

모바일 장치를 위한 실리콘 고무 기반 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터의 개념적 설계

Conceptual Design of Silicone Rubber based Flexible Vibrotactile Feedback Actuator for Mobile Device

허 용 해*(Yong Hae Heo), 홍 영 주**(YeongJu Hong), 김 상 연**(Sang-Youn Kim)

*Interdisciplinary Program in Creative Engineering
Korea University of Technology and Education
huice@koreatech.ac.kr

**Department of Computer Science and Engineering
Korea University of Technology and Education
(abc123472000,sykim)@koreatech.ac.kr

요약

본 연구에서는 플렉서블 모바일 디바이스에 탑재될 수 있는 실리콘 고무 기반 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터를 제안한다. 본 연구에서는 기계적 물성이 딱딱한 PDMS 기반 햅틱 액추에이터 샘플, 기계적 물성이 말랑한 Ecoflex 기반 햅틱 액추에이터 샘플, PDMS와 Ecoflex가 중량 비율 1:5로 혼합된 waSiRu5를 이용한 햅틱 액추에이터 샘플이 제작하였다. 그리고 각 샘플에 대한 유전 특성 및 햅틱 성능이 측정하였다. 측정 결과, PDMS 또는 Ecoflex만을 이용한 액추에이터보다 PDMS와 Ecoflex가 혼합된 물질을 이용한 액추에이터의 햅틱 성능이 우수한 것이 확인된다.

키워드: 플렉서블, 햅틱 피드백, 진동 촉각, 유전 탄성체, 햅틱 액추에이터

Abstract

In this study, we propose a silicone rubber based flexible vibrotactile feedback actuator that can be mounted on a flexible mobile device. We made a PDMS-based haptic actuator sample with hard mechanical properties, an Ecoflex-based haptic actuator sample with soft mechanical properties, and a haptic actuator sample using waSiRu5 in which PDMS and Ecoflex were mixed in a weight ratio of 1:5. And then, the dielectric properties and haptic performance for each sample were measured. As a result, it is confirmed that the haptic performance of the actuator using a mixture of PDMS and Ecoflex is superior to the actuator using only PDMS or Ecoflex.

Key words: Flexible, Haptic Feedback, Vibrotactile, Dielectric Elastomer, Haptic Actuator

* 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2018R1A6A1A03025526)

1. 서론

현재, 모바일 인터페이스 장치는 정보 수집, 통신 수단, 게임 등 다양한 기능 수행이 가능해지면서 사람들의 삶의 필수품이 되었다. 또한, 모바일 인터페이스 장치는 시각, 청각, 촉각 등 다양한 인터랙션 방법을 이용하여 사용자에게 직관적이고 현실감 있는 콘텐츠 체험을 제공하고 있다. 특히, 촉각을 이용한 인터랙션 방법은 시각, 청각을 이용한 인터랙션 방법에 비해 사용자의 주의나 집중을 요구하지 않고 콘텐츠와 관련된 정보를 사용자에게 직관적으로 제공한다는 장점 때문에 모바일 폰, 터치 스크린과 같은 대부분의 모바일 인터페이스 장치에 촉각 피드백 액추에이터(진동 모터 등)가 탑재되고 있다[1-2].

최근 모바일 인터페이스 장치는 사용성 및 활용성을 극대화하기 위해, 외형이 구부러질 수 있는 플렉서블 장치로 발전되고 있다[3-4]. 이에 따라 구부러질 수 있는 모바일 인터페이스 장치에 탑재 가능한 플렉서블 촉각 피드백 액추에이터의 필요성이 대두되고 있다.

과거, 많은 연구자들이 전기 활성 고분자(EAPs) 중에서 가볍고 유연하면서도 촉각 피드백을 생성할 수 있는 유전 탄성체(DE)를 찾고, 이를 이용한 플렉서블 촉각 피드백 액추에이터를 개발해왔다[5-9]. 선행 연구 결과로부터, 실리콘 고무 계열인 polydimethylsiloxane(PDMS)가 플렉서블 촉각 액추에이터로 개발되기에 적합한 대표적인 물질로 주목받고 있다[10]. 왜냐하면, PDMS는 큰 수직 변형이 가능하며, 강한 자극을 제공할 수 있으면서도 탄력성, 내구성, 성형성, 무독성 등 다양한 측면에서 촉각 피드백 액추에이터로 사용되기에 좋은 성질을 가지고 있기 때문이다[7-12].

이처럼, PDMS는 플렉서블 촉각 피드백 액추에이터 개발에 사용되기에 적합한 특성을 가지고 있지만, 여전히 상용 진동 모터만큼 강한 진동을 발생시키는 것은 어렵다. 촉각 피드백 액추에이터의 햅틱 성능을 개선시키기 위해서는 액추에이터의 구동 방식을 이해하는 것이 중요하다. PDMS와 같은 DE 물질

기반 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터는 교류 신호에 의해 DE 물질의 압축 및 복원이 반복적으로 발생하면서 진동을 발생시킨다. 그러므로, DE 물질은 물질의 압축 및 복원되는 변위가 크면서, 압축과 복원이 반복되는 과정이 원활히 이루어질 수 있는 기계적 물성을 가질수록 강한 진동을 발생시킨다.

본 연구에서는 플렉서블 촉각 피드백 액추에이터로 많이 연구·개발되는 DE 물질이면서 기계적 물성이 딱딱한 PDMS(Sylgard 184, Dow Corning Corp.)[13]와 이 물질과 혼합이 가능한 DE 물질이면서 기계적 물성은 말랑한 Ecoflex(Ecoflex-0030™, Smooth-On Inc.)[13]를 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터 개발 물질로 선정하였다. 그리고 pure PDMS, pure Ecoflex, PDMS와 Ecoflex가 혼합된 물질을 이용한 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터를 각각 개발하고, 각 액추에이터의 진동 성능을 측정하였다. 실험 결과는 pure PDMS 또는 pure Ecoflex 보다 PDMS와 Ecoflex가 혼합된 물질을 이용하여 개발된 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터가 가장 좋은 햅틱 성능을 가진 것으로 확인되었다. 이 결과는 PDMS에 Ecoflex를 적절히 혼합하는 방식을 이용하여, 기존 PDMS 기반 액추에이터의 햅틱 성능을 개선시킬 수 있음을 보여준다.

2. 제안하는 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터의 구조

본 연구에서 제안하는 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터는 상판 전극, 물결형상의 실리콘 고무(waSiRu), 하판 전극으로 구성된다(그림 1(a)). 그리고, 상판 전극과 하판 전극에는 모두 금이 코팅된 구리전극(23 mm (H) × 23 mm (W))이 증착되어 있다(그림 1(b)). waSiRu는 두 전극 판 사이에 배치되며, 두 전극 판의 테두리가 테이프를 이용하여 접착되는 방식으로 액추에이터가 조립된다(그림 1(c)). 액추에이터의 상판 전극은 판 스프링을 가지고 있기 때문에 z축 방향으로 움직일 수 있다. 액추에이터에

전기 신호가 인가되면, 두 전극 사이에서 발생하는 정전기적 인력에 waSiRu가 압축되며, 이로 인해 액추에이터의 전체 두께가 얇아진다. 인가된 전기 신호가 해제되면, waSiRu의 탄성복원력으로 인해 액추에이터는 초기상태로 복원된다. 교류 전기 신호가 액추에이터 인가되면, 액추에이터는 압축과 복원이 반복되면서 진동을 발생시킨다. 상판 전극 및 하판 전극의 크기는 25 mm (H) × 25 mm (W) × 100 μm (T) 이며, waSiRu의 크기는 23 mm (H) × 23 mm (W) × 450 μm (T) 이다. 그러므로, 전체 액추에이터의 크기는 25 mm (H) × 25 mm (W) × 650 μm 이다.

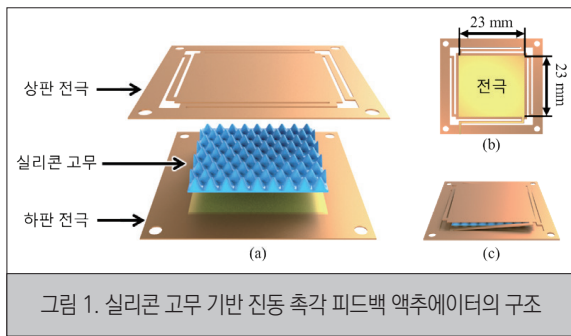


그림 1. 실리콘 고무 기반 진동 촉각 피드백 액추에이터의 구조

3. waSiRu의 유전 특성

제안하는 액추에이터와 같은 구조에 사용된 waSiRu는 전기 신호가 인가되었을 때 정전기적 인력에 의한 압력이 발생하며, 식은 아래와 같이 표현된다. P 는 정전기적 인력에 의해 두 전극 사이에서 발생하는 압력을 의미하며, ϵ_0 는 진공의 유전율을 의미하는 상수 값이다. 그리고, ϵ 는 유전 탄성체의 유전상수 값을 의미하며, E 는 전기장의 세기를 의미한다.

$$P = \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (1)$$

그러므로, waSiRu의 유전 특성은 제안하는 액추에이터에 전기 신호가 인가되었을 때, 액추에이터에 의 상판 전극의 움직임에 대한 세기를 결정짓는 요인이다[14]. 이러한 이유로, 제안하는 액추에이터는 waSiRu의 유전상수 값이 높을수록 강한 진동을 발생시킨다.

본 연구에서는 컴퓨터, 임피던스 분석기, 유전 인

터페이스를 이용하여 제안하는 액추에이터의 유전상수를 측정하는 실험환경을 구축하였다. 유전 인터페이스는 물질을 고정할 수 있는 두 전극이 있으며, 두 전극을 이용하여 제안하는 액추에이터를 고정한다. 임피던스 분석기는 유전 인터페이스를 이용하여, 제안하는 액추에이터의 주파수별 유전 상수 값을 측정한 후 컴퓨터에 전달한다.

본 연구에서는 PDMS샘플과 Ecoflex샘플을 제작한 후, 각각의 샘플에 대한 유전상수를 측정하였다(그림 2). 측정 결과, 2가지 샘플들의 유전상수는 1Hz에서 10,000 Hz 까지 주파수에 따른 값 변동이 거의 없는 것으로 확인되었다. 또한, PDMS는 약 2.76(at 1 Hz)의 유전상수를 가지며, Ecoflex는 약 3.02(at 1 Hz)의 유전 상수를 가지는 것으로 확인된다.

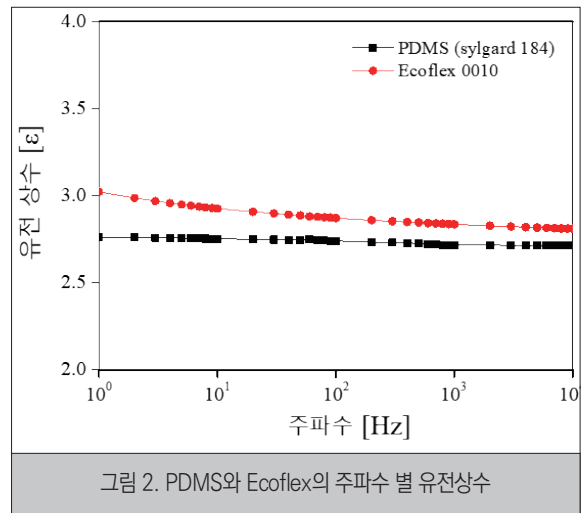


그림 2. PDMS와 Ecoflex의 주파수 별 유전상수

4. 제안하는 액추에이터의 햅틱 성능

본 연구에서는 함수 발생기, 고전압 증폭기, 100 gram 분동, 가속도 센서, 오실로스코프를 이용하여 제안하는 액추에이터의 햅틱 성능을 측정하는 실험환경을 구축하였다. 함수 발생기에서는 0 V ~ 2 V의 사인파 전압을 출력하고, 고전압 앰프는 이 사인파 전압을 1000 배 증폭하여 액추에이터에 인가한다. 100 gram 분동은 액추에이터 위에 놓여져 있으며, 가속도 센서는 100 gram 분동 위에 놓여져 있다. 가속도 센서는 액추에이터가 발생시키는 진동을 측정하며, 측정된 진동 가속도 신호를 오실로스코프

로 전달한다. 그리고, 오실로스코프에서 표시되는 진동 가속도 신호 데이터를 관측하였다.

그림 3(a)는 제안하는 액추에이터의 주파수별 진동 가속도 데이터를 보여준다. 제안하는 액추에이터의 진동 가속도는 pure PDMS 또는 pure Ecoflex 보다 PDMS와 Ecoflex의 중량 혼합 비율이 1:5인 waSiRu5를 이용한 액추에이터가 가장 높은 햅틱 성능(0.952 g)을 가진 것을 보여준다. 그림 3(b)는 제안하는 액추에이터의 전압 세기별 진동 가속도 데이터를 보여준다. 제안하는 액추에이터는 인가된 전압의 세기가 증가할수록 발생시키는 진동 가속도가 점차 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한, PDMS와 Ecoflex의 중량 혼합 비율이 1:5인 액추에이터가 다른 액추에이터들 보다 전압 세기별 진동 가속도가 모든 영역에서 높다. 위 2가지 액추에이터의 햅틱 특성에 대한 실험을 통해, 우리는 PDMS와 Ecoflex의 중량 혼합 비율이 1:5인 waSiRu5를 사용하는 액추에이터가 가장 좋은 햅틱 성능을 가지는 것을 알 수 있다.

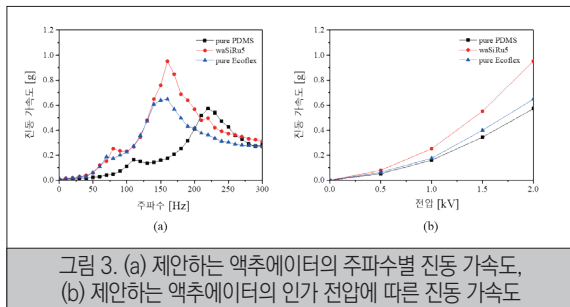


그림 3. (a) 제안하는 액추에이터의 주파수별 진동 가속도, (b) 제안하는 액추에이터의 인가 전압에 따른 진동 가속도

5. 제안하는 액추에이터의 햅틱 성능과 물질 특성과의 관계

앞서 언급했듯이, PDMS와 Ecoflex의 물질 특성(유전 특성, 기계적 물성)은 액추에이터의 햅틱 성능에 영향을 미치는 요인이다. 그러므로, 분석된 샘플들의 물질 특성을 이용하면, pure PDMS 또는 pure Ecoflex를 이용한 액추에이터 보다 waSiRu5를 이용한 액추에이터가 햅틱 성능이 좋은 이유에 대해 설명이 가능하다. 측정된 PDMS와 Ecoflex의 유전 상수(그림 2)는 두 물질 모두 인가된 주파수가 달라

도 유전 상수값이 거의 일정하다. 그리고 PDMS(유전상수: 2.76)보다 Ecoflex(유전상수: 3.02)가 가지는 유전상수 값이 높은 것으로 측정된다. Ecoflex가 PDMS에 비해 유전상수가 높기 때문에 PDMS에 Ecoflex를 혼합하는 비율이 높아질수록 액추에이터의 햅틱 성능을 증가시키는데 긍정적인 영향을 미친다. 또한 Ecoflex는 PDMS보다 매우 말랑하기 때문에 딱딱해서 압축 및 복원되는 변위가 크게 발생하지 않은 pure PDMS를 이용한 햅틱 액추에이터보다 압축 및 복원되는 변위가 큰 PDMS와 Ecoflex가 혼합된 물질을 이용한 햅틱 액추에이터가 더 좋은 햅틱 성능을 가진다. 그러나, pure Ecoflex를 이용하여 제작된 햅틱 액추에이터는 기계적 물성이 너무 말랑하여, 압축된 후 복원되는 과정이 원활히 이루어지지 않기 때문에 오히려 액추에이터의 햅틱 성능이 떨어진다. 이러한 PDMS와 Ecoflex의 물질 특성(유전 특성, 기계적 물성) 때문에 waSiRu5를 이용한 액추에이터가 pure PDMS 또는 pure Ecoflex를 이용한 액추에이터 보다 햅틱 성능이 높게 나타난다.

6. 결론

본 연구에서는 기존 플렉서블 촉각 피드백 액추에이터로 많이 연구·개발되는 PDMS 기반 액추에이터의 햅틱 성능을 개선시키기 위해 pure PDMS, pure Ecoflex 그리고 PDMS와 Ecoflex가 1:5 중량 비율로 혼합된 waSiRu5 실리콘 고무 샘플들을 제작하였다. 그리고 제작한 실리콘 고무 샘플을 이용하여 플렉서블 진동 촉각 피드백 액추에이터를 제작하고 햅틱 성능을 측정하였다. 측정 결과, PDMS와 Ecoflex가 혼합된 waSiRu5를 이용한 햅틱 액추에이터가 가장 좋은 햅틱 성능(0.952 g)을 가진 것으로 확인되었다. 이 결과는 딱딱한 PDMS만을 이용하는 햅틱 액추에이터보다 말랑한 Ecoflex를 PDMS와 적절히 혼합한 물질을 이용하여 제작된 햅틱 액추에이터가 보다 좋은 햅틱 성능을 가진다는 것을 보여준다. 또한, 본 연구의 결과는 기존 PDMS 기반 햅틱 액추에이터의 성능을 개선하는데 도움이 될 뿐

만 아니라, 추후 PDMS 기반 햅틱 액추에이터 개발에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다. 그러나, 본 연구는 다양한 샘플이 아닌, pure PDMS, pure Ecoflex 그리고 waSiRu5에 대해서만 유전 특성 및 햅틱 성능을 측정하였다는 한계점이 있다. 따라서, 추후 연구에서는 PDMS와 Ecoflex를 이용한 다양한 기계적 물성을 가진 샘플을 제작하고 각 샘플에 대한 물질 특성 및 햅틱 성능이 측정되어야 한다.

참고 문헌

- [1] S. Ur-Rehman, L. Liu and H. Li, "Vibrational soccer: tactile rendering of football game on mobiles" In Proceedings of the 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST 2007), Cardiff, UK, pp. 9-13, 2007.
- [2] K. Yatani and K. N. Truong, "SemFeel: A user interface with semantic tactile feedback for mobile touch-screen devices" In Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology" Victoria, Canada, pp. 111-120, 2009
- [3] J. Lo and A. Girouard, "Bendy: exploring mobile gaming with flexible devices" In Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Yokohama, Japan, pp. 163-172, 2017
- [4] P. Strohmeier, J. Burstyn, J. P. Carrascal, V. Levesque, R. Vertegaal, "ReFlex: A flexible smartphone with active haptic feedback for bend input" In Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Eindhoven, Netherlands, pp. 185-192, 2016
- [5] Z. Yu, W. Yuan, P. Brochu, B. Chen, Z. Liu and Q. Pei, "Large-strain, rigid-to-rigid deformation of bistable electroactive polymers" Applied Physics Letters, Vol.95, 192904, 2009.
- [6] I. M. Koo, K. Jung, J. C. Koo, J.-D. Nam, Y. K. Lee and H. R. Choi, "Development of soft-actuator-based wearable tactile display" IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No.3 pp.549-558, 2008.
- [7] D. Pyo, S. Ryu, K.-U. Kyung, S. Yun and D.-S. Kwon, "High-pressure endurable flexible tactile actuator based on microstructured dielectric elastomer" Applied Physics Letters, Vol.112, 061902, 2018.
- [8] S. Yun, S. Park, S. Ryu, S. M. Jeong and K.-U. Kyung, "A soft and transparent visuo-haptic interface pursuing wearable devices" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.67, No.1, pp. 717-724, 2019.
- [9] S. Mun, S. Yun, S. Nam, S. K. Park, S. Park, B. J. Park, J. M. Lim and K.-U. Kyung, "Electro-active polymer based soft tactile interface for wearable devices" IEEE transactions on haptics, Vol.11, No.1, pp. 15-21, 2018.
- [10] S. Biswas and Y. Visell, "Emerging material technologies for haptics" Advanced Materials Technologies, Vol.4, No.4, 1900042, 2019.
- [11] F. W. G. Fearon and M. J. Owen, "Silicone surface science opportunities" In Proceedings of the Science and Technology of Polymers and Advanced Materials, Boston, U.S.A, pp. 873-879, 1998.

- [12] M. J. Owen, "Why silicones behave funny" Chemtech, Vol.11, No.5 pp. 288-292, 1981.
- [13] N. Ni and L. Zhang, "Dielectric elastomer sensors" Elastomers, pp. 231-253. 2017.
- [14] R. Kornbluh, R. Pelrine, J. Eckerle and J. Joseph, "Electrostrictive polymer artificial muscle actuators" In Proceedings of the 1998 IEEE international conference on robotics and automation, Leuven, Belgium, pp. 2147-2154, 1998.