

# 반구형 공진 자이로스코프의 신호 검출 및 제어

현 철<sup>1</sup> · 강태삼<sup>2,+</sup>

## Signal Detection and Control of Hemispherical Resonator Gyroscopes

Chul Hyun<sup>1</sup> and Taesam Kang<sup>2,+</sup>

### Abstract

In this paper, signal detection and control circuits for hemispherical resonator gyroscope(HRG) are designed, simulated and tested. HRG is one of the coriolis vibratory gyroscope(CVG) which has very stable quartz hemispherical resonator and shows very precise performance. HRG signals are usually modulated at the several kHz of resonant frequency. So the general control scheme cannot be applied directly because general control schemes mainly focused at low frequency range. Using demodulated and modulated PI control scheme with the signal detection which is presented in this paper, performance of manufactured HRG has tested.

**Keywords :** HRG, Vibratory Gyroscope, Signal Detection, PI Control

### 1. 서론

자이로스코프는 회전하는 물체의 회전각이나 회전 각속도를 측정하는 관성 센서이다. 이는 항공기나 선박, 유도무기 등에 탑재되어, 항체의 자세, 위치, 속도 등 항법에 필요한 정보들을 계산하고 출력해주는 관성 항법 시스템(Inertial Navigation System : INS)의 중요한 센서로 사용된다. 항법 이외에도 석유 시추 드릴의 방향 제어, 카메라 또는 안테나 받침대의 안정화, 로봇의 자세 제어, 터널 공사나 관로 공사의 위치 검출이나 위치 제어에 이용되는 등 다양한 응용분야에 쓰이고 있으며, 그 밖에도 자동차의 자동 주행 장치나 승차감 개선에도 이용되고 있다[1].

진동형 자이로스코프(Coriolis Vibratory Gyroscope : CVG)는 진동하는 질량체에 회전 운동이 인가될 때 발생하는 코리올리 효과를 이용하는 센서로서, MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems) 자이로스코프와, 반구형 공진 자이로스코프(Hemispherical Resonator Gyroscope : HRG)는 모두 여기에 포함된다[2].

반구형 공진 자이로스코프는 1890년에 영국의 물리학자 G.H. Byran 이 와인잔 실험을 통해 발견한 쉘에 형성된 정상파(standing wave)의 관성 특성을 이용한 것이다. 와인잔이나 실린더, 링 형의 쉘 공진기가 회전운동을 할 때, 공진에 의하여 쉘에서 발생하는 정상

파가 쉘의 기둥을 축으로 하는 각속도 입력에 비례하여 세차 운동하거나, 마디(node)위치의 진폭이 비례하는 원리를 이용한다.

HRG 는 재료 특성이 좋은 무정질 수정을 소재로 이용하여 우수한 환산계수 및 바이어스 안정도를 갖고, 반구형 쉘에서 발생하는 정상파를 기본으로 동작하므로 실제로 크게 움직이는 부분이 없기 때문에 마모현상이 없으며, 이상적으로는 동일한 두 개의 공진 모드를 가지기 때문에 온도 특성도 탁월한 장점이 있다. 이는 현재 전략적 응용에 주로 쓰이는 광학식 자이로스코프 - 링레이저 자이로스코프(Ring Laser Gyroscope : RLG)나 간섭형 광섬유 자이로스코프(Interferometric Fiber Optic Gyroscope : IFOG) - 와 비교했을 때, 보다 간단한 구성으로 인해 잡음원이 적고, 상대적으로 낮은 속도의 신호처리를 할 수 있는 장점을 갖는다. 그리고 실제 그 성능도 광학식 자이로스코프에 준하거나 그 이상의 성능을 보여, 현재 많은 연구와 응용이 수행되고 있다[3].

자이로스코프의 성능은 공진기 구조물의 기계적인 안정성과, 이에 대한 저잡음 신호처리 및 정밀 제어 성능에 의하여 결정된다. 센서 개발 초기에는 기계적인 부분이 성능 제한 요소가 되나, 공정 기술이 확립되고 난 후에는 신호처리 및 제어 부분이 센서 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구는 초정밀 관성 센서 기술 독자 개발을 위해 국내 최초로 제작되고 연구된 HRG 에 대하여 신호 검출, 처리 및 제어 루프 설계에 초점을 맞춘다.

<sup>1</sup>LIG 넥스원 M&S 연구센터 (M&S R&D Lab, LIG Nex1)

<sup>2</sup>건국대학교 항공우주정보시스템공학과(Department of Aerospace Information Engineering, Konkuk University)

<sup>+</sup>Corresponding author: [tskang@konkuk.ac.kr](mailto:tskang@konkuk.ac.kr)

(Received : Jan. 16, 2012, Revised : Mar. 12, 2012, Accepted : Mar. 16, 2012)

### 2. 반구형 공진 자이로스코프

2.1 동작 원리

HRG 는 공진하는 셸의 관성 특성을 이용한 것으로, Fig.1의 (a) 에 나와 있는 와인잔 모양의 공진기를 통하여 그 원리를 이해할 수 있다. Fig. 1(b)는 셸 공진기에 형성되는 탄성 정상파의 모습을 위쪽에서 본 형상인데, 2개의 마디(node)와 2개의 파복(antinode)을 갖는 진동을 보여주고 있다.

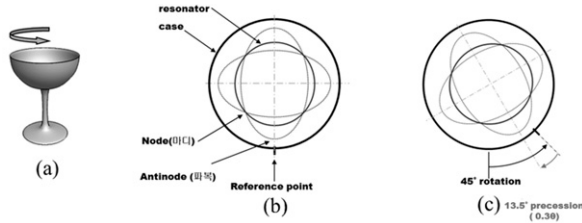


Fig. 1. Operating principle of HRG.

Fig. 1의 (b)와 같은 정상파가 형성된 상태에서 외부 케이스가 (c)와 같이 반시계 방향으로 회전하게 되면, 공진기의 정상파는 케이스 회전과 반대방향으로 일정 비율로 세차운동 하게 된다. Fig. 1의 (c)와 같이 반시계방향으로 45° (θ) 회전 했다면, 정상파의 공진축은 그림과 같이 기준점으로부터 시계방향으로 13.5° (0.3θ) 떨어지게 된다. 0.3이라는 값은 각이득계수(angular-gain factor)로 불리는데, 이는 공진기의 밀도나 탄성계수등과는 무관하게 기하학적 형상에 의하여 결정되는 물리적 특성이다[4]. HRG 는 각이득계수가 매우 안정하기 때문에 정밀 센서로 사용할 수 있다. 이상과 같은 정상파의 공진축 세차 각도나, 마디 위치의 진폭을 이용하여 회전각이나 각속도량을 측정할 수 있다.

2.2 구성

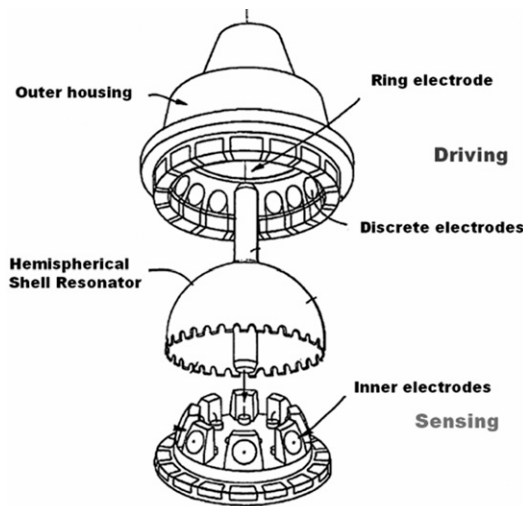


Fig. 2. HRG Structure.

HRG 는 Fig. 2와 같이, 반구형 공진기와 구동 전극(forcer) 및 감지 전극 (pickoff)이 케이스 안에 진공 실장된 형태로 구성된다. 일반적으로 전극들은 반구형 공진기의 내부와 외부에 각각 위치하게 되고, 공진기를 둘러싸는 형태의 링 전극과, 여러 개의 분리된 전극으로 구성된다.

링 전극은 HRG 를 자유롭게 세차운동을 시키고, 세차각을 통하여 회전 각도를 얻어내는 홀앵글(whole angle)모드로 동작시킬 때 주로 사용하는 전극이다. 링 전극을 통하여 공진주파수의 2배 주파수로 가진 전압을 걸어주면 공진 패턴각이 어디에 위치하든지 무관하게 공진 패턴의 진폭을 제어할 수 있다.

외부의 16개의 분리 전극은 주로 제어를 하는데 사용되고, 내부의 8개 전극은 신호 검출을 위해 사용되는 것이 일반적이다. 이상의 내용은 대표적인 사용 방법이고, 특정 목적에 따라, 전극 수와 구성은 다르게 결정될 수 있다.

본 논문에서 사용되는 HRG 샘플은, 제작 공정상의 어려움으로 공진기 외부에 위치하는 전극 없이, 공진기의 내부에 16개의 분리 전극만을 사용하여 구동과 검출 및 제어를 모두 수행하게 된다.

2.3 진동 모드와 운동 방정식

반구형 셸 진동자의 경우 진동모드는 2차 모드를 사용하며, 그 진동형상의 단면이 Fig. 3과 같다. 제어를 수행 할 경우에는 3차원 형상 보다는 단면의 진동형상만을 이용하여 제어기 설계를 위한 모델로 이용한다.

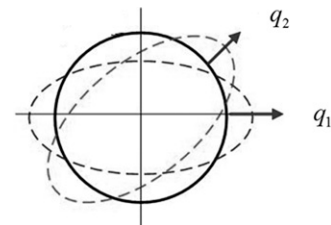


Fig. 3. 2<sup>nd</sup> mode configuration of hemispherical resonator

이상적인 형태의 자이로스코프 운동 방정식은 식(1)과 같이 코리올리 간섭만 존재하는 2차 시스템으로 표현할 수 있다[5].

$$\begin{aligned} \ddot{x} + c_{11}\dot{x} + k_{11}x &= f_{xd} + 2\Omega\dot{y} \\ \ddot{y} + c_{22}\dot{y} + k_{22}y &= -2\Omega\dot{x} \end{aligned} \tag{1}$$

식(1)의 x, y 는 Fig. 3의 독립적인 자이로스코프의 두 축인 q<sub>1</sub>, q<sub>2</sub> 를 각각 의미하고, c<sub>11</sub> 과 c<sub>22</sub> 는 댐핑항, k<sub>11</sub> 과 k<sub>22</sub> 는 스프링 상수를 의미한다. 구동축이 되는 x 축은 구동전압에 의한 f<sub>xd</sub> 에 의하여 공진을 유지하고, 감지축인 y 축으로는 외부 인가 각속도 Ω 에 의한 코리올리 힘이 작용하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 이상적인

형태의 자이로스코프의 동작을 충분히 가능할 수 있으며, 식(1)에서 생략된 비이상적인 항(nonidealities)들은 이상적인 자이로스코프의 동작에 오차 요인으로 작용하는 항으로서, 보다 정밀한 제어를 위해 필요한 부분이라 하겠다.

### 3. 신호 검출

HRG 는 외부 인가 각속도에 의한 질량체의 변위 발생을 이용하여 관성량을 측정한다. 일반적으로  $\mu\text{m}$  단위의 미세한 변위에 의해 변하는 감지 전극과 공진기 사이의 용량(capacitance) 변화를 감지함으로써 이를 측정하게 된다. 즉, 외부 각속도 값이 입력될 때, HRG 의 감지축은 기준 영점에서 벗어나는 동적 특성을 보이고, 감지의 입장에서는 기준 위치에 대한 공진기의 변위를 정전 용량의 변화를 측정하여 검출해낸다.

공진기의 변위가 0에 가까운 값을 유지하여 기준 간격에 비해 매우 작으면, 식(2)와 같이 공진기 변위와 전기용량 변화는 선형성을 유지할 수 있다.

$$C = \frac{\epsilon A}{x+d}$$

$$= \frac{\epsilon A}{d} \left[ 1 - \frac{x}{d} + \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{d}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{x}{d}\right)^3 + \dots \right] \quad (2)$$

$$\approx \frac{\epsilon A}{d} \left( 1 - \frac{x}{d} \right) \quad [d \gg x]$$

식(2)는 평행판 전극에 미세한 변위가 존재할 때의 전기용량 변화에 대한 표현으로, Fig. 4(a)에 나타나 있는 바와 같이,  $\epsilon$  은 유전율,  $A$  는 전극의 면적,  $d$  는 기준 간격,  $x$  는 관성체에 의한 변위를 의미한다. HRG 에서는 Fig. 4(b)와 같이 금속 코팅된 반구형 공진기의 내부와 공진기 내부에 있는 감지 전극이 Fig. 4(a)와 같은 평행판 커패시터와 유사한 구성을 하고 있다.

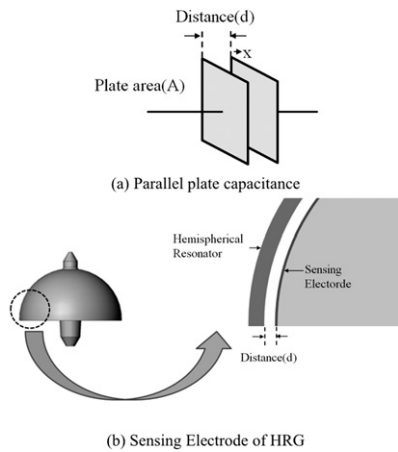


Fig. 4. Parallel plate capacitance and sensing electrode of HRG.

이 때, 미세 변위로 인한 용량 변화는 매우 작은 값이므로 구조 및 감지 원리, 회로 구현성 등을 고려하여 가장 적합한 형태의 감지 회로 인터페이스 단을 구성해야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 전하 적분 방식의 용량 감지 기법을 사용하였고, 이는 공진기와 검출 전극 사이에 유도되는 전하를 적분하여 변위를 측정하는 방식으로, 변위에 의한 신호감도가 크고 기생 커패시턴스의 변화에 거의 영향을 받지 않는 장점이 있다.

전하 적분 방식의 신호 검출 동작 원리는 Fig. 5와 같은 개념도로 설명할 수 있다. 즉, 전하 적분 방식의 신호 검출은 진동에 따라 공진기와 감지 전극 간에 유도되는 전하를 고속, 정밀 연산 증폭기와 궤환 용량을 이용한 반전 회로로 적분하여 변위 신호를 검출하는 원리이다. Fig. 5에서  $C_0 + \Delta C$  로 표현된 부분이 HRG 의 공진기와 검출 전극간의 용량 변화를 의미한다.

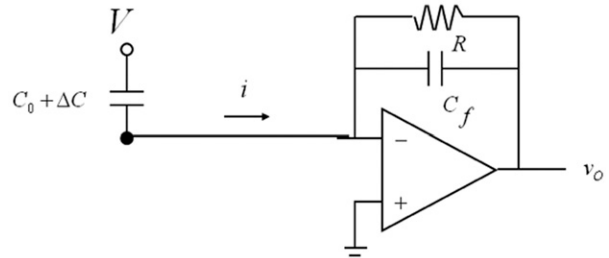


Fig. 5. Configuration of charge amplifier.

Fig. 5에서  $i$  로 표현되는 전류는 식 (3)과 같이 공진기와 감지 전극 사이에 유도되는 전하  $Q$  의 시간에 대한 변화율로 표현할 수 있고, 이는 곧 용량 변화량( $\Delta C$ )과 공진기의 바이어스 전압( $V$ )에 대한 식으로 표현된다.

$$i = \frac{d}{dt} Q = \frac{d}{dt} \{ (C_0 + \Delta C) V \} = \frac{d}{dt} \{ \Delta C V \} \quad (3)$$

연산 증폭기를 포함했을 때, 유도되는 전하  $Q$  와 출력 전압  $V_o$  간의 전달함수는 식 (4)와 같이 고역 통과 필터(high pass filter: HPF)의 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{V_o(s)}{Q(s)} = \frac{s / C_f}{s + 1 / RC_f} \quad (4)$$

검출하고자 하는 공진기의 공진 주파수 대역이 식 (4)에서 표현되는 HPF 의 차단 주파수보다 충분히 높다고 가정할 때, 출력 전압  $V_o$  는 식 (5)와 같이 표현된다. 변위에 대한 신호 감도가 이론적으로 궤환 용량의 크기에 따라 임의로 조절 가능하므로 민감도가 크다.

$$v_o(t) = \frac{\Delta C}{C_f} V \quad (5)$$

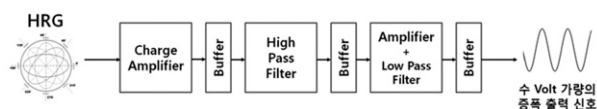


Fig. 6. Block diagram of signal detection board.

전하 적분 방식을 사용한 미세 용량 검출 보드의 구성은 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 블록 다이어그램에서 Charge Amplifier로 표현된 전하 적분 방식의 전치 증폭기의 출력은 고역 통과 필터와 증폭, 저역 통과 필터(Low Pass Filter : LPF)를 지나, 수 Volt 가량의 증폭된 출력 신호로 변환된다. HPF 는 이후 증폭단에서 DC 성분이 불필요하게 증폭되지 않도록 DC 성분을 차단해 주고, 증폭단은 검출된 미세 신호를 Volt 단위로 키워주며, LPF 는 증폭과정에서 발생할 수 있는 고주파 잡음을 차단하는 역할을 한다. 중간마다 들어가는 버퍼는 각 단의 상호 작용을 방지하기 위해 추가되었다. HPF 단에서는 출력신호에 위상 앞섬(phase lead)이 발생할 수 있고, LPF 단에서는 위상 지연(phase lag)가 발생할 수 있다. 수 kHz 의 높은 주파수로 동작하는 HRG 의 경우에는 위상의 변화가 자이로스코프 성능에 큰 영향을 줄 수 있으므로, 필터 설계단계에서 이를 고려하여 위상 지연과 앞섬이 서로 상쇄될 수 있도록 하였다.

Fig. 7은 진공 챔버에 HRG 샘플과 함께 내장되는, PCB 로 구현된 미세 용량 검출 보드이다.



Fig. 7. PCB implemented signal detection board.

## 4. 제 어

### 4.1 HRG 제어 루프

재평형 모드로 동작하는 HRG 에 필요한 제어는 Fig. 8에 나타난 바와 같이, 일반적으로 기준 위상 제어(oscillation loop), 진폭 제어(amplitude control), 쿼드러처 제어(quadrature control), 그리고 재평형 제어(rebalance loop)로, 크게 네 가지를 들 수 있다[2, 5]. 이 중 기준 위상 제어와 진폭 제어를 구동축에 관련된 공진부로 분류할 수 있고, 쿼드러처 제어와 재평형 제어를 감지축에 관련된 제어부로 구분할 수 있다.

기본적으로 반구형 공진 자이로스코프가 코리올리 효과를 얻기

위해서는 일정한 크기의 속도를 갖는 진동을 유지할 수 있어야 한다. 이와 같은 진동을 유지하게 하는 것이 기준 위상 제어루프이다. 기준 위상 제어 루프는 자동 공진 루프나 VCO(Voltage Controlled Oscillator), 클럭(clock) 등을 이용하여 구현이 된다. 복조 및 변조 방식을 이용하는 제어 기법[2]에서는 이 기준 위상 발생 루프로부터 기준 신호를 제공 받고, 복조와 변조를 수행하게 된다.

진폭 제어 루프는 구동축의 공진이 댐핑 손실에 관계없이 일정한 진폭으로 공진을 유지할 수 있도록 제어해 주는 루프이다.

재평형 루프는 HRG 가 재평형 모드로 구동되는 경우에, 코리올리 효과에 의해 유도되는 감지축의 변위 성분을 0에 가깝게 제어하는 것이 목적인 제어 루프이다. HRG 에서는 재평형 제어 결과, 공진기의 공진 패턴 정상파를 검출전극에 정렬시켜주는 역할을 한다. 재평형 제어가 잘 될수록, 마디의 변위를 충분히 증폭시켜 신호처리를 할 수 있고, 이는 센서의 SNR 성과와 바로 연결된다[6]. 그리고 마디 변위를 매우 작은 값으로 유지시킴으로써, 정전 용량 변화에 대한 전기 신호와 입력 관성량 사이의 선형성을 보장할 수 있고, 그 밖에도 시스템의 안정성 보장 및 동정 영역 확장등의 부수적인 성능 개선의 효과를 얻을 수 있다. 이처럼 재평형 제어는 재평형 모드로 동작하는 자이로스코프에서 가장 핵심적인 제어 루프라고 할 수 있다.

쿼드러처 제어는 공진형 자이로스코프에서 구동축과 감지축의 공진축의 불일치에 의한 기계적인 커플링이나 주파수의 불일치에 의해서 발생하는 감지축의 쿼드러처 진동 (quadrature vibration) 성분을 제어해주는 역할을 한다.

쿼드러처 진동 성분은 자이로스코프의 환산 계수나 편류(drift)에 영향을 줄 수 있기 때문에, 높은 정확도의 자이로스코프 성능을 위해서는 이러한 쿼드러처 진동 성분을 0으로 제어해 주는 쿼드러처 제어 루프가 필요하다[7].

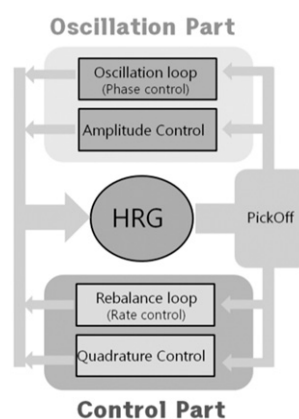


Fig. 8. Control loops of HRG.

#### 4.1.1 공진부

공진부는 반구형 공진기 구조물을 일정한 주파수로 흔들어 주는 역할을 한다. 외부 각속도를 코리올리 효과를 이용해서 측정하는

HRG 에서는 필수적인 부분이다. 일반적으로 센서의 감도를 높이기 위해서 반구형 공진기 구조물을 그것의 공진주파수에서 진동시키게 되고, 이러한 역할을 자기 공진 루프가 수행하게 된다. 자기공진루프는 구조물의 진동을 생성하고 그 진동의 주파수가 구조물의 공진주파수에서 유지될 수 있도록 하는 비선형 되먹임 시스템(nonlinear feedback loop system)이다. 자기 공진 루프의 구성은 Fig. 9와 같다.

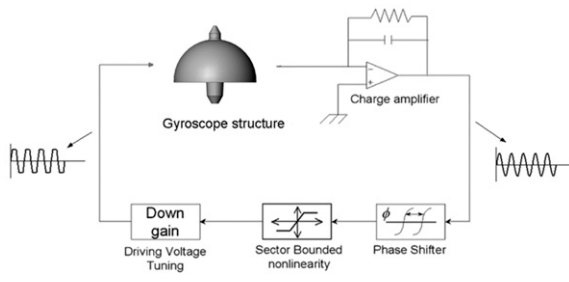


Fig. 9. Self oscillation loop of HRG.

자동 공진 제어의 구성은 정적 상태의 질량체에 대하여 백색 주파수대의 초기 여기 신호(excitation signal)를 입력시키고 이때 출력되는 가장 큰 모드의 신호에 대하여 신호 처리단에서 적절한 위상 지연을 주어 구동 전극에 되먹임으로서 자기 자신의 고유 모드에 수렴하도록 한다. 위상천이기(phase shifter)와 적절한 이득을 갖는 연산증폭기를 이용하여 자동 공진 루프를 얻을 수 있었다.

4.1.2 제어부

재평형 제어기는 HRG 가 개루프로 동작할 때, 제한되는 성능의 개선을 위해 사용하는 폐루프 제어시스템이다. HRG 가 개루프로 동작할 경우, 대역폭의 제한, 비선형성의 증대, 낮은 감도 등의 문제가 발생할 수 있다. 재평형 제어기는 제어전극을 통해 변위신호를 되먹임으로써 반구형 공진기의 변위를 감소시키고 제어신호가 입력을 추종하도록 하여 원하고자 하는 성능을 얻어낼 수 있다. Fig. 10은 HRG 의 재평형 루프에 대한 블록 다이어그램을 나타낸다.

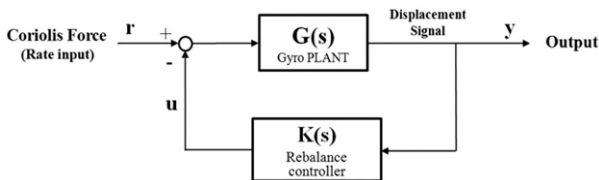


Fig. 10. Block diagram of rebalance loop.

입력 r 은 구동축 공진주파수에 변조된 각속도 입력이고, 출력 y 는 감지축 플랜트의 코리올리 입력에 대한 변위를 나타낸다. 재평형 제어기는 감지축 변위 y 를 자이로스코프 감지축 플랜트에 되먹임

하여 안정성을 해치지 않는 범위에서 출력 변위 y 를 0에 가깝게 제어하는 것이 목적이 된다.

공진 자이로스코프에 대한 재평형 제어 기법 중 가장 일반적으로 적용되는 기법이 복조 및 변조를 이용한 PI 제어기법이 있다. 이는 공진 주파수 대역의 자이로스코프 출력 신호를, 복조를 통해 저주파 대역의 표준화된 변수 형태로 옮기고, 저주파 대역의 신호에 PI 이득을 주어서 제어 신호를 만든 후에, 이를 다시 공진주파수에 변조시켜 플랜트에 되먹이는 형태의 방법[2, 4, 5]이다. 본 연구에서도 이러한 기법을 적용하여 HRG 에 대한 재평형 제어를 수행하였다. 복조 및 변조를 이용한 PI제어기에 대한 구성은 Fig. 11과 같다.

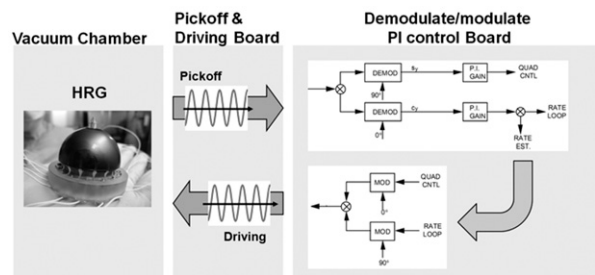


Fig. 11. Configuration of PI controller.

구동축의 공진 신호를 기준으로 하여 동위상 성분과 쿼드러처 성분을 나눠서 각각 제어하는 방법[2]을 이용하여 변조·복조 방식의 PI 재평형 제어기를 구현 하였다.

이와 같은 변조·복조 방식의 PI 제어는 연산 증폭기와 곱셈기를 이용하여 아날로그 회로로 구현하였다. 복조 부분(DEMOD)은 기준 신호와 출력 신호를 곱한 후에 고주파 성분을 필터링 하는 방법으로, 곱셈기와 연산 증폭기를 이용한 1차 LPF 로 구성되었고, 복조된 신호는 PI 이득을 통하여 제어 신호로 만들어진다. 변조 부분(MOD)은 기준 신호와 제어 신호를 곱해서 인가하는 방식으로 구성되었다. PCB 에 구현된 PI 제어 부분이 Fig. 12에 나타나 있다.



Fig. 12. Analog circuit implementation of PI controller.

5. 실험 결과

5.1 HRG 공진 특성 실험

HRG 의 제어실험에 앞서, 구조물의 기본적인 공진 특성을 얻기

위한 시험이 선행되었다. 공진 특성 시험으로부터 공진기의 기본 공진 주파수와 두 축간의 주파수 이격, 양질 계수등의 HRG 제어를 위해 필요한 정보를 얻을 수 있다.

기본 공진 특성 시험 환경은 다음과 같다. 진공챔버의 진공도는  $10^{-6}$  Torr 정도의 고진공 상태를 유지하고, 그 뒤에 공진기 바이어스 전압을 -3kV DC 로 걸어주고, 구조물의 공진주파수 대역의 주파수와 600 mVpk 의 진폭을 갖는 AC 구동신호로 가진하여 공진 특성을 파악하였다.

주파수 영역에서의 공진 특성 시험 결과는 Fig. 13과 같다. 두 개의 피크(peak)가 검출되었고, 그 값은 각각 5153.5 Hz 와 5154.4 Hz 로서 독립적인 두 축의 공진주파수 이격은 약 1 Hz 정도이다. 각각의 양질계수는 피크점의 3 dB 지점으로부터 측정할 수 있는데 이는 두 축 모두 245,000 이었다.

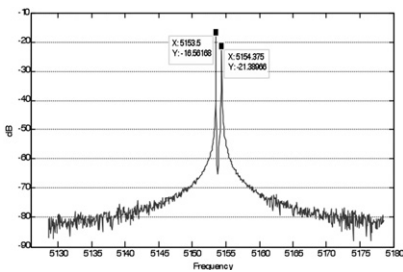


Fig. 13. Oscillation property of HRG.

### 5.2 공진 루프 실험

Fig. 9와 같이 위상천이기와 연산증폭기를 이용한 공진루프의 실험 결과가 Fig. 14와 같다. 그림에서 사인파 형태가 공진하는 반구형 공진기의 출력이고, 구형파는 공진 유지를 위한 제어 신호이다. Fig. 14는 오랜 시간 동안 공진루프의 출력을 중첩시켜 본 결과인데, 반구형 공진기 구조물의 진동이 매우 안정적이기 때문에, 단일 파형의 경우와 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다.

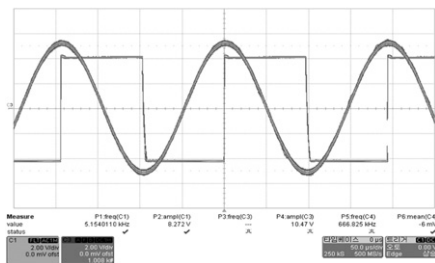


Fig. 14. Oscillation loop output of HRG.

### 5.3 재평형 루프 실험

진공 챔버 내에서 HRG 를 동작시켜야 하는 실험 여건상 물리적

인 회전입력을 주는 실험을 수행할 수 없기 때문에, 코리올리 효과와 등가적인 전기력을 인가하고, 이로 인한 출력 변위 신호의 크기를 제어하는 형태로 재평형 루프 테스트를 진행하였다. Fig. 11과 같은 구성으로 Fig. 12와 같이 구현된 아날로그 재평형 제어를 이용한 재평형 제어 실험 결과는 Fig. 15와 같다.

Fig. 15(a)는 일정값의 각속도 입력을 가정하였을 때의 코리올리 효과와 동일한, HRG 공진 주파수에 변조된 형태의 등가 전기 신호를 보여준다. 재평형제어 실험 시 일정한 값의 각속도가 계속하여 입력되는 상황을 설정하였다.

Fig. 15(b)는 위와 같은 각속도 입력에 대하여, 감지축 출력을 없애기 위한 제어 신호를 보여준다. 제어기의 전원이 켜지면 그림과 같이, Fig. 15(a)의 입력을 상쇄시키려는 제어신호가 생성되고, HRG 의 반구형 공진기 구조물에 되먹임된다.

Fig. 15(c)는 제어 전, 그리고 Fig. 15(d)는 제어 후의 HRG 감지축 출력을 나타낸다. (a)와 같은 각속도 입력이 계속하여 인가될 때는 (c)와 같이 큰 진폭의 진동이 감지축으로 유발되지만, (b)와 같은 제어 신호가 입력되면 HRG 의 출력은 (d)의 그림과 같이 진동의 진폭이 제어전과 비교하여 10 % 미만으로 줄어들음을 확인할 수 있다.

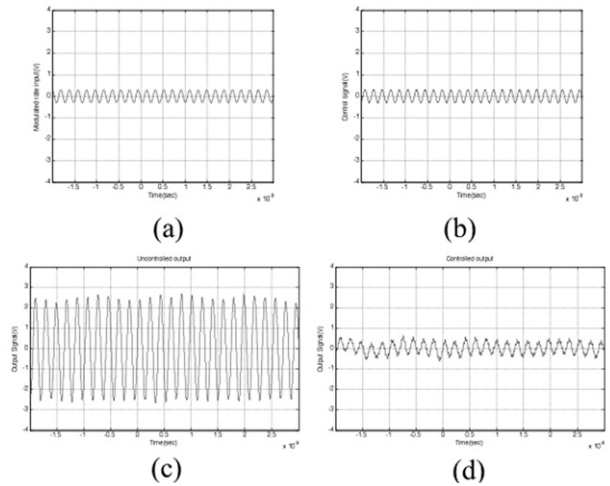


Fig. 15. Result of rebalance loop test.

## 6. 결론

본 논문에서는 코리올리 진동형 자이로스코프 중에서 가장 높은 성능을 갖는 반구형 공진 자이로스코프에 대하여, 동작 원리와 운동 방정식을 기반으로, 센서로서의 동작을 위한 신호검출 회로와 기본적인 제어 회로를 설계하고, 실 샘플에 대하여 실험을 수행하였다. 전하적분방식의 신호검출 회로를 통하여  $\mu\text{m}$  단위의 미세한 공진기의 변위를 검출해냈고, 위상천이기를 이용하여 반구형 공진기의 공진을 안정적으로 유지할 수 있었으며, 수 kHz 의 공진 주파수 대역에서 동작하는 자이로스코프의 신호를 변조와 복조의 과정을 통하

여 제어하였다. 재평형루프를 통하여 제어 이전의 진폭과 비교하여 10 % 미만의 제어된 진폭을 얻었으나, 아날로그 회로로 구현되는 PI 제어기는 회로구성이 복잡하고 오차 발생 요인이 다수 존재하기 때문에, 보다 높고 안정적인 자이로스코프 성능 획득을 위해서는, 체계적이고 단순하며 높은 성능을 보일 수 있는 제어기 설계 연구가 필요할 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구지원(ADD-07-07-03)에 의하여 이루어진 것임.

**REFERENCES**

[1] S.C.Lin and T.G.Giallorenzi, *Fiber optic earth rotation gyro compass*, U.S. patent 4,712,306, 1987.  
 [2] IEEE Aerospace and Electronic System Society, *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros*, 2004.  
 [3] A. Matthews and F. J. Rybak, "Comparison of hemispherical resonator gyro and optical gyros",

*IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 40-46, 1992.  
 [4] David M. Rozelle, "The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets", *Proc. 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, pp. 1157-1178, 2009.  
 [5] Woon-Tahk Sung, *Control Loop Design for the Compensation of Mechanical Error in MEMS Gyroscope*, Ph.D. dissertation, Seoul National University, 2007.  
 [6] D. D. Lynch, A. Matthews, and G. T. Varty, "Innovative mechanizations to optimize inertial sensors for high or low rate operations", *Symposium Gyro Technology*, Stuttgart, Germany, 1997.  
 [7] J. Loper and D.D. Lynch, *Vibratory rotation sensor*, US Patent 4951508.  
 [8] D. D. Lynch, "Vibratory gyro analysis by the method of averaging", *Proceedings of the 2nd International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation*, St. Petersburg, Russia, 1995.  
 [9] Chul Hyun, *Design of Robust Digital Controller for Hemispherical Resonator Gyroscopes*, Ph.D. dissertation, Seoul National University, 2011.



**현 철 (Chul Hyun)**

- 2001년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학부(공학사)
- 2011년 2월 서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부(공학박사)
- 2011년 2월 ~ 현재 LIG넥스원 M&S 연구센터 선임연구원
- 주관심분야 : 관성센서제어, 항법유도 제어, 수중운동체 제어 및 항법 시스템



**강 태 삼 (Taesam Kang)**

- 1986년 2월 서울대학교 공과대학 제어계측공학과(공학사)
- 1988년 2월 서울대학교 공과대학 제어계측공학과(공학석사)
- 1992년 8월 서울대학교 공과대학 제어계측공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 2001년 8월 호서대학교 제어계측공학과 전임강사, 조교수, 부교수
- 2001년 9월 ~ 현재 건국대학교 항공우주정보시스템 공학과 정교수
- 주관심분야 : 강인제어 및 응용, 비행 제어, 항법센서 및 응용, 지능 소자 응용