


2018년 02월

17ZS1100

## 투명소자 및 UX 기술 연구

Research on Transparent Actuator and UX Application

본 문서에서 음영처리된 부분은 (  ) 정보공개법 제9조의 비공개대상정보와 저작권법 및 그 밖의 다른 법령에서 보호하고 있는 제3자의 권리가 포함된 저작물로 공개대상에서 제외되었습니다.

# 제 출 문

본 연구보고서는 내부연구과제인 "투명소자 및 UX 기술 연구"의 결과로서, 본 과제에 참여한 아래의 연구팀이 작성한 것입니다.

2018년 2월

연구책임자 : 책임연구원 경 기 욱 (SW·콘텐츠 연구소)  
연구참여자 : 책임연구원 박 승 구 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  책임연구원 박 선 택 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  책임연구원 박 봉 제 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  책임연구원 임 정 목 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  책임연구원 정 희 범 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  책임연구원 김 철 홍 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  선임연구원 윤 성 룰 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  선임연구원 문 성 철 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  연구원 남 세 광 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  연구원 최 미 정 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  연구원 신 은 진 (SW·콘텐츠 연구소)  
                  연구원 표 동 범 (SW·콘텐츠 연구소)

# 요 약 문

## I. 제 목

투명 소자 및 UX 기술 연구

## II. 연구의 필요성

아이폰 출시 이후 터치스크린 인터페이스를 장착한 스마트 IT 기기들은 다양한 사용자 인터페이스를 변화시킴으로써 사회 문화적 변화를 함께 일으키고 있으며 이러한 스마트 인터페이스 기술들은 휴대폰 시장을 결정하는 중요한 요소가 되고 있다. 국내 휴대폰 산업의 경쟁력 강화를 위해서는 기 개발된 스마트 기술들을 계속 개발하여 경쟁력을 강화하는 한편, 기술적 우위를 갖기 위한 또 다른 독자적인 기술 개발이 필요하다. 이러한 기술 후보 중 하나가 햅틱 기술이며 특히 최근에는 터치스크린 기술과 연계한 햅틱 피드백 기술개발이 활발히 이루어지고 있으며 멀티터치 연동 터치스크린 시장이 급격히 성장하고 있으나 기존 스마트폰에 내장된 햅틱 기술은 단순 진동기능 위주로 되어있어 다양하게 요구되는 사용자의 인터페이스 기능을 충족하지 못하고 있어 새로운 사용자 친화적 햅틱 인터페이스 기술이 필요하다.

## III. 연구내용 및 범위

### □ 연구 목표

- 자가변형 투명 유연 액추에이터 고성능화 및 응용 연구

### □ 연구 내용

- 근육형 액추에이터는 고출력화, 고투명화, 고속응답 특성을 갖도록 꾸준히 성능을 향상 시키는 연구에 주력하며, 이후 배열화 및 집적화하여 다양한 활용

이 가능하도록 연구를 진행한다.

- 근육형 액추에이터는 출력을 크게 증가시킴으로써 촉각 출력의 목적 뿐 아니라 광학용 렌즈등 다양한 응용 방법으로 사용할 수 있도록 새로운 활용 방법을 제시하고, 지적재산권을 함께 확보한다.
- 근육형 액추에이터 응용연구
  - 변형률 10% 이상 고변형 액추에이터
  - 촉각 출력 15dB 이상
  - 국부제어(Localized control)이 가능하도록 하여 2 point 이상에서 독립적 동작 구현
- 투명소자 기반 UX 응용 연구
  - 광학, 촉각 소자 등 신개념 응용 특허 출원

#### IV. 연구결과

본 연구에서는 차세대 촉각 인터페이스의 핵심 기술인 근육형 액추에이터 기반의 투명 촉각 출력 소자 기술을 연구하였으며, 주로 근육형 액추에이터의 고출력화 및 기능성 향상을 위한 연구, 그리고 기능성 폴리머와 투명전극을 이용한 햅틱 피드백 박막형 시험 모듈에 대해 연구하였다.

1. 근육형 액추에이터는 고탄성 투명 유전성 고분자와 신축성 전극으로 구성되며, Pre-strain 기법을 이용하여 근육형 소자의 변형률을 증가시킬 수 있는 구조를 설계 및 적용하여 개발하였다. 150% 이상의 radial expansion을 유도한 원형 프레임구조를 적용하였을 때, 정전파괴 (dielectric breakdown)가 발생하지 않는 수준의 전압인가로 인해 발생시킬 수 있는 최대수준의 길이 변형은 14.6%, 면적기준으로 21.3% 정도임을 확인하였다.
2. 고출력 촉각 피드백 구현을 위하여 유전성 탄성체를 적층한 다층 구조의 촉각 출력 액추에이터를 개발하였다. 본 액추에이터는 강성 변화 없는 탄성 고분자 필름 6층으로 구성되며, 전압 인가 시 최대 6개 point에서 개별 동작이 가능하

며, 큰 수직 방향 변위 (최대 변위: 650  $\mu\text{m}$ , 두께 대비 93%)를 가질 뿐 아니라 높은 출력 힘 (최대 출력힘: 249 mN)을 내며, 다층 구조적용을 통한 출력 향상으로 인해 두 가지 촉각 자극 (돌출, 진동) 구현이 가능함을 확인하였다. 특히, 사용자 평가 기반 ANOVA 분석을 통해 본 액추에이터를 사용하면 인가전압에 의해 돌출 자극을 조정할 수 있으며, 6단계의 다른 인지강도의 자극을 발생시킬 수 있고, 또한 Threshold를 기준으로 약 5.13배의 출력을 낼 수 있으므로, 인지강도로는 최대 약 17.2 dBSL에 해당하는 출력을 발생시킴을 확인할 수 있었다.

3. 촉각 출력 액추에이터의 출력 및 기능성 향상을 위하여 기능성 소재를 개발하였다. 본 소재는 poly(DEDMS-co-DEMVS) 전구체 합성법을 개발하고, 본 전구체를 기반으로 한 PDMS-g-PTBA 이다. 본 소재는 쌍안정성 기계적 물성과 탄성 특성을 동시 보유하며, 기존 유전탄성 고분자인 PDMS 보다 20% 이상의 유전상수가 높으면서도 기계적 물성 가변 제어가 100 ~ 800 배로 가능한 특성을 보유함을 확인하였다. 나노와이어 임베딩법 기반 고 신축성 구동 전극을 형성 공정을 적용하여 본 소재 기반 능동 소자를 개발하였으며, 박막형으로 형상 재구성이 가능한 대변형 특성 구현이 가능함을 확인하였다.
4. 기능성 폴리머와 투명전극을 이용한 햅틱피드백 박막형 시험 모듈을 개발하였다. 본 모듈은 10.1인치 크기로 제작되었으며, 75%의 광투과도를 가지며, 최대 출력이 5 G (free load condition)임을 확인하였다.

## V. 건의사항

본 연구개발 환경에서는 기초원천연구개발 과제의 경우 장기적이고 안정적인 연구개발 환경 마련이 무엇보다 중요하다는 것은 연구자들의 경험에 의한 공감일 뿐 아니라 노벨상 등 세계적인 연구 성과 수준을 달성한 연구자들이 공통적으로 언급하는 사항입니다. 단기적인 실적이 요구되는 경우에는 높은 연구적 수준에 기반한 결과물 보다는 단기 가시적인 실적을 위한 설익은 결과물에 의존하여 과

체를 유지할 수 밖에 없습니다. 장기적으로 지속적인 연구를 통해 무르익은 완성도 높은 연구결과물, 독창적인 연구 결과물을 얻을 수 있도록 해마다 연구지원이나 관리환경이 변하는 것이 아니라, 장기적이고 안정적인 연구개발 환경 지원을 부탁드립니다. 그간 개발된 기술의 원천성이 유지되면서 글로벌 리딩 수준의 기술 수준을 지속적으로 새롭게 달성하기 위한 연구자로서의 노력을 게을리 하지 않을 것을 함께 약속드립니다.

# ABSTRACT

## I. TITLE

Research on Transparent Actuator and UX Application

## II. Purposes of the Research

Smart interface technology becomes a crucial factor for mobile phone market since smart IT devices have changed user interface with social and cultural changes after launching iPhone. In order to enhance competitiveness for our mobile phone industry, development of our own technology with continuous advances in smart technology that has been developed so far is required. Haptic technology is one of promising candidate. Recently, as haptic feedback technology connected with touch-screen technology is continuously developing, touch-screen market allowing multi-touch interaction is rapidly growing. However, haptic technology integrated into current smart phone is not sufficient to satisfy users' various demands on functional interface. Therefore we need novel user-centric haptic interface technologies.

## III. The contents of the study

### Research Goal

- Development of a high performance transparent and flexible actuator and its application



## □ Research Contents

- We focus on performance enhancement of muscle-type actuator to improve its output force, transparency, and response speed. After that, we study on the integration of the actuators to configure an array can be utilized in various application.
- By increasing the output of the muscle type actuator significantly, we can find novel utilization of it and acquire intellectual property rights in various applications such as optical lenses as well as its tactile output purpose.
- Applied study on muscle-type actuator
  - Over 10% change of length
  - Tactile output greater than 15dB
  - Localized control which enabled independent operation more than 2 points
- Applied UX study based on transparent actuator
  - Patent applications of new concept devices such as optical, tactile modules.

## IV. Research Results

In this study, we have developed technologies on transparent tactile output device based on the muscle type actuator which is the core technology of the next generation tactile interface. We mainly studied for the improvement of the output and functionality of the actuator and the film-type haptic feedback test module using

functional polymer and transparent electrodes.

1. Muscle-type actuator is composed of highly elastic transparent dielectric polymer and stretchable electrode. We developed the actuator by designing and applying a structure which can increase the strain of muscle type actuator using pre-strain technique. When the circular frame structure inducing 150% or more radial expansion is applied, we confirmed the maximum level strain that can be generated by voltage application at which dielectric breakdown does not occur is 14.6% in length, 21.3% in area.
2. A multi-layered tactile output actuator with dielectric elastomer laminated is developed to realize high output tactile feedback. This actuator consists of 6 layers of elastic polymer film with no stiffness change. It can be operated separately at maximum 6 points when voltage is applied. It has not only large vertical displacements (maximum displacement: 650  $\mu\text{m}$ , 93% of thickness) but also high output force (Maximum output force: 249 mN), and it is confirmed that two tactile stimuli (protrusion, vibration) can be realized due to the output enhancement achieved by application of multi-layer structure. In particular, the ANOVA analysis based on a user test showed that the actuator can be used to adjust the protruding stimulus by the applied voltage, to generate stimuli of different perceived strength in sixth step. In addition, it can output about 5.13 times of the perceptual threshold, which corresponds to 17.2 dBSL in maximum.
3. Functional material was developed to improve the output and

functionality of tactile output actuator. This material has developed the poly (DEDMS-co-DEMVS) precursor synthesis method and is PDMS-g-PTBA based on this precursor. This material has both bistable mechanical property and elasticity property, and it is confirmed that it has 20% or more higher dielectric constant and 100 ~ 800 times higher variability that can control mechanical property than those of PDMS, which is the conventional dielectric elastic polymer. We have developed and active device based on this material by applying the process of forming the high elasticity driving electrode based on the nanowire embedding method. We also confirmed that it is possible to realize the large deformation characteristic that can be reconfigured by thin film type.

4. A thin-film type haptic feedback test module was developed using functional polymer and transparent electrode. This module was fabricated in 10.1 inch size, has 75% light transmittance, and has maximum output of 5G (free load condition).

## V. Proposition

In this R&D environment, it is not only empathy based on the experience of the researchers, but also the fact that the researchers who attained the global research achievement level such as Nobel Prize commonly mention the fact that the establishment of a long-term and stable R&D environment is the most important thing for a basic fundamental research project. If short-term performance is required, we will have to rely on our results for short-term

performance, rather than high-level results. We ask for your long-term and stable R & D environment to support your research and management environment every year so that you can obtain highly sophisticated research results and original research results through long-term continuous research. We promise not to neglect our efforts as a researcher to continuously achieve the level of technology that is at the global leading level, while maintaining the originality of the developed technology.

# CONTENTS

<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	25
Section 1. Objective of Study .....	25
Section 2. Contents of Study .....	27
Section 3. Organization, System and Method of Study .....	29
1. Organization and System (Overall period) .....	29
2. Method of Study .....	29
<b>Chapter 2. Main Contents</b> .....	31
Section 1. Output Enhancement of Flexible Actuator .....	31
1. Concept .....	31
2. Results .....	32
3. Future works .....	33
Section 2. Variable-type Flexible Actuator .....	35
1. Concept .....	35
2. Results .....	36
3. Future works .....	54
Section 3. High Output Functional Material .....	55
1. Concept .....	55
2. Results .....	55
3. Future works .....	71
Section 4. Film-type Tactile Interaction Module (related to commissioned project) .....	73
1. Backgrounds .....	73
2. Research Plan .....	73
3. Current Status .....	74
4. Future Works .....	76

<b>Chapter 3. Utilization Plan of Results</b> .....	78
Section 1. Utilization Plan in R&D .....	78
Section 2. Industrial Utilization Plan .....	79
Section 3. Future Research Plan According to The Rolling Plan of Major Project .....	80
<b>Chapter 4. Conclusion</b> .....	81
Section 1. Conclusion .....	81
Section 2. Proposition .....	82

# 목 차

제 1 장. 서론 .....	25
제1절. 연구개발 목표 .....	25
제2절. 연구개발 내용 .....	27
제3절. 연구개발 추진 체계 및 방법 .....	29
1. 연구개발 추진 체계 (총년도) .....	29
2. 연구개발방법 .....	29
제 2 장. 본론 .....	31
제1절. 유연 액추에이터 출력 향상 연구 .....	31
1. 연구개발 개념 .....	31
2. 연구개발 결과 .....	32
3. 향후 연구계획 .....	33
제2절. 가변형 유연 액추에이터 연구 .....	35
1. 연구개발 개념 .....	35
2. 연구개발 결과 .....	36
3. 향후 연구계획 .....	54
제3절. 고출력용 기능성 소재 연구 .....	55
1. 연구개발 개념 .....	55
2. 연구개발 결과 .....	55
3. 향후 연구계획 .....	71
제4절. 필름형 촉각인터랙션 소자 연구 (민간수탁 연계) .....	73
1. 연구개발 배경 .....	73
2. 연구개발 계획 .....	73
3. 연구개발 진행 상황 .....	74
4. 향후 연구계획 .....	76

<b>제 3 장. 연구결과 활용계획</b> .....	78
제1절. 연구개발분야 활용계획 .....	78
제2절. 산업분야 활용계획 .....	79
제3절. 주요사업 Rolling Plan에 따른 향후 연구개발 계획 .....	80
<b>제 4 장. 결론</b> .....	81
제1절. 결론 .....	81
제2절. 건의사항 .....	82
표 1-1. 변위량 측정 결과 .....	33
표 2-1. 돌출자극에 의한 손가락 인지자극 강도 추정 .....	51
표 2-2. 진동자극에 의한 전완 인지자극 강도 추정 .....	53
표 3-1. Poly(tBA) (reference) 및 PDMS-g-PTBA 필름들의 기계적, 열-기계적 물성 비교 .....	62
표 3-2. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 유전 물성 비교 .....	62
그림 1-1. 팽창형 근육형 액추에이터 설계 개념 .....	31
그림 1-2. 팽창형 근육형 액추에이터 프로토타입 .....	32
그림 2-1. 유연 액추에이터를 이용한 웨어러블 인터페이스의 개념도 및 프로토타입 타입 .....	35
그림 2-2. 다층 구조의 유전성 탄성체의 단면 모식도 .....	37
그림 2-3. 다양한 수의 적층된 유전성 탄성체와 각각의 층의 실버나노와이어 전 극 .....	38
그림 2-4. 다층 구조의 유전성 탄성체의 단면 모식도와 절단한 단면의 광학 현 미경 이미지 .....	39
그림 2-5. 다층 구조의 유전성 탄성체를 이용한 유연 액추에이터의 구조 모식도 (a)와 전압 인가시 수직방향으로 변형하는 액추에이터의 모식도 (b) .....	41
그림 2-6. 유연 액추에이터 활성부분의 표면 형상을 3D 프로파일러로 촬영한	



3D 형상 이미지 (a)와 전압 인가 시 변형하는 표면의 3D 형상 이미지 (b) .....	43
그림 2-7. 유연 액추에이터의 변위 성능 평가. 인가하는 전압에 따른 변위 추이 (a), 동작주파수에 따른 변위 추이 (b) .....	44
그림 2-8. 사인 입력신호의 전압과 측정된 변위 .....	45
그림 2-9. 유연 액추에이터의 출력힘 성능 평가 .....	47
그림 2-10. 전기 안정성 평가를 위한 누설전류 측정 결과 .....	49
그림 2-11. 열 안정성 평가를 위하여 인가전압 4kV를 가하며 작동시간 100초 후 측정된 온도 분포 이미지 .....	50
그림 2-12. 손가락에 인지된 돌출자극의 강도 추정 .....	52
그림 2-13. 전완에 인지된 진동자극의 강도 추정 .....	53
그림 3-1. diethoxy-dimethylsilane (DEDMS)와 diethoxy-methylvinylsilane (DEMVS)를 결합한 전구체인 poly(DEDMS-co-DEMVS) 중합 과정 .....	56
그림 3-2. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 기계적 물성: 주파수-Storage modulus .....	58
그림 3-3. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 기계적 물성: 시간-Storage modulus .....	59
그림 3-4. 서로 다른 PDMS 중량을 가진 PDMS-g-PTBA 필름의 응력-변형률 (stress-strain) .....	60
그림 3-5. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 열-기계적 물성 .....	61
그림 3-6. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 전기-기계적 물성: 주파수에 따른 소재 유전 특성 추이 곡선 .....	63
그림 3-7. PDMS-g-PTBA 필름에 은나노와이어 전극 형성 공정 (a) 및 PDMS-g-PTBA 필름 상에 임베디드된 전극의 표면과 단면 주사전자현미경 이미지 (b와 c) .....	64
그림 3-8. 은나노와이어 전극이 임베디드된 PDMS-g-PTBA 필름 사진 .....	65
그림 3-9. PDMS-g-PTBA 구동용 전극의 반복적 변형 인가에 따른 전기저항 변화 특성 측정 시스템 사진 .....	66

그림 3-10. PDMS-g-PTBA 필름에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 곡선 .....	67
그림 3-11. Poly(tBA)와 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS:tBA=20:80) 각각에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 비교(반복적 수직방향 인가 변형률: 10%) .....	68
그림 3-12. Poly(tBA)와 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS:tBA=20:80) 각각에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 비교(반복적 수직방향 인가 변형률: 20%) .....	69
그림 3-13. Poly(tBA)와 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS:tBA =20:80) 각각에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 비교 (반복적 수직방향 인가 변형률: 30%) .....	70
그림 3-14. PDMS-g-PTBA 필름 기반 액추에이터의 1차 및 2차 구동 과정 동안 3차원 형상 프로파일로 측정된 형상 이미지 .....	71
그림 4-1 연구개발 개념 .....	74
그림 4-2. 촉각패널 프로토타입 .....	75
그림 4-3. 촉각 패널의 가속도 출력 .....	75
그림 4-4. 전체 시스템 구성도 .....	77

# 세부과제 연차실적 보고서

연차실적 보고서							
과제유형	1. 기초미래선도형 (O) 2. 공공인프라형 ( ) 3. 산업화형 ( )						
대과제명	SW·콘텐츠 기초·미래선도 기술개발						
세부과제명	투명소자 및 UX 기술 연구						
세부과제 책임자	소속 및 부서	스마트UI/UX 디바이스연구실		직위 (직급)	실장(책임연구원)		
	성명	경기욱					
총연구기간	2013년 01월 01일부터 2017년 12월 31일까지 (60개월)						
당해연도 연구기간	2017년 01월 01일부터 2017년 12월 31일까지 (12개월)						
총 연 구 비	정부출연금	3,733,881	천원	당 해 년 연 구 비	정부출연금	847,000	천원
	민간부담금		천원		민간부담금		천원
	계	3,733,881	천원		계	847,000	천원
참여인력(M/Y)	총 연구기간		46명( 24.3 M/Y)				
	당해연도 연구기간		12명( 5.5 M/Y)				
참여기관	기관명	연구책임자	기관명	연구책임자			
참여연구기관							
위탁연구기관							
키워드 (6~10개)	촉각, 투명, UI, UX, 시촉각						
<p>정부출연금사업 연차평가 보고서를 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">2018 년 2 월 1일</p> <p style="text-align: right;">세부과제책임자 : 경 기 욱 (인)</p> <p style="text-align: right;">직 할 부 서 장 : 한 동 원 (인)</p> <p><b>한국전자통신연구원장 귀하</b></p>							

## 연구개발 요약서(세부과제)

대과제명	SW·콘텐츠 기초·미래선도 기술개발					
세부과제명	투명소자 및 UX 기술 연구					
세부과제 책임자	소속	스마트 UI/UX 디바이스 연구실	직 위	실장	성명	경 기 옥
총 연구개발비	3,733,881 천원		당해년도 연구개발비		847,000 천원	
총 연구기간	2013.01.01. - 2017.12.31. (60)개월		당해년도 참여인력	총 (12)명, (5.5)M/Y		
연구목표 (최종)	투명 소자(액추에이터/센서) 원천기술 개발 및 사용자 체험형 신 개념 응용기술 개발					
연구내용 (‘17년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 자가변형 투명 유연 액추에이터 고성능화 및 응용 연구               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자가변형 투명 유연 액추에이터 소자의 박막화 및 고출력 화 연구</li> <li>- 국부적 제어(Localized Control 연구)</li> <li>- 박막형 ICT 소자 응용연구</li> <li>- 자가변형 액추에이터 다수 배열화 연구</li> </ul> </li> </ul>					
예상 성과 (‘17년)	정량	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 액추에이터 기술               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 출력 15dB 이상</li> <li>- 로컬 제어 (2 points 이상)</li> </ul> </li> <li>o SCI 논문 1편, 특허등록 및 출원 3건               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 투명 유연 UI/UX소자 연구 관련 국제학술지(인용지수&gt;5) 논문 게재</li> <li>- 특허 출원 및 포트폴리오 구축</li> </ul> </li> </ul>				
	정성	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 투명한 능동 액추에이터 모듈을 이용하여 차세대 정보기기, 디스플레이 기기, 광학기기를 위한 사용자인터페이스에 관한 독창적인 기술을 개발</li> </ul>				

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 차세대 터치단말 부품용 모델 제시</li> <li>○ IPR 확보에 주력하여 관련분야의 원천 기술 및 지재권 추가 확보</li> <li>○ 관련 분야 우수 해외 기관과 협력을 통해 개발 연구 검증 및 논문을 통한 홍보, 세계 최고 우위 수준 기술 확보</li> </ul>
<p>성과활용계획 (‘17년)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 터치스크린 장치의 새로운 입력 수단 제시, 국제 학회 및 전시회 등을 통한 국제 기술력 홍보</li> <li>○ 차세대 유연 디스플레이 장치의 입력 수단 제시 및 연구 개발 기술 결과를 연계한 대형 연구 사업 발굴 원천 기술로 활용</li> <li>○ 투명하고 움직이는 소자를 이용한 신개념 기기 제시</li> </ul>

## 주요 연구 실적 요약

(1) 지식재산권 실적: 국내등록 1건, 국제등록 2건, 국내출원 1건

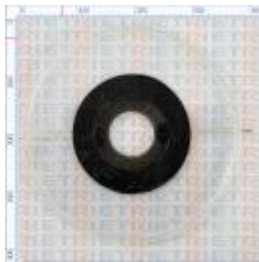
구분	특허제목	출원국	출원/등록번호	출원/등록일	출원인
특허	인공근육	대한민국	10-2017-0034918 (출원)	2017.03.20.	ETRI
특허	ARTIFICIAL MUSCLE	미국	9662197 (등록)	2017.05.30.	ETRI
특허	THIN ACTIVE OPTICAL ZOOM LENS AND APPARATUS USING THE SAME	미국	9612362 (등록)	2017.04.04.	ETRI
특허	Display apparatus and manufacturing method thereof	미국	9841621 (등록)	2017.12.12.	ETRI

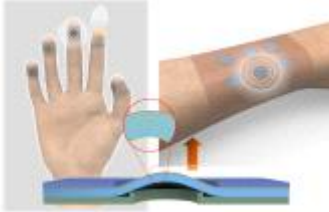
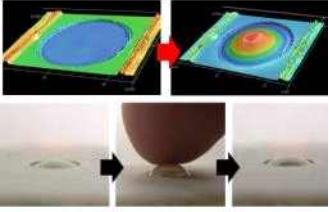
(2) 학술논문: SCI급 4건 게재, 국제학술대회 1건

구분	논문제목	학술지/학술 회의명	권, 호, 쪽	게재/발표 일	Impact Factor (JCR 2015)
학술지 (SCI)	Flexible transparent displays based on core/shell upconversion nanophosphor-incorpora ted polymer waveguides	Scientific Reports	Vol. 7, (45659)	2017.04.03	5.228


학술지 (SCI)	Electrically tunable binary phase Fresnel lens based on a dielectric elastomer actuator	Optics Express	Vol. 25(20), 23802-2380 8	2017.09.19	3.148
학술지 (SCI)	A variation in wrinkle structures of UV-cured films with chemical structures of prepolymers	Materials Letters	Vol. 199, pp. 105-109	2017.07.15	2.437
학술대회	Spontaneous Wrinkle Formation of UV-Cured Films	2nd Global Congress & Expo on Materials Science and Nanoscience	Vol. 2017, pp. 85	2017.09.27	
학술지 (SCI)	Electro-active Polymer based Soft Tactile Interface for Wearable Devices	IEEE Transactions on Haptics	Vol. 11(1), pp. 15-21	2018.02.14	1.031

(3) 주요 연구개발 시제품: 주요시제 4건

시제품명	대표 이미지	주요사항
근육형 액추에이터 소자		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Pre-strain 기법을 이용하여, 근육형 소자의 변형률 증가구조 개발</li> <li>◆ 150%이상의 Radial Expansion을 유도한 원형 프레임 구조</li> <li>◆ 최대변형량: 14.6%</li> </ul>

<p>가변형 촉각소자</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 반응속도 &lt; 10ms</li> <li>◆ 유전성 탄성체를 적층하여 고효율 촉각 액추에이터 개발</li> <li>◆ 강성 변화 없는 고분자 필름 적층(6 layer)</li> <li>◆ 두 가지 촉각 자극 구현 가능 (돌출, 진동)</li> <li>◆ 최대 6 points 개별 동작</li> <li>◆ 최대 변위: 650 um, 두께 대비 93%</li> <li>◆ 최대 출력힘: 249 mN</li> <li>◆ 최대 응답지연: 0.4 ms</li> <li>◆ 최대 인지자극강도(SLdB): 17.20</li> </ul>
<p>고출력 촉각피드용 기능성 소재</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ poly(DEDMS-co-DEMVS) 전구체 합성 및 본 전구체 기반 PDMS-g-PTBA 능동가변 소재 개발</li> <li>◆ 쌍안정성 기계적 물성 및 탄성 특성 동시 보유</li> <li>◆ 유전 특성 개선: 유전상수 (<math>\epsilon' = 3.4</math>) (PDMS 대비 20% 이상 높음)</li> <li>◆ 기계적 물성 가변 제어: 100 ~ 800배</li> <li>◆ 연신율 제어: 130% ~ 520%</li> <li>◆ 나노와이어 임베딩법 기반 고신축성 구동 전극 구현 (<math>R/R_0 &lt; 5</math> @ 인장 변형률 30%)</li> <li>◆ PDMS-g-PTBA 능동가변 소재 기반 박막형 액추에이터 소자 설계 및 제작: 형상 재구성 가능한 대변형 특성 구현</li> </ul>



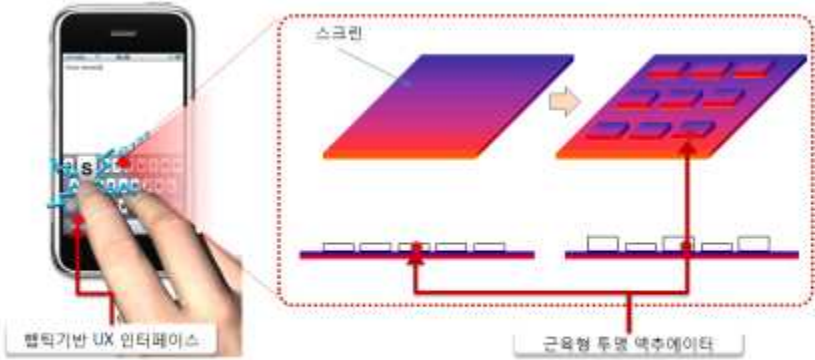
<p>햅틱 피드백 박막형 시험 모듈</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 기능성 폴리머와 투명전극을 이용한 햅틱 피드백 진동 패널 개발</li> <li>◆ 크기: 10.1 인치</li> <li>◆ 광투과도: 약 75%</li> <li>◆ 최대출력: 5G이상 (free load condition)</li> </ul>
---------------------------------	---	--

(4) 글로벌기업 민간수탁 수주

기업명	연구과제명	연구기간/연구비	연구개발 목표
BMW Korea	Haptic Feedback Research	2017.10.01.~ 2018.5.31. (1.1억원)	투명하고 형상가변이 가능한 촉각피드백 터치패널에 관한 기초 연구 및 시험결과 보고

## 제 1 장. 서론

### 제1절. 연구개발 목표

구 분	내 용
<p>최종목표 (연구개념)</p>	<p>○ 투명 가변 소자(액추에이터/센서) 원천기술 개발 및 사용자 체험 (UX)형 신개념 ICT 응용 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 필름형 투명 액추에이터 Array</li> <li>- 수축 이완이 가능한 근육형 투명 액추에이터 원천 기술 확보</li> <li>- 투명 액추에이터를 이용한 신개념 사용자 인터페이스 개발</li> </ul>  <p style="text-align: center;">근육형 투명 액추에이터를 이용한 키보드 개념도</p>
<p>세부목표 (1~3단계)</p>	<p>○ 4인치급 필름형 투명 액추에이터 Array 개발 (1단계, 2012~2014)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 두께 1mm 이하, Array소자 2인치 이하</li> <li>- Multi-Touch 지원</li> <li>- Localized Haptic Feedback 지원</li> <li>- 전용 회로 개발</li> <li>- 지적 재산권 확보</li> </ul> <p>○ 수축/이완이 가능한 근육형 투명 액추에이터 원천 기술 확보(2단계, 2015~2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 총 투명도 75% 이상</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반응 속도 5ms 이내</li> <li>- 멀티포인트 어레이 개발</li> </ul> <p>O 투명 액추에이터를 이용한 프로그래머블 UX 상호작용 기법 제시 (3단계, 2018~2020)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 촉각 입출력 모듈 개발</li> <li>- 촉각 요소 조합형 패턴 생성을 제공하는 API 개발</li> <li>- 촉각, 광학, ICT 응용 소자 연구</li> </ul>
<p>당해연도 연구목표</p>	<p>O 자가변형 투명 유연 액추에이터 소자의 박막화 및 고출력화 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국부화(localized control)연구</li> <li>- 자가변형 액추에이터 고집적화 연구</li> <li>- 투명 유연 박막형 ICT 소자 응용연구</li> </ul>

## 제2절. 연구개발 내용

- 근육형 액추에이터는 고출력화, 고투명화, 고속응답 특성을 갖도록 꾸준히 성능을 향상 시키는 연구에 주력하며, 이후 배열화 및 집적화하여 다양한 활용이 가능하도록 연구를 진행한다.
- 근육형 액추에이터는 출력을 크게 증가시킴으로써 촉각 출력의 목적 뿐 아니라 광학용 렌즈등 다양한 응용 방법으로 사용할 수 있도록 새로운 활용 방법을 제시하고, 지적재산권을 함께 확보함.
- 근육형 액추에이터 응용연구
  - 변형률 10% 이상 고변형 액추에이터
  - 촉각 출력 15dB이상
 국부제어(Localized control)이 가능하도록 하여 2 point 이상에서 독립적인 동작을 구현함.
- 투명소자 기반 UX 응용 연구
  - 광학, 촉각 소자 등 신개념 응용 특허 출원
- 기술개발 성과지표

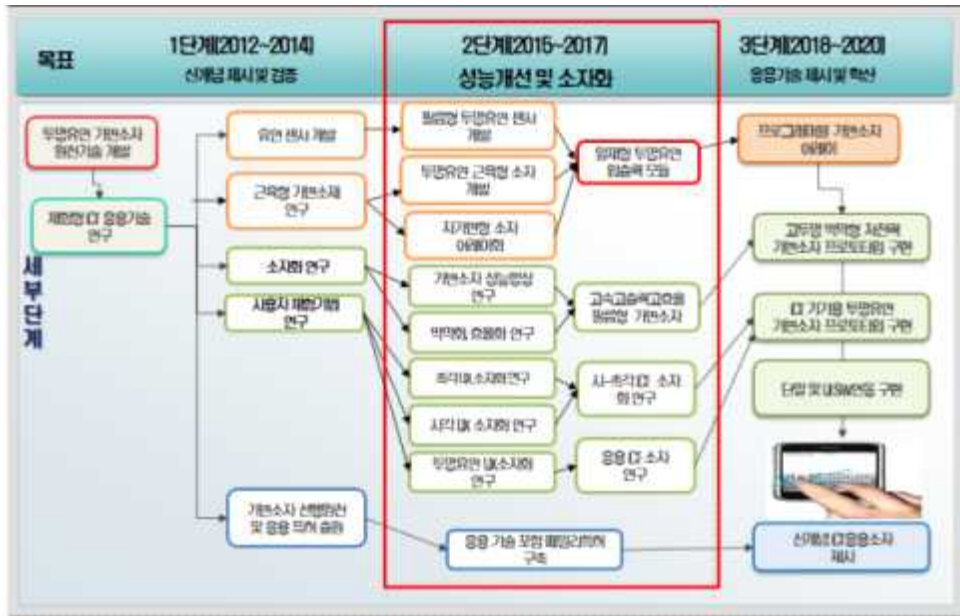
성과지표 (주요성능 Spec)	단위	세계최고수준	기술개발 목표치('17)	목표치 산출근거	달성성과
① 촉각모듈 출력	dB	15	15	세계최고수준	<b>17.20</b>
② 독립국부제어 (localization)	pts	1	2	세계최고수준	<b>6</b>
③ 변형량	%	7	10	세계최고수준	<b>14.6</b>

- 연구산출물 성과지표 (총사업연도/'17년도)

공통지표(필수제시)					자율지표(자율제시)			
지표명		총사업 연도	'17년 도	달성 성과	지표명	총사업 연도	'17년 도	달성 성과
과학 적 성과	표준화된 IF 상위 20% SCI 논문(건)	8	1	2	특허 출원/등록 (건)	20	3	4
	특허활용률 (기술이전건수/ 특허등록보유건수)	-	-	-				
기술 적 성과	국제표준특허(건)	-	-	-	SCI논문 (건)	15	1	3
	국제표준승인표준 기고서(건)	-	-	-				
	3급 특허(건)	1	-	-	Impact Factor 5.0 이상 논문 (건) (2015 JCR 기준)	3	1	1
경제 적 성과	연구비 대비 기술료 수입(%)	-	-	민간 수탁 1.1억				

### 제3절. 연구개발 추진 체계 및 방법

#### 1. 연구개발 추진 체계 (총년도)



<창의연구과제(기존사업평) 연구개발 추진 체계>

#### 2. 연구개발방법

- 필름형 투명 액추에이터 개발
  - 고성능, 고투명 박막형 액추에이터 개발
  - 상용 단말들과 연동하여 동작하도록 개발
  - 체계적인 상용 단말과 연동을 위해 ETRI 내 유관 부서와 협력
  - 기능 향상을 위한 소재 개발 병행 및 전문 인력 활용
- 유연 센서 및 액추에이터용 소재 연구
  - 이전 년도까지 연구된 PDMS 소재를 다른 소재 및 금속 물질을 혼합 또는

합성하여 가변 특성 및 반응속도 개선

- 가변 액추에이터 소자에 사용 가능한 유연하고 투명한 소재를 PDMS 외에 다른 성분의 고유전율 물질 탐색 및 적용

○ 산업계 협력

- 유연디스플레이 등을 위한 인터페이스에 관심을 가진 글로벌 기업과 협력을 통한 수월성 확보
- 국외 산업체와도 지속적 연계를 통한 시장 요구기술 대응 연구
- 관련 기술에 관심을 가진 글로벌 기업과 협력 다각화

## 제 2 장. 본론

### 제1절. 유연 액추에이터 출력 향상 연구

#### 1. 연구개발 개념

- 변형량을 증가시킬 수 있는 유연 액추에이터 연구
  - 유전성 고분자 물질을 이용하여 발생시킬 수 있는 변위를 증가시키면서도, 동시에 힘을 유지할 수 있는 방법 연구
  - 사전변형(pre-strain)을 일으켜 전기활성 폴리머의 복원력과 변형력을 동시에 이용함으로써 변화량을 키우면서도 힘을 유지하는 방법을 연구
  - 사전변형량에 따른 성능 분석 및 최적화 연구 수행
  
- 중력에 안정적이면서도 변형량을 키우는 설계
  - 그림 1-1과 같이 사전에 pre-strain을 가하여 표면의 장력을 유지시키고, 유연전극을 국부적으로 도포함으로써 전기장에 의해 EAP가 늘어나는 힘과 pre-strain에 의하여 복원되는 힘을 동시에 이용함. 유전성 고분자 물질을 이용하여 발생시킬 수 있는 변위를 증가시키면서도, 동시에 힘을 유지할 수 있는 방법 연구

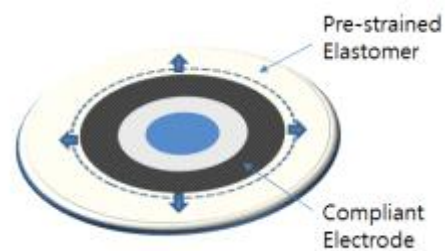


그림 1-1. 팽창형 근육형 액추에이터 설계 개념



## 2. 연구개발 결과

- 그림 1-2는 그림 1-1에서 설명한 원리에 따라 제작한 팽창형 근육형 액추에이터의 프로토타입이다. 그림과 같이 아크릴 등 딱딱한 소재를 이용하여 주변 고정부를 형성한 후, VHB 4910을 가운데를 중심으로 방사형 방향(Radial direction)으로 100~200% 팽창을 시킨 후 고정부에 부착한다. 이와 같은 원리로 VHB4910은 디스크의 형태를 유지하면서도 장력이 유지되어 중력의 방향에 관계없이 평면 형태를 유지할 수 있다. EAP의 움직임의 제한을 두기 위해 가운데 부분에 링을 고정한 후 주변부에 5 mm로 윗면, 아랫면을 모두 Carbon Paste로 도포하였다. 왼쪽 사진은 도포한 후의 모습이며, 오른쪽 사진은 4 kV의 전기장을 양면에 가한 후 EAP가 반지름 기준으로 약 12%, 면적기준으로 약 14% 팽창한 모습이다. 이와 같은 운동은 EAP의 팽창에 의하여 바깥으로 미는 힘, 사전변형 복원으로 인하여 바깥에서 당기는 힘이 동시에 작용하므로 pre-strain을 가하지 않은 경우보다 큰 변형량을 기대할 수 있다. 또한 VHB 4910이 가지고 있는 점성이 EAP의 동적 특성을 방해하는데 반하여, 사전 변형을 가할 경우 소재의 상대적인 영률을 증가시킴으로써 점성이 미치는 영향을 감소시켜 EAP 변형의 동적 특성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

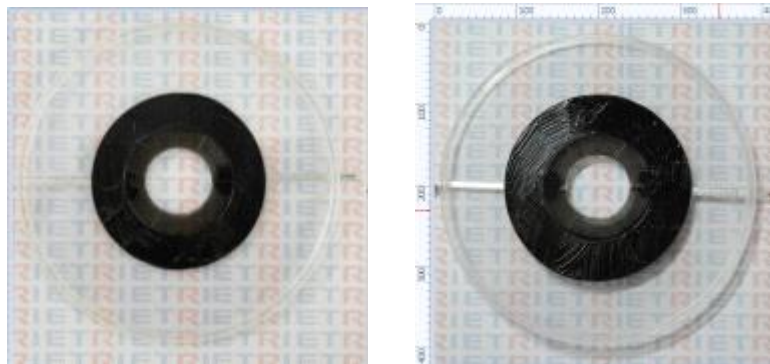


그림 1-2. 팽창형 근육형 액추에이터 프로토타입 (a) Voltage Off (b) Voltage On

- 표1-1은 전위차에 따른 길이 변형량이다. 전압을 상승시킬수록 정전기력이 증가하므로 변형량이 증가하게 되는데, 정전기력은 전위차의 제곱에 비례하므로 변위량 역시 전위차가 증가할수록 급격하게 증가하게 된다. 또한 변위량이 증가하면서 EAP는 얇아지게 되고, 얇아질수록 정전기력은 증가하게 되므로 전압에 따른 변형량은 비선형성을 가지게 되며, 표와 같이 일반적으로 전압의 크기가 커질수록 변위량은 급격하게 증가하게 된다. 4.5 kV의 경우 14.6%의 변위량을 가지며, 이보다 큰 전압을 이용할 경우 Voltage Break Down 현상이 일어나면서 EAP가 파손되거나 순간적으로 방전되는 현상이 일어나게 된다. 그러므로 본 연구에서 제안한 50  $\mu\text{m}$  수준의 VHB4910을 이용한 사전변형구조로 달성할 수 있는 최대수준의 길이 변형은 14.6%, 면적기준으로 21.3%정도임을 확인할 수 있다.

표 1-1. 변위량 측정 결과

작동 전압(kV)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
변위(mm)	0.01	0.05	0.09	0.18	0.27	0.42	0.59	0.73
변위량(%)	0.2	1.0	1.8	3.6	5.4	8.4	11.8	14.6

### 3. 향후 연구계획

- Break Down 현상 방지
  - 폴리머 소재라 할지라도 양면에 큰 전위차가 발생하면 전도성 특성을 가지게 되는데, 이와 같은 이유로 Voltage Break Down 현상이 발생하게 된다. 이와 같은 현상이 발생하면 순간적인 방전으로 액추에이터가 동작하지 않거나 전류량이 커질수록 폴리머가 연소되는 등 파손되는 과정이 일반적으로 일어나게 되는데 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 표면이 균일하게 가공하거나 전기저항이 커지지 않는 부분이 나타나도록 해야 하는데 실험실 수준의 공정에서는 극복에 한계가 있다. 이 부분을 염두에 두고 기계적 전기적 오차가 최소화 되도록 노력할 경우 이론적으로 10 kV수준의 전위차를 사용

할 수 있는 것으로 알려져 있다.

○ 작동전압 낮추기

- 실제 전류는 낮다하더라도 작동 전압이 높은 것은 오작동시 파손 또는 감전의 위험이 있으므로 작동 전압을 낮추는 것이 중요하다. 그러므로 다음 장에서는 가변 유연액추에이터를 만드는 과정에서 얇은 층을 여러 겹 쌓은 다층 구조를 이용함으로써 작동 전압을 낮추고자 한다.

## 제2절. 가변형 유연 액추에이터 연구

### 1. 연구개발 개념

- 웨어러블 디바이스에 적용 가능한 고효율 촉각 액추에이터 연구
  - 고유전성 고분자를 적층하여 고분자의 연성 특성을 극복하고, 인간이 인지 가능한 충분한 강도의 촉각을 제공하는 유연 액추에이터 개발
  - 돌출형 변형을 유도하는 구조를 고안하여 변형 방향성을 제시하고, 입력신호에 따른 다양한 촉각을 구현하는 유연 액추에이터 개발
  - 개발된 유연 액추에이터를 이용하여 두 가지 형태의 프로토타입을 구성하고, 사용자 테스트를 통하여 웨어러블 디바이스 적용 가능성 평가

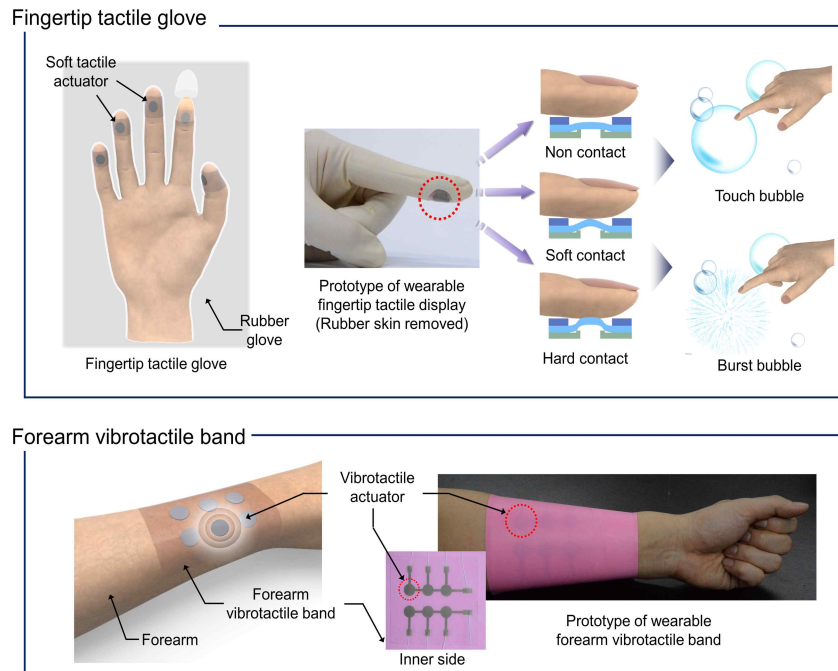


그림 2-1. 유연 액추에이터를 이용한 웨어러블 인터페이스의 개념도 및 프로토타입: 손가락 끝에 촉각을 제공하는 장갑형태 촉각 디스플레이 프로토타입 (상)과 전완에 진동 촉각을 제공하는 촉각 밴드 프로토타입 (하)

## 2. 연구개발 결과

### 가. 가변형 유연 액추에이터 제작

#### ○ 박막형 적층 유전성 탄성 고분자 제조

변형을 이용하는 유연 액추에이터에는 유전성 탄성체 (Dielectric Elastomer, DE)가 주로 사용된다. 유전성 고분자는 전기 전압을 가하면 정전기력에 의해 변형을 일으키는 특성을 가지고 있으며, 일반적으로 유전성이 높을수록 큰 변형을 발생한다. 고분자가 변형을 발생시키고 다시 원 상태로 돌아오는 특성을 탄성체라 한다. 본 연구에서는 유전성이 뛰어나고 탄성 특성이 좋은 유전성 탄성체 중 하나인 PDMS (polydimethylsiloxane) 계열의 Elastosil® P7670를 사용하였다. 고분자들은 대부분 연성을 지니고 있기 때문에 변형이 크며 탄성 성질이 가질 수 있다. 유전성 탄성체도 연성 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 큰 변형을 발생시키더라도 낮은 강성으로 인간에게 제공하는 촉각이 충분하지 않아 촉각용 액추에이터로 사용하기에 어려움이 있다. 이러한 단점을 극복하는 연구가 필요하며, 본 연구팀은 유전성 탄성체를 여러 층을 적층하는 방법으로 해결하고자 하였다. 적층된 유전성 탄성 고분자는 전기 전압 인가 시, 각각의 층이 같은 변형을 보이며 촉각을 제공하기 때문에, 같은 연성이라도 두께의 증대로 더 강한 촉감을 제공할 수 있다. 그러므로, 얇은 박막형태의 유전성 탄성 고분자를 여러 개의 층으로 적층하게 되면, 상대적으로 낮은 전압에 큰 변형을 일으켜 강한 촉감을 제공 가능한 뛰어난 성능의 액추에이터를 제조할 수 있게 된다. 그림 2-1은 실제로 개발된 촉각 모듈의 개념그림 및 프로토타입을 보여준다. 손가락으로 촉감을 제공할 수 있는 모듈은 글러브 형태로 제작되었으며, 암밴드 형태로 제작된 모듈은 전완에 장착되어 6개의 동작점을 개별적으로 가질 수 있도록 설계되었다.

박막형 유전성 탄성체를 제조하기 위하여, Elastosil® P7670의 예비중합체

(pre-polymer) 와 가교결합제 (cross-linker)를 1:1 비율로 섞은 솔루션을 유리판에 doctor blading 방법으로 캐스팅을 한다. 미세 버블을 제거하고 경화하기 위하여 70°C의 진공오븐에서 1시간을 두었다. 성형성과 제조 과정에서 편이성을 고려하여 한 층의 유전성 탄성체의 두께를 100  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 제조된 한 층의 유전성 탄성체 위에 마스크를 이용하여 전극 코팅을 한다. 변형이 발생한 중에도 전극의 내구성이 유지가 가능한 유연 전극 중 하나인 실버나노와이어 (Silver-nanowire)를 사용하였다. 두 번째 유전성 탄성체 박막을 제조하기 위하여 전극이 코팅된 첫 번째 유전성 탄성체 층 위로 같은 공정을 반복한다. 본 연구에서는 6개의 유전성 탄성체 박막을 적층하였다. 그림 2-2(a)는 다층 구조의 유전성 탄성체의 단면 모식도이다. 보시는 바와 같이 유연 전극이 유전성 탄성체 사이에 두고 코팅되어 있으며, 위아래로 겹치는 부분이 전압을 가할 시, 변형이 되는 활성 영역 (Active zone)이다. 그림 2-2(b)는 6개의 층으로 적층하여 제조한 박막형 다층 유전성 탄성체를 촬영한 실제 사진이다. 각각의 층에 코팅된 전극이 변형이 일어나는 원형 형태의 활성 영역까지 연결되어 있는 것을 확인 할 수 있다.

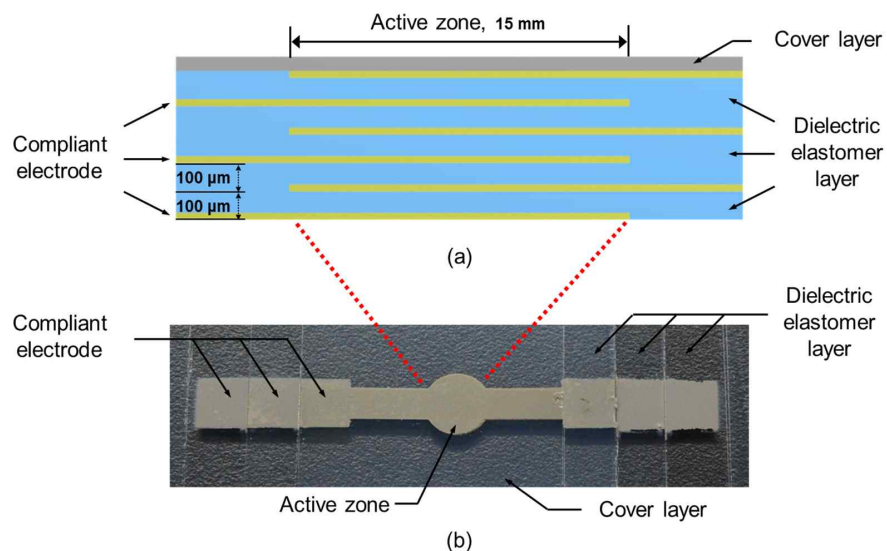


그림 2-2. 다층 구조의 유전성 탄성체의 단면 모식도 (a)와 6개의 층으로 적

층하여 제조한 박막형 다층 유전성 탄성체 실제 사진 (b)

액추에이터가 변형 시에도 가진 전압을 균일하게 유지하기 위해 유연 전극인 실버나노와이어를 사용하였다. 실버나노와이어 전극은 스프레이 건을 이용한 분사 방법으로 코팅을 한다. 다층으로 구성된 박막형 유전성 탄성체에 균일한 전압을 가하기 위하여 전극 설계가 중요하다. 각각의 층의 중앙에 위치한 원형의 활성 영역과 연결된 전극의 길이를 달리하여 동시에 전압을 병렬적으로 공급하는 것이 가능하게 하였다. 이를 위해서는 각각의 층에 노출되어 있는 전극 부분이 다음 층의 유전성 탄성체 제조과정에서 함침이 되지 않도록 주의해야 한다. 그림2-3은 2개, 4개, 6개의 층으로 적층된 유전성 탄성체에 따른 사진으로 각각의 층의 전극 노출부가 함침이 되지 않은 것을 확인 할 수 있다.

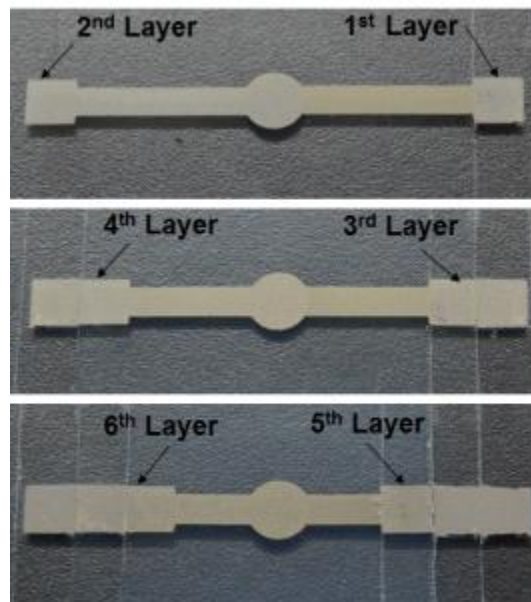


그림 2-3. 다양한 수의 적층된 유전성 탄성체와 각각의 층의 실버나노와이어 전극

각각의 층에서 전극의 노출부에서 활성 영역까지 실버나노와이어 전극으로 연결하여, 노출부에 인가한 전압이 활성영역까지 도달 가능하게 하였다. 각 층의 전극 형성을 확인하기 위하여 6개의 층으로 적층된 유전성 탄성체의 단면을 관찰하였다. 그림 2-4는 다층의 유전성 탄성체를 수직으로 절단한 단면을 광학 현미경으로 촬영한 이미지이다. 그림 2-2(a)의 다층 구조 유전성 탄성체의 단면 모식도와 실제 촬영된 이미지를 비교하였다. 빨간 원으로 표시한 부분의 이미지는 활성 영역의 경계로, 좌측 노출부에서 활성 영역까지 이어진 3개의 전극라인이 확인되며, 우측의 3개의 전극은 우측 노출부에서 활성 영역까지 이어진 것을 확인 할 수 있다. 양쪽의 부분이 달리 형성된 전극을 확인함으로써 코팅된 전극이 설계대로 형성된 것을 확인하였다. 파란 원으로 표시한 부분의 이미지는 활성 영역으로 6개의 전극을 확인 할 수 있다. 단면에서 관찰된 전극들의 일그러진 형상은 단면을 촬영하기 위해 샘플을 준비하는 과정에서 발생되었다.

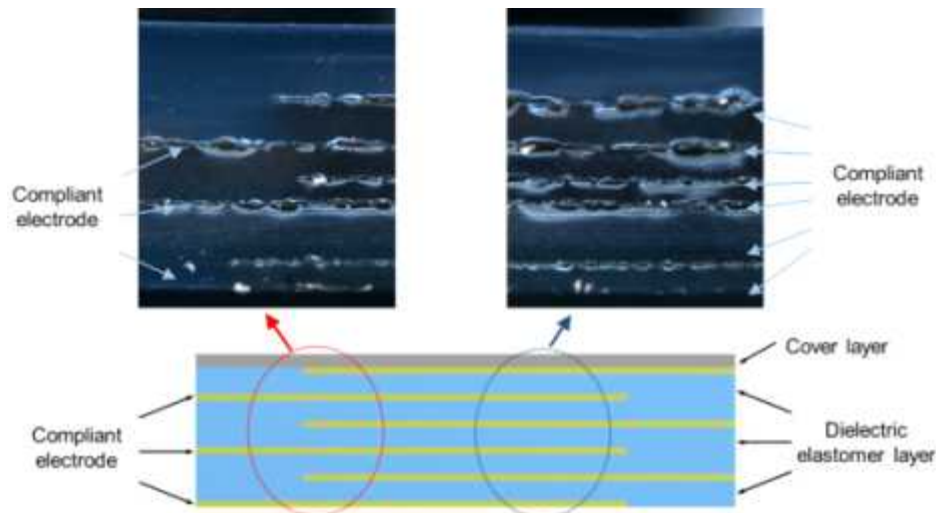


그림 2-4. 다층 구조의 유전성 탄성체의 단면 모식도와 절단한 단면의 광학 현미경 이미지 : 활성영역 경계부(빨간 원), 활성영역(파란 원)



유전 탄성체를 박막형태로 제작하여 전극을 형성하고, 다시 그 위에 유전 탄성체를 적층하여 다층 구조의 유전 탄성체를 제작하였다. 각각의 유전 탄성체 층의 두께가 100 ~ 130  $\mu\text{m}$  로 최대 6번을 적층한 두께는 700  $\mu\text{m}$  내외이다. 여러 층의 유전 탄성체를 적층하였으므로 층간 강성 혹은 적층되는 동안 강성이 달라 질 수 있으며, 이는 전압 인가 시 균일한 변형을 일으킬 수 없게 만들어 액추에이터의 성능을 저하시키는 요인 될 수 있다. 적층되는 동안 강성을 확인하고자 탄성률 중 하나인 Storage modulus를 측정하였다. Storage modulus는 동적기계분석법 (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)으로 측정하였으며, 2, 4, 6개의 층으로 적층된 탄성체를 준비하였다. 측정 결과, 3가지 샘플 모두 200 kPa 내외로 비슷했다. 여러 차례 변형을 주어 탄성률을 측정하는 동적기계분석법으로 얻은 결과이므로, 적층된 유전 탄성체의 각층의 강성 차이로 인한 변형 불균일 현상은 없거나 미미하다는 것을 알 수 있다. 또한 여러 차례 측정 중 층간 이격이 생겼다면 측정되는 탄성률에 반영되어 결과가 상이했을 것이므로, 층간 이격이 없이 6개의 층까지 적층이 된 것을 확인 할 수 있다.

## 나. 고효율 유연 액추에이터 제작

박막형태의 다층 구조의 유전 탄성체를 제작하였다. 각각의 층에 유연 전극도 형성이 되어 6개 층에 전압도 가할 수 있어 유연 액추에이터로 적용이 가능하다. 다만, 성능 향상과 안정성을 위하여 부가적인 프레임은 이용하여 고효율 유연 액추에이터를 제작하였다. 액추에이터에 사용된 프레임은 보호 고분자 필름과 고분자 프레임이다. 두 가지 모두 다층 유전 탄성체의 변형 방향성을 유도하기 위하여 고안하였다. 유전 탄성체는 앞서 언급한 바와 같이, 전압을 인가하면 변형을 일으키며, 대부분 필름형태의 유전 탄성체의 두께 방향으로 전압을 가하면 면 방향으로 변형을 일으킨다. 우선 면방향의 변형을 두께 방향으로 돌출되는 변형으로 전환하기 위해서는 강성이 큰 물질로 경계를 두어 변형을 유도해야한다. 그림 2-5(a)에서 보이는 바와 같

이, 적층된 유전 탄성체 위에 중앙에 구멍을 뚫린 높은 강성의 고분자 필름을 두어 변형을 유도 하였다. 더불어 이 고분자 필름은 액추에이터와 인간의 접촉시, 활성 구간 외의 부분이 직접적으로 접촉하지 않아 안정성을 확보하며, 액추에이터의 손상도 예방할 수 있다. 이에 보호 고분자 필름(Protecting Polymer)으로 명명하였다. 높은 강성의 고분자로 경계를 두어 돌출 변형으로 전환이 가능하였지만, 방향성은 확보되지 않았다. 만약에 보호 고분자 필름을 위, 아래로 양쪽으로 두어 전압을 인가한다면, 위쪽 혹은 아래쪽 어느 방향으로 변형할지 예측이 불가능하다. 이러한 불확실성을 보완하고자, 다층 유전성 고분자가 한쪽 방향으로 치우쳐 변형이 유도되게 하였다. 그림 2-5(a)에서 보이는 고분자 프레임(Polymeric frame)을 제작하여, 유전성 탄성체의 활성 부분이 위쪽 방향으로 굽어지게 하였다. 이와 같은 구조로 액추에이터를 제작하여 전압을 가진하게 되면, 그림 2-5(b)에서 보이는 바와 같이 위쪽 방향으로 변형하게 된다.

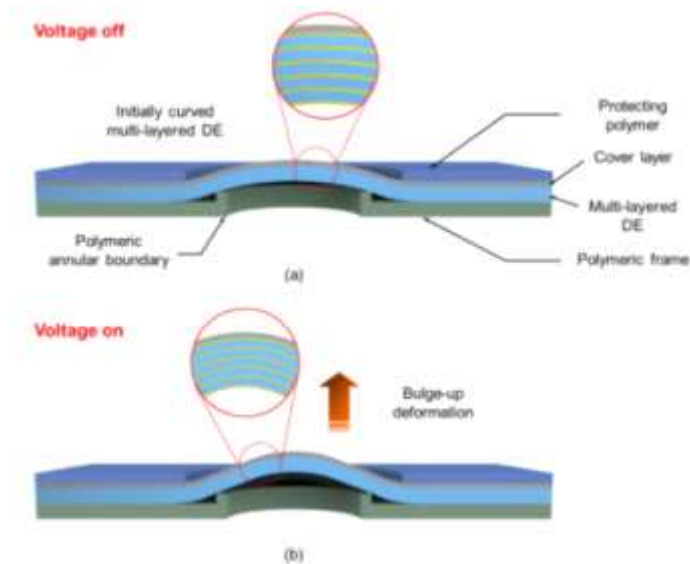


그림 2-5. 다층 구조의 유전성 탄성체를 이용한 유연 액추에이터의 구조 모식도 (a)와 전압 인가시 수직방향으로 변형하는 액추에이터의 모식도

○ 유연 액추에이터 성능 평가

- 기하학적 표면 변형 분석

유연 액추에이터의 유전성 탄성체는 6개 층을 적층하여 제작되었으며, 강성 평가에서도 이격 없이 변형이 발생시키는 것을 확인하였다. 액추에이터에 전압인가를 하면 유전성 탄성체의 활성부분이 보호 필름 중앙의 뚫린 부분으로 돌출 변형을 일으킨다. 원형의 변형으로 활성부분의 중앙부가 가장 큰 변형을 일으키며, 변형의 균일성을 확인하고자 활성부분의 기하학적 표면 분석을 하였다. 3D 광학 프로파일러(VR-3200, Keyence)를 사용하였으며, 액추에이터 작동 전압은 4 kV, 작동 주파수는 0.1 Hz 이다. 그림 2-6(a)에서 보이는 바와 같이 원형형태로 활성부분이 돌출되어 있다. 가장 높은 부분은 중앙부로 측정된 높이는 520  $\mu\text{m}$  이다. 전압을 인가하였을 때, 활성부분의 모든 부분이 변형되어 측정되는 높이가 증가한 것을 확인 할 수 있다. 중앙부의 가장 높은 부분의 측정된 높이는 1.18 mm 로 전압인가 전 대비 660  $\mu\text{m}$  가 증가한 것을 확인 할 수 있다. 그림 2-6(b)에서 확인 할 수 있듯이, 중앙부로 갈수록 붉은 색을 띄고 있다. 이는 좌측의 스케일 바에서 확인 할 수 있듯이 변형이 더 큰 것을 확인 할 수 있다. 전압인가 시 중앙부를 중심으로 기하학적인 대칭변형을 일으킨다. 액추에이터가 작동하는 동안 대칭변형을 유지하여야 변형의 솔림으로 인한 정전기력 불균형을 방지할 수 있으며, 액추에이터의 손상을 줄일 수 있다. 본 연구팀이 제작한 가변형 유연 액추에이터는 대칭변형을 보이며 이는 성능 유지 및 내구성 측면에서 이점을 가진다.

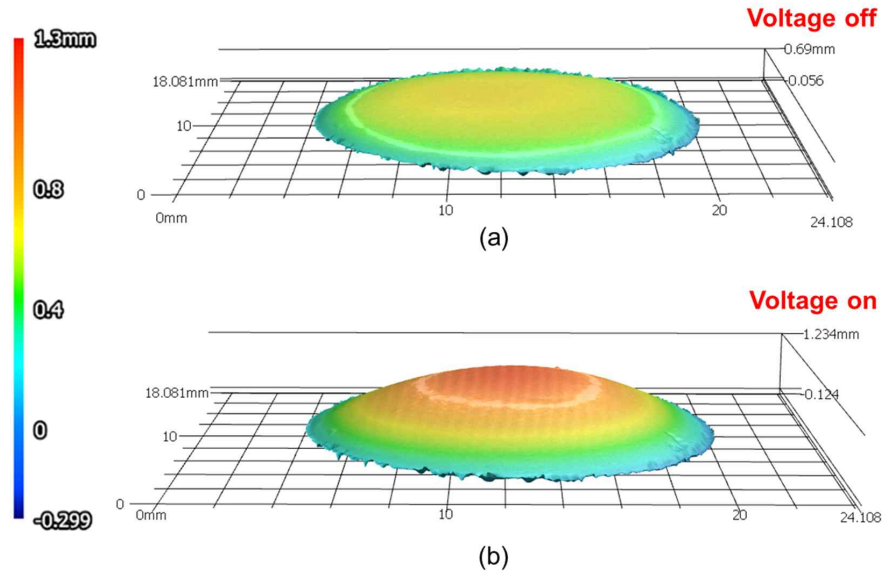


그림 2-6. 유연 액추에이터 활성부분의 표면 형상을 3D 프로파일러로 촬영한 3D 형상 이미지 (a)와 전압 인가 시 변형하는 표면의 3D 형상 이미지(b)

- 변위 분석

가변형 유연 액추에이터의 성능은 수직 방향으로 변형되는 활성부분 돌출부의 변위와 출력힘으로 평가한다. 우선 변형되는 정도, 즉 변위는 전압 인가 전과 후의 측정되는 높이의 차이로 확인 할 수 있다. 변위를 측정하기 위하여 레이저 스캐닝 바이브로미터 (PSV-500, Polytec)를 사용하였으며, 다양한 작동 전압과 작동 주파수를 인가하기 위하여 함수발생기(32220A, Agilent)를 연결하였으며, 신호를 증폭하기 위하여 고전압 앰프 (AMT-10B10-L, Matsusada)를 준비하였다. 외부로부터의 노이즈를 방지하기 위하여 모든 측정은 방진테이블 (DVIO-1, Daeil system)에서 이뤄졌으며 실험결과는 바로 레이저 스캐닝 바이브로미터의 내장 소프트웨어로 모니터링하며 저장하였다. 그림 2-7(a) 는 작동주파수를 1 Hz 로 고정하고 인가전압을 증가하면서 측정된 변위를 나타내고 있다. 인가 전압이 2 kV 에서는 변형이 일어나지 않았지만, 2.5 kV 에서는 변형이 발생하였다. 이

때, 측정되는 변위는 150  $\mu\text{m}$  이었으며, 유연 액추에이터를 작동시키기 위한 최소한의 작동전압은 2.5 kV 임을 확인하였다. 2.5 kV 이상의 인가전압에서는 인가전압을 증가시킬수록 측정되는 변위가 비례해서 증가하는 것을 확인하였다. 최대변위는 인가전압 중 가장 높은 전압인 4.0 kV에서 발생하였으며, 650  $\mu\text{m}$  였다. 6개 층이 적층된 유전성 탄성체의 두께가 700  $\mu\text{m}$  임을 감안하면, 93% 정도가 증가한 것이다. 인가하는 동작주파수에 따른 변위 추이를 확인하기 위하여, 인가전압을 3 kV 로 고정하고 1 Hz부터 500 Hz까지 변화하면서 측정하였다. 이는 인간이 인지할 수 있는 최대주파수(500 Hz)를 고려한 것이다. 그림 2-7(b)는 동작주파수에 따른 변위의 추이를 나타내는 그래프이다. 동작주파수가 1 Hz 일 때의 변위는 340  $\mu\text{m}$  이며, 동작주파수가 220 Hz일 때 변위가 42  $\mu\text{m}$  까지 감소한다. 그 후 235 Hz 에서 변위가 90  $\mu\text{m}$  로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 액추에이터가 가지는 공진주파수 영역대임을 확인할 수 있다. 인간이 인지 가능한 범위에서 변위 인지역치인 40  $\mu\text{m}$ 를 상회하는 변위를 발생시키는 것을 확인하였고, 이러한 결과는 충분한 성능을 갖춘 촉각 액추에이터임을 뒷받침해주는 것이다.

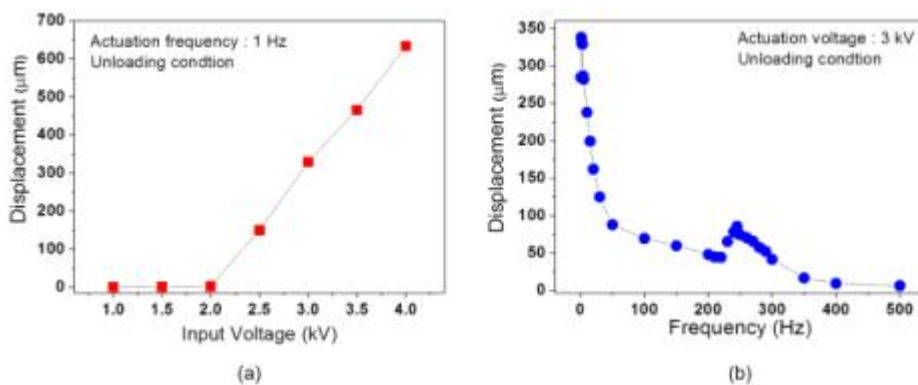


그림 2-7. 유연 액추에이터의 변위 성능 평가. 인가하는 전압에 따른 변위 추이 (a), 동작주파수에 따른 변위 추이 (b)

- 응답 지연

동적거동을 하는 액추에이터는 응답 지연이 성능 평가 시 확인되어야 할 사항이다. 응답 지연은 인가하는 입력에 비해 액추에이터가 얼마나 빠르게 동작하는 지를 나타내는 지표로 인가한 시간과 출력되는 시간의 차이이다. 단위는 ms 로 짧을수록 응답속도가 빠른 것이다. 응답지연은 입력신호에 따른 상대 값으로 고정되어 있고 입력 값에 따라 달라질 수 있으며, 주로 사용되는 입력 값으로 확인한다. 가변형 유연 액추에이터의 응답지연을 확인하고자 공진 주파수 대역인 235 Hz에서 3 kV 전압을 인가하여 작동시켰다. 입력신호와 변위를 동시에 측정하여 응답지연을 그림 2-8 에서 확인할 수 있었다. 사인 입력신호의 최고점으로 기준으로 보았을 때 측정되는 변위의 최고점이 늦게 확인된다. 인가전압으로 인해 전위차가 생겨 전기장을 형성하며 이로 인해 유전성 탄성체가 변형이 되어 돌출되는 과정까지 시간이라고 할 수 있다. 입력신호의 최고점과 변위의 최고점이 측정되는 시간차이가 0.37 ~ 0.40 ms로 확인되며, 입력 동작주파수가 235 Hz, 한 사이클의 시간이 0.43 ms 임을 감안한다면, 우수한 응답성을 확인하였다.

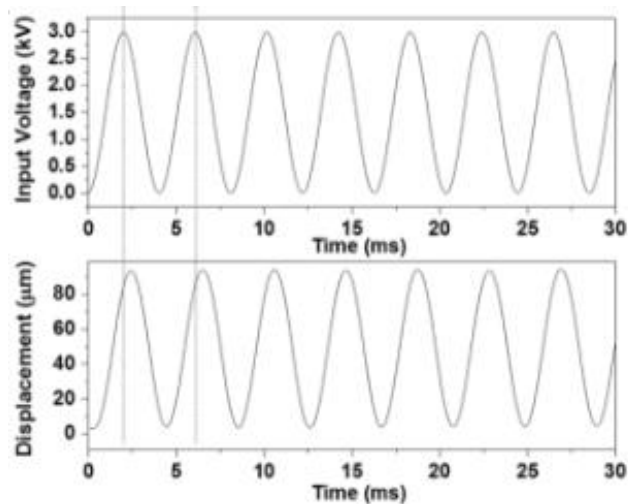


그림 2-8. 사인 입력신호의 전압과 측정된 변위

- 출력힘 분석

가변형 유연 액추에이터의 변위 성능을 확인하였고 촉각 액추에이터로 적용하기에 충분하다는 결론을 내렸다. 변위를 측정하는 것은 액추에이터가 충분한 변형을 하는가를 평가하는 것이다. 실제로 액추에이터가 인간과 접촉하여 변형으로 인하여 촉각을 전할 수 있는가는 출력힘을 측정하여 판단이 가능하다. 이는 유전성 탄성체의 연성특성을 극복하고 충분한 촉각 강도를 인간에게 제공할 수 있는 가능성에 대하여 평가하는 중요한 지표가 된다. 출력힘을 측정하기 위하여 로드셀 (GSO-10, Transducer technique)이 사용되었으며, 정밀한 접촉을 위해 6.3 mm의 실린더형 금속 로드 스템(Load Stem, ALS-08, Transducer technique)을 설치하였다. 유전성 탄성체가 연성을 가지고 있으므로 정확한 접촉 후 힘을 측정하기 위하여 2 mN의 예압을 가하였다. 그림 2-9(a)는 인가전압을 3 kV로 고정하고, 동작주파수에 따른 출력힘을 나타내고 있다. 변위 측정과 마찬가지로 500 Hz 까지 측정하였으나, 실험결과의 추이는 달랐다. 동작주파수가 상대적으로 저주파수 (40 Hz)이하를 제외한 부분에서는 5 mN 이하의 출력힘이 측정되었다. 그러나 동작주파수가 180 ~ 200 Hz일 때 출력 값이 증가하였으며, 최고값은 54 mN으로 191 Hz일 때 확인되었으며 이 영역대가 액추에이터의 공진주파수이다. 변위 때의 공진주파수는 235 Hz이었으며, 출력힘 측정 때의 값이 달랐다. 같은 액추에이터의 공진주파수의 이동은 출력힘 측정 시 유전성 탄성체에 가한 예압에 의한 것이며, 이는 액추에이터와 인간의 접촉에 의해서 발생할 수 있는 것으로 가해지는 예압에 따라 달라진다. 그러므로 출력힘 측정 실험은 액추에이터와 인간 간의 부드러운 접촉으로, 가장 최소한의 접촉을 가정한 것이다. 인가전압에 따른 출력힘의 추이는 그림 2-9(b)에서 나타나 있는 바와 같이 최대 변위 동작주파수인 1 Hz와 최대 출력힘 동작주파수인 191 Hz에서 측정하였다. 동작주파수가 1 Hz 경우 인가전압의 증가에 따라 출력힘도 증가하는 것을 확인할 수

있었다. 인간이 느낄 수 있는 최저 힘의 인지역치가 2.2 mN 임을 고려하였을 때, 측정된 출력힘이 7 mN인 2.5 kV의 인가전압 이상으로 액추에이터에 가하여야만 충분한 촉각을 제공할 수 있다. 최대 출력힘은 인가전압이 가장 큰 4 kV일 때로 25 mN이다. 동작 주파수를 191 Hz로 고정하여 인가전압을 증가시켰다. 측정된 출력힘은 인가전압이 증가할수록 증가되었으며, 인가전압이 1.5 kV일 때의 출력힘이 이미 10 mN으로 인지 가능한 촉각 출력을 제공하였다. 출력힘이 점차적으로 증가하여 동작주파수가 3 kV일 때 54 mN, 3.5 kV일 때 91 mN, 4.0 kV 일 때 249 mN으로 측정되었다. 최저역치를 훨씬 상회하는 값으로 연성특성을 충분히 극복하고 높은 강도의 촉각을 제공할 수 있는 성능을 확인하였다.

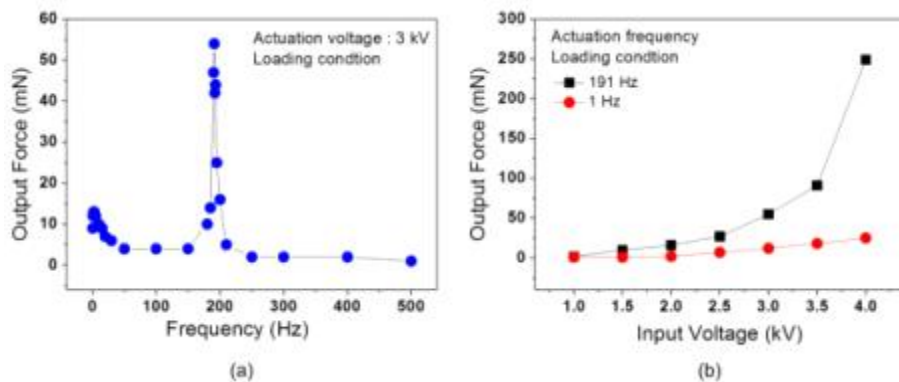


그림 2-9. 유연 액추에이터의 출력힘 성능 평가. 동작주파수에 따른 출력힘 추이 (a), 인가하는 전압에 따른 출력힘 추이 (b)

○ 유연 액추에이터 안정성 평가

- 전기 안정성

유연 액추에이터는 웨어러블 디바이스에 적용하고자 개발되었다. 실제로 착용하게 된다며 액추에이터의 활성부분이 인간과 직접적으로 접촉하게 된다. 전압이 가해지는 전기 경로 부분은 보호필름 등으로 전기적 고립을 시켜 전기적 안정성을 확보할 수 있다. 유연 액추에이터 작동을 위해 수



kV 의 고전압을 사용하기 때문에 잠재적인 전기 안전사고에 대한 안정성 확보는 필수적이다. 전기 안정성은 전기 쇼크 (Electrical shock)의 위험성과 관련하여 평가된다. 전기 쇼크는 전기가 인간에게 가해졌을 때 얼마나 위험한가를 나타내며, 이는 전압의 경우보다는 몸으로 흘러가는 전류의 정도로 평가한다. 유연 액추에이터의 전기 안전성을 평가하기 위해 작동중 누설전류 (Leakage current)를 측정하였다. 누설전류 측정 시스템을 구성하기 위해 미세전류를 측정할 수 있는 디지털 멀티미터(34465A, Keysight)를 사용하였다. 그림 2-10(a)는 동작주파수를 1 Hz와 191 Hz로 고정하여 인가전압을 증가하며 누설전류를 측정하였다. 동작주파수가 1 Hz인 경우는 대부분이 1  $\mu$ A 이하로 상당히 낮은 누설전류를 확인하였다. 191Hz 경우는 인가전압이 증가할수록 누설전류도 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 최대 인가전압인 4 kV일 때로 30.2  $\mu$ A 로 측정되었다. 동작주파수에 따른 누설전류의 변화는 그림 2-10(b)에서 확인되는 바와 같이 동작주파수가 증가할수록 누설전류가 증가하였다. 가장 큰 누설 전류는 500 Hz일 때이며 39.4  $\mu$ A 이다. 전기 안정성에 관한 핸드북\*에 따르면 인간이 전기를 인지하기 시작하는 전류는 1 mA로 유연 액추에이터 작동 시 측정된 모든 누설전류 값보다 큰 차이를 보여 유연 액추에이터의 우수한 전기 안정성을 확인 할 수 있었다.

\* 참고문헌: John Cadick, Mary Capelli-Schellfeffer and Dennis K. Neitzel, "Electrical Safety Handbook," Third Edition, McGraw Hill, pp. 1.7.

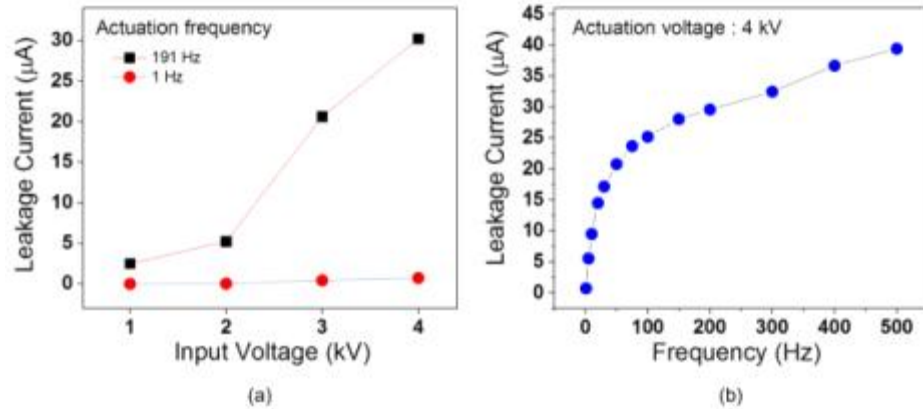


그림 2-10. 전기 안정성 평가를 위한 누설전류 측정 결과. 인가하는 전압에 따른 누설전류 추이 (a), 동작주파수에 따른 누설전류 추이 (b).

#### - 열 안정성

최근 들어 모바일 휴대기기 사용이 급격하게 증가함에 따라 전자기기에 의해 열 안전성이 중요한 이슈로 대두되고 있다. 이러한 열적 안정성은 직접적인 열에 의한 위험이 아니라 전자기기의 사용함에 따라 전자기기가 발생하는 열이 직접적으로 접촉된 인간의 피부에 손상을 가하는 위험을 얘기하며 이에 따른 기준이 마련되고 있다. ASTM 에서 정의하는 인간 피부가 전자기기의 열에 의해 고통을 느끼는 기준은 44°C 에 60초 노출되었을 때이다. 유연 액추에이터 동작 중 발생하는 열을 측정하기 위해 열화상 (InfRec R300, NEC Avio)를 사용하였으며, 그림 2-11은 액추에이터를 4kV의 인가전압을 가하여 100초 작동시키면서 촬영한 열화상 이미지이다. 그림 2-11(a)에서 보이는 바와 같이 1 Hz에서 액추에이터의 작동 후에도 주변온도와 크게 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 그림 2-11(b)는 공진 주파수인 191 Hz에서 측정할 온도로 주변온도 보다 액추에이터의 활성부분 모양으로 상승된 것을 확인할 수 있다. 그러나 중앙부의 최고 온도가 27°C이며, 체온보다 낮고 ASTM의 기준보다도 훨씬 낮은 것을 확인할 수 있다. 실제로 사용자 테스트에 참여했던 모든 사람이 열에 의한 특이점

을 감지하지 못하였다. 가변형 유연 액추에이터가 뛰어난 열적 안정성을 가지고 있음을 확인하였다.

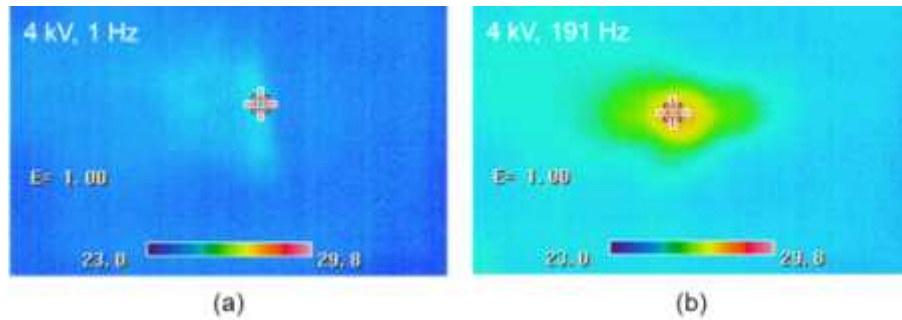


그림 2-11. 열 안정성 평가를 위하여 인가전압 4 kV를 가하며 작동시간 100 초 후 측정된 온도 분포 이미지. 작동주파수 1 Hz (a), 191 Hz (b)

#### ○ 사용자 평가

##### - 손가락 촉각 디스플레이

웨어러블 디바이스로 유연 액추에이터를 적용하기 위하여 사용자 평가를 실시하였다. 총 15명이 참가하였으며, 손가락 끝에 돌출 자극 평가와 진동에 진동 자극 평가를 시행하였다. 손가락 끝 돌출 자극을 평가하기 위하여, 손가락 끝에 유연 액추에이터를 위치하여 흔들림 없이 작동하도록 하였으며 참가자가 소리에 의한 방해 방지하기 위하여 소음방지 헤드폰을 착용하였다. 우선 손가락 끝에 촉각의 인지역치를 정의하고자 예비평가를 실시하였다. 손가락 끝에 가하는 자극은 돌출에 의한 자극으로 동작주파수는 1 Hz로 고정하였다. 촉각의 자극은 강도는 유연 액추에이터에 인가하는 전압으로 조정하였다. 인지역치는 모든 참가자가 예비평가를 통하여 정의하였으며, 예비평가는 참가자가 낮은 인가전압(1 kV)으로부터 증가시키며 자극을 느껴지기 시작하는 인가전압과 역으로 최대 인가전압(4 kV)으로부터 감소시키며 자극이 느껴지지 않는 인가전압을 측정하고 그 두 값을 평균을 내어 결정하였다. 15명의 손가락 끝에 돌출자극의 평균 인지역치는 인가전

압이 2.3 kV 이다. 예비 평가에서 정한 인지역치와 최대 인가전압 값인 4 kV를 5등분하여, 본 평가를 위하여 자극의 강도를 구분 지을 수 있는 6 단계의 값을 도출하였다. 본 평가에서는 각각의 값에 해당하는 인가전압을 두 번씩 무작위로 가하여 총 12번의 자극을 참가자에게 주며, 참가자는 이를 가장 큰 자극을 10, 가장 작은 자극은 1 로 가정하여 자극이 가할 때 마다 느끼는 자극 정도를 숫자로 말한다. 15명 참가자의 12가지의 답변을 분산분석 중 하나인 ANOVA (Analysis of Variation) 로 분석하였다. 표 2-1 은 참가자들이 응답한 손가락에 느껴지는 자극 강도에 대한 평균 값, 표준편차 및 ANOVA 분석을 나타내고 있다. 가진전압이 가장 낮은 V1의 경우 응답한 촉각 강도의 평균값은 1.5, 가장 높은 V6 의 경우 강도의 평균값이 7.7로 6단계의 구분이 있음을 알 수 있다. 그림 2-12에서 확인할 수 있듯이 응답한 인지강도가 확실한 6단계로 구분이 되며, 인가전압 단계에 대한 인지강도 평균의 95%의 신뢰도를 가진다. 비례하는 정도를 나타내는 피어슨 상관계수 (Pearson correlation coefficient, r) 는 0.830 이었다. 이는 가변형 유연 액추에이터는 인가전압에 의해 돌출 자극을 조정할 수 있으며, 6단계의 다른 인지강도의 자극을 발생시킬 수 있다. 또한 Threshold를 기준으로 약 5.13배의 출력을 낼 수 있으므로, 인지강도로는 약 14.2 dBSL에 해당하는 출력을 발생시킴을 확인할 수 있다.

표 2-1. 돌출자극에 의한 손가락 인지자극 강도 추정

Voltage Level	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>
Average	1.5	2.0	3.7	5.0	6.2	7.7
Standard Deviation	0.73	1.05	1.84	1.59	1.73	1.67
ANOVA	F = 79.9, $p << .001$					

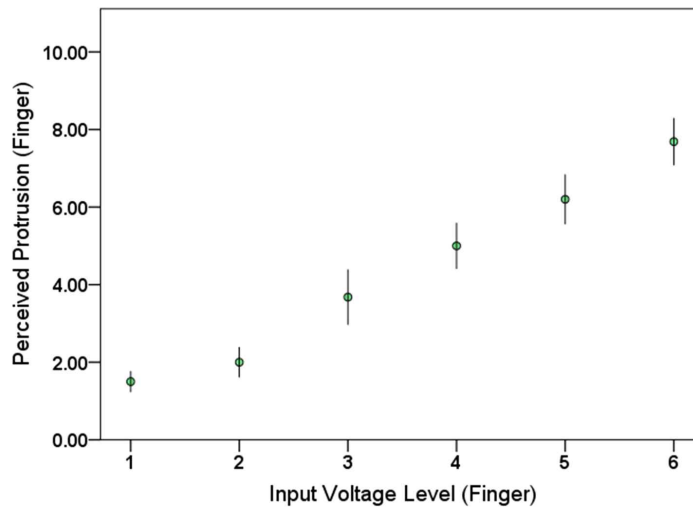


그림 2-12. 손가락에 인지된 돌출자극의 강도 추정.

- 전완 촉각 디스플레이

전완 촉각 디스플레이의 진동 자극의 인지강도 평가를 위해 사용자 평가를 하였다. 총 15명이 참가하였으며, 전완에 진동 자극을 주기 위하여 밴드형태의 구조물을 만들어 유연 액추에이터를 전완과 접촉하도록 하였다. 전완의 촉각 인지역치를 정의하고자 예비평가를 실시하였다. 진동자극을 주기 위하여 공진주파수인 191 Hz를 동작주파수로 인가하였다. 인지역치의 정의는 손가락 자극과 동일하게, 낮은 인가전압으로부터 증가시키며 참가자가 자극을 느껴지기 시작하는 인가전압과 최대 인가전압 (4 kV)으로부터 감소시키며 자극이 느껴지지 않는 인가전압을 측정하고 평균값으로 결정하였다. 전완에서의 진동자극의 평균 인지역치는 인가전압이 1.9 kV 이다. 인지역치와 최대 인가전압 값인 4 kV를 5등분하여, 자극의 강도를 6단계의 값으로 도출하였다. 본 평가에서는 6단계의 인가전압을 두 번씩 무작위로 가하여 총 12번의 자극을 참가자에게 주며, 참가자는 가장 큰 자극을 10, 가장 작은 자극은 1 로 생각하며 응답하였다. 표 2-2는 전완에 느끼는 자극 강도의 평균 값, 표준편차 및 ANOVA 분석을 나타내고 있다. 6단계의 인가전

압과 느끼는 인지강도의 구분이 확실하게 있으며, 이는 그림 2-13에서도 확인된다. 인가전압 단계 대비 인지강도 평균은 95%의 신뢰도를 가지며, 비례정도를 나타내는 피어슨 상관계수가 0.866으로 손가락 자극보다 높은 수치이다. 이는 가변형 유연 액추에이터가 인가전압으로 6단계의 다른 인지강도의 진동 자극을 조정할 수 있음을 의미 한다. 또한 Threshold를 기준으로 약 7.25배의 출력을 낼 수 있으므로, 인지강도로는 약 17.2 dBSL에 해당하는 출력을 발생시킴을 확인할 수 있다.

표 2-2. 진동자극에 의한 전완 인지자극 강도 추정

Voltage Level	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>
Average	1.2	2.1	3.5	5.2	7.3	8.7
Standard Deviation	0.50	1.43	1.89	2.29	1.74	1.09
ANOVA	F = 110.5, $p << .001$					

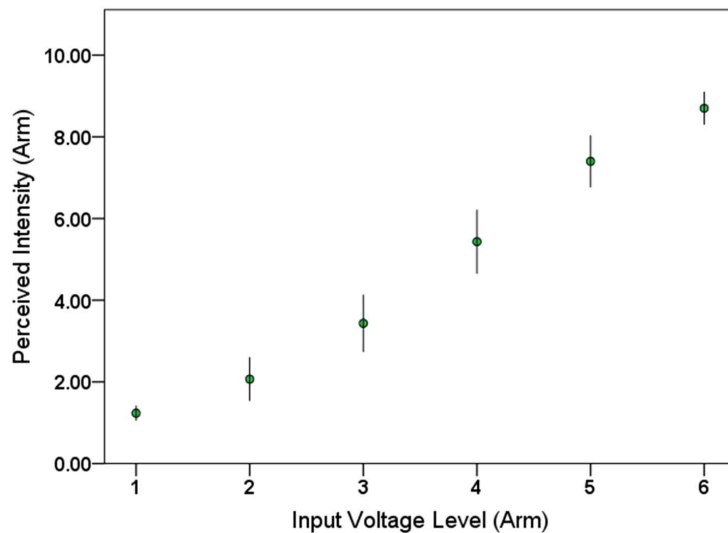


그림 2-13. 전완에 인지된 진동자극의 강도 추정

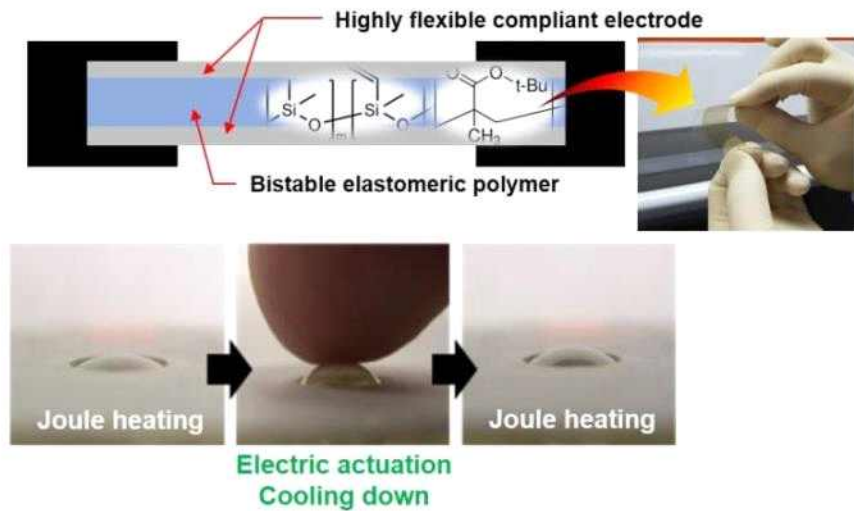
### 3. 향후 연구계획

- 유전성 탄성체를 이용한 유연 액추에이터는 작동전압으로 수 kV가 필요하다. 비록 낮은 누설전류로 전기안정성은 확인되었지만, 다양한 전자기기와 같이 활용되기 위해서는 작동전압을 낮추는 연구가 필요하다. 접근 가능한 두 가지 측면으로 첫 번째는 유전성을 더욱 좋은 재료를 개발하는 것이다. 유전성이 더 향상된다면 같은 변형에 발생시키기 위한 전압을 낮출 수 있을 것이다. 두 번째는 구조적인 변화로 인하여 같은 전압 대비 향상된 변형을 발생시키는 것이다. 돌출 변형을 유도하기 위한 프레임의 구조를 개선하는 방법이다. 이는 인가전압 대비 출력의 효율성을 높이는 방안이다. 이와 더불어 프레임 없이 돌출 변형 방향을 제어하는 연구를 진행하고 있다. 적층되는 층의 강성을 달리하여 방향성을 제어하는 연구를 진행 중이며, 기존의 적층 수를 8개로 늘려서 개발된 유연 액추에이터의 장점을 더 증대시키는 효과를 기대할 수 있다.

### 제3절. 고출력용 기능성 소재 연구

#### 1. 연구개발 개념

- 형상 재구성이 가능한 대변형 촉각 출력 액추에이터용 능동 가변 소재 연구



<연구개발 개념>

#### 2. 연구개발 결과

- poly(DEDMS-co-DEMVS) 전구체 합성

고유연 탄성 고분자인 polydimethylsiloxane (PDMS)에 poly(t-butyl acrylate)를 화학적으로 결합시킨 PDMS-g-PTBA 소재를 합성함. 그림 1에 도시한 바와 같이, 본 소재 합성을 위해 먼저 서로 다른 단량체인 diethoxy-dimethylsilane (DEDMS)와 diethoxy-methylvinylsilane (DEMVS)를 결합한 전구체인 poly(DEDMS-co-DEMVS)를 개발함. 본 전구체는 DEDMS와 DEMVS 단량체 몰% 비율을 80:20 또는 60:40으로 하고, 질소 분위기에서 증류수 (1 mol)과 HCL (0.04 mol)을 촉매제로 사용하여 70°C에



서 24시간동안 고분자화 중합과정을 통해 형성된다. 본 전구체는 증류수에 투입하면, ethyl acetate (EA)와 함께 추출되며, 진공 챔버 내에서 EA를 제거한 후 진공분위기에서 이를 동안 건조하여 제조된다.



그림 3-1. diethoxy-dimethylsilane (DEDMS)와 diethoxy-methylvinylsilane (DEMVS)를 결합한 전구체인 poly(DEDMS-co-DEMVS) 중합 과정

○ 박막형 PDMS-g-PTBA 필름 제작

위에서 언급한 합성법을 통해 얻은 poly(DEDMS-co-DEMVS) 전구체와 t-butyl acrylate (tBA) 및 photo-initiator (2, 2-dimethoxy-2-phenylacetophenone)를 혼합한 폴리머 용액을 모세관 작용을 이용하여 100  $\mu\text{m}$  간격을 가진 두 개의 유리판 사이에 주입한 후, UV lamp (전력: 1 kW, 파장: 365 nm)를 이용하여 광을 10분간 조사하여 광 경화시켰다. 이 후, 경화된 필름형태의 PDMS-g-PTBA를 유리판에서 분리시킨 후, 잔존물을 제거하기 위해 증류수를 이용하여 세정하였으며, 상온 진공 분위기에서 건조하여 박막형 PDMS-g-PTBA 필름을 제작하였다. 제작한 PDMS-g-PTBA 필름은 tBA와 poly(DEDMS-co-DEMVS)의 조성비를 (95:5, 90:10, 80:20, 70:30)로 달리하여 4종으로 제작하였다.

○ 박막형 PDMS-g-PTBA 필름 특성 분석

- 화학적 조성 분석

본 중합체의 화학적 조성을 알아보기 위해서 NMR 분석을 Bruker 500 MHz NMR spectrometer를 이용하여 실시하였으며, 분자량은 tetrahydrofuran (THF)를 이동상 (flow rate: 0.6 mL/min)으로 사용하고, 굴절률 감지 장치를

탑재한 크로마토그래피 (Waters 2690 Alliance gel permeation chromatograph)로 측정하였다.  $^1\text{H}$  NMR  $\delta_{\text{H}}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz),  $^{13}\text{C}$  NMR  $\delta_{\text{C}}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz) 및 분자량 분석 결과는 아래와 같다.

DEDMS/DEMVS=80:20인 경우, Yield: 34.0 g (88 %);  $^1\text{H}$  NMR  $\delta_{\text{H}}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz): 0.09-0.15 (- $\text{CH}_3$ , m, methyl); 5.77-5.83(- $\text{CH}=\text{}$ , m, vinyl); 5.92-6.04 ( $\text{CH}_2=\text{}$ , m, vinyl).

$^{13}\text{C}$  NMR  $\delta_{\text{C}}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz): 0.60-1.39(- $\text{CH}_3$ , methyl); 132.8-132.9(- $\text{CH}=\text{}$ , vinyl); 137.0-137.1( $\text{CH}_2=\text{}$ , vinyl).  $M_n$ :  $6.0 \times 10^4$  mol/g.  $M_w$ :  $11.8 \times 10^4$  mol/g.

DEDMS/DEMVS=60:40인 경우, Yield: 29.0 g (94 %);  $^1\text{H}$  NMR  $\delta_{\text{H}}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz): 0.08-0.18 (- $\text{CH}_3$ , m, methyl); 5.78-5.83(- $\text{CH}=\text{}$ , m, vinyl); 5.92-6.04( $\text{CH}_2=\text{}$ , m, vinyl).

$^{13}\text{C}$  NMR  $\delta_{\text{C}}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz): 0.68-1.03 (- $\text{CH}_3$ , methyl); 132.7-133.0(- $\text{CH}=\text{}$ , vinyl); 136.7-137.0( $\text{CH}_2=\text{}$ , vinyl).  $M_n$ :  $7.94 \times 10^4$  mol/g.  $M_w$ :  $15.6 \times 10^4$  mol/g.

본 NMR 시험 결과를 통해, 합성한 poly(DEDMS-co-DEMVS) 전구체의 조성비를 확인하였다.

#### - 기계적 물성 및 열-기계 물성 분석

합성을 통해 개발한 박막형 PDMS-g-PTBA 필름의 기계적 물성은 TA instruments RSA-G2 시스템을 이용하여 분석하였으며, 시편은 ASTM 규격 (D882 standard test method for thin plastic sheeting)에 따라 제작하였다. 본 기계적 물성 중 응력-변형률 (S-S) 곡선 및 storage modulus를 측정하기 위한 인장 조건은 각각 인장속도 1.8 mm/min와 2% 변형 (1 Hz)이다. 열-기계 물성은 챔버 안에서 5 °C/min의 조건으로 가열하는 동안 변화하는 storage modulus 프로파일을 측정하여 분석하였다.

그림 3-2와 3-3은 PDMS-g-PTBA 필름들의 주파수 및 시간에 따른 storage modulus ( $G'$ ) 변화 추이이다. 측정 결과, 주파수에 관계없이 모든 필름이 일정한 storage modulus를 보였으며, 소재의 점성 특성에 의한 에너지 손실을 의미하는  $\tan\delta$ 는 매우 낮은 값을 보였다. 하지만, 본

PDMS-g-PTBA 소재 내에 PDMS 중량 (wt%)이 5 wt%에서 30 wt%로 증가할수록 storage modulus의 뚜렷한 감소 추세를 확인할 수 있었다. 이는 본 PDMS-g-PTBA 필름에서 가교제 (cross-linking agent) 역할을 하는 Poly(tBA) 특성과 낮은 유리전이온도 ( $-20^{\circ}\text{C}$ )를 보유하고 있는 PDMS의 중량이 증가할수록 상온에서 보다 소프트한 특성을 가짐을 의미한다.

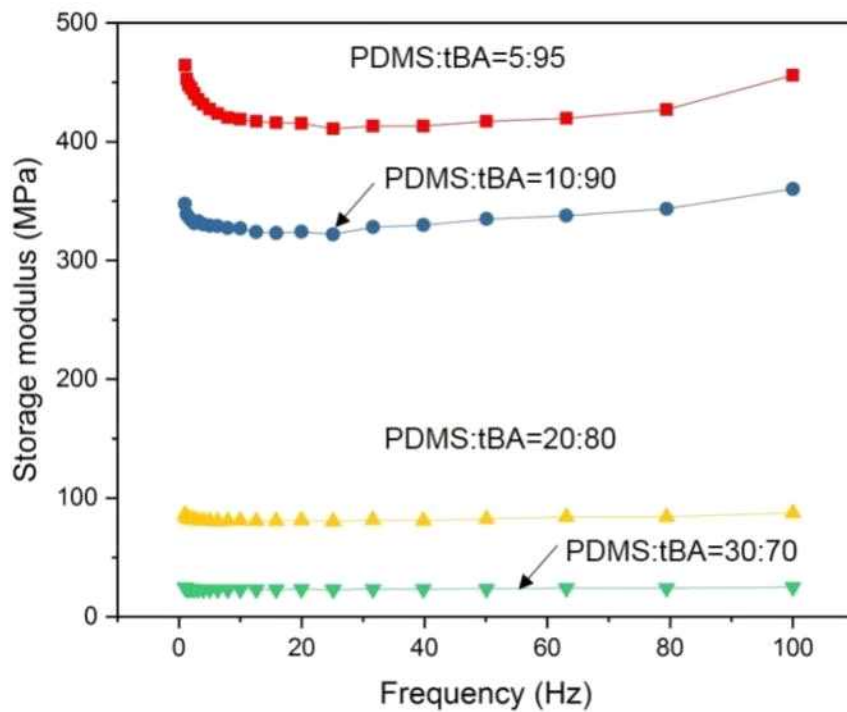


그림 3-2. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 기계적 물성: 주파수-Storage modulus

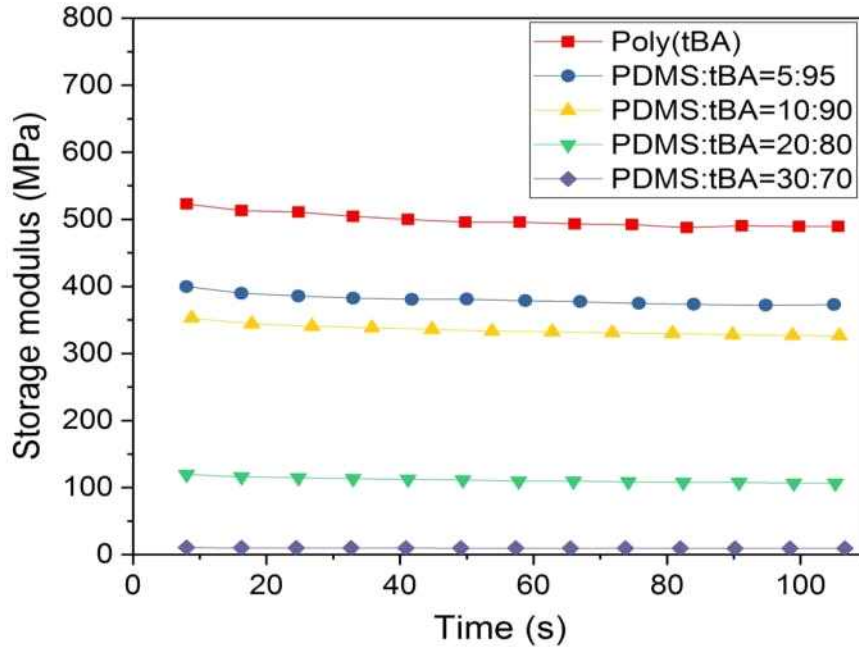


그림 3-3. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 기계적 물성: 시간-Storage modulus

PDMS 중량에 따른 PDMS-g-PTBA 필름의 기계적 물성을 평가하기 위해 서로 다른 PDMS 중량을 가진 PDMS-g-PTBA 필름들의 응력-변형률 곡선을 측정하였다. 그림 3-4에 도시한 바와 같이, PDMS 중량을 하지 않은 Poly(tBA)는 단단한 반결정성 고분자와 유사한 기계적 거동을 보였다. 이로 인해 22 MPa의 높은 항복강도 (yield strength)를 가지나 파단 변형률은 10% 수준으로 구조적 단단함 때문에 허용 변형률이 낮음을 알 수 있었다. 5~10 wt%의 낮은 중량의 PDMS를 사용하는 경우, PDMS-g-PTBA 필름은 Poly(tBA)와 유사한 반결정성 고분자의 응력-변형률 곡선 추이를 보였으나 Poly(tBA)에 비해 허용 변형률은 24% 커졌으며, 항복강도는 32% 낮아졌다. 반면에 PDMS 중량이 20%인 경우, PDMS-g-PTBA 필름의 응력-변형률 곡선에서 항복점이 사라졌으며, 특히 PDMS 중량을 30% 까지 늘린 경우, PDMS-g-PTBA 필름은 전형적인 탄성고분자의 응력 변형률 곡선 특

성을 보였다. 이는 PDMS 중합을 통해 쌍안정 특성을 가진 Poly(tBA)의 기계적 물성 조절이 가능하며, PDMS 중량에 따라 반결정성 고분자 또는 탄성 고분자로 전환이 가능함을 보여준다.

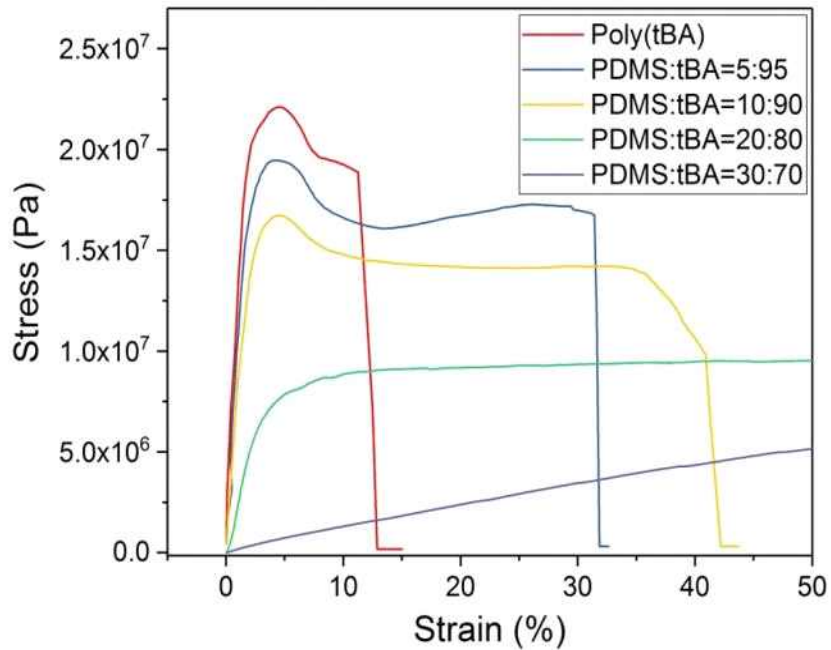


그림 3-4. 서로 다른 PDMS 중량을 가진 PDMS-g-PTBA 필름의 응력-변형률 (stress-strain)

PDMS 중합이 Poly(tBA)의 쌍안정 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 서로 다른 PDMS 중량으로 중합한 PDMS-g-PTBA 필름의 열-기계 물성을 측정하였다. 그림 3-5 및 표 3-1에 도시한 바와 같이, Poly(tBA)는 상온에서 800 MPa의 storage modulus를 가지는 단단한 고분자이나 온도가 본 소재의 유리전이온도 ( $T_g$ ) 영역인 50°C ~ 60°C로 상승하면, 1 MPa의 storage modulus를 가지는 매우 소프트한 고분자로 급격하게 바뀌는 쌍안정(bistable) 특성을 보유한 고분자이다. 5~20 wt% 중량의 PDMS로 중합한 PDMS-g-PTBA 필름의 경우, Poly(tBA)의 쌍안정 특성을 유지하나 PDMS 중량이 증가함에 따라 소프트해지므로 초기 기계적 물성이 점차적

으로 낮아지며, 중합한 PDMS 중량에 따라 PDMS-g-PTBA 필름의 유리 천이온도 ( $T_g$ )의 이동이 발생함을 알 수 있었다. 특히, PDMS-g-PTBA 필름의 유리천이온도 ( $T_g$ )는 근본적으로 낮은  $T_g$ 를 보유한 PDMS 중합에 의해 Poly(tBA) 보다는 낮은 온도 범위에서 형성이 되나 이는 중합한 PDMS 중량에 따라 재조정되는 경향을 보였다. 이는 PDMS 중량이 증가하면  $T_g$ 가 낮아지는 것이 일반적인 현상이나 본 PDMS-g-PTBA 필름에서 PDMS가 광가교제 역할을 하기 때문에 PDMS 중량 증가로 가교량이 증가함으로써  $T_g$ 가 낮아지지 않고 오히려 증가하는 경향을 보였다. 하지만 PDMS-g-PTBA 중합을 위해 사용한 PDMS 중량이 30 wt%가 되면, PDMS의 중량이 tBA에 비해 상대적으로 낮음에도 불구하고, PDMS의 특성이 지배적이게 되어 쌍안정 특성이 사라짐을 알 수 있었다. 즉, 중합에 사용된 PDMS의 중량에 따라서 PDMS-g-PTBA 필름의 쌍안정 특성 및  $T_g$ 의 조절이 가능함을 보여준다.

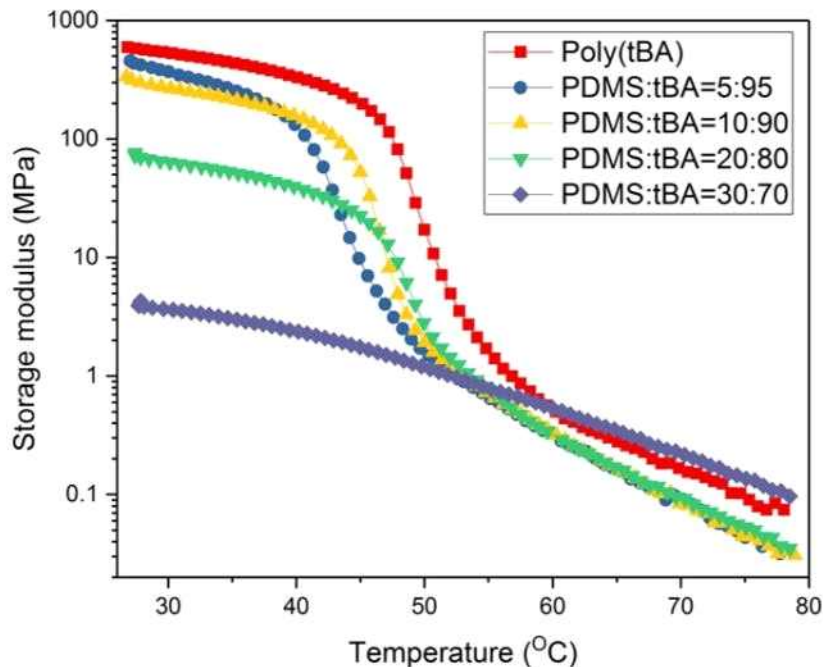


그림 3-5. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 열-기계적 물성: 인

가 온도에 따른 소재 storage modulus의 변화 추이 곡선

표 3-1. Poly(tBA) (reference) 및 PDMS-g-PTBA 필름들의 기계적, 열-기계적 물성 비교 (\* A ~ D: PDMS 중량이 서로 다른 PDMS-g-PTBA 필름)

	Content of PDMS	$\sigma_y$	$\epsilon_b$	$G'$ ( $T_{room}$ )	$G'$ ( $T_g$ )	$G'$ ( $60^\circ C$ )
	[wt%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Reference	0	22.1	111.2	596.7	10.73	0.49
A	5	19.4	131.2	456.4	14.4	0.33
B	10	16.7	135.5	337.3	8.4	0.31
C	20	8.93	347.6	76.6	5.8	0.28
D	30	-	525.5	27.84	-	0.53

PDMS-g-PTBA 필름의 전기적 특성을 평가하기 위해, 증합에 사용된 PDMS 중량에 따른 PDMS-g-PTBA 필름의 유전 상수 ( $\epsilon'$ , dielectric constant)를 측정하였다. 그림 3-6 및 표 3-2에 도시된 바와 같이, Poly(tBA)의 유전상수가 3.7~3.8인데 반해 PDMS-g-PTBA 필름의 유전 상수는 증합에 사용된 PDMS 중량이 증가함에 따라 점차 낮아져서 PDMS 중량이 30 wt%인 경우에는 3.15~3.4가 됨을 알 수 있었다. 하지만, 이는 기존 PDMS 필름의 유전상수 ( $\epsilon'=2.7$ )에 비해 높은 수치이므로 개발한 PDMS-g-PTBA 필름은 대변형 거동 특성 향상 및 본 거동을 위한 허용 구동 전압 범위를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

표 3-2. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 유전 물성 비교

	$\epsilon'$ (@ 20 Hz)	$\epsilon'$ (@ 100 Hz)	$\tan\delta$ (@ 20 Hz)	$\tan\delta$ (@ 100 Hz)
Reference	3.8	3.76	$8.3310^{-3}$	$7.2510^{-3}$
A	3.63	3.51	$8.1110^{-3}$	$6.8410^{-3}$
B	3.41	3.4	$19.3110^{-2}$	$14.7710^{-2}$
C	3.39	3.32	$8.0210^{-3}$	$7.1710^{-3}$
D	3.39	3.33	$8.6510^{-3}$	$8.8210^{-3}$

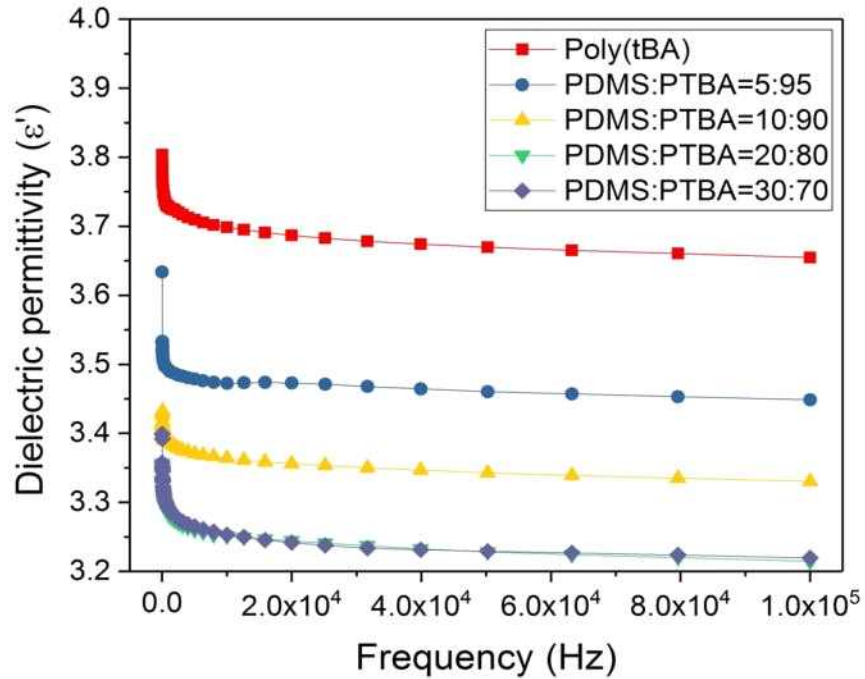


그림 3-6. PDMS-g-PTBA 필름 내 PDMS 중량에 따른 전기-기계적 물성: 주파수에 따른 소재 유전 특성 추이 곡선

본 PDMS-g-PTBA 필름은 상온에서는 단단한 기계적 특성을 가지므로 열을 인가하여 소재의  $T_g$ 에 해당하는 온도로 열을 인가하여 소재의 물성을 소프트하게 만들었을 때 구동이 가능하며, 본 PDMS-g-PTBA 필름 기반 대변형 액추에이터 구동을 위해서는 변형에 강건한 구동 전극 도포가 필수적이다. 이에 그림 3-7(a)에 도시한 바와 같이 PDMS-g-PTBA 필름 상에 변형에 강건한 전극을 형성시키기 위해 유리판에 은나노와이어 (Silver nanowire, AgNWs)를 스프레이 코팅법으로 도포하고, 본 전극이 코팅된 두 기판 사이에 PDMS-g-PTBA 용액을 모세관 현상을 이용하여 캐스팅하고, UV (wavelength: 365 nm)로 광 경화시킨다. 본 전극 형성 기법은 PDMS-g-PTBA 용액이 네트워크 구조를 가진 은나노와이어 전극 내부로 침투한 상태로 고분자화 시키므로 PDMS-g-PTBA 필름에 임베디드된 형태



로 전극 형성이 가능하여 표면에 전극을 형성시키는 방법에 비해 변형 강건성이 우수하다. 그림 3-7(b와 c)는 상기 전극 형성 기법으로 PDMS-g-PTBA 필름 표면 및 내부에 형성된 은나노와이어 전극의 전자주사현미경 이미지이며, 그림 8은 은나노와이어 전극이 임베디드된 유연 PDMS-g-PTBA 필름의 사진이다.

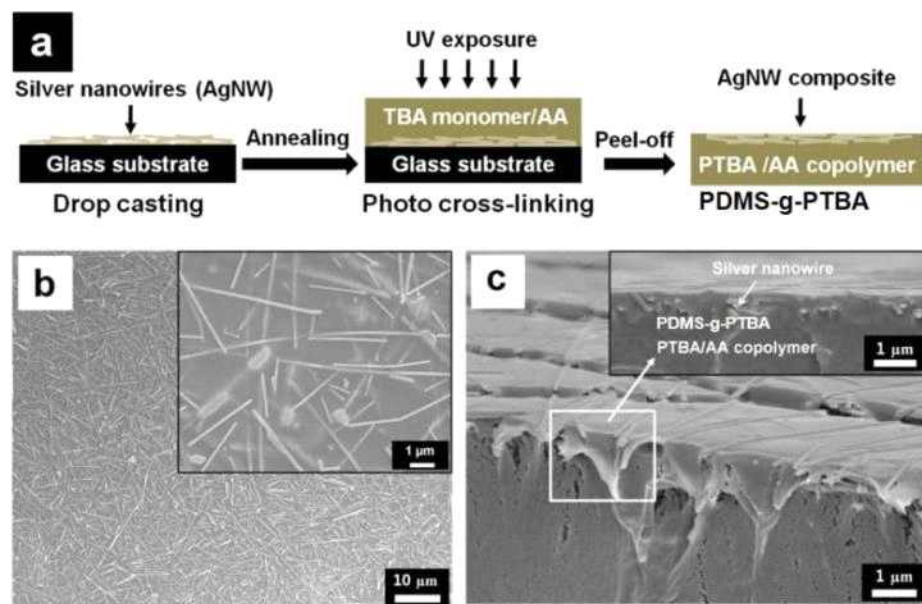


그림 3-7. PDMS-g-PTBA 필름에 은나노와이어 전극 형성 공정 (a) 및 PDMS-g-PTBA 필름 상에 임베디드된 전극의 표면과 단면 주사전자현미경 이미지 (b와 c)



그림 3-8. 은나노와이어 전극이 임베디드된 PDMS-g-PTBA 필름 사진

위에 언급한 바와 같이 안정적인 Joule heating 및 대변형 구동을 위해서는 PDMS-g-PTBA 필름에 형성된 전극의 변형 강건성 확보가 필요하므로, Poly(tBA) 및 다양한 중량의 PDMS를 이용하여 중합한 PDMS-g-PTBA 필름 상에 형성된 전극의 변형에 따른 전기저항 변화를 평가하였다. 그림 3-9에 도시한 바와 같이, 본 평가를 위해 TA Instruments RSA G2의 인장 테스트 모듈과 열 인가 챔버 및 Keysight Technology digital multimeter를 연동하는 측정 시스템을 구축하였으며, 다양한 수준의 반복적 길이방향 변형 시 전극의 전기저항 변화를 측정하였다. 그림 3-10은 PDMS-g-PTBA 필름의  $T_g$  온도까지 열을 인가하여 온도를 안정화 시킨 후, 삼각과 형태의 변형 인가 조건 (최대변형: 20%)하에서 PDMS-g-PTBA 필름에 형성한 은나노와이어 전극의 전기 저항의 변화를 측정한 결과이다. 본 그림에 도시한 바와 같이, 전기저항의 변화율 (변형 시 전기 저항/초기 전기 저항:  $R/R_0$ )은 PDMS-g-PTBA 필름 중합에 적용한 PDMS 중량에 따라 달라지며, PDMS 중량이 5 wt%에서 20 wt%로 증가하면, 동일한 변형조건 (변형률: 0~20%)하에서 10번의 반복적 변형 후 전기저항의 변화율이 14에서 4로 점차 낮아지는 경향을 보였다. 또한, PDMS 중량이 증가할수록 10번의 반복적 변형동안

최대 저항 변화율의 편차가 점차 낮아지며, 특히 PDMS 중량이 20 wt%인 경우에는 반복적 변형 인가에도 최대 저항 편차가 5% 미만으로 반복적 변형에 매우 안정적인 전기저항을 가짐을 확인할 수 있었다. 이는 PDMS의 중량 증가로 인해 PDMS-g-PTBA 필름의 탄성 특성이 강화되어 물리적 변형에 대한 복원력이 향상되기 때문이다.



그림 3-9. PDMS-g-PTBA 구동용 전극의 반복적 변형 인가에 따른 전기저항 변화 특성 측정 시스템 사진

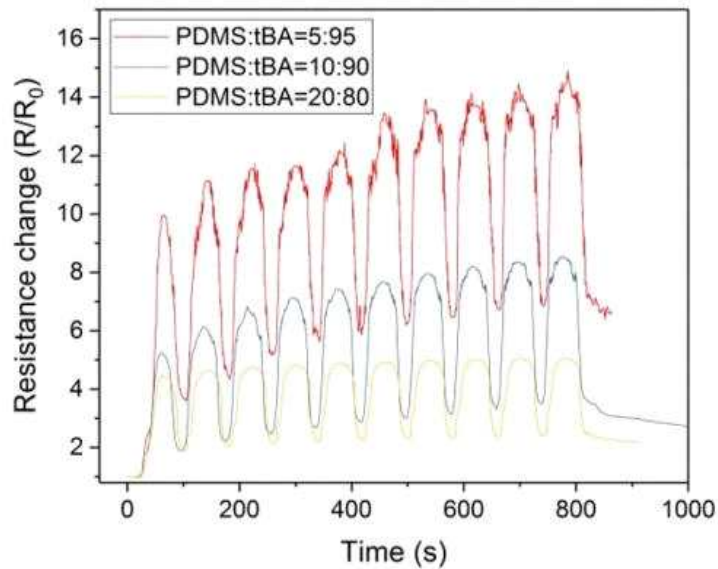


그림 3-10. PDMS-g-PTBA 필름에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 곡선 (반복적 수직방향 인가 변형률: 10%): PDMS 중량에 따른 전기저항 변화 추이 비교

그림 3-11, 3-12 및 3-13은 그림 3-10에 도시한 바와 같이 변형에 대한 전기 저항 안정성이 가장 우수한 20 wt%의 PDMS를 중합한 PDMS-g-PTBA 필름을 실험 시편으로 선택하고, 이에 형성된 은나노와이어 전극의 다양한 변형 조건 (변형률 = 10%, 20%, 30%)에서의 전기저항 변화율을 측정하고, 이를 기존의 poly(tBA)와 비교한 결과이다. 그림 8에 도시한 바와 같이, PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS: 20 wt%)에 형성된 은나노와이어 전극은 인가 변형률이 10% ~ 20%에서는 Poly(tBA)에 비해 전기저항 변화율이 40~50% 낮으며, 10번의 반복적 변형 인가에도 Poly(tBA) 보다 안정적인 저항 변화율을 보임을 확인하였다. 특히, 인가 변형률이 30%인 경우, Poly(tBA)에 형성된 은나노와이어 전극의 전기저항 변화율은 30 ~ 60으로 급격하게 증가하였으며, 반복적 변형 인가에 의한 전기 저항 변화율의 편차 또한 급격하게 증가하였다. 이에 반해 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS: 20 wt%)에 형성된 은나노와이어 전극의 전기저항 변화율은 인가변형률이 20%

경우 유사한 4 ~ 5 수준이며, 반복적 변형 인가에 의한 전기 저항 안정성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 즉, 쌍안정 특성을 보유한 Poly(tBA)에 형성된 은나노와이어 전극은 20% 이하의 변형을 발생시키는 경우에는 전극 임베딩 법의 장점으로 인해 전기 저항의 변화가 10 이하인 특성을 보이므로 전기적 구동을 위한 전극 허용 저항이 수 kΩ 수준인 본 유연 액추에이터의 구동에는 지장이 없으나 외부의 열원 없이 Joule heating을 통해 열을 인가하여 소프트 하게 물성을 변형 시키는 경우에는 반복적 변형에 의해 발생할 수 있는 전기 저항의 증가 및 편차가 커서 열 인가 전류의 제어 어려움이 발생할 수 있다. 이에 반해, PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS: 20wt%)은 쌍안정성과 더불어 탄성 특성을 보유하고 있기 때문에, 본 필름에 형성된 은나노와이어 전극은 반복적 변형에도 전기 저항의 증가 및 편차가 현저하게 낮아서 변형에 대한 전기적 안정성을 가지므로 열 인가 전류 제어가 용이함을 확인하였다.

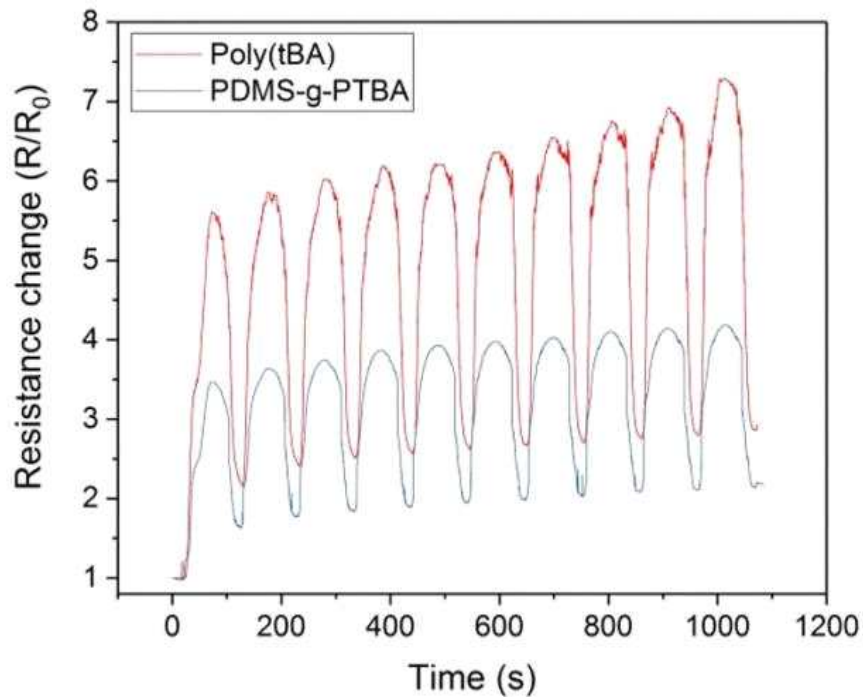


그림 3-11. Poly(tBA)와 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS:tBA =20:80) 각각에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 비교 (반복적 수직방향 인가 변형률: 10%)

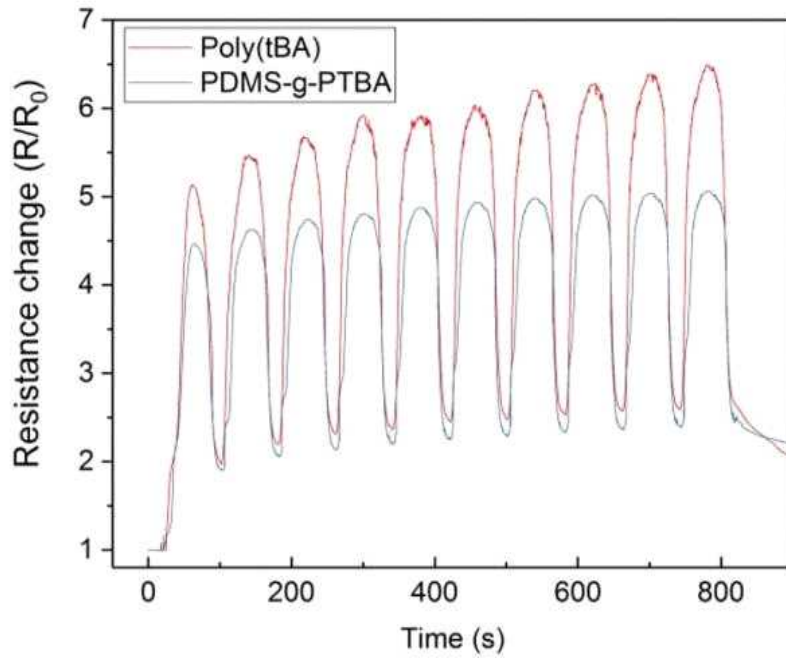


그림 3-12. Poly(tBA)와 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS:tBA =20:80) 각각에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 비교 (반복적 수직방향 인가 변형률: 20%)

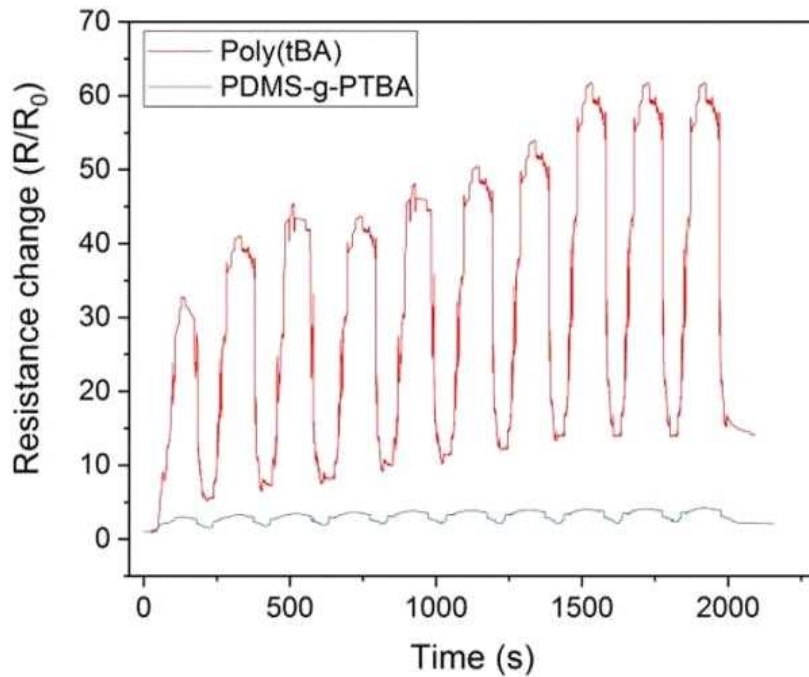


그림 3-13. Poly(tBA)와 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS:tBA =20:80) 각각에 임베디드된 은나노와이어 (AgNWs) 전극의 전기저항 변화 비교 (반복적 수직방향 인가 변형률: 30%)

PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS: 20 wt%) 기반 액추에이터의 전기적 구동 특성을 평가하기 위해서 은나노와이어 전극을 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS: 20 wt%) 양면에 형성시키고, 원형 중공 프레임에 고정시킨 액추에이터를 제작하였다. 본 액추에이터는 한쪽 전극의 양단 사이에 DC 전압을 인가하여 Tg 온도까지 Joule heating 시켜 소프트하게 물성을 변화시키고, 동시에 위아래 전극 사이에 전압을 인가하여 위로 돌출되는 변형을 발생시킨다. 이 후, 변형을 위한 전압을 유지한 채 Joule heating 전력을 제거하여 온도를 낮추고 인가전압을 제거하면, 단단한 물성을 가지며 변형된 형상을 유지하게 된다. 본 구동 과정동안 형상 변화 및 유지 특성을 분석하기 위해서, Keyence 3차원 광 프로파일러를 이용하여 형상을 관찰하였다. 그림 3-14a에 도시한 바와 같이, 초기에 평면 구조를 가진 PDMS-g-PTBA

기반 액추에이터에 Joule heating을 통해 열을 인가하고, 상하전극에 전압 (3.5 kV)을 인가하면 위로 돌출된 곡면형 형상 변형을 발생시키며, 본 형상은 Joule heating 전력 제거 및 구동 전압 제거를 순차적으로 하면 유지된다(그림 3-14b). 본 액추에이터의 반복적 형상 변형성을 확인하기 위해, 변형 형상을 가진 액추에이터를 Joule heating하여 원래 평면 구조로 복원하고 (그림 3-14c), 이에 다시 전압 (3.5 kV)를 인가하여 2차 변형을 시켰다. (그림 3-14d) 본 실험을 통해 탄성에 의한 구조 복원력 및 전기저항 안정성과 쌍안정 특성을 모두 보유한 PDMS-g-PTBA 필름 (PDMS: 20 wt%)의 경우, 변형형상 고정 후 다시 Joule heating하여 평면으로 복원시 초기 평면 형상과 다른 변형된 형상을 가지지만 형상 및 변형량 면에서 일관성 있는 돌출 변형이 가능함을 확인하였다.

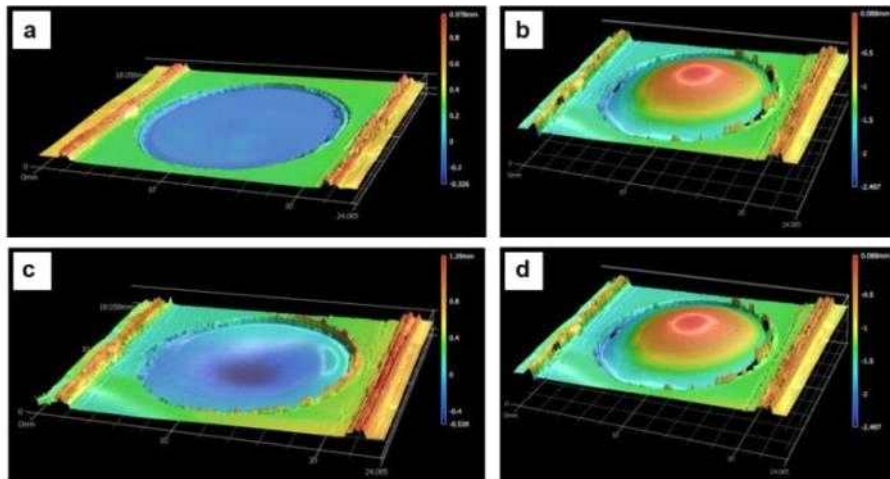


그림 3-14. PDMS-g-PTBA 필름 기반 액추에이터의 1차 및 2차 구동 과정 동안 3차원 형상 프로파일로 측정된 형상 이미지

### 3. 향후 연구계획

- 본 연구에서는 쌍안정성과 탄성을 동시에 보유한 새로운 기능성 능동 가변



소재인 PDMS-g-PTBA 소재 및 본 소재의 대변형 특성에 적합한 고신축성 나노소재 전극 형성 기법을 개발하고, 본 기능성 능동 가변 소재 기반 고효율 액추에이터 1차 프로토타입을 설계/제작 및 변형 특성 시험을 통해 새로운 기능성 유연 촉각 소자로서의 가능성을 확인하였다. 향후 본 액추에이터의 구동 성능 (형상 가변성 및 대변형 특성) 안정화 기술 확보 및 촉각 출력 소자로 활용하기 위한 최적 구조 설계를 통해 어레이형 형상재구성 촉각 출력 액추에이터를 개발하고자 한다.

## 제4절. 필름형 촉각인터랙션 소자 연구 (민간수탁 연계)

### 1. 연구개발 배경

- 2012년부터 시작한 주요사업의 일환인 창의연구사업을 통해 투명, 유연 액추에이터에 관한 새로운 개념을 제시하고 기술을 축적하고 논문을 발표하는 동안, 본 연구과제에 참여한 연구원들의 세계적인 위상이 높아지게 되었고, 이에 따라 지난 수년간 글로벌 기업들의 방문이 이어졌으며 최근 자동차분야의 글로벌 기업인 B社와 민간수탁을 체결하기에 이르렀다.
- B社와의 민간수탁 체결은 연구개발품에 대한 권리를 연구비 출연기업에 허여하는 일반적인 민간수탁계약과 달리 ETRI의 참여연구원에 대한 자체 Labor cost 지원과 전문성을 인정함으로써 지식재산권을 보호받으면서 ‘공동연구’의 형태로 계약을 체결하게 되었다. 이에 B社가 관련과제의 재원을 전액 분담함에도 불구하고, 당 과제인 ETRI 창의연구실사업이 인력과 기존의 지재권을 지원하고 있으며 ETRI에서 내부적으로 지원하고 있다는 점을 상대방관측이 인정하는 공동연구계약을 체결하였으므로, 본 창의연구사업을 통해 민간수탁 과제 성과를 연계하며 관련 진행내역을 보고한다.
- B社와의 민간수탁과제 최초계약은 2017.10~2018.5까지이며, 향후 지속적인 연구 개발협력을 추진할 예정이다. 본 연구는 B社의 입장에서 ‘기술적 가능성’을 검토하는 선행원천연구의 성격을 가진다.

### 2. 연구개발 계획

- 본 연구의 목표는 세계적으로도 본 연구가 연구개발 초기단계라는 점을 감안하여 투명하고 형상가변이 가능한 촉각피드백 터치패널에 관한 기초연구 및 시험결과 보고로 설정한다.
- 그림 4-1과 같이 본 연구에서는 터치를 인식할 수 있는 패널 위에서 다양한

촉각적인 느낌을 느낄 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. (B社의 이익을 보호하기 위하여, 기술적인 상세내역은 본 보고서에서는 생략한다.)

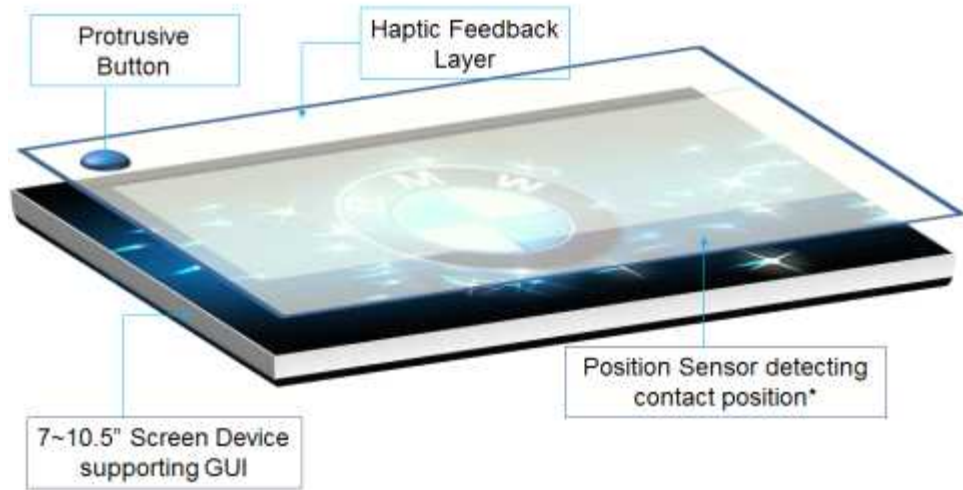


그림 4-1 연구개발 개념

### 3. 연구개발 진행 상황

- 그림 4-2는 개발된 촉각 패널의 프로토타입이다. 개발된 프로토타입을 제어하기 위하여 컨트롤러를 함께 개발 중에 있다. 개발 중인 촉각 패널은 접촉면에서 기계적인 촉감을 생성할 수 있도록 초기 프로토타입을 제작하였으며, 전체 패널의 광 투과도는 약 75%이다. 현재는 패널의 크기, 두께, 동작전압, 출력 등을 시험하고 있으며, 최초의 프로토타입은 직관적으로 동작전압의 크기와 주파수를 제어할 수 있도록 개발되었다.

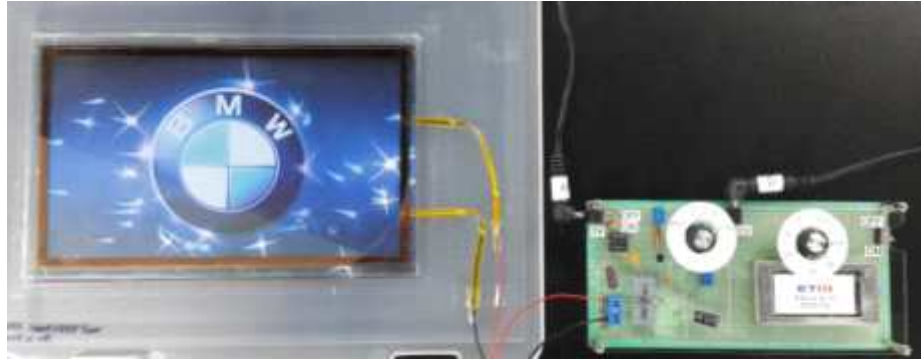
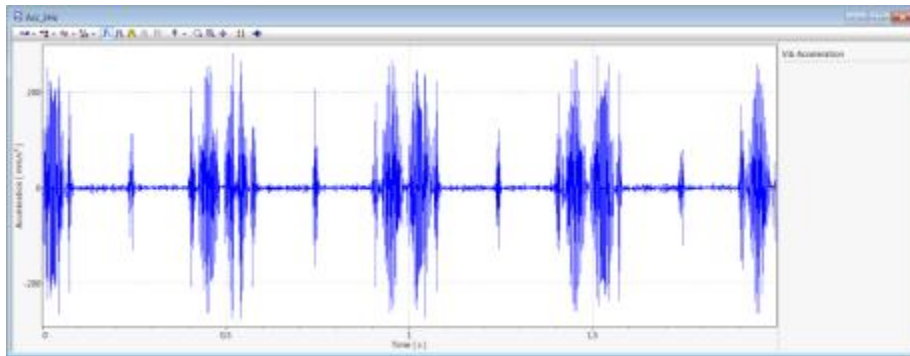


그림 4-2. 촉각패널 프로토타입

- 그림 4-3은 개발된 촉각 패널의 가속도 출력값을 의미한다. 그림에 도시된바와 같이 약 2 Hz 에서는 최대 약 20 G의 가속도를 가지며, 10 Hz에서는 최대 약 9 G의 값을 갖는다. 이 조건은 free load 조건에서의 측정값이므로, 사용자가 손가락 등을 접촉하는 동안은 크게 낮아질 것으로 예상되며 향후 사용자의 접촉 조건에서 이 값을 측정할 예정이다.



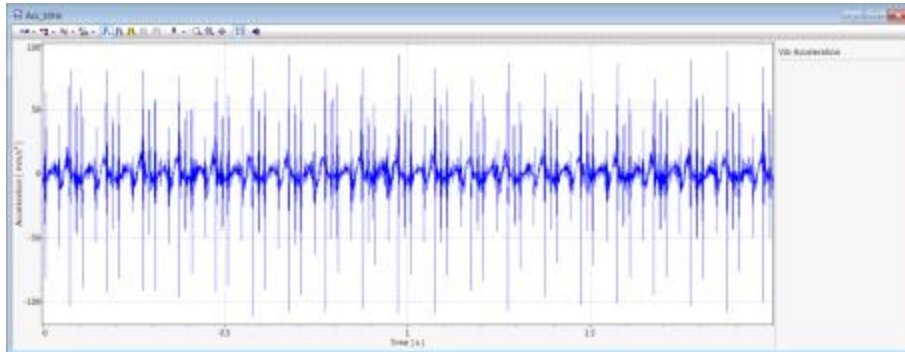


그림 4-3. 촉각 패널의 가속도 출력 (상)2Hz 조건, (하) 10Hz조건

- 가속도 출력값은 촉각적으로 의미를 갖기 위해서는 1.5 G 이상의 가속도 출력을 제공해야하는데, 현재 값의 1/10 수준에 해당하는 값으로 손가락을 얹는 다 하더라도 충분히 1.5 G를 제공할 것으로 예측되나, 향후 실험 수행을 통하여 모든 촉각지각이 가능한 주파수, 다양한 하중조건에서 실험적으로 확인할 예정이다.

#### 4. 향후 연구계획

- 본 연구는 촉각 패널 개발 뿐 아니라 실제로 사용자 인터페이스에 이용될 가능성을 검증해야 하므로, 아래 그림 4-4와 같이 전체 시스템을 구성하여 터치패널 상에서 다양한 촉감을 통한 그래픽 사용자 인터페이스 설계 및 조작성을 통한 효과에 관한 기초 실험을 수행할 예정이다.

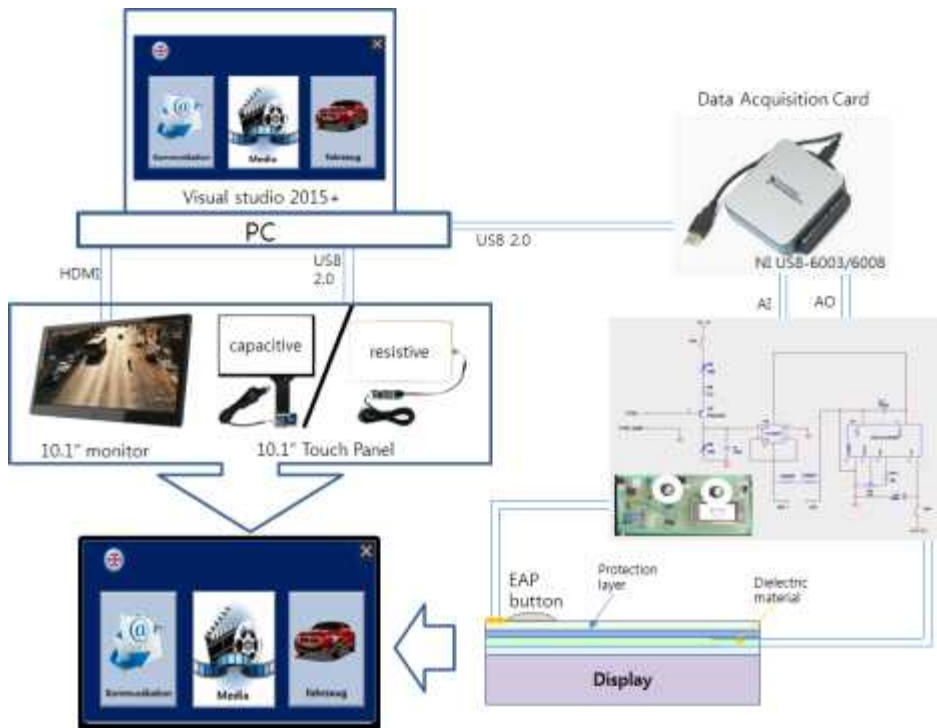


그림 4-4. 전체 시스템 구성도

## 제 3 장. 연구결과 활용계획

### 제1절. 연구개발분야 활용계획

- 필름형 액추에이터 개발
  - 고성능, 고투명 박막형 액추에이터 형태로 개발
  - 상용단말들과 연동하여 동작하도록 개발
  - 체계적인 상용단말과 연동을 위해 ETRI내 콘텐츠 등 관련 부서와 협력
  
- 근육형 유연 액추에이터 개발
  - 고출력 형태로 연구개발 추가 진행
  - 고성능, 고투명 등 경쟁기관에 비하여 기술적 우수성 확보 노력
  - 투명유연을 강조하여 차별화하며, 센서 액추에이터를 결합한 새로운 인터페이스 제시
  
- 신규 응용 연구분야 제시
  - 투명유연 액추에이터를 이용할 수 있는 ICT 전분야에 대한 응용 대상 발굴 연구
  - UI/UX, 광학 등의 측면에서 새로운 활용 방법에 관한 연구로 확장

## 제2절. 산업분야 활용계획

### ○ 정보기기 산업분야 협력

- 스마트 단말, 유연디스플레이 등의 사용자 입력 인터페이스로 활용 가능성을 검토할 수 있음.
- 과제 수행기간동안 국내 스마트단말 제조회사와 NDA 등을 체결하였으며, 관련 산업에 촉각입출력 장치 등으로 활용하는 방안에 대해서 지속적으로 협력해 나아갈 계획임.

### ○ 광학기기 산업분야 협력

- 본 연구개발 기술은 렌즈 등을 포함한 광학기기에 응용될 수 있는 가능성 또한 있으므로, 최근 카메라, 스마트폰 등으로 사용량이 급격히 늘고 있는 광학기기에 활용하는 방법에 대해서 연구함.
- 스마트폰 박막형 줌 렌즈 등을 위해 활용할 수 있으며, 국내 소형 카메라 및 줌렌즈 관련 산업계와 꾸준히 협력해 나아갈 예정임.

### ○ 자동차 산업분야 협력

- 자동차내의 운전자의 손과 발이 닿는 모든 사용자 인터페이스에 근육형 액추에이터, 필름형 액추에이터 개발 결과를 적용할 수 있으며. 자율주행시스템, 블랙박스 등 광학기기에도 활용할 수 있음.
- 국외 자동차 관련 산업체와 MoU를 체결하는 등 관련 협력을 지속해 나아갈 예정임.
- 국내 자동차 업계등과로 협력을 통하여 장기적으로 자동차에서 필요한 체험형 사용자 인터페이스 개발을 지속적으로 추진할 예정임.



### 제3절. 주요사업 Rolling Plan에 따른 향후 연구개발 계획

- 본 과제는 주요사업의 일환으로, 3단계에 접어드는 2018년부터는 주요사업 Rolling Plan에 따라 중과제 형태로 운영될 예정이며, 자동차등 주력산업과 관련되어있는 과제들과 함께 연계되어 지속될 예정입니다.
- 본 과제의 수행을 통하여 글로벌 자동차 기업으로부터 원천연구형 과제를 수행한 경험이 있는 만큼, 차기년도부터 수행되는 주요사업에서도 경쟁력 있는 원천연구의 성격을 지켜가면서도 산업화에 연계될 가능성이 보일 수 있도록 시축각 중심의 ‘사용자 맞춤형 programmable UI/UX’기술에 관한 연구를 수행할 계획입니다.

## 제 4 장. 결론

### 제1절. 결론

본 연구개발과제는 ETRI 창의연구실사업의 일환으로 수행되어 신개념 기술에 기반한 원천기술확보에 주력하여 현재 6년차(2단계 6년차)에 이르고 있다. 본 연구 개발 지원을 통해 연구개발 초기에는 확보하지 않고 있었던 필름형 액추에이터, 근육형 유연액추에이터, 유연 센서 등을 개발할 수 있었으며, 무엇보다 해외 선도국과 경쟁이 가능한 수준에 도달하였다는 데 큰 의의를 두고 있다.

특히 근육형 액추에이터의 광투과도 및 성능 측면에서 이미 선진기관의 수준을 앞질러 세계 최고 수준에 이르렀으며, 그 결과 해외 기관에서 관련 연구개발 문의 및 공동연구개발을 제안하는 수준에 이르고 있다.

학술적으로는 세계적인 수준의 연구논문을 꾸준히 발표하고 있으며, 국제특허 또한 다수가 등록됨으로써 국제적인 수준을 객관적으로 인정받고 있다.

현재 6차년도에는 다층구조를 이용하여 출력을 향상 시킬 수 있는 근육형 액추에이터를 개발하는데 완료하였으며, 기존에 비하여 출력을 향상시키고 웨어러블 촉각입출력 기기로서의 사용성을 검증하였다. 또한 소재개발을 통하여 출력을 크게 확대시킬 수 있는 방안에도 연구하였다.

향후 관련 연구가 지속될 경우, 다수의 배열을 이용하여 활용도를 높이며 또한 관련 산업계와의 지속적인 협력을 통해 신산업으로 활용될 가능성에 대해서 연구해 나아갈 계획이다.

## 제2절. 건의사항

연구개발 환경에서는 기초원천연구개발 과제의 경우 장기적이고 안정적인 연구개발 환경 마련이 무엇보다 중요하다는 것은 연구자들의 경험에 의한 공감일 뿐 아니라 노벨상 등 세계적인 연구성과 수준을 달성한 연구자들이 공통적으로 언급하는 사항입니다. 단기적인 실적이 요구되는 경우에는 높은 연구적 수준에 기반한 결과물 보다는 단기 가시적인 실적을 위한 설익은 결과물에 의존하여 과제를 유지할 수 밖에 없습니다. 장기적으로 지속적인 연구를 통해 무르익은 완성도 높은 연구결과물, 독창적인 연구 결과물을 얻을 수 있도록 해마다 연구지원이나 관리환경이 변하는 것이 아니라, 장기적이고 안정적인 연구개발 환경 지원을 부탁드립니다. 그간 개발된 기술의 원천성이 유지되면서 글로벌 리딩 수준의 기술 수준을 지속적으로 새롭게 달성하기 위한 연구자로서의 노력을 게을리 하지 않을 것을 함께 약속드립니다.

주 의

1. 이 연구보고서는 한국전자통신연구원의 주요사업으로 수행한 **최종** 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국전자통신연구원에서 수행한 주요사업 결과임을 밝혀야 합니다.