

# 통합 GNSS 환경에서 도시공간 위성측위의 가용성 평가 시뮬레이션

## Simulating the Availability of Integrated GNSS Positioning in Dense Urban Areas

서용철<sup>1)</sup> · 이양원<sup>2)</sup>

Suh, Yong Cheol · Lee, Yang Won

### Abstract

This paper describes the availability of the forthcoming integrated GNSS (Global Navigation Positioning System) positioning that includes GPS (Global Positioning System), Galileo, and QZSS (Quasi-Zenith Satellites System). We built a signal propagation model that identifies direct, multipath, and diffraction signals, using the principles of specular reflection and ray tracing technique. The signal propagation model was combined with 3D GIS (three-dimensional geographic information system) in order to measure the satellite visibility and positioning error factors, such as the number of visible satellites, average elevation of visible satellites, optimized DOP (dilution of position) values, and the portion of multipath-producing satellites. Since Galileo and QZSS will not be fully operational until 2010, we used a simulation in comparing GPS and GNSS positioning for a 1 km×1 km developed area in Shinjuku, Tokyo. To account for local terrain variation, we divided the target area into 40,000 5 m×5 m grid cells. The number of visible satellites and that of multipath-free satellites will be greatly increased in the integrated GNSS environment while the average elevation of visible satellites will be higher in the GPS positioning. Much decreased PDOP (position dilution of precision) values indicate the appropriate satellite/user geometry of the integrated GNSS; however, in dense urban areas, multipath mitigation will be more important than the satellite/user geometry. Thus, the efforts for applying current technologies of multipath mitigation to the future GNSS environment will be necessary.

Keywords : Integrated GNSS Positioning, GNSS Availability Simulation, 3D GIS

### 초 록

본 연구에서는 가까운 장래에 실현될 GNSS(Global Navigation Positioning System) 결합측위의 가용성을 평가하기 위하여, GPS(Global Positioning System), Galileo 및 QZSS(Quasi-Zenith Satellites System)의 직달파(direct signal), 반사파(reflected signal), 회절파(diffraction signal) 식별을 위한 신호 전달 모형을 수립하고 이를 3차원 지리정보시스템과 결합함으로써, 위성 가시도와 측위 오차 요소를 모사 측정하였다. 중고층 빌딩이 밀집한 일본 동경도청 부근의 1km×1km 구역을 40,000개의 5m×5m 격자로 구획하여 실시한 시뮬레이션을 통해, GPS 측위와 GNSS 결합측위에 있어서 가시위성의 개수, 위성 고도, 정밀도 저하율(dilution of position : DOP), 의사거리 다중경로 오차(pseudorange multipath error : PME)를 비교 평가하였다. GNSS 결합측위에서는 가시위성 및 직달파 위성의 개수가 현저히 증가함을 확인할 수 있었으며, 위성고도의 평균은 GPS 측위에서보다 약간 낮게 나타나지만, 위성들의 기하학적 배치가 양호하게 이루어져 정밀도 저하율이 매우 감소함을 알 수 있다. 고밀도 도시공간에서는 빌딩 등의 전파 반사로 인해 발생하는 의사거리 다중경로 오차를 완화하는 것이 사용자 위치 정확도를 향상시키기 위한 핵심적인 요소이므로, 수신기 안테나의 설계 및 배치, 신호처리 및 공간통계 기법 등을 GNSS 결합측위에 적합하도록 개선하는 것이 필요할 것이다.

핵심어 : GNSS 결합측위, GNSS 가용성 시뮬레이션, 3차원 지리정보시스템

1) 정희원 · 부경대학교 위성정보과학과 조교수(Email:suh@pknu.ac.kr)

2) 연결저자 · 동경대학 공간정보과학연구소 연구원(Email:jwlee@iis.u-tokyo.ac.jp)

# 1. 서론

항법서비스의 핵심기술인 위성측위는 주로 위성 가시도(satellite visibility)과 측위 오차 요소(positioning error factor)를 통해 그 가용성을 평가한다(Seeber, 2003; Conley 등, 2006). 현재 전지구적으로 운용되고 있는 미국의 GPS(Global Positioning System)와 더불어, 유럽연합이 개발 중인 전지구적 측위 시스템인 갈릴레오(Galileo) 및 일본이 추진하고 있는 지역적 측위 시스템인 준천정 위성 시스템(Quasi-Zenith Satellites System : QZSS) 등이 상호 운용되는 2010년 이후에는, 위성측위의 가용성이 더욱 향상될 것으로 기대된다(Dellago 등, 2003; Kawano 등, 2004; 이동락 등, 2005; 배경호 등, 2006).

이에 따라 고밀도 도시공간에서도 다수의 가시위성이 추가적으로 확보될 것임에 틀림없으나, 빌딩 등의 전파 반사로 인해 발생하는 다중경로(multipath)의 영향 때문에 측위오차는 일정 정도 상존할 것으로 예상된다. 빌딩이 밀집한 도시공간을 대상으로 GPS의 가용성을 시뮬레이션 하는 연구들은(Suh 등, 2004; Taylor 등, 2005; 2007; Lee 등, 2006; Li 등, 2006; Suh and Shibasaki, 2007) 위성 궤도 모형과 3차원 지형데이터를 이용하여 GPS 위성측위의 가용성을 실제에 가깝게 모사 측정하였으나, 통합 GNSS(Global Positioning Satellite System) 환경에서의 가용성 평가에 이르지 못하는 못하였다.

본 연구에서는 고밀도 도시공간에서 GPS+Galileo+QZSS 결합측위의 가용성을 평가하기 위하여, 직달파(direct signal), 다중경로(multipath), 회절파(diffraction)를 식별하는 신호 전달 모형(signal propagation model)을 구축하고 이를 3차원 지리정보시스템(three-dimensional geographic information system : 3D GIS)과 결합함으로써, 가시위성의 개수, 위성 고도, 정밀도 저하율(dilution of position : DOP), 의사거리 다중경로 오차(pseudorange multipath error : PME) 등을 모사 측정하는 시스템을 제시한다. 또한, 이 시뮬레이션 시스템을 이용하여 일본 동경도청 부근의 고층빌딩 구역을 대상으로 GPS 측위와 GNSS 결합측위의 가용성을 비교 평가한다.

## 2. 시뮬레이션 시스템의 구성

GPS+Galileo+QZSS 결합측위의 가용성 시뮬레이션 시스템은 그림 1과 같이 구성되며, 모사 측정 결과는 가용성 평가 지도(availability estimation map)의 형태로 출력된다.

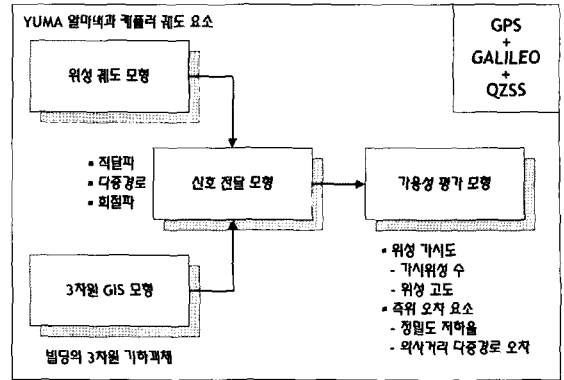


그림 1. GNSS 가용성 평가를 위한 시뮬레이션 시스템의 구성

### 2.1 위성 궤도 모형

안정적인 위성 궤도운동은 정밀한 위성측위에 있어 불가결한 요소이며, 최근의 항공우주공학 발전은 GPS 위성의 궤도운동에서 발생하는 오차를 최소화하고 있다. 이에, 알마넵(almanac) 데이터를 이용하여 실제와 동일하게 위성 궤도운동을 모형화하는 것이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 YUMA 포맷의 알마넵 데이터와 케플러 궤도 요소 (Keplerian orbital elements)를 통해 GPS, Galileo 및 QZSS의 위성 궤도를 모형화하여 시뮬레이션에 사용한다.

### 2.2 신호 전달 모형

GNSS 위성 전파가 지상에 도달하는 방식은 신호 경로의 특성에 따라 직달파, 다중경로, 회절파로 구분된다. 다중경로는 반사파로 인해 GNSS 신호가 둘 이상의 경로를 통해 수신기에 도달하는 것을 말하고, 회절파는 빌딩 모서리 등에 의해 전파가 굴절되어 도달하는 것이다. 본 연구의 신호 전달 모형은 3차원 빌딩 데이터와 광선 추적 기법(ray tracing technique)을 이용하여 이러한 세 가지 유형의 위성 전파를 식별한다.

다중경로 모형은 동일한 입사각과 반사각을 가지는 경면 반사(specular reflection)의 원리를 이용한다. 즉, 위성-빌딩벽면-수신기 사이의 기하학적 관계가 경면 반사에 해당하면, 그 위성은 다중경로를 발생시키는 위성으로 간주되는 것이다(그림 2). 어떤 수신기 지점에 전달되는 다중 경로를 식별하기 위해서는, 모든 위성의 궤도상의 위치와, 수신기 지점으로부터 일정 반경 내의 모든 빌딩 벽면에 대하여 경면 반사 해당 여부를 조사하여야 한다. 이때, 두 차례 이상의 반사를 거쳐 수신기에 도달하는 다중경로(예를 들어, 위성-빌딩벽면A-빌딩벽면B-수신기)는 강도

가 매우 약한 신호로서 일반적인 수신기에서 미리 배제되므로, 이 연산 과정에서는 고려하지 않는다.

회절파 모형은 빌딩 모서리에 전파가 부딪혔을 때 발생하는 굴절 현상인 나이프-에지 효과(knife-edge effect)에 기초한다. 어떤 수신기 지점에서 볼 때, 회절파를 발생시키는 위성은 매우 근소한 차이로 LOS(line-of-sight)의 확

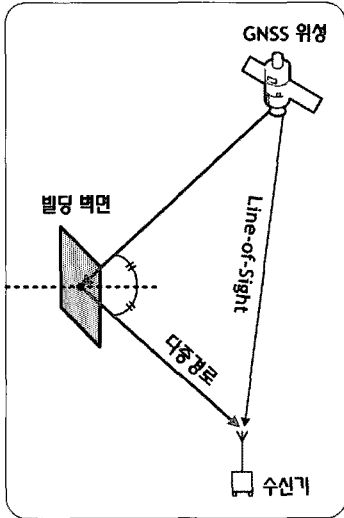
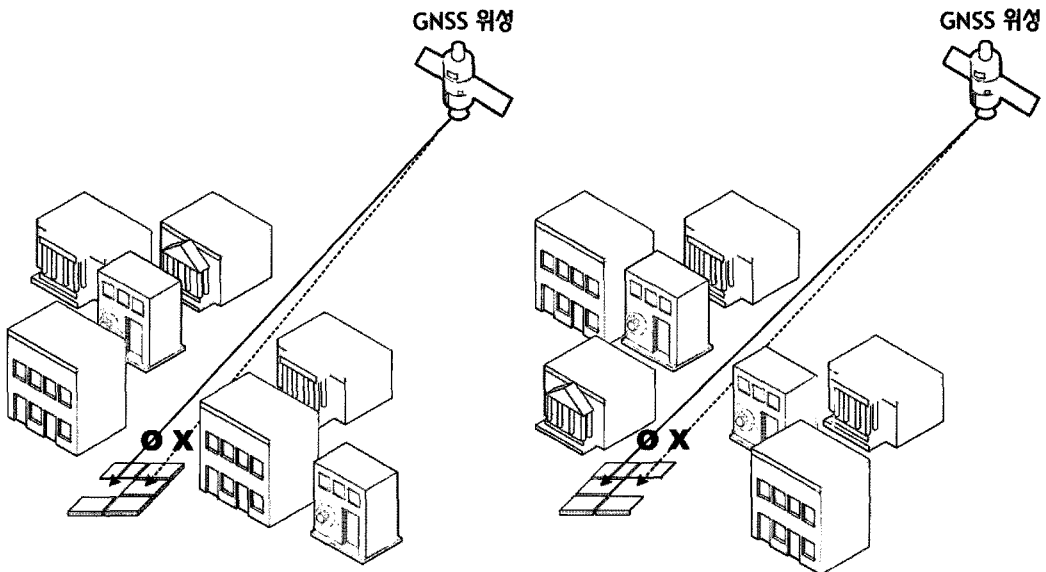


그림 2. 경면 반사와 3차원 빌딩 정보를 이용한 다중경로의 식별

보 또는 미확보가 모호한 위치에 있으므로(Li 등, 2006), 이러한 특성을 이용하여, 가시위성 중에서 약간의 LOS 변동으로 비가시위성이 되는 경우와, 비가시 위성 중에서 LOS를 미세하게 이동시키면 가시위성이 되는 경우를 식별함으로써 회절파 여부를 판단한다. 이와 같은 약간의 LOS 변화를 포착하기 위하여, 본 연구의 신호 전달 모형에서는 위성의 위치를 고정한 채 수신기 지점에 인접한 5개의 격자 셀에 대한 위성 가시여부를 조사한다(그림 3). 사용자가 위성에 가까운 쪽으로 이동하였을 때 가시위성이 비가시 위성으로 바뀌거나, 사용자가 위성에서 먼 쪽으로 움직였을 때 비가시위성이 가시위성으로 변경된다면, 그 위성은 회절파를 발생시킬 가능성이 있다. 이때 위성-수신기를 잇는 직선과 굴절점-수신기를 연결하는 직선이 이루는 각의 크기가 일정 임계치 이상이면, 그 위성은 회절파를 발생시키는 위성으로 간주된다.

### 2.3 가용성 평가 모형

위성측위의 가용성 평가기준이 되는 위성 가시도 및 측위 오차 요소는 세부적으로 가시위성의 개수, 위성 고도, 정밀도 저하율, 의사거리 다중경로 오차로 구분하여 살펴볼 수 있다. 신호 전달 모형을 이용하여 직달파, 다중경로, 회절파를 식별함으로써 어떤 수신기 지점에 대한 가시위성의 개수를 계산하고, 각 가시위성의 궤도상의 위치



(a) 가시위성 신호에 대한 회절파 식별

(b) 비가시위성 신호에 대한 회절파 식별

그림 3. 나이프-에지 효과와 3차원 빌딩 정보를 이용한 회절파의 식별

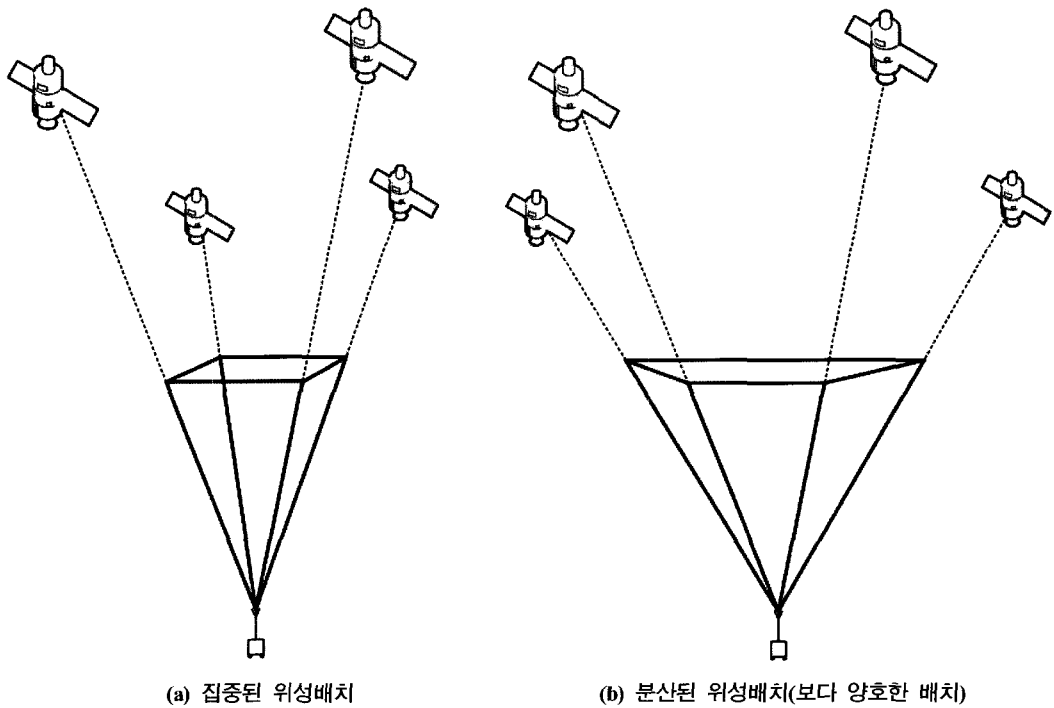
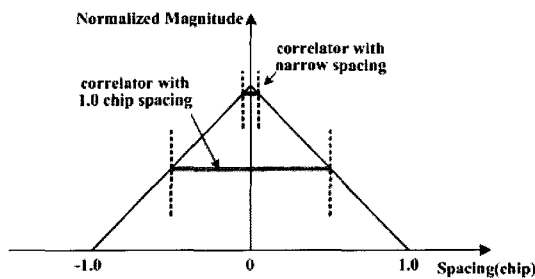
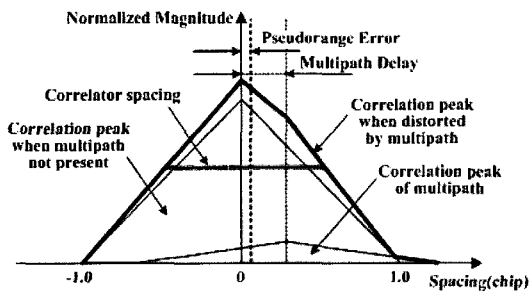


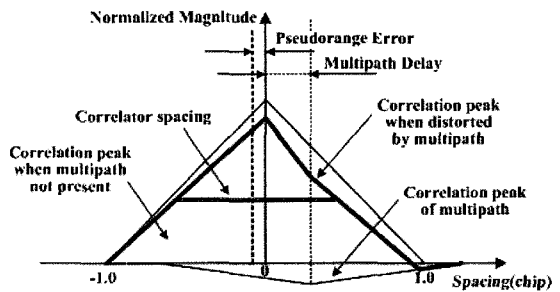
그림 4. 정밀도 저하율 계산의 기초가 되는 위성-사용자 간의 기하학적 관계



(a) 다중경로가 존재하지 않을 때의 상관 정점(correlation peak)



(b) 정적(constructive) 반사파의 개입이 존재할 때의 의사거리 다중경로 오차



(b) 부적(destructive) 반사파의 개입이 존재할 때의 의사거리 다중경로 오차

그림 5. 의사거리 다중경로 오차 계산을 위한 지연로크 루프 상관기의 모사 모형

를 통해 위성 고도를 구한다. 정밀도 저하율은  $n$ 개의 위성과 수신기 위치에 의해 구성되는 입체의 체적을 이용하여(그림 4), 기하학적 정밀도 저하율(geometric dilution of position : GDOP), 수평 정밀도 저하율(horizontal dilution of position : HDOP), 수직 정밀도 저하율(vertical dilution of position : VDOP), 위치 정밀도 저하율(position dilution of position : PDOP) 등의 지수로 산출된다. 이러한 정밀도 저하율이 위성의 배치에 의해 결정되는 데 비해, 의사거리 다중경로 오차는 지형조건에 따른 반사파의 영향에 민감하다. 의사거리(pseudorange)는 신호가 전달되는 경로에 따른 위성-수신기 거리이며, 의사거리 오차(pseudorange error)는 주로 대기의 간섭, 수신기 오차, 다중경로에 의해 발생하지만, 본 연구에서는 대기의 간섭과 수신기 오차는 일정 범위 내에서 고정적인 것으로 간주하고, 다중경로에 의한 의사거리 오차에 초점을 두어, 일반적인 수

신기에서 사용되는 지연로크 루프 상관기(delay-lock loop correlator)의 모사 모형(그림 5)을 이용하여 이를 계산한다. 지연로크 루프 상관기에 관한 논의는 Spilker(1996)와 Ward 등(2006)의 문헌에서 상세히 다루고 있다.

### 3. 도시공간에서의 가용성 평가 시뮬레이션

시뮬레이션의 장점 중 하나는 앞으로 발생할 상황에 대한 예측 및 분석이다. Galileo와 QZSS가 완전 운용될 예정으로 있는 2010년 이전에는 시뮬레이션을 통해 GPS+Galileo+QZSS 결합측위의 가용성을 평가하고, 그 이후 현장측량을 통해 취득한 측정치를 시뮬레이션 예측치와 비교할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 중고층 빌딩이 밀집한 일본 동경도청 부근의 1km×1km 구역을 대상으로 GNSS 결합측위의 가용성을 모사 측정하였다. 지형의 변

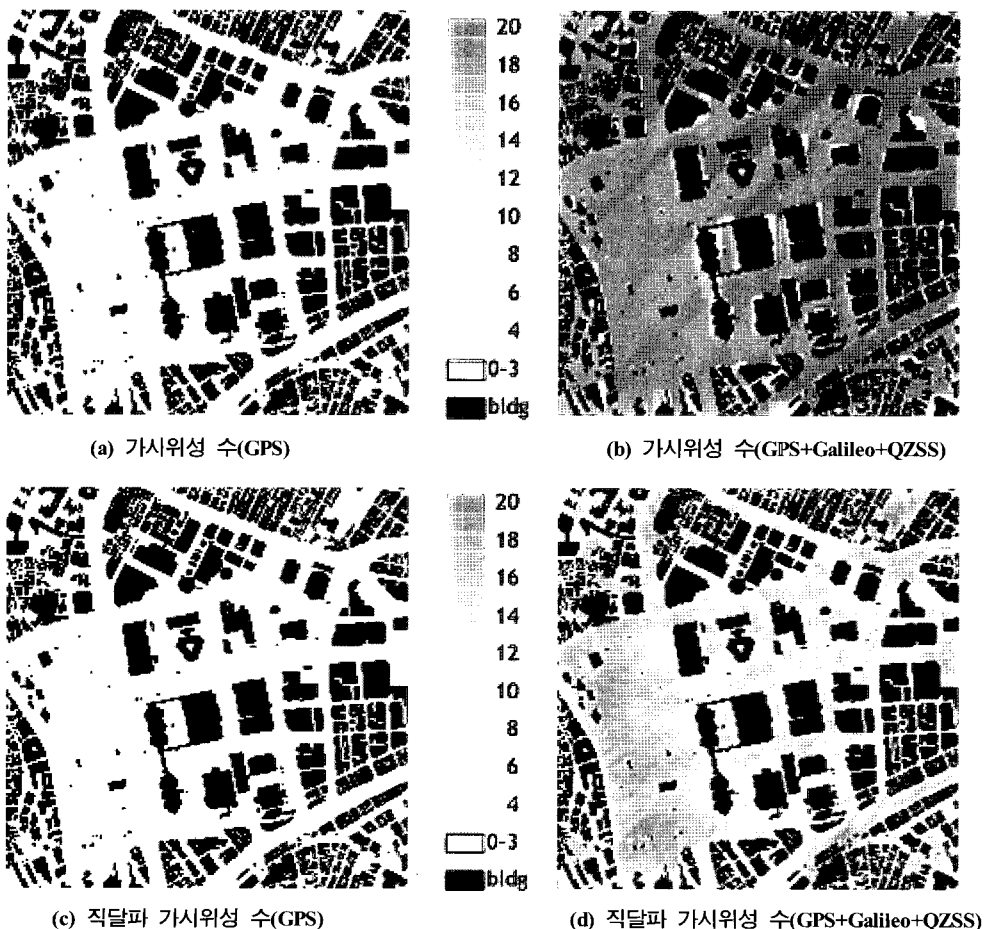


그림 6. 전체 가시위성의 개수(직달파, 다중경로, 회절파 포함)와 직달파 가시위성의 개수

이를 반영하기 위하여 대상지역은 40,000개의 5m×5m 격자로 구획되었으며, 각 셀의 중앙 좌표가 측정 연산의 입력값으로 사용되었다. 가시위성의 마스크 각(mask angle)은 일반적인 수신기의 기본값인 15도를 적용하였다. 시뮬레이션 시각은 2006년 12월 10일 오전 9시로 설정되었으며, 이 시각의 GPS 궤도 정보는 YUMA 알마낙 #380으로부터, 그리고 Galileo 및 QZSS 궤도 정보는 유럽연합(European Commission Directorate-General Energy and Transport, [http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport)) 및 일본 우주항공 연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, <http://www.jaxa.jp>)의 인터넷 홈페이지로부터 취득되었다.

그림 6에서 보듯이 GNSS 결합측위에서는 가시위성 및 직달파 위성의 개수가 현저히 증가할 것으로 예상된다. 또한 GPS 측위 및 GNSS 결합측위 공히, 전체 가시위성의 개수에 비해 직달파를 발생시키는 가시위성의 개수는, 빌딩의 영향으로 인해 지표상의 위치에 따라 미세한 변이가 있음이 발견된다. 가시위성 고도의 평균(그림 7)은 직달파 가시위성의 개수와는 달리 국지적인 차이가 크지는 않으며, GPS 위성들이 약간 더 높은 고도에 분포하는 것으로 나타난다.

어떤 수신기 위치에 대한 정밀도 저하율은 가시위성 조합을 이용하여 계산된다. GNSS 결합측위의 경우 가시위성이 최대 20개에 달하기 때문에, 모든 조합을 이용하는 것은 계산상 효율적이지 않으므로(Park and How, 2001), 이 실험에서는 가시위성의 개수가 15보다 클 경우에는 고도기준으로 상위 15개 위성을 선택하여 조합을 구성한

다. 그림 8은 3차원 위치 정밀도 저하율이 최적화되었을 경우를 모사 측정한 것이며, 이는 위성의 기하학적 배치에 의해 산출되므로 국지적으로 민감한 차이를 보이지는 않는다. 정밀도 저하율은 이상적인 상황에서는 1이며, 3 이하는 정밀도가 우수, 6 이하는 양호, 8 이하는 보통, 20 이상은 불량으로 평가되는데, 다수의 가시위성이 확보되는 GNSS 결합측위에서 전체적으로 정밀도 저하율이 낮게 나타난다. 그림 7에서 위성고도의 평균은 GPS보다 약간 낮게 나타나지만, 그림 8에서 GNSS 결합측위의 정밀도 저하율이 상당히 낮은 것은 Galileo 및 QZSS 위성들의 기하학적 배치가 적절하게 이루어짐을 의미한다.

그림 9는 의사거리 다중경로 오차에 대한 분석으로서, 지연로 루프 상관기의 모사 모형을 통해 계산된 의사거리 오차가 ±5미터 이상인 가시위성의 개수의 전체 가시위성의 개수에 대한 비율을 나타낸 것이다. 위성의 기하학적 배치가 양호한 통합 GNSS 환경에서도, 고밀도 도시공간에서는 빌딩 등의 전파 방해로부터 자유로울 수 없으므로 전체적으로 다중경로에 취약한 경향을 띠며, 빌딩의 공간적 분포에 따라 매우 미세한 국지적 변이를 보인다. 위성측위에서 최종적인 사용자 위치 정확도는 통상적으로 정밀도 저하율(2차원 및 3차원)과 의사거리 오차(대기의 간섭, 수신기 오차, 의사거리 다중경로 오차를 포함)의 함수로 나타내므로, 정밀도 저하율이 매우 낮은 통합 GNSS 환경에서는 다중경로 등으로 인한 의사거리 오차를 줄이는 것이 도시공간에서 사용자 위치 정확도를 향상시키는 핵심임이 다시 한 번 확인된다.

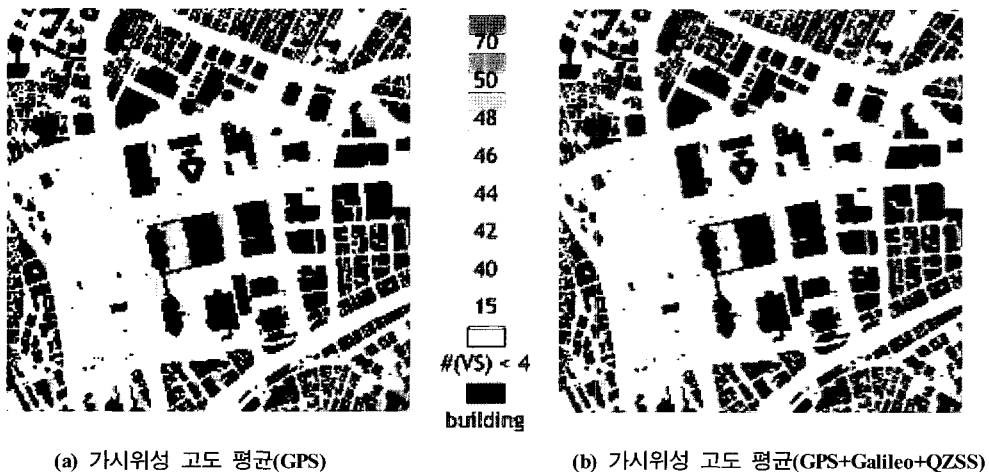


그림 7. 가시위성 고도의 평균

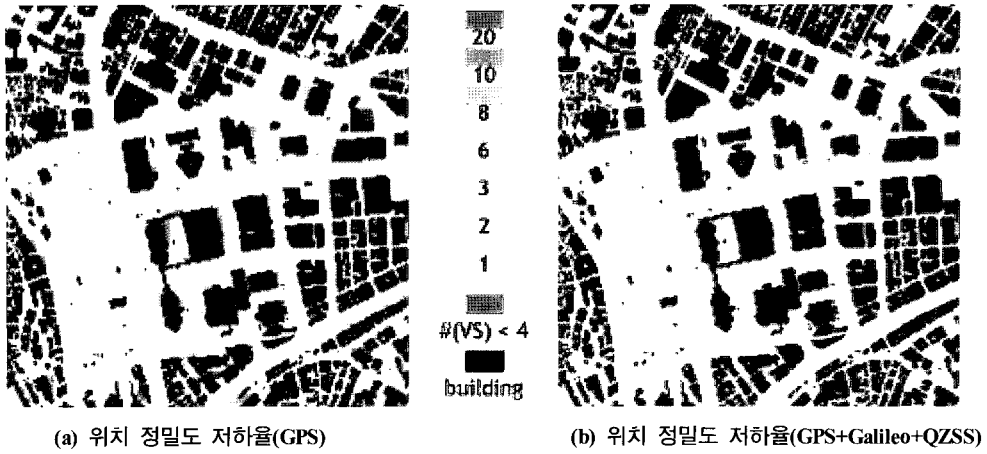


그림 8. 3차원 위치 정밀도 저하율의 최적화값

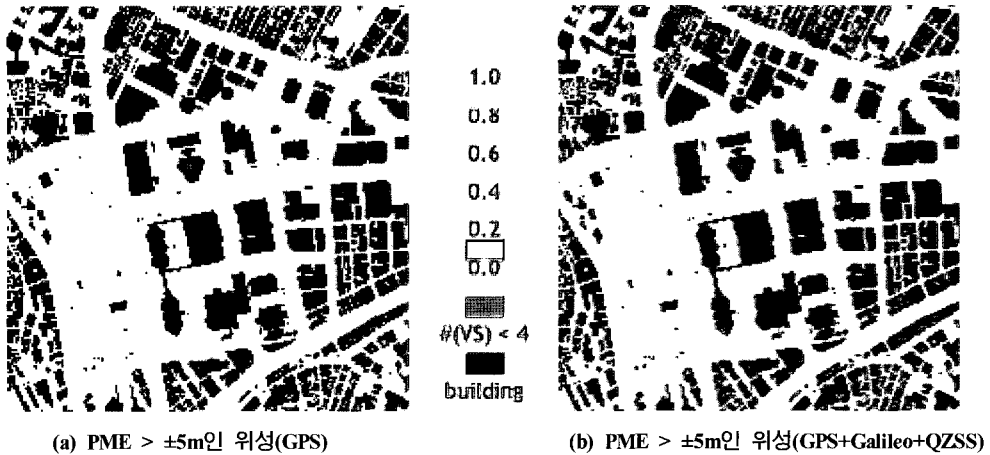


그림 9. 의사거리 다중경로 오차(PME)가 ±5미터 이상인 위성의 비율

#### 4. 결 론

GPS, Galileo 및 QZSS가 상호 운용되는 2010년 이후의 통합 GNSS 환경에서는 고밀도 도시공간에서도 다수의 가시위성이 확보되지만, 빌딩 등의 전파 반사로 인해 발생하는 다중경로의 영향 때문에 일정 정도의 측위오차는 피할 수 없을 것으로 예상된다. 빌딩이 밀집한 도시공간을 대상으로 GPS의 가용성을 시뮬레이션 하는 기존의 연구들과는 달리, 본 논문에서는 통합 GNSS 환경에서의 위성측위 가용성 평가를 위한 모사 측정 시스템을 제시하였고, 일본 동경도청 부근의 고층빌딩 구역을 대상으로 GPS 측위와 GNSS 결합측위의 가용성을 비교 평가하였다.

다수의 가시위성이 확보되는 GNSS 결합측위에서 위성 고도의 평균은 GPS 측위의 경우보다 약간 낮게 나타나지

만, 위성들의 기하학적 배치가 양호하게 이루어져 위치 정밀도 저하율이 매우 감소하게 된다. 오픈 스페이스에서는 위치 정밀도 저하율의 감소로 인해 측위오차가 상당히 줄어들겠지만, 도시공간에서는 위성들의 양호한 기하학적 배치에도 불구하고 반사파로 인한 의사거리 다중경로 오차가 여전히 문제가 된다.

Galileo와 QZSS가 완전 운용될 예정으로 있는 2010년 이후에는 현장 측정치를 수집하여, 본 연구에서 제시한 시뮬레이션의 신뢰도를 검증할 수 있을 것이다. 또한 향후 과제로서, 고밀도 도시공간에서 의사거리 다중경로 오차를 완화하기 위하여, 수신기 안테나의 설계 및 배치, 신호처리 및 공간통계 기법 등을 GNSS 결합측위에 적합하도록 개선하는 것이 필요할 것이다.

## 참고문헌

- 배경호, 허민, 이용욱, 이재원 (2006), 유럽의 Galileo 시스템을 이용한 GNSS 측위 성능 향상, 한국측량학회 2006 춘계학술 발표회 논문집, pp. 33-37.
- 이동락, 이흥규, 배경호 (2005), GPS/Galileo 결합 시스템의 측위 성능 분석, 한국측량학회지, 제 23권, 제 3호, pp. 283-292.
- Conley, R., Cosentino, R., Hegarty, C.J., Kaplan, E.D., Leva, J.L., de Haag, M.U. and van Dyke, K. (2006), Performance of stand-alone GPS, In: Kaplan, E.D. and Hegarty, C.J. (ed.), *Understanding GPS: Principle and Applications*, Artech House, Boston London, pp. 301-378.
- Dellago, R., Detoma, E. and Luongo, F. (2003), Galileo-GPS interoperability and compatibility: a synergetic viewpoint, *Proceedings of Institute of Navigation - Global Positioning System/Global Navigation Satellite System 2003*, Portland, Oregon, pp. 542-548.
- Kawano, I., Mokuno, M., Kogure, S. and Kishimoto, M. (2004), Japanese experimental GPS augmentation using Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), *Proceedings of Institute of Navigation - Global Navigation Satellite System 2004*, Long Beach, California, pp. 175-181.
- Li, J., Taylor, G., Kidner, D. and Ware M. (2004), Prediction of GPS multipath effect using LiDAR digital surface models and building footprints, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4295, pp. 42-53.
- Lee, Y.-W., Suh, Y.-C. and Shibasaki, R. (2006), Simulation-based estimation of multipath mitigation using 3D-GIS and spatial statistics, *Proceedings of Institute of Navigation - Global Navigation Satellite System 2006*, pp. 1778-1783.
- Park, C.-W. and How, J.P. (2001), Quasi-optimal satellite selection algorithm for real-time applications, *Proceedings of Institute of Navigation - Global Positioning System 2001*, pp. 3018-3028.
- Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter, Berlin.
- Suh, Y.-C., Konishi, Y., Hakamata, T., Manandhar, D., Shibasaki, R. and Kubo, N. (2004), Evaluation of multipath error and signal propagation in complex 3D urban environments for GPS multipath identification, *Proceedings of Institute of Navigation - Global Navigation Satellite System 2004*, Long Beach, California, pp. 1147-1156.
- Suh, Y.-C. and Shibasaki, R. (2007), Evaluation of satellite-based navigation services in complex urban environments using a three-dimensional GIS, *IEICE Transactions on Communications*, IN PRESS.
- Taylor, G., Li, J., Kidner, D. and Ware, M. (2005), Surface modelling for GPS satellite visibility, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3833, pp. 281-295.
- Taylor, G., Li, J., Kidner, D., Brunson, C. and Ware, M. (2007), Modelling and prediction of GPS availability with digital photogrammetry and LiDAR, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-20.
- Ward, P.W., Betz, J.W. and Hegarty, C.J. (2006), Satellite signal acquisition, tracking, and data modulation, In: Kaplan, E.D. and Hegarty, C.J. (ed.), *Understanding GPS: Principle and Applications*, Artech House, Boston London, pp. 153-241.
- 
- (접수일 2007. 5. 25, 심사일 2007. 5. 27, 심사완료일 2007. 6. 18)