

## 초음파 모터의 정량적 최대효율 구현

이 영대, 이 올재, 김 영석  
인하대학교 전기공학과

### A High efficient realization for quantity of ultrasonic motor

Young-Dae Lee, Eul-Jae Lee, Young-seok Kim  
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

**Abstract** - The traveling wave type ultrasonic motor(USM) has no electro-magnetic circuits(coil or core). The driving principle of the USM is based on high-frequency mechanical vibrations and frictional force. The USM, thus, is fed by two-phase high - frequency sinusoidal inverter using its series resonant parasitic components. For the using of series resonant type inverter, it should be needed to a USM parasitic capacitance and a proper inductor chosen. In this paper, the values of optimal inductance are designed and the efficiency of USM drives is achieved. The effectiveness of the proposed design is demonstrated by experiments.

#### 1. 서 론

초음파 모터는 기존의 전자기식 모터와는 달리 자기회로 즉, 철심과 코일이 없는 새로운 형태의 소형모터로 압전세라믹소자(Piezoceramics)의 진동에 의해 발생하는 초음파 영역의 기계적 진동을 이용하여 고정자와 회전자 사이의 마찰에 의해 회전을 한다. 그 장점으로는 구조의 단순성, 형태의 다양성, 자기장의 영향에 무관하고, 초음파 영역의 진동을 이용하기에 소음이 적다. 모터의 회전속도는 기존 모터의 약 10분에 1 정도에 불과하나 동일조건하에서 구동토크와 정지토크(holding torque)가 매우 크기에 저속에서 고토크를 얻고자 할 때 매우 유용하게 사용되고 있다[1-2]. 초음파 모터의 이러한 특성에 따라 액추에이터(actuator)등에 이를 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 마찰력을 이용한 모터의 특성상 교류의 비선형성이 매우 강하기 때문에 이를 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다[3-5].

초음파 모터를 구동하기 위해서는 위상차를 갖는 40KHz정도의 2상의 정현파 전원이 필요하다. 이를 얻기 위해 현재 일반적으로 사용하는 방법으로는 인버터(Inverter)를 사용하여 구형파 전원을 발생시킨후 이를 직렬로 연결된 인덕터(Inductor)와 초음파 모터 내부의 기생 캐패시턴스(Capacitance)에 의한 공진을 발생시켜 정현파 전원이 모터에 공급되도록 하는 방법이다. 이러한 공진형 인버터를 사용하기 위해서는 외부에 알맞은 인덕터의 삽입을 필요로 하는데 이를 적절하게 설계하므로써 초음파 모터의 전기적 공진주파수를 초음파 모터의 기계적인 공진주파수의 근처에 오도록 할수있고 이때에 초음파 모터는 높은 토크를 발생하게 된다.

한편 초음파 모터는 운전시간의 경과에 따라 모터 자체의 기계적인 공진 주파수가 변화하게 된다. 이런 특성을 보상하기 위해서는 공진주파수 대역이 변경됨을 고려한적절한 인덕터의 설계가 중요하다. 따라서 본 논문에서는 여러 가지 인덕터를 설계하여 초음파 모터의 속도,

전압 및 전력특성을 파악하여 초음파 모터를 가장 효율적으로 운전할 수 있는 최적의 인덕터의 값을 설정하였다.

#### 2. 초음파 모터 특징

##### 2.1 초음파 모터의 동작특성

진행파형 초음파 모터의 내부는 압전소자, 전극, 고정자 및 고정자에 밀착된 회전자로 이루어져 있다. 고정자의 하부에 부착된 압전세라믹 소자에 모터의 기계적 공진주파수 부근의 교류전압을 인가하면 전원의 극성에 따라 탄성체(고정자)의 표면에 상하의 진동이 발생하게 되는데 이러한 진동을 정재파(standing wave)운동이라 한다. 이때 전압의 크기는 같고 위상이 다른 교류전압을 인가하면 상하의 진동이 회전방향을 갖는 타원운동으로 바뀌게 되는데 이를 진행파(traveling wave) 운동이라 한다. 진행파가 발생되고 있는 고정자 상단에 밀착된 회전자에는 타원운동으로 인하여 진행파의 방향과 반대방향으로 마찰력이 작용하게 되므로 회전자는 마찰력이 작용하는 방향으로 회전하게 된다. 모터의 회전방향을 바꾸기 위해서는 진행파의 방향을 바꾸면 되는데 이것은 인가전압의 위상을 반대로 하여줌으로써 가능하다.

##### 2.2 초음파 모터의 등가회로

초음파 모터의 등가회로는 그림 1과 같다. 여기서, F는 구동힘, I는 USM에 공급되는 입력전류, Z는 기계적 임피던스, V는 USM의 인가전압, A는 힘계수, Y<sub>a</sub>는 기생 어드미턴스 및 v는 USM안의 기계적 진동시스템의 속도이다. 그림 1)을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F = -AV + Zv \quad (2-1)$$

$$I = Y_a V + Av \quad (2-2)$$

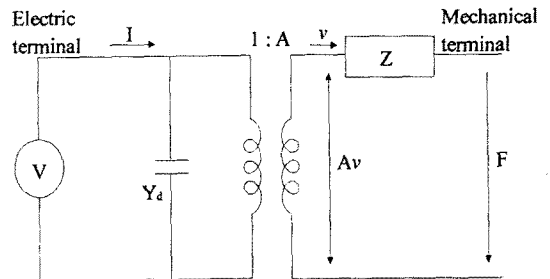


그림 1 초음파 모터의 등가회로

한편, 초음파 모터 고정자 하부의 압전소자 구조는 두 상의 전원이 인가되는 부분이 각각 160°이며 접지상이

30°. 피드백상(feedback phase)이 10°이다. 이 피드백상을 이용해서 초음파 모터의 상태 추정이 가능하다. 식 (2-2)에서 초음파 모터의 피드백상에 발생하는 전압은  $I=0$  에서,  $Y_{dr}V_f + A_f v_f = 0$  가 된다. 이를 다시 쓰면

$$V_f = -\frac{A_f}{Y_{dr}} v_f = -\frac{A_f}{j\omega C_{dr}} v_f \quad (2-3)$$

이 된다. 여기서,  $V_f$ 는 피드백상의 발생전압,  $A_f$ 는 피드백상의 힘계수,  $Y_{dr}$ 는 피드백상의 기생 어드미턴스 및  $v_f$ 는 피드백상안의 기계적 진동시스템의 속도이다. 위의 식에서 초음파 모터의 피드백 단자의 전압은 초음파 모터내의 기계적 진동시스템의 속도  $v_f$ 에 비례하게 된다. 따라서 식 (2-3)에 의해 초음파 모터의 속도상태 추정이 가능하게 된다.

### 3 외부 Inductor 변화에 의한 속도특성 변화

#### 3.1 구동주파수에 따른 속도 특성

일반적으로 초음파 모터의 운전 주파수는 38 - 44[KHz] 정도이며, 또한 공진형 인버터의 L-C 공진 주파수 역시 초음파 모터의 운전 주파수와 비슷해야 한다. 그러므로 인버터의 공진주파수를  $f_r$ 이라 할 때

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_d}} \quad (2-4)$$

이 된다. 여기서,  $C_d$ 는 기생 커패시턴스이다. 초음파 모터의 기생 커패시턴스는 9.5[nf] 이상이므로 외부에 삽입해야하는 인덕터의 값은 식(2-4)에 의해 1.3 - 1.8 [mH] 정도이나 초음파 모터의 기생 커패시턴스는 모터의 운전에 의한 온도상승에 의해서 위의 값보다는 약간 적은값을 갖게된다. 이에 따라 본 논문에서는 인덕터의 값을 1.0 - 1.6[mH] 까지 10단계로 구분을 하여 실험을 실시하였다.

그림 2는 선택된 여러 가지 인덕터의 값에 따른 속도 파형의 변화를 나타내었다. 위 실험의 결과 초음파 모터의 구동주파수를 높은 범위에서 낮은 범위로 운전하였을 때와 낮은 범위에서 높은 범위로 운전하였을 때의 속도 파형에 변화가 있음을 알수있으며, 초음파 모터 자체의 비선형성이 상당히 큼을 알수있다. 선택된 인덕터의 값들 중 초음파 모터의 정격 회전속도인 90RPM 이상으로 회전한 것들은 여러개가 있으나 주파수 변화에 따른 선형성과 회전속도 그리고 모터의 운전이 낮은 주파수 범위에서 높은 주파수 범위로 변경될때의 모터의 운전특성등을 고려하면 적당한 인덕턴스값은 1.15 - 1.3[mH]이며, 이 중에서 가장 특성이 좋은 것은 선행된 실험결과로 나타난 1.2[mH]이다.

초음파 모터의 속도 특성을 살펴보면 인가전압의 주파수가 높은 지점에서는 모터의 회전속도가 느리지만 인가전압의 주파수를 감소시키면 점차 속도가 증가하여 특정 주파수에서 최고 속도에 도달함을 보이고 있다. 이 지점이 모터의 기계적인 공진주파수와 공급전압의 주파수가 일치하였을 때이며 모터의 최대 토크가 발생하게 된다. 공진주파수를 벗어나 인가전압의 주파수를 계속 감소시키면 모터의 속도는 급속히 저하하거나 또는 정지하게 된다. 따라서 주파수제어의 유효범위는 적절한 인덕터 값이 설정 되었을 때 모터의 공진주파수보다 높은 부분으로부터 모터의 최저 속도가 발생하는 구간, 약 39.5 - 42.5KHz 정도로 제한된다

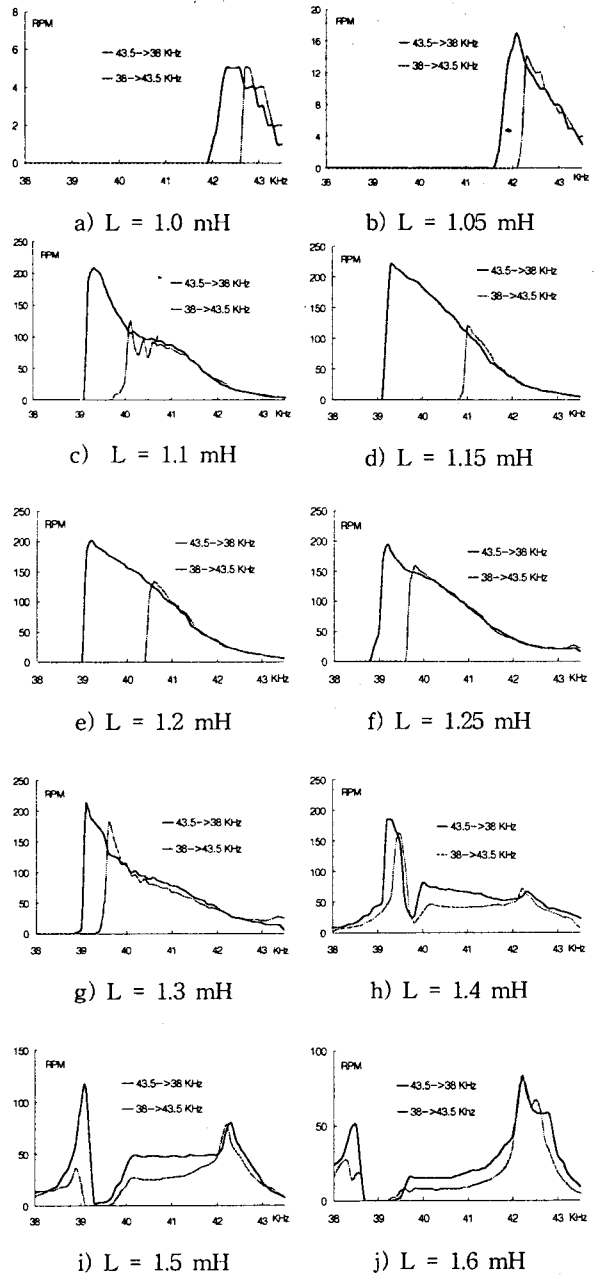


그림 2 선택된 인덕터에 따른 속도파형

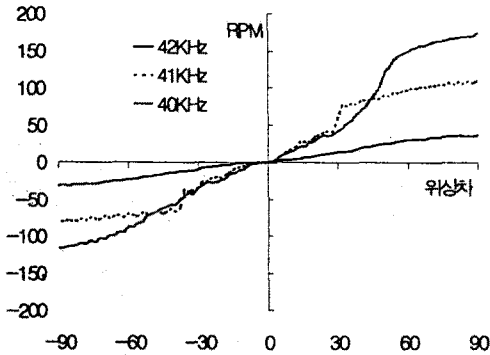
#### 3.2 위상차에 따른 속도특성

그림 3은 인덕터의 값을 1.15 - 1.3[mH]로 하였을 때 위상차에 따른 속도파형을 나타낸 것이다. 인가전압의 위상차를 변화시켰을 때의 속도변화를 살펴보면, 위상의 차이가 0° 부근에서 모터는 정지하며 위상차를 점차 증가시킬수록 모터의 회전속도도 증가하여 위상차가 90° 인 지점에서 최대속도와 최대토크가 발생된다. 그렇지만 그림에 나타난 바와 같이 공급전압의 주파수변화에 따라 모터의 회전속도 변화가 심하며 특히 위상차가 0에 근접할수록 모터에 흐르는 전류가 증가하면서 기계적인 마찰소음이 발생한다. 선택된 인덕턴스 값중에서 위상차에 따른 속도의 선형성과 회전속도를 비교하였을 때 양호한 특성을 나타내는 것은 인덕턴스가 1.2 - 1.25 [mH]일 때이다.

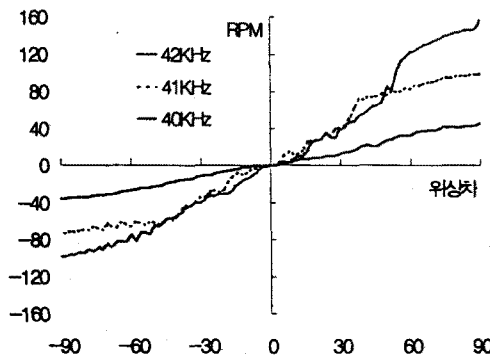
### 3.3 피드백 단자의 전압과 속도파형의 비교

식 (2-3)에서와 같이 초음파 모터의 고정자 하부에 부착된 압전소자 방정식을 이용하여 초음파 모터의 속도 상태를 추정 가능하다. 그림 4는 선택된 인덕턴스의 값에 따른 피드백 단자에서 발생되는 전압파형으로서 초음파 모터의 구동주파수를 높은 범위에서 낮은 범위로, 낮은 범위에서 높은 범위로 이동시의 파형이다.

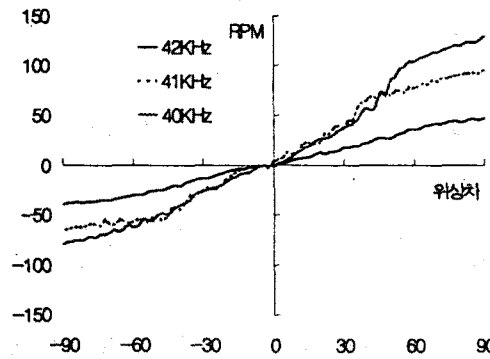
선택된 4개의 인덕터를 사용한 경우 피드백 단자의 전압은 모두 그림 2에 나타난 초음파 모터의 속도상태를 잘 추정하고 있다. 특히 선택된 인덕터중에서 1.2(mH)가 모터의 속도파형과 가장 일치하였다.



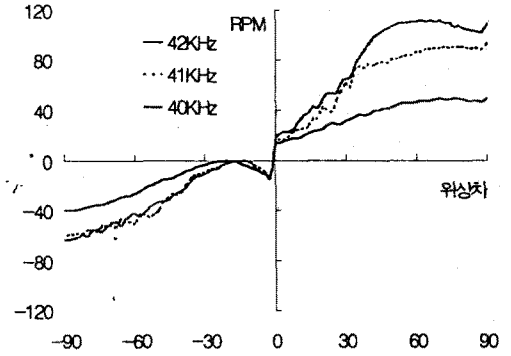
a) 1.15 mH



b) 1.2 mH

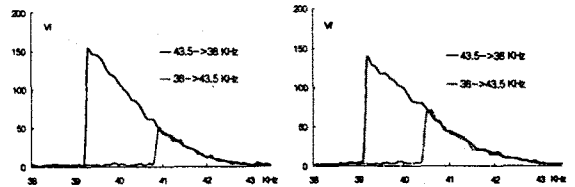


c) 1.25 mH



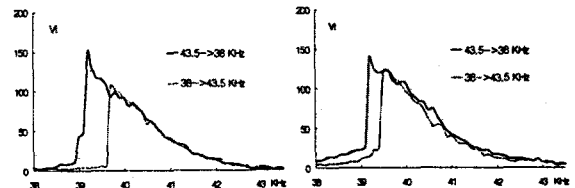
d) 1.3 mH

그림 3 위상차 변화에 따른 속도변화



a) 1.15 mH

b) 1.2 mH

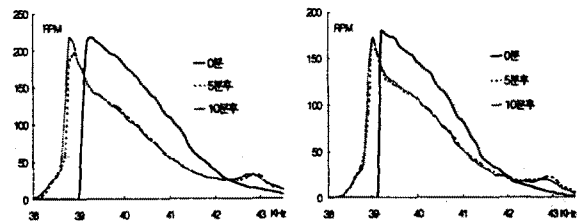


c) 1.25 mH

d) 1.3 mH

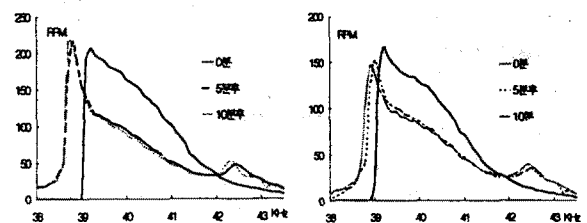
그림 4 피드백 단자의 발생전압

### 3.4 초음파 모터 부하변화에 따른 속도의 변화



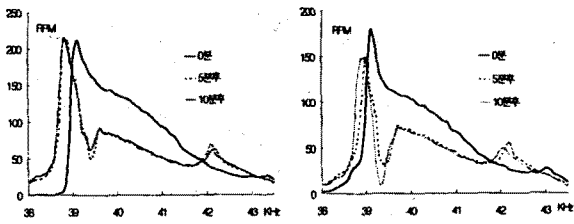
a) 무부하시, 1.15mH

b) 부하시, 1.15 mH



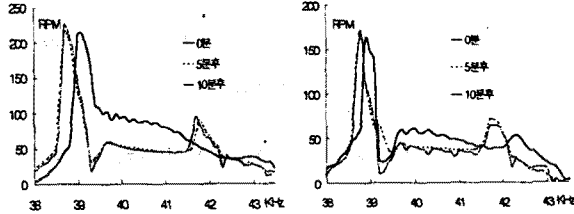
c) 무부하시, 1.2 mH

d) 부하시, 1.2 mH



e) 무부하시, 1.25 mH

f) 부하시, 1.25 mH



g) 무부하시, 1.3 mH

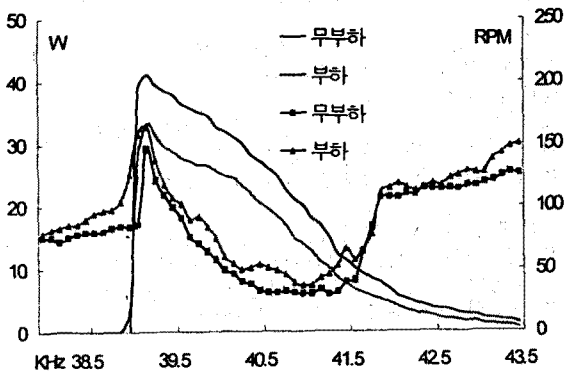
h) 부하시, 1.3 mH

그림 5 무부하/부하 초음파 모터 연속 운전파형

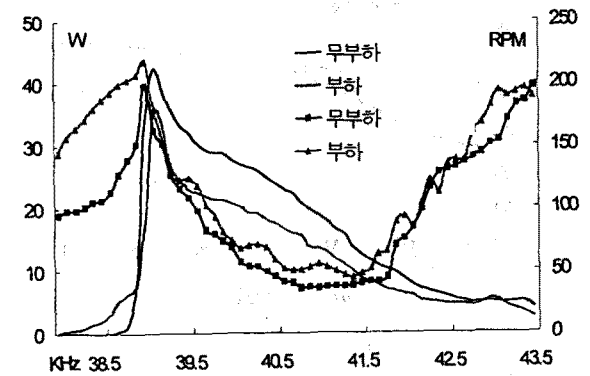
그림 5는 초음파 모터의 연속운전시의 초음파 모터의 공진주파수 변화특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 모터의 운전시간이 경과함에 따라 모터의 공진주파수가 변화하는 것을 알 수 있다. 또한 1.25 - 1.3 [mH]에서는 시간의 경과에 따라 모터의 특성이 그림 2의 h)와 파형이 유사해짐을 알 수 있다. 이것은 초음파 모터의 기계적 공진주파수는 모터의 운전시간의 길어짐에 따라 점점 내려가고 있음을 나타내는 것이다. 그림 5에서도 1.15 - 1.2 [mH]로 선택된 경우 모터의 연속 운전시, 부하 및 무부하에서도 최적임을 알 수 있다. 초음파 모터에 사용된 부하는 120(W) 직류전동기를 초음파 모터의 회전방향과 반대로 하였고 이때 직류전동기로 들어가는 입력전압 및 전류는 4.8V/3A 이다.

### 3.5 초음파 모터의 효율특성

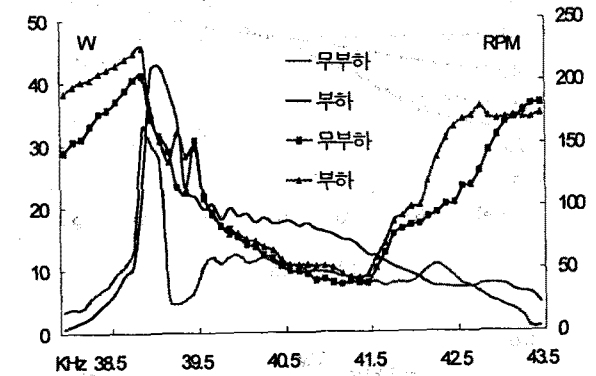
그림 6은 초음파 모터에 인가되는 입력전력(W)의 파형으로서 무부하 및 부하 인가시의 경우이다. 초음파 모터에 인가되는 입력전력은 최대 약 46(W)정도이고 최소는 6(W)정도로 주파수 변동에 따른 입력전력의 차가 심함을 알 수 있다. 선택된 인력터중 효율이 우수한 것은 실험의 결과 1.15 - 1.2[mH]로 하였을 때이다.



b) 1.2 mH



c) 1.25 mH



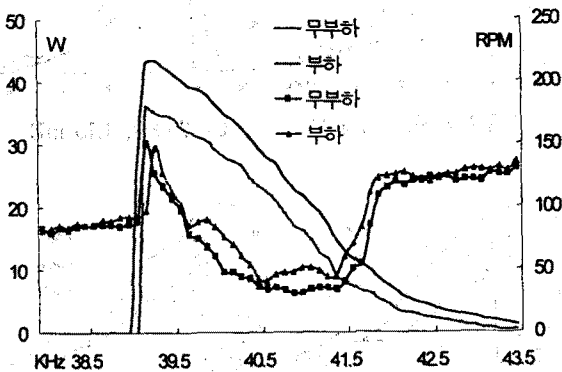
d) 1.3 mH

그림 6 초음파 모터의 효율곡선 (부하 4.8V/3A)

### 3.6 초음파 모터 및 실험장치

실험에 사용된 초음파 모터는 SHINSEI사의 USR-60 진행파형 초음파 모터를 사용하였다. USR-60의 사양은 표 1과 같다.

그림 7은 진행파형 초음파 모터의 구동을 위한 인버터 장치를 나타낸 것이다. 회로의 구성은 2상의 독립적인 전원을 공급하기 위해 2상 반파 브리지 형태로



a) 1.15 mH

하였으며 전력소자로는 MOSFET을 사용하였다. 게이트 구동은 절연된 +15V와 -5V 전원을 사용하였고 포토 커플러에 의하여 제어기에 연결된다.

진행파형 초음파 모터의 구동 실험을 위해 그림 8과 같이 시스템을 구성하였다. 제어를 위한 Micro-Controller는 Intel사의 80C196KC를 사용하였으며 20MHz의 클럭으로 동작된다. host 장치(PC)로부터 USM 제어기에 제어프로그램을 Download 할 수 있도록 하기 위하여 RS-232C 직렬 통신 하드웨어를 구성하였으며 이를 이용하여 운전중 발생하는 각종 파라미터를 실시간으로 호스트에 저장할 수 있도록 하였다. 제어기로부터 계산된 주파수/위상 Data는 Data-bus를 통해 주파수/위상제어기에 전달된다. 이와 함께 오실로스코프상에서 파라미터 관측을 하기 위하여 4 Channel의 12 bit DAC을 사용하였다. 모터의 위치 및 속도 정보는 10000 Pulse/rev 분해능을 갖는 Encoder의 상승과 하강 모두를 검출함으로써 2배의 분해능 효과를 얻도록 하였다.

정격 토크 (kgfcm)	3.2
정격 회전수 (rpm)	90 이상
정격출력 (W)	3 이상
기생 커패시턴스 (nF)	9.5 이상
공진 주파수 (KHz)	약 40
중량 (g)	240
사용 온도 범위 (C°)	-10 - 50

표 1 USR-60 초음파 모터 사양

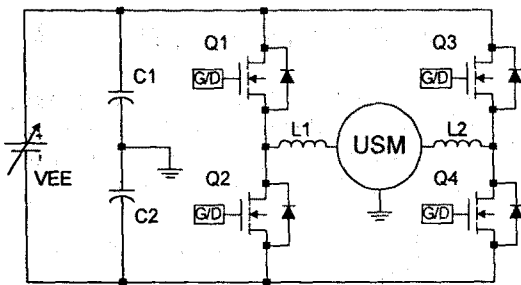


그림 7 2상 half bridge inverter의 주회로 구성

#### 4. 결 론

본 논문에서는 진행파형 초음파 모터(travelling wave type ultrasonic motor:USM)의 최대 효율 구현을 위한 여러 가지 실험을 실시하였다. 먼저 초음파 모터의 동작영역에 적당한 여러 가지 인덕터를 설계하였고 그 중 가장 효율이 좋은 몇 개를 선택하였다. 비선형성이 강한 초음파 모터는 외부에 삽입하는 인덕턴스의 값의 차이에 의해 속도, 입력전력 및 부하 등이 심하게 변동을 하였다. 실험을 통해 선택된 인덕터중에서 초음

파 모터 구동을 위한 최적의 인덕터는 1.2(mH) 이었다. 추후 과제로는 실험을 통해 고찰된 인덕터를 사용하여 비선형성이 강한 초음파 모터에 제어 알고리즘을 적용하는 것과 초음파 모터의 구동에 있어서 필요로 하는 모터의 공진주파수를 온-라인(On-line)으로 추종하는 방법에 대하여 연구를 하고 있다.

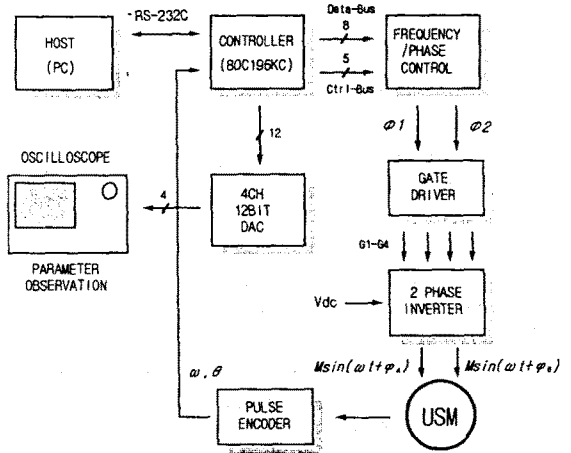


그림 8 초음파 모터 구동 시스템

(참 고 문 헌)

- [1] T. Sashida, T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Clarendon Press, Oxford, 1993
- [2] Y. Izuno et al., "High Performance and High Precision Ultrasonic Motor-Actuated Positioning Controller", Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.1269-1274, 1994
- [3] 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
- [4] Y. Izuno, et al., "New Resonance-Based High Performance Speed/Position Servo Control Schemes Incorporating Ultrasonic Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, No.3, May 1992
- [5] T. Senjyu et al., "Quick and Precise Position Control of an Ultrasonic Motor with Dual Mode Control", Int. J. Electronics, Vol. 80, No.2, pp. 191 - 200, 1996