

자이로스코프에서 토키의 설계 및 해석

김홍규 · 정현교

서울대학교 공과대학 전기공학부
서울 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

홍선거

호서대학교 공과대학 제어계측공학과
충남 아산시 배방면 세출리 산 29-1, 337-795

(1995년 12월 16일 받음, 1996년 3월 5일 최종수정본 받음)

자이로스코프에서 기울어진 회전자를 바로 세우는 역할을 하는 것이 토키이다. 본 연구에서는 최대입력각속도 조건을 만족하면서 주어진 자석성능으로 최대의 특성을 낼 수 있는 토키의 설계에 대하여 알아보려고 한다. 자이로스코프의 기계적 치수가 결정되면 토키의 치수는 제한된다. 즉 코일이 위치하는 공간이 제한되므로 코일의 굵기가 결정되면 권선수도 정해지게 된다. 이 치수들을 이용하여 토키의 환산계수를 계산한 후, 코일에 흐를 수 있는 최대 전류를 계산하면, 최대 입력각속도가 계산되어진다. 토키의 특성해석은 3차원 유한요소법을 이용하였으며, 유한요소 해석 결과로부터 토키의 환산계수를 계산하였다. 실제 제작한 자이로의 성능실험을 통하여 제안된 토키 설계 알고리즘의 유용함을 입증한다.

I. 서 론

항체를 유도 또는 제어하기 위해서는 항체의 위치 및 속도, 자세에 대한 정보가 반드시 필요하다. 관성항법장치(Inertial Navigation System-INS)는 자이로나 가속도계와 같은 관성센서의 출력을 이용하여 항체의 위치 및 속도, 자세를 계산하고 이들 정보를 외부의 도움없이 연속적으로 제공하는 장치로서 인공위성, 항공기, 잠수함, 미사일 등에 필수적으로 사용되고 있다. INS는 2차대전 말기부터 연구가 시작되어 전후 미국과 유럽 등지에서 급속도로 개발되었으나 주로 군사적 용도로 연구, 개발되었기 때문에 국가간의 기술 이전이 거의 전무한 상태이다. 최근 INS가 민간용으로도 널리 쓰이기 시작하여 인공위성, 여객기 등에 사용되고 있다.

현재 사용되고 있는 자이로에는 레이트자이로(rate gyroscope), 동조자이로(dynamically tuned gyroscope-DTG), 링레이저 자이로(ring laser gyroscope), 광섬유자이로(fiber optic gyroscope) 등이 있으며, 이중 DTG는 다른 것들에 비해 가장 먼저 실용화되었으며 정밀도는 다소 떨어지지만 가격이 싸고 부피가 작으며 전기적으로는 다소 복잡하지만 기계적으로는 간단하고 특히 동작 범위가 넓어서 초정밀을 요구하지 않는 INS에 더욱 많이 사용되고 있는 추세이다.

DTG는 크게 기계요소, 전기요소, 제어요소로 구성되

어지며 전기 요소는 다시 회전자를 일정한 속도로 회전시키는 모터부, 회전자의 기울어진 각도를 검출하는 각 검출기, 기울어진 회전자를 다시 바로 세우는 토키부로 구성되어 있다. 그리고 토키는 다시 영구자석 및 토키코일로 구성되어 있다.

본 논문에서는 DTG의 전기 요소 중 토키에 대한 특성 해석 및 요구 사항을 만족할 수 있는 토키 설계에 대한 방법을 제시한다. 또한 제안된 설계 및 특성 해석 방법을 이용하여 제작한 자이로스코프를 실험결과와 비교함으로써, 그 유용함을 검토하였다.

II. 토키의 원리

DTG는 일정한 속도로 회전하고 있는 회전자가 입력을 받으면 기울어지며, 이 기울어진 각도를 이용하여 이동 물체의 위치에 대한 정보를 얻는 장치이다. 토키는 기울어진 회전자를 다시 바로 세워서 전기적으로 영상태(null)로 만들기 위하여 상쇄토크를 주는 부분이다. 토키는 영구자석과 코일로 구성된다.

Fig. 1는 자이로스코프에서의 토키 형상을 보여주는 그림이다. 토키코일은 Fig. 2와 같이 마주보는 두 코일이 한 쌍을 이루어 x, y 두 축에 대해서 토크를 발생시킨다. 영구자석은 Fig. 3처럼 위아래 2개조로 구성되어서 반경 방향으로 자속을 발생시킨다.

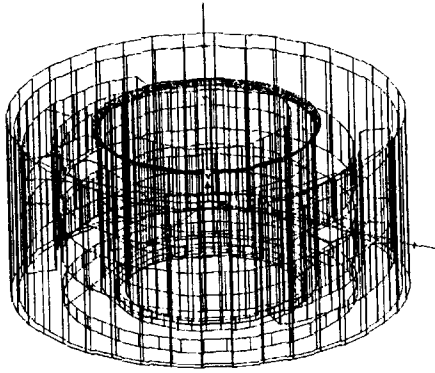


Fig 1. Shape of torquer

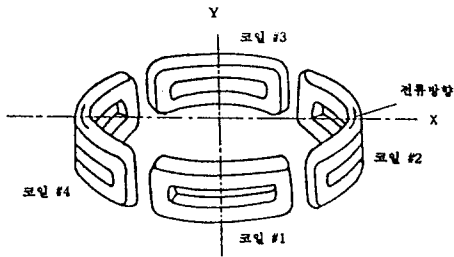


Fig 2. Torquer coil

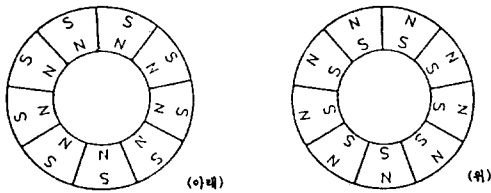


Fig 3. Magnetization configuration of permanent magnet

Fig. 4는 토오크의 발생 원리를 보여주기 위한 그림으로, 자속밀도와 전류의 방향을 그림에 표시한 것처럼 가정을 한다. 자속밀도의 방향과 전류의 방향이 이와 같은 경우 플레밍의 왼손 법칙에 따라 왼쪽의 코일부에서는 아래쪽으로, 오른쪽의 코일부에서는 위쪽으로 힘이 발생한다. 그러나 코일은 코일 받침대(crown)에 고정되어 있으므로 회전자가 비틀림자를 중심으로 시계 방향으로 회전하려는 토오크를 받는다. 전류의 방향을 바꾸면 토오크의 방향도 반대가 된다.

영구자석에 의한 자속밀도(flux density) B 가 있는

공간에 전류 I 가 흐르는 도체가 놓여 있고, 그 길이가 l 이면 그 도체가 받는 힘 F 는 다음 식으로 표현된다.

$$F = Il \times B \quad N \quad (1)$$

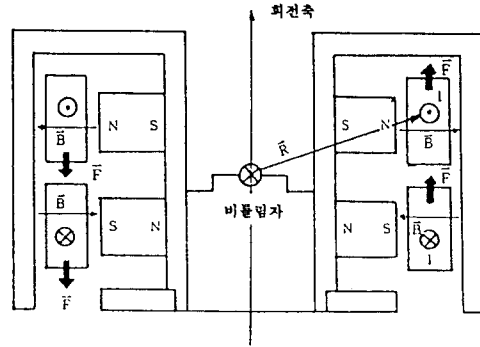


Fig 4. Mechanism of torque generation

코일부에 N 횟수의 코일이 감겨져 있으면 그 힘은 N 배가 된다. 즉 코일이 받는 힘은

$$F = NIl \times B \quad N \quad (2)$$

이 때 비틀림자로부터 도체까지의 길이를 R 이라면 이 도체에 다음 식과 같은 토오크 T 가 발생한다.

$$\begin{aligned} T &= R \times F \\ &= R \times (NIl \times B) \quad Nm \end{aligned} \quad (3)$$

이 코일은 코일 받침대(crown)에 고정되어 있으므로 같은 양의 토오크를 반대 방향으로 회전자가 받게 된다.

Fig. 4에서 자속밀도와 도체의 길이를 다음과 같이 놓는다.

$$B = B, \quad T \quad (4)$$

$$l = l\psi \quad m \quad (5)$$

1회 권선당의 도체가 받는 힘은 위의 식들을 이용하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= Il \times B \\ &= Il \times B_z \quad N \end{aligned} \quad (6)$$

비틀림 자로부터 도체의 길이를 다음 식으로 생각할 수 있다.

$$R = R_r + z, \tag{7}$$

여기서 R 은 비틀림자와 도체와의 반경방향 길이, z 는 높이이다. 따라서 발생토크는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} T &= R \times F = RI/B\psi \\ T &= RI/B \quad \text{Nm} \end{aligned} \tag{8}$$

토크의 해석은 정밀도를 필요로 하기 때문에 3차원 해석을 하여야 한다. 여기서 구한 토크를 이용하여 다음과 같은 토크상수 K_T 를 정의한다.

$$K_T = \frac{T}{I} \quad \text{Nm/A} \tag{9}$$

토크는 회전자가 기울어진 정도에 비례하는 토크를 발생시켜야 하며 이 때 흘려주어야 할 전류의 크기를 결정하기 위하여 다음 식으로부터 환산계수 (Scale Factor -SF)를 정의한다. [1]

$$\begin{aligned} T &= K_T I \\ &= H_s \omega_s \quad \text{Nm} \end{aligned} \tag{10}$$

K_T : 토크상수, H_s : 각운동량, ω_s : 회전자의 각속도
토크 환산계수는 다음 식으로 정의한다.

$$SF = \frac{\omega_s}{I} = \frac{K_T}{H_s} = \frac{K_T}{J_s \omega_s} \text{ rad/sec/A} \tag{11}$$

J_s : 회전자의 질량 관성 모멘트 $K_g \text{ mm}^2$

위의 식에서 알 수 있듯이 환산계수가 계산되어지면, 입력각속도에 비례하여서 전류 I 를 흘려주면 회전자에 상쇄토크를 주어서 바로 세울 수 있게 된다.

III. 토크 설계

토크의 환산계수는 회전자, 자석의 형상에 따라 크게 변한다. 이를 해석적으로는 구하기 힘들며 유한요소법과 같은 수치해석 기법을 이용하여 계산하여야 한다. 특히 토크는 정확한 해석이 이루어져야 하며, 구조상 2차원적

으로는 해석하기 곤란하며 3차원 해석이 이루어져야 한다. 토크를 설계할 때 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

- 자속밀도 B
- 토크 상수 K_T
- 환산계수 SF
- 코일의 권회수
- 코일의 직경

토크의 환산계수는 클수록 적은 전류로도 큰 토크를 얻을 수 있기 때문에 유리하므로 형상을 조금씩 변화시키면서 가장 큰 환산계수를 얻을 수 있는 치수를 얻어야 한다. 그러나 환산계수를 증가시키는데 몇 가지 제약조건이 있다. [2] 즉,

- 토크코일의 권회수가 많을수록 환산계수는 증가하지만 토크코일은 자이로스코프에 발생하는 열의 주발생원이므로 도선 굵기를 무조건 줄여서 권회수를 늘릴 수 없다.
- 자속밀도를 높이기 위해 자석을 크게 하는 것이 유리하지만 관성모멘트 J_s 가 증가하므로 자석 크기에 제약이 있고, 자석의 부피를 너무 늘리면 토크 코일이 차지할 부분이 적어진다.
- 자료가 포화되지 않도록 회전자 안쪽 두께를 늘리면 회전자 관성이 크게 된다.

1. 영구자석의 결정

자석은 적은 부피로 큰 자속을 얻기 위해 희토류 자석을 사용한다. 대표적인 희토류 자석에는 SmCo 자석과 Nd-Fe-B자석이 있다. 이들 자석에 대한 특성을 Table. 1에 나타내었다.

SmCo는 Sm₁Co₅ 자석과 그 후 성능이 개선되어 개발된 Sm₂Co₁₇계 자석이 있는데 모두 고가이며, 또한 소결 자석이어서 가공성이 나빠 금형 프레스를 이용하여 처음부터 형상이 고정된 것이 이용된다. Nd-Fe-B 자석은 1980년대 초반에 개발되어, 가공성 및 경제성 등이 SmCo에 비해 뛰어나 최근 가장 각광받는 희토류계 자석으로, 성능면에서는 우수하지만 온도 특성이 좋지 않고 산화가 잘 되기 때문에 가공 전이나 가공후 관리하기가 어렵다. [3] 본 연구에서는 Sm₂Co₁₇ 자석을 사용하였다.

자이로에 이용되는 자석의 역할은 반경방향으로 균일한 자속을 발생시키는 것이다. 따라서 반경방향 자석을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 반경방향 이방성 자석은 그 제작 공정상의 문제 때문에 제품의 규격이 정해져 있어서, 임의의 치수를 구입하기는 곤란하다. 임의의 원

하는 링형 치수를 얻고자 하는 경우에는 자장 프레스 공형을 만들어야 하고, 이것의 비용은 대단히 고가이다. [4]

따라서 Fig. 3과 같이 축방향 이방성 자석을 9개 조각으로 만들어, 이를 링형태로 접착하는 방식을 채택하였다. 축방향 이방성 자석을 이용하여 링자석을 제작하는 원리는 Fig. 5와 같다.

Table. I. Characteristics for rare earth magnets

특성	SmCo		NdFeB (NEOMAX-27H)
	Sm ₁ Co ₇ (REC-20)	Sm ₂ Co ₁₇ (REC-22)	
잔류자속밀도 B_r , KG	9.0	9.5	10.4
보자력 H_c , KOe	8.8	8.6	9.8
최대에너지적 BH_{max} MGOe	20	22	26
리코일 투자율 μ_{rec}	1.05	1.05	1.05
B_r 의 온도계수 %/°C	-0.03	-0.03	-0.12
밀도	8.2	8.4	7.4
비저항 $\times 10^{-3} \Omega m$	85	85	144
비커스 경도 H_v	550	550	600
인장 강도 Kgf/mm ²	4.1	3.6	8.0
열팽창계수 $\times 10^{-6}/°C$	6	8	5.8
가공성	나쁨	나쁨	우수
경제성	고가	고가	저렴

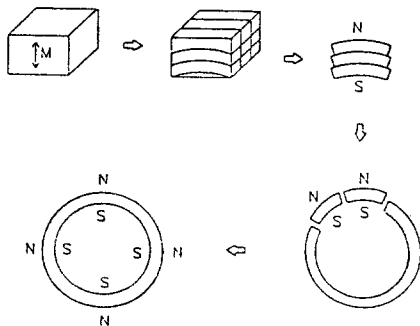
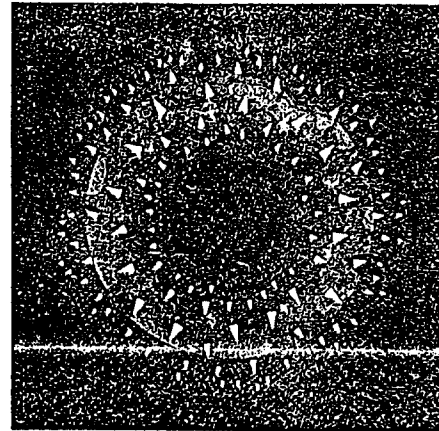


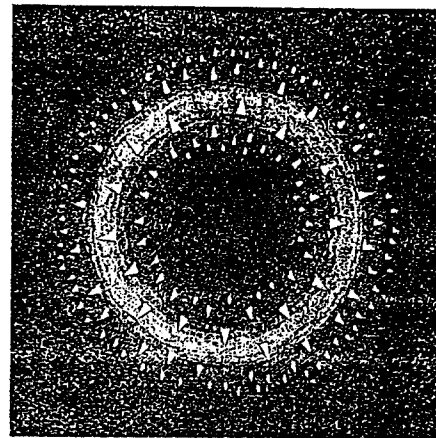
Fig 5. Methodology from axial magnet to radial magnet

링형 자석은 형태는 링 모양이지만, 반경방향 이방성 자석으로 만들어진 것이 아니므로, 공극자속 밀도가 Fig.

6의 (b)처럼 완전히 균일하게 될 수는 없고 (a)와 같이 불균일하다. 유한요소 해석시에는 이 영향을 고려하여 실험에서 구한 자속밀도의 분포를 근사화하여 입력하였다.



(a) Flux pattern of patched PM



(b) Flux pattern of ring type PM

Fig 6. Flux density distribution

2. 토크 코일 선택

토크 코일은 다른 지지물 없이도 형태를 유지하여야 하므로, 코일 스스로 접착성을 갖고 고정되는 자기용착 에나멜선을 이용하여야 한다. 코일의 접착 방법은 도선에 메탄올 등의 용매를 적셔서 권선 후 건조시키는 것과, 열풍을 코일에 불어넣어서 접착시키는 방법 등이 있다. 토

커코일의 권회수가 많을수록 환산계수는 증가하지만 토커코일은 자이로스코프에 발생하는 열의 주발생원이므로 도선 굵기를 무조건 줄여서 권회수를 늘릴 수는 없다.

IV. 설계 사례 및 해석

자이로의 기계적 치수가 정해지면 영구자석과 토커코일이 차지할 수 있는 공간은 제한되어진다. 또한 자이로스코프의 사양이 주어지므로, 이 사양을 만족하는 성능을 낼 수 있는 설계가 이루어져야 한다. 본 연구에서의 목표는 최대 입력각속도가 100 deg./sec 이상이 되는 자이로를 설계하는 것이다. 최대 입력각속도는 식 (11)로부터 알 수 있듯이 환산계수에 최대 허용 전류를 곱해 주면 계산되어진다.

토커 설계 시의 제약조건은 코일의 최대 허용 전류 범위 내에서 자이로스코프의 사양을 만족하여야 하므로, 코일 굵기를 변화시켜 가면서 토커의 특성 해석을 하여야 한다. Fig. 7에 토커 설계 흐름도를 나타내었다.

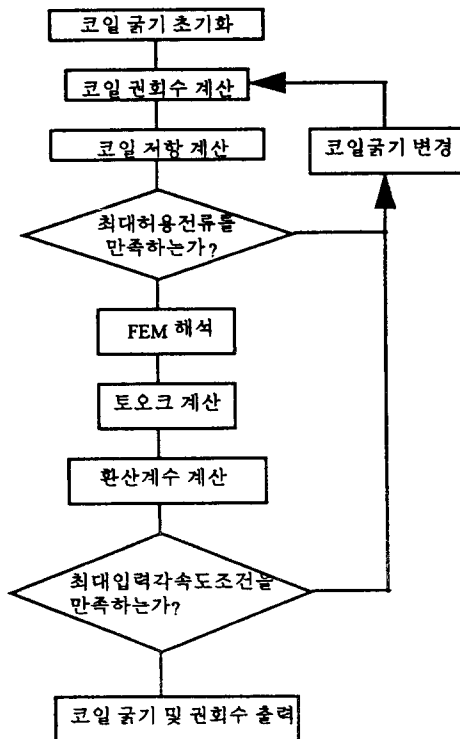


Fig 7. Design flow of torquer

코일의 굵기를 변화시키면서 토커의 특성 해석을 한 결

과를 이용하여, 최대 입력각속도와 코일에 흐르는 전류와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

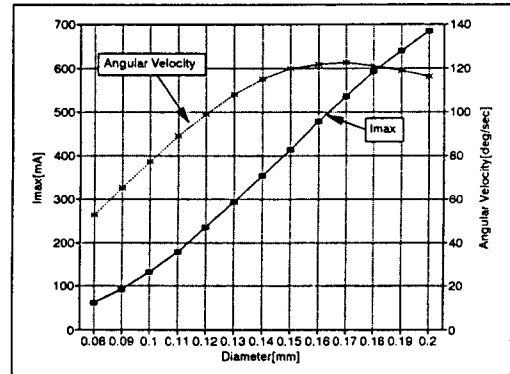


Fig 8. Characteristics of torquer vs. coil diameter

위의 그림에서 보듯이 최대 입력 각속도 조건을 만족하는 코일이 여러 종류가 있지만, 코일 직경이 커지면 전류가 증가하며, 자이로의 열문제 측면에서는 전류의 증가는 바람직하지 못하다.

본 연구에서는 위의 사양과 제약조건을 만족하는 코일의 치수를 직경 0.13mm로 하였으며, 이 경우 권회수는 301회이었다. 사용된 영구자석은 Sm_2Co_{17} 이며, 자석의 잔류자속밀도는 1.05 T, 최대에너지적은 20 MGOe이다.

자석은 9개 조각을 링형태로 접착하였기 때문에 유한요소 해석시에 이 영향을 고려하여서 자석 특성을 입력하였다. 설계된 코일과 자석 조건하에서 상용 소프트웨어인 Maxwell을 이용한 3차원 유한요소 해석 결과는 Table II와 같다.

Table II. Simulation results of torquer

토커상수 Nm / A	0.0184
환산계수 deg / sec / mA	0.39965
최대입력각속도 deg / sec	108

설계된 토커 치수를 반영하여 자이로스코프를 제작하였다. 제작된 자이로의 성능 실험 결과를 Table III에 나타내었다. 이상적으로는 x, y 축의 환산계수가 같아야 하지만, 제작 시의 오차로 인하여 일치하지는 않았다.

Table III. Experimental data of torquer

기준축	환산계수 deg / sec / mA
x 축	0.40777
y 축	0.40854

실험 결과에서 알 수 있듯이 설계된 토크에 대한 3차원 유한요소해석 결과와 실험이 거의 일치함을 알 수 있다. 하지만 자이로에서는 아주 작은 오차도 오랜 시간 누적이 되면 오차가 커지기 때문에 조립시의 오차를 줄일 수 있는 연구가 계속되어야 한다.

V. 결 론

본 연구에서는 자이로에서 기울어진 회전자를 다시 세우는 역할을 하는 토크에 대한 설계 방법 및 특성 해석 방법을 제시하였다.

자이로의 성능이 주어지게 되면 토크도 이 사양을 만족할 수 있게 설계되어야 한다. 설계된 토크를 실제 제작 및 실험을 통하여, 본 논문에서 제시한 토크 설계 방법 및 3차원 유한요소법을 이용한 특성 해석이 유용함을 입증하였다. 본 연구에서는 조각자석을 링 형태로 접착하여 사용하였지만, 링 형태의 자석을 사용한다면 토크의 성능은 크게 개선될 것이며, 이 분야의 연구가 계속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 자동제어 특화 연구센터의 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- [1] 국방과학연구소, “동조자이로의 실용화를 위한 기초 연구”, 1992. 7.
- [2] 국방과학연구소, “동조자이로의 실용화를 위한 기초 연구”, 1994. 3.
- [3] Richard M. Bozorth, *Ferromagnetism*, IEEE Press, 1993.
- [4] 大川 光吉, 永久磁石磁氣回路入門, 綜合電子 出版社, 1994.

The Design Method of the Torquer in DTG

Hong-Kyu Kim, Hyun-Kyo Jung

School of Elec. Eng. Seoul Nat'l Univ.

San 56-1, Shinlim-Dong, Kwanak-Gu, SEOUL, 151-742

Sun-ki Hong

Dept. of Control and Instrumentation Eng. HoSeo Univ.

MT. 29-1, SECHUL-RI, BAE BANG-MYON, ASAN-SI CHOONG-NAM 337-795

(Received 16 December 1995, in final form 5 March 1996)

The role of the torquer in dynamically tuned gyroscope(DTG) is to erect the slanted rotor straight. This paper presents the design method of the torquer.

The torquer must satisfy the desired maximum angular velocity condition. The performance of magnet-residual flux density, maximum energy product, and so on-is limited by the material characteristics. So we should design the torquer with the limited condition that magnet performance is given. If the mechanical size of DTG is determined, the dimension of the torquer is calculated and the space of the torquer becomes constant. Therefore, if we determine the diameter of the torquer coil, the number of coil turns is calculated automatically.

Using these dimensions, we can calculate the torque and the scale factor. The maximum angular velocity is computed if we know the maximum current density.

The analysis of the torquer was carried out by the 3-dimensional finite element method. The proposed algorithm of the torquer design was valid in comparison with the experimental data obtained from fabricated DTG.