

# 퍼지제어기를 이용한 초음파 모터의 온도특성에 관한 연구-위상차 제어

°서기열° 차인수° 유행상° 유권중°°

\* 동신대학교 대학원 전기전자공학과

\*\* 순천공업전문대 전자과

\*\*\* 한국에너지기술연구소

## A study on the characteristic of temperature for Ultrasonic Motor using Fuzzy Controller - with phase angle difference control

°Ki-Yeol Seo° In-Su Cha° Hyung-Sang Yoon°° Gown-Jong Yu°°°

\* Dept. of Electrical and Electronic Eng. Dongshin Univ.

\*\* Dept. of Electronic Eng. Suncheon Junior Engineering College

\*\*\* Korea Institute of Energy Research

### ABSTRACT

This paper describes the bending traveling-wave type ultrasonic motor which generates the traveling wave by combining two standing waves with phase difference time and space.

In  $+20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ , the USM motor operation character has represented normal condition. But the other temperature, (that is say, when long time operating condition) USM operation characteristic has abnormal condition, that is driving frequency, drive current and r.p.m is down. The recent USM has controller without temperature compensation. This study aimed at fuzzy controller which must follow the phase angle difference  $90^{\circ}$  at operation temperature and then r.p.m and torque increase.

### 1. 서론

최근 메케트로닉스의 급격한 발전에 발맞추어 액추에이터의 사용분야는 더욱 폭이 넓어져서 액추에이터 기능의 고성능, 다변화가 요구되는 실정이다. 이와 함께 각종 기기의 소형, 경량화가 진행됨에 따라 액추에이터의 크기가 매우 중요하게 부각되고 있다. 그러나 종전의 액추에이터에서는 이같은 요구의 완벽한 대처가 어렵다. 따라서 지금까지와는 다른 원리로 구동되는 액추에이터의 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 기존 전자식 모터와는 달리 자기회로 즉 철심과 코일이 없는 단순구조를 갖는 소형 모터로 초음파 모터는 그 구조상 마찰에 의한 구동 때문에 운전속도가 기존 모터의 10분의 1정도에 해당되지만 같은 조건하에서 구동토크가 훨씬 커서 저속 운전 및 고토크를 얻고자 하는 액추에이터로서 적합하기에 로보트 액추에이터로서 널리 응용할 수 있다. 이를 위해서 위상차 제어 기법을 적용할 수 있고 두 개의 위상차가  $90^{\circ}$  를 이룰 때 가장 빠

른 속도 및 큰 구동토크를 얻을 수 있으므로 퍼지제어기를 이용하여 두상의 위상차가  $90^{\circ}$  를 유지하도록 하여 빠른 속도를 얻을 수 있도록 하였다.[2]

초음파 모터는 운전중 온도가 높아질수록 속도변동이 감소하며 또한 온도가 높을수록 위상차가 변동하는 일반적인 특성을 갖는다. 본 논문에서는 주파수가 일정시 이에 대한 보상을 위한 기법으로 퍼지제어기를 도입하여 온도상승에 따른 속도 보정을 하고자 한다.

### 2. 초음파 모터 특성

#### 2.1 진행파 발생과 동적원리

초음파 모터는 압전파동자에 교류전압을 인가하여 진동하는 성질을 이용해서 그 파동을 마찰력에 의해 기계역학적으로 꺼내는 것이다. 현재 파동하고 있는 물체로부터 한 방향만의 힘을 산출해 내는 초음파 모터의 여러 방식이 고찰되고 있다. 그 중에서 진행파형 초음파 모터는 일부 실용화

되고 있지만 모터 자체로서는 마찰구동 때문에 내부 변수의 미지수가 많은 것으로 아직 충분한 해석이 이루어져 있지 않다.

그림 1은 분자의 탄성운동을 일으키게 하는 탄성체에 진행파를 일으켜 주는 초음파 모터의 특징을 나타내 준다 [1]-[5].

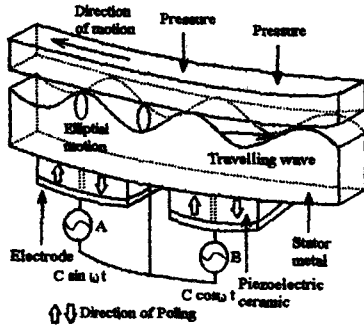


그림 1. 진행파형 모터의 원리

진행파가 발생한 고정자 표면의 한 질점의 운동은 타원을 그리는데, 그 회전방향이 진행파의 진행방향과 반대 방향으로 그 위에 놓인 회전자도 진행파의 진행 방향과 반대 방향으로 회전한다. 공간적으로 90°로 배치된 A상과 B상에 시간적으로 90°의 위상차를 갖는 2상 정현파 전원을 인가하면 각 상에서 발생한 정상파가 탄성체(고정자)내부에서 합성되면서 고정자 표면에 진행파로 나타난다.

A상과 B상에 각각 정현파 전압을 인가하면 각상에 다음과 같은 정상파가 발생한다.

$$Y_A = 2A \sin(2\pi x / \lambda + \phi_A) \cos(\omega_0 t + \theta_A) \quad (1)$$

$$Y_B = 2A \sin(2\pi x / \lambda + \phi_B) \cos(\omega_0 t + \theta_B) \quad (2)$$

A, B상에 공급하는 전원의 시간적 위상차가 90°이기 때문에  $\phi_A = 0, \phi_B = \pi/2, \theta_A = -\pi/2, \theta_B = 0$ 으로 놓을 수 있으므로 (1),(2)식은 다음과 같이 된다.

$$Y_A = 2A \sin(2\pi x / \lambda) \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

$$Y_B = 2A \cos(2\pi x / \lambda) \cos(\omega_0 t) \quad (4)$$

$$Y_0 = Y_A + Y_B = 2A \cos(2\pi x / \lambda - \omega_0 t) \quad (5)$$

$$= \zeta_0 \cos(\pi x - \omega_0 t)$$

(단,  $\zeta_0$ : 정수(=2A),  $\pi$ : 원주상의 전상파수( $2\pi/\lambda$ ))

(5)식은 탄성체의 중성면의 중방향(축방향)의 변위를 나타낸다. 그리고 중성면이 탄성체의 두께 T의 중앙에 있다고 한다면 이곳으로부터 T/2만큼 떨어진 표면의 횡방향(원주방향) 변위는 다음 식으로 표시된다.

$$X_0 = \zeta_0 n (T/2) \sin(\pi x - \omega_0 t) \quad (6)$$

(5)식과 (6)식으로부터

$$\frac{X_0^2}{n^2 (T/2)^2} + Y^2 = \zeta_0^2 (\sin^2(\pi x - \omega_0 t) + \cos^2(\pi x - \omega_0 t)) = \zeta_0^2 \quad (7)$$

이 성립된다. 이 식에서 표면상의 질점이 타원운동을 하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 표면의 타원운동을 일으키는 기계적 휨진동(Bending Wave)은 표면에 접촉되어 있는 회전자에 마찰력으로 작용하여 회전력을 발생시킨다.

## 2.2 고주파 공진형 인버터

초음파모터를 구동하기 위해 2상 인버터는 이 주파수 범위내에서 구동되어야 하며 2상 고주파수 교류전압이 초음파 모터에  $\pi/2$ -rad 위상차를 가지면서 공급되어야 한다. 그림 2는 초음파 모터를 포함한 기생 공진형 임피던스를 이용한 2상 고주파 전압-패드 MOSFET/IGBT의 설계회로를 나타냈다.

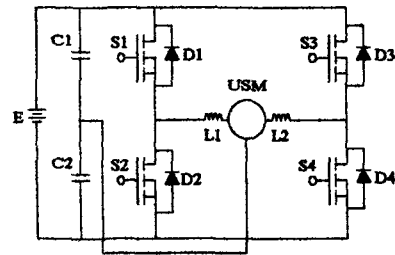


그림 2. 초음파 모터 구동용 공진형 인버터

이 공진형 인버터는 바이폴라 전력 트랜지스터를 이용한 종래의 선형전력 증폭기를 대체한 회로이다. 이런 고주파 스위치 모드 전력 공급기는 정류기 혹은 배터리 그리고 2상 하프-브릿지형 직렬 부하 공진형 고주파 인버터로서 구성된다.

초음파모터의 각속도를  $\omega$  (rad/sec)로, 발생토크 T(Nm)로 주어질 때 회전체의 운동방정식은 식 (8)로 주어진다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_L = T - mgr \quad (8)$$

위 식에서  $T_L$ 은 부하토크, g는 중력의 각속도를 의미한다. 모터의 회전수 n(rpm)은 무부하시에 토크와 직선특성을 가지며 다음 식으로 주어진다.

$$n = n_0 \left( \frac{1-T}{T_0} \right) \quad (9)$$

회전수 n(rpm)과 회전각속도  $\omega$  (rad/sec)의 관계로부터 위의 식은 다음 식으로 주어진다.

$$T = T_0 \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (10)$$

식 (8), (9), (10)으로부터  $t = 0, \omega(0) = 0$ 로 주어질 때 회전각속도  $\omega(t)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\omega(t) = \omega_0 \left( \frac{1 - m\alpha T}{T_0} \right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_0}{J\omega_0} t\right) \right\} \quad (11)$$

그림 3은 초음파 모터의 온도특성을 나타낸다. 초음파 모터의 동작시간이 긴 경우에 초음파 모터의 온도가 증가하는데 온도가 증가할수록 속도가 감소함을 보여준다[4].

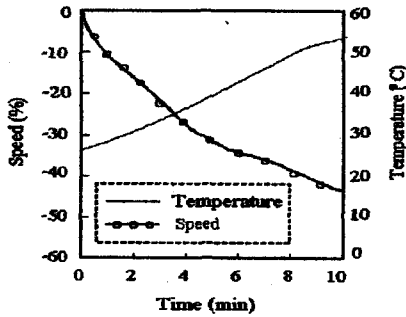


그림 3. USM의 온도특성

### 3. 퍼지논리제어기의 설계

퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Controller)는 일반적으로 퍼지화(Fuzzification Interface)와 비퍼지화(Defuzzification Interface) 및 지식기반(Knowledge Base)을 바탕으로 한 의사결정논리(Decision Marking Logic)의 부분으로 구성된다.

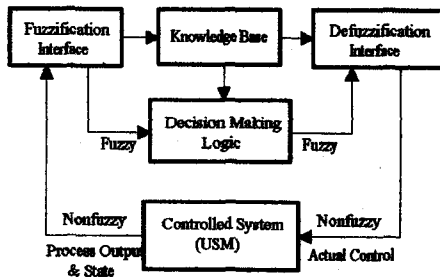


그림 4. 퍼지논리제어기의 기본 구성도

#### 3.1 퍼지화

그림 5는 E(Error), CE(Change of Error), dD(encoder pulse)로 구성되는 초음파모터의 퍼지소속함수를 나타낸다. 이 퍼지제어규칙은 아래의 식(12)에 의해서 결정된다.

$$e(k) = N^*(k) - N(k) \quad (12)$$

$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$

샘플링 시간 T와 샘플링 구간 k에서  $N^*(k)$ 는 speed set point,  $N(k)$ 는 actual rotor speed,  $e(k)$ 는 speed

error,  $\Delta e(k)$ 는 speed error change을 나타낸다.

입력변수는 언어적 변수로서 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NM(negative Medium), NB(Negative Big)으로 나타냈다. 그림 5는 본 논문에서 사용한 입력과 출력변수에 대한 7가지의 기본 소속함수의 정도를 나타내었다.

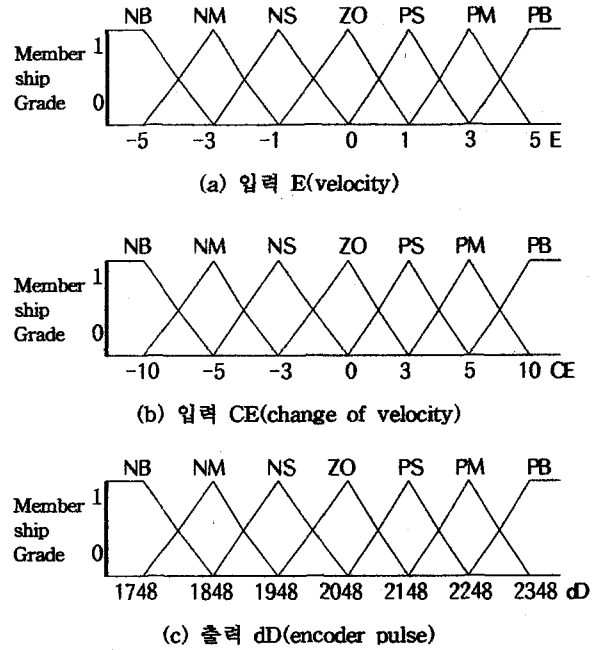


그림 5. 초음파 모터의 소속함수

#### 3.2 추론방법

표 1. 은 퍼지제어기의 제어규칙을 나타내는데, 이 제어규칙의 한가지 예를 들면 다음과 같다.

“IF E is PB AND CE is ZO then dD is PB.”

A, B 위상차가 크고 위상각의 변화가 0이면 엔코더 펄스의 갯수를 늘려라는 의미로서 그림 5에 나타난 언어변수에 대한 소속함수와 표 1과 같은 제어규칙에 의해서 본 연구에서는 퍼지추론방법으로 Mandani's방법인 최대-최소 원리에 의한 퍼지 합성법을 사용하였다.

표 1. 퍼지제어규칙

$\Delta e$	$e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB

### 3.3 비퍼지화

제어기의 출력값은 퍼지변수로서 소속함수로 표현되는 반면, 실제 플랜트에는 퍼지변수가 적합하지 않으므로 플랜트에 적합한 보통값으로 변환하는 과정인 비퍼지화 단계가 필요하다. 일반적인 비퍼지화 방법으로는 최대평균방법과 무게중심방법을 많이 사용하는데, 본 연구에서는 무게중심방법을 이용하고 이산적인 계산을 수행하기 위해서는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$dD_n = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j) \cdot dD_j}{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j)} \quad (13)$$

여기서, n은 제어입력 변화량에 대한 양자화 단계이고,  $dD_j$ 는 j번째 양자화 단계에서 제어입력 변화량을 의미하며,  $\mu(dD_j)$ 는 그 변화량에 대한 소속함수값을 나타내고 있다[4]-[6].

### 4. 제어시스템 및 결과고찰

그림 6은 초음파 모터의 제어시스템 블록다이어그램을 나타낸다.

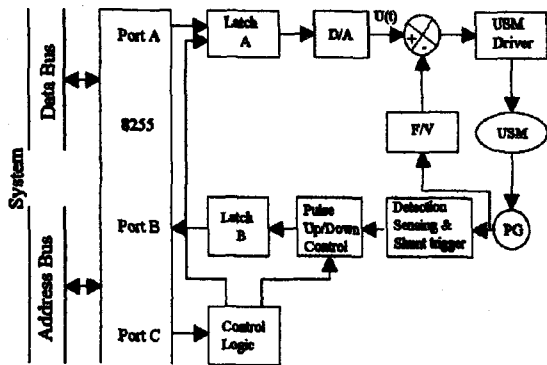
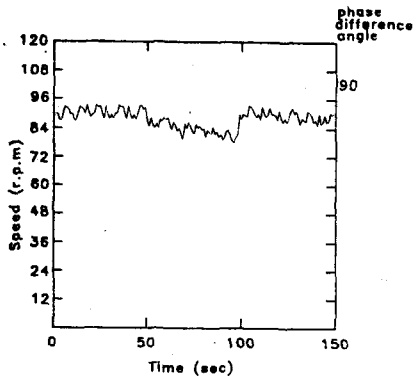
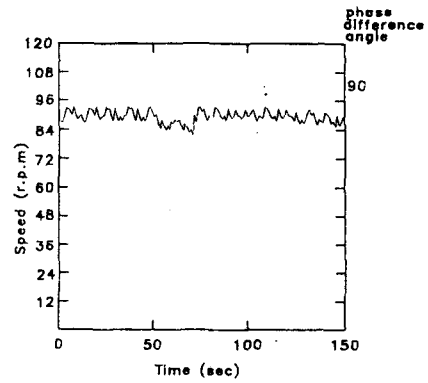


그림 6. 제어시스템

그림 7은 PI제어기와 Fuzzy제어기를 이용하여 온도 보상에 따른 속도특성을 나타낸다.



(a) PI Controller



(b) Fuzzy Controller

그림 7. PI제어기와 퍼지제어기의 온도에 따른 속도보상

### 5. 결론

초음파 모터의 구동은 구동범위에 있어서도 한 번 정지하면 재 기동에 있어서 기동주파수를 공진주파수보다 높은 주파수로 해야하는 비선형적인 요소가 강하다. 또한 장시간 회전시키면 마찰구동이므로 온도가 상승하여 입력주파수가 일정해도 회전속도가 감소한다. 그러므로 모터 회전에 따른 엔코더로부터의 피드백신호에 의한 위상차동의 제어를 하지 않으면 안된다. 퍼지제어기에 의해서 초음파 모터의 온도가 증가해도 모터의 속도를 최적으로 보상해줄 것이다. 따라서, 로봇트 액추에이터의 구동에 이용할 경우 동적 작업환경에서는 물론 정속작업 로봇트에서 중요시하는 컴플라이언스 특성을 얻을 수 있을 것으로 본다.

### 참고문헌

- [1] Toshiiku Sashida & Takashi Kenjo "An Introduction to Ultrasonic Motors", Clarendon Press · OXFORD, pp. 7 ~24, 1993.
- [2] 차인수, "퍼지제어기를 이용한 초음파 모터 전원용 고주파 공진형 인버터의 제작 및 특성에 관한 연구", 기초전력공학공동연구소 최종보고서, 1995.
- [3] In-Su Cha Gwon-Jong Yu & et all " A Study of Phase Difference Control for Ultrasonic Motor Drive Using Fuzzy Controller", ICPE'95, Seoul, Korea, October 1995, pp. 523~528
- [4] In-Su Cha Hea-Am Park & et all " A Study on the Design and Characteristic of the High Frequency Resonant Inverter for Ultrasonic Motor Drive Using Fuzzy Controller", IECON'95, Orlando, Florida, USA , November 1995, pp. 680~685
- [5] Takeshi Hatsuzawa et al " Speed control Characteristics and digital servo system of a circular traveling wave motor" Rev. Sci. Instrum 57(11), November 1986. pp 2886 - 1891
- [6] 이광형, 오길록, "퍼지이론 및 응용", 홍릉출판사, 1991.