

〈論 文〉

공진배제를 위한 스텝핑 모터의 폐회로제어에 관한 연구

노 상 현* · 김 교 형**

(1990년 9월 20일 접수)

A Study on Closed-Loop Control of a Stepping Motor for Resonance Elimination

Sang-Hyun Noh and Kyo-Hyoung Kim

Key Words : Resonance Elimination(공진배제), Closed-Loop Control(폐회로제어) Stepping Motor(스텝핑 모터), Maximum Start Stop Pulse Rate(최대 자기동 주파수), Maximum Slewing Pulse Rate(최대 응답 주파수)

Abstract

A stepping motor can be driven with open-loop or closed-loop control. The major disadvantage of open-loop control is that it is subjected to resonance and instability in certain speed range, and that there is no way to check stalling or error in position. In this paper, a closed-loop control system consisting of a microcomputer, a hybrid stepping motor, a drive, a lead screw, and an encoder which is used as a position sensor is developed. A control program is programmed in assembly language for real time control and the versatile interface adapter(VIA) is used as the interface with the microcomputer. The experimental results of the stepping motor were eliminated on all kinds of inertia load, and maximum start stop pulse rate and maximum slewing pulse rate were also increased about twice respectively.

1. 서 론

스텝핑 모터는 최근 디지털제어의 발전에 따라 위치제어용 구동장치로서 큰 각광을 받고 있으며 다른 위치제어용 전동기에 비해 여러가지 장점을 가지고 있다. 스텝핑모터는 외부 입력신호에 동기하여 한 펄스에 한 스텝씩 회전함으로써 디지털제어에 적합하며 가변속의 동기전동기로서 이용이 가능하다는 것과 회전자의 관성능률에 비해 발생 토크 및 홀딩 토크가 크다^(1,2). 스텝핑 모터의 응용범위는 광범위하여 전자계산기의 프린트, 로봇 및 NC 공작기계등에 사용되고 있다.

위치제어를 위한 스텝핑 모터의 제어방법은 개

회로제어와 폐회로제어로 대별되며 일반적으로 많이 사용되는 방법은 개회로제어이다. 그러나 개회로제어는 시스템의 구성이 간단해진다는 장점이 있으나 구동회로 및 여자방식에 따라 약간씩 달라지기는 하지만 특정속도영역 및 부하종류에 따라 공진현상이 일어나고 공진현상으로 인해 구동속도 영역이 한정되어 신속한 위치결정이 어려우며, 회전자의 상태와 위치를 체크할 수 없다는 단점이 있다^(1,2,9,11).

일반적으로 공진은 전동기의 구동 속도영역의 범위에 따라 저속역, 중속역, 고속역공진으로 구분되며 이중 스텝핑 모터의 응용상 가장 문제가 되는 것이 중속역공진이다. 일반적으로 스텝핑 모터의 고유진동수는 100pps(pulses per second) 부근에 있으며 이부근의 주파수로 운전시 나타나는 공진을 저속역공진이라하며 이보다 더 높은 주파수의 펄스

*정회원, 영남대학교 대학원

**정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

로 운전할때 나타나는 진동현상을 중속역공진이라 한다. 중속역공진은 스텝핑모터의 개회로제어에 있어서 피할 수 없는 결점으로 인식되어져 왔으며 일반적으로 스텝핑 모터의 구동영역은 중속역공진영역을 제외한 속도범위로 한정되어 응용된다. 그러나 부하특성에 따라서는 스텝핑 모우터의 정해진 안전운전영역내에서도 중속역공진이 나타나므로 해서 전동기의 운전을 불안정하게 하거나 불가능하게 한다.

중속역공진을 유발하는 원인으로는 부하토크, 관성, 회로파라미터(parameter)등이다. 위에서 지적한 사항들은 현상을 고찰하므로 얻어진 것일 뿐, 이에 대한 해석은 연구가 아직 미약한 실정이다.

공진을 억제하는 방법으로 개회로 제어시스템에서 기계적, 전기적 감쇄를 사용하는 방법이 있으나 기계적인 감쇄는 브레이크를 사용하거나 점성, 관성, 마찰 등을 이용하는 것으로 모터 시스템에 기계적인 장치를 부가해야 되며 감쇄 효과도 완전하지 못하고, 전기적인 감쇄는 저항이나 콘덴서, 다이오드 등을 이용하는 것으로 전력손실이 크며 모터 속도를 감소시키는 결점이 있다^(2,9).

위와같은 단점 때문에 개회로제어시스템은 스텝핑 모터의 특성에 적합한 상태의 입력주파수에서만 운전하여야 한다. 폐회로제어시스템은 개회로제어 시스템에 비해 회로구성이 복잡하지만 회전자와 회전자속을 검출할 수 있으므로 회전자의 가장 안정된 상태에서 입력펄스를 인가할 수 있다. 따라서 공진현상을 배제할 수 있으며 속도영역의 확장으로 신속하고 정확한 위치결정이 가능하게 될 것이다.

최근 기기의 소형화, 고정밀화 및 고효율화가 요구됨에 따라 마이크로프로세서에 의한 스텝핑 모우터의 새로운 응용기술과 여러 현상들이 집중적으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 하이브리드 스텝핑 모터의 공진 배제를 위한 폐회로제어시스템을 개발하였고 펄스 발생, 위치 및 속도변화, 가감속제어, 정역회전방향결정, 카운트 및 스텝핑 모터의 온/오프기능 등을 하드웨어 대신 마이크로컴퓨터를 이용한 소프트웨어로 대처하였으며, 구동회로의 복잡함을 피하기 위해 스텝핑 모터의 전용제어기인 PMM 8713 IC를 사용하였고 궤환정보는 샤프트 엔코더를 사용하였다. 그리고 리드 스크루우를 사용한 1축 테이블을 제작하여 개회로제어시와 폐회로제어시의 동특성 및 공진 현상을 검토하였다.

2. 폐회로 제어 시스템

본 연구에서 구성한 폐회로 제어 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다.

테이블의 위치 및 속도제어를 위해 마이크로컴퓨터, 하이브리드 스텝핑 모터, 리드스크루우를 사용한 테이블, 위치 검출을 위한 샤프트 엔코더등으로 폐회로 제어 시스템을 구성하였다. 그리고 엔코더의 회전방향을 판단하기 위해 업/다운 펄스 판별회로를 제작 사용하였고 위치신호인 업/다운 펄스의 카운트 및 컴퓨터와 주변장치와의 연결을 위한 만능인터페이스를 사용하였다.

2.1 하이브리드 스텝핑 모터 및 구동회로

본 연구에서는 바이파일러권선을 가진 유니폴러 4상 하이브리드형 스텝핑 모터를 사용하였으며 스텝각은 1.8도이다. 하이브리드 스텝핑 모터는 높은 정밀도와 큰 토크에서 미세한 스텝각을 얻을 수 있으므로 일반적으로 가장 널리 사용되고 있으며 회전자와 고정자로 구성되어 있고 회전자에는 축방향으로 자화된 영구자석과 그 바깥쪽에는 다수의 이(tooth)를 가진 두개의 철심이 있는데 각각 N극, S극으로 자화되며 서로의 이는 반피치 어긋나게 된다. 고정자에는 4상의 여자코일이 감겨져 있고

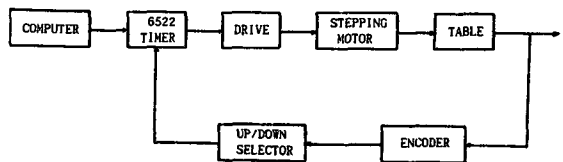


Fig. 1 Block diagram of closed-loop control system

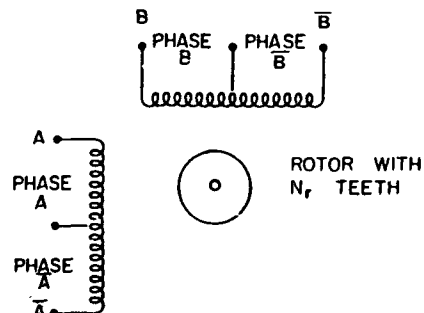


Fig. 2 Schematic diagram of the 4-phase, bifilar-wound hybrid stepping motor

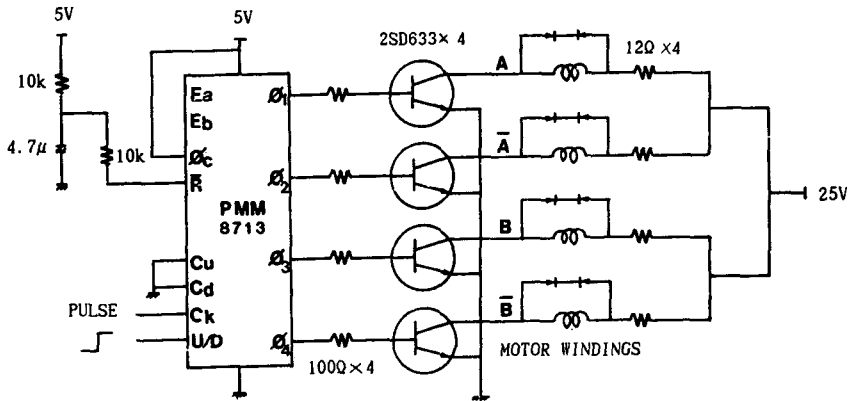


Fig. 3 Driving circuit

코일에 직류전류가 흐름에 따라 여자되어 회전자이를 끌어 당긴다. A상과 \bar{A} 상, B상과 \bar{B} 상은 감는 방향이 반대로 되어 있으며 반대극성이 발생한다. 또 고정자권선은 Fig. 2같이 바이파일러권으로 되어 있어 일정 방향의 전류를 흘리는 유니폴러 구동방식의 드라이브로 구동한다.

구동회로는 여자순서를 결정하는 논리회로와 스텝핑 모터의 권선에 전류를 공급하는 전력제어회로로 구성되어 있다. 논리회로는 스텝핑 모터의 전용 컨트롤러인 PMM8713IC를 사용하였으며 이 IC는 C-MOS이며 직류 4~18볼트의 광범위 전원으로 사용할 수 있다. 모터의 종류(2상, 4상) 및 여자방식(1상, 1-2상, 2상)에 따라 입력을 설정할 수 있다. 또 펄스입력방식도 방향별 펄스입력과 펄스와 방향입력으로 사용이 가능하다.

Fig. 3은 구동회로로 ϕ c 단자를 "1"로 설정하여 4상 모터에 이용할 수 있게 하였으며, Ea 및 Eb 단자를 "0"으로 설정하여 출력토크가 크고 댐핑효과가 있으며 넓은 주파수 범위로 사용할 수 있는 2

상 여자방식을 택하였으며, 외부저항을 부가해서 권선으로 흐르는 전류의 상승이 빨라져서 보다 고속까지 구동이 가능하게 하였다. 그리고 Ck 및 U/D 단자에는 각각 펄스 및 방향신호가 입력되며 Fig. 4는 2상 여자방식의 타임차트를 나타낸다.

2.2 샤프트 엔코더

샤프트 엔코더는 입력축에 주어진 회전각도를 디지털신호로 변환하는 센서이다. 축의 회전에 따라 전기적 신호를 얻는 방법에 의해 광학식, 브리시식, 자기식 샤프트 엔코더로 나누고 출력형태에 따라 인크리멘탈식과 업솔루트식으로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 광학식 인크리멘탈 샤프트 엔코더를 사용하여 테이블의 위치를 검출하였다. 엔코더는 입력축의 회전량을 펄스수로 변환하여 출력하는데 2상의 전진, 지연신호사이에는 각 신호의 1사이클(T)에 대하여 T/4의 위상차가 있는데 이 차이는 입력축의 회전방향에 따라서 전진 패턴이 되거나 지연패턴이 되어 출력된다. 사용한 엔코더는 1회전에 1,000개의 펄스를 발생시키는 것을 입력축을 1회전 시키면 전진신호 A 및 지연신호 B에는 1,000개의 펄스가 회전방향에 따른 위상차를 갖고 출력되므로 스텝핑 모터의 스텝각과 일치시키기 위해 디바이더(divide-by-5-counter)를 사용하여 엔코더의 펄스수를 1회전에 200개로 줄여 사용하였고, 엔코더의 2상 출력을 받아 모터축의 회전방향을 판단하기 위해 업/다운 펄스변환회로를 제작 사용하였다. 2상신호 A 및 B에 의해 각각의 패턴에 따른 에지(edge)변화를 포착하여 축의 회전방향이 반시계방향인 경우는 업펄스를, 시계방향인 경우는

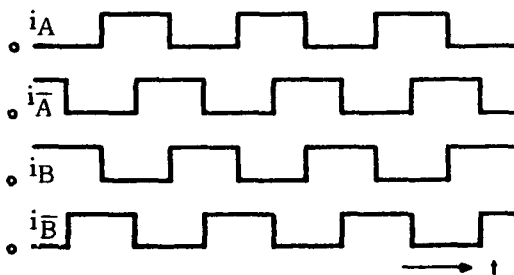


Fig. 4 Time chart of 2-phase drive

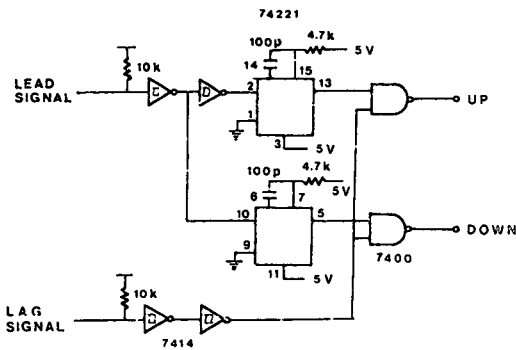


Fig. 5 Up/down pulse conversion circuit

다운펄스를 출력하도록 하여 만능인터페이스를 거쳐 컴퓨터와 연결된다. Fig. 5는 제작한 업/다운 펄스변환회로를 나타낸다.

그리고 정밀위치결정을 위해 백래쉬가 거의 없는 리드 스크루(길이 610mm, 피치5mm)를 사용하여 1축 테이블을 제작하였다. 전달기구부에서의 백래쉬를 억제하고 기구를 간단하게 하기 위하여 스텝핑 모터와 리드 스크루를 직결했고 가이드로서 직경 20mm의 축 2개와 리니어 볼베어링을 사용하였으며 최대 이송거리는 300mm이다.

2.3 마이크로컴퓨터 및 6522만능 인터페이스

본 실험에서 사용한 마이크로컴퓨터는 8비트 6502 CPU를 가지고 48 K 바이트의 RAM과 16 K 바이트의 ROM을 갖고 있으며 8개의 외부 연결용 슬롯이 있고 1 MHz의 클럭으로 동작한다. 외부 회로와의 접촉을 위한 입출력은 일정 메모리를 이용하는 메모리 맵(memory map) I/O방식을 사용하여 신속한 제어가 가능하다. 6522 VIA (versatile interface adapter)는 2개의 8비트 I/O포트와 16비트 타이머를 내장하고 있는 인터페이스 전용 IC인데 8비트 데이터의 병렬 입출력 및 1비트의 직렬통신기능이 있고 핸드셰이크(handshake)가 가능하다. 타이머 I은 내부의 시스템 클럭을 세어 연속적인 인터럽트발생이 가능하며 타이머 II는 내부의 클럭 및 외부로부터 입력되는 펄스를 세는능력이 있다.

PB 7핀으로 펄스를 발생시켰고 TILL(timer I latch low) 및 TICH(timer I counter high)에 로드(load)시키는 값에 따라 출력되는 주파수가 변하고 원하는 펄스 수가 카운트 되었을 때 펄스발생

을 중단한다. PA 1핀으로 스텝핑 모터의 방향을 결정하였는데 정방향일 때는 "0", 역방향일 때는 "1"이 출력된다. 그리고 업/다운 펄스변환회로에서 출력되는 펄스의 상승 에지를 감지할 때마다 CA1 핀을 통해 카운트하도록 하였다. 6522 VIA는 마이크로컴퓨터의 슬롯에 꽂아서 사용하였다.

3. 알고리즘

스텝핑 모터의 위치제어에는 자기동영역(start stop region)내에서 비교적 낮은주파수로 정속구동하는 방법과 슬로우 영역(slew region)을 이용하여 고속으로 가감속구동하는 방법이 있다. 가감속구동에서는 기동을 비교적 낮은 주파수에서 하고 서서히 가속시켜 어느 상한 주파수로 정속구동한 후 주파수를 서서히 감속시킨다.

스텝핑 모터의 폐회로제어를 위한 정속 및 가감속 소프트웨어를 개발하였고 Fig. 6과 Fig. 7은 각각의 흐름도를 나타낸다. 제어프로그램은 베이직언어와 어셈블리언어 프로그램으로 나눌 수 있는데 베이직언어 프로그램은 컴퓨터 키보드를 통해 10진수로 입력된 위치 및 속도값을 16진수로 환산하여

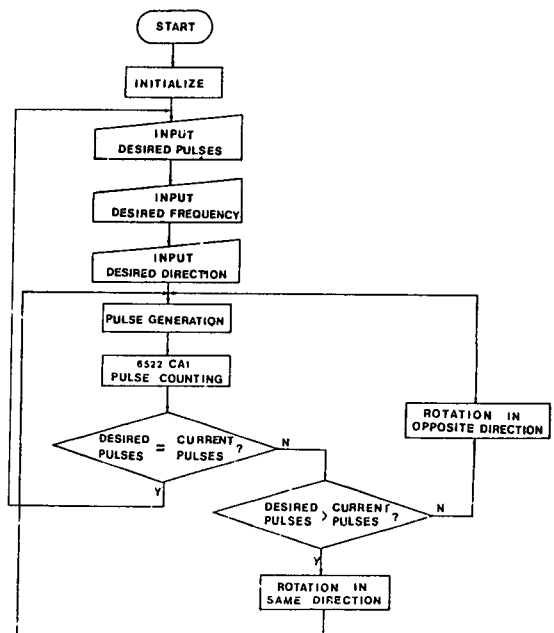


Fig. 6 Flow chart of closed-loop control for constant velocity

메모리에 저장시키고 어셈블리어프로그램은 실시간 제어를 위한 것이다.

컴퓨터의 키보드를 통해서 직접 입력된 데이터에 따라 원하는 펄스의 주파수와 방향신호가 발생된다. 스텝핑 모터가 구동하게 되면 모터축과 직결된 리드 스크루우 말단에 부착된 위치 검출기인 엔코더로부터 2상의 펄스가 발생되는데, 디바이더를 거쳐 업/다운 펄스변환회로에 입력되어 정방향일 때는 다운 펄스, 역방향일 때는 업 펄스를 발생하게 된다. 업/다운 펄스판별회로의 출력핀을 만능인터페이스에 연결하여 상승 에지 변환을 감지할 때마다 카운트하여 현재치로 기억되게 하였다. 가속은 미리설정된 각 구간별 펄스수와 주파수로 제어하였고, 감속은 가속의 역패턴으로 제어하였으며 가속과 감속에 필요한 시간을 같게 하였다. 또한 컴퓨터는 현재치와 목표치의 편차치로써 가감속조건 및

데이블의 위치를 판별하게 된다. 만약 현재치가 목표치를 넘게 되면 그 편차를 계산하여 새로운 목표치로 지령되며, 방향도 역방향으로 바뀌어 입력되게 된다. 이러한 논리가 반복됨으로써 목표치와 현재치가 일치하게 되면 펄스발생이 중지되어 스텝핑 모터는 정지하게 되고, 컴퓨터는 새로운 데이터를 기다리게 된다.

4. 실험 및 고찰

연구에 사용된 스텝핑 모터의 동특성 및 공진 현상을 조사하기 위하여 스텝핑 모터의 운전영역내에 있는 여러 종류의 관성부하에 대하여 미세한 속도 변화를 주면서 개회로제어시와 폐회로제어시의 인입토크(pull-in torque) 및 탈출토크(pull-out torque)를 측정하였다. 측정방법은 스프링 평형(spring balance)법⁽⁴⁾을 사용하였다.

Fig. 8은 개회로제어시의 인입토크(pull-in torque) 특성곡선으로 공진 현상이 발생하지 않았고 관성 부하가 커지면 자기동 주파수가 저하되어 자기동 영역이 좁아짐을 알 수 있었으며 자기동 영역 내에서는 스텝오차없이 기동, 정지, 역전이 가능하였다.

Fig. 9는 본 연구에서 개발한 폐회로 정속제어 소프트웨어로 실험한 인입토크 특성곡선이다. 개회로제어시와 같이 관성 부하가 커지면 자기동 주파수가 저하되어 자기동 영역이 줄어들므로 운전영역

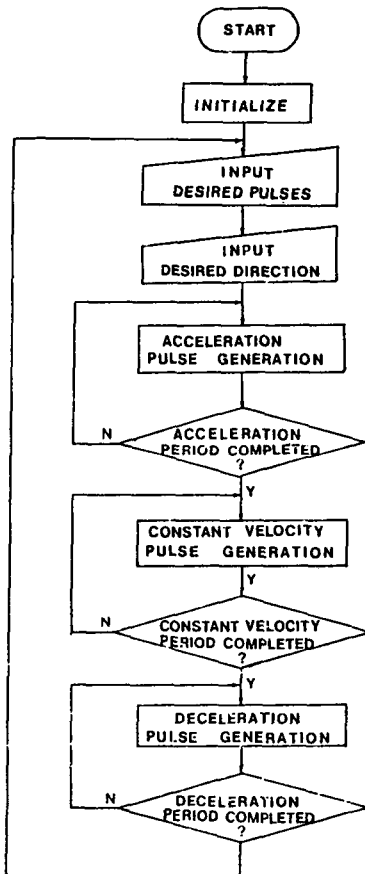


Fig. 7 Flow chart of closed-loop control for acceleration and deceleration

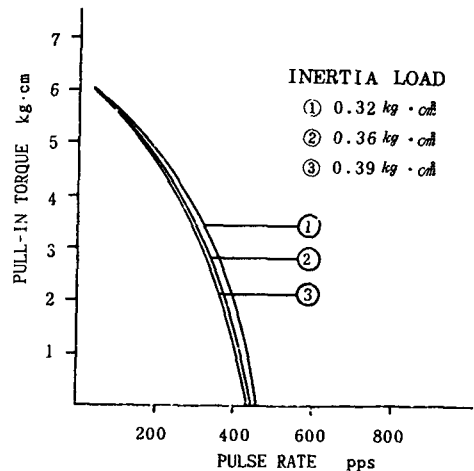


Fig. 8 Pull-in torque characteristics of open-loop control

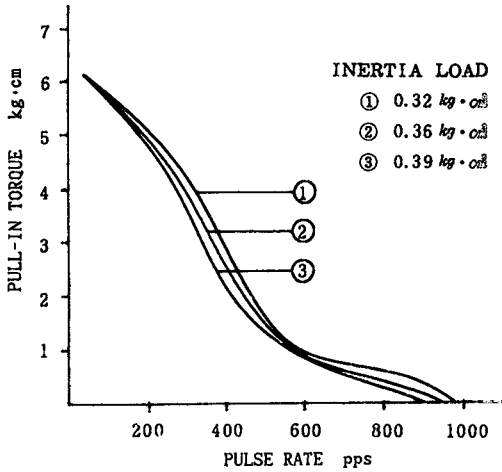


Fig. 9 Pull-in torque characteristics of closed-loop control

이 좁아짐을 알 수 있었다. 그리고 폐회로제어시는 특별히 가속시키지 않아도 입력펄스에 동기하여 쉽게 가속된다는 것을 알 수 있었고, 최대 자기동주 파수(maximum start stop pulse rate)도 약 2배로 증가하여 운전영역이 확장됨을 알 수 있었다.

개회로 및 폐회로 제어시 탈출토크(pull-out torque) 특성곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 스텝핑 모터의 운전영역내에 있는 여러종류의 관성 부하에 대하여 탈출토크를 측정된 결과 개회로 제어시는 관성 부하가 0.39 kg·cm²이고 속도가 720 pps일

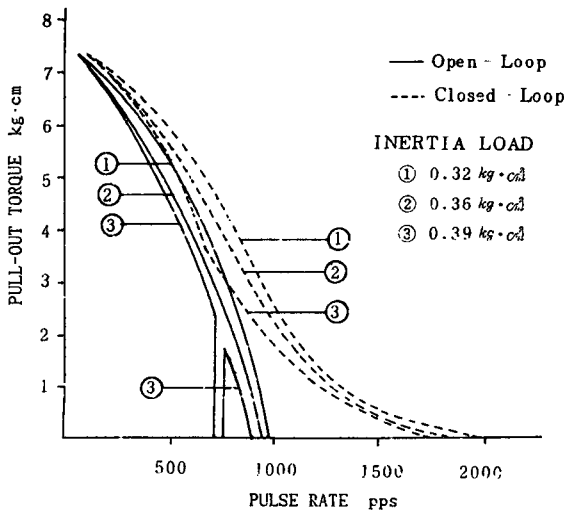


Fig. 10 Pull-out torque characteristics

때공진 현상이 발생되었고 다른 관성 부하나 속도 영역에서는 공진없이 안정하게 운전되었다.

스텝핑 모터의 속도가 공진영역이 되면 전동기는 비동기화되어 공급펄스주기에 응답하여 회전하지 못하고 진동현상이 유발되며, 이 상태에서의 회전 토크는 거의 없어지며, 회전자는 진동확대의 결과로 순간적으로 정지되었다. 그러나 본 연구에서 개발한 마이크로컴퓨터에 의한 폐회로제어시는 관성 부하에 대한 전속도 구간에서 공진현상이 배제되어 스텝핑 모터가 안정하게 가속되었으며, 최대응답주 파수도 개회로 제어시에 비하여 약 2배 정도 증가하여 운전영역이 확장되었다. 그리고 탈출토크 실험에서도 관성 부하가 커지면 응답주파수가 저하되어 슬로우영역이 줄어들므로 결국 운전영역이 좁아짐을 알 수 있었다.

위의 실험 결과로 개회로 제어시는 어떤 관성 부하에 대하여 공진으로 진동이 발생하여도 계속하여 펄스가 공급되어 진동을 확대시켜 결국 회전자가 정지하게 되지만, 본 연구에서 개발한 폐회로 제어시는 마이크로컴퓨터에서 발생하는 하나의 펄스에 의하여 회전자가 한 스텝 회전하게 될 것이다. 그러면 리드 스크루우 끝에 부착되어 있는 위치검출 기인 엔코더에서도 역시 하나의 펄스가 발생되고 이 펄스에 의하여 인터럽트 신호가 발생된다. 그러면 이 신호에 의하여 다시 컴퓨터에서 다른 펄스를 발생시키게 되며 이러한 동작이 연속적으로 수행되어 원하는 위치와 실제 위치가 일치하게 되면 펄스 발생이 중단된다.

결국 개회로 제어시는 공진 현상으로 회전자가 진동하여도 연속적인 펄스공급으로 진동을 확대시켜 회전자가 정지하게 되고 공급 펄스가 비동기화 되어 정확한 위치를 검출할 수 없으나, 폐회로 제어시는 마이크로컴퓨터에서 발생하는 최초의 펄스로 회전자가 회전하고 그 이후에는 엔코더에서 펄스가 발생되어야만 컴퓨터에서 펄스가 발생되므로 항상 회전자가 안정(equilibrium)된 상태에서 펄스가 입력되므로 공진 현상을 배제할 수 있으며 정확한 위치를 검출할 수 있다.

Fig. 11은 폐회로제어시 마이크로컴퓨터에서 발생하는 720 pps의 펄스파형이고 Fig. 12는 같은 입력펄스에 의해 스텝핑 모터가 운전되었을 때 업/다운 펄스반별회로에서 나오는 펄스파형이다. 그리고, Fig. 13과 Fig. 14는 Fig. 11과 같은 720 pps의 입력펄스에 의한 스텝핑 모터의 정전시와 역전시의

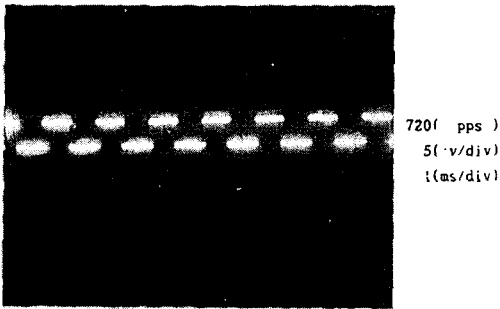


Fig. 11 Waveforms generated from the microcomputer

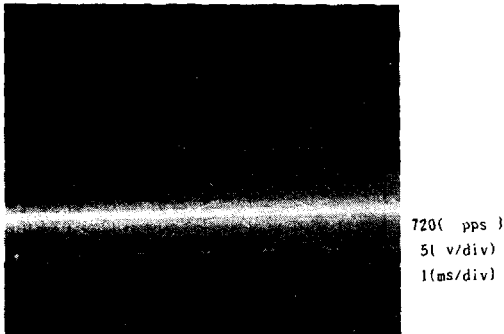


Fig. 12 Waveforms of the up/down pulse conversion circuit

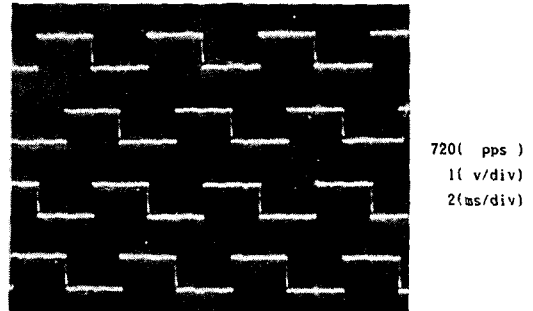


Fig. 13 Transistor input waveforms of A, \bar{A} , B, \bar{B} phase for clockwise

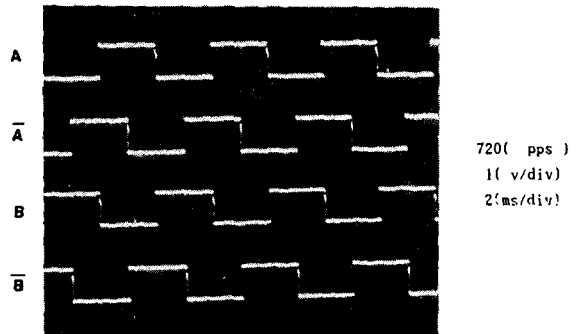


Fig. 14 Transistor input waveforms of A, \bar{A} , B, \bar{B} phase for counterclockwise

트랜지스터 A, \bar{A} , B, \bar{B} 상의 입력파형이다.

이 확장되었다.

5. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 스텝핑 모터의 개회로제어시 발생되는 공진 및 불안정현상을 배제하기 위하여 폐회로제어시스템을 개발하였다. 개발된 폐회로제어시스템은 마이크로컴퓨터, 하이브리드 스텝핑 모터, 리드 스크루우를 사용한 테이블, 위치검출을 위한 샤프트 엔코더 등으로 구성하였다. 그리고 엔코더의 회전방향을 판단하기 위하여 업/다운 펄스판별 회로를, 컴퓨터와 주변장치와의 연결을 위해 만능 인터페이스를 제작하였고 프로그램은 실행시간이 빠르고 외부신호와 연결이 용이한 어셈블리어를 사용하였다. 개발된 폐회로제어시스템의 독특성은 스텝핑 모터의 전 운전영역내에 있는 모든 종류의 관성부하에 대하여 공진 및 불안정현상이 발생되지 않았고, 개회로제어에 비해서 최대자기동주파수 및 최대응답주파수가 각각 2배정도 증가하거 운전영역

- (1) Kuo, B.C., 1974, "Theory and Application of Step Motors", Westing Publishing Co., pp. 206~251.
- (2) Kuo, B.C., 1979, "Step Motors and Control Systems", Incremental Motion Control, Vol. 2, SRL Publishing Co., pp. 215~250.
- (3) Goerke, U.B., August, 1978, "Closed-Loop Control of a Permanent Magnet Step Motor by Waveform Sensing", University of Illinois, Urbana, pp. 153~161.
- (4) Kenjo, T., 1984, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", Clarendon Press, Oxford, pp. 165~195.
- (5) 도서출판 세운 편집부 역, 1985, "스텝핑.모타의 활용기술", pp. 32~36.
- (6) Zaks, R., 1979, "6502 Applications Book", Sybex, pp. 31~60.
- (7) 전재승 역, 1986, "센서 인터페이스", 기전연구소,

- pp. 156~162.
- (8) Koren, Y., 1983, "Computer Control of Manufacturing Systems", M-H Book Co., pp. 94~98.
- (9) 이상석, 1985, "P.M Step Motor의 증속역공진배제에 관한 연구", 영남대학교 박사학위논문.
- (10) Brown, R.H., May, 1986, "Near Time-Optimal Control of Step Motors", 15th Annual Symposium Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 191~200.
- (11) Marushima, K. and Dohmeki, H., May, 1986, "Speed-Torque Characteristics of a Closed-Loop Stepping Motor", 15th Annual Symposium Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 233~240.
- (12) 김교형, 이기설, 1988, "2축 윤곽제어를 위한 소프트웨어 보간자 개발에 관한연구", 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 389~396.