

낙엽송 개별 임분에서 타워야더를 이용한 전목수확시스템의 작업비용 분석

조민재¹ · 조구현² · 오재현² · 한한섭³ · 차두송^{1,*}
¹강원대학교 산림환경과학대학, ²국립산림과학원 생산기술연구소, ³험볼트 주립대학교

Harvesting Productivity and Cost of Whole-Tree Clear Cutting Using a Tower Yarder in a *Larix leptolepis* Stand

Min-Jae Cho^{1,*}, Koo-Hyun Cho², Jae-Heun Oh², Han-Sup Han³ and Du-Song Cha¹
¹Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea
²Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 130-712, Republic of Korea
³Department of Forestry and Wildland Resources, Humboldt State University, Arcata, CA 95521, USA

Abstract

The productivity and cost of clear cutting operations were examined to broaden our knowledge on the harvesting system in a *Larix leptolepis* stand of Korea. The harvesting system was divided into tree operations which were chainsaw (STIHL MS440) felling, tower yarder (Koller301-4) yarding and harvester (WOODY H50) processing. The average cycle time of felling, yarding and processing were 98 s/cycle, 245 s/cycle and 150 s/cycle. The total stump-to-pile operational productivity was 43.07 m³/hr. The highest production activity was the felling 17.93 m³/hr, followed by the productivity of processing 15.62 m³/hr and then by the productivity of yarding 9.52 m³/hr. In addition the total stump-to-pile operational cost was 24,086 won/m³. The highest cost activity was the yarding 14,557 won/m³ (60.4% of the total cost), followed by the costs of processing 8,461 won/m³ (35.2%) and then by the costs of felling 1,068 won/m³.

Key Words: *Larix leptolepis*, harvesting system, harvesting productivity, operational cost

서론

우리나라는 1970년대 치산녹화사업의 성공 및 지속적 숲가꾸기로 인해, 임목축적량이 2010년 기준 ha당 평균 125.6 m³으로 10년 전의 63.46 m³보다 2배 증가하였다(Korea Forest Service 2010). 그러나 전체 산림의 약 68%가 30년생 이하의 어린나무로 대량 우량목 생산을

위한 간벌작업과 보육작업 등의 산림자원화 사업이 필요하며 국내 목재 수용의 증가에 따른 국내 목재생산적업은 점점 증가되고 있다. 또한, 국산 목재의 공급률은 전체 목재 소요량의 6%로 목재수요는 꾸준히 증가하고 있는 반면 2012년 기준 국내 목재자급률은 16.2%에 불과하다. 이에 산림청은 2017년까지 국내 목재자급률을 21%까지 증가시키는 방안을 추진하고 있다(Korea

Received: February 4, 2014. Revised: February 9, 2014. Accepted: February 9, 2014.

Corresponding author: Du-Song Cha

Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea
Tel: 82-33-250-8333, Fax: 82-33-250-5617, E-mail: dscha@kangwon.ac.kr

Table 1. Stand description of the study

Area (ha)	2.8
Species	<i>Larix leptolepis</i>
Age	IV
Average slope (°)	17
Average height (m)	27/23-32
Average DHB (cm)	36/26-50

Forest Service 2013). 그러나 산림작업은 대부분 인력에 의존하는 노동집약 형태이고, 농산촌 인구의 부족 및 고령화, 험준한 지형조건과 임업기계를 이용할 수 있는 숙련된 기능인의 부족으로 인해 생산적인 목재수확 작업이 어려운 실정이다. 또한 앞으로 증가할 국산재의 수요 및 간벌 등의 산림작업에 대처하기 위한 임업기계화가 시급하나 임업기계 구입비용이 고가이고, 영세한 경영규모로 임업기계에 의한 생산성이 많이 부족한 상황이다. 이런 문제점들을 해결하기 위해서는 산지지형과 임황 등을 고려한 임업의 기계화 및 다양한 임업기계의 제원과 특성을 파악하여 효율적인 임업기계의 투입과 산림 생태계를 보존하며 작업을 효율적으로 할 수 있는 임목수확시스템의 도입과 운영이 필요한 실정이다(Kim and Park 2012).

우리나라에서 목재생산 작업에 관한 기존 연구를 살펴보면, 벌목작업에 대해 Ji et al. (1997)은 체인톱에 의한 낙엽송 개별 임분을 대상으로 벌목작업에 대한 시간 분석을 실시한바 있으며, 집재작업은 Park and Lee (2004)가 타워야더(RME-300T)를 이용한 III영급 잣나무, IV영급 리기다소나무 열상간벌지에 대해 상·하향 집재방식에 따라 산림 바이오매스 자원량 및 집재작업 공정조사를 실시하였다. Han et al. (2009)은 트랙터부착 집재기를 이용한 잣나무 간벌작업지의 집재작업 공정분석을 연구하였고, Oh et al. (2012)은 스윙야더를 이용한 잣나무, 리기다소나무, 낙엽송 3개지역을 대상으로 수종별 집재작업 생산성의 차이를 파악하기 위해 공정조사를 실시하였다. 이밖에도 임목생산요소작업별 공정 연구는 많이 진행되었으나 벌목작업에서 운송작업까지 수확시스템에 대한 연구는 Kim and Park (2012)이 리기다소나무를 대상으로 전목 및 단목 집재작업시스템에서 작업시간 및 공정분석을 실시하였으나 아직 수확시스템 연구는 많이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강원도 평창군 미탄면 평안리 가리왕산의 IV영급 낙엽송 개별지를 대상으로 타워야더(Koller301-4)를 이용한 벌목작업에서 집재작업까지의 전목수확시스템에 대한 평



Fig. 1. Schematic of the harvesting system.

균작업시간의 예측모델식을 개발하고 생산성 및 수확비용을 분석하여 효율적인 임목수확시스템 구축을 위한 기초자료를 제공하기 위함이다.

재료 및 방법

조사지의 개요

조사지는 강원도 평창군 미탄면 평안리 가리왕산 48 임반 라소반에 위치한다. 낙엽송 인공조림지로서 면적은 2.8 ha, 영급은 IV영급, 평균 수고 27 m, 평균 경급 36 cm이다. 조사지의 지황 및 임황은 Table 1과 같다.

전목수확작업시스템의 개요

본 연구는 낙엽송 개별지에서 Fig. 1과 같이 체인톱(STIHL MS440)에 의한 벌목을 실행하고, 타워야더(Koller301-4)를 이용하여 전목·하향집재를 실시하였다. 그리고 임도상에서 집재를 실시한 후 하베스터(WOODY H50)를 이용한 조재작업을 실행하였다.

임목수확작업기계

벌목작업에 사용된 체인톱(STIHL MS440)은 배기량 70.7 cc, 중량 6.3 kg이고 집재작업은 타워야더(Koller301-4)로 Austria Koller사에서 제작되었으며 임내차에 탑재한 가선집재기계이다. 상·하향 집재 최대거리는 400 m, 타워 높이는 8 m로 최대 10 m까지 연장이 가능하며 반송기는 USKA 1.5가 이용되었다. 조재작업에 사용된 하베스터(WOODY H50)는 굴삭기에 부착되었으며 무게는 1,200 kg, 최대 조재직경 7-55 cm, 최대 벌목직경 55 cm, 그랩 최대 열림거리 120 cm이다.

조사방법

모든 작업은 스톱워치(stop watch)를 이용하여 시간 및 동작연구방법(time and motion study)을 적용하였다. 개별작업 공정별 수확생산성에 영향을 주는 인자(variables)들은 현장조사를 통해 자료를 수집하고 공정 분석을 실시하였다.

벌목작업은 작업자 1명이 총 2일간 투입되었으며 작업공정은 이동시간, 벌채목 주변정리시간, 벌목(felling)

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

Cost factor	Unit	Harvesting system		
		Felling	Yarding	Processing
Purchase price	Won	1,250,000	300,000,000	300,000,000
Economic lives	Years	1	6	4
Salvage value	%	0	10	10
SMH ^a	Hr/year	2,083	1,680	2,000
Annual interest rate	%	17	17	17
Repair and maintenance	%	120	100	110
Oil price	Won/L	1,900	1,699	1,699
Coefficient of lubricant	%	67	40	40
Fuel consumption	L/hr	1	7	14
Daily wage of operator	Won/day	105,911	97,951	97,951
Daily wage of ground crew	Won/day		81,443	

^aScheduled machine hours.

Table 3. Average cycle time in felling

Classification	Average	Min	Max	Standard deviation
Moving	53	10	210	32.20
Felling	45	19	89	16.93
Delay	76	0	1132	173.22
PMH ^a	98	36	231	34.10
SMH ^b	174	36	1221	172.93

^aProductive machine hour; ^bScheduled machine hour.

시간, 그리고 휴식 및 주유 등과 같은 작업지연(delay)시간으로 구분하였다. 또한, 수확생산성에 영향을 주는 인자인 이동거리와 하층식생을 조사하였다.

집재작업은 타워야더 조작용 1명, 초커맨 3명으로 4인 1조로 총 3일 동안 작업하였으며 작업공정은 반송기 보내기(carriage out), 와이어로프 가로끝기(lateral out), 초커설치(choking), 가로집재(lateral yarding), 집재(yarding), 초커해체(unhooking), 그리고 작업지연(delay)시간으로 구분하였다(Han 2008). 또한, 수확생산성에 영향을 주는 인자인 가로집재거리, 집재거리, 집재본수를 조사하였다.

조재작업은 하베스터 조작용 1명이 총 3일간 투입되었으며 단목의 크기는 6자(1.8 m), 9자(2.7 m), 12자(3.6 m)로 작업하였다. 작업공정은 조재목 운반, 조재(processing)시간, 그리고 작업지연(delay)시간으로 구분하였다. 추가로 전간재의 원구, 말구, 단목의 수량을 조사하였다.

분석방법

작업의 생산성(m³/hr)은 생산량(본/hr)과 평균원목재적(m³/본)으로 산출한다. 즉, 작업별로 측정된 연속작업 시간을 이용하여 평균 작업시간을 이용하여 시간당 생산량을 산출하고, 평균원목재적은 Smalian식을 이용하였다. 또한 전체자료를 이용하여 벌목작업과 집재작업의 평균작업시간 예측모델식을 개발하였다.

작업비용은 고정비용과 운영비용으로 구분되는데, 고정비용은 기계의 작동 여부와 관계없이 소요되는 비용으로 감가상각비, 이자, 보험, 세금이 포함되며, 운영비용은 기계가 작동 할 때 소요되는 비용으로 연료비, 윤활유비, 인건비 등이 포함된다. Table 2와 같이 작업비용의 산출은 Machine rate 방법을 이용하였다(Miyata 1980; Woo et al. 1990; Song 1998; Park 2004).

결과 및 고찰

벌목작업

벌목작업에서는 Table 3과 같이 1회 평균 벌목작업 시간이 약 98초가 소요되는 것으로 나타났다. 이 중 이동시간이 평균 약 53초이고 별도 평균시간이 평균 약 45초이다.

임목 1본을 벌도 하는 동안 발생한 작업지연시간은 평균적으로 약 76초였으며 순수작업시간(PMH)은 98초, 전체작업시간(SMH)은 174초이며, 이에 따른 기계이용률은 56%이다. 이에 평균임목재적이 0.87 m³이고 시간당 약 21본의 임목을 벌목하여 17.93 m³/hr의 생산

Table 4. Regression models to estimate the average cycle time (sec) in felling

Classification	Regression equations	n	R ²	p-value
Felling	Time (sec)=50.70 + 30.04 x DUV1 ^a + 51.80 x DUV2 ^a + 1.03 x MD ^b	96	0.22	0.001 0.067 0.002 0.069

^aDummy 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); ^bMoving distance.

Table 5. Felling cost of the study

Machine utilization (%)		56
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
	Benefit cost	1,311
	Insurance cost	1,280
Total machine costs (won/hr)		19,634
Hourly productivity (m ³ /hr)		17.93
Felling cost (won/m ³)		1,068

량이 나타났다. 이 결과는 낙엽송 개별 및 전간집재의 벌목작업생산량 22.69 m³/hr (Ji et al. 1997)보다 낮게 나타났는데 벌목평균작업시간 96초로 비슷하나 평균 경급 40 cm, 평균 수고 27.5 m로 평균임목재적이 1.21 m³/본으로 높게 나타나 벌목작업생산량이 높게 산출되었다.

벌목평균작업시간 예측모델식을 개발하여 생산성의 변화를 파악하여 작업효율성을 분석하였다. 추정자료에서 이동거리와 하층식생분포(density of understory vegetation)를 독립변수로 설정하여 벌목평균작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 다음과 같다(Table 4).

벌목작업비용은 Table 5와 같이 기계비용(machine cost)과 시간당 생산성(hourly productivity)으로 결정된다. 작업비용은 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 시간당 약 19,634원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 벌목작업비용은 1,068원/m³으로 나타났다. 이 결과는 IV영급 낙엽송 개별 및 전간집재

Table 6. Average cycle time in yarding (unit: sec)

Classification	Average	Min	Max	Standard deviation
Carriage out	29	7	68	13.48
Lateral wire traction	43	13	107	19.74
Choking	29	10	77	12.37
Lateral yarding	37	9	98	17.56
Yarding	46	15	117	18.77
Unhooking	61	34	113	15.00
Delay	82	0	3202	404.32
PMH ^a	245	170	434	48.76
SMH ^b	327	170	3480	413.10

^aProductive machine hour; ^bScheduled machine hour.

Table 7. Regression models to estimate the average cycle time (sec) in yarding

Classification	Regression equations	n	R ²	p-value
Yarding	Time (sec)=99.02 + 0.819 x LD ^a + 0.721 x YD ^b	65	0.25	<0.0001 0.255 <0.0001

^aLateral distance; ^bYarding distance.

의 벌목작업비용 5,477원/m³ (Han 2008)보다는 낮은 수확비용으로 나타났는데 벌목방식, 임령, 수종 등이 다소 차이는 나지만 높은 벌목생산량이 낮은 작업비용으로 이루어졌다고 판단된다.

집재작업

집재작업에서는 Table 6과 같이 1회 평균 집재작업 시간이 약 245초이고 공정당 평균 집재거리는 68.1 (35-127) m, 평균가로집재거리 8.9 (1-24) m, 평균집재수량은 1.0본이었다. 이 중 초커해체시간이 평균 약 61초로 가장 많은 시간을 차지하였고 집재 평균시간이 약 46초, 와이어로프가로끌기 평균시간이 약 43초이다.

초커해체와 집재작업의 경우 낙엽송 전목·하향집재로 인해 오랜 시간이 걸리는 것으로 판단되었다. 집재작업을 하는 동안 발생한 작업지연시간은 평균적으로 약 82초였으며, 순수작업시간(PMH)은 245초, 전체작업시간(SMH)은 327초이며, 이에 따른 기계이용률은 75%이다. 이에 평균임목재적이 0.87 m³이고 시간당 약 11본의 임목을 집재하여 9.52 m³/hr의 생산량이 나타났다. 이 결과는 타워야더(RME-300T)를 이용한 III영급 리기다 소나무 개별지 하향집재작업의 생산량 3.38 m³/hr (Kim

Table 8. Yarding cost of the study

Machine utilization (%)		75
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)		9.52
Yarding cost (won/m ³)		14,557

Table 9. Average cycle time in processing (unit: sec)

Classification	Average	Min	Max	Standard deviation
Moving	40	12	102	20.98
Processing	110	55	200	31.39
Delay	49	0	399	71.71
PMH	150	67	302	52.37
SMH	199	67	701	124.07

^aProductive machine hour; ^bScheduled machine hour.

and Park 2012) 보다 높게 나타났는데 최대집재거리 104 m, 최대가로거리 12 m, 평균작업시간이 344초로 다소 차이가 있으나 평균임목재적이 약 0.32 m³으로 집재작업생산량이 낮은 것으로 판단된다.

집재작업 예측모델식을 개발하여 생산성의 변화를 파악하여 작업효율성을 분석하였다. 추정자료에서 가로집재거리, 세로집재거리를 독립변수로 설정하여 평균집재작업시간 예측모델식을 도출한 결과는 Table 7와 같다.

집재작업비용은 Table 8과 같이 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 기계비용이 시간당 약 138,573 원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 집재작업수확비용은 14,557원/m³으로 나타났다.

조재작업

조재작업에서는 Table 9와 같이 1회 평균 조재작업 시간이 약 150초가 소요되는 것으로 나타났다. 이 중 조재시

Table 10. Processing cost of the 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)		15.62
Processing cost (won/m ³)		8,461

Table 11. Comparison of total harvesting cost of the study

Classification	Productivity (m ³ /hr)	Machine cost (won/hr)	Harvesting cost (won/m ³)
Felling	17.93	19,620	1,068 (4.4%) ^a
Yarding	9.52	138,638	14,557 (60.4%)
Processing	15.62	128,532	8,461 (35.2%)
Total	43.07	349,268	24,086

^aPercentage of total harvesting cost.

간이 평균 약 110초이고 운반 평균시간이 약 40초이다.

임목 1본을 조재 하는 동안 발생한 작업지연시간은 평균적으로 약 49초였으며 순수작업시간(PMH)은 150 초, 전체작업시간(SMH)은 199초이며, 이에 따른 기계 이용률은 75%이다. 이에 평균임목재적이 0.87 m³이고 시간당 약 18본의 임목을 조재하여 15.62 m³/hr의 생산량이 나타났다. 이 결과는 하베스터를 이용한 V영급 리기다소나무 개별 및 전목집재의 조재작업생산량 3.40 m³/hr (Lee 2012)보다 높은 조재작업생산량이 나타났는데 Lee (2012)는 평균임목재적이 본당 0.35 m³으로 낮고 평균 조재작업시간 또한 약 529초로 작업지의 조건 및 작업자의 작업방식 차이가 조재작업생산량이 낮은 것으로 판단된다.

조재작업비용은 Table 10과 같이 고정비용, 운용비용, 노무비용 등을 이용하여 기계비용이 시간당 약 132,149 원 소요되었다. 따라서 기계비용과 작업생산성을 이용한 조재작업비용은 8,461원/m³으로 나타났다.

수확시스템 분석

타워야더(Koller301-4)를 이용한 총 생산량은 Table 11

과 같이 시간당 43.07 m³/hr 이며, 총 수확비용은 단위 재적 당 24,086원/m³이다. 총 수확비용 중 집재작업비용이 14,557원/m³ (60.4%)로 가장 높게 나타났고, 조재작업비용은 8,461원/m³ (35.2%)이다.

결론

본 연구에서는 타워야더(Koller301-4)를 이용한 전목 수확시스템의 작업생산성 및 평균작업시간 예측모델식을 개발하고 작업비용을 분석하고자 하였다. 벌목작업의 요소작업시간을 분석해본 결과 이동시간이 가장 크게 나타났는데 이는 작업자가 이동할 때 하층식생으로 인한 작업방해로 판단되며 벌목작업의 생산성을 높이기 위해 지속적인 관리가 필요하다. 집재작업의 요소작업시간 분석에서는 초킹해체와 집재시간이 높게 나타났는데 이는 집재작업에서 집재목 걸림현상이 자주 발생하였고, 집재수량은 평균 1본으로 전목·하향집재에 대한 작업자의 교육과 훈련이 필요한 것으로 판단된다. 조재작업의 요소작업시간분석은 조재시간이 70% 이상을 차지하는데, 이는 임도에 집재된 조재목을 운반 후 조재하는 비교적 단순한 작업으로 조재작업의 생산성은 작업자의 숙련도 차이에 의해 결정될 것으로 판단된다.

수확시스템 분석에서 전체작업 생산량은 43.07 m³/hr으로 벌목작업의 생산량은 17.93 m³/hr, 집재작업 9.52 m³/hr, 조재작업 15.62 m³/hr으로 나타났으며, 단위 재적당 전체작업비용은 24,086원/m³으로 벌목작업 1,068원/m³, 집재작업 14,557원/m³, 조재작업 8,461원/m³이다. 수확시스템에서 집재작업의 수확비용이 전체 수확비용의 약 60% 이상을 차지하였는데 집재작업비용에 영향이 큰 것은 집재거리, 가로집재거리, 집재수량으로 판단된다. 이에 좀 더 다양한 장비와 임분 조건에 대한 집재작업공정 조사 및 분석을 통해 임분 조건에 맞는 효율적인 집재작업 시스템 구축이 요구되며, 또한 우리나라에서 타워야더에 의한 전목집재작업은 아직 도입초기단계로 작업자의 숙련도 향상을 위한 교육 및 훈련이 필요하다고 사료된다.

References

- Han WS. 2008. Development of an estimation model for timber harvesting and transportation costs. PhD dissertation. Kookmin University, Seoul, Korea, pp 157. (in Korean with English abstract)
- Han WS, Cho KH, Oh JH, Song TY, Kim JW, Shin MY. 2009. Felling productivity in *Korean pine* stands by using chain saw. J Korean For Soc 98: 451-457. (in Korean with English abstract)
- Ji BY, Choi IH, Cha DS. 1997. A time study on felling and bucking of *Larix leptolepis* stands. In: Proceedings of the Annual Meeting of Korean Forest Society. Chuncheon, Korea, pp 95-96. (in Korean)
- Kim MK, Park SJ. 2012. An analysis of the operational time and productivity in whole-tree and cut-to-length logging operation system. J Korean For Soc 101: 344-355. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service. 2010. Statistical yearbook of forestry. <http://www.forest.go.kr>. Accessed 20 Jan 2014.
- Korea Forest Service. 2013. Statistical yearbook of forestry. <http://www.forest.go.kr>. Accessed 20 Jan 2014.
- Lee JA. 2012. Productivity and Cost Analysis of Whole-tree Harvesting System using Swing-yarder. MS thesis. Kangwon National University, Chuncheon, Korea, pp 43. (in Korean with English abstract)
- Miyata ES. 1980. Determining fixed and operating costs of logging equipment. U.S. Department of Agriculture Forest Service Gen. Tech. Re. NC=55. pp 16.
- Oh JH, Lee JA, Kim JW. 2012. Productivity analysis of yarding operation with a swing-yarder. In: Proceedings of Annual Meeting of Korean Forest Society. Jeju, Korea, pp 992-994. (in Korean)
- Park SJ. 2004. An analysis of the yarding operation system with a mobile tower-yarder. J Korean For Soc 93: 205-214. (in Korean with English abstract)
- Park SJ, Lee GT. 2004. An analysis of forest biomass amount and harvesting system. J Korea Soc For Eng Tech 2: 13-29. (in Korean with English abstract)
- Song TY, Park MS, Kim JW, Kang GU. 1998. Studies on the comparison of the working cost with skidding method far track-type mini skidder. Korean J For Econom 6: 20-28. (in Korean with English abstract)
- Woo BM, Park JM, Lee JW, Chung NH. 1990. A study on economical analysis of yarding operation by cable crane. J Korean For Soc 79: 413-418. (in Korean with English abstract)