

# 3축 전기유압 매니플레이터의 컴플라이언스 제어

안경관<sup>#</sup>, 표성만<sup>\*</sup>

## Compliance Control of a 3-Link Electro-Hydraulic Manipulator

Kyoung Kwan Ahn<sup>#</sup> and Sung Man Pyo<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

An electro-hydraulic manipulator using hydraulic actuators has many nonlinear elements, and its parameter fluctuations are greater than those of an electrically driven manipulator. So it is relatively difficult to obtain stable control performance.

In this report, we applied disturbance estimation and compensation type robust control to all axes in a 3-link electro-hydraulic manipulator. From the results of experiment, it was confirmed that the performance of trajectory tracking and attitude regulating is greatly improved by the disturbance observer, which model is the same for each axis.

On the other hand, for the autonomous assembly tasks, it is said that compliance control is one of the most available methods. Therefore we proposed compliance control which is based on the position control by disturbance observer for our manipulator system. To realize more stable contact work, the states in the compliance loop are feedback, where not only displacement but also velocity and acceleration are considered. And we applied this compliance control to Peg-in-Hole insertion task and analyzed mechanical relation between peg and hole. Also we proposed new method of shifting the position of end-effector periodically for the purpose of smooth insertion. As a result of using this method, it is experimentally confirmed that Peg-in-Hole insertion task with a clearance of 0.05[mm] can be achieved.

Key Words : Hydraulic Control(유압제어), Compliance Control(추종제어), 3-Link(3 축), Manipulator(매니플레이터), Robust Control(강인제어), Disturbance Observer(외란 관측기), Hydraulics(유압), Peg-in-Hole Task

### 1. 서론

유압구동의 매니플레이터는 고출력 특성으로부터 중량물반송 등에 이용되고 있지만, 대부분의 유압 액츄에이터는 직접부하를 구동함으로써 외란의 영향을 직접 받기쉬우며, 또 자세에 의한 관성 모멘트의 변화 등의 파라미터 변화가 심하기 때문에 안정적이고 고정도의 제어는 곤란하다고 알려져 왔다. 이와 같은 전기유압매니플레이터의

위치제어에 관해서는 각 액츄에이터에 대해서 외란추정기(Disturbance Observer)를 적용함으로써, 안정하고 고정도의 위치제어가 실현됨을 이미 확인하고 있다.<sup>(1)</sup> 한편, 전기유압매니플레이터는 고출력이고, 절연성을 쉽게 올릴 수 있으므로, 송전을 멈추지 않고 배전선의 보수공사를 수행하는 활선공사용 매니플레이터 등에도 이용되어지고 있다. 활선공사용 매니플레이터를 이용하여 조립 및 접촉작업을 수행할 경우,

접수일:2003년 5월 24일; 게재승인일:2003년 11월 14일

# 교신저자, 울산대학교 기계자동차공학부  
Email: kkahn@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2282  
\* 울산대학교대학원 기계자동차공학과

전기감전 등으로 인하여 매니플레이터의 자율화에의 요구가 높아지고 있다. 이와 같은 작업에는, 매니플레이터가 외부와 접촉할 때 발생하는 힘에 따라서 매니플레이터를 부드럽게 제어하는 컴플라이언스 제어가 유용한 수단이지만, 고정도의 제어가 곤란한 3축 전기유압 매니플레이터에 대해서 실제로 응용한 예는 적다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 다축 매니플레이터의 제 1단계로서 3축 전기유압매니플레이터에 대해서 외란추정보상법을 적용함으로써 고정도의 궤적제어, 자세제어를 실현함과 동시에, 위치제어를 기본으로한 컴플라이언스제어의 실현을 목적으로 한다. 또한 이 컴플라이언스제어를 조립작업의 대표적인 예인 Peg-in-Hole작업에 응용하여, 그 유효성에 대하여 검토한다.

## 2. 실험장치

본 연구에 이용되는 3축 전기유압매니플레이터는 랙과 피니언에 의해 두개의 유압 실린더에 의한 회전동작으로 변환시킴으로서 구동된다(Fig. 1). 각 관절은 동일 평면상에서 구동되는 구조로 되어 있다. 각 관절의 회전각도는 회전형 엔코더에 의해 0.0067[°]의 분해능으로 검출되어, 샘플링 주파수 1[kHz]로 컴퓨터에서 읽혀진다. 또, 매니플레이터가 외계와 접촉할 때 발생하는 힘의 검출은 매니플레이터의 선단에 설치된 힘센서에 의해 수행된다. 여기서는 제1축과 제2축은 위치제어에, 제3축은 선단의 자세제어에 이용된다. 이와 같이 3축 전기 유압 매니플레이터에 의한 궤적 및 자세제어 실험을 실시한다.

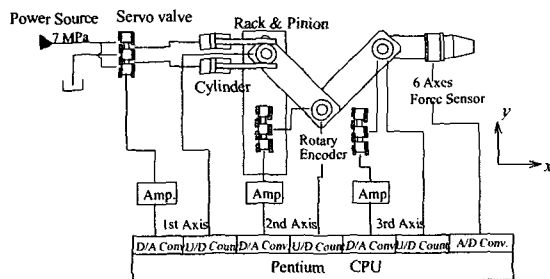


Fig.1 Experimental Apparatus

## 3. 궤적제어실험

본 실험에서 이용하는 시리얼 링크식의 전기유압 매니플레이터는 직접 구동방식을 채용하고 있기 때문에, 유압 액추에이터가 중력 등의 외란의 영향을 그대로 받기 쉬운 뿐만 아니라, 자세에 의한 관성 모멘트의 변화 등과 같은 파라미터의 변동이 크기 때문에 고정도의 위치제어는 곤란하지만, 외란 추정 보상법을 이용함으로써 안정하고, 고정도의 위치제어가 실현됨이 이미 보고되고 있다.<sup>(1)(2)</sup>

외란추정보상법은 시스템의 입력과 출력을 관측해, 규범모델과 일치하지 않는 것은 비선형요소를 포함해서 전부 입력에 중첩된 외란으로 간주, 이 외란을 하나의 상태변수로 취급, 외란 관측기(Disturbance Observer)를 이용하여 추정하여 보상하는 제어법이다. 이 외란 추정보상법을 이용하여 3축 전기 유압 매니플레이터의 끝단에 반경 5[cm]의 원을 그리는 궤적제어실험을 실시했다. 단, 제3축은 매니플레이터 끝단을 항상 수평방향으로 유지하도록 자세제어를 실시한다. 또한, 궤적 제어의 한 주기는 10[s]로 설정하였다. 관절각도의 피드백만으로 제어를 실시한 때의 실험결과 (Without Robust Control)와 외란관측기에 의한 외란 추정 보상법을 각축에 적용한 때의 결과 (With Robust Control)을 Fig. 2에 나타내고 있다.

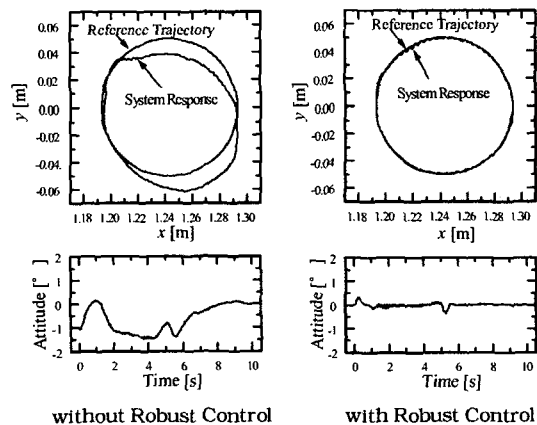


Fig.2 Results of Trajectory and Attitude Control

이 결과로부터 알 수 있듯이 외란에 의해 정확한 궤적 제어, 자세 제어가 3축 전기 유압 매니플레이터에 대해서 각축에 외란 추정 보상기를 적용함으로써, 고정도의 궤적 제어, 자세 제어가 실현됨을 알 수 있다. 다음 절에서는 이 외란 추정 보상법을 적용한 시스템에 대하여 컴플라이언스 제어를 적용한다.

#### 4. 컴플라이언스 제어

##### 4.1 Stiffness 제어

매니플레이터를 외력에 따라서 부드럽게 제어하는 컴플라이언스 제어에 대해서, 매니플레이터의 선단에서 측정되는 발생력을 각 관절에서 발생되어야 할 토크로 변환하여, 각 관절의 가속도를 직접 지령하는 수법이 Hogan에 의하여 제안되어 있다<sup>(3)</sup>. 이 수법은 고정도로 컴플라이언스 제어를 실현할 수 있는 방법이나, 자세에 의하여 변화하는 관성 모멘트의 변화와 역 Jacobian 행렬의 계산 등의 복잡한 연산처리를 필요로 하여 실용적이지 못하다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 전술의 외란 추정 보상법에 의한 고정도의 위치 제어를 바탕으로 하는 컴플라이언스 제어를 적용하고자 한다.

본 실험에서 이용하는 컴플라이언스 제어계는 전술의 외란 추정 보상법에 의해 위치 제어를 수행하는 내부 루프와 외계와 접촉할 때 발생하는 힘에 따라서 매니플레이터를 부드럽게 제어하는 루프 등 2개의 루프로 구성되어 있다. 이후, 전자를 위치 제어 루프, 후자를 컴플라이언스 루프라고 부르기로 한다. 이와 같이 위치 제어 루프와 컴플라이언스 루프로 분리함으로써 종래의 위치 제어만의 매니플레이터에 대해서도 용이하게 컴플라이언스 제어를 추가할 수 있다고 여겨진다. 이와 같이 컴플라이언스 제어에서는 힘 센서에 의해 측정된 발생력을 우선 변위로 변환할 필요가

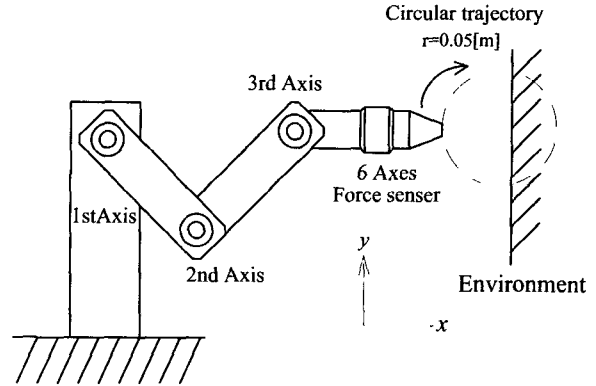


Fig.4 Experimental setup for Copying Work

있다. 이 방법에서 가장 간단한 방법으로는 발생력을 가상적인 스프링 상수로 나눔으로써 변위로 변환해, 입력에 부가함으로써 매니플레이터를 부드럽게 제어하는 방법이다. 이 방법은 힘과 변위의 강성관계만을 고려하고 있어 Stiffness 제어라고도 불리어진다(Fig. 3). 이 효과를 확인하기 위하여 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 접촉작업 실험을 수행한다. 여기서는 매니플레이터에 반경 5[cm]의 원궤적을 목표 궤적으로 사전에 부여하고, 그 궤적상에 장애물로서 벽면을 설치하여 놓았다. 만약 이상적인 컴플라이언스 제어가 실시된다면 장애물에 따라서 매니플레이터를 움직이는 이른바 평탄작업의 실현이 기대된다.

가상 스프링상수를 1500[N/m]로 했을 때의 선단의 궤적과 발생력의 실험결과를 Fig. 5에 나타내고 있다. 이 결과를 보면 알 수 있듯이, 약간의 진동적인 거동을 나타내고 있다. Stiffness 제어에서는 컴플라이언스를 높이면, 즉 가상 스프링상수를 작게 하면, 컴플라이언스 루프로부터의 목표변위의 수정값이 커져 매니플레이터의 선단의 힘 센서의 응답이 진동적으로 될 수 밖에 없다. 한편, Stiffness 제어에서는 컴플라이언스를 낮추면, 즉 가상 스프링상수를 크게 하면, 컴플라이언스 루프로부터의 목표변위의 수정값이 너무 작아져, 발생력의 완화 효과가 적어짐을 알 수 있다. 현재의 실험장치에서는 여기서 보여준 가상스프링 상수가 1500[N/m]정도가 평탄작업의 한계임을 확인하였다.

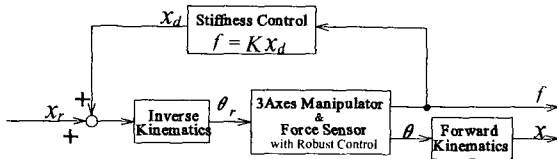


Fig.3 Stiffness Control System

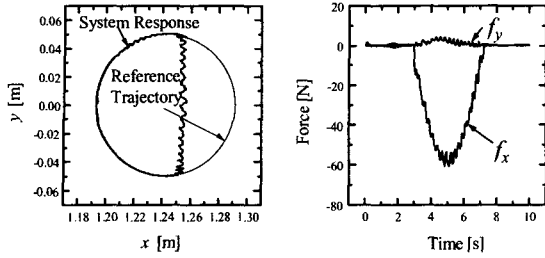


Fig.5 Experimental Results of Stiffness Control  
( $K=1500[N/m]$ )

### 4.2 임피던스 제어

전절에서 가상스프링 상수만을 고려한 Stiffness 제어에서는 한계가 있음을 확인하였다. 여기서, 가상스프링뿐만 아니라, 가상 댐퍼, 가상 질량까지 포함하여, 발생력을 변위로 환산하여 매니플레이터의 거동에 관성효과 및 댐퍼 효과를 가지게 한 것이 임피던스제어의 특징이다(Fig. 6).

Stiffness 제어의 경우와 마찬가지로 가상 스프링정수를 1500[N/m]로 하고, 가상질량  $M=60[kg]$ , 가상댐퍼  $D=600[Ns/m]$ 로 한 경우의 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 이 결과로부터 단순히 임피던스 모델을 컴플라이언스 루프내에 삽입하는 것만으로는 접촉환경을 포함하여 전체 시스템이 불안정하게되어 접촉 및 비접촉을 반복하는 거동을 보이게 된다. 임피던스 제어를 이용한 안정적인 접촉작업을 실현하기 위해서는 컴플라이언스 루프가 안정화되도록 공리를 할 필요가 있다고 여겨진다.

### 4.3 상태 피드백을 이용한 임피던스 제어

전술한 바와 같이 단순히 임피던스 모델을 컴플라이언스 루프내에 삽입하는 것만으로는 안정적인 벽면평탄작업이 실현되지 않음을 확인할 수 있었다. 여기서, 가상 변위만이 아니라, 임피던스 모델로부터 구할 수 있는 가상속도, 가상가속도의 상태 피드백을 실시함으로써 컴플라이언스루프의 안정성을 향상시키고자 한다(Fig. 8).

실험을 수행하기 앞서, 현재의 벽면 평탄작업에 있어서 컴플라이언스 루프는 외란추정보상법에 의해 매니플레이터의 동특성과 규범모델이 일치한다고 가정하면 매니플레이터의 모델로서 규범모델, 힘센서의 출력에 이용되는 접촉하는

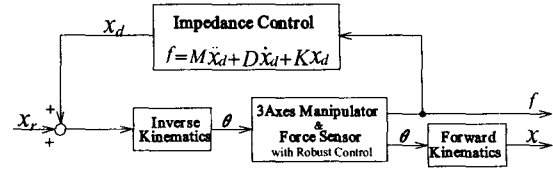


Fig.6 Impedance Control System

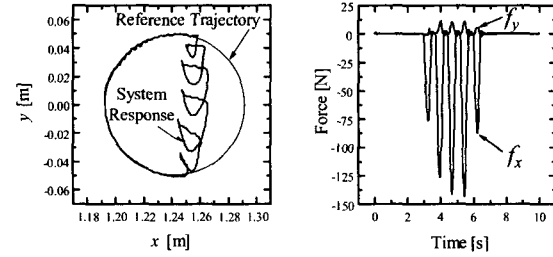


Fig.7 Experimental Results of Impedance Control  
( $M=60[kg]$ ,  $D=600[Ns/m]$ ,  $K=1500[N/m]$ )

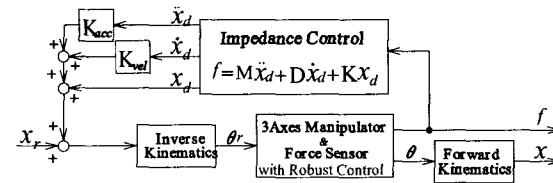
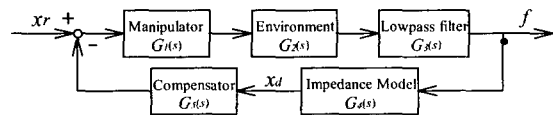


Fig.8 Impedance Control System with State Feedback



$$G_1(s) = \frac{C_2}{s^2 + C_1s + C_2} \quad G_2(s) = K_e$$

$$G_3(s) = \frac{F_2}{s^2 + F_1s + F_2} \quad G_4(s) = \frac{1}{Ms^2 + Ds + K}$$

$$G_5(s) = K_{acc} \cdot s^2 + K_{vel} \cdot s + 1$$

Fig.9 Compliance Loop Model

벽면의 모델, 매니플레이터의 컴플라이언스를 결정하는 임피던스 모델, 속도와 가속도의 상태 피드백 모델로부터 구성된다고 생각할 수 있다. 각 모델은 Fig. 9에 나타난 것과 같다.

이상과 같이 컴플라이언스 루프를 고려해서, 접촉벽면의 모델로서 강성 성분만을 고려해서 강성을 변화시킨 경우의 근궤적을 이하에 나타낸다. 상태 피드백을 이용하지 않은 경우의 결과를 Fig. 10에 나타내고 있다. 현재 실험에

사용되고 있는 벽면의 강성은 1500[N/m]정도임이 확인되어 있는 것을 생각하면, 상태피드백을 이용하지 않은 임피던스제어에서는 컴플라이언스 루프의 안정성이 충분히 확보되어 있지 않음을 알 수 있다. 한편, Fig. 11에서는  $K_{vel}=0.06$ ,  $K_{acc}=0.15$ 의 상태 피드백 계인을 이용한 경우의 결과이다. 이 결과로부터, 상태피드백의 효과에 의해, 벽면의 강성이 상당히 높게 될때까지 컴플라이언스루프의 안정성이 확보되어, 안정적인 접촉작업이 실현되리라 기대할 수 있다.

상기의 파라메터를 이용하여 실제로 벽면 접촉작업을 실시한 경우의 결과를 Fig. 12에 나타

낸다. 임피던스 모델로부터 구한 가상 위치, 속도 및 각가속도의 상태 피드백을 이용함으로써 안정적인 벽면 평탄작업이 실현됨을 확인할 수 있다.

### 5. 컴플라이언스제어를 이용한 Peg-in-Hole작업

전기유압매니플레이터를 이용한 부품간의 조립작업을 고려할 때, 부품의 가공오차나 매니플레이터 자신의 설치오차 등으로해서 위치제어만으로 조립작업을 수행하는 것은 곤란하다. 이와 같은 조건아래에서 부품상호간의 접촉에 의하여 발생하는 힘에 따라서 매니플레이터를 부드럽게 제어함으로써 자유도가 높은 조립 작업을 수행하는 것이 가능해진다. 전술한 바와 같이 3축전기유압 매니플레이터에 대해서 상태 피드백을 이용한 임피던스 제어를 적용함으로써 안정적인 컴플라이언스 제어가 실현가능함을 알 수 있다. 본 절에서는 컴플라이언스 제어를 조립작업의 대표예인 Peg-in-Hole작업에 적용하여, 그 응용의 가능성에 대하여 검토한다.

단, 본 실험에 이용하고 있는 매니플레이터는 2차원 평면상에서만 구동하므로, 실험은 판상의 물건을 슬릿에 삽입하는 작업이 된다. 이후, 삽입하는 판을 Peg, 삽입되는 상대편 슬릿을 Hole이라고 편의상 부른다. 본 실험에서는 Peg로서 폭이 14.5[mm]와 14.9[mm]인 사각판을, Hole로서는 폭 15.0[mm]를 사용한다. 또, Hole의 깊이는 50[mm]이다 (Fig. 13). 컴플라이언스제어를 이용하여 Peg-in-Hole작업을 수행할 경우, 삽입작업은 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 4단계로

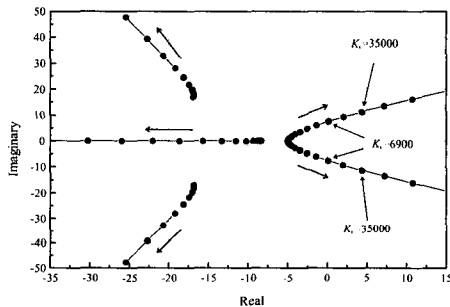


Fig.10 Root Locus (without State Feedback)

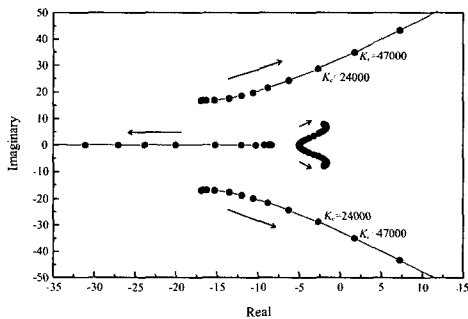


Fig.11 Root Locus (with State Feedback)

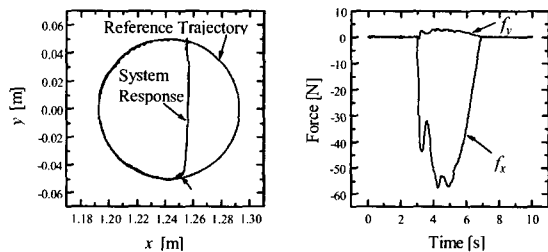


Fig.12 Experimental Results of Impedance Control  
( $M=60$ [kg],  $D=600$ [Ns/m],  $K=1500$ [N/m],  $K_{vel}=0.06$ ,  $K_{acc}=0.15$ )

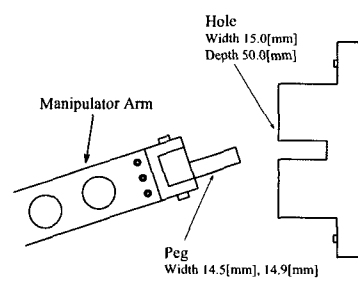


Fig.13 Peg and Hole

나눌 수 있다. 우선 벽면을 따라서 접촉작업을 수행하고, Hole에 Peg가 삽입되기 시작하여 Peg가 Hole에 고착상태가 되면 Peg의 자세에 대해서 컴플라이언스제어를 적용함으로써 Peg와 Hole의 자세의 오차를 부드럽게 흡수하여 마지막으로 삽입을 완료하게 된다. 여기서는 벽면을 따른 접촉작업에서는, 각 방향의 발생력에 대해서는 전절에서 효과가 확인된 임피던스제어를, 삽입시의 자세의 수정에 대해서는 힘센서에 의해 측정되는 모멘트에 대하여 임피던스제어를 실시함으로써 작업을 실현한다.

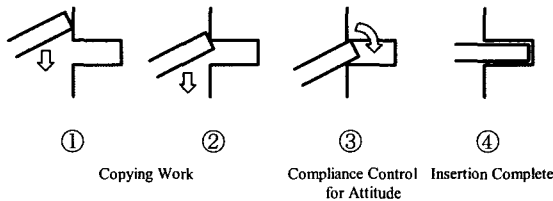


Fig. 14 Procedure for Assembling Stages

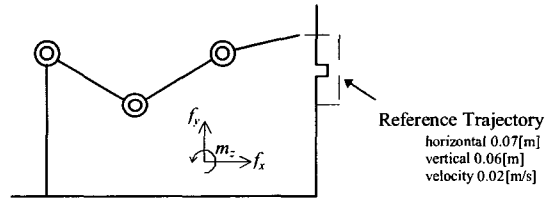


Fig. 15 Reference Trajectory

Peg-in-Hole작업에 있어서는 Fig. 15에 나타난 것과 같은 ㄷ자형의 참조입력 궤적을 사전에 매니플레이터에 부여해 둔다. 이와 같은 지령에 의해 벽면에 대한 접촉작업 및 삽입작업이 실현되리라 여겨진다. 우선은 Peg로서 폭 14.5[mm], 즉 Peg와 Hole의 공차가 0.25[mm]일 때의 실험 결과를 Fig. 16 및 Fig. 17에 나타내고 있다. Fig. 16은 위치제어만으로 Peg-in-Hole작업을 수행했을 때의 결과를, Fig. 17은 Peg가 Hole에 삽입된 후에 자세의 컴플라이언스 제어를 실시했을 때의 결과를 각각 나타내고 있다. 각각의 그래프는 상부로부터 삽입방향의 선단의 위치(단, 여기서는 약 1.255[m]의 위치에서 Peg가 Hole의 바닥까지 도달하여 삽입작업이 완료된 것으로 간주한다.), 선단의 자세, 각 방향의 발생력, 모멘트를 나타내고 있다. 위치제어만으로

Peg-in-Hole작업을 수행할 경우, Peg가 Hole에 삽입

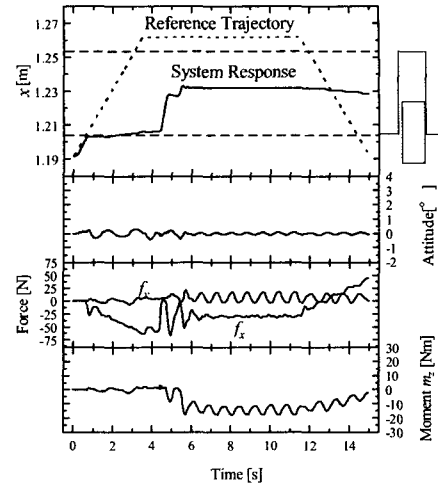


Fig. 16 Peg-in-Hole Operation: Clearance 0.25[mm] (Without Compliance Control for Top Link Attitude)

되기 시작하면서, 삽입이 더 이상 진전되지 못하고 약 1.23[m]의 위치에 삽입작업이 정지해 버리는 것을 알 수 있다. 이것은 위치제어만으로 Peg-in-Hole작업을 수행하려고 하여도 Peg와 Hole사이의 미지의 자세오차 때문에 완전한 삽입작업이 실현할 수 없음을 나타내고 있다. 이것에 반해 Fig. 17의 경우, Peg와 Hole이 물린 후 자세의 오차가 컴플라이언스제어에 의해 부드럽게 흡수되기 때문에 부드러운 삽입작업이 실현됨을 알 수 있다. 이와 같이 자세의 컴플라이언스 제어를 이용함으로써 클리어런스 0.25[mm] 정도라면 충분히 Peg-in-Hole작업을 실현할 수 있음을 확인하였다.

또한, 자세의 컴플라이언스제어를 이용해서 Peg의 폭이 14.9[mm], 즉 클리어런스0.05[mm]로 한 경우의 실험결과를 Fig. 18에 보여준다. 이 경우, 클리어런스가 극단적으로 작아져서 자세의 컴플라이언스 제어를 이용함에도 불구하고 삽입작업이 실현되지 못함을 알 수 있다. 이와 같이 보다 클리어런스가 엄격한 조건에서의 Peg-in-Hole작업을 실현하기 위해서는 다른 수법을 제안할 필요가 있다고 여겨진다.

## 6. Peg-in-Hole작업의 보조수단의 제안

전술한 바와 같이, 클리어런스가 0.05[mm]로 극단적으로 작아진 경우, 자세의 컴플라이언스 제어를 실시하여도, Peg-in-Hole작업은 실현되지 않음이 확인되었다. 본 실험에서 수행하고 있는 위치와 자세에 대한 컴플라이언스 제어를 실시한 경우의 Peg-in-Hole작업에 대해서는 Whitney 등이 상세하게 역학적인 해석을 수행하였으며<sup>(4)</sup>, 여기에 근거하여 계산을 실시하면 본 실험장치의 경우, Peg와 Hole의 초기자세 오차를 변화시켰을 때의 삽입깊이와 그때의 삽입에 필요한 힘의 관계는

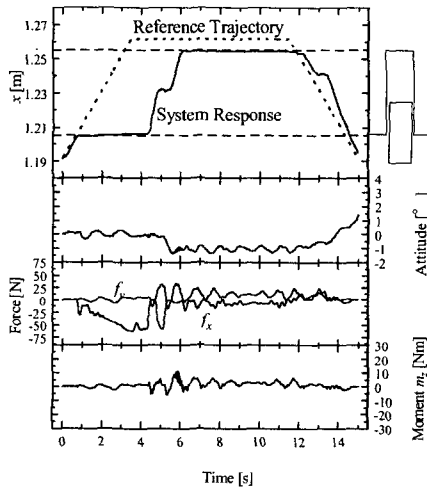


Fig.17 Peg-in-Hole Operation: Clearance 0.25[mm]  
(With Compliance Control for Top Link Attitude)

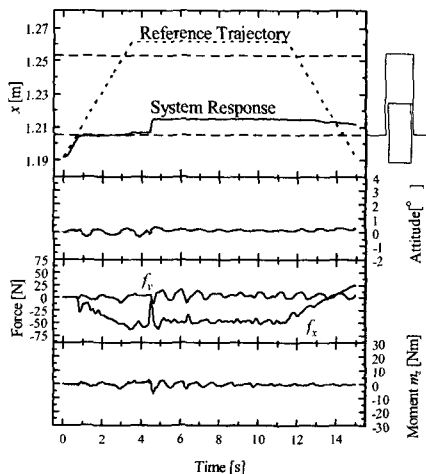


Fig.18 Peg-in-Hole Operation: Clearance 0.05[mm]  
(With Compliance Control for Top Link Attitude)

Fig. 19와 같다. 이 계산결과로부터 Peg와 Hole의 자세오차가 커지게 되어, 클리어런스가 작아지면 작아질수록, 삽입력이 커짐을 알 수 있다.

이와 같이 생각하면 클리어런스가 작은 조건에서도, 삽입력을 크게 하면 삽입가능하지만, 큰 힘으로 무리하게 삽입을 하는 방법은 Peg와 Hole의 파손에도 연결되어 문제가 되며, 또한 컴플라이언스제어라는 개념과도 어긋나게 된다. 따라서, 여기서는 Fig. 20에 보여 주는 바와 같이 3축 전기 유압매니플레이터의 제 3축의 위치를 의도적으로 흔들어서 Peg와 Hole의 자세오차를 순간적으로 작게하여, 거기에 따라서 작은 삽입력으로 Peg-in-Hole작업을 실현하는 보조적인 수법을 제안한다.

이 방법을 이용하여, Fig. 18과 동일한 조건에서 Peg-in-Hole작업을 수행한 결과를 Fig. 21에 나타낸다. 단, 여기서는 상하방향으로 진폭3[mm], 1[Hz]로 흔들어 삽입을 보조하고 있다. 이 결과를 보면 알 수 있듯이, 자세의 컴플라이언스제어를 이용하여도 실현되지 못했던 클리어런스 0.05[mm]의 경우에도, 제안한 보조수단에 의해 단계적이지만, 삽입작업이 완성됨을 알 수 있다. 이와 같이 Peg를 흔들면서 삽입을 수행하는 수법은 인간이 클리어런스가 작은 물체 상호간의 조립작업을 수행할 때에도 무의식적으로 수행하는 방법으로, 또한 매니플레이터의 제어에서도 특별히 복잡한 제어를 필요로 하지 않고, 매우 효과적인 보조적 수단이라고 이야기할 수 있다.

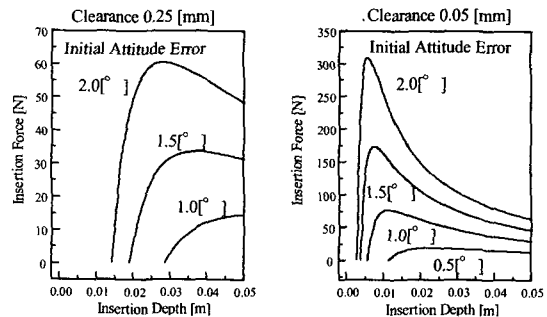


Fig.19 Insertion Force with respect to Insertion Depth

### 7. 결론

외란추정보상법을 각 축에 이용하여 고정도의 위치제어가 가능해진 3축 전기유압 매니플레이터

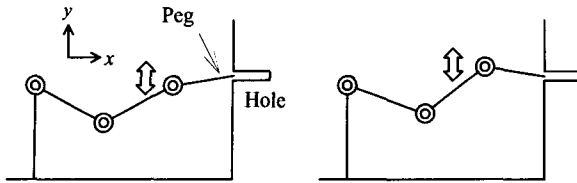


Fig.20 Proposed Assistant Method

에 대해서, 위치제어를 기본으로 하는 컴플라이언스 제어를 벽면 접촉작업에 적용하여, 그 효과를 검토하였다. 그 결과 Stiffness 제어에서는 가상 스프링상수를 충분히 작게할 수 없었고, 가상 스프링, 가상 댐퍼, 가상 질량을 고려한 임피던스 제어에서는 컴플라이언스 루프의 안정성이 확보되지 않아 접촉, 비접촉을 반복하는 결과가 되었다. 여기서 임피던스 모델로부터 구해지는 가상속도, 가상가속도의 상태 피드백에 의해 컴플라이언스루프의 안정성을 충분히 확보함으로써, 안정적인 벽면 접촉작업이 실현가능함을 실험적으로 확인했다.

또한, 벽면 접촉작업에 의해 효과가 확인된 전기유압 매니플레이터의 컴플라이언스제어를 조립작업의 대표적인 예인 Peg-in-Hole 작업에 응용하여, Peg를 저주파로 흔들면서 삽입을 보조수단을 도입하여 클리어런스 0.05[mm]의 Peg-in-Hole 작업이 실현가능함을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

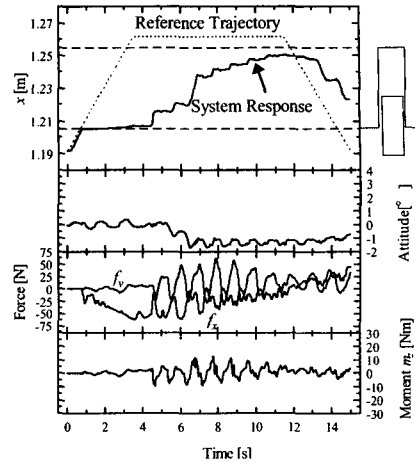


Fig.21 Peg-in-Hole Working: Clearance 0.05[mm]  
(Compliance Control for Top Link Attitude and with Assist Motion Method)

### 참고문헌

1. 山本, 横田, 田村: 配電作業用電氣油圧マニピュレータの高精度制御 第 3 報, 油圧と空氣圧, 26-7, p896/902(1995)
2. 横田, 三橋, 虎谷, 山本: 配電工用電氣油圧マニピュレータの高精度制御 第 2 報, 油圧と空氣圧, 25-6, p746/752 (1994)
3. N. Hogan: Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part2 - Implementation, Trans. of ASME, Journal of Dynamic systems, Measurement and Control, Vol.107, p8/16(1985)
4. Whitney: Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, Trans. of ASME, Journal of Dynamic systems, Measurement and Control, Vol.104, p65/77(1982)