한국정밀공학회지 제 43 권 제 11 호 pp. 1233-1239 November 2026 / 1233
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 11, pp. 1233-1239 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00073
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

보이스 코일 기반 좌석 일체형 햅틱 시스템의 시청각 콘텐츠 기반 감정 경험 향상 효과 분석

Effect of a Voice-coil-based Seat-integrated Haptic System on Affective Experience during Audiovisual Content

이창규[1,2,#]
Chang-Gyu Lee[1,2,#]

1 한국생산기술연구원 사용자편의기술연구부문 (User Convenience Technology R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)
2 과학기술연합대학원대학교 첨단로봇 (Advanced Robotics, University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: cglee@kitech.re.kr, TEL: +82-31-8040-6803
ORCID: 0000-0002-7500-1150

KEYWORDS: Seat-integrated haptic system (좌석 일체형 햅틱 시스템), Voice-coil-based vibrotactile actuator (보이스코일 기반 진동 액츄에이터), Vibrotactile feedback (진동 피드백), Affective experience (감정 경험), Audiovisual content (시청각 콘텐츠)

Emotional engagement is a critical factor in audiovisual entertainment environments such as movies, performances, and immersive exhibitions. This study developed a voice-coil-based seat-integrated vibrotactile system and investigated its effects on users' affective experiences during audiovisual content consumption. Unlike conventional wearable haptic devices, the proposed system provides vibrotactile feedback through the seat structure without requiring equipment, offering a practical configuration for public audience environments. A total of 127 participants were randomly assigned to either an audiovisual-only condition (AV) or an audiovisual condition with synchronized seat vibrotactile feedback (AVH). Participants viewed 50 emotion-inducing video clips categorized into neutral, fun, sadness, anger, and fear. Subjective responses were collected using self-assessment questionnaires measuring valence, arousal, dominance, liking, and emotion intensity. The data were analyzed using linear mixed-effects models (LMMs) to account for repeated measurements and variability among participants and stimuli. The results showed that the AVH condition was associated with significantly higher arousal and lower dominance scores than the AV condition. In addition, sadness and fear intensities increased significantly under vibrotactile feedback. Significant interaction effects were observed for valence in sadness, liking in fun and sadness, and anger intensity in fear, indicating that seat-integrated vibrotactile feedback can modulate affective experiences depending on audiovisual content.

Manuscript received: July 15, 2026 / Revised: August 27, 2026 / Accepted: September 22, 2026

1. 서론

엔터테인먼트 환경에서 관객이 경험하는 감정적 몰입과 참여도는 사용자 경험을 결정하는 핵심 요소이다. 영화, 공연, 실감형 전시와 같은 엔터테인먼트 콘텐츠에서는 조명, 음향, 영상 효과 및 스토리텔링 등 다양한 시청각 요소를 통해 관객의 몰입감을 향상시키고 있다. 최근에는 이러한 시청각 자극에 촉각 정보를 추가하여 다감각 경험을 제공하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 시청각 콘텐츠와 동기화된 촉각 피드백은 감정적 몰입과 사용자 경험 향상에 기여할 수 있는 것으로 보고되고 있다[1-3]. 이러한 가능성을 기반으로 다양한 실감형 엔터테인먼트 시스템이 개발되었으나, 특정 공간과 장비 구성이 요구되어 일반적인 관람 환경에 유연하게 적용하기에는 한계가 있다.

기존 연구에서는 터치 블랭킷, 햅틱 재킷, 진동 조끼 등 다양한 착용형 장치를 활용하여, 진동 피드백이 사용자의 몰입감과 감정 반응에 미치는 영향을 분석하였다. 예를 들어, Dijk 등은 터치 블랭킷 기반의 진동 피드백이 영화 감상 몰입감을 향상시킬

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
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.

수 있음을 확인했고[4], Lemmens 등은 햅틱 재킷을 이용한 진동 피드백이 몰입감과 생리적 반응에 영향을 미친다고 보고했다[5]. 이후 Arafsha 등은 온열, 압력, 진동 등 실질적인 햅틱 피드백이 가상의 피드백과 비교하여 더 높은 수준의 사용자 경험을 제공한다는 사실을 확인하였으며[6], Mazzoni 등[7], Karafotias 등[8], Wang 등[9]은 다양한 진동 패턴과 감정 특성 간의 관계를 분석하여 진동 피드백이 감정 경험을 조절할 수 있음을 확인했다.

그러나 이러한 착용형 햅틱 시스템은 사용자가 개별 장비를 직접 착용해야 한다는 점에서 구조적인 불편함이 존재한다. 더욱이 영화관이나 공연장과 같은 공공 환경에서는 다수의 사용자가 동일한 장비를 반복적으로 이용하게 된다. 이에 따라 장비 관리와 위생 유지에 대한 부담이 증가하며, 유지보수 비용 또한 지속적으로 발생한다. 아울러 사용자가 개별 장비를 직접 착용해야 하므로 착용 과정에서의 불편함과 사용상의 번거로움이 발생할 수 있다. 따라서 실제 상용 엔터테인먼트 환경에 적용하기에는 한계가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 관람 공간 자체에 햅틱 인터랙션을 통합하는 환경형 접근이 연구되고 있다. Ablart 등은 공중 햅틱을 활용하여 비접촉 방식의 촉각 경험을 제공하였으며[10], Liu 등은 공압 기반 인터페이스를 활용하여 관람 환경 내에서 촉각 자극을 제공하는 방식을 제안하였다[11]. 이러한 접근은 착용형 장치의 제약을 줄일 수 있다는 장점이 있지만, 복잡한 설치 환경이 요구되거나 직접적인 촉각 전달이 제한될 수 있다는 한계가 있다.

따라서 좌석 일체형 햅틱 시스템은 별도의 착용 장치 없이 모든 관객에게 촉각 자극을 제공할 수 있는 대안으로 고려되고 있다. Jeong 등은 영화 감상 환경에서 좌석 기반 햅틱 피드백이 사용자의 감정 경험에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다[12]. 그러나 기존 좌석형 햅틱 시스템은 주로 강한 저주파 진동을 생성하기 위한 대형 진동 액추에이터 또는 모션 플랫폼 기반으로 구현되어, 좌석 구조 변경과 추가적인 기계적 구성이 요구된다. 따라서 기존 좌석 구조에 비교적 쉽게 적용할 수 있으면서, 콘텐츠 이벤트에 따른 진동 파형 제어가 용이한 일체형 햅틱 시스템의 개발이 필요해졌다.

본 연구에서는 보이스 코일 기반 진동 액추에이터(Voice-coil-based Vibrotactile Actuator, VCA)를 활용한 좌석 일체형 햅틱 시스템을 개발하였다. 기존의 진동 시스템은 주로 ERM (Eccentric Rotating Mass), LRA (Linear Resonant Actuator), 솔레노이드 기반 액추에이터를 이용하여 진동을 생성하였다[13,14]. 그러나 이러한 방식은 구동 원리와 기계적 특성에 따라 출력 가능한 주파수 범위와 응답 특성이 제한될 수 있으며, 콘텐츠 이벤트에 따른 다양한 진동 패턴 구현에는 추가적인 제어 설계가 요구된다. 반면, 본 연구에서 적용한 VCA는 입력 전류 변화에 따른 코일의 선형 변위를 기반으로 동작하므로, 특정 공진 주파수에 의존하는 LRA와 회전 운동 기반의 ERM과 달리 입력 신호의 시간적 변화에 대응하는 진동 응답을 생성할 수 있다. 이러한 특성은 콘텐츠 이벤트와 시간적으로 동기화된 다양한 진동 패턴을 구현하는 데 적합하다. 또한 컴팩트한 구조를 가지므로 기존 좌석 내부에 효과적으로 통합할 수 있어 공공 관람 환경에 적용하기에 적합하다. 이러한 특성을 바탕으로 본 연구에서는 시청각 콘텐츠와 동기화된 좌석 기반 진동 피드백 시스템을 구현하였다.

개발된 시스템의 효과를 평가하기 위해 시청각 콘텐츠와 좌석 진동 피드백을 함께 제공하는 실험 환경을 구축하고 사용자 실험을 수행하였다. 자기보고식 감정 평가는 참가자가 경험한 감정 상태를 직접 측정할 수 있어 감성 컴퓨팅과 미디어 사용자 경험 연구에서 널리 활용되는 평가 방법 중 하나이다[6-8]. 이에 본 연구에서는 자기보고식 설문을 이용하여 참가자의 감정 반응을 수집하고, 시청각 자극만 제공한 조건(Audiovisual-only, AV)과 시청각 자극과 좌석 진동 피드백을 함께 제공한 조건(Audiovisual-plus-haptic, AVH)을 비교하였다. 이후 수집된 평가 결과에 대해 통계 분석을 수행하여 좌석 일체형 진동 피드백이 주관적 감정 평가에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구의 기여는 다음과 같다. 첫째, VCA 기반의 좌석 일체형 햅틱 시스템을 설계하고 구현하였다. 둘째, 시청각 콘텐츠와 동기화된 좌석 기반 진동 피드백 환경에서 127명의 참가자를 대상으로 사용자 실험을 수행하여 제안 시스템의 사용자 경험 향상 가능성을 검토하였다. 셋째, 자기보고식 감정 평가와 선형 혼합 효과 모형(Linear Mixed-effects Model, LMM)을 이용한 통계 분석을 통해 좌석 기반 진동 피드백이 주관적 감정 평가에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 좌석 일체형 진동 피드백 시스템

2.1 좌석 구조 및 VCA 구성

별도의 착용형 장치 없이 사용자에게 진동 피드백을 제공하기 위해, 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 총 3개의 VCA를 좌석 내부에 통합하였다. 모듈은 좌우 착석 영역과 허벅지를 지지하는 중앙 영역에 각각 배치하였으며, 사용자의 신체와 직접 접촉하지 않도록 좌석 내부 프레임 하부에 고정하였다. VCA에서 발생한 진동은 좌석의 쿠션과 패브릭을 통해 사용자에게 간접적으로 전달되며, 별도의 돌출 구조 없이 일반 좌석과 유사한 착석감을 유지할 수 있도록 설계하였다. 세 개의 VCA는 좌석 전체에 진동을 균일하게 전달하면서도 사용자의 주요 착석 부위를 효과적으로 자극할 수 있도록 배치하였다.

본 연구에서는 좌석 구조 내부에서 다양한 진동 파형을 구현하기 위해 Fig. 1(b)와 같은 VCA를 사용하였다. VCA는 입력 전류에 의해 코일이 선형적으로 변위하면서 진동을 발생시키며, 생성된 진동은 좌석 내부 구조를 따라 사용자에게 전달된다. 본 연구에서 사용한 VCA는 시청각 콘텐츠의 시간적 이벤트와 동기화된 진동 파형을 재생할 수 있도록 설계되었으며, 다양한 주파수 성분을 포함하는 진동 자극을 구현하는 데 활용되었다.

이러한 선형 구동 특성으로 인해 VCA는 입력 신호의 변화에



(a) VCA placement in the seat



(b) VCA used in the proposed system

Fig. 1 Configuration of the seat-integrated vibrotactile system

따라 진동 주파수와 진폭을 독립적으로 조절할 수 있으며, 결과적으로 콘텐츠 이벤트에 대응하는 복합적인 진동 패턴 생성이 가능하다.

2.2 하드웨어 구성 및 신호 전달

좌석 일체형 진동 피드백 시스템은 Fig. 2와 같이 메인 제어부, 진동 신호 재생부, 증폭부, 그리고 좌석 내부에 설치된 VCA로 구성된다.

메인 제어부는 외부 프로그램으로부터 전달되는 제어 신호를 실시간으로 수신하여 진동 재생 시점을 정밀하게 제어한다. 내부 메모리에 저장된 구동 신호 데이터는 Melody IC를 통해 재생 신호로 변환되고, 이후 증폭기를 거쳐 VCA로 전달되어 사용자에게 물리적인 햅틱 피드백을 제공한다.

메인 제어기는 32-bit MIPS 기반의 PIC32MZ EF (Microchip Technology) 계열 MCU를 사용하였으며, Melody IC는 ISD9160 Audio SoC를 적용하였다. 출력 신호의 구동을 위해 5 W Class-D 오디오 증폭기(NS4110B)를 사용하였다. 시스템은 12 V 전원을 입력으로 사용하며, 내부에서는 5와 3.3 V로 전압을 변환하여 각 하드웨어를 구동하였다. 실험에 사용된 진동 파형은 시청각 콘텐츠의 주요 이벤트와 시간적으로 동기화되도록 재생되었으며, 실험 조건 간 비교의 일관성을 확보하기 위해 동일한 진동 강도 설정이 모든 참가자에게 적용되었다. 영상 이벤트와 진동 피드백의 동기화를 위해, 실험 전 공연 연출 감독이 각 영상을 검토하여 영상의 연출 및 시간적 전개를 고려한 진동 피드백 제공 시점을 사전에 지정하였다. 이후 영상 재생 중 사전에 정의된 Cue Point에 맞추어 진동 이벤트가 재생되도록 구성하였으며, 각 영상에 설정된 Cue Mapping은 모든 AVH 조건 참가자에게 동일하게 적용하였다.

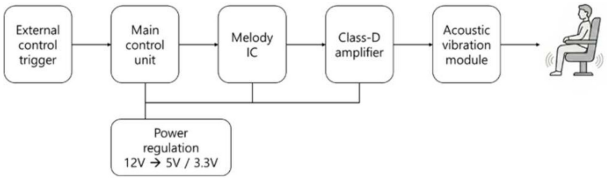


Fig. 2 System architecture and signal flow of the seat-integrated vibrotactile system

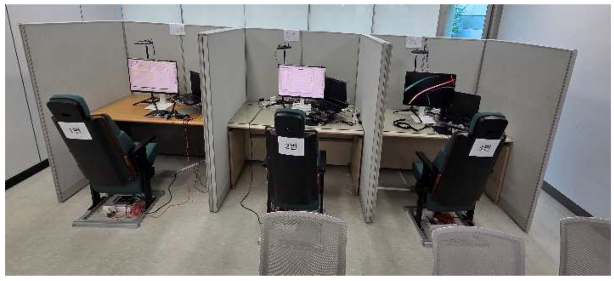


Fig. 3 Experimental environment

3. 실험

본 절에서는 제안한 VCA 기반 좌석 일체형 햅틱 시스템이 사용자의 주관적 감정 평가에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 AV 조건과 AVH 조건을 설정하고 동일한 감정 유발 영상에 대한 사용자 반응을 비교·분석하였으며, 진동 피드백에 따른 기대 효과와 평가 기준 변화를 최소화하기 위해 Between-subject Design을 적용하였다.

3.1 감정 유발 영상

감정 유발을 위해 총 50개의 시청각 영상을 사용하였다. 본 연구에서는 Lee 등[15]이 구축한 LLaMAC 데이터셋의 감정 유발 영상 중 중립, 웃김, 슬픔, 분노, 공포의 다섯 감정 범주에서 각각 10개씩을 선정하였다. LLaMAC 데이터셋은 감정 인식을 목적으로 구축된 대규모 멀티모달 생체신호 데이터셋으로, 다양한 감정 범주의 실제 영상 기반 자극을 포함하고 있다. 사용된 영상은 모두 60초 길이로 구성되었으며, 이는 기존 감정 유발 연구에서 널리 활용되는 영상 기반 자극 구성 방식과 일치한다[16,17].

3.2 실험 환경 및 절차

실험은 실내 온도 22°C, 상대 습도 55%가 유지되는 Fig. 3와 같은 독립된 실험 공간에서 수행하였다. 참가자는 모니터와 일정한 거리를 유지한 상태에서 착석하였으며, 오디오 자극은 유선 이어폰을 통해 제공하였다.

실험에 사용된 진동 피드백은 사전에 정의된 동일한 진동 파형을 이용하여 구성하였다. 해당 파형의 주파수 스펙트럼은 약 108 Hz에서 지배적인 피크를 나타냈으며, 모든 진동 이벤트에는 동일한 구동 신호와 파형을 적용하였다. 각 진동 이벤트의 지속시간은 1초로 설정하였으며, 좌석에 설치된 3개의 VCA에는

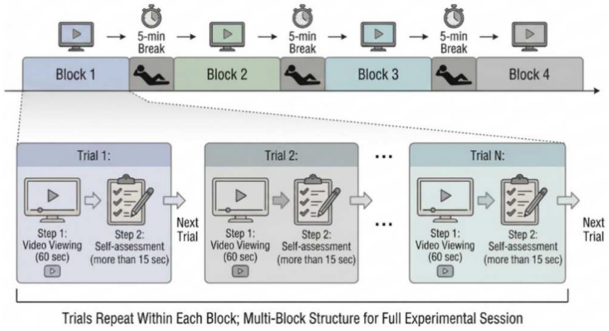


Fig. 4 Experimental procedure for the between-subject evaluation

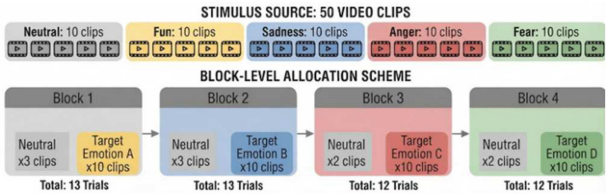


Fig. 5 Block-level stimulus presentation structure

동일한 구동 신호를 전달하여 동시에 작동하도록 하였다. 진동 이벤트는 시청각 콘텐츠에 사전에 설정된 시점에 맞추어 재생함으로써 영상과 시간적으로 동기화하였다.

실험 절차는 Fig. 4와 같이 총 4개의 블록으로 구성하였으며, 각 블록 사이에는 5분의 휴식 시간을 제공하였다. Fig. 5와 같이 블록 1과 블록 2에서는 3개의 중립 영상을 먼저 제시한 후 감정 유발 영상 10개를 연속적으로 제시하였으며, 블록 3과 블록 4에서는 2개의 중립 영상을 먼저 제시한 후 10개의 감정 영상을 제시하였다. 각 블록 내 감정 범주 및 영상 제시 순서는 참가자별로 무작위화하였다. 하나의 트라이얼은 60초 길이의 영상 시청 후 자기보고식 설문을 수행하는 순서로 진행되었다.

참가자는 전날 음주를 금지하고 실험 당일 카페인 섭취를 제한하도록 안내 받았다.

3.3 주관적 감정 평가

모든 영상 시청 직후 참가자는 자기보고식 설문을 수행하였다. 좌석의 진동 피드백은 웃김, 슬픔, 분노, 공포의 4개 감정 영상에서만 제시되었다. 중립 영상에서는 감정 유발 목적이 낮고, 진동 피드백 자체가 평가에 미치는 영향을 최소화하기 위해 촉각 자극을 제공하지 않았다. 설문 항목은 다음과 같다.

1) 감정 상태 평가

A. Valence: 5점 척도(1–5점; 1: 매우 불쾌함, 5: 매우 쾌적함)를 사용하여 감정의 쾌-불쾌 정도를 평가.

B. Arousal: 5점 척도(1–5점; 1: 매우 침착함, 5: 매우 흥분됨)를 사용하여 신체적·심리적 활성화 수준을 평가.

C. Dominance: 5점 척도(1–5점; 1: 상황에 압도됨, 5: 상황을 완전히 통제함)를 사용하여 자극에 대한 지배력을 평가.

D. Liking: 3점 척도(1–3점; 1: 낮음, 3: 높음)를 사용하여 영상에 대한 전반적인 선호도를 평가.

2) 감정 강도 평가: 영상 시청 후 참가자가 경험한 감정의 강도를 중립, 웃김, 슬픔, 분노, 공포의 다섯 감정 범주에 대해 각각 6점 척도(1–6점; 1: 전혀 느껴지지 않음, 6: 매우 강하게 느껴짐)를 사용하여 평가.

3.4 실험 참가자

실험에는 총 127명의 건강한 성인이 참여하였다. 참가자는 AV 조건과 AVH 조건에 각각 71명과 56명이 무작위 배정되었다. AV 조건에서는 동일한 시청각 콘텐츠만 제공하였으며, AVH 조건에서는 동일한 콘텐츠와 함께 영상 이벤트에 동기화된 좌석 진동 피드백을 추가로 제공하였다. 전체 참가자는 남성 50명, 여성 77명으로 구성되었으며, 평균 연령은 27.69세(표준편차 = 10.21)였다. 모든 참가자는 정상 또는 교정 시력을 가지고 있었으며 정상적인 청력을 보유하였다. 또한 신경계 질환, 심혈관계 질환 및 주요 정신질환 병력이 있는 경우에는 실험에서 제외하였다. 모든 실험 절차는 한국생산기술연구원 기관생명윤리위원회의 승인을 받았으며(IRB No. 2025-002-001), 실험 시작 전에 모든 참가자로부터 연구 참여에 대한 서면 동의를 획득하였다.

3.5 통계 분석 방법

수집된 자기보고식 평가 결과는 LMM을 이용하여 분석하였다. 실험 조건(AV, AVH)과 감정 범주는 고정 효과로 설정하였으며, 조건과 감정 범주 간의 상호작용 효과도 함께 분석하였다. 각 참가자는 여러 영상에 대해 반복적으로 평가를 수행하였으므로, 참가자 간의 개인차와 반복 측정 구조를 고려하기 위해 참가자 ID를 Random Intercept로 포함하였다. 또한 영상별 감정 유발 특성과 자극 차이에 따른 변동성을 반영하기 위해 영상 ID를 Random Intercept로 추가하였다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$로 설정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

진동 피드백 유무에 따른 주관적 감정 평가의 기술통계 및 분석 결과를 Table 1에 정리하였다. 표에 제시된 모든 값은 평균(표준편차)을 의미한다.

Table 1에 제시된 감정 강도는 각 감정 강도 항목을 전체 감정 유발 영상에 대해 산출한 결과이므로, 각 영상이 목표로 하는 감정의 유발 강도를 직접적으로 나타내지는 않는다. 이에, AV와 AVH 조건을 통합하여 각 감정 범주의 영상에서 해당 목표 감정이 실제로 어느 정도 유발되었는지를 추가로 확인한 결과, 웃김 영상의 웃김 강도는 3.66 ± 1.47, 슬픔 영상의 슬픔 강도는 3.44 ± 1.58, 분노 영상의 분노 강도는 4.06 ± 1.55, 공포

Table 1 Descriptive statistics of self-assessment scores and p-values from linear mixed-effects model analysis

Dependent variables	AV	AVH	p-value
Valence	2.62 (1.36)	2.60 (1.32)	p = 0.767
Arousal	2.77 (1.27)	2.92 (1.19)	p < 0.001***
Dominance	3.70 (1.32)	3.47 (1.32)	p < 0.001***
Liking	2.00 (0.82)	2.03 (0.80)	p = 0.004**
Strength of fun	1.70 (1.38)	1.67 (1.35)	p = 0.736
Strength of sadness	1.85 (1.41)	1.97 (1.50)	p = 0.003**
Strength of anger	1.81 (1.56)	1.85 (1.55)	p = 0.831
Strength of fear	1.75 (1.48)	1.83 (1.49)	p = 0.001**

영상의 공포 강도는 3.88 ± 1.53으로 나타났다. 이는 Table 1에 제시된 전체 영상에 대한 감정 강도 평균보다 높은 수준으로, Table 1의 낮은 평균값이 각 영상의 목표 감정에 대한 낮은 유발 강도를 의미하지 않음을 보여준다.

4.2 감정 상태 평가의 분석

분석 결과, 좌석 일체형 진동 피드백은 감정 상태 평가 변수 중 Arousal, Dominance, Liking에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. LMM 분석 결과, 실험 조건은 Arousal 평가에 유의한 영향을 미쳤으며(β = 0.294, SE = 0.059, p < 0.001***), AVH 조건에서 AV 조건보다 높은 arousal 수준이 관찰되었다. 반면 Dominance 점수는 AVH 조건에서 AV 조건보다 유의하게 낮게 나타났으며(β = -0.233, SE = 0.065, z = -3.569, p < 0.001***), 이는 진동 피드백이 시청각 자극의 영향성을 상대적으로 강화함으로써 참가자가 자극을 더 강하게 경험하도록 했을 가능성을 시사한다. 또한 Liking 역시 AVH 조건에서 유의하게 증가하였다(β = 0.100, SE = 0.035, p = 0.004**). 이러한 결과는 기존 착용형 햅틱 장치를 활용한 연구에서 보고된 촉각 자극의 정서적 몰입 증진 효과와 일치한다[4,5,8]. 기존 햅틱 연구들은 주로 몰입감과 정서 강도의 증가에 초점을 두었으나[4-9], 본 연구에서는 Dominance 감소가 함께 관찰되었다. 이는 진동 피드백이 단순한 감정 강도 증가뿐 아니라 사용자가 콘텐츠를 경험하는 방식에도 영향을 미칠 가능성을 보여준다. 또한 Liking 평가에서도 통계적으로 유의한 증가가 관찰되었으나 평균 차이는 제한적이었다. 따라서 진동 피드백은 콘텐츠 자체의 선호도를 변화시키기보다는 전반적인 경험 만족도를 보조적으로 향상시킨 것으로 해석된다. 반면 Valence는 진동 유무에 따른 유의미한 차이를 보이지 않았다.

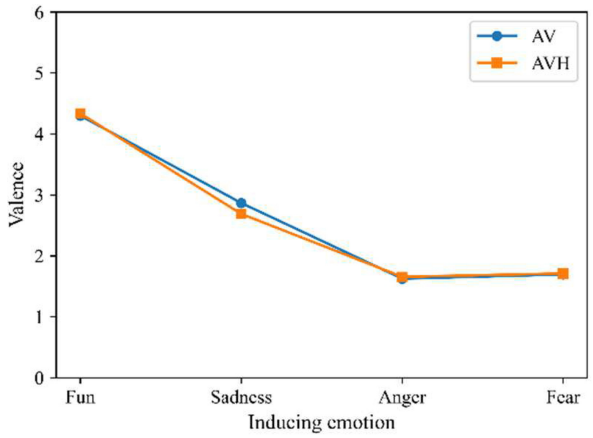
4.3 감정 강도 평가의 분석

감정 강도 평가에서는 슬픔과 공포 감정에서 진동 피드백의 유의한 효과가 관찰되었다. LMM 분석 결과, AVH 조건은 슬픔 강도를 유의하게 증가시키는 것으로 나타났으며(β = 0.172, SE = 0.058, p = 0.003**), 공포 강도 역시 유의하게 증가하였다(β = 0.153, SE = 0.047, p = 0.001**). 이는 진동 피드백이 슬픔과 공포를 유도하는 시청각 자극과 결합될 때 해당 감정 경험의 강도를 증가시킬 가능성이 있음을 보여준다. 이러한 결과는 진동 피드백이 특정 감정 범주에서 선택적으로 정서 경험을 강화할 수 있다는 기존 연구 결과와 일치한다[7,9]. 특히 본 연구에서는 슬픔과 공포와 같은 부정적 감정 범주에서 효과가 관찰되었으며, 이는 강한 정서 반응을 유발하는 콘텐츠에서 촉각 정보가 보조적인 감각 단서로 작용했기 때문으로 해석될 수 있다. 반면 웃김 강도(β = -0.014, SE = 0.042, p = 0.736)와 분노 강도(β = 0.010, SE = 0.048, p = 0.831)에서는 유의한 조건 효과가 관찰되지 않았다. 또한 통계적으로 유의한 변수에서도 AV와 AVH 조건 간 평균 차이는 비교적 제한적이었다. 따라서 좌석 일체형 진동 피드백은 모든 감정 범주에서 동일한 효과를 보이기보다는, 특정 감정 범주에서 정서 반응의 강도와 주관적 감정 평가를 선택적으로 조절하는 보조적 역할을 수행하는 것으로 해석할 수 있다.

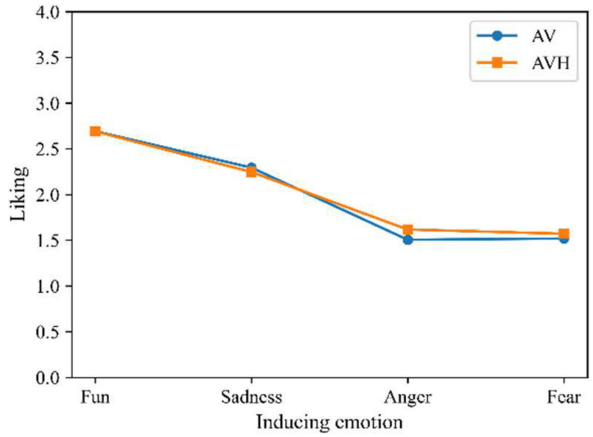
4.4 상호작용 분석

실험 조건(AV, AVH)과 감정 범주(웃김, 슬픔, 분노, 공포) 간의 상호작용을 분석한 결과, 일부 평가 변수에서 통계적으로 유의한 효과가 확인되었다. Valence에서는 슬픔 범주에서 조건과 감정 범주의 상호작용 효과가 유의하게 나타났으며(β = -0.209, SE = 0.061, p < 0.001***), 이는 슬픔 영상에서 진동 피드백이 감정 평가에 차별적인 영향을 미쳤음을 의미한다. Liking에서는 웃김(β = -0.114, SE = 0.049, p = 0.020*)과 슬픔(β = -0.160, SE = 0.049, p = 0.001**) 범주에서 유의한 상호작용 효과가 확인되었다. 또한 분노 강도 평가에서는 공포 영상 조건에서 실험 조건과 감정 범주 간 상호작용 효과가 확인되었다(β = 0.148, SE = 0.067, p = 0.026*).

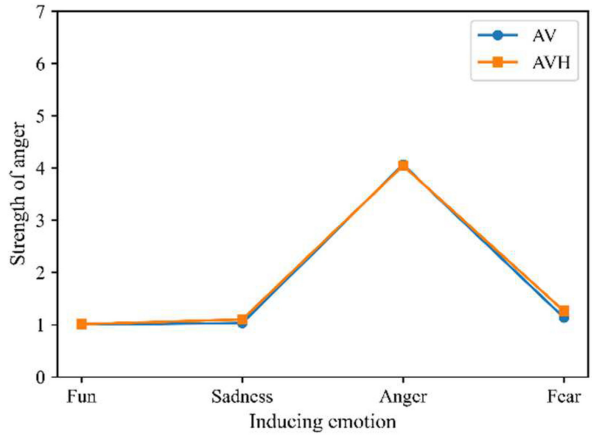
한편 Arousal, 슬픔 강도, 공포 강도에서는 실험 조건 간 평균 차이가 존재하였으나 감정 범주에 따른 상호작용 효과는 유의하지 않았다(모든 p > 0.05). Fig. 6은 유의한 상호작용 효과가 확인된 변수들의 조건별 변화 양상을 나타낸다. 슬픔 영상에서는 AVH 조건의 Valence가 AV 조건보다 낮게 나타나 진동 피드백이 부정적 감정 자극의 쾌-불쾌 평가에 영향을 미칠 가능성을 보여주었다(Fig. 6(a)). 또한 웃김과 슬픔 영상에서는 Liking의 조건별 변화 패턴이 다른 감정 범주와 구별되어, 진동 피드백의 효과가 콘텐츠의 정서적 특성에 따라 달라질 수 있음을 시사하였다(Fig. 6(b)). 공포 영상에서는 분노 강도 평가에서 유의한 상호작용 효과가 관찰되어, 촉각 피드백이 특정 정서 상황에서 부정적 정서 반응 패턴에 영향을 줄 가능성을 보여주었다(Fig. 6(c)). 이러한 감정 범주별 차이는 촉각 정보가 독립적인



(a) Interaction effect on valence



(b) Interaction effect on liking



(c) Interaction effect on strength of anger

Fig. 6 Significant interaction effects between experimental condition (AV vs. AVH) and inducing emotion category

감각 자극으로 작용하기보다 시청각 정보와 결합하여 통합적인 감각 경험을 형성한다는 기존 다감각 통합 연구와 일치한다[1-3]. 즉, 동일한 진동 피드백이라도 콘텐츠가 전달하는 정서적 맥락에 따라 사용자 경험에 미치는 영향이 다르게 나타날 수 있다.

다만 Fig. 6에서 나타난 AV와 AVH 조건 간 평균 차이의 절대적인 크기는 전반적으로 제한적이었다. 유의한 상호작용 효과의 LMM 추정계수 역시 절대값 기준 β = 0.114–0.209 수준으로 나타나, 통계적 유의성과 별개로 효과의 실질적인 크기는 크지 않은 것으로 판단된다. 본 연구의 LMM 분석은 참가자와 영상에 따른 변동성을 고려하면서 반복 측정 자료에서 나타나는 조건별 평가 패턴을 분석하므로, 작은 평균 차이라도 참가자 및 영상 전반에서 일관된 패턴으로 나타날 경우 통계적으로 유의한 효과로 검출될 수 있다. 따라서 본 연구에서 확인된 유의한 상호작용 효과는 진동 피드백이 감정 경험을 큰 폭으로 변화시켰음을 의미하기보다는, 특정 감정 범주에서 감정 평가 패턴을 제한적으로 조절하였음을 보여주는 결과로 해석하는 것이 적절하다.

4.5 연구의 한계

본 연구에는 몇 가지 한계가 존재한다. 첫째, 실험에 사용된 진동 피드백의 주파수 특성, 구동 파형 및 지속시간은 확인하였으나, 좌석 표면에서 참가자에게 실제 전달되는 진동 가속도는 별도로 계측하지 않았다. 좌석을 통해 전달되는 진동의 물리적 크기는 VCA의 구동 특성뿐만 아니라 좌석 구조, 쿠션 재질 및 참가자의 착석 조건 등에 따라 달라질 수 있으므로, 본 연구의 결과만으로 실제 인체에 전달된 진동의 물리적 크기와 감정 평가 변화 간의 관계를 정량적으로 설명하는 데에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 좌석 표면의 가속도 및 주파수 응답을 계측하여 진동 자극의 물리적 특성을 정량화하고, 이러한 특성과 주관적 감정 반응 간의 관계를 분석할 필요가 있다.

둘째, 일부 감정 평가 변수에서 통계적으로 유의한 조건 효과와 상호작용 효과가 확인되었으나, AV와 AVH 조건 간 평균 차이의 절대적인 크기는 전반적으로 제한적이었다. 다수 참가자의 반복 측정 자료를 이용한 LMM 분석에서는 작은 차이도 일관되게 나타날 경우 통계적으로 검출될 수 있으므로, 통계적 유의성이 반드시 큰 실질적 효과를 의미하지는 않는다. 따라서 본 연구의 결과는 좌석 진동 피드백이 감정 경험을 크게 변화시킨다기보다 특정 감정 평가 차원에 제한적인 조절 효과를 나타낸 것으로 해석할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 VCA 기반의 좌석 일체형 햅틱 시스템을 개발하고, 시청각 콘텐츠와 동기화된 진동 피드백이 사용자의 주관적 감정 경험에 미치는 영향을 자기보고식 설문을 통해 분석하였다. LMM 분석 결과, AVH 조건은 Arousal 증가, Dominance 감소, Liking 증가와 유의하게 관련되었다. 또한 감정 강도 평가 결과, 슬픔과 공포 감정 강도는 AVH 조건에서 유의하게 증가하였다. 이는 좌석 진동 피드백이 특히 슬픔과 공포와 같은 부정적 정서 콘텐츠에서 감정 경험의 일부 차원을 조절할 가능성을 보여준다.

상호작용 분석에서는 Valence의 슬픔 범주, Liking의 웃김 및

슬픔 범주, 그리고 분노 강도의 공포 범주에서 유의한 상호작용 효과가 관찰되었다. 이는 진동 피드백의 효과가 모든 감정에서 동일하게 나타나는 것이 아니라, 감정 범주에 따라 차별적으로 나타날 수 있음을 시사한다.

본 연구는 기존 좌석 구조에 통합 가능한 VCA 기반 햅틱 시스템을 구현하고, 다수 참가자를 대상으로 사용자 실험을 수행하여 좌석 일체형 진동 피드백의 감정 경험 변화 효과를 통계적으로 검증하였다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 다양한 진동 패턴과 콘텐츠 유형에 따른 효과를 추가적으로 분석하고, 주관적 평가와 객관적 생체신호를 함께 고려한 다중 모달 평가 체계로 연구를 확장할 필요가 있다. 또한 제안한 시스템은 별도의 착용 장치가 필요하지 않아 착용형 시스템에서 요구되는 개인별 장비 착용 및 관리 부담을 줄일 수 있으며, 공공 엔터테인먼트 환경에서 활용 가능한 좌석 기반 햅틱 인터랙션 플랫폼으로 적용될 가능성을 가진다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한국생산기술연구원 기본사업 “미래형 모빌리티의 인간 상호작용 (Human-X Interaction) 공간 플랫폼 기술 개발 (KITECH EO-26-00008)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

1. Stein, B. E., Meredith, M. A., (1993), The merging of the senses, MIT Press.
2. Spence, C., (2011), Crossmodal correspondences: A tutorial review, Attention, Perception, & Psychophysics, 73(4), 971-995.
3. Gallace, A., Spence, C., (2014), In touch with the future: The sense of touch from cognitive neuroscience to virtual reality, OUP Oxford.
4. Dijk, E.O., Weffers-Albu, A., De Zeeuw, T., (2009), A tactile actuation blanket to intensify movie experiences with personalised tactile effects, Demo Contribution Abstract, Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment.
5. Lemmens, P., Crompvoets, F., Brokken, D., Van Den Eerenbeemd, J., de Vries, G., (2009), A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing, Proceedings of the World Haptics - Third Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 7-12.
6. Arafsha, F., Alam, K. M., El Saddik, A., (2012), EmoJacket: Consumer centric wearable affective jacket to enhance emotional immersion, Proceedings of the International Conference on innovations In Information Technology, 350-355.
7. Mazzoni, A., Bryan-Kinns, N., (2016), Mood glove: A haptic wearable prototype system to enhance mood music in film, Entertainment Computing, 17, 9-17.
8. Karafotias, G., Teranishi, A., Korres, G., Eyssel, F., Copti, S., Eid, M., (2017), Intensifying emotional reactions via tactile gestures in immersive films, ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 13(3), 1-17.
9. Wang, X., Xu, B., Wang, J., Gao, Z., Ping, J., Li, H., Song, A., (2025), Haptic vibrations in emotion induction and regulation: Insights from subjective ratings and EEG signals, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 74, 1-13.
10. Ablart, D., Velasco, C., Obrist, M., (2017), Integrating mid-air haptics into movie experiences, Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Experiences for TV and Online Video, 77-84.
11. Liu, Y., Safin, S., Detienne, F., Lecolinet, E., (2025), Designing interactive pneumatic interfaces for enhanced movie responses, Design and Artificial Intelligence, 1(3), 100021.
12. Jeong, D., Han, S. H., Jeong, D. Y., Kwon, K., Choi, S., (2021), Investigating 4D movie audiences’ emotional responses to motion effects and empathy, Computers in Human Behavior, 121, 106797.
13. Choi, S., Kuchenbecker, K. J., (2013), Vibrotactile display: Perception, technology, and applications, Proceedings of the IEEE, 101(9), 2093-2104.
14. Brewster, S., Brown, L. M., (2004), Tactons: Structured tactile messages for non-visual information display, Proceedings of the Fifth Conference on Australasian User Interface, 28, 15-23.
15. Lee, C., Kim, J. Y., (2025), LLaMAC: low-cost biosignal sensor based large multimodal dataset for affective computing, Scientific Data, 12(1), 1911.
16. Rottenberg, J., Ray, R. D., Gross, J. J., (2007), Emotion elicitation using films, in: Handbook of emotion elicitation and assessment, Coan, J. A., Allen, J. J. B. (Eds), Oxford University Press.
17. Schaefer, A., Nils, F., Sanchez, X., Philippot, P., (2010), Assessing the effectiveness of a large database of emotion-eliciting films: A new tool for emotion researchers, Cognition and Emotion, 24(7), 1153-1172.



Chang-Gyu Lee
Senior researcher in the User convenience technology R&D group, Korea institute of industrial technology. His research interest is human-computer interaction.
E-mail: cglee@kitech.re.kr