

정밀 수준측량에 있어서 빛의 굴절오차에 관한 연구 A Study on the Refraction Errors of Light in the Precise Leveling

이 계 학 *

Lee, Kye-Hak

요 旨

정밀 수준측량은 지각의 상하변동을 조사하거나 지진예지를 위하여 중요한 수단 중의 하나이다. 본 연구는 대기층에서 발생하는 빛의 굴절이 경사지 수준측량에서 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하는데 목적이 있다. 본 연구에서는 Kukkamaki의 이론과 기상관측 자료를 토대로 Kukkamaki의 보정량이 경사지 전후시 수준측량오차에 어떠한 영향을 미치는가를 실제 실험을 통하여 시도하여 보았다. 실제로 경사 1고정측점(2/100~4/100)에서 전후시 반복관측과 경사지 연속 관측 루트를 통하여 빛의 굴절의 영향과 그 특성을 고찰하였다. 특히, 경사지 수준측량(2/100~4/100)에서 빛의 굴절오차를 최소화 하기 위하여는 시준거리를 25~30 m로 하는 것이 이상적이다. 또한, 경사지 연속관측 결과 Kukkamaki의 계산값과 실측값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The precise leveling is one of the important means of investigating fluctuation of earth's crust and foreknowing earthquake. This paper aims to study refraction errors developed in the inclined leveling route. Based on Kukkamaki's theory and data of weather, the author devised an experiment to test how Kukkamaki's corrections improved the discrepancy between fore and back sight leveling in actual slope. Additionally, through the repeated observation between fore and back sight leveling at one fixed station in the slope(2/100~4/100) and the experimental tests of continuous inclined leveling route, the author studied the effects and characteristics of refraction. Especially, in inclined leveling(2/100~4/100), the distance of line of sight is ideally to be 25~30 m to minimize refraction errors. From the results of experimental tests of continuous inclined leveling route, the values of calculation by Kukkamaki's corrections were found to be nearly in accord with the values of observation.

1. 서 론

지진 豫知를 위한 지각변동 조사는 수준측량이 유력한 수단의 하나이다. 최근, 지각변동과 지진의 발생관계에 대한 연구가 진행중이고, 지각 변동의 원인에 의한 지진의 예지도 연구가 진행중이다. 지각변동을 검지할 수 있는 유력한 수단으로 수준측량이 있으며, 수cm (5~6 cm)의 지각의 변화를 검지 할려면 수준측량의 정도(精度)에 관하여 재검토할 필요가 있다. 수준측량의 精度를 조사할 주요 방법은 링(環)의 閉合差를 조사하는 것이다.⁹⁾

국립지리원에서 실시하고 있는 일등 수준측량 閉合差의 제한은 $1.5\sqrt{SKm}$ mm이다. 다시 말하면 100 km

* 호남대학교 공과대학 교수

의 링의 측정을 했을 경우 閉合差가 $1.5\sqrt{100}=15$ mm 以內 라면 합격이라 할 수 있다. 이 閉合差가 생기는 원인으로서는 여러가지 측정오차가 있고, 그 종류는 측정의 개인오차, 기계오차, 빛의 굴절에 의한 오차등이 있으며, 특히 측정중에 생기는 급격한 지각 변동등으로 인하여 閉合差가 생긴다.¹³⁾ 수준측량은 대기권내에서 행해지고 있으므로 빛의 굴절의 영향을 피할 수 없다. 또한 빛은 그가 통과한 대기의 매질 및 기상의 요소에 따라서 빛의 굴절이 각각 달라진다.

본 연구에서는 閉合差가 생기는 원인에 대한 규명보다는 펠란드의 Kukkamaki 이론을 中心으로 빛의 굴절 현상(굴절)이 수준측량의 精度에 미치는 영향을 여러 실험관측을 통하여 고찰하였다.^{11,13)}

2. 하층온도와 微氣象

2.1 빛의 굴절현상

빛은 매질이 서로 다른곳을 통과할 때 그 경계면에서 굴절하고, 공기중에서도 똑같은 현상이며, 매질이 상이하다는 것은 곧 기온, 습도, 기압, 탄산가스 함유량이 서로 다른데 원인이 있다.¹⁾

수준측량의 경우 地面上 3 m 정도의 공기상태가 문제가 되며, 이 범위에서 공기의 각층의 굴절률의 相異는 온도에 의한 영향이 가장 크다. 그리고 공기의 온도는 태양 복사열로 지표가 가열되어 공기 對流로 인한 원인으로 시간에 따라 변화하여 간다. 이 변화의 모양은日出 1~2시간 후에 그 온도경사는 zero가 되고, 그 후는 지표 부근 온도가 상층보다 높아져서 온도경사는 (-)가 된다. 또한 밤에는 지표부근의 온도가 상층보다 낮아져서 온도구배는 (+)가 된다.

2.2 지표부근의 微氣象

우리는 염천에서 지표부근의 물체를 보면 정지하지 않고 흔들리게 보이는 현상을 자주 경험한다. 1978년 스웨덴에서 개최한「빛의 굴절에 관한 심포지엄」에서 Kukkamaki는 1943년 수준측량을 실시한 경험을 통하여 다음과 같이 기술했다.¹¹⁾

여름철 수준측량에서 망원경을 볼 때 표척상이 흔들려서 읽기가 곤란하지만 춘추에는 이 동요가 적었으며, 또 동요의 현상은 정오에 가까워서 최고를 이루고 이 시간을 벗어남에 따라서 점점 감소현상을 발견했다고 발표했다. 따라서 Kukkamaki는 태양이 지평선에 있으면 표척상이 안전하다는 것을 착안하여 수준측량은 일출 일몰에 행하는 것이 가장 이상적이라는 것을 알고서 우선 첫단계로서 지표부근의 미기상구조를 파악하여 빛의 굴절에 관한 연구로 발전시켰다.

지상 3 m 까지 지표부근의 기상상황에 관한 미기상에 의하면 다음과 같다. 야간에는 열방사에 의하여 지표면은 상층공기보다 냉하고 그 때문에 기온은 지표로부터 높이의 증가와 더불어 증가해서 온도 연직경사는 (+)이며, 일출과 더불어 지면상 태양열의 흡수에 따라 온도는 높이의 증가에 따라 감소하여 온도 경사는 (-)가 된다.

온도경사의 절대치는 아침부터 13~15h까지는 증가하고 그후 감소하다가 일몰경에는 zero가 된다. 전술한 바와 같이 (+)의 온도경사가 완만이 증가해서 일출경에

다시 zero가 되며, 온도경사의 절대치는 맑은날씨에 가장크고 주간에는 지상에 열이 가해지므로 이 부근의 온도는 따뜻해서 상승하며, 수m 높이에서 주위의 온도 1°C 상이에 따라 공기의 일부가 연속상승으로 수준측량할 때 표척상에 동요를 일으키고 이 동요의 주기는 대개 1~10 Hz이다.¹³⁾

2.3 패스도의 온도경사측정

패스도는 Siidengland ($\lambda=2$ W, $\phi=52$ N)에서 1941년 8월 1일부터 1943년 7월 31일 까지의 2년간 2분 간격으로 온도경사를 측정 하였으며, 그때 측정한 地表의 높이는 2.5, 30, 120 cm였다. 이 온도 측정의 일부를 그림 1에 나타냈으며, 그림 1에서 시간에 따라 온도 경사가 변하는 것을 볼수 있다. 여기 값은 一測定點에 있어서 연속 관측의 결과를 월 평균으로 각 시간에 따라 나타낸 것으로서 실제의 야외에서는 지표면의 形, 色, 氣象 등에 따라 그 값은 크게 달라진다.^{1,10)}

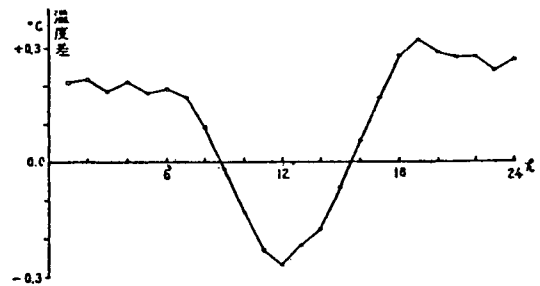


그림 1. 지상 30~120 cm 사이의 온도차

2.4 온도 연직 분포곡선

수준측량에서 빛의 굴절의 문제를 다루는데에는 공간적, 시간적인 온도분포를 구하여 이것을 수식화 할 필요가 있다. 일반적으로 지반고 Z에 있어서 임의 시각 h의 온도 t는 다음 관계식으로 표시 한다.¹³⁾

$$t = A(Z) + B(Z)f(h)$$

윗식에서 제1항은 높이만의 함수이고 제2항은 높이와 시간의 적에 대한 함수로서 여기서 시간을 一定하게 하면 t에 대하여 다음식을 고려하게 된다.

$$t = a + b \log(Z+c) \dots \dots \dots \text{Lallemand Formula}$$

$$t = a + bZ^2 \dots \dots \dots \text{Hugershoff Formula}$$

$$t = a + bZ + cZ^2 \dots \dots \dots \text{Kohlmuler Formula}$$

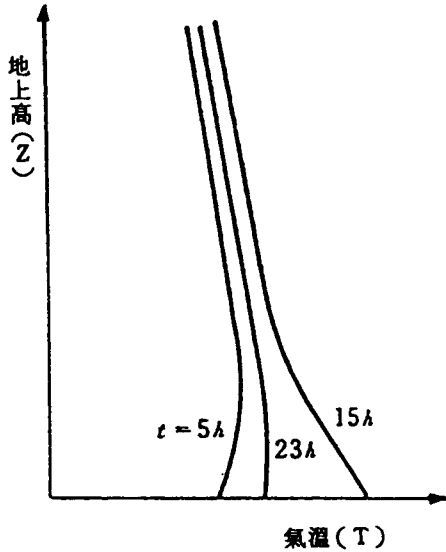


그림 2. 온도의 연직 분포곡선

$$t = a + bZ^c \dots \dots \dots \text{Kukkamaki Formula}$$

여기서, a, b, c는 定數다.

그림 2는 1979년 일본 국토지리원 측지부가 실험을 통하여 온도의 연직분포곡선의 표준상태를 표시한 것이다.^{3,12)}그림 2에서 보는바와 같이 정오 온도분포곡선이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

3. 높이에 따른 系統的인 誤差

본 연구에서 높이에 따라 累積된다고 생각되는 계통적인 오차는 1. 표척보정과 눈금오차, 2. 표척의 비연직성, 3. 지구의 중력장이 다르기 때문에 생기는 오차, 4. 공기굴절률의 相異에 의한 오차(경사지에서 빛의 굴절오차) 등으로 나누어 생각할 수 있다.^{2,3)}

3.1 標尺補正과 눈금 誤差

이것은 각 표척고유의 눈금오차 및 온도 변화에 따른 inver-tape 의 신축에 의한 오차를 보정하는 것이다. 표척의 눈금오차를 단위길이당 m_m 이라하면 이것에 의한 오차는 비고 Δh 에 비례해서 $m_m \cdot \Delta h$ 가 된다. 이를 위하여 표척의 檢定을 하여 1 m 에 대한 補正值가 구해지며, 관측시 온도에 의한 溫度補正과 동시에 각 level net 의 고저차에 곱하여 보정한다.

따라서 표척의 팽창을 적게하기 위해서는 inver-tape

보다는 super inver-tape를 사용해서 신축오차를 적게 할 수 있다.^{2,3)}

3.2 標尺의 非鉛直性

표척이 경사로 세워지는 경우 표척의 눈금수를 많이 읽게 된다. 이것에 의한 오차는 항상 같은 부호로 일방적인 계통오차이다. 이 오차는 높이에 비례하고, 또 그 경사각의 제곱에 비례한다.

그림 3에서

$cs = \gamma + dr$ 양변을 제곱하면

$$\gamma^2 + d\theta^2 = (\gamma + d\gamma)^2 = cs^2$$

또, $d\theta^2 = d\theta'^2 + d\gamma^2$ 와 근사함으로 $d\theta = \gamma \cdot \theta$ 와 같이하여 윗식에 대입하면

$$\gamma^2 + d\theta^2 = (\gamma + d\gamma)^2 = \gamma^2 + 2 \cdot \gamma \cdot d\gamma + d\gamma^2$$

$$\gamma^2 + (d\theta'^2 + d\gamma^2) = \gamma^2 + 2 \cdot \gamma \cdot d\gamma + d\gamma^2$$

$$\gamma^2 \cdot d\theta^2 = 2\gamma \cdot dr$$

$$\therefore d\gamma = \frac{\gamma \cdot \theta^2}{2}$$

3.3 지구의 重力場이 다르기 때문에 생기는 誤差

수준측량에서는 지오이드면으로 부터 높이가 측정되며, 지오이드면은 대개 평활하지 않고 장소에 따라서는 다소 기복이 있다. 수준측량에 의하여 얻어진 비고도 지오이드의 기복, 결국 중력의 영향을 받고 있는 것이 된다.³⁾

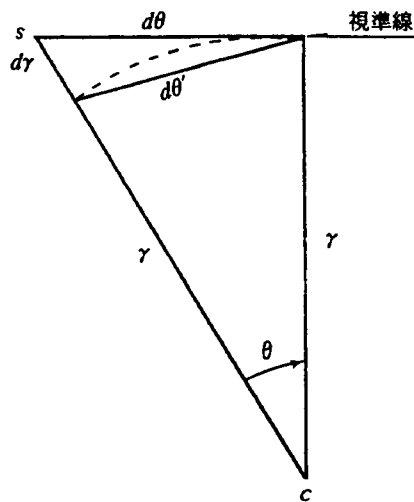


그림 3. 표척의 경사에 의한 오차

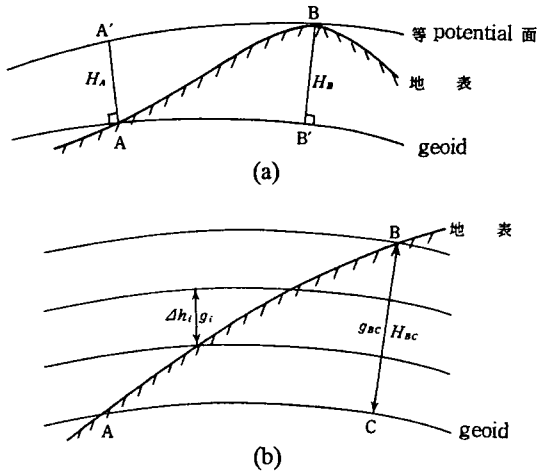


그림 4. (a) 非 potential면의 비평행성에 의한 높이의 차이, (b) 等 potential면과 표고

그림 4에 있어서 A를 수준측량의 출발점으로 하고 점 A 와 B 의 높이차를 구하는 것으로 한다. 지금 A를 지난 等重力 potential면에 따라서 가정적인 수준측량을 하고, BB'의 길이를 자로 부터 높이의 차 H_B를 구할수 있다. 한편 A'의 높이를 측정후, A'로부터 B까지 potential면에 따라서 가상적인 수준측량을 한다.

이렇게 하면 점 A와 B의 높이차로서 AA'=H_A가 얻어 지나 여기서 H_A=H_B가 된다고는 할 수 없다. 그것은 等重力 potential 면의 간격이 장소에 따라서 다르기 때문이다. 다시 말하면 수준측량의 루트가 다르면 높이의 측정 결과도 틀리게 되는 가능성이 있다. 여기서 H_A와 H_B를 같도록 무엇인가 보정계산이 필요하게 된다.

지금 A점부터 B점까지의 수준측량을 하여, BC의 정구중력을 g_{BC} 라하고, B점의 높이 H_{BC}를 구하려면

$$\sum g_i \cdot \Delta h_i = g_{BC} \cdot H_{BC}$$

$$\therefore H_{BC} = \frac{\sum g_i \cdot \Delta h_i}{g_{BC}}$$

가 되고 A 점부터 출발해서 H_{BC}를 구하는데는 수준측량 결과 ($\sum_{i=1}^n \Delta h_i$)뿐 아니라 각점의 중력치(g_i)와 BC간의 중력치(g_{BC})를 알아야 한다.

3.4 경사지에서 빛의 굴절

앞에서 하층공기와 미기상에서 논술한 바와 같이 正午의 온도경사는 마이너스(-)이며, 지표부근의 온도경

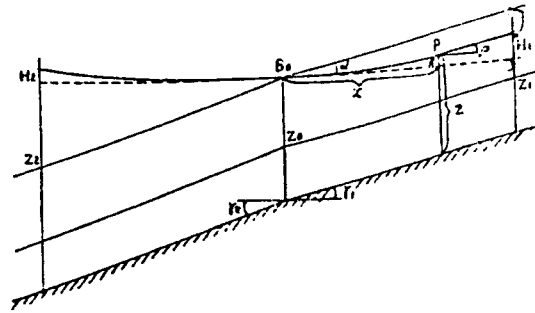


그림 5. 경사지에서 굴절의 모형도

사는 크다. 이러한 상황하에서는 빛은 지표면에 근접한 곳을 통과할수록 크게 굴절한다. 경사지에 있어서 前視가 地 表부근을 시준했을 경우 後視는 地 表에서 상당히 떨어진곳을 시준한다. 그러므로 前視는 빛이 크게 굴절하여 後視의 굴절은 前視의 굴절보다 적다. 이런 현상이 경사지 측정에서 계통적 오차로서 나타나며, 이 모양을 그림 5에 나타냈다.^{3,7,8,11,16)}

Kukkamaki는 이 굴절의 양을 이론적으로 구하였으며, 그 이론식은 다음과 같다

지금 대기중에서의 굴절률(n)은

$$n - 1 = \frac{0.0002923}{1 + 0.00368t} \cdot \frac{B}{760} - 0.000041 \cdot \frac{e}{760} + 0.0000016 \cdot k \cdot \frac{B}{760} \quad (1)$$

여기서, t: 온도 °C

B: 기압 mmHg

k: 대기내의 CO₂의 양

e: 수증기압 mmHg

로 나타 낸다.

이 식을 t, B, k, e에 대하여 미분하여 dt=2°C, de=2 mmHg, dk=0.02%, dB=0.05 mmHg, t=15°C, B=760 mmHg라 하고 dn를 계산하면

$$dn = 1.92 \times 10^{-6} \text{ 온도}$$

$$dn = 0.108 \times 10^{-6} \text{ 습도}$$

$$dn = 0.032 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$$

$$dn = 0.018 \times 10^{-6} \text{ 기압}$$

이 되고 여기서 온도의 영향이 가장 크고 기타는 무시할수 있다.

따라서, dn=-10⁻⁶

$$\left\{ (0.933 - 0.0064(t-20)) \right\} \frac{B}{760} dt \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

한편, 그림 5에서 $n \cdot \cos\alpha = \text{const.}$ 로 이를 미분하면

$$\begin{aligned} \cos\alpha \cdot dn - n \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha &= 0 \\ d\alpha &= \frac{\cos\alpha \cdot dn}{n \cdot \sin\alpha} \end{aligned}$$

가 된다. 굴절각 β 는 χ 의 곳에서

$$\beta = \int_{n_0}^n \frac{\cot\alpha}{n} dn$$

n_0, n 는 B_0, P 에 있어서의 굴절 계수이다. $r_1 = \text{const.}$ 라 하면

$$\beta = -\cot \gamma_1 \log \frac{n}{n_0} \doteq -\cot \frac{\gamma_1}{n_0} (n - n_0)$$

가 되고, 따라서, B_0 부터 P 까지의 높이 h 는

$$h = \int_0^\chi \beta dx = -\frac{\cot \gamma_1}{n_0} \int_0^\chi (n - n_0) d\chi \quad (3)$$

가 된다. 한편 높이 z 와 온도 t 와의 관계는

$$t = a + bz^c \quad (4)$$

a, b, c 는 const. 로 표현되므로 식 (2), (3)에 의하여

$$n - n_0 = d \cdot b \cdot (z^c - z_0^c)$$

$$\text{단, } d = -10^{-6} (0.933 - 0.0064(t-20)) \frac{B}{760}$$

가 되므로 식 (3)은

$$h = -\frac{\cot \gamma_1}{n_0} \cdot d \cdot b \int_0^\chi (z^c - z_0^c) d\chi \quad (5)$$

이 된다. $z = Z_0 - \tan \gamma_1 \cdot \chi$ 되는 변수 변환으로 식 (5)을 적분하여 $n_0=1$ 이라 하면

$$\begin{aligned} H_1 &= \cot^2 \gamma_1 \cdot d \cdot \frac{\theta}{z_2^c - z_1^c} \\ &\left\{ \frac{1}{c+1} \cdot Z_1^{c+1} - Z_0^c \cdot Z_1 + \frac{c}{c+1} \cdot Z_0^{c+1} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

이 되고, 이와 같은 방법으로

$$H_2 = \cot^2 \gamma_2 \cdot d \cdot \frac{\theta}{z_2^c - z_1^c}$$

$$\left\{ \frac{1}{c+1} \cdot Z_2^{c+1} - Z_0^c \cdot Z_2 + \frac{c}{c+1} \cdot Z_0^{c+1} \right\} \quad (7)$$

이 된다. 보정값 H 는 H_1 과 H_2 의 차이므로, $H = H_1 - H_2$ 이며, $\gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma$ 라 하면

$$\begin{aligned} H &= \cot^2 \gamma \cdot d \cdot \frac{\theta}{Z_2^c - Z_1^c} \\ &\left\{ \frac{1}{c+1} (Z_1^{c+1} - Z_2^{c+1}) - Z_0^c (Z_1 - Z_2) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 단, Z_1, Z_2 : 온도 측정점의 높이

θ : 온도차

Z_0 : 기계고

Z_1, Z_2 : 시준선의 높이

c 는 패스도의 2년간 온도차의 연속관측으로부터 식 (4)의 $t = a + bz^c$ 를 이용하여 계산으로 구하고, 每月 그리고 每時間에 따라 表로 나타낼수 있다. 다시 연속 루트에 의한 측정에서는 근사식으로, $Z_0=150, Z_1=50, Z_2=250 \text{ cm}$ 라 하고

$$H_0 = \frac{5.95}{250^c - 50^c} \left\{ \frac{1}{c+1} (50^{c+1} - 250^{c+1}) - 150^c \cdot 200 \right\} \quad (9)$$

로부터

$$H = 10^{-5} \cdot H_0 \left(\frac{S}{50} \right)^2 \theta \cdot D \quad (10)$$

단, S : 시준거리 m

θ : 온도차 $^\circ\text{C}$

D : 比高 scale division, 5 mm

라 하고, H_0 를 表로 나타내두면 각 측정점에서 50, 250 cm의 온도차 측정만으로서 H 를 구할 수 있다. Kukkamaki는 이 이론식을 기초로 하여 일측정점에 있어서 굴절오차 H 와 연속루트(약 2 km)에 있어서 실험관측을 토대로 H 를 구하였다.

그림 6은 연속한 루트에서 시험 결과이다.^{7,10,13} 그림 6에서 계산값과 실측치를 동시에 표시하였으며, 여기에서 계산값은 Kukkimaki에 의하여 굴절량 보정식에 의

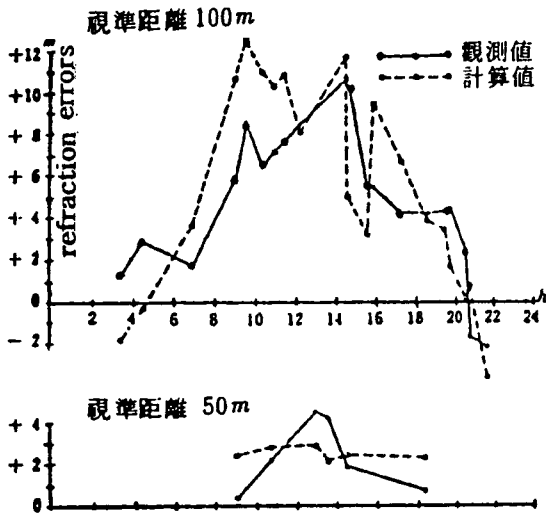


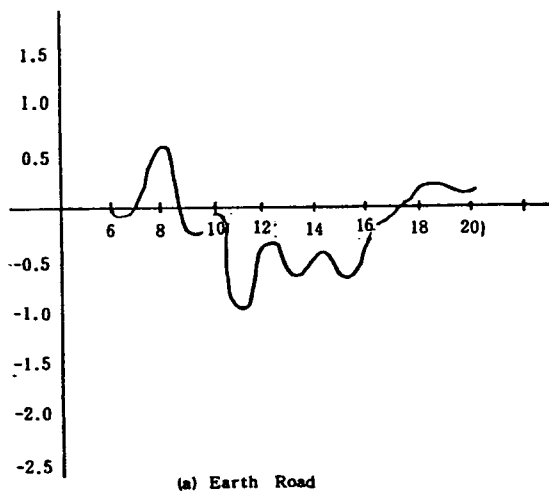
그림 6. 굴절 오차량의 시간변화

한 것이다. 그림에서 보는바와같이 계산값과 실측값이 차이가 없음을 알수 있고 시준거리가 길면 굴절오차가 크다.

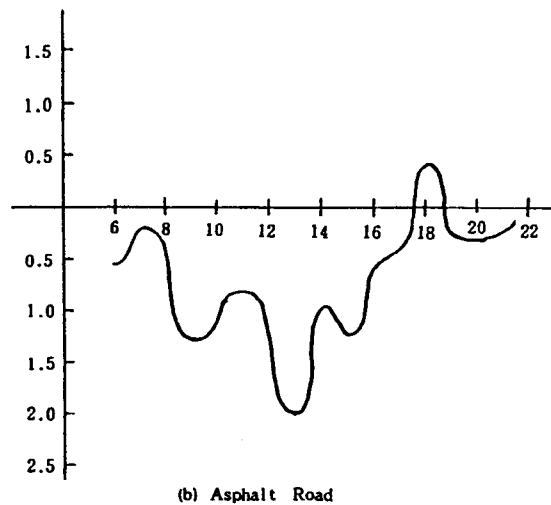
4. 실험관측

본 연구에서는 1996년 10월 2일부터 약 3주간에 걸쳐 호남대학교 뒷산 어등산 등산루트를 택하여 정밀수측량결과를 토대로 굴절의 영향을 검토 하였다.

4.1 온도경사곡선



(a) Earth Road



(b) Asphalt Road

그림 7. 지상에서 온도경사의 시간별 변동 (earth, asphalt)

본 연구에서 온도관측은 광주기상대에서 과거온도를 관측했던 Sato aneroid 기압계와 온도계를 이용했다. 온도측정에서 태양의 직사광선을 받을때에는 급 상승하는 현상을 나타내고 온도경사곡선은 심한 굴곡을 보였다. 따라서 이와같은 기현상을 배제하기 위해서 필자가 고안한 것이 휴대용 소형 백엽상 이었으며 이 백엽상에 정밀온도봉을 넣어서 관측한바 정밀한 값을 얻었고 모든 관측방법은 기상대에서 관측하는방법을 택했다.^{4,7)}

4.1.1 평탄지 온도경사

본 연구와 관련하여 필자가 지난 8월 여름철을 택하여 ① Earth, ② Asphalt 노상등으로 장소별로 나누어 지상에서 약 30, 50, 120, 150, 200, 250 cm의 각각의 높이에서 온도를 관측한바 있으며, 그 결과를 그림으로 표시하면 그림 7과 같다.

그림 7에서 나타낸 바와 같이 온도경사 곡선은 조석을 제외하고는 거의 (-)곡선을 나타내기 때문에 우리가 실시하는 수준측량은 주간에 실시하므로써 굴절오차가 따르기 마련이며, 그크기는 정오를 전후해서 뚜렷하다는 것을 알수 있으며, 온도경사와 굴절의 크기는 asphalt, earth road 등의 순위로 나타났다.^{6,7)}

4.1.2 온도 연직 분포상황

본 연구에서 온도의 연직분포상황을 알기위하여 지난 여름(8월) 지상 30, 50, 120, 150, 200, 250 cm별로 관측 하였으며, 이들을 Earth, Asphalt 노상별로 구분하여 프로팅한 변동상황은 그림 8과 같다. 그림 8에서 보는바와 같이 정오(12~15시) 온도분포곡선이 가장 크다

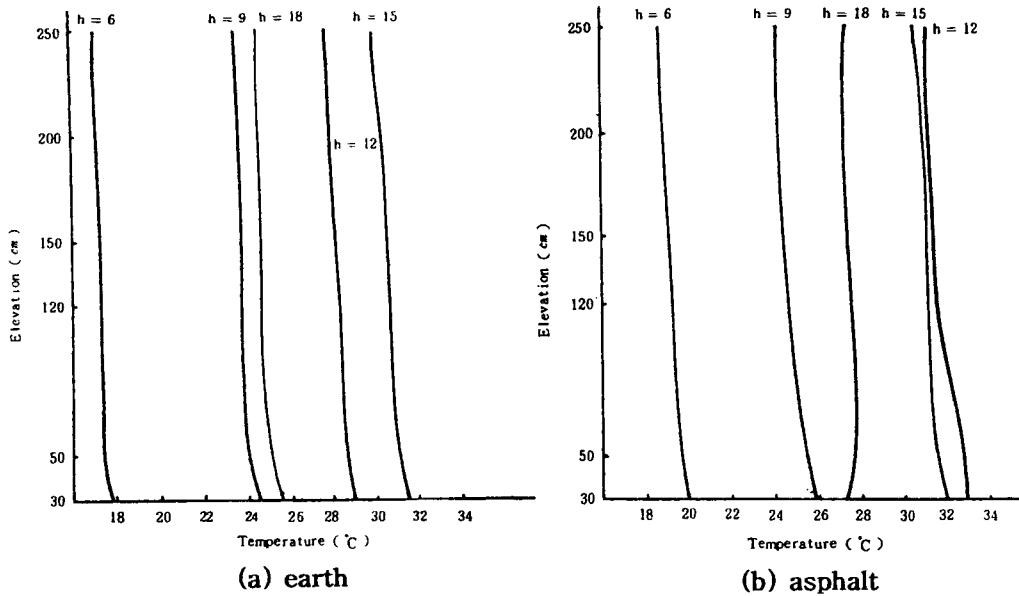


그림 8. 온도의 연직 분포곡선

는 것을 알수 있으며, 굴절의 크기는 역시 asphalt, earth road 등의 순위로 나타났다.^{6,7)}

4.2 一測定點에서의 관측

호남대학교 후정 내에 있는 4/100, 2/100의 경사지에 각각 100, 60 m의 거리에 블록을 묻었고, 그중간에 각 (脚)을 설치할 각대(脚臺)를 만들어서 정밀 실험관측할 수 있도록 하였다(그림 9).

관측은 3개 높이 위치에서 2회씩 측정을 되풀이 하여 그것을 1단위의 관측으로 하였다. 관측과 동시에 온도, 습도, 기압의 측정을 하였으며, 기온의 측정은 기계 보다 3 m 떨어진 地上 15, 45, 120 cm 위치에서 측정하였다.

관측 결과를 8~10, 10~14, 14~17시의 각 時間으로 나누어 각각의 평균치를 만든 것이 표1~2에 나타 났다.

이 결과를 보면 굴절은 正午 前後가 가장 크고 조석

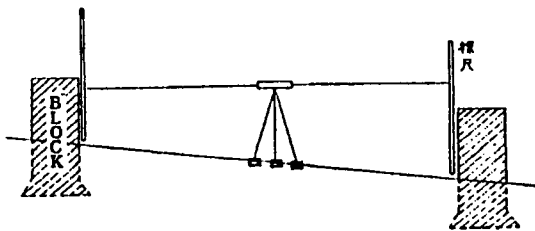


그림 9. 빛의 굴절 관측대

은 비교적 적으며, 어느 경우나 시준거리가 긴편이 굴절의 영향이 크다. 이러한 상황들은 Kukkamaki의 결론 과도 일치한다.^{11,13)}

4.3 연속 루트에서 관측

관측장소는 호남대학교 뒷 어등산 등산길 약 1.5 km의 비포장 도로 였으며, 관측은 각 측정점마다 표척대

표 1. 경 사 4/100, 시준거리 30 m (단위 : mm)

월일	시간			기상
	8~10시	10~14시	15~17시	
10.15	-0.08	-0.14	-0.08	맑음
10.16	-0.09	-0.11	-0.06	구름
10.17	-0.10	-0.10	-0.08	맑음
평균	-0.09	-0.11	-0.07	

표 2. 경 사 2/100, 시준거리 50 m (단위 : mm)

월일	시간			기상
	8~10시	10~14시	15~17시	
10.18	-0.12	-0.13	-0.05	구름
10.19	-0.21	-0.22	-0.02	맑음
10.20	-0.16	-0.21	-0.20	맑음
10.21	-0.11	-0.25	-0.14	맑음
평균	-0.15	-0.20	-0.10	

* -:비교가 적다는 것을 의미한다.

및 기계대를 설치하여 4日間の 관측을 하였다. 참값(眞值) h_0 는 굴절의 영향을 피하기 위하여 시준거리를 25 m로하고 그 왕복관측의 평균치 $h_0=20.0906$ m를 이용했다. 각 관측 比高 h 로부터 h_0 를 감한 Δh 를 굴절 오차로 보고 그 결과를 표 3에 나타냈다.

10월 5일의 관측을 제외하고 오차의 영향은 정오가 크고 조석이 적고 이것은 一測定点 에서의 관측 및 Kukkamaki의 결론과도 일치한다.^{7,11)} 10월 5일의 값은 역결과로 되어 있으나, 이것은 바람이 原因이 된다고 생각한다.

또한, Kukkamaki이론식에 의하여 地表上의 온도차 θ 를 측정하여 굴절의 보정값 h' 를 계산하여 표 3에 나타냈다. 이 결과 보정하여 나빠진것도 있으나 평균으로 보면 1.28부터 1.09 mm로 약 0.2 mm 양호해 졌다.

그러나 전체적으로는 굴절의 보정을 하여 양호하여 졌다고는 볼수 없다. 이것은 10월 5일의 관측값이 이상하다는 것 또는 온도경사 측정값의 오차로 인한 것으로 생각된다. 이 실험 관측은 비포장 도로에서 행하여진 것이나 근래에는 포장도로가 많으므로 굴절의 영향은 더욱

커질 것이다. 그것은 포장도로는 태양열의 영향이 크기 때문에 고온으로 되어 빛의 굴절이 커지기 때문이다.

또한, 굴절오차의 진폭상황을 검토 하기 위하여 10월 4일 8~16시까지 데이터 값만을 도출하여 굴절 오차(관측값)와 계산값을 프로팅한 것을 도시하면 그림 10과 같이 나타났다. 그림10에서 보는 바와 같이 관측값의 오차는

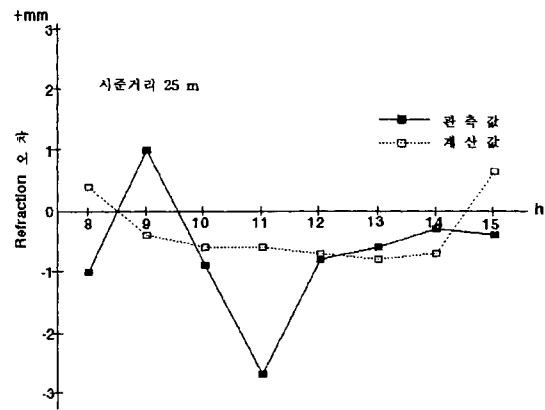


그림 10. 굴절 오차 곡선

표 3. 굴절 오차

월 일 No.	시 간	관측비고 h	굴 절 $\Delta h=h-h_0$	온 도	일 기	바 람	온도차 θ	굴 절 계산치 $\Delta h'$	$\Delta h-\Delta h'$
10월 3일	시	mm	mm	°C			°C	mm	mm
1	9~10	89.44	-1.16	8.7	맑음	없음	-0.40	-1.49	+0.33
2	13~14	89.36	-1.24		"	"	-	-	-
10월 4일									
3	8~9	89.57	-1.03	9.2	맑음	약간	+0.10	+0.37	-1.40
4	9~10	91.57	+0.97	12.5	"	"	-0.10	-0.37	+1.34
5	11~12	87.91	-2.69	13.0	"	"	-0.15	-0.56	+2.14
6	12~13	89.84	-0.76	13.0	구름	"	-0.20	-0.75	-0.01
7	13~14	89.91	-0.64	13.0	흐름	"	-0.20	-0.75	+0.11
8	14~15	90.28	-0.32		맑음	"	-	-	-
9	15~16	90.18	-0.42	11.2	"	"	+0.20	+0.75	-1.17
10월 5일									
10	9~10	91.81	+1.21	10.1	맑음	약간	+0.16	+0.67	+0.54
11	13~14	93.19	+2.59	12.9	"	"	-0.30	-1.12	+3.71
12	14~15	92.86	+2.26	11.8	"	"	-0.00	-0.00	+2.26
10월 6일									
13	13~14	89.26	-1.34	13.8	맑음	없음	-0.40	-1.68	+0.34
14	14~15	89.62	-0.98	13.9	"	"	-0.20	-0.75	-0.23
15	15~16	90.26	-0.32	10.8	"	"	-0.10	+0.35	-0.67
평 균			1.28						1.09

정오를 정점으로 약 3 mm의 큰 진폭을 나타낸 반면 계산 값의 오차는 약 1 mm 미만으로 조석에서 (+)에서 주간에는 (-)로 완만한 곡선을 형성하고 있음을 알 수 있다.

5. 굴절오차

5.1 굴절에 의한 우연오차

Kukkamaki는 자기 논문에서 굴절에 의한 우연오차에 관해서도 언급했다.^{11,13,14} 태양복사열에 의하여地表가 가열되어, 지표부근에 부(-)의 온도 경사가 생긴다. 이때 하층공기는 상층공기보다 가볍게 되어 그 부근의 공기가 불평형 해진다. 그리고 평형을 유지하기 위해서는 공기 상호간에 복잡한 교류가 생긴다. 이때 생기는 빛의 굴절 현상은 주기 1초 전후이며 아지랭이 현상이 상하로 움직여 보인다. 아지랭이 현상의 진폭은 온도 경사가 클수록 커진다. 진폭이 적을 때는 그 동요의中心을 시준하면 되나 진폭이 클 때는 시준거리를 좁혀서 측정하지 않으면 안 된다.¹⁶

다음으로 온도 경사 正(+)이면서 하층공기가 靜의 평형을 유지하고 있을 때 온도가 다른 다음 공기부분이 이동 하였을 경우 역시 빛의 굴절현상이 일어난다. 이 경우 像의 움직임의 주기는 數分에 이른다. 이 영향에 의한 오차는 晴天無風의 이른아침에 시준거리 50 m 때 1 mm, 시준거리 100 m 때 7 mm에 달한다. 이 영향의 오차는 극히 유해한 것임으로 像의 동요가 없음을 확인 후 측정 하여야 한다.

5.2 굴절의 일변화에 의한 오차

여기서, Kukkamaki의 논문을 떠나서 본 연구에서는 굴절의 日變化에 의한 영향에 관하여 설명하고자 한다. 삼각측량의 頂點角(天頂距離)관측에 있어서 그 角度가 時間에 따라 변화함은 잘 알려져 있는 사실이다. 예컨대 1972년 11월에 일본 Tsukuba 산 부근에서 행한 「대

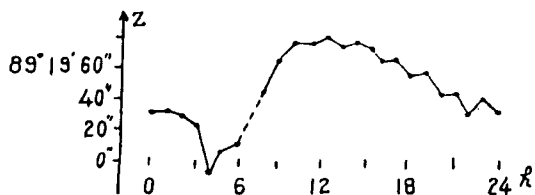


그림 11. 굴절에 의한 정점각의 일변화

기의 굴절」에 대한 실험관측에 의하면 頂點角의 變化의 진폭이 100"에 달한적이 있다(그림 11).⁹ 또한, 본인이 1983년 5~7월에 광주무등산 부근에서 大氣굴절에 관한 실험관측「굴절계수 K값 관측」에 의하면 頂點角(天頂距離와 溫度觀測)의 變化의 진폭이 40"에 달한적이 있다(그림 12).⁹

천정거리와 온도 그리고 관측시간과의 상관관계를 그림 12의 (a),(b)에서 보면 8~15시까지는 대개 공통적으로 직선적인 비례현상의 증가를 보이다가 15시를 기해서 다시 감소현상을 나타내고 있으며, 이들의 상관관계를 표시한 회귀곡선은 시간의 변화에 따라서 산수동(Z_1)→장원봉(Z_2)과 장원봉(Z_1)→원효사(Z_2)의 양쌍방관측결과 Z_1 은 우회전으로 증가하다가 감소하는 반면 Z_2 는 좌회전으로 증가하다가 감소하는 특성이 있는데, 이는 일본의 Tsukuba산이나 Tateno산에서 관측한 곡선과 비슷한 현상을 찾아 볼 수 있다. 여기서, Z_1, Z_2 은 천정관측의 정반 관측각이다.^{4,5,10}

이와 비슷한 실험 관측은 여러나라에서 옛날부터 시행하고 있는 것 같으나 러시아에서 행한 "예"에 의하면 頂點角은 時間에 따라 상당히 變化하고 이 變化는 기계를 설치한 위치가 지표에 근접되고 시준선이 지표에 가까운 곳을 통과할 때 생긴다고 보고 되고 있다. 다시 말하면 전술한 微氣象과 하층공기의 관계가 이러한

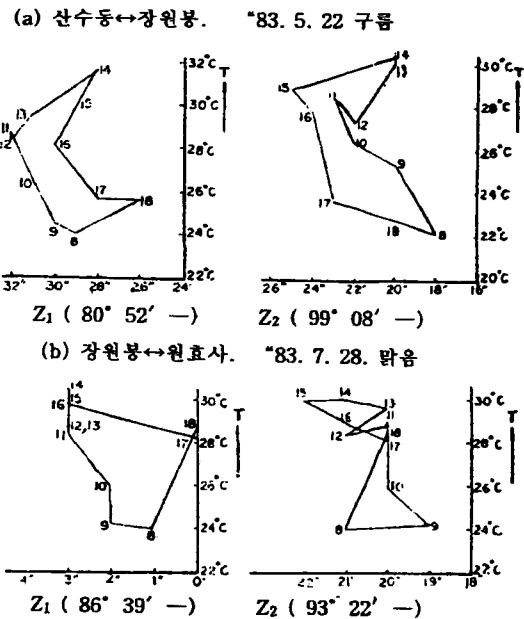


그림 12. 천정거리와 온도, 관측시간과의 관계

頂點角의 큰 變化를 가져 온다고 생각된다.

삼각측량의 결과를 연역해서 곧바로 수준측량의 결론을 도출 시키는 것도 問題가 있다고 생각되나 頂點角의 日變化를 일으키는 原因이 수준측량에도 오차의 원인이 되는지 검토하는것도 큰 의의가 있을것이다. 그림 11을 보면 頂點角은 午前中에 急變함을 알수 있다. 이러한 시준선의 급격한 變化는 수준측량에도 영향을 미칠것이다.

다시말하면 그림 13에서 보는 바와 같이 後視 A點을 읽는 시간에 있어서의 前視의 위치는 B點인데 前視를 읽을 때 까지 경과시간이 있으므로 前視를 시준할때 시준선이 B'점에 달하고 있다 하면 h만큼 오차가 생길 것이다.³⁾

따라서 2등 수준측량과 같이 後視→前視로 읽어서 진행 할 때는 계통적 오차로 되어 나타난다고 볼수 있다.

미국서는 1941年~1942年에 걸쳐서 1,434 km의 거리를 수준측량을 실시하여 그 결과로부터 통계적으로 굴절을 포함한 오차를 검토했다.¹³⁾ 그리고 이런 종류의 오차를 소거하기 위해 기수측점에서는 후시를 먼저 읽고 우수측점에서는 전시를 먼저 읽도록 하고 있다.

以上 굴절의 日變化에 의한 오차는 한가지 생각(방법)을 말한것이며 실제로 이 오차의 有無에 관해서는 실험으로 확인해야 한다. 그러나 실험을 안하고도 실제로 관측된 일등 수준측량의 좌우 눈금에서 얻어진 2개의 比高를 비교하면 하나의 판단 資料가 된다. 즉, {(左 눈금에 의한 比高)-(右 눈금에 의한 比高)}=E의 경향을 보면 된다.

여기서,한예로서 표 4는 1968년 7월~9월에 걸쳐서 일본 규슈지방에서 시준노선거리 100 km에서 실시한 일등 수준측량결과로부터 E를 조사하여 날씨, 시간별로 분류한 결과표이다.^{13,14)}

표 4에서 보면 대략 흐린 날씨보다 개인 날씨가 |E|

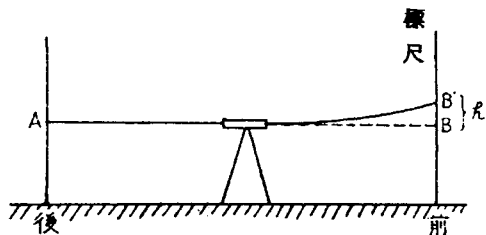


그림 13. 굴절에 의한 시준선의 방향

표 4. 일등수준측량 결과 E값

	맑음 구름(흐림)	
거리 S km	66.3	29.0
오전 (좌눈금비고)-(우눈금비고)=Emm	-88.0	-36.0
E/S(mm/km)	-1.33	-1.25
오후	S	73.5 58.2
	E	-97.4 -48.7
	E/S	-1.33 -0.84

는 크고 오전보다 오후가 |E|는 크다.그러나 오전 오후 다 같이 E는 부(-)로 되어있다. 즉, 그림 11로부터 판단한 E의 경향과 전면적으로 합치 되지 않는다. 이 不一致는 굴절의 日變化의 영향에 따라 그 오차를 구하였거나, 또는 삼각측량의 결과를 그대로 곧 수준측량의 결과에 적용 하였던지 2가지 중에 하나일 것이다. 어찌되었던 이 조사의 범위 내에서는 좌우 눈금으로서 얻어진 2개의 比高間에 계통적 相異點이 생기고 있는 것은 사실이다.

6. Kukkamaki 보정식의 문제점

최근에 이르기까지 Kukkamaki식이 그다지 많이 쓰이지 않고 있는 이유는 지금까지 수준측량이 지각변동의 연구를 위해서 높은 정도를 요구하지 안했다는것도 있지만 Kukkamaki식에 대한 가정의 타당성에 의문이 있었다는 것도 사실이다.^{14,15)}

Kukkamaki의 온도 경사식에서 $a+bZ'$ 의 형이 최근 학자들의 실험으로 꼭 성립한다고 볼 수 없고 시준거리 50 m로 하였을 경우 그 범위내에서 기상상황이 과연 一樣하지 않고 천차 만별이라고 생각 할 수 있다.

미국 측지 측량국이 California에서 실시한 실험에 의하면 온도경사가 영국보다 크고, 경사지의 남면과 북면에 따라서 온도경사의 차가 있다는 점 등으로 Kukkamaki식을 보정할 필요가 있다고 기술하고 있으며 이 상과같은 의문사항은 수준측량에서 굴절문제의 근대적 어프로치의 원인이 된다.

1960~1970년에 걸쳐서 미국 남California에서 발생한 대규모의 지각변동은 과연 지진의 원인인지, 수준측량 오차인지 그 원인을 규명하기 위하여 미국측지 측량국이 대대적인 계통적 수준측량 오차에 관한 실험결과 굴절이 수준측량에서 영향이 상상 이상으로 크다고 발표

7. 결 론

본 연구에서 Kukkamaki의 이론식을 토대로 기상관측과 경사지에서 굴절에 의한 수준측량 실험을 통해서 연구분석한 결과 얻어진 몇가지 특성을 간추려보면 다음과 같다.

1. 표적의 비 연직으로 야기되는 동일부호의 일반적인 계통오차는 비고 그리고 경사각의 제곱에 비례하므로 표적의 연직성 여부는 수준측량 정도에 큰 척도가 된다. 또한 수준측량은 평활하지 않고 기복이 있는 지오이드면부터 높이를 측정하는 것이 되기 때문에 여기에서 얻어진 비고도 지오이드의 기복, 결국 중력의 영향을 받는다.

2. 수준측량에서 빛의 굴절 오차는 지금까지 보정되지 않는 오차중 가장 큰 것의 하나이며 이와같은 오차를 고려할 경우에는 시준거리를 짧게하면 되고 10m 정도면 그 영향은 거의 없다고 한다. 또한 경사지 수준측량에서 굴절의 영향을 최소화 하기 위해서는 표적 읽기를 지면으로부터 10cm 이상 읽어야 하며 이렇게 하기 위해서는 시준거리를 단축해야 함으로 약 25~30m 정도가 가장 이상적이다.

3. 주간에 경사지 수준측량에서 굴절의 영향을 적게 받기 위해서는 비고를 적게 하도록 하고 야간에는 반대로 그 량은 주간에 받는 량의 1/2이며, 일출후, 일몰전에는 그 량은 zero가 된다. Finland에 있어서 그 량은 비고 1m에 대해서 0.1mm 정도가 된다. 또 그 량은 시준거리 제곱에 비례하고 비고와 온도경사에 비례한다.

4. 굴절 실험 결과 Kukkamaki 이론식은 일반적인 사항에 대해서는 거의 합치되는 점도 있지만 엄밀한 의미에서는 나라와 지역, 지형, 위도 및 태양고도차 등에 따라서 다소 다르다. 따라서 수준측량은 거의가 도로에 따라서 행해지므로 지표의 수목이나 건물의 분포가 똑같은 넓이를 갖지 않는 경우가 많다. 특히, 우리나라와 같이 좁은 도로에 따라서 행하는 측량이, 도로폭도 넓고 지표조잡도 똑같은 외국(미국)등에서 확립된 수법을 그대로 적용하는 것은 거의 불가능하고 우리나라에 적합한 방법을 확립해야 한다.

5. 빛의 굴절은 정점각측정이나 측고, 측거에도 크게 영향이 미친다. 따라서 3각 수준측량과 같이 시준거리가 긴 경우에는 필히 고려해야 하지만, 우리가 시행하는 일반 수준측량의 경우 시준거리 20~30m에서는 그

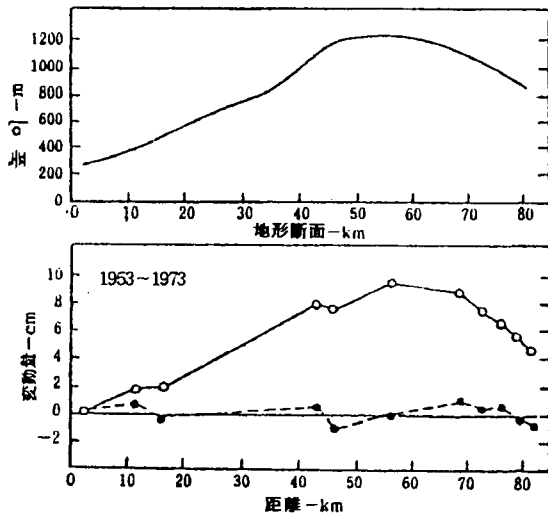


그림 14. 남에서 1953~1973년간 수준 측량결과 “예”

했다. 따라서 Kukkamaki의 보정식으로는 불충분하다고 지적하고 있다.

특히, Kukkamaki의 온도경사식 계수에 대해서는 위도차에 의한 태양고도를 고려해야 한다고 기술하고 있으며 미국 California주에서는 Kukkamaki식에 의하여 얻어진 온도경사 $\theta(t_{250}-t_{50})$ 값의 1.7배를 사용함으로써 좋은 결과를 얻었다고 보고되고 있다. 그리하여 미국 측지 측량국에서는 계산을 손쉽게 하기 위하여 θ 의 2배를 사용하고 있어서 이와같이 수정되어진 굴절보정량은 상당히 신빙성이 있다고 여기고 있다(그림 14). 그림 14에서 실선은 보정 전이고, 점선은 $2 \times \theta$ 의 보정을 표시한 것이다.¹⁴⁾

Holdahl는 θ 가 남쪽산 北斜面에 따라서 다르고 일반적으로 남측에 면한 것이 북측보다 크며 남측으로부터 북에 향하여 경사각을 상승시키는 것은 높은곳의 위치를 낮게 측정하는 것이 되며 수준환에 필연적으로 영향을 주게 된다고 보고하였다.¹⁴⁾

굴절량을 좌우하는 것은 온도경사나 Kukkamaki의 단순화식에도 의문이 없는 것은 아니다. 따라서, 지표부근의 기상상황은 아주 복잡해서 굴절보정량은 一地點의 정확성 여부를 가리는 것 보다도 수준노선 전구간에 걸쳐서 평균적인 보정이 필요하다 할 것이다. Holdahl에 의하면 근대기상학의 입장에서 보더라도 온도경사는 온도측정으로부터 결정하는 것이 바람직하고 이것은 Kukkamaki보정식에 대입해서 이용해야 한다고 말하고 있다.

영향이 미미함으로 고려할 필요가 없다.

참고문헌

1. 須田教明, "測量の物理(空氣の屈折率)," 日本 測量協會, 3月號, 1974, pp.41~44.
2. 小菅俊宏, "水準測量の高度依存誤差について" 日本國土地理院 技術資料, B.5, No.12, 1984, pp.73~106.
3. 李啓鶴外2人, "大氣의 屈折과 氣象이 測角 및 測距에 미치는 影響에 關하여," 大韓土木學會 學術發表概要集, 1979, pp.50~61.
4. 李啓鶴, "湖南地方에 있어서 屈折係數(K)에 關한 實驗的 研究," 韓國測地學會誌, 第1卷, 第 2號, 1983, pp.30~41.
5. 李啓鶴, 1984, "三角水準測量의 天頂距離觀測에 있어서 屈折係數(K)의 日變化에 關한 實驗的 研究," 全大工技研, 第25輯, 1984, pp.30~41.
6. 李啓鶴外2人, "精密三角水準測量의 鉛直角觀測에 있어서 屈折係數(K)에 關한 實驗的 研究" 大韓土木學會論文集, 第5卷 第3輯, 1985, pp.117~126.
7. 金聖辰(李啓鶴指導), "빛의 屈折에 의한 精密水準測量의 誤差에 關한 研究" 全南大學校 大學 院 土木工學科 碩士學位論文, 1987.
8. Kukkamaki, T.J., "Über die nivellitische Refraction," Finn. Geod. Inst., Helsinki, Finland, Publ. 25, 1938.
9. Y.Harada, K.Ono, "Atmospheric Refraction at Mt.Tsukuba," Geog.Surv.Inst.Vol.4, Part.1, 1954, pp.59~63.
10. Kinichi Ono, "Atmospheric Effects on the Cross-sea Leveling Observed at the Straits of Tsugaru" Geodetic Society of Japan, Vol.2, No.3~4, 1956, pp.83~89.
11. Kukkamaki, T.J., "Refraction Influence in Astronomy and Geodesy," D. Reidel Publishing Co. 1979, pp.293~299.
12. Sisuo H.N., "On the Refraction of the Cross-sea Leveling by Theodolite Method," Geog.Surv.Inst. 1980, Vol. 6, pp.1~64.
13. Noriaki S.D., "Observation of Refraction in the Classical Leveling" Japan Society of Surveying and Mapping, Vol. 33, No.3, 1983, pp.17~22.
14. Yasiro N.H., "Phenomena of Study of Light-Path Refraction in the Leveling," Japan Society of Surveying and Mapping," Vol.33, No.3, 1983, pp.23~27.
15. Isao Naito, "New Observation of Light-Path Refraction in the Leveling," Japan Society of Surveying and Mapping," Vol.34, No.11, 1984, pp.22~28.
16. Isao Naito, "A Numerical Estimation of Leveling Refraction Based on Surface Boundary Layer Data" Geodetic Society of Japan, Vol.31, No.2, 1985, pp.177~188.