

자율주행자동차의 윤리적 선택에 따른 교통사고비용 분석

An Analysis of Accident Costs according to Ethical Choice of Autonomous Vehicles

정승원* · 황기연**

* 주저자 : 홍익대학교 과학기술연구소 연구교수

** 교신저자 : 홍익대학교 도시공학과 교수, 첨단교통연구 센터장

Seung weon Jung* · Kee Yeon Hwang**

* Research Professor, Hongik Univ. Research Institute of Science and Technology

** Professor, Hongik Univ.

† Corresponding author : Kee Yeon Hwang, keith@hongik.ac.kr

Vol.17 No.6(2018)

December, 2018

pp.224~239

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.6.224)

2018.17.6.224

Received 4 October 2018

Revised 5 November 2018

Accepted 9 November 2018

© 2018. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

자율주행자동차로 인해 기존의 교통사고 원인의 대부분을 차지하는 ‘운전자부주의’로 인한 교통사고가 크게 감소할 수 있지만, ‘트롤리 딜레마’, 차량 결함, 도로 함몰 등과 같은 사고를 피할 수 없는 상황이 발생할 수 있다. 이 경우 사람과 같은 윤리적 선택이 필요해진다.

본 연구는 돌발적인 싱크홀이 발생하여 자율주행차가 교통사고를 피할 수 없는 상황을 가정하고, 자율주행자동차의 윤리적 선택에 따른 교통사고비용을 시뮬레이션 분석을 통해 추정하였다. 이 때 자율주행자동차는 ① 탑승자의 안전을 최우선으로 하는 이기주의, ② 인명피해를 최소화하는 의무론, ③ 사고비용을 최소화하는 공리주의의 3가지 윤리적 선택 중 한 가지를 선택하도록 하였다.

분석결과, 이기주의의 교통사고비용이 가장 높게 분석되었고, 인명피해를 최우선으로 하는 의무론의 교통사고비용이 가장 낮게 분석되었다.

핵심어 : 자율주행자동차 윤리, 트롤리 딜레마, 교통사고비용

ABSTRACT

Autonomous vehicles can significantly reduce accidents due to ‘driver’s carelessness’, which occupies the majority of causes for traffic accidents, but they may fail to avoid traffic accidents due to unexpected situations, such as “trolley dilemma”, vehicle defects and road defects. Therefore in situations Autonomous vehicles need to be made ethical choices.

This study assumes that Autonomous vehicles can not avoid traffic accidents due to unexpected sink holes. In this situation, the traffic accident costs was analyzed for the ethical choices of Autonomous vehicles. In the process, Autonomous vehicles were made to choose one of three ethical choices : ① Egoism with priority on passenger safety, ② Deontology for minimizing human damages, ③ Utilitarianism with minimizing traffic accident costs.

As a result of the analysis, egoism had the highest traffic accident costs, and deontology for minimizing human damages had the lowest traffic accident costs.

Key words : Ethics of Autonomous Vehicle, Trolley Dilemma, Traffic Accident Cost

I. 서론

자율주행자동차의 윤리적 문제는 법적, 사회적 문제와 함께 대두되고 있는 관심 분야이다. 자율주행자동차는 운전자의 조향 및 가속 등의 차량에 대한 제어권이 거의 사라지게 된다. 주변 환경을 스스로 인지 또는 인식하고, 조향 및 가속속은 물론 예기치 못한 다양한 상황에서 자율주행자동차가 스스로 판단해야하며, 이때 자율주행자동차의 윤리적 문제가 발생할 수 있다. 본 연구는 자율주행자동차가 교통사고를 회피할 수 없는 상황을 시뮬레이션으로 구축하고, 윤리적 선택에 따라 발생하는 교통사고비용을 분석하였다.

자율주행자동차가 교통사고를 피할 수 없는 돌발 상황은 싱크홀 발생으로 가정하였다. 3차로 연속류 도로에서 싱크홀이 발생하였을 때, 자율주행자동차의 윤리적 선택에 따른 교통사고비용의 변화를 인공지능 분석 툴 Netlogo를 활용해 시뮬레이션 구축하여 분석하였다. 자율주행자동차의 윤리적 선택은 이기주의와 의무론, 공리주의 3가지 윤리이론을 적용하였다.

II. 관련 이론 및 연구 고찰

자율주행자동차의 윤리이론은 보통 인공지능 (artificial intelligence : AI) 과 로봇윤리로 해석할 수 있다. 인공지능은 인간의 지능적인 판단을 컴퓨터가 대신 수행할 수 있는 기술로서, 인간의 학습능력, 추론능력, 지각능력 등을 컴퓨터 프로그램으로 실현한 기술이다.¹⁾ 완전자율주행 단계에 가까워진 자율주행자동차는 많은 부분에서 인공지능 기술이 이용된다.

자율주행자동차의 인공지능은 스스로 윤리적·도덕적 행위를 할 수 있는 인공적 도덕행위자(Artificial Moral Agent)라는 점에서, 로봇윤리 문제와 직결된다. 로봇윤리는 로봇이 윤리적 행위자가 될 수 있다는 것을 전제로, 로봇이 스스로 윤리적·도덕적 행위를 할 수 있다고 보는 관점으로 설명할 수 있다.²⁾ 즉 자율적으로 판단하고 주행하는 자율주행자동차는 윤리적 행위자가 되어 윤리적 객체로서의 로봇윤리 개념이 적용된다.³⁾

인공지능과 로봇윤리로 인해 자율주행자동차가 스스로 선택, 판단을 해야 하는 상황에서 윤리적 문제와 충돌한다. 프로그래밍 되어 있는 컴퓨터가 인공지능 알고리즘을 통해 스스로 판단하는 과정에서 특정한 사람 및 단체에게 피해가 가는 선택을 해야만 하는 상황을 직면할 수 있기 때문이다. 이러한 상황을 잘 설명할 수 있는 대표적 사례가 트롤리 딜레마 (Trolley Dilemma) 이다. 트롤리 딜레마는 영국의 철학자 Philippa Foot 과 고안한 윤리학 분야의 실험으로 다수를 위한 소수의 희생이 도덕적으로 허용되는가에 대한 질문이다. 브레이크가 고장 난 트롤리 전차가 5명의 인부를 향해 달리고 있는 상황에서 레일 변환기를 작동하여 트롤리 전차의 방향을 전환시키면 1명의 인부만이 죽게 된다. 이러한 선택이 도덕적으로 허용되는가를 묻고 있다.⁴⁾

이론적으로 자율주행자동차가 주행하면 현재 도로교통사고 원인의 약 90%를 넘는 운전자부주의로 인한 사고가 발생되지 않게 된다. 그러나 Goodall(2014)은 기술적으로 완성된 자율주행자동차라 하더라도 사고를 완전히 피할 수 없으며, 이러한 상황에서 자율주행자동차는 윤리적인 판단을 가지게 될 것이라고 주장하였다. 차량결합, 낙석, 싱크홀 등 부득이 하게 피할 수 없는 상황은 존재하며 그러한 상황에서 자율주행자동차가 ‘무엇을 최우선으로 보호해야 하는가?’ 와 같은 문제에 직면하게 된다. 고속으로 주행 중인 자율주행자

1) 두산백과 인용 후 재구성

2) Lin et al. (2015), “Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics” 인용 후 재구성

3) Lee(2016), “자율주행자동차 : 로봇으로서의 윤리와 법적 문제” 인용 후 재구성

4) 두산백과 인용 후 재구성

동차 전방 최소정지시거 안에 싱크홀이 갑자기 발생하였을 때, 좌측 차로에는 어린이통학버스가 있고 우측 보행로에는 보행자가 걸어가고 있는 상황에서 ‘어떠한 선택을 해야 하는가?’ 와 같은 트롤리 딜레마의 상황이 발생할 수 있다. 이러한 로봇윤리는 자율주행자동차의 사고 발생 시 ‘책임 소재가 누구에게 있는가?’ 와 같은 법적 문제와 깊게 연관되어 있으며, 차량탑승자를 희생시키는 자율주행자동차를 과연 누가 구입할지? 등과 같이 상용화에 있어서도 중요한 문제이다. 자율주행자동차의 상용화를 위해서는 이러한 윤리적 문제에 관한 알고리즘 개발을 위해 윤리학 및 철학에 대한 심층적 고찰이 필요하다.⁵⁾

기존 연구들은 자율주행자동차의 윤리적 문제의 중요성을 강조하고, 기술적 적용 방안 및 법적인 구체화를 위한 연구가 필요하다고 주장하고 있다. Goodall(2014)는 인간의 도덕성을 소프트웨어적으로 반영하는 것은 어렵다고 주장하였고, Applin(2017)은 자율주행자동차의 윤리적 문제가 지역적 문화적 차이를 고려할 필요가 있다고 주장하였다. Lee(2016)는 자율주행자동차의 의사결정 프로그램은 헌법적 적합성의 검토가 필요하며, 다양한 측면에서 자율주행자동차의 로봇윤리의 법적 시사점을 도출하고 이와 관련된 충분한 연구와 대비가 필요하다고 주장하였다.

본 연구는 싱크홀이 발생하여 차로변경을 하지 않으면 싱크홀로 낙차하고 차로변경을 할 경우 옆 차로와 충돌할 수밖에 없는 상황을 시뮬레이션 구축하여, 자율주행자동차의 이기주의, 공리주의, 의무론 3가지 윤리적 선택에 따른 교통사고비용을 분석하였다. 자율주행자동차의 윤리적 문제는 철학적, 법적 등 많은 분야에서 고려되어야할 논제이며, 교통사고비용이 자율주행자동차의 윤리적 선택의 정당성이나 효과적도로써 적절하다고 생각하는 것은 아니다. 다만, 공학적인 방법으로 자율주행자동차의 윤리 이론을 적용하고 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석한 연구로서 의의를 가진다고 판단된다.

Ⅲ. 시뮬레이션 구축 및 시나리오 설정

1. 자동차의 기본 특성 및 행태 특성

자율주행자동차는 SAE기준 2~3단계를 기준으로 설정하여, 차간거리, 차로변경, 군집주행 등의 자율주행 기술이 적용되고 있음을 전제로 하였다.

차간거리 및 차로변경을 위해 필요한 인지반응시간은 자율주행자동차의 통신지연시간을 적용하였다. 현재 자율주행자동차의 통신지연시간은 0.1~0.2초 정도로 예상되고 있으며, 기존 연구에서는 0.1~0.5초 사이로 적용하였다(Vander werf et al., 2002; van Arem et al., 2006; Kesting et al., 2008; Park et al., 2015; Jung et al., 2017; Jung et al., 2018). 본 연구에서는 자율주행자동차의 예상 평균 통신지연시간 0.15초를 적용하였다.

사람 운전자의 인지반응시간은 1.5초를 적용하였다. 국내 도로교통용량편람 등에서는 일반 운전자의 인지반응시간 시간을 2.5초로 적용하여 최소정지시거 등을 산출하고 있다. 그러나 이는 안전적인 측면을 고려한 것이며, 실질적인 일반 운전자의 인지반응시간은 0.7~1.5초 정도로 분석되고 있다(Johansson and Rumar, 1971; Olson and Sivak, 1986; Broen and Chiang, 1996; Green, 2000; Fambro et al., 1998; Jenness et al., 2008).

자율주행자동차와 일반자동차의 차종별 가속도, 마찰계수 등은 <Table 1>과 같다. 자율주행자동차는 사고의 상해정도 차이를 줄이기 위해 승용차만 가능하도록 하였다.

5) Gurney(2016) “Crashing into th Unknown: An Examination of Crash-Optimization Algorithms Through the Two Lanes of Ethics and law” 인용 후 재구성

<Table 1> Variables of Vehicles

Description	Autonomous Vehicle	non Autonomous Vehicle		
		Car	Small Truck	Bus & Heavy Truck
Desired Speed (km/h)	100	100±10	100±10	100±10
Maximum Acceleraten (m/s ²)	2.2±0.1	2.2±0.1	1.8±0.1	1.6±0.1
P.I.E.V(s) ⁶⁾	0.15	1.5±0.1	1.5±0.1	1.5±0.1
Coefficient of Sliding Friction	0.8	0.8	0.68	0.6
Size (m)	5	5	6	10
Platoon Spacing (m)	6	-	-	-

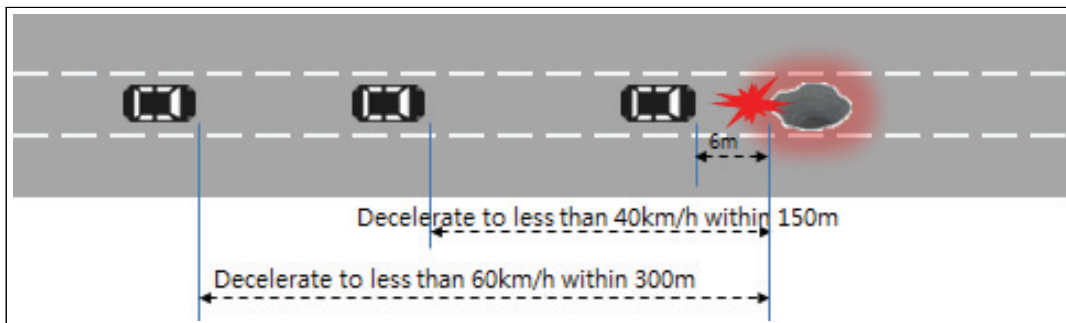
자동차의 행태 특성은 관련 연구에서 활용했던 차량추종모형 IDM(Intelligent Driver Model)을 개선하여 활용하였다(Kesting et al., 2008; Park et al., 2015; Jung et al., 2017; Jung et al., 2018). IDM은 개별차량의 인지반응시간 및 가속도에 따라 최소안전거리 유지를 하는 모형이다. <Table 1>의 자동차 기본 특성만 설정해주면 차종별 주행 행태가 반영되는 모형으로, 자율주행자동차의 특성을 반영하기 좋은 모형이다.

차로변경 모형은 IDM과 함께 적용 가능한 MOBIL(Minimizing Overall Braking Induced by Lane change)을 활용하였다(Kesting et al., 2007). MOBIL은 기준 차량의 후행차량과 기준 차량이 차로변경하고자 하는 차로의 선행, 후행차량을 모두 고려하여 차로변경을 시도하는 모형이다.

자동차 행태특성에 활용된 IDM과 MOBIL은 Jung et al.(2018)의 연구와 동일한 모형을 적용하고 있으므로, 본 연구에서 상세한 설명은 생략한다.

2. 시나리오 설정 및 시뮬레이션 구축

갑작스런 싱크홀 발생으로 인해 자율주행자동차가 사고를 피할 수 없는 상황을 행위자기반모형 시뮬레이션 툴 Netlogo 6.0.1을 이용하여 설정하였다. 각 행위자(agent)라고 할 수 있는 자동차들은 각각 자동차의 기본 특성과 행태 특성을 적용하여 주행하며, 특정한 시간대에 갑작스런 싱크홀이 발생, 자율주행자동차가 싱크홀로 인해 사고를 피할 수 없는 상황에서 윤리적 선택에 따른 교통사고비용을 분석하였다.



<Fig. 1> Simulation Environment

6) Perception-Identification-Emotion-Volition

시뮬레이션을 위한 도로환경은 연속류 편도 3차로 3km 구간을 구축하였다. 승용차와 버스, 화물차가 혼재된 교통류에 자율주행자동차가 유입되어 혼재된 교통류 구간이다. 차종 비율은 2016년 상시조사 지점 고속도로 차종별 교통량을 비율로 환산하여 적용하였다.⁷⁾ 차종별 비율은 승용차 61%, 버스 3%, 소·중형화물 31%, 대형화물 5%이다. 윤리적 선택에서 양 옆으로 화물차가 위치하는 극단적인 경우를 배제하기 위해, 화물차는 2, 3차로만 주행하도록 하였다.

편도 3차로 중 2차로에서 시뮬레이션 개시 후 600초 ± 100초 시간에 전방 2km 지점 기준 반경 200m 임의의 지점에 싱크홀이 발생하도록 설정하였다.

자율주행자동차의 보급률에 따라, 또 도로의 혼잡상태에 따라 각 윤리적 선택에 미치는 영향이 다를 수 있으므로, 자율주행자동차의 혼입율은 25, 50, 75(%)를 적용하였고, 밀도는 20, 30, 40 (veh/km)를 적용하였다.

시나리오 당 시뮬레이션 수행 횟수는 사망사고 3건이 발생할 때까지 반복하고, 3번째 사망사고를 제외한 나머지 사고건수로 교통사고비용을 산정하였다. 이는 사망사고 1건의 인적피해비용이 매우 크기 때문에 사망사고의 영향을 최소화하기 위해서이다.

3. 윤리적 선택의 판단 기준 및 근거

윤리적 선택 (윤리이론) 및 선택적 판단 근거는 크게 이기주의와 이타주의로 구분하였으며, 이타주의는 의무론과 공리주의로 나누어서 총 3가지 윤리적 선택으로 구분하였다. 이기주의는 자율주행자동차의 탑승자를 최우선으로 보호하고, 의무론은 사망자 수의 최소화를 최우선으로 한다. 의무론적 윤리설은 정당성의 판단 기준으로 행위의 결과를 배제하고 동기와 의무를 기준으로 삼는 윤리이론이다.⁸⁾ 이러한 점을 고려하여 사망자 수의 최소화라는 동기와 의무만을 지키는 알고리즘을 적용하였다. 공리주의 윤리설은 정당성의 판단 기준으로 행위의 동기를 배제하고 결과와 효용을 기준으로 삼는다.⁹⁾ 본 연구에서 공리주의는 인적피해비용과 교통사고로 인한 혼잡비용을 포함한 교통사고비용을 최소화하는 판단을 행하도록 하였다.

각 윤리적 선택에서 고려하는 판단 근거는 인적피해와 교통사고비용이다. 이기주의는 자율주행자동차 탑승자의 안전을 최우선으로 하고, 의무론은 인명피해를 최소화하는 것을 최우선으로 한다. 여기서 교통사고의 상해정도 확률이 낮은 상황을 선택하게 되는데 이 때 고려하는 선택적 판단 근거는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Judgment on the ethical choice of Autonomous vehicles

Description	Vehicle Speed	Deviation of vehicle speed from in side lane	Side lane vehicle Vehicle Type	Congestion Costs
Egoism	X	O	O	X
Deontology	O	O	O	X
Utilitarianism	O	O	O	O

즉 의무론과 공리주의는 상해정도에 영향을 주는 자신의 주행속도, 옆 차로 차량과의 주행속도 편차 및 차종 등을 고려한다. 공리주의는 혼잡비용까지 고려하고, 이기주의는 해당 차량의 피해를 최소화하기 위해 자신의 주행속도는 고려하지 않고 옆 차로 차량과 주행속도 편차와 차종을 고려하도록 하였다.

6) TMAS(교통량 정보제공 시스템)

7) Lee(2016), “자율주행자동차 : 로봇으로서의 윤리와 법적 문제” 인용 후 재구성

8) Lee(2016), “자율주행자동차 : 로봇으로서의 윤리와 법적 문제” 인용 후 재구성

9) Lee(2016), “자율주행자동차 : 로봇으로서의 윤리와 법적 문제” 인용 후 재구성

IV. 상해정도 및 교통사고혼잡비용 지표 설정

1. 상해정도 결정지표 설정

교통사고의 상해정도에 따라 윤리적 선택에 따른 사고결과가 달라지며, 분석 결과 값인 총교통사고비용을 산정하는 기준이 되기도 한다. 그러나 교통사고 상해정도를 공학적인 시뮬레이션 분석으로 가정하기에 많은 한계점들이 따른다. 공개된 통계 자료로는 상해정도 확률을 산출하는 것이 불가능하고, 선행연구 또한 충분하지 않다.

국내에서는 경찰 DB에 TAMS(Traffic Accident Management System)를 통해 교통사고를 기록하고 있다. TAMS에는 교통사고와 관련된 다양한 개인정보와 도로상태, 도로종류, 제1당사자 및 제2당사자의 차종과 사고직전속도 등의 정보와 상세한 사고 경위를 파악할 수 있는 사고현장약도가 기록되어 있다. 이러한 경찰 DB를 통해 TAAS(Traffic Accident Analysis System) 등의 교통사고 통계가 일부 제공되고 있으나, 일부 사망사고와 사고장소지점만 공개되는 점, 제1, 제2당사자의 사고직전속도, 사고충돌 부위 등의 데이터가 공개되고 있지 않는 등, 상해정도를 결정하는 지표를 산정하는 자료로서 활용되기에는 질적, 양적인 한계가 있다.

본 연구에서는 각 교통사고 관련 통계자료와 경찰 DB의 TAMS 교통사고 데이터를 활용하여 제1당사자의 주행속도, 주행속도 편차, 충돌 위치에 따른 상해정도 결정지표를 산정하였다. 경찰 DB 교통사고자료는 대외비 자료로서 데이터 가공 및 분석과정, 출처를 밝힐 수 없음을 밝힌다. 본 연구에서 활용한 차대차 교통사고 데이터는 총 498건이며, 충돌 부위 등은 교통사고 현장약도를 토대로 직접 분류하였으므로 연구자의 주관적인 판단과 보정이 일부 포함되어 있다. 이러한 점은 본 연구의 한계로서, 향후 교통사고와 관련된 세부적인 데이터가 공개된다면 보완, 발전시킬 수 있을 것으로 판단된다.

교통사고 상해정도 결정 지표로는 고속도로 차종별 교통사고 상해정도 통계 자료의 확률을 기본으로, 제2당사자의 차종(제1당사자는 승용차로 고정), 제1당사자와 제2당사자의 주행속도 편차, 제1당사자의 주행속도, 충돌 위치에 따른 5가지로 설정하였다. 시뮬레이션에서 교통사고 발생 시 각 지표로 인해 산정된 확률에 의해 교통사고 상해정도가 결정된다.

교통사고 상해정도 결정지표의 기본적인 상해정도 확률은 <Table 4>의 2015년 고속도로 교통사고 상해정도 통계 자료를 활용하였다.¹⁰⁾ 고속도로의 교통사고 사망자수 비율은 전체 사상자수 중 2.3%이며, 중상자수 비율은 26.1%, 경상자수 비율은 71.6%이다. 이 수치는 상해정도의 기본 확률로 사용되며, 나머지 4개의 지수에 따라 비율이 곱 연산 되어 총 상해정도 확률을 산정하도록 하였다.

<Table 3> Number of people injured in road traffic accidents in 2015

Description	Car (persons)	Van (persons)	Truck (persons)	Car (%)	Van (%)	Truck (%)	Highway (persons)	Highway (%)
Death	2,329	363	996	1.0%	1.5%	2.3%	241	2.3%
Serious Injury	59,903	7,284	13,567	26.1%	30.2%	31.0%	2,775	26.1%
Minor Injury	167,024	16,502	29,175	72.9%	68.3%	66.7%	7,611	71.6%
Sum	229,256	24,149	43,738	100%	100%	100%	10,627	100%

10) 교통사고 도로교통사고분석시스템 (TAAS : <http://taas.koroad.or.kr>)

차종에 따른 결정지표는 <Table 3>의 고속도로 전체 상해정도 비율에서 차종별 상해정도 비율에 따라 지표를 산정하였으며, 산정한 차종별 상해정도 결정지표는 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Indices to determine the degree of injury by vehicle type

Description	Car	Van	Truck
Death	0.4	0.7	1
Serious Injury	1	1.2	1.2

승용차의 경우 사망 확률은 2.3%에 0.4를 곱하여 0.92%가 되고, 중상 확률은 $26.1\% \times 1 = 26.1\%$. 경상 확률은 사망과 중상 확률을 제외하여 ‘ $100\% - 0.92\% - 26.1\% = 72.98\%$ ’가 된다. 이하의 결정지표도 동일한 방법으로 계산된다.

속도차이 편차와 주행속도 결정지표는 경찰 DB TAMS 교통사고 자료를 활용하여, 사고 직전의 제1당사자 주행속도 및 제1당사자와 제2당사자의 속도차이에 따른 상해정도에 따라 산정하였다. 설정한 속도차이 편차 및 주행속도로 인한 교통사고 상해정도 결정지표는 각 <Table 5>, <Table 6>과 같다.

<Table 5> Indices to determine the degree of injury by Deviation of vehicle speed

Description	≤ 51km/h	≤ 31km/h	≤ 21km/h	≤ 11km/h	> 10km/h
Death	9.7	4.4	1.3	0.9	0.4
Serious Injury	1.9	1.6	0.9	0.8	0.7

<Table 6> Indices to determine the degree of injury by vehicle speed

Description	≤ 100km/h	≤ 90km/h	≤ 80km/h	> 80km/h
Death	3.7	1.6	1.3	0.8
Serious Injury	1.7	2.3	1.3	1

충돌부위에 따른 교통사고 상해정도 결정지표는 후방추돌사고, 제1당사자 측면추돌, 제2당사자 측면추돌, 낙차로 구분하였다. 제1당사자 측면 추돌은 제2당사자보다 제1당사자가 전방에 위치하여 차로변경 시 제1당사자의 측면과 제2당사자의 정면 부위가 충돌했을 때의 상황이며, 제2당사자 측면 추돌은 그 반대의 상황으로 제1당사자의 정면과 제2당사자의 측면 부위가 충돌했을 때의 상황이다. 결정지표 설정은 경찰 DB TAMS 자료의 교통사고 현장약도를 토대로 코딩하여 활용하였으며, 일부 연구자의 주관적 판단으로 보정하여 산정하였다. 설정된 지표는 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Indices to determine the degree of injury by the site of collision

Description	Rear End	Side-impact (the party of the first part)	Side-impact (the party of the second part)	Falling accident
Death	1.3	1.4	0.6	1.5
Serious Injury	1.1	1.1	0.9	1.2

해당 결정지표를 토대로 상해정도 확률을 산정, 교통사고 발생 시 각 상황에 따라 상해정도가 결정되며, 각 윤리적 선택의 판단 기준 및 근거에 따라 사망확률이 낮거나 교통사고비용이 낮을 것으로 예상되는 사고를 선택하도록 하였다.

2. 교통사고비용 산정

교통사고비용은 교통사고 발생되어 사고처리가 될 때까지 일부 차로가 폐쇄되면서 발생하는 교통혼잡비용과, 교통사고로 인한 인명피해에 해당되는 인적피해비용으로 구성된다. 교통사고가 발생하면 최소 1개 차로 이상이 폐쇄됨으로서 지체가 발생하며, 이 때 발생하는 총 지체와, 지체로 인해 지연되는 주행시간동안 발생하는 시간가치비용을 곱하여 교통사고혼잡비용을 산정한다. 인적피해비용은 보통 사고 1건당 혹은 사상자 1명 당 원단위화 된 인적피해비용을 적용한다.

1) 교통사고혼잡비용 산정

교통사고혼잡비용은 ‘총 지체 (차량 지체로 인한 추가 소요시간 × 교통량) × 차종 별 평균 시간가치 비용 (개인별 시간 가치 비용 × 차종 별 평균 재차인원) × 교통사고 처리시간’ 으로 산정하였다.

시뮬레이션 수행 할 때 마다 혼잡비용을 산정하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 조건에서 교통사고가 발생했을 때 적용할 혼잡비용을 미리 산정하여 적용하는 방법을 이용하였다. 즉, 밀도와 혼입율에 따라 교통사고로 인해 1개 차로 혹은 2개 차로가 폐쇄 되었을 때의 교통혼잡비용을 미리 산정하고, 시뮬레이션 수행 시 미리 산정한 교통혼잡비용을 적용하는 것이다. 또한 윤리적 선택 중 혼잡비용을 고려하는 공리주의 선택에서도 이 때 산정한 교통혼잡비용을 고려하도록 하였다.

혼잡비용 및 총 지체를 구하기 위해 각 밀도와 혼입율에 따른 평균 주행속도 및 교통량을 시뮬레이션 분석을 통해 산정한다. 같은 조건에서 1개 차로 폐쇄 시, 2개 차로 폐쇄 시의 주행속도와 교통량을 산정하여 각 밀도와 혼입율에서의 총 지체를 산정하고, 교통사고 발생 시 처리시간 동안 발생한 시간가치비용을 총 지체에 적용하여 혼잡비용을 산정하였다. 폐쇄된 차로가 없는 일반적인 상황에서의 각 밀도 및 혼입율에 따른 평균주행속도는 <Table 8>, 같은 조건에서 차로 폐쇄 시의 평균주행속도는 <Table 9>와 같다.

<Table 8> Average speed under normal circumstances (km/h)

Density(veh/km) Rate of AVs(%)	20	30	40
25	81.7	66.7	50.1
50	86.7	77.2	57.8
75	92.2	86.7	83.4

<Table 9> Average speed under lane-closed (km/h)

Density(veh/km) Rate of AVs(%)	1 lane-cloesd			2 lane-cloesd		
	20	30	40	20	30	40
25	33.7	27.6	22.5	17.2	15.4	14.2
50	36.2	32.3	26.9	19	17.8	16
75	41.2	39.8	39.7	27.1	24.8	22.2

일반적인 상황에서의 각 밀도 및 혼입율에 따른 교통량은 <Table 10>, 같은 조건에서 차로 폐쇄 시의 교통량은 <Table 11>과 같다.

<Table 10> Traffic volume under normal circumstances (veh/h)

Density(veh/km) Rate of AVs(%)	20	30	40
25	4,902	6,003	6,012
50	5,202	6,948	6,936
75	5,532	7,803	10,008

<Table 11> Traffic volume under lane-closed (veh/h)

Density(veh/km) Rate of AVs(%)	1 lane-cloesd			2 lane-cloesd		
	20	30	40	20	30	40
25	2,022	2,484	2,700	1,032	1,386	1,704
50	2,172	2,907	3,228	1,140	1,602	1,920
75	2,472	3,582	4,764	1,626	2,232	2,664

<Table 8>의 평균주행속도를 역수를 취해 평균 주행시간을 산정한 뒤, 차로 폐쇄 시 추가 시간을 통해 총 지체를 산정하였다. 차로 폐쇄 시의 총 지체는 <Table 12>와 같다.

<Table 12> Total Delay under lane-closed (min)

Density(veh/km) Rate of AVs(%)	1 lane-cloesd			2 lane-cloesd		
	20	30	40	20	30	40
25	85.5	127.5	147.2	225.0	299.8	303.4
50	83.7	125.1	137.8	213.8	300.3	313.5
75	74.3	106.1	132.1	144.1	224.6	330.8

혼잡비용 산정을 위한 시간가치 비용은 교통시설 투자평가지침의 수도권 차량 1대당 시간가치를 적용하였으며 <Table 13>과 같다. 각 차종별 재차인원과 시간가치 비용을 고려하여 본 연구에서 적용한 교통량 비율에 따라 차량 1대 당 시간가치 비용을 산정, 일괄 적용하였다. 시뮬레이션 분석 시, 고정된 차종 비율을 적용하였으므로, 차종별 시간가치비용을 각각 차종에 적용하지 않고, 교통량 비율에 따라 차량 1대 당 평균시간가치비용을 산출하여 적용하였다.

<Table 13> Estimation of the value of travel time

Description	Car	Bus	Truck
Average number of people in vehicle(per/veh)	1.104	12.711	1
Value of travel time (won/veh)	12,145	62,642	14,997
Rate of traffic volume(%)	60.60	3	31.60
Average value of travel time(won/veh/h)	13,978		

교통사고 처리시간은 Lee et al.(2015) 연구의 교통사고 처리시간을 참고하여 부상신고를 제외한 나머지 사고를 대상으로 <Table 14>와 같이 재구성하였다. Lee et al.(2015)의 연구에서는 부상신고 이하의 사고도 고려하였으나, 본 연구에서는 경상 이상의 상해정도만 고려하였기에 3가지의 상해정도만 적용하였다.

교통사고 상해정도에 따른 처리시간에 사고건수를 고려하여, 교통사고 1건당 평균 처리시간을 산정하여, 상해정도와 무관하게 46.1분을 일괄적으로 적용하였다.

<Table 14> Traffic Incident Clearance Time

Description	Death	Serious Injury	Minor Injury
Clearance time(min)	128	67	43
Number of accidents(incident)	57	1,773	13,270
Average clearance time(min)	46.1		

차로 폐쇄 시의 혼잡비용을 각 밀도와 혼입율에 따라 산정한 결과는 <Table 15>와 같으며, 공리주의의 판단기준 및 교통사고비용 산정에 활용하였다.

<Table 15> Congestion cost under lane-closed (won)

Rate of AVs(%) \ Density(veh/km)	1 lane-cloesd			2 lane-cloesd		
	20	30	40	20	30	40
25	915,829	1,366,350	1,577,464	2,411,205	3,212,852	3,251,165
50	896,986	1,340,720	1,477,199	2,291,068	3,218,552	3,359,612
75	795,932	1,136,538	1,415,545	1,544,595	2,407,316	3,545,123

2) 교통사고 인적피해비용 산정

교통사고 인적피해비용은 2013년 교통사고비용 추정(Shim et al., 2013)의 PGS(Pain, Grief & Suffering)를 제외한 사고건당 교통사고비용을 활용하였다. 단 본 연구에서 사용된 각종 통계자료는 2015년 기준이므로, 2015년 기준으로 GDP 성장률을 적용하여 <Table 16>으로 보정하여 적용하였다. PGS는 심리적 인적피해비용을 의미하며 교통사고로 인한 정신적 고통에 대한 사회·도덕적 보상을 의미한다. 사고 당사자뿐만 아니라 가족들이 받는 정신적 고통과 슬픔, 압박 정도를 비용으로 환산한 피해비용이다.11) 본 연구에서는 공리주의와 의무론의 선택 근거인 교통혼잡비용의 영향을 높이기 위해 PGS를 제외한 인적피해비용을 이용하였다.

<Table 16> The cost of human damage per accident in 2015 (1,000 won)

Description	Death	Serious Injury	Minor Injury
PGS included	782,135	135,492	15,794
PGS excluded	450,405	62,232	4,900

11) Shim et al.(2015) “2013년 교통사고비용 추정” 인용 후 재구성

V. 윤리적 선택에 따른 교통사고비용 분석 결과

시뮬레이션 분석을 통해 각 사고건수를 <Table 17>로 정리하였다.

사망사고는 모든 경우에서 2건으로 고정하였으므로 제외하였다. 각 밀도와 혼입율, 윤리적 선택에 따라 시나리오 당 평균 107.8회의 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구는 교통사고가 발생했을 때, 윤리적 선택에 따른 교통사고비용을 산정하는 것이 목적이므로, 일반적인 사고율의 개념은 적용되지 않는다.

<Table 17> Number of accident

Description		Serious Injury				Minor Injury			
Density(veh/km)		20	30	40	Sum	20	30	40	Sum
Rate of AVs(%)									
Egoism	25	24	30	37	91	30	47	72	149
	50	19	38	24	81	55	74	117	246
	75	16	30	30	76	40	71	67	178
	Sum	59	98	91	248	125	192	256	573
Deontology	25	7	27	62	96	27	119	77	223
	50	22	42	27	91	108	67	59	234
	75	28	33	41	102	76	88	202	366
	Sum	57	102	130	289	211	274	338	823
Utilitarianism	25	12	39	53	104	60	35	134	229
	50	15	31	25	71	27	133	37	197
	75	22	7	72	101	49	91	84	224
	Sum	49	77	150	276	136	259	255	650

이기주의는 중상 248건, 경상 573건으로 총 821건이 발생하였다. 즉, 사망사고 3건이 발생하는 동안 821건의 중상, 경상 사고가 발생한 것이다. 의무론은 중상 276건, 경상 650건으로 총 1,112건으로 사망사고 확률이 가장 낮게 나타났으며, 공리주의는 중상 289건, 경상 823건으로 총 926건이 발생하였다.

시뮬레이션 분석 결과 발생한 사망, 중상, 경상 건수를 통해 평균 인적피해비용과 혼잡비용을 산정한 결과 <Table 18>과 같다.

<Table 18> Traffic accident cost (1,000 won)

Description		The cost of human damage				Traffic Congestion Cost			
Density(veh/km)		20	30	40	Sum	20	30	40	Sum
Rate of AVs(%)									
Egoism	25	59,527	48,742	43,118	50,463	2,297	2,998	3,208	2,834
	50	41,663	41,747	28,356	37,255	2,254	3,075	3,367	2,899
	75	49,049	39,265	42,731	43,681	1,540	2,285	3,553	2,459
	Sum	50,080	43,251	38,068	43,800	2,030	2,786	3,376	2,731

Description		The cost of human damage				Traffic Congestion Cost			
Density(veh/km) Rate of AVs(%)		20	30	40	Sum	20	30	40	Sum
Deontology	25	44,317	24,246	41,562	36,708	1,802	2,591	2,705	2,366
	50	23,179	39,499	36,543	33,074	1,737	2,605	2,688	2,343
	75	31,487	31,780	19,695	27,654	1,263	2,018	2,678	1,986
	Sum	32,994	31,842	32,600	32,479	1,601	2,404	2,690	2,232
Utilitarianism	25	31,010	56,621	31,769	39,800	2,012	2,850	2,940	2,600
	50	54,047	25,792	50,967	43,602	1,975	2,849	3,008	2,611
	75	40,403	21,674	43,335	35,137	1,338	2,132	2,977	2,149
	Sum	41,820	34,696	42,024	39,513	1,775	2,610	2,975	2,453

인적피해비용은 이기주의가 평균 43,800천원으로 가장 높게 산정되었다. 다음으로 공리주의가 평균 39,513천원이며, 의무론은 32,479천원으로 가장 낮게 산정되었다. 이기주의의 경우 자율주행자동차 탑승자의 상해 정도만 우선 고려하여 사망사고 확률이 조금이라도 낮을 경우 옆 차로의 차량과 충돌하는 선택을 할 확률이 높아짐으로 인하여 인적피해비용이 다른 윤리적 선택에 비해 높은 것으로 판단된다.

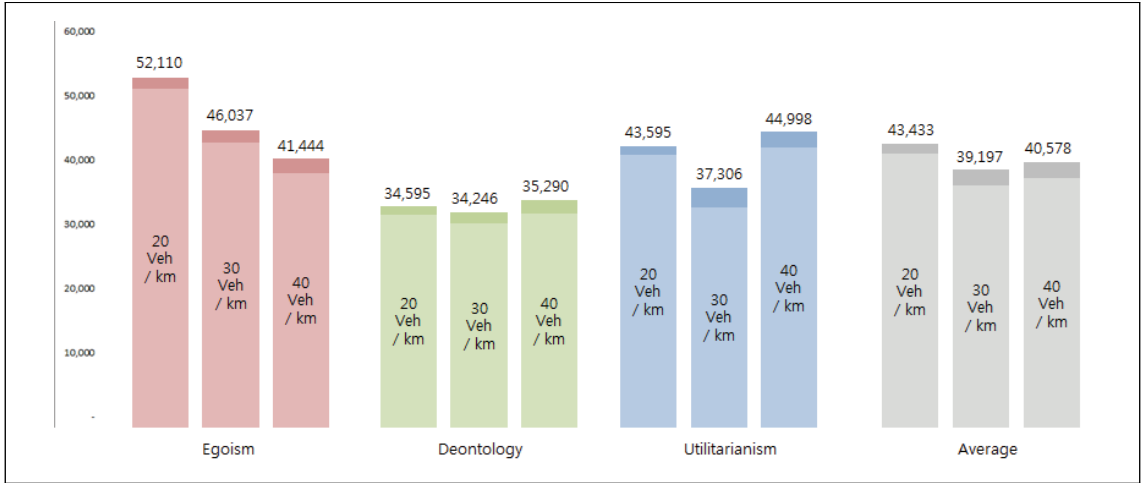
혼잡비용은 이기주의가 2,731천원으로 가장 높게 나타났으며 의무론이 2,232천원으로 가장 낮게 나타났다. 혼잡비용을 고려한 공리주의가 인명피해만을 고려하는 의무론보다 오히려 혼잡비용이 높게 나타났다. 다만, 그 차이가 크지 않고 혼잡비용이 인적피해비용에 비해 크지 않고, 의무론은 인명피해를 최소화하기 위해 낙차를 선택할 확률이 높기 때문에 혼잡비용 또한 낮아지는 결과가 따르는 것으로 판단된다. 또한 시뮬레이션 분석 횟수가 많지 않고, 확률에 의존하고 있는 원인도 있을 것으로 예상된다.

교통사고혼잡비용과 교통사고인적피해비용을 합산한 총 교통사고비용은 <Table 19>와 같다.

<Table 19> Total traffic accident cost (1,000 won)

Density(veh/km) Rate of AVs(%)		20	30	40	평균
Egoism	25	61,824	51,740	46,326	53,297
	50	43,918	44,822	31,723	40,154
	75	50,589	41,550	46,283	46,141
	Average	52,110	46,037	41,444	46,531
Deontology	25	46,119	26,837	44,267	39,074
	50	24,916	42,103	39,231	35,417
	75	32,750	33,798	22,373	29,640
	Average	34,595	34,246	35,290	34,710
Utilitarianism	25	33,022	59,471	34,708	42,401
	50	56,021	28,641	53,976	46,213
	75	41,741	23,807	46,311	37,286
	Average	43,595	37,306	44,998	41,967

<Fig. 2>는 혼입율과 윤리적 선택에 따른 교통사고비용을 도식화한 것이다. 모든 윤리적 선택에서 혼입율과 교통사고비용의 관계가 명료하지 않다. 그러나 평균적으로 혼입율이 증가할수록 교통사고비용은 감소하는 것으로 분석되었다.

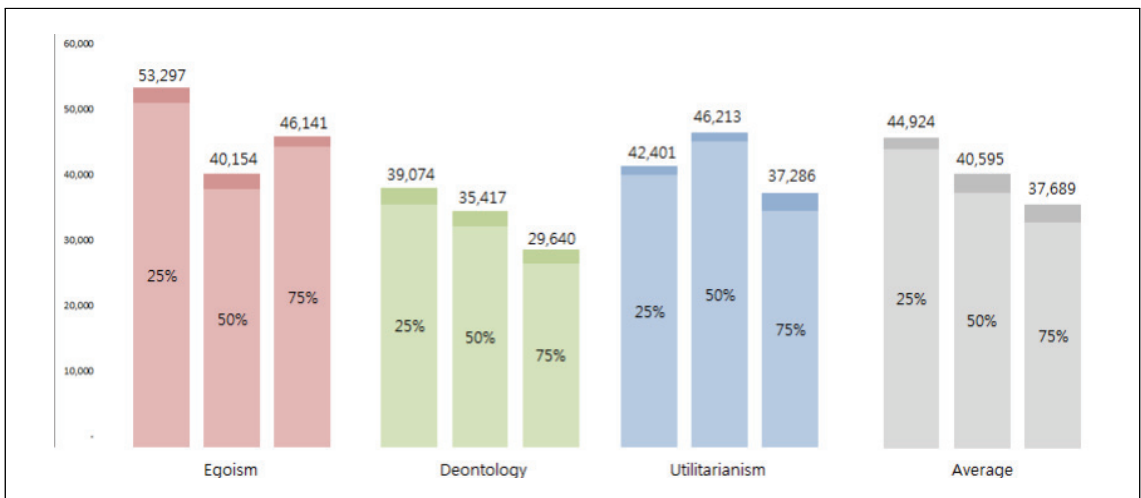


<Fig. 2> Traffic accident costs based on the rate of AVs and ethical choice (1,000 won)

사고비용은 의무론이 가장 낮고, 교통혼잡비용 역시 2차로 폐쇄 상황이 가장 적은 의무론이 가장 낮게 분석되었다. 인적피해비용에 비해 금액 자체가 워낙 작아 영향력이 총 교통사고비용에 미치는 영향은 크지 않다. 이기주의는 자율주행자동차 혼입율 50%에서 교통사고비용이 가장 낮게 분석되었으나 의무론과 공리주의에서는 혼입율 75%에서 교통사고비용이 가장 낮게 분석되었다. 자율주행자동차의 혼입율이 높을수록 교통사고 발생 빈도수가 더 높게 나타났으나, 상대적으로 상해정도는 낮아서 자율주행자동차의 혼입율이 높을수록 교통사고비용이 감소하는 결과가 도출되었다.

<Fig. 3>은 밀도와 윤리적 선택에 따른 교통사고비용이다.

<Fig. 3> Traffic accident costs based on density and ethical choice (1,000 won)



밀도가 높아지면 교통사고 빈도수가 잦아지지만 주행속도가 감소하고 속도차이 또한 감소하기 때문에 상해정도 결정지표가 낮아, 인적피해비용이 낮아지는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 사고율의

개념을 배제하였으므로 이러한 현상이 더 두드러지는 것으로 판단된다. 특히 의무론의 경우 밀도에 따른 영향이 가장 미미하게 나타났다. 의무론은 인명피해를 최소화하기 위해 낙차를 선택할 확률이 높기 때문에 밀도에 영향을 덜 받는 것으로 판단된다.

<Table 20> Traffic accident costs based on ethical choice (1,000 won)

Description	Egoism	Deontology	Utilitarianism
The cost of human damage	43,800	32,479	39,513
Traffic congestion cost	2,731	2,232	2,453
Traffic accident cost	46,531	34,710	41,967

윤리적 선택에 따른 교통사고비용 분석 결과 의무론의 인적피해비용은 32,479천원으로 가장 낮게 분석되었으며, 인적피해비용 뿐 아니라 교통혼잡비용 또한 의무론이 가장 낮게 분석되었다. 이기주의의 인적피해비용은 43,800천원, 혼잡비용은 2,731천원으로 인적피해비용과 혼잡비용 모두 가장 높게 분석되었다. 혼잡비용은 인적피해비용에 비해 비용이 적어 영향력이 매우 약한 편이며, 의무론에 비해 공리주의의 판단 근거 또한 빈약해지는 결과를 초래하였다. 의무론의 경우 무조건 인적피해가 적은 상황을 선택함으로써, 낙차 하는 경우가 많아 오히려 혼잡비용 또한 적어지는 결과를 보이는 것으로 판단된다.

VI. 결론 및 토론

본 연구는 윤리적 선택에 따른 교통사고비용을 시뮬레이션 분석을 통해 도출하였다. 자율주행자동차의 윤리적 문제는 접근 방법이나 기준이 모호한 분야이다. 본 연구는 공학적인 방법으로 자율주행자동차의 윤리이론을 적용하여 시뮬레이션을 통해 분석한 연구로서 의의를 가진다고 판단된다.

분석 결과 개인주의의 교통사고 비용이 가장 높으며, 인명피해를 최소화하는 의무론의 교통사고비용이 가장 낮게 분석되었다. 개인주의의 경우 낙차보다 조금이라도 운전자의 사망 확률이 낮으면 차로변경을 하여 인명피해가 늘어나며, 2차로가 폐쇄되면서 혼잡비용까지 증가하는 것으로 판단된다. 의무론의 경우 인명피해의 최소화를 위한 선택으로서, 공리주의보다 인적피해비용과 혼잡비용이 모두 적게 분석되었다. 인명피해의 최소화를 위해 낙차를 선택할 확률이 상대적으로 높기 때문으로 판단된다. 밀도가 증가할수록, 자율주행자동차의 혼입율이 증가할수록 교통사고비용이 감소하는 것으로 분석되었다. 밀도가 높으면 교통사고가 증가하지만 상해정도가 낮아지게 되어 인적피해비용이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 자율주행자동차의 혼입율이 증가하면 교통사고 발생건수의 감소뿐만 아니라, 사고 건당 교통사고비용 또한 감소될 것으로 기대된다.

의무론은 최대한 다수의 생명을 위해 자기 자신을 희생하거나, 대를 위해 소를 희생하는 윤리적 개념이다. 일반 운전자의 경우 자신의 생명을 지키려는 본능으로 인해, 이러한 윤리적 개념을 적용하거나, 학습이나 교육을 통해 인지시키는 것은 어려운 문제라고 생각된다. 자율주행자동차는 인공지능이 존재한다 하더라도 이러한 윤리 이론을 프로그래밍 하여 상황에 맞춰 정해진 규칙이나 규정에 따라 판단하는 것이 가능하다. 본 연구의 분석 결과로서 자율주행자동차의 윤리이론은 의무론을 따라야한다고 주장하는 것은 아니다. 자율주행자동차의 윤리이론은 인간의 생명과 직결되는 문제이며, 이는 인간의 존엄성에 대한 도덕적 판단을 요구하고 있다. 도덕적 판단 기준은 개개인, 지역, 국가 등에 따라 차이가 있을 수 있으며 수학이나 통계적으로

결정할 수 없는 철학적인 문제이다. 자율주행자동차의 윤리문제는 법·제도, 책임소재, 보험 등과 직결되며, 이용자 측면에 있어서도 이러한 윤리이론에 대한 충분한 인식과 이해가 필요하다. 따라서 각계, 각층의 전문가들이 협업하여 자율주행자동차의 윤리적 개념을 정립하고 법·제도적 문제를 해결하기 위해 보다 많은 노력을 다해야 할 것이며, 이러한 윤리이론의 개념과 의의를 정립하고 이해시킬 필요가 있다고 판단된다.

본 연구는 신뢰성 있는 통계자료의 부족과 시뮬레이션 분석의 확률에 의존하고 있다는 점 등의 한계가 따른다. 현재 공개되어있는 교통사고통계 자료로는 충돌위치, 세분화된 사고유형, 사고 직전 주행속도 등 교통안전과 관련된 연구를 수행하는데 활용할 수 있는 정보가 매우 미흡한 편이다. 보다 많은 연구가 수행되기 위해서 관련 자료의 공개가 필요하다고 판단된다.

시뮬레이션 분석에 있어서 지나치게 확률에 의존하고 있고, 신뢰성 있는 확률에 수렴할 정도의 시뮬레이션을 수행하지 못하였다. 향후 시뮬레이션 구축을 보다 발전시켜 적은 시간으로도 많은 데이터를 확보할 수 있도록 발전시킬 수 있다면, 보다 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 주저자의 박사학위 논문을 수정·보완하여 작성하였음.

본 연구는 이공분야 기초연구사업 로봇차량 윤리적 딜레마: 유형 및 교통영향의 지원을 받아 작성하였습니다.

REFERENCES

- Applin S.(2017), "Autonomous Vehicle Ethics: Stock or custom?," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 6, no. 3, pp.108-110.
- Broen N. L. and Chiang D. P.(1996), "Braking response times for 100 drivers in the avoidance of an unexpected obstacle as measured in a driving simulator," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 40, no. 18, pp.900-904.
- Fambro D., Koppa R., Picha D. and Fitzpatrick K.(1998), "Driver perception-brake response in stopping sight distance situations," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1628, pp.1-7.
- Goodall N. J.(2014), "Ethical Decision Making during Automated Vehicle Crashes," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2424, no. 1, pp.58-65.
- Green M.(2000), "How long does it take to stop? Methodological analysis of driver perception-brake times," *Transportation Human Factors*, vol. 2, no. 3, pp.195-216.
- Gurney J. K.(2016), "Crashing into th Unknown: An Examination of Crash-Optimization Algorithms Through the Two Lanes of Ethics and law," *Albany Law Review*, pp.183-267.
- Jenness J. W., Lerner N. D., Mazor S., Osberg J. S. and Tefft B. C.(2008), "Use of advanced in-vehicle technology by young and older early adopters," *Survey Results on Adaptive Cruise Control Systems*, Report No. DOT HS, 810, 917.
- Johansson G. and Rumar K.(1971), "Drivers' brake reaction times," *Human factors*, vol. 13, no. 1,

pp.23-27.

- Jung S. W., Moon Y. J. and Hwang K. Y.(2018), “An Analysis of the Traffic Speed Due to Jerk on Automated Vehicles,” *Journal of Transport Research*, vol. 16, no. 6, pp.244-257.
- Jung S. W., Moon Y. J., Lee S. Y. and Hwang K. Y.(2017), “Impacts of Automated Vehicles on Traffic Flow Changes,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 6, pp.244-257.
- Kesting A., Treiber M, Schonhof M. and Helbing D.(2008), “Adaptive cruise control design for active congestion avoidance,” *Transportation Research Part C*, vol. 16, no. 6, pp.668-683.
- Kesting A., Treiber M. and Helbing D.(2007), “General lane-changing model MOBIL for car-following models,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1997, no. 1, pp.86-94.
- Lee C. K.(2016), “Autonomous Vehicles : Ethical and legal issues as a robot,” *Planing and Policy*, vol. 416, pp.38-43.
- Lee S. B., Han D. H. and Lee Y. I.(2015), “Development of Freeway Traffic Incident Clearance Time Prediction Model by Accident Level,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 33, no. 5, pp.497-507.
- Lin P., Abney K. and Bekey G. A.(2015), “Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics,” *Ethical Theory & Moral Practice*, vol. 19, no. 2, pp.547-548.
- Olson P. L. and Sivak M.(1986), “Perception-response time to unexpected roadway hazards,” *Human Factors*, vol. 28, no. 1, pp.91-96.
- Park I. S., Lee J. D., Lee J. Y. and Hwang K. Y.(2015), “Impacts of Automated Vehicles on Freeway Traffic-flow-Focused on Seoul-Singal Basic Sections of GyeongBu Freeway,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 6, pp.21-36.
- Shim J. I., Yu J. B., Park J. S. and Sim G. R.(2016), *Estimation of Transport Accident Costs in 2013*, The Korea Transport Institute.
- Van Arem B., Van Driel C. J. and Visser R.(2006), “The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp.429-436.
- Vander Werf J., Shladover S., Miller M. and Kourjanskaia N.(2002), “Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1800, pp.78-84.