

가선집재시스템 역학구조 해석에 관한 연구^{1,2}

— 고정식 가선집재시스템을 중심으로 —
정 주 상³

A Study on Mechanical Analysis of Cable Logging Systems^{1,2}

— with an Example of a Standing Skyline —
Chung, Joo-Sang³

요 약

이 논문에서는 고정식 가선집재기를 중심으로 집재작업의 구조적 특성을 역학적 원리를 이용하여 해석하였다. 그리고 집재지의 지형여건, 시스템의 기하학적 형태 및 작업조건과의 함수관계에서 최대 허용반송용량을 추정하기 위한 함수관계식을 힘과 모멘트의 평형조건으로부터 유도하는 과정을 제시하였다. 이러한 관계식 중에는 벌도목의 들어올려진 정도와 단선구조 cable 철선의 역학적 해석을 위한 기본 관계식들이 포함되었고, 단선구조 역학해석은 현수선원리를 기초로 하여 단선의 처짐이 고려되었다. 역학관계식들은 복잡한 비선형함수식들로 구성되어 이를 풀기 위한 과정을 제시하기 위하여 전산모델을 개발하였다. 이 모델에서는 계산목적상 Secant기법을 이용하였다. 또한 가상적인 데이터를 이용하여 전산모델의 적용예를 제시하였다.

ABSTRACT

In this paper, the characteristics of cable logging operations are discussed from a standpoint of mechanics. An example of standing skyline operations is used to illustrate the mechanical principles. Using force and moment boundary conditions, the maximum allowable payload was formulated as a function of slope profile, system geometry and operation options. This formulation includes fundamental equations for log drag and single segment mechanics. The catenary link model is the basic assumption in simulating cable segment stretches. In order to demonstrate the solution procedures of the formulation, a computer model was developed. The model uses Secant algorithm to determine the solution of the complex nonlinear equation set. Finally, the computer model was demonstrated using a hypothetical data set.

Key words : Cable logging operations, Standing skyline, Maximum allowable payloads, Catenary link, Mechanics, Secant algorithm, Computer model.

¹ 접수 1993년 1월 5일 Received on January 5, 1993.

² 이 연구는 1992-1993년도 한국과학재단 일반목적기초연구비 지원에 의한 연구결과의 일부임.

³ 서울대학교 산림자원학과, Department of Forest Resources, Seoul National University, Suwon, Korea.

I. 서 론

우리나라는 최근 사회적, 경제적 여건의 변화로 인해 기존의 인력의존 집재작업이 임업용 트랙터, 윈치, 가선집재 등을 이용하는 기계화된 집재작업으로 대체되고 있다. 이 중 가선집재법은 (1) 급경사지의 산악지형에서 생산성이 높고, (2) 임도시설 혹은 작업로에 대한 요구도가 낮아 임지보호에 효과적이며, (3) 벌도목을 공중에 띄운 상태에서 임도변까지 운반할 수 있으므로 임목, 치수 및 표토에 대한 피해를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 따라서 일반적으로 가선집재는 트랙터나 윈치를 이용한 기계화 집재법에 비해 작업단가가 비교적 높지만 작업특성상 급경사지 집재에 적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 우리나라에서는 대부분의 산림이 경사가 급격한 산악지형에 편재하고 있는 실정을 고려할 때 작업의 생산성과 임지보호 측면에서 가선집재가 가장 효율적인 집재방법이라고 판단된다.

한편 가선집재시스템의 작업 효율성은 시스템을 구성하는 cable 철선의 역학구조에 지극히 민감하다. 이러한 시스템의 역학구조를 이해하기 위해서는 수확벌채지의 지형적 특성, 임도설비, 벌도목 견인방법, 시스템 설치방법 등 작업생산성과 관련되는 주요 인자들에 대한 이해는 물론 구조해석에 의한 공학적 분석과정에 대한 이해가 중요하다.

가선집재시스템의 역학적 구조해석에 의한 연구는 우리나라와 산림지형이 비슷한 미국의 북서부 지방을 중심으로 1970년 Carson 과 Mann이 현수선 원리에 입각한 가선의 장력분석에 대한 이론을 제시한 이래 Carson, Mann, Binkley, Falk, Nickerson, Sessions 등에 의해 지형, 벌도목 특성 및 가선집재시스템의 기계적 성질 등을 고려한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 국내에서는 집재작업의 기계화를 위한 관심과 노력에 비해서 많은 연구가 진행되지 못하고 있다. 최근 노재후 등(1988), 박중명(1990), 노재후(1992) 등에 의한 연구결과가 발표된 바 있으나 제한된 범위내에서의 작업시간조사에 의한 생산성 연구로 한정되어 있다. 반면 가선집재시스템에 관한 구조적 특성분석 및 역학적 성질분석에 관한 기초연구가 전무하여 기계화 집재작업에 대한 공학

적 학문체계가 수립되지 못한 실정이다.

이 논문에서는 여러가지 형태의 집재시스템중 가장 기본적인 형태에 속하는 고정식 가선집재시스템(standing skyline)을 중심으로 가선집재시스템의 역학적 성질을 밝히기 위한 기본적인 이론체계와 공학적 분석과정을 제시한다. 이를 위하여 가선집재시스템의 역학구조 해석을 통하여 시스템분석에 요구되는 인자별 평형조건식들을 유도하고 관련되는 역학적 가정에 대하여 고찰한다. 또한 standing skyline의 역학적 효율성을 분석하기 위한 전산처리과정 및 그 적용예를 제시한다.

II. 고정식 가선집재시스템의 역학구조적 특성

일반적으로 가선집재시스템은 3개 이상의 단선구조(single segment structure)로 이루어진다. 여기서 단선이란 반송기와 지주목(spartree)사이를 연결해 주는 cable 철선의 한쪽 부분을 의미하며 이와같이 하나 이상의 단선으로 구성된 시스템을 구조적 측면에서 다선구조시스템(multiple segment system)이라고 한다. 그림 1에서와 같이 standing skyline은 3개의 단선구조를 지닌 다선구조시스템으로 벌목된 나무를 매달아 운반하는 반송기와 반송기를 공중에 띄어주는 역할을 하는 가선(skyline)과 반송기를 이동시키기 위한 당김줄(mainline)으로 구성된다. 그림에서 가선의 양끝은 지주목들(head- 및 tailspar)을 지나

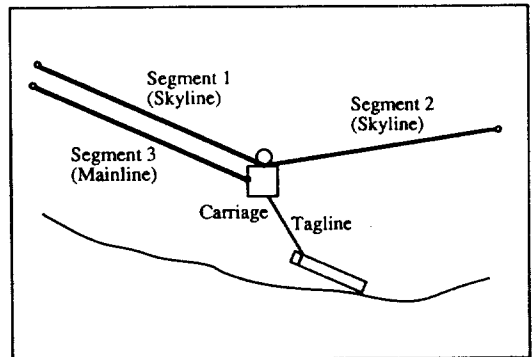


Fig. 1. A diagram illustrating a three-segment cable logging system drawing a log partially suspended.

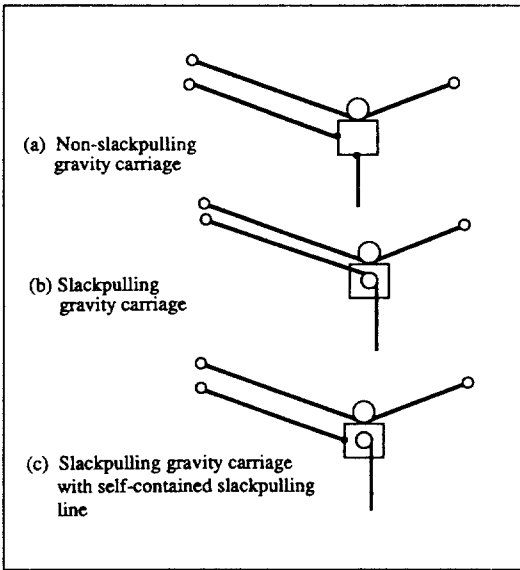


Fig. 2. Carriage types for three-segment cable logging systems.

입목 및 그루터기에 고정되어 있다. 따라서 시스템 설치가 완료되면 일정한 길이의 가선이 유지된다고 할 수 있다. 당김줄의 한쪽 끝은 집재기의 드럼에 감겨 있으므로 집재기에는 1개의 드럼이 요구되며, 드럼을 감아줌으로써 당김줄에 장력을 가하여 반송기를 끌어 올리고, 드럼의 동력 전달을 끊음으로써 중력에 의해 반송기를 별도로까지 보내는 상향식 집재를 한다.

반송기의 형태는 여러가지로 분류될 수 있다. 이 시스템은 상향식 집재를 하게 되므로 자체 동력보다는 중력의 힘에 의존하는 중력식 반송기 (gravity carriage)를 많이 사용하고 있다. 중력식 반송기는 그림 2에서와 같이 반송기의 작업형태에 따라 고정올림줄식(non-slackpulling), 가변올림줄식(slackpulling) 및 자주식 가변올림줄식(self-contained slackpulling)으로 분류될 수 있다. 그러나 이 논문에서는 연구목적상 고정올림줄식 반송기(그림 2(a))만을 고려하였다.

그림 1에서 시스템의 기하학적 구조는 (1) 견인목의 무게, 길이 및 견인방법 (2) 반송기의 특성과 체원 (3) 각 단선 무게에 의한 하중, (4) 가선 및 되돌림줄의 장력, (5) 지형의 종단면 특성과 지주목들의 높이와 같은 물리적 요소들이 상호 연관하여 가선의 처짐을 결정하므로써 만들어 진다.

이와같은 요소들 중 가선의 단위길이당 무게, 파괴강도, 반송기의 특성 및 체원과 같은 것들은 일정한 제조설계에 의해 생산된 공업제품의 특성이 된다. 반면 견인목의 길이나 무게, 견인목의 지면접촉 정도에 따른 견인방법, 지형 종단면도 및 지주목의 높이와 같은 요소들은 집재 대상지의 특성이나 작업자의 의지에 의해 결정되는 기본적인 요소들이다. 따라서 이상과 같은 각 물리적 요소들에 대한 자료를 알고 있다고 가정하면 각 요소들의 역학적 관계를 밝혀, 힘과 모멘트의 평형조건방정식을 유도함으로써 전체시스템의 역학구조를 해석할 수 있게 된다.

III. 시스템의 역학분석 이론체계

단선구조의 역학적 평형 원리

그림 3에는 단선구조에 작용하는 힘의 요소들이 나타나 있다. 그림에서 T_u 는 수평분력 H_u 와 수직분력 V_u 의 합력으로서 단선구조 상단 끝부분에 작용되는 장력을 의미한다. 와이어로프의 무게와 작용점의 거리가 각각 R 과 e 로 표시되어 있으며, 그 외에 단선구조의 기하학적 체원이 나타나 있다.

그림에서 최대장력을 받게 되는 단선구조 상단 부분의 수직분력 및 수평분력은 다음과 같이 기하학적 역학구조로 부터 힘과 모멘트의 평형관계

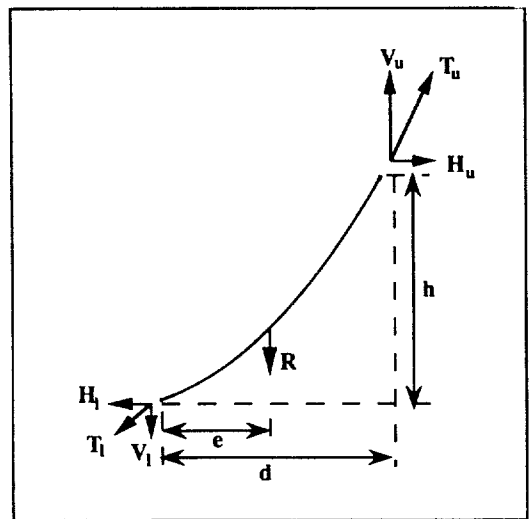


Fig. 3. Forces and geometry for a moment balance on the single segment.

를 이용하여 유도할 수 있다.

즉, 그림 3의 단선구조 하단에서 모멘트의 평형 원리를 이용하면,

$$\Sigma M = 0, H_u h + Re - V_u d = 0$$

장력의 수직분력과 수평분력의 관계에서,

$$T_u^2 = V_u^2 + H_u^2 \tag{1}$$

이상의 두식을 이용하여 V_u 를 소거하고 H_u 에 관하여 정리하면,

$$H_u = \frac{-R(h/d)(e/d) + [(R(h/d)(e/d))^2 + (1 + (h/d)^2)R^2(e/d)^2 - T_u^2]^{1/2}}{1 + (h/d)^2} \tag{2}$$

식 1과 2를 이용하여 수직분력과 수평분력을 계산하기 위해서는 단선의 무게와 작용점의 위치를 의미하는 값이 정의되어야 한다. R과 e를 결정하는 것은 철선의 무게 및 처짐의 형태에 따라 무게를 고려하지 않는 강체선(weightless link), 무게를 고려하는 강체선(rigid link) 및 현수선(catenary link)의 3가지 가정중 하나를 택하여 사용할 수 있다.

이 중 weightless link 및 rigid link 모델은 흔히 일반적인 역학 혹은 물리학에서 사용하고 있는 역학적 가정이며, 특히 weightless line 모델은 문제를 더욱 단순화 하기 위한 가정이라고 할 수 있다. weightless link 모델은 가선의 무게를 고려하지 않는 것이고, rigid link 모델에서는 가선의 무게를 가선에 따라 고르게 분포되어 있는 단위무게(ω)에 직선으로 가정되는 가선의 길이(L)를 곱한 값으로 결정한다. 따라서 이 두 모델에서의 가선은 처짐이 없는 강체로서 무게중심은 수평거리(d)의 중간점에 위치하게 된다.

현수선 모델은 가선을 자체의 단위무게에 따른 하중에 의해 현수선 형태의 처짐이 있는 것으로 가정하는 것이다. 따라서 이 모델에서는 가선을 충분히 유연성이 있는 철선으로 가정하며 가선의 무게는 단위무게와 가선의 현수선 길이(s)의 곱으로 나타낼 수 있다.

이상 세가지 모델에 있어 가선의 무게(R)와 무게중심의 위치(e)에 대한 정의를 요약하면 표 1과 같다. 표에서 m은 현수선 함수의 매개변수로서 현수선에 작용하는 장력의 수평분력(H)과 철선의 단위길이당 무게(ω)의 함수로 표현된다 (Carson and Mann, 1970).

세 모델중 어느 것을 사용할 것인가는 문제의 성격에 따라 달라진다고 할 수 있다. 일반적인 재료역학에 있어서는 대개의 경우 계산의 난이도를 고려하여 rigid link model이 이용되고 있으나, 정밀도가 중요한 경우에는 현수선 모델이 적합할 것이다. 또한 가선집재작업에 있어서 cable 철선은 매우 유연한 재료이지만 단선의 길이가 짧을수록 그리고 견인하중이 클수록 가선의 처짐이 줄게 되어 이 경우에는 rigid link에 의한 계산도 정밀도면에서 충분할 것으로 판단된다.

견인형태에 따른 벌도목의 역학적 평형 원리

벌도목의 견인형태는 전체 벌도목을 공중에 매달아 운반하는 방법과 벌도목의 한쪽 부분을 지면과 접촉시켜 벌도목의 무게로 인한 하중의 일부를 지면이 맡는 방법이 있다. 이중 후자는 지면접촉으로 인한 임지훼손과 벌도목에 대한 피해가 있을 수 있으나, 집재시스템에 부과되는 하중이 적어진다는 장점이 있다.

이러한 전형적인 벌도목의 견인 형태가 그림 4에 나타나 있다. 그림에서 집재시스템에 작용하는 부하 즉 짐매달음줄을 통해 반송기에 전달되는 부하(T_c)는 견인목의 무게 및 벌도목을 들어 올리는 정도에 의한 견인방법, 지면의 경사 등에 의해서 달라지게 되는데, 이를 규명하기 위한 인자들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

그림 4에서 지면의 경사(θ), 견인목과 지면과의 각도(β), 견인목 길이(L), 짐매달음줄이 묶여진 지점에서부터 견인목의 중앙까지의 거리

Table 1. Definitions of the cable segment weights and the force application points for moment balance by the cable link assumptions.

Types of Single Segment Model	Weights of Segment	Locations of Force Application
Weightless	0	—
Rigid	ωL	d/2
Catenary	ωs	e

where

$$L = \sqrt{h^2 + d^2}$$

$$m = H/\omega$$

$$s = \sqrt{h^2 - [2m \cdot \sinh(d/2m)]^2}$$

$$e = d/2 - (h/s) [m - (d/2) \coth(d/2m)]$$

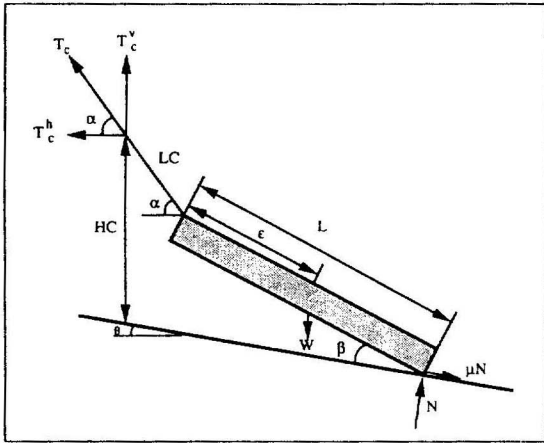


Fig. 4. Log skidding geometry

(ϵ), 견인목과 지면과의 마찰계수(μ)를 이용하여 짐매달음줄에 미치는 장력의 수직분력(T_c^v)과 수평분력(T_c^h)을 힘의 평형과 모멘트의 원리를 이용해 유도하면 다음의 식 3, 4와 같이 나타낼 수 있고, 기하학적 관계로부터 α 는 식 5로 나타낼 수 있다.

$$T_c^v = W \left[1 - \frac{\cos\theta - \sin\theta \cdot \tan\beta}{(L/\epsilon) \cdot (1 + \mu \cdot \tan\beta)} (\cos\theta - \mu \cdot \sin\theta) \right] \quad (3)$$

$$T_c^h = W \left[\frac{\cos\theta - \sin\theta \cdot \tan\beta}{(L/\epsilon) \cdot (1 + \mu \cdot \tan\beta)} (\sin\theta + \mu \cdot \cos\theta) \right] \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{T_c^v}{T_c^h} \right) \quad (5)$$

이상의 관계로부터 견인목이 반송기에 미치는 힘의 수평, 수직 분력들을 결정하므로써 힘의 방

향(α)까지 결정할 수 있다. 즉, 식 3과 식 4를 식 5에 대입하고, 짐매달음줄이 묶여진 지점에서부터 견인목의 중앙까지의 거리(ϵ)를 견인목 길이의 반($L/2$)으로 가정하면 α 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left[2 \tan(\theta + \beta) + \frac{\cos\theta - \mu \cdot \sin\theta}{\sin\theta - \mu \cdot \cos\theta} \right] \quad (6)$$

이 식들의 유도과정은 Appendix에 제시되어 있다. 이러한 과정을 통해 α 를 구하게 되면 지면으로부터 반송기 하단부까지의 높이는 다음의 식 7에 의해 구해지므로 반송기에 연결된 짐매달음줄의 기하학적 구조를 결정할 수 있다.

$$HC = \frac{LC \cdot \sin(\alpha + \theta) + L \cdot \sin\beta}{\cos\theta} \quad (7)$$

다선구조의 역학적 평형조건

그림 1에서 보듯이 가선시스템은 반송기를 중심으로 3개 이상의 다선구조로 이루어져 있다. 반송기를 중심으로 짐매달음줄과 각 단선에 미치는 장력들이 이루는 평형조건을 결정하므로써 전체 시스템의 힘의 역학관계를 설명할 수 있다. 예로써 그림 5에서는 고정올림줄식 반송기를 사용할 때 작용하는 각 단선의 힘의 방향과 그에 따른 힘의 평형조건들을 보여주고 있다. 그림에서 T는 반송기에 미치는 가선의 장력을 의미하고, 첨자 h, v는 각각 장력의 수평분력과 수직분력을 의미하며, 첨자 1, 2, 3은 각기 해당 세그먼트 번호를 의미한다.

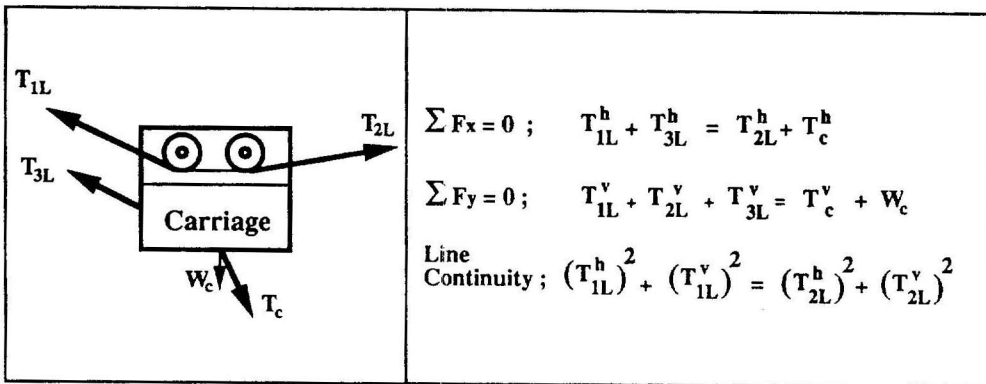


Fig. 5. A diagram showing force equilibrium conditions at the carriage.

(T_{iL} : lower end tension of the i th line segment ; h : horizontal element to line tension ; v : vertical element of line tension)

가선의 변형과 처짐

가선은 여러개의 강도처리를 한 가는 철선(wire)을 나선형으로 꼬아서 만든 가닥들(strands)을 내심재(fiber core)에 나선형으로 감은 cable선이다. 이러한 철선은 충분한 유연성을 지님으로서 벌도목, 반송기 및 자체 하중을 지지할 수 있도록 만들어 진다. 따라서 하중에 의한 가선의 처짐과 변형이 일어나게 되며, 이러한 성질을 밝히므로서 설치 혹은 집재중인 시스템의 기하학적 구조를 예측할 수 있다.

하중에 의한 가선의 변형도는 '응력은 변형도에 비례한다'는 Hooke의 법칙에 의해 계산이 가능하다. 즉, 법선장력(T), 철선의 단면적(A), 가선의 길이(S₀) 및 길이의 변형정도(δ)의 관계에 의한 가선의 탄성계수는 E=(T/A)/(δ/S₀)로 정의된다. 이 관계에 의하면 하중에 의해 변형된 가선의 길이(S)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = S_0 \left(1 + \frac{T}{AE} \right) \tag{8}$$

반송기의 이동경로와 가선의 기하학적 구조

벌도목을 견인하는 반송기는 식 8로 결정되는 변형된 가선을 통해 토장(landing)까지 이동된다. 반송기의 이동에 의한 위치변동에 따라 가선

이 받게 되는 장력이 변동하게 되고 가선의 변형으로 인한 기하학적 형태도 달라지게 된다. 고정식 가선집재시스템의 경우 반송기가 고정된 길이(S)의 가선 위를 통해 움직이게 되므로 반송기의 이동경로는 가선의 양쪽 끝을 중심으로 하는 타원의 원주형태가 된다(그림 6(a)).

그림 6(b)에서와 같이 나선구조의 기하학적 제원이 알려져 있는 경우 이동중인 반송기의 각 지점에서의 수직 위치를 구하는 식은 가선을 rigid link로 가정할 때 단순한 기하학적 원리에 의해 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$h_1 = \frac{cy \pm \frac{c^2 S^2 - 4d_1^2 S^2 (S^2 - y^2)}{2(S^2 - y^2)}}{\tag{9}}$$

(단, $c = S^2 + d_1^2 - (D - d_1)^2 - y^2$)

이 식에서의 ±기호는 좌측 지주목이 우측 지주목보다 높은 경우에는 +기호가 되고 그 반대의 경우에는 -가 적용된다.

IV. 전산모델의 개발

시스템 분석 과정

그림 7에는 분석과정의 흐름도가 제시되어 있다. 시스템 역학분석을 위해서는 계산에 요구되는 지형의 종단면도, 시스템의 구조적 특성 및 작업방법 등에 대한 자료가 요구된다(표 2 참조). 자료가 입력되면 먼저 견인중인 벌도목이 지면으로부터 들어올려진 높이가 항상 주어진 값 이상으로 유지되기 위한 가선의 길이를 계산한다. 즉, 견인중인 벌도목의 들어올려진 높이가 일정하다고 가정할 때 식 6과 7을 이용하여 반송기의 높이를 계산하고, 이때 요구되는 가선의 길이를 구할 수 있다. 이와같이 반송기가 지나는 경로(corridor)상에 위치한 각 측정점에서 요구되는 가선의 길이를 계산하여 그중 가장 짧은 것을 택하면 벌도목은 항상 주어진 값 이상 들어올려진 상태로 견인될 것이다(그림 6(a), (b)).

가선의 길이가 결정되면 각 측정점에서 견인상태의 시스템 역학분석에 요구되는 parameter들을 계산한다. 이를 위해서 먼저 식 9에 의해 벌도목이 들어올려지는 지점에서 반송기의 타원형 이동경로에 의해 가선의 기하학적 구조를 결정하고, 주어진 가선의 장력에 허용될 수 있는 벌도목의 중량을 계산한다.

벌도목 허용중량은 그림 5에서의 반송기에서의

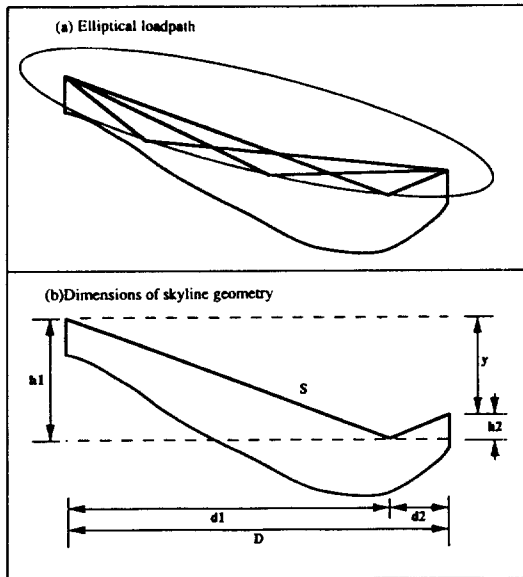


Fig. 6. Load path and dimensions of standing skyline.

Table 2. A hypothetical data set for an example run.

Profile Data					
T.P.No.	Slope Dist. (m)	% Slope	T.P.No.	Slope Dist. (m)	% Slope
0	-	-	4	15	-60
1	20	-40	5	15	-40
2	30	-50	6	20	20
3	20	-70	7	20	30

Wire-Rope Specification				
Types of Wire-rope	Diameter (cm)	Length (m)	Unit Weight (Kg/m)	Safe Working Load (kg)
Skyline	1.91	1,000	1.55	7,756
Mainline	1.43	1,000	0.88	4,400
Tagline	1.91	6	1.55	7,756

Average Log Length :	6m	Log Angle to Ground :	5°
Effective Tagl. Length :	4.5m	Ground Friction Coef. :	0.6
Spar Trees : Head : 10m at T.P.0		Carriage : Weight : 300Kg	
Tail : 10m at T.P.7		Depth : 1.0m	

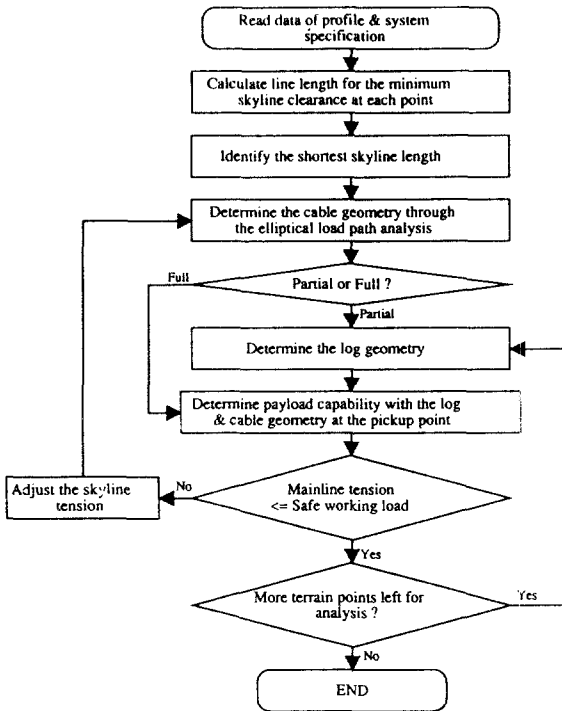


Fig. 7. Flowchart to determine the allowable payload of standing skyline systems.

힘의 평형방정식들에 의해 결정된다. 그림 5에서 반송기에 미치는 힘들 중 짐매달음줄을 통해 반송기에 전달되는 힘(T_c)은 식 6, 7에 의해 그림 4에 나타난 parameter들(α , HC)을 결정하므로써 기하학적 역학관계로부터 결정될 수 있다. 만약 임지보호 등을 목적으로 벌도목을 충분히

들어올려 벌도목과 지면의 접촉이 없는 상태에서 견인하고자 한다면 T_c 는 연직방향으로 작용하는 벌도목의 무게가 될 것이다. 그 외에 반송기 자체의 무게(W_c)를 제외한 나머지 힘들(T_{1L} , T_{2L} , T_{3L})은 각 단선구조의 역학관계에 의해 결정될 수 있다.

이러한 계산과정에 의해 역학적 평형관계로부터 주어진 집재시스템의 벌도목 허용하중을 결정할 수 있다. 그러나 이상에서 결정된 허용하중은 가선에 주어진 장력에 의한 것으로서 견인력을 전달해 주는 당김줄이나 벌도목 하중을 지탱해주는 짐매달음줄에 주게되는 장력도 동시에 고려되어야 한다. 즉, 위에서 결정된 허용하중을 견인하기 위해서 가해지는 당김줄이나 짐매달음줄이 받게되는 최대 장력은 해당 cable 철선의 파괴강도보다 낮아야 한다. 따라서 최대 장력>파괴강도인 경우에는 하중을 조절하여 최대 장력=파괴강도를 만족시키는 허용하중을 다시 찾아야 한다.

비선형 연립방정식의 해법 : Secant 기법

전술한대로 이상의 계산과정은 비선형 연립방정식 형태의 수식함수들을 동시에 풀게 된다. 이러한 문제를 푸는 방법은 여러가지가 있으나 전산모델에서는 Secant method라는 계산방식을 이용하였다. 비선형 초월함수의 해는 그 함수가 미분이 가능한 경우 빠른 속도로 해를 찾을 수 있으나 Secant method에서는 비선형함수($Y=f(X)$)의 미분함수를 구하는 대신 가까운 두점을

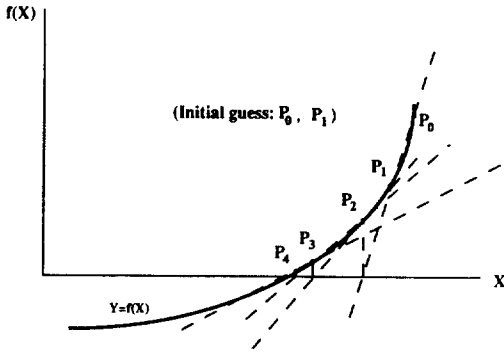


Fig. 8. Diagram illustrating iteration procedures of Secant method

연결하는 직선의 기울기를 이용하여 반복적인 계산과정을 거쳐서 해를 구하게 된다(그림 8).

즉, 그림에서와 같이 함수 그래프 위의 충분히 가까운 두점(P₀, P₁)을 이어주는 직선이 X축과 만나는 점에서 연직선이 Y=f(X)와 만나는 점(P₂)을 찾는다. 다시 두점(P₁, P₂)을 이어주는 직선이 X축과 만나는 점에서 연직방향으로 Y=f(X)상에서 P₃를 찾는다. 이와같이 반복되는 계산과정을 거쳐서 f(X)=0를 만족시키는 X의 값을 찾으면 그 값이 구하고자 하는 해가 된다. 계산과정의 진행방향은 다음 식에 의해 결정된다.

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{\text{Slope}}$$

V. 전산모델의 적용 : 지형조건에 따른 집재 시스템의 허용반송량 추정

가선집재시스템 작업의 역학 분석을 위한 자료로는 시스템의 제원, 작업내용과 관련된 매개변수들 및 지형조건에 관한 자료들이 요구된다. 이

연구에서는 표 2에 제시되어 있는 가상적인 자료들을 이용하였다.

표 2에서 대상지형은 집재기가 위치한 좌측 지주목에서 부터 가선을 따라 7개의 측정점에 대하여 경사거리 및 % 경사가 나타나 있다. 지주목들은 각각 측정 점 0과 7에 위치하고 있다. 가선, 당김줄 및 짐매달음줄의 제원에 대한 파괴강도는 안전계수 3을 적용한 값이다. 벌도목의 길이는 평균 6m이고, 견인중인 벌도목은 앞부분이 지면경사로부터 5° 들어올려지는 것을 가정하였다. 또한 벌도목과 반송기 하단부를 연결해 주는 짐매달음줄의 길이는 4.5m, 벌도목의 지면에 대한 마찰계수는 0.6을 적용하였다.

표 3에는 가선시스템의 기하학적 특성에 의한 허용반송량 추정결과가 제시되어 있다. 이 시스템에서 요구되는 가선의 최소 길이는 134.55m가 된다. 이 길이는 벌도목이 견인되는 모든 지점에서 벌도목의 앞부분을 최소 5° 이상 들어올리기 위한 것이다.

표 3에서의 수평거리는 두 지주목간의 수평거리를 10등분하여 임의로 지정된 최대 견인거리내에 속하는 12.5m 간격의 8점을 의미하고 각 지점에서의 허용반송량이 계산되어 있다. 여기서 측정점의 수 혹은 각 측정점간의 간격은 두 지주목간의 수평거리를 몇 등분하는가에 의해 결정된다. 가선의 높이는 반송기가 해당 측정점을 지날 때 가선의 기하형태를 설명하기 위한 것으로 지면으로부터의 연직 높이를 의미한다. 이때 각 단선구조 철선이 받게되는 최대장력들이 표에 제시되어 있다.

전술한대로 이 시스템의 허용반송용량은 어떤 단선구조에 미치는 장력이 표 2에 제시된 해당

Table 3. Results of mechanical analysis when the shortest stretched skyline length=134.55m.

Horizontal distance (m)	Payload (Kg)	Skyline clearance (m)	Tension on cable segments			
			Seg 1 (Kg)	Seg 2 (Kg)	Seg 3 (Kg)	Tagline (Kg)
13	5,294	4.11	4,620	4,603	4,400	5,013
25	6,210	4.09	7,756	7,730	4,284	5,254
38	3,682	5.52	7,756	7,722	2,324	3,371
51	2,800	8.62	7,756	7,716	1,379	2,587
64	2,215	13.44	7,756	7,710	732	2,215
76	2,250	17.26	7,756	7,704	661	2,250
89	2,413	19.00	7,756	7,699	603	2,413
102	2,790	14.01	7,756	7,694	524	2,790

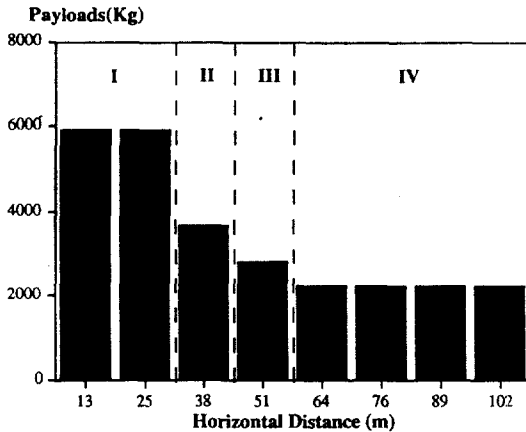


Fig. 9. Payload distributions over horizontal distance from the headspar.

단선의 파괴강도에서 결정된다. 즉, 이 표에 의하면 처음 한점에서는 허용반송량이 당김줄의 파괴강도에 의해 결정되고, 나머지 측정들에서는 가선의 파괴강도에 의해 결정되는 것은 알 수 있다.

이상에서 설명한 허용반송용량은 해당 지점에서 힘의 평형에 의해 결정된 값들이다. 해당 지점에서 견인이 시작된다고 가정할 때 반송기는 적어도 하나 이상의 측정들을 통과하게 된다. 또한 벌도목을 매다는 지점에서의 실제 허용반송용량은 앞으로 통과해야 되는 각 측정에서의 허용반송용량에 제어를 받게 된다. 따라서 각 지점에서의 실제 허용반송용량은 그림 9에서와 같은 분포를 보이게 된다. 즉, 가선시스템의 수평거리는 허용반송용량에 의해 I, II, III, IV와 같이 4개의 구역으로 구분되며 각 구역 내에서의 실제 허용중량은 일정한 값을 가지게 된다.

VI. 결 론

이 연구에서는 가선집재시스템의 역학구조 해석에 의해 지형조건 및 시스템 운용체제에 따른 반송용량 추정 전산모델 체계를 제시하였다. 또한 가상적인 자료를 이용하여 모델의 적용성을 검토하였다. 단선구조의 역학적 해석은 현수선 원리를 이용하였으며, 비선형 역학관계식들을 풀기 위하여 Secant 수치해석기법을 적용하였다. 견인중인 벌도목의 기하학적 매개변수들에 의해 들어올려진 정도에 따라 역학적 해석을 가능하도

록 하였다.

이 연구에서는 고정식 가선집재시스템을 중심으로 역학적 관계식들을 규명하고 수치해석기법을 적용하였으나 이러한 원리들은 다른 기종의 시스템 분석에도 적용될 수 있는 기본적인 역학해석체계가 된다 따라서 차후의 연구에서는 이러한 원리들을 기초로 하여 기종 및 시스템 설치방법에 따른 제반집재시스템의 작업의 효율성을 추정하기 위한 종합적인 전산모델의 개발이 요망된다.

또한 이 연구에서는 고정식 가선집재시스템의 허용반송용량 추정을 위한 계산체제만이 고려되었으나, 벌도목을 매달고 이동중인 반송기의 하중이 가선 및 지주목에 미치는 역학관계는 밝혀지지 않았다. 따라서 차후 연구에서는 가선집재시스템의 공학적 성질을 밝히고자 하는 노력으로서 이러한 문제를 풀기 위한 연구가 요구된다.

인 용 문 헌

1. 노재후. 1992. 집재작업시스템의 작업능률분석에 관한 연구. 서울대 대학원 박사학위논문. 123pp.
2. 노재후·김재원·박문섭. 1988. 케이블 크레인의 국내적용 가능성에 관한 연구. 시험연보 36: 145-153.
3. 박종명. 1990. 소형 케이블 크레인 K-300을 이용한 집재작업에 관한 연구. 서울대 대학원 석사학위논문. 45pp.
4. Carson, W.W. and C.N. Mann. 1970. A technique for the solution of catenary equations. USDA Forest Service Research Paper PNW-110.
5. Chung, J.S. 1987. Development of a cable logging system analysis package for micro-computers. Oregon State University, MF thesis. Corvallis, Oregon. 116pp.
6. 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.
7. Miller, M. 1984. Single segment cable analysis. Oregon State University. MF thesis. Corvallis, Oregon. 86pp.
8. Nickerson, D.B. 1980. Skyline payload analysis using a desktop computer. Division of Timber

Management, USDA Forest Service. Portland, Oregon.

logging systems. Division of Timber Management, USDA Forest Service. Portland, Oregon. 212pp.

9. Studier, D.D. and V.W. Binkley. 1974. Cable

APPENDIX : 짐매달음줄에 작용되는 장력방향 관계식 유도

힘의 평형 :

$$\Sigma F_y = 0 : T_c^v = T_c \sin \alpha = W - N \cos \theta + \mu N \sin \theta \quad (a-1)$$

$$\Sigma F_x = 0 : T_c^h = T_c \cos \alpha = N \sin \theta + \mu N \cos \theta \quad (a-2)$$

모멘트의 평형 :

$$\Sigma M = 0 : [\mu N \cos \theta][L \sin(\beta + \theta)] - [\mu N \sin \theta][L \cos(\beta + \theta) - W \epsilon \cos(\beta + \theta) + [N \cos \theta][L \cos(\beta + \theta)] + [N \sin \theta][L \sin(\beta + \theta)] = 0 \quad (a-3)$$

이 식을 N에 관하여 정리하면,

$$N = \frac{W(\epsilon/L)}{\cos \theta - \mu \cdot \sin \theta + \sin \theta \cdot \tan(\theta + \beta) + \mu \cdot \cos \theta \cdot \tan(\theta + \beta)} \quad (a-4)$$

식 a-4를 식 a-1과 a-2에 대입하여 정리하면,

$$T_c^v = W \left[1 - \frac{\cos \theta - \sin \theta \tan \beta}{(L/\epsilon)(1 + \mu \tan \beta)} (\cos \theta - \mu \sin \theta) \right]$$

$$T_c^h = W \left[\frac{\cos \theta - \sin \theta \tan \beta}{(L/\epsilon)(1 + \mu \tan \beta)} (\sin \theta + \mu \cos \theta) \right]$$

따라서,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{T_c^v}{T_c^h} \right) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\left[1 - \frac{\cos \theta - \sin \theta \cdot \tan \beta}{(L/\epsilon)(1 + \mu \cdot \tan \beta)} (\cos \theta - \mu \cdot \sin \theta) \right]}{\left[\frac{\cos \theta - \sin \theta \cdot \tan \beta}{(L/\epsilon)(1 + \mu \cdot \tan \beta)} (\sin \theta + \mu \cdot \cos \theta) \right]} \right\}$$

$$= \tan^{-1} \left[2 \tan(\theta + \beta) + \frac{\cos \theta - \mu \sin \theta}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \right]$$