조건부 자율주행시 주행환경 변화에 따른 제어권 전환 안정화 시간 영향 분석

Analyzing the Impact of Changes in the Driving Environmenton the Stabilization Time of Take-over in Conditional Automation

박 성 호* · 이 경 진** · 윤 정 은*** · 김 예 진**** · 윤 일 수*****

* 주저자 : 아주대학교 혁신융합사업단 연구조교수
** 교신저자 : 아주대학교 D.N.A.플러스융합학과 교통공학전공 석박사통합과정
*** 공저자 : 아주대학교 D.N.A.플러스융합학과 교통공학전공 박사과정
**** 공저자 : 아주대학교 D.N.A.플러스융합학과 교통공학전공 석박사통합과정
***** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Sungho Park* · Kyeongjin Lee** · Jungeun Yoon** · Yejin Kim** · Ilsoo Yun***

* Center for Convergence and open Sharing, Ajou University
** Dept. of D.N.A. Convergence, Major in Transportation Eng., Ajou University
*** Dept. of Transportation System Eng., Ajou University

† Corresponding author : Kyeongjin Lee, aajom1012@ajou.ac.kr

Vol. 22 No.6(2023)
December, 2023
pp.246~263

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.6.246

Received 20 November 2023
Revised 25 November 2023
Accepted 15 December 2023

ⓒ 2023. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

제어권 전환 안정화 시간(Stabilization time of take-over)은 제어권 전환 이후 운전이 안정화 될 때까지의 시간을 의미한다. 자율주행시스템(autonomated driving system)의 제어권 전환 요청(take-over request) 직후, 운전자는 도로의 주행환경을 인지하고 수동운전을 수행해야하기 때문에 주행환경과 제어권 전환 안정화 시간의 관계를 명확히 규명하는 것은 매우 중요하다. 반면, 제어권 전환 안정화 시간에 대해 특정하여 수행된 기존 연구는 드물었으며, 주행환경을 고려한 연구도 부족한 실정이다. 이 점에 기인하여 본 연구는 드라이빙 시뮬레이터를 활용한 제어권 전환 실험을 수행하고, 실험 결과를 선형혼합모형(linear mixed model)을 통해 분석하여 제어권 전환 안정화 시간에 영향을 미치는 주행환경 요소를 정량적으로 도출하였으며, 각 영향요인에 따른 제어권 전환 안정화 계수를 도출하였다.

핵심어 : 조건부 자율주행, 제어권 전환 안정화 시간, 선형혼합모형, 드라이빙 시뮬레이터

ABSTRACT

The stabilization time of take-over refers to the time it takes for driving to stabilize after the take-over. Following a take-over request from an automated driving system, the driver must become aware of the road driving environment and perform manual driving, making it crucial to clearly understand the relationship between the driving environment and stabilization time of take-over. However, previous studies specifically focusing on stabilization time after take-over are rare, and research considering the driving environment is also lacking. To address this, our study conducted experiments using a driving simulator to observe take-over transitions. The results were analyzed using a liner mixed model to quantitatively identify the driving environment factors affecting the stabilization time of take-over. Additionally, coefficients for stabilization time based on each influencing factor were derived.

Key words : Conditional automation, Stabilization time of take-over linear mixed nodel, Driving simulator

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 필요성

자율주행(Autonomous driving)에 대한 세계적인 관심이 높아짐에 따라 많은 자동차 제작사, 스타트업, IT 기업들이 자율주행 기술개발에 노력하고 있으며, 이에 따라 미국자동차공학회(SAE international, 이하 SAE)에서 정의한 레벨 3 조건부 자율주행(conditional automation)이 상용화 단계에 접어들고 있다(SAE, 2021).

SAE 기준 자율주행 레벨 3 기술은 자율주행시스템(autonomous driving system, ADS)이 사전에 설계된 특정 조건인 운행설계영역(operation design domain, ODD) 하에서만 주행을 담당하며, ADS가 주행할 수 없는 한계에 다다른 경우, 운전자에게 제어권을 넘겨야 한다. 이러한 제어권 전환(take-over) 상황은 운전자가 즉각적으로 제어권 전환 당시의 주변 도로 및 환경을 파악하고 수동 운전(manual driving)을 하는 상황을 수반한다(SAE, 2021). 이때, 주행환경 인지에 지연이 발생하는 경우, 제어권 전환 소요 시간(take-over time, TOT)이 길어지게 되며, 특히 제어권의 수동 전환 직후 운전이 안정화될 때까지의 시간인 제어권 전환 안정화 시간(stabilization time on take-over)에도 영향을 미친다. 따라서 자율주행 상황에서 주행환경은 운전자의 위험도와 ADS의 안전성과 직결되는 매우 중요한 요인이다. 그럼에도 제어권 전환에 영향을 미치는 주행환경 요인에 대해서는 현재까지 충분히 규명되지 않으며, 특히 주행환경에 따른 제어권 전환 안정화 시간에 대한 체계적인 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 주행환경의 변화가 제어권 전환 안정화 시간에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 드라이빙 시뮬레이터(driving simulator)를 활용하여 제어권 전환 실험을 수행하고, 실험의 결과를 통계적 분석 기법인 선형혼합모형(linear mixed model, LMM)을 통해 분석하여 제어권 전환 안정화 시간에 영향을 미치는 주행환경 요소를 도출하고자 한다. 또한 분석 결과를 통해 주행환경 요소에 따른 제어권 전환 안정화 시간의 변화 정도를 확인하고 계수화함으로써 본 연구 결과를 보다 쉽게 활용할 수 있도록 제시하고자 한다.

본 연구를 통해 제어권 전환 안정화 시간에 영향을 미치는 요인을 통계적으로 도출하고, 실험 결과를 계수로 도출함으로써 주행환경 요인이 제어권 전환에 미치는 영향 정도에 대한 직관적인 이해를 도울 수 있을 것이다. 더불어 향후 조건부 자율주행 상용화시 연구 및 관련 산업에 용이하게 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구의 범위 및 절차

본 연구의 공간적 범위는 조건부 자율주행시스템이 가장 먼저 도입될 것으로 예상되는 고속도로를 대상으로 하였다. 경부고속도로의 안성 JC ~ 오산IC 구간을 참조하여 가상 주행 환경을 구축하였다. 본 연구의 내용적 범위는 드라이빙 시뮬레이터를 통해 조건부 자율주행자동차가 고속도로 상에서 제어권 전환이 발생하는 상황을 구축하여 데이터를 수집하고, 데이터 분석을 통해 제어권 전환 안정화 시간에 유의미한 변수를 도출하는 것이다. 이를 위한 연구의 수행 절차는 관련 이론 및 연구 고찰, 실험 설계, 분석방법론, 제어권 전환 안정화 시간 모형 구축, 제어권 전환 안정화 시간 계수 도출, 결론 및 향후 연구과제 도출 순이다.

Ⅱ. 관련 이론 및 연구 고찰

본 장에서는 국내외의 제어권 전환에 대한 기준 현황과 제어권 전환에 관련된 연구를 기술한다.

1. 제어권 전환 기준 고찰

한국에서는 2019년 12월 31일 전세계에서 처음으로 제어권 전환에 대한 안전기준을 제정하였으며, 지속적으로 그 기준을 개정하고 있다.「자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙」제111조의3에 의하면 제어권 전환 요청의 시작은 상황 발생 15초 이전에 시작하며, 예상되지 않는 상황이 발생한 즉시 제어권 전환 요청을 시작해야 한다. 제어권 전환 요청은 안전한 작동을 위해 자동차를 감속시키되 정지시키지는 않아야 한다. 제어권 전환 요청을 했을 때부터 10초 이내에 운전자의 대응이 없으면, 그 이후부터 위험최소화운행(minimum risk maneuver, MRM)을 자동 시작해야 한다. 또한 제어권 전환 요청의 경고에 대해서는 시각·청각, 시각·촉각, 시각·청각·촉각 중 선택해서 복합적인 감각기관을 통해 경고해야 하며, 제어권 전환 요청 이후 4초 이내에 경고 신호를 증폭시키기 시작해야 한다.

자동차 관련 국제 기준의 조화를 위해 국제사회에서는 자동차기준 국제조화 포럼(World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, WP.29)을 유엔 유럽경제위원회(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) 산하에 결성하였고, 현재 미국, 유럽, 일본, 한국 등 주요 국가들이 자동차기준 국제 조화 추진을 위해 활동하고 있다(Lim, 2019). WP.29에서는 2021년 3월 자동 차선유지시스템(automated lane keeping system, ALKS)에 관한 UN regulation no. 157을 발표하였으며, 여기에 제어권 전환에 대한 기준이 포함되어 있다. 제어권 전환이 필요한 주요 상황은 계획된 상황(planned event), 계획되지 않은 상황(unplanned event), 시스템 실패(system failure), 운전자 미인식 또는 안전벨트 해제 등의 상황으로 규정하고 있다(UNECE, 2022).

제어권 전환에 필요한 시간에 대해서는 명확히 제시하고 있지는 않지만, 계획된 상황에서의 제어권 전환은 운전자가 제어권 전환에 응하지 않더라도 MRM을 할 수 있는 충분한 시간을 보장할 수 있도록 조기에 시작되어야 한다고 명시하고 있다. 또한 운전자가 제어권 전환 요구에 응하지 않는 경우, 제어권 전환 시작 10초 후 MRM을 시작할 것을 명시하였다.

2. 제어권 전환 관련 연구 고찰

제어권 전환과 관련된 연구 중 본 연구의 내용적 범위에 해당하는 제어권 전환에 영향을 미치는 요인에 관한 연구에 초점을 맞추어 선행 연구를 검토하였다. 제어권 전환에 영향을 미치는 요인에 대해 메타분석(meta-analysis)를 수행한 기존 선행 연구 결과에 따르면 제어권 전환 영향 요인은 크게 인적요인, 비운전업무(non-driving related task, NDRT), 제어권 전환 요청(take-over request, TOR)을 중점으로 연구가 수행되었다(Zhang et al., 2019; Lee et al., 2022).

Kim et al.(2021)은 레벨 3 수준의 조건부 자율주행 상황에서 수동 운전으로의 제어권 전환을 안전하고 빠르게 이루기 위한 인적요인이 미치는 영향을 조사하였다. 정상 주행 상황, 전방 장애물 발생 상황, 주변 도로의 장애물 및 정체 상황으로 구분하여 드라이빙 시뮬레이터를 활용한 제어권 전환 실험을 수행하였으며, 각 상황에서 운자의 반응에 영향을 미치는 인적요인의 특성을 비교하였다.

TOR에 관한 연구는 TOR의 방식이 제어권 전환에 미치는 영향을 분석하고 효과적인 TOR 방식을 제시하는 연구가 주로 수행되었다. Gomes et al.(2022)는 운전 조건에 따라 지속적으로 조정되는 적응형 촉각 장치(adaptive tactile device, ATD)를 TOR 방식으로 제안하여 운전자의 촉각 피드백을 기반으로 도로 및 시스템에 대해 운전자에게 지속적으로 정보를 제공함으로써 제어권 전환을 원활하게 수행함을 확인하였다. 또한 Barisic et al.(2023)은 자율주행 차량에서 제어권 전환이 발생할 때 운전자의 정신 상태와 반응 시간을 고려한 TOR을 위한 모델인 fallback ready user(FRU)를 제시하였다.

NDRT의 경우, NDRT 수행에 요구되는 감각에 따른 제어권 전환 시간의 변화를 분석한 연구가 주를 이루었다. Zeeb et al.(2016)은 이메일 작성, 신문 읽기, 영상 시청 총 세 가지의 NDRT이 제어권 전환 시간에 미치는 영향을 분석하였다. Wandtner et al.(2018)은 NDRT 수행 여부가 TOT에 미치는 영향을 실험하였다. 실험 결과 NDRT 수행 감각이 청각인 경우 시각적 NDRT보다 TOT가 더 길었다.

이와 같은 영향요인을 복합적으로 고려하여 제어권 전환에 미치는 영향을 분석한 연구도 존재한다. Körber et al.(2016)은 운전자의 연령대와 NDRT의 수행 여부가 제어권 전환 상황에 미치는 영향을 조사하였다. 고령운전자 여부에 따른 NDRT 수행 여부, 교통량, 교통밀도 변수에 변화를 주어 제어권 전환 상황을 겪게 하여 각 조건에 따른 제어권 전환 수행 능력을 확인하였다. Huang and Pitts(2022)는 연령대, NDRT 수행 여부, TOR 방식의 실험 변수가 제어권 전환 상황에 미치는 영향을 조사하였다.

제어권 전환 영향요인에 관한 기존 연구 검토 결과, 제어권 전환에 영향을 미치는 변수는 나이, 성별, NDRT 등인 것으로 판단된다. 이 중 TOR의 방식과 NDRT를 실험 변수로 하는 연구의 비중이 큰 것으로 확인되었으며, 상대적으로 날씨에 관한 연구는 적은 것으로 확인되었다. 특히 기하구조에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 것으로 파악되었다. 또한, 대부분의 연구에서 제어권 전환에 영향을 주는 다양한 요인 중 한두 개의 요인에 대해 독립변수로 설정하여 분석을 실시하였다. 더불어 제어권 전환의 성능을 제어권 전환 시간에 초점을 맞춘 연구가 대다수였으며, 제어권 전환 안정화 시간을 특정하여 분석한 연구는 드물었다. 따라서 본 연구에서는 제어권 전환 안정화 시간에 영향을 주는 다양한 요인의 종합 분석을 위해 교통량, 기하구조, 인적요인, 날씨를 독립변수로 설정하였다.

Ⅲ. 실험 설계

1. 실험 개요

본 연구는 드라이빙 시뮬레이터를 활용하여 실험을 수행하였다. 드라이빙 시뮬레이터는 실제 주행상황을 가상 환경에서 모사할 수 있어 제어권 전환 실험을 조건별로 여러 차례 수행하기에 용이하다. 실험 수행시 고려한 실험 변수는 기하구조, 교통량, 기상환경이며, 각각의 실험 변수의 변화에 따른 제어권 전환 안정화 시간을 측정하였다.

2. 피실험자 특성

본 연구에 참여한 피실험자는 20대 ~ 60대 남녀 중 일상적으로 운전을 하는 인원으로 모집하였다. 1차 실험에서는 49명, 2차 실험에서는 52명으로 총 101명의 피실험자에 대해 실험을 진행하였다. 피실험자의 성별의 경우, 남자 68명, 여자 33명으로 구성되어 있으며 평균 나이는 44.3세이다. 운전경력은 평균 16.3년인 것으로 조사되었다.

3. 실험 변수 선정

실험변수로 제어권 전환에 영향을 미치는 변수 중 중요도가 높을 것으로 판단되는 변수를 선정하기 위해 기존 연구의 고찰을 통해 제어권 전환에 영향을 미치는 요인을 파악하였다. Park et al.(2018)에 의하면 제어

권 전환에 영향을 미치는 요인은 크게 운전자, 차량, 주행 환경 요인으로 구분할 수 있다. 이 중 본 연구에서는 주행 환경 요인에 초점을 맞추어 변수를 선정하였다. 주행 환경 요인에 해당하는 변수는 <Table 1>와 같다. 해당 요인 중 드라이빙 시뮬레이터에서 해당 변수의 구현 가능 여부를 추가로 판단하여 실험 변수에 반영하였다.

<Table 1> Definition of driving environment variables

Category	Content	Definition	Remarks
Road geometry	Type of highway	Type of highway section that is the subject of the experiment among test roads	Basic, weaving, ramp
	Number of lane	Number of operational lanes in each direction	1, 2, 3, 4, 5~
	Gradient	Maximum gradient of roads with inclines among the test roads	-
	Curve radius	Minimum radius of curvature for roads with curves among the test roads	-
Traffic information	Congestion rate	Surrounding traffic volume represented by LOS	LOS A ~ F
	Driving speed	Free-flow speed of autonomous vehicles while in opration	-
	Penetration rate of AV	Proportion of autonomous vehicles among surrounding vehicles	0 ~ 100%
	C-ITS device status	Operational status of C-ITS devices	○ / ×
	Distance to Obstacle	Distance to obstacle during construction zones or obstacle emergence scenarios	-
Environment	Weather condition	Weather conditions of the test road area	Clear, cloudy, rainy, snowy
	Time of day	Presence of light dpending on the time of day in the test road area	Day, night

Reference: Park et al.(2018), Development of Safety Evaluation Scenario for Autonomous Vehicle Take-over at Expressways

주행 환경 요인은 구체적으로 기하구조, 교통상황, 환경 변수로 구분할 수 있으며, 각각의 세부 변수로 다시 구분된다. 기하구조 변수는 고속도로 유형, 차선 수, 구배, 곡선반경이 포함된다. 이 중 고속도로 유형과 차선 수에 비해 구배와 곡선반경이 운전자에게 미치는 영향이 더 클 것으로 판단하였다. 다만, 구배의 경우, 드라이빙 시뮬레이터의 특성상 수배에 따른 변화가 결과에 명확히 반영되지 않을 것으로 판단하여 제외하였다. 따라서 기하구조 변수 중에 곡선반경을 실험 변수로 선정하였다.

교통상황 변수는 혼잡율(교통량), 주행속도, 자율주행자동차 혼입율, C-ITS 설치 여부, 장애물과의 거리 등이 해당된다. 이 중 자율주행자동차 혼입율과 C-ITS 설치 여부는 상대적으로 중요도가 적다고 판단하여 배제하였다. 장애물과의 거리는 제어권 전환 상황 시나리오에 장애물이 포함되지 않으므로 배제하였다. 최종적으로 교통량을 실험 변수로 채택하였으며, 주행속도는 해당 교통량에 따른 속도값을 사용하고 변수로 반영하지 않았다.

환경 변수는 기상 상태와 주야 구분이 해당된다. 본 연구에서는 기상 상태와 주야 구분을 모두 실험 변수로 채택하였다. 기상 상태에 해당되는 맑음, 흐림, 강우, 강설 등의 상황 중 맑음과 강+우의 상황만을 반영하였다. 흐림의 상황은 운전자에게 미치는 영향이 다른 기상 상태에 비해 적다고 판단하여 제외하였으며, 강설의 상황은 드라이빙 시뮬레이터에서 구현하기 어려울 것으로 판단하여 배제하였다. 향후 드라이빙 시뮬레이터의 구현 기술이 발전하면, 실험에서 고려할 수 있는 변수들은 늘어날 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 사용된 드라이빙 시뮬레이터의 기술적 한계를 고려하여 변수들을 선정하였음을 밝힌다. 결론적으로 본 연구에서 최종 선택한 실험 변수는 곡선반경, 교통량, 주야, 기상 상태(맑음, 강우)이며, 이를 반영하여 실험

을 진행하였다.

4. 가상 주행환경 설정

1) 고속도로 환경 구축

본 연구의 공간적 범위는 레벨 3 수준의 자율주행시스템이 우선 도입될 것으로 예상되는 고속도로이다. 따라서 드라이빙 시뮬레이터를 통해 고속도로 환경을 구축하였다. 경부고속도로 안성JC~오산 IC 구간의 기하구조를 참조하여 제작하였다. 해당 구간은 편도 4차선이고 버스전용차로를 운영 중이며 구간의 길이는 13.2km이다. 실험시 버스전용차로를 사용하지 않아 이를 제외한 편도 3차선을 구현하였다. 구간의 길이는 주행속도와 실험 시간을 고려해 약 21km로 설정하였다. 구배는 포함하지 않았으며, 곡선부는 실험에서 필요한 곡선반경과 위치로 변경하여 구현하였다.

2) 곡선반경 설정

본 연구의 실험 변수로 기하구조 요인 중 곡선반경을 선정한 바 있다. 곡선반경의 설정은 운전에 큰 영향을 미치지 않고 자연스럽게 운전할 수 있는 곡선반경과 최소 곡선반경을 대조군으로 설정하였다. 이 중 자연스럽게 운전할 수 있는 곡선반경의 경우 대푯값 설정을 위해 한국도로공사의 고속도로 설계 전문가들에게 설문조사를 실시하여 1,500m로 설정하였다. 그리고 최소 곡선반경의 경우 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」에서 제시된 계산식과 수치를 활용하였다.

가상 고속도로 환경 구축 시 참조한 한국의 경부고속도로 안성JC~오산IC 구간의 설계속도는 100kph인 것으로 확인되었다. 이때 적용되는 횡방향미끄럼마찰계수는 0.11이다. 편경사의 경우, 변화 정도가 실험 결과에 명확히 반영되지 않을 것으로 판단하여 제외하였다. 이를 토대로 최소 곡선반경을 산출하면 약 715m가 도출된다. 본 연구에서는 해당 수치를 참조하여 720m를 최소 곡선반경으로 설정하여 반영하였다.

3) 교통량 및 속도 설정

본 연구에서 교통량의 변화는 서비스수준(level of service, LOS)을 기준으로 적용하였다. 본 연구의 공간적 배경인 고속도로의 경우, LOS는 밀도를 주 효과척도로 하여 판정한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013). 따라서 LOS별 교통량의 기준과 본 연구에서의 적용한 설정값은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Standard and applied values for the LOS of basic freeway sections

LOS	Density(pcpkmpl)	
	Standard value	Applied value
A	≤ 6	4
B	≤ 10	-
C	≤ 14	12
D	≤ 19	16
E	≤ 28	23
F	> 28	34

Reference: Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), Highway Capacity Manual.

1차 실험에서는 전반적인 교통량 변화에 따른 제어권 전환 시간 변화를 알아보기 위해 LOS A, C, E에 대한 실험을 실시하였다. 2차 실험에서는 악의적인 교통상황에서의 제어권 전환 시간의 변화를 알아보기 위해 LOS D, E, F 상황에서 실험을 실시하였다. 전체 실험에서 LOS B를 제외한 모든 교통량 상황에서 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 피실험자 주변을 주행하는 차량 속도 설정을 위해 변수 변화에 따른 속도 변화를 설정하였다. 차량의 속도에 영향을 미치는 변수는 교통량과 강우인 것으로 파악되었다. 따라서 해당 영향변수에 따른 속도변화를 분석하여 반영하였다.

먼저 교통량별 속도 산정을 위해 해당 고속도로 구간의 교통량과 속도 자료를 분석하여 LOS 별 속도를 산정하였다. 조사 기간은 2018년 2월이며, 고속도로 공공데이터 포털에서 제공하는 구간 교통량 및 속도를 1시간 단위로 분석하였다. 분석 결과는 <Table 3>와 같다. 교통량의 평균은 1136.6pcphpl이며, 표준편차는 487.3pcphpl이다. 속도의 평균은 82.9kph이며, 표준편차는 13.8kph이다.

<Table 3> Anseong JC to Osan IC traffic volume and speed statistics(Feb 2018)

Category	N	Mean	Standard deviation
Traffic volume	672	1136.6pcphpl	487.3pcphpl
Driving speed	672	82.9kph	13.8kph

한편, 도로용량편람에서는 LOS별 밀도에 상응하는 교통량을 <Table 4>와 같이 제시하고 있으며, 이에 따라 LOS별 속도를 산정하여 <Table 5>와 같이 적용하였다. 이때, LOS A의 경우, 해당 구간의 제한속도와 동일하게 100kph를 적용하였다.

<Table 4> Basic segment traffic volume by LOS

LOS	Density (pcpkmpl)	Traffic volume (pcphpl, design speed 100kph)
A	≤ 6	≤ 600
B	≤ 10	≤ 1,000
C	≤ 14	≤ 1,350
D	≤ 19	≤ 1,750
E	≤ 28	≤ 2,200
F	> 28	-

Reference: Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), Highway Capacity Manual.

<Table 5> Applied speed by LOS

LOS	Driving speed (kph)
A	100
B	-
C	85
D	80
E	70
F	40

또한 고속도로에서는 지정차로제를 적용하고 있기 때문에 차선 별 주행속도의 차이가 존재한다. 이를 반영하기 위하여 2차선을 기준으로 1차선은 +10kph, 3차선은 -10kph를 적용하였다.

다음으로, 강우에 따른 속도 설정을 위해 안성JC~오산IC 구간의 2018년 1시간 단위 속도 데이터를 취득하여 강우시, 비강우시로 구분하고 속도 차이를 확인하였다. 두 집단의 t-test 수행 결과 <Table 6>와 같이 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 강우시 주행속도가 약 10kph로 감소하는 것으로 나타나 이를 실험에 반영하였다(Park et al., 2020).

<Table 6> 2018 Anseong JC to Osan IC speed T-test results in rainy and non-rainy conditions

Rain presence	N	Mean	Standard deviation	t-value	p-value
During non-rain	7,971	79.7kph	11.1kph	-19.043	0.000
During rain	568	89.4kph	11.7kph		

4) 가상 환경 설정

기상 환경 중 강우 상황과 야간 상황을 구현하여 제어권 전환 시간의 변화를 확인하였다. 강우 상황 구현을 위해 안성JC~오산IC 구간에 해당하는 기상청 데이터를 수집하여 분석한 결과 강우시 평균 강수량은 2.2mm/h였으며, 표준편차는 3.9mm/h인 것으로 분석되었다(Park et al., 2020). 드라이빙 시뮬레이터의 운영 소프트웨어인 SCANeR STUDIO에서는 mm/h 단위로 강우 구현이 불가능하여 피실험자가 비가 오는 것은 인지하나, 시야에 방해가 되지 않을 정도로의 강우를 구현하였다.

야간 환경 구현을 위해 한국 국가기술표준원에서 2007년에 제시한 도로 및 교통의 종류에 따른 도로 조명 등급 기준, 도로의 표면과 반사 특성에 따른 노면등급 기준, 운전자에 대한 도로 조명의 조도 기준을 검토하였으며 이를 통해 안성 JC ~ 오산 IC 구간의 조도 기준을 14lx로 적용하여 고속도로 야간 주행 환경을 구현하였다.

5) 제어권 전환 상황 설정

제어권 전환이 발생하는 상황은 고속도로 본선에서 자율주행 중 시스템 고장으로 인한 제어권 전환 상황을 가정하여 설정하였다. 자율주행으로 주행 중 임의의 지점에서 제어권 전환 알림이 발생하면 피실험자가 브레이크 또는 가속페달을 조작하여 수동운전으로 전환하도록 설정하였다.

본 연구에서는 청각과 시각의 조합을 사용하여 제어권 전환 알림을 설정하였다. 청각 알림은 70db의 알림음이 울리도록 설정하였으며, 제어권 전환이 4초 이내에 이루어지지 않을 경우 점차 증가하도록 설정하였다. 시각알림은 계기판 위치에 별도의 장치를 마련하여 경고 화면을 표출하였다. 시각 알림 장치에는 제어권 전환 알림뿐만 아니라, 현재 제어 주체(운전자인지 자율주행시스템인지)를 표시하였다.

자율주행 레벨 3단계에서는 자율주행시스템 작동 시 운전자의 전방상황 주시에 대한 의무가 없어진다. 자율주행시스템이 작동하는 동안 운전자는 다양한 운전 외 작업을 수행할 것으로 예상됨에 따라 본 연구에서도 이를 반영하여 자율주행시스템 작동 시에 피실험자가 NDRT를 수행하도록 설정하였다. NDRT의 종류와 난이도가 제어권 전환 시간에 미치는 영향을 배제하기 위해 본 연구에서는 피실험자들이 모두 동일한 NDRT를 실시하도록 하였다. 본 연구에서 채택한 NDRT는 arrow task로 별도의 장치에 마련된 화면에 여러 개의 화살표 중 다른 방향의 화살표를 찾는 작업이다.

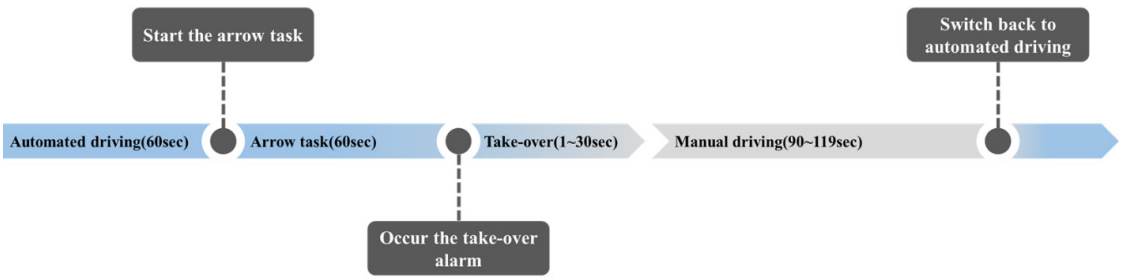
5. 실험 절차

각 실험은 사전 교육, 연습주행, 시험주행의 순으로 진행하였다. 사전 교육은 피실험자의 실험 가능 여부를 확인하고, 실험에 필요한 사항을 교육하는 절차이다. 사전교육시 준비된 자료를 통해 제어권 전환에 대한 설명을 실시하였다. 또한 제어권 전환 상황에서 발생하는 청각 알림음과 시각 알림 화면을 보여주어 실험 주행에서 적절히 대응할 수 있도록 교육하였다.

연습주행은 피실험자들이 드라이빙 시뮬레이터 및 자율주행에 익숙해지기 위한 절차로써 피실험자에게 자율주행시스템의 작동과 자율주행 상태에서의 차량 움직임을 확인시켰다. 또한 시험주행과 유사한 조건에서 제어권 전환 상황을 연습하게 하였다. 연습주행을 실시하지 않을 경우 시험주행에서 피실험자가 제어권

전환 상황을 대처하지 못하는 경우가 발생하며, 이러한 상황에서 수집된 데이터는 분석에 활용이 어렵다. 따라서 수동주행 6분, 자율주행 3분, 제어권 전환 연습 1분 총 약 10분에 걸쳐 연습주행을 실시하였다.

시험주행에서는 변수별 변화에 따른 제어권 전환 및 안정화 시간을 측정하였다. 1차 실험의 경우 교통량, 곡선반경을 변수로 하여 실험을 진행하였다. 교통량은 LOS A, C, E로 설정하였으며, 곡선반경은 직선, 1,500M, 720M로 설정하였다. 두 변수의 조합에 대하여 모두 실험을 실시하였으며, 이에 따라 피실험자 1인당 총 9회의 제어권 전환 상황을 수행하였다. 제어권 전환 상황은 <Fig. 1>의 절차로 구성되며, 자율주행 도중 제어권 전환 알림이 발생하고, 피실험자가 제어권을 인수한 후 일정시간 이상 수동주행을 실시한 후에 다시 자율주행으로 전환하는 방식이다. 각 제어권 전환 상황은 약 4분에 걸쳐서 수행되었으며, 이를 실험변수 조합에 따라 9번 수행하여 피실험자 당 약 36분의 시험주행이 소요되도록 설정하였다. 1차 시험 주행의 구성은 <Fig. 2>와 같다.



<Fig. 1> Configration of take-over situation

<Fig. 2> Configration of experimental driving on the first phase experiment

2차 실험의 경우 교통량, 곡선반경 및 기상 환경을 변수로 실험을 진행하였다. 교통량은 악의적인 상황을 반영한 LOS D, E, F로 설정하였으며, 곡선반경은 직선과 720m로 설정하였다. 기상환경은 맑음, 강우, 야간으

<Table 7> Content and variable configuration for the second experiment

Experimental content	Traffic volume	Curve radius	Weather condition	Exxperiment duration
Traffic volume and road geometry changes	LOS D	Straight	Clear	6 min
		720m	Clear	6 min
	LOS E	Straight	Clear	6 min
		720m	Clear	6 min
	LOS F	Straight	Clear	6 min
		720m	Clear	6 min
Weather conditions changes	LOS D	Straight	Nght	10 min
		Straight	Night + rainy	10 min
		Straight	Raniy	10 min

로 설정하였다. 세 변수의 조합에 따라 피실험자 1인당 총 9회의 제어권 전환 상황을 수행하도록 하였으며, 제어권 전환 상황은 1차 실험과 동일하다. 자세한 실험 내용과 변수 선정에 따른 제어권 전환 실험 소요시간에 관한 내용은 <Table 7>와 같다.

Ⅳ. 분석방법론

1. 데이터 수집

제어권 전환 안정화 시간 분석을 위해 드라이빙 시뮬레이터를 통해 수집되는 차량 데이터를 0.1초 단위로 수집하였다. 수집한 데이터는 시뮬레이션 시간, 브레이크 압력, 가속페달 압력, 기어, 스티어링 휠 각도, 엔진 속도, 차량 속도, 차량 운행 상태(수동주행 및 자율주행 상태 정보) 등이다.

2. 이상치 제거

실험을 통해 수집한 데이터의 수는 총 874개이다. 피실험자 101명을 대상으로 피실험자당 9번의 제어권 전환 상황이 발생하므로 909개의 데이터가 수집되어야 하나, 35개의 데이터가 누락되었다. 데이터가 누락된 이유는 멀미로 인한 실험 중도 포기와 제어권 전환 상황 대처 미흡으로 인한 이상치 제거이다.

드라이빙 시뮬레이터를 비롯한 가상환경의 부작용으로 인해 발생한 사이버 멀미로 인해 실험을 끝까지 완료하지 못하고 중도 포기한 피실험자가 발생하였다. 사이버멀미를 호소한 피실험자는 총 6명이며, 이로 인해 16개의 누락 데이터가 발생하였다.

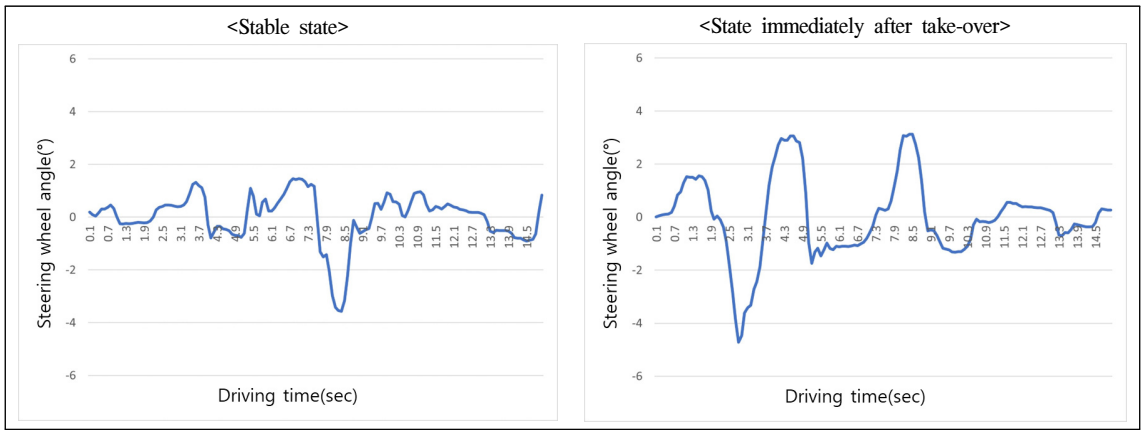
더불어 제어권 전환 상황 발생 시 정상적인 대응을 하지 못해 제어권 전환 시간이 길어지는 경우도 발생하였다. 일부 피실험자들 중 제어권 전환 알림이 발생하였음에도 불구하고 제어권 전환 상황에 대처하지 못하고 당황하는 사례가 발생하여 피실험자 16명으로부터 19개의 이상치 데이터가 발생하였다. 이러한 이상치 데이터는 대부분 시험주행 초기에 발생하였다. 이는 사전교육 및 연습주행이 충분히 이루어지지 않았기 때문으로 판단한다.

3. 제어권 전환 안정화 시간 계측 방법

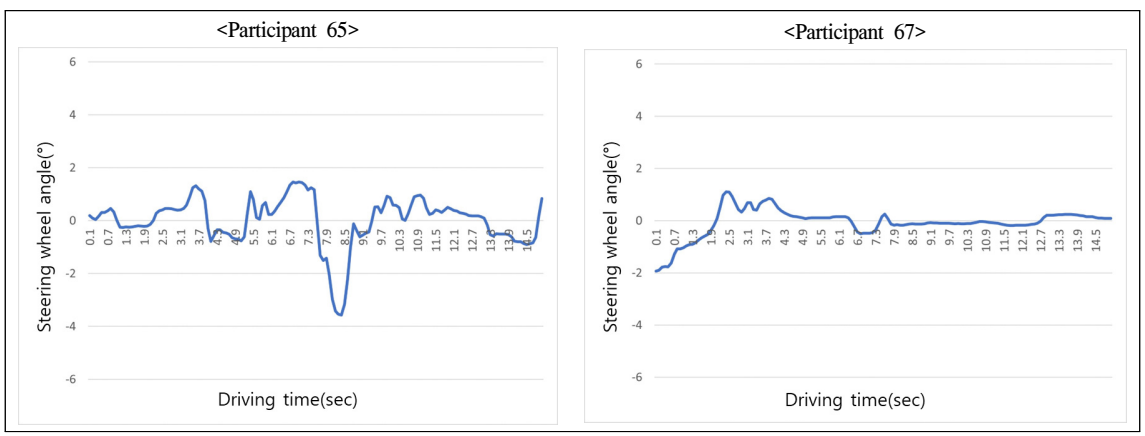
제어권 전환은 운전자가 운전 외 과업에 집중하고 있다가 경고를 받고 다시 운전으로 복귀해야 하는 상황이다. 이와 같은 과정에서 운전자는 다시 주위 상황을 파악하고 운전을 시작하기 위하여 집중하게 된다. 따라서 제어권 전환 직후의 운전자는 평소의 운전 상황 보다는 각성되며, 시간이 지남에 따라 점차 안정된다. 이에 따라 본 연구에서 제어권 전환 안정화 시간은 운전자가 수동운전으로 전환한 이후 다시 안정적인 주행 상태로 돌아오기까지의 시간을 측정하였으며, 계측을 위해 스티어링 휠 각도를 이용하였다.

<Fig. 3>, <Fig. 4>와 같이 스티어링 휠 각도의 특성은 운전자의 상태에 따라 변화하며, 변화의 정도 또한 실험자 별로 상이하다. 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 So et al.(2021)의 연구에서 측정한 방법을 이용하여 제어권 전환 안정화 시간을 측정하였다. 해당 연구에서는 0.1초 당 스티어링 휠 각도의 변화량을 지표로 삼았다. 즉 n초 시점의 스티어링 휠 각도와 n+0.1초 시점의 스티어링 휠 각도의 차이를 지표로 활용하였다. 제어권 전환 안정화 시간 계측은 2초 동안의 스티어링 휠 각도 변화량의 표준편차가 기준값보다 작아

지는 시점으로 판단하였으며, 표준편차의 기준값은 피실험자가 가장 안정적인 상태라고 판단되는 초기의 수동운전 데이터의 표준편차 값으로 설정하였다.



<Fig. 3> Comparison of steering wheel angle between stable state and state immediately after take-over



<Fig. 4> Comparison of steering wheel angles in stable state across participants

4. 데이터 특성 검토 및 모형 구축 방법

본 연구에서 도출된 제어권 전환 데이터는 경시적 자료(longitudinal)에 해당한다. 경시적 자료(Longitudinal data)는 개별 연구가 시간에 걸쳐 반복적으로 관찰되는 것이다(Diggle et al., 2002). 즉, 한 개체 당 다수의 관측치로 구성된 자료이다. 본 연구에서는 제어권 전환 실험시 피실험자 1인당 9회의 제어권 전환을 반복수행하는 것이 이에 해당한다.

경시적 자료는 여러 관측값이 한 개체 내에서 표집되기 때문에 구조적 상관성을 내포하게 된다. 따라서 경시적 자료의 분석은 반복 측정에 의한 상관관계를 고려할 수 있는 분석 방법을 적용해야 한다. 경시적 자료에 적합한 분석 방법은 반복측정분산분석(Repeated Measures Analysis of Variance, RM-ANOVA), 일반화된 선형 모형(General linear mixed model, GLM), 선형혼합모형(Linear Mixed Model, LMM), 일반화추정방정식

(Generalized Estimating Equation, GEE) 등이 있다(Shek and Ma, 2011; Park et al., 2019). 반복측정분산분석은 결측이 있는 개체를 분석에서 제외하기 때문에 편의(deviation)이 발생할 수 있고 자료의 많은 손실을 가져오게 되는 단점이 있다(Kang, 2011). 선형혼합모형과 일반화추정방정식의 차이를 살펴보면 선형혼합모형이 결측치에 대한 가정이 좀 더 유연한 특징이 있다(Lee, 2019). 또한 일반화된 선형 모형은 관측 독립성 가정을 위반한다는 비판을 받는다. 따라서 일반적으로 선형혼합모형이 경시적자료를 이해하고 분석하는데 사용되며, 본 연구 또한 선형혼합모형을 통해 제어권 전환 안정화 시간을 분석하였다(Shek and Ma, 2011). 선형혼합모형은 <Equation 1>와 같이 표현할 수 있으며, 모형 구축은 SPSS 18.0을 이용하여 수행되었다.

$$y = X\beta + Z\gamma + \epsilon \quad \cdots\cdots (1)$$

where, X = fixed effects design matrix
Z = random effects design matrix
β = fixed effects parameters
γ = random effects parameters
ϵ = error term matrix

Ⅴ. 제어권 전환 안정화 시간 모형 구축

1. 기초 통계 분석 결과

제어권 전환 안정화 시간의 기초통계 분석 결과는 <Table 8>와 같다. 평균은 5.45초이며, 표준편차는 4.22초이다. 최소값은 0.1초이며, 최대값은 28.0초인 것으로 나타났다.

<Table 8> Basic statistics of stabilization time of take-over

N	Mean	Standard deviation	Min value	Max value
874	5.45sec	4.22sec	0.1sec	28.0sec

2. 변수별 제어권 전환 안정화 시간 분석

제어권 전환 안정화 시간 분석 또한 제어권 전환 시간과 동일하게 선형혼합모형을 통해 유의한 변수를 도출하였다. 그리고 변수에 따른 제어권 전환 안정화 시간 변화를 분석하였다. 종속변수는 제어권 전환 시간이며, 독립변수는 교통량, 곡선반경, 주야, 강우, 성별, 나이로 설정하였다. 선형혼합모형 구축 결과 곡선반경만이 유효한 변수로 도출되었으며, 검정 통계량은 <Table 9>와 같다.

<Table 9> Test statistics for variable relevant to stabilization time of take-over

Variable	F-value	p-value
Curve radius	16.334	0.000

곡선반경에 따른 제어권 전환 안정화 시간은 다음과 같다. 직선에서 평균 4.667초, 표준편차 0.190초이며,

1,500m에서는 평균 5.621초, 표준편차 0.352초이다. 720m에서는 평균 6.507초, 표준편차 0.265초이다. 추정값 및 대응별 비교 표는 <Table 10>, <Table 11>과 같다. 직선을 기준으로 1,500m에서 0.954초 증가하였으며, 720m에서는 1.840초 증가하는 것으로 분석되었다. 1,500m를 기준으로 720m에서 0.886초 증가하였다.

<Table 10> Estimated stabilization time of take-over based on curve radius

Curve radius	Mean(sec)	Standard deviation(sec)	Degrees of freedom	95% confidence interval	
				Lower limit(sec)	Upper limit(sec)
Straight	4.667	0.190	590.622	4.295	5.039
1,500m	5.621	0.352	545.720	4.929	6.313
720m	6.507	0.265	738.386	5.987	7.026

<Table 11> Comparison of stabilization time of take-over by age group

Curve radius		Mean difference(sec)	Standard deviation	Degrees of freedom	p-value	95% confidence interval for the difference	
						Lower limit(sec)	Upper limit(sec)
Straight	1,500m	-0.954	0.400	638.501	0.052	-1.914	0.006
	720m	-1.840	0.326	798.642	0.000	-2.621	-1.059
1,500m	Straight	0.954	0.400	638.501	0.052	-0.006	1.914
	720m	-0.886	0.440	726.103	0.134	-1.943	0.171
720m	Straight	1.840	0.326	798.642	0.000	1.059	2.621
	1,500m	0.886	0.440	726.103	0.134	-0.171	1.943

제어권 전환 안정화 시간에 유의미한 변수로 곡선반경만이 선정되었다. 그 이유는 제어권 전환 안정화 시간을 계측하는 지표인 스티어링 휠 각도와 연관이 있을 것으로 판단된다. 제어권 전환 직후 스티어링 휠 각도 변화량이 증가하는 것은 운전자가 차선 내 중심선을 찾고 안정된 주행 상태에 이르기 위한 과정으로 추정할 수 있다. 곡선부에서는 차선 내 중심선이 지속적으로 변화한다. 따라서 직선부에 비해 중심선을 찾기 위한 스티어링 휠 각도 변화량이 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 제어권 전환 안정화 시간에 유효한 변수로 곡선반경이 도출된 것으로 판단한다.

3. 모형 구축 및 평가

유효한 변수인 곡선반경을 통하여 구축된 제어권 전환 안정화 시간의 선형혼합모형은 <Table 12>와 같다.

<Table 12> Results of the LMM for the stabilization time of take-over

Variables	Estimated value	Standard deviation	t-value	p-value	95% confidence interval	
					Lower limit	Upper limit
Intercept	6.507	0.265	24.582	0.000	5.987	7.026
Straight	-1.840	0.326	-5.650	0.000	-2.479	-1.200
1,500m	-0.886	0.440	-2.010	0.045	-1.750	-0.021
720m	0	0	-	-	-	-

Note: Duplicate parameters are marked as 0

구축된 선형혼합모형이 적절히 구축되었는 지에 대한 평가가 필요하다. 통계 모형에 대한 평가 방법은 검정법과 모델선택법이 있다. 검정법은 대상 모델의 적합성을 판단하는 절대적 방법이다. 모델선택법은 여러 개의 후보 모델 중 가장 적합한 모델을 선택하는 상대적 방법이다. 검정법은 모델선택법에 비해 더 많은 데이터가 요구되어 일반적으로 모델선택법이 더 많이 사용되고 있다(Noh, 2016). 구축된 선형혼합모형의 적절성을 평가를 위해 본 연구에서는 모델선택법을 활용하였다. 다양한 통계모형에 대한 평가 방법 중 모델선택법은 상대적 비교방법이다(Noh, 2016). 따라서 기준(baseline) 모형과의 비교를 통해 도출된 모형의 적절성을 평가하여야 한다. 일반적으로 모형은 변수가 추가됨에 따라 모형의 예측력이 증가하고 오차가 감소하기 때문에 모형에 독립변수가 추가되지 않은 영 모형(null model)을 기준 모형으로 사용하면 도출된 모형의 적절성을 평가할 수 있다(Garson, 2019).

모형 비교를 위한 지표는 SPSS에서 모형의 적정성 평가를 위해 결과값으로 제시하는 아카이케의 정보 기준(Akaike Information Criterion, AIC), 수정된 아카이케의 정보 기준(corrected Akaike Information Criterion, AICc), 일관된 아카이케의 정보 기준(Consistent Akaike Information Criterion, CAIC), 베이시안 정보 기준(Bayesian information criterion, BIC) 등을 사용하였으며, 해당 지표가 작을수록 모형의 적정성이 높은 것으로 판단한다. 제어권 전환 안정화 시간의 선형혼합모형 평가를 위한 정보는 <Table 13>과 같다. 도출된 모형과 영 모형을 비교 시 도출된 모형의 지표가 모두 낮게 산출되었으며, 이는 도출된 모형이 적절한 것으로 평가할 수 있다.

<Table 13> Appropriateness evaluation metrics for the LMM of stablization time of take-over

Contents	Null-model	Resulting model
AIC	5076.737	5046.797
AICc	5076.946	5047.006
CAIC	5128.685	5098.724
BIC	5119.685	5089.724

Ⅵ. 제어권 전환 안정화 시간 계수 도출

선형혼합모형을 이용하여 제어권 전환 시간 및 제어권 전환 안정화 시간에 유의미한 변수를 도출하고, 각 변수의 변화에 따른 제어권 전환 시간 및 제어권 전환 안정화 시간을 산정하였다. 이 분석 결과를 보다 효율적으로 활용하기 위하여 단순화할 필요가 있다. 따라서 각 변수의 변화에 따른 제어권 전환 안정화 시간을 계수로 도출하였다.

제어권 전환 안정화 시간에 유효한 변수로 도출된 곡선반경에 대해 계수를 도출하였다. 곡선반경 변화에 따른 제어권 전환 안정화 시간은 <Table 14>와 같다.

<Table 14> Stabilization time of take-over by according to curve radius

Curve radius	Mean(sec)	Standard deviation(sec)	95% confidence interval for the difference	
			Lower limit(sec)	Upper limit(sec)
Straight	4.667	0.190	4.295	5.039
1,500m	5.621	0.352	4.929	6.313
720m	6.507	0.265	5.987	7.026

곡선반경 별 제어권 전환 안정화 시간의 이상적인 조건(안정화 시간이 가장 짧은 조건)은 직선이다. 따라서 직선의 평균을 기본값으로 설정하고 각 곡선반경의 상위 95%를 대조군 변화량으로 설정하여 계수를 도출하였다.

<Equation 2>, <Equation 3>을 통해 도출된 제어권 전환 안정화 시간 계수는 곡선반경 변화에 따라 1,500m에서는 1.353, 720m에서는 1.505인 것으로 나타났다.

$$\frac{\text{Upper 95\% stabilization time of take-over in 1,500m curve radius}}{\text{Mean stabilization time of take-over in straight}} = \frac{6.313\text{sec}}{4.667\text{sec}} = 1.353 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\frac{\text{Upper 95\% stabiliazation time of take-over in 720m curve radius}}{\text{Mean stabilization time of take-over in straight}} = \frac{7.026\text{sec}}{4.667\text{sec}} = 1.505 \quad \cdots\cdots (3)$$

제어권 전환 안정화 시간의 환경요인 계수는 곡선반경에 대해 도출되었으며, 기본 시간을 4.7초로 하여 그 결과를 <Equation 4>와 같이 정리할 수 있다.

$$S = S_0 \times R \quad \cdots\cdots (4)$$

where, S = stabilization time of take-over(sec)
S_0 = baseline of stabiliazation time of take-over(4.7sec)
R = curve radius adjustment coefficient

<Equation 5>에 해당하는 곡선반경의 제어권 전환 안정화 시간 보정계수는 <Table 15>와 같다.

<Table 15> Adjustment coefficient for stabilization time of take-over according to curve radius

Variables		Adjustment coefficient
Curve radius	Straight	1.00
	1,500m	1.35
	720m	1.50

본 연구에서 도출한 제어권 전환 안정화 시간의 환경요인 계수를 통해 향후 부분 자율주행자동차의 주행환경 변화에 따른 제어권 전환 및 제어권 전환 안정화 시간을 보다 유연하게 제공하고 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 예를 들어 기본적인 제어권 전환 안정화 시간을 설정하여 주행 관련 사항을 안내하지만, 운전자 모니터링 시스템 등을 통하여 운전자의 나이, 성별 그리고 날씨 및 도로여건 등을 고려하여 추가적인 시간을 부여할 수 있으며, 이 경우 본 연구에서 제시한 환경요인 계수 값을 적용할 수 있다고 판단된다.

Ⅶ. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구의 목적은 주행환경의 변화가 제어권 전환에 미치는 영향을 분석하는 것으로, 특히 주행환경 중 교통량 및 기하구조와 기상상황이 제어권 전환 안정화 시간에 미치는 영향을 분석하였다.

제어권 전환 실험을 위해 드라이빙 시뮬레이터를 이용하여 가상 주행환경을 구축하였으며, 고속도로를 대상으로 하였다. 기존 연구 고찰을 통해 제어권 전환에 영향을 미치는 주행환경 변수를 교통량, 곡선반경, 기상환경으로 선정하였다. 드라이빙 시뮬레이터에서 해당 변수의 변화를 구축하였다. 본 연구에서 설정한 제어권 전환 상황은 자율주행시스템으로 주행 중 자율주행시스템이 고장으로 인한 제어권 전환 발생 상황이다. 자율주행시스템으로 주행 중 피실험자에게 NDRT의 종류 중 하나인 arrow task를 수행하도록 하였으며, 제어권 전환 알림은 시각과 청각을 동시에 사용하였다. 실험절차는 사전교육, 연습주행, 시험주행 순이다.

피실험자 101명을 대상으로 874개의 유효한 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 이용하여 제어권 전환 안정화 시간을 도출하였다. 제어권 전환 안정화 시간의 평균은 5.45초이며, 표준편차는 4.22초로 나타났다. 실험 결과를 바탕으로 선형혼합모형을 통해 제어권 전환 안정화 시간에 영향을 미치는 유의한 변수를 도출하였으며, 그 결과 곡선반경이 제어권 전환 안정화 시간에 유의한 변수인 것으로 나타났다.

제어권 전환 안정화 시간에 유의한 독립변수의 변화에 따른 계수를 도출하여 향후 부분 자율주행자동차 상용화시 본 연구의 결과를 보다 용이하게 적용할 수 있도록 하였다. 제어권 전환 안정화 시간의 이상적인 조건은 직선이며, 곡선반경의 변화에 따른 계수를 도출하였다. 도출 결과 1,500m에서는 1.35, 720m에서는 1.50인 것으로 도출되었다.

본 연구의 한계점은 제어권 전환에 대한 실험을 실차 실험이 아닌 드라이빙 시뮬레이터를 이용한 가상 환경에서 실시한 것이다. 다양한 환경에서 변화하는 제어권 전환에 대한 분석을 용이하게 하기 위하여 현실을 모사한 드라이빙 시뮬레이터를 사용하였지만, 해당 결과가 실차 실험과 완전히 동일할 수는 없다. 물런, 드라이빙 시뮬레이터의 주행환경을 최대한 현실과 가깝도록 만들기 위해 많은 시간과 노력이 투입되지만, 현재의 기술적 한계로 인하여 분명한 현실과의 괴리가 존재한다. 그 결과 실험에 참여한 사람들 중 멀리를 호소하여 실험을 중단하는 사례가 발생하였다. 따라서, 향후 부분 자율주행자동차를 이용한 실차 실험을 통해 본 연구에서 도출된 결과를 다시 한번 검증해 볼 필요가 있다고 판단된다. 또한 제어권 전환에 영향을 미치는 다양한 주행환경에 대한 추가 분석이 필요하다. 본 연구에서는 교통량, 곡선반경, 강우, 주야에 대해서만 실험을 실시하였지만, 이외에도 제어권 전환에 영향을 미칠 것으로 판단되는 편경사, 구배 등의 기하구조 요소와 안개, 강설 등의 기상 요소에 대한 분석이 필요하다. 다양한 변수에 대해서 추가 분석이 이루어진다면 제어권 전환에 취약한 주행환경을 도출할 수 있을 것으로 기대되며, 더 나아가 자율주행 기술의 상용화 과정에서 발생할 수 있는 안전상의 위험을 감소시키고, 향후 자동차 산업의 기술적 발전에 기여할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(RS-2022-00142239)에 의해 수행되었습니다. 본 논문은 박성호의 박사학위논문에 게재되었던 내용을 수정·보완하여 작성하였습니다.

REFERENCES

Barisic, A., Sigrist, P., Oliver, S., Sciarra, A. and Winckler, M.(2023), “Driver model for Take-Over-Request in autonomous vehicles”, *Adjunct Proceedings of the 31st ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, pp.317-324.

Diggle, P., Diggle, P. J., Heagerty, P., Liang, K. and Zeger, S.(2002), *Analysis of Longitudinal Data*, Oxford University Press.

Garson, G. D.(2019), *Multilevel Modeling: Applications in STATA®, IBM® SPSS®, SAS®, R and HLMTM*, Sage Publications.

Gomes, G. D., Flynn, R. and Murray, N.(2022), "Continuous-time feedback device to enhance situation awareness during take-over requests in automated driving conditions", *Proceedings of the 13th ACM Multimedia Systems Conference*, pp.319-323.

Huang, G. and Pitts, B. J.(2022), "The effects of age and physical exercise on multimodal signal responses: Implications for semi-autonomous vehicle takeover requests", *Applied Ergonomics*, vol. 98, p.103595.

Kang, Y.(2011), *Exploration of Optimal Statistical Methods to Analyze Longitudinal Data with Missing Values for Clinical Research Involving Knee Arthroplasty*, Master's Thesis, Dankook University Graduate School.

Kim, H., Kim, W., Kim, J., Lee, S. J., Yoon, D. and Jo, J.(2021), "A study on re-engagement and stabilization time on take-over transition in a highly automated driving system", *Electronics*, vol. 10, no. 3, p.344.

Körber, M., Gold, C., Lechner, D. and Bengler, K.(2016), "The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving", *Transportation Research. Part F, Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 39, pp.19-32.

Lee, K., Park, S., Park, G., Park, J. and Yun, I.(2022), "Analysis of Factors Affecting the Take-over Time of Automated vehicles Using a Meta-analysis", *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 4, pp.167-189.

Lee, S.(2019), *Association between handgrip strength and cognitive function in the elderly: Korean longitudinal study of aging (2006-2016)*, Doctoral Dissertation, Yonsei University Graduate School of Public Health.

Lim, J.(2019), "The Monthly Status of the International Vehicle Regulations in UNECE," *Auto Journal*, vol. 41, no. 5, pp.47-51.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), *Korea Highway Capacity Manual*, pp.12-53.

Noh, Y.(2016), "A Comparison Study on Statistical Modeling Methods", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 17, no. 5, pp.645-652.

Park, S., Jeong, H., Kim, K. H. and Yun, I.(2018), "Development of Safety Evaluation Scenario for Autonomous Vehicle Take-over at Expressways", *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 2, pp.142-151.

Park, S., Jeong, H., Kwon, C., Kim, J. and Yun, I.(2019), "Analysis of Take-over Time and Stabilization of Autonomous Vehicle Using a Driving Simulator", *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 4, pp.31-43.

Park, S., Yun, Y., Ko H., Jeong, H. and Yun, I.(2020), "Analysis of the influence of Road·Traffic conditions and weather on the take-over of a conditional autonomous vehicle", *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 6, pp.235-249.

SAE International(2021), *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles*, pp.1-32.

Shek, D. T. and Ma, C.(2011), “Longitudinal data analyses using linear mixed models in SPSS: Concepts, procedures and illustrations”, *The Scientific World JOURNAL*, vol. 11, pp.42-76.

So, J. J., Park, S., Kim, J., Park, J. and 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*, vol. 2021, pp.1-13.

United Nations Economic Commission for Europe(UNECE)(2022), *Proposal for the 01 series of amendments to UN Regulation No. 157(Automated Lane Keeping System)*, Economic and Social Council, pp.1-32.

Wandtner, B., Schmidt, G., Schoemig, N. and Kunde, W.(2018), “Non-driving related tasks in highly automated driving-effects of task modalities and cognitive workload on take-over performance”, *AmE 2018-Automotive Meets Electronics; 9th GMM-Symposium*, VDE, pp.1-6.

Zeeb, K., Buchner, A. and 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*, vol. 92, pp.230-239.

Zhang, B., De Winter, J., Varotto, S., Happee, R. and Martens, M.(2019), “Determinants of take-over time from automated driving: A meta-analysis of 129 studies”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 64, pp.285-307.