

동조자이로스코프를 이용한 스트랩다운

관성항법장치의 설계 및 제작

김종웅 백승철 이광원 안영석 이허수
대영전자기술연구소

DESIGN AND FABRICATION OF A SDINS UTILIZING DTC

J.W. KIM S.C. BAEK K.W. LEE Y.S. AHN H.S. LEE
DAEYOUNG ELECTRONICS IND. CO., LTD.

ABSTRACT

A STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM FABRICATION UTILIZING DYNAMICALLY TUNED GYROSCOPE WAS FINISHED AS A FIRST STAGE DEVELOPMENT. SO IT'S DESIGN, FABRICATION AND TESTS ARE REPORTED.

ALTHOUGH THIS SYSTEM LACKS IN ACCURACY COMPARED WITH THE GIMBALLED SYSTEM, FACTORS SUCH AS LOW COST, SMALL SIZE AND LIGHTNESS MAKE IT USEABLE IN WIDE RANGE OF APPLICATIONS. THE INITIAL COST FOR INVESTMENT IS RELATIVELY CHEAP, AND SO IT IS BEST SUITABLE FOR LOCAL DEVELOPMENT IN VARIOUS KIND OF INERTIAL NAVIGATION SYSTEM.

SINCE ALL OF THE LOCALLY USED SYSTEMS ARE IMPORTED AND EVEN WITH IT'S CLOSE RELATION TO THE MILITARY, FOREIGN TECHNICAL TRANSFER IS PRACTICALLY NON-EXISTENT. THE INDEPENDENT LOCAL DEVELOPMENT OF SUCH SYSTEM AT A TIME OF DOMESTIC INITIATION IN AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRY, CAN BE SEEN AS A SIGNI-

FICANT MILESTONE IN THE ADVANCEMENT OF THE INERTIAL NAVIGATION SYSTEM FIELD.

1. 서 론

관성항법장치는 외부의 도움없이 독자적인 기능만으로 항체의 위치와 운동성에 대한 정보를 제공한다. 이 점에서 무선항법장치와 뚜렷이 구별된다. 따라서 관성측정 장치의 기계적인 불완전성에서 기인하는 비교적 큰 오차 발생에도 불구하고 이 장치는 군사적인 응용 목적으로 매우 중요하게 취급되어 왔으며, 또한 이 장치로 부터 얻어지는 자세와 속도 신호는 현대 무기체계의 화력제어 시스템에서 일차적으로 요구되어지는 정보로서 무선항법장치보다 고도로 발달한 지금도 그 중요성을 잃지 않고 있다.

이러한 연유로 관성항법장치 제작에 관련된 제반 기술은 민간인들에게 접근이 허용되지 않았던 분야였으며, 전진 각국은 이를 보호기술의 하나로 대외 이전을 금지시키고 있어 국내 자체개발은 불가능한 것으로 여겨져 왔다. 현재까지도 이에 관련하여 발행된 획득 가능한 서적들의 대부분이 기초적이고 이론적인 부분만을 논하였을 뿐, 제조기술에 관하여 언급한 서적은 발견할 수 없다.

이렇게 자료획득이 불가능한 주변 여건은 관성항법장치에 대한 국내의 연구 연혁이 짧지 않음에도

불구하고, 이 분야의 연구 결과의 대부분이 오차 해석을 위주로 한 이론적인 범주에서 크게 벗어나지 못하게 된 주요 원인이 되었으나, 최근에 이르러 장치 자체에 대하여 활발한 연구가 진행되어 실질적인 국내 개발의 진전이 이루어지기 시작했다. 본 논문은 최근의 이러한 꾸준한 연구 노력의 결과로써 동조자이로스코프를 이용한 스트랩다운 관성항법장치에 대하여 그 설계 개념 및 제작과 시험에 관하여 기술한다.

스트랩다운 시스템과 대비되는 장치로 김블드 시스템이 있다. 김블드 시스템은 주로 레이저 적분자이로를 사용하며 자이로와 가속도계가 부착된 테이블을 3내지 4개의 김블로 안정화시켜 물리적인 항법 기준좌표계를 유지한다. 이 시스템은 전장부의 구성이 비교적 단순하나 기계적 구조가 복잡하고 매우 높은 취급 정밀도가 요구되어 크기가 크고 가격이 비싼 단점이 있다. 스트랩다운 시스템은 자이로와 가속도계가 항체에 직접 부착된다. 이 때문에 사용될 수 있는 자이로는 동작범위가 넓은 동조자이로스코프가 주류를 이루며 근자에는 링레이저 자이로스코프도 많이 채택되었다. 이 시스템은 기계적 안정대 대신 컴퓨터의 연속적인 처리를 통한 해석적 항법 좌표계를 유지한다. 따라서 스트랩다운 시스템은 김블드 시스템과 비교하여 기계적 구조가 단순하고 취급 정밀도가 낮다는 이점이 있으나 컴퓨터에 보다 많은 기능이 요구된다. 성능상의 정확도에 있어서 김블드 시스템은 아직도 스트랩다운 시스템보다 우수하나 김블드회로의 급속한 발달과 단순한 구조에서 오는 소형, 경량, 저가격의 잇점은 향후 그 적용분야를 계속 확대해 나갈 것으로 기대된다.

2. 스트랩다운 관성항법장치의 설계와 제작

관성측정장치는 2개의 동조자이로스코프와 3개의 가속도계를 동체 좌표계에 일치되도록 제작되었으며, 시변인자의 재측정 기능을 수행하기 위해 180도 회전 메카니즘을 내장하였고, 온도변화에 따른 관성

감지기의 환산계수 변화량을 최소화하기 위해 온도 제어회로가 부가되었다.

아날로그 회로는 관성감지기를 위한 재평형 회로, 신호발생 회로 그리고 A/F 변환회로로 구성되었다. 회로의 불안정성은 시스템의 성능에 영향을 미치므로 온도안정도와 경년변화가 우수한 부품들이 사용되었고 필요한 경우 온도보상을 시행하였다.

디지털회로는 항법 연산을 수행하기 위한 16비트 CPU와 수치연산 처리기를 중심으로 계수기 입출력 인터페이스등으로 구성되었으며, 소프트웨어는 시스템 제어부분을 어셈블리 언어로 항법 알고리즘 부분을 파스칼 언어로 프로그래밍하였다.

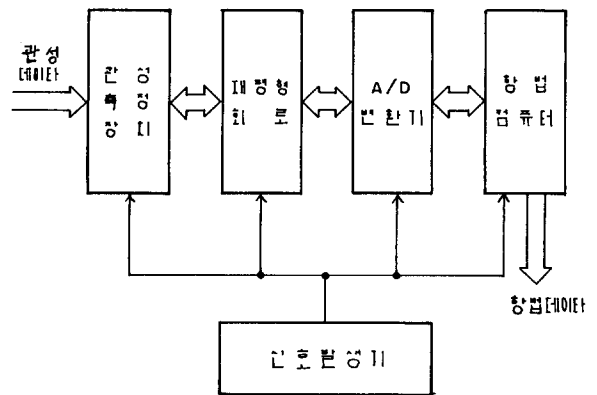


그림 1. 시스템 구성도

1) 관성측정장치

가) 설계상의 원리와 유의점

각 자이로 및 가속도계는 X, Y, Z 3개의 감지축을 갖도록 배치해야 하며, 이 때 3축의 기하적 방향은 수직 및 평행도를 잘 유지해야 한다. 그러나 실제 가공의 경우 공차의 산술적 상승은 가공비의 기하급수적 상승을 가져오므로 수요자의 요구 사양이나 용도에 따라 적절한 공차 범위의 선택이 이루어져야 한다. 재질은 열전달을,

열팽창을, 내력, 신장율의 균일한 방향성, 구배용이성 등을 고려하여 선택 해야 한다. 본 시스템의 관성측정장치는 평행도 및 수직도가 10 m μ 정도이다.

나) 구성

관성측정장치는 충격에 직접 노출되지 않도록 충격 차폐가 필요하며 자이로와 가속도계가 결합된 감지부, 감지부의 감지축 방향을 180도 회전시키기 위한 구동부, 모든 부위들을 찬 구조물로 형성하기 위한 블록, 그 외 외장 및 전장부로 구성된다. 그림 2는 이를 다이어그램으로 나타낸 것이다.

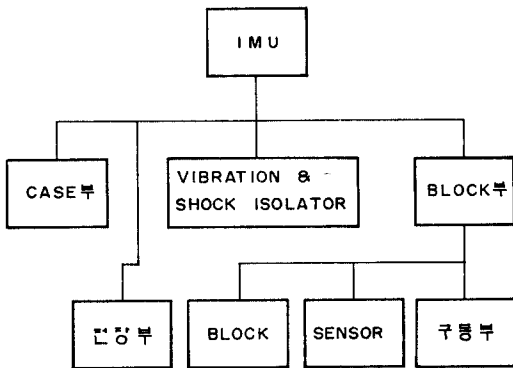


그림 2. 관성측정장치 구성도

다) 제작 및 조립상의 유의점

각 부품의 가공에는 그 형상공차를 달성할 수 있는 적절한 지그(JIG)나 픽스쳐(FIXTURE)를 제작하여야 하며 가공 완료된 부품들은 연마나 랩핑(LAPPING) 작업으로 가공을 마무리한다. 특히 유의할 사항은 재질이 가공열이나 절삭력에 의해 가공중이나 가공후에 변형을 일으키므로 충분한 절삭유를 사용하거나 가공후 내부응력 분산 처리를 하여 변형을 최소화하여야 한다. 감지축의

180도 회전 메카니즘을 위한 베어링은 그 지체가 갖는 반경 방향의 공차가 180도 회전 전후의 감지축 방향의 직접적인 오차로 작용하므로 예비부하를 가하여 오차를 최소화 해야한다.

라) 전장부와의 연계

감지부를 구성하는 관성감지기의 주위온도는 히터와 온도감지기에 의하여 ± 0.1 도 이하로 2차 변환 회로를 사용하여 안정화하였으며, 온도변화가 발생하였을 경우 컴퓨터에서 환산계수를 보상하기 위하여 온도 측정치를 외부로 출력시키도록 설계되었다. 감지부의 180도 회전 메카니즘은 인자 제측정시 컴퓨터의 지시에 의하여 각류 모우터를 구동함으로써 동작하며, 항법 정렬 모드에서 오차 역재의 목적으로 사용된다.

2) 아날로그 회로의 설계 제작

관성항법장치의 아날로그 회로부분은 아래와 같이 다섯장의 회로로 이루어져 있다.

- 자이로 제평형 회로(GYRO CASING BOARD)
- 가속도계 제평형 회로(ACCEL CASING BOARD)
- 자이로 아날로그 주파수 변환 회로(GYRO A F CONVERTER BOARD)
- 가속도계 아날로그 주파수 변환 회로(ACCEL A F CONVERTER BOARD)
- 신호발생기 회로(INVERTER BOARD)

회로 설계에 있어서 주의할 사항으로서의 잡음에 대한 철저한 대비가 있어야 한다. 관성항법장치에서 다루고 있는 양들이 매우 작은 양들이므로 잡음에 대한 성능저하는 무시될 수 없다.

가) 자이로 제평형 회로

동조자이로스코프가 2 자유도를 갖는 프리자이로스코프로 동작하므로 하나의 자이로에는 2개의 제평형 회로가 요구된다. 따라서 3축의 각속도 측정을 위하여 자이로 제평형 회로는 4-채널(X, Y, Z, R)로 구성되며, 2채널이 1조를 이룬다.

제평형 회로는 자이로에 가해진 각속도에 비례하여 기울어진 회전자의 각도변화를 입력으로 받아 회전

자를 최초의 평행위치로 투우킹하기 위해 필요한 신호를 발생시키는 부궤환 회로이다. 뉴우테이션 뎀핑(NUTATION DAMPING)회로는

2-자유도 자이로에서 발생하는 새차현상을 방지하기 위해 2-채널간에 교락(CROSS-COUPLING)을 제공한다.

나) 가속도계 재평형 회로

가속도계 재평형회로는 3축의 가속도량을 측정하기 위해 3개의 동일한 회로로 구성된다. 재평형 방법은 기본적으로 자이로 재평형회로와 동일하나 가속도계에는 새차현상이 발생하지 않으므로 뉴우테이션 뎀핑회로는 존재하지 않는다.

다) 아날로그-주파수 변환기

자이로 및 가속도계 재평형 회로에서 얻어진 토크 신호는 자이로의 회전자 및 가속도계의 진자에 토크를 가하기 위하여 인가된후 그 양을 A/F 변환기를 통하여 양자화 된다. A/F 변환기는 기본적으로 전류-주파수 변환기로 구성된다.

회로는 자이로와 가속도계를 위한 7채널의 동일한 회로구성으로 되어 있으며, 동작원리는 다음과 같다. 토크 전류는 전류분배기에 의해 배분된 후 회로의 적분기에 적분된 양이 일정한 레벨에 도달하면 스위치를 동작시켜 전류원으로 부터 적분기에 축적된 양을 리셋시키고, 펄스신호를 계수기로 출력한다. A/F 변환기는 기본적으로 안정도, 환산계수, 비선형 인자등이 장비 성능에 직접적인 영향을 주는 요소이므로 회로의 설계에 있어서 세심한 주의를 해야 한다.

라) 신호발생기 회로

신호발생기 회로는 관성항법장치에서 사용하는 모든 신호들을 발생시켜 주며, 각 회로의 중요부분을 모니터하는 회로들로 구성되어 있다.

3) 디지털의 설계와 구성

스트랩다운 관성항법장치에 있어서 디지털은

양자화된 관성입력 감지데이터를 실시간 처리하여, 항체의 자세 및 위치등의 항법데이터를 계산하여 각종 전송방식으로 주변기기에 출력하는 기능을 담당한다. 이런 기능의 수행 및 관성측정장치와 아날로그 구성상의 특징을 고려하여, 디지털 하드웨어와 소프트웨어를 설계, 제작하였다.

가) 하드웨어

디지털 하드웨어의 구성은 A/F 변환기로부터 출력되는 펄스들 계수하는 계수기(COUNTER), 항법연산을 수행하는 관성항법처리기(INERTIAL NAVIGATION PROCESSOR), 항법데이터의 출력 및 주변기기로 부터 코멘드등의 입력을 받아 처리하는 입출력처리기(INPUT/OUTPUT PROCESSOR), 데이터의 입출력 인터페이스를 담당하는 입출력 인터페이스(INPUT/OUTPUT INTERFACE) 그리고 관성항법처리기와 입출력 처리기간에 데이터 교신을 담당하는 DPR(DUAL PORT RAM)으로 이루어졌다.

A/F 데이터의 계수기는 모든 채널이 동시에 LATCH 될 수 있도록 설계되었으며, 항법 알고리즘의 실시간 처리를 위해 관성항법처리기와 연산처리기를 사용하여 구성하였다. 입출력 방식은 RS-232C와 RS-422 방식으로 구성하였다.

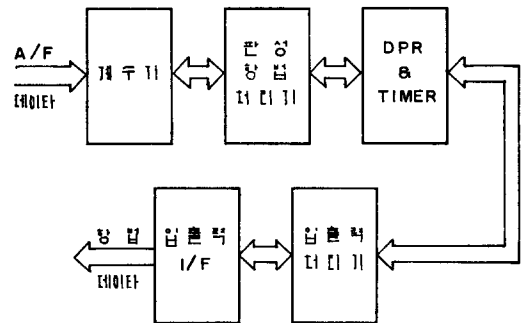


그림 3. 디지털 하드웨어 구성도

나) 소프트웨어

소프트웨어는 크게 관성항법처리기에서 항법 연산을 수행하여 항법데이터를 출력하는 항법 프로그램과 입출력처리기에서 주변기기와의 입출력을 담당하는 입출력 프로그램으로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 항법 프로그램의 구성 및 기능에 대해서만 기술한다.

항법 프로그램은 계수기로 부터 계수된 값을 읽어들이 보정한 후 선택된 시스템 동작 모드를 수행하여 관성측정장치의 상태데이터 및 항법 데이터를 DPR에 출력하게 되는데, 각 시스템 동작 모드의 수행순서 및 기능은 다음과 같다.

전원이 시스템에 인가된 후 시스템의 정상동작 유무의 확인(BUILT-IN TEST), 관성측정장치와 전자부의 초기상태, 소프트웨어 변수들의 초기치를 설정하는 초기화 모드(INITIALIZATION MODE)가 수행되고 나면, 감지기의 온도를 연속적으로 확인하여 일정한 온도가 안정하게 유지될때 까지 수행되는 온도안정화 모드(WARM-UP MODE)가 수행된다. 감지기의 온도가 안정하게 일정한 온도가 유지되어 감지기로 부터 신뢰할 수 있는 데이터가 출력되면, 항체의 이동 직전에 항체의 자세를 계산하여 해석적 항법기준좌표계를 마련하는 정렬 모드(ALIGN MODE)가 상황에 따라 5~15분 정도 수행되고 나면 항체의 항법을 위한 자세 및 위치등의 데이터를 계산하는 정렬 항법(ALIGN NAVIGATION MODE)가 수행된다.

4) 시험 및 평가

시스템의 성능은 감지기, A/F 변환기 그리고 항법 알고리즘의 성능에 의해 거의 결정되어지므로, 이들 구성 요소들의 시험 및 평가는 시스템의 성능평가와 개선방향을 제공해 준다. 본 논문에서는 감지기와 A/F 변환기의 시험 방법과 결과를 기술하였다.

가) 감지기

자이로와 가속도계의 바이어스, 랜덤 편류 그리고 자이로의 질량 불균형등이 감지기의 기본적인 성능을 나타낸다고 볼 수 있는데, 본 장비의 제작과정에서는 직육면체 블록에 감지기를 고정시켜 중력 가속도와 지구자전 가속도를 관성입력으로 하여 시험하였다.

시 험 인 자	결 과	단 위
가속도계 랜덤 편류	0.8	ug
가속도계 바이어스	35.2	ug
자이로 랜덤 편류	0.003	%/hr
자이로 바이어스	-3.26	%/hr
자이로 질량불균형	-1.45	%/hr/g

표1. 감지기 시험결과

나) A/F 변환기

A/F 변환기의 기능이 자이로의 토오코 전류를 주파수로 변환하는 것이므로 A/F 변환기의 오차가 감지기의 오차보다 작아야 한다. 그러므로 A/F 변환기의 시험을 통하여 A/F 변환기의 오차가 감지기의 오차보다 작은지 여부를 확인하고, 시스템 구성후 A/F 변환기 오차를 보상하기 위한 인자들의 수치를 얻는다. 감지기의 동작범위를 고려하여 입력범위를 $+/-1\mu A$ ~ $+/-30mA$ 로, 온도 환경은 $50\pm 0.02^\circ C$ 에서 이루어 졌다.

인자	결 과	단 위
b0	-2.5913E-1	Hz
b1	1.2067E-0	Hz/uA
b2	-2.8284E-6	Hz/uA ²
b3	8.9208E-8	Hz/uA ²
RES	2.1514E-0	Hz

표2. A/F 변환기 시험결과

여기서, b0 : 바이어스 b1 : 환산계수
 b2 : 2차계수 b3 : 교략계수
 RES : 잔차

실험 결과 환산계수가 1.207Hz/μA 정도가 된다. 즉 1μA가 A-F 변환기에 입력 되었을 경우 1.207Hz의 주파수가 발생된다는 것을 의미한다. 표2에 나타난 바와 같이 바이어스, 비선형 계수 및 교락이 시스템에 미치는 영향은 무시하여도 좋은 만큼의 결과를 얻었다. 그러나 주로 비대칭 효과라 할 수 있는 잔차(Residual)가 2.15Hz 정도이므로 구간을 +/-로 나누어 환산계수를 구해야 된다는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문은 1985년도 부터 현재까지 약 3년간에 걸쳐 기존의 스트랩다운 관성항법장치의 구조 해석을 토대로 독자적인 관성항법장치의 개발에 대한 1단계적 결과로서 작성되었으며, 이 기간중 이루어진 주요한 진전은 다음과 같다.

- 1) 동조자이로스코프의 해석과 모델링
- 2) 가속도계의 해석과 모델링
- 3) 제형형회로와 전류-주파수 변환기의 설계와 제작
- 4) 항법 알고리즘의 설계와 구현
- 5) 시험, 평가 기법의 개발

시스템의 성능은 HEADING 정확도가 0.2도 이내가 되도록 목표하였으며 이후 진행될 엄밀한 시험과정을 거쳐 평가될 예정이다. 이후 수행될 연구과제는 시스템의 세부적인 시험평가를 통한 성능 개선, 소형 경량화 및 적용대상 항체의 운동성에 따른 적절한 필터링 기법의 개발이다.

관성항법장치의 핵심을 이루는 동조자이로스코프의 상용화 개발도 중요한 2차 연구과제의 하나이다. 동조자이로스코프는 레이트적분자이로보다 성능이 낫다는 결점에도 불구하고 가격과 레이트자이로의 영역이었던 자세안정장치(STABILIZER)까지 그 적용범위를 넓혀가고 있다. 이와 관련하여 과거부터 폭넓게 사용되어온 무선항법 장치중 최근부터 사용이 가능하게 된 인공위성을 사용한 항법장치인 GPS(GLOBAL POSITIONING SYSTEM)는 항해

지속 시간과는 무관하게 1M 이내의 위치 정확도를 얻을 수 있다. 따라서 GPS의 사용이 일반화되는 1990년대 부터 관성항법장치의 위치 확인 기능은 그 중요성이 점차 감소될 것으로 보이며 중정밀도의 소형 관성항법장치와 GPS가 결합된 시스템이 보편화 되어, 이러한 목적에 적합한 동조자이로스코프의 사용은 링레이저자이로의 저 가격화가 이루어질 때까지 그 사용범위를 계속 확대해 나갈 것으로 예측된다.

앞서 서론에서 지적한 바와 같이 본 연구의 목적은 관성항법장치의 국내 설계 및 제조 능력의 확보로, 소요전량을 외국에서 수입하여야 했던 주요 전략 물자의 대외 의존성 탈피와 태동기에 있는 국내 항공산업의 발전에 기여할 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 이허수 외, "관성측정장치의 인자측정 및 제측정 방법 고찰", 한국 자동제어 학술회의 논문, 1987. 10.
- (2) 안영석 외, "관성측정장치의 아날로그 제평형 루프에 따르는 A/D 변환기 설계에 관한 연구", 한국 자동제어 학술회의 논문, 1987. 10.
- (3) 이장규 외, "선체자세 측정을 위한 스트랩다운 관성측정장치", 서울대학교 공과대학 부속 생산기술 연구소 1985. 5.
- (4) K.B BRITTING, "INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS ANALYSIS", JOHN WILEY & SONS INC., NEW YORK, 1971.
- (5) 이허수 외, "항공기용 SDINS의 항법 S-W 설계", 한국항공우주학회 춘계학술발표 논문, 1988. 4.