

타워야더를 이용한 전간집재작업의 생산성 및 비용과 적정 노망밀도 분석

김민규* · 백승안 · 조구현 · 정도현

국립산림과학원 산림생산기술연구소

Productivity, Cost, and Optimal Forest Road Network Density of Tree-length Yarding Operations with Tower Yarder

Min-Kyu Kim*, Seung-An Baek, Koo-Hyun Cho and Do-Hyun Jung

Forest Practice Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11187, Korea

요약: 본 연구는 우리나라에 도입된 오스트리아 Koller사의 K301-4와 우리나라에서 개발된 HAM300 타워야더의 전간집재작업에 대해서 작업시간을 측정하고, 작업생산성, 작업비용, 최적노망밀도에 대한 분석을 실시하였다. 최대집재거리가 길어질수록 생산성은 감소되지만 K301-4와 HAM300을 비교하였을 때, 최대집재거리가 34 m 보다 길어질수록 K301-4의 생산성이 높았으며, 1회당 집재재적이 커질수록 양측의 차이는 커지는 것을 확인하였다. K301-4는 HAM300에 비해서 기계가격이 높고, 타워야더의 설치 및 철거 소요시간이 더 커지므로 HAM300이 작업비용 측면에서 효율적으로 나타났다. 타워야더를 도입하여 작업비용을 절감하기 위해서는 장기간에 걸쳐 임내노망을 반복적으로 사용하고 1회당 집재재적을 늘리는 것이 유리하다고 판단된다.

Abstract: The productivity, cost, and optimal forest road network density for tree-length yarding with K301-4 and HAM300 tower yarders were analyzed. The results showed that productivity decreased as the yarding distance increased. The productivity of the K301-4 was greater than that of the HAM300 as the maximum yarding distance was longer than 34 m. This difference increased as the load volume increased. As the K301-4 yarder had a higher purchase price and it took more time to set up compared to the HAM300, the HAM300 was cost effective. Therefore, in order to introduce tower yarders to reduce operational cost, it is effective to increase the load volume during operations and to utilize the road network repeatedly for a long period.

Key words: tower yarder, yarding operation, productivity, operational cost, optimal forest road density

서론

우리나라의 산림면적은 국토의 63%를 차지하고 있으며, 벌기령을 맞이한 IV영급 이상의 임목이 전체 산림의 69%를 차지하고 있다. 목재생산 시기에 접어든 산림이 증가하고 있는 반면 노령화에 따른 탄소흡수량 저하 문제가 대두되고 있다. 우리나라의 전체 목재자급률은 2016년 기준으로 16.1%로써, 국산목재 생산량이 수요량에 크게 미치지 못하는 실정이며, 탄소흡수량 증진을 위한 영급구조 개선이 필요한 시기이다. 이를 위해서는 경제림육성단지를 중심으로 산림 인프라를 집중 투자하여

목재생산 확대, 탄소경영 실현 등 산림기능의 극대화가 필요하다(Korea Forest Service, 2017).

한편, 입목취득세 폐지(2%에서 0%) 및 벌기령 완화(낙엽송 40년에서 30년, 참나무류 50년에서 25년 등)로 인하여 사유림 목재생산량이 확대되고 있는 상황이다(Korea Forest Service, 2017). 목재생산을 위해서는 다양한 임업기계와 작업시스템을 적용할 수 있으나, 현재 우리나라에서는 생산성 및 작업비용과 임업기계 도입 등의 이유로 체인톱에 의한 벌목 및 조재 작업, 굴삭기 우드그랩에 의한 수집작업, 임내차 및 트럭에 의한 소운재 및 운재가 가장 널리 적용되고 있다. 그러나, 굴삭기 우드그랩에 의한 수집작업은 숲아베기 지역과 급경사 지역에서는 작업에 어려움이 있으며, 하향집재는 가능하나 상향집재는

* Corresponding author
E-mail: minkyukim@korea.kr

어렵고, 단목집재는 가능하나 전간 또는 전목집재에 어려움이 있기 때문에 고품질의 대경재생산에 제한이 있다. 또한, 임지내 토양교란과 침식 등 환경성의 문제도 제기되고 있는 실정이다(Kim and Park, 2012). 이러한 굴삭기 우드그랩에 의한 수집작업의 단점을 보완할 수 있는 것이 가선계 집재작업이며, 그 중 타워야더 및 트랙터 부착형 집재기는 급준하고 복잡한 산림지형에 가장 효율적인 가선계 집재기계이다. 특히, 간벌작업이나 대경재 및 전목집재에도 적용이 가능하며, 이러한 집재기계를 사용하기 위해서는 임도개설이 필요하다.

우리나라에서는 Woo et al.(1990)이 케이블클레인을 이용한 집재작업의 경제성에 관한 연구를 실시하였으며, Chung(1993)과 Chung and Chung(1994)이 가선집재시스템의 역학분석에 대한 연구를 실시하였다. Park(1997)은 작업량에 따른 적정 집재기계의 선정에 관한 연구를 실시하였고, Park(2002a; 2002b; 2004a; 2004b), Park and Ham(2002), Han et al.(2008) 등은 굴삭기형 타워집재기 및 원목집계톱 개발과 트랙터부착 집재기 및 타워야더에 의한 집재작업시스템의 작업능률 및 비용 등에 대해서 연구하였으며, Oh et al.(2006)은 자주식 반송기를 이용한 가선집재작업의 안정성에 대해서 분석하였다. Kim and Park(2010)은 숲가꾸기 작업에서 인력과 기계에 의한 집재작업에서 공정 및 비용에 대해서 비교분석을 실시하였으며, Kim and Park(2012; 2013)은 타워야더 및 스윙야더를 중심으로 한 전목 집재작업시스템과 굴삭기 그래플(굴삭기 우드그랩)을 중심으로 한 단목 집재작업시스템에 대해서 작업시간, 공정, 비용을 비교분석하였다. Han et al.(2014)는 타워야더, 트랙터부착형 집재기, 트랙터 원치의 가선집재작업에서의 작업 생산성 및 비용을 분석하였으며, Mun et al.(2014; 2015)은 산림바이오매스 이용을 위한 산림작업에서 벌목 및 조재와 집재, 소운재, 파쇄작업시스템의 작업시간과 생산성, 비용 분석을 실시하였다. Cho et al.(2014; 2016)와 Cho et al.(2015)은 타워야더에 의한 전간 및 전목 수확시스템에 대한 생산성 및 비용에 대해서 분석을 실시하였다. 그리고 Seol et al.(2016)은 국내 벌채현장에서 가장 많이 활용되고 있는 우드그랩에 의한 단목집재작업과 Swing yarder 및 Tower yarder에 의한 전목집재작업의 경제적 효율성을 비교분석하였다. 이와 같이, 우리나라에서 가선계 집재에 관한 많은 연구가 실시되어 왔으나, 임업기계를 이용하기 위해서 필요한 임도와 그 적정밀도에 대해서 분석한 연구는 Cha and Cho(1994)의 기계화 집재작업을 위한 노망정비에 관한 연구와 Kwon and Park(2013)의 GIS를 이용한 집재작업 가능구역 분석 및 노망배치를 위한 기법 작성에 관한 연구 이외에는 부족한 실정이다.

Table 1. Description of study sites.

Classification	Contents
Area (ha)	3.0
Type	Coniferous forest
Species	<i>Larix kaempferi</i>
Age (years)	51
Average slope (degree)	20
Average height (m)	23
Average DBH (cm)	34

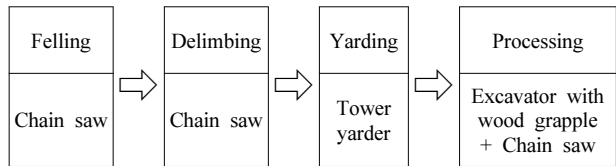


Figure 1. Schematic of the harvesting system.

본 연구에서는 현재 우리나라에서 실시되고 있는 타워야더에 의한 집재작업에 대해서 작업생산성 및 비용을 분석하고, 각 집재작업에 필요한 노망밀도를 산출하여 효율적인 임목수확작업시스템 구축을 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

조사 및 방법

1. 조사지의 개요

조사지는 낙엽송 VI영급 모두베기 작업지로 강원도 평창군 방림면 운교리 11임반 1소반에 위치하고 있다 (Table 1). 또한 K301-4에 의한 집재작업의 경우, 평균집재거리는 97 m, 최대집재거리는 231 m, 최소집재거리는 12 m이었으며, HAM300에 의한 집재작업의 경우 각각 85 m, 139 m, 9 m로 측정되었다.

2. 조사에 사용된 작업시스템 및 타워야더의 개요

본 연구에서 사용된 임목수확작업시스템은 Figure 1과 같이 체인톱에 의한 벌목작업을 실시하고, 전간집재를 위해 가지제거 작업을 실시한 후 타워야더(이하 K301-4, HAM300)에 의한 상향집재작업을 실시하였다. 그 후 굴삭기 우드그랩과 체인톱에 의한 조재작업을 실시하였다. 또한, 조사에 사용된 타워야더 K301-4 및 HAM300의 작업사진 및 제원은 Figure 2 및 Table 2와 같다.

3. 조사방법

조사방법은 스톱워치를 이용하여 집재작업시간을 측정하고, 각 요소작업별로 분류하여 작업생산성 및 비용 분



Figure 2. K301-4 and HAM300.

Table 2. Specifications of the tower yarder used in study.

Classification	K301-4	HAM300
Machine weight (kg) (Not including line)	-	1,850
Full length (mm)	-	1,400
Full width (mm)	-	680
Total height (mm)	-	2.6
Height of tower (m)	8.4	7.3
Engine power (ps)	133	-
Pulling capacity (kgf)	2,600	2,400
Maximum speed of carriage (m/sec)	7.5	4.17
Maximum yarding distance (m)	300	300

석을 실시하였다. 요소작업은 타워야더의 「반송기 보내기」, 초커맨의 「와이어끌기」, 「초커설치」, 「이동 및 대피」, 타워야더의 「가로집재」, 「집재」, 오퍼레이터의 「초커풀기」와 같이 7종으로 분류하였다.

그리고 임목수확작업을 실시하기 전에 해당 조사지에 대한 매목조사를 실시하여 평균수고 및 평균흉고직경을 측정하였으며, 평균경사도를 측정하였다(Table 1). 또한, 집재작업 시 집재거리 및 가로집재거리를 측정하였다. 평균흉고직경 측정에는 윤척을 사용하였으며, 수고, 경사도, 집재거리, 가로집재거리 측정에는 레이저 거리측정기(Nikon사 Forestry Pro)를 이용하였다.

4. 분석방법

1) 사이클타임

본 조사지와 같이 벌구가 도로나 토장에 접해 있고, 집재거리가 0(m)에서 최대집재거리 L (m)까지 균등하게 집

재되는 경우, 집재작업의 평균 사이클타임(sec/cycle)은 다음 식 1과 같이 표현하는 것이 가능하다(Sakai, 1987). 단, 노망과 타워야더 및 트랙터 부착형 집재기의 기동성을 살려, 수고 이상의 긴 가로집재는 실시하지 않는 것으로 한다. 또한, 반송기의 속도는 집재작업 시 측정된 값을 이용하여 산출하였으며, 반송기의 이동거리를 이동시간으로 나누어 산출한 평균값이다.

$$C_y(L) = L(1/v_1 + 1/v_2)/2 + T_{LU} \quad (1)$$

단, $C_y(L)$: 최대집재거리 L (m)에 대한 집재작업의 평균 사이클타임(sec/cycle), L : 평균 사이클타임 산출 시의 최대집재거리(m/cycle), 본 연구에서는 L 의 상한을 300 m로 한다. v_1 : 반송기 보내기 작업에서 반송기 속도(m/sec), v_2 : 집재작업에서 반송기 속도(m/sec), T_{LU} : 집재 1사이클당 와이어끌기, 초커설치, 이동 및 대피, 가로집재, 초커풀기의 평균시간(sec/cycle).

2) 생산성

평균 사이클타임(sec/cycle)과 1일당 실동시간(hr/day)을 이용하여 1일당 사이클 횟수를 산출하여, 여기에 1사이클당 집재재적을 곱하여 1일당 생산성을 예측하는 것으로 한다. 최대집재거리 L (m)에 대해서, 생산성(m^3/day) $P(L)$ 은 다음의 식 2와 같다.

$$P(L) = (60 \times 60 \times H / C_y(L)) \times V_t \quad (2)$$

단, H : 1일당 실동시간(hr/day), V_t : 1사이클당 평균 집재재적($m^3/cycle$), v_2 는 V_t 에 영향을 받지 않는 것으로 하고, 선행 연구(Nakazawa et al., 2012)에 따라 사이클타임과 집재재적간의 명확한 관계가 없는 것으로 한다.

3) 작업비용

작업비용은 기계비용과 가선 설치 및 철거비용, 임도개설비용으로 구성되며, 작업비용(won/ m^3)은 기계비용(won/day)의 합계를 위 식 2에서 구한 생산성으로 나누면 단위재적당 단가로 나타내는 것이 가능하다. 본 연구에서는 가선 설치 및 철거비용과 임도개설비용도 함께 고려하여 단위재적당 단가로 나타낸다.

(1) 기계비용

기계비용은 식 3과 같이 고정비, 운영비, 노무비로 구분되며, 고정비는 기계의 작동 여부와 관계없이 소요되는 비용으로 감가상각비, 이자, 보험, 세금이 포함되며, 운영비는 기계가 작동 할 때 소요되는 비용으로, 연료비,

Table 3. Values used for calculation of yarding cost.

Cost factor	Unit	K301-4	HAM300
Purchase price	won	300,000,000	92,000,000
Economic lives	years	7	7
Salvage value	%	10	10
Scheduled operating time	hr/year	600	600
Annual interest rate	%	15	15
Repair and maintenance	%	100	100
Oil price	won/L	1,289	1,289
Coefficient of lubricant	%	37	37
Fuel consumption	L/hr	7.5	5.8
Daily wage of operator*	won/day	148,613	148,613
Daily wage of ground crew*	won/day	102,628	102,628

*Daily wage is based on 8 hours.

윤활유비 등이 포함된다. 기계비용은 연간 기계이용시간을 고려한 계산법을 이용하여 산출하였다. 기계비용 산출에 사용된 인자는 선행연구를 참고로 하였으며 Table 3과 같다(Cho et al., 2015; Cho et al., 2016).

$$\text{기계비용} = \text{고정비} + \text{운영비} + \text{노무비} \quad (3)$$

고정비는 다음 식 4와 같으며,

$$\text{고정비} = \text{감가상각비} + \text{이자} + \text{보험} + \text{세금} \quad (4)$$

감가상각비는 다음 식 5와 같다.

$$D = \frac{P - S}{N} \quad (5)$$

단, D : 기계의 감가상각비, P : 기계 구입비, S : 기계의 잔존가치, N : 기계의 수명

이자는 연간 투자 평균 가치 AVI (Average value of yearly investment)에 의해 구할 수 있으며 다음 식 6과 같다(Miyata, 1980).

$$AVI = \frac{(P - S) \times (N + 1)}{2N} + S \quad (6)$$

따라서 매년 이자로 소용되는 비용은 $AVI \times \text{이자율}(\%)$ 이며, 보험료는 $AVI \times \text{보험률}(\%)$, 세금은 $AVI \times \text{세율}(\%)$ 로 산출이 가능하다.

운영비는 다음 식 7과 같으며,

$$\text{운영비} = \text{연료비} + \text{윤활유비} + \text{수리유지비} \quad (7)$$

노무비는 다음 식 8과 같다.

$$\text{노무비} = \text{직접노무비} + \text{간접노무비} + \text{보험료} \quad (8)$$

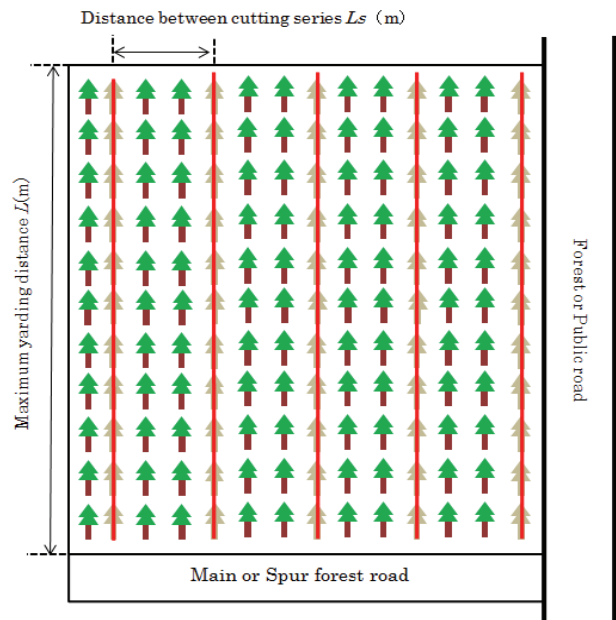


Figure 3. Line-thinning setting model.

단, 직접노무비 : 2017년 상반기 적용 시중노임단가의 건설기계운전자, 보통인부(Construction Association of Korea, 2017), 간접노무비 : 직접노무비의 11.6% (Public Procurement Service, 2017), 산재보험료 : 직접노무비+간접노무비의 9.0% (Ministry of Employment and Labor, 2017), 고용보험료 : 노무비의 0.85% (Ministry of Government Legislation, 2017).

(2) 가선 설치 및 철거비용

가선설치는 Figure 3과 같이 벌구가 도로에 접해있는 것으로 하고, 최대집재거리 $L(m)$ 에 대해서 가선 1줄당 집재면적을 최대집재거리와 벌구폭(본 연구에서는 벌채 열간 거리로 한다)에 근거하여 산출하고, 집재 재적당 가

Table 4. The results observed in yarding operation(1).

	Classification	K301-4	HAM300
Observed value	The number of yarding (times)	259	173
	The number of timber yarded (tree)	282.5	194.5
	The volume of timber yarded (m ³)	291.0	200.3
	Yarding time (sec)	81,989	62,910
	Number of workers (man)	4	4
Average per times	The volume of timber yarded (m ³ /times)	1.12	1.16
	Yarding time (sec/times)	316.56	363.64
Average per hour	The number of yarding (times/hour)	11.37	9.90
	The volume of timber yarded (m ³ /hour)	11.71	10.20
Average per day**	The number of yarding (times/day)	68.23	59.40
	The volume of timber yarded (m ³ /day)	70.28	61.18
Average per man·day**	The number of yarding (times/man·day)	17.06	14.85
	The volume of timber yarded (m ³ /man·day)	17.57	15.30

**Productive time per day is 6 hours.

선 설치 및 철거비용 $Csd(L)$ (won/m³)을 다음 식 9에 의해 산출한다.

$$Csd(L) = ((L \cdot (\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4}) + Ts) + (L \cdot (\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4}) + Td)) \cdot \frac{Cd}{\frac{Vh \cdot Ls \cdot L}{10000}} \quad (9)$$

단, v_3, v_4 : 작업원이 타워야더에서 선주까지 갈 때와 올 때의 이동보행속도(m/sec), Ts : 설치 시간(sec), Td : 철거 시간(sec), Cd : 가선 설치 및 철거 작업원의 노무비(won/hr), Vh : ha당 집재재적 (m³/ha), Ls : 벌채열간 거리(m).

본 연구에서는 가선 설치 및 철거 작업원을 총 4명(오퍼레이터 1명, 초커맨 3명)으로 하고 Cd (won/hr)는 Table 3의 2017년 상반기 적용 시중노임단가의 건설기계운전사, 보통인부(Construction Association of Korea, 2017)를 참고로 하여, 식 10에 의해 가선 설치 및 철거 작업원의 노무비 Cd 를 57,062 won/hr으로 한다.

$$Cd(\text{won/hr}) = ((\text{오퍼레이터 노무비} \times 1) + (\text{초커맨 노무비} \times 3)) / 8 \quad (10)$$

본론에서는 작업시간 관측에 근거하여 작업 생산성을 분석하였지만, 임분조건은 선행연구(Eastern Regional Office of Forest Service, 2009)를 근거로 IV영급 낙엽송림으로 상정하여 ha당 재적을 150 m³/ha로 하고, 1열을 베고 2열을 존치시키는 1벌 2존 열상간벌을 상정하여 K301-4와 HAM300의 작업조건을 동일하게 하여 양쪽을 비교하고 (Figure 3), Vh 를 50 m³/ha (150 m³/ha의 3분의 1), ha당 입목본수를 289본/ha로 하여 Ls 를 17.6 m로 설정하였다. 또한 Figure 3의 도로에 대해 양방향 집재를 실시하는 것

으로 한다. 그리고 주벌수확을 맞이한 소면적 모두베기에 적용을 상정하여 벌구면적을 $Ls \times$ 최대집재거리로 하면 식 9를 적용하는 것이 가능하다.

(3) 임도개설비용

Figure 3의 벌구 모델에서, 임도 개설효과를 높이기 위해 임도를 개설하면서 도로를 따라 타워야더로 순차적으로 열상간벌 또는 모두베기 지역을 대상으로 집재작업을 실시하는 경우를 상정한다.

이 때, 1라인의 가선에 대해서, 임도개설량은 Figure 3에 의해 Ls (m)가 되며, 단위재적당 임도개설비용 $P_{FRC}(L)$ (won/m³)는 식 11과 같다.

$$P_{FRC}(L) = \frac{10000 \cdot r \cdot Ls}{Vh \cdot Ls \cdot 2L} \quad (11)$$

단, r : 임도개설단가(won/m)

결과 및 고찰

1. 작업 생산성

본 연구에서 사용된 타워야더에 의한 집재작업에서 관측한 결과는 Table 4와 Table 5와 같다. Table 4에서 K301-4에 의한 집재작업을 관측한 결과, 총 사이클 횟수는 259 cycle, 집재본수는 282.5본, 집재재적은 291 m³이다. 1사이클당 평균 집재재적은 1.12 m³/cycle, 평균 사이클타임은 316.56 sec/cycle이다. 또한, HAM300에 의한 집재작업을 관측한 결과, 총 사이클 횟수는 173 cycle, 집

Table 5. The results observed in yarding operation (2).

Classification		K301-4	HAM300
Carriage out	sec/cycle	31.2	25.5
Lateral wire traction	sec/cycle	74.3	62.7
Choking	sec/cycle	39.0	30.2
Moving and withdrawing	sec/cycle	17.5	17.5
Lateral yarding	sec/cycle	34.9	44.2
Yarding	sec/cycle	58.9	84.1
Unhooking	sec/cycle	58.6	63.5
T_{LU}	sec/cycle	224.2	218.1
T_s	sec/times	7,200	5,400
T_d	sec/times	3,600	3,600
v_1	m/sec	3.16	3.18
v_2	m/sec	1.52	0.98
v_3	m/sec	0.3	0.3
v_4	m/sec	0.3	0.3

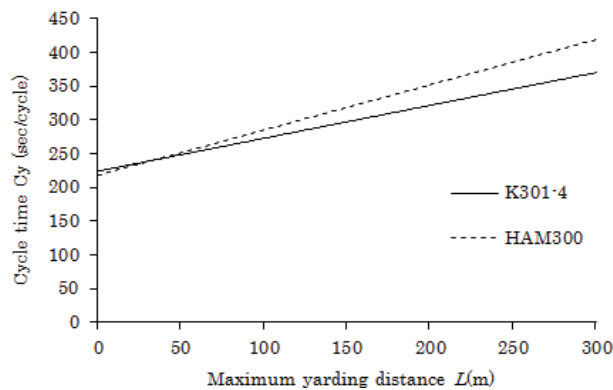


Figure 4. Relationships between maximum yarding distance and cycle time.

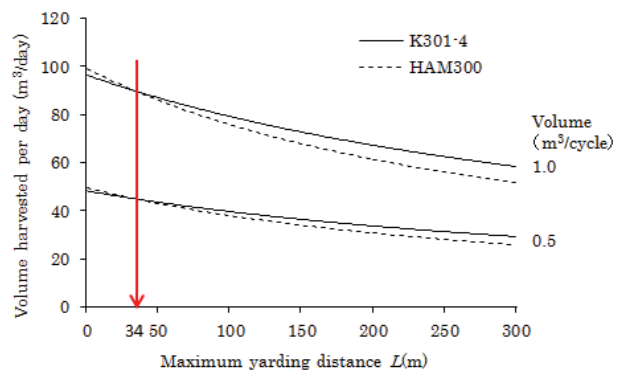


Figure 5. Relationships between maximum yarding distance and productivity.

재본수는 194.5본, 집재재적은 200 m³이다. 1사이클당 평균 집재재적은 1.16 m³/cycle, 평균 사이클타임은 363.64 sec/cycle이다.

Table 5에서 K301-4의 반송기 보내기 평균속도는 3.16 m/sec, 집재 평균속도는 1.52 m/sec로 관측되었으며, HAM300의 경우는 각각 3.18 m/sec, 0.98 m/sec로 관측되었다. 이 결과는 Table 2의 K301-4의 반송기 최대속도 7.5 m/sec 및 HAM300의 반송기 최대속도 4.17 m/sec와는 큰 차이가 있었다. 그 이유로서, 최대주행속도는 정상상태의 구간속도이고, 실제로는 반송기가 움직이기 시작할 때부터 정지할 때까지의 가속 및 감속 구간이 있기 때문이라고 사료된다.

Table 5의 관측치를 식 1에 대입하면 K301-4 및 HAM300의 평균 사이클타임 $Cy_K(L)$ 및 $Cy_H(L)$ (sec/cycle)는 각각 식 12와 13과 같이 되며, Figure 4와 같은 결과를

얻을 수 있고, 최대집재거리와 사이클타임과의 관계를 구할 수 있다.

$$Cy_K(L) = L \left(\frac{1}{3.16} + \frac{1}{1.52} \right) / 2 + 224.2 \quad (12)$$

$$Cy_H(L) = L \left(\frac{1}{3.18} + \frac{1}{0.98} \right) / 2 + 218.1 \quad (13)$$

여기에서, 1사이클당 평균 집재재적을 열상간별의 경우는 0.5 m³/cycle로 설정하고, 소면적 모두베기의 경우는 이번 조사지의 결과와 유의한 1.0 m³/cycle로 설정하여 분석을 실시하였다.

식 2에 의해 1일 실동시간을 6시간으로 한 경우의 작업 생산성(m³/day)을 각각 산출한 결과, Figure 5와 같은 결과가 나타났다. 단, 와이어끌기, 초커설치 등의 시간

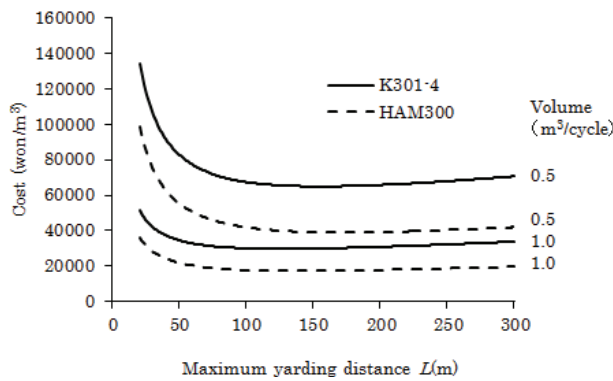


Figure 6. The sum of yarding cost and the rigging and dismantling cost.

$T_{LL}(\text{sec/cycle})$ 는 관측결과에 의해 Table 5와 같다. 최대집재거리가 길수록 작업생산성은 떨어지지만 K301-4와 HAM300을 비교하였을 때, 집재거리가 34 m 이상인 경우 K301-4의 작업생산성이 HAM300 보다 높아지는 결과가 나타났다. 또한, 집재재적이 클수록 양측의 차이는 커지는 결과가 나타났다.

2. 작업 비용

1) 가선 설치 및 철거비용을 포함한 작업비용

Table 5의 가선 설치 및 철거 작업시간의 관측치를 식 9에 대입하여, Figure 3의 벌구 모델에서 열상간별 작업을 상정하고 $Vh=50 \text{ m}^3/\text{ha}$ 로 산출하면, 최대집재거리 $L(\text{m})$ 에 대해서 K301-4의 가선 설치 및 철거비용 $Csd(K)$ (won/m^3)와 HAM300의 가선 설치 및 철거비용 $Csd(H)$ (won/m^3)은 각각 식 14와 15로 나타난다.

$$Csd(K)(L) = 1945295.5/L + 2402.8 \quad (14)$$

$$Csd(H)(L) = 1621079.5/L + 2402.8 \quad (15)$$

또한, 소면적 모두베기의 경우, $Vh=150 \text{ m}^3/\text{ha}$ 로 산출하면 식 16과 17로 나타난다.

$$Csd(K)(L) = 648431.8/L + 800.9 \quad (16)$$

$$Csd(H)(L) = 540359.8/L + 800.9 \quad (17)$$

최대집재거리 $L(\text{m})$ 에 대해서, Figure 5의 작업생산성에 근거한 집재작업비용(won/m^3)과 가선 설치 및 철거비용(won/m^3)의 합계는 Figure 6과 같이 나타났다. 모두베기의 집재량이 많기 때문에, 가선 설치 및 철거비용을 포함한 비용은 열상간별의 약 절반인 것을 확인할 수 있다. 또한, 열상간별($Vh=50 \text{ m}^3/\text{ha}$, 1사이클당 집재재적 0.5

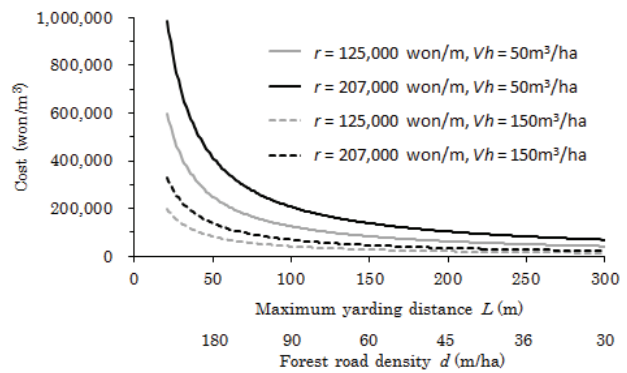


Figure 7. Relationships between maximum yarding distance and forest road construction cost.

m^3/cycle)인 경우, K301-4와 HAM300의 최소작업비용은 각각 $65,000 \text{ won}/\text{m}^3$, $39,030 \text{ won}/\text{m}^3$ 이며, 그때의 최대집재거리 L 은 155 m, 172 m로 나타났다. 그리고 소면적 모두베기($Vh=150 \text{ m}^3/\text{ha}$, 1사이클당 집재재적 $1.0 \text{ m}^3/\text{cycle}$)의 경우, K301-4와 HAM300의 최소작업비용은 각각 $29,790 \text{ won}/\text{m}^3$, $17,390 \text{ won}/\text{m}^3$ 이며, 그때의 최대집재거리 L 은 126 m, 141 m로 나타났다.

2) 임도개설비용

임도개설비용을 구하기 위한 상기의 식 11에서 r 은 개설비용과 유지관리비용으로 구성되는 것으로 하고, 사업 중 개설비용의 부담을 중시해야 하는 경우는 개설비용의 비중이 커지며, 임도가 장기간에 걸쳐 반복 이용되는 경우는 개설비용의 비중이 작아진다(Sakai, 1987). 본 연구에서는 사업으로써의 개설비용 부담을 중시하여, 간선임도의 경우 207,000 won/m , 작업임도의 경우 125,000 won/m 로 상정한다(Korea Forest Service, 2017).

식 11을 이용하여 단위재적당 집재재적 Vh 를 위에서 서술한 열상간별 $50 \text{ m}^3/\text{ha}$, 소면적 모두베기 $150 \text{ m}^3/\text{ha}$ 로 상정하여, 단위재적당 임도개설비용 $P_{FRC}(L)(\text{won}/\text{m}^3)$ 를 산출한 결과 Figure 7과 같이 나타났다. Figure 7에 의해 임도개설단가와 집재재적이 임도개설비용에 대해서 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한, Figure 7에 최대집재거리 $L(\text{m})$ 에 대하여 노망밀도 $d(\text{m}/\text{ha})$ 를 다음 식 18에 의해 구하여(Sakai, 1987) 노망밀도를 최대집재거리와 함께 병기하였다.

$$d=5000(1+\eta)/L \quad (18)$$

단, η : 우회율. 본 연구에서는 선행연구에 근거하여 $\eta = 0.8$ 로 설정하였다(Sawaguchi et al., 1994).

집재재적을 $0.5 \text{ m}^3/\text{cycle}$ (열상간별), $1.0 \text{ m}^3/\text{cycle}$ (소면

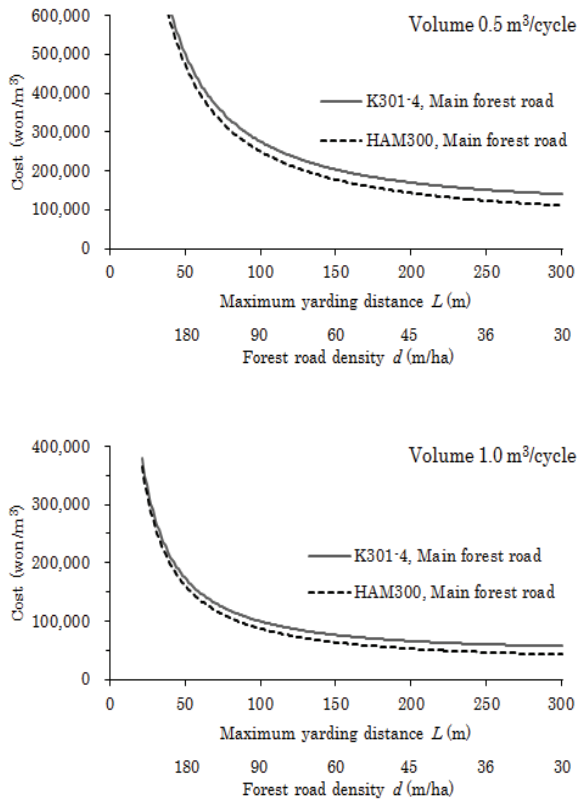


Figure 8. The sum of yarding cost and main forest road construction cost.

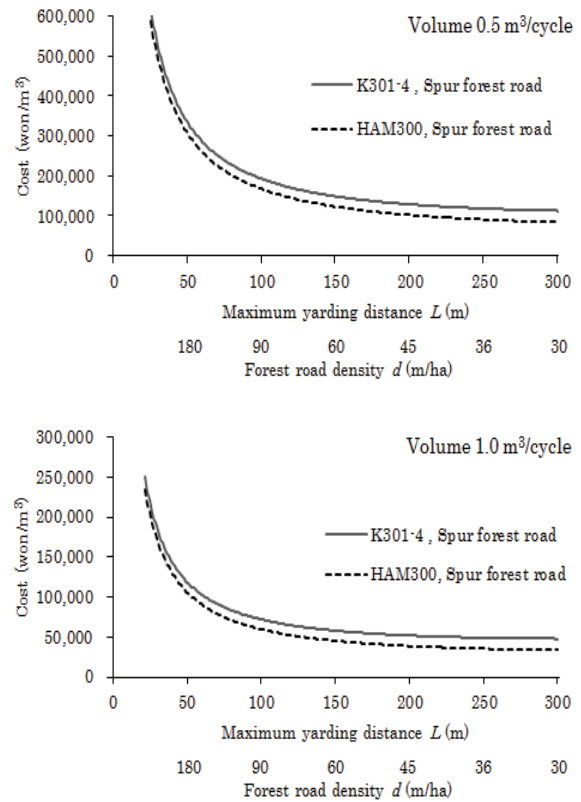


Figure 9. The sum of yarding cost and spur forest road construction cost.

Table 6. Maximum yarding distance, optimal forest road network density and operational cost.

Volume (m³/cycle)		K301-4, HAM300, Spur forest road		K301-4, HAM300, Main forest road	
		K301-4, Spur forest road	HAM300, Spur forest road	K301-4, Main forest road	HAM300, Main forest road
0.5	Maximum yarding distance (m)	300	300	300	300
	Optimal forest road network density (m/ha)	30	30	30	30
	Operational cost (won/m³)	112,390	83,670	139,720	111,010
1.0	Maximum yarding distance (m)	300	300	300	300
	Optimal forest road network density (m/ha)	30	30	30	30
	Operational cost (won/m³)	47,770	33,590	56,880	42,700
0.5	Maximum yarding distance (m)	150	150	150	150
	Optimal forest road network density (m/ha)	60	60	60	60
	Operational cost (won/m³)	148,350	122,540	203,010	177,210
1.0	Maximum yarding distance (m)	150	150	150	150
	Optimal forest road network density (m/ha)	60	60	60	60
	Operational cost (won/m³)	57,720	45,180	75,940	63,400

적 모두베기)로 설정하여, K301-4와 HAM300의 가선 설치 및 철거비용을 포함한 집재비용(won/m³)과 단위재적당 임도개설비(won/m³)의 합계비용을 산출한 결과를 각각 Figure 8 and Figure 9에 나타냈다.

두 기종에 의한 임도개설비용의 차이는 없기 때문에

최대집재거리에 따른 두 기종의 유·불리함은 Figure 6과 동일하다. 또한, 작업비용에서 임도개설비용이 차지하는 부분이 크기 때문에 집재거리가 커질수록 임도개설비용을 포함한 작업비용은 낮아지는 결과가 나타났다.

Figure 8 and Figure 9에서 최대집재거리가 멀어질수

록 작업비용은 줄어드는 경향이 나타났고, 작업비용이 최소가 되는 최대집재거리의 K301-4와 HAM300 두 기종 모두 300 m로 나타났으며, 이때의 최적노망밀도는 30 m/ha로 나타났다. 이때의 값을 Table 6에 나타냈으며, 최대집재거리 300 m의 평균집재거리인 150 m에 대한 값도 함께 나타냈다.

작업임도를 설치하는 집재작업에서 1사이클당 집재재적이 0.5 m³/cycle인 경우 최소작업비용은, K301-4는 112,390 won/m³, HAM300은 83,670 won/m³이며, 이때의 최대집재거리는 300 m, 최적노망밀도는 30 m/ha이다. 또한, 1사이클당 집재재적이 1.0 m³/cycle인 경우 최소작업비용은 K301-4는 47,770 won/m³, HAM300은 33,590 won/m³으로 1사이클당 집재재적이 0.5 m³/cycle인 경우에 비해서 합계비용이 약 40% 절감되는 결과가 나타났다.

한편, 최대집재거리가 150 m인 경우에도, 작업임도를 설치하고 1사이클당 집재재적을 1.0 m³/cycle 이상으로 하면 HAM300의 경우 50,000 won/m³ 이하의 비용으로 작업이 가능하다는 결과가 나타났다.

현실적으로 장기간에 걸쳐 임도를 반복하여 사용한다면, 집재작업 1사이클당의 r 은 작아진다. 임업전체 기반 정비의 관점에서 집재작업비용에 임도개설비용은 포함하지 않는다는 이론(Sakai, 2004)을 근거로 한다면 임도개설비용에 있어서 유지관리의 비율이 커지나, 집재작업비용은 결국 Figure 6에서 나타난 것과 같다.

결론

본 연구에서는 현재 우리나라에서 실시되고 있는 타워야더에 의한 집재작업에 대해서 작업생산성 및 비용을 분석하고, 각 집재작업에 필요한 노망밀도를 산출하여 효율적인 임목수확작업시스템 구축을 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

K301-4와 HAM300에 의한 집재작업을 비교하면, 최대집재거리가 길어질수록 작업생산성이 낮아지나, 최대집재거리가 34 m 이상인 경우에는 K301-4가 HAM300보다 유리하다는 결과가 나타났다. 그러나, 가선 설치 및 철거비용과 임도개설비용을 감안한 작업비용 측면에서는 HAM300이 유리하다는 결과가 나타났다. 따라서 작업생산성을 중요시한다면 K301-4를 활용한 집재작업이 유리하며, 작업비용을 중요시한다면 HAM300을 활용한 집재작업이 유리하므로 상황에 따라 적절히 선택하여 활용하는 것이 유용하다고 판단된다.

작업임도를 설치하는 집재작업에서 1사이클당 집재재적이 0.5 m³/cycle인 경우 최소작업비용은 K301-4는 112,390 won/m³, HAM300은 83,670 won/m³이며, 이때의

최대집재거리는 300 m, 최적노망밀도는 30 m/ha이다. 또한, 1사이클당 집재재적이 1.0 m³/cycle인 경우 최소작업비용은 K301-4는 47,770 won/m³, HAM300은 33,590 won/m³으로 1사이클당 집재재적이 0.5 m³/cycle인 경우에 비해서 합계비용이 약 40% 절감되는 결과가 나타났다. 따라서 타워야더에 의한 집재작업에서는 1회당 집재재적을 크게 하는 것이 유용하다고 판단된다.

우리나라의 산림면적은 국토의 63%를 차지하고 있고, 급경사지의 집재작업에서는 가선계 임업기계가 필수 불가결하며, 이를 위해서는 반복적인 장기 이용을 전제로 하는 노망정비가 필요하다.

References

- Cha, D.S. and Cho, K.H. 1994. Studies on the design of forest road network for mechanized yarding operations(II) -optimal road spacing and density-. Journal of Korean Forest Society 83(3): 299-310.
- 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(2): 221-229.
- Cho, M.J., Cho, K.H., Jeong, E.J., Lee, 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 and 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 Larix leptolepis stand. Journal of Forest Science 30(1): 107-112.
- Chung, J.S. 1993. A study on mechanical analysis of cable logging systems -with an example of a standing skyline-. Journal of Korean Forest Society 82(1): 34-43.
- Chung, J.S. and Chung, W.D. 1994. A study on analyzing the live skyline cable logging mechanics. Journal of Korean Forest Society 83(3): 357-364.
- Construction Association of Korea. 2017. <http://www.cak.or.kr>
- Eastern Regional Office of Forest Service. 2009. Practical Application Research on Eco-Friendly Silvicultural Techniques and Development of Sustainable Forest Management Techniques in Natural Hardwood Forests. pp. 92.
- Han, W.S., Han, H.S., Kim, N.H., Cha, D.S., Cho, K.H., Min, D.H. and Kwon, K.C. 2014. Comparison of harvesting productivity and cost of cable yarding systems. Journal of Korean Forest Society 103(1): 87-97.
- Han, W.S., Han, H.S., Kim, Y.S. and Shin, M.Y. 2008. The

- yarding productivity and cost of cable yarding operation by yarder attached on Tractor -Using the chuncheon tower-yarder-. *Journal of Korean Forest Society* 97(6): 641-649.
- Kim, J.H. and Park, S.J. 2010. An analysis of the yarding productivity and cost in forest tending operation. *Journal of Korean Forest Society* 99(4): 625-632.
- 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. 2017. <http://www.forest.go.kr>
- Kwon, H.J. and Park S.J. 2013. The techniques development for the possibility area analysis of yarding operation and the forest-road network Arrangement using GIS. *Journal of Korean Forest Society* 102(1): 143-155.
- Ministry of Employment and Labor. 2017. <http://www.moel.go.kr>
- Ministry of Government Legislation. 2017. <http://www.moleg.go.kr>
- Miyata, E.S. 1980. Determining fixed and operating costs of logging equipment. U.S. Department of Agriculture Forest service General Technical Report NC-55. pp. 16.
- Mun, H.S., Cho, K.H. and Park, S.J. 2014. An analysis of the operational productivity and cost for the utilization of forest-biomass(I) -the operational time and productivity-. *Journal of Korean Forest Society* 103(4): 583-592.
- Mun, H.S., Cho, K.H. and Park, S.J. 2015. An analysis of the operational productivity and cost for the utilization of forest-biomass(II) -the analysis of operational cost-. *Journal of Korean Forest Society* 104(2): 230-238.
- Nakazawa, M., Yoshida, C., Sasaki, T., Jinkawa, M., Tanaka, Y., Suzuki, H., Uemura, T., Ito, T., Yamasaki, T., Oya, S., Furukawa, K. and Imatomi, Y. 2012. Development of thinning system with a tower yarder newly introduced from Europe -Productivity of uphill yarding under the cable-. *Journal of the Japan Forest Engineering Society* 27(3): 175-178.
- Oh, J.H., Park, M.S., Kim, J.W. and Cha, D.S. 2006. Stability analysis of cable yarding with self-propelled carriage. *Journal of Korean Forest Society* 95(4): 495-500.
- Park, J.M. 1997. Choosing Economical optimum logging machines based on the operating volume. *Journal of Korean Forest Society* 86(4): 450-458.
- Park, S.J. 2002a. An analysis of the efficiency of yarding operation by yarder attached on tractor. *Journal of Korean Forest Society* 91(3): 287-295.
- Park, S.J. 2002b. The development of tower-yarder and grapple saw with shovel type excavator. *Journal of Korean Forest Society* 91(3): 322-333.
- Park, S.J. 2004a. An analysis of the yarding operation system with mobile tower-yarder. *Journal of Korean Forest Society* 93(3): 205-214.
- Park, S.J. 2004b. The optimizing of yarding operation system with a mobile tower-yarder. *Journal of Korean Forest Society* 93(7): 436-445.
- Park, S.J. and Ham, Y.C. 2002. An Analysis of operation efficiency and working cost of tower-yarder and grapple saw with shovel type excavator. *Journal of Korean Forest Society* 91(4): 507-516.
- Public Procurement Service. 2017. <http://www.pps.go.kr>
- Sakai, H. 1987. Planning of long-term forest-road networks based on rational logging and transportation systems. *Bulletin of the University of Tokyo Forests* 76: 1-85.
- Sakai, H. 2004. Forest work road -Theory and environmental preservation function-. National Forestry Improvement Promotion Association. Tokyo, Japan. pp. 281.
- Sawaguchi, I., Ohkawabata, O. and Ichihara, K. 1994. Characteristics of forest-road network correction factors in mountainous forests in Japan (I) Forest-road network adjustment. *Journal of Japanese Forest Society* 76(2): 118-215.
- Seol, A.R., Han, H., Jung, Y.K., Jung, H.J. and Jung, J.S. 2016. Analyzing the comparative economic efficiency of short-wood woodgrab logging and whole-tree cable logging operations. *Journal of Korean Forest Society* 105(2): 231-237.
- 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.