

## 천측 항법 시스템의 수직 방향 결정

### Determination of Local Vertical in Celestial Navigation Systems

석 병 석, 유 준\*

(Byong-Suk Suk and Joon Lyou)

**Abstract :** Determination of the local vertical is not trivial for a moving vehicle and in general will require corrections for the Earth geophysical deflection. The vehicle's local vertical can be estimated by INS integration with initial alignment in SDINS(Strap Down INS) system. In general, the INS has drift error and it cause the performance degradation. In order to compensate the drift error, GPS/INS augmented system is widely used. And in the event that GPS is denied or unavailable, celestial navigation using star tracker can be a backup navigation system especially for the military purpose. In this celestial navigation system, the vehicle's position determination can be achieved using more than two star trackers, and the accuracy of position highly depends on accuracy of local vertical direction. Modern tilt sensors or accelerometers are sensitive to the direction of gravity to arc second (or better) precision. The local gravity provides the direction orthogonal to the geoid and, appropriately corrected, toward the center of the Earth. In this paper, the relationship between direction of center of the Earth and actual gravity direction caused by geophysical deflection was analyzed by using precision orbit simulation program embedded the JGM-3 geoid model. And the result was verified and evaluated with mathematical gravity vector model derived from gravitational potential of the Earth. And also for application purpose, the performance variation of pure INS navigation system was analyzed by applying precise gravity model.

**Keywords :** earth geoid, geophysical deflection, local vertical, gravity, celestial navigation

#### I. 서론

대부분 항법시스템에서 수직 방향(local vertical)의 결정은 매우 중요하며 특히 움직이는 동체의 수직방향을 결정하는 것은 간단하지 않으며 일반적으로 코리올리 힘과 지구 지오이드 면의 굴곡에 대한 보상이 요구된다[1].

스트랩다운 관성항법장치(SDINS)의 경우 동체의 수직방향은 초기정렬 이후 INS 정보를 적분함으로써 추정이 가능하나 자이로의 표류오차(drift)에 따라 시간이 경과할수록 정확도가 떨어지는 것이 일반적이다. 이러한 자이로의 표류오차(drift)를 보정하기 위해 GPS/INS 결합을 통한 보정 기법이 일반적으로 많이 사용되고 있으며 또한 GPS를 이용하지 않는 방법으로 별 센서를 이용한 천측항법 시스템도 많이 연구되고 있다. 이러한 천측항법 시스템은 GPS를 사용하지 않고 독립적인 항법 해를 제공한다는 점에서 매우 중요하며 최근에는 군사목적의 항법시스템에서 GPS를 대신하거나 백업 목적으로 많이 연구되고 있다. 별 센서 정보를 이용한 항체의 위치 결정 및 INS 보정 기법의 경우 동체의 수직 방향 정보가 필수적이며 위치 결정 성능은 수직 방향의 결정 정확도에 따라 민감하게 변하게 된다. 최근 틸트 센서(modern electrolyte tilt sensor) 및 가속도계 등을 이용하여 직접적으로 매우 정확하게 중력 방향 측정이 가능한 것으로 알려져 있으며[1,6-8] 이러한 중력 측정 센서는 원리상 지구 중력 방향을 측정하게 되므로 지구 표면의 굴곡 형상에 따른 실제 중력 방향을 측정하게 되며 실제 중력 방향의 측정을 통하여 항체의 항법 좌표계 수직방향 추정이 가능하게 된다.

본 논문에서는 지오이드의 굴곡으로 인한 실제적인 중력 방향과 지구 중심 방향과의 상관 관계를 JGM-3 지구 지오이

드 모델이 포함된 위성 정밀 궤도 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 분석하였다.

정확한 중력 방향을 토대로, 별 센서를 이용하는 천측 항법 시스템에서, 특히 두 개 이상의 별 센서 고도각 정보를 이용하여 항체의 위치를 결정하는 시스템에서, 정밀한 수직 방향 결정이 가능할 것이다. 분석 결과를 적용하여 천측항법 시스템의 위치 결정 성능을 분석하였으며, 중력 벡터가 일반 항법시스템의 성능에 매우 중요하게 작용함을 보이기 위해 SDINS 순수 항법에 적용하여 일반적인 중력 모델과 정밀 중력 모델을 서로 비교 분석 하였다.

#### II. 해석 방법

##### 1. 지구 중력 모델

지구를 점 질량으로 가정한 중력 포텐셜 함수는 간단하게 표현되며 실제적인 응용에 많이 사용되고 있으나 실제 지구는 완벽한 타원체가 아니며 또한 지표면의 굴곡 영향으로 정확한 중력 포텐셜과 차이가 나게 된다.

현재까지 중력 포텐셜 이론을 근거로 복잡한 수학적인 계산 단계를 거쳐 지구의 실제 모양을 반영한 지구 중력 포텐셜 모델들이 개발되어 있으며 (1)은 이러한 중력 포텐셜 모델들 중의 한 형태이다. 식에서  $r$ ,  $\theta$ ,  $\Phi$ 는 구 좌표계의 각 성분을 나타내며,  $\mu$ 는 GM으로 뉴턴 상수,  $R_E$ 는 적도 반경,  $J_n$ 은 Zonal harmonic 2차 계수,  $P_{nm}$ 은 르장드르 다항식(Legendre Polynomials),  $C_{nm}$ 은 tesseral harmonic 계수,  $S_{nm}$ 은 sectoral harmonic 계수를 각각 나타낸다. (1)은 구좌표계(spherical coordinate frame)에서 표현된 지구 중력 모델이며 이 모델에 지구 자전에 의한 각운동량을 추가하면 지구 지오이드(geoid) 모델이 된다[2-4].

$$U = -\frac{\mu}{r} \left[ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{R_E}{r} \right)^n J_n P_{n0}(\cos \theta) \right] \quad (1)$$

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 20., 채택확정 : 2006. 10. 10.

석병석 : 한국항공우주연구원(byongss@kari.re.kr)

유준 : 충남대학교(jlyou@cnu.ac.kr)

$$+ \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R_E}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\phi + S_{nm} \sin m\phi) P_{nm}(\cos \theta)$$

(1)에서 zonal harmonic은 위도에만 의존하는 변수로 경도와는 무관하므로 지구 적도의 불룩한 형상(oblateness)에 대한 영향을 반영하고 있으며 tesseral/sectorial harmonic은 경도에 따른 지구 모양의 굴곡을 반영하는 상수로 zonal 항에 비하여 상대적으로 작은 값을 가진다[2].

만약 지구가 자전축에 대하여 대칭 형상이라고 가정하면 (1)은 오직 zonal harmonic coefficient 항만 남게 되며 또한 zonal harmonic coefficient를 2차(J<sub>2</sub>)항 까지만 적용하면 (2)와 같이 간략하게 표현 된다.

$$U = -\frac{\mu}{r} + \frac{\mu J_2 R_E^2}{2r^3} (3\cos^2 \theta - 1) \tag{2}$$

(2)에 기울기(gradient)를 취하면 주어진 위치에서 작용하는 중력 가속도 벡터를 구할 수 있다. (3)은 (2)를 미분한 것으로 좌표계에서 표현된 중력 가속도 벡터를 나타낸다. (3)에서처럼 중력가속도 벡터는 반경(r) 방향 성분(g<sub>r</sub>)과 위도(θ) 방향 성분(g<sub>θ</sub>) 두 가지로 성분으로 구성 된다. 일반적으로 중력은 지구 중심방향으로 많이 정의하고 있으나 식에 나타낸 것처럼 중력의 방향은 위도에 따라 변함을 알 수 있다. 항체의 위치가 적도 나 극 지점인 경우 위도(θ) 방향 성분(g<sub>θ</sub>)이 영이 되므로 오직 반경(r) 방향 성분(g<sub>r</sub>)만 존재하므로 지구 중심방향과 중력 방향은 일치하게 되며 그 외의 경우에는 항체의 중력 방향과 지구 중심 방향은 일치 하지 않음을 알 수 있다. 또한 위도(θ) 방향 성분(g<sub>θ</sub>) 수식에서 알 수 있듯이 중력 방향과 지구중심 방향의 최대 오차는 위도 45도 지점에서 발생하는 것을 알 수 있다.

$$g = -\frac{\mu}{r^2} - \frac{3\mu J_2 R_E^2}{2r^4} + \frac{9\mu J_2 R_E^2 \sin^2 \theta}{2r^4} : g_r$$

$$+ \frac{3\mu J_2 R_E^2}{r^4} \sin \theta \cos \theta : g_\theta \tag{3}$$

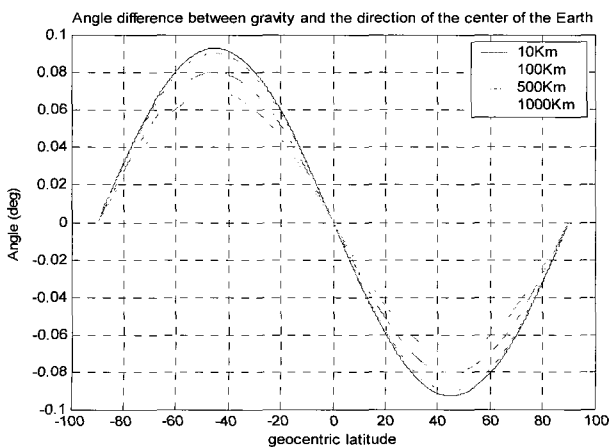


그림 1. 수학적 지구 중력 모델.  
Fig. 1. Mathematical gravity model.

그림 1은 (3)을 이용하여 고도를 10, 100, 500, 1000Km로 변화 시키면서 위도변화에 따른 지구 중심과 중력방향의 오차를 matlab에서 시뮬레이션 한 결과이다.

그림에서 고도가 10Km일 경우 지구 중심 방향과 중력방향의 최대 오차 각은 +/- 45° 위도 지점에서 약 +/- 0.09° 정도임을 알 수 있다. 그림에서 북반구에서는 음, 남반구에서는 양의 오차 값을 나타내는데 이는 지구 중력 방향이 지구 중심 방향에 대해 적도 쪽으로 기울는 것을 나타내고 있으며 오차 각의 크기는 고도가 높아 질수록 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 지구가 회전축에 대하여 대칭인 타원체라는 가정 하에 zonal harmonic 2차(J<sub>2</sub>) 항까지만 고려한 지구 중력의 수학적 모델에 따른 결과이다.

2. 해석 방법

실제 지구는 완벽한 타원체가 아니며 지표면은 거칠고 굴곡이 존재한다. 이러한 지구의 굴곡을 반영하는 지구 지오이드 모델을 구하기 위하여 오랜 기간 동안 기술적으로 많은 시도와 측정들이 이루어 졌으며 현재에는 인공위성(CHAMP, GRACE, GOCE)을 이용하여 정밀한 지구 지오이드 모델을 측정하는 노력이 진행 중에 있다. 일반적으로 지구 지오이드면이 지구 기준 타원체(reference spheroid)와 비교하여 뉴기니 근처에서 77m 높으며, 인도양 근처에서는 105m 정도 낮다고 알려져 있다[2]. 지표면의 굴곡 형상(geophysical deflection)과 지구내부의 질량 분포 및 지구 내부 맨틀 운동 등이 지오이드 모델 형성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

지오이드 면의 굴곡이 중력 방향에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지구 지오이드 모델들 중 JGM-3 모델을 정밀 위성 궤도 시뮬레이션 프로그램에 이용하였다. 지구 지오이드 모델이 포함된 위성 정밀 궤도 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 지구 중심 방향과 지구 중력 방향을 동시에 추출하여 주어진 위치에서 지오이드 굴곡으로 인해 야기되는 지구 중심 방향과 지구 중력방향간 상호 관계를 분석하였다.

앞의 (1)은 (4)와 같이 간단히 표현 할 수 있으며 지구 중력 포텐셜의 구성을 지구 점 질량 항과 외란 요소인 zonal harmonic 항 및 tesseral/sectorial 항으로 구분하여 표현 한 것이다.

$$U(r, \theta, \phi) = -\frac{\mu}{r} + U_2(r, \theta) + U_1(r, \theta, \phi) \tag{4}$$

(4)에서 알 수 있듯이 지구 중력 벡터는 식 전체의 기울기(gradient)이며 지구 중심 벡터는 위 (4) 중에서 첫째 항인 지구 점 질량 항만의 기울기로써 구할 수 있게 된다. 이러한 근거로 위성 정밀 궤도 프로그램에 이용하여 고도 별로 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 과정에서 위에서 언급한 지구 점 질량에 의한 지구 중심 벡터와 외란 항을 모두 포함하는 지구 중력 벡터를 동시에 추출하였다. 지구 표면 전체를 효과적으로 커버하기 위하여 지구 자전을 고려하여 시뮬레이션 궤도를 90도 경사각을 가지는 원 궤도로 선택하여 데이터가 전체 지구 표면을 따라 고루 추출될 수 있도록 하였다. 결과 데이터 분석의 편의를 위하여 right ascension of the ascending node(Ω)는 0도로 설정하여 궤도면이 ECI 좌표계의 XZ 면이 되도록 설정하였다. 또한 본 논문에서 사용된 위성 궤도 프로그램의 정확도는 NASA POE(Precision Orbit Ephemeris)

와 비교하여 위치 오차는 약 16~7m, 속도 오차는 0.0157~0.0074m/s (RMS) 정도 이다[5].

**III. 시뮬레이션 데이터 분석**

**1. 중력 오차의 크기(magnitude of gravity deflection)**

지구중심 방향과 중력방향의 관계를 도출하기 위하여 10, 100, 200, 500, 1000Km 고도 조건에서 각각 24시간 시뮬레이션을 수행하였다. 추출된 지구 중심과 중력 벡터간의 오차 각을 구하기 위해 추출된 두 벡터에 벡터 내적을 취하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림에서와 같이 두 벡터간의 오차 각은 사인 함수 형태이며 위도 45도 지점에서 최대가 됨을 알 수 있으며 또한 고도가 높아 질수록 오차 각은 감소함을 알 수 있다.

벡터 내적의 성질상 음의 값이 존재하지 않으며 고도 10Km 인 경우 위도 45도 지점에서 약 0.094도 정도의 오차 각을 나타내고 있으며 고도 1000Km 인 경우에는 위도 45도 지점에서 약 0.07도 정도의 오차가 있음을 알 수 있다. 각각의 고도 별 결과 데이터를 확대해 보면 비슷한 위도 지점에서 어느 정도 변화 폭을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 동

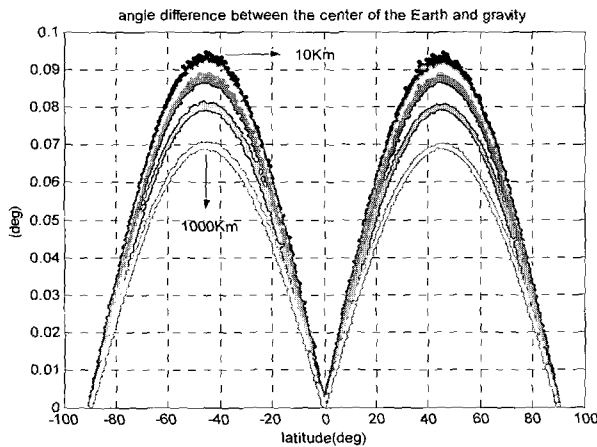


그림 2. 지구 중심과 중력 방향 오차의 크기.  
Fig. 2. Magnitude of gravity deflection.

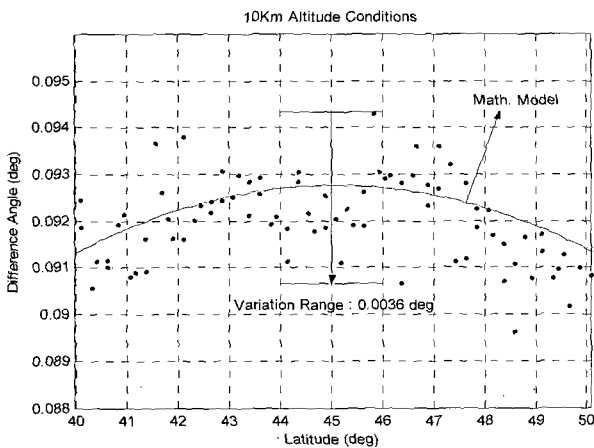


그림 3. 위도 45도 지점에서 지오이드 변화에 의한 중력 방향 오차(10Km).  
Fig. 3. The geoid variation effect on gravity at 45° latitude(10Km).

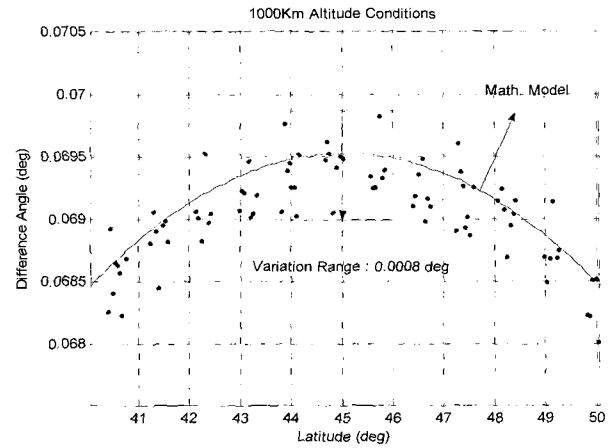


그림 4. 위도 45도 지점에서 지오이드 변화에 의한 중력 방향 오차(100Km).  
Fig. 4. The geoid variation effect on gravity at 45° latitude (1000Km).

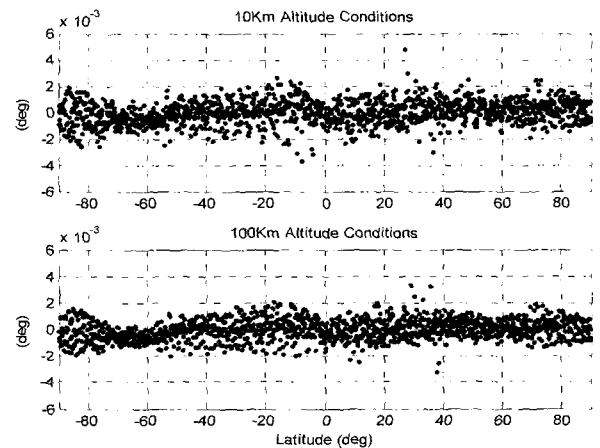


그림 5. 수학적 중력 모델과 지오이드 효과를 고려한 중력 방향간의 오차(저 고도).  
Fig. 5. Deviation between mathematical model and simulation results(low altitude).

일 위도 지점이라도 경도가 달라 짐에 따른 지오이드 굴곡 영향에 의해서 나타나는 지구중심 벡터와 지구 중력 벡터의 오차 각 범위를 의미하며 변화 폭은 고도가 낮을수록 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 3 및 그림 4는 각각 10Km와 1000Km 고도 조건에서 지구 중심과 지구 중력 벡터 간의 오차를 각도(deg)로 나타낸 그림으로 위도 45도 지점을 중심으로 확대한 것이다. 그림에서 위도 45도를 중심으로 +/-1도 위도 범위 내에서 오차 각의 변화폭은 10Km, 1000Km 고도에서는 각각 약 0.0036도, 0.0008도 정도임을 나타낸다.

앞에서 언급한 지구중력 포텐셜을 근거로 도출된 지구중력 벡터의 수학적 모델과 시뮬레이션 데이터와의 비교를 위하여 그림에 지구 중력의 수학 모델 값도 함께 나타내었다. 수학 모델의 경우 음의 값이 존재하지만 시뮬레이션 데이터의 경우 벡터 내적을 적용하여 음의 값이 존재하지 않으므로 편의상 북반구에서의 수학적 모델 값은 절대치를 그렸다.

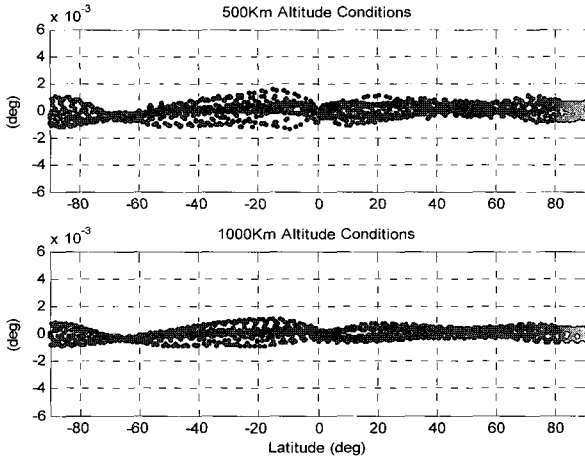


그림 6. 수학적 중력 모델과 지오이드 효과를 고려한 중력방향간의 오차(고 고도).

Fig. 6. Deviation between mathematical model and simulation results(high altitude).

표 1. 고도 별 중력 벡터 오차 요약표(arc-second).  
Table 1. Summary of deflection angle(arc-second).

	10Km	100Km	200Km	500Km	1000Km
Max value	338.4	331.2	320.4	291.6	252
Range of Variation (at 45° lat)	12.9	7.2	5.04	3.6	2.88
Range of Variation (at Equator)	13.6	11.52	10.8	10.08	8.6
Range of Variation (at Poles)	12.2	14.4	11.5	14.7	10.0
Errors from math. Model	18	13.6	7.56	6.48	3.6

그림 5와 그림 6은 지구 중력 벡터의 수학적 모델과 시뮬레이션을 통하여 구한 데이터 간의 오차를 각각의 고도 별로 나타낸 것이다. 지구 중력 벡터의 수학적 모델은 앞서 언급한 대로 zonal harmonic 2차 항( $J_2$ )까지만 고려한 것으로 실제 지구 표면의 굴곡 형상 영향을 자세히 반영하지 않은 것이며 시뮬레이션 결과는 지구표면의 굴곡형상에 의한 영향까지도 포함된 데이터이므로 두 값의 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 10Km, 100Km, 200Km, 500Km, 그리고 1000Km 각각의 경우에 +/-0.005, +/-0.0038, +/- 0.0021, +/-0.0018, 그리고 +/-0.001도 정도의 오차 범위를 가지고 있음을 알 수 있으며 고도가 높아질수록 오차는 감소함을 알 수 있다. 표 1은 고도 별로 지구 중력 벡터와 지구중심 벡터간의 최대 오차 각 및 변화폭을 요약한 것이다.

2. 중력 오차의 방향(the phase of gravity deflection)

앞서 분석된 오차 각은 벡터 내적의 결과이므로 절대값이며 오차의 크기만 제공할 뿐 오차의 방향을 알 수 없으므로 주어진 위치에서 지구 중심과 중력이 어느 방향으로 오차가

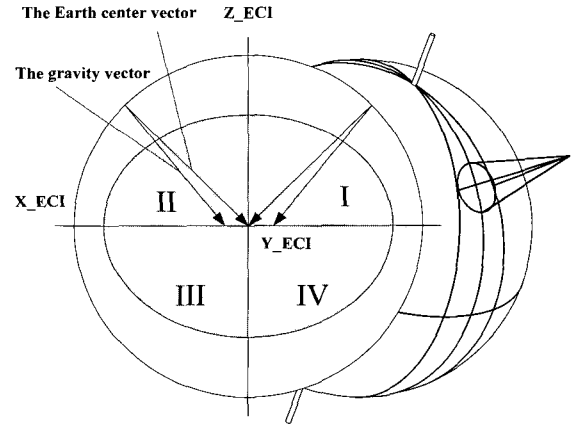


그림 7. 궤적에 따른 지구 중력과 지구 중심 벡터의 배열.  
Fig. 7. Vector alignment and relative orientation.

발생하는지 분석이 필요하다. (3)의 지구 중력 수학 모델 식은 위도( $\theta$ )와 고도( $r$ )의 함수이며 경도( $\phi$ )에는 영향을 받지 않는다. 이는 수학 모델을 구성할 때 지구 타원체가 축 대칭으로 가정하고 적도가 불룩한 효과( $J_2$ )만 고려하였기 때문이다. 따라서 (3)의 수학 모델은 지구 중력 벡터와 지구 중심 벡터의 오차는 위도 방향(남북 방향)으로만 발생하게 된다. 만약 추출한 지구 중심 벡터와 지구 중력 벡터가 궤도면에 존재한다면 즉 두 벡터의 오차 방향이 남북방향으로만 존재한다면 두 벡터의 외적을 취한 결과는 ECI +Y 혹은 -Y축과 일치하게 될 것이다. 또한 벡터 외적의 성질상 연산의 순서에 따라서 결과 벡터의 방향이 달라지므로 벡터 외적의 결과로 구해지는 벡터의 방향은 ECI +Y 축 혹은 -Y축 방향이 된다. 그림 7은 궤도 시뮬레이션 과정에서 지구 중심 벡터와 지구 중력 벡터 간의 상대적인 배치를 표현한 그림이다. 궤도면을 따라서 일주하는 동안 1사분면(I)과 2사분면(II)에서는 지구 중심 및 중력 벡터의 배치가 반대로 바뀌므로 두 사분면에서 구한 벡터 외적의 결과 벡터는 서로 180도 위상 차를 가지게 되며 3사분면(III)과 4사분면(IV)에서도 동일하게 반대가 된다.

따라서 벡터 외적의 결과 벡터와 ECI +/-Y축 벡터와의 차이가 바로 중력벡터의 방향을 알 수 있는 척도가 되며 이를 위해 벡터 외적으로 생성된 결과 벡터와 ECI +Y축 벡터간에 벡터 내적을 다시 한번 수행하였다.

그림 8은 10Km 고도 조건에서 앞서 언급한대로 지구 중심 벡터와 지구 중력 벡터간에 벡터 외적을 취하고 그 결과 벡터와 ECI +Y축과의 벡터 내적을 취한 결과이다. 궤도 사분면의 위치에 따라서 지구 중심 벡터와 중력 벡터간의 상대 위치가 달라지므로 두 벡터의 외적을 취한 결과 벡터가 서로 180도 위상 차를 가지기 때문에 그림에 나타난 것처럼 대부분 값이 0과 180도에 분포하고 있다. 또한 적도와 극 지점 근처에서는 지구 중력 벡터와 지구 중심 벡터 사이의 오차 각 방향이 매우 랜덤 함을 알 수 있다.

분석의 편의를 위해 데이터를 +90도~-90도 사이의 값으로 변환하고 북반구를 중심으로 확대하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 극과 적도를 제외하고 대부분의 위치에서 지구 중력 벡터의 방향은 위도 방향오차뿐만 아니라 경도 방향오차도 약 +/-2도 정도 존재함을 알 수 있다.

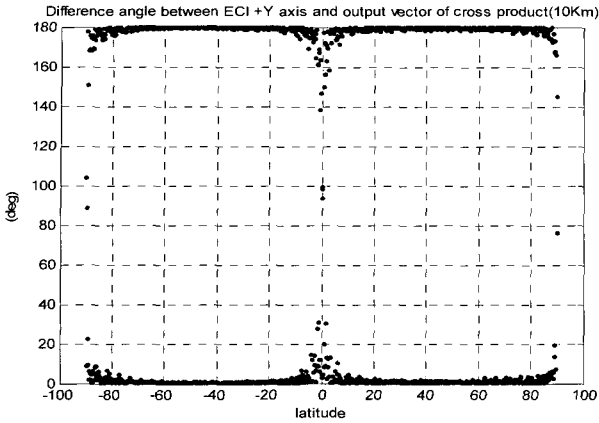


그림 8. 벡터 외적의 결과 벡터와 ECI +Y축 벡터 간의 오차 각(10Km).

Fig. 8. Difference angle between the ECI +Y axis and the output vector of the cross product(10Km).

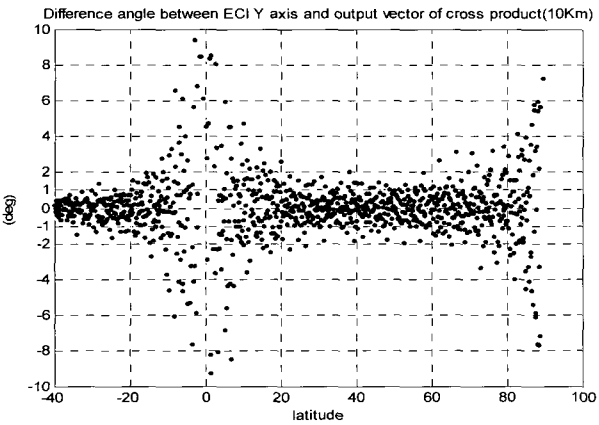


그림 9. 벡터 외적 결과 벡터와 ECI +Y축 벡터 간의 오차 각 (10Km)(확대).

Fig. 9. Magnification of gravity phase deflection at 10Km.

IV. 적용(applications)

지금까지 지구 지오이드 면의 굴곡으로 인한 지구 중심과 중력 벡터간의 오차에 대한 분석을 수행하였다. 분석된 지오이드 굴곡에 의한 중력 방향의 분석 내용을 천측항법 시스템의 위치결정에 미치는 영향과 INS 순수 항법 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 천측항법 시스템의 성능 분석

GPS가 없거나 혹은 사용할 수 없는 경우, 대안으로 주로 많이 고려되는 천측항법 시스템에서, 특히 두 개 이상의 별 센서를 사용하여 항체의 위치를 결정하고 보정하는 항법시스템에서, 수직방향 결정이 항법 시스템의 성능에 매우 중요한 요소로 작용하고 있다. 천측항법시스템의 위치 결정은 항체에 장착된 두 개 이상의 별 센서에서 측정된 별의 고도각 정보들을 이용하여 지표면에 타원 형태의 LOP(Line of Position)를 형성할 수 있으며 생성된 두 개 이상의 타원이 교차하는 한 점이 항체의 현재 위치가 되는 원리이다. 이 때 별의 고도각 결정을 위해서는 항체의 수직 방향을 알고 있어야 하며, 수직방향 결정 오차는 별의 고도각 측정 오차에 직

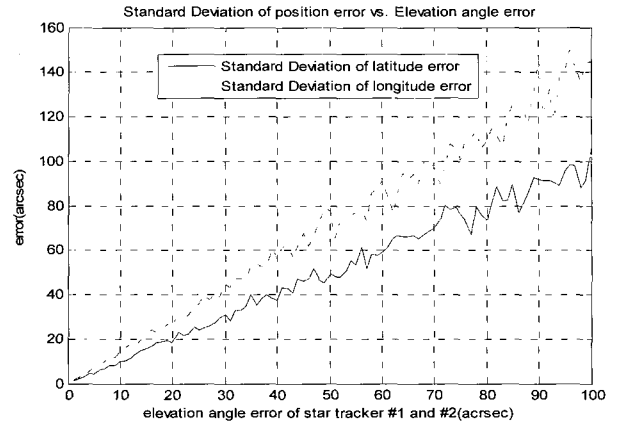


그림 10. 고도각 오차에 따른 위치 결정 오차.

Fig. 10. Position error vs. Elevation error.

접적으로 영향을 준다.

이러한 고도각 측정오차에 따른 위치 오차 관계식을 아래 (5)에 나타내었다. (5)에서  $\Phi$ 는 위도,  $\lambda$ 는 경도,  $Az_{1,2}$ 는 각각의 별 센서의 bore sight 벡터에 대한 azimuth angle,  $E_{1,2}$ 는 각각의 별 센서의 bore sight 벡터에 대한 elevation angle을 나타낸다. (5)에서 고도각 오차에 대한 위도, 경도 오차를 분석하기 위해서 두 개의 별 센서 bore sight 벡터가 동일 평면에 존재하면 분모가 영이 되어 해를 구할 수 없게 되므로  $(Az_2 - Az_1)$ 를 90도로 가정하고 위도 45도를 가정하여 오차 분석을 수행하였다.

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta E_{l_2} \sin(Az_1) - \Delta E_{l_1} \sin(Az_2)}{\sin(Az_2 - Az_1)} \tag{5}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta E_{l_1} \cos(Az_2) - \Delta E_{l_2} \cos(Az_1)}{\cos(\Phi) \sin(Az_2 - Az_1)}$$

그림 10은 고도각( $E_{1,2}$ ) 오차의 표준편차(standard deviation)를 1arcsec에서 100arcsec까지 변화시켰을 때 고도각 오차에 따라 발생하는 위도, 경도 오차의 표준편차를 나타낸다. 그림에서처럼 고도각 오차는 직접적으로 위도 오차에 전달되며 (5)에서 알 수 있듯이 경도 오차는 위도의 영향을 받음을 알 수 있다.

정밀 중력 방향을 이용하여 천측항법 시스템의 수직방향 추정에 적용할 경우 기준 지구 타원체의 수학적 모델과 비교하여 10Km 고도 조건에서 최대 18arcsec 정도의 오차가 발생하는 것을 앞 절에서 분석하였다. 이는 천측항법 시스템의 위치 결정에서 위도 18arcsec, 경도 25arcsec 정도의 오차로 반영되며 CEP(Circular Error Probability)로 나타낼 경우 지표상 거리오차는 약 800m 정도에 해당한다. 따라서 중력방향을 이용하여 항체의 수직방향을 추정할 경우 지오이드 굴곡으로 인한 영향으로 10Km 고도 조건에서 위치 결정 오차는 약 800m 정도가 발생함을 알 수 있다.

만약 항체의 비행 시나리오(trajjectory)가 미리 주어진다면 이를 이용하여 항체 위치에 따른 정밀 중력 방향 추정이 가능하며 또한 이를 토대로 보다 정밀한 수직방향 및 위치 결정 정확도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

2. 순수항법 시스템 성능 분석

일반적으로 항법 시스템 성능 분석을 위해 지상 시뮬레이션 알고리즘을 구현하는 경우 중력 방향을 NED 좌표계의 D(down) 방향으로 가정하며 중력의 평균값을 사용하는 모델을 주로 사용한다. NED 좌표계 정의에 따라 down 방향은 지구 타원체(reference ellipsoid)의 접선에 수직한 방향이며 이는 geodetic 혹은 geographic vertical로 볼 수 있다. 위도에 따른 geocentric vertical과 geodetic vertical 간의 오차 각은 (5)에서 나타낸 geocentric latitude와 geodetic latitude 간의 상호 관계식을 통하여 알 수 있으며 45도 위도 지점에서 약 0.2도 오차가 존재함을 알 수 있다. 앞서 구좌표계에서 표현된 수학적 중력 모델을 NED 좌표계로 변환하기 위해 (6)에서 나타낸 위도에 따른 geocentric과 geographic latitude의 차이 각 정보를 이용하여 좌표변환 하였다. (6)에서  $\theta$ 는 geocentric latitude,  $\theta_g$ 는 geographic latitude,  $c$ 는 지구 극 반경,  $a$ 는 지구 적도 반경,  $f$ 는 지구의 편평도를 나타낸다.

$$\tan \theta = \frac{c^2}{a^2} \tan \theta_g = (1 - f)^2 \tan \theta_g \quad (6)$$

시뮬레이션에서 가정한 항체 경로는 고도 10Km, 위도 36도, 동경 127도 지점에서 정북에서 동쪽으로 30도 방향으로 170m/s 등속도로 움직이는 항체를 가정하여 5시간 동안 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 자이로와 가속도계의 오차 계수들을 나타낸다.

그림 11은 평균중력 모델을 사용하였을 경우 항체의 위도 및 경도 방향의 위치오차를 나타내며 그림 12는 지구 중력의 수학적 모델을 적용하였을 때 위치오차를 나타낸다.

또한 앞서 분석한 지오이드 굴곡으로 인한 정밀 중력 방향을 시뮬레이션에 적용하여 항체의 위치 오차에 미치는 영향 분석을 수행하였다. 그림 13과 그림 14는 10Km 고도에서 위도 별 그리고 경도 별 지구 중력의 수학적 모델과 정밀 중력 벡터의 오차를 나타낸 것이다. 항체의 경로에 해당되는 위도 및 경도 지역을 표시하였으며 그림에서 알 수 있듯이 해당 위도 범위에서는 약 -0.003 ~ 0.005도 오차를, 항체의 경도 범위에 대해서는 약 -0.004 ~ 0.002도 오차를 가지고 있다.

이러한 오차 값의 범위를 기준으로 NED 좌표계에서의 north, east 방향의 중력 성분을 분리하고 범위내의 값 중 가장 worst 값(north: 0.005도, east: 2도)을 입력하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과와 수학 모델간의 차이를 그림 15에 나타내었다. 그림은 지오이드 변화를 고려하여 정밀한 중력 모델을 적용한 경우와 수학적 중력 모델을 사용하였을 경우와의

표 2. INS 모델 정확도.  
Table 2. INS model accuracy.

Error factors	Value
Gyro random walk	0.003 deg/hr <sup>1/2</sup>
Gyro bias	0.004 deg/hr
Gyro misalignment	1 arcsec
Accelerometer bias	50 ug
Accelerometer random walk	10 ug/hr <sup>1/2</sup>
Accelerometer misalignment	1 arcsec

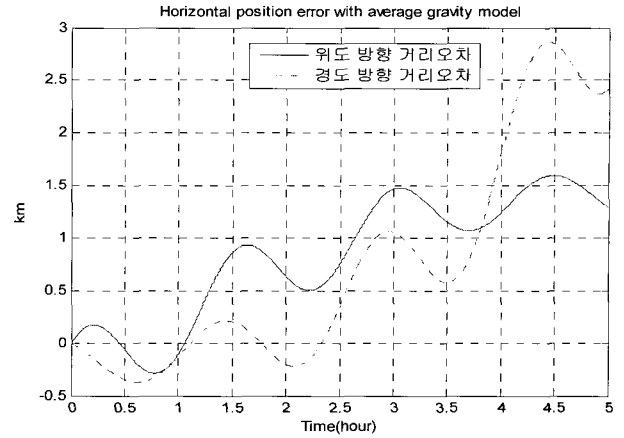


그림 11. 평균중력 모델을 사용한 경우 위치오차.  
Fig. 11. Position error with average gravity model.

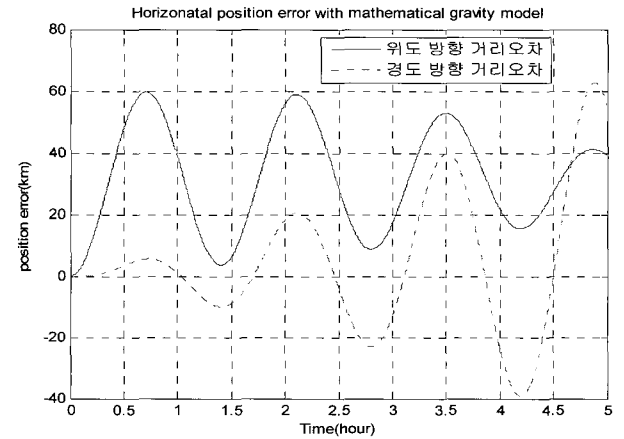


그림 12. 수학적 중력 모델을 사용한 경우 위치오차.  
Fig. 12. Position error with mathematical gravity model.

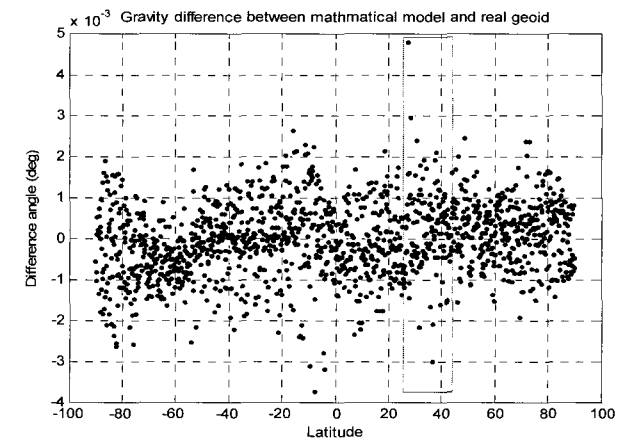


그림 13. 위도에 따른 수학적 중력 모델과 지오이드 변화에 의한 중력 벡터 간의 차이.  
Fig. 13. Difference angle between mathematical and precision gravity vector with latitude.

위치 오차 차이를 나타내며 약 1Km 미만 정도의 차이가 남을 알 수 있다.

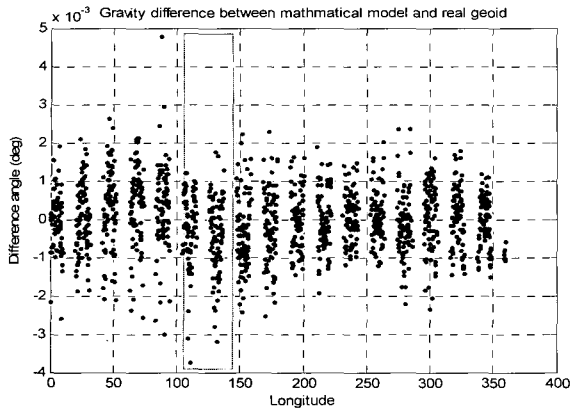


그림 14. 경도에 따른 수학적 중력 모델과 지오이드 변화에 의한 중력 벡터 간의 차이.

Fig. 14. Difference angle between mathematical and precision gravity vector with longitude.

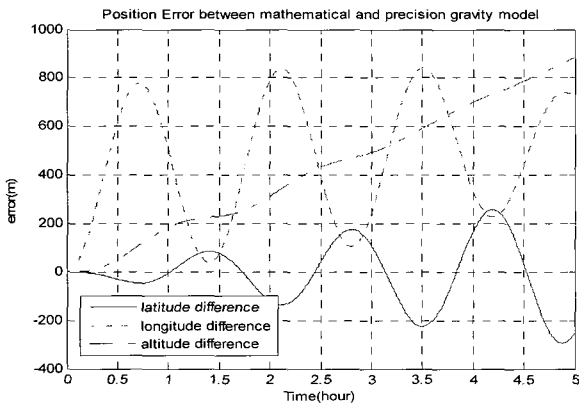
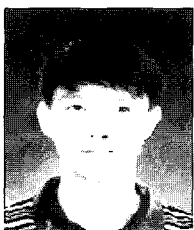


그림 15. 지오이드 변화에 의한 중력 모델과 수학적 중력 모델간의 위치 오차 차이.

Fig. 15. Position error between mathematical and worst case of precision gravity model.

**V. 결론**

항법시스템에서 수직 방향(local vertical)의 결정은 시스템 성능에 매우 중요한 요소이며 특히 GPS를 사용하지 않고 별 센서의 정보를 이용하여 항체의 위치를 결정하는 천측 항법 시스템의 경우 매우 정밀한 수직방향 결정이 요구된다. 최근 수평 센서의 경우 그 정확도가 arc second 수준으로 중력 방향 측정이 가능한 것으로 알려져 있으며 이를 이용하여 중력



**석병석**

1992년 경북대 전자공학과(공학사).  
1994년 경북대 전자공학과(공학석사).  
1994년 3월~현재 한국항공우주연구원  
선임연구원. 2002년 8월~현재 충남 대학  
교 전자공학 제어전공 박사과정. 관심  
분야는 인공위성제어, 센서신호처리, 항  
법시스템 등.

법시스템 등.

방향 측정이 가능하다면, 적절한 보상을 통하여 지구 중심 방향 혹은 항법좌표계(NED)의 down 방향 결정이 가능하게 된다. 이러한 목적으로 본 논문에서는 지구 지오이드 면의 굴곡 형상이 지구 중력 벡터에 미치는 영향을 분석하였다. 지구 지오이드 모델이 포함된 위성 궤도 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 지구 중력 벡터와 지구 중심 벡터를 동시에 추출하고 추출된 지구 중력 및 중심 벡터에 벡터 내적 및 외적의 성질을 적용하여 두 벡터간의 오차 각과 오차 각의 방향에 대하여 분석하였으며 이상적인 기준 지구타원체(reference ellipsoid)의 수학적 중력 모델과 비교 분석하였다. 분석 결과를 적용하여 천측항법 시스템의 위치 결정 성능을 분석하였으며, 중력 벡터가 일반 항법시스템의 성능에 매우 중요하게 작용함을 보이기 위해 평균 중력 모델과 수학적 중력 모델, 그리고 현실에 가장 가까운 정밀 중력 모델을 SDINS 순수 항법에 적용하여 서로 다른 중력 모델에 따른 항체의 거리 오차에 대해 분석하였다.

**참고문헌**

- [1] F. Pappalardi, S. J. Dunham, M. E. LeBlang, T. E. Jones, J. Bangert, and G. Kaplan, "Alternative to GPS," *Ocean Conference*, vol. 3, pp. 1452-1459, 2001.
- [2] J. R.(ed.). Wertz, *Spacecraft Attitude Determination and Control*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1978.
- [3] W. J. Larson and J. R.(ed.). Wertz, *Space Mission Analysis and Design*, Published jointly by Microcosm Inc. and Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1995.
- [4] V. A. Chobotv.(ed), *Orbital Mechanics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Washington, DC. 1996.
- [5] J. C. Yoon, B. S. Lee, and K. H. Choi, "Spacecraft orbit determination using GPS navigation solutions," *Aerospace Science and Technology*, 4 (2000) 215-221.
- [6] V. Milanovi, E. Bowen, N. Tea, J. Suehle, B. Payne, M. Zaghoul, and M. Gaitan, "Convection-based Accelerometer and Tilt sensor implemented in standard CMOS, International Mechanical Engineering Conference and Exposition," *MEMS Symposia*, Anaheim, CA, Nov. 18th, 1998.
- [7] F. Zhang, "The Accelerometer and Tilt sensor based on natural convection gas pendulum, International Conference on Information Acquisition," *IEEE*, 2004.
- [8] M. Berutto, M. Ortolano, F. Periale, and A. D. Marchi, "Realization and metrological characterization of compact high-resolution pendulum tiltmeter," *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no 1, Feb. 2005.



**유준**

1978년 서울대 전자공학과(공학사). 1980년, 1984년 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사, 공학박사). 1984년 9월~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수. 1982년 2월~1990년 2월 미시건 주립대학교 객원 교수. 1983년 12월~1994년 2월 독일 후라운호퍼 생산공학 및 자동화(IPA) 연구소 방문연구원. 1997년 2월~1998년 2월 캘리포니아 주립대학교(데이비스) 객원교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서신호처리, IT 기반 로봇, 항법시스템 등.

년 2월 독일 후라운호퍼 생산공학 및 자동화(IPA) 연구소 방문연구원. 1997년 2월~1998년 2월 캘리포니아 주립대학교(데이비스) 객원교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서신호처리, IT 기반 로봇, 항법시스템 등.