Inertial Explorer 소프트웨어를 이용한 관성항법유도장치 정렬 및 항법계산

김정용*, 오준석**, 노웅래***

Alignment and Navigation of Inertial Navigation and Guidance Unit using Inertial Explorer Software

Jeong-Yong Kim*, Jun-Seok Oh**, Woong-Rae Roh***

Abstract

In this paper, the alignment and navigation results by INGU(Inertial Navigation and Guidance Unit) onboard software and by Inertial Explorer which is a post-processing software specialized for IMU(Inertial Measurement Unit) are compared for identification of inertial sensor error models and estimation of alignment and navigation errors for KSLV-I INGU. For verification of the IMU error estimated by Kalman Filter of Inertial Explorer, the covariance parameters of inertial sensor error model state are identified by using stochastic error model of inertial sensors estimated by Allan variance and the alignment and navigation test with static condition and the land navigation test with dynamic condition are carried out. The validity of inertial sensor model for KSLV-I INGU is verified by comparison the alignment and navigation results of INGU on-board software and Inertial Explorer.

초 록

본 논문에서는 KSLV-I 관성항법유도장치 관성계측부에 대한 오차 모델 확인 및 항법 오차 추정을 위해 관성항법유도장치 탑재 소프트웨어를 통한 정렬 및 항법계산 결과와 관성계측유닛 후처리 소프트웨어인 Inertial Explorer를 통한 정렬 및 항법계산 결과를 비교하였다. Inertial Explorer의 칼만필터를 통한 관성계측부 오차 추정 정확도 확인을 위해 Allan Variance를 통한 관성계측부 확률적 오차모델을 이용하여 관성계측부 오차모델 상태변수 공분산 값을 설정하였고, 정적상태에서의 정렬 및 항법시험, 동적환경에서의 주행 항법시험을 수행하였다. INGU 탑재 소프트웨어와 Inertial Explorer를 통한 정렬 및 항법계산 결과 비교를 통해 본 논문에 설정한 KSLV-I 관성항법유도장치 관성센서 오차모델의 유효성을 확인하였다.

키워드 : 관성항법시스템 (Inertial Navigation System), 정렬 (Alignment), 항법 (Navigation), 칼만필터 (Kalman Filter)

접수일(2009년12월21일), 수정일(1차 : 2010년 5월 19일, 2차 : 2010년 6월 18일, 게재 확정일 : 2010년 7월 1일)

* 임무설계팀/kjy0413@kari.re.kr
** 임무설계팀/ohjs@kari.re.kr
*** 임무설계팀/rwr@kari.re.kr

1. 서 론

KSLV-I 관성항법유도장치는 정렬 수행과정 중에 초기 자세추정 뿐만 아니라 3축 자이로와 중력 방향 가속도계에 대한 Run-to-Run 바이어스를 추정하며, 정렬 과정에서 추정된 관성센서 바이어스 보상 및 초기 자세 정보를 이용하여 항법계산을 수행한다. 정렬 및 항법 성능 향상을 위해 관성센서 출력은 시스템 레벨 교정에 의해 식별된 관성센서 동작 메카니즘에 따른 수학적 모델에 의한 온도 및 관성 입력에 대한 센서 출력을 보상하여 정렬 및 항법계산에 사용한다.

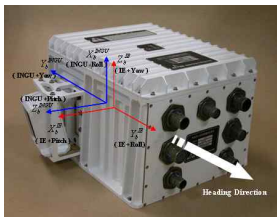
여기서 관성항법유도장치는 관성센서 수학적 모델에 의한 오차 보상 후에 관성센서에 존재하는 확률적 오차 요인 추정을 위해 별도로 시스템 모델에 의한 오차 추정 및 보상을 수행하지 않는다. 따라서 정렬 이후 항법계산 중 관성센서 오차 항 변화 발생은 항법오차로 전이되게 된다. 시스템 모델에 의한 오차 추정을 통해 관성센서 계측부 출력을 보상하는 방법으로써 대표적인 확률적 오차 추정방법인 칼만필터에 의한 추정법이 사용되고 있다. 칼만필터에 의한 오차 추정 시 관성센서 확률적 오차특성을 반영한 시스템 모델이 매우 신중히 설정되어야 항법성능을 보장할 수 있다.

본 논문에서는 KSLV-I 관성항법유도장치 관성계측부에 대한 오차 모델 확인 및 정렬, 항법 오차 추정을 위해 관성항법유도장치 탑재 소프트웨어를 통한 정렬 및 항법계산 결과와 관성계측유닛 후처리 소프트웨어인 Inertial Explorer를 통한 정렬 및 항법계산 결과를 비교하였다. 이를 위해 Inertial Explorer를 이용하여 관성항법유도장치 관성계측부 오차모델에 대한 칼만필터 시스템 모델 상태변수 파라메터를 설정하였고, 설정된 상태변수 확인을 위해 정적상태에서 정렬을 수행하였으며, 정적 및 동적상태에서 항법을 수행하였다. 이와 같은 시험에서 획득된 관성센서 데이터를 Inertial Explorer에 적용하여 관성센서 오차모델 및 정렬, 항법계산 결과의 유효성을 검증하였다.

2. IE 적용을 위한 INGU Software

IE(Inertial Explorer) 소프트웨어는 Novatel(사)의 Waypoint 제품군 중 관성센서 데이터를 이용한 정렬 및 항법계산을 수행해주는 소프트웨어로써, KF(Kalman Filter)를 통해 관성센서와 GNSS (Global Navigation Satellite System) 수신기 데이터의 강결합 및 약결합 방식을 이용한 복합항법 후처리 계산을 수행하는 기능을 가지며, GNSS 이 외에 차량의 Odometer 센서 데이터를 결합한 복합항법 후처리 계산을 수행하는 기능을 갖는다. 또한 관성항법장치의 시스템 모델을 통해 순수항법을 위한 정렬 및 관성센서 오차추정, 항법계산 등의 후처리 기능을 갖는다. 본 소프트웨어의 항법 알고리듬은 다양한 관성항법장치 모델에 적용되어 성능이 검증된 소프트웨어로써, 순수항법을 수행하는 KSLV-I 관성항법유도장치 (INGU:Inertial Navigation and Guidance Unit)의 관성계측부 시스템 모델 추정 및 정렬, 항법 알고리듬을 통한 항법성능 검증을 위해 사용된다.

INGU의 관성센서 데이터를 IE에 적용하기 위해서는 IE 관성계측부의 동체 축이 정의되어야 한다. IE에서 정의된 초기 관성계측부 동체 축과 방위각 기준 축은 그림 1과 같이 INGU와 다르게 정의되어 있다. 따라서 INGU 데이터를 IE에 적용 시에는 INGU 관성센서 데이터를 IE 축과 일치시키도록 변환해야 한다.



$$\begin{bmatrix} X_b^{ingu} \\ Y_b^{ingu} \\ Z_b^{ingu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b^{ie} \\ Y_b^{ie} \\ Z_b^{ie} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{ingu\,roll} \\ \theta_{ingu\,pitch} \\ \theta_{ingu\,yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{ie\,roll} \\ \theta_{ie\,pitch} \\ \theta_{ie\,yaw} \end{bmatrix}$$

그림 1. INGU와 IE 동체좌표 및 자세 상관관계

INGU 데이터를 IE 소프트웨어에 적용하기 위해서는 표 1과 같은 Binary 형태의 INGU 관성센서 데이터가 요구되며, 이 데이터 포맷은 IE

에서 IMR(Raw IMU data) 데이터 포맷으로 변환되어 관성센서 후처리 계산에 사용된다.

표 1. IMR 변환을 위한 INGU Binary Raw Data 포맷

No.	Parameter	Data Type	S.F.	Range	Unit
Format I : Primary Axis Set					
1	gps_time	DB	1	±1.7e+308	sec
2	rx1 (G2X)	SL	0.00000005	±107	deg/sec
3	ry1 (G1X)	SL	0.00000005	±107	deg/sec
4	rz1 (G1Y)	SL	0.00000005	±107	deg/sec
5	ax1 (A1)	SL	0.0000001	±214	m/sec^2
6	ay1 (A2)	SL	0.0000001	±214	m/sec^2
7	az1 (A3)	SL	0.0000001	±214	m/sec^2
Format II : Secondary Axis Set					
1	gps_time	DB	1	±1.7e+308	sec
2	rx2 (G3Y)	SL	0.00000005	±107	deg/sec
3	ry2 (G2Y)	SL	0.00000005	±107	deg/sec
4	rz2 (G3X)	SL	0.00000005	±107	deg/sec
5	ax2 (A4)	SL	0.0000001	±214	m/sec^2
6	ay2 (A2)	SL	0.0000001	±214	m/sec^2
7	az2 (A3)	SL	0.0000001	±214	m/sec^2

여기서 INGU는 여분의 관성센서를 탑재하여 동일한 축의 관성모션을 서로 다른 센서 조합을 통해 측정하여 독립적인 정렬 및 항법 계산을 수행한다. IE 적용을 위한 INGU 소스 데이터에는 위 표와 같이 Primary Axis Set과 Secondary Axis Set의 관성센서 Raw Data를 제공한다. INGU 데이터의 IE 적용을 위한 INGU 소프트웨어 구성은 그림 2와 같다.

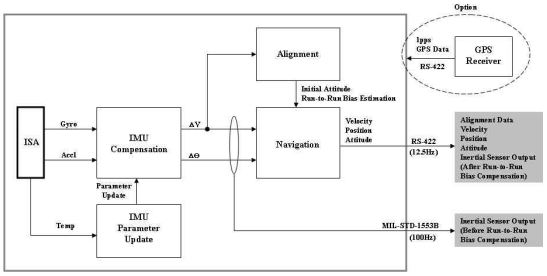


그림 2. IE 적용을 위한 INGU 소프트웨어 구성

INGU는 두 채널의 RS-422 통신과 MIL-STD-1553B 통신을 지원한다. 이 중 RS-422 채널을 통해 12.5Hz 주기로 INGU 탑재컴퓨터에서 계산한 정렬 및 항법 데이터를 전송하며, 정렬과정에서 추정한 관성센서 Run-to-Run 바이어스가 보상된 관성센서 출력 데이터 및 관성센서 출력 30초 평균 데이터를 전송한다. RS-422 통신을 통해 획득한 데이터는 INGU 자체 탑재컴퓨터에서 계산한 정렬 및 항법 계산결과와 IE 계산 결과 비교에 사용된다. INGU 시스템 레벨 교정을 통해 획득한 INGU 온도 및 관성센서 모델 파라메터를 이용하여 보상된 관성센서 출력 데이터는 100Hz 주기로 MIL- STD-1553B 버스 통신을 통해 전송되며, IMR 변환을 위한 소스 데이터로 사용된다.

IMR 변환을 위한 소스 데이터는 아래와 같이 INGU 관성센서 환산계수 및 센서 축 설정을 통해 IE에 적용하였다.

- Inertial Sensor Scale Factor
  - Inverse Gyro Scale Factor : 20000000
  - Inverse Accel Scale Factor : 10000000

- Sensor Orientation
  - X-Axis : Up Direction(Positive Yaw Rate)
  - Y-Axis : Back Direction(Negative Roll Rate)
  - Z-Axis : Right Side(Positive Pitch Rate)

여기서 표 1의 관성센서 데이터에 관한 환산계수는 관성센서 최대 출력 범위, 요구 분해능 그리고 4byte 부호가 있는 정수형 데이터 출력 범위를 고려하여 INGU 소프트웨어에 적용한 값이며, 이 환산계수에 대한 역수를 IE 소프트웨어에 적용하였다. 이를 통해 IE 소프트웨어에서는 4byte의 데이터 정보만을 이용하여 충분한 분해능 및 출력 범위 정보를 갖도록 하였다.

3. IE 소프트웨어 환경설정

3.1 INGU 오차 모델 설정

INGU 관성센서 데이터를 이용하여 정렬 및 항법 후처리 계산을 수행하기 위해서는 INGU 관성계측부에 대해 KF의 상태변수 오차 모델 파

라메터 설정이 요구된다. 여기서 INGU 관성계측부는 Navigation Grade의 성능을 갖는 항법 시스템으로써, KF 상태변수 오차 모델 파라메터 선정은 기존 IE 소프트웨어에 등록되어 있는 Navigation (High Precision) 파라메터를 기초로 하였으며, Allan Variance를 통해 추정한 INGU 확률적 오차모델을 통해 상태변수 오차모델 값을 설정하였다[2]. 이와 같은 오차 모델 파라메터 및 측정 초기 분산값은 실험을 통해 일부 조정하였다. IE 소프트웨어에 적용된 IMU KF 오차모델 파라메터는 그림 3과 같다.

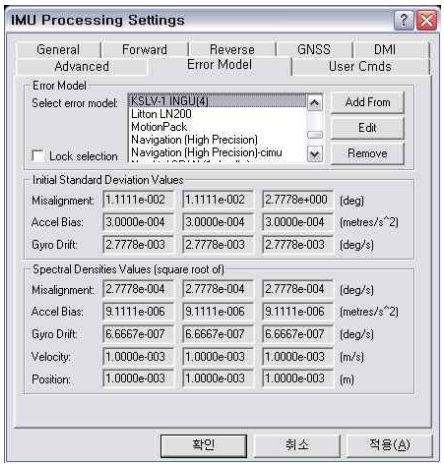


그림 3. INGU 관성센서 오차모델 파라메터 설정

3.2 정렬방식에 따른 IE 설정

IE 소프트웨어는 관성센서 데이터를 이용하여 전방향 데이터 처리방식, 후방향 데이터 처리방식 그리고 양방향 데이터 처리방식으로 정렬 및 항법계산 처리 옵션을 지원한다. 항법 수행 전 INGU의 초기 자세 추정 및 관성센서 바이어스 추정결과와 IE 계산결과 비교를 위해서는 시간 진행방향의 데이터 처리 옵션을 사용해야 하며, 이를 위해 본 논문에서는 전방향 데이터 처리방식 모드를 이용한 정렬계산에 대해서만 다룬다.

INGU는 자가정렬 방식과 방위각 전달정렬 방식으로 정렬 수행이 가능하다. 여기서 자가정렬 방식은 초기 INGU 위치정보가 입력되어 있는 상태에서 관성센서에서 계측한 지구자전 각속도 및 중력가속도를 이용하여 Coarse Alignment와 Fine Alignment 수행하여 INGU 초기 레벨 및 방위각 정보를 추정하며, 3축의 자이로 및 수직방향 가속도의 Run-to-Run 바이어스를 추정하는 방식이다. 그리고 방위각 전달정렬 방식은 초기 INGU 위치정보가 입력되어 있는 상태에서 외부 시스템을 통해 계측된 INGU의 초기 방위각 정보를 INGU에 전달한 후 Coarse Alignment와 Fine Alignment를 수행하여 INGU 초기 레벨을 추정하며, 3축의 자이로 및 수직방향 가속도의 Run-to-Run 바이어스를 추정하는 방식이다.

IE 소프트웨어는 KF를 통해 자세 추정 및 3축의 관성센서 바이어스 추정을 수행하는 정렬방식으로써, 관성센서 오차 모델을 이산시간 Markov Process로 처리한다. 비록 INGU와 IE가 서로 다른 정렬 알고리듬이 사용되어도 적합한 IMU 오차 모델이 설정될 경우 IE와 INGU의 정렬을 통한 자세 및 관선셍서 바이어스 추정 결과는 동일해야 한다. IE 소프트웨어는 다양한 정렬 방식 옵션을 제공하며, INGU 정렬결과와 비교를 위해 적용한 정렬방식은 다음과 같다.

① IE 자가정렬

초기 자세에 대한 정보가 없는 상태에서 초기 위치에 대한 중력 가속도 및 지구자전 각속도 정보와 관성센서 데이터를 이용하여 초기 레벨 및 방위각을 추정하는 방법으로써, Coarse + Fine Alignment 수행 시간 및 초기 위치 값을 설정하여 정렬을 수행하는 방법이다.

② IE 전달정렬

이미 알고 있는 초기 자세 정보에 대한 정보를 IE에 전달하여 롤, 피치, 요 자세 데이터를 항법계산을 위한 초기 파라메터로 이용하는 방법이다. 이 정렬 모드에서 IE는 관성센서 바이어스 추정 및 장착 비정렬 각 등의 측정변수 오차 추정을 수행하지 않으므로, ZUPT(Zero Velocity Update) 기능을 이용하여 관성센서 바이어스 추정하는 과정이 요구된다. ZUPT 기능은 Fine Align과 유사하게 IE에서 적용된 KF 오차 모델

15차 상태변수를 추정하는 기능을 수행한다.

여기서 INGU 자가정렬과 IE의 자가정렬은 동일한 방식으로 처리 가능하지만, INGU의 방위각 전달정렬과 동일한 방식의 정렬방식을 IE에서 지원하지 않는다. 따라서 INGU의 방위각 전달정렬 결과와 IE 정렬 결과 비교를 위해 IE의 전달정렬 방식과 ZUPT 기능을 이용하여 INGU 정렬 방식과 유사한 정렬 방식을 설정하였다.

INGU는 외부 시스템에서 계측한 방위각 정보만을 INGU로 전달한 후 정렬을 수행을 통해 레벨 및 관성센서 바이어스를 추정하지만, IE에서는 방위각 정보만 전달하는 기능이 없으므로 3축 자세에 대한 정보를 전달하는 전달정렬 방식으로 구현하였고, INGU의 Fine Alignment 구간에서 ZUPT를 수행하여 관성센서 바이어스 추정을 수행하도록 하였다. 그리고 발사체 탑재되는 INGU는 비행 중 ZUPT를 실행할 수 없는 비행 조건에서 항법계산을 수행하므로, IE의 데이터 처리도 정렬 이후 항법구간에서 ZUPT 기능을 해제하여 항법 중 관성센서 바이어스 추정 갱신이 이루어지지 못하도록 설정하였다.

4. 시험 결과

본 장에서는 INGU 탑재 컴퓨터에서 계산한 정렬 및 항법계산 결과와 INGU의 관성센서 오차보상 모듈 출력 데이터를 이용한 IE 정렬 및 항법 결과 비교를 위한 시험에 대해 다룬다. 결과 비교를 위해 정적상태에서의 정렬 및 항법을 수행하였으며 동적상태에서의 주행항법 시험을 수행하였다.

정적상태 정렬 및 항법시험을 위해 자세 및 위치에 대한 기준 정보를 갖는 3축 모션 테이블에 INGU을 장착하여 시험을 수행하였다. 정렬 시험은 INGU 자가정렬 및 방위각 전달정렬에 대해 수행하였으며, 이 두 시험에서의 INGU 관성센서 데이터를 이용하여 INGU 관성계측부 오차모델이 적용된 IE 소프트웨어의 자가정렬 및 전달정렬을 수행하였다. 시험 구성은 그림 4와 같다.

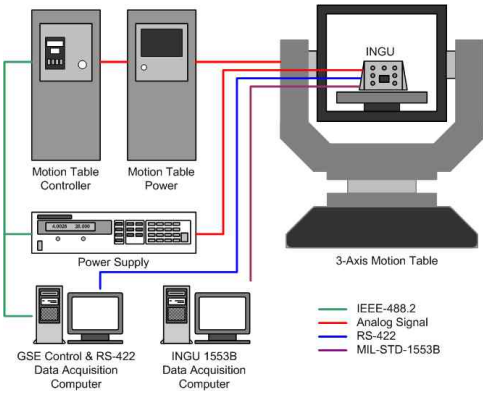


그림 4. 정적상태 정렬 및 항법시험 시스템 구성

4.1 자가정렬 결과

INGU 자가 정렬과 IE 자가 정렬에서의 자세 추정 및 관성센서 바이어스 추정 결과를 비교하기 위한 시험을 수행하였다.

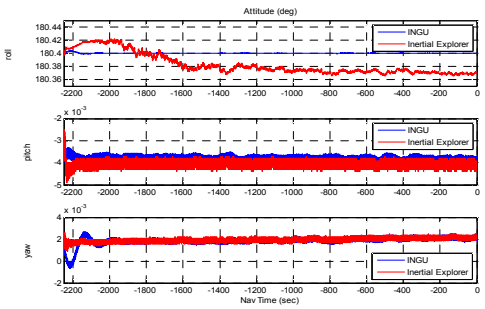


그림 5. 자가정렬 시 자세추정

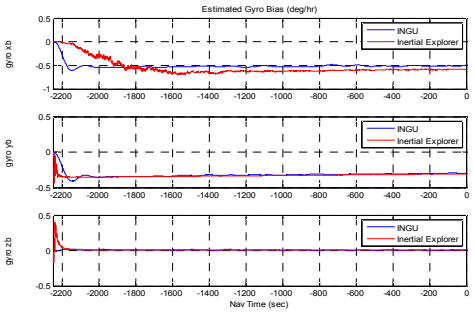


그림 6. 자가정렬 시 자이로 바이어스 추정

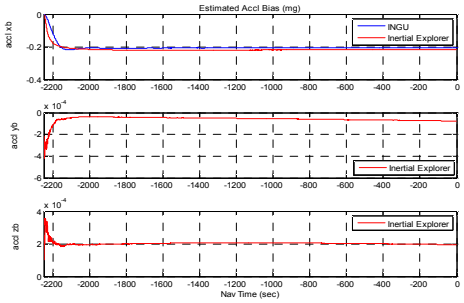


그림 7. 자가정렬 시 가속도계 바이어스 추정

표 2. INGU, IE 자가정렬계산 결과

Estimated Parameters		INGU	IE	Diff. INGU/IE
Attitude	Roll (deg)	180.3999	180.3694	0.0305
	Pitch (deg)	-0.0037	-0.0039	0.0002
	Yaw (deg)	0.0023	0.0023	0.0000
Gyro Run-to-Run Bias	rxb (deg/hr)	-0.496	-0.582	0.086
	ryb (deg/hr)	-0.302	-0.308	0.006
	rzb (deg/hr)	0.006	0.010	-0.004
Accel Run-to-Run Bias	axb (mg)	-0.205	-0.218	0.013
	ayb (mg)	N/A	-0.000	N/A
	azb (mg)	N/A	0.000	N/A

IE 소프트웨어에 설정된 INGU 관성센서 KF 오차모델을 통한 IE 자가 정렬계산과 INGU 탑재 컴퓨터 정렬 알고리듬에 의한 정렬계산 비교 결과 자세의 경우 방위각에서 약 0.03도의 추정 차이를 보였으며, 그 외 피치, 요축 자세는 동일한 값을 가짐을 확인하였다. INGU는 정렬계산 중 3축 자이로와 수직축 가속도계 Run-to-Run 바이어스를 추정하는데, IE와 INGU 관성센서 Run-to-Run 바이어스 추정결과 모든 센서 바이어스 추정값이 유사하게 나타났으며, X축 자이로와 가속도계 바이어스 추정값은 약간의 차이를 보였다. 수평축 가속도계 바이어스는 INGU에서 추정하지 않으므로 비교 대상에서 제외하였다.

INGU와 IE의 서로 다른 알고리듬을 통한 정렬 수행 결과 자세 및 센서 바이어스 추정값이 유사한 결과를 보이는 것을 통해 IE에 설정된 INGU 관성센서 모델이 적합함을 확인하였다.

그리고 방위각 및 롤 축 자이로 바이어스 추정 계산과정을 확인한 결과 INGU에 비해 IE 소프트웨어에 의한 방위각 및 바이어스 추정 방법이 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다. 이를 통해 INGU 탑재소프트웨어에 구현된 정렬 알고리듬이 KF에 의한 정렬방법보다 빠르고 정확한 정렬 결과를 제공함을 확인하였다.

4.2 전달정렬 결과

INGU 전달 정렬과 IE 전달 정렬에서의 자세 추정 및 관성센서 바이어스 추정 결과를 비교하기 위한 정렬시험을 수행하였다. 본 시험에서는 3축 모션테이블 자세정보로부터 획득한 방위각 정보를 INGU에 전달한 후 수평 자세 및 관성센서 바이어스 추정을 위한 방위각 전달정렬을 수행하였고, 여기서 획득된 관성센서 데이터를 IE 소프트웨어 전달 정렬 기능에 적용하여 정렬을 수행하였다.

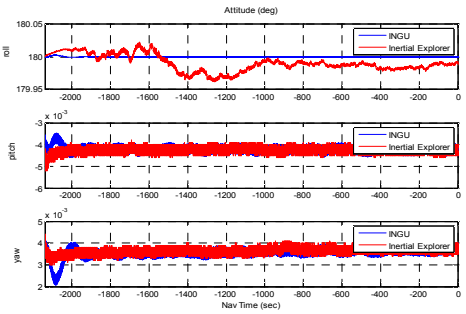


그림 8. 전달정렬 시 자세추정

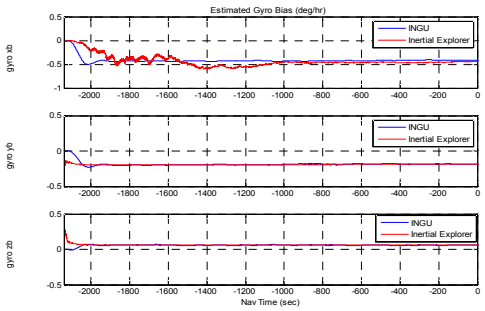


그림 9. 전달정렬 시 자이로 바이어스 추정

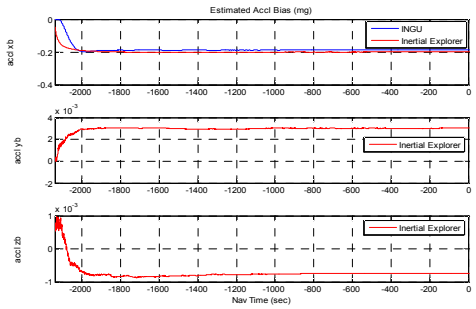


그림 10. 전달정렬 시 가속도계 바이어스 추정

표 3. INGU, IE 전달정렬계산 결과

Estimated Parameters		INGU	IE	Diff. INGU/IE
Attitude	Roll (deg)	179.9998	179.9923	0.0075
	Pitch (deg)	-0.0043	-0.0043	0.0000
	Yaw (deg)	0.0036	0.0036	0.0000
Gyro Run-to-Run Bias	rxb (deg/hr)	-0.420	-0.439	0.019
	ryb (deg/hr)	-0.186	-0.185	-0.001
	rzb (deg/hr)	0.061	0.062	-0.001
Accel Run-to-Run Bias	axb (mg)	-0.186	-0.198	0.012
	ayb (mg)	N/A	0.003	N/A
	azb (mg)	N/A	-0.001	N/A

전달정렬 시험 결과 INGU와 IE 소프트웨어의 자세 각 차이는 자가정렬 결과보다 작음을 확인하였고, 관성센서 Run-to-Run 바이어스 추정값도 거의 일치하는 값을 얻을 수 있었다.

여기서 IE 소프트웨어의 방위각 추정값이 입력된 방위값과 차이가 발생하는 이유는 IE 소프트웨어 자세 전달 이후 ZUPT 기능에 의해 관성센서 바이어스를 추정하는 과정에서 IE 소프트웨어가 3축의 자세 추정을 수행하면서 발생한 오차이다.

그리고 IE 소프트웨어 ZUPT 기능에 의한 관성센서 바이어스 추정값 수렴 시간을 확인 결과 INGU 탑재 소프트웨어의 정렬 알고리듬에 의한 관성센서 바이어스 추정 시간보다 수렴 속도가 늦음을 확인할 수 있다.

4.3 3축 각속도 모션 항법시험

정렬에서 추정된 관성센서 Run-to-Run 바이어스 보상 및 자세를 이용하여 항법계산을 수행하였다. 항법시험은 3축 모션테이블 위에 INGU를 탑재하여 수행하였으며, 정적 상태에서 정렬 수행 후 항법시작 이후 3축 각속도 명령을 인가하였다. 정렬과정부터 항법계산과정에서의 INGU를 관성센서 데이터를 IE에 적용하여 계산한 항법결과와 INGU 탑재 소프트웨어 항법 알고리듬에 의한 항법 결과를 비교하였다. IE 적용을 위해 정렬은 전달 정렬 방식으로 수행하였으며, INGU 정렬 구간 동안 ZUPT 기능을 활성화시켜 관성센서 바이어스를 추정하도록 하였다. 그리고 INGU 항법 시작 시점부터 ZUPT를 해제하여 관성센서 바이어스를 추정을 중단하였으며, 잔여 항법 오차 성분이 항법계산에 반영될 수 있도록 하였다.

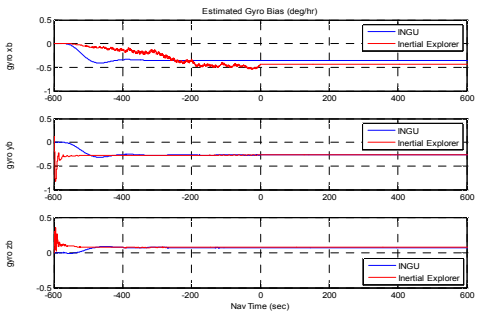


그림 11. 항법시험 정렬 시 자이로 바이어스 추정

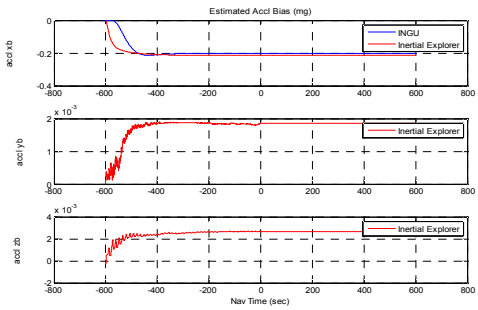


그림 12. 항법시험 정렬 시 가속도계 바이어스 추정

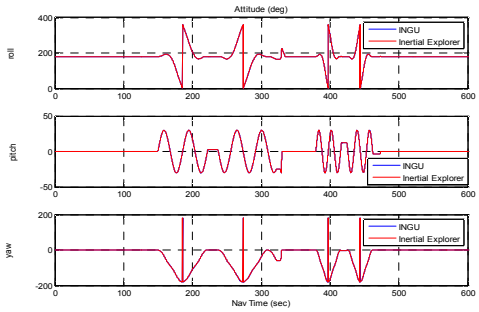


그림 13. 3축 각속도 모션 항법시험 시 자세

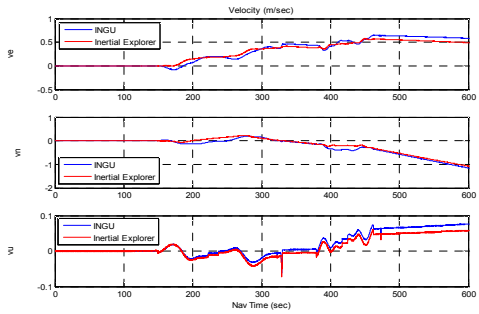


그림 14. 3축 각속도 모션 항법시험 시 속도

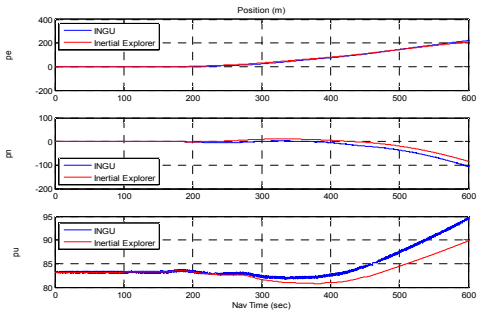


그림 15. 3축 각속도 모션 항법시험 시 위치

표 4. 항법시험 결과 (600sec)

	Angle(deg)		Velocity(m/s)		Position(m)	
INGU	Roll	0.0014	Ve	0.58	Pe	220
	Pitch	-0.0332	Vn	-1.15	Pn	-105
	Yaw	-0.0026	Vu	0.07	Pu	11.2
IE	Roll	-0.0076	Ve	0.49	Pe	209
	Pitch	-0.0309	Vn	-1.07	Pn	-83
	Yaw	-0.0032	Vu	0.05	Pu	6.3

IE 항법 계산과 INGU 탑재 소프트웨어에서 계산한 항법 계산 비교 결과 비록 작은 값이지만 각속도 입력 이후 속도와 위치 차이가 증가하였음을 알 수 있다. 동일한 관성센서 데이터를 이용한 두 계산에서 차이를 보이는 이유는 정렬 시 서로 다른 정렬 알고리듬에 의한 Run-to-Run 바이어스 추정값 차이에 의해 발생할 수 있으며, 각속도 입력에 따른 기계식 자이로의 온도 증가에 의한 바이어스 및 환산계수 변화에 의해 발생할 수 있다. 여기서 IE 소프트웨어는 항법 계산 과정 중 KF 시스템 모델을 통한 장착 비정렬각 및 자이로 환산계수, 바이어스, 가속도계 환산계수, 바이어스를 추정하여 보상된 관성계측정보를 이용하기 때문에 온도 변화에 의한 관성센서 환산계수 변화는 INGU와의 항법 차이를 발생하게 한다.

본 시험은 3축 모션테이블 위에서 수행되었으므로 이상적으로 위치는 변하지 않아야 하며, 속도는 0의 값을 가져야 한다. 시험 결과 INGU와 IE의 속도 및 위치는 항법시간에 따라 유사한 값을 보이며, 증가 경향이 유사함을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통해 IE 적용된 KF 상태변수 오차모델이 적합하게 설계되었음을 알 수 있다.

4.4 주행항법시험

관성센서의 모든 축 입력이 인가될 수 있는 환경에서의 항법시험 수행을 위해 지상항법차량에 관성항법유도장치를 탑재하여 항법시험을 수행하였다. 지상항법차량에는 RLG 시스템과 GPS, Odometer를 보조 센서로 사용하는 SIGMA30 복합항법시스템이 탑재되어 있으며, SIGMA30 초기 정렬 방위각 정보를 이용하여 INGU 초기 방위각을 입력하여 정렬 및 항법을 수행하였다. 주행 경로는 한국항공우주연구원 내 도로를 따라 2000초 이상의 항법을 수행하였으며, 항법시간 500초 정도에 차량을 정지하여 속도 및 위치 오차 증가 크기를 확인하였다. 그림 16~18.과 표 5.는 INGU와 IE를 통한 항법계산 결과를 나타낸다.

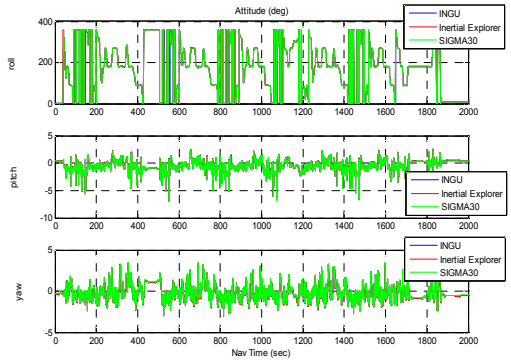


그림 16. 주행항법시험 시 자세

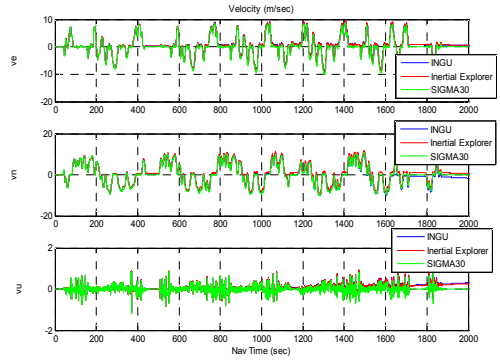


그림 17. 주행항법시험 시 속도

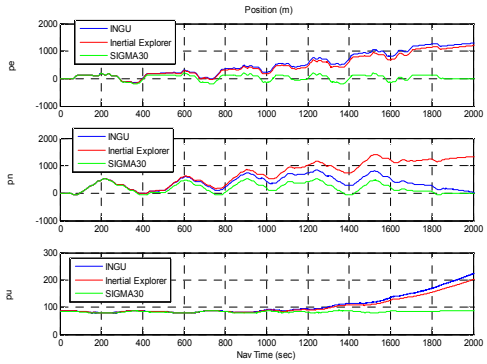


그림 18. 주행항법시험 시 위치

표 5. 주행항법시험 결과 (2000sec)

	Angle(deg)		Velocity(m/s)		Position(m)	
INGU	Roll	0.4542	Ve	0.46	Pe	1289
	Pitch	0.0265	Vn	-1.61	Pn	33
	Yaw	-0.0006	Vu	0.30	Pu	134
IE	Roll	0.4226	Ve	0.62	Pe	1203
	Pitch	0.0174	Vn	0.61	Pn	1329
	Yaw	-0.0001	Vu	0.26	Pu	112

본 시험에서의 INGU 정렬은 방위각 전달정렬 방식으로 수행하였으나, IE 정렬은 자가정렬 방식으로 수행하였다. 자가정렬방식을 선택한 이유는 IE 정렬을 전달정렬 방식으로 한 후 ZUPT를 수행하는 과정에서 초기 전달한 방위각 변화 발생으로 인해 항법 시작 시 INGU에서 계측된 방위각과 IE에서 추정한 방위각이 차이가 약 0.2deg 정도로 크게 발생하기 때문이다. 전달 정렬에서 자세차이는 지상항법차량 조건에 의해 발생할 수 있다. 지상항법시험에서는 차량에 의한 진동조건 및 차량 외부 바람과 사람 탑승에 의한 스웨이 운동 조건에서 정렬을 수행하므로 전달정렬을 수행하여도 ZUPT 과정 중 자세 추정값 및 바이어스 추정값이 변하게 된다.

IE의 자가 정렬을 통한 초기 방위각은 INGU 초기 방위각과 약 0.1deg 미만으로 발생하였다. INGU 방위각 전달정렬은 0.025deg 미만의 정확도로 수행되는 것이 비해 IE 자가 정렬을 통한 0.1deg 방위각 차이는 큰 방위각 오차로써, 이와 같은 방위각 오차는 주행시험에서 수평축 속도 및 위치 항법 오차를 증가시킨다.

이와 같이 IE 정렬 조건을 INGU와 동일하게 설정하지 못하는 한계로 인해 절대적인 항법계산 결과를 비교하기 어렵지만, 항법 수행 구간에서 SIGMA30 기준 IE의 항법오차가 발산하지 않으며, INGU와 IE의 항법오차 증가율이 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 이를 통해 모든 관성센서 입력이 주어진 조건에서 설정된 관성센서 오차모델이 적합함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 관성항법유도장치 탑재 컴퓨터에 구현된 정렬 및 항법 알고리듬 계산 결과와 IE 소프트웨어를 통한 후처리 항법계산 결과를 비교하였다. 동일한 관성센서 데이터를 이용한 항법계산 비교를 위해 IE 소프트웨어에 적용 가능한 IMR 데이터를 생성하였고, 정적상태에서의 정렬시험 및 확률적 오차추정 방법 중 하나인 Allan Variance를 통해 관성센서 KF 상태변수 오차모델을 설정하였다. IE 소프트웨어에 적용된 관성센서 오차모델의 유효성 확인을 위해 INGU를 3축 모션테이블 위에 장착한 상태에서 INGU와 IE의 자가 정렬 및 전달정렬 시험 결과를 비교하였으며, 3축 모션테이블 위에서 각속도 모션인가 시험 및 주행항법시험을 통한 항법계산 결과를 비교하였다. INGU와 IE의 서로 다른 정렬 알고리듬을 통한 자세 추정 및 관성센서 Run-to-Run 바이어스 추정 결과가 일치함을 확인하였고, 각속도 모션 조건 및 주행항법 조건에서의 IE 항법계산 결과 상태변수 오차 모델에 의한 발산현상이 발생하지 않았으며, INGU와 유사한 항법 계산 결과를 보임을 확인하였다. 이를 통해 IE에 적용한 관성센서 오차 모델이 유효함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Novatel, *Inertial Explorer User Guide*, OM-20000106, 2008.02.15
2. 김정용, 오준석, 노웅래, Allan Variance와 PSD 기법을 이용한 관성센서 정적 안정도 성능분석, 한국항공우주연구원 기술문서, 2008.12.18
3. N. El-Sheimy, H. Hau, and X. Niu, "Analysis and Modeling of Inertial Sensor Using Allan Variance," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol 57, no. 1, Jan. 2008, pp. 140-149.
4. 송은정, 김정용, 오준석, KSLV-I 관성항법유도시스템의 초기정밀정렬 알고리듬 성능분석, 한국항공우주연구원 기술문서, 2009.12.12
5. 조현철, 김정용, 김상원, 노웅래, 최형돈, 조광래, “KSLV-I 관성항법유도시스템의 교정 및 성능 시험,” 제6회 우주발사체기술 심포지움, 2005.04.11
6. 조현철, 김정용, 오준석, “동조자이로와 가속도계의 파라메터 검증 시험의 설계와 결과,” 2006 제어자동화시스템 심포지엄, pp. 324-329, 2006.06, KINTEX.
7. S. Kennedy, D. Cosandier, J. Hamilton, "GPS/INS Integration in Real-time and Post-processing with NovAtel’s SPAN System," IGNSS Syposium 2007, 2007.12.4.