

<技術論文>

架空索道の支柱높이 最適値에 관한 研究

崔善浩* · 朴龍洙**

(1987年 9月 10日 接受)

A Study on the Optimal Value for the Towers Height of the Ropeway

Sun Ho Choi and Yong Soo Park

Key Words : Deflection Angle(屈折角), Initial Tension(初期張力), Dimension of Rope(로우프의 단위길이당 무게), Catenary Curve(懸垂曲線), Optimal Design(最適設計)

Abstract

The heights of the towers of a ropeway are theoretically derived and the result is experimentally verified. The accuracy in the equation of deflection angle obtained by applying the characteristics of catenary curve was confirmed through experiment. By applying these equations the optimal values of the tower heights could be obtained because the deflection angles trade off each other. The deflection angle was measured by using the curve fitting technique.

記號說明

H_i : i 번째 지주상의 수평장력(kg)
 h^* : 무차원변수 ($=h/l$)
 h_i^* : 무차원변수 ($=h_i/l_i$)
 h_i : i 번째 구간의 수직거리 (m)
 h_b : i 번째 지주의 기점에 대한 지면 높이(m),
 h : 쏜스팬의 수직거리
 h_i^i : i 번째 지주의 높이 (m)
 ① : Tower number
 < i > : interval number
 l_i : i 번째 구간의 수평거리 (m)
 l : 쏜스팬의 수평거리 ($=\sum l_i$) (m)
 S_i : i 번째 구간의 로우프길이 (m)
 S : 쏜스팬의 로우프길이 (m)
 T_i : i 번째 지주상에서의 支索의 장력(kg)

Q_i : i 번째 지주상의 굴절각 (rad)
 w : 로우프의 규격 kg/m
 x : 스패간의 임의 수직거리 (m)
 y : 스패간의 임의 수직거리 (m)
 S^* : 무차원변수 ($=S/l$)
 U_i^* : 무차원변수 ($=\frac{wl_i}{2H_i}$)
 T^* : 무차원변수 ($=T/H_0$)
 y^* : 무차원변수 ($=y/l$)
 α : $x^*=0$ 에서 접선각 (rad)
 α_i : i 번째 구간에서 $x^*=0$ 일 때 접선각
 β : $x^*=1$ 에서 접선각 (rad)
 β_i : i 번째 구간에서 $x^*=1$ 일 때 접선각
 μ : 마찰계수
 φ_i : i 번째 구간의 경사각 (rad)

첨 자

* : 무차원표시

* 正會員, 嶺南大學校 工科大學 機械設計學科
 ** 正會員, 東明專門大學 機械科

1. 序 論

索道設計는 線路設計, 機械要素設計, 構造物設計 및 電氣·制御裝置設計 등으로 區分지어 볼 수 있다. 특히 여기에 사용되는 로우프는 유연성을 가지고 있기 때문에 일반 운송기관의 軌道와는 달리 현수곡선을 이루고 있으므로⁽¹⁾, 支柱높이는 路線設計, 이에 따른 構造物設計, 로우프의 支持用인 새들면의 設計 등의 아주 중요한 設計要素中의 하나이다.

支柱높이를 決定하는데 使用되는 函數는 屈折角에 依해서 行하여 진다. 이 屈折角의 의미로서, 굴절각이 작을 수록 승차감의 향상, 마찰력으로 인한 소요 동력의 감소, 支柱上의 反力등의 좋은 영향을 주는 반면 굴절각이 클수록 탈삭이 일어나지 않은 영향도 준다. 그러므로 屈折角에 內包하고 있는 제한조건은 주로 탈삭의 영향, 輪數와 反力등의 設計要素間에는 서로 복잡한 영향을 미치고 있기 때문에 일반적으로 n_T 개의 支柱가 있는 線路에서는 최종支柱를 제외한 $n_T - 1$ 개의 支柱에서는 屈折角이 중요한 의미를 가진다고 본다. 支柱의 갯수 n_T 가 증가 할수록 屈折角을 고려한 支柱높이 設計는 어려워 진다. 그리고 지금까지 支柱높이 決定은 엄밀해를 가진 현수곡선 이론 대신 비교적 수식이 간편한 근사해를 가진 포물곡선 이론을 이용하여 시행착오법에 의존 할 수 밖에 없었다. 또 支柱높이 最適值에 관한 研究는 아직 發見되지 않았으므로 이를 감안하여 本 研究에서는

- (1) 設計條件에 만족하는 정확한 支柱높이를 얻기 위하여 엄밀해를 가진 현수곡선이론을 바탕으로 하여 設計變數들과의 關係를 유도 및 수식화 하였다.
- (2) 이를 最適設計問題로 정의하여 필요한 제한조건을 만족시키는 범위 내에서 支柱의 屈折角들을 최소로 줄이는 最適化技法을 도입하여 體系의인 設計方法을 提示 하였다.
- (3) 解析에 관한 設計例의 모델을 選定하여 屈折角들을 比較·檢討하고 實驗을 통하여 확인하였다.

2. 最適設計의 모델화

2.1 索道設計 및 計圖

索道の 設計·計圖의 順序와 그 內容은 다음과 같다.



豫備調査는 주로 다음의 것에 관하여 調査한다.

- (가) 始點·終點에서의 所要輸送量
- (나) 架設로우프 設置의 容易性
- (다) 地形에 따른 障害의 有無
- (마) 地圖에 의한 概略의 整理을 行한다

現場踏査에서는 豫備調査時에 測定하고자 하는 地點의 地盤의 土質力學的 檢討을 施行한다.

地形測量의 目的은 索道線路設計의 基本이 되는 線路地形의 縱斷面圖를 얻기 위함이다. 이 縱斷面圖에는 支柱豫定地의 高低差, 水平距離, 傾斜度등 全線路에 對한 地形要素가 記載되어야 한다.

索道設計를 하기 위해서 다음과 같은 設計要因들 이 必要된다.

- (가) 兩地點間의 水平距離
- (나) 兩地點間의 高低差
- (다) 許容 最大처짐량
- (라) 로우프 길이
- (마) 最大容量
- (바) 曳索 및 支索의 단위길이당 무게
- (사) 로우프의 保障破斷強度
- (아) 風速, 積雪등의 附加荷重
- (자) 重錘무게
- (차) 搬器速度 및 加速度

즉 10個의 設計要因을 決定하여야 한다.

또한 最適設計는 다음과 같은 條件을 만족하여야 한다.

- (가) 材料費 및 建設費등의 最小, 즉 經濟性이 있어야 한다(최소의 로우프規格, 停留場의 規模, 支柱數, 支柱의 높이 등)
- (나) 運轉動力費가 最小이 되어야 한다.
(最小의 屈折角 및 傾斜角 등)
- (다) 어떠한 경우에도 支柱에서 로우프가 뜨거나, 搬器가 소정의 높이 이하가 되어서는 안된다.
- (라) 볼록형(凸)地形은 支索이 支柱上에 마찰을 最小화하기 위하여 可及의 피하여야 한다.
- (마) 安樂한 乘車感을 주어야 한다.
(최소의 屈折角)
- (바) 소정의 安全度를 가져야 한다.

이들 條件들을 充足시키는 設計過程에서는 위의 10個의 設計要因中에서 가장 重要한 것은 로우프規格(로우프의 단위길이당 무게)와 屈折角이다. 最適의 로우프規格이 決定되면 이에 따른 最適의 重錘무게를 알 수 있고, 最適의 屈折角이 決定되면 支柱높이를 알 수 있다.

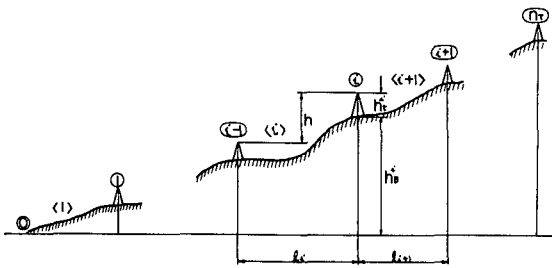


Fig. 1 Explanation of the variables and the rope-way.

- ① : tower number, <i> : interval number
- l_i : i -th 스패너리
- h_i^t : i -th 지주의 지면 높이, h_i^i : i -th 지주높이,
- h_i : i -th 구간의 수직거리 ;
- $h_i = (h_i^t + h_i^i) - (h_{i-1}^t + h_{i-1}^i)$ ($i=1, \dots, n_T$)
- (단, $h_0^t = h_0^i = 0$)

2.2 問題의 設定

設計의 適用範圍은 一般索道에 국한 하였으며 設計範圍는 搬器가 作用하지 않은 狀態에서 주어진 갯수의 支柱높이를 決定하고자 하며, 線路設計의 초기 단계로서 중추무게 G , 支柱의 位置 l_i 등을 이미 決定된 것으로 한다. 이에 따른 最適化過程은 다음과

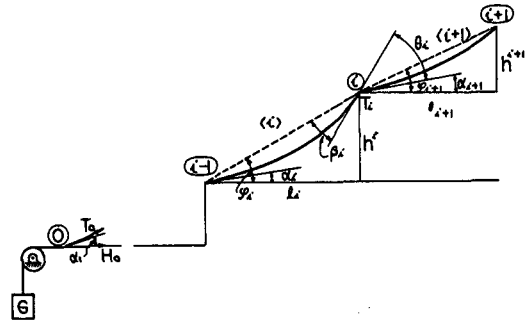
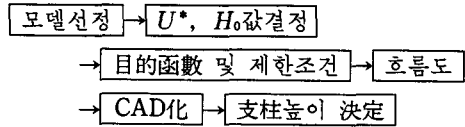


Fig. 2 Deflection angle of i -th tower

- G : 중추의 무게, ϕ_i : i 구간의 경사각
- T_i : i 번째 지주상에서의 지사의 張力

같이 행하여 진다.



支柱높이의 構造解析을 위한 모델은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같이, Fig. 1은 支柱 갯수 n_T 에 對한 各 支柱의 位置, 地반높이 支柱높이의 關係를 나타내며, Fig. 2는 i 번째 支柱上의 頂선각, 경사각, 굴절각의 關係를 나타내고 있다. Fig. 1에서 ①상의 屈折角은 $\theta_1 =$

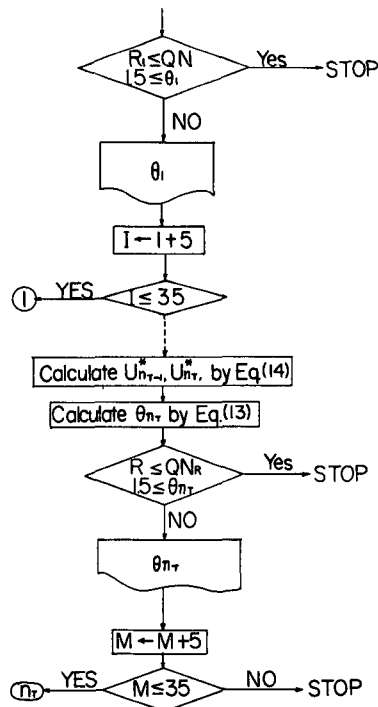
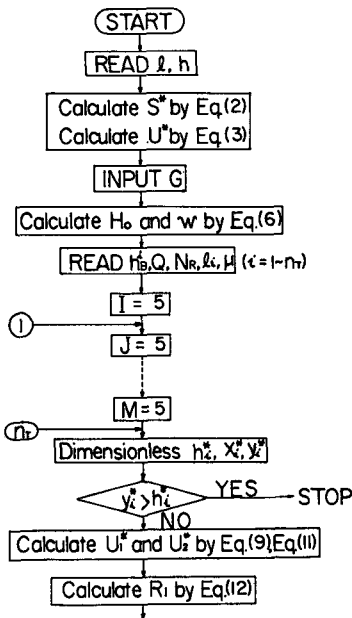


Fig. 3 Flow chart

$\beta_1 - \alpha_2$ 이므로 h_i 의 변화에 따라 ②상의 屈折角도 변화한다.

일반적으로 $h_i = (h_b^i + h_i) - (h_b^{i-1} + h_i^{i-1})$ ($i=1, \dots, n_T$)의 관계이므로 h_i 의 변화는 h_b^i, h_i^{i-1} 변화에 의존하여 ①상의 屈折角 전체가 변화한다. 이러한 관계에서 ①상의 屈折角을 시행착오법에 의하여最適化 하는 데는 상당한 시간과 손이 많이 드는 작업이다. 그러므로 여기에最適化技法을 利用하여 탈삭이 일어나지 않는 범위 내에서 단시간내에 支柱높이 $b = (h_b^i, \dots, h_b^{n_T})$ 를 찾아 내는데 目的이 있다.

2.3 U^* 및 H_0 값의 決定

일반적으로 支索의 경우 各 스패んの 로우프길이는 다음과 같이 설계범위를 定하고 있다⁽²⁾

$$S_i^* = (1.005 \sim 1.007) \times \sqrt{1 + h_i^{*2}} \quad (1)$$

支柱갯수 n_T 에 대한 全스패んの 로우프 길이⁽³⁾ S^* 는 최악의 조건에서 h_i 를 정하여 구해진다. 즉

$$S^* = \sum S_i^* = (h^{*2} + (\sin h U^* / U_i^*)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

식 (2)에서 S^*, h^* 의 값을 알 수 있으므로 全스패んに 대한 U^* 의 값은 本 研究에서는 Newton-Raphson법을 利用하여 해결 하였다. 또 全스패んに 임의 길이에 대한 로우프의 張力⁽⁴⁾은

$$T_i^* = \cos h (2U^* \ell_i^* + B) \quad (3)$$

$$\text{여기서 } B = \sin h^{-1} (U^* h^* / \sin h U^*) - U^* \quad (4)$$

◎상의 張力 T_0 는 식(3)에서 $\ell_1^* = 0$ 일 때 이므로

$$T_0^* (= T_0 / H_0) = U^* (S^* \cos h U^* - h^*) \quad (5)$$

초기장력 H_0 는 Fig. 2에서 中추무게 G 는 T_0 의 관계에서 구해진다. 즉

$$H_0 = G / T_{50}^*, \quad w = 2U^* H_0 / \ell \quad (6)$$

이다.

2.4 U^*, h^* 및 θ 와의 관계

各 스패んの $U_1^*, U_2^* \dots U_{n_T}^*$ 의 값은

$$U_1^* = \frac{w l_1}{2H_0}, \quad U_2^* = \frac{w l_2}{2H_1}, \quad \dots,$$

$$U_{n_T}^* = \frac{w l_{n_T}}{2H_{n_T-1}} \quad (7)$$

이고, 또 各 스패んの 고저차에 대한 무차원값

$$h_1^* = h_1 / l, \quad h_2^* = h_2 / l_2, \quad \dots, \quad h_{n_T}^* = h_{n_T} / l_{n_T} \quad (8)$$

의 관계가 주어지므로 스패ん<1>에 대한 U_1^* 의 값은 식(6)에 의하여

$$U_1^* = (w l_1 / 2T_0) \cdot \cos \varphi_1 \quad (9)$$

이고 스패ん<2>에 對한 U_2^* 의 값을 구해 보면, ①상의 張力은

$$T_1 = T_0 + w h_1 \quad (10)$$

$$\text{에서 } U_2^* = (w l_2 / 2T_1) \cos \varphi_2 \quad (11)$$

의 關係에서, ①상의 굴절각 θ_1 는

$$\begin{aligned} \theta_1 = \tan^{-1} [& U_1^* (h_1^* \cos h U_1^* \\ & + \sqrt{(h_1^*)^2 + (\sin h U_1^* / U_1^*)^2})] \\ & - \tan^{-1} [U_2^* (h_2^* \cos h U_2^* \\ & - \sqrt{h_2^{*2} + (\sin h U_2^* / U_2^*)^2})] \end{aligned} \quad (12)$$

의 관계식을 얻어진다. 똑 같은 방법으로 되풀이 하여 이 굴절각을 일반화하면

$$\begin{aligned} \theta_i = \tan^{-1} [& U_{i-1}^* (h_{i-1}^* \cos h U_{i-1}^* \\ & + \sqrt{h_{i-1}^{*2} + (\sin h U_{i-1}^* / U_{i-1}^*)^2})] \\ & - \tan^{-1} [U_i^* (h_i^* \cos h U_i^* \\ & - \sqrt{h_i^{*2} + (\sin h U_i^* / U_i^*)^2})] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{여기서 } U_i^* = (w l_i / 2T_{i-1}) \cdot \cos \varphi_i \quad (14)$$

$$T_i = T_{i-1} + w h_i \quad (15)$$

이다. ①상의 反力은

$$R_i = 2T_i \sin \frac{1}{2} \theta_i \quad (16)$$

이므로 全體의 마찰력은 $\mu \sum R_i$ 로 주어진다.

2.5 제한조건

제한조건으로서는 다음의 2종류로 생각한다.

(1) 支柱높이는 제한되며 그 제한범위는 결정되어 있는 것으로 본다.

(2) 탈삭의 방지를 위하여 支柱上의 反力이 적정 값을 넘어야 한다.

이상의 제한조건中, 첫번째 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉

$$h_{i,\min}^* \leq h_i^* \leq h_{i,\max}^* \quad (17)$$

다음, 탈삭의 방지를 위한 제한조건은 다음과 같은 조건으로 기술 된다. 즉, 支索의 數索輪 한개당 反力의 Q kgf을 넘어야 한다. 또 한개의 支柱上에 최소한 N_R 개의 數索輪이 있어야 한다(보통 $Q=50$ kgf, $N_R=4$ 를 기준으로 한다).

따라서 임의 支柱에서의 反力은 최소한 $Q \cdot N_R$ 을 넘어야 한다. 이상에 의하여 두번째 제한조건은

$$R_i \geq Q \cdot N_R, \quad (i=1, \dots, n_T-1) \quad (18)$$

로 주어진다.

2.6 定式化

식(14)을 目的函數로서 아래의 設計條件을 만족하고, 支柱높이最適值을 얻기 위하여 다음과 같이 정식화 하였다.

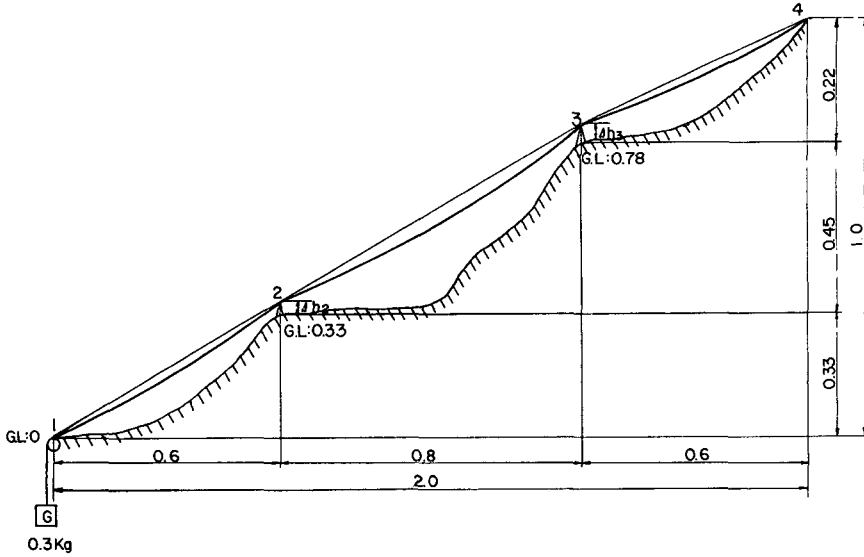


Fig. 4 Dimension of experimental model.

Find $b = \{h_1^i, h_2^i, \dots, h_n^i\}$
 Min $J = \max_i |\theta_i|$ (19)

Subject, to $h_{i,\min} \leq h_i \leq h_{i,\max}$
 $(i=1, \dots, n_T)$
 $|R_i| \geq Q \cdot N_R$ (20)

이다. 여기서 支柱높이 적용범위는 대개 10m~35m로 보통索道에서 적용하며 특수索道의 경우에는 4m~10m로 하고 있다⁽⁵⁾.

3. 실험

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 모델은 Fig. 4와 같이 로우프規格 $w=0.023\text{kg/m}$, 중추무게 $G=0.3\text{kg}$ 를 사용하여 中間支柱 ②, ③의 지면높이를 각각 0.33m, 0.78m로 하여 이 상태에서 各 支柱높이를 0.01m씩 변화시키기에 따라 屈折角을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험장치를 배치 하였다. 이 장치에 사용한 광원

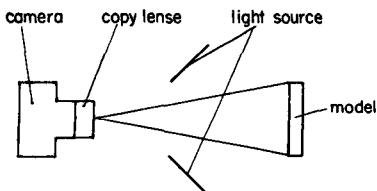


Fig. 5 Experimental apparatus.

은 2kW의 형광이며 정확한 측적비를 얻기 위하여 복사렌즈를 사용 하였고 여기에 사용한 필름은 측정감도가 좋은 코닥사의 Verichrome(ASA125)이다. Fig. 6는 측정할 모델장치이며 초기단계로서 各 支柱

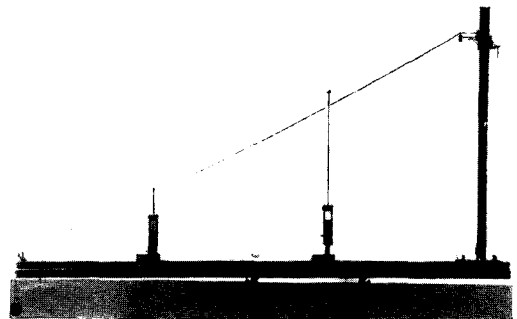


Fig. 6 Model of experiment.

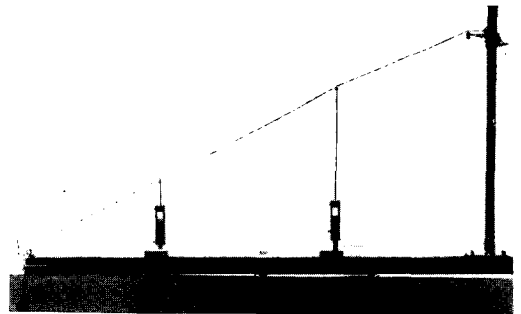


Fig. 7 Model of measurement.

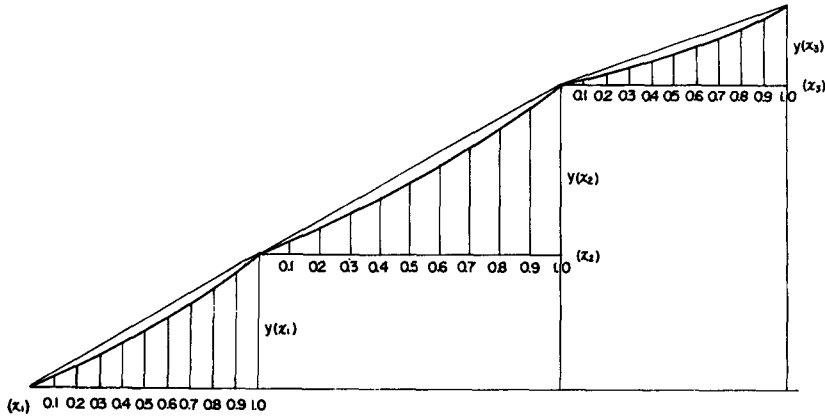


Fig. 8 Method of measurement.

의 위치와 지면높이를 나타내며 또 로우프의 처짐곡선과 지면높이의 관계를 나타내고 있다.

3.2 측정방법

Fig. 6의 상태에서 로우프를 거리 各支柱의 높이變化에 따라 촬영한 필름이 Fig. 7이다. 이 필름을 콤팩트미터(comparator)에 의하여 ②, ③上的 屈折角을 구하고자 하는 부분에서 屈折角을 측정하는 데는 측정기점의 선정이 어렵고 측정하는 방향에 따라 많은 오차를 가져오기 때문에 정확한 값을 얻을 수 없

었다. 그래서 Fig. 8과 같이 各區間の 曲線값을 콤팩트미터로 측정하여 그 값을 커브 피팅되도록 프로그램을 개발하여 屈折角을 찾아내는 방법을 고안하였다. 이 방법에 의한 屈折角을 구하는 예시는 Table 1과 같다.

3.3 결과 및 고찰

中間支柱 ②, ③의 支柱높이를 0.01m씩 변화시켜 측정방법에 의해서 얻어진 실험값과 식(19)에서 얻어진 이론값들을 비교한 것이 Table 2이다. 여기서 오차의 크기는 굴절각이 적을수록 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 약간의 상(像)변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉, 측정필름을 콤팩트미터에 10배로 하여 측정하였더니 쏠스팬길이 $l=23.10\text{cm}$, 쏠스팬의 고저차가 $h=11.3\text{cm}$ 이었다. 이것을 축적비로 환산하는 과정에서의 오차와 측정오차에 기인 한다면 屈折角에 對한 理論式은 정확함을 알 수 있었다.

지주높이 변화에 따라 各支柱上的 屈折角들을 비교한 것이 Fig. 9와 같다. 여기서 屈折角은 各支柱높이와 서로 상반관계를 가지고 있으므로 최적값이 존재함을 알 수 있었고 어느 경우나 초기값에서 모든 제한조건을 만족하므로 최적의 굴절각의 값에 대한 확연한 향상이 이루어지지 않는다.

Min-Max문제⁽⁶⁾는 승차감의 향상을 고려하였을때 가장 큰 屈折角을 줄이고자 할때 취하면 좋을 것으로 보이나, 다음과 같은 문제점이 있다. 국부적으로 최대값을 줄이는데만 치중하므로 최대값이 아닌 다른 屈折角들은 더 줄일 수 있음에도 불구하고 최대값은 더 이상 줄이지 못하는 상태에서 답이 얻어진 다.

Table 1 EX. Value of measurement

x_1^*	h_1 (cm)	x_2^*	h_2 (cm)	x_3^*	h_3 (cm)
	34	45		21	
0.1	3.33	0.1	4.31	0.1	2.06
0.2	6.60	0.2	8.59	0.2	4.06
0.3	9.91	0.3	12.93	0.3	6.09
0.4	13.25	0.4	17.33	0.4	8.14
0.5	16.63	0.5	21.80	0.5	10.23
0.6	20.05	0.6	26.33	0.6	12.34
0.7	23.52	0.7	30.93	0.7	14.49
0.8	27.01	0.8	35.58	0.8	16.66
0.9	30.53	0.9	40.31	0.9	18.86
1.0	34.00	1.0	45.00	1.0	21.00
	β_1 30°.43'	α_2 27°.94'		α_3 18°.54'	
		β_2 30°.74'			
$\theta_2 = \beta_1 - \alpha_2 = 2^\circ.49'$		$\theta_3 = \beta_2 - \alpha_2 = 12^\circ.20'$			

Table 2 Comparison of the theory value and the experiment value

Tower's height (cm)		Theory value (Degree)		Experiment value (Degree)		Error (Degree)	
Δh_2	Δh_3	θ_2	θ_3	θ_2	θ_3	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$
1	1	3.24	13.03	2.49	12.20	0.75	0.83
2	1	4.51	12.48	3.75	11.66	0.76	0.82
3	1	5.76	11.93	5.01	11.08	0.75	0.85
4	1	7.02	11.37	6.32	10.53	0.70	0.84
5	1	8.27	10.81	7.16	9.96	1.11	0.85
1	2	2.70	14.43	1.98	13.62	0.72	0.81
2	2	3.96	13.89	3.20	13.06	0.76	0.83
3	2	5.21	13.34	4.47	12.52	0.74	0.82
4	2	6.46	12.78	5.76	11.94	0.70	0.84
5	2	7.70	12.22	6.60	11.38	1.10	0.85
1	3	2.17	15.82	1.43	15.01	0.74	0.81
2	3	3.42	15.29	2.67	14.47	0.75	0.82
3	3	4.67	14.75	3.92	13.92	0.75	0.83
4	3	5.91	14.20	5.26	13.41	0.65	0.79
5	3	7.17	13.65	6.05	12.81	1.12	0.84
1	4	1.64	17.22	0.90	16.43	0.74	0.79
2	4	2.88	16.69	1.68	16.49	1.20	0.20
3	4	4.12	16.16	3.37	15.31	0.75	0.85
4	4	5.36	15.62	4.67	14.81	0.69	0.81

그러므로 각 상태에서 얻어진 屈折角을 比較, 검토해서 設計에 필요한 값을 선택하는 것이 바람직하였다. 여기서 선택조건을 굴절각의 합이 최소로 한 다든지, 지주상의 反力을 최소로 되는 것을 선택한다면 ②, ③의 높이를 각각 0.01m로 하면 된다.

일반적으로 탈삭의 방지를 위하여 設計時 屈折角을 1.5° 이상으로 취하고 있다⁶⁾. 본 실험에서는 이 경우를 모두 만족 하므로 문제는 없지만 搬器가 作用할 경우는 支柱上에 搬器가 출발 할때 屈折角이 變化하므로 支柱높이 最適값 決定이 상당히 어려워진다. 본 研究에서는 搬器가 作用하지 않은 상태에서 제한조건을 反力(굴절각)의 범위와 지주높이만 제한

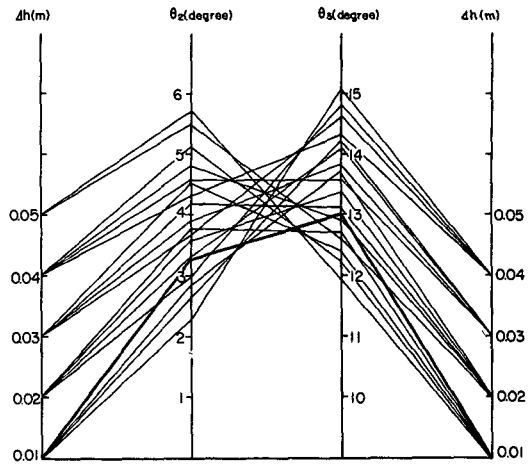


Fig. 9 Determination of tower's height

하여 支柱높이를 決定하는 것을 시도 하였으나, 앞으로 搬器가 作用한 상태에서 탈삭의 방지를 위한 支柱上의 反力을 고려하여 最大장력을 最小화하는 方法을 研究하여 索道の 운영비, 시설비 등을 동시에 줄이는 方法이 研究 되어야 할 것이다.

1. 결 론

이상의 이론과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 현수곡선성질을 利用하여 얻어진 굴절각에 對한 식(19)를 실험을 통해서 정확성을 확인하였다.
- (2) 이 식을 利用하여 경험과 시행착오법에 의존하여 얻어진 부정확한 값들을 컴퓨터에 의하여 정확 한 값을 얻을 수 있었다.
- (3) 추정방법으로 굴절각을 얻은 커브피팅을 사용 하였다.
- (4) 지주높이에 따라 굴절각은 서로 상반관계를 가 지는 상태에서 지주높이 最適값을 찾을 수 있었다.

參 考 文 獻

- (1) Walter Podolny., 1976, "Construction and Design of Cable-Stayed Bridges", John-Wiley & Sons, New York, pp. 337~346.
- (2) 二官嘉弘, 1976, "簡易索道の計画と設計", 鹿島出版 會 p. 70.
- (3) 崔善浩, 朴龍洙., 1986, "架空索道の 線路理論에 對한 研究", 대한기계학회논문집, 제10권, 제 3 호, pp.

- 419~426.
- (4) 崔善浩, 朴龍洙., 1987, “索道線路의 最適設計에 對한 研究”, 대한기계학회논문집, 제11권, 제 1 호, pp. 26~35.
- (5) 崔善浩., 1986, “여객索道의 기본설계”, 영남대학교 공업기술연구소, p. 42.
- (6) Edward J, Haug., 1979, “Applied Optimal Design”, John-Wiley & Sons, New York, pp. 77~154.