

산불진화 활동시 유해물질 노출 평가

Evaluation of Exposure to Hazard Substances in Forest Fire Suppression

Byung Doo Lee*, Sung Yong Kim**, Ho Joong Youn***, Sang Min Kang****,
Young Gwang Seo*****, Won Kim*****, Seung Moo Heo*****

Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro,
Dongdaemun-gu, Seoul, Korea

Institute for Occupational and Environmental Health, 49 Sagajung-ro, Jungrang-gu, Seoul, Korea

Abstract

The study measured the types and amount of hazard substances in three burning conditions: burning leaves of *Pinus densiflora*, leaves of *Quercus variabilis* Blume, and a combination of live leaves and live branches of *Pinus densiflora*. The result demonstrates the importance of securing the respiratory health system when a high level of fine particles was emitted. The level of emitted benzene was relatively high compared to that in atmosphere. The level of total resin acids exceeded the U.K. regulation level, with formaldehyde surpassing the recommended short-term level. Sulfuric acid was measured about 30 percent of the short-term exposure level. Carbon dioxide concentration was similar to indoor CO₂ concentration, while carbon monoxide concentration was lower than the exposure level suggested by the Korean government. As for burning conditions, burning live leaves and branches of *Pinus densiflora* produced the highest concentration of various hazard substances including fine particles and chemicals.

* Tel. +82-2-961-2687. Fax. +82-2-961-2699. E-mail. byungdoo@korea.kr

** Corresponding author. Tel. +82-2-961-2686. Fax. +82-2-961-2699. E-mail. kitaco1@korea.kr

*** Tel. +82-2-961-2681. Fax. +82-2-961-2699. E-mail. yount@korea.kr

**** Tel. +82-2-961-2696. Fax. +82-2-961-2699. E-mail. kang3257@korea.kr

***** Tel. +82-2-961-2949. Fax. +82-2-961-2699. E-mail. fofireco@korea.kr

***** Tel. +82-2-490-2098. Fax. +82-2-490-2099. E-mail. gganna@hanmail.net

***** Tel. +82-2-490-2093. Fax. +82-2-490-2099. E-mail. ken98@naver.com

Submission & Publication Process

Received: Sep. 2, 2015 / Revised: Oct. 28, 2015 / Accepted: Nov. 23, 2015

Key words: forest fire, combustion, hazardous substances, emissions, safe guideline

국문초록

본 연구에서는 소나무 낙엽, 굴참나무 낙엽과 소나무 낙엽 + 생엽, 생가지 등 세 가지 연소 조건에서 발생하는 유해물질의 종류와 양을 측정하였다. 측정 결과, 미세먼지의 경우 고농도로 방출되고 있어 호흡기의 건강영향에 대한 대비가 필요하다. 휘발성유기화합물에서는 벤젠 등이 일반 대기에 비해 높은 수준으로 발생하였다. 총수지산류가 영국 정부의 노출기준을 상회하는 수준으로 발생하였고, 포름알데히드 역시 단기간 기준을 초과하는 수준으로 발생하였다. 산류 중에서는 황산의 농도가 단기간 노출기준 대비 약 30% 수준까지 확인되었다. 이산화탄소의 농도는 실내 농도 수준과 비슷하고, 일산화탄소는 높게 검출되었으나 고용노동부의 노출기준 이하였다. 소나무 생엽, 생가지를 연소할 때 미세먼지와 화학물질을 포함한 다양한 유해물질들이 다른 2가지 경우보다 더 높은 농도로 발생하였다. 이러한 측정 자료들은 향후 산불 진화대원과 지역주민들의 안전 기준을 정립하는 기초 자료로 활용될 수 있다.

주제어: 산불, 연소, 유해물질, 방출, 안전기준

1. 서론

산불과 같은 바이오매스 연소과정에서 나온 연기는 건강에 유해성이 있다고 알려진 수백 가지의 화학물질로 구성되어 있다(Naeher, et al., 2007). 대표적인 화학물질로는 미세먼지(Fine particle material), 알데하이드, 휘발성물질, 산류, 다핵방향족탄화수소(Polynuclear Aromatic Hydrocarbons), 총수지산류, 일산화탄소, 이산화탄소와 같은 화학물질 등이 있으며, 이러한 물질들은 도시에서 발생하는 오염물질과 비슷한 병태생리학적 영향을 미친다고 알려져 있다(Barregard, et al., 2006; Danielsen, et al., 2009; Kocbach, et al., 2008). 지금까지 대기오염의 해로움에 대해서 수많은 연구결과가 보고되었지만, 산불연기의 해로움에 대한 내용은 강조되지 않은 실정이다(Lohman, et al., 2007).

들불, 인위적 산불, 농업 목적의 태우기, 초지불 등으로 인해서 매년 2 페타그램($1Pg = 10^{12} kg$)의 탄소가 대기 중으로 방출(Van der Werf, et al., 2010)된다고 추정되며, 이러한 방출물질들은 지구온도 변화와 수문순환에 영향을 미친다(Bowman, et al., 2009; Cochrane & Laurance 2008; Fargione, et al., 2008; Langmann, et al., 2009; Tosca, et al., 2010; Yokelson, et al., 2007). 국내 지표화 형태 산불에서 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등의 온실가스 배출량은 활엽수 지표화 연소지역 15,856kg/ha, 소나무 지표화 연소지역 14,834kg/ha, 소나무 수관화 연소지역 약 22,709kg/ha이었다(Lee, et al., 2012). 또한 소나무 숲에서 수관화로 연소되었을 때 수관층에서 배출되는 이산화탄소량은 23,454kg/ha으로 보고된 바 있다(Lee, et al., 2012).

Johnston, et al.(2012)은 NASA의 인공위성 자료와 세계보건기구(WHO)의 자료를 활용하여 연기로 인해 직간접적으로 사망하는 인구를 분석한 결과, 산불을 포함한 식물성 바이오매스 연소로 인하여 매년 평균 339,000명이 사망한다고 하였다. 지역별로는 아프리카 사하라와 동남아시아가 가장 취약하며, 기상에 영

향을 많이 받는 라니냐 시기에는 평균 262,000명, 엘니뇨 시기에는 532,000명까지 증가한다고 밝혔다.

우리나라의 경우 최근 10년 평균 매년 389건이 발생하며, 776ha의 산림이 전소된다. 이러한 산불을 진화하기 위해 공무원, 진화대원, 소방대원, 군인, 경찰, 주민 등이 참여하는데, 산림청 산불통계연보에 따르면 연간 82,111명이 산불진화에 참여하며, 이는 1건당 약 206명, 1ha당 약 112명에 해당한다 (Korea Forest Service, 2015). 이처럼 진화 활동에 직접 참여하는 사람들뿐만 아니라 연기가 넓은 면적으로 확산되는 것을 감안하면 많은 수의 국민들이 연기의 유해물질에 노출됨을 알 수 있다. 하나의 예로 2013년 3월 경상북도 포항에서 산불이 발생했을 때 시내에서 측정된 통합대기환경지수가 보통에서 한 시간 만에 나쁨으로 2단계 악화된 사례가 있었다.

본 연구는 산불 발생 시 어떠한 유해물질이 방출되고, 진화활동에 참여했을 때 유해 물질별로 어느 강도로 노출되는지를 알아보기 위해 수행되었다.

II. 연구 방법

1. 유해물질 측정 항목 및 측정 장비 배치

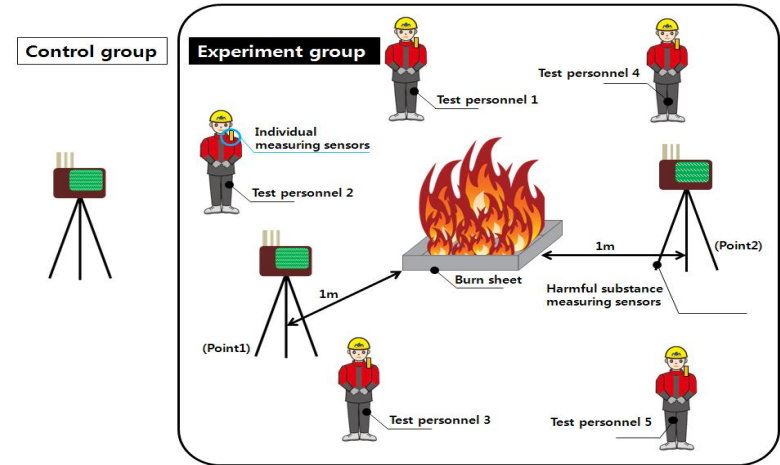
서론에서와 같이 일반 화재 및 산불 방출에 관련된 문헌 검토를 통해 <Table 1>과 같이 측정 대상을 선정하였다.

<Table 1> Type of forest fire harmful substance

Categorization	Harmful substance measuring sensors	Individual measuring sensors
Fine particle material	Fine dust (PM2.5, PM10)	Respirable suspended particles (Particle diameter 4µm)
Chemical material	Aldehyde	-
	Volatile Organic Compounds, VOCs	-
	Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PAHs	-
	Total resin acids, Acids	-
	CO, CO2	-

실험은 산불의 일반적인 확산 형태인 지표화와 수관화를 가정으로 진행하였으며, 지표화는 활엽수의 대표수종으로 굴참나무, 침엽수의 대표수종으로 소나무 낙엽 3kg을 연소하였다. 수관화는 대부분 침엽수림에서 발생하고, 지표층과 수관층이 동시에 연소되는 것을 감안하여 소나무 낙엽 1kg, 소나무 생엽과 가지 2kg을 혼합하여 연소하였다. 실제 측정은 <Figure 1>과 같이 진화대원 개인과 지역으로 구분하여 측정하였고, 호흡성 분진은 진화대원 5명의 어깨에 센서를 부착하여 측정하였다. 진화대원이

방화선을 구축할 때 화선으로부터 1m 정도 떨어진 것을 감안, 비슷한 환경을 연출하기 위해서 미세먼지와 화학물질 측정센서를 연소판으로부터 좌우 1m 떨어진 지점에 설치하였다. 또한 측정된 값을 비교하기 위해 연기의 영향을 받지 않는 지점을 대조군으로 선정하여 동일한 장비를 설치하였다.



<Figure 1> Arrangement of sensor for forest fire harmful substance

2. 유해물질 측정 및 분석 방법

1) 미세먼지

미세먼지는 대기오염공정시험기준의 환경대기 중 먼지 측정법(ES 01354.1)에 준하여 수행하였다. 측정 장비는 Grimm Dust Spectrometer로써 광산란방식 및 중량측정법을 통해 미세먼지(PM-10, PM-2.5)를 측정할 수 있다.

진화대원 개인별 호흡성 분진의 측정 및 분석방법은 미국산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health; NIOSH)의 0600 방법을 참조하였다. 개인 측정은 호흡성 분진을 측정하였는데, 호흡성 분진이란 폐 속 깊숙이까지 다다를 수 있는 미세하게 작은 크기를 갖고 있는 분진이다. 대략적인 입자의 직경이 4 µm정도 크기의 분진이기 때문에 폐의 가장 말단, 즉, 가스교환이 일어나는 폐포까지 이를 수 있는 물리적인 특성을 갖고 있다.

호흡성 분진의 채취는 사이클론을 장착한 필터를 이용하였다. 즉, 39mm PVC 필터가 장착된 2단 카세트에 알루미늄 재질의 사이클론을 결합시킨 상태에서 2.5LPM(Liter per minute)의 유량이 유지되

도록 펌프 유량 조절을 하였다. 유량의 변동량을 확인하기 위해 측정 전후에 캘리브레이션을 하였다.

2) 휘발성유기화합물(VOCs)

휘발성유기화합물 측정 및 분석방법은 미국산업안전보건연구원의 1500 방법을 참조하였다. 휘발성 유기화합물은 활성탄관에 약 0.2 l/min의 유량으로 조정된 저유량 펌프를 연결하여 채취하였고, 검정 곡선용 표준용액으로 Benzene(Sigma Aldrich 99.9%, USA)과 Toluene(Sigma Aldrich 99.9%, USA) 등을 사용하였다. 용매로는 CS₂(Kanto 99%, Japan)를 사용하였다.

전처리가 완료된 시료는 AutoSampler(HP 7683 series Injector, USA)가 장착된 가스크로마토그래피/불꽃이온화검출기(Gas Chromatography/Flame ionization detector; GC/FID)를 이용하여 분석하였고, 검출된 성분의 정성분석을 위하여 가스크로마토그래피/질량분석기(Gas Chromatography/mass spectrometry detectors; GC/MSD) Scan mode로 분석하였다. 분석된 크로마토그램의 정성은 Wiley 275 Library를 이용하였다.

3) 포름알데히드

포름알데히드의 주요 실외 발생원으로는 포르말린 제조, 합판 제조, 합성수지 및 화학제품 제조, 소각로, 석유정제, 유류, 목재, 천연가스 연소시설 등으로 광범위하다. 고농도의 포름알데히드를 흡입하게 되면 기침이 나고, 기관지염, 폐렴, 폐수종 등의 증상이 나타나는 등 호흡기 손상을 초래하며, 심각할 경우 사망에 이를 수도 있다. 또한 포름알데히드는 인간에게 암을 일으킬 수 있는 발암물질로 알려져 있는데, 주로 호흡기에 영향을 미쳐서 비인강암을 유발할 수 있고, 벤젠과 마찬가지로 백혈병 등을 일으킬 수 있다고 한다.

포름알데히드 측정 및 분석방법은 미국산업안전보건연구원의 2016 방법을 참조하였다. 포름알데히드는 2,4-dinitrophenylhydrazine(2,4-DNPH)이 코팅된 실리카 흡착관에 약 0.2 l/min의 유량으로 조정된 저유량 펌프를 연결하여 채취하였다. 포름알데히드 표준물질은 100ug/mL(HCHO-2,4 DNPH) 농도의 Stock solution(SUPELCO)을 사용하였다.

DNPH Cartridge에 Acetonitrile 2mL을 첨가하여 추출한 후, HPLC 분석용 Vial에 담아 최종시험액으로 전처리하고, 고속액체크로마토그래피(High performance liquid chromatography; HPLC)를 사용하여 분석하였다.

4) 총수지산류 (TRAs)

공기 중 수지산류의 측정 및 분석은 영국 보건안전청(Health and Safety Executive; HSE)의 MDHS 83: Resin acids in rosin(colophony) solder flux fume 방법을 참조하였다. 멤브레인 여과지

(Mixed cellulose ester; MCE filter, 0.8μm, SKC, USA)를 장착한 3-piece 카세트를 1~2 l/min의 유량을 유지하는 고유량 펌프에 연결하여 샘플을 채취하였다.

MCE 필터를 이용해 채취한 시료는 유리 바이엘에 옮겨 디에틸에테르(99%, Aldrich, Australia) 3mL를 첨가하고, 30초 동안 초음파를 이용하여 추출하였다. 이 용액을 유리 재질의 일회용 피펫(glass pasteur pipette)을 이용하여 2mL GC용 바이엘에 옮긴 다음 40°C로 유지된 진공오븐에서 용매를 휘발시켰다. 남은 추출 용액은 모두 GC용 바이엘에 추가로 옮겨 완전히 휘발시켰다. 용액이 모두 휘발되면 3mm 유리구슬 2개를 모든 GC용 바이엘에 옮긴 후, 25% DMF dimethylacetate 200μL를 첨가하였다. 그리고 75°C의 진공오븐에서 30분 동안 가열시켜 시료 중 대상 성분을 메틸 에스테르화시켰으며, 가열이 끝나면 상온에서 식힌 후, 내부표준물질인 0.1% 메틸 스테아레이트(GC grade, 99%, Sigma, Australia) 용액 100μL와 톨루엔(HPLC grade, Aldrich, Australia) 100μL를 차례로 첨가하였다. 다음 가스크로마토그래피/불꽃이온화검출기(Gas Chromatography/Flame Ionization Detector; GC/FID)로 분석하였다. 표준용액은 0.01%(w/w) abietic acid(HPLC grade, 75%, Sigma, Australia)를 단계별로 희석하여 제조하였으며, 시료와 동일한 방법으로 전처리를 한 다음 GC/FID로 분석하였다.

5) 다핵방향족탄화수소(PAHs)

다핵방향족탄화수소는 2개 이상의 벤젠고리를 갖는 방향족 탄화수소로서 벤젠고리가 2~4개인 물질은 기체나 고체에 흡착된 형태로 벤젠고리가 5개 이상인 물질은 주로 고체에 흡착된 형태로 자연계에 존재하게 된다. 구성 성분에 따라 200여개의 물질이 있지만 미국 환경보호청이나 미국산업보건연구원 등에서 관심을 갖는 물질은 대표적으로 17개가 있다. 이 중 Benz(a)anthracene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benz(a)pyrene, Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, Dibenzo(a,h)anthracene 등은 폐암, 방광암, 후두암, 그리고 음낭암과 피부암 등을 일으킬 수 있는 발암물질로 알려져 있다.

다핵방향족탄화수소 측정 및 분석방법은 미국산업안전보건연구원 5515 방법을 참조하였다. 다핵 방향족 탄화수소는 테플론(Polytetrafluoroethylene; PTFE) 필터에 튜브를 연결한 상태로 약 2 l/min의 유량으로 조정된 고유량 펌프를 연결하여 채취하였다. 표준시약은 PAHs 16종이 혼합된 TCL Polynuclear Aromatic Hydrocarbons mix(2000ug/ml in CH₂Cl₂:Benzene (1:1))를 SUPELCO(USA)에서 생산되는 제품을 사용하였다. 전처리가 완료된 시료는 AutoSampler(HP 7683 series Injector, USA)가 장착된 가스크로마토그래피/질량분석기(Gas Chromatography/mass spectrometry detectors; GC/MSD) SIM mode로 분석하였다.

6) 일산화탄소, 이산화탄소

일산화탄소 및 이산화탄소는 Model 7545 IAQ-CALCTM(USA, TSI)을 이용하여 측정하였다. 이 장비는 일산화탄소, 이산화탄소, 온도, 그리고 습도를 측정할 수 있는 장비로써 시간대별 농도 변화 수준 확인할 수 있는 실시간 그래프를 볼 수 있는 장점을 갖고 있다.

IV. 결과 및 고찰

1) 미세먼지

연소관 1m 떨어진 지점에서의 PM10 농도는 평균적으로 약 5,000 ~ 23,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보였다. 이는 40 ~ 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보인 대조군과 비교해서 100배 이상 높은 수준이었다. PM2.5의 경우, 평균적으로 약 4,000 ~ 17,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보였으며, 이 역시 대조군에 비해 높은 수준이었다. 참고로 국내의 PM10에 대한 기준은 연간평균치 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 24시간평균치로는 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. PM2.5에 대한 노출 기준이 2015년 1월에 제정되어 연간평균치 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간평균치로는 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 규제하고 있다. 세계보건기구와 미국에서는 PM-2.5에 대해 각각 25와 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 제시하고 있다. 측정 시간이 대략 20분 ~ 30분 정도 소요된 상황이었기 때문에 위의 대기기준과 직접 비교는 불가능하지만, 다만 어느 정도 수준의 미세먼지가 발생하고 있는지 상대적인 양을 가늠해야 한다.

소나무 낙엽을 태울 때 발생하는 미세먼지의 양이 가장 적었으며, 소나무 생엽과 가지가 포함된 경우에 비해 약 1/4 정도의 수준이었다. 굴참나무 낙엽의 경우에는 약 1/3 정도 수준이었다. 소나무 생엽과 가지가 섞인 연소 실험의 경우, 100%가 넘는 수분량 때문에 연소 환경의 온도가 낮아져서 다른 연소 실험과 확연한 차이가 발생했을 것으로 판단된다<Table 2>.

<Table 2> Distribution of fine particle material thickness by fuel component

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Burning substance	Classification	Point 1		Point 2		Control	
		PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
Leaves of <i>Pinus densiflora</i>	Mean	5,263.7	4,312.0	5,201.8	4,604.1	43.3	37.4
	Median	5,626.5	4,652.1	5,572.4	5,052.1	26.6	25.7
	Minimum	180.7	143.3	280.3	253.1	18.7	18.7
	Maximum	10,770.1	8,738.3	10,879.6	9,428.3	293.4	293.7
Combination of leaves, live leaves and branches of <i>Pinus densiflora</i>	Mean	23,256.2	17,450.9	18,314.9	15,437.6	56.0	45.7
	Median	18,002.3	15,770.8	11,361.3	10,975.1	30.1	28.7
	Minimum	914.0	838.9	2104.5	1,804.5	20.9	21.0
	Maximum	64,594.6	41,377.2	64,505.9	46,322.9	917.7	523.0
Leaves of <i>Quercus variabilis</i>	Mean	8,296.9	7,395.9	7,627.1	7,256.1	-	-
	Median	6,281.1	5,942.6	7,512.1	7,254.2	-	-
	Minimum	1,613.3	1,385.5	2,250.9	2,023.1	-	-
	Maximum	26,311.9	21,284.3	22,156.6	19,712.7	-	-

우리나라 고용노동부의 고시에는 아직 호흡성분진에 대한 노출기준이 설정되어 있지 않으므로 미국 산업환경보건청이나 미국산업위생전문가협회에서는 호흡성분진에 대해서 각각 5 mg/m^3 , 3 mg/m^3 의 기준을 적용하고 있다. 분석결과, 미국산업위생전문가협회의 작업시간 평균 노출 기준인 3 mg/m^3 수준을 웃돌고 있었고, 대부분의 상황에서 미국산업환경보건청의 작업시간 평균 기준인 5 mg/m^3 을 상회하고 있었다. 가장 높은 농도는 침엽수의 생가지와 침엽수 낙엽을 태우면서 측정된 것으로써 18.3 mg/m^3 의 수준까지 검출되었다.

2) 휘발성유기화합물(VOCs)

고용노동부의 노출기준에 관한 고시에서 벤젠의 경우 8시간 평균 1ppm 그리고 단기간 기준 5ppm을 적용하고 있으며, 톨루엔의 경우 각각 50ppm과 150ppm을 적용하고 있다. 대부분의 경우에서 <Table 3>에서와 같이 벤젠과 톨루엔이 검출되었고, 실외 대조군에 비해서 상대적으로 높은 농도가 분석되었다. 특히, 벤젠은 대조군에서는 전혀 검출되지 않았지만 연소 실험 중에는 10~30ppb에 이르는 농도수준이 확인되었다.

<Table 3> Distribution of VOCs, Formaldehyde and TRAs by fuel component

Burning substance	Measuring Point	Measuring time (Min)	VOCs(ppb)		Formaldehyde (ppm)	Resin acids (mg/m ³)
			Benzene	Toluene		
Leaves of <i>Pinus densiflora</i>	Point 1	41	27.2	32.9	0.24	0.49
	Point 2	38	31.8	45.0	0.21	0.97
Combination of leaves, live leaves and branches of <i>Pinus densiflora</i>	Point 1	22	24.8	27.4	0.69	4.19
	Point 2	22	22.1	21.6	0.46	2.09
Leaves of <i>Quercus variabilis</i>	Point 1	30	25.9	36.4	0.29	0.66
	Point 2	33	13.7	14.4	0.24	0.50
Outside area	Control	81	ND	14.5	0.01	ND

3) 포름알데히드

각 연소 실험에서 발생된 포름알데히드 농도는 0.2~0.7ppm 수준이었으며, 대조군에 비해 현저하게 높은 수준이었다(<Table 3>). 고용노동부의 단기간 노출기준이 1ppm 이므로 상황에 따라서는 기준에 거의 육박하였다. 혹은 미국 산업위생전문가협회와 미국 산업안전보건연구원에서 제시하고 있는 기준, 즉, 한 순간이라도 넘어서는 안 되는 기준이 0.1 혹은 0.3ppm을 초과하였다. 마른 낙엽만을 태우는 지표화보다는 생엽과 가지가 포함된 수관화 상황에서 상대적으로 더 높게 발생하였다. 이는 생엽, 가지에 들어 있는 송진 등의 성분이 연소되면서 발생되었을 것으로 판단된다.

4) 총수지산류 (TRAs)

송진이 열을 받으면 수지산류 이외에 포름알데히드와 같은 다양한 물질들이 발생된다. 이에 영국에서는 1999년 최대노출허용농도로써 8시간 가중 평균 기준 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 단기간 기준으로 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 제정하여 적용하고 있다.

측정 결과 <Table 3>와 같이 연소물질 종류에 따라 농도 범위는 다르지만 $0.5\sim 4.2\text{mg}/\text{m}^3$ 수준이었다. 영국의 단기간 기준과 비교하면 모든 경우에서 영국의 최대 노출허용농도를 초과하고 있는 수준이었다. 대조군에서는 전혀 검출되지 않았다는 점을 고려할 때 일부 과대평가의 가능성이 있으나, 상당한 수준의 수지산류가 발생하고 있다는 판단을 내릴 수 있었다.

5) 다핵방향족탄화수소(PAHs)

다핵방향족탄화수소에 대한 노출기준 및 관리를 위한 가이드라인은 찾아보기 힘들다. 다만 유럽연합 집행위원회의 대기환경 기준에서는 1년 평균 농도로써 $1\text{Mg}/\text{m}^3$ 의 농도 수준을 기준으로 설정하고 있다. 다핵방향족탄화수소의 측정 결과 고용노동부의 노출기준 이상의 농도 수준을 보여주는 경우는 없었다. 다만, 발암성 물질이라 알려진 Benz(a)anthracene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benz(a)pyrene, Indeno(1,2,3-c,d)pyrene, 그리고 Dibenzo(a,h)anthracene 등이 모두 검출되었다. 물론 농도 수준은 낮은 편이지만 모두 불검출되거나 검출되었더라도 극히 미량이었던 대조군(실험동 앞 일반 대기 중 측정)에서의 측정결과와 비교하면 상대적으로 높은 수준이었다.

특히, 유럽연합에서 연간 평균 $1\text{ng}/\text{m}^3$ 의 농도 수준을 기준으로 설정하고 있는 Benzo(a)pyrene의 경우, 대조군에서는 검출되지 않았지만 세 가지 실험 조건에서는 모두 검출(소나무 낙엽 : $0.2724\mu\text{g}/\text{m}^3$, 소나무 낙엽 + 생엽, 가지 : $0.0660\mu\text{g}/\text{m}^3$, 굴참나무 낙엽 : $0.1015\mu\text{g}/\text{m}^3$)되었으며, 농도 수준 역시 기준에 비해 매우 높은 편이었다. 물론, 유럽연합의 기준은 연간 평균에 대한 것이므로 20~40분 정도의 짧은 기간에 검출된 양을 직접적으로 비교하는 것은 맞지 않는 판단이다. 다만 상대적인 발생량을 비교하는 것에 의미를 한정할 필요가 있다.

6) 일산화탄소, 이산화탄소

고용노동부의 화학물질 및 물리적인자의 노출기준에 관한 고시에 따르면 일산화탄소의 경우, 8시간 평균 30ppm의 농도수준 이하로 유지되어야 하고 단기간 노출에 대한 기준은 200ppm이다. 이산화탄소의 경우는 8시간 평균 5,000ppm 이고, 단기간 노출기준은 30,000ppm이다. 고용노동부의 고시는 하루 8시간 동안에 노출되는 양의 평균값이기 때문에 본 연구의 결과와 직접적으로 비교하여 초과 여부를 판단할 수 없다. 다만, 화재 연소시 발생하는 일산화탄소의 농도가 평균 노출에 대한 기준과 단기간 노출에 대한 기준 사이의 농도 수준을 보이고 있음을 확인할 수 있다. <Table 4>에서 알 수 있는 바와

같이 화염이 있는 연소 증보다는 무염연소 단계일 때 농도가 2배 이상 증가하였고, 이는 불완전 연소의 양이 증가하였기 때문으로 추정된다.

<Table 4> Distribution of CO and CO2 thickness by species

(unit: PPM)

Burning substance	Classification	Burning		Burned	
		CO	CO2	CO	CO2
Leaves of <i>Pinus densiflora</i>	Mean	1.1	412.1	27.3	941.9
	Median	1.1	394.5	25.6	904.5
	Minimum	0.6	349.0	0.9	377.0
	Maximum	1.5	626.0	69.4	1,444.0
Combination of leaves, live leaves and branches of <i>Pinus densiflora</i>	Mean	3.5	420.4	34.2	734.6
	Median	4.0	421.0	39.1	794.0
	Minimum	0.5	350.0	0.5	370.0
	Maximum	12.2	571.0	72.3	1,057.0
Leaves of <i>Quercus variabilis</i>	Mean	0.1	400.2	22.6	875.2
	Median	0.1	385.0	24.8	1,011.0
	Minimum	0.0	321.0	0.0	391.0
	Maximum	0.6	733.0	42.7	1,268.0

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 산불 연소 과정 중에 발생 가능한 유해물질을 선정하고 세 가지 연소물질 종류별로 유해물질의 발생량을 평가하였다. 세 가지 연소 실험 조건은 소나무 낙엽, 굴참나무 낙엽, 소나무낙엽 + 생엽, 가지를 태우는 것이었으며 각각 30 분 내외의 시간이 소요되었다. 평가 대상 유해물질은 미세먼지 및 호흡성분진, 다핵방향족탄화수소, 휘발성유기화합물, 총수지산류, 그리고 일산화탄소 및 이산화탄소였다.

미세먼지의 경우, 지역에서 최고 $23\text{mg}/\text{m}^3$ 의 농도수준까지 높아졌고, 개인 노출량으로는 최고 $18.3\text{mg}/\text{m}^3$ 의 농도가 확인되었다. 최고 농도는 소나무 생엽, 가지를 포함해서 연소되는 상황에서 발생하였다. 휘발성유기화합물에서도 백혈병 등을 일으킬 수 있는 벤젠과 같은 물질들이 일반 대기에 비해 높은 수준으로 발생하였다. 천식을 일으키는 물질로 알려진 총 수지산류가 영국 정부의 노출기준을 훨씬 상회하는 수준으로 발생하였고, 동시에 포름알데히드와 같은 발암물질 역시 선진국의 단기간 기준을 초과하는 수준으로 발생하였다. 이 외에 산류 중에서는 폐암 등을 일으키는 것으로 알려진 황산의 농도가 단기간 노출기준 대비 약 30% 수준까지 확인되었다.

일산화탄소와 이산화탄소의 경우, 이산화탄소의 농도는 실내 농도 수준과 비슷한 반면 일산화탄소의 농도가 최고 72.3ppm까지 확인되었지만, 고용노동부의 노출기준에 비하면 낮은 수준이었다. 일산화탄소 및 이산화탄소 역시 소나무 생엽과 생가지를 함께 태울 때 더욱 높은 농도가 관찰되었다.

화학적 인자에 대한 평가결과를 종합해보면 소나무나 굴참나무에 상관없이 건조된 낙엽을 태우는 것보다는 생엽, 생가지를 포함하여 연소가 이루어질 때 다양한 유해물질들이 더 높은 농도로 발생한 것을 확인하였고, 일부 물질들은 고용노동부 혹은 선진국의 노출기준을 초과함을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 종합해보면 아래와 같이 정리할 수 있다.

첫째, 산불 진화 활동 시 순간적으로 고농도의 미세먼지에 노출되고 있어 호흡기의 건강영향에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

둘째, 미세먼지 외에도 총수지산류와 같은 천식을 유발할 수 있는 물질에 고농도로 노출 가능하다.

셋째, 발암성을 갖는 벤젠, 포름알데히드와 같은 물질들에 대해 일반적인 대기 환경에서보다 훨씬 높은 농도에 노출이 가능하다.

넷째, 수관화로 확산되는 경우 즉 생엽과 생가지가 한꺼번에 연소될 경우 위의 유해물질 노출량이 급격히 늘어나기 때문에 실제 현장에서는 높은 수준의 노출이 발생할 것으로 예상된다.

참고문헌

- The National Institute for Occupational Safety and Health. 2015. NIOSH Manual of Analytical Methods. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/>
- Occupational Safety & Health Administration. 2015. Permissible Exposure Limits. <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/index.html>.
- World Health Organization. 2010. Selected Pollutants: WHO Guideline for Indoor Air Quality.
- Barregard, L., G. Sallsten, P. Gustafson, L. Andersson, L. Johansson, and S. Basu. 2006. Experimental Exposure to Wood-smoke Particles in Healthy Humans: Effects on Markers of Inflammation, Coagulation, and Lipid Peroxidation. *Inhalation Toxicology*. 18(11): 845-863.
- Bowman, D. M. J. S., J. K. Balch, P. Artaxo, W. J. Bond, J. M. Carlson, and M. A. Cochrane. 2009. *Fire in the Earth System*. *Science*. 324(5926): 481-484.
- Cochrane, M. A., and W. F. Laurance. 2008. Synergisms among Fire, Land Use, and Climate Change in the Amazon. *AMBIO. A Journal of the Human Environment*. 37(7): 522-527.
- Danielsen, P. H., S. Loft, A. Kocbach, P. E. Schwarze, and P. Møller. 2009. Oxidative Damage to DNA and Repair Induced by Norwegian Wood Smoke Particles in Human A549 and THP-1 Cell Lines. *Mut Res-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 674(1-2): 116-122.
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne. 2008. Land Clearing and the Biofuel

- Carbon Debt. *Science*. 319(5867): 1235.
- Health and safety Executive. 2015. Methods for the Determination of Hazardous Substances (MDHS) guidance. <http://www.hse.gov.uk/pubns/mdhs/>.
- Johnston, F. H., S. B. Henderson, Y. Chen, J. T. Randerson, M. Marlier, R. S. Defries, P. Kinney, D. M. Bowman, and M. Brauer. 2012. Estimated Global Mortality Attributable to Smoke from Landscape Fires. *Environmental Health Perspectives*. 120(5): 695-701.
- Kocbach, A., E. Namork, and P. E. Schwarze. 2008. Pro-inflammatory Potential of Wood Smoke and Traffic-derived Particles in a Monocytic Cell Line. *Toxicology*. 247(2-3): 123-132.
- Korea Forest Service. 2015. <http://www.forest.go.kr/>
- Langmann, B., B. Duncan, C. Textor, J. Trentmann, and G. R. van der Werf. 2009. Vegetation Fire Emissions and Their Impact on Air Pollution and Climate. *Atmospheric Environment* 43(1): 107-116.
- Lee, Byung Doo, Ho Joong Youn, Kyo Sang Koo and Kyung Ha Kim. 2012. Estimation of Biomass Loss and Greenhouse Gases Emissions from Surface Layer Burned by Forest Fire. *Journal of Korean Forest Society*. 101(2): 286-290
- Lohman, D. J., D. Bickford, and N. S. Sodhi. 2007. The Burning Issue. *Science*. 316(5823): 376.
- Naeher, L. P., M. Brauer, M. Lipsett, J. T. Zelikoff, C. D. Simpson, and J. Q. Koenig. 2007. Woodsmoke Health Effects: A Review. *Inhalation Toxicology*. 19(1): 67-106.
- Tosca, M. G., J. T. Randerson, C. S. Zender, M. G. Flammer, and P. J. Rasch. 2010. Do Biomass Burning Aerosols Intensify Drought in Equatorial Asia During El Niño?. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10: 3515-3528.
- Van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, and P. S. Kasibhatla. 2010. Global Fire Emissions and the Contribution of Deforestation, Savanna, Forest, Agricultural, and Peat Fires(1997-2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10: 11707-11735.
- Yokelson, R. J., T. Karl, P. Artaxo, D. R. Blake, T. J. Christian, and D. W. T. Griffith. 2007. The Tropical Forest and Fire Emissions Experiment: Overview and Airborne Fire Emission Factor Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7: 5175-5196.

Korean References translated from the English

- 이병두, 윤호중, 구교상, 김경하. 2012. 산불로 인한 지표층 연소량 및 온실가스 배출량 추정. 한국 임학회지. 101(2): 286-290.
- 산림청. 2015. <http://www.forest.go.kr/>

이병두: 서울대학교에서 “GIS와 RS를 이용한 2000년 삼척산불 행동 특성 분석 및 산불확산예측모델 개발”로 농학박사학위를 취득하였으며(2005. 08), 현재는 국립산림과학원 산림방재연구과에서 연구관으로 재직 중이다. 산불과 관련된 다양한 연구 과제를 수행하였고, 이를 통해 다수의 논문을 발표하였다. 주 연구분야는 산불예방 및 진화기술, 산불위험 평가 분야이다(byungdoo@korea.kr).

김성용: 공주대학교에서 “산불위험지 평가를 위한 주요 침엽수종의 연료특성 분석에 관한 연구”로 농학박사학위를 취득하였으며(2015. 08), 현재는 국립산림과학원 산림방재연구과에서 박사연구원으로 재직 중이다. 주 연구 분야는 산불 연료모델과 관련된 연구를 수행하였고, 이를 통해 “우리나라 주요 침엽수종의 수관연료특성 평가”, “숲가꾸기 사업이 수관층 연료특성에 미치는 영향” 등을 논문을 작성하였다(kitaco1@korea.kr).

윤호중: 서울대학교에서 “山林 小流域에서의 流出 特性和 單位流量圖에 關한 研究”로 농학박사학위를 취득하였으며(1995. 02) 현재는 국립산림과학원 산림방재연구과 과장으로 재직 중이다. 산지토사재해 및 산지사방과 관련된 다양한 연구과제를 수행하였고, 이를 통해 다수의 논문을 발표하였다(yount@korea.kr).

강상민: 부경대학교에서 지구환경과학 분야로 이학사를 취득하였으며, 현재는 국립산림과학원 산림방재연구과에서 연구원으로 재직 중이다. 산불진화와 관련된 연구과제에 참여중이며, 주요 연구활동으로는 “토지이용도와 기상인자에 의한 실제증발산량의 계절 변동 분석”이라는 주제로 학술 발표를 수행한 바 있다(kang3257@korea.kr).

서영광: 경상대학교에서 열역학 및 재료역학으로 공학사를 취득하였으며(2003. 02), 현재 국립산림과학원 산림방재연구과에서 연구원으로 재직 중이다. 산불진화, 예방 및 연소실험 연구에 참여중이며, 산불원인 감식지표를 개발하고 있다(fofireco@korea.kr).

김 원: 서울대학교에서 “어린이 보육시설에서의 먼지 내 프탈레이트 농도와 관련 요인”으로 보건학박사학위를 취득하였으며(2014.08), 현재는 원진재단부설 노동환경건강연구소 화학물질센터의 팀장으로 재직 중이다. 산업보건 및 환경보건에 관련된 연구과제를 수행하였으며, 주 연구분야는 작업환경에서의 유해물질 노출평가 및 직업성 질병에 관한 원인규명이다(gganna@hanmail.net).

허승무: 홍익대학교에서 “자동차 조립 공정에서 동력 수동구에 의하여 발생하는 국소진동의 측정과 분석에 관한 연구”로 인간공학석사학위를 취득하였으며(2004.8월) 현재 서울과학기술대학교 안전공학 박사과정 중이다. 원진재단부설 노동환경건강연구소 근골격계센터 인간공학팀장으로 재직 중이며, 안전공학 및 근골격계 질환에 관련된 연구과제를 수행하였으며, 주 연구분야는 작업환경에서의 근골격계 위험요인 평가 및 노동강도 평가이다(ken98@naver.com).