

# 퍼지 논리에 의한 순응기구의 위치/힘 동시제어

서정욱<sup>†\*</sup> · 최용제<sup>\*\*</sup>

## Kinesthetic Control using a Compliant Device by Fuzzy Logic

Jeong Wook Seo, Yong Je Choi

**Key Words :** position/force control(위치/힘 제어), compliant device(순응기구), stiffness mapping(강성 사상), twist of compliance(순응 트위스트), twist of freedom(자유 트위스트), wrench of constraint(구속 렌치), fuzzy logic(퍼지 이론)

### Abstract

As the tasks of robots become more diverse, some complicated tasks have come to require force and position hybrid control. A compliant device can be used to control force and position simultaneously by separating the twist of the robot's end effector from the twist of compliance and freedom by using stiffness mapping of the compliant device. The development of a fuzzy gain scheduling scheme of control for a robot with a compliant device is described in this paper. Fuzzy rules and reasoning are performed on-line to determine the gain of twists based on wrench error and twist error and twist of compliance and twist of freedom ratio. Simulation results demonstrate that better control performance can be achieved in comparison with constant gain control.

### 1. 서론

생산자동화에 주로 활용되고 있는 일반적인 산업용로봇 시스템은 위치 제어 작업에 국한되어 있다. 작업 환경과 접촉하고 있는 상태에서는 로봇 위치 제어의 미세한 오차가 로봇과 작업환경(environment)에 파손을 유발할 수 있다. 이러한 문제의 해결을 위하여, 작업환경에 접촉하는 로봇의 끝단에 순응성(compliance)을 부여하는 방법을 생각해 볼 수 있다.

로봇이 복잡한 작업을 수행하기 위해서는 위치 제어 뿐만 아니라 힘제어도 동시에 이루어져야 한다. 예를 들어 물체를 구멍에 끼워 넣는 작업, 유리를 닦는 작업, 볼트를 체결하는 작업과 같이 접촉력을 제어하는 작업들은 위치 제어 만으로는

하기 어려운 작업이다.

이 같은 문제들의 해결을 위해 강성을 알 수 있는 순응기구를 로봇 끝단에 부착하여 위치와 힘을 동시에 제어하는 방법이 제안되었다.[1, 2]

로봇 끝단에서의 트위스트는 자유 트위스트(twist of freedom)와 강성사상(stiffness mapping)에 의한 순응 트위스트(twist of compliance)로 분할되고 각각은 위치와 힘을 제어하는데 사용된다.

실제 위치/힘 동시 제어에서는 순응 트위스트와 자유 트위스트의 오차에 가중치를 곱하고, 그 값을 더하여 로봇 끝단(end-effector)의 입력 트위스트로 사용한다.

본 논문에서는 순응기구를 이용한 위치 / 힘 동시 제어에 있어서의 가중치의 의미를 살펴보고 효과적인 가중치 설정 방법에 대해 알아 보았다.

### 2. 강성사상과 위치/힘 제어

#### 2.1 강성행렬

$n$  개의 커넥터(connector)를 가진 병렬형 머니

<sup>†</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : seojw21@hanmail.net

TEL : (02)2123-2826 FAX : (02)362-2736

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학부

플레이터(manipulator)에 외력 렌치  $\hat{\mathbf{w}}$  가 작용할 때 이동 플랫폼이 평형 상태를 이루고 있다면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\hat{\mathbf{w}} = \sum_{i=1}^n f_i \hat{\mathbf{s}}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

여기서  $f_i$  는 커넥터(connector)의 반력의 크기이고,  $\hat{\mathbf{s}}_i$  는 커넥터의 직선 좌표들이다.

외력에 미소변화  $\delta\hat{\mathbf{w}}$  가 있게 되면 하판이 고정되어 있을 때 상판은 한 축을 중심으로  $\delta\hat{\mathbf{D}}$ 로 표현되는 미소 변위를 가진다. 이 둘 사이를 관계 짓는 강성행렬  $[K]$ 은 외력 렌치의 미소 변화량  $\delta\hat{\mathbf{w}}$  를 트위스트 미소 변화량  $\delta\hat{\mathbf{D}}$ 으로 변환시키는 행렬이다.

$$\delta\hat{\mathbf{w}} = [K]\delta\hat{\mathbf{D}} \quad (2)$$

강성행렬을 구하기 위하여 여기서는 N. Ciblak [3]에 의해 제안된 방법을 사용하기로 한다. 즉, 한 개의 강체가 n 개의 스프링에 의하여 병렬로 지지되고 있을 때, 강성행렬  $[K]$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K] = \sum_{i=1}^n [K_i] \quad (3)$$

여기서

$$[K_i] = k_i \rho_i \hat{\mathbf{s}}_i \hat{\mathbf{s}}_i^T + k_i (1 - \rho_i) [M_i] \quad (4)$$

그리고

$$[M_i] = \begin{bmatrix} I & -\mathbf{u}_i \times \\ \mathbf{b}_i \times & -\mathbf{b}_i \times \mathbf{u}_i \times \end{bmatrix} \quad (5)$$

이며, 여기서  $l_{0i}$  와  $l_i$  는 각각 i 번째 스프링의 자유길이 및 하중시의 길이를 나타내고,  $\rho_i = l_{0i}/l_i$  이며,  $\mathbf{b}_i \times$ ,  $\mathbf{u}_i \times$  는 각각  $\overline{OB}_i$ ,  $\overline{OU}_i$  의 벡터곱을 반대칭(skew symmetric) 행렬로 표현한 것이다.

본 연구에서 사용한 순응기구는 6-6 형 스텐더트 플랫폼의 기구 구조를 채택하였으므로, 순응기구의 공간 강성행렬  $[K]$ 는 6 개의 링크의 상판, 하판의 조인트 위치와 스프링 상수를 통해 얻을 수 있다.

## 2.2 강성사상을 이용한 힘과 위치의 동시제어

Fig. 1 은 로봇 끝단에 강성행렬  $[K]$ 을 가지는 순응기구가 부착되어 있고 부착된 작업단이 환경에 완전히 구속되어 있는 경우를 나타낸다.

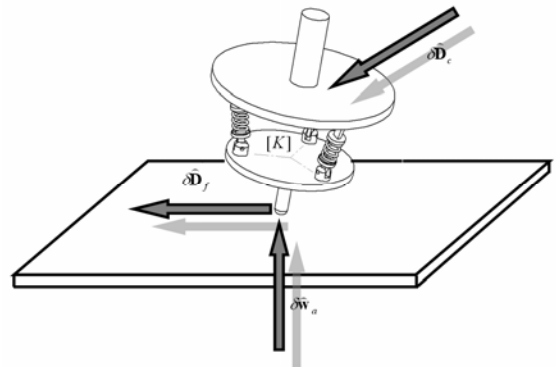


Fig. 1 Compliant device contacting a surface

작업단은 환경 구속렌치  $\delta\hat{\mathbf{w}}_a$  에 의해 자유도를 갖지 않지만, 로봇 끝단은 로봇의 순응성 때문에 구속 방향을 제외한 자유도를 갖는다. 이때 로봇 끝단의 순응 트위스트  $\delta\hat{\mathbf{D}}_c$  는 강성행렬을 이용해 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta\hat{\mathbf{w}}_a = -[K]\delta\hat{\mathbf{D}}_c \quad (6)$$

음부호는 순응기구 하판의 트위스트가 상판의 트위스트와 반대임을 의미한다. 피드백 제어에 의하여 입출력 렌치의 오차  $\delta\hat{\mathbf{w}}_e$  가 계산되면 렌치의 오차를 상쇄하는 순응 트위스트  $\delta\hat{\mathbf{D}}_c$  를 식(6)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta\hat{\mathbf{D}}_c = -[K]^{-1} \delta\hat{\mathbf{w}}_e \quad (7)$$

이 식을 이용하여 작업단에 발생하는 힘의 오차를  $\delta\hat{\mathbf{D}}_c$  에 의해 제어할 수 있다.

Fig. 1 처럼 작업단이 환경에 의해 부분적으로 구속되어 있는 경우 구속렌치에 영향을 주지 않고 운동 가능한 트위스트를 자유 트위스트  $\delta\hat{\mathbf{D}}_f$ , 작업단을 구속하는 렌치를 구속렌치  $\delta\hat{\mathbf{w}}_a$  라 하며, 이 둘은 순간 일률이 영(zero)이 되는 역(reciprocal)의 관계에 있다.

$$\text{일률} = \delta\hat{\mathbf{D}}_f^T \delta\hat{\mathbf{w}}_a = 0 \quad (8)$$

식(6)을 식(8)에 대입하면 강성행렬  $[K]$ 에 대한 직교(orthogonal)관계를 얻을 수 있다.

$$\delta\hat{\mathbf{D}}_f^T [K] \delta\hat{\mathbf{D}}_c = 0 \quad (9)$$

구속렌치를 제어하는  $\delta\hat{\mathbf{D}}_c$  와 운동 가능한  $\delta\hat{\mathbf{D}}_f$  는 직접 직교하지는 않지만 순응기구의 순응성에 의해 강성행렬  $[K]$ 에 대해서는 직교한다. 따라서 힘과 위치를 제어하기 위한 로봇 끝단의 트위스트  $\delta\hat{\mathbf{D}}$  는 힘을 제어하는 순응 트위스트

$\hat{\delta D}_c$ 와 자유트위스트  $\hat{\delta D}_f$ 로 분할할 수 있다.

$$\hat{\delta D} = \hat{\delta D}_f + \hat{\delta D}_c \quad (10)$$

### 3. 제어 계획 및 가중치 설정

#### 3.1 좌표축의 설정

{G} 및 {C}는 각각 로봇의 하판 중심, 순응기구의 하판 중심의 좌표계이며, {E}는 순응기구의 작업 끝단의 좌표계이다. {T}는 {E}와 위치는 같고 {G}와 방향이 같은 좌표계이다. 축좌표계(axis coordinate)와 방사좌표계(ray coordinate)에서 표현된 유클리디안 변환 행렬은 각각  $E, e$ 로 표현한다.

#### 3.2 제어 계획

로봇 끝단에 입력할 순응 트위스트  $\hat{\delta D}_c$ 는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\delta D}_c = -[K]^{-1}(\hat{w}_d - \hat{w}_a) \quad (11)$$

여기서  $\hat{w}_d$ 는 입력 렌치,  $\hat{w}_a$ 는 실제 출력 렌치를 나타내고,  $[K]$ 는 순응기구의 강성행렬이다.

로봇 끝단에 입력할 자유 트위스트  $\hat{\delta D}_f$ 는 식(12)와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\delta D}_f = \hat{D}_d - \hat{D}_a \quad (12)$$

여기서  $\hat{D}_d$ 는 입력 트위스트,  $\hat{D}_a$ 는 출력 트위스트이다.

식(11)과 식(12)에서 구한 두 개의 트위스트에 단위가 없는 스칼라의 가중치  $G_c, G_f$ 를 각각 곱하여, 최종적으로 로봇에 입력할 트위스트를 구하게 된다.

$$\hat{\delta D} = G_f \hat{\delta D}_f + G_c \hat{\delta D}_c \quad (13)$$

좌표계를 고려해 표현하면 {T}에서 표현한 입력 렌치  $\hat{w}_d^{(T)}$ 와 실제 렌치  $\hat{w}_a^{(T)}$ 는 {T}에서

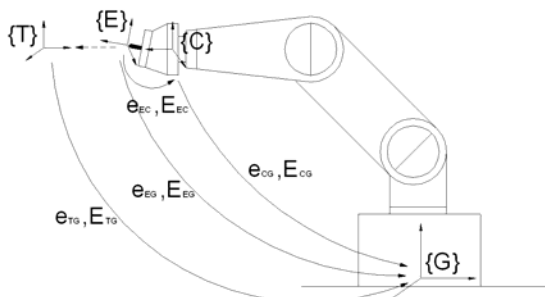


Fig. 2 Coordinate system

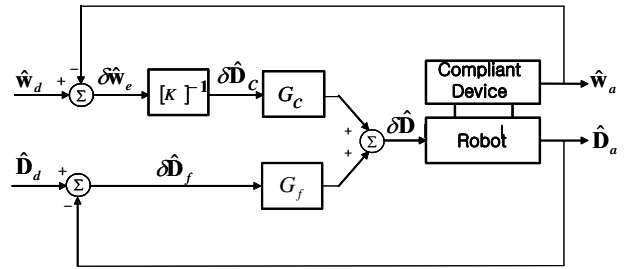


Fig. 3 Block diagram of kinesthetic control

{C}로 변환시키는 변환행렬  $E_{CG}$ 에 의해 각각  $\hat{w}_d^{(C)}$ 와  $\hat{w}_a^{(C)}$ 가 계산되며 강성행렬  $[K]$ 과 가중치  $G_c$ 를 이용하여 식(11)과 같이 {G} 좌표에서 표현한 순응 트위스트  $\hat{\delta D}_c^{(G)}$ 를 구할 수 있다.

$$\hat{\delta D}_c^{(C)} = -G_c [K]^{(C-1)} (\hat{w}_d^{(C)} - \hat{w}_a^{(C)}) \quad (14)$$

$$\hat{\delta D}_c^{(G)} = E_{CG} \hat{\delta D}_c^{(C)} \quad (15)$$

#### 3.3 가중치 설정 방법

순응기구의 공간 강성 사상 관계를 이용하여 원하는 위치와 힘을 제어하기 위한 로봇 끝단의 트위스트 변화량은 다음과 같다.

$$\hat{\delta D} = \hat{\delta D}_f + \hat{\delta D}_c = \hat{\delta D}_f - [K]^{-1} \delta \hat{w}_e \quad (16)$$

실제 위치/힘 동시 제어에서는 순응 트위스트와 자유 트위스트의 오차  $\hat{\delta D}_c$ 와  $\hat{\delta D}_f$ 에 각각 가중치  $G_c$ 와  $G_f$ 를 곱하여 식(13)과 같이 나타낸다. [1, 2]

가중치  $G_c, G_f$ 는 제어에 있어서 순응 트위스트와 자유 트위스트 중 어떤 것에 더 비중을 줄 것인지를 결정하는 가중치 역할을 한다.

나선(screw)은 단위가 다른 3행의 벡터 두 개로 표현되는 이중 벡터(dual vector)이므로 그 크기를 정량적인 값으로 표현할 수가 없다. 그리고 두 트위스트의 가중치와 에러의 관계도 정량적인 함수 관계로 나타낼 수 없다. 이런 모호성을 반영하기 위해 본 논문에서는 퍼지 이론을 제어에 적용하기로 하였다.

퍼지에 의한 제어는 매개변수들이 제어를 하는 동안 적응성(adaptiveness)을 가지고 선택된다. 퍼지 이득치 스케줄링 방법은 여러 분야에 적용되었으며, 상수의 이득치를 갖는 비례미분적분 제어에 비해 수렴 속도 및 안정성 면에서 우수함이 입증되었다.[6]

제어 방법에 있어서는 완전 구속 상태인 6-DOC(Degrees of Constraint)와 자유도를 가지는 경

우로 나눌 수 있다. 6-DOC의 경우에는 자유 트위스트가 나타나지 않으므로 가중치  $G_f$ 가 0이 된다. 이 때 가중치  $G_c$ 는 이득치의 역할만을 하게 된다.

3.3.1 6-DOC의 경우

이 경우엔 자유 트위스트가 없으므로, 순응 트위스트의 가중치  $G_c$ 만 정해주면 된다. 퍼지 제어에 사용한 입력은 출력 렌치와 입력 렌치의 오차  $e$ 와 오차의 변화율  $ce$ 이며, 출력은 가중치  $G_c$ 이다.

퍼지 집합  $e$ 와  $ce$ 에 대한 소속 함수는 Fig. 4에 나타나 있다.

Table 1은 퍼지 규칙을 나타내며 IF - THEN의 형식으로 이루어져 있다.

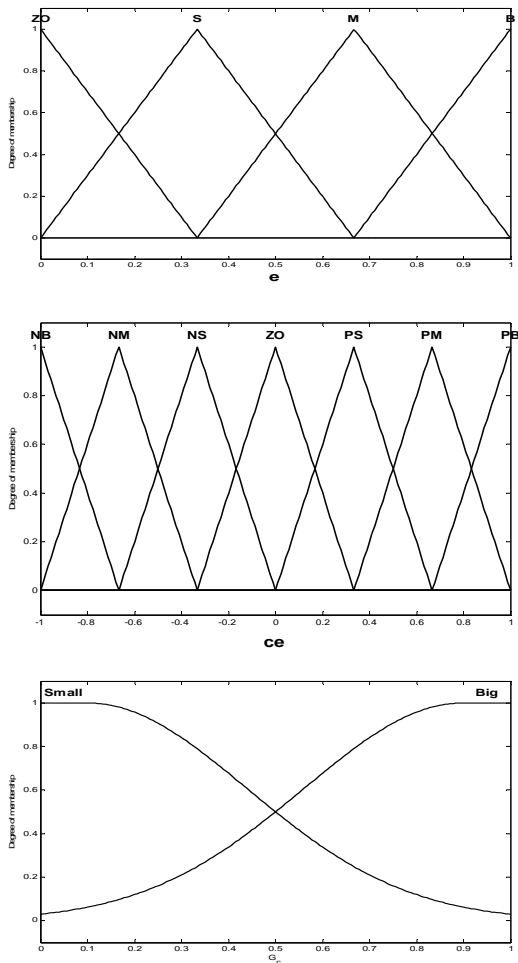


Fig. 4 Membership functions for input and output

Table 1 Fuzzy Rule

e / ce	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	S	S	S	B	S	S	S
S	S	S	B	B	B	S	S
M	S	S	B	B	B	S	S
B	B	B	B	B	B	B	B

3.3.2 자유도를 가지는 경우

6-DOC와는 달리 현재의 오차 뿐만 아니라 작업 단 끝에 작용하는 렌치와 자유 트위스트 사이의 관계도 고려해야 한다. 렌치는 힘과 모멘트를 트위스트는 선속도와 각속도를 나타내므로 이 두 개를 직접 비교할 수 없다. 그래서 렌치를 순응 트위스트로 바꿔서 자유 트위스트와 비교하였다. 직접 두 개의 트위스트를 비교할 수 없으므로, 식 (17)과 같이 선형 성분  $v_0$ 과 회전 성분  $\omega$ 로 나누고 원하는 작업에 따라 중요한 성분을 택하여 비교한다.

$$\delta \hat{D} = [v_0 \ \omega]^T \tag{17}$$

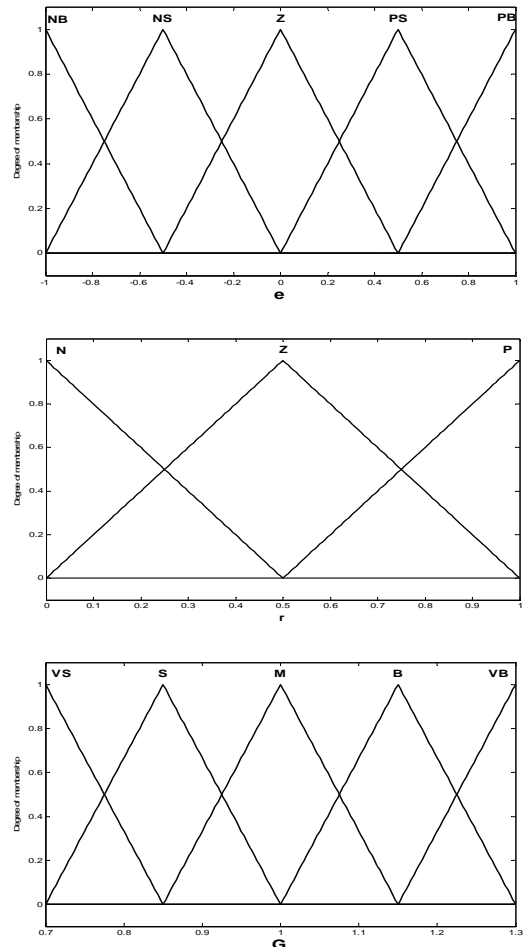


Fig. 5 Membership functions for input and output

Table 2 Fuzzy rule for Gc

r/e	PB	PS	Z	NS	NB
B	VB	B	M	S	VS
M	B	M	M	M	S
S	M	M	M	M	M

Table 3 Fuzzy rule for Gf

r/e	PB	PS	Z	NS	NB
B	M	M	M	M	M
M	B	M	M	M	S
S	VB	B	M	S	VS

퍼지 추론의 입력은 현재의 오차의 크기와 두 트위스트의 선형/회전성분 중 하나의 크기 비 (ratio)이다. 그 비는 식(18), 식(19)와 같이 구하였다.

$$r_{v_o} = \frac{\|\delta v_{oc}\|}{(\|\delta v_{of}\| + \|\delta v_{oc}\|)} \quad (18)$$

$$r_{\omega} = \frac{\|\delta \omega_c\|}{(\|\delta \omega_f\| + \|\delta \omega_c\|)} \quad (19)$$

6-DOC 와 달리  $G_c$ ,  $G_f$  가 둘 다 존재하므로, 출력 성분은 두 개로 늘어 난다.

예를 들어 식(18), 식(19)에서 구한 비 중 순응 트위스트 성분이 자유 트위스트 성분보다 큰 경우는 순응 트위스트의 가중치  $G_c$ 를  $G_f$  보다 더 크게 해주어야 한다. 여기에 현재의 오차 e 도 고려하여 퍼지 규칙을 만들어 보았다.

현재 오차 e 와 크기의 비에 관한 소속 함수는 Fig. 5 와 같다.

둘 사이의 퍼지 규칙은 Table 2 와 3 에 나와있다.

#### 4. 모의 실험

##### 4.1 6-DOC 모의 실험

공작 기계용으로 제작된 스텐더트 플랫폼형 병렬 로봇을 모델로 선정하였다. 로봇 끝단은 충분히 빠른 응답을 하며, 한 점에 구속되어 있다는 가정하에 모의 실험을 실시하였다. 샘플링 타임 (samplint time)은 임의로 10msec 로 하였다.

가중치  $G_c$ 를 0.05 로 했을 때 수렴 속도는 1 초 였다. 반면 가중치  $G_c$ 를 0.5 로 했을 때 수렴 속도가 0.1 초로 10 배 정도 빨라졌다. 하지만, z 축

Sampling time : 10 msec

$$\hat{w}_d = [1000; 000]^T \quad [N; Nm]$$

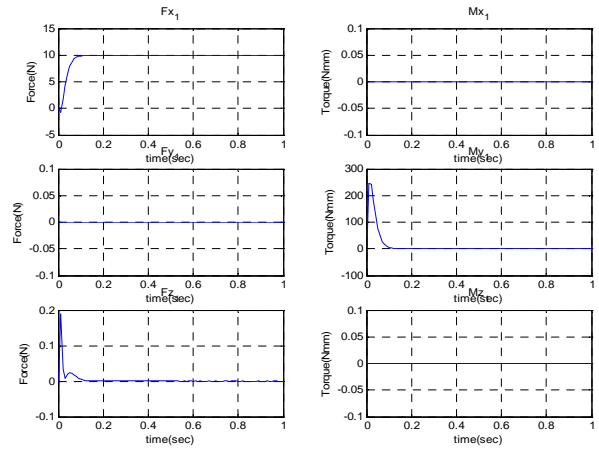


Fig. 6 Constant gain, Gc=0.5

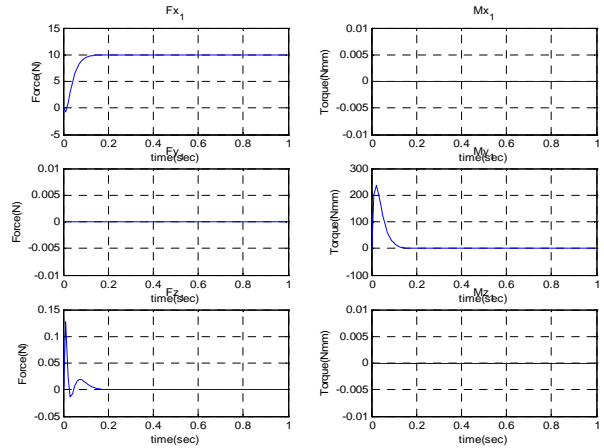


Fig. 7 Fuzzy gain scheduling

으로의 힘과 y 축으로의 모멘트에서 오버 슈트 (Over Shoot)의 양은 증가하였다.

Fig. 7 에서 보듯이 퍼지 제어를 한 결과 수렴 속도는 0.1 초 정도로  $G_c$ 가 0.5 일 때와 같고, z 축으로의 힘 오차가 0.12N 으로  $G_c$ 가 0.5 일때의 오차 0.2N 에 비해 감소하는 효과를 얻었다.

##### 4.2 자유도가 있는 경우의 모의실험

6-DOC 의 경우 순응기구의 끝단이 고정되어있다는 가정하에 모의실험을 실시하였다. 하지만 자유도가 있는 경우는 순응기구의 끝단의 위치가 구속 방향을 제외하고는 변할 수 있다. 즉 로봇 끝단의 위치  $\hat{D}_R$ 를 구했을 때, 순응기구 상판과 하판 사이의 트위스트  $\hat{D}_{CD}$ 는 그 순응성으로 인해 구속 방향 이외에는 예측할 수가 없다.

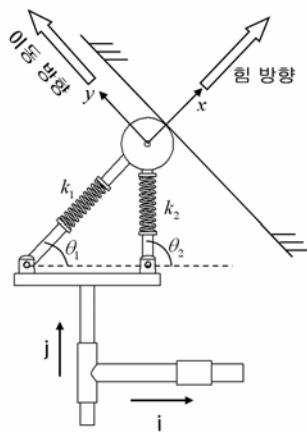


Fig. 8 Robot System for simulation

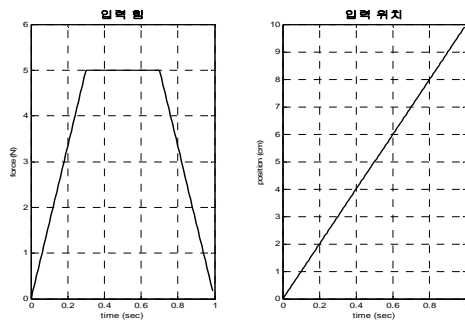


Fig. 9 Input force and input position

이번 모의 실험에서는 그 위치를 다음과 같은 방법으로 정하였다. 순응기구의 끝단과 작업 환경 사이에는 아무런 마찰력과 외란이 존재하지 않는다고 가정하고, 순응기구의 끝단이 갈 수 있는 모든 위치에 대해 작용 렌치와 순응기구 상판과 하판 사이의 트위스트를 이용해서 스트레인 에너지를 구하였다. 구한 값들 중에서 최소가 되는 지점을 순응 기구의 끝단의 위치로 정했다.

1-DOF 인 경우에 대해 모의 실험을 해보았다. 모의 실험에 사용할 시스템은 참고 문헌[1]에 나오는 예제를 이용하였다.  $\theta_1 = 45$  degree  $\theta_2 = 90$  degree 이며, 스프링 상수는  $k_1 = k_2 = 10$  N/cm 이다.

입력 힘과 입력 위치는 Fig. 9 와 같다. 힘의 경우 서서히 증가하다가 일정 부분 유지하고 다시 감소하게 하였고 위치의 경우 일정하게 계속 증가하게 하였다.

Fig. 10 과 Fig. 11 에 나온 결과를 보면 가중치를 상수로 두었을 때의 힘의 오차는  $-0.04 \sim 0.03$  N 이었는데 퍼지 제어로 가중치를 조절 했을 때 힘의 오차가  $-0.03 \sim 0.01$  N 으로 40% 정도 감소했다. 위치의 오차도 상수일 때  $-0.08 \sim 0.06$  mm 에서  $-0.07 \sim 0.04$  mm 로 30% 정도 감소하였다.

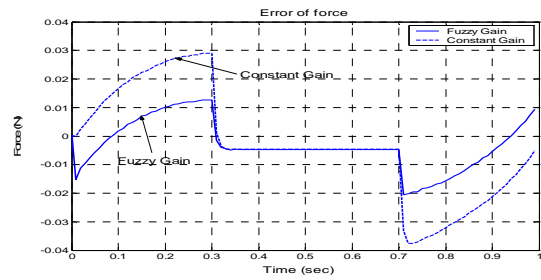


Fig. 10 Error of force

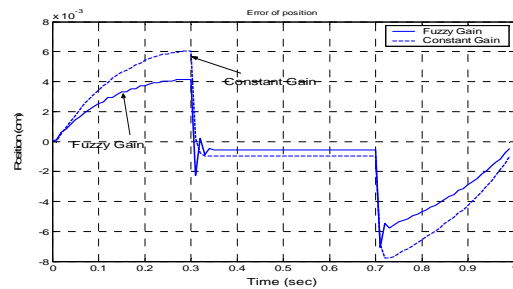


Fig. 11 Error of position

### 5. 결론

본 연구에서는 순응기구를 이용한 위치/힘 동시 제어에서의 가중치를 퍼지 이론을 통해 적절히 설정하는 방법을 제시하였다. 제안한 방법으로 모의 실험을 한 결과 순응기구의 가중치를 상수로 고정 하였을 때 보다 입력 트위스트와 렌치에 대해 균형적이며 신속하게 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 방법으로 위치/힘 제어에 순응기구를 사용하면 간단한 스프링과 링크 장치로 기존의 위치/힘 제어 방법을 대체 할 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고문헌

- (1) Duffy, J., 1996, "Statics and Kinematics with applications to Robotics", Cambridge University Press.
- (2) Griffis, M. W., 1991, "Kinestatic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement," Ph.D Thesis, University of Florida,.
- (3) Namik Ciblak, 1988, "Analysis of cartesian stiffness and compliance with applications", Ph.D. Thesis Georgia Institute of Technology.
- (4) Zhen-Yu Zhao, and Masayoshi Tomizuka, 1993, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers" IEEE Transaction on System. Man and Cybernetics, vol. 23. No. 5. September/October.
- (5) J. -S. R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani, 1997, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing", Prentice Hall.