

관성항법장치 기술에 관한 연구*

이 영 옥**

요 약

본 논문에서는 유도무기체계의 관성항법장치 기술에 대한 사항과 발전추세에 대해 연구하였다. 항법장치는 여러 곳에 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그중 관성항법장치는 무기체계에 부착되어 사용됨에 따라 많은 관심들을 가지고 장치의 개발과 발전을 위한 연구가 가속화되고 있다. 따라서 본 논문에서는 유도무기체계 관성항법장치의 개발동향, 기능 및 구성, 종류, 작동기술에 대해 연구하였다.

A Study on the Inertial Navigation System Technology

Young Uk Lee**

ABSTRACT

In this paper, a study on the inertial navigation system technology in guided weapon system development. Navigation devices are being used more commonly in places. Inertial navigation devices attached to them are used as weapons systems have a lot of interest in the development of devices for research and development accelerated. Therefore, this paper will encourage the development of weapon systems Inertial navigation device trends, features and configuration, type, techniques for research work.

Key words : Inertial Navigation System, Inertial Navigation System(INS), Navigation System

* 본 연구는 2008년도 호원대학교 교내 연구비 지원에 의해 연구되었음.

** 호원대학교 국방과학기술대학 지상무기학과

1. 서론

문명의 발전에 인간은 편리를 추구하고 이것은 과학의 기술을 발전시키는 원동력이 되었다. 선박이 항해를 하거나, 항공기가 비행할 때 자신의 위치를 아는 것은 매우 중요하다. 특히 캄캄한 밤 중 또는 악천후 중에는 항시 위험이 따른다. 이런 경우에 항법장치가 자신의 위치와 항행(航行)에 필요한 정보를 제공해 준다.

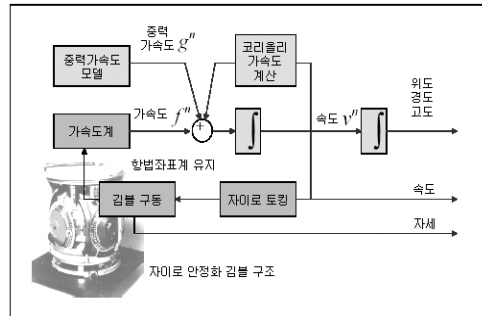
항법장치에는 라디오 전파를 이용한 전파항법장치(Radio Navigation Aids)와 관성센서인 자이로스코프와 가속도계를 이용한 관성항법장치(Inertial Navigation System : INS)가 있다. 이 항법장치들은 현대의 항행에 필수적인 것이 되었으며, 보다 안전한 운항을 위하여 항상 배나 항공기의 정확한 위치, 운항속도, 자세 등의 필요한 정보를 제공해 준다. 또한 이것은 선박이네 항공기뿐만 아니라 군사용 미사일, 어뢰 등과 같은 유도무기에도 같은 역할을 수행한다.

2. 관성항법장치 개발동향

2.1 세계 기술개발 실태

최근 국외에서는 링 레이저 자이로스코프(RLG)를 이용한 스트랩다운(Strapdown) 관성항법장치가 생산되고 있으며 종래의 기계식 자이로스코프의 생산은 점점 줄어드는 추세이다. 미국, 영국, 프랑스, 일본 등의 선진국에서 링 레이저 자이로스코프를 이용한 스트랩다운(Strapdown) 관성항법장치는 실용화단계로 이미 많은 민간 항공기, 군용 전투기에 사용되고 있으며, 유도무기에도 응용되고 있다.

종래의 기계식 자이로스코프는 로우터를 회전시키기 때문에 정밀한 출력을 내려면 가공이 까다롭고, 베어링의 마모에 따른 사용시간, 사용온도에



(그림 1) 관성항법장치 개념도

제한이 있는데 비하여 링 레이저 자이로스코프는 레이저 광을 이용하기 때문에 이런 단점은 제거되었다. 또 RLG는 가속도의 영향(g-sensitivity)를 별로 받지 않은 장점이 있다. 그러나 현재 RLG는 항법장치에 사용되고 있으나 TLG나름의 고유한 문제점들을 갖고 있는데 이를 열거하면 다음과 같다. 제한된 광학통로(Light Path) 때문에 발생하는 Resolution 문제, Lock-in문제, Dithering Noise 문제, 또 레이저를 발생시키기 위한 고전압 사용, 고전압 전원장치(HVPS), Anode Current Balance 문제 등이 있다.

최근 광통신 기술의 발전으로 여러 분야에 광섬유의 응용이 늘고 있다. 그 중의 하나로 광섬유 자이로스코프(FOG)를 들 수 있다. 정밀한 단일 모드 광섬유가 생산되고 여기에 필요한 레이저 다이오드, PIN 다이오드 등 관련 기술이 발전하였다. 이에 비하여 FOG 광원(Light Source)으로 레이저 다이오드를 사용하고 100m에서 1000m에 이르는 광섬유를 사용하면 전술한 RLG의 단점에 비하여 여러 가지 잇점이 있다. 그러나 온도에 따라 자이로스코프의 출력인 Phase, Bias가 예민하게 변하는 단점이 있어 이를 여러 가지 기법을 이용하여 최소화하는 노력을 경주하고 있다. 최근에 반도체 기술을 이용한 광전자 Integrated Optics의 발전으로 Phase Modulator, Polarizer, Coupler 등이 소형으로 제작하는 것이 가능하게 되었다. 이에 힘입

어 FOG 기술이 발전하게 되었고 현재는 0.1 deg/hr급의 FOG 시제품이 선을 보이고 있다. 향후 RLG에 해당하는 정도의 정밀도를 갖는 향상된 FOG가 개발될 전망이다.

현재 관성장치에 많이 사용되는 가속도계는 Force Rebalance Type이 대표적인 것으로 알려져 있다. 앞으로 가속도계는 제작 단가가 비교적 저렴하고 양산성이 보장되는 Silicon 가속도계를 개발하는 추세이다. 또 정밀도는 떨어지지만 일반 산업 제어용, 인체에 응용할 수 있는 상용 Silicon 가속도계가 속속 개발되고 있다. Silicon Wafer 한장에 수백 개의 가속도계가 생산되기 때문에 양산이 가능하고, 가격을 매우 저렴하게 할 수 있어 그 응용 범위가 날로 늘어나고 있다.

2.2 국내기술현황

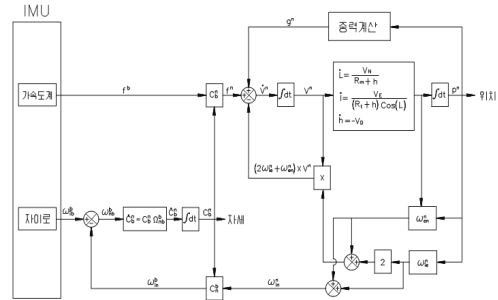
김발형 관성항법장치에 관련된 소프트웨어 기술, 하드웨어 센서 제작 기술이 어느 정도 정착되어 있다. 그러나, 링 레이저 자이로스코프 기술, 광섬유 자이로스코프 기술은 이제 시작 단계에 머무르고 있으며 이에 대한 집중적인 투자가 요청된다. 방대한 초기 투자에 비하여 현실적으로 수요는 적어서 경제성이 없는 점이 큰 장애이나 이러한 기술은 외국에서 사올 수 없는 기술 이므로 국산화 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

3. 관성항법장치의 기능 및 구성

3.1 기능

관성항법장치에는 여러 가지 기능이 있지만 주 기능은 감지, 계산, 출력의 세 가지 기능이다. 플랫폼에 장착된 자이로스코프와 가속도계는 운반체의 각속도와 가속도를 측정하여 컴퓨터에 입력시키며, 컴퓨터는 이 자료를 이용하여 좌표변환, 적분,

필터링 등의 복잡한 계산과정을 거친 후 항법에 필요한 위치, 속도, 자세, 방향, 고도 등을 출력한다.



(그림 2) 관성항법장치의 기본원리

관성항법(Inertial Navigation)이란 운반체(Vehicle)의 각속도와 가속도를 측정하여 시간에 대한 연속적인 적분을 수행하여 이미 알고 있는 출발점에 대한 운반체의 위치와 속도를 결정하는 일련의 처리과정(Process)이다. 이 때 가속도 등 필요한 정보를 외부의 도움없이 운반체 내에 설치된 관성 센서들을 통해서 얻는다.

일차원에서 레일 위를 달리고 있는 기차를 고려하자. 기차의 진행 방향으로 가속도계를 설치하고 가속도를 시간에 대하여 적분하면 기차의 속도가 산출된다. 출발점을 기점으로 하여 이 속도를 시간에 따라 다시 적분하면 기차의 현재 위치를 산출할 수 있다. 같은 방법으로 한 축은 북쪽, 다른 한 축은 동쪽을 유지하도록 하는 안정된 플랫폼(Platform)이 있으면, 이 플랫폼에 설치된 동쪽 방향의 가속도계와 북쪽 방향의 가속도계로부터 측정된 가속도를 이용하여 현재의 위치와 속도를 산출할 수 있게 될 것이다. 이것이 관성항법장치의 원리이다.

실제 운반체에서 측정된 가속도는 방향을 지닌 벡터이므로 기준좌표계를 세 축 성분으로 분해할 수 있다. 관성공간(Inertial Space)에 대하여 기준축(Reference Axis)을 제공하는 자이로스코프를 이

용하여, 가속도계가 설치되어 있는 플랫폼을 일정한 방향으로 유지시킨다. 이 안정된 플랫폼의 세축 방향 각각에 가속도계를 장착하여 각 성분의 가속도를 측정한다. 이를 기초로 하여 3차원 공간에서의 운반체의 속도, 위치, 방향을 산출한다.

3.2 관성항법장치의 구성

기능에서 소개된 관성항법장치의 기능으로부터 관성항법장치의 주요 구성요소는 자이로스코프, 가속도계, 그리고 컴퓨터를 중심으로 하는 전자장치를 예측할 수 있으며 세부내용은 다음과 같다.

3.2.1 자이로스코프(Gyroscope)

팽이처럼 어떤 물체가 회전하고 있으면 그 회전자의 회전축은 공간상에서 일정한 방향을 유지하려는 성질이 있다. 1852년 프랑스의 물리학자 Jean Foucault는 이 성질을 이용하여 지구가 자전하는 것을 보여줄 수 있는 기구를 만들었다. 그는 그리스(회람)의 말로 ‘회전’이라는 뜻의 ‘Gyro’ 단어와 ‘본다’는 뜻의 ‘Skopein’ 단어를 이용하여 Gyro-

scope 라는 말을 만들었다. 그래서 자이로스코프는 ‘회전을 본다’는 뜻이 된다.

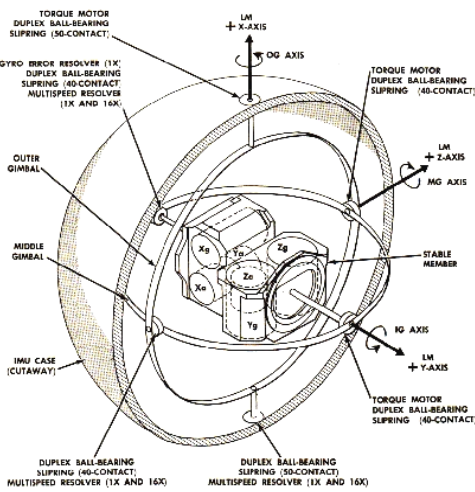
오늘날 자이로스코프는 자세(Attitude)와 각속도(Angular Rate)를 측정하는 장치를 부르는 편리한 말이 되었다. 관성항법장치에 주로 사용되는 자이로스코프는 Floated Rate Integrating 자이로스코프, Dynamically Tuned 자이로스코프, Ring Laser 자이로스코프 등이 있다.

3.2.2 가속도계(Accelerometer)

관성항법장치에서 가속도를 측정하는 가속도계는 관성장치의 작동모드에 따라 두 가지 기능으로 나눌 수 있다. 자신의 자세를 산출하기 위한 조준(Alignment) 모드 중에는 플랫폼을 수평으로 Leveling을 하는 것이고, 비행(Navigation) 모드 중에는 비행체의 가속도를 측정하여 항법 계산의 기초가 되도록 하는 것이다.

3.2.3 전자장치(Electronics)

관성장치 내의 전자장치는 플랫폼을 구동하기 위한 Motor Drive Servo 휠, 센서와 컴퓨터에 전원을 공급하는 전원장치, 각 기능별로 센서의 출력값을 증폭, 필터링하는 전자회로, 센서의 온도를 일정하게 유지해 주는 온도제어회로, 좌표변환계산과 항법자료계산을 위한 컴퓨터 등으로 구성된다.



(그림 3) 관성항법장치 구성도

4. 관성항법장치의 종류

4.1 관성항법장치 분류

관성항법장치는 관성센서들이 설치되어 있는 받침대가 김발(Gimbal)로 구성된 김발형과 운반체 자체가 받침대 역할을 하는 스트랩다운(Strapdown) 형으로 나눌 수 있다.

김발형 관성항법장치에서는 자이로스코프와 가속도계가 김발로 구성된 플랫폼에 장착되어 운반

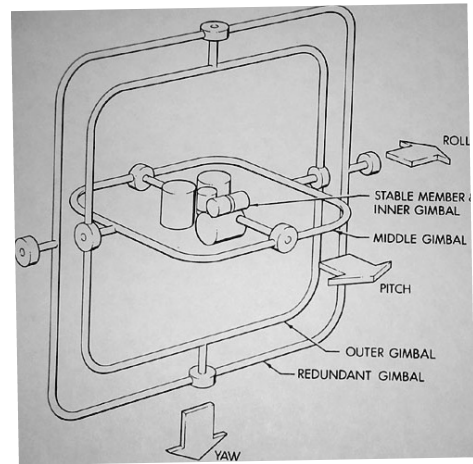
체의 운동과 자세와는 독립적으로 지구 또는 관성 공간(Inertial Space)에 대해 일정한 방향을 유지할 수 있다. 기계적 구조는 다소 복잡하지만 이로 인하여 가속도를 기초로 하는 속도와 위치의 계산이 비교적 간단하며 자이로스코프의 각속도 범위가 크게 줄어든다

스트랩다운형 관성항법장치에서는 가속도계와 자이로스코프는 운반체의 몸체에 직접 장착되어 있다. 자이로스코프 출력을 이용한 자세계산 알고리즘을 수행하여 항법좌표계에 대한 운반체의 자세 및 자세변환 행렬을 계산하고 가속도계 출력을 계산된 자세변환 행렬을 이용하여 항법좌표계에서 가속도로 변환하여 위치와 속도를 구한다. 따라서 계산과정이 복잡하나 현대의 소형 고속 컴퓨터의 발전으로 스트랩다운형 관성항법장치의 실용화가 가능하게 되었다.

관성항법장치가 외부의 다른 항법장치의 도움(Navigation Aids)을 받을 때 보조관성항법장치(Aides INS)라 한다. 위치정보 보조장치로는 Groval Position System(GPS), Long-Range Navigation(LORAN), Tactical Air Navigation(TACAN), Terrain Contour Matching(TERCOM), 고도정보 보조장치로는 Barometer(또는 Air Data Computer)가 있고 속도정보 보조장치로는 Doppler, Odometer, Laser Velocity Meter 등이 있다.

4.2 김발형 관성항법장치

김발형 관성항법장치의 플랫폼에서는 세 개의 자이로스코프와 세 개의 가속도계가 서로 수직으로 장착되어 공간좌표계를 형성하는 감지기 장치(Sensor Instrument)가 있다. 또한 운반체가 회전운동을 하여도 감지기 장치는 일정한 항법좌표계를 유지할 수 있도록 3개, 또는 4개의 김발이 있다. 이 김발은 각 축마다 김발 서어보 토오크 모터와 싱크로(Synchro)에 의하여 지지되어있다. 운반체의 회전운동시 발생하는 움직임에 대하여 김발



(그림 4) 김발형 관성항법장치

서어보 모터는 김발을 토오크시켜 지구의 회전운동(Earth Rate) 또는 운반체의 회전운동(Vehicle Rate)을 상쇄시킨다. 따라서 플랫폼은 특정의 항법좌표계를 유지할 수 있다. 비행중 플랫폼의 수직축을 토오크하는 방법에 따라 시스템을 다음 다섯 가지로 나눌 수 있다.

4.2.1 North-Slaved System

플랫폼좌표계가 NED좌표계를 유지하도록 플랫폼의 수직축(Vertical Axis 또는 Azimuth Axis)을 토오크 시킨다. 플랫폼좌표계의 특정 수평축이 항상 북쪽을 지향한다. 플랫폼좌표계로부터 직접 지구고정좌표계를 구하기 때문에 좌표변환이 용이하다.

4.2.2 Free-azimuth System

플랫폼의 수직축을 토오크 시키지 않는다. 수직 자이로스코프의 토오크 에러가 발생하지 않는다.

4.2.3 Unipolar System

Wander Angle이 항상 현재의 경도값을 유지하도록 플랫폼의 수직축을 토오크 시킨다. Azimuth와 경도를 간단한 계산으로 구할 수 있다.

4.2.4 Wander-azimuth System

플랫폼좌표계가 Wander-azimuth 좌표계를 유지하도록 플랫폼의 수직축을 토오킹시킨다. 좌표변환이 상대적으로 간단하다.

4.2.5 Target-Slaved System

플랫폼좌표계의 특정 수평축이 항상 Target을 향하도록 플랫폼의 수직축을 토오킹시킨다. 유도 알고리즘 수행에 용이하다.

3차원 운동하는 운반체에서는 (그림 4)와 같은 네 개의 김발(Four-Gimbal)로 구성된 플랫폼을 사용하여 김발잠김(Gimbal Lock) 현상을 방지한다. 이 때 내측 김발(Inner Gimbal)의 자유도(Gimbal Freedom)는 $\pm 20^\circ$ 정도의 제한된 자유도 갖는다. 선박처럼 제한된 3차원 운동을 하여 김발잠김이 일어나지 않는 경우 관성항법장치에서는 세 개의 김발(Three-Gimbal)로 구성된 플랫폼을 사용할 수 있다.

4.3 스트랩다운형 관성항법장치

모터로 구동되는 김발을 없애고 공간좌표계를 형성하는 세 개의 가속도계와 세 개의 자이로스코프를 운반체에 고정시키는 방법을 고안한 것이 스트랩다운형 관성항법장치이다. 관성공간에 대하여 자이로스코프의 회전한 정도를 알면 이를 좌표변환하여 관성좌표계나 지구고정좌표계를 기준으로 하는 항법자료를 계산하는 방법이 1950년말 부터 고안되었으나 우수한 성능의 자이로스코프와 짧은 시간 내에 많은 계산능력을 요하여 그 당시에는 실용화에 어려움이 있었다. 최근 링 레이저 자이로스코프(Ring-Laser Gyroscope)의 개발과 더불어 소형 고성능 컴퓨터의 개발로 많은 양의 계산을 빠르게 처리할 수 있게 되어 스트랩다운형 관성항법장치의 실용화가 가능하게 되었다. 김발형 관성항법장치에서 외부의 운동에 대해 독립적인 좌표계를 형성하는데 필수적인 김발의 기능을 스

트랩다운형 관성항법장치에서는 고성능 컴퓨터가 대신하여 좌표변환을 위한 계산을 수행한다.

5. 관성항법장치의 작동기술

관성항법장치는 자세와 가속도의 변화를 감지하여 항법에 필요한 정보로 변환시키는 작업을 한다. 이러한 정보의 생성을 위한 계산은 관성항법장치에 내재된 디지털 컴퓨터가 수행한다. 또한 관성항법장치는 생성된 정보중에서 필요한 정보를 운반체의 다른 장치에 주고받기 위한 인터페이스 장치를 필요로 한다. 이와 같은 기능과 성능을 유지하기 위하여 관성항법장치의 일반적인 동작절차는 다음과 같이 여러 단계로 구성되어 있다.

5.1 Off모드

관성장치에 Power가 전혀 공급되어 있지 않은 상태를 의미한다.

5.2 Standby 모드

Power는 관성장치의 온도환경 제어회로에 공급되어 관성항법장치의 플랫폼의 온도를 일정한 상태로 유지케 한다. 이것은 플랫폼에 설치되어 있는 관성센스들의 특성이 온도에 영향을 많이 받기 때문에 주위 온도를 일정하게 유지하여 주기 위한 단계이다.

5.3 조준(Alignment) 모드

조준을 하는 데 있어 김발형 관성항법장치와 스트랩다운형 관성항법장치는 그 목적을 달리한다. 플랫폼이 없는 스트랩다운형 관성항법장치의 조준이란 자이로스코프 및 가속도계 출력을 이용하여 운반체의 초기자세를 결정하는 과정이고, 김발형 관성항법장치에서는 관성항법장치의 플랫폼의 좌

표계를 특정의 항법좌표계로 일치화 시키는 과정이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 외부의 계측기기를 이용하여 플랫폼을 특정의 위치로 고정하는 방법과 외부 계측기기를 사용하지 않고 내장된 관성센스에 의한 중력가속도와 지구자전을 이용하는 방법, 그리고 이 두 가지 방법을 혼합하는 방식이 있다. 본 자료에서는 내장관성센스들만을 사용하는 관성항법장치에 대하여 설명하기로 한다.

조준 모드에서는 관성항법장치 내의 모든 회로에 전원이 공급되며 관성항법장치에 필요한 여러 가지 자료를 입력할 수 있다. 이 단계는 Initial Position Inserting 모드로 불리기도 한다. 즉 현재 위치인 위도와 경도, 경로좌표, 도달점의 위치, Heading 값(또는 특정의 항법좌표계 방향) 등을 입력할 수 있다. 조준하는 절차는 Coarse, Fine Leveling, Gyrocompassing 등 세 가지 단계로 진행한다.

5.3.1 Coarse Leveling 조준

자이로스코프의 Spin Wheel의 구동속도는 사용 가능한 상태까지 높인다. 수평면(North-East 평면)에 설치된 가속도계의 출력을 이용하여 플랫폼을 신속히 수평으로 유지하도록 한다.

5.3.2 Fine Leveling 조준

가속도계 출력을 North/East 자이로스코프의 Torqing Signal로 이용되며 가속도계의 출력이 영이 되도록 하여 플랫폼을 더욱 정밀하게 수평으로 유지하도록 한다.

5.3.3 Gyrocompassing

플랫폼의 방위각을 조준하는 과정이다. 즉 진북(True North) 방향 또는 진북에 대한 플랫폼의 상대적 방향을 알아내는 과정을 의미한다. East 자이로스코프와 North 자이로스코프가 정확히 동쪽과 북쪽으로 각각 조준되어 있다면 지구의 자전을

은 East 자이로스코프에 의해 감지되지 않을 것이다. 만일 플랫폼의 방위각이 정확하게 북쪽으로 조준되어 있지 않았다면 East 자이로스코프는 지구자전의 수평성분의 한 성분을 감지하며 그 값은 다음과 같다.

$$\Omega \cos \lambda \sin \psi$$

여기서 Ω = 지구자전을

λ = 현재위치의 위도

ψ = 방위각 오차값 또는 Wander 각

이 성분은 플랫폼을 기울게 하여 가속도계 출력을 발생시킨다. North-slaved System인 경우 이 출력을 이용하여 Azimuth 자이로스코프를 토오킹시켜 East 자이로스코프가 감지하는 지구자전 성분은 영이 되도록 플랫폼을 회전시킨다. 이와 함께 방위각 오차로 생기는 플랫폼 기울어짐을 제거하기 위하여 East 자이로스코프를 토오킹한다. Wander-azimuth System인 경우 이 값을 Wander 각으로 정하여 비행 모드에서 김발 토오킹에 이용한다.

5.4 Navigation 모드

이 모드에서는 관성항법장치의 항행기능을 수행한다. 즉, 관성항법장치에 있는 컴퓨터가 Navigation Program을 수행하여 항행에 필요한 가속도, 속도, 위치, Heading, 자세 등을 계산하여 출력한다. 김발의 Synchro로부터 측정되는 자세값인 Pitch, Roll, Yaw는 Synchro/Digital 변환기에 의해 디지털화 하여 출력된다.

5.5 Calibration 모드

Calibration 모드를 선택하면 자이로스코프의 드리프트 값을 교정하는 프로그램이 실행된다. 자이로스코프의 드리프트 값의 변화에 의한 기능의 저하를 바로 잡아 줄 수단으로 이용된다.

6. 결 론

본 논문에서 연구한 바와 같이 관성항법장치에 관련된 기술분야의 발전이 가속화 되고 그 용도도 다양화 되어 가고 있으며 향후 국산화로 발전시켜야 할 주요 핵심기술들로 다음과 같이 설명할 수 있다. 센서의 주요기술은 정밀한 베어링의 제작, 균일한 재료의 획득, 정밀 가공, 조립 공정의 개발 등이며, 항법장치의 주요기술은 전자적인 조정과 이를 컴퓨터와 연결시키는 H/W기술, 항법 알고리즘에 관련된 S/W 기술이며 세부기술적인 분야로써는 링제이저 자이로스코프에 관한 기술 분야의 레이저 발생 기술, 정밀 거울(Mirror) 제작 기술, 유리 세라믹(Zerodur) Block 가공기술, 광로 길이 조절(Path Length Control) 기술, 고압 전원장치(HVPS) 제작 기술 등이고, RLG를 이용한 관성항법장치에 대한 기술 분야의 고속 Micro Processor 제작기술, Strapdown 관성항법장치의 소프트웨어 기술, 교정(Calibration and Alignment) 기술, 광섬유 자이로스코프에 대한 기술 분야의 광섬유 결합기(Coupler) m Phase Modulator 제작 기술, 관련 전자 기술 등의 발전이 항법장치와 특수무기체계 분야의 발전과 우주항공분야의 발전 등을 가져올 것이다.

참 고 문 헌

[1] Lin, Ching-Fang, "Modern Navigation, Gui-

dance, and Control Processing", Prentice Hall, 1991.

- [2] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, 1971.
- [3] J. Diesel, Calibration of a Ring Laser Gyro Inertial Navigation System, Proc. of the 13th Biennial Guidance Test Symposium, New Mexico, 1987.
- [4] J. Fernow and Y. Lee, Analyses Supporting FAA Decisions Made During the Development of Supplemental GPS Avionics Requirements, Navigation : Journal of the Institute of Navigation, Vol. 41, No. 4, Winter 1994~1995.
- [5] 강태삼, "선형시스템의 교란 억제에 관한 연구", 서울대학교 대학원 제어계측학과, 박사학위논문, 1992.



이 영 옥

1992년 육군3사관학교 기계공학과 (공학사)

1998년 아주대학교 기계공학과(공학석사)

2008년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 박사수료

2005년~2008년 대덕대학 특수무기과 교수

2008년~현재 호원대학교 국방과학기술 대학 교수