

## 고온로의 가열 온도에 의한 리기다소나무와 일본잎갈나무 생엽과 생지의 연소온도변화

김관수 · 장인수 · 박기돈 · 김수정

대전대학교 이과대학 생물학과

### Burning-Temperature Change of Living Branches and Leaves of *Pinus rigida* and *Larix leptolepis*

Kim, Kwan-Soo, In-Soo Jang, Ki-Don Park and Su-Jung Kim

Department of Biology, College of Natural Science, Taejon University

#### ABSTRACT

This study aims to examine how the amount of sample and changes in combustible temperature of living branches and leaves treated with high temperature are associated with combustible time of two coniferous trees, *Pinus rigida* (R) and *Larix leptolepis* (L), which are the main victims of forest fire.

During the first thirty minutes at 80°C, moisture content of R was higher than that of L by 12%, but after four hours, the moisture content was both lowered by 4~5% and turned to highly combustible leaves. With living leaves, the maximal combustible temperature, regardless of heating temperature, turned out to be higher than normal temperature by 67~140°C, and that with living branches, it was higher by 113~207°C. Also, with living leaves (R, L), the duration time of combustion was as follows: 605, 906 seconds at 400°C and 76, 227 seconds at 600°C, respectively.

Concerning the relation between the amount of burnt fuel and maximal temperature, the more the former was, the higher the latter. The total amounts of combustion heat of living branches and living leaves were 1,121 Cal (20.8%) and 1,137 Cal (21.4%), respectively. The total amount of combustion heat increased in proportion to the amount of consumed fuel: 100 g of living leaves and branches gave rise to 128 Cal, whereas 300 g did 556 Cal, that was more than three times.

**Key words:** Combustible temperature, Combustion heat, Coniferous trees, Maximal temperature

#### 서 론

최근 우리나라에서는 연간 200 여건의 산불이 발생하여 1,100 ha 이상의 삼림면적과 3,800 m<sup>3</sup> 이상의 재적이 소실되어 (산림청 1993), 삼림생태계의 안정과 기능에 큰 위협을 주고 있다. 산불

발생의 주원인은 입산자실화로 전체 산불 발생건수의 52.2%를 점하고 있으며, 이의 80% 정도가 담배불에 의한 것으로 보고되었다 (김 등 1994). 특히 산불은 삼림의 특성을 변화시키고 토양의 질적인 면에 영향을 주고 있다 (Komarek 1971, Wright and Bailey 1982). 또한 논, 밭두렁 태우기와 산불 등이 발생되어 자생식물이 연소되거나 고사하는 직접적인 원인은 연소온도에 따라 식물체내의 수분 소실로 인한 식물 체온의 상승이 주원인인 것 같다 (Iwanami 1973a, b). 따라서 연료량, 수직분포, 함수량 등이 연소상태를 좌우한다고 Iwanami(1971)는 보고했다. 이것은 Naito 등(1967)이 산불은 가연물의 특성 뿐만 아니라 산지의 지형과 기상 등의 영향에 따라 연소 형태가 달라진다고 보고된 내용과 대체적으로 유사하다.

우리나라의 산불발생 원인은 대부분이 인위적이며 낙뢰 등의 자연현상에 의한 화재(Naito *et al.* 1971, Komarek 1967, 1971)는 거의 없다. 일반적으로 화원이 되는 연소의 3 요소는 에너지, 가연물 및 산소의 공급이다 (申村 1956). 산불로 인하여 토양이 연소되면 질소와 부식질이 소실되기 때문에 자칫하면 불모지로 변할 수 있다고 생각된다. 특히 토양 bacteria와 기타 미생물 및 곤충 등이 소멸되는 간접적인 영향도 고려해야 된다 (三浦 1931). 논, 밭두렁 태우기나 산불 발생시에 지표 경계면의 온도측정은 기술적으로 어려움이 많아서 동일한 실험에서조차도 연료분포의 불균일성 때문에 장소에 따라 측정된 온도의 편차가 매우 크다고 생각된다. 다만 토양의 온도변화는 완만하기 때문에 온도계의 종류나 계수가 다를지라도 측정 오차는 비교적 적다 (Iwanami 1972b). 그러나 식물체가 연소된다는 것은 함유된 수분이 증발하여 온도가 섭씨 수백도에 도달하기 때문에 많은 주변 환경요인의 변화가 수반된다. 사실상 고온에서 식물체내의 수분 증발과정이나 식물체의 변화상태를 산불 발생장소에서 측정한다는 것이 거의 불가능하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 산불발생시 연소대상 수목의 주종이 되는 리기다소나무 (*Pinus rigida*)와 일본잎갈나무 (*Larix leptolepis*)의 생엽 및 생지를 주재료로 하여 고온에서 연소온도가 변화하는 과정을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 실험대상 수종의 분포현황

우리나라 삼림면적 (6,289,000 ha) 중 침엽수림 46%, 활엽수림 26.6%, 혼효림 27.3%, 죽림 0.12%(산림청 1993)로서 침엽수림이 가장 넓고, 충남의 삼림면적 (446,273 ha) 중 52.4%가 침엽수림(충청남도 1992)이다. 이 침엽수림 중 실험대상 수종인 리기다소나무와 일본잎갈나무 등의 분포현황을 조사하기 위하여, 도립공원인 칠갑산 (561 m: E126°55'20" N36°23'40")과 오서산 (791 m: E126°39'50" N36°27'30"), 성주산 (680 m: E126°04'25" N36°24'40"), 운주산 (459.7 m: E127°14'30" N36°40'55") 등에 방형구(10 m × 10 m)를 무작위로 각 10 개 지점에 설치하여 분포현황과 참고자료를 이용하여 특성을 조사하였다.

### 생엽과 생지의 함수량 변화

시료의 함수량을 조사하기 위하여 리기다소나무의 생엽 100 g (R-100), 200 g (R-200), 300 g (R-300), 일본잎갈나무의 생엽 100 g (L-100), 200 g (L-200), 300 g (L-300) 그리고 길이 20 cm, 직경 1~1.5 cm의 리기다소나무의 생지 100 g (Rb-100), 200 g (Rb-200), 300 g (Rb-300), 일본잎갈나무의 생지 100 g (Lb-100), 200 g (Lb-200), 300 g (Lb-300)을 채취하여 80℃의 건조기에서 8 시간 건조하면서 30 분 단위로 함수량을 측정하였다.

### 가열 온도에 따른 생엽과 생지의 연소속도와 온도변화

시료 각 200 g을 연소측정기 (chamber dimensions: 30 × 20 × 25 cm, 제일과학산업)에서 400℃, 500℃, 600℃의 고온에 가열하여 착화 (catch fire: 시료에 불이 붙을 때) 및 발화 (ignition: 시료에 불이 붙거나 연기만 나고 불기둥이 솟지 않을 때), 발염 (burning: 시료가 불기둥을 내며 연소될 때) 시간을 연계시켜서 각각 측정하고, 또한 생엽 및 생지시료(i.e. : R-100, R-200, R-300, L-100, L-200, L-300, Rb-100, Rb-200, Rb-300, Lb-100, Lb-200, Lb-300)를 연소 연료의 다소에 따른 각 최고온도와 고온 지속시간을 측정, 비교하였다. 그리고 실험에 따른 연소 시간 및 고온 지속시간은 다음과 같이 Iwanami(1972a)의 측정방법으로 나타냈다. 즉, 0-00'00" = hours - minutes, seconds

### 연료 소비량과 전연소열량

시료 R-100, R-200, R-300, L-100, L-200, L-300 그리고 Rb-100, Rb-200, Rb-300, Lb-100, Lb-200, Lb-300 등이 고온에서 연소된 뒤의 연료 소비량을 각각 측정하고 연소된 연료의 다소와 온도와의 관계 그리고 발염시에 발생하는 연소열량을 측정하였다. 그리고 다음과 같이 Iwanami (1972a)의 측정방법을 응용하여 연소열량은 g당 4.5 Cal, 연소연료의 건중량은 m<sup>2</sup>당 600 g을 기준으로 산출하고, 시료량에 대한 것은 상대적인 비율로, 또 단위 시료량은 Cal량으로 나타냈다. 즉, 전연소열량 (Cal/m<sup>2</sup>) = 연소열량 (Cal/g) × 연소연료의 건중량 (g/m<sup>2</sup>).

## 결과 및 고찰

### 실험대상 수종의 분포현황과 특성

실험대상 수종인 리기다소나무와 일본잎갈나무를 포함한 침엽수림의 분포현황을 식피율로 나타내면 도립공원인 칠갑산 32%, 시민 휴양림이 있는 오서산 72%, 운주산 82%, 비교적 인간간섭이 적은 성주산이 66%로 평균 63%가 침엽수림이었다. 특히 그 중 분 실험대상 수종이 매우 넓다. 오서산의 동편산록과 운주산 중봉은 대부분이 일본잎갈나무이며, 12월 이후에 쌓여진 낙엽층 (Aoo-A)은 대체적으로 5 cm 이상을 상회하고 있어서 산불발생시 지표화(surface fire) (Spurr and Barnes 1980)의 연소연료로서 크게 기여할 것으로 판단된다. 한편 리기다소나무와 일본잎갈나무의 개화 결실기는 동일하지만 (李 1980, 林 1988) 내화성은 일본잎갈나무가 강한 수목이라고 공평와 中沖(1971)는 보고하였다.

### 건조 시간에 따른 생엽과 생지의 함수량 변화

삼림수목의 생엽과 생지는 함수량이 줄어들수록 인화성이 강해져서 연소속도가 빠를 것으로 판단되어 시료(i.e.: R-100, R-200, R-300, L-100, L-200, L-300, Rb-100, Rb-200, Rb-300, Lb-100, Lb-200, Lb-300)의 함수량을 조사한 결과는 30분이 경과될 때 리기다소나무 생엽(R)은 일본잎갈나무 생엽(L)보다 함수량이 12% 정도가 더 많았다. 그러나 3시간이 경과되면서 함수량은 급격히 저하되어 두 시료가 4% 이하의 인화성이 아주 강한 건엽(김 등 1994)이 되었다 (Fig. 1). 또한 생지시료는 생엽시료보다 함수량의 변화가 다소 완만했으나 건조 시간이 경과됨에 따라 시료의 함수량 감소폭이 커서 5시간이 경과된 후에는 4% 선으로 급격히 하락되었다. 따라서 산불발생시에 적어도 80℃의 온도가 3시간 이상 지속되는 주변 지역의 침엽수림은 인화성이 강

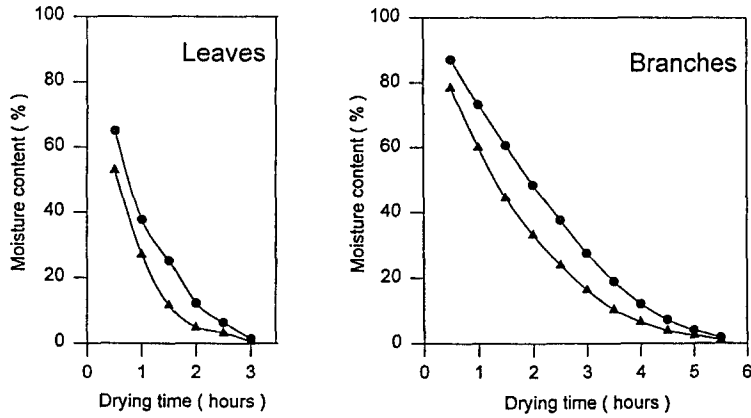


Fig. 1. The moisture content according to drying time.  
 ●—● : *Pinus rigida*, ▲—▲ : *Larix leptolepis*

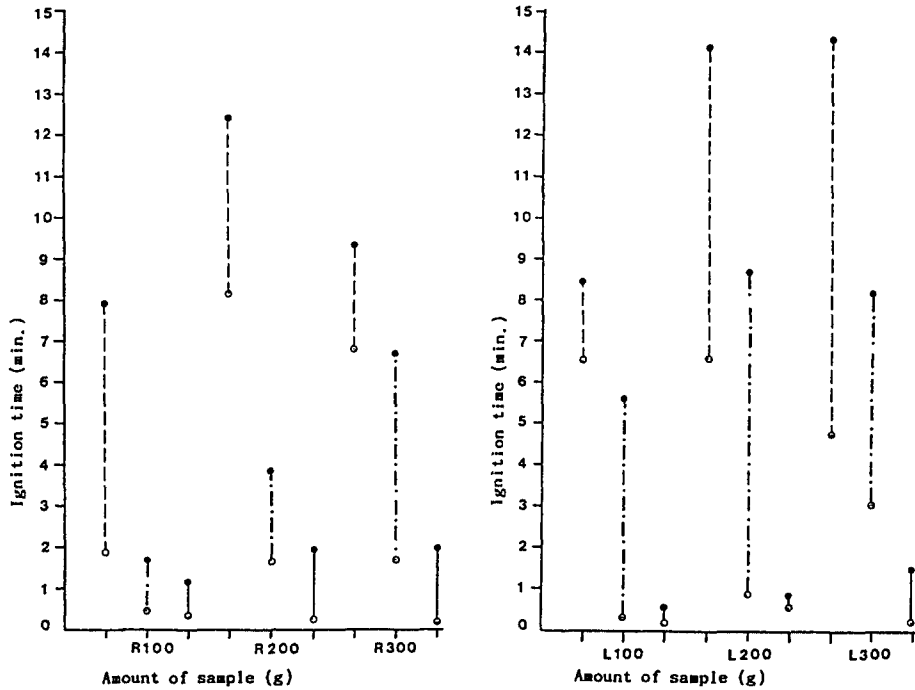


Fig. 2. The combustible time of living leaves according to heating temperature.  
 R: Leaves of *Pinus rigida*    L: Leaves of *Larix leptolepis*  
 - - - - : 400°C                    ● : Burn  
 - · - · - : 500°C                    ○ : Catch-fire point  
 ————— : 600°C

한 연료로 환원될 수 있어서 산지의 지형, 가연물량, 풍속 등의 영향에 따라 연소속도가 한층 가  
 중될 것으로 판단된다.

### 가열 온도에 따른 생엽과 생지의 연소속도와 온도관계

산불의 연소속도는 산불의 방화상 가장 중요하여 지형, 상대습도, 풍향 및 풍속, 연료의 함수량, 낙엽의 퇴적량 및 퇴적 상태 그리고 연소면적 등에 의하여 크게 달라진다 (Iwanami 1972a, b). 또한 목재는 100℃가 넘으면 열분해가 시작되고, 300℃가 되면 연소되기 시작하여 500℃ 전후에서 발염되어 심하게 연소된다 (小田島 1978). 따라서 400℃, 500℃, 600℃의 고온에서 생엽 및 생지시료를 가열했을 때 고온일수록 착화와 발염속도가 빨랐다 (Fig. 2, 3). 또한 각각의 고온과는 관계없이 생엽 및 생엽시료의 최고온도는 각 고온보다 각각 140~67℃, 207~113℃ 정도 더 높았다. 따라서 생지시료의 연소 최고온도가 생엽시료의 것보다 60℃ 정도 더 높았다. 또한 생엽 및 생지의 발화온도는 가열온도가 낮을수록 낮은 경향을 보였다 (Fig. 4).

생엽 (R, L) 및 생지 (Rb, Lb)시료의 연소 지속시간은 각각 400℃에서 0-10'05", 0-15'06", 500℃에서 0-03'45", 0-05'48", 600℃에서 0-01'16", 0-03'17"였다. 따라서 연소 지속시간은 고온일수록 짧았고, 또한 생엽 및 생지시료의 연소 최고온도는 가열 온도보다 균일하게 약 100℃ 정도가 더 높았다 (Fig. 4). 이상의 결과에서, 산림화재 발생시에 불씨의 지속시간이 길어질 것으로

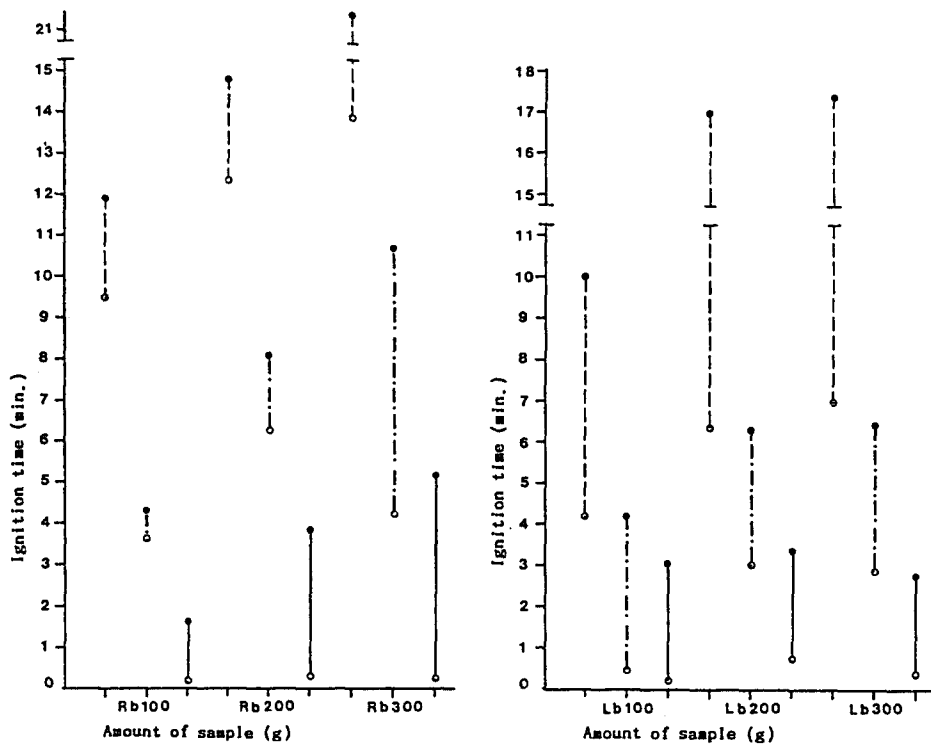


Fig. 3. The combustible time of living branches according to heating temperature.

Rb: Branches of *Pinus rigida*    Lb: Branches of *Larix leptolepis*

----- : 400℃

- . - . - : 500℃

————— : 600℃

● : Burn

○ : Catch-fire point

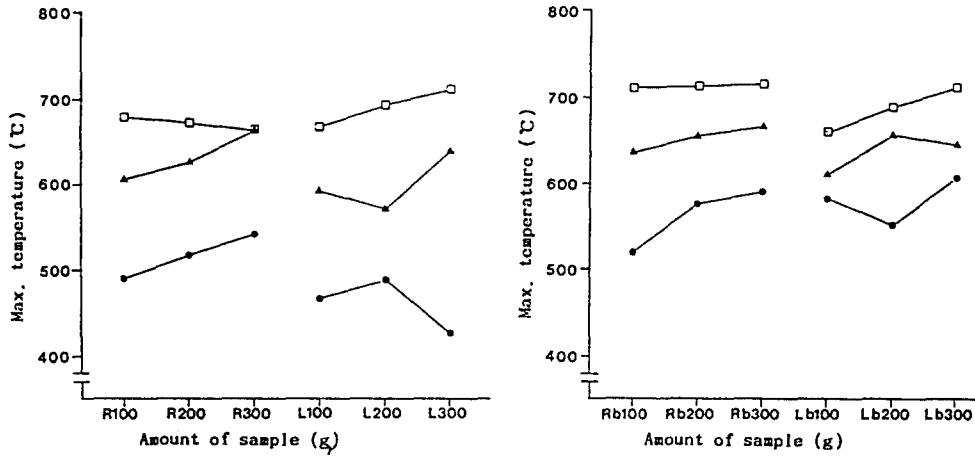


Fig. 4. The maximal temperature of living branches and leaves according to heating temperature.

R: Leaves of *Pinus rigida*      Rb: Branches of *Pinus rigida*  
 L: Leaves of *Larix leptolepis*      Lb: Branches of *Larix leptolepis*  
 ●-● : 400°C      ▲-▲ : 500°C      □-□ : 600°C

생각되며 또한 주변 환경에 따라서 발염속도가 크게 변화될 것으로 예상된다.

**시료의 연료 소비량과 전연소열량**

연소된 연료 건중량과 연소 최고온도와와의 관계는 리기다소나무와 일본잎갈나무의 생엽 및 생지시료가 연소된 연료 건중량이 10 g 이내일 때의 최고온도가 가열온도보다 각각 119°C, 83°C 더

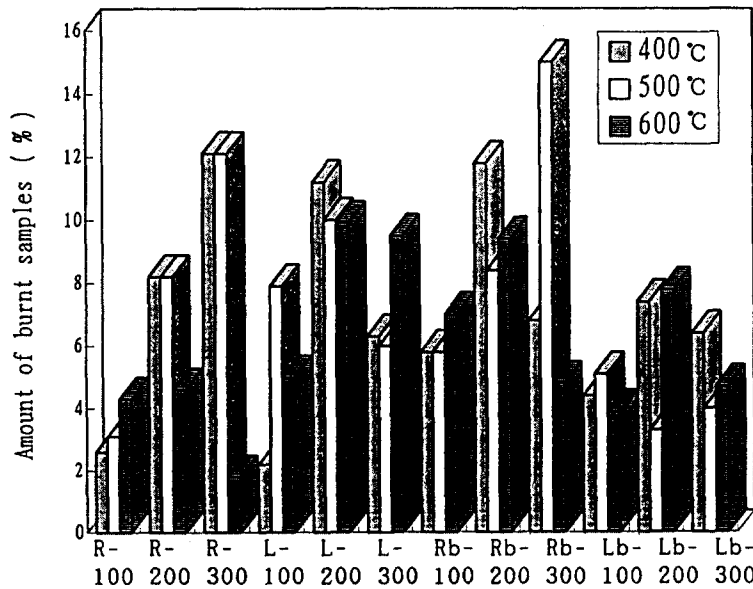


Fig. 5. The amount of combustion heat according to the amount of consumed fuel.

높았다. 또한 연소된 연료 건중량이 20 g 이상이면 생엽시료는 120℃, 그리고 생지시료는 150℃ 정도 더 높았다. 따라서 연소된 연료 건중량이 적을 경우의 최고온도는 낮은 경향을 보였다. 이것은 Iwanami(1972a)가 참억새를 대상으로 실험한 측정 결과와 유사하였다.

발엽시의 불의 강도는 발생하는 전연소열량과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 생엽 (R, L) 및 생지 (Rb, Lb) 시료별 전연소열량은 각각 1,121Cal, 1,137 Cal이므로 시료량에 대한 연소 연료 건중량은 단위량 (600 g) 당 각각 20.8% 및 21.4%로서 거의 같았다. 모든 생엽 및 생지시료의 100 g에서는 각각 113 Cal, 143 Cal, 200 g에서는 459 Cal, 432 Cal 그리고 300 g에서는 549 Cal, 562 Cal가 측정되어 100 g의 전연소열량보다 300 g의 것이 3 배 이상 많았다 (Fig. 5). 따라서 가연물량이 많을수록 연료 소비량이 많아서 전연료 소비량도 많아진다.

산불은 먼저 발화하기 쉬운 건조한 낙엽에서 발생하는 많은 열량 때문에 여기에 접하는 고지나 수목 등의 가연물이 연소되어 순간적으로 확산된다. 公平과 中沖(1971)는 건조가 발화의 위험성이 가장 높다고 보고했다. 그러나 본 연구결과에서는 완전히 건조된 낙엽이 밟히거나 파손되어 분진율이 높아지면 인화성이 매우 강한 연료가 되어 (김 등 1994), 불씨가 정착되면 수분 내에 착화, 발열되어 큰 산불이 일어날 것으로 예상된다.

## 적 요

산불의 주요 피해 식물인 침엽수 리기다소나무와 일본잎갈나무의 생엽과 생지가 고온에서 시료량 및 연소온도의 변화와 연소속도와와의 관계를 조사하였다.

리기다소나무 시료의 함수량은 80℃에서 30분간 건조 하였을 때 일본잎갈나무의 시료보다 12% 더 많았으나, 4시간이 경과하면 두 시료의 함수량은 4~5% 정도로 급격히 저하되어 인화성이 강한 건엽이 되었다. 생엽 및 생지시료의 연소 최고온도는 가열 온도의 고저와 관계없이 가열 온도보다 각각 67~140℃, 113~207℃가 높았다. 생엽시료의 연소 지속시간은 400℃에서 각각 605, 906초 그리고 600℃에서는 76, 227초로서 고온일수록 짧았다.

연소된 연료량과 최고온도와의 관계는 연료량이 적으면 최고온도가 낮았고, 연료량이 많을수록 최고온도는 높았다. 생엽과 생지시료의 전연소열량은 각각 1,121 Cal (20.8%) 및 1,137 Cal (21.4%)이었다. 생엽 및 생지시료 100 g의 전연소열량은 128 Cal이고 300 g의 것은 556 Cal로서 전자보다 3 배 이상 많아서 연료 소비량이 많을수록 전연소열량이 많았다.

## 인용문헌

- 김관수·장인수·김수정. 1994. 삼림내 낙엽층의 함수량과 담배불에 의한 가연성. 한국생태학회지 17:1-9.
- 이창복. 1980. 대한식물도감. 향문사, 서울. pp. 61-62.
- 산림청. 1993. 임업통계연보. pp. 336-337.
- 충청남도. 1992. 충청남도통계연보. pp. 142-143.
- 公平秀藏·中沖豊. 1971. 林野火災 핸드ブック. 宏林 타임스社, 東京. pp. 90-103.
- 三浦伊八郎. 1931. 原野火入れの草及土に及ぼす影響に跡て. 日本林學會雜誌 14:359-360.
- 小田島輝夫. 1978. 林野火災實務 手引書. 林野火災對策協會, 東京. pp. 13-33.
- 中村貞一. 1956. 防火植栽の基礎的研究. 京都大學農學部演習林報告 26:15.

- 林 彌榮. 1988. 山溪カラー名鑑, 日本の樹木. 山と溪谷社, 東京. p.24.
- Iwanami, Y. 1971. Burning temperatures of grasslands in Japan. (3) Condition of fuel before and after burning in grasslands. Jap. J. Ecol. 21:246-254.
- Iwanami, Y. 1972a. Burning temperatures of grasslands in Japan. (5) The comprehensive consideration on the burning temperatures (1). J. Japan. Grassl. Sci. 18:135-143.
- Iwanami, Y. 1972b. Burning temperatures of grasslands in Japan. (6) The comprehensive consideration on the burning temperatures (2). J. Japan. Grassl. Sci. 18:144-151.
- Iwanami, Y. 1973a. Time-temperature change of *Miscanthus sinensis* in the high temperature chamber. J. Japan. Grassl. Sci. 19:135-137.
- Iwanami, Y. 1973b. Dead parts of *Miscanthus sinensis* by burning. J. Japan. Grassl. Sci. 19:141-143.
- Komarek, E. V. 1967. The nature of lightening fires. Tall Timbers Fire Ecology Conference, Hoberg, California. pp. 6.
- Komarek, E. V. 1971. Fire in the northern environment, A symposium. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Forest Service. US. Dept. Agr. Portland, Oregon. pp. 8-10.
- Naito, T., K. Sugawara, Y. Iwanami and S. Iizumi. 1967. Some effects of fire on the coastal pine forest at Gamow, Miyagi Prefecture. Jap. J. Ecol. 17:122.
- Naito, T., Y. Iwanami and S. Iizumi. 1971. Effects of fire on vegetation of *Thujaopsis dolabrata* var. *hondae* forest on a hill, Odagawayama, Aomori Prefecture. Jap. J. Ecol. 21:193.
- Spurr, S.H. and B.V. Barnes. 1980. Forest Ecology. John Wiley & Sons, New York. pp. 275-293.
- Wright, H.A. and A.W. Bailey. 1982. Fire Ecology. John Wiley & Sons, New York. pp. 8-12.

(1995년 3월 16일 접수)