

# HILS를 이용한 함정의 관성항법장치 전달정렬 환경 모의 기법

## A Simulation Technique of the Shipboard INS Transfer Alignment Environments using Hardware-In-the-Loop Simulation

김 운 식\*                      양 태 수\*                      김 상 하\*\*  
Woon-Sik Kim                Tae-Soo Yang                Sang-Ha Kim

### Abstract

A simulation technique, which simulate dynamic motion and communication environments of ship in the lab, is needed in order to reduce the testing cost when we evaluate the transfer alignment performance of shipboard INS. Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS) can be used as an effective test method for those system because it can provide flexible and realistic simulation environments, various test scenario, and repeated test environment in the lab without additional cost and person.

This paper presents the methods for implementing the real time HILS environment for testing transfer alignment performance of shipboard INS. It includes real time executive for controlling realtime simulation and calculating the ship motion, communication method for interfacing between the systems, and coordinate transformation method for converting real ship coordinate attitude data to lab coordinate attitude data.

Keywords : Transfer Alignment(전달정렬), Real-Time Hardware-In-the-Loop Simulation(실시간 모의비행시험)

### 1. 서론

전달정렬은 유도탄 내부에 탑재되는 관성항법장치가 함정이나 차량에 탑재된 마스터 관성항법장치의 위치와 자세정보를 전달받아 자세와 위치 정렬을 수행하는 방법<sup>[1]</sup>으로, 관성항법장치의 정렬시간을 줄이기 위

한 목적으로 사용된다.

관성항법장치에 탑재되는 전달정렬 알고리즘은 초기 개발 단계에서 많은 불확실한 오류들을 포함할 수 있기 때문에 원하는 코드가 정확히 구현되었는지 검증(Verification)하는 절차와 원하는 작동을 하도록 구현되었는지 입증(Validation)하는 절차가 필요하다. 검증 및 입증을 위한 방법으로 아래의 두 가지 방법을 사용할 수 있다.

첫 번째 방법은 개발자가 함정에 직접 승선하여 실제 관성항법장치와 관련 장비들이 동작하는 환경에서 관성항법장치의 전달정렬 성능을 확인하는 것이

† 2011년 1월 4일 접수~2011년 3월 25일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 충남대학교(ChungNam National University)

책임저자 : 김운식(wskim0106@hanmail.net)

다. 두 번째 방법은 실험실내에서 M&S(Modeling and Simulation) 기법으로 함정의 운동을 모사하고, 실제 함정과 동일한 통신 환경을 구현하여 전달정렬 성능을 확인하는 것이다. 전자는 실제 시험 환경에서 시험을 수행하기 때문에 실제에 가장 충실한 방법으로 검증과 입증에 수행할 수 있는 장점이 있지만 많은 장비, 인원, 시간이 소요되고, 다양한 함정 기동 상황에서 전달정렬이 제대로 동작하는지 확인하는데 많은 제약이 따르며, 동일한 조건의 시험을 반복적으로 수행할 수 없어 전달정렬 알고리즘을 디버깅하는데 어려움이 따른다. 후자는 검증 및 입증 시험에 소요되는 많은 인적, 물적 비용을 줄일 수 있고 반복적인 실험 환경을 제공하여 디버깅을 수행하는데 용이한 장점을 갖지만, 실제 환경을 그대로 모의하는데 한계가 있다.

위의 두 가지 방법은 각각 장/단점을 가지기 때문에 개발 초기에 후자의 실험 방법으로 알고리즘의 불확실성을 제거하고, 개발 완료 단계에서 전자의 방법으로 입증 시험을 수행하는 절충안이 비용 및 시간을 줄이는 최적의 해법이 될 수 있다. 실험실에서 함정의 전달정렬 환경을 모의하는 방법으로는 전달정렬에 사용되는 실제 하드웨어를 사용하여 충실도(Fidelity) 있는 함정의 전달정렬 환경을 모의할 수 있는 Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS)<sup>[2~4]</sup>를 사용할 수 있다. HILS는 실제 시험 개발품을 사용하고 이들이 동작하는 환경을 공학 레벨로 모델링한 후 시뮬레이션 루프를 구성하여 실시간 시뮬레이션을 수행하는 M&S 기법이다. 실제 하드웨어가 시험 평가에 사용되기 때문에 모든 시험 대상물 및 시험 평가 환경을 공학적으로 모델링하여 성능을 평가하는 소프트웨어 시뮬레이션 기법보다 실제에 충실한 시험 평가 기법으로 인식되고 있으며, 유도탄 개발에 있어서 필수적으로 수행해야 할 시험 평가 과정에 포함되어 있다.

실제 함정 환경과 실험실 환경에는 아래와 같은 차이가 존재한다. 따라서 HILS를 활용하여 실험실에서 전달정렬 환경을 구현하기 위해서는 위의 차이점을 극복할 수 있는 방안을 개발해야 한다.

- 함정은 전방위 기동이 가능하여 표적 방향이 다양하지만 실험실의 장비들은 일반적으로 표적 방위각이 고정되어 있다.
- 함정의 회전 운동을 표현하는 오일러 순서와 실험실 장비의 회전운동을 표현하는 오일러 순서가 다르다.

- 함정은 회전운동과 병진운동을 수행하지만 실험실에서는 병진운동을 구현할 수 없다.

본 논문에서는 함정에 탑재되어 전달정렬을 수행하는 관성항법장치의 전달정렬 성능을 검증 및 입증하고 인터페이스를 확인하기 위한 HILS 환경 설계 방법과 앞에서 설명한 차이점을 극복하기 위한 방법을 제시한다. 구체적인 방안을 제시하기 위해 본 논문은 다음의 두 가지 사실을 가정하였다. 첫째, 실험실의 Flight Motion Simulator(FMS)<sup>[6]</sup>는 한 방향( $FMS_{heading}$ )으로 한 점에 고정되어 있다. 둘째, 함정운동을 모의하는 FMS의 오일러 순서는 피치→요→롤이고 함정의 자세를 표현하는 오일러 순서는 요→피치→롤이다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서 실제 함정에서 전달정렬을 수행하기 위한 장비 구성과 인터페이스 구조를 간단히 설명하고, 3장에서 HILS 환경을 구현하기 위한 기법들에 대해 설명하며, 4장에서 개발된 HILS 환경의 적용 사례로 HILS 시나리오와 수행결과를 기술하고, 6장에서 결론을 제시한다.

## 2. 함정의 전달정렬 환경

함정에 탑재되는 유도탄 관성항법장치는 정렬시간을 줄이고 유도탄의 정확한 위치와 자세를 얻기 위해 초기 위치, 자세 정보를 함정에 탑재된 마스터 관성항법장치에서 전달받는 전달정렬을 수행한다. 함정에서 전달정렬을 수행하기 위해서는 Fig. 1과 같이 함정의 마스터 관성항법장치, 자료중계장치, 유도탄 관성항법장치가 필요하며<sup>[1]</sup> 각 장비들은 다음의 업무를 수행한다.

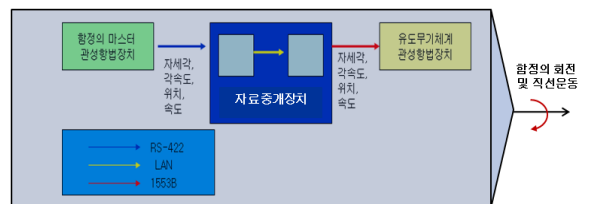


Fig. 1. The INS transfer alignment environment in the ship

- 마스터 관성항법장치 : 일반적으로 마스터 관성항법장치는 정확한 함정의 위치, 자세를 측정하기 위

해 정밀도가 높은 관성센서를 사용한다. 합정의 병진운동 및 회전운동을 측정하여 합정의 위치 및 자세정보를 일정 주기로 자료중계장치로 전송한다.

- 자료중계장치 : 마스터 관성항법장치로부터 전송된 자료를 전달정렬을 수행하는 관성항법장치로 전달한다.
- 유도탄 관성항법장치 : 자료중계장치로부터 전달된 자료와 자신의 센서가 측정한 합정운동 자료를 기반으로 초기 위치와 자세를 알아내는 전달정렬을 수행한다.

Fig. 1의 전달정렬 환경에서 각 장비들은 일정 주기로 획득한 자료를 연결된 장비로 전송하게 되는데 자료 통신 수단으로 RS-422, 1553B, LAN이 사용되며 기능은 다음과 같다.

- RS-422 통신 : 마스터 관성항법장치에서 측정한 합정 자료를 자료중계장치로 전송하기 위해 사용된다.
- 1553B 통신 : 자료중계장치가 유도탄 관성항법장치로 합정자료를 전송하기 위해 사용된다.

위의 통신 방법을 이용하여 유도탄의 관성항법장치로 전송되는 자료는 합정의 자세각, 각속도, 위치, 속도이다. 이 가운데 자세각과 각속도는  $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$ 의 오일러 변환식을 갖는데 실험실 내에서 FMS를 사용하여 합정운동을 모의할 때 중요한 인자로 고려된다.

### 3. 전달정렬 환경 모의

전달정렬은 합정의 마스터 관성항법장치 통신 자료와 유도탄 관성항법장치에서 실제 측정한 센서 자료를 이용하여 수행된다. 따라서 Fig. 1의 합정 전달정렬 환경을 실험실에서 모의하기 위해서는 마스터 관성항법장치의 통신 자료를 모의해야 하고, 유도탄 관성항법장치 센서가 합정의 움직임을 측정할 수 있도록 합정의 움직임을 모의해야 한다. 또한 Fig. 1 환경의 합정운동과 자료 통신은 실시간 기반으로 동작하므로 실험실 모의 환경도 실시간 기반으로 구현해야 한다.

이 장에서는 합정의 전달정렬 환경을 실험실 내에서 모의하기 위한 합정운동 모의 기법, 실시간 통신 기법 및 실시간 제어 기법을 설명한다.

#### 가. 전달정렬을 위한 시스템 구성

##### 1) 하드웨어 구성 설계

전달정렬 HILS 환경을 실험실에서 구현하기 위해서는 합정운동, 인터페이스, 마스터 관성항법장치 모의를 위한 여러 장비들이 필요하며 이 논문에서는 Fig. 2와 같은 전달정렬 HILS 환경을 제안하였다. HILS 환경 구현을 위해 사용된 장비들은 FMS, 실시간 컴퓨터, 자료중계장치, 각종 인터페이스 케이블들이다.

- FMS : 비행체 또는 운동체의 피치, 요, 롤 회전운동을 실시간으로 모의할 수 있는 장비이다. 각 회전축을 모의할 수 있도록 세 축으로 구성되어 있으며, 롤 축에 관성센서 또는 관성항법장치를 탑재할 수 있다. 각 축의 제어 명령은 실시간 컴퓨터에서 계산되어 실시간 통신을 통해 전송된다. 비행체 또는 운동체의 회전운동을 실시간으로 모의하기 위해 전송된 제어 명령에 따라 피치, 요, 롤 순서로 기동한다. 이 논문에서 소개된 장비는 각속도로 제어되며 합정의 피치, 요, 롤 운동을 모의하기 위해 사용되었다.
- 실시간 컴퓨터 : 비행운동방정식과 같은 산술연산을 실시간으로 수행할 수 있는 컴퓨터이다. 합정운동을 계산하여 FMS를 제어하고 마스터 관성항법장치를 모의할 목적으로 사용되었다.
- 자료중계장치 : 합정에서 마스터 관성항법장치의 자료를 중계하는 시스템이다. 자료중계장치에 탑재되는 프로그램의 정상 동작 여부를 확인하고, 전달정렬시험을 위한 인터페이스를 제공하기 위해 실제 개발품이 사용되었다.

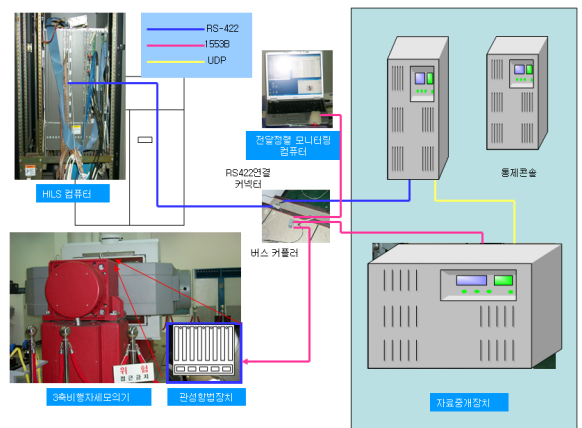


Fig. 2. The H/W configuration of HILS

2) 통신 환경 모의

실험실에서 전달정렬 통신 환경을 모의하기 위해 Fig. 3과 같이 인터페이스를 구성하였다. 실제 전달정렬에서 사용하는 RS-422, 1553B 통신 환경을 그대로 모의하였고, FMS를 제어하기 위해 DDI(Differential Dual Interface)<sup>[6]</sup>를 사용하였다.

- 1553B 인터페이스 : 자료중계장치와 유도탄 관성항법장치 사이의 통신을 모의하기 위해 사용되었다.
- RS-422 인터페이스 : 함정의 마스터 관성항법장치와 자료중계장치 사이의 통신을 모의하기 위해 사용되었다.
- DDI<sup>[6]</sup> : 디지털 인터페이스로 함정의 자세를 모의하는 FMS를 제어하기 위해 사용되었다

통신 자료들은 Fig. 3과 같은 변환 및 전송 과정을 거친다. 함정의 통신 환경을 모의하기 위해 모의된 마스터 관성항법장치자료(각속도, 자세, 위치, 속도)는 실제 마스터 관성항법장치와 같은 주기로 자료중계장치로 전송하게 되고, 실제 자료중계장치는 FMS에 탑재된 유도탄 관성항법장치로 항법자료(각속도, 자세, 위치, 속도)를 전송한다. 모의된 함정 자세각을 좌표 변환 후 미분함으로써 FMS 피치, 요, 롤 각속도 명령이 계산되며, 계산된 명령은 DDI 통신을 사용하여 2.5ms마다 제어 콘솔로 전송된다.

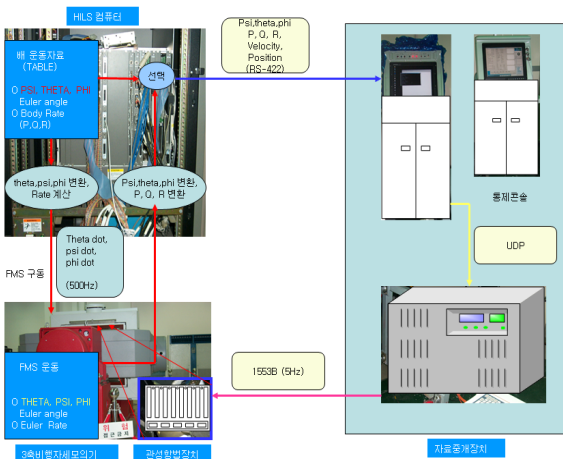


Fig. 3. The communication configuration of HILS

나. 함정운동 모의 방법

실험실에서 함정운동을 모의하기 위해서는 함정의

자세각을 계산한 후, 실제 환경과 실험실 환경의 차이를 반영하여 좌표 변환을 수행해야 한다. 이 때 함정의 방위각과 표적 방위각이 고려되어야 한다. 함정의 방위각은 Fig. 4와 같이 함정이 진복으로부터 얼마나 회전되어 있는지를 나타내는 값으로 함정에 탑재된 마스터 관성항법장치가 측정한다. 표적 방위각은 유도탄이 실제 발사되는 방향을 나타내며 진복을 기준으로 측정된 값이다.

이 장에서는 함정운동을 모의하기 위한 자세각을 계산하는 방법과, 실제 함정운동을 실험실 환경으로 변환하는 방법을 제시한다.

1) 함정운동을 모의하기 위한 자세각 계산

다양한 함정운동을 모의하기 위해 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째는 모델링된 함정운동을 구현하기 위해 정현파 신호를 생성하여 함정의 자세각 자료로 사용하는 방법이고, 두 번째는 실제 함정의 마스터 관성항법장치에서 측정한 여러 운동 자료를 획득하여 실시간 컴퓨터에서 실시간으로 재생하는 방법이다.

2) 함정운동을 모의하기 위한 좌표 변환

실제 시험 환경에서는 임의의 표적 방위각으로 전달정렬을 수행하지만 실험실에서는 FMS가 설치된 위치에 따라 표적의 방위각이 미리 결정되고, FMS의 축에 따라 오일러 순서( $\theta \rightarrow \psi \rightarrow \phi$ )가 미리 고정된다. 따라서 임의의 표적 방위각을 가진 함정운동을 실험실에서 모의하기 위해서는 다음과 같이 두 단계의 좌표 변환을 수행해야 한다.

- 고정된 FMS 방위각을 고려한 함정의 자세 계산 : 표적 방위각과 FMS 방위각을 일치시키는 과정
- 계산된 함정 정보를 이용한 FMS 자세각 계산 : 함정의 오일러 순서와 FMS의 오일러 순서를 일치시키는 과정

위의 두 과정 가운데 첫 번째는 고정된 FMS의 방위각 때문에 수행하는 절차이고 두 번째는 오일러 순서 때문에 수행하는 과정이다. 따라서 첫 번째 과정은 HILS 시나리오에 따라 항상 수행해야 하고, 두 번째 과정은 실제 측정된 함정의 자세각을 사용하여 함정운동을 재생할 때만 수행한다.

첫 번째 과정을 수행하기 위해서는 Fig. 4의 왼쪽과 같이 임의의 표적 방위각을 갖는 함정의 시험 조건을

Fig. 4의 오른쪽과 같이 고정된 FMS의 방위각을 갖는 실험실 조건으로 변환해야 한다. 이 변환을 수행하기 위해 임의의 표적 방위각을 FMS의 방위각( $FMS_{heading}$ )으로 일치시킨 후 그에 따른 함정의 방위각을 새롭게 계산한다.

변환하는 절차는 다음과 같다.

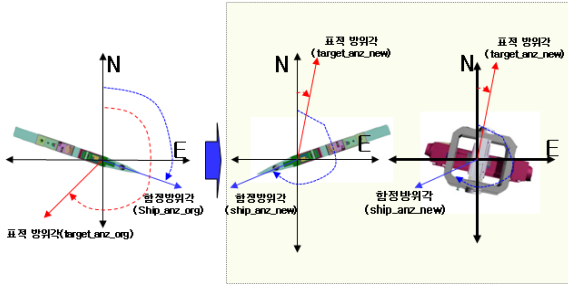


Fig. 4. The recalibration of the ship heading angle

$$SHIP_{anz\_new} = SHIP_{anz\_org} - At_{org} + FMS_{heading}$$

$$At_{new} = FMS_{heading}$$

- $SHIP_{anz\_new}$  : HILS를 위해 변환된 함정 방위각 ( $ship\_anz\_new$ )
- $SHIP_{anz\_org}$  : 실제 시험 환경의 함정 방위각 ( $ship\_anz\_org$ )
- $At_{org}$  : 실제 시험 환경의 표적 방위각 ( $target\_anz\_org$ )
- $At_{new}$  : HILS를 위해 변환된 표적 방위각 ( $FMS_{heading}$ )
- $FMS_{heading}$  : FMS 방위각 (=  $target\_anz\_new$ )

다음으로 함정의 자세각으로 부터 FMS 오일러 순서( $\theta \rightarrow \psi \rightarrow \phi$ )에 맞는 자세각을 찾는 과정이 필요하다. 함정의 자세각 자료( $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$ )를 사용하여 유도탄의 플랫폼 좌표계를 표적 방향을 지향하는 관성좌표계로 변환하는 과정은 다음과 같다.

$$CIM = C_n^t C_s^m C_p^s \quad (1)$$

- $C_p^s$  유도탄 플랫폼을 함정의 플랫폼으로 변환하는 Direction Cosine Matrix(DCM)
- $C_s^m$  함정의 자세가 표현되는 오일러 순서를 이용하여 NED 좌표계로 변환하는 DCM( $SHIP_{anz}$  사용)
- $C_n^t$  NED 좌표계를 표적방향을 지향( $At_{new}$ )하는 좌표계로 변환하는 DCM

FMS는 항상 표적방향을 지향하는 좌표계를 사용하고 자세각은 ( $\theta \rightarrow \psi \rightarrow \phi$ )으로 표현되기 때문에 몸통좌표계로의 변환식은 (2)와 같은 DCM으로 표현될 수 있다.

$$CIFT = \begin{pmatrix} c\psi_{FT}c\theta_{FT} & s\psi_{FT} & -s\theta_{FT}c\psi_{FT} \\ s\theta_{FT}s\phi_{FT} & c\psi_{FT}c\phi_{FT} & c\theta_{FT}s\phi_{FT} \\ -c\theta_{FT}s\psi_{FT}c\phi_{FT} & & +s\theta_{FT}s\psi_{FT}c\phi_{FT} \\ s\theta_{FT}c\phi_{FT} & -c\psi_{FT}s\phi_{FT} & c\theta_{FT}c\phi_{FT} \\ +c\theta_{FT}s\psi_{FT}s\phi_{FT} & & -s\theta_{FT}s\psi_{FT}s\phi_{FT} \end{pmatrix} \quad (2)$$

이 때 (1)과 (2)의 식 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립하며 이 관계식으로부터 FMS 자세각을 산출할 수 있다.

$$CIFT^T = CIM$$

$$\phi_{FT} = \text{atan}(-CIM(2,3), CIM(2,2))$$

$$\theta_{FT} = \text{atan}(-CIM(3,1), CIM(1,1))$$

$$\psi_{FT} = \text{asin}(CIM(2,1))$$

위의 수식으로부터 FMS 제어를 위한 피치, 요, 롤 순서의 오일러 각을 계산할 수 있고, 이 자료와 실시간 컴퓨터의 계산 주기  $\Delta t$ (Step Time)을 사용하여 오일러 각속도를 계산할 수 있다.

$$FMS_{rollRate} = (FmsRollAngle_{t_n} - FmsRollAngle_{t_{n-1}}) / \Delta t$$

$$FMS_{yawRate} = (FmsYawAngle_{t_n} - FmsYawAngle_{t_{n-1}}) / \Delta t$$

$$FMS_{pitchRate} = (FmsPitchAngle_{t_n} - FmsPitchAngle_{t_{n-1}}) / \Delta t$$

실제 함정의 병진운동(기동)은 실험실에서 구현하기 불가능하기 때문에 함정이 정지되어 있다고 가정하여 함정의 속도는 항상 "0"으로 설정하였다.

#### 다. 마스터 관성항법장치 모의

함정의 마스터 관성항법장치는 실시간 컴퓨터에서 모델링되어 연산되거나 실측 자료를 재생함으로써 모의되고, 통신 환경은 실시간으로 모의된 마스터 관성항법장치 각속도(롤, 피치, 요 레이트), 자세각(롤, 피치, 요)과 위치(위도, 경도, 고도), 속도( $V_e, V_n, V_u$ ) 자료를 RS-422 통신을 통하여 자료중계장치로 전송함으로써 모의된다. 이 때 통신에 사용되는 자료를 획득하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 모의된 마스터 관성항법장치의 자료를 사용하여 FMS를 구동하고, 구동에 사용된 자료 쌍(자세각, 각속도, 위치, 속도자료)을 자료중계장치로 보내는 방법이고, 두 번째는 위치, 속도자료는 모의된 관성항법장치의 자료를 사용하고, 자세각, 각속도 자료는 FMS 응답신호를 함정에서 사용하는 오일러 순서에 맞게 재 변환하여 자료중계장치로 보내는 방법이다. 모의된 마스터 관성항법장치

의 자세각, 각속도 자료와 실제 관성항법장치가 측정 한 자료의 시간지연 측면을 고려할 때 후자가 실제 환경을 보다 유사하게 모사하지만, 두 가지 방법의 실험 결과에 큰 차이가 발생하지 않으므로 본 논문에서는 첫 번째 방법을 사용하여 구현하였다. Fig. 5에서 *IO\_RS422()* 함수가 마스터 관성항법장치 모의자료를 통신 인터페이스로 출력하는 함수이다.

라. 실시간 시스템 설계

앞 절에서 제시한 함정 좌표계 변환, 마스터 관성항법장치 통신 모의, 함정운동을 실제로 모의하기 위한 FMS 제어는 모두 실시간 컴퓨터에서 제한된 시간 안에 수행이 완료되어야 하고, 시뮬레이션이 계속적으로 진행됨에 따라 연산 및 제어가 반복되는 연속시간 시뮬레이션 형태로 진행되어야 한다. 따라서 시간 제약성을 가지는 연속시간 시뮬레이션을 수행하기 위한 실시간 제어 시스템이 설계되어야 한다.

본 논문에서는  $\mu\text{sec}$  단위의 타이머를 갖는 2개의 Power PC 계열 연산 프로세서와 입/출력 보드들을 사용하는 실시간 제어 시스템을 제안하였고, 실시간 제어를 위한 프로그램의 구조와 프로세서 사이의 실시간 통신 방법을 제안하였다. Fig. 5는 이러한 목적으로 설계된 시스템의 실시간 제어 및 통신 구조이다.

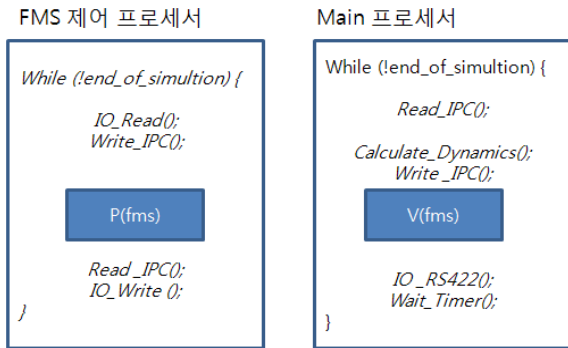


Fig. 5. The realtime control and synchronization mechanism

각 프로세서들은 다음과 같은 역할을 수행한다.

- 메인 프로세서 : 실시간 시뮬레이션을 수행하여 함정의 운동을 모의하기 위한 자세각을 실시간으로 연산 또는 재생하고, 마스터 관성항법장치를 모의하여 항법자료를 전송하며, FMS 제어 프로세서로

동기 자료와 FMS 제어 자료를 전송한다.

- FMS 제어 프로세서 : 메인 프로세서에 수행이 동기화되며 FMS 제어 명령을 VME 통신을 통해 전송받아 FMS를 실시간으로 제어한다.

1) 실시간 제어 프로그램

실시간 제어 프로그램은 실시간을 만족할 수 있도록 타이머를 제어하고, 무결성의 다중 프로세서 통신을 제공하며 연속시간 시뮬레이션을 수행하는 미들웨어 프로그램이다. 이러한 역할을 수행하기 위해서는 타이머를 제어하여 고정된 시간 단위로 시뮬레이션이 진행되도록 설계해야 하고, 연속적으로 연산을 수행하는 적분기를 구현해야 한다.

Fig. 5의 *Wait\_timer()*는 실시간을 유지하기 위한 함수로 프로세서의 연산이 주어진 시간보다 일찍 끝나더라도 타이머의 세마포어가 동작할 때까지 작업을 대기시키는 역할을 수행한다.

Fig. 5의 *Caculate\_Dynamics()* 함수는 연속 동특성 모델의 미분방정식 및 대수 방정식을 연산하고 독립변수인 시간에 대한 적분을 수행하여 함정의 자세를 계산하는 함수이다. 적분 방식으로 AB(Adams-Bashforth) 방식<sup>[5]</sup>과 같은 단일 패스 알고리즘과 RK(Runge-Kutta) 방식<sup>[5]</sup>과 같은 다중 패스 알고리즘을 사용할 수 있는데 다중 패스 방식은 단위 스텝 시간동안 N번의 연산을 수행하여 더 정확한 연산 결과를 얻을 수 있지만, 연산 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 일반적인 실시간 시뮬레이션에서는 시간 제약성이 중요하기 때문에 본 논문에서는 아래와 같은 적분식을 갖고, 2.5ms의 적분간격을 갖는 AB2(Adams-Bashforth 2nd order) 방식<sup>[5]</sup>을 사용하였다.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2}(3f_n - f_{n-1})$$

2) 실시간 제어를 위한 프로세서 통신 방법 설계

실시간 시뮬레이션에서는 시간지연(latency)이 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 시간 지연을 최소화하고 자료 무결성을 보장하는 프로세서 사이의 통신 방법이 필요하며 설계시 프로세서 동기화, 시뮬레이션 자료 전송 측면을 고려해야한다. Fig. 5와 같은 병렬처리 환경에서 프로세서 사이의 동기화를 위해 이진 세마포어를 사용하였다. FMS 제어 프로세서가 P()에서 대기하면 메인 프로세서가 모든 연산을 마치고 V())를

통해 FMS제어 프로세서의 태스크를 활성화 시키는 방식이다.

메인 프로세서와 FMS제어 프로세서 사이의 자료 통신에는 VME 메모리를 활용한 공유 메모리를 사용하였다. 메인 프로세서가 연산 결과를 공유메모리에 쓰고 V()를 수행하면 FMS 제어 프로세서가 P()를 수행하고 공유메모리를 읽음으로써 두 프로세서 사이에 발생할 수 있는 Critical Section 문제를 해결하였다.

두 프로세서의 통신 방식을 다이어그램으로 분석하면 Fig. 6과 같다. 메인 프로세서가 자료 계산 및 통신(Write\_IPC)을 완료한 후 V()를 수행하면 P()에서 대기하던 FMS 제어 프로세서가 활성화된다. 활성화된 프로세서는 FMS 제어 자료를 공유메모리에서 읽어(Read\_IPC) FMS 제어 콘솔로 출력한다.

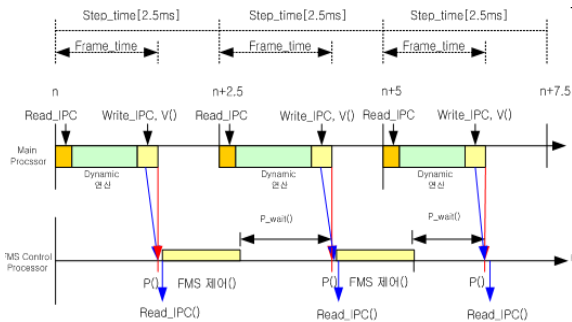


Fig. 6. The interprocessor communication mechanism

이 방법을 사용하면 FMS 제어 출력이 메인 프로세서의 연산시간에 종속되어 지터(Jitter)가 발생할 수 있지만 가장 빠른 시간에 FMS를 제어할 수 있는 장점을 가진다. 지터링되는 시간은 수  $\mu$ sec 이내이고, 설계의 주 목적이 시간 지연이 적은 상태로 함정을 모의하는 것이기 때문에 약간의 지터(Jitter)가 발생하여도 시뮬레이션의 정확성(Correctness)에는 영향을 미치지 않는다.

#### 4. 적용 사례

앞 절에서 설계한 방법을 기반으로 HILS 환경을 구현하여 유도탄의 관성항법장치 전달정렬 시험에 적용하였다. 이 장에서는 적용된 시나리오와 시험 결과를 제시한다.

#### 가. 시험 시나리오

유도탄 관성항법장치의 전달정렬 성능을 확인하기 위해서는 함정이 움직이는 모든 환경에서 시험을 수행하여 모두 만족할 만한 결과를 얻어야 한다. 그러나 모든 함정운동 환경에서 시험을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 대표적인 몇 가지 함정운동 시나리오에 대해 시험을 실시하였다. 제시된 실험 환경은 함정운동을 임의로 모델링한 7개의 시나리오와 실측한 자료를 사용한 1개의 시나리오이다.

Table 1. Simulation Scenarios

번호	조 건	비고
1	정지상태	모델
2	함정의 Roll : 진폭 : 0.2도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 heading : 0	모델
3	함정의 Roll : 진폭 : 0.2도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 Pitch : 진폭 : 1도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 Heading : 0도	모델
4	함정의 Roll : 진폭 : 2도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 Pitch : 진폭 : 1도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 Heading : 각속도 0.1°/sec 선형 운동	모델
5	함정의 Roll : 진폭 : 2도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 Pitch : 진폭 : 1도, 주파수 0.1Hz 정현파 운동 함정의 Heading : 진폭 20도, 주파수 0.01Hz 정현파 운동	모델
6	연안근처(Nominal)	실측
7	최대 피치(MaxPitch)	모델
8	최대 롤(MaxRoll)	모델

#### 나. 시험 수행 결과

위에서 제시한 시나리오에 따라 HILS를 수행한 후 FMS 명령과 관성항법장치 출력값을 비교함으로써 전달정렬 프로그램 검증을 수행하였다. 여러 가지 시나리오 가운데 몇 개의 시나리오에 대한 시험 결과를 Fig. 7~Fig. 9에 수록하였다. 그림의 “명령”은 FMS 제어 명령이고, “SDINS 출력”은 유도탄 관성항법장치가 전달정렬을 수행한 결과값이다. 그림에서 볼 수 있듯이 유도탄 관성항법장치의 자세각이 전달정렬 수행 초기에는 조금 다르지만 빠르게 함정의 자세각으로 수렴함을 확인할 수 있다. 위의 결과를 바탕으로 관성

항법장치 전달정렬 프로그램이 정상적으로 구현되었음을 확인하였다.

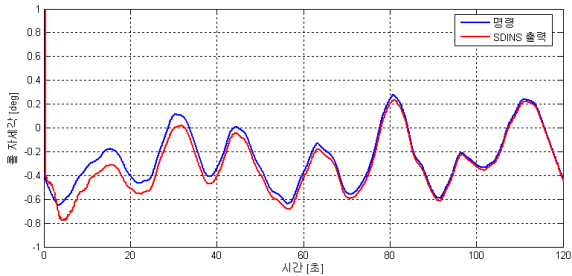


Fig. 7. Roll Angle(Nominal Case)

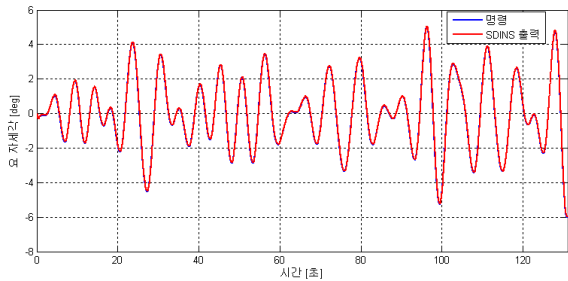


Fig. 8. Yaw Angle(MaxPitch Case)

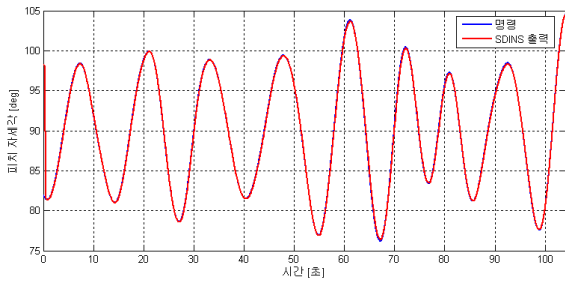


Fig. 9. Pitch Angle(MaxRoll Case)

## 5. 결론

FMS, 실시간 컴퓨터와 유도탄 구성품인 실제 관성 항법장치, 자료중계장치를 사용하여 함정에 탑재되는 유도탄의 관성항법장치 전달정렬 프로그램 검증에 위한 HILS 환경을 개발하였다.

HILS 환경 개발을 위해 실시간 제어 시스템을 설계하였고, 함정의 전달정렬에 사용되는 장비 사이의 인터페이스를 실제와 똑같이 구현하였으며, 함정운동을 모사하기 위한 좌표계 변환 방법을 제시하였다. 이와 같이 개발된 환경에서 모델링된 함정운동과 실측된 함정운동 자료를 이용한 다양한 시험을 수행하여 전달정렬 프로그램을 검증 및 입증하였다. 실험실에서 함정운동을 모의하는 환경을 구현함으로써 시험의 반복성을 제공하고 실제 환경에서 수행하기 어려운 시나리오에 대한 시험을 수행할 수 있는 장점이 있고 실제 함정에서 수행해야 할 많은 업무들을 실험실 환경에서 수행함으로써 시간 및 비용 측면에서 큰 절감 효과를 얻을 수 있다. HILS 환경이 실제 시험 환경을 그대로 모의하는 데는 한계가 있지만 HILS를 수행함으로써 전달정렬 프로그램과 관련된 부체계 시스템의 성능을 검증 및 입증하는데 큰 효과가 있음을 확인하였다.

## Reference

- [1] 송기원, 공종필, 남창우, 전창배, “SDINS 전달정렬 알고리즘의 구현 및 FMS에서의 성능평가”, 유도 무기학술대회 논문집, pp.181~186, 2000.
- [2] E. J. Eichblatt, Test and Evaluation of the Tactical Missile, Princeton Combustion Research Lab., pp. 107~194, 1989.
- [3] G. B. Stupp, D. S. Lehnus, “Program Risk Reduction Through GPS/INS Testing : An Example”, Proc. of SPIE Vol. 2741, pp. 400~408, 1996.
- [4] H. Richard, A. Lowman, R. Youngren, “Object Oriented Design(OOD) in Real-Time Hardware-In-the-Loop(HWIL) Simulations”, Proc. of SPIE Vol. 6208, 2006.
- [5] S. D. Conte, C. D. Boor, Elementary Numerical Analysis An Algorithm Approach, McGraw-Hill, pp. 362~376, 1980.
- [6] “16-Bit Parallel Interface for the ACUTROL ACT2000 Measurement and Motion Control System”, ACUTRONIC