

산림탄소상쇄 사업에 따른 이차적 배출량 산정에 관한 연구

김 영 환

국립산림과학원 산림산업연구과

Estimation of Secondary Emissions from Forest Carbon Offset Projects

Kim, Young-hwan

Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

ABSTRACT

For estimating a net removal of carbon dioxides from a forest carbon offset project, it is necessary to consider secondary emissions occurred from the use of machineries or vehicles. According to the forest carbon standard in Korea, a default rate (5%) could be applied for estimating secondary emissions of small projects, which provide annual net removals less than or equal to 600 tCO₂, while secondary emissions should be estimated for larger projects with field survey. In this study, we intended to develop a methodology for estimating the secondary emission of a forest carbon project. For this purpose, we analyzed the working process and the carbon emissions of the forest management activities for major tree species in Korea. Based on the developed methodology, we estimated the secondary carbon emission of a reforestation project. The result showed that the secondary carbon emission of a reforestation project was estimated between 0.42% and 1.19 % compared to net removals, that is to say that the current default rate in the forest carbon standard could give an overestimated secondary emission.

Key words : Forest Carbon Offset, Secondary Emission, LCA, Forest Management, Carbon Standard.

1. 서 론

산림탄소상쇄는 탄소흡수원인 산림의 기능을 유지하고 증진시키기 위해 다양한 감축활동을 추진하고, 이를 통해 얻어진 이산화탄소 흡수량을 이용하여 다른 분야의 이산화탄소 배출량을 상쇄하는 것을 말한다. 우리나라에서는 2010년 처음으로 도입되어 2년간 시범 운영되었으며, 2013년 「탄소흡수원의 유지 및 증진에 관한 법률」(이하 ‘탄소흡수원법’)이 제정되면서 본격적으로 제도가 운영되고 있다.

탄소흡수원법에서는 산림탄소상쇄제도의 효율적인 운영 및 과학적인 사업설계를 위해 ‘사회공헌형 산림탄소상쇄 운영표준’(이하 ‘운영표준’)을 개발하도록 요구하고 있다. 국립산림과학원에서는 VCS, CAR, J-VER, CarbonFix 등 해외 주요 산림탄소상쇄제도들의 운영표준을 검토하고, 국내 산림경영 여건을 고려하여 국제적 기준에 부합하면서도 국내 적용 가능한

운영표준을 개발하였다(Kim *et al.*, 2013). 개발된 운영표준은 탄소흡수증진위원회의 심의를 거쳐 고시되었으며, 제도 운영에 적용되고 있다(Korea Forest Service, 2013c, 2014).

운영표준은 신규조림/재조림, 산림경영, 식생복구, 산림전용 억제, 목제품 이용, 산림바이오매스 에너지 이용 등 탄소흡수원의 유지 및 증진을 위한 다양한 사업유형들을 소개하고 있다. 또한 각각의 사업유형별로 사업적합성 및 추가성 분석, 이산화탄소 순흡수량 산정, 모니터링 계획 수립, 비영속성 관리 등 사업을 설계하고 추진하는데 필요한 방법론을 제시하고 있다(Kim *et al.*, 2015).

산림탄소상쇄 사업에 따른 이산화탄소 순흡수량을 산정하기 위해서는 임목벌채, 산림재해 등으로 인해 산림바이오매스가 소실되면서 발생하는 직접적인 배출량(일차적 배출량) 이외에도, 사업추진 과정에서 기계장비나 차량을 이용하면서 발생하는 간접적인 배출량(이차적 배출량)도 흡수량에서 제외해

† Corresponding author : kyhpeniel@korea.kr

Received September 25, 2015 / Revised October 25, 2015 / Accepted November 25, 2015

야 한다. 운영표준에 따르면 이산화탄소 흡수량이 600톤 이하인 소규모 사업의 경우에는 흡수량의 5%를 기본 값으로 적용하고, 600톤을 초과하는 사업에 대해서는 이차적 배출량을 직접 산정하도록 요구하고 있다.

이차적 배출량을 산정하기 위해서는 사업에 대한 전과정 평가(LCA, Life-Cycle Assessment)를 수행할 필요가 있다. 즉, 조림지 정리 작업부터 숲가꾸기, 벌채에 이르기까지 모든 산림작업에 대해서 이용된 기계장비의 종류, 연료의 유형 및 사용량 등을 기록하고 관리해야 한다. 하지만 사업기간과 모니터링 주기가 매우 긴 산림탄소상쇄 사업의 특성을 감안할 때, 현실적으로 개별사업에서 전과정 평가를 수행하는 것을 매우 어렵다. 따라서 산림탄소상쇄 사업에 따른 이차적 배출량을 보다 효율적으로 산정할 수 있는 방법을 개발할 필요가 있다.

Cha *et al.*(2010)은 낙엽송 목재생산에 대해 전과정평가를 수행한 바 있고, Son *et al.* (2014)은 리기다소나무 집성재를 활용한 목조교량에 대해서 전과정 평가를 수행한 바 있다. 또한 Park *et al.*(2013)은 우리나라 주요 수종에 대해서 양묘부터 조림지 정리, 풀베기, 어린나무 가꾸기, 간벌, 벌채, 집재 및 운재에 이르기까지 모든 산림작업에 대해 작업공정 및 연료 소비량을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 전과정 평가 연구결과들과 조림 및 숲가꾸기 지침 등을 토대로 우리나라 주요 수종에 대해서 조림지 정리 작업부터 풀베기, 어린나무 가꾸기, 벌채, 집재 및 운재에 이르기까지 목재생산에 필요한 모든 산림작업 공정을 표준화하고, 이에 따른 이산화탄소배출량을 산정하였다. 또한 산정된 결과를 토대로 기존 운영표준의 이차적 배출량 산정 기본 값의 적정성을 검토하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 우선 ‘조림 설계·감리 및 사업시행 지침’(Korea Forest Service, 2013a)과 ‘숲가꾸기 설계·감리 및 사업시행 지침’(Korea Forest Service, 2013b)과 Park *et al.*(2013)의 전과정평가 자료를 토대로 조림지 정리 작업부터 벌채까지 각 산림작업별 기본 연료사용량을 구하였다. 또한 주요 수종별로 작업공정을 표준화하고, 이에 따른 할증률을 결정하여 전체 연료사용량과 이산화탄소 배출량을 산정하였다.

2.1 산림작업별 기본 연료사용량 산출

각 작업별 기본 연료사용량을 구하기 위하여 조림지 정리, 풀베기, 어린나무 가꾸기 작업에 대해서 1 ha를 기준으로 소요인력, 기계장비(기계톱/예초기) 사용횟수, 연료유형 및 사용

량 등을 분석하였다. 간벌과 벌채의 경우에는 5개 지방산림청에서 조사된 국유림의 연간 임목생산량과 기계장비(기계톱) 사용일수, 연료유형 및 사용량 등을 분석하여 1 m³의 목재를 생산하는데 필요한 연료 사용량을 구하였다. 마찬가지로 집재와 운재에 대해서도 국유림의 연간 기계장비(굴삭기, 트랙터, 윈치, 수라, 집재기 등) 사용일수, 연료유형 및 사용량 등을 분석하여 1 m³의 목재를 집재하고 운재하는데 필요한 연료 사용량을 구하였다.

2.2 산림작업별 할증요인 분석

‘조림 설계·감리 및 사업시행 지침’과 ‘숲가꾸기 설계·감리 및 사업시행 지침’(산림청, 2013b)에 따르면 조림예정지 정리 작업의 경우에는 제거본수, 임상, 경사, 작업장까지의 이동거리, 개별 작업장의 크기에 따라서 할인·할증률을 적용한다. 풀베기의 경우에는 경사, 임상, 임상에 따라서, 어린나무 가꾸기의 경우에는 제거본수, 경사, 임상에 따라서 할인·할증률을 적용한다(Table 1). 간벌 및 벌채, 집재 및 운재의 경우에는 국유림 조사 자료를 이용하여 별도의 할인·할증률을 적용하지 않았다.

2.3 주요 수종에 대한 작업 공정의 표준화

이차적 배출량을 산정하기 위해서는 각 산림작업별로 할증률을 결정할 필요가 있다. 또한 작업 횟수나 시기도 수종별로 차이가 있어서 배출량에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 낙엽송, 잣나무, 소나무(강원, 중부), 리기다소나무, 편백, 상수리나무 등 우리나라의 7개 주요 수종에 대해서 작업공정을 표준화하고, 수종별로 표준화된 작업공정에 따라 할증률을 적용하였다. 단, 이차적 배출량의 보수적인 산정을 위해 할증률이 가장 높게 산정되도록 하였다.

조림예정지 정리 작업의 경우에는 수종의 영향을 크게 받지 않으므로 모든 수종에 대해서 동일한 작업공정을 적용하였다. 풀베기 작업은 동일한 작업공정을 적용하되, 수종별로 작업횟수에 차이가 있을 수 있으므로 풀베기 작업 횟수를 수종별로 표준화하였다. 어린나무 가꾸기 작업의 경우에는 작업 시기 별로 제거되는 나무의 직경이 다르고, 직경급에 따라서 연료사용량에도 차이가 있으므로 수종별로 제거되는 나무의 직경급을 표준화하였다. 숲가꾸기 작업 가운데 조림, 덩굴제거, 가지치기 등은 일반적으로 장비를 사용하지 않고, 주로 인력에 의해 작업이 이루어지므로, 본 연구에서는 고려하지 않았다.

간벌 및 벌채, 집재 및 운재 작업의 경우에는 할증률은 적용되지 않으나, 수종별로 간벌과 주벌의 시기가 다르고, 벌채

Table 1. Correction factors of working process for forest management activities

Activities	Factor	Categories	Correction rate (%)
Site preparation	Number of trees for removal	Over 1,000 trees/ha	+30
		800~1,000 trees/ha	+15
		600~800 trees/ha	0
		400~600 trees/ha	-15
		Less than 400 trees/ha	-30
	Forest type	Coniferous forest	+10
		Deciduous forest	-10
		Mixed forest	0
	Slope	Steep (over 30°)	+10
		Moderate (15~30°)	0
Gentle (less than 15°)		-10	
Distance to the site	Over than 1 hour	+10	
	30 min.~1 hour	+5	
	Less than 30 min.	0	
Size of a single patch	Less than 700 m ²	+10	
	700~3,000 m ²	+5	
	Over 3,000 m ²	0	
Weeding	Slope	Steep (over 30°)	+10
		Moderate (15~30°)	+5
		Gentle (less than 15°)	0
	Site type	Plantation	0
		Natural regeneration	+10
Young tree tending	Forest type	Deciduous forest	+10
		Steep (over 30°)	+10
		Moderate (15~30°)	+5
	Slope	Gentle (less than 15°)	0
		Coniferous forest	+10
	Number of trees for removal	Deciduous forest	-10
		Mixed forest	0
Over 1,200 trees/ha		+10	
Forest type	800~1,200 trees/ha	0	
	Less than 800 trees/ha	-10	
	Coniferous forest	+10	

량도 차이가 있으므로 수종별로 간벌량과 주벌량을 표준화하였다.

이와 같이 표준화된 작업공정에 따라 할증률을 산정하고, 여기에 기본 연료사용량을 적용하여 각 산림작업별 전체 연료사용량을 산정하였다.

2.4 산림작업별 이산화탄소 배출량 산정

수종별로 표준화된 작업공정에 따라 산정된 전체 연료사용량을 아래 식 (1)에 적용하여 이산화탄소 배출량을 산정하였다.

$$E_{i,j} = \sum (Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times F_{eq,j} \times 10^{-9}) \quad (1)$$

여기서 $E_{i,j}$: 연료 종류 (i)의 사용에 따른 온실가스 (j)의 배출량(tCO₂-e)

Q_i : 연료 종류 (i)의 연료소비량(리터)

EC_i : 연료 종류 (i)의 순발열량(MJ/리터)

$EF_{i,j}$: 연료 종류 (i)에 대한 온실가스 (j)의 배출계수(kg/TJ)

$F_{eq,j}$: 온실가스 (j)의 CO₂ 등가계수(CO₂ = 1, CH₄ = 21, N₂O = 310)

i : 연료 종류

위의 식 (1)은 ‘온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침’(Ministry of Environment, 2014)에 제시된 수식을 이용하였으며, 순발열량(EC_i)과 등가계수($F_{eq,j}$) 등도 지침에 제시된 수치를 적용하였다. 연료의 배출계수($EF_{i,j}$)는 국가 온실가스 배출계수(GHG Inventory & Research Center, 2013)를 적용하였다.

2.5 산림탄소상쇄 사업에 따른 이차적 배출량 산정

산림탄소상쇄 운영표준에서는 연간 순흡수량이 600 tCO₂ 이하인 경우에는 사업에 따른 배출량을 순흡수량의 5%로 산정하도록 기본 값을 제시하고 있으나, 기본 값 5%에 대한 근거가 명확하게 제시되지 못하고 있다. 본 연구에서는 산림작업별 이산화탄소 배출량 산정결과를 토대로 상쇄사업에 따른 기본 값 5%의 적정성을 평가하였다.

이를 위해 가장 보수적인 가정을 적용하여 산림탄소상쇄 사업에 따른 흡수량과 이차적 배출량을 산정하였다. 즉, 조림부터 벌채까지 전체 산림작업이 포함되도록 사업기간 70년의 재조림 사업을 대상으로 하였고, 산림작업 횟수가 가장 많은 목재생산 목표(대경재 혹은 특경재)를 적용하였다. 흡수량은 ‘임분수확표’(Korea Forest Research Institute, 2012) 자료와

국가 탄소흡수 계수(GHG Inventory & Research Center, 2013)를 토대로 산정하였는데, 흡수량의 보수적인 산정을 위해 가장 낮은 지위지수를 적용하였다.

3. 연구결과

3.1 산림작업별 기본 연료사용량 산출 결과

3.1.1 조림지 정리

조림지 정리 작업에 필요한 소요인력 및 기계장비(기계톱) 연료사용량을 1 ha 기준으로 조사한 결과, 소요인력 9명이 필요하고, 기계톱 한대 당 5.6리터의 연료가 사용된다. 기계톱은 2인 1조로 작업이 이루어지므로 50% 비율을 적용하여 기본 연료사용량을 산정한 결과 Table 2와 같이 25.2리터가 사용되는 것으로 분석되었다. 주연료는 휘발유를 사용하며, 윤활유는 휘발유 사용량의 95%를 적용하였다.

3.1.2 풀베기

풀베기 작업에 필요한 소요인력 및 기계장비(예초기) 연료사용량을 1 ha 기준으로 조사한 결과, 소요인력 7명이 필요하고, 예초기 한 대당 연료사용량 5.0리터의 연료가 사용된다. 예초기 한 대당 2인 1조로 작업이 이루어지므로 50% 비율을 적용하여 기본 연료사용량을 산정한 결과, Table 3과 같이 17.5리터가 사용되는 것으로 분석되었다. 주연료는 휘발유를 사용하며, 윤활유는 휘발유 사용량의 10%를 적용하였다. 풀베기는 작업방식에 따라 둘러베기(7명), 줄베기(4.8명), 모두베기(3.5

명) 등 소요인력에 차이가 나타나는데, 본 연구에서는 소요인력이 가장 높은 모두베기를 적용하였다.

3.1.3 어린나무 가꾸기

어린나무 가꾸기 작업에 필요한 소요인력 및 기계장비(예초기) 연료사용량을 1 ha 기준으로 조사한 결과, Table 4와 같이 제거대상 나무의 직경에 따라 소요인력이 5.5명에서 6.5명까지 차이가 난다. 기계톱 한 대당 5.6리터의 연료가 사용되는데, 2인 1조로 작업이 이루어지므로 50% 비율을 적용하여 기본 연료사용량을 산정한 결과, 직경급에 따라 15.4리터에서 19.6리터가 사용되는 것으로 분석하였다. 주연료는 휘발유를 사용하며, 윤활유는 휘발유 사용량의 95%를 적용하였다.

3.1.4 간벌 및 벌채

간벌과 벌채의 경우에는 면적보다는 임목생산량에 따라 작업공정에 차이가 있으므로, 5개 지방산림청에서 조사된 국유림의 연간 임목생산량과 기계장비(기계톱) 연료사용량 자료 (Park *et al.*, 2013)를 이용하여 1 m³의 목재를 벌채하는데 필요한 기본 연료 사용량을 산정한 결과, 1 m³의 목재를 벌채하는데 0.652리터의 연료가 사용되는 것으로 분석되었다. 주연료는 휘발유를 사용하며, 윤활유는 휘발유 사용량의 95%를 적용하였다.

3.1.5 집재 및 운재

간벌 및 벌채와 마찬가지로 5개 지방산림청에서 조사된 국

Table 2. Fuel consumptions for site preparation

Activity	Equipment	Fuel type	Fuel consumption (A) (L)	Man power (B) (/ha)	Discount rate (C)	Basic fuel consumption (D=A×B×C) (L/ha)
Site preparation	Chain saw	Gasoline	5.6	9	0.5	25.2
		Lubricant	-	-	-	23.9

Source : Korea Forest Service, 2013a.

Table 3. Fuel consumptions for weeding

Activity	Equipment	Fuel type	Fuel consumption (A) (L)	Man power (B) (/ha)	Discount rate (C)	Basic fuel consumption (D=A×B×C) (L/ha)
Weeding	Mower	Gasoline	5.0	7	0.5	17.5
		Lubricant	-	-	-	1.75

Source : Korea Forest Service, 2013b.

Table 4. Fuel consumption for tending young trees

DBH of trees	Equipment	Fuel type	Fuel consumption (A) (L)	Man power (B) (/ha)	Discount rate (C)	Basic fuel consumption (D=A×B×C) (L/ha)
< 6 cm	Chain saw	Gasoline	5.6	5.5	0.5	15.40
		Lubricant	-	-	-	14.63
6~8 cm	Chain saw	Gasoline	5.6	6.0	0.5	16.80
		Lubricant	-	-	-	15.96
8~10 cm	Chain saw	Gasoline	5.6	6.5	0.5	18.20
		Lubricant	-	-	-	17.29
10 cm ≤	Chain saw	Gasoline	5.6	7.0	0.5	19.60
		Lubricant	-	-	-	18.62

Source : Korea Forest Service, 2013b.

Table 5. Fuel consumption for thinning and final cutting in national forests

Activity	Equipment	Fuel type	Timber production (A) (m ³)	Fuel consumption (B) (L)	Basic fuel consumption (C=B/A) (L/m ³)
Thinning and final cutting	Chain saw	Gasoline	424,047	27,651	0.065
		Lubricant		-	0.062

Source : Park *et al.*, 2013.

유림의 연간 임목생산량과 기계장비(굴삭기, 트랙터, 윈치, 집재기, 타워야더 등) 연료사용량 자료를 이용하여 1 m³의 목재를 집재하고 운재하는데 필요한 연료 사용량을 산정한 결과, Table 6과 같이 0.146리터의 연료가 사용되는 것으로 분석되었다. 주연료는 휘발유와 경유를 사용하며, 윤활유는 휘발유와 경유 사용량의 30%를 적용하였다.

3.2 주요 수종별 표준 공정을 고려한 연료사용량 산출 결과

3.2.1 조림예정지 정리

조림예정지 정리 작업은 제거분수, 경사, 임상, 작업장까지의 이동거리, 개별 작업장의 크기에 따라서 할인·할증률이 적용된다. 본 연구에서는 제거분수 과다(1,000본 이상/ha), 급경사(30° 이상), 이동거리 1시간 이상, 개별지 크기 700 m² 미만 등 작업공정을 표준화하여 할증률 60%을 적용하였으며, 모든 수종에 대해서 동일한 표준공정을 적용하였다(Table 7). 표준공정에 따른 전체 연료사용량은 휘발유 40.3리터, 윤활유 38.3리터로 산출되었다(Table 9).

3.2.2 풀베기

Table 6. Fuel consumption for thinning and final cutting in national forests

Activity	Equipment	Fuel type	Timber production (A) (m ³)	Fuel consumption (B) (L)	Basic fuel consumption (C=B/A) (L/m ³)
Skidding and loading	Excavator, tractor, winch, skidder, tower yarder etc.	Gasoline	424,047	61,741	0.146
		Diesel		728,806	1.719
		Lubricant		-	0.559

Source : Park *et al.*, 2013.

Table 7. Standard working process for major tree species in Korea

Activity	Species	DBH of removed trees (cm)	Number of removed trees	Working frequency	Correction rate (%)
Site preparation	All species	N/A	600~800	1 time	60
	<i>Larix leptolepis</i>			5 times	10
	<i>Pinus koraiensis</i>			10 times	10
	<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon province)			8 times	10
Weeding	<i>Pinus densiflora</i> (Other region)	N/A	N/A	8 times	10
	<i>Pinus rigida</i>			8 times	10
	<i>Chamaecyparis obtusa</i>			3 times	10
	<i>Quercus acutissima</i>			5 times	20
Young tree tending	<i>Larix leptolepis</i>	8	1,000	1 time	20
	<i>Pinus koraiensis</i>	4	1,000	1st	20
		8	500	2nd	10
	<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon province)	4	2,000	1st	30
		6	1,400	2nd	30
	<i>Pinus densiflora</i> (Other region)	4	2,000	1st	30
		6	1,400	2nd	30
	<i>Pinus rigida</i>	4	1,000	1 time	20
	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	6	1,000	1st	20
		8	1,000	2nd	20
	<i>Quercus acutissima</i>	5	2,000	1 time	10

Table 8. Harvested timber volume from thinning and final cutting

Species	Harvested volume (m ³ /ha)					
	1st thinning	2nd thinning	3rd thinning	4th thinning	Final cutting	Total
<i>Larix leptolepis</i>	51.0	126.7	141.3	105.9	256.1	681.0
<i>Pinus koraiensis</i>	59.7	94.3	90.3		231.0	475.3
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon province)	61.0	127.7	143.3		262.2	594.2
<i>Pinus densiflora</i> (Other region)	66.9	139.2	155.8		151.3	513.2
<i>Pinus rigida</i>	56.9	110.7			177.5	345.0
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	61.1	95.3	68.1	176.8	222.2	623.6
<i>Quercus acutissima</i>	65.9	153.9	148.5		251.4	619.8

풀베기 작업은 경사, 임종, 임상에 따라서 할인·할증률이 적용된다. 본 연구에서는 급경사(30° 이상), 인공조림지 등을

가정하여 할증률 10%를 적용하였으며, 상수리나무에 대해서는 활엽수에 대한 할증률(10%)을 추가하여 할증률 20%를 적

Table 9. Total fuel consumption for each forest management activities

Species	Fuel type	Total fuel consumption(L/ha, L/m ³)				
		Site preparation	Weeding	Young tree tending	Thinning & final cutting	Skidding & loading
<i>Larix leptolepis</i>	Gasoline	40.3	96.3	21.8	44.4	99.1
	Diesel	0.0	0.0	0.0	0.0	1,170.4
	Lubricant	38.3	9.6	20.7	42.2	380.9
<i>Pinus koraiensis</i>	Gasoline	40.3	192.5	38.5	31.0	69.2
	Diesel	0.0	0.0	-	0.0	816.9
	Lubricant	38.3	19.3	36.6	29.4	265.8
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon province)	Gasoline	40.3	154.0	41.8	38.7	86.5
	Diesel	0.0	0.0	0.0	0.0	1,021.3
	Lubricant	38.3	15.4	39.7	36.8	332.3
<i>Pinus densiflora</i> (Other region)	Gasoline	40.3	154.0	41.8	33.5	74.7
	Diesel	0.0	0.0	0.0	0.0	882.1
	Lubricant	38.3	15.4	39.7	31.8	287.0
<i>Pinus rigida</i>	Gasoline	40.3	154.0	18.5	22.5	50.2
	Diesel	0.0	0.0	0.0	0.0	592.9
	Lubricant	38.3	15.4	17.6	21.4	193.0
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	Gasoline	40.3	57.8	42.0	40.7	90.8
	Diesel	0.0	0.0	0.0	0.0	1,071.7
	Lubricant	38.3	5.8	39.9	38.6	348.8
<i>Quercus acutissima</i>	Gasoline	40.3	105.0	16.9	40.4	90.2
	Diesel	0.0	0.0	0.0	0.0	1,065.2
	Lubricant	38.3	10.5	16.1	38.4	346.6

용하였다. 수종별 풀베기 시행 횟수는 낙엽송 5회, 잣나무 10회, 소나무(중부·강원) 8회, 리기다소나무 8회, 편백 3회, 상수리나무 5회 등으로 작업공정을 표준화하였다(Table 7). 수종별로 풀베기 작업횟수가 달라서, 전체 연료사용량도 57.8리터에서 192.5리터까지 수종별로 차이가 나타난다(Table 9).

3.2.3 어린나무 가꾸기

어린나무 가꾸기 작업은 제거대상 나무의 직경에 따라 기본 연료사용량에 차이가 나며, 제거본수, 경사, 임상에 따라서 할인·할증률이 적용된다. 본 연구에서는 ‘지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼’(Korea Forest Research Institute, 2005)의

자료를 이용하여 각 수종별 제거본수와 직경을 표준화하고, 경사는 급경사(30° 이상)를 적용하였다(Table 7). 수종별로 작업 횟수와 제거대상 본수가 달라서, 전체 연료사용량도 16.9리터에서 42.0리터까지 수종별로 차이가 나타난다(Table 9).

3.2.4 간벌 및 벌채

간벌 및 벌채 작업의 기본 연료사용량은 1 m³의 목재를 벌채하는데 필요한 연료량을 기준으로 하므로, 전체 연료사용량을 산정하기 위해서는 간벌 및 주벌에 따른 전체 벌채량을 구해야 한다. 본 연구에서는 ‘지속가능한 산림자원관리 표준매뉴얼’(Korea Forest Research Institute, 2005)을 이용하여 벌채

되는 나무의 직경, 수고, 본수 등을 표준화하고, 이를 ‘임목재 적표’(Korea Forest Research Institute, 2012)에 적용하여 간벌 및 주벌에 따른 벌채량을 산정하였다(Table 8). 산정된 벌채량에 기본 연료 사용량을 적용하여 간벌 및 벌채 작업에 따른 전체 연료사용량을 산정한 결과, 수종별로 22.5리터에서 44.4리터까지 차이가 나타났다(Table 9).

3.2.5 집재 및 운재

간벌 및 벌채와 마찬가지로 집재 및 운재 작업의 기본 연료 사용량도 1 m³의 목재를 기준으로 하므로, 간벌 및 주벌에 따른 벌채량을 산정하고, 여기에 기본 연료 사용량을 적용하여 집재 및 운재 작업에 따른 전체 연료사용량을 산정하였다. 그 결과, 50.2리터에서 99.1리터까지 수종별로 차이가 나타났다 (Table 9).

3.3 산림작업별 표준공정에 따른 이산화탄소 배출량 산정결과

산정된 산림작업별 전체 연료사용량을 이용하여 이산화탄소 배출량을 산정한 결과, 작업별로는 집재 및 운재, 간벌 및 벌채가 다른 작업에 비해 연료 사용량이 높아서 배출량이 높았다. 수종별로는 낙엽송 임분을 경영하는데 가장 많은 연료가 사용되어 이산화탄소 배출량도 가장 높았다. 반면, 상수리 나무 임분은 상대적으로 작업량이 적어서 가장 낮은 연료 사용량과 이산화탄소 배출량을 보였다.

3.4 산림탄소상쇄 사업에 따른 이차적 배출량 산정

산림탄소상쇄 운영표준에서 제시하고 있는 이차적 배출량

산정 기본 값의 적정성을 평가하기 위해서 보수적인 기준을 적용하여 사업기간 70년의 재조림 사업에 대한 흡수량과 흡수량 대비 이차적 배출량의 비율을 분석하였다. 분석 결과, 아래 Table 11과 같이 이차적 배출량이 4.01톤에서 5.06톤으로 흡수량 대비 최소 0.59%에서 최대 1.49%로 나타났다. 따라서 현재 운영표준에서 제시하고 있는 기본 값 5%는 다소 높은 것으로 판단된다.

4. 결 론

산림탄소상쇄 사업추진 과정에서 기계장비나 차량을 이용하면서 발생하는 이차적 배출량을 산정하기 위해서는 조림지 정리 작업부터 숲가꾸기, 벌채에 이르기까지 모든 산림작업에 대해 기계장비의 종류, 연료의 유형 및 사용량 등을 기록하고

Table 11. Secondary emission rate of reforestation project

Species	Carbon removals (tCO ₂)	Secondary emissions (tCO ₂)	Ratio (%)
<i>Larix leptolepis</i>	424.69	5.06	1.19
<i>Pinus koraiensis</i>	460.38	4.01	0.87
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon province)	459.06	4.72	1.49
<i>Pinus densiflora</i> (Other region)	280.20	4.19	1.03
<i>Pinus rigida</i>	322.47	4.68	1.45
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	782.63	4.65	0.59

Table 10. Carbon emission from forest management activities

Species	Emissions (kgCO ₂)					Total
	Site preparation	Weeding	Young tree tending	Thinning & final cutting	Skidding & loading	
<i>Larix leptolepis</i>	193.0	239.8	104.5	212.6	4,310.3	5,060.2
<i>Pinus koraiensis</i>	193.0	479.5	184.3	148.4	3,008.5	4,013.7
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon province)	193.0	383.6	200.4	185.5	3,761.2	4,723.7
<i>Pinus densiflora</i> (Other region)	193.0	383.6	200.4	160.2	3,248.5	4,185.7
<i>Pinus rigida</i>	193.0	383.6	88.5	107.7	2,183.7	2,956.5
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	193.0	143.9	201.1	194.6	3,947.0	4,679.5
<i>Quercus acutissima</i>	193.0	261.6	81.1	193.5	3,922.8	4,651.9

관리해야 한다. 하지만 사업기간이 매우 긴 산림탄소상쇄 사업의 특성을 감안할 때 현실적으로 매우 어려운 부분이 있다. 따라서 본 연구에서는 산림탄소상쇄 사업에 따른 이차적 배출량을 산정할 수 있는 방법론을 제시하고, 이를 토대로 기존 운영표준에서 소규모 사업을 토대로 적용하고 있는 이차적 배출량 산정 기본 값(5%)의 적정성을 검토하였다.

연구 결과, 우리나라 주요 수종을 대상으로 조림지 정리 작업부터 풀베기, 어린나무 가꾸기, 벌채, 집재 및 운재에 이르기까지 모든 산림작업 공정을 표준화하고, 이에 따른 연료사용량과 이산화탄소배출량을 산정함으로써 산림탄소상쇄 사업에 따른 이차적 배출량을 산정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한 개발된 방법론을 토대로 재조림 사업에 따른 이차적 배출량을 구하고, 순흡수량 대비 비율을 산정한 결과, 이차적 배출량의 비율이 0.59%에서 1.49%로 산정되었다. 따라서 기존 운영표준의 기본 값 5%를 적용할 경우, 이차적 배출량이 과대 추정될 가능성이 있는 것으로 나타났다.

산림탄소상쇄 사업은 개별 사업마다 산림작업의 내용과 사용하는 장비가 다를 수 있으므로 본 연구에서 제시된 방법론을 토대로 이차적 배출량을 정확하게 산정하는 데에는 한계가 있을 수 있다. 특히 보수적인 기준을 적용하여 방법론을 개발함으로써 실제보다 배출량이 높게 산정될 수 있다. 하지만 사업자 입장에서는 이차적 배출량 조사에 투입되는 비용과 시간을 절감할 수 있는 장점이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기계 장비를 사용하는 모든 산림작업들을 연구대상으로 하였으며, 숲가꾸기 작업 가운데 덩굴제거와 비료주기는 기계 장비를 사용하지 않으므로 연구대상에 포함하지 않았다. 따라서 본 연구에서 제시된 방법론은 덩굴제거와 비료주기에서 화학비료 사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하는 데에는 적용하기 어려운 한계가 있다.

REFERENCES

- Cha J, Kang K, Youn Y. 2010. Life cycle assessment of larch roundwood production forestry. J of the Korean Society for Life Cycle Assessment 11(1):119-126.
- GHG Inventory & Research Center. 2013. National GHG emission/removal factors in 2013. GIR Announcement.
- Kim Y, Kim K, Jeon E, Lee K. 2013. Development of a carbon standard for the forest carbon offset program in Korea. KFRI Forest Policy Issue Paper-2.
- Kim Y, Song M, Bae J. 2015. Linkage between the forest carbon offset program and the national GHG emission trading scheme in Korea. KFRI Forest Policy Issue P. 42.
- Korea Forest Research Institute. 2005. Standard manual for sustainable forest resource management. KFRI Research Publication-5. pp. 289.
- Korea Forest Research Institute. 2012. Table of timber volume, biomass, and stand volume. pp. 261.
- Korea Forest Service. 2013a. Guidance for design, inspection, and implementation of reforestation. pp. 73.
- Korea Forest Service. 2013b. Guidance for design, inspection, and implementation of forest tending. pp. 115.
- Korea Forest Service. 2013c. Carbon standard for the forest carbon offset program in Korea. KFS Official Announcement 2013-37.
- Korea Forest Service. 2014. Revised carbon standard for the forest carbon offset program in Korea. KFS Official Announcement 2014-92.
- Ministry of Environment. 2014. Guidance for the GHG and energy target management program in Korea. ME Official Announcement 2014-88.
- Park J, Son W, Park M, Lee S, Kang K, Han K, Lee J. 2013. Estimation of GHG emissions based on the life cycle assessment for major tree species in Korea. KFRI Research Paper-520. pp. 151.
- Son W, Park J, Kim K. 2014. Life cycle assessment of timber arch-truss bridge by using domestic *Pinus rigida* glued-laminated timber. J of Korean Wood Sci & Tech 42(1): 1-12.