

가선집재작업에서의 작업 생산성 및 비용 분석

한원성^{1*} · 한한섭² · 김남훈³ · 차두송³ · 조구현⁴ · 민도홍¹ · 권기철¹

¹산림조합중앙회 임업경제경영연구소, ²호놀룰루대학교 산림자원학과,
³강원대학교 산림환경과학대학, ⁴국립산림과학원 산림생산기술연구소

Comparison of Harvesting Productivity and Cost of Cable Yarding Systems

Won Sung Han^{1*}, Han-Sup Han², Nam-Hun Kim³, Du Song Cha³,
Koo Hyun Cho⁴, Do Hong Min¹ and Ki Cheol Kwon¹

¹Forestry Economics and Management Research Institute, National Forestry Cooperative Federation, Seoul 138-837, Korea

²Department of Forestry and Wildland Resources, Humboldt State University, California, USA

³College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

⁴Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-821, Korea

요 약: 본 연구에서는 임목수확작업에 사용되는 집재기계의 작업효율성을 분석하여 경사가 급한(20° 이상) 작업조건에 적합한 가선계 집재기계를 선정하는데 기초 정보를 제공하고자, 타워야더(RME-300T), 트랙터부착형 집재기(일명 : 춘천집재기), 트랙터윈치(FARMI) 등에 의한 집재작업에서의 작업생산성 및 비용을 비교 분석하였다. 평균 흉고 직경이 20 cm, 집재거리 60 m, 가로집재거리 10 m, 그리고 기계이용률이 70%인 동일한 작업 조건에서 작업이 이루어질 경우, 타워야더의 1일 집재작업 생산성은 33.04 m³/일, 트랙터부착형 집재기는 38.47 m³/일, 그리고 트랙터윈치는 14.17 m³/일로 분석되었으며, 이에 따른 집재작업비용은 각각 25,105원/m³, 20,520원/m³, 37,835원/m³으로 나타났다. 동일한 작업조건에서 집재거리에 따른 각 집재기계별 작업효율성을 비교하였을 경우, 집재거리가 40 m 이내로 짧은 경우에는 트랙터윈치에 의한 집재작업이 효율적이며, 40~140 m의 집재거리에서는 춘천집재기가, 140 m 이상의 장거리 집재작업에서는 타워야더가 가장 효율적인 것으로 나타났다.

Abstract: This study was conducted to provide field-based harvesting study information which can be used to select an optimal cable system for certain work conditions on steep grounds (>20° ground slope) in Korea. To accomplish this study objectives, we evaluated three cable yarding systems (RME-300T tower-yarder, Chuncheon tower-yarder, FARMI tractor winch) working in typical work conditions for their yarding productivity and operational efficiency. Those yarders are commonly used for removing logs or trees on steep grounds in Korea. Under the same work conditions (average DBH of tree to be cut, 20 cm; yarding distance, 60 m; lateral yarding distance, 10 m; and machine utilization rate, 70%), the average productivities were 33.04 m³/day, 38.47 m³/day, and 14.17 m³/day for RME-300T, Chuncheon tower-yarder, and FARMI, respectively. Our standardized cost comparison study also showed that the yarding cost was highest at 37,835 won/m³ with FARMI, followed by RME-300T at 25,105 won/m³ for the same work conditions. We found the lowest yarding cost with the Chuncheon tower-yarder at 20,520 won/m³ which was resulted primarily from high yarding productivity at the yarding distance (60 m). Our analysis suggested that a small machine such as FARMI could be a low-cost yarding machine option for a cable yarding job with a short yarding distance (40 m or less). The Chuncheon tower-yarder is well suited for a mid-range yarding distance job in Korea, ranged between 40 to 140 m. If yarding distance were longer than 140 m, the RME-300T tower yarder appears to be most cost-effective.

Key words: cable yarding, yarding productivity, yarding cost

*Corresponding author
E-mail: mikey-hws@hanmail.net

서 론

우리나라는 국토면적의 약 64%인 642만 ha가 산림으로서, III영급 이상의 산림이 전체의 약 87%를 차지하고 있으며, 수확기 혹은 수확시기에 가까워진 IV영급 이상의 산림은 약 65%를 차지하고 있다(Korea Forest Service, 2013). 과거 치산녹화를 위한 ‘심는 산림정책’에 의해 조성된 산림이 현재 III~IV영급 이상의 임분을 구성하고 있으나, 산림관리에 필요한 예산과 인력의 부족으로 인해 관리가 제대로 이루어지지 못하고 방치된 산림이 많은 실정이다. 1990년대 후반부터 숲가꾸기 사업이 본격적으로 시작되면서 ‘가꾸는 산림정책’이 시행되어 방치되었던 산림을 가꾸는 계기를 마련하였다.

1990년대 이후, 숲가꾸기 사업과 간벌작업, 최종 임목수확 작업 등에 의해 임목벌채가 증가하면서, 이에 따른 산물수집 작업이 증가하기 시작하였다. 생산된 원목을 임분 밖으로 반출하기 위해 집재작업이 이루어지는데, 집재작업은 많은 비용과 노력이 요구되는 산림작업 중의 하나이며, 부족한 예산과 노동력, 그리고 임금상승 등으로 인해 작업에 어려움이 발생하게 된다(Woo et al., 1990). 이러한 임목수확작업의 원활한 수행을 위해 다양한 임업기계와 임목수확작업시스템을 도입하여 운영 중에 있으나, 환경친화적이고 임분조건에 적합한 임업기계를 활용한 임목수확작업 기술의 연구·개발 및 보급이 부족하고 체계화되어 있지 못한 상황이다(Kim and Park, 2012). 임업기계에 대한 성능과 작업능력 등에 대한 정보를 정확히 파악하여 임목수확작업에 적절히 적용할 경우 작업효율이 높아지고, 생산비용이 낮아지는 효과가 나타날 수 있으므로, 각 기계의 생산성과 생산비용을 파악 할 수 있는 정보는 매우 중요하다.

우리나라의 산악지형에서 임목수확작업의 효율성을 높이고, 생산비용을 줄이기 위해서는 기계화에 의한 작업이 필수적이며(Song et al., 1998), 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나, 기술개발 및 현장 적용성 등은 아직은 미비한 상태라 할 수 있다. 이러한 이유에서 임업기계를 이용한 임목수확 작업시스템을 이용하기보다는 대부분 굴삭기 우드그랩을 이용한 집재작업이 많이 이루어

지고 있으며, 이에 따른 임지훼손 및 작업의 위험도 증가라는 문제점이 제기되고 있다(Kim and Park, 2012). 결국 환경친화적이면서 작업의 효율성 및 안정성을 확보하면서 임목수확이 가능한 작업시스템에 대한 기술도입 및 보급이 중요한 시기이며, 작업 조건에 따른 효율적 기계의 선정에 위한 각 기계별 작업능률을 예측할 수 있는 정보가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 우리나라의 임목수확작업에서 일반적으로 사용될 수 있는 타워야더, 트랙터부착 집재기, 트랙터 윈치 등의 작업생산성 및 집재비용에 따른 작업효율성을 조사·분석하여 작업조건에 적합한 작업시스템을 선정하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

조사 및 방법

1. 조사지의 개요

본 연구의 조사지는 강원도 춘천시 사북면(조사지 1)과 경기도 가평군 설악면(조사지 2)에 위치한 낙엽송 조림지의 숲야베기 작업지 각 10 ha, 그리고 전북 진안군 성수면(조사지 3)에 위치한 리기다소나무 조림지의 숲야베기 작업지 3 ha이다(Table 1). 조사지 1, 2, 3 모두 ha당 임목체적이 200 m³ 이상으로 향후 우량대경재 생산을 목표로 수익숲야베기를 실시하는 대상지로서 간벌율은 조사지 1과 조사지 2가 약 30%, 그리고 조사지 3이 약 50%이다.

2. 조사에 사용한 집재기 및 작업시스템의 개요

집재작업에 사용된 춘천집재기는 50~80마력급 트랙터에 부착하여 사용하며, 타워의 높이는 2.5 m~4.2 m까지 조절이 가능하다. 스카이라인용, 견인용 및 되돌림용 등 3개의 드럼이 부착되어 있으며, 최대 집재거리는 200 m, 그리고 최대 1.0톤까지 견인이 가능한 집재기계로 3~4인이 1개조로 편성되어 작업이 진행된다. 타워야더 RME-300T는 6륜구동 임내차에 탑재된 집재기계로서 타워의 높이는 5~9 m까지 조절이 가능하며, 스카이라인용, 견인용 및 되돌림용 등 3개의 드럼이 부착되어 있다. 최대 집재거리는 300 m, 그리고 최대 1.5톤까지 견인이 가능한 집재기계로 3~4인이 1개조로 편성되어 작업이 진행된다. 트랙터윈치

Table 1. Stand description in the study sites.

Classification	Site 1	Site 2	Site 3
Area(ha)	10	10	3
Species	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Larix leptolepis</i>	<i>Pinus rigida</i>
Average DBH(cm)	26	28	19
Average slope(degree)	26	25	26
Average growing stock(m ³ /ha)	210.5	261.0	270.0
Thinning intensity(%) ²	30	30	50

²% indicates the amount of reduction in growing stock

인 FARMI는 트랙터에 윈치를 부착하여 지면끌기식 집재작업이 이루어지며, 최대 집재거리는 100 m, 윈치 견인력은 최대 3톤으로 2~3인이 1개조로 작업이 진행된다(Korea Forest Research Institute, 2008).

조사지 1과 조사지 2에서의 집재작업시스템은 체인톱을 이용한 벌목과 가지자르기 작업을 실시한 후, 트랙터 부착형 집재기인 춘천집재기를 이용하여 전간재 하향집재 작업을 실시하였다. 집재된 전간재는 굴삭기 우드그랩과 체인톱으로 통나무자르기 작업을 진행하였다. 집재작업은 기계조작수 1인, 초킹수 2인, 짐풀기 1인으로 4인이 1개조를 이루어 실시되었다.

조사지 3에서의 집재작업시스템은 체인톱을 이용한 벌목과 가지치기 작업을 실시한 후, 타워야더(RME-300T)와 트랙터윈치(FARMI)에 의한 전간재 하향집재 작업을 실시하였다. 타워야더에 의한 집재작업은 기계조작수 1인과 초킹수 2인이 1개조를 이루어 실시되었으며, 기계조작수가 기계조작과 짐풀기 작업을 동시에 진행하면서 실시되었다. 트랙터 윈치에 의한 집재작업도 기계조작수 1인과 초킹수 2인이 1개조를 이루어 실시되었다.

3. 조사 방법

본 조사지에서의 집재작업에 대한 작업시간, 요소작업시간, 그리고 작업공정 등을 분석하기 위해 스톱워치를 이용한 시간 동작 연구(time and motion study) 방법을 적용하였다. 춘천집재기, 타워야더, 트랙터윈치에 의한 집재작업공정을 반송기보내기, 와이어로프 가로끌기, 초킹, 신호보내기 및 작업자 이동, 가로집재, 집재, 그리고 짐풀기 작업 등으로 구분하였다(Studier and Binkley, 1974; Huyler and Ledoux, 1997). 반송기보내는 원목의 수집을 위해 가선을 따라 움직이는 반송기를 목표물까지 보내는 작업을 의미하며, 반송기가 사용되지 않는 트랙터윈치에 의한 집재작업에서는 와이어로프끌기 작업을 반송기보내기 작업으로 표현하였다. 와이어로프 가로끌기는 반송기보내기 이후에 작업자가 반송기에서 와이어로프를 집재할 벌채목까지 견인하는 작업을 의미한다. 초킹 작업은 벌채목을 작업자가 와이어로프로 묶는 작업을 의미하며, 이후 작업자가 작업진행 신호를 보내고 안전한 곳으로 대피하는 과정을 신호보내기 및 작업자 이동 작업으로 구분하였다. 가로집재는 와이어로프에 묶은 벌채목을 반송기가 위치한 곳까지 이동하는 과정으로 반송기가 이동하여 집재작업이 이루어지기 전까지의 과정이다. 가로집재 작업에 의해 벌채목이 반송기까지 운반된 후 주집재선을 타고 짐풀기 작업이 이루어지는 곳까지 이동하는 과정을 집재작업으로 구분하였다. 집재된 벌채목에서 와이어로프를 제거하여 반송기가 다시 보내지기 전까지의 과정은 짐풀기 작업으로 구분하

여 조사하였다.

집재작업공정 이외에 작업대기시간과 작업지연시간, 가선 설치 및 철거 시간 등을 추가로 조사하였으며, 이때 집재수량, 집재목의 흉고직경, 경사도, 집재거리, 가로집재거리 등을 함께 조사하여 작업공정 분석에 사용하였다. 작업지연시간은 집재기계의 기계적 결함이나 수리, 주유 등에 의해 작업이 지연되는 기계적지연(mechanical delay), 집재목 걸림현상, 장애물 제거 등 작업과정에서 발생하는 운용지연(operational delay), 그리고 작업원의 휴식, 식사시간, 작업과 관련 없는 대화나 행동 등에 의해 지연되는 작업자지연(personal delay)으로 구분하여 조사하였다.

4. 분석 방법

1) 집재작업 공정 및 생산성 분석 방법

각 조사지에서 집재기계별로 측정된 요소작업별 연속작업 시간을 이용하여 평균 작업시간을 산출하고, 집재수량과 입목재적 등을 이용하여 시간당 작업량을 산출하였다. 각 조사지별로 사용된 집재기계의 작업공정을 분석한 후, 작업효율성을 비교하기 위해 동일한 임분조건에서의 생산성을 분석하였다. 이를 위해 각 집재기계별 평균 집재작업 시간을 예측할 수 있는 추정식을 개발하였으며, 도출된 추정식에 의해 평균 집재작업 시간을 산출하고, 이때의 집재재적 등을 이용하여 작업생산성을 각 집재기계별로 비교 분석하였다.

2) 작업비용 분석 방법

집재작업 비용은 기계비용과 현장에서 관찰된 시간당 생산성에 의해 산출하였으며, 기계비용은 고정비용과 운용비용으로 구분하여 계산하였다. 고정비용에는 감가상각비, 이자, 보험, 세금 등이 포함되며, 운용비용에는 유지관리비, 연료비, 오일, 그리고 인건비 등이 포함된다. 집재작업 비용의 계산은 다음과 같은 방법을 사용하여 계산하였다(Woo et al., 1990; Brinker et al., 2002).

$$D = \frac{(P-S)}{N}, AVI = \frac{(P-S) \times (N+1)}{2N} + S, IN = AVI \times \text{이자율} (\%)$$

여기서, D 는 감가상각비, P 는 기계구입비, S 는 기계의 잔존가치, N 은 기계의 수명, 그리고 AVI 는 투자평균가치이다. IN 은 이자이며, 보험 그리고 세금 등도 IN 과 같은 방법으로 계산하였다.

집재작업 비용 분석에 사용되는 각 기계별 인자값은 Table 2와 같으며, 이를 이용하여 집재작업 비용을 산출하였다.

3) 통계분석 방법

각 집재기계별 평균 집재작업시간 예측을 위한 추정식을 개발하기 위해 수집한 자료를 종속변수인 집재작

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

Cost factor	Unit	Value		
		Chuncheon Tower-yarder	Tower-yarder (RME-300T)	Tractor winch (FARMI)
Purchase price	won	70,000,000	180,000,000	55,000,000
Economic lives	years	6	8	6
Salvage value	%	10	10	10
Scheduled machine hours	hr/year	1200	1200	1200
Annual interest rate	%	15	15	15
Repair and maintenance	%	100	100	100
Oil price	won/l	1,740	1,740	1,740
Coefficient of lubricant	%	40	40	30
Fuel consumption	l/hr	9	6	4
Daily wage of operator	won/day	104,611	104,611	104,611
Daily wage of ground crew	won/day	92,512	92,512	92,512
Daily wage of assistant worker	won/day	80,732	80,732	80,732

업시간과 독립변수인 집재거리, 가로집재거리, 집재목의 DBH, 집재 수량, 집재작업지 경사도 등으로 분류하여 정리하였다.

일반적으로 회귀모형을 사용한 추정식을 개발할 경우, 모형의 적합성을 검증하기 위해 독립자료를 수집하여 사용하는 것이 일반적이지만 새로운 자료의 수집을 위해 많은 시간과 비용이 투입되어 자료 수집에 어려움이 있기 때문에, 이를 해결하기 위해 사용가능한 자료를 추정자료와 검증자료로 50%씩 분류하여 통계 분석에 사용하는 것이 효율적이라고 알려져 있다(Snee, 1977). 본 연구에서는 수집된 자료의 양이 적고, 회귀 추정의 적합성을 고려하여 수집한 자료를 무작위 분류에 의해 Table 3과 같이 추정식 도출에 필요한 추정자료(fit data) 70%와 검증에 필요한 검증자료(test data) 30%로 분류하여 사용하였다(Shin et al., 2006; Adebayo et al., 2007).

각 집재기계별 평균 집재작업시간 예측 추정식은 추정 자료의 독립변수들 중에서 다중공선성이 높게 나타나는

변수들을 제거하면서 추정에 필요한 최적의 변수 조합을 찾아내는 중회귀분석의 단계별 회귀기법(stepwise regression)을 이용하여 개발하였다. 이와 같은 방법으로 도출된 추정식의 적합성을 검증하기 위해 대응하는 두 표본평균 간의 비교에 사용되는 t-검정을 사용하여 검증자료의 평균 집재작업시간과 추정식에 의한 평균 집재작업시간을 비교분석 하였다(Adebayo et al., 2007).

회귀기법에 의해 추정식을 도출하는 방법은 가능한 많은 자료를 사용하는 것이 추정식의 정도를 높일 수 있는 방법이며, 본 연구에서는 비교적 자료의 양이 많지 않아 추정식의 적합성에 문제가 없을 경우 추정자료와 검증자료를 통합하여 좀 더 효율성이 높은 추정식을 도출하였다. 이때, 추정자료와 검증자료로 사용하였던 두 자료간의 동질성이 통계적으로 인정되어야 자료를 통합하여 추정식을 재도출하였을 경우 문제가 없으며(Shin et al., 2006), 이를 위해 두 집단의 분산비를 통해 자료의 균질성 또는 정밀도를 검증하는 F-검정을 사용하여 추정자료와 검증자료의 동질성에 대한 통계검증을 실시하였다.

Table 3. The number of the model fit and test data used to develop predictive equations of yarding cycle time.

Classification		No. of sample	Average delay-free cycle time(sec.)			
			Mean	Min.	Max.	Std. dev.
Chuncheon Tower-yarder	Pooled data	350	185	69	374	62.24
	Fit data	245	181	69	374	63.05
	Test data	105	185	69	342	56.77
Tower-yarder (RME-300T)	Pooled data	46	390	253	523	68.46
	Fit data	32	392	253	523	69.09
	Test data	14	384	279	499	69.15
Tractor winch (FARMI)	Pooled data	23	385	60	704	203.33
	Fit data	16	357	144	704	193.08
	Test data	7	446	60	677	228.07

결과 및 고찰

1. 집재작업 시간 및 공정 분석

본 연구에서 조사한 3가지 집재기계에 대한 시간 및 작업공정분석 결과는 Table 4와 같다. 춘천집재기에 의한 집재작업에서는 집재거리가 평균 66 m, 가로집재거리가 평균 11 m로 1회 평균 1.1개의 전간재 0.38 m³을 수집하였다. 이때, 1회 평균 집재작업시간이 약 185초가 소요되는 것으로 조사되었다. 1회 평균 집재작업시간 중에서 반송기보내기작업시간이 약 17.3%를 차지하고 있었으며, 와이어로프끝기작업이 17.3%, 초킹작업에 11.4%가 소요되고 있었다. 작업자가 안전한 곳으로 이동하면서 작업진행 신호를 보내는데 3.2%, 가로집재작업시간이 9.7%를 차지하고 있었으며, 주집재작업시간이 24.9%로 가장 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그밖에 짐풀기작업에 16.2%가 소요되고 있는 것으로 나타났으며, 평균적으로 작업이 지연되는 현상이 약 90초 정도 발생하고 있었다.

춘천집재기의 1회 평균 집재작업시간은 약 185초로 순작업시간당 작업량은 약 7.39 m³/hr이다. 1회 평균 집재작업에서 순작업시간 이외에 기계오작동, 집재목 걸림현상, 작업지체 등의 작업지연시간이 약 90초 정도 발생하고 있어 기계이용률(machine utilization)은 약 67.5%로 분석되었으나, 가선의 설치·철거, 집재로 변경 등을 포함한 춘천집재기의 기계이용률은 약 51.0%로 나타났다. 따라서 1일 작업시간이 8시간일 경우, 실제 작업이 가능한 시간은 4시간 정도이며 연구조사지에서의 춘천집재기의 1일 작업량은 약 29.56 m³/일이다. Kim and Park(2010)의 연구결과인 숲가꾸기 작업지에서의 1일 작업량 19.1 m³/일보다 높게 나타났다. 이는 본 연구에서는 전간재 집재를 실시하였으며, 시간당 약 19.46회 집재작업이 진행되었으며, 집재목 1본의 재적이 0.345 m³이었으나, 기존 연구 결과에서는 전목집재를 실시하여 시간당 17.65회의 집재작업이 진행되었고, 집재목 1본의 평균 재적도 약 0.15 m³으로 1회 집재재적과 집재회수 등에서 많은 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. Han et al.(2008)의 연구 결과에서는 춘천집재기의 시간당 작업량이 약 13.1 m³/hr으로 높게 나타나고 있으며, 이는 임목 1본당 재적이 0.577 m³으로 매우 높았기 때문인 것으로 판단된다.

타워야더에 의한 집재작업에서는 평균 집재거리가 101 m, 가로집재거리가 평균 5 m, 1회 평균 2.4개의 전간재 0.20 m³을 수집하는 것으로 나타났다. 이때, 1회 평균 작업시간은 390초이며, 반송기보내기작업시간이 27.2%, 와이어로프끝기작업시간, 원목의 초킹시간, 신호보내기시간이 각각 7.4%, 8.7%, 1.3%를 차지하고 있다. 가로집재작업시간은 5.9%를 차지하고 있으며, 주집재작업시간은 34.4%로 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 짐풀기작업시

간은 15.1%로 나타나고 있으며, 작업지연시간은 평균 116초가 발생하고 있는 것으로 나타났다.

타워야더를 이용한 집재작업에서 임목 1본의 평균 재적은 0.083 m³으로 1회 평균 약 0.20 m³을 수집하는 것으로 분석되었다. 1회 평균 집재작업시간은 약 390초로 순작업시간당 집재작업량은 약 1.85 m³/hr으로 작업생산성이 매우 낮았다. 타워야더를 이용한 집재작업에서의 작업지연시간은 1회 평균 116초가 발생하고 있는 것으로 나타났으며, 이에 따른 기계이용률은 77.0%로 분석되었고, 가선의 설치·철거, 집재로 변경 등을 포함한 기계이용률은 약 63.9%로 나타났다. 이에 따른 타워야더의 1일 작업가능시간은 5.1시간으로 1일 작업량은 약 9.44 m³/일로 분석되었다. 기존의 연구 결과에서는 타워야더의 1일 작업량이 약 20.3 m³/일(Kim and Park, 2012)과 21.9 m³/일(Kim and Park, 2010)로 높게 나타났으며, 이때 1회 평균 집재재적이 각각 0.32 m³과 0.37 m³으로 본 연구에서의 집재재적 0.20 m³보다 높았기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 1회 평균 집재작업시간이 344초로 시간당 10.45회 집재작업이 진행되었으나, 본 연구에서는 1회 작업시간이 390초로 시간당 집재회수가 약 9.23회로 낮은 것도 하나의 원인으로 판단된다.

트랙터원치에 의한 집재작업에서는 평균 집재거리가 32 m이며, 1회 평균 2.3개의 전간재 약 0.20 m³을 집재한 것으로 나타났다. 이때, 1회 평균 작업시간이 385초로 분석되었으며, 와이어로프끝기작업에 19.7%가 소요되고 원목의 초킹작업에 32.2%가 소요되고 있었다. 작업자의 이동 및 신호보내기작업에 6.0%를 소모하고 있으며, 집재시간에 10.9%, 짐풀기작업시간에 31.2%를 소모하고 있는 것으로 분석되었다. 트랙터원치에 의한 집재작업에서의 작업지연시간은 1회 평균 67초가 발생하고 있는 것으로 나타났으며, 춘천집재기와 타워야더에 비해 적게 발생하고 있는 것으로 분석되었다.

트랙터원치를 이용한 집재작업에서는 1회 평균 약 0.20 m³을 집재하는데 평균 385초가 소요되고 있었으며, 이때 순작업시간당 집재작업량은 1.88 m³/hr으로 타워야더의 시간당 집재작업량보다 높게 나타났다. 트랙터원치의 작업지연시간은 1회 평균 67초씩 발생하고 있었으며, 이에 따른 기계이용률은 85.2%로 춘천집재기와 타워야더에 비해 높게 분석되었다. 트랙터원치의 경우 가선의 설치·해체 작업이 없고, 작업공정이 단순하여 기계 오작동, 작업지연 등이 적어 기계이용률이 높게 나타난 것으로 판단된다. 하루 6시간의 작업시간을 기준으로 할 때, 트랙터원치의 1일 집재작업량은 약 11.28 m³/일로 분석되었다. 이 결과는 FARMi 원치의 집재작업에 대한 기존 연구 결과(Park, 2002)인 28.8 m³/일에 비해 40% 수준으로 매우 낮게 나타났다. 이는 기존 연구가 상향식 집재작업을 실시

하여 하향식 집재작업을 실시한 본 연구보다 작업생산성이 높게 나타났을 뿐만 아니라, 집재목 1본의 입목재적이 0.31 m³/분으로 1회 집재재적이 높았기 때문인 것으로 판단되며, 1회 평균 집재작업시간도 134초로 본 연구의 385초보다 적게 소요되어 시간당 집재회수에서도 차이가 있었기 때문인 것으로 판단된다.

각 집재기계별 집재작업시간을 비교해볼 때, 춘천집재기의 작업시간이 가장 적게 소요되고 있는 것으로 분석되었다. 춘천집재기의 경우 타워야더의 작업지보다 집재거리가 상대적으로 짧고 작업원 1인이 더 투입되어 작업시간이 적게 소요된 것으로 판단된다. 또한 트랙터 윈치의 경우 집재거리는 가장 짧았으나, 와이어로프를 인력에 의해 집재목까지 이동시킨 후 초킹작업을 진행함에 따라 작업시간이 증가하는 것으로 나타났다. 춘천집재기와 타워야더는 반송기보내기작업과 주집재작업이 전체 작업시간에서 차지하는 비중이 매우 높았으며, 특히 타워야더의 경우 집재거리가 100 m정도로 춘천집재기의 집재거리 66 m 보다 훨씬 길어 두가지 공정의 작업시간이 3배 이상 소요되고 있는 것으로 분석되었다. 반면 트랙터 윈치의 경우 원목 초킹작업과 짐푼기작업시간이 가장 많은 비중을 차지하고 있었으며, 주집재작업을 제외한 모든 작업이 인력에 의해 이루어져 다른 집재기계를 사용할 때보다 많은 시간이 소요되는 것으로 판단된다. 이로 인해 트랙터 윈치의 집재작업거리가

32 m임에도 불구하고 작업시간은 타워야더의 작업시간과 비슷하게 소요되고 있는 것으로 나타났다.

집재작업의 생산성과 효율성을 높이기 위해서는 작업지연시간을 줄이는 것이 필요하다. Table 4와 같이 집재견인력이 가장 적은 춘천집재기의 경우 집재목 걸림현상과 장애물 제거 작업 등의 운용지연시간이 가장 많이 발생하고 있었으며, 기계적 결함도 상대적으로 많이 발생하는 것으로 나타났다. 반면, 4인 1조 집재작업을 진행하여 노동강도가 낮아 비교적 작업자지연시간이 적게 나타나고 있었으며, 타워야더와 트랙터 윈치의 경우 작업자지연이 60% 이상을 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 타워야더와 트랙터 윈치의 집재작업에서는 작업원의 이동이 상대적으로 많고, 3인 1조 집재작업으로 인한 노동강도가 높아 비교적 작업자지연이 많이 발생하는 것으로 판단된다. 집재작업 공정이 단순한 트랙터 윈치의 집재작업에서는 기계적 지연이 거의 발생하지 않았으며, 타워야더의 집재작업에서도 11.5% 정도로 적게 발생하고 있었다. 집재작업의 효율성을 높이기 위해서는 집재작업 교육과 훈련 등을 통해 운용지연시간을 낮추고, 적절한 작업원의 배치로 작업자의 노동강도를 낮추는 것이 중요할 것으로 판단된다.

2. 작업비용 분석

본 연구에서 조사한 각 집재기계별 집재작업비용 분석

Table 4. Comparison of average cycle time and yarding productivity for three yarders used in this study.

Item	Chuncheon Tower-yarder		Tower-yarder (RME-300T)		Tractor winch (FARMI)		
	Time (sec.)	Ratio (%)	Time (sec.)	Ratio (%)	Time (sec.)	Ratio (%)	
Average cycle time	Carriage out	32	17.3	106	27.2	76	19.7
	Lateral yarding out	32	17.3	29	7.4		
	Choking	21	11.4	34	8.7	124	32.2
	Moving and signaling	6	3.2	5	1.3	23	6.0
	Lateral yarding in	18	9.7	23	5.9		
	Yarding	46	24.9	134	34.4	42	10.9
	Unhooking	30	16.2	59	15.1	120	31.2
	Total ²	185	100.0	390	100.0	385	100.0
	Average delay time per cycle						
	Mechanical delay		31.4	11.5		1.2	
	Operational delay	90	42.9	116	27.5	67	33.0
	Personal delay		25.8	61.0		65.8	
Average yarding productivity	Average lateral distance(m)		11	5		-	
	Average yarding distance(m)		66	101		32	
	Average number of pieces per cycle		1.1	2.4		2.3	
	Average volume per pieces(m ³)		0.345	0.083		0.083	
	Average volume per cycle(m ³)		0.38	0.20		0.20	
	Machine utilization(%)		67.5	77.0		85.2	
	Yarding productivity(m ³ /hr)		7.39	1.85		1.88	

²Based on a delay-free cycle time

Table 5. Comparison of yarding cost for three yarders used in this study.

Item		Chuncheon Tower-yarder	Tower-yarder (RME-300T)	Tractor winch (FARMI)
Fixed costs (won/hr)	Depreciation cost	8,750	16,875	6,875
	Interest, Insurance and Tax	5,469	13,641	4,297
Operating costs (won/hr)	Repair and Maintenance cost	8,750	16,875	6,875
	Fuel and Lube cost	21,924	14,616	9,048
Labor costs (won/hr)	Labor cost	44,823	34,732	33,259
	Insurance cost	4,482	3,473	3,326
	Benefit cost	4,482	3,473	3,326
Total machine costs(won/hr)		98,681	103,685	67,006
Hourly productivity(m ³ /hr)		7.39	1.85	1.88
Machine utilization(%) ²		51.0	63.9	85.2
Yarding cost(won/m ³)		26,183	87,709	41,833

²Machine utilization including setting up and dismantling time.

결과는 Table 5와 같다. 집재작업 비용은 기계비용(machine cost)과 시간당 생산성(hourly productivity)에 의해 결정되며, 기계이용률에 따라 변화하며, 춘천집재기와 타워야더는 가선의 설치 및 해체시간을 포함한 집재작업비용을 산출하였다. 춘천집재기의 고정비용, 운용비용, 그리고 인건비 등을 계산하여 기계비용을 산출하였을 경우, 시간당 약 98,681원/hr이 소요되는 것으로 분석되었으며, 기계비용과 작업생산성을 고려한 집재작업 비용은 약 26,183원/m³으로 나타났다. 이는 기존 연구결과(Kim and Park, 2010)에서의 기계비용 95,397원/hr과 비슷한 수준인 것으로 나타났으며, 이때 집재작업 비용이 29,968원/m³으로 본 연구에서의 작업비용이 높은 생산성으로 인해 낮게 나타난 것으로 판단된다.

타워야더의 기계비용은 103,685원/hr으로 산출되었으며, 이에 따른 집재작업 비용은 약 87,709원/m³으로 나타났다. 기존 연구결과(Kim and Park, 2010)에서는 타워야더의 기계비용이 84,065원/hr이며, 집재작업 비용은 23,032원/m³으로 본 연구에서의 결과보다 낮았다. 기계비용의 경우 인건비, 유류비 등의 상승요인 등이 기계비용을 증가시킨 것으로 판단되며, 본 연구에서의 시간당 작업생산성이 낮고, 기계비용이 높기 때문에 집재작업비용이 높게 나타난 것으로 보인다.

트랙터윈치의 기계비용은 67,006원/hr으로 다른 집재기

계에 비해 낮게 산출되었으며, 집재작업비용은 약 41,833원/m³으로 춘천집재기 보다는 높게 나타났으나 타워야더의 집재작업 비용보다는 낮게 분석되었다.

3. 집재작업 생산성 예측 및 효율성 비교 분석

1) 집재작업 생산성 예측

본 연구에서 수집한 자료를 이용하여 각 집재기계별 집재작업시간을 예측할 수 있는 추정식을 도출하여 집재작업 생산성 및 비용의 변화를 파악하였다. 평균 집재작업시간은 단계별 회귀분석 기법에 의해 추정식에 적합한 최적의 독립변수를 선택하여 추정식을 도출하였다(Table 6). 추정자료를 이용하여 평균 집재작업시간 추정식을 도출할 때 사용된 독립변수는 집재거리, 가로집재거리, 집재목의 개수, 집재목의 DBH 등이 선택되었으며, 춘천집재기와 트랙터윈치의 집재작업시간 추정식의 결정계수는 0.78과 0.89로 비교적 높은 추정 능력을 나타내는 것으로 분석되었다. 춘천집재기에 의한 집재작업의 경우 수집한 데이터의 양이 많아 비교적 추정능력이 우수한 추정식이 도출된 것으로 판단되며, 트랙터윈치의 경우 추정식 도출에 사용된 데이터의 양은 매우 적었으나, 작업공정이 비교적 단순하여 집재작업시간 추정식의 결정계수가 높게 나타난 것으로 보인다. 반면 타워야더의 집재작업시간 추정식의 결정계수는 0.31로 앞의 두가지 집재기계에 비해 추정

Table 6. Regression models to estimate the average cycle time(sec.) by fit data.

Yarder	Regression equations	n	R ²
Chuncheon Tower-yarder	time(sec.) = 16.81+3.05×Lateral dist. +1.40 × Yarding dist. + 21.77 × Pieces + 0.55 × DBH	245	0.78
Tower-yarder (RME-300T)	time(sec.) = 5.17 + 10.44 × Lateral dist. +2.99 × Yarding dist. + 15.46 × Pieces	32	0.31
Tractor winch (FARMI)	time(sec.) = -164.48 + 7.71 × Yarding dist. + 128.03 × Pieces	16	0.89

Table 7. Validation result of the regression equations using the test data.

Yarder	n	\bar{D}	$S_{\bar{D}}$	t^*	p-value
Chuncheon Tower-yarder	105	0.49	7.50	0.07	0.948
Tower-yarder (RME-300T)	14	-13.22	23.94	0.55	0.586
Tractor winch (FARMI)	7	24.78	109.25	0.23	0.824

능력이 상당히 낮게 나타났다. 타워야더의 경우 수집한 데이터의 양이 적고 독립변수로 사용된 집재거리, 가로집재거리, 집재수량 등의 변이가 크기 때문에 결정계수가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

Table 7은 앞에서 도출된 3가지 평균 집재작업시간 추정식을 검증하기 위해 실시한 t-검정을 통해 t 통계량(t^*), 검증자료와 추정식에 의한 평균 집재작업시간 차이의 평균치(\bar{D}), 그리고 평균 집재작업시간 차이의 평균치에 대한 표준오차($S_{\bar{D}}$)를 분석한 결과로서, 실측치와 추정치 간에는 통계적으로 유의한 차이가 인정되지 않았다($p>0.05$). 따라서 도출된 추정식에 의한 집재작업시간 추정치와 실제 집재작업시간이 통계적으로 차이가 없다는 것을 의미한다. 검증자료와 추정식에 의한 평균 집재작업시간 차이의 평균치(\bar{D})는 춘천집재기가 0.49초로 매우 작게 나타났으며, 타워야더와 트랙터윈치는 각각 13.22초와 24.78초로 약간 높게 나타났다. 타워야더와 트랙터윈치의 경우 수집한 자료의 수와 검증에 사용된 검증자료의 수가 적어 춘천집재기에 비해 평균치(\bar{D}) 값이 높게 분석되었으나, 통계적으로는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

본 연구에서 도출한 3가지 집재기계의 평균 집재작업시간 예측 추정식이 통계적으로 문제가 없는 것으로 분석되었으며, 더 많은 자료를 이용하여 추정식을 개발하기 위해 앞에서 추정자료와 검증자료로 분류하였던 자료를 통합하여 최종적으로 추정식을 도출하여도 문제가 없는지

Table 8. Result of F-test for the homogeneity between fit data and test data.

Classification	Delay-free cycle time (sec.)	
	F^*	p-value
Chuncheon Tower-yarder	1.23	0.2224
Tower-yarder (RME-300T)	1.00	0.9459
Tractor winch (FARMI)	0.72	0.5589

분석하였다. 추정자료와 검증자료의 집재작업시간에 대한 분산의 동질성을 비교하기 위해 Table 8과 같이 F-검정을 실시한 결과, 집재작업시간 표본분산의 비를 나타내는 F^* 는 모두 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다($p>0.05$). 따라서 추정자료와 검증자료의 분산이 동질성을 갖는 것으로 판단하여 자료 통합을 통해 집재작업시간 예측 추정식을 재도출하였다.

통합된 자료에 의해 도출된 최종 집재작업시간 예측 추정식은 Table 9와 같으며, 추정 능력이 비교적 높았던 춘천집재기와 트랙터윈치의 경우 결정계수가 0.03과 0.08씩 감소하였으나 비교적 높은 추정능력을 보이는 것으로 판단된다. 결정계수가 가장 낮았던 타워야더의 집재작업시간 추정식의 경우 자료의 수가 증가하면서 결정계수 값이 0.11 증가하여 추정 능력이 높아지는 것으로 분석되었다.

2) 집재작업 효율성 비교 분석

본 연구에서 조사한 3가지 집재기계의 집재작업 효율성을 비교하기 위해 동일한 조건에서 집재작업이 진행되었다고 가정하여 집재작업의 생산성 및 생산비용을 추정하여 비교하였다. 집재작업의 가정 조건은 Table 10과 같이 평균 흉고직경이 20 cm인 낙엽송 임분에서 벌채 후, 집재작업을 실시하고, 집재작업에서 평균 집재거리는 60 m, 평균 가로집재거리는 10 m, 1회 평균 집재목의 개수는 1.75개로 설정하였다.

Table 10과 같은 조건을 기준으로 집재기계별 집재작업

Table 9. Regression models to estimate the average cycle time(sec.) for yarding.

Yarder	Regression equations	n	R^2	Prob>F	p-value
Chuncheon Tower-yarder	time(sec.) = 36.17	350	0.75	<0.0001	<0.0001
	+ 3.19 × Lateral dist.				<0.0001
	+ 1.34 × Yarding dist.				<0.0001
	+ 20.18 × Pieces				<0.0001
Tower-yarder (RME-300T)	time(sec.) = -54.87	46	0.42	<0.0001	0.5800
	+ 8.53 × Lateral dist.				0.0007
	+ 0.71 × Yarding dist.				0.0005
	+ 20.41 × Pieces				0.0100
	+ 5.27 × DBH	0.1410			
Tractor winch (FARMI)	time(sec.) = -149.01	23	0.81	<0.0001	0.0420
	+ 6.81 × Yarding dist.				0.0010
	+ 137.08 × Pieces				<0.0001

Table 10. Comparison of yarding productivity and cost for three yarders.

Classification	Chuncheon Tower-yarder	Tower-yarder (RME-300T)	Tractor winch (FARMI)
Average DBH(cm)		20	
Average lateral distance(m)		10	
Average yarding distance(m)		60	
Average number of pieces per cycle		1.75	
Average volume per pieces(m ³ /tree)		0.20	
Average volume per cycle(m ³ /cycle)		0.35	
Machine utilization(%)		70	
Machine cost(won/hr)	98,681	103,685	67,006
Yarding productivity(m ³ /hr)	6.87	5.90	2.53
Yarding cost(won/m ³)	20,520	25,105	37,835

생산성 예측자료를 이용하여 생산성 및 생산비용을 분석한 결과, 춘천집재기의 시간당 생산성(m³/hr)은 약 6.87(38.47 m³/일), 타워야더는 5.90(33.04 m³/일), 그리고 트랙터윈치는 2.53(14.17 m³/일)으로 나타났다. 또한, 집재 작업비용은 각각 20,520원/m³, 25,105원/m³, 37,835원/m³으로 분석되었다. 춘천집재기의 경우 본 연구조사지에서 조사된 시간당 생산성은 7.39 m³/hr, 집재작업비용은 26,183원/m³으로 조사되었으나 Table 10과 같은 조건에서는 작업생산성과 작업비용이 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 1회 집재재적이 낮아지면서 작업생산성이 낮아지고, 기계이용률은 조사지에서보다 20% 가량 높아지면서 작업비용이 낮아지는 결과라고 파악된다.

타워야더에 의한 연구 조사지에서의 집재작업에서는 생산성이 1.85 m³/hr, 작업비용이 87,709원/m³으로 조사되었으나, Table 10의 조건에서는 작업생산성은 높아지고 집재비용은 낮아지는 것으로 분석되었다. 1회 집재재적이 0.2 m³/cycle에서 0.35 m³/cycle으로 높아지고, 집재거리가 짧아지면서 작업생산성은 높아졌으며, 이에 따라 작업비용은 낮아지는 효과가 나타나고 있다.

트랙터윈치에 의한 집재작업에서는 생산성이 1.88 m³/hr, 작업비용이 41,833원/m³으로 조사되었으나, Table 10의 조건에서는 작업생산성이 2.53 m³/hr으로 높아졌으며, 작업비용은 37,835원/m³으로 약간 낮아졌다. 집재목 1본의 입목재적이 크고 1회 집재재적이 증가하면서 집재거리가 2배정도 증가하였음에도 작업생산성은 증가하였으며, 기계이용률은 낮아졌음에도 작업비용이 감소하는 것으로 분석되었다.

집재기계별 집재작업생산성을 집재거리에 따라 추정된 결과는 Figure 1과 같다. 집재거리가 멀어질수록 생산성은 떨어지게 되며, 춘천집재기와 트랙터윈치에 비해 타워야더의 생산성은 감소폭이 적은 것으로 나타나고 있다. 집재거리가 짧을수록 춘천집재기의 생산성이 가장 높았으며, 집재거리가 120 m 이상일 경우에는 타워야더의 생산

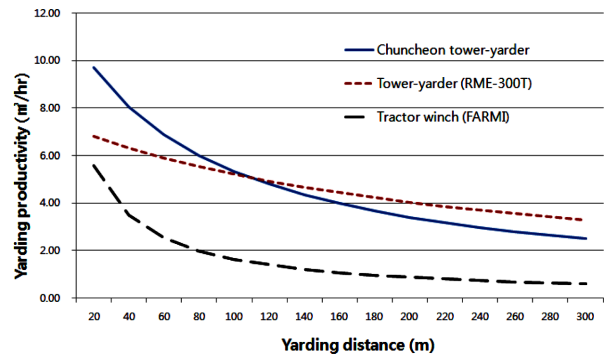


Figure 1. Comparison of yarding productivity for a wide range of yarding distance.

성이 높은 것으로 나타나고 있다. 지면끝기식 집재작업이 이루어지는 트랙터윈치의 경우 집재거리가 증가하면, 작업생산성이 급격히 감소하는 것으로 분석되고 있으며, 이에 비해 타워야더는 집재거리가 증가하더라도, 작업생산성의 감소폭이 비교적 적은 것으로 나타나고 있다. 따라서 집재거리가 길어질수록 타워야더의 작업생산성이 다른 집재기계에 비해 높아지면서 효율적인 집재작업이 이루어질 수 있을 것으로 예상된다.

집재거리에 따른 집재기계별 생산비용을 비교한 결과는 Figure 2와 같다. 집재거리가 20~40 m 정도로 짧을 경우에는 춘천집재기의 생산성이 가장 높으면서 생산비용도 가장 낮은 것으로 나타나고 있으나, 짧은 거리의 소량 집재작업을 위해 가선을 설치하고 다시 해체하여 집재기계를 이동시키는 등 비효율적으로 집재기계가 운영될 경우와 트랙터윈치의 기계이용률이 실제 80% 이상임을 감안한다면 비용적인 측면에서 트랙터윈치의 생산성이 높다고 평가할 수 있다. 집재거리가 140 m 이하에서는 춘천집재기의 집재작업생산비용이 가장 적게 나타나고 있으나, 집재거리가 그 이상으로 증가할 경우 타워야더의 집재작업생산비용이 저렴한 것으로 분석되고 있다. 춘천집재기와 타워야더의 집재작업생산성에서는 집재거리 120

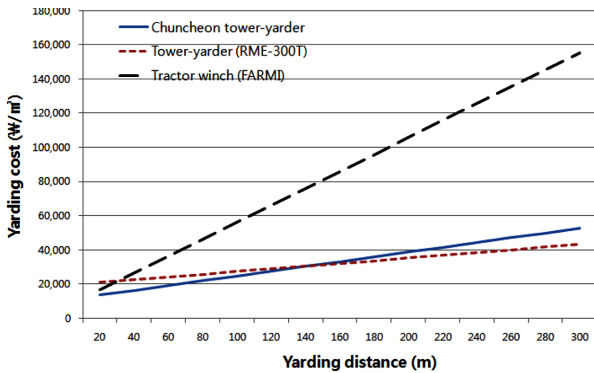


Figure 2. Comparison of yarding cost for a wide range of yarding distance.

m를 기준으로 교차되고 있었으나, 집재작업생산비용에서는 140 m를 기준으로 교차되고 있다. 이는 집재작업기계의 기계비용은 고정적으로 소요되고 있으나, 집재작업생산성에 따라 단위재적당 집재작업생산비용이 결정되기 때문에 집재거리 120 m 이상에서 타워야더의 집재작업생산성이 높았으나 집재작업생산비용은 집재거리 140 m 이상에서 저렴하게 나타나는 것으로 분석되었다. 집재작업의 효율성은 생산성과 생산비용을 모두 고려하여 결정하여야 하므로 집재거리 140 m 이상에서 타워야더의 집재작업 효율성이 높은 것으로 평가하였다. 결국 집재거리가 40 m 이내로 짧을 경우에는 트랙터윈치에 의한 집재작업이 효율적인 것으로 판단되며, 40~140 m의 집재거리에서는 춘천집재기, 그 이상의 집재거리에서는 타워야더가 가장 효율적인 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 춘천집재기, 타워야더, 트랙터윈치 등 3가지 집재기계에 대한 집재작업생산성 및 집재작업생산비용을 분석하여 각 집재기계에 따른 집재작업 효율성을 예측하고자 하였다. 이를 위해 각기 다른 임분 조건에서의 집재작업에 대한 작업효율성을 비교하기가 어려워 동일한 조건에서의 작업생산성과 집재작업 비용을 추정하여 각 집재기계에 따른 작업효율성을 비교하였다. 각 집재기계에 따른 평균 집재작업시간을 예측할 수 있는 추정식을 도출하여 작업시간을 산출한 후, 집재작업생산성과 작업비용을 추정하여 작업효율성을 비교하였을 경우, 집재거리가 40 m 이내로 짧을 경우에는 트랙터윈치에 의한 집재작업이 효율적이며, 40~140 m의 집재거리에서는 춘천집재기가, 140 m 이상의 장거리 집재작업에서는 타워야더가 가장 효율적인 것으로 나타났다.

집재작업에서의 작업생산성과 작업비용은 1회 집재적 및 집재거리 등에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 판

단되며, 집재작업지의 임분조건에 따른 최적의 집재작업 시스템을 구축하여 효율적인 집재작업을 실행하기 위해서는 좀 더 많은 집재기계에 대한 집재작업공정 조사를 통한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부재원(교육과학기술부)으로 한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 연구되었습니다.

인용문헌

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.

Brinker, R.W., Kinkard, J., Rummer, B., and Landford, B. 2002. Machine rates for selected forest harvesting machines. Circular 296(Revised). Alabama Agricultural Experimental Station. Auburn, Alabama, USA. pp. 32.

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.

Huyler, N.K. and LeDoux, C.B. 1997. Cycle-time equation for the Koller K300 cable yarder operating on steep slopes in the Northeast. Res. Pap. NE-705. Rannor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. pp. 4.

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.

Korea Forest Research Institute. 2008. Forestry working equipments. pp. 101.

Korea Forest Service. 2013. Statistical yearbook of forestry. pp. 486.

Park, S.-J. 2002. An analysis of the efficiency of yarding operation by yarder attached on tractor. *Journal of Korean Forest Society* 91(3): 287-295.

Shin, M.Y., Jung, I.B., Koo, K.S., and Won, H.G. 2006. Development of a site index equation for *Pinus koraiensis* based on environmental factors and estimation of productive areas for reforestation. *Korean Journal of agricultural and Meteorology* 8(2): 97-106.

Snee, R.D. 1997. Validation of regression models: Methods and examples. *Technometrics* 19(4): 415-428.

Song, T.-Y., Park, M.-S., Kim, J.-W., and Kang, G.-W. 1998.

- Studies on the comparison of the working cost with skidding method for track-type mini skidder. Korean Journal of Forest Economics 6(2): 20-28.
- Studier, D.D. and Binkley, V.W. 1974. Cable logging systems. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Region. pp. 211.
- 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.
-
- (2013년 11월 7일 접수; 2014년 1월 28일 채택)