

소성변형가능한 물체와 접촉하는 프로브 매니플레이터의 접촉제어

Contact Control of a Probing Manipulator Contacting with Plastically Deformable Objects

°심재홍*, 조형석**, 김성권***

*한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 (Tel: 02-958-3461; Fax: 02-968-1638; E-mail: sjh@control.kaist.ac.kr)

**한국과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-869-3213; Fax: 042-869-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

***삼성전자 생산기술센터 (Tel: 0331-200-2200; Fax: 0331-200-2454)

Abstract Since impact phenomenon is highly nonlinear, the analysis and control of the contact motion has been a challenging subject. Various researches have been carried out mostly for the contact of a rigid robotic manipulator with a stiff and elastic environment. This paper is motivated by a new contact task: the in-circuit test of a printed circuit board. In this process, high speed contact occurs between a rigid probing manipulator and a plastically deformable work environment. A new dynamic model of the impact controlled probing task has been proposed, considering contact with the plastically deformable object. Approaching velocity conditions to avoid an excess of the allowable penetration depth and control the generated impact force properly are derived from the proposed model. The results of the simulation studies are made for various probing conditions and show the validity of the proposed model.

Keywords Impact, Plastic Deformation, Penetration Depth, Contact Transition, Probing

1. 서론

최근 자동화기술의 급격한 발전은 보다 빠르고 정확한 로봇의 발전을 가져왔다. 이 결과, 정밀조립, 미세 가공등의 작업에서 로봇은 놀라운 정도의 향상된 효율을 나타내고 있다. 대부분의 로봇을 이용한 작업은 로봇과 환경과의 상호동작(interaction)을 요구한다. 이때, 만약 로봇 매니플레이터의 접촉운동속도가 충분히 빠르다면, 로봇과 작업물체간에 충돌(collision)이 발생할 수 있다. 이 충돌은 매우 비선형적인 현상이며, 로봇의 급격한 구조변화를 가져온다. 이러한 충돌의 특성들은 접촉운동의 해석 및 제어를 어렵게 만든다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해 지금까지 로봇 매니플레이터의 접촉운동 해석 및 제어에 대해 많은 연구들이 진행되어 왔다.

Zheng과 Hemami[1]는 로봇에 의한 충격모델을 제시했다. 로봇을 포함한 작업물체는 인가된 힘에 의해 변형을 일으키지 않는 강체로 모델링되어졌다. Wang과 Paul[2]은 매니플레이터가 물체를 잡을 때 로봇과 작업물체 사이에 발생하는 충돌에 의한 충격력에 매니플레이터가 반응하는 함수관계를 갖는 충격모델을 제안하였다. Mills와 Nguyen[3]은 연속함수화한 동력학 모델을 기반으로 하는 충격모델을 제시했다. Eppinger와 Seering[6]은 접촉시 로봇 시스템의 페루프 제어폭의 영향을 나타낼 수 있는 모델을 개발했다. 한편, 충격제어 문제에서 있어서는 불연속(discontinuous) 제어방법[5], 입력명령 형성(input command shaping) 방법[8], 유연한 매니플레이터의 접촉제어[7]등이 제안되어져 왔다. 또한, 충격력을 적절하게 제어하기 위한 접근속도(approaching velocity) 조건들이 제안되기도 하였다[4]. 지금까지 소개된 모델들은 대부분 강체 로봇 매니플레이터와 탄성체인 작업물체와의 사이에서 발생하는 상호작용으로 생각되어져 왔다.

본 논문에서는 일종의 로봇으로 간주할 수 있는 프로브가 작업물체와 접촉하는 측정(probing) 작업에 대해 논하고자 한다. 특히, 저자들은 소성변형 가능한 물체와의 접촉에서 발생할 수 있는 새로운 종류의 문제를 다루고자 한다. 그런 문제중의 한 예가 인쇄회로기판의 통전검사이다. 이 검사는 회로기판의 조립검사중의 한 공정으로서, 프로브가 회로기판상의 납땜부의 통전성을 검사하기 위해 고속으로 납땜결합부와 접촉한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 날카로운 형상을 갖는 프로브 끝(tip)이 납땜부 표면과 접촉하면서 발생하는 접촉력이 접촉물체의 탄성영역을 벗어나면, 납땜부의 접촉되는 부분은 소성변형된다. 만약 이 접촉력이 일정 크기이상 커지게 되면, 납땜부 표면이 움푹을 남기게 되며, 이는 납땜조직에 인위적인 불량을 발생시키게 된다. 또한, 이 힘은 프로브 운동을 불안정하게 만들 수 있으며, 이는 사실과 다른 통전검사 결과를 낳을 수도 있다. 그러므로, 프로브는 주어진 작업시간 동안에 그런 불량이나 불안정한 운동을 발생시키지 않고, 각기 다른 크기, 형상 및 표면강도를 갖는 납땜부와 접촉되도록 요구되어진다.

본 논문은 프로브와 소성변형 가능한 물체간의 접촉에 대한 새로운 동역학적 충격 모델을 제시하고자 한다. 본 논문에서 다루고 있는 프로브 매니플레이터는 실제로 통전검사 공정에 적용되고 있는 2 자유도를 갖는 프로브 시스템이다. 또한, 매니플레이터의 접근속도가 임계치를 벗어난 상태에서 작업물체와 접촉한다면, 한계 허용치(allowable magnitude) 이상의 소성변형이 작업물체에 발생할 수 있으므로, 접근속도의 한계 조건을 고려할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 제안된 충격모델로부터 접근속도 조건을 유도하였다. 다양한 측정조건들에 대해 모의실험결과들이 다루어졌으며, 이를 통해 제안된 모델의 유효성을 보여주고 있다.

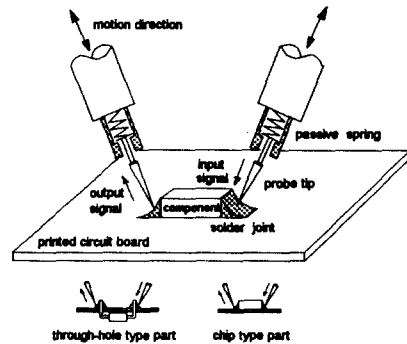


그림 1. 기존의 통전검사 방법.

Fig. 1. Conventional in-circuit test of a printed circuit board.

2. 충격 모델링 및 접근속도 조건

측정작업과 같은 로봇을 이용한 작업에 있어서, 부정확한 운동계획은 충돌을 발생시킬 수 있는 원인이 된다. 충돌속도가 큰 경우, 작업물체가 로봇보다 강성이 작거나, 작업물체가 탄성과 소성을 동시에 갖는 물성을 갖고 있다면, 충돌시 발생하는 큰 충격력이 로봇장치의 내구성에 문제를 발생시킬 수 있으며, 접촉물체에 매우 큰 소성변형을 일으킬 수 있다. 일반적으로, 접촉현상에는 두 가지 상태가 존재한다. 즉, 탄성접촉상태와 소성접촉상태이다. 탄성접촉상태에서의 충격모델은 Hertz 모델에 의해 표현된다[11]. 이때, 충격력 F 는 다음과 같이 표현된다.

$$F = n\alpha^{3/2} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } n = \frac{4\sqrt{R_1}}{3\pi(k_1 + k_2)}, \quad k_i = \frac{1 - \zeta_i^2}{\pi E_i} \quad i = 1, 2.$$

또한, α 는 탄성변형량, R_1 는 로봇 말단부의 접촉반경, 그리고 E_i, ζ_i 는 로봇 말단부의 영계수(Young's modulus)와 작업물체의 포와송비(Poisson's ratio)를 각각 나타낸다. 본 논문에서는 동전검사 공정과 같이 대개 소성변형이 발생하는 부분에 더 많은 관심을 두고자 한다.

그림 2(a)와 같이 원추형 단면을 갖는 프로브 시스템의 말단효과부가 초기 접근속도 v_0 , 질량 M 으로 목표 물체의 평면과 접촉하는 경우를 고려해보자. 이때, 발생하는 충격력 F [10]는 다음과 같이 표현된다.

$$F = \pi \bar{Y} \alpha^2 \tan^2 \theta \quad (2)$$

여기서 α 는 상대적인 소성 변형량이며, 침투깊이(penetration depth)를 의미한다. 그리고, \bar{Y}, θ 는 접촉물체의 평균저항압력, 프로브 말단부의 반각(semi-angle)을 각각 의미한다. \bar{Y} 를 접촉물체의 항복응력(yield stress)라고 한다면, \bar{Y} 의 값은 약 γ 의 3 배정도이다.

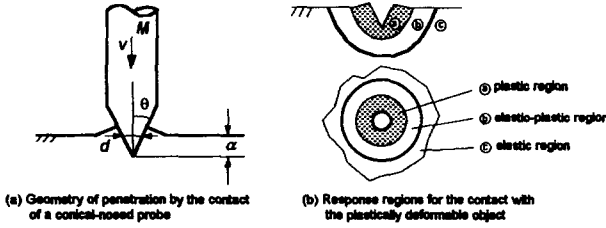


Fig. 2. Geometry and response regions for the contact between a conical-nosed probe and a plastically deformable object.

최대 소성변형량 α_{max} 는 다음과 같이 유도된다.

$$\int F d\alpha = \frac{1}{3} \pi \bar{Y} \alpha^3 \tan^2 \theta = \frac{1}{2} M (v_0^2 - v^2) \quad (3)$$

$$\alpha_{max} = \left(\frac{3M v_0^2}{2\pi \bar{Y} \tan^2 \theta} \right)^{1/3} \quad (4)$$

여기서 v 는 접촉운동기간동안의 접촉속도를 의미한다. 따라서, 최대 충격력 F_{max} 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_{max} = \pi \bar{Y} \alpha_{max}^2 \tan^2 \theta. \quad (5)$$

접촉운동에 있어서, 안정된 접촉상태를 유지하고, 큰 충격력의 발생을 방지하기 위해서는 제어기가 접촉력이 최대치가 되기전에 위치제어모드에서 힘제어모드로 변환되어야 한다. 이때, 충격력발생기간(time duration of impact)을 T_t 라고 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_t = \frac{M v_0}{F_{max}} = 1.328 \left(\frac{M}{\pi \bar{Y} v_0 \tan^2 \theta} \right)^{1/3} \quad (6)$$

접촉력 발생에 따른 제어기 변환논리는 최초 충격력 감지에 의해 결정되므로, 샘플링시간 T_s 는 충격력 발생기간의 1/2 보다 작아야 한다; $T_t > 2T_s$. 위 관계식으로부터 첫 번째 접근속도 조건을 유추할 수 있다.

$$v_0 < 0.2886 M (\pi \bar{Y} \tan^2 \theta)^{-1} T_s^{-3}. \quad (7)$$

또한, 과대 소성변형이 부정확한 제어입력에 의해 발생할 수도 있다. 그러므로, 접촉점에서의 소성변형량은 허용 침투깊이를 초과하지 않도록 해야한다. 즉, $\alpha_{max} < \alpha_{limit}$ 을 만족하여야 한다. 여기서, α_{limit} 는 허용 침투깊이이다. 식(4)로부터 다음과 같은 두 번째 접근속도 조건이 구해진다.

$$v_0 < \left(\frac{2\pi \bar{Y} \alpha_{limit}^3 \tan^2 \theta}{3M} \right)^{1/2} \quad (8)$$

결과적으로, 식 (7), (8)로부터 최대 접근속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max} = \text{Min} \left[0.2886 M (\pi \bar{Y} \tan^2 \theta)^{-1} T_s^{-3}, \left(\frac{2\pi \bar{Y} \alpha_{limit}^3 \tan^2 \theta}{3M} \right)^{1/2} \right] \quad (9)$$

3. 시스템 모델링

본 논문에서는 로봇 팔과 작업물체와 직접 접촉하는 말단효과부로 이루어진 일련의 동력학적 시스템을 고려한다. 이 로봇은 실제 동전검사에 사용되고 있는 프로브 시스템이며[12], 그림 3과 같이 직렬로 연결된 2 자유도 구조로 모델링할 수 있다. 그 구조는 강제인 로봇 매니플레이터와 1 자유도의 프로브로 이루어져 있다. 또한, 작업물체는 소성변형 가능한 물체로 이루어져 있다. 이 시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

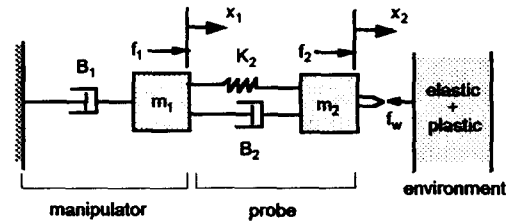


그림 3. 2 자유도를 갖는 프로브 매니플레이터 모델.

Fig. 3. Two degree-of-freedom model of a manipulator for the contact task.

첫 번째 링크 (매니플레이터)

$$m_1 \ddot{x}_1 = f_1 - (B_1 + B_2) \dot{x}_1 + B_2 \dot{x}_2 - K_2 (x_1 - x_2) \quad (10)$$

두 번째 링크 (프로브)

$$m_2 \ddot{x}_2 = f_2 - f_w - B_2 (\dot{x}_1 + \dot{x}_2) + K_2 (x_1 - x_2) \quad (11)$$

여기서, 침차 1, 2는 각각 매니플레이터, 프로브를 의미한다. 또한, x, m, B, K 는 각각 링크의 변위, 질량, 감쇠계수, 스프링상수를 의미한다.

f_1, f_2 는 매니플레이터와 프로브의 입력 제어 힘을 각각 의미하며, f_w 는 프로브와 작업물체 사이에서 측정된 힘이다.

접속 힘제어시 다음과 같은 간단한 비례-적분-미분 (PID) 힘제어 제어기를 적용하였다.

$$f_2 = f_d + k_{pf}(f_d - f_w) + k_{if} \int (f_d - f_w) dt + k_{df} \frac{d}{dt}(f_d - f_w) \quad (12)$$

여기서, f_d 는 요구힘이고, k_{pf}, k_{if}, k_{df} 는 각각 비례, 적분, 미분이득을 의미한다. 식(1)과 (2)로부터 접촉력 f_w 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_w = \begin{cases} 0 & (\text{non-contact}) \\ n\alpha^{3/2} & (\text{elastic contact, } 0 < \sigma_w < 1.1Y) \\ \pi\bar{Y}\alpha^2 \tan^2\theta & (\text{plastic contact, } \sigma_w \geq 1.1Y) \end{cases} \quad (13)$$

여기서, σ_w 는 접촉시 접촉점에서의 평균 응력(mean stress)이다. 접촉상태가 탄성영역인지 소성영역인지의 구별은 접촉순간 발생하는 접촉력에 의해서 판단된다. 일반적으로, 물체와 빠른 속도로 충돌하는 소성변형을 일으키지 않는 물체에 의해서는 초기에 탄성응력이 발생하며, 이는 Hertz 모델에 의해 계산될 수 있다. 만약 충돌속도가 더욱 빨라져 발생하는 충격력이 $1.1Y$ 를 초과한다면 소성변형이 발생하면서 운동에너지의 일부가 환원불가능해지게 된다[16].

4. 모의 실험

제안된 모델의 동력학적 현상을 설명하기 위해 다양한 모의실험결과를 수행하였다. 모의실험에 사용된 작업은 초기에 매니플레이터가 비접촉운동을 하다가 작업물체와 충돌하게 되며, 충돌후에는 접촉상태를 계속 유지하는 내용으로 하였다.

4.1 모의실험 방법 및 초기조건

매니플레이터는 직선상에서 움직이도록 제어된다. 그러다가 매니플레이터의 운동방향에 수직하게 놓여있는 작업물체에 의해 매니플레이터의 경로가 방해받게 된다. 프로브와 작업물체로 선정된 땀납(solder)의 물성이 표 1에 나타나 있다.

4.2 모의실험 결과

그림 4는 작업물체의 여러가지 표면강도에 대한 초기 충격력을 확대한 결과를 보여주고 있다. 힘제어제어에 의해 이와 같은 초기 충격력을 줄이기 위해서는 제어가 충격 지속기간의 1/2 내에 이루어져야한다. 그러나, 그림에서 볼 수 있듯이 초기 임팩트 발생시간이 너무 짧기때문에 이의 달성은 매우 어렵다.

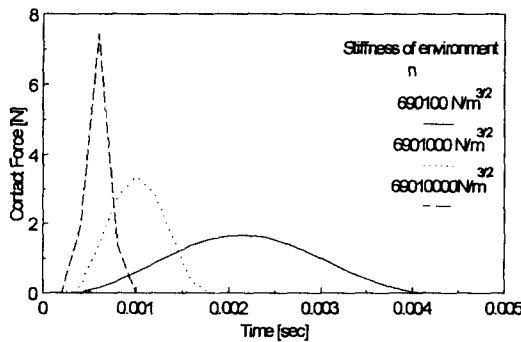


그림 4. 다양한 작업물체의 강도에 대한 충격력 발생기간.
Fig. 4. Impact force durations for various environment surfaces.

그림 5(a)는 힘제어를 하지 않는 상태에서 다양한 프로브의 접근속도에 따른 접촉력의 발생결과를 보여주고 있다. 초기 최대 충격력은 일반적으로 최초 접촉시 발생한다. 그러나, 접근속도의 변화는 최초 접촉과 2 번째 접촉사이의 시간차이에 큰 영향을 끼치지 않는다. 또한, 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 최초 발생한 최대 충격력에 의해 가장 많은 소성변형이 발생한다. 접촉표면에서의 진동에 의해 발생하는 연속적인 접촉은 작업물체에 새로운 소성변형을 일으킨다. 그러나, 이러한 연속적인 접촉에 의해 발생하는 침투깊이는 최초접촉시의 최대 충격력에 의해 발생하는 침투깊이량에 비해 아주 적다.

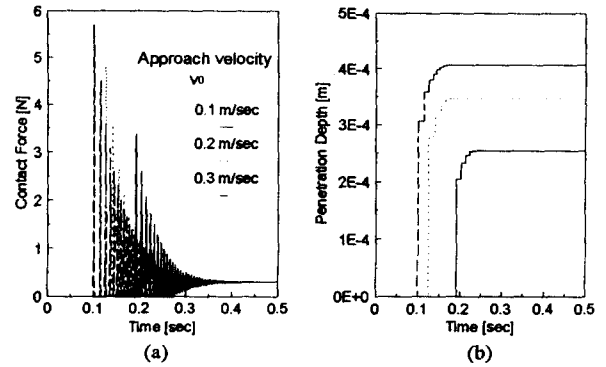


그림 5. 다양한 접근속도에 의한 접촉응답의 변화
Fig. 5. Contact force and plastic deformation responses for various approach velocities.

다양한 프로브의 강도에 대한 접촉력 발생 결과가 그림 6에 나타나 있다. 과도상태 기간은 프로브 강도 변화에 의해 크게 영향받지 않는다. 그림 7(a)는 여러가지 프로브 질량변화에 의한 접촉 결과를 보여주고 있다. 프로브 질량이 클수록 안정시간이 길어지나, 침투깊이의 변화에는 큰 영향을 끼치지 않는다.

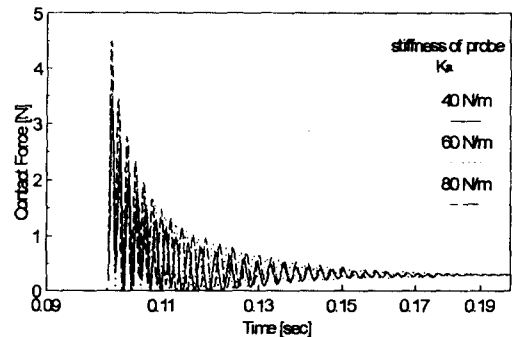


그림 6. 다양한 프로브 강도에 대한 접촉력의 변화.
Fig. 6. Contact force for different probe stiffnesses.

최대 충격력의 크기를 줄이고, 과도상태를 안정화시키기 위해 간단한 비례-적분-미분 힘제어제어기를 적용하였다. 안정조건을 만족하는 제어결과가 그림 8(a)에 나타나 있다. 이때, 접근속도는 0.1 m/sec로 설정하였다. 결과에서 알 수 있듯이 프로브 시스템은 안정되게 제어되며, 요구 접촉력에 매우 빠르게 수렴한다. 그러나, 최초 접촉시 발생하는 최대 충격력의 크기는 만족스러우리만큼 줄이기가 어렵다. 그림 9(a)는 불안정한 조건에 의한 힘제어제어 결과를 나타내고 있다. 접촉력이 수렴하거나 발산되지 않고 계속되는 주기적인 진동을 나타내고 있다.

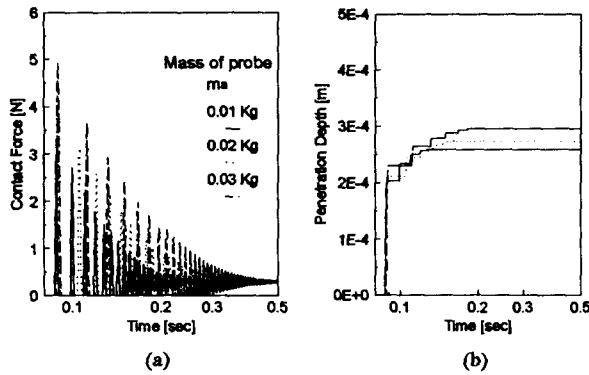


그림 7. 다양한 프로브 질량에 대한 접촉응답의 변화.
Fig. 7. Contact force and plastic deformation responses for various probe masses.

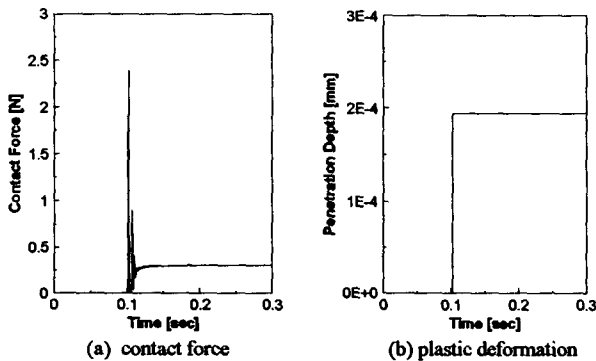


그림 8. 안정조건을 만족하는 힘제어 결과.
Fig. 8. Impact response with PID force control satisfying stable condition.

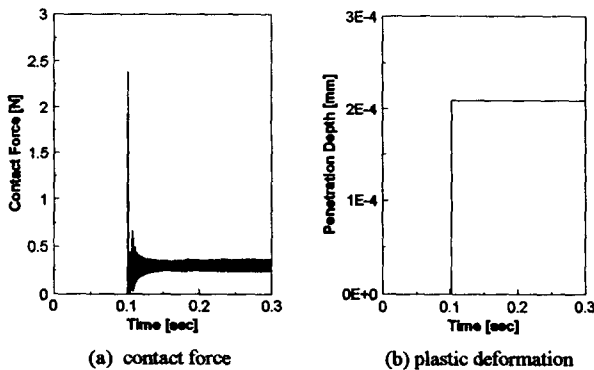


그림 9. 불안정한 이득조건을 갖는 힘제어 결과.
Fig. 9. Impact response with PID force control outside stable condition.

5. 결론

본 논문은 강체인 로봇 매니퓰레이터와 소성변형 가능한 작업물체사이에 발생하는 접촉전이 기간동안 로봇 매니퓰레이터의 동역학적 운동을 표현해주는 새로운 충격모델을 제시하였다. 최초 접촉에 의해 발생하는 최대 충격력에 의해 전체 소성변형량의 약 80-90% 정도가 결정된다. 이러한 최대 충격력의 크기를 줄이고, 과도상태를 빠르게 안정화시키기 위해 간단한 비례-적분-미분 힘제어방법을 적용하였다. 그러나, 힘제어방법의 특성상 초기

최대 충격력의 크기를 충분한 크기로 줄이기는 어렵다. 본 논문에서 제안한 해석방법은 시간에 따른 작업물체의 소성변형을 고려하는 접촉전이 상태를 해석할 수 있으므로, 로봇의 소성변형 가능한 물체와의 조립작업등에 유용하게 적용될 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- [1] Y.F. Zheng and H. Hemami, "Mathematical Modeling of a Robot Collision with its Environment", *J. of Robotic Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 289-307, 1985.
- [2] Y. Wang and R.P. Paul, "Modeling Impact Dynamics for Robotic Operations", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh, pp. 678-683, 1987.
- [3] J.K. Mill and C.V. Nguyen, "Robotic Manipulator Collision: Modeling and Simulation", *Trans. of the ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, pp. 650-658, 1992.
- [4] K. Kitagaki and M. Uchiyama, "Optimal Approach velocity of End-effector to the Environment", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1928-1934, 1992.
- [5] Y. Wu, T.J. Tarn, and N. Xi, "Force and Transition Control with Environmental Uncertainties", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 899-904, 1995.
- [6] S.D. Eppinger and W.P. Seering, "Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 904-909, 1987.
- [7] R. Volpe and P. Khosla, "Experimental Verification of a Strategy for Impact Control", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1854-1860, 1991.
- [8] J.M. Hyde and M.R. Cutkosky, "Controlling Contact Transition", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 25-30, 1994.
- [9] W.J. Book and D.S. Kwon, "Contact Control for Advanced Applications of Light Weight Arms", *J. of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 6, pp. 121-137, 1992.
- [10] W. Johnson, *Impact Strength of Materials*, Edward Arnold, 1972.
- [11] J.A. Zukas, T. Nicholas, H.F. Swift, L.B. Greszczuk, and D.R. Curran, *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, 1982.
- [12] 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*, April 22-28, Minneapolis, pp. 580-585, 1996.

표 1. 프로브와 땀납의 물성치.

Table 1. Material properties of the probe tip and the solder.

specification material	Poisson's ratio (ζ)	Young's modulus (E), GPa	yield stress (Y), MPa
steel	0.3	210	275
solder (Sn:Pb = 63:37)	0.5	50	50