

## 자주식 반송기를 이용한 가선집재작업의 안정성분석

오재현<sup>1</sup> · 박문섭<sup>2</sup> · 김재원<sup>2</sup> · 차두송<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>강원도 환경정책과, <sup>2</sup>국립산림과학원, <sup>3</sup>강원대학교 산림과학대학

## Stability Analysis of Cable Yarding with Self-Propelled Carriage

Jae-Heun Oh<sup>1</sup>, Mun Seub Park<sup>2</sup>, Jae Won Kim<sup>2</sup> and Du Song Cha<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Policy, Gangwon Province, Chunchon 200-700, Korea

<sup>2</sup>Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>3</sup>College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

**요 약:** 자주식 반송기를 이용한 가선집재작업의 안정성을 이론적인 계산과 현장 계측을 통해 검토하였다. 가선집재 시스템의 이론적 안정성 평가의 유용성을 입증하기 위하여 스카이라인의 장력과 근주의 저항력을 측정하여 이론 계산값과 비교평가하였다. 그 결과 측정된 스카이라인의 장력과 계산값이 유사하였으며, 이를 통해 전체적인 안정성 검토가 가능하였다. 또한 근주의 저항력은 근주의 직경과 밀접한 관계가 있으며 근주면의 각도가 5~10° 일 때 가장 큰 저항력을 나타내었으며, 그 이상의 각도에서는 지주목으로서의 기능을 잃어버리는 것으로 판단되었다.

**Abstract:** Stability of cable yarding with self-propelled carriage was discussed by theoretical tension calculation and field test. To verify usefulness of theoretical stability evaluation of cable yarding operation, skyline tension and stump anchoring force were measured and compared with theoretical calculation. As results, we know that measured skyline tension was similar to theoretical calculated tension. From these results, overall stability of cable logging operation could be evaluate. The stump anchoring force correlated closely with the stump diameters. The inclination angles that the stumps show the maximum anchoring force were ranged 5-10 degrees. It was conclude that the stumps have lost the function as an anchor when the inclinations was so large that they could be observed.

**Key words :** cable yarding, forestry machine, forest operation, self-propelled carriage

### 서 론

최근 국내의 사회적, 경제적 여건의 변화로 인해 기존 인력에 의존하는 집재작업이 임업용 트랙터, 윈치, 가선집재 등을 이용하는 기계화된 집재작업으로 대체되고 있으며, 또한 숲가꾸기 사업 및 간벌 등으로 발생한 육림 부산물 및 간벌재를 효율적으로 수집하기 위한 집재방법 등이 요구되어 지고 있는 실정이다. 집재방법중에서 가선 집재법은 산악지형에서 생산성이 높고, 임도시설 혹은 작업로에 대한 요구도가 낮아, 임지보호에 효과적이며, 벌도목을 공중에 띄운 상태에서 임도변까지 운반할 수 있으므로 입목, 치수 및 임지에 대한 피해를 줄일 수 있는 장점

이 있다. 또한 전목(全木)상태로 집재가 가능하며, 최근 산불의 가중요소로 인식되고, 에너지원으로서 재활용 가능성이 있는 벌도목 가지나 말목(末木)등을 별도로 수집할 필요가 없는 것이다. 일반적으로 가선집재는 기계비용이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있으나, 국내 산림의 지형적 특성을 고려할 때 작업의 생산성과 임지보호 측면에서 비교적 효율적인 집재방법이라고 판단된다.

현재 국내에는 중·소형의 가선 집재기들이 외국으로부터 도입되어 부분적으로 활용되고 있다. 그 중에서 자주식 반송기는 90년대 초반 국내의 민간업체들에 의해 일본으로부터 도입된 것으로, 타기종에 비해 구입비용이 낮고, 조작이 용이하여 쉽게 이용할 수 있는 간편한 기종으로 알려져 있다. 국내에 도입되어 활용되고 있는 자주식 반송기는 이와후지(Iwafuzi) 社の Radi-carry로, 현재 소경재 위주의 국내 임업특성과 초기 단계에 있는 국내 임업의 기계화 과정을 고려할 때 충분히 보편화 될 가능성이

\*Corresponding author

E-mail: dscha@kangwon.ac.kr

본 연구는 농림기술관리센터 현장애로기술과제(103035-3)에 의한 연구결과임

있는 기종이라고 할 수 있다.

그러나 가선집재시스템의 작업 효율성은 시스템을 구성하는 와이어로프(wire rope)의 역학구조에 지극히 민감하다. 따라서 가선집재시스템을 효율적으로 이용하기 위해서는 수확벌채지의 지형적 특성, 임도설비, 벌도목 견인 방법, 시스템 설치방법 등 작업생산성과 관련된 주요인 자들에 대한 이해가 중요하다.

가선집재시스템의 역학적 구조해석에 의한 연구는 우리나라와 산림지형이 비슷한 미국의 북서부 지방을 중심으로 Carson과 Mann(1970)이 현수선 원리에 입각한 가선의 장력분석에 관한 이론을 제시한 이래 Studier와 Binkley(1974), Falk(1981), Nickerson(1980) 등에 의해 지형, 벌도목 특성 및 가선집재시스템의 기계적 성질 등을 밝히기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 과거 노재후 등(1988), 박종명(1990), 노재후(1992) 등에 연구결과가 발표한 바 있으나 제한된 범위 내에서의 작업시간조사에 의한 생산성 연구로 한정되어 있고, 정주상(1993)과 정주상과 정우담(1994)이 고정식 가선시스템과 유동식 가선시스템의 이론적 역학분석에 관한 연구가 보고되어있다. 또한 자주식 반송기에 대한 연구는 김덕수(1994)의 생산성 분석 연구만이 진행되었을 뿐 현장에서의 가선작업 안정성과 적정 가선장력에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 기계화 집재작업 중에서 국내 산악지형에 비교적 도입이 용이하며 적용가능성이 높은 자주식 반송기를 이용한 가선집재작업의 안정성을 현장계측을 통해 분석하고, 이론적인 안정성 추정방법과의 비교를 통해 이론적인 안정성평가의 유효성을 검증하여 집재현장의 가선설치에 쉽게 적용할 수 있는 방안을 마련하기 위해 수행하였다.

## 연구방법

### 1. 연구대상지

본 연구는 국립산림과학원 산림생산기술연구소의 광릉시험림 15임반에서 실시하였다. 이지역은 Figure 1과 같이 기존의 임도에서 분기된 작업로가 설치되어 있는 곳으로 임황 및 지황은 Table 1과 같다.

### 2. 적용된 자주식 반송기와 집재작업 방법

Figure 2와 같이 안정성 평가에 적용된 자주식 반송기는 엔진출력이 20마력이고 무게는 440 kg으로 무선조정에 의해 엔진시동과 이동 및 견인작업이 가능하다. 반송기의 최대 견인력은 800 kg, 최대집재거리는 약 300 m, 횡방향 집재거리는 좌우 각 50 m로서 최대작업 허용면적이 약 3 ha정도이다.

안정성 분석에 적용된 가선집재방법은 비교적 전문적

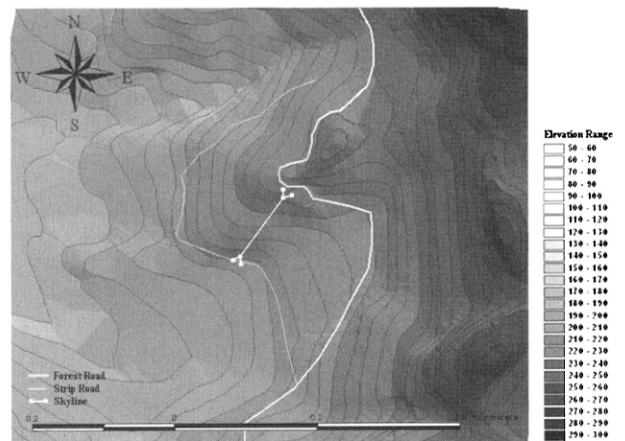


Figure 1. Installed location of cable yarding system in study site.

Table 1. Conditions of forest stands in study site.

Study site	Gwangreung experimental forest
Tree species	Korean pine ( <i>pinus koraiensis</i> )
Age class	IV
Mean DBH(cm)	25
Mean tree height (m)	16.5
Mean gradient (%)	19
Stands density(m <sup>3</sup> /ha)	120



Figure 2. Self-propelled carriage used in stability analysis of cable yarding.

인 지식을 요하지 않고 국내 소경재 수집 반출에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되는 고정식 가선집재 방법으로, 동력원으로는 자주식 반송기가 사용하며, 가선의 설치 및 해체에 요구되는 시간은 약 1~1.5일 정도이다. 집재작업은 집재장과 벌도목이 위치한 곳에서 각각 1대씩 모두 2대의 무선 조종기를 이용하며, 일반적으로 4인 혹은 5인이 1개조로 편성되어 목재생산 작업을 실시하고 있다. 본 연구의 안정성 해석이 실시된 가선집재방법은

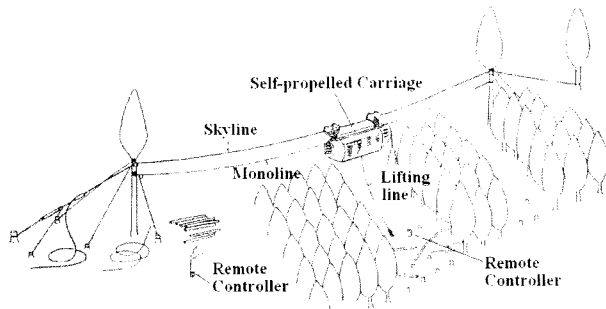


Figure 3. Cable yarding with self-propelled carriage.

Figure 3과 같은 중간지지대가 없는 단지간(single span) 고정식 가선집제방법을 적용하였다.

3. 스카이 라인의 이론적 안정계산법

적용한 가선집제방법에서 가선의 장력과 안정성은 스카이 라인의 최대장력계산과 보정계산법(산림청, 2000)에 따라 추정하였으며, 본 연구에서는 보정계산까지 적용한 결과를 활용하였다.

4. 가선의 장력측정

자주식반송기가 설치된 장소에서 각각 스카이라인과 메인라인 2곳의 장력을 측정하기 위해 앞쪽 기둥목(head tree)의 지주목에 연결되는 부분에 Figure 4와 같이 각각 5톤과 2톤의 Load cell과 자료수집장치를 설치하여, 자주식 반송기가 작동되는 동안 지속적인 장력을 측정하였다.

설치된 로드셀은 각각 스트레인 앰프를 통해 증폭되어 A/D 카드를 통해 노트북 컴퓨터로 입력하여 데이터를 수집하였다. 계측에 사용된 전원은 DC 12V의 차량용 배터리를 사용하였으며, 노트북에 저장된 자료는 추후 물리적인 값으로 환산하여 분석하였다.

5. 근주 지주목의 저항력측정

일반적으로 가선을 고정 설치할 때는 현장의 입목을 그대로 이용하는 경우가 대부분이다. 이 경우 지지력이 약한 입목을 선택하여 가선을 고정하는 경우, 가선의 장력

Table 2. Specifications and condition of tested stumps for measuring pull-out strength.

Species	Nos. of trees	Tree age (year)	Stump diameter(cm)	Ground gradient(deg.)
Pinus koraiensis	1	30	20.0	4.0
	2	17	18.0	6.0
	3	25	20.2	1.5
	4	30	23.0	4.0
	5	25	17.8	4.0

문제 및 사고발생의 위험이 커진다. 따라서 선택된 가선집제방법의 특성과 반출목의 크기 및 하중을 고려해 적절한 버팀목을 선택할 수 있도록 하기 위하여, 근주의 측면인발 저항력을 측정하여, 근주직경처럼 현장에서 쉽게 측정할 수 있는 요인의 함수로써 표현하였다. 근주의 저항

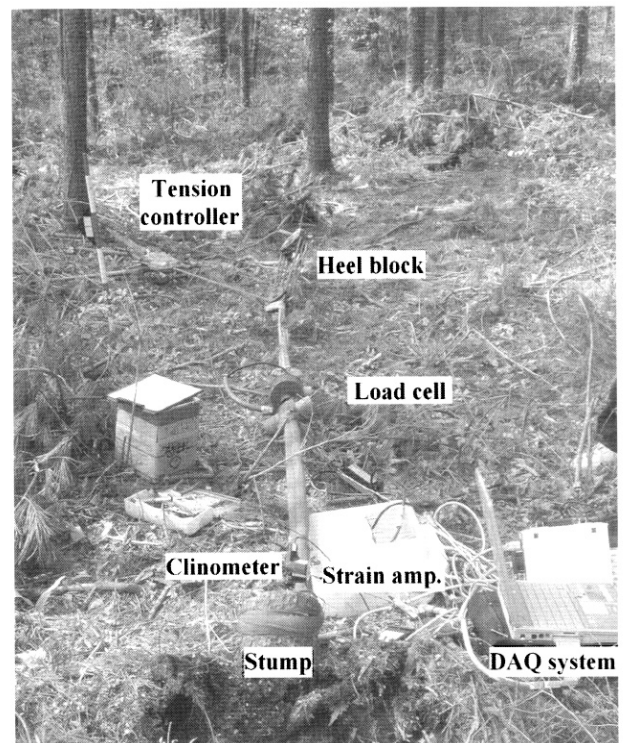


Figure 5. Measurements of pull-out strength for tree stump.



Figure 4. Load-cell and data acquisition system for measuring tension of wire rope.

력을 측정하는 곳은 가선집재 시스템이 설치된 동일 임분에서 실시하였다. 총 5본에 대해서 근주의 인발저항력을 측정하였으며, 측정된 잣나무 근주의 제원과 조건은 Table 2와 같다.

근주의 인발저항력 측정방법은 힐 블록(heel block)을 이용하여 Figure 5와 같이 대상 근주를 와이어로 지상높이 15 cm에서 고정시킨 후, 견인장치를 이용하여 견인하였다. 견인시 발생하는 견인력과 근주가 견인력에 의해 도복되는 것을 근주면상에 고정된 경사계 통하여 모니터링하였다. 사용된 경사계는  $\pm 60^\circ$ 까지 측정가능하며 출력이 전류형태로 도선의 길이에 영향을 받지 않는 것이 특징이다. 또한 근주의 측면인발 저항력을 측정하기 위해 5 ton 용량의 로드셀을 이용하여 측정하였다. 실험은 계속적으로 견인한 후, 근주면의 각도가  $30^\circ$  이상이 되면 실험을 종료하였으며, 그때까지의 각도변화 및 근주의 저항력 변화를 자료수집장치를 통해 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 자주식 반송기 이용한 고정식 가선집재의 안전성검토**

고정식 가선집재 방법의 반송기 위치에 따른 스카이라인의 장력 변화 특성을 분석하기 위해 Figure 6과 같은 고정식 가선시스템을 기반으로 하는 이론장력 계산을 실시하였다. 이때 Figure 6에서의 각각의 제원은 실제 안정성 검토를 위해 설치한 지주와 가선의 제원 및 설치위치 단면을 기준으로 하였다. 실제장력을 측정하기 위해 설치한 가선집재시스템에 사용된 와이어로프는 직경 12 mm를 사용하였다. 또한, 이때의 안전율은 산림청(2000)의 장력계

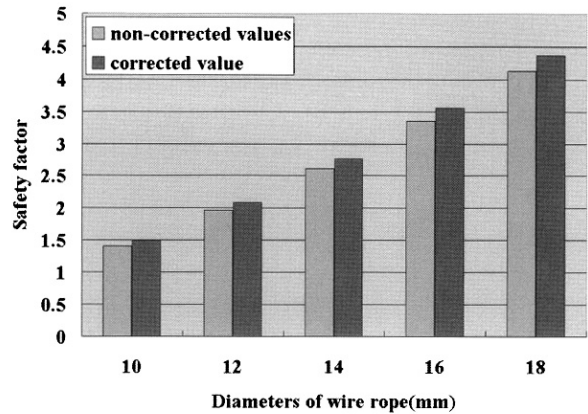


Figure 7. Calculated safety factor of cable yarding wire rope diameters.

산 방법에 의해 계산하였으며, 와이어로프의 강도는 Table 3을 기준으로 계산 하였다.

계산 결과 Figure 7과 같이 안전계수가 2.7미만인 경우는 보정계산을 한 경우에 있어서도 스카이라인의 직경이 16 mm 이상이 되어야 하는 것으로 판단된다. 따라서 장력측정시 사용한 직경 12 mm의 스카이라인은 공주행의 경우 무보정 계산결과에서 1.97의 안전율을 나타내었고, 보정계산을 한 경우도 2.10으로, 일반적으로 적용되는 안전계수 2.7 이하로 동적하중이 가해질 경우 안정성에 문제가 있을 것으로 판단되었다.

**2. 가선장력 측정 및 해석**

가선 집재시스템에 있어서 올바른 가선의 장력은 작업에 있어서 매우 중요한 요소이다. Watanabe(1986)는 적절

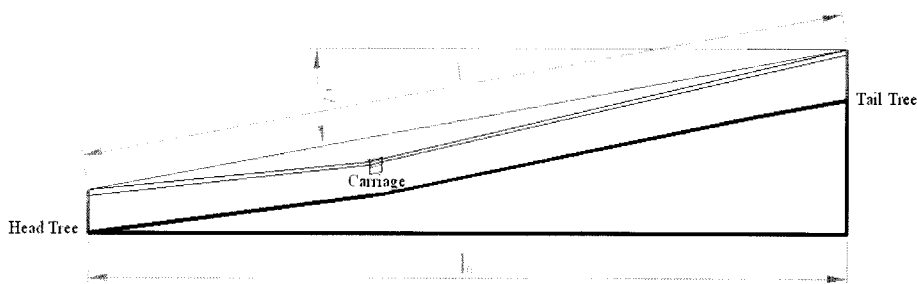


Figure 6. Geometric variables of single span cable yarding system used in theoretical tension calculation.

Table 3. Strength and unit weight of wire ropes.

Type	Diameter (mm)	ST W	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
			ton	kg	ton	kg	ton	kg	ton	kg	ton	kg	ton	kg
Skyline		ton	3.9	6.1	8.7	11.8	15.5	19.6	24.2	29.3	34.9	40.9	47.5	54.5
A type(6*7)		kg	0.237	0.370	0.533	0.725	0.947	1.20	1.48	1.79	2.14	2.50	2.90	3.33
Mainline		ton	3.5	5.5	7.9	10.8	14.1	17.8	22.0	26.6	31.7	37.2	43.2	49.5
A type (6*19)		kg	0.234	0.364	0.524	0.715	0.934	1.18	1.46	1.77	2.10	2.47	2.86	3.29

\*ST : strength of wire ropes, W: weight of wire ropes

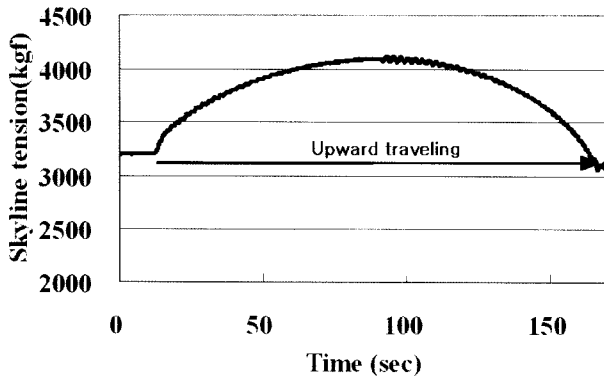


Figure 8. Changes of skyline tension for unloaded the carriage.

하지 않은 가선의 장력은 작업의 능률에 많은 영향을 준다고 하였다. 그러나 가선의 장력을 일정하게 유지하는 것은 매우 어렵다. 간이 가선 기계의 경우 기계자체의 이동이 빈번하기 때문에 가선의 전체적인 길이와 경사가 달라지기 때문이다. 자주식 반송기의 공주행시 측정된 스카이라인의 장력추이는 Figure 8과 같으며, 지주간의 거리의 1/2이 되는 지점에서 가선의 장력이 최대가 되는 것을 알 수 있다. Figure 8에서의 조건은 상향으로 자주식 반송기를 저속으로 공주행 시킨 결과로, 최대장력은 4,120 kgf 이었다. 이 결과는 스카이라인의 이론적 최대장력을 구하는 계산 방법으로 구한 4,163 kgf와 비슷한 결과를 나타냄으로써, 이론 장력계산의 유용성을 나타내고 있는 것이다. 그러나, 이 계산 결과는 보정계산의 결과로 실제 가선의 장력으로 양쪽 지주간의 거리가 실제로 줄어든다는 것을 짐작할 수 있는 부분이며, 본 연구의 경우 양쪽 지주간 거리가 최소 8 cm 정도는 변형되었다는 것을 이론적 계산에 의해 예측할 수 있다.

### 3. 근주 지주목 저항강도의 평가

가선을 고정 설치할 때는 지금까지 대부분 현장 작업원의 경험에 의존하여 지주목을 선정하는 경우가 대부분이다. 그러나 가선집재시스템과 같이 무거운 중량물을 대상으로 하는 경우에는 특히 안전성에 대한 문제를 신중히

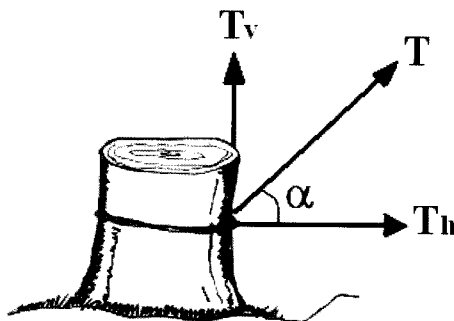


Figure 9. Load diagram of stump anchor.

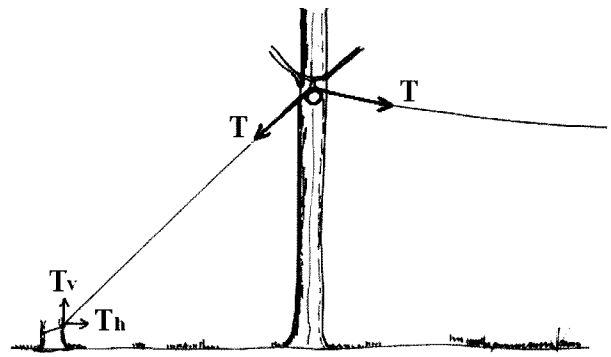


Figure 10. Relationship of stump anchoring strength and cable tension.

고려하여야 한다.

Figure 9는 스카이라인과 메인라인 등과 같은 집재가선 시스템의 구성물을 안전하게 고정시키기 위한 방법으로 현장에서 벌채된 나무 혹은 벌도를 하여 근주를 지주목으로 이용하는 경우를 고려한 것이다. 실제의 경우는 장력 T와 같이 지면과 일정한 각도를 이룬 상태로 고정이 되게 된다. 이 경우 장력 T에 대한 수평분력( $T_h$ )과 수직분력( $T_v$ )로 나누어 생각할 수 있다. 즉  $T_h$ 의 힘과 각도  $\alpha$ 를 알면 장력 T를 계산할 수 있으며 반대로 장력 T와 각도  $\alpha$ 를 안다면  $T_h$ 와  $T_v$ 를 알 수 있다. 따라서 지주목의 최대저항강도 측정시 측정된 힘을  $T_h$ 에 대한 성분으로 측정할 수 있다면, 최대로 견딜 수 있는 장력 T를 역으로 계산할 수가 있다(Figure 10).

스카이라인의 장력으로 인발되는 근주단면의 각도와 수평견인장력과의 관계는 Figure 11과 같으며, 근주직경이 클수록 최대 측면 인발저항력이 크게 나타났다. 최대 인발저항력은 근주단면의 각도가 5~10° 사이에서 발생하였으며 그 이후에는 계속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 최대 인발저항력이 나타낸 이후에도 감소하는 도중에 약간의 증가분이 관찰되는데 이것은 당기는 방향쪽의 반대방향으로 지지하고 있는 측근과 주근이 먼저 저항을 하다가 주근과 측근이 대부분 인발이 된 후, 측근에 연계되어 발달한 수하근들이 저항하는 것으로 판단

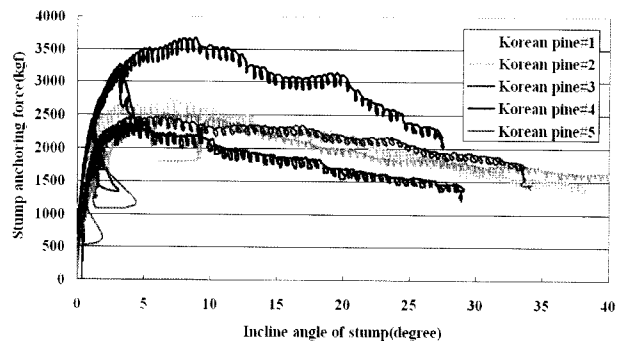


Figure 11. Changes of stump anchoring forces by inclination angle of stumps.

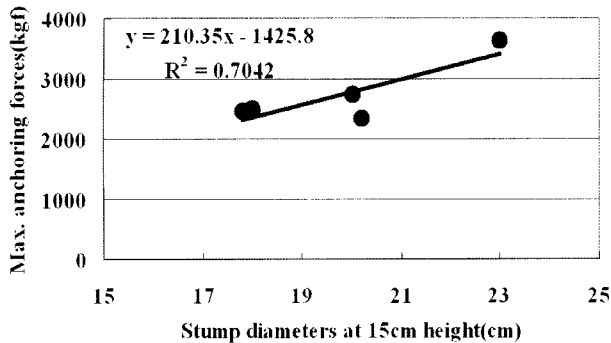


Figure 12. Relationship between diameters and anchoring force of stumps.

된다. 또한 현재 실험방법은 견인장치의 설치로 인해 견인하는 방향이 제한적이라서 뿌리의 발달 상태를 고려하지 못했다. 사면에서 자라는 뿌리의 경우 사면방향으로 견인할 때와 사면의 측방향에서 견인하는 것이 다를 것으로 사료되는 바, 추후 계속적인 보완 실험이 요구된다.

또한 각 지주목의 근원직경 별로 최대 견인저항력이 어느 정도 선형적으로 증가할 것으로 판단되어 근주의 근원직경에 따른 최대 견인저항력을 분석한 결과, 20.2 cm의 근원직경을 가진 공시목의 경우 Figure 12과 같이 다른 지주목과는 약간 낮은 값을 나타내었다. 이것은 전술한 바와 같이 측근의 방향 및 자람 상태에 따른 변이로 추정된다. 그러나 직경이 커질수록 견인저항력이 커지는 경향은 관찰할 수 있었다.

#### 4. 자주식 반송기를 이용한 단시간 가선집재의 안정성 검토

계산 또는 측정된 가선의 장력을 고려할 때 Figure 10과 같이 가선의 장력이 그대로 지주목에 전달되므로 버팀줄이 설치된 각도를 고려하여 지주목의 수평면 최대 저항각도와 비교를 한다면 시험한 가선집재의 기본적인 안정성 검토를 할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 11에서 근주직경이 약 23 cm 정도의 30년생 잣나무 지주목의 수평방향의 최대견인저항력은 약 3,600 kgf로 스카이라인 장력분석을 통해 얻어진 직경 16 mm 이상의 와이어를 사용할 경우, 안전율 2.7이상에서는 스카이라인 안정성 계산법을 통해 최대 300 kgf까지의 견인목을 견인할 수 있는 것으로 계산되었으며, 이 경우 와이어에 걸리는 이론적인 최대장력은 약 6,000 kgf이다. 따라서 지주목의 최대 견인량을 고려한 지주목 버팀줄의 설치각도 ( $\alpha$ )는 최소한  $53^\circ$  이상으로 설치하여야 할 것이다. 지금까지의 이론적인 검토와 실측에 의한 검증은 정적상태에서의 힘의 평형을 고려하여 해석 평가한 것이지만 실제의 경우는 목재가 이동을 하는 상황이라서 모든 구조물에 동적인 힘이 부가되므로 차후 동적인 문제에 대한 것도 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 결론

현재 국내 임업 경영 상황과 전체적인 기계화 마인드, 그리고 지형적인 조건 등을 고려할 때 가장 효율적이고 경제적인 것이라고 판단되는 자주식 반송기를 활용한 가선집재작업의 안정성을 검토하였다. 이론적 해석과 실측을 통해 자주식 반송기를 이용한 가선집재작업의 안정성을 검토한 결과, 이론적인 해석만으로도 충분히 실제의 가선집재 안정성을 예측할 수 있었다.

특히 예측된 자료를 통해 버팀줄의 설치조건을 제시할 수 있었으며, 지금까지 경험에 의존하여 가선집재시스템을 운영하는 것에서 보다 체계적이고 안전한 가선집재작업을 운영할 수 있는 가능성을 찾을 수 있었다. 또한 이러한 예측 및 설계 기술을 통해 임업 현장에서의 안전사고를 줄이며, 향후 목재자원 수확에 매우 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 인용문헌

1. 김덕수. 1994. Radi-Carry를 이용한 무선 조종식 가선집재작업의 생산성 분석. 서울대 대학원 석사학위논문.
2. 노재후. 1992. 집재작업시스템의 작업능률분석에 관한 연구. 서울대 대학원 박사학위논문.
3. 노재후, 김재원, 박문섭. 1988. 케이블 크레인의 국내적용 가능성에 관한 연구. 시험연보 36: 145-153.
4. 박종명. 1990. 소형 케이블 크레인 K-300을 이용한 집재작업에 관한 연구. 서울대 대학원 석사학위논문. pp.45.
5. 산림청. 2000. 산림과 임업기술 [III]산림경영. pp.755.
6. 정주상. 1993. 가선집재시스템 역학구조 해석에 관한 연구 -고정식 가선집재시스템을 중심으로-. 한국임학회지 82(1): 34-43.
7. 정주상, 정우담. 1994. 유동식 가선집재시스템 Live Skyline의 역학분석에 관한 연구. 한국임학회지 83(3): 357-364.
8. Carson, W. W. and C. N. Mann. 1970. A technique for the solution of catenary equations. USDA Forest Service Research Paper PNW-110.
9. Falk, G. D. 1981. Predicting the payload capability of cable logging systems including the effect of partial suspension. USDA Forest Service Research Paper NE-479.
10. Nickerson, D. B. 1980. Skyline payload analysis using a desktop computer. Division of Timber Management, USDA Forest Service. Portland, Oregon.
11. Studier, D. D. and V. W. Binkley. 1974. Cable logging systems. Division of Timber Management, USDA Forest Service. Portland, Oregon. pp. 212.
12. Watanabe, S. 1986. The cable stretching planing and cheking. 49-66. Thanaban Printer, Chiang Mai.