Landsat TM 영상자료를 활용한 삼척 대형산불 피해지의 비이산화탄소 온실가스 배출량 추정

원명수^{1*} · 구교상¹ · 이명보¹ · 손영모²

¹국립산림과학원/산불연구과, ²국립산림과학원/산림평가과

(2008년 2월 12일 접수; 2008년 3월 14일 수락)

Estimation of non-CO₂ Greenhouse Gases Emissions from Biomass Burning in the Samcheok Large-Fire Area Using Landsat TM Imagery

Myoung Soo Won^{1*}, Kyo Sang Koo¹, Myung Bo Lee¹ and Yeong Mo Son²

¹Division of Forest Fire, Korea Forest Research Institute

²Division of Forest Sink and Forest Land Use, Korea Forest Research Institute,

Cheongyangri-2 dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-712, Korea

(Received February 12, 2008; Accepted March 14, 2008)

ABSTRACT

This study was performed to estimate non-CO₂ greenhouse gases (i.e., GHGs) emission from biomass burning at a local scale. Estimation of non-CO₂ GHGs emission was conducted using Landsat TM satellite imagery in order to assess the damage degree in burnt area and its effect on non-CO₂ GHGs emission. This approach of estimation was based on the protocol of the 2003 *IPCC Guidelines*. In this study, we used one of the most severe fire cases occurred Samcheok in April, 2004. Landsat TM satellite images of pre- and post-fire were used 1) to calculate delta normalized burn ratio (*dNBR*) for analyzing burnt area and burn severity of the Samcheok large-fire and 2) to quantify non-CO₂ GHGs emission from different size of the burnt area and the damage degree. The analysis of *dNBR* of the Samcheok large-fire indicated that the total burnt area was 16,200ha and the size of the burnt area differed with the burn severity: out of the total burnt area, the burn severities of Low (*dNBR* < 152), Moderate (*dNBR* = 153-190), and High (*dNBR* = 191-255) were 35%, 33%, and 32%, respectively. It was estimated that the burnt areas of coniferous forest, deciduous forest, and mixed forest were about 11,506ha (77%), 453ha (3%), and 2,978ha (20%), respectively. The magnitude of non-CO₂ GHGs emissions from the Samcheok large-fire differed significantly, showing 93% of CO (44.100Gg), 6.4% of CH₄ (3.053Gg), 0.5% of NO_x (0.238Gg), and 0.1% of N₂O (0.038Gg). Although there were little changes in the total burnt area by the burn severity, there were differences in the emission of non-CO₂ GHGs with the degree of the burn severity. The maximum emission of non-CO₂ GHGs occurred in moderate burn severity, indicating 47% of the total emission.

Key words : Forest fire, Biomass burning, Non-CO₂ GHGs, Normalized burn ratio, Combustion efficiency, Emission factor, Landsat TM

I. 서 론

산불발생시 방출되는 온실가스는 생태계와 사회·경제 분야에 지대한 영향을 미치고 있다. 우리나라의 경

우 최근 10년간(1997-2006) 연평균 495건의 산불이 발생하였다. 이 중 84%에 해당하는 산불이 건조기인 1월~5월에 발생하였다(Won *et al.*, 2006). 특히 같은 기간에 300ha 이상의 대형 산불이 10건 발생하여

28,377ha의 산림과 재산피해를 가져왔으며, 대부분 4월에 집중되었다(Korea Forest Service, 2006). 이는 10년간 산불로 인한 전체 피해면적의 72%에 해당하는 수치로 봄철 대형산불로 인한 피해는 매우 심각하다고 할 수 있다(Won *et al.*, 2007).

산불피해로 인한 분광 패턴의 변화 분석은 산불피해 전후 영상의 정규탄화지수(normalized burn ratio; *NBR*)와 정규식생지수(normalized difference vegetation index; *NDVI*)와 같은 분광밴드들의 조합을 이용하여 수행될 수 있다. 특히, *NBR*과 *delta normalized burn ratio(dNBR)*은 원격탐사 자료에서 산불 피해강도를 추정하는데 유용하다(Key and Benson, 2002, 2006; van Wagtenonk *et al.*, 2004; Cocke *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2006). *NBR*은 1994년 미국의 Glacier 국립공원에서 발생한 대형산불 피해지역을 대상으로 산불피해 강도를 분석하기 위해 Key and Benson(2002)에 의해 처음 고안되었다. 이 후 *dNBR*과 종합피해지수(composite burn index; *CBI*)는 원격탐사 기술과 현장조사 자료와 접목하여 산불피해도 제작에 활용되고 있다(Key and Benson, 2006). 산불피해 면적 산정 및 피해강도(burn severity) 분석을 위해서 *dNBR*과 함께 *delta normalized difference vegetation index(dNDVI)*도 이용되었으나, 산불 직후에는 *dNDVI*보다 *dNBR*이 우수한 결과를 산출하였다(Key and Benson, 2006; Lentile *et al.*, 2006; van Wagtenonk *et al.*, 2004). 이들은

산불피해강도 분석시 현장조사자료(*CBI*)와 *dNBR*의 표준편차 구간을 설정하여 피해강도를 산출한 후 산불피해지역의 경관평가에 활용하였다. 우리나라에서는 Won *et al.*(2007)이 Landsat TM/ETM⁺ 영상자료에서 *NBR*을 추출하여 삼척, 청양, 양양 대형산불피해지를 대상으로 산불강도를 평가하였다.

교토의정서 발효 이후 세계 각국은 산불, 산림전용 등 산림교란에 의해 발생하는 이산화탄소 및 비이산화탄소(non-CO₂) 흡수 및 배출량을 정량화하여 경제적으로 불이익을 받지 않기 위한 연구 개발을 활발히 진행하고 있다. 그러나, 우리나라에서는 산불로 인해 배출되는 비이산화탄소를 정량적/과학적으로 측정 및 평가할 수 있는 기초적 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 바이오매스 연소 시 배출되는 비이산화탄소의 배출량을 정량적으로 추정하기 위한 방법론을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 위성영상 자료를 활용, Tier 2와 3* 수준으로 가기 위한 활동자료 구축 방안을 모색하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 산불피해지 공간자료 구축 및 산불피해강도 분석

2.1.1. 산불피해지 위성영상자료

본 연구는 2000년 4월 7일 발생한 우리나라 최대 산불피해지인 강원도 삼척지역을 대상으로 하였다(Fig.

Fig. 1. Study area and Landsat TM imagery of pre- and post-fire (Samcheok large-fire area).

* 온실가스 배출량 추정값의 정확도는 이용할 수 있는 자료에 달려 있다. 수준 1에서는 각 온실가스 배출량을 IPCC에서 권고하는 접근방법과 기본자료를 이용하여 추정할 수 있다. 수준 2에서는 국가 고유 활동자료나 배출계수를 이용하는 반면, 수준 3에서는 모든 국가 고유 자료와 방법을 이용한다(IPCC, 2003).

1a). 산불피해지역의 피해면적 구획과 피해강도 분석을 위해 산불피해 전과 후의 Landsat TM 영상을 사용하였다. Landsat TM 영상은 가시광선, 근적외선, 중적외선 대역의 7개 밴드를 가지고 있는 30m(열적외 밴드 120m) 공간해상도의 다중분광영상이다.

분석에 사용된 강원도 삼척 일대의 Landsat TM 위성영상은 Fig. 1b, 1c와 같다. Fig. 1b는 산불발생 전인 1999년 5월 7일 sub-scene 영상이고 Fig. 1c는 산불피해 직후인 2000년 5월 25일 촬영된 sub-scene 영상이다. Landsat TM 영상자료에 대하여 기존에 기하보정된 영상을 이용하여 영상대 영상 정합(image to image)을 통해 Transverse Mercator(TM) 좌표체계(중부원점)에 따라 투영변환한 후, 공 1차 내삽법(bilinear interpolation)에 의해 각 화소값(digital number)을 30m×30m 크기로 재배열하였으며, 이 때 영상 좌표변환은 X, Y 각 방향에 대해 RMSE 0.5 픽셀 이내의 정확도로 수행하였다.

2.1.2. 정규탄화지수(NBR)를 이용한 산불피해지도 제작

본 연구에서는 NBR 산출을 위해 전자기적 분광대역인 근적외 및 중적외 밴드(Landsat TM과 ETM+ 센서의 4번과 7번 밴드에 해당)에서의 반사율들의 조합인 식 (1)을 이용하였다. 그리고 식 (2)를 통해 산불피해강도를 파악하였다.

$$NBR = (R_4 - R_7) / (R_4 + R_7) \quad (1)$$

여기서 R_4 는 TM 4번 밴드의 반사율이며, R_7 은 TM 7번 밴드의 반사율이다.

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \quad (2)$$

NBR은 -1에서 +1의 범위를 가지며 dNBR은 -2에서 +2의 범위를 가지기 때문에 분석이 용이하도록 0~255 정수값을 갖도록 선형변환하였다.

2.2. 산불로 인한 비이산화탄소 배출량 추정자료 준비

2.2.1. 비이산화탄소 온실가스량 추정식

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)에서는 산불 발생시 직접 배출되는 비이산화탄소 온실가스의 추정을 위해 두 가지 방법을 제시하고 있는데 국가별 지역자료의 유무에 따라 적절한 방법을 선택하여 온실가스의 배출을 추정해야 한다(IPCC, 2003). 본 연구에서는 2000년 발생한 삼척 대형산불 피해지

를 대상으로 우리나라 실정에 맞는 모델구축과 바이오매스 연소시 직접 배출되는 비이산화탄소 온실가스 추정을 위해 IPCC에서 제시하고 있는 식 (3)을 적용하였다(IPCC, 2003).

$$L_{fire} = A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

여기에서, L_{fire} 는 산불로 인해 배출된 온실가스량(ton), A는 연소면적(ha), B는 '이용가능한' 연료량(kg dry matter ha⁻¹), C는 연소효율(또는 연소된 바이오매스 비율), D는 배출계수(g (kg dry matter)⁻¹)이다.

2.2.2. 바이오매스 축적량(연료량) 추정

산불에서 직접 배출된 온실가스량을 추정하기 위해 우선적으로 연소된 연료량을 파악하여야 한다. 연료량 추정을 위해 산불피해전인 1999년의 임상별 임목축적 DB(Korea Forest Service, 2005)와 바이오매스 축적량 환산식(Son *et al.*, 2007)을 이용하였다. 이 환산식을 이용할 때, 침엽수와 활엽수의 확장계수 적용을 위해 Table 1의 임상별 전건비중(E), 수간대 지상부 바이오매스 비율(F), 지상부대 전체 바이오매스 비율(G)을 적용하였다(Son *et al.*, 2007). 이 방법은 현재 우리나라가 '기후변화에 관한 유엔 기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)'에 제출하는 국가 온실가스 인벤토리 보고서 상 산림부문의 통계량을 계정하는 공식적인 방법이며, 현재 3차 국가보고서가 작성 중에 있다(IPCC, 2003). 본 연구에서는 국립산림과학원에서 제작한 1:25,000 임상도를 활용하여 임상의 공간적 분포를 파악하였으며, 임상도에서 혼효율을 파악하기 곤란하기 때문에 혼효율에 따라 혼효림의 바이오매스 축적량이 과대 혹은 과소 추정될 수 있어 불확실성이 증가할 수 있는 한계가 있다.

Table 1. Biomass expansion factors for estimating biomass stock of forest types¹

Forest type	Anhydrous density (E) (dry matter/m ³)	Ratio of above ground biomass/stem (F)	Ratio of total biomass/above ground biomass (G)
Conifer	0.47	1.29	1.28
Deciduous	0.80 ²	1.22	1.41

¹Source: Son *et al.*(2007)

²Anhydrous density value of deciduous trees was slightly overestimated.

Table 2. Combustion efficiency of IPCC Good Practice Guideline¹

Vegetation type	Sub-category	Mean	SD	No. m ²	Range	No. r ³
Boreal forest	wildfire(general)	0.40	0.06	2	0.36-0.45	2
	crown fire	0.43	0.21	3	0.18-0.76	6
	surface fire	0.15	0.08	3	0.05-0.73	3

¹Source: IPCC (2003)²No. m indicates the number of observations for the mean.³No. r indicates the number of observations for the range.**Table 3.** IPCC (2003) emission factors (G/kg dry matter combusted)

Categories	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	N ₂ O ²	Source
All vegetation type ¹	1,403-1,503	67-120	4-7	0.5-0.8	0.10	IPCC(1994)
Forest fires	1,531	112	7.1	0.6-0.8	0.11	Kauffman <i>et al.</i> (1995)
Forest fires	1,580	130	9	0.7	0.11	Delmas <i>et al.</i> (1995)

¹It assumed that carbon content was 41-45% and combustion completeness was 85-100%.²It was calculated from data of Crutzen and Andreae (1990) assuming nitrogen/carbon ratio of 0.01.

침엽수 바이오매스 축적량(BMc)

$$= E \cdot F \cdot G \cdot (\text{침엽수 임목축적})$$

활엽수 바이오매스 축적량(BMd)

$$= E \cdot F \cdot G \cdot (\text{활엽수 임목축적}) \quad (4)$$

혼효림 바이오매스 축적량(BMm)

$$= (BMc + BMd) \times 0.5$$

2.2.3. 연소효율

본 연구에서는 IPCC 기본값인 연소효율을 적용하였다(IPCC, 2003; Table 2). 적용한 연소효율값은 전문가 판단에 의해 수관화 연소(피해강도 ‘심’)는 0.43, 지표화 연소(피해강도 ‘경’)는 0.15, 일반적 적용(피해강도 ‘중’)을 위해서는 0.40이다.

2.2.4. 배출계수

본 연구에서는 IPCC(2003)의 내용 중 Delmas *et al.*(1995)이 제시한 기본 배출계수를 적용하였다(Table 3). 즉, CO₂ 1,580, CO 130, CH₄ 9, NO_x 0.7, N₂O 0.11를 각각 적용하였으며, N/C 비율은 IPCC에서 제시한 기본값인 0.01을 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 삼척 산불피해지의 피해면적 및 피해강도

산불피해지역의 구획을 위해 분석된 *dNBR* 주제도를 2000년 국립산림과학원에서 구축한 산불피해 경계 GIS자료를 활용하여 절출한 후 산불강도에 따른 피해

면적을 산출하였다.

산불피해 전과 후의 *dNBR* 값을 계산하여 산불피해 정도를 파악할 수 있다. 왜냐하면 *dNBR* 알고리즘에 사용된 밴드7이 토양에 민감하게 반응하여 산불피해지역에서는 반사값이 증가하지만 식생의 활력도를 평가할 수 있는 밴드4는 산불피해로 인해 분광값이 감소하는 특성이 있기 때문이다. 즉, 산불피해를 받은 식생은 피해정도가 심할수록 식생활력도가 급격히 떨어지고 수관층과 지표층이 완전 연소된 지역은 토양 반사로 인해 분광값이 증가한다(Key and Benson, 2006; Jensen, 2002). 따라서 *dNBR*은 산불피해강도를 평가하는 지표로 활용될 수 있고 산불피해 지역의 통계분석을 통해 피해정도와 강도 등급을 세분화할 수 있다. 본 연구에서는 삼척 산불피해지 전후의 *NBR*값을 계산하였고, 이후 시기별 *dNBR* 통계량(평균, 표준편차 등)을 산출한 후 각 구간별 임계값(threshold)을 추출하여 산불강도별 피해등급을 구분하였다. *dNBR* 변화량에 대한 구간별 피해등급은 Table 4와 Fig. 2와 같다. 삼척 산불피해지 *dNBR* 분석 결과, 피해강도 ‘중(moderate)’에 해당하는 *dNBR* 구간 153-190에서 33.5%를 차지하여 가장 넓은 분포를 보였으며, 피해강도 ‘심(high)’에 해당하는 *dNBR* 구간 191-255에서 약 32%의 면적분포를 보였다(Table 4). *dNBR* 분석 결과 삼척지역의 산불에 의한 전체 피해면적은 16,200ha로 나타났다.

3.2. 삼척 산불피해지의 바이오매스 추정

임상별 산불피해 면적을 평가하기 위해 1:25,000

Table 4. $dNBR_{1999-2000}$ of Samcheok forest fire area and burn severity classes (Mean(μ)=171.1, Std. D(δ)=37.99, N=180,006)

Burn severity	Classes	Intervals	Threshold	Pixel number	Damage area (ha)	Percentage (%)
Low	Unburned	$x < \mu - 2\delta$	0-76	1,036	93	0.6
	Very low	$\mu - 2\delta \leq x < \mu - 1\delta$	77-114	9,011	811	5.0
	Low	$\mu - 1\delta \leq x < \mu$	115-152	52,701	4,743	29.3
Moderate	Moderate	μ	153-190	60,236	5,421	33.5
High	High	$\mu \leq x < \mu + 1\delta$	191-228	43,270	3,894	24.0
	Very high	$\mu + 1\delta \leq x < \mu + 2\delta$	229-255	13,752	1,238	7.6
	Total			180,006	16,200	100.0

Fig. 2. Change of burn severity by $dNBR_{1999-2000}$ in Samcheok forest fire area.

축적의 수치임상도를 활용하여 침엽수, 활엽수, 혼효림으로 자료를 통합, 구분하였으며, $dNBR$ 에 의해 구분된 산불피해 경계자료를 중첩하여 임상별 산림피해 면적을 추출하였다. 자료 구축시 죽림과 무림목지는 면적이 협소하여 분석에서 제외하였다. 삼척산불로 인한 임상별 피해 면적은 침엽수림 11,506ha(77%), 활엽수림 453ha(3%), 혼효림 2,978ha(20%)으로 평가되었다 (Fig. 3). 2005년 임업통계연보(Korea Forest Service, 2005)에 따르면 삼척산불 피해전인 1999년 우리나라의 임상별 산림면적, 임목축적은 Table 5와 같다. Table 5의 1ha 당 임상별 바이오매스 축적량(kg d.m. ha^{-1})은 Son *et al.*(2007)이 개발한 식 (4)를 적용하여 계산한 결과로 침엽수림에서는 47,672kg d.m. ha^{-1} , 활엽수림 86,314kg d.m. ha^{-1} , 혼효림 74,199kg d.m. ha^{-1} 으로 추정되었다. 그러나 활엽수 전건비중이 다소 과대평가되어 활엽수 및 혼효림 바이오매스 축적량이

과대평가될 수 있고, 그 결과 비이산화탄소 온실가스 배출량의 불확실성이 높아질 수 있다. 따라서 현재 국립산림과학원에서는 우리나라 활엽수 국가고유값을 재계산 중에 있다. 또한 위성영상 분류기법을 활용하여 산림지역의 침엽수와 활엽수의 혼효비율에 따라 혼효림을 구분한다면 과대 혹은 과소 평가될 수 있는 바이오매스량의 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 삼척지역의 바이오매스 연소에 의한 비이산화탄소 온실가스 배출량 추정

산불로 인해 연소되는 바이오매스 비율(combustion efficiency)은 100%가 될 수 없으며, 이는 암내 연료가 연소할 때 완전연소가 불가능하다는 것을 의미하는 것이다. 일반적으로 연소효율은 50%에서 95%까지로 추정하고 있으며(Ward, 1990), 연소효율의 계산은 모든 탄소가 이산화탄소로 배출된다고 가정하고 이산화

Fig. 3. Forest type of Samcheok forest fire area.

탄소에 포함되어 있는 실제 탄소비율로 측정할 수 있다. 대개 연소효율은 연기가 나고 화세가 약한 불에서 가장 낮고 통풍이 잘되고 화세가 강한 산불의 경우에 가장 높다. 연무를 많이 동반하는 산불의 경우 미립자와 일산화탄소의 배출이 매우 높다. 즉 피해강도가 낮은 산불은 미립자 배출량이 많은 반면 연소효율은 낮다고 할 수 있다(Ward, 1990).

삼척 대형산불 피해지의 바이오매스 연소로 인해 직접 배출된 비이산화탄소 배출량 추정을 위해 IPCC에서 제시한 식 (3)을 적용한 결과, 본 연구의 대상인 4 종의 비이산화탄소 온실가스의 총배출량을 100%로

Table 5. Forest land area, growing stock, biomass stock per hectare by forest type of South Korea in 1999

Categories	Forest Land Area ¹ (ha)	Growing Stock ¹ (m ³)	Biomass Stock ² (kg d.m. ha ⁻¹)
Coniferous	2,727,122	167,514,462	47,672.01
Deciduous	1,676,359	105,143,357	86,314.50
Mixed	1,851,072	115,100,403	74,199.17
Others	175,448	-	-
Total	6,430,001	387,758,222	208,183.68

¹Korea Forest Service (2005)

²Biomass stock in terms of equation 4 (Son *et al.*, 2007)

보았을 때 CO 93%(44.100Gg), CH₄ 6.4%(3.053Gg), NO_x 0.5%(0.238Gg), N₂O 0.1%(0.038Gg)의 순으로 배출되었다. 단, 피해강도별로 연소효율을 적용할 때, 비이산화탄소 배출량 추정시 산불에 취약한 침엽수림은 피해강도 ‘심’ 지역으로 가정하였고 상대적으로 덜 취약한 혼효림은 피해강도 ‘중’ 지역으로 가정하였다. 그리고 다른 임상구조에 비해 산불에 강한 활엽수림은 대부분 지표화지(surface fire area)로 피해강도 ‘경’ 지역으로 가정하였다. 삼척 산불피해지의 이령림에 대한 자료의 부재로, 동일 임상의 바이오매스량을 적용하여 추정하였기 때문에 불확실성이 내재되어 있으며, 향후 이에 대한 보완연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 Table 6의 피해지역을 임상별(침엽수/활엽수/혼효림) 피해강도(심/중/경)에 따라 9가지 유형으로 분류하여 재계산한다면 오차범위를 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

비이산화탄소 가스 배출량 추정을 위해 적용한 추정계수는 Table 6과 같으며, 산불피해가 심한 지역에서는 CO 13.676Gg, CH₄ 0.947Gg, NO_x 0.074Gg, N₂O 0.012Gg가 배출된 것으로 추정되었다(Table 7). 삼척 산불피해지의 강도별 피해면적은 32%~35%의 분포로 고른 양상을 보이고 있지만 피해강도 ‘중’ 지역에서 배출되는 비이산화탄소 배출량이 전체의 47%를 차지

Table 6. Factors for non-CO₂ GHG emissions in the Samcheok large-fire area

Damaged area (ha)		Biomass (kg dry matter ha ⁻¹)		Combustion efficiency		Emission factors*	
High	5,132	Coniferous	47,670.01	Crown fire	0.43	CH ₄	9
Moderate	5,421	Mixed	74,199.17	General	0.40	CO	130
Low	5,647	Deciduous	86,314.50	Surface fire	0.15	N ₂ O	0.11
						NO _x	0.7

*g/kg dry matter combusted.

Table 7. Estimation of non-CO₂ GHG emissions from biomass burning (Unit : Gg)

Burn severity	CH ₄	CO	N ₂ O	NO _x
High	0.947	13.676	0.012	0.074
Moderate	1.448	20.917	0.018	0.113
Low	0.658	9.507	0.008	0.051
Total	3.053	44.100	0.038	0.238

하여 배출율이 가장 높은 것으로 나타났고 피해가 가장 심한 지역에서는 상대적으로 낮은 31%의 비이산화탄소가 배출된 것으로 분석되었다.

적 요

지구온난화 문제는 국지적, 국내적 환경문제가 아닌 범지구적 차원에서 해결하여야 할 문제로 온실가스 규제와 지구환경의 조화를 위한 국제적 노력이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 바이오매스 연소시 배출되는 비이산화탄소의 배출량을 정량적으로 추정하기 위한 방법론을 제시하고자 하였고, 산불피해지 구분은 물론 피해강도에 따라 배출되는 비이산화탄소 온실가스를 정량적으로 추정하기 위해 위성영상 자료를 활용하였으며, IPCC 기준인 Tier 2 수준으로 비이산화탄소 온실가스 배출량을 추정하였다.

본 연구에서는 2000년 4월에 발생한 우리나라 최대 산불인 삼척피해지를 대상으로 산불 전후 동일시기에 관측된 Landsat 위성영상으로부터 정규탄화지수(*NBR*)를 추출하여 산불피해지역과 피해강도를 정량적으로 분석하였다. 위성영상에서 추출된 피해면적과 피해강도별 분석자료는 바이오매스 연소로 인해 직접 배출되는 비이산화탄소 배출량 추정을 위한 활동자료로 활용하였다. 비이산화탄소 배출량 추정을 위해 IPCC의 추정식을 이용하였다. 산불피해강도별 연소효율은 피해강도가 ‘심’(burn severity: high)인 수관화 지역의 경우 0.43, 피해강도 ‘중’(burn severity: moderate) 0.40, 그리고 피해강도가 ‘경’인 지표화지(burn severity: low)의 경우는 0.15를 적용하였다. 바이오매스 연소시 배출되는 비이산화탄소 온실가스별 배출계수는 CO 130, CH₄ 9, NO_x 0.7, N₂O 0.11 값을 적용하였다. 삼척 산불피해지의 *dNBR*에 의한 피해강도 분석 결과, 전체 피해면적은 16,200ha로 나타났으며, 피해강도는 ‘경(Low: *dNBR* 152 이하)’ 35%, ‘중(Moderate: *dNBR* 153-190)’ 33%, ‘심(High: *dNBR* 191-255)’ 32%의 면적분

포를 보였다. 임상별 피해면적은 침엽수림 11,506ha(77%), 활엽수림 453ha(3%) 그리고 혼효림에서 2,978ha(20%)의 피해를 입은 것으로 평가되었다. 삼척 산불피해지의 바이오매스 연소로 인해 직접 배출된 비이산화탄소 배출량 추정 결과, CO 93%, CH₄ 6.4%, NO_x 0.5%, N₂O 0.1%의 순으로 배출량이 많았다. 삼척 산불피해지의 강도별 피해면적은 32%~35%의 분포로 고른 양상을 보이고 있지만 피해강도 ‘중’ 지역에서 배출된 비이산화탄소의 양이 전체의 47%를 차지하여 배출율이 가장 높은 것으로 나타났다. 삼척산불 피해지의 총 비이산화탄소 온실가스 배출량은 CO 44.100Gg, CH₄ 3.053Gg, NO_x 0.238Gg 그리고 N₂O는 0.038Gg이 배출된 것으로 추정되었다.

REFERENCES

- Cocke, A. E., P. Z. Fule, and J. E. Crouse, 2005: Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire* **14**(2), 189-198.
- Crutzen, P. J., and M. O. Andreae, 1990: Biomass burning in the Tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* **250**(4988), 1669-1678.
- Delmas, R., J. P. Lacaux, and D. Brocard, 1995: *Determination of Biomass Burning Emission factors: Methods and Results*. Environmental Monitoring and Assessment 38, Kluwer Academic Publishers, 181-204.
- IPCC, 1994: Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios.
- IPCC, 2003: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, National Greenhouse Gas Inventories Programme, the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- Jensen, J. R., 2000: *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resources Perspective*, Prentice Hall, 204pp
- Key, C. H., and N. C. Benson, 2002: Measuring and remote sensing of burn severity. US Geological Survey Wildland Fire Workshop, 31 October to 3 November 2000, Los Alamos, NM. USGS Open-File Report 02-11.
- Kauffman, J. B., D. L. Cummings, D. E. Ward, and R. Babbitt, 1995: Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. *Oecologia* **104**(4), 397-408.
- Key, C. H., and N. C. Benson, 2006: Landscape assessment: sampling and analysis methods. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. Ogden, UT.
- Korea Forest Service, 2005: Statistical yearbook of forestry 2005(35), 38-39. (in Korean)

- Korea Forest Service, 2006: Forest fire statistics: 2006 annual report, 26-27. (*in Korean*)
- Lentile, L. B., Z. A. Holden, A. M. S. Smith, M. J. Falkowski, A. T. Hudak, P. Morgan, S. A. Lewis, P. E. Gessler, and N. C. Benson, 2006: Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire* **15**(3), 319-345.
- Roy, D. P., L. Boschetti, and S. N. Trigg, 2006: Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **3**(1), 112-116.
- Son, Y. M., J. C. Kim, K. H. Lee, and R. H. Kim, 2007: *Forest biomass assessment in Korea*. Korea Forest Research Institute, Research Paper 07-22. (*in Korean*)
- van Wageningen, J. W., R. R. Root, and C. H. Key, 2004: Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment* **92**(3), 397-408.
- Ward, D. E., 1990: Factors influencing the emissions of gases and particulate matter from biomass burning. *Fire in the Tropical Biota*, J. G. Goldammer (Eds.), Springer, 418-436.
- Won, M. S., K. S. Koo, and M. B. Lee, 2006: An analysis of forest fire occurrence hazards by changing temperature and humidity of ten-day intervals for 30 years in spring. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4), 250-259. (*in Korean with English abstract*)
- Won, M. S., K. S. Koo, and M. B. Lee, 2007: A quantitative analysis of severity classification and burn severity for the large forest fire areas using normalized burn ratio of landsat imagery. *The Korean Association of Geographic Information Studies* **10**(3), 80-92. (*in Korean with English abstract*)