

천문측량의 과거와 현재 그리고 미래

Yesterday, Today and Furture of Astronomic Surveying

신귀호¹⁾ · 이재원²⁾ · 안기덕³⁾

¹⁾ 대한측량협회 심사부장

²⁾ 대한측량협회 연구위원

³⁾ 국립지리원 측지과

요지 : 본 논문은 천문측량의 기본원리와 관측방법에 대하여 간단히 소개함과 동시에 국내에서 천문측량으로 실시된 국가경위도원점의 설치와 독도 천문측량 등 국내의 천문측량 현황에 대하여 체계적으로 고찰하였다. 그리고 재래식 천문측량의 단점이던 장비운용과 측량방법을 개선하여 디지털 천정카메라에 의한 천문측량의 자동화에 대한 외국의 사례를 소개하고 디지털 천문측량에 의한 연직선편차의 측정결과를 고찰하여 이의 활용방안을 논하였다.

1. 서 론

과거 경위도 원점과 방위각은 주로 별을 관측하는 천문측량에 의하여 수행되었다. 하지만 1980년대 이후 관측기법과 경제적인 측면에서 당시의 사진촬영 기법이 아주 높은 정확도가 요구되는 측지적인 목적을 충족시킬 수가 없어 천문측량은 지난 20년간 매우 드물게 사용되었다. 아울러 천문측지방법에 의한 연직선편차와 지오이드 결정은 정밀 중력측정기법 및 위성자료의 활용성에 따라 이의 이용이 두드러지게 감소하고 있다. 하지만 최근 수치 영상자료수집을 위한 CCD 센서의 활용에 따라 천문관측기법에도 상당한 변화가 일어나 재래식 방법을 대체하고 있다. 이에 따라 측지천문학 분야에서는 최근 관측자료 수집의 자동화와 천문측지방법에 의한 연직선편차를 실시간으로 결정가능하게 되었다. 독일 하노바 대학의 지구측량연구소에서는 재래식 사진측정에 의한 천정 카메라를 실시간 디지털 측정이 가능한 시스템으로 개조하고, 자료처리가 완전히 자동인 S/W를 개발하여 활용하고 있다. 디지털 천문카메라는 GPS수신기와 연계하여 연직선 편차를 실시간으로 매우 경제적이고 정밀하게 결정할 수 있다. 이에 따라 측지천문학은 정밀지역지오이드 결정과 고해상도 세부중력모델결정을 위한 전도유망한 분야가 되고 있다. 디지털 천문관측기에 부착된 CCD 센서는 크기가 수 mm인 실리콘 반도체이며 매트릭스 형태의 광에 민감한 화소로 구성되어 있다. 광자(photon)가 입사되면 광전자의 원리에 의해서 전자가 실리콘으로부터 분리되는 데, 분리되는 전자의 수는 입사하는 광자의 수에 비례한다. CCD센서는 사진건판과 달리 균등하지 않게 높은 광예민도를 가지며 영상 정보를 즉시 활용할 수 있어 자료처리가 실시간으로 이루어 진다. 따라서 디지털 천문측량은 재래식 사진관측기법에 비해 월등히 경제적이며 정확도 측면에서도 확실히 우수하여 고정밀 지역지오이드결정을 위해 천문 측지방법을 다시 선호하게 되는 동기를 마련하게 되었다.

2. 천문측량(Astronomical Surveying)의 기본원리와 활용분야

2.1 천구좌표계와 항성표

천문측량은 별의 방향과 시각을 관측하여 그 지점의 경위도와 방위각(azimuth)을 구하므로, 먼저 천체

의 움직임과 별의 좌표를 정하는 방법을 알고 있어야 한다. 또한 고정도의 성과를 얻기 위해서는 관련 기술자는 규정된 작업방법을 준수하고 위치계산과 관측오차의 처리를 위한 구면삼각법 등 제반 수학적 개념을 잘 이해하여야 한다. 먼저 우주의 공간을 지구와 닮은 무한히 큰 天球(celestial sphere)라고 생각하고 천구의 적도에 대하여 23.5도 기울어진 태양이 지나는 궤도인 황도(ecliptic)를 아래의 그림과 표시할 수 있다. 이때 태양이 매일 서쪽에서 동쪽으로 지날 때 남으로부터 북쪽방향으로 통하는 적도상에 하나의 교점이 만들어 지는데, 이 점을 춘분점(vernal equinox)이라고 한다. 이 춘분점으로부터 천구상의 적도를 따라 동쪽을 따라 별까지의 각거리(시간각)를 적경(right ascension)이라 하며, 천구상에서 경도좌표이다. 또한 천구상의 적도로부터 북(남)쪽으로 별까지 켜 각도를 적위(declination)라 하며 천구상의 위도좌표이다.

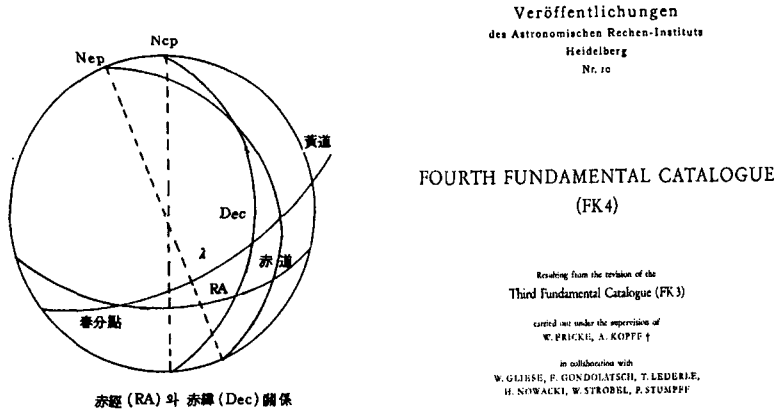


그림 1. 천문좌표계와 항성표(star catalogue)

다음은 별과 항성표(star catalogue)에 대하여 설명한다. 항성들은 여러 개의 성좌집단으로 나누어져 있다. 개개의 항성(Fixed Star)을 식별하기 위해서 고유 문자와 번호가 붙여져 있으며, 별의 밝기에 따라 별의 등급도 함께 정해 놓고 있다. 고유명의 첫 문자는 대개 희랍의 알파벳이 사용되어, 별의 밝기에 따라 A, B, C... 순으로 W까지 쓰고 있다. 희랍의 알파벳 24자가 다 사용되면 로마 알파벳을 사용한다. 항성에 대한 좌표와 밝기 등 모든 자료를 기록한 표를 항성표(star catalogue)라 하며 천문측량에 사용되는 장비에 따라 항성표가 다르다. T-4의 경우에는 기본항성표가 FK-4이며, 이는 1879년 독일 하이델베르크의 천문계산 연구소가 제작하였으며 1988년에는 최신의 FK-5가 출판하였다. FK-4에는 기본성 1,535개가 수록되어 있으며, 이는 천문 5도 평방당 1개씩의 밀도로 별이 분포되어 있다. 이런 방법으로 모든 별들의 이름과 위치, 밝기 등을 미리 정해 놓고 이를 기준으로 별들에 대한 관측을 통하여 지구상에서의 위치를 상대적으로 결정하여 측량의 기준으로 삼는다.

2.2 시간계

시간의 개념은 과거에서 미래를 향해 연속적인 흐름으로 생각 할 때 어느 순간의 시각이라고 말하고 두 시각사이를 시간이라고 한다. 시간계의 단위를 분류하면 여러 가지 형태가 있으나 천문측량에서 필요한 두 가지의 주요한 시간계는 태양과 관련된 지구의 자전운동에 기초를 둔 관측자의 자오선과 태양이 그 자오선에 이루는 시간각에 의해 결정되는 태양시(solar time)와 관측자의 자오선과 춘분점이 자오선에 이루는 시간각에 의해 결정되는 항성시(sidereal time)가 있다. 참고로 1항성일은 1태양일 보타 3분 56.555초가 짧다. 즉, 1 평균태양일 = 24h 03m 56s.55536 평균항성일이며, 1 평균항성일 = 24h 56m 04s.09054 평균태양일이 된다. 그래서 태양년은 한 춘분 시각부터 다음 춘분 시각까지 지구가 태양주위를 회전하는 수라고 정의를 내린다면 항성년은 별과 관계되어 지구가 그 360도 회전운동을 완전히 끝내는 회전수를 말한다. 하지만 여러 가지 물리적인 요인에 의하여 지구의 회전운동은 불규칙하여 가장 정확한 시간계의 기준이 되는 국제원자시와 일치하지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해 지구의 천체운동을 보정한 세계표준시(UT : Universal time)를 도입하여 사용하고 있다. 즉 지구의 자전에 의한 북극성

의 운동을 보정한 시를 UT₁이라 하고, 여기에 더하여 계절적인 변화에 의한 지구의 자전속도의 변화를 고려한 시를 UT₂ 라고 한다. 하지만 일상생활에서는 이러한 보정을 즉각적으로 반영하기가 어려워 협정 세계시(UTC)를 사용한다.

2.3 연직선 편차와 지오이드

측지학의 기본업무중의 하나는 지오이드를 보다 정확하게 결정하는 일이며, 이를 위하여 중요한 지상 관측값으로는 지역중력벡터 \mathbf{g} 를 완전히 기술할 수 있는 중력 g 와 천문경위도(Λ, Φ)이다. 이러한 천문 경위도는 주로 천문측량에 의하여 결정되며 천문좌표는 지심좌표계상에서 그 지역의 물리적인 연직선을 결정한다. 따라서 천문좌표는 연직선 파라메타라고도 한다. 아래 그림에는 연직선편차와 그 성분을 도해적으로 표시한 것이다. 연직선 파라메타를 이용하여 그 지역의 연직선을 기준으로 측정된 지상관측값 방위, 수평방향 및 천정각을 지심좌표계상으로 변환한다. 천문측량에 의한 연직선값(Λ, Φ)과 타원체상의 연직선값(φ, λ)을 비교하면 자오선방향의 연직선편차 성분 ξ 와 묘유선(prime vertical) 방향의 연직선 편차성분 η 을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{g} = -g \begin{pmatrix} \cos\Phi \cos\Lambda \\ \cos\Phi \sin\Lambda \\ \sin\Phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\xi = \Phi - \varphi \quad \eta = (\Lambda - \lambda) \cos\varphi \quad (2)$$

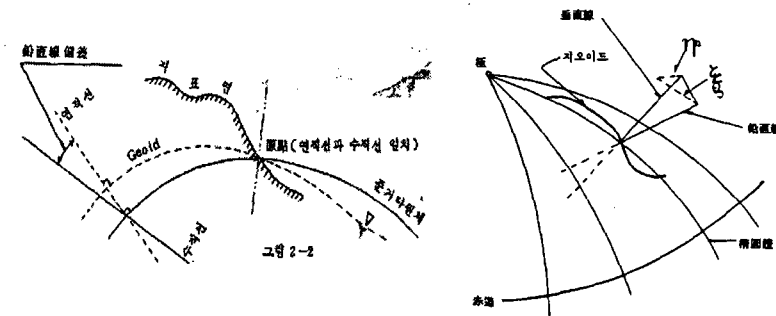


그림 2. 연직선편차의 개념과 그 성분

위의 공식은 타원체에 대한 지오이드의 경사를 나타내는 척도이면서, Helmert가 고안한 천문 수준측량법에 의해 천문측지학적 지오이드결정에 이용할 수 있으므로 특별한 의미를 지닌다. 두 점 P₁, P₂간의 지오이드 기복고(Geoid undulation) ΔN_{12} 는 다음과 같다.

$$\Delta N_{12} = - \int_1^2 (\xi \cos\alpha + \eta \sin\alpha) ds - E_{12} \quad (3)$$

여기서, ds 는 방위 α 상에서의 미소 이동거리이며, E_{12} 는 지구의 곡률로 인한 정표고 보정량이다.

3. 천문측량의 목적

천문측량의 목적을 대별하면 경위도 원점설치, 연직선편차의 결정 및 측지망의 방위조정을 위한 Laplace 점 설치 등으로 구분할 수 있다.

3.1 경위도 원점설치

한 나라의 국토관리를 위한 측지좌표계는 천문측량에 의하여 결정된 경위도 원점에서부터 출발하여 국토의 모든 삼각망의 기준점과 연결하기 위하여 삼각측량, 삼변측량, 다각측량 등의 방법에 의하여 기하학적으로 확대하면서 좌표 및 표고를 결정함으로써 측지망을 설정하게 된다. 측지학적 측면에서 지구의 형상을 분류하면 기복이 많은 실제의 지구표면, 회전타원체면과 geoid면 등으로 나누고 있다. 일상생활에서 사용되고 있는 지도 및 측량좌표는 지오이드면과 비슷하게 가정된 회전타원체면을 기준으로 정해진 측지학적 좌표이다. 그러나 측지학에서의 지구의 진형상은 해상에서 정지한 평균해면과 일치하고 중력방향의 직각면인 지오이드이다. 따라서 천문측량은 지구의 물리학적 요소에 바탕을 둔 중력방향에 기준을 두고 지오이드면에 대한 연직선 방향(직각방향)을 기준으로 실시되는 상대적 위치관계가 없는 독립적인 위치이다. 예를 들면, 지오이드면의 연직선상에서 항성을 이용한 천문측량에 의하여 측지원점의 위치관측과 진북방향으로부터 원방위점의 방위각을 측정한다. 측지원점과 원방위점간의 거리는 직접 재거나 또 광파측거리 등에 의하여 측정하여야 한다. 또한 측지원점상에서 타원체와 지오이드면을 결합시키기 위하여 전국 주요지점에 검조소를 설치하여 평균해면을 측정하여 각 검조소에 수준기점을 설치하고, 이를 기준으로 수준원점을 결정하여 전국적으로 확대하면서 수준점을 설치하고 각 삼각점에 대하여는 직접 또는 간접수준측량에 의하여 표고를 결정한다. 천문측량에 의하여 결정된 경위도 값은 지오이드면에 대한 연직선을 기준으로 실시되며 이를 천문학적좌표라고 한다. 하지만 경위도 원점을 설치하고 지표면상 각지점의 상호관계에서 위치를 결정하려면 먼저 지구의 형태와 크기를 알고 있어야 한다. 천문측량에 의해 경위도 원점을 설치하는 목적은 지구내부의 물리학적 측면인 지오이드와 기하학적 측면인 타원체와 접합하여 i) 경위도 원점에서 타원체면과 지오이드면을 접합하여 수직선과 연직선을 일치시키고 ii) 수직원점에 직하표면 0m와 타원체를 고정하며, iii) 지구축과 회전타원체 축이 평행하도록 한다. 이렇게 가정하여 경위도 원점상에서 천문경위도 및 천문방위각을 측지학적 경위도 및 원방위각으로 분리하여 지리학상 절대위치로 확정짓고 측지좌표계내에서 통일된 측지제원(geodetic datum)을 정하고 지오이드면과 회전타원체로서 정한 한점에서 연직선과 수직선이 일치되도록 가정하는 준거타원체(reference ellipsoid)를 정한다.

3.2 연직선 편차의 결정

측지학에서는 지구진형상은 지오이드를 말한다. 지오이드에서는 지구상의 각 점에서 중력방향에 직교하는 1개의 등 potential면 중에서 대양에서의 평균해수면과 일치하는 면이다. 그리고 일상 생활에 사용하는 측지위치는 준거타원체를 기준으로 하여 경도와 위도에 의해서 표시되어 있다. 한편 천문측량에 의한 경도와 위도의 값은 지오이드면의 중력방향의 연직선을 기준으로 해서 실시되는 것으로 양자는 연직선 편차만큼 차이가 있다. 연직선이 남북으로 분해되는 것은 천문학적 위도와 측지학적 위도사이의 차이와 같다. 또한 동서성분은 천문학적 경도와 측지학적 경도사이의 차이에 비례한다. 이의 원인은 천문측량은 실제의 지구표면상에서 지구내부의 물리적 현상으로 중력방향에 일치, 즉 지오이드표면에 대한 연직선방향으로써 이것은 독립적인좌표가 된다. 또한 연직선편차는 그 측정수단에 따라 천문측지학적 연직선 편차와 중력 연직선편차의 두 종류로 분류된다. 천문측지 연직선편차는 일반적으로 기준타원체로서 준거타원체를 취하므로 상대연직선 편차라고 하며, 중력 연직선편차는 절대 연직선편차라고 한다. 여기서는 삼각측량시 계산상 기준이 되는 지구타원체상의 연직선과 천문측량에서 기준이 되는 지오이드상의 연직선간의 차이인 상대적 편차에 대하여 논하고자 한다. 이런 문제를 규명하기위하여 국립지리원에서는 천문측량을 정밀1차 기준점설치작업과 병행하여 천문측량점을 전국에 걸쳐 40점을 선정하고 1973년부터 1, 2등 삼각점에 대하여 27점에 대하여 관측을 실시하였다.

3.3 측지망의 방위각조정

관측된 천문측량 좌표와 천문방위각은 준거타원체에 의거한 원점의 지리학적 좌표와 방위각으로서 아무런 보정없이 채택된다. 이는 연직선 편차 및 타원체와 지오이드 사이의 분리가 0(zero)임을 뜻한다. 이러한 방위각조정법을 사용하므로써 타원체의 법선은 기준점에서는 연직선과 일치한다. 이러한 방위각 조정법에 의해 계산된 위치가 서로 다른 점에 대해서 옳다고 할지라도 전체의 망은 지축에 대해 옮겨져야

한다. 그러나 경위도원점에서 원방위각을 측정하여 이를 기준으로 삼각망이 확대됨과 동시에 변장이 멀리까지 연결되면서 지구내부의 물리적인 영향과 관측중 여러 가지 복합적인 오차가 누적되므로 변장의 방위각이 뒤틀림으로써 방향의 오차가 나타나게 된다. 그러므로 정밀삼각망(1, 2등 삼각점)중 2/3, 또는 점간 50km마다 라플라스 점을 설치하여 천문학적 위치와 측지학적 위치의 편차의 자승의 합이 최소가 되도록 하는 원점에서의 보정이 이루어 진다. 이러한 조정에서 한 개의 라플라스점은 임의의 원점으로 선택된다. 라플라스 방정식은 3개의 분리된 기준면의 사용으로부터 얻은 방위각의 차이를 순화시키는 방법을 제공한다. 보다 상세히 라플라스점을 설명하면 실제 측량작업시 기포관이 부착된 장비의 정치상태가 연직선 방향이기 때문에 국지적인 지각구조내부의 밀도 불균형 등의 원인으로 해서 중력방향의 뒤틀림의 영향을 받기 때문에 측지원점의 원방위각(azimuth)을 기준으로 해서 삼각망이 확장되어 멀리까지 이어지는 과정에서 비계통적인 연직선 편차도 생긴다. 따라서 우리나라에 경위도 원점을 설치한다고 해도 연직선편차가 전혀 없어지는 것이 아니고 단지 vecto량이 적어질 뿐이다. 엄밀히 따져 보면 측지측량은 계산상의 회전타원체면의 수직선과 중력방향의 영향을 받는 지오이드면의 연직선과 복합적인 관계를 포함하고 있다는 사실을 관심있게 주시하여야 한다. 광대한 삼각점을 연결하는 과정에서 생기는 연직선 편차와 원인불명의 오차누적은 결국 관측망의 삼각점, 진위치와 방향의 이탈현상이 일어난다. 이런 난제의 측지망 방위조정을 위하여 천문측량에 의한 Laplace point를 설치하여 뒤틀려진 삼각망의 진방향을 바로잡아 측지학적 진위치를 결정하게 된다. 라플라스점은 삼각망 각 점중에서 천문측량을 실시하여 천문좌표와 측지학적 좌표 및 방위각의 차이를 점점조정하여 삼각망의 비틀림을 바로 잡는 점이다. 라플라스 점의 설치밀도는 이론적으로 사방 50km정도가 이상적이라고 주장하고 있다. 국립지리원의 천문측량의 1차 기본계획을 남한 면적 약 10만 km²에 대하여 약 40점으로 계획한 것도 여기에 산출 근거를 두고 있다. 라플라스점을 합리적으로 배치하여 i) 삼각망의 규정, ii) 수평각 관측값 점점, iii) 삼각망의 조정계산 조건식으로 사용하여 망의 위치조건과 방위조건을 충족시켜야 한다. 이렇게 정밀기준망의 강도를 높여야 하며 장기계획으로 정밀기준점의 2/3를 15년 주기로 반복측량을 실시하여 지각변동조사와 아울러 폭넓은 측지분야조사 활동에 이용한다.

4. 천문측량의 관측방법

아래에서는 천문측량에 의한 경위도 및 방위각 결정에 대하여 설명한다.

4.1 경도결정

경도($\Delta\lambda$)는 그리니치 자오선면과 관측자의 자오선사이에 가로 놓인 지구적도의 호를 말하며 통상적으로 시간각으로 표시하며 지방시간과 그리니치 시간의 차이와 같다. 따라서 경도($\Delta\lambda$)는 지방항성시 - 그리니치 항성시, 또는 지방평균시 - 그리니치 평균시로 표시된다. 경도의 결정은 먼저 관측점의 근사좌표를 가정하여 놓고 시보계(chronometer)를 가정 경도의 지방항성시에 맞추고 관측기계를 자오선상에 정확히 설치하여 자오선상의 통과순간의 항성시를 특정한 항성을 통해서 관측한다. 만약 관측점의 가정위치가 정확하다면 지방항성시는 관측자의 자오선의 상방통과(upper transit)하는 별의 적경이 정확할 것이다. 그러나 가정경도의 차가 $\pm 5^\circ$ 가 되었다면 (RA -t)의 시간차가 $\pm 5^\circ$ 나게 된다. 그래서 가정경도에 대한 시간보정치는 관측한 별의 적경으로부터 그 별의 자오선 통과시간의 대수화가 관측자의 자오선 경도가 된다.

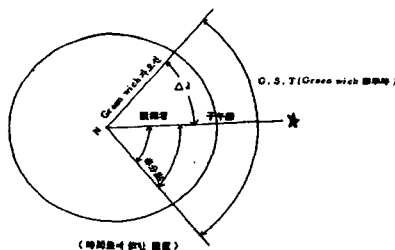


그림 3. 천문경도의 결정

4.2 위도결정

위도의 결정은 아래의 그림과 같이, 지구상의 관측점에서 연직선을 위로 연장하여 천구와 만나는 점을 천정(Zenith)이라 하고 관측점의 연직선 방향으로부터 별이 내린 수선의 발까지의 거리를 천정거리(Zenith Distance)라 한다. 또한 관측의 편의상 관측자의 천정이북에 있는 별을 북쪽별, 천정이남에 있는 별을 남쪽별이라 부르고 적위의 부호가 정이든 부이든 상관하지 않는다. 이 때 천체가 지평선상의 최고 높이, 즉 남중시의 천정거리(Z.D.)를 측정하면 된다. 별이 천정의 북쪽에 있을 경우에는 $\phi = \delta - Z.D.$ 이며, 별이 천정의 남쪽에 있을 경우에는 $\phi = \delta + Z.D$ 가 된다.

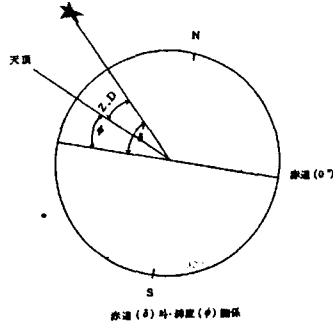


그림 4. 천문위도의 결정

4.3 방위각 결정

천문방위각은 수평면상에서 관측자의 자오선으로부터 천체를 지나는 수직대원까지 시계방향으로 측정 한 각을 말하며, 일반적으로 북을 기준으로 잡는다. 만약 극점으로부터 천체까지의 방위각이 기지이고 또 천체로부터 지상목표물(방위표)사이의 각을 수평으로 시계방향으로 측정하게 되면 그 지상목표물에 대한 방위각이 계산된다. 즉 방위각 계산공식은 다음과 같이 된다.

$$-\tan A = \frac{\sin t}{\cos \phi \tan \delta - \sin \phi \cos t} \quad (4)$$

여기서, A는 극으로부터 시계방향으로 잰 별의 방위각이며, ϕ 는 관측점의 천문위도, δ 는 적위이다. 또한 t는 0^h 부터 서쪽으로 24^h 까지 잰 별의 지방시각이다. 따라서 천문방위각(A_z)은 다음과 같다.

$$A_z = A + (M-S) = A + \alpha.$$

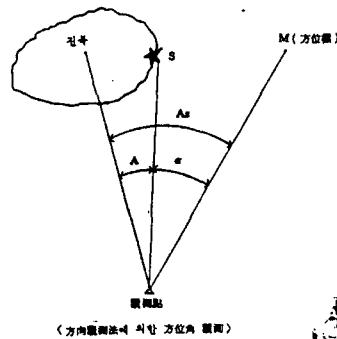


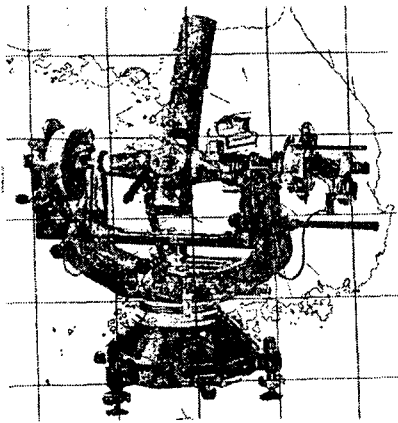
그림 5. 천문방위각의 결정

5. 우리나라 천문측량의 現況

국립지리원에서는 천문측량을 기준측량사업중 정밀측지망설정 사업계획에 병행하여 천문점을 전국에 걸쳐 1973년 - 1984년까지 1, 2등 삼각점에 대하여 22점을 관측하여 1985년 경기도 수원시 원천구 국립지리원 구내 대한민국 경위도 원점설치가 완료되었다. 최초의 천문측량은 1970년대에 간이 천문측량기인 경위의(T-3)와 시간수신기 및 stop watch만으로 위도와 방위각 관측이 실시되어 당시의 장비와 기술능력으로 미루어 그 성과의 신뢰도는 미흡하였다. 1987년 스위스 Wild사의 천문측량기(Theodolite T4)와 수정발진시계(OMEGA) 및 단파수신기(독일 Gruendig사)가 도입되어 지난날의 경험을 토대로 과거의 결합을 분석하면서 본격적인 천문측량 사업을 추진하기 위해 작업규정이 제정되고 각종 관측방법 및 계산양식이 재정비되어 일정한 Form이 정해지게 되었다. 그리고 시간이 흐름에 따라 관측방법이 다양해지고 현장여건에 따라서 응용력도 생기게 되었다. 또한 관측성과 계산의 대부분이 program화 되었으며 계산처리과정으로 신속정확을 기하게 되었다. 한편 1979년 한일측지술협력의 일환으로 국립지리원 보유장비인 데오돌라이트 T-4를 가지고 일본국 국토지리원 Kanozan 측지관측소에서 일본 Sokkia제 Astrolab와 비교 관측 및 성과분석을 하여 T-4와 Astrolab의 장비성능의 장단점을 파악함으로써 T-4의 장점을 최대한으로 이용하고 단점을 보완하여 보다 높은 정확도 확보에 자신감과 신뢰감을 얻게 되었다.

5.1 관측장비 T-4

Wild T-4는 크고 무거우나 다른 경위의와 별 다를 바가 없으며, 측량은 높은 정확도를 필요로 하므로 크기와 무게의 측면에서는 불편하지만 유리한 점이 더 많다고 할 수 있다. 장비의 주요구성은 그림과 같이 기계기반과 망원경 받침대, 망원경과 수직분도반, 연직수준기 Horre-Talcott 수준기, 접안 micrometer 등이며, 외부적으로 분리된 부속장치로는 라디오수신기 및 Chronometer로 구성되어 있다.



망원경 대물렌즈 직경	60mm
망원경 배율	80배
수평분도원 최소간격	0.1"
수직분도원 최소간격	0.1"
기포관 감도	0.6mm
중 량	60kg
시보기록 기록치	1/1000초

그림 6. 천문측량기 T-4와 그 제원

5.2 경위도 원점 설치

우리나라의 경위도 원점은 국립지리원의 장기계획에 의거 1981.8 - 1985.10(5년간)에 걸쳐서 관측된 결과를 바탕으로 고시 제57호(1985년 12월 27일)로 그 좌표값이 결정되었다. 그 당시 궤청일수가 많은 4, 5, 6월과 10, 11월에 걸쳐 온도차에 따른 기류변화 및 대기온도차가 적은 계절을 택하여 집중적으로 관측함으로써 빛의 반사 및 원인불명의 대기굴절오차를 줄이는 데 노력하였다. 관측방법은 미육군성 측지사령부 발행 정밀천문측량(Precise Astronomic Survey)과 야외천문측량(Field Astronomic Survey)의 관측요령에 의하여 항성표 FK-4(Fundamental Star Catalogue)에 수록된 항성중에서 시등급 3-6으로써 경도 및 위도에서 각각 700개를 관측하여 경위도 원점의 좌표를 결정하였다. 장비는 데오돌라이트 T-4와 시보기록계(Chronometer)를 사용하고 표준시보는 일본 우정성 전파연구소를 통해서 발신되는 동경 135도 표준시인 JJY를 수신하여 세계협정시(UTC)를 사용하였으며 또 시보보정고시 "Time and

latitude bulletins"를 동경천문대로부터 입수하여 관측순간의 천체운동 시각을 UT₁-UTC의 윤초(leap time)를 보간법으로 하여 표준시를 수정하였으며, 한편으로 지구자전축은 수학적으로 정의한 조정(평균)극으로부터 이동된 순간극(pole)을 보정하였다. 천문측량은 천체운동 시간의 철저한 관리이다. 이것은 정확한 전자 시간관측 장치를 이용하여야만 가능하며, 1/1,000초까지 독취가 가능한 Chronometer로 관측하였다. 경도관측방법은 자오선 시차법(Mayer법)으로 하였으며 위도관측법은 정고도법(Sterneck법)으로 하였다. 원방위각 관측은 원점에서 남쪽으로 약 8km 떨어진 동학산(2등 삼각점)과 북극성(polaris)을 대상으로 한 방향관측법으로 수행하였다.

천문측량의 결과와 기본삼각점 좌표를 비교하여 본 결과, 둘 사이에 좌표편차 즉 위치의 어긋남이 발견되었다. 그 원인은 경위도 원점에서는 천문측량에 의한 경위도 및 원방위각을 그대로 사용하여 준거타원체는 원점에 있어서 지오이드와 일치로 가정하고 연직선과 타원체상의 수직선을 일치시키는 것이며 경위도 원점에서는 지오이드의 높이를 Zero화 한 때문이다. 일본 동경경위도 원점에 고정되어 있는 우리나라 측지삼각점 성과는 상당한 조직적인 지오이드의 분리를 일으키고 있다. 우리나라 연직선편차의 Vector를 관찰하여 보면 삼각점의 위치를 기준하여 천문측량 위치좌표의 차이가 잠정적인 평균이 서쪽으로 11".125(247m), 북쪽으로 11".257(347m)로써 Vector는 북서쪽으로 426m의 분리현상을 보이고 있다. Vector량을 지역별로 분석하여 보면 태백산맥의 남북을 경계로 동서 분포가 뚜렷한 차이를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 동해안에서는 태백산맥의 특수한 지각구조의 밀도영향이 아닌가 여겨진다. 또한 서쪽은 최대의 차이를 나타내고 중부지역은 동서의 편차량의 중간값을 나타내고 있는 것은 흥미로운 현상으로 여겨진다.

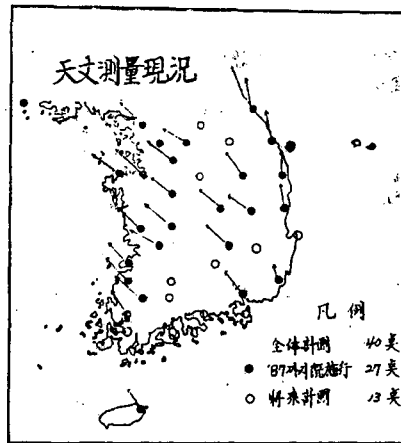


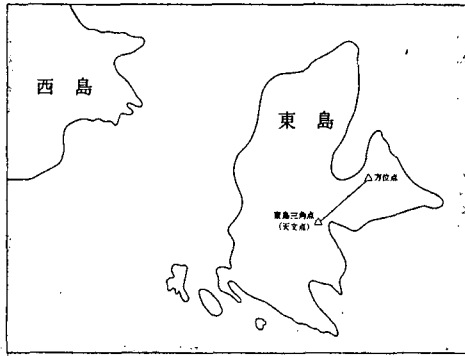
그림 7. 천문측량의 결과

그러나 대체적으로 방향이 서쪽으로 연직선 편차량이 크고 그 분포가 계통적인 Vector가 일본전역에 대한 평균이 우리나라 측지삼각망의 연직선편차의 Vector와 흡사하게 일치하고 있다는 사실이다. 이 사실은 아마도 일본 동경경위도 원점의 위치가 지오이드면의 가파른 경사에 위치하고 있어 측지학적 측면에서 볼 때 위상적인 위치가 아니라는 것을 의미하며 또한 준거타원체와 Bessel값이라는 두개의 가정이 측지성과를 산출하는데 적합하지 않았다는 것을 알 수 있다. 한편으로 우리나라에서 천문측량에 의한 좌표와 측지삼각점 좌표의 상대적인 거리분리(연직선 편차)를 일으키는 것은 동경원점에서 시작된 삼각망이 우리나라에 상륙하여 전국에 확대되면서 생긴 누적오차가 아니고

- ① 동경원점에서의 준거타원체와 지오이드의 일치 가정이 지구물리학적 가정이 다른 우리나라에서는 측지학적으로 적합하지 않으며
- ② 우리가 살고 있는 지구는 현재 까지 크기가 정확하게 밝혀진 구가 아니고 또한 물리학적인 밀도가 고르지 않고 변화무상하기 때문에 물리학적인 지구표면에서는 중력의 크기가 다르고 방향의 구심점이 없어 산발적이다.

5.3 독도측량

현실의 지구와 고정관계에 있는 한 나라의 측지좌표계는 원점을 출발점으로 하여 측지삼각망을 형성한다. 하지만 육지에서 광학장비로서 동일 원점의 측지망의 연결이 불가능한 독도와 같은 낙도지역에서는 천문측량을 실시하여야만 한다. 이런 관점에서 독도에서 T-4에 의한 천문측량을 1980년 5월과 6월 사이에 수행한 바 있다. 당초 독도의 기준삼각점상에서 천문관측을 수행할 계획이었으나 해풍의 영향으로 삼각점에서 약 30m 떨어진 구릉지를 택하여 천문측량을 수행하였다. 아래에는 독도의 천문측량의 지점과 그 성과표를 도시한 것이다. 기타 자세한 내용은 건설부 국립지리원에서 1981년 출간한, “독도측량·지도제작사업보고서”를 참조하길 바란다.



區分	經 度	緯 度	方 位 角	備 考
測點	(-) 08°-47'-28".1018 ±0".01268	(N) 37°-14'-20".367 ±0".124	45°-31'-35".681 ±0".226	
東島三角點	(E) 131°-52'-01".527 ±0".190		(東島三角點-方位點)	

그림 8. 독도의 천문측량과 그 성과

6. 디지털 천문측량

6.1 디지털 천정 카메라 TZK2-D의 구조

디지털 천정 카메라 TZK2-D는 그림 2와 같이 이동식 천정 카메라 TZK2, CCD센서, GPS수신기와 두 대의 전자식 경사측정기 및 현장에서 카메라의 작동, 관측자료의 저장과 처리를 위한 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 그림 3에는 디지털 카메라의 개념도를 나타낸 것이다. 디지털 천정 카메라 TZK2-D의 핵심장치는 렌즈, 회전반, 정준장치와 광학장치 등이다. 렌즈(Zeiss사Mirotar)는 직경 20cm, 초점거리 1,000mm, 시야각 3.5°로 수차가 작으며 많은 량의 광을 받을 수 있다. 렌즈는 장치의 하부구조에 고정되어 있으나 회전반에 의해서 방위 방향으로 180° 회전이 가능하여 두 위치에서 측정이 가능하다. 따라서 CCD센서의 편심오차의 영향을 소거할 수 있으며 전자 경사센서의 영점오차를 보정할 수 있다. CCD카메라 KX2E(Apogee사)는 그림4와 같으며 그 중심에 광을 기록하는 반도체 센서 KAF-1602E (Kodak사)가 장치되어 있다. 반도체 센서의 크기는 13.8mm x 9.2mm 이며 1,530 x 1,020(1화소 크기 9μm x 9μm) 화소로 구성되어 있으며, 유효시야각은 단지 47.2' x 31.5' 이다. 따라서 촬영된 영상의 축척은 화소 당 약 1.85"에 해당한다. 이러한 축성으로 14등급의 별까지 촬영이 가능하며 흑전류(dark current)를 제거하기 위해 열전자식 냉각장치를 가지고 있다. 흑전류란 CCD센서의 별관측시 발생하는 가장 큰 오차중의 하나로서 별의 광자(photon)에 의해서 전자가 발생하지 않고 CCD센서의 열에 의해서 전자가 생성되는 현상을 말한다.

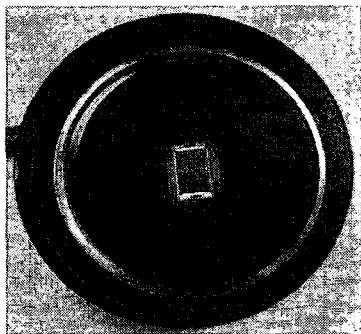


그림 9. CCD Camera KX2E

CCD에 기록된 영상은 신속한 읽음 장치에 의해서 3초 이내에 PCI 인터페이스를 통해 컴퓨터로 전달된다. 따라서 짧은 순간에 재관측이 가능하여 연직선 파라메타 결정의 정확도와 신뢰도를 높일 수 있게 한다. 또한 천정카메라는 연직선의 기준을 설정하는 데 필요한 두 대의 전자식 경사측정센서를 부착하고 있다. 경사측정기는 실제 별관측전에 천정카메라의 수평작업에 이용한다. 카메라로 관측하는 동안 연직선에 대하여 카메라 회전축의 잔류경사각을 측정하여 이를 보정한다. 전자 경사측정기는 아날로그로 측정된 전기신호를 A/D변환에 의해서 16bit의 디지털로 바꾸게 된다. 신호변환의 주기는 100Hz이다. 천정카메라와 각도측정기의 시각동기화를 위해 CCD카메라의 셔터의 신호를 A/D변환 chip에 기록한다. 경사측정기는 Taylor-Hobson사의 Talyvel-2이며 그 정확도는 0.2"이다. 이의 정확도를 향상시키기 위해 지구측량연구소에서 연구중이며 이의 결과로 현재 HRTM(High Resolution Tiltmeter, Lippmann사)을 연결하고 있다. 그리고 타원체 좌표(φ, λ)와 촬영순간의 시각은 Astech사의 GPS 수신기 Z12로 결정하였다. 위치결정은 DGPS 기법으로 약 1m 이내로만 결정하면 타원체상의 위도의 정확도는 0.3" 정도로 요구정확도를 충족한다. 타원체 좌표는 연직선의 결정(식 2) 뿐만 아니라 물리적인 연직선 결정(식 12)의 근사좌표로도 활용한다. 시간측정을 위해 GPS는 매우 중요한 역할을 한다. 하노바 대학 지구측량연구소에서 개발한 디지털 천정카메라 TZK2-D(Transportable Zenith Camera-2 Digital System)은 연직선 편차성분 ξ 와 η 를 실시간으로 결정할 수 있는 매우 능률적인 천문측지용 장비이다. 이 장비는 물리적인 연직선 방향을 결정하는 디지털 천정 카메라와 타원체 연직선을 결정하는 GPS 수신기의 두 가지 주요 요소로 구성되어 있다. GPS수신기에 의한 타원체 연직선을 결정하는 방법에 대하여서는 위성측지학 교재에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 주로 디지털 천정 카메라에 의해서 물리적인 연직선을 결정하는 방법에 대하여만 설명한다. 디지털 천정 카메라의 기술적인 설계와 자료처리에 대하여 중점적으로 설명한다.

6.2 디지털 천정카메라에 의한 연직선 방향 결정

천정 카메라는 방위(azimuth) 주위로 회전 가능한 카메라를 연직으로 설치하여 천정주위의 별들을 광에 민감한 센서(CCD 또는 사진건판)에 영상을 기록하는 장치이다. 180도 상반된 두 방향에서 관측한 천정 관측치로부터 항성표(star catalog)를 이용하여 천문 연직선 편차(Λ, Φ)를 구한다. 아래에는 천정카메라에 의해서 천문위치를 결정하는 기본원리를 잘 설명하고 있다. 그림 1은 별의 위치를 표시하는 천구 좌표계로 적위 δ (declination)와 적경 α (right ascension)를 표시해 준다.

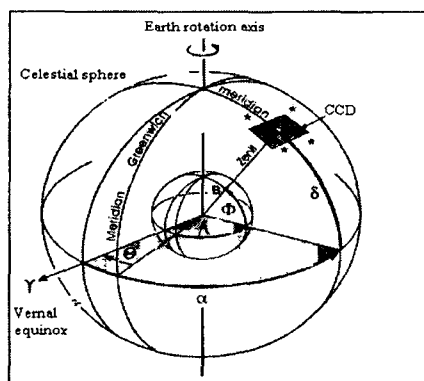


그림 10. 디지털 천문측량의 원리

지표면상의 한 점은 천문경위도(Λ, Φ)를 이용하여 지구좌표계로 나타낸다. 천문좌표계와 지구좌표계는 그림에서 보는 바와 같이 그리니치 항성시 θ 로 표시되는 지구의 회전에 의한 영향에 의해서 구분된다. 항성시 θ 일 때 천정 Z와 관측지점 B의 연직선에 대한 천문좌표와 적도좌표는 동일하다.

$$\Phi = \delta \quad \Lambda = \alpha - \theta \quad (5)$$

따라서 천정위에 직접 위치해 있는 별의 적도좌표(φ, λ)는 관측시각 θ 에서 측정된 천문좌표(Λ, Φ)로 표시할 수 있다. 하지만 실제적으로 별들은 완전히 천정에 있지는 않고 천정 부근에 있으므로 천정 카메라로 측정된 별의 위치를 천정의 중심에 위치하도록 보간(interpolation)하여야 한다. 천정 중심으로 보간하기에 앞서 우선 센서에 기록된 사진좌표 (x, y)를 천문학적으로 결정해야 한다. 사진좌표 (x, y)는 천문 관측의 기본이 되는 항성표(star catalogue, FK5)로부터 구해지는 적도좌표계 (φ, λ)로 변환한다. 이는 적절한 변환공식에 의한 별의 차분(star difference)에 의해서 이루어진다. 공식 (4)에서 촬영시점 θ 는 매우 중요한 의미를 가지는데, 그 이유는 이에 따라 천문 경도 λ 가 결정되기 때문이다. 오늘날 이러한 문제해결을 위해 초정밀 시간측정이 가능한 GPS 신호를 이용하고 있다. 천정카메라에 의해서 연직선의 결정시 중심은 카메라 회전축을 이용하여 이루어진다. 연직선과 회전축간의 차이는 전자식 경사측정기로 관측한다.

경사측정기에 의해서 천정카메라를 수평으로 설치한 후 별관측을 위해 CCD카메라를 완전 자동으로 정준하게 되며, 한번의 관측을 위해 정준에 소요되는 시간은 약 10초이다. 먼저 위치1에서 CCD카메라로 천정주위의 별을 0.5초~1초간 관측하여 영상을 기록하고 셔터의 터짐과 동시에 A/D변환기로 경사측정기의 신호를 기록하며 절대시간은 GPS수신기로 측정한다. 그 다음 카메라를 방위방향으로 180도 회전하여 위치2로 이동하여 관측을 시행한다.

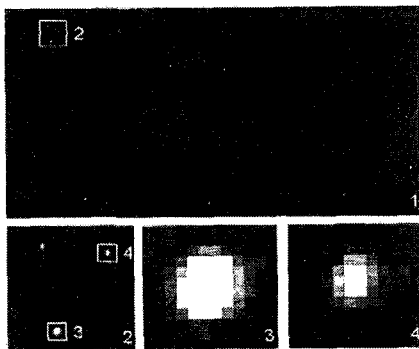


그림 11. 관측된 별의 확대

일반적으로 연직선결정은 두 위치에서 일회씩 측정하면 충분하다. 하지만 정확도와 신뢰도를 높이기 위해 한 지점에서 최소한 5회 이상 관측을 하였다. 관측이 실시간으로 이루어지기 때문에 연직선편차결정을 위한 내부정확도는 반복관측으로 현장에서 직접 추정이 가능하다. 현장에서 5회 측정된 결과의 내부정확도가 정확도 수준을 충족하지 못하면 계속적으로 반복 측정을 실시한다. 반복측정의 횟수가 많을수록 섬광현상(scintillation)에 의한 별빛의 경로 변화에 의한 기록된 영상의 오류를 방지할 수 있다.

디지털 방식에 의한 관측으로 천체의 상황에 따라 14등급의 항성까지 약 20-30개를 관측할 수 있다. 별이 드문 천체의 경우에는 약 10개 정도까지 관측이 가능하다. 하지만 은하수와 같이 별이 많은 천체에 대하여는 100개 이상의 관측도 가능하다.

6.3 관측 및 자료처리

디지털 천정카메라에 의해서 연직선을 결정할 경우 중요한 사실은 실시간 처리가 가능한 S/W이다. 실시간 처리S/W는 항성표를 이용하여 카메라 설치지점의 연직선파라메타(Λ, Φ)를 자동으로 계산한다. 천정카메라의 관측값들을 자동으로 처리하기 위해 지구측량연구소에서는 AURIGA(Aytomatic Realtime Image Processing System for Geodetic Astronomy)를 개발하였다. 이 S/W는 관측자료의 처리, 분석, 시각화 및 결과의 취득이 완전자동으로 이루어지며, 이에 소요되는 시간은 약 3-5초이다. 따라서 연직선편차와(Λ, Φ) 그 성분(ξ, η)의 결정이 완전 실시간으로 처리된다. 아래의 그림6은 천정카메라 관측값의 중요한 처리과정이며 이에 대한 설명은 아래에 기술하였다.

6.3.1 별추출(Star Extraction)

결과의 평가는 먼저 수치관측값의 처리로부터 시작된다. 수치로 기록된 영상은 디지털 이미지 처리방법에 의해서 자동으로 추출된다. 수치로 기록된 별의 영상을 pixel단위로 표시하면 그림7과 같이 주위의

배경에 비하여 확연히 높은 명암(grey value)을 갖게 된다.

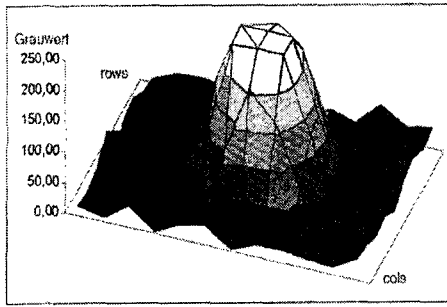


그림 12. Star image(3차원으로 표시)

별을 추출하는 적절한 방법은 영역증가법(area growing method)에 의한 영상분할 기법으로, 영상을 화소그룹별로 분할하여 추출하는 방식이다.--

이 방법에 의해서 별의 중심에 대한 영상좌표(x,y)를 0.1-0.2화소의 정확도로 결정가능하다. 이 정확도는 방향의 정확도로 환산하면 약 0.2-0.4"에 해당한다.

6.3.2 Reference Star(기본항성)

천정관측에서 기본항성은 관측된 별의 위치결정시 좌표가 기지인 고정점의 역할을 한다. 기준항성의 적도좌표계(δ , α)는 천문연구소에서 발표하는 항성표로부터 얻는다. 시간측정을 위한 기준항성은 카메라 설치지점의 근사좌표, 관측시점 및 CCD센서가 관측가능한 천정의 시계 등을 고려하여 항성표로부터 얻어진다. 기준항성의 좌표는 시간에 의존하는 물리적인 변수들(항성의 자체운동, 지구의 장동과 세차, 빛의 광행차 등)에 종속되는 데, 이러한 영향은 사전에 보정되어야 한다. ---

6.3.3 Star Identification(별 식별)

다음 단계로는 기준항성과 항성표를 이용하여 추출된 별을 찾아내는 별 식별작업이다. 이 단계에서는 사진좌표(x, y)와 적도좌표계(δ , α)를 결정한다. 그리고 식별이 불가능한 별은 다음 단계에서 제외시킨다. 별의 식별과정은 물체인식과 상관기법을 바탕으로 매우 정밀하게 처리된다.

6.3.4 천정 관측값의 환산(Reduction)

별의 식별후 천정 관측값의 적도좌표(δ , α)와 사진좌표(x, y) 사이의 관계를 정밀하게 계산한다. 구면좌표계인 적도좌표계(δ , α)를 지상의 평면좌표계인 사진좌표(x, y)와 직접 연관지을 수 없으므로 접선좌표계(tangential coordinate, ξ , η : 연직선편차와 혼등하지 말것)를 이용한다. 접선좌표계는 그림8과 같이 적도좌표계(δ , α)를 접선평면에 투영시 첨구와 만나는 점(δ_0 , α_0)을 기준으로 한다.

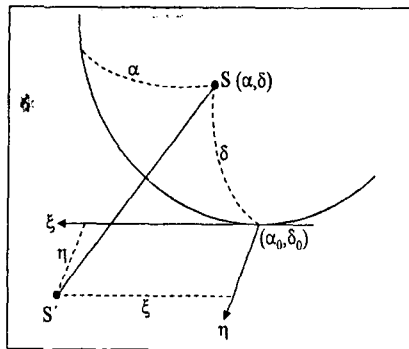


그림 13. 접선좌표계

어떤 별 S의 적도좌표(δ, α)를 접선좌표로(ξ, η) 변환하는 공식은 보조량 q 를 이용하여 아래와 같은 공식으로 수행된다.

$$\cot q = \cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (6)$$

$$\xi = \frac{\tan(\alpha - \alpha_0) \cos q}{\cos(q - \delta_0)} \quad (7)$$

$$\eta = \tan(q - \delta_0) \quad (8)$$

위의 공식들로부터 δ 와 α 를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha = \alpha_0 + \arctan \frac{\xi}{\cos \delta_0 - \eta \sin \delta_0} \quad (9)$$

$$\delta = \arctan \frac{(\eta + \tan \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - \eta \tan \delta_0} \quad (10)$$

접선좌표(ξ, η)와 사진좌표(x, y)의 관계는 아래와 같은 투영변환 공식에 의해서 이루어지며, 여기서 계수 $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ 및 d 와 e 는 조정에 의해서 결정된다. ---

6.3.5 연직선 파라메타의 결정

천정관측값의 환산 후 천정의 항성계를 중심으로 하는 구심(Centering)을 구하기 위해 보간 작업을 수행한다. 사진좌표계상에서 천정점(x_z, y_z)은 CCD센서의 중심점으로 가정하여 그 좌표를 (0,0)로 한다. 투영변환 공식(10, 11)과 공식 8, 9를 이용하여 사진좌표를 근사적인 적도좌표계(δ_z, α_z)로 변환한다. 접선평면상의 원점(δ_0, α_0)좌표는 항성시 θ 와 타원체 좌표(φ, λ)를 이용하여 다음의 공식으로부터 구할 수 있다.

$$\Phi_0 := \Phi \quad \Lambda_0 := \lambda \quad (11)$$

$$\delta_0 = \Phi_0 \quad \alpha_0 = \Lambda_0 + \theta \quad (12)$$

6.3.6 결과 정확도

디지털 천정카메라 TZK2-D는 하노바에서 여러 번 시험관측한 결과 연직선성분 결정의 내부정확도를 발표할 수 있게 되었다. 아래의 그림 9에는 10회의 반복측정에 대한 정확도의 결과이다.

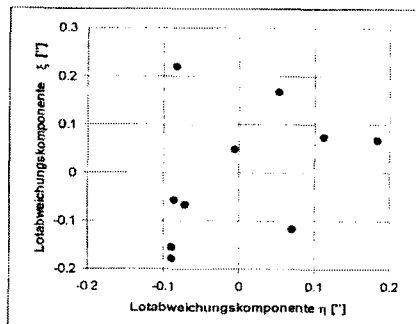


그림 14. 연직선 편차결정의 정확도

각각의 측량결과의 정확도는 0.1 - 0.2" 정도의 범위에 있으며, 평균적인 내부정확도는 약 0.1" 정도 수준이다. 따라서 디지털 천문측량의 결과는 재래식 방법의 수준과 동일하다.

7. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 과거 천문측량은 국가경위도 원점, 연직선 편차 등에 활용되어 측지분야에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 재래식 천문측량은 장비의 운용과 관측방법 등이 어려워 그 활용이 점점 쇠퇴하고 있다. 하지만 디지털 천문측지 방법에 의한 연직선편차 결정은 여러 측면에서 획기적인 발달로 생각된다. 따라서 현재 국부적인 지오모델의 결정시 약 50m 간격으로 이 방법을 적용하면 재래식 방법의 비경제성과 위성자료에 의한 지오이드 모델의 취약점을 보완할 수 있어 향후 이 방법의 적용은 천문측량과 지오이드 모델의 결정에 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 따라서 이제 국가적인 차원에서 과거 우리나라의 천문측량의 결과를 체계적으로 정리하고 이를 활용하는 방안을 마련함과 동시에 디지털 천문측량기법을 도입하여 천문측량을 국가의 측지측량에 활용하는 방안을 구체적으로 검토해야 할 시점으로 사료된다.

참고문헌

- 신귀호, “우리나라의 천문측량현황”, 대한토목학회지, 제36권 4호, 1988 pp.29-34
신귀호, “천문측량 ” 측량회지, 대한측량협회 1984년 3월
신귀호, “대한민국 경위도 원점 ” 측량회지, 대한측량협회 1986년 6월
건설부 국립지리원, “독도측량·지도제작사업보고서, 1981년, 건설부 국립지리원
G. Seeber, “디지털 천정카메라 TZK2-D에 의한 천문측지학적 연직선편차 결정”
독일측지학회지, 2002년 6호, pp.388-396