

자율주행 차량의 제어권 인수요구 정보양상과 도로 형태에 따른 운전자의 제어권 인수시간과 정신적 작업부하 차이

The Effects of Control Takeover Request Modality of Automated Vehicle and
Road Type on Driver's Takeover Time and Mental Workload

윤남경¹ · 이재식^{2†}

Nam-Kyung Yun¹ · Jaesik Lee^{2†}

Abstract

This study employed driving simulation to examine how takeover request (TOR) information modalities (visual, auditory, and visual + auditory) in Level-3 automated vehicles, and road types (straight and curved) influence the driver's control takeover time (TOT) and mental workload, assessed through subjective workload and heart rate variations. The findings reveal several key points. First, visual TOR resulted in the quickest TOT, while auditory TOR led to the longest. Second, TOT was considerably slower on curved roads compared to straight roads, with the greatest difference observed under the auditory TOR condition. Third, the auditory TOR condition generally induced lower subjective workload and heart rate variability than the visual or visual + auditory conditions. Finally, significant heart rate changes were predominantly observed in curved road conditions. These outcomes indicate that TOT and mental workload levels in drivers are influenced by both the TOR modality and road geometry. Notably, a faster TOT is associated with increased mental workload.

Key words: Automated Vehicle, Takeover Request Modality, Road Type, Takeover Time, Mental Workload

요약

본 연구에서는 운전 시뮬레이션을 사용하여 자율주행 환경을 구현한 후 3-수준 자율주행 조건에서 자율주행 차량(automated vehicle: AV)으로부터 운전자에게 전달되는 제어권 인수 요구(takeover request: TOR) 정보의 양상(시각, 청각 및 시각+청각) 및 도로 형태(직선도로와 곡선도로)에 따라 운전자의 제어권 인수 시간(takeover time: TOT) 및 정신적 작업부하(제어권 인수 이후에 운전자들이 경험한 주관적 작업부하와 심장박동수에서의 변화)가 어떻게 차별화되는지 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, AV로부터 TOR이 제시된 이후 실험참가자들이 보인 TOT에 대한 분석 결과, TOR 정보양상의 측면에서는 시각 정보가 가장 빠른 TOT를 이끌어 낸 반면 청각 정보 조건에서 가장 느렸고, 도로 형태 측면에서는 직선도로 조건에 비해 곡선도로 조건에서의 TOT가 유의하게 더 느렸으며, 특히 청각 정보 조건에서 도로 형태에 따른 TOT에서의 차이가 가장 컸다. 둘째, 정신적 작업부하에 대한 분석 결과, TOR 정보가 시각 혹은 시각+청각적으로 제시된 조건에 비해 청각적으로 제시된 조건에서 주관적 작업부하 측정치와 심장박동수 변화 크기 모두 전반적으로 더 낮았고 특히, 심장박동수 변화의 경우 이러한 경향은 곡선도로 조건에서만 관찰되었다. 이러한 결과는 TOR 정보의 양상과 도로 형태에 따라 운전자의 TOT와 정신적 작업부하 수준이 달라질 수 있고, 특히 TOT가 빠를수록 정신적 작업부하 수준은 상대적으로 더 높아질 수 있음을 시사한다.

주제어: 자율주행 차량, 제어권 인수요구 정보양상, 도로 형태, 제어권 인수시간, 정신적 작업부하

* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2C1008447).

¹ 윤남경: 부산대학교 심리학과 석사과정

^{2†} (교신저자) 이재식: 부산대학교 심리학과 교수 / E-mail: jslee100@pusan.ac.kr / TEL: 051-510-2131

1. 서론

운전은 매 순간 운전자, 도로 및 차량이 서로 역동적으로 상호작용하는 과정이다. 운전에는 시력이나 청력과 같은 기본적인 감각 능력은 물론 지각과 주의, 기억, 의사결정, 그리고 반응선택과 반응실행을 포함하는 거의 모든 정보처리 요소들이 관여한다(Lee, 2020; 2021; McKnight & McKnight, 1999). 뿐만 아니라 운전은 기본적으로 안전하고 효율적인 차량통제와 함께 운전 장면에 대한 정보처리가 동시에 그리고 복합적으로 이루어지는 중다과제의 대표적 유형이다. 즉, 운전자는 주어진 운전상황에서 일차적으로는 차량의 속도나 선행 차량과의 차간거리 유지와 같은 종적통제와 차선 안에서 차량의 위치를 안정적으로 유지하는 횡적통제를 수행함과 동시에 안전하고 효율적 운전을 위해 요구되는 다양한 정보를 추가적으로 처리해야 하는 부담을 안고 있다. 운전이 갖는 이러한 특성(운전에 거의 모든 정보처리 요소들이 관여한다는 것과 운전이 여러 과제를 동시에 수행해야 하는 중다과제라는 것)을 종합하면 특정 운전상황에서 운전자의 정보처리 요소들 중 일부만이라도 기능을 제대로 못하거나 운전자의 작업부하 수준이 높아 여러 과제를 동시에 처리하지 못하는 경우 운전수행의 질이 저하되는 것은 물론 자동차 사고의 가능성을 증가시킬 수 있다(Brady et al., 2021; Joo & Lee, 2014; Lee, 2018; 2022).

이러한 이유로 다양한 형태의 자동화된 운전보조시스템들이 개발되어 사용되고 있다(Risser, 2019). 자동화된 운전보조 시스템 중에서 목적지까지의 경로를 안내해 주는 항법 시스템(in-vehicle navigation system)이나 선행차량 혹은 위험요소와의 충돌 위험성을 경고해주는 충돌 경고 시스템(collision warning system) 등은 운전자의 정보처리 부담을 경감시키는 기능을 담당한다. 반면 차량의 운행 속도를 자동으로 제어하는 적응형 정속 주행 시스템(auto cruise control system)은 운전자의 차량에 대한 종적통제 부담을, 그리고 차선이탈 경고 시스템(lane departure warning system)은 차량에 대한 횡적통제 상실에 따른 사고 위험성을 경감시켜주는 기능을 제공한다.

운전과제 중 일부를 선택적으로 지원하는 이러한 운전보조 시스템들과는 달리 운전자가 원하는 목적지까

지 자동차가 스스로 주행하여 이동하는 자율주행 기능은 운전자의 정보처리 부담과 차량제어 부담을 모두 경감시켜 줄 뿐만 아니라(NHTSA, 2013) 운전자 과실로 인한 교통사고를 방지할 수 있는 첨단 기술로 여겨지고 있다. 자율주행 차량(automated vehicle: AV)은 기본적으로 운전자나 승객의 개입없이 스스로 움직이는 자동차이다. AV는 운전자의 신체적, 인지적 부담을 경감시켜 준다는 목적을 넘어 운전에서의 편리성과 안전성을 도모한다. 2010년에 Google이 기존 차량에 자율주행 시스템을 장착하는 방식으로 자율주행 차량을 개발하여 시험주행을 실시한 것을 시작으로 AV의 개발이 활발하게 이루어지고 있다(Goodall, 2014).

NHTSA(2013)는 AV의 자동화 단계를 0-수준부터 4-수준까지의 5단계로 구분하였고, 미국 자동차공학회(Society of Automotive Engineers; SAE)는 NHTSA가 정의한 단계의 마지막 부분을 더욱 세분화하여 자율주행 수준을 6단계(0-수준에서 5-수준)로 구분하였다(SAE International, 2018). 본 연구에서 검토한 자율주행 단계는 3-수준이다. 3-수준 자율주행 단계는 제한적 자율주행, 조건부 자동화, 혹은 부분 자율주행 등 다양한 용어로 불린다. 3-수준 자율주행의 경우에는 자동차가 거의 모든 주행을 스스로 제어하고 수행할 수 있기 때문에 이 단계에서 운전자는 많은 시간을 운전과제 이외의 활동(예를 들어 휴대전화를 보거나 책을 읽는 등)에 사용할 수 있다. 이러한 운전과 관련되지 않는 과제를 비운전-관련 과제(nondriving-related task: NDRT)라고 부른다. 그러나 특정 시점에서 위험요소가 출현하여 충돌 가능성이 있거나 자율주행 차량의 한계를 벗어나는 경우에는 운전자의 개입을 필요로 한다.

본 연구에서 3-수준의 자율주행 단계에 초점을 맞춘 것은 바로 3-수준 자율주행이 갖는 이러한 “역설적” 특징 때문이다. 즉, 이 단계에서는 운전자가 전방을 지속적으로 주시할 필요가 없고 일상적 운전의 거의 모든 측면을 차량이 담당하기는 하지만 운전자는 운전상황을 충분히 감독하고 경우에 따라 특정 시점에서 적절하게 차량을 직접 통제해야 하는 것이다(Casner et al., 2016). 이것은 이 단계의 AV와 운전자 사이에서 발생하는 상호작용, 특히 AV와 운전자 사이의 차량에 대한 제어권 전환(control transition) 과정이 매우 중요하다는 점을 시사한다. 제어권 전환의 유형은 자율주행 중

이던 자동차로부터 운전자에게 제어권이 전환되는 제어권 인수(control takeover)와 운전자가 직접 수동으로 운전하다가 자동차로 제어권을 넘겨주는 제어권 이양(control handover)으로 구분된다. 제어권 인수와 이양은 여러 측면에서 차이가 있을 수 있지만 가장 중요한 측면은 제어권 전환을 요구하는 주체가 다르다는 점일 것이다. 즉, 제어권 이양 여부와 시점은 운전자가 결정하는 반면, 제어권 인수는 운전자의 신체적 활동이나 인지적 부담 수준과는 관계없이 AV로부터 요구된다. 이 때문에 제어권 인수가 요구되는 시점에서 운전자의 주의가 차량의 전방으로부터 벗어나 다른 지점으로 분산되어 있거나 운전과제 이외의 다른 신체적 활동에 관여하고 있다면 제어권 인수 과정이 원활하게 이루어지지 않을 수 있다.

실제로, 많은 연구자들은 자율주행 중 특정 상황과 시점에서 (그리고 아마도 운전자가 미리 충분히 예상하지 못한 상태에서) 운전자에게 요구되는 제어권 인수가 제어권 이양에 비해 인지적, 신체적 부담 수준을 더 높일 수 있다는 것을 발견하였다(Kim et al., 2017; Reimer et al., 2016; van der Heiden et al., 2017). 비록 제어권 인수와 제어권 이양이 모두 AV와 운전자 사이에서 발생하는 중요한 상호작용 과정이기는 하지만 이러한 연구 결과들은 제어권 이양과 비교하여 제어권 인수가 운전자의 차량제어와 정보처리에 상대적으로 더 높은 수준의 어려움을 부과할 수 있다는 것을 시사한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 제어권 전환 유형 중 제어권 인수 과정에 초점을 맞추었다.

AV로부터의 제어권 인수 요구(takeover request: TOR)가 운전자에게 미치는 영향을 살펴본 기존 연구들은 다음과 같은 변인들을 중요하게 고려하고 있는 것으로 보인다: (1) TOR 정보(메시지)의 감각 양상(혹은 감각 경로: 시각, 청각, 시각+청각, 촉각 등) 및 정보 제시 시점, (2) TOR이 제시되기 직전에 운전자는 무엇을 하고 있었는가(전방 주시, 휴대폰이나 노트북 컴퓨터를 포함한 휴대용 전자기기 사용, 혹은 음악 청취 등), (3) TOR이 운전자의 인지적, 신체적 반응에 미치는 영향(제어권 인수 시간(takeover time: TOT), 작업부하, 상황인식 등), 그리고 (4) 제어권 인수 상황에서의 운전환경(도로 혼잡도와 도로 곡률을 포함하는 도로 조건, 운전자 전방의 긴급상황의 유형 등). 본 연구에서

도 기존 연구들이 주요하게 다루었던 이러한 변인들을 고루 반영하여 실험 상황을 구성하였다. 즉, 본 연구에서는 서로 다른 도로 형태(직선도로, 곡선도로)에서 운전자가 전방을 주시하며 운전할 때 AV로부터 운전자에게 전달되는 TOR 정보의 양상에 따라(청각, 시각, 혹은 시각+청각) 운전자의 TOT와 작업부하(주관적 작업부하와 심장박동수에서의 변화)에서 어떠한 차이가 관찰되는지 살펴보았다. 아래에서는 본 연구와 관련된 선행연구들의 주요 결과를 개관하였다. 특히 여기에서는 선행 연구와 비교하여 본 연구가 갖는 특징이 무엇인지 구체적으로 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1. TOR 정보의 감각양상

운전자와 AV 사이의 상호작용, 특히 AV로부터 운전자가 제어권을 인수받는 상황에서 중요하게 고려되어야 하는 문제는 TOR에 대한 정보를 어떻게, 그리고 언제 운전자에게 전달할 것인지에 대한 것이다. 전자는 TOT 정보의 감각양상 유형(sensory modality: 시각, 청각, 혹은 촉각 정보) 및 정보의 중복성 여부(단일양상 혹은 중다양상)과 관련되는 반면, 후자는 정보의 제시 시점과 관련되어 있다. 사실, 정보의 감각양상 유형이나 정보의 중복성 여부를 결정하는 것은 AV와 운전자 사이의 상호작용 맥락의 범위를 훨씬 넘는 다양한 영역에서 광범위하게 다루어져 온 문제이다. 즉, 시스템(특히 디스플레이)과 인간 오퍼레이터 사이의 상호작용이 효과적, 효율적으로 이루어지기 위해 시스템으로부터 전달되는 정보를 어떠한 방식으로 구성하여 제시할 것인지는 시스템 설계의 맥락에서 이미 오래전부터 중요하게 다루어져 온 연구 주제이다(Mollenhauer et al., 1994).

선행연구들은 AV가 운전자에게 TOR을 전달하기 위한 효율적 방식을 결정할 때 각각의 감각양상이 갖는 상대적 장단점을 우선적으로 고려하였다(Eriksson & Stanton, 2017; Politis et al., 2015; Yoon et al., 2019). 청각 정보는 단순한 톤음(tone sound) 혹은 음성 메시지의 형태를 통해 전달될 수 있다. 톤음은 운전자가 매우 긴급한 상황에서 반응해야 할 때 주어지는 것이 바람직한 반면, 긴급성이 너무 높은 수준이 아니라면 음성

정보가 운전자로 하여금 더 정확하고 적절한 방식으로 행동하도록 유도한다(Neurauter, 2005). 예를 들어, Naujoks et al.(2016)은 자율주행 상황에 대한 운전 시뮬레이션 연구를 통해 TOR을 톤음과 음성 정보로 구분하여 제시하였을 때 운전자는 톤음에 비해 음성 정보를 더 선호하는 것을 발견하였다. 특히, Yoon et al.(2019)의 연구에서는 NDRT가 요구되지 않았던 조건인 경우 TOR을 청각 정보로 제시했을 때가 시각이나 촉각 양상으로 정보를 제공한 경우에 비해 TOT가 가장 빠르다는 것을 관찰하였다.

시각 정보는 공간적 위치, 색상, 아이콘 및 텍스트(text) 등의 형태로 제시된다. 시각 정보는 즉각적인 반응이 필요하지 않거나 안전과 직결되지 않거나 혹은 복잡한 정보를 제공하고자 할 때 가장 효과적이다. 특히 자율주행 상황에서 시각 정보는 자율주행 상태나 항행 정보 등 비교적 우선순위가 낮은 정보를 지속적으로 제공해야 할 때 적합하다. Huang et al.(2019)은 다양한 감각양상을 통해 TOR 정보를 제시한 결과 시각 정보가 다른 감각양상을 통한 정보에 비해 유의하게 더 빠른 TOT를 이끌어낸다는 것을 발견하였다. 이와 유사한 결과는 Yu et al.(2021)의 연구에서도 관찰되었다. 한 가지 흥미있는 점은 연구들에 따라 더 신속한 TOT를 이끌어내는데 청각 정보와 시각 정보 사이의 상대적 이점에서 일관적인 결과가 보고되고 있지 않다는 점이다. 즉, 앞에서 기술했던 Yoon et al.(2019)의 연구에서는 시각 정보에 비해 청각 정보가 더 빠른 TOT를 이끌어 낸 반면 Huang et al.(2019)의 연구 및 Yu et al.(2021)의 연구에서는 이와는 반대로 청각 정보에 비해 시각 정보 조건에서 상대적으로 더 빠른 TOT가 관찰되었다. 이러한 비일관적 결과가 관찰된 이유에 대해서는 현재까지 충분한 설명이 제시되지는 않았다. 본 연구가 이러한 비일관적 결과의 원인이 무엇인지에 대해 직접 검토하는 것은 아니지만 이에 대해 몇 가지 설명이 가능할 것으로 보인다. 본 연구의 논의 및 결론 부분에서 본 연구의 결과를 해석할 때 이러한 비일관적 결과에 대한 가능한 설명이 무엇인지 기술하고자 한다.

본 연구에서는 TOR을 위한 정보의 감각양상 유형으로 촉각 정보는 고려하지 않았으나 촉각 정보도 시각, 청각 정보와 마찬가지로 TOR을 제시하기 위해 사용될 수 있다(Huang et al., 2019; Yoon et al., 2019; Yu et al., 2021). 촉각 정보는 운전자의 주의를 신속하게 이끌어내

는 것에서 매우 효과적이다. AV가 운전자에게 촉각 정보를 제공하기 위해서는 스티어링 휠, 페달, 시트, 혹은 안전벨트 등을 사용하여 운전자의 신체와 서로 직접 접촉할 수 있는 위치에 촉각 정보 제공 장치를 부착하는 방식이 일반적이다. 예를 들어, Telpaz et al.(2015)은 TOR을 제시하기 위해 자동차 시트의 진동을 사용하였다. 그 결과, 시트에 진동이 있었을 때가 그렇지 않은 경우보다 제어권 전환이 빠르다는 것을 관찰할 수 있었다.

Yoon et al.(2019)의 연구에서는 AV로부터의 제어권 전환에서 TOR 정보가 단일양상으로 제시될 때에 비해 중다양상으로 제시될 때 전반적으로 더 빠른 TOT가 가능하다는 것을 발견하였다. 구체적으로 이 연구에서는 자율주행 상황에서 NDRT가 요구되지 않은 통제조건을 포함하여 운전자들이 다양한 NDRT(전화 통화, 스마트폰 사용, 비디오 시청)를 수행할 때 TOR 정보양상을 일곱 가지 조건 즉, 시각, 청각, 촉각의 세 가지 단일양상 조건과 시각+촉각, 촉각+청각, 시각+청각, 그리고 시각+청각+촉각의 네 가지 중다양상 조건으로 구분하여 제시한 후 운전자들의 TOT를 조건에 따라 비교하였다. 그 결과 시각+청각 정보 조건에서 가장 빠른 TOT가 관찰된 반면(2.13초) 시각 단일양상 정보 조건에서 가장 느린 TOT가 관찰되었다(2.82초). 이와 유사하게, Politis et al.(2015)의 연구에서도 Yoon et al.(2019)의 연구와 동일하게 TOR 정보양상을 일곱 가지의 조건으로 구분한 후 운전자에게 제시한 결과, 다른 조건들에 비해 시각+청각의 중다양상 정보 조건에서 TOT가 가장 빨랐다. 구체적으로 TOR에 대한 정보가 청각적으로 제시된 조건에서의 TOT는 2.24초, 시각 정보 조건에서는 6.91초였던 반면 시각 정보와 청각 정보가 중복적으로 제시된 조건에서는 TOT가 2.12초로 가장 빨랐다. 또한 시각+청각 정보 조건에서는 운전자들의 차량에 대한 횡적 통제(즉, 차선 안에서의 자동차 횡적 위치에 대한 통제)의 편차가 가장 작은 것도 관찰되었다. 그러나 단일양상 정보에 대한 중다양상 정보의 상대적 우위성 역시 연구들에 따라 일관적이지 않은 것으로 보인다. 예를 들어, Roche et al.(2019)의 연구와 Beukel et al.(2016)의 연구 모두에서는 청각 정보만으로 제시된 단일양상 조건에 비해 시각+청각 정보의 중다양상 조건에서 유의하게 더 느린 TOT(각각 3.24초 vs. 4.61초, 4.32초 vs. 4.88초)를 관찰하였다. 이러한 결

과를 개관한 후 Kim et al.(2021)는 중다양상으로 제공된 TOR 정보가 항상 단일양상 정보에 비해 더 빠른 TOT를 가져오는 것은 아니라고 결론지었다.

본 연구에서는 TOR에 대한 정보의 감각양상 조건으로 촉각 정보는 포함하지 않았다. 이에 따라 본 연구에서는 단일양상으로 시각 정보와 청각 정보를, 그리고 중다양상으로 시각+청각 정보를 사용하고자 한다. 특히 청각 정보의 경우 톤음 보다는 음성 정보에 대해 운전자들의 선호도가 더 높고 또한 좀 더 정확한 정보 전달이 가능하다는 점(Naujoks et al., 2016)을 고려하여 본 연구에서도 음성을 통해 청각 정보를 제시하였다. 시각 정보의 경우에는 청각 정보의 내용을 그대로 텍스트로 전환하여 사용하였다.

2.2. TOR 정보의 제시 시점

AV가 제어권을 가지고 주행하는 도중에 TOR 정보를 언제 제시해야 하는지에 대한 문제도 TOR 정보의 효과성을 검증하는데 중요하게 고려해야 하는 변인이다. 앞서서도 기술하였듯이 AV의 자동화 단계 중 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 3-수준에서는 AV가 스스로 운전하는 도중 긴급상황이 발생할 경우 운전자가 직접 운전하도록 제어권 인수를 요청하는 것이 일반적이다. 여기에서 문제는 긴급상황과 접촉하기 몇 초 전에 TOR 정보를 제시하는지를 결정하는 것이다. TOR을 언제 제시할 것인지는 차량이 위험요소 혹은 긴급상황과 접촉(혹은 충돌)할 때까지의 시간(time to contact; TTC)을 기준으로 하는 것이 일반적이다. TOR이 너무 늦게(즉, TTC가 작은 상황에서) 제시된다면 운전자는 긴급상황에 대해 충분히 대처하지 못할 수 있는 반면, 너무 일찍(즉, TTC가 큰 상황에서) 제시된다면 AV로서의 효과나 기능의 범위가 축소될 것이다.

Eriksson & Stanton(2017)은 TOR 제시 시점을 검토한 선행 연구들을 개관한 결과 TOR 제시 시점은TTC를 기준으로 평균 6.37초(± 5.36)였고, 이러한 TOR에 의해 운전자들이 보인 TOT(또는 스티어링 휠에 손을 올려놓는 것을 포함한 다양한 형태의 반응시간 측정치)의 평균은 2.96초(± 1.96)였다고 보고하였다. Gold et al.(2013)은 TOR의 제시 시점을 긴급상황과 접촉하기 5초 전과 7초 전으로 구분하여 TOR 시점에 따른 다양한 운전

수행 측정치에서의 차이를 비교하였다. 그 결과, TTC-7초 전 조건에서는 비록 TTC-5초 전 조건에 비해 수동운전을 위한 스티어링 휠 조작이나 브레이크 입력에서의 최초 반응은 약간 느렸지만 브레이크 입력과 스티어링 휠 조작을 함께 수행하였고, 부드럽게 차선을 변경하였으며, 브레이크를 최대값까지 밟지 않는 등의 좀 더 안전한 운전 패턴을 보여주는 것이 관찰되었다. 이와 함께 Gold et al.(2013)은 운전자의 주의가 심각하게 분산될 수 있는 상황이라면 안전한 제어권 전환을 위해 TOR이 적어도 TTC-7초 전에 주어져야 한다고 주장하였다. 또한 Clark & Feng(2017)에 따르면 TOR을 청각적으로 제시할 경우 청년 운전자와 고령 운전자 모두 TTC가 7.5초일 때가 4.5초인 조건에 비해 더 우수한 충돌 회피 수행을 보인다는 것을 발견하였다. 위에서 기술한 연구 결과를 종합적으로 고려하여 본 연구에서는 TOR 제시 시점을 긴급상황과 접촉하기 7.5초 전으로 정하였다.

2.3. 자율주행 중 운전자 행동

앞서서도 언급하였듯이, 운전자가 3-수준의 자율주행 조건에서 운전할 때는 자동차 전방을 항상 주시할 필요가 없다. 대신 운전자는 필요에 따라 자동차 안에서 휴대폰이나 노트북 컴퓨터를 포함한 휴대용 전자기기를 사용하거나, 혹은 음악을 청취하는 등의 운전과는 직접적으로 관련되지 않는 과제들 즉, NDRT를 수행하는데 주의를 집중할 수 있다. 실제로, Zeeb et al.(2016)의 연구에서는 자율주행 환경에서 운전자들이 이메일 사용, 서적이거나 문서 등과 같은 텍스트 자료 읽기, 전자기기를 이용한 영상 시청, 혹은 동승자와의 대화나 휴대전화 통화 등의 NDRT를 수행한다고 보고하였다. NDRT 수행은 운전자로 하여금 운전 중의 시간을 좀 더 효율적으로 사용할 수 있도록 하거나 즐거움을 경험할 수 있는 기회를 제공할 수 있을 것이다. 그러나 운전자가 직접 운전을 수행하지 않아도 되는 상황이라 할지라도 NDRT의 수행 자체는 운전자의 인지부담 수준을 증가시켜 TOR에 대한 TOT를 지연시킬 수 있고 제어권 인수 이후에 수행해야 하는 수동운전의 수행을 저하시키며(Merat et al., 2012), 운전자의 시야각을 좁게 하거나 부주의를 유발할 가능성을 높일 수 있다

(Son & Park, 2013).

자율주행 상황에서 운전자들이 수행하는 NDRT가 TOT 및 운전자의 인지부담에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보는 것에는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있는 것으로 보인다. 먼저, NDRT 수행의 효과가 연구들에 따라 일관적이지 못하다는 점이다. 예를 들어, Dorgan et al.(2019)의 연구에서는 NDRT 유형에 따른 TOT에서의 유의한 차이가 관찰되지 않았던 반면, Yoon et al.(2019)의 연구에서는 그 차이가 유의하였다. 이러한 일관적이지 않은 결과가 관찰된 이유를 직접적으로 검토한 연구는 아직 보고되고 있지 않지만 아마도 동일한 유형의 NDRT라 할지라도 NDRT 수행을 구성하는 자극 속성과 반응 양상의 조합 혹은 NDRT 유형 사이의 상대적 난이도가 연구들에 따라 상이하였기 때문일 수 있다. 둘째, 자율주행 환경에서 운전자들이 NDRT를 수행하지 않는 조건도 AV와 운전자 사이의 상호작용을 이해하는데 중요하게 고려되어야 한다. 즉, 자율주행 차량이 차량 통제에 대한 제어권을 갖고 있고 이 상황에서 운전자가 전방을 주시하고 있는 조건이라 하더라도 AV로부터의 TOR이 어떠한 감각양상을 통해 제시되는지에 따라 운전자의 TOT가 달라질 것이다 (Yoon et al., 2019). 마찬가지로 모든 TOR의 시점에서 운전자들이 NDRT를 수행하는 것도 아닐 것이다. 실제로, Huang et al.(2019)은 운전자들이 NDRT의 수행에 대한 요구없이 전방의 운전 장면을 관찰할 수 있도록 한 조건에서 TOR 정보가 제시되는 방식에 따라 TOT에서의 차이가 관찰되는지 검토하기도 하였다. 이러한 점들을 종합적으로 고려하여 본 연구에서는 NDRT 유형을 다양화하는 대신 NDRT를 수행하지 않는 조건에 초점을 맞추어 TOR의 정보의 감각양상에 따라 운전자의 TOT와 인지부담 수준(즉, 정신적 작업부하 수준)이 어떻게 차별화되는지 살펴보고자 한다.

2.4. 도로 형태

운전자가 주행하는 도로의 여러 가지 조건 예를 들어 도로 형태(roadway type)나 도로 혼잡도(road complexity)는 운전자의 정보처리와 운전수행의 질에 영향을 미치는 중요한 요소이다. AV와 운전자 사이의 상호작용을 살펴

본 연구들 중 일부는 도로 조건을 고려하지 않고 일반적 고속도로나 교외 지역의 도로 등에서 운전자들이 AV를 운전하도록 하기도 하였지만(Eriksson & Stanton, 2017; Yoon et al., 2019; Zeeb et al., 2016), 많은 연구들은 자율주행 환경에서도 도로 조건이 중요한 변인이라는 점을 강조하였다(Radlmayr et al., 2014; Salvucci et al., 2001; Shen & Neyens, 2014; Son & Park, 2013).

도로 조건을 다양화하기 위해 조작되는 대표적인 변인은 도로 혼잡도와 도로 형태이다. 전자는 운전자가 운전하고 있는 차량 주변의 교통량 즉, 차량의 수를 통해, 반면 후자의 경우는 도로의 곡률을 통해 조작된다. 일반적으로 도로의 혼잡도가 증가할수록 운전자의 종적 및 횡적 통제를 포함한 운전수행은 저조해지고(Corver et al., 2016), 신체적, 정신적 작업부하의 수준은 증가하며 (Pennetti, et al., 2019), 안전한 운전을 위해 필수적으로 요구되는 운전상황에 대한 인식능력은 감소하는 것으로 (Edquist et al., 2012) 보고되고 있다. 도로 혼잡도는 자율주행 차량과 운전자의 상호작용에도 영향을 미친다. Radlmayr et al.(2014)은 운전자가 3-수준 AV를 운전할 때 교통량이 적은 도로 조건에 비해 교통량이 많은 도로 조건에서 TOT가 상대적으로 더 느려진다는 것을 발견하였다. 이와 유사하게, Gold et al.(2016)은 운전자의 차량 주변에 차량의 수를 달리 배치한 후 TOT와 제어권 인수 이후 선행 차량과의 차간거리 유지 수행을 비교하였다. 그 결과 운전자 주변의 차량이 많을수록 TOT가 증가하고 제어권 인수 이후 선행 차량과의 일정한 차간거리 유지 수행도 저조해진다는 것을 관찰하였다.

도로 조건의 또 다른 요소로 도로 혼잡도만큼 중요하게 고려되는 측면은 도로가 횡적인 방향으로 얼마나 굽어져 있는지의 정도를 의미하는 도로 곡률(road curvature)이다. 도로가 직선도로인지 곡선도로인지, 곡선도로라면 곡률은 얼마인지 등을 통해 운전자가 운전하는 도로 조건에서 운전의 난이도를 조작한다. 도로 곡률이 크면 운전자가 스티어링 휠을 큰 각도로 회전시켜야 차선을 유지할 수 있다. 충분히 기대되는 것이지만 일반적으로 직선도로보다는 곡선도로에서 (그리고 도로 곡률이 증가함에 따라) 운전자가 경험하는 차량의 횡적 통제에 대한 부담감이 증가한다. Shen & Neyens(2014)는 차량이 운전속도와 차선유지 기능을 담당하는 자율주행 차

량의 시스템 오작동으로 인해 운전자가 수동으로 운전을 직접 수행해야 상황에서 운전자의 TOT와 횡적 통제가 직선도로와 곡선도로에 따라 어떠한 차이를 보이는지 살펴보았다. 이 연구에서는 운전속도와 차선유지 기능을 AV가 모두 담당하는지 아니면 AV는 차선유지만 담당하고 운전속도는 운전자가 담당하는지에 따라 자동화의 수준을 고수준과 저수준으로 각각 구분하였다. AV의 오작동은 비프음을 통해 운전자에게 알려주었고, 비프음이 제시되면 운전자는 수동으로 차량의 종적 및 횡적 통제를 직접 그리고 즉각적으로 수행해야 했다. 그 결과, AV의 자동화 수준이 높을수록 운전자의 TOT가 더 느리다는 것을 발견하였다.

도로 형태는 도로 혼잡도와 마찬가지로 운전자가 운전 중에 경험하는 인지부담의 수준에 영향을 미치고, 특히 곡선도로 상황에서 자율주행 차량으로부터 TOR이 제시될 경우 운전자는 신속하게 제어권을 인수받아 도로의 곡률에 맞게 차량의 횡적 위치를 제어하는 안전한 운전이 필수적인 조건임에도 불구하고 도로 형태가 TOT나 제어권 인수 이후 운전자가 경험하는 작업부하에 어떠한 영향을 미치는지 살펴본 연구는 아직 충분하지 않은 것으로 보인다. 본 연구에서는 도로 조건을 구성하는 다양한 변인 중에서 도로 형태를 선택하였다. 즉, 운전자가 AV와 상호작용하면서 운전하는 도로의 형태를 직선도로와 곡선도로로 구분하였다. 또한 운전자 차량 주변에는 다른 차량이 제시되지 않도록 함으로써 도로 혼잡도를 일정한 수준으로 통제하였다.

3. 연구방법 및 절차

3.1. 연구참가자

P시 소재 P대학교 교내 및 온라인 홈페이지 게시판과 연구 참가 사이트를 통해 연구에 자발적 참여 의사를 밝힌 운전자 26명이 연구에 참여하였다. 이들 중 남성과 여성은 각각 13명이었다. 실험참가자의 평균 연령은 25.65세(SD = 2.97; 범위: 22.0~33.0), 평균 운전경력은 3.58년(SD = 1.99, 범위: 0.8~8.0)이었다. 이들은 모두

유효한 면허를 소지하고 있었고 인터뷰를 통해 본 실험에 참여하는데 신체적, 인지적 측면에서 모두 적절한 수준임을 확인하였다. 본 연구는 부산대학교 생명윤리위원회의 승인을 받아 진행되었다(PNU IRB/2019_88_HR). 참가자는 실험 절차에 대한 안내를 받고 서면 동의서를 작성한 후 연구에 참여하였으며, 실험 참가에 대한 보상으로 소정 금액의 문화상품권을 지급받았다.

3.2. 실험장치 및 도구

본 연구에서는 고정형 시뮬레이터가 사용되었다. 운전 시뮬레이션 소프트웨어로는 Forum 8 UC-win/ Road (ver.13.0.1)가 사용되었다. 운전 장면과 시각 정보는 해상도 1360 × 768의 50인치 모니터 3대를 좌우방향으로 연결하여 제시하였고, 이 디스플레이가 제공하는 운전자의 시야각은 약 120°였다. 운전상황에서 발생하는 엔진음과 소음, 청각 정보 등은 2.1 채널 스피커를 통해 제공하였다. 시뮬레이터 차량의 통제 및 제어권 전환을 위해 Logitech사의 G29 조이스틱이 사용되었다. 이 장치를 통해 제어권 전환이 이루어졌는데 제어권 전환이 요청되면 실험참가자들은 스티어링 휠의 좌측에 부착된 버튼을 이용하여 제어권을 인수받거나 이양할 수 있었다. 운전 시뮬레이션 소프트웨어를 제어하고 데이터를 저장하는 주 통제 컴퓨터는 CPU i7-4790 사양의 데스크톱 컴퓨터가 사용하였고, 그래픽은 NVIDIA Geforce GTX770 그래픽 카드를 통해 제시되었다. 본 연구에 사용된 운전 시뮬레이터와 운전 장면의 예시는 Fig. 1에 제시하였다. 실험참가자들의 제어권 인수 이전과 이후의 심장박동수 변화를 측정하기 위해 PhysioLab에서 개발한 PhysioLab 400 생체신호기록기를 사용하여 500Hz로 데이터를 수집하였다. (-)전극은 오른쪽 쇄골 아래, (+)전극과 접지전극은 왼쪽 팔 아래 부분에 부착하였다.

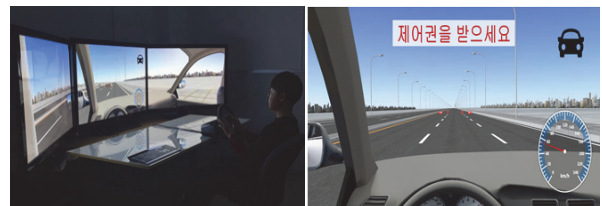


Fig. 1. Examples of driving scene and visual information for control takeover

3.3. 독립변인의 처치

3.3.1. TOR 정보의 양상

자율주행 차량으로부터 운전자가 제어권을 인수받거나 운전자가 차량에게 제어권을 이양해야 하는 상황에서 제어권의 전환을 요청하는 정보는 세 가지의 양상으로 구분되어 제시되었다: 청각 정보, 시각 정보, 시각+청각 정보. 청각 정보는 단발적 비프음과 짧은 음성 정보를 혼합하여 사용하였고 음성 정보는 모노톤의 여성 목소리로 제시되었다. 제어권 인수 상황에서는 ‘당’, ‘제어권을 받으세요’, 제어권 이양 상황에서는 ‘당’, ‘제어권을 넘기세요’와 같이 제시되었다. 시각 정보의 경우 ‘제어권을 받으세요’와 ‘제어권을 넘기세요’라고 표기된 빨간색 문구가 시뮬레이터 화면 중앙 상단에 제시되었다. 시각+청각 정보는 청각 정보와 시각 정보가 중복적으로 결합된 형태였다. 제어권 인수 정보는 운전자가 위험요소를 접하기 7.5초 전에, 그리고 제어권 이양 정보는 운전자가 위험요소를 지나친 10초 후에 제시되었다. 모든 제어권 전환 정보의 지속시간은 2.3초였다.

3.3.2. 직선도로 vs. 곡선도로

본 연구에서 사용된 도로는 교통량이 없는 왕복 3차선 도로였고, 도로 형태는 직선도로와 곡선도로로 구분되었다. 곡선도로의 경우 좌굴절 곡선도로와 우굴절 곡선도로가 모두 제시되었고, Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2018)의 선형설계 지침을 따라 도로의 곡률(평면곡선 반지름)을 정하였다. 이 지침에 따르면 60km/h 미만의 도로에서는 편경사를 고려하지 않았을 때 평면곡선 반지름은 240m 이상, 완화 곡선은 35m 이상으로 할 것을 규정하고 있다. 본 연구에서 실험참가자들에게 55km/h의 주행속도를 유지하면 운전하도록 지시하였기 때문에 이 지침에 따라 곡선도로의 평면곡선 반지름과 완화곡선의 길이가 각각 240m와 35m가 되도록 곡선도로를 제작하였다.

3.4. 운전 시나리오

본 연구에서 실험참가자의 과제는 기본적으로 자율주행 차량으로부터의 TOR에 따라 제어권을 인수받거나 이양하는 두 가지의 운전을 반복하며 운전하는 것

이었다. 제어권 인수는 운전자 도로 전방에 위험요소가 출현하기 이전에 요청된 반면, 제어권 이양은 운전자가 위험요소로부터 벗어난 이후 이루어졌다. 수동 운전 상황에서 운전자는 55km/h의 주행속도를 유지하도록 하였고 곡선도로의 경우 도로의 굴곡에 따라 차선을 유지하면서 적절하게 스티어링 휠을 조작하도록 하였다. 자율주행인 경우 차량이 스스로 55km/h의 주행속도와 차선을 유지하였다.

본 연구에서 위험요소의 유형은 Park & Son(2019)이 제안한 제어권 전환 기준 시나리오를 본 연구의 목적에 맞게 수정하여 새롭게 구성하였다. 구체적으로, 도로 안으로 동물이나 사람이 튀어나오거나, 도로상에 구급차, 소방차, 혹은 흙더미가 놓여있거나, 혹은 오토바이나 버스와 같은 선행차량이 도로 상에 정지해 있는 상황이 위험요소로 제시되었다. 자율주행 조건에서 이러한 위험요소들의 출현상황이 발생하면 운전자가 그러한 상황을 접하기 7.5초 전에 TOR이 제시되었고, 운전자는 신속하게 제어권을 인수받아 수동운전을 통해 위험요소와 충돌하지 않도록 적절하게 차선을 변경하거나 속도를 감속하도록 요구받았다. Fig. 2는 본 연구에서 제시된 위험요소의 예시이다.

실험을 위해 모두 네 개의 도로가 구성되었다. 하나는 연습주행을 위한 것이고, 나머지 세 개는 제어권 정보양상 조건(즉, 청각, 시각 및 시각+청각 정보)에서의 주행을 위한 것이었다. 모든 도로는 직선구간과 곡선구간이 반복되었고, 곡선도로의 경우 좌굴절 곡선도로와 우굴절 곡선도로가 번갈아 제시되었다. 예를 들어, 직선도로, 좌굴절 곡선도로, 직선도로 우굴절 곡선도로 등의 순서였다. 모든 도로는 3차선 고속도로 형태였고, 운전자 주변에 다른 차량은 제시되지 않았다. 연습주행에서 위험요소는 세 가지 TOR 정보양상에 대해 4회씩 제시되었고 이에 따라 제어권 인수 및 이양 정보도 각각 4회씩(직선도로 각 2회, 좌굴절 및 우굴절 곡선도로



Fig. 2. Examples of hazards on the road

각 1회) 제시되었다. 본 시행에서는 세 가지 TOR 정보 양상에 대해 위험요소가 각각 8회씩 제시되었고, 제어권 인수 및 이양 정보도 각각 8회씩(직선 4회, 좌굴절 및 우굴절 곡선도로 각 2회) 제시되었다. 연습주행을 포함한 모든 제어권 전환 상황에서 위험요소들은 유형을 달리하여 제시하였고, 도로의 전반적 형태는 실험 조건별로 약간씩 차이가 있도록 구성되었다.

3.5. 종속변인의 측정

3.5.1. 제어권 인수 반응시간 TOT

본 연구에서 실험참가자들은 운전상황에서 따라 AV로부터 제어권을 인수받거나 혹은 AV로 제어권을 이양하는 과정을 반복하였다. 제어권 인수는 실험참가자 차량 전방에 위험요소가 있는 경우 요청되었고, 이때 실험참가자가 위험요소로부터 안전하게 벗어나기 위해서는 신속하게 제어권을 인수받아야 한다. 반면 제어권의 이양은 위험요소로부터 벗어난 상황에서 자율주행을 위해 요구된다. 따라서 자율주행 차량과의 원활한 상호작용을 통해 안전한 운전을 유지하기 위해서는 제어권을 이양하는 시간보다는 실험참가자가 얼마나 빠르게 제어권을 인수받았는지가 핵심적 요인이 될 수 있다. 이러한 점에 기초하여 본 연구에서는 TOT를 종속측정치로 분석하였다. TOT는 AV로부터 TOR이 제시된 시점부터 실험참가자가 제어권 인수를 위해 스티어링 휠에 부착된 버튼을 누르기까지의 시간으로 정의하고 이를 분석자료로 사용하였다. 제어권 TOR이 제시된 이후에도 버튼을 누르지 않았거나 너무 느린 TOT 자료는 분석에서 제외하였다. 분석에서 제외된 지연 TOT는 7.5초로 정하였는데, 그것은 실험참가자들에게 요구되었던 55km/h의 주행속도로 운전할 경우 TTC가 7.5초였기 때문이다.

3.5.2. 정신적 작업부하

실험참가자들이 각각의 TOR 정보양상 조건에서 제어권을 인수받을 때 경험한 정신적 작업부하 수준을 주관적 작업부하와 TOR 정보제시 전후의 심장박동수에서의 변화를 통해 측정하였다. 특히 본 연구에서는 특정 TOR 정보양상 조건에서 직선도로와 곡선도로가 비교적 짧은 시간 사이에서 번갈아 제시되었을 뿐만 아니라 주관적 작업부하 설문지에 대해 응답하는 것 자체가 실

험참가자들의 제어권 인수 수행과 심장박동수에서의 변화를 신뢰롭게 측정하는데 일종의 “침입적인(intrusive)” 영향을 줄 수 있었다. 이에 따라 주관적 작업부하는 도로 형태의 구분없이 실험참가자들이 각각의 TOR 정보양상 조건에서 주행을 완료한 이후 측정되었다.

주관적 작업부하는 NASA-TLX (The National Aeronautics and Space Administration Task Load Index)를 사용하여 측정하였다. 구체적으로, AV로부터 TOR이 제시된 후 제어권을 인수받았을 때 실험참가자들이 경험한 정신적 부담(mental demand), 신체적 부담(physical demand), 시간적 압박감(temporal demand), 운전수행의 질(performance), 투여한 정신적/신체적 노력의 정도(effort), 그리고 TOR 정보 제시에 대한 짜증감(frustration) 등을 포함하는 6개의 차원으로 구분하여 주관적 작업부하를 측정하였다. NASA-TLX를 사용한 연구들에 따라서는 NASA-TLX의 각 문항에 가중치를 두고 점수를 합산하는 방식을 채택하거나(Borojeni et al., 2016), 각 문항을 독립적으로 분석하기도 한다(Heikoop et al., 2019). NASA-TLX에 포함된 6개의 항목들은 주관적 작업부하의 상이한 측면을 개별적으로 반영한다는 점을 감안하면 실험참가자가 제어권 전환 정보제공 양상에 따라 이러한 항목 각각에 대해 어느 정도의 작업부하를 경험했는지 구분하여 분석하는 것도 운전자가 경험한 주관적 작업부하의 특성을 이해하는데 도움이 될 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 NASA-TLX 각 차원의 개별 점수를 제어권 전환 정보양상에 걸쳐 비교하였다. 각 문항에 대해 7점 리커트 척도로 평가하도록 하였다.

심장박동수 변화는 스트레스와 정신적인 작업부하를 측정하는 타당한 지표로 간주된다(Mehler et al., 2012). 본 연구에서는 TOR에 따른 심장박동수를 측정하기 위해 전체 주행에 대한 심장박동수를 측정 대상으로 삼지 않고 TOR 시점을 기준으로 TOR이 제시된 이전과 이후 각 5초의 심장박동수를 초당 10회로 수집하였다. 기존 연구(Mehler et al., 2012)에서도 밝혔듯이, 본 연구에서도 심장박동수가 증가할수록 정신적 작업부하의 수준이 높은 것으로 가정하였다.

3.6. 실험 절차

본 연구는 네 개의 단계에 걸쳐 진행되었다: 실험전

단계, 연습 시행, 본 시행 및 실험 후 단계. 실험참가자가 실험실에 도착하면, 연구의 목적과 절차에 대해 안내받은 뒤 연구 참여에 동의할 경우 실험참가 동의서에 서명하였다. 그 다음 나이와 성별 및 운전경력 등을 포함한 인구통계학적 설문지에 응답하였다. 본격적인 실험 진행에 앞서 실험참가자에게 AV에 대해 충분히 설명하였다. 이때 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 자율주행 3-수준 차량의 작동 방식(즉, 자율주행 중에 위험요소가 출현할 경우 운전자가 제어권을 인수받아야 한다는 것), 제어권이 전환되는 상황 및 제어권 전환 방식에 대해 예시를 포함하여 설명하였다. 이후 실험참가자들로부터 추가적 질문이 없으면 연습시행이 실시되었다. 연습시행에서는 운전 시뮬레이션에 충분히 익숙해질 때까지 스티어링 휠과 페달을 조작하면서 운전하는 것과 AV의 지시에 따라 제어권을 인수받거나 이양하는 방식에 대해 연습하였다.

본 시행에서는 세 가지의 제어권 전환 정보양상에 따라 세 번의 주행이 이루어졌다. 각 정보양상에 따른 주행에서 실험참가자들은 직선도로와 곡선도로 모두에서 운전하였다. 또한 실험참가자들은 AV부터 제어권 인수 혹은 이양 요구가 있을 경우 가능한 한 빠르고 정확하게 스티어링 휠의 좌측에 부착된 버튼을 누름으로써 제어권을 전환하도록 지시받았다. 그리고 제어권

인수 이후에는 전방의 위험요소와 충돌하지 않도록 운속도를 줄이거나 차선을 변경하는 등 차량을 안전하게 통제하도록 하였다. 실험참가자들이 AV에게 제어권을 이양한 후 AV가 스스로 운전하는 상황에서 실험참가자들은 손을 무릎 위에 두고 발은 페달에서 떼도록 지시하였다. TOR 정보양상에 따른 주행순서는 실험참가자들에 따라 역균형화되었다. 각각의 주행 이후에 주관적 작업부하 설문지에 응답하도록 하였다. 모든 실험이 종료된 후 실험참가자들로부터의 추가 질문에 대해 응답하였고, 실험 참가에 대한 사례 제공을 위한 서류작성 과정이 있었다. 실험 전 실험 참가 동의서 및 인구통계학 설문지 작성에 10분, 연습주행에 10분, 본 시행에 45분, 실험 후 사후 설명 및 기타 서류작성에 5분 등을 포함하여 대략 70분 정도가 소요되었다. Fig. 3에 본 연구의 전반적 진행 단계를 정리하였다.

3.7. 분석 방법

앞에서 기술하였듯이 본 연구에서는 TOT 및 두 가지 정신적 작업부하 측정치(주관적 작업부하와 심장박동수에서의 변화)가 종속측정치로 분석되었다. 각 종속측정치는 측정 시점과 측정 방식에 따라 분석 방법에서 차이가 있었다. TOT는 제어권 인수 정보양상(3: 청각 vs. 시각 vs. 시각+청각)과 도로 형태(2: 직선도로 vs. 곡도로)의 조합에 따른 3 x 2 완전무선 반복측정 변량분석을 통해 분석되었다. 주관적 작업부하의 경우 실험참가자들이 각각의 TOR 정보양상 조건에 따라 주행을 완결한 후 1회씩 측정되었기 때문에 TOR 정보양상을 단일 변인으로 하는 반복측정 변량분석을 통해 분석되었다. 심장박동수는 TOR 정보양상과 도로 형태의 조합에 따른 6가지의 서로 다른 조건에서 제어권을 인수받기 이전과 인수받은 이후에 측정된 값을 모두 고려하여 비교하였기 때문에 제어권 인수 정보양상(3: 청각 vs. 시각 vs. 시각+청각), 도로 형태(2: 직선도로 vs. 곡선도로), 측정 시점(2: 인수 이전 vs. 인수 이후)의 조합에 따른 3 x 2 x 2 반복측정 변량분석을 통해 분석되었다.

본 연구에서는 실험참가자의 수가 비교적 적었기 때문에 자료의 정규성 가정의 충족 여부를 확인하는 것이 필수적이다. 이에 따라 일차적으로 자료의 첨도와 왜도를 통한 정규성 가정 여부를 먼저 확인하였다. 그

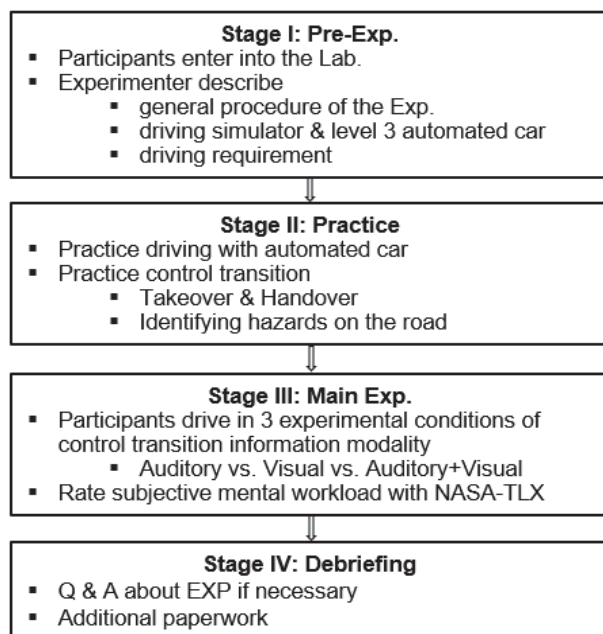


Fig. 3. General sequence of the study

리고 전반적 변량분석의 결과 유의한 효과들이 관찰될 경우 조건에 따라 Bonferroni 검증 및 대응표본 t-검증을 통한 사후 분석을 실시하였다. 통계적인 유의도 수준을 5%로 정하였다. 모든 자료는 IBM SPSS Statistics 25를 사용하여 분석하였다.

4. 연구 결과

중속측정치들에 대한 변량분석에 앞서 자료들이 정규성과 구형성 가정을 충족하는지 여부를 먼저 확인하였다. 정규성 가정은 왜도와 첨도를 계산하여 확인하였다. ek. TOT의 경우 TOR 정보양상 조건과 도로 형태 조건의 모든 조합에서 왜도는 -.35 ~ 1.24의 범위를, 첨도는 -.16 ~ .16의 범위를 보였다. NASA-TLX의 하위 요인별 점수들의 정규성을 검토한 결과 모든 하위 요인들에서 점수들의 왜도는 -.07 ~ 1.51의 범위를, 첨도는 -1.29 ~ 2.47의 범위였다. 그리고 심장박동수 자료의 경우 왜도는 -.03 ~ -.31의 범위를, 첨도는 -.84 ~ 1.14의 범위를 보였다. 이러한 분석 결과를 통해 본 연구에서 측정한 세 가지의 중속측정치들이 모두 정규성 기준을 충족한다는 것을 확인하였다. 구형성 가정은 Mauchly 구형성 검증을 통해 확인하였다. 그 결과, TOT와 NASA-TLX의 하위 요인 점수에서는 Mauchly의 W값의 유의확률이 5%를 초과하여 구형성 가정이 충족되었음을 확인하였다. 그러나 심장박동수의 경우에는 TOR 정보양상과 측정 시점 사이의 상호작용 효과와 TOR 정보양상, 도로 형태 조건 및 심장박동수 측정 시점 사이의 상호작용 효과에서 이 가정이 위배됨이 관찰되었다. 이에 따라 이 두 가지 상호작용 효과에 대해서는 Greenhouse-Geisser 교정을 통한 자유도를 사용하여 효과의 유의성을 검토하였다.

4.1. 제어권 인수 반응시간 TOT

TOT가 TOR 정보양상과 도로 형태에 따라 어떠한 차이를 보였는지 정리한 자료가 Table 1에 제시되어 있다. TOT에 대한 분석 결과, TOR 정보양상의 주효과 [F(2, 50) = 368.34, $p < .001$, $\eta^2 = .94$]와 도로 형태의 주효과[F(1, 25) = 60.42, $p < .001$, $\eta^2 = .70$], 그리고 TOR 정보양상과 도로 형태 사이의 상호작용 효과[F(2, 50) = 13.64, $p < .001$, $\eta^2 = .35$]가 모두 유의하였다. TOR 정보양상의 주효과에 대한 사후검증결과, 청각 정보 조건(M = 2.34, SD = .26)에서의 TOT는 시각 정보 조건(M = 1.51, SD = .16)과 시각+청각 정보 조건(M = 1.68, SD = .26) 모두에 비해 유의하게 느렸고(각각, mean difference = .83, $p < .001$; mean difference = .66, $p < .001$), 시각+청각 정보 조건에서의 TOT는 시각 조건에서의 TOT에 비해 유의하게 더 느렸다(mean difference = .17, $p < .001$). 즉, 청각 정보 조건, 시각+청각 정보 조건, 시각 정보 조건 순으로 TOT가 유의하게 느렸다. 그리고 도로 형태별로 운전자들이 보인 TOT에서의 차이를 비교한 결과 직선도로(M = 1.73, SD = .23)보다는 곡선도로 조건(M = 1.95, SD = .24)에서 유의하게 느린 TOT가 관찰되었다.

TOR 정보양상과 도로 형태 사이의 상호작용 효과를 좀 더 구체적으로 분석하기 위해 TOR 정보양상별로 도로 형태에 따른 TOT에서의 차이를 대응 표본 t-검증을 통해 비교하였다. 그 결과, 청각 정보, 시각 정보 및 시각+청각 정보 조건 모두에서 직선도로에 비해 곡선도로 조건에서 TOT가 유의하게 느렸으나, 도로 형태에 따른 TOT에서의 차이는 TOR 정보양상에 따라 차이가 있었다. 즉, 그 차이는 청각 정보 조건에서 가장 컸던 반면(mean difference = .38, $t = 7.89$, $p < .001$) 시각+청각 정보 조건에서 가장 작았고(mean difference = .12, $t =$

Table 1. Takeover time(TOT, seconds) according to the TOR information modality and road type

Road type (R)	Control takeover information modality (M)			Main effect	Interaction effect	Bonferroni test for M
	A	V	AV			
	M (SD)	M (SD)	M (SD)			
Straight	2.15(.29)	1.43(.17)	1.62(.23)	M		
Curved	2.53(.22)	1.59(.14)	1.74(.29)	F = 368.34***	M x R	V<AV<A
Paired t-test	t = 7.89***	t = 5.78***	t = 2.52*	R	F = 13.64***	
				F = 60.42***		

Note: Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$; A: Auditory, V: Visual, AV: Auditory+Visual

2.52, $p < .05$), 시각 정보 조건에서는 중간 수준의 차이를 보였다(mean difference = .16, $t = 5.78$, $p < .001$).

4.2. 주관적 작업부하 분석 결과

세 가지 유형의 TOR 정보 제시에 따라 제어권을 인수받은 이후 실험참가자들이 경험한 정신적 작업부하 점수들이 NASA-TLX의 하위 요인별로 구분되어 Table 2에 제시되어 있다. NASA-TLX 6개 항목에 대해 변량 분석을 각각 실시한 결과, 정신적 부담[F(2, 50) = 3.68, 32.97, $p < .05$, $\eta^2 = .13$], 시간적 압박감[F(2, 50) = 4.69, $p < .05$, $\eta^2 = .16$], 그리고 시스템 사용에서의 짜증감[F(2, 50) = 5.23, $p < .001$, $\eta^2 = .29$]에서 TOR 정보양상의 주효과가 관찰되었다. 이러한 주효과에 대해 Bonferroni 사후검증을 실시하였다. 그 결과 정신적 부담의 경우 시청각 정보 조건(M = 2.58, SD = 1.39)에서의 점수가 청각 정보 조건(M = 1.98, SD = .32)에서의 점수보다 기각역에 근접하는 수준에서 유의하게 높았고(mean difference = .60, $p = .067$), 시간적 압박감의 경우 시각 정보 조건(M = 2.54, SD = 1.08)에서의 점수가 청각 정보 조건(M = 1.94, SD = .79)에서의 점수보다 유의하게 높았다. 특히, 시스템 사용에서의 짜증감의 경우는 시각 정보 조건(M = 2.67, SD = 1.41)과 시청각 정보 조건(M = 3.12, SD = 1.36) 모두에서의 점수가 청각 정보 조건(M = 2.00, SD = .95)에서의 점수보다 각각 유의하게 높았다(각각, mean difference = 1.12, $p < .01$; mean difference = .67, $p < .05$).

4.3. 심장박동수 변화 분석 결과

TOR 정보양상과 도로 형태 및 제어권 인수 전후에 따른 심장박동수의 기초적 기술통계치와 분석 결과와 Table 3에 제시되어 있다. 심장박동수의 변화에 대한 분석 결과, 도로 형태의 주효과[F(1, 25) = 7.59, $p < .05$, $\eta^2 = .23$]와 심장박동수 측정 시점의 주효과[F(1, 25) = 12.97, $p < .01$, $\eta^2 = .34$]가 유의하였다. 즉, 직선 도로 조건보다는 곡선도로 조건(M = 74.15, SD = 11.77 vs. M = 78.19, SD = 9.70)에서, 그리고 TOR이 제시되기 이전보다는 제어권을 인수한 이후에 심장박동수가 유의하게 더 빨랐다(M = 75.90, SD = 11.05 vs. M = 76.45, SD = 11.23). 상호작용 효과 중에서는 TOR 정보양상과 측정 시점 사이의 2원 상호작용 효과[F(1.539, 38.466) = 5.78, $p < .01$, $\eta^2 = .18$]와 TOR 정보양상, 도로 형태 및 측정 시점 사이의 3원 상호작용 효과[F(1.475, 38.872) = 3.98, $p < .05$, $\eta^2 = .14$]가 유의하였다.

TOR 정보양상, 도로 형태 및 측정 시점 사이의 3원 상호작용을 좀 더 구체적으로 분석하기 위해 도로 형태 별로 TOR 정보양상과 측정 시점을 변인으로 하는 분석을 추가로 실시하였다. 그 결과, 직선도로 조건에서는 유의한 효과가 관찰되지 않았으나, 곡선도로 조건에서는 TOR 정보양상의 주효과[F(2, 50) = 4.11, $p < .05$, $\eta^2 = .14$], 측정 시점의 주효과[F(1, 25) = 11.02, $p < .01$, $\eta^2 = .31$] 및 TOR 정보양상과 측정 시점 사이의 2원 상호작용 효과[F(2, 50) = 8.09, $p < .01$, $\eta^2 = .24$]가 모두 유의하였다. 곡선도로 조건에서 TOR 정보양상에 따른 심장박동수에서의 차이를 비교한 결과, 청각 정보

Table 2. Comparison of the NASA-TLX scores(1-7) according to the Information modality of control takeover

Factors in NASA-TLX	Control Takeover Information Modality			F	Bonferroni test for M
	A	V	AV		
	M(SD)	M(SD)	M(SD)		
MD	1.98(0.81)	2.40(1.40)	2.58(1.39)	3.68*	A<AV
PD	1.96(1.01)	1.96(1.08)	2.08(1.25)	1.50	-
TD	1.94(0.79)	2.54(1.08)	2.08(1.18)	4.92*	A<V
PF	3.00(1.24)	2.85(1.21)	2.90(0.88)	2.31	-
EF	3.04(1.39)	3.19(1.42)	2.88(1.56)	2.48	-
FR	2.00(0.95)	2.67(1.41)	3.12(1.36)	5.23**	A<V, A<AV

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$; A: Auditory, V: Visual, AV: Auditory+Visual; MD: Mental Demand, PD: Physical Demand, TD: Temporal Demand, PF: Performance, EF: Effort, FR: Frustration

Table 3. Heart rates(bpm) according to the TOR information modality, road type and measurement period

Road type(R)	Measurement period(P)	Control takeover information modality(M)			Overall ANOVA	2-way ANOVA in each road type	Bonferroni test for M
		A	V	AV			
		M(SD)	M(SD)	M(SD)			
Straight	Before	74.00(11.83)	73.90(11.61)	74.11(11.55)	R F = 7.59*	-	-
	After	74.27(11.67)	74.33(11.31)	74.31(11.80)			
Paired t-test		ns	ns	ns	F = 12.97**		
Curved	Before	77.51(9.74)	78.00(9.76)	77.86(10.20)	M x P F = 5.78*	M F = 4.11*	A<V
	After	77.55(9.69)	79.90(9.86)	78.34(10.20)			
Paired t-test		ns	t = 3.36**	t = 2.48*	M x R x P F = 3.98*	P F = 11.03**	
						M x P F = 8.09**	

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$; bpm: beats per minute; A: Auditory, V: Visual, AV: Auditory+Visual

(M = 77.53, SD = 9.70)로 제공된 조건에 비해 시각 정보(M = 78.95, SD = 9.81)로 제공된 조건에서 심장박동수가 유의하게 빨랐다(mean difference = 1.42, $p < .05$). 다른 비교에서는 유의한 차이가 관찰되지 않았다.

곡선도로 조건에서 TOR 정보양상과 측정 시점 사이의 유의한 상호작용 효과를 좀 더 구체적으로 비교하기 위해 각 TOR 정보양상별로 측정 시점에 따른 심장박동수의 차이를 대응 표본 t-검증을 통해 비교하였다. 그 결과 청각 정보 조건(인수 이전 M = 77.51, SD = 9.74 vs. 인수 이후 M = 77.55, SD = 9.69, ns)에서는 측정 시점간 심박수 차이가 유의하지 않았던 반면, 시각 정보 조건(인수 이전 M = 78.00, SD = 9.76 vs. 인수 이후 M = 79.90, SD = 9.86, mean difference = 1.90, $t = 3.36$, $p < .01$)과 시청각 정보 조건(인수 이전 M = 77.86, SD = 10.20 vs. 인수 이후 M = 78.34, SD = 10.20, mean difference = .48, $t = 2.48$, $p < .05$)에서는 인수 이후의 심박수가 인수 이전의 심박수에 비해 유의하게 더 빨랐다.

5. 논의 및 결론

운전자가 원하는 목적지까지 자동차가 스스로 주행하여 이동하는 자율주행 기능은 운전자의 정보처리 부담과 차량제어 부담을 모두 경감시켜 줄 뿐만 아니라 운전자 과실로 인한 교통사고를 방지할 수 있고, 나아가 교통체증과 연료 소비를 줄일 수 있는 첨단 기술로

여겨지고 있다. AV는 스스로 운전한다는 점에서 명실공히 “자동차”라는 자신의 명칭에 걸맞는 위상을 갖게 된 것이다. AV는 기본적으로 운전자를 대신하여 목적지까지 안전하고 효율적으로 이동하는 것을 목표로 하고 있지만 현재의 기술 수준 단계로 보면 아직 완전한 수준에 도달한 것은 아니다(Goodall, 2014). AV의 여러 자동화 단계 중에서 현재 가장 많이 적용되고 있는 단계는 3-수준이다. 3-수준 자율주행은 자동차가 거의 모든 주행 과정을 담당할 수 있기 때문에 운전자는 운전 이외에 전자기기를 사용하거나 책자를 읽는 등의 활동을 할 수 있지만 특정 시점에서 위험요소가 출현하여 충돌 가능성이 높아지거나 자율주행 시스템의 한계를 벗어나는 경우에는 운전자의 개입을 필요로 한다(Casner et al., 2016). 이것은 이 단계의 AV와 운전자 사이에서 발생하는 상호작용, 특히 AV와 운전자 사이의 차량에 대한 제어권 전환 과정이 매우 중요하다는 점을 시사한다. 본 연구에서는 운전 시뮬레이션을 사용하여 자율주행 환경을 구현한 후 3-수준 자율주행 조건에서 차량으로부터 운전자에게 전달되는 TOR 정보의 양상(시각, 청각 및 시각+청각) 및 도로 형태(직선도로와 곡선도로)에 따라 운전자의 TOT 및 정신적 작업부하(제어권 인수 이후에 운전자들이 경험한 주관적 작업부하와 심장박동수에서의 변화)를 분석하였다.

본 연구의 결과와 이에 대한 논의점을 기술하면 다음과 같다. 먼저, AV로부터 TOR이 제시된 이후 실험참가자들이 보인 TOT에 대한 분석 결과, (1) TOR 정보양상의 측면에서는 시각 정보가 가장 빠른 TOT를 이끌어낸

반면 청각 정보 조건에서 가장 느렸고, (2) 도로 형태 측면에서는 직선도로 조건에 비해 곡선도로 조건에서의 TOT가 유의하게 더 느렸으며, 특히 (3) 청각 정보 조건에서 도로 형태에 따른 TOT에서의 차이가 가장 컸다는 것으로 요약할 수 있다. 앞에서 TOR 정보양상에 따른 TOT에서의 차이를 검토한 연구들 사이에서는 일관적인 결과가 관찰되지 않았다는 것을 언급한 바 있다. 이러한 비일관적 결과는 연구들에 따라 시각 정보가 제시되는 위치와 시각 정보 제시 이후 제어권을 인수받기 위해 요구된 반응 방식에서의 차이가 가장 중요한 원인일 가능성이 있다. 구체적으로 시각 정보 조건에 비해 청각 정보 조건에서 더 빠른 TOT가 관찰되었던 Yoon et al.(2019)의 연구에서는 시각 정보가 스티어링 휠의 우측에 위치한 태블릿 PC 화면에 제시되고 제어권 인수를 위한 반응은 스티어링 휠 옆에 위치한 버튼을 누르는 방식이었다. 또한 청각 정보에 대해서도 동일한 방식으로 제어권을 인수받도록 하였다. 반면 청각 정보 조건에 비해 시각 정보 조건에서 더 빠른 TOT가 관찰되었던 Huang et al.(2019)의 연구 및 Yu et al.(2021)의 연구에서는 시각 정보가 운전자가 정면으로 응시하고 있는 시뮬레이터 화면에 직접 제시되었고 이 정보에 따라 제어권을 인수받기 위해 브레이크를 밟는 방식이었다.

운전상황에서 정면에 제시되는 자극에 대해 브레이크를 밟는 행동이 일상적 운전과 형태와 일치하고 또한 운전자들이 이러한 자극-반응 조합에 대해 더 익숙하다는 점을 감안하면 Yoon et al.(2019)의 연구에 비해 Huang et al.(2019) 및 Yu et al.(2021)의 연구에서 사용된 시각 자극과 발 반응 조합이 상대적으로 더 빠른 TOT를 산출했을 가능성이 있다. 본 연구에서는 시각 자극의 제시방식 측면에서는 Huang et al.(2019) 및 Yu et al.(2021)의 연구와 마찬가지로 운전자가 관찰하고 있는 운전 장면 위에 제시한 반면 시각 정보를 포함한 모든 TOR 정보양상에 대한 반응(즉, 제어권에 대한 인수 및 이양 반응)은 Yoon et al.(2019)의 연구에서와 유사하게 스티어링 휠의 좌측에 위치한 버튼을 누르는 방식이었다. 뿐만 아니라 청각 자극은 단순한 톤음의 형태가 아닌 ‘제어권을 받으세요’ 또는 ‘제어권을 넘기세요’ 라는 완전한 문장 형태의 텍스트를 청각적으로 제시하였기 때문에 실험참가자들은 제어권의 인수 혹은 이양 여부에 대한 내용을 어느 정도 청취한 후 제어권 인수를

위한 반응을 개시했을 가능성도 있다. 반면 시각 정보의 전체 문장이 운전 장면 위에 동시에 제시되기 때문에 즉각적으로 TOR의 내용을 파악할 수 있었을 것이다.

따라서 선행 연구와 본 연구의 결과를 종합하면 운전자가 도로 정면을 응시하고 있는 조건에서 TOR 시각 정보가 청각 정보 혹은 시각+청각 정보에 비해 상대적으로 더 빠른 TOT를 보였던 것은 TOR에 대한 반응 방식보다는 시각 정보가 제시되는 위치가 상대적으로 더 중요한 영향을 미치는 것으로 보인다. 즉, 이러한 결과는 운전자가 고개를 숙이고 있는 상태에 시각 정보를 획득할 수 있는 태블릿 PC 등과 같은 헤드-다운 디스플레이(head-down display) 방식보다는 운전자가 고개를 숙이지 않고 정면으로 주시하면서 시각 정보를 획득할 수 있는 헤드-업 디스플레이(head-up display) 방식이 시각 정보에 대한 신속한 처리, 그리고 이를 통한 신속한 TOT를 이끌어내는데 더 바람직할 수 있다는 것을 시사한다. 또한 본 연구에서 시각+청각의 중다양상 정보는 청각 단일양상 정보에 비해서는 더 빠른 TOT를 반면 시각 단일양상 정보에 비해서는 더 느린 TOT를 이끌었다는 것도 주목된다. 시각+청각의 중다양상 정보가 청각 단일양상 정보에 비해 더 빠른 TOT를 보였던 것은 앞에서 기술한 바와 같이 시각+청각의 중다양상 정보가 제시될 때 시각 정보는 운전 장면 위에 제시되었기 때문에 청각 정보에 비해 반응시간에서 상대적 이점을 가질 수 있었을 것이다. 반면 시각+청각 정보에 포함된 청각 정보의 처리를 위한 추가적 시간 때문에 시각 단일양상 정보만 제시된 조건에 비해 시간적 지연이 있었을 가능성이 있다.

본 연구에서 관찰된 TOR 정보양상에 따른 TOT에서의 차이를 종합적으로 고려하면 인간-시스템 상호작용 과정에서 시스템으로부터 인간 오퍼레이터로의 정보 제공을 위한 디스플레이 설계 가이드라인을 일반적으로 적용하는 것에서 주의가 필요할 것으로 보인다. 예를 들어, Wickes et al.(2015)은 신속한 반응을 이끌어내는 것에서는 청각 정보가 시각 정보에 비해 상대적으로 유리하다고 기술하였다. 따라서 AV를 사용한 운전 상황에서 전방에 위험요소가 출현하는 경우와 같이 긴급한 반응이 요구된다면 시각 정보에 비해 청각 정보를 사용하여 운전자에게 제어권을 인수받도록 하는 것이 합리적 선택이 될 것이다. 그러나 본 연구의 결과에

(그리고 앞에서 기술한 다른 연구의 결과에) 기초한다면 청각 정보가 다른 정보양상에 비해 상대적으로 더 느린 TOT를 이끌어 낼 가능성도 있다. 따라서 자율주행 상황에서 운전자의 주의를 빠르게 유도하고 신속하게 반응하도록 하기 위해 어떠한 정보양상을 선택할 것인지 결정하는 문제에서는 정보가 제시되는 방식과 운전자에게 요구되는 반응의 방식이 어떻게 조합되는지가 중요한 변인으로 고려되어야 할 것이다.

본 연구에서는 도로 형태에 따라서도 TOT에서 차이가 관찰되어 직선도로에 비해 곡선도로 조건에서 전반적으로 유의하게 느린 TOT가 관찰되었다. 그러나 도로 형태와 TOR 정보양상 사이의 유의한 상호작용 효과가 시사하듯이 직선도로 조건과 곡선도로 조건 사이에서 관찰되는 TOT 차이는 TOR 정보양상에 따라 유의하게 달랐다. 구체적으로 도로 형태에 따른 TOT에서의 차이는 청각 정보 조건에서 가장 컸던 반면 시각+청각 정보 조건에서 가장 작았다. 직선도로에 비해 곡선도로에서 전반적으로 느린 TOT가 보였던 것은 운전자들의 인지적 부담이 직선도로 조건보다는 곡선도로를 주시하고 있을 상대적으로 더 높았기 때문일 것이다. 실제로 Xu et al.(2022)은 TOR 정보가 제시되었을 때 운전자들은 직선도로 조건보다는 곡선도로 조건에서 더 높은 수준의 작업부하를 경험할 뿐만 아니라 제어권 인수 수행이 더 저조하다는 것을 발견하였다. 특히 높은 작업부하를 경험하고 있는 곡선도로 조건에서 운전자들이 도로를 시각적으로 주시하고 있을 때 청각 TOR 정보가 제시된다면 운전자들은 청각 정보를 처리하기 위해 시각적 주의로부터 청각적 주의로 주의를 전환을 해야 하는 추가적 부담도 경험했을 가능성이 있다. 요약하면, 직선도로 조건에서 비해 곡선도로 조건에서 운전자들이 경험하는 상대적으로 높은 수준의 인지부담과 TOR 정보양상 사이의 주의전환 부담이 직선도로와 곡선도로 사이에서 관찰되는 TOT에서의 차이를 청각 TOR 정보 조건에서 더 크게 영향을 미쳤을 것이다.

도로 형태가 운전자들의 TOT에 미치는 영향과 관련하여 흥미있는 연구 결과 중 하나는 So et al.(2021)에 의해 보고되었다. 이 연구자들은 도로 형태가 TOT 자체에는 유의한 영향을 미치지 않지만 운전자들이 제어권을 인수받은 이후 안정적으로 운전을 수행하는 과정에 더 큰 영향을 미친다고 주장하였다. 운전자 전방의 위험

요소 등으로 인해 AV가 스스로 그것을 회피하여 운전하기에는 역량의 한계가 있을 때 TOR이 제시된다는 점을 고려하면 TOR 직후의 TOT에 대한 분석뿐만 아니라 운전자들이 제어권을 인수받은 이후의 수동운전 패턴이나 작업부하 수준이 도로 형태에 따라 어떻게 달라지는지도 종합적으로 검토되어야 할 것으로 보인다.

실험참가자들이 TOR 정보 제시에 의해 제어권을 인수받은 후 경험한 정신적 작업부하 측정치들 중 NASA-TLX의 6개 항목으로 측정된 주관적 작업부하 측정치에 대한 분석 결과, 정신적 부담, 시간적 압박감, TOR 정보 제시에 대한 짜증감 차원에서 TOR 정보양상의 주효과가 관찰되었다. 구체적으로, 이 세 가지 정신적 작업부하 차원 모두에서 시각 정보 혹은 시각+청각 정보에 비해 청각 정보에 대한 주관적 작업부하 수준이 상대적으로 더 낮았다. TOR 정보양상 변인과 도로 형태 변인을 모두 고려한 심장박동수에서의 변화에 대한 분석 결과, 전반적으로는 도로 형태의 주효과와 심장박동수 측정 시점의 주효과가 유의하여 직선도로보다는 곡선도로 조건에서, 그리고 제어권 인수 이전보다는 이후에 심장박동수가 유의하게 증가하였다. 그러나 도로 형태를 구분하여 분석하였을 때는 곡선도로 조건에서만 TOR 정보양상 변인과 측정 시점 변인의 주효과가 관찰되었고, 특히 곡선도로 조건에서는 제어권 인수 정보양상과 측정 시점 사이의 상호작용 효과가 유의하였다. 즉, 곡선도로 조건에서는 청각 정보가 제공된 조건에 비해 시각 정보가 제공된 조건에서 심장박동수가 유의하게 더 증가하였다. 또한 청각 정보 조건에서는 측정 시점간 심장박동수 차이가 유의하지 않았던 반면, 시각 정보 조건과 시각+청각 정보 조건에서는 인수 이후의 심박수가 인수 이전의 심박수에 비해 유의하게 더 빨랐다.

정신적 작업부하 자료에 대한 분석을 종합하면, 주관적 작업부하 측정치와 심장박동수에서의 변화 모두 TOR 정보가 시각적으로 혹은 시각+청각적으로 제시된 조건에 비해 청각적으로 제시된 조건에서 실험참가자들은 정신적 작업부하의 수준을 상대적으로 더 낮게 평가한 것으로 보인다. 이러한 결과는 앞에서 기술한 TOT 측정치가 보인 결과와 대비되는 것이다. 즉, TOT에 대해서는 시각 TOR 정보양상이 청각 TOR 정보양상 혹은 시각+청각 TOR 정보양상에 비해 상대적으로 더 우세한 반응(즉, 더 빠른 반응)을 이끌어낸 반면 정

신적 작업부하 측면에서는 주관적 작업부하나 심장박동수에서의 변화 모두에서 청각 TOR 정보양상이 시각 TOR 정보양상이나 시각+청각 TOR 정보양상에 비해 상대적으로 더 낮은 수준을 보였다.

일반적으로 동일한 연구 환경에서 측정되는 중다의 종속치들은 서로 수렴하는 결과를 산출하는 것이 연구 결과를 타당화하는데 더 바람직한 것으로 여겨진다(Wickens et al., 2015). 그러나 본 연구에서는 TOR 정보 양상에 따른 TOT 측정치와 정신적 작업부하 측정치 사이의 상대적 우위성이 일관적이지 않았다. 즉, 대략적으로 보면 TOT에서는 시각 TOR 정보가, 반면 정신적 작업부하에서는 청각 TOR 정보가 상대적으로 긍정적 효과를 이끌어내었다. 이에 대한 한 가지 가능한 설명은 TOT와 정신적 작업부하 사이에 일종의 교환적 관계(trade-offs)가 작용할 수 있다는 점이다. 다시 말해 실험 참가자들이 TOR 정보가 제시될 때 빠르게 제어권을 인수받도록 요구한 결과 실험참가자들은 청각 TOR 정보에 비해 시각 TOR 정보에 대해 유의하게 더 빠른 TOT를 보였는데, 이러한 빠른 TOT는 제어권 인수 이후 실험참가자들이 경험하는 정신적 작업부하의 수준을 높일 수 있다는 것이다. 실제로 자율주행 환경에서 반응시간과 정신적 작업부하 사이의 교환적 관계는 많은 연구들에서 보고된 바 있고(Wu et al., 2022), 본 연구의 결과도 이러한 선행 연구들의 결과와 일치하는 것으로 보인다.

본 연구에서 관찰된 결과의 시사점과 본 연구의 한계점을 종합적으로 고려하여 추후 연구에 대한 제안점을 제시하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서 가장 주목되는 결과는 바로 앞에서 기술한 TOR 정보 제공 양상에 따른 TOT 및 정신적 작업부하 사이의 교환적 관계에서의 차이이다. 이러한 결과는 자율주행 상황에서(특히 시각 정보가 포함된 TOR의 경우) 운전자에게 더 신속한 제어권 인수를 요구하는 조건에서는 운전자들의 정신적 작업부하가 증가할 수 있고 이것은 다시 운전상황의 전방에서 발생하는 위험요소의 회피 반응에 부정적 효과를 가져올 수 있다는 것을 시사한다. 이러한 시사점은 이론적 배경 부분에서 기술한 TOR 정보의 제시 시점과 밀접한 관련성이 있을 것이다. 즉, 운전자 전방의 위험요소 출현 등으로 자율주행 차량이 운전자에게 제어권을 인수받도록 요구할 때 위험요소와 접촉할(또는 충돌할) 때까지의 시간이 중요한 변인

이 될 것이다. 실제로 TOR 정보의 제시 시점이 짧을수록 제어권 인수 이후의 운전수행이 불안정해지고(Gold et al., 2013), 위험요소와 충돌 가능성도 증가할 수 있다는(Clark & Feng, 2017) 연구 결과들이 보고된 바 있다. 그러나 AV가 위험요소와 접촉할 때까지의 시간을 너무 길게 설정하여 TOT 정보를 제시할 경우 AV로서의 기능이 축소될 수 있다는 점도 고려한다면 최적의 TOR 정보 제시 시점을 결정하는 문제도 AV와 운전자 사이의 원활한 상호작용 방식을 탐구하는데 중요한 연구 물음 중 하나가 될 것이다. 특히 여기에서는 운전자의 연령이나 성별 등을 포함한 운전자 변인의 특성이 충분히 고려되어야 할 것이다(Clark & Feng, 2017)

둘째, 본 연구에서는 자율주행 상황에서 운전자가 수행할 수 있는 NDRT의 유형을 고려하지 않는 대신 운전자가 운전 장면의 전방을 주시하는 상황에 국한하여 TOR 정보 제공 양상과 도로 형태에 따라 운전자의 TOT와 정신적 작업부하 수준이 어떻게 차별화될 수 있는지 살펴보았다. 비록 NDRT 유형에 따른 TOT나 운전수행에서의 차이가 NDRT를 어떠한 방식으로 수행하도록 요구하는지에 따라(즉, NDRT의 자극 속성이나 반응 방식이 어떻게 구성되는지에 따라) 일관적이지 않은 연구 결과들이 관찰되기는 하였으나 AV가 갖는 여러 가지 장점 중 하나가 운전과제 수행의 부담없이 다른 활동을 수행할 수 있게 한다는 점을 고려하면 NDRT의 유형을 중요한 변인으로 고려할 필요가 있을 것이다. 특히 NDRT를 구성할 때는 자극의 유형 혹은 자극이 제시되는 위치 등을 포함하는 자극 속성과 수동 반응(손 반응과 발 반응) 혹은 구두 반응을 포함하는 반응 방식 조합들의 효과를 차별화하여 체계적으로 분석할 수 있도록 해야 할 것이다.

셋째, 본 연구에서는 TOR에 대한 정신적 작업부하의 생리적 지표로 TOR 이전과 이후에서 관찰되는 심장박동수의 평균값을 비교하였다. 그러나 이 종속측정치에 대해서는 추가적으로 고려되어야 할 사항들이 있는 것으로 보인다. 먼저 비록 심장박동수가 운전자를 포함한 오퍼레이터의 정신적 작업부하 수준을 반영하는 좋은 지표라는 것은 이미 많이 알려져 있지만(Mehler et al., 2012) 오퍼레이터의 정신적 작업부하가 증가할수록 평균 심장박동수는 증가하는 반면 그 변산성은 감소한다는 점을 종합적으로 고려하면(Brookhuis

& De Waard, 2010) 추후 연구에서는 심장박동수의 평균값과 함께 심장박동수에서의 변산성도 동시에 고려하는 것이 필요할 것이다. 특히, 심장박동수 평균값이나 심장박동수 변산성은 스트레스 수준이나 질병의 유무뿐만 아니라 성별(일반적으로 여성은 남성보다 심장박동수 평균값이 크다)이나 연령(연령이 증가할수록 심장박동수 변산성이 감소한다) 등과 같은 개인의 인구통계학적 변인들에 의해서도 차이가 있기 때문에 (Yeragani et al., 1997) 심장박동수를 정신적 작업부하의 지표로 사용하기 위해서는 개인에 따라 이 측정치에 대한 표준화 과정이 먼저 선행되어야 할 것이다.

넷째, 본 연구에서의 종속측정치들은 모두 관찰된 점수의 평균값을 사용하여 분석되었다. 점수들의 분포가 정상성 가정을 심각하게 위배하지 않는다면 평균값을 측정치로 채택하는 것이 일반적이기는 하지만 경우에 따라 평균값 이외에 다른 측정치들도 실험참가자들이 보인 수행의 속성을 이해하고 연구결과를 실제 세계에 적용하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서 분석한 TOT 측정치들은 실험참가자들이 특정 실험조건에서 보인 반응의 “평균적” 속성을 반영한다. 그러나 운전 시뮬레이션이 아닌 실제의 AV 운전환경이라면 운전자들의 평균적인 TOT보다는 개인에 걸쳐 관찰된 TOT의 최대값이 AV-운전자 상호작용 과정에서 안전성을 확보하기 위한 좀 더 중요한 지표가 될 수 있다. 예를 들어, 특정 운전상황이나 운전자 상태에 의해 TOR에 따른 TOT가 지연될 수 밖에 없는 조건임에도 불구하고 실험실에서 관찰된 평균 TOT에 기초하여 TOR 제시 시점을 결정한다면 위급한 상황에서 AV로부터 TOR이 늦게(즉, TTC가 짧은 상태에서) 전달될 것이고 이것은 운전자가 위급상황에 대처하는데 충분한 시간을 제공하지 못하는 결과를 초래할 수 있다. TOT의 최대값 정보는 앞의 서론 부분에서 기술한 TOT 제시 시점을 결정하는데도 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

마지막으로, 본 연구에 참가한 실험참가자들이 대체적으로 젊고 운전경력도 짧은 운전자들로 구성되었다는 점도 본 연구의 결과가 일반화되는데 또 다른 한계점을 갖게 한다. 젊은 운전자들은 비록 운전경력은 많지 않더라도 제시된 자극에 대해 반응하는 속도를 포함한 정보처리 역량은 나이 든 운전자에 비해 일반적

으로 더 우수할 것이지만 운전경력이 많은 운전자들에 비해 운전 숙련도의 측면에서는 상대적으로 더 큰 약점을 갖는다(McKnight & McKnight, 1999). 운전자-AV 상호작용 과정에서는 AV로부터 전달되는 정보에 대한 신속하고 정확한 처리와 반응뿐만 아니라 긴급상황에서 AV로부터 제어권을 인수받은 이후에 적절하게 차량을 직접 제어하는 것이 위험요소 회피와 안전한 운전의 필수적이라는 점을 감안하면 추후 연구에서는 다양한 연령대의 운전자들을 대상으로 자료를 수집할 필요가 있다. 특히, 고령운전자 집단의 경우는 운전경력은 풍부하지만 연령증가에 따른 신체적, 인지적 역량에서의 저하에 따라 운전수행에서 많은 한계를 보이고 이에 따라 교통사고의 위험성도 높다는 점을 감안하면 운전자-AV 상호작용을 검토하는 맥락에서 고령운전자 집단이 실험참가자 집단에 포함될 수 있도록 하는 것도 고려해야 할 것이다.

REFERENCES

- Beukel, A. P., van der Voort, M. C., & Eger, A. O. (2016). Supporting the changing driver's task: Exploration of interface designs for supervision and intervention in automated driving. *Transportation Research: Part F, Traffic Psychology and Behavior*, 43, 279-301. DOI: 10.1016/j.trf. 201.09.009
- Borojeni, S. S., Chuang, L., Heuten, W., & Boll, S. (2016). Assisting drivers with ambient take-over requests in highly automated driving. *In Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 237-244). ACM. DOI: 10.1145/3003715.3005409
- Brady, B., Eramudugolla, R., Wood, J. M., & Anstey, K. J. (2021). Association between decision-making under risk conditions and on-road driving safety among older drivers, *Neuropsychology*, 35(6), 622-629. DOI: 10.1037/neu0000754
- Brookhuis, K. A., & De Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 898-903. DOI: 10.1016/j.aap. 2009.06.001

- Casner, S. M., Hutchins, E. L., & Norman, D. (2016). The challenges of partially automated driving. *Communications of the ACM*, 59(5), 70-77. DOI: 10.1145/2830565
- Clark, H., & Feng, J. (2017). Age differences in the takeover of vehicle control and engagement in non-driving-related activities in simulated driving with conditional automation. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 468-479. DOI: 10.1016/j.aap. 2016. 08.027
- Corver, S. C., Unger, D., & Grote, G. (2016). Predicting air traffic controller workload: trajectory uncertainty as the moderator of the indirect effect of traffic density on controller workload through traffic conflict. *Human Factors*, 58(4), 560-573. DOI: 10.1177/0018720816639418
- Dogan, E., Honnêt, V., Masfrand, S., & Guillaume, A. (2019). Effects of non-driving-related tasks on takeover performance in different takeover situations in conditionally automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 494-504. DOI: 10.1016/j.trf. 2019.02.010
- Edquist, J., Rudin-Brown, C. M., & Lenné, M. G. (2012). The effects of on-street parking and road environment visual complexity on travel speed and reaction time. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 759-765. DOI: 10.1016/j.aap.2011.10.001
- Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2017). Takeover time in highly automated vehicles: noncritical transitions to and from manual control. *Human Factors*, 59(4), 689-705. DOI: 10.1177/0018720816685832
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop?. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 1938-1942. Los Angeles, USA: SAGE Publications. DOI: 10.1177/1541931213571433
- Gold, C., Körber, M., Lechner, D., & Bengler, K. (2016). Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: the role of traffic density. *Human Factors*, 58(4), 642-652. DOI: 10.1177/0018720816634226
- Goodall, N. J. (2014). Ethical decision making during automated vehicle crashes. *Transportation Research Record*, 2424(1), 58-65. DOI: 10.3141/2424-07
- Heikoop, D. D., de Winter, J. C., van Arem, B., & Stanton, N. A. (2019). Acclimatizing to automation: driver workload and stress during partially automated car following in real traffic. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 503-517. DOI: 10.1016/j.trf.2019.07.024
- Huang, G., Steele, C., Zhang, X., & Pitts, B. J. (2019, November). Multimodal cue combinations: A possible approach to designing in-vehicle takeover requests for semi-autonomous driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 1739-1743. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Joo, M., & Lee, J. (2014). The Relationship between older drivers' BIS/BAS and life satisfaction: mediating effects of mobility and affectivity. *Korean Journal of the Science of Emotion and Sensibility*, 17(4), 29-40.
- Kim, N., Jeong, K., Yang, M., Oh, Y., & Kim, J. (2017). "Are you ready to take-over?" An exploratory study on visual assistance to enhance driver vigilance. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing System*, 1771-1778. Denver, CO, USA: ACM. DOI: 10.1145/3027063.3053155
- Kim, S., van Egmond, R., & Happee, R. (2021). Effects of user interfaces on take-over performance: A review of the empirical evidence. *Information*, 12(4), 162. DOI: 10.3390/info12040162
- Lee, J. (2018). Comparisons of middle- and old-aged drivers' recognition for driving scene elements using sensitivity, response bias, and response time. *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 20(6), 3185-3199.
- Lee, J. (2020). Difference in middle-aged and elderly drivers' performances in continuous lateral tracking and selecting stimuli varied in visual angle. *Journal of The Korean Data Analysis Society*, 22(6), 2489-2503. DOI: 10.37727/jkdas.2020.22.6.2489
- Lee, J. (2021). The effects of road type and driver's age on simulator sickness. *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 23(5), 2365-2380. DOI: 10.37727/

- jkdas.2021.23.5.2365
- Lee, J. (2022). Differences in detection response and driving performance of middle-aged and elderly drivers according to stimulus location and road type: A driving simulation study. *Journal of The Korean Data Analysis Society*, 24(4), 1543-1561. DOI: 10.37727/jkdas.2022.24.4.1543
- McKnight, A. J., & McKnight, A. S. (1999). Multivariate analysis of age-related driver ability and performance deficits. *Accident Analysis and Prevention*, 31(5), 445-454. DOI: 10.1016/S0001-4575(98)00082-7
- Mehler, B., Reimer, B., & Coughlin, J. F. (2012). Sensitivity of physiological measures for detecting systematic variations in cognitive demand from a working memory task: An on-road study across three age groups. *Human Factors*, 54(3), 396-412. <https://doi.org/10.1177/0018720812442086>
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors*, 54(5), 762-771. DOI: 10.1177/0018720812442087
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2018). *Linear Design (KDS 44 20 10: 2018)*, Sejong, Republic of Korea: KDS.
- Mollenhauer, M. A., Lee, J., Cho, K., Hulse, M. C., & Dingus, T. A. (1994). The effects of sensory modality and information priority on in-vehicle signing and information systems. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 38(16), 1072-1076. Los Angeles, USA: SAGE Publications.
- Naujoks, F., Forster, Y., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2016). Speech improves human-automation cooperation in automated driving. In *Mensch and Computer 2016-Workshopband*. Aachen, Germany: DBLP. DOI: 10.18420/muc2016-ws08-0007
- Neurauter, M. L. (2005). Multimodal warnings: Curve-warning design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49(22), 1945-1949. Los Angeles, USA: SAGE Publications. DOI: 10.1177/154193120504902
- NHTSA, (2013). *Department of Transportation Releases Policy on Automated Vehicle Development*. National Highway Traffic Safety Administration.
- Park, M., & Son, J. (2019). Reference test scenarios for assessing the safety of take-over in a conditionally autonomous vehicle, In *Transactions of KSAE*, 27(4), 309-317. DOI: 10.7467/KSAE.2019.27.4.309
- Pennetti, C. A., Hollenback, K., Kim, I., & Lambert, J. H. (2019). Cognitive load variability from road characteristics should influence a safety requirement for vehicle stopping sight distance. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2129-2133. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications. DOI: 10.1177/1071181319631396
- Politis, I., Brewster, S., & Pollick, F. (2015). Language-based multimodal displays for the handover of control in autonomous cars. In *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 3-10. Nottingham, UK: ACM. DOI: 10.1145/2799250.2799262
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014). How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2063-2067. Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications. DOI: 10.1177/1541931214581434
- Reimer, B., Mehler, B., & Coughlin, J. F. (2016). Reductions in self-reported stress and anticipatory heart rate with the use of a semi-automated parallel parking system. *Applied Ergonomics*, 52, 120-127. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.07.008
- Risser, R. (2019). *The Safety of Intelligent Driver Support Systems: Design, Evaluation and Social Perspectives*. CRC Press.
- Roche, F., Somieski, A., & Brandenburg, S. (2019). Behavioral changes to repeated takeovers in highly automated driving: Effects of the takeover-request design and the nondriving-related task modality. *Human Factors*, 61, 839-849. DOI: 10.1177/0018720818814963
- SAE International. (2018). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. *SAE international*, 4970, 1-5.

- Salvucci, D. D., Boer, E. R., & Liu, A. (2001). Toward an integrated model of driver behavior in cognitive architecture. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1779(1), 9-16. DOI: 10.3141/1779-02
- Shen, S., & Neyens, D. M. (2014). Assessing drivers' performance when automated driver support systems fail with different levels of automation. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1), 2068-2072. Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.
- So, J. J., Park, S., Kim, J., Park, J., & Yun, I. (2021). Investigating the impacts of road traffic conditions and driver's characteristics on automated vehicle takeover time and quality using a driving simulator. *Journal of Advanced Transportation*, 1-13. DOI: 10.1155/2021/8859553
- Son, J., & Park, M. (2013). The impact of cognitive workload on driving performance and visual attention in younger and older drivers. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 21(4), 62-69. DOI: 10.7467/KSAE.2013.21.4.062
- Telpaz, A., Rhindress, B., Zelman, I., & Tsimhoni, O. (2015). Haptic seat for automated driving: Preparing the driver to take control effectively. In *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 23-30. Nottingham, UK: ACM. DOI: 10.1145/2799250.2799267
- van der Heiden, R. M., Iqbal, S. T., & Janssen, C. P. (2017). Priming drivers before handover in semi-autonomous cars. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 392-404. Denver, Colorado, USA: ACM. DOI: 10.1145/3025453.3025507
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2015). *Engineering psychology and human performance*. Psychology Press. DOI: 10.4324/9781315665177
- Wu, H., Wu, C., Lyu, N., & Li, J. (2022). Does a faster takeover necessarily mean it is better? A study on the influence of urgency and takeover-request lead time on takeover performance and safety. *Accident Analysis & Prevention*, 171, 106647. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106647
- Xu, C., Li, P., Li, Y., Merat, N., Lu, Z., & Guo, X. (2022). Takeover performance and workload under varying automation levels, time budget and road curvature. In *2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)*, 1379-1385. IEEE.
- Yeragani, V. K., Edward, S., Jerald, K., Gina, I. (1997). Effect of age on long-term heart rate variability. *Cardiovascular Research*, 35(1), 35-42. DOI: 10.1016/S0008-6363(97)00107-7
- Yoon, S. H., Kim, Y. W., & Ji, Y. G. (2019). The effects of takeover request modalities on highly automated car control transitions. *Accident Analysis and Prevention*, 123, 150-158. DOI: 10.1016/j.aap.2018.11.018
- Yu, D., Park, C., Choi, H., Kim, D., & Hwang, S. H. (2021). Takeover safety analysis with driver monitoring systems and driver-vehicle interfaces in highly automated vehicles. *Applied Sciences*, 11(15), 6685. DOI: 10.1177/0018720818814963
- Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2016). Is take-over time all that matters?: The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis and Prevention*, 92, 230-239. DOI: 10.1016/j.aap.2016.04.002

원고접수: 2023.06.30

수정접수: 2023.08.08

게재확정: 2023.08.15