

<응용논문>

유연 구동기를 이용한 스티어링휠의 촉각 진동 시스템 개발

장경진¹⁾ · 김현우²⁾ · 마지형²⁾ · 김민기²⁾ · 남종석²⁾ · 경기욱²⁾

현대자동차 사운드디자인리서치랩¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾

Development of Haptic Vibration System for Steering Wheel Using Soft Actuators

Kyoung-Jin Chang^{*1)} · Hyunwoo Kim²⁾ · Jiheong Ma²⁾ · Minki Kim²⁾ · Jongseok Nam²⁾ · Kiuk Kyung²⁾

¹⁾Sound Design Research Lab, Hyundai Motor Group, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

(Received 16 June 2022 / Revised 7 February 2023 / Accepted 4 May 2023)

Abstract : Compared to conventional vibration actuators, such as an electric motor or an inertial mass shaker, a soft actuator with electro-hydraulic characteristics may produce delicate vibration. However, this actuator can cause some problems, including high driving voltage, low excitation force, and a short life cycle, to vehicles. This paper proposes a new type of soft actuator that uses a polymer gel film to address these problems, and a control system with a rapid switching speed to generate target vibration. Additionally, a synthesis method of the control signal is suggested to generate vibration linked to sound through the actuator and the control system. The suggested system is applied to a steering wheel to generate haptic vibration in a vehicle. This system has significantly improved the output, driving voltage, and durability, and emits soft vibration.

Key words : Soft actuator(유연 구동기), Vibration control(진동 제어), Electrohydraulic actuator(전기유체식 구동기)

1. 서론

차량에서 진동을 발생시키는 시스템은 주행음 등 소리를 만드는데 활용되기도 하고, 스티어링휠이나 시트 등에 적용되어 승객에게 쾌적한 진동을 제공하는데 활용되기도 한다.¹⁾ 특히, 승객에게 쾌적한 진동을 제공하는 시스템은 대부분 모터나 전동식 구동기(Electro-dynamic actuator)를 사용하고 있는데 이들은 가진력이 큰 장점이 있으나, 가진 주파수 대역이 높고, 비교적 큰 공간을 차지하며, 강성이 높아서 딱딱한 느낌을 준다는 단점이 있다. 이에 반해 본 연구에서 이용한 유연 구동기(Soft actuator)는 저주파 가진도 가능하고 비교적 적은 공간을 차지하며 부드러운 재질을 사용해서 감성적인 진동을 발생시킬 수 있다는 장점이 있다.²⁾ 하지만, 이러한 장점에 도 불구하고 유연 구동기를 이용하여 상용화된 제품 개발이 어려웠던 이유는, 구조와 제어 방법의 한계 등으로 인해 출력이 낮고, 구동전압이 매우 높으며, 내구 수

명이 낮은 문제가 있었기 때문이다. 본 연구에서는 기존의 유연 구동기가 갖고 있던 이러한 한계를 극복하고 차량에서 새로운 촉각 경험을 주는 진동 발생장치를 개발하기 위하여, 새로운 형태의 유연 구동기 시스템 및 제어 장치를 고안하고, 시작품을 제작하여 성능을 개선하는 연구를 수행하였다.

2. 구동기 디자인

2.1 기존 방식의 문제점

앞 장에서 기술한 기존의 유연 구동기 방식들이 갖는 한계를 극복하고자 먼저 기존 방식의 특징을 분석하여 Fig. 1에 도시하였다. 첫번째 방식은 PVC-gel 구동기로서, 그 작동원리는 다음과 같다. 먼저 PVC(Polyvinyl chloride)에 가소제를 첨가하고 일정시간 휘저은 후 용매를 증발시켜서 PVC-gel 소재를 제작할 수 있는데, 여기에 전극을 부착하고 고전압을 인가하면 고분자젤 내부

* A part of this paper was presented at KSAE 2022 Spring Conference

*Corresponding author, E-mail: changkj@hyundai.com

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

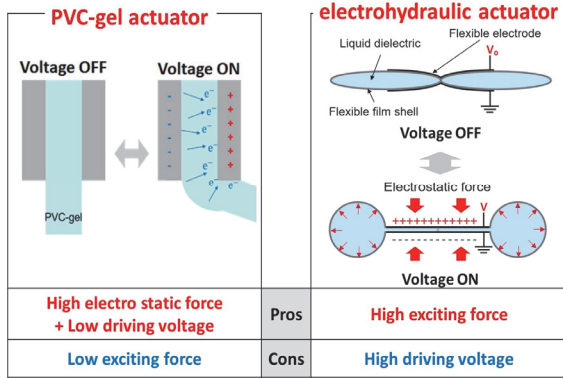


Fig. 1 Comparison of the existing soft actuators

의 음전하가 양극으로 이동하여 표면에 축적되고 이 때 음전하와 양극 사이의 정전기력에 의하여 고분자젤이 운동하게 되며, 이를 통해 부드러운 느낌의 힘과 진동을 발생시킬 수 있다. 이 방식은 고전압 중에서 상대적으로 낮은 작동 전압을 사용할 수 있는 장점이 있으나 고분자젤 내부를 통해 전달되는 힘이 작은 것이 단점이다. 이로 인해 과거 여러 연구들이 시도되었지만 실제 발생시킬 수 있는 최대 가진력이 1 N 이하, 가속도 기준 0.7 G 이하에 불과하여 차량의 승객이 체감하기에는 힘이 부족하다는 문제를 갖고 있다.³⁾ 두번째 방식은 유전성 유체(Dielectric liquid)로 채운 전기유체식 구동기(Electrohydraulic actuator)로서, 작동원리는 다음과 같다. 유연한 필름주머니에 유전성 유체를 채우고, 필름 양쪽의 전극에 전압을 인가하면 전극 사이의 정전기력으로 필름 안쪽의 유체를 밀어서 운동함으로써 부드러운 느낌의 힘과 진동을 발생시킬 수 있다. 이 방식은 전극 사이의 거리를 작게 함으로써 비교적 높은 출력을 얻을 수 있으나, 내구성이 낮고, 응답성이 느리며, 더 높은 구동 전압을 필요로 하는 단점을 갖고 있다. 이로 인해 과거 여러 연구들이 시도되었지만 시간에 따라 성능이 저하되고, 최대 가진 주파수 대역이 10 Hz 이내에 불과하며, 작동 전압이 최소 6 kV 이상을 필요로 하기 때문에 차량 등에 활용하기에는 많은 문제를 해결하는 것이 필요하다.⁴⁾

2.2 곡면형 폴리머젤 필름 방식의 구조

본 연구에서는 이전 연구에서 개발한 시스템을 더욱 발전시키면서, 기존의 유연 구동기의 성능을 극대화하도록 새로운 구조를 고안하였다.⁸⁾ 즉, PVC-gel 구동기 방식과 전기유체 구동기 방식의 장점을 결합하여 낮은 구동전압에서도 작동 가능하고, 가진력도 증대시키고, 내구 수명도 높은 새로운 곡면형 폴리머젤 필름 방식의 유연 구동기를 고안하였다. 기존의 전기유체 구동기 방식

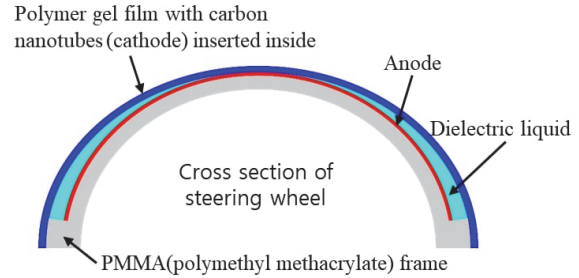


Fig. 2 Structure of the proposed soft actuator with curved polymer-gel film

에서 필름은 단순히 유전성 유체를 가두는 역할을 하는 반면, 본 연구에서 제안한 방식의 필름은 유전성 유체를 가둘 뿐 아니라 전기유변적 특성을 갖도록 폴리머젤 필름으로 제작한 것이 특징이다. 이로써, 필름 내부에서 전압 인가에 따른 전하의 움직임을 유도하고 정전기력을 최대한 증폭시킴으로써, 비교적 작은 구동전압을 인가 하더라도 필름 아래쪽에 있는 유전성 유체의 움직임을 크게 촉진시킬 수 있게 하였다. 여기서, 폴리머젤 필름, 유전성 유체, 전극 등의 재료 구성 및 배합 비율은 유연 구동기의 가진력과 내구 수명을 최대화하도록 실험을 통해 결정하였다. 결과를 요약하면, 폴리머젤 필름에는 PVC(Polyvinyl chloride) 재료와 DBA(Diallyl bisphenol A) 재료를 1:2의 질량비로 혼합하여 제조한 PVC-GEL을 사용하였고, 그 내부에는 탄소나노튜브로 이루어진 음의 전극을 삽입하였다. 유전성 유체에는 DBA와 실리콘 오일을 1:1의 질량비로 혼합하여 제조한 용액을 사용하였다. 상기의 재료 구성 및 제조 과정은 별도 논문에서 상세히 소개하였다.⁹⁾ 아울러, 본 연구에서 제안한 유연 구동기는 Fig. 2와 같이 차량의 스티어링휠 등에 부착할 수 있도록 곡면형으로 설계하였는데, 폴리머젤 필름이 유전성 유체를 감싸면서 윗면에는 음의 전극이 삽입되고, 유전성 유체의 아랫면에는 양의 전극이 배치되는 구조로 이루어져 있다. Fig. 3은 유연 구동기의 작동 과정을 도시하고 있는데, 전극에 전압 인가시 유전성 유체가 곡면의 중심부에서 양 옆으로 밀려나면서 양 옆이 집중적으로 빠르게 팽창 및 수축 운동을 할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안한 곡면형 폴리머젤 필름 방식의 유연 구동기는 정전기력을 이용하여 필름이 그 아래에 있는 유전성 유체를 압축하는 과정에서 Fig. 3과 같이 초기 접촉 지점으로부터 주변으로 빠르게 전파되도록 하는 지핑(Zipping) 현상을 만들 수 있다.⁹⁾ 이러한 구조를 통해 기존 방식 대비 가진력 및 반응속도를 더욱 높일 수 있었다. Fig. 4는 본 연구에서 개발한 유연 구동기를 차량의 스티어링휠에 적용하여 진동 발생기 시작품을 제작한 형상을 도시하

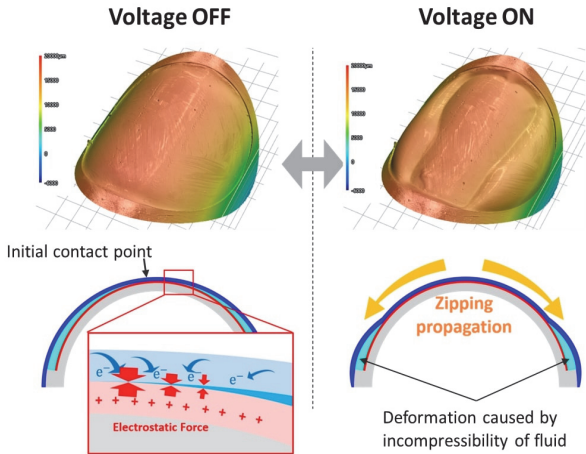


Fig. 3 Operation process of soft actuator before and after voltage application⁵⁾



Fig. 4 Prototype of steering wheel vibration generator

고 있다. 다음 장에서 소개할 디지털 제어회로를 이용하여 전압 인가 신호의 주파수와 패턴을 제어하게 되면 가장자리부가 수축과 팽창을 반복하면서 여기에 손을 접촉하고 있는 사용자는 부드럽고 감성적인 느낌의 진동을 느낄 수 있다.

3. 제어 시스템 개발

3.1 제어 회로

본 연구에서 고안한 스티어링휠 진동 발생기의 제어를 위해, 먼저 제어회로가 갖추어야할 요구사항을 다음과 같이 검토하였다. 구동기가 정전기력을 이용하여 작동하기 때문에 고전압을 필요로 하고, 높은 임피던스를 갖고 있어서 저전류가 필요하며, 넓은 주파수 대역의 진동을 발생시키기 위해 빠른 스위칭 속도를 필요로 하고, 이외 에너지 효율이 높고 내구성이 높은 소자의 사용이 필요하다. 이를 만족하는 제어장치를 검토한 결과, 전원 공급용으로는 고전압 DC/DC 컨버터를 사용하였고, 컨트롤보드는 NI DAQ 모듈을 사용하였다. 또한, 고전

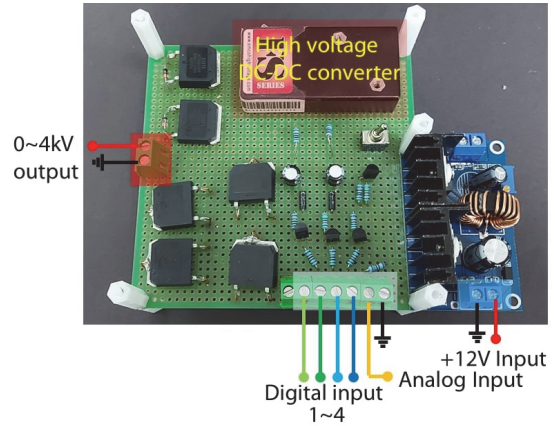


Fig. 5 Control circuit of vibration generator

압 스위치는 오토커플러, 리드릴레이, HV MOSFET의 3개 안의 사양을 조사하여 성능을 비교한 결과 HV MOSFET가 스위칭 속도가 가장 빠르고 스위칭 전압이 비교적 낮으면서 가격이 가장 저렴하여 이를 사용하기로 결정하였다. Fig. 5에는 제어회로 제작 결과를 도시하였다. 제어회로는 디지털 제어 신호 입력 및 출력 진폭 제어가 가능하도록 채널을 구성하였다.

3.2 성능 평가

상기 과정을 통해 스티어링휠 진동발생기의 시작품과 제어회로를 제작한 후, 레이저 도플러 속도계(Laser doppler velocimeter)로 진동 가속도를 측정하였다. Fig. 6은 주파수 대역별 가속도 및 구동전압별 가속도를 측정 한 결과를 보이고 있다. 결과를 보면, 약 3 kV의 구동전압 및 100 ~ 350 Hz의 넓은 주파수 대역에서 3 G ~ 6 G까지의 높은 가속도 출력을 나타낸 것을 알 수 있고, 가속도 출력을 1 G로 낮추면 구동전압을 1.5 kV까지 줄일 수 있어 제어기 제작 비용 측면에서 보다 유리해진다. 한편, 이와 같이 유전성 유체와 폴리머젤을 이용하는 유연 구동기는 반복적으로 작동할 경우 유전성 유체 내부에서 자유전하의 분극현상이 발생하여 출력이 서서히 저하되는 내구성 문제를 갖고 있는데, 본 연구에서는 그 해결방법을 다음과 같이 확인하였다. 즉, 제어회로의 구동 전류로서 0 ~ A kV까지의 편향(Biased) AC 전류를 사용하는 것보다, -A ~ A kV까지의 비편향(Unbiased) AC 전류를 사용할 경우, 초기 출력에 약간의 변동성은 있지만 폴리머젤의 표면 유도전하가 감소하고 이로 인해 유전성 유체 내부에서 자유전하가 양극과 음극으로 분리되는 분극현상이 억제되어 높은 정전기력이 유지됨으로써 작동 사이클 반복에 따른 출력 저하 문제가 발생하지 않음을 실험적으로 확인하였다. Fig. 7은 구동전류에 따라

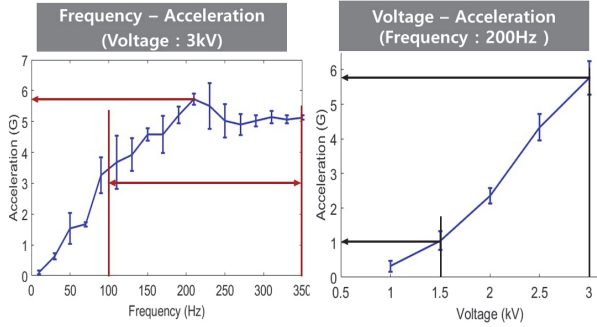


Fig. 6 Vibration measurement results of the proposed soft actuator

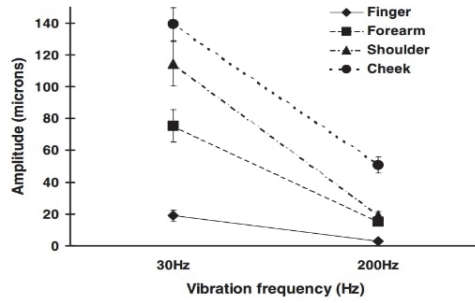


Fig. 8 Sensory vibration of the body by frequency⁶⁾

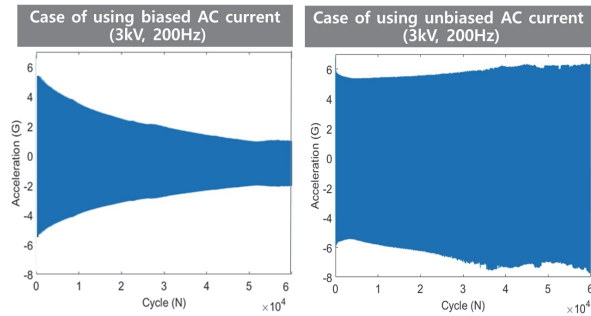


Fig. 7 Vibration measurement results by cycle according to the type of drive current

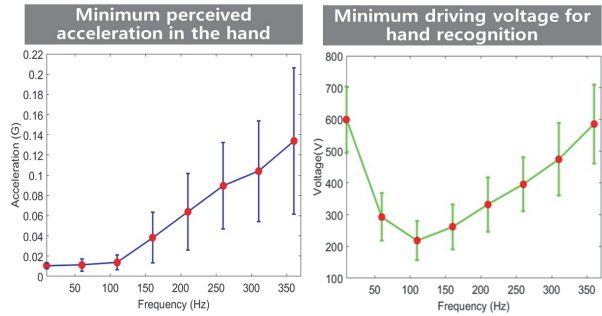


Fig. 9 Test results of minimum acceleration and driving voltage for hand recognition

측정한 가속도를 비교한 결과를 도시하고 있다. 편향 AC 전류를 사용하는 경우에는 사이클 반복에 따른 가속도 출력 저하가 나타나는 반면, 비편향 AC 전류를 사용한 경우에는 사이클 반복에 따른 가속도 출력 저하가 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 상기의 실험결과들을 통해, 본 연구에서 고안한 유연 구동기는 기존 기술 대비 가진력, 구동전압, 주파수 대역, 내구성 면에서 큰 폭의 성능 개선을 달성한 것으로 나타났다.

4. 차량 적용 결과

4.1 주파수별 햅틱 진동 민감도 연구

본 연구에서 개발한 유연 구동기를 차량에 적용할 경우 가장 높은 효과를 보일 수 있는 대상을 선정하기 위하여, Fig. 8과 같이 기존 연구 문헌에 소개된 신체 체감 진동의 크기 비교 결과를 이용하였다.⁶⁾ 이를 바탕으로 손가락에서는 200 Hz 이내에서 적은 진동으로 높은 체감 효과를 얻을 수 있어서 본 기술을 스티어링휠 진동 발생기에 적용 하게 되었다. Fig. 9는 본 연구에서 개발한 스티어링휠 진동 발생기에서 주파수별로 사용자가 진동을 느끼기 시작하는 가속도와 구동 전압을 측정한 결과를 도시하고 있다. 결과를 보면 100 Hz 이내에서 낮은 가속도로도 진동을 인지하는 것을 알 수 있고, 이 때 약 100 Hz

부근에서 가장 적은 구동 전압이 소요 되는 것을 알 수 있다. 이는, 본 연구의 구동기를 이용하면 50 ~ 150 Hz 대역에서 작은 구동전압으로 사용자에게 큰 진동 체감 효과를 줄 수 있어 효과적으로 활용할 수 있음을 의미한다.

4.2 진동 신호 합성 방법 및 시나리오 구성

본 연구에서 개발한 Fig. 4의 스티어링휠 진동 발생기와 Fig. 5의 제어회로를 이용하여, 사용자에게 힐링을 주는 진동을 발생시키고자 하였다. 이를 위해, Fig. 10과 같이 음악용 음원으로부터 진동 신호를 생성하는 알고리즘을 개발하고, 다양한 주파수 및 패턴의 진동 시나리오를 만들었다. 음악에 연동한 진동 신호를 생성하는 과정은 다음과 같다. 먼저 음악 특징을 고려하여 진동 신호를 구성할 단위 블록의 시간을 설정하는데, 이때 댄스 음악은 짧은 블록, 클래식 음악은 긴 블록 시간을 갖는 것이 적합하다. 다음으로, 인체 민감도가 높은 주파수 대역의 진동에 집중하기 위해 음원에 250 Hz Cut off 주파수를 갖는 저주파 필터를 통과시킨 후, 여기서 일정 개수의 주요 주파수를 추출하고, 힐버트 엔빌로프 추출 과정을 통해 해당 주파수별 진폭을 추출한다.⁷⁾ 이렇게 매 단위 블록별로 주요 주파수와 진폭을 추출하고 진동 신호를 합성한 후 이를 제어회로에 입력하는 목표 신호로 이용하

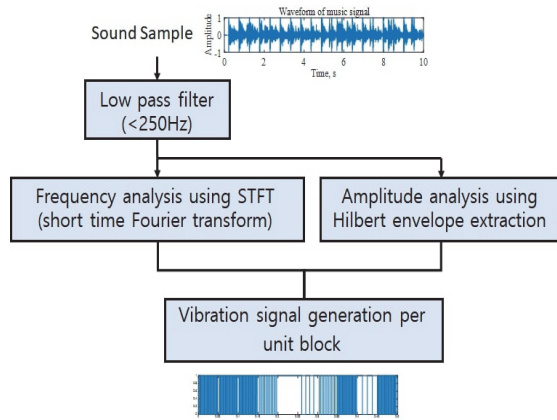


Fig. 10 Flowchart of the vibration signal synthesis process

었다. 다음으로, 이러한 진동 합성 방법을 이용하여 다양한 느낌을 주는 진동을 만들고자 다음과 같이 네 개의 진동 시나리오를 구성하였다. 첫째로, 댄스 음악용 진동은 댄스 음악 특유의 강한 비트의 주파수와 진폭으로 이루어진 진동으로 구성하였다. 두번째로, 클래식 음악용 진동은 다소 주파수가 낮고 주요 주파수 갯수를 증가시켜서 부드러우면서 진폭이 작은 진동으로 구성하였다. 세번째로, 경고음용 진동은 차량의 각종 경고음(예: 시트벨트 경고음, 차선 이탈 경고음 등)에 연동한 진동을 제공하기 위해 적은 개수의 주요 주파수를 이용하고 큰 진폭의 진동으로 구성하였다. 마지막으로 힐링용 진동은 음악과 무관한 신호를 사용하고 사용자의 피곤함을 해소할 수 있는 30 Hz, 50 Hz, 80 Hz, 100 Hz 등의 진동 신호를 적절한 패턴으로 혼합하여 구성하였다.

4.3 실차 데모 결과

본 연구에서 개발한 진동 발생기, 제어회로 및 진동 시나리오로 데모시스템을 구성하고, 이를 Fig. 11과 같이 중대형 세단 차량에 시범적으로 적용하였다. 약 20명의 인원을 대상으로 체험 평가를 진행한 결과, 전체적으로 만족도가 높게 나타났다. 주요 의견을 보면 “음악에 잘 어울리고 자연스러움”, “부드러운 느낌의 진동”, “피로가 풀릴 것 같다”, “다양한 제품에 활용 가능” 등의 의견



Fig. 11 Demonstration picture of the proposed steering wheel vibration generator

이 있었다. 향후 본 기술을 활용하면 차량에서 고객들에게 새로운 촉각 경험을 제공함으로써 감성적이고 매력적인 느낌을 줄 수 있는 다양한 제품을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

- 1) 본 연구에서는 기존의 전동식 구동기 대비 부드럽고 섬세한 느낌의 진동을 구현할 수 있는 유연 구동기를 이용하여 새로운 진동 발생기를 디자인하였고 아울러 다양하고 감성적인 진동을 구현할 수 있도록 제어 장치를 개발하였다.
- 2) 본 연구에서 개발한 곡면형 폴리머젤 필름 방식 진동 발생기는 기존의 전기유체 방식의 유연 구동기가 고질적으로 갖고 있던 낮은 출력, 높은 구동전압, 좁은 주파수 대역, 짧은 내구 수명 등의 문제를 개선하였다.
- 3) 본 연구에서 개발한 곡면형 폴리머젤 필름 방식 진동 발생기를 스티어링휠 커버에 부착하여 다양한 목표 신호로 제어한 결과, 새롭고 매력적인 느낌의 진동을 구현하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 현대자동차(주)와 한국과학기술원의 2020년 산학협동연구과제(제목: 감성적인 진동시트를 위한 소프트액츄에이터 활용 기술 개발)로 수행한 연구임.

References

- 1) K. J. Chang, D. C. Park and Y. S. Lee, “Active Noise Control Using a Body-Mounted Vibration Actuator to Enhance the Interior Sound of Vehicle,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.23, No.2, pp.327-333, 2022.
- 2) J. H. Youn, S. M. Jeong, G. Hwang, H. Kim, K. Hyeon, J. Park and K. U. Kyung, “Dielectric Elastomer Actuator for Soft Robotics Applications and Challenges,” *Applied Sciences*, Vol.10, No.2, Paper No.640, 2020.
- 3) W. H. Park, E. J. Shin, Y. Yoo, S. Choi and S. Y. Kim, “Soft Haptic Actuator Based on Knitted PVC Gel Fabric,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.67, No.1, pp.677-685, 2019.
- 4) A. K. Han, S. Ji, D. Wang and M. R. Cutkosky, “Haptic Surface Display Based on Miniature Dielectric Fluid Transducers,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.5, No.3, pp.4021-4027, 2020.
- 5) H. Kim, J. Nam, M. Kim and K. U. Kyung,

- “Wide-Bandwidth Soft Vibrotactile Interface Using Electrohydraulic Actuator for Haptic Steering Wheel Application,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.6, No.4, pp.8245-8252, 2021.
- 6) M. Stuart, A. B. Turman, J. Shaw, N. Walsh and V. Nguyen, “Effects of Aging on Vibration Detection Thresholds at Various Body Regions,” BMC Geriatrics, No.3, pp.1-10, 2003.
- 7) S. Choi and Z. Jiang, “Comparison of Envelope Extraction Algorithms for Cardiac Sound Signal Segmentation,” Expert Systems with Applications, Vol.34, No.2, pp.1056-1069, 2008.
- 8) K. -J. Chang, H. W. Kim, J. Ma, M. Kim, J. Nam and K. Kyung, “Development of the Vibration Control System Based on a Soft Actuator for New Haptic Experience,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.377-379, 2022.