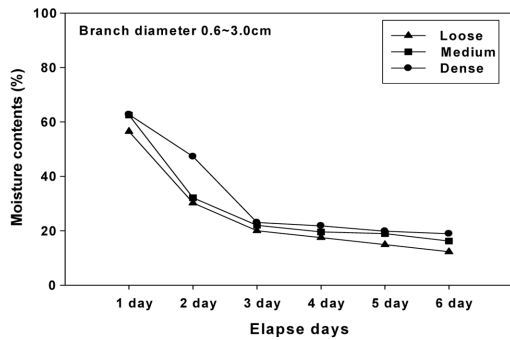
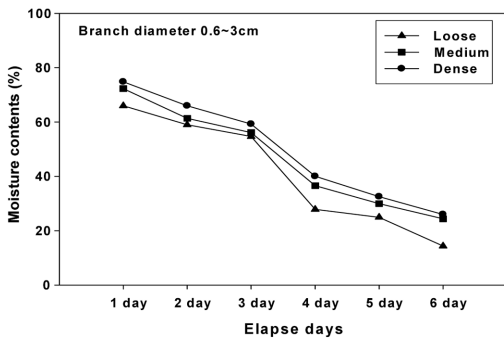


Figure 6. FMC changes of 0.6~3.0 cm (a: spring, b: Autumn).

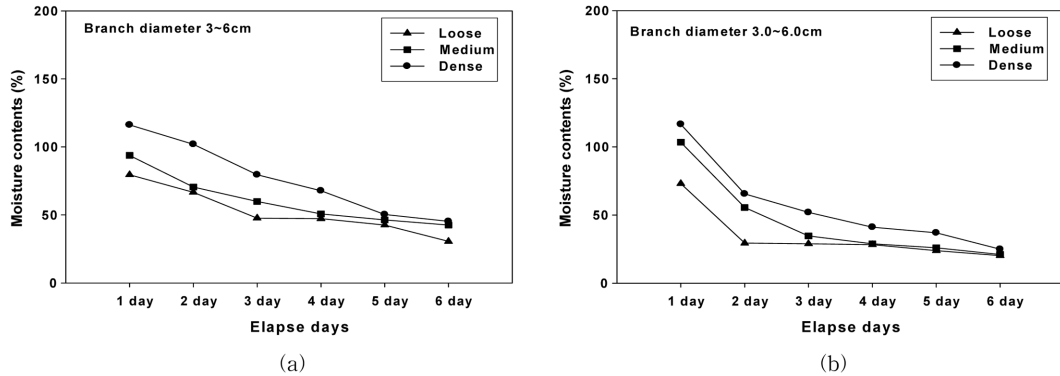


Figure 7. FMC changes of 3.0~6.0 cm (a: spring, b: Autumn).

한 산불 위험성이 된다고 하였다.<sup>19)</sup> 가을철 역시 직경 0.6 cm 이하의 산림연료의 연료습도 감소는 직경별로 가장 빠르게 강우 익일 소, 중, 밀입분은 36~58%의 범위를 나타내고 있으며 소입분의 경우 강우 후 3일차에 중, 밀입분은 5, 6일차에 연료습도가 17% 이하의 정도로 떨어져 산불 초기발화 위험성이 시작되는 것으로 분석되었다.

Figure 6의 봄철 직경 0.6~3.0 cm 범위의 산림연료의 경우 입분별로 강우 익일 62~75%의 범위를 보이며 연료습도는 강우 익일 후 1~4일차에 급격히 감소하며, 소입분은 5~6일차에 17% 이하의 연료습도를 보임으로써 산불위험성에 노출되는 것으로 분석되었다. 가을철 0.6~3.0 cm 산림연료의 경우도 입분별로 강우 익일 후 58~64%의 범위를 보이며 소입분의 경우 5일차 되는 날 약 17%로 떨어져 산불의 위험성이 높아지는 연료습도를 보이고 있으나 중, 밀입분은 6일이 경과하여도 20% 이상의 연료습도를 나타내고 있어 산불 초기발화

위험성이 낮은 것으로 분석되었다. 그러나 연료습도는 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으므로 약 8일이 경과하면 산불위험 연료습도인 17%에 도달될 것으로 추정된다.

Figure 7의 봄철 직경 3.0~6.0 cm 범위의 산림연료의 경우 입분별로 강우 익일 79~116%의 범위를 보이다 6일차에도 소, 중, 밀입분 공히 30% 이상을 나타내고 있어 상대적으로 산불위험성은 적은 것으로 분석되었다. 그러나 연료습도는 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으므로 약 8일이 경과하면 산불위험 연료습도인 17%에 도달될 것으로 추정된다. 가을철 직경 3.0~6.0 cm 범위의 산림연료의 경우 입분별로 강우 익일 74~123%의 범위를 보이고 있으며, 6일차가 되어도 입분별로 소입분에서는 25%, 중, 밀입분의 경우 28~34%를 나타내고 있어 산불 초기발화의 위험성은 적은 것으로 분석되었다.

Figure 8의 봄철 직경 6.0 cm 이상의 연료습도는 강

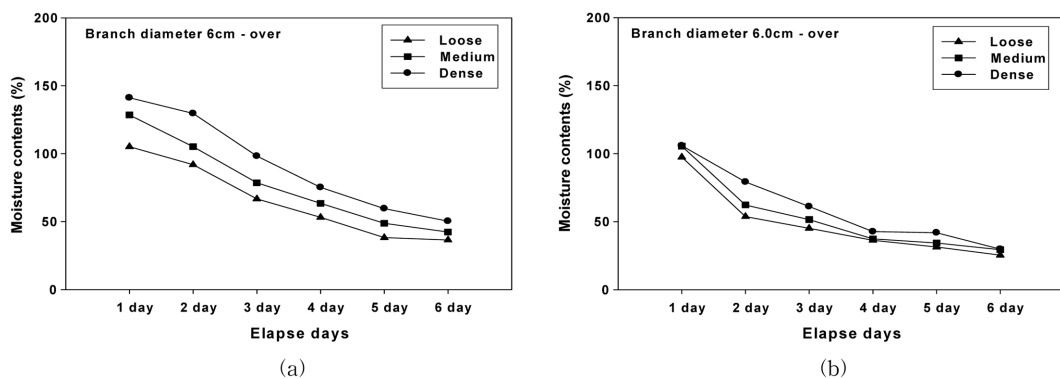


Figure 8. FMC changes of 6.0 cm over (a: spring, b: Autumn).

우익일 임분별로 105~147%의 높은 연료습도의 범위를 나타내고 있으며, 6일차가 되어도 연료습도는 임분별로 41~62%의 범위를 보이고 있어 산불위험성은 매우 적은 것으로 분석되었다. 가을철 직경 6.0 cm 이상의 연료습도는 강우 익일 후 소, 중, 밀입분 공히 높은 연료습도를 유지하고 있으며 6일차가 되어도 32% 이상의 연료습도를 나타내는 것으로 조사되었다.

이것은 지표연료의 직경이 작을수록 연료습도의 감소 기울기가 급하여 연료습도의 감소가 빠르게 진행되었으며 산불위험 연료습도에 도달하는 날짜도 빠르게 도달한다는 연구결과와 유사한 결과를 나타냈다.<sup>21)</sup>

**3.2 봄·가을철 강우 후 층위별 임내 연료습도 변화 비교**

**3.2.1 낙엽층, 부식층, 토양층 비교**

Figure 9~Figure 11은 봄·가을철 강우익일 후 경과일수에 따른 임분밀도별 낙엽층, 부식층의 연료습도 변화와 토양상층(0~5 cm), 토양하층(5~10 cm)의 토양습도

변화를 층위별로 나타낸 결과이다. 즉 Figure 9의 봄·가을철 소임분 연료습도 변화의 경우 봄철 낙엽층이 6~108%, 부식층이 41~121%, 토양상층이 18~34%, 토양하층이 14~23%를 나타냈으며, 특히 부식층은 낙엽층에 비해 12~72% 높은 연료습도를 나타냈다. 이 경우 강우 직후에는 지피물이 표면부터 건조하고, 지피물의 양이 많을 경우에는 지피물의 내부는 표면층보다 수 시간 또는 수일 늦게 건조함을 알 수 있었다. 이것은 부식층이 낙엽층에 덮여 있어 공기 중에 노출되어 있지 않아 낙엽층에 비해 습도, 풍속, 조도 등 기상인자의 영향을 덜 받고 있으며, 일부는 부식층 아래의 토양층으로부터 수분이 올라왔기 때문에 높은 연료습도를 유지한 것으로 판단된다. 가을철 소임분 연료습도 변화의 경우 낙엽층이 10~57%, 부식층이 45~132%, 토양상층이 28~47%, 토양하층이 12~22%를 나타내고 있으며, 부식층은 낙엽층에 비해 33~92% 높은 연료습도를 나타냈다.

또한, Figure 10의 봄·가을철 중임분 연료습도 변

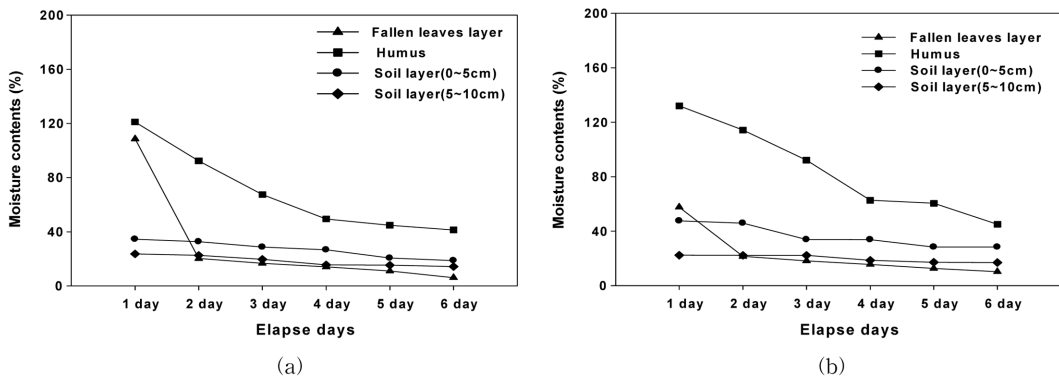


Figure 9. FMC changes of loose stand (a: spring, b: Autumn).

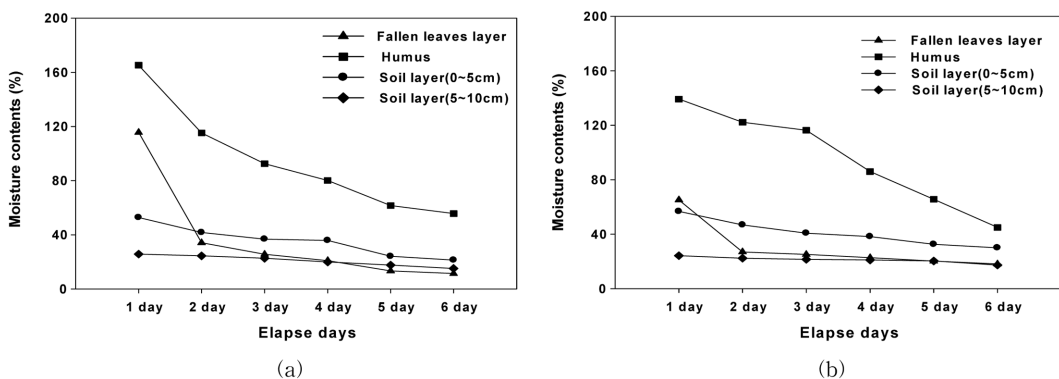


Figure 10. FMC changes of medium stand (a: spring, b: Autumn).



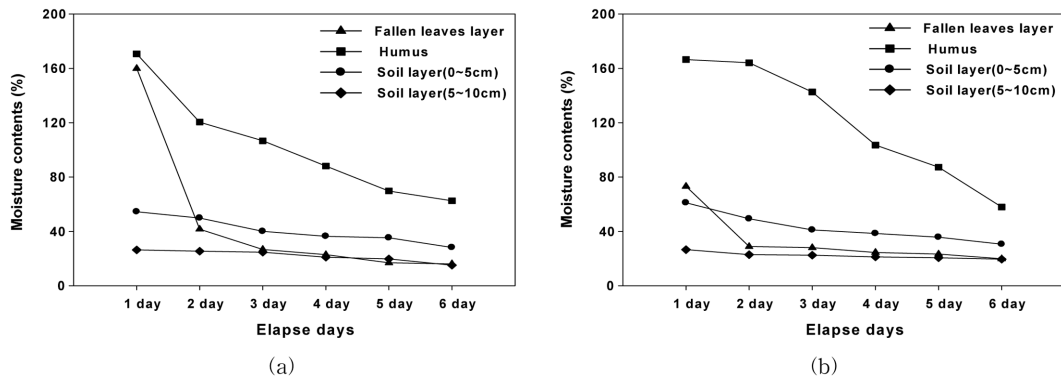


Figure 11. FMC changes of dense stand (a: spring, b: Autumn).

화의 경우 봄철 낙엽층이 11~115 %, 부식층이 55~165 %, 토양상층이 21~52 %, 토양하층이 15~25 % 나타났으며, 특히 부식층은 낙엽층에 비해 44~81 % 높은 연료습도를 나타냈다. 가을철 중임분 연료습도 변화의 경우 낙엽층이 18~65 %, 부식층이 44~139 %, 토양상층이 30~56 %, 토양하층이 17~24 %를 나타내고 있으며, 부식층은 낙엽층에 비해 26~95 % 높은 연료습도를 나타냈다.

Figure 11의 봄·가을철 밀임분 연료습도 변화의 경우 봄철 낙엽층이 16~159 %, 부식층이 62~170 %, 토양상층이 28~54 %, 토양하층이 15~26 % 나타났으며, 특히 부식층은 낙엽층에 비해 10~79 % 높은 연료습도를 나타냈다. 가을철 밀임분 연료습도 변화의 경우 낙엽층이 19~73 %, 부식층이 57~165 %, 토양상층이 30~61 %, 토양하층이 19~26 %를 나타내고 있으며, 부식층은 낙엽층에 비해 38~135 % 높은 연료습도를 나타냈다. 이러한 결과를 볼 때 강우 직후에 지표물의 건조는 표면에서만 일어나고 내부는 상당히 늦게 건조하였

고, 강우가 시작되었어도 수 시간 늦게 연료습도가 증가함을 알 수 있었다. 특히, 지표물이 두껍게 퇴적되어 있는 경우에 공중으로부터 물을 살포하면 물은 표면만을 적시게 되고, 그 내부는 건조한 상태로 남아있어 다시 강풍이 분다면 재발화의 위험성이 있을 것으로 판단된다.

### 3.2.2 직경별 지표연료 비교

Figure 12~Figure 14는 봄·가을철 강우의일 후 경과일수에 따른 임분밀도별 직경별 지표연료 0.6 cm 이하, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, 6.0 cm 이상의 연료습도 변화를 층위별로 나타낸 결과이다.

Figure 12의 직경별 봄·가을철 소임분 연료습도 변화의 경우 봄철 3.0 cm 이하의 연료습도는 3.0 cm 이상의 연료습도에 비해 6~30 % 낮게 나타났으며, 가을철의 경우 3.0 cm 이하의 연료습도는 3.0 cm 이상의 연료습도에 비해 7~40 % 낮게 나타났다. 6.0 cm 이상의

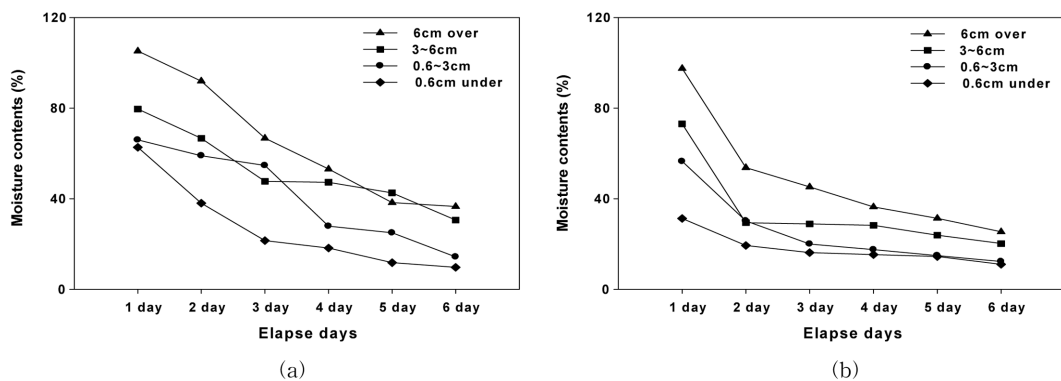


Figure 12. FMC changes of loose stand (a: spring, b: Autumn).

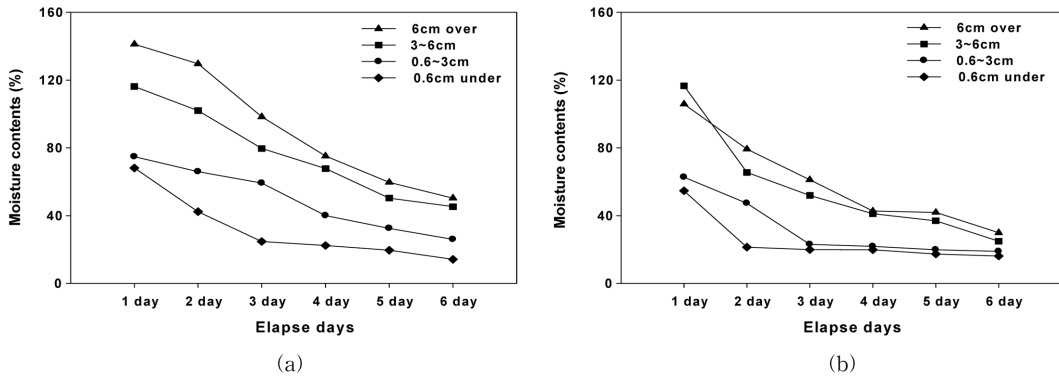


Figure 13. FMC changes of dense stand (a: spring, b: Autumn).

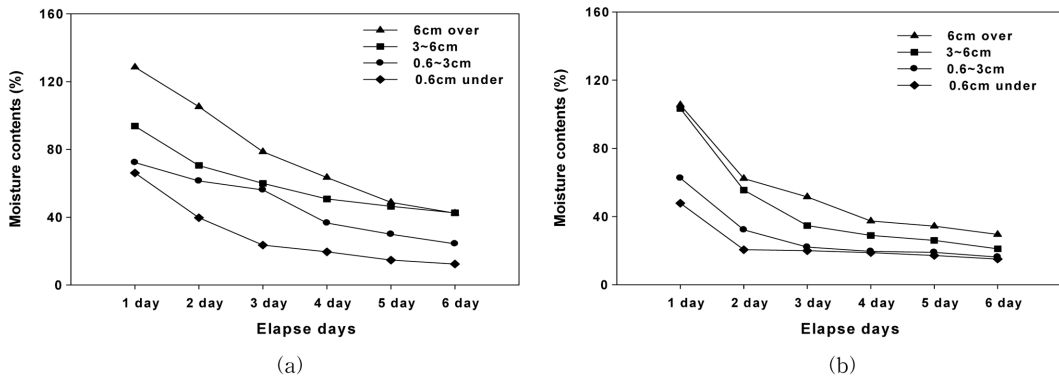


Figure 14. FMC changes of medium stand (a: spring, b: Autumn).

경우 봄·가을철 모두 소, 중, 밀입분 공히 높은 연료 습도의 경향을 보이고 있다.

Figure 13의 직경별 봄·가을철 중입분 연료습도 변화의 경우 봄철 3.0 cm 이하의 연료습도는 3.0 cm 이상의 연료습도에 비해 9~32 % 낮게 나타났으며, 가을철의 경우 3.0 cm 이하의 연료습도는 3.0 cm 이상의 연료습도에 비해 7~40 % 낮게 나타났고, Figure 14의 직경별 봄·가을철 밀입분 연료습도 변화의 경우 봄철 3.0 cm 이하의 연료습도는 3.0 cm 이상의 연료습도에 비해 17~59 % 낮게 나타났으며, 가을철의 경우 3.0 cm 이하의 연료습도는 3.0 cm 이상의 연료습도에 비해 6~61 % 낮게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 영동지방 활엽수림에서의 봄·가을철 산불조심기간 중 7차에 걸쳐 누적 강우량 5.0 mm 이상의 강우에 대하여 입분별 강우 후 익일부터 6일간

임내의 낙엽층, 부식층 및 토양상층(0~5 cm), 토양하층(5~10 cm), 지표연료를 직경별 0.6 cm 이하, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, 6.0 cm 이상으로 구분, 연료습도 변화를 실측하여 산불발생위험도와와의 관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 봄철 산불조심 기간 중 강우 후 낙엽층의 경우 소입분 경우는 3일차 되는 날 연료습도가 약 17%로 떨어져 산불의 위험성이 나타났으나, 중밀입분의 경우는 5일차 이상 되어야야 산불 초기발화 위험성이 나타났으며, 가을철의 경우 소입분 경우는 4일차 되는 날 연료습도가 약 17%로 떨어져 산불의 위험성이 높아지는 연료습도를 보이고 있으나 중밀입분의 경우는 6일차가 되어도 20% 이상의 연료습도를 나타내고 있어 산불초기 발화의 위험성이 적은 것으로 분석 되었다.

2) 부식층의 경우 연료습도는 계절에 상관없이 봄 가을철 강우 익일 후 121~170%, 높은 연료습도를 보이고 있었으며, 소입분의 경우 강우 후 6일차가 되어도 계절에 상관없이 약 40%, 중, 밀입분의 경우 46~68%

의 높은 연료습도를 보이고 있어 초기 발화 위험성은 낮은 것으로 조사되었다.

3) 토양 상층의 경우 계절에 상관없이 봄 가을철 강우 익일에는 36~63%의 습도를 나타냈고, 6일 후에도 20% 이상의 습도를 유지하고 있는 반면, 토양 하층의 경우는 강우량, 임분밀도, 시간경과와는 거의 상관없이 15~26% 정도의 일정한 습도를 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 이것은 지상의 낙엽층, 부식층에 의해 토양하층이 기상요소에 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다.

4) 봄철 직경 0.6 cm 이하의 산림연료의 연료습도 감소는 직경별 지표연료 중 가장 빠르며 소입분의 경우 3일차에 중입분과 밀입분의 경우 4~5일차에 위험 연료 습도인 17%에 도달하는 것으로 분석되었으며, 직경 0.6~3.0 cm 범위의 산림연료의 경우 소입분은 5~6일 차에 17% 이하의 연료습도를 보임으로써 산불위험성에 노출되는 것으로 분석되었으며, 가을철 소입분의 경우 3일차 중입분과 밀입분의 경우 5~6일차에 위험 연료 습도인 17%에 도달하는 것으로 분석되었다.

5) 봄철 직경 3.0~6.0 cm 범위의 지표연료의 경우 6일차에 소, 중, 밀입분 공히 높은 연료습도를 유지하고 있으며 6일차가 되어도 30~45%의 범위의 연료습도를 보이고 있어 산불위험성은 적은 것으로 분석되었다. 직경 6.0 cm 이상의 지표연료는 6일차가 되어도 연료습도는 임분별로 41~62%의 범위를 보이고 있어 산불위험성은 매우 적은 것으로 조사되었으며, 가을철의 경우 직경별 3.0 cm 이상의 연료습도의 경우 강우 익일 후 소, 중, 밀입분 공히 높은 연료습도를 유지하고 있으며 6일차가 되어도 25~35%의 범위의 연료습도를 나타내는 것으로 조사되었다.

6) 봄·가을철 지표연료의 경우 직경이 작을수록 연료습도의 감소 기속도가 급하여 연료습도의 감소가 빠르게 진행되었으며 산불위험 연료습도에 도달하는 날짜도 빠른 것으로 분석 되었다.

### 참고문헌

1. 산림청, 산불통계 분석을 통한 산불정책변천 및 대응 방안, 산림청, pp.198-243(2010).
2. Joseph D. Lowe, Wildland Firefighting Practices. Delmar: pp.21-24(2001).
3. B.J. Stock, M.E. Alexander, B.D. Lawson, and C.E. Van Wanger, Canadian Forest Fire Danger Rating System. User' Guide. The Canadian Forest Service Fire Danger Group(1987).
4. C.E. Van Wagner, A Comparison of the Canadian

- and American Forest Fire Danger Rating System. Petawawa Forest Experiment Station. Chalk River, Ontario. Information Report PS-X-59, p.22(1975).
5. J.E. Deeming, R.E. Burgan, J.D. Cohen, The National Fire-danger Rating System-1978. USDA For. Ser v. Gen. Tech. Rep. INT 39:1-63(1977).
6. C.E. Van Wagner, "Season Variation in Moisture Content of Eastern Canadian Tree Foliage and the Possible Effect on Crown Fires", Canadian Forest Branch. Publication, No.1204. p.15(1968).
7. M.A. Fosberg, Forecasting the 10-Hour Timelag Fuel Moisture. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-187:1-10(1977).
8. W.L. Fons, "Analysis of Fire Spread in Light Forest Fuels", Journal of Agricultural Research, Vol.72, pp.93-121(1946).
9. G. Xanthopoulos and R.H. Wakimoto, "A Time to Ignition Temperature-moisture Relationship for Branches of Three Western Conifers", Canadian Journal of Forest Research, Vol.23, pp.253-258 (1993).
10. J.K. Brown, "Physical Fuel Properties of Ponderosa Pine Forest Floors and Cheargrass", U.S. Forest Service Research Paper INT-74, p.16(1970).
11. E.A. Catchpole, W.R. Catchpole, N.R. Viney, W.L. McCaw, and J.B. Marsden-Smedley, "Estimating Fuel Response Time and Predicting Fuel Moisture Content from Field Data", International Journal of Wildland Fire, Vol.10, No.2, pp.215-222(2001).
12. William J. de Groot, Wardati and Yonghe Wang, "Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for Grass Ignition Potential in Sumatra", Indonesia. International Journal of Wildland Fire, Vol.14, pp.161-168 (2005).
13. 채희문, "산림미세연료의 수분함량에 관한 연구", 한국임학회, Vol.94, No.2, pp.297-304(2003).
14. 山下邦博, "임야화재의 비화연소에 관한 연구", 일본 소방청 소방연구소, pp.42-59(1988)
15. H. Tanskanen, A. Venalainen, P. Puttonen, and A. Granstrom, "Impact of Stand Structure on Surface Fire Ignition Potential in Picea Abies and Pinus Sylvestris Forest in Southern Finland", Canadian Journal of Forest Research, Vol.35, pp.410-420 (2005).
16. B.J. Stock, M.E. Alexander, B.D. Lawson, and C.E. Van Wanger, Canadian Forest Fire Danger Rating System. User' Guide. The Canadian Forest Service Fire Danger Group(1987).
17. 강건유, 김상욱, 김영채, 김종갑, 김준신, 박승찬, 박용구, 이수욱, 이시영, 이우신, 이찬호, 이현호, 저상배, 한정호, 산림 환경보전학, 향문사, pp.34-70(2002).

18. H.E. Anderson, R.D. Schuette, and R.W. Mutch, Timelag and Equilibrium Moisture Content of Ponderosa Pine Needles. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-202. Intermountain Research Station, Ogden, Utah, p.28(1978).
19. 이시영, “산불발생 위험도 및 연소확대 요인 분석에 관한 연구”, 동국대학교 박사학위논문, pp.22-23 (1994).
20. 임야화재연구회, 개정 임야화재실무수인서, 산림화재 대책협회, p.146(1984).
21. 권춘근, 이시영, 이해평, 차주영, “영동지역 봄철 소나무림에서 강우 후 연료습도변화 예측모델 개발(지표연료 직경두께를 중심으로)”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.24, No.2, pp.67-75(2010).