

Analysis on GPS PDOP Peaks in Signal-Blockage Simulations

Yeong-Guk Kim¹, Kwan-Dong Park^{1,2†}, Mi-So Kim², Chang Seok Yoo³, Joon Sung Bae³, Jun O Kim³

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

³Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

ABSTRACT

We determined Global Positioning System (GPS) satellite visibilities in signal-blockage simulations and then analyzed Position Dilution of Precision (PDOP) fluctuations obtained from those simulated satellite geometries. PDOP values under harsh signal-blockage simulation conditions become very high compared to those calculated with real observations. Especially when the number of observed satellites is four, which is the minimum requirement for GPS positioning, PDOP values instantaneously reached several hundreds or even several tens of thousands. It was also found that the volume of the tetrahedron composed with four satellites decreases significantly. When the correlation of the tetrahedron volume and PDOP was analyzed, we reached the following conclusions: PDOP values less than 4 can be acquired when the volume is larger than $103.2 \times 10^{19} \text{ m}^3$, and PDOP values increase beyond 50 when the volume is less than $6.0 \times 10^{19} \text{ m}^3$.

Keywords: GPS, DOP chimney, volume, simulation

1. INTRODUCTION

미국의 위성항법시스템인 Global Positioning System (GPS)를 이용한 위치 결정 방법은 측량 및 다양한 항법시스템에서 중요한 역할로 수행하고 있다. 이 때 Dilution of Precision (DOP)는 일반적으로 위성항법시스템의 측위 정확도를 평가하기 위한 중요한 인자로 사용된다. DOP는 가시위성의 기하적 배치가 좋을수록 감소하고, 낮은 DOP는 측위정확도가 높아지는 것을 의미한다. 따라서 사용자는 낮은 DOP를 확보하기 위해 가능한 많은 위성수를 확보해야 한다. 하지만 신호수신이 제한적인 극한 환경에서는 충분한 가시위성 확보에 어려움이 있다. 예를 들어, 발사체를 추적하기 위해 사용되는 GPS 장비는 탑재체의 둥근 원통형 기체와 빠른 자세 변화로 인해 특정 방향으로 위성 신호가 차폐된다

(Kwon et al. 2003). 또한 대표적인 고층건물 밀집지역인 강남 테헤란로에서는 최소 0기에서 최대 4기까지 GPS 위성이 관측된다 (Kim 2009). 이와 같이 불가피하게 적은 가시위성만으로 측위를 수행하는 경우에 대한 사전 연구가 필요하다.

특정방향으로의 차폐환경은 가시위성수의 감소와 가시위성의 기하적 배치에 영향을 미치며, 이는 일반적으로 DOP의 증가와 측위 정확도의 저하를 의미하기도 한다. 이와 같이 차폐 환경을 대상으로 일부 위성만을 사용하여 DOP 및 측위 정확도 분석을 수행한 연구사례에 대해 살펴보면 다음과 같다. Dutt et al. (2009)은 매 시각 인도지역에서 관측된 모든 GPS 위성 중 기하적으로 최적 배치된 4기의 위성만을 선택하여 Geometric DOP (GDOP)를 계산하고 분석하였다. 그 결과, 최적의 위성 4기만을 사용한 경우의 GDOP는 모든 위성을 사용했을 때 계산되는 GDOP보다 높았지만 2~4 정도의 수준을 보였다. 또한 매 시각 최적의 4기의 위성으로 구성된 사면체의 부피를 계산하고, 매 시각 계산된 사면체의 부피가 4기의 위성으로 계산된 GDOP와 반비례함을 확인하였다. 그러나 위 선행연구의 DOP 분석은 관측된 모든 위성 중 최적의 기하적 배치를 이루는 위성 4기를 선택, 사용하는 경우에 대해 수행되었으며, 이와 같이 임의의 위성 4기를 선택하는 경우는 고층 건물이나 발사체 등과 같이 4기 위성이 관측될 수 있는 실제 환경과 다르다는 한계점이 있다. Lee et al. (2012)은 동쪽, 서쪽, 남쪽 방향으로 고층건물에 의해 신호차폐가 발생하는

Received Mar 29, 2020 Revised Apr 12, 2020 Accepted Apr 17, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: kdpark@inha.ac.kr

Tel: +82-32-873-4310 Fax: +82-32-863-1506

Yeong-Guk Kim <https://orcid.org/0000-0003-4770-813X>

Kwan-Dong Park <https://orcid.org/0000-0003-1538-8768>

Mi-So Kim <https://orcid.org/0000-0002-6959-1991>

Chang Seok Yoo <http://orcid.org/0000-0003-3879-8022>

Joon Sung Bae <https://orcid.org/0000-0003-1980-5135>

Jun O Kim <https://orcid.org/0000-0002-9519-0542>

환경을 시뮬레이션 하여 GPS 단독 및 GPS와 GLObal Navigation Satellite System (GLONASS) 통합 이중차분 상대측위 정확도를 분석하였다. 그 결과 차폐 환경에서 GPS만 사용한 경우 가시위성이 4기일 때 측위 오차가 순간적으로 급증하였으며, 측위 오차의 급증 원인을 스카이 플롯 (Sky Plot)에서 보이는 GPS 위성의 기하적 배치를 통해 확인하였다. 하지만 위성의 기하적 배치 불량 상태를 스카이 플롯을 통해서 가시적으로만 확인했다는 한계점이 있으며, 이와 같은 측위 오차의 급증을 방지하기 위해 스카이 플롯이 아닌 3차원에서의 위성의 기하적 배치구조를 살펴볼 필요가 있다.

이 연구에서는 국내 지역을 대상으로 신호차폐 시뮬레이션을 통해 위성 가시성에 변화를 주고, 측위정확도의 지표인 Position DOP (PDOP)의 급증 현상을 분석하였다. 신호차폐 시뮬레이션을 위해 주변 장애물에 의한 영향이 적은 국내 상시관측소를 대상으로 하였으며, 상시관측소에서 제공하는 GPS의 방송 궤도력 데이터를 이용해 위성의 위치를 계산하였다. 이후 탑재체나 고층 건물과 같은 신호차폐 환경으로 인해 관측소로부터 동쪽, 서쪽, 남쪽, 북쪽의 시야가 각각 차단되는 상황을 조성한 후 가시위성으로부터 PDOP를 산출하고 각 상황에서의 PDOP 변동을 확인하였다.

2. DILUTION OF PRECISION (DOP)

관측된 위성의 배치 상황은 측위 오차와 밀접한 관련이 있으며, 이때 DOP는 관측위성의 배치 상황을 나타내는 인자로 사용된다. Fig. 1a와 같이 사용자의 위치는 위성들로부터 관측된 의사 거리로 이루어진 구들의 접점으로 해석될 수 있다. Fig. 1a와 같이 위성의 기하적인 배치가 양호하다면 DOP의 수치가 낮고 측위 정확도가 높아진다. 반면 Fig. 1b와 같이 위성 배치가 양호하지 않다면 DOP의 수치가 높고 측위 정확도가 낮아진다. 일반적으로 DOP 수치는 Table 1과 같이 해석된다.

일반적으로 DOP 계산은 정규 방정식 행렬의 역행렬인 식 (1)의 여인자 행렬 Q_{xyz} 의 대각원소가 사용된다 (Hofmann-Wellenhof et al. 2008). 식 (2)의 설계 행렬 A의 e_x^n, e_y^n, e_z^n 은 수신기와 위성 n을 연결하는 단위 벡터의 성분이며 4열의 1은 거리단위로 표현된 수신기 시계 오차 성분이다.

$$Q_{xyz} = (A^T A)^{-1} \tag{1}$$

$$A_{(n \times 4)} = \begin{pmatrix} e_x^1 & e_y^1 & e_z^1 & 1 \\ e_x^2 & e_y^2 & e_z^2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_x^n & e_y^n & e_z^n & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

여인자 행렬 Q_{xyz} 는 4×4 행렬로 표현되며, 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. Q_{xyz} 의 대각원소 중 3개의 요소 q_{xx}, q_{yy}, q_{zz} 는 수신기의 X, Y, Z 좌표에 의해 구성되며, 나머지 1개 q_{tt} 는 수신기 시각에 의해 구성된다.

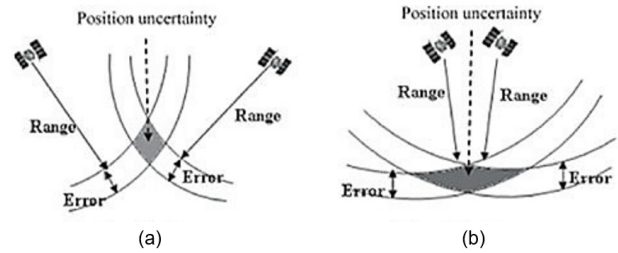


Fig. 1. (a) Good satellite geometry, (b) Bad satellite geometry (Tahsin et al. 2015).

Table 1. DOP ratings (Tahsin et al. 2015).

DOP	1	2-4	4-6	6-8	8-20	20-50
Rating	Ideal	Excellent	Good	Moderate	Fair	Poor

$$Q_{xyz} = \begin{pmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt} & q_{tt} \end{pmatrix} \tag{3}$$

DOP 중 위치 정확도의 지표가 되는 PDOP는 식 (3)의 대각원소 q_{xx}, q_{yy}, q_{zz} 를 이용하여 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}} \tag{4}$$

Santerre et al. (2017)은 식 (4)와 같이 여인자 행렬을 통해 계산하는 PDOP 계산식을 식 (5)와 같이 정리한 바 있다.

$$PDOP^2 = \frac{\sum_{c=1}^q (S^{c:ijk})^2}{9 \sum_{c=1}^s (V^{c:ijkl})^2} \tag{5}$$

여기서 $c:ijk$ 는 관측된 n개의 위성 중 3기의 위성 i, j, k로 구성된 c번째 조합을 의미하며 즉, n개의 위성을 이용해 $q = n(n-1)(n-2)/6$ 만큼 3기 위성으로 이루어진 조합을 구성할 수 있다. $c:ijkl$ 은 관측된 n개의 위성 중 4기의 위성 i, j, k, l로 구성된 c번째 조합을 의미하며 즉, n개의 위성을 이용해 $s = n(n-1)(n-2)(n-3)/24$ 만큼 4기 위성으로 이루어진 조합을 구성할 수 있다. $V^{c:ijkl}$ 은 $c:ijkl$ 위성만으로 구성되는 사면체의 부피를 의미한다. $S^{c:ijk}$ 는 식 (6)을 통해 계산할 수 있다.

$$(S^{c:ijk})^2 = (S_{EN}^{c:ijk})^2 + (S_{EV}^{c:ijk})^2 + (S_{NV}^{c:ijk})^2 \tag{6}$$

여기서 $S_{EN}^{c:ijk}, S_{EV}^{c:ijk}, S_{NV}^{c:ijk}$ 는 $c:ijk$ 위성만으로 구성되는 삼각형을 각각 사용자 중심 좌표계 (E, N, V)에서의 East-North, East-Vertical, North-Vertical 평면으로 투영하였을 때의 표면적을 의미한다.

만약 관측된 위성수 n이 4라면, 식 (5)를 식 (7)과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$PDOP_{n=4}^2 = \frac{\sum_{c=1}^4 (S^{c:ijk})^2}{9(V^{ijkl})^2} \tag{7}$$

식 (7)의 분자에 위치한 투영면적은 무한대로 증가할 수 없기 때문에, PDOP의 발산은 분모에 위치한 사면체의 부피가 0에 가까워지는 조건에서 발생할 수 있다. 이를 통해 만약 PDOP가 수

백에서 수 만까지 급증한다면, 투영면적보다 위성으로 구성된 사면체의 부피에 더 영향을 받아 발생하는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 위와 같이 식 (7)에서 확인할 수 있는 PDOP와 사면체의 부피의 관계를 이용해 PDOP의 급증과 위성의 기하적 배치 간의 상관성을 확인하였다. 식 (1~4)의 절차에서는 PDOP가 급증할 때 관측된 위성의 기하적 배치를 파악하는 것이 어려우나, 식 (7)의 방법에서는 PDOP와 사면체의 부피 관계를 통해 PDOP가 급증할 때 관측된 위성의 기하적 배치를 쉽게 파악할 수 있다.

3. 정상환경에서의 GPS의 위성 가시성 분석

3.1 위성 가시성 분석 방법

이 장에서는 국내 상시관측소를 대상으로 정상환경에서 관측되는 GPS의 가시위성수와 DOP 분석을 수행하였다. 상시관측소로는 국토지리정보원에서 운영중인 서산 (SEOS) 상시관측소를 선택하였으며, PDOP 계산에 필요한 관측소의 좌표는 국토지리정보원 고시 2008 - 259호 이력서에 고시된 좌표를 사용하였다. 분석일자는 2019년 DOY 004 (1월 4일)이며, 해당 일자에 관측된 위성 위치를 계산하기 위해 서산 관측소에 30초 간격으로 기록된 위성 궤도력 및 관측 Receiver INdependent EXchange format 파

일을 사용하였다.

일반적으로 낮은 고도각의 위성은 신호에 잡음 비중이 높아 측위정확도의 저하 요인이 될 수 있기 때문에, 본 연구에서도 고도각이 10° 이하인 GPS 위성은 제외하였다. 또한 International GNSS Service에서 제공하는 GPS 위성의 방송궤도력과 서산 상시관측소에 기록된 관측 데이터를 비교해 분석일자의 고도각 10° 이상에서 관측 가능한 위성과 관측된 위성이 동일한 것을 확인하였으며, 이는 이후 4장에서 수행할 가상의 차폐 요소 외 신호 차폐 요소가 없다는 것을 의미한다.

3.2 정상환경에서의 위성 가시성 분석

Fig. 2는 분석일의 24시간 동안 서산관측소에서 관측된 모든 GPS 위성의 궤적을 나타낸다. GPS 위성은 궤도 특성상 북반구에 위치한 한국에서는 북쪽 방향 저고도각 영역에서 관측되지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 분석일의 24시간 동안 서산관측소에서 관측한 GPS 위성의 수와 PDOP를 나타낸 것이다. 관측된 위성 수는 최소 6개에서 최대 11개이며, PDOP는 3을 넘지 않아 관측된 위성의 기하적 배치가 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 약 3시에 관측 위성이 최소인 6기 일 때 PDOP가 최대 2.95이며, 전체적으로 가시위성 수가 적을수록 PDOP가 증가하는 경향임을 확인할 수 있다.

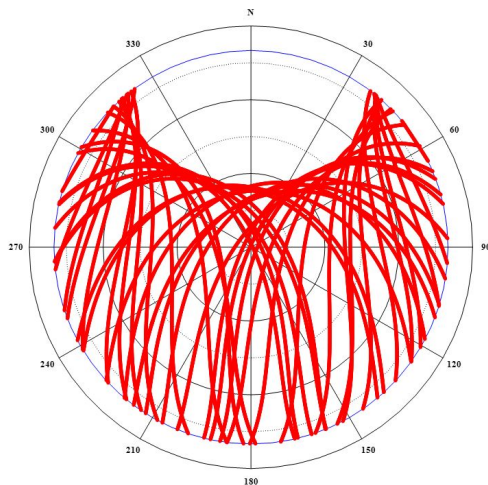


Fig. 2. GPS skyplot at SEOS (2019/004).

4. 신호차폐 환경 시뮬레이션 위성 가시성 분석

4.1 신호차폐 환경 시뮬레이션

3장에서는 국내 관측소에서 정상 환경일 때 관측되는 GPS의 가시성을 확인하였다. 4장에서는 3장에서 사용한 DOY 004, 서산 관측소 자료에 임계 방위각을 설정하여 다양한 신호차폐 시뮬레이션 환경을 구현하고 가시위성수 및 PDOP를 확인하였다. CASE 1은 동쪽방향으로 신호차폐 요소가 존재한다고 가정한 경우로 방위각 180°~360° 사이의 위성신호만 획득가능한 경우이다. CASE 2는 서쪽방향의 신호차폐로 방위각 0°~180° 사이의 위성신호만 획득가능한 경우이며, CASE 3는 남쪽방향의 신호차폐로 방위각 270°~90° 사이의 위성신호만 획득가능한 경우, 마지막으로 CASE 4는 북쪽방향의 신호차폐로 방위각 90°~270° 사이의

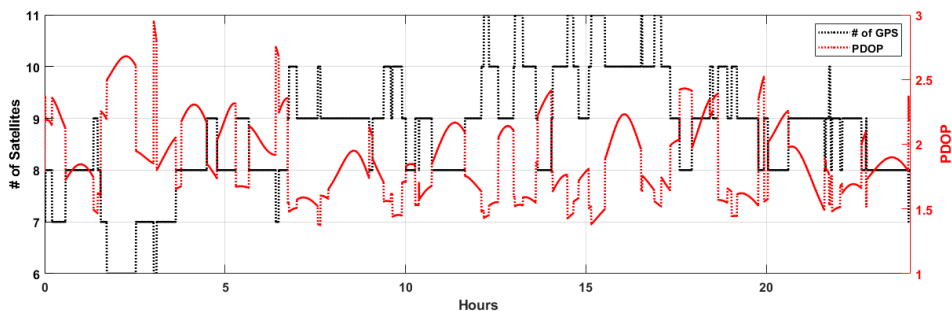


Fig. 3. Number of observed GPS satellites and PDOP at SEOS (2019/004).

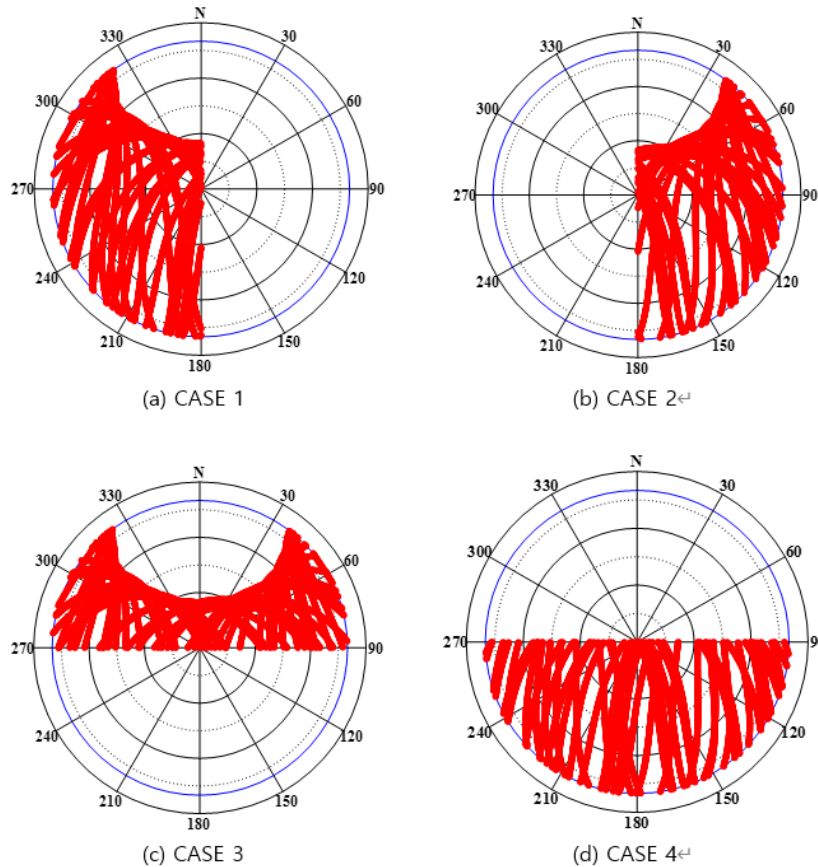


Fig. 4. Four cases of signal blockage simulation.

위성신호만 획득가능한 경우로 설정하였다. 모든 CASE는 3장과 마찬가지로 관측될 수 있는 임계고도각을 10°로 설정하였다. 위와 같은 조건을 설정한 뒤 각 경우에 관측되는 GPS 위성의 궤적을 Fig. 4에 나타내었다.

신호 차폐 시뮬레이션 CASE에 따른 GPS 위성의 가시위성수 최대, 최소값과 전체 시간 중 GPS 항법의 최소 조건인 위성이 4기 이상 확보되는 시간의 비율을 Table 2에 나타내었다. 정상 환경에서의 최소 관측위성은 6기로 모든 시간에서 GPS 위성이 4기 이상 확보되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 모든 신호차폐 CASE에서 가시위성의 최소값이 4 미만인 시점이 발생하였다. 동쪽과 서쪽방향을 차폐한 CASE 1, 2에서는 4기 이상의 가시위성이 확보되는 시간 비율이 약 86%로 유사한 것을 볼 수 있다. 남쪽 방향을 차폐한 CASE 3에서 4기 이상의 가시위성이 확보되는 시간 비율은 95.1%로 가장 높았으며 북쪽 방향을 차폐한 CASE 4에서는 측위가능시간이 67.5%로 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 북반구지역에서 보이는 GPS 위성의 궤도 특성으로 인해 나타난 결과이다.

4.2 신호차폐 환경 시뮬레이션에서의 가시위성수 및 PDOP 분석

신호차폐 시뮬레이션 CASE에 따른 가시위성수 및 PDOP를 분석하였다. PDOP는 30초 간격으로 가시위성수가 4 이상일 때

Table 2. Statistics of visible satellites by signal blockage simulation.

CASE	Min.	Max.	4 or more satellites (%)
Not blocked	6	11	100.0
CASE 1	2	7	86.0
CASE 2	2	7	85.9
CASE 3	3	7	95.1
CASE 4	2	6	67.5

만 계산되었다. Fig. 5는 차례대로 동쪽방향의 신호차폐 시뮬레이션을 수행한 CASE 1, 서쪽방향의 신호차폐 시뮬레이션을 수행한 CASE 2, 남쪽방향의 신호차폐 시뮬레이션을 수행한 CASE 3, 북쪽방향의 신호차폐 시뮬레이션을 수행한 CASE 4에서 관측된 GPS 위성수와 PDOP를 나타낸다. GPS 위성수를 그린 그래프는 4 이상 구간에서 검은색으로, 4 미만 구간은 파란색으로 구별되어 있다.

모든 차폐환경 시뮬레이션에서 가시위성수가 4기 미만으로 관측되는 것을 빈번히 볼 수 있다. 특히 북쪽을 차폐한 환경인 Fig. 5d는 약 1.5시에서 4.2시 구간에서 가시위성수가 4 미만이며 상대적으로 장시간 측위가 불가능하였다. 이는 4.1절의 북쪽 차폐환경에서 위성 4기 이상의 구간이 가장 낮은 결과와 동일한 이유이다.

차폐 방향에 상관없이 PDOP가 순간적으로 수 백에서 수 만까지 증가하는 현상은 가시위성수가 4일 때 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 가시위성수가 4인 모든 경우에 PDOP가 급증하

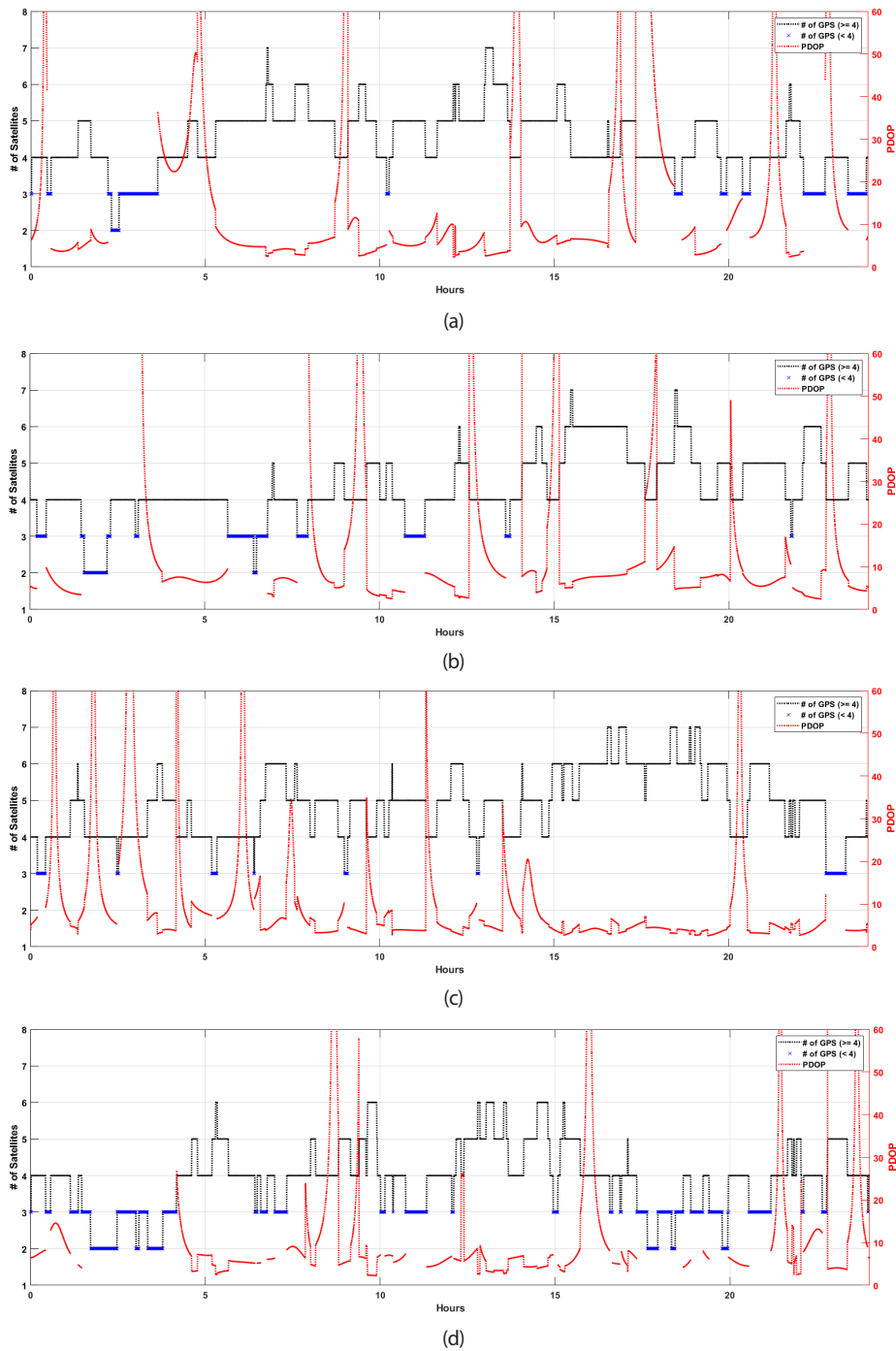


Fig. 5. Number of observed GPS satellite and PDOP by signal blockage simulation (2019/004). (a) CASE 1, (b) CASE 2, (c) CASE 3, (d) CASE 4

진 않는다. 예를 들어 Fig. 5a에서는 약 17.5시에 가시위성수가 4일 때 PDOP가 최대 45420.9까지 증가하지만, 약 22시에 가시위성수가 4임에도 불구하고 PDOP는 3.5이며 급증하는 경우에 비해 상대적으로 매우 낮은 수치를 보인다. Fig. 6은 앞에서 언급한 Fig. 5a 중 가시위성수가 4인 구간에서 PDOP가 최대일 때 최소일 때의 관측된 GPS 위성의 배치를 나타낸다. Fig. 6a를 통해 PDOP가 급증하는 구간에서 위성들로 구성된 사면체는 부피를 거의 갖

지않는 형상인 것을 확인할 수 있으며, 이와 반대로 Fig. 6b를 통해 PDOP가 낮은 구간에서 위성들로 구성된 사면체는 적절한 부피를 가진 형상인 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 Fig. 5c에서도 약 0.7시에는 가시위성수가 4이며 PDOP가 20817.0까지 급증하지만, 약 23.6시에 가시위성수가 4임에도 PDOP는 3.8이며 상대적으로 낮은 수치인 것을 확인할 수 있다.

추가적으로 4일의 서산 관측소의 자료를 이용하여 차폐 방향

과 PDOP의 급증현상의 관계성을 확인하였다. 분석 일자에는 1 항 성일로 반복하는 GPS 위성의 궤도 특성을 제외하기 위해 연속 되는 날을 피하여 3개월 간격인 2019년 DOY 004, 094, 185, 277 (1월 4일, 4월 4일, 7월 4일, 10월 4일)로 선택하였다. PDOP의 급증현상의 횟수를 확인하기 위해 PDOP가 50이 넘어가는 순간을 PDOP 급증현상 1회로 임의 정의하였다. Table 3은 각 일자에서 CASE별 최대 PDOP와 PDOP 급증현상의 횟수를 나타낸다.

각 DOY에서 계산되는 최대 PDOP는 차폐 방향과 무관하게 수 천에서 수십만까지 급증하였다. 이를 통해 차폐 환경에서의 PDOP의 급증 정도는 차폐 방향과 상관성이 없음을 확인할 수 있다.

급증현상의 횟수는 일자에 상관없이 각 CASE 별 유사한 횟 수를 보인다. CASE 4 같은 경우 급증현상이 6~8회, 일 평균 6.75 회로 상대적으로 다른 CASE에 비해 가장 낮다. 이러한 현상은 Table 2에서도 확인했듯이, CASE 4는 PDOP가 급증할 수 있는 가시위성수가 4인 구간이 다른 차폐환경에 비해 가장 짧기 때문이다. CASE 2의 DOY 277에서 PDOP의 급증현상은 4회로 다른 날에 비해 상대적으로 낮은 횟수를 보이는데, 이는 급증현상의 정의 값을 50으로 임의 설정하였기 때문이다. Fig. 7은 CASE 2 중 DOY 277에서의 가시위성수와 PDOP를 나타낸다. Fig. 7에서 PDOP는 약 8시에 41.5로 급증하나 임계값인 50에 도달하지 못하였으며, 마찬가지로 약 23시에 PDOP가 약 39.0으로 급증하나 임 계값에 도달하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 급증 구 간을 고려한다면 PDOP의 급증현상은 4회보다 더 발생한 것으로 볼 수 있다. 결과적으로 PDOP 급증현상은 각 차폐 방향에서 가시 위성이 4기 이상 확보되는 시간을 달리하는 이유로 인해 각 차폐 방향에 따라 유사한 횟수로 발생한다.

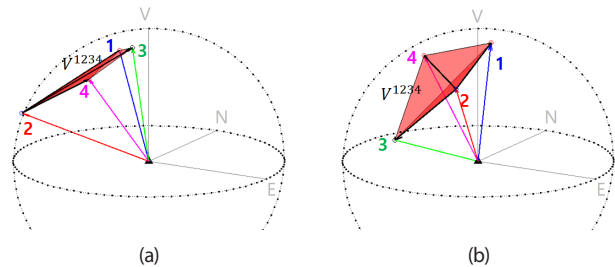


Fig. 6. The four observed GPS satellites and the tetrahedron formed by the satellites for CASE 1 (2019/004). (a) PDOP = 45420.9, (b) PDOP = 3.5

5. PDOP 급증 현상 분석

5.1 PDOP와 위성으로 구성된 사면체 부피 간의 관계 (가시위성이 4기 인 경우)

4장에서 가시위성이 4기일 때 순간적으로 PDOP가 급증하는 현상을 확인하였다. 본 장에서는 차폐 환경에서 PDOP의 급증현 상을 식 (7)의 PDOP와 위성 4기로 이루어진 사면체의 부피 간의 관계를 이용하여 분석하였다. Fig. 8은 순서대로 2019년 DOY 004 CASE 1, 2, 3, 4에서 관측 위성이 4기일 때 위성으로 이루어진 사면체의 부피와 PDOP를 나타낸다. 또한 본 논문에서는 관측 위성으로 이루어진 사면체의 부피의 단위를 간소화하기 위해 $1 \times 10^{20} \text{ m}^3$ 을 1 Tetrahedron Volume (TV)로 임의 정의하고 표현하였다. 대체적으로 PDOP는 사면체의 부피가 작은 경우에서 증가하는 경향을 보였으며, 특히 사면체의 부피가 0 TV 가까워질수록 PDOP가 수 백에서 수 만까지 급증하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 PDOP는 사면체의 부피가 작은 모든 구간에서 급증하진 않는다. 다시 말해, PDOP와 사면체의 부피는 정확히 반비례 관계를 가지지 않는다. 이는 Fig. 9에서 확인할 수 있으며, Fig. 9는 Fig. 8b 중 사면체의 부피가 0 ~ 0.50 TV인 구간을 확대한 그래프이다. Fig. 9 중 ①에서의 사면체의 부피는 0.11 TV, PDOP는 6438.4로 모든 구간에서 사면체의 부피가 가장 낮은 않지만 ② 다음으로 PDOP가 가장 높은 수치임을 확인할 수 있다. 또한 ②를 제외한 노란색 음영부분의 PDOP는 사면체의 부피가 ①에 비해 작음에도 불구하고 ①의 PDOP에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 DOY 094, 185, 277에서의 사면체의 부피와 PDOP의 크기, 부피와 PDOP의 관계는 위의 DOY 004의 분석 결과와 동일하

Table 3. PDOP maximum and peak events by signal blockage simulation (DOY 004, 094, 185, 277).

CASE	DOY	PDOP Max.	Peak events	CASE	DOY	PDOP Max.	Peak events
1	004	45420.9	9	2	004	8476.5	8
	094	9116.5	8		094	5423.2	10
	185	4790.5	8		185	2741.0	8
	277	10437.5	8		277	70453.7	4
3	004	20817.0	7	4	004	2984.5	6
	094	21007.8	8		094	1745.9	7
	185	21596.3	9		185	8176.5	6
	277	3794.4	9		277	120567.3	8

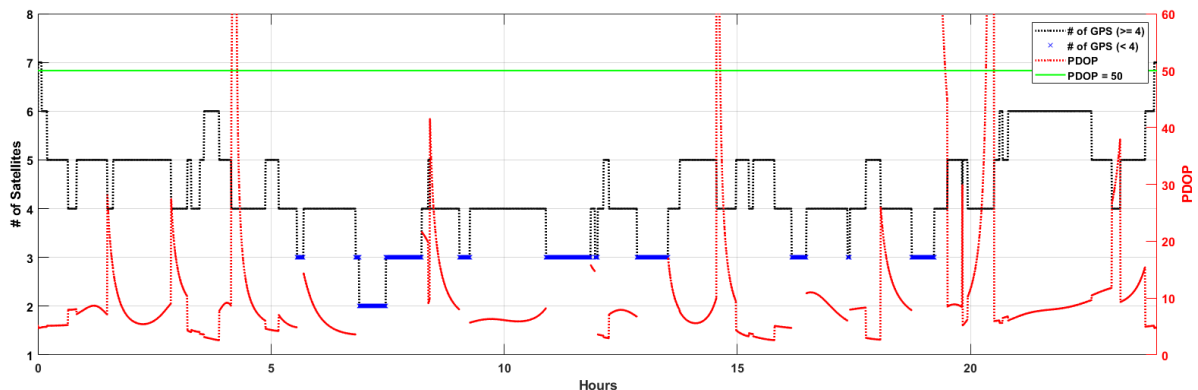


Fig. 7. Number of observed GPS satellites and PDOP for CASE 2 (2019/277).

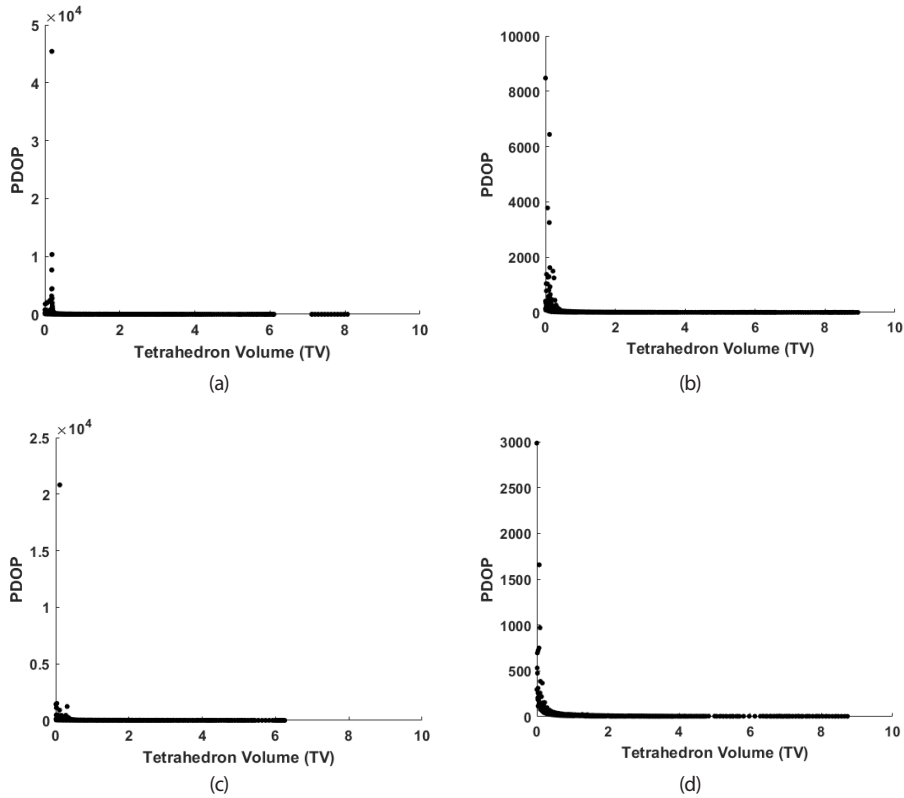


Fig. 8. Tetrahedron volume and PDOP (2019/004). (a) CASE 1, (b) CASE 2, (c) CASE 3, (d) CASE 4

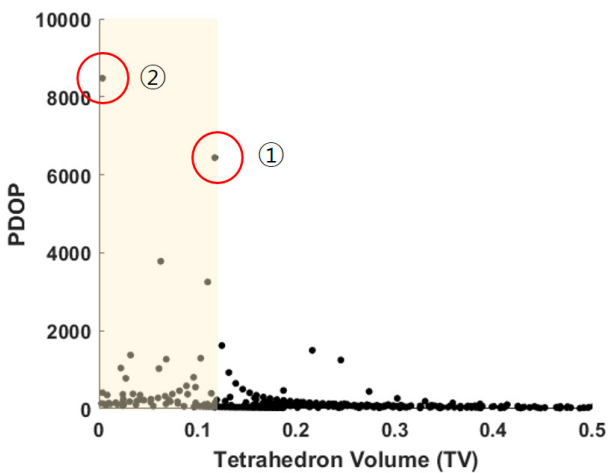


Fig. 9. Tetrahedron volume and PDOP (2019/004 – CASE 2).

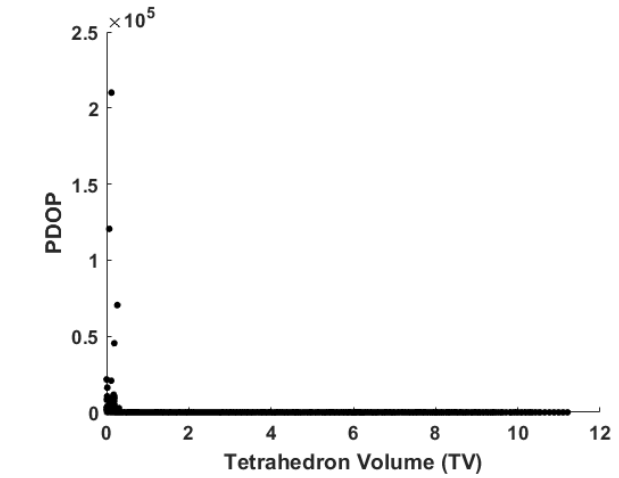


Fig. 10. Tetrahedron volume and PDOP (Total: 18985 epoch).

였으며, 차폐 방향과의 상관성은 보이지 않았다.

PDOP와 사면체의 부피가 정확히 반비례하지 않는 현상은 식 (7)의 분자로 인한 영향으로 볼 수 있다. PDOP는 위성 4기로 구성된 사면체의 부피와 반비례 관계를 가지긴 하지만, 3기의 위성으로 구성되는 삼각형을 사용자 중심 좌표계로 투영한 면적과도 비례 관계를 가지기 때문이다. 그러므로 PDOP는 대체적으로 사면체의 부피와 반비례하여 증가하는 경향을 보이지만 최대 PDOP와 사면체의 최소 부피 구간이 정확히 일치하지 않는다고 볼 수 있다.

5.2 사면체의 부피를 이용한 PDOP 안정 구간 분석 (가시위성이 4기 일 때)

일정 수준의 PDOP를 안정적으로 확보하기 위한 사면체의 부피를 산출하였다. 일정 PDOP를 확보할 수 있는 사면체 부피를 산출하기 위해 특정 사면체 부피 이상에서 일정 수준 이상의 PDOP가 도출되는지 확인하였고, 부피가 충분히 커져 일정 수준 이상의 PDOP가 도출되지 않는 부피를 산출하였다. 5.1절에서 사면체의 부피와 PDOP의 크기, 부피와 PDOP의 반비례 관계가 차폐

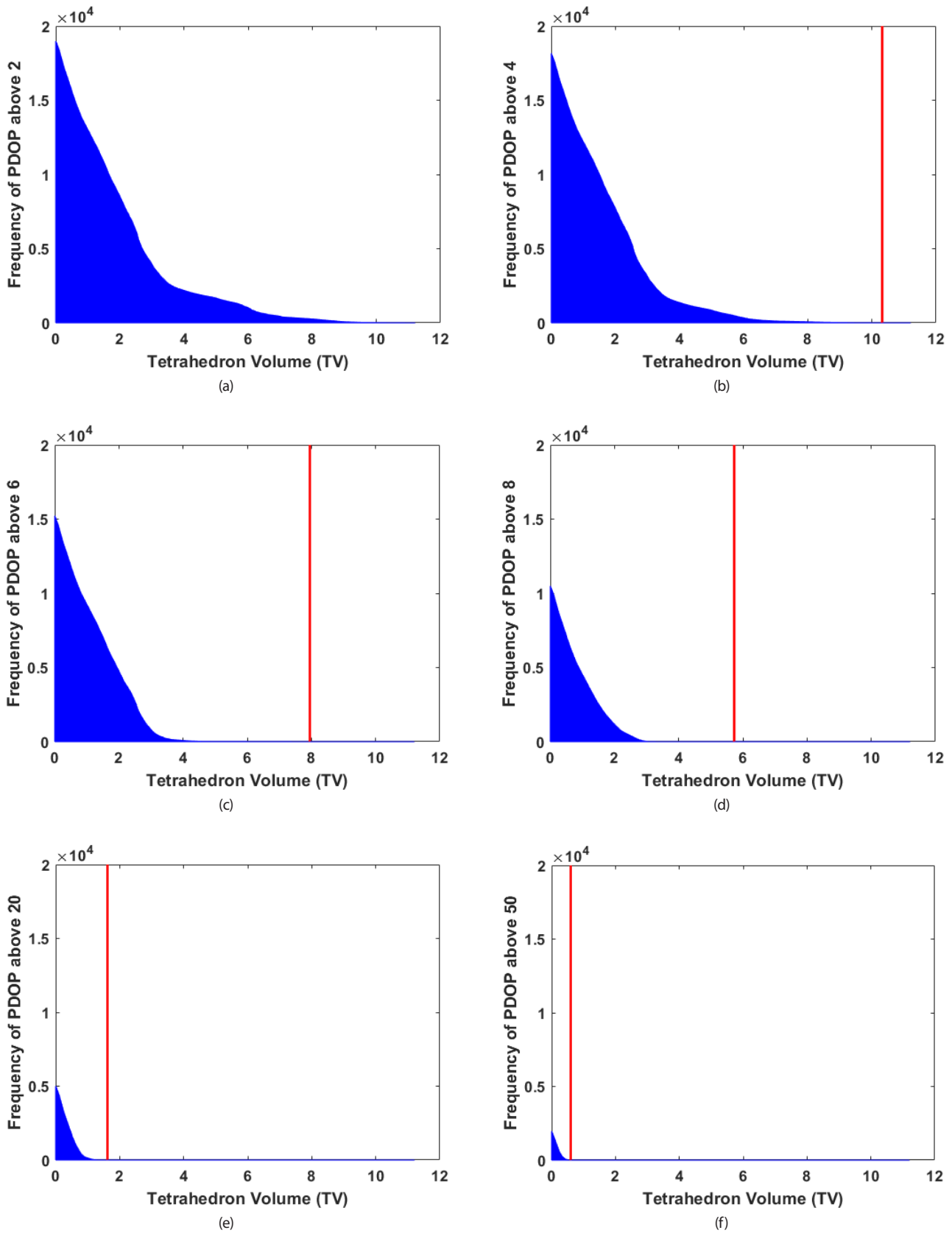


Fig. 11. Frequency of PDOP with pre-specified PDOP values. (a) PDOP above 2, (b) PDOP above 4, (c) PDOP above 6, (d) PDOP above 8, (e) PDOP above 20, (f) PDOP above 50

방향과 상관이 없다는 것을 확인하였기에, 이 장에서는 4.2절에서 사용한 4일 (DOY 004, 094, 185, 277)의 각 차폐 환경에서 가시위성이 4기일 때의 총 18985 epoch을 대상으로 하여 수행하였다. Fig. 10은 총 18985개 epoch에서의 산출된 사면체의 부피와 PDOP의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 10에서 사면체의 부피와 PDOP의 관계는 Fig. 8에서의 사면체의 부피와 PDOP의 관계와 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11에서 X축은 4기 위성으로 구성된 사면체 부피를 의미하며 0 TV에서부터 최대 11.20 TV까지 0.01 TV 간격으로 나뉘어져 있다. Y축은 X축의 사면체 부피 이상인 epoch 중 일정 PDOP보다 높은 epoch 수를 나타낸다. 붉은색 실선은 실선이 위치한 TV 이상 epoch 중에서 일정 PDOP보다 높은 epoch 수가 0인 지점을 나타낸다. 예를 들어, Fig. 11c의 붉은색 실선의 X 값은 7.95 TV이며, 이는 PDOP가 6 이상인 epoch이 사면체의 부피가 7.95 TV 이상인 epoch 구간에서 도출되지 않는 것을 의미한다. 또한 0 TV 이상에서 PDOP가 6 이상인 epoch은 15214개이며, 이는 전체 18985개 epoch 중 3771개 epoch은 PDOP가 6 미만인 것을 의미한다. 다른 예로, Fig. 11a의 붉은색 실선은 없으며 이는 모든 epoch에서 PDOP가 2보다 낮은 구간이 없는 것을 의미한다. 실제로 4기 위성이 관측된 모든 epoch에서 최소 PDOP는 3.3이다.

Fig. 11a는 X축의 사면체 부피 이상인 epoch 중 PDOP가 2 이상인 epoch 수를 나타내며, Figs. 11b-f 순서대로 PDOP가 4, 6, 8, 20, 50 이상인 epoch 수를 의미한다. 각 그래프의 PDOP 임계값은 Table 1의 PDOP 수치 등급에 따라 지정하였다. 붉은색 실선은 PDOP의 임계값이 커질수록 좌측으로 이동하며, 이는 낮은 PDOP를 안정적으로 확보하기 위한 사면체의 부피가 높은 PDOP를 안정적으로 확보하기 위한 사면체의 부피보다 커야함을 의미한다. 각 PDOP 임계값을 안정적으로 확보하기 위한 사면체 부피는 Table 4에 정리되어 있다.

4일의 차폐환경 시뮬레이션의 데이터 분석을 토대로, 만약 가시위성이 4기일 때 사면체의 부피가 10.32 TV 이상이라면 4 수준 이하의 PDOP를 확보할 수 있었지만, 사면체의 부피가 0.60 TV 이하라면 PDOP가 50 수준 이상으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 PDOP의 수준은 사면체의 부피를 통해 파악할 수 있으며, 이는 측위 오차의 지표로 사용되는 PDOP의 역할을 사면체의 부피로도 수행할 수 있음을 의미한다. 가시위성이 4기일 때 측위 오차의 급증을 방지하기 위하여 PDOP를 사용한다면 사용자 및 위성의 좌표를 이용한 설계 행렬 구성과 역행렬 및 행렬 간 연산을 통해 여인자 행렬을 산출해야 되는 과정이 필요하다. 그러나 사면체의 부피는 관측된 위성 4기를 서로 연결하는 세 벡터의 내적 및 외적을 통해 비교적 간단히 산출할 수 있으며, 이는 측위 오차의 급증 방지에 더 효율적으로 사용할 수 있을 것이라 판단된다.

6. 결론

논문에서는 서산 상시 관측소를 대상으로 차폐환경으로 인한 동, 서, 남, 북쪽의 신호만 수신하는 신호차폐 시뮬레이션 수행하여 GPS 위성의 가시성 및 PDOP 변동에 대해 분석하였다. 차폐 방향별로 가시 GPS 위성이 4기일 때 PDOP가 수백에서 수만까지

Table 4. Tetrahedron volume to secure pre-specified PDOP values.

PDOP above	4	6	8	20	50
TV	10.32	7.95	5.73	1.62	0.60

급증하는 현상을 확인하였으며, 각 차폐방향과 PDOP 급증현상의 상관성을 확인하였다. 이후 PDOP의 급증현상을 분석하기 위해 PDOP와 가시위성 4기로 구성되는 사면체의 부피간의 상관성을 확인하였고, PDOP를 안정적으로 확보하기 위한 위성의 기하적 배치에 관해 연구를 수행하였다.

2019년 DOY 004, 094, 185, 277 4일의 서산 상시 관측소 데이터를 분석한 결과, PDOP의 급증횟수는 각 차폐 방향별로 유사했으며 급증 크기는 차폐방향과 상관성을 보이지 않았다. PDOP와 사면체의 부피관계를 확인했을 때, PDOP가 최대인 지점과 사면체의 부피가 최소인 지점은 정확히 일치하지 않았다. PDOP의 급증은 사면체의 부피가 0에 가까워질 때 발생하기는 하나, 사면체를 사용자 중심 좌표계로 투영한 면적에도 일부 영향을 받기 때문이다. PDOP는 위성으로 구성된 사면체의 부피가 10.32 TV일 때 4, 7.95 TV일 때 6, 5.73 TV일 때 8, 1.62 TV일 때 20, 0.60 TV일 때 50 정도의 수준을 보였으며, 사면체의 부피가 감소할 때 PDOP가 증가하는 관계를 보였다. 이와 같은 PDOP와 사면체의 부피 관계를 고려한다면, 가시위성이 4기일 때 발생할 수 있는 측위 오차의 급증을 사면체의 부피를 통해 방지할 수 있을 것이라 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Agency for Defense Development.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conduct research and write manuscripts, Y.G. Kim; Research and manuscript supervision, K.D. Park; Information investigation and provision, M.S. Kim, C.S. Yoo, J.S. Bae, and J.O. Kim.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Dutt, V. B. S. S. I., Rao, G. S. B., Rani, S. S., Babu, S. R., Goswami, R., et al. 2009, Investigation of GDOP for Precise user Position Computation with all Satellites in view and Optimum four Satellite Configurations, J. Ind.

Geophys. Union, 13, 139-148.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2008, GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more (NewYork: Springer Wien)

Kim, H.-I. 2009, Development of Integrated Global Navigation Satellite System Simulator for Evaluation of Positioning Availability and Accuracy Improvement, MS Thesis, Inha University

Kwon, B.-M., Park, Y.-K., Sun, B.-C., Roh, W.-R., & Choi, H.-D. 2003, Satellite Visibility Analysis according to GPS Antennas for Satellite Launcher, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 31, 129-136. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2003.31.9.129>

Lee, H.-S., Park, K.-D., Kim, D.-S., & Sohn, D.-H. 2012, Analysis of integrated GPS and GLONASS double difference relative positioning accuracy in the simulation environment with lots of signal blockage, Journal of Navigation and Port Research, 36, 429-435. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2012.36.6.429>

Santerre, R., Geiger, A., & Banville, S. 2017, Geometry of GPS diltion of precision: revisted, GPS Solution, 21, 1747-1763. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0649-y>

Tahsin, M., Sultana, S., Reza, T., & Hossam-E-Haider, M. 2015, Analysis of DOP and its preciseness in GNSS position estimation, 2015 International conference on electrical engineering and information communication technology (ICEEICT), 21-23 May 2015, Dhaka, Bangladesh, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307445>



Yeong-Guk Kim received his B.S. degree in geoinformatic engineering from Inha University, Korea. He is currently working towards a M.S. degree on geoinformatics engineering at the same university. His research interests include SBAS and PPPRTK algorithm development.



Kwan-Dong Park received his Ph. D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include DGNSS/PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.



Mi-So Kim received M. S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, and she is currently working at Research Institute of PP-Solution Inc. Her research interests include GNSS PPP algorithm development using code pseudorange measurements and modeling of GNSS error sources.



Chang Seok Yoo received the B.S. degree and M.S. degrees in Electrical and Electronic Engineering from the Kyungpook National University, Daegu, South Korea in 2000 and 2002, respectively. He is currently pursuing the Ph.D with the College of Electronics, Radio Sciences and Engineering and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon, South Korea. Since Feb. 2002, he has been in Agency for Defense Development, Daejeon, South Korea, where he has worked on several missile research programs. His research interests include GNSS/SINS tightly-coupled navigation and cooperative communications in wireless communications.



Joon Sung Bae is a principle researcher of ADD in Korea. He received the M.S. degree in Department of Electronic Engineering from Kwangwoon University. His research interests are Multi GNSS and Navigation warfare technologies.



Jun O Kim received his Ph. D. degree from the Division of Electronics, Radio Sciences & Engineering and Information Communication Engineering, Graduate School Chungnam National University, Daejeon, South Korea, and he is currently at Agency for Defence Development as a Principle researcher, Navigation Division. His research intetests include GNSS receiver, Anti-jamming and SBAS algorithm.