

드라이빙 시뮬레이터를 이용한 자율주행자동차 제어권 전환 소요시간 및 안정화 특성 분석

Analysis of Take-over Time and Stabilization of Autonomous Vehicle Using a Driving Simulator

박 성 호* · 정 하 립* · 권 철 우** · 김 종 화*** · 윤 일 수****

* 주저자 : 아주대학교 건설교통공학과 박사과정
 ** 공저자 : 아주대학교 건설교통공학과 석사과정
 *** 공저자 : 한국교통안전공단 자동차안전연구원 자율주행실 자율주행정책처 책임연구원
 **** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수

Sungho Park* · Harim Jeong* · Cheolwoo Kwon** · Jonghwa Kim*** · Ilsoo Yun****

* Dept. of Construction and Transportation Eng., Ajou University
 ** Dept. of Construction and Transportation Eng., Ajou University
 *** Korea Automobile Testing & Research Institute, Korea Transportation Safety Authority
 **** Dept. of Transportation Eng., Ajou University
 † Corresponding author : Ilsoo Yun, ilsooyun@ajou.ac.kr

Vol.18 No.4(2019)

August, 2019

pp.31~43

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.4.31>

Received 14 February 2019

Revised 25 March 2019

Accepted 31 July 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

SAE 기준 3단계의 자율주행자동차에서는 필요 시 운전의 주체가 시스템에서 운전자로 또는 그 반대로 이전되는 제어권 전환(take-over)이 발생하게 된다. 이때 안전한 제어권 전환을 위해서는 다양한 도로환경에서 여러 계층의 운전자들이 안전하게 제어권 전환을 완료하는 데 필요한 시간을 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 자율주행자동차의 제어권 전환의 안전성을 확보하기 위해 제어권 전환 소요시간 및 안정화 특성을 분석하였다. 이를 위해 드라이빙 시뮬레이터를 활용하였으며, 고속도로와 유사한 상황을 설정하여 실험을 진행하였다. 다양한 성별 및 나이를 가진 50명의 운전자가 실험에 참가하였고, 각 피실험자별로 교통량과 기하구조의 변화를 주어서 다양한 상황에 따른 제어권 전환 소요시간 변화와 안정화 특성을 측정하였다. 실험 결과, 제어권 전환 소요시간은 평균 2.3초였으며 표준편차는 0.1초로 분석되었다. 또한 안정화 특성 분석 결과, 고속도로 교통량 차이에 따른 제어권 전환 안정화 시간은 차이는 없었으며, 곡선반경의 변화에 따라서는 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다.

핵심어 : 자율주행자동차, 제어권 전환, 드라이빙 시뮬레이터, 인간공학, 안정화

ABSTRACT

Take-overs occur in autonomous vehicles at levels 3 and 4 based on SAE. For safe take-over, it is necessary to set the time required for diverse drivers to complete take-over in various road conditions. In this study, take-over time and stabilization characteristics were measured to secure safety of take-over in autonomous vehicle. To this end, a virtual driving simulator was used to set up situations similar to those on real expressways. Fifty drivers with various sexes and ages participated in the experiment where changes in traffic volume and geometry were applied to measure change in takeover time and stabilization characteristics according to various road conditions. Experimental results show that the average take-over time was 2.3 seconds and the standard deviation

was 0.1 second. As a result of analysis of stabilization characteristics, there was no difference in take-over stabilization time due to the difference of traffic volume, and there was a significant difference by curvature changes.

Key words : Autonomous vehicle, Take-over, Virtual driving simulator, Ergonomics, Stabilization

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

자율주행자동차(autonomous vehicle)는 운전자 또는 승객의 조작 없이 자동차 스스로 운행이 가능한 자동차로 알려져 있다. 하지만, 미국 자동차공학회(Society of Automotive Engineers, SAE)에서 제시한 기준에 따르면 자율주행자동차는 기술의 발전에 따라 0~5단계로 분류된다(NHTSA, 2017). 3단계에서는 필요에 따라 자율주행자동차 시스템과 운전자 사이의 운전 주체가 변경되는 제어권 전환(take-over)이 발생한다(Roche et al., 2018). 여기서 필요한 때란 자율주행자동차 시스템의 운영설계범위(operational design domain, ODD)를 넘어설 때, 자율주행자동차 시스템이 여러 가지 이유로 더 이상 스스로 운행할 수 없다고 판단할 때, 또는 운전자가 스스로 운전하고자 할 때 등이다. 자율주행 중 시스템이 운전자에게 제어권을 이양하는 경우에는 운전자가 즉각적으로 운전을 할 수 있는 상태가 아닐 가능성이 높다. 따라서 이러한 경우에는 제어권 전환에 충분한 시간이 주어져야 하며 이는 안전한 주행에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 조건에서 제어권 전환에 소요되는 시간을 측정하여 안전한 제어권 전환을 도모하고자 한다. 제어권 전환 소요시간은 제어권 전환이 발생하는 시점의 도로환경에 따라 영향을 받을 수 있다. 이에 본 연구에서는 제어권 전환 소요시간에 영향을 주는 많은 요인 중 교통량과 곡선반경을 변수로 하여 제어권 전환 소요시간에 어떠한 영향을 미치는지를 다양한 특성을 갖춘 운전자들을 대상으로 드라이빙 시뮬레이터(virtual driving simulator)를 이용하여 분석하였다.

또한 시스템으로부터 운전자로 제어권 전환이 이루어진 이후에도 운전자들이 얼마나 운전을 할 수 있는 준비가 되어 있는 지도 중요하다. 자율주행 중 운전자가 주위 상황에 집중하고 있지 않는 경우, 제어권 전환 직후 운전자의 상태는 평소의 운전 상태와 다를 확률이 크다. 운전이 집중하고 있지 못한 상태이기 때문에 평소의 운전 상태로 복귀하기 까지 시간이 소요된다. 따라서 제어권 전환 이후 평소의 운전 상태와 동일한 상태에 이르기까지에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 제어권 전환 이후의 상황을 고려하기 위하여 제어권 전환 이후의 안정화 특성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 연구의 범위 및 절차

본 연구의 공간적 범위는 자율주행이 가장 먼저 도입될 것으로 예상되는 고속도로로 설정하였으며, 다양한 연령의 남·여 피실험자 50명을 대상으로 교통량과 곡선반경의 변화에 따른 제어권 전환 소요시간 및 안정화 특성을 분석하였다. 연구 절차는 관련 연구 고찰, 실험 설계, 실험 수행, 결과 분석의 순서로 이루어졌다. 관련 연구 고찰 단계에서는 제어권 전환 소요시간 측정과 관련된 기존의 연구에 대해 검토하였다. 실험 설계 단계에서는 드라이빙 시뮬레이터 설정, 제어권 전환 상황 설정 등 연구 목적에 부합하는 실험 설계를 실시하였다. 실험 수행 단계에서는 피실험자에 대해 사전교육, 연습주행, 시험주행의 순서대로 실험을 진행

하여 제어권 전환 소요시간을 측정하였다. 결과 분석에서는 피실험자 별로 수집된 제어권 전환 소요시간에 대하여 이상치 제거를 실시하고, 변수 별 제어권 전환 소요시간의 변화를 분석하였다. 또한 제어권 전환의 안정화 시간을 측정하기 위하여 분석 방법론 고찰을 통해 방법론을 선정하였다. 선정된 방법론을 통해 제어권 전환 안정화 시간을 분석하였다.

II. 관련 연구 고찰

제어권 전환과 관련된 기존 연구들은 크게 제어권 전환 소요시간, 제어권 전환 알림 방법론, 시스템과 관련된 정보(시스템의 신뢰도, 한계 등) 등 크게 세 가지 범주로 나누어 볼 수 있다(Kim et al., 2018). 본 연구는 제어권 전환 소요시간 측정에 관한 범주에 속하므로 이와 관련된 연구를 고찰하였다.

Hergeth et al.(2017)은 사전교육(familiarization)이 제어권 전환 소요시간, time-to-collision(TTC, 충돌 예상시간) 등에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 110명의 피실험자를 드라이빙 시뮬레이터를 통해 실험을 실시하였으며, 피실험자를 사전교육의 정도에 따라 사전교육 없음, 설명에 의한 교육, 실험에 의한 교육, 설명과 실험에 의한 교육 등 네 가지 그룹으로 구분하여 두 번 제어권 전환 실험을 실시하였다. 제어권 전환 소요시간에 관련된 실험 결과를 살펴보면, 첫 번째 제어권 전환 소요시간 측정에서는 설명에 의한 교육과 설명과 실험에 의한 교육 그룹은 약 2.5초, 실험에 의한 교육 그룹은 약 3.0초, 사전교육 없음은 약 3.5초로 측정되었다. 그리고 두 번째 제어권 전환 소요시간 측정에서는 네 그룹 모두 약 2.0~2.3초의 분포를 나타내었다. 또한 제어권 전환 상황(제어권 전환 요청 시점부터 제어권 전환 시점까지)에서 측정된 최소 TTC와 최대 가속도를 척도로 제어권 전환의 질(quality)을 평가하였다.

Gold et al.(2016)은 교통류 밀도에 따른 제어권 전환 소요시간 및 제어권 전환 질에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 드라이빙 시뮬레이터를 통해 72명의 피실험자의 데이터를 수집하였으며, 밀도는 0대/km, 10대/km, 20대/km로 설정하였다. 밀도에 따른 제어권 전환 소요시간 실험 결과, 0대/km에서는 2.6초, 10대/km에서는 3.4초, 20대/km에서는 3.5초가 소요되는 것으로 분석되었다. 제어권 전환의 질을 평가하기 위한 변수로서 종방향 최대 가속도, 횡방향 최대 가속도, TTC 등을 측정하였다.

Yoon et al.(2019)는 운전 외 과업(non-driving-related task, NDRT)과 알림 방법의 조합에 따른 제어권 전환 소요시간을 측정하였다. NDRT는 없음, 전화 통화, 스마트폰 사용, 비디오 시청 등 네 가지 대조군을 설정하였다. 알림 방법은 시각, 청각, 촉각 및 알림 방법 별 조합 등 7가지 대조군으로 구성하였다. 20명의 피실험자들이 참여하였으며 드라이빙 시뮬레이터를 통해 실험을 진행하였다. NDRT 별 제어권 소요시간 변화를 살펴보면 NDRT가 없는 경우 2.31초, 전화 통화는 2.29초, 스마트폰 사용은 2.63초, 비디오 시청은 2.10초로 측정되었다.

기존의 연구들을 살펴보면 다양한 변수들의 변화를 통해 제어권 전환 소요시간의 변화를 측정하였다. 제어권 전환 소요시간 뿐만 아니라 질을 평가하기 위해 TTC, 최대 가속도 등을 척도로 하여 측정하였다. 본 연구에서는 제어권 전환 소요시간에 영향을 미칠 것이라고 판단되는 변수 중 기존 연구에서 고려되지 않은 기하구조 요소에 대한 분석을 실시하였다. 또한 제어권 전환의 질을 평가하기 위한 방안으로 분석 범위를 제어권 전환 이후로 시간적 범위를 확장하여 제어권 전환 안정화 시간 측정을 시도하였다.

Ⅲ. 실험 방법

1. 실험 설계

드라이빙 시뮬레이터를 이용하는 실험에 참가하는 피실험자는 일상적으로 운전을 하는 20대~60대를 대상으로 총 50명이다. 50명 중 남자가 36명, 여자는 14명으로 구성되었다. 평균 나이는 44.8세이며, 연령 대 별로는 20대가 5명, 30대가 15명, 40대가 9명, 50대가 15명, 60대가 6명으로 구성되었다. 운전경력력은 평균 16.4년으로, 10년 미만인 12명, 10년 이상 20년 미만인 16명, 20년 이상 30년 미만인 18명, 30년 이상 경력자가 4명으로 구성되었다.

실험을 위해 드라이빙 시뮬레이터를 활용하였으며, 이를 위해 드라이빙 시뮬레이션 프로그램인 SCANNER를 활용하였다. 실험을 위한 맵 구축 및 실험 조건 설정을 위하여 경부고속도로 상행선 중 동탄 JC~오산 IC를 대상구간으로 선정하였다. 따라서 이 대상구간의 고속도로 본선과 유사한 기하구조를 가진 가상도로를 제작하였다. 참고로, 해당 구간의 고속도로로는 4개의 주행차로와 1개의 갓길 가변차로로 구성되어 있으며, 1차선은 버스전용차로로 사용되고, 갓길 가변차로를 적용하지 않는 것을 가정하였기에 실질적으로 3개 차로에서만 주행하도록 설정하였다. 참고로 해당 구간의 제한속도는 110km/h이다.



Source: Korea Transportation Safety Authority's homepage
 <Fig. 1> Driving test using virtual driving simulator

본 연구에서 독립변수로는 교통량과 도로의 기하구조인 곡선반경을 선정하였다. 교통량은 서비스수준 (Level of Service, LOS)를 척도로 하였으며, 대상구간에서 LOS A, C, E에 해당하는 교통량으로 설정하였다. LOS A~F까지 모든 등급에 대하여 실험을 수행하는 것이 이상적이지만, 모든 등급에 대하여 실험을 실시할 경우 실험 횟수가 증가하기 때문에 LOS C를 기준으로 하여 LOS A와 E를 대조군으로 실험을 실시하였다. 각 LOS 별 적용 교통량은 도로용량편람에서 제시하는 고속도로 본선의 기준과 대상 구간 여건을 참조하여 각각 4pcpkmpl, 12pcpkmpl, 23pcpkmpl을 적용하였다. 참고로, 본 실험에서는 트럭, 버스 등 차량의 종류에 따른 변수를 최소화하기 위해 교통량은 모두 승용차로 이루어지는 것으로 가정하였다.

고속도로의 기하구조 요소 중 변수로 선정된 것은 곡선반경이다. 고속도로 본선의 기하구조 요소 중 주행에 영향을 미칠 수 있는 것은 구배, 곡선반경, 편경사 등이 있다. 이 중 편경사는 곡선반경과 설계속도의 조합에 의해서 결정되고, 고속도로에서는 구배의 변화가 크지 않으며 드라이빙 시뮬레이터의 특성 상 피실험

자가 구배를 체감하기 어렵다고 판단하여 편경사와 구배를 제외하였다. 결론적으로 고속도로 설계요소 중에서 곡선반경을 변수로 선정하였다. 곡선반경은 고속도로 본선에서 가장 많은 부분을 차지하는 직선을 기본으로 하였으며, 대조군으로 110km/h 주행 시 불편함을 느끼지 않는 곡선반경과 110km/h 주행 시 안전을 보장할 수 있는 최소 곡선반경을 목표로 하였다. 곡선반경 설정 목표에 부합하는 곡선반경 수치를 설정하기 위하여 고속도로 설계 전문가들에게 설문조사를 실시하여 각각 1500m와 720m로 설정하였다.

자율주행 시 주행 속도와 주변 차량의 주행 속도는 LOS 별로 다르게 설정하였으며, 기하구조를 참조한 구간의 실제 데이터를 분석하여 적용하였다. 2018년 2월 중 평일에 경부고속도로 상행선 동탄 JC~오산 IC 구간을 운행한 차량들을 1시간 단위로 나누어서 시간 별 교통량과 속도를 산정하고, 교통량을 LOS 별로 분류하여 LOS C와 E에 해당하는 속도를 적용하였다. LOS A는 해당 구간의 제한속도인 110km/h를 적용하였으며, LOS C와 E는 데이터 분석 결과에 따라 각각 85km/h, 75km/h를 적용하였다(MLIT, 2013). 고속도로에서 시행 중인 지정차로제로 인해 1차로에 가까울수록 주행속도가 높아지므로, 이를 반영하기 위해 운행에 사용된 3개 차선 중 가운데 차선은 설정된 속도를 적용하였으며 왼쪽 차선은 설정된 속도 +10km/h, 오른쪽 차선은 설정된 속도 -10km/h를 적용하였다.

실험 시 자연스러운 주행을 위하여 독립변수로 설정된 교통량과 기하구조의 변화를 모두 포함하는 맵을 제작하여 실험에 이용하는 것이 이상적이다. 하지만 이러한 경우 실험시간이 길어지기 때문에 운전자들이 멀미(simulator sickness)가 발생할 가능성이 높아져 실험 후반부의 신뢰성이 낮아질 수 있다. 이와 같은 점을 고려하여 기하구조의 변화만을 포함하는 맵을 이용하여 교통량의 변화를 달리하여 3번의 실험으로 나누어 진행되는 방법을 선택하였다(예: LOS C→LOS A→LOS E). 그래서 총 여섯 개의 LOS 변화 순서를 만들어서 랜덤하게 선택하여 실험을 진행하였다.

교통량 별로 주행속도가 다르기 때문에 각 제어권 상황 별로 동일한 시간 간격을 유지하기 위해서는 교통량 별 이벤트 발생 시점이 다르며 이를 맵 전체에서 모두 포함하여야 한다. 각 교통량 별 곡선반경의 실험 순서가 같다면(예:직선→곡선반경 1500m→곡선반경 720m), 맵 초반부에는 직선만 이어지고 후반부에는 곡선이 연속되는 상황이 발생할 수 있다. 이와 같은 형태의 기하구조 배치는 운전의 단조로움을 가져와 피실험자의 집중력이 하락할 수 있으며, 단순 반복되는 패턴으로 인해 피실험자가 제어권 전환 발생 시점을 예상하는 등의 효과로 인해 실험 결과의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다. 제어권 전환 발생 시점과 피실험자의 자연스러운 주행을 위해 기하구조의 배치 순서를 결정하여 랜덤하게 실험에 적용하였다.

제어권 전환 상황은 고속도로 본선을 주행 중 시스템 고장이 감지되어 제어권 전환 요구(take-over request)가 발생하며 운전자는 제어권 전환 요구를 완료한 후 수동운전으로 속도와 차선을 유지하는 상황을 설정하였다. 제어권 전환 실험에서 1번의 이벤트는 자율주행, 제어권 전환 요청, 제어권 전환 후 수동운전, 자율주행 모드 작동의 순서로 이루어지며 약 4분에 걸쳐서 진행되었다. 제어권 전환 요청 시 발생하는 알림은 청각과 시각을 동시에 사용하였으며, 운전자의 차량이 지정된 지점을 통과할 시점부터 알림을 주어 운전자가 제어권을 이양 받거나 30초가 지나면 해제되도록 설정하였다. 청각 알림은 70db의 경고음을 사용하였으며, 시각 알림은 계기판 위치에 별도의 장치를 두어 제어권 전환 시 경고 알림과 수동운전, 자율운전 등의 상태를 표시하도록 하였다.

SAE 3단계에서는 자율주행 상태에서 운전 중일 때 전방주시의 의무가 있지만, 본 실험에서는 운전자가 전방주시를 하지 않을 상황을 가정하여 실험을 수행하였다. 운전자의 주의를 운전 상황이 아닌 다른 것에 집중하게하기 위해 NDRT를 설정하였으며, 운전 외 과업으로 arrow task를 설정하였다. Arrow task는 차량 내부에 별도로 설치된 장치를 통해 상, 하, 좌, 우 방향의 화살표가 나열된 화면을 표출하여 특정 방향의 화살표에 대한 존재 유무를 체크하는 것으로, 8초 간격으로 새로운 화면을 표출하여 운전자가 지속적으로 NDRT에 집중할 수 있도록 하였다.

2. 실험 절차

실험은 사전교육, 연습주행, 시험주행의 순서로 진행되었다. 사전교육은 피실험자가 드라이빙 시뮬레이터에 탑승하기 이전에 실험에 관한 전반적인 설명과 자율주행자동차에 대한 설명, 제어권 전환 요청 시 발생하는 경고음과 화면 등에 대해 교육을 실시하며, 실험에 대한 피실험자의 이해를 높여서 실험 환경에 적응되는 시간을 단축시켜 실험 결과에 대한 신뢰도를 높이는 것이 목적이다.

대부분의 피실험자는 드라이빙 시뮬레이터와 자율주행차량에 대한 경험이 없기 때문에, 실험 시 익숙하지 않은 환경으로 인한 긴장으로 인해 실제 차량을 운전할 때와 상이한 결과가 나올 수 있다. 이를 최소화하기 위해 연습주행 과정을 두어 실험자들이 드라이빙 시뮬레이터에 익숙해지고, 제어권 전환 상황을 연습할 수 있도록 하였다. 연습주행은 수동운전 6분과 자율주행 및 제어권 전환 상황 연습 4분을 수행하여 약 10분에 걸쳐서 진행되었다.

시험주행은 교통량의 변화를 반영하기 위하여 동일한 맵을 이용하여 LOS를 달리하여 세 번의 주행을 실시하였다. 각 주행 별로 세 번의 제어권 전환 상황을 부여하였으며 곡선반경을 달리하여 직선, 720m, 1500m에서 각각 발생하도록 하였다. 자율주행으로 운전 중 특정 지점을 지나면 상황이 발생하여 제어권 전환 요청을 위한 알림이 발생하도록 설정하였다. 각 피실험자는 시험주행을 통해 총 9번의 각기 다른 교통량과 곡선반경에서 제어권 전환 상황을 측정하도록 설계하였다.

각 제어권 전환 상황은 수동주행, 자율주행, 제어권 전환 알림, 제어권 전환 후 수동주행으로 전환 등의 순서로 진행되었다. 자율주행은 약 2분, 제어권 전환 알림과 수동주행으로의 전환 상황을 합쳐서 약 2분으로 한 번의 제어권 전환 상황이 약 4분에 걸쳐서 발생하도록 하였다. 제어권 전환 소요시간 측정은 제어권 전환 알림이 시작한 순간부터 운전자가 제어권을 가져오는 순간(가속페달 혹은 브레이크 페달 조작)까지를 측정하였다.

각 피실험자는 연습주행 10분과 12분 씩 3회의 시험주행을 실시하여 약 45분에 걸쳐 실험을 실시하도록 설계하였다. 가상현실을 체험할 때 일부 사용자는 멀미와 유사한 이상 증상을 겪을 수 있는데 이를 사이버멀미라 한다(McCauley et al., 1992). 이러한 사이버멀미의 정도는 가상현실 콘텐츠의 체험시간 비례하기 때문에 적절한 실험 시간을 지키는 정도에서 설계하였다(Son, 2017). 또한 피실험자에게 사이버멀미가 발생하는 것을 최소화하기 위하여 각 시험주행 사이에 휴식시간을 두었으며 피실험자가 멀미를 호소할 경우 즉시 실험을 중단하였다.

IV. 제어권 전환 소요시간 분석

1. 이상치 제거

총 50명씩 9번의 실험(세 가지 LOS와 세 가지 곡선반경의 조합)을 통해 얻어진 450개의 데이터를 분석에 앞서 이상치 제거를 실시하였다. 이상치 제거는 중위절대편차법(Median Absolute Deviation, MAD)를 이용하였다. MAD은 표본 자료의 중위값을 이용하여 특정 범위를 초과하는 자료들을 제거하기 위한 방법에 해당하며, 표본을 정규분포로 만들기 위한 필터링 기법에 해당한다(Jeong et al., 2013).

$$MAD = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |x_i - x_{median}|$$

$$z_i^{MAD} = \frac{x_i - x_{median}}{MAD}$$

$$x_i = \begin{cases} \text{유지}; & (|z_i^{MAD}| \leq z_{out}) \\ \text{제거}; & (|z_i^{MAD}| > z_{out}) \end{cases}$$

여기에서,

x_i = 변수 x 의 관측값

x_{median} = 변수 x 의 중위값

N = 표본의 관측 개수

Z_i^{MAD} = MAD 에 의한 표준화 점수 (Z score)

z_{out} = 제거변수

MAD 는 자료의 분포를 가정하지 않아도 되며, 표본의 변동성이 커질수록 이상치가 존재할 가능성이 커진다는 기본 가정 또한 합리적이다. 각 데이터의 표준화 점수가 절대값이 3을 넘으면 이상치로 판단하여 제거한다(Lim, 2016, p.17). MAD 를 적용하여 이상치를 제거한 결과 450개의 데이터 중 17개의 데이터가 이상치로 판명이 되었으며, 433개의 데이터가 유효한 데이터로 선택되었다. 이상치로 선택된 데이터의 대부분은 각 피실험자 별 9개의 실험 데이터 중 1, 2번째 데이터가 대부분이었다. 이와 같이 1, 2번째 데이터에 이상치가 집중된 이유는 사전교육 및 연습주행으로도 제어권 전환 상황에 적응하지 못하여 제어권 전환 소요시간이 길어져서 발생한 경우가 많았다.

2. 제어권 전환 소요시간 분석

실험 시 교통량과 곡선반경의 변화를 알아보기 위해 피실험자로부터 교통량과 곡선반경의 조합에 따른 제어권 전환 소요시간에 대해 반복적으로 측정을 하였다. 이와 같이 피실험자에게서 반복적으로 여러 데이터를 수집하는 경우 적합한 분석 방법으로는 반복측정분산분석(Repeated Measures Analysis of Variance, RM-ANOVA), 선형혼합모형(Linear Mixed Model, LMM), 일반화추정방정식(Generalized Estimating Equation, GEE) 등이 있다(Kang, 2011). 반복측정분산분석은 결측이 발생한 경우 결측이 포함되어 있는 개체는 분석에서 제외하고 분석을 하기 때문에 이상치 제거로 인해 결측치가 발생한 본 실험 자료에는 적합하지 않은 것으로 판단하였다. 나머지 분석방법 중 선형혼합모형이 일반화추정방정식에 비해 분석이 다소 용이하여 본 연구에서는 선형혼합모형을 통해 교통량과 곡선반경이 제어권 전환 소요 시간에 미치는 영향을 분석하였다.

LOS 별로 제어권 전환 평균 소요시간을 살펴보면 <Table 1>에서 보인 바와 같이 LOS A에서는 2.3초 및 표준편차 0.1초, LOS C에서는 평균 2.3초 및 표준편차 0.1초, LOS E에서는 평균 2.3초 및 표준편차 0.1초 나타났다. 곡선반경 별로 살펴보면 직선에서는 평균 2.3초 및 표준편차 0.1초, 곡선반경 1500m에서는 평균 2.3초 및 표준편차 0.1초, 곡선반경 720m에서는 평균 2.3초 및 표준편차 0.1초로 나타났다.

<Table 1> Average take-over times by LOSs and curve radius

Radius of curve	LOS A	LOS C	LOS E	Grand mean
Straight	2.3±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.
1500m	2.2±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.	2.2±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.
720m	2.3±0.1 sec.	2.4±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.
Grand mean	2.3±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.	2.3±0.1 sec.	-

검정통계량을 살펴보면 <Table 2>에서 보인 바와 같이 교통량과 곡선반경의 p-value는 각각 0.940과 0.855로 신뢰수준 95%에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 교통량과 곡선반경의 변화가 제어권 전환 소요 시간에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

<Table 2> Test statistics of LOS and curve radius

Type	F-value	p-value
Traffic volume	0.061	0.940
Radius of curve	0.157	0.855

V. 제어권 전환 안정화 특성 분석

1. 분석 지표 설정

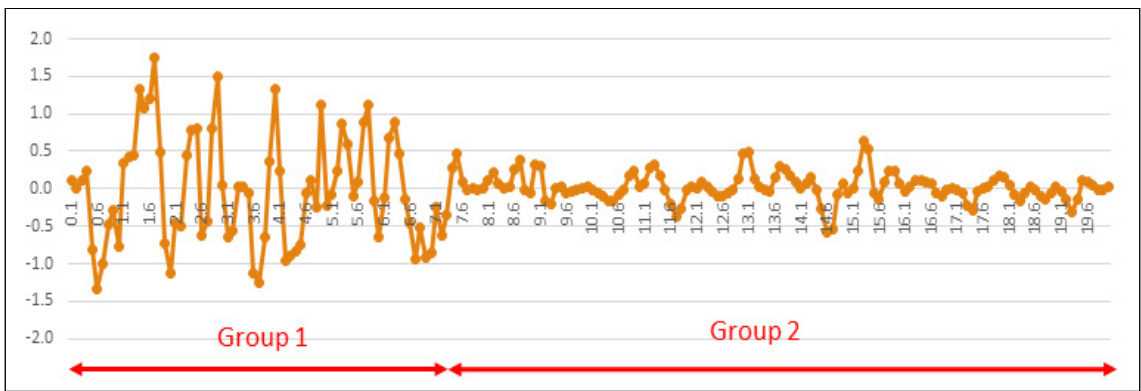
제어권 전환 안정화 특성 분석 목적은 제어권 전환 이후 안정적인 주행으로 복귀하기까지의 시간 등을 측정하는 것이다. 관련 연구 고찰에서 검토한 Hergeth et al.(2017)과 Gold et al.(2016)의 연구에서는 제어권 전환의 품질 측정을 위해 최대 가속도와 TTC를 척도로 하여 측정을 하였다. 하지만, 이러한 연구 사용한 측정 시간의 범위가 제어권 전환 알림 이후부터 제어권 전환 시점까지로 제어권 전환 시간과 동일한 시간에서 측정하였기 때문에 제어권 전환 이후 시점에 대해서 고려할 수 없다. 또한 최대 가속도는 개인 별 운전 습관에 의한 차이가 반영될 수 있기 때문에 객관성이 떨어지며, TTC는 LOS A와 같이 제어권 전환 상황에서 앞 차량이 존재하지 않을 경우 측정이 불가능한 단점이 존재한다. 따라서 기존 연구에 적용되었던 TTC와 최대 가속도는 제어권 전환 안정화 시간 분석의 지표로 부적합한 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 제어권 전환 안정화 시간의 분석 목적에 적합한 새로운 분석 지표를 모색하였다. 분석 지표는 실험을 통해 수집된 차량 데이터 중 가속 페달, 브레이크 페달, 스티어링 휠 각도, 속도 등이 지표로 사용 가능한 데이터로 판단하였다. 이 중 가속 페달, 브레이크 페달은 속도와 직접적인 영향이 있을 것으로 판단되어 배제하였으며, 속도와 스티어링 휠 각도 중 스티어링 휠 각도가 분석 지표로 적절한 것으로 판단하여 선택하였다.

제어권 전환의 장소가 곡선일 경우 스티어링 휠 각도 변화가 곡선을 주행하기 위한 변화인지, 안정화에 이르기 위한 변화인지 구분할 수가 없으므로, 스티어링 휠 각도 변화량을 지표로 하였다. 스티어링 휠 각도 변화량은 분석의 최소 시간 단위의 0.1초를 간격으로 하여, n+0.1초 시점의 스티어링 휠 각도와 n초 시점의 스티어링 휠각도의 차이를 지표로 하였다. 분석 범위는 운전자가 제어권 전환 요청에 응해 수동운전으로 전환한 시점부터 20초까지를 범위로 하였으며, 범위 내에서 스티어링 휠 각도의 변화량이 안정되는 시점을 탐색하였다.

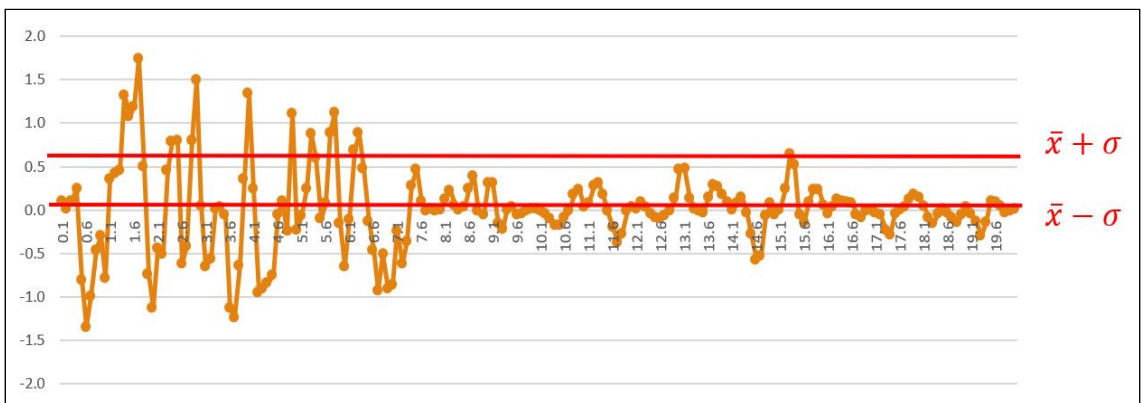
2. 분석 방법론 고찰 및 선정

제어권 전환 직후의 스티어링 휠 각도의 변화량은 피험자마다 다르고 상황 별로 달라 일정한 패턴이 나타나지 않았다. 다양한 패턴에 모두 적용할 수 있는 방법론을 찾기 위해 등분산 검정, 운전자의 데이터 활용 방안 등을 검토하였다. 등분산 검정을 이용한 방법은 <Fig. 2>에서 보인 바와 같이 특정 시점을 기점으로 전과 후를 그룹 1과 그룹 2로 나누어 두 그룹의 등분산 검정을 통해 두 그룹의 분산이 다르게 분석되는 지점을 찾는 방안이다. 그룹 1은 제어권 전환 직후 시점부터 안정화 시점까지의 스티어링 휠 각도의 변화량이며, 그룹 2는 안정화 시점부터 분석 범위(제어권 전환 후 20초)까지의 스티어링 휠 각도의 변화량이다. 등분산 검정을 이용할 경우 두 그룹의 분산이 달라지는 시점이 여러 곳 존재할 수 있으며, 그 중 최적의 지점을 파악하는 것이 어려울 수 있다.



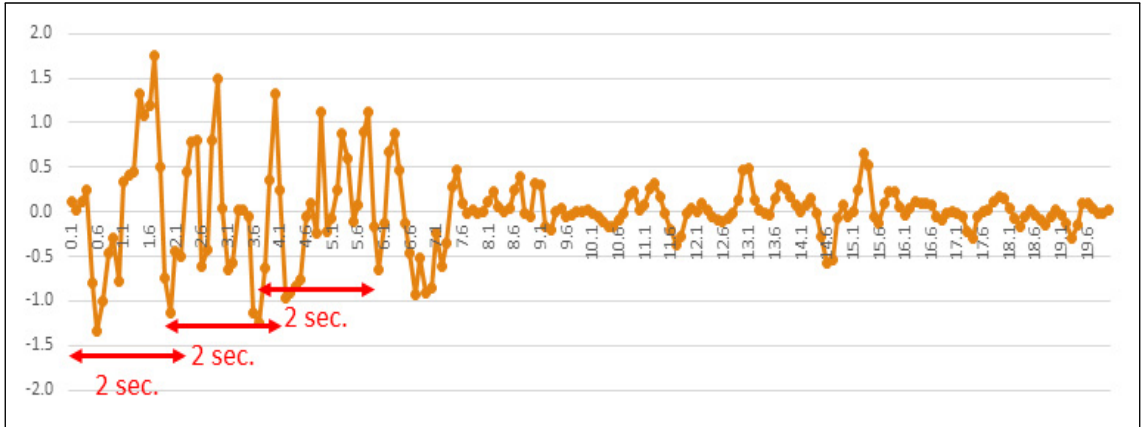
<Fig. 2> Example of group segmentation and stabilization point search using uniform distribution test

두 번째로 고려한 방안은 <Fig. 3>에서 보인 바와 같이 분석 시간(제어권 전환 이후 20초) 내의 데이터 중 표준편차 등의 기술통계를 기준을 정하여 그 기준 값 이하로 연속될 경우 안정화로 판단하는 방안이다. 가장 직관적인 방안이지만 동일한 운전자의 데이터가 상황에 따라 일정하지 않은 패턴으로 나타났기 때문에 단순 기술통계를 기준으로 하는 것은 논리적인 설명력이 약하다.



<Fig. 3> Example of stabilization point search using descriptive statistics of analysis time data

세 번째 방안은 <Fig. 4>에서 보인 바와 같이 각 실험별로 시행되는 초기 수동운전 데이터를 기준으로 설정하여, 분석기간 중 일정기간 이상 기준값 내에 들어오는 시점을 안정화 시점으로 판단하는 방안이다. 실험 초기에 시행되는 수동운전의 데이터를 주어진 환경에서의 기준으로 판단하여, 제어권 전환 후의 데이터와 비교하여 판단한다. 각 개인의 운전특성을 반영할 수 있는 장점이 있지만 실험 초기 데이터와 제어권 전환 직후의 시간적 괴리로 인해 데이터의 연속성이 결여된다.



<Fig. 4> Example of stabilization point search using manual operation data

본 연구에서는 세 가지 대안 중 실험 초기 수동운전 데이터를 활용한 분석 방안을 선택하여 제어권 전환 안정화 시점을 분석하였다. 제어권 전환 후의 스티어링 휠 각도 변화량의 패턴이 피실험자 별, 상황 별로 다른데, 이와 같은 다양한 패턴에 대해 가장 합리적인 기준을 적용할 수 있는 방안이 각 피실험자의 수동운전 데이터라고 판단하였다.

수동운전 데이터의 계측은 주행을 위해 엑셀을 처음 밟는 시점부터 자율주행이 시작하는 시점까지 계측하였으며, 계측된 데이터의 표준편차를 분석 기준으로 하였다. 수동운전 데이터 계측 기간 중 다른 차량의 급격한 끼어들기로 인한 회피 상황 등 일반적인 운전 상황과 크게 다르다고 판단되는 기간의 데이터는 분석에서 제외하였다. 제어권 전환 직후의 분석에서는 2초 단위로 분석을 실시하였으며, 2초 동안의 표준편차가 수동운전에서 도출된 기준값보다 같아지거나 작아지는 시점을 제어권 전환 안정화 시점으로 판단하였다.

3. 제어권 전환 안정화 시간 분석 결과

교통량과 곡선반경이 제어권 전환 안정화 시간에 미치는 영향을 알아보기 위해 제어권 전환 소요시간 분석과 동일하게 선형혼합모형을 통해 분석을 실시하였다. LOS 별로 제어권 전환 소요시간을 살펴보면 <Table 3>에서 보인 바와 같이 LOS A에서는 평균 3.7초 및 표준편차 0.3초, LOS C에서는 평균 5.7초 및 표준편차 0.3초, LOS E에서는 평균 5.8초 및 표준편차 0.3초 나타났다. 곡선반경 별로 살펴보면 직선에서는 평균 5.5초 및 표준편차 0.3초, 곡선반경 1500m에서는 평균 4.4초 및 표준편차 0.3초, 곡선반경 720m에서는 평균 5.3초 및 표준편차 0.3초로 나타났다.

<Table 3> Average stability times by LOSs and curve radius after take-over

Radius of curve	LOS A	LOS C	LOS E	Grand mean
Straight	3.5±0.6 sec.	6.7±0.6 sec.	6.3±0.6 sec.	5.5±0.3 sec.
1500m	4.0±0.6 sec.	4.0±0.6 sec.	5.4±0.6 sec.	4.4±0.3 sec.
720m	3.8±0.6 sec.	6.3±0.6 sec.	5.8±0.6 sec.	5.3±0.3 sec.
Grand mean	3.7±0.3 sec.	5.7±0.3 sec.	5.8±0.3 sec.	-

<Table 4>의 검정통계량을 살펴보면 교통량과 곡선반경의 p-value는 각각 0.058과 0.000으로 곡선반경이 신뢰 수준 95%에서 유의한 것으로 나타났다. 이는 곡선반경이 제어권 전환 안정화 시간에 영향이 있음을 의미한다.

<Table 4> Test statistics of LOS and curve radius

Type	F-value	p-value
Traffic volume	2.868	0.058
Radius of curve	12.268	0.000

구체적으로 곡선반경이 제어권 전환 안정화 시간에 어떠한 영향을 미치는 지 알아보기 위해 대응 별 비교를 실시하였으며 결과는 <Table 5>와 같다. 분석 결과 직선과 곡선반경 1500m, 직선과 곡선반경 720m가 각각 유의 확률 0.000으로 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 직선보다 곡선반경 1500m에서 제어권 전환 안정화 시간이 1.9초 길었으며 직선보다 곡선반경 720m에서 제어권 전환 안정화 시간이 2.1초 길게 나타났다. 즉, 직선보다는 곡선부에서 제어권 안정화 시간이 약 2초 정도 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 곡선반경 1500m와 곡선반경 720m의 차이는 유의확률 1.000으로 곡선반경의 변화에 따른 차이는 나타나지 않았다.

<Table 5> Comparison between different curve radius

Radius of curve		Difference in mean	Standard deviation	Degree of freedom	p-value
Straight	1500m	-1.928	0.467	428	0.000
	720m	-2.084	0.469	428	0.000
1500m	Straight	-0.156	0.467	428	0.000
	720m	1.928	0.466	428	1.000
720m	Straight	2.084	0.469	428	0.000
	1500m	0.156	0.466	428	1.000

VI. 결 론

본 연구에서는 향후 상용화될 자율주행차량에서 필연적으로 발생하게 되는 제어권 전환의 안전성을 확보 하기 위해 제어권 전환 소요시간을 측정하였다. 이를 위해 드라이빙 시뮬레이터를 활용하였으며, 고속도로와 유사한 상황을 설정하여 실험을 진행하였다. 총 50명에 대해 실험을 실시하였으며, 각 피실험자에게 별도 교통량과 기하구조의 변화를 주어서 다양한 상황에 따른 제어권 전환 소요시간 변화를 알아보려고 하였다. 선형혼합모형을 통해 실험결과를 분석한 결과 제어권 전환 소요시간은 평균 2.2초였으며 표준편차는 0.1초였다.

교통량과 기하구조의 변화에 따른 제어권 전환 소요시간의 변화는 나타나지 않았다. 제어권 전환 안정화 시간 분석을 위해서 분석 방법론을 고찰을 통해 등분산 검정 활용 방안, 분석시간 기술통계 활용 방안, 수동운전 데이터 활용 방안 등에 대해서 검토하였다. 검토 결과 실험 초기의 수동운전 데이터의 표준편차를 기준으로 분석하는 것이 적절한 것으로 판단하였다. 선택된 방법론을 통해 분석한 결과 LOS에 따른 제어권 전환 안정화 시간은 차이가 없었으며, 직선보다 곡선반경에서 약 2초 정도의 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다.

향후 연구에서는 좀 더 다양한 기하구조에 대해서 실험을 실시하고 그 영향을 알아볼 필요가 있다. 본 연구에서는 시뮬레이터의 한계로 판단하여 기하구조 중 곡선반경만을 변수로 하였다. 향후 편경사, 구배 등이 구현 가능한 시뮬레이터를 이용하여 다양한 기하구조의 변화에 따른 제어권 전환 소요시간 변화를 측정하여 기하구조 전반에 대한 변화를 파악하여야 한다. 기하구조 뿐만 아니라 교통량 측면에서도 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다. LOS를 기준으로 A, C, E에 대해 실험하였으나 고려되지 못한 B, D, F에 대해서도 실험이 필요하다. 특히 용량 상태 이상의 의미를 갖는 LOS F에 대한 실험이 반드시 추가적으로 필요할 것으로 생각된다. 추가적인 독립변수 이외에도 제어권 전환 소요시간에 대한 심도 있는 분석이 필요하다. 또한 다양한 시나리오를 통한 제어권 전환 소요시간 측정이 필요할 것으로 판단된다. 전방 장애물 출현 등 본 연구에서 이용된 시나리오보다 충돌 및 사고 위험이 높은 시나리오를 이용하여 제어권 전환 소요시간의 변화를 알아볼 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(과제번호 17TLRP-B131486-01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Clark H. and 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*, vol. 106, pp.468-479.
- Gold C., Körber M., Lechner D. and Bengler K.(2016), “Taking Over Control From Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations: The Role of Traffic Density,” *Human Factors*, vol. 58, no. 4, pp.642-652.
- Hergeth S., Lorenz L. and Kreams J. F.(2017), “Prior Familiarization With Takeover Requests Affects Drivers’ Takeover Performance and Automation Trust,” *Human Factors*, vol. 59, no. 3, pp.457-470.
- Jeong Y., Park H. S., Kim B. H. and Kim Y.(2013), “Combined Filtering Model Using Voting Rule and Median Absolute Deviation for Travel Time Estimation,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 12, no. 6, pp.10-21.
- Kang Y. K.(2011), *Exploration of Optimal Statistical Methods to Analyze Longitudinal Data with Missing Values for Clinical Research Involving Knee Arthroplasty*, Dankook University.
- Kim H. J. and Yang J. H.(2017), “Takeover Requests in Simulated Partially Autonomous Vehicles Considering Human Factors,” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 47, no. 5, pp.735-740.

- Kim N., Yang M., Lee J. and Kim J.(2018), "A study on the effect of information types on Drivers in Takeover period of automated vehicles," *Journal of Digital Contents Society*, vol. 19, no. 1, pp.113-122.
- Kim Y. Y., Kim E. N., Jung C. Y., Go H. D. and Kim H. Y.(2002), "The Efficacy of Biofeedback in Reducing Cybersickness in Virtual Navigation," *Science of Emotion & Sensibility*, vol. 5, no. 2, pp.29-34.
- Lim D. S.(2016), *Efficiency Evaluation of Prolonged Green Time Durations at Signalized Intersections*, Kyonggi University.
- McCauley M. E. and Sharkey T. J.(1992), "Cybersickness: Perception of self-motion in virtual environments," *Presence: Teleoperators and Virtual environments*, vol. 1, no. 3, pp.311-318.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Highway Capacity Manual*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Road structures and facilities Commentary Guidelines*.
- National Highway Traffic Safety Administration(2017), *Federal Automated Vehicle Policy*.
- Roche F. and Brandenburg S.(2018), "Should the urgency of auditory-tactile takeover requests match the criticality of takeover situations?," *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, pp.1035-1040.
- Son J. W.(2017), *A Study on The Application Status of Cyber Sickness Mitigation Methods in Korean Virtual Reality Games*, Sangmyung University.
- Yoon S. H., Kim Y. W. and Ji Y. G.(2019), "The effects of takeover request modalities on highly automated car control transitions," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, pp.150-158.