

콘 칼로리미터를 이용한 바이오매스의  
연소특성에 관한 연구 (I)  
- 단풍잎, 은행잎, 덩굴, 솔잎에 대해서 -

A Study on the Combustion Characteristics of Biomass using  
Cone-calorimeter (I) : the Case of Maple Leaves,  
Gingko Leaves, Bush, Pine Needles

박병현 · 박덕신\* · 조영민 · 박은영 · 이철규  
한국철도기술연구원 환경·화재연구팀  
(2005년 4월 13일 접수, 2005년 7월 28일 채택)

Byunghyun Park, Duckshin Park\*, Youngmin Cho, Eunyoung Park and Cheulkyu Lee  
*Environment and Fire Control Research Team, Korea Railroad Research Institute*  
(Received 13 April 2005, accepted 28 July 2005)

Abstract

In recent years, concerns have been growing globally regarding greenhouse gases. Open burning of biomass causes emission of a number of greenhouse and other gases and substances. This paper studied an analysis on the characteristics of four types of biomass using duel type cone calorimeter. Cone calorimeter is widely used for assessing combustibility of materials in Europe. As a result, we evaluated several characteristics of biomass, such as heat released rate, smoke production rate, CO, CO<sub>2</sub> production and mass loss rate, and so on. CO<sub>2</sub> is currently responsible for over 60% of the enhanced greenhouse effect, and may be the most important contributor to future. CO<sub>2</sub> production for biomass in the range of 1.74 ~ 1.99 kg/kg is similar to previous research conducted by Bhattacharya *et al.* (2002a).

**Key words** : Biomass, Open burning, Combustion, Cone calorimeter

1. 서 론

최근 교토의정서의 발효로 온실가스에 의한 지구 온난화가 지구 규모의 대기환경에서 심각한 이슈로

대두되고 있다. 실제 지난 백 년 동안 지구의 연평균 기온은 0.3~0.6°C 상승했다(Bernard, 2002). 각종 자료에 따르면 2100년 지구평균기온은 1990년에 비해 약 1.4~5.8°C 정도 상승하고, 이로 인해 각종 이상 기후가 발생할 것으로 예상되고 있다. 산업혁명 이전 만 년 동안 지구대기의 온도가 1°C 이내에서 변화한 것을 고려하면 이 같은 예상은 심각한 수준이다(한

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)31-460-5367, E-mail : dspark@krii.re.kr

국환경정책 · 평가연구원, 2003).

2005년 2월 교토의정서가 본격적으로 발효되면서 온실가스 배출 증가율 세계 1위인 우리나라도 온실가스 감축 의무에서 예외일 수 없다. 세계 각국이 기후변화협약을 맺고 배출량을 감축해야 하는 상황에서 에너지다소비산업과 환경오염산업은 온실가스 저감비용과 생산비 부담이 가장될 것이 분명하다 (환경부, 2001). 현재 화력발전과 같은 에너지산업과 비철 금속, 철강 등 에너지 다소비형 산업에는 온실가스 감축이 원가상승 요인으로 작용해 관련 산업 활동이 위축될 것으로 전망된다.

바이오매스를 소각할 때 발생하는 입자상물질은 지구온난화현상을 유발시키는 원인의 하나로 밝혀진 바 있으며, 자동차나 산업시설에서 배출되는 것보다 더 많은 양을 배출한다고 알려져 있다 (Bernard, 2002). CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs, SF<sub>6</sub>, 대류권 O<sub>3</sub> 등이 대표적인 온실가스이며, 이 중 탄소성분을 함유한 화석연료에서 배출되는 이산화탄소의 감축이 가장 시급한 과제이다. 이산화탄소는 인위적으로 배출되는 전체 온실가스 양의 60% 가량을 차지하며, 산업 활동에 사용되는 석탄, 석유 및 천연가스 등의 화석연료 연소 및 추출, 처리, 수송과정에서 주로 발생된다. 인위적 이산화탄소 배출량의 80~85%가 화석연료의 사용과 소각에 의한 것으로 알려져 있다 (Bhattacharya *et al.*, 1999).

우리나라에서도 바이오매스의 소각에 의한 대기오염이 심각한 수준인 것으로 알려져 있으며 특히, 가로수에서 발생하는 엄청난 양의 낙엽과 가을철 농작물의 수확 후 방치된 잔여물 등은 대부분 수거 후

청소원이나 농부에 의해 노천소각 (opening burning) 되고 있는 실정이다. 최근 쓰레기문제 해결을 위한 시민운동협의회(쓰시협)의 설문조사 결과 농가의 90%가 쓰레기를 소각하고 있으며, 소각장소로는 드럼통, 아궁이, 노천 등으로 나타나 대부분의 소각행위가 불법으로 이루어지고 있음을 알 수 있다 (쓰시협, 2002). 소각시설을 제대로 갖추지 않은 채 무단으로 소각하는 것에 대해 아무런 문제가 없다고 응답한 농민이 무려 68%에 달했다. 또한 86%의 농민은 소각하고 남은 바닥재를 거름으로 밭에 뿌리고 있어 소각문제가 대기오염뿐만 아니라 토양과 작물의 오염에도 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 바이오매스의 불법소각 문제로 인해 지구온난화현상이 가속화 되고 있지만 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았고, 기초자료 또한 부족한 실정이다.

본 연구에서는 실험대상으로 가로수로 많이 사용되는 단풍나무, 은행나무, 소나무에 의한 낙엽과 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 덩불을 선정하여 국내에서 재료의 연소특성평가에 널리 사용되고 있는 콘칼로리미터 (FTT, U.K.)를 사용하여 바이오매스의 연소시 발열량 (heat release rate), 발연량 (smoke production rate), 일산화탄소 발생량 (carbon monoxide concentration), 이산화탄소 발생량 (carbon dioxide concentration), 질량 감소율 (mass loss rate) 등을 대상으로 연소실험을 하였다. 본 논문은 다양한 바이오매스 중 극히 일부 항목에 대한 실험결과를 수록한 것으로서 향후 보다 다양한 물질에 대한 실험을 실시하고, 이들 물질들이 국지규모나 지구규모의 대기환경

Table 1. Summary of biomass burning in literature review.

Sample	CO (kg/kg)	CO <sub>2</sub> (kg/kg)	NOx (g/kg)	SO <sub>2</sub> (kg/kg)	Reference
Wood chip (mm)					
50×50×200	0.0259	1.590	0.112		Bhattacharya <i>et al.</i> (2002a)
50×50×50	0.0259	1.597	0.115		Bhattacharya <i>et al.</i> (2002a)
25×25×50	0.0174	1.605	0.213		Bhattacharya <i>et al.</i> (2002a)
Biofuel					
Wood	0.0325	0.900	1.500		Kituyi <i>et al.</i> (2001)
Wood	0.0002	0.016	0.0001		Bhattacharya <i>et al.</i> (2002b)
Charcoal	0.0050	0.080	0.140		Kituyi <i>et al.</i> (2001)
Charcoal	0.155	2.576	0.0004		Bhattacharya <i>et al.</i> (2002b)
Pesticide					
Cone (50 kW/m <sup>2</sup> )	0.027	0.37	14.0	0.56	Kakko (1995)
Cone (25 kW/m <sup>2</sup> )	0.026	0.60	4.50	0.51	Kakko (1995)

과 온도상승에 얼마나 기여할지에 대한 연구를 계속 해 나갈 예정이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 연구사례

바이오매스의 연소특성에 관한 연구동향을 표 1에 정리하였다. 기존의 연구결과를 요약하면 현재 많은 나라에서 바이오매스를 연료로 사용하고 있으며, 이들 연료는 대부분 불법 소각되고 있는 것으로 조사되었다. 그러므로 배출 가스는 처리되지 않고 이로 인해 엄청난 양의 지구온난화가스가 해마다 별다른 대책 없이 배출되고 있다. 바이오매스의 불법소각에 의한 영향을 파악하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실험대상물질로는 나무와 화석연료가 대부분으로 연구결과 연소 방식에 따라서 지구온난화가스의 배출량에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

### 2.2 콘 칼로리미터 (cone calorimeter)

콘 칼로리미터는 재료의 연소특성을 파악하는데 이용되는 장비이며, 바이오매스의 연소특성을 평가하기 위해서 알아야 할 몇 가지 변수를 다음과 같이 정리하였다(Cho and Han, 2004).

점화시간(TTI, time to ignition, s)은 시료에 불꽃이 붙을 때까지의 시간이며, 발열량(HRR, heat release rate, kW/m<sup>2</sup>)은 식(1)의 단위 면적당 열 방출량을 의미한다.

$$\overline{Q}_A(t) = \overline{Q}(t)/A_s \quad (1)$$

여기서,  $\overline{Q}$ 는 열방출율(kW),  $A_s$ 는 시료의 초기 노출면적(0.0088 m<sup>2</sup>)을 뜻한다. 최대 발열량(pkHRR, kW/m<sup>2</sup>)은 점화에서 최대(peak) 발열량에 이르는 시간  $t_{fp}$ (s)이며, 점화로 부터 60초까지의 평균발열량,  $\overline{Q}_{60}$ (kW/m<sup>2</sup>)은 식(2)를 이용하여 구한다.

$$\overline{Q}_{60} = \frac{1}{60} \int_{TTI}^{TTI+60} Q(t)dt \quad (2)$$

점화로 부터 180초까지의 평균 발열량,  $\overline{Q}_{180}$ (kW/m<sup>2</sup>)은 식(3)을 이용해서 구할 수 있다.

$$\overline{Q}_{180} = \frac{1}{180} \int_{TTI}^{TTI+180} Q(t)dt \quad (3)$$

총 발열량(THR, total heat release, MJ/m<sup>2</sup>)은 식(4)를 이용하여 구한다.

$$THR = \int_0^{\infty} Q(t)dt \quad (4)$$

질량감소율(mL, mass loss; %)은 식(5)를 이용하여 구한다.

$$m_{A,10-90} = \frac{m_{10} - m_{90}}{t_{90} - t_{10}} \cdot \frac{1}{A_s} \quad (5)$$

여기서,  $\Delta m = m_s - m_f$ ,  $m_{10} = m_s - 0.1 \Delta m$ ,  $m_{90} = m_s - 0.9 \Delta m$ 의 관계가 있다. 식(6) 유효 연소열( $\Delta H_c$ , effective heat of combustion, MJ/kg)에서  $m_s$ 는 지속적인 불꽃 연소시의 시료질량을,  $m_f$ 는 실험 종료 시의 시료질량을 의미한다.

$$\Delta H_c = \frac{\Sigma \overline{Q}(t)dt}{m_s - m_f} \quad (6)$$

총 발열량(TSR, total smoke released)은 연기발생율( $S_R$ )을 시간에 따라 적분하여 구할 수 있다.

$$TSR = \int_0^{\infty} S_R dt \quad (7)$$

CO와 CO<sub>2</sub> 발생량(kg/kg)은 시료의 질량감소량과 관계가 있으며, 콘 칼로리미터에 내장된 NDIR(non dispersive infrared) 방식으로 측정된다.

## 3. 실험방법

### 3.1 실험재료

본 연구에서는 단풍잎, 은행잎, 덩굴, 솔잎 등 네 가지 종류의 시료를 사용하였다. 시료는 우리가 일반적으로 주변에서 쉽게 구할 수 있고, 대부분이 불법소각을 통해 처리가 되는 것들로서 가로수에서 떨어진 것을 채취하여 사용하였다. 시료는 분쇄기(TP-6792, Tefal)를 이용하여 5 mm 이하로 분쇄하였으며, 수분의 영향을 최소화하기 위해 105°C 오븐에서 60분간 건조하였다(Bhattacharya et al., 2002a). 시료에 함유된 원소성분에 의해 연소특성이 달라질 것으로 예상

Table. 2 Elemental analysis of the materials used in this study.

(wt.%)

Sample	Moisture	Ash	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur	Oxygen
Maple leaves	17.6	33.6	53.7	6.45	0.91	0.25	35.6
Ginkgo leaves	54.4	39.6	47.6	5.60	0.74	0.34	32.9
Bush	9.8	39.5	43.3	5.40	2.26	0.21	37.4
Pine needles	11.6	41.5	54.9	6.99	0.00	0.00	37.4

되어 Automatic Elemental Analyzer (EA 1110, CE instruments)를 이용하여 각 시료에 대한 원소분석을 실시하여 결과를 표 2에 제시하였다. 표에서 은행잎의 수분함량이 가장 높은 것을 알 수 있고, 덩불의 수분함량이 비교적 낮았다. Bhattacharya *et al.* (2002a)은 바이오매스를 소각할 때 수분함량이 CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>의 발생량에 많은 영향을 미친다고 보고한 바 있다. 회분(ash)의 경우 단풍잎이 33.6%로서 가장 낮았으며, 솔잎이 41.5%로서 가장 높게 조사되어 단풍잎이 네 가지 실험재료 중 가연분의 함유량이 가장 높았다. 여기서 회분의 양은 로에서 태웠을 때의 값이 아니라 콘 칼로리미터에서 50 kW의 온도로 재료를 연소시켰을 때 직접적으로 발생하는 회분의 양이다. 탄소의 함량은 바이오매스를 연소시킬 때 CO와 CO<sub>2</sub>의 발생량과 밀접한 관련이 있으며, 표에서 탄소는 43.3~54.9%의 범위를 보였으며, 덩불이 43.3%로서 최소 값을, 솔잎이 54.9%로 최대 값을 나타냈다.

### 3. 2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 영국 FTT사의 콘 칼로리미터(듀얼 타입)를 사용하여 바이오매스에 의한 CO, CO<sub>2</sub> 발생량, 발열량 및 발연량을 동시에 측정하였다. 실험은 ISO 5660 Part 1 및 Part 2의 방법을 따랐으며, 실험에 사용된 콘 칼로리미터를 그림 1에 제시하였다. 이 장치는 Vytenis Babrauskas (Babrauskas, 1984)가 NIST에서 개발한 bench scale의 산소소모열량계 (oxygen depletion calorimeter)로서, 그림에서 100×100 mm 크기의 샘플에 100 kW/m<sup>2</sup>까지의 복사열을 방출할 수 있는 폭대기가 잘려진 원뿔형의 히터 모양에서 그 이름이 유래되었다.

본 장비는 콘 형태의 복사전기히터, 산소분석장치, 유량측정용 레이저가 부착된 배기 시스템, 시료의 질량을 측정하기 위한 질량 측정장치, 시료 홀더, 스파

크 점화회로, 열량 측정을 위한 heat flux meter, 메탄 열량측정을 위한 버너 및 데이터 수집, 분석시스템, CO와 CO<sub>2</sub> 측정을 위한 NDIR 분석기로 구성된다. 여기서 복사전기히터는 앞서 언급했듯이, 230 V에서 5,000 W의 비율로 100 kW/m<sup>2</sup>까지의 복사열 방출이 가능한 잘려진 원뿔 형태로 되어 있으며, 수평 및 수직실험이 가능하다. 온도 조절을 위해 3개의 K 타입 thermocouple과 30 term (PID) 온도 조절기가 사용된다. 배기시스템은 스텐리스 강으로 제작되었으며, 후드, 가스 샘플링 ring prove, 배기 팬(최소 0.1 g/s의 분해능, 0~50 g/s의 유량조절), orifice plate 유량계 (thermocouple 및 differential pressure transducer)로 구성되어 있다. 그리고 ISO 5660, ASTM E 1354, ASTM E 1474, ASTM E 1740, ASTM F 1550, ASTM D 5485, ASTM D 6113, NFPA 264, CAN ULC 135, BS 476 Part 15를 포함한 국내외 규격을 만족시키고 있다.

본 실험에서는 분쇄한 시료를 고정하기 위해 100×100×36 mm 크기로 제작된 시료홀더를 사용하였다. 시료홀더와 그리드는 모든 시료에 동일하게 적용하였다. 배기 팬은 24 L/s로 고정하였으며, 열분해 가스에 점화하기 위하여 spark igniter를 사용하였다. 실험에 앞서 장비를 최적의 상태로 하기 위해서 몇 가지 작업을 해야 한다. 먼저 콘 칼로리미터에 일정한 전압을 공급하기 위해 UPS (uninterruptible power supply, 무정전전원공급장치)를 연결한다. 안정화 시간을 확보하기 위해 실험 시작 2시간 전에 연기와 O, CO, CO<sub>2</sub> 가스 분석 장비를 켜고, 정확한 분석을 위해서 N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 표준가스를 이용하여 가스 보정을 하고, 동시에 장비내부에 내장되어있는 전자저울을 보정하고, 스모크 측정 시 사용되는 레이저를 보정렌즈를 사용하여 보정한다. 이때, 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해서 배출가스가 통과하는 필터는 반드시 교체한다. 그리고, 메탄가스를 이용해서 열량 측정을 위한 열량 방출 보정을 하며, C factor는 0.04±

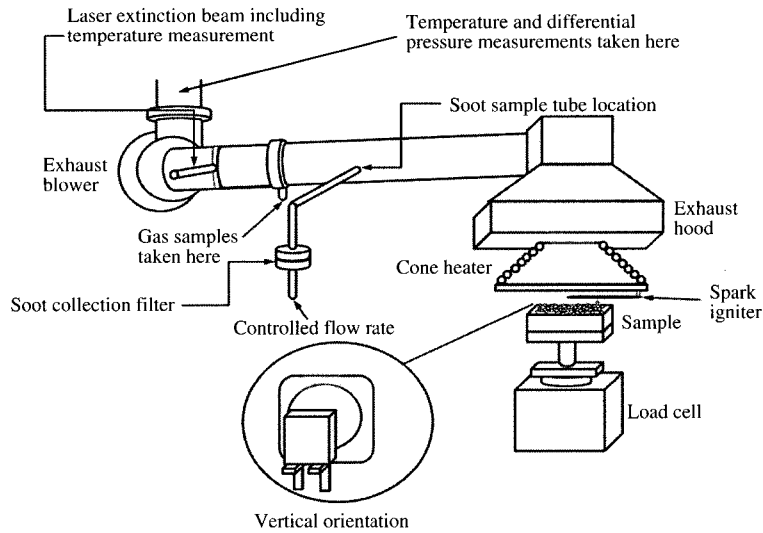


Fig. 1. Schematic diagrams of the cone-calorimeter used in this study.

0.002로 유지한다. 마지막으로 콘의 온도를 높이면서 heat flux를 삽입하여 25 kW에 맞춰준다. Heat flux는 장비제어 프로그램 (cone calorimeter) 상의 irradiance를 통해 확인할 수 있다. 보정이 끝나면 미리 준비한 시료 홀더를 전자저울 위에 설치하고 안전유리를 내린 후 실험을 실시한다. 이때 콘 칼로리미터는 다른 종류의 로와 달리 고온의 히터가 외부에 개방되어 있으므로 더욱 각별한 주의를 요한다.

실험은 시료를 삽입하는 순간, igniter를 넣고 시작 버튼을 누름으로 시작되고 불이 시료에 붙는 순간 igniter를 제거한다. 시료가 소화된 후에는 120초 이상 데이터를 받은 후 flame out 버튼을 눌러 실험을 종료한다. 다음 실험을 위해 홀더를 교체할 때에도 홀더가 고온으로 가열된 상태이므로 안전을 위해서 반드시 보호 장갑을 착용한 후 제거해야 한다.

#### 4. 결과 및 토론

콘 칼로리미터를 이용하여 단풍잎, 은행잎, 덩굴, 솔잎을 대상으로 실험한 결과를 표 3에 제시하였다. 여기서 TTI(s)는 실험시작 시점에서 불꽃이 붙는 순간까지의 시간이며, 실험자가 육안으로 확인하여 기록한 시간 값이다. 네 가지 시료를 50 kW의 heat flux

Table 3. Combustion characteristics of the tested biomass.

Parameter	Materials			
	Maple leaves	Gingko leaves	Bush	Pine needles
Thermal data				
TTI (s)	4	3	3	3
pkHRR (kW/m <sup>2</sup> )	189.9	162.4	172.1	218.4
t <sub>fp</sub> (s)	15	15	15	15
$\bar{Q}_{60}$ (kW/m <sup>2</sup> )	124.3	113.3	111.5	139.6
$\bar{Q}_{180}$ (kW/m <sup>2</sup> )	86.3	84.2	62.0	97.4
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	25.8	25.8	11.5	39.0
mL (%)	4.1	3.4	4.5	3.5
$\Delta H_c$ (MJ/kg)	13.9	15.0	11.6	14.6
Smoke				
TSR (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	74.4	91.0	6.5	61.5
CO yield (kg/kg)	0.0167	0.0253	0.0128	0.0184
CO <sub>2</sub> yield (kg/kg)	1.80	1.99	1.74	1.98

로 연소시킨 결과, 각 시료별 점화시간은 3~4초로서 거의 동일한 값을 보였다. 최대 발열량은 162.4 ~ 218.4 kW/m<sup>2</sup>의 범위로서 다소 차이가 있지만 최대발열량 (pkHRR)에 이르는 시간, t<sub>fp</sub>는 15초로 네 가지 시료가 동일하였다. 솔잎의 경우, t<sub>fp</sub>가 15초 일 때 최대발열량 (pkHRR)이 218.4 kW/m<sup>2</sup>로서 이것은 솔잎의 경우 1 m<sup>2</sup>의 연소면적에 대해서 발열량이

218.4kW 임을 의미한다.

4.1 총발열량 (total heat released; THR)

그림 2는 연소시 네 가지 바이오매스에서 방출되는 발열량을 나타낸 것이다. 그림에서 초기 발열량의 경우 솔잎>단풍>덤불>은행잎의 순서를 보였다. 솔잎의 경우 앞서 표 2에서 언급한 바와 같이 원소분석 결과 열원이라고 할 수 있는 탄소의 함량이 다른 시료보다 많아서 발열량이 높은 것으로 사료된다. 발열량(heat release rate; HRR)은 바이오매스가 연소될 때 소비되는 산소의 량을 측정하여 발열량의 역으로 계산한 것으로 일반적으로 연소시 산소 1kg당 13 MJ 가량의 열이 방출된다고 가정한다. 최대발열량(pkHRR)은 162.4~218.4kW/m<sup>2</sup>의 범위를 보였으며, 최대 발열량에 이르는 시간 t<sub>ip</sub>는 네 가지 시료가 동일하게 15초였지만 솔잎의 최대 발열량이 218.4 kW/m<sup>2</sup>로서 은행잎 보다 34% 가량 높게 나타났다. 솔잎을 제외한 나머지 세 가지 항목의 바이오매스의

최대 발생량은 거의 비슷한 수준이었다. 총발열량 (THR)은 바이오매스가 연소될 때 방출된 발열량의 합으로서 11.5~39.0MJ/m<sup>2</sup>의 범위를 보여 바이오매스에 따라 총발열량에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 솔잎의 경우 총발열량이 39.0 MJ/m<sup>2</sup>으로 11.5MJ/m<sup>2</sup>인 덩불의 3.4배가량 높은 값을 보였다.

실험 후 60분이 경과되었을 때의 발열량( $\overline{Q}_{60}$ )과 180분이 경과되었을 때의 발열량( $\overline{Q}_{180}$ )을 비교해보면 시간이 경과 할수록 발열량의 차이가 커졌고 초기 발열량이 가장 높았던 솔잎의 경우  $\overline{Q}_{60}$ (139.6 kW/m<sup>2</sup>)에서  $\overline{Q}_{180}$ (97.4 kW/m<sup>2</sup>)로 연소 후 1분이 경과한 시점에서 다시 2분이 경과했을 때 발열량이 30% 가량 감소하였다. 초기 발열량이 가장 낮았던 은행잎의 경우  $\overline{Q}_{60}$ 은 113.3 kW/m<sup>2</sup>이었지만  $\overline{Q}_{180}$ 은 84.2 kW/m<sup>2</sup>으로 25%의 발열량 감소율 추세를 보여서, 연소 온도의 지속성은 은행잎이 다른 세 가지의 바이오매스 보다 높은 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

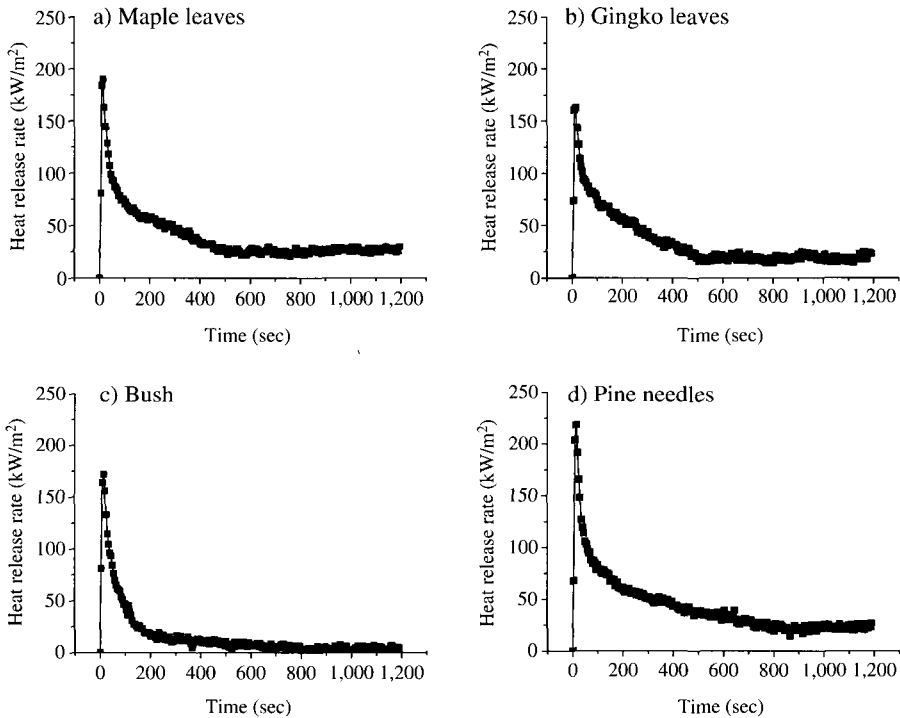


Fig. 2. Heat release rates of the tested biomass.

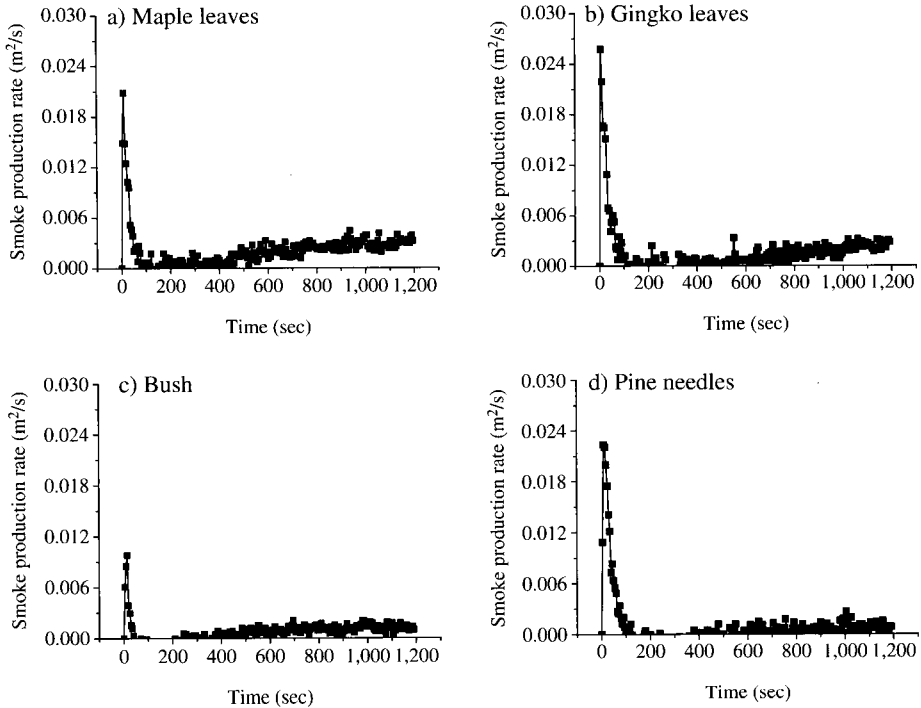


Fig. 3. Smoke production rates of the tested biomass.

4. 2 총 연기발생량 (total smoke released; TSR)

그림 3은 실험대상 바이오매스에서의 연기 발생량을 그래프로 도시한 것이다. 그림에서 은행잎>단풍잎>솔잎>덤불의 순으로 연기 발생량이 높은 것을 알 수 있다. 원소분석을 실시하기 전 시료에 함유된 수분함량을 최소화하기 위해 105°C 오븐에서 60분간 건조했지만 은행잎의 수분 함량이 54.4%로서 단풍잎(17.6%), 솔잎(11.6%), 덩불(9.8%)보다 월등히 높기 때문에 연기 발생량에 차이가 나는 것으로 사료되며, 연기 발생량의 경우 수분 함량과 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다.

바이오매스 연소시 발생하는 연기의 양은 식(8)의 Bougure’s law를 이용하여 계산하며, 연기방출량은 소멸상수(extinction constant)와 유량을 이용하여 계산할 수 있다(ISO TR 5660-2). 표 3에서 총 연기발생량은 6.5~91.0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>의 범위를 보였으며, 은행잎이 가장 높은 91.0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, 덩불이 가장 낮은 6.5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로 나타났다. 덩불의 경우 연소시 다른 바이오매

스와 비교했을 때 거의 연기가 발생하지 않았으며, 발화에서 완전 연소까지 걸리는 시간이 상대적으로 짧았다. 은행잎의 경우 연기 발생량이 91.0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로서 연소시 덩불보다 14배가량 많은 연기가 발생하는 것으로 나타났다. 은행잎은 최대 발열량이 네 가지 바이오매스 중 가장 낮았지만 연기 발생량은 가장 많아서 서로 상반되는 결과를 보였다. 은행잎뿐만 아니라 단풍잎도 연소 종료시점에 가까워질수록 연기의 발생이 증가하는 경향을 보였다.

$$I = I_0 \exp(-\tau) \tag{8}$$

여기서, I<sub>0</sub>=입사 복사선의 세기, I=투과 복사선의 세기, τ=투과거리를 의미한다.

4. 3 CO 발생량 (carbon monoxide concentration)

그림 4에 바이오매스의 연소시 발생하는 CO의 농도를 나타내었다. CO는 NDIR 방법으로 측정되며, 표 3에서 CO의 발생량(kr/kr)은 0.0128~0.0253의 범위

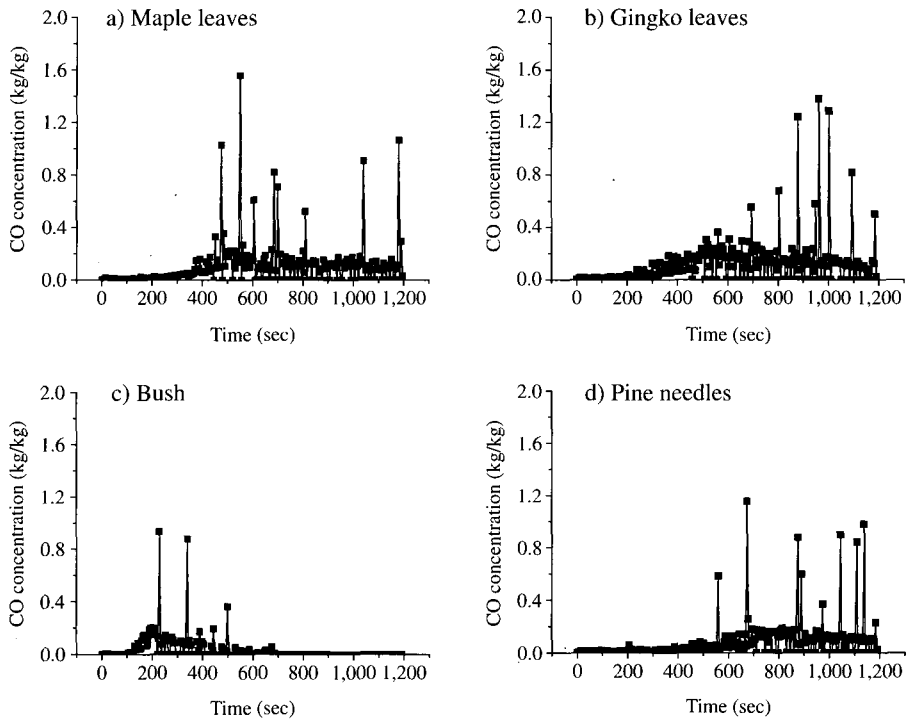


Fig. 4. Carbon monoxide concentrations of the tested biomass.

를 보였다. 연소시 덩불의 CO 발생량이 0.0128 kg/kg 으로서 가장 적었으며, 은행잎의 경우 0.0253 kg/kg 으로 연소시 덩불보다 두 배 가량 많은 양의 CO를 방출하는 것으로 나타났다. 덩불의 경우 다른 바이오 매스에 비해 총 연기발생량도 현저히 적었으며, 연소 시간 역시 상대적으로 적었다. 이에 비해 단풍잎, 솔 잎, 은행잎은 연소초기인 200초까지는 CO가 거의 발생하지 않다가 300초가 지난 시점에서 발생하여 실험이 끝날 때 까지 지속적으로 CO가 발생하였다. 표 3에서 연기 발생량이 가장 많은 은행잎에서 CO의 발생도 많았고, 연기 발생량이 가장 적은 덩불의 CO 발생량이 전체 바이오매스 중 가장 적은 결과를 보여 연기발생량과 CO와의 사이에 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되었다.

#### 4. 4 CO<sub>2</sub> 발생량 (carbon dioxide concentration)

그림 5에 각 바이오매스에서의 CO<sub>2</sub> 발생량을 그래프로 도시하였다. CO<sub>2</sub> 역시 CO와 마찬가지로

NDIR analyzer를 이용하여 측정하였다. 그림 5와 표 3에서 CO<sub>2</sub> 발생량(kg/kg)은 1.74~1.99의 범위를 보였으며, 덩불에서 1.74 kg/kg로 발생량이 가장 적었고, 은행잎에서 1.99 kg/kg로 가장 많은 발생량을 나타냈다. CO<sub>2</sub>의 경우 CO에 비해 각 물질별 차이가 적었으며, CO 발생량이 가장 많은 은행잎에서 CO<sub>2</sub> 역시 높은 값을 보였으며, CO 발생량이 가장 적은 덩불이 CO<sub>2</sub>의 발생량도 적어서 CO와 마찬가지로 CO<sub>2</sub> 발생량의 경우 연기 발생량과 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다. 솔잎의 경우 초기 CO<sub>2</sub> 발생량이 가장 높았는데 이는 솔잎의 초기 발열량이 가장 높았을 뿐만 아니라, 표 2에서 원소분석 결과 물질 내의 탄소 함유량이 54.9%로서 다른 바이오매스 보다 높기 때문으로 판단된다.

#### 4. 5 질량 감소율 (mass loss rate; MLR)

각 바이오매스별 질량 감소율(m<sub>L</sub>, %)을 그림 6에 나타내었다. 그림 6과 표 3에서 질량 감소율은 3.4~4.5%의 범위였으며, 덩불이 4.5%로 가장 높았고, 솔



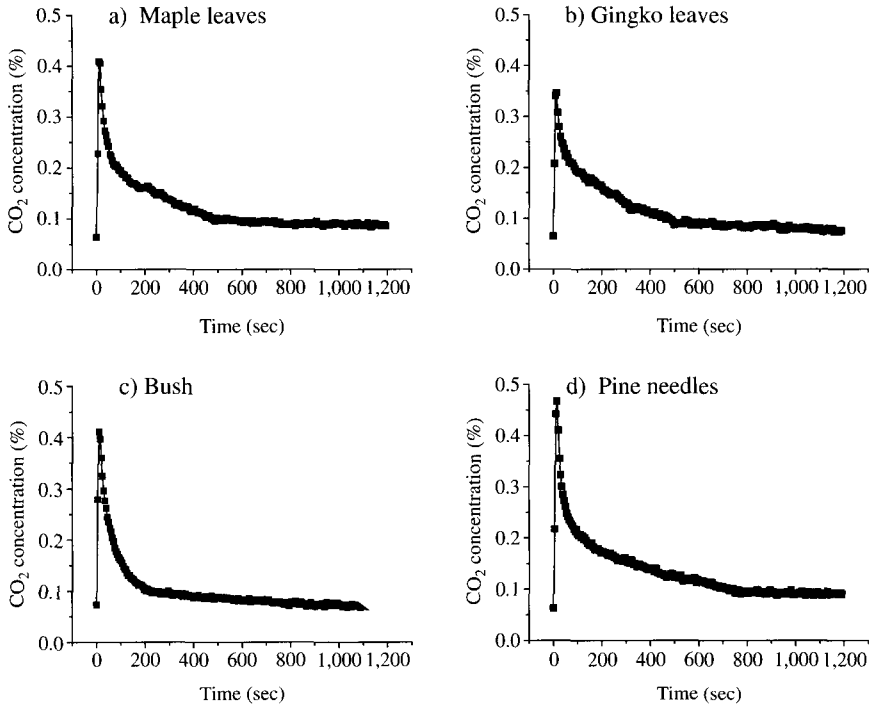


Fig. 5. Carbon dioxide concentrations of the tested biomass.

잎과 은행잎은 각각 3.4%와 3.5%로 비슷한 수준인 것으로 분석되었다. 실험을 통해 50 kW의 연소조건에서 1,200초 동안 연소하였을 때, 네 가지 바이오매스 중 덩불이 가장 많은 가연분을 포함하고 있었으며, 은행잎과 솔잎은 회분 함량이 가장 많았다. 또한, 질량 감소율이 높다는 것은 단 시간에 모든 가연분이 소멸되는 것을 의미하며, 실험을 통해 솔잎과 은행잎의 연소 지속시간이 덩불, 단풍잎 보다 길다는 것을 확인할 수 있었다. 질량 감소율 실험에서 특이할 사항은 바이오매스의 구조와 질량 변화 사이의 연관성이다. 덩불의 경우 질량 감소율이 가장 높았는데 그 원인을 바이오매스의 구조에서 찾을 수 있으며, 분쇄기로 시료를 분쇄하더라도 마치 실처럼 뭉쳐져서 다른 바이오매스에 비해 공극이 크게 존재함을 확인할 수 있었고, 은행잎과 솔잎의 경우 거의 빈공간이 없을 정도로 매우 조밀하게 형성되어 있었다. 또한, 유효연소열,  $\Delta H_c$ 의 경우에도 덩불이 11.6 MJ/kg인 것에 비해 은행잎의 경우 15.0 MJ/kg으로 질량감소율이 낮을수록 연소 지속시간이 길고 그로 인해

유효연소열이 높은 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

국내외에서 가연 재료의 연소성 평가에 널리 쓰이는 큰 칼로리미터를 이용하여 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 바이오매스 중 단풍잎, 은행잎, 솔잎, 덩불 등을 대상으로 발열량, 연기발생량, CO, CO<sub>2</sub> 발생량, 질량감소율 등에 대한 연소특성을 파악하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

최대발열량에 이르는 시간은 네 가지 시료가 모두 동일했지만, 솔잎의 경우 최단시간에 218.3 kW/m<sup>2</sup>까지 발열량이 증가했으며, 연소온도 역시 가장 오랫동안 지속되었다. 은행잎의 경우 초기발열량이 가장 낮았으며, 덩불은 초기발열량에 대해 연소지속시간이 가장 적은 것으로 나타났다. 덩불의 경우 연소시 연기의 발생량이 가장 적었으며, 이런 현상은 덩불 시

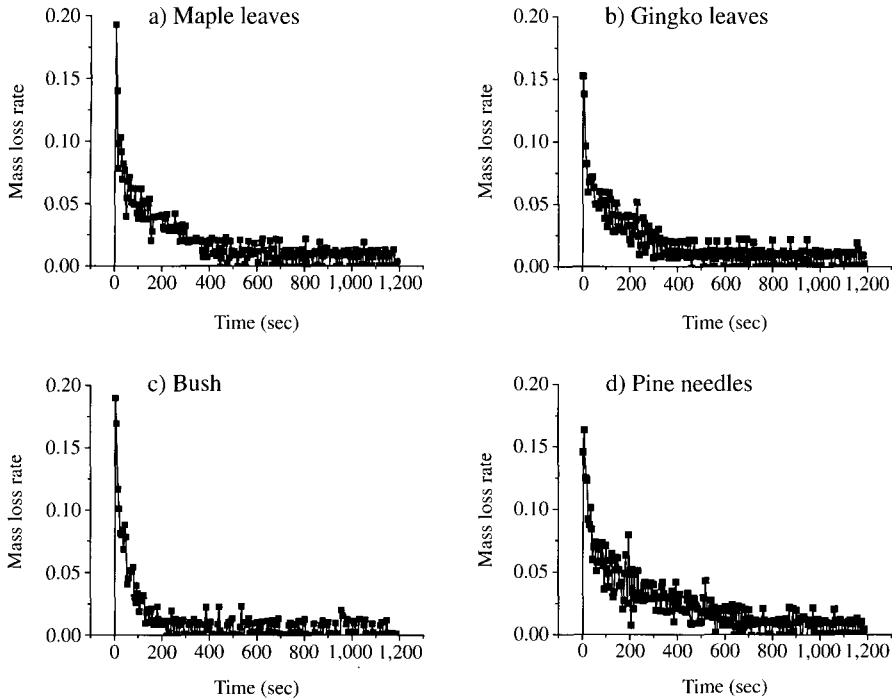


Fig. 6. Mass loss rates of the tested biomass.

료에 공극이 많아 화염에 노출되는 표면적이 넓기 때문에 쉽게 연소하기 때문에 사료된다. 반면 은행잎의 경우 점화 전 · 후에 가장 많은 연기가 발생했고, 소화된 후에도 계속해서 연기가 발생하였다. 네 가지 시료의 연기발생량은 은행잎 > 단풍잎 > 솔잎 > 덩불의 순으로 높게 나타났으며, 이것은 보다 심도 있는 연구가 필요하지만 본 연구에서 수행한 원소분석 결과, 은행잎(54.4%), 단풍잎(17.6%), 솔잎(11.6%), 덩불(9.8%)의 수분함량과 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다.

CO 발생량은 덩불에서 0.0128 kg/kg으로 가장 적었고, 은행잎에서 0.0253 kg/kg으로 덩불의 두 배 가까운 양의 CO가 발생되어 실험 대상 시료중 가장 큰 CO 발생원인을 확인 할 수 있었다. 이 값은 Bhattacharya *et al.* (2002a)의 연구에서 wood chip을 대상으로 한 실험결과인 0.0174~0.0259 kg/kg와 거의 유사한 결과였다. 지구 온난화에 가장 큰 영향을 미치는 CO<sub>2</sub>의 경우 네 가지 바이오매스에서 거의 비슷한 수준인 1.74~1.99 kg/kg으로 배출되었으며, 이는 CO와 마찬가지로 Bhattacharya *et al.* (2002a)의

연구결과인 CO<sub>2</sub> 발생량 1.59~1.605 kg/kg과 거의 유사한 결과라고 판단된다. 솔잎과 단풍잎의 탄소함량은 각각 54.9, 53.7%로서 덩불보다 10~11% 가량 높은 것으로 나타나 CO<sub>2</sub> 발생량은 바이오매스에 함유된 탄소의 함량과도 관련이 있다고 사료된다. 질량 감소율은 덩불이 가장 높았으며, 솔잎과 은행잎은 상대적으로 적어서 연소가 서서히 진행되는 것으로 나타났다. 이는 바이오매스의 구조에서 그 원인을 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 유효연소열에서도 덩불의 경우 11.6 MJ/kg로서 은행잎의 15.0 MJ/kg보다 낮아 질량감소율이 낮을수록 연소 지속시간이 길고, 유효연소열이 높다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 불법소각의 주요 배출원인 바이오매스 중 몇 가지를 선정하여 연소특성과 지구온난화의 주요원인물질인 CO<sub>2</sub>의 발생량에 대하여 언급하였다. 본 논문은 다양한 바이오매스 중 극히 일부 항목에 대한 실험 결과를 수록한 것으로서 향후 보다 다양한 물질에 대한 실험을 실시하고, 이들 물질들이 국지규모나 지구규모의 대기환경과 온도상승에 얼마

나 기여할지에 대한 연구를 계속해 나갈 예정이다.

### 참 고 문 헌

- 교토 의정서의 관련 국제 동향 및 향후 전망(2001) 환경부 국제협력관실.
- 기후변화대응 환경부문 종합계획수립(최종보고서)(2003) 한국환경정책·평가연구원.
- 농촌지역 폐기물 관리현황 실태조사(2002. 10) 쓰레기 문제 해결을 위한 시민운동협의회.
- Babrauskas, V. (1984) Development of the cone calorimeter—a bench scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire and Materials*, 8, 81–95.
- Bassilakis, R., R.M. Carangelo, and M.A. Wojtowicz (2001) TG-FTIR analysis of biomass pyrolysis, *Fuel*, 80, 1765–1789.
- Bernd, R.T.S. (2002) Biomass burning—a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion, *Applied Geochemistry*, 17, 129–162.
- Bhattacharya, S.C., D.O. Albina, and A.M. Khang (2002a) Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves, *Biomass and Bioenergy*, 23, 387–395.
- Bhattacharya, S.C., D.O. Albina, and A.P. Salam (2002b) Emission factors of wood and charcoal-fired cookstoves, *Biomass and Bioenergy*, 23, 453–469.
- Bhattacharya, S.C., M.A. Joe, Z. Kandhekar, P.A. Salam, and R.M. Shrestha (1999) Greenhouse-gas emission mitigation from the use of agricultural residues: the case of ricehusk, *Energy*, 24, 43–59.
- Chow, W.K. and S.S. Han (2004) Studies on fire behavior of video compact disc (VCD) materials with a cone calorimeter, *Polymer testing*, 23, 685–694.
- De Jong, W., A. Pirone, and M.A. Wojtowicz (2003) Pyrolysis of miscanthus giganteus and wood pellets, *Fuel*, 82, 1139–1147.
- Haykiri, A.H. (2003) Combustion characteristics of different biomass materials, *Energy conversion & Management*, 44, 155–162.
- ISO/TR 5660-2, Reaction-to-fire tests—heat release, smoke production and mass loss rate—Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement).
- ISO/TR 5660-3, Reaction-to-fire tests—heat release, smoke production and mass loss rate—Part 3: Guidance on measurement.
- Kakko, R., V. Christiansen, E. Mikkola, and R. Kallonen (1995) Toxic combustion products three pesticides, *J. Loss Prev. Process Ind*, 8(2), 127–132.
- Kituyi, E., L. Marufu, S.O. Wandiga, I.O. Jimba, M.O. Andrae, and G. Helas (2001) Carbon monoxide and nitric oxide from biofuel fires in Kenya, *Energy conversion & Management*, 42, 1517–1542.
- KS F ISO 5660-1, 연소 성능 시험-열 방출, 연기발생, 질량 감소율-제1부 : 열방출률(콘칼로리미터법).