

자율주행자동차의 안전한 차량 추종을 위한 RSS 모형의 안전거리 비교

Comparison of RSS Safety Distance for Safe Vehicle Following of Autonomous Vehicles

박 성 호* · 박 상 민* · 홍 윤 석** · 류 승 규*** · 윤 일 수****

* 주저자 : 아주대학교 건설교통공학과 박사과정
 ** 공저자 : 한국교통안전공단 자동차안전연구원 자율주행실장
 *** 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 전임연구원
 **** 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 부교수

Sungho Park* · Sangmin Park* · YunSeog Hong** · Seungkyu Ryu*** ·
 Ilsoo Yun***

* Dept. of Transportation Eng., Ajou University
 ** Connected & Automated Driving Division, Korea Automobile Testing and Research Institute
 *** Dept. of Transportation Eng., Ajou University
 † Corresponding author : Ilsoo Yun, ilsooyun@ajou.ac.kr

Vol.17 No.6(2018)
 December, 2018
 pp.84~95

pISSN 1738-0774
 eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.6.84>

Received 18 October 2018
 Revised 7 November 2018
 Accepted 26 November 2018

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

요 약

자율주행 과실 여부 판단 위한 방법으로 수학적인 모형인 responsibility-sensitive safety(RSS)를 제시된 이후로 자율주행 관련 산업으로부터 많은 관심을 받고 있다. 하지만, 이러한 수학적 모형이 자율주행자동차가 관련된 교통사고 발생 시 책임소재를 명확히 하는 데 활용될 수 있는 지에 대한 종합적인 검토는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 RSS 모형의 적용성과 활용을 위해서 추가적으로 해결되어야 할 사항에 대하여 분석하였다. 결론적으로 RSS 모형을 활용하기에는 모형식 자체 및 수용성 등에 한계가 있으며, RSS 모형을 실무적으로 사용하려고 한다면 자율주행자동차의 반응시간을 정의하고, 자율주행자동차별로 적절한 기술수준에 따라서 반응시간 값을 측정하고 관리할 필요가 있는 것으로 판단된다.

핵심어 : 자율주행자동차, 차량 추종, 책임민감안전모형, 차량 추종, 안전거리

ABSTRACT

A mathematical model of responsibility-sensitive safety (RSS) has been proposed as a way to determine whether an autonomous driving accident has occurred. Autonomous vehicles related industry and academia have shown great interest in this model. However, this mathematical model lacks a comprehensive review on whether the model can be used to clarify responsibilities of autonomous vehicles in the event of a traffic accident. In this study, we analyzed the issues that need to be solved in order to apply the RSS model. In conclusion, there is a limit in the equation and the social acceptability of the RSS model. To use the RSS model practically, it is necessary to define the response time of the autonomous vehicle and to measure and control the reaction time value according to the appropriate technology level for each autonomous vehicle.

Key words : Autonomous vehicle, Car following, Responsibility-sensitive safety model, Safety distance

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

국내에서 2020년 미국 자동차공학회(Society of Automotive Engineers, SAE) 기준 레벨 3수준의 자율주행자동차의 상용화를 목표로 하고 있지만 그에 적합한 제도와 기준은 아직 정립되지 못한 상황이다. 그 중에서도 자율주행자동차량의 교통사고 발생 시 책임 소재에 대한 기준은 쟁점이 되어 꾸준히 논의 및 연구가 진행되고 있지만 명확한 기준은 아직 제시되지 못하고 있다. 이는 비록 국내뿐만 아니라 자율주행자동차 분야 선진국에서도 여전히 활발한 논의가 진행 중에 있다.

2016년 테슬라의 자율주행 기능인 Autopilot 사용 중 발생한 첫 자율주행자동차 사망사고를 시작으로 자율주행자동차의 사고가 증가하고 있다. 이후에도 지속적으로 자율주행자동차의 사고가 발생하고 있으며, 2018년 3월, 우버의 자율주행자동차는 보행자와의 사고가 발생하여 사망한 사례가 있었다. 2016년 테슬라의 사고는 미국 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)의 조사에 의해 그 원인이 밝혀졌지만, 원인 규명까지 6개월의 시간이 소요되었다.

최근 모빌아이(Mobileye)에서 연구를 통해 자율주행 과실 여부 판단 위한 방법으로 수학적 모형인 responsibility-sensitive safety(RSS) 모형을 사용할 것을 제안하였다(Shalev-Shwartz et al., 2017). 이 연구에서는 자율주행 중 발생할 수 있는 모든 상황에 대한 모형을 구축하여 정확한 기준안을 제시하지는 못하였지만 차량 추종 시 안전거리를 계산하는 모형을 제시하였다. 하지만, 이러한 모형이 자율주행자동차 교통사고 발생 시 책임소재를 명확히 하는 데 활용될 수 있는 지에 대한 다각적인 검토는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모빌아이에서 제시하는 안전거리 관련 RSS 모형이 교통사고 발생 시 판단 기준으로써의 활용 가능성을 알아보고자 한다. 이를 위해, 국내에서 사용 중인 안전 관련 지표 중 RSS 안전거리와 가장 유사하다고 판단되는 정지시거를 선정하였으며 유사한 상황을 가정하여 비교 및 분석해보고자 한다. 또한 RSS 모형을 적용하기 위해서 향후 준비가 필요한 사항들을 점검하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

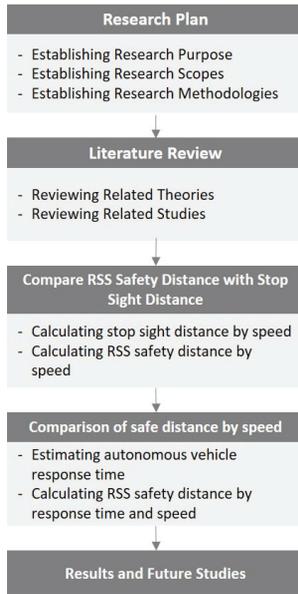
1) 연구의 범위

본 연구의 범위는 Shalev-Shwartz et al.(2017)의 연구에서 제시한 RSS 모형의 여러 가지 상황 중 안전거리(safe longitudinal distance) 모형을 주요 대상으로 하였다. RSS의 안전거리 모형에 대한 검증은 위해 안전 관련 지표 중 모형에 사용되는 변수가 가장 유사하다고 판단되는 정지시거와의 비교 및 분석을 하였다. 모형의 유사성을 고려 시 차량추종모형과 비교하는 것이 적합한 것으로 판단되지만, 본 연구에서는 교통사고 발생 시 판단 기준으로서의 활용 가능성에 초점을 두었기 때문에 비교 대상을 안전과 관련된 모형에 국한하였다. 향후 자율주행자동차의 발전과 다양한 상황을 고려하여 속도 별 RSS 모형에 따른 안전거리를 분석하였고, 이를 바탕으로 RSS 활용 가능성에 대해 논하는 것을 연구의 범위로 하였다.

2) 연구의 방법

본 연구는 연구 계획 수립, 관련 이론 및 연구 고찰, 정지시거 모형과 RSS 모형의 안전거리 비교, 속도 별 안전거리 비교, 결론 순으로 수행하였다. 연구 계획 수립 단계에서는 연구의 배경 및 목적을 설정하고 연구 범위와 방법론을 설정하였다. 관련 이론 및 연구 고찰 단계에서는 RSS 모형과 정지시거 모형 등 관련 이론

에 대한 서술과 기존에 이루어진 자율주행자동차 차량추종과 관련된 연구에 대해 조사하였다. 정지시거와 RSS 모형의 안전거리 비교 단계에서는 RSS 모형의 안전거리 산출에 적용되는 변수들에 대한 적정값을 고찰하여 속도별 RSS 모형의 안전거리를 산정하였고, 이를 정지시거와 비교해보았다. 속도 별 안전거리 비교 단계에서는 자율주행자동차의 반응시간에 대한 고찰과 이를 적용한 반응시간별 RSS 모형의 안전거리를 분석하였고, 이를 토대로 RSS 모형 활용 가능성에 대해 논하였다. 결론 단계에서는 본 연구의 결론을 맺고 향후 연구과제에 대해 논하였다.



<Fig. 1> Research process

II. 관련 이론 및 연구 고찰

1. 관련 이론 고찰

1) RSS

이스라엘의 자율주행카메라 및 센서 제작사인 모빌아이(MobilityEye)가 RSS라 명명한 자율주행자동차 안전과 관련된 모형을 제시하며 자율주행자동차의 교통사고 발생 시 책임 소재를 판단할 수 있는 근거로 활용할 것을 제안하였다(Shalev-Shwartz et al., 2017). 모빌아이는 Shalev-Shwartz et al.(2017) 연구에서 교통사고 발생 위험을 최소화하는 자율주행자동차 상태를 안전 상태(safe state)라 명명하고 주행 시 안전 상태를 유지하거나 안전 상태로 복귀하기 위한 조작을 자율주행자동차의 주행전략으로 하였다. 하지만 안전 상태의 유지 혹은 유지하기 위한 과정에서 교통사고 발생 시, 구체적인 책임 소재에 대한 구분 방안까지는 제시하지 못하였다. 현재까지 발표된 연구에서는 차량추종 시나리오, 끼어들기 시나리오, 감지한계 및 장애물 시나리오 등 세 가지 시나리오를 제시하였지만 구체적인 수학적 모형까지 제시한 것은 차량추종 시나리오에서의 전방차량과의 안전거리를 계산하는 모형이다.

2) 차량추종이론 및 모형

차량추종이론은 연이어 주행하는 두 차량 간 가·감속도, 차두간격, 속도 등의 변화상태 및 상호 관계식을 규명하기 위해 개발된 모든 분석기법을 의미하며, 1950년대에 활발히 논의가 되었다(Won and Choi, 1999). 차량추종이론은 단차선 교통류의 형태를 이해하기 위한 방법으로 뒤 차량은 앞 차량을 따른다고 가정하고 앞 차량의 움직임에 따른 뒤 차량의 반응 예측하는 것이 목적이며, 교통류의 주행특성을 이해하고 뒤 차량에 의한 추돌 사고를 최소화할 수 있는 교통운영기법의 이론적 토대를 제공한다(Han, 1999).

차량추종모형(car-following model)은 차량추종상황에서 가속행태를 이끌어내는 것이며, 운전자는 자신의 선두차량과 근접하여 진행하므로 선두차량의 행태에 직접적으로 영향을 받는다. 따라서 선행차량의 행태변화에 직접적으로 반응하면서 후행차량을 진행시키는 모형이다(Choi, 2000). Mark et al.(1999)의 연구를 살펴보면 Gazis-Herman-Rothey(GHR)모형, Safety distance or collision avoidance(CA) 모형, Psychophysical or action point(AP) 모형 등 크게 3가지 형태로 구분되어지며 <Table 1>과 같다(Kim, 2005).

<Table 1> Major Car-following model

Model		Equation	Parameter
GHR	Chandler	$a_n(t+T) = \lambda \Delta v(t)$	T, λ
	GM	$a_n(t+T) = \alpha \frac{v_n(t+T)^m}{\Delta x(t)^l} \Delta v(t)$	T, α, m, l
Safety distance	Krauss	$v_{safe} = v_{n-1} + \frac{g_n(t) - v_{n-1}(t)T}{(v_n(t) + v_{n-1}(t))/2b + T}$	T, b, V
AP	Lenutz	$a_n(t+T) = \frac{\Delta v(t)^2}{2[S - \Delta x(t)]} + a_{n-1}(t)$	T, S

3) 정지시거

정지시거(stopping sight distance)는 운전자가 같은 차로 상에 있는 고장차 등의 장애물 또는 위험요소를 알아차리고 제동을 걸어서 안전하게 정지하거나, 혹은 장애물을 피해서 주행하기 위하여 필요한 길이를 설계 속도에 따라 산정한 것이다(MOLIT, 2013). 실제로 그 도로의 확보된 정지시거를 측정하는 방법은 운전자의 위치를 진행하는 차로의 중심선상으로 하고, 운전자 눈의 높이를 도로 표면으로부터 100cm로 하여, 장애물 또는 물체의 높이 15cm를 볼 수 있는 거리를 같은 차로의 중심선상으로 측정하여야 한다(MOLIT, 2013).

정지시거는 공주거리(반응시간 동안의 주행거리, free running distance)와 제동정지거리(braking distance)를 산정하여 합한 값으로 결정된다. 공주거리는 운전자의 경험과 숙련 정도, 위기대처능력 등에 따라 다양하며 운전자가 장애물을 발견하고 브레이크를 밟을 때까지의 반응시간에 의해 결정된다. 반응시간은 인지-판단 시간과 제동장치 작동시간으로 구분될 수 있다. 기존의 반응시간에 대한 연구들을 살펴보면 0.4-0.7초 정도이나, 혼잡한 도로상황과 예기치 못한 상황들을 고려하여 2.5초(인지-판단 시간 1.5초 및 제동장치 작동시간 1초)를 반응시간으로 잡을 경우 90% 이상의 운전자가 위기에 대응할 수 있는 적당한 시간으로 판단하고 있다(MOLIT, 2018).

제동정지거리는 운전자가 브레이크를 밟아 자동차를 정지시킬 때 필요한 거리로, 그 자동차의 브레이크 성능, 포장의 종류 및 노면상태, 타이어의 재질 및 상태 등 다양한 조건에 따라 달라진다. 노면과 타이어 간에 작용하게 되는 종방향미끄럼마찰계수는 속도에 따라 변화하며, 이로 인해 운전자가 브레이크를 밟고 있는 동안 자동차의 속도도 변화하게 되나, 이 때 종방향미끄럼마찰계수의 값은 안전을 고려하기 위해 브레이크를 밟기 직전의 속도 및 노면의 습윤상태의 값을 적용하여 계산한다(MOLIT, 2018).

2. 관련 연구 고찰

Stephanie et al.(2015)은 자율주행자동차량의 차량 추종은 운전자의 안전, 편안함 등을 고려해야 하며 이는 실제 운전자의 움직임을 모방하는 것이 가장 적합할 것이라 판단했다. 운전자의 실제 주행 궤적을 통해 운전자 모형을 만들고 안전을 위해 주행궤적을 제한하는 컨트롤러를 혼합하여 차량 추종 모형을 제시하였다. 5명의 운전자 데이터를 통해 모형을 구축하고 K-S 검정을 통해 각 모형이 다르게 구축되었음을 보였다. 시뮬레이션을 통해 모형의 주행 데이터를 검증하였으며, 기존 운전자와의 데이터 유사성과 안전 기준 준수 등을 확인하였다.

Zhu et al.(2018)은 예상 평균 속도를 이용하여 자율주행자동차량의 차량추종모형을 개발하였다. 모든 차량이 자율차량으로 이루어지고 차량들의 속도 및 위치 정보를 알 수 있는 상황을 가정하였다. 모형의 변수로는 민감도, 강도계수, 예상 평균 속도 등이 이용되었다. 개발된 모형의 검증을 위해 두 가지의 시나리오를 수립하고 시뮬레이션을 통해 모형의 적용성을 검증하였다.

Cho(2010)의 연구에서는 다차로 다차량 주행환경에서 무인자동차가 인접 차량과의 충돌 또는 충돌 없이 안정적으로 주행하기 위한 주행 궤적을 생성하고 추종하게 함으로써 무인 자동차의 자율주행을 구현하는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘은 인접차량의 위치, 속도, 가속도, 주행 차로 정보를 이용하였다. 알고리즘의 효과적인 시뮬레이션을 위하여 3차원 그래픽 기반 시뮬레이션 환경을 제안하였으며 이를 통하여 제시된 알고리즘의 성능을 평가하였다. 후방에서 가속하여 오는 차량과 충돌하지 않고 안정적인 차로를 선택하여 주행하는 상황과 주행하고 있는 자율주행 차량의 앞 쪽으로 끼어들기 하는 인접 차량과 충돌하지 않고 안정적인 차로를 선택하여 주행하는 2가지 상황에 대해서 수행하였으며 인접 차량들과 충돌 위험을 예측하여 안정적인 차로를 선택하여 주행하는 것을 확인하였다.

자율주행에서 종방향제어와 관련된 기존의 연구들에서도 안전을 항상 고려하고 있다. 각 연구 별로 안전을 위한 모형 또는 기준은 상이하지만 사용되는 변수는 속도, 가속도 등으로 대동소이하였다. 최근에 대두되고 있는 RSS 안전거리 모형을 국내에서의 기준인 정지시거와 비교해 봄으로서, 자율주행 모형 개발에 있어 안전 기준에 대한 참고의 의의를 두었다.

Ⅲ. 정지시거 모형과 RSS 모형의 안전거리 비교

1. 정지시거

정지시거는 운전자가 앞쪽의 장애물을 인지하고 위험하다고 판단하여 제동장치를 작동시키기까지의 주행 거리와 운전자가 브레이크를 밟기 시작하여 자동차가 정지할 때까지의 제동정지거리를 더한 값으로 다음과 같이 계산된다(MOLIT, 2013).

$$D = d_1 + d_2 = \frac{V}{3.6}t + \frac{V^2}{254f}$$

여기서, D : 정지시거(m)
 d_1 : 반응시간 동안의 주행거리
 d_2 : 제동정지거리
 V : 주행속도(km/h)
 t : 반응시간(2.5초)
 f : 종방향미끄럼마찰계수

종방향미끄럼마찰계수는 충분히 안전한 값을 취하기 위해 노면습윤상태로 고려하였으며 미국의 AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)에서 사용한 0.347을 적용하였다(AASHTO, 2011). 이때 속도에 따른 정지시거는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Stopping sight distances according to the speed in wet road condition

Speeds(km/h)	Friction factors(wet road condition)	Stopping sight distances(m)
120	0.347	246.7
110	0.347	213.7
100	0.347	182.9
90	0.347	154.4
80	0.347	128.2
70	0.347	104.2
60	0.347	82.5
50	0.347	63.1
40	0.347	45.9

2. RSS 모형의 안전거리

RSS의 차량추종 시나리오에서 안전거리 공식(safe distance formula)은 자율주행자동차인 후방차(following vehicle)와 전방차(leading vehicle)의 속도 및 후방차의 반응시간이 가장 주요한 변수이며 계산 방법은 다음과 같다.

$$d_{\min} = L + T_f[v_r + v_f + \rho(a_a + a_b)] - \frac{\rho^2 a_b}{2} + \frac{(T_r - T_f)(v_r + \rho a_a - (T_f - \rho)a_b)}{2}$$

$$T_f = \frac{v_f}{a_{\max,brake}}$$

$$T_r = \rho + \frac{v_{\rho, \max}}{a_{\max,brake}}$$

$$v_{\rho, \max} = v_r + \rho \cdot a_{\max, accel}$$

- 여기서, d_{\min} : 최소안전거리(m)
 L : 평균차량길이
 ρ : 후방차의 반응시간
 v_r, v_f : 후방차, 전방차의 속도(m/s)
 a_a, a_b : 차량들의 최대가속도, 최대감속도(m/s²)
 T_f : 최대감속도 적용시 전방차량이 완전정지까지 걸리는 시간
 T_r : 반응시간동안 후방차량이 최대가속도로 주행 후 최대감속도로 완전정지까지 걸리는 시간

본 연구에서는 전방차와 후방차가 모두 승용자동차일 경우를 가정하여 최소안전거리를 계산하였다. 평균 차량길이는 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설’에서 설계기준자동차 중 승용자동차의 제원인 4.7m를 적용하였다(MOLIT, 2013). 후방차의 반응시간은 정지시거에서 적용된 2.5초를 동일하게 적용하였다. 차량의 최대가속도 및 최대감속도는 국제표준인 ISO-22179에서 제안한 FSRA(full speed range adaptive cruise control)

시스템의 최대가속도인 $4m/s^2$ 과 최대감속도인 $-4.9m/s^2$ 로 설정하였다(Ahn et al., 2018). 이와 같은 조건일 때 전방차와 후방차의 속도가 같다는 가정 하에 속도 별 RSS 모형의 안전거리는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Safe distance of RSS model

Speeds of leading vehicle(km/h)	Speeds of following vehicle(km/h)	Safe distance(m)
120	120	191.3
110	110	178.7
100	100	166.0
90	90	153.4
80	80	140.8
70	70	128.2
60	60	115.6
50	50	103.0
40	40	90.4

3. 비교 분석

정지시거와 RSS 모형의 안전거리를 비교해보면 90km/h 시 각각 154.4m와 153.4m로 비슷하게 도출되었다. 속도가 낮을수록 정지시거와 RSS 안전거리의 차이가 크게 벌어졌는데 이는 두 모형에서 후방차량의 반응시간 동안의 주행거리 산정 방법이 다른데서 기인한다. 정지시거 모형에서는 반응시간 동안의 주행거리 산정 시 주행 중이던 속도가 유지된다고 가정한다. 반면에 RSS 모형에서는 반응시간 동안 전방차량은 최대감속도로 속도가 변화하고 후방차량은 최대가속도로 속도가 변화하는 것을 가정하고 있기 때문에 저속 구간에서도 상대적으로 긴 안전거리가 산정된다.

분석 결과를 바탕으로 RSS 안전거리의 적용성을 판단해보면 고속의 범위에서는 충분히 가능할 것으로 판단된다. 하지만 저속범위에서는 필요 이상으로 거리가 길어지기 때문에 직접적인 적용은 어려울 것으로 판단된다. 안전을 위해 충분한 안전거리 확보도 중요하지만 안전거리 확보가 과도할 경우 교통류율이 낮아져 비효율적인 차량의 흐름을 야기할 수 있기 때문이다.

따라서 정지시거와 RSS 모형의 안전거리를 보다 다양한 조건에서 확인해볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 다양한 조건을 고려하기 위하여 자율주행자동차의 기술수준에 따라 달라질 수 있는 반응시간과 후방차와 전방차의 속도 차이를 고려하고자 한다.

IV. 다양한 조건에서 RSS 모형 안전거리 비교

1. 반응시간별 안전거리

기존에 사용되는 반응시간은 위험요소를 판단하는 인지-판단 시간 1.5초와 제동장치를 작동하기까지 걸리는 시간 1초를 더하여 총 2.5초로 사용하였다. 하지만 자율주행자동차에서는 기존의 반응시간 중 인지 및 판단의 과정이 각종 센서와 시스템으로 대체될 것이기 때문에 그 시간이 극단적으로 짧아지거나 없어질 것으로 예상된다. 따라서 기존의 반응시간 중 인지-판단 시간은 제외하고 제동장치 작동시간이 자율주행자동차

동차의 반응시간과 동일할 것이다.

현재 시점에서 자율주행자동차의 반응시간을 정확하게 예측하는 것은 현실적으로 어려우므로 정지시거 시 적용한 반응시간 1.0초를 기본으로 검토하고, 향후 자율주행자동차의 성능 발전을 고려하여 더 짧은 시간인 0.3초를 적용하여 비교하였다(MOLIT, 2018). 즉, RSS에서 모형에서 반응시간을 각각 2.5초, 1.0초 그리고 0.3초로 설정하여 안전거리를 산출하였으며, 기존 정지시거와의 비교 결과는 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Comparison of distances according to different response times

Speeds of leading and following vehicle (km/h)	Stopping sight distances (m)	Safe distance (m)		
		Response time of 2.5s	Response time of 1.0s	Response time of 0.3s
120	246.7	191.3	70.9	23.4
110	213.7	178.7	65.8	21.9
100	182.9	166.0	60.8	20.3
90	154.4	153.4	55.7	18.8
80	128.2	140.8	50.7	17.3
70	104.2	128.2	45.7	15.8
60	82.5	115.6	40.6	14.3
50	63.1	103.0	35.6	12.8
40	45.9	90.4	30.5	11.3

비교 결과, RSS 모형의 적용에 있어서 자율주행자동차인 후방차의 반응시간이 산출되는 안전거리에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 즉, 기술발달로 인하여 자율주행자동차의 반응시간이 줄어들수록 <Table 4>에서 보인 바와 같이 RSS 모형에서 산출된 안전거리가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하지만, RSS 모형을 실무적으로 사용하려고 한다면 자율주행자동차의 반응시간을 정의할 필요가 있다고 판단된다.

2. 전방차량 및 후방차량 속도별 안전거리

RSS 모형에서 중요한 역할을 하는 요소는 전방차량과 후방차량의 속도 값이다. 따라서 선행차와 후행차의 속도 값의 차이에 따라 RSS 모형에서 산출하는 안전거리가 어떠한 차이를 보이는 지 확인할 필요가 있다. 속도별 RSS 모형의 안전거리를 산출함에 있어 다양한 상황을 고려하기 위해 반응시간 및 전방차량과 후방차량의 속도를 다양하게 분석을 실시하였다. 또한 사용된 반응시간은 정지시거에서 사용하는 인간 운전자 기준의 반응시간 값인 2.5초와 더불어 자율주행자동차의 성능을 반영한 1.0초와 0.3초에 대해서도 각각 분석을 실시하였다.

<Table 5> RSS safety distance by speeds (reaction time 2.5 seconds)

(Unit: m)

Speed		Following vehicle						
		120km/h	110km/h	100km/h	90km/h	80km/h	70km/h	60km/h
Leading vehicle	120km/h	191.3	160.5	131.4	103.8	77.8	53.4	30.6
	110km/h	209.4	178.7	149.5	121.9	95.9	71.5	48.7
	100km/h	225.9	195.2	166.0	138.5	112.5	88.0	65.2
	90km/h	240.9	210.1	181.0	153.4	127.4	103.0	80.2
	80km/h	254.3	223.5	194.4	166.8	140.8	116.4	93.5
	70km/h	266.1	235.3	206.2	178.6	152.6	128.2	105.3
	60km/h	276.3	245.6	216.4	188.9	162.9	138.4	115.6

<Table 5>에서 보인 바와 같이, 후방 차량속도와 전방 차량의 속도 조합에 따라 안전거리를 다양하게 분석되었다. 전방 차량의 속도가 후방 차량의 속도보다 높은 경우에는 안전거리가 짧게 분석되었고, 후방 차량의 속도가 전방 차량의 속도보다 높은 경우에는 필요한 안전거리가 긴 것으로 분석되었다. 반응속도 2.5초인 경우에는 충분한 반응시간을 고려한 만큼 안전거리가 다소 길게 계산된 것으로 판단된다.

<Table 6> RSS safety distance by speeds (reaction time 1.0 seconds) (Unit: m)

Speed		Following vehicle						
		120km/h	110km/h	100km/h	90km/h	80km/h	70km/h	60km/h
Leading vehicle	120km/h	70.9	47.7	26.1	6.1	-	-	-
	110km/h	89.0	65.8	44.3	24.2	5.8	-	-
	100km/h	105.5	82.4	60.8	40.8	22.4	5.5	-
	90km/h	120.5	97.3	75.7	55.7	37.3	20.5	5.2
	80km/h	133.9	110.7	89.1	69.1	50.7	33.8	18.6
	70km/h	145.7	122.5	100.9	80.9	62.5	45.7	30.4
	60km/h	155.9	132.8	111.2	91.2	72.7	55.9	40.6

<Table 6>에서 보인 바와 같이, 반응속도가 1.0초일 경우에는 전체적으로 안전거리가 반응속도 2.5초일 경우에 비해 짧게 분석되었다. 전방 차량의 속도가 100km/h 이상에서는 후방 차량의 속도와 40km 이상 차이 나는 경우 안전거리가 0m 이하로 계산되었다.

<Table 7> RSS safety distance by speeds (reaction time 0.3 seconds) (Unit: m)

Speed		Following vehicle						
		120km/h	110km/h	100km/h	90km/h	80km/h	70km/h	60km/h
Leading vehicle	120km/h	23.4	3.7	-	-	-	-	-
	110km/h	41.5	21.9	3.8	-	-	-	-
	100km/h	58.0	38.4	20.3	3.9	-	-	-
	90km/h	73.0	53.4	35.3	18.8	3.9	-	-
	80km/h	86.4	66.7	48.7	32.2	17.3	4.0	-
	70km/h	98.2	78.5	60.5	44.0	29.1	15.8	4.1
	60km/h	108.4	88.8	70.7	54.3	39.4	26.0	14.3

<Table 7>에서 보인 바와 같이, 반응속도가 0.3초일 경우에는 전체적으로 안전거리가 상당히 짧게 분석되었다. 전방 차량의 속도가 80km/h 이상에서는 후방 차량의 속도와 20km 이상 차이 나는 경우 안전거리가 0m 이하로 계산되었다. 고속에서도 도출된 안전거리가 짧다고 판단되어 지기 때문에 전방 차량이 자율주행자동차가 아닌 경우에는 운전자가 불안감을 느낄 수 있을 정도의 거리인 것으로 판단된다.

3. RSS 모형 활용

RSS 모형은 자율주행 과실 여부 판단 위한 방법으로서 제시되었으며, 현재 자율주행 중 발생할 수 있는 모든 상황 중 차량 추종 시 안전거리를 계산하는 모형을 제시되어 있다. 현재 RSS 모형을 자율주행자동차가 추종하는 상황에서 발생한 추돌교통사고에 적용함에 있어 중요한 역할을 하는 요소는 반응시간과 전방차량

과 후방차량의 속도이다. 특히, 반응시간이 줄어들수록 안전거리가 크게 줄어드는 것을 확인하였고 전방차량과 후방차량의 속도값이 다를 경우에도 산출된 안전거리가 많이 차이 나는 것을 확인할 수 있었다.

우선 속도와 관련하여, <Table 2>와 <Table 3>에서 보인바와 같이 큰 반응시간 값을 적용할 경우 고속의 범위에서는 RSS 모형을 적용하는 것이 충분히 가능할 것으로 판단되지만, 저속범위에서는 필요 이상으로 거리가 길어지기 때문에 직접적인 적용은 어려울 것으로 판단된다. 안전을 위해 충분한 안전거리 확보도 중요하지만 안전거리 확보가 과도할 경우 교통류율이 낮아져 비효율적인 차량의 흐름을 야기할 수 있기 때문이다. 또한 작은 반응시간 값을 적용할 경우 안전거리 값이 너무 작아서 운전자들의 불안감과 예기치 못한 상황(unplanned ODD exit)에 대응하기 힘들 것으로 판단된다. 즉, RSS 모형으로부터 도출된 안전거리 값에 대한 사회적 수용성에 대한 논란이 있을 수 있으며, 사회적 수용성을 얻기 위해서는 지속적인 모니터링 및 개선이 필요할 것으로 판단된다.

또한 전방차량과 후방차량의 속도를 달리하였을 때 일부의 경우에는 안전거리 값이 음수가 산출되는 등 아직은 모형의 개선 여지가 필요한 것으로 판단된다.

또한 RSS 모형을 실무적으로 사용하려고 한다면 자율주행자동차의 반응시간을 정의할 필요가 있다. 자율주행자동차의 반응시간은 사용하는 센서의 종류, 인지 및 판단 알고리즘, 주변 환경(조명, 날씨, 곡률 등)에 따라서 달라질 수 있기 때문에 RSS 모형을 자율주행자동차 관련 교통사고의 책임 규명에 사용하려면 자율주행자동차의 반응시간을 정의하고, 자율주행자동차별로 적절한 기술수준과 운영설계도메인(operational design domain, ODD)에 따라서 반응시간 값을 측정하고, 자율주행자동차의 사물 및 사건 감지·대응(object and event detection and response, OEDR) 관련 기준값으로 관리할 필요가 있다고 판단된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

본 연구에서는 자율주행자동차의 안전한 차량추종을 위해 모빌아이에서 제시한 RSS의 안전거리 모형과 정지시거를 비교 및 분석해보았다. 정지시거는 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설’의 모형을 적용하였다. RSS 모형에 적용되는 변수는 승용자동차를 기준으로 하여 일반적으로 통용될 수 있는 값들을 적용하였다.

차량의 속도가 동일한 경우와 정지시거를 비교한 결과 90km/h에서는 두 값이 비슷하게 도출되었고 100km/h 이상의 속도에서는 정지시거가, 80km/h 이하의 속도에서는 RSS 안전거리가 크게 분석되었다. 자율주행차량의 반응시간을 고려하여 각각 2.5초, 1.0초, 0.3초로 가정하여 전방 차량과 후방 차량의 속도를 다양하게 조합하여 안전거리를 분석하였다. 반응속도가 2.5초에서는 다소 길게 분석되었으며, 반응속도 0.3초에서는 극단적으로 짧게 분석되었으며 속도 조합에 따라 0m 이하의 값이 도출되는 경우도 존재하였다.

또한 RSS 모형을 자율주행자동차 관련 교통사고의 책임 규명에 사용하려면 자율주행자동차의 반응시간에 대한 기준을 정의하고 다양한 자율주행자동차 방식에 대하여 조사할 필요가 있다고 판단된다.

2. 향후 연구과제

본 연구의 한계는 자율주행자동차의 반응시간을 기존 문헌조사 결과를 바탕으로 RSS 모형에 적용한 것이다. 향후 RSS 모형의 적용을 고려한다고 하면, 먼저 자율주행자동차에 기술적으로 적용될 수 있는 반응시간을 정의하고, 자율주행자동차의 ODD 및 OEDR의 기술 수준에 따라서 자율주행자동차의 반응시간을 측정하

고 또한 이를 자율주행자동차 안전기준으로서 체계적으로 관리할 수 있는 제도를 마련할 필요가 있다고 판단된다.

또한 기존 RSS 모형에서 전방차량과 후방차량의 속도 값에 따라서 음수가 나오는 문제 등을 구조적으로 해결할 필요가 있다. 이를 위해서는 보다 다양한 조건에서 RSS 모형을 검토하고 모형식 자체의 구조적 변경을 통해서 이러한 문제를 개선할 필요가 있다.

RSS 안전거리 모형의 개발 및 활용 목적과 유사성이 높은 기존의 차량추종모형과의 비교해 볼 필요가 있다. 다양한 상황에서 차량추종모형과의 비교를 통해 실제 주행 상황에서의 RSS 안전거리 모형의 활용 가능성을 판단해 볼 필요성이 있다.

마지막으로 자율주행자동차가 상용화되고 본격적으로 도로를 주행하게 되면 기존에 예상하지 못하였던 상황들이 도출될 것으로 예상됨에 따라 이러한 부분을 지속적으로 모니터링함으로써 RSS 모형의 확대 적용 시 사회적 수용성 등을 고려할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(과제번호 18TLRP-B131486-02)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- AASHTO(2011), *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*.
- Ahn D. R., Shin S. G., Park K H., Choi I. S. and Lee H. K.(2018), "Functional safety concept design and verification for longitudinal driving assistance system of an autonomous vehicle," *Transactions of KSAE*, vol. 26, no. 2, pp.149-158.
- Brackstone M. and McDonald M.(1999), "Car-following: a historical review," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 2, Issue 4, pp.181-196.
- Cho Y. W.(2010), "A study on algorithm for autonomous navigation of unmanned ground vehicle and its 3D graphical simulation," *Journal of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, vol. 14, no. 4, pp.324-331.
- Choi S. S.(2000), *Development of a Car-following Model for Microscopic Simulation Model*, University of Seoul.
- Han D. H.(1999), *A Development of the Car-following Theory Using Fuzzy Variables of Roadway System*, Hanyang university.
- Kim E. Y.(2006), *Calibration Car Following Model Parameter Using DGPS Receiving Data*, University of Seoul.
- Lefèvre S., Carvalho A. and Borrelli F.(2015), "Autonomous car following: A learning-based approach," In *Intelligent Vehicles Symposium, 2015 IEEE*, pp.920-926.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Explanation of regulations on the structure and facility standards of roads*.

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2018), *Study on autonomous road geometry*.
- Shalev-Shwartz S., Shammah S. and Shashua A.(2017), *On a formal model of safe and scalable self-driving cars*, arXiv preprint arXiv : 1708.06374.
- Wen-Xing Z. and Li-Dong Z.(2018), “A new car-following model for autonomous vehicles flow with mean expected velocity field,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 492, pp.2154-2165.
- Won J. and Choi J. S.(1999), *Transportation Engineering*, Pakyounghsa.