

# 로봇을 이용한 컨베이어상에서의 연속 이동조립

박 용길\*, 최 현영\*, 조 형석\*, 권 대갑\*, 락 윤근\*\*, 김 완수\*\*\*  
(Y.K.Park, H.Y.Choi, H.S.Cho, D.G.Gweon, Y.K.Kwak, W.S.Kim)

\* 한국 과학 기술원 생산공학과 제어 및 자동화 연구실  
\*\* 한국 과학 기술 대학 기계 재료 공학부  
\*\*\* 삼성 전자 생산 기술 연구소

## ABSTRACT

This paper describes a dynamic robotic assembly system in which an industrial robot executes peg-in-hole task in a moving state. As an effective means to synchronize the end-effector of the robot with the moving conveyor this work uses a control algorithm which is essentially a PID position control scheme combined with velocity feedforward loop. A RCC wrist is used for the inserting task and its force responses are investigated for various tracking conditions and inserting velocities through a series of experiments.

## 1. 서론

오늘날 Robot의 응용 분야는 Robot이 가지는 일반성(programmability)과 유연성(flexibility)으로 인하여 조립, 도장, 용접, 검사 등의 전분야로 넓혀지고 있다. 특히 조립 분야에서 Robot는 형상 그리고 크기 등의 조립 제품의 다양성을 극복할 수 있기 때문에 조립 작업의 응용은 많이 연구되고 있으며 그 수요는 더욱 늘어날 전망이다[1]. 현재 산업 현장에서 사용되는 조립 시스템은 Conveyor belt상의 작업 대상을 정지시킨 후 Robot의 순차적인 동작-이송 및 조립(Transfer and Assembly)-을 통해서 조립이 완료되기 때문에 고정구(fixture)가 필요하고 작업 시간이 길며 로봇의 일반성을 최대한으로 활용하지 못하는 등의 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 조립 작업과 이송을 동시에 수행함으로써 작업 시간을 줄이고 로봇의 일반성을 최대한 활용할 수 있는 새로운 조립시스템을 제시하였는데 우리는 이것을 "DRAS(Dynamic Robotic Assembly System)"라 부른다. DRAS는 무엇보다도 로봇의 첨단부(end effector)와 conveyor상의 이동물체와의 연속적인 위치 및 속도 동기 특성이 우수해야 한다. 만약 조립될 부품이 완전히 알려져 있고, 이송 테이블 및 로봇의 모델링이 완전하다면 완전추적(perfect tracking)이 이루어질 수 있고 조립 공정은 준정적(quasi-static)조립과 같이 해석될 수 있다[2]. 그러나 로봇 자체가 가지는 기구학적, 동적 오차 요인, 기어의 백래시(back lash) 및 제어 성능 등에 의한 불완전성과 이송테이블 및 고정기구의 불완전한 인자등으로 인하여 완전추적은 불가능하다[3,4]. 따라서 DRAS를 성공적으로 구현하기 위해서는 다음의 네 단계를 밟아야 한다. 1) 이동 물체와 Robot end effector 간의 상대오차를 실시간으로 측정할 수 있는 sensor 시스템 개발 2) 효과적인 추적 제어기 설계 3) 이동 조립 특성 파악 4) 이동 조립시에 적합한 조립 기구 개발이 요구된다.

현재까지 로봇을 이용하여 이송되는 물체를 실시간으로 추적 조립하는 문제는 아직 연구 되어 있지 않다. DRAS와 기존의 조립 방법과의 차이점은 robot end effector와 이동 물체간에는 연속적인 위치 및 속도 동기가 이루어져야 한다는 것이다. 따라서 우수한 추적 제어 알고리즘의 개발은 DRAS를 실현하는데 있어서 핵심적인 요소이다.

Cartesian coordinate상에서 추적시스템에 대한 연구는 Taylor[5]와 Fruta[6]에 의해서 이루어졌다. Taylor는 제한된 오차범위(error bound) 안에서 추적을 할 수 있는 보간추적계획(recursive trajectory planning) 알고리즘을 제안하였고 Fruta는 레이저빔을 이용한 추적시스템을 제안하였으며 실험을 통해 성능을 확인하였다. 그러나 Taylor와 Fruta의 연구 모두 이동조립에 이용할 만큼 정밀하지가 못하다. 본 논문에서는 DRAS의 추적 시스템을 제안하였고 이에 알맞는 추적제어의 설계와 제시된 알고리즘을 이용한 조립실험을 수행함으로써, DRAS의 효율적인 가능성을 제시하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 조립 시스템의 배치를 나타내었으며, 제3절에서는 추적 알고리즘 및 그 성능에 대한 실험 결과들을 보여준다. 그리고 조립 실험 결과에 따른 고찰이 이루어졌으며, 마지막으로 5절에서 실험을 근거로한 몇가지 결론을 맺었다.

## 2. 이동 조립 시스템의 구성

그림1에 나타내었듯이 제안된 DRAS는 4개의 subsystem으로 구성되어 있다. 즉 로봇, DC 서보모동 컨베이어, 마이크로컴퓨터 그리고 PSD sensor system이다.

첫째, Robot 시스템은 4-DOF SCARA type robot와 그것의 제어기로 구성되어 있다. USER DI/DO port는 host computer와 통신을 위해서 사용된다.

둘째, 컨베이어 시스템은 DC 서보 모터, 볼스쿠루(ball screw), 그리고 hole과 force sensor가 올려지는 pallet으로 구성된다. 컨베이어 시스템은 DC 서보모터에 의해서 로봇의 첨단부를 추적하게 된다.

셋째, IBM AT 마이크로컴퓨터가 전체 DRAS를 감독하고 모터에 제어입력(control input)을 가하기 위해 사용되었다.

넷째, peg와 hole의 상대 오차를 측정하기 위해 PSD sensor system이 구성되었다. 센서 시스템은 광원으로서 적외선 LED, 조명기구에 의한 광학 노이즈(optical noise)를 제거하기 위해 optical band pass filter, 그리고 측정 소자로서 PSD 소자를 이용하였다. sensor의 resolution은 0.01mm이고 측정할 수 있는 활성영역(Active range)은 5mm이다[7].

### 3. 추적 실험(Tracking Control)

#### 3.1 좌표계 설정

Robot의 tool coordinate system의 X축이 conveyor 진행 방향과 일치하도록 설정되어 있다. 또한 sensor의 X축과 robot의 end effector의 진행 방향이 일치하도록 sensor를 이송 테이블에 고정시켰다. 이렇게 설정된 좌표계 상에서 sensor는 peg와 hole의 상대오차를 실시간으로 센서의 분해능 범위 내에서 정확하게 측정하게 된다. PSD sensor의 광원으로는 적외선 LED가 사용되었다.

#### 3.2 제어기 설계(Controller Design)

두가지 제어기법을 사용하여 conveyor의 motion을 제어하였다. 즉, 일반적인 PID 제어기와 PID plus feedforward 제어기이다. 그림2에 추적시스템의 블록선도가 주어져 있다. 디지털 영역에서의 PID 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$u(k) = \{k_p + \frac{k_i h}{1 - q^{-1}} + \frac{k_d}{h}(1 - q^{-1})\}e(k) \quad (1)$$

여기서  $e(k)$ 는 센서와 목적물과의 상대위치 오차이고,  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$ 는 각각 비례, 적분, 미분이득이다. 그리고  $q^{-1}$ 는 backward shift operator,  $h$ 는 샘플링 시간으로 본 논문에서는 10msec로 하였다.

한편, 고전 PID제어기를 사용했을 때는 목표물의 속도가 빨라질수록 위치오차의 overshoot이 커지게 되어 센서의 측정 범위 -5mm를 벗어날 위험성이 있으며 정상 상태에 도달하는데 긴 시간이 요구되기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 feedforward scheme을 제시하였으며, 제어기는 다음의 구조를 갖는다.

$$u(k) = u_f(k) + \{k_p + \frac{k_i h}{1 - q^{-1}} + \frac{k_d}{h}(1 - q^{-1})\}e(k) \quad (2)$$

여기서  $U_f$ 는 속도 feedforward 제어 입력을 나타내며 나머지는 식(1)과 같다.

#### 3.3 실험 순서

초기에 로봇트와 컨베이어는 정지해 있는 상태에서 IBM-AT는 시작 신호를 LAB MASTER의 I/O Port를 통해서 SCARA 로봇트의 제어기인 USER DI/DO 포트에 보낸다. 시작 신호에 따라 로봇트와 컨베이어는 초기에 서로 다른 속도로 컨베이어 축을 따라 움직인다. 그러면 PSD센서는 peg와 hole의 위치 오차를 감지한 후 출력출을 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 보낸다. 컴퓨터 내부에서는 속도 오차를 계산하고, 이러한 속도 및 위치 오차를 보상하기 위하여 제어 방식에 의한 제어입력을 D/A 변환기를 통하여 컨베이어의 DC 서보 모터에 보낸다. 여기서 PSD로부터의 출력 신호에 실리는 noise를 줄이기 위하여 20Hz의 low pass filter를 사용하였다.

#### 3.4 추적 성능

그림3에서는 고전 PID 제어방식에 대한 실험적 추적 성능을 보여주고 있다. 속도가 20mm/sec에서 120mm/sec로 커짐에 따라 overshoot가 커지고 동기 시간이 증대됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 미분이득에 의한 특성을 나타내지 않았는데 측정시에 나타나는 noise의 영향 때문에 미분이득을 작게 조정하였더니 미분 효과는 거의 나타나지 않았다. 따라서 빠른 속도에서 제어성능을 높이기 위한 제어기의 도입이 필요하며 그림4는 방위제 제어방식의 추적 성능을 나타낸다. 이 방식은 고전제어 방식에 비하여 위치 오차에서의

overshoot가 현저히 줄어들었으며 정상 상태에 도달하는 시간은 훨씬 줄어들었음을 알 수 있다.

### 4. 조립 실험

여러가지 이유로 peg-in-hole 작업에서는 항상 조립 부품들간에 기계적인 힘이 존재한다. 그러나 과도한 힘은 부품뿐만 아니라 조립시스템에도 손상을 주기 때문에 피해야한다. 따라서 자동조립에 있어서 가장 중요한 목적중의 하나는 가능한 한 짧은 시간내에 기계적인 간섭력을 최소화 하는 것이다. 자연적으로 조건시스템의 성능을 향상시키기 위하여 여러가지 조건하에서의 force특성을 조사하는 것은 필연적이다.

조립반력을 좌우하는 요소는 여러가지가 있다. 즉 조립 속도, 마찰, 이동 속도, 조립기구, 추적성능 등이다. 그 중에서 이동 조립에서 일차적으로 가장 큰 영향을 미치는 것은 추적성능 및 조립속도이다. 따라서 본 시스템에서는 추적 성능과 조립속도에 따른 조립반력을 알아보기 위해 RCC를 사용하여 조립 실험을 수행하였다. 조립 실험에는 6축(FS6-120A, Barry Wright사) force 센서가 사용되었고 peg와 hole에 대한 치수는 그림5에 있다. 여기서  $L_g$ 는 RCC지지점으로부터 peg선단까지의 거리,  $D_p, D_h$ 는 각각 peg와 hole의 직경,  $w$ 는 chamfer 너비,  $\alpha$ 는 chamfer 각도이다. 공차비(clearance ratio)는 0.0025로 고정되었다. 그림6은 실험 장치를 보여준다.

#### 4.1 실험 방법

시스템 배치는 2절에서 이미 언급되었다. Host computer에서 로봇트에 시작 신호를 주면 정지 상태에 있던 로봇트는 일정한 속도로 움직이게 되고 이와 동시에 PSD 센서에 의해 상대위치오차를 측정하고 motor를 제어하여 conveyor가 로봇트를 따라가게 된다. 그리고 host computer는 추적 오차가 chamfer범위내에 있으면 조립작업(insertion task)을 수행한다.

#### 4.2 실험 결과

이동 조립과정에서는 lateral force  $F_x$ 와 삽입력(Insertion force)  $F_z$ 가 조립 반력들중에서 가장 중요한 성분이다. 왜냐하면  $F_x$ 는 추적 방향에서 존재하는 위치 및 속도 오차에 의하여 발생하며 삽입력  $F_z$ 는 추적 오차 및 삽입속도에 좌우되기 때문이다. 그림7에서부터 그림9에 추적 오차와 조립 반력과의 관계를 나타내었다. 그리고 그림10은 조립 속도와 조립 반력과의 관계를 나타낸다. 그림 7(b), 8(b)는 참고 문헌[2]에서의 준정적상태에서의 한점 접촉인 경우와 유사한 결과를 보여준다. 그림9(b)는 삽입력은 거의 나타나지 않았는데 이것은 lateral방향의 위치 및 속도 오차가 매우 작다는 사실로 증명될 수 있다. 그림 7(c), 8(c), 9(c)는 여러 추적 조건에 따른 lateral force를 보여준다. 이 결과는 RCC에 작용하는 힘은 lateral방향의 위치 오차와 비례한다는 사실과 일치한다. 실험에서 속도 오차에 의한 impact force는 나타나지 않았다. 결과로부터 RCC의 lateral compliance는 속도 오차에 의한 impact force와 위치 오차에 의한 힘도 흡수함을 알았다. 그림 10(a), (b)는 삽입 속도에 따른 조립 반력  $F_z$ 를 보여주고 있다. 이때의 초기오차는 1.5mm이며 삽입깊이는 20mm이다. 실험결과에서 한가지 중요한 사실을 발견할 수 있다. 즉 낮은속도의 결과 그림 10(a)는 준정적상태의 한점접촉의 특성을 그대로 나타내나 속도가 상대적으로 큰 그림 10(b)에서는 참고문헌[2]에서 제시되지 않은 특성을 나타낸다. 속도의 증가에 따른 동적 특성이 현저한 영향을 나타냄을 볼 수

있다. 여기서 조립 속도가 커짐에 따라 조립 반력 역시 커짐을 알 수 있는데 이것으로부터 조립 반력을 감소시키는 효과적인 기구의 제시가 기대된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 조립시스템에 있어서 새로운 개념인 DRAS를 제시하였다. 제안된 DRAS에서는 속도 feedforward plus 위치 PID 제어 방법이 제시되었고 제시된 알고리즘의 성능은 고전 PID 제어기법과 실험을 통하여 비교하였다. 그리고 제시된 알고리즘을 사용하여 여러가지 추적조건에 대하여 조립 반력을 조사하였으며 조립 속도에 따른 반력 특성 또한 제시하였다. 실험 결과 추적 오차는 조립 허용 오차 범위 내에 존재한다. 결론적으로 본 논문에서 제시한 DRAS는 이동 조립에 매우 효과적임을 알 수 있다. 앞으로 조립 속도의 증가에 따른 조립 반력 상승을 극복하기 위한 효과적인 방법에 대한 연구가 진행되어야 한다.

## References

1. Alan L. Porter and Frederick Ao Rossini, "Robotics in the Year 2000", Robotics Today, 1987, pp27-28.
2. D.E. Whitney, "Quasi- static Assembly of Compliantly Supported Rigid parts", ASME J. Dyna. Meas. and Control, Vol.104,1982,pp65-77.

3. Chi-haur Wu, "A Kinematic CAD Tool for the Design and Control of a Robot Manipulator", Int. J. Robotis Research, 1994, No.4, pp.28-67.
4. Albert J. Sturm and Ioor Matz' "Robot Testing and Evaluation", Robotics Engineering, Dec.1986, pp4-10.
5. Russell H. Taylor, "Planning and Execution of Straight Line Manipulator Trajectories", Tutorial on Robotics, 1983, pp.152-164.
6. Katsuhisa Fruta, Kazuhiro Kosuge, and Nobuhiko Mukai, "Control of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback: Laser Beam Tracking System", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.35, No.1, 1988, pp.31-39.
7. W.S.Kim, "Development of the sensor system for synchronizing the velocity of moving object with that of a robot-end effector", M.S.thesis, Production Eng. Dept. KAIST, 1989.

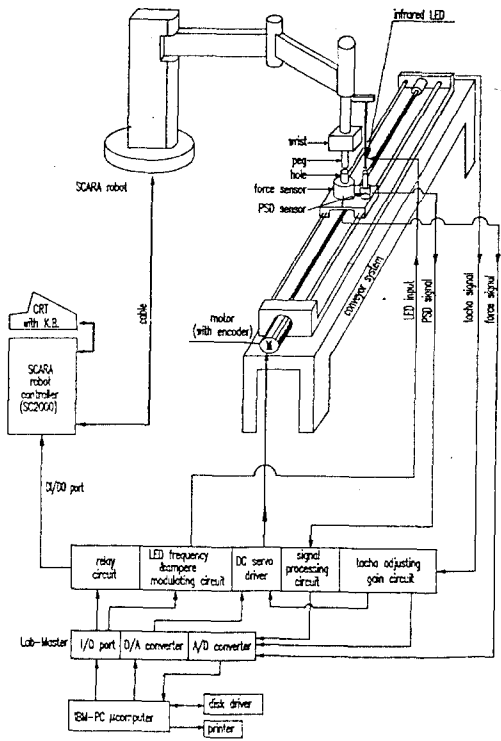
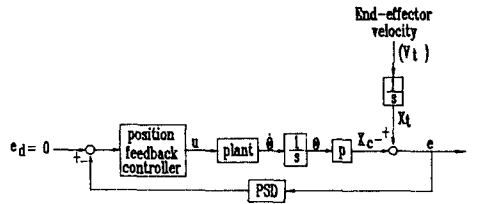
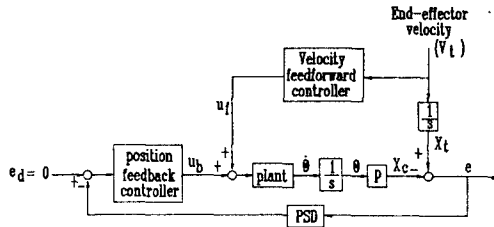


그림1. 이동 조립 시스템의 전체 구성도



(a) Conventional PID controller



(b) PID plus velocity feedforward control

그림2. 추적 시스템의 블록 선도

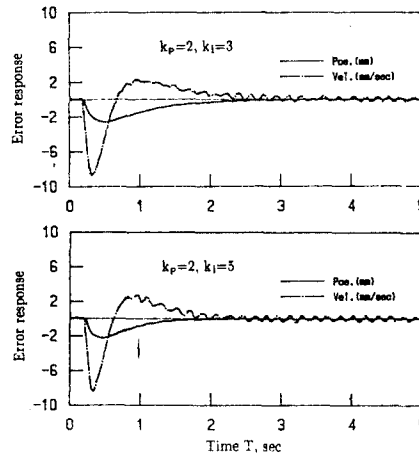


그림3(a). PID제어기의 추적성능( $V_t=120\text{mm/s}$ )

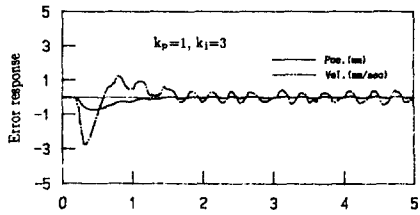


그림3(b). PID제어기의 추적성능( $V_t=20\text{mm/s}$ )

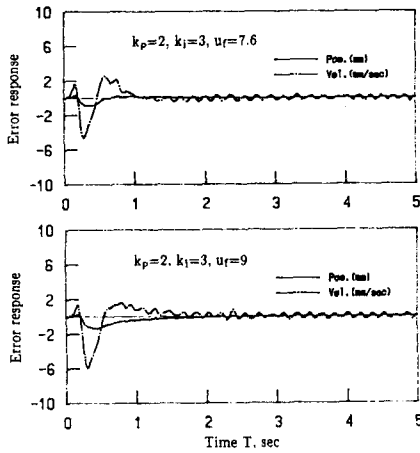


그림4(a). PID + feedforward 추적성능( $V_t=120\text{mm/s}$ )

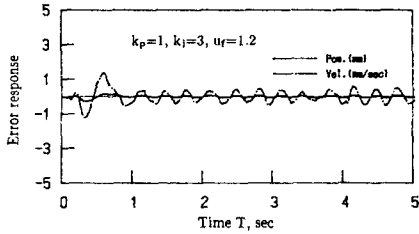


그림4(b). PID + feedforward 추적성능( $V_t=20\text{mm/s}$ )

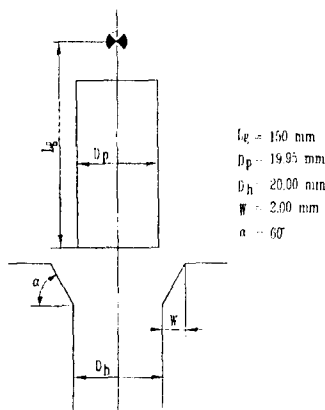


그림5. Peg와 hole의 치수

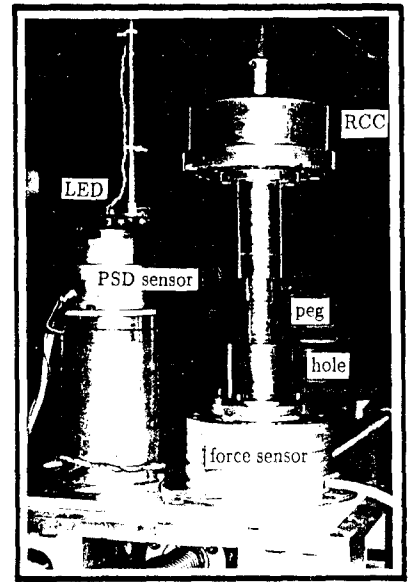


그림6. 이동 조립 실험 장치

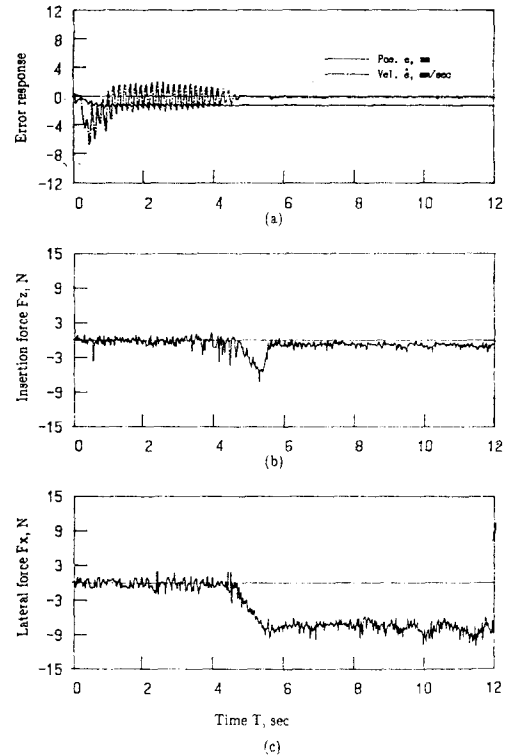


그림7. 추적 성능 VS. 조립 반력( $V_t=50\text{mm/s}$ )

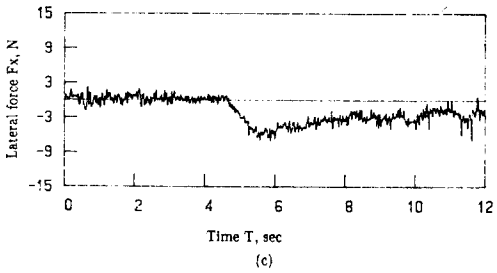
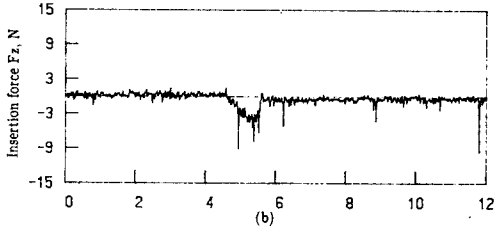
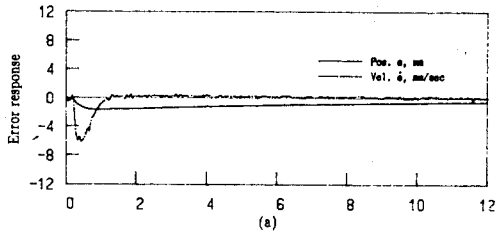


그림8. 추적 성능 VS. 조립 반력 ( $V_t=50\text{mm/s}$ )

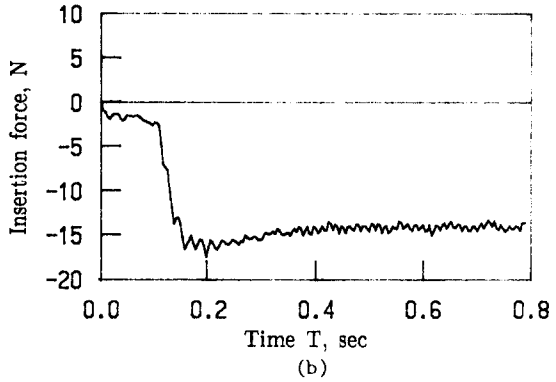
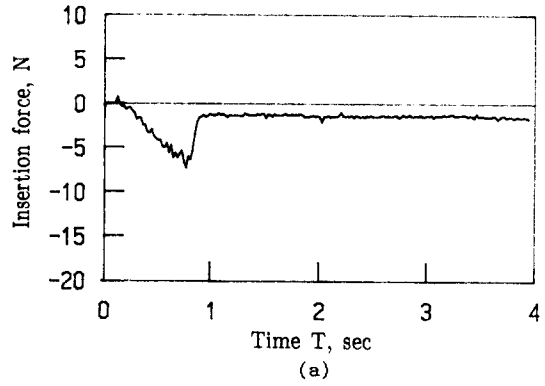


그림10. 조립 속도에 따른 조립 반력 (삽입깊이: 20mm)

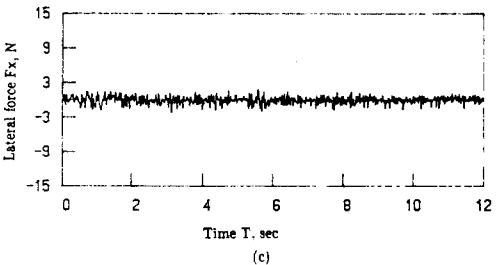
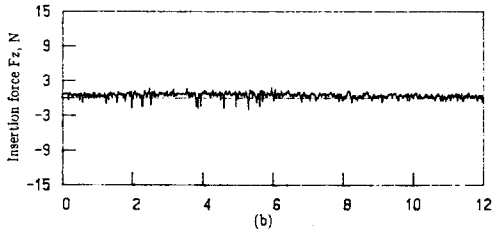
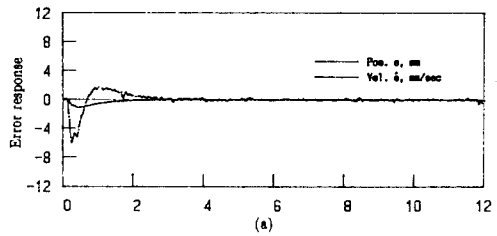


그림9. 추적 성능 VS. 조립 반력 ( $V_t=50\text{mm/s}$ )