

3 기준좌표계



3.1 개요

관측점에서 위성까지의 거리 ρ 을 나타내는 기본 방정식은 위성의 순간적인 위치 벡터 ρ^S 와 관측점의 위치벡터 ρ_R 과의 관계로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = \|\rho^S - \rho_R\| \quad (3.1)$$

위 식 3.1에서 2개의 위치벡터는 동일한 좌표계로 표현되어야 한다. 여기에서 3차원 직교 좌표계를 정의하기 위해서는 원점의 위치와 좌표축의 방향을 결정해야 할 필요가 있다.

위성측지와 같은 범지구적인 부분에서는 적도좌표계를 이용하는 것이 적절하다. 그림 3.1과 같이 우주중심 또는 천구좌표계를 나타내는 X_i^0 와 지구중심 또는 지구좌표계를 나타내는 X_i 는 서로 구별되어 사용된다. 여기서 $i=1,2,3$). 두 좌표계 모두 지구의 자전축벡터 ω_E 을 X_3 축으로 하고 있다. 천구좌표계의 X_1^0 축의 방향은 춘분점을 향하고 있어, 결국 X_1^0 축은 적도면과 황도면의 교선을 나타낸다. 반면 지구좌표계의 X_1 축은 적도면과 본초자오선(Greenwich meridian)과의 교선을 나타내며, 두 좌표계의 X_1^0 축과 X_1 축 사이의 각 θ_0 을 그리니치항성시라 한다. 마지막으로 X_1 축과 X_3 축에 직교하는 X_2 축을 통해 오른손 기준좌표계가 완전하게 표현된다.

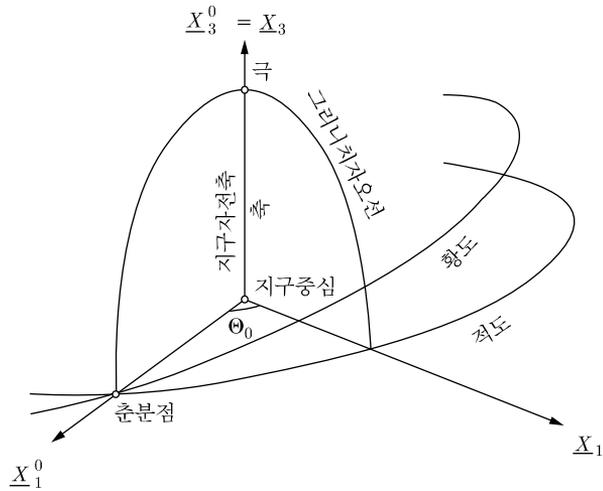


그림 3.1 • 적도좌표계

태양계에 기준한 좌표계는 그 무게중심, 즉 태양을 원점으로 하는 정지된 좌표계로서 뉴턴역학을 따르는 관성좌표계이다. 하지만 지구의 무게중심을 원점으로 하는 지심좌표계의 경우는 지구의 공전으로 인한 가속도를 가지게 되므로 일반상대성이론이 고려되어야 한다. 실제로 지구는 자체의 중력장으로 인해 주요한 상대성 효과가 발생하기 때문에, 지구중력장의 영향을 받는 인공위성의 운동을 표현하기 위해서는 지심좌표계가 보다 적절하다고 할 수 있다. 하지만 아직 지구의 운동 중 자전을 고려하지 않은 상태이므로, 지심좌표계의 좌표축 방향이 공전 중에도 평행한 상태를 유지하고 있다는 점을 유의해야 한다.

ω_E 로 표현되는 지구의 자전벡터는 몇 가지 요인에 의해 주기적으로 진동하게 되는데, 이러한 진동을 나타내는 기본적인 미분방정식은 고전역학에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{M} = \frac{d\underline{N}}{dt} \tag{3.2}$$

$$\underline{M} = \frac{\partial \underline{N}}{\partial t} + \omega_E \times \underline{N} \tag{3.3}$$

여기에서 \underline{M} 은 토크 벡터, \underline{N} 은 지구의 각운동량 벡터, 그리고 t 는 시간을 나타내며(Moritz and Mueller, 1988 : 식 2-54, 2-59), 기호 “ \times ”는 벡터의 내적을 나타낸

다. 토크 벡터 \underline{M} 은 주로 태양과 달의 만류인력으로 인해 발생하므로 조석 포텐셜과 밀접한 관련이 있다. 식 3.2는 천구좌표계 X_i' 와 같은 관성계(또는 의사관성계)에서 유효한 관계식이며, 식 3.3은 회전(자전)을 하는 지구좌표계 X_i 에 일반적으로 적용된다. 식 3.3의 편미분항은 지구좌표계에 대한 토크 벡터 \underline{N} 의 시간적 변화를 나타내며, 벡터의 내적은 관성계에 대한 지구좌표계의 자전을 나타낸다. 지구의 자전벡터 $\underline{\omega}_E$ 는 관성틀서 \underline{C} 에 의해 각운동량 벡터 \underline{N} 과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\underline{N} = \underline{C}\underline{\omega}_E \quad (3.4)$$

또한, 지구 자전벡터 $\underline{\omega}_E$ 는 단위벡터 $\underline{\omega}$ 와 그 크기를 나타내는 놈벡터 $\omega_E = \|\underline{\omega}_E\|$ 을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{\omega}_E = \omega_E \underline{\omega} \quad (3.5)$$

위의 미분방정식 식 3.2와 식 3.3은 두 가지 부분으로 나누어 생각할 수 있는데, 먼저 진동 $\underline{\omega}$ 가 좌표축 X_3 의 변동의 원인이라는 것이며 이는 다음 절에서 보다 자세히 논의하도록 한다. 또한 놈 벡터 ω_E 의 진동은 지구 자전속도 변동의 원인을 야기하게 되는데, 이는 3.3절의 시간체계에서 다루도록 한다.

식 3.2와 식 3.3에서 외력이 없는 경우(즉, $\underline{M} = 0$)만을 고려하면 이는 자유진동을 뜻하며, 외력이 있는 경우는 강제진동을 의미한다. 어떠한 경우라도 이러한 진동은 관성좌표계 또는 지구좌표계와 관련될 수 있다.

3.2 좌표계

3.2.1 정의

자전축의 진동

관성 공간에서 발생하는 지구의 자전벡터 $\underline{\omega}$ 의 전체적인 진동을 장동이라 한다. 이러한 전체적인 진동은 편의상 장기간의 세차운동과 주기적인 장동이라 부르는 2개의 운동으로 구분되며, 지구좌표계 상에서는 이러한 자전축의 변동을 통합하여 극운동이라고 부르고 있다. 그림 3.2는 극운동의 개념을 간략하게 표현한 것으로

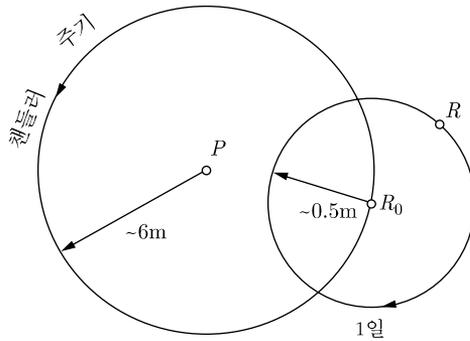


그림 3.2 • 지구 자전축의 극운동

점 P 는 자전벡터 ω 의 평균위치를 나타낸다. 자전축 운동의 하나인 자전벡터 ω 의 자유진동은 그 평균위치(P)를 축으로 약 0.4초의 개구각을 가지는 원추의 형태로 나타나며, 이를 지표상에 표현하면 평균위치 P 를 주위로 반경 6m의 원을 그리는 원운동으로 나타난다. 점 R_0 는 자유진동 중 임의의 순간의 지구 자전축 위치를 나타내고 있다. 이러한 자전축의 자유운동의 주기는 약 430일로 알려져 있으며, 이를 철편리 주기라고 부르고 있다. 자전축에 발생하는 강제적인 운동도 역시 원추의 형태로 표현되는데, 그림 3.2에 보이는 점 R_0 주변의 원이 바로 이 원추를 표현한 것이다. 이 원의 반경은 조수의 변동과 밀접한 관련이 있으며, 약 0.5m의 크기를 가지고 있다. 이러한 강제적인 운동의 주기는 대략적으로 일주기이며, 이는 조석의 일분조 성분의 주기와 일치한다.

자전축을 기준으로 0.001초 반경 내에서 발생하는 각운동축의 운동들은 매우 유사한 형태를 보인다. 각운동축의 강제적인 운동은 조수에 의한 인력을 모델링하는 것에 의해 제거될 수 있기 때문에, 각 운동축의 자유운동을 특히 주의해서 고려해야 한다.

$M = 0$ 의 경우에는 식 3.2를 적분하면 N 이 상수가 되므로, 극운동의 자유운동은 매우 긴 주기를 가지게 되고 각운동축의 위치는 공간상에 고정되게 된다. 이 결과는 외력이 작용하지 않는 동안 각운동량이 보존된다는 것을 의미한다. 앞서 언급한 이러한 특성 때문에, 각운동축은 기준좌표축으로 제공되기 적합하며, 이 각운동축의 공간상 위치를 CEP(Celestial Ephemeris Pole)라 명명하고 있다. 하지만 지구좌표계를 위한 기준좌표축으로 사용하기 적당한 것은 그림 3.2에 P 로 표현된 자전축의 평균위치로서, 이는 CIO(Conventional International Origin)라고 부

르고 있다.

관용적 천구기준좌표계

일반적으로 천구기준좌표계의 X_3^0 축은 표준원기 J2000.0(3.3.3절 참조)에 결정된 지구의 각운동축의 위치를 사용한다. X_1^0 축은 춘분점을 가리키고 있는데, 춘분점의 위치는 표준항성들을 관측하여 결정한다(Wielen et al., 1999). 통상적으로 CRF (Celestial Reference Frame)라 부르는 이 천구기준좌표계는 관용적으로 결정되며, 그 실제적인 표현에 있어서도 반드시 이론적인 좌표계와 일치시킬 필요가 없다. 하지만 지구가 태양의 주위에서 가속도를 가지는 운동을 하기 때문에 지심좌표계는 실제로 완전한 관성계가 아니게 되며, 이로 인해 이 좌표계에 의사관성이라는 용어를 포함하여 부르기도 한다.

이러한 천구기준좌표계의 대표적인 하나가 바로 ICRF라고 부르는 기준계이며, 이는 국제자전서비스(International Earth Rotation Service : IERS)에 의해 결정되었다(McCarthy, 1996). ICRF라는 명칭의 첫 번째 문자 I는 IERS에 의해 결정되었다는 것을 나타내고 있다. 이 ICRF는 500개 이상의 은하계 밖의 물체를 관측하여 실시간적으로 결정되며, 이러한 외은하계의 물체는 대부분 퀘이사와 은하핵으로 구성된다.

관용적 지구기준좌표계

지구좌표계의 X_3 축 역시 CIO와 같이 이미 정의된 지구 자전축의 평균위치를 일반적으로 사용하며, X_1 축은 본초자오선의 평균적인 위치와 관련되게 있다. 이러한 좌표계를 지구기준좌표계(Terrestrial Reference Frame : TRF) 또는 관용적 지구 기준좌표계라고 하며, 좌표의 기준을 제공하는 다수의 지상제어국(기준국)에 의하여 결정된다. 이러한 기준국의 대부분은 좌표계 기준의 결정을 위해 위성 레이저 거리측량(Satellite Laser Ranging : SLR) 또는 초장기선 전파간섭법(Very Long Baseline Interferometry : VLBI)을 수행하고 있다.

지구기준좌표계의 한 예로 IERS에서 결정된 ITRF(International Terrestrial Reference Frame) 좌표계가 있다(McCarthy, 1996). 이 좌표계는 X_3 축으로 IERS에서 정의한 IRP(IERS Reference Pole)을 사용하며, X_1 축도 역시 IERS에 의해 정의된 기준자오선 IRM(IERS Reference Meridian)을 사용하고 있다. ITRF 좌표계는 지상

에 존재하는 수많은 관측점의 좌표결정을 위해 국제적으로 많이 사용되고 있는 좌표계 중의 하나로서, 지각변동이나 조수의 영향과 같은 시간적 변화도 고려하는 좌표계이다. 따라서 ITRF는 정기적으로 갱신되어 발표되고 있으며, 새롭게 갱신되는 ITRF 좌표계의 구별을 위해서 최종적으로 갱신된 연도의 끝자리 두 숫자를 추가하여 이를 표시하고 있다. 예를 들어 1999년의 중반 이후에는 그 당시를 기준으로 가장 최근에 갱신되었던 ITRF97 좌표계를 이용하였다(Boucher et al., 1999).

ITRF 좌표계 이외에 많이 사용되고 있는 지구기준좌표계로는 WGS84(World Geodetic System 1984) 좌표계가 있다. 지심좌표계 형식인 이 WGS84 좌표계는 TRANSIT 시스템을 통해 계산된 약 1,500개 지상관측점의 좌표를 이용하여 결정되었다. 이 좌표계는 지구중심(지심)을 기준으로 한 등포텐셜의 회전타원체면을 채용하고 있으며, 이 회전타원체는 장반경 a , 정규이차중력계수 $\overline{C}_{2,0}$, 지구의 자전속도 ω_E , 지구의 중력상수 μ 와 같은 4개의 파라미터에 의해 정의된다. WGS84 좌표계는 1987년 이후부터 GPS 측위의 기준좌표계로 사용되고 있다.

WGS84와 ITRF 좌표계를 비교해 보면, 둘 사이에는 다음과 같은 특징적인 차이가 존재한다(Malys and Slater, 1994).

1. WGS84 좌표계는 TRANSIT 위성의 도플러 관측으로 구축된 반면, ITRF 좌표계는 SLR과 VLBI 관측을 기초로 하고 있다. 이러한 관측방식의 차이로 인해 TRANSIT 기준점의 위치정밀도는 1~2m인 반면, ITRF 기준점의 위치정밀도는 cm의 수준으로 추정되고 있다.
2. 양 좌표계를 위해 결정된 파라미터의 수치에는 다소의 차이가 있으며, 특히 큰 차이를 보이는 지구 중력상수의 차이는 $d\mu = \mu_{WGS} - \mu_{ITRF} = 0.582 \cdot 10^8 m^3 s^{-2}$ 로서, 이로 인해 위성궤도에서 상당한 차이가 발생되고 있다.

이러한 두 좌표계 간의 차이를 해소하기 위해서 구 국방지도국인 DMA는 WGS84 좌표계의 μ 값을 IERS의 표준값으로 대체하였으며, GPS 추적국의 좌표도 새롭게 개정하였다. 갱신된 WGS84 좌표계는 1994년 1월 2일부터 사용되고 있으며, 이는 WGS84(G730)이라는 명칭으로 표시되고 있다. 여기에서 730이라는 의미는 좌표계가 갱신된 GPS 주의 숫자를 나타낸 것이다.

그 후 1996년 미국의 국립영상·지도제작소(National Imagery and Mapping :

NIMA, DMA의 후속기관)는 WGS84(G730) 좌표계를 WGS84(G873) 좌표계로 다시 갱신하였으며, 이는 1996년 9월 29일부터 사용되고 있다. 이 좌표계의 준거타원체는 표 3.1과 같은 4개의 파라미터로 정의되며, 각 파라미터 수치를 ITRF 좌표계의 수치와 비교하면 아직도 약간의 차이가 존재한다. 그러나 WGS84(G873) 좌표계와 ITRF97 좌표계 간의 계통적인 차이는 2cm 이하의 아주 작은 차이로 알려져 있으며, 이에 따라 두 좌표계는 실제적으로 동일한 것으로 간주된다. 이 좌표계에 관해 보다 상세한 내용은 NIMA의 기술보고서(1997)를 참고할 수 있다.

표 3.1 • WGS-84 타원체의 파라미터

파라미터와 그 수치	정의
$a = 6\,378\,137.0\text{m}$	타원형의 장반경
$f = 1/298.257\,223\,563$	타원형의 편평률
$\omega_E = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11}\text{rads}^{-1}$	지구의 자전각속도
$\mu = 3\,386\,004.418 \cdot 10^8\text{m}^3\text{s}^{-2}$	지구의 중력정수

다양한 지구기준좌표계 간의 좌표변환은 일반적으로는 3차원 상사변환에 의해 이루어진다. 이러한 변환식은 일반적으로 7개의 좌표변환 파라미터를 포함하고 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{X}_{TRF_1} = \underline{c} + \mu \underline{R} \underline{X}_{TRF_2} \quad (3.6)$$

여기에서 \underline{X}_{TRF_1} 와 \underline{X}_{TRF_2} 는 동일한 점에서 서로 다른 좌표계 TRF_1 및 TRF_2 의 3차원 위치벡터를 각각 표현한 것이다. 또한 $\underline{c} = [c_1, c_2, c_3]^T$ 는 두 좌표계 사이의 평행이동벡터, μ 는 축척계수, \underline{R} 은 좌표축에 대한 3개의 회전량(α_i)으로 구성된 정규직교행렬이다.

위치벡터 \underline{X} 는 타원체상의 좌표인 φ, λ, h 또는 X, Y, Z 와 같은 직교좌표계의 형태로도 표현이 가능하다. 직교좌표계는 지구중심·지구고정(Earth-Centered-Earth-Fixed : ECEF) 좌표계라고도 불리기도 한다. 직교좌표와 타원체좌표(측지좌표) 간의 좌표변환에 대한 상세한 내용은 10.2.1절에서 기술하기로 한다.

3.2.2 좌표변환

일반적인 사항

천구기준좌표계(CRF)와 지구기준좌표계(TRF) 간의 좌표변환은 좌표계를 회전시키는 것에 의하여 수행된다. 임의의 벡터 \underline{x} 에 대하여 두 좌표계 간의 변환은 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{x}_{TRF} = \underline{R}^M \underline{R}^S \underline{R}^N \underline{R}^P \underline{x}_{CRF} \quad (3.7)$$

여기에서, \underline{R}^M 은 극운동의 회전행렬, \underline{R}^S 은 항성시의 회전행렬, \underline{R}^N 은 장동의 회전행렬, \underline{R}^P 은 세차의 회전행렬을 나타낸다.

표준원기 J2000.0에 정의된 천구기준좌표계(CRF)는 관측 시에 발생한 세차와 장동으로 인한 영향을 보정함으로써 관측 순간에 대한 실제적인 좌표계로 변환된다. 이렇게 변환된 실제적인 천구기준좌표계의 \underline{X}_3^0 축은 CEP를 향하게 되는데, 이는 \underline{X}_3^0 축 자체가 각 운동축의 자유운동에 의한 위치를 나타내기 때문이다. 그 후 이 좌표계를 \underline{X}_3^0 축을 기준으로 \underline{R}^S (항성시)만큼 회전시키게 되며, 이때 CEP의 위치는 변하지 않는다. 마지막으로 CEP를 \underline{R}^M 를 이용하여 CIO로 회전시키게 되면, 천구기준좌표계에서 지구기준좌표계로 변환이 완료된다.

식 3.7의 각 회전행렬들은 기본행렬 $\underline{R}_i\{\alpha\}$ 을 이용하여 구성되게 되는데, 다음의 기본행렬들은 회전각 α 에 의해 발생하는 각 좌표축(\underline{X}_i)의 (+)방향 회전량을 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} \underline{R}_1\{\alpha\} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \underline{R}_2\{\alpha\} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \underline{R}_3\{\alpha\} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.8)$$

이러한 행렬들은 오른손 좌표계에서만 성립한다는 것에 유의하여야 한다. 각 \underline{X}_i

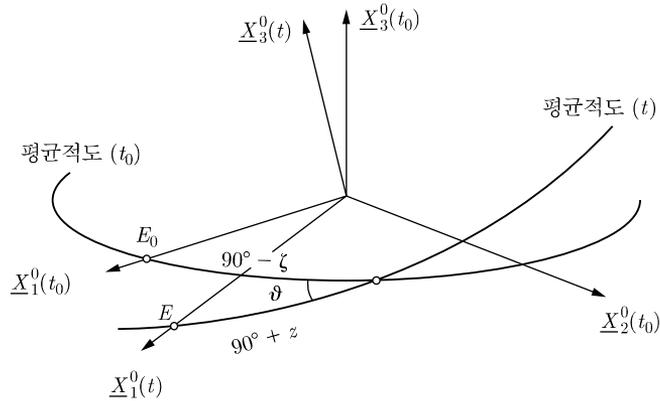


그림 3.3 • 세차

축이 원점에 대해 (+)방향을 가지고 시계방향으로 회전하는 경우에만 회전각 α 는 (+)부호를 가진다.

세차림

그림 3.3은 세차를 표현한 것이다. 이 그림에서 특정한 표준원기 t_0 에 있어서 평균적인 춘분점 위치는 E_0 로 나타내었으며, 임의의 관측시점 t 에서의 춘분점 위치는 E 로 나타내었다. 세차의 회�행렬은 다음과 같이 연속되는 3개의 회�행렬로 구성되어 있으며, 여기서 z , θ , ζ 는 세차 파라미터를 나타낸다.

$$\underline{R}^P = \underline{R}_3\{-z\} \underline{R}_2\{\theta\} \underline{R}_3\{-\zeta\} \quad (3.9)$$

식 3.8의 기본행렬을 이용하여, 식 3.9를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\underline{R}^P = \begin{bmatrix} \cos z \cos \vartheta \cos \zeta & -\cos z \cos \vartheta \sin \zeta & -\cos z \sin \vartheta \\ -\sin z \sin \zeta & -\sin z \cos \zeta & \\ \sin z \cos \vartheta \cos \zeta & -\sin z \cos \vartheta \sin \zeta & -\sin z \sin \vartheta \\ +\cos z \sin \zeta & +\cos z \cos \zeta & \\ \sin \vartheta \cos \zeta & -\sin \vartheta \sin \zeta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

각 세차 파라미터는 다음과 같은 시계열로부터 계산된다(Seidelmann, 1992).

$$\begin{aligned} \zeta &= 2306.''2181 T + 0.''30188 T^2 + 0.''017998 T^3 \\ z &= 2306.''2181 T + 1.''09468 T^2 + 0.''018203 T^3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\vartheta = 2004.''3109 T - 0.''42665 T^2 - 0.''041833 T^3,$$

파라미터 T 는 표준원기 J2000.0과 관측시점 사이의 기간을 36,525 평균 태양일을 1세기로 하는 율리우스 세기로 나타낸 것이다. 예를 들면 관측시가 J1990.5인 경우 $T = -0.095$ 이며, 이를 식 3.11에 대입하면 $\zeta = -219.''0880$, $z = -219.''0809$, $\vartheta = -190.''4134$ 가 된다. 그 후 이 값을 식 3.10에 대입하면 다음과 같은 세차행렬이 구해진다.

$$\underline{R}^P = \begin{bmatrix} 0.999997318 & 0.002124301 & 0.000923150 \\ -0.002124301 & 0.999997744 & -0.000000981 \\ -0.000923150 & -0.000000981 & 0.999999574 \end{bmatrix}.$$

장동

그림 3.4는 장동을 표현한 것으로, 임의의 관측시점에 있어서 평균적인 춘분점 위치는 E , 실제 춘분점의 위치는 E_t 로 나타내고 있다.

장동의 회전행렬 \underline{R}^N 도 역시 다음과 같은 연속된 3개의 회전행렬로 구성되어 있다.

$$\underline{R}^N = \underline{R}_1\{-\epsilon + \Delta\epsilon\} \underline{R}_3\{-\Delta\psi\} \underline{R}_1\{\epsilon\} \tag{3.12}$$

여기에서 경도상에서의 장동 $\Delta\psi$ 와 황도경사상에서의 장동 $\Delta\epsilon$ 와 $\Delta\psi$ 는 모두 미분된 값으로 다루어진다. 식 3.12를 다시 정리하면 다음과 같다.

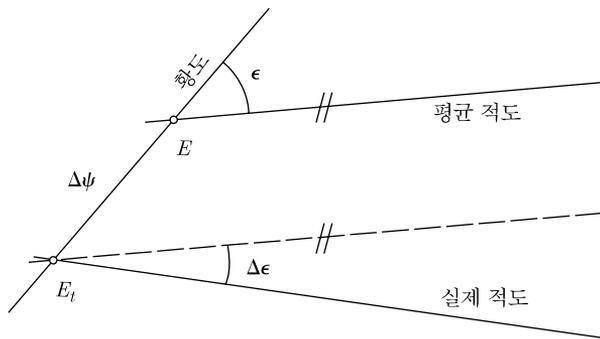


그림 3.4 • 장동

$$\underline{R}^N = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\psi \cos \varepsilon & -\Delta\psi \sin \varepsilon \\ \Delta\psi \cos \varepsilon & 1 & -\Delta\varepsilon \\ \Delta\psi \sin \varepsilon & \Delta\varepsilon & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

황도의 평균경사각 ε 는 다음의 식을 통해 계산할 수 있다(Seidelmann, 1992).

$$\varepsilon = 23^\circ 26' 21.''448 - 46.''8150 T - 0.''00059 T^2 + 0.''001813 T^3 \quad (3.14)$$

여기에서 T 는 식 3.11에 사용된 파라미터와 동일하며, 장동 파라미터 $\Delta\varepsilon$ 와 $\Delta\psi$ 는 다음과 같은 조화급수를 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \sum_{i=1}^{106} a_i \sin\left(\sum_{j=1}^5 e_j E_j\right) = -17.''2 \sin \Omega_m + \dots \\ \Delta\varepsilon &= \sum_{i=1}^{64} b_i \cos\left(\sum_{j=1}^5 e_j E_j\right) = 9.''2 \cos \Omega_m + \dots \end{aligned} \quad (3.15)$$

정수형의 계수 e_j 와 진폭을 나타내는 a_i , b_i 의 수치는 Seidelmann(1992)의 표 3.222.1에 기재되어 있다. 총 5개의 기본변수 E_j 는 SEM(Sun-Earth-Moon) 좌표계의 평균운동을 의미하며, 달의 승교점에 대한 평균경도 Ω_m 도 이러한 기본변수 중의 하나이다. 달의 승교점은 약 18.6년의 주기를 가지며 역행하는데, 이 주기는 장동 급수전개에 있어 주요한 항으로 나타난다.

항성시

항성시에 대한 회전형렬 \underline{R}^S 는 다음과 같다.

$$\underline{R}^S = \underline{R}_3\{\Theta_0\} \quad (3.16)$$

그리니치항성시 Θ_0 의 구체적인 계산 방법에 관해서는 3.3.2절에서 설명하기로 한다.

WGS84 좌표계는 일정한 각속도 ω_E (표 3.1 참조)에 의해 정의되기 때문에, GPS의 경우에는 식 3.16의 회전각으로서 평균항성시를 이용해야 한다.

극운동

지금까지의 계산을 통해 관측 순간의 CEP를 산출하였으며, 최종적으로 이 CEP를 CIO로 회전시켜야 한다. 이는 CIO에 대한 CEP의 상대적인 위치를 나타내는 극점의 좌표 x_P , y_P 를 이용하여 수행되며, 극점의 좌표는 IERS에 의해 결정된다 (Grambis and Ray, 2000). 극운동의 회전행렬 \underline{R}^M 은 다음과 같이 주어진다.

$$\underline{R}^M = \underline{R}_2\{-x_P\} \underline{R}_1\{-y_P\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_P \\ 0 & 1 & -y_P \\ -x_P & y_P & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

또한 회전행렬 \underline{R}^S 와 \underline{R}^M 는 종종 지구의 자전을 나타내는 회전행렬 \underline{R}^R 로 결합되어 사용되기도 한다.

$$\underline{R}^R = \underline{R}^M \underline{R}^S \quad (3.18)$$

GPS 시스템을 위한 우주공간 상의 좌표계는 이미 CEP와 연계되어 고정되어 있으며, 이로 인해 이를 지상좌표계로 변환할 경우 회전행렬 \underline{R}^R 만을 적용하면 된다. 또한 GPS의 실제적인 이용에서는 극운동의 효과를 대부분 무시하고 있다.

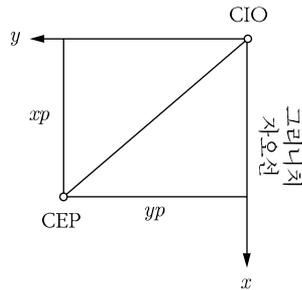


그림 3.5 • 극좌표

3.3 시간체계

3.3.1 정의

현재 몇 가지의 시간체계가 이용되고 있으며(표 3.3 참조), 이러한 시간체계는 지구의 자전과 같은 다양한 주기적 현상을 근거로 결정되었다.

태양시와 항성시

지구 자전의 척도는 천체의 자오선과 기준자오선(본초자오선)이 이루는 각도인 시각이다. 세계시(Universal Time : UT)는 그리니치 시각에 12시간을 더하여 정의되었는데, 이 12시간은 사용상의 편의를 위하여 보정된 값으로 적도면에서 일정하게 궤도운동을 하는 가상의 태양을 고려하여 산출된 것이다. 항성시는 춘분점의 시각(時角)에 의해 정의된다. 평균 춘분점을 기준으로 하여 평균 항성시를 계산할 수 있으며, 실제 춘분점을 기준으로 하면 실제 항성시를 구할 수도 있다. 그러나 일정하지 않은 지구 자전의 각속도 ω_E 때문에 태양시와 항성시에서 모두 변동이 발생하게 된다. 태양시와 항성시의 변동은 조수변동과 더불어 지구 내부질량의 이동에 의해 발생하는 지구의 극관성모멘트의 변화 및 지구 회전축 자체의 진동 등에서 그 원인을 찾을 수 있다. 이러한 극운동의 영향을 보정한 세계시를 UT1이라 부르고 있다.

역학시

태양계의 행성운동에서 유도된 시간을 역학시라 한다. 태양계역학시(Barycentric Dynamic Time : BDT)는 뉴턴역학의 개념을 따르는 관성시간계이며, 운동 방정식에서 사용되는 시간변수는 이 시간계를 이용하고 있다. 의사관성(준관성)계인 지구역학시(Terrestrial Dynamic Time : TDT)는 이전에 천문력(Ephemeris Time)이라 불렸으며, 지구를 회전하는 위성의 궤도운동에 대한 미분방정식의 해석에 적당한 시간계이다. 1991년에 국제천문연합(International Astronomical Union : IAU)은 지구역학시(TDT)를 대체하는 용어로서 지구시(Terrestrial Time : TT)를 도입했으며, 일반상대론에 따라 좌표시라는 용어도 도입되었다. 이에 대한 보다 상세한 내용을 위해 Seidelmann 등(1992)을 참고할 수 있다.

표 3.2 • 시간체계

주기운동	시계
지구자전	세계시 (UT) Greenwich 항성시 (θ_0)
지구공전	지구역학시 (TDT) 태양계중심역학시 (BDT)
원자진동	국제원자시 (IAT) 협정세계시 (UTC) GPS시

원자시

역학시를 실제로 구하기 위해서는 원자시계를 이용하게 된다. 협정세계시(Universal Time Coordinated : UTC)는 일종의 절충된 시간체계라 할 수 있다. 이는 시간의 단위로 원자를 이용하여 측정된 초를 사용하지만 UT1과 근사적인 상용시에 근접하도록 특정한 시점에 윤초를 추가하기 때문이다. GPS 시간체계도 역시 원자시 체계와 관련이 있다. GPS 시간체계는 미국 해군천문대(U.S. Naval Observatory : USNO)에서 관리하고 있는 UTC에 기반하고 있으며, 국제원자시(International Atomic Time : IAT)와는 19초의 오프셋(offset)이 존재하고 UTC와는 GPS의 표준 원기인 1980년 1월 6.0일에 일치되었다.

3.3.2 시간체계간의 전환

지구의 자전으로부터 결정된 시간체계인 극운동의 영향이 보정된 평균태양시 UT1 과 실제 항성시 θ_0 사이의 전환은 다음 식에 의해 이루어진다.

$$\theta_0 = 1.0027379093 UT1 + \vartheta_0 + \Delta\psi \cos \varepsilon \quad (3.19)$$

위 식 3.19의 우변 첫 번째 항은 태양시와 항성시 간 비율의 차이를 나타내고 있으며, 두 번째 항인 ϑ_0 는 그리니치 시간의 자정(세계시 UT의 0시), 즉 실제 항성시를 나타내고 있다. 마지막으로 세 번째 항은 적도면에 $\Delta\psi$ 를 투영한 것으로 장동의 영향을 고려하는 것이다. 식 3.19에서 장동에 관계된 항을 무시하면 평균 항성시가 얻어지고, 이것은 GPS 위성에서 방송되는 항법 메시지에 포함된다(4.4.2절 참조).

ϑ_0 에 대한 시계열은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\vartheta_0 = 24\,110.54841 + 8\,640\,184.812866 T_0' + 0.093104 T_0'^2 - 6.2 \cdot 10^{-6} T_0'^3 \quad (3.20)$$

여기에서 T_0 는 표준원기 J2000.0에서부터 특정한 관측일의 세계시 0시까지의 기간을 율리우스 세기로 표현한 것이다(Seidelmann, 1992).

UT1시간계는 UTC시간계에 대해 다음과 같은 관계를 가지며, 이때 $dUT1$ 은 시간에 따라 증대되는 양으로서 IERS에 의해 공표되고 있다.

$$UT1 = UTC + dUT1 \quad (3.21)$$

이러한 $dUT1$ 의 절대값이 0.9초보다 큰 값을 가질 경우, UTC에 윤초가 삽입되게 된다.

GPS에서는 기준시간계로서 역학시 대신 원자시가 사용되고 있으며, 각 시간계 간의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} IAT &= GPS + 19.5000 && \text{정량 오프셋} \\ IAT &= TDT - 32.5184 && \text{정량 오프셋} \\ IAT &= UTC + 1.5000n && \text{윤초 삽입에 의한 변량 오프셋} \end{aligned} \quad (3.22)$$

여기서 정수 n 은 IERS에 의해 공표되고 있다. 일례로 2000년 6월에 정수 n 의 값은 32이며, 이로 인해 GPS 시간은 UTC와 정확히 13초의 차이를 보이게 된다.

3.3.3 책력

율리우스 일

율리우스 일(Julian Date : JD)은 BC 4713년 1월 1.5일(1.^d5)을 시점으로, 그 후 경과된 평균태양일의 수를 이용하여 정의된다.

수정 율리우스 일(Modified Julian Date : MJD)은 율리우스 일로부터 2,400,000.5 일을 차감하면 구할 수 있으며, 여기서 소수점 이하의 수인 0.5를 제외하면 맨 처음 1일의 시점이 율리우스 일과 같이 낮이 아닌 자정이 된다. 표 3.3에는 2개의 표준원기에 대한 율리우스 일의 수치를 나타내고 있으며, 이 수치를 이용하면 GPS

표준원기에 대한 파라미터 T 를 계산할 수 있다. 표에 기재된 GPS 표준원기와 현재 표준원기(J2000.0)에 대한 율리우스 일 간의 차이를 율리우스 세기(36,525일)로 나누면 파라미터 $T = -0.199\ 876\ 7967$ 가 얻어진다.

표 3.3 • 표준원기

연월일	Julian일	비고
1980년 1월 6. ^d 0일	2 444 244.5	GPS 표준원기
2000년 1월 1. ^d 5일	2 451 545.0	현 표준원기 (J2000.0)

율리우스 일의 전환

날짜 전환에 대한 관계식은 Montenbruck(1984)에 의해 제안된 식을 이용하였는데, 이 식은 1900년 3월부터 2100년 2월 사이의 기간만 적용이 가능한 식이므로, 본 책에서는 이를 조금 수정하여 나타내었다.

상용시의 특정한 날짜와 시간은 정수값(년 Y , 월 M , 일 D)과 실수값(UT의 시)의 조합으로 표현될 수 있으며, 이를 이용하여 그 날짜의 율리우스 일을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$JD = INT[365.25y] + INT[30.6001(m + 1)] + D + UT/24 + 1\ 720\ 981.5 \quad (3.23)$$

여기에서 INT 는 실수의 정수값 부분을 의미하며 y , m 은 다음과 같이 계산된다.

$$M \leq 2 \text{의 경우, } y = Y - 1, \quad m = M + 12$$

$$M > 2 \text{의 경우, } y = Y, \quad m = M$$

율리우스 일로부터 상용시로의 역전환은 다음의 단계를 통해 이루어진다. 먼저 다음과 같은 보조적인 수치들을 계산한다.

$$a = INT[JD + 0.5]$$

$$b = a + 1537$$

$$c = INT[(b - 122.1) / 365.25]$$

$$d = INT[365.25c]$$

$$e = INT[(b - d) / 30.6001]$$

그 후 다음의 관계식을 이용하여 상용시의 각 파라미터들을 구하게 된다.

$$\begin{aligned} D &= b - d - INT[30.6001e] + FRAC[JD + 0.5] \\ M &= e - 1 - 12INT[e/14] \\ Y &= c - 4715 - INT[(7 + M)/10] \end{aligned} \quad (3.24)$$

여기에서 $FRAC$ 는 소수점 이하의 부분을 의미한다. 또한 다음 식을 통해 올리우스 일로부터 요일을 간단하게 계산할 수도 있다.

$$N = \text{modulo}\{INT[JD + 0.5], 7\} \quad (3.25)$$

여기에서 N 은 0에서 6 사이의 정수값을 가지며, $N = 0$ 은 월요일, $N = 1$ 은 화요일의 식으로 수치에 따라 요일을 차례대로 나타낸다. 이와 더불어 다음과 같은 관계식을 통해 GPS 주를 계산하는 것도 가능하다.

$$WEEK = INT[(JD - 2\,444\,244.5)/7] \quad (3.26)$$

여기에서 주어진 계산식을 통해 표 3.3에 기재된 다양한 시간계의 날짜를 직접 확인하는 것이 가능하며, 표준원기 J2000.0은 토요일이고 1,024번째 GPS 주에 해당한다는 것도 증명할 수 있다. 다만 항법메시지에 GPS 주의 수치를 기록하는데 할당된 데이터 용량이 10비트이기 때문에, GPS 주는 1,024주마다 다시 0에서 시작된다는 점을 유의해야 한다. 이러한 GPS 주 리셋은 1999년 8월 21일부터 22일의 심야에 걸쳐 최초로 딱 한번 시행되었다.

2000년에는 ‘GPS Toolbox’가 공개되었다(Hilla and Jackson, 2000). 이는 다음의 웹사이트(<http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox>)를 통해서 무료로 제공되고 있으며, 날짜 전환과 관련된 사항으로는 ‘Toolbox’ 항목 내 B. Remondi에 의해 제작된 날짜 전환 프로그램(Vol.3, No.4)이 있다.

