

工學碩士學位論文

Idle air valve용 PM 스텝 모터의 구동 특성

Drive Characteristics of PM Step Motor for Idle Air Valve

指導教授 金 奎 卓

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함.

1994年 12月 日

昌原大學校 大學院

電氣工學科 電氣工學專攻

李 定 奎

李定奎의 碩士學位 論文을 認定함.

審査委員長 安 鎬 均 (印)

審査委員 朴 泰 坤 (印)

審査委員 金 奎 卓 (印)

1994年 12月 日

昌原大學校 大學院

요 지

본 연구에서는 자동차의 MPFI 엔진의 공기 유량 제어용으로 쓰이는 PM형 스텝 모터를 퍼미언스법에 의하여 설계치로 부터 정특성, 동특성 및 스텝 응답 특성을 해석하였다.

또한, 마이크로 프로세서인 INTEL i8051AH와 IC(L297, L298)를 이용한 구동 회로를 설계, 제작하였으며, 1-2상 여자 방식에 의하여 스텝 모터를 구동시켜 계산치와 실험치를 비교, 검토하였다.

목 차

요 지	
1. 서 론	1
2. 해석 모델 설정 및 특성 해석	3
2.1 해석 모델	3
2.2 정특성 및 동특성 해석	6
2.3 2차계 모델에 의한 1 스텝 응답 특성	12
3. 해석 모델의 구동 특성	16
4. 실험 장치 구성 및 결과 검토	20
4.1 실험 장치 및 구동 회로 구성	20
4.2 계산치와 실험치와 비교 검토	24
5. 결 론	30
참고 문헌	31
Abstract	
부 록	

1. 서 론

각종 산업 분야의 자동화 추이에 따라 이들 시스템을 구동하기 위한 정밀 전동기의 수요는 증가 일로에 있으며 전동기의 종류 또한 세분화, 전문화 되고 있다. 또한 제품 생산의 輕薄短小化, 고신뢰성, 제품의 life cycle 단축 등에 따라 이들의 구동용 전동기도 에너지 밀도가 높은 compact형의 신속한 제품 개발이 요구되고 있다. 또한, 제어 방식도 기존의 유압 기기나 기어, 링크 등을 이용한 메카니즘 제어에서 서어보 전동기를 이용한 전자 제어로 변환하여 생산 단가의 절감 및 메카니즘의 간소화를 이루고 있다. 이에 따라 전자 제어에 필수적인 구동용 전동기인 서보 전동기의 수요는 년 15 - 20[%] 정도의 신장을 거듭할 만큼 기하 급수적으로 증가하고 있다[1, 2]. 위치 제어용 서어보 전동기로 현재 이용되고 있는 전동기는 브러시를 부착한 DC 모터, 브러시리스 DC 모터, 스텝 모터, AC 서보 모터 등이 이용되고 있으나, 스텝 모터는 회전 속도가 입력 펄스 수에 비례하며 타 종류의 모터에 비해 제어가 간단한 이유 등으로 인하여 위치 제어용 전동기로 가장 많이 이용되고 있다. 즉, 동기기의 일종인 스텝 모터는 open-loop로서 정도 높은 위치 제어를 행할 수 있으며 주파수에 비례한 회전 속도로 광범위한 속도 제어 등의 장점이 있어 위치 제어용 actuator로서 괄목할 만한 성장을 이루어 OA, FA 기기에 없어서는 안될 중요한 위치를 확보하게 되었다[3, 4].

그 중 slow - pole을 갖는 PM형 스텝 모터는 구조가 간단하고 견고하며 단체 및 계철이 프레스 가공에 의하여 저가로 가공 할수 있어 프린터 등의 OA 기기, 가전 기기, 자동차용으로서 널리 이용되고 있다[5]. 그러나, 스텝 모터는 본질적으로 스텝 동작을 행하므로 고유 주파수 부근에서 진동, 공진 현상이 발생하여 탈조의 우려가 매우 높아 운전 주파수의 제한을 받으며 관성 부하에 매우 약한 결점이 있

다. 또한, 고속 운전시 권선 인덕턴스의 영향으로 발생 토크의 급격한 저하로 탈조되기 쉬운 결점이 있어 사용 속도 및 부하 토크 등에 대한 충분한 검토가 선행되어야 한다. 그러나, 지금까지의 스텝 모터에 대한 국내 연구는 타 전동기의 경우와 마찬가지로 설계 데이터로 부터 자속 분포 및 토크 등을 계산하는 정도로 선진 외국에 비해 매우 뒤떨어지는 실정이다. 즉, 현재의 국내 수준은 설계치로 부터 정특성을 계산하는 방법과 정특성으로 부터 동특성을 계산하는 방법등 전자기적 현상을 규명하는 기초 연구에 머물러 있는 실정으로 요구하는 특성을 만족하는 설계치를 도출하는 연구는 거의 발표 되지 않아 실제적인 스텝 모터의 해석 및 설계법으로는 불충분하였다.

따라서, 본 연구에서는 자동차 MPFI 엔진의 idle air valve에 사용되는 PM형 스텝 모터를 퍼미언스법을 이용하여 설계치로 부터 정특성, 동특성 및 스텝 응답 특성인 기본특성을 해석하고 간단히 구동 회로를 구성한 후 실험하여 계산치와 실험치를 비교, 검토하였다.

2. 해석 모델 설정 및 기본 특성 해석

2.1 해석 모델

스텝 모터는 구조상 크게 릴럭턴스형, 영구 자석형, 하이브리드형으로 대별 된다. 릴럭턴스형(VR형)은 연철을 기어 모양으로 가공한 회전자와 권선을 실시한 고정자로 이루어지며 전자 흡인력에 의하여 회전자가 회전하는 형이다. 그러나, VR형은 정지 토크가 0이며 관성 부하에 약한 결점이 있어 관성 부하에 의하여 유량을 제어하는 유량 제어용 전동기로는 부적당하다.

한편, 하이브리드형은 영구 자석을 치 모양으로 가공한 회전자와 권선을 실시한 고정자로 구성되어 있어 고정밀도, 고폭토크 등의 장점이 있으나 회전자 치의 가공 및 자동차에서와 같이 진동이 심한 용도에는 기계적 강도, 가격 문제 등으로 거의 사용되지 않고 정밀 제어용의 프린터, FDD, HDD 등과 같은 OA 기기에 널리 이용되고 있으며 자동차의 공기량을 제어하는 유량 제어용 스텝 모터는 가격면과 기계적

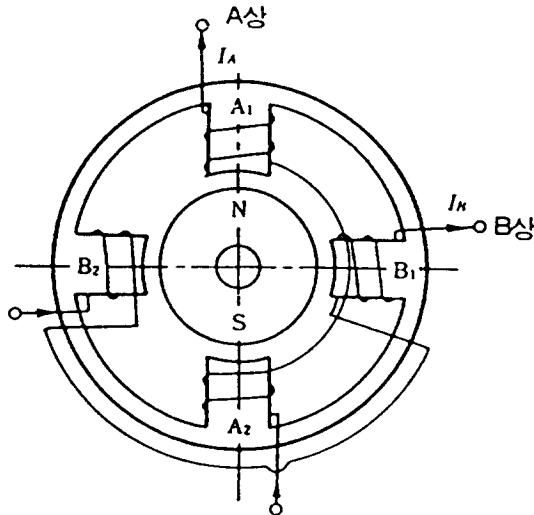


그림 2.1 PM형 스텝 모터

Fig. 2.1 PM type step motor

강도 등으로 인하여 PM형 스텝 모터가 널리 이용되고 있다[1,2]. 따라서, 본 연구에서는 PM형 스텝 모터를 유량 제어용 전동기로 해석하고자 한다. 그림 2.1과 같은 구조의 PM형 스텝 모터는 원주 방향으로 자화된 영구 자석의 회전자와 권선을 감은 고정자로 구성된다. 그림 2.1에서 알 수 있는 바와 같이 스텝각이 작은 고분해능의 스텝 모터를 설계하기 위하여는 상수 및 로우터 치수를 증가시켜야 한다. 그러나 분해능을 증가시키기 위하여 상수를 증가시키면 출력단 power TR의 증가로 시스템의 생산 단가가 고가로 된다. 또한, 고정자 치수를 증가시키면 치의 가공 기술 및 공극 유지가 매우 어려우며 구조가 복잡하게 되고 저주파수에서는 소음, 진동 등에 많은 문제점이 존재한다. 그러므로 고속성, 고효율 및 고분해능을 위해서는 상수 및 치수를 증가시켜야 하나 가격 및 기계적 가공 정도, 저속 영역에서의 소음, 진동, 관성부하 등을 고려하면 상수 및 치수는 가급적 적어야 한다. 따라서, 자동차의 idle air valve용과 같이 저속 운전, 큰 관성 부하, 큰 진동, 위치 정밀도가 그다지 높지않은 용도의 스텝 모터는 자동차의 진동 등을 고려한 기계적 강도, 제작단가 등의 영향으로 인하여 그림 2.2와 같은 clow - pole을 갖는 1-2상 여자 방식의 12극 PM형 스텝 모터가 널리 이용되고 있다[5]. 특히 그림 2.1과 같은 PM형 스텝 모터의 고정자 권선은 기계적인 작업이 곤란하여 수작업으로 인하여 제작 단가가 매우 비싸지는 결점이 있다. 따라서, 제작 단가를 절감하기 위하여 그림 2.2와 같이 각 치에 권선을 시행하지 않고 치 주변에 하나의 큰 권선을 행하는 clow pole형 PM 스텝 모터가 널리 이용되고 있다. 또한, 자동차에 널리 이용되고 있는 clow pole형 PM 스텝 모터는 속응성은 그다지 크지 않으므로 구동 토크 대 홀딩 토크의 비를 크게 하면서 공진 주파수를 피하기 위하여 구동 주파수를 매우 낮게 설정한다.

따라서, 발생 토크를 크게 하기 위하여 turn수를 많이 시행하여도 리액턴스는

크지 않게 된다. 또한, 최대 발생 토크인 holding torque는 1-2상 여자시 100[g.cm] 내외로 설계, 제작하므로 본 연구에서도 이들을 종합적으로 고려하여 표 2.1과 같은 유량 제어용 스텝 모터를 해석하고자 한다[3,5].

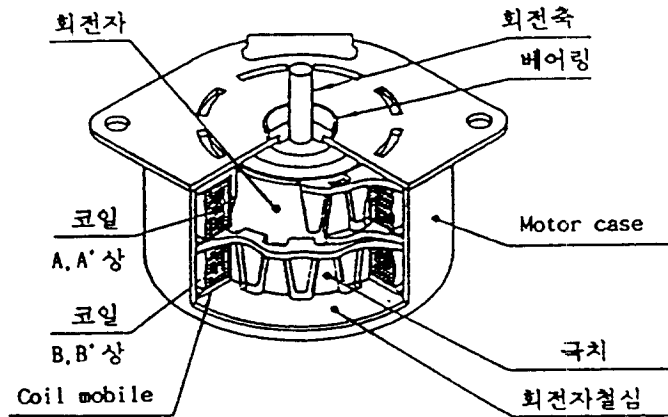


그림 2.2 Clow - pole형 PM 스텝 모터
Fig. 2.2 Clow - pole type PM step motor

표 2.1 해석모델의 사양

입력전압	12 [V]	관 성	2.0 [g.cm ²]
극 수	12	구동토크	0.7 이상
구동방식	1-2상여자방식	홀딩토크	100 [g.cm]
턴 수	620 [Turn]	입력전류	250 [mA]이하
영구자석	페라이트	홀딩토크	100 [g.cm]
저 항	58 [Ω]	스텝 각	7.5 [°/step]
		인덕턴스	106.6 [mH]

2.2 정특성 및 동특성 해석

스텝 모터는 본질적으로 스텝 동작을 행하므로 고유 주파수 부근에서 진동, 공진 현상이 발생하여 탈조의 우려가 매우 높아 운전 주파수가 제한을 받으며 관성 부하에 매우 약한 결점이 있다. 또한, 고속 운전시 권선 인덕턴스의 영향으로 발생 토크의 급격한 저하로 탈조되기 쉬운 결점이 있어 사용 속도 및 부하 토크 등에 대한 충분한 검토가 선행 되어야 한다.

즉, 사용 목적에 부합되는 스텝 모터를 설계하기 위하여는 회전자의 위치 변화에 따라 발생하는 토크 특성(이때의 최대토크를 holding torque라 함)인 스티프니스 특성과 주파수에 따른 발생 토크의 변화를 나타내는 동특성, 1 스텝 입력에 대한 회전자의 운동(회전각, 각속도)을 나타내는 1 스텝 응답 특성등 기본 특성에 대한 정도 높은 해석이 선행되어야 한다. 따라서, 본 장에서는 설계치로부터 정특성인 스티프니스 특성, 동특성, 1 스텝 응답 특성을 해석하고자 한다.

그림 2.2에 나타낸 바와 같이 자동차의 idle air valve용 스텝 모터는 전기자의 齒數는 통상 극수와 같게 설계, 제작하며 고조파 자속중 가장 두드러진 3 고조파 성분도 통상 기본파의 10[%] 정도이므로 이를 무시하면 비돌극형 동기 전동기로써 PM 스텝 모터를 모델화 할 수 있다[6,7]. 따라서, 전기자 권선의 저항을 R , 각 권선의 쇄교자속을 λ_a, λ_b 라 하면 각 상의 전압 방정식은

$$\begin{aligned} V_a &= RI_a + d\lambda_a / dt \\ V_b &= RI_b + d\lambda_b / dt \end{aligned} \tag{2.1}$$

이다. 각 권선의 자기 인덕턴스를 L 이라 하면 계자 자속과 권선과의 전체 쇄교자속은,

$$\lambda_a = LI_a + \Phi_m \cos\theta \quad (2.2)$$

$$\lambda_b = LI_b + \Phi_m \sin\theta$$

이다. 여기서 Φ_m 는 계자 자속의 최대치다. 식 (2.1)과 (2.2)를 정리하면 전압 방정식은 다음식으로 된다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+L\frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R+L\frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} + \dot{\theta}\Phi \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

한편, a상, b상 전류에 의하여 발생한 토크를 각각 T_a , T_b , detent torque를 T_d 라고 하면 발생 토크는 이들의 합으로 주어지나 공극의 자기 저항차에 의해 발생하는 detent torque는 총 발생 토크의 수 [%]에 지나지 않으므로 이를 무시하면 식 (2.4)로 주어진다[8,9].

$$T_m = T_a + T_b + T_d \approx \left(\frac{\partial \lambda_a}{\partial \theta}\right) I_a + \left(\frac{\partial \lambda_b}{\partial \theta}\right) I_b \quad (2.4)$$

한편, 스텝 모터의 운동 방정식은 식 (2.5)와 같다.

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + T_L = T_M \quad (2.5)$$

여기서 T_L 은 부하 토크, J 는 관성 모멘트, D 는 점성 마찰 계수이다. 식 (2.3) - (2.5)가 스텝 모터의 기본 특성을 해석하기 위한 기본 방정식이다. 스텝 모터의 기본 특성을 해석하기 위하여는 이 방정식을 풀어야 하나 전압 방정식이 시변형이

며 운동 방정식도 비선형이므로 수치계산을 행하지 않으면 안된다. 따라서, 본 연구에서는 동기기 등가 회로법의 출력식으로 부터 스텝 모터의 발생 토크를 계산하여 정특성 및 동특성을 해석하였다. 스텝 모터를 주파수 $F(\text{pps})$ 로 구동하는 경우, 구동 전압의 기본파에 의한 전류는 다음식으로 표현된다.

$$I = (V - E) / Z_0 \quad (2.6)$$

$$= (V_0 e^{-j\phi} - E_0 e^{-j(\phi + \delta)}) / Z_0$$

$$Z_0 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$E_0 = \omega N \Phi_m$$

여기서 E_0 는 역기전력, δ 은 부하각, $\tan \phi = X/R$ 이다. 또한, 발생 토크 T_m 는

$$T_m = (2/\omega) (V_0 E_0 \cos(\phi - \delta) / Z_0 - E_0^2 \cos \phi / Z_0) \quad (2.7)$$

이다. 식 (2.7)로 부터 최대 토크인 탈출 토크(pull out torque) T_{out} 은 $\phi - \delta = 0$ 인 경우이므로 $\cos \phi = R / Z_0$ 가 되어

$$T_{out} = (2 / \omega) (V_0 E_0 / Z_0 - E_0^2 R / Z_0^2) \quad (2.8)$$

이다. 따라서, 여자시 최대 정지 토크인 holding torque는 pps가 0인 경우이므로

$$T_{hold} = 2 (N \Phi_m V_0) / R \quad (2.9)$$

이다. 식 (2.9)의 holding torque는 a상 토크와 b상 토크가 합해진 경우이고 a상

과 b상의 토크는 90도의 위상차가 발생하므로 스텝 모터의 정특성인 각도 변화에 따른 각 상의 스티프니스 특성식은 식 (2.10)으로 주어진다.

$$T_i = -T_{hold} \sin (Z_r \theta - \pi (i-1) / 2) / \sqrt{2} \quad (2.10)$$

또한, 동특성인 주파수 - 토크곡선은 식 (2.7) 및 (2.8)로 부터 계산할 수 있으므로 이를 그림 2.3 및 2.4에 나타내었다.

한편, 스텝 모터는 스텝 동작의 반복으로 회전하므로 관성 부하의 크기에 따라 특성이 크게 변화한다. 이는 회전자의 관성 때문에 입력 신호와 동기되어 회전하지 못하고 회전 지연이 발생하기 때문이다. 이 회전 지연은 스텝 모터의 발생 토크와 관성 모멘트에 의한 기계적인 시정수에 의하여 결정된다. 즉, 펄스가 입력되

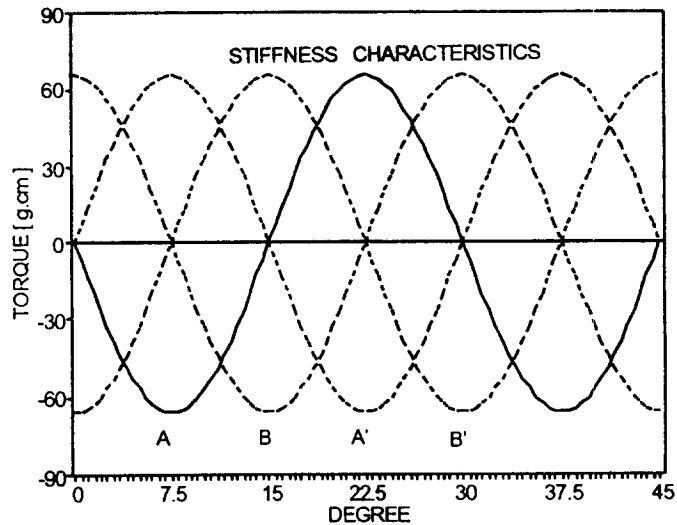


그림 2.3 스티프니스 특성곡선

Fig. 2.3 Stiffness characteristics

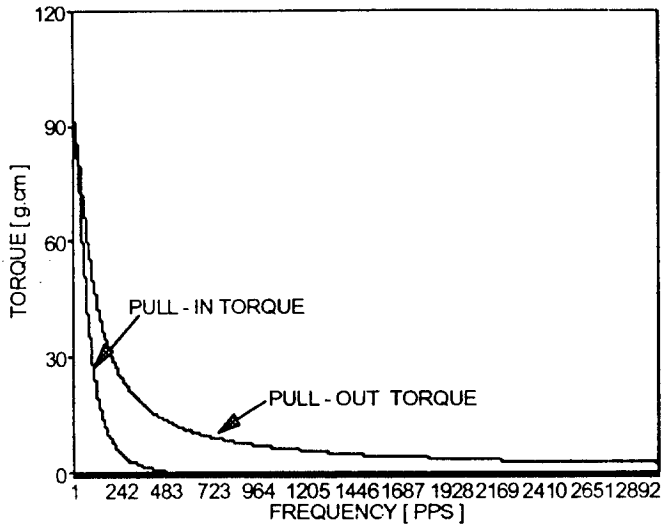


그림 2.4 주파수 - 토크 특성곡선

Fig. 2.4 Frequency - torque characteristics

는 시간과 회전각 사이 에는 비례 관계가 성립되지 않고 기계적인 시정수에 의한 지연이 발생하면서 기동하므로 동기 회전까지는 어느 정도 시간이 필요하다.

따라서, 기동 주파수를 너무 크게 하면 기동시의 지연으로 인하여 입력 펄스에 추종하여 회전하지 못하게 되므로 탈조하게 된다. 이 기동 한계를 나타내는 주파수를 최대 자기동 주파수라 한다[10]. 이 자기동 주파수는 부하가 증가함에 따라 저하 되므로 관성 모멘트는 가속, 감속 등의 동적 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 일반적으로, 관성 부하가 증가하면 자기동 주파수가 저하되고 자기동 영역도 줄어들어 탈조의 위험이 있다. 따라서, 관성 부하가 커 슬로우 영역에서의 운전이 필요한 경우에는 가, 감속 운전을 행하여야 하므로 관성 부하에 따른 자기동 주파수의 특성은 매우 중요하다. 최대 자기동 주파수와 관성 부하에 따른 자기동 주파수와의 관계는 식 (2.11)으로 주어진다[2, 5].

$$F = F_s / \sqrt{1 + J_L / J_r} \quad (2.11)$$

여기서,

F = 관성 부하가 있는 경우의 자기동 주파수의 최대치(pps)

F_s = 스텝 모터의 최대 자기동 주파수(pps)

J_r = 로우터의 관성 모멘트($g \cdot cm^2$)

J_L = 부하의 관성 모멘트($g \cdot cm^2$)

이다. 이때의 최대 자기동 주파수는 그림 2.4로부터 구할 수 있으므로 관성 부하에 따른 자기동 주파수의 변화를 그림 2.5에 나타내었다.

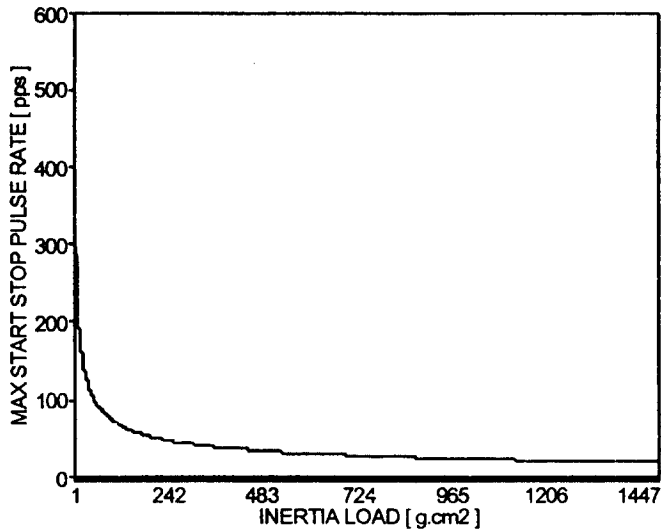


그림 2.5 관성 부하 - 자기동 주파수 특성

Fig. 2.5 Inertia load - max start stop pulse rate characteristics

2.3 2차계 모델에 의한 1 스텝 응답 특성

스텝 모터를 자동차의 idle air valve용으로 이용하는 경우, 진동이 적고 원활한 회전을 위하여는 위치 정밀도 및 속응성이 양호하여야 하므로 이를 평가하기 위한 원 스텝 응답 특성에 대하여 고찰하여야 한다. 식 (2.5)로 주어진 운동 방식중 우변향 발생 토크는 본 연구에서는 1-2상 여자 방식을 채택하므로 각 상 발생 토크의 벡터 합으로 그림 2.6과 같이 주어진다. 따라서, 스텝 모터의 발생 토크 축을 $\theta = 0$ 으로 설정하면 발생 토크는

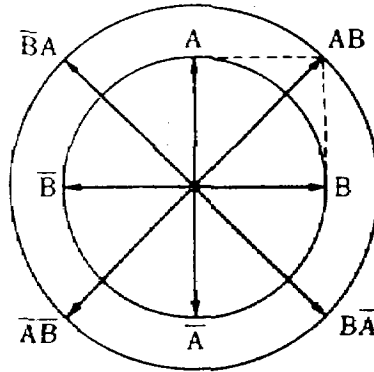


그림 2.6 토크 벡터도
Fig. 2.6 Torque vector diagram

$$T_m = - \overline{T_{hold}} / \sqrt{2} \sin(Z_r\theta + \pi/4) - \overline{T_{hold}} / \sqrt{2} \sin(Z_r\theta - \pi/4) \quad (2.12)$$

이다. 따라서, 이를 정리하면

$$T_m = - T_{hold} \sin(Z_r\theta) \quad (2.13)$$

이다. 그러므로 식 (2.13)을 식 (2.5)에 대입하여 정리하면

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + T_L = -T_{hold}\sin(Z_r\theta) \quad (2.14)$$

이다. 식 (2.14)를 정규화하기 위하여

$$X = Z_r\theta$$

$$\tau = t\omega_n = t\sqrt{T_{hold}Z_r/J}$$

으로 치환하여 정리하면 다음 식으로 주어진다.

$$d^2x/d\tau^2 + 2\xi dx/d\tau + \overline{T_L} \operatorname{sgn}x = -\sin x \quad (2.15)$$

여기서, $\xi = D\omega_n / (2T_{hold}Z_r)$

$$\overline{T_L} = T_L / T_{hold}$$

이다. 식 (2.15)의 초기조건은 토크 벡터도인 그림 2.6에서 보는 바와 같이

$\tau = 0, \theta = -\pi/2$, 또는 0 이다. 한편, 부하토크 $\overline{T_L}$ 은 정의 속도로 회전 하는

경우에는 (+), 부의 속도로 회전 하는 경우에는 (-)이므로

$$\dot{\theta} > 0 \quad \operatorname{sgn} = 1$$

$$\dot{\theta} < 0 \quad \operatorname{sgn} = -1$$

이다. 식 (2.15)로 주어진 운동 방정식은 sin항과 속도에 의한 마찰 저항, 관성 등에 의하여 비선형 미분 방정식이 되므로 본 연구에서는 RUNGE - KUTTEA 법을 이용하여 해석 하고자 한다. 식 (2.15)를 해석 하기 위하여 $dx / dt = x_1$ 으로 놓으면 다음과 같은 연립 방정식이 성립된다.

$$dx / dt = x_1 \quad (2.16)$$

$$dx_1 / dt = -\sin x - 2 \zeta x_1 - \overline{T_L} \operatorname{sgn} x$$

이다. 따라서, 식 (2.16)은 초기치 문제이므로 위에 언급한 초기조건을 대입하면 스텝 모터의 원 스텝 입력 시의 위치 및 각속도 응답을 구할수 있으며 이를 그림 2.7에 나타내었다. 그림 2.7에 나타난 바와 같이 1 스텝 응답은 감쇄 진동을 한

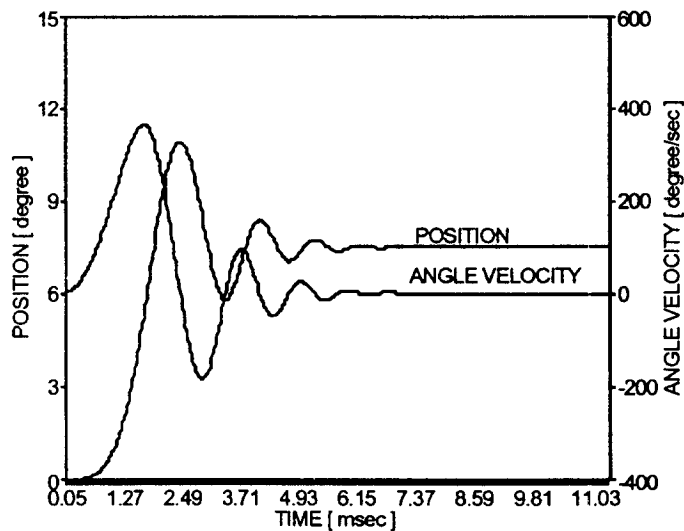


그림 2.7 1 스텝 응답 특성

Fig. 2.7 One step response characteristics

다. 만일 진동이 커지고 진폭이 안정 영역을 초과 하면 역전이나 미스 스텝이 발생한다. 또, 감쇄 진동중 역방향으로 토크가 작용하고 있는 동안에 다음 입력 펄스를 가하면 정방향의 토크와 역방향의 토크가 복잡하게 작용하여 회전이 불안정하게 되거나 최악의 경우 탈조하게 된다. 이를 피하기 위하여는 부하의 운동 속도를 바꾸거나 감속비를 바꾸어 모터의 속도를 변경하여 공진을 억제시키거나 마찰 부하를 덧붙여서 진동의 진폭을 작게 하거나 관성 부하를 피하므로써 공진영역을 낮은 주파수로 이동시켜야 한다. 그러나 idle air valve용 PM형 스텝 모터는 공기량을 단순 조절하며 입력 주파수가 매우 낮아 주기가 크고 또한, 1 스텝시의 기계적 회전각 7.5도에 비해 오버슈트하는 진폭이 최대 2.6도로 그다지 크지 않아 1 스텝 응답시 감쇄 진동은 있으나 입력 신호에 잘 추종하리라 사료된다.

3. 해석 모델의 구동 특성

실제 스텝 모터를 구동 하는 경우 구동 토크는 영구 자석에 의한 자속과 전류의 상호 작용에 의해 발생한다. 이때, 전압을 구형파로 인가하므로 전류에 많은 고조파가 포함되게 된다. 따라서, 각 상의 발생 토크는 정현적인 변화를 한다고 가정 한 기본 특성 해석에서의 토크 특성과 실제 모터에서 발생하는 구동 토크와는 많은 차이가 있다.

입력 주파수 $F(\text{pps})$ 에 대한 토크 특성은 어느 주파수 이상에서는 급격히 감소하는데 이는 속도에 의한 역기전력으로 인하여 전류가 감소하기 때문이다. 회전시의 토크가 최대 기동 토크의 90[%]로 저하할 때까지의 속도 범위를 중저속 영역이라 하며 idle air valve용 PM형 스텝 모터의 사용 또한 중저속에서 이용하고 있다 [5,7]. 일반적으로 자동차에 이용되고 있는 clow pole형 PM 스텝 모터의 고유 주파수는 60 - 90[Hz]로 알려져 있다. 따라서, 구동 주파수는 공진 주파수를 피하기 위하여는 구동 주파수를 매우 낮게 설정하거나 100[pps]이상으로 설정하여야 한다. 그러나 100[pps]이상의 높은 주파수에서는 구동 토크대 홀딩 토크의 비가 매우 낮게 된다. 또한, idle air valve용 PM 스텝 모터는 설치 공간의 제약으로 compact하게 제작하여야 하므로 한극당 자속이 매우 작아 요구하는 토크를 발생 시키기 위하여 turn수를 많이 시행한다. 따라서, 구동 주파수를 크게하면 리액턴스의 영향으로 입력 전류의 감소 및 전류의 상승 시간이 지연되어 미스 스텝의 원인이 될 수 있고 본 스텝 모터는 속응성이 그다지 필요치 않으므로 30[pps]부근의 매우 낮은 주파수로 구동시키고 있으므로, 본 연구에서도 구동 주파수를 33[pps]로 설정하였다. 토크를 계산하기 위하여는 먼저 전류 특성을 계산하여야 한다. 중저속에서의 각 상의 전류는 근사적으로 식 (3.1)로 주어진다[7,11].

$$I_i = \frac{V_i - E_i}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (3.1)$$

여기서, $E = N\omega\phi_m \sin(\omega t - \Delta\theta)$

$$\omega = 2\pi f$$

$i = a$ 또는 b 상

이다. 그림 3.1은 바이폴라 1-2상 여자 방식으로 구동 시킨 경우의 한상의 입력 전압과 전류 파형을 도시 한것이다.

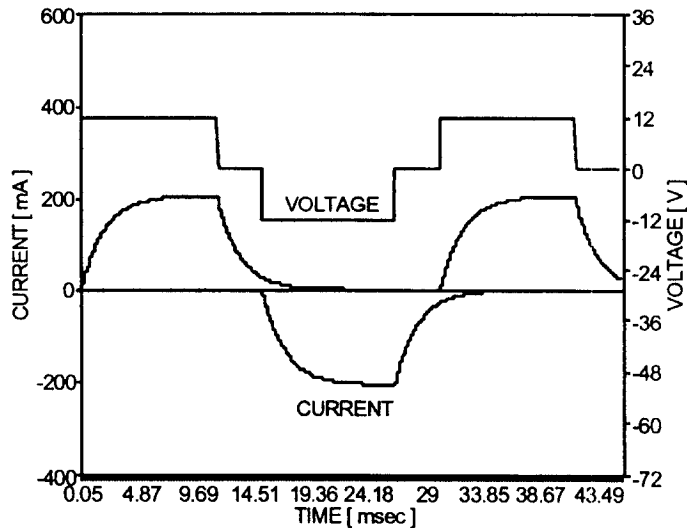


그림 3.1 A- A'상 전압, 전류 파형

Fig. 3.1 A -A' Phase voltage, current

그림 3.1에서 알 수 있는 바와 같이 펄스 전압이 인가되더라도 인덕턴스의 영향으로 인하여 전류가 곧바로 상승하지 않고 지연 상승하고 있으며 펄스가 끝난 후

에도 전류가 곧바로 off되지 않음을 알 수 있다. 이 turn off시의 지연 전류에 의해 (-) 토크가 발생하여 스텝 모터의 효율 저하 및 회전 속도의 맥동 발생의 원인이 된다. 또한, 모든 구동 IC가 on되는 순간이 발생하여 트랜지스터 등의 IC 파괴의 주 원인이 되므로 펄스 전압이 끝나면 전류를 곧바로 off시키기 위해 구동 회로 제작시 fast recovery diode를 사용하여야 한다.

한편, 구동 토크의 계산법으로는 역기전력에 의해 계산하는 방법과 스티프니스 곡선으로 부터 계산하는 방법이 제안되어 있으나, 본 논문에서는 역기전력에 의한 방법으로 구동시의 토크 특성을 계산하였다. [3, 12]

구동 토크는

$$T = \frac{K_{tm}K_s E_f I}{2\pi F_m} = \frac{K_{tm}K_s N \Phi_m I}{2} \quad (3.2)$$

- 여기서, K_{tm} : holding torque계수
 K_s : 최대 기동 토크 감쇄율
 E_f : 속도 기전력의 기본파 성분
 F_m : 기본파 주파수
 N : turn수
 Φ_m : 쇄교 자속의 최대치

이다. 따라서, 식 (3.2)에서 알 수 있는 바와 같이 토크는 시정수가 고려된 입력 전류와 시간에 따라 변하는 쇄교 자속과의 곱으로 나타난다.

구동시의 시간 변화에 따른 토크 특성을 그림 3.2에 나타내었다. 그림3.2를 보면 전류가 바로 off되지 않고 시정수에 의해 감소하여 생기는 (-)토크의 영향으로

발생 토크의 감소와 더불어 리플도 크게 됨을 알 수 있다. 그러므로 앞서 언급한 fast recovery diode를 이용하여 전류가 바로 off되도록 구동 회로를 설계, 제작 하여야 발생 토크의 감소 및 리플을 억제 할 수 있다.

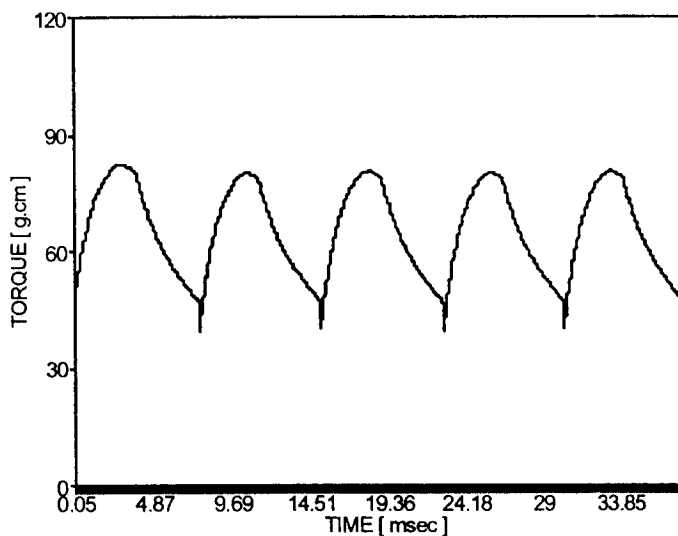


그림 3.2 구동 토크

Fig. 3.2 Driving torque

4. 실험 장치 구성 및 결과 검토

본 장에서는 2장의 기본 특성 해석과 3장의 구동 특성 해석의 신뢰성을 확립하기 위하여 구동 회로를 설계, 제작하여 전류 및 스텝 응답 특성을 고찰하였다.

4.1 구동 회로 및 실험 장치 구성

그림 4.1은 본 논문에서 설계, 제작한 실험 장치이다. 설계된 스텝 모터의 회전각을 측정하기 위하여 포텐션 미터(모델명 : CPP45RK, 회사명 : MIDORI)를 스텝 모터의 축에 커플링 하였다. 이 때의 출력 파형을 오실로스코프로 측정하여 회전각을 실측하였다. 또한, 입력 전류를 측정하기 위하여 $0.86[\Omega]$ 의 저항을 달아 그 양단의 전압을 측정하므로써 전류 파형을 실측하였다.

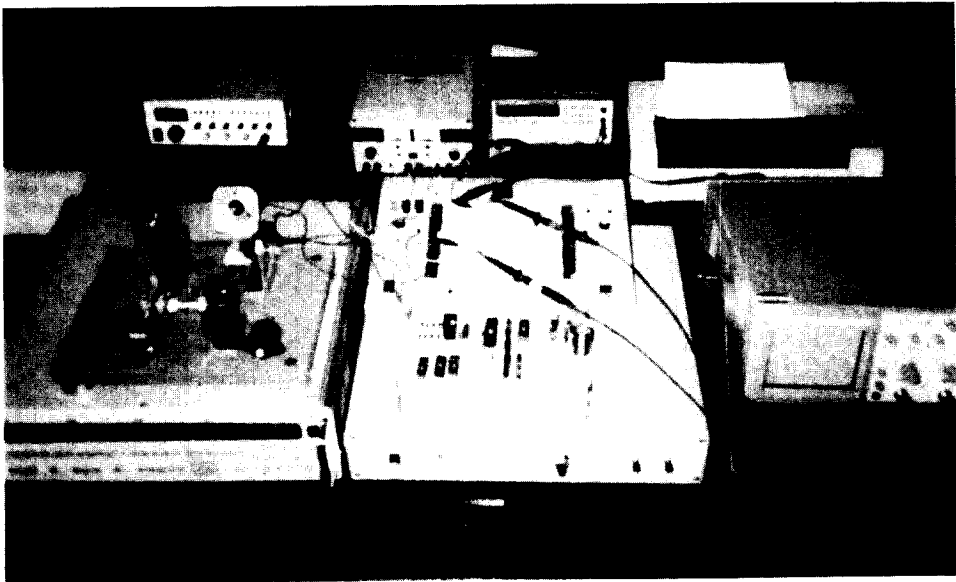


그림 4.1 실험 장치

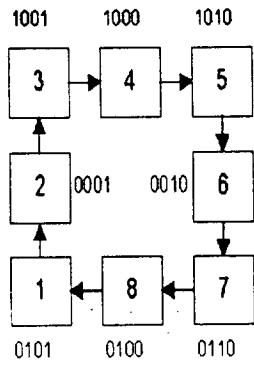
Fig. 4.1 Test apparatus

구동 회로는 구동 방식에 따라 바이폴라, 유니폴라 방식으로, 여자 방식에 따라 1상 여자, 2상 여자, 1-2상 여자로 분류된다. 바이폴라 구동 방식은 유니폴라 구동 방식에 비하여 회로가 다소 복잡하나 코일에 전류가 지속적으로 흘러 ED이 유니폴라 방식보다 크고 PM형 스텝 모터에서는 토크가 약 2배로 증가하여 효율이 좋다. 또한, 유니폴라 구동 방식에서는 전류 off시에 코일에 흐르는 역기전력을 빨리 소모시키기 위하여 정전압 다이오드를 이용하고 있다.

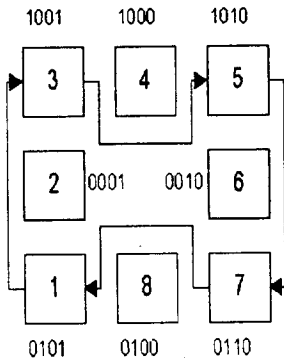
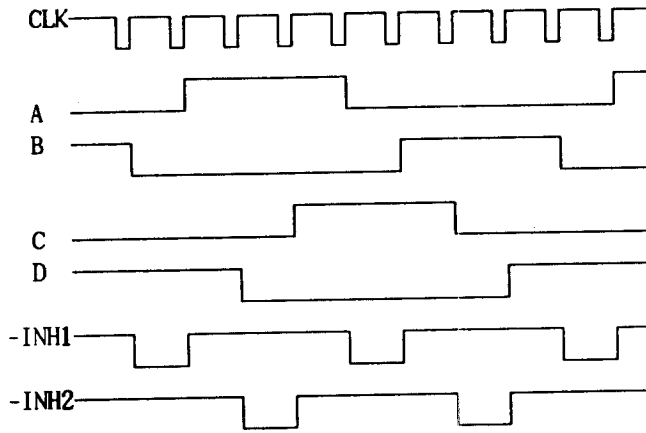
따라서, 모터의 자기 저장 에너지가 다이오드나 코일안에서 소비되거나 바이폴라 구동 방식에서는 이 자기 저장 에너지를 전원으로 피드백 시킬 수 있어 효율이 좋으므로 본 연구에서도 바이폴라 구동 방식을 채택하였으며 바이폴라 구동시의 최대 맹점인 여자상의 전환시에 생기는 turn off의 지연으로 인한 구동 회로의 파괴 위험성을 피하기 위하여 fast recovery diode인 RGB30J를 삽입하였다.

한편, 여자 방식으로는 그림 4.2에 도시한 바와 같이 1상, 2상, 1-2상이 사용되고 있다[6,13]. 바이폴라 1상 여자 방식은 각도 정확도는 좋으나 스텝각이 풀스텝으로 항상 1상에만 전류가 흐르므로 이용 효율이 나빠 바이폴라 구동 방식에는 잘 사용하지 않으며 바이폴라 2상 여자 방식은 코일의 2상에 교대로 변화시키기에 저속시의 토크 특성은 우수하지만 고속시 인덕턴스의 영향으로 시정수가 커져 토크가 낮아 지기도 하며 스텝각이 풀 스텝으로 스텝 응답시에 오브 슈트나 언더 슈트가 커져 미스 스텝의 원인이 될 수도 있다.

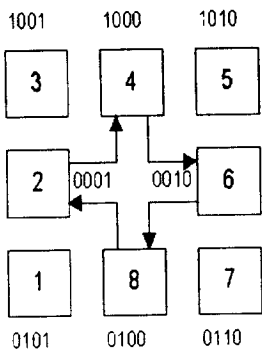
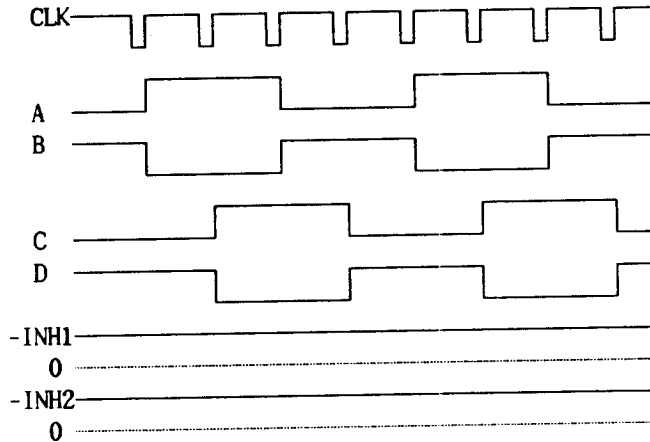
한편, 바이폴라 1-2상 여자 방식은 바이폴라 1상 여자와 2상 여자의 중간 특성을 가지며 스텝각이 하프 스텝으로 스텝 각도가 작아 바이폴라 2상 여자보다 스텝 응답시에 오브 슈트나 언더 슈트가 그리 크지않아 부드러운 운전을 할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 3개의 여자 방식중 스텝각이 하프 스텝으로 한펄스당 7.5도 회전하는 바이폴라 1-2상 여자 방식으로 채택하고 나머지 두 여자



1-2상 여자 방식



2상 여자 방식



1상 여자 방식

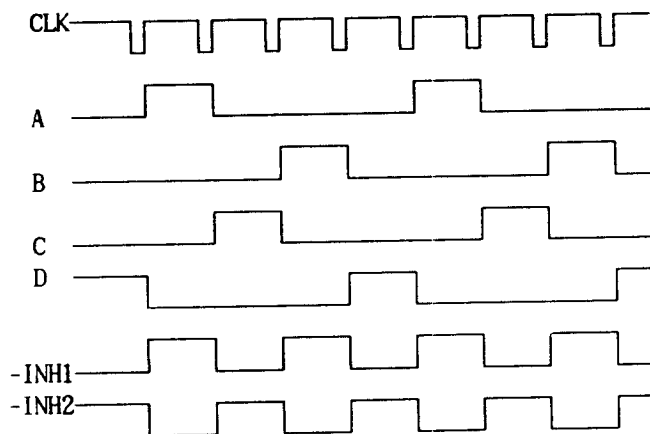


그림 4.2 바이폴라 여자 방식

Fig. 4.2 Bipolar exciting method

방식도 비교할 수 있도록 상 전환 모드를 설치하여 하나의 구동 회로로 3가지의 여자 방식을 실험 할 수 있도록 설계 하였다. 한편, 전원 회로는 회전 방향(여자 순서)을 결정하기 위한 논리 회로와 스텝 모터의 권선에 전류를 공급하기 위한 전력 제어 회로로 구성하였다. 스텝 모터의 구동 회로에 쓰이는 원칩 마이크로 프로세서는 많은 종류가 있으나, 본 연구에서는 폐 루프가 아닌 오픈 루프로 구동시키므로 일반적으로 많이 사용되고 있는 MCS-51 계열의 i8051AH(MPU) 중 8751H을 사용하였다. MPU는 제어 응용 전문의 8비트 CPU와 32개의 양 방향 I/O와 2개의 16비트 타이머와 클럭 발진기를 내장하고 있으며 5개의 인터럽트와 128byte의 내부 RAM, 4kbyte의 ROM을 내장하고 있으므로 외부 ROM없이 프로그램을 수행 할 수 있는 장점이 있어 본 연구에서는 MPU에 의하여 상태 표시와 모터 컨트롤러의 제어를 행하였다.

모터 컨트롤러는 MPU에 의한 제어(프로그램상의 제어)와 외부 입력에 의한 제어가 이루어질 수 있도록 IC(L297, L298)를 이용하여 설계 하였다. 여기서, IC L297는 스텝 모터를 정전류 구동하기 위한 컨트롤러이며 4000[pps]정도의 고속 구동이 가능하다. 또한, IC L298은 바이폴라 구동을 위한 두개의 브릿지 드라이버를 내장하고 있으며 공급 전압이 최대 46[V], 허용 전류는 4[A]이다.

구동 방법은 그림 4.3과 같이 구동 회로를 구성한뒤, L297에 일정한 주기를 가지는 펄스 신호와 1상, 2상, 1-2상 여자 방식과 기동, 정지, 1 스텝을 스위치 동작으로 전환 할수 있도록 프로그램을 구성한후 EP-ROM에 기입 한뒤 8751H 마이크로 프로세서에 의하여 스텝 모터를 구동시켰다. 본 연구에 사용된 i8051AH는 내부 ROM을 가지는 8751H를 사용하였지만 연구 단계에서 프로그램 수정을 용이하게 하기 위하여 외부에 ROM을 사용하여 8031H처럼 동작되도록 설계하였다. 또한, 프로그램이 많을 경우 8751H 내부 ROM은 용량이 작아 외부 ROM을 사용하여야 하나 본

연구의 스텝 모터 구동 프로그램은 그리 길지 않으므로 차후 8751H의 내부 ROM에 바로 프로그램을 기입하면 구동 회로는 더 간단해 질 것이라 사료 된다.

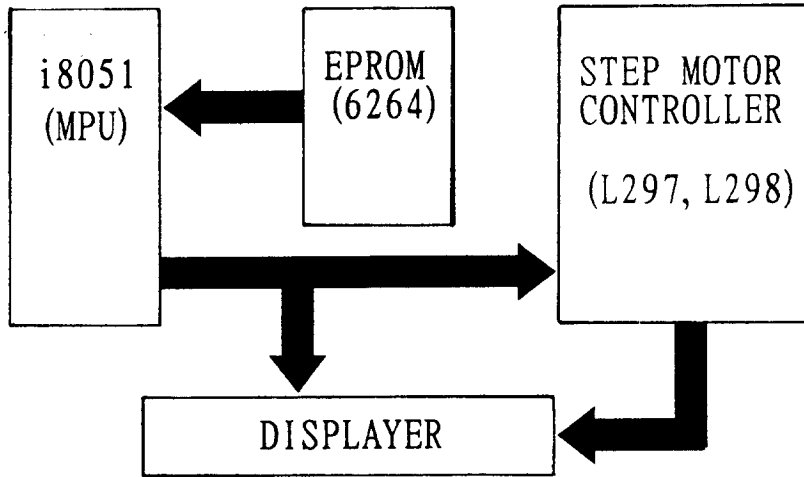
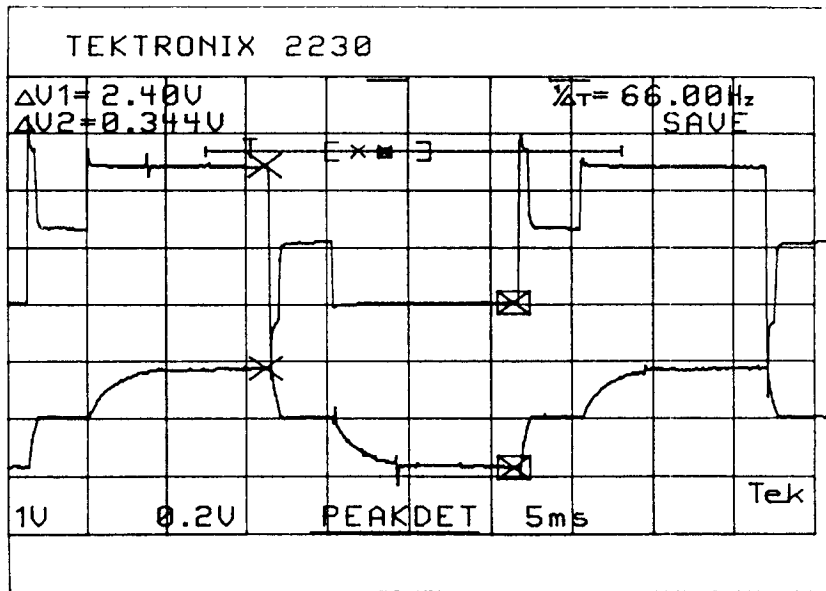


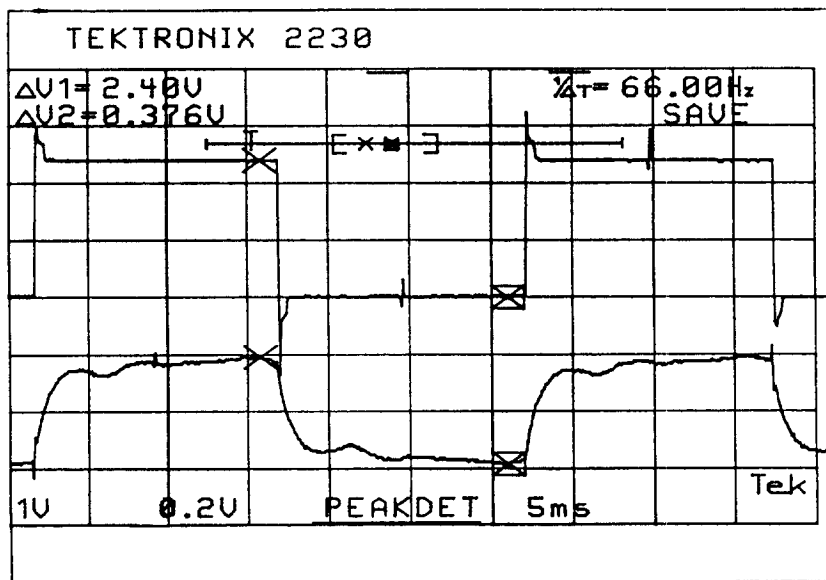
그림 4.3 스텝 모터 콘트롤러 구성도
 Fig. 4.3 Step motor controller diagram

4.2 계산치와 실험치의 비교, 검토

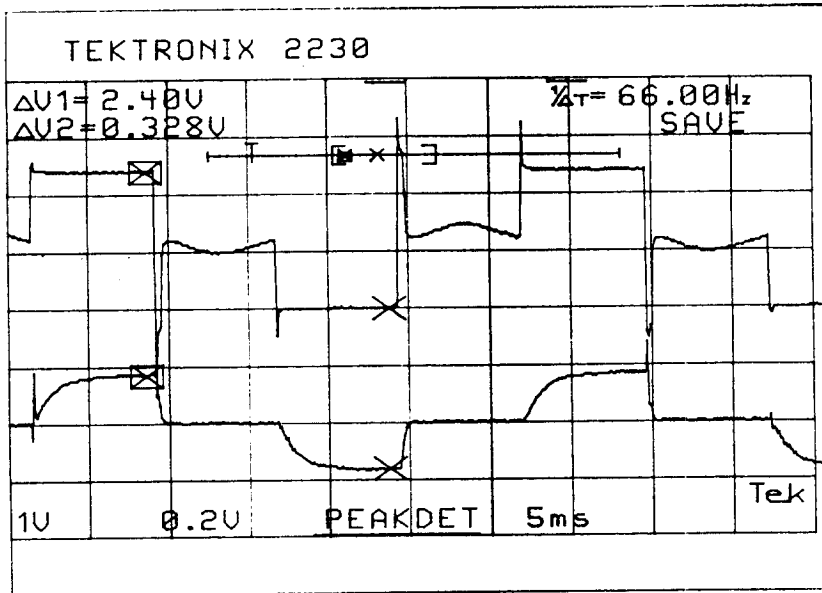
그림 4.4는 33[pps]로 구동시킨 경우의 전압, 전류 파형이다. 그림 4.4에서 전압은 10 : 1 probe를 사용하여 측정하였으며 전류는 입력단에 0.86[Ω]의 저항을 달아 이 저항에 걸린 전압을 측정하였다. 1-2상 여자의 경우 전류는 최대 206[mA]가 흘러 이론치와 잘 일치하고 있다. 다만, 실험치에서는 3.79 [msec]에서 전류 파형에 피크치가 발생하고 그 이후 다소 감소하는 이유는 a상 펄스가 인가된 후 3.79 [msec]에서 b'상 펄스 전압이 off되므로 b'상 전류의 급격한 변화가 a상에 영향을 주었기 때문이다. 또한, 7.57 [msec]이후의 전류 파형은 b상이 on되어 이로 인한



(a) 1-2상 여자



(b) 2상 여자



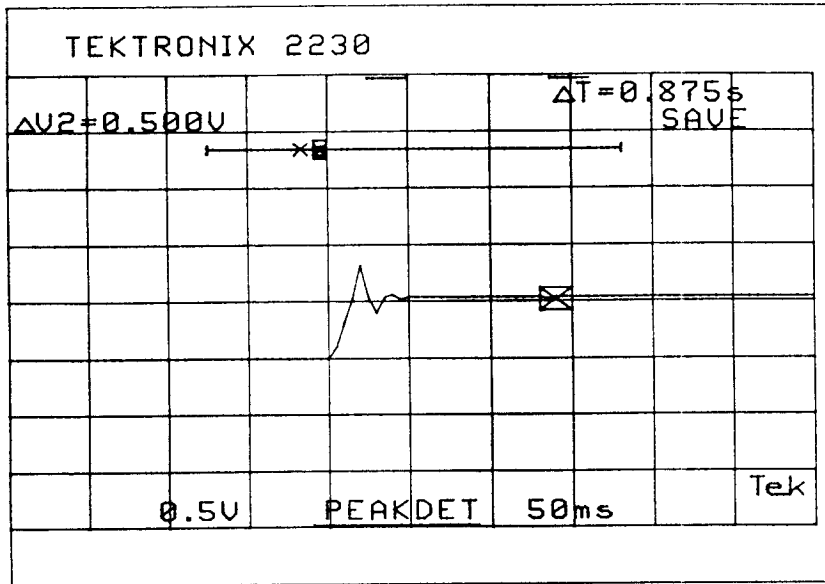
(c) 1상 여자

그림 4.4 구동시의 전압, 전류

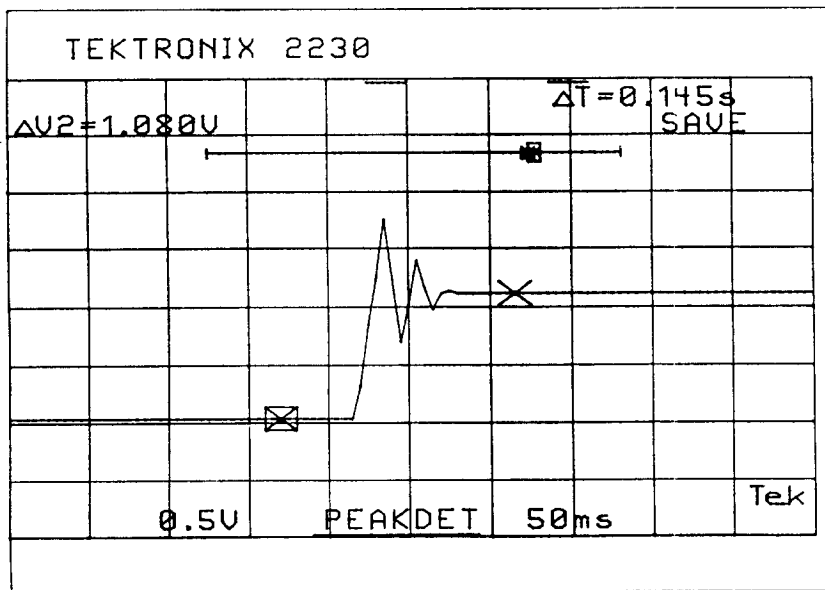
Fig. 4.4 Voltage and current of driving

영향 때문이며 11.04 [msec] 이후에는 a상이 off되나 인덕턴스의 영향으로 지연 전류가 발생한다. 이를 억제하기 위하여 fast recovery diode인 RGB30J를 사용하였으므로 이론치 보다는 빨리 감소하였으나 약간의 지연 전류가 있는 것은 좀 더 정밀한 fast recovery diode를 쓰게 되면 가능하리라 사료된다. b상의 펄스 전압에 의한 a상에의 영향은 a, b상의 상호 인덕턴스로 보정하여야 하며 on, off시의 전압시의 전압 피크치의 영향을 없애기 위하여는 평활 콘덴서나 리액터로 정밀한 보정을 행하여야 되므로 이는 차후의 연구 과제로 삼겠다.

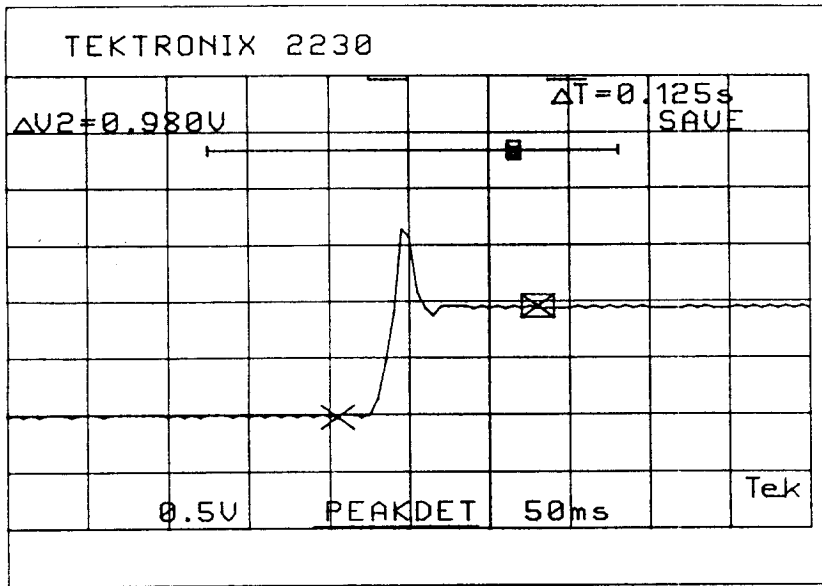
한편, 2상 여자의 경우 3.79 [msec] 이후 입력 전류의 감소가 나타나는데 이는 속도 기전력의 영향때문이며 7.5 [msec]에서 상간 간섭이 발생하였다. 그러나 1상 여자에서는 항상 1상만 여자되므로 상간 간섭은 발생하지 않았다. 그러나 입력 전



(a) 1-2상 여자



(b) 2상 여자



(c) 1상 여자

그림 4.5 1 스텝 응답 특성

Fig. 4.5 One step response characteristics

류의 최대치에서는 2상 여자 방식이 218.6[mA], 1-2상 여자에서는 200[mA], 1상 여자에서는 190.7[mA]로 나타났다. 2상 여자 방식이 타 방식보다 입력 전류가 큰 이유는 1-2상 여자 방식에서는 7.5[msec]에서 b상이 여자되어 이로 인한 속도 기전력이 발생하여 1 스텝 구동이 끝나기 전 a상 전압이 off되므로 이 속도 기전력에 의한 전압 강하 때문이다.

그림 4.5는 1 스텝 구동시의 회전각을 포텐션 미터의 출력 전압으로 측정한 것이다. 이때의 입력은 24[V]로 하였으므로 7.5도 회전시의 출력은 0.5[V]이다. 1 스텝 구동시 회전 각도 이론치와 실험치가 잘 일치하고 있다. 다만 포텐션 미터의 마찰력 등으로 5[msec]이후의 작은 섭동에 대하여는 실측할 수 없었다.

2상 여자시에는 스텝각이 full step으로 스텝 응답시에 오브 슈트나 언더 슈트가 커져 미스 스텝의 원인이 될 수도 있으나 1상 여자에는 풀 스텝으로 구동하여도 2상 여자 방식과 같은 진동 현상은 나타나지 않아 회전각의 정확도는 우수하였다. 그림 4.6은 half step구동시의 회전각을 도시한 것으로 입력 펄스에 정확히 추종하며 진동이 적고 원활하게 회전함을 알수 있었다. 따라서, 자동차 MPFI 엔진의 공기 유량 제어용 모터로써 PM 스텝 모터를 이용하여 open-loop제어로도 정밀한 유량 제어가 가능함을 입증하였다.

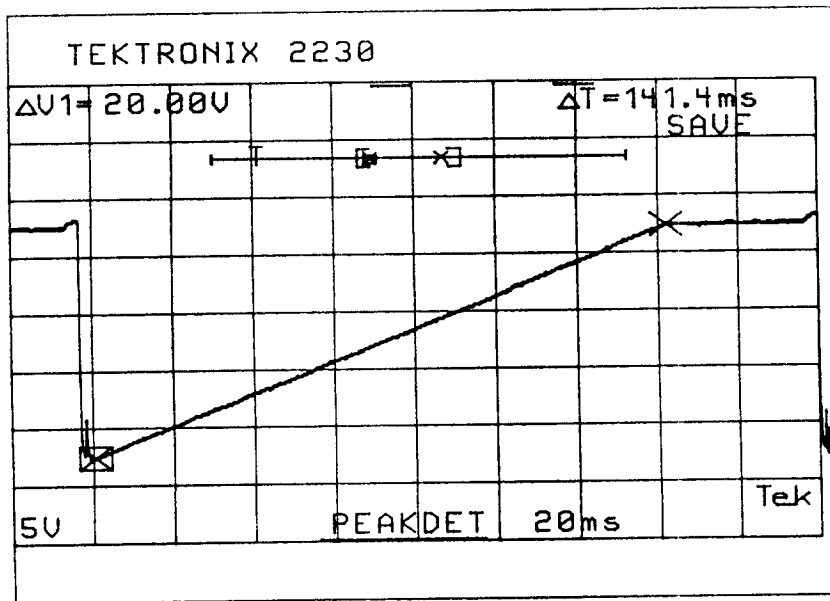


그림 4.6 스텝 응답 특성

Fig. 4.6 Step response characteristics

5. 결 론

본 연구에서는 자동차의 MPFI 엔진의 공기 유량 제어용으로 쓰이는 PM형 스텝 모터를 퍼미언스법에 의하여 설계치로 부터 정특성, 동특성 및 스텝 응답 특성을 해석하였다. 구동 회로는 MCS-51 계열의 i8051AH(MPU) 중 8751H을 사용하였으며 모터 콘트롤러는 MPU에 의한 제어(프로그램상의 제어)와 외부 입력에 의한 제어가 이루어질 수 있도록 IC(L297, L298)를 이용하여 설계 하였다.

실험치와 이론치가 잘 일치하는 만족할 만한 결과를 얻었으며, 모터가 입력 펄스에 정확히 추종하며 진동이 적고 원활하게 회전함을 알 수 있었다.

앞으로, 토크 계산에 대한 신뢰성 확인 및 펄스 전압에 의한 상간 간섭, on, off시의 전압 피크치의 영향을 보상하기 위한 평활 콘덴서나 리액터의 설계 등이 이루어지면 보다 더 정도 높은 해석 및 구동이 가능하리라 사료된다.

参 考 文 献

1. 山田博, “小形モータの理論と実際”, (株)工学圖書, 1989
2. 大木創, “ステップモータの理論と應用”, (株)實教出版, 1982
3. 眞壁國昭, “ステッピングモータ制御回路設計”.
4. 見城尚志, “小形ACモータの設計と制御”, 綜合電子出版社, 1984
5. 英山行雄 外 3人, “クローボール型ステッピングモータ特性算定” 電氣學會研究會資料 LD-93-98, pp. 79 - 88, 1993
6. 百目鬼英雄 外 3人, “ステッピングモータの脱出トルクに関する一考察”, 電氣學會研究會資料 RM-91-129, pp. 81 - 87, 1991
7. 百目鬼英雄 外 2人, “驅動回路を考慮したステッピングモータの驅動トルク”, 電氣學會研究會資料 RM-92-18, pp. 89 - 96, 1992
8. 百目鬼英雄, “ステッピングモータの低域安定性に関する考察”, 電氣學會研究會資料 RM-90-117, pp.83 - 89, 1990
9. 石原章雄 外 3人, “驅動回路を考察したステッピングモータの驅動トルク”, 電氣學會研究會資料 RM-92-18, pp. 89 - 96, 1992
10. 新村佳久 外 2人, “圖解小形モータの基礎知識”, オーム社, 1985
11. 馬場英治 外 4人, “ハイブリットステッピングモータの回轉時トルク特性”, 電氣學會研究會資料 RM-90-25, pp. 59 - 67, 1990
12. D. W. J. Pulle et al, “Normalised high-speed performance analysis of small hybrid stepping motors”, IEE Pro., Vol. 134, No. 6, pp. 333 - 337, 1987
13. B. Kuo, “Step motors”, West pub. co. 1974

14. T. Kenjo, "Stepping motors and their microprocessor controls",
Clarendon press, 1984
15. P. P. Acarnley and A. Hughes, "Predicting the pull out torque
/ speed curve of variable - reluctance stepping motors", IEE
Pro. vol. 128, no. 2, pp. 109 - 113, 1981

Abstract

Drive Characteristics of PM Step Motor for Idle Air Valve

by Lee, Jung - Gyu

Dept. of Electrical Engineering

Graduate School, Changwon National University

Changwon, Korea

In this study, the characteristics of PM step motor for idle air valve is analyzed by permeance method. Drive circuit is composed of micro processor(i8051AH), L297 and L298.

The calculation results were discussed and compared to experimental results of PM step motor driven by 1-2 phase exciting method.

감사의 글

아쉬움과 부끄러움 속에 논문을 마감 하면서 지금까지 많은 도움을 주신 분들께 감사드립니다. 먼저, 부족한 저를 사랑으로 지도하여 주시고 학문 이전에 인간이 되기를 가르쳐 주신 지도 교수님이신 김규탁 교수님께 진심으로 감사와 존경의 마음을 전하며 어디에서나 교수님의 가르침에 어긋나지 않는 인간이 되도록 노력하겠습니다.

석사 과정 동안 많은 관심과 지도를 해주신 유인근 교수님, 윤태성 교수님, 박승규 교수님 그리고, 부족한 논문을 손수 돌보아 주신 박태곤 교수님, 안호균 교수님께 진심으로 감사드립니다.

항상 따뜻한 마음으로 격려해 주시던 경남대학교 서기영 교수님, 경상대학교 신흥교 교수님, 동서공과대학교 손영대 교수님께 진심으로 감사드립니다.

함께 연구하며 충고를 아끼지 않았던 김창일, 진광식, 허재영 선배, 그리고 우현, 성보, 주홍, 기채, 유승, 민원에게도 고마움을 전합니다. 또한, 사회의 많은 경험과 앞길을 가르쳐 주신 강규홍, 김덕현선배, 송경호 선생님께 진심으로 감사를 드리며, 마음 고생하고 있는 태희에게 기쁜 소식이 있기를 빕니다.

또한, 연구실에서 궂은일을 도맡아 하며 많은 밤을 같이 지새운 재욱에게 고마움을 전하며 발전하는 인간이 되기를 곁에서 기원합니다.

그 동안 소홀함에도 불구하고 변함없는 우정을 보여준 친구 형태, 준하, 덕호, 재용, 희연, 봉수에게 고마움을 전하며 앞으로 희망찬 앞날이 충만하길 바랍니다.

그리고, 곁에서 지켜봐준 동생에게 고마움을 전하며 앞으로는 좀 더 멋있는 형, 오

빠가 될 것을 약속 합니다.

특히, 그 동안 자식들의 올바른 성장을 위하여 모든 것을 희생으로 돌보아 주신 부모님, 이마에 진 주름과 거치른 손을 보고 있으면 안타까울 뿐입니다. 부모님의 깊은 사랑에 머리 숙여 감사드리며, 이 조그마한 결실을 존경하는 부모님께 바칩니다.

1994년 12 월

李 定 奎 올림