

고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구
A study on fire investigation & calorie analysis of main trees
in Go-sung wildfire land

김 동 현* 고 재 선* 최 세 환* 김 광 일*
Kim Dong-Hyun* · Ko Je-Sun* · Choi Se-Whan* · Kim Kwang-Il*

Abstract

This paper contained an actual investigation of a wildfire which broke out on 23 April 1996 in Go-sung Kun, Kang-won Do examined the calories and the total calories of the main trees which were *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora*. There were three important fire spread factors which were weather condition, fuel condition and terrain. The weather condition was the most dangerous alarm level. The fuel condition having a high calory value, *Pinus densiflora* made up 63% of the forest. Terrain of the forest were mostly covered by steep slopes and complicated line construction. This experimental calorie study about *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* showed that *Pinus densiflora* had 13.34kcal/g and *Quercus variabilis* had 9.64kcal/g. In the case of weight loss of pyrolysis, *Pinus densiflora* had a higher percentage rated 35.71~10.05% than *Quercus variabilis*. Accordingly, *Pinus densiflora* showed lower than *Quercus variabilis* in heat resistance

Key Word : Wildfire, Calorie, Go-sung, Wildfire Spread.

국문 요약

1996년 4월 23일 강원도 고성군에서 발생한 산불에 대한 현장조사와 주요수목인 굴참나무와 소나무에 대한 열량에 대한 실험을 하였다. 산불의 확산에 영향을 주는 주된 요인은 크게 기상, 연료, 지형 3가지로 구분할 수 있는데 기상 조건에서는 산불위험경보 수준이었고, 연료 조건에서는 높은 열량값을 가지고 있는 소나무 순림이 전체 산림의 63%를 차지하고 있었다. 산림의 지형에서는 지형의 변화와 기복이 크며 단순상향사면형의 지형이 어우러진 골짜기 형태로 급경사지가 대부분이었다. 주요 수목인 소나무와 굴참나무의 열량 실험에 대한 분석 결과는 소나무의 경우 부위별 전체 열량값이 13.43kcal/g, 굴참나무는 9.64kcal/g로 나타났다. 열분해에 의한 질량손실의 경우 소나무가 굴참나무보다 약 35.71~10.05% 더 높은 질량 손실률을 나타냈다. 따라서 소나무가 굴참나무보다 열에 대한 저항성 낮다고 볼 수 있다.

* 경상남도 김해시 어방동 인제대학교 산업안전시스템공학부

1. 서론

산불은 실내화재와는 다른 확산 메커니즘을 가지고 있다. 산불의 확산에 영향을 주는 주된 요인은 크게 기상, 연료, 지형 3가지로 구분할 수 있다. 산불 확산 메커니즘의 규명을 위한 위 3가지 요인에 대한 연구와 산불 진행 예측 기술은 캐나다, 미국, 일본 및 유럽 등의 산림국을 중심으로 발전되어 왔다. 미국은 이러한 메커니즘규명의 결과로 산불확산 시뮬레이션 프로그램인 FARSITE를 개발하였다. 이것은 산불지역을 4시간 단위로 화재가 확산되어지는 경로를 보여줌으로써 실제 산불지역의 진화작전에 많이 이용되어져 왔다. 국내의 경우 국내환경에 맞는 화재 요인 분석과 실험적 자료를 근거로 네트워크가 구성된 시뮬레이션개발을 위해 기초자료 연구를 진행 중에 있다.

산불확산 메커니즘 규명을 위해서는 먼저 연료와 지형에서는 실험을 통한 연구와 지리조사를 통한 지리정보체계가 구축되어져야 하고 기상조건에 대한 자료는 실시간 측정을 통하여 연구되어진 기상자료의 화재확산속도에 적용시키는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 이에 먼저 고성산불 지역에 대한 현장 답사와 주요수목의 열량분석을 통해 산화지역에서의 연소에 의한 피해를 규명하고자 한다. 미국, 캐나다 등의 경우에는 산림지역을 16개의 Fuel Type으로 나누어 관리하고 있다. 이에 관한 연구 형태는 현지조사 중심으로 이루어지고 있으며 연료의 열량적 가치에 대한 분석은 가지와 잎, 수피(樹皮), 그리고 심재(心材)의 구분 없이 전체를 연소시킴으로써 열량을 측정하였는데 본 실험에서는 실험대상 수목을 나뭇가지와 잎, 수피 그리고 심재로 분류하여 실험하였다. 그 이유는 수목피해의 조사 결과 Live Fuel인 소나무의 경우 Crown Fire지역에서도 나뭇가지와 잎은 전소하였으나 수피는

약 1cm 이내의 두께까지 연소과정만 나타났을 뿐 심재의 경우에는 전혀 연소되지 않았기 때문이다. 산림지역에서의 연료에 관한 각국 기준은 식생의 분포와 종류에 따라 다르게 적용시키고 있으며 아직 국내에서는 이에 대한 연구가 진행되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 실험에서 얻는 수목의 열량 및 열 증량 손실 비율로 수목의 내화력과 수목분포도에 따른 화재하중 규명으로 열량지도제작, 방화림 조성의 근거마련 등 여러 프로젝트에 기초가 되는 자료로서 활용하는데 그 목적이 있다.

2. 고성산불의 요인별 화재조사

1996년 4월에 발생한 강원도 고성산불의 경우 산불의 주된 요인인 기상, 연료, 지형의 화재발생조건에 충실히 부합되어 발생한 산불로 국내 사상최대의 산불로 기록이 되었다. 산불 발생 당시 요인별 상황과 1997년 4월에 현장 답사한 내용은 다음과 같다.

1) 산불발생 당시의 기상조건

편(Föhn)현상으로 인한 바람의 최대 속도는 17~27m/sec의 강풍이었으며, 공기중의 상대습도도 26~35%로 매우 건조하였다. 그리고 기압의 급속한 변동으로 풍향이 불규칙하게 발생하였다. 당시의 산불위험경보는 산불 위험지수 82~91로 산불경보 단계 중 가장 높은 단계인 산불위험경보 단계였다.

2) 연료

임야면적의 70%가 침엽수림이며 대표적 식생분포는 가연성이 높은 소나무 순림이 전체의 63%, 혼효림이 31%, 활엽수림이 6%로 구성되어 있다. 임내에는 무육부산물(木屑)이 방치되어 있었고, 연료의 수분함량은 당시 RH(Relative

Humidity) 26~35%로 볼 때 8~10%로 높은 발화 위험성을 가지고 있었다. 산불 피해지역의 수종별 고사 및 소생상태를 조사한 결과 침엽수림의 소나무는 지표화에도 대부분 고사하였으며 활엽수림의 굴참나무 등 참나무류는 지표화 지역에서 모두 소생하였고 Crown Fire지역에서도 일부 소생하였다.

3) 지형

고성군의 총 면적은 621.38km²이며, 임야면적은 46,920ha로 구성되어 있다. 산들은 향로봉 산맥 동쪽에 위치한 표고 300m이하의 저지형으로 지형의 변화와 기복이 크며 단순상향사면형의 지형이 어우러진 골짜기 형태로 급경사지가 대부분이었다. 산세의 복잡과 급경사지로 화재의 확산이 빠르게 이동하였으며 대부분 세류(細流)인 수계에 의한 화재확산저지는 이루어지지 않은 것으로 보인다.

3. 실험방법

3.1 시료의 준비

본 실험에 사용한 시료는 고성산불 피해지역에서 살아남은 소나무와 굴참나무를 사용하였다. 각 수목을 나뭇잎, 나뭇가지, 수피(樹皮), 심재(心材) 등의 각 부위별로 분쇄과정을 행하지 않고 3일간 자연건조 시킨 후 50℃ 無風乾狀態의 OVEN器에 12시간 건조시킨 후 Desiccator에서 24시간 보관하여 2~5mg의 양을 정량하여 시료용기에 담아 실험에 사용하였다.

3.2 실험장치

본 실험에서 사용한 수목의 열에 대한 정상

을 알아보기 위해 시차주사 열량계(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 발열개시 온도, 발열최고온도, 발열종료온도 및 발열량 등을 측정하였다. 시료의 열 중량을 알아보기 위해 열 중량 분석기(Thermogravimetric Analyzer)를 이용하여 열 분해율을 측정하였다. 실험장치의 조건들은 [Table 1]에 주어진 바와 같다.

Table 1. DSC 및 TGA기기의 실험 환경

| 항 목 | 특 성 값 |
|--------------------|----------------|
| 분위기 기체 | N ₂ |
| Temp Rate (°C/min) | 15 |
| Hold Temp(°C) | 500 |
| Hold Time(min) | 50 |
| 시료 함수율(%) | 2 以內 |
| 실험실 내부 온도(°C) | 24~29 |
| 실험실 내부 상대습도 | 56~72 |

4. 실험결과 및 고찰

4.1 시차주사 열량계(DSC)에 의한 열 반응값

Fig.1은 소나무와 참나무에 대해 가열분해 시켰을 때의 DSC 결과이며, 이 DSC 곡선으로부터 얻어진 각 부위별 열량값, 발열최고온도, 발열최고시간의 평균치는 Table 2. 에 나타난 바와 같이 소나무가 굴참나무의 열량값보다 높게 나타났으며,

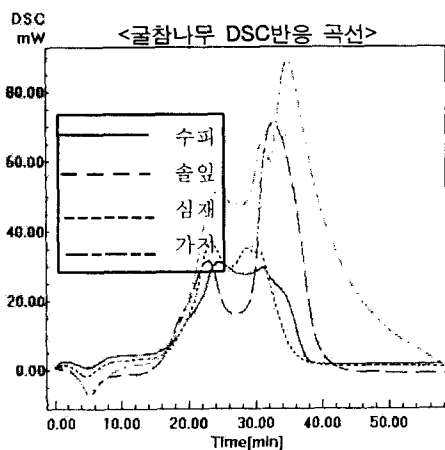
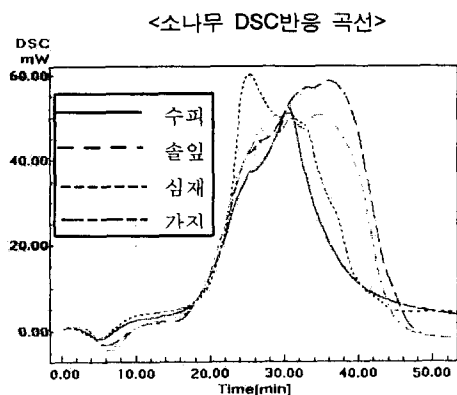


Fig 1. 소나무와 굴참나무의 DSC 반응 곡선

부위별 열량값의 경우 수피(樹皮) 부분이 다른 부위에 비해 높게 나타났다. 이는 [Table 3]의 NFPA에서 제시한 나무류에 대한 열량값과 비교해 볼 때 소나무가 참나무류인 졸참나무의 열량값보다 높고 수피(樹皮)의 경우 다른 목재의 시료 상태들보다 2~3배의 높은 열량값을 가지고 있음을 알 수 있다.

고성산불지역 현장조사결과 소나무와 참나무 모두 나뭇가지, 외피 그리고 잎만 연소되었을 뿐 심재 부분은 연소의 흔적이 없었다.

따라서 실제 연소 가능한 부위의 평균 열량값의 합은 소나무의 경우 10.41Kcal/g, 굴참나

무의 경우 7.41 Kcal/g로 굴참나무의 발열량이 현저히 낮게 나타났다.

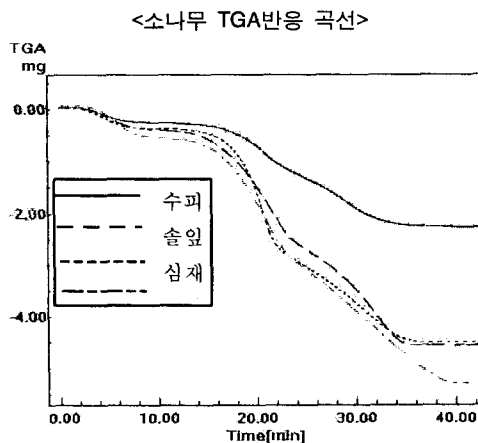
Table 2. 소나무, 굴참나무의 각 부위별 DSC분석값

| 시료 | 내 용 | 발열량 (kcal/g) | Peak Temp(°C) | Peak Time(min) | 총발열량 (kcal/g) |
|--------|------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| | | | | | |
| 잎 | 3.34 | 474.9 | 32 | | |
| 수피 | 3.76 | 459.1 | 23 | | |
| 심재 | 2.93 | 376.9 | 32 | | |
| 굴 참 나무 | 가지 | 1.97 | 486.6 | 34 | 9.64 |
| | 잎 | 2.55 | 485.6 | 32 | |
| | 수피 | 2.89 | 491.2 | 32 | |
| | 심재 | 2.23 | 382.4 | 24 | |

Table 3. Heat of combustion of various wood (NFPA Handbook)

| Substance | Heating Value (kcal/g) |
|---------------------|------------------------|
| Wood sawdust (oak) | 4.72 |
| Wood sawdust (pine) | 5.38 |
| Wood shavings | 4.59 |
| Wood bark (fir) | 12.28 |

4.2 열 중량 분석기(TGA)에 의한 열 반응값



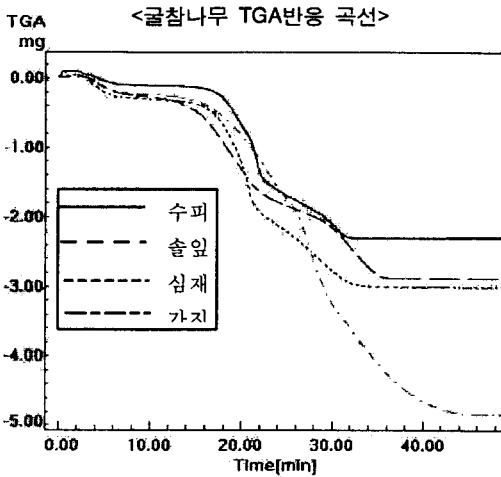


Fig 2. 소나무와 굴참나무의 TGA 반응곡선

Fig.2는 소나무와 참나무에 대해 가열분해 시켰을 때의 TGA곡선이며, 이 TGA곡선으로부터 얻어진 각 부위별 열 분해율의 평균치는 [Table 4]에 나타난 바와 같다. 열 중량 분석 결과 소나무의 각 부위별 열 중량 손실 비율이 굴참나무의 각 부위별 열 중량 손실 비율보다 35.71~10.05%의 차이를 보였다. 이러한 결과는 수목의 열분해 성분 구성비의 차이로 나타난 결과라 사료된다.

DSC 열량측정값에 나타난 바와 같이 소나무의 전체 열량값이 굴참나무의 전체 열량값보다 3.7kcal/g 높게 측정된 점으로 미루어 소나무의 열분해 성분의 구성비가 굴참나무보다 높다는 것을 알 수 있다.

실제 산불현장에서 조사된 내용을 보면 소나무에서 발열량이 가장 많이 나타난 수피 부분의 연소 흔적이 있는 소나무는 대부분 고사하였다. 이는 소나무속의 수피율이 2.8~10.5%의 범위로 수피의 구성비가 높고, 발열온도는 낮고, 열량값은 높게 나타나 소나무 생식에 치명적인 위해를 주는 원인이라 할 수 있다.

Table 4. 소나무, 굴참나무의 각 부위별 TGA분석값

| 내 용 | Weight Loss (%) | |
|--------|-----------------|-------|
| 소 나무 | 가지 | 93.92 |
| | 잎 | 95.12 |
| | 수피 | 98.73 |
| | 심재 | 91.89 |
| 굴 참 나무 | 가지 | 78.95 |
| | 잎 | 85.07 |
| | 수피 | 63.01 |
| | 심재 | 72.69 |

5. 결 론

고성산불지역에서의 산불확산에 영향을 미치는 주요인자별 조사내용의 결과와 수목에 대한 열량 및 열 중량 실험 결과는 다음과 같다.

- (1) 기상 조건에서는 풍속이 9.3m/sec이상의 강풍과 서풍, 북서풍, 남서풍 등 풍향이 불규칙하게 발생하였고 상대습도 26~35%의 산불위험지수 82~91로 산불경보 단계 중 가장 높은 단계인 산불위험경보 단계였다.
- (2) 지형 조건에서는 동향의 표고 300m이하의 저지형으로 지형의 변화와 기복이 크며 단순상향사면형의 지형이 어우러진 골짜기 형태로 급경사지가 대부분이었다. 또한 대부분 細流인 수계에 의한 화재확산저지는 이루어지지 않았다.
- (3) 연료 조건에서는 임야면적의 70%가 침엽수림이며 대표적인 식생은 가연성이 높은 소나무 순림이 전체의 63%였으며 임내에는 무육부산물이 방치되어 있었고, 연료의 수분함량은 당시 RH 26~

35%로 볼 때 8~10%로 높은 발화 위험성을 가지고 있었다.

- (4) 수목의 열량 및 열 중량 분석결과 소나무의 발열량이 굴참나무보다 3.7kcal/g 높게 나타났다. 열분해에 의한 질량손실의 경우에도 소나무가 굴참나무보다 약 35.71~10.05% 높게 나타났다. 이는 소나무의 열분해 성분의 구성비가 굴참나무보다 높다는 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과 굴참나무의 열에 대한 저항성이 소나무보다 높다고 볼 수 있다. 위의 이러한 결과를 바탕으로 방화림 조성의 수목 선정 시 수목의 열적 안정성이 고려되어야 하며, 이러한 수목의 지속적인 열량 및 열 중량 분석은 향후 산림의 수목분포에 따른 열량지도의 제작과 산화위험관리 및 산불 확산 시뮬레이션 적용에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

속도에 미치는 영향”, 동국대학교 석사논문, 1990.

- 9) 정연화 외 2명, “산화 위험을 예측에 관한 연구”, 임업연구원 연구보고 제38호, 1989.

참고 문헌

- 1) William C. Teie, "Fire Officer's Handbook on Wildland Firefighting", Neotec, 1995.
- 2) John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", 2nd Edition. San Francisco Laboratory Center, 1982.
- 3) NFPA, "Fire Hazards of Materials, NFPA Handbook", NFPA, 1990
- 4) 산림청, " '96 산불통계자료", 산림청, 1997.
- 5) 이시영 외 13명 공저, "삼림환경보전학", 향문사, 1997.
- 6) 산림청, "산불예방과 진화", 산림청, 1996
- 7) 정연화 외 2명, "산불발생시기 분석 및 위험지수 산정", 임업연구원 연구보고 제49호, 1994.
- 8) 이시영, "환경인자가 산불의 온도 및 진행