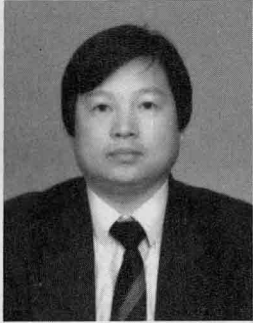


## 유도무기 항법기술

鄭太鎬 / 국방과학연구소  
선임연구원

유도무기의 개발에서 관성유도에 필요한 관성항법장치 기술의 확보는 필수적이다. 관성항법장치의 핵심부품이 되는 자이로 기술 및 발전추세에 대해서는 국내 학술 회의에서 최근에 발표된바 있으므로, 이 글에서는 국내의 관성항법장치 연구개발에 관심이 있는 관계자가 관성항법장치 기술을 개괄적으로 이해하는데 도움이 되도록 꾸며 보았다. 이에따라 관성항법장치 시스템에 대한 기본 원리, 하드웨어 설계제작 및 시험 평가 소요 기술, 그리고 관성항법장치의 유도탄 응용현황 및 발전 추세 등을 개략적으로 기술하였다. 이어 국내의 관성항법장치 보유 기술 및 추후 연구 개발이 필요한 기술에 대해 덧붙였음을 알린다 (필자 주)

**걸프戰** 당시 소련의 스킵-8 유도탄의 개량형인 이라크의 알 후세인 또는 알 압바스 중거리 지대지 유도탄의 항법 정밀도 및 핵 또는 화학탄두 탑재 가능성등이 전세계 이목을 집중시켰었다.

전쟁결과는 관성유도방식인 이라크 유도탄의 항법 정밀도가 높지 않았으며, 대부분의 이라크 유도탄이 미국의 패트리엇 유도탄에 의하여 요격됨으로써, 이라크가 의도한대로 전쟁의 양상을 변화시키지는 못하였었다.

그러나 일개의 개발도상국에 지나지 않는 이라크가 관성유도방식의 중거리 유도탄을 보유함으로써, 미국을 비롯한 전세계를 긴장시킬 수 있었으며, 이라크의 전쟁 상대가 최신형 유도탄 요격용 패트리엇 유도탄 보유국인 미국이 아니었을 경우 그 위력을 충분히 발휘할수 있었을 것이라고 생각할때, 유도무기의 국방 전략적 중요성 및 국제사회에서의 지위 향상에 미치는 영향은 지대한 것이라고 아니 할수 없다.

걸프전 이후 선진 7개국들이 유도무기 관련기술 및 관련부품에 대한 수출허가 승인이 더욱 엄격해지고 있음은 이를 뒷바침하는 것이라 사료된다.

유도탄의 유도방식에는 관성항법장치에 의한 관성유도방식, 레이다에 의한 지령유도방식, 탐색기, 지형대조항법 및 영상대조항법에 의한 종말유도방식등으로서 단독 또는 두종류이상을 혼합한 유도방식이 사용된다.

종말유도방식은 중장거리 유도무기에 단독으로 사용할수 없으며, 레이다에 의한 지령유도방식은 단거리에서는 단독으로도 정확한 유도가 가능한 장점이 있지만 유도도중에 적으로부터 전자교란을 받을수 있으며, 지상장비에 레이다를 운용해야하는 운용상의 복잡성이 있다.

또한 레이다의 추적한계에 의하여 유도탄의 사거리가 제한되므로, 중장거리 유도탄에는 관성유도 단독 또는 관성유도후 종말유도를 혼합한 방식이 널리 사용된다.

그러므로 중(中)거리 이상의 유도무기를 개발하기 위해서는 관성항법장치 기술의 확보가 필수적이다.

관성항법장치는 관성좌표계에 대한 항체의 회전각속도를 측정하는 자이로와 항체의 비힘(Specific Force)을 측정하는 가속도계를 이용하여 항체의 위치, 속도, 자세등의 정보를 계산하는 장치이다.

관성유도방식은 이러한 유도탄의 관성항법 정보를 제공받아 유도법칙에 따른 유도명령을 계산하고 유도탄을 유도조종하여 목표지점까지 유도탄을 도달시키는 것이다. 관성항법장치의 핵심부품이 되는 자이로의 기본원리, 설계제작 소요기술 및 발전추세에 대해 국내에서 최근에 발표된바 있다.

이 글에서는 하드웨어 설계제작 및 시험평가 소요기술, 관성항법장치의 유도탄 응용현황 및 발전추세등을 개략적으로 기술해 국내의 관성항법장치 연구개발에 관심이 있는 관계자 여러분들이 관성항법장치 기술을 개발적으로 이해하는데 도움이 되도록 했다.

### 관성항법장치 설계제작 기술

#### ● 항법 알고리즘

##### \* 항법계산 알고리즘

항법좌표계에서의 항체의 속도를 구하고 위도, 경도 및 고도를 계산한다. 항법을 계산하기 위해서는 지구 중력가속도 모델에 의하여 위치변화에 따른 중력가속도를 계산하여야 한다.

##### \*SDINS 자세계산 알고리즘

SDINS에서 실시간 자세계산을 위한 알고리즘에는 Euler각 미분방정식, 좌표변환 행렬 미분방정식 및 Quaternion 미분방정식 등이 있는데, Euler각 미분방정식에 비하여 복잡한 삼각함수의 계산이 필요없고 Singularity 특성이 없으며, 좌표변환 미분방정식에 비하여 Orthogonality 유지가 용이한 장점이 있는 Quaternion 알고리즘이 널리 사용되고 있다.

이때 원추운동등 자세계산시 발생하는 비교환오차를 보상하는 알고리즘으로 Goodwin-Robinson 이론을 근거로한 다수 샘플 알고리즘, 이전 샘플 알고리즘 등이 있다.

##### \* 고도계 보정 알고리즘

항법좌표계가 n좌표계인 경우 고도계산 오차를 가속도계 오차에 의하여 시간에 따라 급격히 발산한다. 이를 보정하기 위한 고도계 보정 알고리즘이 있다. 이 알고리즘을 적용하기 위한 보조장치로는 기압고도계와 레이다 고도계가 있다.

##### \*SDINS 초기정렬 알고리즘

AINS와 같이 안정대 구조가 없는 SDINS의 초기정렬은 자이로 및 가속도계 출력을 이용하여 항체의 초기자세를 결정하는 것이다. 이러한 SDINS초기 정렬 알고리즘에는 고정이득 알고리즘 및 초기정렬 칼만필터가 있다.

##### \* 두 위치 초기정렬 알고리즘

두 위치 초기정렬은 감지기 좌표계가 항체의 자세와 수직축으로 반대 위치가 되도록하여 초기정렬을 수행하고, 본래의 위치에서도 초기정렬을 수행하여 두 위치에서의 초기정렬 결과에 의해 수평축 자이로오차 및 방위각 오차를 보상해주는 알고리즘이다.

한편 칼만필터에 의하여 두 위치 초기정렬을 수행할수도 있다. 이렇게 하여 초기정렬 성능을 크게 개선할수 있다.

##### \* 초기정렬 전달 알고리즘

유도탄을 탑재한 항체의 정밀한 모 INS를 이용하여 상대적으로 정밀도가 낮은 유도탄 INS의 초기정렬을 보다 정밀하게 수행할수 있는 알고리즘을 초기정렬 전달 알고리즘이라고 한다.

이러한 초기정렬전달 알고리즘에는 유도탄을 탑재한 항체가 정지한 상태에서 초기정렬을 수행하는 경우와 이동중 수행하는 경우가 있다.

전자는 이동식 발사대에 장착된 정밀한 INS를 이용하여 중력가속도 벡터와 발사대를 들어 올릴때의 회전 벡터에 대한 두종류 INS

의 측정치를 비교함으로써 두 INS좌표계 사이의 회전 벡터를 추정하고, 발사대 INS를 기준으로 정밀한 유도탄 INS 초기정렬 수행이 가능한 알고리즘이다.

후자는 전투기 또는 전함의 정밀한 INS를 이용하여 정밀하게 유도탄 INS 초기정렬 수행이 가능한 알고리즘으로써 유도탄을 탑재한 항체가 이동중의 두 INS의 항법정보를 비교하여 칼만 필터를 수행함으로써, 유도탄의 자세오차를 교정하는 알고리즘이다.

단시간 고속비행을 하는 유도탄의 INS 오차는 주로 방위각 오차에 의하여 나타나는데, 1도/시간급 차이로 구성된 유도탄 INS의 경우 차이로 콤팩스 초기정렬시 방위각 오차가 매우 크게 나타나므로, 모 INS를 이용하는 초기정렬 전달 알고리즘을 적용해 유도탄 INS의 항법성능을 크게 향상시킬 수 있다.

#### \* 항해중 초기정렬 알고리즘

차이로 콤팩스 초기정렬 오차가 큰 유도탄 INS에서 초기정렬 전달 알고리즘을 적용할 수 없는 경우, 발사후 초기에 위치 및 속도 측정기와 같은 보조장치를 이용하여 항해중 초기정렬을 수행하는 알고리즘이다.

#### \* 영속도 보정 항법 알고리즘

이동식 발사대의 자동측지장비에 적용할수 있는 것으로 차량을 10분 이내에서 주기적으로 정지시킨 후 정지상태의 영속도를 기준으로 항법장치를 교정하는 알고리즘이다.

이 알고리즘을 적용할 경우 이동중 차량을 주기적으로 정지시켜야 하는 운용상의 단점이 있지만, 수시간 사용하여도 고도를 포함한 위치오차가 수십 m 이내로 유지되는 좋은 항법오차 특성이 있어서 작전 수행에 영속도 보정이 가능한 경우 매우 유용한 알고리즘이다.

#### \* 보정항법 알고리즘

관성항법장치의 항법오차는 시간에 따라 증가하므로 오차특성이 일정하게 유지되는 비관성 보조센서를 이용하여 보정항법장치를 구성할 경우 정밀도가 낮은 INS에 적용하여도 항법성능이 크게 개선된다.

자동측지장비의 경우 영속도 보정항법 알고리즘과 속도보정 항법을 병행하여 사용하기도 한다. 보정항법에는 GPS, TACAN, LORAN, TERCOM, RADAG등 위치보정 항법이 있고, EM Log, 주행거리계, 어뢰의 Tachometer 등 속도보정항법이 있으며, 별 관측에 의한 자세보정항법등이 있다.

### ● 하드웨어 설계제작기술

#### \* 항법컴퓨터

SDINS의 경우 실시간 자세계산을 위하여 GINS보다 계산량이 많이 요구되며, 최근 보정항법 칼만필터의 구현으로 고성능 소형 마이크로 프로세서 설계기술이 필요하다.

#### \* GINS의 안정대

GINS의 안정대를 설계하기 위해서는 감지기 축배열, 짐벌구조의 동특성해석 및 열전달 특성등을 고려하여 감지기몽치 및 짐벌구조를 설계하고, 짐벌모터, Synchro 및 안정대 성능에 직접적인 영향을 주는 고성능 베어링을 확보하고, 구동회로를 설계한 후 짐벌 서어보 시스템의 수학적 모델링을 통하여 안정대 제어를 설계한다.

그리고 감지기, 감지기 장착대 및 짐벌 구조에 대한 열전달 수학적 모델링을 통하여 감지기 온도제어 시스템을 설계한다. 짐벌구조 설계, 제어기 설계 및 감지기 온도제어 설계가 종합적으로 이루어져야 하는점이 설계에 어려움이 있다고 하겠다.

그리고 안정대의 동특성을 해석하여 진동 흡수장치를 설계한다. GINS의 안정대를 제작함에 있어서 감지기 측정렬, 짐벌 불균형 보상, 짐벌 및 Synchro 측정렬 등의 기술이 필요하다. 한편 GINS의 초기정렬 수행을 위한 개략정렬 및 정밀정렬의 두 초기정렬 루우프를 설계해야 한다.

#### \* SDINS의 관성측정기

SDINS의 감지기 축배열 및 온도제어를 고려하여 장착대를 설계한다. 두 위치 초기정렬을 수행하는 SDING의 경우 두축에 고정 가능한 감지기 장착대를 설계해야 한다.

SDINS에서는 GINS보다 온도변화에 민감한 차이로 척도계수 오차가 항법오차에 큰 영향을 주므로 감지기 온도가 섭씨  $\pm 0.1$ 도 이내로 제어되도록 요구된다. 복잡한 열전달 모델링을 하지 않고 온도제어기를 설계할수 있는 방법도 있다.

SDINS에서도 GINS에서와 같이 진동흡수장치가 필요하다. SDINS는 감지기의 재평형 회로 및 아나로그/주파수 변환기회로 설계가 필요한데 SDINS에서는 자이로의 측정범위가 1도/시간에서 100도/초까지 넓은 범위를 측정해야 하며, 척도계수의 안정도는 수십 ppm 이하가 요구되므로 아나로그/주파수 변환기회로설계가 가장 어려운 기술중의 하나이다.

재평형 회로에는 아나로그 방식과 디지털 방식이 있는데, 디지털 방식은 아나로그/주파수 변환기 기능을 포함하고 있으며 측정범위 확장이 아나로그 방식보다 용이하다.

● 성능시험

\*GINS 안정대 교정시험

GINS의 감지기 오차를 교정하기 위해서는 Synchro 서어보 루우프가 필요하다. 이 루우프에 의하여 감지기 뭉치를 다위치에 고정할 수 있으며, 다 위치에서 측정된 감지기 출력 데이터로 감지기 오차를 계산할수 있다.

이에 대한 오차보상은 보상회로 또는 오차보상 프로그램에 의하여 보상한다. 하드웨어로 보상하려면 정밀한 오차보상 회로 설계기술이 필요하다.

\*SDINS 관성측정기 교정시험

정밀 회전 테이블을 이용하여 다위치에서 정지상태 및 등각속도 운동에 따른 감지기 출력을 측정하고, 오차방정식에 의한 계산 또는 최소자승법에 의하여 관성측정기의 감지기 오차 및 감지기 축 배열오차를 측정한다. SDINS의 경우 자이로 척도계수오차의 정밀 측정을 위해 정밀 회전 테이블이 필요하다.

\*GINS 시스템 교정시험

GINS의 시스템 교정시험에는 4위치 교정시험과 단축 술러시험이 있다.

4위치 교정시험은 감지기 뭉치의 방위각을 90도씩 회전시켜 주면서 초기정렬을 수행하고, 4위치에서의 초기정렬 결과에 의하여 자이로 오차를 교정한다.

단축 술러시험은 정지상태의 항법장치에 큰 초기 속도오차를 인가하여 술러주기 특성을 갖고 나타나는 시간 경과에 따른 속도오차 변화를 측정한다.

\*SDINS 시스템 교정시험

SDINS 시스템 교정시험에는 다위치 시스템 교정시험이 있다. 이 시험은 다위치에서의 속도오차 변화를 측정하여 최소자승법에 의하여 감지기 오차를 추정한다.

\*GINS 시스템 성능평가 시험

GINS 시스템 성능평가 시험에는 정지 항법시험 및 두축 술러시험이 있다. 정지 항법시험은 정지상태에서 위치오차 및 속도오차의 변화를 3시간 이상 측정하여 평가기준에 의거 판정한다. GINS에서 정지항법 시험으로는 자이로의 질량불균형오차가 감지되지 않으므로, 이를 감지하기 위해서 두축 술러시험을 수행한다.

두축 술러시험은 단축 술러시험과 같은 방법으로 동시에 두축으로 초기 속도오차를 인가하여, 시간에 따른 속도오차의 변화를 측정하고, 정상적인 속도오차로부터 벗어난 속도오차가 평가기준 이내인가를 판정한다.

\*SDINS 시스템 성능평가 시험

SDINS 시스템 성능평가 시험에는 정지 항법시험과 회전진동시험이 있다. SDINS는 자세변화시 서로 상쇄되었던 초기 정렬오차와 감지기 오차가 상쇄효과를 잃게되어 항법오차가 크게 나타나는 특성이 있으므로, 초기정렬후 자세가 유지되는 경우와 초기정렬후 방위각이 180도 회전한 경우에 대해서 정지항법 시험을 수행하여 평가기준과 비교한다.

SDINS는 항체의 회전진동시 자이로 동적오차에 의한 큰 항법오차가 발생되므로, 3축 회전 테이블에서 SDINS에 진동을 가하여 시간 경과에 따른 항법오차를 측정, 비교한다.

## ● 항법장치 시뮬레이션

### \* 항법장치 오차모델

섭동(Perturbation)방법에 의하여 유도한 GINS 오차모델이 발표되어 있으며, SDINS 오차모델은 자세오차를 오일러각 오차로 표시한 모델과 Quaternion 오차로 표시한 모델이 있다.

그리고 자이로 콤파스 초기 정렬을 수행하는 INS에 대해서 초기정렬 오차특성을 고려한 INS 오차모델이 발표되어 있는데, 이 모델은 실험실에서 INS 성능평가를 위한 정지 항법오차 분석에 유용하다.

감지기 오차모델은 각 오차요인에 따라 실제에 가까운 수학적 모델(불규칙 상수, 백색잡음, 랜덤 워크, Markov 프로세스등)로 모델링한다. 실험 데이터로부터 수학적 모델 계수를 추정하기도 한다.

### \* 항법장치 오차분석

항법오차는 항체의 비행궤적 및 시간 경과에 따라 변화하는데, 계산량이 많아서 전산 시뮬레이션에 의존할 수밖에 없다.

항법오차 시뮬레이션은 다음과 같은 목적에 필요하다.

-INS 응용을 위한 항법오차를 예측

-INS 개발시 각 오차요인의

오차 허용범위 결정

-INS 알고리즘 개발을 위한

항법오차 분석

-교정시험기법개발시 최소자승법 계수결정

-성능시험 평가기준 설정

따라서 다양한 종류의 항법오차 시뮬레이션 프로그램 개발이 요구된다.

순항 유도탄(ICCM)은 INS로 중기 유도후 지형대조항법(TERCOM)에 의해 INS를 보정하는 종말유도가 있다.

Pe-rshing II의 경우에는 영상대조항법(RADAG)에 의하여 INS를 보정하는 종말유도를 한다. 현재까지는 장거리 유도무기에 GINS가 사용되는 것으로 알려지고 있으며, 0.1~0.3NM/HR로 추측된다. 앞으로 레이저 자이로(광로길이: 42cm)를 이용한 레이저 관성항법장치로 대체될 것으로 예상된다.

### \* 중거리 지대지 유도탄

랜스, 플커튼, 스킵드-B, 퍼싱 I 등 사거리가 100~700Km 정도인 중거리 지대지 유도탄에서는 대체로 관성유도방식이 사용된다. 정확도(GEP)는 1.3마일 정도로 추측되며, 요구정확도에 따라 GINS와 SDINS가 선택적으로 사용된다.

최근에 미국에서 개발된 ATACMS 지대지 유도탄은 0.02도/시간급의 레이저 자이로를 이용한 레이저 INS를 사용하였으며, 발사대의 자동측지장비에 의한 초기정렬전달기법 적용으로 항법정확도를 1마일 이하로 향상시킨 것으로 알려지고 있다. 향후 SDINS의 응용이 확대될 것으로 예상된다.

### \* 대공·대함 유도탄

사거리가 30~120Km 정도인 대공·대함 유도탄에서는 중기유도에 관성유도 또는 레이다에 의한 지령 유도방식, 탐색기에 의한 종말유도방식을 단독으로 또는 두 종류 이상을 혼합한 유도방식을 사용한다.

예를들면 엑조세(Exsocet)의 경우 관성유도 후 능동 탐색기 유도방식을 사용하며, 패트리엇의 경우는 레이다와 능동탐색기를 동시에 사용하는 유도방식을 사용하는데 자세기준장치로써 SDIMU가 사용된다.

### \* 어뢰

신형 MK-48 ADCAP 중어뢰에서는 중기 유도에서 Tachometer에 의한 속도 보정 INS를 사용하고, 종말유도에서는 음파탐지기로 유도한다.

## 유도무기의 INS 응용현황 및 발전추세

### \* 장거리 유도무기

대륙간 탄도탄(ICBM) 및 수중발사 탄도탄(SLBM)에는 GINS가 응용되고 있으며, 발사후 탄도탄이 분리되기전에 별을 관측하여 INS를 보정해 준다.

어뢰 INS의 경우 기술적으로는 모선의 INS를 이용하여 발사전에 항해중 초기정렬이 가능한것으로 판단되는데 어뢰 무기체계에서 이 기법의 채택여부는 확인되지 않고 있다.

MK-50, Murence(개발중)등 경어뢰에서는 항법의 중요성이 별로 없으므로 음파탐지기 에 의한 유도방식을 사용하며 자세기준 장치 (IRS)로서 SDIMU가 사용된다.

**\* 발전추세**

이동식 발사대의 자동측지장비도 유도무기 체계의 소요기술이므로, 유도무기 관성항법장치 기술은 거의 모든 관성항법장치 기술을 포함하고 있다고 볼수 있다. 여기서는 관성항법장치 기술의 발전추세를 기술했다.

SDINS에 적합한 레이저 자이로의 개발로 성능면에서도 GINS와 대등하게 되어, 전반적으로 어느 응용분야에서나 SDINS의 응용범위가 확대되는 추세에 있다. SDINS에 사용되는 자이로는 0.1도/시간급 이하인 경우 동조자이로가 많이 사용되고 있으며 0.01도/시간급 이상에서는 레이저 자이로가 사용되고 있다.

최근에는 크기가 큰 레이저 자이로(광로길이 : 42cm)로서 0.1~0.3NM/시간급의 GINS를 대체하려고 노력중이며, 크기가 작은 레이저 자이로(광로길이 : 15cm 이하)로서 0.1도/시간급 이하의 동조자이로 SDINS를 개발하는 추세이다. 한편 고성능 마이크로 프로세서의 발달로 각종 보정항법, 항해중 초기정렬기법, 초기정렬 전달기법 적용등 현대제어이론 적용분야가 확대되는 추세이다.

**맺는 말**

중장거리 유도무기에는 물론 다른 유도방식을 갖는 단거리 유도탄에서도 관성기준시스템(IRS)을 사용하는 등 유도무기를 개발함에 있어서 INS 기술은 필수적이다. 이 INS 기술에는 지금까지 주로 언급한 INS 시스템 분야 이외에도 자이로 및 가속도계 등 감지기 분야를 생각하지 않을수 없다.

INS 감지기 분야를 포함한 국내의 INS보유 기술은 자이로 및 가속도계를 포함한 GINS의 조립생산 기술, INS 항법 알고리즘, 오차분석 및 시뮬레이션 기술, INS 시험평가 기술 등이 있다.

또한 SDINS용 동조자이로 및 광섬유 자이로 설계, 보정항법 알고리즘 구현 등을 연구 개발중에 있다.

추후 국내에서 연구 개발이 필요한 INS 기술에는 각종 INS에 소요되는 자이로를 포함하는 INS의 하드웨어 설계제작, 각종 항법 알고리즘 구현에 따른 문제점 도출 및 해결, 보정항법장치에 대한 시험평가 기술등이 있으며, 이 분야에 대한 관계자 여러분들의 깊은 관심과 참여 있으시기를 기대한다.\*

**참 고 자 료**

- ▲ 오 문수, 문 홍기, 「관성 계측 기술」, 유도항법제어 심포지움, 한국자동제어 협의회, 1991년 2월 25-26일, pp13-44
- ▲ 이 장규 하 인중, 박 찬국, 강 태중, 「스트랩다운 관성항법장치의 자세계산 알고리즘」, 국방과학연구소, GUCD-417-88156, 1988년 5월
- ▲ R.Mckern, H.Musoff, 「Strapdown Attitude Algorithms from a geometric viewpoint」, J.Guidance, vol 4, no 6, NOV., 1981.
- ▲ R.B, Miller, 「A New Strapdown attitude algorithm」, J. Guidance, 1983.
- ▲ Jang, G. Lee, Yong J. Yoon & John G.Mark & Daniel A. Tazartes, 「Extension of Strapdown Attitude algorithm for high-frequency base mation」, J.Guidance, Vol. 13, No. 4, July-Aug. 1990.
- ▲ J.F.Bellantoni & E.J.Koenke, 「Launch Pad Alignment of a Strapdown Navigator by the Kalman Filter」, AIAA Paper, NO.68-831
- ▲ I.Y.Bar-Itzhack & E.F.Mallove, 「Accurate INS Transfer Alignment using a monitor Gyro and External Navigation Measurements」, IEEE Trans. A.E.S, Vol. AES-16, No.1, Jan. 1980