

Performance Analysis of Transfer Alignment for Velocity & Angle Matching and Angular Rate & Acceleration Matching

°양철관[†], 심덕선[‡]

† 중앙대학교 제어계측공학과(Tel: 820-5329, Fax: 825-1585, E-mail: ckyang@jupiter.cie.cau.ac.kr)

‡ 중앙대학교 제어계측공학과(Tel: 820-5329, Fax: 825-1585, E-mail: dshim@jupiter.cie.cau.ac.kr)

Abstracts Transfer alignment is the process of initializing attitude of slave INS using the data of master INS. This paper presents the performance analysis of transfer alignment at sea using covariance analysis method. Velocity & angle matching and angular rate & acceleration matching are used for analysis, and the performance of two matching methods are compared. We propose a new method for angular rate & acceleration matching. Under the assumption of accurate modeling of ship flexure, the performance of transfer alignment time and accuracy is improved very much for the new method.

Keywords Transfer Alignment, Inertial Navigation System

1. 서론

전달정렬은 기준이 되는 정밀한 주(master) INS(관성항법시스템)의 정보를 이용하여 상대적으로 정밀도가 떨어지는 종(slave) INS의 자세각을 정렬시키는 과정을 말한다.

선박에서 미사일을 발사할 경우 선박의 INS는 주 INS이며 미사일의 INS는 종 INS이다. 미사일이 발사된후 목표에 정확히 도달하기 위해서는 발사 직전의 자세를 정확히 아는 것이 필요한데 미사일에 사용되는 INS는 중급의 INS이므로 정확한 자세를 알기 어렵다. 그러므로 선박의 고급 INS의 출력을 이용하여 미사일의 자세를 추정하는 것이다.

최근까지 전달정렬에 관한 연구는 비행체를 대상으로한 연구가 주류를 이루고 있으며 선박의 전달정렬에 관한 연구는 별로 없는 실정이다. 그러나 비행체와 선체는 그 구조가 상당히 달라서 구조의 유연성에 의한 영향이 상당히 다르고 운항 조건이 다르므로 전달정렬 문제는 양자간에 상당히 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 선체에서의 전달정렬 문제를 다루고자 한다.

선체를 대상으로한 전달정렬에는 장착 비정렬 오차, 동적 정렬 오차, 지렛대 효과, 측정 오차가 주요 오차원이다. 장착 비정렬 오차는 주 INS와 종 INS 좌표계 사이의 고정 자세각 오차를 말한다. 동적 정렬 오차에는 배의 유연성과 배의 변형이 있다. 배의 유연성에 의한 오차는 배가 강체가 아닌데 기인하는 현상으로 파도나 바람 뿐만 아니라 엔진 등에 의한 배의 고유진동에 의해서도 일어난다. 배의 변형은 태양열이나 배의 선적 상태, 전투에 의한 배의 손상, 배의 노화 등에 의하여 발생하는 오차이다. 지렛대 효과는 주 INS와 종 INS의 거리가 떨어져 있으므로 회전이 일어날 때 측정되는 가속도가 달라짐으로 해서 생기는 오차이다.

본 연구에서는 주요 오차 요인인, 장착 비정렬 오차, 지렛대 효과, 배의 유연성을 모델링하여 시스템 오차 모델을 구하고 위의 오차 요인을 포함한 전체 모델에 대하여 속도 및 각정합 방

법을 사용하여 전달정렬의 성능을 분석한다. 또한 장착 비정렬각 모델과 유연성에 의한 각 모델을 시스템 모델로 하고 각속도 및 가속도정합을 이용하여 전달정렬의 성능을 분석한다.

각속도 및 가속도정합 방법은 주 INS와 종 INS의 상대적인 비정렬각(장착 비정렬각+유연성에 의한 각)을 추정하여 종 INS의 자세를 결정하는 방법이다. 이 논문에서는 각속도 및 가속도정합에 대하여 두가지 방법을 제시하였는데 기존의 방법과 이 논문에서 제시하는 새로운 각속도 및 가속도정합을 공분산 해석을 통하여 서로 비교한다. 또한 속도 및 각정합과 각속도 및 가속도정합도 공분산 해석을 통하여 서로 비교 한다. 선체의 운항 조건으로는 가관측성이 좋은 원형 계측을 택하였고 실제와 비슷한 파도의 영향을 분석하기 위하여 파도에 대한 배 운동을 3차 가우스 마코프 프로세스로 모델링 하였다. 파도 영향에 의한 선체의 운동은 잔잔한 바다일 경우의 수평축 자세 운동만을 고려하기로 한다. 주 INS는 김블드 관성항법장치를 사용하고 종 INS는 중저급의 스트랩다운 관성항법장치를 사용한다.

2. 속도 및 각정합

속도 및 각정합은 주 INS와 종 INS의 출력중 속도와 자세를 비교하는 방법으로 속도정합, 각정합 또는 위치정합보다 성능이 우수한 정합방법이다.

이 절에서는 가속도계 바이어스 오차와 자이로 부유 오차, 지렛대거리 오차, 선체 유연성에 의한 오차를 모두 포함한 칼만필터(24차)의 오차 모델을 구성한다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t) \quad (1)$$

$$z(t) = H(t)x(t) + v(t)$$

여기서 $F(t)$ 는 시스템 행렬로서 상태변수의 오차 모델에 해당하며 구성은 식(2)와 같다[4]. 구성된 칼만필터에서 공정잡음 $w(t)$ 및 측정잡음 $v(t)$ 는 서로 상관관계가 없으며 (uncorrelated) 각각 영평균(zero mean)을 갖는 백색잡음으로 가정한다.

*이 연구는 국방 과학 연구소와 서울대학교 자동제어특화연구센터의 지원에 의한 것임

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & C_b^n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} & 0 & C_b^n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{87} & F_{88} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F_{11} = -(2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times, \quad F_{12} = f^n \times, \quad F_{22} = -\omega_{in}^n \times$$

$$F_{87} = \text{diag}\{-w_{NX}^2, -w_{NY}^2, -w_{NZ}^2\}$$

$$F_{88} = \text{diag}\{-2\zeta_X w_{NX}, -2\zeta_Y w_{NY}, -2\zeta_Z w_{NZ}\}$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\tan L}{R} & 0 \end{bmatrix}$$

여기서 R : 지구 반지름

L : 위도

$f \times$: j 의 왜대칭 행렬

ω_{ie}^n : 항법좌표계에서 표현된 지구자전 각속도

ω_{en}^n : 항법좌표계에서 표현된 지구고정 좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도

식(2)와 같이 구성된 오차 모델의 상태변수는 식(3)과 같으며, 각 변수의 의미를 표1에 나타내었다.

$$x^T = [\delta V^T \quad \delta \phi^T \quad \delta f^T \quad \delta \omega_b^T \quad \theta_M^T \quad \delta r^T \quad \theta_F^T \quad \theta'_F^T] \quad (3)$$

속도와 자세오차식은 항법식에서 선형 섭동법을 이용하여 유도할 수 있는데 Coriolis 항을 무시하지 않는 모델을 사용한다. 가속도계 바이어스와 자이로의 부유 오차, 장착 비정렬 오차 그리고 지렛대 거리 오차는 랜덤 상수로 모델링한다. 선체 유연성은 2차 가우스 마코프 프로세스로 모델링한다.

지렛대 효과와 선체 유연성 및 장착 비정렬 오차를 포함한 경우의 속도 및 각속도의 측정식은 식(4)와 같다.

$$z = \begin{bmatrix} z_v^n \\ z_\phi^n \\ z_\omega^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$z_v^n = \delta V^n - C_b^n(\omega_{nb}^b \times \delta r^b - V^b) + v_v = H_1 x + v_v$$

$$z_\phi^n = \delta \phi^n - C_b^n(\theta_M + \theta_F) + v_\phi = H_2 x + v_\phi$$

여기서

$$H_1 = [I \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -C_b^n \omega_{nb}^b \times \quad 0 \quad C_b^n r^b \times]$$

$$H_2 = [0 \quad I \quad 0 \quad 0 \quad -C_b^n \quad 0 \quad -C_b^n \quad 0]$$

V^b : 유연성에 기인한 속도성분 ($\theta_F \times r^b$)

ω_{nb}^b : 항법좌표계에 대한 동체좌표계의 회전 각속도

v_v, v_ϕ : 속도, 자세 측정오차

표 1 상태 변수

기호	변수명	상태 변수	변수명
δV	속도오차	δr	지렛대 거리오차
$\delta \phi$	자세오차	θ_F	선체 유연성 각
δf^b	가속도계 바이어스	θ'_F	선체유연성각속도
$\delta \omega_{ib}^b$	자이로 부유 오차		
θ_M	장착 비정렬오차		

3. 각속도 및 가속도정합

각속도 및 가속도정합은 주 INS와 종 INS에서 측정된 각속도와 가속도를 직접 비교하는 방법이며 주 INS와 종 INS 사이의 비정렬 각인 장착 비정렬각과 유연성에 의한 각을 직접 추정하여 주 INS 자세로부터 종 INS의 자세를 직접 계산하는 방식이다. 장착 비정렬각은 랜덤 상수로 모델링하고 선체 유연성에 의한 각은 2차 가우스 마코프 프로세스로 모델링을 하여 시스템 모델을 구성한다[1]. 본 논문에서는 유연성에 대한 모델이 정확하다고 가정한다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t) \quad (5)$$

$$z(t) = H(t)x(t) + v(t)$$

여기서 $F(t)$ 는 시스템 행렬로서 구성은 식(6)과 같다.

$w(t)$ 는 공집중음으로서 측정잡음 $v(t)$ 와 서로 상관관계가 없으며 각각 영평균을 갖는 백색잡음으로 가정한다.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ 0 & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_{32} = \text{diag}\{-w_{NX}^2, -w_{NY}^2, -w_{NZ}^2\}$$

$$F_{33} = \text{diag}\{-2\zeta_X w_{NX}, -2\zeta_Y w_{NY}, -2\zeta_Z w_{NZ}\}$$

$$x^T = [\theta_M^T \quad \theta_F^T \quad \theta'_F^T]$$

여기서 측정식인 $H(t)$ 의 구성에 따라 기존의 방법과 새로 제안한 방법을 나누고자 한다.

3.1 기존의 방법

주 INS(master INS)와 종 INS(slave INS)의 각속도계의 출력 w_m, w_s 는 아래의 식(7)과 같다[3].

$$\begin{aligned} w_m &= w_{im}^m = w_{ie}^m + w_{en}^m + w_{im}^m \\ w_s &= w_{is}^s = w_{im}^s + \theta_F + \epsilon_s \\ &= (I - B) w_{im}^m + \theta_F + \epsilon_s \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 m 은 주 INS 좌표계, s 는 종 INS 좌표계를 나타내며 I

$$\text{는 단일 행렬이고 } B = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_Z & \beta_Y \\ \beta_Z & 0 & -\beta_X \\ -\beta_Y & \beta_X & 0 \end{bmatrix}$$

$\beta_i = (\theta_{M,i} + \theta_{F,i})$, $i = X, Y, Z$, ϵ_s 는 자이로 랜덤 부유(random drift)오차이다.

여기서 각속도정합의 측정식은 아래식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} z_a &= dw = w_m - w_s = H_a x + w_a \\ &= -w_m \times (\theta_M + \theta_F) - \theta'_F + \epsilon_s \end{aligned} \quad (8)$$

$$H_a = [-w_m \times \quad -w_m \times \quad -I]$$

여기서 가관측성을 보면 각속도정합 시 θ_F, θ'_F 는 가관측성이 매우 좋아 추정이 잘 되는 반면에 θ_M 은 가관측성이 좋지 않아 추정이 잘 되지 않는다. 따라서 θ_M 의 가관측성을 보완하기 위해서 가속도 정보를 이용하게 된다.

먼저 주 INS와 종 INS의 가속도계의 출력 f_m, f_s 는 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$f_s = f_{is}^s = (I - B)f_m + a_r^s + a_F^s + \nabla_s \quad (9)$$

여기서 ∇_s 는 가속도계 랜덤 오차이고 a_r^s, a_F^s 는 각각 지렛대 영향에 의해 생기는 가속도와 유연성에 의해 생기는 가속도이다.

$$a_r^s = w_{im}^m \times (w_{im}^m \times r^s) + \dot{w}_{im}^m \times r^s$$

$$a_F^s = \theta_F \times (\theta'_F \times r^s) + \dot{\theta}_F \times r^s$$

여기서 r^s 는 지렛대 거리이다.

따라서 가속도정합의 측정식(10)은 다음과 같다.

$$z_f = df = f_m - f_s = -f_m \times (\theta_M + \theta_F) - a_r^s - a_F^s + \nabla_s \quad (10)$$

여기서 a_r^s, a_F^s 을 보상해 주면 측정식(11)은 다음과 같이 간단해진다.

$$z_{fcorr} = H_{fcorr} x + w_f, H_{fcorr} = [-f_m \times -f_m \times 0] \quad (11)$$

결국 각속도 및 가속도정합의 전체 측정식(12)은 다음과 같다.

$$z = \begin{bmatrix} z_a \\ z_{fcorr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_a \\ H_{fcorr} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} w_a \\ w_f \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2 새롭게 제안한 방법

이 논문에서 새롭게 제안한 방법은 가속도정합의 측정식은 기존의 방법과 동일하고 각속도정합에서 θ_F 는 추정이 잘되기 때문에 θ_F 를 아는 값으로 보고 보상해 줘서 θ_M 에 대한 가관측성을 향상 시켰다. 새롭게 제안한 각속도정합의 측정식(13)은 다음과 같다.

$$z_{acorr} = H_{acorr} x + w_a = -w_m \times (\theta_M + \theta_F) + \varepsilon_s$$

$$H_{acorr} = [-w_m \times -w_m \times 0] \quad (13)$$

따라서 새롭게 제안한 각속도 및 가속도정합의 전체 측정식(14)은 다음과 같다.

$$z = \begin{bmatrix} z_{acorr} \\ z_{fcorr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{acorr} \\ H_{fcorr} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} w_a \\ w_f \end{bmatrix} \quad (14)$$

새롭게 제안한 방법으로 시뮬레이션을 해본 결과 $\theta_F, \dot{\theta}_F$ 에 대한 추정이 잘됨을 알 수 있었다.

4. 시뮬레이션 결과

여러 정합 방법에 대한 전달정렬의 특성 분석은 공분산 해석을 통하여 수행하였다.

본 논문에서는 선체의 운항계획으로서 원형계획을 선택하였는데 일반적으로 전달정렬에서는 중심 가속도가 클수록 성능이 우수하다. 속도 및 각정합에서는 원하는 성능을 얻기 위해서는 각속도 및 가속도정합 보다 중심 가속도가 커야한다. 이 논문에서는 속도 및 각정합의 중심 가속도가 $1[m/sec^2]$ 이고 각속도 및 가속도 정합일 경우는 $0.1[m/sec^2]$ 이고 각속도는 둘다 $2\pi/900[rad/sec]$ 인 조건으로 시뮬레이션을 하였다. 또한 실제 선체의 환경과 비슷하게 하기위해 파도 영향에 의한 배 자세 운동을 3차 마코프 프로세스로 모델링 하였고 수평축 자세 운동만 고려하였다. 바다의 상태는 잔잔한 바다로 하였다(그림4-1 참조).

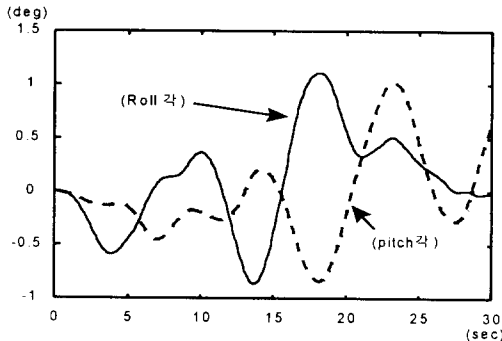


그림 4-1 선체의 자세 운동

여기서 칼만필터 상태 변수의 초기 오차 공분산 값(1σ)은 다음과 같다. 속도오차는 $0.3 m/sec$, 자세오차는 5° , 가속도계 바

이어스 오차는 $100 \mu g$, 자이로 부유 오차는 $1^\circ/hr$, 장착 비정렬각과 유연성에 의한 각은 0.5° 로 하였다.

시뮬레이션 결과 속도 및 각정합에서는 어느 정도의 순항이 있어야 D축 자세오차가 추정이 잘 된다. 따라서 이 논문에서는 40초간 순항을 한 다음 원형 궤적을 수행 하였다.

그림4-2는 속도 및 각정합에서 40초간 순항을 하다가 중심 가속도가 $1[m/sec^2]$ 로 60초간 원형 궤적을 수행했을 경우의 D축 자세오차의(1σ)로서 100초가 되어서 만족할 만한 결과가 나옴을 알 수 있다.

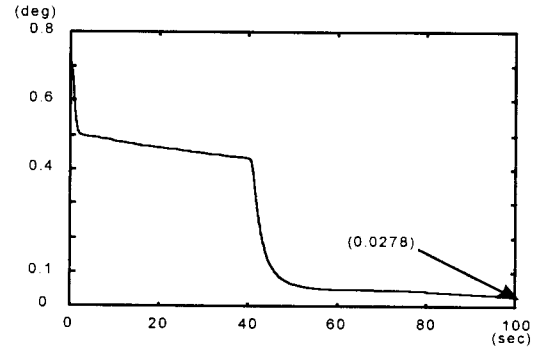


그림 4-2 속도 및 각정합(D축 자세오차)

그림4-3 와 4-4는 이 논문에서 새롭게 제안한 방법으로서 유연성에 의한 각오차와 유연성에 의한 각속도 오차의 1σ값으로써 결과를 보면 추정 성능이 좋음을 알 수 있다.

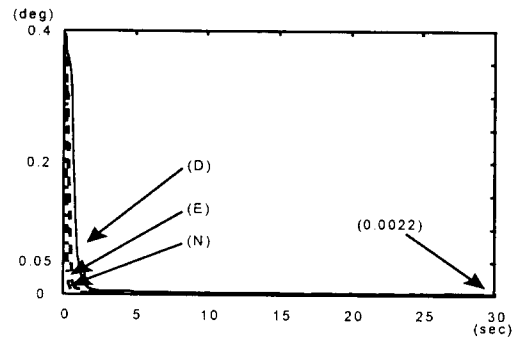


그림 4-3 유연성에 의한 각

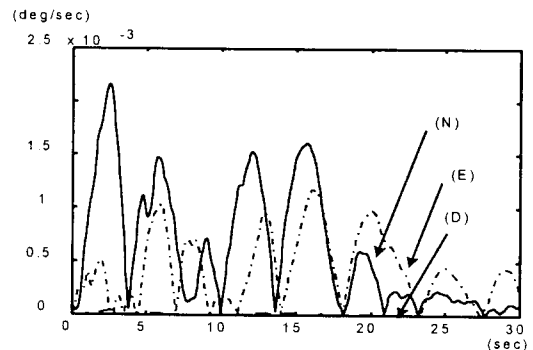


그림 4-4 유연성에 의한 각속도

그림4-5는 장착 비정렬각에 대한 결과로서 실선은 새롭게 제안한 방법을 이용한 장착 비정렬각오차의 1σ값이고 점선은 기존의 방법을 이용한 장착 비정렬각오차의 1σ값이다. 두 결과를 비교해 보면 이 논문에서 새롭게 제안한 방법이 장착 비정렬 각 추정에서는 훨씬 좋은 성능을 보이고 있다.

참고 문헌

- [1] Alan M. Schneider, "Kalman Filter Formulation for Transfer Alignment of Strapdown Inertial Units", *Navigation*, Vol. 30, No. 1, Spring 1983.
- [2] James E. Kain, James R. Cloutier, "Rapid Transfer Alignment for Tactical Weapon Applications".
- [3] Zhang Changyung, "Scheme of Alignment for Strapdown Inertial Navigation Systems", *ICAS*, 92.7.6.
- [4] 박준규, 양철관, 심덕선, 이장규, "시간지연, 지렛대 효과, 유연성에 대한 전달정렬의 특성 분석", 제어계측·자동화·로보틱스 연구회 합동 학술 발표회 논문집, 1997.2.

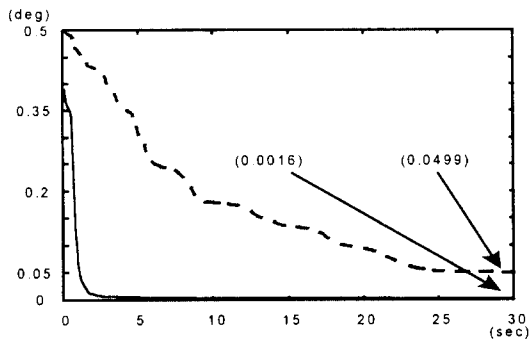


그림 4-5 장착 비정렬각

그림4-6은 장착 비정렬 각과 선체 유연성에 의한 각을 합한 각 즉 비정렬 각오차의 1 σ 값이다. 여기서도 실선은 새롭게 제안한 방법을 이용한 결과이고 점선은 기존의 방법을 이용한 결과이다. 유연성에 의한 각오차의 1 σ 값이 기존의 방법을 이용한 것과 새롭게 제안한 방법을 이용한 결과가 거의 차이가 없고 또한 수렴 값이 장착 비정렬 각 오차값보다 상당히 작기 때문에 비정렬각 오차의 1 σ 값의 결과와 장착 비정렬각 오차의 1 σ 값 결과가 비슷함을 알 수 있다.

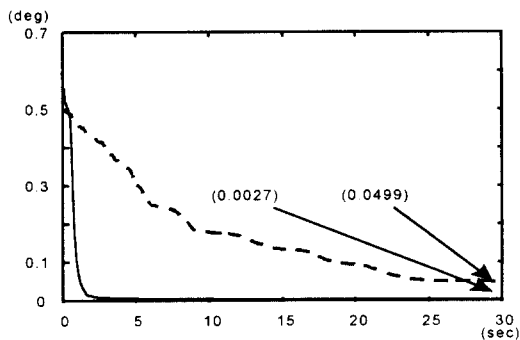


그림 4-6 비정렬각(장착 비정렬각+유연성에 의한 각)

5. 결론

본 초기 전달정렬 연구에서는 속도 및 각정합 방법과, 각속도 및 가속도 정합방법을 공분산 해석을 통하여 비교하였다. 바다가 잔잔한 바다일 경우의 결과를 보면 속도 및 각정합에서는 원하는 만큼의 D축 자세오차의 성능을 얻으려면 순항을 어느정도 해주어야하고 순항후 원형 궤적을 수행할 경우도 중심 가속도를 각속도 및 가속도 정합에 비해 크게 해주어야만 한다. 그리고 수렴 시간도 각속도 및 가속도 정합에 비해서 길다. 반면에 각속도 및 가속도 정합은 순항을 할 필요가 없고 원형 궤적을 수행 시 중심 가속도가 속도 및 각정합에 비해 작은 가속도로도 짧은 시간내에 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그리고 이 논문에서 새롭게 제안한 방법은 기존의 방법에 비해 장착 비정렬 각 추정 성능이 매우 좋으며 그림4-5를 보면 전달정렬 시간과 정확도가 매우 개선된 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 선체 유연성의 모델링이 잘 되었다고 가정하고 수행한 것이므로 각속도 및 가속도 정합의 유용성을 높이기 위해서는 선체 유연성을 정확히 모델링하는 것이 중요하다.