

◆ 특집 ◆ 고분자 기반 소프트 액추에이터

셀룰로오스 아세테이트 기반의 햅틱 액추에이터

A New Haptic Actuator based on Cellulose Acetate

김상연¹, 김동구², 윤성률³, 경기욱^{4,✉}, 김재환²
Sang-Youn Kim¹, Dong-Gu Kim², Sungryul Yun³, Ki-Uk Kyung^{4,✉} and Jaehwan Kim²

¹ 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 (Department of Computer Engineering, Korea University of Technology and Education)

² 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)

³ Department of Mechanical Engineering, UCLA

⁴ 한국전자통신연구원 차세대 컴퓨팅 연구부 (ETRI)

✉ Corresponding author: kyungku@gmail.com Tel: 042-860-1703

Manuscript received: 2011.9.20 / Accepted: 2011.10.4

This paper suggests a new film-type haptic actuator based on cellulose acetate electro-active paper. Conventional tiny haptic actuators in mobile devices can create vibrotactile sensation at only near resonant frequency. The strategy of operating near the resonant frequency, however, brought a new issue for creating vibrotactile sensation which can be strong enough to feel in arbitrary frequency. Another problem is that the size of the conventional actuator is not small enough to be embedded into slim mobile devices. In order to achieve these issues, we propose a thin and tiny actuator based on a cellulose acetate material charged with an electric potential. The motion of the actuator can be a concave or a convex by controlling a polarity of both charged membranes and the actuator performance can be modulated by increasing level of biased electric potential.

Key Words: Haptic Actuator (햅틱 액추에이터), Vibrotactile Sensation (피부진동감), Mobile Devices (휴대용 기기).

1. 서론

사람의 햅틱감각은 크게 관절, 근육, 인대 등에 있는 수용기를 통해서 느껴지는 근 감각(역감, kinesthetic sense)과 피부 내에 있는 수용기 (Receptor)를 통해서 받아들여지는 피부감각(재질감, tactile sense)으로 나뉘어진다. 근 감각은 물체의 딱딱하고 말랑말랑한 정도를 파악하는 수용기가 받아들이는 정보이며 피부감각은 물체 표면의 거칠기를 파악하는 수용기로부터 받아들인다. 이와 같은 근 감각과 피부감각은 기기를 조작하거나 가상의 물체와 인터랙션 할 때 시각정보와 함께 사용

자에게 전달되어 사용자의 몰입감을 높여준다. 특히 휴대용 기기의 경우에는 시각 디스플레이 부 (Visual Display Unit)의 크기를 사용자가 몰입감을 느낄 만큼 충분히 증가시키는 것이 힘들기 때문에 햅틱 감각은 몰입감 및 조작감을 증대시키는데 중요한 요소가 된다. 그러므로 사용자에게 촉감을 전달하기 위한 햅틱 기술들이 휴대용기기에 적용되고 있다.

사용자에게 몰입감을 전달해 주기 위해 사용자에게 근 감각뿐 아니라 피부 감각까지 전달해야 한다. 그러나 현재 근 감각 제시장치들에 주로 사용되고 있는 햅틱 액추에이터들은 크기가

다소 커서 휴대용 기기에 적용하는 것은 매우 힘들기 때문에 휴대용 기기에서의 햅틱 인터랙션을 위하여 많은 연구자들은 사람의 피부 안의 수용기들을 자극할 수 있는 피부감각 액추에이터 및 방법에 대한 연구를 진행하였다. 사람의 피부(털이 없는 피부 기준)에는 크게 통증을 받아들이는 통각 수용기(noci-receptor), 온열감을 위한 수용기(thermo-receptor), 그리고 물체 표면의 거칠기를 파악하게 해주는 기계적 수용기(mechanoreceptor)라는 3 가지 타입의 수용기가 존재한다.¹⁻³ 그리고 털이 없는 피부에 존재하는 기계적 수용기에는 머켈디스크(Merkel's disk), 마이스너 소체(Meissner corpuscle), 루피니 엔딩(Ruffini ending) 그리고 퍼치니언 소체(Pacinian corpuscle)가 존재한다. 머켈디스크는 정적 자극이나 준 정적(quasi-static) 자극에 따른 피부의 변형에 반응하여 물체의 경계등을 사람에게 느끼게 하는 역할을 하며 동작 주파수는 약 0-3Hz 에서 가장 민감하다. 2-40Hz 의 주파수에 반응하는 마이스너 소체는 피부의 떨림과 같은 피부의 동적인 변형에 반응한다. 기계적 수용기 중에서 가장 민감한 퍼치니언 소체는 40-500Hz 의 주파수에 반응하여 가속도나 진동자극을 받아들이는 역할을 한다. 그리고 루피니 엔딩은 100-500 Hz 의 주파수에 반응하고 피부의 미끄러짐 또는 밀림과 같은 느낌을 전달 받는다.

이와 같이 사용자가 휴대기기의 터치스크린 안의 물체를 문지르거나 터치스크린상의 그래픽 버튼들을 누를 때, 햅틱 정보는 0-500Hz 사이의 주파수를 가진 다양한 진동 자극 형태로 사용자에게 전달된다. 초기의 햅틱 액추에이터는 전자 기력과 원심력을 모두 이용한 편심 모터(eccentric motor) 형태로 개발되었다. 편심 모터에서는 불평형 질량(unbalanced mass)체가 영구자석과 인터랙션 하면서 회전하기 때문에 진동의 강도는 주파수와 비례하고 사용자의 손에 전달되는 햅틱 응답은 실시간으로 생성되어 사용자에게 전달될 만큼 충분히 빠르지 않다. 햅틱 응답 특성을 향상시켜 휴대용 기기에서 햅틱 인터랙션을 가능하도록 공진 모터(linear resonance actuator (LRA))가 개발되고 상용화 되었다.¹ 탄성스프링과 영구자석, 그리고 전자석으로 구성된 공진모터는 스프링 끝단에 달려있는 영구자석이 솔레노이드와 인터랙션을 함에 따라 움직여 사용자의 명령에 따른 햅틱 정보를 빠르게 생성하여 사용자에게 실시간

인터랙션을 가능하게 하지만, 다양한 주파수를 가진 진동감각이 아닌 공진주파수 근처의 진동신호를 생성하므로 다양한 햅틱 감각을 생성하는 것이 쉽지 않다. 0-300Hz 사이로 주파수를 가변시키면서 햅틱 자극을 생성하여 다양한 햅틱 감각을 사용자에게 전달하기 위해, 여러 가지 햅틱 액추에이터 및 햅틱 모듈이 연구되었지만,²⁻⁵ 부피가 다소 커서 휴대용기기에 적용하는 것이 쉽지 않았다.

최근 들어 소재기술들의 발전으로 인해 점점 얇아지고 작아지고 있는 휴대용기기에 적용될 수 있는 작은 부피를 가진 초박형 세라믹 기반의 피에조 햅틱 액추에이터 등이 연구되고 있다.⁶⁻⁸ 피에조 액추에이터는 넓은 대역의 주파수를 가진 진동 자극을 생성할 수 있으므로 기계적 수용기들을 선택적으로 자극할 수 있어 다양한 형태의 햅틱 정보를 생성할 수 있다. 그러나 세라믹 기반의 피에조 액추에이터는 충격에 약하며 진동의 세기가 강하지 않다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 기존의 피에조 세라믹 물질 대신, PVDF(Polyvinylidene Fluoride), EAP(Electro-active Polymer)와 같은 여러 폴리머 물질들이나 크리스털 공중합체(Crystal Copolymer) 등이 액추에이터의 개발을 위해 연구되고 있다.^{9,10} 현재 산업체에서 많이 사용되고 있는 PVDF 폴리머와는 달리 EAPap (Electro-active Paper)의 경우 결정화구조의 셀룰로오스에서 발생하는 압전 효과와 셀룰로오스 내부에 잔존하는 이온이 외부전기장에 의한 내부이동으로 인한 변형 등으로 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되어 액추에이터로 사용 가능하다. 특히 셀룰로오스의 경우 내부에 다공성 구조를 가지고 있어 계면 분극을 통해 전하를 축적할 수 있으므로 외부 전기장에 의해 대전되면 내부의 빈 공간에 극성이 존재하게 되어 척력 또는 인력이 발생할 수 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 셀룰로오스 EAPap 의 경우 정질과 비정질의 특성을 모두 가지고 있으나 정질의 특성은 잔류 분극으로 인해 액추에이터의 반응 속도를 감소시키게 된다. 그러므로 본 연구에서는 얇은 액추에이터로 넓은 동작 주파수를 가진 햅틱 감각을 생성하기 위해 다공성 재료로 내부에 전하를 저장 할 수 있으며 정전현상을 통한 기계적 변형을 일으키는 비 정질 특성을 갖는 셀룰로오스 아세테이트를 이용하여 햅틱 액추에이터를 개발한다.

2. 정전현상을 갖는 햅틱 액추에이터

2.1 정전현상을 갖는 햅틱 액추에이터의 원리

모든 물체는 원자 구조상 양극성을 갖는 원자핵과 원자핵에 구속된 동일한 전하 량의 음극성을 갖는 전자로 이루어진다. 이러한 물체가 특정이상의 에너지를 얻어 전자가 원자핵의 구속에서 벗어나 들뜬 상태가 되어 그 물체를 이탈하거나 외부의 자유전자가 물체내의 원자핵의 인력에 의하여 물체에 구속된 현상을 대전이라 한다. 정전현상은 물체 상에 전하가 정지되어 대전된 상태에서 나타나는 물리적 현상을 말한다. 즉 전류가 흐르지 못하는 상태에서 정지된 전하들 사이의 상호 작용만으로 발생하는 현상을 의미한다. 정전 현상은 상호 작용하는 전하의 종류에 따라 같은 전하 사이에서는 서로 반발하는 척력, 다른 전하 사이에서는 서로 끌어당기는 힘(인력)이 작용하며, 이에 따라 각 물체들은 기계적 운동이나 형태의 변화를 갖게 된다. 전하 량의 크기에 비례하는 정전 현상에 따른 기계적 운동은 즉각적이고 미세하게 조절이 가능하며 물체의 미세의 거동을 일으키는 작동원리로 다양하게 사용된다. 반영구적인 대전 상태 또는 분극을 유지할 수 있는 유전물질인 Electret 은 강한 전기장에 의하여 전체적인 전하 량은 0 이지만 양단이 각각 음극성과 양극성을 띄게 된다. 이와 같은 Electret 의 대전은 Fig. 1 과 같이 표면 대전 층들과 공간 전하들 등의 실제 전하들에 의한 대전, 쌍극자의 배열에 분극화에 따른 대전 또는 이 두 가지의 결합에 의해서 나타난다. 전하들은 유전체의 표면 또는 그 근방에 위치하는 양극성 또는 음극성의 운반자가 포획된 층에 의해 형성된다. 이러한 electret 은 물체에 준 영구적 분극을 형성하여 전하 량을 높여 주기 때문에 정전 현상에 의한 기계적 운동을 향상시켜 저전력이며 작은 크기에서 충분한 힘과 변형 등의 특성이 요구되는 햅틱 액추에이터로 사용이 가능하다.

셀룰로오스는 압전 재료 중 하나로 쌍극자 분자 사슬 구조를 가지고 있어 쌍극자의 배열에 의한 배향 분극이 가능하며 내부에 이온을 함유하고 있어 이온에 의한 공간 전하 분극이 가능하고 내부에 다공성 구조를 가지고 있어 계면 분극을 통해 전하를 축적할 수 있다. Fig. 2 는 셀룰로오스 단면의 내부를 확인할 수 있는 주사 현미경 사진을 보여준다. Fig. 2 에서 보듯이 셀룰로오스 필름은

나노섬유가 조밀하게 구성되어 있으며 전하를 축적할 수 있는 다공성 구조를 가지고 있다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 electret 특성은 재료 내부에 분극을 형성하므로써 정전현상을 통한 기계적 변형을 야기한다.

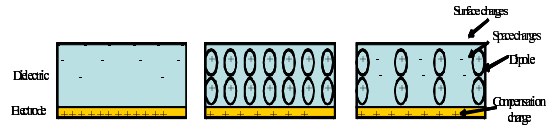


Fig. 1 The three types of the Electret : space charge polarization, dipole polarization, combined polarization

Fig. 3 은 정전현상을 이용한 액추에이터의 작동 원리를 보여주고 있다. Fig. 3(a) 와 같이 외부 전기장이 인가되지 않은 상태에는, 액추에이터의 구조물이 내부에 빈 공간을 가진 평판 형태로 존재한다. 하지만, 외부 전기장에 의해 대전되면 내부의 빈 공간에 극성이 존재하게 되어 척력 또는 인력이 발생할 수 있다(Fig. 3(b), Fig. 3(c)). 셀룰로오스 EAPap 은 정전현상의 주요한 원리인 대전현상을 상승시킴으로써 성능을 향상시키게 된다.

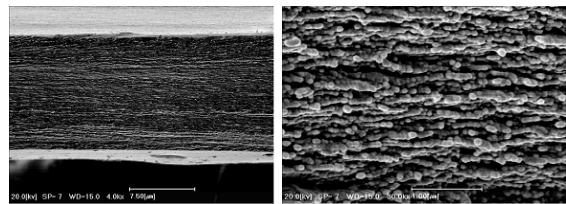


Fig. 2 Scanning microscope images: (a) a magnification of 4,000 times the actual size, (b) a magnification of 30,000 times the actual size

Electret 재료인 셀룰로오스 EAPap 은 일반적으로 정질과 비정질의 특성을 모두 가지고 있어 Semi-crystalline electret 으로 분류 된다. 이 때 정질의 특성에서는 압전효과 등을 발생시키는 잔류 분극이 존재하게 되어 전하의 집중과 발산을 통해 작동성이 상승되는 정전현상 액추에이터의 작동 성능은 향상시킬 수 있으나 반응 속도를 감소시키게 되어 햅틱 액추에이터로는 적합하지 않다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 4 와 같이 비 정질 특성만을 가지고 있는 셀룰로오스 아세테이트를 사용하여 액추에이터를 개발하였다.

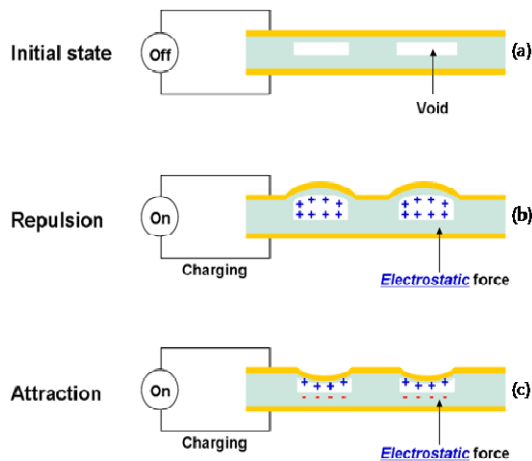


Fig. 3 The basic principle of the proposed actuator based on electrostatic effect

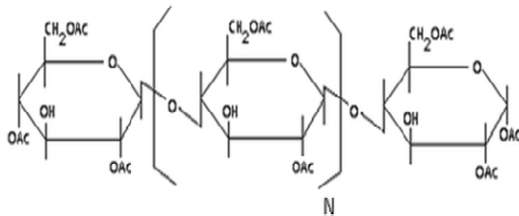


Fig. 4 The structure of a cellulose acetate

2.2 액추에이터를 위한 셀룰로오스 아세테이트 필름 제작

전기방사 법을 통해 섬유형태로 제조되는 셀룰로오스 아세테이트를 일정한 강도를 지닌 투명 박막 형태로 제작하기 위해서 회전도포 법을 적용하였다. Fig. 5(a) 는 셀룰로오스 아세테이트 필름의 제작과정을 보여주고 있다. 우선 셀룰로오스 아세테이트 분말을 순도가 높은 아세톤에 15 wt%로 녹여 셀룰로오스 아세테이트 용액을 만들고, 이후 회전 도포기에서 수회에 걸쳐 도포와 고형화 작업을 반복하여 투명도가 뛰어나고 표면의 편평도가 높은 셀룰로오스 아세테이트 필름을 얻었다. Fig. 5(b)는 개발한 셀룰로오스 아세테이트 필름의 주사현미경 사진을 보여준다. 현미경 사진에서와 같이 셀룰로오스 아세테이트의 입자는 매우 고르게 분포되어 있으며, 대전현상에 이점이 있는 미세한 공기층을 고루 포함한 다공성 해면구조를 확인할 수 있다.

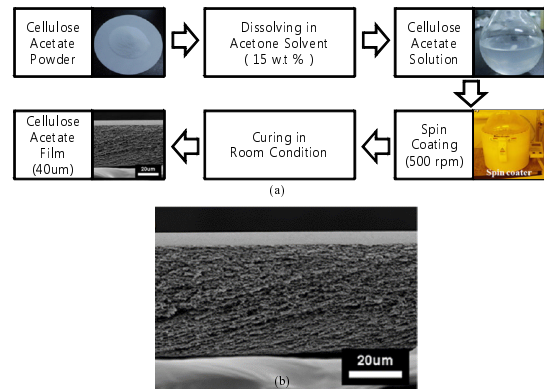


Fig. 5 (a) Manufacturing process of a cellulose acetate film, (b) Electron microscope image of the cellulose acetate film

2.3 정전현상 액추에이터 제작과정

Fig. 6 은 EAPap 정전현상 액추에이터의 기본 구조를 보여준다. 정전현상을 향상시키기 위하여 제작된 셀룰로오스 아세테이트 필름을 작동부와 하판에 적용하였으며 작동부에는 발생하는 힘을 향상시키기 위하여 비교적 두껍게 제작한 셀룰로오스 아세테이트 필름을 적용하였다.

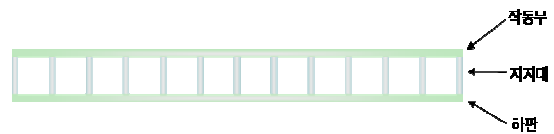


Fig. 6 The basic structure of an EAPap actuators based on electrostatic effect

그림 7 은 셀룰로오스 아세테이트를 이용한 정전현상 액추에이터의 제작과정을 보여주고 있다. 그림 7 과 같이 셀룰로오스 아세테이트를 이용한 정전현상 액추에이터를 개발하기 위해, 셀룰로오스 아세테이트 필름을 실리콘 웨이퍼 위에 회전도포과정을 반복하여 약 300um의 두께로 제작하였으며, 작동부의 진동을 뒷받침 할 수 있도록 약 100um 두께의 접착테이프를 지지대를 제작하고, 지지대 위에 약 300um 두께의 셀룰로오스 아세테이트 필름을 붙여 제작을 완료하였다. 제작된 정전현상 액추에이터는 전기장을 인가하기 위하여 실리콘 웨이퍼에서 떼어내 진극을 코팅하였다. 그림 8 은 개발한 액추에이터의 모습을 보여주고 있다.

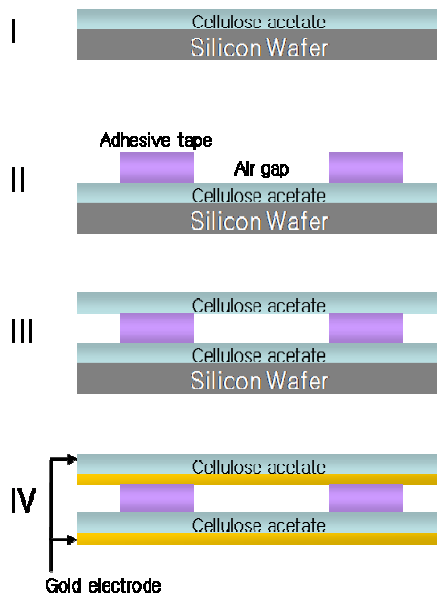


Fig. 7 Manufacturing process of the proposed actuator

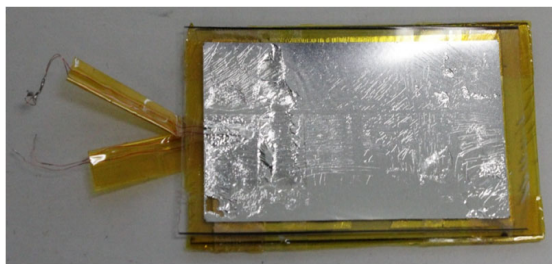


Fig. 8 The developed actuator

3. 개발한 햅틱 액추에이터의 성능 실험

제안하는 액추에이터의 구동 특성을 분석하기 위하여 Fig. 9 와 같은 실험 장치를 구성하였다. 함수발생기 (function generator)를 이용하여 교류 전압을 발생한 후 이를 전압 증폭기를 통하여 고 전압을 갖는 제어 입력신호를 생성 후 제안하는 액추에이터에 인가하였다. 제안하는 액추에이터가 인가되는 교류전압에 따라 어떻게 동작하는 지를 파악하기 위해, 비 접촉 표면진동 측정기인 LDV (Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 액추에이터의 거동을 측정하였다. 그리고 정확한 발생변위를 측정하기 위해서 외부의 진동을 차단할 수 있는 방진시스템을 적용하였다.

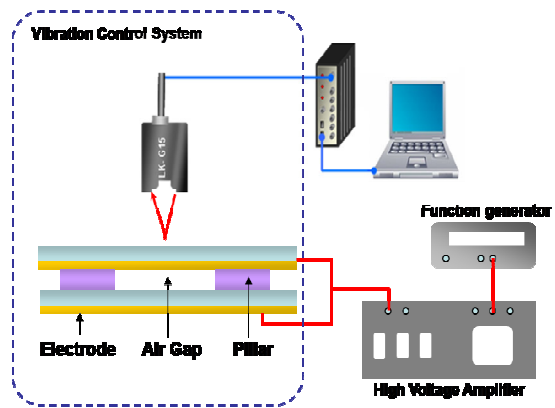


Fig. 9 Evaluation system

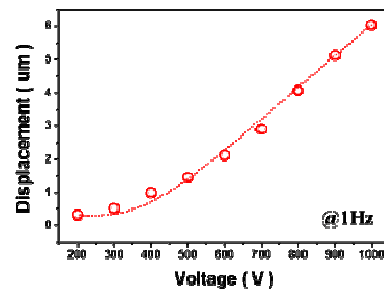


Fig. 10 The displacement of the proposed actuator according to the input voltage

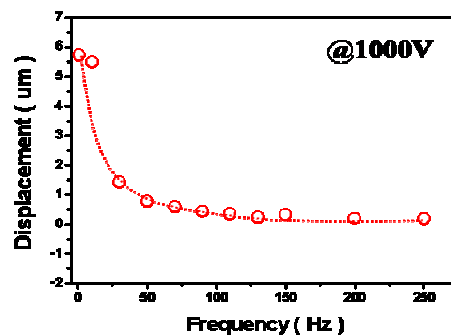


Fig. 11 The displacement of the proposed actuator according to the actuating frequency

본 실험에서는 액추에이터에서 발생하는 진동 모드를 확인하기 위해서 양쪽의 지지대와 공기층 위에서 발생하는 변위를 측정하였다. 전압에 따른 작동성능을 평가하기 위하여 200V 부터 1000V 까지 100V 씩 전압을 증가시키며 발생변위를 측정하였고, 사람의 피부에 있는 기계적 수용기

(mechanoreceptor)들을 모두 선택적으로 자극하여 다양한 햅틱 감각을 생성할 수 있는 지를 파악하기 위해 1Hz 부터 250Hz 까지 주파수를 증가시키며 액추에이터의 거동을 측정하였다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 전압에 따른 구동성능의 변화와 주파수에 따른 성능 변화를 각각 나타낸다. 측정결과를 통해 인가되는 전압의 증가에 따라 작동 부에서 발생하는 변위 량이 꾸준히 증가함을 확인할 수 있었으며 1000V 의 전압에서 최대 6 μ m 의 변위 량을 발생시켰다. 주파수에 따른 변위 량 결과는 반응속도의 영향에 따라 250Hz 까지 감소하는 경향을 나타내고 있지만 실제로 피부를 접촉하였을 때 충분한 진동을 느낄 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 휴대용 기기에서 사용자들의 기계적 수용기들을 선택적으로 자극하기에 충분한 변위와 주파수를 생성하는 초박형 햅틱 액추에이터를 제안하였다. 초박형 햅틱 액추에이터를 개발하기 위해 다공성 해면 구조를 가지고 있어 외부 전기장이 가해지면 내부의 빈 공간에 극성이 존재하게 되어 척력 또는 인력이 발생할 뿐 아니라 비 정질 특성만을 가지고 있어 반응속도가 빠른 셀룰로오스 아세테이트를 이용하였다. 개발한 액추에이터는 충분히 얇고 작아 휴대용 기기에 쉽게 적용 가능하다. 만일 제안한 액추에이터가 상용화 되어 휴대용 기기에 적용된다면 사용자는 휴대용기기를 보다 직관적으로 조작하며 보다 몰입감 있게 휴대용 기기와 인터랙션이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본과제는 지식경제부 SW 컴퓨팅산업원천기술 개발사업(과제번호: 10035360, 과제명: 시-촉각 융합 디스플레이 기술 및 렌더링 엔진 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kweon, S. D., Park, I. O., Son, Y. H., Choi, J. and Oh, H. Y., "Linear vibration motor using resonance frequency," US Patent, No. 7,358,633 B2, Assignee Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd., 2008.
2. Wagner, C. R., Lederman, S. J. and Howe, R. D.,

- "Design and Performance of a Tactile Shape Display Using RC Servomotors," The Electronic Journal of Haptics Research, Haptics-e, Vol. 3, No. 4, pp. 1-6, 2004.
3. Wang, Q. and Hayward, V., "Compact, Portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Transducer Device Based on Lateral Skin Deformation," 2006 Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems IEEE VR, pp. 67-72, 2006.
 4. Kyung, K. U., Lee, J. Y. and Park, J. S., "Haptic Stylus and Empirical Studies on Braille, Button, and Texture Display," Journal of Biomedicine and Biotechnology, Vol. 2008, Article No. 369651, 2008.
 5. Velázquez, R., Pissaloux, E., Hafez, M. and Szweczyk, J., "A Low-Cost Highly-Portable Tactile Display Based on Shape Memory Alloy Micro-Actuators," IEEE International Conf. on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, pp. 121-126, 2005.
 6. Ernst, M. O. and Banks, M. S., "Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion," Nature, Vol. 415, No. 6870, pp. 429-433, 2005.
 7. Wood, R. J., Steltz, E. and Fearing, R. S., "Optimal energy density piezoelectric bending actuators," Sensors and Actuators A, Vol. 119, No. 2, pp. 476-488, 2005.
 8. Kim, D. H., Kim, B. and Kang, H., "Development of a piezoelectric polymer based-sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation," Microsystem Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 275-280, 2004.
 9. Bune, A. V., Zhu, C., Bucharme, S., Blinov, L. M., Fridkin, V. M., Palto, S. P., Petukhova, N. G. and Yudin, S. G., "Piezoelectric and pyroelectric properties of ferroelectric Langmuir-Blodgett polymer films," J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 11, pp. 7869-7873, 1999.
 10. Ambrosy, A. and Holdik, K., "Piezoelectric PVDF films as ultrasonic transducer," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 17, No. 10, pp. 856-859, 1984.