태양의 겉보기 방향각 측정을 통하여 어떤 기선의 방위각을 결정하는 방법

임무택[1)*], 박영수[1)], 임형래[1)], 구성본[1)], 곽병욱[2)]

[1)]한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, [*]limmt@kigam.re.kr
[2)]충남대학교 자연과학대학 지구과학부

A method to determine the azimuth of a baseline by measuring the apparent direction of the Sun

LIM, Mutaek[1)*], PARK, Yeongsue[1)], RIM, HyoungRae[1)], KOO, Sungbon[1)], KWAK, Byoung-wook[2)]

[1)]Geology & Geoinformation Div., KIGAM
[2)]Geoscience School, Natural Science College, Chungnam Nat'l Univ.

요약 : 태양의 겉보기 방향각을 측정한 자료와 측정한 시각, 그리고 기점의 위도, 경도만 있으면 기선의 방위각을 계산할 수 있는 방법을 소개한다. 각각 다른 3 개의 기선에 대해서 이 방법으로 얻은 기선의 방위각과 2 대의 GPS 수신기로 얻은 자료를 후처리 DGPS(PDGPS; Post Processed Differential GPS)방법으로 얻은 기선의 방위각을 비교하였는데, 두 방법으로 결정한 방위각들의 차이(태양방향각측정법 - 후처리GPS법)는 3 기선 위에서 각각 -13″, +45″, +24″였다. 이 방법은 요구하는 정확도가 1 분 이하일 경우에는 매우 빠르고, 효과적으로 이용될 수 있다.
주요어 : 태양, 방향각, 기선, 방위각

ABSTRACT : A method to determine the azimuth of a baseline by using the measured apparent directions of the Sun, the measurement time and the latitude and the longitude of the survey point. Comparing the azimuths determined by this method and those determined by the PDGPS(Post Processed Differential GPS) on 3 different baselines, the differences (this method - PDGPS) between the azimuths determined by two methods were -13″, +45″ and +24″ respectively. This method can be used as an effective and rapid tool in cases that require the accuracy lower than 1 arc-min.
Keywords : sun, direction, baseline, azimuth

1. 서 론

태양의 겉보기 방향각을 관측하여 어떤 기준선의 실제 방위각을 결정하는 방법은 해시계(sundial)의 원리에 기반을 두고 있으며, 여기에 시간과 지구의 자전속도 사이의 관계, 측지좌표(위도, 경도)와 태양의 방위각 사이의 관계를 고려한다. 이 방법을 수행하기 위해서는 경위의(theodolite)와 수치형 초시계 및 정밀한 지도만 필요하고, 혼자서 비교적 짧은 시간 안에 기선의 방위각 측량을 완료할 수 있으며, 방법은 비교적 단순하지만 오차 1 분 이내의 측량 결과를 얻을 수 있다.

지구를 중심으로 보면, 태양은 Fig. 1에서와 같이 겉보기 태양 궤도(Apparent Solar Path)를 따라 360 ° /day = 15 ° /hr = 15 '/min = 15 ″ /sec의 등각속도로 운동한다. 예를 들어, 한국표준시의 기준 경도인 동경 135 ° 를 지나는 자오선 위에 있는 어떤 관측점에서는 태양이 남중할 때의 표준시는 정각 12:00가 되며, 방위각은 천구좌표계에서의 정북 방향을 0 ° 로 하고 시계방향으로 계산할 때 180 ° 가 된다. 한편, 같은 시각에 서울을 지나는 동경 127 ° 위에 있는 어떤 관측점에서의 방위각은 172 ° 가 되고, 따라서 태양이 남중할 때(방위각이 180 ° 일 때)의 시각은 12:32이 된다.

북반구에서 위도가 φ, 경도가 λ인 임의의 관측점에서, 그리고 임의의 시각 t에서 태양의 이론적인 방위각(theoretical azimuth of the Sun) $A_{sun/th}(\phi, \lambda, t)$는 다음 식으로 계산된다(Jankowski & Sucksdorff, 1996).

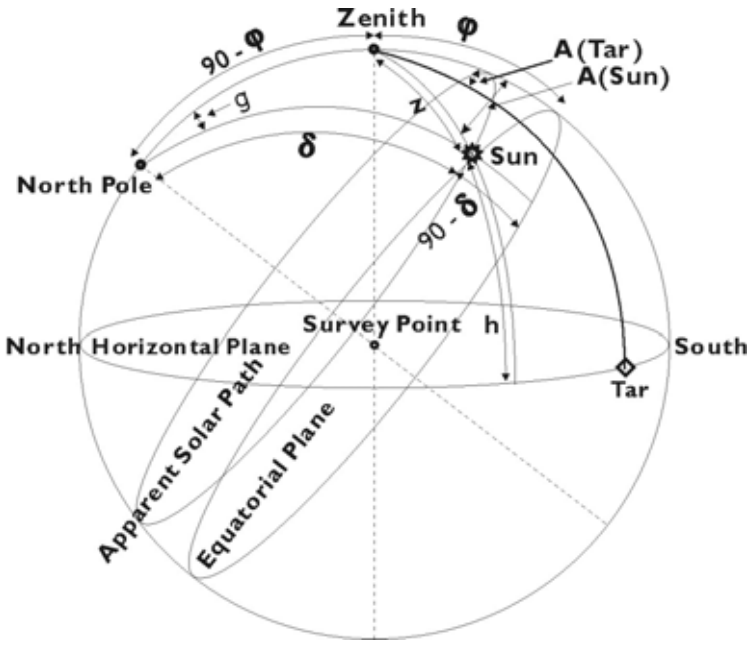

Fig. 1. Celestial spherical triangle from which the Sun's azimuth A(Sun) is determined (modified from Jankowski & Sucksdorf(1996), p. 119). z = zenith distance of the Sun, δ = declination of the Sun, 90 ° - δ = distance angle of the Sun from the North Pole, g = Greenwich Hour Angle or meridian angle of the Sun, φ = latitude, 90 ° - φ = colatitude of survey point.

즉, Fig. 1에서

$$\sin(z)*\cos(A_{sun/th}(\phi,\lambda,t)) = -\cos(\phi)*\sin(\delta)+\sin(\phi)*\cos(\delta)*\cos(g) \quad \text{..... (1)}$$

$$\sin(z)*\sin(A_{sun/th}(\phi,\lambda,t)) = \cos(\delta)*\sin(g) \quad \text{..... (2)}$$

이고, 두 식 안의 δ와 g도 φ, λ, t의 함수 즉, $\delta(\phi,\lambda,t)$, $g(\phi,\lambda,t)$이다. (2) 식을 (1) 식으로 나눈 뒤, $A_{sun/th}(\phi,\lambda,t)$를 계산하면,

$$A_{sun/th}(\phi,\lambda,t) = \arctan(\sin(g)/(\sin(\phi)*\cos(g)-\cos(\phi)*\tan(\delta))) \quad \text{..... (3)}$$

이 된다. 이 식에 나타나는 어떤 시각 t에서의 태양의 그리니치 시간각 $g(\phi,\lambda,t)$와 태양의 편각 $\delta(\phi,\lambda,t)$는 항해력 또는 천문력에서 구할 수 있으며, 실제 계산 프로그램의 예(Newitt et al., 1996)는 이들 계산식을 포함하고 있다. 한편, 어떤 경도 λ에서의 $g(\phi,\lambda,t)$는 단순히 $g(\phi,0,t)$에 λ를 더한 값이 된다.

측량기의 핵심인 경위의(theodolite) 안에는 망원경축의 겉보기 방향각을 읽는 수평분도반과 망원경축의 연직각을 읽는 연직 분도반이 있다. 여기서의 측량의 목적은 어떤 관측점과 목표를 잇는 기선(baseline)의 측지좌표계에서의 실제 방위각 $A_{tar/re}(\phi,\lambda,t)$을 결정하는 것이다. 기선 위의 목표를 경위의로 시준한 뒤 읽은 겉보기 방향각 $A_{tar/ap}(\phi,\lambda,t)$은 처음에 경위의를 설치할 때 0°가 측지좌표계에서의 정북을 향하도록 맞춰진 것이 아니고 임의의 각도에 맞춰진 것이므로 실제 방위각과는 다르다. 그러나, 이러한 경우, 목표의 측정된 겉보기 방향각, 태양의 이론적 방위각 및 태양의 관측된 겉보기 방향각 등을 이용하여 기선의 실제 방위각을 구할 수 있다. 즉, $A_{sun/th}(\phi,\lambda,t)$는 식 (3)으로부터 이론적으로 계산할 수 있고, 같은 시간 t, 같은 관측점에서 태양의 겉보기 방향각 $A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t)$은 관측에 의하여 알고 있으며, 그 차이인

$$\triangle A_{sun}(\phi,\lambda,t) = A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t) - A_{sun/th}(\phi,\lambda,t) \quad \text{..... (4)}$$

는 그 관측점에서의 기선의 겉보기 방향각과 실제방위각의 차이인

$$\triangle A_{tar}(\phi,\lambda,t) = A_{tar/ap}(\phi,\lambda,t) - A_{tar/re}(\phi,\lambda,t) \quad \text{..... (5)}$$

와 같고, 따라서, 식 (4)와 식 (5)를 종합하여 $A_{tar/re}(\phi,\lambda,t)$를 구하는 식으로 나타내면

$$A_{tar/re}(\phi,\lambda,t) = A_{tar/ap}(\phi,\lambda,t) - (A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t) - A_{sun/th}(\phi,\lambda,t)) \quad \text{..... (6)}$$

가 되고 이것이 우리가 구하고자 하는 기선의 실제 방위각이다.

2. 실제 측량

여기서 설명하는 측량 방법은 Newitt et al.(1996)에 공개되어 있고, 실제 측량으로 얻은 자료를 디지털 파일로 만드는 sunin.for 프로그램과 디지털 파일에 있는 측량 자료로부터 기선의 실제 방위각을 결정하는 sunaz.for 프로그램 등 2 개의 프로그램으로 구성되어 있다. Table 1은 sunin.for를 위한 기록표이다.

Table 1. Substantial explanation of the baseline azimuth's surveying method by the solar observation (from Newitt et al. (1996)).

Example of a Pro Forma for Solar Observations
Place
Station
Mark
Date(day, mon, yr)
Theodolite
Observer
Lat. (degN, min, sec) & Long. (degE, min, sec)
Watch Start UT (hr, min, sec)
Correction (decimal secs)

Vert. Circ. Pos.	Object	Watch Time (hr, min, sec)	Horiz. Circ. Read. (deg, min, sec)
R	Mark	- n/a -	*** ** **
1 R	O|	** ** **	*** ** **
2 R	O|	** ** **	*** ** **
3 L	|O	** ** **	*** ** **
4 L	|O	** ** **	*** ** **
L	Mark	- n/a -	*** ** **
L	Mark	- n/a -	*** ** **
1 L	|O	** ** **	*** ** **
2 L	|O	** ** **	*** ** **
3 R	O|	** ** **	*** ** **
4 R	O|	** ** **	*** ** **
R	Mark	- n/a -	*** ** **

한편, Fig. 2는 Table 1에 표시한 완전한 한 세트의 측량 시 수행하는 단위 관측들의 순서를 보이며, sunin.for 프로그램을 수행할 때 자료를 입력하는 순서도 이와 같다.

먼저, 기본 정보로서 측량장소, 관측점(측량기준점), 목표, 일자, 측량기, 관측자, 측지좌표(위도, 경도), 초시계시작시간(UT(hr, min, sec)), 초시계보정량(decimal secs)을 기재한다. 초시계시작시간은 초시계를 0으로 맞춘 시점의 세계표준시이며, 초시계보정량은 초시계를 0으로 맞춘 순간과 실제시간과의 차이인데, 초시계로 읽는 시간이 실제시간(시보)보다 빠르면 (+)로, 늦으면 (-)로 준다.

태양 방향각의 측정은, 수직분도반을 얼굴의 오른쪽에 둔 상태에서(Table 1에서 R로 표시), 목표(Table 1에서 Mark로 표시) 관측 1 번, 태양의 오른쪽 경계점(Table 1에서 O| 로 표시) 관측 2 번을 반 세트로 하고, 수직분도반을 얼굴의 왼쪽에 둔 상태에서(Table 1에서 L로 표시), 태양의 왼쪽 경계점(Table 1에서 |O 로 표시) 관측 2 번, 목표(Table 1에서 Mark로 표시) 관측 1 번을 반 세트로 하여, 모두 6 번의 관측을 한 세트로 하여 수행된다. 측정은 오차를 줄이기 위하여 연직분도반(vertical circle)의 위치와 목표, 태양의 상대적인 위치를 다르게 하여 목표와 태양의 겉보기 방향각을 각각 측정한

다. 즉, 연직분도반을 관측자의 오른쪽에 둔 경우(Table 1에서 R로 표시)와 왼쪽에 둔 경우(Table 1에서 L로 표시)에 대하여 각각 관측함으로써 경위의의 수평분도반과 수직분도반의 유격오차를 줄인다. 관측시간(watch time)은 목표나 태양을 관측한 시간으로 초시계를 0으로 둔 시각으로부터 경과한 시간이며, 수평분도반 값(horizontal circle reading)은 이 때 읽은 겉보기 방향각이다. 단, 목표(Mark)는 시간에 따라 이동하지 않으므로 시간을 기록할 필요가 없다. 이 각도가 위 식 (5)의 $A_{tar/ap}(\phi,\lambda,t)$이다.

태양의 방향각은 태양의 오른쪽 경계점(Table 1에서 O| 로 표시)과 왼쪽 경계점(Table 1에서 |O 로 표시)의 방향각을 측정하는데, 이는 태양의 중심을 시준하기 어렵기 때문이며, 이러한 관측값들로부터 나중에 태양의 중심을 시준한 경우의 값(식 (4)의 $A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t)$)을 계산하게 된다. 우리나라를 포함한 북반구에서는 태양은 주로 남쪽을 중심으로 하는 반구 위에 있고 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이기 때문에, 태양의 오른쪽 경계점을 관측하기 위해서는 태양의 오른쪽 경계점보다 좀 더 오른쪽에 망원경 안의 종선을 놓고 태양이 오른쪽으로 이동하여 종선과 만나는 순간에 초시계를 누르고, 그 때의 경과시간 및 방향각을 읽어서 기록한다. 왼쪽의 경우도 마찬가지이다. 이렇게 Table 1 및 Fig. 2의 순서에 맞추어 또 다른 한 세트의 측정을 수행할 수 있다.

이 모든 과정에서 태양을 관측할 때는 반드시 접안렌즈에 필터를 장착하고 관측해야 하는데 그렇게 하지 않으면 태양이 너무 밝기 때문에 눈을 상할 수 있기 때문이다.

위와 같은 완전한 한 세트의 관측을 여러 번 반복하면 관측 오차가 줄어들 것을 기대할 수 있다. Fig. 3은 위와 같은 완전한 한 세트를 2 번 반복한 결과를 그림으로 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 경과시간(t_p)와 방위각 $A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t)$은, 식 (3)에서 알 수 있듯이 1차 비례 관계에 있지는 않으나, 관측 시작 시간과 종료 시간의 차이 즉, 일련의 관측에 소요된 시간이 짧을수록 관측 자료점들을 연결하는 선은 직선에 가까워진다. 그러므로, 위와 같은 그림을 검토함으로써 관측의 정확도를 예상할 수 있으며, 가능한 한 짧은 시간 안에 1 세트의 관측을 완료할수록 계산된 기선의 결과에 존재하는 오차를 줄일 수 있음을 시사한다.

한 세트의 관측을 수행했을 때를 생각해 보자. Fig. 3에서 네 번의 관측 (1, 2, 3, 4) 중 오른쪽 경계점 통과 시의 두 값의 평균(1,2)을 구하고, 마찬가지로 왼쪽 경계점 통과 시의 두 값의 평균(3,4)을 구한다. 그 다음 1,2와 3,4의 평균(1,2,3,4)을 구하면, 그 값이 어떤 경과시간(t_p)에서 가상적으로 관측된 태양 중심의 겉보기 방향각 $A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t)$가 된다.

한편, 두 세트의 관측을 행했을 때를 생각해 보면, 첫째 세트에 대해서는 바로 위에서 계산한 것처럼 1,2,3,4 점의 평균값을 구하고, 둘째 세트의 관측에 대해서도 똑같은 과정을 거쳐 (5,6)과 (7,8)의 평균(5,6,7,8)을 구하면, 이 두 값의 평균(1,2,3,4,5,6,7,8)이 어떤 시간 t 에서 실제로 관측된 태양의 중심의 방향각 $A_{sun/ap}(\phi,\lambda,t)$가 된다.

또한, sunaz.for 프로그램은 태양과 지구의 공간에서의 위치에 변화를 야기하는 달과 태양계의 다른 행성들의 공전 궤도들도 계산에 고려한다.

3. 지자기절대측정을 위한 기선 측량 예

한국지질자원연구원은 1998년, 2000년, 2002년에 각각 대전, 경주, 홍성에 지자기관측소를 설치하여 운용하고 있다(임무택 등, 1999; 임무택 등, 2000; 임무택 등, 2002).

관측된 지자기장의 크기 및 방향을 보정하기 위하여 정기적으로 지자기 절대측정을 수행하여야 한다. 지자기 절대측정에 의하여 획득하는 자료들 중 한 가지는 측정 당시의 자편각이고, 정기적인 자편각 획득을 위해서는 어떤 한 기선의 방위각을 미리 정밀하게 측정해 두어야 한다.

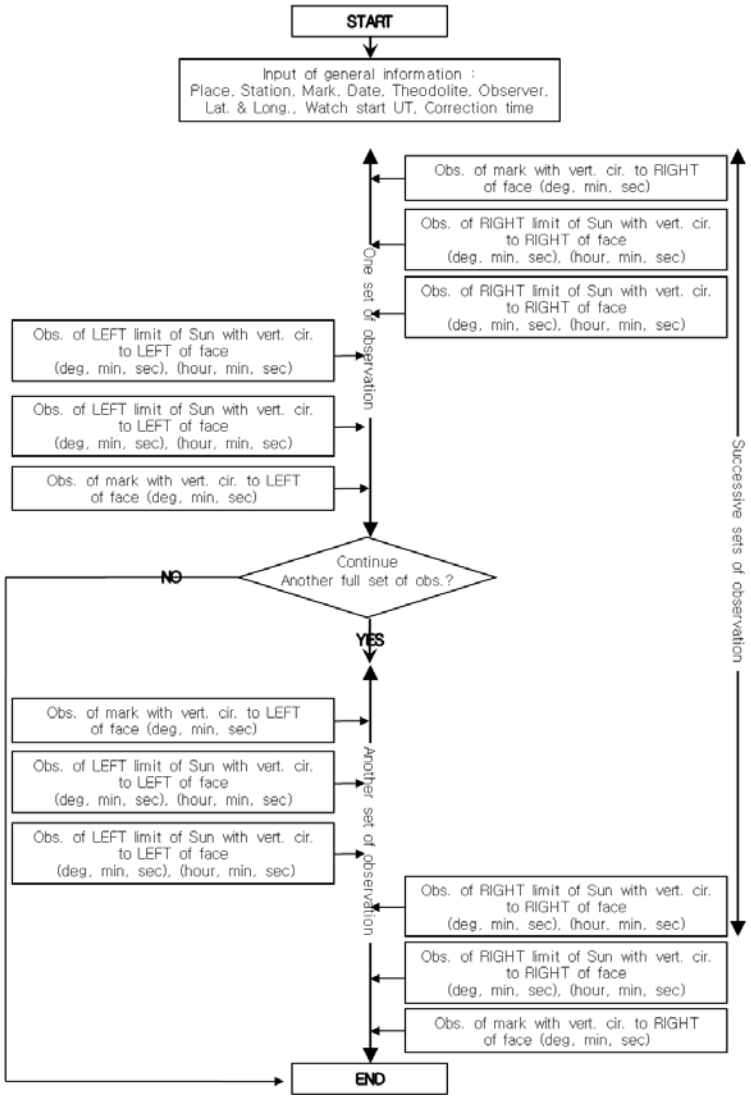

Fig. 2. The flow-chart of one full set of observation. The order of input of datat to the program sunin.for is the same as that in this flow-chart.

임무택 등(1999, 2000, 2002)은 위에서 설명한 방법으로 기선의 방위각을 측량, 계산하였으며, 그 오차를 확인하기 위하여 후처리GPS(Post Processed Differential GPS; PDGPS) 측량 결과와 비교하였다. Fig. 4 에 세 관측소에서 설정한 각 기선의 방위각 측량의 결과를 나타내었다.

대전지자기관측소에서는 지자기 절대측정 좌대와 먼거리 표시 좌대에 Trimble 사의 측지용 GPS인 모델 SSE4000의 안테나를 각각 세우고 약 6 시간 동안 관측한 자료로부터 후처리GPS 방법으로 계산한 기선의 길이는 96.9 m, 방위각은 291 ° 43 ′ 37 ″ 였다. 한편, 태양의 관측에 의한 기선 측량에 숙련된 영국지질조사소의 Dr. Clarke가 관측한 자료로부터 계산한 기선의 방위각은 291 ° 43 ′ 24 ″ 였고, 한국지질자원연구원의 임무택

이 처음으로 관측한 자료로부터 계산한 기선의 방위각은 291 ° 44 ′ 26 ″ 였다.

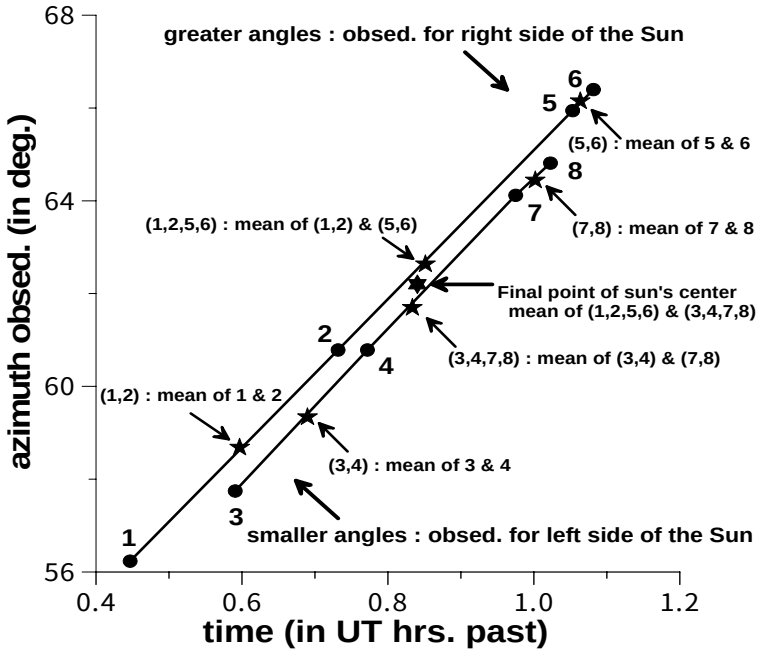

Fig. 3. An examplary plot of two sets of the Solar observations, 24 - 03 - 1999 at Gyeongzu Geomagnetic Observatory.

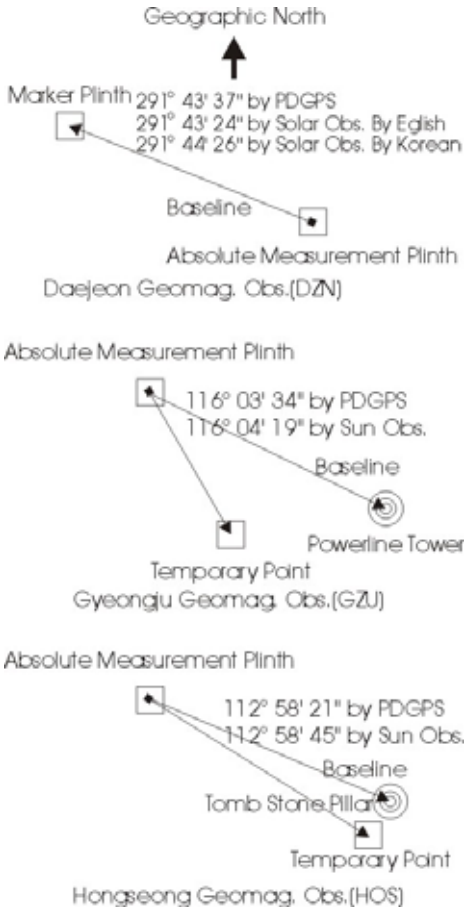

Fig. 4. Results of the baseline surveying by the Solar Observations and PDGPS in Daejeon, Gyeongju and Hongseong Geomagnetic Observatories respectively.

후처리GPS 측량의 수평 오차는 관측시간이 충분할 경우 10 mm + 1 ppm x 기선길이 정도인 것으로 알려져 있으며(Wells, 1986), 대전관측소의 경우 기선의 길이가 약 100 m 이므로 수평 오차는 10 mm 정도라고 할 수 있다. 따라서 가장 나쁜 경우, 기선의 방향에 수직인 방향으로 10 mm의 오차가 있다고 할 때, 그 각도의 오차는 약 ±21" 정도라고 볼 수 있다. 한편, 태양의 관측에 의해 계산한 기선의 방위각은, 숙련된 관측자의 경우 후처리GPS 측량에 의한 방위각보다 약 13″ 더 작은 것으로 나타났고, 미숙련된 관측자의 경우 약 49″더 큰 것으로 나타났다.

한편, 경주지자기관측소에서는 먼거리 목표로 사용하는 송전탑이 너무 멀리 있으므로 한 개의 임시 기점을 설치하고 이 임시 기점과 지자기 절대측정 좌대에 Trimble 사의 측지용 GPS인 모델 SSE4000의 안테나를 각각 세우고 약 1 시간 동안 관측한 자료로부터 후처리GPS 방법으로 임시 기선의 방위각을 계산하였다. 그리고, 이 임시 기선과 실제 기선 사이의 각은 경위의를 이용하여 구했으며, 이 둘로부터 계산한 실제 기선의 방위각은 116°03′34″였다. 한편, 실제 기선에 대하여 태양의 관측을 통하여 결정한 방위각은 116°04′19″였다.

경주지자기관측소의 경우 후처리GPS 측량의 수평 오차는 대전과 마찬가지로 약 10 mm 라 할 수 있으며 계산된 기선의 길이는 64.2 m이므로 이 경우의 방위각 오차는 최대 ±33" 정도로 볼 수 있다. 두 가지 방법으로 얻은 측량 결과의 차이는 태양의 관측에 의한 경우가 후처리GPS 측량의 경우보다 약 45″더 큰 것으로 나타났다.

또한, 홍성지자기관측소에서는 먼거리 목표로 사용할 묘지석의 세로 모서리 선에 GPS 수신기의 안테나를 정렬할 수 없으므로 한 개의 임시 기점을 설치하고 이 임시 기점과 지자기 절대측정 좌대에 Trimble 사의 측지용 GPS인 모델 5700의 안테나를 각각 세우고 약 반 시간 동안 관측한 자료로부터 후처리GPS 방법으로 임시 기선의 방위각을 계산하였다. 그리고, 이 임시 기선과 실제 기선 사이의 각은 경위의를 이용하여 구했으며, 이 둘로부터 계산한 실제 기선의 방위각은 112°58′21″였다. 한편, 실제 기선에 대하여 태양의 관측을 통하여 결정한 방위각은 112°58′45″였다.

홍성지자기관측소의 경우 후처리GPS 측량의 수평 오차는 대전과 마찬가지로 약 10 mm 라 할 수 있으며 계산된 기선의 길이는 184.8 m이므로 이 경우의 방위각 오차는 최대 ±11" 정도로 볼 수 있다. 두 가지 방법으로 얻은 측량 결과의 차이는 태양의 관측에 의한 경우가 PDGPS 측량의 경우보다 약 24″큰 것으로 나타났다.

4. 방위각의 오차에 관한 고찰

태양의 관측에 의한 겉보기 방향각 측량 결과에 오차를 유발하는 요인들은 기준점의 측지좌표 읽기 오차, 초시계를 초기화할 때의 시간 오차, 목표의 겉보기 방향각 읽기 오차, 태양을 관측할 때의 겉보기 방향각 읽기 오차, 태양을 관측한 시간 읽기 오차 등이다. 이하에서는 그러한 오차들이 목표의 계산된 실제 방위각에 미치는 오차량을, Table 2의 실제 관측 자료의 내용을 변경시켜 sunaz.for 프로그램에 이를 입력자료로 하여 계산하면서, 논의한다.

기준점의 측지좌표 읽기 오차는, 1 : 5,000 지도에서 측지좌표를 읽는 경우, 주위에 지형지물이 있으면 위도, 경도 모두 쉽게 25 m 이내의 오차로 읽을 수 있는데, 한국 중부를 대상으로 할 때, 위도 1" 당 거리는 30 m 정도 되고, 경도 1" 당 거리는 25 m 정도 되므로 위도, 경도 모두 약 1" 이내의 오차로 입력할 수 있는 것이 된다. 한국 중부의

예를 들어 실제 계산에 의하면, 위도 +1" 오차가 계산된 기선의 방위각에 미치는 오차는 +0.37" 정도 되고, 경도 +1" 오차가 계산된 기선의 방위각에 미치는 오차는 +1.7" 정도 되어, 결국 관측점의 측지좌표 읽기 오차에 의한 계산된 기선의 방위각의 오차는 2" 이내라고 볼 수 있다.

Table 2. An examplary data file measured by the solar observation at Gyeongju Geomagnetic Observatory, 24th Mar. 2000.

```
Gyeongzu Geomag. Obs. Station
GZU
powerline tower
24 03 2000
ZeissTheo010B
LIM
  35.0000   43.0000   30.0000    129.0000     24.0000     04.0000
   2.0000   10.0000     .0000
    .0000
 156.0000   42.0000   16.0000
    .0000   37.0000   39.6300    203.0000     12.0000     12.5000
    .0000   41.0000   43.4100    204.0000     57.0000     43.3000
    .0000   47.0000   24.9400     26.0000     25.0000     26.0000
    .0000   50.0000   33.3700     27.0000     46.0000     34.0000
 336.0000   42.0000   16.0000
 336.0000   42.0000   16.0000
   0.0000   58.0000   43.8900     32.0000     16.0000     18.0000
   1.0000   01.0000   36.8200     33.0000     32.0000     36.0000
   1.0000   03.0000   56.7800    213.0000     37.0000     13.0000
   1.0000   05.0000   50.2600    214.0000     28.0000     30.0000
 156.0000   41.0000   57.0000
```

초시계를 초기화할 때의 시간 차이는 초기화한 뒤 시보의 삐 소리와 초시계의 시간과의 차이를 몇 번 듣고 보아서 차이의 평균을 입력한다. 이와 같이 하면 0.1 초 이내의 차이로 입력할 수 있으며 초시계가 시보보다 빨리 가면 (+)로 늦게 가면 (-)로 입력한다. 그러나, 이 차이는 기선의 방위각 계산에 이미 반영되고 있고, 이러한 차이를 판단할 때 생기는 오차인데, +0.05 초의 오차가 있으면 기선의 방위각에 +1.3"의 오차를 유발한다.

목표의 겉보기 방향각 읽기 오차는 고정되어 있는 목표를 정확히 시준하여 읽으면 되고 측량기의 읽기 눈금이 1" 단위로 되어 있으면 충분히 1" 이내의 오차로 읽을 수 있다. 목표의 겉보기 방향각을 1" 크게 읽었다면 목표의 계산된 방위각에도 같은 부호, 크기를 가지고 +1" 크게 계산된다.

태양을 관측할 때의 겉보기 방향각 읽기 오차는 태양이 계속 움직이므로 가장 큰 오차를 유발하는 요인이라고 볼 수 있지만, 측량 경험에 의하면 이 오차는 많아도 ±5" 정도이다. 이 경우 계산된 방위각에는 ∓4.3" 정도의 오차를 유발한다. 그러나, 이러한 오차는 한 방향으로 일률적으로 생기는 것이 아니고, Table 1 이나 Fig. 2에서와 같이 완전한 한 세트의 측량에서 8 번을 측정하다 보면 이론상으로는 0"에 수렴할 것이므로 4.3" 보다 훨씬 작은 오차를 유발할 것이다.

태양을 관측한 시간 읽기 오차는 망원경 안의 종선을 태양의 오른쪽 경계점이나 왼쪽 경계점이 통과하는 시점에 초시계를 누를 때 생기는 오차이며, 이 오차는 0.1 초 이내라고 볼 수 있다. 이 경우에 계산된 기선의 방위각에는 -2.2"의 오차를 유발한다.

위와 같은 여러 종류의 오차는 일반적으로 같은 방향으로 누적되는 것은 아니지만, 최악의 경우 같은 방향으로 누적된다고 가정할 때, 위의 모든 오차의 산술적 합은 10.8"이

다. 즉, 모든 오차 요인이 같은 방향으로 누적된다고 인정해도 11" 이내의 오차로 기선의 실제 방위각을 측정할 수 있다는 것이다.

Fig. 4의 예를 들어, 대전관측소의 경우, 이 방법에 숙련된 영국지질조사소의 연구원이 태양의 관측에 의해 결정한 기선의 방위각은 후처리GPS로 구한 방위각보다 13" 더 작게 나타났고, 이 방법에 숙련되지 않은 한국지질자원연구원의 연구원이 태양의 관측에 의해 결정한 기선의 방위각은 후처리GPS로 구한 방위각보다 49" 더 크게 나타났다. 위에서 설명한 대로 후처리GPS법도 태양 관측에 의한 방위각 결정법도 오차가 있으므로 기선의 방위각의 절대값을 알 수는 없으나, 후처리GPS의 경우 오차가 가능한 최대로 발생한 것이 아니고 절대값 근처에 있을 것으로 가정한다면, 미숙련자가 결정한 값이 숙련자가 결정한 값보다 기준으로 삼는 후처리GPS에 의해 결정한 값으로부터 더 멀리 떨어져 있다는 것은 관측자의 숙련에 의해서 더 정확한 값을 구할 수 있을 것임을 시사한다.

Fig. 5는 기선 방위각의 가상적인 절대값 Az_{abs}, 후처리GPS법으로 계산한 값 Az_{PDGPS}, 태양 관측법으로 계산한 값 Az_{solobs} 사이의 상대적인 관계의 한 예(경주관측소의 경우)를 표시한 것이다. Fig. 5에서 보듯이, 두 GPS 안테나의 중심을 연결하는 임시 기선이 가장 짧은(64.2 m) 경주관측소의 경우, Az_{PDGPS}는 Az_{abs}를 중심으로 ±33" 범위 안에 존재할 것이고, Az_{solobs}도 이론적으로는 Az_{abs}를 중심으로 ±11" 범위 안에 존재할 것이다. 그러나, 실제 측정 과정에서 위에서 설명한 것 말고도 수많은 오차 요인이 있을 것임을 인정하여야 하고, 측정 결과 비교는 Az_{PDGPS}와 Az_{solobs} 사이에서 했으므로 경주관측소의 경우에 Az_{solobs}는 Az_{abs}를 중심으로 ±44" 범위 내에 존재할 것이다.

Table 3. Summary of 3 substantial examples of the baseline azimuth's surveying method by the solar observation.

1. Place	2. Az. of BL acquired by PDGPS method	3. Length of BL (m)	4. Max. err. to exist in Az. acq. by PDGPS method	5. Az. of BL acq. by Solar Obs. method	6. Max. err. to exist in Az. acq. by Solar Obs. method	7. Diff. (5 - 2)	8. Tot. Max. err. to exist (4 + 6)
Daejeon	291°43′37″	96.9	21″	291°43′24″	11″	-13″	32″
Gyeongju	116°03′34″	64.2	33″	116°04′19″	11″	+45″	44″
Hongseong	112°58′21″	184.8	11″	112°58′45″	11″	+24″	22″

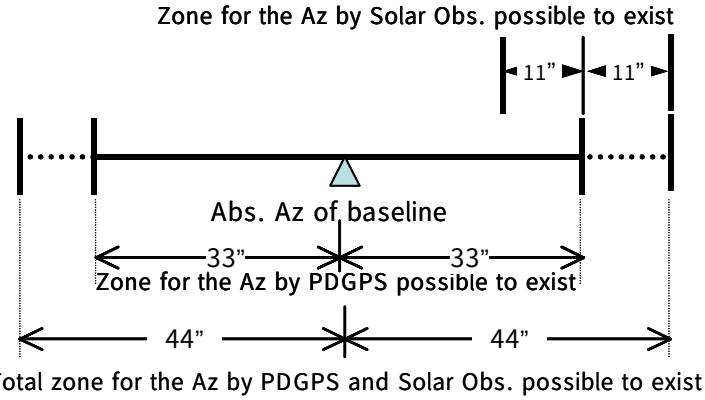

Fig. 5. Statistical consideration of the expected errors in baseline azimuth surveying for the case of Gyeongju(GZU) Observatory, where the temporary baseline is 64.2 m long.

한편, 기선의 길이가 짧아도, 후처리GPS 측량의 수평 오차는 관측시간이 충분할 경우 10 mm + 1 ppm x 기선길이 즉, 10 mm 정도로 변함이 없어서, 이론적으로는 기선의 길이가 짧을수록 계산으로 얻는 기선의 방위각의 오차는 커지게 되므로, 두 안테나 사이의 거리를 너무 짧게 하면 안 된다. 그래서, 최단 기선 거리를 50 m로 할 때 Az_{PDGPS}는 Az_{abs}를 중심으로 ±42" 범위 안에 존재할 것이고, Az_{solobs}는 이론적으로 Az_{PDGPS}와 ±11" 이내의 차이를 가지게 될 것이다. 이 경우에 Az_{solobs}는 Az_{abs}를 중심으로 ±53" 범위 내에 존재할 것이다. 그러므로, ±53"보다 약간 큰 1 ‘ (1 분)을 태양관측법으로 계산한 기선의 방위각이 가질 수 있는 오차의 한계라고 볼 수 있다. 이와 같은 사항들을 Table 3에 정리하였다.

5. 결 론

태양의 겉보기 방향각 관측, 관측시간 읽기, 그리고 관측점의 측지좌표(위도, 경도)를 이용하여 어떤 미지의 기선의 방위각을 추출하는 방법을 설명하였다. 이 방법에 필요한 장비 및 자료는 경위의, 수치형 초시계, 관측점의 측지좌표(위도, 경도) 뿐이고 혼자서 수행할 수 있으므로 작업이 매우 간단하다는 장점이 있는 반면, 태양을 관측할 수 있는 동안만 사용할 수 있다는 단점이 있다.

이 방법을 3 곳의 실제 상황에 적용한 후 그 결과를 논의하였는데, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 한국지질자원연구원이 설치한 3 곳의 지자기관측소에서 태양 관측방법에 의하여 지자기 절대측정용 기선의 방위각을 추출하였고, 그 결과로부터 후처리GPS법으로 추출한 방위각을 빼면 그 차이 즉, (태양관측법 - 후처리GPS법)는 각각의 기선 위에서 -13″, +45″, +24″였다.
2. 태양 관측에 의한 기선의 방위각 추출의 오차 발생 요인을 분석한 결과, 태양 관측법의 오차는 최대 ±44" 정도 된다.
3. 그러므로, 이 방법은 매우 빠른 결과를 필요로 하면서, 계산된 기선의 방위각의 요구되는 정확도가 1 분 정도 될 때에는 매우 효과적으로 쓸 수 있다.

참고 문헌

이희일, 임무택 등, 2002, 인공지진과 지자기장 특성 연구, 한국지질자원연구원 연차보고서 KR-02(연차)-11

임무택, 박영수, 정현기, 이희일, 1999, 대전 지자기 관측시스템의 설치, 국제측지학 및 지구물리학연맹(IUGG) 한국위원회 학술발표회(1999. 5. 8.), 국립지리원

임무택, 박영수, 정현기, 이희일, 2000, 한국에서의 지자기 관측의 현황, 한국천문학회지, 15권, 특별2호, 15-20

임무택, 박영수, 조진동, 임형래, 고인세, 신현모, 2004, 태양의 겉보기 방향각 측정을 통한 기선의 방위각 결정, 한국측량학회지, 22권, 4호, 411-418.

Jankowski, J. and Sucksdorff, Ch., 1996, Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice, IAGA, Warsaw.

Newitt, L. R., Barton, C. E. and Bitterly, J., 1996, Guide for Magnetic Repeat Station Surveys, IAGA Working Group V-8.

Wells, D., 1986, Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates.