

# 자이로를 이용한 수중로봇 자세제어장치의 구조와 제어

김광홍, 김준홍, 김석곤, 조병학  
한국전력공사 전력연구원

## Structure & Control of Positioning Control System for Underwater Robot Using Gyro

Kwang-Hong Kim, Joon-Hong Kim, Suk-Gon Kim, Byung-Hak Cho  
Korea Electric Power Research Institute

### ABSTRACT

전력연구원은 원자로 내부에 적용하기 위한 소형 경량의 수중로봇을 개발하기 위한 준비작업으로 자이로를 이용한 수중로봇 조향장치를 개발하고 있다. 이 장치는 자이로 3개를 조합한 모듈을 서보가 회전시켜 일정한 방향으로 서보의 회전속도에 비례하는 회전 토크를 발생하도록 고안되었다. 발생된 토크는 작용/반작용의 원리에 의해 서보가 부착되어 있는 로봇 본체에 작용한다. 이 장치를 이용하면 수중로봇의 중심에서 Yaw와 Pitch를 제어할 수 있는 토크가 발생하고 좁은 공간에서 신속한 자세변환이 가능하다. 본 고에서는 자이로 조향장치의 구조와 이론적 배경 및 시뮬레이션 결과를 소개한다.

### 1. 서 론

본 논문에서는 자이로를 이용하여 수중로봇의 자세를 제어하기 위한 조향장치의 설계에 목적을 둔다. 일반적으로 소형 수중로봇은 수직, 수평 및 측면방향으로의 이동을 위해 프로펠러형태의 쓰러스터(Thruster)를 작게는 4개에서부터 많게는 6개 이상을 장착하고 있다. 이로인해, 같은 위치에서 자세 전환시 다수의 쓰러스터를 동시에 구동해야 하고 쓰러스터 추력의 비선형 특성으로 인해 불필요한 위치이동이 발생하는 등 민첩성(dexterity)이 떨어지며, 많은 수의 쓰러스터를 외부에 장착해야 하므로 구조가 복잡하고 로봇의 크기가 커진다. 또한 무게중심을 아래에 두어 피동적으로 자세를 유지하므로 수중에서 발생하는 와류에 대해 로봇의 위치와 자세유지가 취약하다. 이러한 점을 개선하기 위해 자이로의 자이로의 동적 특성을 이용한 조향장치를 이용하면 정확한 자세유지와 위치제어가 가능하게 된다.

물체의 자세 안정화에 자이로를 사용한 예는 비행기나 크레인의 자세제어에 관한 연구가 있는데 이는 대부분 제어대상물체의 주어진 1차원적인 자세 안정화에 관한 연구[1,2]이며, 보다 확장된 최근 연구로는 평면상의 2차원적인 자세제어에 관한 연구[4]가 있다. 본 고에서는 기존에 제시된 한개의 대형 자이로를 이용한 평면상의 자세제어가 아니라, 다수의 초소형 자이로를 조합하여 3차원 공간상에서의 자세를 제어함으로써 자이로의 응용범위를 획기적으로 전환하고자 한다.

본 논문에서 제시한 자이로 조향장치는 자이로 휠을 회전시키는 모터, 서보를 회전시키는 모터, 베어링 및 기어 등으로 구성된다. 이 자이로 조향장치에 대한 연구범위는 일정한 힘의 지향성을 갖는 자이로 조향장치의 타당성을 검증하고, 다양한 시뮬레이션을 통해 이 장치의 최적구조를 도출하여 이의 제작 및 제어알고리즘을 개발하는 것이다.

### 2. 자이로의 이론적 배경

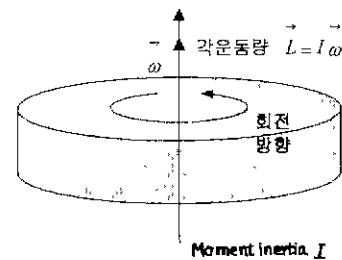


그림 1 자이로의 원리

Fig. 1 Principle of gyro

Gyro의 회전에 관한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (1)$$

식(1)에 의하면 그림 1의 Gyro의 회전축을 변경하기 위해서는 회전축과 같은 방향을 갖고 있는 각속

도  $\vec{\omega}$ 를 바꾸어야 하며 이때  $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$ 에 비례하는 힘을 가하여야 한다. 이와 같은 이유로 회전체는 회전방향을 일정하게 유지하고자하는 관성을 가지게 된다. Gyro를 이용하여 효율적인 조향장치를 만들기 위해서는 Gyro 시스템 전체를 회전시키는 Servo가 필요하며, 그림 2는 이 장치의 원리를 보이고 있다. 이 장치는 Gyro의 회전축을 임의 방향으로 회전시켜 Gyro의 회전 각속도  $\vec{\omega}$ 를 쉽게 바꿀 수 있는 구조를 갖고 있다.

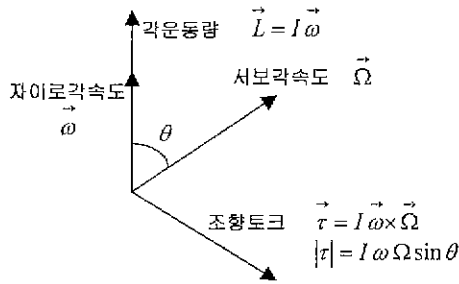


그림 2 자이로를 이용한 조향장치의 원리  
Fig. 2 Principle of gyro steering device

그림 2에서 자이로 서보장치의 Servo의 회전에 관한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = I \omega \vec{\Omega} \sin \theta \quad (2)$$

따라서, Gyro의 회전 각속도  $\vec{\omega}$ 와 Gyro와 Servo의 내각  $\theta$ 를 일정하게 유지할 경우 Servo의 회전 각속도  $\vec{\Omega}$ 에 비례하는 조향 토크(Torque)  $\vec{\tau}$ 를 얻을 수 있다. 조향 토크는  $\theta$ 를  $90^\circ$ 로 유지 했을 때 가장 크게 나타난다. 이 장치의 개략도는 그림 3과 같다.

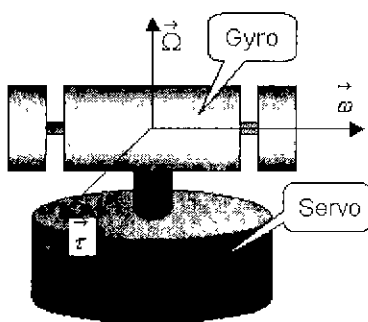


그림 3 자이로 서보장치의 개략도  
Fig. 3 Schematic diagram of gyro servo device

Gyro 조향장치는 수중로봇의 본체에 고정되어 있으므로 조향 토크는 작용/반작용의 원리에 의해 로봇 본체에 전달된다. 조향 토크는 벡터의 오른손 법칙에 의해  $\vec{\omega}$ 와  $\vec{\Omega}$ 에 직교하는 방향을 갖고 자이로의 중심에 조향의 중심축이 있다 Gyro 조향장치의 장점은 조향의 중심을 로봇 본체내부에 위치시킬 수 있는 점이다. 따라서, 다수의 프로펠러 추력을 벡터적으로 합성하여 조향하는 일반적인 방식에 비해 빠르고 정확한 조향이 가능하다. 그러나, 조향 토크의 방향이 서보의 회전각에 따라 변하므로 일정한 방향으로 토크를 발생하기 위해서는 3 개 이상의 자이로를 조합할 필요가 있다. 자이로 3개를 조합한 시스템의 기구학적 해석을 위해 자이로를 서보의 회전축과 직교하는 링크에 부착하고 자이로 본체의 각속도  $\vec{\Omega}$ 의 크기를 서보의 각속도  $\vec{\Omega}_s$ 와 일치시킨 시스템을 생각해 보기로 한다

### 3. 자이로 조향장치의 기구학적 해석

효율적으로 조향장치를 얻기 위해서는 서보의 속도에 비례하여 높은 지향성을 나타내는 조향 토크를 발생 시키는 것이 필수적이다. 조향장치 개발의 기본 아이디어는 서보로 자이로를 서보의 회전축과  $90^\circ$  뒤틀림 각도를 갖는 축을 중심으로 회전하여 1회전하는 동안 자이로 각속도를 반전시켜 지향성을 만들어 내는 데에 있다.

#### 3.1 3축 자이로 조향장치

3축 자이로 조향장치는 자이로를  $120^\circ$  위상차를 가지게 배열한 것이므로 해석의 편의를 위해 1축 자이로 시스템을 도입하였다. 그림 4와 같은 1축 자이로 조향장치에서 서보가 1회전하는 동안 자이로도  $\vec{\omega}$ 의 방향이 1회전하도록 서보와 자이로 본체의 회전속도를 식(3)과 같이 같게 한다.

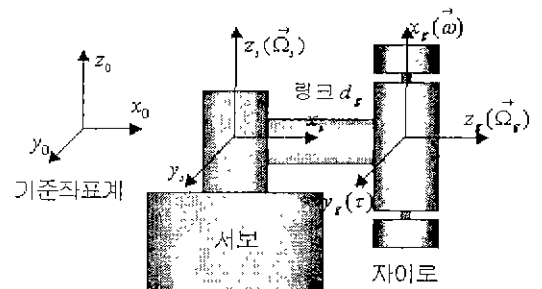


그림 4 1축 자이로 조향장치의 기구학적 좌표계  
Fig. 4 Coordinate system of 1-axis gyro steering device

$$|\vec{\Omega}_g| = |\vec{\Omega}_s| \quad (3)$$

따라서, 자이로는 공전과 자전을 같은 주기로 수형하게 된다. 이 시스템의 서보와 자이로 본체의 회전각도  $\vec{\Omega}_s$ 와  $\vec{\Omega}_g$ 로부터 자이로의 자세(Approach, Normal과 Sliding 벡터)를 구하기 위해 로봇 기구학에서 일반적으로 활용되고 있는 Denavit - Hartenberg 식의 표현방법을 적용하였다. 먼저 이 시스템의 기구학적 특성변수를 구하면 다음의 표 1과 같다.

표 1 자이로 조향장치의 기구학적 특성변수  
Table 1 Kinematic parameters of gyro device

Joint		1	2
Joint Parameters	Variables	$\theta_s$	$\theta_g$
	Constant (d <sub>i</sub> )	0	d <sub>g</sub>
	Remark	서보 각도	자이로 각도
Link Parameters	Twist Angle ( $\alpha$ )	-90°	0°
	Link Length (a <sub>i</sub> )	0	0
	Remark		

Denavit-Hartenberg 방식에서는 임의의 i번째 축의 위치가 이전(i-1)축의 위치와 이의 변환행렬에 의해 정의된다. 이 과정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_o^i = A_o^1 A_1^2 \cdots A_{i-1}^i = \prod_{j=1}^i A_{j-1}^j = \begin{bmatrix} n_i & s_i & a_i & l_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

for  $i = 1, 2, \dots, n$ .

여기서  $T_o^i$ 는 Normal 벡터  $n_i$ , Sliding 벡터  $s_i$ , Approach 벡터  $a_i$  및 위치벡터  $p_i$ 로 구성된 i번째 축의 Orientation을 나타내는 4x4 매트릭스이다. 로봇 암(Arm) 기구학의 Denavit-Hartenberg 표현 방식에 의한 자이로 조향장치의 변환행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$T_o^g = A_o^s A_s^g = \begin{bmatrix} \tau & \omega & \Omega_g & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_s c\theta_g & -c\theta_s s\theta_g & -s\theta_s & -d_g s\theta_s \\ s\theta_s c\theta_g & -s\theta_s s\theta_g & -c\theta_g & d_g c\theta_s \\ 0 & -c\theta_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서,  $c = \cos$ ,  $s = \sin$ (아래에도 계속적용),  
 $A_o^s$ =기준점에서 서보까지의 변환행렬  
 $A_s^g$ =서보에서 자이로까지의 변환행렬

자이로 조향장치로부터 출력되는 조향토크는  
 $\vec{\tau} = I \vec{\omega} \times \vec{\Omega}_g$  (6)

이므로, 식 (5)의  $\omega$ 와  $\Omega_g$ 를 식(6)에 대입하면

$$\vec{\tau} = -I|\omega||\Omega_g|[c\theta_g c\theta_s, c\theta_g s\theta_s, -s\theta_g] \quad (7)$$

식(3)에서 각속도  $\vec{\Omega}_s$ 와  $\vec{\Omega}_g$ 의 크기를 같게 놓았으므로 두 각속도 사이의 위상차를 0으로 놓으면  $\theta_g = \theta_s$ 가 되어 조향토크는 다음과 같다.

$$\tau_o = -I|\omega||\Omega_s|[c^2\theta_s, c\theta_s s\theta_s, -s\theta_s] \quad (8)$$

따라서,  $\tau_{ox}$ 는 항상 0보다 크므로  $\tau_o$ 는 x-축 방향으로 지향성을 가지게 된다. 두 각속도  $\vec{\Omega}_s$ 와  $\vec{\Omega}_g$  사이의 위상차를  $\delta$ 로 놓고 식(7)을 일반적인 표현으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tau_o = I|\omega||\Omega_s|[c\theta_s c(\theta_s + \delta), s\theta_s c(\theta_s + \delta), -s(\theta_s + \delta)] \quad (9)$$

식(9)에서 볼 수 있는 바와 같이 조향 토크  $\tau_o$ 는  $\delta=0$ 이면 x-축으로 지향성을 갖게되고  $\delta=90^\circ$ 이면 y-축으로 지향성을 갖게 되어 결국 (x,y) 평면에서 x-축을 기준으로  $\delta$ 도 방향으로 지향성을 갖게됨을 알 수 있다. 따라서, 자이로의 회전 각속도  $\omega$ 는  $\Omega_s$ 일정하므로 극각도(Polar Angle)는 서보의 각속도 에 비례하고 방위각(Azimuth)은 위상차  $\delta$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

지금까지의 결과를 3축 자이로 조향장치의 해석으로 확장시켜 보자. 3축 조향장치는 자이로가 각각 120°의 위상차를 가지고 서보 축을 공전하고 같은 주기로 링크 축을 중심으로 자전한다. 각 자이로의 회전속도  $\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2, \vec{\omega}_3$ 의 크기는 같다고 가정한다. 1축 자이로 조향장치에서와 마찬가지로 이 조향장치의 서보 각속도  $\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_{g1}, \vec{\Omega}_{g2}, \vec{\Omega}_{g3}$ 의 크기를 같게 놓고  $\vec{\Omega}_s$ 와  $\vec{\Omega}_{g1}, \vec{\Omega}_{g2}, \vec{\Omega}_{g3}$ 사이의 위상차를 0으로 하면

$$\theta_1 = \theta_s, \quad \theta_2 = \theta_s - \frac{2}{3}\pi, \quad \theta_3 = \theta_s - \frac{4}{3}\pi \quad (10)$$

이 되므로 식(8)로부터 각 자이로에서 발생하는 조향토크를 구할 수 있다.

$$\vec{\tau}_{o1} = I|\omega||\Omega_s| [c^2\theta_s \ s\theta_s c\theta_s \ -s\theta_s], \quad (11.a)$$

$$\vec{\tau}_{o2} = I|\omega||\Omega_s| [c^2(\theta_s - \frac{2}{3}\pi) \ s(\theta_s - \frac{2}{3}\pi) c(\theta_s - \frac{2}{3}\pi) \ -s(\theta_s - \frac{2}{3}\pi)] \quad (11.b)$$

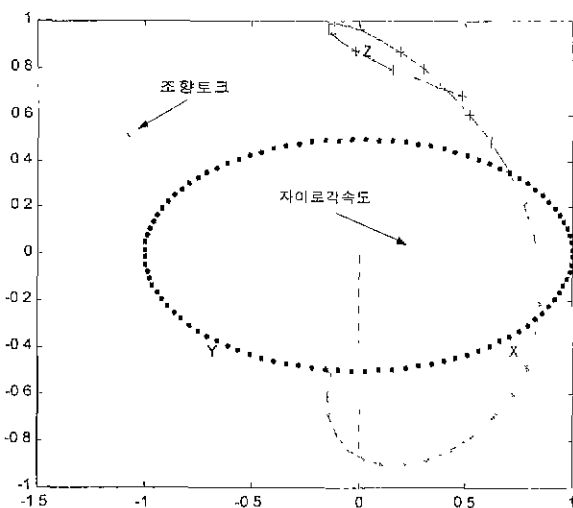
$$\vec{\tau}_{o3} = I|\omega||\Omega_s| [c^2(\theta_s - \frac{4}{3}\pi) \ s(\theta_s - \frac{4}{3}\pi) c(\theta_s - \frac{4}{3}\pi) \ -s(\theta_s - \frac{4}{3}\pi)] \quad (11.c)$$

전체 시스템의 조향토크는 3개의 자이로에서 발생하는 토크의 합이므로 다음과 같다.

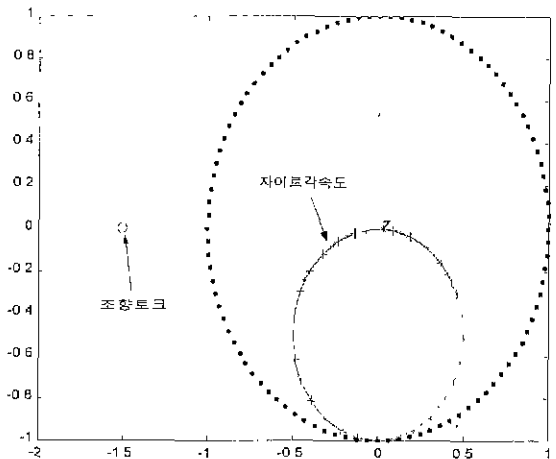
$$\begin{aligned} \vec{\tau}_o &= \vec{\tau}_{o1} + \vec{\tau}_{o2} + \vec{\tau}_{o3} \\ &= I|\omega||\Omega_s| [-1.5 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (12)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과

앞에서 소개한 바와 같이 방위각(azimuth)을 각 속도  $\vec{\Omega}_s$ ,  $\vec{\Omega}_{g1}$  사이의 위상차  $\delta$ 에 의해 결정할 수 있다. 위상차  $\delta$ 를 0으로 놓고 조향 토크를 시뮬레이션한 결과를 그림 5에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 조향 토크가 한방향으로 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) 3D 표현



(b) 2D 표현

그림 5 3축 자이로 조향장치의 자이로 각속도  $\omega(o, *, +)$ 와 조향토크(o)

Fig.5 ang. velocity of gyro and steering torque

#### 5. 결 론

본 논문에서는 수중로봇의 자세제어를 위해 자이로를 이용한 조향장치를 제안하였으며, 이 장치에서 발생하는 토크(torque)가 일정한 지향성이 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또 제시된 자이로 조향장치가 갖는 특성을 고찰하였다. 현재 실험 장치가 제작중이며, 앞으로의 과제는 다양한 실험을 통하여 최적 제어알고리즘을 개발하는 것이며 실용화를 목표로 하고 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1]Hiroshi Kanki, Yoshisugu Nekomoto, Hiryuki Monobe, Hironobu Ogura, Kiichu Kobayashi, "Development of CMG Active Vibration Control Device for Gondola," JSME Int. J. Series C, Vol. 37, No. 3, 1994.
- [2]Jasim Ahmed Robert H. Miller, Edward H. Hoopman, Vincent Action, "An Actively Controlled Control Moment Gyro/GyroPendulum Testbed", Proc. '97 IEEE Int. Conf. on Control Applications, pp. 250-252, 1997.
- [3]Mark W. Spong, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", 1989.
- [4]정영구, 이진영, "자이로 구동장치를 이용한 공중물체의 자세제어", 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, Vol. B, pp.563-565, 1999.
- [5]조병학, "Simulation Studies on Robot System Applied to Nozzle Dam Installation", TM. 96EW03 P1998 482, 전력연구원