

계수 추정 기법을 이용한 동조자이로스코프 온도 제어기의 설계

송진우*, 이장규*, 강태삼†, 김진원*

*서울대학교 전기공학부, †호서대학교 제어계측공학과

Design of the Temperature Controller for a Dynamically Tuned Gyroscope Using Parameter Estimation Methods

Jinwoo Song*, Jang Gyu Lee*, Taesam Kang† and Jinwon Kim*

*Automatic Control Research Center, School of Electrical Engineering, Seoul National University

†Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Hoseo University

Abstract In this paper, uncertain parameters of the heat transfer model of a Dynamically Tuned Gyroscope (DTG) are estimated by the Recursive Least Squares (RLS) method. Also, using this model, a temperature controller for a DTG is designed. As the temperature controller, a PI controller is used. It is presented that a controller can be easily designed when the heat transfer model of a DTG is used. By simulations and experiments, it is shown that the estimated heat transfer model is appropriate and the desired performance of the temperature controller is satisfied.

1. 서론

동조자이로스코프(Dynamically Tuned Gyroscope : DTG, 이하 DTG)는 회전자와 김블, 그리고 회전축이 스프링으로 연결되어 회전자가 동조 조건을 만족하면 자유 회전자가 되는 프리 사이로스코프(free gyroscope)이다. DTG는 크게 각속도를 인지하는 인지부, 회전자를 구동하는 모터부, 모터와 각검출기를 구동하는 구동부, 그리고 제어부로 구성되어 있다. 제어부는 재평형과 온도 제어를 수행하고 측정된 각속도를 전기적 신호로 변환시키는 역할을 한다 [1,7,8].

이 중 온도 제어는 DTG의 성능에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. DTG 내의 회전자에 부착되어 있는 자석은 온도에 매우 민감한 부분으로 작은 온도의 변화에 대해서도 자속의 변화가 생겨 동조자이로의 환산계수오차가 발생하게 되며, 이는 불규칙 오차의 원인이 되어 성능에 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러므로 DTG 내부의 온도를 정확하게 측정하고 온도를 원하는 범위 내에서 일정하게 유지시켜야 한다[1].

서울대학교에서 연구 개발된 DTG의 경우, 오차를 줄이기 위하여 내부의 온도를 약 70 °C에서 ± 0.1 °C 이내로 유지한다[1]. DTG의 구조상 온도를 높이기 위한 열원은 부착할 수 있지만 온도를 낮추기 위한 장치는 부착할 수 없다. 따라서 온도가 일단 70 °C 이상이 되면 온도를 낮추는 것이 어렵기 때문에 온도가 정상 상태에 도달하는 시간이 길어지므로 온도가 70 °C를 넘지 않도록 제어하는 것이 중요하다. 또한 DTG의 내부에는 픽오프를 ‘영’으로 제어하기 위한 토크가 있는데[8], 토크는 정전류원에 의해

전류를 공급 받기 때문에 많은 열이 발생한다. 따라서 온도 제어기는 이것까지 고려하여 온도를 일정하게 유지하여야 한다.

온도 제어기 구성 시 정확한 온도 모델을 알고 있다면 제어기의 구성이 용이해진다. 그러나 DTG 내부는 매우 복잡하여 열전달 모델을 식으로 풀 수 없고 유한요소법 (Finite Element Method : FEM) 등의 방법을 이용하는 것도 매우 어렵다[3]. 그래서 기존의 DTG 온도 제어기에서는 온도 모델 없이 여러 번의 실험을 통하여 제어기를 구성하는 것이 대부분이었다. 그러나 이 경우 주변 환경의 변화에 따라 시스템이 변하게 되어 온도가 불안정해질 수 있다. 따라서 개략적인 DTG의 온도 모델을 안다면 시스템의 변화 정도를 미리 예측하여 변화에 대응할 수 있는 제어기를 구성할 수 있다.

본 논문에서는 계수 추정 알고리즘을 이용하여 DTG의 온도 모델을 추정하고, 그 결과를 이용하여 온도 제어기를 설계한다. 또한 시뮬레이션 및 실제 DTG를 이용한 실험을 수행하여 추정 계수의 실효성을 확인하고 구성된 제어기가 목표 성능을 만족시킴을 보인다.

2. 온도 제어기의 구성

2.1 DTG 온도 모델

DTG에 부착된 열원은 외부에 부착한 히터와 내부에 있는 토크이다. 히터에서 발생하는 열은 제어 출력에 의하여 결정되지만 토크에서 발생하는 열은 토크 방식에 의하여 결정된다. 토크에 전류를 공급하는 방식은 아날로그 토크 방식과 디지털 토크 방식이 있다. 아날로그 토크 방식을 이용하여 DTG를 제어할 경우 각속도도 입력에 따라 토크에 흐르는 전류량이 변하게 되므로 열원이 시간에 따라 변하게 된다. 그러므로 DTG의 온도 모델이 시간에 따라 변하게 되어 정확한 온도 모델을 세울 수 없게 된다. 디지털 토크 방식을 이용할 경우 각속도 크기에 관계 없이 일정한 양의 전류가 토크에 흐르게 되므로 토크에서 발생하는 열이 일정해지고 따라서 온도 모델이 일정해진다[1].

DTG의 온도 모델을 구하는 방법에는 여러 가지가 있으나, DTG는 여러 가지 다른 열전달 계수를 가진 물질로

구성되어 있고 내부의 구조도 복잡하며, 내부의 로터가 고속으로 회전하기 때문에 열전달 식을 이용하여 온도 모델을 직접 구하거나 유한요소법을 이용하여 모델을 구성하는 것은 매우 어렵다[3].

본 논문에서는 디지털 토킹 방식을 이용하여 DTG를 제어하는 경우 주변 환경을 일정하게 유지하였을 때 효과적으로 온도 제어기를 구성 할 수 있는 방법을 제시한다.

2.2 DTG 온도 모델의 추정

전술한 바와 같이 디지털 토킹 방식을 이용할 경우 DTG의 온도 모델이 일정하게 된다는 가정하에 온도 모델을 추정한다. DTG의 온도 모델의 계수 추정을 위하여 RLS(Recursive Least Squares) 방법을 이용한다. RLS 방법은 적응 제어를 위한 계수 추정 방법 중 가장 많이 쓰이는 방법으로 수렴이 빠르고 계산이 간단하여 본 논문에서는 이 방법을 택하였다[2].

이산 시간 공간에서 온도 모델을 다음과 같이 가정한다.

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (1)$$

이때 모델의 추정 계수 벡터는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}^T(k) = [\hat{a}_1 \ \dots \ \hat{a}_n \ \ \hat{b}_1 \ \dots \ \hat{b}_m] \quad (2)$$

각 스텝에서 센서를 통해 얻은 온도 출력을 $y(k)$ 라 하고, 제어 입력을 $u(k)$ 라 하면 데이터 벡터를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\psi^T(k) = [-y(k-1) \ \dots \ -y(k-m) \ u(k-1) \ \dots \ u(k-m)] \quad (3)$$

RLS 알고리즘을 이용하여 계수 갱신 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \gamma(k)e(k+1) \quad (4)$$

$\hat{\theta}(k+1)$: new estimation

$\hat{\theta}(k)$: old estimation

$\gamma(k)$: correcting vector

$e(k+1)$: error

이 때 correcting vector 와 오차의 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \gamma(k) &= P(k+1)\psi(k+1) \\ &= \frac{1}{\psi^T(k+1)P(k)\psi(k+1)+1}P(k)\psi(k+1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$P(k+1) = [I - \gamma(k)\psi^T(k+1)]P(k) \quad (6)$$

$$e(k+1) = y(k+1) - \psi^T(k+1)\hat{\theta}(k) \quad (7)$$

RLS 기법에서 잡음은 ARMA 모델을 이용하였으며 잡음 필터로는 $1/A(z^{-1})$ 을 이용하였다. 테드 타임은 0으로 하고 초기 값은 아래와 같이 설정하였다[2,4-6].

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(0) &= 0_{1 \times 2m} \\ P(0) &= \alpha I \\ \text{where } \alpha &>> 1 \end{aligned} \quad (8)$$

모델의 차수를 2 차로 하였을 경우와 3 차 이상으로 하였을 경우의 차이가 크지 않으므로 시스템의 차수는 2 차로 설정하였다.

위의 방법을 이용하여 실제 DTG 데이터를 이용하여 오프-라인으로 계수 추정을 수행한 결과는 다음과 같다.

$$H(z) = \frac{-0.1415z^{-1} - 0.1551z^{-2}}{1 - 1.5731z^{-1} + 0.5746z^{-2}} \quad (9)$$

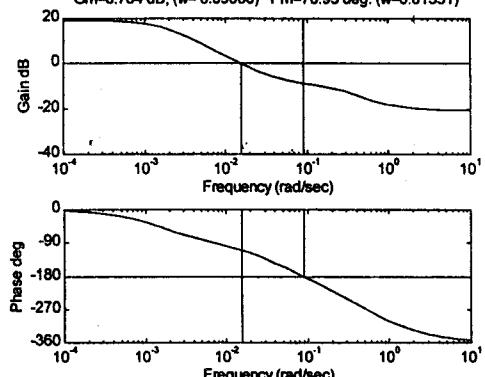
2.3 제어기의 구성

본 절에서는 계수 추정 알고리즘을 통해 얻은 온도 모델을 이용하여 그에 적합한 제어기를 구성한다. 제어기로는 일반적인 PI 제어기나 DTG 온도 모델의 불확실성을 고려하여 시스템을 안정하게 만드는 견실 제어기, 적응 제어기 등을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 PI 제어기를 구성하여 추정된 DTG 온도 모델의 실효성을 검토하고 온도가 일정하게 유지되는 것을 보인다.

추정 모델 식(9)를 연속 시간 영역으로 나타내면 아래와 같으며, 이 시스템의 Bode 선도는 그림 1과 같다.

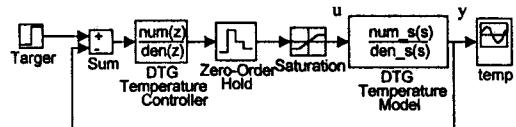
$$H(S) = \frac{-0.0942 - 0.0897S^{-1} + 0.0036S^{-2}}{1 + 4.2460S^{-1} + 0.0004S^{-2}} \quad (10)$$

그림 1. DTG 온도 모델의 Bode 선도
Gain=8.764 dB, (w= 0.09006) Phm=70.95 deg. (w=0.01551)



추정된 온도 모델의 극점은 $-4.2459, -0.0001$ 이며, 극점 -0.0001 의 영향으로 반응이 매우 느리게 된다. 또한 영점은 $0.9102, 0.0420$ 이 되어 비최소위상 시스템(nonminimal phase system)이 되므로 되먹임 제어기를 구성할 경우 시스템이 불안정해지기 쉽다.

그림 2. 온도 제어기의 블록 선도



본 논문에서는 그림 2의 블록 선도와 같이 제어기를 구성한 후 시뮬레이션 및 디지털 제어기를 이용한 실험을 수행하였으며, 동일 조건에서 실험하기 위하여 외부의 온도와 습도를 일정하게 유지하였다. 실제로 DTG를 사용하는 경우 온도를 70°C 로 유지시켜야 하지만 DTG가 IMU(Intertial Measurement Unit) 내부에서 사용될 때 주변의 온도가 40°C 로 유지되므로 본 논문에서는 온도가 초기 온도 20°C 에서 50°C 까지 증가한 후 50°C 에서 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되는 것을 보인다. 그림 3은 제어기의 비례 계수와 적분 계수가 각각 2.5, 0.001 일 때의 시뮬레이션 결과

과와 실험 결과를 나타낸 것이며, 그림 4는 최대 오비슈트를 작게 하기 위하여 비례 계수와 적분 계수를 1과 0.00115로 한 경우의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 나타낸 것으로, 모두 온도가 50°C를 기준으로 ±0.1°C 이내로 유지되는 것을 알 수 있으며, 추정된 모델의 계수가 타당함을 알 수 있다. 따라서, 계수 추정 방법을 이용하여 DTG의 온도 모델을 추정한 후 온도 제어를 수행할 경우 온도 제어기의 구성이 용이해지며, 주변 환경의 변화에 대한 시스템의 변화를 예측할 수 있으므로 장인 제어기의 구성이 가능할 것으로 판단된다.

그림 3. 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 비교 (1)

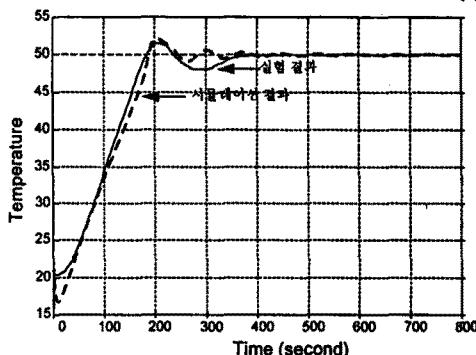
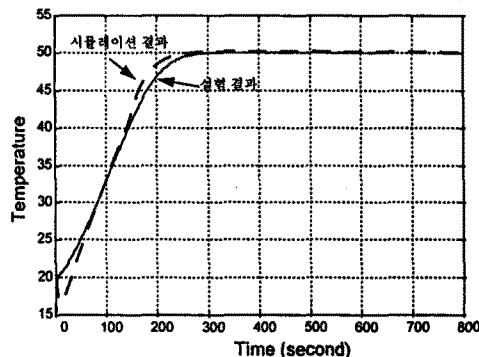


그림 4. 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 비교(2)



3. 결론

본 논문에서는 동조자이로스코프 내부의 온도를 빠른 시간 내에 정상 상태에 도달시키며, 온도를 일정하게 유지시키기 위한 제어기를 구성하였다. DTG의 온도 모델을 계수 추정 방법을 이용하여 추정하였으며, 그 결과를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 실제 DTG를 이용하여 실험을 수행하여 추정된 모델의 실효성을 밝히고 DTG의 온도가 일정하게 유지됨을 보였다. 계수 추정 방법을 이용하여 DTG의 온도 모델을 추정한 후 온도 제어를 수행할 경우 온도 제어기의 구성이 용이해지며, 주변 환경의 변화에 대한 시스템의 변화를 예측할 수 있으므로 장인 제어기의 구성이 가능할 것으로 판단된다. 추후에 주변 환경의 변화에 따른 시스템의 변화 정도를 예측하여 시스템 계수의 변화에 대하여 안정적인 장인 제어기의 구성 방법이 연구되어야 할 것이다.

본 연구는 자동제어특화연구센터 및 국방과학연구소의 지원에 의하여 이루어졌다.

참고 문헌

- [1] 이장규 외, 동조자이로의 실용화를 위한 기초 연구, 국방과학연구소, 1994.3.
- [2] R.Isermann, K.-H.Lachmann & D.Matco, *Adaptive Control Systems*, Prentice Hall International Inc., 1992.
- [3] Frank P.Incropera & David P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd Ed., Jhon Wiley & Sons, 1990.
- [4] Karl J. Åström & Björn Wittenmark, *Adaptive Control*, 2nd Ed., Addison Wesley, 1995.
- [5] Torsten Söderström & Petre Stoica, *System Identification*, Prentice Hall International Inc., 1989.
- [6] Frank L.Lewis, *Applied Optimal Control and Estimation*, Prentice Hall International Inc., 1992.
- [7] R.J.G.Craig, "Dynamically Tuned Gyros in Strapdown Systems," Conference Proceeding no.116, North Atlantic Treaty for Organization Advisory Group for Aerospace Research and Development, Florence, Italy, 2-5 October 1972.
- [8] 강태삼, "선형시스템의 교란 억제에 관한 연구-자이로스코프 시스템의 응용을 중심으로," 박사 학위 논문, 제어계측공학과, 서울대학교, 1992.