

자율주행차 내 몰입형 VR 시스템 설계 및 사용자 경험 최적화 전략

한정수*
백석대학교 컴퓨터공학부 교수

Design and Optimization Strategies for Immersive VR Systems in Autonomous Vehicles

Jung-Soo Han*
Professor, Division of Computer Engineering, Baekseok University

요약 본 연구는 자율주행차 내 실내 VR 시스템이 단순한 오락기기를 넘어 미래형 디지털 체험 공간으로 진화하기 위한 설계 방향과 기술 요소를 체계적으로 분석한 것이다. 자율주행차의 특수한 물리적 조건, 즉 이동 중 발생하는 진동, 시야 제약, 공간 제한 등을 고려하여 VR 콘텐츠의 시야 정렬, 인터페이스 구성, 자세 변화 인식 및 생체 신호 기반의 인터랙션 설계가 필요함을 강조한다. 특히 HMD 착용 기반 환경에서 사용자의 몰입도를 유지하고 멀미를 방지하기 위해서는 차량 동역학 정보를 반영한 콘텐츠 보정, 시각 안정화 기술, 생체 신호와 행동 데이터를 반영한 적응형 콘텐츠 조정이 필수적이다. 또한 개별 체험과 다자간 체험 간의 시점 불일치, 감정 반응 차이를 해결하기 위한 동기화 기술과 실시간 반응 최적화 구조가 필요하며, 콘텐츠 스트리밍과 연산 경량화를 위한 분산 컴퓨팅 구조도 함께 논의하였다. 실증 실험을 통해 UX를 평가하고 이를 자동 분석하는 피드백 루프 기반 시스템은 지속적인 설계 개선의 핵심이며, 향후 자율주행차 VR 시스템은 관광, 교육, 의료, 업무 등 다양한 산업 콘텐츠와 연계되어 메타버스 플랫폼 및 스마트 도시 인프라로 확장될 수 있는 가능성을 지닌다. 이를 위해 정책적 가이드라인과 데이터 보호 체계 마련도 병행되어야 한다.

주제어 : 자율주행차, 가상현실, 사용자 경험 설계, 생체신호 기반 인터랙션, 실시간 연산 및 콘텐츠 경량화

Abstract This study systematically analyzes the key design elements and technical requirements for implementing immersive VR systems within autonomous vehicles, transforming them into future-oriented digital experience spaces. Given the unique physical constraints of a moving vehicle—such as vibration, limited field of view, and spatial restrictions—VR content must incorporate dynamic viewpoint alignment, interface adaptability, posture recognition, and biosignal-based interaction. To maintain immersion and reduce motion sickness, content must be adjusted in real time using vehicle kinematic data and physiological feedback. The paper also addresses multi-user synchronization issues, including viewpoint mismatch and emotional desynchronization, requiring advanced real-time coordination systems. A distributed computing structure and lightweight rendering strategies are proposed to optimize real-time performance. User experience (UX) evaluation through empirical testing and feedback-loop-based analytics is emphasized, and future expansion into industries such as tourism, education, healthcare, and the metaverse is anticipated, alongside regulatory and data protection considerations.

Key Words : Autonomous Vehicle, Virtual Reality, UX Design, Biosignal-Based Interaction, Real-Time Processing and Content Optimization

1. 서론

4차 산업혁명 시대의 도래와 함께 자율주행 기술과 가상현실(VR) 기술은 각각의 영역에서 괄목할 만한 발전을 이루어왔다. 자율주행차는 이동의 개념을 단순한 운송에서 벗어나 사용자의 시간을 재구성할 수 있는 새로운 생활공간으로 확장시키고 있으며, VR은 사용자 몰입을 기반으로 한 감각적 경험을 제공함으로써 기존의 정보 소비 방식과 상호작용 방식을 근본적으로 변화시키고 있다. 이러한 두 기술이 융합될 때, 차량은 단순한 이동 수단을 넘어 몰입형 디지털 체험 플랫폼으로 재정의 될 수 있다.

특히 자율주행차 실내 공간에서의 VR 경험은 탑승자의 이동 시간을 가치 있는 체험 시간으로 전환시킬 수 있는 가능성을 지닌다. HMD(Head-Mounted Display)를 활용한 몰입형 콘텐츠 체험은 영화, 게임, 교육, 회의 등 다양한 콘텐츠를 실시간으로 제공할 수 있으며, 탑승자는 이동 중에도 몰입감 있는 인터랙티브 경험을 누릴 수 있게 된다. 그러나 자율주행차 내 환경은 일반적인 실내 공간과는 다른 동적이고 제약된 조건을 내포하고 있어, VR 시스템의 설계 및 구현에 있어 다층적인 기술적 고려가 요구된다[1, 2].

차량은 끊임없이 움직이며 진동, 회전, 속도 변화 등의 동역학 요소가 존재하고, 탑승자의 좌석 위치, 자세 변화, 시야 제한 등 물리적 제약도 크다. 이러한 제약은 콘텐츠의 위치 배치, 인터랙션 방식, 시점 설계 등에 직접적인 영향을 미치며, 몰입감 유지와 멀미 방지, 피로 최소화 등 사용자 경험(UX)을 위해 정밀한 시스템 설계가 필수적이다. 더불어 다자간 체험 환경에서는 사용자 간 시점 불일치, 반응 시간 차이, 감정 인식의 비동기성 등의 문제가 발생할 수 있어, 이를 보완하기 위한 동기화 및 감정 정렬 기술이 병행되어야 한다.

또한, 자율주행차 내 VR 시스템은 단순히 콘텐츠를 재생하는 수준을 넘어, 사용자의 생리적 상태(심박수, 피부 전도도 등), 행동 반응(시선, 제스처 등)을 실시간으로 인식하고, 이에 따라 인터페이스를 자동 조정하는 적응형 구조를 갖추고 있어야 한다. 이를 통해 각 사용자에게 맞춤형 몰입 경험을 제공하고, 장시간 체험에도 피로를 최소화할 수 있다. 이와 함께 고속 연산을 위한 분산 컴퓨팅 구조, 실시간 스트리밍을 위한 초저지연 네트워크, 연산 병목을 방지하기 위한 시스템 최적화 기술 등도 병행 적용되어야 한다.

본 논문은 자율주행차 내 실내 VR 시스템의 몰입 경

험 설계에 필요한 주요 구성 요소를 분석하고, 개별 및 다자간 체험 구조, 인터랙션 기반 상태 인식 기술, 실시간 처리 및 경량화 방안, 사용자 피드백 기반 UX 개선 전략, 산업적 확장 가능성 및 정책 기반 연계 전략 등을 종합적으로 고찰한다. 이를 통해 자율주행차가 단순한 교통수단이 아닌, 미래형 디지털 체험 공간으로 기능할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

2. 체험 환경 분석

2.1 차량 내 몰입 공간의 제약 조건

VR 콘텐츠의 몰입도는 시각-청각-공간 감각의 정합성과 일관성에 크게 의존한다. 그러나 자율주행차라는 특수한 환경은 VR 시스템의 구현에 있어 일반 실내 공간이나 거치형 장치 기반 환경과는 근본적으로 다른 제약 조건을 내포하고 있다. 차량의 움직임, 공간 크기, 좌석 방향성, 승차 자세는 몰입형 콘텐츠의 설계에 있어 예외적 고려 요소가 되며, 이들은 VR 인터랙션 및 UX 신뢰도에 직접적 영향을 미친다[3].

첫 번째로 고려해야 할 요소는 차량 이동 중 공간 제약과 감각의 불일치이다. 자율주행차는 지속적으로 이동 중인 공간이기 때문에, 탑승자의 시각적 체험과 전정기관의 공간 인식 간에 불일치가 발생할 수 있다. 이는 특히 HMD 기반 VR 콘텐츠에서 흔히 발생하는 VR 멀미를 유발하는 주요 원인이다. 차량이 실제로 가속하거나 회전하고 있음에도 불구하고, 사용자는 정적인 콘텐츠나 일정한 이동 방향의 가상 환경을 체험할 경우, 감각 간 불일치로 인해 현기증, 피로, 두통 등의 부작용이 발생할 수 있다. 이를 보정하기 위해서는 차량 동역학 정보(속도, 가속도, 회전을 등)를 콘텐츠 레이어에 반영하거나, 시점 보정 알고리즘을 통해 체감과 시각의 차이를 최소화해야 한다[4].

공간 제약으로 인해 사용자는 VR 내에서 자유롭게 이동할 수 없기 때문에, 콘텐츠는 제자리 기반 체험 중심으로 구성되고, 시선 및 머리 회전을 중심으로 상호작용할 수 있도록 설계되어야 한다. 차량 내 좌석은 고정된 방향성과 제한된 회전각을 가지며, 사용자의 자세는 운전 외 활동(수면, 휴식, 반쯤 누운 자세 등)으로 다양하게 변할 수 있다. 이는 VR 콘텐츠의 시야 위치 정렬, 상호작용 방식, UX 타이밍에 있어 큰 변동성을 유발한다. 예컨대 후방을 바라보는 콘텐츠나, 특정 방향을 기준으로 한 동적 시뮬레이션 콘텐츠는 고정된 좌석 구조 내에서 의도된

몰입을 유도하기 어렵다.

또한 사용자의 상체 자세가 변화하거나, 시선이 중앙을 벗어난 상태에서도 HUD 또는 VR 콘텐츠는 사용자의 주관적 중심을 기준으로 자동 조정되어야 한다. 이를 위해서는 실시간 자세 추적 센서(FSR, IMU, 시선 추적기 등)와 연계된 콘텐츠 배치 보정 알고리즘이 필수적으로 적용되어야 한다. 뿐만 아니라 주행 중 발생하는 미세한 진동, 도로 요철, 차선 변경, 급제동/가속 등은 VR 경험 중 불규칙한 시각 흔들림 또는 콘텐츠 왜곡을 유발한다. 이로 인해 VR 환경에 대한 몰입이 깨지고, 사용자 혼란이 가중될 수 있다. 특히 HMD 착용 상태에서는 머리의 미세한 흔들림이 화면 전체에 확대 적용되기 때문에, 시각 안정화 기술이 필수적이다. 이를 위해서는 차량의 주행 상태 데이터를 실시간 수신하여 콘텐츠의 흔들림을 보정하거나, 가상 카메라의 가속값을 역보정하는 방식의 역동역학 보정 알고리즘이 요구된다. 일정 수준 이상의 주행 충격이 감지될 경우, 시스템은 콘텐츠를 일시 중지하거나, 간단한 시청 모드로 전환하는 안정 모드(Safe Mode)가 자동으로 동작해야 한다.

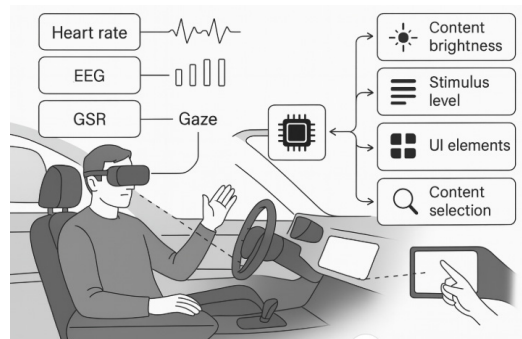
2.2 몰입형 콘텐츠의 설계 패러다임

자율주행차 내 VR 콘텐츠는 단순한 감상형 또는 입력형 콘텐츠를 넘어, 사용자의 시야, 자세, 생체 반응 등 다양한 요소와 실시간으로 상호작용하며 공간 전체를 디지털 인터페이스로 전환하는 몰입형 체험 구조로 설계되어야 한다. 특히 차량이라는 특수한 이동 환경은 콘텐츠의 배치 위치, 시야 정렬 방식, 깊이감 및 동적 반응 방식 등에서 기존의 거치형 VR 환경과 전혀 다른 구조적 고려사항을 요구한다. 먼저, 차량 내 실내 공간은 제한적이고 고정된 시점 위주로 구성되므로, 모든 콘텐츠는 사용자의 중심 시야에서 시작되어야 한다. 이를 통해 콘텐츠가 실제 공간에서 존재하는 것처럼 느껴지도록 해야 하며, 단순히 보는 대상이 아니라 공간을 구성하는 요소처럼 기능하도록 만들어야 한다. 중심 콘텐츠는 HMD 기반 시야 중앙에 배치되고, 이를 둘러싼 주변 시야 요소들은 몰입감을 높이기 위한 가상공간 배경, 라벨, 경로 안내선, 피드백 인터페이스 등으로 구성된다[5, 6].

이를 위해 중심 시야 콘텐츠는 고정 화면이 아니라, 사용자의 시선 움직임에 반응하여 자동 확대, 강조, 배경 흐림 효과 등으로 감각 중심 체험을 유도해야 한다. 주변 콘텐츠는 몰입을 유지하면서도 피로를 유발하지 않도록, 움직임 없이 조용한 애니메이션 또는 컬러 배경 위주로 구성되어야 하며, 정보 노출 밀도는 중심 대비 1/3 이하

로 제한되어야 한다. 공간적 깊이는 자율주행차 VR 콘텐츠에서 몰입감을 결정짓는 중요한 설계 요소이다. 정적인 콘텐츠일지라도 사용자와의 거리, 각도, 회전 위치에 따라 체감되는 공간 인식이 완전히 달라지기 때문이다. 예를 들어, 영화 콘텐츠는 사용자의 시야에서 약 2m 전방에 고정된 120인치 화면 크기로 구현되지만, 시점 고정형 보다 입체적으로 콘텐츠가 공간 내에 존재하는 듯 설계되면 사용자는 더욱 자연스럽게 몰입하게 된다. 이러한 깊이감은 가상 조명, 그림자, 시차(parallax) 효과 등을 통해 강화될 수 있다. 또한 차량 내 콘텐츠는 사용자의 움직임이 제한적인 환경에 맞춰, 사용자의 미세한 반응에도 즉각적으로 대응할 수 있는 시야 반응형 콘텐츠 배치 전략을 수반해야 한다. 사용자가 고개를 살짝 돌리거나 자세를 조정할 때 콘텐츠가 불필요하게 따라오면 혼란이 유발될 수 있다. 따라서 중심 콘텐츠는 상대 고정(fixed-in-space), 주변 콘텐츠는 반응형(follow-the-head) 또는 고정형 중 선택적으로 설정되어야 하며, 이는 콘텐츠의 성격과 체험 목적에 따라 분리 적용되어야 한다. 그리고 자세 변화에 따라 콘텐츠 위치, 각도, 거리 등이 자동으로 재배열되는 적응형 시야 보정 알고리즘이 필수로 작동해야 하며, 이를 통해 몰입 흐름을 유지하고 사용자 불편을 최소화할 수 있다[1, 7, 8].

실제 차량의 진동, 회전, 정지 등과 같은 동역학 요소가 콘텐츠의 공간 배치에 영향을 주지 않도록 하기 위해서는 콘텐츠의 위치 정보를 고정된 가상 좌표계가 아니라 차량 내 관성 좌표계에 연동시켜야 한다. 이를 통해 사용자 기준의 정적인 콘텐츠 구성이 가능하며, 외부 물리 환경에 영향을 받지 않는 심리적 안정성 확보가 가능해진다. 결론적으로 콘텐츠의 레이아웃은 단순히 시각적으로 보기 좋게 구성하는 것이 아니라, 사용자의 생리적 반응, 인지 피로도, 감정 변화 등에 따라 변할 수 있도록



[Fig. 1] Biometric, Gaze, Gesture based Recognition System

다층 구조의 콘텐츠 큐(queue)를 구성하고, 이를 상황에 따라 실시간 재정렬할 수 있는 시스템 구조가 요구된다. 이를 통해 자율주행차 VR 콘텐츠는 더 이상 정적인 보기용 콘텐츠가 아닌, 사용자 중심 감응형 체험 플랫폼으로 기능하게 된다[9, 10]

2.3 탑승자 상태 인지 기반 인터랙션 시스템

2.3.1 생체·시선·제스처 기반 인식 시스템

탑승자 상태 인지 기반 시스템은 [Fig. 1]처럼 탑승자의 생리적 및 행동적 상태를 정밀하게 인식하기 위해 다양한 센서 기반 기술이 활용된다. 생체 신호로는 심박수, 피부 전도도(GSR), 뇌파(EEG), 안면 근전도(EMG) 등이 있으며, 이를 통해 사용자의 피로도, 스트레스 수준, 집중도 등을 정량적으로 분석할 수 있다. 예를 들어 심박수가 급격히 상승하면 긴장 상태로 판단하여 콘텐츠의 자극 수준을 낮추고, 피부 전도도가 높아지면 스트레스를 감지하여 인터페이스를 간소화하는 방식으로 반응할 수 있다. 이러한 적응형 조정은 사용자 상태에 맞춘 맞춤형 경험을 제공하며 장시간 체험 중에도 편안함을 유지할 수 있도록 한다[11].

또한, 자율주행차 환경에서는 기존의 입력 장치 사용이 어렵기 때문에 시선 추적과 제스처 인식 기술이 주요 상호작용 방식으로 활용된다. 시선 추적을 통해 사용자의 관심 영역을 파악하고, 이를 기반으로 콘텐츠를 강조하거나 관련 정보를 제공할 수 있으며, 제스처 인식은 손 동작을 통해 직관적이고 몰입감 있는 인터페이스 조작용 가능하도록 한다. 이러한 생체 신호 및 시선·제스처 정보는 상호 연계되어 사용자 상태에 따라 콘텐츠 밝기, 자극 정도, UI 요소 등을 실시간으로 조정하는 데 활용되며, 시스템은 피드백 루프를 통해 지속적으로 사용자 경험을 최적화한다. 예측 알고리즘과 반복 행동 학습을 기반으로 사용자 반응을 선제적으로 반영함으로써 몰입도와 만족도를 향상시킬 수 있다.

2.3.2 상태 기반 인터페이스 조정 및 피드백 최적화

사용자의 생리적 또는 감정적 상태 변화에 따라 콘텐츠와 인터페이스를 동적으로 조정함으로써 최적의 사용자 경험을 제공할 수 있다. 예를 들어, 피로 상태에서는 콘텐츠의 밝기와 자극 강도를 낮추고, 인터페이스 요소를 간소화하여 사용자의 부담을 줄이는 방식이 효과적이다. 반면, 활발하거나 집중된 상태에서는 상호작용 요소를 확장해 능동적 참여를 유도할 수 있다. 이처럼 사용자

상태에 따라 적절한 반응을 유도하는 적응형 콘텐츠 조정은 장시간 체험에도 몰입감과 편안함을 유지할 수 있도록 지원한다.

추가적으로 시스템은 실시간으로 수집된 생체 신호와 행동 데이터를 분석하여 사용자 모델을 지속적으로 업데이트하며, 콘텐츠 및 인터페이스를 개인화한다. 사용자 피드백은 시스템 반응성 개선과 몰입도 증대에 활용되며, 반복적인 사용자 행동 패턴을 학습하여 예측 알고리즘을 정교화할 수 있다. 이러한 피드백 루프 구조는 사용자 중심의 인터랙션 설계를 가능하게 하고, 장기적으로는 몰입형 체험의 품질을 지속적으로 향상시킬 수 있다 [6, 7, 12]

2.4 실시간 반응과 시스템 경량화

2.4.1 분산 연산 구조와 실시간 처리 전략

자율주행차 내 VR 시스템은 차량 제어용 CPU, 착용 디바이스(HMD)의 온보드 SoC, 외부 Edge 장치 간 연산을 분산하는 구조로 운영된다. 차량 내부에는 자율주행 제어, 내비게이션, 상태 모니터링 등을 위한 전용 ECU와 GPU가 존재하고, VR 콘텐츠는 주로 HMD 내부 SoC 또는 차량 내 서버형 컴퓨팅 유닛(IVI, TCU)에서 처리된다. 고해상도 콘텐츠는 5G 기반의 초저지연 네트워크를 통해 Edge 서버에서 클라우드 렌더링 되기도 하며, 이러한 환경에서는 각 연산 모듈 간 역할 분담이 명확히 이루어져야 발열, 지연, 렌더링 오류 등 시스템 안정성 저하를 방지할 수 있다. 따라서 콘텐츠 경량화와 함께 연산 우선순위 큐 구성 전략이 필수적으로 적용되어야 한다[13].

VR 시스템은 시각적 끊김을 방지하기 위해 초당 60~120프레임 이상의 렌더링을 유지해야 하며, 시선 추적, 제스처 반응, 생체 신호 등 다양한 입력 데이터를 50ms 이내에 처리해야 실시간 인터페이스로 인식된다. 그러나 차량 내에서는 네트워크 지연, 인터럽트 병목, 전력 제한 등의 문제가 복합적으로 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 연산 스레드는 병렬 분기 구조로 재구성되어야 하며, 작업 큐는 우선순위 기반으로 설계되어야 한다. 예컨대, 사용자 입력에 직접 영향을 미치는 루틴은 최우선 순위로 처리하고, 콘텐츠 다운로드나 업데이트는 백그라운드 스레드로 배치하는 방식이다. 또한, 고품량 텍스처나 복잡한 3D 모델은 LOD(Level of Detail) 적용이나 DXT1/BC1 등의 압축 방식을 통해 시각 품질을 유지하면서도 연산 부담을 줄이는 기술이 병행되어야 한다[14, 15].

2.4.2 HMD 성능 한계와 경량 시스템 최적화 방안

VR 콘텐츠는 FHD 이상의 해상도, 90Hz 이상의 주사율, 6DoF 입력 지원 등 높은 기술적 요구를 충족해야 한다. 하지만 차량 내에서 사용되는 HMD는 무게, 발열, 배터리 시간 등의 제한으로 인해 데스크톱 수준의 GPU를 탑재하기 어렵고, SoC 기반의 내장 GPU에 의존하는 경우가 많다. 특히 다중 사용자가 동시에 콘텐츠를 체험하거나, 실시간으로 생성되는 3D 시뮬레이션 콘텐츠의 경우 시스템 병목 현상이 두드러진다.

이를 해결하기 위한 방안으로는 차량 내 로컬 서버형 연산 장치를 두거나, 외부 MEC(Mobile Edge Computing) 서버를 통해 HMD의 연산 부담을 분산시키는 구조가 필요하다. HMD는 콘텐츠를 스트리밍 방식으로 수신하고, 시각 출력만 담당하는 저지연 디코딩 장치로 기능 분리를 해야 한다. 이를 위해 WebXR, MPEG-OMAF와 같은 표준이 활용된다[2].

한편, 사용자 입력(시선, 제스처 등)이 시스템에 감지된 이후 콘텐츠가 이에 반응하여 출력되기까지의 전체 지연 시간(end-to-end latency)이 150ms를 초과할 경우, 사용자 체감 반응 속도가 느려져 몰입도가 급격히 저하된다. 이를 줄이기 위해 예측 기반 피드백 루프(preemptive feedback loop)를 적용하고, 반복적으로 사용되는 시선 경로 및 제스처 동선을 사전 캐싱(cache-forwarding)하여 반응 속도를 개선할 수 있다.

또한, 자율주행차 내 VR 시스템은 장시간 사용되는 실내 서비스 플랫폼이기 때문에 발열이 낮고 지속 가능한 연산 시스템이 필요하다. 이를 위해 ARM 기반 저전력 CPU, NPU, DSP 등으로 구성된 이기종 연산 구조가

적용되며, 히트싱크, 소형 액티브 쿨링, 열 방출 코팅 등 하드웨어 최적화도 병행되어야 한다. 소프트웨어 측면에서는 예외 상황 발생 시 시스템 전체가 중단되지 않도록 작업 단위 복원성(Task-level fault recovery)을 보장하는 마이크로서비스 아키텍처, 가상 머신 혹은 컨테이너 기반의 격리 실행 환경이 요구된다[14].

3. 다자간 VR 체험의 구조적 설계 과제

3.1 개별 및 공유 시점 체험의 특성과 설계 차이

다자간 VR 체험은 크게 두 가지 방식으로 구분된다. <Table 1>은 개인 경험(Individual Experience)과 공유 경험(Shared Experience)의 차이를 구조적으로 비교한 표로, 개인 경험은 사용자별로 독립적으로 콘텐츠를 실행하며 개별 시청각 콘텐츠에 집중하는 반면, 공유 경험은 같은 공간에서 다수 사용자가 동시에 상호작용하며 몰입을 유지한다. 기술적 복잡성 측면에서 개인 경험은 개별 처리만으로 가능해 상대적으로 단순하지만, 공유 경험은 동기화, 위치 정렬, 이벤트 공유 등 높은 수준의 기술 지원이 필요하다. 대표적인 문제로 개인 경험은 상호작용 부족과 외부 사용자 소외 가능성이 높다. 이 구조에서는 서로 다른 콘텐츠가 충돌하지 않도록 사운드, 시선, 피드백 요소를 물리적으로 분산하여 설계해야 한다. 반면 공유형 체험 구조는 다수의 사용자가 같은 공간에서 동일한 객체를 바라보고 상호작용함으로써 협업과 공감을 유도할 수 있다. 그러나 이 방식은 사용자의 시점 차이로 인한 콘텐츠 위치 오차, 반응 타이밍 불일치 등으로 인해 몰입도가 저하될 위험이 크며, 이를 방지하기 위해 동기화 시스템과 실시간 상태 브로드캐스트 기능이 필수적이다[16].

<Table 1> Comparison of Individual and Shared Experiences

Category	Individual Experience	Shared Experience
Basic Structure	Independent content execution per user	Simultaneous experience in the same space
Immersion Maintenance	Focus on personal view and content	Immersion through multi-user interaction
Technical Complexity	Relatively low (individual processing)	High (requires synchronization, position alignment, event sharing)
Representative Issues	Lack of interaction, potential exclusion of external users	Viewpoint conflicts, emotional mismatch, response delay issues
Need for Content Synchronization	Not required (autonomous experience)	Very high (requires real-time state and response reflection)
Example Applications	Solo movie watching, video apps, VR reading	Collaborative games, virtual meetings, real-time co-learning content

3.2 인지·감정 불일치와 물리·가상 위치의 정합성

공동 체험 환경에서는 사용자의 시선 방향, 체험 속도, 반응 시간이 서로 달라 동일한 콘텐츠에 대한 인지적 체감이 달라질 수 있으며, 이는 공동 인터랙션의 혼란을 유발할 수 있다. 예를 들어 두 사용자가 동일한 오브젝트를 조작할 때, 한쪽은 이미 오브젝트가 이동된 상태를 보지만, 다른 쪽은 여전히 기존 위치로 인식하는 경우가 발생할 수 있다. 이는 단순한 기술적 오류를 넘어 감정적 몰입의 붕괴로 이어질 수 있으며, 사용자 간 공감 형성을 방해한다. 이를 해결하기 위해서는 사용자 간 상태 정보

의 실시간 동기화, 이벤트 우선순위 기반 처리 구조가 시스템에 포함되어야 한다[17].

또한, 사용자 간 감정 표현 속도나 반응 시간의 차이로 인해 일부 사용자가 상대적으로 소외감을 느끼거나 정보에서 밀릴 수 있다. 이를 보완하기 위해 콘텐츠는 전체 평균 반응 시간이나 최저 반응 속도 기준으로 싱크 조정을 수행해야 하며, 멀티 트랙 타임라인 설계 등을 통해 감정 표현 타이밍 차이를 보완할 수 있다. 아울러 자율주행차 내에서는 각 사용자의 좌석 위치가 상이하므로, 동일한 가상 콘텐츠를 경험하더라도 물리적 시점과 가상공간 시점 간의 불일치가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 각 HMD에는 좌석 ID 및 기준 좌표계를 설정하고, 차량 중심 좌표계를 기준으로 상대 위치를 변환하는 매핑 시스템이 필요하다. 이를 통해 사용자마다 다른 좌석에 앉아 있더라도 동일한 공간 정보를 기반으로 협업형 콘텐츠를 체험할 수 있게 된다.

4. 경험 실증 및 피드백 기반 설계 전략

4.1 실증 실험 설계 및 UX 평가 지표 체계

자율주행차 내 실내 VR 시스템은 기존 인포테인먼트 시스템과는 전혀 다른 사용자 경험을 제공한다. 따라서 단순 기능 테스트만으로는 체감 품질, 몰입도, 피로도, 신뢰도 등을 종합적으로 평가할 수 없으며, 실증 실험과 사용자 피드백 기반의 반복 설계가 병행되어야 한다. 이를 위해 먼저 실내 VR 환경의 UX 품질을 수치화할 수 있는 평가 지표가 필요하다. 대표적으로는 몰입도(Impression Immersion Score), 피로도(Fatigue Index), 반응 정확도(Interaction Accuracy), 감정일치도(Affective Synchronization), 사용자 만족도(User Satisfaction)가 포함된다. 이러한 평가는 생체 데이터 변화, 시스템 반응성, 설문 및 감정 표현 도구 등을 통해 정량·정성적으로 이루어진다. 수집된 데이터는 실시간 로그, 사후 인터뷰, 사용자 행동을 종합 분석하여 설계 개선의 핵심 자료로 활용된다[4, 18].

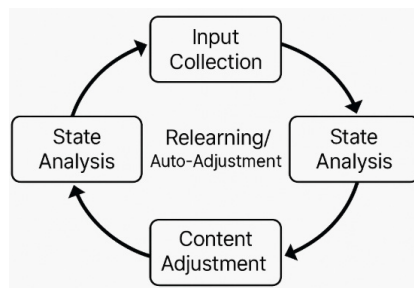
UX 평가를 위한 실증 실험은 정적 시뮬레이터와 실제 주행 환경 모두에서 이루어질 수 있다. 정적 시뮬레이터는 조명, 시트 포지션, 소음 등을 조절하며 반복성과 정밀한 측정에 유리하고, 이동 환경은 실제 도로 상황에서 사용자 반응의 현실적 데이터를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 실험은 콘텐츠 유형 비교, 단일 vs 다자간 체험 비교, 피로 누적 시나리오, 예기치 않은 이벤트 대응 등

다양한 테스트 시나리오를 포함해야 한다.

4.2 피드백 루프 및 자동화 기반 사용자 반응 분석

이러한 실증을 효과적으로 분석하고 적용하기 위해서는 UX 피드백 루프 구조가 필요하다. 이 구조는 다음과 같이 구성된다.

- 입력 수집(생체 데이터, 시선/행동 로그 등)
- 상태 분석(감정 인식, 집중도 판별 등)
- 콘텐츠 조정(속도, 조명, 인터페이스 간소화 등)
- 사용자 반응 평가(설문 및 로그 분석)
- 재학습/자동 조절



[Fig. 2] UX Feedback loop

[Fig. 2]처럼 이 루프를 통해 사용자의 특성에 따른 맞춤형 경험 설계가 가능해지며, 시스템의 정밀도와 반응성이 지속적으로 개선될 수 있다. 이를 지원하기 위한 기술적 인프라는 자동 분석 기반의 UX 시스템이 필수적이다. 센서 연동 로깅 시스템, 실시간 행동 분석 엔진, 콘텐츠별 사용자 반응 시각화 대시보드, 자동 보고서 생성기 등으로 구성된 이 시스템은 사용자 반응을 신속히 이해하고 설계 피드백으로 전환할 수 있다. 궁극적으로 이 구조는 VR 콘텐츠의 신뢰성과 몰입도를 향상시키는 핵심 도구로 작동하게 된다.

5. 확장 가능성 및 실현 전략

5.1 차량 유형 및 산업 플랫폼 확장 방향

자율주행차 실내 VR 시스템은 단순한 오락적 요소를 넘어, 차량 내부를 디지털 경험 공간으로 전환하는 핵심 플랫폼으로 진화하고 있다. HMD 기술의 고도화, 실시간 연산 분산 구조의 안정화, 그리고 사용자의 몰입 경험에 대한 설계 패러다임이 정립됨에 따라 향후 적용 분야와 산업 연계 전략이 더욱 중요해지고 있다. 실내 VR 시스

템은 초기에는 프리미엄 세단이나 전기 SUV 등을 중심으로 적용되었으나, 향후 장거리 셔틀, 로보택시, 비즈니스 밴, 이동형 회의 차량 등으로 확산될 가능성이 크다. 특히 운전자 없이 운행되는 레벨 4~5급 완전자율주행차에서는 실내 공간 전체가 인터페이스로 재정의 됨으로, VR 콘텐츠 배치 및 체험 설계가 차량 상품성의 핵심 요소가 된다. 목적별 차량 구성에 따라 회의, 프레젠테이션, 원격 협업, 관광, 의료 등의 다양한 VR 콘텐츠가 요구되며, 하드웨어 또한 차량 맞춤형 커스터마이징이 필요하다[12].

VR 콘텐츠는 차량 제조사 단독으로 제공하기 어려운 영역으로, 기존 OTT, 게임, 시뮬레이션, 교육 콘텐츠 플랫폼과의 연계가 핵심이다. 콘텐츠 제작사는 몰입형 포맷(360도 시점, 반응형 콘텐츠 등)을 제공하고, 플랫폼 사업자는 로그인 연동, 콘텐츠 관리 기능을, 통신사 및 클라우드 기업은 실시간 스트리밍과 API 기반 서비스를 담당하는 다계층 협업 구조가 요구된다. 사용자 반응 데이터를 활용한 추천 알고리즘, 감정 기반 콘텐츠 시나리오 전환 등은 수익 모델의 차별화 요소로 작동할 수 있다.

5.2 메타버스 연계 및 정책 기반 구축 전략

실내 VR 시스템은 차량 내부를 넘어서 도시 인프라, 외부 메타버스 플랫폼, 스마트 빌딩 시스템 등과의 융합 가능성이 높다. 예를 들어, 도시 관광 콘텐츠는 공공 IoT 데이터를 활용해 실시간 교통 및 이벤트 정보에 따라 콘텐츠를 자동 조정할 수 있고, 차량 내 콘텐츠와 연동된 상점을 하차 후 AR로 이어 체험하는 통합 콘텐츠 설계도 가능하다. 이처럼 VR-AR 혼합 체험이 차량 안팎으로 확장되며, 외부 사용자와 실시간 상호작용이 가능한 메타버스 게이트웨이로 차량이 진화할 수 있다[10].

기술 확산과 함께 정책적·제도적 기반도 필수적이다. 실내 VR은 피로 유발, 감각 부조화, 방향 혼란 등의 UX 리스크를 포함하므로, 시청 시간제한, 연령별 사용 가이드, 멀미 유발 시 안전 모드 전환, HMD 장치 열화 방지 기준 등 안전 기반 설계 가이드라인이 마련되어야 한다. 더불어 개인정보와 생체 신호 데이터의 보호 기준, 국가별 인증 절차, 교통법규 정합성 확보 등도 중요하다. 이를 위해 정부, 제조사, 콘텐츠 기업, 의료·교육 전문가 등이 참여하는 다자간 거버넌스 체계가 필요하며, 이를 통해 자율주행차 기반 VR 생태계의 안정적 확산이 가능해질 것이다[17].

6. 결론

본 연구는 자율주행차 내 실내 VR 시스템의 몰입 경험 구현을 위한 주요 기술 요소와 설계 방안을 체계적으로 분석하였다. 차량이라는 동적이고 제한된 환경 내에서 VR 콘텐츠의 몰입도를 유지하기 위해서는 시야 정렬, 콘텐츠 배치, 자세 변화 인식, 생체 신호 기반 인터랙션, 실시간 처리 구조 등 다층적인 기술이 복합적으로 작동해야 함을 확인하였다. 특히 사용자 맞춤형 경험을 제공하기 위해 생체 반응 및 행동 데이터를 기반으로 인터페이스를 동적으로 조정하는 시스템이 필수적이며, 이를 통해 몰입감과 피로도를 동시에 조절하는 감응형 VR 환경이 가능함을 제시하였다.

또한 다자간 체험 환경에서는 시점 정합성, 인지 불일치, 감정 표현 타이밍 차이 등이 몰입 경험의 일관성에 영향을 미칠 수 있으므로, 사용자 간 동기화와 상태 매핑 시스템의 정밀성이 핵심 요소로 작용한다. 아울러 실시간 처리를 위한 경량 연산 구조, 스트리밍 기반 콘텐츠 분산 처리, 반복 반응의 사전 캐싱 등은 시스템의 안정성과 응답성을 향상시키는 중요한 기반이 된다.

나아가 자율주행차 VR 시스템은 단순한 엔터테인먼트를 넘어, 관광, 원격 교육, 업무, 의료 등 다양한 산업 콘텐츠와의 연계 가능성을 지니며, 메타버스 및 스마트 도시 인프라와도 통합될 수 있는 확장성을 가진다. 이를 뒷받침하기 위해 제도적·윤리적 기반, 생체 데이터 보호 기준, 안전 설계 가이드라인 등이 병행되어야 하며, 정부, 기업, 전문가 그룹 간 다자 협력이 필수적으로 요구된다.

향후 연구에서는 사용자 유형별 몰입 반응 패턴 분석, 감정 기반 콘텐츠 전환 시스템, 차량 내 다중 사용자 대응형 UI 구조 등 더욱 구체적이고 정량적인 실증 연구를 통해 사용자 중심 설계의 정밀도를 높이는 방향으로 발전이 필요하다. 본 논문이 자율주행차 기반 실내 VR 시스템의 사용자 경험 설계 및 산업적 구현에 실질적인 기여를 할 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

- [1] A.Degenhard, A.Askari, M.Rietzler, and E.Rukzio, "When Do We Feel Present in a Virtual Reality? Towards Sensitivity and User Acceptance of Presence Questionnaires," in Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems,

- 2025.
- [2] J.S.Han, "Research on XR and Key Technologies for Autonomous Driving," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.11, No.1, pp.101-106, 2025.
- [3] J.Ihemedu-Steinke, T.Engel, M.Wölfel, "Virtual Reality Driving Simulator Based on Head-Mounted Displays," in *Automotive User Interfaces*, Springer, pp.401-428, 2017.
- [4] T.M.Tran, C.Parker, and M.Tomitsch, "A review of virtual reality studies on autonomous vehicle-pedestrian interaction," *arXiv preprint*, arXiv:2403.11378, 2024.
- [5] C.E.Mendoza-Ramírez, J.C.Tudon-Martinez, L.C.Félix-Herrán, J.deJ.Loza-Santos, and A.Vargas-Martínez, "Augmented Reality: Survey," *Applied Sciences*, Vol.13, No.18, 2023.
- [6] J.Jerald, "The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality," Morgan & Claypool, pp.87-116, 2015.
- [7] A.Hameed, and A.Perkis, "Authenticity and presence: defining perceived quality in VR Experiences," *Frontiers in Psychology*, vol.15, Art. no. 1291650, 2024.
- [8] E.Ferrier-Barbut, D.Vaufreydaz, J.A.David, J.Lussereau, and A.Spalanzani, "Personal space of autonomous car's passengers sitting in the driver's seat," *arXiv preprint*, arXiv:1805.03563, 2018.
- [9] A.Lécuyer, "Playing with Senses in VR: Alternate Perceptions Combining Vision and Touch," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.37, No.1, pp.20-26, 2017.
- [10] J.Wang, Y.Zhao, H.Mao, and X.Yang, "Survey of Large Language Models in Extended Reality: Technical Paradigms and Application Frontiers," *arXiv, preprint* arXiv:2508.03014, 2025.
- [11] C.Martella M.Cecchinato, L.Chittaro, "Measuring and modeling physiological responses to adaptive VR content," *ACM Transactions on Applied Perception*, Vol.16, No.3, pp.1-19, 2019.
- [12] L.Morra, F.Lamberti, F.G.Pratticó, S.LaRosa, and P.Montuschi, "Building trust in autonomous vehicles: Role of virtual reality driving simulators in HMI design," *arXiv preprint*, arXiv:2007.13371, 2020.
- [13] Y.Kang, J.Hauswald C.Gao, A.Rovinski, T.Mudge, J.Mars, L.Tang, "Neurosurgeon: Collaborative Intelligence Between the Cloud and Mobile Edge," *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, Vol.45, No.1, pp.615-629, 2017.
- [14] T.Kamarainen, M.Siekkinen, J.Erikainen, A.Yla-Jaaski, "CloudVR: Cloud Accelerated Interactive Mobile Virtual Reality", *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Multimedia*, pp.1181-1189, 2018.
- [15] K.LaValle, "An introduction to sensors and tracking systems in immersive environments," *Synthesis Lectures on VR*, Vol.1, No.1, pp.160-170, 2012.
- [16] J.S.Han, "An Integrated Approach to Real-Time Edge Computing and Data Compression Algorithms for Full Autonomous Driving," *Journal of Internet of Things and Convergence*, Vol.11, No.2, pp.89-94, 2025.
- [17] S.Kalamkar, V.Biener, F.Beck, and J.Grubert, "Remote monitoring and teleoperation of autonomous vehicles -Is virtual reality an option?," *arXiv preprint*, arXiv:2304.11228, 2023.
- [18] S.M.Serrano, R.Izquierdo, I.GarcíaDaza, M.A.Sotelo, and D.F.Llorca, "Behavioural gap assessment of human-vehicle interaction in real and virtual reality-based scenarios in autonomous driving," *arXiv preprint*, arXiv:2407.04070, 2024.

한 정 수(Jung-Soo Han)

[정회원]



- 1992년 8월 : 경희대학교 컴퓨터 공학부(공학석사)
- 2000년 8월 : 경희대학교 대학원 컴퓨터공학부(공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 컴퓨터공학부 교수

〈관심분야〉

AI 교육, 자율주행, 데이터 분석, SW 모델링