

임내 낙엽층의 연소 방출가스 분석 및 건강 위험성 평가

김동현 · 이명보

국립산림과학원 산불연구과

Combustion Emission Gas Analysis & Hazard Assessment to the Litter Layer in Forest

Kim, Dong Hyun · Lee, Myung Bo

Div. of Forest Fire Research, KFRI

요 약

본 연구에서는 우리나라 주요 침엽수종인 소나무(*Pinus densiflora*)와 활엽수종인 굴참나무(*Quercus variabilis*)의 낙엽에 대해 FTIR(Fourier Transform Infrared) 분광계를 이용하여 배출 연소가스 종류 및 농도를 측정하였다. 실험결과 소나무와 굴참나무 낙엽에서 Carbon monoxide, Carbon dioxide, Acetic acid, Butyl acetate, Ethylene, Methane, Methanol, Nitrogen dioxide, Ammonia, Hydrogen Fluoride, Sulfur dioxide, Hydrogen bromide 등 13개 연소가스가 검출되었고 굴참나무 낙엽에서는 Nitrogen monoxide가 추가로 검출되었다. 방출된 연소가스의 전체 농도는 소나무 낙엽이 굴참나무 낙엽에 비해 4.5 배 많이 검출되었다. 특히, 시간가중평균가스농도(TWA : Time-weighted average, ppm) 기준을 초과하는 연소가스는 Carbon monoxide, Carbon dioxide, Butyl acetate가 검출되었고 단시간노출기준(STEL : Short Term Exposure Limit, ppm) 기준을 초과하는 연소가스는 Carbon monoxide, Carbon dioxide로 소나무 및 굴참나무 모두에서 나타났다. 이에 산불에서의 낙엽층 지표화 연소시 전체 가스 방출량의 99% 이상을 차지하고 있는 Carbon monoxide, Carbon dioxide의 건강 위험성이 높은 것으로 나타났다. 하지만, 검출된 다른 건강 위험성 가스의 경우에도 연소물질의 양이 증가할수록 연소가스의 농도가 높아져 건강안정성에 해가 있을 것으로 판단되며 또한 검출된 연소가스 중 나무의 주요구성 원소가 아닌 Bromide, Fluoride 화합물에 대해서는 토양으로부터의 오염 또는 분석과정에서의 노이즈로 인한 검출 등에 대한 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

1. 서 론

우리나라는 최근 10년 평균(1999~2008) 약 497건의 산불 발생으로 인해 표 1과 같이 약 3,600ha의 산림피해와 인명피해가 발생되고 있다. 특히 대부분의 인명피해는 연기 질식에 의한 것으로 농촌 고령자의 연기 질식에 의한 사망 및 부상 사례가 매년 발생되고 있

다. 외국의 경우, 80만 ha의 산림피해와 251명의 사망자를 기록한 1997년 7월 인도네시아 칼리만탄 산불(Kalimantan Fire)로 발생한 연무로 인해 인접 7개국으로 이동되어 도시형 대기오염과 겹쳐져 주민에게 호흡곤란 등을 일으켜 7,000 만명의 환자와 2,000 만명의 입원환자가 발생하였고 이중 17명의 사망자가 발생하였으며 연무로 인한 시계감소로 항공기가 추락하여 234명의 사망자를 발생시켰다.⁹⁾ 극동러시아에서도 매년 산불로 발생하는 연무로 인해 연기 질식 및 호흡기 질환자가 증가하는 것으로 보고되어지고 있다. 그림 1은 2008년 3월 11일 극동러시아 산불발생으로 인한 연무위성영상 및 러시아 Khabarovsk시의 공기오염에 대해 보여주고 있다. 이에 본 연구에서는 FTIR(Fourier Transform Infrared) 분광계를 이용하여 산림내 낙엽연소시 발생하는 연소가스에 대해 정량·정성 분석을 통해 위험성을 평가하고자 하였다.

표 1. 연도별 산불발생 및 피해현황(출처: 2008년 산림청 산불발생 통계연보)

연도		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	연평균
현황	발생건수(건)	315	729	785	599	271	544	516	405	418	389	497
	피해면적(ha)	473	25,607	963	4,467	133	1,588	2,067	254	230	227	3600
인명 피해	사망	5	13	13	12	9	10	10	4	9	6	13
	부상	-	17	7	7	-	1	-	1	-	-	4
	계	5	30	20	19	9	11	10	5	9	6	17



그림 1. 극동러시아 산불 연무 Modis Aqua 위성영상(2008. 3. 11) 및 러시아 Khabarovsk 연무 공기오염 사진(자료출처: Global Fire Monitoring Center 및 Pacific Forest Forum)

2. 연구 방법 및 결과

본 논문에서는 우리나라 침·활엽수 대표수종인 소나무, 굴참나무의 낙엽에 대해 연소가스 분석을 실시하였으며 실험방법은 표 2와 같이 건조한 시기의 낙엽함수율 15±2%의 낙엽을 ISO착화성 시험기에 20kW/m²의 복사열에 의한 자연발화 조건으로 연소가 지속적인

로 일어나는 시간동안 10 l/min의 유입속도로 측정하였다. 적외선 분광계의 특정 실험방법은 아래 2.1항과 같다.

표 2. 낙엽의 연소가스 분석 실험 방법

구 분	공시재료		착화조건	흡입유량 (l/min)
	낙엽	낙엽함수율		
내 용	소나무, 굴참나무	15±2%	복사열 자연발화 (20kW/m ²)	10

2.1 적외선분광계 실험방법

연소가스 성분 및 농도분석을 위해 적외선분광계 실험방법은 정밀한 측정을 위해 먼저 FTIR기기 분석 장치 내부의 오염제거를 위하여 Dry Nitrogen gas 및 Liquid Nitrogen gas로 Purging 및 cooling 등의 Purging 초기화 과정을 실시하였다. 이때 대기압 조건은 1기압 상태인 17.7psi조건으로 초기화하였다. 이 과정은 FTIR의 background를 그림 2와 같이 나타나야지만 분석하고자 하는 가스성분에 대한 Noise 및 기타 오염에 대한 문제를 해결할 수 있다. 이러한 Background가 준비가 되면 Rsb(Reference single beam)의 상태를 FT-IR기기와 연결된 분석컴퓨터로 확인하여 수분 및 이산화탄소가 깨끗이 제거 된 상태에서 실험을 실시하였다. 수종 낙엽 부위를 연소가스 성분 및 농도를 측정하는 검출기인 Cell-body에 유입될 수 있도록 실험시 Inlet부분을 개방하여 낙엽연소 가스가 Cell-body Inlet부분으로 유입되고 다시 Cell-body의 outlet부분으로 방출되도록 하였다.

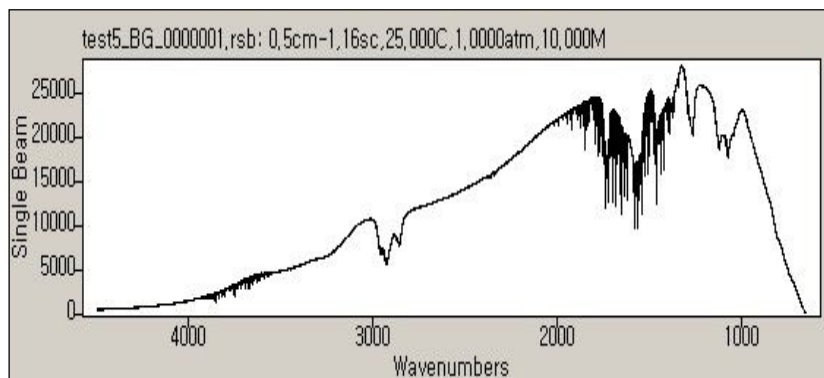


그림 2. 적외선분광계 초기화 Background 파장대

그림 2의 적외선분광계 가스검출 파장대 스펙트럼에서 각각의 가스종이 가지는 고유 파장대를 비교하여 실험으로 검출된 가스의 종이 무엇인지 정성분석을 실시한다. 여기서 그림 3은 여러 검출가스종의 흡수파장대 중에서 이산화탄소와 일산화탄소에 대한 스펙트럼으로 이산화탄소 및 일산화탄소의 Baseline Spectrum범위는 각각 3659.725 ~ 3759.137, 2034.691 ~ 2412.331 이다. 여기서 파장대의 좌변축은 흡수량을 나타낸다.

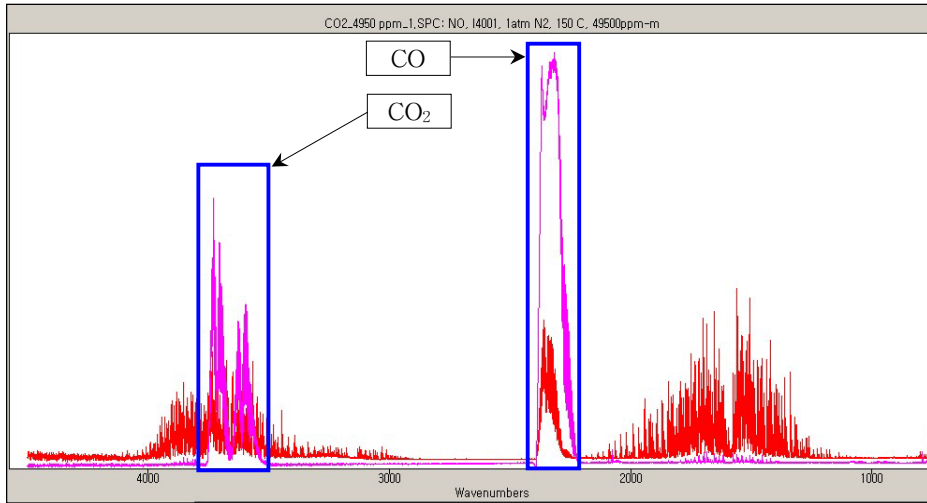


그림 3. CO₂, CO 연소가스 검출 스펙트럼

검출된 연소가스의 정성분석을 위해 FTIR분석기의 가스종류별 흡수 파장대 library와 Bands Classification을 이용하였고 정량분석을 위해서는 검출된 농도를 식 1에 의해 방출량을 산정하였다. 여기서 방출량 계산은 표준상태(STP : Standard Temperature and Pressure)조건으로 산정하였다.

$$Q_s = C \times V_g \times t_b \times A \quad 1)$$

여기서, Q_s 는 연소가스량(g), C 는 가스방출농도(mg/ℓ), V_g 는 적외선분광계 흡입가스 유량(ℓ/min), t_b 는 가스측정연소시간(sec), A 는 단위환산계수이다.

2.2 연소낙엽의 검출 가스종 및 농도

소나무와 굴참나무 낙엽의 연소시 검출된 가스는 Carbon monoxide, Carbon dioxide, Acetic acid, Butyl acetate, Ethylene, Methane, Methanol, Nitrogen dioxide, Ammonia, Hydrogen Fluoride, Sulfur dioxide, Hydrogen bromide 등 13종이 검출되었고 굴참나무 낙엽에서는 Nitrogen monoxide가 추가로 검출되었다. 소나무 낙엽연소시 검출된 13종의 가스농도 분석결과 이산화탄소가 약 90%로 가장 많이 검출되었고 일산화탄소가 약 9.5%로 검출되었고 굴참나무 낙엽연소시 검출된 14종의 가스 농도분석 결과 이산화탄소가 약 89%로 가장 많이 검출되었고 일산화탄소가 약 10%로 검출되어 탄소복합체로 구성된 셀룰로오스의 연소시 이산화탄소와 일산화탄소의 연소가스가 각각 전체 방출가스의 99.5%, 99.3%를 차지하였다. 여기서 식 1에 의해 산출된 방출된 연소가스의 전체량은 소나무 낙엽이 굴참나무 낙엽에 비해 4.5배 많이 검출되었다.

표 3. 소나무, 굴참나무 낙엽연소시 검출가스, 농도 및 배출량

구분 시료	검출 연소가스	Carbon monoxide	Carbon dioxide	Acetic Acid	Butyl acetate	Ethylene	Methane	Nitrogen dioxide
소나무 낙엽	농도(ppm)	3493.85	33225.122	57.591	25.603	21.822	21.057	20.403
	배출량(g)	174.71	1690.8	2.93	1.3	1.11	1.08	1.04
굴참나무 낙엽	농도(ppm)	850.106	7339.321	18.69	6.292	5.434	5.239	6.42
	배출량(g)	18.08	156.09	0.39	0.13	0.12	0.11	0.14
구분 시료	검출 연소가스	Ammonia	Hydrogen fluoride	Sulfur dioxide	Hydrogen bromide	Methanol	Hydrogen chloride	Nitrogen monoxide
소나무 낙엽	농도(ppm)	14.373	8.539	6.845	6.567	5.562	2.467	None
	배출량(g)	0.73	0.43	0.35	0.33	0.29	0.12	None
굴참나무 낙엽	농도(ppm)	4.894	0.626	2.303	3.489	2.571	0.689	1.484
	배출량(g)	0.1	0.02	0.05	0.08	0.05	0.02	0.03

2.3 건강위험성 평가

소나무와 굴참나무 낙엽의 연소시 발생하는 14종 검출가스에 대한 건강위험성 평가는 물질안전보건자료(MSDS : Material Safety Data Sheets)에서 제공하는 노출기준 및 건강위험성 보고에 기재된 사항을 토대로 평가 하였다. 그 결과 표 4와 같이 10개 가스종에 대한 건강위험성을 조사하였다. 이 중 대부분의 검출된 연소가스는 호흡곤란과 질식을 유발하고 혈액의 산소공급을 저해하는 혈액이상 증세를 나타내는 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄가스가 확인되었고 신경이상 및 눈자극 증세를 발생시킬 수 있는 염화수소, 메탄올, 이산화질소가 확인되었다. 특히 연소가스의 99%이상을 배출하는 이산화탄소, 일산화탄소에서 TWA, STEL 농도기준을 모두 초과하는 것으로 나타났다.

표 4. 검출 연소가스의 노출기준 및 건강위험성^{6),7),8)}

연소가스	노출기준 및 건강위험성	
Carbon monoxide	노출기준	TWA:50ppm, STEL:400ppm
	건강위험성	혈액이상, 호흡곤란, 질식
Carbon dioxide	노출기준	TWA:5,000ppm, STEL:30,000ppm
	건강위험성	혈액이상, 호흡곤란, 질식
Hydrogen chloride	노출기준	TWA:200ppm, STEL:250ppm
	건강위험성	피부자극, 눈 자극, 중추신경계통 억제, 신경이상
Sulfur dioxide	노출기준	TWA: 1mg , STEL: - ppm
	건강위험성	삼키면 유해, 호흡기도 자극, 눈 자극, 알레르기반응, 발암
Ammonia	노출기준	노출기준이 제정되어 있지 않음.
	건강위험성	표적장기에 주요 영향이 보고된 바 없음.
Methane	노출기준	노출기준이 제정되어 있지 않음
	건강위험성	혈액이상, 호흡곤란, 단순질식
Acetic acid	노출기준	TWA:150ppm, STEL:187ppm
	건강위험성	피부자극 및 알레르기, 눈자극, 신장 및 간 이상
Methanol	노출기준	TWA:10ppm, STEL:35ppm
	건강위험성	피부자극, 눈 자극, 중추신경계통 억제, 신경이상
Nitrogen	노출기준	TWA:100ppm, STEL:150ppm

dioxide	건강위험성	호흡기도 자극, 피부 자극, 눈 자극, 흡인위험, 중추신경계통 억제, 동물실험결과 발암성위험물질
Ethylene	노출기준	노출기준이 제정되어 있지 않음.
	건강위험성	표적장기에 주요 영향이 보고된 바 없음.

3. 결 론

우리나라 주요 침엽수종인 소나무(*Pinus densiflora*)와 활엽수종인 굴참나무(*Quercus variabilis*)의 낙엽에 대해 연소가스 종류 및 농도를 측정 및 건강위험성을 평가한 결론은 다음과 같다.

1. 소나무와 굴참나무 낙엽에서 Carbon monoxide, Carbon dioxide, Acetic acid, Butyl acetate, Ethylene, Methane, Methanol, Nitrogen dioxide, Ammonia, Hydrogen Fluoride, Sulfur dioxide, Hydrogen bromide 등 13개 연소가스가 검출되었고 굴참나무 낙엽에서는 Nitrogen monoxide가 추가로 검출되었다.

2. 방출된 연소가스의 전체 농도는 소나무 낙엽이 굴참나무 낙엽에 비해 4.5배 많이 검출되어 산불 발생시 연무에 의한 건강위험성이 더욱 높다고 볼 수 있다.

3. 시간가중평균가스농도와 단시간노출기준을 초과하는 연소 가스는 Carbon monoxide, Carbon dioxide가 검출되었고 소나무 및 굴참나무 모두에서 나타났다.

4. 이에 산불에서의 낙엽층 지표화 연소시 전체 가스 방출량의 99% 이상을 차지하고 있는 Carbon monoxide, Carbon dioxide의 건강 위험성이 높은 것으로 나타났다.

5. 하지만 검출된 다른 건강 위험성 가스의 경우에도 연소물질의 양이 증가할수록 연소가스의 농도가 높아져 건강안정성에 해가 있을 것으로 판단된다.

검출된 연소가스 중 나무의 주요구성 원소가 아닌 Bromide, Fluoride 화합물에 대해서는 향후, 토양으로부터의 오염 또는 분석과정에서의 노이즈로 인한 검출 등에 대한 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김동현, 김태구, 김광일(2001). “산림화재종합위험등급화에 관한 연구” 한국화재소방학회 논문지, Vol.15, No. 3, pp.49-54.
2. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영(2006). “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 2006 한국방재학회 학술발표대회 논문집, pp379-384.
3. Dong Hyun Kim, "Forest Fire Risk Assessment through Analyzing Ignition Characteristics of Forest Fuel Bed", V International Conference on Forest Fire Research, pp.30-31(2006)
4. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현(2007). “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회논문지, Vol.21., No.3, pp.33-41.
5. 김장환, 김응식, 박형주, 이명보, 김동현(2008). “지표화 연료의 열량분석에 관한 실험방법 연구”, 한국화재소방학회논문지. Vol.22, No.3. pp.258-264

6. 물질안전보건자료(MSDS : Material Safety Data Sheets), (2009). 산업안전관리공단.
7. American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), (2009), "TLV (Threshold Limit Value) of MSDS".
8. Occupational Safety and Health Administration(OSHA), (2009). "PEL(Permissible Exposure Limit) of MSDS".
9. AP로이터 통신(2005), "동남아 연무대란 또 오나", 신문스크랩.