

# ADE(Acrylic Dielectric Elastomer)를 이용한 MAV 날개 구동기의 설계 및 제어

## Design and Control of based on Acrylic Dielectric Elastomer MAV Wing Actuator

김 훈 모\*  
(Hunmo Kim)

**Abstract :** Existing flapping MAV which is driven by motors or the other materials, has various defects. For the settlement of the issue, flapping MAV wing actuator is developed by using ADE(Acrylic Dielectric Elastomer). In comparison with existing materials which drive flapping wing, ADE has advantages of light weight as well as sufficient force. In order that correct lift force occurs at this actuator, it must require to control to approach given reference. So it is controlled to approach given displacement by using fuzzy algorithm and is verified through simulation.

**Keywords :** flapping MAV, acrylic dielectric elastomer, fuzzy algorithm

### I. 서론

현재의 MAV(Micro Aerial Vehicle)의 비행형태는 고정익형, 회전익형, 플래핑형(flapping)의 3가지로 구분되어 개발되고 있다. 고정익의 경우 MAV가 충분한 양력을 발생시키기 위해서는 날개의 크기가 커지거나 MAV의 속도가 증가하여야 하므로 실내 임무 수행이 불가능하며, 수직이착륙이 불가능하다는 단점이 있고, 회전익의 경우 Hovering이 가능하나, 비행시 회전익에서 발생하는 난기류로 인해 기체의 안정성에 영향을 주며, 소음이 크다는 단점이 존재한다. 그러나 플래핑형의 경우 날개의 작아진 면적으로 인한 양력의 손실을 날개의 frequency로 만회가 가능하여 따라서 고정익 및 회전익에 비하여 MAV의 목적인 정찰 등의 수행에 더 적합한 구동 형태라 말할 수 있다.

이러한 장점을 가지고 있는 MAV 날개의 구동을 위하여 다양한 액츄에이터가 사용되고 있는데 Caltech의 Pomsinsirirak 등은 동력원으로 소형 배터리를 사용하여, 소형모터의 회전운동을 병진운동으로 변환시켜 플래핑을 하는 MAV(Omithopter)를 제작하였다[1].

Burkeley의 Fearing등은 압전소자를 사용하여 압전소자의 병진운동을 날개의 플래핑으로 이용하는 MFI (Micro Flight Insect)의 메커니즘을 개발하였다[2,3,4,5,6].

그러나 위와 같은 플래핑 형태의 MAV에서 날개를 구동시키는 구동기의 대부분은 플래핑을 하기 위해 구성된 메커니즘 자체가 비교적 복잡하여 무게를 증가시켜 상대적으로 양력에 손실을 주는 문제점이 존재하였으며 압전소자의 경우 짧은 시간에 고주파의 구동으로 인하여 피로 파괴가 발생한다. 이러한 플래핑 형태의 MAV의 날개의 구동기들의 문제점을 해결하기 위하여 고분자 물질인 ADE(Acrylic dielectric elastomer)를 이용하여 액츄에이터를 제작하였다.

ADE는 전압을 가하면 스스로 구동을 일으키는 물질로 그 자체로 액츄에이터의 역할을 하기 때문에 구동 메커니즘이 간단하며 자체의 중량이 가벼워 MAV의 중량을 줄일 수 있다. 또한 ADE는 인간의 근육보다 효율이 높으며 충분한 구동 주파수를 가진다. 공정 면에 있어서는 재료 자체가 flexible 하므로 원하는 형태로 액츄에이터를 제작할 수 있다. 이러한 ADE의 장점을 이용하여 ADE를 이용한 MAV의 메커니즘을 구성하고 날개의 구동을 제어하고자 한다.

### II. ADE의 구동 특성 및 메커니즘의 구성

#### 1. ADE 단품 액츄에이터의 구동 메커니즘

##### 1.1 ADE의 특성

ADE의 구동 메커니즘은 ADE가 유전체의 역할을 하여 전압을 인가하였을 경우 ADE는 전압이 인가되면 두께 방향으로 변형이 발생을 하게 되며 이 순간 ADE가 가지고 있는 탄성계수가 줄어들게 된다[7,8,9]. 따라서 ADE가 가지고 있는 장력이 작아지게 되고, 이 관계로 인하여 ADE가 변하게 된다.

Fig 1과 같은 구동력의 발생을 위해서는 우선 유전체의 양단면에 전극을 가하고 전극을 가한 부분에 전압을 인가한다. 양 단면에 전압을 인가하면 a, b는

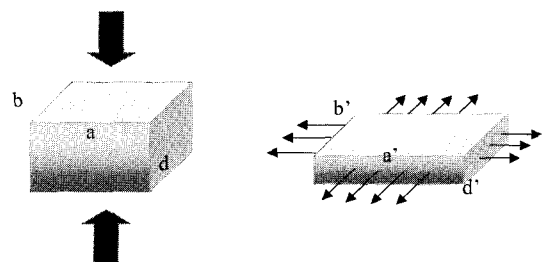


그림 1. ADE의 액츄에이션.

Fig. 1. Actuation of Acrylic Dielectric Elastomer.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 29., 채택확정 : 2003. 8. 31.

김훈모 : 성균관대학교 기계공학부(kimhm@me.skku.ac.kr)

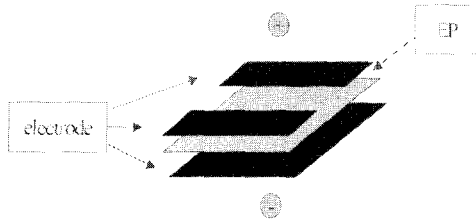


그림 2. 단일 액추에이터 형상.  
Fig. 2. Feature of Unit actuator.

$a'$ ,  $b'$  과 같이 너비 방향으로 길이가 늘어나는 변형이 발생하고  $d$ 는  $d'$  과 같이 두께방향으로 길이가 줄어들게 된다.

1.2 단품 ADE의 Modeling

ADE에 전압을 인가할 경우 Fig 1 과 같이 등방성과 비압축성의 특성을 가지고 변형이 발생하게 된다. Fig. 1과 같이 구속조건이 없는 경우 넓이 방향으로 변형이 발생하게 되는데 초기의 길이를 각각  $a$ ,  $b$ ,  $d$  변형한 후의 길이를  $a'$ ,  $b'$ ,  $d'$  라 하면 비압축성에 의하여

$$abd = a'b'd' = a'b'd(1 - \frac{d-d'}{d}) = a'b'd(1 - \delta_T) \tag{1}$$

$\delta_T$  : 두께방향의 변형율과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 또한 등방성에 의하여 넓이 방향의 변형률이 같으므로

$$\begin{aligned} a' &= a(1 + \delta_{ab}) \\ b' &= b(1 + \delta_{ab}) \end{aligned} \tag{2}$$

위의 (2)를 (1)에 대입시키면 아래와 같은 (3)과 같은 식이 되며

$$abd = a(1 + \delta_{ab})b(1 + \delta_{ab})d(1 - \delta_T) \tag{3}$$

(3)은 아래의 넓이 방향에 대한 변형율과 두께방향의 변형율에 관한 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\delta_{ab} = \sqrt{\frac{1}{1 - \delta_T}} - 1 \tag{4}$$

위의 (4)를 이용하여 탄성계수와 압력에 대한 식을 유도할 있다.

$$(E(t) - \sqrt{E(t)(E(t) - P(t))}) = \tau(t) \tag{5}$$

$\tau(t)$ 는 장력이며  $E(t)$ 는 시간에 대한 탄성계수,  $P(t)$ 는 전압이 인가되었을 시의 압력이다. 또한 압력과 전압과의 관계는 Maxwell stress 개념을 사용[1]하여 (6)으로 나타내었다.

$$P(t) = \epsilon \epsilon_0 (V(t)/d)^2 \tag{6}$$

여기서,  $\epsilon$ 은 ADE가 가지는 유전율이고,  $\epsilon_0$ 는 대기 중 유전율,  $d$ 는 ADE의 두께,  $V(t)$ 는 ADE에 공급되는 전압이 된다.

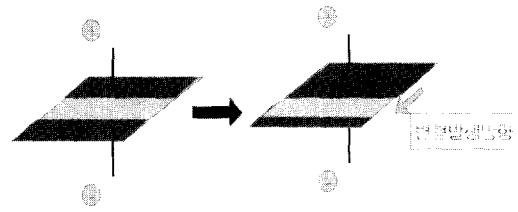
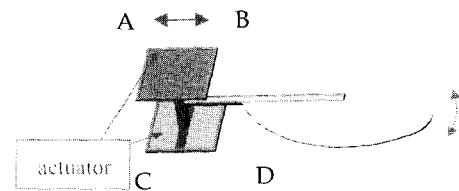


그림 3. 입력 전압이 가해졌을 때의 변형.  
Fig. 3. The occurrence of deformation when apply to input voltage to upper channel.



- ⊙ when apply to voltage for A and D: Large down actuation
- ⊙ when apply to voltage for B and C: Large upper actuation
- ⊙ when apply to voltage for A or D: Small down actuation
- ⊙ when apply to voltage for B or C: Small upper actuation

그림 4. 단면 액추에이터를 이용한 날개 형상.  
Fig. 4. MAV wing mechanism by using unit actuator(unipolar).

2. ADE 단품 액추에이터를 응용한 MAV 날개 메커니즘의 구성  
2.1 ADE를 이용한 액추에이터의 구성

Fig. 1과 같은 ADE의 4면으로 발생하는 변형의 구속에 따라 다양한 액추에이션이 가능하며 이를 이용하여 Fig. 2 과 같은 단품 액추에이터를 제작하였다. Fig. 2에서 ADE의 상단면은 상채널과 하채널 2개의 채널로 나누어 전극을 가 하였으며 상단면은 양으로 하단면은 접지로 ADE전면에 전극을 가하였다. ADE의 4면은 경계면이 구속되어 있으므로 Fig. 1처럼 4면 전방향으로 변형이 발생되지 않는다. 그러나 ADE의 전 경계면이 구속되어 있지만 실제로 변형이 발생하는 부분은 전극이 가해진 부분이므로 즉 상채널과 하채널에 전극이 가해진 ADE는 바깥면만이 구속되어 있고 안쪽면은 구속이 되어있지 않게 된다. 즉 경계면으로 인하여 바깥면은 변형이 구속되고 따라서 Fig. 3과 같이 안쪽방향으로의 구동이 발생한다. 상채널과 하채널에 반복적인 주파수로 전압을 인가하면 이 액추에이터는 상하의 주기적인 병진운동을 발생시킨다. 이를 응용하여 MAV 날개 메커니즘을 구성하였다.

2.2 단품 액추에이터를 응용한 MAV 날개 메커니즘의 원리

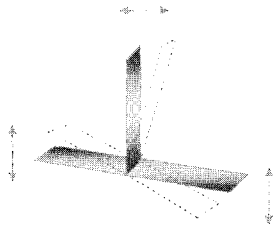


그림 5. 날개 프레임의 액추에이션.  
Fig. 5. Actuation mode of MAV wing frame.

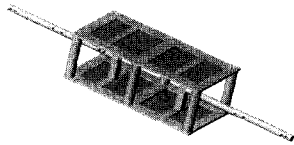


그림 6. 날개 메커니즘.  
Fig. 6. MAV wing mechanism(bipolar).

Fig. 2과 같은 단품 액추에이터를 조합하여 날개의 메커니즘을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 메커니즘에서 바깥면은 접지로 안쪽면은 양으로 전원을 인가하게 된다. Fig. 4와 같이 프레임과 연결된 상하의 액추에이터는 서로 다른 채널의 전극 즉 위쪽의 액추에이터가 상채널에 전압이 인가되면 아래쪽의 액추에이터에는 하채널의 전압이 인가되어 프레임을 Fig. 5와 같은 형태로 구동 시킨다. 액추에이터 날개를 지지하고 있는 프레임은 액추에이터에 연결되어 있는 프레임과 직각으로 부착되어 액추에이터의 변형 발생시 날개를 상하로 구동시키도록 한다. 유니폴라(Unipolar)형 액추에이터의 구동은 상단과 하단의 단품 액추에이터의 좌우 방향의 구동에 따라 날개를 지지하고 있는 프레임이 상하로 움직이면서 양력이 발생하게 된다.

유니폴라(Unipolar)형의 메커니즘을 좌우 반대방향으로 조합하게 되어 서로 대칭되는 전압을 인가하게 되면 플래핑과 같은 형태의 구동방식을 얻을 수 있다. 바이폴라(Bipolar)형의 메커니즘은 Fig 6과 같이 전압이 인가됨으로서 서로 대칭되는 액추에이션을 얻을 수 있다.

2.3 날개의 메커니즘의 모델링

1.2 절의 단품 ADE의 모델링 식을 기초로 하여 압력과 변형율의 관계에 의하여 변위  $w(t)$ 를 구하면 아래와 같다.

$$u(t) = \frac{\tau(t)}{E(t)} L \tag{7}$$

여기서  $\tau(t)$ 는 전압을 인가하였을 시의 발생하는 장력이다.  $\tau(t)$ 는 (5)와 같으므로 (7)은 아래와 같이 변환시킬 수 있다.

$$w(t) = \frac{(E(t) - \sqrt{E(t)(E(t) - P(t))})l}{E(t)} L \tag{8}$$

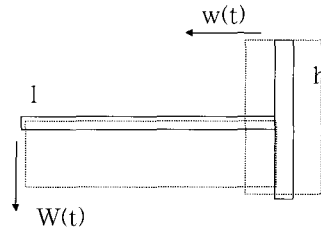


그림 7. 날개 프레임의 해석.  
Fig. 7. Geometrical analysis of MAV wing frame.

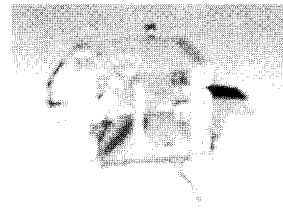
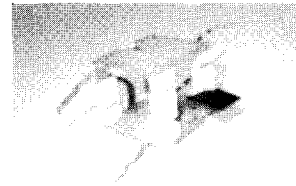


그림 8. 유니폴라 메커니즘.  
Fig. 8. MAV mechanism (unipolar).

$P(t)$ 는 (4)와 같다.

MAV 날개 메커니즘에서  $w(t)$ 는 단품 구동기의 각각의 전극을 인가한 부분의 변위 즉 Fig. 4의 각 A,B,C,D의 변위를 의미한다. 따라서 실제 구동되는 날개의 변위는 기하학적으로 고려해 볼 때 아래 그림 7과 같이 날개의 프레임이 구성되어 있으므로  $W(t)$ 는 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W(t) = \frac{(E(t) - \sqrt{E(t)(E(t) - P(t))})l}{E(t)h} L \tag{9}$$

III. 실험 및 제어 결과

1. Modeling과 실제 output의 비교

2절에서의 모델링 식과 실제의 출력을 비교하기 위하여 2절에서 설계한 액추에이터를 실제로 제작하고 일정 전압을 인가하였다.

아래와 같이 프로그래밍 되어 일정한 주파수를 가지는 입력 전압이 DA 컨버터를 통하여 제어회로를 거치게 되면 고전압으로 변환되어 Fig. 8과 9와 같은 액추에이터에 인가된다. 액추에이터의 경계는 PVC 판으로 무게를 줄이기 위하여 가벼운 재질의 절연재료를 사용하였으며 구동되는 ADE는 3M사의 VHB를 사용하였다. 전극으로는 ADE의 변형

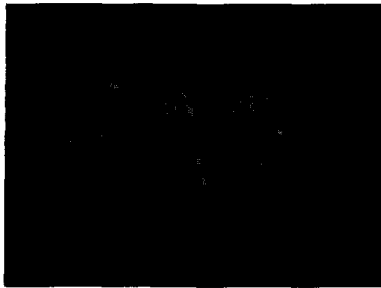


그림 9. 바이폴라 메커니즘.  
Fig. 9. MAV mechanism (bipolar).

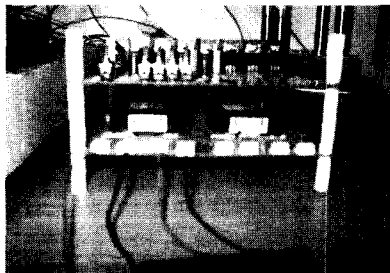


그림 10. 제어 회로.  
Fig. 10. Control circuit (15×12).

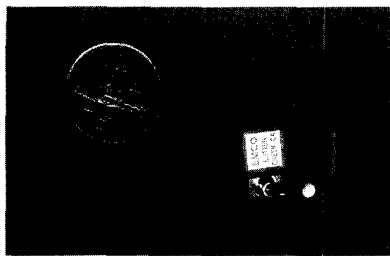


그림 11. 제어 회로.  
Fig. 11. Control circuit (3 diameter).

을 방해하지 않는 silver conductive grease를 사용하였다. 이렇게 구성된 액츄에이터에 인가되는 전압의 변화에 따라 날개가 플래핑을 하는데 이를 레이저 변위 센서를 통하여 센싱하여 이 값이 processor에 저장된다. 차후 MAV에 탑재될 제어기의 경량화를 위해 제어부를 15cm×12cm(Fig. 10)에서 3cm(Fig. 3, 5)의 원형으로 구성하여 소형화를 시켰다.

실험장치에 전압을 인가하였을 때의 결과는 Figs. 12, 13, 14과 같다. Figs. 12, 13, 14는 각각 0.75Hz, 1.2Hz, 3.2Hz의 2kV의 전압을 가했을 때의 발생 변위의 변화이다. 0.75Hz의 응답속도로 변위를 인가하였을 때 최대 변위는 약 ±4.0mm이며, 1.2Hz의 경우 ±2.8mm, 3.2Hz일 때 ±1.6mm로 나타난다. 같은 2kV의 전압을 가하였음에도 변위가 주파수가 증가할수록 낮아지는 이유는 재료가 가지는 캐패시터(capacitor)의 성질로 인하여 고전압일 경우 전하의 방출시간의 지연 때문이다. 이에 따라서 주파수가 증가할 경우 전압이 완벽하게 방출되기 이전에 다시 전하가 인가되어 변위가 줄어들게 된다.

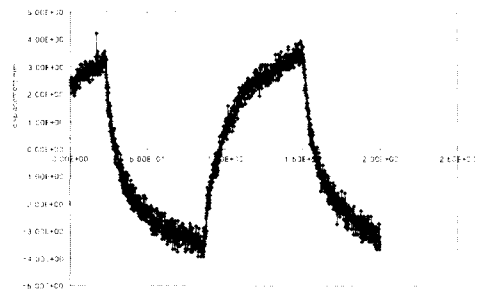


그림 12. 0.75Hz에서의 변위.  
Fig. 12. Displacement at 0.75Hz.

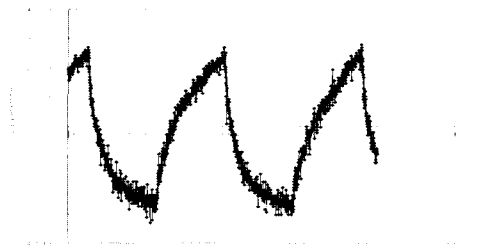


그림 13. 1.2Hz에서의 변위.  
Fig. 13. Displacement at 1.2Hz.

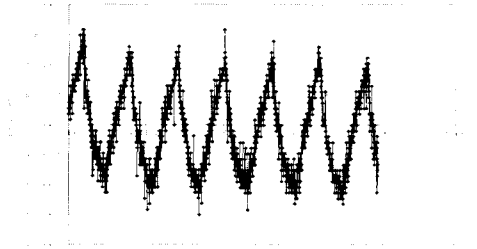


그림 14. 3.2Hz에서의 변위.  
Fig. 14. Displacement at 3.2Hz.

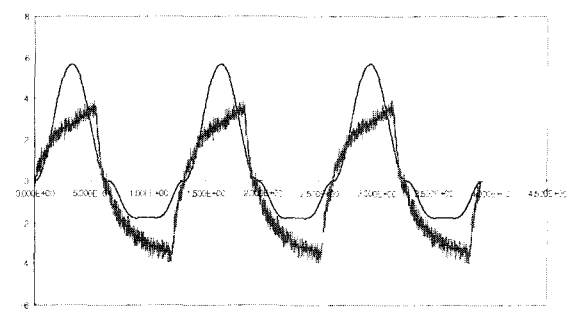


그림 15. 실제 데이터와 모델링 데이터 출력 비교.  
Fig. 15. Comparison of real and modeling output.

모델링식에 2kV, 0.75Hz의 전압을 인가하면 Fig. 15와 같은 차이가 발생하는데 이는 실제의 탄성계수 E(t) 값의 변화값과 모델링을 통하여 변화를 추정한 탄성계수 E(t) 값의 차이가 주된 원인이다. 그러나 Fig. 3, 9에서 확인할 수 있듯이 변위에서 약간의 차이가 있을 뿐 실제의 값과 유사하므로 모델링식을 플랜트로 설정하고 제어기를 구성하였다.

표 1. 양자화 변위.

Table 1. Quantization of displacement.

Quantization e, er	Range
10	$W \geq 0.3$
9	$0.27 \leq W < 0.3$
8	$0.24 \leq W < 0.27$
7	$0.21 \leq W < 0.24$
6	$0.18 \leq W < 0.21$
5	$0.15 \leq W < 0.18$
4	$0.12 \leq W < 0.15$
3	$0.09 \leq W < 0.12$
2	$0.06 \leq W < 0.09$
1	$0.03 \leq W < 0.06$
0	$0 \leq W < 0.03$

표 2. 에러와 에러 변화의 룩업 테이블.

Table 2. Lookup Table of error and error change.

e	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.0	1.0	1.0	4.3	4.725	5.0	5.275	5.7	7.0	9.235	9.35
1	1.0	1.0	1.0	4.3	4.78	5.0	5.216	5.7	7.0	9.235	9.235
2	1.0	2.0	4.5	4.5	5.0	5.0	5.0	5.5	7.0	9.0	9.0
3	3.0	2.0	4.5	4.622	5.44	6.025	6.51	6.909	7.0	9.235	9.235
4	3.0	2.0	4.5	4.622	5.48	5.0	5.977	6.333	7.0	9.235	9.235
5	4.0	4.0	4.5	4.622	5.57	5.05	6.627	7.106	7.0	9.235	9.235
6	4.0	6.0	4.5	5.0	6.59	5.0	7.586	7.25	7.0	9.235	9.235
7	4.0	6.0	4.5	5.3	7.62	6.91	6.91	7.690	9.0	9.235	9.235
8	4.5	4.5	4.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.0	9.0	9.0	9.0
9	5.0	5.0	4.5	6.0	6.1	9.35	9.35	9.235	9.0	9.235	9.235
10	5.0	5.0	4.5	6.0	6.74	9.35	9.35	9.235	9.0	9.235	9.235

Fig. 15 그래프에서 사인(sine) 파형과 유사한 형태의 파형이 모델링을 통하여 얻은 값이며 나머지 파형은 실제 실험을 통해 얻은 값이다.

2. Fuzzy알고리즘을 이용한 MAV wing의 제어

ADE는 내부의 재료적인 특성이 아직 완벽하게 파악되지 않았으며 내부적으로 여러 비선형적인 특성을 가지고 있다. 이에 따라서 퍼지 알고리즘을 이용하여 제어를 실행하였다.

MAV 날개의 제어는 스트로크각(stroke angle) 즉 변위  $W(t)$ 를 퍼지 알고리즘을 이용하여 실행하였다. 기준값은 0.75Hz의  $\pm 4mm$ 의 크기를 가지는 사인파형으로 지정하고 (9)와 같은 모델링식을 플레트로 지정하여 출력이 사인값을 추정하도록 하였다. 퍼지 제어를 위하여 에러와 에러율을 Table 1과 같이 양자화 하였으며 Table 2는 구성된 rulebase를 통하여 작성된 look up table이다. 추론 방식은 Mandani의 Min-Max법을 사용하였으며 비퍼지화는 무게중심법을 이용하였다.

위 look up table을 이용하여 나온 결과는 Fig. 3, 10과 같다. 초기에 입력이 0로 주어진 상태에서 reference 값과 비교하여 입력을 보정하여 제어 한 결과는 Fig. 16 그래프에서

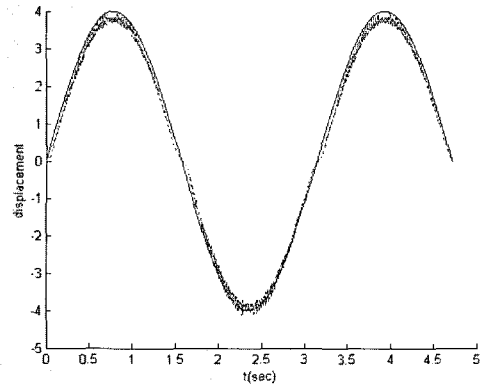


그림 16. 제어 결과.

Fig. 16. Control result.

도 알수 있듯이 주어진 값을 거의 완벽하게 추정함을 알 수 있다. 그래프에서 x축은 시간을 나타내며 y축은 변위를 나타내며 기준값은 실선으로 제어되는 결과는 점선으로 나타내었다.

IV. 결론 및 고찰

본 논문에서는 ADE를 이용하여 MAV 날개 액추에이터를 구성하였으며 구성된 MAV 날개 액추에이터의 변위를 제어하기 위하여 퍼지 알고리즘을 이용하였다. 제어 성능을 시뮬레이션을 통하여 판단한 결과 Fig. 16과 같이 주어진 기준값을 잘 추정한다는 것을 확인 할 수 있었다.

그러나 3절에서도 언급한 바와 같이 탄성계수의 변화의 차이 및 실제 시스템을 구동 시 회로 등에 의한 환경적인 요인에 따른 오차가 발생하므로 본 논문에서 구성된 algorithm을 실제 시스템에 적용하여 실험을 수행할 것이며 이를 보정하여 실제 MAV 날개의 제어를 수행할 것이다.

또한 MAV를 구동하는 고분자의 재질의 개선을 통하여 MAV의 성능을 향상시킬 수 있다. SDE(Silicone Dielectric Elastomer)은 최대 주파수가 170Hz까지 나올 수 있기 때문에 차후 연구에 SDE 계열의 재료를 사용하면 주파수를 향상시킬 수 있으며, 또한 다층구조를 통하여 전압을 강하시키고, 나노복합재료를 이용하여 재료의 출력을 향상시킬 수 있으므로 차후 이를 통하여 성능이 향상된 MAV를 구성할 것이다.

참고문헌

[1] T. N. Pornsin-sirirak, S. W. Lee, H. Nassef, J. Grasmeyer, Y. C. Tai, C. M. Ho, M. Keennon "MEMS Wing Technology For a Battery-Powered Ornithopter" *IEEE 2000* pp. 799-804.

[2] J. Yan, R. J. Wood, S. Avadhanula, M. Sitti, R.S. Fearing "Towards flapping wing control for a micromechanical flying insect", *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3901-3908, Seoul Korea, May 21-26, 2001.

[3] M. Sitti, D. Campolo, J. Yan, R.S. Fearing, T. Su, D. Taylor, and T. Sands, "Development of PZT and PZN-PT

- based unimorph actuators for micromechanical flapping mechanisms" *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3839-3846, Seoul Korea, May 21-26, 2001.
- [4] Schenato, X. Deng, and S. Sastry, "Flight control system for a micromechanical flying insect: architecture and implementation," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Seoul Korea, May 21-26, 2001.
- [5] R. S. Fearing, K. H. Chiang, M. Dickinson, D. L. Pick, M. Sitti, and J. Yan, "Wing transmission for a micromechanical flying insect," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, April, 2000.
- [6] W. C. Wu, R. J. Wood, R. S. Fearing, "Halteres for the micromechanical flying insect" *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC May 11-15, 2002.
- [7] M. Zhenyl, 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.
- [8] K. I. Hwang, H. M. Kim, "General modeling of electrostrictive polymer using finite element method", *1<sup>st</sup> Intelligent Microsystem Symposium*, 2001.
- [9] H. M. Kim, K. I. Hwang' "Actuator model of electrostrictive polymer(ADEs) for micro actuators", *SPIE 2001*, 2001.



#### 김 훈 모

1984년 성균관대 기계공학과 졸업.  
Univ. of Michigan 항공우주공학과 석사(1990), Univ. of Alabama 기계 공학과 박사(1993). 1995년~현재 성균관대학교 기계공학과 교수.