

## 2중 무선 클램프 반송기를 이용한 굴삭기 기반 타워야더의 생산성 및 비용 분석

최윤성<sup>1</sup> · 조민재<sup>1</sup> · 문호성<sup>1</sup> · 김대현<sup>2</sup> · 차두송<sup>3</sup> · 한상균<sup>4</sup> · 오재현<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 산림기술경영연구소, <sup>2</sup>강원대학교 농업생명과학대학,

<sup>3</sup>강원대학교 산림환경과학대학, <sup>4</sup>한국농수산대학 산림학과

## Analysis on Yarding Productivity and Cost of Tower-Yarder Based on Excavator Using Radio-Controlled Double Clamp Carriage

Yun-Sung Choi<sup>1</sup>, Min-Jae Cho<sup>1</sup>, Ho-Seong Mun<sup>1</sup>, Dae-Hyun Kim<sup>2</sup>,  
Du-Song Cha<sup>3</sup>, Sang-Kyun Han<sup>4</sup> and Jae-Heun Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science,  
Pocheon 11186, Korea

<sup>2</sup>Agriculture and life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>3</sup>College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>4</sup>Department of Forestry, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

**요약:** 본 연구에서는 모두베기 작업지에서 2중 무선 클램프 반송기를 적용한 굴삭기 기반 타워야더의 집재작업 생산성 및 비용을 분석하였다. 집재작업의 생산성은 6.2 m<sup>3</sup>/SMH(기계이용률 80.4%)이고, 비용은 13,705 won/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 이 결과는 기존 연구결과에 비해 최대 집재거리가 길었음에도 불구하고 가선설치용 견인줄(Straw line)을 이용한 가선설치로 집재선 가선설치 시간이 단축되었으며, 2중 무선 클램프 반송기 적용으로 인해 생산성이 향상되고 비용이 절감된 것으로 나타났다. 또한, 원료재급과 임목축적 137 m<sup>3</sup>/ha 기준으로 집재작업의 생산재적에 따른 최소작업량과 최소작업면적은 리기 다소나무의 경우 각각 558.3 m<sup>3</sup> 및 4.1 ha였고, 신갈나무의 경우 433.7 m<sup>3</sup> 및 3.2 ha로 나타났다. 향후, 다양한 작업현장에서 집재기계별 최소작업량 및 최소작업면적에 관한 데이터를 구축하면, 집재작업에 효율적인 집재기계를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract:** This study was conducted in clear cutting stands. For the whole-tree yarding operation, a tower-yarder based on excavator with a radio-controlled double clamp carriage was applied to analyze yarding productivity and cost. The productivity and cost of yarding operation was 6.2 m<sup>3</sup>/SMH(machine utilization rate, 80.4%) and 13,705 won/m<sup>3</sup>, respectively. Although the maximum yarding distance was longer than the previous studies, the setting up time of the tower-yarder was decreased as used straw line. The application of the radio-controlled double clamp carriage improved productivity and reduced costs. Based on the fuel log and growing stock(137.0 m<sup>3</sup>/ha), the minimum production(m<sup>3</sup>) and area(ha) were 558.3 m<sup>3</sup> and 4.1 ha for *Pinus rigida* stands and 433.7 m<sup>3</sup> and 3.2 ha for *Quercus mongolica* stands, respectively. Based on the this study, it will be possible to select an efficient yarding machine by accumulation of data on minimum production and area for many machines in various harvesting sites.

**Key words:** clear cutting, cable yarding, yarding productivity, yarding cost

\* Corresponding author

E-mail: jhoh7038@korea.kr

ORCID

Jae-Heun Oh  https://orcid.org/0000-0002-1384-6780

## 서론

우리나라는 성공적인 치산녹화사업과 지속적인 숲가꾸기 사업 등으로 IV영급 이상의 산림이 전체산림의 69.1%이며, 점차 장령림으로 변화함에 따라 지속적인 간벌 및 개벌 등의 산림사업이 점점 증가하고 있는 실정이다(KFS, 2017a). 또한 목재자원 보유국의 수출규제와 자국의 자원 보호 등에 따른 목재수입의 여건이 악화되고 있으며, 산림청은 2016년 기준 국내 목재자급률을 16.2%에서 2035년까지 25.0%로 증대방안을 추진하는 등 국산재의 생산 및 이용에 관한 기대가 높아지고 있다(KFS, 2017b).

현재 국내 목재생산방식은 대부분 임내에서 체인톱을 이용한 벌도 및 조재작업 후, 굴삭기 우드그랩을 이용한 하산집재 및 집적하는 단목생산방식이다. 집적된 원목을 반출하기 위해서 작업로를 이용한 소운반 작업은 포워드(Forwarder), GMC 트럭, 영운기 등을 이용하고 있으며, 최근에는 건설용 궤도형 운반차를 활용한 방법이 이용되고 있다. 이러한 단목수확작업시스템(Cut-to-length)을 이용하여 목재를 생산할 경우, 급경사지에서 가선계 중심이 아닌 차량계 중심의 목재수확기계의 투입으로 생산성과 비용적인 면에서는 유리할 수 있으나, 임내의 무분별한 작업로 개설과 차량의 주행 등으로 임지 훼손이 심각하고, 급경사지는 작업자의 위험이 높은 실정이다(Lee and Park, 2001; 2002; 2003). 이에 자연친화적이고 작업안전을 위한 가선집재방식의 임목수확시스템 도입이 요구되고 있다(Kim and Park, 2012). 또한, 단목수확작업시스템은 벌채부산물을 이용하고자 할 경우에 추가적인 수집비용이 발생되지만, 전목수확작업시스템(Whole-tree)의 경우에는 임도 또는 토장까지 집재 후에 조재작업이 이루어지므로 벌도의 벌채부산물 수집비용이 발생되지 않기 때문에 전목수확작업시스템의 구축이 요구되고 있다(Lee, 2013; KFS, 2017c; Oh et al., 2017).

국내·외 전목수확작업시스템의 집재작업에 관한 선행 연구를 살펴보면, 모두베기 작업지에서 인터락 장치가 있는 타워야더(RME-300T)와 굴삭기 기반 스윙야더의 집재작업 생산성 및 비용을 비교하였으며(Kim and Park, 2012; 2013), Cho et al.(2009)은 굴삭기 기반의 스윙야더를 이용하였고, Bruce et al.(2014; 2015) 집재원치를 이용하여 집재작업 생산성 및 비용 연구를 수행하였다. 이와 같이, 가선집재작업의 생산성 및 비용 분석에 관한 연구가 활발히 진행되었으나, 인터락 장치가 있는 집재기계를 이용한 집재작업에서 적정작업량 산정과 생산성 향상을 위한 반송기 성능개선에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 모두베기 대상지의 전목수확작업시스템에서 2중 무선 클램프 반송기를 적용한 굴삭기 기반 타워야더

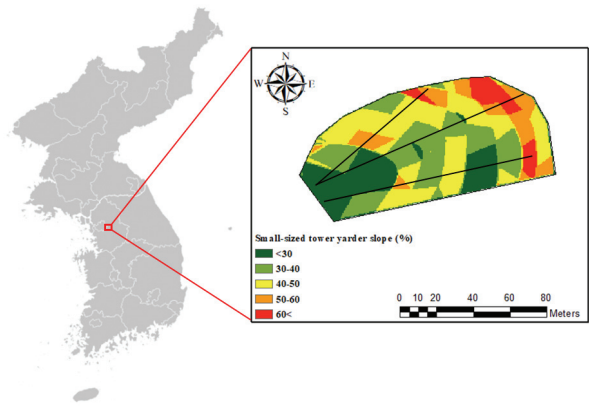


Figure 1. Location of study site.

Table 1. Stand descriptions of the study site.

|                       |                          |                          |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Area                  | 1.15 ha                  |                          |
| Average slope         | 40 %                     |                          |
| Forest type           | Plantation               |                          |
| Species               | <i>Pinus rigida</i>      | <i>Quercus mongolica</i> |
| Average height        | 15/9~21 m                | 14/10~18 m               |
| Average DBH           | 22/8~38 cm               | 20/10~36 cm              |
| Average growing stock | 137.0 m <sup>3</sup> /ha |                          |

에 의한 집재작업의 생산성 및 비용 분석을 통해 효율적인 집재작업방식을 제시하고, 집재기계를 투입하기 전에 집재작업 생산재적에 따른 손익분기점 및 최소작업량과 임목축적을 고려한 최소작업면적을 제시하여 효율적인 집재작업 및 집재기계를 선정할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개요

본 연구 조사지 및 조사지 개요는 Figure 1 및 Table 1과 같다. 조사지는 경기도 이천시 호법면 매곡리 17임반 3소반에 위치한 모두베기 작업지로 전체면적은 7.2 ha이며, 전목수확작업시스템을 적용한 면적은 1.15 ha이다. 집재대상수종은 리기다소나무(*Pinus rigida*) 및 신갈나무(*Quercus mongolica*) 등으로 구성되어 있다. 조사지의 개요는 Table 1과 같으며, 조사지의 평균경사는 40 %, 조사지 내의 리기다소나무 및 신갈나무의 집재목 평균수고는 각각 15 m 및 14 m, 집재목 평균직경은 22 cm 및 20 cm, 조사지의 전체 평균임목축적은 평균임목축적은 137.0 m<sup>3</sup>/ha이다.

### 2. 전목수확작업시스템의 하향 집재작업 개요

본 연구에 적용된 전목수확작업시스템의 개요는 Figure

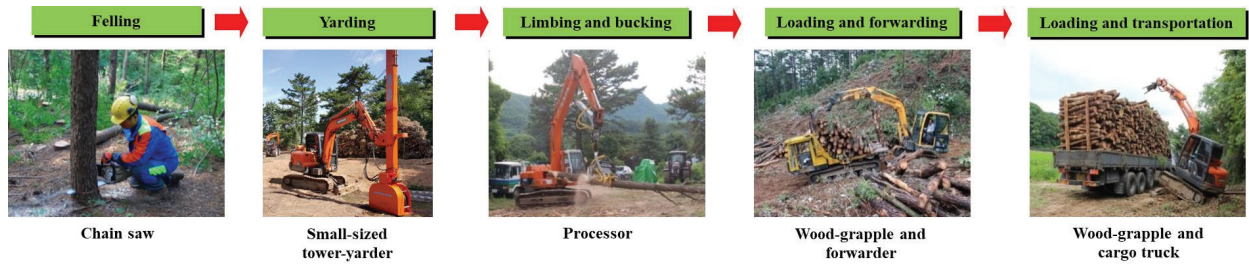


Figure 2. Whole-tree harvesting system.

2와 같다. Figure 2에서 보듯이, 체인톱에 의한 벌도작업 후, 굴삭기 기반의 타워야더에 의한 하향 집재작업의 최대 집재거리는 183.6 m, 최대 가로집재거리는 약 30 m이며, 대부분 30 m 이내에서 가로집재가 이루어졌다. 집재된 전목은 프로세서에 의해 2.1 m, 3.6 m의 길이로 조재작업이 실시되었다. 조재된 원목은 굴삭기 우드그랩+궤도형 임내차에 의한 소운반 작업과 굴삭기 우드그랩+25톤 트럭에 의한 운재작업으로 이루어졌다. 또한, 각 작업에 투입된 인원은 벌도작업 1명, 집재작업 2명, 조재작업 1명, 상·하차 및 소운반 작업 2명, 상차 및 운재작업 2명이었으며, 조사에 사용된 각종 기계의 운전원은 최소 5년 이상 해당 기계를 사용하여 표준 작업을 수행한 경향이 있는 전문 인력을 투입하였다.

3. 집재기계의 개요

1) 집재작업에 사용된 굴삭기 기반의 타워야더

본 연구 조사지에서의 전목수확작업시스템에서의 집재작업에 사용된 기계는 5톤급 굴삭기에 부착한 소형 타워



Figure 3. Tower-yarder based on excavator.

야더로 작업줄(Main line) 및 되돌림줄(Haulback line) 등 2개의 드럼이 부착되어 있으며, 최대집재거리 200 m, 최대 견인력 1.8톤, 최대견인속도는 공주행 기준으로 180 m/min이다. 소형 타워야더는 유압식 인터락(Interlocking) 기능이 탑재되어 있어 하향집재작업에 매우 유리하며, 무선제어 방식의 적용으로 작업자의 위험성을 감소시켜 작업 효율성을 향상시킬 수 있도록 고안한 집재기계이다(Figure 3, Table 2).

Table 2. Specifications of small-sized tower-yarder based on excavator.

| Items                       | Specifications                               |              |               |           |
|-----------------------------|--|--------------|---------------|-----------|
| Model                       | SW200  |              |               |           |
| Size                        | 1,250(L)×600(W)×5,060(H) mm                  |              |               |           |
| Weight                      | 1,000 kg                                     |              |               |           |
| Tower-yarder control method | Radio frequency remote control               |              |               |           |
| Brake                       | Mechanical brake embedded in hydraulic motor |              |               |           |
| Winch                       | Specifications                               | Main line    | Haulback line |           |
|                             | Drum numbers                                 | 2            |               |           |
|                             | Drum diameter                                | ø 265 mm     | ø 265 mm      |           |
|                             | Flange diameter                              | ø 465 mm     | ø 565 mm      |           |
|                             | Drum Width                                   | 184 mm       | 184 mm        |           |
|                             | Traction speed                               | 76~180 m/min |               |           |
|                             | Tensile force                                | Bear drum    | 1,800 kgf     | 1,100 kgf |
|                             |  | Average drum | 1,500 kgf     | 850 kgf   |
|                             |  | Full drum    | 1,350 kgf     | 650 kgf   |
|                             | Wire rope capacity                           | ø 9 mm       | 375 m         | 586 m     |
| ø 10 mm                     |  | 303 m        | 475 m         |           |
| ø 11 mm                     |  | 251 m        | 392 m         |           |
| Hydraulic                   | Pressure                                     | 210 bar      |               |           |
|                             | Required flow                                | 48~79 ℓ/min  |               |           |



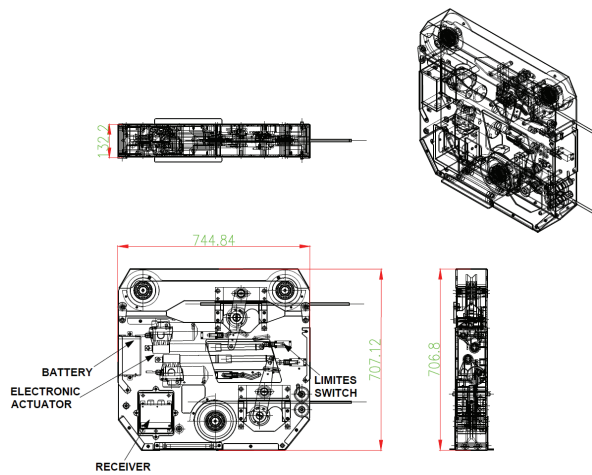


Figure 4. Radio-controlled double clamp carriage.

2) 2중 클램프 무선 반송기의 제원 및 작동원리

현재 가선 집재작업에서 사용되고 있는 반송기의 유형은 클램프 장치가 없는 반송기와 클램프가 있는 반송기로 구분된다. 국내 목재수확현장은 대부분 70~80%가 집재장의 위치상 하향집재로 이루어지고 있다(KFS, 2017c). 하향집재는 견인하는 집재목의 위치를 제어하기 어렵고, 운전원의 능력에 따라 생산성 및 작업안전이 좌우되는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고자 반송기에서 집재목의 위치에 따른 가로끌기와 초커설치, 가로집재, 집재작업 등을 효율적으로 제어하기 위한 2중 클램프 무선 반송기를 적용하여 조사 분석하였다(Figure 4). 적용된 2중 클램프 반송기의 제원은 Table 3과 같으며, 작동은 무선 송·수신기 방식으로 반송기의 상·하단에 되돌림줄과 작업줄을 고정할 수 있는 클램프를 적용하여 하향집재와 가로집재에 효율적이다.

2중 클램프 반송기를 이용한 집재작업의 개념도는 Figure 5와 같으며, 초커맨이 작업할 가로집재거리를 운전원에게 전달하면, 운전원이 반송기를 보내기전 사전에 가로집재거리만큼 작업줄을 늘어뜨린 상태에서 이송시킨다. 이후 초커맨은 늘어뜨린 작업줄을 집재목으로 이

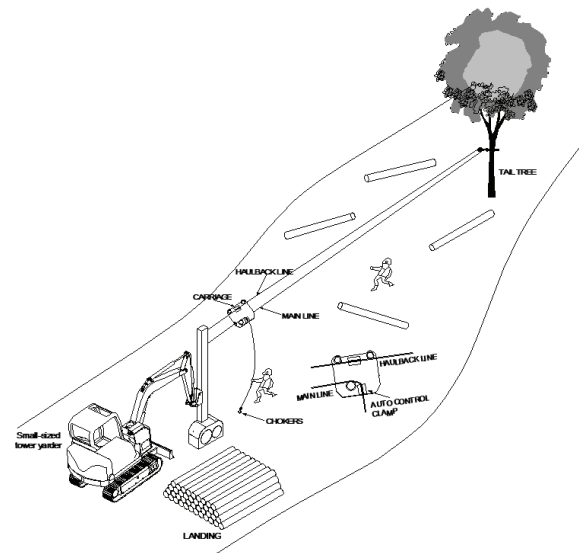


Figure 5. The layout of yarding operation by tower-yarder with radio-controlled double clamp carriage.

동하여 초커 설치작업을 실시하게 된다. 일반 무클램프 반송기의 경우 되돌림줄을 고정하는 클램프 등이 적용되어 있지 않아 상·하향집재의 경우 집재거리가 길어질수록 작업줄을 당겨 가로집재 위치로 가는 작업이 어려운 점이 있었다. 본 연구에서는 2중 클램프 반송기를 적용하여 기존 무클램프 반송기와 비교하여 집재작업의 생산성 및 작업효율에 미치는 영향을 조사 분석하였다.

4. 조사 방법

본 조사지에서의 집재작업에 대한 작업시간, 요소작업 시간, 그리고 작업공정 등을 조사하기 위해 스톱워치를 이용한 연속작업의 시간 및 동작 연구(Time and motion study) 방법을 적용하였다.

Table 3. Specifications of radio-controlled double clamp carriage.

| Items                   | Specifications                    |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Size                    | 740(L)×169(W)×700(H) mm           |
| Weight                  | 75 kg                             |
| Actuator                | Electric cylinder                 |
| Control method          | Remote control by radio frequency |
| Allowable control range | 150 m                             |
| Power source            | DC 12 V battery                   |

집재작업에 있어서 요소작업은 2인 1조로 반송기 보내기 (Carriage out), 가로끌기(Lateral wire traction), 초커설치 (Hooking), 가로집재(Lateral yarding), 집재작업(Yarding), 초커풀기(Unhooking), 총 작업지연시간(Total operation delay time)으로 구분하였다. 총 작업지연시간은 휴식 및 작업자 간의 대화 등과 같은 작업자지연시간(Personal delay time), 주변정리, 와이어걸림, 나무걸림, 작업대기, 반송기 위치조정, 반송기걸림 등의 작업적 지연시간(Operational delay time), 반송기 점검 등 기계적 지연시간(Mechanical delay time)으로 구분하여 조사하였다.

## 5. 분석방법

### 1) 작업시간 및 작업생산성 분석

작업시간의 일일 작업은 전체작업시간(Cycle time), 순수작업시간(Delay-free cycle time) 및 작업지연시간(Delay time)으로 구분하여 분석한 후, 기계이용률을 산출하였다. 또한, 작업생산성(SMH; Schedule Machine Hour, m/hr)은 별도작업 전에 입목에 번호를 표기하면서 전수 매목조사를 실시하여 임목재적을 산출한 후, 입목을 별도 집재한 후에 이를 바탕으로 집재작업의 생산성을 산출하였다.

### 2) 집재작업비용 분석

집재작업비용은 기계비용과 작업생산성에 의해 산출하였으며, 기계비용(won/hr)은 독일 산림작업 및 임업기계 위원회(KWF)에서 정한 방식에 의해서 기계작업비용을 계산하는 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). 집재작업비용분석에 사용한 공식에서 각 항목 및 식은 아래와 같다.

#### (1) 감가상각비

경제적 내구년수 동안에 기계의 수명(가동시간)에 달할 때까지 가동을 못할 경우는 감가상각비가 증가한다. 즉 장비의 활용도가 일정한 기준 이하일 때는 감가상각비가 증가하는 방식을 사용하였다. 장비구입 가격이 P, 장비의 경제적 수명이 H시간, 장비내구년수가 N년, 실제 연간 가동시간이 J 시간일 경우에는 이 장비는 최소한 년간 H/N 이상 사용하여야 하는데 실제 연간 가동시간 J가 H/N보다 적을 때의 감가상각비 D는 다음과 같이 적용하였다.

$$J \geq H/N \text{ 일 경우 } D = P/H \quad (1)$$

$$J < H/N \text{ 일 경우 } D = P/(J \times N) \quad (2)$$

#### (2) 이자비용

기계구입시 자금을 은행으로부터 용자받는 것으로 계산하여 시중은행금리나, 임업이자율 등을 적용하였고 평균 투자금액은 장비 구입가격의 1/2로 계산하였다.

$$\text{자본이자}(I) = P/2 \times \text{연이율} \quad (3)$$

#### (3) 수리 유지비

감가상각비에 대한 수리정비계수(r)를 이용하여 계산하였다.

$$\text{수리유지비}(RM) = P/H \times r \quad (4)$$

#### (4) 유류비용

연료비는 사용연료의 시간당 비용으로 계산하고 한국 석유공사의 2015년 7~8월 평균유가를 기준으로 분석하였다(KNOC, 2015). 또한, 윤활유 비용은 윤활유 계수를 이용하여 구하며 보통 장비일 경우 윤활유계수는 0.1이나 본 연구에서는 유압시스템으로 장비로 0.4를 적용하였다.

#### (5) 이동비용

장비를 다른 작업장소로 이동시키는데 소요되는 비용과 운전원의 인건비, 숙박비 등을 고려하여 계산하였다.

#### (6) 기타비용

장비에 대한 손해보험과 대인, 대물보험 비용 등을 고려하였다. 연간 보험료는 장비구입비의 1.4%를 적용하였으며, 창고 보관비용은 장비의 보관에 필요한 창고 임대비용으로 대체하고 경우에 따라서는 기계에 대한 관리비용을 계산하여 비용에 편입할 수도 있지만 본 연구에서는 적용하지 않았다.

#### (7) 인건비

인건비는 대한건설협회의 2015년 하반기 적용 임금보고서를 기준으로 분석하였다(CAOK, 2015).

### 3) 집재작업 생산성 및 비용에 따른 민감도 분석

집재작업의 민감도 분석은 집재순수작업생산성(m<sup>3</sup>/PMH)과 기계비용(won/hr)을 고정하고 기계이용률을 변화시키면서 산출하였다(Oh et al., 2017).

$$\begin{aligned} \text{집재작업 생산성} &= \text{집재순수작업생산성}(m^3/PMH) \\ &\times \text{기계이용율}(\%) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{집재작업 비용} = \frac{\text{기계비용(won/hr)}}{(\text{m}^3/\text{PMH}) \times \text{기계이용률(\%)}} \quad (6)$$

4) 집재작업에 따른 최소작업량 및 최소작업면적 분석  
 집재작업에 따른 최소작업량 및 최소작업면적 분석에 필요한 인자를 고려하여 투입비용(고정비, 변동비)과 수입을 이용하였다. 투입비용은 식 6을 적용하였으며 (Ahn et al., 2007), 이에 고정비는 작업현장의 임목계약 금액과 작업기계의 운송비용, 변동비는 생산재적(m<sup>3</sup>)에 따른 전목수확작업시스템의 총 작업비용(won/m<sup>3</sup>)이다.

$$TC(won) = FC(won) + VC(won/\text{m}^3) \times X(\text{production, m}^3) \quad (7)$$

where,

- TC= Total cost
- FC = Fixed cost
- VC = Variable cost

또한, 수종별 원목의 등급 구분은 특용재급, 1등급, 2등급, 3등급, 원주재급, 원료재급으로 분류된다(KOFPI, 2015). 수입은 식 7과 같이 원목 등급 구분에 따른 주요 수종 2종(리기다소나무, 신갈나무)을 대상으로 생산재적(m<sup>3</sup>)과 원료재급의 원목매각비용(원/m<sup>3</sup>)을 적용하였다 (Table 10). 식 6과 7을 이용하여 생산재적(m<sup>3</sup>)의 변화에 따른 투입비용(TC)과 수입(TI)으로 손익분기점 및 최소작업량(m<sup>3</sup>)을 분석하였으며, 연구대상지의 임목축적(137

m<sup>3</sup>/ha)을 이용하여 최소작업면적(ha)을 산출하였다.

$$TI(won) = LP(won/\text{m}^3) \times X(\text{production, m}^3) \quad (8)$$

where,

- TI = Total income
- LP = Log price

## 결과 및 고찰

### 1. 전목수확시스템에서의 집재작업 시간 및 생산성 분석

2중 무선 클램프 반송기를 이용한 굴삭기 기반 타워야더에 의한 집재작업 시간 및 생산성을 분석한 결과, 1 사이클 당 전체작업시간(Total cycle time)은 평균 315 sec/cycle이고, 1 사이클당 순수작업시간(Delay-free cycle time)은 평균 253 sec/cycle이며, 이에 따른 기계이용률은 80.4 %로 나타났다. 1 사이클당 집재작업의 초커설치시간은 평균 약 71 sec/cycle(22.5 %)로 가장 많이 차지하였고, 집재작업시간이 평균 약 62 sec/cycle(19.7 %), 반송기보내기시간이 평균 약 39 sec/cycle(12.4 %)로 나타났으며, 총작업지연시간은 평균 약 62 sec/cycle로 나타났다(Table 5). 또한, 본 조사에서의 1 사이클당 평균 집재거리는 68.9 m, 평균 가로집재거리는 10.0 m, 평균 집재작업본수는 2.4 본/cycle, 평균 집재작업공정은 0.54 m<sup>3</sup>/cycle이었고, 시간당 약 11회를 집재하여 생산성은 6.2 m<sup>3</sup>/SMH, 1일 기준 49.6 m<sup>3</sup>/일, 1일 1인 기준 24.8 m<sup>3</sup>/일·일로 나타났다(Table 4).

Table 4. Productivity in yarding operation by tower-yarder.

|                     | Items   | Value  |
|---------------------|---|--------|
| Observed value      | The number of yarding (times)                         | 196    |
|                     | The number of timber yarded (tree)                    | 457    |
|                     | The volume of timber yarded (m <sup>3</sup> )         | 101    |
|                     | Yarding time (sec)                                    | 61,550 |
|                     | Number of workers (man)                               | 2      |
| Average per times   | The volume of timber yarded (m <sup>3</sup> /times)   | 0.54   |
|                     | Yarding time (sec/time)                               | 315    |
| Average per hour    | The number of yarding (time/hour)                     | 11.42  |
|                     | The volume of timber yarded (m <sup>3</sup> /hour)    | 6.2    |
| Average per day     | The number of yarding (times/day)                     | 91.36  |
|                     | The volume of timber yarded (m <sup>3</sup> /day)     | 49.6   |
| Average per man-day | The number of yarding(times/man-day)                  | 45.7   |
|                     | The volume of timber yarded (m <sup>3</sup> /man-day) | 24.8   |

Note) Productive time per day is 8 hours

**Table 5. Cycle time per 1 cycle by work elements in yarding operation.**

(unit : sec.)

| Classification             | Average | Min | Max   | Standard deviation | Rate (%) |
|----------------------------|---------|-----|-------|--------------------|----------|
| Carriage out               | 39      | 5   | 102   | 20.2               | 12.4     |
| Lateral wire traction      | 38      | 0   | 104   | 21.2               | 12.1     |
| Hooking                    | 71      | 8   | 180   | 30.3               | 22.5     |
| Yarding                    | 14      | 0   | 51    | 5.7                | 4.4      |
| Carriage in                | 62      | 12  | 170   | 27.0               | 19.7     |
| Unhooking                  | 29      | 9   | 40    | 7.3                | 9.2      |
| Total operation delay time | 62      | 0   | 3,460 | 266.2              | 19.7     |
| Total cycle time           | 315     | 135 | 3,800 | 272.8              | 100      |
| Delay-free cycle time      | 253     | 34  | 696   | 118.1              |          |

**Table 6. Comparison between precedent studies and this study for average cycle time by work elements in yarding operation.**

(unit : sec)

| Classification             | Cho et al.(2009) | Kim and Park(2012) | This study      |
|----------------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| Carriage out               | 32               | 47                 | 39              |
| Lateral wire traction      | 39               | 44 <sup>b</sup>    | 38 <sup>a</sup> |
| Hooking                    | 51               | 31                 | 71              |
| Yarding                    | 21               | 38 <sup>c</sup>    | 14              |
| Carriage in                | 84               | 56                 | 62              |
| Unhooking                  | 46               | 50 <sup>d</sup>    | 29              |
| Total operation delay time | 75               | 48                 | 62              |
| Total cycle time           | 348              | 314                | 315             |
| Delay-free cycle time      | 273              | 266                | 253             |

<sup>a</sup> include wire out, <sup>b</sup> include carriage down, <sup>c</sup> include choker moving and signaling, <sup>d</sup> include unloading

본 연구결과를 기존의 연구결과와 비교해 보기 위해 조사대상지 등 조건이 비슷한 연구결과와 비교 분석해 보았다. 즉, 리기다소나무 인공림지역에서 3인 1조 및 4인 1조의 작업원에 의한 13톤 급 스윙야더를 이용한 전목 수확작업지의 집재작업공정이 각각 0.34 m<sup>3</sup>/cycle, 0.26 m<sup>3</sup>/cycle이고, 집재작업 생산성이 각각 5.25 m<sup>3</sup>/hr(Kim and Park, 2012), 2.67 m<sup>3</sup>/hr(Cho et al., 2009)의 기존 연구보다 조사지의 조건이 다소 다르지만, 본 연구에서의 2중 무선 클램프 반송기를 이용한 굴삭기 기반 타워야더 연구결과의 생산성이 다소 높게 나타났다(Table 5).

이 결과는 여러 가지 조건이 다르므로 다소 차이가 있겠지만, 무클램프 반송기를 사용한 기존 연구결과보다 본 연구에서 2중 무선 클램프 반송기를 적용하여 반송기의 위치 조정 및 고정, 와이어의 풀림이 쉽고, 운전자가 반송기를 무선으로 제어할 수 있어 작업이 용이하고 작업범위가 넓은 관계로 집재작업 요소작업에서의 가로끌기, 가로집재, 초커 풀기 시간이 감소하여 작업생산성이

높게 나타난 것으로 사료되며, 이에 2중 무선 클램프 반송기를 적용한 집재작업이 효율적일 것으로 판단된다.

## 2. 집재작업 지연시간 분석

집재작업 작업지연시간을 분석한 결과는 Table 7과 같다. 인위적 지연은 휴식 1,758초, 작업자간 대화가 813초로 나타났고, 작업지연은 설치 및 해체시간 3,460초, 나무결림 2,730초, 와이어결림 1,230초, 작업대기 546초, 반송기 위치 조정 168초, 주변정리 159초로 나타났으며, 기계적 지연은 반송기 점검으로 지연시간이 1,145초로 나타났다(Table 7). 대부분 가선 설치 및 해체시간이 작업지연시간에 많은 비중을 차지하고 있다. Kim and Park(2012)는 모두베기 작업 대상지 하향집재에서 인터락 장치가 있는 스윙야더와 타워야더(RME-300T)를 이용한 런닝스카이라인방식의 설치 및 해체시간이 각각 최대집재거리가 90 m 및 140 m 일 때, 소요되는 시간은 3,870초 및 6,367초이었다. 이 기존 연구결과는 본 연구

Table 7. Distributions for delay time in yarding operation by tower-yarder.

|                       | Classification         | Time(sec) | Rate(%) |
|-----------------------|------------------------|-----------|---------|
| Personal delay time   | Rest                   | 1,758     | 14.6    |
|                       | Talking of work        | 813       | 6.8     |
|                       | Total                  | 2,571     | 21.4    |
| Working delay time    | Corridor change        | 3,460     | 28.8    |
|                       | Reposition of carriage | 168       | 1.4     |
|                       | Hang-up in timber      | 2,730     | 22.7    |
|                       | Hang-up in wire        | 1,230     | 10.2    |
|                       | Waiting                | 546       | 4.5     |
|                       | Clear landing area     | 159       | 1.3     |
|                       | Total                  | 8,293     | 69.1    |
| Mechanical delay time | Repair of carriage     | 1,145     | 9.5     |
|                       | Total                  | 1,145     | 9.5     |
| Total delay time      |                        | 12,009    | 100.0   |

에서 적용한 2중 클램프 반송기를 이용한 굴삭기 기반 타워야더가 최대집재거리 183.6 m 일 때, 동일한 런닝스 카이라인방식의 설치 및 해체시간 3,460초 보다 높은 것이다. 이는 사전에 가선설치용 견인줄(Straw line) 이용한 집재선을 선정 후 가선설치용 견인줄과 되돌림줄을 연결하여 가선 설치함으로써 작업자의 노동작업강도를 경감하고 작업이 더욱 효율적이기 때문에 가선 설치 시간이 단축된 것으로 사료된다.

### 3. 집재작업비용 분석

집재작업비용은 상기 집재작업비용 분석방법과 Table 8에 나타난 관련 인자를 사용하여 산출하였다. 집재작업비용을 산출한 결과는 Table 8에서 보듯이, 기계비용(84,974 won/hr)과 작업생산성(6.2 m<sup>3</sup>/hr)을 이용한 작업비용은 13,705 won/m<sup>3</sup>이다. 이 결과는 본 연구와 유사한 전목수확작업지에서의 하향집재를 통한 기존 연구(Kim and Park, 2013)의 작업비용 18,265 won/m<sup>3</sup>보다 낮게 나타났으며, 이는 모두베기 작업과 집재목 크기에 따른 결과로서 작업조건 등을 고려하여도 다소 낮은 집재작업비용이라고 판단된다. 또한, 기계이용률 변화에 따른 집재작업의 영향력을 분석하기 위해 집재순수작업생산성(m<sup>3</sup>/PMH)과 기계비용(won/hr)을 고정시키고, 기계이용률을 변화시켜 집재 전체작업생산성(m<sup>3</sup>/SMH)과 작업비용에 대한 민감도를 분석하였다(Figure 6). 집재작업에서 사전작업준비 및 작업숙련도에 따라 반송기 재위치, 목재 및 와이어 걸림, 반송기 수리작업 등의 지연시간이 감소되면 기계이용률이 최대 88.0 %로 증가하고, 작업비용은 9.7%를 절감될 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존 무클램프 반송기에서 성능

개선된 2중 무선 클램프 반송기를 적용한 새로운 집재작업을 적용함으로써 기계이용률이 80.4%로 높게 나타난 것으로 사료되며, 향후 작업적 및 기계적 지연시간을 단축하면 작업생산성 및 작업비용이 더욱 향상되고 절감될 것으로 판단된다.

### 4. 집재작업에 따른 최소작업량 및 최소작업면적 분석

집재작업에 따른 최소작업량 및 최소작업면적 분석은 투입비용(고정비, 변동비)과 수입을 구분하여 검토하였다. 투입비용의 고정비는 11,270,833 won(임목계약 금액 9,870,833 won(1.15 ha 기준) + 장비 운송비용 1,400,000 won)이고, 변동비는 전목수확작업시스템의 총 작업비용 44,713 won/m<sup>3</sup>이다(Table 9). 수입은 Table 10에서 제시한 주요 수종 2종(리기다소나무, 신갈나무)의 등급에 따른 원목매각단가와 원목재적을 변화시켜 검토하였다. 또한 원목을 매각 시 발생하는 종합소득세의 경우 임목계약금액이 1억원 미만일 경우 발생되지 않으며, 조사지의 계획비용은 임목계약금액에 포함되어 있다.

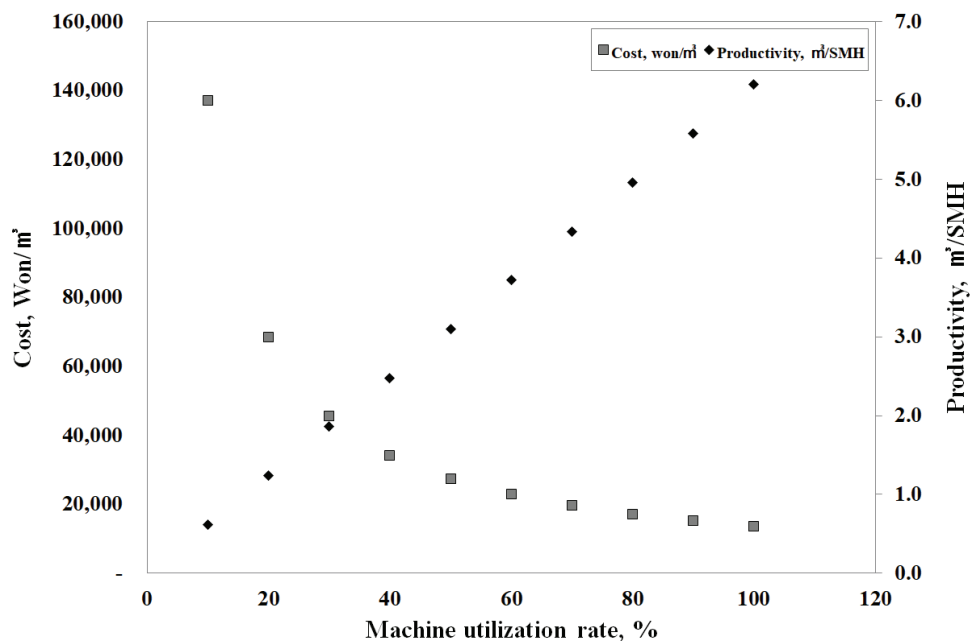
전목수확작업지에서 리기다소나무를 기준으로 손익분기점을 분석한 결과, 원목 등급에 따라 138.5~558.3 m<sup>3</sup>(1등급~원료재급)로 변화하는 것으로 나타났다(Figure 8). 이에 본 연구대상지의 임목축적 137.0 m<sup>3</sup>/ha와 원목매각 등급이 가장 낮은 원료재급을 기준으로 최소작업량과 최소작업면적이 각각 558.3 m<sup>3</sup>과 4.1 ha 이상에서 손익분기점이 발생하는 것으로 나타났다(Table 11). 또한, 활엽수종인 신갈나무 기준으로 원목등급별 손익분기점을 129.1~433.7 m<sup>3</sup>(1등급~원료재급)으로 변화하였다(Figure 9). 리기다소나무와 동일하게 원료재급 기준으로 최소작업량과 최소작업면적은 각각 433.7 m<sup>3</sup>, 3.2 ha 이상에서 손



**Table 8. Cost factors and assumptions used for yarding cost analysis(Woo et al., 1990).**

| Cost factor  |                                    | Yarding machines         |                                  |
|--|------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
|  |                                    | Base machine (Excavator) | Tower yarder (Included carriage) |
| Price (won)  | (P)                                | 54,000,000               | 71,700,000                       |
| Endurance period (years)                                 | (N)                                | 7                        | 7                                |
| Economic life (hour)                                     | (H)                                | 14,000                   | 9,744                            |
| Annual operation time <sup>a</sup> (hour)                | (J)                                | 1,392                    | 1,392                            |
| Fuel(diesel) consumption (liter/hour)                    | won/liter                          | 16.0                     | -                                |
| Coefficient of repair and maintenance                    | (r)                                | 0.8                      | 0.7                              |
| Coefficient of lube oil                                  | -                                  | 0.4                      | 0.4                              |
| Interest rate (%/year)                                   | (i)                                | 10                       | 10                               |
| Depreciation (won/hour)                                  | P/H                                | 3,857                    | 7,358                            |
| Interest expense (won/hour)                              | $0.5 \cdot P \cdot i \cdot 0.01/J$ | 1,940                    | 2,575                            |
| Costs of repair and maintenance (won/hour)               | $P/H \cdot r$                      | 3,086                    | 5,151                            |
| Fuel(diesel) cost (won/hour)                             | $won/liter \cdot 10 \cdot (1+0.1)$ | 15,252                   | -                                |
| Other cost (won/hour) (Insurance, storage fee etc.)      | won/year                           | 540                      | 1,104                            |
| Labor cost (won/hour) (50% Inclusion incidental expense) | won/year                           | 44,111                   | -                                |
| Total machine cost (won/hour) (Inclusion labor cost)     | -                                  | 68,786                   | 16,188                           |
| Productivity (m <sup>3</sup> /hour)                      | -                                  | -                        | 6.2                              |
| Yarding cost (won/m <sup>3</sup> )                       | -                                  | -                        | 13,705                           |

<sup>a</sup> Korea Forest Service(2012), Forestry mechanization promotion - Number of working days for forestry machines (174 day × 8 hour = 1,392 hour).



**Figure 6. Sensitivity analysis of machine utilization rate on yarding productivity and operational cost.**

**Table 9. Analysis on productivity and cost in whole-tree harvesting system (Oh et al., 2017).**

| items                                     | Felling<br>(Chain saw) | Yarding<br>(Tower-yarder) | Limbing and<br>bucking<br>(Processor) | Loading and<br>forwarding<br>(Wood-grapple<br>and forwarder) | Loading and<br>transportation<br>(Wood-grapple and<br>cargo truck) <sup>a</sup> | Total     |
|---|------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--|---|-----------|
| Productivity<br>(m <sup>3</sup> /man/day) | 104.0                  | 24.8                      | 154.9                                 | 93.6   | 71.1  | -         |
| Operation cost<br>(won/m <sup>3</sup> )   | 3,394                  | 13,705                    | 4,272                                 | 8,522  | 14,820  | 44,713    |
| Transportation cost<br>(won/one)          | -                      | 300,000                   | 500,000                               | 600,000  | -   | 1,400,000 |

<sup>a</sup> Transportation distance is 90 km (I-cheon-shi, Gyeonggi → A-san-shi, chungcheongnam-do)

**Table 10. Market prices of round wood by grade in 2015 (KOFPI, 2015).**

| Grade       | Market prices(won/m <sup>3</sup> ) |                          |
|-------------|------------------------------------|--------------------------|
|             | <i>Pinus rigida</i>                | <i>Quercus mongolica</i> |
| Special log | -                                  | -                        |
| Grade 1st   | 126,100                            | 132,000                  |
| Grade 2nd   | 120,500                            | 115,000                  |
| Grade 3rd   | 116,300                            | 85,300                   |
| Round log   | 88,300                             | -                        |
| Fuel log    | 64,900                             | 70,700                   |

**Table 11. Yarding operation production and area of brake-even point by species.**

| Grade       | Brake-even point                           |  |                              |  |                                 |                 |
|-------------|--|--|------------------------------|--|---------------------------------|-----------------|
|             | <i>Pinus rigida</i>                        |  |                              | <i>Quercus mongolica</i>                   |                                 |                 |
|             | Minimum<br>production<br>(m <sup>3</sup> ) | Minimum<br>yarding area <sup>a</sup><br>(ha) | Profit <sup>b</sup><br>(won) | Minimum<br>production<br>(m <sup>3</sup> ) | Minimum<br>yarding area<br>(ha) | Profit<br>(won) |
| Special log | -  | -  | -                            | -  | -                               | -               |
| Grade 1st   | 138.5                                      | 1.0  | 81,387                       | 129.1                                      | 0.9                             | 87,287          |
| Grade 2nd   | 148.7                                      | 1.1  | 75,787                       | 160.4                                      | 1.2                             | 70,287          |
| Grade 3rd   | 157.4                                      | 1.1  | 71,587                       | 277.7                                      | 2.0                             | 40,587          |
| Round log   | 258.6                                      | 1.9  | 43,587                       | -  | -                               | -               |
| Fuel log    | 558.3                                      | 4.1  | 20,187                       | 433.7                                      | 3.2                             | 25,987          |

<sup>a</sup> Minimum yarding area(ha) = minimum production(m<sup>3</sup>) / growing stock(m<sup>3</sup>/ha)

<sup>b</sup> Profit(won) = TC(won) - TI(won)

익분기점이 발생하는 것으로 나타났다(Table 11).

따라서, 분석된 결과를 바탕으로 다양한 작업현장에서 발생하는 투입비용, 수종 및 원목등급에 따른 수입, 목재 수확작업시스템 방법에 따른 최소작업량과 최소작업면

적을 예상하면 전목수확작업시스템에서 집재작업의 효율적인 집재기계 선정을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

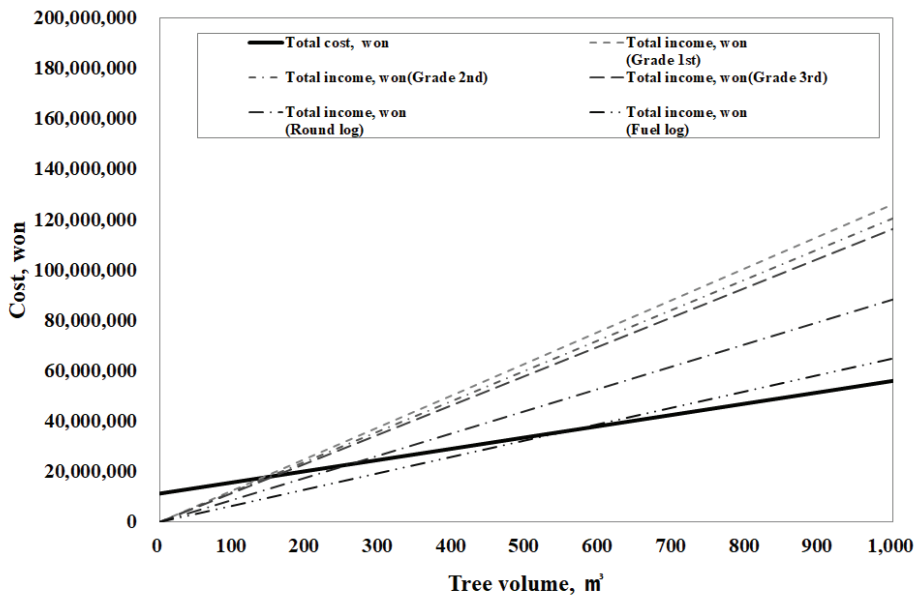


Figure 7. Break-even analysis of whole-tree harvesting system on *Pinus rigida* stand.

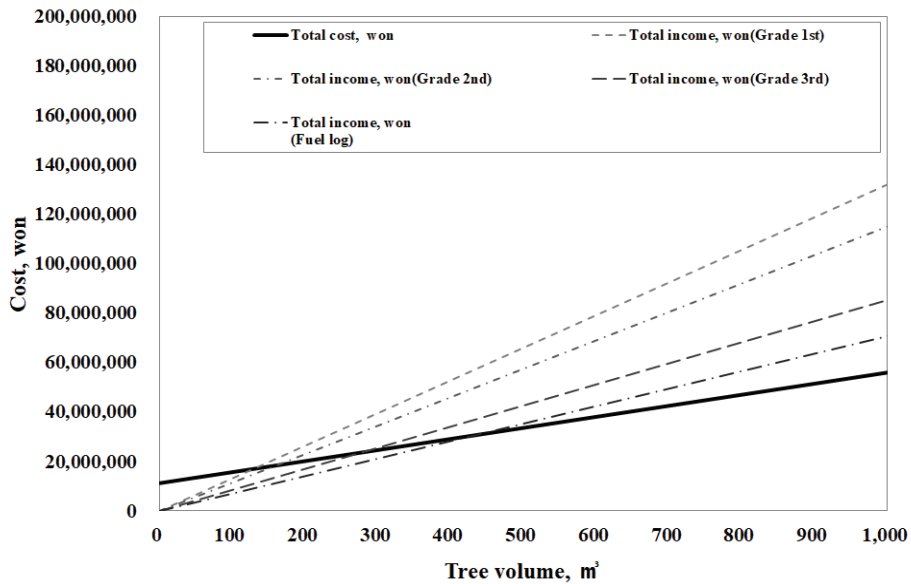


Figure 8. Break-even analysis of whole-tree harvesting system on *Quercus mongolica* stand.

### 결론

현재 우리나라에서는 대부분 굴삭기 우드그랩에 의한 중하산 집재작업인 단목집재작업에서 나타나는 과도한 작업로 개설과 굴삭기의 임지주행에 의한 임지훼손 등 환경적인 문제가 발생되고 있다. 따라서, 가선계 고성능 임업기계인 굴삭기 기반의 타워야더 및 2중 무선 클램프 반송기에 의한 전목집재작업시스템은 아직 도입 단계로 장비 수 및 작업자의 숙련 부족 등을 감안하면 향후 임지

훼손 방지와 효율적인 집재작업을 구축하기 위해 굴삭기 기반의 타워야더를 중심으로 한 전목집재작업시스템이 반드시 도입되어야 할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 2중 무선 클램프 반송기를 적용한 굴삭기 기반의 타워야더를 이용하여 집재작업 생산성 및 비용, 집재작업 생산재적의 변화에 따른 투입비용과 수입으로 손익분기점 및 최소작업량, 임목축적을 이용한 최소작업면적을 분석하였다. 집재작업의 생산성과 비용은 기존 무클램프 반송기에서 2중 클램프 반송기를 적용

함으로써 작업인원 감소와 작업이 용이한 것으로 나타났다. 또한, 집재작업지연시간 분석을 통해 사전작업준비 및 작업의 숙련도에 따라 반송기 재위치, 목재 및 와이어 걸림, 반송기 수리작업 등의 작업지연시간이 감소하면 기계이용률이 증가하여 작업생산성 향상과 비용 절감으로 집재작업이 효율적일 것으로 판단되었다. 또한, 집재작업 생산재적의 변화에 따른 손익분기점 및 최소작업량과 임목축적을 이용한 최소작업면적 분석을 통해 굴삭기 기반 타워야더의 적용 가능성을 확인하였다. 향후, 다양한 작업현장에서 발생하는 투입비용, 수종 및 원목등급에 따른 수입, 목재수확작업시스템 방법에 따른 최소작업량과 최소작업면적에 대한 데이터가 축적되면, 전목수확작업시스템에서 집재작업의 효율적인 집재기계를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- Ahn, J.M., Woo, J.C., Yoon, H.W., Lee, D.S., Lee, S.h., Lee, Y.J., Lee, W.K. and Lim, Y.J. 2007. Forest management, Hyangmunsa, Seoul. pp. 331.
- 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.
- Bruce, T., Giovanna, O.A. and Karl, S. 2014. Productivity Analysis of an Un-Guyed Integrated Yarder-Processor with Running Skyline. Croatian Journal of Forest Engineering 35(2): 201-209.
- Bruce, T., Karl, S., and Rien, V. 2015. Machine function integration and its effect on the performance of a timber yarding and processing operation. Biosystem Engineering 135: 10-20.
- Cho, K.H., Oh, J.H., Song, T.Y., Kim, J.W., Han, W.S., Cho, D.S. and Park, S.J. 2009. Efficient Logging Operations by Swing-Yarder(1). Proceedings of the 2009 Summer Meeting of the Korean Forest Society. pp. 310-312.
- Construction Association of Korea. 2015. Report on the actual condition of construction industry wage in the second half of 2015. pp. 17.
- 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 Forest Society 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 Forest Society 102(2): 229-238.
- Korea Forest Service (KFS). 2012. Forestry mechanization promotion. Korea Forest Service. pp. 24.
- Korea Forest Service (KFS). 2017a. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service. pp. 39.
- Korea Forest Service (KFS). 2017b. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service. pp. 286.
- Korea Forest Service (KFS). 2017c. Development of low cost production and supply technology for increasing Logging residue and non-commercial thinning log utilization. Forest Science Technology R&D Report. Daejeon, KOREA. pp. 98.
- Korea Forestry Promotion Institute. 2015. The Domestic Timber Market Price Trends. Korea Forestry Promotion Institute. pp. 17-33.
- Korea National Oil Corporation. 2015. Domestic oil prices. <http://www.knoc.co.kr/> (2005. 08. 10)
- Lee, G.T. and Park, S.J. 2001. Development of eco-friendly timber harvesting model and study on process investigation. National Forestry Cooperative Federation. pp. 114.
- Lee, G.T. and Park, S.J. 2003. Eco-friendly tree harvesting model development and process research project. National Forestry Cooperative Federation. pp. 86.
- Lee, G.T. and Park, S.J. 2002. Eco-friendly tree harvesting model development and process research project. National Forestry Cooperative Federation. pp. 89.
- Lee, J.A. 2013. Productivity and cost analysis of whole-tree harvesting system using swing-yarder. (Dissertation). Chun-choen, Kangwon National University.
- 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.
- Oh, J.H., Choi, Y.S., Kim, D.H., Paik, S.H., Mun, H.S., Cho, M.J., Jung, M.S., Jung, D.H. and Ji, B.Y. 2017. Cost-Effective Production and Utilization of Residual Forest Biomass for Small Scaled Residential Heating. National Institute of Forest Science. Seoul, KOREA. pp. 150.
- 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.

Manuscript Received : April 3, 2018

First Revision : June 19, 2018

Second Revision : July 26, 2018

Accepted : July 27, 2018