GIS를 이용한 산림 바이오매스 자원량 및 수확비용 예측

이진아¹ · 오재현^{1,*} · 차두송²

¹국립산림과학원 산림생산기술연구소 ²강원대학교 산림환경과학대학

Prediction of Forest Biomass Resources and Harvesting Cost Using GIS

Jin-A Lee¹, Jae-Heun Oh^{1,*} and Du-Song Cha²

¹Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-498, Republic of Korea

²College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea

Abstract

Nowadays, excessive using of fossil fuel contributes to global warming. Also, this phenomenon increases steadily. Therefore forest biomass from logging residues has received attention. The goal of this study was to determine the sustainability and economic feasibility of forest-biomass energy source. Accordingly, forest biomass resource was calculated, and harvesting and transporting machines which can be used in investing area were chosen, when using forest biomass as energy source. And then through these data, the harvesting cost was decided. The forest biomass resource calculated, thinned trees and logging residues, was 37,330.23 m³ and 14,073.60 ton, respectively. When harvesting timber in each sub-compartment, the average thinned trees yield was 120.73 m³, and tree logging residues was 402.80 ton. The use of tower yarder as harvesting and transporting equipments in study area was 85.4% and 66.7%, respectively, in up hill and down hill yarding. The average harvesting cost of biomass in the possibility area of timber yarding operation was expensive as 81,757 won/m³, 85,434 won/m³ and 50,003 won/ton, respectively, in thinned trees and logging residue. If using data from this research analysis, tree could be felled by choosing sub-compartment.

Key Words: biomass resources, GIS, forestry machines, harvesting cost, logging residues

서 론

전 세계적으로 지구환경문제의 대두 및 친환경 에너지원에 대한 관심의 증폭에 따라 고효율 장비를 통한 에너지 소비감소와 더불어 대체 에너지의 개발에 주력하고 있다. 이에 따라 대체 에너지 가운데 가장 유리한 에너지원의 파악 및 활용이 시급한 실정이다(Korea Rural Economic Institute 2008).

우리나라는 고유가 기초 및 탄소배출 감소를 기조로

하는 기후변화 대응체제하에서 대체에너지로써 산림 바이오매스 에너지 활용에 대한 기대가 높아지고 있으며, 산림 바이오매스 에너지를 사업화 하고 있는 경우가 증가하고 있다(Ministry of Knowledge Economy 2008).

특히 국내의 경우 연간 7백만 m³이 벌채되고, 그 중 54%가 임지에 방치되어 미이용되고 있다. 간벌의 경우도 77%가 산에서 단순히 경제성이 없다고 해서 버려지고 있는 상황이다. 이러한 미이용 산림 자원의 에너지 이용을 위해 수확비용을 절감할 수 있는 효율적인 시스템

Received: November 21, 2012. Revised: January 6, 2013. Accepted: January 25, 2013.

Corresponding author: Jae-Heun Oh

Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-498, Republic of Korea

Tel: 82-31-540-1183, Fax: 82-31-540-1187, E-mail: jhoh@forest.go.kr

Fig. 1. Location of study sites.

구축에 관한 관심이 증대하고 있으며, 이를 통해 환경적인 측면과 수익성 개선에 대한 기대가 커지고 있다.

또한, 산지에서 에너지자원으로써 산림 바이오매스를 활용하기 위해서는 이용 가능한 산림 바이오매스 자원량을 추정하는 것과 수확 및 운송과정에서 발생하는 비용을 추정하여 경제적인 관점에서 접근하는 것이 중요하다. 이와 관련하여 Kinoshita et al. (2009)과 Yoshioka and Sakai (2005)는 GIS를 이용한 산림 바이오매스의 수확비용을 계산하고, 조사 대상 지역의 산림 바이오매스 에너지의 도입가능성을 평가한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 산림 바이오매스를 에너지원으로 활용할 경우 사전에 계획단계에서 가장 중요한 지속성 및 경제성을 판단하기 위해 GIS를 이용한 산림 바이오매스 자원량을 구하고, 투입 가능한 수확 및 운송장비를 선정 후, 이를 통해 수확 비용을 결정하여 보다 효율적인 산림 바이오매스 에너지 이용을 위한 수확, 공급시스템의 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

연구 대상지

지속가능한 산림경영(SFM; Sustainable Forest Management)은 산림청뿐만 아니라 지방산림청의 기본 패러다임으로서 최우선 정책목표로 추진하고 있다. 이에 따라 본 연구의 대상지는 국유림의 지속가능한 산림경영 현 지이행 체계 개발과 산촌지역 주민들의 소득창출을 위해 조성한 매화산 특별경영계획구로 선정하였다. 매화산 특별경영계획구는 Fig. 1에서와 같이 강원도 홍천군에 위치한 행정재산(요존국유림)으로 경영목적에 따라 자원순환경영지구, 산림복합경영지구, 생태환경보전지구로 구분되어 있다. 그 중에서 벌채, 목재생산, 조림, 숲가꾸기 사업 등을 집중 실시토록 하여 목재생산과 공급의 핵심기지로 육성함을 목적으로 하는 자원순환경영지구를 대상으로 분석하였으며 면적은 2,016 ha이다. 임상분포는 침엽수림 63% (1,271 ha), 활엽수림 24% (483 ha), 혼효림 12% (250 ha), 무림목지 1% (12 ha)로 분포되어 있다(Northern Regional Forest Service 2012). 임도밀도는 7.69 m/ha이며, 수치지형도에서 추출한 농로의 길이는

36.30 km이다.

연구 방법

연구 방법은 산림 바이오매스 자원량을 산출한 후, 대상지역내의 지형 및 경사조건을 기준으로 투입 가능한 수확 및 운송 장비를 GIS를 통해 선정하여, 집재 및 운송에 필요한 수확비용을 집재 및 운송거리의 함수식을 이용하여 계산하였다.

본 연구에서 사용된 주제도는 경사 및 지형 분석을 위한 1:25,000 축척의 수치지형도, 집재 및 운송거리를 구하기 위한 임도망도, 소반별 분석을 위한 행정구역도이며, ESRI사의 Arc GIS 9.3을 사용하여 산림 바이오매스 자원량 및 수확비용 분석을 실시하였다.

산림 바이오매스 자원량 산출 방법

산림 바이오매스 자원량을 산출하기 위해 경영계획부의 임목재적자료와 Forest Service (2010)의 수종별 탄소배출계수를 이용하여 매화산 특별경영계획구의 소반별 바이오매스 자원량을 산출하였다. 바이오매스량은 전목수확을 통한 목재칩 생산과 벌채부산물 수확을 통한 목재칩 생산으로 구분하여 분석하였으며, 산출 식은

Table 1. Applied factors and its values for calculating the amount of forest biomass resources by tree species (Forest Service 2010)

Basic Wood Density ^a (t/m ³)		Biomass Expansion Factor ^b
Pinus densiflora	0.40	1.47
Pinus koraiensis	0.41	1.85
Larix kaempferi	0.45	1.32
Pinus rigida	0.51	1.39
Broadleaved forest	0.66	1.50
Mixed forest	0.49	1.44

^aBWD (Basic Wood Density) (t/m³): Absolute dry weight ratio to green wood volume; ^bBEF (Biomass Expansion Factor): Stem volume ratio to the whole tree volume.

(1), (2)와 같다(Son et al. 2007).

$$\text{전목(m}^3\text{)} = \text{산림면적}^1 \times \text{ha당 간재적}^2 \times \text{목재기본밀도} \times \text{바이오매스 확장계수} \times \text{간벌율} \times \text{조재율} \quad (1)$$

$$\text{벌채부산물(ton)} = (\text{산림면적} \times \text{ha당 간재적} \times \text{목재기본밀도} \times \text{바이오매스 확장계수} \times \text{간벌율}) - (\text{산림면적} \times \text{ha당 간재적} \times \text{목재기본밀도} \times \text{간벌율}) \quad (2)$$

¹산림면적(ha): 수치임상도의 산림면적

²ha당 간재적(m³/ha): ha당 임목의 축적(m³) (Table 1)

ha당 간재적은 매화산 경영계획부를 이용하였으며, 수종별 바이오매스 확장계수와 목재기본밀도는 ‘교토의정

Fig. 2. Classifications of logging equipment by slope gradient and logging distance (Yoshioka and Sakai 2005). X axis: slope gradient; Y axis: logging distance. (A) Up hill. (B) Down hill.

Table 2. Standard table of residual numbers after thinning operation by species (Forest Service 2005)

Tree species	Average diameter at breast height (cm)											
	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Pinus densiflora	2,300	1,800	1,500	1,300	1,100	950	840	740	670	610	-	-
Pinus koraiensis	1,500	1,200	1,000	880	760	670	600	530	480	440	400	-
Larix kaempferi	1,500	1,300	1,100	1,000	900	800	700	600	530	490	410	-
Pinus rigida	2,000	1,600	1,300	1,100	940	810	710	630	560	500	-	-
Broadleaved forest	980	880	800	730	660	600	540	500	460	430	390	350

서 대응 산림탄소계정 기반구축연구최종보고서(2010)'를 적용하였다. 간벌율을 소반별로 적용하기 위해 소반의 평균 흉고직경과 수고, 현실축적을 이용하여 ha당 본수를 구하였으며, 수종 및 평균흉고직경을 이용한 간벌 후 잔존본수기준표를 이용하여 소반별로 간벌되는 양을 산출하였으며(Table 2), 조재율은 일괄적으로 70%로 적용하여 분석하였다.

투입장비 선정

수확 및 운송장비의 선정기준은 Fig. 2와 같이 경사별, 집재거리별, 집재방향의 지리적 조건에 의해 Tractor, Forwarder, Tower-yarder, Yarder를 이용하는 것으로서, 4개 장비로 구분하여 적용하였다(Yoshioka and Sakai

2005). 소반별 집재거리 주제도는 수치지형도를 이용하여 소반별 평균경사 주제도를 구하고, 연구대상지에 배치되어 있는 임도와 농로를 기준으로 상향집재시 0-2,000 m까지 buffering (집재가능구역)하여 구하였고, 두 개의 주제도를 중첩하여 소반별 투입장비를 구하였다.

산림 바이오매스 수확비용 분석

수확 비용의 계산은 경사, 집재거리 및 운송거리, 집재 방향의 지리적 조건에 의해 결정되기 때문에 Yoshioka and Sakai (2005)가 개발한 수확비용 계산방정식을 적용하였다. 수확방법은 Fig. 3과 같이 8가지 방법으로 분류되었으며 전목수확을 통한 목재칩 생산과 벌채부산물

A : Thinned trees and broad-leaved forest(whole tree harvesting and comminution)

B : Logging residues

Fig. 3. Forest biomass harvesting system classified by the parts of a tree and logging equipment (Yoshioka and Sakai 2005). (A) Thinned trees and broad-leaved forest. (B) Logging residues.

수확을 통한 목재칩 생산 시스템으로 구분하여 계산하였다. 수확 시스템은 체인톱에 의한 벌목 후 집재기계로 Tractor, Forwarder, Tower-yarder, Yarder를 이용하는 것으로서 전목수확 시 중형 파쇄기, 벌채부산물 수확 시 소형 파쇄기를 이용하는 것으로 고려하였다. 또한, Tractor, Forwarder, Yarder는 전목집재가 가능한 장비로서 임도변 토장에서 프로세서를 이용하여 제재 작업을 실시하는 것으로 분석을 실시하였다. 각 소반의 지형자료를 적용하여 매화산 특별경영계획구의 모든 소반에 대한 수확비용을 계산하였다. 구체적인 수확비용 식은 (3)-(14)와 같다.

Tractor

$$\text{간벌목재(won/m}^3\text{)}=(0.845 \text{ Ly}+0.027 \text{ Lt}+91.7e^{0.117\theta}+4,563)\times 13.7 \quad (3)$$

$$\text{활엽수림(won/m}^3\text{)}=(0.845 \text{ Ly}+0.027 \text{ Lt}+91.7e^{0.117\theta}+4,688)\times 13.7 \quad (4)$$

$$\text{벌채부산물(won/ton)}=(0.027 \text{ Lt}+1,955)\times 13.7 \quad (5)$$

Forwarder

$$\text{간벌목재(won/m}^3\text{)}=(0.165 \text{ Ly}+0.027 \text{ Lt}+45.0e^{0.117\theta}+5,483)\times 13.7 \quad (6)$$

$$\text{활엽수림(won/m}^3\text{)}=(0.165 \text{ Ly}+0.027 \text{ Lt}+45.0e^{0.117\theta}+5,608)\times 13.7 \quad (7)$$

$$\text{벌채부산물(won/ton)}=(0.165 \text{ Ly}+0.027 \text{ Lt}+45.0e^{0.117\theta}+4,621)\times 13.7 \quad (8)$$

Tower-yarder

$$\text{간벌목재(won/m}^3\text{)}=(5.540 \text{ Ly}+14,363/\text{Ly}+0.027 \text{ Lt}+3,460)\times 13.7 \quad (9)$$

$$\text{활엽수림(won/m}^3\text{)}=(5.540 \text{ Ly}+14,363/\text{Ly}+0.027 \text{ Lt}+3,585)\times 13.7 \quad (10)$$

$$\text{벌채부산물(won/ton)}=(0.027 \text{ Lt}+1,955)\times 13.7 \quad (11)$$

Yarder

$$\text{간벌목재(won/m}^3\text{)}=(761.592/\text{Ly}^{-0.2142}+12,409/\text{Ly}+0.027 \text{ Lt}+3,407)\times 13.7 \quad (12)$$

$$\text{활엽수림(won/m}^3\text{)}=(761.592/\text{Ly}^{-0.2142}+12,409/\text{Ly}+0.027 \text{ Lt}+3,532)\times 13.7 \quad (13)$$

$$\text{벌채부산물(won/ton)}=(0.027 \text{ Lt}+1,955)\times 13.7 \quad (14)$$

이 식에서, Ly는 집재거리(m)이며, Lt는 운송거리(m)이다. 벌채부산물은 원목생산 공정에서 발생하는 부산물로 간주되어 수확비용은 오직 파쇄와 운송과정으로 고려하여 계산하였다.

결과 및 고찰

바이오매스 자원량 산출

Table 3에서는 식 (1)과 (2)를 이용하여 매화산 자원순환경영지구의 총 바이오매스량을 임상별, 영급별로 산출하였다. 침엽수림의 경우 전체 산림 바이오매스량의 약 65%를 차지하며 III영급의 면적은 744 ha로 간벌목재의 경우 79,225 m³, 벌채부산물의 경우 23,355 ton의 자원량이 분포하는 것으로 나타났다. 또한 활엽수림의 경우 IV영급의 간벌목재, 벌채부산물의 자원량이 각각 약 68%, 약 72%로 가장 높게 나타났다. 혼효림의 경우 I, II영급은 분포하지 않았으며, 매화산 자원순환경영지구

Table 3. Predicted total forest biomass resources amount by forest type and age class in study sites

Forest type	Age class	Thinned trees (m ³)	Logging residues (dry-t)
Coniferous forest	I	240	38
	II	9,167	3,126
	III	79,225	23,355
	IV	23,272	3,420
	V	5,321	766
	Total	117,225	30,705
Broad-leaved forest	I	-	-
	II	202	49
	III	8,258	2,029
	IV	24,537	7,658
	V	2,678	884
	Total	35,675	10,620
Mixed forest	I	-	-
	II	-	-
	III	6,197	1,433
	IV	4,941	994
	V	13,725	3,162
	Total	24,863	5,588
Total		177,763	46,914

Fig. 4. Distribution map of available forest biomass resources. (A) Thinned trees and broad-leaved forest. (B) Logging residues.

Fig. 5. Selection of logging equipment by slope gradient and logging distance. (A) Up hill. (B) Down hill.

Fig. 6. Logging equipment for available forest biomass resources. (A) Up hill. (B) Down hill.

Fig. 7. Harvesting cost. (A) Up hill. (B) Down hill.

Fig. 8. Harvesting cost of available forest biomass resources. (A) Up hill. (B) Down hill.

의 총 바이오매스량은 간벌목재 177,763 m³, 벌채부산물 46,914 ton으로 나타났다.

Fig. 4에서는 총 산림 바이오매스량 중에서 소반별 실제 목재수확작업 시 수확할 수 있는 바이오매스량을 구하기 위해 간벌율, 조재율을 적용하였으며 수확 가능한 소반의 수는 총 192개 소반 중에서 95개 소반이 해당되며, 면적은 1,256.4 ha이다. Fig. 4와 같이 수확 가능한 간벌재의 수확량은 평균 120.73 m³이며, 벌채부산물의 수확량은 평균 402.80 ton으로 나타났다.

투입장비 선정

산림 바이오매스의 생산을 위한 경사, 집재거리 및 운송거리, 집재방향의 지리적 조건에 의해 결정된 수확 및 운송장비의 선정결과는 Fig. 5에 나타났다. 분석 결과 연구대상지에서 이용되는 수확 및 운송장비는 상향 집재 시 Tower-yarder가 1,721.3 ha (85.4%), 하향 집재 시 Tower-yarder가 1,345.5 ha (66.7%)로 가장 많은 지역에 투입되는 것으로 분석되었으며, Tractor의 투입면적은 437.6 ha (21.7%)로 나타났다. 매화산 자원순환 경영지

구의 경사분포는 12-42°로 나타났으며, Forwarder는 낮은 경사지역에서 이용되는 운송장비로써 Forwarder가 투입되는 지역은 없는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 간벌율, 조재율을 고려한 수확 가능한 산림 바이오매스를 집재 및 운송할 때 투입되는 장비를 나타냈다.

산림 바이오매스 수확 비용 분석

수확비용을 구하기 위해 위와 같이 선정된 임업장비를 이용하여 집재한 후, 홍천군 홍천읍 삼마치리에 위치한 제재소로 운송하는 것을 가정하였다. 집재거리는 임도 및 농로에서 10 m 단위로 buffering하여 소반별로 구하였으며, 운송거리는 임도와 공도가 이어지는 세 지점을 운송 경로로 선택하여 소반별로 인접한 임도를 통해 운송되는 것으로 분석하였으며, 제재소까지의 거리는 평균 15.18 km이다. 수확비용 계산식의 단위는 m³당 비용으로, 벌채 부산물의 수확비용은 ton으로 환산하여 계산하였다. 소반별 최종 수확비용은 위에서 구한 이용 가능한 산림 바이오매스 자원량과 집재 및 운송에 투입되는 장비, 장비에 따른 수확비용을 고려하여 구하였다. 연구 대상지의

수확비용은 Fig. 7과 같으며 Tractor를 이용하여 전목수확을 하는 경우 간벌목재는 평균 78,849원/m³, 활엽수림은 평균 79,455원/m³이며, 벌채부산물의 경우 평균 50,128원/ton으로 예측되었다. Tower-yarder를 이용하여 전목수확을 하는 경우 간벌목재는 평균 75,146원/m³, 활엽수림은 평균 82,005원/m³이며, 벌채부산물의 경우 평균 49,853원/ton으로 예측되었다. Yarder를 이용하여 전목수확을 하는 경우 간벌목재는 평균 91,276원/m³, 활엽수림은 평균 94,843원/m³이며, 벌채부산물의 경우 평균 50,029원/ton으로 예측되었다. 비용 면에서 벌채부산물의 이용이 가장 효과적이고 그 뒤로 침엽수림, 활엽수림에 의한 것으로 나타났다. 본 연구에서 벌채산물은 벌채공정의 생산물로 간주되어 수확비용은 오직 파쇄와 운송과정으로 고려하여 계산되어 저비용으로 판명되었다.

결론

본 연구에서는 산림 바이오매스를 에너지원으로 활용할 경우 지속성 및 경제성을 판단하기 위해, GIS을 이용하여 산림 바이오매스 자원량을 구하고 투입 가능한 수확 및 운송 장비를 선정 후, 이를 통해 수확비용을 결정하여 보다 효율적인 에너지 이용시스템을 위한 기초자료를 구축하고자 하였다. 본 연구에서 분석한 산림 바이오매스 자원량은 전목수확을 통한 목재칩 생산과 벌채부산물 수확을 통한 목재칩 생산 시스템으로 구분하여 구하였으며 각각 177,763 m³, 46,914 ton으로 나타났다. 이 중에서 소반별 목재수확작업 시 수확할 수 있는 소반의 수는 총 192개 소반 중에서 95개 소반이 해당되었으며, 원목의 수확량은 평균 120.73 m³이며, 벌채부산물의 수확량은 402.80 ton로 나타났다. 연구대상지에서 이용되는 수확 및 운송장비는 상향 집재 시 소형 Tower-yarder가 85.4%, 하향 집재 시 소형 Tower-yarder

가 66.7%로 많은 지역에 투입되는 것으로 분석되었다. 집재가능구역에서의 산림 바이오매스 자원량의 수확비용은 원목생산의 경우 간벌목재는 평균 81,757원/m³, 활엽수림은 평균 85,434원/m³이며, 벌채부산물의 경우 평균 50,003원/ton으로 나타났다. 위와 같은 분석을 통해 목재수확작업 시 소반을 선택하여 벌채할 수 있으므로 작업계획에 도움이 될 것으로 사료된다.

본 연구에서 산림 바이오매스 자원량과 수확비용 사이의 관계는 오직 현재에 초점을 맞춰 분석되었으므로 산림 바이오매스의 지속적인 이용가능성을 고려하여 연구를 수행할 필요가 있다.

참고문헌

- Forest Service. 2005. Standard Manual of Sustainable Forest Resources Management. pp 124.
- Forest Service. 2010. Study on the basis of forest carbon accounting in Korea. pp 109-120.
- Kinoshita T, Inoue K, Iwao K, Kagemoto H Yamagata Y. 2009. A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS. Applied Energy 86: 1-8.
- Korea Rural Economic Institute. 2008. A Study of Industrializations and Usages of Forest Biomass. pp 1-8.
- Ministry of Knowledge Economy. 2008. A Study on the Economic Analysis for Utilizing of the Pitch Pine -focusing on energy utilizing of Ligneous biomass-. pp 133.
- Northern Regional Forest Service. 2012. Maehwa mountain Special Management Planning. pp 30-43.
- Son YM, Lee KH, Kim RH. 2007. Estimation of Forest Biomass in Korea. J Korean For Soc 96: 477-482.
- Yoshioka T, Sakai H. 2005. Amount and availability of forest biomass as an energy resource in a mountainous region in Japan: a GIS-based analysis. Croatian Journal of Forest Engineering 26: 59-70.