J. Korean For. Soc. Vol. 104, No. 2, pp. 221~229 (2015)
http://dx.doi.org/10.14578/jkfs.2015.104.2.221

한국임학회지
JOURNAL OF KOREAN FOREST SOCIETY
ISSN 0445-4650(Print), ISSN 2289-0904(Online)
http://e-journal.kfs21.or.kr

낙엽송 간벌작업에서 전간수확시스템의 작업비용 분석

조구현[1] · 조민재[2] · 한한섭[3] · 한상균[4] · 차두송[2]*
[1]국립산림과학원 생산기술연구소, [2]강원대학교 산림경영학과,
[3]험볼트 주립대학교 산림 · 자연자원학과, [4]한국농수산대학교 산림조경학과

Harvesting Cost of Tree-length Thinning in a *Larix leptolepis* Stands

Koo-Hyun Cho[1], Min-Jae Cho[2], Han-Sup Han[3], Sang-Kyun Han[4] and Du-Song Cha[2]*
[1]*Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pochen 487-829, Korea*
[2]*Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea*
[3]*Department of Forestry and Wildland Resources, Humboldt State University, Arcata, California, USA*
[4]*Department of Forestry and Landscape Architecture, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 560-500, Korea*

요 약: 본 연구는 강원도 평창군 가리왕산의 낙엽송 인공림을 대상으로 효율적인 임목수확시스템 구축을 위해 타워야더(Koller K301-4)에 의한 전간간벌수확시스템의 생산성 및 비용분석을 실시하였다. 수확시스템은 벌목, 가지정리, 집재, 조재, 집적작업으로 구성하여 요소작업별 비용을 분석하였다. 총 수확비용은 41,707원/m^{3}으로서 벌도작업비용 1,315원/m^3(3.2%), 가지정리작업비용 3,127원/m^3(7.5%), 집재작업비용 20,083원/m^3(48.2%), 조재작업비용 12,143원/m^3(29.1%), 집적작업비용 5,039원/m^3(12.1%) 등으로 구성되었다. 수확시스템비용 중에서 가장 높은 비중을 차지하는 집재작업에 대하여 평균집재시간 예측모델식을 개발하여, 수확시스템비용에 대한 인자별 영향력 분석을 위해 민감도분석을 실시하였다. 인자별 수확시스템비용에 대한 증감율은 가로집재거리가 약 5.2%, 세로집재거리는 약 3.0%의 증가를 규칙적으로 나타내었다. 집재본수는 많아질수록 수확시스템비용 증감율의 폭은 작아지는 것으로 나타났으며, 집재본수 4~5본에서 감소폭 둔화현상이 발생되었다. 따라서 집재본수인자가 수확시스템비용에 가장 큰 영향을 미치고, 다음으로 세로집재거리인자와 가로집재거리인자의 순으로 영향을 주는 것으로 나타났다.

Abstract: The purpose of study was to broaden our knowledge on the productivity and cost of thinning operations which has become increasingly practiced in Korea. The thinning operations were conducted in a 40-year old larch (*Larix leptolepis*) stand, including chainsaw felling and processing at the stump, followed by yarding tree-length logs using a Koller K301-4 tower yarder. The logs were further processed and sorted into 1.8 m and 3.6 m log piles at the landing. We used a standard time study method to evaluate key variables that affect the productivity of thinning operations. The total stump-to-pile operational cost was 41,707 won/m^3. The highest cost activity was the yarding phase which cost 20,083 won/m^3 (48.2% of the total cost), followed by the costs of processing tree-length materials into marketable log lengths (12,143 won/m^3; 29.1%), and then by the costs of sorting/piling the processed logs (5,039 won/m^3; 12.1%). It was interesting to see that felling and processing trees at the stump had low costs at 1,315 won/m^3 (3.2%) and 3,127 won/m^3 (7.5%), respectively. We used the detailed time study data to develop regression equations which were to predict yarding productivity. Our analysis showed that harvesting system cost was highly sensitive to the number of logs, yarding distance and lateral distance per turn, respectively.

Key words: *skyline thinning, harvesting system productivity and cost, yarding distance, the number of logs in yarding*

서 론

우리나라는 치산녹화사업의 성공과 지속적인 숲 가꾸기 사업 등으로 10년 전 산림에 비해 임목축적량이 2배로 증가하는 등 현재 대부분의 산림이 수확기에 도달한 상태이다. 숲가꾸기 산물 수집과 국내 목재 수요의 증가 등으로 국내 목재생산작업은 점점 증가추세에 있으며, 이에 산림청은 국내 목재자급률 17.4%(2013)에서 2017년까지 국

*Corresponding author
E-mail: dscha@kangwon.ac.kr

내 목재자급률 21.0%까지 증대하는 방안이 추진되고 있다(Korea Forest Service, 2014). 그러나 임업작업의 특성상 노동자의 고령화와 기피현상으로 인해 증가하는 목재생산업을 충족시키기에는 임업노동력이 매우 부족한 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 산지지형과 임황 등을 고려한 임업의 기계화의 도입과 환경 친화적인 임목수확작업시스템의 구축이 요구되고 있는 실정이다(Kim and Park, 2012).

우리나라에서 목재생산 작업에 관한 기존 연구를 살펴보면, 벌도작업에 대해 Kang(1999)은 소나무 간벌 임분을 대상으로 벌도작업에 대한 시간분석을 실시하였으며, Lee et al.(1998)은 낙엽송 간벌지에서 체인톱을 이용한 4명의 작업원들이 벌도작업에서 최대 작업수행 능력평가 및 최대산소섭취량을 조사하였다.

집재작업에 대해서는 Woo et al.(1990)은 이동식 타워 소형 케이블크레인(K-300)을 이용한 집재작업과 인력집재작업의 비용을 비교하였으며, Han et al.(2008)이 낙엽송림에서 춘천집재기를 이용한 상·하향집재방식에 따른 집재작업의 생산성 차이를 분석하였으며, 또한 트랙터 부착형 집재기(춘천집재기), 타워야더(RME-300T), 트랙터 윈치(FARMI)를 이용하여 기종별 집재작업 생산성 및 비용을 분석하였고(Han et al., 2014), Lee(2012)는 스윙야더를 이용한 전목수확시스템의 생산성 및 비용분석 하였다.

수확시스템에 대한 연구는 Kim and Park(2012)이 리기다소나무를 대상으로 전목 및 단목 집재작업시스템에서 작업시간 및 공정분석을 실시하였으나, 벌도작업에서부터 운송작업까지에 대한 수확시스템 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강원도 평창군 진부면 가리왕산의 낙엽송 IV영급 간벌지를 대상으로 타워야더(Koller K301-4)를 이용한 벌도작업에서 집적작업까지의 전간수확시스템에 대한 생산성 및 작업비용을 분석하였으며, 작업별 생산성을 예측하기 위한 모델식을 개발하여 효율적인 임목수확시스템 구축을 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

자료 및 방법

1. 전간수확시스템 개요

본 연구에서는 Figure 1과 같이 체인톱(STIHL MS440)에 의한 벌목을 실행하고, 전간집재를 위해 가지정리 작업을 실시 한 후 타워야더(Koller K301-4)를 이용하여 상향집재를 실시하였다. 그리고 임도상에 집재를 실시한 후

Figure 1. Schematic of the harvesting system.

Table 1. Stand description in the study.

Classification	Contents
Area(ha)	2.9
Type	Coniferous forest
Species	*Larix leptolepis*
Age	IB
Average slope (dgree)	18
Average height (m)	16/10~21
Average DHB (cm)	24/12~38

에 하베스터(WOODY H50)를 이용한 조재작업을 실행하고, 우드그랩으로 집적작업을 실행하였다.

벌도작업에 사용된 체인톱(STIHL MS440)은 배기량 70.7 cc, 중량 6.3 kg이고 가지정리에 사용된 체인톱(HUSQVARNA 350)은 배기량 40.8 cc, 중량 4.8 kg 이다. 집재작업은 타워야더(Koller K301-4)로 Austria Koller사에서 제작되었으며 임내차에 탑재한 가선집재기계이다. 상·하향 집재 최대거리는 400 m, 타워 높이는 8 m로 최대 10 m까지 연장이 가능하며 반송기는 USKA 1.5 이다. 조재작업에 사용된 하베스터(WOODY H50)은 굴삭기 0.6 m^3에 부착되었으며 무게는 1,200 kg, 최대 조재직경 7~55 cm, 최대 벌목직경 55 cm, 그랩 최대 열림거리는 120 cm 이다. 집적작업은 굴삭기 0.2 m^3에 부착된 우드그랩을 사용하였다.

2. 조사지의 개요

조사지는 강원도 평창군 진부면 장전리 가리왕산 126 임반 라 소반에 위치한 낙엽송 인공조림지로서 면적은 2.9 ha이다. 또한 ha당 175본을 제거하는 간벌율 28%의 수익간벌작업지로 집재방식은 전간·상향 집재이며 IV영급, 평균수고 16 m, 평균 경급 24 cm이다. 조사지의 지황 및 임황은 Table 1과 같다.

3. 조사방법

작업비용 산출을 위한 작업생산성은 각 공정별 요소작업으로 구분하여 동작연구방법(time and motion study)을 적용하였으며, 또한 작업시간에 영향을 미치는 인자들을 조사하였다.

벌도작업에 있어서 요소작업은 이동시간, 벌채목 주변 정리시간, 벌목시간, 그리고 휴식 및 주유 등과 같은 작업지연시간으로 구분하였으며, 작업시간에 영향을 주는 인자는 이동거리, 하층식생으로 조사하였다. 가지정리작업에 있어서 요소작업은 이동시간, 가지정리시간, 그리고 작업지연시간으로 구분하였으며, 작업시간에 영향을 주는 인자는 이동거리, 나무겹침 등이다. 집재작업의 요소작업은 4인 1조로 반송기보내기(carriage out), 와이어로프 가로끌기(lateral out), 쵸커설치(choking), 가로집재(lateral yarding), 집재(yarding), 쵸커해체(unhooking), 그리고 작업

지연(delay)시간으로 구분하였으며(Han, 2008), 작업시간에 영향을 주는 인자는 가로집재거리, 집재거리, 집재본수로 조사하였다. 조재작업의 요소작업은 조재목 운반시간, 조재시간, 그리고 작업지연(delay)시간으로 구분하였으며, 집적작업은 작업시간당 집적량을 조사하였다.

4. 분석방법

작업공정별 작업비용(₩/m³)은 다음과 같이 기계비용(₩/hr)과 작업생산성(m³/hr)을 이용하여 산출하였다.

$$\frac{Machine\ \ cost(₩/\mathrm{hr})}{\mathrm{Pro}ductivity(\mathrm{m}^3/\mathrm{hr})} = Harvesting\ \ cost(₩/\mathrm{m}^3)$$

1) 작업생산성

작업의 생산성(m³/hr)은 시간당 생산본수(본/hr)와 본수당 원목재적(m³/본)으로 산출한다. 즉, 요소작업별로 측정한 연속작업시간을 이용하여 시간당 생산본수를 구하였으며, 원목재적은 스말리언(Smalian)식을 이용하여 산출하였다.

2) 기계비용

기계비용은 고정비용, 운영비용, 노무비로 구분되며, 고정비용은 기계의 작동 여부와 관계없이 소요되는 비용으로 감가상각비, 이자, 보험, 세금이 포함되며, 운영비용은 기계가 작동 할 때 소요되는 비용으로 연료비, 윤활유비 등이 포함된다. 기계비용은 연간 기계이용시간을 고려한 계산법(machine rate calculation)을 이용하여 산출하였다(Miyata, 1980).

3) 작업공정별 작업시간 예측

전간수확시스템 공정 중에서 실제로 집재작업 생산성에 영향을 미치고 있는 3개의 작업공정 즉, 벌도작업, 가지정리작업 및 집재작업을 대상으로 작업시간 예측모델식을 개발하여 적합성을 검증하였다.

작업시간 예측모델식 도출에 사용한 자료는 일반적으로 사용하고 있는 무작위 추출방법으로 작업공정별 전체 실측 자료의 70%를 이용하였으며, 검증을 위한 자료는 나머지 30%를 이용하였다(Snee, 1977). 작업시간 예측모델식은 t-검증을 통해 적합성을 검증하였다(Shin and Han, 2006; Adebayo et al., 2007; Hartsough et al., 2001). 또한 적합성 검증에서 적합하다고 판별될 경우, 전체실측 자료에 대한 작업시간 예측모델식을 동일한 방법으로 개발하였다(Shin and Han, 2006; Han, 2008).

또한 수확시스템비용에 가장 큰 비중을 차지하는 집재작업에 대하여 개발된 최종 집재작업시간 예측모델식과 조사자료를 바탕으로 가로집재거리, 세로집재거리, 집재본수 인자들이 수확시스템비용에 대한 영향력을 분석하기 위해 민감도분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 기계비용 산출을 위한 인자값

공정별 작업비용 산출을 위한 기계비용 인자값은 기존의 연구 방법(Miyata, 1980)을 토대로 현장조사를 통하여 Table 2와 같이 종합적으로 정리하였다. 국외에서는 기계장비별 인자값은 축적된 자료를 활용하여 정비되어 있으나(Brinker et al., 2002), 국내의 경우에는 이들에 대한 인자값들은 아직 부족한 실정으로 더 많은 연구를 통하여 인자값들의 정확성을 높일 필요가 있다.

2. 벌도작업비용 산출

1) 작업생산성 분석

벌도작업에서의 작업생산성(m³/hr)은 시간당 생산본수(본수/hr)와 본수당 원목재적(m³/본수)의 비로서 작업시간은 Table 3과 같이 임목 1회 순수벌도작업(PMH) 시간이

Table 2. Cost factors and assumptions used for machine rate calculations.

Cost factor	Unit	Harvesting system				
		Felling	Delimbing	Yarding	Processing	Sorting/piling
Purchase price	won	1,250,000	770,000	300,000,000	300,000,000	52,000,000
Economic lives	years	1	1	6	4	4
Salvage value	%	0	0	10	10	20
Scheduled operating time	hr/year	2,083	2,095	1,680	2,000	1600
Annual interest rate	%	17	17	17	17	17
Repair and maintenance	%	120	120	100	110	100
Oil price	won/L	1,900	1,900	1,699	1,699	1,699
Coefficient of lubricant	%	67	67	40	40	40
Fuel consumption	L/hr	1	1	7	14	6
Daily wage of operator	won/day	105,911	105,911	97,951	97,951	97,951
Daily wage of ground crew	won/day			81,443		

Table 3. Average cycle time in felling. (unit : sec.)

Classification	Average (n=317)	Standard deviation
Moving	29	19.58
Clear felling area	4	8.98
Felling	22	7.58
Delay	21	114.25
PMH[a]	55	23.89
SMH[b]	76	174.58

a : Productive machine hour, b : Scheduled machine hour

평균 55초가 소요되었다. 이 중 이동시간이 평균 29초로 가장 많은 시간을 차지하였고 벌도시간이 평균 22초, 벌채목 주변정리시간이 평균 4초이다.

임목 1회 벌목시의 작업지연시간은 평균 21초, 순수벌도작업시간(PMH)은 평균 55초로서, 전체벌도작업시간(SMH)은 평균 76초로 산출되어, 기계이용률은 약 72%이다. 이에 평균임목재적이 0.32 m^3이고 시간당 약 47본의 임목을 벌목하여 시간당 작업생산성은 14.92 m^3/hr으로 산출되었다. 본 연구결과의 벌도작업 생산성은 Han et al. (2009)의 잣나무 간벌작업지에서 경사 24°, 벌도작업시간이 본당 463초로 벌도작업 생산성 4.83 m^3/hr보다 높게 나타났다. 이는 작업지의 경사와 본당 벌도작업시간의 차이가 벌도작업 생산성에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

2) 작업비용 분석

벌도작업비용은 Table 4와 같이 기계비용(19,631원/hr)과 작업생산성(14.92 m^3/hr)을 이용하여 벌도작업에 있어서의 작업비용은 1,316원/m^3이다. 이 결과는 낙엽송 IV영급 간벌지의 벌도작업비용 5,477원/m^3(Han, 2008)보다는 낮은 작업비용으로 나타났으며, 이것은 집재방식과, 임령, 수종 등은 동일하지만 1본당 원목재적의 차이에 의해서 본 연구의 높은 벌도작업 생산성이 낮은 작업비용으로 이루어졌다고 판단된다.

Table 4. Felling cost in this study.

Machine utilization (%)		72
Fixed costs (won/hr)	Depreciation cost	600
	Interest, Insurance and Tax	102
Operating costs (won/hr)	Fuel cost	1,976
	Lube cost	1,317
	Repair and Maintenance cost	996
Labor costs (won/hr)	Labor cost	13,239
	Benefit cost	1,311
	Insurance cost	1,280
Total machine costs (won/hr)		19,631
Hourly productivity (m^3/hr)		14.92
Delimbing cost (won/m^3)		1,316

Table 5. Regression models to estimate the average cycle time(sec.) in felling.

Classification	Regression equations	n	R^2	p-value
Felling	time(sec)=29.21	211	0.42	<0.0001
	+3.51×DUV1[a]			0.2120
	+25.56×DUV2[a]			<0.0001
	+3.70×MD[b]			<0.0001

a: Dummy variable based on density of understory vegetation (DUV) and utility of the chainsaw; 1) N. understory vegetation as the obstacle of moving operator (0,0); 2) understory vegetation as the obstacle of moving operator but N. chainsaw (1,0); 3) understory vegetation as the obstacle of moving operator and chainsaw (0,1)
b : Moving distance

Table 6. Validation result of the regression equation using the test data in felling.

	n	$\overline{D}$	$S_{\overline{D}}$	t	Prob>|t|
Felling	106	-0.622	2.027	-0.307	0.760

3) 평균벌도작업시간 예측모델식 개발

평균벌도작업시간 예측모델식을 개발하여 작업효율성을 분석하였다. 추정자료에서 이동거리와 하층식생분포(density of understory vegetation)를 독립변수로 설정하여 평균벌도작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 Table 5와 같다.

평균벌도작업시간 예측모델식의 적합성을 검증하기 위해 t-검증을 실시한 결과는 Table 6과 같이 실측치와 추정치 간에는 유의수준 5%내에서 차이가 인정되지 않았다. 즉, 예측모델식의 평균벌도작업시간과 실제 조사한 평균벌도작업시간은 통계적으로 차이가 없다는 것을 의미한다.

따라서 평균벌도작업시간 예측모델식을 개발하기 위해 추정자료와 검증자료를 통합하여 최종 평균벌도작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 Table 7과 같다.

2. 가지정리작업

1) 작업생산성 분석

가지정리작업에서는 Table 8과 같이 1회 평균 가지정리시간이 약 134초가 소요되는 것으로 나타났다. 이 중 가지정리 시간이 평균 약 108초로 가장 많은 시간을 차지하

Table 7. Final regression models to estimate the average cycle time(sec.) in felling.

Classification	Regression equations	n	R^2	p-value
Felling	time(sec)=27.23	317	0.41	<0.0001
	+4.85×DUV1[a]			0.0290
	+24.45×DUV2[a]			<0.0001
	+3.88×MD[b]			<0.0001

a : Dummy variable based on density of understory vegetation (DUV) and utility of the chainsaw; 1) N. understory vegetation as the obstacle of moving operator (0,0); 2) understory vegetation as the obstacle of moving operator but N. chainsaw (1,0); 3) understory vegetation as the obstacle of moving operator and chainsaw (0,1)
b: Moving distance

Table 8. Average cycle time in delimbing. (Unit : sec.)

Classification	Average	Min	Max	Standard deviation
Moving	26	3	300	36.00
Delimbing	108	14	297	50.72
Delay	53	0	826	145.17
PMH[a]	134	17	597	61.64
SMH[b]	187	17	1423	166.51

a : Productive machine hour, b : Scheduled machine hour

Table 9. Delimbing cost in this study.

Machine utilization(%)		72
Fixed costs (won/hr)	Depreciation cost	368
	Interest, Insurance and Tax	62
Operating costs (won/hr)	Fuel cost	1,976
	Lube cost	1,317
	Repair and Maintenance cost	616
Labor costs (won/hr)	Labor cost	13,239
	Benefit cost	1,311
	Insurance cost	1,280
Total machine costs (won/hr)		19,058
Hourly productivity (m^3/hr)		6.09
Delimbing cost (won/m^3)		3,131

였고 평균이동시간이 26초이다.

임목 1본을 가지정리 하는 동안에 발생한 작업지연시간은 평균적으로 약 53초였으며 순수작업시간(PMH)은 134초, 전체작업시간(SMH)은 187초이며, 기계이용률은 72%이다. 이에 본당 평균임목재적이 0.32 m^3이고 시간당 약 19본의 임목을 가지정리 하여 시간당 작업생산성은 6.09 m^3/hr으로 나타났다. 본 연구결과의 가지정리작업 생산성은 Han et al.(2009)의 잣나무 간벌작업지에서 경사 24°, 가지정리작업 시간이 본당 247초로 가지정리작업 생산성 4.22 m^3/hr보다 높게 나타났다. 이는 작업지의 경사, 본당 가지정리작업시간의 차이, 수종별 가지특성의 차이가 가지정리작업 생산성에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

2) 작업비용 분석

가지정리작업비용은 Table 9와 같이 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 기계비용이 시간당 약 19,058원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 가지치지작업비용은 3,131원/m^3으로 나타났다. 이 결과는 잣나무 III, IV영급 간벌지의 가지정리작업비용 4,852원/m^3(Han et al., 2009)보다는 작업의 생산성이 높아 낮은 가지정리작업비용으로 나타났다.

3) 평균가지정리작업시간 예측모델식 개발

평균가지정리작업시간 예측모델식을 개발하여 작업효율성을 분석하였다. 추정자료에서 이동거리와 나무겹침(Tree overlapped)을 독립변수로 설정하여 평균가지정리작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 Table 10과 같다.

Table 10. Regression models to estimate the average cycle time(sec.) in Delimbing.

Classification	Regression equations	n	R^2	p-value
Delimbing	time(sec)=79.96	93	0.57	<0.0001
	+65.34×TO[a]			<0.0001
	+4.54×MD[b]			<0.0001

a : if trees felled are overlapped “1” and if not overlapped “0”, b : Moving distance between felled

Table 11. Validation result of the regression equation using the test data in Delimbing.

	n	$\overline{D}$	$S_{\overline{D}}$	t^*	Prob>|t|
Delimbing	47	-4.629	5.952	-0.778	0.441

Table 12. Final regression models to estimate the average cycle time(sec.) in Delimbing.

Classification	Regression equations	n	R^2	p-vlaue
Delimbing	time(sec)=75.72	140	0.55	<0.0001
	+70.51×TFO[a]			<0.0001
	+5.24×MD[b]			<0.0001

a : if trees felled are overlapped “1” and if not overlapped “0”, b : Moving distance between felled trees

평균가지정리작업시간 예측모델식의 적합성을 검증하기 위해 t-검증을 실시한 결과는 Table 11과 같이 실측치와 추정치 간에는 유의수준 5%내에서 차이가 인정되지 않았다.

따라서 평균가지정리작업시간 예측모델식을 개발하기 위해 추정자료와 검증자료를 통합하여 최종 평균가지정리작업시간 예측모델식을 도출한 것은 Table 12와 같다.

3. 집재작업

1) 작업생산성 분석

집재작업에서는 Table 13과 같이 1회 평균 집재작업 시간이 약 413초이고 공정 당 평균 집재거리는 90.7(20~164)m, 평균가로집재거리 10.4(≦31)m, 평균집재수량은 3.6본이었다. 이 중 쵸커설치시간이 평균 약 102초로 가장 많은 시간을 차지하였고, 와이어로프 가로끌기 평균시간이 약 101초, 가로집재 평균시간이 약 63초이다.

와이어로프 가로끌기와 쵸커설치의 경우 대상목 선정에 있어서 작업자의 주관으로 인해 오랜 시간이 걸리는 것으로 판단되었다. 집재작업에서 발생한 작업지연시간은 평균적으로 약 47초였으며, 순수작업시간(PMH)은 413초, 전체작업시간(SMH)은 460이며, 이에 따른 기계이용률은 90%이다. 이에 평균임목재적이 0.32 m^3이고 시간당 약 22본의 임목을 집재하여 6.90 m^3/hr의 생산량이 나타났다.

Table 13. Average cycle time in yarding. (unit : sec.)

Classification	Average	Min	Max	Standard deviation
Carriage out	46	8	130	25.83
Lateral wire traction	101	6	265	48.26
Choking	102	4	280	66.93
Lateral yarding	63	7	322	46.98
Yarding	40	16	110	18.29
Unhooking	61	20	158	27.15
Delay	180	0	6,300	163.01
PMH[a]	413	166	765	144.75
SMH[b]	593	166	1,602	163.21

a : Productive machine hour, b : Scheduled machine hour

본 연구결과 타워야더(Koller K301-4)를 이용한 집재작업 생산성(6.91 m^3/hr)이 기존 연구결과인 낙엽송 간벌작업지에서 타워야더(RME-300T)를 이용한 상향집재의 집재작업 생산성 3.7 m^3/hr보다 높게 나타났다(Kim and Park, 2010). 이는 Kim and Park(2010) 작업지의 경사가 20~25°로, 본 연구 타워야더(Koller K301-4) 작업지(18°)보다 급경사지이고, 타워야더(RME-300T)의 마력은 87Hp로 타워야더(Koller K301-4)의 133Hp보다 낮은 관계로, 본 연구 타워야더(Koller K301-4)의 집재작업 생산성이 높게 나타났다.

2) 작업비용 분석

집재작업비용은 Table 14와 같이 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 기계비용이 시간당 약 138,573원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 집재작업비용은 20,083원/m^3으로 나타났다. 이 결과는 타워야더(RME-300T)를 이용한 리기다소나무 간벌지의 전간 집재작업비용 71,384원/m^3(Han, 2008)과 개벌지의 전목집재작업비용 26,073원/m^3(Kim, 2010)보다 낮게 나타났다. 이는 Han(2008)의 연구결과에서 기계비용이 134,203원/hr으로 본 연구결과와 비슷하였으나, 시간당 생산성이 약 1.88 m^3으로 낮았고, Kim(2010)는 본 연구결과보다 기계비용이 88,212원/hr으로 낮았으나, 시간당 생산성도 약 3.38 m^3로 낮아 두 기존 연구결과의 집재작업비용이 본 연구결과보다 높게 나타났다. 따라서 집재작업비용은 생산성의 차이가 큰 영향을 주므로, 낮은 집재작업비용을 위해 생산성 향상이 필요하다고 판단된다.

Table 14. Yarding cost in this study.

Machine utilization(%)		89
Fixed costs (won/hr)	Depreciation cost	26,786
	Interest, Insurance and Tax	18,973
Operating costs (won/hr)	Fuel cost	11,820
	Lube cost	4,728
	Repair and Maintenance cost	29,808
Labor costs (won/hr)	Labor cost	42,785
	Benefit cost	4,236
	Insurance cost	4,138
Total machine costs (won/hr)		138,573
Hourly productivity (m^3/hr)		6.90
Yarding cost (won/m^3)		20,083

3) 평균집재작업시간 예측모델식 개발

평균집재작업시간 예측모델식을 개발하여 작업효율성을 분석하였다. 추정자료에서 가로집재거리, 세로집재거리, 집재본수를 독립변수로 설정하여 평균집재작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 Table 15와 같다.

평균집재작업시간 예측모델식의 적합성을 검증하기 위해 t-검증을 실시한 결과는 Table 16과 같이 실측치와 추정치 간에 유의수준 5%내에서 차이가 인정되지 않았다.

따라서 평균집재작업시간 예측모델식을 개발하기 위해 추정자료와 검증자료를 통합하여 최종 평균집재작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 Table 17과 같다.

수확시스템비용에서 가장 큰 비중을 차지하는 집재작업에 대한 효율성 분석이 수확시스템비용을 절감하는데 중요한 요소라 사료되었다. 이에 위에서 개발된 평균집재작업시간 예측모델식을 이용하여, 수확시스템비용에 가장 영향력이 큰 인자를 분석하기 위해, 가로집재거리, 세로집재거리, 집재본수를 이용하여 민감도 분석을 실시하였다.

가로집재거리의 변화에 따른 수확시스템의 비용변화를 위하여 다른 독립변수의 평균값, 즉 세로집재거리

Table 15. Regression models to estimate the average cycle time(sec.) in yarding.

Classification	Regression equations	n	R^2	p-value
Yarding	time(sec)=45.87	60	0.66	0.2410
	+10.68×LD[a]			<0.0001
	+1.30×YD[b]			<0.0001
	+33.83×NT[c]			<0.0001

a : Lateral distance, b : Yarding distance, c : Number of trees

Table 16. Validation result of the regression equation using the test data in yarding.

	n	$\overline{D}$	$S_{\overline{D}}$	t	Prob>|t|
Yarding	31	8.025	15.420	0.520	0.607

Table 17. Final regression models to estimate the average cycle time(sec.) in yarding.

Classification	Regression equations	n	R^2	p-value
Yarding	time(sec)=42.92	91	0.68	0.1550
	+9.89×LD[a]			<0.0001
	+1.38×YD[b]			<0.0001
	+39.19×NT[c]			<0.0001

a : Lateral distance, b : Yarding distance, c : Number of trees

Table 18. Sensitivity analysis by lateral distance.

Lateral distance (m)	Productivity (m^3/hr)	Yarding cost (won/m^3)	Harvesting cost (won/m^3)	Increase or decrease (won/m^3)	Percentage of increase or decrease (%)
0	13.4	10,335	31,955	standard	0.0
5	11.6	11,988	33,608	1,653	5.2
10	10.2	13,641	35,261	3,306	10.3
15	9.1	15,295	36,915	4,959	15.5
20	8.2	16,948	38,568	6,612	20.7
25	7.5	18,601	40,221	8,265	25.9
30	6.8	20,254	41,874	9,918	31.0

Table 19. Sensitivity analysis by yarding distance.

Yarding distance (m)	Productivity (m^3/hr)	Yarding cost (won/m^3)	Harvesting cost (won/m^3)	Increase or decrease (won/m^3)	Percentage of increase or decrease (%)
0	14.5	9,590	31,210	standard	0.0
20	13.2	10,512	32,132	923	3.0
40	12.1	11,435	33,055	1,845	5.9
60	11.2	12,357	33,977	2,768	8.9
80	10.4	13,280	34,900	3,691	11.8
100	9.8	14,203	35,823	4,613	14.8
120	9.2	15,125	36,745	5,536	17.7
140	8.6	16,048	37,668	6,459	20.7
160	8.2	16,971	38,591	7,381	23.7
180	7.7	17,893	39,513	8,304	26.6
200	7.4	18,816	40,436	9,226	29.6

Table 20. Sensitivity analysis by number of tree.

Number of tree (m)	Productivity (m^3/hr)	Yarding cost (won/m^3)	Harvesting cost (won/m^3)	Increase or decrease (won/m^3)	Percentage of increase or decrease (%)
1	3.7	37,323	58,943	standard	0.0
2	6.6	21,020	42,640	-16,303	-27.7
3	8.9	15,585	37,205	-21,738	-36.9
4	10.8	12,868	34,488	-24,455	-41.5
5	12.3	11,238	32,858	-26,085	-44.3
6	13.7	10,151	31,771	-27,172	-46.1
7	14.8	9,374	30,994	-27,949	-47.4

(YD)=90.7 m, 집재본수(NT)=3.6본으로 고정하여 분석한 결과는 Table 18과 같다. 가로집재거리 0 m를 기준으로 하여, 5 m 단위로 수확시스템의 비용 증감율은 약 5.2%씩 규칙적으로 증가하고 있다.

또한 Table 19와 같이 세로집재거리의 변화에 따른 수확시스템비용 증감율을 살펴보기 위하여 평균가로집재거리(YD)=10.4 m, 평균집재본수(NT)=3.6본으로 고정하였고, 세로집재거리 0 m를 기준으로 하여 20 m 단위의 수확시스템비용 변화는 약 3.0%로 증가하였다.

집재본수의 변화에 따른 수확시스템비용 증감율 분석을 위해 평균가로집재거리(YD)=10.4 m, 평균세로집재거리(YD)=90.7 m로 고정하였다. 집재본수가 많을수록 수확비용 증감률의 폭은 작아지는 것으로 나타났으며, 집재본수 4~5본에서 둔화현상이 발생되었다(Table 20).

종합적으로 수확시스템에서 약 50%로 가장 큰 비중을 차지하는 집재작업에 대한 인자별 영향력 분석결과는 집재본수가 수확시스템비용에 가장 큰 영향을 미치고, 세로집재거리, 가로집재거리 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다.

4. 조재작업

1) 작업생산성 분석

조재작업에서는 Table 21과 같이 1회 평균 조재작업 시간이 약 89초가 소요되는 것으로 나타났다. 이 중 조재시간이 평균 약 51초로 가장 많은 시간을 차지하였고 이동시간이 평균 약 39초이다.

임목 1본을 조재 하는 동안 발생한 작업지연시간은 평균적으로 약 15초였으며 순수작업시간(PMH)은 89초, 전체작업시간(SMH)은 105초이며, 이에 따른 기계이용률은

Table 21. Average cycle time in processing. (unit : sec.)

Classification	Average	Min	Max	Standard deviation
Moving	39	19	140	12.91
Processing	51	15	116	15.91
Delay	15	0	2,737	160.58
PMH[a]	89	34	228	22.99
SMH[b]	105	34	2,783	277.03

a : Productive machine hour, b : Scheduled machine hour

Table 22. Processing cost in this study.

Machine utilization(%)		90
Fixed costs (won/hr)	Depreciation cost	33,750
	Interest, Insurance and Tax	16,894
Operating costs (won/hr)	Fuel cost	23,640
	Lube cost	9,456
	Repair and Maintenance cost	41,314
Labor costs (won/hr)	Labor cost	12,244
	Benefit cost	1,212
	Insurance cost	1,184
Total machine costs (won/hr)		132,149
Hourly productivity (m^3/hr)		10.88
Processing cost (won/m^3)		12,143

85%이다. 이에 평균임목재적이 0.32 m^3이고, 시간당 약 34본의 임목을 조재하여 10.88 m^3/hr의 생산성이 나타났다. 이 결과는 기존 연구결과(Lee, 2012)에서 하베스터를 이용한 리기다소나무 V영급 개벌 및 전목집재의 조재작업 생산성 3.40 m^3/hr보다 높은 생산성이 나타났다. 작업지의 평균임목재적이 0.35 m^3/본으로 비슷하지만, 평균조재작업시간이 529초로 본 연구결과보다 오랜 시간 소요되었다. 이는 낙엽송 보다 리기다소나무의 임령이 높아 가지가 굵고 많은 관계로 본 연구결과보다 조재작업시간이 오래 소요된 것으로 판단된다.

2) 작업비용 분석

조재작업비용은 Table 22와 같이 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 기계비용이 시간당 약 132,149원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 조재작업비용은 12,143원/m^3으로 나타났다.

5. 집적작업

1) 작업생산성 분석

집적작업은 3시간동안 단목 총 655본을 집적하였으며, 6자(1.8 m) 599본, 12자(3.6 m) 56본 으로 총 생산량은 34.48 m^3이다. 기계이용률은 작업자에게 설문한 결과 값인 75%를 적용하여 8.62 m^3/hr의 생산량을 산출하였다.

Table 23. Sorting/piling cost in this study.

Machine utilization(%)		75
Fixed costs (won/hr)	Depreciation cost	6,500
	Interest, Insurance and Tax	3,868
Operating costs (won/hr)	Fuel cost	11,330
	Lube cost	4,532
	Repair and Maintenance cost	8,667
Labor costs (won/hr)	Labor cost	12,244
	Benefit cost	1,212
	Insurance cost	1,184
Total machine costs (won/hr)		43,403
Hourly productivity (m^3/hr)		8.62
Processing cost (won/m^3)		5,035

2) 작업비용 분석

집적작업비용은 Table 23과 같이 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 기계비용이 시간당 약 43,403원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 집적작업비용은 5,035원/m^3으로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 타워야더(Koller K301-4)를 이용한 전간수확시스템의 작업생산성 및 수확비용을 분석하여, 효율적인 수확시스템을 예측하고자 하였다. 낙엽송 간벌작업지의 시간당 벌도작업의 생산성은 14.92 m^3/hr, 가지정리작업 6.09 m^3/hr, 집재작업 6.90 m^3/hr, 조재작업 10.88 m^3/hr, 집적작업 8.62 m^3/hr으로 나타났다. 수확시스템비용은 단위 재적 당 41,707원으로 벌도작업비용 1,315원/m^3(3.2%), 가지정리작업비용 3,127원/m^3(7.5%), 집재작업비용 20,083원/m^3(48.2%), 조재작업비용 12,143원/m^3(29.1%), 집적작업 5,039원/m^3(12.1%)이다. 수확시스템에서 집재와 조재작업비용이 전체 수확시스템비용의 약 77% 이상을 차지하였다.

수확시스템의 비용 절감을 위해, 수확시스템비용 중 가장 높은 비용을 차지하는 집재작업에 대해 효율성을 분석하였다. 이에 평균집재시간 예측모델식을 이용하여 인자별 수확시스템비용에 대한 영향력이 큰 인자를 검토하기 위해, 분석대상인자 외의 다른 인자들은 평균값으로 고정시켰다. 가로집재거리 변화에 따른 수확시스템비용 증감율은 약 5.2%로 규칙적으로 증가하였고, 세로집재거리 변화에 따라서는 약 3.0%의 증가율이 나타났다. 집재본수 변화에 따라서는 공정 당 집재본수가 많아질수록 증감율의 폭은 작아지는 것으로 나타났으며, 집재본수 4~5본에서 둔화현상이 발생되었다. 따라서 집재본수인자가 수확시스템비용에 가장 큰 영향을 미치고, 세로집재거리인자, 가로집재거리인자 순으로 영향을 주는 것으로 판단된다.

References

Adebayo, A.B., Han, H.S., and Johnson, L. 2007. Productivity and cost of cou-to-length and whole-tree harvesting in a mixed-conifer stand. Forest Products Journal 57(6): 59-69.

Brinker, R.W., Kinard, J., Rummer, B., and Lanford, B. 2002. Machine rates for selected forest harvesting machines. Circular 296(Revised). Alabama Agricultural Experimental Station. Auburn. Alabama. USA. pp. 32.

Han, W.S. 2008. Development of an Estimation Model for Timber Harvesting and Transportation Costs. Department of Forest Resources Graduate School, Kookmin University. pp. 157.

Han, W.S., Cho, K.H., Oh, J.H., Song, T.Y., Kim, J.W., and Shin, M.Y. 2009. Felling Productivity in Korean Pine Stands by using Chain Saw. Journal of Korean Forest Society 98(4): 451-547.

Han, W.S., Han, H.S., Kim, N.H., Cha, D.S., Cho, K.H., Min, D.H., and Kwon, K.C. 2014. Comparison of Harvesting Productivity and Cost of Cable Yarding System. Journal of Korean Forest Society 103(1): 87-97.

Han, W.S., Han, H.S., Kim, Y.S., and Shin, M.Y. 2008. The Yarding Productivity and Cost of Cable Yarding Operation by Yarder Attached on Tractor -Using the Chuncheon Tower-yarder-. Journal of Korean Forest Society 97(6): 641-649.

Hartsough, B.R., Zhang, X., and Fight, R.D. 2001. Harvesting cost model for small trees in natural stands in the interior northwest. Forest Products Journal 51(4): 54-56.

Kang, G.U. 1999. A study on the Tinning Productivity in Red Pine Stand. Korean Journal of Forest Economics 7(2): 12-18.

Kim, J.H. and Park, S.J. 2010. An Analysis of the Yarding Productivity and Cost in Forest Tending Operation. Journal of Korean Forest Society 90(4): 625-632.

Kim, M.K. 2010. An analysis on the productivity and cost of logging operation in Whole-tree logging operation system. Department of Forestry Graduate School, Kyungpook National University. pp. 52-69.

Kim, M.K. and Park, S.J. 2012. An Analysis of the Opertional Time and Productivity in Whole-tree and Cut-to-Length Logging Operation System. Journal of Korean Forest Society 101(3): 344-355.

Korea Forest Service. 2014. Statistical Yearbook of Forestry pp. 302.

Lee, J.A. 2012. Productivity and Cost Analysis of Whole-tree Harvesting System using Swing-yarder. Department of Forest Management Graduate School, Kangwon National University. pp. 34-38.

Lee, J.W., Park, B.J., Kim, J.W., and Song, T.Y. 1998. Work Load of Felling Work Using Chain Saw in Japanese Larch Plantation Site. Journal of Korean Forest Society 87(2): 121-130.

Miyata, E.S. 1980. Determining fixed and operating costs of logging equip-ment. U.S. Department of Agriculture Forest Service General. Technical. Report. NC=55. pp. 16.

Shin, M.Y. and Han, W.S. 2006. Development of a Forest Inventory System for the Sustainable Forest Management. Journal of Korean Forest Society 95(3): 370-377.

Snee, R.D. 1977. Validation of regression medel : Methods and example. Technometrics 19: 415-428.

Woo, B.M., Park, J.M., Lee, J.W., and Chung, N.H. 1990. A study on Economical Analysis of Yarding Operation by Cable Crane. Journal of Korean Forest Society 79(4): 413-418.

(Received: February 9, 2015; Accepted: April 8, 2015)