

산불발생 후 불자국을 이용한 소나무 생존 및 지형에 따른 산불의 방향 분석

채희문 · 이찬용

강원대학교 산림과학대학 산림자원보호학과
(2003년 1월 10일 접수; 2003년 3월 7일 수락)

Analysis of Fire Direction and Pine Tree Survival using to Fire Scar formed in Tree Stem after forest Fire

Hee-Mun Chae and Chan-Yong Lee

Dept. Forest Resources Protection, College of Forest Sciences, Kangwon National University,
Chuncheon 200-701, Korea

(Received January 10, 2003; Accepted March 7, 2003)

ABSTRACT

The study of the scars formed on the bark of pine trees damaged by forest fire was carried out in the burned area of Samchuk and Donghae in 2000. Fire scars were formed on the bark of trees when fire passed by the tree. Fire scarring is usually found on the windward and leeward sides of the tree. Fire spread was analyzed topographically using the fire scars formed at the tree stem. Fire spread was closely related to the shape, slope and direction of the forestland. Four fire direction types are classified according to the shapes of the forestland. The height of the fire scar was higher on the leeward side than on the windward side of the trees studied. The burnt area of the total bark of the tree was over 30% in dead trees and below 12% in living trees. The regression model of the burnt stem area using the height of the fire scar, the diameter of breast height and the height of tree was $Y = -2.484 \times \text{Height} + 0.04199 \times \text{D.B.H} - 1.686 \times \text{Windward} + 11.172 \times \text{Leeward} + 23.432$ ($r = 0.936$, $F = 409.968$, $P > 0.0001$).

Key words : forest fire, fire scar, windward and leeward side of tree, fire direction

I. 서 론

산불은 인류와 밀접한 관련을 맺고 있는 산림생태계의 변화를 주도하는 가장 큰 원인이며, 산불에 의해서 산림생태계는 끊임없이 변화되고, 인류가 불을 사용하기 이전부터 지구상에 끊임없이 일어나는 자연 현상 중의 하나로써 산림내에 존재하는 가연물들 즉, 낙엽, 고사목, 초본류, 임목 등이 연소되는 현상이라고 할 수 있다.

최근 10년간(1991~2000년) 산불 발생건수는 4,020

건이며, 피해면적은 39,410 ha 이었다. 산을 찾는 휴양 인구의 증가로 산불 발생 건수는 점차적으로 증가 추세를 보이고 있으며, 1996년 고성 산불과 2000년 동해안 산불의 대형화재로 발발하기에 이르렀다(산림청, 2001).

산불이 발생한 후 불자국은 산불의 강도, 산불의 진행방향에 대한 자료들을 제공하며, 이들에 대한 연구가 다양하게 시도되고 있다.

산불피해지와 실험실내의 조사를 통해, 불이 어떻게 수목의 수간에 불자국을 형성할 수 있는가의 메커니

즘이 연구되고 있으며, 수목의 수간에 열의 전도과정과 유체의 흐름으로 설명할 수 있다. 불자국은 주로 수목의 수간을 기준으로 바람이 부는 반대방향(leeward side)에서 발생하는데, 이것은 수목의 수간 뒤쪽의 연료와 공기가 혼합되어 생기는 소용돌이에 의해서 발생한다. 이러한 소용돌이는 열의 대류현상에 의한 gas의 흐름에 의해 위쪽으로 상승하는 열에 의해 발생하고, 불자국은 수목의 수간을 기준으로 바람이 부는 방향(windward side)에서 불꽃이 잔존하는 시간보다 leeward side에서 불꽃이 잔존하는 시간이 길기 때문에 형성되며, 일반적으로 불자국은 기부가 넓고 상부가 좁은 삼각형의 형태를 취한다고 하였다(Gutsell *et al.*, 1996).

지표화(surface fire) 발생지역에서 longleaf pine (*Pinus palustris*)의 수간에 불자국은 위쪽으로 올라가면서 작아지며, 온도가 871°C에 이르게 되면 wood-flame이 발생하며, 열에 의해서 수피의 표면에는 불자국이 형성되고, 수목의 바람이 부는 반대쪽(leeward side)은 바람이 부는 앞쪽(windward side)보다 더 많은 열을 받게 되므로 수목의 수피에 불자국이 형성된다(George *et al.*, 1964).

실험실내의 실험을 통하여 4등급의 직경을 가진 cylinder를 이용하여(직경: 7 cm, 17 cm, 27 cm, 34 cm, 높이: 3.5 m) 각 수간에 열이 받는 온도를 기록한 결과, 불이 발생하는 동안 기록된 온도들은 연료의 등급에 따라 다소 차이가 나며, 불꽃 높이 40 cm의 높이에서 가장 큰 온도를 기록하였다. 큰 직경의 실린더는 작은 직경의 실린더 보다 온도를 예측하기 쉬웠으며, 이러한 연구를 통하여 실제 수목에 있어서 열의 피해 예측을 하기도 하였다(Tunstall *et al.*, 1975). *Populus tremulidie*의 임지에서 불이 발생한 후 생존한 수목은 수간의 불자국이 50% 이하였으며, 고사한 수목은 70% 이상 불자국이 형성되었다. 회귀분석을 실시한 결과 수목의 생존율은 흉고직경, 불자국의 높이와 밀접한 관련이 있다고 하였다(James *et al.*, 1987).

활엽수(hardwood)와 침엽수(softwood)의 14수종을 이용하여 열에 대한 수목의 저항성을 측정된 결과, 저항성은 수목의 직경과 밀접한 관련이 있으며, 수종에 따라 직경의 크기, 수피두께, 수피의 열전도율에 따라 열에 대한 저항의 시간이 달라진다(Robert, 1965).

따라서 본 연구에서는 산불발생 후 불자국을 이용하여 지형 및 사면에 산불의 진행 방향을 추정하고, 수

목의 생존을 분석을 통하여 산불 발생지역의 산림관리 차원에서 차후 산불 발생 시 수목의 생존 분석에 대한 기본적인 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2000년 고성지역과 동해, 삼척지역 산불발생지에서 수목의 수간에 형성된 불자국을 이용하여 산불의 확산 행동을 분석하였으며, 조사기간은 2000년, 2001년, 2002년 3년 동안 매년 8~9월에 2회씩 조사하였다.

조사된 총 본수는 632본 이었다. 산불 발생지역에서 수목의 수간에 형성된 불자국은 수간을 중심으로 바람이 부는 방향(windward side)과 반대방향(leeward side)에 형성되며, 산불에 의해서 형성된 불자국의 높이를 측정하였으며, 불자국이 형성된 수목의 수고와 직경을 조사하였다.

각 조사지역은 지역별로 10×10 m 또는 10×15 m의 조사구를 설정(총 60개의 조사구)하여 조사구내의 모든 수목을 조사하였고, 조사지역의 수목의 생존 여부, 조사지역의 사면과 경사도를 측정하였다.

2.1. 불자국을 이용한 산불 피해지의 산불확산 형태 분석

조사구내 모든 수목의 불자국 높이와 방향을 측정하여, 조사구내의 불자국의 방향을 분석하였으며, 불자국의 방향에 따른 지형별 분석을 위하여 경사도와 사면을 조사한 후 사면별에 따른 불자국의 방향을 분석하였다.

2.2. 불자국을 이용한 산불피해지의 소나무 생존 분석

생존한 수목과 고사한 수목의 불자국 높이를 이용하여 수고와 직경, 불에 탄 수간면적과의 관계를 분석하여 산불 발생 후 소나무의 생존 여부를 분석하였다.

수목의 고사 판별은 수목의 수관에 존재하는 침엽의 유무를 이용하였고, 당해연도 고사목은 수목의 침엽의 변색의 유무를 가지고 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 불자국을 이용한 산불 피해지의 산불확산 형태 분석

Fig. 1은 수목의 수간에 불자국이 형성되는 것과 조

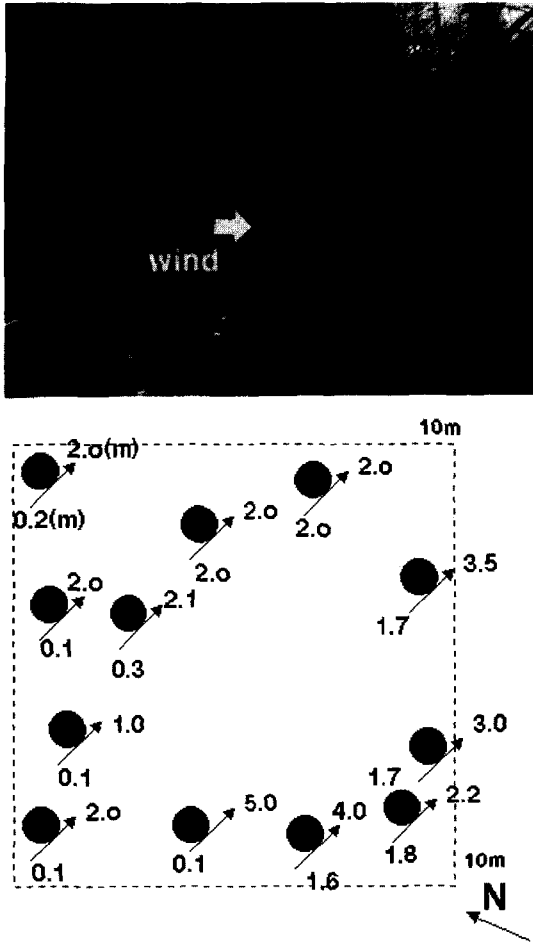


Fig. 1. Prediction of wind direction using fire scar and fire scar formed in tree stem after forest fire(Arrow; wind direction, 1, 2, 4 number; living tree, other numbers; dead tree).

사구(10×10 m) 내의 수목에 형성된 불자국의 높이를 수목의 수간을 기준으로 바람이 부는 방향(windward side)과 반대방향(leeward side)으로 표현하였으며, 이러한 불자국과 바람방향의 관계를 밝힌 것이다.

불자국은 수목의 수간을 기준으로 양측에 바람이 부는 방향과 반대방향에 형성된다. 이러한 불자국은 수목의 위치, 경사, 수목의 직경, 산불의 강도와 밀접한 관련이 있다. George *et al.*(1964)은 수목의 수피에 열이 가해지면 수피의 표면에는 불자국이 형성된다고 하였으며, 수목의 leeward side는 바람이 부는 앞쪽보다 더 많은 열을 받게 된다고 보고하였다.

이러한 수목의 leeward side에서는 더 많은 열에 의해서 windward side에서 보다 더 높은 불자국이

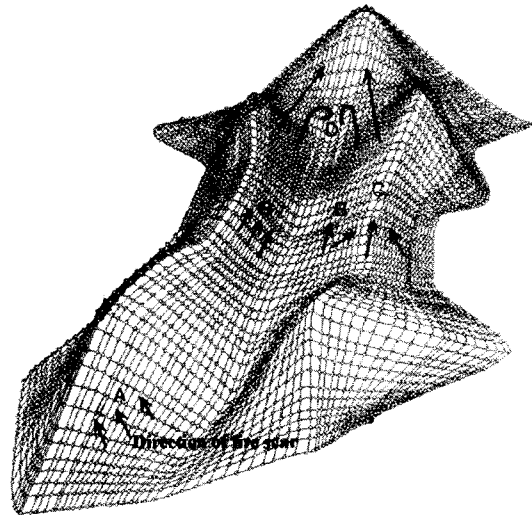


Fig. 2. Estimate of forest fire spread direction by fire scar.

형성되는 것으로 판단된다.

일반적으로 평지의 경우 Fig. 1과 같이 바람이 부는 방향을 따라 수목의 수간에 불자국이 형성되며, 불자국의 방향은 사면의 형태, 경사 등에 따라 다양하게 나타나며, 이들의 관계는 Fig. 2를 이용하여 설명하였다.

Fig. 2는 불자국을 이용하여 산불의 방향을 추정할 것으로 바람의 방향이 일정하게 분다고 가정하면 4가지 유형(A, B, C, D)으로 분석할 수 있다.

A 유형의 경우 경사도 20~40° 사이의 지역으로 사면 방향과 동일하게 수목의 불자국이 형성된 것으로 나타났으며, 바람의 방향과 동일하게 산불이 확산되지만 사면을 따라서 산불의 확산이 진행되고 있는 것으로 판단된다.

B 유형의 경우는 산의 사면과 사면 사이를 바람이 통과하여 바람의 방향과 동일하게 산불 확산이 진행되고 있는 지역이며, 이러한 계곡을 통과하는 산불의 확산속도는 바람의 영향을 받아 빨라지는 것으로 추측된다.

C의 경우에는 능선지역으로서 경사면 지역은 A의 경우와 비슷하지만 능선지역은 바람의 방향을 따라 산불이 확산되는 형태이며, 산불이 이러한 능선을 만나는 경우에는 능선을 따라 일정한 방향으로 확산이 진행된 것으로 판단된다.

D의 경우에는 양측면의 계곡의 바람이 일정한 지점에서 만나는 지역으로 이 지점에서의 불자국은 뚜렷한

방향성을 띠지 않고 수목의 수간에 windward side와 leeward side의 구별이 혼란스러울 때가 많았으며, 불자국의 방향성을 정의하기가 어려웠다. 이 지점을 지나게 되면 다시 바람의 방향과 사면의 방향에 일정하게 산불이 확산되었다.

이러한 불자국을 이용한 산불의 방향성 추정은 산림 내의 기후변화(지형에 따른 바람의 방향성 변화) 등을 예측하는데 도움이 되며, 본 연구의 방법은 외국의 사례에서도 많이 연구되지 않은 방법으로써 우리나라 지형에 알맞은 특수한 산불의 행동을 예측하는데 기본적인 자료로서 제공될 수 있을 것이다.

이(1995)의 연구에 의하면 우리나라 산불의 연소 확대과정 및 연소유형 분석을 통하여 산불의 연소유형을 단순 사면형, 골짜기 막장형, 요철 사면형, 능선 사면형, 구릉형, 비산화 발생형으로 구분하였는데 이러한 유형들에 있어서 산불의 진행은 지형과 밀접한 관련이 있는 것으로 추측되며, 이러한 지형의 영향에 따라 산불 발생 시 바람의 방향 또한 변화될 것으로 판단되며, 차후의 연구에서는 지형의 특성과 관련하여 산불의 진행을 분석하는 연구가 필요할 것이다.

3.2. 불자국을 이용한 수목의 고사 측정

Table 1은 2000년에 발생한 산불피해 지역인 고성지역, 영동지역(동해, 삼척)에서 3년(2000, 2001, 2002)년간의 야외조사를 분석한 것으로, 각 조사구에서 불자국(fire scar)이 잔존해 있는 수목의 생존목과 고사목을 조사하여 불자국 높이와 흉고직경(D.B.H), 수고

(Height), 수목의 수간에 형성된 불자국의 면적(Burned area of stem)을 나타낸 것이다.

총 조사 본수 중 생존목은 443본, 고사목은 189본이었다. 산불이 났던 해(2000년)의 생존목의 평균 불자국 높이는 수목의 수간을 기준으로 바람이 부는 방향(windward side)과 반대 방향(leeward side)의 높이는 각각 1.3 m, 2.7 m였으며, 고사목의 경우에는 각각 2.7 m, 3.4 m으로 나타났다. 두 방향 모두에서 생존목 보다는 고사목의 불자국의 높이가 높게 나타나고 있으며, 그 차이는 약 1 m 정도를 보이고 있다.

산불이 났던 다음 해(2001년)의 조사에서는 산불에 의해서 2000년에 고사한 수목과 2001년에 고사한 수목의 구별이 가능하여 2년 동안 수목의 고사를 조사하였으며, 불자국의 높이는 windward side와 leeward side의 생존목에서는 각각 0.25 m, 1.3 m의 높이를 보이고, 고사목에서는 2000년의 경우, 각각 1.29 m, 2.7 m의 높이를 보이고 있으며, 2001년의 고사목의 경우는 각각 0.5 m, 2.1 m의 높이를 보이고 있다.

2002년의 조사에서도 위의 2년 동안의 결과와 유사하게 windward side와 leeward side의 높이가 생존목이 고사목 보다 낮게 나타나고 있다.

수간이 불에 탄 면적을 보면 생존목의 경우에는 2000년 25.9%, 2001년 17.1%, 2002년 12.4% 이었으며, 고사목의 경우에는 2000년 40.9%, 2001년 31.3% 2002년 30.5%였다. 이러한 결과로 볼 때 소나무의 경우 수간면적이 최소한 12% 이하가 불에 타면 생존하게 되고, 30% 이상의 면적이 불에 타게 되면 고사하게 된다는 것을 알 수 있었다.

Brown *et al.*(1987)의 연구에 따르면 사시나무의 불에 탄 면적이 고사한 수목의 경우에는 평균 70% 이상이고, 생존한 수목의 경우에는 50% 이하로 나타난다고 보고하였으며, 본 연구에서 수행된 소나무의 경우에는 이보다 훨씬 작은 면적이 불에 타더라도 고사하게 되는 결과를 나타냈다. 이것은 소나무의 경우 사시나무와 비교하여 소나무 특성상 많은 수지를 포함하고 있기 때문이며, 이러한 휘발성 물질들의 빠른 연소에 의해서 불에 쉽게 피해를 받는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 산불발생지에서 흔히 발병되는 리지나뿌리썩음병, 그 밖의 천공성 해충류 유입 등이 감안된다면 다소 차이를 보일 것으로 예상된다.

George *et al.*(1964), Tunstall *et al.*(1975), Guestell *et al.*(1996)의 연구에 따르면 불자국은 단지 수목의

Table 1. Fire scar size and height and D.B.H of tree in burned area

		Wind ward(m)	Lee ward(m)	Height (m)	D.B.H (cm)	Scar Area(%)
2000	Living	1.3	2.7	10.4	15.7	25.9
	Dead	2.7	3.4	8.3	12	40.9
2001	Living	0.25	1.3	7.6	17.9	17.1
	Dead(2000)	1.29	2.7	6.8	11.8	39.7
	Dead(2001)	0.5	2.1	6.7	14.2	31.3
2002	Living	0.5	1.2	10	20	12.4
	Dead	1.2	3.3	11	21	30.5

*Windward: Height of windward side in burned stem of tree. Leeward: Height of leeward side in burned stem of tree. Height: height of tree. D.B.H: diameter at Breast Height of tree. Scar Area: Area of fire scar in burned stem of tree. Living: survival tree in study plot, Dead: dead tree in study plot

leeward side에서만 형성된다고 하였으나, 본 조사에서는 windward side에서도 수목의 불자국이 발견되었다. 산불 발생 시 수목의 불자국은 일반적으로 수목 직경의 영향으로 인하여 수목의 leeward side에 열이 오랫동안 머물게 되어 leeward side에 불자국을 형성하게 된다. 그러나 windward side 상에서 형성된 불자국 또한 수목이 서 있는 위치, 경사도, 바람의 속도, 산불의 확산 속도 등에 따라서 다양한 차이를 보일 것으로 예상되므로 본 연구에서는 windward side의 불자국의 높이를 함께 측정하였다.

또한 이들의 연구에서 leeward side의 온도의 변화를 측정하고 이들의 변화에 따라 불자국의 높이가 상당한 차이를 보인다는 결론을 얻고 있는데, 우리나라의 경우 지형, 수종간의 차이가 상당할 것으로 예상되므로 차후의 연구에서는 지형간, 수종간의 불자국 높이와 온도 등에 대한 연구가 필요하다.

이러한 연구를 통하여 산불의 확산 속도의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

3.3. 불자국을 이용한 산불피해지의 소나무의 생존 분석

소나무의 생존분석은 불자국의 면적, 불자국의 높이, 수고, 직경의 4가지 인자를 이용하여 분석하였다.

2000년과 2001년의 조사지에서 생존한 수목으로 변수를 선택하였으며, 이들의 관계는 수간에 형성된 불자국의 면적을 기본 요인으로 하고 나머지 다른 인자들을 변수로 회귀모형을 만들었다.

Table 2는 생존을 분석을 위한 각 인자들의 계수를 나타낸 것으로 모든 인자들은 유의수준 0.05%에서 유의성을 갖으며, 이러한 회귀모형을 이용하여 산불이 발생한 후 소나무 생존의 지표를 삼고자 하였다.

회귀식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

Table 2. Summary statistics for logistic regression model for survival tree in pine tree($r=0.936$, $F=409.968$, $P>0.0001$)

	Coefficient	t-value	P
Hight	-2.484	20.787	0.0001
D.B.H	0.04199	0.975	0.0001
Windward	-1.686	3.012	0.0331
Leeward	11.172	30.414	0.003
Constant	23.432	30.521	0.0001

Windward: Height of windward side in burned stem of tree.
Leeward: Height of leeward side in burned stem of tree. Height: height of tree. D.B.H: diameter at Breast Height of tree

$$Y = -2.484 \times \text{Hight} + 0.04199 \times \text{D.B.H} - 1.686 \\ \times \text{Windward} + 11.172 \times \text{Leeward} + 23.432 \\ (r=0.936, F=409.968, P>0.0001).$$

Peterson *et al.*(1988)은 Douglas fir의 산불 발생후의 생존율에 대한 조사를 하였는데, 산불 발생 후 2년이 경과하면 수목의 생존과 고사의 수준을 알 수 있다고 하였으며, 본 연구에서는 그의 제의에 따라 2년(2000, 2001년) 동안의 자료만을 변수로 취하였다.

Peterson *et al.*(1988)은 수목의 직경, 수피두께, 수관의 비율, 불자국의 높이 등을 이용하여 생존율의 회귀식을 만들었다. 그의 연구와 본 연구를 통하여 공통되는 인자들은 수목의 직경, 불자국의 높이였으며, 이들 변수들 중 수목의 직경과 불자국의 높이는 상당한 관련이 있는 것으로 사료된다.

이러한 생존 가능성에 대한 연구는 산불 발생후의 산불 관리차원에서 중요한 인자를 차지하기 때문에 소나무 외의 다른 수목의 생존을 분석도 필요하다.

IV. 적 요

산불발생 후 수목의 수간에 형성된 불자국을 이용하여 산불 발생 시 지형에 따른 산불의 방향성 추경과 수목의 생존을 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

불자국은 수목의 수간을 기준으로 바람이 부는 반대 방향(leeward side)에서 더 높게 형성되며, 수목의 직경, 사면의 경사 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

불자국을 이용하여 불의 진행방향을 분석한 결과 4가지 유형이 가장 두드러지게 나타나고 있었으며, 이들 유형들은 사면의 방향과 일정하게 또는 바람의 방향과도 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.

불자국의 높이는 생존목과 고사목을 비교해 보면 평균 불자국 높이는 수목의 수간을 기준으로 바람이 부는 방향(windward side)과 반대 방향(leeward side)의 높이는 생존목 보다는 고사목의 불자국의 높이가 높게 나타났다.

수간이 불에 탄 면적을 보면 생존목의 경우에는 2000년 25.9%, 2001년 17.1%, 2002년 12.4% 이었으며, 고사목의 경우에는 2000년 40.9%, 2001년 31.3% 2002년 30.5% 이었다. 이러한 결과로 불

때 소나무의 경우 수간면적이 최소한 12% 이하가 불에 타면 생존하게 되고, 30% 이상의 면적이 불에 타게 되면 고사되는 것으로 나타났다.

Brown *et al.*(1987)의 연구에 따르면 사시나무에서 불의 강도와 고사와의 관계에서, 불에 탄 면적이 고사한 수목의 경우에는 평균 70% 이상이고, 생존한 수목의 경우에는 50% 이하로 나타난다고 보고하였으나 본 연구에서 수행된 소나무의 경우에는 이보다 훨씬 작은 면적이 불에 타더라도 고사하게 되는 것으로 나타났다.

소나무의 생존분석은 불자국의 면적, 불자국의 높이, 수고, 직경의 4가지 인자를 이용하여 분석한 결과 회귀식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Y = -2.484 \times \text{Height} + 0.04199 \times \text{D.B.H} - 1.686 \\ \times \text{Windward} + 11.172 \times \text{Leeward} + 23.432 \\ (r=0.936, F=409.968, P>0.0001).$$

이러한 불자국을 이용한 다양한 연구들은 산불의 강도, 속도 등에 대한 분석을 가능하게 하며, 산불 발생 후 야기되는 산림관리에 대한 기본적인 자료들로서 제공될 수 있을 것이다.

인용문헌

- 이시영, 1995: 헬기를 이용한 산불연소상황 조사. 임업정보, **52**, 26-28.
- 산림청, 2001: 동해안 산불백서 I, II, 871pp.
- Brown, J. K. and N. V. DeByle, 1987: Fire damage, mortality, and Suckering in aspen. *Canadian Journal Forest Research*, **17**, 1100-1109.
- Gutsell, S. L. and E. A. Johnson, 1996: How fire scars are formed: coupling a disturbance process to its ecological effect. *Canadian Journal Forest Research*, **26**, 166-174.
- George, R. F. and C. H. Robert, 1964: Heating of tree Trunks in Surface fires. *Journal of forest*, **62**, 799-805.
- James, K. A., B. Berni, A. F. Mark, N. O. Philip, B. S. David, N. S. Carl, Jan. W. van Wagtenonk, and C. P. W. 2000: The use of shaded fuel breaks in landscape fire management. *Forest Ecology and Management*, **127**, 55-66.
- Peterson, D. L. and M. J. Arbaugh, 1989: Estimating postfire survival of Douglas-fire in the Cascade Range. *Canadian Journal Forrest Research*, **19**, 530-533.
- Robert, C. H. 1965: Contribution of bark to fire resistance of Southern Tree. *Journal of Forestry*, **63**, 248-251.
- Tunstall, B. R., J. Walker, and A. M. Gill, 1975: Temperature Distribution Around Synthetic Trees During Grass Fires. *Forest Science*, **22**, 269-276.