*J. Korean Soc. For. Sci. Vol. 111, No. 4, pp. 567~582 (2022)*
https://doi.org/10.14578/jkfs.2022.111.4.567

한국산림과학회지
JOURNAL OF KOREAN SOCIETY OF FOREST SCIENCE
ISSN 2586-6613(Print), ISSN 2586-6621(Online)
http://e-journal.kfs21.or.kr

# 수종에 따른 스트로크 하베스터의 벌도 · 조재작업 생산성 및 비용

**최윤성 · 조민재 · 문호성 · 오재헌***
국립산림과학원 산림기술경영연구소

# Productivity and Cost of Mechanized Felling and Processing Operations Performed with an Excavator-based Stroke Harvester by Tree Species

**Yun-Sung Choi, Min-Jae Cho, Ho-Seong Mun and Jae-Heun Oh***
*Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea*

**요 약:** 체인톱에 의한 인력위주의 임목수확작업은 안전사고 문제에 직면하고 있으나, 기계화작업을 통해 작업자의 위험성을 줄이고 생산성을 높일 수 있다. 본 연구는 국내 수종에 적합한 굴삭기 기반의 스트로크 하베스터을 이용하여 리기다소나무(*Pinus rigida*)와 신갈나무(*Quercus mongolica*)를 대상으로 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업으로 구분하여 생산성과 비용을 분석하였다. 스트로크 하베스터의 효율적인 운영을 위한 작업생산성 예측모델 개발과 직경 및 기계이용률에 따른 작업비용 변화를 분석하였다. 벌도+조재작업에서 리기다소나무와 신갈나무의 생산성은 각각 6.53 $m^3$/SMH와 4.02 $m^3$/SMH이고, 비용은 각각 17,983 won/$m^3$과 29,210 won/$m^3$으로 나타났다. 벌도작업에서 리기다소나무와 신갈나무의 생산성은 각각 40.9 $m^3$/SMH와 23.0 $m^3$/SMH이고 비용은 각각 2,667 won/$m^3$와 4,743 won/$m^3$으로 나타났다. 조재작업에서 리기다소나무와 신갈나무의 생산성은 각각 8.25 $m^3$/SMH와 7.75 $m^3$/SMH이고, 비용은 각각 15,296 won/$m^3$와 16,283 $m^3$/SMH으로 나타났다. 스트로크 하베스터를 이용한 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업의 생산성에 대한 중요인자는 흉고직경, 이동거리와 절단횟수가 선정되었으며($p<0.05$), 이를 이용하여 작업생산성 예측모델을 개발하였다. 따라서 스트로크 하베스터를 이용한 벌도 및 조재작업에서 다양한 조건과 수종을 고려한 DB 구축으로 생산성과 비용 예측의 정확성을 높이기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**Abstract:** Chainsaw use for motor-manual timber harvesting in South Korea is associated with worker safety issues. However, forestry operations such as timber harvesting have already been mechanized to reduce hazards to workers and increase productivity. This study analyzed the productivities and costs of felling and processing, felling and processing using an excavator-based stroke harvester for *Pinus rigida* and *Quercus mongolica* stands. To efficiently operate the stroke harvester, we developed a regression equation to estimate the productivities of felling and processing, felling, and processing operations,and we conducted sensitivity analysis of the operation costs using DBH and machine utilization. The felling and processing productivity was 6.53 and 4.02 $m^3$/SMH for *P. rigida* and *Q. mongolica*, respectively, and the cost was 17,983 and 29,210 won/$m^3$, respectively. The felling productivity for *P. rigida* and *Q. mongolica* was 40.9 and 23.0 $m^3$/SMH, respectively, and the cost was 2,667 and 4,743 won/$m^3$, respectively. The processing productivity for *P. rigida* and *Q. mongolica* was 8.25 and 7.75 $m^3$/SMH, respectively, and the cost was 15,296 and 16,283 won/$m^3$, respectively. In the developed regression equation, the DBH, traveling distance, and number of cuttings were found to be important factors ($p<0.05$). Therefore, it is necessary to construct a DB considering the various conditions and species associated with harvester operations, and further research is needed to increase the accuracy of predicting operation productivity and costs.

***Key words:*** *clear-cutting, stroke harvester, productivity and cost, sensitivity analysis, regression equation*

## 서 론

임목수확작업에 있어서 벌도작업과 가지제거, 조재 작업은 수작업, 모터 매뉴얼(motor-manual) 또는 기계화된 하베스터를 사용하여 수행 할 수 있다(Conway, 1982). 그러나,

* Corresponding author
E-mail: jhoh7038@korea.kr
**ORCID**
Jae-Heun Oh https://orcid.org/0000-0002-1384-6780

인력으로 체인톱을 사용해 수행하는 벌도, 가지제거, 조재 등의 작업은 안전사고가 많이 발생한다(Slappendel et al., 1993). 모터 매뉴얼 형태의 작업시스템을 운영하는 경우 경험이 적은 작업자들은 항상 위험(절단, 베임, 끼임)에 노출되어 있어 기계화 작업시스템으로의 전환이 필요하며, 기계화 작업시스템은 생산성과 작업안전 측면에서 유리한 이점이 있다(Bell, 2002; Raymond, 2012).

국내 목재수확 작업은 대부분 단목수확시스템(CTL, Cut-to-length harvesting system)으로, 이중 벌도 및 조재작업은 체인톱을 가장 많이 활용하고 있다(Cho et al., 2016). 그러나 임업 산업재해에서 체인톱에 의한 절단·베임·찔림이 30.1%(MOEL, 2021)로 가장 높은 것으로 나타나 작업 안전 및 생산성 향상을 위해 기계화를 추진하고 있으며, 산림청은 2014년부터 국유림에 스트로크 하베스터를 보급하였다(KFS, 2021). 스트로크 하베스터는 휠타입 하베스터에 비해 가지제거력(Delimbing force)이 뛰어나 잣나무(윤생), 리기다 소나무(가지가 굵은 경우) 등과 같이 굵고 억센 가지의 제거가 용이해 국내 수종에 적합한 장비이며, 휠타입 하베스터를 이용한 벌도 및 조재작업에서 낙엽송 보다 가지가 굵고 많은 리기다소나무가 더 오랜시간이 소요된다고 보고하였다(Cho et al., 2015). 하베스터를 이용한 기계화 벌도작업은 체인톱에 비해 생산성이 4.3배 높고(Spinelli et al., 2014), 작업시간을 70% 감소시킬 수 있다고 한다(Zinkevicius et al., 2012). 그러나 이러한 장점에도 불구하고 국내에서는 하베스터 활용을 위한 교육 및 전문 오퍼레이터의 부재 등으로 현장 적용 사례가 매우 적은 상황이다. 특히 효과적인 활용을 위해 국내 산림현장을 대상으로 한 하베스터의 생산성 자료와 수종별 적용 가능성에 대한 연구가 매우 필요하다.

유럽과 북·남미 등에서는 단목수확시스템에 다양한 베이스머신(트랙형, 바퀴형)을 적용한 하베스터로 생산성과 비용, 작업시간에 따른 예측모델 개발 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. Acosta et al.(2020)와 Nakagawa et al.(2007, 2010)은 완경사지를 대상으로 굴삭기 기반의 하베스터로 간벌과 개벌작업지에서 생산된 입목 재적, 흉고직경과 요소작업에 따른 시간 등을 고려한 생산성을 회귀모델로 개발하여 재적과 흉고직경이 벌도 및 조재작업 생산성에 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 또한 McEwan et al.(2016)은 굴삭기 기반 하베스터의 벌도+조재작업에서 요소작업별 시간으로 다중회귀모델을 개발하여 흉고직경에 따른 생산성과 비용에 관한 연구를 수행하였다. Gerasimov et al.(2012)은 바퀴형 기반 베이스머신 하베스터를 완경사지와 개벌작업지에 적용하여 벌도 및 조재작업에서의 요소작업별 작업시간을 분석하고 다양한 수종과 재적 증가에 따른 생산성을 분석하였다. Spinelli et al.(2011)은 트랙형과 바퀴형, 반각식(Flexible-legs) 굴삭기 기반의 하베스터를 이용하여 요소작업시간, 경사, 수종과 장비의 출력에 따른 회귀모델식을 개발하여 생산성을 분석하였다. Stampfer and Steinmüller. (2001)는 트랙형 전용 하베스터를 대상으로 생산성을 조사 및 분석한 결과 완경사지보다 급경사지에서 12% 감소되고, 간벌보다는 개벌 작업지에서 11% 증가되며, 개체목의 입목재적이 클수록 증가한다고 보고하였다. 국내의 선행연구는 단목과 전목수확시스템에서 체인톱에 의한 벌도 및 조재작업 생산성과 비용에 관한 연구가 대부분이다(Han et al., 2009; Kim and Park, 2012, 2013; Cho et al., 2016). Choi et al.(2018)과 Cho et al.(2019)는 프로세서를 이용한 조재작업에 대한 생산성과 비용에 관한 연구가 일부 수행되었을 뿐 하베스터 단일 기종에 대한 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업에 관한 생산성과 비용 예측 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 국내에 보급된 굴삭기 기반의 스트로크 하베스터를 대상으로 1) 수종(리기다소나무, 신갈나무)에 따른 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업의 생산성 및 비용 분석, 2) 수종(리기다소나무, 신갈나무)에 따른 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업의 작업생산성 예측 모델 제시, 3) 수종(리기다소나무, 신갈나무)에 따른 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업 비용에 따른 민감도 분석을 통해 작업현장에서 효율적이고, 경제적으로 스트로크 하베스터를 운영할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 조사 및 방법

### 1. 연구대상지

본 연구대상지는 경기도 이천시 호법면 매곡리 산 41번지(37°11′36.7″N 127°23′21.1″E) 위치한 모두베기 작업지이고, 혼효림으로 수종은 리기다소나무(*Pinus rigida*) 및 신갈나무(*Quercus mongolica*)로 구성되어 있다. 전체 평균경사는 40%, 평균 입목축적은 131.1 $m^3$/ha, 전체 면적은 7.2 ha이다. 하베스터를 이용한 작업은 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업으로 구분하였으며, 벌도+조재작업의 평균경사는 22.5%, 면적은 0.70 ha이며, 리기다소나무와 신갈나무의 평균수고는 각각 18 m와 15 m, 평균 흉고직경은 26 cm와 18 cm이다. 벌도작업의 평균경사는 30.0%, 면적은 0.92 ha이며, 리기다소나무과 신갈나무의 평균수고는 각각 17 m와 16 m, 평균 흉고직경은 24 cm와 20 cm이다. 조재작업은 벌도작업 후 집재작업과 소운반 작업을 통해 토장으로 집결된 전목 벌도목을 대상으로 실시하였고, 이때의 리기다소나무와 신갈나무의 평균수고는 각각

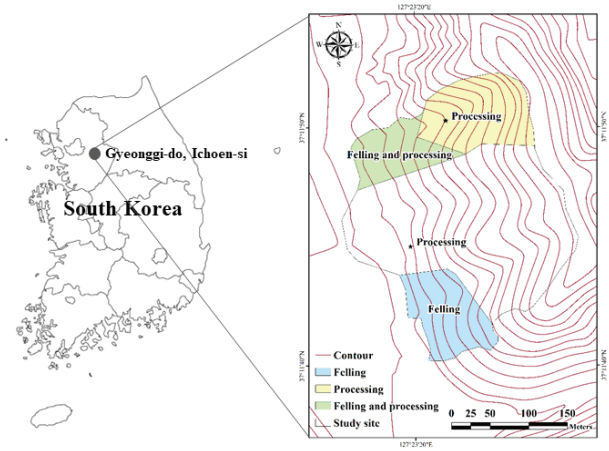



**Figure 1. Location of study site and their test area layout.**

16 m와 15 m, 평균 흉고직경은 각각 22 cm와 18 cm이다. 이에 대한 연구대상지의 임황 및 지황은 Figure 1과 Table 1과 같다.

## 2. 벌도 및 조재장비의 개요

벌도 및 조재작업에서 이용되는 장비는 크게 하베스터와 프로세서로 구분할 수 있다. 하베스터(Harvester)는 1대의 장비로 대상목을 벌목, 가지자르기, 토막내기 작업을 일관된 공정으로 작업할 수 있는 다공정 벌목장비이다. 대부분 트랙 또는 바퀴형 장비에 탑재된 크레인 끝에 벌목장비인 하베스터 헤드가 부착된 형태로 유압으로 작동한다(KFS, 2021). 프로세서(Processor)는 기계톱에 의한 인력조재작업을 기계화한 다공정 조재장비로 벌목이 이루어진 전목(Whole-tree)의 가지를 자르고 토막을 내는 장비로 벌도목의 수간을 잡는 그래플장치, 가지를 자르는 장치, 수간을 밀어내는 송재장치, 절단장치로 이루어져 있으며, 하베스터와 다른 점은 조재작업만 가능하다(KFS, 2021).

본 연구에서 사용된 장비는 16톤급 굴삭기(DX140LCR, DOOSAN, Korea)에 부착된 스트로크 하베스터(25SH, KESLA, Finland)이다(Figure 2). 스트로크 하베스터는 휠타입 하베스터에 비해 잣나무(윤생), 리기다(가지가 굵은 경우) 등 거칠고 억센 가지의 가지정리를 최소한의 유압힘으로 매끄럽고 신속하게 작업이 가능한 장점이 있다. 제원은 Table 2와 같이 최대 벌도 가능 직경은 670 mm, 가지치기 힘은 65 kN이며, 4개의 유동칼날과 1개의 고정칼날로 구성되어있으며, Figure 2와 같이 기본차량의 주행 안정성을 향상시키기 위해 하베스터 붐 지지대(Harvester supporter)를 적용하였다. 또한 스트로크 하베스터를 2년 이상 벌도 및 조재작업을 수행한 경험이 있는 작업자를 투입하여 실시하였다.

**Table 1. Description of stand and the test operations.**

| Items | Contents | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Forest type | Plantation | | | | | |
| Operation type | Clear-cutting | | | | | |
| Total area (ha) | 7.2 | | | | | |
| Total Average slope (%) | 40.0 | | | | | |
| Stand density (m3/ha) | 131.1 | | | | | |
| Tree species | Pinus rigida (49.7%) | | | Quercus mongolica (50.4%) | | |
| Operation | Felling and processing (CTL) | | Felling (WT) | | Processing (WT) | |
| Area (ha) | 0.70 | | 0.92 | | - | |
| Tree species | Pinus rigida | Quercus mongolica | Pinus rigida | Quercus mongolica | Pinus rigida | Quercus mongolica |
| Average DBH (cm) | 26 | 18 | 24 | 20 | 22 | 18 |
| Average Height (m) | 18 | 15 | 17 | 16 | 16 | 15 |
| Average tree volume (m3/tree) | 0.45 | 0.21 | 0.43 | 0.32 | 0.34 | 0.23 |
| Average slope (%) | 22.5 | | 30.0 | | - | |

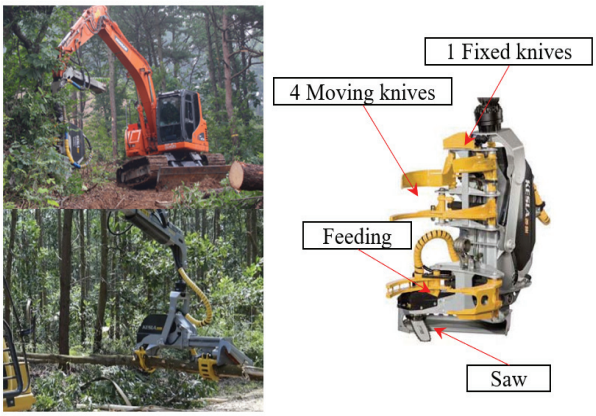



**Figure 2. A typical felling and processing operation of stroke harvester.**

**Table 2. Specifications of excavator-based stroke harvester used in the study.**

| Component | | Specification |
|---|---|---|
| **Base machine** | | |
| Maker and model | | Doosan / DX140LCR |
| Weight | | 14,480 kg |
| Rated power | | 73.5 kW |
| Hydraulic | Max. pressure | 350 kgf/cm2 |
| | Max. flow | 2×114ℓ/min |
| Width | | 2,590 mm |
| Length (without boom) | | 3,755 mm |
| Height | | 2,585 mm |
| Ground clearance | | 410 mm |
| Boom outreach | | 7,600 mm |
| **Harvester head** | | |
| Maker and model | | Kesla / 25SH |
| Weight | | 920 kg |
| Max. cutting capacity | | 670 mm |
| Power required | | 40-75 kW |
| Feed force | | 65kN |
| Number of knives | | 4moving+1fixed |
| Hydraulic fluid requirement | | 120-180 l/min |
| Max hydraulic pressure requirement | | 175-210 bar |

## 3. 조사방법

1) 작업시간 조사

본 조사지는 굴삭기 기반의 스트로크 하베스터에 의한 벌도 및 조재작업에 대한 작업시간, 요소작업시간, 그리고 작업공정 등을 조사하기 위해 스톱워치를 이용한 연속작업의 시간 및 동작연구(Time and motion study)를 적용하였다(Vitorele et al., 2011; Cho et al., 2016; Choi et al., 2018). 스트로크 하베스터를 이용한 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업에서 요소작업은 다음 Table 3과 같다. 또한 작업지연시간은 Table 4와 같이 작업자 지연시간(Personal delay time), 작업적 지연시간(Operational delay time)과 기계적 지연시간(Mechanical delay time)으로 구분하여 조사하였다.

**Table 3. Description of time elements of the felling and processing operation.**

| Time element | Description |
|---|---|
| Traveling | Machine starts moving to a felling tree |
| Picking up | Head arms of machine turns close to the tree for felling |
| Felling | The felled tree reaches the ground |
| Bunching | Bunching the tree to skidding tail side |
| Processing | Starts delimbing and cross cutting the tree to 3.6 m (timbers) and 2.1 m (plup) |
| Sorting(log) | Take logs and get into the pile |
| Sorting (logging residues) | Take logging residues and get into the pile |
| Delays | Operation is being delayed by machines and workers |

**Table 4. Description of delays type of the felling and processing operation.**

| Delays | Description |
|---|---|
| Personal delays | Rest, talking of operation |
| Operation delays | Waiting, hang-up on trees, cleaning around the stump or understory buking, repostion of excavator, check up the length of logs, collecting of timber, cleaning of timber |
| Mechanical delays | Repair chain-saw, change chain-saw or guide-bar, inject grease into the machine |

**Table 5. Cost factors and assumptions used for operation cost analysis.**

| Cost factor | | Machine | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Excavator | | | Head |
| Price (won) | (P) | 110,000,000 | | | 110,000,000 |
| Endurance period[a] (years) | (N) | 7 | | | 8 |
| Economic life (hour) | (H) | 9,744 | | | 11,136 |
| Annual operation time[b] (hour) | (J) | 1,392 | | | 1,392 |
| Fuel consumption (liter/hour) | (c) | 12.8 | 9.0 | 16.8 | - |
| Coefficient of repair and maintenance | (r) | 0.8 | | | 0.8 |
| Coefficient of lube oil | (l) | 0.4 | | | 0.4 |
| Interest rate (%/year) | (i)1 | 10 | | | 10 |
| Depreciation (won/hour) | P/H or P(N·H) | 11,289 | | | 9,878 |
| Interest expense (won/hour) | 0.5・P・i・0.01/J | 3,951 | | | 3,951 |
| Costs of repair and maintenance (won/hour) | P/H・r | 9,031 | | | 7,902 |
| Fuel cost[c] (won/hour) | c・l・(1+0.1) | 28,063 | 19,732 | 36,832 | - |
| Other cost (won/hour, Insurance, storage fee etc.) | - | 158 | | | 138 |
| Sub total | - | 52,492 | 44,161 | 61,262 | 21,870 |
| Labor cost[d] (won/hour, 50% Inclusion incidental expense) | - | 43,064 | | | - |
| Total machine cost (won/hour, Inclusion labor cost) | - | 95,556 | 87,225 | 104,326 | 21,870 |
| | | 117,426[e] | | 109,095[f] | 126,196[g] |

[a] 174day×8hour=1,392hours (Korea Forest Service, 2012)
[b] Endurance period (Miyata, 1980; Woo et al., 1997; Brinker et al., 2002)
[c] Diesel : 1,566won/liters in 2022, South Korea (Korea National Oil Corporation, 2022)
[d] Standard of labor cost: machine operator (229,676won/day) (Construction Association of Korea, 2022)
[e] Machine cost of felling and processing operation, [f] Machine cost of felling operation, [g] machine cost of processing operation

## 4. 분석방법

1) 작업시간 및 생산성 분석

작업시간의 일일 작업은 전체작업시간(Cycle time), 순수작업시간(Delay-free cycle time) 및 작업지연시간(Delay time)으로 구분하여 분석한 후 기계이용률(Utilization)을 산출하였다(Choi et al., 2018). 또한 작업생산성(SMH; Schedule Machine Hour, $m^3$/SMH)은 벌도작업 전에 입목에 나무번호를 표기하고 전수 매목조사를 실시하여 임목재적을 산출 한 후, 입목을 스트로크 하베스터에 의한 작업 후에 이를 바탕으로 생산성을 산출하였다.

Productivity($m^3$/SMH) =
3600 / cycle time(sec) × tree volume($m^3$)

Utilization(%) =
PMH(Productive Machine Hour) / SMH × 100

2) 작업비용 분석

스트로크 하베스터에 의한 작업비용은 기계비용과 작업생산성에 의해 산출하였으며, Table 5와 같이 기계비용(won/hr)은 독일 산림작업 및 임업기계위원회(KWF; Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.)에서 정한 방식에 의해 산출하는 방법으로 감가상각비를 기계의 활용도에 따라 다르게 적용하는 것이 특징이다(Woo et al., 1990). 또한 기계비용 산출에 필요한 요소비용은 감가상각비, 이자비용, 수리 유지비, 유류비용, 이동비용, 기타비용, 인건비 등을 고려하였다(Woo et al., 1990; Miyata, 1980; Brinker et al., 2002).

Operation cost(won/$m^3$) =
Machine cost(won/hr) / Productivity($m^3$/hr)

3) 작업시간 예측

스트로크 하베스터를 이용한 작업 생산성을 예측하기 위해서는 작업시간과 이에 영향을 미치는 영향의 인자 조사가 필요하다. 이에 벌도+조재작업은 흉고직경, 경사, 재적, 이동거리, 번칭거리, 절단횟수, 벌도작업은 흉고직경, 경사, 재적, 이동거리, 번칭거리와 조재작업은 흉고직경, 재적, 절단횟수로 구분하였다. 작업시간(delay-free cycle

time)에 대한 분석을 Shapiro-Wilk 검정을 통해 정규성 검정에서 오류가 없음을 확인하였다. 또한 조사된 인자들에 대한 상관관계 분석을 통해 가장 영향이 있는 인자를 대상으로 작업시간 예측모델을 개발하고 적합성을 검증하고자 하였다. 작업시간 예측모델에 사용된 데이터는 일반적으로 사용하고 있는 무작위 추출방식을 작업별 전체 실측자료의 70%를 이용하고, 검증을 위한 데이터는 나머지 30%를 이용하였다(Snee, 1977). 작업시간 예측에 대한 검증을 위해 t-검증(대응표본)을 이용하였다(Shin and han, 2006; Adebayo et al., 2007; Hartsough et al., 2001). 또한 적합성 검증에서 적합할 경우, 전체데이터을 통합하여 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업에 대한 작업시간 예측모델을 동일한 방법으로 개발하였다(Shin and Han, 2006; Han, 2008). 또한 개발된 최종 작업시간 예측모델식과 조사자료를 바탕으로 흉고직경에 따른 스트로크 하베스터의 작업 비용에 대한 영향력을 분석하기 위해 민감도 분석을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 스트로크 하베스터의 작업시간 및 생산성

1) 벌도+조재작업 시간 및 지연시간 분석

스트로크 하베스터에 의한 벌도+조재작업 시간과 생산성을 리기다소나무와 신갈나무로 구분하여 분석한 결과, 각각 사이클당 전체작업시간은 평균 303 sec/cycle과 213 sec/cycle이고, 사이클당 순수작업시간은 각각 평균 241 sec/cycle과 167 sec/cycle이며, 이에 따른 기계이용률은 각각 80.0%와 78.4%로 나타났다. 리기다소나무의 벌도+조재작업에서 사이클당 조재작업이 평균 127 sec/ cycle (41.9%)로 가장 많이 차지하였고, 벌채부산물 집적작업이 평균 39 sec/cycle (12.9%), 대상목 선정작업이 평균 20 sec/cycle (6.6%)로 나타났으며, 작업지연시간은 평균 62 sec/cycle (20.5%)로 나타났다. 신갈나무의 벌도+조재작업은 사이클당 조재작업이 평균 90 sec/cycle (42.3%)로 가장 많이 차지하였고, 리기다소나무와 동일하게 벌채부산물 집적작업이 평균 27 sec/cycle (12.7%), 대상목 선정작업이 평균 21 sec/cycle (9.9%)로 나타났으며, 작업지연시간은 평균 46 sec/cycle (21.6%)로 나타났다. 또한 본 연구대상지에서 리기다소나무와 신갈나무의 평균 벌도+조재공정은 각각 0.45 $m^3$/cycle과 0.21 $m^3$/cycle로 시간당 각각 15회와 25회를 작업하여 생산성은 리기다소나무가 시간당 6.53 $m^3$, 1일 기준 52.3 $m^3$로 나타났고, 신갈나무는 시간당 4.02 $m^3$, 1일 기준 32.1 $m^3$로 나타났다(Table 6).

하베스터를 이용한 단목 벌도+조재작업은 국내 선행연구는 수행된 적이 없으나 선행연구에서 본 연구와 유사한 장비(엔진출력 80kW) 기준으로 개별작업에서 벌도+조재작업 생산성이 지형 조건 및 수종(침엽수 및 활엽수)에 따라 10.1～45.4 $m^3$/SMH로 나타났다(Jirousek et al., 2007). 또한 생산성에 영향을 미치는 요소들을 최소화하고 지형조건이 좋으면 본당 재적이 0.12 $m^3$/tree에서 0.34 $m^3$/tree로 변화할 때 생산성이 6.24～17.8 $m^3$/SMH로 나타났다(Ledoux and Huyler, 2001). 그러나 본 연구에서 본당 재적을 고려하였을 때 선행연구에 비해 낮은 생산성으로 나타났으며, 이는 임지조건이 다소 다르고 본 장비를 이용한 오퍼레이터의 작업경험에 인한 것으로 사료된다. 이에 Pausch(2002)은 흉고직경에 따라 작업 생산성에서 최대 5

**Table 6. Productivity in felling and processing operation by stroke harvester.**

| Classification | Items | Value | |
|---|---|---|---|
| | | *Pinus rigida* | *Quercus mongolica* |
| Observed value | The number of felling and processing (cycle) | 43 | 39 |
| | The number of timber felling and processing (tree) | 43 | 39 |
| | The volume of timber felling and processing (m3) | 19.35 | 8.11 |
| | Felling and processing times (sec) | 9,099 | 8,306 |
| | Number of operator (man) | 1 | 1 |
| Average per cycle | The volume of timber felling and processing (m3/cycle) | 0.45 | 0.21 |
| | Felling and processing time (sec/cycle) | 303 | 213 |
| Average per hour | The number of felling and processing (cycle/hour) | 15.37 | 25.17 |
| | The volume of timber felling and processing (m3/hour) | 6.53 | 4.02 |
| Average per day | The number of felling and processing (cycle/day) | 122.97 | 201.34 |
| | The volume of timber felling and processing (m3/day) | 52.25 | 32.12 |

Note) Productive time per day is 8 hours.

**Table 7. Distribution for delay time in felling and processing operation(CTL) by stroke harvester.**

| Classification | | *Pinus rigida* | | *Quercus mongolica* | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Time, sec | Rate, % | Time, sec | Rate, % |
| Personal delay time | - | - | - | - | - |
| | Total | - | - | - | - |
| Operation delay time | Waiting | 320 | 12.6 | - | - |
| | Stump cleaning | 30 | 1.2 | - | - |
| | Cleaning around the understory | 1,355 | 53.2 | 593 | 34.0 |
| | Cleaning around the stump | 360 | 14.1 | - | - |
| | Bucking | 190 | 7.5 | - | - |
| | Reposition of excavator | 290 | 11.4 | 100 | 5.7 |
| | Total | 2,545 | 100.0 | 693 | 39.8 |
| Mechanical delay time | Repair chain-saw | - | - | 1,050 | 60.2 |
| | Total | - | - | 1,050 | 60.2 |
| Total delay time | | 2,545 | 100.0 | 1,743 | 100.0 |

배 정도 차이가 날 수 있으며, Forbrig (2000)은 하베스터를 이용한 작업생산성은 생산재적, 지형, 오퍼레이터에 따라 변화되고, 오퍼레이터에 숙련도(skill)에 따라 생산성이 20～50%에서 다양하게 차이가 날 수 있다고 보고하였다(Glode, 1999).

벌도+조재작업의 작업지연시간을 분석한 결과는 Table 7과 같다. 인위적 지연시간은 리기다소나무와 신갈나무에서 작업시 데이터의 수가 적기 때문에 발생되지 않은 것으로 나타났다. 작업적 지연은 리기다소나무에서 하층정리작업이 1,355초 (53.2%)로 가장 많이 차지하였으며, 주변정리작업이 360초 (14.1%), 작업대기가 320초 (12.6%), 장비 재위치선정이 290초(11.4%)로 나타났다. 하층정리작업은 작업시기에 따라 변화되며, 본 연구는 여름철에 작업하여 하층 발생이 많아 하층정리작업 시간이 작업지연시간에 가장 비중을 차지한 것으로 사료된다. 신갈나무는 하층정리작업이 593초(34.0%)로 가장 많이 차지하였으며, 장비 재위치선정이 100초 (39.8%)로 나타났다. 기계적 지연은 리기다소나무 작업에서는 발생되지 않았고, 신날나무에서 체인톱날 점검작업이 1,050초 (60.2%)로 나타났으며, 이는 참나무류와 활엽수의 수종이 리기다소나무가 해당되는 침엽수 보다 분지 형태로 가지가 많기 때문에 조재작업 과정에서 체인톱날 걸림 현상이 작업지연시간에서 가장 많이 발생한 것으로 사료된다.

2) 벌도작업 시간 및 지연시간 분석

스트로크 하베스터에 의한 벌도작업 시간 및 생산성을 리기다소나무와 활엽수로 구분하여 분석한 결과, 각각 사이클당 전체작업시간은 평균 65 sec/cycle과 102 sec/cycle이고, 사이클당 순수작업시간은 각각 평균 33 sec/cycle과 39 sec/cycle이며, 이에 따른 기계이용률은 각각 81.6%와 64.3%로 나타났다. 침엽수의 벌도작업에서 사이클당 번칭 정리작업이 평균 20 sec/cylce(30.8%)로 가장 많이 차지하였고, 대상목 선정작업이 평균 12 sec/cycle(18.5%), 벌도작업이 평균 10 sec/cycle(15.4%)로 나타났으며, 작업지연시간은 평균 12 sec/cycle(18.5%)로 나타났다. 신갈나무의 벌도작업은 사이클당 번칭 정리작업이 평균 26 sec/cycle (25.5%)로 가장 많이 차지하였고, 대상목 선정작업과 이동시간이 동일하게 평균 11 sec/cycle(10.5%)로 나타났으며, 작업지연시간은 평균 36 sec/cycle(35.3%)로 나타났다. 또한 본 연구대상지에서 리기다소나무와 신갈나무의 평균 전목 벌도공정은 각각 0.43 $m^3$/cycle과 0.32 $m^3$/cycle로 시간당 각각 96회와 75회를 작업하여 생산성은 리기다소나무가 시간당 40.9 $m^3$, 1일 기준 327.4 $m^3$로 나타났고, 신갈나무는 시간당 23.0 $m^3$, 1일 기준 183.7 $m^3$로 나타났다(Table 8). 국내에 하베스터가 도입 및 보급되어 운영되고 있으나 전목 벌도에 대한 작업 생산성 연구가 미흡하다. 이에 국외 선행연구를 살펴보면, 대부분 전목 벌도 작업은 펠러번처(Feller buncher)를 이용한 작업이 주를 이루고 있다. Bilici et al., (2019)는 경험이 적은 작업자를 대상으로 개벌 작업지, 침엽수종, 평균 흉고직경이 24.6 cm 일 때 벌도작업 생산성이 시간당 118 $m^3$으로 나타났으며, 본 연구에서 사용된 장비와 현장 조건에서 차이가 있으나 시간당 100 $m^3$ 이상의 생산성으로 나타났다. 또한 Alam et al. (2013)은 경사에 따른 펠러번쳐를 이용한 벌도작업의 생

**Table 8. Productivity in felling operation by stroke harvester.**

| Classification | Items | Value | |
|---|---|---|---|
| | | *Pinus rigida* | *Quercus mongolica* |
| Observed value | The number of felling (cycle) | 80 | 29 |
| | The number of timber felling (tree) | 80 | 29 |
| | The volume of timber felling ($m^3$) | 34.35 | 9.28 |
| | Felling times (sec) | 5,233 | 2,946 |
| | Number of operator (man) | 1 | 1 |
| Average per times | The volume of timber felling ($m^3$/cycle) | 0.43 | 0.32 |
| | Felling time (sec/cycle) | 65 | 102 |
| Average per hour | The number of felling (cycle/hour) | 96.1 | 75.1 |
| | The volume of timber felling (m3/hour) | 40.9 | 23.0 |
| Average per day | The number of felling (cycle/day) | 768.8 | 600.8 |
| | The volume of timber felling ($m^3$/day) | 327.4 | 183.7 |

Note) Productive time per day is 8 hours.

**Table 9. Distribution for delay time in felling operation by stroke harvester.**

| Classification | | *Pinus rigida* | | *Quercus mongolica* | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Time, Sec | Rate, % | Time, Sec | Rate, % |
| Personal delay time | - | - | - | - | - |
| | Total | - | - | - | - |
| Operation delay time | Waiting | - | - | - | - |
| | Cleaning around the stump | 42 | 7.7 | - | - |
| | Hang-up on trees | 12 | 2.2 | - | - |
| | Cleaning around the understory | 494 | 90.1 | 108 | 10.3 |
| | Total | 548 | 60.6 | 108 | 10.3 |
| Mechanical delay time | Change chains-aw | 357 | 39.4 | 504 | 53.5 |
| | Change guide-bar | - | - | 438 | 41.7 |
| | Total | 357 | 39.4 | 942 | 89.7 |
| Total delay time | | 905 | 100.0 | 1,050 | 100.0 |

산성 차이는 작업자에 숙련도에 따라 발생되는 것으로 보고하였으며, 본 연구에서와 동일하게 해당 장비를 2년 이상 운영한 작업자로 지속적인 작업을 통한 숙련도가 향상되었을 때 작업 생산성을 효과적으로 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다.

벌도작업의 작업지연시간을 분석한 결과는 Table 9와 같다. 인위적 지연시간은 리기다소나무와 신갈나무에서 벌도+조재작업과 동일하게 발생되지 않은 것으로 나타났다. 작업적 지연은 리기다소나무에서 하층정리작업이 494초 (90.1%)로 가장 많이 차지하였으며, 주변정리작업이 42초 (7.7%), 행업작업이 12초 (2.2%)로 나타났다. 이는 앞서 언급한 여름철에 작업을 실시하여 하층식생이 많아 하층정리시간이 작업지연시간에 가장 많이 차지하여 생산성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 신갈나무는 작업로 정리작업이 108초 (10.3%)로 가장 많이 차지하는 것으로 나타났다. 기계적 지연은 리기다소나무에서 체인톱 점검작업이 357초 (39.4%)로 나타났으며, 신갈나무는 체인톱날 점검작업이 504초 (53.5%)로 가장 많이 차지하였고, 가이드바 점검작업이 438초 (41.7%)로 나타났다. 이는 작업자의 숙련에 따라 벌도목을 잡고 체인톱날로 벌도하여 완전히 절단이 되지 않은 상태로 넘어가게 되면 그 사이에 체인톱날이 끼어 문제가 발생되기 때문에 리기다소나무와 신갈나무에서 동일하게 체인톱날 점검작업시간이 기계적 지연에 가장 많이 발생된 것으로 사료된다.

3) 조재작업 시간 및 지연시간 분석

스트로크 하베스터에 의한 조재작업 시간 및 생산성을 리기다소나무와 신갈나무로 구분하여 분석한 결과, 각각 사이클당 전체작업시간은 평균 141 sec/cycle과 179 sec/cycle이고, 사이클당 순수작업시간은 평균 109 sec/cycle과 98 sec/cycle이며, 이에 따른 기계이용률은 각각 77.3%와 54.7%로 나타났다. 리기다소나무의 평균 조재작업시간이 88 sec/cyle(62.3%)로 가장 많이 차지하였고, 벌채부산물 집적작업시간이 31 sec/cycle(9.9%), 원목 집적작업시간이 14 sec/cycle(3.7%), 번칭작업시간이 3 sec/cycle(1.8%)로 나타났으며, 작업지연시간은 평균 31 sec/cycle(22.3%)로 나타났다. 신갈나무의 평균 조재작업시간이 65 sec/cycle (43.2%)로 가장 많이 차지하였고, 벌채부산물 집적작업시간이 12 sec/cycle(8.1%), 번칭작업시간이 11 sec/cycle(7.5%), 원목 집적작업시간이 9 sec/cycle(6.1%)로 나타났으며, 작업지연시간은 평균 81 sec/cycle(35.1%)로 나타났다.

또한 본 연구대상지에서 리기다소나무와 신갈나무의 평균 조재공정은 각각 0.33 $m^3$/cycle과 0.23 $m^3$/cycle로 시간당 각각 144회와 153회를 작업하여 생산성은 리기다소나무가 시간당 8.25 $m^3$, 1일 기준 66.00 $m^3$/day로 나타났고, 신갈나무는 시간당 7.75 $m^3$, 1일 기준 52.3 $m^3$으로 나타났다(Table 10). 국내에서 하베스터를 이용한 조재작업에 관한 연구로 휠 타입 하베스터의 생산성은 대경재 기준으로 시간당 8.10~10.88 $m^3$으로 나타났고(Cho, 2015), 본 연구대상지에 비해 본당 재적이 높았고, 다른수종과 생산방식이 다소 차이가 있었으나 생산성이 크게 다르지 않은 것으로 나타났다. Strandgard et al.(2016)은 스트로크 형태의 프로세서를 대상으로 작업자 경력이 10년이며, 수종, 절단길이, 임목재적(0.20 $m^3$)에 따라 다르지만 생산성이 시간당 17.5 $m^3$으로 본 연구결과보다 높은 것으로 나타났다. 앞서 벌도+조재, 벌목 작업에서 생산성에 영향을 미치는 인자로 작업자의 숙련도와 작업방법에 대한 숙지가 중요한 것으로 나타났으며, 이를 고려하여 작업 효율을 증대시킨다면 생산성이 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

조재작업의 작업지연시간을 분석한 결과는 Table 11과 같다. 인위적 지연시간은 리기가소나무에서 작업자간 대화가 130초(3.9%), 신갈나무에서는 휴식시간이 92초(2.0%)로 나타났다. 작업적 지연시간은 리기다소나무에서 작업대기시간이 2,159초(64.9%)로 가장 많이 차지하였으며, 주변정리작업이 442초(13.3%), 나무길이 확인작업이 192초(5.8%)와 나무모으기작업이 30초(0.9%)로 나타났다. 신갈나무는 작업대기시간이 2,348초(49.8%)로 가장 많이 차지하였으며, 나무모으기 작업이 598초(12.7%), 나무정리작업이 182초(3.9%)와 주변정리작업이 114초(2.4%)로 나타났다. 이는 리기다소나무와 신갈나무의 조재작업에서 작업대기시간이 가장 높은 원인으로 전목으로 벌도되어 토장까지 집재 또는 소운반작업 과정에서 작업로 길이나 이전 생산성이 조재작업에 영향으로 가장 높게 나타난 것으로 사료된다. 기계적 지연시간은 리기다소나무에서 체인톱날 점검이 372초(11.2%)로 나타났고, 신갈나무에서 하베스터 헤드에 그리스 주입시간이 778초(16.5%)로 가장 많이 차지하였고 체인톱날 점검이 605초(12.8%)로 나타났다. 이중 하베스터 헤드에 그리스 주입시간이 신갈나무에서 발생하였는데 대부분 작업을 시작하거나 종료 후 장비 점검 상황으로 주입을 하여야 하나, 장비 작동 중 실린더와 같은 액츄에이터 작동이 원활하지 않을 때에는 주입이 필요한 경우가 발생된다. 또한 이전 벌도+조재작업과 벌도작업에서도 체인톱 점검시간이 신갈나무에서 더욱 발생

**Table 10. Productivity in processing operation by stroke harvester.**

| Classification | Items | Value | |
|---|---|---|---|
| | | *Pinus rigida* | *Quercus mongolica* |
| Observed value | The number of processing (cycle) | 157 | 140 |
| | The number of timber processing (tree) | 157 | 140 |
| | The volume of timber processing ($m^3$) | 55.90 | 33.95 |
| | Processing times (sec) | 24,537 | 22,527 |
| | Number of operator (man) | 1 | 1 |
| Average per cycle | The volume of timber processing ($m^3$/cycle) | 0.33 | 0.23 |
| | Processing time (sec/cycle) | 144.47 | 153.24 |
| Average per hour | The number of processing (cycle/hour) | 24.92 | 23.49 |
| | The volume of timber processing ($m^3$/hour) | 8.25 | 7.75 |
| Average per day | The number of processing (cycle/day) | 199.35 | 187.94 |
| | The volume of timber processing ($m^3$/day) | 66.00 | 62.02 |

Note) Productive time per day is 8 hours.

**Table 11. Distribution for delay time in processing operation by stroke harvester.**

| Classification | | *Pinus rigida* | | *Quercus mongolica* | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Time, sec | Rate, % | Time, sec | Rate, % |
| Personal delay time | Rest | - | - | 92 | 2.0 |
| | Talking of operation | 130 | 3.9 | - | - |
| | Total | 130 | 3.9 | 92 | 2.0 |
| Operation delay time | Waiting | 2,159 | 64.9 | 2,348 | 49.8 |
| | Cleaning around the stump | 442 | 13.3 | 114 | 2.4 |
| | Check up the lengh of logs | 192 | 5.8 | - | - |
| | Collection of timber | 30 | 0.9 | 598 | 12.7 |
| | Cleaning of timber | - | 0.0 | 182 | 3.9 |
| | Total | 2,823 | 84.9 | 3,242 | 68.7 |
| Mechanical delay time | Repair chain-saw | 372 | 11.2 | 605 | 12.8 |
| | Grease injection into the machine | - | - | 778 | 16.5 |
| | Total | 372 | 11.2 | 1,383 | 29.3 |
| Total delay time | | 3,325 | 100.0 | 4,717 | 100.0 |

**Table 12. Validation result of the regression equation using the test data in felling and processing.**

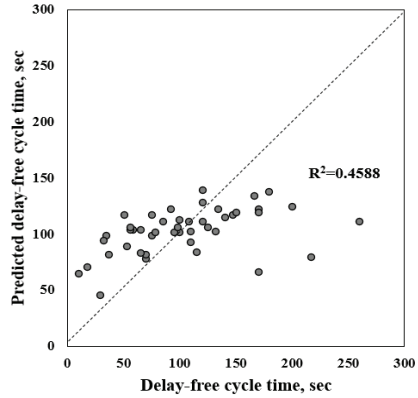
| Operations and species | | n | $\overline{D}$ | $S_{\overline{D}}$ | t | Prob>\|t\| |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Felling and processing | *Pinus rigida* | 13 | -28.84723 | 14.83594 | -1.944 | 0.076 |
| | *Quercus mongolica* | 12 | -0.29167 | 18.73496 | -0.016 | 0.988 |
| Felling | *Pinus rigida* | 24 | 7.07917 | 6.75630 | 1.048 | 0.306 |
| | *Quercus mongolica* | 9 | -0.81111 | 10.08065 | -0.080 | 0.938 |
| Processing | *Pinus rigida* | 48 | -14.29583 | 10.42140 | -1.372 | 0.177 |
| | *Quercus mongolica* | 43 | -11.12558 | 16.47783 | -0.675 | 0.503 |

하였는데 앞서 언급한 내용과 같이 침엽수종에 비해 활엽수종이 분지형태로 가지가 많기 때문에 조재하는 과정에서 더 많은 지연시간이 발생할 것으로 사료된다.

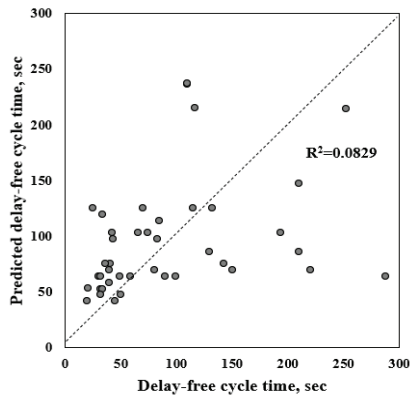
## 2. 스트로크 하베스터의 작업시간 예측 모델 분석

스트로크 하베스터를 이용한 작업별 작업시간의 예측모델을 개발하여 작업효율성을 분석하고자 하였다. 각각의 작업별 작업시간과 전체인자는 벌도+조재작업에서 흉고직경, 경사, 재적, 이동거리, 번칭거리 중 상관관계분석에 따라 흉고직경, 이동거리와 절단횟수가 가장 높았다. 벌도작업은 흉고직경, 재적, 이동거리, 번칭거리 중 흉고직경과 이동거리가 상관관계가 가장 높았으며, 조재작업은 흉고직경, 재적, 절단횟수 중 흉고직경과 절단횟수가 상관관계가 가장 높았다. 따라서 상관관계분석을 통해 가장 높은 인자를 대상으로 작업별 독립변수로 설정하여 어떤 요인이 모델에 영향을 미치는지 확인하여 리기다소나무와 신갈나무에 대한 작업별 평균 작업시간(지연시간 제외)의 예측모델을 개발하였다(Table 13). 또한 개발된 예측모델은 대응표본 *t*-검정($p$<0.05)을 이용하여 검증하였으며(Table 12), 이에 대한 작업별 실측값과 예측값에 대한 작업시간 예측모델 검증에 대한 비교 분석은 Figure 3과 같고, 모델검증에 대한 정확도는 다소 낮게 나타났지만 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었기 때문에 예측모델로 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

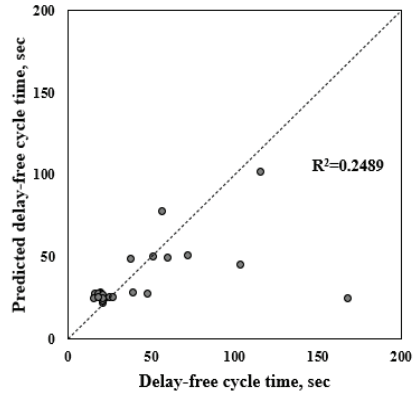
벌도+조재작업에서 리기다소나무의 예측모델은 이동거리와 절단횟수가 통계적으로 유의한 차이($p$<0.05)가 있는 것으로 나타났으나, 흉고직경은 유의한 차이($p$>0.05)가 없는 것으로 분석되었다. 또한 신갈나무에서도 이동거리와 절단횟수에서 통계적으로 유의한 차이($p$>0.05)가 있는 것으로 나타났지만, 흉고직경에서는 유의한 차이($p$>0.05)가 없는 것으로 나타났다. 이에 벌도+조재작업에서 2가지 수종에서 모두 중요한 인자가 이동거리와 절단횟수로 나타났다. 벌도작업에서 리기다소나무의 예측모델은 흉고직경과 이동거리가 모두 통계적으로 유의한 차이($p$<0.05)가 있는 것으로 분석되었다. 그러나 신갈나무에서는 이동거리만 통계적으로 유의한 차이($p$<0.05)가 있는 것으로 나타



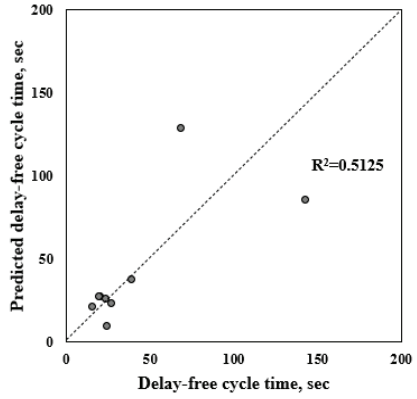

(a) Felling and processing (*Pinus rigida*)



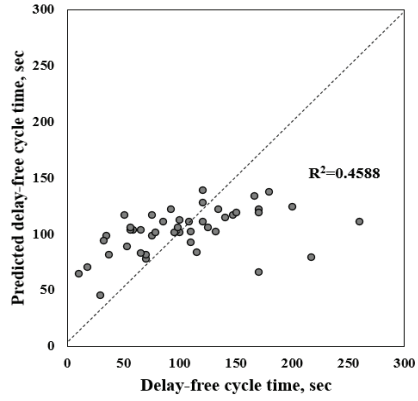

(b) Felling and processing (*Quercus mongolica*)



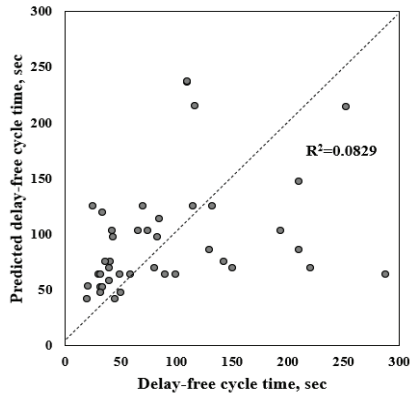

(c) Felling (*Pinus rigida*)




(d) Felling (*Quercus mongolica*)




(e) Processing (*Pinus rigida*)




(f) processing (*Quercus mongolica*)

**Figure 3. Measured and predicted values for delays-free cycle time, line is 1:1 (Felling and processing).**

났지만, 흉고직경에서는 유의한 차이($p$>0.05)가 없는 것으로 분석되었다. 조재작업은 리기다소나무와 신갈나무의 예측모델에서 흉고직경과 이동거리가 모두 통계적으로 유의한 차이($p$<0.05)가 있는 것으로 분석되었다. 이에 조재작업에 있어서 예측모델에 중요한 인자는 흉고직경과 이동거리로 분석되었다. 따라서 본연구는 스트로크 하베스터를 목재수확현장에서 적용하기 위한 것으로 실제 현장에서 비교적 쉽게 파악할 수 있는 인자 중 흉고직경을 고려하였기 때문에, 통계적으로 유의한 차이가 없었지만 개발된 예측모델을 이용하여 작업별 작업시간의 예측이 가능할 것으로 판단되었다(Table 13).

### 3. 스트로크 하베스터의 작업비용 및 민감도 분석

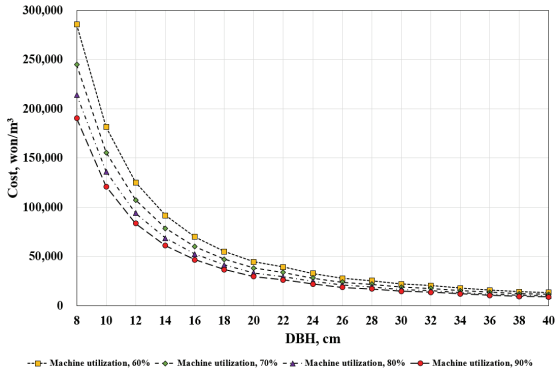
벌도+조재작업비용은 상기 작업비용 분석방법과 Table

**Table 13. Delay-free average cycle time equations for felling and processing.**

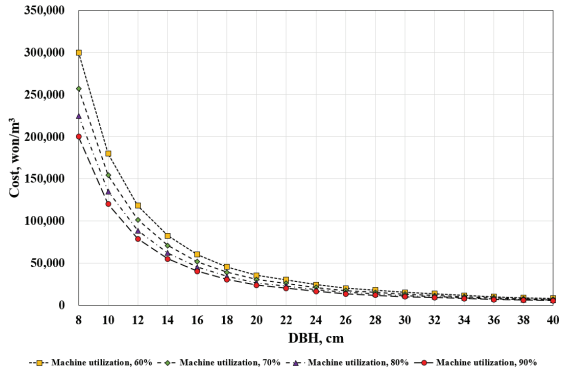
| Operations and Species | | Regression equation | n | $R^2$ | p-value |
|---|---|---|---|---|---|
| Felling and processing | *Pinus rigida* | Delay-free cycle times (sec) | 43 | 0.69 | |
| | | =-105.251 | | | 0.139 |
| | | +5.197 (DBH) | | | 0.054 |
| | | +7.656 (Travelling distance) | | | 0.001 |
| | | +33.874 (Number of cutting) | | | 0.001 |
| | *Quercus mongolica* | Delay-free cycle times (sec) | 39 | 0.89 | |
| | | =-58.773 | | | 0.029 |
| | | +1.467 (DBH) | | | 0.429 |
| | | +13.563 (Travelling distance) | | | 0.003 |
| | | +42.15 (Number of cutting) | | | 0.001 |
| Felling | *Pinus rigida* | Delay-free cycle times (sec) | 77 | 0.72 | |
| | | =15.844 | | | 0.001 |
| | | +0.348 (DBH) | | | 0.049 |
| | | +5.33 (Traveling distance) | | | 0.001 |
| | *Quercus mongolica* | Delay-free cycle times (sec) | 29 | 0.69 | |
| | | =24.288 | | | 0.006 |
| | | +0.063 (DBH) | | | 0.866 |
| | | +6.241 (Traveling distance) | | | 0.001 |
| Processing | *Pinus rigida* | Delay-free cycle times (sec) | 157 | 0.204 | |
| | | =-6.060 | | | 0.756 |
| | | +2.213 (DBH) | | | 0.003 |
| | | +13.007 (Number of cutting) | | | 0.001 |
| | *Quercus mongolica* | Delay-free cycle times (sec) | 140 | 0.395 | |
| | | =3.923 | | | 0.753 |
| | | +2.228 (DBH) | | | 0.001 |
| | | +10.286 (Number of cutting) | | | 0.001 |

5에 나타낸 관련 인자를 사용하여 산출하였다. 작업비용을 산출하기 위한 기계비용이 117,426 won/hr으로 리기다소나무에 경우 작업생산성이 6.53 $m^3$/SMH로 작업비용은 17,983 won/$m^3$이다. 신갈나무는 작업생산성이 4.02 $m^3$/SMH로 작업비용은 29,210 won/$m^3$이다. 선행연구에서 하베스터 작업비용은 본 연구와 유사한 장비로 하였을 때 9,802~2,215 won/$m^3$(10.1~45.4 $m^3$/SMH)로 나타났다(Jirousek et al., 2007). 이는 앞서 생산성 분석에서 언급한 임지조건, 오퍼레이터 숙련도에 따라 비용이 차이가 나는 것으로 사료된다. 이에 흉고직경 및 기계이용률 변화에 따른 단목벌도+조재작업의 영향력을 분석하기 위해 순수작업시간($m^3$/PMH)과 기계비용(won/hr)을 고정시키고, 기계이용률과 흉고직경을 변화시켜 작업비용에 대한 민감도를 분석하였다. 국외 선행연구에 따르면 작업비용은 기계비용과 생산성에 따라 상관관계가 있으며, 생산성이 증가하면 비용이 감소하는 경향이 본 연구와 유사하게 나타났다(Ascota et al., 2021). Figure 4에 (a), (b)와 같이 예측모델에서 추정된 생산성 결과와 작업비용은 흉고직경에 따라 다르게 나타났다. 개발된 예측모델을 통해 리기다소나무에서 벌도+조재작업은 기계이용률이 80.0%(실측값)와 평균 흉고직경 26 cm 일때 생산성은 5.64 $m^3$/PMH와 작업비용은 20,828 won/$m^3$였고, 신갈나무에서도 기계이용률이 78.4%(실측값)와 평균 흉고직경 18 cm일 때 생산성은 3.00 $m^3$/PMH와 작업비용이 39,083 won/$m^3$으로 나타났으며, 이는 예측모델에 있어 정확성이 실제 산출된 생산성과 비용에 차이가 있기 때문에 더 높게 나타난 것으로 사료되었으며, 향후 정확성을 높이기 위한 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 그러나 국내에서는 하베스터에 의한 벌도+조재작업 연구가 수행되지 않아 선행연구에서 연구결과를 이용하여 작업비용 목표로 설정하여 분석하였다(Jirousek et al., 2007). 리기다소나무와 신갈나무에서 작업비용은 각각 17,983 won/$m^3$와 29,210 won/$m^3$으로 목표인 9,802 won/$m^3$로 절감하기 위해서는 기계이용률이 최대 90% 이상까지 증가되어야 하며, 수종에 대한 목재의 특성이 다르기 때문에 다양한 수종에 대한 추가적인 연구가 필요하고, 특히 신갈나무에서 기계적 지연시간으로 체인톱 교체시간이 발생되었으며, 이는 대상목을 파지한 상태로 완벽히 절단이 안된 상태에서 넘어가는 경우에 발생되기 때문에 이러한 문제점을 해결하고, 생산성 향상과 비용을 절감하기 위해 작업자의 숙련도가 더욱 향상이 되어야 할 것으로 판단된다.

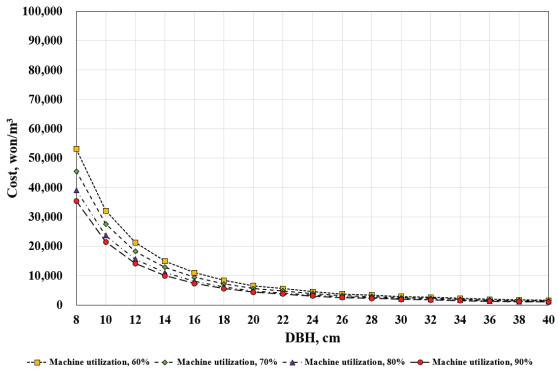
벌도작업의 작업비용을 산출하기 위한 기계비용이 109,095 won/hr으로 리기다소나무에 경우 작업생산성이



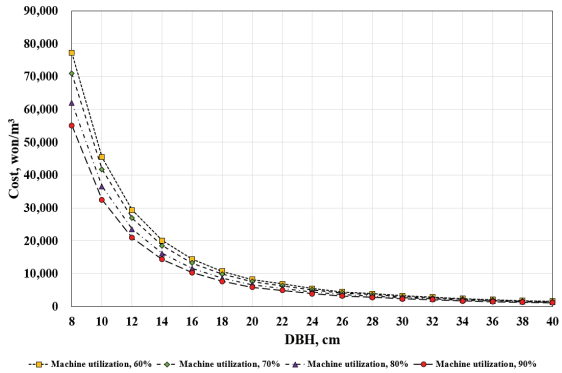

(a) Felling and processing (*Pinus rigida*)



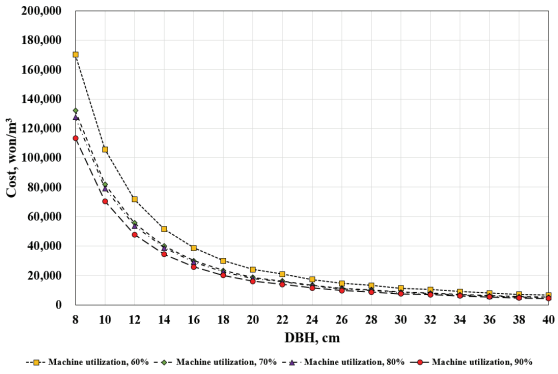

(b) Felling and processing (*Quercus mongolica*)



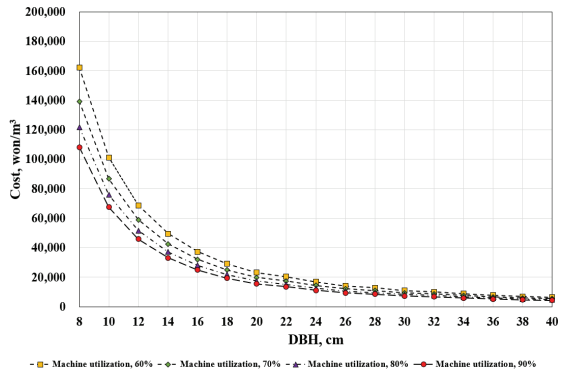

(c) Felling (*Pinus rigida*)




(d) Felling (*Quercus mongolica*)




(e) Processing (*Pinus rigida*)




(f) Processing (*Quercus mongolica*)

**Figure 4. Sensitivity analysis of cost depending on tree DBH and machine utilization by felling and processing.**

40.9 $m^3$/SMH로 작업비용이 2,667 won/$m^3$이다. 신갈나무는 작업생산성이 23.0 $m^3$/SMH로 작업비용이 4,743 won/$m^3$이다. Figure 4에 (c), (d)과 같이 예측모델에서 추정된 생산성과 작업비용은 흉고직경이 증가할수록 절감되는 것으로 나타났다. 예측모델을 통해 리기다소나무에서 벌도작업은 기계이용률이 81.6%(실측값)와 평균 흉고직경 24 cm 일 때 생산성은 34.98 $m^3$/PMH와 작업비용은 3,357 won/$m^3$였고, 신갈나무도 기계이용률이 64.3%(실측값)와 평균 흉고직경이 22 cm 일 때 생산성은 16.94 $m^3$/PMH와 작업비용은 6,930 won/$m^3$으로 나타났다. 또한 벌도작업 생산성 향상과 비용을 절감하기 위해서는 작업지연시간에서 비교적 많은 시간이 발생된 기계적 지연시간에서 체인톱날 및 가이드바의 교체시간을 줄이기 위한 방법과 벌도작업 시 대상목을 파지한 상태에서 절단이 완벽히 이루어진 후 작업하면 이러한 지연시간을 줄일 수 있을 것으며, 이에 따라 작업자의 숙련도가 더욱 향상되면 생산성을 향상시키고 비용을 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

조재작업의 작업비용을 산출하기 위한 기계비용은 126,196 won/hr으로 리기다소나무에 경우 작업생산성이 8.25 $m^3$/SMH로 작업비용이 15,296 won/$m^3$이다. 신갈나무는 작업생산성이 7.75 $m^3$/SMH로 작업비용이 16,283 won/$m^3$이다. 선행연구결과에 따르면 나무의 특징에 따라 수종에따라 낙엽송 같이 가지가 약하면 휠타입의 하베스터가, 리기다소나무와 같이 나무가 굵고 많은 것은 스토르크 하베스터가 더 효율적인 것으로 판단된다(Cho, 2015). 선행연구에 따르면, 프로세서를 이용한 조재작업은 낙엽송 보다 가지가 굵고 많은 리기다 소나무가 더 오랜시간이 소요된다고 보고하였다(Cho et al., 2015). 또한 Lee(2012)의 연구결과, 리기다 소나무를 대상으로 조재작업 시 휠타입(375 sec/cycle, PMH 기준)보다 본 연구의 스트로크 타입(109 sec/cyle, PMH)이 보다 효율적인 것으로 판단된다. Figure 4에 (e), (f)와 같이 예측모델에서 추정된 생산성과 작업비용은 흉고직경이 증가할수록 절감되는 것으로 나타났다. 예측모델을 통해 리기다소나무에서 조재작업은 기계이용률이 77.3%(실측값)와 평균 흉고직경 22 cm 일 때 생산성은 7.22 $m^3$/PMH와 작업비용은 16,266 won/$m^3$였고, 신갈나무도 기계이용률이 54.7%(실측값)와 평균 흉고직경이 22 cm 일 때 생산성은 5.27 $m^3$/PMH와 작업비용은 22,283 won/$m^3$으로 나타났다. 또한 조재작업 생산성 향상과 비용을 절감하기 위해서는 작업지연시간에서 대기시간이 높아 현장에서의 작업 계획이 매우 중요하고, 작업자 숙련도가 더욱 향상되어야 할 것으로 판단된다.

## 결 론

우리나라 산림은 장.노령림이 점차 증가함에 따라 지속적으로 산림사업이 증가하고 있다. 그러나 산림작업의 대부분은 인력작업으로 인해 위험에 노출되어 있고, 3D 업종이라는 인식으로 젊은 노동인력확보가 어려울뿐만 아니라 기존 작업자의 고령화로 인력문제에 직면하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 고성능 임업기계인 스트로크 하베스터를 이용한 벌도+조재작업, 벌도작업과 조재작업의 시간과 주요인자 조사를 통해 작업생산성을 이용한 비용을 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다. 본 연구에서 하베스터를 이용한 벌도+조재작업 시 흉고직경, 이동거리와 절단횟수가 중요한 인자로 나타났으며, 이를 이용하여 각 작업에 따른 예측모델식을 개발하였다. 산림현장에서 벌도와 조재작업의 생산성과 비용을 예측하기 위해 임분에 사전조사 항목에서 흉고직경, 이동거리는 식재간격, 절단횟수는 나무의 용도별(용재 3.6 m, 펄프 2.1 m)로 조사하면 하베스터을 이용한 작업생산성과 비용을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 하베스터를 이용한 작업에서의 생산성과 비용 예측 정확성을 높이기 위해 다양한 수종과 작업조건 등을 고려하고, 생산성 향상과 비용 절감을 위해 오퍼레이터의 숙련도 향상 시킬 수 있는 방법에 대한 검토와 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청(국립산림과학원) 특정과제(과제번호: 2021351E10-2223-AC03)'의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

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

Acosta, F.C., Silva, I.M., Garcia, M.L. and Melo, R.R.D. 2020. Productivity and costs of harvester cutting of teak trees for thinning. Floresta e Ambiente 28.

Alam, M., Acuna, M. and Brown, M. 2013. Self-levelling feller-buncher productivity based on Lidar-derived slope. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering 34(2): 273-281.

Bell, J.L. 2002. Changes in logging injury rates associated with use of feller-bunchers in West Virginia. Journal of Safety Research 33(4): 463-471

Bilici, E., Akay, A.E. and Abbas, D. 2019. Assessing the effects of site factors on the productivity of a feller buncher: A time and motion analysis. Journal of Forestry Research 30(4): 1471-1478.

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.

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 Scociety of Forest Science 104(2): 221-229.

Cho, M.J. 2015. Efficient tree-length harvesting system using tower-yarder and tractor-yarder. (Dissertation), Chun-Choen. Kangwon National University.

Cho, M.J., Choi, Y.S., Mun, H.S., Lee, C.G., Lee, E.J., Jung, E.J., Oh, J.H., Han, S.K., Kim, D.H. and Cha, D.S. 2016. Productivity and costs of felling operation for three harvesting methods forest stands. Journal of Korean Forest

Society 105(4): 441-448.

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., Mun, H.S., Kim, D.H., Cha, D.S., Han, S.K. and Oh, J.H. 2018. Analysis of yarding productivity and cost of tower-yarder based on excavator using radio-Controlled double clamp carriage. Journal of Korean Society of Forest Science 107(3): 266-277.

Conway, S. 1982. Logging practices: Principles of timber harvesting systems. Miller Freeman Publications, San Francisco, pp. 432.

Dykstra, D.P. 1975. Production rates and costs for cable, balloon, and helicopter yarding systems in old-growth Douglas-fir(Dissertation). Oregon State University. pp. 1-44.

Gerasimov, Y., Senkin, V., Väätäinen, K. 2012. Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the northern European part of Russia. European Journal of Forest Research 131(3): 647-654.

Glade, D. 1999. Single-and double-grip harvesters–productive measurements in final cutting of shelterwood. Journal of Forest Engineering 10(2): 63-74.

Forbrig, A. 2000. Konzeption und anwendung eines informationssystems über forstmaschinen auf der grundlage von maschinenbuchführung, leistungsnachweisen und technischen daten. KWF.

Konzeption und anwendung eines informationssystems uber forstmaschinen auf der grundlage von maschinenbuchfuhrung, leistrungsnachweisen und technischen daten. Doctor Theses. Technische universitat munchen, Bericht Nr.29/ 2000 der Kuratoriums fur waldarbeit und forsttechnik, Grobumstadt, p .213.

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.H., 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): 451-457.

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.

Jiroušek, R., Klvač, R. and Skoupý, A. 2007. Productivity and costs of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. Journal of forest science 53(10): 476-482.

Kim, M.K. and Park, S.J. 2012. An analysis of the operational time and productivity in whole-tree and cut-to-length logging operation system. Journal of Korean Society of Forest Science 101(3): 344-355.

Kim, M.K. and Park, S.J. 2013. An analysis of the operational cost in the whole-tree and cut-to-length logging operation system. Journal of Korean Society of Forest Science 102(2): 229-238.

Korea Forest Service (KFS). 2021. Statistical yearbook of forestry, pp. 36;267.

Korea National Oil Corporation. 2022. Domestic oil prices. http://www.knoc.co.kr/ (2022. 02. 23)

LeDoux, C.B. and Huyler, N.K. 2001. Comparison of two cut-to-length harvesting systems operating in eastern hardwoods. Journal of Forest Engineering 12(1): 53-60.

Lee, J.A. 2013. Productivity and cost analysis of whole-tree harvesting system using swing-yarder. (Dissertation), Chun-Choen. Kangwon National University.

McEwan, A., Magagnotti, N. and Spinelli, R. 2016. The effects of number of stems per stool on cutting productivity in coppiced Eucalyptus plantations. Silva Fenn 50(2): 1448.

Ministry of Employment and Labor (MOEL). 2021. Analysis of industrial accident status. pp. 13.

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

Nakagawa, M., Hamatsu, J., Saitou, T. and Ishida, H. 2007. Effect of tree size on productivity and time required for work elements in selective thinning by a harvester. International Journal of Forest Engineering 18(2): 24-28.

Nakagawa, M., Hayashi, N. and Narushima, T. 2010. Effect of tree size on time of each work element and processing productivity using an excavator-based single-grip harvester or processor at a landing. Journal of Forest Research 15(4): 226-233.

Pausch, R. (2002). Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost-und nordbayerischer Mittelgebirge (Doctoral dissertation, Technische Universität München).

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.

Slappendel, C., Laird, I., Kawachi, I., Marshall S. and Cryer C. 1993. Factors affecting work-related injury among forestry workers: A review. Journal of Safety Research

24(1): 19-32.

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

Slappendel, C., Laird, I., Kawachi, I., Marshall S. and Cryer C. 1993. Factors affecting work-related injury among forestry workers: A review. Journal of Safety Research 24(1): 19-32.

Spinelli, R., Magagnotti, N. and Hartsough, B. 2011. Productivity norms for harvesters and processors used in Italy. Formec Austria.

Spinelli, R., Lombardini, C. and Magagnotti, N. 2014. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. Silva Fennica 48(1): 1-15.

Stampfer, K. and Steinmüller, T. 2001. A new approach to derive a productivity model for the harvester Valmet 911 Snake. In Proc., international mountain logging and 11th Pacific Northwest skyline symposium–a forest engineering odyssey (pp. 254-262).

Strandgard, M., Walsh, D. and Mitchell, R. 2015. Productivity and cost of whole-tree harvesting without debarking in a Eucalyptus nitens plantation in Tasmania, Australia. Southern Forests: A Journal of Forest Science 77(3): 173-178.

Raymond, K. 2012. Innovation to increase profitability of steep terrain harvesting. NZ Journal of forestry, August 2012. 57(2): 19-23.

Vitorelo, B., Han, H.S. and Elliot, W. 2011. Productivity and cost of integrated harvesting for fuel reduction thinning in mixed-conifer forest. Forest Products Journal 61(8): 664-674.

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.

Zinkevicius, R., Steponavicius, D., Vitunskas, D. and Cinga, G. (2012). Comparison of harvester and motor-manual logging in intermediate cuttings of deciduous stands. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 36(5): 591-600.

Manuscript Received : September 19, 2022
First Revision : November 28, 2022
Accepted : November 29, 2022