

## A Study on the Driving Circuit of Piezoelectric Ultrasonic Motor Using PLL Technique

金南賢\* · Sergey Borodin · 姜種鈞\*\* · 安秉局 · 高太國\*\*\* · 金賢在\*\*\*\* · 尹錫珍\*\*\*\*  
 (Nam-Hyun Kim · Sergey Borodin · Chong-Yun Kang · Byung-Guk Ahn · TaeKuk Ko  
 · Hyun-Jai Kim · Seok-Jin Yoon)

**Abstract** - This paper describes control principles of the piezoelectric ultrasonic motor which is operated by the ultrasonic vibration generated by the piezoelectric element. The piezoelectric ultrasonic motor has excellent characteristics such as compact size, noiseless motion, low speed, high torque and controllability, and has been recently applied for the practical utilization in industrial, consumer, medical and automotive fields. In this paper, the design of two-phase push-pull inverter for driving the piezoelectric ultrasonic motor is described, and a new control method of automatic resonant frequency tracking using PLL(Phase-Locked Loop) technique is mainly presented. The experimental results by this inverter system for driving the piezoelectric ultrasonic motor are illustrated herein. The inverter system with PLL technique improved the speed stability of the piezoelectric ultrasonic motor.

**Key Words** : Ultrasonic motor, PLL, Resonant frequency, Speed control

### 1. 서론

압전 초음파 모터(piezoelectric ultrasonic motor)는 초음파 영역(20 kHz 이상)의 기계적 진동을 구동원으로 하는 액추에이터로 기존의 전자식 모터와 달리 압전 세라믹스(piezoelectric ceramics)에 교류전압이 인가되었을 때 발생하는 기계적 변위에 의해 구동되는 모터로서 구조가 간단하며 기존방식의 모터에 비하여 소형이고 저속 고토오크의 특성을 갖는다. 또한 빠른 응답속도와 높은 위치분해능을 가지므로 정밀위치제어에 유리하다. 압전 초음파 모터의 기본원리는 1973년 H.V. Barth에 의하여 고안되었으며 현재 상용화 된 진동과형 초음파 모터는 1980년 T. Shasida에 의해 개발된 후로 연구개발 및 해석이 활발히 이루어지고 있다.

응용분야로는 자동차용 소형모터, MRI용 인젝터, 롤스크린의 자동설비, 카메라의 자동초점장치, 자동무인 카메라의 구동 등이 있으며 종래의 소형 서보모터나 스텝모터가 응용되던 모든 제어 설비를 대체할 차세대 모터로 각광받고있으나 실용화를 위해 극복해야할 문제도 많다. 우선적으로 발열 및 마모로 의해 장시간 구동에 제약을 받으며 고주파 전원장치를 필요로 하고 개루프 제어시 불안정한 동작특성을 갖는다.

이는 소형 제어용 모터가 갖추어야 할 정밀한 위치 및 속도 제어에 반드시 극복되어야 할 과제이다[1][2].

압전 초음파 모터의 안정성 향상을 위해 입력전압의 여자 주파수와 압전 세라믹스의 공진주파수를 동기화해야 하며 이는 구동회로에서 압전 초음파 모터의 입력단의 전압과 전류 위상의 두 성분의 위상차에 따라 인가되는 전원의 주파수를 조정함으로써 가능하다[3][4].

따라서 본 연구에서는 압전 초음파 모터의 구동시간에 따른 공진주파수 특성 해석하고 이를 토대로 PLL방식을 적용한 피드백 회로를 직접 설계 제작하여 실험을 통해서 그 특성을 검토하였다. 그 결과 PLL방식을 이용한 피드백 회로에 의하여 압전 초음파 모터의 시간에 따른 속도의 안정성이 향상되었음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 압전 초음파 모터의 구동을 위해 PLL방식을 적용한 피드백 회로를 설계 제작하여 압전 초음파 모터의 구동시간에 따른 안정성을 검토하였다.

### 2. 압전 초음파 모터 구조 및 제어회로 설계

#### 2.1 압전 초음파 모터의 구조

그림 1은 원환형 압전 초음파 모터(PUMR-40, Piezotech Ltd.)의 구조로 초음파 모터는 크게 압전 세라믹스와 탄성체로 이루어진 고정자(stator)와 마찰재(friction material)가 부착되어 있는 회전자(rotor)로 구성이 된다. 고정자의 상부는 탄성체의 진동변위를 증폭시키고 구동중 발생하는 불순물을 제거하기 위해 치(tooth)의 형태를 가지며 하부에는 압전 세라믹스가 부착되어 있다.

\* 準 會 員 : 韓國科學技術研究院 學生研究員  
 \*\* 正 會 員 : 韓國科學技術研究院 선임研究員  
 \*\*\* 終身會員 : 延世大學校 電氣電子工學科 教授  
 \*\*\*\* 終身會員 : 韓國科學技術研究院 責任研究員  
 接受日字 : 2002年 1月 28日  
 最終完了 : 2002年 12月 11日

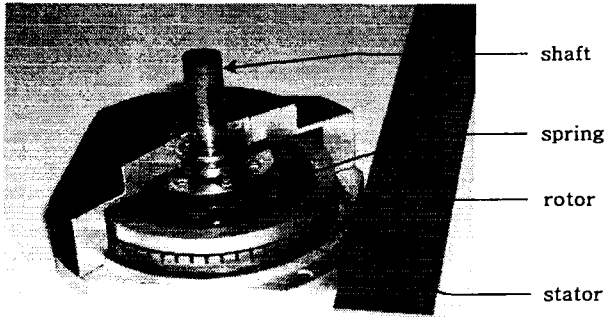


그림 1 압전 초음파 모터의 구조  
Fig. 1 Structure of the piezoelectric ultrasonic motor

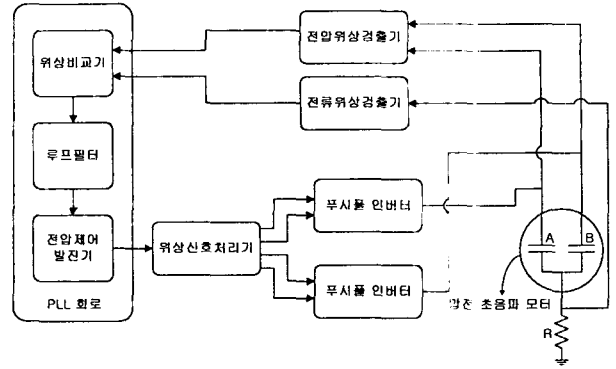


그림 3 압전 초음파 모터의 구동회로  
Fig. 3 Driving circuit of the piezoelectric ultrasonic motor

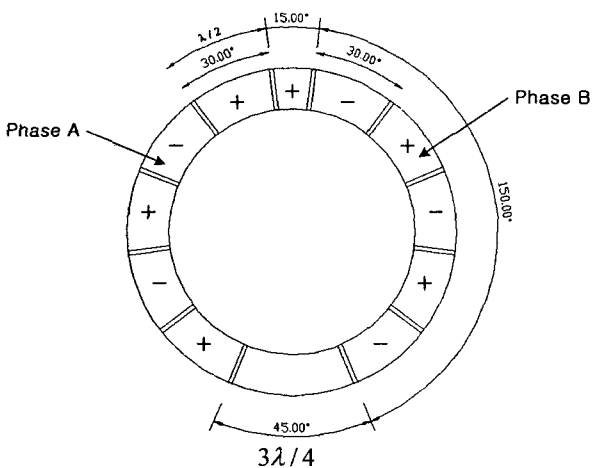


그림 2 압전 세라믹의 구조  
Fig. 2 Structure of the piezoelectric ceramics

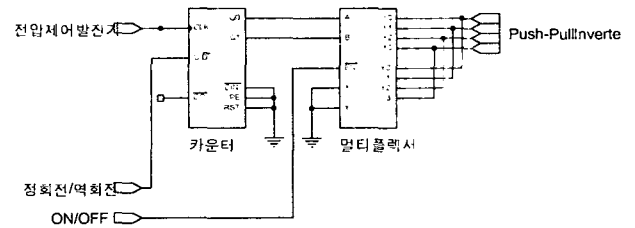
그림 2는 압전 세라믹의 구조이다. 압전 세라믹스는 공진주파수(resonant frequency)에서 진동하면서 7개의 파장을 형성하도록 설계되었다. 압전 세라믹스는 (+), (-)의 순서로 분극(polarization)처리된 후 탄성체의 밑부분에 부착된다. 회전자는 원판형의 금속재질인 알루미늄이며 고정자와의 접촉 부분에 얇은 마찰재가 부착되어 있고 마찰재의 구조 및 재질에 따라 구동특성에 영향을 준다[5].

2.2 제어회로 설계

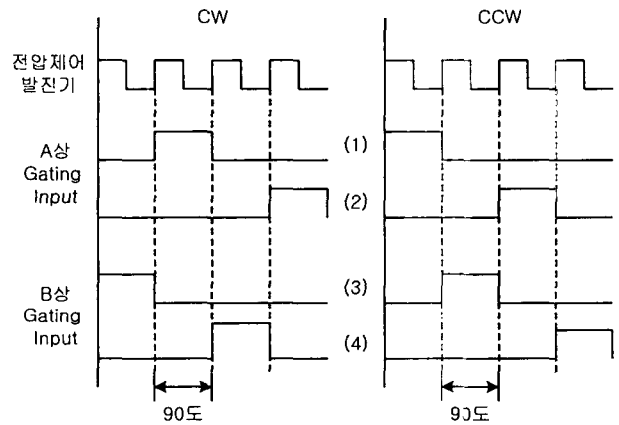
압전 초음파 모터를 구동시키기 위해서는 30~50 [kHz]대의 주파수 영역과 약 300[V<sub>p-p</sub>]정도 크기를 갖는 교류전압을 필요로 한다.

그림 3은 압전 초음파 모터의 제어회로에 대한 구성도이다. 제어회로는 크게 전압제어발진기, 위상신호처리기, 푸시풀인버터(push-pull Inverter), 전압 및 전류위상검출기, 위상비교기, 그리고 루프필터로 구성된다. 이들 중 위상비교기, 루프필터, 그리고 전압제어발진기는 PLL회로 내에 포함이 된다.

전압제어 발진기는 루프필터의 출력인 직류전압을 주파수로 변환하여 출력하는 회로이다. 출력은 듀티비 50%를 가지며 모터에 인가되는 교류전압의 4배의 주파수를 갖는다. 본



(a) 구조



(b) 출력 파형

그림 4 위상신호처리기

Fig. 4 Phase-signal conversion circuit

실험에 사용된 전압제어 발진기는 PLL회로에 내장되어 있으며 수동소자의 크기에 의해 간단하게 출력주파수의 범위 및 위상동기화 대역을 조절할 수 있다. 위상동기화대역이란 위상비교기의 두 위상입력신호가 동기화를 유지하는 출력주파수의 대역이다.

그림 4의 (a)는 위상신호처리기의 구조이며 위상신호처리기는 2비트 업-다운 카운터와 8채널 디멀티플렉서를 이용하여 구성하였다. 위상신호처리기는 전압제어발진기의 출력을 각각 90도의 위상차를 갖는 4개의 펄스파로 출력하여 푸시풀인버터를 제어하고, 모터의 정회전과 역회전 및 ON/OFF 모드를 결정함으로써 모터의 간단한 동작을 실행한다. 그림 4의 (b)는 위상신호처리기의 출력파형이다. 그림에서 정회전일

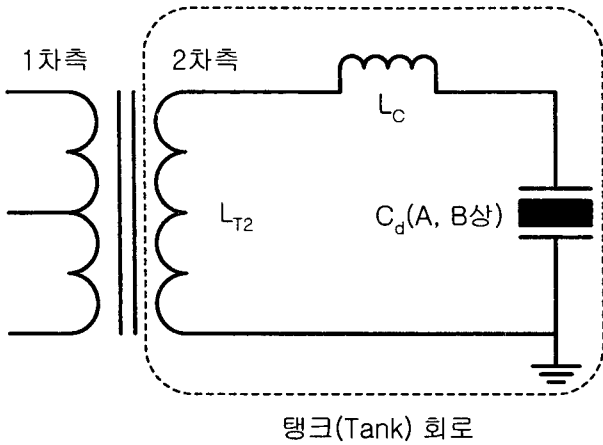


그림 5 압전 초음파 모터와 변압기 2차 측으로 구성된 탱크(tank)회로

Fig. 5 Tank circuit composed of the piezoelectric ultrasonic motor and the secondary part of transformer

경우 각각 (1), (2) 신호는 압전 세라믹스의 A상에 인가되는 교류전압을 제어하며 (3), (4) 신호는 B상에 인가되는 교류전압을 제어한다. 각각의 신호들은 그림 3에서의 MOSFET을 구동시킴으로써 초음파 모터에 사인파의 전압이 인가되도록 한다. 역회전일 경우 그림 4의 (b)에서처럼 각각 위상이 전환되어 압전 초음파 모터의 회전방향이 역전된다.

그림 5는 푸시풀 인버터내의 변압기의 2차측 인덕터와 압전 초음파 모터의 등가 캐패시턴스가 형성하는 탱크(tank)회로이다. 변압기의 2차측에서는 증폭된 구형파가 발생하고, 증폭된 구형파는 공진에 의해 정현파로 변환되어 압전 초음파 모터에 인가된다. 탱크회로내의 인덕터(Lc)는 매우 작은 값으로 변압기의 2차측의 인덕터를 보상하여 공진을 보정하는 역할을 한다. 일반적으로 압전 초음파 모터는 기계적 공진이 발생하였을 때 가장 효율이 좋은 구동을 한다. 따라서 그림 5의 탱크회로가 압전 초음파 모터의 기계적 공진주파수에서 공진이 발생하도록 설계되어야 한다. 따라서 병렬공진회로의 각 파라미터는 다음과 같은 계산식을 만족하도록 설계한다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{T2} \cdot C_d}}$$

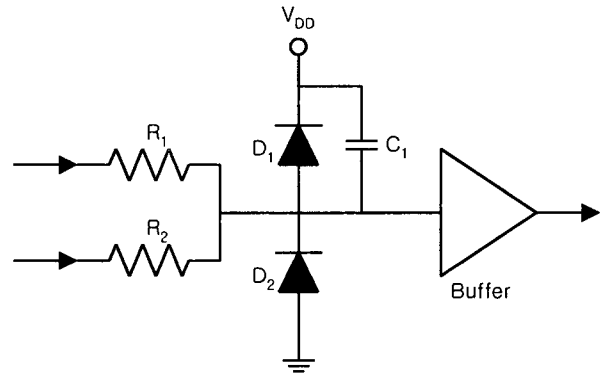
$f_r$  : 초음파 모터의 공진주파수

$L_{T2}$  : 공진주파수에서의 변압기의 2차측의 인덕턴스

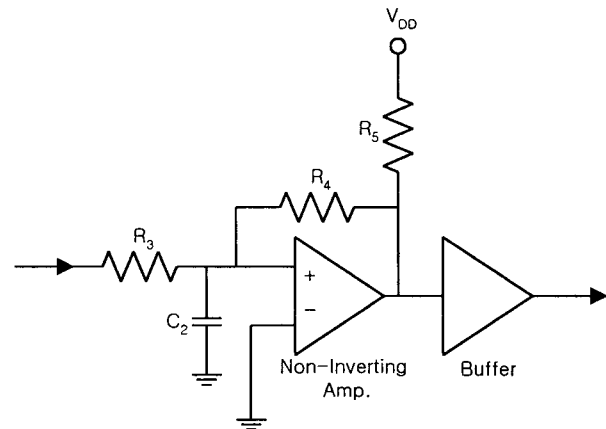
$C_d$  : 압전 초음파 모터의 공진주파수에서의 커패시턴스

변압기의 2차측의 인덕턴스( $L_{T2}$ )는 실제적으로 인덕터( $L_c$ )의 인덕턴스 크기보다 상대적으로 큰 값이므로 계산식에서는 인덕터( $L_A$ )의 인덕턴스는 무시되었다. 압전 초음파 모터의 공진주파수는 33.5[kHz]이며 이때의 캐패시턴스는 약 4.5[nF]이었다.

실제적으로 압전 초음파 모터의 예측된 공진주파수와 실제 구동되는 공진주파수는 약간의 차이를 갖는다. 이는 측정조건과 실제적 구동조건에 차이에 기인한 것이다. 압전 초음파



(a) 전압위상검출기



(b) 전류위상검출기

그림 6 위상검출기 회로도

Fig. 6 Structure of phase detector circuit

모터는 구동시 300[V<sub>P-P</sub>]의 고전압을 필요로 하지만 각 파라미터의 예측시 이런 실제적 구동조건을 적용하기는 힘들다. 따라서 이를 잘 고려하여 적용해야 한다.

만일 그림 5의 병렬공진회로에서 공진이 발생할 경우 압전 초음파 모터에 인가되는 전압과 전류의 위상은 일치된다. 온도에 의해 압전 초음파 모터의 공진주파수가 변화하여도 전압과 전류의 위상차가 계속적으로 초기상태와 일치하도록 전압제어 발진기의 출력을 제어한다면 압전 초음파 모터는 효율적이며 안정적인 동작을 유지할 것이다. 따라서 본 논문에서는 전압과 전류의 위상차를 비교하여 전압제어발진기의 출력을 조절하는 PLL방식을 적용한 새로운 주파수 보상 피드백 시스템을 구성하였다.

우선적으로 본 실험에서 적용된 PLL 방식은 전압과 전류의 위상을 검출하여 비교하는 DPLL 방식을 적용하였다. 이 방식은 회로구성이 간단하고 제어성이 우수하므로 차후 산업화에 유리하다. 그림 6는 압전초음파 모터의 입력전압과 전류의 위상을 검출하기 위한 전압위상검출기와 전류위상검출기의 회로도이다. 그림 6의 (a)의 전압위상검출기의 경우, 압전 초음파 모터에 인가되는 전압은 약 300[V<sub>P-P</sub>]의 높은 교류전압이므로 차폐 후 A상과 B상의 위상을 더하여 다이오드로 정류한다. 그 후 위상성분은 버퍼(buffer)를 거쳐 위상성분의 펄스파로 출력된다. 이는 회전방향에 관계없이 인가된 전압의

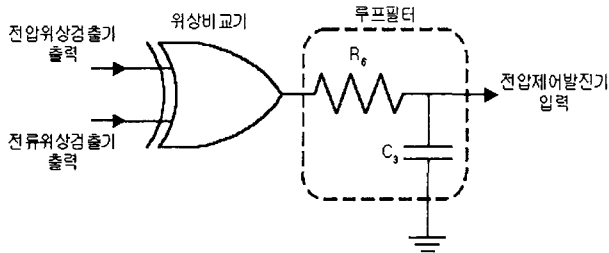


그림 7 위상비교기 및 루프 필터  
Fig. 7 Phase comparator and loop-filter

안정된 위상성분신호를 검출하기 위해서이다. 그림 6의 (b)는 전류위상검출기의 회로도이다. 전압위상검출기와 마찬가지로 회전방향에 관계없이 안정된 전류의 위상성분을 검출하기 위하여 그림 3에서처럼  $1[\Omega]$ 의 저항을 초음파 모터의 접지단자에 연결하여 전류위상성분의 신호를 검출한다. 검출된 전류성분의 신호는 매우 많은 노이즈를 포함하므로 저역통과회로를 구성하여 필터링을 한 후, Op-amp를 이용한 비반전 증폭기와 버퍼(buffer)를 구성하여 전류의 위상성분을 갖는 펄스파로 변환한다. 본 실험에 적용된 PLL방식에서는 위상비교기의 기준전압이 0 대신  $V_{DD}/2$  ( $V_{DD}$ : 위상비교기의 출력최대전압)가 되기 때문에 전압제어발진기의 입력 기준전압도 0 대신에  $V_{DD}/2$ 가 된다. 그림 6 (a)와 (b)의 위상검출기에서 출력된 전압과 전류의 위상은 약 90도 정도의 위상차를 갖는다. 따라서 기준전압이  $V_{DD}/2$ 가 되기 위해서는 위상차가 90도가 되어야하므로 그림 6 (a)의 전압위상검출기의 후단에 위상보정용 콘덴서( $C_1$ )를 부착함으로써 초기에 전압과 전류의 위상차를 90도가 되도록 조절한다.

PLL회로는 그림 3에서처럼 위상비교기, 루프필터 그리고 전압제어발진기로 이루어져 있다. PLL은 입력신호와 출력신호의 위상차이를 줄이거나 0이 되도록 하는 피드백의 종류로 본 실험에서는 위상비교기로 그림 7처럼 Exclusive -OR을 사용하고, 루프필터로는 저항과 콘덴서를 이용한 저역통과필터를 사용한 DPLL 방식의 회로를 구성하였다.

그림 7에서 각각 위상비교기의 입력에는 전압위상검출기와 전류위상검출기의 출력신호가 연결된다. 압전 초음파 모터가 공진일 경우 두 위상성분의 펄스파는 90도의 위상차를 가지며 각각 50%의 듀티비를 갖는다. 따라서 위상비교기의 출력은 입력된 펄스파의 2배의 주파수를 갖는 펄스파가 되며 위상비교기의 출력은 루프필터를 거쳐 매우 작은 리플을 갖는 직류로 변환되어 전압제어 발진기에 입력된다.

전압위상검출기와 전류위상검출기 출력의 위상차는 90도를 이루는 것을 기준으로 위상차가 감소할수록 전압제어발진기의 입력전압의 크기는 낮아지고 위상차가 커질수록 높아진다. 전압제어발진기의 입력전압이 커지면 출력주파수는 높아지고 입력전압이 낮아지면 출력주파수는 줄어든다. 따라서 전압과 전류의 위상차에 따라 전압제어발진기의 출력이 제어되므로 결국 압전 초음파 모터의 공진주파수의 변화에 따라 전압제어발진기는 두 위상차가 90도가 되도록 유지하기 위해 출력주파수를 가변함으로써 압전 초음파 모터의 공진주파수를 추적하게 된다.

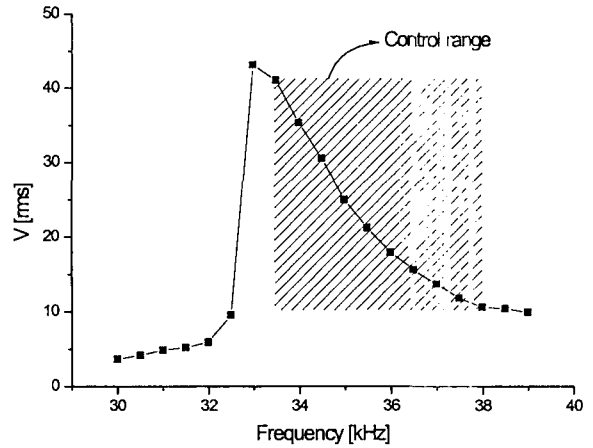


그림 8 주파수에 따른 압전 세라믹의  $3\lambda/4$ 의 출력전압  
Fig. 8 Output voltage on  $3\lambda/4$  of the ultrasonic motor by frequency

### 3. 결과 및 고찰

압전 초음파 모터의 기본적인 구동력은 회전자와 고정자사이의 마찰력이다. 일반적으로 모터 회전시 회전자와 고정자의 마찰을 방지하고 마찰계수를 향상시키기 위해 다찰재를 중간에 삽입한다. 하지만 장시간 구동시 고정자와 다찰재사이의 계속된 마찰에 의하여 열손실이 발생하고 발생한 열에 의하여 압전 초음파 모터의 공진주파수가 낮은 쪽으로 이동함으로 결과적으로 개루프일 경우 초음파 모터의 효율 및 동작 특성을 저하시킨다.

그림 8은 초음파 모터의 입력전압 주파수에 따른 압전 세라믹스의  $3/4\lambda$ (피드백)구역의 출력전압을 측정된 그래프이다. 출력전압( $V_i$ )은 모터가 기동할 경우 그림 2의 압전 세라믹스의  $3/4\lambda$ 영역에서의 출력을 나타낸다. 출력전압이 증가할수록 압전 세라믹스의 변위가 증가하므로 모터의 속도는 증가하고 출력전압이 감소할수록 압전 초음파 모터의 속도는

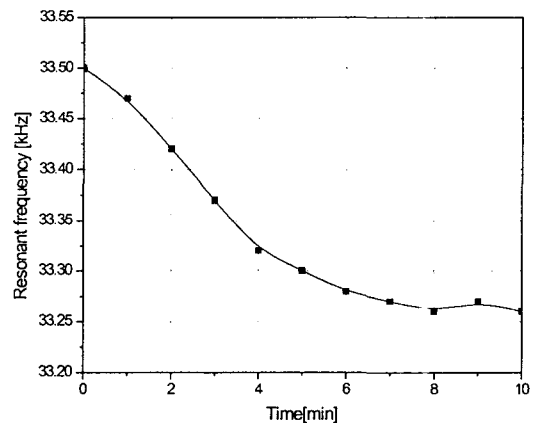
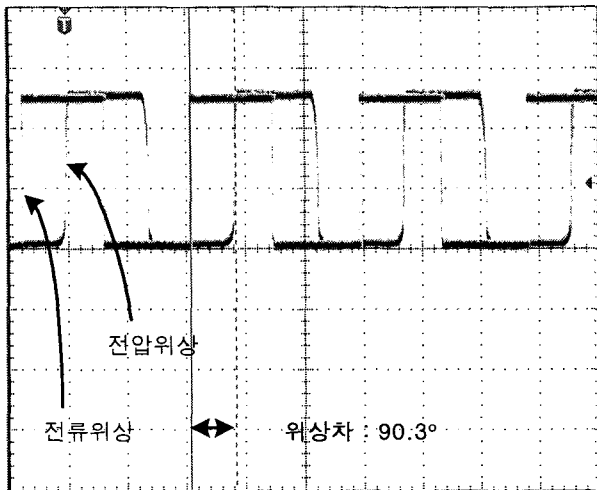
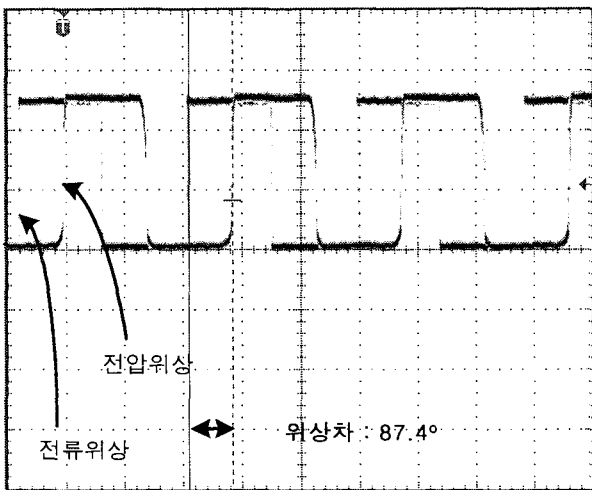


그림 9 시간에 따른 개루프에서의 공진주파수의 특성  
Fig. 9 Open-loop resonant frequency characteristics as a function of time



(a) 동작 초기



(b) 10분 후

그림 10 개루프에서의 시간에 따른 전압위상과 전류위상의 변화

Fig. 10 Difference between voltage phase and current phase as time at a open-loop

감소한다. 하지만 그림 8과 같이 입력전압의 주파수에 따른 압전 초음파 모터의 속도는 비선형적인 특성을 갖는다. 따라서 실제적으로 속도를 제어할 수 있는 주파수의 범위는 33.5~38.0[kHz]의 영역에서 가능하고 입력전압의 주파수가 이 영역을 벗어나면 압전 초음파 모터는 불안정한 동작하거나 정지한다.

그림 9와 10은 각각 개루프에서 시간에 따른 모터의 공진주파수의 변화와 전압과 전류위상검출기의 출력변화를 나타낸다. 모터의 공진주파수는 약 0.2[kHz]가 감소된 후 안정되었다. 모터의 공진주파수가 감소하므로 모터의 초기속도도 공진주파수가 안정화되기 전까지 계속적으로 감소하게 된다. 그림 10에서처럼 전압과 전류의 위상차는 초기에 90도이나 10분 뒤 위상차는 87.4도로 약 2.6도가 감소하였다. 따라서 폐루프가 이루어 질 경우 전압과 전류의 위상차가 감소하므로

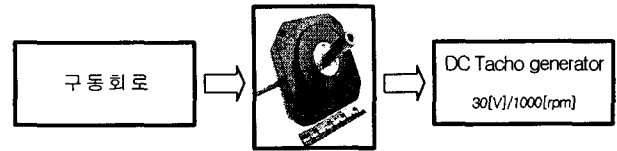


그림 11 회전속도 측정시스템

Fig. 11 Measurement system of the rotating speed

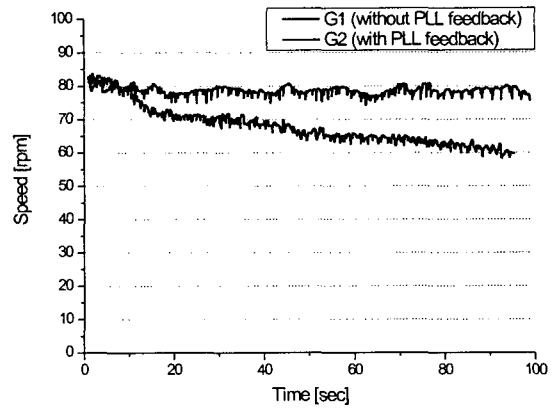


그림 12 피드백 유무에 따른 초음파 모터의 속도특성

Fig. 12 Speed regulation of the ultrasonic motor with /without PLL feedback

그림 7의 위상비교기의 출력이 감소한다. 결국 위상비교기의 출력이 감소하면 전압제어발진기의 입력이 감소하므로 전압제어발진기의 출력주파수 또한 낮아지므로 최종적으로 모터의 구동주파수를 감소시키므로 모터의 속도는 증가한다. 따라서 모터의 속도가 보상되게 된다.

그림 11는 모터의 시간에 따른 회전속도의 측정도이다. 초음파 모터는 Tacho-generator와 접속되며 구동회로에 의해 고주파 전원이 인가된다. Tacho-generator의 출력은 직류전압이며 출력은 저장장치로 수집된다.

따라서 그림 10과 11에서 모터의 구동에 따른 온도변화는 모터의 구동특성에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 12에서는 PLL을 이용한 위상차 보상 피드백의 유무에 따른 압전 초음파 모터의 속도변화량을 비교하였다. G1은 PLL 피드백을 적용하지 않은 속도변화이고, G2는 PLL 피드백으로 적용한 속도변화이다. G1과 G2에서 발생하는 약 ±5[rpm]의 Fluctuation은 모터의 회전자와 고정자의 마찰구동특성과 압전 세라믹스의 온도에 따른 특성변화에 기인한 것이다. 따라서 엔코더를 사용하지 않은 상태에서 전기적인 피드백만으로는 정밀한 제어는 매우 어렵다. G1은 개루프 시스템으로써 모터의 온도가 초기 20[°C]에서 약 10[°C]정도 증가함에 따라 초음파 모터의 공진주파수가 약 60[Hz]정도 감소하여 회전속도가 약 20[rpm]정도 감소하였다. 그에 반해 PLL 피드백을 갖는 G2 역시 약 10[°C]정도의 온도상승이 발생하였지만 시간에 대해 비교적 일정한 속도를 유지하고 있다. 이는 온도에 따른 압전 초음파 모터의 공진주파수의 변화에 따라 입력전압과 입력전류의 위상차가 초기 조건(90도 위상

차)를 벗어나므로 이를 보상하기 위해 전압제어발전기의 출력주파수가 압전 초음파 모터의 공진주파수를 추적하기 때문이다. 따라서 압전 초음파 모터는 공진을 유지하고 시간에 따른 속도의 감쇠가 보상되었다.

**4. 결 론**

본 논문에서는 PLL방식을 이용한 압전 초음파 모터의 제어회로를 제시하였다. 제시된 제어방식은 세라믹의 A상과 B상에서의 전압위상과 전류위상을 각각 합하여 검출하였고, 검출된 전압과 전류의 위상신호를 PLL회로를 통해 전압과 전류의 위상차를 비교하여 전압제어 발전기의 출력이 모터의 공진주파수를 추적하도록 설계되었다. 그림 12에서처럼 제작된 PLL방식을 이용한 주파수제어회로는 압전 초음파 모터의 공진주파수를 추적하여 속도의 감소를 보상하였다.

**참 고 문 헌**

- [1] 김영동, 오금근, "초음파 모터의 위상차 제어", 한국조명전기설비학회, 조명전기설비 학회지, 1996
- [2] L. Petit, N. Rizet, R. Briot and P. Gonnard, "Frequency behaviour and speed control of piezomotor", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 80, Issue 1, 1 March 2000, pp 45~52
- [3] S. Furuya, T. Maruhashi, Y.Izuno and M. Nakaoka, "Load-adaptive frequency tracking control implementation of two-phase inverter for ultrasonic motor", IEEE Trans on Power Electronics, vol. 7, No3, pp 542~550
- [4] T. zumi, H. Yasutsune, Kim, Y.J, M. Nakaoka, S. Furuya and T. Maruhashi, "New inverter-fed power ultrasonic motor for speed tracking servo application and its feasible evaluations", Power Electronics and Drive Systems, 1995, vol. 2, pp 766~773
- [5] T. Shasida and T. Kenjo, "An introduction of Ultrasonic Motor", Oxford, 1993

**저 자 소 개**



**김남현(金南賢)**  
1975년 1월 30일 생. 2000년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2000년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정. 2000년~현재 한국과학기술연구원 학생연구원



**Sergey Borodin**

1963년 3월 4일 생. 1986년 Voronezh Technical Univ. 메카트로닉스공학과 졸업. 1993년 Vilnius Pedagegical Univ. 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(공학박사). 2001년~현재 한국과학기술연구원 초빙과학자



**강종운(姜種鈞)**

1969년 11월 26일 생. 1993년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 한국과학기술연구원 선임연구원



**안병국(安秉局)**

1983년 전북대학교 금속공학과 졸업. 1985년 연세대학교 금속공학과 졸업(석사). 1991년 Tohoku Univ. 금속공학과 졸업(공학박사).



**고태국(高太國)**

1955년 7월 4일 생. 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1983년 Case Western Reserve Univ. 전기공학 및 응용물리학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학 및 응용물리학과 졸업(공학박사). 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 교수. 1988년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수



**김현재(金賢在)**

1975년 연세대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1984년~현재 한국과학기술연구원 책임연구원



**윤석진(尹錫珍)**

1983년 연세대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년~현재 한국과학기술연구원 책임연구원