



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

타원체고 기반 수로측량을 위한  
GPS-PPP 측위의 타원체고 정확도 분석

2017년 12월

창 원 대 학 교 대 학 원

친환경해양플랜트FEED공학과정

함                      건                      우

공학석사학위논문

타원체고 기반 수로측량을 위한  
GPS-PPP 측위의 타원체고 정확도 분석

지도교수 이 홍 규

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2017년 12월

창 원 대 학 교 대 학 원

친환경해양플랜트FEED공학과정

함 건 우

함건우의 석사학위논문을 인준함

심 사 위 원 어 석 홍 ㉠

심 사 위 원 류 시 완 ㉠

심 사 위 원 이 홍 규 ㉠

2017년 12월

창원대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1. 연구배경 및 목적 .....	1
1.2. 연구동향 .....	3
1.3. 연구의 내용 .....	5
<b>II. 타원체고 기반 수로측량에서 수직위치 결정 .....</b>	<b>6</b>
2.1 수로측량 기준 .....	6
2.2 수심측량 .....	9
2.2.1 관측 .....	9
2.2.2 관측수심 보정 및 환산 .....	10
2.3 타원체 기반 수심측량 .....	12
2.3.1 타원체고 .....	12
2.3.2 해저지형의 타원체고 결정 및 기준면 변환 .....	14
<b>III. GPS-PPP 측위 .....</b>	<b>16</b>
3.1 개요 .....	16
3.2 위성신호 .....	17
3.3 관측오차 .....	20

3.3.1 위성오차 .....	20
3.3.2 수신기오차 .....	21
3.3.3 신호전파오차 .....	21
3.4 관측데이터 .....	23
3.4.1 의사거리 .....	23
3.4.2 반송파 .....	25
3.4.3 선형결합 .....	26
3.5 GPS-PPP 측위 .....	27
3.5.1 개요 .....	27
3.5.2 IGS 해석결과물 .....	27
3.5.3 GPS-PPP 측위 .....	29
<b>IV. 실험 및 분석 .....</b>	<b>32</b>
4.1 개요 .....	32
4.2 RTKLib 소프트웨어 .....	33
4.3 GPS-PPP 타원체고 정밀 추정 방법도출 .....	35
4.3.1 데이터 및 방법 .....	35
4.3.2 위성의 궤도 및 시계오차 .....	36
(1) 분석방법 .....	36
(2) 결과 및 고찰 .....	37
4.3.3 전리층효과 .....	39
(1) 분석방법 .....	39
(2) 결과 및 고찰 .....	39

4.3.3 대류권지연 .....	41
(1) 분석방법 .....	41
(2) 결과 및 고찰 .....	41
4.3.3 위성 절사각 .....	42
(1) 분석방법 .....	42
(2) 결과 및 고찰 .....	43
4.4 정지측위 데이터를 이용한 타원체고 추정정확도 분석 .....	45
4.4.1 관측데이터 및 방법 .....	45
4.4.2 결과 및 고찰 .....	46
4.5 회전테이블 관측실험 .....	50
4.5.1 관측데이터 및 방법 .....	50
4.5.2 결과 및 고찰 .....	52
4.6 측량선 관측실험 .....	54
4.6.1 관측데이터 및 방법 .....	54
4.6.2 기준좌표 결정 .....	57
4.6.3 결과 및 고찰 .....	58
<b>V. 결론 .....</b>	<b>61</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>63</b>
<b>감사의글 .....</b>	<b>65</b>

# LIST OF TABLE

Table. 2.1 Standards for Hydrographic Surveys .....	8
Table. 3.1 Signal components of GPS Satellite .....	18
Table. 3.2 Error sources of GPS measurements .....	20
Table. 3.3 IGS precise ephemeris and clock models .....	29
Table. 3.4 Advantages and disadvantages of the GPS-PPP technique ....	31
Table. 4.1 Modules of RTKLib's software package .....	33
Table. 4.2 Types of ephemeris and correction information file .....	34
Table. 4.3 Published ellipsoidal heights of the CORS .....	35
Table 4.4 Testing cases for derivation of a GPS-PPP processing scheme .....	37
Table 4.5 Statistical summary of RMSE against CASEs depending on IGS products .....	39
Table 4.6 Statistical summary of RMSE against CASEs depending on ionospheric corrections .....	40
Table 4.7 Statistical summary of RMSE against CASEs depending on the troposphere corrections .....	42
Table 4.8 RMSE of estimated ellipsoidal heights against station and cut-off angles .....	45
Table 4.9 Scheme of error corrections and options for GPS-PPP processing .....	45
Table 4.10 Cases of height estimation accuracy tests by static observations .....	46
Table. 4.11 RMSE of estimated ellipsoidal heights in the static tests ....	50
Table. 4.12 Estimated coordinate sets of reference stations .....	56



## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Distribution of hydrographic control points .....	7
Fig. 2.2 Principle of water depth measurement by echo-sounder .....	9
Fig. 2.3 Reduction of measured water depth by using pitch and roll .....	11
Fig. 2.4 Reference surfaces of the Earth .....	13
Fig. 2.5 Determination of ellipsoidal height at seabed .....	14
Fig. 2.6 Geometrical relationship of some surfaces used in hydrography .....	15
Fig. 3.1 Segments of GPS .....	16
Fig. 3.2 Phase modulation of PRN code .....	19
Fig. 3.3 Atmospheric refraction of GPS satellite signals .....	22
Fig. 3.4 IGS tracking network .....	28
Fig. 4.1 Distribution of the CORS used in the tests .....	35
Fig. 4.2 Procedure of GPS-PPP processing scheme .....	36
Fig. 4.3 RMSE of estimated ellipsoidal heights against cases depending on IGS products .....	38
Fig. 4.4 RMSE of estimated ellipsoidal heights against stations and ionospheric corrections CORSs .....	40
Fig. 4.5 RMSE of estimated ellipsoidal heights against stations and CASEs .....	42
Fig. 4.6 RMSE of estimated ellipsoidal heights depending on stations cut-off angles .....	44
Fig. 4.7 RMSE of estimated ellipsoidal heights depending on cut-off angles .....	44
Fig. 4.8 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in spring .....	47
Fig. 4.9 Differences between estimated and published ellipsoidal heights	

of the tests in summer .....	48
Fig. 4.10 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in autumn .....	48
Fig. 4.11 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in winter .....	49
Fig. 4.12 RMSE of the estimated ellipsoidal heights against seasons ...	49
Fig. 4.13 Error bar of RMSE depending on seasons .....	50
Fig. 4.14 View of the turning table test .....	51
Fig. 4.15 Ground track of GPS-PPK and PPP Solutions .....	52
Fig. 4.16 Time series of ellipsoidal heights estimated by GPS-PPK and PPP .....	53
Fig. 4.17 GNSS receivers installed on the roof of a surveying vessel ·	54
Fig. 4.18 GPS-PPP campaign by survey vessel .....	55
Fig. 4.19 Trajectory of survey vessel with location of reference stations .....	55
Fig. 4.20 Setup of reference station for reference generation .....	56
Fig. 4.21 Time series of the estimated ellipsoidal heights by GPS-PPK with respect to REFa .....	57
Fig. 4.22 Differences between trajectories generated by the two reference stations .....	58
Fig. 4.23 Time series of ellipsoidal heights obtained by GPS-PPK and PPP processing .....	59
Fig. 4.24 Comparison of the PPP-estimated ellipsoidal heights with those of the references .....	60
Fig. 4.25 RMSE of GPS-PPP estimated ellipsoidal heights with respect to the reference trajectories .....	60

# I. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 해양 분야에 대한 관심이 급속도로 증가함에 따라 개발 및 보전·이용 그리고 재해예방을 목적으로 수로측량, 해양관측, 항로조사 및 해양지형조사가 다양하게 이루어지고 있다. 수로조사는 해양의 지형과 지질 및 중력 등의 조사와 해안선과 이에 근접한 토지에 대한 측량을 말한다. 특히 해양도제작 및 해양지형조사를 위한 3차원 위치는 측량선에 설치된 음향측심기(echo-sounder)의 2차원 위치와 측심기로부터 해저면 사이 수심을 측량기준에 따라 관측한다.

우리나라에서 측량기준은 「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률(이하 법률)」 제6조(측량기준)에 규정되어 있으며, 수평은 세계측지계에 대한 경·위도 원점 그리고 높이는 1910년대의 인천만 평균해면에 대해 성과를 결정한 수준원점이다. 수로측량에서 수직기준은 법률 제6조 4항과 5항에 따라 일정 기간 조석관측을 통해 분석한 결과 가장 낮은 해수면에 해당하는 “약최저저조면”을 기본수준면(datum level)로 한다. 따라서 육상 지형측량에서 표고는 인천만 평균해면에 대한 것으로 나타내는 반면 수로측량에서 수심은 관측해수면을 기준으로 측정한 후 조위를 차감하여 결정하며 측량지역의 기본수준면에 대해 표현해야한다. 이와 같이 상이한 육·해상 높이기준으로 인해 해안선 및 연안지역에서 해일 등으로 인한 재난관리와 지형의 변화를 모니터링을 위한 통합 공간정보 구축에 어려움이 있다.

육·해상에서 상이한 높이기준 채택에 따른 문제는 고정밀 GPS(Global Positioning System) 측량기술을 활용한 타원체기반 높이측량 (ERS: Ellipsoidal

y Referenced Surveys) 도입을 통해 해결할 수 있다(FIG, 2014). ERS에서는 육·해상 측량에서 타원체를 기준으로 1차원 위치를 결정한 이후 지구 물리적 모형을 적용하여 각각의 위치표현 기준면으로 변환 혹은 상호 변환한다. 이를 기준면 변환이라 하며, 육상에서는 지오이드모형 그리고 해양에서는 지오이드, 해수면지형(TSS: Topography of Sea Surface) 및 조석모형이 필요하다.

현재 수로측량에서 해상 2차원 위치결정에는 인공위성의 전자파를 이용하는 GPS 측위기술을 사용하며, 특히 수 미터의 요구 정확도 확보를 위해 상대 측위기법 중의 하나인 DGPS(Differential GPS)를 적용한다. DGPS는 의사거리(pseudo-range)에 의해 3차원 위치를 추정하여 그 정확도는 수평과 수직성분에서 각각 약 1m와 2~3m 수준으로 수로측량 요구정확도(IHO, 2008)를 고려할 때 이 기법을 ERS 적용하는데 한계가 있다. 따라서 ERS 수로측량의 수심관측 기준면 결정을 위해서는 상대적 정밀도가 높은 GPS 반송파(carrier-phases)에 기반한 측위기법을 사용해야 한다(FIG, 2014). GPS 반송파 후처리 방식의 측위기법은 위치추정에서 관측오차를 보정하는 방식에 따라 PPK(Post Processed Kinematic)와 PPP(Precise Point Positioning)로 구분할 수 있다.

본 연구는 1대 GPS 수신기 사용으로 장비운용 효율성이 높은 GPS-PPP 방식에 의한 ERS 수로측량에서 관측데이터 처리 전략을 도출하고 확보 가능한 타원체고 추정 정확도를 실험을 통해 평가·고찰하는 것이 목적이다.

## 1.2 연구동향

ERS 기반 수로측량 관련 연구는 도입 검토단계로 관련 연구를 국외 사례를 중심으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

Hees (2003) 등은 GPS 동적측위를 통해 결정한 해저면의 타원체고를 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 해도제작 기준면인 평균해면을 변환하기 위한 4단계 절차를 도출하고 2001년 Delaware 만의 측량결과에 적용하여 그 적절성을 확인하였다.

Dodd 등(2009)는 GPS 부의(buoy)에 의해 결정한 타원체고를 기반으로 Chesapeake 만에 위치하는 조위관측소 사이 수직기준 변환에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 특히 GPS-PPK와 후처리 및 실시간 PPP 해석결과의 타원체고를 비교하였으며, 그 결과 후처리는 약 5cm 그리고 실시간은 약 20cm 수준으로 일치하는 결과를 나타내었다.

Dodd (2012)는 ERS 기반한 수로측량 결과물은 해저지형의 타원체고를 해도제작 기준면으로의 변환모형(separation model) 산정을 위한 표준 업무절차 도출과 관련한 FIG(International Federation Surveyors)의 제4분과의 활용내용을 소개하였다. 변환지역을 소·중대 규모로 분류하여 전자의 경우 단일모형을, 이에 반해 후자는 격자에 대해 보간(interpolation) 기법을 제시하였다.

Ligteringen 등(2014) 기존 DGNSS를 대신하여 반송파 관측자료 처리에 의해 추정된 타원체고 기반한 수로측량의 장점을 정확성과 선체의 동적거동 보정의 불필요성을 중심으로 분석하고, 협업에 적용을 위해서는 아테나와 음향측심기 기준점 사이 오프셋(offset) 측정의 중요성을 강조하였다. 타원체고 추정 정확도 측면에서 반송파가 의사거리를 이용한 DGNSS에 비해

월등함을 보였으며, ERS 기반 수로측량에 이 기술이 적용되어야 함을 강조하였다.

최근 FIG 제4분과에서는 ERS에 기반한 수로측량과 관련한 기술적 과제를 타원체고, 안테나-음향측심기 오프셋 및 수심관측으로 이루어진 수직위치 결정과 해저지형의 타원체고와 해도제작 기준면 사이의 변환으로 구분하여 그 연구 성과를 요약하고 다양한 지역에서 적용의 사례를 소개한 바가 있다(Dodd 등, 2014)

ERS 기반한 수로측량은 그 효율성과 정확성 그리고 육상기준과의 통합 측면에서 FIG를 중심을 도입을 위한 다양한 연구와 활동들이 이루어지고 있다. 현재 우리나라의 경우 담당기관인 국립해양조사원을 중심으로 ERS 도입을 위한 검토가 이루어지고 있으나, 학술적으로 연구한 사례를 찾기는 어려운 실정이다. 따라서 ERS의 가장 핵심기술 중의 하나인 GPS 타원체고 방법과 그 정확도 평가가 이루어질 필요가 있다.



### 1.3 연구내용

본 연구는 ERS 방식에 의한 수심관측의 기준면 결정에서 GPS-PPP 측위 기법의 적용하기 위한 GPS 관측데이터 처리방법 도출과 취득 가능한 타원체고 정확도 평가를 목적으로 이론연구 및 관측실험과 자료처리를 병행하여 수행하였으며, 그 주요내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

본 연구에서 GPS-PPP 측위에서 관측오차 보정방식과 알고리즘을 연구하여 관측데이터 처리방법 도출에 필요한 이론적 기초를 확립하였다. 특히 IGS(International GNSS Services)의 해석결과물 중 GPS-PPP 처리에 적용 가능한 위성 궤도력 및 시계오차 모형을 심층 조사하였다.

GPS-PPP 측위기법에서 보정해야하는 오차는 위성궤도 및 시계오차, 대기오차가 있으며, 이들은 IGS 해석결과물의 사용과 선형결합 관측데이터를 이용한 미지수추정 혹은 대류권지연은 경험적 모형을 적용해 축소할 수 있다. 따라서 관측자료 처리에 사용되는 IGS 해석결과물의 종류 및 오차처리 방법 등이 GPS-PPP 타원체고 추정 정확도에 미치는 영향을 실험을 통해 분석하여 ERS 수로측량에 적합한 관측자료 처리방안을 도출하였다.

GPS-PPP 방식에 의한 타원체고 추정 정확도를 평가하기 위해 국토지리정보원의 상시관측소(CORS: Continuously Operating Reference Station) 및 이동측량을 통해 취득한 GPS 관측데이터를 GPS-PPP 방식으로 처리하여 확보 가능한 타원체고 추정정확도를 RMSE(Root Mean Squares)를 통해 분석하였다. 이를 통해 GPS-PPP 방식의 ERS 수로측량에서 IHO(International Hydrographic Organization) 표준(S-44)을 기준으로 적용 가능한 측량등급을 고찰하였다.

## II. 타원체고 기반 수로측량에서 수직위치 결정

### 2.1 수로측량 기준

수로조사에서 수평위치는 관련 법령의 규정에 의거하여 세계측지계에 따라 경위도로 표시한다. 우리나라에서 채택한 세계측지는 ITRF2000(International Terrestrial Reference Frame)이며, 그 기준시점은 2002년 1월 1일이다. 이 측지계는 GRS80(Geodetic Reference System 1980)의 타원체를 기준면으로 하며 그 원점은 지구의 질량중심이다.

수로측량에서 수직위치에 해당하는 수심의 표시는 각 지역에 위치한 조위관측소에서 해당 해역의 조위관측을 통해 얻어진 기본수준면(datum level)을 기준으로 한다. 이러한 경우 각 해역마다 관측한 조위가 상이하게 정의되기 때문에 인천 평균해면을 기준으로 하는 수준원점과 연결 관측을 통해 설치한 수준점을 사용하는 육상의 높이기준과 상의한 것에 주목할 필요가 있다. 기본수준면 정의를 위해 국립해양조사원에서는 Fig. 2.1과 같이 기본수준점을 설치하여, 중·장기 조위관측을 통해 성과를 고시하고 있다. 또한 조위관측결과의 조화분해를 통해 지역의 평균해수면(M.S.L)과 주요 4개 분조의 결정하게 된다. 평균해수면은 어떤 기간에 해면의 평균높이를 나타내며 실용적으로 1년 동안 매 시별 조위의 평균치로 나타낸다. 이렇게 결정된 평균해면을 기준으로 하여 4대 분조의 반조차의 합만큼 올라가게 되면 약최고고조위(Approx,H,H,W,L)가 되며 4대 분조의 반조차의 합만큼 차감하면 약최저저조위(Approx,L,L,W,L)가 되며 수심의 기준면인 기본수준면이 된다.





Fig. 2.1 Distribution of hydrographic control points

우리나라의 수륙측량에서 수심관측은 IHO 표준을 준용하여 Table 2.1과 같이 3개 등급으로 구하고 있다(IHO, 2008). 특등급(special order)은 가장 정확한 측량이 요구되는 선저통과 수심이 중요한 묘박지, 항만, 항행수로 등에 적용하며, 완전한 해저면 탐사가 필요하고 탐사에 의해 발견한 물체는 섬세하게 묘사해야 때문에 요구정확도는  $1\sigma$ 에 대해 수심 1~40m를 고려할 때 0.13~0.18m이다. 이에 반해 1a등급(order 1a)은 수심이 얕은 해역의 해저에 자연적 또는 인공적인 물체가 있는 곳을 대상으로 하며 해역을 통과하는 선박항행 형태의 고려가 필요한 경우 그리고 1b등급(order 1b)은 100m보다 얕은 해역을 대상으로 완전한 해저면 탐사가 필요하지 않는 경우에 대한 측량으로 목표정확도는 수심 1~100m에 대해 0.26~0.71m 수준이다. 2등급(order 2)은 가장 엄격하지 않은 측량등급으로 100m보다 깊은 지역에서 이루어지며 요구정확도는 수심 100~200m에서 1.28~2.4m 이다.

Table. 2.1 Standards for Hydrographic Surveys

Order	Special	1a	1b	2
Description of Area	Area where under-keel clearance is critical.	Areas shallower than 100m where under-keel clearance is less critical but features of concern to surface shipping may exit.	Areas shallower than 100m where under-keel clearance is not considered to be an issue for type of surface shipping may exit.	Areas generally deeper than 100m where a general description of sea floor is considered adequate.
Total Horizontal Uncertainty (95%)	2m	5m + 5% of depth	5m + 5% of depth	20m + 10% of depth
Total Vertical Uncertainty (95%)	a=0.25m b=0.0075m	a=0.5m b=0.013m	a=0.5m b=0.013m	a=1.0m b=0.023m
Range of TVU (95%)	0.25~0.35 m (depth: 1~40m)	0.5~1.39m (depth: 1~100m)	0.5~1.39m (depth: 1~100m)	2.51~4.71m (depth: 100~200m)
Range of TVU (1 $\sigma$ , 68%)	0.13~0.18 m (depth: 1~40m)	0.26~0.71m (depth: 1~100m)	0.26~0.71m (depth: 1~100m)	1.28~2.40m (depth: 100~200m)

## 2.2 수심측량

### 2.2.1 관측

해양에서 수심관측은 일반적으로 음향측심기를 활용하여 Fig. 2.2에 도시한 바와 같이 수심측량이 요구되는 해저에서 음파를 발사하여 반사되어 돌아오는 시간을 측정한 후 음속을 스케일링(scaling)하여 결정한다. 그림에서  $D$ 는 음향측심기로부터 해양지형까지의 거리이고,  $v$ 는 음파의 수중 평균속도이며,  $t$ 는 음파의 도달시간을 의미한다(이석배, 2013).

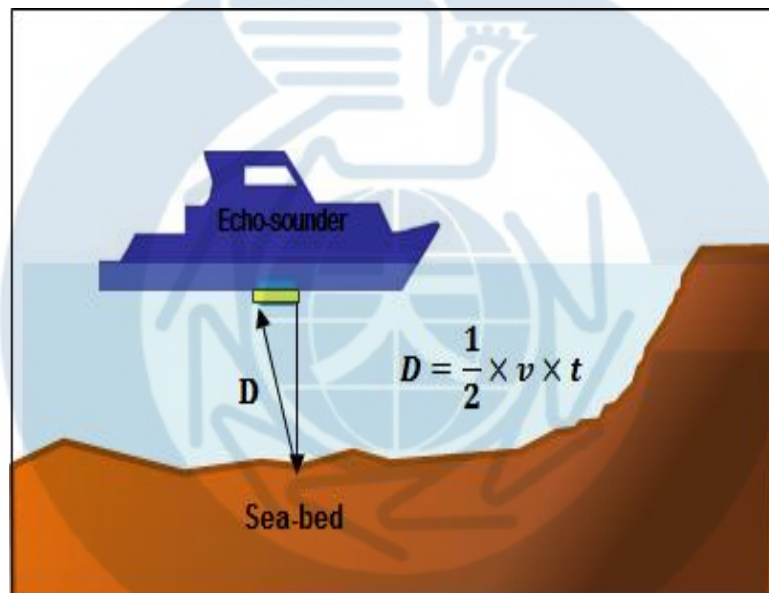


Fig. 2.2 Principle of water depth measurement by echo-sounder

수심관측 방법은 선의측량과 면의측량으로 구분할 수 있다. 전자는 단일 빔을 활용하여 일정한 간격의 선을 따라 항해하면서 음향측심기에 의하여 연속적으로 수심을 기록하는 방법이고, 후자는 다중빔을 사용하여 해저면을 미측심폭 없이 측량하여 해저지형 및 해저장애물을 탐사하는 방법이다(국립해양조사원, 2017).

### 2.2.2 관측수심 보정 및 환산

음향측심기에 의해 관측한 수심은 오차를 포함하고 있을 뿐만 아니라 그 기준은 관측당시 해수면이다. 따라서 오차를 보정한 후 기본수준면에 대한 중력방향 수심으로 환산되어야 한다. 수심 관측오차는 대부분 수중을 전파하는 음파의 전파속도 차이에 의해 발생한다. 이와 함께 측량선 자세(attitude)의 영향에 의해 관측수심은 경사거리가 되며, 측량선의 동적거동에 따라 조위기준면과 관측기준면에 차이가 발생하여 환산이 필요하다.

음향측심기는 음파의 왕·복 전파시간을 측정하여 음속을 스케일(scaling)하여 거리를 측정한다. 이 때 해수의 수온 및 염분에 따른 밀도차이에 의해 음속이 실제보다 빠르면 수심이 낮게 느릴 경우 수심이 깊게 취득되어 음속차이에 의한 오차를 보정할 필요가 있다. 수로측량 업무규정에 따르면 표척검사(bar-check)에 의해 취득된 음속을 사용하지만 측량해역의 상태에 따라 음속측정기에 의해 취득한 음속보정 값을 적용한다. 전자의 방법은 수심 30~50m 미만의 항만 및 해양측량에서 적합한 방법이다. 측량에 필요한 장비는 반사판과 그것을 매달아 내리는 와이어 구성되어 간단하며, 반사판을 수면으로부터 예정수심까지 상하로 왕복하여 바(bar)의 반향(echo)을 기록하여 음속도, 기차, 흘수량 및 조고에 대한 보정을 한다(서정훈 등, 2002). 후자의 방법은 속도계 및 해수의 염분, 온도를 측정하여 계산에 의해 직접 음속도를 구하는 것이다.

측량선은 운동에너지 및 파랑과 같은 자연적인 현상에 의해 지속적으로 동적거동(dynamics)할 수밖에 없다. 항체의 자세는 질량중심에서 바닥을 향하는 축으로 선체를 좌우로 움직이는 요(yaw), 좌우를 연결하는 평행한 축으로 선체를 앞뒤로 운동시키는 피치(pitch), 그리고 앞뒤를 연결하는 평행한 축을 기준으로 하여 선박을 좌우로 운동하게 하는 롤(roll)로 구분하다.

이들 중 피치와 롤에 의한 영향은 Fig. 2.3에 도시한 바와 같이 경사수심  $d_s$ 이 관측되어 연직방향 수심  $d_v$ 로 환산해야 한다.

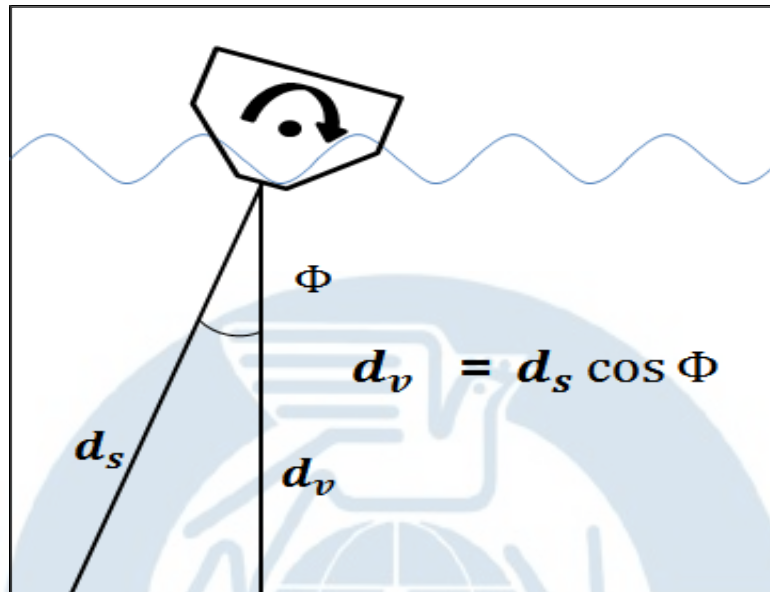


Fig. 2.3 Reduction of measured water depth by using pitch and roll

측량선은 운항과 파랑 및 바람 등의 외부적 요인에 의한 히브운동(heave)으로 조석기준면과 선박의 RP(Reference Point)와 차이가 발생한다. 따라서 관측수심을 조석기준면으로 환산하기 위해서는 측량선에 모션센서(motion sensor)를 탑재하여 관측을 수행한다.

측량선 자세와 운동에 대한 보정 후 수심은 조석기준면과 해저 지형상의 임의 점 사이 중력방향거리가 된다. 따라서 기본수준면에 대한 그것으로 환산하기 위해서는 관측당시 조위를 차감할 필요가 있다. 조석보정은 측량이 이루어진 해역에 조위관측소 유무에 따라 이를 활용하여야 하며, 표준조석도에 의해 조위를 계산 할 수 있는 경우에는 표준조석시스템에서 제공되는 조위를 사용해 기본수준면을 구한다.

## 2.3 타원체 기반 수심측량

### 2.3.1 타원체고

지구는 완전한 구로 형성되지 않은 적도를 기준으로 한 반지름이 극반지름보다 긴 타원의 형상을 갖고 있으며, 지표가 매우 불규칙하여 위치표현을 위한 기준면을 모형화할 필요가 있다. 측지학(geodesy)에서는 지구형상과 유사한 지오이드(Geoid)로 물리적으로 모형화 하였으며, 그 면은 중력방향에 직각인 등포텐셜면으로 같은 위치에너지를 내포하는 면을 연결한 선으로 지구 내부 밀도에 영향을 받으며 중력이 강한 지역에서는 간격이 좁게 나타난다.

지오이드면 또한 지구내부에 분포하는 물질의 밀도차이로 불규칙하여, 이 면과 최소제곱(least squares) 관점에서 가장 적합한 형태로 Fig. 2.4와 같은 타원체로 기하적으로 모형화 하여 지구상 위치관계를 나타내는 기준면으로 사용한다. 측지학에서는 이와 같은 지구형 형상을 기준타원체(reference ellipsoid)라 하고 장축의 반경( $a$ )과 편평률( $f$ )로 정의한다. 우리나라에서 채택하고 있는 기준타원체는 GRS80으로 그 장반경과 편평률의 역수는 각각 6378137m와 298.257222101 이다.

GRS80은 국제측지학협회(IAG: International Association of Geodesy) 및 국제측지학 및 지구물리학연합(IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics)가 1979년에 채택한 것으로, 지구의 형상, 중력 정수, 각 속도 등 지구의 물리학적인 정수 및 계산식으로부터 정의된다. 또한 이는 지구의 형상을 가장 잘 나타내고 있는 타원체로서 넓게 이용되고 있다(이강원 2016).



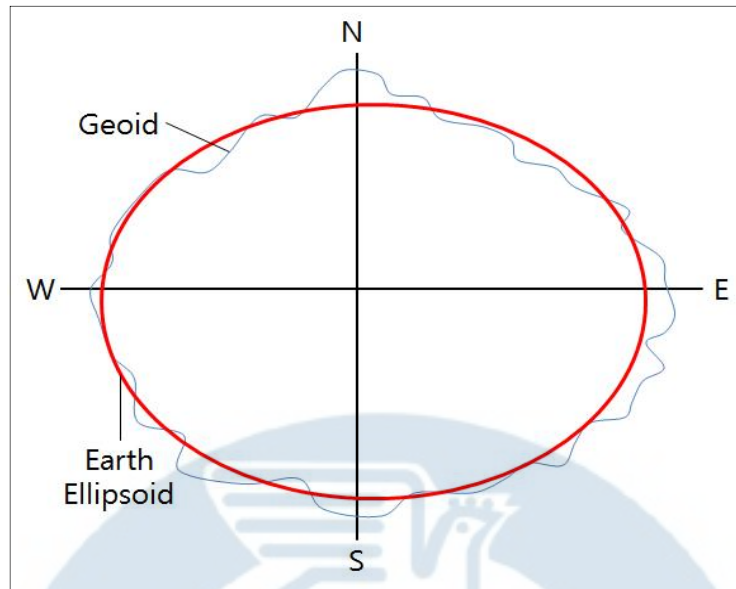


Fig. 2.4 Reference surfaces of the Earth

타원체고(ellipsoidal height)는 기준타원체 면에서 지구상 한 점 사이의 법선방향(normal direction) 거리로 정표고(orthometric height)와 타원체고 사이의 관계는 식(2-1)과 같다. 육상에서는 정표고와 지오이드 관계를 이용해 타원체고를 산정할 수 있다. 그러나 해상에서는 정표고의 측정이 불가능하여 이 방식에 의해 타원체고를 결정할 수 없기 때문에 GPS 관측자료 처리를 통해 ECEF 좌표계 상에서 3차원 좌표 X, Y, Z가 추정된 후 식(2-2)를 사용하여 타원체고를 계산할 수 있다.

$$h - H - N = 0 \quad (2-1)$$

여기서,  $h$ 는 타원체고,  $H$ 는 정표고를 나타내며  $N$ 은 지오이드고이다.

$$h = \sqrt{(X^2 + Y^2)} \cos\Phi + Z \sin\Phi - \left(\frac{a^2}{N}\right) \quad (2-2)$$

여기서,  $\Phi$ 는 위도,  $N$ 은 묘우선 곡률반경이다.

### 2.3.2 해저지형의 타원체고 결정 및 기준면 변환

ERS 방식의 수로측량에서 해저지형 타원체고 혹은 타원체기준 수심은 Fig. 2.5에 도시한 바와 같이 GPS 관측자료 처리를 통해 얻어지는 안테나의 타원체고에 안테나와 음향측심기 사이 오프셋(offset)과 자세각 환산 수심을 차감하여 산정할 수 있다. 특히 기존 관측수면기준 수심측량과 비교할 때 ERS의 특징은 선박의 히브 운동이 GPS 안테나고에 반영되어 이론적으로 이를 보정할 필요가 없으며, 조석관측을 통한 조위보정 또한 불필요하다. 다만 GPS와 음향측심기의 관측이 동시에 이루어지지 않은 경우 안테나 타원체고는 수심관측 시간으로 보간할 필요가 있다.

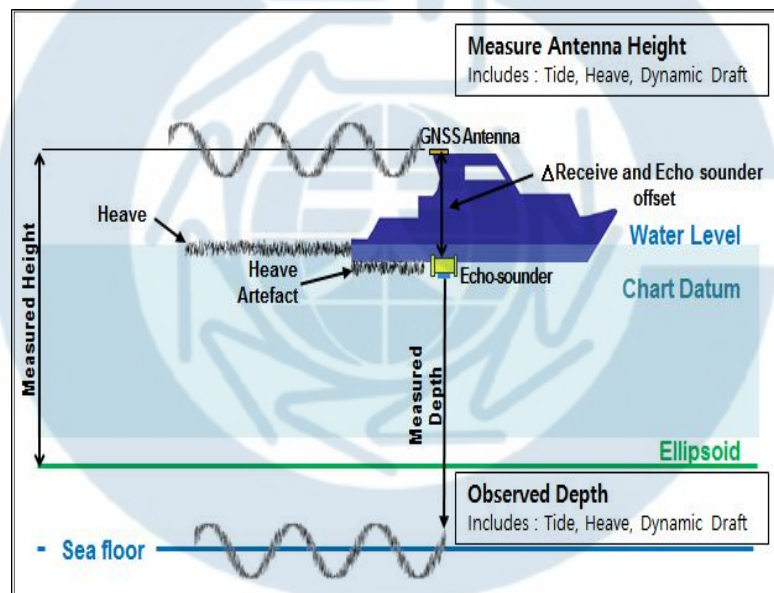


Fig. 2.5 Determination of ellipsoidal height at seabed

ERS 방식에 의한 측량의 결과는 지오이드, TSS 및 조석모형을 이용해 육·해상 어떤 측량기준면으로의 변환이 가능하여 상이한 높이기준에 의해



발생하는 문제의 해결이 가능하다. 육상의 지형측량 결과는 식(2-1)에서와 같이 타원체고에 지오이드고를 차감하여 정표고로 변환할 수 있으며, 수로측량은 식(2-3)와 Fig. 2.6의 관계를 이용해 기본수준면에 대한 수심으로 변환할 수 있다. 이와 함께 이들 모형을 이용하는 경우 지형측량 결과를 기본수준면 그리고 수로측량의 그것을 육상기준의 수준원점에 대한 표고로 상호 변환 가능하다.

$$D = h - N + TSS - T \quad (2-3)$$

여기서,  $D$ 는 기본수준면에 대한 수심,  $h$  타원체고,  $TSS$  지오이드와 평균해수면 차이 그리고  $T$ 는 조석모형으로부터 얻어지는 평균해면과 기본수준면의 차이이다.

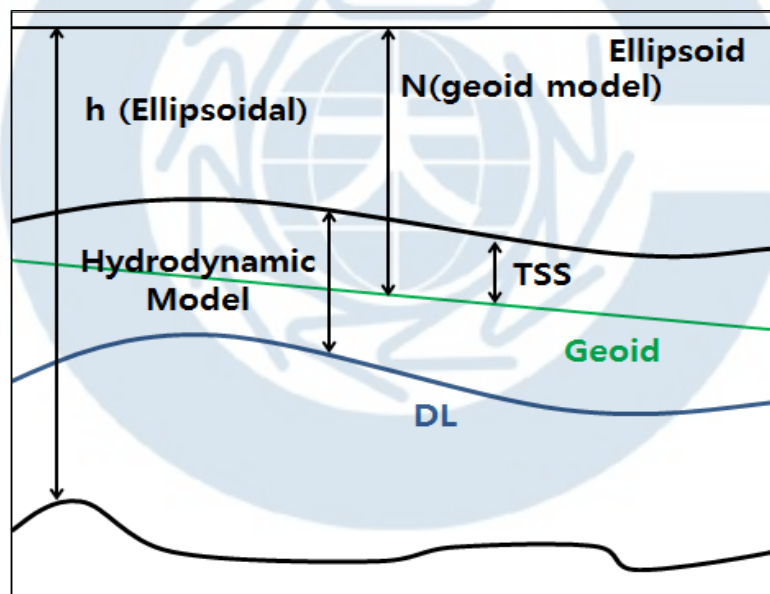


Fig. 2.6 Geometrical relationship of some surfaces used in hydrography

### Ⅲ. GPS-PPP 측위

#### 3.1 개요

GPS는 측위신호로부터 의사거리와 반송파 관측데이터를 취득하여 삼변 측량의 후방교회법 원리를 적용해 지구상 3차원 위치, 속도, 시각을 결정하는 전파항법 체계이다. 1970년대 군사적 목적으로 미국 국방부(US Department of Defence)에서 개발되어 운용되었으나, 1983년 이후 GPS 신호를 민간에 개방하여 현재 측지·측량, 항공 및 선박의 항법 등 다양한 분야에서 활용되어지고 있다. GPS는 Fig. 3.1과 같이 항법메시지를 사용자에게 전송하는 위성군으로 이루어진 우주부분(space segment), 전 세계 각지에 분포해 있는 관제국을 통해 GPS 위성을 추적하고 관제하는 제어부분(control segment), 위성으로부터 전송된 전파신호를 바탕으로 위치결정에 필요한 다양한 장치로 구성되는 사용자부분(user segment)로 구성되어 있다.

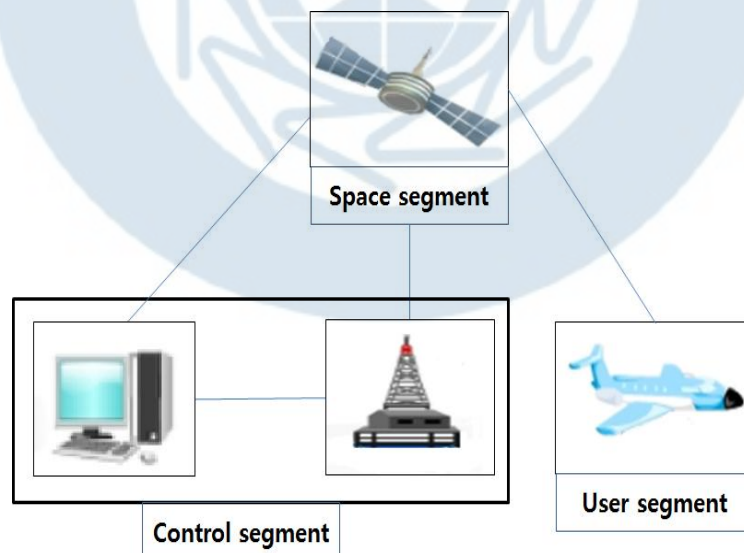


Fig. 3.1 Segments of GPS

GPS를 활용해 3차원 좌표를 결정하기 위해 인공위성과 수신기 사이의 거리와 동등한 관측데이터가 취득되어야 한다. 인공위성과 수신기 사이의 거리는 두 가지 방법으로 얻어지며, 이들은 위성신호가 송신된 후 수신기에 수신되는 전파시간에 빛의 전파속도를 곱하여 취득되는 의사거리(pseudo-range)와 반송파(carrier-phase) 그 자체이다. 특히 반송파는 인공위성과 수신기 사이의 생성된 완전파의 수와 잘려진 부분을 더하여 파장의 길이를 곱하여 얻어지며 의사거리에 비해 파장이 작아 보다 상대적으로 높은 정밀도로 관측할 수 있다.

인공위성으로부터 취득한 관측데이터를 처리하는 방식에 따라 절대측위(absolute positioning)와 상대측위(relative positioning)로 구분한다. 절대측위는 1대의 수신기로 최소 4개 이상 위성신호로부터 관측데이터를 취득하여 3차원 위치를 결정하는 방식으로 의사거리를 사용하는 경우 약 10~20m 그리고 반송파를 이용하는 경우 센티미터에서 수 십 센티미터 수준의 정확도 확보가 가능하다. 전자를 표준절대측위(SPP: Standard Point Positioning) 그리고 후자를 정밀절대측위(GPS-PPP: Precise Point Positioning)라 한다. 이에 반해 상대측위는 최소 2대의 수신기를 이용해 동일한 위성신호를 동시에 관측하여 미지점의 위치를 결정하는 방식으로 의사거리를 사용할 때 1미터 내외 그리고 반송파를 이용하는 경우 센티미터 수준의 측위 정확도를 확보할 수 있다.

### 3.2 위성신호

GPS 위성들은 Table 3.1과 같이 반송파(carrier), PRN(Pseudo-Random Noise) 코드 및 항법 메시지(navigation message)를 지상으로 송신한다(Hofmann-Wellenhof 등, 1997). 특히 반송파는  $10^{-13}$ 의 오차를 내포한 기본주파

수( $f_0$ )에 전리층의 효과를 최소화하기 위해 각각 154배, 120배 증가한 1.57 542 GHz 대역의 L1과 1.2276 GHz 대역의 L2로 이루어져 있으나 GPS 현대 화 계획에 따라 최근 L5가 추가되었다.

Table. 3.1 Signal components of GPS Satellite

Component		Frequency (MHz)	
Fundamental Frequency		$f_0$	10.23
Carrier	L1	$154 \cdot f_0$	1,575.42 ( $\approx 19.0$ cm)
	L2	$120 \cdot f_0$	1,227.60 ( $\approx 24.4$ cm)
PRN - Code	P - Code	$f_0$	10.23 ( $\approx 300$ m)
	C/A - Code	$f_0/10$	1.023 ( $\approx 30$ m)
Navigation message		$f_0/204,600$	$50 \cdot 10^{-6}$

PRN 코드는 0과 1로 구성된 2진수로, 0과 1의 상태가 바뀔 때 마다 반 송파의 위상을 Fig. 3.2과 같이 변화 시킨다. 코드는 Table 3.1과 같이 C/A(Coarse Acquisition)와 P(Precision)으로 구분하며, 칩(chip) 당 길이는 각 각 약 300m와 30m 이다. 이와 같은 코드 길이 차이는 의사거리 취득 정밀 도에 영향을 미쳐 C/A는 약 3m 그리고 P-코드는 약 30cm 수준이다. C/A-코드는 L1 그리고 P-코드는 L1 및 L2 반송파에 변조되어 전송된다. 따라서 P-코드로부터 2개의 의사거리가 취득할 수 있어 전리층효과 모형 화가 가능하여 보다 정확한 측위가 가능하다. 그러나 주목할 것은 GPS P-코드를 취득하기 위해서는 고가의 측지측량용 수신기의 사용이 필요하다는 것이다.

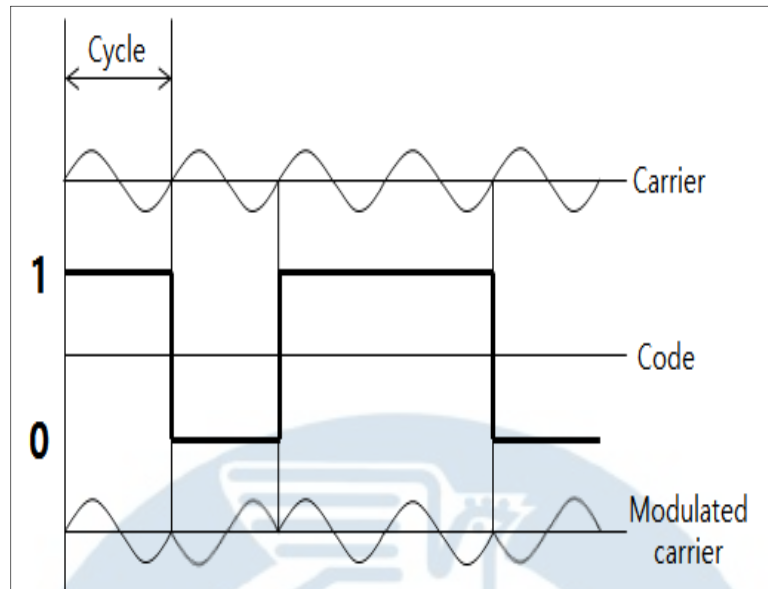


Fig. 3.2 Phase modulation of PRN code

항법메시지는 L1, L2에 변조되어 전송하며, 위성의 궤도정보, 시계 보정  
치, 전리층 보정정보, 건강상태 정보 외에도 타 위성들에 대한 궤도 정보를  
포함하고 있다. 이들은 25개의 프레임으로 구성되어 있으며, 각 프레임은 5  
개의 서브프레임으로 구분되고 각 서브프레임은 30비트인 10개의 단어로  
이루어져 있다. 최초 3개의 서브 프레임의 내용은 동일하지만 4번째와 5번  
째는 위성의 개별정보로 되어 있으며, 프레임마다 내용이 바뀐다. 이것을  
페이지라 부르며 서브 프레임 4번과 5번은 같은 형식을 가진 25페이지로  
구성되어 완전한 항법메시지가 되며 이 모두를 마스터 프레임이라고 부른  
다. 하나의 서브프레임을 전송하는데 6초가 소요되어 위성의 궤도정보를  
포함하는 프레임 전체를 완성하는 30초가 걸린다. 따라서 궤도정보만 취득  
하는 시간은 30초, 모든 자료를 전송받는 시간은 12.5분이 소요된다(이강  
원, 2016).

### 3.3 관측오차

GPS 위성신호가 수신기에 전파되기 까지 다양한 물리적 요인에 의해 관측 오차가 발생한다. 이들 오차는 발생 요인에 따라 위성, 수신기, 신호전파 경로로 의한 것으로 Table 3.2와 같이 구분할 수 있다.

Table. 3.2 Error sources of GPS measurements

Error Sources	Details
Satellite	clock bias, orbit uncertainty
Receiver	clock bias, antenna phase center variation, noise
satellite Signal propagation	Ionosphere effect, Troposphere delay, Multipath

#### 3.3.1 위성오차

위성궤도오차는 인공위성 위치가 항법메시지 혹은 방송력(broadcast ephemeris)정보로부터 전송되는 것과의 불일치이다. 상대측위에서 궤도오차는 단기선의 경우 차분을 통해 대부분 축소 가능하나 기선장이 증가함에 따라 낮은 공간적 상관성으로 커지게 된다. 이 경우 궤도오차의 영향을 줄이기 위해서 IGS 해석센터에서 인터넷을 통해 제공하는 정밀궤도력(precise ephemeris)를 관측자료 처리에 사용해야 한다. 이 방식은 GPS-PPP 측위에서도 동일하게 적용할 수 있다.

위성시계오차는 인공위성 내부에 장착되어있는 원자시계의 불완전성에 따른 것으로 항법메시지에 보정계수에 의해 축소 가능하지만 그 정확도는 대체로 1.0m 내외이다. 상대측위에서는 차분을 통해 대부분 소거 가능하지만 GPS-PPP와 같은 절대측위에서 그 영향을 축소하기 위해서는 IGS 해석센터의 위성시계오차 모형을 적용해야 한다.



### 3.3.2 수신기오차

수신기시계오차는 위성이 그것과 유사하게 발생하지만 저렴한 석영시계를 사용하기 때문에 그 크기가 상대적으로 매우 크다. 석영시계 대신 성능이 매우 우수한 원자시계를 사용할 수 있지만 루비듐, 세슘시계는 가격이 매우 비싸 수신기에 사용하기에 비효율적으로, 상시관측소 등에서 제한적으로 활용되고 있다. 상대측위에서는 이중차분을 통해 수신기시계오차 영향을 제거할 수 있으며, 절대측위에서는 수신기 좌표의 추정에서 미지수로 추가하여 동시 추정하는 방법을 사용한다.

GPS 수신기는 측위신호를 전기에너지로 변환하여 처리되며, 이때 신호가 수신되는 지점이 파장의 중심위치가 된다. 하지만 위성 신호는 수신기의 물리적인 중심으로 수신되지 않기 때문에 안테나 위상센터 변동에 변동이 발생한다. 따라서 이 문제의 해결을 위해서는 IGS 혹은 NGS(National Geodetic Survey) 등의 캘리브레이션(calibration) 모형을 적용한다.

수신기의 잡음은 코드파와 반송파에 따라 다르게 나타나며 흔히 PRN 칩의 길이와 반송파 파장의 1%미만으로 나타나며 제거는 불가능하며, 경중률을 부여하여 미지수를 추정한다. 영기선(zero baseline) 시험을 통해 잡음의 정도(magnitude)의 평가가 가능하다.

### 3.3.3 신호전파오차

전리층(ionosphere)은 고도 50~1000km에 이르는 이온화된 층으로 전자기파의 전파에 큰 영향을 미치는 자유전자(free electron)가 분포하는 대기층이다. 이온화의 주요원인은 태양에서 방출되는 X선과 극자외선 복사이며, 이로 인해 대기 중의 원자와 분자의 전자를 잃어버리기 때문이다. 이온화 정도는 전자밀도에 영향을 미쳐 전자파의 전파시간 및 방향에 변화를

일으킨다. 위성 측위신호가 전리층을 통과하게 될 때 코드파와 반송파는 상이한 영향을 받게 된다. 전자는 전리층을 지나갈 때 전파가 지연(delay)되어 의사거리의 실제 값보다 증가시키며, 후자의 경우 반대로 전파 속도를 증가(advanced)시켜 기하거리가 적게 관측된다. 뿐만 아니라 전리층효과는 관측 지역과 시간에 따른 다른 영향을 미치며, 적도와 극지방보다 중위도지역에서 영향이 미미하게 나타나며 밤이 낮보다 약 5배 정도 적은 효과가 있다(Rizos, 1996). Fig. 3.3은 대기권 영향이 측위신호의 미치는 영향을 도시하였다.

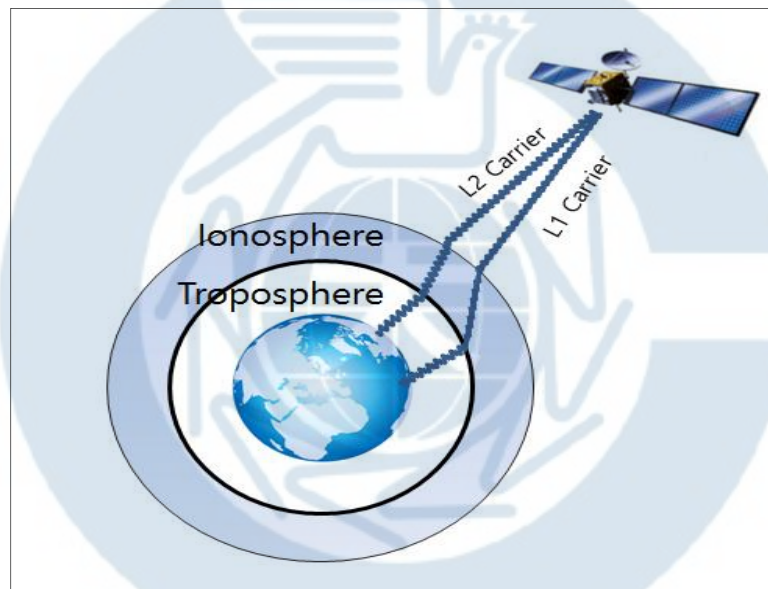


Fig. 3.3 Atmospheric refraction of GPS satellite signals

전리층효과를 보정하는 방법은 허용정확도에 따라 다르며, 항법과 같이 높은 정확도를 필요로 하지 않는 분야에서는 GPS 항법 메시지에 포함된 전리층 모델(Klobuchar 모델)을 사용하면 약 50%까지 전리층 효과를 줄일 수 있다. 하지만 센티미터 수준의 높은 정확도가 요구되는 경우라면 이중 주파수 관측데이터를 취득하고 광폭선형결합(wide band combination: L5)을



형성하여 미지수를 추정함으로써 대폭 축소가 가능하다.

대류권(troposphere)은 지표면으로 약 10~12Km정도에 위치하며 대류현상으로 인한 기상변화가 일어나는 영역이다. 특히 이 대기권은 전자적으로 중립층에 해당하며 모든 전파를 지연시키며 전자기파의 주파수에 따른 영향은 없다. 대류권지연은 건조부분(90%)와 습윤부분(10%)으로 구분할 수 있으며, 전자는 경험적 모형을 적용하여 99%정도 보정가능하나 후자는 정확한 수증기압 측정 장비를 사용하지 않으면 70%정도만 모형화가 가능하다 (Hofmann-Wellenhof 등, 1997)

다중경로(multipath)는 위성측위 신호의 관측에서 안테나 주변에 위치한 물체에 의한 신호 굴절과 인공위성 자체에서 굴절된 신호를 전파하여 발생한다. 이러한 영향으로 발생하는 다중경로 영향의 최소화를 위해서는 관측시 위성신호 수신에 방해가 될 물체가 없는 개활지에서 관측데이터를 취득하거나, 위성 절사각이 낮은 위성으로부터 수신되어 오는 위성신호 관측을 피해야 한다.

## **3.4 관측데이터**

### **3.4.1 의사거리**

GPS 측위에서 거리측정은 다른 측량기기의 방식과 다른 단방향 측정(one way concept) 방식을 사용하며 각각의 인공위성과 수신기에 내포된 2개의 시계를 사용하여 거리를 구할 수 있다. 하지만 인공위성과 수신기에 탑재된 시계는 서로 상이한 정확도를 가지기 때문에 위성에서 송출된 신호가 수신기에 도달하는 전파시간에는 불확실성이 내포하고 있어 위성과 수신기 사이 거리결정에 오차를 초래한다. 이러한 시각동기 불확실성을 포함하여

얻어진 거리를 ‘의사거리(pseudo-range)’ 라 하며 위성신호 전파시간에 빛의 전파속도를 곱하여 취득된다. 이때 시계오차 외의 다양한 요인을 통해 오차가 발생하며 GPS 의사거리 관측데이터는 식(3-1), 식(3-2)과 같이 관측 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$R_{i,L1}^s = \rho_i^s + d\rho_i^s + c(dt^s - dT_i) + di_{i,L1}^s + dr_i^s + dm_{i,R_{L1}}^s + \epsilon_{i,R_{L1}}^s \quad (3-1)$$

$$R_{j,L2}^s = \rho_j^s + d\rho_j^s + c(dt^s - dT_j) + di_{j,L2}^s + dr_j^s + dm_{j,R_{L2}}^s + \epsilon_{j,R_{L2}}^s \quad (3-2)$$

여기서,  $R_j^s$  : j 수신기와 s 위성 사이의 의사거리 관측 값 (m)

$\rho_j^s$  : j 수신기와 s 위성 사이의 기하거리

$d\rho_j^s$  : 위성 궤도 오차

$dt^s$  : 위성 시계 오차

$dT_j$  : 수신기 시계 오차

$di_j^s$  : 전리층 오차

$dr_j^s$  : 대류권 오차

$dm_{j,R}^s$  : GPS 의사거리 관측값의 다중경로 오차

$\epsilon_{j,R}^s$  : 관측 잡음

$c$  : 진공 중 빛의 속도

### 3.4.2 반송파

반송파를 활용하여 위성과 수신기 사이의 기하거리를 구하기 위해서는 전체 파장 수를 파악해야 하지만 수신기의 전원을 켜는 순간에 위성과 수신기 사이의 완전한 파장수를 알 수 없다.

반송파 관측데이터는 위상의 수를 형용하는 정수 부분과 우수리 부분으로 구성되어지며 누적되어 나타난 위상 관측 값의 초기 부분에 알 수 없는 정수배의 위상수를 담고 있다. 이를 미지정수(integer value ambiguity)라 하며, GPS 반송파 관측을 통해 센티미터 이상의 정확도를 요구한다면 반드시 미지정수의 결정은 필수적이다. 식(3-3), 식(3-4)는 반송파를 이용한 관측데이터의 관측방정식을 표현하였다.

$$\lambda_{L1}\Phi_j^s = \rho_j^s + d\rho_j^s + c(dt^s - dT_j) + \lambda_{L1}N_{j,L1}^s - di_{j,L1}^s + dr_j^s + d_{j,\Phi_{L1}}^s + \epsilon_{j,\Phi_{L1}}^s \quad (3-3)$$

$$\lambda_{L2}\Phi_j^s = \rho_j^s + d\rho_j^s + c(dt^s - dT_j) + \lambda_{L2}N_{j,L2}^s - di_{j,L2}^s + dr_j^s + d_{j,\Phi_{L2}}^s + \epsilon_{j,\Phi_{L2}}^s \quad (3-4)$$

여기서,  $\Phi_j^s$  : 수신기 j 와 위성 s 사이의 반송파 관측값

$\lambda_G$  : GPS 반송파의 파장

$N_j^s$  : 미지정수

$d_{j,\Phi}^s$  : GPS 반송파의 다중경로 오차

$\epsilon_{j,\Phi}^s$  : GPS 반송파 관측 잡음

### 3.4.3 선형결합

선형결합은 이중주파수 관측데이터를 처리할 때 식(3-5)를 이용하는 경우 새로운 성질을 가지는 데이터를 생성 가능하여 다양하게 활용할 수 있다.

$$\Phi_{combined} = n_1\Phi_{L1} + n_2\Phi_{L2} \quad (3-5)$$

여기서,  $n_1$ 과  $n_2$ 는 선형결합계수,  $\Phi_{L1}$ 는 반송파 L1 관측데이터, 그리고  $\Phi_{L2}$ 는 반송파 L2 관측데이터 이다.

대표적인 선형결합 중의 하나는 식(3-6)의 L3 혹은 무전리층 결합이다. 이 방식은 선형결합의 계수를 반송파의 L1, L2 주파수를 조합한 결합으로 유사한 특성을 가진 전리층효과를 대부분 소거하기 위해 사용한다. 하지만 L1, L2의 미지정수의 결합으로 정수의 성질을 상실하여 관측 잡음이 L1보다 3.2배 증가하게 된다.

$$\Phi_{L3} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \Phi_{L1} - \frac{f_{L1}f_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \Phi_{L2} \quad (3-6)$$

여기서  $f_{L1}$ 과  $f_{L2}$ 는 각각 L1과 L2 반송파 주파수 이다.

식(3-5)에서 계수  $n_1$ 과  $n_2$ 가 각각 1과 -1일 때 식(3-7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 광폭선형결합(L5)라 한다. L5은 파장이 기존의 L1(19.0cm)와 L2 (24.4cm)주파수 보다 큰 86.2cm로 미지수결정에 장점이 있다. 그 이유는 정확한 미지정수를 결정하기 위해서는 GPS 관측데이터에 포함된 오차의 총합이 0.5 미만일 경우에만 가능하다. 따라서 L1과 L2보다 많은 오차가 발생하여도 정확한 미지정수 결정이 가능하다.

$$\Phi_{L5} = \Phi_{L1} - \Phi_{L2} \quad (3-7)$$

## 3.5 GPS-PPP 측위

### 3.5.1 개요

수로측량에서 측량의 기준면을 ERS로 결정하기 위한 측위기법은 IHO에서 제시하는 허용정확도 만족해야한다. 일반적으로 해양측위를 실행할 때 일반적으로 의사거리 기반 실시간 상대이동측위(DGPS: Differential GPS) 방식을 활용하고 있다. 이 방식은 두 수신기 사이의 기선장이 충분히 가까울 때 단일차분을 통해 위성 시계오차가 소거되고 위성궤도, 전리층 및 대류권에 의해 발생하는 오차가 관측 잡음에 비해 매우 낮은 수준으로 축소할 수 있다. 수로측량에서 DGPS 방식을 이용하여 산출된 수평위치는 Table 2.1의 수로측량 허용정확도에 만족할 수 있지만 수직방향은 정확도는 요구하는 정확도에 미치지 못한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 반송파 기반의 상대측위 기법을 활용한 단기선 GPS-PPK 방식을 이용한다면 센티미터 수준의 정확도로 3차원 측위가 가능하다. 하지만 육상에서 약 15km 떨어진 먼 바다에서의 수로측량을 수행하는 경우 단기선 GPS-PPK 방식은 기준국 설치 및 기선장이 길어짐에 따라 위성궤도, 대류권지연, 전리층효과로 인해 발생하는 오차가 증가하여 원해에서는 사용하기 힘들다. 이런 문제는 반송파 기반의 절대측위 기술이 GPS-PPP의 적용을 통해 일부 해결이 가능하다.

### 3.5.2 IGS 해석결과물

IGS는 Fig. 3.4와 같이 전 세계 500여개 이상의 상시관측소를 관리 및 자료처리를 통해 다양한 해석결과물을 제공하고 있으며, 운용측면에서 데이터센터(DC: Data Centers), 해석센터(AC: Analysis center)로 구성되어 있다. DC는 관측된 자료를 FTP(File Transfer Protocol)를 통해 RINEX(Receiver I

ndependent Exchange Format) 형식의 데이터로 제공하며, AC는 GPS 관측 데이터를 상시 처리하여 관측소의 3차원 좌표를 결정하며, 위성의 정밀궤도, 위성 시계오차, 자전 파라미터, 대류권 지연, 전리층 효과의 오차 모델을 추정하여 FTP를 통해 사용자들에게 제공하고 있다.

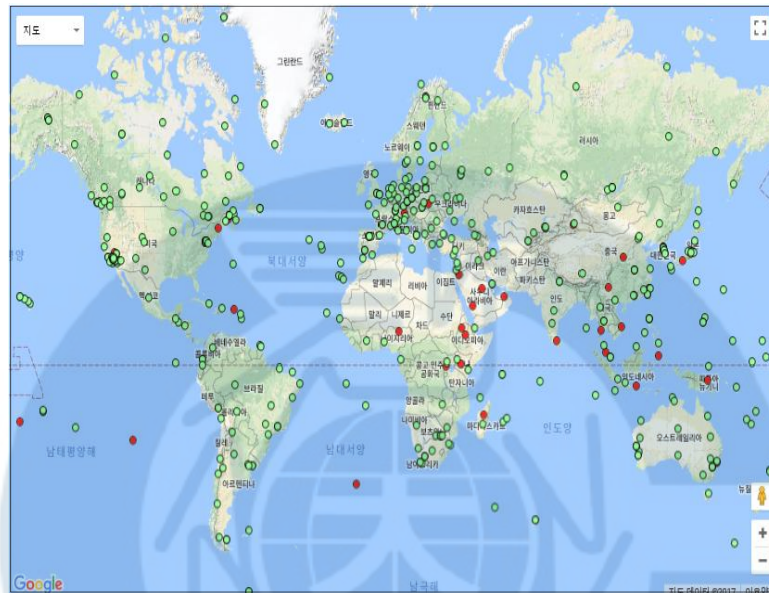


Fig. 3.4 IGS tracking network

GPS-PPP 측위에서 위성궤도 및 시계오차는 IGS 해석센터의 결과물을 사용해 보정한다. 특히 정밀궤도력(precise ephemeris)은 SP3(Standard Product 3) 포맷으로 15분 간격의 위성궤도와 위성시계 오차정보를 포함하고 있어, 만약 그 이상의 저장간격으로 GPS 관측데이터를 취득하는 경우라면 보간이 필요하다(Remondi, 1991; 박정현 등, 2004).

IGS가 제공하는 해석 결과물은 요구하는 허용정확도에 따라 정밀궤도력을 선택하여 위성 시계오차 및 궤도오차를 보정할 수 있지만, 보다 높은 정확도의 정보를 이용하기 위해서는 해석센터의 자료처리 기간만큼의 지연



은 필수적이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 IGS는 지연시간에 따라 각기 다른 해석결과물을 생산·제공한다. 초신속(ultra-rapid)은 파일 생성 기준시로부터 과거 24시간, 미래 24시간의 위성정보를 포함하며 거의 실시간 활용이 가능한 반면, 신속(rapid) 해석결과물을 사용을 위해서는 최소 1일의 지연이 발생한다. 최종(final) 결과물은 12-18일 정도의 지연은 피할 수 없으나 표에 나타난 바와 같이 가장 높은 정확도의 확보가 가능하다. IGS에서는 전리층 효과를 보정하기 위해 전 지구 이온층 모델(Global Ionosphere Model)을 민간인들에게 제공하여 실시간 보정 방법에서 사용하는 경험 모델 Klobuchar보다 더 정확하나 실시간 이용이 불가능하다. Table 3.3은 IGS 해석센터에서 제공하는 위성 궤도력을 나타내었다.

Table. 3.3 IGS precise ephemeris and clock models

Type		Accuracy	Latency	Updates	Interval
Ultra-Rapid (predicted half)	Orbit	~5cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15min
	Clock	~3ns RMS ~1.5ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	Orbit	~3cm	3~9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15min
	Clock	~150ps RMS ~50ps SDev			
Rapid	Orbit	~2.5cm	17~41 hours	at 17 UTC	15min
	Clock	~75ps RMS ~20ps SDev			5min
Final	Orbit	~2.5cm	12~18 days	every Thursday	15min
	Clock	~75ps RMS ~20ps SDev			Sat : 30s Stn : 5min

### 3.5.3 GPS-PPP 측위

상대측위는 수신기 2대 이상을 활용하여 동시간대의 위성을 관측하여 미 지점의 수신기의 위치를 계산하는 방식으로 두 수신기 사이의 기선의 거

리, 신뢰할 수 있는 수준의 정확도를 갖춘 기준국 등 관측데이터를 취득할 때 다양한 조건을 만족해야만 목표로 하는 정확도를 얻을 수 있다. 반면에 절대측위는 수신기 1대를 활용해 최소 4개 이상의 위성으로부터 측위신호를 수신하여 일정한 정확도로 수신기의 3차원 좌표를 결정할 수 있다.

반송파 기반의 절대측위 기법 GPS-PPP는 기준국을 통한 차분을 사용하지 않고 3차원 좌표를 결정하기 때문에 발생하는 주요 요인에 따른 오차를 반드시 보정해야한다. GPS-PPP 정확도를 밀리미터 수준으로 향상시키기 위해서는 미지정수를 실수(float)가 아닌 정수(integer) 형태로 결정지어야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 위성과 수신기의 바이어스를 각 시계오차로부터 분리하면 된다(Ge 등, 2008).

Collins, (2008)은 ‘decoupled clock model’ 을 활용한다면 1시간 이후 미지정수의 90%를 찾을 수 있으며 네트워크가 시통이 원활히 된다면 지구 어디에서든 정적측위일 경우 센티미터 수준, 이동측위는 수 십 센티미터 수준의 정확도로 3차원 좌표를 구할 수 있다. GPS-PPP는 절대측위 기법으로 기준국의 설치와 기선장에 영향을 받지 않으며 4차원 동적측지계를 활용하기 때문에 절대변위 측정이 가능한 장점을 있다. 반면에 IGS 결과물이 제공되는 지연시간이 발생하며, 이동측위가 이루어질 경우 미지정수 결정이 다소 어렵다. 이 측위로 추정된 3차원 좌표의 측지계는 ITRF 4차원 동적측지계이다. 하지만 우리나라의 경우 2002년 이후로 고정되어있는 정적측지계를 사용하고 있어 센티미터 수준의 정확도를 위해서는 측지계 변환이 필수적이다. GPS-측위의 장·단점은 Table 3.4과 같이 요약할 수 있다.

GPS-PPP는 일반적으로 이중주파수를 이용한 전리층효과 모형을 위해 이중주파수 수신기를 사용이 필요하며, 요구정확도를 고려한 오차요인별 보정방법을 적용해 관측데이터를 처리해야 한다. 다음은 GPS-PPP에 적용



하는 가장 일반적인 오차보정 방법을 열거한 것이다.

- ① 위성 궤도오차 : IGS AC에서 제공하는 정밀궤도력 사용
- ② 위성 시계오차 : IGS AC에서 추정 위성시계오차 이용
- ③ 전리층 효과 : 이중주파수 관측데이터에 식(3-6)을 적용해 추정
- ④ 대류권 지연, 수신기 시계오차 : 미지정수로 고려하여 추정

Table. 3.4 Advantages and disadvantages of the GPS-PPP technique

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No necessary of reference station</li> <li>▪ No impact of baseline length</li> <li>▪ Possible to estimate absolute displacement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Time delay until IGS analysis output</li> <li>▪ In case of kinematic positioning, It is difficult to determine ambiguities</li> <li>▪ Need to convert when using other geodetic frame</li> </ul>

앞서 언급한 GPS 관측오차 보정방식을 적용한 후 무전리층 선형결합을 의사거리와 반송파에 대해 식(3-8)와 (3-9)로 나타낼 수 있다. 이 식들에서 미지수는 3차원 좌표, 대류권지연, 수신기 시계오차 및 실수형미지정수 (real-valued ambiguity)이다.

$$R_{j,free}^s = \rho_j^s - c \cdot dT_j + dr_j^s + \epsilon_{j,R}^s \quad (3-8)$$

$$\Phi_{j,free}^s = \rho_j^s - c \cdot dT_j + N_j^s + dr_j^s + \epsilon_{j,\Phi}^s \quad (3-9)$$

여기서,  $\rho_j^s$ , j 수신기와 s 위성 사이의 기하거리,  $dT_j$ 는 수신기 시계 오차,  $dr_j^s$ 는 대류권지연 오차, 그리고  $\epsilon_j^s$ 는 관측 잡음이다.

## IV. 실험 및 분석

### 4.1 개요

타원체 기반 수로측량에 GPS-PPP 측위방식의 적용을 위해서는 오차보정을 포함한 관측데이터 처리의 최적화와 추정된 타원체고의 정확도의 분석이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 국토지리정보원에서 설치·운영 중에 있는 상시관측소 관측데이터를 GNSS 데이터제공센터로부터 확보하고 측지측량용 수신기를 사용한 관측실험을 통해 취득한 데이터를 처리하여 GPS-PPP의 오차보정 방식에 따른 정확도 및 이동측위에서 추정되는 타원체고의 정확도 분석 실험을 수행하였다.

GPS-PPP에서 오차보정 방식에 따른 정확도를 평가하기 위해 국토지리정보원으로부터 확보한 CORS 관측데이터를 각기 다른 IGS 궤도력 및 위성시계오차 모형 그리고 대기권오차 보정방식을 적용·처리하여 그 결과를 타원체고 정확도 측면에서 분석하고 최적의 관측데이터 처리 방식을 도출하였다. 이렇게 도출한 오차 보정방식을 GPS-PPP에 적용하여 추정된 타원체고의 정확도를 분석하기 위해 국토지리정보원 상시관측소 그리고 회전테이블 및 측량선을 이용한 이동측위 실험을 통해 취득한 데이터를 RTKLib 소프트웨어를 이용해 처리하였다. 실험 결과와 IHO에서 제공하는 정확도 표준과 비교하여 타원체고 추정 정확도 측면에서 식(4-1)의 RMSE를 기준으로 GPS-PPP 방식의 수로측량 적용성을 평가하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(h_i - h_{ref})^2}{n}} \quad (4-1)$$

여기서, RMSE는 수직성분에 대한 평균제곱오차,  $h_i$ 는 추정좌표의 높이

방향의 좌표성분,  $h_{ref}$ 는 기준좌표의 높이방향 성분,  $n$ 은 정확도 계산에서 사용되는 샘플의 수이다.

## 4.2 RTKLib 소프트웨어

RTKLib은 인공위성으로부터 취득한 관측데이터를 RINEX형식으로 변환, 처리 및 결과를 도출할 수 있는 소프트웨어로 다른 상용 소프트웨어와 달리 오픈소스 프로그램 패키지(open source program package)이다. 특히 GPS, GLONASS, Galileo, QZSS(Quasi-Zenith Satellite System), BDS(BeiDou navigation Satellite) 및 SBAS(Satellite-based Augmentation System)를 관측데이터에 대한 표준(SPP: Standard Point Positioning) 및 정밀 상대·절대측위 알고리즘을 실시간 및 후처리에 대해 지원한다. Table 4.1은 RTKLib을 통해 이용 가능한 GUI(Graphical User Interface) 및 CUI(Character User Interface)의 응용프로그램을 나타낸 것이다(RTKLib, 2013)

Table. 4.1 Modules of RTKLib's software package

Function	GUI AP	CUI AP
AP Launcher	RTKLAUNCH	-
Real-Time Positioning	RTKNAVI	RTKRCV
Communication Server	STRSVR	STR2STR
Post-Processing Analysis	RTKPOST	RNX2RTKP
RINEX Converter	RTKCONV	CONVBIN
Plot Solutions and Observation Data	RTKPLOT	-
Downloader of GNSS Data	RTKGET	-
NTRIP Browser	SRCTBLBROWS	-

본 연구에서 RTKLib 패키지 중 ‘RTKGET’, ‘RTKCONV’, ‘RTKPOST’, ‘RTKPLOT’를 사용하였다. 주요한 기능은 다음과 같다. RTKGET은 인터넷(FTP) 접속을 통해 GPS-PPP에 필요한 IGS 해석센터 해석결과물인 정밀궤도력, 지구회전요소(Earth rotation parameters), 대기권 오차의 전 지구 모형 그리고 IGS에 등록 관측소 RINEX 형식 관측데이터를 다운로드할 수 있다. RTKCONV은 관측데이터 형식변환용 프로그램으로 수신기 제조사에 따라 고유의 바이너리 형식의 관측데이터를 RINEX 형식으로 변환한다. RTKPOST는 GPS 관측데이터 후처리 응용프로그램으로 RINEX 형식의 위성 관측데이터와 위성 궤도력을 입력하여 GPS-PPP, 단기선 GPS-PPK 측위 알고리즘에 의한 수신기 3차원 좌표를 추정한다. Table 4.2은 RTKPOST에서 입력 가능한 궤도력 및 보정정보 파일의 종류이다.

Table. 4.2 Types of ephemeris and correction information file

Extension	Type and Type
.sp3, .SP3, .eph, .EPH	SP3-c type of precise orbital force
.sbs, .SBS, .ems, .EMS	SBAS message log file
.rtcm3, .RTCM3	RTCM 3 SSR correction message file
.*i, .*I	IONEN VTEC
Etc	RINEX OBS, NAV, CLK

### 4.3 GPS-PPP 타원체고 정밀 추정 방법도출

#### 4.3.1 데이터 및 방법

국토교통부 국토지리정보원에서 운영하는 GNSS 데이터제공센터로부터 2016년 10월 1일 00시부터 24시까지 총 1일 분량의 1초 간격의 상시관측소 데이터를 확보하였다. 대상 관측소는 Fig. 4.1과 같이 제주(CHJU), 창원(CHWN), 강릉(KANR), 상주(SNJU), 대구(TEGN)이었다. Table 4.3은 국토지리정보원으로부터 CORS 5개의 고시된 타원체고의 성과내역으로 정확도 평가에 활용하였으며, 위성 궤도력 및 시계오차를 보정하기 위해 ‘RTKGET’을 통해 초신속, 신속, 최종 IGS 해석결과물을 취득하였다.

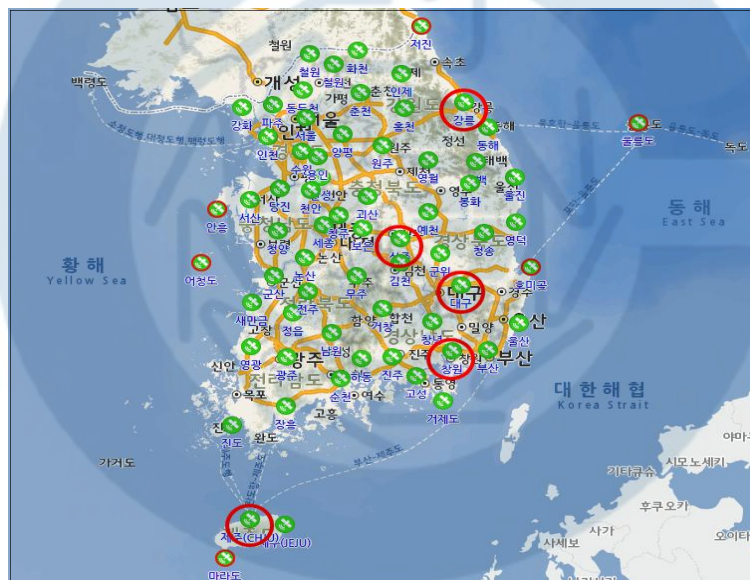


Fig. 4.1 Distribution of the CORS used in the tests

Table. 4.3 Published ellipsoidal heights of the CORS

Reference	CHJU	CHWN	KANR	SNJU	TEGN
Ellipsoid	50.3366	88.3459	57.0427	111.5859	106.3773

Fig. 4.2는 GPS-PPP에서 오차 보정방식에 따른 추정 타원체고 정확도 평가를 위한 관측자료 처리 절차를 도시한 것이다. 적합한 오차보정 방식을 도출하기 위해 위성궤도 및 위성시계 오차, 전리층 효과, 대류권 지연, 위성 절사각의 보정방식 다르게 적용하여 관측데이터를 처리하여, 그 정확도를 Table 4.3의 고시 타원체고를 이용해 RMSE를 계산·분석 하였다.

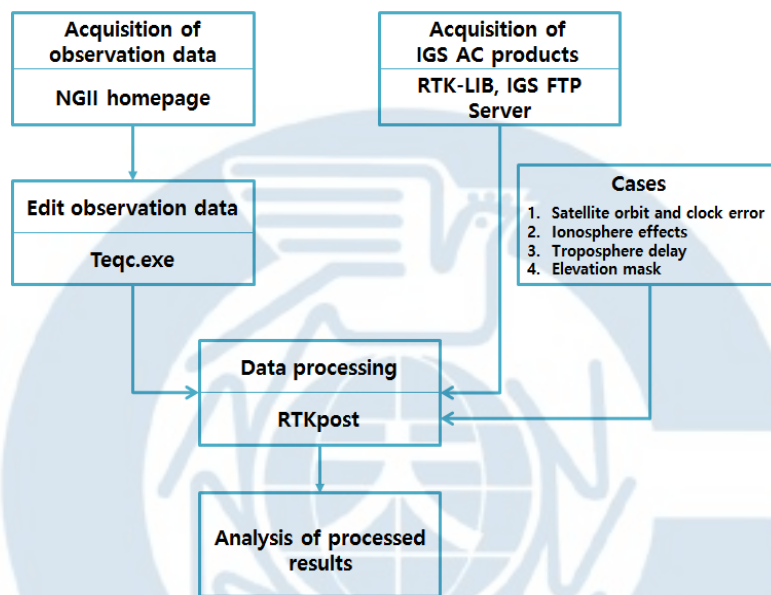


Fig. 4.2 Procedure of GPS-PPP processing scheme

#### 4.3.2 위성의 궤도 및 시계오차

##### (1) 분석방법

IGS 해석결과물을 이용한 위성궤도 및 시계오차 보정에서 사용되는 결과물의 종류가 타원체고 추정 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 GPS-PPP 처리에서 위성 절사각(cut-off angle)을  $5^{\circ}$  설정한 후 전리층 효과 축소를 위해 L3 선형결합을 통해 3차원 좌표와 함께 대류권지연, 실



수형미지정수 및 수신기 시계오차를 동시 추정하였다. IGS 해석결과물은 5개 해석센터들의 통합해(Table 4.4에서 IGS)와 CODE(Center for Orbit Determination in Europe)의 해를 Table 4.4와 같이 사용하였다. CODE 결과물을 사용하는 이유는 IGS 최종결과물은 위성 시계오차 보정정보를 30초 간격으로 제공하는 반면에 CODE의 최종결과물은 5초 간격으로 위성시계 모형을 제공하여 영향을 분석하기 위해서 이다. Table 4.4에서와 같이 실험은 다른 위성궤도 및 시계오차 모형을 적용한 6가지 경우로 구분하였다.

Table. 4.4 Testing cases for derivation of a GPS-PPP processing scheme

CASE	Satellite orbits	Satellite clock model
1	IGS - Rapid	IGS - Rapid
2	CODE - Rapid	CODE - Rapid
3	IGS - Final	IGS - Final (30 sec)
4	CODE - Final	CODE - Final (30sec)
5	IGS - Final	CODE - Final (5sec)
6	CODE - Final	CODE - Final (5sec)

## (2) 결과 및 고찰

GPS 상시관측소 5개소의 고시 타원체고에 대한 RMSE를 Fig. 4.3에 나타내었으며, 이들의 통계값은 Table 4.5에 요약하였다. 신속해석 결과물을 사용하는 CASE 1 & CASE 2을 비교하였을 때 CODE을 사용하여 처리한 결과가 약 2cm 수준의 높은 정확도를 나타내며, 최종해석 결과물을 이용하여 보정한 CASE 3의 경우 앞선 결과보다 수 센티미터 수준으로 향상된 결과를 보인다. CODE를 이용하여 위성 관측데이터를 처리하는 CASE 4 & CASE 6 그리고 IGS 최종해석 결과물을 이용하는 CASE 3 & CASE 5도 유

사하게 경향을 보이고 있다. GPS-PPP로 관측데이터를 처리할 때 위성의 궤도 및 시계오차는 최종해석 결과물을 활용할 경우 약 5cm 수준의 정확도를 확보 할 수 있다. 또한 신속해석 결과물을 이용하여 추정값을 처리하여도 최종해석 결과물과 1~2cm 수준의 차이로 최종해석 결과물을 사용할 만큼 충분한 여유가 있지 않다면 신속해석 결과물을 사용해도 무방할 것으로 판단되나, 본 실험의 결과를 고려할 때 CODE 결과물을 사용하는 것이 정확도 향상측면에서 바람직할 것이다. 본 연구에서는 수로측량을 요구정확도를 고려할 때 CASE 5가 가장 높은 정확도를 제공하여 데이터 처리에 적용을 고려할 수 있지만, 미비한 정확도 증가 효과에 비해 관측파일 크기가 약 90Mb인 점을 고려할 때 IGS 최종궤도력과 30초 간격 위성시계 오차모형을 사용하는 것이 적합할 것이다.

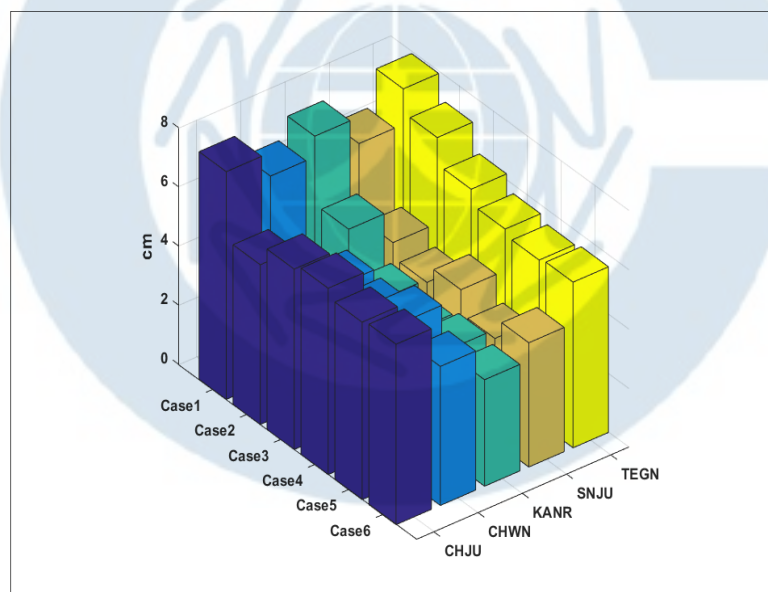


Fig. 4.3 RMSE of estimated ellipsoidal heights against cases depending on IGS products

Table. 4.5 Statistical summary of RMSE against CASEs depending on IGS products

CASE	CHJU	CHWN	KANR	SNJU	TEGN	Average	Std. Dev.
1	7.7	6.9	7.6	6.7	7.9	7.4	$\pm 0.5$
2	5.4	4.1	5.3	4.2	7.1	5.2	$\pm 1.2$
3	6.1	4.9	3.8	3.7	6.2	4.9	$\pm 1.2$
4	6.3	4.8	3.6	4.3	5.7	4.9	$\pm 1.1$
5	6.0	5.4	3.8	3.5	5.5	4.8	$\pm 1.1$
6	6.1	4.7	3.6	4.2	5.6	4.9	$\pm 1.0$

### 4.3.3 전리층효과

#### (1) 분석 방법

전리층 효과를 보정하는 방식이 GPS-PPP의 정확도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 각기 다른 방식을 적용하여 산정한 타원체고의 정확도를 분석하였다. 관측데이터의 처리에서 위성의 궤도 및 시계오차는 IGS 통합해로 얻어진 최종궤도력과 30초 간격의 위성 시계오차 모형을 적용하였다. 전리층효과 보정방식을 L3 선형결합 관측데이터를 사용하는 CASE1과 선형결합하지 않은 데이터를 사용하여 이 효과를 추정하는 방법인 CASE2로 구분하여 분석하였다.

#### (2) 결과 및 고찰

위성 관측데이터를 처리하여 5지역 CORS의 고시 타원체고를 기준으로 추정된 타원체고의 정확도를 평가하였다. Fig. 4.4은 각각의 상시관측소에 대한 보정방식에 RMSE를 3차원 막대그래프로 도시한 것이며, Table. 4.6은

계산된 RMSE의 통계값을 요약한 것이다. CASE 2의 경우 전리층 효과를 미지수로 두고 3차원 좌표와 함께 추정하는 방식으로 정확도가 1m 내외로 계산되었으며, CASE 1에 비해 매우 낮은 정확도를 나타낸다. 이에 따라 GPS-PPP 측위에서 전리층효과를 추정하는 방식을 수로측량에 적용하는 것은 요구정확도를 고려할 때 어려울 것으로 판단된다. 반면에 CASE1의 전리층 선형결합데이터를 사용하는 방식은 센티미터 수준의 타원체고 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

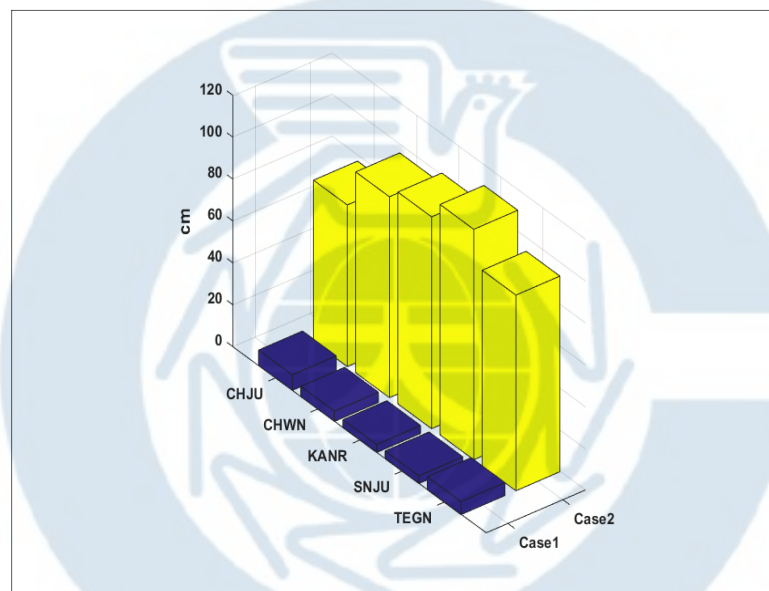


Fig. 4.4 RMSE of estimated ellipsoidal heights against stations and ionospheric corrections CORs

Table. 4.6 Statistical summary of RMSE against CASEs depending on ionospheric corrections

CASE	CHJU	CHWN	KANR	SNJU	TEGN	Average	Std. Dev.
1	7.4	4.9	3.8	3.7	6.2	5.2	$\pm 1.6$
2	77.14	95.9	101.1	110.0	93.4	95.5	$\pm 12.1$

#### 4.3.4 대류권지연

##### (1) 분석방법

GPS-PPP를 이용하여 처리 할 때 대류권지연의 보정 방식에 따라 정확도에 미치는 영향을 고찰하기 위한 실험을 수행하였다. 대류권 지연을 보정하는 방법은 경험모형을 적용하거나 천정방향 지연을 추정하는 방법을 사용할 수 있다. GPS-PPP 처리에서 대류권지연 보정방법이 타원체고 추정 정확도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 IGS 통합해석 최종궤도력과 위성시계모형을 적용한 후 무전리층 선형결합 관측데이터를 사용하여 관측데이터를 처리하였다. 이 때 천정방향 대류권 지연을 좌표와 동시 추정하는 방법(CASE1)과 추정에서 방위각의 영향을 고려하는 방법(CASE2), 그리고 Saastamoinen 경험식을 적용하는 것(CASE3)으로 구분하여 각각 타원체고를 추정하여 고시좌표와 비교하였다.

##### (2) 결과 및 고찰

Fig. 4.5은 GPS-PPP 처리 후 계산한 RMSE를 3차원 막대 그래프로 도시한 것이며, Table. 4.7은 대류권 지연 보정 방식에 따른 RMSE의 통계값을 요약한 것이다. 결과에서 나타난 바와 같이 경험식을 사용하는 CASE 3은 약 50cm 내외의 정확도를 보였으며, 이는 대류권의 습윤부분이 고려되지 못했기 때문이다. 이에 반해 CASE 1과 2와 같이 천정방향 지연을 추정한 경우는 오차가 대폭 감소한 결과를 보였다. 그러나 위성신호의 방향에 따른 영향은 고려하여 추정하더라도 정확도에 미치는 영향은 극히 제한적이었다. 이러한 결과를 고려할 때 CASE1과 2의 어떤 결 적용하여도 의미 있는 정확도 차이는 기대하기 어려우나 보다 높은 정확도 확보가 가능한 CASE2를 GPS-PPP 처리에 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

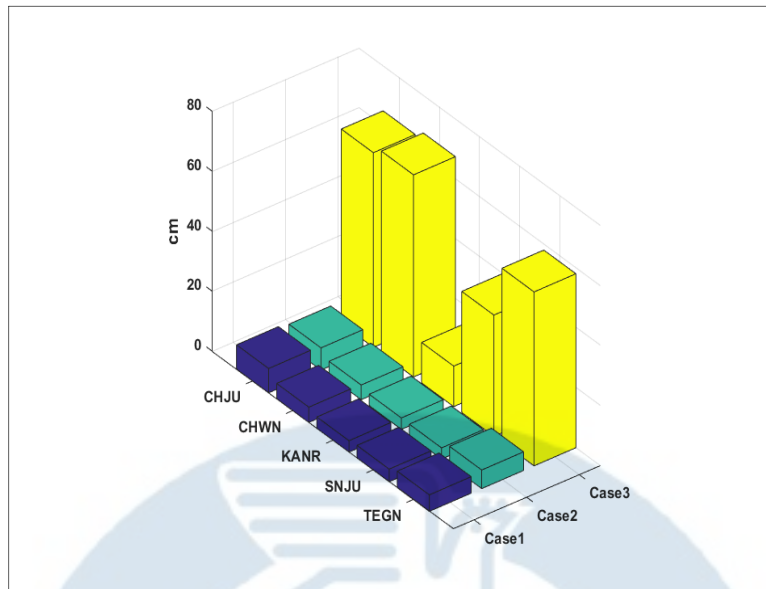


Fig. 4.5 RMSE of estimated ellipsoidal heights against stations and CASEs

Table. 4.7 Statistical summary of RMSE against CASEs depending on the troposphere corrections

CASE	CHJU	CHWN	KANR	SNJU	TEGN	Average	Std. Dev.
1	7.4	4.9	3.8	3.7	6.2	5.3	$\pm 1.7$
2	8.1	5.1	3.8	4.2	5.5	5.2	$\pm 1.6$
3	64.9	67.4	13.5	40.4	58	48.8	$\pm 22.4$

#### 4.3.5 위성 절사각

##### (1) 분석 방법

위성 절사각(elevation angle)은 지상의 수평면과 천구상의 GPS가 이루는 각으로서 높이 각도는  $0^\circ$  에서  $90^\circ$  까지 나타난다. 저각에서 고각으로 커짐



에 따라 건물과 나무에 의한 방해나 다중 경로 오차를 피할 수 있기 때문에 수신기 측정치 잡음크기가 작아지는 경향이 나타난다. 「(구)GPS에 의한 기준점측량 작업규정」 제12조 제2호에서 GPS측량에 사용하는 위성의 절사각(cut-off angle)은 원칙적으로  $15^\circ$  이상으로 규정하였으며, 이는 다중 경로, 전파장애요인, 위성배치 및 장애물 등에 의한 영향을 축소하기 위해서였다. 본 실험에서는 GPS-PPP 처리에서 절사각을  $5^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $20^\circ$  로 총 6가지로 설정하여 이 들이 타원체고 추정정확도에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히 실험에서는 IGS 통합해석 최종궤도력과 30초 간격 위성시계 모형 그리고 무전리층 선형결합을 이용한 천정방향 대류권지역을 동시에 추정하는 방법을 적용하였다.

## (2) 결과 및 고찰

Fig. 4.6는 5개 관측소를 기준으로 위성 절사각 설정에 따라 계산한 타원체고의 정확도를 RMSE로 나타낸 것이며, Fig. 4.7는 각 경우에 대한 RMSE 평균과 표준편차를 오차막대로 도시한 것이다. Table 4.8은 정량적인 분석을 위해 RMSE의 통계값을 나타낸 것이다. 결과는 위성 절사각  $15^\circ$  까지 설정하는 경우 높을수록 정확도가 증가하는 경향을 보이나  $18^\circ$  이상부터는 오히려 낮아지는 결과를 보인다. 이는 절사각이 높아질수록 상대적으로 높은 오차를 포함하고 있는 저고도 위성 데이터가 좌표추정에 사용되지 않았기 때문이다. 그러나 절사각을 너무 높게 설정되는 경우는 좌표추정에 충분한 데이터가 사용되지 못하여 그 정확도가 낮아진 것으로 유추된다. 따라서 실험을 통해 GPS-PPP 측위에서 기존 기준점 측량과 동일하게 위성 절사각을  $15^\circ$  설정하는 것이 적합할 것으로 분석하였다.

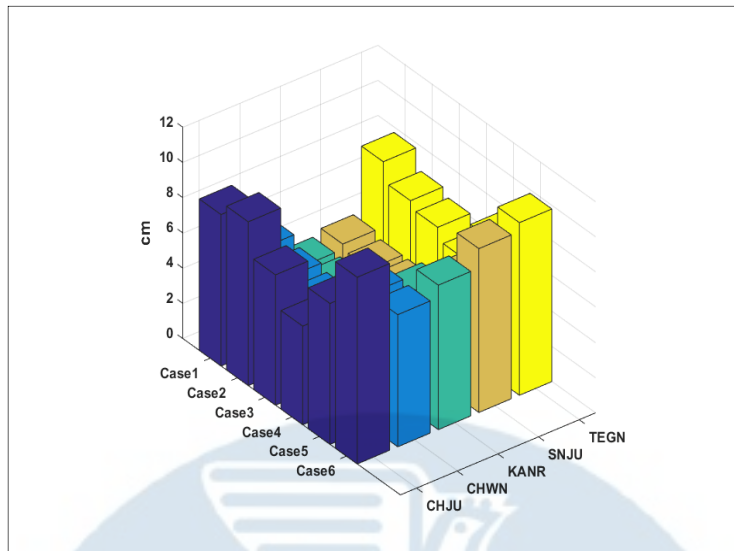


Fig. 4.6 RMSE of estimated ellipsoidal heights depending on stations cut-off angles

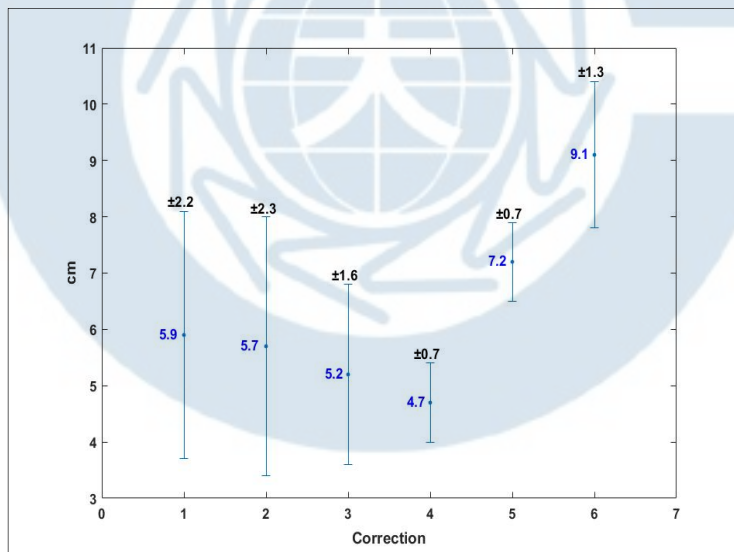


Fig. 4.7 RMSE of estimated ellipsoidal heights depending on cut-off angles

Table. 4.8 RMSE of estimated ellipsoidal heights against station and cut-off angles

CASE	CHJU	CHWN	KANR	SNJU	TEGN	Average	Std. Dev.
1	8.6	5.7	3.7	4.0	7.7	5.9	±2.2
2	9.3	5.2	3.7	3.7	6.6	5.7	±2.3
3	7.4	4.9	3.8	3.7	6.2	5.2	±1.6
4	5.6	4.5	4.3	3.8	5.5	4.7	±0.7
5	8.0	7.6	6.7	6.3	7.7	7.2	±0.7
6	10.6	7.5	8.2	9.3	9.8	9.1	±1.3

#### 4.4 정지측위 데이터를 이용한 타원체고 추정정확도 분석

##### 4.4.1 관측데이터 및 방법

수로측량에서 GPS-PPP 측위를 통해 확보 가능한 정확도 평가를 위해서는 이동환경 관측데이터의 처리결과를 분석해야 하나 본 절에서는 국토지리정보원의 상시관측소 데이터를 이용하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 이들 관측소는 센티미터 수준 이상의 정확도로 산정한 3차원 좌표가 이미 고시되어 있기 때문이다. 관측데이터의 처리에는 Table 4.9에 나타난 바와 같이 IGS 통합 최종궤도력과 30초 간격 시계모형 그리고 무전리층 선형결합데이터를 통해 대류권지역을 추정하는 방식을 적용하였다.

Table. 4.9 Scheme of error corrections and options for GPS-PPP processing

Terms	Setting Scheme / Option
Satellite clock	IGS Final orbit
Satellite orbit	IGS Final product
Ionosphere	Usage of ionosphere-free linear combination
Troposphere	Estimation of ZTD with horizontal gradient
Earth Tides	Solid tide correction
Cut-off angle	15°

GPS 위성신호가 전파되는 경우 전리층의 영향으로 계절에 따른 영향을 피할 수 없다(Rizos, 1996). 이와 같은 영향과 GPS-PPP 측위를 통해 확보 가능한 타원체고 추정정확도를 평가하기 위해 국토지리정보원의 5개 상시관측소 데이터를 계절별 1주일 동안의 Table 4.10과 같이 확보하였다. 취득한 관측데이터는 1초간격의 00시부터 24시까지 하루 분량이나 동시처리를 위하여 7일 하나의 파일로 재편집하였다.

Table. 4.10 Cases of height estimation accuracy tests by static observations

CASE	Season	Observation period	Average temperature (°C)
1	Spring	2017.03.30. ~ 04.05.	11.7° C
2	Summer	2017.07.01. ~ 07.07.	27.3° C
3	Autumn	2016.09.28. ~ 10.04.	20.8° C
4	Winter	2017.01.01. ~ 01.07.	4.2° C

#### 4.4.2 결과 및 고찰

Fig. 4.8~11는 실험 CASE에 대한 각 상시관측소에서 추정한 타원체고를 고시좌표와 비교하여 도시한 것이며, Fig. 4.12은 3차원 막대를 이용하여 CASE별 타원체고 추정정확도를 RMSE를 통해 나타낸 것이다. 이와 함께 각 CASE들에서 산정한 정확도를 비교하기 위해 평균과 표준편차를 오차막대와 표로 각각 Fig. 4.13와 Table 4.11에 요약하였다.

결과를 비교할 때 정지관측 자료처리를 통해 평가한 GPS-PPP 측위의 타원체고 추정 정확도는 약 4cm 내외이며, 예상한 바와 같이 계절에 따른 영향을 확인할 수 있다. 계절에 따른 정확도 차이를 살펴보면 겨울이 최고 그리고 여름에 최하가 됨을 알 수 있으며, 이는 전리층효과의 영향이 계절

에 따라 다르게 미치기 때문이다(Rizos, 1996). 즉 실험의 결과는 태양의 흑점활동이 전리층효과에 미치는 영향이 여름에서 초가을에 상대적으로 높다는 사실을 반영하고 있다.

주목할 것은 본 관측자료 처리 실험은 관측환경에 매우 양호하고 다중경로 영향을 축소하기 위해 고성능안테나 설치된 상시관측소에 대한 타원체고 추정정확도 평가라는 사실이다. 따라서 수로측량 등에서의 같이 수신기가 이동하는 경우 수면 혹은 선박구조물에 의해 유발되는 다중경로 및 관측 잡음의 증가하기 때문에 그 정확도는 낮을 것으로 예상된다.

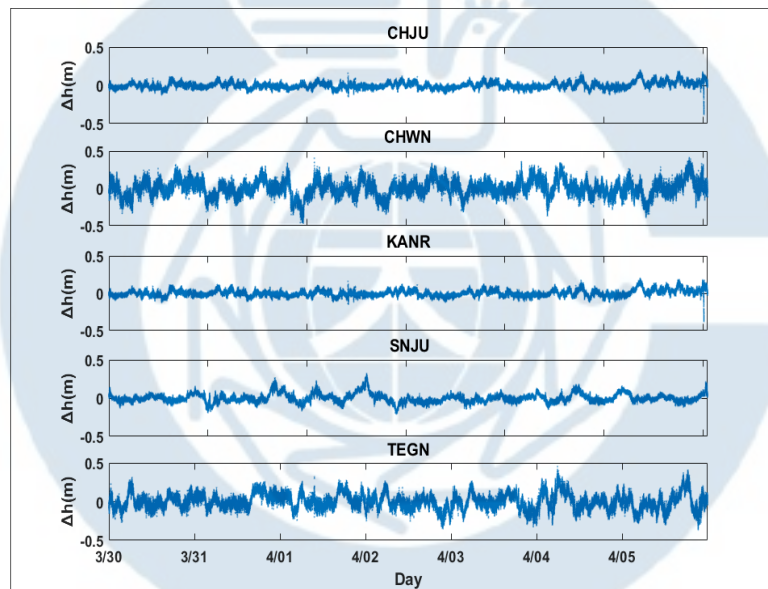


Fig. 4.8 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in spring

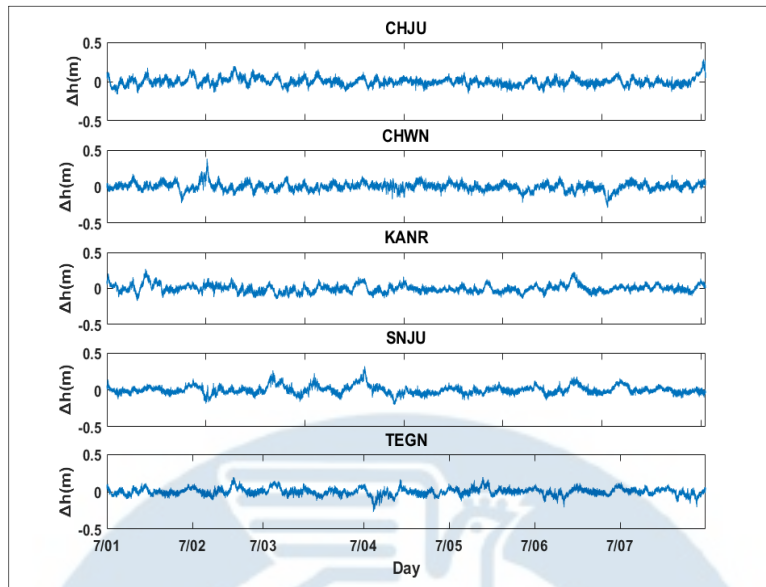


Fig. 4.9 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in summer

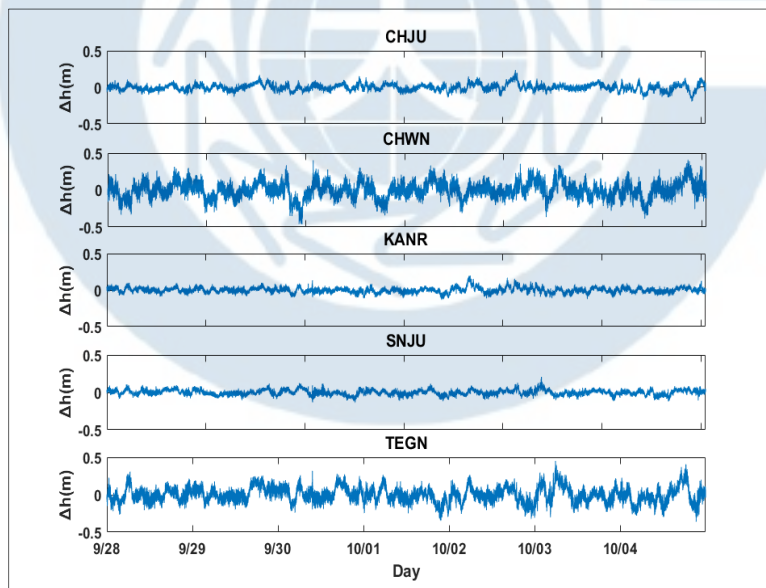


Fig. 4.10 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in autumn



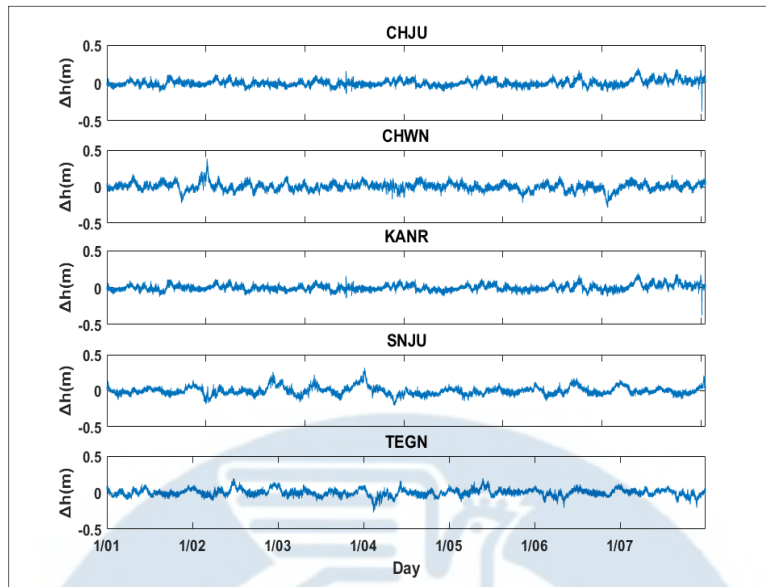


Fig. 4.11 Differences between estimated and published ellipsoidal heights of the tests in winter

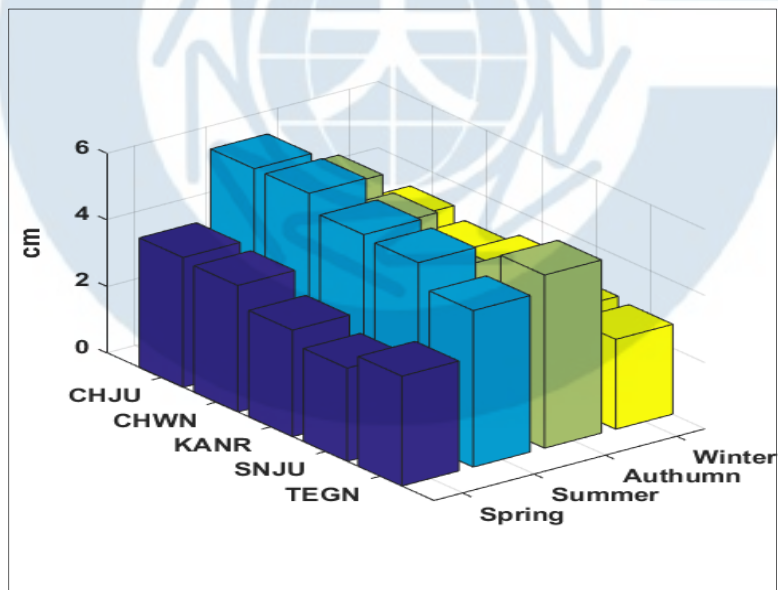


Fig. 4.12 RMSE of the estimated ellipsoidal heights against seasons

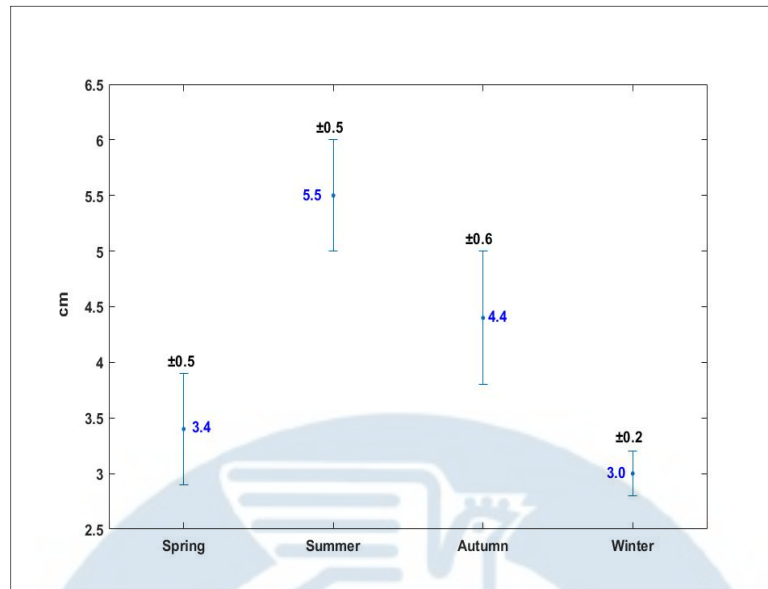


Fig. 4.13 Error bar of RMSE depending on seasons

Table. 4.11 RMSE of estimated ellipsoidal heights in the static tests

CASE	CHJU	CHWN	KANR	SNJU	TEGN	Average	Std. Dev.
1	3.9	3.8	3.2	2.8	3.3	3.4	±0.5
2	6.0	6.0	5.5	5.4	4.7	5.5	±0.5
3	4.8	4.4	3.6	4.0	5.2	4.4	±0.6
4	3.3	3.0	3.3	2.8	2.7	3.0	±0.2

## 4.5 회전테이블 관측실험

### 4.5.1 관측데이터 및 방법

상시관측소 관측데이터는 이상적인 환경에서 취득된 것으로 보다 현실에 부합하는 이동측위 환경에서 GPS-PPP 타원체고 추정정확도를 평가하기 위해 Fig. 4.14과 같은 회전테이블 실험 장치를 제작하여 관측실험을 수행하

였다. 타원체고 추정정확도 평가는 회전테이블 높이가 실험 중에 변화가 없는 것으로 가정하여 계산한 표준편차와 상대측위 방식인 단기선 GPS-PPK 처리를 통해 산정한 타원체고에 대해 계산한 RMSE를 통해 평가하였다.

관측에는 Fig. 4.14과 같이 SOKKIA GRS2600 이중주파수 수신기를 사용하여 저장간격 1초에 대해 총 80분의 데이터를 취득하였다. RMSE 계산을 위한 기준좌표 산정을 위한 PPK 처리는 실험 대상지에서 약 700m 떨어진 국토지리정보원 CHWN 관측소를 기준국에 대해 수행하였다. 이 경우 이중차분을 통해 공간적 상관성이 높은 모든 오차를 대부분 소거할 수 있어 정확한 미지정수가 결정되는 경우 예상 가능한 측위정확도는 수평과 수직방향에서 각각 1cm와 2cm 내외도 PPP 정확도 평가에 사용하기에 충분한 것으로 판단된다.



Fig. 4.14 View of the turning table test

#### 4.5.2 결과 및 고찰

Fig. 4.15은 회전테이블 관측실험 데이터를 GPS-PPK와 PPP 방식으로 처리하여 수평성분 좌표를 도시한 것이다. 회전테이블이 동일한 궤적으로 이동을 지속했기 때문에 GPS 처리에 오차가 포함되지 않는 경우라면 실선으로 나타내야 한다. 그러나 결과를 살펴보면 그러하지 못하며 원의 궤적에 두께가 있음을 확인할 수 있으며, 이는 측위기법의 정밀도를 나타낸다. 즉 정량적으로 분석하지 않았지만 GPS-PPK가 PPP에 비해서 높은 수평방향 정밀도의 측위가 가능함을 알 수 있다. 그림에서 측지계가 상이하여 발생하는 두 궤적 사이의 편이에 주목할 필요가 있으며, 이는 PPK의 결과는 정적측지계(우리나라 세계측지계) 그리고 PPP는 4차원 동적측지계에 대한 것이기 때문이다. 따라서 GPS-PPP를 통해 10cm 내외의 정확도로 수평위치 결정을 위해서는 측지계 변환이 필요함을 인지할 수 있다.

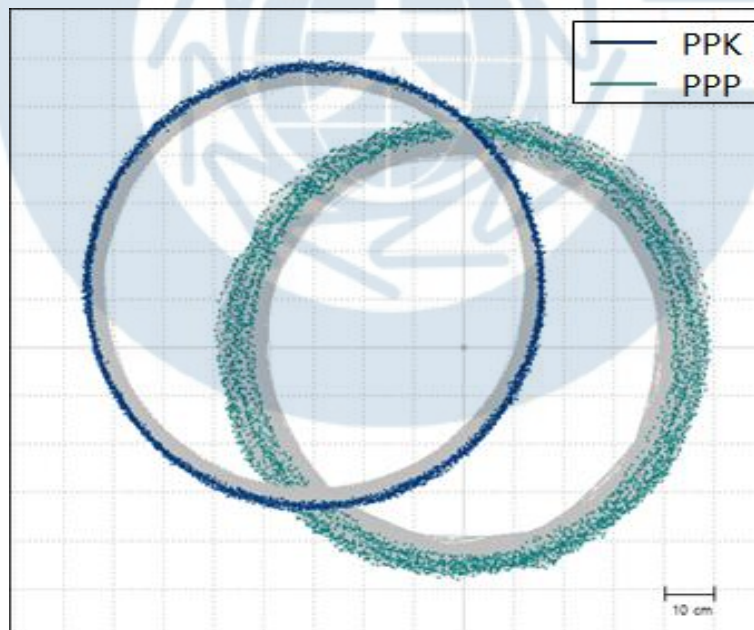


Fig. 4.15 Ground track of GPS-PPK and PPP Solutions

GPS-PPK와 PPP 처리를 통해 산정한 타원체고 시계열을 Fig. 4.16에 도시하였다. 표준편차를 통해 분석할 수 있는 타원체고 정밀도는 PPK는 1.3cm 그리고 PPP는 3.6cm 이나, 전자의 경우 시간에 따라 추정 타원체고 변화가 크게 발생하지 않으나 후자는 그렇지 못하며 이는 필터와 스무드의 초기화 영향으로 판단된다. 따라서 단기선 PPK 추정 타원체고를 기준으로 PPP 정확도 평가를 위해 RMSE를 계산하는 경우  $\pm 8.4\text{cm}$ 의 정확도를 나타내었다.

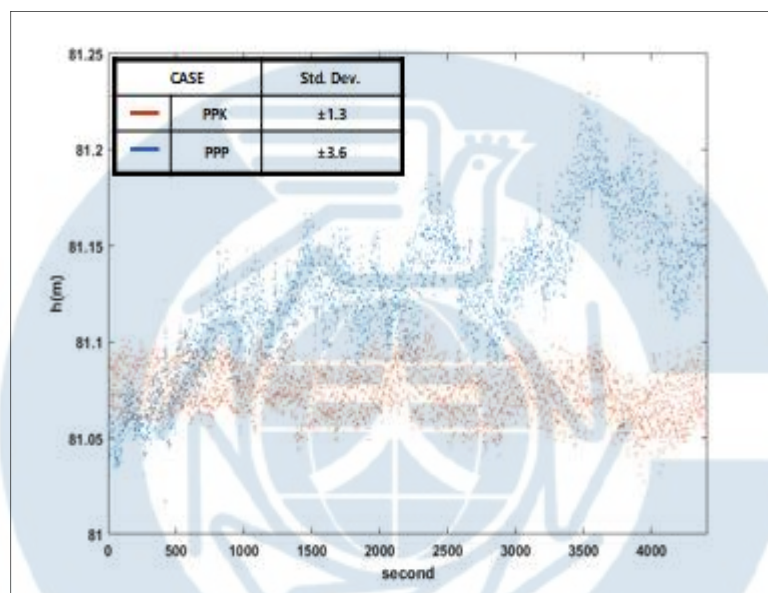


Fig. 4.16 Time series of ellipsoidal heights estimated by GPS-PPK and PPP

## 4.6 측량선 관측실험

### 4.6.1 관측데이터 및 방법

본 연구목적에 부합하는 이동측위 환경에서 GPS-PPP 측위를 통해 추정된 타원체고의 정확도 평가를 위해 측량선을 이용한 관측실험을 수행하였다. Fig. 4.17에 도시한 바와 같이 SOKKIA GRX1 일체형 수신기 3대를 설치하여 Fig. 4.18과 같이 약 2시간 동안 부산광역시 서낙동강 일원에서 1초 간격의 GPS 관측데이터를 취득하였다. 측량선 관측실험 중 GPS-PPP 타원체고 정확도 평가의 기준좌표 취득을 위한 단기선 GPS-PPK 처리에 사용할 기준국 2곳을 Fig. 4.18에 도시한바 같이 설치·운용 하였다. 실험대상 지역은 낙동강 하구언 상류에 위치하여 유수의 흐름 등에 의한 수면고 변화가 제한적으로 GPS-PPP 타원체고 정확도 평가에 용이한 환경이었다.

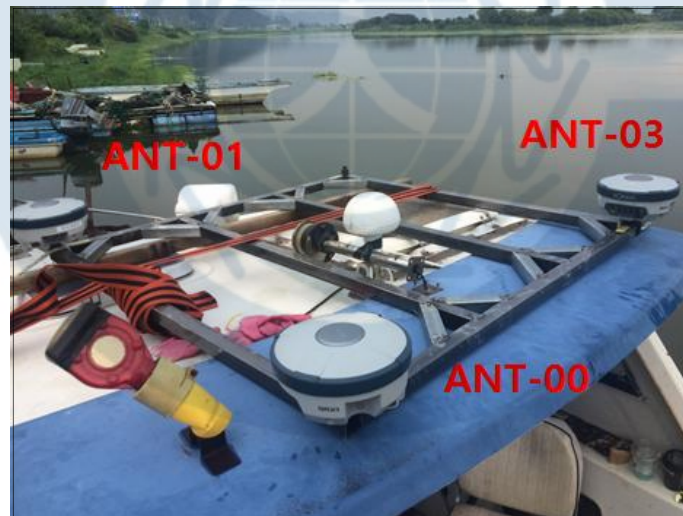


Fig. 4.17 GNSS receivers installed on the roof of the surveying vessel





Fig. 4.18 GPS-PPP campaign by survey vessel

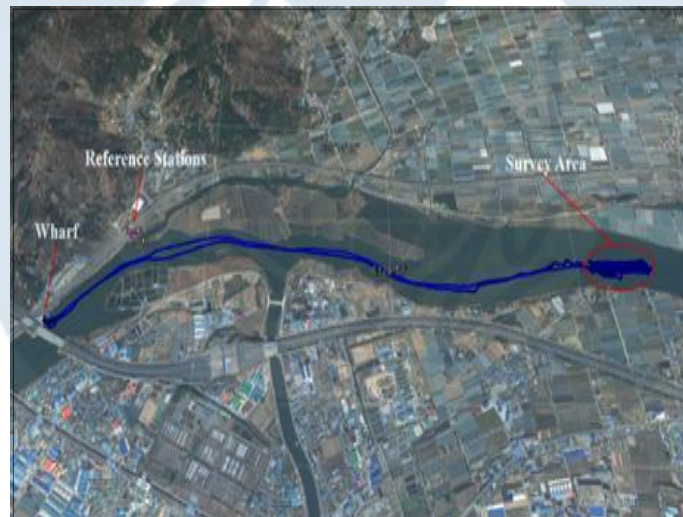


Fig. 4.19 Trajectory of survey vessel with location of reference stations

하천에서 측량선을 활용한 이동측위 실험에서 GPS-PPP의 정확도를 판단할 수 있는 기준이 없다. 따라서 상대적으로 높은 정확도로 타원체고를 추정할 수 있는 단기선 GPS\_PPK의 추정값을 기준으로 간접적으로 평가 할

수 있다. 하지만 회전테이블 실험과 달리 대상지역 인근에 활용 가능한 상시관측소가 존재하지 않아 Fig. 4.20과 같이 측량지역 인근에 2개 기준국에 SOKKA GRS2600(REFa)와 GRS2700(REFb) 수신기를 설치하였다. 단기선 GPS-PPK 처리를 위한 기준국의 좌표는 국토지리정보원 상시관측소 창원(CHWN)과 부산(PUSN)과 연결한 기선해석과 망조정을 LGO(Leica Geomatics Office)에 의해 수행하여 Table 4.12와 같이 산정하였다.



Fig. 4.20 Setup of reference station for reference generation

Table. 4.12 Estimated coordinate sets of reference stations

Station ID	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Ellipsoidal Height
REFa207	35°13 ' 34.15704 ''	128°56 ' 09.58463 ''	32.5457m
REFb207	35°13 ' 33.49255 ''	128°56 ' 08.79495 ''	32.3789m

#### 4.6.2 기준좌표 결정

GPS-PPP 추정 타원체고 정확도 평가를 위한 기준좌표를 RTKLib의 단기선 PPK 방식을 처리를 통해 취득하였다. 앞서 언급한 두 기준국들에 대해 각각 관측데이터 처리를 수행하였으며, 그 결과 중 REFa에 대한 추정한 측량선 설치 3대 수신기의 타원체고를 Fig. 4.21에 나타내었다. 기준국과 이동국 사이 기선장이 수 킬로미터 이내이며, 정확한 미지정수의 결정이 이루어졌기 때문에 GPS-PPK 추정좌표의 정확도는 1~3cm 정도로 예상할 수 있다. Fig. 22는 두 기준국을 이용한 PPK 처리를 통해 얻어진 3차원 좌표의 차이를 도시한 것으로, RMSE를 기준으로 1cm 내외로 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 측량선 설치 3대 수신기 기준좌표를 2 곳의 기준국에 대해 처리한 PPK 결과를 가중평균하여 결정하였다.

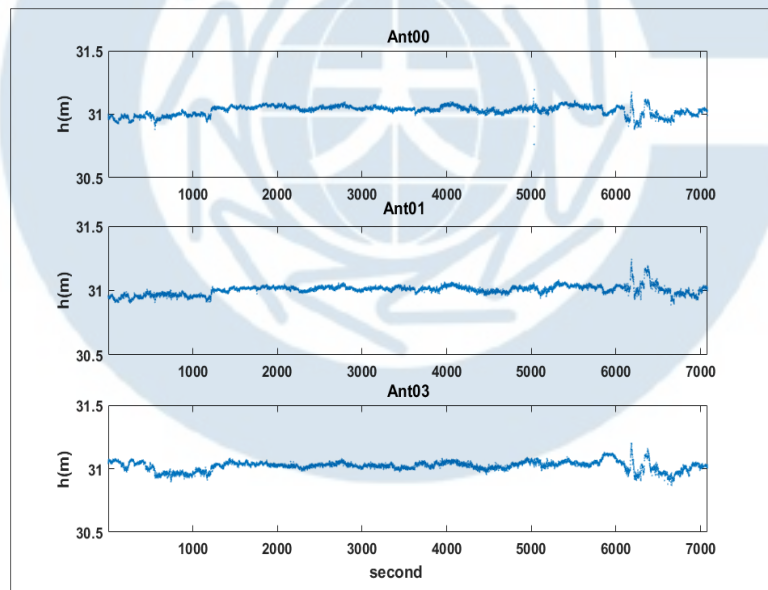


Fig. 4.21 Time series of the estimated ellipsoidal heights by GPS-PPK with respect to REFa

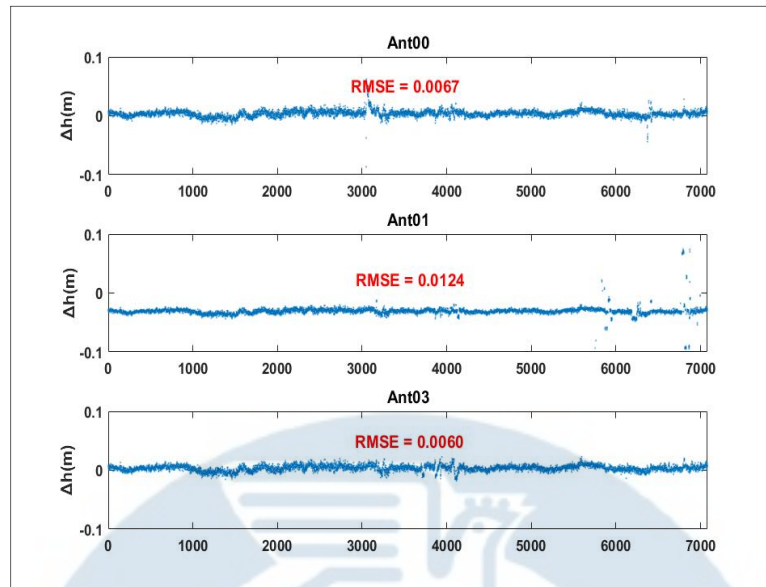


Fig. 4.22 Differences between trajectories generated by the two reference stations

#### 4.6.3 결과 및 고찰

측량선 설치 3대 수신기에 대해 각각 GPS-PPP 처리를 수행하여 추정된 타원체고의 시계열을 Fig. 4.23에 기준좌표의 그것들과 같이 도시하였다. 기준좌표 타원체고와 비교할 때 GPS-PPP 처리 결과들은 시간에 따라 유사한 경향을 보이거나 약 9cm 수준의 편의를 보이고 있다. 이는 무전리층 선형 결합 관측데이터를 이용하여 천정방향의 대류권지연과 실수형미지정수 동시추정에 따른 것으로 판단된다. 즉 기준좌표 산정에 사용한 단기선 PPK 처리에서는 이중차분의 적용으로 대류권지연의 영향이 대부분 소거되고, 정확한 미지정수가 결정되었으나 PPP는 그러하지 않았기 때문이다.

Fig. 4.24는 GPS-PPP 추정 타원체고와 기준좌표의 그것과의 차이를 그리고 Fig. 4.25는 이들로부터 계산한 RMSE를 나타낸 것이다. 따라서 본 실험

을 통해 판단할 수 있는 GPS-PPP 타원체고 추정 정확도는  $\pm 9\sim 16.0\text{cm}$  수준이다. 수신기들 사이의 정확도 차이는 설치위치에 따른 다중경로의 영향 그리고 측량선이 항해에 따른 자세변화로 선박 구조물이 위성신호 수신에 일정한 부분 장애를 유발했기 때문인 것으로 판단된다.

실험에 의해 평가된 정확도와 Table 2.1의 IHO 수로측량 요구정확도와 비교할 때 수심에 따라 특등급을 만족하는 것을 알 수 있다. 그러나 IHO 정확도 표준은 측량 기준면 및 수심관측 불확실성을 모두 포함한 것으로, 이들을 같이 고려하는 경우 GPS-PPP 방식을 적용한 ERS 수로측량을 특등급에 적용하기에는 무리가 따를 것으로 판단된다. 따라서 수심 1~100m의 1등급 측량의 경우 요구정확도가 0.5~1.39m 수준으로 GPS-PPP 측위를 ERS 수로측량에 적용 가능할 것으로 분석되었다.

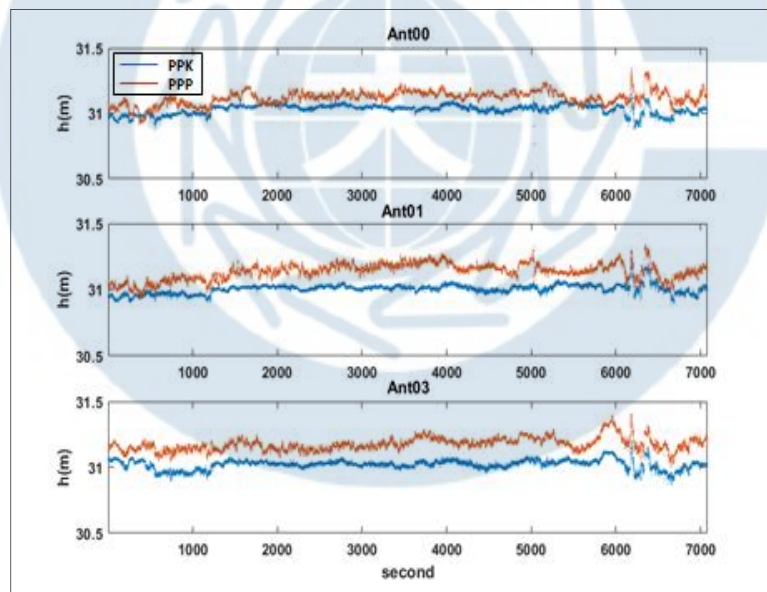


Fig. 4.23 Time series of ellipsoidal heights obtained by GPS-PPK and PPP processing

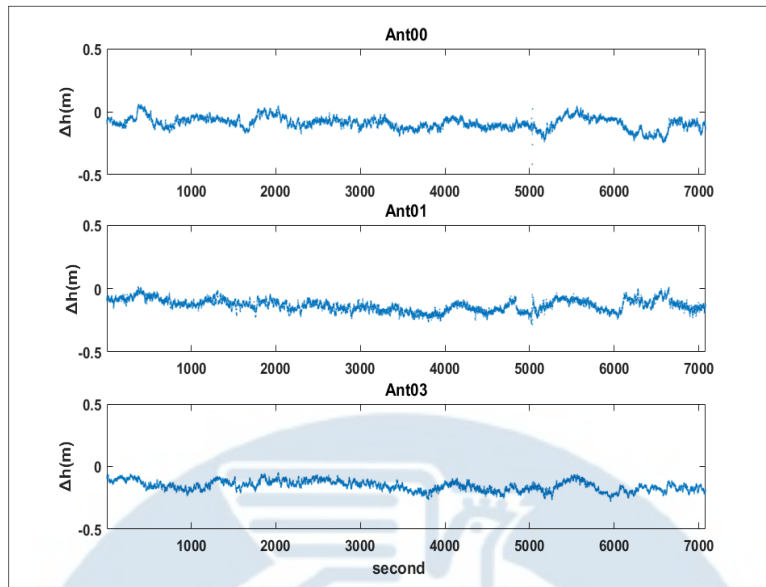


Fig. 4.24 Comparison of the PPP-estimated ellipsoidal heights with those of the references

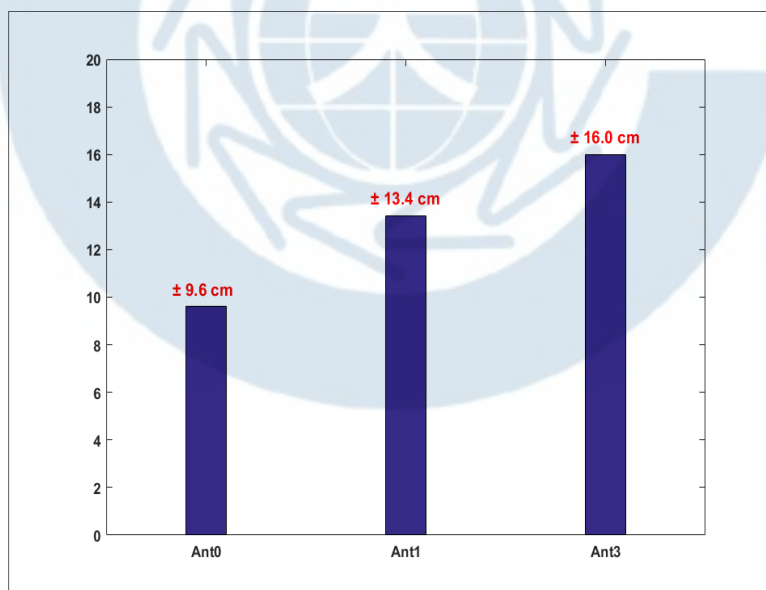


Fig. 4.25 RMSE of GPS-PPP estimated ellipsoidal heights with respect to the reference trajectories



## V. 결론

본 논문에서는 GPS-PPP 측위기법의 수로측량 적용을 고려하여 이론과 실험적 연구를 병행하여 관측자료 처리 방법과 타원체고 추정 정확도를 분석하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 위성 궤도력 및 시계 오차는 IGS 해석센터의 결과물을 이용해 보정할 수 있으며, 실험을 통해 분석한 결과 CODE 5초 간격 최종결과물을 이용하는 경우 가장 높은 타원체고 추정 정확도를 나타내었으나, 시계오차 모형의 파일 크기가 90Mb 이상 되어 데이터 관리에 어려움이 따른다. 따라서 파일 크기가 상대적으로 작고 정확도에 큰 영향을 미치지 않은 IGS 30초 간격 통합해를 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 최종과 신속해석 결과물을 이용한 타원체고 정확도 차이는 1~2cm 수준으로 목표정확도가 상대적으로 낮고 고려하여 신속한 측량결과의 처리가 필요한 경우 신속해를 이용해 궤도와 시계오차를 보정할 수 있을 것이다.

둘째, 전리층은 효과를 추정하여 처리하는 방식과 L3 선형결합을 통해 보정할 수 있으나, 전자의 경우 1m의 바이어스가 발생하며 후자로 효과를 보정할 경우 5cm 수준으로 이 오차는 반드시 L3 선형결합을 통해 축소되어야 할 것이다. 대류권지연 오차는 경험식을 적용하는 방법과 좌표와 동시에 추정하여 고려할 수 있으나, 후자가 월등한 정확도를 보여 이 방법의 적용해야 할 것이다. 이와 함께 위성 절사각은 원칙적으로  $15^\circ$  이상으로 처리하는 것이 타당함이 실험을 통해 확인되었다.

셋째, 상시관측소 및 이동측량을 통해 취득한 GPS 관측데이터를 GPS-PP P로 처리하여 추정 정확도를 RMSE를 통해 분석한 결과 계절에 따른 전리

층의 영향이 다르게 미치나 정지 관측실험은  $\pm 8\text{cm}$  그리고 이동측량에서는  $\pm 15\text{cm}$  이상의 정확도를 보여 IHO 정확도 표준의 특등급을 만족하였다. 그러나 IHO에서 요구하는 정확도 표준은 기준면 환산, 수심관측 등을 모두 포함하는 정확도로 이 모든 것을 고려하는 경우 본 연구의 실험결과는 GPS-PPP 측위를 특등급 수로측량에 적용하기에 어려움이 있을 것으로 분석되었다. 따라서  $0.5\text{m}\sim 1.39\text{m}$  수준의 수직정확도를 요구하는 1등급 측량에 GPS-PPP를 적용 가능할 것으로 사료된다.

본 연구는 제한된 관측자료를 이용해 GPS-PPP 측위의 타원체고 추정정확도를 분석한 것으로, 향후 이 기술을 ERS 기반 수로측량에 도입하기 위해서는 보다 다양한 관측자료를 이용한 정확도 분석과 적용성 검토가 추가로 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] FIG, Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography, FIG PUBLICATION No. 62, (2014).
- [2] IHO, standard for hydrographic surveys, Publication No. 44, 5<sup>th</sup> Edition, 15, (2008).
- [3] H. W. Hess, D. G. Milbert and S. Gill, Vertical datum transformations for kinematic GPS hydrographic surveys, U.S. Hydrographic Conference, Biloxi, Mississippi, (2003).
- [4] D. Dodd, M. Mehaffey, G., Smith, K., Barbor, S. O'Brien, M. V. Norden, Chart datum transfer using a GPS tide gauge buoy in Chesapeake Bay. International Hydrographic Review, 39-51, (2009).
- [5] D. Dodd Ellipsoidally referenced surveys separation models, FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6-10 May, (2012).
- [6] T. Ligteringen, J. Loog, L., Dorst, GNSS based hydrographic surveying: clear advantages and hidden obstacles, Proc. of 2014 GNSS Based Hydrographic Conference, (2014).
- [7] 이석배, 김기흥, 박재현, NTRIP 기반 음향측심기를 이용한 남강댐 유역의 순퇴적량 산정, 한국측량학회지, 31(4), 251-257, (2013).
- [8] 국립해양조사원, “수로측량”, <http://www.khoa.go.kr/>, (2017.12.16.)
- [9] 서정훈, 서동준, 이종출, GPS와 음향측심기의 조합에 의한 저수용량 산정, 한국지형공간정보학회, 10(1), 27-35, (2002).
- [10] 이강원, 지형 공간정보체계 용어사전, 구미서관, 387, (2016).
- [11] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, Theory and Practice, Springer-Verlag Wien, Austria, 389, (1997).
- [12] 이강원, 지형 공간정보체계 용어사전, 구미서관, 603, (2016).
- [13] C. Rizos, Principle and practice of GPS surveying, School of Surveying & Spatial Information Systems, University of New South

Wales, Sydney, Australia

- [14] 차득기, GPS 측량이해, 성림출판사, 35-36, (2006).
- [15] IGS, “Network”. <http://www.igs.org/>. (2017.12.04.)
- [16] 박정현, 이용욱, 이은수, 신속정밀궤도력과 초신속정밀궤도력을 이용한 GPS 위성좌표 계산, 한국측량학회지, 22(4), 383-390, (2004).
- [17] IGS, “IGS Product”. <http://www.igs.org/>. (2017.12.04.)
- [18] M. Ge, G. Gendt, M. Rothacher, C. Shi. and J. Liu, Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations, Journal of Geodesy, Vol. 82, 389-399, (2008).
- [19] P. Collins, Isolating and Estimating Undifferenced GPS Integer Ambiguities, Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, US, 720-732, (2008).
- [20] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, RTKLib ver. 2.4.2 Manual, (2013).

## 감사의 글

2년간의 석사 과정을 잘 마무리 하고, 졸업을 무사히 할 수 있도록 지도를 해주신 이흥규 교수님께 감사를 드립니다. 좋은 연구실에서 연구할 수 있게 배려해 주신 교수님의 조언과 지도 속에서 과정을 무사히 마칠 수 있었습니다. 그리고 부족한 논문을 심사해주신 어석홍 교수님, 류시완 교수님께 감사의 말씀 전합니다.

대학원 입학 후 2년간의 연구실 생활과 수업, 학위논문에 이르기까지, 부족함이 많았던 저에게 많은 도움을 준 해양 측지 항법 연구실의 선후배님들의 도움이 큰 힘이 되었습니다.

무엇보다도 고집스러운 아들을 항상 믿고 말없이 응원과 지원을 해주신 아버지와 어머니, 공부에 전념할 수 있도록 도와준 형에게도 감사하다는 말을 전합니다. 앞으로 더욱 발전된 모습을 보여드려 은혜에 보답하려 합니다. 지난 2년간의 석사 생활은 아직도 부족한 점과 배워야 할 점이 많은 것을 일깨워 주었습니다. 앞으로 더욱 정진하고 발전된 모습을 보여드리겠다는 말로 모든 분들에게 감사를 표하고자 합니다. 마지막으로 그 동안 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시한번 진심으로 감사드립니다.

2017년 12월 함건우 올림

## ABSTRACT

# Experimental Assessment of Heights Determined by GPS-PPP Technique for Ellipsoidally Referenced Hydrographic Surveys

*by Ham Geon Woo*

*Department of Eco-Friendly Offshore  
Plant FEED Engineering,  
Graduate School of  
Changwon National University*

This thesis has focused on the GPS-PPP positioning technique with a view to its application of ellipsoidally referenced surveys (ERS) for hydrograph. To effectively achieve its objective, theoretical and experimental studies have intensively carried out.

Based on these studies, a data processing scheme of GPS-PPP has been derived. That is, simultaneous estimation of 3 dimensional coordinates with receiver clock bias and total zenith path delay of the troposphere from the so-called ionosphere-free linear combination measurements of which elevation angles are higher than  $30^\circ$ . In this process, the satellite-dependent errors (i.e., ephemeris and clock) is corrected by application of IGS final products at 30 seconds sampling rate.



In order to evaluate potential accuracy of the GPS-PPP derived height, measurements collected on static and kinematic mode has been processed by the RTKLib software package. The accuracy was assessed by computation of root-mean-squares error (RMSE) with  $1-\sigma$  confidence level. Results reveal that achievable accuracy of the ellipsoidal heights on static and kinematic mode is better  $\pm 8\text{cm}$  and  $\pm 15\text{cm}$ , respectively. These accuracies meet tolerance of the 1<sup>st</sup> order surveys defined by International Hydrographic Organization (IHO). Nevertheless, it is of importance to note that the tolerance includes all the uncertainties, such as measurements and datum. If this issue is considered, the GPS-PPP would be effectively applied for the 1<sup>st</sup> order surveys with the ERS concept.

**KEYWORD:** GPS-PPP, Hydrographic surveys, Ellipsoidal Height Accuracy