

실도로 기반 E-scooter 경사로 주행 안전성 연구

Analysis of E-scooter Riding Safety on Slopes Based on Real Road

장 일 준* · 이 재 덕** · 안 세 영*** · 노 찬 우****

* 주저자 : 가천대학교 도시계획학과 교수

** 교신저자 : 가천대학교 도시계획학과 연구교수

*** 공저자 : 가천대학교 도시계획학과 박사후 연구원

**** 공저자 : 가천대학교 도시계획학과 석사과정

Iljoon Chang* · Jaeduk Lee* · Seyoung Ahn* · Chanwoo Roh*

* Dept. of Urban Planning., Univ. of Gachon

† Corresponding author : Jaeduk Lee, ljd8860@gmail.com

Vol. 22 No.6(2023)
December, 2023
pp.102~113

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.6.102>

Received 7 November 2023
Revised 18 November 2023
Accepted 21 November 2023

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

요 약

E-scooter의 사용이 증가함에 따라 관련 사고가 증가하는 실정에서 E-scooter의 주행 위험성에 관한 연구가 미비하다. 그러나 기존의 이론적 분석방법은 주로 차량 중심의 방법론으로 E-scooter의 위험성 연구를 위해서는 E-scooter의 경량 및 소형 특성 등을 반영하는 방법론 연구가 필요하다. 이에 본 연구는 E-scooter의 특성을 반영하여 경사로 주행시 운전자가 느끼는 위험속도 및 안정속도를 분석하기 위해 실도로 기반으로 분석하였다. 경사도별 위험속도는 평균 21km/h로 분석되었으며, 경사도가 급격해질수록 초기 위험속도가 감소하였다. 안정속도는 상대적으로 위험성이 낮은 경사도 1~2%를 제외하고 평균적으로 17km/h로 분석되었다. 이러한 연구 결과는 국내에서 추진 중인 개인형 이동장치의 최고속도 하향 제도의 학술적 근거로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : E-scooter, 경사로, 실도로 기반, 위험속도, 안정속도

ABSTRACT

With the increasing use of E-scooters, there is an urgent need for research into their driving risks because of the rising number of related accidents. Existing theoretical analysis methods are primarily vehicle-centered and do not adequately reflect the lightweight and compact characteristics of E-scooters. This study was conducted on real roads to analyze the risk and stable speeds of drivers on longitudinal slopes, considering the unique attributes of E-scooters. The risk speed on slopes was, on average, 21 km/h, with the initial risk speed decreasing as the slope became steeper. The stable speed was determined to be an average of 17 km/h, except on slopes of 1-2%, which presented a relatively low risk. These results are expected to contribute to the academic foundation for policies aimed at reducing the top speed of personal mobility, as is currently being promoted in Korea.

Key words : E-scooter, Slope, Real Road, Risk Speed, Stable Speed

I. 서 론

1. 연구 배경

최근 전동킥보드(Electric Scooter 이하 E-scooter)의 사용률이 급격히 증가함에 따라, 이에 대한 안전성 연구의 필요성이 대두되고 있다(Geels et al., 2017; Degele et al., 2018). E-scooter의 인기가 급증하면서 운전자의 공격적인 운전행태, 불법주행, 사고와 관련된 문제를 포함하여 대중들의 우려가 심각하다(Guo and Zhang, 2021). E-scooter는 자동차 및 자전거에 비해 상대적으로 작은 바퀴크기로 인해 도로의 작은 변화에도 민감하게 반응하여 사고를 유발할 수 있고, E-scooter의 안전성 향상을 위해서는 사고 원인을 정확히 이해하고 이에 대한 적절한 대책 수립이 필요하다(Beck et al., 2020; Prati et al., 2017).

전세계적으로 E-scooter 사고가 증가함에 따라, 많은 국가들이 E-scooter의 최대 속도를 제한하는 방향으로 정책을 변경하고 있다. E-scooter의 안전성을 보장하기 위해서는 안전하게 주행할 수 있는 도로환경 및 인프라 등이 구축되어 있어야 하지만 속도를 제한하는 것이 가장 효율적일 것으로 판단된다. 독일, 이탈리아, 일본 등에서는 E-scooter의 최고 속도를 기존 25km/h에서 20km/h 이하로 낮추었으며 속도 규제는 도로 유형에 따라 차별화되고 있는데, 프랑스를 포함한 일부 국가에서는 보행자 밀집 지역에서의 E-scooter의 속도를 10km/h로 제한하고 있다(Che et al., 2023). 국내에서도 E-scooter를 포함한 개인형 이동장치(Personal Mobility 이하 PM)의 다양한 사회적 문제로 2021년 5월 「도로교통법」을 개정하였으며 개정된 주요 내용은 운전자격 강화 및 처벌 규정 신설이었다. 속도 제한의 필요성이 지속적으로 제기되고 있지만, 현재는 여전히 25km/h의 속도 제한이 유지되고 있다.

특히, 경사로와 같은 특정 주행 환경에서의 E-scooter 사용의 위험성은 사고 발생 위험이 높음에도 불구하고, 이에 대한 체계적인 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 경사로에서의 E-scooter 주행 위험성을 정량적으로 평가할 수 있는 지표가 마련되지 않았기 때문에, 경사로의 위험성을 객관적으로 비교하고 평가하는 것에 한계가 있다. 또한 기존의 이론적 분석 방법은 대부분 자동차를 기준으로 개발된 산정식을 사용하기 때문에, E-scooter와 같은 경량 및 소형 이동수단의 특성을 적절히 반영하지 못한다. 이로 인해 E-scooter 사용자들이 직면할 수 있는 실제 위험성을 과소평가하거나 잘못된 안전 지침을 제시할 수 있는 문제점이 존재한다. 따라서 실제 도로 환경을 대상으로 경사로가 E-scooter의 주행 안전성에 미치는 영향을 직접 측정하고 평가하기 위한 연구가 필요하다.

2. 연구 목적

본 연구는 E-scooter의 주행 안전성에 중대한 영향을 미치는 요소 중 하나인 경사로구간을 대상으로 운전자가 E-scooter 주행 시 위험성을 느끼는 속도와 심리적 안정속도를 분석하였다. 이를 위해 각속도(Gyroscope) 기반 충격강도를 통해 E-scooter가 어느 정도 흔들리는지를 수치로 정량화하여 사용운전자의 주행성을 평가하는 방법론을 제시하였다. 경사로가 운전자의 E-scooter 주행안전에 미치는 영향을 정량적으로 환산할 수 있으며, 안전을 향상시키기 위한 실질적인 E-scooter 주행속도 대책을 모색하고자 하였다. 본 연구결과는 E-scooter 사용자의 안전한 주행을 유도하고 교통사고를 감소시키는데 기여할 수 있다. 본 연구는 E-scooter 주행 안전성에 대한 이해를 심화시키고, 실제 도로 환경에서의 E-scooter 사용자의 안전을 개선하는데 방안을 제시했다는 점에서 중요한 의의를 가진다.

II. 선행 연구

본 연구에서는 E-scooter 위험성 관련 연구와 경사도에 관한 연구로 구분하여 검토하였다. E-scooter 위험성 관련 연구에서는 관련 사고분석을 통한 원인 도출, PM 사고 특성 등에 관한 연구를 검토하였다. 또한 경사로에서의 실차주행 실험을 통한 제동거리 및 위험성 분석 등에 관한 연구를 검토하였다. E-scooter를 대상으로 경사로 주행에 관한 연구가 많지 않아 자전거를 대상으로 하는 경사로 관련 연구를 함께 검토하였으며 선행연구 검토를 통해 본 연구의 차별성을 제시하였다.

1. E-scooter 위험성 관련 연구

현재까지 E-scooter에 대한 관심이 높아지고 있지만 적정속도 및 안전과 관련된 연구는 아직 부족한 상황이며 더 많은 사고관련 데이터가 필요하다(Yang et al., 2020; Todd et al., 2019). 대부분의 E-scooter 안전사고에 관한 연구는 응급실에서 기록된 데이터에 의존하고 있다(Hangle et al., 2015; Badeau et al., 2019). 특히 사고의 20%는 빙판 길, 자갈길과 같은 마찰력이 낮은 도로나 노면의 포트홀, 연석 등에 의한 전도사고로 나타났다(Stigson et al., 2021; Allen-Munley et al., 2004; Basky, 2020; Bloom et al., 2021). James et al.(2019)는 E-scooter가 보도에 부적절하게 주차될 때 안전 문제를 일으킬 수 있다고 분석하였다. APH(2019)는 탑승자를 대상으로 인터뷰한 결과 50%는 도로 포장상태, 37%는 높은 주행속도가 부상의 원인이라고 답변하였다. PM의 주행 안전성을 평가하기 위한 실험에서는 93%의 실험자가 장애물 통과, 경사로 주행, 기기 조정 등이 주행 전 교육이 필요하다고 평가하였다. 또한 도로 종류별 수용성에서 자전거도로, 갓길, 보도 순으로 나타났으며 보도에서는 속도 제한이 필요하다고 하였다(Centre for Electric Vehicle Experimentation in Quebec, 2004, 2006). Carlsson and Lundälv(2019)는 PM 사고의 심각도를 분석한 결과 여름, 주말, 남성의 사고심각도가 상대적으로 높게 나타났다. 국내에서도 마찬가지로 PM 교통사고와 사고 심각도를 분석한 연구들이 진행되었다(Han et al., 2020; Han et al., 2021; Shin, 2023). Han et al.(2020)은 2017년부터 2018년까지 국내에서 발생한 PM 사고를 대상으로 사고 심각도를 분석하고, 도로 및 환경적 요인, 사고특성 요인, 인적요인으로 구분하여 사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 그 결과 이용률이 높은 5월과 시야 확보가 어려운 야간 시간대에 사고 심각도가 높게 나타났으며, 도로 노면 상태는 젖은 상태일 경우와 인적요인은 사고 당사자가 고령일 경우에 사고 심각도가 높은 것으로 나타났다. Han et al.(2021)은 최근 3년간(2017-2019년) 발생한 PM 및 자전거의 교통사고 특성을 분석하여 문제점을 도출하고자 하였다. PM 교통사고의 경우 전체 교통사고와 비교하였을 때 차량 단독사고 비율이 높으며, 도로 노면상태 및 장애물 확인이 어려운 야간 시간대에 사고가 많이 발생함에 따라 관련 규제 및 안전 관련 연구의 필요성을 강조하였다. Kim et al.(2021)도 최근 3년간 발생한 PM 교통사고를 대상으로 운행환경 및 근린 환경요인이 사고에 미치는 영향을 분석하기 위한 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 분석결과, 주로 인구가 밀집한 공간과 면적이 넓은 공간시설에서 교통사고가 증가하여 인구가 밀집되어 있으며, 단거리 이동이 잦은 지역의 주행환경을 개선하고, 면적이 넓은 공간시설의 경우 안전 시설물 설치가 필수적이라고 주장하였다. 문헌 검토 결과 E-scooter는 주행 환경의 변화에 민감하고 인적 요인이 행동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났지만 주행 환경의 물리적 조건과의 상호작용을 설명하는 정량적 데이터는 부족하다. 이를 해결하기 위해 다양한 출처의 단편적인 데이터를 통합하여 안전 문제에 대한 데이터 기반 분석을 수행하려는 노력이 필요하다(Ma et al., 2021). 이는 전통 키보드 운전의 위험을 이해하기 위해 더 많은 데이터 기반 연구가 필요하다는 동기를 부여한다.

2. 경사로 관련 연구

Kim et al.(2021)은 설문조사를 통해 통행구간 내 평균경사도가 높을수록 E-scooter 이용 의향이 높은 것으로 분석하였다. Yazhisaiwendhan and Vella(2022)은 다양한 체중의 실험자들을 대상으로 경사구간에서 후륜브레이크 PM의 제동 시 정지거리를 분석하였으며, 최대 정지거리 5m를 도출하였다. Novotny et al.(2023)은 E-scooter의 제동거리가 경사로와 평지 간에 차이가 있으며, 하방경사 구간의 경우 전력 개입 없이도 제한 속도를 초과하여 주행할 가능성이 있으므로 소프트웨어적 제한 장치가 필요하다고 보았다. Han et al.(2021)은 2017년~2019년 전국 PM교통사고 분석 데이터 수집 결과, 하방 경사로에서 E-scooter가 자전거에 비해 교통사고율이 낮음을 분석하였다. 자전거의 경사로와 관련된 연구인 Jeong(2016)은 실차 주행시험을 통해 경사로에서의 주행 중 위험성을 분석하였으며, 13.8%의 하방 경사로에서 20.2km/h로 주행 중 제동을 가할 경우 후륜 들림이 발생하여 전복 위험이 높은 것으로 도출하였다.

E-scooter의 경사도와 관련된 연구는 미흡한 실정이며, 직접적으로 경사도에 따른 주行的 안전성을 분석한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 E-scooter의 실차주행 방법론을 활용하여 경사도별로 주행속도에 미치는 영향을 분석하는 연구를 진행하고자 한다.

이에 본 연구는 다음과 같은 차별성을 가지고 연구를 진행하였다. 첫째, E-scooter의 주행 특성에 대한 연구가 미흡하며, 실제 주행을 통해 E-scooter의 주행 특성을 파악하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 E-scooter의 각속도 측정을 통해 이동 중에 기울임을 파악하여 경사도별 위험속도 및 안정속도를 도출하였다. 둘째, E-scooter는 운전자의 반응과 밀접한 관련이 있으며, 기존 연구에서는 설문 조사를 통해 주로 정성적인 평가를 수행했다. 따라서 본 연구에서는 실도로를 기반으로 하여 피실험자의 주행데이터를 분석하였다.

Ⅲ. 연구 방법

1. 주행 조사 설계

본 연구에서는 E-scooter의 안전성을 평가하기 위해 실차주행 실험을 실시하였으며 주행 조사 설계는 <Table 1>과 같다. 실제 도로 환경에서의 경사도별로 E-scooter의 주행 안전성에 미치는 영향을 측정하고 운전자가 느끼는 위험속도 및 안정속도를 분석하였다.

현행법에 적합한 E-scooter를 주행 조사 도구로 사용하였다. 다양한 조건으로 E-scooter의 위험성을 테스트하기 위해 6개 범위의 경사도 구간(1~2%, 3~4, 5~6%, 7~8%, 9~11%, 12~14%)을 선택하였다. 주행시간 최소 5초를 확보하기 위하여 경사로가 20m 이상인 구간을 선정하였다.

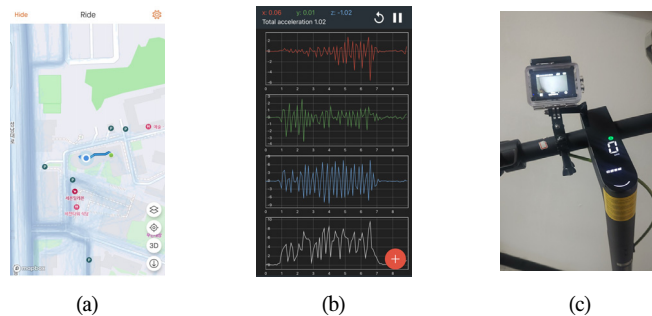
주행실험은 외부요인의 영향을 최소화하기 위하여 교차로·노면장애물·기타 동적환경요소 등으로 인한 영향이 미치지 않는 구간으로서 동일한 포장 재질 및 노면상태를 갖춘 직선구간을 선정하여 건조 상태인 맑은 날 실험을 진행하였다. E-scooter 이용량이 오후 1시에서 오후 5시에 사이에 가장 많이 이용되는 것으로 분석되어 주행 시 시야가 양호한 오후 1시~5시의 주간 시간대에 진행하였다(Jiao and Bai, 2020). 한 국내 공유 킥보드 기업의 최근 1년 자사 데이터 통계에 따르면, E-scooter의 이용률이 높은 연령층은 20대(44.1%)와 30대(21.4%) 순으로 나타났다. 이러한 데이터를 바탕으로, 본 연구의 실험 참여자를 선정하였으며 E-scooter 사용에 유경험자인 20대 2명과 30대 2명의 남성으로 구성하였다. 본 실험에서는 개인의 특성에 따라 위험성 및 안전성을 인지하는 속도가 다를 수 있다는 가정 하에, 네 명의 실험자가 각각 6개의 다른 구간을 30회씩 주행하도록 하였다.

<Table 1> Designing a driving survey

Factor	Description
Product	NAVEE Electric Scooter S65
Road surface conditions	Asphalt (Dry and fine conditions)
Road alignment	Straight
Slope range	1~2% / 3~4% / 5~6% / 7~8% / 9~11% / 12~14%
Minimum length of slope	20m
Exclusion factors	Intersections
	Roadside facility obstacles
	Roadside obstacles
	Dynamic Environments

2. 실험 장치

주행 데이터 수집을 위하여 <Fig. 1>에서 (a) GPS와 속도기록을 위한 어플리케이션(application)과 (b) 각속도를 측정할 수 있는 어플리케이션을 설치한 스마트폰을 활용하였다. 추가적으로 실시간으로 주행환경과 브레이크 조작 시점을 보완 분석하기 위한 (c) 영상 녹화 카메라를 E-scooter에 장착하였다.



<Fig. 1> Experimental Devices

3. 분석 방법

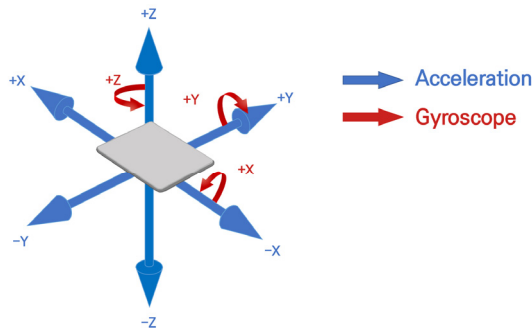
1) E-scooter 운전자의 주행안전성 평가 방법

본 연구는 종단 경사가 다른 환경에서 개인 이동 수단(E-scooter)을 이용하는 운전자들의 주행 안전성 인식을 속도의 차원에서 분석하고자 하였다. 이를 위해 운전자가 위험을 인식하여 브레이크를 처음으로 조작하기 직전의 속도를 ‘위험속도’로, 그 이후 브레이크를 조작 이후 유지되는 속도를 ‘안정속도’로 정의하였다. 주행 안전성을 평가하기 위한 지표로는 충격강도의 변화를 활용하였으며, 충격강도가 급격히 변화하는 변곡점을 브레이크 조작 시점으로, 충격강도가 일정하게 유지되는 구간을 안정성이 확보된 구간으로 간주하였다. GPS 데이터와 속도 측정 어플리케이션을 사용하여 교차분석을 수행함으로써, 해당 시점에서의 속도를 정확히 측정하고 이를 통해 위험속도 및 안정속도를 도출하였다. 추가적으로 피실험자들에게는 안전을 최우선으로 고려하여, 위험하다고 느껴질 때 즉시 브레이크를 작동할 수 있도록 사전에 철저한 교육을 실시하였다. 또한, 각속도를 단독으로 측정하는 방법의 잠재적 오류를 방지하기 위해, 녹화된 카메라 영상검토 및 피실험

자의 음성 녹음을 병행하여 이중으로 검증하였다. 이는 피실험자가 가장 위험하다고 느끼는 순간을 정확히 포착하고, 해당 순간의 각속도 데이터를 더욱 신뢰성 있게 분석하는데 기여하였다.

2) 충격강도의 측정 방법

충격강도는 각속도를 사용하여 산출하였으며, <Fig. 2>와 같이 각속도는 특정 축을 기준으로 회전에 대한 속력 변화를 나타내는 Vector이다. Acceleration은 특정 축을 기준으로 진행 방향에 대한 속도 변화를 나타내는 Vector이며, Gyroscope는 특정 축을 기준으로 회전에 대한 속력 변화를 나타내는 Vector이다. 즉, Acceleration와 Gyroscope는 속도 변화량의 진행 방향을 나타내는 Vector이므로 Acceleration와 Gyroscope의 절댓값이 클수록 속도 변화량이 크다는 것을 알 수 있다. 이를 활용하여 Acceleration는 E-scooter의 진동 및 감속을, Gyroscope는 E-scooter의 기울임을 판단하였다.



<Fig. 2> Acceleration and Gyroscope

이러한 이론을 바탕으로 본 연구의 e-scooter의 3-axis gyroscope를 <Table 2>와 같이 정의하였다.

<Table 2> Descriptions of 3-axis gyroscope

3-axis gyroscope	Descriptions
X axis gyroscope	Changes according to factors that cause left and right shaking, such as road obstacles, etc.
Y axis gyroscope	Change in inclination due to gradient
Z axis gyroscope	Changes due to the steering wheel

본 연구는 각속도를 통해 E-scooter의 기울기 변화를 감지하는데 사용하였다. 각속도 측정 어플리케이션을 통하여 1초당 100개의 각속도 데이터를 수집하여 이를 0.1초 단위의 scalar로 변환하였으며, 그 값을 ‘충격강도’로 정의하였다. 즉, 충격강도는 외부환경에 의해 충격을 받게 되었을 때 E-scooter가 어느 정도 흔들림을 발생하는지를 나타내는 척도이며, 본 연구에서는 경사도 외의 요인을 최대한 제외하여 실험하고자 하였으므로 브레이크 조작에 의한 속도변화의 충격이 충격강도로 나타날 것이다. 충격강도를 도출하기 위한 산정식은 3축 gyroscope의 최댓값과 최솟값을 활용한 Ma et al.(2021)의 방법론을 활용하였다. 이 산정식은 1초 내 변동이 심한 값의 경향을 반영하였으며 본 연구에서는 이를 착안하여 Gyroscope 산정식으로 활용하였다.

$$S_t = \sqrt{(X_{max} - X_{min})^2 + (Y_{max} - Y_{min})^2 + (Z_{max} - Z_{min})^2} \dots\dots\dots (1)$$

IV. 분석결과

6개 구간별로 실험한 결과 총 760개의 주행 데이터를 수집하였으며, 이 중 유효한 데이터 540개를 추출하고 충격강도로 변환하여 평균 충격강도와 해당시점의 속도를 도출하였다. 충격강도 변화가 큰 구간을 분석하여 브레이크 조작 직전의 위험속도와 속도가 유지되는 안정속도를 분석하였다. 경사도별로 분석한 위험속도와 안전속도의 유의성을 검증하기 위하여 일원분산분석(One-Way ANOVA)을 실시하였다. 분산분석은 여러 집단의 평균이 서로 다르다는 것을 검정하는 통계분석 방법으로써, 실험을 통해 분석한 평균속도가 유의함을 검정할 수 있다. 이 때 각 경사도 집단 간의 평균이 모두 같은 모집단에서 추출되었음을 가정하고 모든 집단의 평균은 같다는 귀무가설을 설정하였다.

1. 경사도별 위험속도

E-scooter가 외부요인 없이 주행하다가 운전자의 브레이크 조작으로 인하여 속도가 급격히 감속함과 동시에 자체가 크게 흔들리며 충격강도의 변화가 크게 발생하였으며, 해당 충격강도 발생 직전의 속도를 위험속도로 정의하였다. 위험속도의 분산분석을 실시하기 전에 동질성 결정 검정을 통하여 등분산성을 만족하는지 확인하였다. 분산의 동질성 검정결과 <Table 3>와 같이 유의확률 값(0.077)이 0.05 이상이므로 등분산성을 만족하며, 분산분석이 가능한 것으로 나타났다.

<Table 3> Test of homogeneity of variances of Dangerous speed analysis by slope

Levene Statistic	Degrees of Freedom 1	Degrees of Freedom 2	p-value
1.998	5	534	.077

분산분석을 실시하여 경사도별 평균위험속도와 유의확률을 분석하였다. 그 결과 <Table 4>와 같이 경사로 별 평균위험속도가 분석되었으며, 유의확률 0.001 미만으로 나타났다. 이는 분석한 평균위험속도가 유의하며, 경사로 구간 간에 평균위험속도의 차이가 있다는 것으로 해석할 수 있다. Scheffe test 결과 경사도 7~8% 평균 위험속도가 18.8km/h로 1~2%, 3~4%, 5~6% 20.3~21.3km/h 보다 낮게 나타났으며 12~14% 평균 위험속도가 23.0km/h로 1~2%, 3~4%, 5~6%, 7~8% 18.8~21.3km/h 보다 높게 분석되었다.

브레이크 조작 직전의 위험속도는 실험자에 따라 다르게 나타났으나, 평균 위험속도는 경사도에 따라 패턴을 보이는 것으로 분석되었다. 경사도 1~2%(21.3km/h) 에서 경사도 7~8%(18.8km/h)까지는 점차 감소하였다. 그러나 경사도 9~11%(22.4km/h)에서 크게 증가하였으며, 경사도 12~14%(23.0km/h)로 증가하였다. 경사도 증감에 따라 속도가 커지거나 작아지는 등 일관적인 패턴으로 도출되지 않아, 이에 대한 원인을 분석하기 위해 실험자(운전자)를 대상으로 면접조사를 실시하였다. 면접조사 결과에 따르면, 운전자들은 경사가 급할수록 위험을 더 크게 느끼고, 이에 따라 낮은 속도에서 사전에 브레이크를 조작하는 경향이 나타났다. 반면, 경사도가 9~11%를 초과하는 구간에서는 급경사로 인해 가속도가 빠르게 붙으며, 브레이크 조작 전까지 속도가 급격히 증가했다. 이로 인해 운전자는 실제 속도에 비해 더 빨리 브레이크를 조작할 필요성을 느끼는 것으로 나타났다. 즉, 경사도가 클수록 속도가 더 높아지기 때문에 위험성이 높을 것이라고 느끼는 운전자의 심리로 인하여, 더 낮은 속도에서도 동일한 위험을 느끼고 사전에 브레이크를 조작하는 것으로 볼 수 있다. 경사도 9~11% 이상의 구간에서 위험속도가 증가한 것은 급경사에서 가속도가 커져, 브레이크를 조작하기 전까지 더욱 짧은 시간 내에 속도가 크게 증가한 것으로 판단할 수 있다. 전체 구간에 대한 평균 위험속도는 21.1km/h로 분석되어, 경사로에서 E-scooter 주행 시 위험을 느끼는 속도는 약 21km/h로 추정할 수 있다.

<Table 4> Results of Dangerous speed analysis by slope

Slope	1~2% ^a	3~4% ^b	5~6% ^c	7~8% ^d	9~11% ^e	12~14% ^f	Average
n	90	90	90	90	90	90	-
Average Dangerous Speed (Km/h)	21.3	20.5	20.3	18.8	22.4	23	20.8
SD	.285	.268	.284	.304	.256	.231	-
F	31.9						-
p	0.000***						-
Scheffe	d < c · b · a, b c < e < f						

* p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

2. 경사도별 안정속도

운전자가 주행 중 브레이크를 동작한 후 심리적 안정을 느끼고 속도를 유지함과 동시에 E-scooter의 충격 강도의 변화폭이 매우 작은 구간이 발생하였으며, 이를 안정속도로 정의하였다. 안정속도의 분산분석을 실시하기 전에 동질성 결정 검정을 통하여 등분산성을 만족하는지 확인하였다. 분산의 동질성 검정결과 <Table 5>와 같이 유의확률 값(0.572)이 0.05 이상이므로 등분산성을 만족하며, 분산분석이 가능한 것으로 나타났다.

<Table 5> Test of homogeneity of variances of Stable speed analysis by slope

Levene Statistic	Degrees of Freedom 1	Degrees of Freedom 2	p-value
.770	5	534	.572

분산분석 결과 <Table 6>와 같이 경사로별 평균안정속도가 분석되었으며, 유의확률 0.001 미만으로 나타났다. 이는 분석한 평균안정속도가 유의하며, 경사로 구간 간에 평균안정속도의 차이가 있다는 것으로 해석할 수 있다. Scheffe test 결과 경사도 1~2%와 3~4%,5~6%,7~8%,9~11%,12~14%의 안정속도 평균 차이가 나타났다. 1~2% 경사에서는 평균 안정속도가 19.5km/h로 나타났으며 그 외 경사에서는 16.5~17.0km/h로 상대적으로 평균속도가 낮게 분석되었다

안정속도는 위험속도와 마찬가지로 실험자에 따라 다르게 나타났으나, 평균 안정속도는 경사도 1~2%를 제외하고 유사한 것으로 분석되었다. 경사도 1~2%는 19.5km/h로 다른 구간 평균속도보다 높게 나타났다. 이는 운전자에게 1~2%의 경사도가 상대적으로 위험성이 낮기 때문으로 판단할 수 있다. 그 외 경사도 3% 이상의 구간에서는 16.5~17.0km/h 범위가 안정속도로 분석되었는데 경사구간 내에서 운전자가 평균 17km/h의 속도로 주행 시 안정감을 느낀다고 추정할 수 있다.

<Table 6> Results of Stable speed analysis by slope

Slope	1~2% ^a	3~4% ^b	5~6% ^c	7~8% ^d	9~11% ^e	12~14% ^f	Average
n	90	90	90	90	90	90	-
Average Stable Speed (Km/h)	19.5	16.6	16.8	16.7	17.0	16.5	17.2
SD	.260	.225	.237	.252	.210	.231	-
F	23.329						-
p	0.000***						-
Scheffe	b, c, d, e, f < a						

* p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

V. 결 론

E-scooter의 사용이 증가함에 따라 경사로에서의 주행 위험성에 대한 연구가 요구되고 있으나, 이에 대한 체계적인 연구는 부족한 상태다. 기존의 이론적 분석 방법이 E-scooter의 경량 및 소형 특성을 반영하지 못하여 실제 위험성을 제대로 평가하지 못하고 있다. 본 연구는 경사로에서 E-scooter 주행 시 운전자가 느끼는 위험성과 심리적 적정 속도를 분석하기 위해 실도로를 기반으로 각속도 기반의 충격강도 평가하였다.

운전자가 현재 주행속도가 위험하다고 판단할 경우 브레이크를 조작한다는 점에 착안하여 브레이크 조작 직전 속도를 ‘위험속도’로, 그 이후 유지되는 속도를 ‘안정속도’로 정의하였다. 해당 시점을 판단하기 위한 지표로 충격강도를 활용하였으며, 충격강도는 각속도 측정을 통해 E-scooter가 어느 정도 흔들리는지를 수치로 정량화하는 방법을 사용하였다.

그 결과 경사도별 위험속도는 평균 21km/h로 분석되었으며, 경사도가 급격해질수록 초기 위험속도가 감소하였다. 이는 경사가 급할수록 속도가 증가하며 위험도 높아진다고 운전자가 인식할 수 있기 때문에 운전자는 실제로 더 높은 위험을 경험하는 것과 같은 수준의 위험감을 낮은 속도에서도 느끼게 되어, 결과적으로 사전에 브레이크를 조작할 가능성이 있다고 추론할 수 있다. 안정속도는 경사도 1~2%를 제외하고 유사한 것으로 분석되었다. 이는 운전자에게 1~2%의 경사도가 상대적으로 위험성이 낮기 때문으로 볼 수 있다. 그 외 경사도 3% 이상의 구간에서는 평균 17.0km/h가 안전하다고 분석되었는데 이는 운전자들이 평균적으로 17km/h 속도로 주행할 때 안정감을 느낀다는 것을 의미할 수 있다.

본 연구는 실제 주행실험을 통하여 이론적으로 검토하기 어려운 운전자의 심리적 특성을 반영하였으며, 각속도를 이용한 충격강도를 산정함으로써 E-scooter의 주행안전성을 수치로 정량화하여 분석할 수 있는 방법론을 고안하였다. 최종적으로 경사도별 운전자의 위험속도와 안정속도를 도출하여 향후 E-scooter 주행 시의 적정속도 연구 및 자전거도로 설계기준의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 이러한 연구 결과는 국내에서 추진 중인 개인형 이동장치의 최고속도 하향 제도의 학술적 근거로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 본 연구는 비교적 적은 수의 피실험자를 대상으로 하고, 제한된 테스트베드 도로 환경에서만 주행 실험을 진행함으로써, 다양한 환경적 요인들을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 특히, 본 연구에서 조사한 경사도에 따른 안정 속도는 도로 형태, 도로 포장 상태, 날씨, 인적 요인 등 다른 중요한 요소들을 고려하지 않았다. 따라서, E-scooter의 안정 속도를 결정하는 데 있어 이러한 다양한 환경적 요인을 포함하는 모형 개발이 필요하다. 향후 연구에서는 실험 조건이 더욱 발전하고 확장되어 다양한 연령대의 더 많은 피실험자를 대상으로 보다 포괄적인 실험 진행이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 행정안전부 국민수요맞춤형 생활안전 연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-MOIS41-001)

REFERENCES

Allen-Munley, C., Daniel, J. and Dhar, S.(2004), “Logistic model for rating urban bicycle route safety”, *Transportation Research Record*, vol. 1878, no. 1, pp.107-115.

- Austin Public Health(2019), *Dockless electric Scooter-Related injuries study*.
- Badeau, A., Carman, C., Newman, M., Steenblik, J., Carlson, M. and Madsen, T.(2019), “Emergency department visits for electric scooter-related injuries after introduction of an urban rental program”, *The American Journal of Emergency Medicine*, vol. 37, no. 8, pp.1531-1533.
- Basky, G.(2020), “Spike in e-scooter injuries linked to ride-share boom”, *CMAJ*, vol. 192, no. 8, pp.E195-E196.
- Beck, S., Barker, L., Chan, A. and Stanbridge, S.(2020), “Emergency department impact following the introduction of an electric scooter sharing service”, *Emergency Medicine Australasia*, vol. 32, no. 3, pp.409-415.
- Bloom, M. B., Noorzad, A., Lin, C., Little, M., Lee, E. Y., Margulies, D. R. and Torbati, S. S.(2021), “Standing electric scooter injuries: Impact on a community”, *The American Journal of Surgery*, vol. 221, no. 1, pp.227-232.
- Bozzi, A. D. and Aguilera, A.(2021), “Shared E-scooters: A review of uses, health and environmental impacts, and policy implications of a new micro-mobility service”, *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 8676.
- Carlsson, A. and Lundälv, J.(2019), “Acute injuries resulting from accidents involving powered mobility devices (PMDs)–Development and outcomes of PMD-related accidents in Sweden”, *Traffic Injury Prevention*, vol. 20, no. 5, pp.484-491.
- Celik, A. K. and Oktay, E.(2014), “A multinomial logit analysis of risk factors influencing road traffic injury severities in the Erzurum and Kars Provinces of Turkey”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 72, pp.66-77.
- Centre for Electric Vehicle Experimentation in Quebec(2004), *Pilot Project for Evaluating Motorized Personal Transportation Devices: Segways and Electric Scooters*.
- Centre for Electric Vehicle Experimentation in Quebec(2006), *Pilot Project for Evaluating the Segway Motorized Personal Transportation Device in Real Conditions*.
- Che, M., Wong, Y. D., Lum, K. M. and Rojas Lopez, M. C.(2023), “Users’ behavioral intention and their behavior: Before-and-after study of “keep left” markings on shared footpaths”, *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 17, no. 3, pp.219-227.
- Degele, J., Gorr, A., Haas, K., Kormann, D., Krauss, S., Lipinski, P. and Hertweck, D.(2018), “Identifying e-scooter sharing customer segments using clustering”, *2018 IEEE international conference on engineering, technology and innovation (ICE/ITMC)*, pp.1-8.
- Finck, M., Lamping, M., Moscon, V. and Richter, H.(2020), *Smart Urban Mobility*, Springer Berlin Heidelberg.
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T. and Sorrell, S.(2017), “Sociotechnical transitions for deep decarbonization”, *Science*, vol. 357, no. 6357, pp.1242-1244.
- Gioldasis, C., Christoforou, Z. and Seidowsky, R.(2021), “Risk-taking behaviors of e-scooter users: A survey in Paris”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 163, 106427.
- Gössling, S.(2020), “Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 79, 102230.
- Guo, Y. and Zhang, Y.(2021), “Understanding factors influencing shared e-scooter usage and its

- impact on auto mode substitution”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 99, 102991.
- Hagel, B. E., Romanow, N. T., Enns, N., Williamson, J. and Rowe, B. H.(2015), “Severe bicycling injury risk factors in children and adolescents: A case - control study”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 78, pp.165-172.
- Han, D. J., Kim, E. C. and Ji, M. K.(2020), “Analysis of Severity Factors in Personal Mobility (PM)Traffic Accidents”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 38, no. 3, pp.232-247.
- Han, S. Y., Lee, C. G., Yun, I. S., Yoon, Y. I. and Na, J. P.(2021), “Analysis of PM (Personal Mobility)Traffic Accident Characteristics and Cause of Death”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 1, pp.100-118.
- James, O., Swiderski, J. I., Hicks, J., Teoman, D. and Buehler, R.(2019), “Pedestrians and e-scooters: An initial look at e-scooter parking and perceptions by riders and non-riders”, *Sustainability*, vol. 11, no. 20, p.5591.
- Jeong, D. H., Ryu, J. H. and Chi, D. I.(2016), “The Implementation and Effects of Passive ABS for Hydraulic Brake System of Bicycle”, *The Korean Society of Automotive Engineers Annual Autumn Conference & Exhibition*, pp.927-928.
- Jiao, J. and Bai, S.(2020), “Understanding the shared e-scooter travels in Austin, TX”, *ISPRS(International Society of Photogrammetry and Remote Sensing) International Journal of Geo-Information*, vol. 9, no. 2, p.135.
- Joo, S., Lee, G., Oh, C. and Choi, K.(2018), “A new approach to analyzing cycling stability using an inertial measurement unit sensor”, *Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering*, vol. 22, pp.5195-5202.
- Jung, K. B.(2022), “A study on the countermeasures according to the review of personal (shared) mobility system and operating conditions”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 40, no. 1, pp.1-10.
- Kim, S. J., Lee, G. J., Choo, S. H. and Kim, S. H.(2021), “Study on Shared E-scooter Usage Characteristics and Influencing Factors”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 20, no. 1, pp.40-53.
- Kim, Y. W., Park, W. B., Cho, J. S., Hyun, S. Y. and Lee, G.(2018), “The New Recreational Transportation on the Street: Personal Mobility, Is It Safe?”, *Journal of Trauma and Injury*, vol. 31, no. 3, pp.125-134.
- Lam, P. Y.(2011), “Gyroscopic stabilization of a kid-size bicycle”, *2011 IEEE 5th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems(CIS)*, pp.247-252.
- Ma, Q., Xin, Y., Yang, H. and Xie, K.(2022), “Connecting metros with shared electric scooters: Comparisons with shared bikes and taxis”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 109, 103376.
- Ma, Q., Yang, H., Mayhue, A., Sun, Y., Huang, Z. and Ma, Y.(2021), “E-Scooter safety: The riding risk analysis based on mobile sensing data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 151, 105954.
- Novotny, A., Mollenhauer, M. and White, E.(2023), *E-Scooter Design: Safety Measures for Next Gen Scooter*, Safe-D National UTC.
- Paleti, R., Sahin, O. and Cetin, M.(2017), “Modeling the impact of latent driving patterns on traffic

- safety using mobile sensor data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 107, pp.92-101.
- Petraki, V., Ziakopoulos, A. and Yannis, G.(2020), “Combined impact of road and traffic characteristic on driver behavior using smartphone sensor data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 144, 105657.
- Prati, G., Pietrantonio, L. and Fraboni, F.(2017), “Using data mining techniques to predict the severity of bicycle crashes”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 101, 44-54.
- Shin, S. H., Choo, S. H. and Lim, D. B.(2023), “Influence of Urban Built Environment on Severity of PM-Pedestrian Accidents in Seoul”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 22, no. 4, pp.114-131.
- Stigson, H., Malakuti, I. and Klingegård, M.(2021), “Electric scooters accidents: Analyses of two Swedish accident data sets”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 163, 106466.
- Suntharasantic, S. and Wongsaisuwan, M.(2011), “Piecewise affine model and control of bicycle by gyroscopic stabilization”, *The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI) Association of Thailand-Conference 2011*, pp.549-552.
- Todd, J., Krauss, D., Zimmermann, J. and Dunning, A.(2019), “Behavior of electric scooter operators in naturalistic environments” *SAE(Society of Automotive Engineers) Technical Paper*, No. 2019-01-1007.
- Vajari, M. A., Aghabayk, K., Sadeghian, M. and Shiwakoti, N.(2020), “A multinomial logit model of motorcycle crash severity at Australian intersections”, *Journal of Safety Research*, vol. 73, pp.17-24.
- White, E., Guo, F., Han, S., Mollenhauer, M., Broaddus, A., Sweeney, T. and Buehler, R.(2023), “What factors contribute to e-scooter crashes: A first look using a naturalistic riding approach”, *Journal of Safety Research*.
- Xu, C., Wang, X., Yang, H., Xie, K. and Chen, X.(2019), “Exploring the impacts of speed variances on safety performance of urban elevated expressways using GPS data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, pp.29-38.
- Yang, D., Xie, K., Ozbay, K., Yang, H. and Budnick, N.(2019), “Modeling of time-dependent safety performance using anonymized and aggregated smartphone-based dangerous driving event data”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 132, 105286.
- Yang, H., Ma, Q., Wang, Z., Cai, Q., Xie, K. and Yang, D.(2020), “Safety of micro-mobility: Analysis of E-Scooter crashes by mining news reports”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 143, 105608.
- Yang, H., Xie, K., Ozbay, K., Ma, Y. and Wang, Z.(2018), “Use of deep learning to predict daily usage of bike sharing systems”, *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 36, pp.92-102.
- Yazhisavendhan, A. V. A. and Vella, A. D.(2022), *Experimental Analysis on Electric-Kick Scooter*, Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino.
- Zeng, H., Park, H., Smith, B. L. and Parkany, E.(2018), “Feasibility assessment of a smartphone-based application to estimate road roughness”, *Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering*, vol. 22, pp.3120-3129.