

혼합정합 전달정렬시 해상항체의 가관측성 향상조건에 관한 연구

A Study of Observability Enhancement by Matching Methods at Sea

° 김경주*, 고영웅**, 박찬웅***

*원광대학교 전자공학과 (Tel: 50-6713; Fax:50-6713; E-mail: kimsclub@electro.wonkwang.ac.kr)

**원광대학교 전자공학과 (Tel: 50-6713; Fax:50-6713; E-mail: frog@electro.wonkwang.ac.kr)

***원광대학교 전자공학과 (Tel: 50-6713; Fax:50-6713; E-mail: cupark@engin.wonkwang.ac.kr)

Abstracts Often an INS has to be aligned in navigation. In these cases it is necessary to obtain some reference information on the state of the aligned INS(Slave) such as its position, its velocity of its angular rate. Usually the reference information is velocity which is supplied by another reference INS. In the alignment state the velocity computed by the reference INS(Master) is compared with that computed by the slave INS and the difference which is indicative of the slave misalignment with respect to the master, is processed by a Kalman filter which estimates misalignment as well as the slave gyro and accelerometer error states.

The operation of aligning a slave INS with a master INS comparing quantities computed by both INS is known as transfer alignment. The delivery vehicle performs error. these maneuvers enable the TA Kalman filter to separate between the tilt errors and the accelerometer biases which otherwise are unobservable. The basic objective this paper is to study the observability enhancement by ship's maneuvering and matching methods during transfer alignment at sea.

Keywords Navigation, Observability, Gyro,

1. 서론

전달정렬이라 함은 주 INS(Inertial Navigation System)의 자세를 기준 정보로 하여 종 INS의 자세를 주 INS의 자세에 일치시키는 과정을 말한다. 이러한 전달정렬 기법은 정합방법에 따라 여러 종류로 구분되어 질 수 있으며 같은 정합 방법을 사용한다 하더라도 해상 혹은 공중 등의 항체 종류에 따라 정렬 수행능력에 많은 차이가 있다. 해상 항체에서는 비행체에 비해 속도변화가 용이하지 못하기 때문에 각정합이 속도정합에 비하여 전달정렬 수행능력이 상대적으로 우수하다. 그러나 각정합 방법은 장차 비정렬오차가 존재하며 이로 인하여 자세오차 추정에 영향을 받는다. 따라서 속도정합 방식과 각정합 방식을 조합한 혼합정합 방식으로 전달정렬을 수행한다면 오차추정 성능의 향상을 기대할 수 있다. 정렬 수행능력은 각각의 오차를 상태변수로 하는 칼만 필터를 구성한 후, 시스템의 오차 추정 성능과 직접적인 관계를 가지고 있는 상태변수들의 가관측성을 조사하여 관측성의 향상추이를 알아보고 이 결과를 실제 공분산 시뮬레이션 결과와 일치하는지 비교함으로써 분석 가능하다.

본 논문에서는 주 INS가 탑재된 항체가 해상항체라 가정하고 속도나 각정합에 비하여 추정성능이 우수하리라 기대되는 혼합정합 방법을 적용하여 전달정렬 시스템의 칼만 필터를 구성한 후 그 시스템의 가관측성 분석 결과를 토대로 칼만 필터의 추정성능을 예측해 보았다. 그리고 실제 공분산 시뮬레이션을 통하여 가관측성이 향상되는 시점에서의 오차추정 성능을 비교 분석 하였다. 또한 동일 조건을 속도정합과 각정합에도 적용하여 위의 결과와 비교하였으며 비교 결과 혼합정합의 추정성능이 속도정합이나 각정합 방법에 비하여 비하여 더욱 향상된 결과로 나타남을 확인하였다.

2. 오차 방정식

2.1 속도 및 자세 오차 방정식

동체좌표계로 표현되는 종INS의 f^b 와 항법좌표계로 표현되는 속도계산식(1)과 동체좌표계로부터 항법좌표계로 변환되는 좌표 변환행렬의 미분식(2)로부터 속도오차와 자세오차계산식을 얻는다.

$$\dot{V}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n \quad (1)$$

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b \quad (2)$$

속도와 자세계산식에 자이로나 가속도계오차와 계산오차들이 포함될 경우, 섭동기법(perturbation method)을 이용하여 선형화된 식(3), (4), (5), (6)을 얻는다

$$\dot{v}^n = -(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n + f^n \times \phi^n + C_b^n B^b \quad (3)$$

$$\dot{\phi}^n = \Gamma \cdot v^n - \omega_{in}^n \times \phi^n + C_b^n \epsilon^b \quad (4)$$

$$\dot{B}^b = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}^b = 0 \quad (6)$$

또한 항체가 강체라고 가정한다면 주INS와 종INS사이에는 C_m^n, C_b^m 및 C_b^n 의 세 가지 좌표변환 행렬이 존재하고 주 INS로부터 전달되는 종 INS의 초기 자세 오차를 보정하는 방법을 이용하면 속도와 자세 계산은 앞의 속도 정합과 동일하며 주 INS의 좌표계와 종 INS의 동체좌표계사이의 좌표변환 행렬은 장차 비정렬 행렬이 되며, 이는 식(7)의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} V^m &= C_b^n V^b \\ V^m &= C_n^m V^m = C_n^m C_b^n V^b = C_b^m V^b \\ \therefore C_b^m &= C_n^m C_b^n \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)의 양변을 미분하여 얻어진 장착 비정렬에 대한 동적 방정식은 식(8)이 되고, 주 INS와 종 INS가 강체에 장착(mount)되었다고 가정하였으므로 주 INS에 대한 종 INS의 상대적인 각속도는 영(Zero)이며 장착비정렬 오차는 식(9)로 표현된다.

$$\dot{C}_b^m = C_b^m \Omega_{mb}^l \quad (8)$$

$$\dot{\theta}^m = 0 \quad (9)$$

주 INS의 계산되는 항체속도에는 오차가 없다고 가정하면 종 INS에서 계산되는 항체의 속도와 기준이 되는 주 INS의 항체속도의 차를 측정하는 방정식은 속도정합 측정방정식과 동일한 식(10)을 얻는다.

$$z = \hat{V}_{slave}^n - \hat{V}_{master}^n = v^n + \nu \quad (10)$$

여기서 H는 다음과 같다.

$$H = [I \ 0 \ 0 \ 0] \quad (11)$$

각정합 방식에서와 같은 방법으로 섭동기법을 이용하여 아래의 식(12)로부터 종 INS와 항법좌표계사이의 비정렬 자세오차(misalignment angle)를 측정하는 방정식을 유도할 수 있다[5].

$$z = \hat{C}_m^n \hat{C}_b^m \hat{C}_n^b - I \quad (12)$$

식(12)에 포함되어 있는 좌표변환 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{C}_m^n = (I - \Psi^n) C_m^n \quad (13)$$

$$\hat{C}_b^m = (I - \Theta^m) C_b^m \quad (14)$$

$$\hat{C}_n^b = C_b^n (I + \Phi^n) \quad (15)$$

주 INS와 항법좌표계사이의 자세 오차를 무시할 수 있다면 위의 식(13), (14), (15)를 식(12)에 대입하여 식(16)의 측정방정식을 유도할 수 있다.

$$z = \phi^n - C_m^n \theta^m \quad (16)$$

여기서 H는 다음과 같다.

$$H = [O \ I \ 0 \ 0 \ -C_m^n] \quad (17)$$

이제 식(10)과 (17)을 결합하여 최종적인 혼합정합 방식의 측정방정식을 얻는다.

2.2 칼만 필터 구성

오차추정을 위한 칼만 필터는 위의 오차방정식을 이용하여 15차의 상태변수를 갖는 식(18), (19)로 구성되어지며 각 상태변수들은 식(20), (21)이고 표 1.에서 각 오차성분에 대한 상태변수를 표시 하였다.

$$\dot{x} = Fx + w \quad (18)$$

$$z = Hx + \nu \quad (19)$$

$$x = [v^T \ \phi^T \ B^T \ \varepsilon^T \ \theta^T]^T \quad (20)$$

$$z = \begin{bmatrix} z_v \\ z_\phi \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서 F 및 H는 식(22), (23)과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & C_b^n & 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} & 0 & C_b^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$H = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & -C_m^n \end{bmatrix} \quad (23)$$

시스템 행렬 (22)에 사용되어진 보조행렬(sub-matrices)은 다

음과 같다.

$$F_{11} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega_D & -\Omega_E \\ -\Omega_D & 0 & \Omega_N \\ \Omega_E & -\Omega_N & 0 \end{bmatrix} \quad F_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -f_D & f_E \\ f_D & 0 & -f_N \\ -f_E & f_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan L}{R} & 0 \end{bmatrix} \quad F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_D & -\omega_E \\ -\omega_D & 0 & \omega_N \\ \omega_E & -\omega_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} C\alpha \cdot C\gamma & C\alpha \cdot S\beta \cdot S\gamma - S\alpha \cdot C\beta & C\alpha \cdot C\beta \cdot S\gamma + S\alpha \cdot S\beta \\ S\alpha \cdot C\gamma & S\alpha \cdot S\beta \cdot S\gamma + C\alpha \cdot C\beta & S\alpha \cdot C\beta \cdot S\gamma - C\alpha \cdot S\beta \\ -S\gamma & S\beta \cdot C\gamma & C\beta \cdot C\gamma \end{bmatrix}$$

여기서

$$\Omega_N = (2\Omega + \dot{\lambda}) \cos L, \quad \omega_N = (\Omega + \dot{\lambda}) \cos L$$

$$\Omega_E = -\dot{L}, \quad \omega_E = -\dot{L}$$

$$\Omega_D = -(2\Omega + \dot{\lambda}) \sin L, \quad \omega_D = -(\Omega + \dot{\lambda}) \sin L$$

이다.

표 1. 칼만 필터 상태변수

Table 1. The state values of Kalman filter

속도오차	U_N, U_E, U_D
자세오차	ϕ_N, ϕ_E, ϕ_D
가속도계 바이어스 오차	B_x, B_y, B_z
자이로 드리프트 오차	$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$
장착 비정렬 오차	$\theta_x, \theta_y, \theta_z$

3. 가관측성 분석

가관측성 분석은 상태변수들을 칼만 필터로 추정하는 과정에서 각 상태변수의 관측성 여부를 분석하는 기초작업이 된다. 시불변 계통에서의 가관측성 분석은 단순히 가관측 행렬을 구성하여 분석할 수 있지만 INS 오차 방정식과 같은 시변 시스템에서는 가관측성 분석이 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 PWCS 방법[2]을 이용하여 가관측성 분석을 하였다. PWCS 방법을 이용한 시변계통의 가관측성 분석방법은 다음 정리1.에 요약되어 있으며 만약 시변 시스템이 Piece-wise 시불변 시스템으로 대체 될 수 있다면 정리 1.의 SOM(Stripped Observability Matrix)를 구성하여 가관측성 분석을 할 수 있다.

정리1.

만약 주어진 시스템행렬 F_j 와 가관측행렬 \tilde{Q}_j 가 에 대하여

$Null(Q_{TOM,j}) \subset Null(F_i), 1 \leq i \leq j$ 을 만족하면

$Null(Q_{TOM,j}) \subset Null(Q_{SOM,j})$ 이고

$Rank(Q_{TOM,j}) \subset Rank(Q_{SOM,j})$ 이 된다.

여기서

$$\tilde{Q}_i^T = [H_i^T \mid (H_i, F_i)^T \mid (H_i, F_i^2)^T \mid \dots \mid (H_i, F_i^{n-1})^T] \quad (24)$$

$$Q_{TOM,j} = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_{1,j}^T \\ \tilde{Q}_{2,j}^T \\ \vdots \\ \tilde{Q}_{j,j}^T \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$Q_{SOM,j} = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_1 \\ \tilde{Q}_2 \\ \vdots \\ \tilde{Q}_n \end{bmatrix} \quad (26)$$

$Q_{TOM,j}$ TOM(구간 j 번째에서의 total observability matrix)

$Q_{SOM,j}$ SOM(구간 j 번째에서의 stripped observability matrix)이다.

3.1 가관측 행렬 구성

PWCS 가관측성 분석방법을 위하여 가관측 행렬을 순항구간, 가속도구간(북측, 동측, 수평측), 자세변화구간으로 나누어 각각의 구간에 대하여 다음과 같은 방법으로 구성한다.

먼저 시스템 행렬 F와 관측행렬 H를 이용하여 식(27)을 구성한다.

$$O^T = [H^T \quad (HF)^T \quad (HF^2)^T \quad \dots \quad (HF^{n-1})^T] \quad (27)$$

식(27)을 행운용(elementary row manipulation)을 통하여 식(28)의 최종적인 가관측 행렬을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} I & O & O & O & O \\ O & I & O & O & -C_m^n \\ O & F_{12} & C_s^n & O & O \\ O & F_{22} & O & C_s^n & O \end{bmatrix} \quad (28)$$

각각의 구간에서 구성된 SOM을 이용하여 초기상태에서 선형 가속 또는 자세변화로의 천이상태를 고려하여 식(26) 형태의 SOM을 구성하고 그 SOM의 계수를 결정한다. 구성된 SOM에 상태변수 행렬을 곱하면 가관측한 상태변수와 조합된 상태변수로 분리되어지는 식을 얻는다.

3.2 속도 및 자세변화에 따른 가관측성 분석

초기 순항상태에서의 가관측행렬을 구성하고 3.1 에서 기술한 방법으로 가관측 행렬을 구성한 후 표 2. 에 관측 가능한 상태변수를 나타내었다.

표 2. 순항상태에서의 가관측한 상태변수
Table 2. Observable state values in cruise

$u_N, u_E, u_D, B_D, \phi_N - \theta_X, \phi_E - \theta_Y, \phi_D - \theta_Z, g\phi_E + B_N,$ $-g\phi_N + B_E, \omega_D\phi_E - \omega_E\phi_D + \varepsilon_N, -\omega_D\phi_N + \omega_N\phi_D + \varepsilon_E,$ $\omega_E\phi_N - \omega_N\phi_E + \varepsilon_D$
--

표 2.에서와 같이 혼합정합에서는 각정합에서 나타나지 않던 속도 오차 성분이 가관측한 항으로 나타나게 되어 속도정합이나 각정합에 비하여 향상된 가관측성을 보이고 있다. 그러나 각정합에서의 마찬가지로 오차각 성분은 속도나 각 정합에서의 마찬가지로 관측 가능하지 못한 항으로 나타나며 이 오차각 성분들이 장차 비정렬 오차성분과 분리되게 하기 위해서는 항체에 자세나 가속도의 변화를 야기 시켜야만 된다. 따라서 본 논문에서는 항체가 순항상태로부터 선형가속상태 또는 자세 변화상태로 항체의 속도나 자세가 변화한다고 가정하고 가관측성을 분석한다. 먼저 항체가 선형가속상태로 천이될 때 북측 가속, 동측 가속, 수평측 가속의 세 가지 경우로 구분하여 구성된 SOM(stripped observable matrix)을 각 천이상태에 따라 결합 구성하여 그 행렬의 행조작으로 구한 가관측한 항들은 표 2.에 나타나있다. 여기서 ω_{en}^n 은 상대적으로 적은 변화량을 갖기 때문에 무시하였다.

분석 결과 표 3.에서와 같이 SOM의 계수는 14로 증가하였으나 순항 상태에서 가속을 인가한 방향의 오차각 성분이 분리되지 않아 인가방향의 오차각은 관측이 불가능한 것으로 나타났다.

수평 방향으로 가속도를 인가한 경우 양측으로 가속을 받기 때문에 북측이나 동측과 같이 단일방향으로 가속도를 가한 경우와 SOM의 계수는 같지만 실제 관측 가능한 항들이 각 상태변수들의 결합형태로 나타나기 때문에 단일방향 가속경우에 비해 상대적으로 적게 나타났다.

2-위치 정렬 방법(2-position alignment)은 방위각(α), 롤각(β), 피치각(γ)의 자세 변화로 인해 좌표변환 행렬이 변화되기 때문에 가관측성이 향상된다. 분석결과 2-위치 정렬을 한 경우의 SOM의 계수는 15로 증가하고, 시스템의 모든 상태 변수가 가관측한 항으로 분리되는데, 이때는 변화하는 자세각 즉 방위각, 롤각, 피치각이 360°의 배수가 아니어야 한다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

총 시뮬레이션 시간은 200초이며 속도 오차는 1ft/sec(σ -value), 자세 오차는 5 degree(σ -value), 가속도 바이어스 오차는 100 μ g(σ -value), 자이로 부유 오차는 1 deg/hr(σ -value), 속도측정오차는 0.1ft/sec(σ -value), 방위각과 롤각의 자세 측정 오차는 0.3°, 피치각의 자세 측정오차는 0.1°로 하였다. 항체가 처음 100초간은 순항 상태를 지속하다 그 후 100초 동안은 항체의 가속도나 자세를 변화시켜 정렬을 하는 것으로 시뮬레이션을 수행하였다.

표 3 선형 가속 구간에서의 가관측한 항
Table 3. Observable state values of linear acceleration step

북측 가속 인가	동측 가속 인가	수평측 가속 인가
u_N, u_E, u_D	u_N, u_E, u_D	u_N, u_E, u_D
B_N, B_D	B_E, B_D	B_D
ϕ_E, ϕ_D	ϕ_N, ϕ_D	ϕ_D
ε_N	ε_E	θ_Z
θ_Y, θ_Z	θ_X, θ_Z	$\phi_N - \theta_X$
$\phi_N - \theta_X$	$\phi_E - \theta_Y$	$\phi_E - \theta_Y$
$-g\phi_N + B_E$	$g\phi_E + B_N$	$g\phi_E + B_N$
$\omega_E\phi_N + \varepsilon_D$	$\omega_D\phi_E + \varepsilon_N$	$-g\phi_N + B_E$
$-\omega_D\phi_N + \varepsilon_E$	$-\omega_N\phi_E + \varepsilon_D$	$-f_E\phi_N + f_N\phi_E$
		$\omega_D\phi_E + \varepsilon_N$
		$-\omega_D\phi_N + \varepsilon_E$
		$\omega_E\phi_N - \omega_N\phi_E + \varepsilon_D$
Rank=14	Rank =14	Rank=14

4.1 가속도 변화를 이용한 시뮬레이션

그림 1은 혼합 정합에서 가속도 변화를 이용한 정렬을 한 경우에 대한 공분산 시뮬레이션을 통한 북측 속도 오차 추정 상태를 보인 것이다.

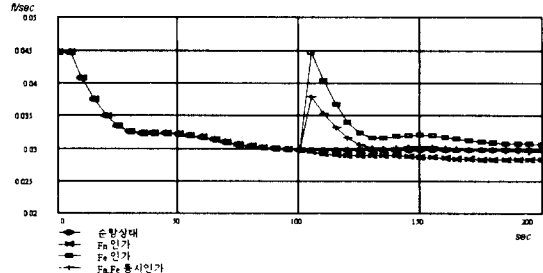


그림 1. 북측 속도오차

Fig. 1. North velocity error

시뮬레이션 결과에서 보면 가속도를 인가한 시점에서 가속도

인가방향의 속도오차는 자세오차로 인하여 상대적인 속도오차의 증가를 유발 이를 관측함으로써 가관측성의 향상효과로 나타나고 있다. 그림 2는 방위각 오차 추정능을 나타내고 있으며 가관측성 분석에서 결과와 동일하게 방위각이 가관측하게 되어 추정능력이 급격히 향상됨을 볼 수 있다. 하지만 실제 해상 항체에서는 시뮬레이션과 같은 조건의 가속도를 인가하기가 힘들기 때문에 그림 2와 같은 추정성능은 기대하기가 힘들 것으로 생각된다.

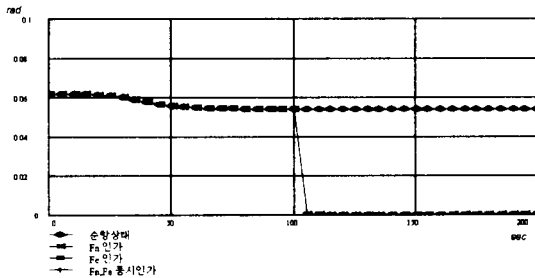


그림 2. 방위각 자세 오차
Fig. 2. Azimuth angle error

4.2 자세 변화를 이용한 시뮬레이션

자세 변화를 이용한 정렬시 속도오차 및 방위각 자세 오차의 추정 성능은 그림 3, 그림 4, 와 같다.

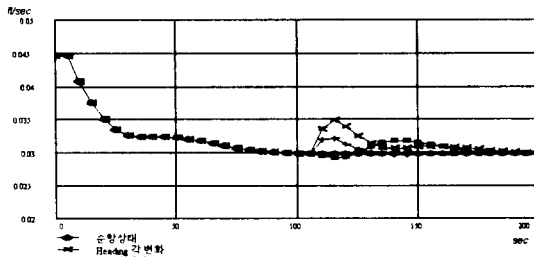


그림 3. 북측 속도 오차(자세변화)
Fig. 3. North velocity error(Angle change)

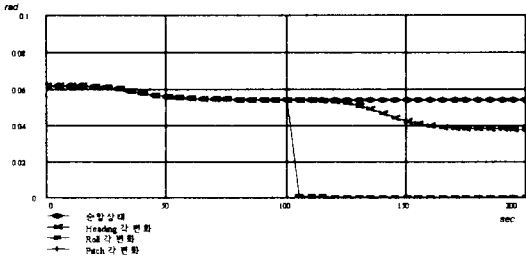


그림 4. 방위각 자세 오차(자세변화)
Fig. 4. Azimuth angle error(Angle change)

자세 변화를 시킬 경우 혼합정합에서는 모든 자세변화에 대하여 방위각 오차성분의 추정성능이 향상됨으로써 가관측성 분석시 완전 가관측한 결과와 동일함을 보이고 있다. 그러나 피치각이나 롤각에 비하여 헤딩각의 변화는 상대적으로 적은 추정성능을 보임을 알 수 있다. 이것은 가속도를 이용한 방법에서의 수평측(북측과 동측동시인가)가속도 인가시와 같은 현상으로 나타나며 속도오차가 단일방향에서 증가되는 것이 가관측성 향상에 도움이 된다는 것을 알 수 있다.

4.3 항체의 고유운동을 이용한 시뮬레이션

위의 시뮬레이션 결과는 가관측성 분석결과를 확인하기 위한 시뮬레이션이며 실제 항체에 적용하기에는 어렵다 따라서 실제

해상에서의 항체의 고유운동을 9초 주기와 6°의 진폭으로 변화하는 Rolling Motion 과 6초의 주기로 5°의 진폭 변위를 갖는 Pitching Motion으로 가정하고 이에 대하여 속도정합, 각정합, 혼합정합방법에 의한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 5에 나타내었으며 그림에 나타난 것과 같이 속도정합방법에 비하여 혼합정합 방법에서 방위각 추정 성능이 우수한 결과로 나타나고 동측, 북측 자세오차 성분은 각정합에 비하여 추정성능이 우수하게 나타났다.

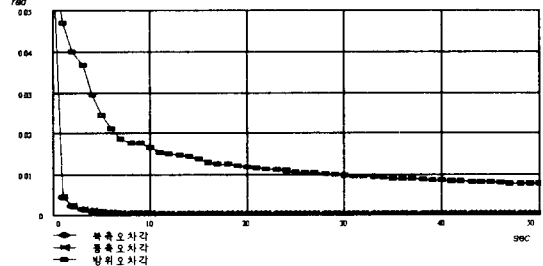


그림 5. 속도 및 각정합에서의 오차각추정
Fig. 5. Error angle estimation

5. 결론

본 논문에서는 해상에서 이동하는 항체에 대하여 속도 정합, 각정합, 그리고 두 가지 방법이 조합된 혼합정합 방법으로 초기 전달 정렬 특성을 가관측성을 분석하고 공분산 시뮬레이션을 통하여 제성능을 고찰 하였다. 항체가 해상항체라는 특수성을 고려할 때 항체의 가속도 변화를 인가하기 어렵기 때문에 속도정합 방법보다는 각정합방법이 오차추정 성능이 우수하지만 각정합은 master INS와 slave INS사이에 장차 비정렬 오차가 존재하여 각 항들의 가관측성을 낮게하고 속도오차가 발산하여 추정하기 힘들고, 반면 속도정합은 레버암(lever-arm)효과가 존재하여 이를 보상에 주어야 하는 단점이 있다. 시뮬레이션 결과에서와 같이 방위각 오차 추정성능이 좋은 각정합방법과 수평오차각 추정성능이 좋은 속도정합 방법을 혼합한 혼합정합방법이 해상항체에 대한 전달정렬 수행하는데 있어서 좋은 성능을 나타내었으며 이를 수행하기 위해 레버암 효과나 장차비정렬 오차보정 등의 연구가 더욱 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Kenneth R. Britting. *Inertial Navigation Systems Analysis*, Wiley-Interscience, NewYork, 1971.
- [2] I.Y. Bar-Itzhack & Boaz Porat "Azimuth Observability Enhancement During Inertial Navigation Systems In-Flight Alignment", *J. Guidance and Control* Vol.3 No.4, pp 337-344, 1980
- [3] D. Goshen-Meskin & I.Y. Bar-Itzhack "Observability Analysis of Piece-Wise Constant Systems-Part 2", *IEEE on AES*. Vol.28. No.4, pp.1068-1075, 1992,
- [4] Jang Gue Lee, Chan Gook Park, Heung Won Park, "Multiposition Alignment of Strapdown Inertial Navigation Systems", *IEEE on AES*. Vol.29. No.4, pp.1323-1328, 1993
- [5] 송기원, 전창배, 김현백, "스트랩다운 관성항법장치에의 각을 이용한 초기전달 정렬기법", '93 한국자동제어 학술회의 논문집, pp.29-33, 1993