

## 論文

## 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기의 개발 및 응용

백일현\*, 구남서\*\*, 정용채\*\*\*, 조재환\*\*\*

## Development and Application of Conducting Shape Memory Polyurethane Actuators

Il Hyun Paik\*, Nam Seo Goo\*\*, Yong Chae Jung\*\*\* and Jae Hwan Cho\*\*\*

## ABSTRACT

This paper presents the development and application of a conducting shape memory polyurethane (CSMPU) actuator. While conventional shape memory polyurethanes were activated by external heat source, conducting shape memory polyurethanes introduced in 2004 are activated by electric power. Conducting shape memory polyurethane actuators were manufactured by adding carbon nano tube to conventional shape memory polyurethane. The main problem of the CSMPU developed in 2004 was bad dispersion of carbon nano tubes. In this paper, we tried to find how to solve the dispersion problem, and with a lot of elaborative works, conducting shape memory polyurethane actuators which had better electrical characteristics were developed. Then the actuation performance of the conducting shape memory polyurethane actuators was also measured and assessed. Finally, the possibility of applications were examined through the installation to Micro Air Vehicle.

## 초 록

본 논문에서는 전도성 형상기억폴리우레탄 (CSMPU)의 개발과 응용 방법이 연구되었다. 일반적인 형상기억폴리우레탄이 외부 열원에 의해 작동되어 온 반면에, 2004년에 소개된 전도성 형상기억폴리우레탄은 전력에 의해 작동되었다. 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기는 일반적인 형상기억폴리우레탄에 카본 나노 튜브를 첨가함으로써 제작되었다. 2004년 연구에서 제작된 전도성 형상기억폴리우레탄이 지닌 핵심 문제점은 카본 나노 튜브의 낮은 분산도였다. 이 논문에서는 분산 문제 해결을 시도하였으며, 일련의 정교한 작업을 통해 향상된 전기적 특성을 지닌 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기를 개발하였다. 그리고 개발된 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기의 작동 성능을 측정 및 평가하였으며, 초소형비행체 조종면의 제어 실험을 통하여 응용 가능성을 검토하였다.

**Key Words** : Conducting shape memory polyurethane(전도성 형상기억폴리우레탄), carbon nano tube(카본 나노 튜브), Actuator(작동기), MAV(초소형비행체)

† 2005년 8월 10일 접수 ~ 2005년 11월 29일 심사완료

\* 정회원, 건국대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 정회원, 건국대학교 기계항공공학부  
연락처, E-mail : nsgoo@konkuk.ac.kr

서울시 광진구 화양동 1번지

\*\*\* 건국대학교 섬유공학과

## I. 서 론

형상기억폴리머는 스마트 작동기로서의 개발 가능성이 매우 높은 재료이다[1]. 뿐만 아니라 기계, 항공 분야 외에 의학 분야와 같은 타 분야에

서도 그 응용 가능성이 매우 높다[2,3]. 이러한 가능성을 바탕으로 저자들은 이전 연구에서 형상기억폴리머 중의 한가지인 형상기억폴리우레탄에 카본 나노 튜브를 혼합함으로써, 전기가 흐를 수 있는 전도성 형상기억폴리우레탄을 개발하였고 각종 특성 검출 실험을 통하여 지능재료로서의 새로운 가능성을 제시하였다[4-6]. 일반적인 형상기억폴리머가 외부 열원에 의해 온도 조절이 되는 것과는 달리, 전도성 형상기억폴리우레탄은 전력을 공급함으로써 자체 발열을 유도한다. 외부 열원의 공급은 에너지 전달의 효율성을 위하여 부가적인 장비를 요구하며, 에너지 형태의 특성상 정량적 공급과 차단이 어렵다. 반면에 전도성 형상기억폴리우레탄은 전기에너지를 직접 공급함으로써 에너지 효율을 보다 높일 수 있고, 전기 제어를 통해 보다 쉽게 작동을 제어할 수 있다[7,8].

그러나 이전의 연구 과정에서 지속적으로 발생 하였던 핵심적인 문제점은 전도성 형상기억폴리우레탄 내부에 분포한 카본 나노 튜브의 분산도가 낮아 전기적 특성이 우수하지 못했다는 점이다. 카본 나노 튜브의 분산도가 낮았기 때문에 시편의 전기저항이 높아 실용적 작동기 개발에 가장 큰 어려움으로 작용하였다. 뿐만 아니라 시편의 전기저항이 부위별로 고르지 못하고 측정 지점마다 다르게 측정되는 현상이 발생하여 각종 실험을 진행하는 데에 큰 방해요인으로 작용하였다. 이러한 문제로 인하여 시편의 작동 시연이 불가능하였으며, 작동기 개발에 어려움을 겪었다.

본 연구에서는 전도성 형상기억폴리우레탄 내부의 카본 나노 튜브가 높은 분산도를 지닐 수 있도록 하는 방법을 연구하였다. 그리고 분산도가 향상된 전도성 형상기억폴리우레탄 시편을 제작하고 기본 물성 측정하였다. 뿐만 아니라 다양한 전기적 특성 검출 실험과 작동 성능 측정 실험을 수행하였다. 전기적 특성을 검출하기 위해 시편의 온도증가에 따른 저항 변화 측정 외 두 가지 실험을 수행하였고, 작동 성능 측정을 위하여 작동력과 작동변위와의 상관관계 측정 실험, 초기신장 횟수에 따른 초기요구신장력 변화 측정 실험 그리고 시간에 따른 응답성 실험을 수행하였다. 마지막으로, 초소형 비행체의 조종면 제어 실험을 통하여 전도성 형상기억폴리우레탄의 응용 가능성을 검토하였다.

## II. 본 론

### 2.1 전도성 형상기억폴리우레탄의 제조

그림 1은 전도성 형상기억폴리우레탄의 제조 과정을 보여주는 개략도이다. poly( $\epsilon$ -caprolactone)

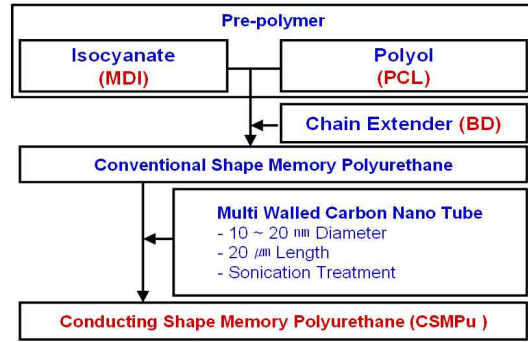


그림 1. 전도성 형상기억폴리우레탄의 제조 과정

diol (PCL), 4,4'-methylene bis (phenylisocyanate) (MDI)과 1,4-butanediol (BD)의 양을 조절하면서 전-중합반응(pre-polymerization) 방법을 통해 형상기억폴리우레탄이 합성된다. PCL은 소프트 세그먼트로 작용하며 MDI와 BD는 하드세그먼트로 작용하게 된다. 먼저, MDI (Junsei Chemical Co.)와 PCL (Solvay Co., MW=3,000 g/mol)을 교반기가 장착된 4구 원통형 반응조(four-neck cylindrical vessel) 내에서 80°C로 90분 동안 반응시킴으로써 프리폴리머가 만들어진다. 그리고 사슬연장제(chain extender)로써 BD (Duksan Chemical Co.)를 110°C에서 150분 동안 프리폴리머에 조금씩 첨가하면서 반응시킨다. 마지막으로 폴리우레탄을 물로 세척하고 건조기에서 건조시킨다[9].

최적의 혼합비율로써, 4 : 1 : 3 (MDI / PCL / BD) 몰비(molar ratio)를 사용하였으며 30wt% 하드세그먼트를 지닌 시편을 제작하였다. 전도성 형상기억폴리우레탄은 이 과정에서 폴리우레탄에 다중벽 카본 나노 튜브(Multi-Walled Carbon Nano Tube; MWCNT)를 첨가함으로써 얻어진다. 사용된 MWCNT의 직경은 10-20nm이며 일진화학에서 구매하였으며 분산도 향상을 위하여 표면개질 및 고주파분해(high-energy sonication) 처리를 시도하였다. 이렇게 해서 제작된 전도성 형상기억폴리우레탄은 마지막으로 용융압착기(melting press machine)에 의해 압착됨으로써 박판 형태의 시편으로 완성된다.

형상기억폴리우레탄은 물리적, 화학적 성질이 서로 다른 두 종류의 세그먼트로 이루어진 블록공중합체이다. 이들 두 세그먼트 사이의 열역학적 비상용성으로 인하여 서로 상 분리된 하드 세그먼트와 소프트 세그먼트를 형성한다.

따라서 하드 세그먼트와 소프트 세그먼트의 구조, 함량, 합성 조건 및 기타 가공 조건에 따른 상분리 거동은 폴리우레탄의 물성을 결정짓는다.

하드 세그먼트는 상온보다 높은 유리 전이온도( $T_g$ )를 가져 유리 상태의 성질을 나타내며 세그먼트간의 결정 형성이나 수소결합, 반데르발스(van der Waals) 힘 등의 결합으로 인하여 물리적인 가교점을 형성한다. 반면에, 소프트 세그먼트는 상온보다 낮은 전이온도를 가져 고무 성질을 나타내며 연신율, 탄성률 등을 부여하는 역할을 한다. 따라서 기본적으로 하드세그먼트의 양을 늘리면 전이온도가 올라가고 소프트 세그먼트의 양을 늘리면 전이온도가 내려간다.

그러나 작동기로서 요구되는 작동 성능과 시편의 기계적 성질을 만족시키면서 전이온도를 조절할 수 있는 범위는 크지 않으며, 본 연구에서 사용하는 시편의 전이온도는  $30^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  정도로 설정하였다. 이는 작동기의 동작 온도가 상온일 때, 전기를 가하여 쉽게 가열 또는 냉각함으로써 작동이 용이한 온도이다.

본 연구에서는 최적의 시편을 만들어내기 위하여 많은 다양한 경우를 시도하였으며, MWCNT의 함량 무게비를 3% ~ 10%의 범위 내에서 변화시켰다. 그리고 하드세그먼트는 25%~40%의 범위 내에서 변화시켰으며 MWCNT의 분산도를 증가시키기 위하여 표면 개질 및 고주파 분해 처리의 유무에 따른 차이점을 관찰하였다. 그 결과, HS 30%, PCL MW 3000 g/mol, MWCNT 7wt% (sonicated 및 raw CNT)의 조건을 갖는 시편이 최적의 성능을 갖는다는 것을 경험적으로 확인할 수 있었으며, 이것으로 각종 실험을 수행하였다.

표 1은 최적의 시편으로 측정된 전도성 형상 기억폴리우레탄의 기초 물성을 보여준다. ATR(attenuated total reflectance)이 장착된 Jasco FT-IR 300E를 이용하여 FT-IR 분광(spectroscopic) 측정을 하였고, 이 측정으로부터 표면 개질된 나노 튜브 안에서 카르복시산(carboxylic acid) 그룹(peaks at  $1729\text{ cm}^{-1}$ )이 존재한다는 것을 확증할 수 있었다. 이러한 현상은 개질되지 않은 나노 튜브에서는 나타나지 않았다. 또한, TA 인스트루먼트 사의 2010 DSC (differential scanning calorimetry, Du Pont)를 이용하여 전이온도를 알기내기 위한 시차주사열량 측정을 수행하였다. 샘플들은 수소 대기 내에서 상온에서 용융점까지  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 비율로 가열되었다. 비접촉 방식으로 온도를 측정하기 위하여 디지털 멀티미터(digital multi-meters) (M-4660, DM-7241, METEX)가 사용되었다. 이 시편은 전이온도가 MWCNT 분산도 개선 전의 연구에서 측정된  $38.7^{\circ}\text{C}$  보다 높은  $40.8^{\circ}\text{C}$  임이 확인되었고, 탄성

표 1. 분산도가 향상된 CSMPU의 기초 물성

MWCNT (%)	Modification	Sonic-ation	$T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Enthalpy of Melting (J/g)	Modulus (MPa)
3	×	○	39.8	23.3	43.51
5	×	○	40.6	21.6	43.81
<b>7</b>	<b>×</b>	<b>○</b>	<b>40.8</b>	<b>22.4</b>	<b>44.20</b>
5	○	○	36.7	7.6	36.65
10	○	○	35.8	9.3	42.83

계수를 비롯한 대부분의 기초 물성은 이전의 연구 결과[5-7]와 거의 흡사하였다.

## 2.2 분산도 향상

MWCNT는 나노미터정도의 크기를 갖기 때문에 표면적이 매우 넓고, 탄소로 이루어져 있어 열적으로 매우 안정하며, 역학적 특성과 전기적 특성이 매우 우수하다. 하지만, 나노 입자 간의 응집력이 매우 강하기 때문에 분산이 어려워 복합체를 제조할 경우 균일한 샘플을 얻기 힘들다는 문제가 있다. 이러한 MWCNT의 분산도를 증가시키기 위한 방법으로 소수성과 친수성 사슬을 MWCNT의 표면에 공중합하여 MWCNT의 표면 구조를 개질하는 결합(defect)법이나 MWCNT를 산처리하여 표면을 산화시켜 -COOH를 생성시키는 방법 등이 사용된다. 이 외에도 비공유 결합, 즉 단순히 물리적으로 결합하는 방법과 MWCNT 표면을 감는 방법 등이 있다.

이들 중에서 가장 많이 이용되는 방법은 산처리에 의한 방법이다. MWCNT의 경우 완벽한 구조로 이루어져 있어 복합체 제조 시 폴리머수지 사이의 결합력이 약하고, MWCNT간의 응집력이 강하여 분산이 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 MWCNT와 폴리머수지 사이의 계면접착력을 향상시키기 위하여 그림 2에 보이듯이 원형 MWCNT의 표면을 산처리 함으로써 표면 기능화를 하였고 또한 초음파 처리도 함으로써 분산도 향상을 시도하였다[10-14].

그러나 반복 실험 결과, 화학적 산처리 방법으로는 폴리머수지 내에서 분산도를 향상시키는 데

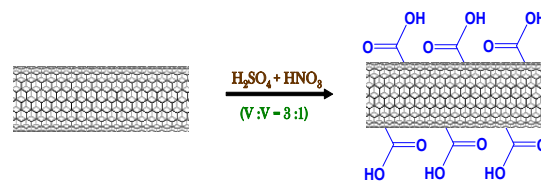
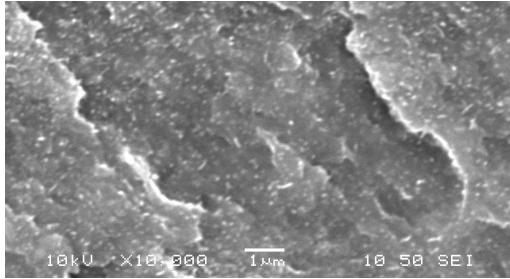
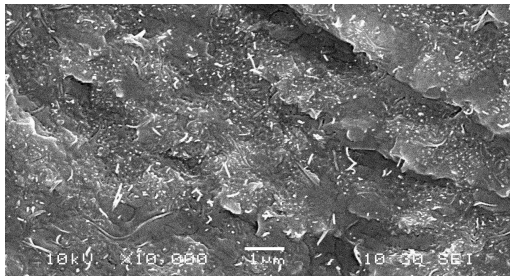


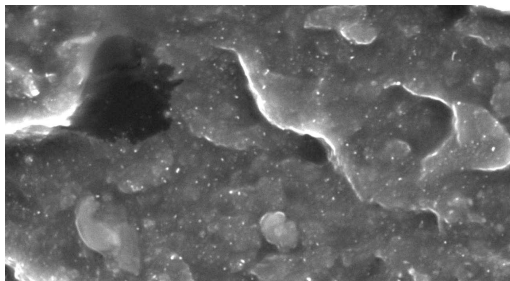
그림 2. 원형 MWCNT의 산처리 과정



(a) 분산처리를 하지 않은 CSMPU



(b) 산처리 및 초음파 처리한 CSMPU



(c) 동시중합법으로 합성한 CSMPU

그림 3. MWCNT의 분산도 향상 비교

에 한계가 있을 뿐만 아니라, 시편의 전도성과 기계적 성질을 저해하는 것으로 판명되었다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 2차적으로 전도성 고분자 복합체를 만드는 과정에서 합성 방법을 달리하여 그 분산도를 증진 시키는 동시중합법 (in-situ polymerization; MWCNT와 폴리우레탄의 동시중합)을 시도하였다.

동시중합법으로 합성된 시료의 분산도를 확인하기 위하여 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 그림 3(a)는 분산처리를 하지 않은 CSMPU이고, (b)는 화학적 산처리와 초음파 처리(sonication)를 이용한 CSMPU 이다. (c)는 동시중합법(in-situ polymerization)으로 합성한 CSMPU 이다. 그림에 보이듯이, MWCNT의 폴리우레탄 수지에서의 분산도가 확연히 차이가 있음을 알

수 있다. 즉, 동시중합법(in-situ polymerization)에 의해 CSMPU의 MWCNT 분산도 및 전도성은 크게 향상되었다.

### 2.3 실험준비

#### 2.3.1 전기적 특성 검출 실험

앞서 설명한 제작 과정 속에서 최적화된 전도성 형상기억폴리우레탄의 합성 조건을 통하여 제작한 시편의 전기적 특성을 알아보기 위하여 아래와 같은 세 가지 실험을 수행하였다.

- ① 시편의 온도 증가에 따른 저항의 변화
- ② 시편의 신장에 따른 저항의 변화
- ③ 특정 온도 증가(자체발열)에 요구되는 시간

그림 4에 전기적 특성을 검출하기 위하여 사용된 실험 장비를 나타내었다. 그림 5에는 실험 장비 내에서 고정된 전도성 형상기억폴리우레탄 시편과 시편고정용 전용 조(jaws)를 확대하여 보여주고 있다. 모든 전기적 특성 검출 실험에는 10×10×0.5(mm) 크기의 시편이 사용되었다. 시편의 표면에는 표면온도를 측정하기 위한 열전대가 접촉되어 있고 디지털온도계로 수치를 읽을 수 있다. 그림 2에는 나타나지 않았지만 직류 전원 공급기를 사용하여 시편에 전류가 흐르도록 하였고, 디지털멀티미터는 시편에 흐르는 전류를 측정하는데 사용되었다. 실험장비 자체의 마찰저항을 최소화하기 위하여 리니어 베어링을 슬라이딩



그림 4. 전기적 특성 검출 실험 장비

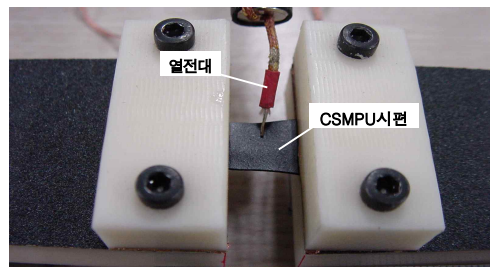


그림 5. 고정용 지그와 CSMPU 시편

지그(sliding jigs)로 사용하였다. 리니어 베어링(linear bearing)의 내부 슬라이더(inner slider) 한쪽 끝에는 시편을 고정할 수 있는 전용 조(jaw)를 설계, 제작하여 장착함으로써 시편을 고정하는 과정에서 시편의 형상이 변형되는 문제를 최소화하였다.

### 2.3.2 작동 성능 측정 실험

전도성 형상기억 폴리우레탄의 작동 성능을 알아보기 위하여 아래와 같은 세 가지 실험을 실시하였다.

- ① 작동력 (blocking force : 실험장비 내의 무게추) 증가에 따른 작동 변위 측정
- ② 길들이기 과정시 요구되는 초기신장력 (initial elongation force: 초기신장에 요구되는 외부힘)의 변화 측정
- ③ 시편의 응답성 (step response : 일정 전압 공급 시간에 따른 작동변위) 측정

모든 작동 성능 측정 실험에서도 10×10×0.5 (mm) 크기의 시편이 사용되었다. 그림 6은 와이어와 내부 슬라이더를 보여주며 각각에 작용하는 힘의 방향을 나타내었다. 내부슬라이더는 와이어를 통해 무게추까지 연결되어 있으며, 무게추의 하중은 와이어를 통하여 내부슬라이더를 당기게 되고 내부슬라이더에 연결된 CSMPU 시편을 신장시키려는 힘으로 작용한다. 실험테이블 모서리에는 롤러가 설치되어있으며 와이어는 이 롤러를



그림 6. 작동력 측정 장비와 작용력의 방향



그림 7. 인장력 발생용 무게추

통해 수직으로 바닥면을 향해 꺾인 후 무게추로 연결된다. 그림 7은 와이어 끝에 연결된 무게추의 모습이다. 무게추를 50g씩 추가함으로써 일정하게 인장력을 증가시키면서 실험을 수행하였다.

## 2.4 실험결과

### 2.4.1 전기적 특성 검출 실험 결과

#### 2.4.1.1 저항 대 온도

본 실험에서는 시편에 외부에서 열을 가해 시편의 온도를 증가시켜 가면서 전기저항을 측정하였다. 고유저항은 치수 측정으로 얻은 시편 길이와 평균단면적을 이용하여 식 (1)로부터 산출하였다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{1}$$

여기서 R은 측정된 전기저항값, ρ는 고유저항, L은 시편 길이, A는 시편의 평균단면적이다.

그림 8에서 알 수 있듯이, 온도가 12℃에서 34℃까지 변하는 동안 시편의 저항 및 고유저항은 거의 일정하였다. 25℃ 부근에서 저항이 감소하기 시작하는 경향을 보이지만 실험장비 설치상의 오차 범위 내에 있는 것으로 간주하였다. 저온에서 시편을 슬라이딩 지그에 장착할 때, 현실적으로 시편은 자중에 의하여 약간의 처짐 현상을 보이게 된다. 그러나 온도가 증가함에 따라 수축 변형이 발생하고, 그 결과 처짐 현상이 사라지게 된다. 실험 과정에서 초기 설치시의 시편 길이보다 온도증가 후의 시편 길이가 짧아진 셈이므로 이러한 원인에 의하여 25℃ 부근에서부터 전기저항이 감소한 것으로 여겨진다. 실험 온도 변화를 전이온도 이하에서만 실시한 이유는 그 이상의 온도에서는 시편이 손상되거나 파괴되었기 때문이다.

#### 2.4.1.2 저항 대 신장

시편의 길이에 따른 전기저항은 슬라이딩 지그를 이용하여 시편을 외력에 의해 신장시켜가면서 측정하였으며 고유저항은 앞절의 온도에 따른 저항값 측정 실험과 동일한 방법으로 산출하였다.

그림 9에서 알 수 있듯이, 신장률이 100%까지 증가하는 동안 저항은 약 100%, 고유저항은 약 300%까지 증가하였다. 100%이상 신장을 시도하였을 때는 시편이 손상되거나 파괴되었기 때문에 100%이하에서만 실험을 수행하였다. 30% 신장 이하에서는 저항과 고유저항의 감소 경향을 보이지만 실험장비 설치상의 오차 범위 내에 있는 것으로 간주하였다. 박판 형태의 고분자 시편의 재질 특성상 전용 조를 이용하여 시편의 한쪽 끝단

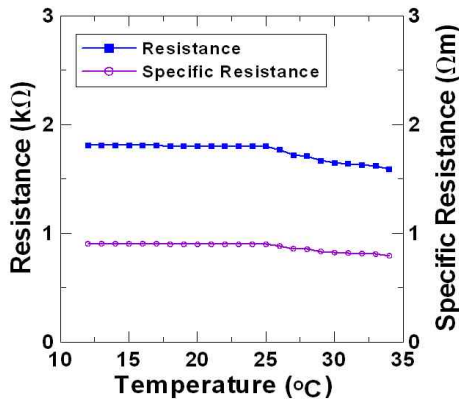


그림 8. 저항(비저항) 대 온도

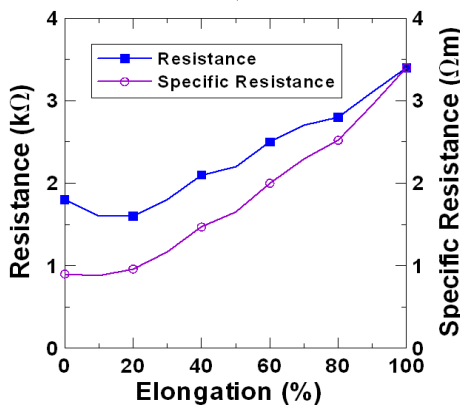


그림 9. 저항(비저항) 대 신장

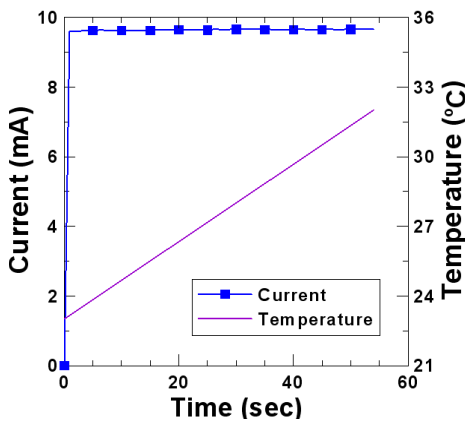


그림 10. 전류(온도) 대 시간

을 압착함으로써 고정하는 것이 가장 효과적인 시편고정 방법이다. 저항 측정을 위하여 조와 시편이 물리는 사이에 구리그물망을 삽입하고 함께 압착한다. 구리그물망은 시편 표면으로 압착(수

직력 작용)이 되지만, 시편 내부에 분산되어있는 MWCNT와는 아직 효과적으로 접촉되어 있지 않은 상태이다. 그러나 신장과 동시에 구리그물망 전극에 수평력이 추가됨으로써 시편 내부와 전극의 접촉 면적이 증가되는 효과가 발생한다. 이러한 원인으로 30% 신장까지는 전극과 시편간의 접촉 면적이 계속 증가하여 전체 저항이 감소하는 경향이 나타난 것으로 여겨진다. 전도성 형상기억폴리우레탄의 표면에 효과적으로 전극을 부착할 수 있는 방법은 현재 연구 중에 있다.

2.4.1.3 전류(온도) 대 시간

그림 10에서 보이듯이, 온도가 22°C에서 32°C까지 변하는 동안 전류는 10mA로 거의 일정하였다. 그러나 실제로는 전류가 매우 조금 증가하였으며, 이것은 그림 8에서 보았던 것처럼 온도가 증가하자 전기저항이 감소했기 때문이다. 이 실험을 수행하는 동안 공급된 전압은 일정하였으며, 50초 동안 약 10V, 10mA로 약 10°C를 증가시킬 수 있었다.

2.4.2 작동 성능 측정 실험

2.4.2.1 작동변위 대 작동력

작동력의 크기는 앞서 실험장비 설명에서 언급했듯이, 시편에 인장력으로 작용하는 무게추의 하중과 동일하다. 따라서 작동력은 외부 인장력에 대해서 시편이 버티는 동일한 크기의 힘으로써 버티력(blocking force)이라고 부르며, 작동기의 관점에서는 작동기가 발생시키는 힘으로써 작동력(actuation force)이라고도 한다. 또한 시편이 수축하면서 발생시키는 힘으로써 수축력(shrinking force)라고도 할 수 있다. 그림 11은 무게추의 하중이 증가함에 따라 작동변위가 줄어드는 관계를 보여준다. 작동변위와 작동력 간의 관계는 거의 선형적이며 반비례한다. 접선은 최소자승법으로 얻어 낸 근사화 직선이다. 이 실험에서 시편은 최대 650gf의 작동력을 보였으며, 그 이상에서는 손상되거나 파괴되었다.

2.4.2.2 초기요구신장력 대 초기신장 횟수

초기요구신장력이란, 작동기의 작동(수축)을 위하여 시편을 초기 신장시킬 때 요구되는 외력을 의미한다. 그림 12에서 볼 수 있듯이, 폴리우레탄의 특성상 초기요구신장력은 초기 신장 횟수가 증가함에 따라 점차 줄어들게 된다. 32°C의 일정한 온도에서 시편을 100%까지 시장시킬 때 약 30회까지는 초기요구신장력이 계속 줄어들다가 그 이후부터는 일정하게 유지된다. 이러한 일련의 과정을 시편의 “길들이기 과정”으로 부르기로 하였으며, 시편의 물성 안정화 기간이 존재하는

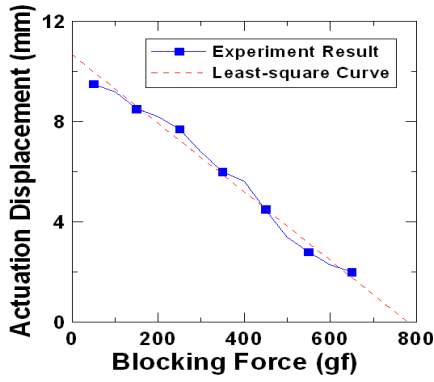


그림 11. 작동변위 대 작동력

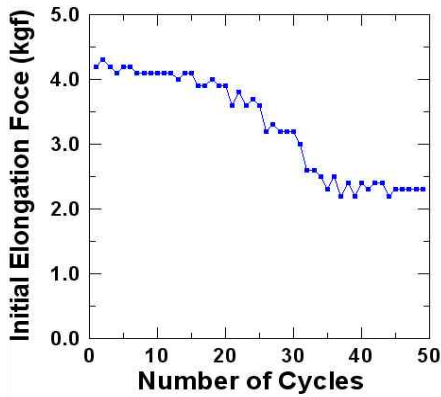


그림 12. 초기요구신장력 대 초기신장 횟수

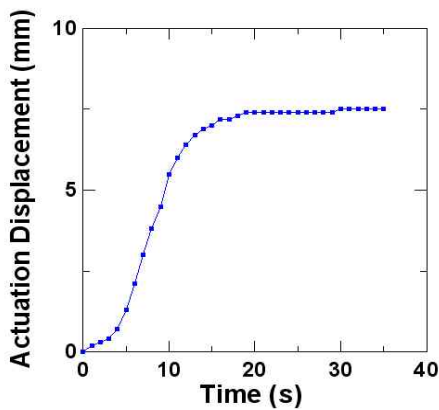


그림 13. 작동거리 대 시간

이유와 안정 상태가 얼마나 오랫동안 유지되는가 (내구성)는 현재 연구 중에 있다.

2.4.2.3 시편의 응답성

시편의 응답성(step response)는 앞 절의 초기

요구신장력 측정 과정에서 동시에 수행된 실험이며, 시편의 물성이 안정화된 이후에 (약 40회~50회) 추출한 결과이다.

따라서 실험 조건은 초기요구신장력 측정 실험과 동일하며 결과는 그림 13에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 5초~20초 부근에서는 시편이 급격하게 회복(최대 작동 거리의 약 90% 이상)되었다. 20초~30초 사이에는 시편의 잔여분이 수축되는 구간이며, 본래 길이로 완벽하게 수축(작동거리 100%)하기까지는 상대적으로 긴 시간을 필요로 했다.

2.5 CSMPU 작동기의 응용

그림 14에서 보이는 것처럼 BATWING으로 알려진 건국대학교 항공우주공학과 초소형비행체(Micro Air Vehicle)[15]의 조종면에 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기를 설치함으로써 CSMPU 작동기의 응용을 시도하였다. 그리고 직류 전원공급기를 이용하여(작동속도 조절을 위하여 약 10V 내외에서 가변적으로 공급) 전도성 형상기억폴리우레탄을 자체 발열시켜서 작동(수축)하게 하여 조종면의 작동을 유도하는 실험을 수행하였다.

그림 15는 조종면에 설치된 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기와 전원공급을 위한 전선, 온도 측정을 위한 열전대의 모습을 확대해서 보여주고 있다. 작동기의 한쪽 끝은 조종면의 콘트롤혼에 연결이 되어있으며, 반대편 끝에는 로드가 장착되고 이 로드는 동체에 고정하였다. 따라서 전원이 공급되면 작동기가 수축을 하게 되고 조종면은 간단한 기구학적 원리에 의하여 움직이게 된다. 조종면의 표면에 접촉한 열전대를 통해 온도를 측정하면서 흐르는 전류량을 조절한다. 본 실험은 기구 해석이나 실제 비행은 시도하지 않았으며, 초소형 비행체 전용의 작고 가벼운 작동기로서의 응용 가능성을 알아보기 위한 모의실험이었다[16].

기존의 BATWING 15cm 타입을 포함하여 10cm~30cm에 해당하는 MAV의 경우, 일반적으로 무선조종 모형항공기(radio control model airplane) 용으로 사용되는 초소형 서보모터를 사용하며 표2에 알려진 사양을 나타내었다. 표2에서 알 수 있듯이, 중량이 적은 서보모터일수록 토크 역시 작지만, 중량 2g 대의 서보모터에 비하여 1g 대의 서보모터는 중량의 차이는 적지만 토크의 감소량은 매우 크다.

현재의 BATWING은 1g 대의 서보 모터(Falcon)를 이용하여 조종면을 작동하고 있지만, 운용 현실상, 더 많은 토크 보다는 더 적은 중량의 서보를 필요로 한다.



그림 14. 조종면 작동 실험용 MAV (BATWING)

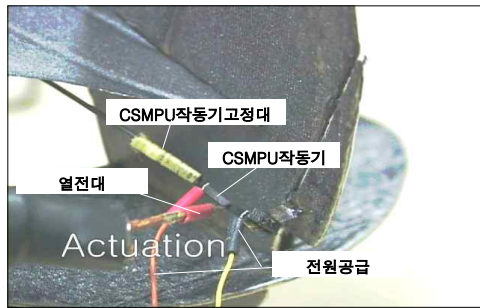


그림 15. 작동 중인 MAV 러더

표 2. MAV에 사용되는 일반적인 서보모터

종 류	동작 전압 (V)	최 대 동작량	최 대 토크 (g · cm) @ 5V	동 작 시 간 (s) @ 120도	중량 (g)	비고
HS-50	4.8 ~ 6	160도	600	0.08 ~ 0.09	6.1	50cm
LS 2.4	3 ~ 5	14mm	175	0.2	2.4	15cm
LS 2.1	3 ~ 5	14mm	160	0.15	2.1	15cm
Falcon	3.3 ~ 5	120도	28	-	1.7	15cm

전도성 형상기억폴리우레탄은 0.1g 대의 시편으로 수십 gf 이상의 작동력을 지닐 수 있기 때문에 1g 대의 서보모터(Falcon)로 작동되는 일반적인 MAV 및 BATWING이 요구하는 작동력 및 중량을 충분히 만족시킬 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때, 전도성 형상기억폴리우레탄은 MAV를 위한 초소형 작동기로써의 응용 가능성이 높다.

그러나, 현재의 전도성 형상기억폴리우레탄은 능동적인 양방향 작동(two-way actuation)이 불가능하며 반응속도(일반적으로 MAV를 위한 서보모터의 동작속도는 초당 60~120도의 각속도 요구), 내구성 및 안정성 등이 낮아 MAV를 위한 초소형 작동기로 현재 수준에서 상용화하는 것은

불가능하다.

따라서, 보다 많은 연구를 통하여 재료를 개선하고, 효율적인 초소형 작동기 시스템 연구를 병행해야 할 것이다.

### III. 결 론

이번 논문에서는 MWCNT 분산도가 증가된 새로운 전도성 형상기억폴리우레탄을 연구하였고 전기적 특성을 검출하기 위한 실험과 작동 성능을 측정하기 위한 실험들을 수행하였다. 전이온도 이하 범위에서의 온도변화에 따른 저항변화는 거의 없었으며, 시편이 100% 신장됨에 따라 저항값도 약 100% 증가하였다(비저항 약 300% 증가). 현재의 전도성 형상기억폴리우레탄은 양방향 작동(수축-신장)이 불가능하므로 수축을 위해서는 외력에 의한 신장을 필요로 하고, 이때 요구되는 초기신장력은 “길들이기 과정”으로 명명한 물성안정화 기간을 통해 일정해진다. 그리고 작동 변위는 작동기에 작용하는 페이로드(payload)가 증가함에 따라 선형적으로 줄어들었다.

이번 연구를 통하여 전도성 형상기억폴리우레탄이 한층 더 향상되었지만, 능동 작동기 개발을 위한 핵심 재료로는 아직까지 개선해야 할 점이 많다. 첫째, 전도성 형상기억폴리우레탄이 스스로 양방향 작동을 구현할 수 있어야 한다. 둘째, 더 적은 전력으로 더 빠르고 많이 작동할 수 있어야 한다. 셋째, 고분자 물질의 화학 구조적 특성에 기인한 낮은 내구성을 개선해야 한다. 이외에도 보다 구체적인 많은 문제점들이 해결되어야 하며, 우수한 성능의 전도성 형상기억폴리우레탄 작동기의 개발을 위해서보다 많은 연구와 실험이 필요하다.

### 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 젊은과학자연구활동 지원사업 (과제번호: R08-2003-000-10248-0)과 중점연구소중점연구소 지원사업 (과제번호: KRF-2004-005-D00046)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1) R.F. Gordon, “The Properties and Applications of Shape Memory Polyurethanes”, *Mat. Tech.*, Vol. 8, 1993, pp. 254-258.



- 2) R.P. Kusy and J.Q. Whitley, "Thermal characterization of shape memory polymer blends for bio-medical implantation", *Biomedical Engineering and Dental Research Center*, University of North Carolina, Chapel Hill, NC, 1993.
- 3) 김재환, "Electroactive Polymers(EAP)의 연구동향 및 응용분야", 한국항공우주학회지, 제29권 제1호, 2001, pp. 142-150.
- 4) N.S. Goo, I.H. Paik, K.J. Yoon, Y.C. Jung, and J.W. Cho, "Actuation of MAV Control Surface using Conducting Shape Memory Polymer Actuator", *Proceedings of 11th SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, USA, March 2004.
- 5) I.H. Paik, N.S. Goo, K.J. Yoon, Y.C. Jung, and J.W. Cho, "Electric Resistance Property of a Conducting Shape Memory Polyurethane Actuator", *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, 2005, pp. 1539-1544.
- 6) 백일현, 구남서, 윤광준, 정용채, 조재환, "능동작동기로써의 전도성 형상기억폴리머에 관한 기초 연구", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2004, pp. 438-442.
- 7) 백일현, 구남서, 윤광준, 조재환, "전도성 형상기억폴리머 작동기의 개발", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제10권 제11호, 2004, pp. 976-980.
- 8) I.H. Paik, N.S. Goo, K.J. Yoon, Y.C. Jung, and J.W. Cho, "Actuation Performance of Conducting Shape Memory Polyurethane Actuators", *Proceedings of 12th SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, USA, March 2005, p. 174.
- 9) Y. Shirai and S. Hayashi, "Development of polymeric shape memory material", *Mitsubishi Technical Bulletin No. 184*, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Tokyo, Japan, 1988.
- 10) T. Saito, K. Matsushige, K. Tanaka, "Chemical treatment and modification of multi-walled carbon nanotubes", *Physica b* Vol. 323, 2002, p. 280.
- 11) A. Fasi, I. Palinko, J.W. Seo, Z. Konya, K. Hemadi, I. Kiricsi, "Sonication assisted gold deposition on multiwall carbon nanotubes", *Chemical Physics Letters*, Vol. 372, 2003, p. 848.
- 12) Y. Zhang, Z. Shi, Z. Gu, S. Ijima, "Structure modification of single-wall carbon nanotubes", *Carbon*, Vol. 38, 2000, p. 2055.
- 13) Urszula Dettlaff-Weglikowska, Jean-Michel Benoit, Po-Wen Chiu, Ralf Graupner, Sergey Lebedkin, Siegmund Roth, "Chemical functionalization of single walled carbon nanotubes", *Current Applied Physics*, Vol. 2, 2002, p. 497.
- 14) Takashi Kyotani, Susumu Nakazki, Wei-Hua Xu, Alcira Tomita, "Chemical modification of the inner walls of carbon nanotubes by HNO<sub>3</sub> oxidation", *Carbon*, Vol. 39, 2001, p. 771.
- 15) 정대근, 황희철, 김종현, 박훈철, 윤광준, "고정익 초소형비행체 "BATWING" 시스템 개발", 한국항공우주학회지, 제32권 제2호, 2004, pp. 82-87.
- 16) R.M. Barrett, R.S. Gross, "Recent advances in adaptive aerostructures: Designing for flight control", *4th ESSM and 2nd MIMR Conference*, Aerospace Engineering Department, Auburn University, 1998, pp. 17~19.