

## Adaptive Fuzzy 제어를 이용한 Embedded 시스템 기반의 기능성 고분자 구동체 다중제어에 관한 연구

김태형\*, 김훈모\*\*

### A Study on Multi-Vehicle Control of Electro Active Polymer Actuator based on Embedded System using Adaptive Fuzzy Controller

Tae Hyung Kim\*, Hun Mo Kim\*\*

#### ABSTRACT

In case of environment requiring safety such as human body and requiring flexible shape, a conventional mechanical actuator system does not satisfy requirements. Therefore, in order to solve these problems, a research of various smart material such as EAP (Electro Active Polymer), EAC (Electro Active Ceramic) and SMA (Shape Memory Alloy) is in progress. Recently, the highest preferring material among various smart material is EP (Electrostrictive Polymer), because it has very fast response time, powerful force and large displacement. The previous researches have been studied properties of polymer and simple control, but present researches are studied a polymer actuator. An EP (Electrostrictive Polymer) actuator has properties which change variably as shape and environmental condition. Therefore, in order to coincide with a user's purpose, it is important not only to decide a shape of actuator and mechanical design but also to investigate a efficient controller. In this paper, we constructed the control logic with an adaptive fuzzy algorithm which depends on the physical properties of EP that has a dielectric constant depending on time. It caused for a sub-actuator to operate at the same time that a sub-actuator system operation increase with a functional improvement and control efficiency improvement in each actuator, hence it becomes very important to manage it effectively and to control the sub-system which is operated effectively.

There is a limitation on the management of Main-host system which has multiple sub-system, hence it brings out the Multi-Vehicle Control process that disperse the task efficiently. Controlling the multi-dispersion system efficiently, it needs the research of Main-host system's scheduling, data interchange between sub-actuators, data interchange between Main-host system and sub-actuator system, and data communication process. Therefore in this papers, we compared the fuzzy controller with the adaptive fuzzy controller. also, we applied the scheduling method for efficient multi-control in EP Actuator and the algorithm with interchanging data, protocol design.

**Key Words** : Electrostrictive polymer actuator (EP 구동체), Adaptive fuzzy control (적응 퍼지 제어), Embedded system (임베디드 시스템), Multi distribute control system (다중분산제어 시스템)

---

2002년 4월 26일 접수

\* 성균관대학교 기계공학부 대학원

\*\* 성균관대학교 기계공학부

## 1. 서론

인체내부와 같은 안전성이 크게 요구되는 환경이나, 구동 System의 모양이 유연한 형태가 요구되는 환경 그리고, 특수한 목적에 맞은 환경에서 작업하는 구동체는 기존의 철이나 합금으로 된 시스템으로서 그 작업에 안전성도 보장할 수 없고, 작업도 제한적으로 이루어질 수밖에 없는 실정이다. 이에 따른 문제점을 해결하기 위하여 EAP(Electro Active Polymer), EAC(Electro Active Ceramic), SMA(Shape Memory Alloy) 등과 같은 여러 가지 재료의 Smart Material에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 다양한 Smart Material 중 현재 가장 각광 받고 있는 물질은 Electro Active Polymer이며, 그 중에서도 Electrostrictive Polymer(EP)이다. 그 이유는 EP가 다른 물질에 비하여 빠른 반응시간과 상대적으로 큰 변위와 힘을 갖는 장점 때문이다. 이전까지의 연구는 이러한 고분자 물질의 특성이나 단순한 단품제어의 연구형태가 대부분이었지만 최근에는 이러한 기능성 물질로 이루어진 Actuator에 대한 연구가 더욱 활성화되고 있다. EP Actuator는 형태나 외부환경 조건이 변화함에 따라서 다양하게 그 특성이나 성능이 변화되는 재료 자체의 특징을 가지고 있다. 따라서 사용자의 목적에 가장 적합한 성능을 발휘할 수 있게 하기 위하여 구동체의 형상과 기구적인 형태를 결정하는 것과 효율성 높은 운영방안 수립을 위한 제어기에 관한 연구가 중요한 요소이다.<sup>(1)</sup> 특히 제어기는 고속처리와 실시간 제어(real-time control)를 필요로 하기 때문에 Embedded Real-Time 시스템화가 중요한 요소로써 부각되고 있다. 따라서 본 논문에서는 시간에 따라서 장력이 변하는 EP의 물성에 따라서 Adaptive Fuzzy 알고리즘을 사용하여 구동체의 제어논리를 구성하고, 고속처리와 실시간성을 보장하기 위해서 Main-host system과 Sub-actuator system을 Embedded real-time system화하여 시스템의 제어성능을 향상시키고자 한다.<sup>(2)</sup>

개별 Actuator의 기능적인 향상과 제어 성능 개선과 함께 하나의 Sub-actuator system에서 수행하여야 하는 작업의 증가에 따라서 여러 대의 sub-actuator가 작업을 동시에 수행하여야 하는 상황이 발생하게 되었다. 이에 따라 이를 효과적으로 관리하고 sub-system의 효율적인 작업 수행이 가능하도록 하는 제어방법이 매우 중요한 요소로 자리

잡게 되었다. 여러 대의 sub-system을 둔 Main-host system의 관리 능력에는 한계가 있기 때문에 task를 효율적으로 분산해주는 다중제어(Multi-Vehicle Control) 방식이 필요하게 되고, 이에 따라 효과적인 다중분산 제어를 위하여 Main-host system의 스케줄링에 대한 연구와 sub-actuator간의 데이터 교환, Main-host system과 sub-actuator system간의 데이터 교환 방법 그리고 데이터 통신 방법에 대한 연구를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 시간에 따라서 EP의 물성 중 장력이 변화하기 때문에 Adaptive Fuzzy 알고리즘을 사용하여 구동체의 제어논리를 구성하였으며, 또한 데이터의 고속처리와 실시간성을 보장하기 위해서 Main-host system과 Sub-actuator system을 Embedded real-time system화하여 Main-host computer 기반의 Distributed-embedded agent system을 구현하여 시스템의 제어성능을 향상시키고자 한다. 이에 따라 fuzzy 알고리즘을 이용한 제어기와 Adaptive fuzzy 알고리즘을 이용한 제어기를 Simulation을 통하여 비교하고, 또한 EP Actuator의 효율적인 다중제어를 위한 스케줄링 방법과 최적의 교환 데이터가 적용된 알고리즘을 개발하여 Simulation Program에 적용하고자 한다. 그리고 Adaptive Fuzzy 제어기를 이용한 구동체의 단독제어와 다중제어의 성능을 비교하고자 한다.

## 2. EP의 Dynamic modeling 및 Actuator modeling

### 2.1 EP의 Dynamic modeling

EP는 전압이 인가되면 두께 방향으로 변형이 발생을 하게 되며 이 순간 EP가 가지고 있는 탄성 계수가 줄어들게 된다. 따라서 EP가 가지고 있는 장력이 작아지게 되고, 이 관계로 인하여 EP가 변하게 된다.

Dynamic Modeling을 수행하기 위하여 EP를 얇은 막으로 생각을 하였다. 얇은 막은 굽힘에 대한 저항력이 거의 없고, 변형 시 작용하는 복원력은 장력으로만 존재하는 물질이다.

먼저 막에 대한 동역학적인 상태도는 Fig. 1과 같다.

막에서  $w$ 는 EP의 dimension, 즉  $x, y$ 축과 시간에 대한 함수이다. 이를  $w(x, y, t)$ 라고 표현을 하였다. Fig. 1과 같은 상태도를 이용하여 상태 방정식을 만들면 식 (1)과 같다.

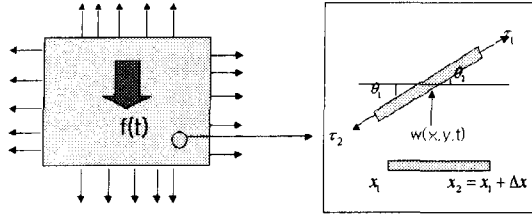


Fig 1 Dynamic state of EP

$$-\tau_1 \sin \theta_1 + \tau_2 \sin \theta_2 = \gamma \Delta x \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서,  $\theta_1, \theta_2$ 는 변형 각도,  $\tau_1, \tau_2$ 는 장력,  $\Delta x$ 는 변형량,  $\gamma$ 는 단위 면적당 질량이다. 식(1)을 선형화시키면 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial w^2(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial w^2(x,y,t)}{\partial y^2} = \frac{\gamma}{\tau(t)} \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

위 식 (2)는 Partial Difference Equation(P.D.E)식이 된다. 그리고 장력  $\tau(t)$ 가 시간에 대한 함수이므로 전체적인 식은 Linear time variant 식이 된다. 장력  $\tau(t)$ 에 대한 식은 식 (3)과 같다.

$$(E(t) - \sqrt{E(t)(E(t) - P(t))}) = \tau(t) \quad (3)$$

여기서  $E(t)$ 는 시간에 대한 탄성계수,  $P(t)$ 는 전압이 인가되었을 시의 압력이다. 또한 압력과 전압과의 관계는 maxwell stress 개념을 사용하여 식 (4)로 나타내었다.

$$P(t) = \epsilon \epsilon_0 (V(t)/d)^2 \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 EP가 가지는 유전율이고,  $\epsilon_0$ 는 대기중 유전율,  $d$ 는 EP의 두께,  $V(t)$ 는 EP에 공급되는 전압이 된다.

이제 식 (2)를 풀기 위해서 Separation method를 사용하면 식 (5)와 같다.

$$Y(y)T(t)X''(x) + X(x)T(t)Y''(y) = \frac{\gamma}{\tau(t)} X(x)Y(x)\ddot{T}(t) \quad (5)$$

그리고 먼저  $x, y$ 에 대한 식을 먼저 풀게 되면 식 (6)이 나오게 된다. 이때 경계조건이 사용되는데, 사용된 경계조건은 EP의 constraint에서 변위는 항상 0 이라는 것이다. 결과로 나온 Mode Shape는 식 (6)과 같다.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \quad (6)$$

여기서  $a$ 는  $x$ 축 방향의 크기,  $b$ 는  $y$ 축 방향의 크기이다.

다음으로 시간에 대한 식에 대한 미분 방정식을 푼다. 이때는 장력이 시간에 대해서 변하게 되므로 P.D.E를 Series solution으로 문제를 풀었다. 결과는 식 (7)과 같다.

$$T(t) = T(0) \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{12\{(4n+4)(4n+3)\}^n} t^{4(n+1)} \right] + T \left[ \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{20\{(4n)(4n+1)\}^{n-1}} t^{4n-3} \right] \quad (7)$$

또한 mode shape의 직교성을 이용하여서

$T(0), T(0)$ 를 결정할 수 있다.

## 2.2 Actuator modeling

현재 만들어진 Actuator type은 볼을 감싸는 EP가 쌍으로 되어있어서 각각의 EP에 전압을 인가하면 전압이 인가되는 방향으로 변위가 발생하는 메커니즘을 가지고 있다. 따라서 이에 대한 모델링을 수행하기 위해서는 앞 절에서 언급한 EP Modeling에 새로운 외력의 항이 추가되게 된다. Fig. 2는 볼에 힘이 작용하는 모습을 나타내고 있다.

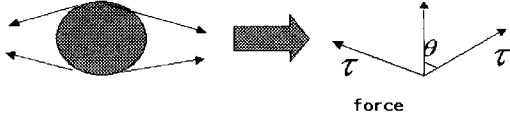


Fig. 2 The Operation Mechanism

따라서 외력은 식 (8)과 같다.

$$F = 2 \cos \theta \tau \quad (8)$$

여기서, F는 가해지는 외력,  $\theta$ 는 중심과 막과의 접선 각도,  $\tau$ 는 장력이다. 이제 이 외력의 항을 기존의 EP모델링에 추가를 시키면 식 (9)와 같은 linear time variant system의 식이 나오게 된다.

$$\frac{\partial w^2(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial w^2(x, y, t)}{\partial y^2} + f(t) = \frac{\gamma}{\tau(t)} \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} \quad (9)$$

이 방정식을 풀게되면 결과적으로 식 (10)이 나오게 되고 이것이 단품 Actuator의 구동식이 된다.

$$w(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \times$$

$$T(t) = T(0) \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{12\{(4n+4)(4n+3)\}^n} t^{4(n+1)} \right] +$$

$$T \left[ \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{20\{(4n)(4n+1)\}^{n-1}} t^{4n-3} \right] + \frac{1}{6\gamma} 2 \cos \theta (r(t))^{-3} \quad (10)$$

Fig. 3은 전체적인 Actuator system을 나타낸다. 구동체는 단품이 3개가 한 조를 이루고 있으며, 총 3층으로 구성되어 있다.

구동체의 변위와 속도는 식 (11), (12)와 같이 나타난다.

$$W = 3 \times w \quad (11)$$

$$v = W / \Delta t \quad (12)$$

여기서, W는 Actuator의 총 변위, w는 개별 단품의 변위, v는 actuator의 속도,  $\Delta t$ 는 임의의 Sampling 시간을 나타낸다.

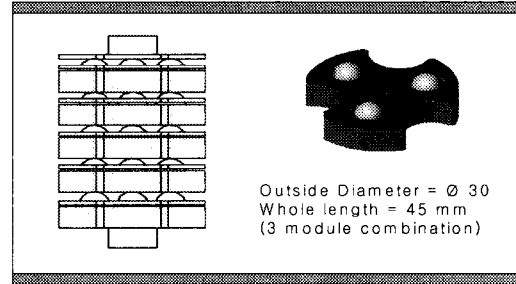


Fig. 3 Shape of Actuator

### 3. Adaptive Fuzzy 제어기 설계

EP는 인가되는 전압에 따라서 capacitance 역할을 하므로 전기적인 특성이 고려되어야 한다. 또한 EP는 점탄성 물질이므로 점탄성 물질에 대한 고분자적 이론이 적용이 되어야 한다. 즉 EP의 완벽한 모델링을 수행하기 위해서는 기계적 · 전기적 · 고분자적 이론을 통해야 완벽한 모델링 결과를 얻을 수 있다. 앞에서 수행한 모델링은 EP의 기계적 특성을 이용한 결과이다. 따라서 본 모델링 결과를 이용하여서 완벽하게 인가되는 전압에 따른 변형 특성을 얻을 수 없으므로 제어 알고리즘을 개발하여 적용시켰다.

제어 알고리즘을 적용시키기 위해서 일반적으로 강인성이 보장되는 fuzzy 알고리즘과 EP가 가지는 시변적인 요소를 고려할 수 있는 adaptive 알고리즘을 동시에 적용하여 제어를 수행하였다. Adaptive fuzzy 알고리즘은 시간에 따라 변화하는 탄성계수의 영향으로 인하여 발생하는 변위 및 속도 제어에 매우 우수한 성능을 발휘할 수 있다. 또한 adaptive fuzzy 알고리즘을 사용하면 대장 내부의 환경으로 인하여 발생할 수 있는 여러 외란 등에 매우 강인하게 시스템을 제어할 수 있다.

Fig. 4는 본 논문에서 적용한 적응 퍼지모델 기준 학습제어 알고리즘의 블록선도를 보여준다.

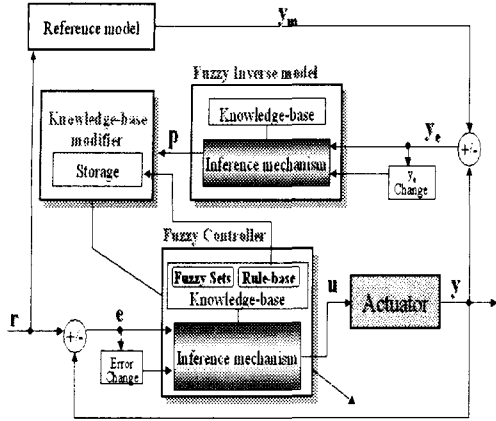


Fig. 4 Block diagram of adaptive fuzzy

### 3.1 Fuzzy 제어부

Fuzzy 제어부는 일반적인 퍼지 제어기와 동일한 형태를 사용하여 삼각형 형태의 소속함수와 Min-Max 추론 엔진, 그리고 무게 중심법의 비퍼지화를 사용하였다. 이를 수식으로 나타낸 것이 식(13), 식(14), 식(15)와 같다.

$$U(e|\sigma) = \frac{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} y_u^{l_1 \dots l_n} [\prod_l \mu_{f_l}(e)]}{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} [\prod_l \mu_{f_l}(e)]} \quad (13)$$

$$U(e|\sigma) = \sigma^T \xi(e) \quad (14)$$

$$\xi = \frac{[\prod_l \mu_{f_l}(e)]}{\sum_{l_1=1}^{m_1} \dots \sum_{l_n=1}^{m_n} [\prod_l \mu_{f_l}(e)]} \quad (15)$$

제어기의 입력과 출력은 다음과 같이 정의하고 퍼지화를 수행하였다.

1) 입력 변수

① EP 액츄에이터의 변위

EP 액츄에이터에 대한 언어적인 변수는 오차라는 것을 나타내기 위해 퍼지화를 수행하였다.

② EP 액츄에이터의 오차 변화

EP 액츄에이터의 변화에 대한 언어적인

변수는 압력 오차 정도라는 것을 나타내기 위해 c(change error)로 하였다.

### 3.2 학습 Mechanism

학습 메커니즘은 다음과 같이 퍼지 역모델(Fuzzy Inverse Model)과 퍼지 수정부(Rule-Base Modifier) 2가지로 구성되어 있다.

Fig. 4에서 퍼지 역모델은 입력으로 기준모델과 시스템의 출력 변위 오차  $y_e$  와 그것의 변위 변화량  $y_c$  을 가지며 출력으로는 기존 퍼지 제어기의 소속함수의 중심값을 얼마만큼 이동시킬 것인지를 결정하는  $p$  로 구성되어 있다.

퍼지 역모델에서 출력  $p$  를 산출하기 위한 퍼지 규칙은 식(16)에 나타내었다.

$$IF \tilde{y}_e \text{ is } Y_e^j \text{ AND } \tilde{y}_c \text{ is } Y_c^l \text{ THEN } \tilde{p} \text{ is } P^m \quad (16)$$

이와 같이 산출된 출력  $p$  는 퍼지 수정부를 통해 식(17)에 의해 퍼지 제어기의 제어 규칙을 적용시켜 나간다.

$$c_i(kT) = c_i(kT - dT) + p(kT) \quad (17)$$

여기서  $c_i$  는 시간  $kT$  에서  $i$  번째 출력 변수에 대한 퍼지 소속함수의 중심을 나타낸다.

### 4. 분산 제어 시스템 modeling

효율적인 다중분산제어를 위하여 본 연구에서 사용할 시스템은 각각의 sub-system의 개별 작업 수행 능력도 보장하고, Main-host system의 감시도 필요하며, 실시간 통신을 통하여 정보의 교환도 이루어져야 하므로 중앙 집중식 직렬 제어 시스템을 기반으로 하지만 Main-host system의 감시 기능을 최소화하고 sub-system에 최대의 자유도를 주는 제어 시스템으로 구성하였다. 이에 따라서 Main-host system과 sub-system과의 역할 분담을 수행하였는데 먼저 Main-host system의 주요 임무는 다음과 같다.

- 1) 전체 sub-system 스케줄링
- 2) sub-system의 제어 데이터 모니터링
- 3) 전체 구동체의 호출 및 비상정지

이와 같은 임무에 따라서 Main-host system은 전체적인 sub-system의 감시를 수행하지만 sub-system의 움직임에 대한 간단한 제어만을 수행하기 때문에 system의 부하를 최소화 할 수 있고, 동시에 상대적으로 많은 수의 sub-system을 운영할 수 있게 된다.

다음으로 sub-system의 주요 임무는 다음과 같다.

- 1) 구동 명령에 따른 자율 구동
- 2) Main-host computer와의 데이터 교환
- 3) Adaptive fuzzy 제어 알고리즘 수행

이와 같이 sub-system도 단지 자신의 움직임에 대한 제어만을 수행하면 되므로 전체적인 움직임에 대한 고려를 따로 할 필요가 없고, 다른 sub-system과의 연관 관계도 고려할 필요성이 없기 때문에 하부 자율 주행 system의 부하도 상당히 줄어들게 된다. Fig. 5에 전체 system의 개략도를 나타내었다.

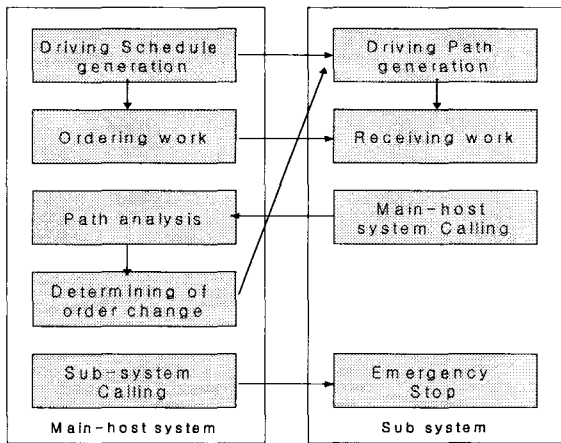


Fig. 5 Schematic Diagram of Whole System

#### 4.1 Main-host system의 제어 Scheduler 설계

main-host computer의 작업은 각각의 sub-system의 정보를 충분한 시간을 가지고 받아 들여야 하고 그 정보는 system의 fail에 영향을 미칠만큼 중요한 hard real-time은 아니므로 Time-Slice(TS) 스케줄링을 바탕으로 여기에 sub-system의 emergency 호출시 최우선 권을 주는 Priority-Based Preemptive(Event Driven, ED) 스케줄링을 접목한 스케줄링 방식을

선택한다. 또한 모니터링 부분은 time-thread를 이용하여 동시에 데이터 표현이 가능하도록 구현하였다. Fig. 6에 Main-host system의 스케줄 개념도를 나타내었다.

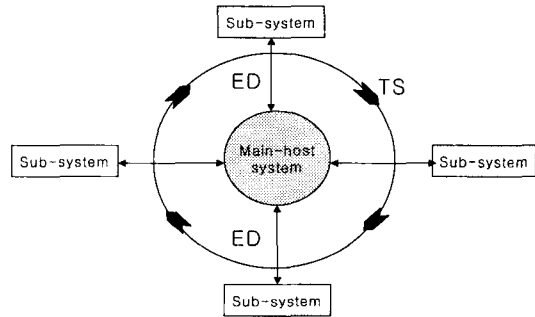


Fig. 6 Schematic Diagram of Scheduling

#### 4.2. 데이터 통신 Protocol 정의

Main-host computer와 제어기간의 통신을 위하여 다음과 같이 Protocol을 정의한다.

항목	Header	Channel	Command	End of Data
크기(byte)	1	1	2	1

- Header : Send 와 Receive 데이터를 구분해준다.
- Channel : Channel의 ID를 확인한다.
- Command : 앞의 1byte는 일반 제어 명령을 뒤의 1byte에는 위치 데이터 정보를 실는다.
- End of Data : Data의 끝을 알려준다.

### 5. Simulation 및 실험 결과

#### 5.1 Actuator 시뮬레이터 개발

개발 Actuator의 단품 제어에 대한 Fuzzy 알고리즘과 Adaptive Fuzzy 알고리즘의 성능 평가를 위하여 그래픽 시뮬레이터를 JAVA Language를 이용하여 개발하고 결과를 비교하였다. Fig. 7은 단품 Actuator 제어 시뮬레이터의 전체화면 구성도이다.

시뮬레이터 화면의 각 Module들을 살펴보면 Fig. 7에서 보여지듯이 제어 창을 통해서 Actuator의 초기 설정 값을 입력할 수 있다. Reference V는 추

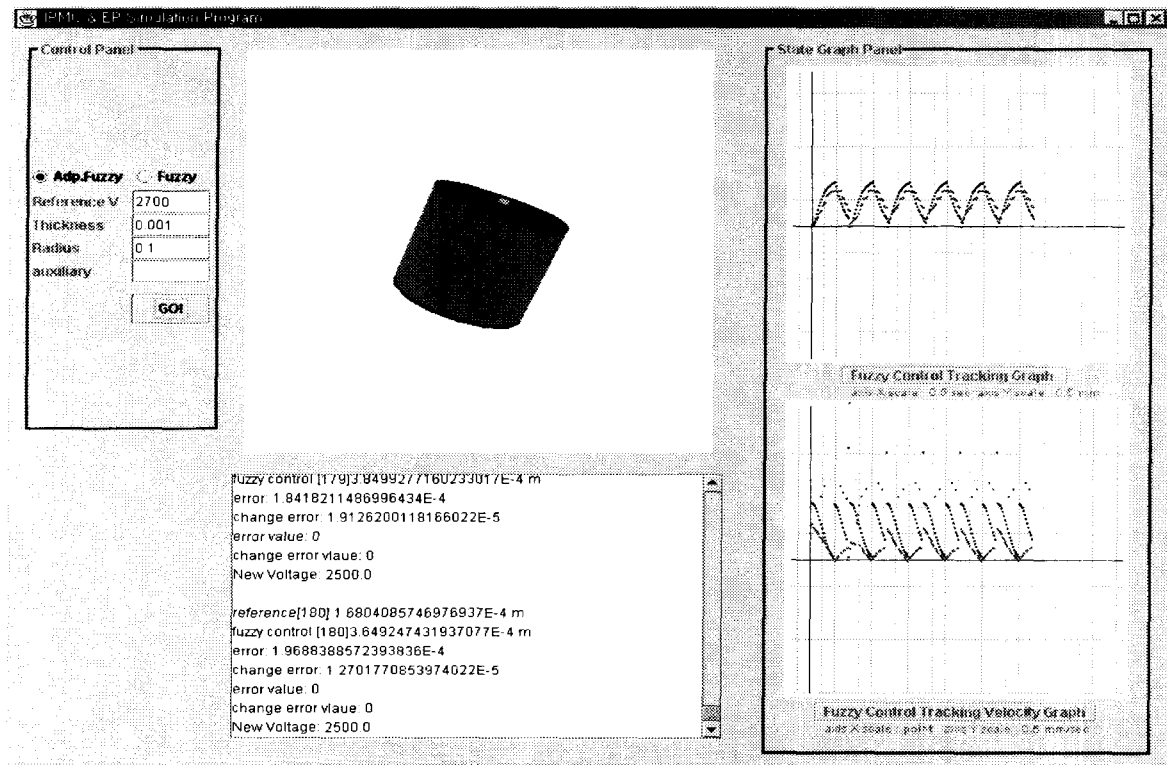


Fig. 7 Actuator Simulator

정해 가는 변위를 입력하는 부분이고, Thickness와 Radius는 EP의 두께와 반지름을 입력하는 부분이다. 또한 상단에 보이는 radio 버튼을 통해서 제어 방식을 선택할 수 있도록 되어 있어서 Fuzzy controller와 Adaptive Fuzzy controller를 시뮬레이션을 통해서 비교 분석한다. 또한 움직임을 애니메이션으로 보여주는 3D창과 구동되는 상태 정보 데이터를 보여주는 부분이 있어서 현재의 변위, 속도 등을 표시하여 구동 성능을 나타내는 지표로 사용된다. 그리고 제어 성능을 그래프를 통하여 보여주는 부분을 포함하고 있어서 각각의 제어 방식을 실시간으로 확인할 수 있다. 이러한 부분들을 통해서 Fuzzy와 Adaptive Fuzzy 제어 방식 중 어떤 제어 방식이 더욱 효율적으로 Reference 입력을 추정해 가는지 확인할 수 있고, 또한 Adaptive Fuzzy 제어 알고리즘의 추정 성능을 좀 더 효율적으로 개선할 수 있다.

## 5.2 Adaptive fuzzy 와 Fuzzy 알고리즘 비교

단품 Actuator는 제어기의 성능을 비교하기 위하여 임의의 주기적인 Reference 입력을 주고 제어기를 통해서 출력되는 결과 값이 얼마나 빠르게 근접한 값으로 접근해 가는지를 비교하였다. 처음에 시뮬레이션을 수행한 결과는 두 방식 모두가 reference 입력을 초기에는 잘 추정하다가 시간이 흐른 후에는 추정이 잘 되지 않는 결과를 보였다. 이를 반복 수행한 결과를 토대로 Adaptive rule의 수정을 거쳐서 시간이 지나도 reference 입력을 안정적으로 추정하는 알고리즘을 찾아낼 수 있었다. Fig. 8은 Fuzzy의 변위 추정 그래프이며 Fig. 9는 속도 추정 그래프이다. Fig. 10은 Adaptive Fuzzy 제어를 사용했을 경우에 출력되는 변위의 그래프이며 Fig. 11은 속도를 나타낸 그래프이다.

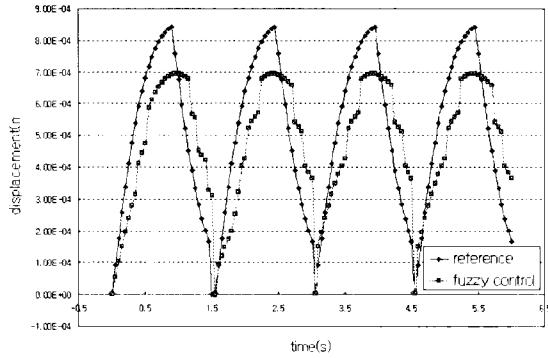


Fig. 8 Result of displacement at fuzzy control

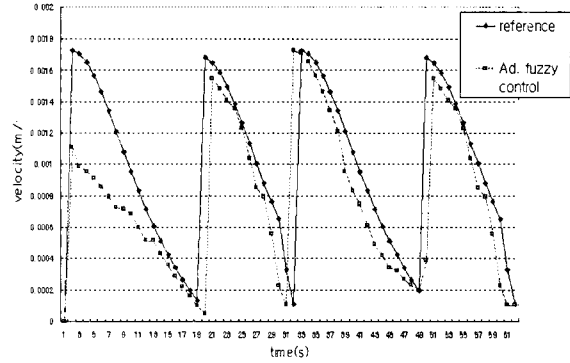


Fig. 11 Result of velocity at adaptive fuzzy control

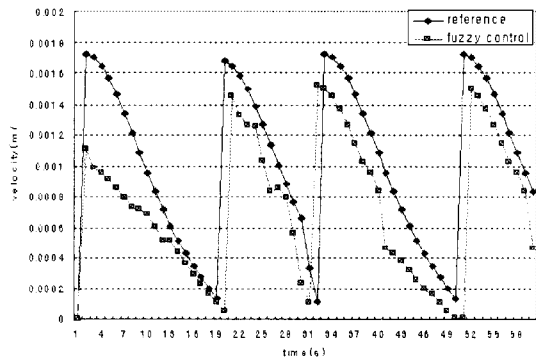


Fig. 9 Result of velocity at fuzzy control

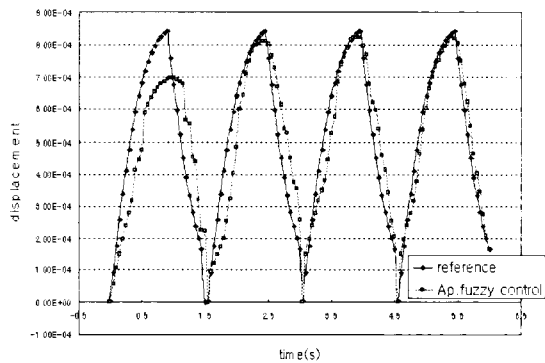


Fig. 10 Result of displacement at adaptive fuzzy control

그래프에서 보이듯이 일반 Fuzzy 제어기의 경우나 Adaptive Fuzzy 제어기를 사용하는 경우나 초기에 값을 추정하는 속도나 오차에서 크게 차이를 보이지 않으나 시간이 지나서 계속 진행 될 경우 장력의 변화로 인한 압력의 변화로 인하여 Fuzzy

제어기는 주기적인 reference 입력의 추정이 잘 되지 않은 현상을 볼 수 있었다. 결과를 초기에 결정한 rule base를 비교해보면 Table 1과 Table 2와 같다. Table 1에서는 학습 전의 fuzzy rule base를 나타낸 것이고 Table 2에서는 학습 후 변화된 rule base를 나타낸 것이다. Table 2에서는 adaptive rule을 바탕으로 rule의 오차와 오차 변화율이 거의 0으로 수렴해 가는 것을 확인해 볼 수 있다. 이와 같은 결과가 adaptive fuzzy 와 일반 fuzzy 결과를 야기하였다. 이상의 시뮬레이션 결과를 토대로 Adaptive Fuzzy 제어 방식이 시스템에 가장 적합한 방법이라는 것을 알 수 있었고, 여러 가지 환경 변화에도 가장 유연하고 효과적으로 대응함을 알 수 있었다.

Table 1 Rule base before changing

ce.e	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1.1	1.1	1.32	4.3	4.725	5	5.275	5.7	7	9.235	9.235
1	1.1	1.1	1.32	4.3	4.78	5	5.216	5.7	7	9.235	9.235
2	1.5	1.5	1.5	4.5	5	5	5	5.5	7	9	9
3	3.5	3.5	4.5	4.622	5.44	6.025	6.51	6.909	7	9.235	9.235
4	4	4	4.5	4.622	5.48	5	5.977	6.333	7	9.235	9.235
5	4	4	4.5	4.622	5.57	5.05	6.627	7.106	7	9.235	9.235
6	4	6	4.6	5	6.59	5	7.566	7.25	7	9.235	9.235
7	4	6	4.5	5.3	7.62	6.91	6.91	7.690	9	9.235	9.235
8	4.5	4.5	4.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7	9	9	9
9	5	5	4.5	6	6.1	9.35	9.35	9.235	9	9.235	9.235
10	5	5	4.5	6	6.74	9.35	9.35	9.235	9	9.235	9.235



Table 2 Rule base after changing

ce.e	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3.84	2.863	2.115	0.512	1.212	0	0	0	0	0	2.21
1	2.51	2.211	1.557	0.256	0.005	0	0	0	0	0	1.55
2	2.012	2.005	1.144	0.241	0.241	0.011	0	0	0	0	1.055
3	1.002	0.895	0.885	0.116	0	0	0	0.014	0	0	1.115
4	0	0.01	0	0.012	0	0	1.511	0.056	0	0	0.056
5	0	0.026	0	0	0	0	0.212	0	0	0	0
6	0.885	0.151	0	0	0	0.032	0.356	0	0.958	0	0
7	0	0	0.01	0	3.55	0	0.266	0	0	0	0
8	0.234	0	0	0	2.11	0	0	0	0	0	0
9	0.159	0.312	0.224	0.015	0.06	0	0	0	0.125	0	0
10	0.011	0	0.111	0.011	0	0	0	0.001	0.023	0	0

## 6. 결론

본 논문에서는 기능성 고분자 구동체 시스템을 효율적으로 제어하고 또, 여러 기를 다중 제어하였을 경우에 효율적인 관리를 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- (1) 새로운 EP Actuator 형태의 개발 및 시스템 모델링을 수행하였다.
- (2) 시간과 외부 환경의 영향에 강인하도록 Actuator 시스템 제어를 위하여 Adaptive Fuzzy 알고리즘을 개발하고 이를 적용한 시뮬레이터를 개발하여 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 이를 바탕으로 제어를 개발하였다.
- (3) 여러 개의 Actuator 구동체를 다중제어하기 위하여 TS 방식을 기반으로 한 time-schedule 알고리즘을 개발하였고, 효율적인 통신을 위한 protocol을 설계하였으며, 이를 적용하기 위하여 Serial-Ethernet converter를 이용한 시스템을 제안하였다.
- (4) 실제 Network을 통하여 제어 가능한 system을 구현하였고, 이를 바탕으로 다중분산제어 시스템 환경을 조성하여 개발된 제어기의 우수성 및 알고리즘의 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 성균관대학교 마이크로-나노 시스템 연구소에서 지원하여 수행한 것입니다.

## 참고문헌

1. Yoseph Bar-Cohen, "Electroactive Polymer Actuators ac Artificial Muscles," SPIE Press, Washington USA, 2001.
2. Hermann Kopetz, "Real Time Systems-Desing Principles for Distributed Embedded Applications," Kluwer academic publishers, Boston USA, 1997.
3. R. Pelrine, R. Kornbluh, J. Joseph, and S. Chiba, "Electrostriction of polymer films for microactuators," Proceeding of IEEE Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Nagoya, Japan, pp. 238-243, 1997.
4. M. Zhenyi, J. I. Scheinbeim, J. W. Lee, and B. A. Newman, "High field electrostrictive response of polymers," Journal of Polymer Sciences, Part B-Polymer Physics, Vol. 32, pp. 2721-2731, 1994.
5. Y. Shkel and D. Klingenberg, "Material parameters for electrostriction," Journal of Aplied Physics, Vol. 80, No. 8, pp. 4566-4572, 1996.
6. T. Furukawa and N. Seo, "Electrostriction as the origin of piezoelectricity in ferroelectric polymers," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 29, No. 4, pp. 675-680, 1992.
7. H. Tobushi, S. Hayashi, and S. Kojima, "Mechanical properties of shape memory polymer of polyurethane series," JSME International Journal, Series I, Vol. 35, No. 3, 1992.
8. R. Baughman, I. Shacklette, R. Elsenbaumer, E. Pichta, and C. Becht, "Conducting polymer electromechanical actuators," Conjugated Polymeric Materials: Opportunities in Electronics, Optoelectronics and Molecular Electronics, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 559-582, 1990.
9. D. De Rossi, and P. Chiarelli, "Biomimetic macromolecular actuators," Macro-Ion Characterization, American Chemical Society Symposium Series, Vol. 548, Ch. 40, pp. 517-530, 1994.
10. S. Bobbio, S. M. Kellam, B. Dudley, S. Goodwin

- Johansson, S. Jones, J. Jacobson, F. Tranjan, and T. Dubois, "Integrated force arrays," Proceeding of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, Florida, 1993.
11. R. Kornbluh, R. Pelrine, J. Joseph, Qibing.pei, Seajin Oh, "Ultrahigh strain response of field-actuated elastomeric polymers," SPIE, pp. 51-64, 2000.
12. Su J., J. S. Harrison, T.st.Clair, Y. Bar-Cohen, and S. Leary, "Electrosrictive graft elastomers and applications," MRS Symposium Proceedings, pp. 77-85, 1999.
13. Do-Yoon Kim, "On-Line Path Planning for Multiple Mobile Robots," MEE 953050, pp. 3-10, 1996.
14. C. O'Dunlaing, M. Sharir, C. Yap, "Retraction: A new Approach to Motion Planning: ACM Symp. Theory and Computing," pp. 207-220, 1983.
15. Lynne E. Parker, "ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant Multirobot Cooperation," IEEE Transactions on Journal of Robotics and Automation, Vol. 14, No. 2, pp. 220-228, 1998.
16. F. Nekoogar, and G. Moriarty, "Digital Control Using Digital Signal Processing", Prentice Hall International, New Jersey USA, 1999.
17. Andrew S. Tanenbaum, "Operating Systems Design and Implementation," Prentice-Hall International Inc., 1987.
18. Embedded System- [Http://www.embedded.com](http://www.embedded.com)
19. Andrew S. Tanenbaum, "Modern Operating Systems," Prentice-Hall International Inc., 1992.
20. John G. Ackenhusen, "Real-time signal processing: Design and implementation of signal processing systems," Prentice Hall PTR, New Jersey USA, 1999.
21. Giorgio C. Buttazzo, "Hard real-time computing systems: predictable scheduling algorithms and applications," Kluwer Academic Publishers, Boston USA, 1997.
22. RTOS '99 자료집.
23. Kandel Langholz, "Fuzzy Control Systems," CRC Press, 1994.
24. 이광형, 오길록, "퍼지 이론 및 응용," 홍릉과학출판사, 1991.
25. 채석, 오영석, "퍼지이론과 제어," 청문각, 1995.