

유전성 고분자를 이용한 생체모방형 구동기

Biomimetic Actuator Based on Dielectric Polymer

정 광 목, 류 성 무, 구 익 모, 전 재 욱, 구 자 춘, 남 재 도, 이 영 관, 최 혁 렬*

(Kwangmok Jung, Sungmoo Ryew, Igmo Koo, Jaewook Jeon, Jachoon Koo, Jaedo Nam, Youngkwan Lee, and Hyoukryeol Choi)

Abstract : A new bio-mimetic actuator is proposed. The actuator realizes bidirectional actuation since it is with a stretched film antagonistically configured with compliant electrodes. Also, it is distinguished from existing actuators with respect to the controllability of its compliance. Bidirectional actuation and compliance controllability are important characteristics for the artificial muscle actuator and the proposed one accomplishes these requirements without any mechanical substitute or complicated algorithms. In this paper its basic concepts and working principles are introduced with static and dynamic analysis. Control strategies for displacement as well as stiffness are introduced and experimental results are given to confirm the effectiveness of the proposed methods. In addition, an example of robotic actuating devices is given to confirm the usefulness of the proposed actuator.

Keyword : actuator, dielectric elastomer, biomimetic

I. 서론

최근, 고분자 재료를 이용한 구동기가 기존 구동기를 대체할만한 대안으로 떠오르고 있다. EAP(Electro-Active Polymer)는 전기적 자극에 의해서 변형을 일으키는 고분자류를 일컬으며 이를 이용한 구동기 개발이 활발히 진행되고 있다. EAP로 분류되는 고분자에는 IPMC(Ionic polymer Metal Composites), 전도성 고분자(Conducting Polymer), 폴리머 젤(Polymer gel), 유전 탄성체(Dielectric elastomer), 압전소자 고분자(Piezo electric Polymer) 등 여러 종류의 고분자 재료가 포함된다. 일반적으로 EAP들은 구동의 기본적인 원리에 따라 ionic 와 non ionic EAP 두 그룹으로 분류된다.

Ionic EAP에 대한 최근의 연구 성과로 볼 때 가까운 장래에 실용적으로 응용될 가능성이 비교적 높음을 알 수 있다. 그러나 유전성 고분자, 압전 소자 고분자와 같은 non ionic EAP가 보다 광범위하고 실제적인 응용에 더 근접한 것으로 판단되며, 이 논문에서는 유전 탄성체(Dielectric elastomer)를 이용한 구동기의 구동 원리를 분석하고 응용 방안을 제시한다.

유전 탄성체는 우리 주위에서 쉽게 찾을 수 있으며 폴리우레탄(Polyurethane), 실리콘(Silicone) 그리고 고무(rubber)등이 대표적이다. 기본적인 유전 탄성체의 변형은 전기장에 의한 수축(active)과 그로인한 팽창(passive)에 의해 이루어진다. 이러한 유전 탄성체의 변형은 기계적 구성 방식에 따라

다양한 형태로 연구 되고 있다[1]. 선-인장된(pre-stretched) 유전 탄성체 필름의 양쪽 면에 유연한(compliant) 전극을 형성하고 전압을 인가하면, 유전체는 전극에 가해진 높은 전압으로 발생된 전기장에 의해서 변형된다. 이러한 단순한 원리에 의존하여 개발된 기존의 유전체 구동기는 변형의 방향이 한쪽으로 고정된 형태로 나타나며, 이로 인해 능동적인 양방향 구동을 할 수 없는 단점이 있다.

이 논문에서 제안된 유전체 구동기는 단일의 유전체 위에 두 부분으로 분할된 유연 전극을 입힘으로서 대립 구조의 유연한 구동기를 형성하였으며, 이를 통하여 능동적인 양방향 구동을 실현하였다. 또한 구분된 두 전극에 인가되는 전압의 크기를 조절함으로써 강성 제어(stiffness control)를 가능하게 하였다.

이 논문에서는 제안된 구동기의 기본적인 구동 원리와 구동 모델(model) 그리고 강성 제어 알고리즘을 제시하였다.

II. 구동기의 기본 원리

이 장에서는 유전성 고분자 재료의 변형 원리에 대해 간단히 소개하였다. 자세한 내용은 이전의 논문에서 참고할 수 있다[1]. 얇은 탄성체 필름위에 코팅된 유연한 전극에 전압이 공급되었을 때, 필름의 두께는 감소하고 면적은 늘어나게 된다. 이것은 간단한 정전기 모델에 근거한 전기장으로 인해 유발된 변형이며, 필름의 변형을 발생시킨 유효 압력은 간단히 계산될 수 있다[2].

Maxwell stress로 불리는 정전기력은 전기장의 방향으로 수축을 일으키기 때문에 압력 σ_a 는 다음과 같이 유도된다.

$$\sigma_a = -\epsilon_r \epsilon_o E^2 = -\epsilon_r \epsilon_o \left(\frac{V}{t}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 E는 전기장(electric field), t는 탄성체의 최종 두께, V는 인가된 전압, 그리고, ϵ_o , ϵ_r 은 각각 자유공간에서의 유전율과 고분자의 상대 유전율이다. 그러므로 압력 σ_a 에

*책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 9. 25., 채택확정 : 2004. 10. 13.

최혁렬 : 성균관대학교 기계공학부(hrchoi@me.skku.ac.kr)

정광목, 류성무, 구익모, 구자춘 : 성균관대학교 기계공학부

(jungkmok@me.skku.ac.kr/smryew@me.skku.ac.kr/kooigmo@me.skku.ac.kr/jckoo@me.skku.ac.kr)

전재욱 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부

(jwjeon@yurim.skku.ac.kr)

남재도, 이영관 : 성균관대학교 응용화학부

(jdnam@skku.edu/sklee@skku.ac.kr)

※ 본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 지능형마이크로시스템개발사업과 인간기능 생활지원 지능 로봇 기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

의해서 유발된 변형률은 작용된 전기장의 제곱에 대략적으로 비례한다. 기계적 제약이 없는 등방의 고체에서 두께 방향의 변형률 ϵ 는 다음처럼 유도된다.

$$\Delta\epsilon_a = \frac{1}{Y_a} \sigma_a = \frac{1}{Y_a} [-\epsilon_r \epsilon_o (\frac{V}{t})^2] \quad (2)$$

여기서 $\Delta\epsilon_a$ 는 작동된 변형률, Y_a 방향으로의 유효 탄성 계수를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$Y_a = \frac{1}{\eta} Y_o \quad (3)$$

여기서 Y_o 는 초기 상태에서의 탄성 계수를 나타내며 η 는 유효 변형률 계수이다. 탄성체는 큰 변형률에서 많은 비선형 특성들을 가지고 있기 때문에 탄성계수, 유전체 상수와 같은 상수들이 유전체가 변형하는 동안 초기와는 다른 값을 갖게 되며, 이러한 변화는 유효 응력과 변형률에 영향을 미치게 된다. 따라서 탄성체의 비선형 특성들을 효과적으로 상쇄하기 위한 보상 인수로서 유효 변형률 계수 η 를 적용하였다. 유효 변형률 계수 η 는 각 재료에 대해 실험적으로 결정 된다. 변형률 변수 $\Delta^p \epsilon_a$ 와 ${}^o \epsilon_p$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\Delta^p \epsilon_a = \frac{\delta_a - \delta_p}{\delta_o} \quad (4)$$

$${}^o \epsilon_p = \frac{\delta_p - \delta_o}{\delta_o}$$

여기서 δ_p 는 선-변형 후의 두께, δ_a 는 최종 두께, δ_o 는 초기두께를 나타낸다.

III. 구동기 제안

그림 1에 ANTILA(ANTagonistically driven Linear Actuator)로 이름 붙여진 구동기의 구조를 나타내었다. 양 방향으로 선-인장된 고분자 필름을 단단한 프레임에 고정하고 탄성체 필름의 양쪽 면에 유연한 전극을 코팅하였다.

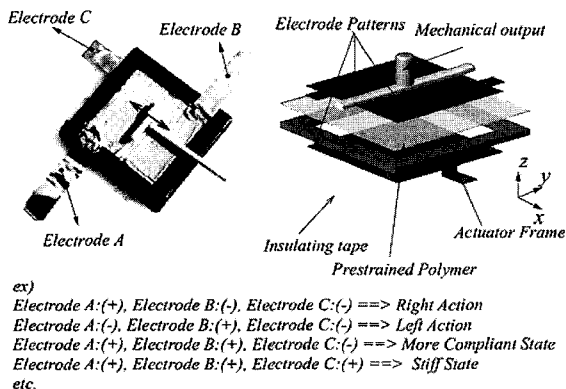


그림 1. ANTILA 개념도.

Fig. 1. Schematic diagram of ANTILA.

표 1. 전압에 대한 ANTILA의 상태.

Table 1. States of ANTILA according to given voltage.

State	Electrodes(ABC)
Stiff state	⊖⊖⊖ or ⊕⊕⊕
More compliant	⊕⊕⊖ or ⊖⊖⊕
Action toward B	⊕⊖⊖ or ⊖⊕⊕
Action toward A	⊖⊕⊖ or ⊕⊖⊕

여기서 전극은 탄성체의 변형을 방해하지 않으면서 지속적으로 전도성을 유지하여야 하기에 점도가 매우 낮고 전도성은 높은 재료를 사용하여야 한다. 통상적으로 탄소 분말(carbon powder) 또는 전도성 그리스(conductive greases)가 사용된다. 그림 1에서 출력단은 위쪽 표면의 전극을 활성 전극 A와 B로 구분하며 양 전극을 절연시키게 된다. 그리고 바닥면에 공통 전극 C를 코팅하였다. 이러한 대립 구조 방식을 통해 능동적인 양방향 구동이 가능하게 되었다.

제안된 디자인에서 일정한 장력(tension)이 길이 방향을 따라 주어진다 가정한다면, 두 필름의 장력은 초기에 탄성체 필름의 변형된 방향을 따라 탄성 평형을 유지한다. 출력단이 위치한 탄성 평형점은 전압의 인가와 함께 유전 탄성체의 변형에 의해서 유발된 불균형한 힘으로 인해 변형된다. 예를 들어, 만약 전극 A에 양의 전압을 주고, B와 C에 음의 전압을 인가한다면 출력단은 전극 B를 향해서 이동하며, 전극 B에 양의 전압, A와 C에 음의 전압을 인가한다면 그 반대로 이동할 것이다. 또한 출력단의 강성은 양 전극 A와 B에 인가되는 입력전압을 조절해서 능동적으로 조절할 수 있다. 전극 C에 음의 전압이 계속해서 주어지는 동안 양의 전압이 전극 A, B에 주어진다면 출력단은 보다 유연한 상태로 변화하며, 전극 A, B, C에 모든 전압이 동일하게 주어졌을 때는 높은 강성을 갖게 된다.

따라서 제안된 구동기는 인공 근육 구동기에서 요구되는 4가지 상태를 만족한다. 즉, 표 1에서 요약한 것처럼 전(forward), 후(backward), 높은 유연성 (highly compliant), 높은 강성 (highly stiff)을 수행할 수 있다.

IV. 구동기 분석

유전 탄성체는 큰 선-변형률을 가지고 구동되며, 큰 변형 상태에서의 탄성체는 비선형적 특성을 갖는다. 더욱이 변형률은 경계조건에 의존하기 때문에 구동기의 일반적인 모델을 유도하는 것은 거의 불가능하다.

1. 구동기의 반쪽 모델

먼저 그림 2(a)에서처럼 제안된 구동기의 반쪽만을 고려해 보았다. 그림 2(a)에서 그려진 것처럼 구동기의 반쪽 모델은 유한한 폭을 가진 요소들로 나누어 질 수 있다. 일반적으로 고분자는 비압축성이기 때문에, 각 방향의 변형률은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$(1 + {}^o \epsilon_x)(1 + {}^o \epsilon_y)(1 + {}^o \epsilon_z) = 1 \quad (5)$$

여기서 ${}^o \epsilon_z$ 는 두께 방향의 변형률이며, ${}^o \epsilon_x$ 와 ${}^o \epsilon_y$ 는 각각 길이 방향과 폭 방향의 변형률이다.

각각의 요소에 대해서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(1 + {}^o\varepsilon_{xi} + \Delta^i\varepsilon_{ij})(1 + {}^o\varepsilon_{yi} + \Delta^i\varepsilon_{yj})(1 + {}^o\varepsilon_{zi} + \Delta^i\varepsilon_{zj}) = 1 \quad (6)$$

여기서 변형률 변수의 접두사와 접미사 o, p 그리고 f는 각각 원래상태, 선-변형된 상태 그리고 최종상태를 나타낸다. 여기서 변형률 변수 $\Delta^i\varepsilon_{zj}$ 와 ${}^i\varepsilon_{zj}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta^i\varepsilon_{zj} = \frac{\delta_{zj} - \delta_{zi}}{\delta_{zo}} \quad (7)$$

$${}^i\varepsilon_{zj} = \frac{\delta_{zj} - \delta_{zi}}{\delta_{zi}}$$

여기서 δ_{zi} 는 i 상태에서 그 요소의 z 방향 길이이다. 그리고 i 는 $i = o, p, f$ 와 같은 상태 값으로 정의된다. 예를 들어, δ_{zo} 는 요소의 원래 두께이고 δ_{zp} 는 선-변형된 후의 두께를 나타낸다. 또한 x -, y -방향의 변형률 $\Delta^i\varepsilon_{xj}$, ${}^i\varepsilon_{xj}$, $\Delta^i\varepsilon_{yj}$ 그리고 ${}^i\varepsilon_{yj}$ 는 각각 유사한 방법으로 정의될 수 있다.

모델의 분석을 위한 첫 번째 단계로, 탄성체에 주어진 선-변형률에 의한 탄성 복원력(elastic restoration force)을 유도하였다. 그림 2(a)에서 보여준 요소는 각각 길이, 폭, 두께인 δ_{xp} , δ_{yp} 그리고 δ_{zp} 를 가진다. 선-변형률에 의해서 늘어난 요소의 길이는 다음과 같다.

$$\delta_{xp} = \delta_{xo}(1 + {}^o\varepsilon_{xp}) \quad (8)$$

$$\delta_{yp} = \delta_{yo}(1 + {}^o\varepsilon_{yp}) \quad (9)$$

$$\delta_{zp} = \delta_{zo}(1 + {}^o\varepsilon_{zp}) \quad (10)$$

(5)로부터 다음을 유도 할 수 있다.

$$\delta_{zp} = \delta_{zo} \frac{1}{(1 + {}^o\varepsilon_{xp})(1 + {}^o\varepsilon_{yp})} \quad (11)$$

선-변형이 적용된 후, 탄성체는 그림 2(b)에서 보여준 것처럼 늘어났다. 최종 길이 δ_{zf} , δ_{yf} 는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\delta_{zf} = \delta_{zp} + x \quad (12)$$

$$\delta_{yf} = \delta_{yp} \quad (13)$$

여기서 x 는 선-변형된 상태와 최종상태 사이의 길이 차이이다. 그러므로 x 방향의 최종 변형률은 선-변형 상태에서의 변형률과 구동시의 변형률의 합으로 표현된다.

$${}^o\varepsilon_{xf} = \frac{\delta_{zf} - \delta_{zo}}{\delta_{zo}} = {}^o\varepsilon_{xp} + \frac{x}{\delta_{zo}} \quad (14)$$

오직 x 방향의 변형률, ${}^p\varepsilon_{xf}$ 만 존재할 때, 최종 두께 δ_{zf} 는 (5)와 (10) 그리고 (13) 으로부터 다음이 유도된다.

$$\delta_{zf} = \delta_{zp} \frac{1}{(1 + {}^p\varepsilon_{xf})(1 + {}^p\varepsilon_{yf})} \quad (15)$$

${}^p\varepsilon_{yf} = 0$ 이기 때문에,

$$\delta_{zf} = \delta_{zp} \frac{\delta_{xp}}{\delta_{xp} + x} \quad (16)$$

그러므로 요소의 탄성 복원력 P_1 는 (14)로부터

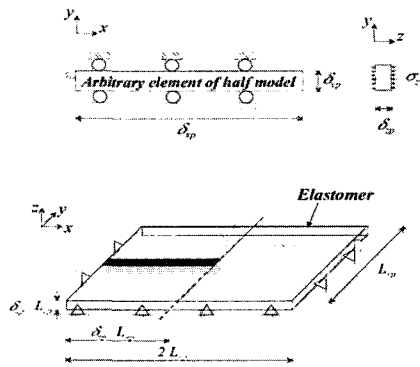
$$P_1 = -dA_f Y_x {}^o\varepsilon_{xf} \hat{=} f_1(x) \quad (17)$$

여기서 Y_x 는 x 방향의 유효 탄성계수를 나타낸다. dA_f 는 요소의 단면적이다. 그리고 $f_1(x)$ 는 x 의 변위를 가진 선-변형에 의한 힘을 나타낸다.

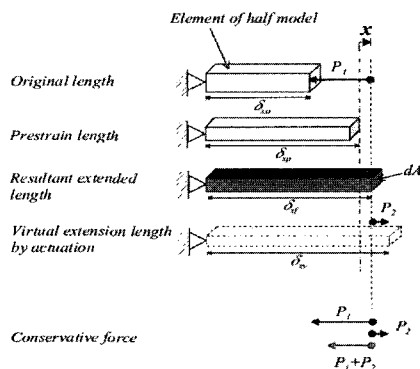
두 번째로 전압의 인가에 의해 발생하는 Maxwell stress에 의한 힘을 유도하였다. 여기서는 구동 전압 V 가 탄성체에 작용할 때 가상 변형률이 생긴다고 가정하였다. (1)에서 정전기력에 의한 압력은 다음과 같다.

$$\sigma_{zv} = -\varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{V}{\delta_{zf}}\right)^2 \quad (18)$$

여기서 σ_{zv} 는 z 방향의 가상 변형률이다. 그러므로 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(a) Half model of proposed



(b) Force on arbitrary actuator element

그림 2. 구동기의 반쪽 모델.

Fig. 2. Half model.

$$\Delta^f \epsilon_{zv} = -\frac{1}{Y_z} \epsilon_r \epsilon_o \left(\frac{V}{\delta_z f}\right)^2 \quad (19)$$

여기서 Y_z 방향의 유효 탄성계수이다. 그리고 $\Delta^f \epsilon_{zv}$ 는 원래상태에 대한 가상 변형률이다. 탄성체가 등방체라 할 때, 오직 x 방향의 가상 변형률만 존재한다. 그리고 y 방향의 가상 변형률은 반력 때문에 제거된다. 그러므로 x 방향의 가상 변형률은 다음처럼 얻어진다.

$$f \epsilon_{xv} = \frac{1}{1 + \frac{\delta_{zo}}{\delta_{zf}} \Delta^f \epsilon_{zv}} - 1 \quad (20)$$

(7)에서, x 방향으로 작용된 응력 σ_{xv} 는,

$$\sigma_{xv} = Y_x \Delta^f \epsilon_{xv} = Y_x \frac{\delta_{zf}}{\delta_{zo}} f \epsilon_{xv} \quad (21)$$

(21)에 (19)와 (20)을 대입하면,

$$\sigma_{xv} = Y_x \frac{\delta_{zf}}{\delta_{zo}} \left[\frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{zo}}{\delta_{zf}} \epsilon_r \epsilon_o \left(\frac{V}{\delta_{zf}}\right)^2} - 1 \right] \quad (22)$$

(22)로부터 정전기력 P_2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_2 = dA_f \sigma_{xv} \triangleq f_2(x, V) \quad (23)$$

여기서 $f_2(x, V)$ 는 변위 x와 인가된 전압 V에 관한 함수로 정전기력을 나타낸다. 따라서 반쪽 모델(half model)에서 최종의 힘은 선-변형에 의한 복원력과 정전기력의 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$P = f_1(x) + f_2(x, V) = -Y_x L_{yp} \delta_{zf} (\epsilon_{xp} + \frac{x}{\delta_{zo}} - \frac{\delta_{zf}}{\delta_{zo}} \left[\frac{y_z}{Y_z - \frac{\delta_{zo}}{\delta_{zf}} \epsilon_r \epsilon_o \left(\frac{V}{\delta_{zf}}\right)^2} + 1 \right]) \quad (24)$$

여기서 L_{yp} 는 그림 2(a)에서 보여준 구동기의 폭이다.

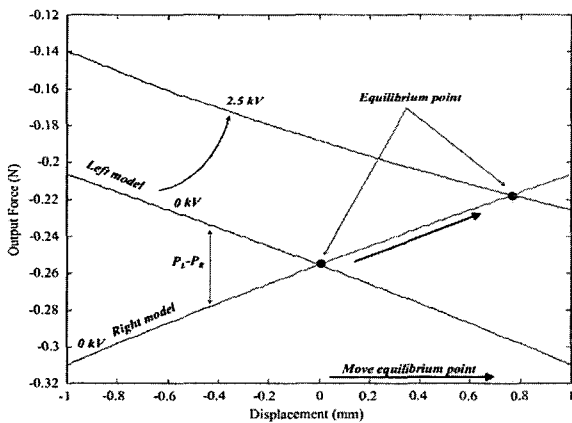


그림 3. 전체 모델의 시뮬레이션 결과.
Fig. 3. Simulation results for full model ($\epsilon_{xp} = 2.0$, $\epsilon_{yp} = 2.0$).

2. 전체 모델

반쪽 모델에서 얻어진 방정식은 그것의 대칭성에 의해서 전체 모델로 쉽게 확장될 수 있다. δ_{zo} , δ_{yo} , δ_{zo} , ϵ_{xp} 그리고 ϵ_{yp} 는 일정한 값이기 때문에 왼쪽과 오른쪽 탄성체에 의한 출력단에서의 힘 P_L 과 P_R 은 최종의 변위와 공급된 전압의 함수로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_L = f_{L1}(x) + f_{L2}(x, V_L) \quad (25)$$

$$P_R = f_{R1}(-x) + f_{R2}(-x, V_R) \quad (26)$$

여기서 V_L 과 V_R 은 각각 왼쪽과 오른쪽부분에 인가된 전압이다. 전체모델에서 최종 변위는 그림 3에서 보여준 것처럼 왼쪽 반쪽 모델의 힘과 오른쪽 반쪽 모델의 힘 사이의 평형점(equilibrium point)에서 결정된다. 전압을 인가하지 않은 상태에서는 두 모델이 평형 상태를 이루기에 변위는 0으로 나타난다. 왼쪽 모델에 전압을 인가한 경우, 기존의 평형은 깨어지고, 두 모델간의 새로운 평형점은 오른쪽으로 이동한 위치에서 형성되게 된다. 이 상태를 표현하면,

$$\int P_L = \int P_R \quad (27)$$

$$\int f_{L1}(x) + f_{L2}(x, V_L) = \int f_{R1}(-x) + f_{R2}(-x, V_R)$$

따라서, 전체 출력 힘은 다음과 같이 유도된다.

$$F = \int (P_R - P_L) \quad (28)$$

$$\triangleq g_k \cdot K(x) - g_e \cdot E(x, V_L, V_R) \quad (29)$$

여기서 $K(x)$ 와 $E(x, V_L, V_R)$ 은 각각 선-변형과 정전기 효과에 의한 힘을 나타낸다. $K(x)$ 와 $E(x, V_L, V_R)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$K(x) \triangleq Y_x L_{yp} \left[\epsilon_{xp} (\delta_{Lzf} - \delta_{Rzf}) + \frac{x(1 + \epsilon_{xp})}{\delta_{xp}} (\delta_{Lzf} + \delta_{Rzf}) \right] \quad (30)$$

$$E(x, V_L, V_R) \triangleq Y_x L_{yp} \left[\delta_{Lzf} \frac{\delta_{Lzf}}{\delta_{Lzo}} \left\{ \frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{Lzo}}{\delta_{Lzf}} \epsilon_r \epsilon_o \left(\frac{V_L}{\delta_{Lzf}}\right)^2} - 1 \right\} - \delta_{Rzf} \frac{\delta_{Rzf}}{\delta_{Rzo}} \left\{ \frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{Rzo}}{\delta_{Rzf}} \epsilon_r \epsilon_o \left(\frac{V_R}{\delta_{Rzf}}\right)^2} - 1 \right\} \right] \quad (31)$$

여기서 δ_{Ljf} 와 δ_{Rjf} 는 각각 왼쪽과 오른쪽 부분의 j 방향의 최종 길이이고 δ_{Ljo} 와 δ_{Rjo} 는 각각 왼쪽과 오른쪽 부분의 j 방향의 초기 길이이다. ($j = x, z$) g_k 와 g_e 는 각각 유효 복원계수(restoration coefficient), 정전기 계수(electrostatic coefficient)이다. 이 계수는 프레임 크기의 비율과 출력단의 두께와 같은 기하학적 요소에 의해서 영향을 받는다. 이상적인 경우에, g_k 와 g_e 는 1.0이지만 일반적인 경우 그들의 값은 1.0보다 크거나 작다. 이 논문에서는 실험적으로 그 값을 결정하였다. (30), (31)은 강성과 변위, 그리고 주어진 전압사이의 관계를 나타낸다.

V. 동적 모델 해석

제안된 구동기는 그림 4에서 보인 것처럼 간단한 lumped model로 표현 될 수 있으나, 그 수학적 모델은 여러 비선형 점성 계수(nonlinear viscous coefficients)로 인해 복잡한 해를 가진다. Lumped model를 기초로 한 제안된 구동기의 운동 역학은 다음처럼 유도될 수 있다.

$$F(t) = M\ddot{x} + B(\dot{x}) + g_k K(x) - g_c E(x, V_L, V_R) \quad (32)$$

여기서 $M\ddot{x}$ 는 관성력(inertial force)을, $B(\dot{x})$ 는 감쇠력(damping force)을 나타낸다. 그리고 $K(x)$ 는 복원력(restoration force)을 표현한다. 또한, $E(x, V_L, V_R)$ 는 정전기력을 의미한다. 그리고 $F(t)$ 는 외부력을 나타낸다. M 은 외부 부하와 구조부 및 고분자의 질량의 합이며, 고분자가 변형하는 동안 변화한다. 따라서 여기서는 고분자의 등가 질량만을 고려하였다.

탄성체의 등가 질량을 얻기 위해서 그림 4(b)에서 나타난 것처럼 n 개의 요소로 균등하게 나눈다. 이 모델에서 k 번째 요소의 변위 x_k 와 가속도 \ddot{x}_k 는 다음과 같이 유도된다.

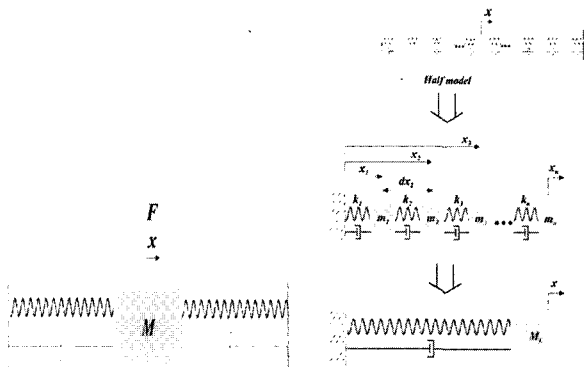
$$x_k = \sum_{i=1}^k dx_i \quad (33)$$

$$\ddot{x}_k = \sum_{i=1}^k \frac{d^2 dx_i}{dt^2} \quad (34)$$

$m_k = dm = (\rho A_L)/n$ 이고 $d\ddot{x} = \ddot{x}/n$ 이라고 가정하면, 관성력 항목은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_L \ddot{x} = dm [n\ddot{x}_1 + (n-1)\ddot{x}_2 + 2 \dots + n\ddot{x}_n] = \frac{n+1}{2n} \rho A_L \ddot{x} \quad (35)$$

여기서 ρ 는 탄성체 재료의 밀도이다. A_L 은 왼쪽 부분 고분자의 부피이다. 그리고 M_L 과 M_R 은 각각 ANTLA 반쪽 모델의 왼쪽과 오른쪽 부분의 등가 질량이다. (35)에서 분포된 질량 모델(distributed mass model)의 최대값은 다음과 같이 쓸 수 있다.



(a) Dynamic model of Proposed actuator (b) Lumped mass

그림 4. 동적 감쇄 모델.

Fig. 4. Lumped dynamic model.

$$M_L = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} \rho A_L = \frac{1}{2} \rho A_L \quad (36)$$

그러므로 탄성체의 등가 질량은 다음과 같다.

$$M = M_L + M_R = \frac{1}{2} \cdot \rho A = \frac{1}{2} \rho L_{x0} L_{y0} L_{z0} \quad (37)$$

여기서 A 는 고분자의 전체 부피이다. 그리고 L_{x0} , L_{y0} 그리고 L_{z0} 는 각각 탄성체의 초기 길이, 폭, 그리고 두께이다. 탄성체는 점탄성이기 때문에 그것은 비선형, 소성 변형 그리고 초기 쿨롬 감쇠(coulomb damping)등에 의한 에너지 소실로 독특한 특성을 가지고 있다. 따라서 모든 그런 영향을 고려한다는 것은 거의 불가능하다. 모든 영향은 등가 감쇠의 개념으로 모델 안에 포함하였다. 예를 들어 VHB 4905의 등가 점성 감쇠 $B(\dot{x})$ 는 (30), (31)로부터 얻은 $K(x)$ 와 $E(x, V_L, V_R)$ 으로 표현될 수 있다.

VI. 구동기 제어

이번 장에서는 제안된 구동기의 변위와 강성을 제어하는 방법을 기술하였다. 제안된 구동기의 복잡한 비선형 특성 때문에 제어를 설계한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 이런 문제에 대처하기 위해 우선 제안된 구동기의 선형 모델을 작동점 근처에서 유도하였으며 그로부터 피드백 선형 제어를 개발하였다.

1. 선형화 시스템 모델

(29), (30)으로부터 제안된 구동기의 강성은 다음과 같이 계산된다.

$$\kappa = \left(-\frac{\partial P_L}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial P_R}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) = A_1 - A_2 \left[\frac{V_R^2}{(A_3 - A_4 V_R^2)^2} + \frac{V_L^2}{(A_3 - A_4 V_L^2)^2} \right] \quad (38)$$

여기서 κ 는 구동기의 강성을 나타내고 F 는 구동기의 출력을 나타낸다. (38)은 매우 복잡한 비선형 방정식이기 때문에 올바른 해를 유도하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 Taylor's Series Expansion을 적용한 균형 상태에서의 준 평형 모델로부터 반쪽 모델 전체의 선형화된 힘 F 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \kappa x + \beta \quad (39)$$

$$= P \Big|_{x=0} + \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} \times x \quad (40)$$

여기서 κ , β 와 P 는 각각 강성, 균형점에서의 출력 힘, 그리고 전체 반쪽 모델의 최종 힘을 나타낸다. (39)에서 원래의 비선형 시스템은 균형점 $x = 0$ 에서 선형화되므로,

$$\kappa = \left(-\frac{\partial P_L}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial P_R}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) = A_1 - A_2 \left[\frac{V_R^2}{(A_3 - A_4 V_R^2)^2} + \frac{V_L^2}{(A_3 - A_4 V_L^2)^2} \right] \quad (41)$$

$$\beta = \left(-P_L \Big|_{x=0} + P_R \Big|_{x=0} \right) = A_3 \left[\frac{1}{A_3 - A_4 V_R^2} + \frac{1}{A_3 - A_4 V_L^2} \right] \quad (42)$$

여기서,

$$A_1 = g_k = \frac{2Y_x \delta_{zp} L_{yp}}{\delta_{xp}}$$

$$A_2 = g_c = \frac{3Y_x Y_z \delta_{zp}^4 L_{yp} \delta_{zo} \epsilon_o \epsilon_r}{\delta_{xo}}$$

$$A_3 = Y_z \delta_{zp}^3$$

$$A_4 = g_c = \frac{Y_x Y_z \delta_{zp}^4 L_{yp} \delta_{xp}}{\delta_{xo}}$$

$$V_L = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_3 - C_4}} \tag{50}$$

$$V_R = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_3 + C_4}} \tag{51}$$

2. 선형화 피드백

로봇에서의 일반적인 접근방식은 computed torque control 이라 불리는 피드백에 의한 선형화이다. 여기서 이 방법을 적용한 제어기를 제안하였다. 제어기는 운동 방정식에서 비선형 항을 제거하고, 제어 방정식에 추가하는 형식으로 구성되었다.

그림 5(a)는 제안된 제어기의 전체적인 구조를 보여주고 있다. (32), (39)에서 개루프 방정식(open loop equation)은 다음과 같다.

$$F = M\ddot{x} + B(\dot{x}) + \kappa x + \beta \tag{43}$$

모델에 기초한 부분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \Lambda F' + \Gamma \tag{44}$$

여기서,

$$\Lambda = M \tag{45}$$

$$\Gamma = B(\dot{x}) + \kappa x + \beta \tag{46}$$

그리고 강성 제어기의 입력 부분은 다음과 같다.

$$F' = \ddot{x} + K_v \dot{e} + K_p e \tag{47}$$

여기서 e 와 \dot{e} 는 각각 목표 변위와 측정된 변위 사이의 위치 에러와 속도 에러이다. 각각의 이득 K_v 와 K_p 값은 성능의 요구 특성에 따라 계산된다.

3. 강성 제어기

강성 제어기는 전체 제어기의 일부분이며, 개발된 모델을 기초로 설계 되었다. 그림 5(b)에 제어기의 알고리즘을 나타내었다.

그림 5(b)에서 입력 변수는 부하 F, 목표 강성 k_d , 그리고 변위 x이다. 제어기의 출력은 V_L 과 V_R 이다. 강성 k_d 가 목표 값이면, (39)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\kappa = k_d \tag{48}$$

$$\beta = F - k_d x \tag{49}$$

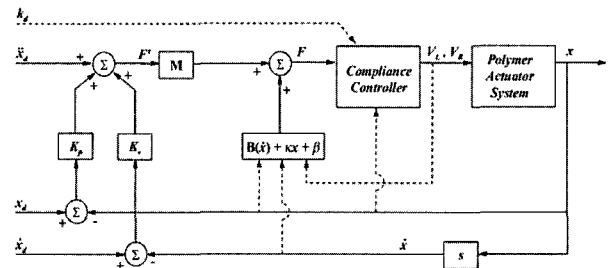
강성 입력에 대한 역 해법은 동시에 (48), (49)로부터 얻을 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

여기서,

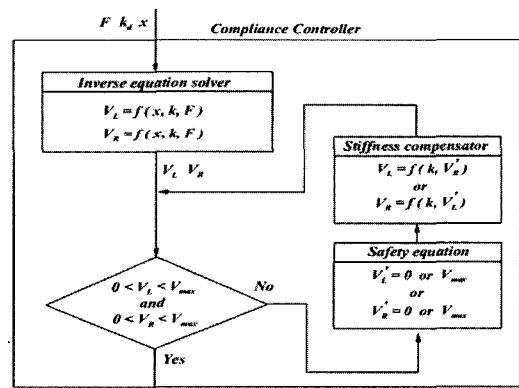
$$\begin{aligned} C_1 &= A_3 A_4^2 A_5^2 (k_d - A_1) + A_2 A_3^2 A_4 (F - k_d x)^2 - A_2 A_4 A_5^2 \\ C_2 &= \sqrt{-2 A_2 A_3 A_4 A_5^3 (k_d - A_1) - A_2^2 A_4^2 A_5^2 (F - k_d x)^2 + A_2^2 A_4^2 A_5^4} \\ C_3 &= A_4^3 A_5^2 (k_d - A_1) + A_2 A_3 A_4^2 (F - k_d x)^2 \\ C_4 &= A_2 A_4^2 A_5 (F - k_d x) \end{aligned} \tag{52}$$

그림 5(b)에서 보여준 것처럼, 얻어진 출력 값 V_L 과 V_R 은 구동 전압의 범위 안에서 결정되어야 한다. 만약 계산된 전압이 제한 전압 범위 안에 있지 않으면, 경계값으로 조정되어 설정되며 다른 쪽 전압은 강성 보상기(stiffness compensator)에 의해서 계산된다. 강성 보상기는 (41)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{\frac{-A_2 + A_3 G_R + \sqrt{A_2^2 - 2 A_2 G_R}}{A_4 G_R}} \\ V_R &= \sqrt{\frac{-A_2 + A_3 G_L + \sqrt{A_2^2 - 2 A_2 G_L}}{A_4 G_L}} \end{aligned} \tag{53}$$



(a) Controller structure



(b) Stiffness controller

그림 5. 위치 제어기 및 강성 제어기.
Fig. 5. Position and stiffness controller.

여기서,

$$G_L = 2A_4[k_d - A_1 + A_2 \frac{V_L'^2}{(A_3 - A_4V_L'^2)^2}]$$

$$G_R = 2A_4[k_d - A_1 + A_2 \frac{V_R'^2}{(A_3 - A_4V_R'^2)^2}]$$

그림 6은 변위, 강성, 전압, 출력의 위치 사이의 관계를 표시한 등고선 그래프이다. 그림 6에서 같이 위치는 목표된 강성 k_d 를 유지하면서 제어가 가능하다. 또한 강성은 요구된 위치를 유지하면서 V_L 과 V_R 을 결정하여 조정이 가능하다.

VII. 구동 실험

제안된 제어기의 효과를 시험하기 위해, 여러 가지 시험을 수행할 것이다. 첫 번째 실험은 준 평성 상태에서 유연성 제어기를 입증하기 위해 계획되었다. 그림 7(a)은 실험의 절차를 보여준다. 이 그림에서의 step 0은 테스트하기 전의 초기 단계를 의미한다.

구동기의 출력단은 평형상태에서 장애물과 접촉시켰다. 실험의 모든 과정에서 변위 x 를 유지하면서 장애물과의 접촉력을 6축 힘 센서를 이용하여 측정하였다. 그리고 강성은 목표 위치와 측정된 위치의 차이를 이용하여 계산되었다.

목표로한 강성은 (41)을 사용하여 계산하였다. step1에서 강성 k_0 은 0에서 5초 동안 15 N/m로 제어되었다. k_2 과 k_3 은 각각 step2와 step3 동안 22.5 N/m, 30 N/m로 제어되었다.

입력 전압은 목표로한 기계적 강성을 유지하기 위하여 (53)에서 계산되어 공급되었다. 이 실험을 통하여 목표로한 강성이 입력 전압에 의해서 제어된다는 것을 확인할 수 있었다. (41)에 따르면 강성은 변위 x 에 독립적이기 때문에, 오직 입력 전압의 조정으로 구동기의 유연성을 제어하는 것이 가능하다. 이 방법은 진정한 기계적 유연성 제어를 실현한 것이며 간단하면서 안정적이다. 두 번째 실험에서는 그림 8에서 나타낸 것처럼 자유공간상에서 구동기의 위치 제어를 실시하였다.

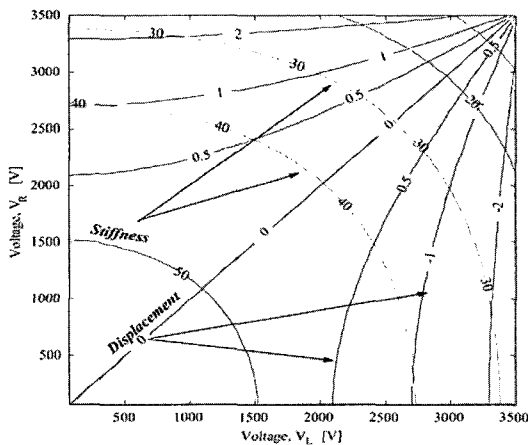


그림 6. 강성과 변위 사이의 관계.
Fig. 6. Relation between stiffness and displacement. (stiffness k[n/m], displacement x[mm])

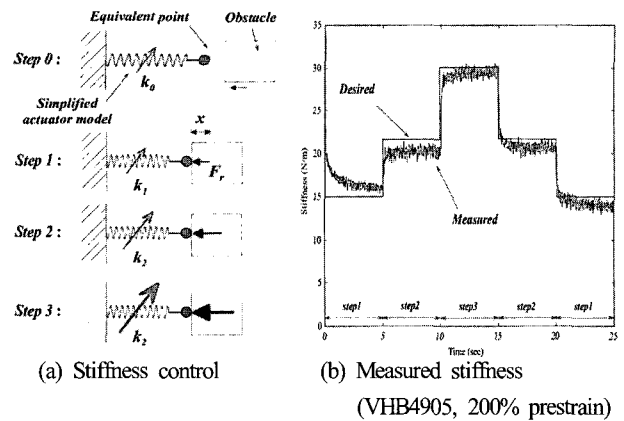


그림 7. 강성 제어 및 실험 결과.
Fig. 7. Stiffness control and experiment result.

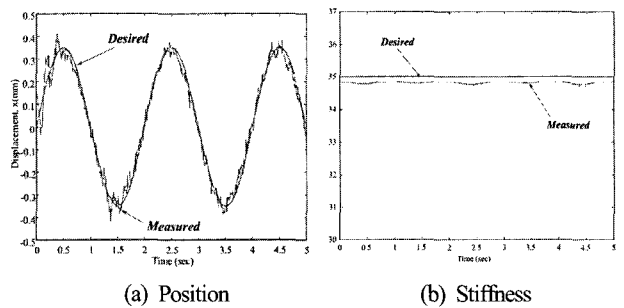
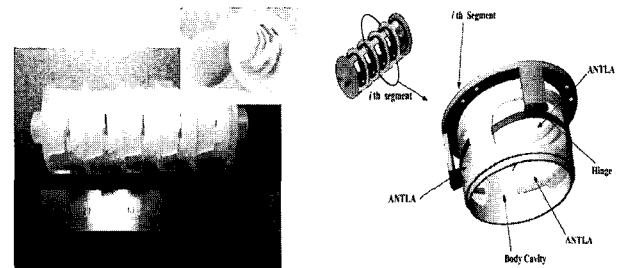


그림 8. 자유공간에서의 위치 제어 및 강성 제어.
Fig. 8. Position and stiffness control in free space.



(a) Annelida-like robot (b) Mechanism details of i -th module

그림 9. 환형동물 형태의 로봇 및 자세한 구조.
Fig. 9. Annelida-like robot and mechanism detail.

목표 위치는 그림 5(a)에 나타낸 알고리즘에 의해서 제어되었다. 그림 8은 강성과 위치를 제어하기 위해 입력된 전압을 나타내고 있다. 입력 전압은 목표로한 경로를 따라가는 동안에 목표로한 강성을 유지하도록 유연성 제어기에 의해 제어되었다. 비록 사용한 재료인 VHB4905가 많은 비선형 특성을 가지고 있지만 제안된 제어기는 자유공간에서 성공적으로 위치와 유연성 제어를 수행하였다.

VIII. 구동기 응용

그림 9는 이 논문에서 제안된 구동기를 사용한 환형동물 형태의 로봇이다. 이 로봇은 5개의 마디를 가진 다자유도

로봇이며 각각의 마디는 그림 9에서 보여 준 것과 같이 3개의 ANTLA 형태를 하고 있다. ANTLA가 양방향 구동과 독립적인 구동이 가능하기 때문에, 각각의 구동 모듈은 위아래(up-down), 요(yaw), 피치(pitch)와 같은 3자유도 운동을 만들 수 있다. 로봇은 구동 모듈 5개를 직렬로 연결하여 제작되었다. 따라서 외부 전압의 제어에 따라 각 마디별로 독립적인 운동이 가능하다.

이 로봇은 지금까지 개발된 다른 소형 로봇을 능가하는 여러 가지 장점을 가지고 있다. 전체 무게는 9.7g에 불과하지만 추력은 15.3gf 까지 낼 수 있다. 또한 로봇의 안쪽이 중공이라는 점이 주목할 만하다. 그곳에 복잡한 선(wire)과 장치 등을 장착할 수 있어 초소형 로봇의 공간 활용에 매우 유리하다. 추후 미비점의 보완을 통하여 매우 좁은 공간 등을 탐색할 수 있는 로봇 개발에 활용될 것으로 기대할 수 있다.

IX. 결론

유전 탄성체를 기초로 한 새로운 생체모방형 구동기를 제안하였고 구동 특성에 대한 정적, 동적 분석을 수행하였

다. 또한 단순화된 구동 모델을 통하여 변위와 강성의 제어 방법을 설명하였으며 개발된 위치 및 강성 제어기를 사용하여 기계적 유연성과 위치 제어가 동시에 이루어질 수 있음을 다양한 실험을 통하여 입증하였다.

여기서 소개된 환형동물 형태의 소형 로봇은 단지 한 예에 불과하며, 개발된 구동기는 산업 현장 및 로봇 시스템 등에서 다양하게 활용될 수 있다.

참고 문헌

[1] R. Perline, R. Kornbluh, and J. P. Joseph, "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrode as a means of actuation" *Sensors and Actuators A*, 64, pp. 77-85, 1998.

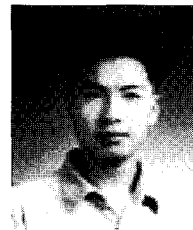
[2] R. Kornbluh, R. Pelrine, J. Eckerle, and J. Hoseph, "Electrostritive polymer articial muscle actuators," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2147-2154, 1998.

[3] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, vol. third edition, Addison-Wesley, 1994.



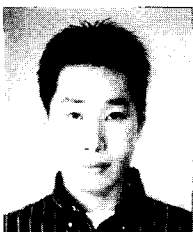
정 광 목

1991년 성균관대학교 기계설계학과(공학학사). 2002년 성균관대학교 대학원 기계설계학과(공학석사). 2002년~현재 성균관대학교 대학원 기계설계학과 박사과정 재학. Artificial muscles actuator milli/micro robots.



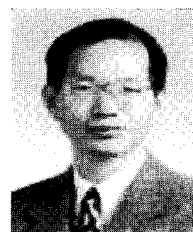
류 성 무

1997년 성균관대학교 기계공학과(공학학사). 1999년 성균관대학교 대학원 기계공학과(공학석사). 2002년 성균관대학교 대학원 기계공학과(공학박사). Artificial muscles actuator, inspection robot, microactuator and microrobot.



구 익 모

2004년 명지대학교 기계공학부(공학학사). 2004년~현재 성균관대학교 대학원 기계공학부 석사 과정 재학. Robot /Artificial muscles.



전 재 옥

1984년 서울대학교 전자공학과(공학학사). 1986년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1990년 Purdue University (공학박사). 1994년~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 교수. Robot/내장형시스템/공장 자동화.



구 자 춘

한양대학교 기계공학과(공학학사) University of Texas at Austin 기계공학(공학석사). University of Texas at Austin 기계공학 (공학박사). 2000년~현재 성균관대학교 기계공학부 교수. Modeling and simulation of physical systems,

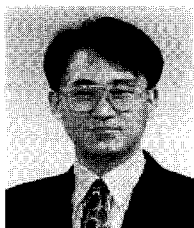


남 재 도

1984년 서울대학교 화학공학과(공학학사). 1996년 서울대학교 대학원 화학공학과(공학석사). 1991년 Washington University(공학박사). 1994년~현재 성균관대학교 고분자공학과 교수. Polymer nano-compo sites/Direct methanol fuel/전기활성 고분자를 이용한 Actuator/sensor.

Distri-buted processing.

전기활성 고분자를 이용한 Actuator/sensor.



이 영 관

Southern Mississippi Univ (박사). 현재 성균관대 화학공학과 부교수. Reichhold Chemical Inc. Senior research scientist. 전기특성 고분자 재료, 고성능 고분자 복합재료.



최 혁 렬

1984년 서울대학교 기계공학과(공학박사). 1986년 한국과학기술연구원 기계공학과(공학석사). 1994년 포항공과대학교(공학박사). 1995년~현재 성균관대학교 기계공학부 교수. Artificial muscles actuator/field-rescue robotics/dextrous mechanism/milli/micro robot.