

## 타워야더+프로세서 기반의 작업시스템에서 단공정 및 다공정작업의 생산성 및 비용분석

조민재 · 최윤성 · 문호성 · 오재현<sup>ID\*</sup>

국립산림과학원 산림기술경영연구소

### Comparison of the Timber Harvesting Productivity and Cost of Single-operation using a Forestry Combi-machine Versus Multi-operation using a Tower-yarder and Processor

Min-Jae Cho, Yun-Sung Choi, Ho-Seong Mun and Jae-Heun Oh<sup>ID\*</sup>

Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea

**요약:** 우리나라의 임목수확작업은 작업자의 고령화 및 고임금의 문제에 직면하고 있으며, 위기 개선을 위해 작업체계 개선 및 고성능 임업기계를 이용한 안정성 확보 등이 필요하다. 따라서 본 연구는 경사 35% 이상의 지역에서 타워야더와 프로세서를 기반으로 한 목재수확시스템을 적용할 때 다공정작업과 단공정작업의 생산성을 비교하며, 작업시스템의 비용절감 효과를 분석하고자 하였다. 국립산림과학원 광릉시험림 15임반 모두베기 지역을 대상으로 전목(가선)집재작업을 실시하였으며, 다공정과 단공정시스템의 생산성 및 비용을 분석하였다. 다목적집재장비를 이용한 단공정시스템은 타워야더와 프로세서를 이용한 다공정시스템에 비해 cycle당 집재본수가 1본/cycle 더 많아 집재작업 생산성은 약 1.5 m<sup>3</sup>/PMH (Productive Machine Hour; PMH)이, 조재작업은 약 1.6 m<sup>3</sup>/PMH이 더 높게 산출되었다. 다목적집재장비를 이용한 단공정(36,113 원/m<sup>3</sup>)시스템은 다공정작업(41,065 원/m<sup>3</sup>)시스템 보다 약 12.1%의 비용이 절감되었다. 또한 유희시간(Idle time) 감소에 따라 단공정 및 다공정시스템 비용은 각각 최대 22.6%와 15.9%가 절감되었다.

**Abstract:** The harvesting system in South Korea faces the problems of aging workers and high wages, so it is necessary to improve the operation system and train workers to use high-performance forestry machines. This study compared the effectiveness and costs of yarding and processing operations between a multi-operation system using a tower yarder (HAM300) and a processor (KESLA 20SH) with those of a single-system using a forestry combi-machine. A whole-tree (cable) yarding operation was conducted in the clear-cutting area located at Compartment 15, Gwangneung Experimental Forest, National Institute of Forest Science, and the productivity and cost of multi- and single-system were analyzed. The productivity of the single-system was 1.5 m<sup>3</sup>/PMH and 1.6 m<sup>3</sup>/PMH higher than that of the multi-system because the single-system produced 1 log/cycle more than the multi-system in the yarding operation. The cost was approximately 12.1% lower for the single-system (₩36,113/m<sup>3</sup>) than for the multi-system (₩41,065/m<sup>3</sup>). The costs of the single-system and multi-system were decreased by maximums of 22.6% and 15.9%, respectively, by decreasing the idle time.

**Key words:** whole-tree, clear-cut, combi-machine, idle time

## 서론

기계화목재수확작업은 생산성향상, 작업안전, 환경피해

저감 등의 이유로 지속적으로 활용되고 있다(Cambi et al., 2015; Enache et al., 2016; Lee et al., 2020a; Cho et al., 2021). 또한 산림작업자는 점점 감소하고 고령화 및 고임금의 문제로 고성능 임업기계를 활용한 목재수확작업에 대한 관심이 증가하고 있다(Cho et al., 2018; Lee et al., 2020b). 고성능 임업기계를 활용한 목재수확작업에서 하베스터+포워더 또는 하베스터+스키더 등의 지상집재작업시스템

\* Corresponding author

E-mail: jhoh7038@korea.kr

ORCID

Jae-Heun Oh <sup>ID</sup> https://orcid.org/0000-0002-1384-6780

은 가장 경제적이지만, 경사 30% 미만 지역에서만 적용이 가능한 한계가 있다(Visser and Stampfer, 2015). 이를 해결하기 위해 윈치보조(Cable-assist)시스템을 이용하면, 경사 70%까지 지상집재작업시스템 적용이 가능하다(Visser and Stampfer, 2015). 우리나라의 경우 국립산림과학원 연구보고(National Institute of Forest Science, 2020)에 따르면 경사 70% 미만 지역이 87%로 대부분 윈치보조 지상집재작업시스템을 적용할 수 있다. 그러나 우리나라는 윈치보조 지상집재작업시스템 초기 단계로 대부분 지역(중·급경사지, 76% 이상)에서 가선집재작업시스템이 필요하다(National Institute of Forest Science, 2020).

가선집재작업시스템은 급경사지나 접근이 어려운 지역에서 목재를 수확하는 일반적인 방법이다(Talbot et al., 2015). 가선집재작업시스템 비용 절감을 위해서는 기계화 및 자동화가 필요하다(Visser and Stampfer, 2015). 예를 들어, 무선 제어 초커를 사용하면 집재장에서 초커해체작업에 별도의 작업자가 요구되지 않아 비용을 절감할 수 있다. 또한 전동 그래플 캐리지의 개발로 임지 내 초커맨의 필요성을 감소할 수 있다(McFadzean and Visser, 2013). Talbot et al.(2015)에 따르면 집재 및 조재작업에서 작업자가 감소하고, 2대의 단일 장비에서 1대의 콤비장비를 이용하면 비용 절감이 가능하다고 보고하였다.

국내 가선집재작업시스템에 관한 선행연구를 살펴보면, 스윙야더, 타워야더(RME-300T, HAM300, Koller K301-4)를 이용하여 일반적인 방식의 집재작업생산성 및 비용을 분석하였다(Kim and Park, 2012; Cho et al., 2014, 2015, 2016, 2018; Beak et al., 2020). Choi et al.(2018)이 무선

클램프 반송기로 일부 자동화 시스템을 적용하여 집재작업 생산성 향상에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 가선집재작업시스템 비용을 절감하기 위한 기계화 및 자동화에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 경사 35% 이상의 지역에서 타워야더와 프로세서를 기반으로 한 목재수확시스템을 적용할 때 단공정작업과 다공정작업의 생산성을 비교하며, 작업시스템의 비용절감 효과를 분석하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

경기도 포천시 소흘읍 직동리 산50번지(37°54'40.0"N 127°19'53.6"E)에 위치한 국립산림과학원 광릉시험림 15 입반으로 1975년 조림한 잣나무(V영급) 인공림에서 모두 베기작업을 실시하였다(Figure 1). 원목과 부산물을 모두 이용하기 위해 전목수확작업을 실시하였다. 평균경사가 35.5%인 동일한 사면에서 단공정(다목적집재장비) 및 다공정(타워야더+프로세서)으로 구분하여 가선집재작업을 실시하였으며, 지향 및 임황은 다음 Table 1과 같다.

### 2. 단공정 및 다공정시스템 작업 개요

단공정 및 다공정시스템의 작업구성은 Table 2와 같다. 단공정시스템은 2019년 국립산림과학원에서 개발한 다목적집재장비를 이용하여, 3개의 가선라인(평균 집재거리 42.7 m, 평균 가로집재거리 15.1 m)을 2인1조로 집재 및 조재작업을 하였다(Figure 2). 무선 제어 초커를 사용하였으

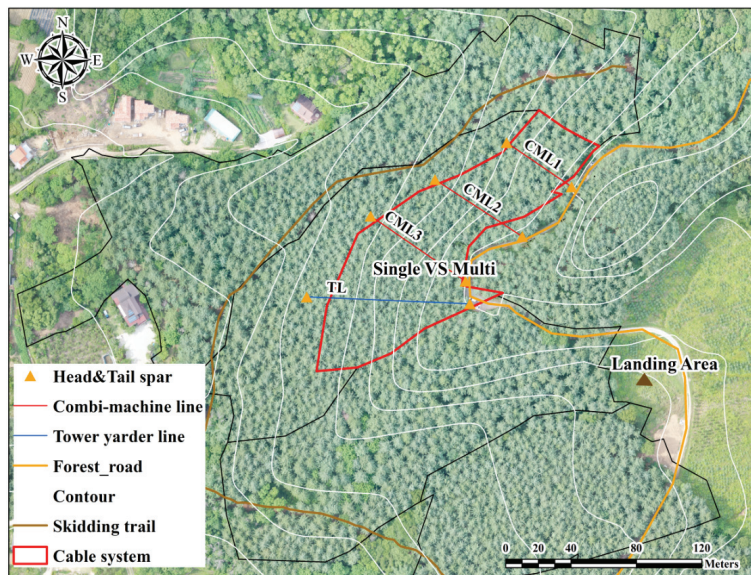


Figure 1. Study site of single and multi operation.

**Table 1. Description of study site.**

Site	Description
Location	Mt. 50, Jikdong-ri, Soheul-eup, Pocheon-si, Gyeonggi-do
Species	<i>Pinus koraiensis</i>
Forest type	Plantation
Silvicultural system	Clear cut
Area (ha)	1.0
Stand density (tree/ha)	610
Stock (m <sup>3</sup> /ha)	321.5
DBH (cm, avg./min.-max.)	29/14-48
Height (m, avg./min.-max.)	16/11-20
Volume (m <sup>3</sup> /tree, avg./min.-max.)	0.53/0.07-1.61
Slope (% , avg.)	35.5

**Table 2. Description of work configurations.**

Element	Work configuration	
	Single operation	Multi operation
Choking and Yarding	Person A,B, Machine 1	Person A,B Machine 1
Processing		Person C, Machine 2
Crew size	2	3



**Figure 2. Combi-machine.**



**Figure 3. Tower-yarder and Processor.**

며, 작업자 1인은 초커설치 및 집재작업을 하였고, 다른 1인은 초커해체 및 조재작업을 실시하였다. 다공정시스템은 국내 국유림에서 많이 이용하는 트랙터 부착 타워야더(HAM300)와 프로세서(KESLA 20SH)를 이용하였으며 (Figure 3), 1개의 가선라인(평균 집재거리 42.4 m, 평균 가로집재거리 9.1 m)을 3인1조로 작업하였다. 트랙터 부착 타워야더(HAM300)도 무선 제어 초커를 사용하였으며, 작업자 1인이 초커설치작업을 다른 작업자 1인은 집재 및 초커해체작업을 하였다. 또한 나머지 작업자 1인이 프로세서(KESLA 20SH)를 이용하여 조재작업을 실시하였다.

다목적집재장비, 트랙터 부착 타워야더(HAM300) 및 프로세서(KESLA 20SH)의 제원은 Table 3과 같다.

### 3. 조사방법

단공정 및 다공정시스템에서 가선집재와 조재작업의 생산성을 분석하기 위해 스톱워치를 이용한 시간 및 동작연구(Time and motion study) 방법을 적용하였다(Cho et al., 2019; Choi et al., 2021). 집재작업은 반송기이동, 와이어 풀기, 초커설치, 가로집재, 집재, 초커해체, 지연으로 구분하였으며, 집재시간에 영향을 주는 집재재적(m<sup>3</sup>/cycle), 가

**Table 3. Technical information for the combi-machine, Tower-yarder (HAM300), and Processor (KESLA 20SH).**

	Machine	Specification
Combi-machine	Base machine	5 ton truck
	Weight	19,000 kg
	Max. yarding distance	300 m
	Height of tower	11 m
	Engine power	tower-yarder (260 hp), processor (134 hp)
Tower-yarder (HAM300)	Base machine	tractor
	Weight	1,850 kg
	Max. yarding distance	300 m
	Height of tower	2.6~7.3 m
	Engine power	80~100 hp
Processor head (KESLA 20SH)	Base machine	Excavator (16 ton)
	Weight	520 kg
	Max. capacity	45 cm
	Pressure and flow	175~220 bar, 70~120 liters/min.
	Required power	29.5~59.0 hp

로집재거리(m), 집재거리(m)를 조사하였다. 또한 지연시간은 기계적지연(장비점검, 배터리교체 등), 작업적지연(나무걸림, 초크재설치, 작업대기 등), 인위적지연(작업대화, 휴식 등)으로 구분하여 조사하였다. 조재작업은 조재, 원목변칭, 부산물변칭, 지연으로 구분하였으며, 조재시간에 영향을 주는 재적(m<sup>3</sup>/cycle), 절동횟수를 조사하였다. 지연시간은 집재작업과 동일하게 기계적지연, 작업적지연, 인위적지연으로 구분하여 조사하였다.

작업기계별 기계비용(won/SMH; Scheduled Machine Hour)을 산출하기 위해 장비초기구입비용, 내구년수, 연간사용시간, 유류소비량, 인건비 등을 조사하였다.

#### 4. 분석방법

단공정 및 다공정시스템에서 집재 및 조재작업비용(won/m<sup>3</sup>)은 다음 식 1과 같이 작업생산성(m<sup>3</sup>/SMH)과 기계비용(won/SMH)을 이용하여 산출하였다.

$$\text{Operation cost (won/m}^3\text{)} = \frac{\text{Machine cost (won/SMH)}}{\text{Productivity (m}^3\text{/SMH)}} \quad (1)$$

##### 1) 작업공정 및 생산성

작업공정은 전체작업시간(Cycle time), 순수작업시간(Delay-free cycle time), 지연시간(Delay time)으로 구분하여, 기계이용률(Utilization, %)을 산출하였다. 또한 단공정 및 다공정시스템의 지연시간을 비교·분석하였다. 작업생산성(m<sup>3</sup>/SMH)은 cycle 당 평균 시간(sec/cycle)과 평균 작업량(m<sup>3</sup>/cycle)으로 분석하였다.

##### 2) 기계비용

기계비용은 독일 산림작업 및 임업기계위원회(KWF, Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e. V.)에서 정한 방식으로 다음 Table 4와 같이 기계별 감가상각비, 이자비, 수리 및 유지비, 유류비, 인건비 등을 이용하여 산출하였다(Miyata, 1980; Woo et al., 1990; Brinker et al., 2002; Cho et al., 2018, 2019; Choi et al., 2018, 2021).

##### 3) 유희시간(Idle time) 감소에 따른시스템 작업비용 절감효과

단공정 및 다공정시스템에서 유희시간은 집재목이 조재를 할 수 있는 공간으로 도착하기 전까지 조재작업을 대기하는 시간으로, 이는 작업생산성에 많은 영향을 주었다. 따라서 유희시간 감소에 따른 작업생산성 향상과 작업비용 절감효과를 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 시스템 작업공정 및 생산성 분석

#### 1) 작업공정

다목적집재장비를 이용한 단공정시스템의 설치 및 해체시간은 3시간 30분이 소요되었으며, 설치시간이 57.1% (2시간)으로 가장 높았으며, 해체시간 26.2%(55분), 프리리깅시간 16.7%(35분)였다(Table 5). 트랙터 부착 타워야더와 프로세서를 이용한 다공정시스템의 설치 및 해체시간은 5시간10분으로 설치시간이 3시간30분이고, 해체 및



**Table 4. Cost factors and assumptions used for operation cost analysis.**

Cost factor	Operation machine				
	Combimachine		Tower-yarder	Processor	
	yarder	processor	HAM300	Excavator	head
Purchase price (won)	455,000,000	120,000,000	147,400,000	110,000,000	110,000,000
Endurance period <sup>a</sup> (years)	8	8	8	7	8
Economic life (hour)	8,000	8,000	8,000	9,744	11,136
Annual operation time <sup>b</sup> (hour)	1,392	1,392	1,392	1,392	1,392
Fuel consumption (liter/hour)	4.2	5.3	5.4	9.3	-
Coefficient of repair and maintenance	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9
Coefficient of lube oil	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Interest rate (%/year)	10	10	15	15	15
Depreciation (won/hour)	56,875	15,000	18,425	11,289	9,878
Interest expense (won/hour)	16,343	4,310	7,942	5,927	5,927
Costs of repair and maintenance (won/hour)	39,813	10,500	12,898	9,031	8,890
Fuel cost <sup>c</sup> (won/hour)	8,127	10,255	10,449	17,955	-
Other cost (won/hour) (Insurance, storage fee etc.)	8,531	2,250	2,764	1,693	1,482
Sub total	129,689	42,315	52,477	45,895	26,176
Labor cost <sup>d</sup> (won/hour) (50% Inclusion incidental expense)	35,669	35,669	60,094	42,803	
Total machine cost (won/hour, Inclusion labor cost)	165,358	77,985	112,570	88,698	26,176
	243,343			114,874	

<sup>a</sup> 174 day×8 hour=1,392 hours (KFS, 2012)

<sup>b</sup> Endurance period (Miyata, 1980; Woo et al., 1990; Brinker et al., 2002)

<sup>c</sup> Diesel : 1,382 won/liters in 2019, South Korea (KNOC, 2019)

<sup>d</sup> Standard of labor cost : machine operator (190,235 won), worker (130,264 won) in 2019 (CAK, 2019)

**Table 5. Average cycle time by work elements in yarding and processing of single and multi operations.**

Classification	Single operation <sup>c</sup> (n=95)		Multi operation <sup>d</sup> (n=104)		
	sec	%	sec	%	
Yarding <sup>a,b</sup>	Carriage out	35	6.7	24	8.2
	Lateral out	128	24.4	56	19.5
	Hook	129	24.7	36	12.7
	Lateral in	34	6.5	27	9.6
	Carriage in	29	5.6	30	10.6
	Unhook	20	3.9	25	8.7
	Delay	149	28.3	88	30.7
	Total cycle time	525	100.0	287	100.0
	Delay-free cycle time	376	-	199	-
Processing	Single operation <sup>a</sup> (n=173)		Multi operation <sup>b</sup> (n=104)		
	Moving	-	-	10	4.6
	Processing	114	46.1	110	50.2
	Log bunching	11	4.4	22	10.0
	Residues bunching	16	6.6	6	2.7
	Delay	105	42.8	71	32.4
	Total cycle time	246	100.0	219	100.0
Delay-free cycle time	141	-	148	-	

<sup>a</sup> set-up and displacement time : (single) 3h30m, (multi) 5h10m

<sup>b</sup> Number of trees per cycle : (single) avg. 2 (min. 1, max. 4), (multi) avg. 1

<sup>c</sup> Utilization : Yarding (71.6%), Processing (56.9%),

<sup>d</sup> Utilization : Yarding (69.3%), Processing (69.1%)

프리리깅시간이 각각 50분씩 소요되었다(Table 5).

단공정시스템의 집재작업시간은 cycle당 평균 525초였으며, 순수작업시간은 376초이고, 지연시간은 149초로 기계이용률은 71.6%로 분석되었다. 다공정시스템의 집재작업시간은 cycle당 평균 287초였으며, 순수작업시간은 199초이고, 지연시간은 88초로 기계이용률은 69.3%로 분석되었다(Table 5). 다목적집재장비와 트랙터 부착 타워야더의 집재작업시간은 와이어풀기 및 초커설치시간(signle 257초, multi 92초)에서 가장 많은 차이가 발생하였다(Table 5). 이는 cycle당 집재본수의 차이로 트랙터 부착 타워야더는 1분이었지만, 다목적집재장비는 평균 2분으로 최소 1분에서 최대 4분을 집재하였다(Table 5).

단공정시스템의 조재작업시간은 cycle당 평균 246초였으며, 순수작업시간은 141초이고, 지연시간은 105초로 기계이용률은 56.9%로 분석되었다. 다공정시스템의 조재작업시간은 cycle당 평균 219초였으며, 순수작업시간은 148초이고, 지연시간은 71초로 기계이용률은 69.1%로 분석되었다(Table 5). 다목적집재장비와 프로세서의 조재작업에서 순수작업시간은 유사하였으나, 지연시간은 다목적집재장비가 약 34초 더 소요되었다(Table 5).

2) 지연시간

단공정시스템의 집재작업 지연시간은 cycle 당 149초로 작업적지연이 62%로 가장 많은 비율을 차지하였으며, 인위적지연이 17%로 가장 낮았다, 다공정시스템의 집재작업

지연시간은 88초로 작업적지연(51%), 기계적지연(21%), 인위적지연(17%)순으로 분석되었다(Figure 4). 다목적집재장비와 트랙터 부착 타워야더(HAM300)의 기계적 및 인위적 지연시간은 유사하였다(Table 6). 그러나 다목적집재장비를 이용한 집재작업은 국내에서 처음 적용한 것으로 트랙터 부착 타워야더에서는 발생하지 않는 반송기오작동, 가이라인재조정, 가선라인장력조절 등의 작업적 지연시간이 더 소요되었다(Table 6).

단공정시스템과 다공정시스템의 조재작업 지연시간은 각각 cycle 당 105초와 71초였으며, 작업적지연이 각각 85%와 87%로 대부분을 차지하였다(Table 6, Figure 4). 특히, 작업적지연에서 집재목이 조재를 할 수 있는 공간으로 도착하기 전까지 조재작업을 대기하는 시간 즉, 유휴시간은 단공정시스템이 cycle 당 87초였고, 다공정시스템은 43초/cycle가 발생하였다(Table 6). Talbot et al.(2015)에 따르면 집재 및 조재작업의 생산성과 비용에 유휴시간은 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 따라서 3 chapter에서 유휴시간에 따른 시스템 비용 절감 효과를 분석하였다.

3) 작업생산성

단공정시스템의 집재작업생산성은 순수작업시간 기준 11.0 m<sup>3</sup>/PMH이며, 전체작업시간에서 설치 및 해체시간(3시간30분)의 포함과 미포함 시 각각 6.3 m<sup>3</sup>/SMH과 7.9 m<sup>3</sup>/SMH으로 분석되었다(Table 7). 이는 Talbot et al. (2014) 이 보고한 집재작업생산성 10.4 m<sup>3</sup>/PMH와 유사하였으며,

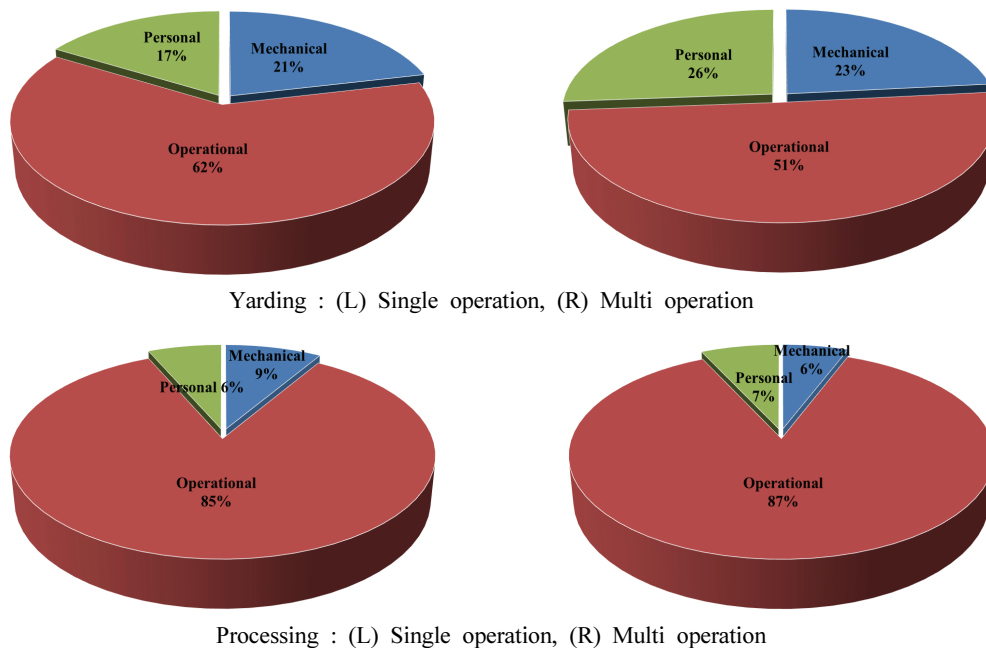


Figure 4. Mechanical, operational, and personal delay time in yarding and processing operations.

**Table 6. Delay time in yarding and processing of single and multi operations.**

Classification		Single operation	Multi operation	
		(sec/cycle)	(sec/cycle)	
Yarding	Mechanical	Machine checking	18	21
		Battery change	14	-
		Sub	32	21
	Operational	Hang-up	8	8
		Carriage error	18	11
		Waiting	19	20
		Re-hook	11	5
		Cutting	3	2
		Re-setup of guyed line	19	-
		Skyline tension checking	4	-
		Auto-choker error	9	-
		Sub	93	44
	Personal	Talking	3	1
		Rest	21	22
		Sub	24	23
Total		149	88	
Processing	Mechanical	Machine checking	9	4
		Sub	9	4
	Operational	Operating for yarding	2	19
		Waiting	87	43
	Sub	89	62	
	Personal	Rest	7	5
		Sub	7	5
Total		105	71	

**Table 7. Productivity in yarding and processing of single and multi operations.**

Classification		Yarding		Processing		Note
		PMH	SMH	PMH	SMH	(Set-up and displacement time)
Single operation	Productivity (m <sup>3</sup> /hr)	11.0	7.9 6.3	14.2	8.1	(None) (3 h 30 m)
	Utilization (%)		71.7 57.0		56.9	(None) (3 h 30 m)
Multi operation	Productivity (m <sup>3</sup> /hr)	9.5	6.6 4.6 4.0	12.6	8.7	(None) (3 h 30 m) (5 h 10 m)
	Utilization (%)		69.3 48.5 42.7		69.1	(None) (3 h 30 m) (5 h 10 m)

선행연구 결과에서 제시한 집재목 선정과 무선 제어 초크 사용은 집재작업생산성 향상에 중요한 것으로 확인하였다(Talbot et al., 2014). 다공정시스템의 집재작업생산성은 순수작업시간 기준 9.5 m<sup>3</sup>/PMH이었고, 설치 및 해체시간

(5시간10분)에 따라 각각 4.0 m<sup>3</sup>/SMH과 6.6 m<sup>3</sup>/SMH으로 분석되었다. Cho et al.(2018)의 연구결과에 따르면, 트랙터 부착 타워야더를 이용한 집재작업생산성은 5.7 m<sup>3</sup>/SMH으로 본 연구결과(4.0 m<sup>3</sup>/SMH) 보다 높았지만, 작업원수

Table 8. Cost in yarding and processing of single and multi operations.

Classification		Yarding	Processing	Note
				(Set-up and displacement time)
Single operation	Cost (won/m <sup>3</sup> )	21,053	9,655	(None)
		30,708		
		26,458	9,655	(3 h 30 m)
Multi operation	Cost (won/m <sup>3</sup> )	36,113		
		17,143	13,226	(None)
		30,369		
		24,509	13,226	(3 h 30 m)
		37,735		
	27,839	13,226	(5 h 10 m)	
		41,065		

(4인1조)와 설치 및 해체시간(2시간30분)을 고려한다면, 본 연구결과와 유사한 것으로 사료된다. 다목적집재장비와 트랙터 부착 타워야더의 집재작업 생산성은 설치 및 해체시간의 차이가 가장 많은 영향을 주었으며, 설치 및 해체시간이 동일한 조건(3시간30분)에서도 다목적집재장비(6.3 m<sup>3</sup>/SMH)가 트랙터 부착 타워야더(4.6 m<sup>3</sup>/SMH) 보다 효율적인 것으로 분석되었다(Table 7).

단공정시스템의 조재작업생산성은 순수작업시간 기준 14.2 m<sup>3</sup>/PMH으로 다공정시스템의 조재작업생산성(12.6 m<sup>3</sup>/PMH) 보다 약 13% 더 높게 분석되었다. 하지만 전체 작업시간 기준은 지연시간 분석에서 언급한 유휴시간의 차이(다목적집재장비: 87초/cycle, 프로세서: 43초/cycle)로 프로세서의 조재작업생산성(8.7 m<sup>3</sup>/SMH)이 다목적집재장비(8.1 m<sup>3</sup>/SMH) 보다 더 높게 분석되었다. 이에 유휴시간은 작업생산성에 중요한 것으로 확인되었다.

## 2. 시스템 작업비용 분석

단공정시스템 작업비용은 다목적집재장비의 설치 및 해체시간(3시간30분) 포함 기준 36,113원/m<sup>3</sup>이며, 집재작업비용은 26,458원/m<sup>3</sup>(73.3%)이고, 조재작업비용은 9,655원/m<sup>3</sup>(26.7%)으로 분석되었다(Table 8). 다공정시스템 작업비용은 설치 및 해체시간(5시간10분) 기준, 41,065원/m<sup>3</sup>이며, 집재작업비용이 27,839원/m<sup>3</sup>(77.1%)으로 대부분 차지하였다(Table 8). 단공정과 다공정시스템의 동일 조건(3시간30분)에서 다공정시스템(37,735원/m<sup>3</sup>) 보다 단공정시스템(36,113원/m<sup>3</sup>)이 약 4.3%의 비용이 낮았다(Table 8). 이는 Talbot et al.(2015)의 연구결과, 단공정시스템(작업자 2명, 장비 1대)은 다공정시스템(작업자 3명, 장비 2대) 보다 투입비용이 적은 관계로 경제적인 시스템으로 보고한 것과 동일하였다. 또한, 현장으로 장비운송비를 고려한다면 단공정시스템이 보다 경제적인 것으로 판단된다.

집재작업비용은 트랙터 부착 타워야더가 24,509원/m<sup>3</sup>으로 Cho et al.(2018)의 연구결과(30,701원/m<sup>3</sup>)보다 낮게 분석되었다. 선행연구(Cho et al., 2018)의 집재작업은 4인1조였지만 본 연구는 무인 제어 초커를 사용함으로써 작업자가 감소(2인1조)하여, 비용이 절감된 것으로 사료된다. 또한 트랙터 부착 타워야더의 집재작업비용(24,509원/m<sup>3</sup>)은 다목적집재장비(26,458원/m<sup>3</sup>) 보다 낮게 분석되었다(Table 8). 이는 다목적집재장비의 집재작업생산성(6.3 m<sup>3</sup>/SMH)이 트랙터 부착 타워야더(4.6 m<sup>3</sup>/SMH) 보다 높았지만(Table 7), 다목적집재장비의 초기구입비(455,000천원)가 고비용이고, 기계비용(165,358원/SMH)도 트랙터 부착 타워야더(112,570원/SMH) 보다 높은 것이 원인으로 판단된다(Table 4). 따라서, 트랙터 부착 타워야더의 집재작업비용 보다 저비용으로 작업하기 위해서는 다목적집재장비의 집재작업생산성은 최소 6.8 m<sup>3</sup>/SMH으로 향상이 필요하다.

조재작업비용은 프로세서(13,226원/m<sup>3</sup>) 보다 다목적집재장비(9,655원/m<sup>3</sup>)가 약 27%의 비용이 더 낮았다(Table 8). 이는 조재장비의 특성 차이로 다목적집재장비의 프로세서는 별도의 베이스머신이 필요하지 않지만, 프로세서는 베이스머신으로 16톤급 굴삭기가 요구되기 때문이다.

## 3. 유휴시간(Idle time)에 따른 시스템 작업비용 절감효과

단공정시스템에서 집재작업과 조재작업간 대기시간이 발생하는 유휴시간은 cycle 당 87초였고, 다공정시스템은 43초/cycle로 분석되었다(Table 6). 유휴시간 감소에 따른 단공정시스템의 집재 및 조재작업생산성(설치 및 해체시간 미포함)은 기존 각각 7.9 m<sup>3</sup>/SMH과 8.1 m<sup>3</sup>/SMH에서 최대 각각 19%(9.4 m<sup>3</sup>/SMH)와 55.6%(12.6 m<sup>3</sup>/SMH)가 향상되었다(Figure 5). 다공정시스템에서 집재작업생산성(6.6 m<sup>3</sup>/SMH)은 최대 16.7%(7.7 m<sup>3</sup>/SMH)가 조재작업생산



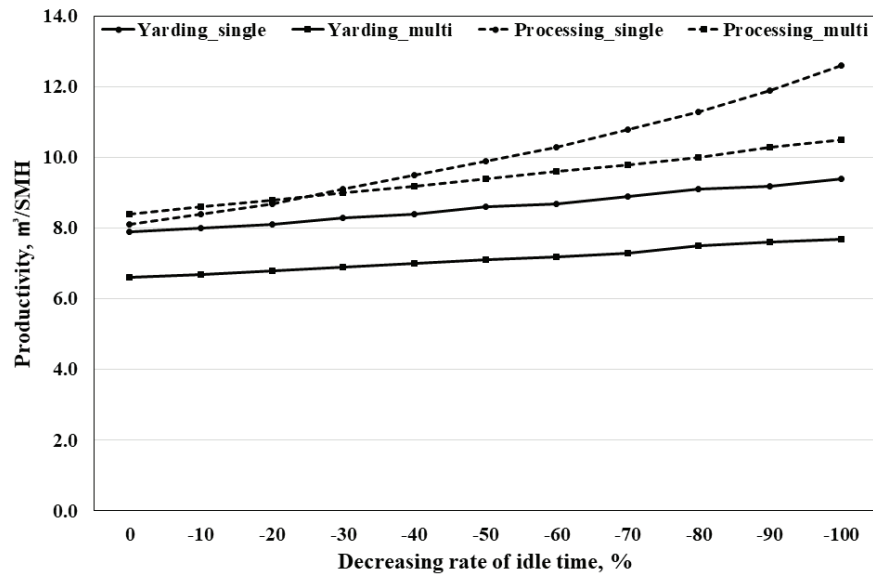


Figure 5. The productivity of single and multi operations by decreasing idle time.

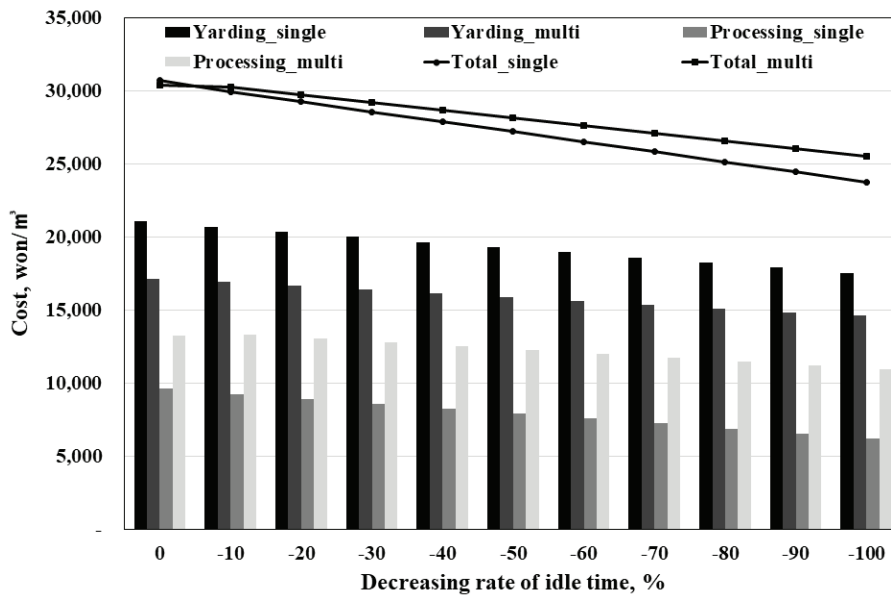


Figure 6. The cost of single and multi operations by decreasing idle time.

성(8.7 m³/SMH)은 20.7%(10.5 m³/SMH)가 향상되었다 (Figure 5). 기존 프로세서를 이용한 조재작업생산성은 다목적집재장비 보다 약 0.3 m³/SMH이 높았지만, 유휴시간이 30%가 감소되는 시점부터 다목적집재장비가 효율적인 것으로 분석되었다(Figure 5).

단공정시스템의 집재작업비용은 기존 21,053원/m³에서 최소 1.7%에서 최대 16.6%이고, 조재작업비용은 9,655원/m³에서 4.1~35.7%의 비용이 절감되었다(Figure 6). 다공정시스템의 집재 및 조재작업비용은 각각 1.4~14.9%와

1.1~17.3%의 비용이 절감되었다(Figure 6). 따라서 단공정시스템은 최대 22.6%가 다공정시스템은 최대 15.9%의 비용절감이 가능한 것으로 분석되었다(Figure 6). 설치 및 해체시간 미포함 기준으로 다공정시스템(30,369원/m³)이 단공정시스템(30,708원/m³)보다 저비용이었지만, 유휴시간이 10%만 감소하여도 다공정시스템이 보다 경제적인 것으로 분석되었다(Figure 6). 이는 작업자가 2인1조라도 집재작업에서 가이라인재조정, 스카이라인장력조절, 무선 제어 초커오작동 등의 작업적지연을 해소한다면 다목

적집재장비를 이용한 저비용 단공정시스템 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 결론

우리나라 전체 산림에서 76% 이상이 중·급경사지로 고비용의 가선집재작업시스템을 적용해야 한다. 또한 산림작업은 3D업종이라는 인식으로 젊은 작업자확보가 어려울 뿐만 아니라 기존 작업자의 고령화로 인력문제에 직면하고 있다. 이에 가선집재작업시스템에서 작업자 감소와 비용절감을 위한 고성능 입업기계의 자동화 및 기계화가 필요하다. 따라서 본 연구는 경사 35% 이상의 지역에서 타워야더와 프로세서를 기반으로 한 목재수확시스템을 적용할 때 다공정작업과 단공정작업의 생산성을 비교하며, 작업시스템의 비용절감 효과를 분석하고자 하였다. 트랙터 부착 타워야더(HAM300)와 프로세서(KESLA 20SH)는 다공정시스템이고, 다목적집재장비를 단공정시스템으로 구분하여, 가선집재작업시스템의 생산성 및 비용을 분석하였다.

단공정시스템의 순수작업생산성( $m^3/PMH$ )은 다공정시스템 보다 효율적인 것으로 확인하였다. 전체작업생산성( $m^3/SMH$ ) 기준으로 집재작업은 다목적집재장비가 생산성이 높았지만, 조재작업은 다목적집재장비가 프로세서 보다 생산성이 낮게 분석되었다. 이는 집재와 조재작업 사이 지연으로 작업을 대기하는 유희시간(Idle time)의 중요성을 확인하였다.

단공정 및 다공정시스템 모두 무선 제어 초커를 사용함에 따라 작업자가 감소되어 비용절감이 가능하였다. 단공정시스템( $37,735\text{원}/m^3$ )은 다공정시스템( $36,113\text{원}/m^3$ ) 보다 약 4.3%의 비용이 낮았다. 이는 단일장비를 이용한 단공정시스템이 투입비용과 장비운송비가 절감되어 경제적인 것을 확인하였다. 또한 집재작업에서 작업적지연을 해소하여, 유희시간이 감소하면 보다 효율적인 단공정시스템 적용이 가능할 것으로 사료된다.

향후, 다목적집재장비를 이용한 단공정시스템과 다양한 집재 및 조재장비를 조합한 다공정시스템을 비교·분석하여, 단공정시스템의 비용 절감 효과에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청 국립산림과학원 일반과제(FO0200-2022-01-2022)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

- Beak, S.A., Cho, K.H. and Lee, E.J. 2020. Performance comparison for two cable extraction machines in a *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr. Plantation. Sustainability 12.
- Brinker, R.W., Kinard, J., Rummer, B. and Lanford, B. 2002. Machine rate for selected forest harvesting machines. Circular 296 (Revised). Alabama Agricultural Experimental Station, Auburn, Alabama, USA, pp. 32.
- Cambi, M., Certini, G., Fabiano, F., Laschi, A. and Picchio, R. 2016. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand, iForest 9: 89-94.
- Cho, K.H., Cho, M.J., Han, H.S., Han, S.K. and Cha, D.S. 2015. Harvesting cost of tree-length thinning in a *Larix leptolepis* stands. Journal of Korean Forest Society 104: 221-229.
- Cho, M.J., Cho, K.H., Choi, B.K. and Cha, D.S. 2018. Yarding productivity of tree-length harvesting using a small cable-yarder in steep slope, South Korea. Forest Science and Technology 14(1): 1-6.
- Cho, M.J., Cho, K.H., Jeong, E.J., Choi, B.K., Han, S.K. and Cha, D.S. 2016. Harvesting cost and productive of tree-length thinning in a *pinus densiflora* stand using the tower yarder (HAM300). Journal of Forest Environmental Science 32(2): 189-195
- Cho, M.J., Cho, K.H., Oh, J.H., Han, H.S. and Cha, D.S. 2014. Harvesting productivity and cost of whole-tree clear cutting using a tower yarder in a *Larix leptolepis* stand. Journal of Forest Environmental Science 30(1): 107-112.
- Cho, M.J., Choi, Y.S., Oh, J.H. and Lee, E.J. 2021. Estimating the forest micro-topography by unmanned aerial vehicles (UAV) photogrammetry. Journal of Korean Society of Industry Convergence 24(3): 343-350.
- Cho, M.J., Choi, Y.S., Paik, S.H., Mun, H.S., Cha, D.S., Han, S.K. and Oh, J.H. 2019. Comparison of productivity and cost between two integrated harvesting systems in South Korea. Forests 10(9): 763.
- Choi, Y.S., Cho, M.J. and Oh, J.H. 2021. Timber loading productivity of remote controlled forestry equipment through image of monitor. Journal of Korean Society of Industry Convergence 24(3): 363-371.
- Choi, Y.S., Cho, M.J., Mun, H.S., Kim, D.H., Cha, D.S., Han, S.K. and Oh, J.H. 2018. Analysis on yarding productivity and cost of tower-yarder based on excavator using radio-controlled double clamp carriage. Journal of Korean Forest Society 107(3): 266-277.

- Construction Association of Korea. 2019. Report on the Actual Condition of Construction Industry Wage in the Second Half of 2019; Construction Association of Korea, pp. 9-10.
- Enache, A., Kühmaier, M., Visser, R. and Stampfer, K. 2016. Forestry operations in the European mountains: a study of current practices and efficiency gaps. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31(4): 412-427.
- Kim, M.K. and Park, S.J. 2012. An analysis of the operational time and productivity in whole-tree and cut-to-length logging operations system. *Journal of Korean Forest Society* 101(3): 344-355.
- Korea Forest Service. 2012. Forestry Mechanization Promotion; Korea Forest Service, pp. 24.
- Korea National Oil Corporation. 2019. Domestic Oil Price. <http://www.knoc.co.kr/> (accessed 2019. 11. 22.)
- Lee, E.J., Im, S.J., Lee, S.J. and Han, S.Y. 2020b. Economic Evaluation of the HAM300 Yarding Operation with Tree-Length Harvesting Methods in *Larix kaempferi* Forest Stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(1): 72-80.
- Lee, E.J., Lim Q,m Eu, S., Han, S.K. and Im, S.J. 2020a. Assessing the impacts of log extraction by typical small shovel logging system on soil physical and hydrological properties in the Republic of Korea. *Heliyon* 6(3): e03544.
- McFadzean, S. and Visser, R. 2013. Falcon Forestry Claw Grapple: Productivity and Ergonomics. Harvesting Technical Note HTN05-06, Future Forests Research Limited, Rotorua, New Zealand, pp. 7.
- Miyata, E.S. 1980. Determining fixed and operating costs of logging equipment. U.S. Department of Agriculture Forest Service.
- National Institute of Forest Science. 2020. A study on optimized forest road density by forest characteristics. National Institute of Forest Science report 20-21, pp. 63.
- Talbot, B., Aalmo, G.O. and Stampfer, K. 2014. Productivity analysis of an un-guyed integrated yarder-processor with running skyline. *Croatian Journal of Forest Engineering* 35(2): 201-210.
- Talbot, B., Stampfer, K. and Visser, R. 2015. Machine function integration and its effect on the performance of a timber yarding and processing operation. *Biosystems Engineering* 135(2015): 10-20.
- Visser, R. and Stampfer, K. 2015. Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: a review. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36(2): 321-331.
- Woo, B.M., Koh, D.H., Kim, J.S., Oh, K.C., Kwon, T.H., Ma, H.S., Kim, J.W., Lee, H.H. and Kim, N.C. 1990. *Forest Engineering*; Gwangilmunhwasa: Seoul, Korea, pp. 332-334.

---

Manuscript Received : September 27, 2022

First Revision : November 10, 2022

Accepted : November 24, 2022