

## 6 축 전기 유압 매니플레이터의 컴플라이언스 제어

### Compliance Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator

안 경 관\*, 표 성 만  
(Kyoung Kwan Ahn and Sung Man Pyo)

**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 quite difficult to obtain stable control performance. We have applied a disturbance estimation and compensation type robust control to all the axes in a 6-link electro-hydraulic manipulator. It was confirmed that the performance of trajectory tracking and attitude regulating was greatly improved by the disturbance observer.

For autonomous assembly tasks, it is said that compliance control is one of the most popular methods in contact task. We have proposed a compliance control based on the position control by a disturbance observer for our manipulator system. To realize more stable contact work, the states in the compliance loop are feedbacked, where not only displacement but also the velocity and acceleration are considered. We have also applied this compliance control to the Peg-in-Hole insertion task and proposed new methods of (1)rotating of the end-effector periodically in order to reduce the friction force, (2)random searching for the center of a hole and (3)trajectory modification to reduce the impact force.

As a result of these new methods, it could be experimentally confirmed that the Peg-in-Hole insertion task with a clearance of 0.007[mm] could be achieved.

**Keywords** : hydraulic control ,compliance control, multi-link, manipulator, disturbance observer, robust control, peg-in-hole task

#### I. 서론

유압구동의 매니플레이터는 고출력 특성으로부터 중량물 반송 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[1][2].

한편, 전기유압매니플레이터는 고출력이고, 절연성을 쉽게 얻을 수 있으므로, 송전을 멈추지 않고 배전선의 보수공사를 수행하는 활선공사용 매니플레이터 등에도 이용되고 있다. 이와 같은 매니플레이터를 이용하여 조립 및, 접촉작업을 수행할 경우, 불안정한 장소에서의 작업일 뿐만 아니라, 전기감전 등의 위험으로부터 매니플레이터의 자율화와의 요구가 높아지고 있다. 이와 같은 작업에는, 매니플레이터가 외부와 접촉할 때 발생하는 힘에 따라서 매니플레이터를 부드럽게 제어하는 컴플라이언스 제어가 유용한 수단이지만, 고정도의 제어가 곤란한 6축 전기유압 매니플레이터에 대해서 실제로 응용한 예는 적다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 6축 전기 유압매니플레이터에 대해서 외란 추정보상법을 적용함으로써 고정도의 궤적제어, 자세제어를

실현함과 동시에 위치제어를 기본으로하는 컴플라이언스제어의 실현을 목적으로 한다. 또, 이 컴플라이언스제어를 조립작업의 대표적인 예인 Peg-in-Hole작업에 응용하여, 그 유효성에 대하여 검토한다.

#### II. 실험장치

Fig 1은 실험에 이용되는 전기유압매니플레이터의 개략을 나타낸다. 매니플레이터의 공급 압력은 10[MPa]이다. 각축의 제어 알고리즘은 1대의 PC에 의해 2[kHz]의 샘플링 주기내에 연산되어, 12Bit의 D/A보드를 거쳐 서보앰프를 통하여 서보밸브를 구동한다. 각 관절축에는 위치검출기로서 0.0044[°]의 분해능을 가지는 로타리 엔코더를 가지고 있으며, Up/Down Counter를 통하여 관절의 회전각이 컴퓨터에 입력된다. 또, 매니플레이터가 외계와 접촉할 때 발생하는 힘의 검출은 매니플레이터 선단에 취부되어 있는 6축의 힘센서에 의해 수행되어져, 선단의 힘과 모멘트가 12Bit의 A/D보드를 통하여 컴퓨터에 입력된다. 이와 같은 6축 전기 유압 매니플레이터에 대하여 궤적 제어실험을 실시한다.

#### III. 궤적제어 실험

본 실험에 적용하는 외란추정 보상법은 시스템의 입력과 출력을 관측하여, 규범 모델과 일치하지 않는 것은 비선형요소를 포함하여 모두 입력에 중첩된 외란으로 간주하고, 이 외란을 하나의 상태변수로 취급하고 외란 관측기를 이용하여 추정하여 보상하는 방법이다. 이 외란 추정보상법을 이용하여 6축전기 유압 매니플레이터의 End-effector에 반경 15[cm]의 원을 1주기를 10초에 그리는 궤적제어 실험을 실시

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 6. 20., 채택확정 : 2003. 9. 15.

안경관, 표성만 : 울산대학교 기계자동차공학과

(kkahn@mail.ulsan.ac.kr/mic9577@mail.ulsan.ac.kr)

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

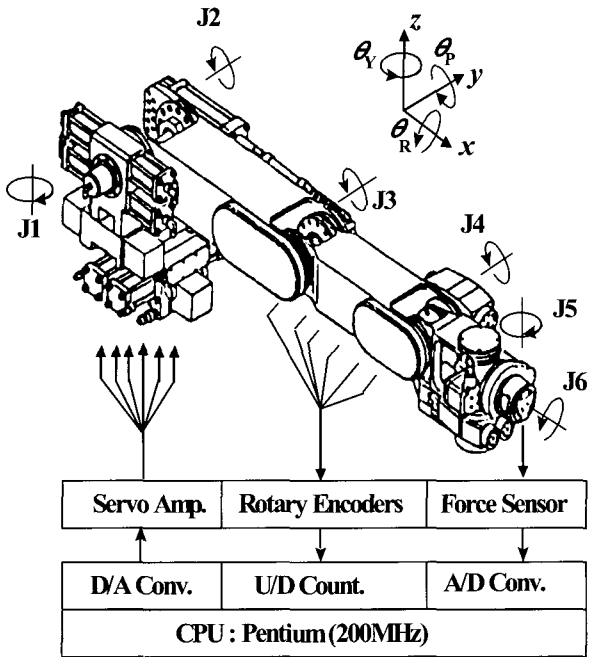


그림 1. 실험기구.  
Fig. 1. Experimental apparatus.

하였다. 이 때, 끝단의 자세를, x축에 대하여 30[°]를 유지하도록 제어하고자 한다. 이때, 매니플레이터의 선단은 원래적에 대해서 수직이 된다. 관찰각도 피드백만으로 제어를 수행할 때의 결과 (Without Robust Control)과 외란 보상법을 각 축에 이용한 경우의 결과 (With Robust Control)를 Fig 2에 나타낸다. 이 결과를 보면 알 수 있듯이 외란에 의하여 정확한 궤적 제어, 자세제어가 곤란한 6축전기유압 매니플레이터에 대해서 각축에 외란 추정보상법을 응용함으로써 고정도의 궤적 및 자세제어가 실현됨을 알 수 있다. 다음 절에서는 이 외란추정보상법을 이용한 시스템에 대하여 컴플라이언스 제어를 적용하고자 한다.

IV. 컴플라이언스 제어

1. 임피던스 제어

외계로부터의 힘의 정보를 적극적으로 이용하는 능동적 컴플라이언스제어의 가장 간단한 방법은, 외부환경과의 접촉에 의해 생기는 반력에 비례한 변위지령을 힘의 방향으로 주는 방법이다. 여기서 외력 f와 매니플레이터 선단의 변위  $x_d$ 의 사이에 Fig 3(a)에 나타난 가상의 스프링으로 된 시스템을 고찰 한다. 여기서, K는 가상 스프링 상수, 즉 매니플레이터의 컴플라이언스의 척도로, 임의로 설정할 수 있다. 이 제어 방법은 강성만을 고려하고 있으므로 Stiffness 제어라고도 부른다.

그러나, 발생력이 급격하게 변화하기 쉬우므로, 단순히 힘을 가상 스프링 상수로 나눔으로서 가상변위를 구하는 Stiffness 제어로서는 같은 발생력이라도 가상변위가 크게 뒹과 함께 진동적으로 되어, 시스템이 불안정하게 되는 것을 3축 전기 유압 매니플레이터의 실험에 의해 이미 보고되었다[3].

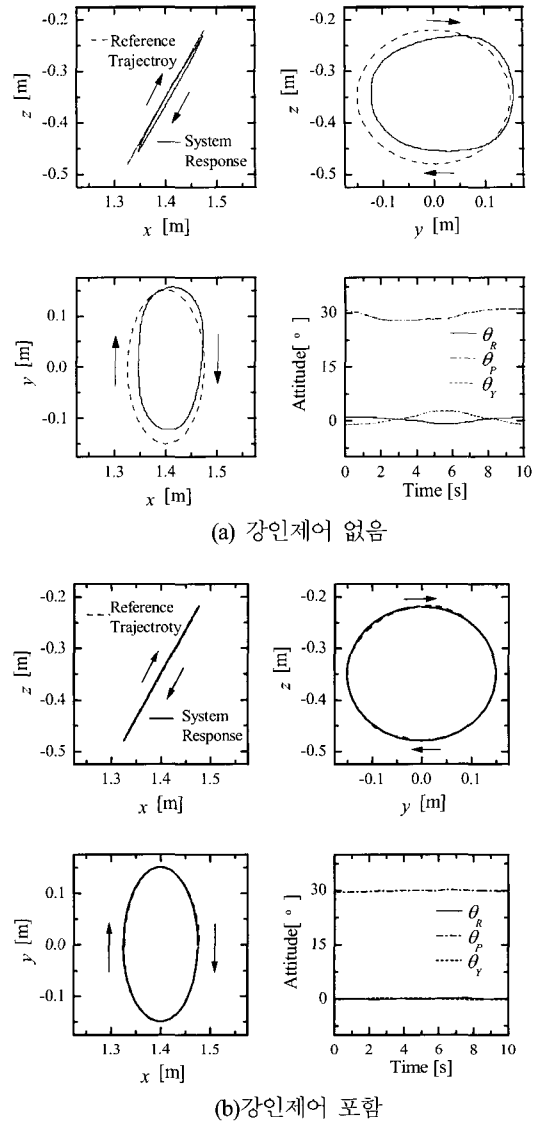


그림 2. 추종제어결과.  
Fig. 2. Results of trajectory control.

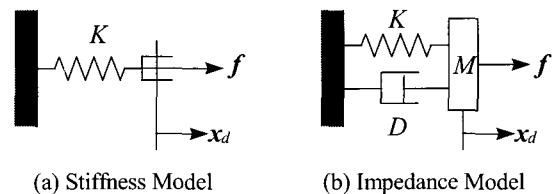


그림 3. 컴플라이언스 모델.  
Fig. 3. Compliance models.

여기서, 외부환경과의 접촉에 의해 발생하는 반력과 가상 변위와의 사이의 관계를 단순한 스프링으로 구성된 시스템이 아니라, Fig 3(b)에 나타난 바와 같은 가상 스프링K, 가상 댐퍼D, 가상질량M을 고려한 임피던스 모델을 고려한다[4][5]. 이와 같이 가상 스프링뿐만 아니라 가상댐퍼, 가상 질량을 고려하여 발생력을 변위로 변환시킴으로서, 매니플레이터의

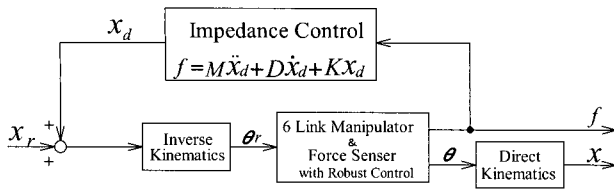


그림 4. 임피던스 제어 시스템.  
Fig. 4. Impedance control system.

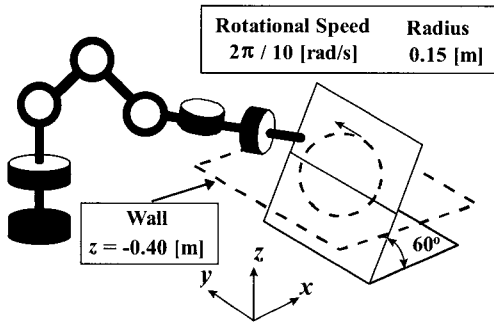


그림 5. 실험기구.  
Fig. 5. Experimental setup.

거동에 관성 및 감쇄 효과를 가지게 하는 것이 이 임피던스 제어이다(Fig 4).

이 임피던스제어법을 이용하여 Fig 5에 나타낸 바와 같이 매니플레이터 선단에 반경0.15[m]의 원 궤적을 그리는 실험을 실시했다. 특별히 이 원궤적상에는 장애물로서 벽면을 설치한다. 벽면은 약  $z=-0.40$ [m]의 위치에 설치되어 있고, 매니플레이터 끝단의 자세는 수평에 대하여  $60^\circ$ 를 이루고 있다. 이와 같은 실험을 위치제어만으로 수행시에는, 매니플레이터의 끝단이 벽면과 접촉하는 시점에 매니플레이터의 거동은 정지하게 될 것이다. 그러나, 컴플라이언스 제어를 이용함으로써, 접촉에 의해 발생하는 힘에 따라서 매니플레이터를 부드럽게 제어하여 매니플레이터를 벽면에 따라 움직이게 하는 이른바, 안정된 접촉작업이 실현되리라 기대된다. 여기서 가상 스프링상수  $K=1000$ [N/m], 가상 질량  $M=40$ [kg] 가상 댐퍼  $D = 400$ [Ns/m]로 둔 경우의 시험결과를 Fig 6에 나타내고 있다. 이 결과를 보면 알 수 있듯이, 단순히 임피던스 모델을 컴플라이언스 루프내에 삽입함으로써 접촉환경을 포함한 시스템이 불안정하게 되어, 접촉, 비접촉을 반복하는 거동을 보여주고 있다. 임피던스 제어를 이용하여 안전한 접촉작업을 실현하기 위해서는 컴플라이언스 루프가 안정하게 되는 방법을 취할 필요가 있다고 생각된다.

2. 상태 피드백을 이용한 임피던스제어

전술한 바와 같이 단순히 임피던스 모델을 컴플라이언스 루프내에 삽입함으로써 안정적인 벽면 실험을 수행하기 전에, 현재의 벽면접촉작업에 있어서 컴플라이언스 루프의 모델화를 수행한다. 접촉작업에서의 컴플라이언스 루프는 외란 추정 보상법(Compensation by Disturbance Observer)으로부터 매니플레이터의 동특성과 규범 모델의 모델이 일치하는 것을 가정하면 매니플레이터의 모델로서 규범 모델, 힘센서로부터의 출력에 이용되는 저역통과 필터의 모델, 접촉작업시 벽면의

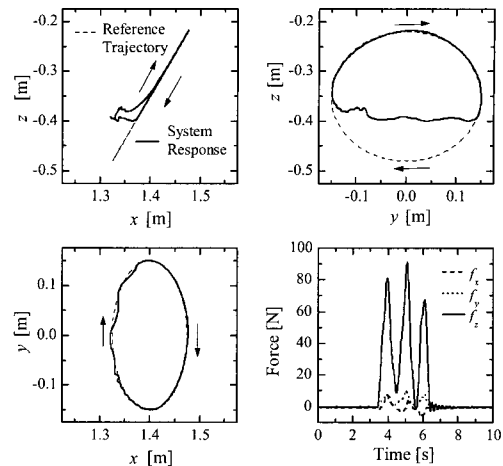


그림 6. 임피던스 제어의 실험 결과.  
Fig. 6. Experimental results of impedance control.  
( $M=40$ [kg],  $D=400$ [Ns/m],  $K=1000$ [N/m])

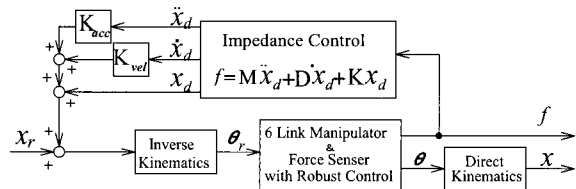


그림 7. 상태피드백을 포함한 임피던스 제어 시스템.  
Fig. 7. Impedance control system with state feedback.

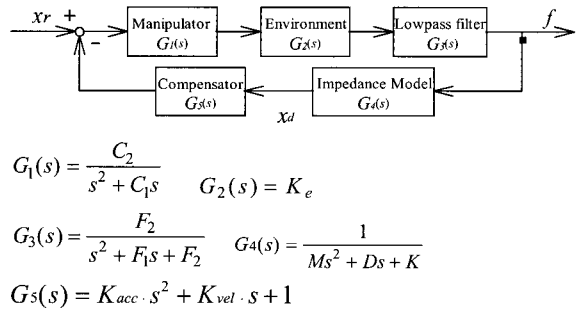


그림 8. 컴플라이언스 루프 모델.  
Fig. 8. Compliance loop model.

모델, 매니플레이터의 접촉작업을 실현할 수 없음을 확인 할 수 있었다. 여기서 가상변위뿐만 아니라, 임피던스 모델로부터 구해지는 가상속도, 가상가속도의 상태 피드백을 이용함으로써 컴플라이언스루프의 안정성을 높이고자 한다.

컴플라이언스를 결정하는 임피던스 모델 및 속도와 가속도의 상태 피드백 루프로부터 구성된다고 생각할 수 있다. 각 모델은 Fig 8에 나타낸 바와 같은 식으로 나타낼 수 있다. 이상과 같은 컴플라이언스 루프에서, 접촉벽면의 모델을 강성성분만 고려해서 그 강성을 루프게인으로 변화시켰을 때의 근계적을 다음에 나타낸다. Fig 9는 상태 피드백을 이용하지 않은 경우의 근계적을 나타낸다. 현재 실험에 사용하고 있는 벽면의 강성이  $1.5 \times 10^4$  [N/m] 정도이므로 상태 피드백을

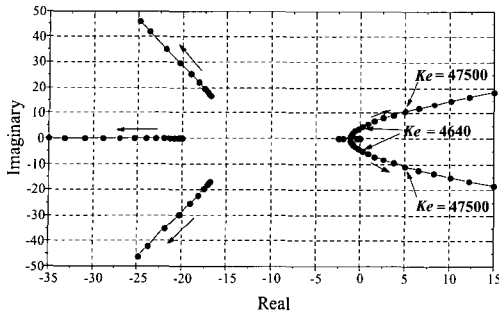


그림 9. 근궤적선도(상태피드백없음).

Fig. 9. Root locus (without state feedback).

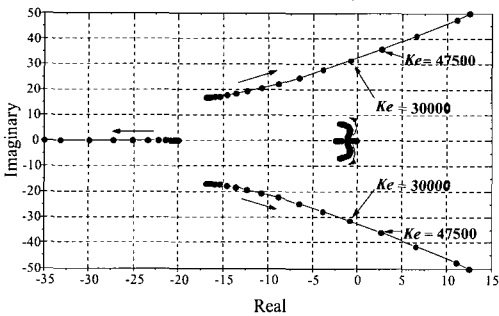


그림 10. 근궤적선도(상태피드백 포함).

Fig. 10. Root Locus (with state feedback).

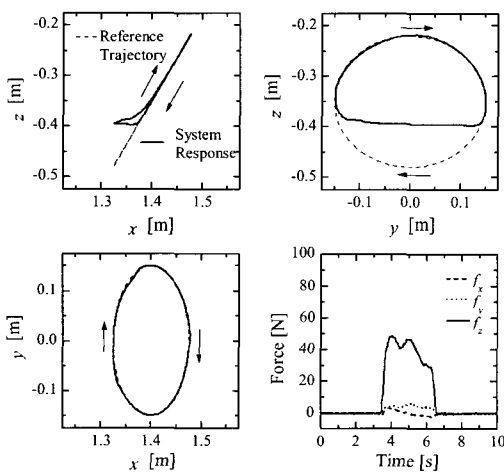


그림 11. 임피던스 제어 실험 결과.

Fig. 11. Experimental results of impedance control( $M=40$ [kg],  $D=400$ [Ns/m],  $K=1000$ [N/m],  $K_{vel}=0.08$ ,  $K_{acc}=0.02$ ).

사용하지 않은 임피던스 제어에서는 컴플라이언스 루프의 안정성이 충분히 확보되어 있지 않음을 알 수 있다. 한편, Fig 10에서는  $K_{vel}=0.08$ ,  $K_{acc}=0.02$  의 상태 피드백 계인을 이용한 경우의 근궤적선도를 나타내고 있다. 이 결과를 보면 알 수 있듯이 상태 피드백제어에 의하여 벽면의 강성이 상당히 높아도 컴플라이언스 루프의 안정성이 확보되어져, 안정한 접촉작업이 실현되어질 수 있음을 알 수 있다. 여기서, 이 파라미터를 이용하여 벽면 접촉작업 실험을 실시하였다. 그 결과를 Fig 11에 나타내고 있다. 임피던스 모델로부터 구해지는 가상속도, 가상가속도의 상태 피드백을 이용함으로써 안정적인 벽면접촉 작업이 실현됨을 확인 할 수 있다.

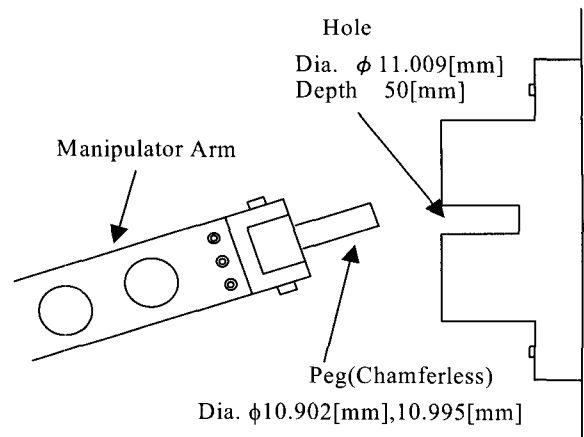


그림 12. Peg와 Hole.

Fig. 12. Peg and hole.

그러나, 접촉시로부터 비 접촉시로 천이될 경우, 접촉면으로부터 약간 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 이 그림에서는 나타내고 있지 않지만, 실제 벽면과 떨어지는 부분의 목표궤적을 검토하면, 각 축 축의 응답지연이 원인으로 이 시점에서의 목표궤적이 이미 벽면과 떨어져 있는 것을 확인하였다.

### V. 컴플라이언스 제어를 이용한 Peg-in-Hole작업

본절에서는 컴플라이언스 제어를 조립작업의 대표적인 예인 환봉(Peg)를 클리어런스가 작은 구멍(Hole)에 삽입하는 Peg-in-Hole작업에 적용하고자 한다. 본 실험에서는 Peg로서 평균직경이 10.902[mm] 및 10.995[mm]인 것을, Hole로서는 직경 11.009[mm]인 것을 사용한다. 또한, Hole의 깊이는 50[mm]이다.

Fig 12의 Peg와 Hole의 직경은 10[mm]간격으로 6곳을 마이크로 미터로 계측하여 평균한 결과이다.

컴플라이언스제어를 이용하여 Peg-in-Hole 작업을 실행할 경우, 삽입작업은 Fig 13에 나타낸 바와 같은 단계로 나눌 수 있다. 우선, 벽면을 따라서 벽면 도망작업을 실행하고, 구멍에 Peg가 걸친 상태에서 자세의 컴플라이언스 제어를 적용함으로써 Peg의 자세의 오차를 부드럽게 흡수하여, 최후에 삽입을 완료하게 된다.

여기서 벽면 접촉작업에서의 위치에 대한 컴플라이언스 제어는 전절의 각 방향의 발생력에 대한 임피던스 제어(이것을 위치의 임피던스제어라고 부른다.)를, 삽입시의 자세에 대한 컴플라이언스 제어는 힘센서에 의해 측정된 모멘트에 대한 임피던스 제어(이것을 자세의 임피던스 제어라고 부른다.)에 의해 실현한다. Peg-in-Hole작업에 대해서는 Fig 14에 보여주는 바와 같은 기준입력 궤적을 사전에 매니플레이터에 부여해준다. 우선, Peg로서 직경 10.902[mm], 즉 클리어런스 0.054[mm]인 경우의 실험결과를 Fig 15와 Fig 16에 나타내고 있다. Fig 15는 위치의 컴플라이언스제어만 적용한 경우, Fig 16은 위치 및 자세의 컴플라이언스제어를 이용한 때의 결과이다. 각 그래프에서 상단부부터 매니플레이터 끝단의 위치(여기서는 1.560[m]에서 Peg가 Hole이 바닥에 도달하여 삽입작업이 완료된다), 끝단의 자세, 각 방향의 발생력 및

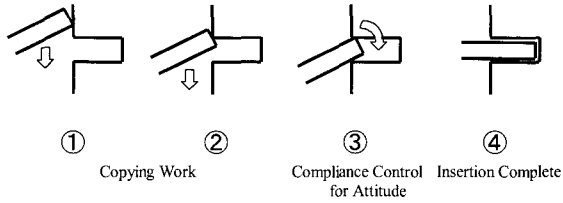


그림 13. 조립단계 과정.

Fig. 13. Procedure for assembling stages.

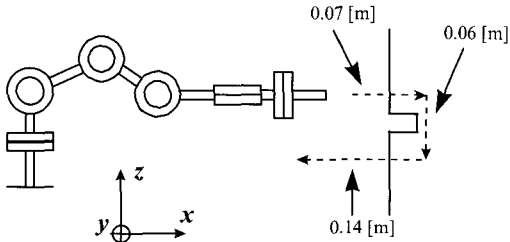


그림 14. 목표궤적.

Fig. 14. Reference trajectory.

모멘트를 각각 나타내고 있다. 실험에서는 Pitch각에 초기 자세의 오차를  $0.5^\circ$ 로 두고 있다. 실험결과를 보면 알 수 있듯이 위치의 컴플라이언스제어만을 적용한 경우에는 접촉작업에서 Peg가 Hole에 물린 상태가 된 후에도 초기 자세오차를 그대로 유지, 전혀 삽입이 진행되지 못하고 약 1.53[m]의 위치에서 삽입작업이 정지되어 있음을 알 수 있다. 이것은 위치의 컴플라이언스 제어만으로는 Peg-in-Hole 작업을 수행하려고 하여도 미지의 초기오차때문에 완전한 삽입작업이 실현되지 않음을 나타낸다. 이에 반해 Fig 16의 경우에는, Peg가 Hole에 물린후, 자세의 오차가 컴플라이언스제어에 의해 흡수되어 삽입작업이 실현됨을 알 수 있다. 이와 같이 자세의 컴플라이언스제어를 적용함으로써 클리어런스 0.05[mm] 정도라면 충분히 Peg-in-Hole 작업을 실현할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 동일하게 자세의 컴플라이언스제어를 이용하여 Peg의 직경이 10.995[mm], 즉 클리어런스를 0.007[mm]로 한 경우에는, 틈새가 극단적으로 작아졌기 때문에 자세의 컴플라이언스 제어를 적용하여도 삽입작업이 실현되지 못하였다. 이와 같이 보다 어려운 조건에서의 Peg-in-Hole작업을 실현하기 위해서는 다른 수법을 새롭게 제안할 필요가 있다.

**VI. Peg-in-Hole작업의 보조수단의 제안**

**1. 요동에 의한 삽입력의 저감**

전절에서 설명한 바와 같이, 예를 들어 자세의 컴플라이언스제어를 이용하여도 클리어런스가 0.007[mm]인 경우, Peg-in-Hole작업이 실현될 수 없음을 확인하였다. 이것은 클리어런스가 극단적으로 작아짐에 따라서, 같은 자세오차에 대해서도 보다 큰 삽입력이 필요하게 되기 때문이다. 따라서 여기서는 삽입력을 저감하기 위한 방법으로서 Peg를 축주위에 요동시키면서 Hole에 삽입해가는 삽입마찰 저감법을 시도한다. 이 방법의 유효성을 확인하기 위하여, 직경 10.902[mm]의 Peg를 이용하여 동일한 실험조건에서, Peg를 요동시킨 경우와 시키지 않은 경우의 삽입력을 실험에 의해 비교하였다(Fig 17).

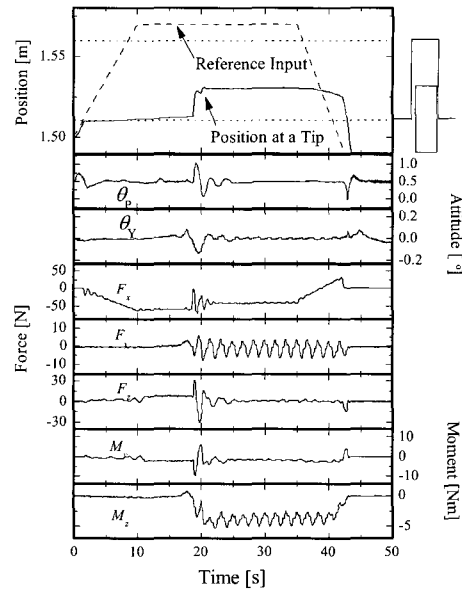


그림 15. Peg와Hole작동: 틈새 0.05 [mm](끝단 링크의 컴플라이언스 제어 없음).

Fig. 15. Peg-in-hole operation: Clearance 0.05 [mm](Without compliance control for top link attitude).

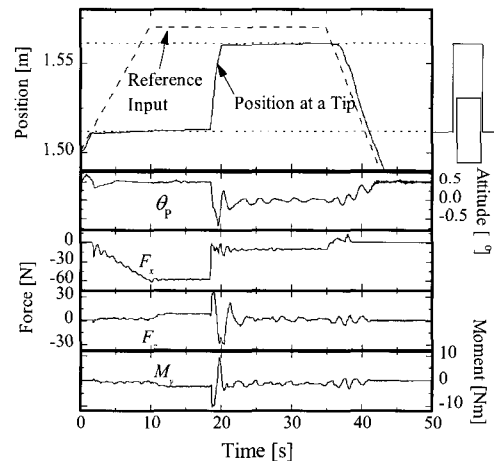


그림 16. Peg와Hole작동: 틈새 0.05 [mm](끝단 링크의 컴플라이언스 제어 포함).

Fig. 16. Peg-in-hole operation: Clearance 0.05 [mm](With compliance control for top link attitude).

이 결과로부터 요동함으로써 삽입력이 약 25[%]정도 감소하여, 상당히 효과가 있음을 알 수 있다.

**2. Random Hole중심 탐색법**

전장에서 설명한 peg-in-Hole실험 수행시, Fig 14에 보여주는 궤적상에 반드시 Hole의 중심이 위치하지 않으면 안되는 점과, 중심을 탐색하는데 시간이 너무 많이 걸린다는 점 등이 문제점으로 열거될 수 있다. 그러나, 실제의 조립작업의 환경에서는, 부품의 치수공차나 위치오차 등으로 인하여 Fig 14는 실제의 Peg-in-Hole작업에는 적합하지 않다. 여기서, Peg축의 수직면(여기서는 Y-Z평면)에 대해서 각각 랜덤한 목표궤적에 의해 신속하게 Hole중심을 탐색하는 방법을 시도하였다.

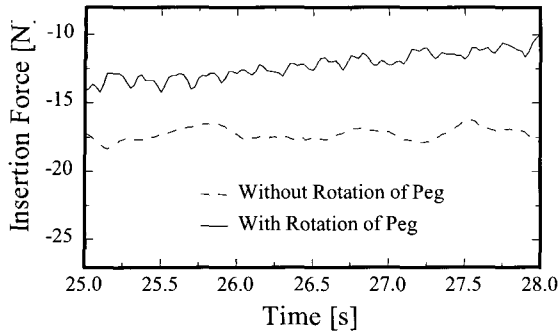


그림 17. Peg가 회전할때와 회전하지 않을 때의 삽입력 비교.  
Fig. 17. Comparison of insertion forces with and without rotation of peg.

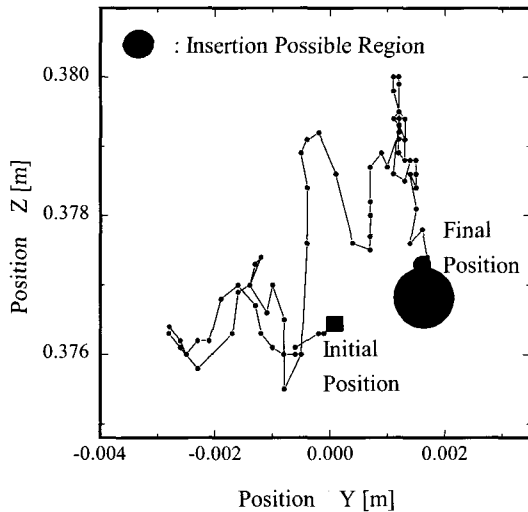


그림 18. 무작위검색 추종의 진행.  
Fig. 18. One typical of random search trajectories.

제한하는 Random Hole 중심 탐색법의 일례를 Fig 18에 나타낸다. 여기서 랜덤 입력의 최대변위는 0.015[m], 구동주파수는 50[Hz], Hole의 중심에 대해서 peg의 최초 위치오차( y,z) = (-2[mm], 0.5[mm])로 한 경우의 결과이다. Fig 18의 경우, Hole 중심 탐색시간은 1.83[sec]였다. 이것은 Hole 중심의 위치오차가 약 2[mm] 이내라면 충분히 극복할 수 있는 아주 효과적인 수단이라고 말할 수 있다.

3. 충격력 저감을 위한 목표궤적의 수정

지금까지의 Peg-in-Hole 실험을 수행할 때, 삽입최초의 단계에서 큰 충격력이 발생하였다. 이것은 Fig 15에서 약 20[sec]의 삽입의 초기단계에서 약 -70[N]의 큰 충격력이 발생하고 있는 점으로부터 알 수 있다. 이 현상은 실제의 삽입작업에서는 부품 상호간에 손상을 입힐 가능성도 있을 뿐만 아니라, 컴플라이언스 제어의 개념으로부터도 벗어나게 된다. 여기에 대한 해결책으로 목표궤적의 수정을 시도하였다. 제한하는 목표궤적의 수정의 일례를 Fig 19의 상단부에 보여준다. 이 목표궤적을 보면 알 수 있듯이 Hole의 중심을 탐색한 후, 점진적으로 목표궤적을 수정하여 삽입력을 작게함으로써 충격력을 상당히 저감시켜가는 것을 알 수 있다.

4. 보조수단에 의한 Peg-in-Hole 실험결과

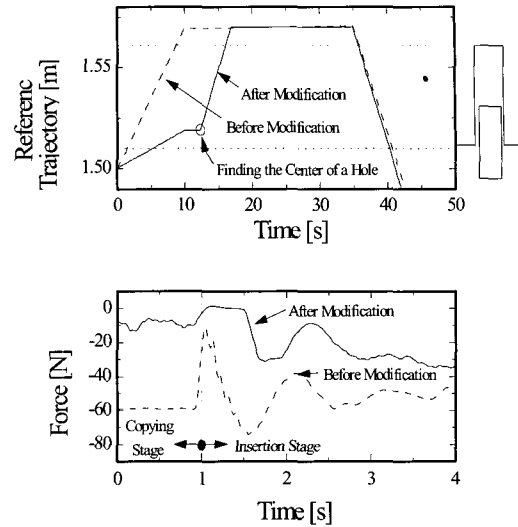


그림 19. 수정된 추종 전과 후의 충격력 비교.  
Fig. 19. Comparison of impact force before and after trajectory modification.

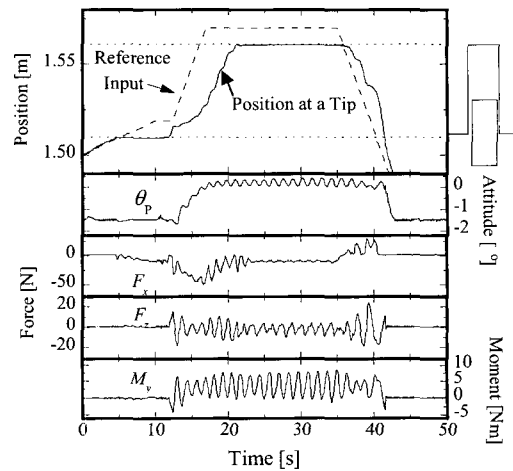


그림 20. Peg-in-hole 작업: 틈새 0.007[mm](링크 끝단의 자세와 제한된 알고리즘에 의한 컴플라이언스 제어).  
Fig. 20. Peg-in-hole working: Clearance 0.007[mm](Compliance control for top link attitude and with proposed algorithms).

전술의 3가지의 보조수단을 전부 이용하여 Peg-in-Hole 실험을 실시한 결과를 Fig 20에 나타내고 있다. 실험결과를 보면 알 수 있듯이, 우선 Peg의 요동에 의해 마찰력이 상당히 저감되어 클리어런스 0.007[mm]의 경우의 Peg-in-Hole 작업이 실현되었음을 마지막으로 삽입초기의 단계에서 발생하는 충격력도 약 30[N]으로 제한할 수 있다. 이 수법들은, 인간이 클리어런스가 상당히 작은 부품 상호간의 조립작업을 수행할 때, 무의식중에 수행하고 있는 방법으로, 또한 매니플레이터를 이용하여 작업을 수행시에도 특별히 복잡한 제어를 필요로 하지 않는 굉장히 효과적인 수단이라고 말할 수 있다.

VII. 결론

외관추정보상법을 각 축에 적용하여 고정도의 위치제어가 가능해진 6축 전기유압 매니플레이터에 대해서, 위치제어를

기본으로 하는 컴플라이언스제어를 적용하여, 벽면 접촉작업에 의해 그 효과를 검토했다. 그 결과, 가상 스프링, 가상댐퍼, 가상질량만을 고려한 임피던스 제어에서는 컴플라이언스 루프의 안정성이 확보되지 않았으며 접촉, 비접촉을 반복하는 결과를 보였다. 여기서 임피던스 모델로부터 구해지는 가상속도, 가상가속도의 상태 피드백에 의해 컴플라이언스 루프의 안정성을 확보함으로써, 안정적인 벽면 접촉작업이 실현 가능함을 실험적으로 확인하였다.

또 6축 전기유압 매니퓰레이터의 컴플라이언스 제어법을 조립작업의 대표예인 Peg-in-Hole작업에 응용하였다. 이 때, 작업의 보조수단으로 Peg의 요동 삽입법과 Random Hole중심탐색법 및 목표궤적의 수정법을 제안하여, 클리어런스 0.007 [mm]의 Peg-in-Hole작업을 실현할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

#### 참고문헌

[1] S. Yokota, M. Mitsuhashi, T. Toratani and T. Yamamoto, "Control

of electro-hydraulic manipulators for electric distributed power line tasks using a disturbance observer," *Journal of Japan Hydraulics & Pneumatics Society*, vol. 25, no. 6, pp. 746-752, 1994.

- [2] T. Yamamoto, S. Yokota and Y. Tamura, "Control of electro-hydraulic manipulators for overhead distribution line work," *Journal of Japan Hydraulics & Pneumatics Society*, vol. 26, no. 7, pp. 896-902, 1995.
- [3] S. Yokota, J. Shinogara, K. K. Ahn, T. Yamamoto, "Compliance control of a 3-link electro-hydraulic manipulator" *Journal of Japan Hydraulics & Pneumatics Society*, vol.29, no.1, pp. 23-29, 1998.
- [4] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation part2 - implementation," *Trans. of ASME, Journal of DSMC*, vol.107, pp. 8-16, 1985.
- [5] Whitney, "Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts," *Trans. of ASME, Journal of DSMC*, vol. 104, pp. 66-77, 1982.

#### 안 경 관

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 3 호 참조.

#### 표 성 만

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 4 호 참조.