

## 헬리콥터 자세 제어를 위한 액체형 균형센서의 특성 연구

김봉수, 김형석  
전북대학교 제어계측공학과

### Characteristic of Liquid Inclinomometer for Helicopter Balance Control

Bong Su Kim, Hyong Suk Kim

Dept. of Control and Instrumentation Eng., ChonBuk Univ.

**Abstract** - 무인 헬리콥터의 자세 정보를 계측할 수 있는 액체형 균형센서의 특성에 대해 연구하였다. 액체형 균형센서는 시간경과에 따른 누적오차가 없으므로 헬리콥터에 장착하면 장시간동안 균형을 유지시킬 수 있다. 제작된 균형센서의 각 전극에서 측정된 전압으로부터 기울어진 각도를 추정하기 위해 균형센서를 전기적으로 해석하고 측정된 전압과 각도사이의 환산모델을 유도하였다. 구해진 환산모델의 정확성을 실험을 통하여 입증하였다.

이 각도를 전자력으로 바로 잡아주기 위해서 발생시키는 전류의 크기에 의해 기울어짐 각도가 측정되는 원리<sup>(2)</sup>이다. 그러나 헬리콥터의 균형 상태 측정을 위해서 자이로 시스템을 이용한다면 시스템의 특성상 에러가 누적되어 pitch각과 roll각의 누적 에러가 발생, 결과적으로 현재의 균형 상태 여부의 판단을 불확실하게 하므로 헬리콥터에 장착하여 이용하는 데 적합하지 않다. 따라서 에러의 누적이 없는 새로운 균형센서<sup>(3)</sup>의 개발이 필요하다.

#### 1. 서 론

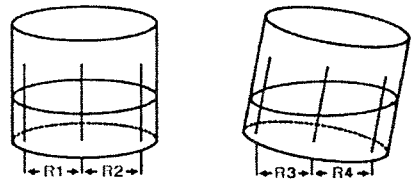
헬리콥터는 탐사, 구조, 화재진압, 지형제작, 농작업, 감시정찰, 어군탐지등 다양한 분야에 이용되고 있다. 그러나 유인 헬리콥터의 운용비용은 매우 높고, 비행에 있어서 상당한 제약이 따른다. 만약 이러한 결점들을 극복하기 위해 헬리콥터를 무인화 즉, 모형 헬리콥터를 이용한다면 경제적, 기술적 측면에서 상당한 비용절감과 성능면에서 고난도의 작업 수행이 가능할 것이다. 모형 헬리콥터의 특징은 다음과 같다.

헬리콥터는 바람이나 기압 등의 외란에 노출되어 있으며, 메인 로터의 회전속도에 따라 파라미터 값들이 연속적으로 변하는 특성을 가지고 있다. 또한 선형운동 및 각운동들 사이의 간섭이 심한 비선형 시스템이며 대부분의 헬리콥터 동작은 주위환경에 대해 전혀 알 수 없는 동적인 공간에서 이루어진다는 특징이 있다. 이와 같은 특징의 시스템<sup>(1)</sup>을 무인 자율 조종하기 위해서는 시스템의 상태를 정확히 계측할 수 있는 센서와 제어 시스템이 필요하다.

자이로(gyro)는 이를 위해 주로 사용되는 장치인데 회전자를 일정한 각속도로 회전시키는 동안 회전자가 회전축 방향을 유지하려는 관성에 의해 짐벌(gimbal)축과의 기울어짐 각도를 만들게 되고

#### 2. 전해질 용액을 이용한 균형센서

액체의 표면은 항상 지구 중력 방향에 대하여 수직방향으로서 수평을 유지하게되므로 자이로 시스템과는 달리 시간의 경과와 관계없이 평형의 기준을 인식할 수 있다.



$$R4 < R1 = R2 < R3$$

그림 1. 저항의 변화

기울어짐 상태의 신속, 정확한 측정을 위해서 그림 1과 같이 전해질 용액을 용기에 주입하고 용기 내부의 중앙에 있는 중심 전극을 기준으로 하여 양쪽에 2개의 전극을 설치한다.

전기적 저항의 기본 식은 다음과 같다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

$R$  = the electrical resistance ( $\Omega$ )  
 $\rho$  = the resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )  
 $L$  = the length of the conductor ( $\text{cm}$ )  
 $A$  = the cross-sectional area of the conductor ( $\text{cm}^2$ )

물질들은 각각의 고유저항을 가지고 있는데 만약 고유저항  $\rho$ 가 시간과 관계없이 변하지 않는다면 중심 전극을 기준으로 양쪽 2개의 전극축 방향으로 용기를 기울였을 때 기울임에 의해 도체의 길이  $L$ 과 단면적  $A$ 가 변하면서 중심 전극과 전극간의 저항 변화가 일어난다.

그림 1에서 기울어지지 않은 상태에서의 액체 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 의 값은 같은 반면 센서가 기울어진 상태에서의 저항은  $R_3 > R_4$ 의 관계가 있다.

$$R_4 < R_1 = R_2 < R_3 \quad (2)$$

이와 같이 센서 기울어짐 각도와 저항과의 상관 관계를 이용하면 전극사이의 저항값에 의해 기울어짐 각도를 환산할 수 있다.

### 2.1 저항의 측정

그림 1의 센서에서 전극간의 저항을 측정하기 위해 전원을 기준전극에 인가하고 용액을 통과한 후에 저항  $R$ 을 거치도록 센서를 구성하였으며 그림 2는 균형센서의 전기적 등가회로이다. 이 센서에서 전압 전류 관계식은

$$V = (R_3 + R) I_3, \quad V = (R_4 + R) I_4 \quad (3)$$

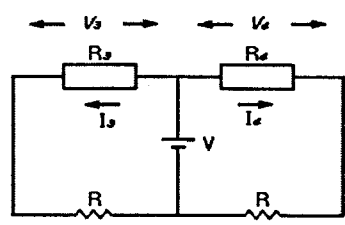


그림 2. 액체 균형센서의 전기적 등가회로

이다. 그런데  $V_3 = I_3 R_3$ 이고  $I_3 = (V - V_3)/R$ 이며  $V_4$ 와  $I_4$ 는 각각  $I_4 R_4$ ,  $(V - V_4)/R$ 이다. 결국  $V_3$ ,  $V_4$ 는

$$\begin{aligned}
 V_3 &= \frac{R_3}{R + R_3} V \\
 V_4 &= \frac{R_4}{R + R_4} V
 \end{aligned} \quad (4)$$

가 된다. 실험에서 실제 측정되는 출력  $V_0$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V_3 - V_4 \\
 &= \left( \frac{R_3}{R + R_3} - \frac{R_4}{R + R_4} \right) V \\
 &= \frac{R(R_3 - R_4)}{(R + R_3)(R + R_4)} V
 \end{aligned} \quad (5)$$

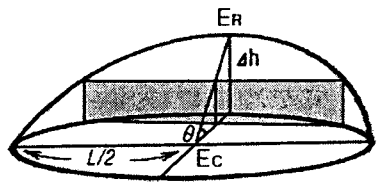


그림 3. 액체 균형센서의 저항

그림 3에서 중심전극을  $E_C$ 라하고 오른쪽 전극을  $E_R$ 이라 하면 센서가  $\theta$ 만큼 기울어져 있을 때  $E_R$ 은  $\Delta h$ 만큼 액체에 더 잠기게 된다. 따라서  $E_C$ 와  $E_R$ 사이의 저항  $R'$ 은 원래의 저항에 색칠된 부분을 단면으로 하는 저항체가 병렬로 연결된 것 같은 효과가 있다. 즉 우측 전극쪽에서는 저항이 감소하고 반대쪽은 저항이 증가한다. 이 부가적인 저항을  $\Delta R'$ 라고 하면 식 (1)에서

$$\begin{aligned}
 \Delta R' &= \rho \frac{L'}{A'} \\
 &\cong \rho \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{2x \tan \theta \sqrt{(\frac{L}{2})^2 - x^2}} \\
 &= \rho \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{2x \sqrt{(\frac{L}{2})^2 - x^2}} \frac{1}{\tan \theta}
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\rho \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{2x \sqrt{(\frac{L}{2})^2 - x^2}}$ 를  $R_K$ 라고 하면

$$\Delta R' = R_K \frac{1}{\tan \theta} \quad (7)$$

즉 기울어진 액체에 의한 저항성분은 기울어진 각의  $\tan$ 값에 반비례한 관계가 있다. 이 새로운 저항  $\Delta R'$ 로 그림 2 균형센서의 전기적 등가회로의 저항  $R_3$ ,  $R_4$ 를 각각 나타내면

$$\begin{aligned}
 R_3 &= R_0 + \Delta R' = R_0 + \frac{R_K}{\tan \theta} \\
 R_4 &= R_0 - \Delta R' = R_0 - \frac{R_K}{\tan \theta}
 \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 여기서  $R_0$ 는 평형상태에서의 저항값이다. 결국 식 (5)와 (8)에 의해 출력  $V_0$ 은 다음과 같고 기울어진 각도  $\theta$ 는 이 식에 의해서 결정된다.

$$V_o = \frac{2R_K R \tan \theta}{(R + R_0)^2 \tan^2 \theta - R_K^2} V \quad (9)$$

여기서  $R_K$ 는 용액의 고유저항과 전극의 길이, 전극들 사이의 간격에 의해 결정되는 상수이고  $R$ 은  $R_3$ 와  $R_4$ 에 직렬 연결된 저항이다. 그리고  $V$ 는 균형센서 회로에 인가한 전압이다.

### 3. 실험

그림 4와 같이 중심 전극을 기준축으로 양쪽에 두 개씩 네 개의 전극이 서로 수직으로 배치된 반구형의 용기 안에 전해질 용액을 주입하고 중심 전극에 +5V를 인가한 후  $X_+$  전극과  $X_-$  전극 사이의 전압차(output1)와  $Y_+$  전극과  $Y_-$  전극 사이의 전압차(output2)를 측정하여 계측용 증폭기로 증폭한 후에 A/D 컨버터를 이용해 컴퓨터에서 읽어 들였다.

각도와 측정된 전압 차들과의 관계를 규명하기 위해 여러 가지 각도에서 반복적으로 전압을 측정하였다.

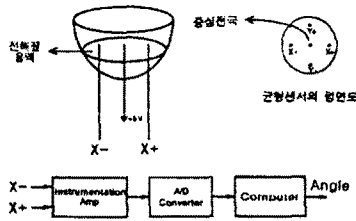


그림 4. 액체형 균형센서

실험은 같은 각도에서 약 2분의 시간 간격을 두고 20개의 샘플 데이터를 추출하였다. 반복적인 실험을 통해 여러 가지 각도에서의 데이터들을 획득했는데 다음 그림 5는 데이터들을 2차원 그래프로 나타낸 결과이다. 반복 측정시 측정오차는 최대 2.6%였다. 그림 6의 실선은 기울어진 각도와 측정된 전압과의 관계 그래프이고 점선은 앞절에서 유도한 기울어진 각도와 전압사이의 관계 모델로부터 얻은 결과이다. 두 그래프가 유사하다는 사실은 유도한 식 (9)가 센서의 특성을 잘 모델링하고 있음을 의미하며, 이 식을 이용하면 센서의 측정된 임의의 전압에 대해서도 해당 기울어진 각도가 환산 될 수 있음을 알 수 있다.

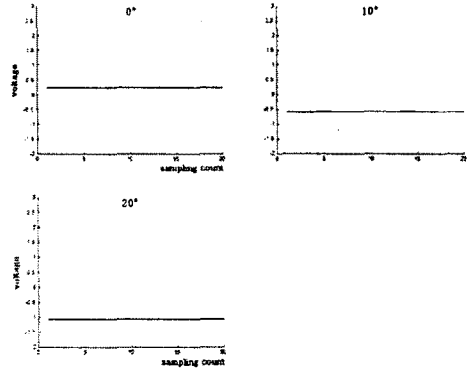
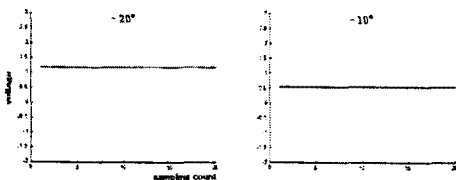


그림 5. 각도에 따른 균형 센서의 출력

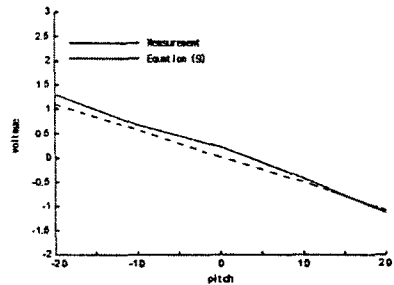


그림 6. 균형 센서 데이터의 각도에 따른 평균

### 4. 결론

본 논문에서는 액체형 균형센서를 해석하여 수학적 모델을 구했으며, 액체형 균형센서를 제작, 실험을 통해 모델의 정확성을 입증하였다. 또한 제작된 센서에 대한 반복측정 실험 결과, 최대 오차는 4.3%로서 액체형 균형센서를 무인 헬리콥터 자세 제어에 이용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 앞으로 실제 헬리콥터의 제어에 액체형 균형센서를 이용하기 위해서는 고유 저항 특성이 변하지 않는 전해질 용액의 선택과 액체형 균형센서의 특성상 예상되는 진동에 의해 발생하는 노이즈의 영향을 최소화시키는 연구가 이루어져야 한다.

### 5. 참고문헌

- [1] A.R.S. Bramwell, *Helicopter Dynamics*, Edward Arnold Press, 1976.
- [2] Wrigley, Hollister, and Denhard, *Gyroscopic Theory, Design and Instrumentation*, The M.I.T Press 1969.
- [3] Harry N. Norton, *Sensor and Analyzer Handbook*, Prentice Hall, Inc 1982.