

DTG (Dynamically Tuned Gyroscope) 설계 및 제작

이 장 규  
서울대학교 제어계측공학과

이 장 무  
서울대학교 기계설계공학과

연 중 수  
서울대학교 전기공학과

김 원 찬  
서울대학교 전자공학과

이 동 녕  
서울대학교 금속공학과

Design and Fabrication of a Dynamically Tuned Gyroscope

°Jang Gyu Lee  
Dept. of Control & Instrumentation Eng.

Jang Moo Lee  
Dept. of Mechanical Design & Production Eng.

Jong-Soo Won  
Dept. of Electrical Eng.

Won Chan Kim  
Dept. of Electronics Eng.

Dong-Nyung Lee  
Dept. of Metallurgical Eng.

Abstract

Among the gyroscopes used for SDINS, the dynamically turned gyroscope (DTG) covers a wide dynamic range while it is simple and small. In addition, it is a two-degree-of freedom gyro; it can detect two-axis input simultaneously. DTG, since its development in 1970's, is widely accepted for strapdown inertial systems.

In the first year, we have concentrated on developing a two degree-of-freedom DTG. An interdisciplinary research team has been formed to accomplish the first year objective. Five departments in the College of Engineering, Seoul National University are involved. They are; 1) Department of Control and Instrumentation, 2) Department of Mechanical Design and Production, 3) Department of Electrical Engineering, 4) Department of Electronic Engineering, and 5) Department of Metallurgical Engineering. In addition, the Department of Precision Mechanical Engineering of Pusan National University is sub-contracted to develop a test procedure for gyroscope and SDINS.

Gyroscope is a key sensor for SDINS. Furthermore gyroscope itself is used as an independent sensor for vehicle guidance and control and fire control system. Gyroscope and SDINS are an important instrument for defense, aeronautical, and space industries that Korea is and will be actively involved. Upon the success of the project, they are expected to be manufactured in Korea under a cooperative effort between university and industry.

1. 서 론

자유공간을 움직이는 항체에 있어서 위치, 속도 자세에 대한 정보는 항체의 유도 및 제어를 위하여 필요한 기본적인 정보량이다. 관성항법장치(Inertial Navigation System-INS)는 이들 정보를 외부와의 교신없이 연속적으로 제공하는 장치로서 인공위성, 항공기, 잠수함, 미사일등에 긴요하

게 사용되고 있다. INS는 2차대전 말기부터 연구가 시작되어 전후 미국과 유럽등지에서 급속도로 개발되었으며 주로 군사적 용도로 연구 개발되었기 때문에 국가간의 기술이전이 거의 없는 실정이다. 이제 비군사용으로도 쓰이기 시작하여 인공위성, 여객기등에 사용되고 있으며 우리나라에서도 앞으로 국방산업 또는 우주항공기술 개발을 위해서는 INS에 대한 연구 개발이 절실히 요구된다.

INS는 크게 두가지로 분류된다. 한가지는 짐벌(gimbal)과 플랫폼(platform)을 사용하는 짐벌시스템(gimbaled system)이고 다른 한가지는 짐벌이나 플랫폼이 없이 관성 센서를 항체에 직접 부착시키는 스트랩다운 시스템(strapdown system-SDINS)이다.

지금까지의 관성항법장치 개발은 짐벌시스템에 의존하였으며 현재 사용되고 있는 대부분의 관성항법장치가 그 범주에 속한다. 스트랩다운 시스템은 플랫폼(platform)을 사용하지 않고 가속도계와 자이로스코프의 출력을 이용해 항체의 초기상태와 현재 상태의 상대적인 위치 및 자세를 해석적으로 계산해 나가는 것이다. 즉, 지금까지 주로 사용되어온 짐벌시스템에서는 플랫폼을 안정시켜 일정한 기준좌표계(reference frame)를 유지하고 그 위에 자이로스코프와 가속도계가 위치하지만 스트랩다운시스템에서는 센서들이 직접 몸체에 부착되어 기준좌표계를 연속적으로 계산하여 가상적인 플랫폼을 컴퓨터에 저장시키는 것이다.

스트랩다운관성항법장치를 개발하는데 있어 가장 문제가 되는 것은 극정확한 자이로스코프 개발과 빠른 속도의 연산을 수행할 수 있는 프로세서의 개발이다. SDINS에 사용되는 자이로스코프는 동작 범위가 넓으면서도 최소한 오차를 갖는 것이어야 한다. 현재 사용되고 있는 SDINS 자이로스코프로는 레이트적분자이로스코프(rate integrating gyroscope), 동조자이로스코프(dynamically tuned gyroscope : DTG), 링레이저자이로스코프(ring laser gyroscope : RLG) 등이 있으며, 이러한 자이로스코프의 오차를 줄이기 위한 연구가 계속되고 있다. 이중 DTG는 미국에서 1960년대에 개념이 정립되고 1970년대에 개발되기 시작하여 1980년대에 본격적으로 실용화된 기기로 현재는 관성항법장치 또는 유도제어용 센서로 널리 채택되고 있다. 다른 자이로스코프와 비교하여 아직 정밀도는 떨어지지만 가격이 싸고 부피가 작으며 기계적으로 간단하고(반면 전기적으로 다소 복잡함) 특히 동작범위가 넓어 초정밀을 요구하지 않는 SDINS 또는 SDIMU에 더욱 많이 채택될 전망이다.<sup>1)</sup>

DTG가 이와같이 선진국에서는 개발이 완료되고 실용단계에 있으나 주로 군사적 용도로 개발되었기 때문에 국가간 기술이전이 쉽게 이루어지지 않아 우리나라에는 전혀 생산한 자이로스코프이다. 따라서 본 연구의

1차년도 목표는 DTG 개발에 역점을 두었다. DTG는 기계, 전기, 전자과  
 트가 복합된 메카트로닉스 계측기기 (mechatronics instrument)로서 각  
 운동변화량을 정확히 측정하는 정밀센서이다.

기계적으로 보면 고속으로 회전하는 회전자가 비틀림자 (torsion bar)를  
 사이에 두고 자이로결합과 후크스결합 (Hooke's joint)을 이루고, 세차운동  
 (precession)에 의해 발생하는 음의 스프링계수 (negative spring coef-  
 ficient)와 비틀림자가 갖는 양의 스프링계수 (positive spring coef-  
 ficient) 값이 같아지는 동조된 상태 (tuned condition)를 유지하도록 비  
 틀림자의 굽기를 결정하고 (보통 0.5mm 이하의 두께) 그에 맞도록 가공해  
 야 되기 때문에 설계, 가공상의 어려움이 따른다.

전기적으로는 회전자를 일정한 고속 (12000 rpm 이상)으로 회전시킬 수 있  
 는 모터설계, DTG에 입력된 각속도에 비례하여 세차된 기울기를 검출하  
 는 각검출기 (pick-off), 그리고 기울어진 회전자를 원위치로 복원시키는 토  
 커 (torquer) 등이 모두 정밀하게 설계되어야 하며 동시에 크기가 작아야  
 하므로 그에 따른 설계, 제작이 또한 쉽지 않다. 전기과트를 동작시키고,  
 각검출기에서 검출된 신호를 처리하는 전자회로가 DTG 외부에 외장 된다.  
 DTG 전자회로중 가장 중요한 것은 토커에 정확한 제어입력을 계산해 내  
 어야 하는 재평형루프 (rebalance loop)와 각검출기 신호를 컴퓨터에 공  
 급하는 전류/주파수 변환기 (current-to-frequency converter)이다. 이  
 러한 전자회로들은 현재 PCB (printed circuit board)를 이용하나 본 연  
 구에서는 VLSI 기법을 써서 소형화하는 것을 시도하고 있다.

DTG는 소형이면서도 정밀도를 요구하는 계측기이며, 또한 장시간 사  
 용에도 견딜 수 있는 내구성을 필요로 하기 때문에 특수재료가 사용되며  
 각 부품의 제작과정에서 세심한 열처리가 요구된다. DTG에 사용되는 재료  
 는 덮개 (cover)로 사용되는 스텐레스강외에 국내에서 생산되는 것이 하  
 나도 없다. 따라서 각 부품의 특성에 맞는 재료준비가 본 연구에서 중요  
 한 부분을 차지하고 있다.

## 2. DTG의 구조

DTG는 그림과 같이 자이로스코프 케이스 (case)를 기준으로 윗  
 부분에는 외부의 회전을 감지 (detecting)하는 인지부 (sensitive part)와 밑  
 부분에는 그 인지부에 커다란 각 운동량 (angular momentum)을 발생하기  
 위한 회전을 제공하는 모터부 (motor part), 그리고 인지부와 모터부의 전원  
 및 신호처리를 담당하는 구동부 (driving part)로 구성되어 있다.<sup>2)</sup>

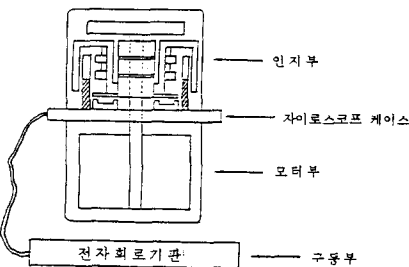


그림 1. DTG 구성도

인지부는 다시 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 나누어지는데, 기계적  
 인 부분은 회전축과 감물 그리고 회전자가 후크스 결합으로 구성된 서스  
 펜션 (suspension), 커다란 관성을 유지함으로써 입력의 각변화율에 따라  
 각검출기에 검출각을 일으키는 회전자, 회전자가 선형동작 범위를 벗어났  
 을 때 제한을 가하는 스톱퍼 (stopper), 모터부의 회전을 인지부로 전달시

키는 회전축 (shaft)과 DTG시스템을 보호하고 외부로부터 자장을 차단하  
 기 위한 덮개 (cover)로 구성되어 있다. 전기적인 부분은 회전자가 케이  
 스축에 대하여 기울어진 회전각을 2차 포일에 유도되는 전압으로써 측정하  
 는 각검출기 (pick-off)와 기울어진 회전자를 그에 비례하는 전류에 따  
 라 힘을 발생시켜 주어 도로 잡아주는 자석과 토커코일 (torquer coil)로  
 구성되어 있다.

모터부는 인지부에 고속의 일정한 회전을 공급해 주기 위하여 히스테리  
 시스 (hysteresis)모터를 사용하는데, 만일 회전속도에 약간의 변동 (varia-  
 tion)이 발생하는 경우에 DTG성능에 직접적인 영향을 주기 때문이다.

구동부는 이미 앞에서 설명한 DTG시스템을 구동하기 위한 모든 신호  
 를 발생시키는 인버터 (inverter) 회로, 회전자가 케이스에 대해서 기울어졌  
 을 때, 이를 일차시키기 위해서 토커 코일에 전류를 제공하는 재평형 (re-  
 balance)루프, 이 전류중의 일부를 뺐내어 컴퓨터가 인식할 수 있는 걸  
 스신호로 바꾸어 줌으로써 자이로스코프 출력을 알고리즘프로세서에 제  
 공하는 A/F (current to frequency) 변환기와 DTG시스템의 온도변화에 따  
 른 영향을 줄여주기 위한 온도제어기 회로로 구성되어 있다.

## 3. 동작원리

자이로스코프의 회전자는 후크스결합으로된 서스펜션에 의해 매달려 있  
 어 자이로스코프 회전축에 따라 회전하게 된다. 그러므로 회전자와 감물은  
 모터의 회전속도(N)와 그들의 관성에 의해 결정되는 각운동량을 갖게 된다.  
 그림 2는 자이로스코프 케이스의 기준 입력축에 입력각속도가 있을 경  
 우 회전자, 감물 그리고 회전축간의 관계를 도시한 것이다. 즉 고정된 케  
 이스의 기준 입력축에 입력각속도가 있을 경우에 회전자는 그의 각운동량  
 때문에 세차운동 (precession)되기 전의 상태를 유지하려 한다. 그러나 감물  
 은 각운동량과 입력각속도의 크기에 따라 결정되는 진폭크기로 기울게 된  
 다. 이와같은 현상을 다이나믹 효과라 한다.

회전축, 감물 그리고 회전자가 N의 속도로 회전하고 있을 때 회전하지  
 않은 케이스에 고정된 X<sub>1</sub>축, Y<sub>1</sub>축에 각각 각속도가 입력되면 회전자의 X<sub>1</sub>  
 축으로  $\phi_x$  만큼 세차운동이 발생되고, 감물이 Y<sub>1</sub>축으로  $\phi_y$  만큼 세차운동이  
 발생된다.  $\phi_x$ 와  $\phi_y$ 의 크기는 다이나믹 효과에 의해 결정되며, 이때 비틀  
 림자는 음의 스프링계수 (negative spring coefficient)를 갖게된다. 그러나 이  
 비틀림자는 재질에 따라 결정되는 양의 스프링계수 (positive spring coef-  
 ficient)를 갖고 있기 때문에 반작용 토커가 발생되어 감물을 원상태로  
 유지하려는 힘으로 감물이 진동하게 된다. 어느 일정한 회전속도 상태하에  
 서 양의 스프링 계수와 음의 스프링 계수가 같도록 감물의 관성을 조절  
 하였다면, 그림 3과 같이 회전축과 회전자의 스프링 결합율이 "0"이  
 되어 진동이 발생되지 않을 것이다.<sup>3)</sup> 이와같은 상태를 동조된 상태 (tuned  
 state)라 하고 이때의 동조주파수는 회전축의 회전속도가 된다. 동조된  
 상태하에서는 회전자와 회전축은 서로 비결합되어 있으므로, 자이로케이스축  
 과 회전자는 서로 자유 (free)상태가 된다. 그러므로 자이로케이스와 회전  
 자간의 편각은 입력각속도에 비례 (비례상수는 -1)하게되어 프리자이로스  
 코프와 같이 동작한다. 그러나 케이스와 회전자간의 편각이 큰 경우에는 비  
 틀림자의 땀핀토크와 회전자의 항력 (drag) 때문에 회전자와 회전축이 서로  
 완전히 비결합 상태가 되지않아 프리자이로스코프로서의 기능을 상실하게  
 된다.

이와같은 이유때문에 회전자와 케이스간의 자유도가 0.5° 이상 되지않도록  
 하여야 하므로 이 편각을 제어하는 귀환회로가 필요하다. 이 귀환회로를  
 재평형루프 (rebalance loop)라 한다.

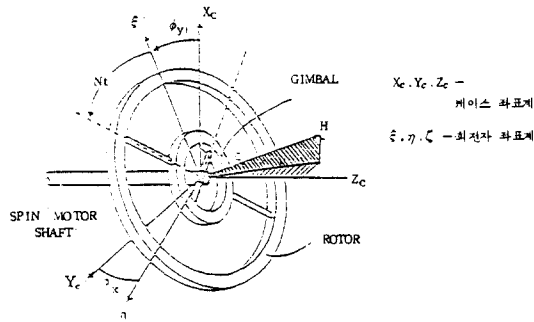


그림 2 DTG 회전자와 서스펜션시스템

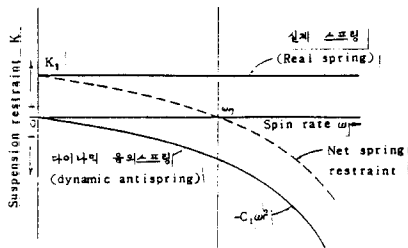


그림 3. 서스펜션 스프링계수

#### 4. 결 론

본 연구는 스트랩다운 관성항법장치 (SDINS)를 국내기술로 설계, 제작해 봄으로써 정밀계측장치 제작에 따르는 해석기법을 얻어 내는데 그 목적을 두고 있다. SDINS는 자유공간을 움직이는 항체의 유도제어를 위한 중심계측장치로 항체의 위치, 속도 및 자세정보를 제공해 준다. SDINS를 설계, 제작하기 위해서는 우선 그에 맞는 자이로스코프가 만들어 져야 한다. SDINS에 맞는 자이로스코프는 동작범위가 크면서도 정밀도가 높아야 하는 특성을 요구하고 있으며, 동조자이로스코프 (dynamically tuned gyroscope)와 RLGi (ring laser gyroscope)가 대표적인 스트랩다운용 자이로스코프로 사용되고 있다.

동조자이로스코프는 1970년대에 미국에서 처음 개발된 것으로 구조가 간단하고, 크기가 작으며, 무게가 가볍고, 가격이 저렴하여 실제 시스템에 많이 채택되고 있다. 본 연구에서는 1차년도에 DTG 개발에 역점을 두어, 우선 시뮬레이션을 통하여 그 동작원리와 특성을 이해하고, 기존의 DTG 구조를 참조하여 독자적으로 각 부분을 설계, 가공하였다. 구체적으로, 1차년도에 수행된 연구결과를 나열해 보면 아래와 같다.

- (1) 동조자이로스코프 모델링 및 시뮬레이션
  - 동조자이로스코프 모델링
  - 시뮬레이션 프로그램 개발
  - 제작중인 자이로스코프 성능해석
- (2) 기계파트 설계 및 가공
  - 회전자 (rotor) 설계 및 가공 (재료: 2V-Permendur)
  - 서스펜션 (suspension) 설계 및 가공 (재료: maraging steel)
  - 회전축 (shaft) 설계 및 가공 (재료: maraging steel)
  - 스톱퍼 (Stopper) 설계 및 가공 (재료: Ti 합금)
  - 덮개 (cover) 설계 및 가공 (재료: stainless steel)
  - 하부링 (bottom ring) 설계 및 가공 (재료: permalloy)

#### (3) 전기파트 설계 및 제작

- 히스테리시스 모터 (hysteresis motor) 개조
- 각검출기 (pick-off) 설계 및 제작
- 토크 (torquer) 설계 및 제작

#### (4) 전자파트 설계 및 제작

- 인버터 (inverter) 회로 설계 및 제작
- 재평형루프 (rebalance loop) 설계 및 제작
- A/F 변환기 (current-to-frequency converter) 설계 및 제작
- 온도제어기 설계 및 제작
- VLSI를 이용한 A/F 변환기 설계 개선

이와같이, 히스테리시스 모터를 제외한 모든 부품은 본 연구에서 설계, 제작되었으며, 회전자를 구동시키기 위한 히스테리시스 모터는 시중에서 60 Hz 용을 구입하여, 회전축 (shaft)을 재 가공한 후 400 Hz로 작동시켜 12,000 rpm으로 회전 시키고자 한다. 자이로스코프 전용 히스테리시스 모터의 설계는 2차년도 연구에서 수행될 예정이다. 1차년도 연구결과 현재의 국내 기술로 동조자이로스코프의 설계, 제작이 가능하다는 결론을 내릴 수 있다. 우선은 정밀도가 떨어지겠지만, 연구가 계속되면 정밀도도 많이 향상될 수 있을 것으로 추측된다. 본 연구에서는 0.5°/hr의 랜덤오차를 갖는 자이로스코프 제작을 목표로 하고 있으며, 2차년도 연구가 끝날때까지 목표가 달성될 것으로 본다.

이미 서론에서 지적한 바와 같이 본 연구의 궁극적인 목적은 자이로스코프와 SDINS의 국내산업화에 있다. 본 국책과제에서 얻어진 연구결과를 기초로 하여 제품의 균일화, 신뢰성 향상등을 이룩하기 위한 산업체의 후가연구가 첨가된다면 그것이 가능하리라 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) S. C. Garg, L. D. Morrow, and R. Mamen, "Strapdown Navigation Technology: A Literature Survey," J. Guidance and control, May - June, 1978.
- (2) R. J. G. Craig, "Dynamically Tuned Gyros in Strapdown Inertial Navigation Components and Systems," AGARD - CP - 116, April, 1973.
- (3) 이장규 외, "선체자세 측정을 위한 스트랩다운 관성측정장치," 서울대학교 공과대학 부속 생산기술 연구소, 1985.5.
- (4) E. W. Howe and P. H. Savet, "The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro," Control Engineering, June, 1964.
- (5) John E. Bortz, "Dynamic Errors in a Tuned Flexure-Mounted Strapdown Gyro," The Analytic Sciences Corporation N 73-20682, 1973.
- (6) R. J. G. Craig, "Theory of Errors of a multigimbal, Elastically Supported Tuned Gyroscope," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES - 8, No. 3, May, 1972.