

직렬 공진형 인버터를 사용한 초음파 모터 구동시스템의 공진 인덕턴스 선정법

李乙宰, 金榮石

A Selection Method of Resonant Inductance for the Traveling Wave Type Ultrasonic Motor Drive System using Series Resonant Inverter

Eul-Jae Lee, Young-Seok Kim

요약

본 논문에서는 진행파형 초음파 모터 구동을 위한 직렬형 인버터의 모터측에 직렬로 삽입되는 인덕터의 설계를 위한 새로운 해석 방법을 제시하였다. 초음파 모터의 구조를 등가적으로 해석하였고 이를 토대로 직렬 인덕터의 선정법을 제시하였다. 직렬 인덕터가 최적으로 설계되었을 때 모터 내부의 기계축 고유 공진 요소에 효율적인 전력이 전달될 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 여러 단계의 외부 인덕터에 대한 실험을 통하여 초음파 모터의 주파수 및 속도 특성이 검토되었다. 그 결과 제안된 외부 인덕터 선정방법의 타당성이 입증되었다.

ABSTRACT

To drive a traveling wave type ultrasonic motor with the series-resonant inverter, the external inductor is inserted between the motor and inverter. In this paper, we proposed a novel analysis method to design the external inductor. An equivalent model of the ultrasonic motor is expressed, and a selection method of the series inductor is proposed from the basis of the model. When the series inductor has an optimal value, it is verified by computer simulation results that power is efficiently transmitted to the mechanical resonant component in the motor. The frequency and speed characteristics of the ultrasonic motor are investigated by experiments for several external inductors. The validity of the proposed method for selecting external inductor is clarified.

Key Words : Ultrasonic motor(USM), Series Resonance Inverter

1. 서론

초음파 모터는 기존의 전자기식 모터와는 달리 자기 회로 즉, 철심과 코일이 없는 새로운 형태의 소형모터로 압전 세라믹소자(piezo-ceramics)의 진동에 의해 발생하는 초음파 영역의 기계적 진동을 이용하여 고정자와 회전자 사이의 마찰에 의해 회전을 한다. 이에 따라 기존의 모터와 비교할 때 저속-고 토크, 구조의 단순성, 형태의 다양성, 자기장의 영향에 무관함 등과 초음파 영역의 진동을 이용하기 때문에 소음이 적은 장점을 갖는다.^[1] 특히 모터가 동작하지 않는 경우에도

매우 큰 정지토크(holding torque)를 갖고 있으며 기동시나 정지시에 빠른 응답특성을 가지고 있으므로 액추에이터(actuator)등에 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^[5-7]

진행파형 초음파 모터를 구동하기 위해서는 위상차를 갖는 40kHz 부근의 2상 정현파 전원이 필요하다. 정현파 전원으로는 모터와 인버터 사이에 직렬로 인덕터를 삽입하여 초음파 모터 내부에 존재하는 기생 캐패시턴스에 의한 공진을 발생시킴으로써 모터의 입력단이 정현파가 되도록 하는 부하직렬 공진형 인버터의 사용이 일반화되어 있다.

부하직렬 공진형 인버터를 사용하여 초음파 모터를 구동하는 경우에 얻어지는 장점으로는 외부 인덕터의 삽입만으로 모터의 구동을 위한 높은 전압이 공진에 의하여 쉽게 얻어질 수 있다는 것과 구동 스위치에 가해지는 전압의 크기가 상대적으로 작게되므로 인버터 구동에 저전압 MOSFET를 사용함으로써 도통손실의 저감 및 구성회로의 저압화 등에 유리하다는 점이다.

한편 공진을 발생시키기 위하여 모터와 인버터 사이에 삽입시키는 인덕터의 크기는 일반적으로 제작사에서 제공하는 모터의 공진주파수와 기생 캐패시턴스의 크기로부터 계산되는 방법이 사용되고 있다. 그러나 모터의 등가회로상에서 보면 공진을 발생시키기 위해 사용되는 모터 내부의 기생 캐패시턴스가 기계적인 공진을 유발하는 L-C-R 공진회로에 병렬로 접속된 형태로 되어 있어서 상호간의 공진 주파수가 상이한 경우에는 전력의 전달이 원활히 이루어지지 않아 결과적으로 모터의 효율적인 구동을 방해하는 요소로 작용한다.

본 논문에서는 이러한 외부 인덕턴스가 초음파 모터의 구동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 초음파모터의 등가회로에 공진을 위한 외부 인덕턴스를 포함시켜 모터측의 등가회로를 해석하였으며 이를 통하여 적정 인덕턴스의 선정방법에 관하여 기술하였다. 또한 모터 구동 시스템에서의 외부 인덕턴스의 영향을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

2. 직렬 인덕터를 고려한 초음파 모터의 등가회로

진행파형 초음파 모터는 압전세라믹 소자에 가해지는 2상의 정현파 전압에 의해 발생하는 진동을 여기원으로 하여 회전자가 회전한다. 그림 1은 직렬 인덕터를 포함한 진행파형 초음파 모터의 한상에 대한 전기적인 등가회로를 나타낸 것이다. 모터의 각 파라미터에 대한 설명은 표 1과 같다. 여기서 모터의 기계적 상수인 L_m , C_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[1]

$$L_m = m/A^2 \tag{1}$$

$$C_m = A^2/K \tag{2}$$

초음파 모터는 식 (1)과 (2)의 기계적 요소에 의하여 공진을 하게 되며 공진주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_m = 1/2\pi \cdot \sqrt{1/C_m L_m} = 1/2\pi \cdot \sqrt{K/m} \tag{3}$$

한편 초음파 모터와 공진을 일으켜 모터 입력단 전압이 정현파가 되도록 하기 위하여 외부 인덕터 L_i 를 삽입한다. 통상의 경우 L_i 와 압전세라믹의 블록킹 캐패시턴스 C_d 만을 고려하여 모터의 공진주파수와 식 (4)로 표현되는 L_i 와 C_d 의 공진주파수가 일치하도록 L_i 를 선정한다.

$$f_o = 1/2\pi \cdot \sqrt{1/C_d L_i} \tag{4}$$

그러나 그림 1의 등가회로에서 알 수 있듯이 L_i 는 C_d 에 의해서만 공진을 하는 것이 아니고 병렬로 연결된 L_m , r_o , C_m 루프의 요소들이 공진에 영향을 미치기 때문에 식 (4)에 의한 L_i 의 선정은 정확한 방법이 되지 못한다.

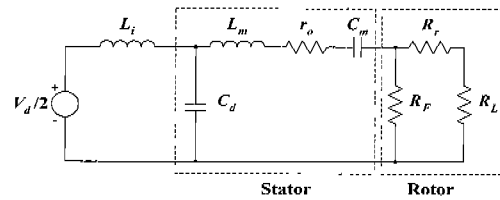


그림 1 직렬 인덕터를 포함한 초음파 모터 한상의 등가회로 모델

Fig. 1 Single-phase equivalent circuit model of ultrasonic motor including series inductor

표 1 초음파 모터의 관련 파라미터

Table 1 Parameter description of ultrasonic motor

A	forcc factor
K	고정자 세라믹-금속간의 스프링 상수
m	고정자 세라믹-금속의 질량
C_d	압전세라믹의 dielectric 특성에 의한 블록킹 캐패시턴스
L_m	고정자 질량 효과에 의한 등가 인덕턴스
C_m	고정자 스프링 효과에 의한 등가 캐패시턴스
r_o	고정자 기계적 손실에 의한 등가 저항
R_F	고정자-회전자간의 마찰손에 의한 등가 저항
R_r	회전자 기계적 손실에 의한 등가 저항
R_L	등가 부하
L_i	외부 직렬 공진 인덕턴스
f_m	모터의 기계적 공진주파수
f_o	직렬 인덕터에 의한 공진주파수
V_d	인버터 DC link 전압

2.1 등가회로 해석 및 최적 인덕턴스 선정

그림 2에 초음파 모터의 동작 해석을 위한 간략화된 등가회로를 나타내었다. 그림에서 V_i 는 인버터에서 발생하는 출력전압이고 I_i 는 모터측으로 흐르는 입력 전류이며 L_i 는 모터의 기생 캐패시턴스 C_d 와 공진을 일으키기 위해 삽입된 외부 인덕터이다. 한편 회전자와 고정자 사이의 기계적 손실과 마찰손 및 부하의 변화는 합성 임피던스 R_o 로 표현할 수 있으며 식 (5)로 주어진다.

$$R_o = r_o + \frac{R_F \cdot (R_r + R_L)}{R_F + (R_r + R_L)} \quad (5)$$

모터의 입력측에 발생하는 전압 V_{Cd} 는 삽입된 외부 인덕터와 기생 캐패시턴스의 공진에 의하여 정현파 형태로 나타난다. I_{Cd} 와 I_{Ro} 은 각각 C_d 와 모터의 회전력 발생 및 부하에 흐르는 전류이다. 그림 2의 등가회로로부터 다음의 식이 성립한다.

$$V_i = V_{L_i} + V_{Cd} \quad (6)$$

$$V_{L_i} = \omega L_i \cdot I_i \quad (7)$$

$$I_i = I_{L_i} = I_{Cd} + I_{Ro} \quad (8)$$

$$I_{Ro} = \frac{1}{R_o} V_{Ro} \quad (9)$$

그림 3은 그림 2에 보여진 등가회로에 대한 벡터도이다. 벡터도에서 입력전압 V_i 는 외부 인덕터에 인가되는 전압 V_{L_i} 와 내부 기생 캐패시턴스에 인가되는 전압 V_{Cd} 의 합과 같다. 따라서 외부 인덕터에 가해지는 전압 V_{L_i} 는 식 (7)과 같으므로 공급전압의 주파수 f_s 가 모터의 동작 주파수 영역 내에 있을 때 외부 인덕터 L_i 의 크기를 적절히 선정하게 되면 입력전압 V_i 와 입력전류 I_i 의 위상이 일치하게 되어 모터에 효율적인 전력의 전달이 가능함을 알 수 있다.

직렬 인덕터 L_i 를 제외한 모터의 등가 임피던스를 Z_o 라 하면 식 (10)과 같이 표현된다.

$$Z_o = \frac{Z_m \cdot jX_c}{Z_m + jX_c} \quad (10)$$

여기서, Z_m 은 모터의 기계적 상수에 대한 등가 임피던스이며 X_L , X_C , X_m 은 각각 L_i , C_d 및 L_m , C_m 의 리액

턴스로 각각 다음 식으로 주어진다. 이때 ω_s 는 전원의 각주파수이다.

$$Z_m = R_o + jX_m \quad (11)$$

$$X_L = \omega_s L_i \quad (12)$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega_s C_d} \quad (13)$$

$$X_m = \omega_s L_m - \frac{1}{\omega_s C_m} \quad (14)$$

$X_o = X_m + X_c$ 라 하고 식 (11)를 식 (10)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} Z_o &= \frac{(R_o + jX_m) \cdot jX_c}{R_o + j(X_m + X_c)} \\ &= \frac{(-X_m X_c + jR_o X_c)(R_o - jX_o)}{R_o^2 + X_o^2} \\ &= \frac{(R_o X_c (X_o - X_m)) + j(R_o^2 X_c + X_m X_c X_o)}{R_o^2 + X_o^2} \end{aligned} \quad (15)$$

가 된다. 따라서 직렬 인덕터 L_i 를 포함한 전원측에서 본 등가 임피던스 Z_T 는

$$\begin{aligned} Z_T &= Z_o + jX_L \\ &= \frac{\{R_o X_c (X_o - X_m)\}}{R_o^2 + X_o^2} \\ &\quad + \frac{j\{R_o^2 X_c + X_m X_c X_o + (R_o^2 + X_o^2) \cdot X_L\}}{R_o^2 + X_o^2} \end{aligned} \quad (16)$$

가 된다

모터의 각 정수들이 일정한 상태에서 인버터에서 공급되는 전압의 주파수 f_s 를 식 (3)으로 표시되는 모터의 기계적 공진주파수 f_m 와 일치되도록 하면 C_m 과 L_m 이 완전공진의 상태에 있게 되어 C_m 과 L_m 의 임피던스는 상쇄되므로 이때에 L_i 를 포함한 전원측에서 본 등가 임피던스 Z_T' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_T' = \frac{R_o X_c^2 + j\{R_o^2 (X_c + X_L) + X_c X_L\}}{R_o^2 + X_c^2} \quad (17)$$

모터에 가해지는 전력이 최대가 되기 위해서는 식 (17)에서 허수부가 0이 되어야 하므로 기계적 공진 각

주파수를 ω_m 이라 할 때 $\omega_m \neq 0$ 이면서 $R_o^2 + X_c^2 \neq 0$, $R_o^2(X_c + X_L) + X_c X_L = 0$ 조건을 만족하는 L_i 를 구하면

$$L_i = \frac{R_o^2 X_c}{\omega_m (R_o^2 + X_c^2)} \quad (18)$$

이 된다. 따라서 식 (18)은 전원에서 초음파 모터측으로 최대의 전력을 전달할 수 있는 외부 인덕턴스 값이 된다.

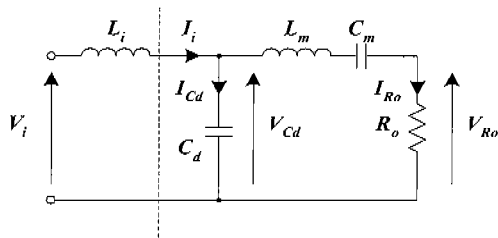


그림 2 공진인덕터를 포함한 간략화된 초음파 모터의 등가회로
Fig. 2 Simplified equivalent circuit model of ultrasonic motor including resonant inductor

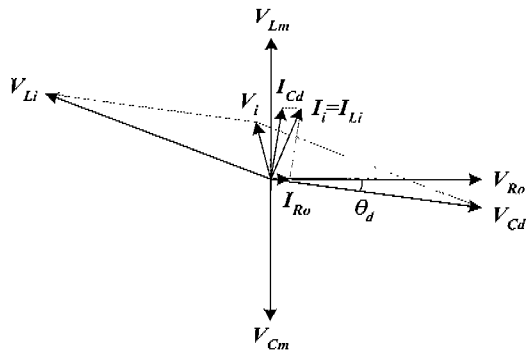


그림 3 공진 인덕터를 고려한 초음파 모터 한상의 벡터도
Fig. 3 Vector diagram of one phase of ultrasonic motor considered with resonant inductor

2.2 직렬 인덕터가 전체시스템에 미치는 영향 고찰

초음파 모터 구동 시스템에서 직렬 인덕터가 모터에 미치는 영향을 알아보기 위하여 등가회로에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모터 내부의 파라미터 값은 표 2와 같으며 이때에 식 (18)에 의하여 구해진 외부 인덕터의 값은 1.236mH이다.

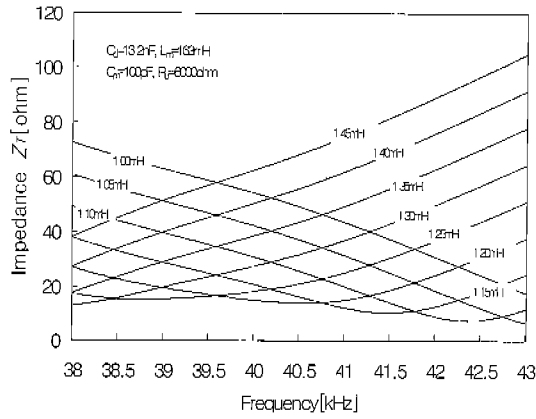
인덕터의 크기를 1.0mH부터 1.45mH까지 0.05mH

간격으로 변화를 주었을 때 모터 입력측의 특성을 그림 4에 나타내었다. 그림 4-(a)는 외부 인덕턴스가 변화하였을 때 인덕터를 포함한 모터측의 합성 임피던스의 추이를 전원 주파수의 변화에 따라 나타낸 것이다. 초음파 모터의 운전주파수 영역이 39kHz에서 42kHz 정도이고 모터의 고유 공진주파수가 약 40kHz 부근임을 감안할 때 운전주파수 전 영역에서 모터측의 임피던스가 균등하게 최소로 되기 위한 외부 인덕터는 약 1.2mH 정도가 적당함을 볼 수 있다. 그림 4-(b)는 그림 4-(a)와 동일조건하에서 모터의 입력측 위상변화를 나타낸 것이다. 그림 4-(a)에서와 마찬가지로 모터의 운전영역과 고유 공진주파수를 고려할 때 입력역율이 최대가 되기 위한 외부 인덕터의 크기는 약 1.2mH 정도임을 알 수 있다. 그림 4-(c)에는 인버터 출력 전압의 기본파 성분의 실효값이 20V일 때 외부 인덕턴스의 조건에 의한 입력 전력의 크기를 나타내었다. 모터의 동일운전 조건에서 최적의 효율을 얻기 위해서는 인덕턴스의 범위가 1.2~1.25mH 사이로 선정되어야 함을 알 수 있다.

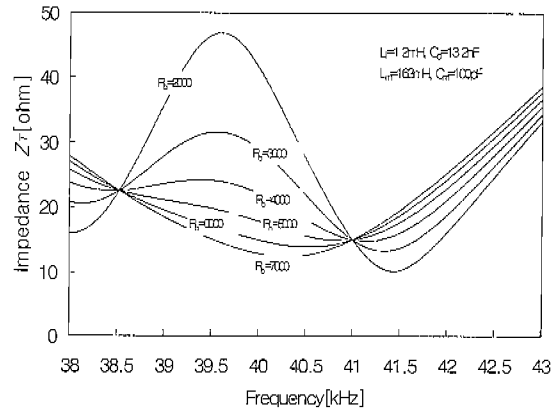
그림 5는 외부 인덕턴스의 크기를 1.2mH로 고정하였을 때 부하의 변화 및 손실변화에 의한 내부 등가저항의 변동을 고려한 모터의 특성을 나타낸 것이다. 그림 5-(a)와 5-(b)는 부하의 변화 또는 손실증가 등에 의하여 내부 등가저항이 변화할 때 전체 임피던스의 상태 및 위상의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5-(c)에서 보면 등가저항이 낮아질수록 입력전력은 모터의 공진주파수 영역 밖에서 커지게 되는 경향이 있는데 이것은 모터의 임피던스 위상각이 공진지점이 아닌 곳에서 변화의 폭이 심하게 나타나고 이에 따라 모터에 공급되는 유효전류가 점차 감소하기 때문이다. 그림 5-(d), 5-(e) 및 5-(f)는 외부 인덕턴스의 크기가 1.2mH이고 모터의 연속운전으로 온도가 상승되어 각 파라미터의 상태가 변화되었을 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행한 것이다. 파라미터의 변동폭은 캐패시턴스와 인덕턴스가 각각 5% 증가와 감소하였을 경우를 가정하였으며 내부 등가저항은 앞서와 동일하다.

표 2 시뮬레이션에 사용된 모터 파라미터
Table 2 USM parameters used in simulation

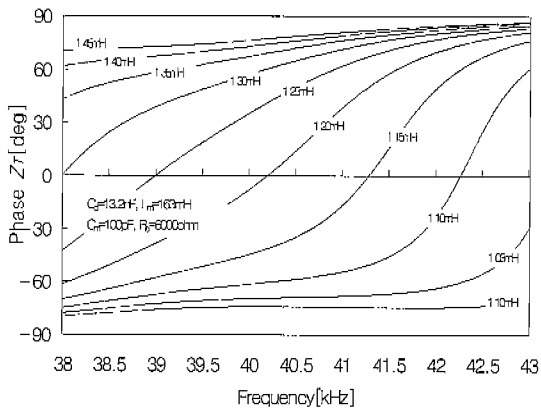
C_d	13.2[nF]
C_m	100[pF]
L_m	163[mH]
R_o	6000[Ω]



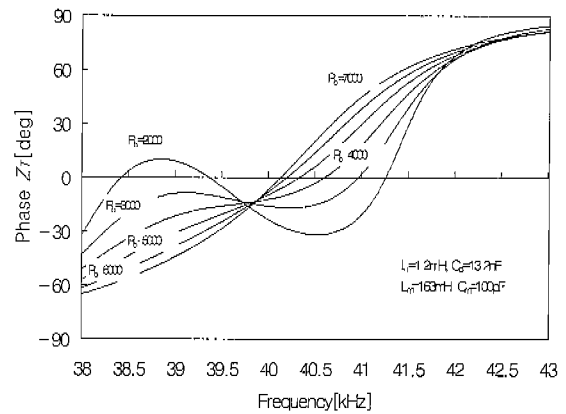
(a)



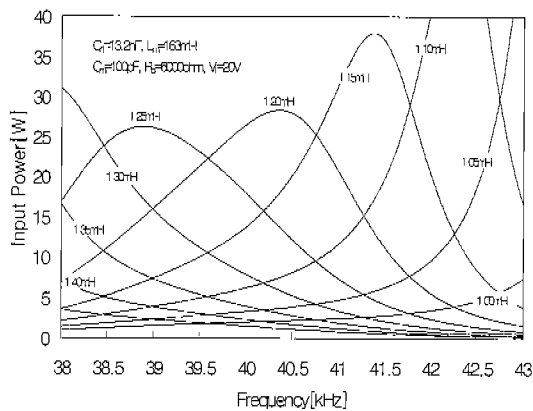
(a)



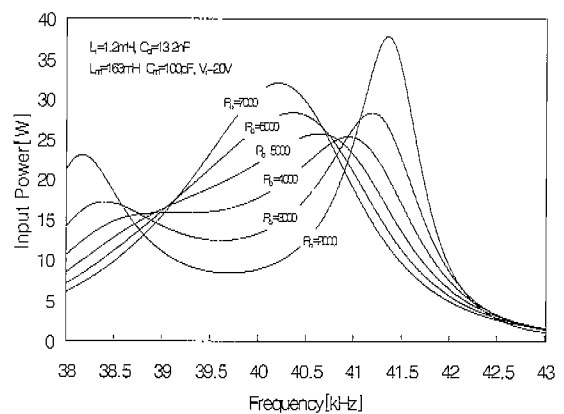
(b)



(b)



(c)



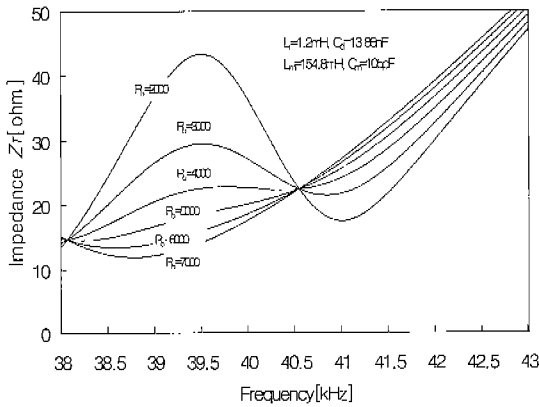
(c)

그림 4 외부 인덕터의 변화에 따른 모터의 특성 (시뮬레이션)

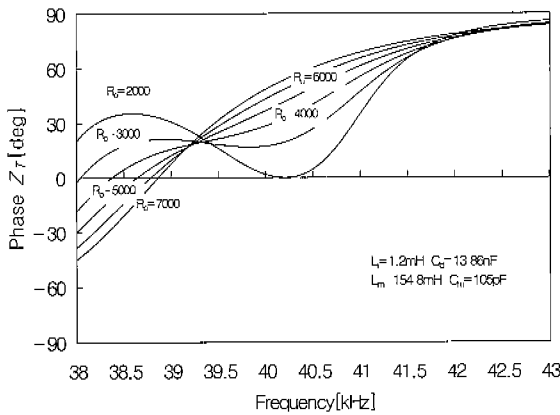
Fig. 4 Characteristics of USM on the varying external inductor(simulation)

그림 5 부하 임피던스의 변화에 따른 모터의 특성 (시뮬레이션)

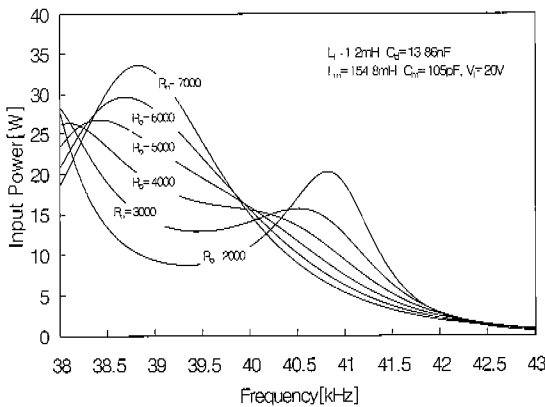
Fig. 5 Characteristics of USM on the varying load impedance(simulation)



(e)



(f)



(g)

그림 5 부하 임피던스의 변화에 따른 모터의 특성 (시뮬레이션)
 Fig. 5 Characteristics of USM on the varying load impedance(simulation)

3. 외부 인덕터의 변화에 따른 초음파 모터의 운전특성 실험

3.1 실험장치의 구성

외부 인덕터 변화에 대한 진행파형 초음파 모터의 특성 조사를 위해 그림 6과 같이 시스템을 구성하였다. 제어를 위한 마이크로 콘트롤러는 Intel사의 단일 칩 마이크로 콘트롤러인 80C196KC를 사용하였으며 16MHz의 클럭으로 동작된다. 호스트 장치(PC)로부터 초음파 모터 제어장치에 제어프로그램을 다운로드(download) 할 수 있도록 하기 위하여 RS-232C 직렬 통신 하드웨어를 구성하였으며 이를 이용하여 운전중 발생하는 각종 파라미터를 실시간으로 호스트에 저장할 수 있도록 하였다. 마이크로 콘트롤러로부터 계산된 주파수/위상차 데이터는 데이터 버스를 통해 주파수/위상차 제어기에 전달된다. 이와 함께 오실로스코프상에서 실시간으로 파라미터 관측을 하기 위하여 4 채널의 12 bit DAC를 사용하였다.

그림 7은 진행파형 초음파 모터의 구동을 위한 부하 직렬 공진형 인버터 장치를 나타낸 것이다. 회로의 구성은 2상의 독립적인 전원을 모터에 공급하기 위해 2-phase half bridge 형태로 하였으며 전력용 스위치 소자로는 MOSFET[IRFP250]을 사용하였다. 게이트 구동은 포토 커플러에 의하여 절연된 +15V와 -5V 전원을 사용하여 제어기에 연결된다. 실험에서는 SHINSEI사에서 제작한 USR-60 진행파형 초음파 모터를 사용하였다.

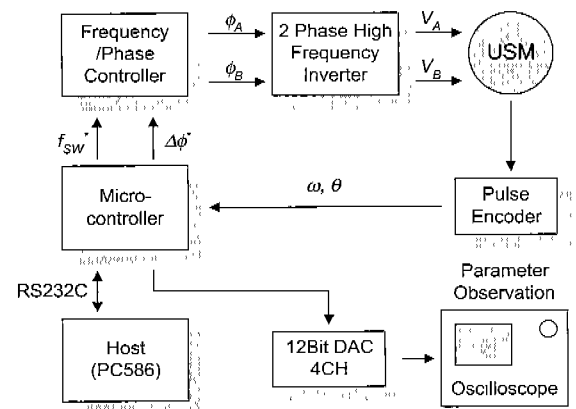


그림 6 초음파 모터 제어 시스템의 구성
 Fig. 6 Configuration of ultrasonic motor drive system

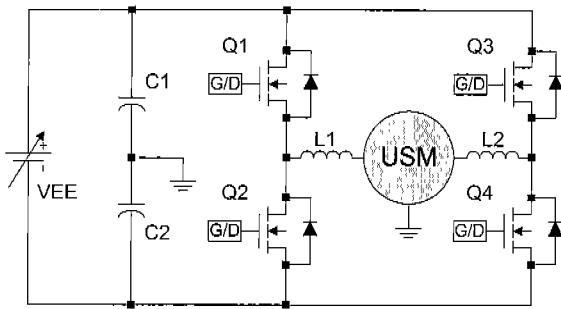


그림 7 초음파 모터 구동을 위한 부하 공진형 2상 half-bridge 인버터
 Fig. 7 A two phase half bridge series resonance type inverter for the ultrasonic motor drive

3.2 외부 인덕턴스 변화에 의한 모터의 운전 특성

외부 인덕턴스 변화에 의한 초음파 모터의 운전특성을 조사하기 위하여 1.0mH-1.6mH까지 0.05mH 단계별로 인덕터를 제작하여 실험을 실시하였다. 모터의 운전은 최대 속도를 얻기 위하여 외부 인덕터의 조건에 무관하게 두 상간의 위상차는 $\pi/2$ 로 고정하였으며 운전주파수의 범위는 38kHz에서 43.5kHz로 설정하였다.

그림 8은 모터의 구동 주파수를 허용범위 내에서 변경하였을 때에 직렬 인덕터 값의 변화에 따른 모터의 속도파형 변화를 조사한 것이다. 모터에 가해지는 주파수의 변경은 높은 주파수 대역에서 기동하여 낮은 주파수 대역으로 변경하였을 때와 반대로 낮은 주파수 대역에서 기동하여 높은 주파수 대역으로 변경하였을 때의 두 가지로 분리하여 실시하였다. 실험 결과 외부 인덕터의 값이 1.0mH-1.1mH 정도로 낮은 경우 정상적인 모터의 운전 주파수 영역에서는 거의 모터가 회전하지 않았으며 높은 주파수 영역에서만 매우 저속으로 회전하였다. 이것은 시뮬레이션에서 나타난 바와 같이 인덕턴스가 낮으면 전체의 임피던스가 모터의 운전 주파수 영역에서는 높게 나타나고 입력력의 역을 또한 0에 근접하여 모터에 효율적인 전력이 공급되지 않기 때문이다. 그림 8-(a)와 8-(b)는 외부 인덕터가 각각 1.15mH와 1.2mH인 경우로 모터의 최대속도 운전이 가능하였으며 주파수 변화에 따른 속도변화의 선형성이 가장 양호하다. 그림 8-(d)는 외부 인덕터를 1.4mH로 운전한 경우이며 인덕턴스가 작은 경우에서와 마찬가지로 입력 임피던스가 높고 역율이 낮아서 정상적인 모터의 제어가 원활하지 못하였다.

그림 9는 외부 인덕턴스가 1.15~1.3mH일 때에 초음파 모터의 연속운전으로 인한 온도 상승시에 초음파 모터의 회전속도 변화특성을 나타낸 것으로 모터의 온도가 충분히 낮아졌을 때에 기동을 시작하여 초기 데이터를 추출하고 5분 연속운전 후 및 10분 연속운전 후에 데이터를 추출하는 방식을 취하였다. 초음파 모터의 부하로는 120[W] 직류전동기를 사용하여 역토크가 발생하도록 하였고 이때 직류전동기에는 4.8V/3A의 입력전압 및 전류가 가해진다.

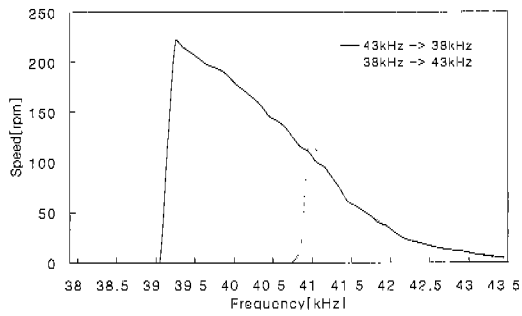
연속운전에서 공통적인 특징은 온도상승으로 인하여 모터의 기계측 고유 공진주파수가 낮은 쪽으로 이동하기 시작하며 10여분이 경과한 후에는 상태변화한계점에 도달하였다. 이때의 공진주파수는 초기 운전 시보다 약 300~400Hz 감소된 위치로 이동한 것이 관측되었다.

그림 10, 11은 외부에 삽입된 인덕턴스가 1.15~1.3mH이며 무부하 및 부하 운전시 각각의 경우에 대한 초음파 모터의 속도에 대한 입력전력의 크기를 나타낸 것이다.

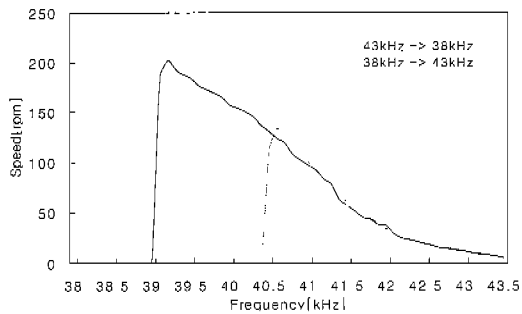
실험 결과 동일속도에 대한 전력의 소모는 외부 인덕터의 크기가 클수록 증가하였으며 시뮬레이션과는 달리 공급 주파수가 높고 모터의 속도가 낮은 경우에도 소모전력이 증가하였다. 이것은 공급주파수에 대한 L_m , C_m 의 영향으로 인하여 주파수에 따라 임피던스의 크기가 서로 크게 차이가 나게 되어 회로가 단락상태가 되기 때문으로 추정된다. 따라서 이 상태에서는 모터의 운전 조건이 상실되므로 고정자의 타원운동에 의하여 더 이상 모터가 회전하지 않으며 손실만 증가한다.

부하운전시 모터속도에 대한 입력전력의 소모량은 외부 인덕터를 1.15~1.2mH로 선정하였을 때가 1.25~1.3mH로 선정하였을 때 보다 최대속도지점에서 약 13W 이상의 차이가 발생하며 이때의 속도는 약 170~180[rpm]으로 관측되었다. 전력소모량이 적은 41kHz 부근에서는 약 3[W]정도의 차이가 발생하였으며 속도의 변화는 50~80[rpm]으로 관측되었다.

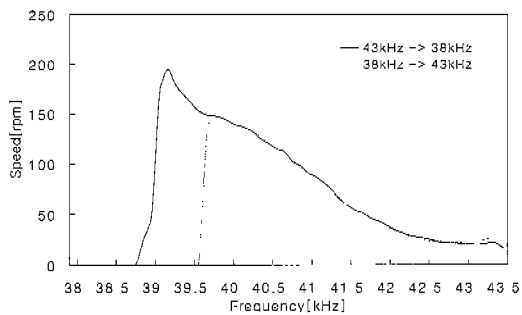
무부하 및 부하의 경우 모두에서 입력전력의 크기 증가에 대한 속도의 변화는 선형적으로 증가하지 않는다. 한편 효율적인 모터의 운전을 위해서는 외부 인덕터의 크기는 온도변화의 영향으로 인하여 연산에 의하여 구해진 값보다 약 0.05mH 낮은 1.15~1.2mH가 되어야 함을 확인하였으며, 인가전압의 동작주파수는 공진주파수보다 약간 높은 40~41kHz 부근에서 운전이 필요하다.



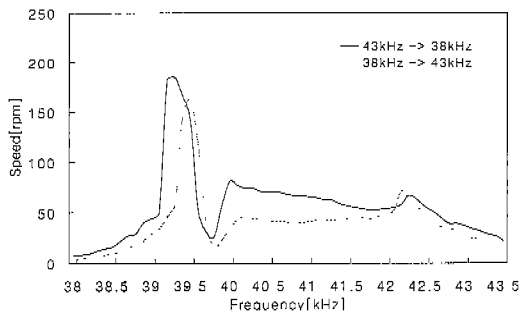
(a) $L_i = 1.15$ mH



(b) $L_i = 1.2$ mH

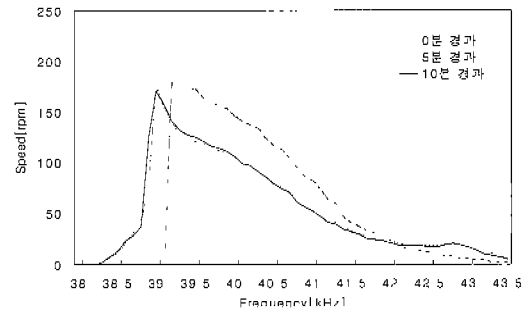


(c) $L_i = 1.25$ mH

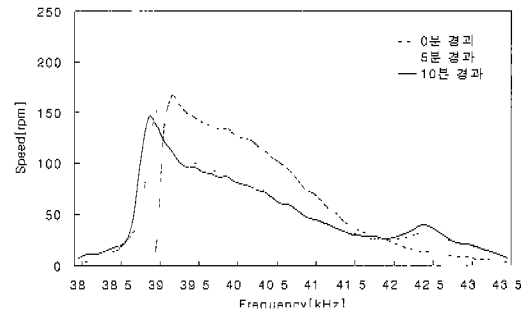


(d) $L_i = 1.4$ mH

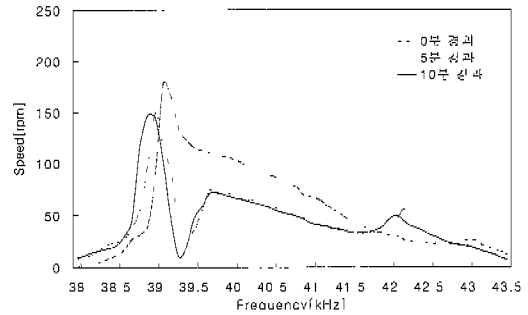
그림 8 외부 인덕터의 변화에 따른 모터의 속도특성
Fig. 8 Speed characteristics of USM with various external inductors



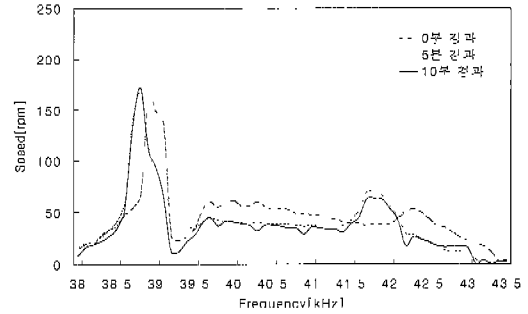
(a) $L_i = 1.15$ mH



(b) $L_i = 1.2$ mH

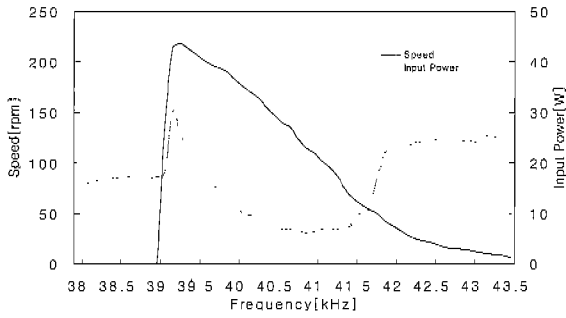


(c) $L_i = 1.25$ mH

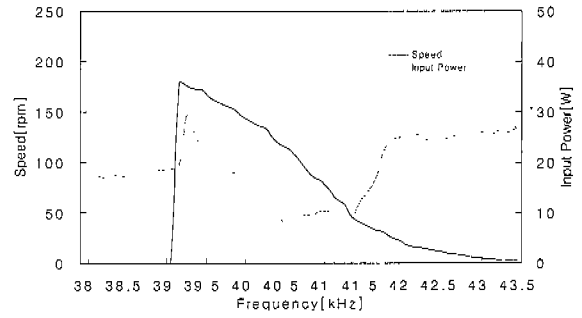


(d) $L_i = 1.3$ mH

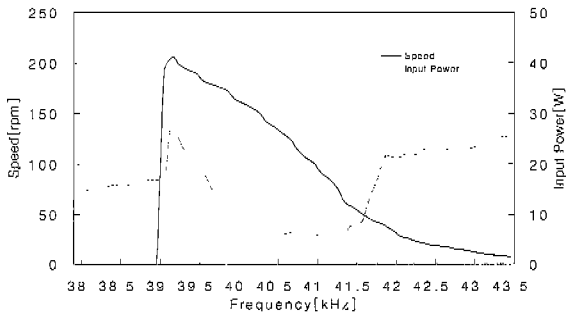
그림 9 동작시간 변화에 따른 모터의 속도특성
Fig. 9 Speed characteristics of USM with varying drive time



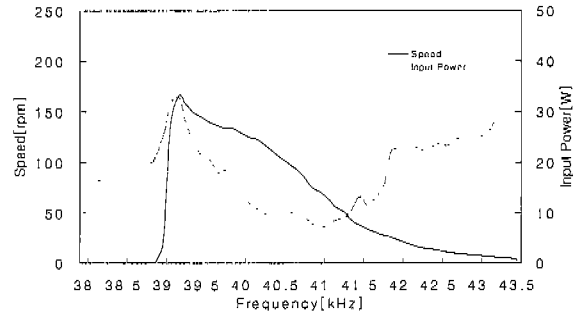
(a) $L_i = 1.15$ mH



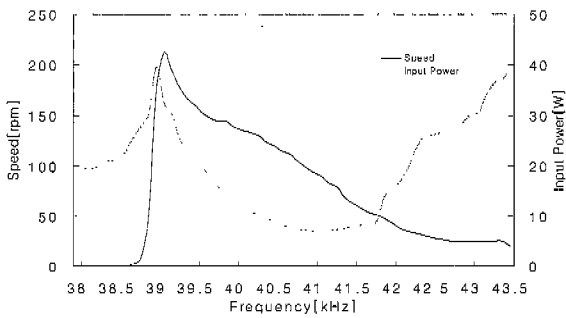
(a) $L_i = 1.15$ mH



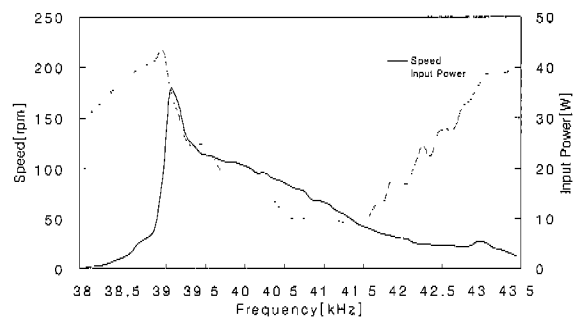
(b) $L_i = 1.2$ mH



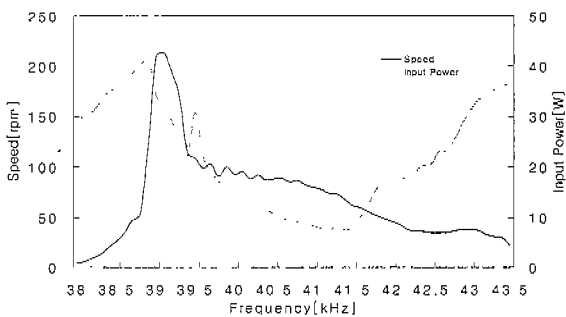
(b) $L_i = 1.2$ mH



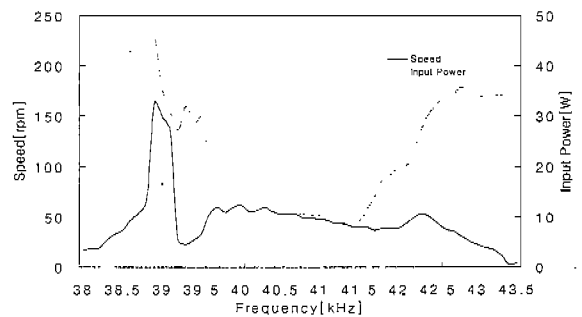
(c) $L_i = 1.25$ mH



(c) $L_i = 1.25$ mH



(d) $L_i = 1.3$ mH



(d) $L_i = 1.3$ mH

그림 10 무부하시 모터의 속도 및 입력전력

Fig. 10 Speed vs. input power curves of USM with no-load

그림 11 부하시 모터의 속도 및 입력전력

Fig. 11 Speed vs. input power curves of USM with loads

4. 결 론

진행파형 초음파 모터의 구동에 사용되는 부하직렬형 공진형 인버터 시스템은 외부 인덕턴스를 모터에 직렬로 삽입하여 모터의 기생 캐패시턴스와 공진을 발생시켜 필요한 정현파 전압을 발생시킨다. 본 논문에서는 진행파형 초음파모터의 동작회로에 공진을 위한 외부 인덕터를 포함시켜 모터측의 동작회로를 해석하였으며 모터에 최대의 유효전력을 전달하기 위한 외부 인덕터의 조건을 유도하였다. 또한 해석결과를 바탕으로 외부 인덕턴스가 모터의 상태에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였으며 실험에서는 단계별 인덕터를 준비하여 모터의 주파수, 속도 및 효율의 변화를 세밀히 조사하였다. 실험결과 시뮬레이션에서와 마찬가지로 외부 인덕턴스의 영향에 의하여 모터의 운전 패턴이 여러 형태로 관측되었으며 제안된 외부 인덕턴스 선정식에 의하여 구해진 외부 인덕터를 사용한 경우에 모터의 최적운전 특성을 얻을 수 있었다. 한편 시뮬레이션에서와는 달리 주파수변화에 따른 입력전력의 분포는 고유 공진주파수에서 최대가 될 뿐만 아니라 모터의 속도가 매우 낮은 높은 주파수영역에서도 다시 상승함이 관측되었다. 이것은 모터의 운전조건이 상실되어 고정자에서 발생하는 타원운동에 의하여 더 이상 모터가 회전하지 못하게 되었음을 의미하며 압전세라믹에서의 손실이 급격히 증가하기 때문으로 추정된다.

참 고 문 헌

[1] T. Sashida, T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Clarendon Press. Oxford. 1993.
 [2] S. Ueha, Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors: theory and applications", Clarendon Press. Oxford. 1993.
 [3] Y. Izuno, et al., "High Performance and High Precision Ultrasonic Motor-Actuated Positioning Controller", Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1269-1274, 1994.
 [4] S. Furuya et al., "Load-Adaptive Frequency Tracking Control Implementation of Two-Phase Resonant Inverter for Ultrasonic Motor", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No. 3, pp. 542-550, July 1992.

[5] Y. Izuno, et al., "New Servo Control Schemes of Ultrasonic Motor using Fuzzy Reasoning", Proc. of IEE Jpn.-Industry Appl. Soc, pp. 221-226, 1990.
 [6] A. Kato et al., "Compliant Motion of Ultrasonic Motor by Phase Difference Control", Trans. Soc. Instrum. Control Eng., Vol. 27, No. 11, pp. 1290-1295, 1991.
 [7] A. Kato et al., "Adjustable Compliant Motion of Ultrasonic Motor", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 5, No. 5, 1993.
 [8] Y. Izuno et al., "Software-Based Adjusting PI Gain Controller for Speed Tracking Servo System using Travelling-Wave Type Ultrasonic Motor", Proceedings of IEE-PEVD, No. 399, pp. 554-561, Oct. 1994.
 [9] T. Senjyu et al., "Adjustable Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control", IEEE, Trans. PE., Vol. 10, No. 5, pp. 532-538, 1995.
 [10] F. Lin, L. Kuo, "Driving Circuit for Ultrasonic Motor Servo Drive with Variable Structure Adaptive Model-following Control", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 144, No. 3, pp. 199-206, May 1997.

< 저 자 소개 >



이을재(李乙宰)

1963년 8월 1일생. 1989년 호서대 전자공학과 졸업. 1991년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1998년 인하대 공대 전기공학과 박사과정수료. 1991년~1996년 (주)칭계기전 기술연구소 연구실장. 현재 이경산전(주) 대표이사.



김영석(金榮石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 선임연구원 실장. 현재 인하대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 조사이사.