

퍼지추론제어기를 이용한 초음파모타의 속도제어시스템

김 윤 호*, 이 장 선*, 고 요**
*중앙대학교 전기공학과 **에너지자원 기술개발지원센터

Speed Control System of Ultrasonic Motor Using Fuzzy Controller

Yoon-Ho Kim*, Jang-Sun Lee*, Yo Ko**
* Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang Univ.
**R&D Management Center for Energy and Resources.

1. 서론

최근 메카트로닉스의 급격한 발전에 따라 모터의 사용분야는 더욱 넓어져 모터 기능의 고성능, 다변화, 소형, 경량화가 요구되는 실정이다. 따라서 초음파모타는 지금까지의 전자모타와는 달리 자기회로 즉 철심과 코일이 없는 단순구조를 갖는 소형모타로, 그 구동원에 있어서 초음파의 기계적인 진동을 이용한 모타이다.[3][4]

초음파모타의 구동원리에 따른 분류에는 압전소자에 정상파 전압을 공급하여 압전소자에 수축, 팽창을 반복하는 기계적인 진동을 만들어, 이 진동이 진동편에 의하여 주기적으로 이동체를 충돌시켜 모타의 회전자를 회전하게 하는 형태와 압전소자의 진동이 진행파를 만들어 모타의 회전자를 회전하게 하는 형태 등으로 구분할 수 있다. 이러한 초음파모타는 압전진동자에서 발생한 기계진동을 마찰력을 매개로하여 구동력을 회전운동으로 변환하는 것이다. 따라서 종래의 전자모타와는 달리 압력에 따라 고정자와 회전자의 마찰구동 메카니즘에 의한 복잡한 비선형특성과 온도의존형의 비정상시변특성을 가진다. 이에 따라 정량적인 동적특성과 모델링이 충분히 설명되어지지 않는다는.[1][2]

따라서 본 논문에서는 비선형적인 특성을 가진 시스템을 제어하기에 적합한 퍼지추론제어기를 사용하여 초음파모타의 입력인 구동주파수와 구동전압을 제어한 속도제어시스템을 실현하고자 한다.

2. 초음파모타의 특성

2-1. 진행파의 발생과 동작원리

탄성체가 변형하면 왜가 생기는데 그 왜는 탄성체 내부를 탄성진동의 파로서 진행한다. 이 파를 탄성파라고 부르는데 일반적으로 이 탄성파는 종파와 횡파로 분류된다.[3]

그림 1에 진행파형 초음파모타의 원리를 나타내었다. 탄성체 E의 표면을 종파와 횡파가 합성된 탄성진행파가 진행하고 있으면 그 표면상의 질점은 타원궤적을 그리며 진행한다. X축을 탄성체 표면의 접선방향, Y축을 탄성체 표면의 법선방향이 라 하면, 표면상의 질점 A는 종진동 u, 횡진동 w,의 반시계 방향의 타원진동을 한다. 여기서 정점의 속도 $V_x = 2\pi fu$ (f:탄성진동의 주파수)이다.

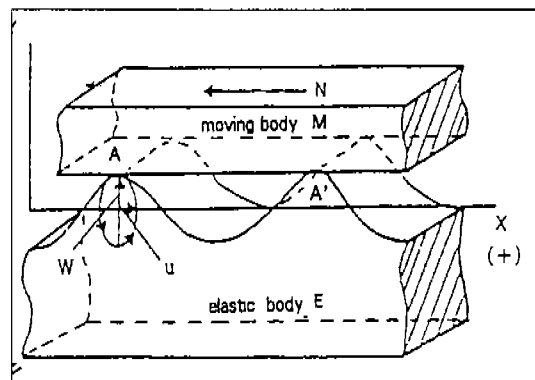


그림 1. 진행파형 초음파모타의 원리

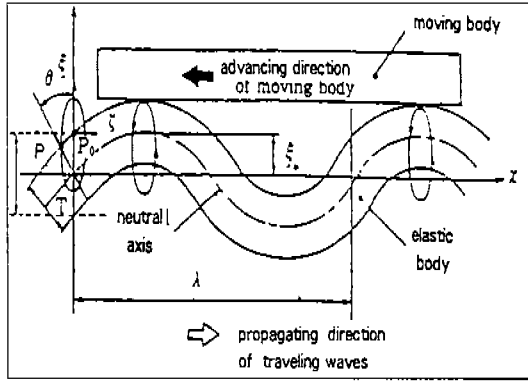


그림 2. 탄성체의 진행파와 직진력의 발생

한편 그림 2처럼 탄성체의 두께가 T 이고, 진행파의 굴곡진동의 파장이 λ , 길이방향(Longitudinal direction)에 있어서 굴곡진동의 크기를 ξ_0 , 각속도(Angular velocity)를 ω_0 라 하고, 이 탄성체의 위에 이동체를 올려놓은 구조를 고려하면 탄성체의 중심축상의 진행파는 다음식으로 표시된다.

$$y = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right) \quad (2-1)$$

탄성체 표면의 임의의 점을 P , 편향이 없는 상태의 위치를 P_0 , 편향각을 θ 라 하면, 두께방향으로 P_0 로부터 P 까지의 변위는 굴곡진동의 진폭 ξ_0 는 굴곡진동의 파장 λ 보다 아주 작고, 편향각 θ 도 매우 작으므로

$$\xi \approx \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right) \quad (2-2)$$

가 되고, 또한 길이방향으로 P_0 에서 P 까지의 변위 ζ 는 다음과 같다.

$$\zeta = -\frac{T}{2} \sin \theta \approx -\frac{T}{2} \theta \quad (2-3)$$

따라서 두께방향의 변위 ξ 와 길이방향의 변위 ζ 는 다음식으로 주어진다.

$$\left(\frac{\xi}{\xi_0}\right)^2 + \left(\frac{\zeta}{\pi \xi_0 (T/\lambda)}\right)^2 = 1 \quad (2-4)$$

이 식으로부터 탄성체 표면의 임의의 점 P 는 타원궤도를 그리는 것을 알 수 있다. 한편, 길이방향 변위의 속도를 U 라하면

$$U = \frac{d\zeta}{dt} = -\pi \omega_0 \xi_0 \left(\frac{T}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega_0 t\right) \quad (2-5)$$

이며 이 속도 U 는 진동체와 이동체가 접촉하는 점에서 최대가 되므로 접촉면에서의 미끄러짐이 없다고 가정하면, 이동체는 아래식과 속도 U_0 로 진행파와 반대방향으로 움직인다.

$$U = -\pi \omega_0 \xi_0 \left(\frac{T}{\lambda}\right) \quad (2-6)$$

결국 진행파형 초음파모터는 앞에서 기술한 것처럼 위상이 서로 다른 두 종류의 파를 결합하여 진행파를 발생시키고 탄성체 표면에 밀착된 이동체를 움직이게 하는 것이다.

2-2. 등가회로

공진점에서 압전효과에 의해 여기된 기계적인 진동계의 진동모드의 특성은 그림 3과 같이 공진 주파수 근처에서 2단자 회로망의 전기동가회로로 표현될 수 있다.[3]

여기에서 C_d 는 유전체에서의 콘덴서용량을 나타내는 정전용량, L_m 은 고정자의 질량을 나타내는 등가 인덕턴스, C_m 은 고정자의 스프링작용을 나타내는 등가 정전용량, R_m 은 고정자내부에서 일어나는 손실을 나타내는 저항이다.

$$C_d = \text{저주파에서의 어드미턴스} / 2\pi f \quad (2-7)$$

$$L_m = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{C_d} \frac{1}{f_a^2 - f_r^2} \quad (2-8)$$

$$C_m = C_d \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (2-9)$$

R_m 은 공진시의 임피던스와 같도록 한다.

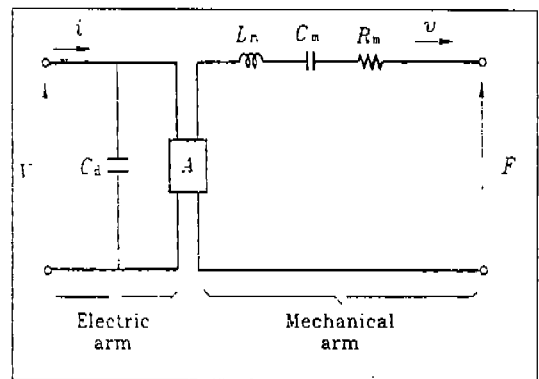


그림 3. 초음파모터의 등가회로

그림 3의 고정자의 등가회로와 4단자망 표현에서의 힘계수는 단위전압을 인가할 경우의 힘이 A 임을 나타낸 것이므로, 기계적 단자의 전압이 E_L 이라면 단자에 발생하는 힘 F 는 AE_L 이 되며, 가압된 회전자에 발생하는 한 상당 토크는 다음과 같다.

$$T/2 = RAE_L \quad (2-10)$$

여기에서, RA 를 토크상수 K_T [Nm/V]라 한다. 또한 회전자의 속도를 v [m/s]라 할 때, 회전자의 슬립을 무시하면, 동전류 i 는

$$i = Av \quad (2-11)$$

로 되며, 회전자의 각속도를 N [rad/s]이라 하면

$v=NR$ 이므로

$$i = ANR = K_T N \quad (2-12)$$

2-3. 공진주파수

초음파모타의 특징은 고정자의 링과 고정자에 붙여진 압전세라믹이 일체가 되어 공진을 일으켜, 굴곡진행파를 일으키는 것을 이용하는 것이다.[3]

길이 L인 봉에서 일어나는 n차의 파동진동수

$$f_n = \frac{\pi n^2}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho s}} \quad (2-13)$$

와 같이 된다. 여기서 E는 영률, ρ 는 밀도, I는 단면 2차모멘트, S는 봉의 단면적이다.

링의 한 원주는 M개의 파장을 가진 파동이 발생한다면, 파장 λ 는

$$\lambda = \frac{\pi(D_o + D_i)}{2m} \quad (2-14)$$

이 된다. 단, D_o 는 링의 외경, D_i 는 링의 내경

한편, 파동의 차수 n과 m의 사이에는 $m=n/2$ 의 관계가 있으며, λ , m과 l 사이에는

$$\lambda = \frac{2l}{n} \quad (2-15)$$

의 관계가 있으므로, 진동수 f_n 은 다음과 같다.

$$f_n = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho s}} \quad (2-16)$$

3. 퍼지추론제어기를 이용한 속도제어시스템

3-1. 퍼지추론제어기

인간의 모호한 표현을 처리할 수 있는 이론적인 바탕을 제공하는 것이 바로 퍼지 이론이다. 복잡하고 불확실한 비선형시스템을 수학적으로 모델링하기는 어려우므로 이러한 시스템을 다루기 위해 퍼지 모델링 기법이 활발히 연구되어 왔다.[2]

초음파모타의 속도 제어를 위해서 퍼지 제어기를 설계하면, 그 블록선도는 그림 4와 같다. 제어기의 입력변수는 오차($e(k)$)와 오차의 변화량($ce(k)$)으로 선정하고, 출력변수($u(k)$)를 정의하면

$$\begin{aligned} e(k) &= \omega_r^* - \omega_r \\ ce(k) &= e(k) - e(k-1), \\ u(k) &= u(k-1) + \rho \cdot \Delta u(k) \end{aligned} \quad (3-1)$$

과 같이 된다

퍼지변수 $e(k)$, $ce(k)$, $u(k)$ 에 대한 언어변수는 7개로 정의하고, 제어규칙은 전문가의 경험과 지식은 토대로 하여 전체 시스템에 대한 제어규칙을 표 1에 제시한다.

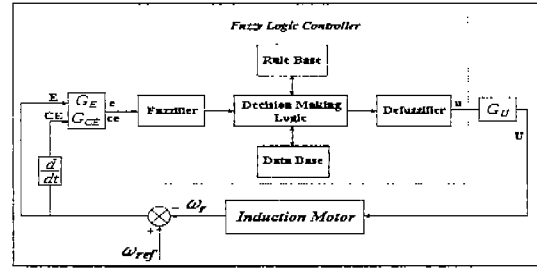


그림 4. 퍼지제어기의 블록도

표 1. 언어적 제어규칙

		CHANGE OF ERROR							
		elce	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
R	NS	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
O	PS	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
R	PB	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

일반적으로 시스템 제어 특성은 빠른 응답과 정확성이 요구되지만, 오버슈트 현상이 나타나고, 이것을 개선하기 위하여 퍼지 로직을 이용하여 정확한 제어를 해야 한다. 그리고 특히 초음파모타의 속도 제어는 정상상태에서 진동을 없애고, 부하 변동에 잘 적응할 수 있도록 설계되어야 한다.

3-2. 공진형인버터의 구동원리

USM의 공진주파수는 약 40[kHz]이다. 단상인버터는 단상 AC 출력이 90도의 위상차를 가지고 동작주파수 이상으로 되도록 설계되었다. 그림 5는 USM에 포함된 기생 공진 임피던스를 사용한 단상 고주파 전압원 MOSFET 인버터의 회로도이다.[1]

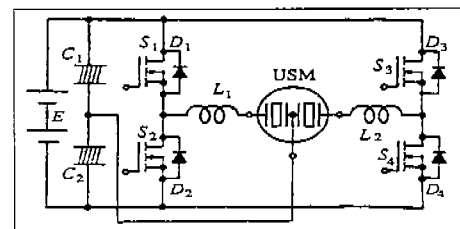


그림 5. 직렬 단상 공진형 인버터

3-2. 속도제어시스템

다음의 그림 7은 초음파모타의 속도제어시스템의 블록도를 나타내고 있다. 그림에서 주파수 명령은 초음파모타의 공진주파수를 나타내고, α_T 는 토크계수로 역계수 A와 원환형 초음파모타 고정자의 반지름 R의 곱으로 표현된다.

