

SBAS 이동측위 정확도 분석

Accuracy Analysis of Kinematic SBAS Surveying

김혜인¹⁾ · 손은성²⁾ · 이호석³⁾ · 김현호⁴⁾ · 박관동⁵⁾

Kim, Hye In · Son, Eun Seong · Lee, Ho Seok · Kim, Hyun Ho · Park, Kwan Dong

Abstract

Space-Based Augmentation System (SBAS), which is one of the GPS augmentation systems, is a Wide-Area Differential GPS that provides differential GPS corrections and integrity data. In this study, we did performance analysis of kinematic SBAS surveying by conducting Real-Time Kinematic (RTK), DGPS, standalone, and SBAS surveys. Considering static survey results as truth, 2-D Root Mean Square (RMS) error and 3-D RMS error were computed to evaluate the positioning accuracy of each survey method. As a result, the 3-D positioning error of RTK was 13.1cm, DGPS 126.0cm, standalone (L1/L2) 135.7cm, standalone (C/A) 428.9cm, and SBAS 109.2cm. The results showed that the positioning accuracy of SBAS was comparable to that of DGPS.

Keywords : GPS, RTK, DGPS, SBAS, MSAS

초 록

SBAS(Space-Based Augmentation System)는 광역보정항법시스템(WADGPS, Wide Area DGPS)으로써 지역 보정항법시스템(LADGPS, Local Area DGPS)의 단점을 보완한 위성항법 보정시스템이다. 이 연구에서는 GPS 측위의 대표적인 방법인 실시간 이동측위(RTK; Real-Time Kinematic), DGPS(Differential GPS) 측위, 단독측위 (Standalone)와 SBAS 이동측위를 실시하고 그에 따른 측위 정확도 비교를 통해 SBAS 이동측위의 성능을 분석하였다. 정지측위 결과 산출한 좌표를 참값으로 간주하였고, 각각의 측위방법으로 획득한 관측데이터를 참값과 비교하여 계산한 2차원 평균제곱근(RMS: Root Mean Square)오차와 3차원 RMS 오차를 정확도 비교의 지표로 사용하였다. 그 결과, 각 측위방법에 따른 3차원 RMS 오차는 RTK 측위 13.1cm, DGPS 측위 126.0cm, 이중주파수 단독측위 135.7cm, 단일주파수 단독측위 428.9cm, 그리고 SBAS 측위 109.2cm로 나타났다. 이를 통해 SBAS 측위의 정확도가 DGPS 측위 정확도와 대등한 수준임을 확인할 수 있었다.

핵심어 : GPS, RTK, DGPS, SBAS, MSAS

1. 서 론

GPS(Global Positioning System) 측위방법은 의사거리 vs. 반송파 위상, 실시간 vs. 후처리, 단독측위 vs. 상대측위, 정지측위 vs. 이동측위 등의 기준에 따라 나눌 수 있다(Hofmann-Wellenhof 등, 2007). 사용자는 이들의 조합으로 다양한 측위를 할 수 있으며, 측위방법과 사용 장비의 성능에 따라 정밀도와 정확도가 달라진다. GPS의 측

위방법에 따른 정밀도 및 정확도에 관한 연구는 국내외에서 다수 수행되었으며, 일반적으로 단독측위는 22m, DGPS (Differential GPS) 측위 1-5m, 실시간 이동측위(RTK; Real Time Kinematic) 1-2cm, 후처리 상대측위의 경우 수 mm의 정확도로 측정이 가능하다(Parkinson 등, 1996; El-Rabbany, 2002).

SBAS는 지역보정항법시스템(LADGPS, Local Area DGPS)의 지역적, 비용적 측면의 단점을 보완한 위성기반의 광

- 1) 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 석사과정(E-mail:hikim@inha.ac.kr)
- 2) 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 학부과정(E-mail:h79s86@gmail.com)
- 3) 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 학부과정(E-mail:god1985@naver.com)
- 4) 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 학부과정(E-mail:lh7i@naver.com)
- 5) 연결저자 · 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 조교수(E-mail:kdpark@inha.ac.kr)

역보정항법시스템(WADGPS, Wide Area DGPS)으로써, 전 세계적으로 미국의 WAAS(Wide-Area Augmentation System), 유럽의 EGNOS(European Geostationary Navigation Overlay System), 일본의 MSAS(MTSAT Satellite-Based Augmentation System), 인도의 GAGAN(GPS And Geo Augmented Navigation)등이 개발되어 있다. 국내에서는 전 세계적으로 구축된 SBAS 중에서 일본에서 운영하고 있는 MSAS 신호를 수신할 수 있으며, 인도에서 개발 중인 GAGAN 신호도 간헐적으로 수신되고 있다(김정래 등, 2007). 국내에서 SBAS 신호를 사용할 경우는 대부분이 MSAS 신호를 사용하는 경우이며, 그렇기 때문에 실제 측위에 사용하기에 앞서 MSAS 보정신호에 대한 정확도 평가가 반드시 필요하다. 국내에서는 아직까지 실제 SBAS 보정신호를 이용하여 이동측위를 수행했을 때의 정확도 검증에 관한 연구는 수행된 바가 없으며, 다만 정지측위의 수평 정확도 평가에 관한 몇몇 선행 연구가 수행된 바 있다.

유 훈 등(2006)은 정확한 좌표를 알고 있는 기지점에서 SBAS 보정신호 수신이 가능한 수신기를 사용한 관측과 DGPS 보정신호를 이용하는 비컨(beacon) 수신기를 사용한 관측을 실시하여, 두 경우의 수평 정확도를 비교하였다. 비컨은 우리나라 국토해양부에서 해양 항법에 활용하기 위해 구축한 DGPS 시스템에서 사용하는 신호이다. 유 훈 등(2006)이 수평 정확도를 비교한 결과, DGPS 측위와 SBAS 측위의 RMS 오차는 각각 90cm, 80cm로 대등한 수준임을 확인하였다. 박상현 등(2008)은 영기선(zero-baseline) 조건의 성능 비교분석법을 제안하였다. 동일한 안테나와 수신기를 이용하여 DGPS와 MSAS 기반의 보정측위 성능을 비교분석한 결과, DGPS 측위와 SBAS 측위의 수평정확도가 각각 50cm, 70cm로 나타났다. 이를 통해 DGPS의 보정측위성능이 MSAS의 보정측위성능보다 우수하지만 DGPS의 경우, 기선거리가 증가함에 따라 가용성이 낮아진다는 결론을 내렸다.

이 연구에서는 SBAS 이동측위의 정확도 평가를 위하여 GPS 이동측위 방법 중에서 많이 사용되는 RTK 측위, DGPS 측위, 단독측위와 SBAS 측위를 실시하고 정확도를 비교분석하였다. 이 중에서 단독측위의 경우, 이중주파수 수신기를 사용할 때와 단일주파수 수신기를 사용할 때를 구분하여 측위를 실시하여 이중주파수 수신기와 단일주파수 수신기의 성능을 비교하였다. 이 연구는 이동측위를 실시하고 수평과 수직방향을 모두 포함한 3차원 측

위 정확도 평가를 수행했다는 점에서 앞서 소개한 선행연구들과 차별화된다.

이 논문에서는 먼저 전 세계적인 SBAS 구축, 개발, 그리고 서비스 현황에 대하여 개괄적으로 설명하고, 각 측위방법별 측위과정을 설명하였다. 그리고 정확도 검증을 위한 실험방법과 정확도 평가결과에 대해 기술하였다.

2. SBAS 구축, 개발, 서비스 현황

GPS를 민간 항공부문에서 유일한 항법시스템으로 사용하기에는 민간항공 요구조건을 충족하기에 어려움이 있으며, GPS의 무결성 확보에 관한 부분을 해결하기 위해서는 광역적인 보강시스템이 필수적이다. 광역 보정시스템은 정지궤도 위성을 이용하는 SBAS와 지상시설을 이용하는 GBAS(Ground-Based Augmentation System)로 분류된다(Kaplan 등, 2006; Hofmann-Wellenhof 등, 2007). 현재 전 세계적으로는 미국의 WAAS, 일본의 MSAS, 유럽의 EGNOS, 인도의 GAGAN 등의 SBAS가 운영되고 있다.

SBAS는 중앙제어국, 기준국, 지상송신국을 포함하는 지상부문과 위성부문으로 구성되어 있으며 운영 원리는 다음과 같다. 기준국들은 네트워크로 연결되어 있으며, 각 기준국에서 GPS 신호를 수신하여 L1 C/A 코드와 L2 P 코드를 이용한 의사거리와 반송파 위상 데이터를 중앙제어국으로 전송한다. 중앙제어국에서는 전송된 각 기준국 데이터를 처리하여 GPS 위성궤도, 위성시계오차, 이온층 영향에 관한 보정정보를 생성한다. 또한 GPS 위성의 무결성 정보를 추정한다. 그러나 다중경로오차와 같은 측정의 환경과 수신기에 따른 개별적인 오차나 대류층 효과는 SBAS 보정정보에 포함되지 않는다. 중앙제어국에서 생성된 보정정보는 지상송신국을 통해 C-band 신호를 이용하여 정지위성으로 송신된다. 그리고 정지위성에서는 해당 서비스 지역에 GPS L1 주파수와 같은 주파수(1575.42MHz)로 보정메시지가 실린 신호를 방송하게 된다. SBAS 보정메시지 타입은 기본적인 광역보정항법시스템에서 사용하는 형식을 따르고 있으며, 총 64개의 메시지 타입으로 이루어져 있다. 대표적으로 메시지 타입 2-5는 시계오차, 25는 궤도오차, 26은 이온층 지연 효과를 나타낸다(Kaplan 등, 2006). 각 SBAS 시스템의 지상부문과 위성부문에 관한 자세한 사항은 표 1에 정리하였으며, 표 1의 약어를 포함한 상세한 설명은 2.1절에서 2.4절까지 상세히 설명하였다.

표 1. 대표적인 SBAS의 지상부문과 위성부문

SBAS	지상부문			위성부문		
	기준국	중앙제어국	지상송신국	위성	경도	PRN
WAAS	WRS	WMS	GUS	Inmarsat-3-F3/POR	178°E	134
				Inmarsat-3-F4/AOR-W	142°W	122
				Intelsat Galaxy XV	133°W	135
				TeleSat Anik FIR	107.3°W	138
EGNOS	RIMS	MCC	NLES	Inmarsat-3-F2/AOR-E	15.5°W	120
				ESA Artemis	21.5°E	124
				Inmarsat-3-F5/IND-W	25°E	126
MSAS	GMS	MCS	NES	MTSAT-1R	140°E	129
				MTSAT-2	145°E	137
GAGAN	INRES	INMCC	INLUS	INSAT-4B	93.5°E	127
				GSAT-4 (2008년 발사예정)	82°E	130

2.1 미국의 WAAS

WAAS는 미 연방항공국(FAA; Federal Aviation Administration)에서 캐나다와 멕시코를 포함하는 북미 전역에서 항공기 정밀접근(precision approach)의 최저성능을 유지하며 육·해상에서도 사용하고자 개발한 SBAS이다. 또한 항공분야 이외에도 농업, 해양, 운송 분야 등 GPS가 활용되는 많은 분야에서 유용하게 사용되고 있다.

WAAS의 지상부문은 25개의 기준국(WRS; Wide Area Reference Station), 보정정보를 생성하는 2개의 중앙제어국(WMS; WAAS Master Station), 그리고 생성된 보정정보를 위성으로 송신하는 4개의 지상송신국(GUS; Ground Uplink Station)으로 구성되어 있다. WAAS에서 사용되는 정지궤도위성은 Inmarsat-3-F3, Inmarsat-3-F4, Intelsat Galaxy XV, 그리고 TeleSat Anik FIR이며 각각 동경 178°, 서경 142°, 서경 133°, 그리고 서경 107.3°에 위치하고 있다.

2.2 유럽의 EGNOS

유럽에서는 유럽 전역의 항공, 해양 및 육상 운송 분야에 항법 신호를 제공하는 유럽의 위성항법시스템 정책을 위한 첫 단계의 일환으로 EGNOS를 개발하였으며, 이를 바탕으로 두 번째 단계에서는 Galileo 시스템을 개발하고 있다. EGNOS 보정신호에는 정확한 GPS·Galileo 위성 궤도력, 위성에 탑재된 원자시계 오차정보, 그리고 이온층 보정신호가 포함되어 있으며 무결성 신호를 제공하고 있다.

EGNOS의 지상부문은 4개의 중앙제어국(MCC; Master Control Center), 34개의 감시국(RIMS; Ranging and Integrity Monitoring Station), 6개의 지상송신국(NLES; Navigation

Land Earth Station)으로 구성되어 있으며, 서경 15.5°, 서경 21.5°, 그리고 서경 25°에 위치하고 있는 Inmarsat-3-F2, ESA Artemis, Inmarsat-3-F5 정지궤도위성을 통해 보정정보를 전송하고 있다.

2.3 일본의 MSAS

MSAS는 미국의 WAAS, 유럽의 EGNOS와 같은 역할을 하는 일본의 위성항법 보정시스템으로써 우리나라를 포함하여 아시아, 태평양 지역에 서비스를 제공하고 있다. MSAS는 WAAS, EGNOS와 마찬가지로 무결성 감시, GPS 위성 시계오차 및 궤도오차 보정, 이온층 보정 등의 역할을 한다. 국내에서는 일본과 지리적으로 인접해 있기 때문에 MSAS 서비스를 이용할 수 있으며, 실질적으로 이를 이용한 연구들이 수행되고 있다.

MSAS 지상부문의 시스템은 8개의 기준국(GMS; Ground Monitor Station), 2개의 중앙제어국(MCS; Master Control Station), 그리고 지상송신국(NES; Navigation Ground Earth Station)으로 구성되어 있다. 8개의 기준국 중에서 6개소는 일본 내에 위치하고 있으며 2개소는 호주와 하와이에 각각 위치하고 있다. 중앙제어국은 무결성, 이온층 정보, 시계 및 궤도 오차 보정정보 생성에 필요한 데이터처리를 담당하는 중앙처리국(CPF; Central Processing Facility)과 위성의 상태를 모니터링하고 거리정보를 제공하는 MRS(Monitor and Range Station)를 포함하고 있다. 기준국에서는 GPS와 MTSAT 신호를 수신하고 데이터를 생성하여 중앙제어국으로 전송하며, 중앙제어국에서 생성된 보정정보는 지상송신국을 통해 MTSAT 위성으로 송신된다. 위성부문 시스템은 동경 140°와 145°의 정지궤

도에 위치한 두 개의 통신위성인 MTSAT-1R과 MTSAT-2 위성으로 구성되어 있으며, 국내에서는 약 45° 고도각으로 관측된다.

2.4 인도의 GAGAN

GAGAN은 인도에서 개발하여 시험운용 중인 SBAS로써 위성을 기반으로 하는 통신, 항법, 항공운송을 위한 목적으로 개발되었다. 2006년에 지상부문 테스트를 실시하였으며, 2007년 최종 시스템 테스트를 완료하고 현재 시험운용 중이다. GAGAN 시스템은 대부분의 아시아 태평양 지역을 커버하고 있으며, 한국에서도 간헐적으로 신호가 수신되기도 한다(김정래 등, 2007).

GAGAN의 지상부문은 8개의 기준국(INRES; Indian Reference Station), 1개의 주기지국(INMCC; Indian Mission Control Center), 2개의 지상송신국(INLUS; Indian Land Uplink Station)으로 구성되어 있다(Kibe, 2003; Radhakrishnan, 2007). 보정정보를 전송하는 위성부문으로는 현재 동경 93.5°에 위치한 INSAT-4B가 운영되고 있으며, GSAT-4가 2008년 중에 발사될 계획이다(Hofmann-Wellenhof 등, 2007).

3. 측위 정확도 비교 방법

이 연구에서는 SBAS 이동측위의 정확도를 평가하기 위해 RTK 측위, DGPS 측위, 단독측위, SBAS 측위를 실시하였다. 좀 더 정확한 분석과 비교를 위해 RTK 측위 2회, DGPS 측위 6회, SBAS 측위 5회, 이중주파수를 이

용한 단독측위 2회, 단일주파수를 이용한 단독측위 3회를 실시하였다. 특히 DGPS와 SBAS 측위의 경우 지역보정항법시스템과 광역보정항법시스템을 대표하는 측위방법이기 때문에 보다 정확한 비교를 위하여 각각 6회, 5회 측위를 실시하였다. 정지측위 결과 산출한 좌표를 참값으로 간주하고, 측위방법별로 관측한 데이터를 참값과 비교하였다. 각각 2차원 RMS 오차와 3차원 RMS 오차를 계산하였으며 이를 정확도 비교의 지표로 사용하였다. 이 장에서는 각각의 측위방법과 과정, 오차 분석방법에 대해 기술한다.

3.1 정확도 비교를 위한 GPS 측위

측위 대상지역은 위성의 가시성과 관측환경을 고려하여 인하대학교 서호관 옥상으로 선정하였으며, 30m×10m 크기의 사각형 내에 'INHA'라는 알파벳 모양으로 옥상 바닥에 테이프를 붙여 실험모형을 제작하였다(그림 1). 참값 산출을 위한 정지측위는 'INHA' 알파벳의 모서리 지점인 17개 지점에서 실시하였으며, 나머지 측위들은 글자를 따라 이동해가면서 수행하였다. 사람이 안테나를 들고 이동함으로써 발생하는 인위적 오차를 최소화하기 위하여 안테나를 고정시킬 수 있는 이동장비를 제작하였으며, 이 장비의 높이는 1.47m이다(그림 2). 각 측위에 사용한 장비는 크게 안테나, 수신기, 통신장비로 구분할 수 있으며, 표 2에 장비의 제조사와 모델명 등을 정리하였다.

3.1.1 정지측위

이 연구에서는 정확도 비교를 위한 기준이 되는 참값을

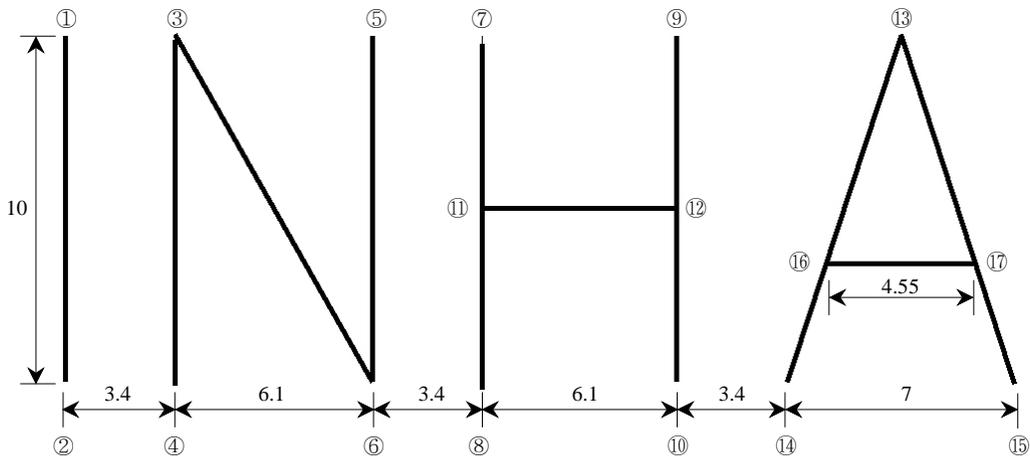


그림 1. 'INHA' 실험모형의 실측 제원(m)

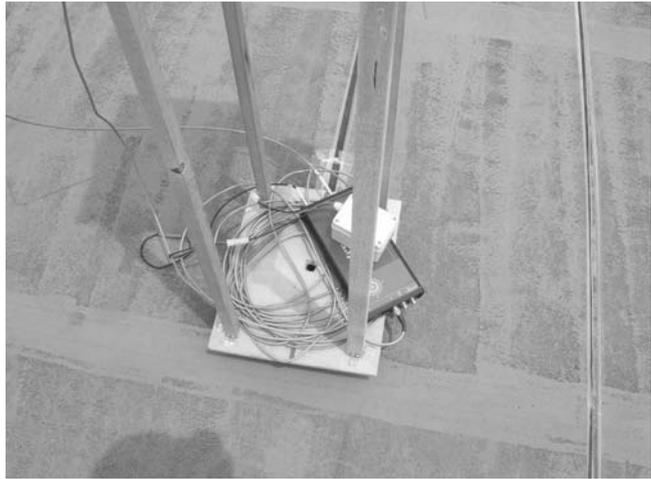
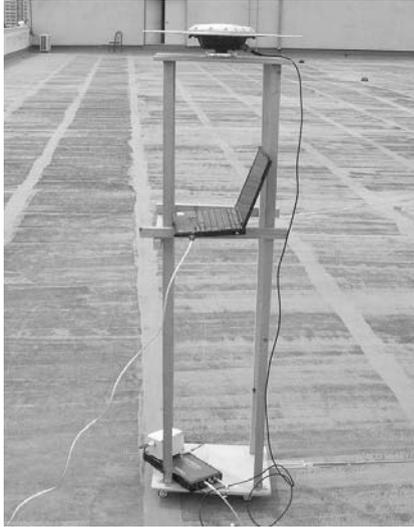


그림 2. 이동측위를 위해 제작한 측량장비

표 2. 측위방법별 사용 장비

측위방법		사용 장비		
		수신기	안테나	통신장비
정지측위(static)		Trimble 4700	Trimble 33429.00+GP (L1/L2)	
		Trimble NetR5	Trimble Zephyr Geodetic (L1/L2)	
RTK	Base	Trimble 4700	Trimble 33429.00+GP (L1/L2) Trimble Zephyr Geodetic (L1/L2)	Trimtalk 450S
	Rover	Trimble 4800	수신기/안테나 일체형 (L1/L2)	내장형
DGPS	Base	Septentrio PolaRx2e	Trimble Zephyr Geodetic (L1/L2)	PDL 4535
	Rover	NovAtel PowerPak-4	NovAtel GPS-600 (L1/L2)	PDL 4500
SBAS		Septentrio PolaRx2e	Trimble Zephyr Geodetic (L1/L2)	
			Trimble 23965.00+GP (L1)	
Standalone(L1/L2)		NovAtel PowerPak-4	NovAtel GPS-600 (L1/L2)	
		Septentrio PolaRx2e	Trimble Zephyr Geodetic (L1/L2)	
Standalone(C/A)		Smart GPS	수신기/안테나 일체형 (C/A)	

정지측위를 통해 결정하였다. 정지측위는 측위를 위해 제작한 'INHA' 알파벳의 모서리 지점에서 2시간씩 실시하였다. 모서리 지점은 'I' 2개, 'N' 4개, 'H' 6개, 'A' 5개로 총 17개 지점이다(그림 1). 정지측위 결과데이터는 Trimble사의 상용 소프트웨어인 TGO(Trimble Geomatics Office)를 사용하여, 인하대학교 4호관 옥상에 설치된 기준국 IHU1의 좌표를 고정시키고 상대처리하였다. IHU1은 인하대학교 지리정보공학과 GPS 연구실에서 연구 목적으로 설치한 기준국이다. 그 결과로 17개 지점의 WGS84 (World Geodetic System 1984) 3차원 직각좌표 X, Y, Z

와 측지좌표인 경위도, 타원체고를 산출하였다.

3.1.2 RTK 측위

이 연구에서는 Trimble 장비를 이용하여 RTK 측위를 실시하였다(표 2). RTK 2회 측량 중에서 1차 측량은 이동국에서 약 50m 떨어진 지점에 기준국을 설치하고 1초 간격으로 측량을 실시하였다. 그리고 2차 측량은 이동국에서 약 400m 떨어진 지점에 위치한 기준국 IHU2를 이용하여 1초 간격으로 측량을 실시하였다. IHU2는 IHU1과 마찬가지로 인하대학교 지리정보공학과 GPS 연구실

에서 연구목적으로 설치한 기준국이다. 이동국으로 사용한 Trimble 4800은 안테나, 수신기 일체형이며 모뎀이 내장되어있는 장비이다. TSC1 컨트롤러로 장비를 제어할 수 있으며, 컨트롤러에 측량결과가 저장된다. 기준국과 이동국간의 통신을 위해 사용한 Trimble 450S 모뎀은 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Services) SC-104 버전 2.1 형식과 CMR 형식으로 데이터 전송이 가능한데, 그 중 RTCM SC-104 버전 2.1 형식을 사용하였으며 전송속도는 38,400bps로 설정하였다. 측위결과는 WGS84 X, Y, Z 좌표와 경위도, 타원체고로 각각 획득하였다.

3.1.3 DGPS 측위

총 6번의 DGPS 측위를 RTK 측위와 마찬가지로 1초 간격으로 실시하였다. 6회 측위 모두 기준국으로는 인하대 4호관 옥상에 설치된 기준국 IHU2를 이용하였다. 이동국에 사용한 장비는 NovAtel-600 안테나와 NovAtel PowerPak-4 수신기이다. 수신기를 노트북에 연결하고 NovAtel 장비를 제어하는 상용 소프트웨어인 GPSolution을 이용하여 NMEA(National Marine Electronics Association) 형식의 데이터를 수집하고 저장하였다. 특히 NMEA 코드 중에서 GPGGA(Global Positioning System Fix Data)에 기록된 WGS84 경위도, 타원체고를 측위결과로 획득하였다. 기준국과 이동국간의 통신에는 PDL 모뎀을 사용하였으며 RTCM SC-104 버전 2.3 형식의 보정정보를 9600bps로 전송하도록 하였다.

3.1.4 단독측위

단독측위는 이중주파수 장비를 이용하여 2회, 단일주파수 장비를 이용하여 3회 실시하였다. 이중주파수를 이용한 2회 측위 중에서 1차 측위는 NovAtel 장비를 사용하였고, 2차 측위는 PolaRx2e 수신기와 Trimble Zephyr Geodetic 안테나를 사용하였다. 단일주파수를 이용한 측위에는 USB 타입의 Smart GPS 장비를 사용하였는데, 이 장비는 단일주파수 수신만 가능하며 C/A 코드를 이용하여 좌표를 계산한다. 또한 수신기, 안테나 일체형으로써 노트북에 바로 연결하여 사용할 수 있으며 그 크기가 약 5cm×5cm로 매우 작아 휴대하기 간편하고 저렴한 장비이다. 측위결과는 1초 간격으로 데이터를 수신하여 NMEA 형식으로 기록하였다. 데이터 기록에는 각각의 수신기에 상응하는 소프트웨어를 사용하였는데, PolaRx2e 수신기는

RxControl, NovAtel 수신기는 GPSolution, 그리고 Smart GPS는 VisualGPS 프로그램을 사용하였다.

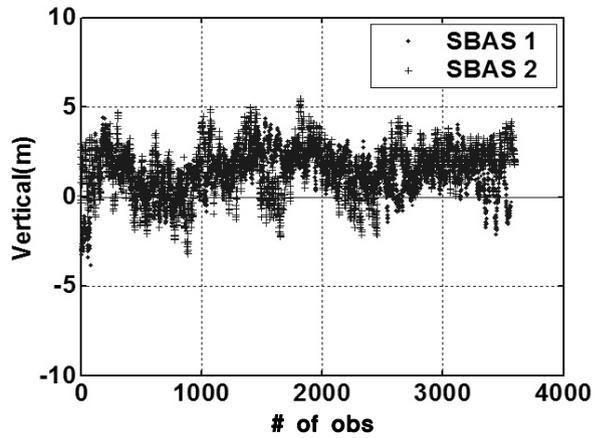
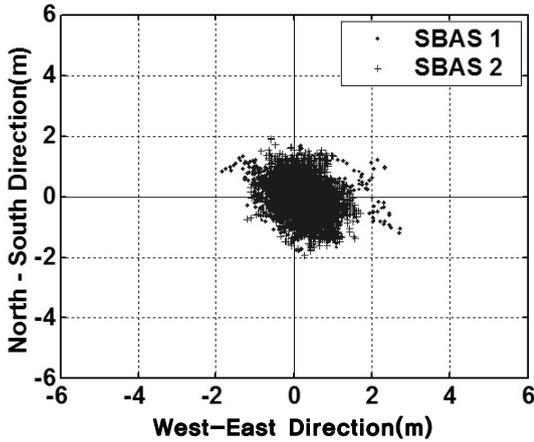
3.1.5 SBAS 측위

SBAS 이동측위는 이중주파수 수신이 가능한 Trimble Zephyr Geodetic 안테나를 사용하여 3회 실시하고, 단일주파수 수신이 가능한 Trimble 23965 w/t Ground Plane L1 안테나를 사용하여 2회 실시하였다. 측위에 사용된 수신기는 SBAS 수신이 가능한 Septentrio PolaRx2e이며, 사용 목적에 따라 옵션을 통해 보정정보를 수신할 위성을 선택할 수 있다. 이 연구에서는 MSAS의 MTSAT-1R과 MTSAT-2 위성의 보정신호를 모두 수신하도록 설정하여, 수신기내에서 최적화된 위성의 보정정보를 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다. 두 개 MTSAT 위성의 정확도 비교를 별도로 수행하였으며, 그 실험내용과 결과는 다음절에 기술하였다. SBAS 측위 데이터는 수신기에 노트북을 연결하고 PolaRx2e 수신기를 제어할 수 있는 RxControl 프로그램을 통해 NMEA 형식으로 기록하였다.

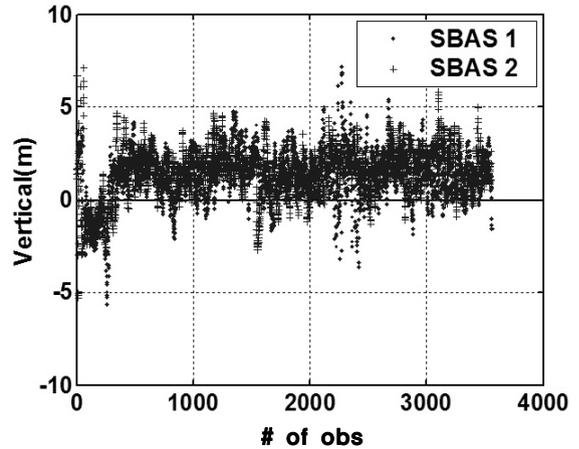
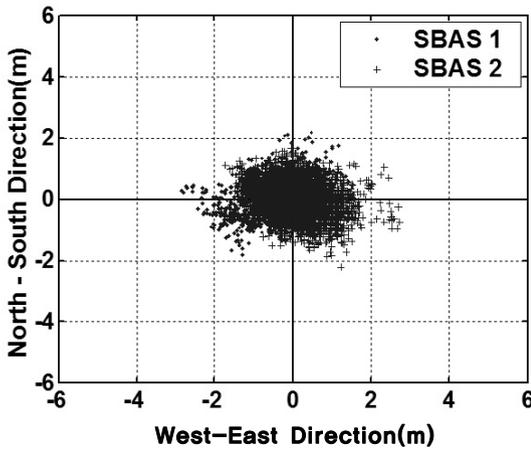
3.2 각 MTSAT 위성의 정확도 분석

국내에서는 일본에 지리적으로 가깝기 때문에 SBAS 측량에 MSAS에서 운영하고 있는 MTSAT-1R과 MTSAT-2의 보정신호를 수신할 수 있다. MTSAT-1R과 MTSAT-2 위성의 위치는 동경 140°와 145°이며, 우리나라에서는 약 45° 고도각으로 관측이 가능하다. 실험모형 'INHA'를 대상으로 하는 SBAS 측위에 앞서, MTSAT-1R과 MTSAT-2 위성 보정신호를 각각 수신하여 정확도를 비교하였다. 측위지점은 인하대학교 4호관 옥상에 설치되어 있는 관측소 IHU2로 선정하였다. IHU2 관측소의 장비는 Septentrio PolaRx2e 수신기와 Trimble Zephyr Geodetic 안테나이다. PolaRx2e는 사용 목적에 따라 옵션을 통해 보정정보를 수신할 위성을 선택할 수 있기 때문에 옵션 설정을 통해 MTSAT-1R(PRN 129) 신호를 수신할 경우, 그리고 MTSAT-2(PRN 137) 신호를 수신할 경우를 구분하여 정확도 분석을 실시하였다. 측위는 모두 1초 간격으로 1시간씩 2회 실시하였으며, NMEA 형식으로 데이터를 획득하였다. 정확도 비교를 위한 참값은 수원 기준국 좌표를 2002년 1월 1일 국토지리정보원 고시좌표로 고정시키고, IHU2의 24시간 데이터를 TGO로 상대처리하여 결정하였다.

SBAS 정지측위의 수평오차와 수직오차는 그림 3에 나타내었다. 2회 측량 중 첫 번째 측량은 SBAS 1, 두 번째



(a) MTSAT-1R



(b) MTSAT-2

그림 3. SBAS 정지측위 오차

표 3. SBAS 정지측위 RMS 오차(cm)

측위방법		수평오차	3차원오차
MTSAT-1R	1차	82.5	223.2
	2차	72.9	191.8
	평균	77.7	207.5
MTSAT-2	1차	83.1	218.4
	2차	81.9	205.8
	평균	82.5	212.1

측량은 SBAS 2로 나타내었으며, 그림 3의 (a)는 MSAS 서비스 중 MTSAT-1R의 보정신호만 사용한 경우, 그리고 (b)는 MTSAT-2의 보정신호만 사용한 경우이다. 그림을 통해 MTSAT-1R의 경우와 MTSAT-2의 경우 모두

수평오차는 $\pm 2\text{m}$ 이내, 수직오차는 $\pm 4\text{m}$ 이내로 크게 다르지 않음을 확인하였다. 또한 수직방향으로 약 1m의 편향(bias)이 나타나며 오차의 변동폭이 다소 큰 것을 확인할 수 있었다. 측위결과 산출한 RMS 오차를 표 3에 정리하였다. MTSAT-1R의 보정신호를 수신했을 경우 2차원 RMS 오차 77.7cm, 3차원 RMS 오차 207.5cm로 나타났으며, MTSAT-2의 보정신호를 수신하여 좌표계산에 이용했을 경우에는 2차원 RMS 오차와 3차원 RMS 오차가 각각 82.5cm, 212.1cm로 나타났다. 두 경우의 오차 크기의 차이가 수평방향 4.8cm, 수직방향 4.6cm로 큰 차이를 나타내지 않았다. 그 이유는 MTSAT-1R과 MTSAT-2 위성에서 동일한 보정정보를 방송하며, 위성위치의 차이(동경 140°와 145°)로 인해 보정정보 도달시간 차이가 발생

하지만 무시할 수 있을 정도의 미미한 수준이기 때문이다. 이는 박상현 등(2008)의 연구결과와도 일치하는 결과이다. 이를 통해 2개의 MTSAT 중에서 어떤 위성을 사용하여도 성능 차이가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

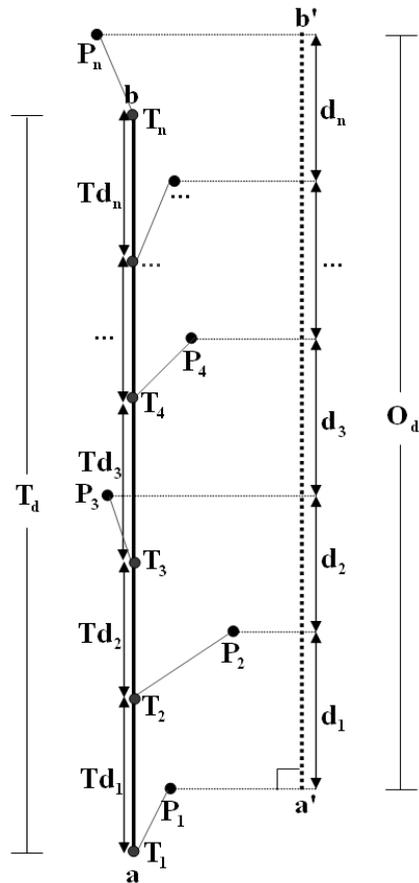
3.3 오차 분석

오차분석은 정지측위로 산출한 좌표를 참값으로 간주하고, 측위방법별로 관측한 데이터를 참값과 비교하여 RMS 오차를 구하는 방식으로 하였다. 먼저 각 관측지점들에 해당하는 참값을 파악하는 작업을 수행하고, 참값과 관측값 사이의 ΔX , ΔY , ΔZ 를 구했다. 그리고 각 관측지점의 경위도 좌표를 이용하여 ΔX , ΔY , ΔZ 를 남북, 동서, 그리고 수직 좌표계(NEU: North, East, and Up)로 변환하였다. 남북방향과 동서방향 좌표차이를 통해 2차원 RMS 오차를 계산하고, 남북, 동서, 수직방향 좌표차이를 통해 3차원 RMS 오차를 계산하였다.

각 관측지점에 해당하는 참값을 파악하기 위하여, 정지측위로 산출한 17개 지점 좌표(그림 1 참고)를 이용하여 'INHA' 알파벳의 각 직선별로 총 10개의 3차원 직선의 방정식을 만들었다. 참값을 도출하는 과정은 그림 4에 나타내었다. 먼저 정지측위를 실시한 a, b 지점의 정확한 좌표를 이용하여 a, b의 직선의 방정식을 산출하였다. 그림에서는 편의를 위해 직선을 a'b'로 따로 표기하였다. 각 관측지점 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 에서 선분 a'b'에 수선의 발을 내려 각 관측지점간의 거리인 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 을 계산하였으며, T_a 와 O_d 가 일치하지 않을 경우를 고려하여 비례식을 사용하여 참값간의 거리인 $Td_1, Td_2, Td_3, \dots, Td_n$ 을 계산하였다(그림 4(a)). 그리고 각 관측지점에 해당하는 참값 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ 은 측위 시작점인 a부터 $Td_1, Td_2, Td_3, \dots, Td_n$ 을 누적하여 가산함으로써 도출하였다(그림 4(b)).

4. 결과 및 고찰

각 측위방법별로 수행한 오차분석 결과를 그림 5에서 그림 9까지 나타내었다. 각 그림에서 (a)는 참값인 정지측위 지점과 각각의 측위로 획득한 측위궤적을 2차원 평면상에 나타낸 것이다. 관측점들의 경위도 좌표를 2차원 부등각사상변환(2-D affine coordinate transformation) 방법으로 좌표 변환하여 각 그림의 (a)와 같이 나타내었다. 각 그림의 (b)는 수평오차를 나타내며, (c)는 수직오차를 나타낸다. 각 그림에서 (a)의 가로축과 세로축은 거리를



- P : 관측지점
- T : 각 관측지점에 해당하는 참값
- d : 관측지점간의 거리
- Td : 참값간의 거리
- Ta : True Distance
- Od : Observation Distance

$$Td : Od = Td : d \quad (a)$$

$$\begin{aligned} T_1 &= a + Td_1 \\ T_2 &= a + Td_1 + Td_2 \\ T_3 &= a + Td_1 + Td_2 + Td_3 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (b)$$

$$T_n = a + Td_1 + Td_2 + Td_3 + \dots + Td_n$$

그림 4. 오차분석을 위한 관측지점별 참값 산출 방법

나타내며, (b)의 가로축은 동서방향 좌표차이, 세로축은 남북방향 좌표차이를 의미한다. (c)의 가로축은 관측치의 개수를 나타내며 세로축은 수직방향 좌표차이를 의미한다. 각 그래프에는 여러 차례 실시한 측위결과를 모두 나타내었으며 DGPS와 SBAS는 색깔로, RTK, Standalone

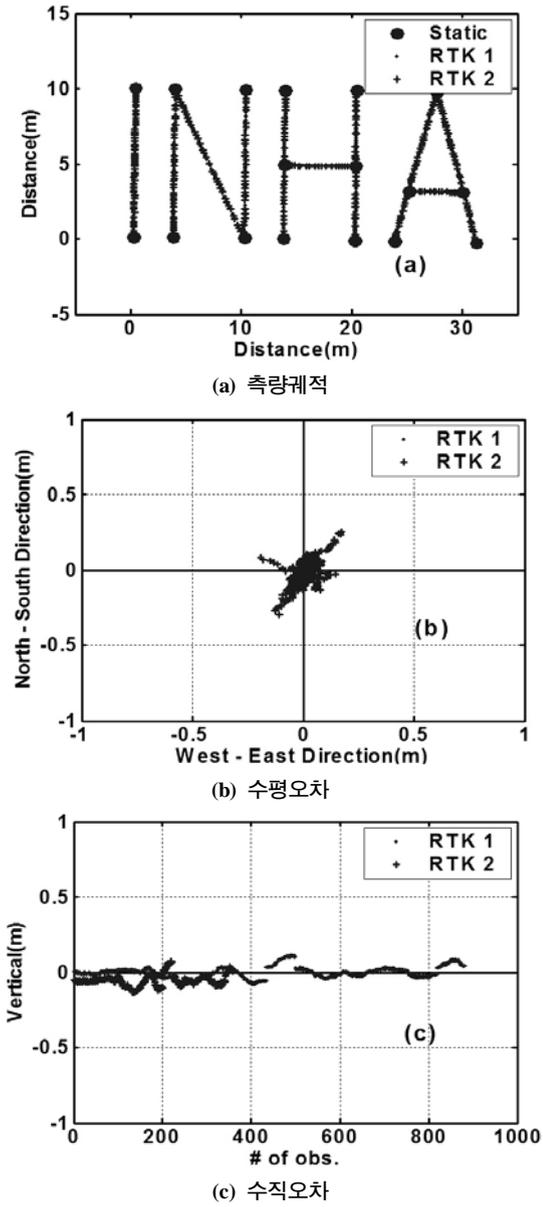


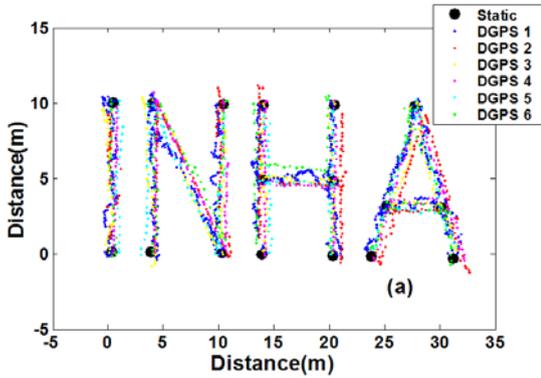
그림 5. RTK 오차분석 결과

은 기호로 구분하여 나타내었다. 예를 들어 총 2회 측위를 실시한 RTK 측위의 경우 RTK 1차 측위결과를 RTK 1로 나타내었고 RTK 2차 측위를 RTK 2로 나타내었다 (그림 5). 각 그림에서 데이터 개수의 차이가 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 개별측위에서는 이동속도를 일정하게 유지했지만 각 측위마다 이동속도가 일치하지 않았기 때문이다. 10m 이동하는데 걸린 시간은 짧을 경우 30

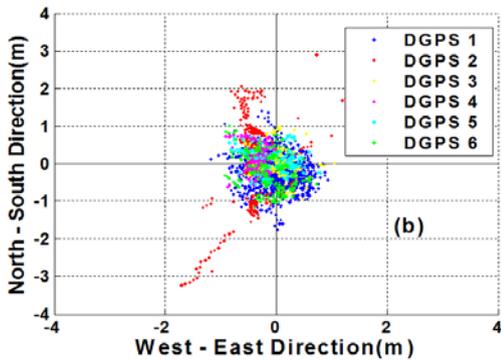
초, 길 경우 2분 30초였다.

그림 5에서 9까지의 (a)를 통해 확인할 수 있듯이 RTK 측위궤적이 실제 실험모형에 가장 가깝게 나타났으며 정확도와 정밀도가 가장 높았다. DGPS 측위 결과는 남북, 동서, 수직오차가 모두 약 $\pm 2m$ 까지 나타나는 것을 확인할 수 있었다(그림 6). SBAS 측위의 수평오차는 약 $\pm 1m$, 수직오차는 약 $\pm 2m$ 로 나타났으며, 오차의 변동 폭이 다소 크게 나타났다. 또한 앞서 MSAS 위성별 성능 비교 실험에서 나타났던 결과와 같이 약 1m 편향이 나타나는 것을 재차 확인할 수 있었다.

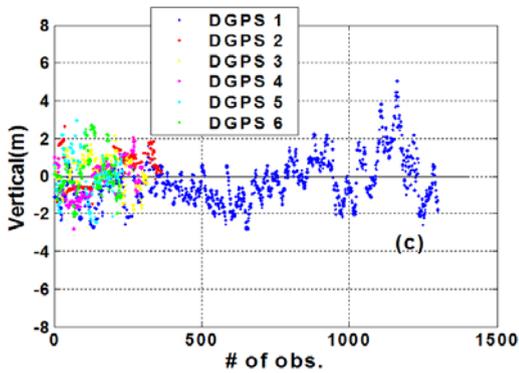
측위방법별 2차원 RMS 오차와 3차원 RMS 오차를 표 4에 정리하였다. 표 4에서 확인할 수 있듯이 RTK 측위가 2차원 RMS 오차 10.8cm, 3차원 RMS 오차 13.1cm로 가장 정확도가 높았으며, 단일주파수 단독측위가 2차원 RMS 오차 140.8cm, 3차원 RMS 오차 428.9cm로 정확도가 가장 낮았다. DGPS의 수평오차와 3차원 오차는 65.6cm, 126.0cm이며 SBAS의 수평오차와 3차원 오차는 56.2cm, 109.2cm로, SBAS의 측위오차가 수평방향으로 9.4cm, 수직방향이 포함된 3차원에서 16.8cm 낮게 나타났다. 그림 10은 각 측위방법별 RMS 오차평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 모든 측위방법에서 2차원 오차보다는 수직방향 오차가 포함된 3차원오차가 더 크게 나타났으며, C/A 코드를 이용한 단독측위를 제외하고는 RMS 오차 평균이 1.5m 내인 것을 확인할 수 있었다. 특히 주목할 사항은 SBAS 측위의 정확도가 DGPS 측위의 정확도와 대등하다는 점이다. 그림 10을 통해 DGPS와 SBAS의 RMS 오차가 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있다. 현장측위에서는 두 대의 수신기와 통신장비까지 필요한 DGPS 측위보다는 별도의 지상기준국이 필요하지 않은 SBAS 측위가 더 용이하다. 또한 DGPS의 경우 기준국과 이동국 간의 거리가 멀어질수록 가용성이 떨어지는 경향이 나타나는 문제점이 있다. 이 연구의 결과를 통해 DGPS 측위의 정확도 수준을 요구하는 작업에 있어서는 SBAS 측위로도 커버할 수 있다고 판단할 수 있다. 하지만 오차 변동 폭이 다소 큰 경향과 편향이 나타났기 때문에 우선적으로 이에 대한 원인 분석과 이를 제거하기 위한 방법 개발을 위한 추가적인 정확도 검증이 필요한 것으로 판단된다.



(a) 측량궤적



(b) 수평오차

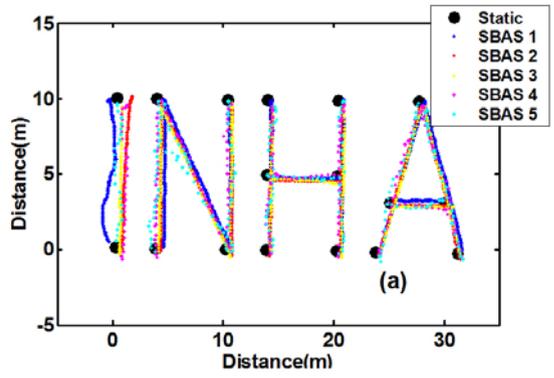


(c) 수직오차

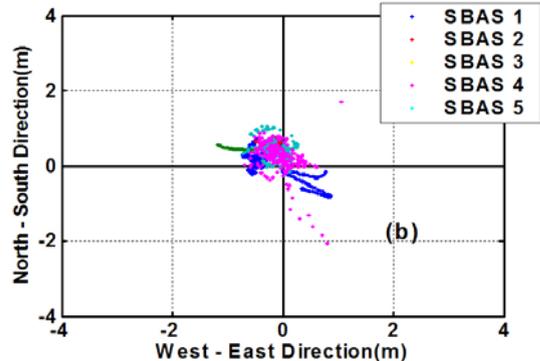
그림 6. DGPS 오차분석 결과

5. 결 론

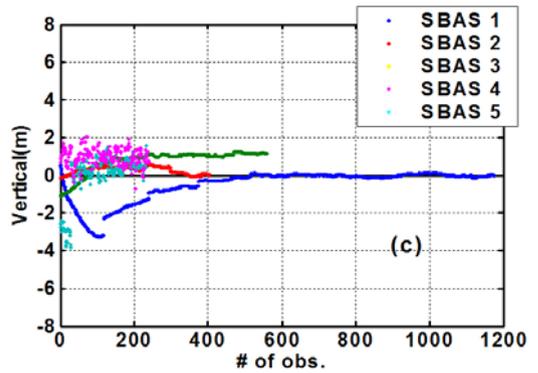
이 연구에서는 SBAS 이동측위의 성능을 평가하기 위하여 다양한 GPS 측위방법에 따른 이동측위 정확도와 SBAS 이동측위 정확도의 비교를 수행하였다. RTK 측위, DGPS 측위, SBAS 측위, 단독측위의 방법으로 이동측위



(a) 측량궤적



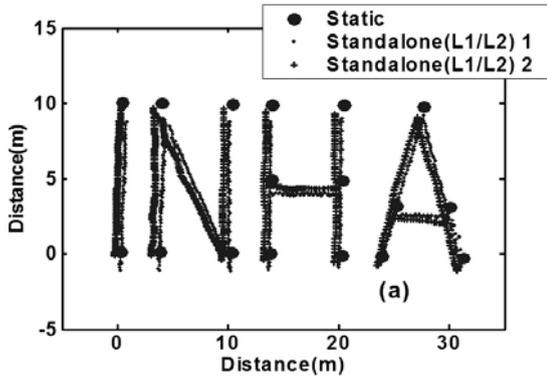
(b) 수평오차



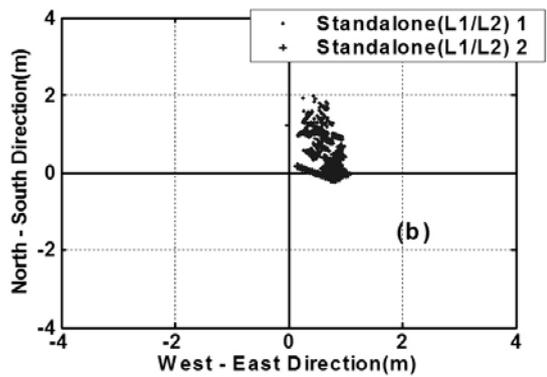
(c) 수직오차

그림 7. SBAS 오차분석 결과

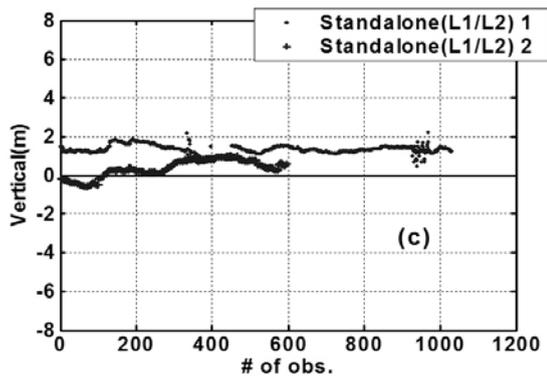
를 실시하고, 정지측위로 결정된 좌표와 비교하여 산출한 2차원 RMS 오차와 3차원 RMS 오차를 통해 정확도를 평가하였다. 그 결과, 각 측위방법에 따른 3차원 RMS 오차는 RTK 측위 13.1cm, DGPS 측위 126.0cm, Standalone (L1/L2) 135.7cm, Standalone(L1) 428.9cm, 그리고 SBAS 109.2cm로 나타났다. 가장 정확도가 높은 RTK 측위의 3



(a) 측량계적

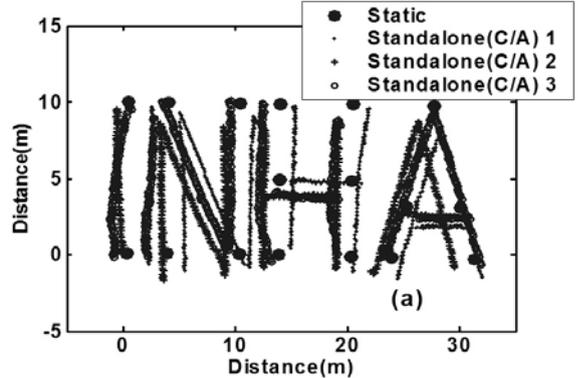


(b) 수평오차

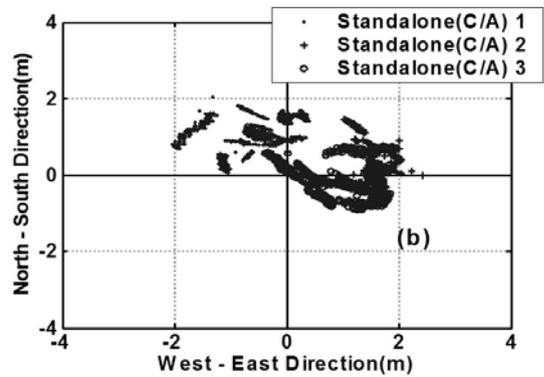


(c) 수직오차

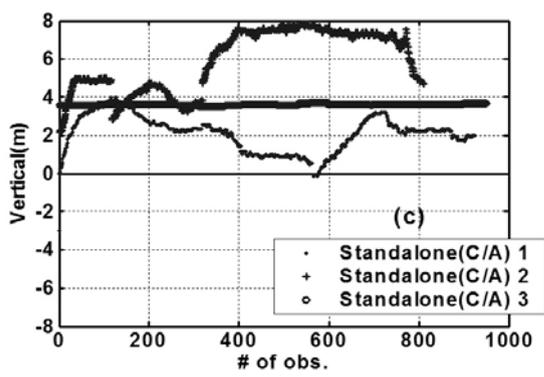
그림 8. Standalone(L1/L2) 오차분석 결과



(a) 측량계적



(b) 수평오차



(c) 수직오차

그림 9. Standalone(C/A) 오차분석 결과

차원 RMS 오차가 13.1cm이며, 가장 정확도가 낮은 단일 주파수를 이용한 단독측위의 3차원 RMS 오차는 428.9 cm로 나타났다. 또한 SBAS 측위의 2차원 RMS 오차와 3차원 RMS 오차는 각각 56.2cm, 109.2cm로 나타났다. 이같은 결과는 DGPS 측위 오차보다 수평오차 9.4cm, 수직방향을 포함한 3차원오차 16.8cm 낮은 결과로써

SBAS 측위의 정확도가 DGPS 측위의 정확도와 대등한 수준이라는 것을 보여준다. 하지만 수직방향의 오차변동 폭이 다소 크고 약 1m의 편향이 나타난 것으로 보아 SBAS 측위를 할 경우 수직방향에서 불안정성이 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 SBAS 측위의 수직방향에서 나타나는 불안정성의 원인 규명과 SBAS 측위의

표 4. 측위방법별 RMS 오차(cm)

측위방법	횟수	수평오차	3차원오차
RTK	1차	11.3	13.9
	2차	10.3	12.2
	평균	10.8	13.1
DGPS	1차	59.4	142.4
	2차	125.9	155.5
	3차	43.5	92.1
	4차	50.0	109.6
	5차	50.9	128.2
	6차	63.8	128.2
	평균	65.6	126.0
SBAS	1차	54.5	113.4
	2차	60.0	113.4
	3차	59.1	67.1
	4차	53.1	134.0
	5차	54.5	118.0
	평균	56.2	109.2
Standalone(L1/L2)	1차	110.4	174.2
	2차	78.2	97.1
	평균	94.3	135.7
Standalone(C/A)	1차	144.6	271.5
	2차	165.0	636.3
	3차	112.7	378.8
	평균	140.8	428.9

활용성을 높이기 위해 다양한 실험환경에서의 SBAS 측위 정확도 검증이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

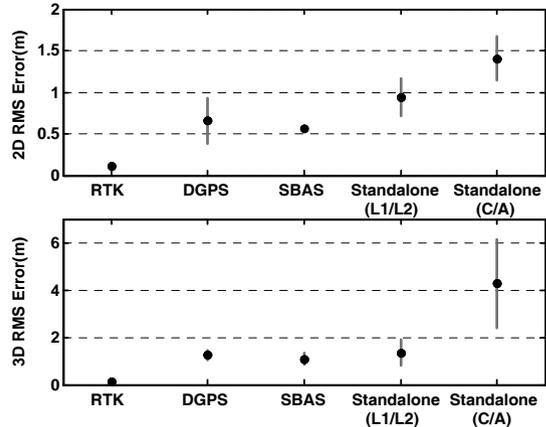


그림 10. 측위방법별 RMS 오차 평균과 표준편차

참고문헌

김정래, 정명숙 (2007), MSAS 전리층 보정정보 분석, 제 14차 GNSS Workshop CD, C-IV: [GIS/SS].

박상현, 조득재, 서상현 (2008), 해양항법을 위한 NDGPS와 MSAS 기반의 보정측위성능 비교분석, 선박해양기술, 제 45 권, pp. 51-58.

유훈, 김적교, 이용욱, 임수봉 (2006), MTSAT를 이용한 WADGPS의 수평위치 해석, 한국지형공간정보학회지, 제 14권, 제 3호, pp. 71-77.

Civil Aviation Bureau of MLIT Japan (2006), MSAS Status: MTSAT Satellite-based Augmentation System, 12th SBAS Iono Meeting.

El-Rabbany, A. (2002), *Introduction to GPS: The Global Positioning System*, Artech House.

Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and E. Wasle (2007), *GNSS-Global Navigation Satellite Systems*, Springer-Verlag

Kaplan, E. D., and C. J. Hegarty (2006), *Understanding GPS (Principles And Applications)*, Artech House.

Kibe, S. V. (2003), Indian plan for satellite-based navigation systems for civil aviation, *Current Science*, Vol. 84, No. 11

Parkinson, B. W., and J. J. Spilker (1996), *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. 164, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

Radhakrishnan, D. (2007), Use of Equatorial orbit for Indian Satellite Navigation Program, *COSPAR/IAF Workshop*, 44th Session of S&T.

(접수일 2008. 9. 1, 심사일 2008. 10. 1, 심사완료일 2008. 10. 16)