

영동지역 봄철 소나무림에서 강우후 연료습도변화 예측모델 개발
(지표연료 직경두께를 중심으로)

Development of Prediction Model of Fuel Moisture Changes
After Precipitation in the Spring for the Pine Forest
Located the Yeongdong Region
(Focused on the Down Wood Material Diameter)

이시영 · 권춘근[†] · 이명욱* · 이해평**

Si-Young Lee · Chun-Geun Kwon[†] · Myung-Woog Lee* · Hae-Pyeong Lee**

강원대학교 방재전문대학원, *한중대학교 공학부, **강원대학교 소방방재학부
(2010. 3. 3. 접수/2010. 8. 16. 채택)

요 약

강우 후 경과일수에 따른 연료습도 변화는 산불위험도 예측과 산불감시원 활용에 매우 중요하다. 따라서 이러한 산불위험 조건을 구명하기 위해 2007년 봄철 영동지방 소나무림에서 임분 밀도별로 5mm 이상 강우 후 지표에 떨어져 있는 고사한 나뭇가지의 직경이 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상에 대한 연료습도변화 예측모델을 개발하였다. 연구결과 지표연료의 직경이 작고, 소입분일수록 연료 습도의 감소가 빠르게 진행되었으며 산불위험 연료습도에 도달하는 날짜도 소입분 직경 0.6cm 이하의 경우 2일차, 직경 0.6~3.0cm의 경우 3일차로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 각 직경별 연료습도변화 예측모델($R^2 = 0.76-0.92$)을 개발하였으며, 2008년 동일기간의 강우 후 기상 실측자료를 적용하여 예측모델을 검증한 결과 1% 수준에서 유의성이 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The change of fuel moisture according to the passed days after a raindrop is very important to forecast risk of forest fire and to make a good use of forest fire watchmen. For that reason, in the Spring of 2007, we researched pine forest that were widespread growing in Yeongdong region to find out the condition of forest fire risk. We developed the forecast model of fuel moisture change on dead tree branches which were dropped on the ground and less than 0.6 cm, 0.6~3.0 cm, 3.0~6.0 cm, and more than 6.0 cm in diameter after more than 5.0 mm in precipitation. The result showed that the less diameter of ground fuel and small stand of pines the faster diminishing of fuel moisture, and the days of reaching to a forest fire danger fuel moisture level were represented by two (2) days for less than 0.6 cm diameter of small stand of pine and three (3) days for 0.6~3.0 cm diameter one, respectively. By those results, we developed the forecast model($R^2 = 0.76-0.92$) of fuel moisture change on different diameter of small stand of pine, and found that the model had statistical significant of 1% level after we applied it to the data of 2008 after the same period of raindrop by actual meteorological measurement.

Key words : Forest fire, Fuel moisture, Forest density, Prediction model

[†] E-mail: kcg3338@kangwon.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라 산불은 대부분은 봄철 산불 조심기간(2월 15일부터 5월 15일까지)에 발생하고 있으며, 이 기간 동안의 산불 발생건수는 매년 전국 산불 발생건수의 약 60%를 차지하고 있다. 특히, 이 기간 동안 강원도 영동지방의 경우 30ha이상의 대형산불 37건중 47%인 17건이('02-'05년)발생하였는데, 이것은 봄철 중국대륙에서 불어오는 편서풍이 태백산맥을 넘으면서 쉼(foehn) 현상을 일으켜 고온 건조한 바람으로 바뀌어 산림연료가 매우 건조해져 발화조건과 확산조건을 모두 만족시키기 때문이다.¹⁾

산림연료의 수분 함량은 산불의 발생 및 강도 그리고 확산속도에 영향을 미치게 되는 중요한 인자로서 수분 함량이 많은 경우 산불발생률이 적으며, 수분 함량이 낮을 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 식물은 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 성장 주기에 있을 때 더 높다가 일반적으로 늦여름이나 가을에 가장 저점을 가진다. 그러나 사연료의 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.²⁾ 이러한 연료 조건들이 산불발화 조건을 만족하기 위해서는 산림연료의 수분함량이 발화조건 수준까지 떨어져야만 산불이 쉽게 발생하게 된다. 그러나 국내외적으로 산불 발생조건에 대한 연구가 대단히 미흡하며, 특히, 강우 후 산림연료에 대한 수분 함량의 분석이 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 봄철 산불조심기간 중 영동지방 소나무림에 대하여 입분 밀도별로 강우 후 6일부터 6일간 고사한 지표연료에 대하여 직경별 수분 함량 변화를 실측하여 연료습도변화 예측모델을 개발함으로써 강우 후 산불위험을 판단의 기초자료를 제공코자 수행하였다.

1.2 국내외 연구현황

산림연료의 수분함량 변화는 미국과 캐나다에서 산

불위험을 예보시스템의 기본적인 지표로서 사용되어지고 있으며(Stock *et al.*, 1987; 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, FPMC)는 강우, 바람, 온도, 상대습도 등의 변수를 이용하여 각각의 연료의 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.^{3,4)} 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 관하여 연구가 진행된 바 있다.⁵⁻⁷⁾

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 임지에서의 연료의 수분 함량은 연료의 구조와 량에 의존하며(고사한 연료/생존 연료의 비율, 밀집율, 공극율, 연료의 크기), 기후조건(강우, 상대습도, 온도)과 관련이 많은 것으로 보고되었다.⁸⁻¹⁰⁾

또한 Catchpole 등(2001)은 야외에서의 수분함량측을 분석한 결과 연료의 온도와 습도에 의한 수분함량이 변화 된다고 보고한바 있다. 인도네시아에서 William 등(2005)은 초본류(고사, 생존)의 수분함량을 FPMC를 사용하여 8개월 동안 분석한 결과 고사한 초본류의 수분함량이 증가하였으며, 또한 이들의 발화 실험을 실시 한 결과 수분 함량의 차이에 따라 발화의 가능성이 다르게 나타난다고 하였다.^{11,12)}

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.¹³⁾

특히, 강우후의 입내 연료습도에 대한 논문은 국·

내외적으로 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.¹⁴⁾

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 및 조사방법

본 연구는 2007년 봄철 산불조심 기간 중 Table 1 과 같이 강원도 삼척시와 동해시에 분포한 소나무림 중 임분 밀도가 소, 중, 밀인 지역을 선정하여 강우 후 연료습도 변화를 조사하였으며, 조사 기준은 누적 강우량이 5.0mm 이상 내린 날을 기준으로 강우 후 익일부터 6일간 Table 2와 같이 4회에 걸쳐 조사하였다.^{15,16)}

조사구의 크기는 각각의 임분에 대하여 10m × 10m 로 하였으며, 시료채취는 조사구내 0.2m × 0.2m 크기

의 소조사 plot 3(상, 중, 하) 곳을 설정하여, 직경별 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상의 지표 연료에 대하여 매일 동일 시간인 10시에 vinyl 지퍼백에 샘플을 채취하여 무게를 측정 후 실험실로 운반하였다.

또한, 시료채취와 동일한 시간대에 기상측정 장비인 Kestrel 4000를 사용하여 온도, 상대습도, 풍속을 측정하였고, 조도의 경우는 INS DX-200 장비를 사용하였다.

2.2 분석방법

2.2.1 연료습도 변화 분석

현장에서 채취한 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상의 고사한 지표연료를 실험실로 운반 후 105°C, 24시간 동안 Dry-oven에서 건조시킨 후¹⁷⁾ 무게를 측정하여 연료습도(Fuel Moisture Contents, FMC)를 산정한 후 강우 후 임분밀도별, 층위별 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.

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	<i>Pinus densiflora</i>	7.0	23.5	20	400	94	S40W	bottom	23	N 37° 30' 04.6" E 129° 05' 34.7"	1.3	2.3	3.6
Medium	<i>Pinus densiflora</i>	10.70	18.93	60	1400	20	S30W	bottom	14	N 37° 27' 35.7" E 129° 09' 22.2"	1.7	3.5	5.2
Dense	<i>Pinus densiflora</i>	12.72	16.26	70	2500	48	S30E	bottom	7	N 37° 29' 21.7" E 129° 06' 16.6"	2.5	3.0	5.5

Table 2. Survey Period of Fuel Moisture

Investigation	Item	Duration of Rainfall	Survey period	Accumulation Rainfall
First Investigation		'07 March 4	'07 March 5~March 10	6.5 mm
Second Investigation		'07 March 28-April 1	'07 April 2~April 7	62.5 mm
Third Investigation		'07 April 17	'07 April 18~April 23	10.5 mm
Fourth Investigation		'07 May 1	'07 May 2~May 7	18.5 mm

2.2.2 연료습도변화 예측모델 개발 및 검증

연료습도변화 예측모델 개발을 위하여 4회에 걸쳐 측정된 6일간의 연료습도를 종속변수로, 동일한 시간대에 측정된 기상요소인 조도, 풍속, 상대습도, 실효습도, 입분밀도(소, 중, 밀), 강우의일 후 경과일수를 독립변수로 하여 통계분석을 실시하였다.¹⁸⁾

특히, 기상요소의 경우 풍속은 조사당시의 풍속을, 조도는 조사 당일부터 누적된 조도를, 경과일수는 강우 종료 후 경과일수별로, 입분밀도는 더미변수를 이용하여 회귀분석을 실시하였으며, 기본 회귀모형 식은 다음 (2)와 같다.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 D1X4 \tag{2}$$

여기서 \hat{Y} = FMC의 추정치, $X4$ = 입분밀도로서 본 연구에서는 소입분, 중입분, 밀입분 세 집단을 가지므로, 더미변수(D1)가 두 개가 되므로 분석에 사용할 회귀모형은 다음 식(3)과 같으며, 여기서 b_0 는 FMC 초기상수, b_1 는 독립변수를 나타낸 것이다.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 D1X4 + D2X4 \tag{3}$$

또한, 추정식에서 $X4$ 가 소입분이면 $D1X4 = 1$, $D2X4 = 0$ 로 할당하고, $X4$ 가 중입분이면 $D1X4 = 0$, $D2X4 = 1$ 로 할당하였고, $X4$ 가 밀입분 이면, $D1X4 = 0$, $D2X4 = 0$ 로 정하여 회귀분석을 실시하였다. 이와 같은 방법으로 개발한 회귀식의 검증을 위하여 2008년 봄철 산불 조심기간 중 누적강우량이 13.0mm 내린 날인 3월 14일 익일부터 6일간(3월 15일~3월 20일) 측정된 기상요소를 회귀식에 적용하여 예측 값과 관찰 값을 T-test를 통해 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우 후 입내 연료습도 변화 비교

3.1.1 입분밀도별 비교

Figure 1~Figure 4는 지표에 떨어져 있는 고사한 나뭇가지의 직경이 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상에 대하여 강우 후 경과일수에 따른 연료습도 변화를 나타낸 결과이다. 즉, Figure 1의 직경 0.6cm 이하의 경우 밀입분이 중입분에 비해 3~15% 높게 나타났으며, 소입분에 비해서는 8~24% 높게 나타났다.

또한, 직경 0.6cm 이하의 산림연료의 연료습도 감소는 직경별로 가장 빠르며 감소하였으며, 소입분의 경우 2일차에 산불위험 연료습도인 17%에 도달하고 중입분과 밀입분의 경우 3~4일차에 위험 연료습도인 17%에 도달하는 것으로 분석되었다. Figure 2의 직경

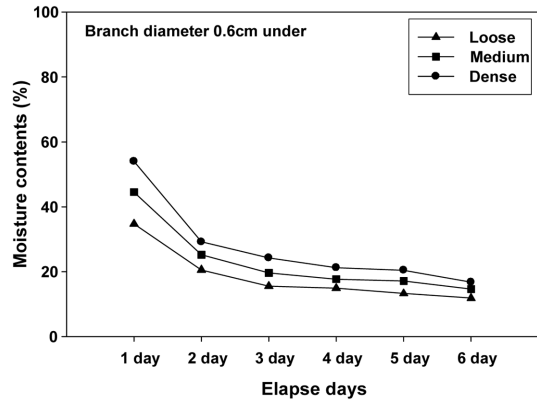


Figure 1. FMC changes of 0.6 cm under.

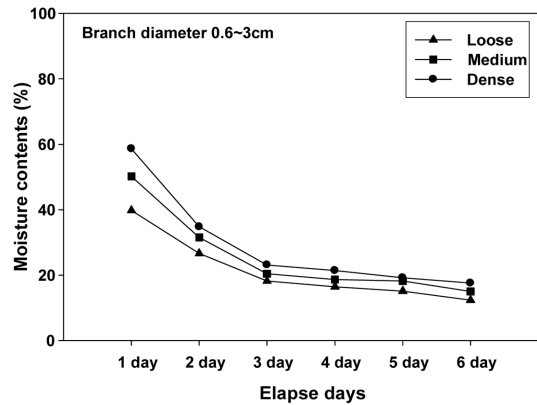


Figure 2. FMC changes of 0.6~3.0 cm.

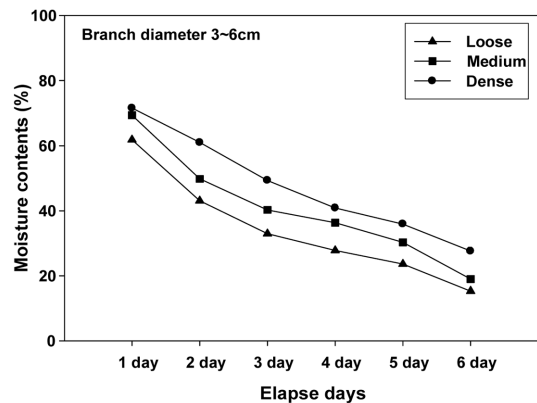


Figure 3. FMC change of 3.0~6.0 cm.

0.6cm~3.0cm 범위의 산림연료의 경우 입분별로 강우 익일 40~60%의 범위를 보이며 연료습도는 강우 익일

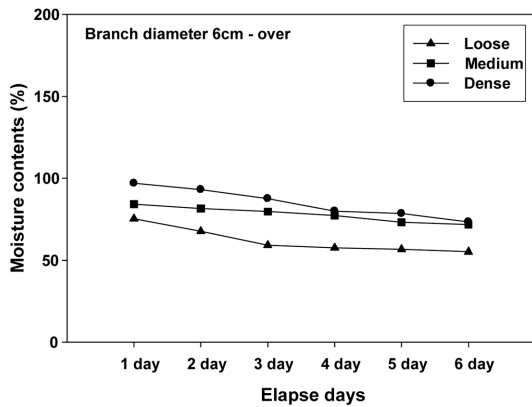


Figure 4. FMC changes of 6.0 cm over.

후 1~3일 차에 급격히 감소하며, 소입분은 3일차에 중 입분과 밀입분은 4~5일 차에 17% 이하의 연료습도를 보임으로써 산불위험성에 노출되는 것으로 분석되었다. 이것은 낙엽의 건조상태와 함수량과의 관계에 있어 함수량이 20% 이하로 내려간다면 가연성이 강하고 급속한 산불위험성이 된다는 연구결과와 일치하는 경향이 있었다.¹⁹⁾

Figure 3의 직경 3.0~6.0cm 범위의 산림연료의 경우 입분별로 강우 익일 60~75%의 범위를 보이다 연료습도가 수렴하지 않고 6일차가 되어도 계속 감소하는 경향을 보이고 있다. 6일차에는 입분별로 소입분과 중입분에서는 17%, 20%로 산불위험성이 높은 연료습도를 나타내고 있으나 밀입분의 경우 30%를 나타내고 있어 상대적으로 산불위험성은 적은 것으로 분석되었다. 그러나 연료습도는 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으므로 약 8일이 경과하면 산불위험 연료습도인 17%에 도달될 것으로 추정된다. Figure의 직경 6.0cm 이상의 연료습도는 강우익일 입분별로 70~100%의 범위를 보이다 3일차 되는 함수비가 일정하게 수렴되었으며, 6일차가 되어도 연료습도는 입분별로 55~75%의 범위를 보이고 있어 산불위험성은 매우 적은 것으로 분석되었다.

직경 3.0cm 이상의 지표연료의 연료습도 변화의 경우 직경 3.0~6.0cm 이하의 소입분을 제외하고는 지표연료의 연료습도 감소는 강우 익일 후 6일이 경과하여도 산불 초기발화의 위험성은 낮은 것으로 나타났다.

지표연료의 직경이 작을수록 연료습도의 감소 기울기가 급하여 연료습도의 감소가 빠르게 진행되었으며 산불위험 연료습도에 도달하는 날짜도 빠름을 알 수

있었다.

3.1.2 층위별 비교

Figure 5~Figure 8은 입분 밀도별, 직경별 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상의 연료습도를 강우익일 후 경과일수에 따른 연료습도의 변화를 나타낸 결과이다.

Figure 5의 직경별 소입분 연료습도 변화의 경우 3.0cm 이하의 연료습도는 3.0cm 이상의 연료습도에 비해 13~31% 낮게 나타났으며, 6.0cm 이상의 경우 소, 중, 밀입분 공히 높은 연료습도의 경향을 보이고 있다. Figure 6의 중입분 연료습도 변화의 경우 3.0cm 이하의 연료습도는 3.0cm 이상의 연료습도에 비해 24~39% 낮게 나타났으며, Figure 7의 밀입분 연료습도 변화의 경우 3.0cm 이하의 연료습도는 3.0cm 이상의 연료습도에 비해 27~46% 낮게 나타났다.

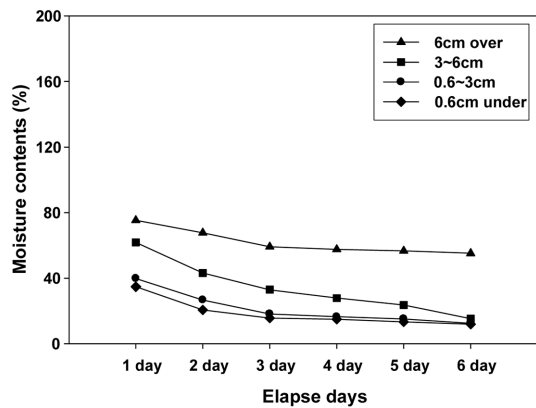


Figure 5. FMC changes of loose stand.

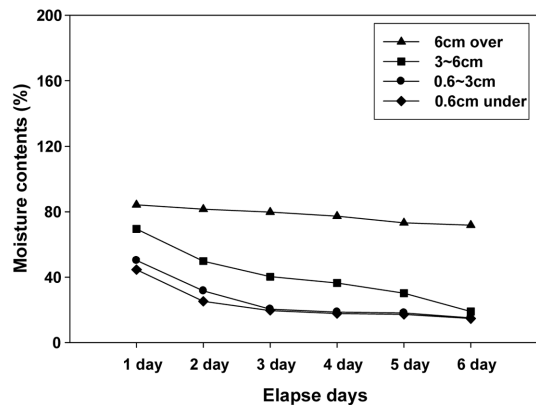


Figure 6. FMC changes of medium stand.

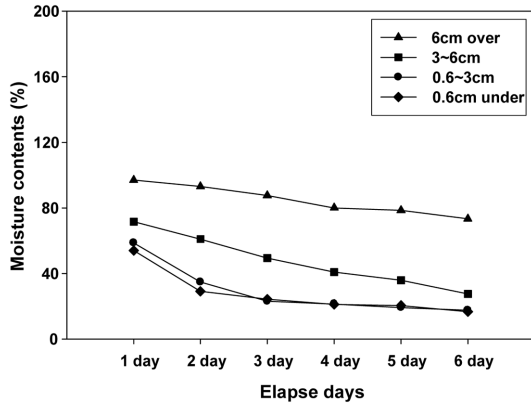


Figure 7. FMC changes of dense stand.

3.2 연료습도 예측모델 개발

연료습도변화 예측모델 개발을 위하여 연료습도를 종속변수로, 동일한 시간대에 측정된 기상요소인 온도, 풍속, 상대습도, 실효습도와 임분밀도(소, 중, 밀), 강우 익일 후 경과일수를 독립변수로 하여 내부 상관도와 회귀분석을 실시한 결과 Table 3 및 4와 같다.

강우 익일 후의 지표연료직경별 연료습도 변화와 각

종 기상인자 및 임분밀도와의 상관분석결과(Table 3), 지표연료직경별 연료습도는 6.0cm 이상을 제외한 0.6cm under, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm에서는 ALUX(누적조도), EH(실효습도), ED(경과일수)와는 높은 상관관계를 보였으나, 대부분의 경우 임분밀도와는 낮은 상관관계를 나타냈다.

또한, Table 4은 강우 익일 후 6일간 측정된 연료습도를 독립변수로 위에서 분석한 누적조도, 실효습도, 임분밀도(소, 중, 밀), 강우익일 후 경과일수를 이용하여 도출한 직경별 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상 지표연료의 연료습도 예측모델이며, Table 5는 이 예측모델에 대한 분산분석의 결과를 나타낸 것이다. 지표연료 직경별 0.6cm 이하, 0.6~3cm, 3~6cm, 6cm 이상의 연료습도 예측모델은 통계적으로 유의하였으며(유의확률 = 0.000 < 0.05), 예측모델의 적합도는 91.5%, 84.9%, 76.1%, 82.1%를 나타냈다.

3.3 예측모델의 검증

Figure 8~Figure 11은 '08년 봄철 산불조심기간 중 누적강우량이 13.0mm 내린 날인 3월 14일 익일부터 6일간(3월 15일~3월 20일) 측정된 기상자료와 더미변수를 이용 회귀분석에 의한 연료습도 예측식을 이용하여 예

Table 3. Correlations Analysis Between FMC and Factors

0.6cm under		0.6~3.0cm		3.0~6.0cm		6.0cm	
Pearson Correlation	FMC	Pearson Correlation	FMC	Pearson Correlation	FMC	Pearson Correlation	FMC
log10(ALUX)	-.789	log10(ALUX)	-.801	log10(ALUX)	-.795	log10(ALUX)	-.821
log10(EH)	.666	log10(EH)	.635	log10(EH)	.597	log10(EH)	.350
log10(ED)	-.838	log10(ED)	-.807	log10(ED)	-.684	log10(ED)	-.404
L	-.367	L	-.359	L	-.370	L	-.793
M	-.043	M	.015	M	.017	M	.252

*범례: FMC = 연료습도(%), log10(ALUX) = 누적조도, log10(EH) = 실효습도(%), log10(ED) = 경과일수(일), L = 소, M = 중

Table 4. Fuel Moisture's Predictive Expression by Statistics Analysis

0.6cm under	$FMC = 1.560 + 0.177 * \text{Log}_{10}(\text{EH}) - 0.075 * \text{Log}_{10}(\text{ALUX}) - 0.160 * (\text{L}) - 0.126 * (\text{M}) - 0.501 * \text{Log}_{10}(\text{ED})$	(R ² = 0.915)
0.6~3 cm	$FMC = 1.883 + 0.139 * \text{Log}_{10}(\text{EH}) - 0.189 * \text{Log}_{10}(\text{ALUX}) - 0.049 * (\text{L}) - 0.073 * (\text{M}) - 0.371 * \text{Log}_{10}(\text{ED})$	(R ² = 0.849)
3~6 cm	$FMC = 1.973 + 0.348 * \text{Log}_{10}(\text{EH}) - 0.364 * \text{Log}_{10}(\text{ALUX}) + 0.0747 * (\text{L}) - 0.066 * (\text{M}) - 0.051 * \text{Log}_{10}(\text{ED})$	(R ² = 0.761)
6 cm over	$FMC = 2.057 - 0.027 * \text{Log}_{10}(\text{EH}) - 0.0071 * \text{Log}_{10}(\text{ALUX}) - 0.176 * (\text{L}) - 0.037 * (\text{M}) - 0.150 * \text{Log}_{10}(\text{ED})$	(R ² = 0.821)

*범례: FMC = 연료습도(%), log10(EH) = 실효습도(%), log10(ALUX) = 누적조도, log10(ED) = 경과일수(일), L = 소, M = 중

Table 5. Analysis of ANOVA

Item	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
0.6 cm under	Regression	2.654	5	.531	142.088	.000
	Residual	.247	66	.004		
	Total	2.900	71			
0.6~3 cm	Regression	2.417	5	.483	74.438	.000
	Residual	.429	66	.006		
	Total	2.846	71			
3~6 cm	Regression	2.385	5	.477	41.976	.000
	Residual	.750	66	.011		
	Total	3.135	71			
6 cm over	Regression	.543	5	.109	60.589	.000
	Residual	.118	66	.002		
	Total	.661	71			

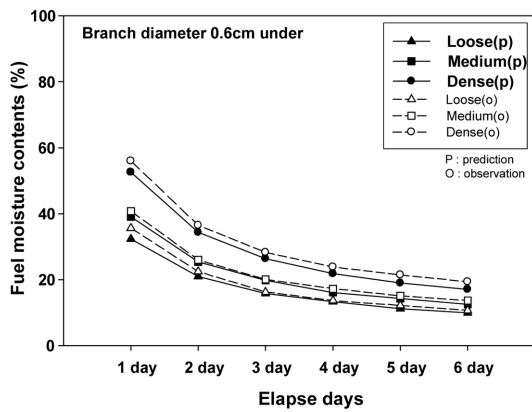


Figure 8. FMC changes of 0.6cm under.

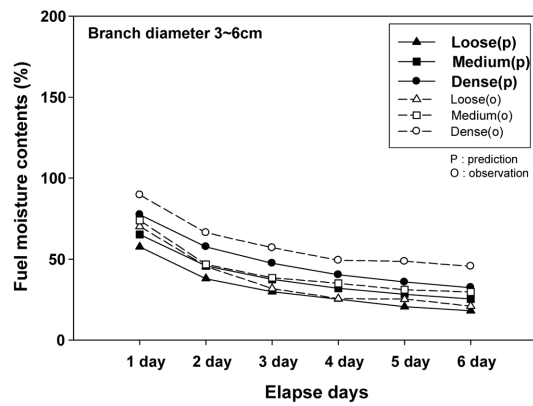


Figure 10. FMC changes of 3~6 cm.

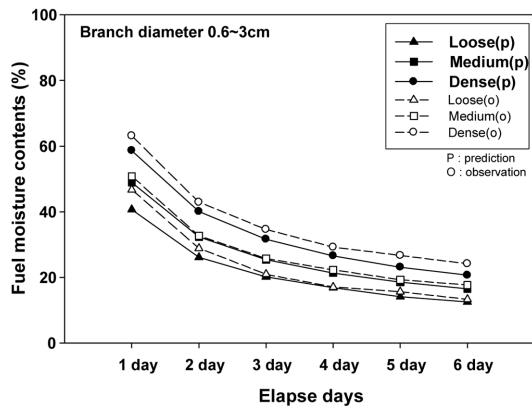


Figure 9. FMC changes of 0.6~3 cm.

측값과 관찰값을 비교한 결과이다. Figure 8의 0.6cm 이하의 밀입분 관측값의 경우 예측치에 비해 높게 예측되고 있으며, 소, 중입분의 경우 초기값을 제외하고는 2~6일간 근접하게 예측하고 있다. Figure 9의 0.6~3.0cm의 경우도 소입분, 중입분의 경우 초기값을 제외하고는 매우 근접하게 예측하고 있으나, 밀입분의 관측값은 예측치에 비해 높게 예측되고 있다. Figure 10의 3.0~6.0cm의 경우도 밀입분을 제외한 소, 중입분은 초기값을 제외하고는 근접하게 예측하고 있으나, 밀입분 관측값은 예측값에 비해 높게 예측되고 있다. Figure 11의 6.0cm 이상의 경우 소, 중, 밀입분의 관측값은 예측값에 비해 높게 예측되고 있는 결과를 보이고 있다. Table 6은 예측값과 측정값 차의 유의도를 검증하기 위

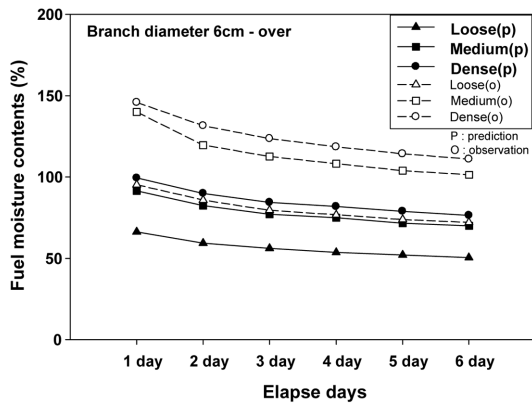


Figure 11. FMC changes of 6 cm over.

Table 6. Analysis of T-test

Item	N	M	SD	T	P
Prediction	72	40.650	24.006	-6.507	.000
Observation	72	52.238	38.067	-6.507	.000

해 T-test를 실시한 결과이다. 예측값과 관측값의 차이는 1% 수준에서 유의함을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 영동지방 소나무림에서의 봄철 산불 조심기간 중 4차에 걸쳐 누적 강우량 5.0 mm 이상의 강우에 대하여 임분별 강우 후 익일부터 6일간 임내의 지표연료를 직경별 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상으로 구분, 연료습도 변화를 실측하여 산불 발생위험도와와의 관계 분석과 연료습도변화 예측모델을 개발하고자 하였다.

1) 직경 0.6cm 이하의 산림연료의 연료습도 감소는 직경별 지표연료중 가장 빠르며 소입분의 경우 2일차 중입분과 밀입분의 경우 3~4일차에 위험 연료습도인 17%에 도달하는 것으로 분석되었으며, 직경 0.6~3.0cm 범위의 산림연료의 경우 소입분은 3일차에 중입분과 밀입분은 4~5일 차에 17% 이하의 연료습도를 보임으로써 산불위험성에 노출되는 것으로 분석되었다.

2) 직경 3.0~6.0cm 범위의 지표연료의 경우 6일차에 소, 중입분에서는 17~20%로 산불위험성이 높은 연료습도를 나타내고 있으나 밀입분의 경우 30%를 나타내고 있어 상대적으로 산불위험성은 적은 것으로 분석되었고, 직경 6.0cm 이상의 지표연료는 6일차가 되어도 연료습도는 임분별로 40~80%의 범위를 보이고 있어

산불위험성은 매우 적은 것으로 분석되었다.

3) 지표연료의 직경이 작을수록 연료습도의 감소 기율이 급하여 연료습도의 감소가 빠르게 진행되었으며 산불위험 연료습도에 도달하는 날짜도 빠른 것으로 분석 되었다.

4) SPSS 통계프로그램을 이용하여 지표연료 직경별 0.6cm 이하, 0.6~3.0cm, 3.0~6.0cm, 6.0cm 이상의 연료 습도변화 예측모델을 개발($R^2 = 0.76\sim 0.92$)하였으며, 2008년 봄철 동일기간 강우 후 기상실측 자료를 적용하여 예측모델의 검증은 실시한 결과 1% 수준에서 유의성이 있었다.

감사의 글

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호 S210810L010130)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. 동해안 산불 지역 정밀조사 보고서 I. 동해안 산불 피해지 공동 조사단, pp.15-26(2000).
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. 22pp(1975).
5. J.E. Deeming, R.E. Burgan, and 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. 15pp(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. 16p(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. 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).
18. 손충기, 백영균, 박정환, 내가하는 통계분석 SPSS. 학지사, pp.271-291(2007).
19. 임야화재연구회, 개정 임야화재실무수인서, 산림화재 대책협회, p.146(1984).