

# 고체형 정밀 공진 자이로스코프를 위한 이차 PLL 루프필터 기반 위상제어루프 설계

## Phase Control Loop Design based on Second Order PLL Loop Filter for Solid Type High Q-factor Resonant Gyroscope

박 상 준, 용 기 렷, 이 영 재, 성 상 경\*  
(Sang-Jun Park<sup>1</sup>, Ki Ryeok Yong<sup>2</sup>, Young Jae Lee<sup>1</sup>, and Sangkyung Sung<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Konkuk University

<sup>2</sup>Korea Aerospace Research Institute

**Abstract:** This paper suggests a design method of an improved phase control loop for tracking resonant frequency of solid type precision resonant gyroscope. In general, a low cost MEMS gyroscope adapts the automatic gain control loops by taking a velocity feedback configuration. This control technique for controlling the resonance amplitude shows a stable performance. But in terms of resonant frequency tracking, this technique shows an unreliable performance due to phase errors because the AGC method cannot provide an active phase control capability. For the resonance control loop design of a solid type precision resonant gyroscope, this paper presents a phase domain control loop based on linear PLL (Phase Locked Loop). In particular, phase control loop is exploited using a higher order PLL loop filter by extending the first order active PI (Proportion-Integral) filter. For the verification of the proposed loop design, a hemispherical resonant gyroscope is considered. Numerical simulation result demonstrates that the control loop shows a robust performance against initial resonant frequency gap between resonator and voltage control oscillator. Also it is verified that the designed loop achieves a stable oscillation even under the initial frequency gap condition of about 25 Hz, which amounts to about 1% of the natural frequency of a conventional resonant gyroscope.

**Keywords:** phase control, resonant frequency tracking, PLL, resonant gyroscope, loop filter

### 1. 서론

공진형 자이로스코프는 진동하는 공진체에 가해지는 입력 물리량에 따른 코리올리 힘에 대한 동적 시스템의 변위 변화량 혹은 위상 변화량을 이용하여 자이로스코프의 입력된 물리량을 역으로 추정하는 원리를 갖는다. 이러한 입력된 물리량을 추정하기 위해서 자이로스코프 공진체는 항상 일정한 주파수와 진폭으로 이루어진 공진성을 유지해야 하며 이는 자이로스코프의 성능과 밀접한 관계를 맺는다. 따라서 이러한 공진 센서의 일정한 공진 진폭과 주파수를 유지하기 위한 자이로스코프의 공진제어는 진동체의 외란에 의한 주파수변화나 회로적 잡음에 의한 변위변화, 회로적 특성에 따른 위상변화와 같은 여러 외란에도 진동의 진폭을 일정하게 유지하고, 주파수를 진동체의 설계 고유진동수에 일치시키며 보존하는 것이 중요하다. 따라서 위와 같은 안정적인 공진 특성을 유지하기 위해서는 진동주파수와 진폭을 제어하는 공진제어루프가 필수적이다.

공진제어루프의 단일루프 형태인 Simple Self Sustained 공진 제어루프는 가장 간단하게 구성이 가능하나 진폭 제어 및 공진점에 따른 위상튜닝이 필요하기 때문에 시편 마다 위상튜

닝이 필요한 단점이 있다. 이중루프 형태인 AGC (Automatic Gain Control) 기반 공진제어루프는 속도제어 개념이 적용되어 자동적으로 Barkhausen criteria가 만족되어 공진이 이루어지며 기준 전압에 따라 공진 진폭이 쉽게 제어된다는 장점이 있다. 하지만 비선형루프이기 때문에 루프해석이 어려우며 단순히 공진조건만 만족 시킬 뿐 위상제어 및 주파수 제어가 포함되지 않는 루프이므로 루프 내 위상 및 주파수 오차에 강인하지 않은 단점을 보이고 있다[1-4]. 따라서 고성능 자이로스코프 같은 잡음에 민감한 시스템의 안정적인 성능을 보장하기 위해서는 센서 성능에 큰 영향을 미치는 위상 오차 및 주파수 오차의 고려가 필수적이기 때문에 위와 같은 단점들은 성능에 악영향을 끼친다[5].

이러한 필요성에 따라 본 논문은 외부 예러요인에도 안정적인 성능을 보장하기 위해 높은 Q-factor 특성을 지닌 진동체의 공진주파수를 추종 및 보존 할 수 있는 PLL (Phase-Locked Loop) 기반의 위상제어루프를 설계한다. 루프 설계에는 위상오차 보상의 개념을 도입하여 공진점 추종을 수행하였으며, 특히 기존의 루프구성[6,7]을 확장하여 고차 루프필터를 이용한 설계기법을 제안하였다. 이를 통하여 공진점 추종 성능과 초기 주파수 이격에 따른 위상 제어루프의 성능향상을 획득하였다. 또한 제안된 고차 필터 기반의 설계 기법은 Lyapunov redesign, LQR (Linear-Quadratic Regulator) 및 LMI (Linear Matrix Inequality) 등 기존 PLL 제어루프의 성능향상을 위하여 적용된 기법에 비하여 설계 과정이 간단하며 안정도 판별이 용이한 장점을 갖는 것을 특징으로 한다[8-10].

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 1. 3., 수정: 2012. 3. 30., 채택확정: 2012. 5. 14.

박상준: 건국대학교 항공우주정보시스템공학과(letter82@gmail.com)

용기력: 한국항공우주연구소(kdyong@kari.re.kr)

이영재: 건국대학교(younglee@konkuk.ac.kr)

성상경: 건국대학교 항공우주정보시스템공학과(sksung@konkuk.ac.kr)

※ 본 연구(논문)는 한국항공우주연구원 인제양성형 과제와 한국연구재단 신진연구자 연구지원사업의 일환으로 수행되었음.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 본 논문이 제시하는 위상제어루프를 적용 할 수 있는 고성능 자이로스코프인 반구형 공진자이로의 일반적인 동작원리를 간략하게 설명한다. III 장에서는 선형 PLL (Linear PLL) 기반의 초기 구동에 유리한 위상제어루프 설계기법을 제시하며 IV 장에서는 설계된 위상제어루프를 시뮬레이션을 통하여 기본적인 루프의 안정성과 성능을 분석하였고, 제어루프의 초기 제어 주파수와 자이로스코프의 진동체의 설계 주파수와 오차에 따른 공진성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 마지막으로 V 장에서 결론을 내렸다.

**II. 반구형 자이로스코프 동작원리**

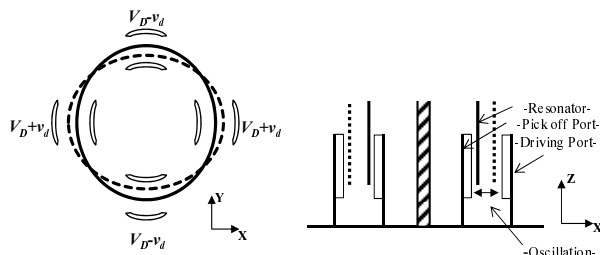
이 절에서는 제안된 공진루프가 적용 가능한 반구형 공진체를 사용한 고성능 자이로스코프의 일반적인 동작 원리와 기본구조를 설명한다. 본 논문이 고려하는 반구형 공진체는 일반적으로 Quartz를 이용하여 제작되며 등방성인 재질의 특성 때문에 바이어스 안정도와 온도 등의 외부환경에 강인하여 Q-factor가 매우 높다[11]. 따라서 그림 1(a)와 같이 인공위성이나 심우주 탐사선의 초정밀 항법 시스템으로 사용된다.

시스템의 동작원리를 설명하기 위해 그림 1(b)와 같이 가진전극(driving port)과 검출전극(pick off port) 사이를 진동하는 반구형 진동체(hemispherical resonator)의 구조를 고려하기로 한다. 일반적으로 반구형 공진체는 정전기력을 이용해 공진(oscillation)을 유도하며 기준 바이어스전압인  $V_D$ 과 구동을 위한 가진 전압인  $v_d$ 을 가진 전극을 통하여 가진 시키고 그 결과 진동체는 X축과 Y축으로 확장과 수축을 반복하며 진동한다. 진동체가 고유진동수로 진동 시 자이로스코프의 물리량 입력에 상응하는 진동체의 진동 진폭 변화와 위상의 변화는 안쪽의 검출회로로 검출하게 된다. 검출회로를 통해 검출된 진폭변화와 위상변화를 역으로 추정함으로써 자이로스코프에 입력된 물리적 신호를 관측 할 수 있다[6].

그림 1(b)와 같은 반구형 자이로스코프 진동체의 운동방정



(a) Northrop Grumman's space level hemispherical resonator gyroscope system.



(b) Simple hemispherical gyro model.

그림 1. 반구형 공진체를 사용한 자이로스코프 시스템.

Fig. 1. Hemispherical Resonator Gyroscope system.

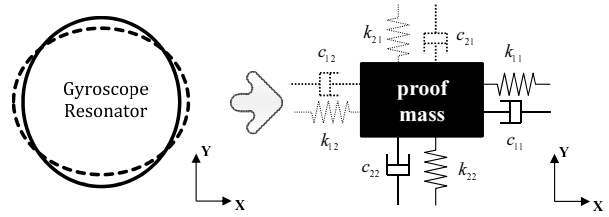


그림 2. 반구형 공진체 모델의 간략화.

Fig. 2. Simplified Hemispherical Resonator model.

식은 Lynch's Generic Vibratory Gyro Model을 이용하여 그림 2와 같이 간략화가 가능하며 식 (1)와 같이 표현 할 수 있다 [12,14].

그림 2와 같이 일반적인 2차원 진동모델의 형태에서 X축을 가진축, Y축을 검출축 이라고 가정할 때 일반적으로 축사이의 불균형각인  $\theta_r, \theta_\theta$ 가 생기게 된다. 또한  $g$ 는 진동패턴과 회전입력의 비로 공진기 형상 파라미터 이며,  $\Omega$ 는 외부입력 각속도,  $\tau_1$ 와  $\tau_2$ 는 각 공진모드에 대한 시상수,  $\omega_1$ 와  $\omega_2$ 는 각 공진모드에 대한 고유진동수 이며,  $f_x$ 와  $f_y$ 는 질량체에 가해지는 힘이다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2g\Omega\dot{y} + \left(\frac{2}{\tau} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\cos 2\theta_r\right)\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\sin 2\theta_r\dot{y} \\ + (\omega^2 - \omega\Delta\omega\cos 2\theta_\theta)x - \omega\Delta\omega\sin 2\theta_\theta y = f_x \\ \ddot{y} + 2g\Omega\dot{x} + \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\sin 2\theta_r\dot{x} + \left(\frac{2}{\tau} - \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\cos 2\theta_r\right)\dot{y} \\ - \omega\Delta\omega\sin 2\theta_\theta x + (\omega^2 + \omega\Delta\omega\cos 2\theta_\theta)y = f_y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right), \Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}, \\ \omega^2 &= \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2}, \omega\Delta\omega = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2} \end{aligned} \right\} \\ \ddot{x} - 2g\Omega\dot{y} + c_{11}\dot{x} + c_{12}\dot{y} + k_{11}x + k_{12}y = f_x \\ \ddot{y} + 2g\Omega\dot{x} + c_{21}\dot{x} + c_{22}\dot{y} + k_{21}x + k_{22}y = f_y \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)와 같이 간략하게 표현 가능 하며 이때  $k_{12}, k_{21}$ 는 각각 기계적인 결함으로 인한 코리올리 힘이 작용하였을 경우 주파수 간섭요인이며  $c_{12}, c_{21}$ 는 각 모드의 댐핑 비대칭,  $\tau_{12}, \tau_{21}$ 는 Principal Damping의 시간상수이다. 식 (2)에서의 미세한 오차항을 무시하고 두 축의 변수가 같다고 가정 ( $c_{12} = c_{21} = k_{12} = k_{21} = 0, c_{11} = c_{22} = c, k_{11} = k_{22} = k$ )하여 평균화 한다면 느리게 변화하는 성질의 성분 변수들에 대한 운동방정식으로 표현하다. 이를 외부 입력 각속도 없이 자이로가 가진축 방향으로 진동을 하고 있다고 가정한다면 식 (3)과 같은 운동방정식 모델로 표현 할 수 있다[12-14].

$$\begin{aligned} \dot{X}_s &= -(c/2)X_s - ((k - \omega^2)/2\omega)X_c + (g\Omega/2)Y_s + F_{xc}/2\omega \\ \dot{X}_c &= ((k - \omega^2)/2\omega)X_s - (c/2)X_c + (g\Omega/2)Y_s - F_{xc}/2\omega \end{aligned} \quad (3)$$

$F_{xc}, F_{xs}$ 는 질량체에 가해지는 힘을 사인, 코사인으로 나타낼 때의 성분을 의미하며  $X_s, X_c$ 는 각각 위상과 진폭을 나타내는 변수이다. 여기서 위상을 나타내는  $X_s$ 를 일정하게 유지하는 것이 위상제어루프의 목적이다[6].

III. 위상제어루프의 설계

앞서 소개된 공진형 자이로스코프를 위한 일반적인 제어 루프는 공진 운동을 유지하기 위한 공진제어루프와 센서 신호 분석을 위한 검출신호 제어루프로 나누어 진다. 더욱 세분화하여 공진제어루프는 외란에 대하여 공진점을 유지하기 위한 공진점 트래킹 제어와 공진폭 제어로 나눌 수 있으며, 검출신호 제어루프는 재평형 제어루프와 사분오차 제어루프로 나눌 수 있다[12]. 본 논문에서는 공진형 자이로의 핵심적인 구동기능인 공진 제어루프에 관한 내용을 다루며 특히 진동 주파수와 위상에 대한 제어기 설계에 중점을 둔다. 안정적인 공진주파수의 유지 및 트래킹 기능은 선형성과 반복정밀도 등 고성능 센서의 구현을 위해 필수적인 요구 성능이다. 한편, 진폭제어루프는 공진점 트래킹 제어와 복합적으로 구현되어 센서 성능을 보장하는 제어루프이다. 진폭제어루프는 변위신호 포락선 검출기와 기준전압 비교를 통한 제어기로 구성되나 구체적인 루프 설명은 본 논문이 다루는 범위를 벗어나므로 생략하기 한다[15-17,22,23]. 공진점 트래킹 제어는 PLL을 이용한 위상제어루프로 구성할 수 있다. 이 제어 기법은 공진주파수로 공진체 진동시 출력신호 위상과 기준 주파수 발진기 출력신호 위상과의 차이를 검출 및 제어하여 공진 주파수를 보존하는 방법이다. 위상제어루프에 대한 자세한 설명은 다음절에 제시하였다.

1. 공진자이로 주파수제어를 위한 위상제어루프

공진자이로 시스템의 위상제어루프는 위상에러의 검출 및 피드백 제어로 인한 에러의 보정으로 이루어진다. PLL을 이용한 공진자이로 시스템의 위상제어 공진루프의 구성은 그림 3의 구성을 따르며 위상제어의 타겟 시스템인 공진자이로 진동체(gyroscope plant), 위상차 검출기(phase detector), 루프 필터(loop filter), 전압제어공진기(VCO: Voltage Control Oscillator)로 이루어진다. 기본적인 구동방식은 다음과 같다.

공진체의 위상인  $\theta_i$ 와 전압제어공진기의 위상인  $\theta_o$ 의 차이를 위상차 검출기를 통하여 위상오차인  $\theta_e$ 를 검출한다. 이를 루프필터를 통해 제어 전압으로 환산하여 전압제어공진기에 인가하고 제어신호를 위상신호로 환산하여 대상 시스템인 진동체에 위상제어신호를 주는 구조이다. 이를 통해 자이로스코프 공진체의 고유진동수를 보존하게 된다.

공진체가 고유진동수로 안정적으로 주파수가 유지되며 진동하고 있다고 가정할 때 선형 PLL 이론이 적용가능하며 전달함수적 표현은 다음의 식 (4)과 같다[18]. 각각 G(s)는 개루프(open-loop), H(s)는 시스템루프(system-loop), E(s)는 에러루프

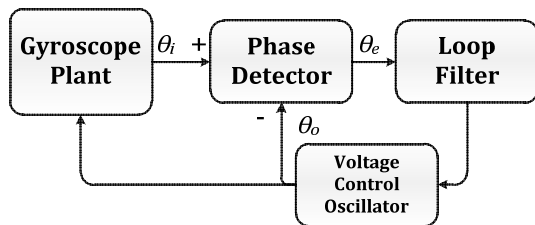


그림 3. 자이로스코프 질량체의 주파수제어를 위한 위상제어 루프의 블록다이어그램.

Fig. 3. Block diagram of phase control loop for gyroscope proof mass frequency control.

(error-loop)의 전달함수를 나타낸다. 이를 통하여 PLL 시스템에서의 위상오차 발생 시 반응을 산술적으로 계산가능[19] 하나 이는 낮은 차수의 PLL에서만 가능하다. 따라서 높은 차수의 PLL을 통한 공진자이로의 주파수제어 시 외부 오차에 따른 공진자이로 시스템의 주파수 응답을 추정하고 특히 초기 구동 시 반응을 고려한다면 본 논문과 같이 비선형 시뮬레이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여야 한다.

$$G(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_e(s)}$$

$$E(s) = \frac{\theta_e(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{1+G(s)} \tag{4}$$

$$H(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} = 1 - E(s)$$

위상차 검출기는 공진자이로 진동체와 전압제어공진기사이의 에러요인에 의해 위상오차가 있는 경우 이 신호를 검출하여 루프필터에 인가하는 역할을 한다. 위상차 검출기는 크게 아날로그 곱셈기 기반의 위상차 검출기와 Charge Pump 기반의 Sequential 위상차 검출기로 나뉜다. 아날로그 곱셈기 기반의 검출기는 신호 추정 성능이 떨어지고 상대적으로 구현에 어려움이 있지만 잡음 성능에서 보다 강한 특성을 보인다. 따라서 본 논문이 고려 하는 고성능 자이로스코프와 같은 잡음에 민감한 시스템에서는 아날로그 기반의 위상차 검출기가 유리하다.

루프필터는 위상제어루프의 특성을 결정하는 역할을 한다. 안정성이 쉽게 보장되며 Op-amp와 R, C 소자로 실제 회로를 이용하여 구현 시 간단하게 구현이 가능한 가장 기본적인 1<sup>st</sup> order Active PI 루프 필터가 주로 사용된다[6].

전압제어공진기는 루프필터를 통해 받은 제어신호에 상응하는 출력주파수를 내보내는 공진기이다. 공진자이로를 위한 위상제어루프의 구성에서는 진동주파수의 위상오차를 보상하는데 사용된다. 이는 공진자이로의 공진제어시스템에서 공진주파수 보존능력의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소로서 민감하고 정밀한 소자를 사용할수록 그 성능이 극대화된다. 따라서 우주급 공진자이로 시스템에서는 정상구동 시 온도도와 외부요인 그리고 정밀도에 따른 일반적인 오차가 약 50 ppm정도인 정밀소자를 사용한다.

전압제어공진기의 일반적인 위상 도메인 전달함수와 수식적 표현은 식 (5),(6)와 같으며  $K_o$ ,  $V_c$ ,  $\omega_o$ ,  $V_{VCO}$ 는 전압제어공진기의 이득, 전압으로 환산된 루프필터의 제어신호, 초기 주파수, 출력 신호의 진폭 크기이다[18].

$$\theta_o(s) = \frac{K_o V_c(s)}{s} \tag{5}$$

$$V_o(t) = V_{VCO} \cos(\omega_o t + K_o \int V_c(t) dt) \tag{6}$$

표 1. 위상차 검출기 타입에 따른 성능분석[20].

Table 1. Performance table of phase detector types.

	Analog Phase Detector	Sequential Phase Detector
Signal/Noise	Good	Bad
Capture Range	Bad	Very Good
Tracking	Bad	Good

2. 위상제어루프 구성을 위한 일반적인 루프 필터 설계기법

본 절에서는 위상제어를 위한 일반적인 설계 기법을 제시한다. 먼저 그림 4는 1<sup>st</sup> order Active PI 루프 필터를 포함한 위상제어루프의 블록다이어그램을 도시하며 다음과 같이 설계 기법을 체계화할 수 있다[18].

Step 1: 전압제어공진기 초기 기동 주파수 설정: 일반적인 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 이용한 설계 시 우선 초기 기동 주파수 범위를 설정한다. 고성능의 자이로스코프 공진체는 Q-factor가 매우 높으므로 자이로스코프의 주파수 범위 보다 전압제어공진기의 주파수 범위를 고려한다.

Step 2: PLL의 감쇠비(damping ratio) 설정: PLL의 시스템루프인 H(s)의 감쇠비 설계 시 부족감쇠는 overshoot를 과감쇠는 느린 응답을 야기하므로 통상적으로 0.5~1의 값을 사용하며 본 연구에서는 일반적인 값인 0.7을 사용 하도록 한다.

Step 3: Lock-in Range 설정: PLL의 일반적인 작동범위라 할 수 있는 Lock-in Range 설계 시 위상노이즈 민감도와 Lock-in range는 trade off의 관계임을 고려해야 한다. Lock-in range의 범위가 넓으면 공진이 잘 이루어지지만 노이즈면에서 불리하며 반대로 범위가 좁으면 초기 공진에 불리 하지만 노이즈면에서 유리하다[6]. 본 논문에서 고려하는 공진제어 시스템은 노이즈를 최소화 하는 것이 성능에 유리하므로 Lock-in Range를 5 Hz 이내로 설계한다.

Step 4: 전압제어공진기 이득 설정: K<sub>o</sub>는 전압제어공진기의 입력 전압과 출력 주파수 범위를 이용하여 구할 수 있다. 특성식은 식 (7)과 같으며 ω<sub>MAX</sub>, ω<sub>MIN</sub>, V<sub>MAX</sub>, V<sub>MIN</sub>은 공진주파수의 최대, 최소 변화량과 그에 따른 전압의 최대, 최소변화량 값이다[18].

$$K_o = \frac{\omega_{MAX} - \omega_{MIN}}{V_{MAX} - V_{MIN}} \quad (7)$$

Step 5: 위상차 검출기 이득 설정: 위상차 검출기의 이득인 K<sub>d</sub> 설계 시 일반 상용 charge pump 타입의 위상차 검출기의 경우 제품의 데이터 시트를 참조 하여 얻을 수 있으며 아날로그 곱셈기를 이용하여 구성 시 LPF (Low Pass Filter) 이득을 고려하여 구한다.

Step 6: 루프필터 설계: 루프 필터 설계 시 Lock-in range와 시스템루프의 감쇠비, 제어루프 수렴시간 간의 관계식을 이용하여 루프 필터의 파라미터를 설계 할 수 있다[6,18].

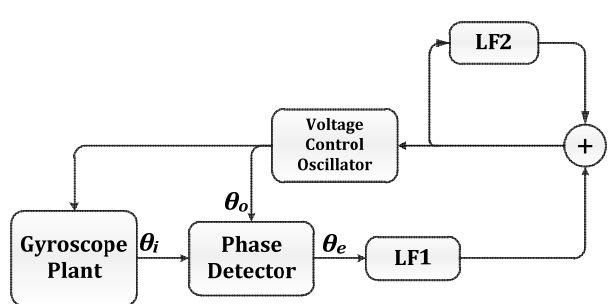


그림 4. 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 이용한 위상제어루프의 블록다이어그램.

Fig. 4. Block diagram of phase control loop using 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter.

$$F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{s\tau_1} = \frac{\tau_2 + \tau_1^{-1}}{\tau_1} \frac{1}{s} = C_{1st} + \omega_a \frac{1}{s} \quad (8)$$

1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터는 이론적으로는 공진성능과 위상 오차와의 관계인 Pull-in range와 Hold on Range가 무한대라는 장점 때문에 많이 사용된다[6,10]. 이론적으로 위와 같은 장점은 시뮬레이션 상으로는 반드시 공진을 일으킬 수 있다. 그러나 실제 구현 시 고성능 자이로스코프 같은 높은 Q-factor를 가지고 있는 시스템의 공진을 일으키기 위해 PLL을 이용한 공진제어루프를 사용하게 되면 초기 공진 주파수와 가진 주파수(전압제어공진기의 초기 주파수)와의 이격에 따라 공진모드 진입이 불가능한 경우가 많다. 따라서 이와 같은 오차는 PLL을 이용한 제어루프 구성 시 가장 큰 장애요인이며[6], 고차 필터를 사용하여 초기 구동에 유리한 루프의 구성이 반드시 필요하다.

3. 고성능 공진체의 위상제어루프를 위한 루프 필터 설계기법

기존 연구에서 성능향상을 목적으로 고차필터를 이용한 MEMS급 공진체의 위상제어가 고려되었다[7]. 하지만 초기 공진이 어려워 큰 Q-factor의 고성능 자이로스코프의 구동에는 적합하지 않다. 따라서 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터의 장점을 유지하면서 동등한 노이즈 성능을 유지하고(Lock-in Range 5Hz 이내) 실질적인 Pull-in Range를 크게 하는 설계가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 그림 5와 같이 확장된 루프 필터 구조를 갖는 고차 위상제어루프를 제안한다.

위상제어루프의 작동범위는 1<sup>st</sup> order Active PI 루프 필터를 적용한 Q-factor가 비교적 작은 MEMS 시스템 같은 경우 이론적인 값[6,18]을 적용 할 수 있다. 하지만 본 연구와 같이 높은 Q-factor 시스템에서는 위상 비선형성이 매우 커지므로 이론적인 값이 부합되지 않는다. 따라서 실험적으로 구하거나 비선형 시뮬레이터를 통해 수치적으로 추정해야 한다.

Pull-in Range는 unlock 상태에서 어느 정도 시간에 흐른 후에 공진을 하는 범위를 뜻하므로 초기 공진조건과 비슷하다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구 결과[6]를 토대로 하여 주파수 수렴시간이 1sec이내에 공진이 일어날 수 있는 작동범위를 그림 6과 같이 Actual Pull-in Range로 설계한다. 고차 위상제어루프의 설계를 위해 다음과 같은 절차를 따른다.

Step 1: K<sub>o</sub>, K<sub>d</sub> 설정: 고차 필터를 이용한 PLL을 설계하기 위하여 기존의 설계 기법의 과정(Step 1 ~ Step 5)을 따라 전압

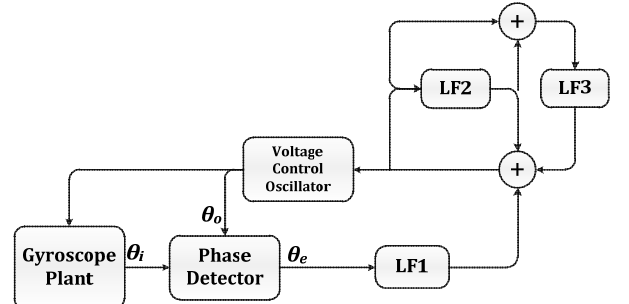


그림 5. 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 이용한 위상제어루프의 블록다이어그램.

Fig. 5. Block diagram of phase control loop using 2<sup>nd</sup> order loop filter.

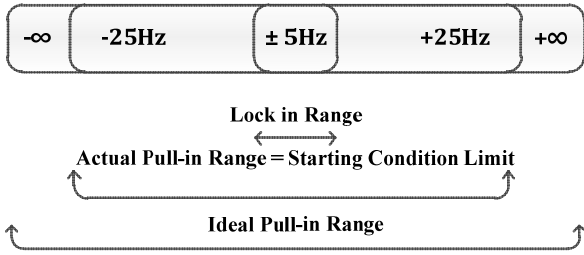


그림 6. 본 연구에서 설계된 위상제어루프의 주파수 작동범위.  
Fig. 6. Operation frequency range of phase control loop designed by this study.

제어공진기의 초기 기동 주파수와  $K_o, K_d$ 를 설정한다.  
Step 2: 1차 루프필터 설계(Velocity Tracking 루프필터): Velocity Tracking 루프필터를 구성한다[21]. 여기서  $LF_1$ (loop filter 1)는 설계 상수 값인  $C_{2nd}$ 이며 그에 따른  $LF_2$ 는 적분기가 포함된 구조이다. 이에 따라  $LF_1$ 과  $LF_2$ 가 혼합된  $LF_{1,2}(s)$ 는 다음의 식 (9) 같으며, 이는 기존의 설계 기법 결과인 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 동일한 구조이다.

$$LF_{1,2}(s) = \frac{\omega_a + C_{2nd} \cdot s}{s} = C_{2nd} + \frac{\omega_a}{s} \quad (9)$$

Step 3: 2차 루프필터 설계(Acceleration Tracking 루프필터): 식 (9)와 같은 설계된 1차 루프필터에 식 (10)과 같은  $LF_3$ 를 추가하여  $LF_1, LF_2, LF_3$ 가 혼합된 필터를 그림 5과 같이 구성하게 되면 Acceleration Tracking 루프필터[21]가 되며 이에 따른 고차화된 루프 필터  $LF_{1,2,3}(s)$ 의 관계식은 아래의 식 (11)과 같다.

$$LF_3(s) = \frac{1}{1 + (s/\omega_b)} \quad (10)$$

$$LF_{1,2,3}(s) = LF_1(s) \frac{1}{(1 - LF_2(s))(1 - LF_3(s))} \quad (11)$$

Step 4: 안정도 판별(Root Locus, Routh-Hurwitz)을 이용한 루프필터 파라미터 설계: Step 3에서 설계한 2차 루프필터의 파라미터를 얻기 위하여 2차 루프필터인 식 (11)를 PLL의 시스템루프방정식에 대입하여 식 (12)를 얻는다.

$$H(s) = \frac{C_{2nd} K_o K_d s^2 + C_{2nd} K_o K_d (\omega_a + \omega_b) s + C_{2nd} K_o K_d \omega_a \omega_b}{s^3 + C_{2nd} K_o K_d s^2 + C_{2nd} K_o K_d (\omega_a + \omega_b) s + C_{2nd} K_o K_d \omega_a \omega_b} \quad (12)$$

PLL의 시스템 루프방정식인 식 (12)은 Routh-Hurwitz criterion를 이용하여 안정도 판별식[21]을 정할 수 있으며 이에 따른 판별식은 식 (13)과 같다. 한편 근계적 해석을 통하여 안정도 및 페루프 특성을 모두 고려한 루프필터 파라미터  $C_{2nd}, \omega_a, \omega_b$ 를 설계할 수 있다. 그림 7은 2차의 루프필터를 적용한 위상제어루프의 일반적인 근계적을 나타내며 이를 통하여 지배적인 페루프 극점의 값을 도시적으로 설정할 수 있다.

$$\frac{C_{2nd} \cdot K_o \cdot K_d}{\omega_a \omega_b / (\omega_a + \omega_b)} > 1 \quad (13)$$

Step 5: 2<sup>nd</sup> order 루프 필터 구성: 위와 같은 방법으로  $C_{2nd}, \omega_a, \omega_b$ 를 설계한 후 아래의 식 (14)과 같은 2<sup>nd</sup> order 루프필

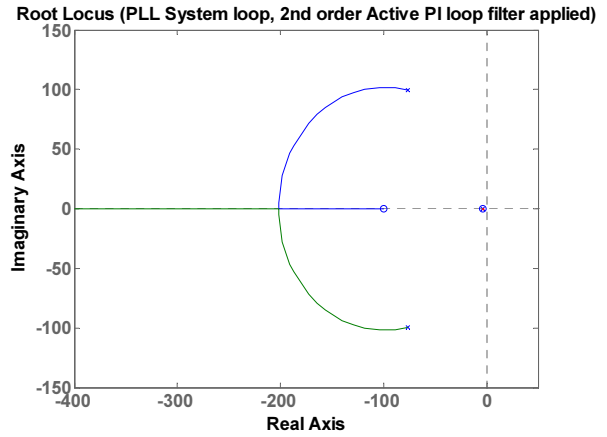


그림 7. 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 적용한 위상제어루프의 안정도 판별 결과.  
Fig. 7. Stability result of Phase Control loop which is 2<sup>nd</sup> order loop filter applied.

터를 구성 할 수 있다.

$$LF_{1,2,3}(s) = C_{2nd} \cdot \frac{\omega_a \omega_b (1 + s/\omega_a)(1 + s/\omega_b)}{s^2} \quad (14)$$

#### IV. 시뮬레이션 및 결과

앞서 구성한 위상제어루프를 이용하여 자이로스코프 진동체의 공진제어 시 성능과 동작 특성 등을 MATLAB SIMULINK<sup>®</sup>를 이용하여 구성하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 위상차 검출기는 아날로그 곱셈기 기반의 위상차 검출기를 모델링 하였고 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 기반의 위상제어루프를 구성 하였다. 공진폭 제어는 문헌에서 알려진 바와 같이 변위 신호 포락선을 이용하여 제어루프를 구성하였다[15,16]. 시뮬레이션을 위한 공진형 자이로스코프의 파라미터는 표 2에서 보여준다.

정지 상태에서 자이로스코프 진동체의 고유진동수로의 초기 공진 구현을 PLL을 이용한 위상제어기법을 모사한 시뮬레이션을 통하여 구현하였다. 진동체의 설계 고유진동수와 전압제어공진기의 초기 주파수간의 차이가 생길 때의 위상제어루프의 성능비교를 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 적용하

표 2. 시뮬레이션을 위한 자이로스코프의 공진체 파라미터.  
Table 2. Gyroscope resonator parameters for simulation.

Parameter	Value	Unit
Proof Mass	3e-3	[kg]
Natural Frequency	2500	[Hz]
Spring Constant	7.40e5	[N/m]
Damping Ratio	2.00e-6	[N-s/m]

표 3. 시뮬레이션을 위한 위상제어루프 파라미터.  
Table 3. Phase control loop parameters for simulation.

Parameter	Value	Unit
$K_d$	2.77	[V/rad]
$K_o$	56.55	[rad/V]
Lock-in Range	5	[Hz]
VCO Initial Frequency	2500	[Hz]
VCO Error	5, 10, 25	[Hz]

였을 경우와 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 사용한 경우를 가정하여 비교를 하였다. 위상제어루프의 파라미터는 표 3와 같다.

일반적인 자이로스코프 시스템은 회로적 요인 등으로 인한 잡음에 민감한 시스템이므로 Lock-in range를 10 Hz 이내로 정하는 것이 타당하다. 따라서 본 논문에서는 고성능 자이로스코프를 고려한 잡음에 대한 성능을 극대화시키기 위하여 5 Hz로 설정하여 시뮬레이션을 수행 하였다.  $K_o$ ,  $K_f$ 는 상용 IC 타입의 PLL 소자인 EXAR 사의 XR2212를 참조하여 구성하였다. 위의 조건에 따라서 설계한 루프필터의 파라미터는 표 4와 같다.

시뮬레이션 시간은 총 1 sec이며 시뮬레이션마다 초기 주파수 오차를 달리하여 시뮬레이션을 수행하였다. 자이로스코프의 변위의 설계값은 공진체 진폭의 포락선 모델을 이용하여 구할 수 있다[16]. 이에 따른 진동체 변위의 설계 값은 약 25  $\mu\text{m}$ 이다.

그림 8, 9는 초기 구동 시 전압제어공진기와 자이로스코프 진동체간의 주파수가 오차가 없다고 가정하였을 경우 진동체의 변위신호와 주파수 오차를 도시한 것이다. 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> order 루프필터 모두 진폭과 주파수 모두 설계 값과 정상상태로 0.1sec 이내로 수렴하여 안정적으로 공진이 되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 구성한 위상제어루프는 높은 Q-factor의 고성능 자이로스코프 시스템의 위상제어에

표 4. 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 파라미터.

Table 4. 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter parameters.

Loop Filter Type	C	$\omega_a$	$\omega_b$
1 <sup>st</sup> order Active PI loop filter	0.240	3.858	-
2 <sup>nd</sup> order loop filter	1	3.858	100

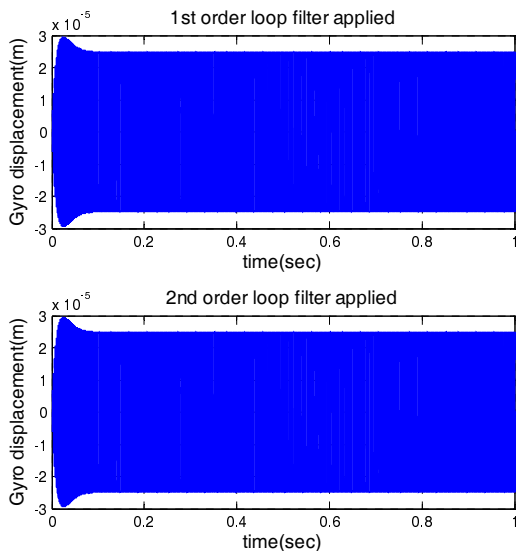


그림 8. 초기 주파수 오차가 없을 경우의 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 진동 변위의 모습.

Fig. 8. Output characteristics of the measured displacement applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter (no initial frequency error).

안정적인 기본성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 10, 11은 초기 구동 시 전압제어공진기와 자이로스코프 진동체간의 주파수가 오차가 5 Hz로 Lock-in Range 만큼의 오차가 있을 때를 가정한 결과를 도식한 것이다. 오차가 없는 경우와 유사하게 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 적용한 경우 모두 안정적으로 공진이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 진폭의 경우 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> order 루프필터 모두 성능에 큰 차이가 없다. 주파수 측면에서는 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터의 경우 오차의

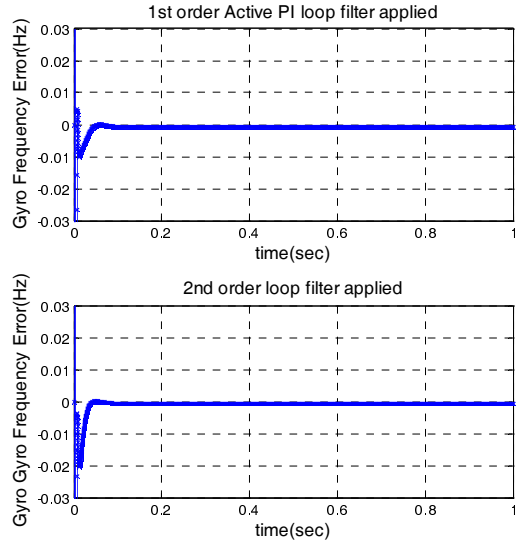


그림 9. 초기 주파수 오차가 없을 경우의 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 주파수 출력 특성.

Fig. 9. Output characteristics of the measured frequency applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter (no initial frequency error).

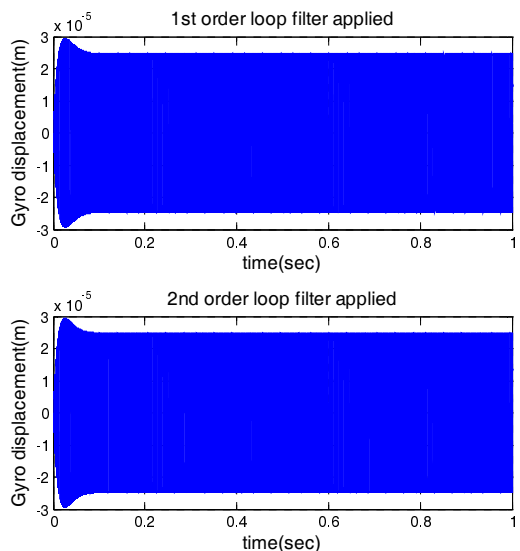


그림 10. 초기 주파수 오차가 있을 경우(5Hz) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 변위 특성.

Fig. 10. Output Characteristics of the measured displacement applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter when initial frequency error is applied (5 Hz).

수렴시간이 약 0.4 sec 이내인 반면 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용의 경우 약 0.3 sec 이내로 수렴시간이 상대적으로 빠르며 over shoot 도 작은 것을 확인 할 수 있다.

그림 12, 13은 초기 구동 시 전압제어공진기와 자이로스코프 진동체간의 주파수가 오차가 10 Hz로 Lock-in Range의 2배 만큼의 오차가 있는 즉, 공진주파수의 약 0.4 %의 오차가 있을 경우의 결과를 도식한 것이다. 시뮬레이션 결과를 볼 때 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 적용한 위상제어루프에서 공진

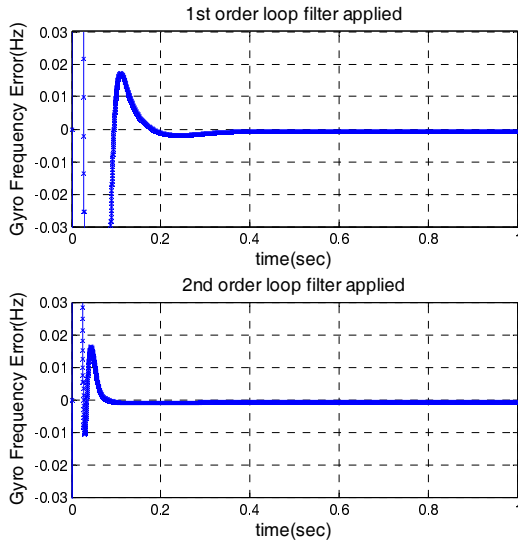


그림 11. 초기 주파수 오차가 있을 경우(5 Hz) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 주파수 출력 특성.

Fig. 11. Output Characteristics of the measured frequency applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter when initial frequency error is applied (5 Hz).

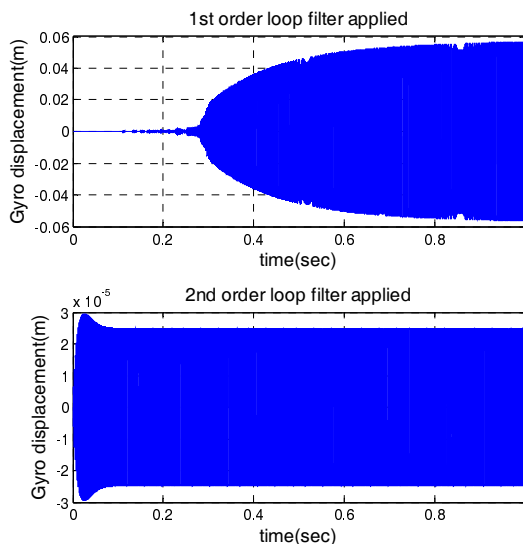


그림 12. 초기 주파수 오차 존재 (10 Hz)시, 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order loop filter 적용시의 변위 특성.

Fig. 12. Output Characteristics of the measured displacement applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter when initial frequency error is applied (10 Hz).

주파수를 보존하지 못해 공진주파수 오차를 0으로 수렴시키지 못함을 확인 할 수 있다. 그러나 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 적용한 위상제어루프는 변위 설계값을 0.1 sec 이내에 추종하며 주파수 측면에서도 overshoot은 발생하나 공진주파수를 약 0.4 sec 이내에 보존하는 것을 확인 할 수 있다.

한편 초기 주파수 이격이 커 공진점 트래킹 루프의 출력 이불 안정할 경우, 트래킹 루프 출력 신호에 대한 진폭 제어를 수행하는 루프도 기능을 상실하게 된다. 이는 트래킹 신호의 진폭 제어값의 위상 성분이 안정하지 못하기 때문에 발생하며 그림 12(a)와 같이 변위 신호가 발산하는 결과를 보여준다.

기타 온도 등의 영향을 받은 회로적 잡음 등에 따른 진폭의 오차가 공진주파수에 영향을 끼치기도 하는데 그 값은 자이로스코프의 질량체 특성에 따라 다르지만 고성능 자이로스코프를 대상으로 한 질량체의 경우 일반적으로 수 mHz이 내의 미미한 수준[15,16]이다. 따라서 본 논문에서 설계한 위상제어루프가 충분히 대응을 할 수 있는 수준이다.

그림 14, 15는 초기 전압제어공진기와 자이로스코프 진동체간의 주파수가 오차가 25 Hz로 공진주파수의 약 1 %의 오차가 있을 경우의 결과를 도식한 것이다. 위와 같은 파라미터는 실제 회로를 이용하여 공진제어루프 구성 시 중급 성능의 상용 IC소자인 EXAR 사의 XR2212를 사용하였을 경우 초기 발진 시 생길 수 있는 오차의 예상 값이다. 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 사용하였을 경우 공진모드에 돌입하지 못해 진폭과 주파수가 유지되지 못하는 것을 확인 할 수 있

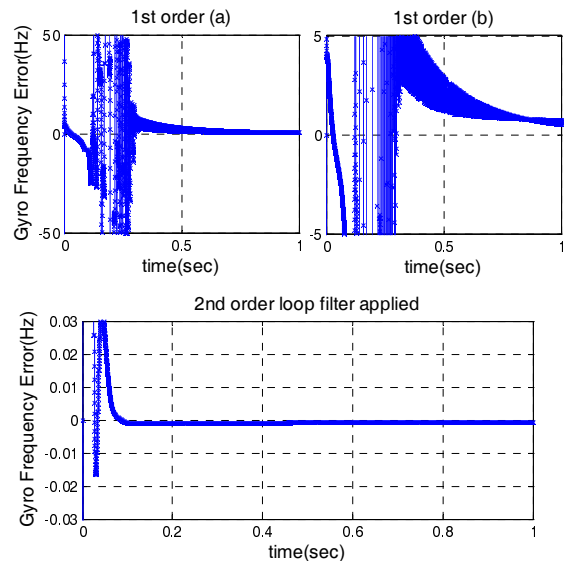


그림 13. 초기 주파수 오차가 있을 경우(10 Hz) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 주파수 출력 특성 (a) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 적용시의 모습 (b) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 적용 시 확대 모습.

Fig. 13. Output Characteristics of the measured frequency applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter when initial frequency error is applied (10 Hz) (a) Output of 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter applied (b) Heighten the scale of output of 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter applied.

다. 하지만 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 사용 하였을 경우 공진모드에 진입하여 진폭과 주파수 모두 설계 값에 수렴하고 보존하는 것을 확인 할 수 있다.

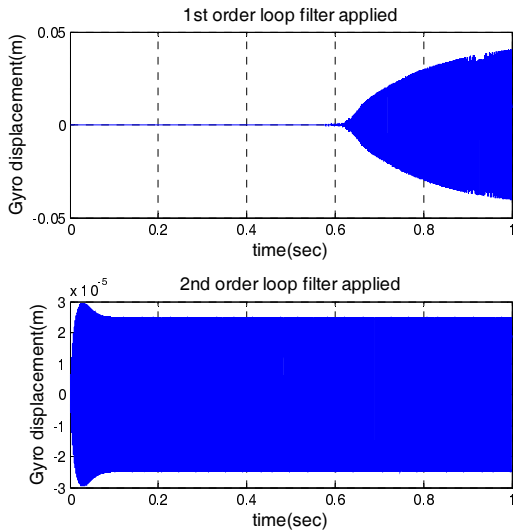


그림 14. 초기 주파수 오차가 있을 경우(25Hz: XR2212의 일반적인 주파수 정밀도 오차) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 변위 특성.

Fig. 14. Output Characteristics of the measured displacement applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> loop filter when initial frequency error is applied (25Hz: XR2212 typical frequency accuracy error).

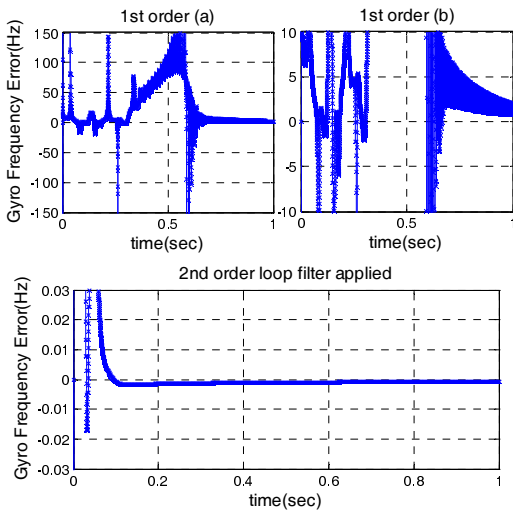


그림 15. 초기 주파수 오차가 있을 경우(25Hz: XR2212의 일반적인 주파수 정밀도 오차) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터와 2<sup>nd</sup> order 루프필터 적용시의 주파수 출력 특성 (a) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터 적용 시의 모습 (b) 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터 적용 시 확대모습.

Fig. 15. Output Characteristics of the measured frequency applied by 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter and 2<sup>nd</sup> order loop filter when initial frequency error is applied (25Hz: XR2212 typical frequency accuracy error) (a) Output of 1<sup>st</sup> order Active PI applied (b) Heighten the scale of output of 1<sup>st</sup> order Active PI loop filter applied.

표 5. 시뮬레이션 결과.

Table 5. Simulation results.

Loop Filter Type	Error Input [Hz]	Frequency Stability Result	Frequency Settling Time [sec]
1 <sup>st</sup> order	0	stable	0.1
	5		0.4
	10	unstable	-
	25		-
2 <sup>nd</sup> order	0	stable	0.1
	5		0.3
	10		0.4
	25		0.65
	25		0.65

이러한 시뮬레이션 결과를 종합 할 때 본 논문이 제시한 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 이용한 위상제어루프는 진동체의 초기 구동 시 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 이용한 위상제어루프에 비해 더욱 안정된 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

이는 1<sup>st</sup> order Active PI 루프필터를 적용한 위상제어루프가 초기 주파수 오차가 없거나 초기 주파수 오차가 Lock-in range 이내에 있을 경우에만 공진주파수를 보존하는 트래킹 루프 성능을 만족함에 비하여, 2<sup>nd</sup> order 루프필터를 이용한 위상제어루프를 적용하는 경우에는 공진주파수의 약 1%의 초기 주파수 오차가 있는 경우에서도 안정적으로 공진이 됨을 시뮬레이션 결과로 확인 할 수 있다. 이를 통해 위상제어루프의 구동작동범위(Actual Pull-in range)는 약 +/-25 Hz로 기존 설계 기법의 작동범위인 약 +/-7 Hz보다 3.5배 정도 성능향상을 이룬 것을 확인 할 수 있다.

실제 회로를 통한 위상제어루프 구성 시, 본 논문이 고려하는 높은 Q-factor의 고성능 자이로스코프 시스템의 경우 초기 전압제어공진기의 가진 주파수와 질량체의 설계 공진주파수의 차이로 인해 초기 공진이 이루어지지 않는 영역이 넓다. 따라서 Q-tech의 QT-24와 같은 고성능의 소자를 반드시 사용하여야 한다. 하지만 본 논문에서는 루프 필터의 차수를 높이는 설계 기법을 제시함으로써 EXAR2212와 같은 중급 성능의 전압제어공진기를 사용 함에도 불구하고 충분히 안정적인 공진제어 성능을 확보할 수 있음을 보였다.

### V. 결론

본 연구에서는 고정밀도 공진형 자이로스코프에 적용 가능한 위상제어루프 설계 기법을 제시하였다. 위상제어루프의 주파수 추종 성능을 향상 시키기 위하여 고차루프필터를 적용하는 설계 기법을 제시하였으며 Routh-Hurwitz, Root Locus 기준에 따른 안정도 조건을 고려하였다. 가상의 자이로스코프 모델을 가정한 공진제어 시뮬레이션을 구성하고 기본적인 위상제어루프 성능인 주파수 트래킹 성능을 보였으며 또한 루프필터 고차화에 따른 주파수 초기 오차에 대한 진동체 공진 주파수 추종 성능의 향상을 시뮬레이션 결과를 통해 입증하였다. 이를 통해 HRG (Hemispherical Resonator Gyroscope)와 같은 고정밀 공진 자이로스코프를 위한 위상제어루프 구성 시 안정적인 공진성능을 보장하며 특히 비교적 낮은 성능의 PLL 소자 입에도 불구하고 초기 공진 조건에 유리한 공진제어루프를 설계 할 수 있는 방안을 제시하였다.



## 참고문헌

- [1] B.-L. Lee, C. H. Oh, S. Lee, Y. S. Oh, and K. Chun, "A vacuum packaged differential resonant accelerometer using gap sensitive electrostatic stiffness changing effect," *Proc. of IEEE National Conference on Aerospace and Electronics*, Miyazaki, Japan, pp. 352-357, Jan. 2000.
- [2] D. Joachim and L. Lin, "Selective polysilicon deposition for frequency tuning of MEMS resonators," *Proc. of IEEE National Conference on Aerospace and Electronics*, Las Vegas, Nevada, pp. 727-730, Aug. 2002.
- [3] B. L. Norling, "Superflex: a synergistic combination of vibrating beam and quartz flexure accelerometer," *Journal of the Institute of Navigation*, vol. 1. 34, no. 4, pp. 337-354, Winter 1988.
- [4] S. Sung, J. G. Lee, T. Kang, and J. Song, "Development of a tunable resonant accelerometer with self-sustained oscillation loop," *IEEE Proc. of National Conference on Aerospace and Electronics*, Dayton, Ohio, pp. 354-361, Oct. 2000.
- [5] S. J. Park, S. C. Yun, H. Yoon, Y. J. Lee, and S. Sung, "Oscillation phase control loop design and simulation for space level resonant," *Proc. of 2011 KSAS Conference*, pp. 1656-1661, Yongpyong, Korea, Nov. 2011.
- [6] B. S. Chang, "An oscillation loop design for vibratory gyroscopes using phase locked loop," *Ph.D. Thesis*, Seoul National University, Korea, 2011.
- [7] J. A. Connally and S. B. Brown, "Micromechanical fatigue testing," *Proc. of 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 956-956, June 1991.
- [8] D. Y. Abramovitch, "Lyapunov redesign of analog phase-locked loops," *IEEE Transactions on Communication*, vol. 38, no. 12, pp. 2197-2202, Dec. 1990.
- [9] S. Wanchanna, T. Benjanarasuth, N. Komine, and J. Ngamwivit, "PLL equivalent augmented system incorporated with state feedback designed by LQR," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 161-168, April 2007.
- [10] Y. S. Chou, W. L. Mao, Y. C. Chen, and F. R. Chang, "A novel loop filter design for phase locked loops," *Proc. of IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Taipei, Taiwan, pp. 2935-2938, Oct. 2006.
- [11] M. S. Kang, *Controller Design for a Solid State Resonating Gyro*, M.S. Thesis, Konkuk University, Korea, 2019.
- [12] D. D. Lynch, "Vibratory gyro analysis by the method of averaging," *Proc. of the 2nd St. Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation*, St. Petersburg, Russia, pp. 26-34, 1995.
- [13] H. S. Myung, H. C. Bang, J. S. Lee, and J. W. Lim, "Controller design of hemispherical resonator gyroscopes using feedback linearization," *Proc. of 2008 KSAS Conference*, Jeju, Korea, pp. 911-914, Nov. 2008.
- [14] P. W. Loveday and C. A. Rogers, "The influence of control system design on the performance of vibratory gyroscopes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 255, no. 3, pp. 417-432, Aug. 2002.
- [15] S. J. Park, J. W. Song, S. H. Yun, B. J. Lee, Y. J. Lee, and S. Sung, "Oscillation control loop design and circuit implementation with a sustained amplitude for frequency readout type resonant sensors," *Proc. of 2010 KSAS Conference*, Jeju, Korea, pp. 722-725, Nov. 2010.
- [16] S. J. Park, J. W. Song, B. Lee, H. Yoon, Y. J. Lee, and S. Sung, "Autonomous oscillation control loop design for amplitude controlled, frequency read-out-type resonant sensors," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, article in press, 2012.
- [17] S. C. Yun, S. Sung, Y. J. Lee, and T. Kang, "Oscillation amplitude-controlled resonant accelerometer design using automatic gain control loop," *Journal of the KSAS*, vol. 36, no. 7, pp. 674-679, June 2008.
- [18] Roland E. Best, *Phase-locked loops: design, simulation, and applications*, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [19] S. J. Goldman, *Phase-Locked Loop Engineering Handbook for Integrated Circuits*, Artech House, Boston, 2000.
- [20] Paul V. Brennan, *Phase-Locked Loops: Principles and Practices*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [21] A. Carlosena and A. Manuel-Lazaro, "General method for phase-locked loop filter analysis and design," *Journal of Circuits, Devices & Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 249-256, April 2008.
- [22] H.-J. Kong, S. C. Lee, S. Park, and S. K. Hong, "Oscillation control for a electro-magnetic vibratory gyroscope," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 11, no. 3, pp. 187-192, Mar. 2005.
- [23] S. S. Park, "Frequency and amplitude control of micro resonant sensors," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 3, pp. 258-264, Mar. 2009.



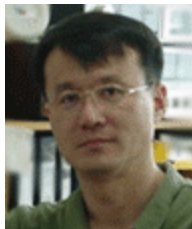
박상준

2010년 건국대학교 항공우주정보시스템 학사 졸업. 2010년~현재 건국대학교 대학원 항공우주정보시스템공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 관성센서 공진제어루프시스템, GPS/INS 항법 및 위치 결정.



용기력

1995년 조선대학교 우주항공공학과 학사 졸업. 2012년 KAIST 항공우주공학 박사. 1997년부터 한국항공우주연구원 근무. 아리랑 위성의 자세 및 궤도 제어계 개발. 관심분야는 추정이론, 위성자이로 및 별 센서 보정.



이영재

1990년 미국 The Univ. of Texas at Austin 항공우주공학 박사. 1996년~현재 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 교수. 관심분야는 GPS를 이용한 정밀 위치 결정, 고장 검출 및 GPS 응용.



성상경

1996년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2003년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 박사. 2007년 3월~현재 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 부교수. 관심분야는 Avionics 센서, 통신 및 제어 시스템.