

인쇄회로기관의 통전검사를 위한 가변순응력을 갖는 프로브 시스템

A Variably Compliant Probe System for the In-Circuit Test of a PCB

심재홍, 조형석, 김성권
(Jae Hong Shim, Hyung Suck Cho and Sung Kwun Kim)

Abstract : A new probing mechanism and an active compliance control algorithm have been developed for the in-circuit test of a PCB (printed circuit board). Commercially available robotic probing devices are incapable of controlling contact force generated through rigid probe contacts with a solder joint, at high speed. The uncontrollable excessive contact force often brings about some defects on the surface of the solder joint, which is plastically deformable over some limited contact force. This force also makes unstable contact motions resulting in unreliable test data. To overcome these problems, we propose that a serially connected macro and micro device with active compliance provide the best potential for a safe and reliable in-circuit test. This paper describes the design characteristics, modeling and control scheme of the newly proposed device. The experimental results clearly show the effectiveness of the proposed system.

Keywords : probing, in-circuit test, plastic deformation, impact force control, macro / micro, active compliance

I. 서론

표면실장기술의 발전과 더불어 인쇄회로기판(printed circuit board)은 날로 고밀도집적화되어지고 있다. 따라서 인쇄회로기판에 대한 검사공정도 고신뢰성 및 고밀도화를 요구하게 되었다. 인쇄회로기판의 검사공정중 하나인 통전검사는 납땀후 부품장착성, 납땀양불성등을 검사하는 제품의 품질보증에 있어서 대단히 중요한 부분이다. 종래의 검사방법은 지그(fixture)상에 인쇄회로기판의 패턴과 같은 위치에 전도성 프로브를 고정시켜놓고 그 위에 인쇄회로기판을 올려놓은 뒤 해당하는 부품별로 통전검사를 시행한다. 따라서, 이 방법에 의한 측정신뢰성은 지그제작기술에 크게 의존하게 된다. 그러나, 이 방법은 고밀도 실장화가 진행됨에 따라 인쇄회로기판상의 부품의 리드(lead) 간격이 좁아지므로써 지그상의 해당되는 위치에 프로브를 압입시키기가 어려워졌으며, 해당 인쇄회로기판의 모델이 바뀌면 지그도 바뀌어져야 하므로 모델변경시간이 짧아야하는 보편화된 다품종소량 생산방식에 적합하지 않다.

이와같은 문제를 해결하고자 로봇에 프로브를 장착하여 납땀렛(solder fillet)에 직접 프로브를 접촉시켜 통전검사를 하는 이동 프로브(flying probe)방법이 최근에 개발되었다. 이 방식은 그림 1에서 보는 바와 같이 능동적으로 프로브가 납땀표면과 접촉할 때 수동스프링에 의해서만 충격에너지를 흡수한다. 따라서 이와 같은 장치로는 프로브가 고속(0.2 ~ 0.4 m/sec)으로 납땀부와 접촉시 발생하는 접촉력을 제어하기 어렵다. 이러한 제어상태에서는 프로브가 납땀표면과 접촉시 과도한 접촉력(contact force)이 발생하여 표면에 흠집을 발생시키며, 진동과 같은 불안정한 접촉운동을 일으킨다. 과도한 접촉력은 납땀표면에 소성 변형(plastic deformation)을 발생시키며 납땀불량의 원인이 될수 있고, 접촉진동은 통전검사시 부정확한 신호계측을 발생시킬수 있다. 특히

소성변형된 납땀표면은 그 표면이 쉽게 산화부식되며, 부식된 부위는 작은 충격에도 부서지기 쉽다. 따라서, 통전검사시 프로브는 주어진 작업시간내에 위와 같은 손상이나 진동을 발생시키지 않고 다양한 크기, 강성 및 모양을 갖는 납땀과 접촉하도록 요구된다.

통전검사공정에서 볼수 있듯이 두 물체간의 유한한 속도를 갖는 접촉은 불연속적인 동특성 변화를 가져온다. 이러한 현상을 접촉천이(contact transition)라고 한다. 로봇을 이용한 능동적(active)인 접촉천이제어는 로봇이 갖는 높은 임피던스(impedance), 즉 큰 중량(mass)이나 강성(stiffness)으로 인해 매우 어렵다[1]. 또한, 충돌시간이 매우 빠르기때문에 보통의 제어기로서는 제한된 제어속도(control bandwidth)로 인해 능동 접촉력 제어가 쉽지 않다.

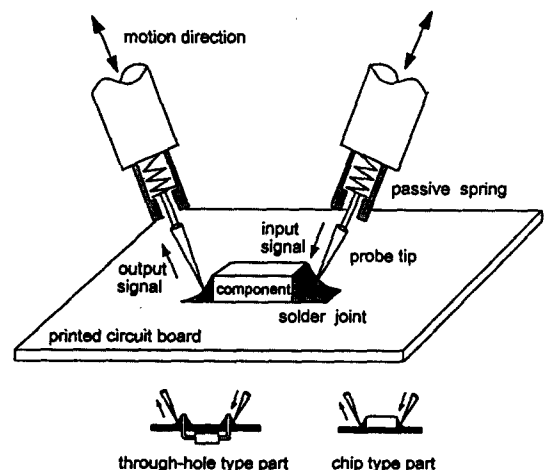


그림 1. 기존의 통전검사용 프로브.
Fig. 1. Conventional probes for in-circuit test.

이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 광역 / 미세 매니플레이터(macro / micro manipulator)개념이 제안되었다[1][2]. 광역 운동기구는 큰 로봇이 단순히 위치 제어에

의해 미세 운동기구를 이송하며, 미세 운동기구는 작은 크기를 가지며 실제 작업(task)을 수행한다[3]. 이와 같은 2 단계 운동기구의 장점은 저중량, 저관성, 저마찰등을 들 수 있다. 따라서, 일체형 운동기구보다 빠른 제어속도를 가지며, 안정된 작업수행이 가능하다. 미세운동기구의 설계와 제어가 이러한 시스템의 성공에 절대적으로 중요하다. 로봇에 장착할 수 있는 미세운동기구에 대한 다양한 연구가 수행되어져 왔다[3][4][5]. 주로 조립이나 가공등에 적용되어졌으며[4], 미세운동기구의 액츄에이터로서 유압, 전기 서보모터, 자기베어링, 전자석등이 사용되어졌다.

접촉천이제어에 많은 연구가 수행되어져 왔다. 지금까지 수행된 연구들은 주로 2가지로 분류할 수 있다[6]. 그 첫번째 부류는 임피던스 제어방법이다[8][9]. 이 방법은 접촉천이 기간동안 접촉여부에 관계없이 하나의 통일된 제어구조를 갖지만 접촉하는 물체 내지는 환경(environment)에 대한 모델을 정확하게 알고 있어야 한다. 두 번째 부류는 불연속(discontinuous) 제어방법이다[10][11]. 이 방법은 대상물체와의 접촉여부에 따라 다른 제어구조를 가지며, 충돌후에 발생하는 접촉력을 제어할 수 있으나, 충돌후 반발력에 의해 로봇과 대상물체와의 접촉이 끊어질 수 있는 데 이런 경우에는 제어하기가 어렵다. 이들 대부분의 제어방법들은 강체표면(hard surface)에서의 접촉천이 제어를 다루고 있으며, 제어기 성능개선에 의해서 충격력제어를 수행해왔다.

본 논문에서 다루고자 하는 통전검사에서의 접촉천이는 접촉점에서 과도한 접촉력이 발생할 경우 소성변형가능한 납땜표면에서 발생하기 때문에 새로운 제어방법이 요구된다. 일반적으로 접촉천이운동은 세 가지로 분류할 수 있다. 즉, 자유운동, 충격운동, 그리고 구속운동이다[7]. 대부분의 소성변형은 충격운동구간에 의해서 결정된다. 그러므로 충격운동구간에서 발생하는 초기 충격력제어가 피접촉물체의 소성변형 정도를 나타내는 침투깊이(penetration depth)를 제어하는 데 필수적이다.

저자들의 지식으로는 통전검사공정에 대한 관련연구가 지금까지 별로 진행되어 있지 않다고 알고 있다[12]. 본 논문에서는 본 공정에서 요구되는 목적을 달성하기 위해 빠르고 정확한 제어응답특성을 갖는 광역운동기구와 미세운동기구가 직렬로 연결된 새로운 통전검사 시스템을 제안하고자 한다. 넓은 동작영역을 갖는 2자유도의 광역운동기구는 소형 직류서보모터를 사용하였으며, 좁은 동작영역을 갖지만 높은 위치정밀도를 갖는 1자유도의 미세운동기구는 프로브를 포함하는 이동코일이 여러 개의 영구자석사이에서 작동하는 전자기학 원리를 응용하여 개발하였다[13]. 이 공정에 적합한 메카니즘의 설계, 위치 및 힘 제어방법에 대하여 논하였으며, 본 시스템의 효용성을 보여주기 위해 납땜통전검사에 대한 일련의 실험이 행하여졌다. 그 결과, 본 시스템이 안정된 접촉력제어를 통하여 수동적인 순운성을 갖는 종래의 방법보다 우수한 통전검사를 할 수 있음을 보여주었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 프로브 시스템의 설계 및 모델링에 대해 논하고 있으며, 3장에서는 충격제어를 포함하는 접촉제어 알고리즘을 제안하였으며, 4장에서는 3장에서 제안된 제어알고리즘, 기존의 수동순운 제어방법과 PID 힘제한제어방법을 실험을 통해 비교검토하였으며, 5장에서는 결론을 기술하고 있다.

II. 새로운 프로브 시스템의 제안

유한한 속도를 갖는 물체간의 접촉과 같이 동특성의 변화가 중요하게 여겨지는 작업을 수행하기 위한 메카니즘의 설계는 힘/중량, 작업공간/시스템체적과 같은 일반적인 사양이

외에도 접촉력 및 위치제어에 관련된 특성들이 고려되어야 한다. 또한, 정해진 작업종류에 따라 주어지는 특수한 사양도 고려된 설계가 이루어져야 한다. 특히, 통전검사에서의 같은 공정에서는 작업대상물체와 접촉시 발생하는 충격력과 진동의 최소화 및 임의의 방향으로 촉침이 가능하도록 하는 방향제어능력이 요구된다. 이와 같은 요구사항을 만족시키도록, 다음과 같은 설계특성을 갖는 프로브 시스템을 제안하고자 한다.

1. 액츄에이터 모델

광역/미세운동기구 개념을 이용한 간단화된 액츄에이터의 모델이 그림 2에 나타나 있다. 이 시스템의 목적은 환경(environment)과의 접촉시 발생하는 힘을 가능한한 정확하게 제어하는 데 있다. 그림에 나타난 시스템을 모델링하면 다음과 같다.

광역운동기구 :

$$m_m \ddot{x}_m = f_m - (B_m + B_n) \dot{x}_m + B_n \dot{x}_n - K_n(s_m - x_n) \quad (1)$$

미세운동기구 :

$$m_n \ddot{x}_n = f_n - f_e + B_n \dot{x}_m - B_n \dot{x}_n + K_n(x_m - x_n) \quad (2)$$

환경을 탄성모델로만 표현한다면,

$$f_e = B_e \dot{x}_n + K_e x_n \quad (3)$$

여기서, m, K, B 는 각각 질량, 스프링상수, 감쇠계수를 나타내며, m, n, e 는 각각 광역운동기구, 미세운동기구, 접촉 환경을 의미한다. 또한, f_n 는 액츄에이터에 가해진 힘이며, f_e 는 접촉력이다. 감쇠계수 B_m, B_n 의 크기가 작다고 하면, 시스템은 다음과 같은 공진(resonance) 관계를 보이게 된다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_e}{m_n}}$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_n}{m_m}} \quad (4)$$

여기서, n 는 미세운동기구가 환경과 접촉시 발생하는 공진 모드이며, m 는 광역운동기구와 미세운동기구사이에 발생하는 공진모드이다. 만약 $m_m > 10 m_n, K_e > K_n$ 이면, n 는 m 보다 훨씬 크므로 n 가 접촉점에서의 설계된 시스템의 제어대역폭(control bandwidth)의 상한치라고 볼 수 있다. 직렬연결방식의 액츄에이터의 설계는 미세운동기구의 제어성능에 의해 시스템전체의 성능이 결정되므로, 미세운동기구의 제어대역폭을 크게하는 것이 좋은 설계라고 볼 수 있다.

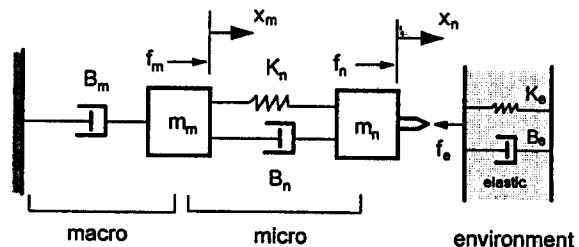


그림 2. 환경과 접촉운동을 위한 광역/미세운동기구 모델.

Fig. 2. Model of a macro/micro motion device for the contact task with the environment.

2. 설계 법칙

본 절에서는 시스템의 성능을 특성화시키는 변수들을 정

의하고, 이 변수들을 이용한 설계법칙에 대해 논하고자 한다. 광역/미세운동기구조를 갖는 시스템에 있어서 접촉전이운동을 하기 위한 액추에이터와 제어계의 시스템 변수들을 다음과 같이 표현할 수 있다.

- ω_{clm} : 광역운동기구의 페루프 제어 대역폭
- ω_{cln} : 미세운동기구의 페루프 제어 대역폭
- F_{satn} : 미세운동기구의 최대 제어 가능한 힘의 크기
- F_d : 접촉점에서의 요구 힘
- F_{res} : 측정된 힘 성분의 해상도
- X_{res} : 측정된 위치 성분의 해상도.

위에 열거한 변수들은 다음과 같은 성능지수로 표현한다면, 힘제어속도비(force control speed) :

$$\Psi_1 = \frac{\omega_{cln}}{\omega_{clm}}$$

힘제어응답성 (force control responsibility) :

$$\Psi_2 = \frac{F_d}{F_{satn}}$$

접촉강성 (contact stiffness) :

$$\Psi_3 = \frac{K_n}{K_e}$$

임피던스해상도 (impedance resolution) :

$$\Psi_4 = \frac{F_{res}}{X_{res}} \quad (5)$$

여기서 힘제어속도비는 접촉운동제어시 광역운동기구와 미세운동기구의 응답속도의 상대비, 힘제어응답성은 접촉시 미세운동기구에 의한 접촉력 발생능력을 의미하며, 접촉강성은 미세운동기구가 갖는 외부 충격에 대한 순응정도를 나타낸다[2]. 또한, 임피던스 해상도는 대상 시스템과 환경이 서로 부딪혔을 때 접촉점에서의 접촉상태에 대한 정보의 밀집도(density)를 표현한다. 시스템의 성능은 설계된 시스템의 제어속도가 클수록, 제어응답성이 작을수록, 접촉강성이 작을수록 좋다. 접촉강성이 크면, 즉 미세운동기구의 강성이 커지면 (4)에서 알 수 있듯이 n 과 m 이 같아지는 공진발생의 확률이 높아진다. 또한, 주어진 환경의 강성의 변화가 있다면 이에 따라 시스템의 강성, 또는 순응성도 그에 따라 바뀌어야 접촉점에서 제어능력을 최대화시킬 수 있다. 위와 같은 관계를 이용하여 시스템의 성능을 최대화하기 위해서는

$$\Psi_1 > 1, \Psi_2 < 1, \Psi_3 < 1 \quad (6)$$

와 같은 조건들을 만족하여야는 것이 필요하다[2]. 또한, 임피던스 해상도는 실제 디지털로 구현되므로 이산화된 임피던스의 신호에 대한 해상도가 $\Psi_4 = 1$ 에 가까울수록 좋은 성능을 발휘할 수 있다.

3. 프로브 메카니즘의 자유도 및 작업영역

프로브 장치 전체를 작업공간내에서 이송시키는 역할은 3축(XY축 병진운동, Z축 회전) 직교좌표계 로봇에 의해서 수행된다. 이 로봇은 프로브 장치를 해당 검사대상 부품위까지 위치시키며, 인쇄회로기판상에 정해진 부품의 방향에 따라 프로브 장치의 자세를 결정시켜 준다. 인쇄회로기판상에 실장되는 전자부품의 종류에 따라 납땜부의 모양이 바뀌므로, 안정된 접촉을 위해서는 프로브의 인입각이 납땜부상의 접촉점의 법선방향에 대해 바뀌어져야 한다. 따라서 1개의 회전(rotation) 자유도가 요구된다. 이때, 프로브의 회전각은 납땜의 모양에 따라 임의의 각도를 유지해야 하므로 표 1에 주어진 작업범위를 갖도록 제어되어야 한다. 또한,

프로브가 납땜과 접촉할 때 납땜부주위에 이웃해 있는 전자 부품들과의 간섭을 피하고, 미세운동기구를 운송하기 위한 또하나의 병진(translation)운동자유도가 사용되어야 한다. 병진운동에 따른 행정거리는 실제 인쇄회로기판에 실장되는 부품의 크기등을 감안해서 표 1과 같이 설계되었다.

표 1. 프로브 메카니즘의 자유도 및 작업영역 사양.
Table 1. Specifications of the degree-of-freedom and the workspace of the proposed probe mechanism.

항 목	수 치
광역운동기구의 자유도	2
광역운동기구의 회전액추에이터의 작업영역	± 45 [deg]
광역운동기구의 병진액추에이터의 스트로크	25 [mm]
미세운동기구의 자유도	1
미세운동기구의 스트로크	공칭위치기준 ± 2.5 [mm]

또한, 미세운동기구의 운동은 단지 1자유도의 병진운동만을 필요로 한다. 프로브가 납땜부와 접촉할 때 균일한 접촉조건을 유지하기 위해서는 단지 1자유도의 상하방향, 즉 광역운동기구의 병진운동과 같은 방향으로 미세운동기구의 운동을 제한시켜야 한다. 미세운동기구의 행정거리는 검사대상 부품의 납땜모양(과납, 정상, 미납)에 따라 접촉깊이가 달라지므로 이를 감안해서 표 1과 같이 설정한다. 결론적으로, 프로브 장치는 2자유도의 광역운동기구, 1자유도의 미세운동기구로 구성된다.

4. 제안된 프로브 장치 설계 및 결과

제안된 프로브 시스템의 개략적인 구성이 그림 3에 나타나 있다. 제안된 광역운동기구는 회전운동 및 병진운동을 할 수 있는 2자유도로 구성되어 있으며, 그림 3에서 보는 바와 같이 2개의 직류서보모터를 그 액추에이터로 이용하였다. 미세운동기구는 운동코일(moving coil) 방식을 응용하였으며, 1자유도의 병진운동만이 가능하도록 운동코일의 회전을 방지하는 안내베어링을 부착하였다.

운동 코일방식의 전자기 운동기구는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용한 것으로써, 저중량, 저관성, 저마찰 및 순응성(compliance)를 능동적으로 바꿀 수 있는 장점이 있다.

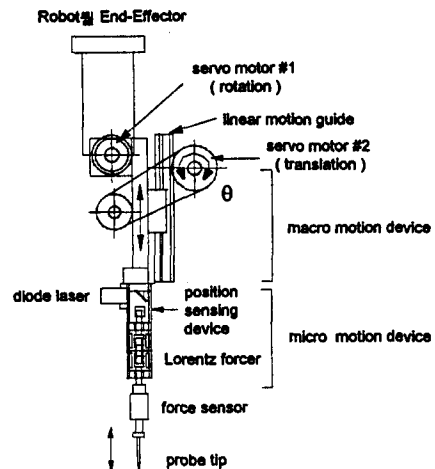


그림 3. 제안된 새로운 통전검사용 프로브 메카니즘.
Fig. 3. A schematic of the proposed probing mechanism.

본 논문에서 제안한 미세운동기구는 4개의 사각형 네오디뮴 - 철 - 붕소(NdFeB) 영구자석 사이에 전도체인 코일을 위치시킨 뒤 코일에 전류 I 를 가하면 아래와 같은 힘 f_{coil} 이 코일에 발생한다[15].

$$f_{coil} = -I \int B \times dl \quad (7)$$

여기서 B 는 자속밀도이고, dl 은 코일의 유효길이이다. 코일의 법선방향에서 측정된 힘 f_{coil} 은 0.8 N/A이다. 미세운동 액츄에이터의 사양이 표 2에 나타나있다. 운동코일은 아나로그 전력증폭기에 의해 전류모드로 동작된다. 이때, 코일에 발생하는 힘은 운동코일의 위치에 관계없이 전류의 세기에 비례한다. 이때, 코일에 발생하는 힘은 스트레인 게이지를 이용한 로드셀(CAS MW1200)에 이동코일 선단부에 부착된 프로브를 접촉시켜 코일에 흐르는 전류의 세기 및 이동코일의 위치를 가변시키면서 측정하였다.

그림 4에 제안된 미세운동시스템의 전형적인 폐루프 주파수 응답이 나타나 있다. 본 시스템의 경우 운동코일이 제한된 작은 행정거리내에서 운동하므로 개루프(open loop) 주파수 응답을 구하기가 매우 어렵다. 물론 폐루프 제어의 경우 제환이득을 바꾸어주면 주파수 응답특성이 바뀌나 안정된 제어상태에서 그 변화의 폭은 크지 않다. 제환이득을 바꾸어주어도 시스템의 제어대역폭은 약 50 - 60Hz 정도이다. 이 주파수 응답은 Hewlette-Packard 3562A Dynamic Signal Analyzer를 이용하여 구하였다.

표 2. 제안된 운동코일방식 미세운동액츄에이터의 사양.

Table 2. Specifications of the proposed moving coil type micro motion actuator.

항 목	수 치
액츄에이터 전체길이	64 [mm]
액츄에이터 단면적	10 x 14 [mm ²]
NdFeB 자석의 크기	10 x 8 x 2.8 [mm ³]
NdFeB 자석의 갯수	4
자석 사이의 간격	3 [mm]
자석과 코일사이의 간격 (Air Gap)	0.5 [mm]
코일의 직경	0.22 [mm]
보빈에의 코일권수	185 [회]
보빈에 감긴 코일단의 평균단면적	10 x 12 [mm ²]
코일의 저항	4.8 [Ω]
코일의 인덕턴스	0.038 [mH]
최대 스트로크	5 [mm]

미세운동기구의 위치는 그림 5에서 보는 바와 같이 광학 센서를 이용하여 측정하였다. 이 센서는 한 개의 다이오드 레이저, 두 개의 거울, 한 개의 PSD(position sensing device)로 구성되어 있다. 고정된 다이오드 레이저로부터 나온 광(light rays)은 고정거울로 입사된 뒤 좌측 운동방향쪽으로 90각도로 꺾여서 반사된다. 반사된 이 빛은 운동코일 상에 부착되어 있는 또다른 거울로 투영되며, PSD 센서쪽으로 재차 90반사된다. 이때 반사된 광의 중심이 PSD의 출

력전류값으로부터 쉽게 얻을 수 있다. PSD 센서에 입사되는 레이저 광의 최종 지름은 약 1mm 이다. 이 장치의 위치 측정 해상도는 상용 레이저 거리 센서(Keyence LC-2220)를 사용하여 측정하였으며, 그 결과는 그림 7에서 보여주는 바와 같이 약 ± 6μm 이다.

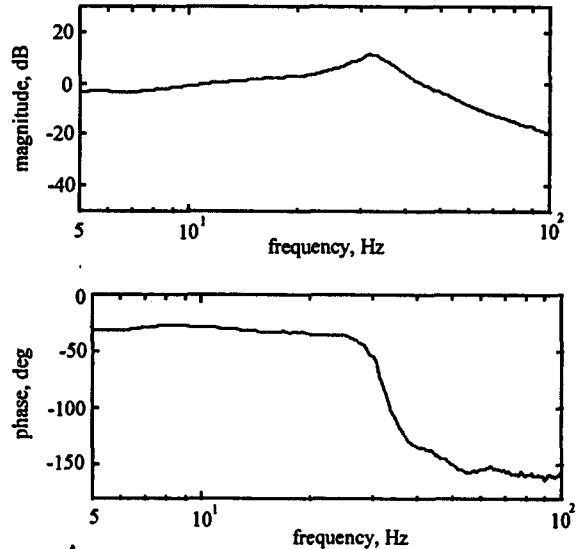


그림 4. 제안된 시스템의 폐루프 주파수 응답.
Fig. 4. Closed loop frequency response of the proposed system.

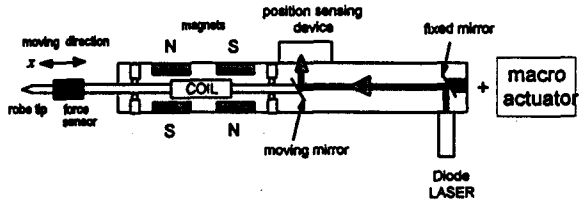


그림 5. 미세운동기구의 위치측정장치 개략도.
Fig. 5. Position sensing mechanism of the micro motion device.

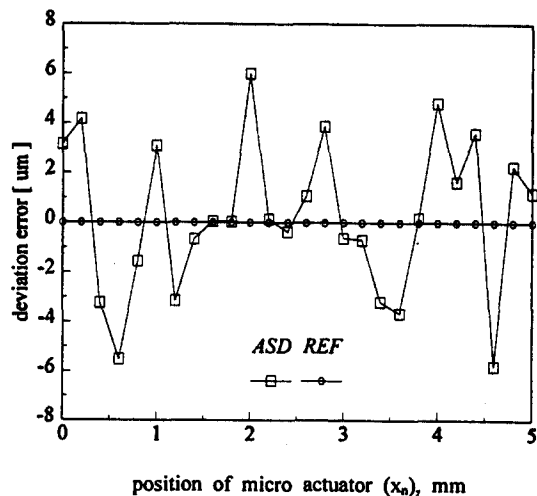


그림 6. 미세운동기구의 위치 정밀도.
Fig. 6. Position sensing accuracy of the micro motion device (ASD = actually sensed data from the PSD, REF = reference data of the laser displacement sensor)

표 3. 제안된 시스템의 성능 평가.
Table 3. Performance results of the proposed system.

비교항목	광역운동 m	미세운동 n	특 징
· mass	0.1 Kg	0.012 Kg	- $M_m > 10 M_n$
· 페루프 제어대역폭	< 30 Hz	> 50 Hz	- $\Psi_1 > 1$
· F_{satn}		2.4 N	- $F_d = 0.3 N$, $\Psi_2 > 1$
· 스프링 상수		0 - 560 N/m	- $\Psi_3 > 1$

앞절에서 언급한 설계법칙에 대한 본 시스템의 성능을 평가한 결과가 표 3에 나타나 있다. 미세운동기구의 질량은 광역운동기구의 질량의 약 1/10정도에 불과하며, 이는 응답속도가 빠른 미세운동기구의 운동코일방식의 액츄에이터와 결합되어 광역운동기구의 페루프 제어대역폭보다 배이상 큰 결과를 가져왔다. 또한, 미세운동기구의 최대제어가능한 힘의 크기는 접촉점에서의 요구힘보다 약 8배정도 큰 성능을 가지며, 접촉물체의 강성에 따라 변화시킬수 있는 미세운동기구의 강성의 변화폭은 0에서 560 N/m 로서 다양한 물체와의 접촉능력을 보유하고 있다. 그 결과로 보아 본 시스템은 요구되는 설계법칙을 만족하는 성능을 가졌다고 볼 수 있다.

5. 시스템 모델링

본절에서는 앞절에서 설계된 액츄에이터 모델에 대해 구체적인 운동제어를 위한 광역운동기구와 미세운동기구의 동역학적 모델링에 대해 다루고자 한다. 제안된 시스템의 동력학 시뮬레이션을 통하여 시스템의 응답특성을 파악하고, 적절한 제어 이득을 미리 선정할 수 있다. 광역 운동기구의 동역학 모델은 직류서보모터, 동력전달기구를 함께 고려하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\theta}(t) + \frac{1}{M_e} (B_v + \frac{K_e K_t}{R_a}) \dot{\theta}(t) = \frac{1}{M_e} (V_r(t) \frac{K_t}{R_a} - T_D(t)) \tag{8}$$

여기에서 는 모터회전변수이고, M_e 는 모터, 동력전달기구의 복합관성모멘트이다. 또한, B_v 는 점성마찰계수이고, K_e 는 역기전력상수, K_t 는 모터상수이다. R_a 는 전기자 저항이며, $V(t)$ 는 모터에 인가된 전압이고, $T_D(t)$ 는 쿨롱(Coulomb) 마찰및 중력을 포함한 외란을 나타낸다. 설계된 병진운동을 하는 광역운동기구의 모터회전변수 (t) 와 프로브 운동축 $x(t)$ 와의 관계식은 다음과 같다.

$$x(t) = R_r (t) \tag{9}$$

여기서, R_r 은 기어감속비이며, 제작된 원형 (prototype)에서의 값은 2.38335 이다.

제안된 미세운동기구의 전기 및 기계적 특성을 선형방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI + Bl \dot{x}$$

$$f_{coil} = BlI \tag{10}$$

$$f_{mech} = M \ddot{x} + D \dot{x}$$

여기서, x 는 위치변수, Bl 은 로렌츠힘상수, L 은 인덕턴스, R

은 코일의 저항, V 는 등가회로상의 입력전압, f_{coil} 은 코일에 발생하는 힘이다. M 은 운동코일의 무게, D 는 점성감쇠계수, f_{mech} 는 미세운동기구에 발생하는 기계적인 힘이다. (10)의 미세운동기구의 전기, 기계적 특성및 케환제어를 함께 고려한 시스템의 운동방정식을 전달함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{x}{u_n} = \frac{GBI}{MLs^3 + (MR + DL)s^2 + (RD + B^2 \ell^2)s + K_s GBI} \tag{11}$$

여기서, u_n 은 전압입력, G 는 전력 증폭기의 이득, K_s 는 변위의 케환이득이다. 이동코일의 전기적 시상수, L/R , 가 제작된 원형으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{L}{R} < 10^{-4} [s]. \tag{12}$$

따라서 (12)의 결과를 (11)에 대입하여 간단화된 미세운동기구의 운동방정식을 개루프 전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{x}{u_n} = \frac{GBI}{s(Ms + D)}. \tag{13}$$

위의 (13)을 블록선도로 표시하면 그림 7과 같다.

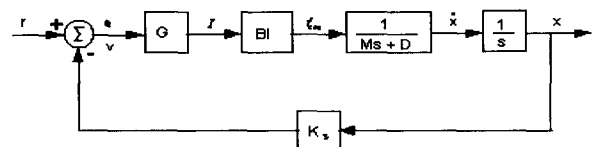


그림 7. 미세운동기구부의 블록선도.
Fig. 7. Block diagram of the micro motion device.

III. 제어 알고리즘

실제 통전검사에서 부품 하나당 요구되는 검사시간은 0.3 초이다. 그중에서, 전기적 신호처리시간(약 0.05 초)과 다음 부품의 위치로의 이동시간등을 감안한다면 검사대상부품과의 최초접촉시에 허용되는 시간은 0.1sec정도이다. 따라서, 매우 빠른 시간내에 안정된 접촉천이가 이루어져야한다. 본 논문에서는 제안된 광역/미세운동기구를 이용한 충격력및 침투깊이 제어알고리즘을 통해 이와 같은 문제를 해결하고자 한다. 그림 7에 본 논문에서 제안한 제어구조가 나타나 있다.

x_m, u_m 을 각각 광역운동기구의 입력, 위치 벡터라고 하자. 자유운동구간에서는 광역운동기구의 위치 제어만이 행하여진다. 대부분의 로봇의 관절제어기와 같이 광역운동기구의 위치제어는 PID 제어기에 의해서 아래와 같이 수행된다.

$$u_m = k_{mp}(x_{md} - x_m) + k_{md}(\dot{x}_{md} - \dot{x}_m) + k_{mi} \int (x_{md} - x_m) dt, t \geq 0 \tag{14}$$

여기서, x_{md} 는 광역운동기구의 요구위치이고, k_{mp}, k_{md}, k_{mi} 는 각각 광역운동기구 제어기의 비례, 미분, 적분이득이다.

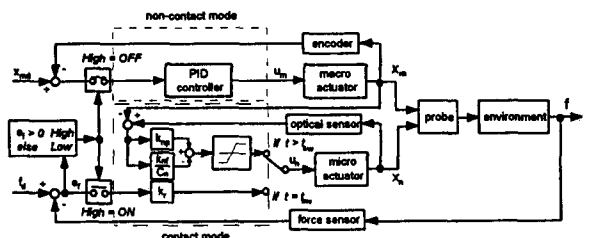


그림 8. 제안된 제어기 구조.
Fig. 8. Block diagram of the proposed controller.

충격이 발생하는 순간, 제어방식이 자유운동방식에서 접촉방식으로 전환된다. 전환이 되는 초기에 미세운동기구가 운동방향의 역방향으로 제어된다. 그러나, 광역운동기구는 자유운동구간에서와 같은 제어방법에 의해 여전히 운동하고 있다. 이는 충격이 매우 빠른 시간동안에 발생하므로 기존의 제한제어에 의해서는 관성에 의한 영향때문에 충격력감소에 그 한계가 있으며, 프로브와 납땜부와의 거리, 납땜부 표면의 모양과 같은 불확실성때문에 발생하는 에러발생 요인을 줄이기 위함이다. 미세운동기구의 역방향 제어가 완료되는 시점에 광역운동기구의 운동도 정지시킨다. 이때, 미세운동기구의 제어입력 u_n 는

$$u_n = \hat{u}_n - k_r \text{sgn}(e_f), t = t_{sw} \quad (15)$$

$$\text{sgn}(e_f) = 0, \text{ if } e_f < 0 \text{ 경우}$$

$$\text{sgn}(e_f) = 1, \text{ if } e_f \geq 0 \text{ 경우} \quad (16)$$

$$e_f = f - f_d \quad (17)$$

$$k_r \gg M_n g \quad (18)$$

여기서, \hat{u}_n 는 \hat{u} 는 접촉순간 광역운동기구의 위치와 미세운동기구의 위치가 트리거링(triggering)되며, 이 위치가 설정점(setpoint)으로 지정된다. 또한, 접촉후 광역운동기구의 운동이 계속된다고 하더라도 설정점에서부터의 상대 위치로부터 프로브끝과 접촉점까지의 상대거리 d 를 알 수 있다. 외부로부터의 접촉력 발생이 없을 때 미세운동기구의 최하단위치에 프로브끝이 위치하고 최초접촉시 발생하는 충격력에 대응하기위한 초기강성을 갖도록 하기위한 공칭위치(nominal position)제어 입력이고, f 는 접촉힘, f_d 는 요구접촉력이다. 또한, t_{sw} 는 충격감지시간이며, M_n 은 미세운동부의 질량이다. k_r 은 실험으로부터 결정된다.

$$d(t) = [x_{ns} - x_n(t)] - [x_m(t) - x_{ms}] \quad (19)$$

여기서, x_{ms} , x_{ns} 는 각각 설정점에서의 광역운동기구의 위치, 미세운동기구의 위치이다. $x_m(t)$, $x_n(t)$ 는 각각 접촉후의 광역운동기구, 미세운동기구의 위치이다.

이제 미세운동기구의 위치 및 힘제어를 통해 접촉점에서 원하는 접촉력이 발생하도록 최종적인 제어를 수행한다. 앞에서 언급한 제어입력 (15) 이후에, 위치 비례 되먹임 - 힘 앞먹임 제어(PPFF : proportional position feedback - force feedforward)가 다음과 같이 구현된다.

$$u_n = k_{np}(d_f - x_n) + k_{nf}f_c, t > t_{sw} \quad (20)$$

여기서, d_f 는 제어입력 (15)이 끝났을 때 (19)의 상대거리이며, x_n , k_{np} , k_{nf} , f_c 는 각각 미세운동부의 위치, 위치 비례 되먹임 이득, 힘 앞먹임 이득, 그리고 구속운동에서의 접촉력이다.

접촉후 일정한 접촉력 및 침투깊이를 유지하기 위해 미세운동기구가 가지고 있는 다음과 같은 순응성을 이용한다. 즉, 주어진 접촉점에서 운동코일에 흐르는 전류의 세기 I 를 바꾸어주면 접촉력이 달라진다. 이때 운동코일에서의 접촉력은 (10)에 의해 결정된다. 운동코일의 공칭위치로부터의 변위 x 가 주어졌을 때, 전류의 변화는 순응성 C_n 과 반비례한다.

$$C_n = \frac{\Delta x}{BII}. \quad (21)$$

접촉후 제한운동구간동안의 접촉력 f_c 는 순응성 C_n 으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$f_c = \frac{\Delta x}{C_n} \quad (22)$$

또한, PPF 제어는 다음의 조건을 만족하도록 수행된다.

$$f_c \leq f_d$$

$$x_p = x_n - d_f \leq x_{plimit} \quad (23)$$

여기서, x_{plimit} 는 허용침투깊이(allowable penetration depth)이고, x_p 은 침투깊이이다.

IV. 실험및고찰

본 논문에서 제안한 통전검사시스템의 실현성을 검증하기 위하여 원형시스템을 제작한 후 실제 통전검사와 유사한 환경상에서 몇 가지 실험을 행하였다. 원형시스템은 설계시에 의도하였던 광역운동기구와 미세운동기구의 결합에 의한 위치 및 힘제어에 관련된 동작특성을 구현하는 데 있어 성공적으로 작동되었다. DSP(digital signal processing, TMS 320C30)가 채용된 서보모터 제어가 광역운동기구의 제어를 위해 사용되었다. 그림 9는 제안된 원형 프로브 시스템의 실험을 보여주고 있다.

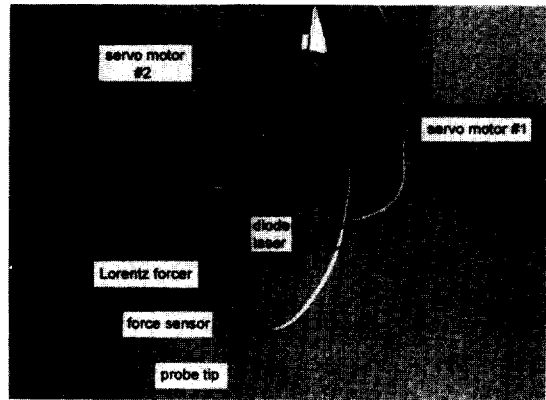


그림 9. 제안된 프로브 시스템의 제작된 원형.

Fig. 9. A photograph of the proposed probing system prototype.

먼저, 본 논문에서 제안한 프로브시스템의 핵심이라고 할 수 있는 미세운동기구의 응답특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 고찰하였다. 또한, 제안된 접촉제어 알고리즘의 효율성을 검토하기위해서 단순한 스프링에 의한 수동순응제어(passive compliance control), 접촉힘 제한에 의한 PID 제어방법과 비교실험을 행하였다. 이때, 프로브의 접촉속도 및 프로브와 접촉물체인 납땜면이 이루는 접촉각등의 접촉조건은 각제어방법에 대해 일정하게 유지하였다.

표 4. 원형시스템의 제어기 사양 및 실험조건.

Table 4. Control specifications of the prototype and experimental conditions.

항 목	수 치
광역운동기구의 제어 샘플링 주기	1 [kHz]
미세운동기구의 제어 샘플링 주기	10 [kHz]
힘센서(Piezotronics, 209B12)의 해상도	2.22 x 10 ⁻⁴ [N]
힘센서의 최대 측정 가능치	Max. 10 [N]
최대 침투 허용깊이	0.15 [mm]
요구 접촉력	0.2 [N]

실험재료로는 주석 - 납 (Sn - Pb; 63 : 37) 계의 땀납을 이용하였다. 본 논문에서의 최대 허용 침투깊이 및 요구 접촉력을 표 4와 같이 설정하였다. 이러한 수치들은 실제 생산현장에서의 실험자료로부터 구한 값들이다.

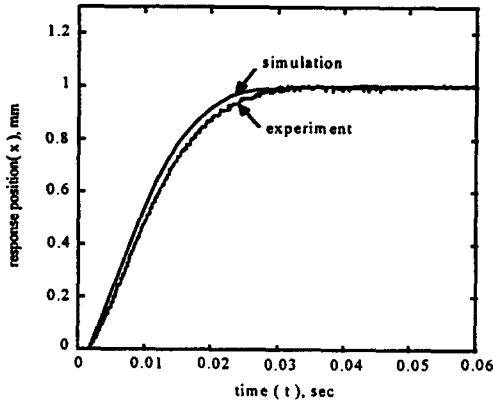


그림 10. 미세운동기구의 PID 위치 제어에 의한 폐루프 계단 응답.

Fig. 10. Closed loop step responses by the PID position control.

그림 10에 PID 제어에 의한 미세운동기구의 폐루프 계단응답에 대해 시뮬레이션 및 실험결과가 나타나 있다. 두 결과는 상승시간등에서 약간의 차이를 보이지만 잘 일치하고 있다. 이러한 시뮬레이션을 통해 프로브 제어기의 제어 이득을 효과적으로 선택할 수 있다. 본 논문에서 제안한 미세운동기구의 PID 위치제어결과가 그림 11에 나타나 있다. $k_{mp} = 1.3$, $k_{ml} = 0.0004$, $k_{md} = 20$ 의 이득을 가진 PID 위치제어의 경우 안정된 과도응답을 보이지만, 약 10m 정도의 정상상태 위치 오차를 보인다. 그러나, 비례 이득과 적분이득을 약 2배증가시키면, 그림에서 보는 바와 같이 정상상태 위치 오차는 거의 0으로 수렴하나, 오버슈트가 발생한다.

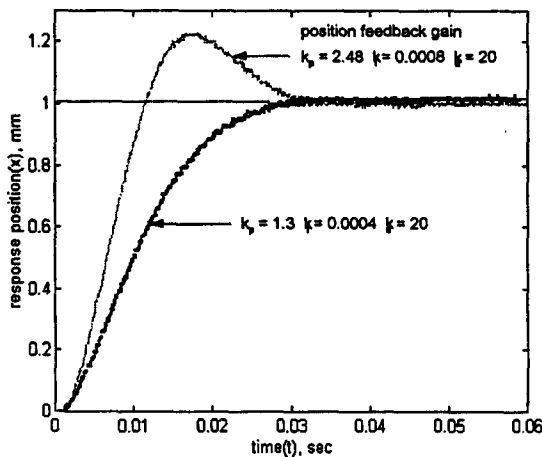


그림 11. 미세운동기구 제어의 위치제환이득의 영향.

Fig. 11. Response of the PID position control of the micro motion device for various feedback gains.

그림 12에 프로브 끝과 땀납면이 직각으로 접촉하는 경우, 3가지 접촉제어방법에 의한 접촉천이 결과를 보여주고 있다. PID 힘 제환 제어방법이 수동 순운제어 방법보다 최대 충격력을 30% 정도 줄일 수 있고, 접촉진동을 급격히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이때 발생한 침투깊이는 약 0.2mm 였다. 침투깊이 측정은 접촉실험후 소성

변형된 시편을 줌렌즈(x100) 부착 카메라에 의해 영상을 잡은 뒤 프로브에 의해 형성된 납표면의 변형부의 지름을 측정하므로써 이미 알고 있는 프로브 형상치수로부터 침투깊이를 간접적으로 측정할 수 있다. PID 힘 제환제어만으로는 최초의 충격구간에서 발생하는 최대 충격력 감소에는 한계가 있음을 알 수 있으며, 힘제환신호의 잡음으로 인해 접촉후 제한운동기간동안 불안정한 접촉이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 논문에서 제안한 제어방법은 비교 방법중 가장 안정된 접촉제어 결과를 보여준다. 수동 순운제어 방법에 비해 최대 충격력이 약 60% 정도 줄어들었으며, 접촉 천이구간동안 지속적인 안정된 힘제어를 보여주며, 침투깊이는 0.1mm 정도이다. 그러나, PID 힘 제환 제어에 비해 상승시간이 느리고, 재접촉시 약간의 진동이 발생하는 단점이 있다. 정상상태 도달시간이 0.06sec이므로 통전검사에서 요구되는 작업시간을 충분히 만족한다. 또한, 본 논문에서 제안한 방법은 제환신호와와는 무관한 앞먹임제어를 행하기때문에 PID 힘 제환 제어방법에서 나타난 바와 같이 잡음의 영향을 전혀 받지 않는다[7].

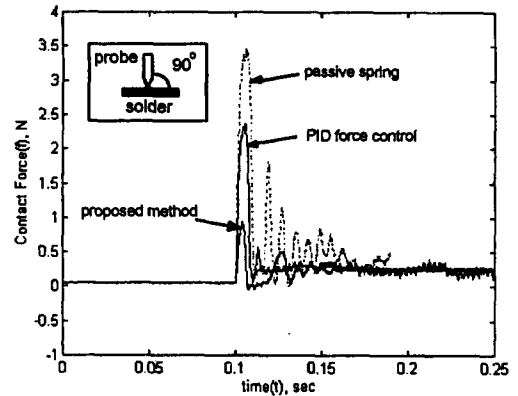


그림 12. 제안된 제어방법과 기존 방법과의 비교 (접촉각 = 0).

Fig. 12. Comparison of the conventional methods with the proposed method (slant angle of contact point = 0).

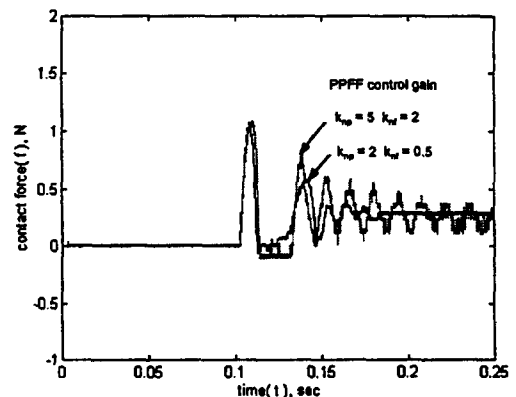


그림 13. PPF 제어의 경우 다양한 제어 이득에 의한 접촉력의 변화.

Fig. 13. Contact force for various control gains of the proposed PPF control method.

그림 13에 제안된 제어 일고리즘의 여러 이득에 대한 접촉제어결과가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 비례 위치 이득 k_{mp} 와 비례 힘 이득 k_{rf} 의 증가는 궁극적으로 불안정한 접촉응답을 가져올 수 있다.

실제 땀납표면은 3차원 형상을 갖기때문에 프로브가 접촉하는 납땀부 표면의 법선과 수평선이 이루는 작은 임의의 값을 가지고 있다. 그림 15에 프로브 끝과 접촉하는 땀납면이 만나는 접촉각이 30°일 경우, 그림 12와 동일한 이득을 가지고 접촉실험을 행한 결과가 나타나 있다. PID 힘 제환 제어는 접촉조건이 바뀌게됨에 따라 불안정한 과도응답을 갖는 접촉결과를 보여주고 있지만, 본논문에서 제안한 방법은 그림 13과 동일한 결과를 보여주고 있다. 이는 제안된 제어알고리즘의 강건성을 나타낸다.

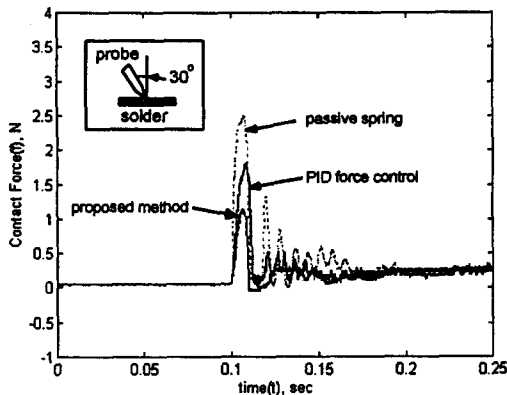


그림 14. 제안된 제어방법과 기존 방법과의 비교 (접촉각 = 30).

Fig. 14. Comparison of the conventional method with the proposed method (slant angle of contact point = 30).

V. 결론

본 논문에서는 인쇄회로기판의 통전검사를 위한 새로운 프로브시스템을 제안하였다. 소성변형 가능한 납땀부와 접촉시 능동적인 접촉력 제어를 할 수 있도록 광역/미세운동 기구가 직렬연결된 새로운 프로브기구를 제안하였으며, 원형제작과 실험을 통해 그 유효성을 보였다. 특히 미세운동 기구는 프로브 시스템의 최종 운동에 끼치는 영향이 매우 크기 때문에 정밀 위치제어가 가능한 운동코일방식의 전자 기학 원리를 이용하였다. 이 기구는 빠른 응답속도와 선형화된 힘발생이 가능하며, 따라서 프로브 액츄에이터로서 적합한 특성을 갖는다. 또한, 제안된 제어 방법은 기존의 수동 순응제어, PID 힘제어방법보다 충격력발생이 작고, 따라서 충격에 따른 침투깊이의 조절이 보다 용이하며, 안정된 접촉천이 운동을 할 수 있음을 일련의 실험을 통해 알 수 있었다.

참고문헌

[1] A. Sharon, N. N. Hogan, and D. E. Hardt, "High bandwidth force regulation and inertia reduction using a Macro / micro manipulator system," *IEEE Int. Conf. on R&A*, pp. 126-132, 1988.
 [2] J. B. Morrell and J. K. Salisbury, "Parallel coupled actuators for high performance force control : a micro - macro concept," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, vol. 1, pp. 391-397,

1995.
 [3] R. L. Hollis, S. E. Salcudean, and A. P. Allan, "A Six-Degree-of-Freedom magnetically levitated variable compliance Fine-Motion wrist: design, modeling, and control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 320-332, 1991.
 [4] S. R. Oh, R. L. Hollis, and S. E. Salcudean, "Precision assembly with a magnetically levitated wrist," *IEEE Int. Conf. on R&A*, pp. 1-8, 1993.
 [5] K. Asakawa, F. Akiya, and F. Tabata, "A variable compliance device and its application for Automatic Assembly," *Autofact 5 Conf. Proc.* (Detroit, MI, Nov. 14-17, 1983), pp. 10-1-10-7.
 [6] Y. Wu, T. J. Tarn, and N. Xi, "Force and transition control with environmental uncertainties," *IEEE Int. Conf. on R&A*, pp. 899-904, 1995.
 [7] J. M. Hyde and M. R. Cutkosky, "Controlling contact transition," *IEEE Control Systems*, pp. 25-30, 1994.
 [8] H. Kazerooni, B. Waibei, and S. Kim, "On the stability of robot compliant motion control: theory and experiments," *Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems Measurements and Control*, vol. 112, pp. 417-425, 1990.
 [9] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation: part I - theory and part II - implementation," *J. of Dynamical Systems, Measurements and Control*, vol. 107, pp. 1-16, 1985.
 [10] R. Volpe and P. Khosla, "A Theoretical and Experimental Investigation of Impact Control for Manipulators," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 12, no. 4, pp. 352-365, 1993.
 [11] J. K. Mills and D. M. Lokhorst, "Control of robotic manipulators during general task execution : a discontinuous control approach," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 12, no. 2, pp. 861-874, 1993.
 [12] 심재홍, 조형석, 김성권, "인쇄회로기판의 통전검사를 위한 새로운 프로브 시스템", '95 한국자동제어학술회의, 2 권, pp. 659-662, 1995.
 [13] J. H. Shim, H. S. Cho and S. Kim, "A new probing system for the in-circuit test of a PCB," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 580-585, 1996.
 [14] J. H. Shim, H. S. Cho and S. Kim, "Impact control of a probing manipulator contacting with plastically deformable environment," *Proc. of the 11th Int. Conf. on Systems Engineering*, pp. 987-993, 1996.
 [15] W. H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, 4th ed., McGraw-Hill, 1992.



심재홍

1985년 고려대 기계공학과 졸업, 동대학원석사(1987), 1987년 ~ 1992년 삼성전자 생산기술센터 시스템개발실 주임연구원, 1992년 ~ 현재 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 로봇틱스, 센서 및

제어이론.



조형석

1946년생. 1971년 서울대학교 공과대학 공업교육학과 졸업 (학사), 1973년 미국 Northwestern University 기계공학과 졸업 (석사), 1977년 미국 University of California, Berkley 기계공학과 졸업 (박사). 현재 한국과학기술원

기계공학과 교수. 1990년 ~ 1993년 IFAC Manufacturing Committee의 부위원장, 1996년 ~ 1997년 포항제철(주) 석좌교수, 현재 국제 Journal인 Robotica, Control Engineering Practice, Advanced Robotics의 편집위원. 관심분야는 인공지능 응용, 비전 시스템, 공정 제어, 로봇틱스, 그리고 조립 자동화임.



김성권

1972년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1986년 미국 Minnesota University 기계공학과 졸업(석사), 동대학원 박사(1988). 1976년 국방과학연구소 선임연구원, 1988년 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소장, 현재 생산기술센터장. 1991, 1992년

장영실상, 1993년 다산기술대상등 수상. 주관분야는 로봇, 로봇제어, CNC 제어기, 비전시스템, 검사조정시스템, Mobile 로봇.