

기준국 배치에 따른 한국 위성기반 보강 시스템 UDRE 성능 영향 분석

An Analysis of Reference Station Distribution Impact on KASS UDRE Performance

윤 영 선

한국항공우주연구원 위성항법팀

Youngsun Yun

Satellite Navigation Team, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-806, Korea

[요 약]

SBAS 기준국의 배치는 시스템 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나이므로 기준국 배치가 주어진 성능 요구사항을 만족시킬 수 있는지 시스템 개발 초기에 신중하게 분석하여야 한다. 특히 한국형 SBAS로 개발이 진행 중인 KASS의 기준국은 대한민국 내에 설치될 예정이므로 기준국의 개수와 영역이 제한될 수밖에 없으며 이는 넓게 기준국을 배치할 수 있는 타 SBAS 시스템과 구별이 되는 부분이다. 본 논문에서는 이러한 한계로 인한 GPS 및 GEO에 대한 UDRE와 δ UDRE 성능 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하였으며 그 결과 UDRE 성능은 기준국이 얼마나 넓게 분포하는지에 크게 영향을 받으며 특히 GEO UDRE에 미치는 영향이 매우 심각한 것을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 기준국 배치 영향으로 인한 시스템 성능 위험을 최소화하기 위한 KASS 설계 및 개발 고려 사항을 제시한다.

[Abstract]

Since the distribution of SBAS reference stations is one of the most important factors that affect the system performance, the effects of the distribution should be analyzed carefully from the beginning of the program to develop the system conforming to given performance requirements. The reference stations of KASS, the Korean SBAS, are planned to be installed only inside South Korea, which limits the number and area of those. It differentiates KASS from others that have much larger sites. In this paper, the author analyzes the performance impact on UDRE and δ UDRE for GPS and GEO due to the limitations by a series of simulations, which showed that the UDRE performance depends on the diversity of the reference station distribution and the impact on the GEO UDRE is significant. The paper concludes by providing KASS design and development considerations to minimize the possible performance risks due to the limitations of KASS reference station distribution.

Key word : Korea augmentation satellite system, Reference station distribution, User differential range error, Geostationary satellite.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.3.207>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 17 May 2015; Revised 1 June 2015
Accepted (Publication) 11 June 2015 (30 June 2015)

*Corresponding Author; Youngsun Yun

Tel: +82-42-860-2798

E-mail: ysyun@kari.re.kr

I. 서론

위성기반 보강 시스템(SBAS; space based augmentation system)은 위성항법시스템(GPS; global positioning system) 단독으로는 만족할 수 없는 항공용 항행 사용자의 정확성, 무결성, 가용성, 연속성 등의 항행 성능을 개선하기 위하여 개발된 시스템으로 미국의 WAAS (wide area augmentation system), 유럽의 EGNOS (European geostationary navigation overlay system), 일본의 MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system), 인도의 GAGAN (GPS aided geo augmented navigation) 등이 구축되어 사용되고 있다. 대한민국 국토교통부는 2014년 10월에 SBAS 개발을 공식적으로 시작하였으며 국내에 구축될 시스템을 KASS (Korea augmentation satellite system)로 명명하였다.

KASS는 5기 이상의 기준국 (KRS; KASS reference station), 2기의 중앙처리국 (KPS; KASS processing station), 2기의 통합운영국 (KCS; KASS control station), 4기의 위성통신국 (KUS; KASS uplink station) 그리고 2기의 정지궤도위성 (GEO; geostationary satellite)으로 구성될 예정이다. 기준국은 GPS 및 GEO 신호를 수신하여 거리 측정치 및 항법 데이터를 수집하고 이를 중앙처리국으로 전송한다. 중앙처리국은 GPS 및 GEO 위성의 궤도 및 시간 정보에 대한 보정 정보를 포함하는 단기 및 장기 보정치와 전리층 지연 오차 보정을 위한 전리층 보정치를 생성한다. 이 때, UDRE (user differential range error)와 GIVE (grid ionospheric vertical error)와 같은 관련 무결성 경계값들을 같이 생성하여 국제 표준에 따라 SBAS 메시지를 구성하고 위성통신국으로 전달한다. 위성통신국은 SBAS 메시지를 포함한 SBAS 신호를 생성하여 GEO로 전송하며, GEO는 수신한 신호의 주파수를 변환하여 지상으로 방송한다. 통합운영국은 전체 시스템의 상태 및 성능을 감시하며 이상 현상 발생 시 유지보수 작업을 수행하여 시스템의 성능이 지속적으로 유지되도록 운영한다.

KASS 시스템의 주목적은 2022년부터 우리나라 본토 내의 공항에서 APV-I (approach with vertical guidance-I) 급의 수직 유도접근 절차를 활용하기 위한 SBAS 기반 항행 신호를 제공하는 것이다. APV-I 요구사항 만족을 위해서는 99% 이상의 시간 동안 수평 및 수직 보호수준(Protection level)이 각각 수평 및 수직 경보한계(alert limit)인 40 m, 50 m 보다 작아야 하며, 이 때 보호수준은 서비스 영역 내 사용자들의 실제 위치 오차를 특정 무결성 확률로 포함하여야 한다 [1]. 보호수준은 UDRE, GIVE와 관련 파라미터들을 이용하여 계산하게 되므로 이 값들은 사용자의 무결성 보장 및 서비스 가용성 제공에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 한편, GEO는 GPS 신호와 동일한 형태로 SBAS 신호를 방송하기 때문에 SBAS 사용자는 SBAS 신호를 추가 거리 정보 획득 수단으로 이용할 수 있으므로 서비스의 가용성 향상에 활용할 수 있다.

앞서 언급된 UDRE, GIVE, GEO 거리 정보 성능 등은 기준

국 배치에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 문헌들을 참고하여 이러한 성능 요소들이 기준국 배치에 어떻게 영향을 받는지를 정리하고 시뮬레이션을 통하여 GEO 거리 정보 성능을 포함한 UDRE 성능에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여 타 SBAS 시스템들에 비해 기준국 배치 영역이 협소하고 개수가 적은 KASS의 기준국 배치 특성을 고려하였다.

본 논문의 2장에서는 SBAS 성능에 직접 영향을 미치는 요소들을 정리하고 특히 GPS와 GEO의 위성 궤도 및 시계 오차 추정 성능과 관련된 UDRE 성능이 어떤 요소의 영향을 받는지를 검토한다. 3장에서는 기준국의 UDRE 성능 영향 분석을 위하여 수행한 시뮬레이션 구성 및 GPS 및 GEO에 대한 UDRE 영향 분석 결과를 제시한다. 4장에서는 3장의 결과를 정리하고 분석 결과를 반영한 KASS 개발 계획에 대하여 논하고 결론을 맺는다.

II. 주요 SBAS 성능 요소

SBAS 신호를 이용한 항공기 작업의 가용성, 즉 SBAS 항법해 사용여부는 항공 사용자의 무결성 경계, 즉 수평 및 수직 보호수준을 계산하여 수평 및 수직 경보한계와 비교함으로써 판단할 수 있으며 이 때 수직 보호수준은 다음과 같이 계산된다 [2].

$$VPL = K_V \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{V,i}^2 \sigma_i^2} \tag{1}$$

이 때, K_V 는 SBAS를 이용한 접근 절차의 경우 5.33으로 정의되어 있으며, $S_{V,i}$ 는 i 번째 위성의 수직 위치 방향에 대한 정사영 변환 계수로 사용자 수신기에서 가시 위성들로의 시선 벡터로 구성된 관측 행렬로부터 계산된다. N 은 가시 위성의 개수이다. 각 가시 위성에 대한 의사거리 측정치의 보정후 오차 수준을 나타내는 표준편차 σ_i 는 다음 식으로 계산된다.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,тропо}^2 \tag{2}$$

이 때, σ_i 는 i 번째 위성에 대한 보정 의사거리 오차의 표준편차, $\sigma_{i,flt}$ 는 i 번째 위성에 대한 단기 및 장기 보정 (flt; fast and long term) 오차의 표준편차, $\sigma_{i,UIRE}$ 는 i 번째 위성에 대한 사용자 전리층 지연 보정 오차 (UIRE; user ionospheric range error)의 표준편차, $\sigma_{i,air}$ 는 i 번째 위성에 대한 항공기 탑재 수신기 잡음 및 다중경로 오차의 표준편차, $\sigma_{i,тропо}$ 는 i 번째 위성에 대한 대류층 지연 보정 오차의 표준편차이다.

$\sigma_{i,air}$ 와 $\sigma_{i,тропо}$ 는 [2]에 각각 모델로 제시되어 있으므로 결국 보정 의사거리 오차의 표준편차 σ_i 와 수평/수직 보호수준은 단기 및 장기 보정 오차와 전리층 지연 보정 오차에 대한 표

준편차, 즉 SBAS 중앙처리국에서 생성하는 UDRE, GIVE와 관련된 파라미터들로부터 결정된다.

수평 보호수준은 식(1)에서 K 값과 S 값을 수평 방향으로 할당된 값으로 변경하여 계산할 수 있는데, 일반적으로 수직 보호수준이 가용성 판단에 미치는 영향이 더 크기 때문에 본 논문에서는 수직 보호수준 만을 고려하였다.

2-1 위성 궤도 및 시계 보정 오차 (UDRE)

1) UDRE

UDRE는 보정 후 위성 궤도 및 시계 오차를 할당된 무결성 요구조건을 만족하는 확률로 포함할 수 있어야 하며, 그 외에도 신호 변형 (signal deformation)에 의한 오차, 코드-반송파 비일관성 (code-carrier incoherence), 대류층 보정 잔여 오차, 주파수 간 바이어스 (interfrequency bias), 수신기 시계 오차 추정 잔여 오차 등을 고려하여야 한다 [3]. UDRE가 할당된 무결성 확률 요구조건을 만족하지 못할 경우, 즉 실제 오차들을 적절한 확률로 포함하지 못할 경우 사용자의 위치해는 예기치 못한 무결성 위협 요소에 의해 큰 오차를 가질 수 있으며 이는 사용자 위치해의 무결성을 저해하는 결과로 이어진다. 이를 방지하기 위하여 SBAS 중앙처리국에서는 방송될 UDRE 값을 지속적으로 감시하는 작업을 수행하며, WAAS에서는 내부 UDRE 감시 (internal UDRE monitor) 및 외부 UDRE 감시(external UDRE monitor) 기능을 통하여, EGNOS에서는 UDRE 검사(check) 기능을 통하여 수행한다 [4][5]. 특정 위성 신호가 3개 이상의 SBAS 기준국에서 수신되지 않을 경우 해당 위성에 대한 UDRE 값은 “Not Monitored”로 지정되며 해당 위성은 사용자 위치해 결정에 사용될 수 없다. 따라서 국내와 같이 기준국 개수가 적을 경우 기준국에서의 데이터 누락 또는 신호 획득 실패는 UDRE에 영향을 줄 수 있으며 사용자 가용성에 영향을 미칠 수 있다.

UDRE 알고리즘에서 담당해야 하는 무결성 위협 요인들 중 가장 주요한 요소는 위성 궤도 및 시계 오차이므로 본 논문에서는 이 요소에 대해서만 고려하도록 한다. 식 (2)에서 언급된 단기 및 장기 보정치의 오차의 표준편차는 성능저하계수와 양자화 및 UDRE 정의를 고려하면 다음과 같이 표현 가능하다 [2][6].

$$\sigma_{fit} \geq \sigma_{UDRE} \cdot \delta UDRE \geq \sqrt{e^T \cdot P \cdot e} \tag{3}$$

이 때 σ_{UDRE} 는 SBAS 메시지 형식 (MT; message type) 2, 3, 4, 5, 6, 24로 방송되는 UDRE 지시자 (UDREI; UDRE indicator)에서 나타내는 값([2] 표 A-6 참조)으로 기준국 네트워크 중심부에 위치한 사용자 기준의 위성 궤도 및 시계 오차 보정치에 대한 오차 수준이다. $\delta UDRE$ 는 MT 28에서 전송되는 공분산 행렬과 해당 위성으로의 사용자 시선 벡터로부터 계산된 값([2] A.4.4.16 참조)으로 사용자가 기준국 네트워크 근처에 위치할

때는 1의 값을 가지며 멀어질수록 큰 값을 가지게 된다. e 는 사용자로부터 해당 GPS 위성까지의 시선 벡터를 의미한다. 한편 행렬 P 는 위성 궤도 및 시계 오차의 추정 공분산 행렬로 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다 [6][7]. 단, 이 수식은 운동학적인 방법을 사용한 것으로 위성동역학 모델을 적용할 경우 성능 개선이 가능하다는 것을 고려하여야 한다.

$$P = (P_0^{-1} + G^T W G)^{-1} \tag{4}$$

이 때 P_0 는 GPS 방송 궤도의 정확도에 대한 사전(a-priori) 정보로 구성된 행렬, G 행렬은 기준국에서 위성으로의 시선 벡터들로 구성된 관측 행렬이며 W 는 오차 추정에 사용된 측정치의 표준편차로 구성된 가중 행렬이다. 측정치의 표준편차는 기준국에서 수집된 원시 측정치를 중앙처리국에서 평활화한 결과로 생성된 측정치의 오차 수준을 나타내며 이후 각종 데이터 처리 과정의 입력으로 사용되는 값(σ_{OMP})이다.

위 식에서 σ_{fit} 및 사용자 보호수준에 영향을 미치는 주요 요인은 G 행렬 및 W 행렬이라는 것을 확인할 수 있다. G 행렬은 기준국의 구성에 따라 결정되며 W 행렬은 σ_{OMP} 로부터 결정된다. σ_{OMP} 에 대한 설명은 2-2절에서 제시하도록 한다.

2) GEO UDRE

SBAS에서 GEO 레인징(ranging) 기능을 제공할 경우 SBAS 또는 GNSS 사용자는 SBAS 신호를 추가적인 거리정보원으로 사용할 수 있다. 이는 항법해 계산을 위한 거리 측정치가 추가되는 것을 의미하며 결국 사용자의 DOP (dilution of precision)을 개선하여 사용자 위치해의 정확성 및 가용성을 향상시키는 효과를 가져오게 된다. 그러나 SBAS 거리 측정치의 품질이 저하될 경우 오히려 위치 오차를 증가시킬 수도 있기 때문에 SBAS 신호에서 거리 정보를 획득하고자 하는 사용자는 거리 정보의 품질 확인을 위하여 해당 위성에 대한 UDRE 값을 검사하게 된다. 약 36,000 km 상공에 위치한 GEO 위성은 약 20,200 km 상공에 위치한 GPS 위성에 비해 기준국에서 훨씬 멀리 떨어져 있으며 지구와 같은 주기로 공전하므로 지상에 대한 상대운동의 크기가 매우 작다. 이로 인해 기준국에서 수집할 수 있는 관측치의 다양성이 매우 제한되어 정확한 궤도 및 시계 오차 추정이 어려우며 UDRE 값이 GPS에 대한 값에 비해 크게 결정된다 [8]. KASS 기준국 분포는 기존의 SBAS에 비해 더 좁기 때문에 KASS의 레인징 성능에 대해서는 더욱 면밀한 검토가 필요하다.

GEO에 대한 UDRE는 GDOP (geometric dilution of precision)에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 본 논문에서는 GEO에 대한 GDOP을 계산하여 그에 해당하는 UDRE 예상 성능을 대략적으로 추정해 보았다 [9].

$$GDOP_{GEO} = \sqrt{\text{tr}((G_{GEO}^T G_{GEO})^{-1})} \tag{5}$$

이 때 G_{GEO} 는 기준국들로부터 GEO 방향으로의 시선 벡터들 로 구성된 관측 행렬이며 따라서 기준국 배치에 따라 결정된다.

2-2 코드 잡음 및 다중경로 오차 (CNMP)

SBAS 중앙처리국은 기준국에서 수집된 데이터에 포함될 수 있는 하드웨어의 성능 저하, 통신 이상, 반송파 위상 사이클 슬립 (cycle slip), 다중 경로 오차, 전리층 상태 등의 무결성 위협 요 인들을 감시하여 적절히 제거하거나 경감시킴으로써 다른 무결 성 감시 기능들에서 사용할 수 있는 데이터를 생성한다 [10].

이 중 가장 주요한 기능은 코드 잡음 및 다중경로 (CNMP; code noise and multipath) 알고리즘으로 의사거리 측정치의 다 중 경로 오차 및 수신기 잡음 효과를 경감시키기 위해 반송파 위상 측정치를 이용한 의사거리 평활화(smoothing)을 수행하며 평활화 이후 의사거리에 대한 잔차의 표준편차(σ_{MP})를 추정하 는 작업을 수행한다. 이 때 생성된 평활화 의사거리 및 표준편 차는 이후 수행되는 UDRE 및 GIVE 감시 알고리즘에 식 (4)에 서와 같이 사용되므로 UDRE 및 GIVE 성능에도 영향을 미치게 되며 결과적으로 전체 시스템 가용성에도 영향을 준다 [11].

EGNOS에서 중앙처리국 역할을 수행하는 CPF (central processing facility)에서는 기준국 측정치에 대한 감시를 별도로 수행하지 않으나 UDRE 및 GIVE 계산 과정에서 고려하는 것으 로 알려져 있다 [5].

[10]을 참고하면 WAAS에서 사용되는 σ_{MP} 는 해당 위성에 대 해 해당 기준국에서 수집한 연속적인 거리 측정치 개수의 함수 이다. 따라서 사이클 슬립이나 통신 이상에 의한 데이터 손실, 신호 손실 (loss of lock) 발생 시에는 측정치 평활화 필터가 초 기화 되고 σ_{MP} 도 역시 초기값으로 설정된다 [12]. 초기값은 정 상상태 (steady state) 값에 비해 큰 값을 가지기 때문에 위와 같 은 이벤트가 빈번하게 발생할 경우 UDRE 및 GIVE 성능 저하 의 원인이 될 수 있다.

2-3 전리층 지연 보정 오차 (GIVE)

GIVE는 전리층 격자점 (IGP; ionospheric grid point)에서의 수직 전리층 보정치의 잔여 오차 수준을 나타내는 값이다. 식 (2)에서의 σ_{UIRE} 는 사용자 GPS 측정치의 전리층 통과점 (IPP; ionospheric pierce point)에서의 수직 전리층 지연 보정 오차 (UIVE; user ionospheric vertical error)를 주위 격자점에서의 GIVE 값들을 이용하여 계산하고, 이를 해당 GPS 위성의 양각 에 따른 경사도 (obliquity factor)를 이용하여 시선 벡터 방향으 로 추정된 오차 수준을 의미한다 [2].

GIVE는 공간적/시간적 전리층의 변화, 전리층 모델의 부정 확성, 위경도 5° 간격으로 배치된 IGP의 한계, 제한적인 관측치 분포 및 개수, 주파수간 바이어스 등을 고려하여 결정된다 [3]. 태양 활동의 증가에 따라 전리층이 불규칙한 특성을 가질 것으 로 예상될 경우, SBAS 시스템이 균등하게 분포된 충분한 개수 의 관측치를 얻을 수 없을 때에는 사용자가 경험할 전리층 지연

의 정확한 값 및 오차 수준을 정확하게 예측할 수 없으므로 사 용자의 무결성을 보장하기 위하여 GIVE 값을 증가시키게 된 다. 또한 특정 지역 내의 전리층 관측치를 획득할 수 없을 경우 해당 지역의 전리층이 사용자 항법해에 주는 영향을 감시할 방 법이 없으므로 GIVE 값을 보수적으로 크게 설정하여야 한다.

따라서 GIVE 감시 성능은 전리층 측정치의 밀도, 균등성, 개 수, 범위 등의 영향을 받는다 [13].

III. UDRE에 대한 기준국 배치 영향 분석

3-1 고려 사항

앞 장에서 SBAS 성능에 영향을 미치는 요소들을 정리하였 으며 기준국의 개수 및 분포와 연속적으로 수집된 측정치의 품 질 및 개수가 전체 성능에 기여하는 것을 확인하였다. 현재 WAAS는 38개, EGNOS는 39개, MSAS는 8개, GAGAN은 15개 의 기준국을 운영하고 있다. KASS의 기준국들은 국내에 설치 되는 것이 현재 목표이므로 타 SBAS 시스템에 비해 개수와 측 정치 수신 영역이 크게 제한될 수밖에 없다. 또한 통신 두절, 전 파 간섭, 전리층 섬광(scintillation), 지역 내에서 발생한 사고 등 으로 인한 데이터 손실의 가능성도 존재한다 [14]. 특히 KASS 기준국의 개수가 타 SBAS의 기준국에 비해 적은 상황에서 데 이터 손실이 발생할 경우 그 영향은 타 시스템에 비해 심각할 것으로 예상된다.

따라서 기준국의 개수 및 분포, 데이터 손실이 GPS 및 GEO 의 UDRE에 미치는 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션을 수행 하였다.

3-2 시뮬레이션

본 논문에서는 Stanford GPS 연구실에서 개발한 MAAST (Matlab algorithm availability simulation tool)를 수정하여 기준 국 구성에 따른 UDRE의 영향 분석 시뮬레이션을 수행하였다 [15].

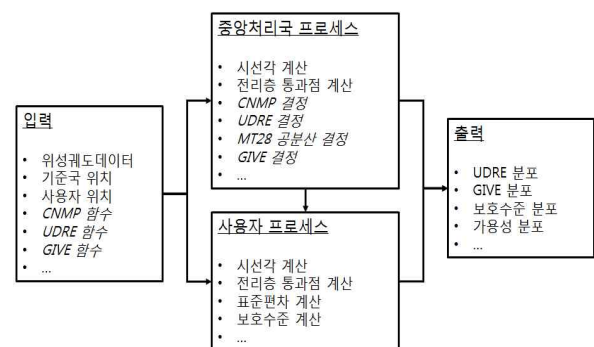


그림 1. MAAST 주요 기능
Fig. 1. Major functions of MAAST

MAAST는 그림 1과 같은 흐름으로 데이터 처리를 수행하는데 공개된 버전의 UDRE 함수와 GIVE 함수 등은 사용자가 지정한 상수로 파라미터를 직접 설정하는 단순한 기능만 구현되어 있기 때문에 기준국 분포에 따른 의미 있는 결과를 나타내기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 UDRE 함수를 위주로 다음과 같은 부분을 수정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

CNMP 함수에서는 [10]에서 설명된 σ_{MP} 함수를 이용하였으며, UDRE 함수에서는 식 (3), (4), (5)를 구현하였다. 식(4)의 P_0 행렬 구성을 위한 위성 궤도 추정 오차의 공분산은 RAC (radial, along-track, cross-track) 좌표계에서 $(3\text{ m})^2$, $(10\text{ m})^2$, $(10\text{ m})^2$, 시계 추정 오차는 무한대(∞)로 설정하였다 [6].

보호수준 계산 함수는 식 (2)에서 σ_{th} 만을 이용하고 나머지 항목들은 0으로 강제로 설정하여 UDRE에 의한 수직 보호수준의 영향만을 관찰할 수 있도록 하였다. 보호수준 분포 출력 함수에서는 UDRE 만을 고려한 수직 보호수준을 VPL_{UDRE} 로 표시하도록 수정하였다.

GPS 위성군은 [2]에 정의된 24개 위성 구성으로 설정하였으며 GEO는 143.5°E에 위치한 Inmarsat 4F1 위성으로 가정하였다. 24 시간 동안 20 분 간격으로 위경도 1도 간격으로 배치된 가상 사용자들의 수직 보호수준을 계산하였다.

표 1과 같이 국내 NDGPS 기준국 및 감시국과 국외 SBAS 기준국의 위치를 바탕으로 선별한 가상의 국내 기준국 10곳과 국외 기준국 6곳을 이용한 다양한 기준국 조합에 따른 영향을 분석하였으며 사용된 기준국의 배치는 그림 2, 3과 같다. 기준국의 기본 구성은 국내 5개의 기준국으로 SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA로 설정하였으며 표 2와 같이 다양한 기준국 조합을 적용한 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 가상 기준국 목록

Table 1. Virtual reference stations used for the simulation.

분류	기준국명	위치	비고
국내	SOCH	소청도	NDGPS ¹⁾ 기준국
	ULLE	울릉도	NDGPS 기준국
	DAEJ	대전	NDGPS 감시국
	YNDO	영도	NDGPS 기준국
	MARA	마라도	NDGPS 기준국
	PALM	팔미도	NDGPS 기준국
	JUMN	주문진	NDGPS 기준국
	CCHJ	충주	NDGPS 기준국
	SEOI	서이말	NDGPS 감시국
	GAGE	가거도	NDGPS 기준국
국외	COQ	Choibalsan, Mongol	
	SAP	Sapporo, Japan	MSAS GMS ²⁾
	OKA	Naha, Japan	MSAS GMS
	HNL	Honolulu, USA	WAAS WRS ³⁾
	CBR	Canberra, Australia	MSAS MRS ⁴⁾
	LKO	Lucknow, India	GAGAN INRES ⁵⁾

- 1) NDGPS : nationwide differential GPS
- 2) GMS : ground monitor station
- 3) WRS : WAAS reference station
- 4) MRS : monitor and ranging station
- 5) INRES : Indian reference station

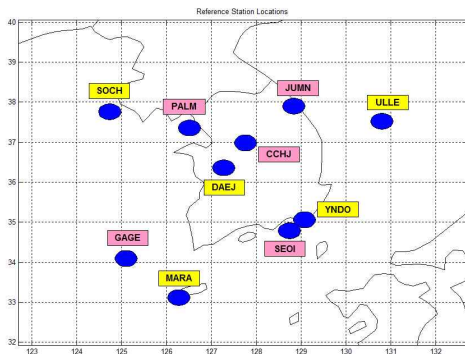


그림 2. 국내 기준국 분포. 노란색은 기본 기준국 구성
Fig. 2. Internal reference stations. The yellow marked stations are the baseline stations.

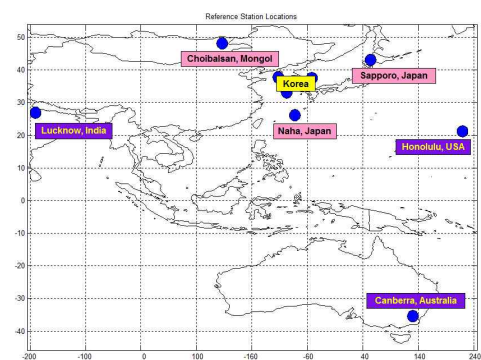


그림 3. 국외 기준국 분포
Fig. 3. External reference stations.

3-3 시뮬레이션 결과

1) VPL_{UDRE}

그림 4는 5개의 국내 기준국 기본 구성을 가정했을 때의 99% VPL_{UDRE} 분포를 나타낸다. 수직 보호수준은 우리나라 영

표 2. 시뮬레이션 구성에 사용된 기준국 조합

Table 2. Reference station combinations for the simulation configuration.

Case	기준국 조합	구성 기준국명
1	국내 5	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA
2	국내 10	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, PALM, JUMN, CCHJ, SEOI, GAGE
3	국내 3, 국외 2 (몽골, 북 일본)	SOCH, MARA, ULLE, COQ, SAP
4	국내 3, 국외 2 (몽골, 남 일본)	SOCH, MARA, ULLE, COQ, OKA
5	국내 5, 국외 2 (몽골, 북 일본)	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, COQ, SAP
6	국내 5, 국외 2 (몽골, 남 일본)	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, COQ, OKA
7	국내 5, 국외 3 (몽골, 남/북 일본)	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, COQ, SAP, OKA
8	국내 5, 국외 2 (인도, 하와이)	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, LKO, HNL
9	국내 5, 국외 2 (호주, 하와이)	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, CBR, HNL
10	국내 5, 국외 3 (인도, 호주, 하와이)	SOCH, ULLE, DAEJ, YNDO, MARA, LKO, CBR, HNL

토 대부분 지역에서 99%의 시간 동안 4 m 이내의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그림 5와 6은 동일하게 5개의 기준국을 설정 하였으나 3개만이 국내 기준국이고 2개의 기준국은 국외에 설치했을 경우의 분포를 보여준다. 국외 기준국이 설치된 방향으로 4 m 영역이 크게 증가하지만 우리나라 공항들이 위치한 지역에서의 값은 크게 달라지지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 국내 기본 기준국 5개에 국외 기준국 2개가 추가되었을 경우의 분포를 보여준다. 그림 7의 (a)와 (c)는 그림 5, 6에서 국내 기준국 2개가 추가된 경우인데, 우리나라 내륙 지역의 성능이 조금 개선되는 것을 볼 수 있으나 큰 차이는 만들지 않는 것을 확인할 수 있다.

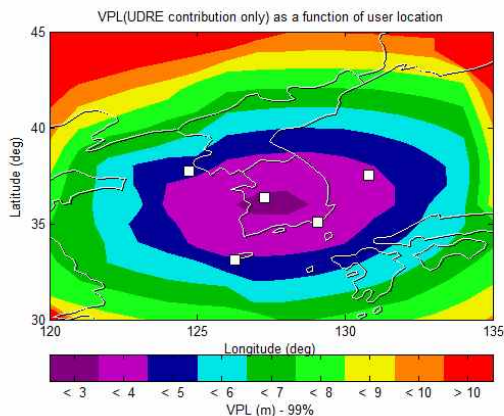


그림 4. Case 1 적용 시 VPL_{UDRE} 분포
Fig. 4. VPL_{UDRE} distribution with Case 1.

그림 7의 (b)와 (d)는 국외 기준국이 인도, 호주, 미국 하와이 등 원거리에 설치되었을 경우로 4 m 보호수준 영역이 국외 기준국 방향으로 더 길게 확장되는 것을 보여준다. 그러나 이 경우에도 우리나라 주변으로는 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 그림 8은 국외 기준국이 3개일 경우로 2개일 때와 큰 차이를 나타 내지 않는다.

그림 9는 5개의 국내 기준국 중 하나의 기준국에 통신 두절 또는 이상, 전파 간섭 등의 문제가 발생하여 데이터가 손실되었을 경우를 가정했을 때의 결과이다. 데이터가 손실된 지역 주변으로 성능이 저하되는 것을 볼 수 있으나 그 정도가 1 m 내외, 최대 2 m 이내로 APV-I 요구사항의 수직 경보한계 50 m 에 비해 매우 작은 수준으로 영향이 매우 심각하지는 않은 것으로 판단된다.

그림 10은 국내 기준국이 그림 1과 같이 10개로 구성되어 있을 때의 VPL_{UDRE} 성능을 나타내며 그림 4의 국내 기준국 5인 경우가 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 그림 11과 같이 10개의 기준국 중 1개의 데이터가 손실되었을 경우 그림 9에 비해 변화가 적으므로 보다 강인하다는 것을 확인할 수 있다.

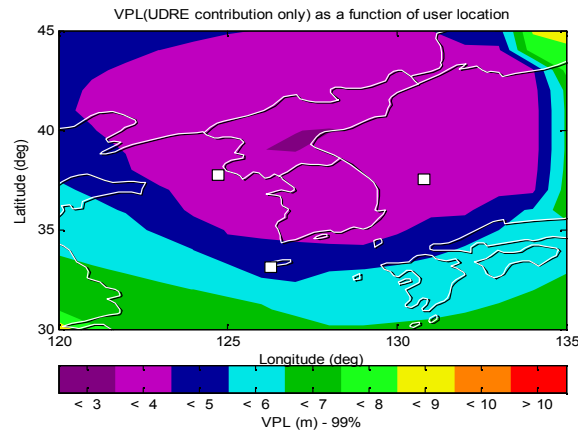


그림 5. Case 3 적용 시 VPL_{UDRE} 분포
Fig. 5. VPL_{UDRE} distribution with Case 3.

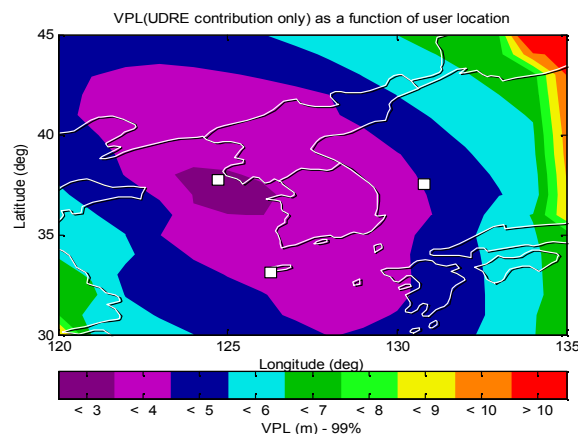


그림 6. Case 4 적용 시 VPL_{UDRE} 분포
Fig. 6. VPL_{UDRE} distribution with Case 4.

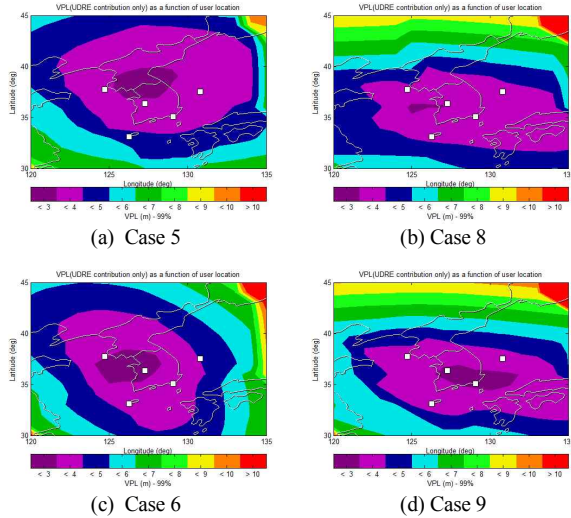


그림 7. VPLUDRE 분포: Case 5, 6, 8, 9
 Fig. 7. VPLUDRE distribution: Case 5, 6, 8, 9.

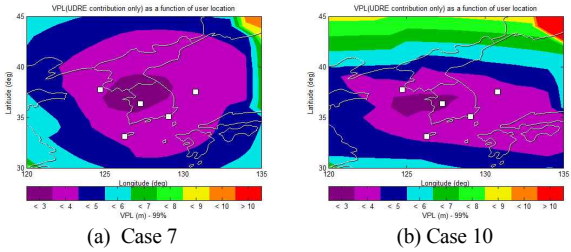


그림 8. VPLUDRE 분포: Case 7, 10
 Fig. 8. VPLUDRE distribution: Case 7, 10.

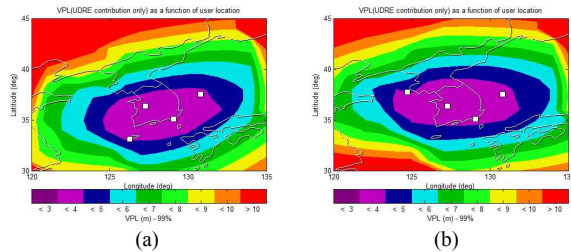


그림 9. Case 1 적용 시 VPLUDRE 분포: (a) SOCH (최서북단) 이상 (b) MARA (최남단) 이상 시
 Fig. 9. VPLUDRE distribution with Case 1 in case of (a) SOCH (the most western and northern station) and (b) MARA (the most southern station) outage.

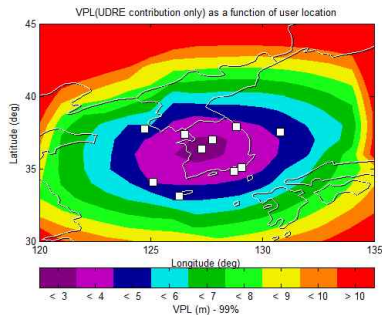


그림 10. Case 2 적용 시 VPLUDRE 분포
 Fig. 10. VPLUDRE distribution with Case 2.

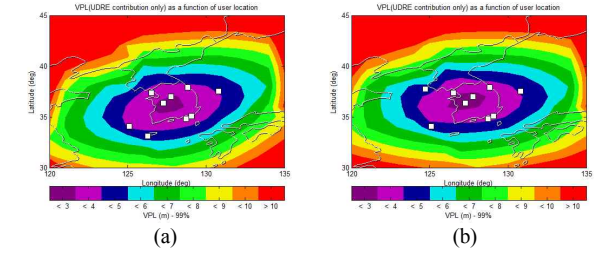


그림 11. Case 2 적용 시 VPLUDRE 분포: (a) SOCH (최서북단) 이상 (b) MARA (최남단) 이상 시
 Fig. 11. VPLUDRE distribution with Case 2 in case of (a) SOCH (the most western and northern station) and (b) MARA (the most southern station) outage.

2) GEO UDRE

기준국 배치가 GEO의 UDRE에 미치는 영향을 조사하기 위하여 여러 기준국 조합에 따른 GDOP_{GEO}를 계산하였으며 GEO UDRE의 GDOP_{GEO} 의존성 분석 결과를 참고로 예상되는 UDRE를 추정하였다 [9]. 따라서 본 결과는 궤도 결정 오차만을 고려한 것이며, 다양한 기준국 구성에 대한 결과를 표 3에 정리하였다.

5개의 국내 기준국 구성 시 GDOP이 40,000을 넘는 값을 가지며 예상되는 UDRE의 범위가 60 m에서 150 m로 UDREI는 13의 값을 가지게 된다. 이는 WAAS GEO 중 CRW와 CRE에 대한 UDRE에 비해 10~20 배 가량 낮은 성능이다 [16]. GDOP과 UDRE는 국외 기준국을 추가함에 따라 크게 감소하지만 WAAS와 유사한 성능을 제공하기 위해서는 훨씬 더 많은 기준국이 필요할 것으로 예상된다.

표 3. 기준국 구성에 따른 GDOP_{GEO}와 UDRE 및 UDREI 추정치

Table 3. GDOP_{GEO} and the corresponding UDRE and UDREI estimate for various reference station configurations.

기준국 구성	GDOP _{GEO}	UDRE (m)	UDREI
Case 1	43,398	60-150	13
Case 2	33,713	55-135	13
Case 3	6,463	35-60	12, 13
Case 4	5,713	30-55	12, 13
Case 5	6,171	35-60	12, 13
Case 6	5,391	30-55	12, 13
Case 7	2,737	22-35	12
Case 8	1,534	17-27	12
Case 9	1,308	15-23	11, 12
Case 10	1,237	14-22	11, 12

표 4. 이상 기준국 발생 시 GDOP_{GEO}와 UDREI 추정치

Table 4. GDOP_{GEO} and the corresponding UDREI estimate in case of a reference station outage.

기준국 구성	이상 기준국	GDOP _{GEO}	UDREI
Case 1	없음	43,398	13
	SOCH	47,903	13, 15(DNU)
	DAEJ	57,334	13, 15(DNU)
	YND0	54,722	13, 15(DNU)
	MARA	122,934	13, 15(DNU)
	ULLE	155,364	13, 15(DNU)

표 4에서와 같이 만약 KASS에서 5개의 국내 기준국만을 이용할 경우 하나의 기준국 데이터 손실이 발생하게 되면 GEO UDRE는 UDREI가 15, 즉 “Do Not Use” 수준으로 증가하게 된다. 특히 최동단(ULLE) 또는 최남단(MARA) 기준국에 이상이 발생할 경우 UDRE 성능은 다른 경우에 비해 두세 배 가량 저하될 것으로 예상된다.

3-4 시뮬레이션 결과 분석

그림 4에서 11까지는 기준국 배치에 따른 UDRE의 영향을 나타내었으나 우리나라 영토 내의 VPL_{UDRE} 차이는 2 m 이내인 것을 확인할 수 있었다. KASS의 APV-I 서비스 대상 영역 내에서의 VPL_{UDRE} 값은 그림 12의 WAAS 기준국 구성에서 획득할 수 있는 것과 유사한 4 m 정도의 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

따라서 KASS의 APV-I 서비스 영역 내에서의 UDRE는 성능 요구조건 만족이 가능할 것으로 예상되고 국외 기준국의 추가에 의한 영향은 서비스 영역 내에서는 크지 않은 것으로 판단된다. 논문 [17]의 결과는 우리나라와 가까운 지역에 위치한 국외 기준국 2개를 설치할 경우 시스템 가용성이 크게 개선되는 것을 보여주었다. 이 결과는 전리층 보정 오차, 즉 GIVE 결과를 포함한 것으로 GIVE에 미치는 기준국 추가의 영향이 더욱 크다는 것을 짐작하게 한다. 따라서 KASS 기준국 배치를 선정할 때 기준국 분포의 UDRE에 대한 영향 보다는 GIVE에 대한 영향에 더욱 집중할 필요가 있을 것으로 보인다.

그러나 GEO UDRE의 기준국 배치에 대한 의존성은 훨씬 크며 GEO 레인징 기능 제공을 위해서는 기준국 추가 또는 알고리즘 개선이 필요할 것으로 예상된다.

앞서 언급한 대로 기준국 데이터의 손실이 발생할 경우 CNMP 평활화 필터가 초기화 되며 σ_{MP} 의 갑작스런 증가가 발생할 수 있다.

이 영향에 대한 결과 역시 분석되었으나 결과는 그림 9 및 11과 비슷하였으며 이는 갑작스런 표준편차의 증가가 해당 측정

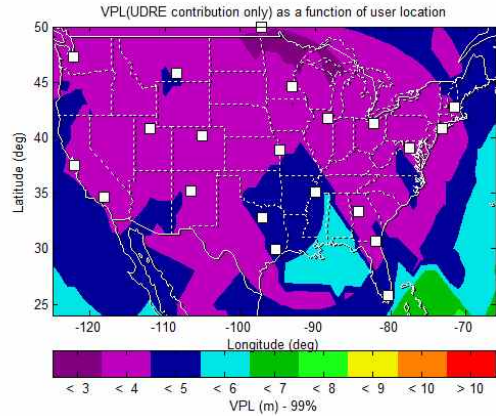


그림 12. 기준국 38개 배치 시 WAAS VPL_{UDRE} 분포
Fig. 12. VPL_{UDRE} distribution in CONUS with 38 WAAS reference stations.

치에 대한 가중치를 낮춤으로써 해당 기준국 데이터가 손실된 것과 유사한 결과를 생성하였기 때문이다. 따라서 필터 초기화의 UDRE에 대한 영향은 심각하지 않을 것으로 예상되지만 측정치의 밀도가 주요한 성능 요소로 작용하는 GIVE에 미치는 영향은 좀 더 조사가 필요할 것으로 보인다.

앞의 결과를 종합해 보면 VPL_{UDRE}와 GEO UDRE성능은 기준국의 밀도 보다는 분포에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있으며 그에 따라 기준국 데이터 손실의 영향이 미미한 것으로 판단할 수 있다. APV-I 서비스 대상 지역에서의 VPL_{UDRE}는 국내 기준국 만으로 WAAS와 유사한 성능을 얻을 수 있으나 GEO 레인징 성능은 크게 미치지 못할 것으로 예상된다. 본 연구 결과만을 고려하면 UDRE 성능 개선을 위하여 기준국의 개수 또는 분포를 확장하는 것은 큰 의미가 없을 것으로 판단할 수 있으나 GIVE 성능의 경우 측정치의 밀도가 중요하기 때문에 이에 대한 추가적인 고려가 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 SBAS 가용성 및 GEO 레인징 성능에 영향을 미치는 요소들을 기술하고 기준국의 개수 및 배치와 사용자 보호수준과의 관계를 분석하였다. 시뮬레이션을 통하여 기준국 구성이 GPS 및 GEO의 UDRE에 미치는 영향을 확인하였다. 분석 결과는 UDRE에 따른 보호수준의 분포가 기준국 네트워크 구성에 의존하지만 그 영향이 GIVE와 비교했을 때 지배적이지는 않다는 것을 보여주었다. 하지만 GEO UDRE는 기준국의 배치에 매우 민감한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 시스템 성능을 극대화하고 기준국 재설치의 위험을 최소화하기 위하여 기준국 부지 확정 이전에 KASS 시스템 설계 초기 단계에서 GEO 레인징 및 GIVE 성능에 대한 분석이 집중적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 특히 GEO 레인징 성능의 경우 기준에 계획된 기준국 보다 훨씬 많은 수의 기준국이 필요할 수도 있으므

로 사업 예산 및 기간, 사용자 측면에서의 GEO 레인징 기능의 필요성, 알고리즘 개선 가능성 등을 고려한 요구사항 정의 및 개발 계획의 수립이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업의 연구비지원 (14ATRP-A085964-01)에 의해 수행되었으며, 본 연구 내용의 일부는 ION 2015 Pacific PNT 학회에서 발표되었음 [18]. 본 논문에 수록된 내용은 저자 개인의 의견으로 소속기관의 공식 견해가 아님.

참고 문헌

- [1] ICAO, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I – Radio Navigation Aids, International Standards and Recommended Practices, Amendment 87, Nov. 2012.
- [2] RTCA SC-159, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment (DO-229D), RTCA Inc., Dec. 13, 2006.
- [3] T. Walter, P. Enge and B. DeCleene, “Integrity lessons from the WAAS integrity performance panel (WIPP),” in *Proceedings of the 2003 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Anaheim: CA, pp. 183-194, Jan. 2003.
- [4] T. Wu and S. Peck, “An analysis of satellite integrity monitoring improvement for WAAS,” in *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland: OR, pp.756-765, Sep. 2002.
- [5] W. Werner, U. Rossbach and R. Wolf, “Algorithms and performance of the EGNOS CPF independent check set,” in *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, Salt Lake City: UT, pp.219-229, Sept. 2000.
- [6] T. Walter, A. Hansen and P. Enge, “Message type 28,” in *Proceedings of the 2001 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Long Beach: CA, pp. 522-532, Jan. 2001.
- [7] D. Kim, A Study on Correction Generation Algorithms for Wide Area Differential GNSS, Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, Oct. 2006.
- [8] M. Grewal, E. Carolipio and M. Bailey, “Comparison of GEO and GPS orbit determination,” in *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland: OR, pp. 790-799, Sept. 2002.
- [9] N. Pandya, J. Wu and M. Grewal, “Dependence of GEO UDRE on ground station geometries,” in *Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Anaheim: CA, pp. 80-90, Jan. 2000.
- [10] K. Shallberg and F. Sheng, “WAAS measurement processing; current design and potential improvements,” in *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008*, Monterey: CA, pp. 253-262, May 2008.
- [11] Y. Yun, D. Kim, C. Pyong and C. Kee, “Performance analysis of Korean WADGPS algorithms with NDGPS data,” in *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach: CA, pp. 1329-1339, Sept. 2004.
- [12] K. Shallberg, P. Shloss, E. Altshuler and L. Tahmazyan, “WAAS measurement processing, reducing the effects of multipath,” in *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, Salt Lake City: UT, pp.2334-2340, Sept. 2001.
- [13] E. Bang and J. Lee, “Considerations on ionospheric correction and integrity algorithm for Korean SBAS,” *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, Vol. 3, No. 1, pp. 17-23, Mar. 2014.
- [14] Y. Yun and M. Heo, “A feasibility study of a GNSS jammer detection and localization architecture using airborne sensor networks,” in *Proceedings of the International Symposium on GNSS 2014*, Jeju, Korea, pp. 334-349, October 2014.
- [15] S. S. Jan, “Matlab simulation toolset for SBAS availability analysis,” in *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, Salt Lake City: UT, pp. 2366-2375, Sept. 2001.
- [16] William J. Hughes Technical Center WAAS Test Team [Internet]. Available: <http://www.nstb.tc.faa.gov/>.
- [17] E. Bang, J. Lee, J. Lee, J. Seo and T. Walter, “Constructing ionospheric irregularity threat model for Korean SBAS,” in *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*, Honolulu: HI, pp. 296-306, Apr. 2013.
- [18] Y. Yun, “Influence of reference station distribution on the Korean SBAS performance,” in *Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting*, Honolulu: HI, Apr. 2015.



윤 영 선 (Youngsun Yun)

2000년 2월: 서울대학교 기계항공공학부 (공학사) 2002년 2월: 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)

2007년 2월: 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사) 2004년 3월 ~ 2005년 3월: Stanford University GPS Lab, Visiting Researcher

2007년 5월 ~ 2010년 3월: 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2010년 4월 ~ 현재: 한국항공우주연구원 선임 연구원

※ 관심분야: GNSS 무결성 감시, GBAS/SBAS 시스템 개발/평가/인증, GNSS 항공 활용