

소나무류 수관층 및 지표층의 CO₂/non-CO₂ 배출량 분석 연구

박영주 · 이해평* · 백창선*

강원대학교 소방방재학부 · *한국소방산업기술원
(2014. 11. 5. 접수 / 2014. 12. 10. 수정 / 2015. 1. 6. 채택)

A Study on the Emissions of CO₂/non-CO₂ for the Crown Layer and Surface Layer of Pine Trees

Young Ju Park · Hae Pyeong Lee* · Chang Sun Baek*

Department of Fire & Management, Kangwon National University · *Korea Fire Institute
(Received November 5, 2014 / Revised December 10, 2014 / Accepted January 6, 2015)

Abstract : In this study, we carried out the emissions analysis of CO and non-CO₂ for the age-classes of various pine trees(*Pinus koraiensis*, *Pinus densiflora*, *Pinus rigida* Mill., *Pinus thunbergii* Parl.) to estimate of emission factors of the crown layer and surface layer in the forest fire. We used the thermal characteristic analyzer cone heater and NDIR analyzer in order to measure amount of emission. As a result, the major emissions of *Pinus koraiensis* were CO₂ and CH₄ and that of *Pinus thunbergii* Parl. was only CO. The major emissions of the most of pine trees were NO and N₂O. The CO₂ emission of *Pinus thunbergii* Parl. was the highest about as $7.26 \times 10^{-2} \sim 1.63 \times 10^{-1}$ g and next came *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Pinus rigida* Mill.. And the CO emission of *Pinus thunbergii* Parl. was about $5.14 \times 10^{-3} \sim 6.58 \times 10^{-3}$ g and followed by *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Pinus rigida* Mill.. The emissions of CH₄, NO, and N₂O showed small differences between species and the emission of CH₄ was $8.37 \times 10^{-5} \sim 2.55 \times 10^{-4}$ g, and NO was $6.65 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ g and N₂O was $1.42 \times 10^{-4} \sim 2.09 \times 10^{-3}$ g in all species. Particularly, the emission of *Pinus thunbergii* Parl. was the highest in all pine trees except CH₄.

Key Words : forest fire, greenhouse gas, CO₂, Non-CO₂, crown layer, surface layer, pine tree

1. 서론

산림은 연소되기 전까지 바이오매스의 이용으로 발생된 CO₂는 산림에 의해 재흡수 되고 대기 중의 온실가스 농도를 높이지 않는 탄소 중립적인 연료이다. 하지만 산림은 산불발생에 따라 많은 연소생성가스를 배출함으로 인해 온실가스 발생원이 될 수 있다¹⁻³⁾.

온실가스 종류별로는 N₂O가 총 배출량의 60%, CH₄는 50%, CO₂는 1% 미만이 농업부분에서 배출되지만⁴⁾ 산불 등 자연재해로 인한 온실가스 배출량은 온실가스 배출량 계산에서 제외되어 보고되고 있다. 따라서, 국가 차원에서 온실가스 통계의 정확성을 제고하고 국제적 신뢰성을 확보하기 위해서는 가장 기본적으로 LULUCF 부문의 활동자료 즉, 통계가 제대로 구축되어 있어야 한다.

온실가스 감축을 위한 노력의 일환으로 미국의 경우

교토의정서에 의한 구속적 의무감축 방식보다 기술개발 등을 통한 자발적 감축을 주장하고 있으며, 중국은 산림면적을 국토의 20%로 확대하여 5천만 톤의 CO₂를 흡수하여 온실가스를 감축하고 있다. 또한, 일본의 경우는 2050년까지 현재 수준 대비 50% 감축목표를 제시하지 않았지만 최근 전향적 감축노력 의지를 표명하여 『National Climate Change Strategy』를 발표하고 주요 산업 업종별로 2007년부터 2014년까지 189백만 톤의 CO₂ 감축 잠재량을 제시하였다⁵⁾.

이를 탄소로 전환하기 위해서는 탄소배출계수를 개발하여 적용하는 것이 가장 적합하며, 탄소배출계수는 임목 축적(부피)을 탄소량으로 전환시키는 아주 중요한 인자로 현재 세계 각국에서는 자국에 맞는 계수를 개발 중에 있다⁶⁾. 그 신뢰성을 높이기 위해 지속적으로 추정방법과 활동자료 및 배출계수의 수준을 향상시키고 있다.

* Corresponding Author : Hae Pyeong Lee, Tel : +82-33-540-3141, E-mail : crelabr@Kangwon.ac.kr

Department of Fire & Emergency Management, Kangwon National University, Gangwon National University, Samcheok 2nd Campus, 346, Hwangjo-gil, Dogye-eup, Samcheok-si 245-907 Gangwon-do, Korea

배출계수를 향상시키기 위해 선진국들은 고사목, 낙엽층 및 토양에서의 탄소 흡수 및 배출량을 Tier 3 수준에서 산정하기 위해 자국에 맞는 토양탄소모델을 개발하고 활용하고 있다. 핀란드는 Yasso, 미국은 Century를 개발하여 사용하고 있으며, 일본은 Century를 자국의 자료를 기반으로 하는 Century-jfos로 재개발하여 사용하고 있다⁷⁻⁹⁾.

국내에서도 온실가스 통계체제로 탄소 흡수 및 배출 면적과 활동에 따른 단위면적당 탄소축적량 변화 측정과 바이오매스 연소 시 배출되는 이산화탄소와 비이산화탄소의 배출량을 정량적으로 추정하기 위한 방법론을 제시하였다¹⁰⁾. 또한, 탄소전환계수 도출을 위하여 12개 수종에 대하여 보다 상세한 계수를 개발 중에 있으나 현행 이용되는 탄소전환계수는 단순히 침엽수 활엽수로만 구분하여 제한된 조사에 근거하여 불확실성이 크다. 따라서, 산불발생시 통계자료의 검증이 필요하며, 수종별 온실가스 배출량의 기초 data가 부족한 실정이다. 또한, 새로운 흡수/배출 계수와 국가산림자원조사 자료가 축적되고 있는 바, 이를 토대로 기존에 흡수/배출 계수와 임목축적통계 자료에 의해 작성된 산림부문 온실가스 통계의 재계산이 필요하다¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 산림부문 온실가스 인벤토리 및 탄소개정 개발의 일환으로 우리나라 고유배출계수 개발을 위해 소나무류 영급에 대한 지표층 및 수관층을 대상으로 CO₂ 및 non-CO₂의 배출량을 정량적으로 추정하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 연료 선정 및 시료채취





산불발생 시 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량을 분석하기 위해서 수관화 위험성이 높은 소나무류를 대상으로 영급별로 시험연료를 선정하였다.

선정한 소나무류는 잣나무, 적송, 리기다, 해송 등 4

Table 1. Fuels for Experiments in this Study

Sampling places	Species	Layer of forest fire	Age-class
Gangwon-do [Hongcheon]	<i>Pinus koraiensis</i>	Crown layer	2, 4, 6
		Surface layer	2, 4, 6
Gyeongsangbuk-do [Andong]	<i>Pinus densiflora</i>	Crown layer	2, 4, 6
		Surface layer	2, 4, 6
Jeolabuk-do [Wuju]	<i>Pinus rigida Mill.</i>	Crown layer	2, 4, 5
		Surface layer	2, 4, 5
Gangwon-do [Samcheok]	<i>Pinus thunbergii Parl.</i>	Crown layer	2, 4, 6
		Surface layer	2, 4, 6

Table 2. Sampling Procedure for Crown Layer and Surface Layer

Surface Layer	
Fallen leaves	
Fallen twigs	
Grass	
Crown layer	
Live leaves	
Less than 1 cm twigs	

가지 수종을 선정하고, 산불발생 빈도가 높고 대형 산불의 위험성이 높은 강원(홍천), 경북(안동), 경북(무주), 강원(삼척) 지역에서 시료를 채취하였으며, table 1에 제시하였다.

시료는 봄철 건조기(2~5월) 중에 채취하였으며, 산불 미피해 지역의 임분 성장특성을 고려하여 3영급 이하, 3~4영급, 5영급 이상의 임상으로 2, 4, 6영급을 준비하였으며, 리기다의 경우는 지리적 특성으로 인한 6영급 제한으로 5영급을 채취하였다.

수관화 피해지역의 경우 가지부는 연소가 거의 되지 않으며, 1 cm 이하의 잔가지는 60~70%가 연소되고, 생엽부는 대부분 연소된다는 기존 연구결과를 근거로 수관층 시료들은 1 cm 이하의 잔가지와 생엽만을 대상으로 채취하였다. 지표층 시료 채취 방법은 10 cm×10 cm×5 cm 크기의 방형구 쇠틀을 이용하여 낙엽, 낙지, 초본을 대상으로 시료를 채취하였으며, Table 2에 제시하였다.

2.2 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 분석 실험

소나무류 수관층과 지표층의 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 분석을 위하여 각각 Fig. 1에 제시한 열특성분석 장치와 NDIR 분석기를 이용하였으며, 열특성장치로부터 배출되는 가스를 NDIR 분석기로 바로 연결하여 배출 가스의 농도를 측정하였다.

가스 분석은 5가지 가스(CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O)에 대하여 측정하였으며, NDIR의 Gas density value의 조건은 CO₂ : 1.98, CO : 1.25, CH₄ : 0.72, NO : 1.34, N₂O : 1.84로 설정하여 Table 7의 조건에서 측정하였으며, 각 가스별 유도식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{가스부피} &= \text{농도} \times \text{가스부피유량} \times \text{구간시간} \\ \text{가스총량} &= \sum_{\text{총시간}} (\text{가스부피} \times \text{가스밀도}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 농도는 ppm, 가스부피유량은 l/h, 구간시간



Fig. 1. Equipments used in this study(Thermal characteristic analyzer cone heater (ISO 5660-1/KS F ISO 5660-1) and NDIR analyzer).

Table 3. Operational conditions for NDIR analyzer

Parameters	Indication range	Detection limit
CO - carbon monoxide	Min : 0~2000 ppm	1 ppm
NO - nitric oxide	Max : 0~100%	0.1%
N ₂ O - nitrous oxide		
CO ₂ - carbon dioxide	Min : 0~5%	0.01%
CH ₄ - methane	Max : 0~100%	0.1%

은 2s 단위를 사용하였다.

2.3 함수율 측정

CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 분석 실험에 앞서 ASTM D2016(American Society for Testing and Material)⁶⁾에 의해 함수율을 산출하였다. 함수율 측정방법으로는 재료 200 g을 취하여 103±2 °C의 온도로 일정하게 유지하도록 설정된 열풍건조기 내에서 48시간 이상 항량이 될 때까지 건조시킨 후 중량을 측정하여 함수율을 산출하였다. 함수율은 3회 반복 측정하여 평균값을 구하였으며, 각각의 결과들을 Table 4에 제시하였다. 항량 측정 기준은 4시간 간격으로 중량을 측정하였을 때 0.1%의 중량 변화가 없을 때까지로 하여 식 (2)에 의하여 산출하였다. 여기서, MC(moisture content)는 함수율[%], W₀은 건조 전 시료중량(생중량)[g], W는 건조 후 시료중량(건중량)[g]을 나타낸다.

$$MC(\%) = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

수관층과 지표층의 실험 전 초기중량의 차이는 수관층의 경우 가지와 생엽이 포함된 중량으로 초기중량

Table 4. Percentages of moisture contents

<i>Pinus koraiensis</i>						
Age-class	Crown layer			Surface layer		
	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]
2	50	23.67	52.67	28.90	12.47	56.86
4	50	22.63	54.73	43.76	21.90	49.95
6	50	23.20	53.60	48.57	25.53	47.42
<i>Pinus densiflora</i>						
Age-class	Crown layer			Surface layer		
	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]
2	50	20.80	58.40	21.10	10.91	48.29
4	50	22.63	54.73	33.07	16.70	49.50
6	50	21.03	57.93	60.87	31.07	48.96
<i>Pinus rigida Mill.</i>						
Age-class	Crown layer			Surface layer		
	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]
2	50	20.13	59.73	16.23	8.23	49.28
4	50	20.33	59.33	38.00	14.37	62.19
6	50	18.77	62.47	30.73	14.87	51.63
<i>Pinus thunbergii Parl.</i>						
Age-class	Crown layer			Surface layer		
	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]	Raw Sample [g]	Dried Sample [g]	M. C. [%]
2	50	21.90	56.20	45.00	31.47	30.07
4	50	24.23	51.53	71.10	38.33	46.09
6	50	22.67	54.67	53.33	32.63	38.81

50 g을 기준으로 하였고, 지표층의 경우 정방형 쇠틀로 해당 영급의 지표층을 수거하여 흙과 돌은 제거하고 낙엽, 낙지, 초본만 있는 상태이므로 각 시료 당 중량이 다르다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수관층의 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 특성

Table 5에는 4가지 수종의 소나무류 수관층에 대한 CO₂ 및 non-CO₂의 총배출량 특성을 제시하였다. 먼저, 잣나무에 대한 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, 영급별 특성으로는 2영급에서는 CO₂(0.1669653 g), CO(0.0059990 g), N₂O(0.0003312 g)가 최대값을 보였으며, 6영급에서는 CH₄(0.0003944 g)와 NO(0.0001904 g)가 최대값을 보였다. 또한, 4영급에서는 2영급과 6영급

에 비해 각 가스별 최대값은 나타나지 않아 영급별 배출량은 경향성이 없는 것으로 나타났다.

또한, 각 가스별 총배출량 평균값을 살펴보면, CO₂가 0.0608823 g으로 상대적으로 배출량이 가장 많았으며, 다음으로는 CO 0.0052310 g, N₂O는 0.0002893 g, CH₄는 0.0002857 g, NO는 0.0001832 g 순서로 나타남으로써 CO₂와 CO가 대체로 배출량이 많았으며, NO는 상대적으로 가장 낮은 값을 보여 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 부위별 조성비 차이에 기인한 것으로 사료되며, 소나무류의 일반적인 주성분은 cellulose, hemicellulose, lignin과 추출성분(유지, 수지, 정유, 무기물, 단백질) 등의 부성분, 회분, 다수의 수분 등으로 구성되어 있다. Cellulose는 50% 정도로서 활엽수와 침엽수에 따라 hemicellulose, lignin의 함량에 다소 차이를 보이며, 10% 정도의 추출성분과 1% 미만의 회분 등으로 구성되어 있다¹²⁻¹³⁾고 보고되었다. 또한, 배출량이 상대적으로 가장 많은 CO₂ 배출량 차이는 같은 수종 내에서도 개체와 채취부위에 따라서 그 조성이 다르기 때문에 부위별 조성에 따른 차이는 다소 있을 것으로 사료된다.

Table 5. Total emissions of CO₂ and non-CO₂ for crown layer

<i>Pinus koraiensis</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.1669653	0.0003369	0.0059990	0.0001796	0.0003312
4	0.1580517	0.0001257	0.0046321	0.0001797	0.0002534
6	0.1576300	0.0003944	0.0050620	0.0001904	0.0002834
Mean	0.1608823	0.0002857	0.0052310	0.0001832	0.0002893
<i>Pinus densiflora</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.1460947	0.0002285	0.0054397	0.0002019	0.0002812
4	0.1494277	0.0002385	0.0056808	0.0002433	0.0003736
6	0.1684833	0.0003052	0.0058398	0.0003509	0.0003075
Mean	0.1546686	0.0002574	0.0056534	0.0002654	0.0003208
<i>Pinus rigida Mill.</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.1505350	0.0001680	0.0048020	0.0002374	0.0002799
4	0.1667527	0.0002037	0.0057390	0.0002422	0.0003086
5	0.1523390	0.0001082	0.0048891	0.0002693	0.0002726
Mean	0.1565422	0.0001600	0.0051434	0.0002496	0.0002870
<i>Pinus thunbergii Parl.</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.1174140	0.0001822	0.0050206	0.0002153	0.0013693
4	0.1532355	0.0002184	0.0069395	0.0002440	0.0016283
6	0.1508613	0.0003451	0.0077843	0.0002535	0.0017300
Mean	0.1405000	0.0002500	0.0065800	0.0002400	0.0015800

적송 수관층의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, N₂O(0.0003736 g)를 제외한 CO₂, CH₄, CO, NO는 6 영급이 상대적으로 높은 값을 보였는데, 각각의 배출량은 CO₂ 0.1684833 g, CH₄ 0.0003052 g, CO 0.0058398 g, NO 0.0003509 g 정도 배출하는 것으로 나타났다.

또한, CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O의 총배출량 평균값을 살펴보면, CO₂가 0.1608823 g으로서 상대적으로 배출량이 많았으며, NO는 0.0001832 g로 가장 낮은 값을 보였다.

연소에 의한 이러한 가스 배출량 차이는 적송이 구성하고 있는 성분비 차이에 의한 결과로 주성분인 cellulose의 완전연소로부터 CO₂ 배출량이 가장 많은 것으로 나타났다.

적송의 약 50% 가량 이상은 cellulose가 차지하고 있으며, 이 cellulose의 화학식은 C₆H₁₀O₅이다. Cellulose의 분자량 162에는 탄소 72, 수소 10, 산소 80으로 구성되어 있다. 즉, 절반가량이 cellulose로 이루어져 있고, 질량으로 보았을 때 이 cellulose의 절반가량은 산소로 이루어져 있다. C, H는 그 자체만으로도 연소가 잘 이루어지는 물질이며, cellulose의 열분해 시 발생하는 O는 대기 중의 산소 농도가 16% 이하로 낮아지더라도 C와 H의 연소를 도와 계속해서 연소가 이루어질 수 있다. 산소가 충분하지 못하므로 활발한 연소는 진행되지 못하지만 불꽃 없는 화학반응이 계속된다¹⁴⁾.

리기다 수관층의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, NO(0.0002693 g)를 제외한 CO₂, CH₄, CO, N₂O는 4 영급에서 최대값을 보였으며, 각각 배출량은 CO₂는 0.1667527 g, CH₄는 0.0002037 g, CO는 0.0057390 g, N₂O는 0.0003086 g 정도 배출하는 것으로 나타났다. 따라서 리기다 또한 영급에 대한 배출량의 경향성은 없는 것으로 나타났다.

또한, CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O 가스에 대한 총배출량의 평균값을 살펴보면, CO₂가 0.1565422 g으로 상대적으로 배출량이 많았으며, 다음으로는 CO 0.0051434 g, N₂O 0.0002870 g, NO 0.0002496 g, CH₄ 0.0001600 g, 순서로 나타남으로써 리기다 또한 CO₂와 CO가 대체로 배출량이 많았으며, CH₄는 상대적으로 가장 낮은 값을 보여 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

해송 수관층의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, CO₂(0.1532355 g)를 제외한 CH₄, CO, NO, N₂O는 6 영급에서 최대값을 보였으며, 각각 배출량은 CH₄는 0.0003451 g, CO는 0.0077843 g, NO는 0.0002400 g, N₂O는 0.0015800 g 정도인 것으로 나타나 해송 또한 영급에 대한 경향성은 없는 것으로 나타났다.

또한, CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O에 대한 총배출량 평

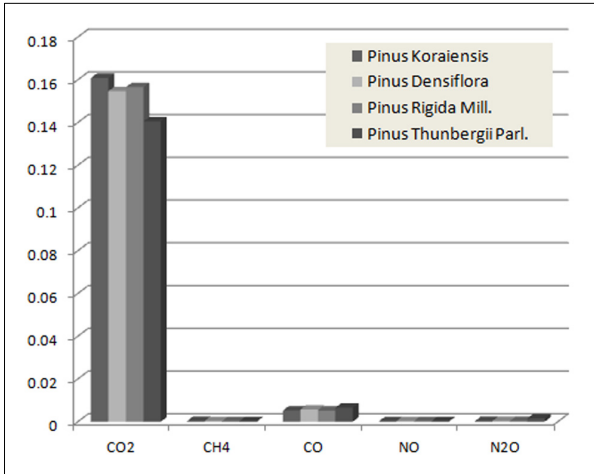


Fig. 2. Emissions of CO₂ and non-CO₂ for crown layer of pine trees.

균값을 살펴보면, CO₂가 0.1405000 g으로 상대적으로 배출량이 많았으며, 다음으로는 CO 0.0065800 g, N₂O는 0.0015800 g, CH₄는 0.0002500 g, NO는 0.0002400 g 순서로 나타나 해송 또한 CO₂와 CO가 대체로 배출량이 많았으며, NO는 상대적으로 가장 낮은 값을 보여 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

Fig. 2에는 CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O 배출량에 대하여 수종별 특성을 비교하기 위하여 4가지 수종(잣나무, 적송, 리기다, 해송)의 총배출량 특성을 나타내었다. Fig. 2에 나타나듯이 50g 중량에 대하여 4가지 모든 수종에서 CO₂ 배출량이 상대적으로 가장 많았으며, CO₂ 총배출량은 0.1505350~0.1667527 g 정도로 나타났다. 특히, 잣나무는 리기다, 적송, 해송 보다 CO₂(0.1667527 g)와 CH₄(0.0002857 g)가 많이 배출되는 수종인 것으로 나타났다.

또한, 가스별 배출량을 살펴보면 CO가 CO₂ 다음으로 배출량이 많은 것으로 나타났는데, 0.0051434~ 0.0065800 g 범위에서 해송은 0.0065800 g으로 가장 CO의 배출량이 많은 수종인 것으로 나타났으며, 다음으로 적송, 잣나무, 리기다 순서로 배출량의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

NO의 배출량은 0.0001832~0.0002654 g 정도인 것으로 나타났으며, N₂O 배출량은 0.0001580~ 0.0003208 g 정도인 것으로 나타났다. 질소산화물인 NO와 N₂O 배출량이 많은 수종으로는 적송 수종인 것으로 나타났다.

수관층의 4가지 수종 모두에서 CO₂와 CO의 배출량이 상대적으로 많은 것으로 나타났는데 이는 소나무류의 주성분인 cellulose, hemicellulose, lignin과 부성분인 추출성분(유지, 수지, 정유, 무기물, 단백질) 등에 의한 구성성분 차이로 연소 시 완전연소와 불완전연소에 의한 결과 때문인 것으로 사료된다.

불완전 연소할 때는 열분해에 의해 CO·탄화수소가 생성되며, 높은 온도에서는 공기 속의 질소가 산화되어 질소산화물이 생성된다. 또한, 대부분 검은색 연기가 발생하는데 이는 연소되는 물질 중에 탄소 분자의 비율이 높기 때문이며, 탄소가 타지 않고 공기 중으로 기화되기 때문이다. 즉, 포화탄화수소화합물의 탄소수가 많아질수록 완전연소하기 어려운 것으로 보고된 바가 있다¹⁵⁾.

또한, CO는 거의 모든 화재에서 일정 수준 발생되며, 탄소함유 가연물은 불완전연소 할 경우 CO를 생성한다. 유기연료를 연소시키는 동안 CO는 초기에 생성된 후 산화되어 CO₂가 된다. 산불과 같이 개방된 연소에서는 생성된 CO의 양은 거의 발생되지 않는다. 하지만 O₂의 공급이 충분하지 않거나 혼소 또는 플래시오버 후 화재에서는 1~10% 정도(10,000~100,000 ppm)의 CO가 발생된다¹⁶⁾.

3.2 지표층의 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 특성

Table 6에는 4가지 수종의 소나무류 지표층에 대한 CO₂ 및 non-CO₂의 총배출량 특성을 제시하였다. 잣나무의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, 4영급에서는 CO₂(0.0963490 g), CH₄(0.0002812 g), N₂O(0.0002812 g)가 최대값을 보였으며, 6영급에서는 CO(0.0060971 g)와 NO(0.0000869 g)가 최대값을 보였다.

또한, 각 가스별 총배출량 평균값을 살펴보면, CO₂가 0.0963368 g으로 상대적으로 배출량이 가장 많았으며, 다음으로는 CO 0.0052166 g, N₂O는 0.0002552 g, CH₄는 0.0002552 g, NO는 0.0001832 g 순서로 나타나 CO₂와 CO가 대체로 배출량이 많았으며, NO는 상대적으로 가장 낮은 값을 보여 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

또한, 지표층과 수관층의 배출량 특성을 살펴보면, CO₂ 배출량은 지표층에서, CO₂를 제외한 나머지 CH₄, CO, NO, N₂O 4가지 가스는 수관층에서 총배출량이 상대적으로 더 많은 것으로 나타났으나 오차범위 내에서 배출량 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

적송 지표층의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, 영급별 특성으로는 6영급에서 CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O 배출가스 모두 최대값을 보이는 것으로 나타났으며, 2영급에서 상대적으로 낮은값을 보이는 것으로 나타나 6영급에 가까울수록 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량이 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 하지만, 배출량 차이는 오차범위 내에서 극히 미세하다고 볼 수 있는 값의 차이로 영급별 경향성은 없는 것으로 사료된다.

또한, 각 가스별 총배출량 평균값을 살펴보면, CO₂

Table 6. Total Emissions of CO₂ and non-CO₂ for surface layer

<i>Pinus koraiensis</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.0777737	0.0002312	0.0034974	0.0000534	0.0002312
4	0.0963490	0.0002812	0.0060553	0.0000592	0.0002812
6	0.1148877	0.0002533	0.0060971	0.0000869	0.0002533
Mean	0.0963368	0.0002552	0.0052166	0.0000665	0.0002552
<i>Pinus densiflora</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.0920223	0.0001285	0.0046439	0.0001111	0.0002231
4	0.1102200	0.0001451	0.0053580	0.0001510	0.0002670
6	0.1539377	0.0004056	0.0083775	0.0001540	0.0004757
Mean	0.1187267	0.0002264	0.0061265	0.0001387	0.0003219
<i>Pinus rigida Mill.</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.0622967	0.0000595	0.0029581	0.05000972	0.0001390
4	0.0760430	0.0001031	0.0033067	0.0000511	0.0001155
6	0.0794530	0.0000884	0.0040296	0.0000934	0.0001723
Mean	0.0725976	0.0000837	0.0034315	0.0000806	0.0001423
<i>Pinus thunbergii Parl.</i>					
Age class	CO ₂ [g]	CH ₄ [g]	CO[g]	NO[g]	N ₂ O[g]
2	0.1670387	0.0002151	0.0072625	0.0001997	0.0018911
4	0.1714735	0.0001914	0.0086303	0.0002411	0.0023398
6	0.1495927	0.0001631	0.0081276	0.0001475	0.0020280
Mean	0.1627000	0.0001900	0.0080100	0.0002000	0.0020900

가 0.1539377 g으로 상대적으로 배출량이 가장 많았으며, 다음으로는 CO 0.0061265 g, N₂O는 0.0003219 g, CH₄는 0.0002264 g, NO는 0.0001540 g 순서로 나타나 CO₂와 CO가 대체로 배출량이 많았으며, NO는 상대적으로 가장 낮은 값을 보여 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 또한, 지표층과 수관층의 배출량 특성을 살펴보면, CO와 N₂O는 지표층에서, CO₂, CH₄, NO는 수관층에서 총배출량이 상대적으로 더 많은 것으로 나타났으나 오차범위 내에서 배출량 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

리기다 지표층의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, 영급별 특성으로는 6영급에서 CO₂ 0.0794530 g, CO 0.0040296 g, N₂O 0.0001723 g 정도의 최대값을 보였으며, 4영급에서 CH₄ 0.00010317 g, 2영급에서 NO 0.05000972 g 정도의 최대값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 각 가스별 총배출량 평균값을 살펴보면, CO₂가 0.0725976 g으로 상대적으로 배출량이 가장 많았으며, 다음으로는 CO 0.0034315 g, N₂O는 0.001423 g, CH₄는 0.0000837 g, NO는 0.0000806 g 순서로 나타나 CO₂와 CO가 대체로 배출량이 많았으며, NO는 상대적

으로 가장 낮은 값을 보여 배출량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

또한, 지표층과 수관층의 배출량 특성을 살펴보면, CO, N₂O, CO₂, CH₄, NO 모두 수관층에서 총배출량이 상대적으로 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 차이의 결과 또한, 주성분인 cellulose, hemicellulose, lignin과 부성분인 유지, 수지, 정유, 무기물, 단백질 등의 구성성분 차이에 따라 연소 시 탄소화합물의 완전연소와 일부 불완전연소에 의해 다량의 탄소산화물이 배출된 것으로 사료된다.

Cellulose를 300~500 °C에서 열분해 시키면 저온에서는 levogluconic acid · furfural · furane · 2-methylfuran 등이 생성되고, 고온에서는 환상구조가 아닌 acetaldehyde · propionaldehyde · acrolein · acetone 등이 증가한다. 또한, lignin을 열분해시키면 phenol · vanillin · p-cresol · 몰식자산 타닌 따위를 가수분해하여 얻어지는 무색의 결정 · syringa aldehyde 등의 방향족 화합물이 생성되며, cellulose에 비하여 열분해에 대한 저항성이 크고, 목탄 생성량이 많다. Hemicellulose는 열분해에 의하여 CO · CO₂ · 메탄 · 에탄 · 아세틸렌 · 에틸렌 · formaldehyde · acetaldehyde · 수소 등이 생성되고 그 밖에 furfural · methylfurfural 등이 생성된다¹⁷⁾.

해송 지표층의 각 가스별 총배출량 특성을 살펴보면, 영급별 특성으로는 4영급에서는 CH₄를 제외한 나머지 CO₂, CO, NO, N₂O 4가지 가스에서 최대값을 보였으며, 각각 총배출량은 CO₂ 0.1714735 g, CO는 0.0086308 g, NO는 0.0002411 g, N₂O는 0.0023398 g 정도인 것으로 나타났다. 또한, CH₄는 0.0002151 g 정도로 2영급에서 최대값을 보이는 것으로 나타났다. 하지만, 영급별 차이는 오차범위 내에서 크지 않은 것으로 나타나 경향성은 없는 것으로 간주하였다. 또한, 각 가스별 총배출량 평균값을 살펴보면, CO₂가 0.1627000 g으로 상대적으로 배출량이 가장 많았으며, CH₄는 0.0001900 g, NO는 0.0002411 g정도로 대체로 낮은 값을 보였다. 또한, 지표층과 수관층의 배출량 특성을 살펴보면, CO₂와 CO 배출량은 지표층에서, CH₄, NO, N₂O는 수관층에서 상대적으로 총배출량이 더 많은 것으로 나타났으나 오차범위 내에서 배출량 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 3에는 CO₂, CH₄, CO, NO, N₂O 배출량에 대하여 수종별 특성을 비교하기 위하여 4가지 수종(갯나무, 적송, 리기다, 해송)의 총배출량 특성을 나타내었다.

Fig. 3에 나타나듯이 건조 전 각각의 중량에 대하여 4가지 모든 수종에서 CO₂ 배출량이 상대적으로 가장 많았으며, CO₂ 총배출량은 0.0725976~0.1627000 g 정

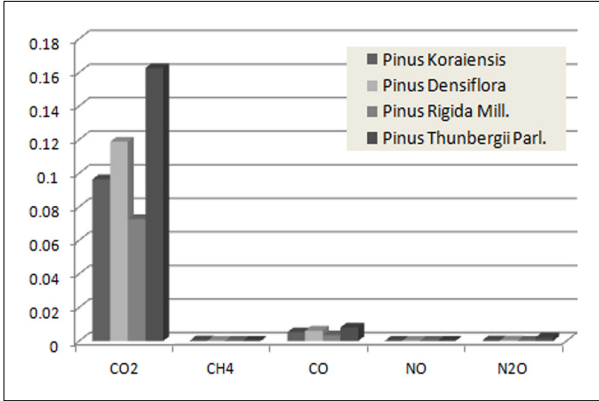


Fig. 3. Emissions of CO₂ and non-CO₂ for surface layer of pine trees.

도인 것으로 나타났는데, 해송, 적송, 잣나무, 리기다 순서로 나타났다. 또한, CH₄는 0.0000837~ 0.0002552 g, CO는 0.0034315~0.0080100 g, NO는 0.0000665~ 0.00020000 g, N₂O는 0.0001423~0.0020900 g 정도에서 수종별 미미한 배출량의 차이를 보였다.

수종별 CO 배출량을 살펴보면 CO₂ 다음으로 배출량이 많은 것으로 나타났는데, 0.0051434~ 0.0065800g 범위에서 해송은 0.0080100 g으로 가장 CO의 배출량이 많은 수종인 것으로 나타났으며, 적송, 잣나무, 리기다 순서로 수관층과 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

따라서 해송은 CH₄를 제외한 나머지 CO₂(0.1627000 g), CO(0.000100 g) NO(0.0002000 g), N₂O(0.0020900 g)의 배출량이 잣나무, 적송, 리기다 보다 상대적으로 많은 것으로 나타나 산불발생 시 CO₂와 non-CO₂ 배출량이 상대적으로 많을 것으로 사료된다.

산불발생 시 CO₂와 non-CO₂ 배출량 차이는 Table 7에 제시한 바와 같이 연소물질의 조성비에 따라 연소생성기체의 종류와 배출량이 달라진다. 즉, 탄소배출량의 차이는 열분해 시 열에 대한 반응성 차이에 따라 다르다고 밝히고 있다. Cellulose는 결정영역과 비결정영역에서의 열에 대한 반응성이 다르다. 즉, 결정 cellulose의

Table 7. Principal combustible gases and materials¹⁷⁾

Combustible Gases	Combustible Material
CO	carbon-containing material
CO ₂	carbon-containing material
CH ₄	organic-containing and decomposing material
N ₂ O	combustible and decomposing material of nitro cellulose
NO	Nitrogen-containing material and oxides

열분해에서는 acetaldehyde-acetone 등이 생성되고, 열분해 초기에는 furfural의 양이 많지만, 분해가 진행됨에 따라서 acetaldehyde-acetone 등의 양이 증가된다. 그러나 비결정 cellulose의 열분해에서는 결정 cellulose에 비해 초기에 furfural과 furane의 생성이 증가된다. Lignin은 cellulose와는 열적 성질이 서로 다르고, 넓은 온도범위에서 완만하게 열분해 된다. Hemicellulose를 열분해시킬 경우에는 타르보다도 가스가 많이 생성되며, cellulose와 마찬가지로 다량의 수용성 건유물이 생성되지만, cellulose는 levogluconic acid를 생성하지 않는 점이 다르다¹⁸⁾.

4. 결론

본 연구에서는 소나무류(잣나무, 적송, 리기다, 해송)의 수관층과 지표층의 영급별 연소에 따른 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량의 정량 분석으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 수종별 수관층의 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 특성결과로는 모든 소나무류(잣나무, 적송, 리기다, 해송)에서 CO₂와 CO의 배출량이 상대적으로 많았으며, 생중량 50 g에 대하여 CO₂의 총배출량은 0.1505350~ 0.1667527 g, CO 배출량은 CO₂ 다음으로 배출량이 많아 0.0051434~ 0.0065800 g 범위 정도인 것을 알 수 있었다.

2) 잣나무에서는 CO₂와 CH₄ 배출량이 많았으며, CO를 많이 배출하는 수종은 해송인 것을 확인할 수 있었다. 또한, NO 총배출량은 0.0001832~0.0002654 g, N₂O는 0.0001580~0.0003208 g 정도였으며, 질소산화물인 NO와 N₂O 배출량이 많은 수종으로는 적송 수종인 것을 확인할 수 있었다.

3) 수종별 지표층의 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량 특성결과로는 수관층과 마찬가지로 모든 소나무류에서 CO₂와 CO의 배출량이 상대적으로 많은 것을 알 수 있었다. 생중량 50 g에 대하여 CO₂의 총배출량은 0.0725976~0.1627000 g 정도에서 해송이 CO₂를 가장 많이 배출하는 것을 알 수 있었으며, 다음으로 적송, 잣나무, 리기다 순서인 것을 확인할 수 있었다. CO 배출량은 CO₂ 다음으로 배출량이 많아 0.0051434~ 0.0065800 g 정도에서 수관층처럼 해송은 CO의 배출량이 많은 수종인 것을 알 수 있었으며, 적송, 잣나무, 리기다 순서로 수관층과 결과가 동일한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 CH₄는 0.0000837~0.0002552 g, NO 0.0000665~0.00020000 g, N₂O 0.0001423~0.0020900 g 정도에서 수종별 미미한 배출량의 차이를 보이는 것을 알 수 있었으며, 특히 해송은 잣나무, 적송, 리기다 수

종보다 CO₂, CO, NO, N₂O의 배출량이 많은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 산불발생 시 해송 군락지에서는 다른 수종에 비해 CO₂와 non-CO₂ 배출량이 상대적으로 많을 것으로 사료된다.

4) 영급별 CO₂ 및 non-CO₂ 총배출량 특성 결과로는 모든 수종의 지표층과 수관층에서 6영급에 가까울수록 총배출량이 약간 높게 나타나는 경향을 보였으나 이러한 차이는 매우 미미한 차이로 특별한 경향성은 없는 것을 알 수 있었다.

5) 소나무류의 연소에 따른 CO₂ 및 non-CO₂ 배출량은 수종별 조성비에 따라 배출량 차이가 미미한 정도로 수종간 차이는 크지 않았으나, CO₂, CO, CH₄의 배출량이 상대적으로 많은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 산림연료의 연소에 따른 연소생성가스의 정량분석은 산림부분에서의 탄소배출계수 정립에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글 : 이 논문은 “2014년도 강원대학교 학술연구조성비(관리번호-220140092)”로 연구하였음

References

- 1) Washington Associated Press “California forest fire, Large quantity emission of greenhouse gases emission’. Younhap News Agency, <http://www.2006un.org/8756>, Accessed on 2 November, 2007.
- 2) Delmas, R., J. P. Lacaux, and D. Brocard, Determination of biomass burning emission factors: Method and Results. Environmental Monitoring and Assessment 38, Kluwer Academic Publishers, pp. 181-204, 1995.
- 3) Intergovernmental Panel On Climate Change, 1994: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, 1994.
- 4) Smith P., D. Martino, and Z. Cai. Agriculture (Chapter 8). In: Climate change: Mitigation. Contribution of Working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Metz B, Davidson O R, Bosch P R, Dave R, Meyer L A). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 497-540, 2007.
- 5) UNFCCC. Report of the Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties Under the Kyoto Protocol to the Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol in its Fifth Session. FCCC/KP/AWG/2009/L.15. December 16. 2009.
- 6) Y. M. Son, K. H. Lee, R. H. Kim, J. G. Pyo, I. H. Park, Y. H. Son, Y. J. Lee, C. S. Kim, “Carbon Emission Factor of Major tree for Forestry Greenhouse Gas Inventory”, Korea Forest Research Institute, pp.5-23, 2010.
- 7) IPCC. 2006. Harvested Wood Products Chapter 12, Volume 4. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by Eggleston H., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds.), National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>), 2006.
- 8) IPCC, IPCC Fourth Assessment Report., 2007.
- 9) Tonosaki, M., Harvested wood products accounting in the post Kyoto commitment period. J. of Wood Science, Vol.55, pp. 390-394, 2009.
- 10) M.S. Won, K.S. Koo, M.B. Lee and Y.M. Son, “Estimation of non-CO₂ Greenhouse Gases Emissions from Biomass Burning in the Samcheok Large-Fire Area Using Landsat TM Imagery”, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 10, No. 1, pp. 17-24, 2008.
- 11) UNFCCC. Reports on Intercessional Activities. Issues Related to Issues From Forest Harvesting and Wood Products, Submissions from Parties. Fourteenth Session, Bonn. Provisional Agenda Item 3(a). (<http://unfccc.int/resource/docs/2001/sbsta/misc01.pdf>), 2001.
- 12) B. G. Lee, “New Introduction to Forestry Engineering(I), Yeungnam University Publishing, pp.161-163, 2005.
- 13) J. H. Cho, B. H. Hwang, H. J. Lee, G. R. Chock, H. Y. Kang, S. H. Yu, “Study on the analysis of the main special ingredient leaf pine trees for new functional materials search”, Journal of Forest Science, Journal of Fall Conference, pp. 134-142, 1997.
- 14) J. S. Shim, D. S. Shin, H. H. Lee, K. P. Lim, N. S. Cho and B. O. Cho, Forest Chemistry. Hyangmoonsa, pp.32-36, 1994.
- 15) H. J. Kim, Y. G. Eom, J. J. Lee, H. S. Jung, I. K. Choi, “Introduction of Wood Materials Engineering”, Sunginmunwhasa, pp. 33-34, 2004.
- 16) S. H. Lee, “Theory and Practice of Fire investigation”, pp. 23-86, Dongwha Technology Publisher, 2009.
- 17) J. S. Sim, D. S. Sin, H. H. Lee, G. P. Lim, N. S. Jo, B. W. Cho, “Forest Products Chemistry”, Hyangmunsa, pp.137-170, 1994.
- 18) H. P. Lee, Y. S. Kim, H. Kim, D. M. Ha, “Fire Protection Engineering”, Dongwha Technology Publisher, p.29, 2013.