

論文

MSAS 보정정보 분석 및 국내 적용 시 성능 평가

정명숙*, 김정래**

Analysis of MSAS Correction Information
and Performance in Korea

Myeong-Sook Jeong* and Jeongrae Kim**

ABSTRACT

A GNSS software for processing the SBAS correction data is developed, and Japan MSAS correction data is analyzed. MSAS orbit correction data is analyzed and compared with WAAS data. MSAS ionosphere correction data is analyzed and the effect of the equatorial anomaly on the correction accuracy is discussed. Degradation due to receive delay of correction information and effect of the degradation on protection level analyzed using partial remove of MSAS correction information. Integrity and availability for precision approach using the MSAS system analyzed.

초 록

자체 개발한 SBAS 보정정보 처리 프로그램을 이용하여 MSAS 궤도 보정정보의 정확도를 분석하고, MSAS 전리층 보정정보 대한 적도변이의 영향을 분석하였다. 또한 MSAS 보정정보의 일부분의 제거를 통해 보정정보의 수신지연으로 인한 정확도 저하와 그것이 Protection Level에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 국내에서 MSAS 보정정보를 이용하여 항공기 정밀접근 시 시스템의 무결성 및 가용성에 대해 분석했다.

Key Words : Equatorial Anomaly(적도변이), Degradation(정확도 저하), Protection Level(보호수준), Integrity(무결성), Availability(가용성), SBAS(위성기반 보강시스템), MSAS

1. 서 론

SBAS(Satellite Based Augmentation System)는 GNSS(Global Navigation Satellite System) 보강 시스템으로 유럽의 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), 미국의 WAAS (Wide Area Augmentation System), 일본의 MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation

System), 인도의 GAGAN(GPS Aided Geo Augmented Navigation)등이 있으며, WAAS, MSAS는 현재 정상운용 중에 있고 EGNOS와 GAGAN은 시험운용 중에 있다. SBAS에서는 의사거리 보정정보와 위성궤도 보정정보, 전리층 보정정보를 위성을 통해 제공하며, 이들 정보는 항공기 운항 및 이착륙 등 다양한 분야에 이용될 수 있다. 국내에서는 24시간 MSAS 위성을 관측할 수 있고, 간헐적으로 GAGAN 위성을 관측할 수 있다.

본 연구에서는 SBAS 데이터를 처리하여 SBAS 보정정보를 이용한 위치해 향상 결과 및 항공기 접근절차 시 필요한 PL(Protection Level)을 계산할 수 있는 GPP(GNSS Positioning Program) 프

† 2008년 11월 17일 접수 ~ 2009년 3월 30일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

교신저자, E-mail : jrkim@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

로그를 개발하였다. GPP 프로그램의 결과 정확도는 EUROCONTROL에서 개발한 PEGASUS 프로그램을 통해 검증 하였다[1]. PEGASUS는 GNSS 데이터와 SBAS 보정정보를 처리할 수 있고, GBAS(Ground Based Augmentation System) 보정정보를 생성 및 처리할 수 있으며, GBAS와 SBAS를 이용한 항공기 정밀접근을 지정한 공항의 비행경로에 따라 시뮬레이션을 해 볼 수 있는 기능도 포함하고 있다. 또한 각각의 시스템의 처리 결과로부터 각 시스템의 성능을 분석할 수 있는 다양한 분석 프로그램들도 포함하고 있다.

본 논문에서는 우선, SBAS에서 제공하는 여러 메시지 형식 및 내용을 정리하고 이들 정보를 이용하여 의사거리 보정정보와 위성궤도 보정정보 및 전리층 보정정보를 계산하는 방법을 간단하게 정리하였다. 다음 MSAS에서 제공하는 위성궤도 보정정보를 IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 정밀위성궤도 데이터와 비교를 통해 그 정확도를 분석하였다. 그리고 GPP 프로그램을 이용한 MSAS 전리층 보정정보 분석을 통해 적도변이가 전리층 보정정보 및 PL에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 보정정보 수신 지연으로 인한 보정정보의 정확도 저하가 PL에 미치는 영향에 대해서도 분석하였다. 마지막으로 MSAS 보정정보를 국내에서 적용하였을 경우 사용자 위치해향상 정도와 항공기 정밀 접근 시 시스템의 무결성 및 가용성에 대한 성능을 분석해 보았다.

II. MSAS 보정정보 형식

2.1 MSAS 데이터 형식 및 내용

SBAS 보정정보는 250bps로 비교적 느린 속도로 전송되며, 64개의 메시지 형식(MT : Message Type)에 따라 데이터 전송이 이루어진다. MT0는 SBAS 시스템에 이상이 발생하였을 경우나 SBAS 시스템이 시험운영 중 일 경우 SBAS 위성의 위성번호를 전송한다. 그러나 SBAS 시스템이 정상운영 중이고, 이상이 없을 경우는 MT0정보는 전송되지 않는다. 사용자는 MT0에 포함된 SBAS위성의 위성번호를 확인함으로써 해당 위성에서 제공하는 SBAS 보정정보에 대한 사용여부를 판단하게 된다. MT1은 보정정보를 제공하는 GNSS 및 SBAS 위성의 위성번호와 IODP(Issue of data PRN)정보를 전송한다. MT2~5는 각각의 GNSS 위성에 대한 의사거리 보정정보와 IODP, IODF(Issue of data Fast Correction) 정보를 전송한다. 그리고 MT6는 MT2~5가 일정한 시간

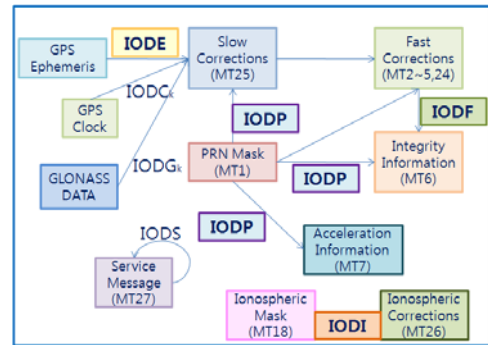


그림 1. SBAS MT 연결구조

간격으로 수신되지 못했을 경우에 대한 무결성(Integrity) 정보와 IODF 정보를 전송한다. MT7은 의사거리 보정정보에 대한 유효시간 및 정확도 저하 인자 관련 정보를 전송하는데, 주요 지상 관측소에서 보정정보를 생성한 시점부터 보정정보를 사용자가 수신하기 시작한 시점까지 소요된 시간인 시스템 지연시간(Latency Time)과 IODP정보도 함께 전송한다[1,2].

MT10은 의사거리, 위성궤도 및 전리층 보정정보의 정확도 저하와 관련된 정보를 전송하고, MT24와 25는 위성위치 및 위성시계오차와 관련된 보정정보를 IODP, IOD(Issue of Data)와 함께 전송한다. 그리고 MT18과 26은 전리층 보정정보를 전송한다. MT27과 28은 위성관측 지역에 따른 의사거리 보정정보와 위성궤도 보정정보의 추정오차인 UDRE(User Differential Range Error)에 대한 증분값과 관련된 정보를 제공한다. MT27의 경우 계산된 UDRE 증분값을 제공하는 반면에 MT28은 위성궤도와 시계보정정보 간의 공분산(Covariance)값을 IODP와 함께 전송하여, 사용자가 직접 UDRE 증분값을 계산하도록 한다[1,2].

앞에서 언급한 여러 SBAS MT들은 서로 긴밀하게 연관되어 있고, 각각의 정보를 서로 조합하였을 때 의사거리, 위성궤도 및 전리층 보정정보를 생성할 수 있다. 그림 1은 SBAS MT들 간의 연결 구조를 나타낸 것이다. MT1의 경우 MT2~5, MT7, MT24, MT25와 연결되어 있고 IODP를 통해 서로의 데이터를 비교/조합한다. MT2~5, MT24는 MT6과 연관되어 있고 IODF를 이용하여 서로의 데이터를 비교/조합한다. 그리고 MT1과 MT25는 위성궤도 데이터와 연관되어 있으며, 각각 IODP와 IODE를 통해 각각의 데이터를 조합한다.

앞에서 언급한 MT들 중 MT1과 IODP로 연결

된 MT2~5, MT7, MT24/25의 경우 각각의 MT 정보를 이용하기 위해서는 MT1의 IODP와 해당 MT에 포함된 IODP가 일치해야 하는데, 이는 MT2~5, MT7, MT24/25에 포함된 GNSS의 위성번호 관련정보는 실제 GNSS의 위성번호 정보와 다르기 때문에 MT1을 통해 위성번호를 파악하게 된다. 가끔 SBAS에서 보정정보를 제공하는 GNSS 위성번호가 바뀌는 경우가 발생하는데, 이 경우 보정정보가 적용 되어야 할 위성번호가 바뀌게 됨으로 항상 이들 정보를 이용하기 위해서는 MT1의 IODP와 일치 여부를 확인하고, 보정정보를 적용할 GNSS 위성번호를 파악해야 한다.

의사거리보정정보가 포함된 MT2~5 보정정보의 최대 갱신주기는 6초이며, 유효시간은 MT7에 포함된 의사거리 보정정보의 정확도 저하 정보에 따라 최대 180초에서 최소 18초까지 가능하다. 항공기 정밀접근 절차 시(Precision Approach)에는 최대 120초에서 최소 12초까지 가능하다. 반면에 위성궤도 보정정보가 포함된 MT24/25의 보정정보의 최대갱신주기는 2분이고, 유효시간은 5분이며 항공용 응용 시에는 4분이다. 따라서 의사거리 보정정보는 빠르게 변화하는 오차 성분을 보정해 주기 때문에 FC(Fast Correction)로 불리고, 위성궤도 보정정보는 천천히 변화하는 위성궤도오차를 보정해 줌으로 SC(Slow Correction)로 불린다.

2.2 의사거리 보정정보

SBAS 시스템은 SA(Selective Availability)가 존재하던 1990년대에 연구 개발되었다. 따라서 SA로 인한 위성시계오차에 대한 보정정보가 필요하였고, 이에 관한 보정정보가 FC이다. 현재 SA가 해제되었지만, SBAS에서는 약 $\pm 1\sim 2\text{m}$ 이내의 FC를 계속 제공해 주고 있으며, 실제 위성시계에 이상이 발생하였을 경우에 유용하게 사용될 수 있다.

FC는 MT1, MT2~5, MT6, MT7, MT24 정보를 이용하여 계산할 수 있으며, 특히 MT2~5에는 의사거리 보정정보인 PRC(Pseudorange Correction)와 PRC 정보의 추정오차인 UDRE정보가 들어있다. 평활화(smoothing) 처리된 의사거리에 적용할 의사거리 보정정보 RC(Range Correction)는 PRC이외에 PRC의 변화율 정보인 RRC(Range-Rate Correction)의 계산이 필요하다. SBAS는 GBAS와 달리 RRC 정보를 따로 생성하여 전송하지 않고 사용자가 전송 받은 PRC 정보와 MT7의 의사거리 보정정보의 정확도 저하 정보를 이용하여 RRC 정보를 계산하게 된다. RRC는 최근 수신된

PRC 정보의 수신시점과 사용자가 보정을 적용할 시점이 다르기 때문에 두 시점간의 시간간격 동안 발생한 PRC의 변화량을 계산한 것이다. 최근 수신된 PRC 정보와 그 이전에 수신된 PRC 정보를 이용하여 PRC의 변화율을 계산하고, 최근 수신된 PRC에 적용하여 보정하고자 하는 시점에서의 RC를 계산할 수 있게 된다[1,2].

SBAS 보정정보 중 또 다른 중요 정보인 UDRE는 MT2~5와 MT6에 UDREI(User Differential Range Error Indecator) 형태로 포함되어 있으며 PL 계산에 이용된다. 이들은 0부터 15까지 16단계로 나뉘어져 각각 UDRE 0.75m에서 150m까지 대응된다. 이때 UDREI가 14인 경우 "Not Monitored", UDREI가 15인 경우 "Do Not Use"로 대응하는 UDRE값이 존재하지 않고 실제 보정도 이루어지지 않는다. 또한 UDREI는 UDRE의 분산값인 σ_{UDRE}^2 와 대응되는데 0.052m²부터 2078.695m²까지 UDREI 0부터 13까지 대응된다. 만약 비 정밀접근시(Non-Precision Approach) UDREI가 14이상 이거나, 정밀접근시 UDREI가 12이상일 경우에는 SBAS에서 제공하는 FC와 SC는 모두 이용할 수 없으며, 해당 위성은 수신기 위치해 계산 시 이용하지 못한다.

2.3 위성궤도 및 시계 보정정보

SBAS에서 제공하는 위성궤도 보정정보는 MT1, MT24/25 데이터를 이용하여 계산할 수 있는데, MT24/25에는 GNSS 위성의 ECEF 좌표계에서의 위성위치오차와 위성시계오차에 대한 보정정보가 포함되어 있다. MT25의 경우 전송데이터 형식은 VC(Velocity Code)에 따라 VC0와 VC1 두 가지로 나뉜다. MT25는 한 번의 데이터 전송 시 최대 4개의 위성에 대한 궤도보정정보를 전송하는데, VC0는 유럽의 EGNOS에서 이용하는 데이터 형식으로 한번 전송 시 4개의 위성에 대한 위치 및 시계오차 정보를 전송한다. VC1은 WAAS와 MSAS에서 이용하는데 한번 전송 시 최대 2개 위성에 대해 위치 및 시계오차 정보 이외에 변화율 정보를 제공하여 좀 더 정확한 궤도오차를 계산할 수 있다[1,2].

한편 SBAS 위성궤도 보정정보를 이용할 때에는 사용자의 위치해 계산시 이용된 GNSS의 IODE(Issue of Data Ephemeris)와 MT25에 포함된 IOD의 일치 여부를 확인하는 작업이 필요하다. GNSS의 IODE와 MT25의 IOD가 일치한다면, MT25의 위성궤도 보정정보는 최근 위성궤도 데이터를 이용하여 계산한 위성의 위치좌표에 적

용을 하게 된다. 그러나 MT25의 IOD가 이전에 수신된 GNSS 데이터의 IODE와 일치한다면, MT25 궤도보정정보는 이전 위성궤도 데이터를 이용하여 계산된 위성의 위치좌표에 적용해야 한다. 만약 앞의 두 경우 이외에 MT25의 IOD가 GNSS IODE와 일치 또는 불일치하는 경우에는 위성궤도 보정정보를 적용할 수 없으며, 해당 위성은 위치해 계산시 이용되지 못한다.

2.4 전리층 보정정보

GNSS 신호가 전리층을 통과할 때 신호지연이 일어나게 되는데, 현재 이를 모델링하는 일반적인 방법은 전리층을 일정 고도에 위치한 단일막으로 가정하는 것이다. IPP (Ionosphere Pierce Point)는 GNSS 신호가 단일막을 통과하는 지점으로 GNSS 위성과 수신기 사이의 기하학적인 관계로부터 계산할 수 있다[1]. 전리층지도는 IPP에서의 전리층 지연값을 위도/경도에 따라 나타낸 것으로, GNSS 신호가 전리층 단일막을 수직으로 입사하였을 때의 값을 나타낸다. 실제 GNSS 신호는 단일막을 비스듬히 지나므로 경사함수(obliquity function)를 적용하여 실제 의사거리에 적용할 수 있는 보정값으로 변환하게 된다. GPS 항법메시지에서는 IPP에서의 전리층 지연값 분포를 간단한 모델을 사용해서 표현하지만, SBAS에서는 실시간 지연값을 MT18과 MT26을 통해 제공하고 있다.

현재 SBAS 규격에서는 전 세계 지역을 5도 간격(고위도는 10도)의 격자(IGP)로 나누어, 각 IGP에 대한 전리층 정보를 제공하는 것으로 되어 있다. SBAS IGP는 경도에 따라 9개 band (0 ~ 8)로 구분되는데, 한 개의 SBAS 위성은 최대 3개 band의 전리층 정보를 송신하게 된다. 한국은 7번 band에 위치하는데, 저 경사각 위성신호까지 보정할 경우 인접한 8번 band 정보까지 필요하게 된다. 각 band는 200개 또는 201개의 IGP를 포함하고 있다[1].

MT18에는 데이터를 전송하는 총 band의 수와 정보를 전송하려는 band 번호 정보가 포함되어 있고, IGP mask 정보는 각 band 별로 전리층 보정정보를 송신하는 IGP를 1과 0으로 표시한다. MT26에서는 각 IGP별 전리층 지연값 및 GIVE (Grid Ionospheric Vertical Error)를 전송하는데, MT18에서 정의된 전리층정보가 제공되는 IGP의 값만 전송한다. 1개의 MT에 모두 전송할 수는 없으므로, 각 band 별로 15개씩 분할하여 전송한다[1,2].

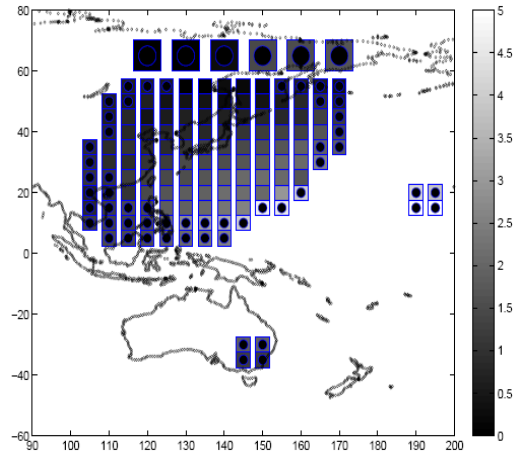


그림 2. MSAS IGP 분포 및 전리층 지연값 (2007.09.30 UTC5, 단위 = m)

전리층 지연값은 0에서 63.875m까지 0.125m 단위로 표현된다. GIVE는 전리층 보정정보의 오차 추정값을 나타내는 것으로 항공기 접근절차에 필요한 PL을 계산하는데 사용된다. GIVE는 0에서 14까지 15개 단계로 나누어 송신하는데, 이는 전리층오차 추정 분산값의 0m부터 187.0826m²에 대응된다. 한편, 특정 grid에서 일시적으로 보정정보를 제공하지 않을 경우 'Not monitored'로 표시하게 되는데, 이는 GIVE값을 최대값인 15로 설정함으로써 통보하게 된다.

그림 2는 MSAS IGP 지도인데, 2007년 9월 30일 UTC 5시의 전리층 지연값 분포를 나타내고 있다. 일본 내에만 MSAS 기준국이 있으므로 WAAS와 비교할 때 정보제공 영역이 크지 않다. 굵은 점으로 표시된 점들은 보정정보 신뢰성이 낮은 "Not monitored" 지역이다. 한국에서 관측되는 위성고도 10도 이상의 GNSS 위성의 IPP 궤적을 추적해 보면 MSAS에서 전리층 보정정보를 제공하는 영역 안에 대부분의 궤적이 표시가 됨을 확인할 수 있다. 이는 한국에서도 MSAS의 전리층 보정정보를 이용하여 전리층 지연값을 계산할 수 있음을 의미한다.

2.5 보정정보의 추정오차 모델링

SBAS를 이용한 사용자 위치해 계산은 RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics)에서 제공하는 WAAS MOPS (Minimum Operational Performance Standards) 규격에 따라 최소자승법을 사용한다. 이때 위성별 가중치는 SBAS에서 제공된 보정정보들의 추정오차 분산값의 역수로 적용되기 때문에 SBAS에서는 반

드시 각 보정정보의 추정오차의 분산값 계산이 필요하며, 또한 이들 분산값은 PL 계산에도 이용된다.

추정오차의 분산값은 의사거리 및 위성궤도 보정정보에 대한 추정오차의 분산값인 σ_{fu}^2 , 전리층 보정정보의 추정오차 분산값인 σ_{UIRE}^2 , 수신기의 노이즈특성과 다중경로에 대한 분산값인 σ_{air}^2 , 대류층 지연값 추정오차의 분산값인 σ_{tro}^2 로부터 계산된다. 또한 σ_{fu}^2 와 σ_{UIRE}^2 의 경우 UDRE와 GIVE의 분산값인 σ_{UDRE}^2 와 σ_{GIVE}^2 이외에 각각의 보정정보의 시간초과(time-out)로 인한 정확도 저하 인자도 포함하고 있다. SBAS에서 각각의 보정정보는 규정된 최대갱신주기 이내에 수신되어야 하는데, 수신기의 보정정보 수신문제 또는 SBAS 시스템 문제로 인해 보정정보가 최대갱신주기를 넘는 경우가 발생한다. 이때 초과된 시간에 따라 각 보정정보의 정확도 저하를 계산하여 σ_{UDRE}^2 와 σ_{GIVE}^2 에 더해 줌으로써 보정정보의 추정오차의 분산값을 증가시키게 된다.

특히, σ_{fu}^2 에 포함된 정확도 저하값은 의사거리 보정정보에 관련된 ϵ_{fe} , RRC에 관련된 ϵ_{rrc} , 위성궤도에 관련된 ϵ_{fu} , En-Route와 비 정밀접근의 보정정보 유효시간과 관련된 ϵ_{er} 이 있다. 그리고 σ_{UIRE}^2 에는 전리층 보정정보의 정확도 저하값인 ϵ_{iono} 가 포함되어 있다.

MOPS에 규격화된 각 보정정보의 정확도 저하 계산과정은 다소 복잡하지만, 이들 정확도 저하값은 PL 변화에 영향을 미치지 때문에 SBAS 보정정보의 추정오차의 분산값에 반드시 포함하여 계산해야 하는 값이다[1,2,3].

III. MSAS 보정정보 분석결과

3.1 MSAS 궤도 및 시계 보정정보

MSAS의 위성궤도 및 시계보정 정보를 IGS의 정밀궤도 및 시계 추정값과 비교를 통해 보정정보의 정확도 및 보정효과를 확인하고 이를 미국의 WAAS의 궤도 및 시계보정정보와 비교해 보았다. IGS 궤도정보와 위성시계오차 정보의 정확도는 각각 5cm와 3cm 이내로 이를 참값으로 가정하여, MSAS 보정정보의 정확도를 분석하였다 [4,5].

그림 3과 그림 4는 2007년 9월 30일 각각 IGS 상시관측소인 미국 서부의 Goldstone(GOL2)과

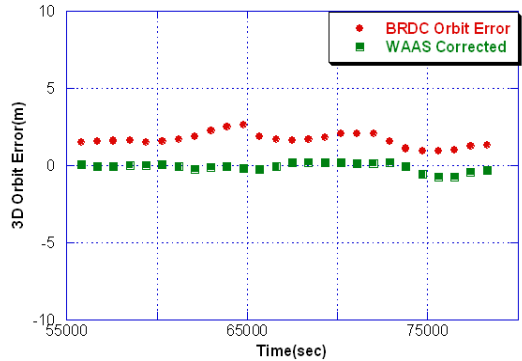


그림 3. WAAS의 위성궤도보정 전/후 궤도오차 (2007.09.30 PRN27)

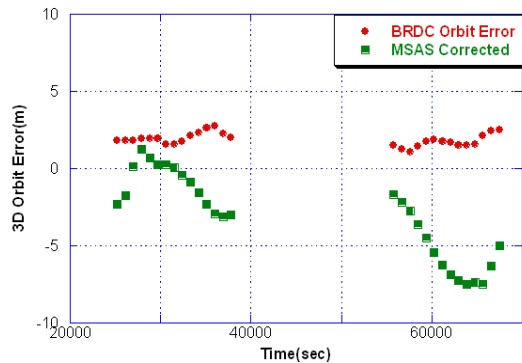


그림 4. MSAS의 위성궤도보정 전/후 궤도오차 (2007.09.30 PRN27)

한국의 수원(SUWN)에서 관측된 GPS PRN27 위성에 대해 각각 WAAS와 MSAS 궤도보정정보의 적용 전/후의 3D 궤도오차를 나타낸 것이다. 그림 3을 보면 GOL2에서 수신된 PRN27 위성의 GPS 방송궤도력의 위성위치정보는 IGS와 비교하여 약 2~3m 이내의 오차를 가졌으나, WAAS에서 제공하는 PRN27 위성의 궤도보정정보를 적용한 후에는 IGS와 약 0.5m 이하의 오차를 갖는 것을 볼 수 있다. 즉 WAAS의 궤도보정정보를 통해 위성의 궤도 정확도가 향상되었음을 확인할 수 있다.

그러나 그림 4의 MSAS 궤도보정정보의 적용 전/후의 결과를 보면, 오히려 궤도보정정보 적용 후 IGS와의 오차가 더 커진 것을 볼 수 있다. IGS와 GPS의 방송궤도력의 오차는 약 2~3m 이내이다. 그러나 실제 MSAS에서 제공하는 위성의 궤도보정정보는 보통 3~7m 가량으로 상당히 큰 값을 제공한다. 특히 위성이 관측되기 시작하는 시점에서 MSAS 궤도보정정보는 보통 7m 전후의 매우 큰 값을 제공하여 보정정보의 효과가 전

혀 나타나지 않고, 위성의 고도가 60도 이상으로 높아졌을 때에는 다소 정확한 보정정보가 제공되고 보정효과가 나타난다. 그러나 보정효과가 나타나는 시간은 위성관측이 이루어진 전체시간에 비해 매우 적기 때문에 전체적으로는 보정효과 매우 떨어진다. 이는 모든 위성에 대해 동일하게 나타나는 현상인데, 이러한 현상은 WAAS와 MSAS 시스템의 보정정보 생성을 위한 GPS 데이터를 수집하는 기준국(Reference Station)의 수와 분포범위에서 그 원인을 찾을 수 있다[6].

위성궤도 추정은 위성시계추정과 동시에 수행되는데, 의사거리 보정 시 궤도와 시계 추정값이 모두 적용된다. 궤도오차와 시계오차의 상관관계가 높을 경우, 두 개의 보정값을 동시에 적용하여야만 의사거리오차 보정효과를 볼 수 있다.

그림 5와 그림 6은 2007년 9월 30일 미국의 GOL2와 한국의 SUWN에서 각각 WAAS와 MSAS의 PRN27 위성에 대해 위성궤도 또는 위성시계오차 보정정보를 따로 적용한 경우와 같이 적용한 경우에 대한 의사거리 오차 (URE: User Range Error)를 나타낸 것이다.

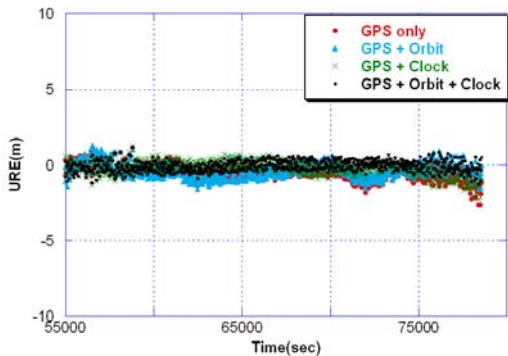


그림 5. WAAS의 궤도 및 시계보정정보 적용에 따른 URE 변화(2007.09.30 PRN27)

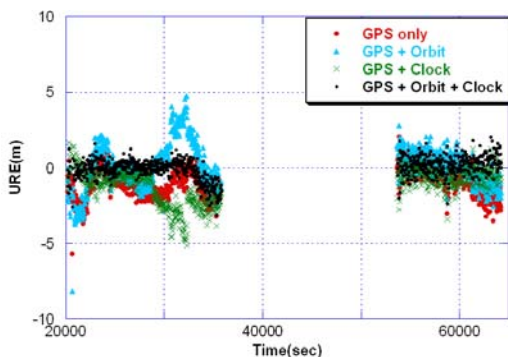


그림 6. MSAS의 궤도 및 시계보정정보 적용에 따른 URE 변화(2007.09.30 PRN27)

그림 5의 WAAS의 결과 보면, 보정정보를 보정하기 전 URE의 평균은 약 0.63m이고, 위성궤도와 위성시계오차 보정정보를 각각 따로 적용한 경우 약 0.57m와 0.42m, 위성궤도와 시계오차 보정정보를 같이 적용한 경우에는 0.33m로 URE가 감소되는 것을 볼 수 있다.

그림 6의 MSAS의 결과를 보면, 보정정보 적용 전에는 URE의 평균이 약 1.14m이고, 위성궤도와 위성시계오차 보정정보를 각각 따로 적용할 시에는 각각 1.11m와 1.18m, 두 보정정보를 같이 적용할 경우에는 약 0.5m의 URE 평균값을 가졌다. MSAS의 경우 대부분의 위성에서 두 보정정보를 따로 적용할 경우에는 그림 6과 같이 보정전과 결과가 비슷하거나 오히려 나빠지는 경우가 매우 많았다. 이는 WAAS의 경우 위성궤도와 시계오차 보정정보가 상당히 정확하기 때문에 이들 값을 따로 적용하여도 URE가 향상이 되지만, MSAS의 경우는 위성궤도 및 시계오차 보정정보가 매우 부정확하기 때문에 둘을 따로 적용할 경우 오히려 URE가 나빠지는 것을 볼 수 있다.

한편, 위성궤도 및 시계오차 보정정보를 같이 적용한 경우에 대해서는 두 시스템 모두 URE가 향상되는 모습을 볼 수 있는데, 이는 두 보정정보 사이의 상관관계가 상당히 높기 때문이다. 특히, MSAS의 경우 궤도보정 정보만을 적용하였을 경우 보정정보의 부정확성으로 인해 오히려 URE가 증가하지만, 위성시계오차 보정정보를 적용함으로써 증가한 URE에 대한 보상과 함께 URE가 향상되는 결과를 얻을 수 있게 된다. 이러한 비교 분석은 다양한 GPS 위성 및 날짜 데이터를 이용해서 수행하였는데, 비슷한 경향을 나타내었다.

3.2 MSAS 전리층보정정보와 적도변이

한반도 남쪽의 전리층 상공에는 지자기 적도를 따라 적도변이(Equatorial Anomaly)가 동에서 서로 매일 UTC 0시 ~ 11시경에 통과하며 전리층에 영향을 미친다. 적도변이는 중력에 의해 플라즈마 자기력선을 따라 내려오면서 지자기 적도 ± 15 도 내에서 플라즈마 밀도가 최대가 되는 점을 생성하는 현상을 말한다[7].

그림 7은 2007년 8월 11일 한반도 남쪽의 전리층 상공을 지나는 적도변이와 지자기 적도를 나타낸 것인데, 그림과 같이 한반도 및 지자기 적도는 지리적 위도보다 약 5~10도 가량 한반도와 더 근접해 있기 때문에 한국의 전리층은 적도변이의 영향을 동일 지리적 위도에 위치한 다른 지역보다(예, 미국) 더 많이 받을 수 있다.

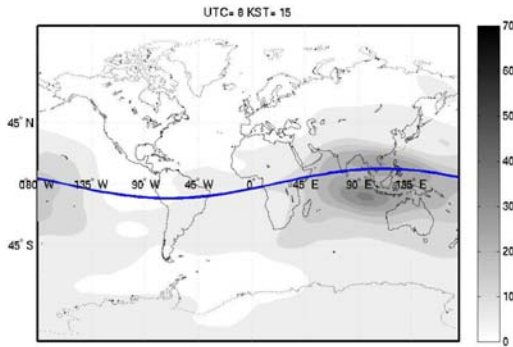


그림 7. 지자기 적도와 적도변이(2007.08.11)

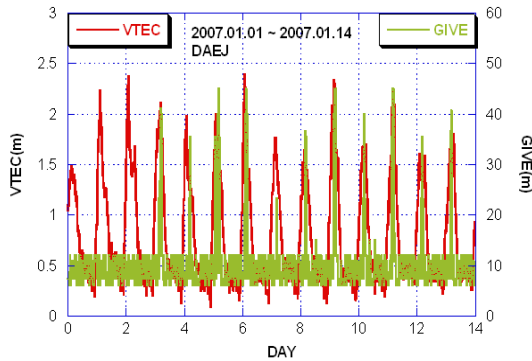


그림 8. MSAS 전리층 수직지연값과 GIVE 변화 (2007.01.01 ~ 2007.01.14)

그림 8은 2007년 1월 1일부터 2007년 1월 14일 동안 MSAS에서 제공하는 전리층 수직지연값과 GIVE 값을 같이 나타낸 것이다. GIVE값을 보면 평균적으로 약 10m 전후의 값을 갖는데, 14일 중 11일에서 GIVE값이 20m 이상으로 급증하는 날이 관측되었다. GIVE값이 급증하는 현상은 순간적으로 일어나는 것이 아니라 보통 1~3시간 동안 지속적으로 발생을 하였다. 이러한 현상은 2007년 동안 약 65회, 2008년 9월까지 약 26회 발생하였으며, 봄과 겨울에 자주 발생하였다. 그리고 발생시점은 항상 UTC 3시~11시 사이로 적도변이가 한반도 남쪽 상공을 지나는 시점과 일치하였으며, 한국의 경우 동쪽지역 보다 서쪽지역에서 더 자주 발생하였다. 한편, GIVE값이 급증한 날에 대해 Kp와 Dst 분석을 통해 전리층 폭풍에 대한 영향도 분석 하였으나, 2007년은 태양활동 극소기로 전리층 폭풍이 거의 발생하지 않았음을 확인하였다. 결과적으로 MSAS에서 제공하는 전리층 보정정보는 직접적으로 한반도 남쪽 상공을 지나는 적도변이의 영향을 받고 있으며, 이로 인해 GIVE 값이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

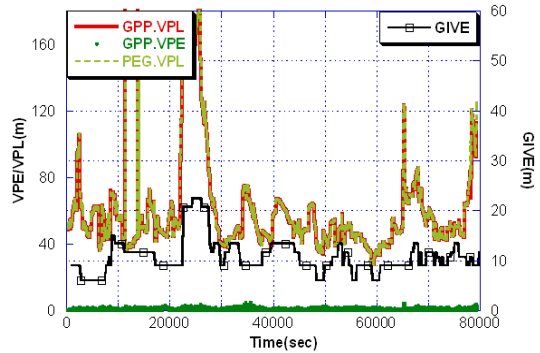


그림 9. MSAS GIVE와 VPL 변화 (HAUM, 2008.04.04)

그림 9는 2008년 4월 4일 항공대학교(HAUM)에서 수신된 1Hz GPS 데이터에 일본의 MSAS 보정정보를 적용하여 계산된 VPL(Vertical Protection Level)을 GIVE와 함께 나타낸 것이다. GPP 프로그램이 계산한 수직위치오차인 VPE도 표시하였고 PEGASUS에서 계산한 VPL도 같이 나타내었다. GPP와 PEGASUS가 계산한 VPL 결과가 서로 일치하는 것으로부터 GPP 프로그램의 정확도를 확인할 수 있다.

한편, 20000 ~ 30000초 사이에 GIVE값이 급격히 증가하고 있으며, 이때 VPL도 GIVE값의 변화에 따라 급격히 증가하는 모습을 볼 수 있다. GIVE값의 급격한 증가는 보통 1~3 시간동안 지속되기 때문에 맑게는 하루의 약 1/8에 해당하는 시간동안 VPL이 100m를 넘게 된다. 국제민간항공기구인 ICAO(International Civil Aviation Organization)에서는 항공기 정밀접근 등급 따라 VPL의 경보한계치 요구조건이 달라지는데, APV-1에서 요구하는 VPL의 경보한계치가 40m이다. 즉 적도변이로 인해 GIVE값이 급격히 증가하게 되면 VPL은 대부분 경보한계치를 넘게 되고 이는 MSAS의 가용성에 있어 심각한 문제로 작용하게 된다.

그림 10은 일본 중심부 위도 약 36.13도, 경도 약 138.36도에 위치한 IGS 상시관측소인 USUD에서 2008년 4월 4일에 관측된 1Hz GPS 데이터에 MSAS 보정정보를 적용하여 얻은 GIVE과 VPL의 변화를 나타낸 것이다. 일본 국내에서 GIVE값은 보통 약 6m로, 10m 전후로 변하는 한국에 비해 전리층 보정정보의 추정오차가 더 작은 것을 볼 수 있다. 그리고 GIVE값도 한국에서와 달리 상당히 일정하고 안정된 것을 볼 수 있다. WAAS의 경우도 미국 내에서 GIVE값 변화를 살펴보면 약 4m로 상당히 일정하고 안정적으로 변하는 것을 볼 수 있다[7]. USUD의 경우

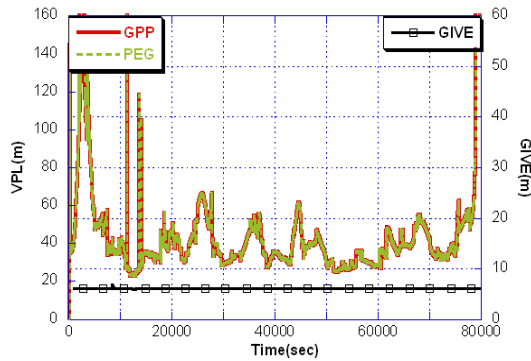


그림 10. MSAS GIVE와 VPL 변화 (USUD, 2007.04.04)

VPL이 급격히 증가하는 부분을 제외하고 전반적으로 약 20~60m사이에서 변화하는데, 한국의 경우 약 40~80m 사이에서 VPL값이 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 MSAS 보정정보가 일본 국내에서 관측된 GPS 데이터로부터 생성됐기 때문에 일본 국내에서 멀리 떨어진 한국에서는 MSAS 전리층 보정정보를 이용할 순 있지만 보정정보의 추정오차가 크고, 이는 PL의 증가로 이어지게 된다.

3.3 MSAS 보정정보의 Degradation

앞에서 언급한 바와 같이 SBAS 각각의 보정정보는 일정한 최대갱신주기 이내에 수신되어야 하는데, 만약 최대갱신주기 이내에 보정정보가 수신되지 못하였을 경우 보정정보의 time-out으로 인한 정확도 저하 인자를 계산하여 보정정보의 추정오차의 분산값에 더해 주게 된다. 이 절에서는 보정정보의 정확도 저하가 PL에 미치는 영향을 알아보기 위해 일정 시간동안 특정 보정정보를 삭제 한 후 PL을 계산하고 이를 정상적인 보정정보를 이용하여 얻은 PL과 비교 분석하였다.

그림 11은 2008년 4월 4일 항공대에서 수신된 1Hz GPS 데이터와 MSAS 보정정보를 이용하여 정확도 저하가 HPL에 미치는 영향을 알아본 것이다. 이때 정확도 저하 유발을 위해 궤도보정정보가 들어있는 MT25의 3100~3700초 사이에 수신된 PRN2와 PRN7 위성의 궤도보정정보를 10분간 삭제하였다. 그리고 4000~4600초 사이에 수신된 데이터에서는 PRN2과 PRN17위성에 대한 궤도보정정보를 10분간 삭제 하였고, 7000~7300초 사이에 수신된 데이터에서는 PRN13 위성에 대한 궤도보정 정보를 삭제하였다. 보정정보가 삭제된 위성은 실제 해당시간에 수신기에서 관측

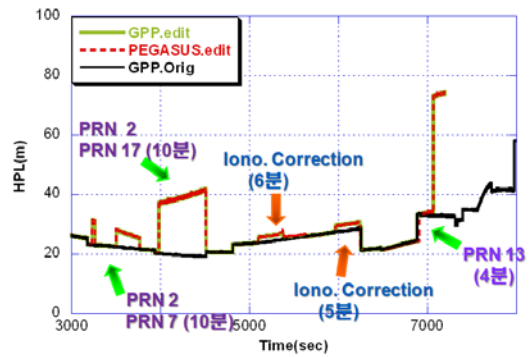


그림 11. 보정정보 손실 시 정확도 저하로 인한 HPL 변화(2008.04.04)

이 되고 있는 위성들이다. 그리고 전리층 보정정보가 들어있는 MT26에서는 5100~5500초, 6000~6300초 사이의 데이터를 삭제하였다. MOPS 규격에 따라 MT25는 2분의 최대갱신주기를 갖고 MT26은 5분의 최대갱신주기를 갖기 때문에 삭제된 보정정보들은 충분히 정확도 저하를 발생 시킬 수 있다.

그림 11의 GPP.Orig은 GPP 프로그램을 통해 수정되지 않은 MSAS 보정정보를 이용하여 계산된 본래 HPL의 변화를 나타낸 것이고, GPP.edit와 PEGASUS.edit은 수정된 동일한 MSAS 보정정보를 이용하여 계산된 HPL의 변화를 나타낸 것이다. 그림 11을 보면, 실제 보정정보 데이터가 삭제된 구간에서 HPL이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 HPL은 보정정보의 수신지연으로 인한 정확도 저하로 인해 급격한 증가와 함께 시간에 따라 일정하게 증가 또는 감소하는 모습을 볼 수 있다. 전리층 보정정보가 위성궤도 보정정보에 비해 정확도 저하로 인한 PL의 증가에 대한 민감도가 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 전리층 보정정보의 갱신주기가 5분으로 길게 설정됐기 때문이다. 갱신주기가 긴 이유는 보정정보 생성시 전리층을 전리층폭풍이 발생하지 않은 안정된 상태로 가정했기 때문인데, 그러나 만약 전리층폭풍이나 산란(scintillation) 이 발생할 경우에는 PL 증가에 따른 민감도가 급증할 수 있다. 한편 또 다른 실험에서 20분 이상 궤도보정정보를 제공하지 않는 경우에는 HPL이100m 이상 급격하게 증가하는 것을 확인하였다.

각각의 보정정보의 time-out로 인한 정확도 저하의 영향은 PL에 직접적으로 민감하게 반영됨으로, 정확한 PL을 계산하기 위해서는 각 보정정보의 정확도 저하를 항상 정확하게 계산해 주어야 한다.

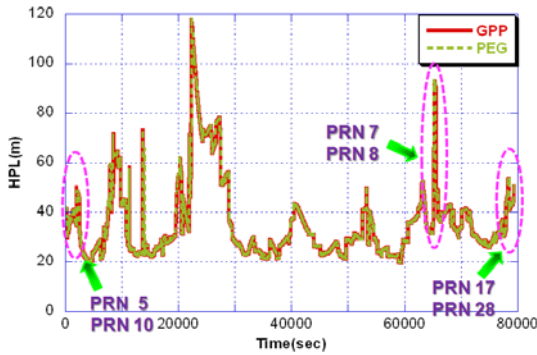


그림 12. SC의 Degadation로 인한 HPL 변화 (2008.04.04)

그림 12는 실제 2008년 4월 4일 항공대에서 관측된 1Hz GPS 데이터에 수정하지 않은 실제 MSAS 보정정보를 처리하여 얻은 HPL의 변화를 나타낸 그림이다. GIVE값이 급격히 증가했던 20000~30000초 이외에도 HPL이 급격히 증가하는 구간이 발생하였다. 먼저, 관측초기 약 0~3000초 부근에서 실제 PRN5과 PRN10위성의 위성궤도 보정정보의 time-out이 발생 하였고, 65000초 부근에서 PRN7과 PRN8 위성에 대해, 78000초 부근에서 PRN17과 PRN28 위성에 대해 SC의 time-out이 발생하였다. 이러한 구간들은 SC의 시간 초과로 인한 정확도 저하로 HPL이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

실제 국내에서 수신된 GPS 데이터에 MSAS 보정정보를 적용하여 처리해 보면, SC의 time-out이 빈번이 발생한다. 이는 한국과 일본의 지리적 위치차로 인해 한국에서 먼저 특정 위성이 관측되고 이후 일본에서 관측될 경우 MSAS는 해당위성의 보정정보를 한국에서 위성이 관측된 시점에 대해서는 생성하지 못한다. 따라서 한국의 서북쪽 또는 남서쪽 부근에서 관측되어지기 시작하는 위성에 대해서는 관측초기 MSAS 보정정보가 제공되지 않아 잦은 SC의 time-out이 발생하고, 이는 국내에 MSAS 보정정보를 적용하였을 경우 MSAS의 무결성 및 가용성 저하로 이어지게 된다.

3.4 위치해 향상과 무결성 및 가용성

국내에서 정지 측량된 GPS 데이터에 대해 MSAS 보정정보를 처리하여 적용할 경우 사용자의 위치해 정확도 향상에 대해 분석해 보았다.

그림 13과 그림 14는 2008년 4월 4일 항공대에서 수신된 1Hz GPS데이터에 MSAS 보정정보를 적용하여 수신기 위치해의 수평오차와 수직오

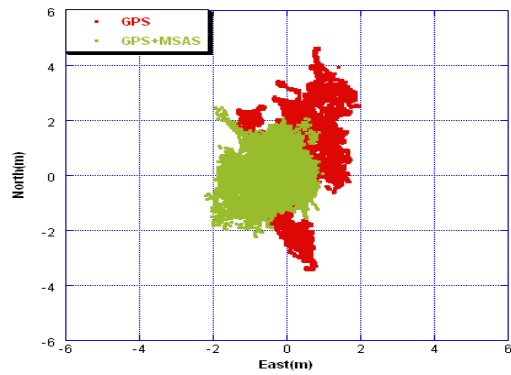


그림 13. MSAS 적용 전/후 수평 위치해 (HAUM, 2008.04.04)

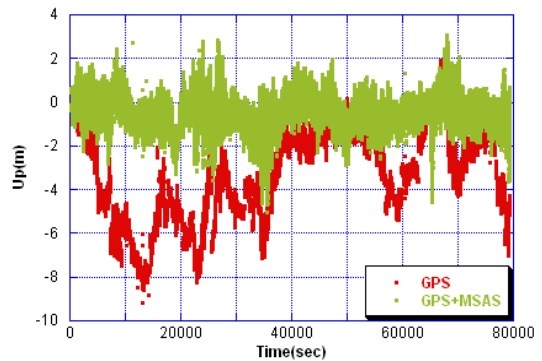


그림 14. MSAS 적용 전/후 수직 위치해 (HAUM, 2008.04.04)

차를 각각 1σ 대해 계산한 것이다. Novatel DL-V3 수신기를 사용하였으며, 단주파 신호만을 사용하여 위치해를 계산하였다. GPS 단독으로 위치해를 계산한 경우 수평오차는 약 1.56m, 수직오차는 3.31m였는데, MSAS 보정정보를 적용한 경우 수평오차는 약 0.57m, 수직오차는 0.72m로 감소하였다. MSAS 보정정보를 이용함으로써 국내에서도 사용자의 위치해를 향상시킬 수 있음을 보여주는 결과이다.

그림 15는 2008년 4월 4일 항공대학교에서 수신된 1Hz GPS 데이터를 처리하여 얻은 수직오차와 VPL을 이용하여 나타난 Stanford Plot으로 MSAS를 이용한 항공기 정밀접근 시 시스템의 무결성 및 가용성을 분석을 위해 나타내었다. APV-I 항공기 정밀접근 요구조건에 대해 수직방향으로 약 49.45%의 만족도를 보이는 것을 볼 수 있는데, 수평방향에 대해서는 이보다 높은 74.56%의 만족도를 보였다. 다른 날짜에 대해서도 가용성을 확인해 보았는데 국내의 경우 평균적으로 약 40~50%의 가용성을 보임을 확인하였

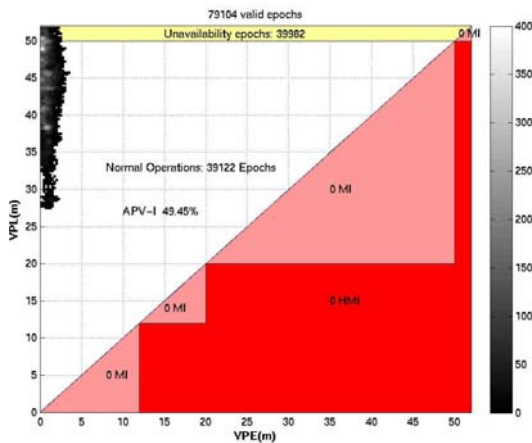


그림 15. MSAS 보정정보 사용시 수직오차와 VPL(HAUM, 2008.04.04)

다. 이 결과는 참고문헌에서 MSAS를 이용한 대전지역에서의 가용성 분석결과와 비슷하고, 일본에서 분석한 한국 내 가용성 결과와도 유사함을 확인하였다[8,9].

국내에서 MSAS 보정정보 사용 시 사용자의 가용성이 낮은 이유는 앞 절에서 언급한 바와 같이 일본지역보다 높은 GIVE값과 잦은 적도변이, 그리고 위성궤도 및 시계보정정보의 잦은 time-out 으로 인한 정확도 저하를 그 원인으로 분석할 수 있다.

또한 지리적으로 일본의 중심부에 위치한 USUD에서도 1Hz 데이터를 이용하여 APV-1에 대한 가용성을 분석해 보았는데, 수평방향에 대해 약 95.19%, 수직방향에 대해 약 84.34%로 나타났다. 국내에서의 APV-1 정밀 접근에 대한 가용성의 약 두 배에 가까운 수치이다. 그러나 이 수치 또한 ICAO에서 요구하는 99.999%의 가용성 요구 조건에는 미치지 못한다.

현재 일본에서는 MSAS의 가용성을 높이기 위해 MSAS의 보정정보 생성 알고리즘에 대한 개선에 노력하고 있는데, 낮은 가용성의 원인을 적은 기준국 수로 인한 관측값의 부족과 그로 인한 전리층 보정정보의 높은 GIVE값에서 찾고 있다. 그리고 이를 보완하기 위해 일본 내 GPS 관측망인 GEONET(GPS Earth Observation Network)을 이용한 과도샘플링(Oversampling) 기법을 전리층 보정정보 생성 알고리즘에 이용하였고, 시뮬레이션 결과 일본 중심부에서 APV-1에 대해 가용성이 약 90~95%까지 도달하는 것을 확인하였다. 또한 과도샘플링기법에 추가적으로 MSA(Maximum Separation Angle)라는 기법을 추가

하여 일본 중심부에서 APV-1에 대해 가용성이 약 95~99%까지 도달하는 것을 확인하였다[9,10].

그러나 이러한 보정정보 생성알고리즘 개선에도 불구하고 시뮬레이션 결과 일본의 중심부에서 벗어난 지역으로 갈수록 MSAS APV-1 가용성은 떨어져 일본 남서쪽 끝과 동북쪽 끝에서는 약 50%의 가용성을 보였다[9]. MSAS의 경우 미국의 WAAS 시스템을 도입하는 과정에서 일본 지리적 특성에 대한 고려가 부족했다고 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일본은 MSAS의 일본 내 기준국 증축과 보정정보 생성 알고리즘 개선에 노력하고 있다[9].

IV. 결 론

본 연구에서는 SBAS 보정정보를 처리할 수 있는 프로그램을 개발하여 MSAS의 보정정보와 항공기 정밀접근 시 무결성 및 가용성에 대해 분석하였다.

MSAS 궤도보정정보 정확도를 분석하였는데, MSAS는 일본 국내에 4개의 적은 기준국에서 수집된 데이터를 이용하여 보정정보를 생성하기 때문에 WAAS에 비해 위성궤도 보정정보의 정확도가 떨어지는 것을 확인하였다. 그리고 MSAS의 위성궤도 및 위성시계오차 보정정보는 상관관계가 크기 때문에 두 보정정보를 함께 이용하였을 경우에만 의사거리오차의 감소 효과가 나타나는 것을 확인하였다. MSAS의 전리층 보정정보 분석을 통해, 적도변이가 MSAS 전리층 보정정보에 영향을 미쳐 급격한 GIVE값과 PL의 증가라는 결과를 가져옴을 확인하였다. 한국의 경우 지자기 적도와 근접하게 위치하고 있기 때문에 적도변이의 영향을 자주 받게 되고 이로 인해 PL이 증가함으로, 항공기 정밀 접근시 MSAS 시스템의 전체 가용성이 크게 저하됨을 확인하였다. 따라서 국내 GNSS 보강시스템 개발 시에는 전리층 보정정보 생성에 있어 적도변이에 대한 고려가 필요할 것으로 분석된다.

MSAS 보정정보의 일부분을 삭제함으로써 인의적인 보정정보의 수신 지연 현상을 만들고 그로 인한 보정정보의 정확도 저하와 PL에 미치는 영향을 분석하였다. 한국의 경우 일본과의 지리적 위치차로 인해 잦은 SC의 시간초과로 인한 정확도 저하가 발생함을 확인하였다.

또한 국내에서 MSAS 보정정보를 적용하였을 때, 사용자의 위치 오차가 1m 이내로 감소하는 것을 확인하였고, 정밀접근 절차 시 무결성 및 가용성을 분석한 결과 일본 내에 비해 성능이 많이 떨어지는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 국내에서 MSAS 보정정보를 이용할 경우 위치해 향상 결과를 얻을 수는 있으나 항공기 이착륙 적용에 있어서는 무결성 및 가용성이 ICAO 기준을 만족하지 못함을 확인하였다. 또한 일본과 지리적 환경이 유사한 국내에서 향후 GNSS 보강시스템 개발 시 각종 보정정보 생성에 있어 주의해야 할 부분에 대해 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 국내 보정정보 생성 알고리즘 구현에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) EUROCONTROL, GNSS Tools Team, PEGASUS: Technical Notes on SBAS, Jun. 2003.
- 2) RTCA, Inc., Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA DO-229C, Nov. 2001.
- 3) Civil Aviation Bureau of MLIT Japan, "MSAS Status: MTSAT Satellite-based Augmentation System", 12th SBAS Iono Meeting, Boston, USA, Jun. 2006.
- 4) Hyunho Rho and Richard B. Langley, "The Usefulness of WADGPS Satellite Orbit and Clock Corrections for Dual-Frequency Precise Point Positioning", ION GNSS Meeting, Dallas, USA, Sep. 2007, pp. 939~949.
- 5) Yujie Zhang and Chris Bartone, "A GPS Orbit and Clock Correction Analysis for Long Baseline High Performance DGPS", ION 61st Annual Meeting, Cambridge, USA, Jun. 2005, pp. 1062~1072.
- 6) 정명숙, 김정래, "SBAS 의사거리 및 위성궤도 보정정보에 관한 분석", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2008년 4월, pp. 257~260.
- 7) 정명숙, 김정래, "MSAS 전리층 보정정보 및 적도변이에 의한 영향 분석", 한국항공우주학회지, 제 16권 2호, 2008년 6월, pp. 12~20.
- 8) 김도윤, 윤호, 기창돈, "SBAS의 시스템별 특성 및 국내 이용가능성 분석", 제2회 항법기술 워크샵, 무주, 2008년 9월, pp. 233~246.
- 9) Takeyasu Sakai, Keisuke Matsunaga, and Kazuaki Hoshinoo, "Modeling Ionospheric Spatial Threat Based on Dense Observation Datasets for MSAS", ION GNSS Meeting, Savannah, USA, Sep. 2008.
- 10) Hideki Manabe, "MTSAT Satellite-based Augmentation System(MSAS)", ION GNSS Meeting, Savannah, USA, Sep. 2008.
- 11) Rho, H., and R. Langley : "Assessment of WAAS Correction Data in Eastern Canada." Proceedings of the Ionospheric Effects Symposium, IES2002, Alexandria, Virginia, 2002, pp. 131~138.
- 12) T. Sakai, K. Matsunaga, and K. Hoshinoo, "Evaluation of MSAS Ionospheric Corrections", SBAS IWG/15, Kobe, Japan, Mar. 2006, pp. 14~16.
- 13) 김정래, 양태형, 이은성, 전향식, "위성항법 시스템 적용을 위한 전리층 지연값 기율기연구", 제어·자동화·시스템 공학 논문지, 제12권 9호, 2006년, pp. 898~904.
- 14) 김민승, "GPS/WAAS 수신 알고리즘 설계", 충남대학교 석사 학위 논문, 2002.
- 15) 김도윤, "GNSS 광역보정시스템의 보정 정보 생성 알고리즘에 관한 연구", 서울대학교 박사 학위 논문, 2007.