

정밀제어를 위한 자동화요소의 발전 동향

최 덕 권

대곤인터네셔널 기술영업부

1. 서론

현대의 산업은 생산라인의 자동화에 근간을 둔다고 해도 과언이 아니며, 특히 공장자동화는 모든 산업전체에 영향을 미칠 정도로 중요하게 다루어지고 있다. 선진국의 경우 경쟁국이나 경쟁사보다 우수한 성능의 장비를 제작하기 위해, 자동화요소의 성능을 향상시키기 위한 연구개발에 지원을 하고 있으며, 타국이나 타사가 보유하지 못하고 있는 연구 결과 및 기술의 경우에는 국가의 승인을 받아야 외국으로 이전 할 수 있을 정도이다. 공장자동화 및 생산설비자동화에 필요한 기본적인 요소들은 구동원인 Motor, 힘을 전달하는 Ball-Screw와 같은 기구부 그리고 전체 시스템을 제어하는 제어부로 크게 구분할 수 있다. 대표적인 자동화요소는 Micro-Stepping Motor, Servo Motor, Linear Motor, Piezo Motor와 같은 구동원, Air Bearing, Cross Roller Bearing, Lead-Screw, Ball-Screw와 같은 기구부 그리고 Motion Controller & Drive, PLC와 같은 제어부가 있다. 현재 자동화장비에 일반적으로 많이 사용되어지고있는 Rotary Step & Servo Motor, Ball Screw, Lead Screw 등에 대해서는 많이 알려져 있으므로, 본 글에서는 Multi Axis Controller, Linear Motor, Piezo Motor, Air Bearing, High Resolution Feedback Device 등 정밀산업기계 자동화에 필요한 요소들의 특징 및 장비에 적용 함으로서 얻을 수 있는 이점에 대해 기술하고자 한다.

2. 본론

현재의 전체 산업분야의 공장자동화는 정밀한 제어가 불필요한 일반 산업장비(치) 자동화에서부터 정밀제어가 필요한 정밀산업장비 자동화 등 전반적인 산업 자동화가 이루어지고 있다. 여기에서는 정밀제어가 필요한 장비에 적용 가능한 자동화요소에 대해 언급하고자 한다.

2.1. Controller 의 발전 동향

Motion control 은 Robotics의 기반으로서 컴퓨터를 이용해 운동을 제어하는 과정이다. Tool 의 능력을 정밀하게 제어하는 능력은 인간의 손으로 할 수 없는 작업

을 가능하게 한다. 일반적으로 모터, 엔진, 공압, 유압 등의 힘을 발생하는 기구를 사용하여 기계적인 움직임을 제어하는 것이다. Motion control 의 문제는 커다란 용접로봇의 동작을 제어하는 것이든가 또는 정밀한 하드디스크 헤드의 위치를 제어하는 것이든가 모두 구동자를 제어하는 문제 즉 구동자의 속도, 위치, 힘, 토크, 등을 제어하는 문제가 된다. 속도, 위치, 힘, 토크 등을 제어하기 위해서 개발된 것이 Motion Controller 이다.

Motion Controller는 큰 분류로 Feedback을 받지않는 (Step Motor, Pulse type servo drive 등) Open loop type과 Encoder, LVDT, MLDT, Analog와 같은 변화량을 받아서 제어를 하는 Close loop type으로 나눌 수 있는데, 여기서는 Servo Controller의 특징 및 현재까지 발전된 제어 기술에 대하여 설명하기로 한다.

1) 기본적인 제어 parameter

Controller 기술의 발달은 CPU의 발달과 같은 선상에 있다고 할 수 있다. 20년 전의 8 BIT시절에 개발되었던 Controller의 기능과 최근에 개발된 DSP를 이용한 Controller와의 차이는 여러 면에서 큰 차이가 있다 Controller 의 servo에 관련하여 필요한 특성을 나열해 보면 다음과 같다.

- 가) Servo update time : feedback 장치에서 data를 읽어서 이를 계산하여 교정 출력을 보낼 때까지의 시간. 고성능 Controller일수록 시간이 짧다.
(< 수십 μ sec)
- 나) Servo Frequency(Servo Update Rate) : 1초에 할 수 있는 Servo Update 수. 고성능 controller일수록 높다.
(> 수 Khz)
- 다) Servo Gain Resolution : 보통은 16bit를 사용하나 고성능 일 경우 24 bit 까지 사용한다. % Resolution 이 높을수록 보다 세밀한 제어를 할 수 있다.
- 라) DAC resolution : 일반적으로 12bit를 사용한다. 최근에는 18bit까지 사용하며 높을수록 정밀한 Torque 나 Velocity출력을 줄 수 있다.
- 마) 각종 Feedforward Gain : 제어 대상물의 응답특성을 빠르게 한다(Acceleration, Velocity, Friction Feed-

forward).

바) Maximum Encoder Rate : 높을수록 좋으며 보통 수Mhz~40Mhz. 만일 1Mhz이하라면 1nm의 분해능을 가지는 부하를 1mm/sec이상으로 운전할 수 없다.

사) Notch Filter, Low Pass Filter : 부하가 기구부의 진동에 반응하여 진동할 경우 Notch Filter나 Low Pass Filter를 이용하여 진동하는 주파수에 대한 반응을 줄일 수 있다.

이상이 부하를 제어하는데 필요한 Servo Controller의 각종 Parameter에 대한 설명이다.

2) 제어 방식

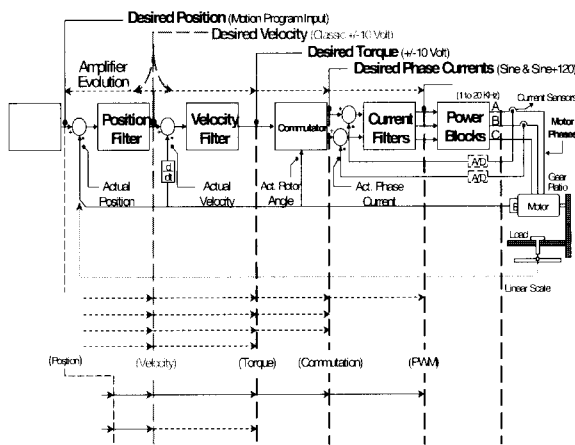


그림 1. 제어알고리즘.

위의 그림은 Servo controller, Drive, Motor 및 부하가 갖추어진 제어알고리즘이다. Controller와 Drive를 연결하는데 있어서 사용되는 방법은 다음과 같다.

가) Position Mode

Controller에서 Digital signal인 Pulse를 Drive에 주어서 제어를 하는 방법으로서 위치 및 속도에 대한 제어를 Drive에서 담당하게 된다. 이는 Open loop로 사용하게 되며, 제어 및 사용상의 이점은 있으나 시스템의 성능을 일정수준 이상 개선할 수 없다.

나) Velocity Mode

Controller에서 Analog Velocity Signal을 주어서 control 하는 방법으로서, Drive에서 PI Gain을 제어함으로 속도에 대한 제어를 좋게 할 수 있다. 그러나, 높은 정밀도를 요구하는 시스템에서는 문제가 발생할 수 있고, 몇 가지 Gain을 Drive에서 담당하므로 Torque mode 보다 간단한 구성으로 Controller를 제작할 수 있다.

다) Torque Mode

Controller에서 Analog Torque Signal을 주어서 제어하는 방법으로서, Drive는 단순한 전력증폭기 역할 및 Commutation기능만 필요하며 일반적으로 가장 간단한

구성으로 되어 있다. 그러나 Controller에서 PID 및 Feedforward Gain을 가지고 제어해야 함으로, 고성능 Controller가 필요하다. 시스템의 성능을 높일 수 있다.

라) Controller에서 sinusoidal(sin & sin+120°) 신호를 보내는 방법.

Drive에서 Digital Hall Commutation을 하는 경우 Commutation signal이 on/off동작을 하며, 모터로 보내는 전류도 이와 비례한 동작을 한다. 따라서 모터의 Rotor가 회전을 할 때 commutation동작이 일어나는 위치에서 velocity ripple 및 기계적인 소음이 발생하며 부하가 많을 때, 속도가 높을 때 증상이 심해지고 linear motor에서는 특히 더 심해진다. 이와 같은 증상을 없애기 위해서는, drive에서 sinusoidal commutation을 하여 rotor의 각도에 따른 전류를 보내야 하는데 이 기능을 controller에서 제어하게 함으로서 시스템의 신뢰성 및 응답성을 한 차원 높인 방법이다.

마) Controller에서 Drive의 전력증폭단으로 PWM signal을 보내는 방법.

Direct PWM 제어라고 하며 controller에서 hardware적으로는 마지막까지 제어하는 방법이다. Direct PWM 제어에서의 drive는 전력증폭 소자와 전류 sensor만 가진 단순 구조로 되어 있고 모든 제어를 controller에서 함으로서, 기존의 방법인 controller에서의 DA변환 및 drive에서의 commutation을 필요로 하지 않으므로 시스템의 응답시간을 수msec이상 높일 수 있다.

2.2. 정밀 제어를 위한 기구부분의 개발/사용 동향.

1) 에어베어링 (Air Bearing)

에어베어링 기술은 1800년대부터 1900년대에 걸쳐 이론적으로 정리되어, 현대에 이르러서야 진보된 가공기술과 계산기법에 힘입어 상용화 제품으로 개발되어지고 있다. 마찰을 최소화시킬 수 있는 에어베어링 기술은 반도체장비/ 3차원측정기등과 같은 균일한 속도 특성, 정밀 위치제어, 우수한 직진성이 보장되어야 하는 정밀장비에 사용되어지고 있다. 본란에서는 위치제어 시스템에 적합한 Aerostatic Bearing에 대해 언급하고자 하며, 에어베어링 해석 및 제작기술보다는 시스템에 적용하여 얻을 수 있는 장점에 대해 정리하고자 한다.

가) 최소의 마찰.

공기의 점성이 매우 작아 정적마찰 및 동적마찰이 0에 가까우며, 구름이나 회전요소를 갖고 있는 전통적인 베어링에 비해 우수한 직진성 및 속도의 변화가 거의 없는 부드러운 동작이 가능하다. 또한, 마찰 및 Stick-Slip과 같은 특성을 배제할 수 있어, 상용화 되어있는 위치정보장치와 컨트롤장치를 이용해 수 Micron에서 Nano급의 분해능을 얻을 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 3차원측정기, X-Ray Stepper, Diamond Turning Machine등 Scanning작업이 중요한 장비의 위치제어용으로

적용하여 고정도, 고속을 동시에 얻을 수 있다.

나) 직진성.

에어베어링을 사용하는 슬라이드의 직진성은 Cross-roller Bearing, Ball Bearing 등과 같은 기계베어링을 사용하여 제작되어지는 슬라이드에 비해 탁월한 직진특성을 얻을 수 있다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 에어베어링의 경우 표면의 불균일성을 Air Gab에서 흡수하여 우수한 직진성을 얻을 수 있지만, 구름이나 회전요소가 포함된 기계베어링에서는 시스템에 그대로 반영되어 기구부의 자체 에러이하의 직진성을 얻을 수 없다.

일반적으로 고정도 Cross-roller Slide의 경우 200mm 구동거리애 4~10 μ m의 직진성을 얻을 수 있지만, 에어베어링 슬라이드의 경우 0.5 μ m 이하의 직진성을 얻을 수 있다. 또한, 2mm의 짧은 구동거리에서는 10nm의 직진특성을 얻을 수 있는 반면, 구름/회전 요소들로 구성된 기계베어링 Slide는 0.5~1 μ m급의 직진 특성을 나타낸다.

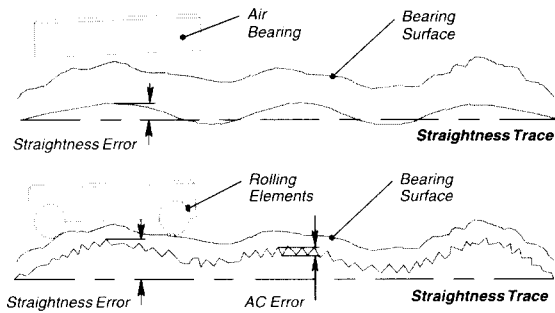


그림 2. Straightness Errors.

다) 속도안정특성 (Air Bearing Spindle)

Brushless D.C Motor와 Optical Encoder를 Rotary Air Bearing 회전부에 직접 부착하여 제작된 Air Bearing Spindle은 기구적인 마찰에러뿐만 아니라 킥플링으로 조립 시 발생할 수 있는 고유에러까지 최소화 시켜 회전에러를 최소화 시킨다. 에어베어링 스피ndl의 속도 변화율은 2,400~20,000RPM으로 회전 시 0.01~0.001%로 Electrical Head Tester, Flight Height Tester, Data storage test Equipment, Micro-Milling Center 그리고 EDM Machine에 적용할 수 있다.

라) 고속, 고정도(High Speed & Axes Precision.)

일반적인 장비의 속도 한계 및 위치정밀도는 기계베어링 등 기구부의 마찰로 인해 제한 되어진다고 볼 수 있다. 에어베어링은 공기의 "Averaging Effect" 특성으로 기구표면의 미소한 불균일성의 극복 및 마찰계수가 0에 가까워 기구적인 손상 없이 고속, 고정도의 사양이 동시에 요구되어지는 시스템에 적용하여, 우수한 Motion Accuracy 특성을 얻을 수 있다.

표 1. 공기베어링과 기계베어링의 비교.

	공기베어링	기계베어링
Initial Cost	Low to Moderate	Moderate to High
Size	Small to Medium	Moderate to High
Load Capacity	High	Medium
Stiffness	High	High
Friction	Medium to Poor	Excellent
Vibration	Medium to Poor	Excellent
Accuracy of Position	Medium	Excellent
Life	Medium	Excellent

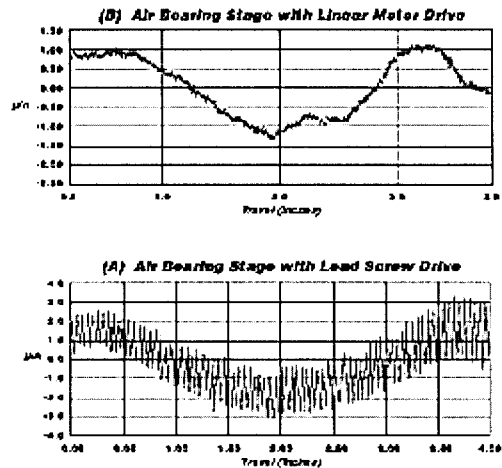


그림 3. Air Bearing의 직진 특성 측정 데이터.

2) 리니어모터 (Linear Motor)

리니어모터에는 일반적으로 널리 사용되어 지는 Linear Stepper, Linear Burshed Motor, Linear Brushless Motor, Inductance and AC Synchronous 등이 있다. Linear Brushless Motor는 일반적인 정밀위치제어 분야에 주로 사용되어 지며, Linear Brushed Motors는 Commutation시 열 발생이나 브러시의 마모로 인한 문제점이 있다. 리니어스테핑모타는 쉽게 적용되어지나 하중능력이나 고정도의 위치 피드백에 어려움이 있다. 리니어모터의 장점은 일반적인 회전운동을 직선운동으로 전환하는 직선운동시스템에 비해 고속, 고정도, 백래쉬가 없음, 설치의 편리 등이 있으며, 점차 일반적인 직선운동시스템을 대체하고 있으나, 초기투자비용의 증가라는 단점도 있다. 리니어구동을 위해 모터는 U Type / Platen Type Linear Motor와 같이 구동부(Coil Assembly)와 고정자(Magnet Track)의 두 부분이 비접촉식으로 구성 되어있다. 이러한 구조는 Rotary Servo Motor의 Armature / Stator의 구조와 동일하며 동작원리 또한 동일하다. Linear Motor Commutation은 Analog Hall Sensor/ Digital Hall Sensor / Sine 방식을 모두 사용할 수 있다. (Sine방식이 Hall 방식에 비해 대략 10~15% 효율이 높다.)

가). Sine Commutation : 리니어엔코더가 위치 정보 및 모터 Commutator로 사용 되며, Power-On시 모터의 상을 맞추는 작업을 컨트롤러에서 실시한다.

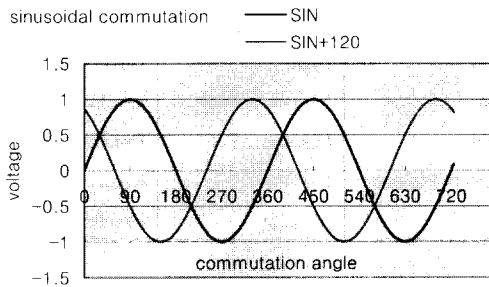


그림 4. Sinusoidal Commutation.

가-1) 장점

- * Motor 효율 증가 (~ 10%)
- * Following Error의 최소화
- * 정밀한 윤곽선 / Milling과 같이 반작용이 있는 Application에 적합

가-2) 단점

- * Sine Commutation Controller 필요
- * Power-Up 시 Motor Phasing 필요
- * Motor Phasing 동안 Limit Switch에 근접하지 말 것

나). Hall Effect Device Commutation

Coil Assembly내에 내장된 Hall Sensor에 의해 Magnet Track의 극성과 60도마다 바뀌는 모터 상을 검출한다.

나-1). 장점

- * 특정 위치 제어 우수
- * 간단한 구성
- * 상용화된 Controller / Drive와의 호환성

나-2). 단점

- * 비용 증가 (Hall Sensor 필요)
- * 저속에서 Ripple 발생
- * 윤곽선 작업이 어려움
- * Sine Commutation에 비해 저효율성
- * Force 불균일.

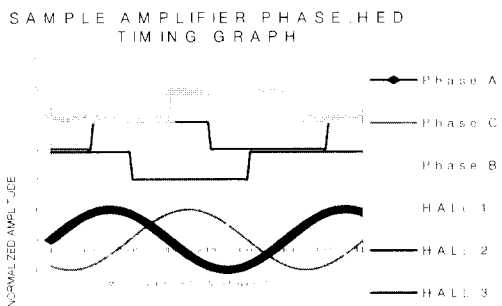


그림 5. HED Commutation.

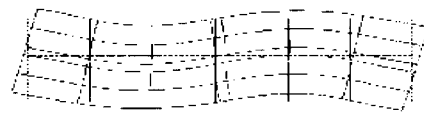
다). 열에 의한 모터 효율 감소.

Linear Motor를 적용하여 효과적인 성능을 구현하기 위해서는 구동 시 발생하는 열을 효과적으로 분산시킬 수 있도록 디자인해야 한다. 일반적으로 고속, 고가감속 조건에서 Motor를 구동 시킬 때 상당히 큰 Electrical Energy가 요구되어진다. 이러한 Electrical Energy는 Motor에 열을 발생시키며 Motor 효율을 상당히 저하시키는 요인으로 작용하기 때문이다.

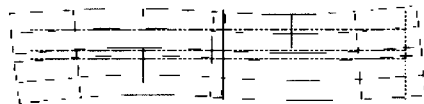
3) Piezo Motor

가) Piezo-ceramic motor.

20여년 전에 이미 개발되었으며, 최근에 동작제어 부품으로 속도의 한계/ Low Force(1N~40N)에도 불구하고 높은 분해능이 필요한 반도체분야와 같은 초정밀제어 분야에 적용되고 있다. 이러한 고 분해능의 장점에도 불구하고, 산업분야에 쉽게 적용하지 못한 것은 상용화 Drive /Controller와 쉽게 호환되지 한다는 점이었으나, 현재는 일반Drive와 Controller로도 구동할 수 있게 되어 보다 쉽게 Piezo Motor의 장점을 이용할 수 있게 되었다. 작동원리는 전계 안에서 기계적 응력을 발생하는 압전효과를 이용하는 것이며, 압전 물질에 Drive Voltage를 인가하면 두 가지 모드의 Field가 발생한다. (longitudinal mode와 비슷한 주파수에서 진동하는 transfers bending oscillation mode).



Transverse Bending Mode



Longitudinal extension mode

이 두 가지 모드를 동시에 사용하여 세라믹의 가장 자리에 작은 타원케적의 Driving Force를 발생시키며, 이것이 스테이지를 구동 시킨다, 이때 사용하는 세라믹의 모양에 따라 직선 또는 회전운동으로 전환시키며, 두 진동모드의 상을 역전시켜 구동방향을 바꾼다. 그리고, 기계적 고유공진주파수보다 훨씬 높은 Driving Force의 주기적 성질은 고해상도와 고정밀을 유지하면서 부드러운 동작이 가능하게 하여 준다.(5nm의 해상도를 유지하면서 0.1um/sec~250 mm/sec로 0.1%의 속도 편차를 갖고 구동.) Piezoceramic Motor 와 드라이브의 조합은 Voltage Amplifier로 구동되는 표준 DC Motor와 비슷한 Force Velocity 특성을 가지고 있으며, Piezoceramic Motor는 어떤 DC motor controller로도 구동할 수 있다. (일반적으로 Rotary 및 Linear motor들은 40 kHz

AC driver voltage로 구동 된다.)

초기 Ultrasonic Piezoceramic motor는 여러 가지 단점들이 있었는데, 그 중 하나는 Driving force가 마모하기 쉬운 재질을 통해 전달 되므로 수명이 매우 짧은 것이었다. 현재는 Stage에 Ceramic 재질을 부착하여 이 문제를 해결하였으며, 수명을 20,000시간 또는 수천 Km의 이송거리를 초과하여 사용할 수 있게 되었다. 또 하나의 문제점은 각각의 응용사례에 따라 모터가 생산되었기 때문에 표준사양이 없다는 것이었다. 그러나 수요의 발생에 따라 대량생산이 가능해져 새로이 생산되는 Piezoceramic Motor들은 점차 표준화되어 Precision Mechanical System에 쉽게 적용할 수 있게 되었다.

나) PZT Actuator

전압을 가해 주었을 때 생기는 부피의 변화를 이용한 전기 장치이다. 전기 에너지가 역학적인 에너지 즉 실질적인 운동으로 변화할 때 거의 자기장을 발생시키지도 않으며 전기적인 연결 부위를 이동시킬 필요도 없다. 또한 부피의 변화는 가해지는 전압에 비례하기 때문에 전기적인 신호 발생의 기술의 발전과 더불어 극도로 높은 분해능을 가지고 조절할 수 있다. PZT Actuator는 마모나 성능의 저하 없이 수백만 회 이상을 작동할 수 있다. PZT Actuator의 높은 응답 속도는 움직이려 하는 물체와 전기적 Driver의 출력 용량에 의해서만 제한된다. 실제로 PZT Actuator가 여기 상태를 유지하는 데는 전력이 소모되지 않으며, 열 또한 발생하지 않는다. 그렇지만 PZT Actuator의 최대 Dimensional 변화는 자체 길이의 0.1%에 불과하기 때문에 위와 같은 많은 장점에도 불구하고 일반적인 Application에 두루 사용되지는 않으며, 매우 작은 행정 거리의 마이크로 미터 이하의 초고정밀 제어에 주로 사용된다.(수백 Volts의 Application일 경우에도) 이 사실은 PZT Actuator를 유용한 위치 제어 장치로 사용하기 위해서는 신중한 설계와 제작에 있어서의 전문가적인 특별한 능력이 필요하다는 것을 뜻하는데, 이러한 방법의 일례를 아래에서 볼 수 있다.

INCHWORM Motor는 이미 여러 가지 Application에 사용되고 있는 메커니즘으로, 기본적인 작동 원리는 다음과 같다.

운동은 아래와 같이 세 PZT 요소들을 순차적으로 활성화시키면서 이루어진다.

그림의 바깥 쪽 두 PZT들은 Clamp로서 동작한다.중앙의 PZT는 전압이 가해지면 Motor Shaft를 따라 수축 / 팽창하며, 세 PZT 소자들은 모두 독립적으로 작동하지만, 물리적으로는 서로 연결되어 있다.

PZT 소자 1번에 전압이 가해지면 1번이 Shaft를 잡는다. 그리고 나서 비율을 변화시킬 수 있는 계단 형식의 전압이 2번 PZT에 가해지면 Nano meter 분해능의 Discrete Step을 갖는 길이 변화가 일어난다. 그 계단형 전압은 수백개의 Step을 가지며 경사의 어떤 점에서라

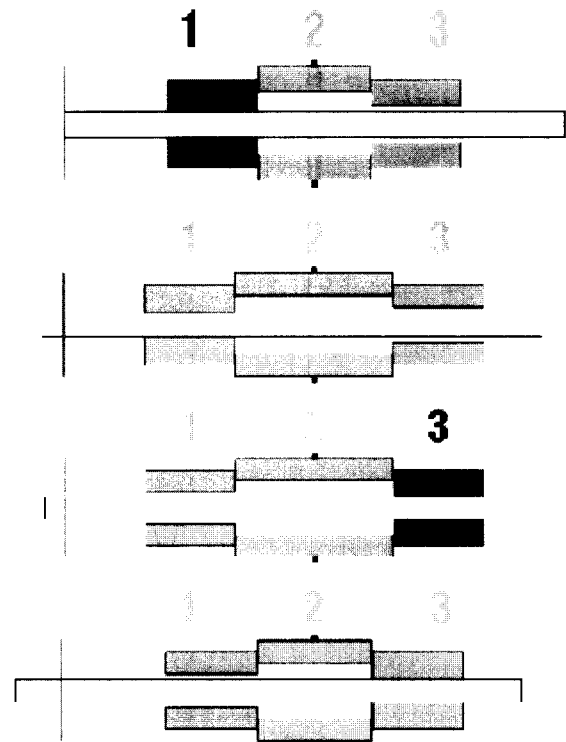


그림 6. Inchworm Motor 동작순서.

도 멈추거나 역으로 이동할 수 있다. 이 Step들은 제어가 가능하기 때문에 이것이 INCHWORM Motor의 실질적인 분해능이다. 경사의 끝에서 3번 PZT에 전압을 가하면 3번이 Shaft를 잡는다. 그런 후에 1번에 전압을 제거하면 1번이 Shaft를 놓는다. 계단형 전압이 하한선까지 밀므로 이동하면 1번이 다시 작동되고 3번이 Shaft를 놓고, 계단형 전압이 다시 시작된다. 이러한 절차가 몇번이고 반복될 수 있으며, 그것으로 Motor Shaft에 의해서만 제한된다.

4) Sub-Micron Feedback Device

구동거리의 장대화, 고속특성의 리니어모터 사용이 증가함에 따라, 실제 이송부의 정밀한 위치제어를 위해 리니어엔코더의 사용도 보편화되고 있다. 분해능 0.1um ~ 5um급의 리니어엔코더를 주로 사용하고 있으며, 이 이상의 분해능이 필요할 경우 Laser Interferometer를 사용하는 것이 보편적인 방법이다. 그러나, 엔코더의 분해능이 낮아 질수록 초기투자비용도 크게 증가하여 장비 제작에 부담으로 작용하고 있다. 현재는 일반적인 리니어엔코더와 Laser Interferometer 그리고 레이저다이오드를 이용한 0.3~20Nano급 Optical Encoder가 출시되고 있다. Laser Diode 엔코더는 Laser가 Grid로부터 반사되어 발생하는 간섭무늬를 Grating의 Spatially Filterd Image 또는 Diffracted Beam 사이의 간섭무늬(간섭무늬 간격은 레이저다이오드의 파장에 의존하지 않는다.)를 해석하여 120 위상차가 나는 R, S, T 신호를 발생시킨다.

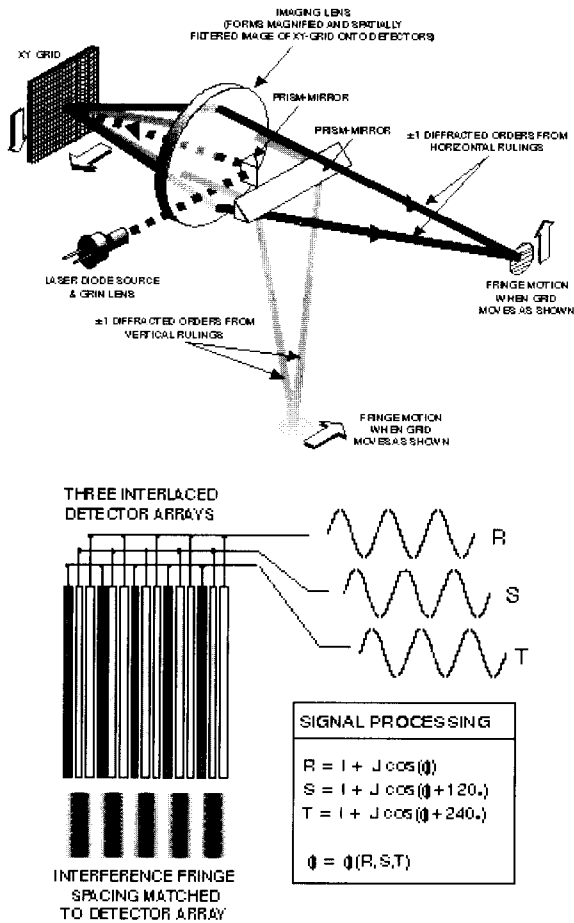


그림 7. Laser Diode Linear Encoder의 원리.

이 3개의 신호는 Interferometric 측정방식에 정의된 I, J, θ 에 의한 신호 처리 과정을 거쳐 컨트롤러로 전송되어 Laser Interferometer에 상응하는 반복정도 $\pm 5\text{nm}$, 절대정도 $\pm 200\text{nm}$ 급을 얻을 수 있어, 초기투자 비용을 절감할 수 있을 것이다. 이러한 레이저다이오드를 이용한 리니어엔코더는 온도, 습도등과 같은 외부 환경의 영향을 거의 받지 않아 일반 리니어엔코더처럼 부착하여 장비에 적용할 수 있다.

3. 결론

본 글에서는 산업장비의 고성능, 고급화를 위한 자동화부품에 대하여 언급함으로써 향후 자동화장비에 필요한 부품을 소개하였다. 해외 자동화장비 제조업체는 에어베어링, 리니어모터, 다축 컨트롤러를 채용 함으로써 이들 장비의 고성능화에 주력하고 있으나, 초기투자 비용의 증가 등 여러가지 이유로 수출용 장비등 내수 장비의 일부분에 적용되어 지고 있는 국내 실정에 비추어, 해외 업체와 경쟁력을 갖추기 위해 이 자동화 부품의 국산화 및 이러한 자동화 부품의 이해에 도움이 되기를 바란다.

최 덕 권

1963년생. 1987년-1989년 한국시그네텍스(주) 재직.
1989년-1991년 택서실업 재직. 1991년-현재 대곤인터내셔널 기술영업부 팀장 재직 중.