

도로 및 인접차량과의 상호작용분석을 통한 차량의 주행안전성 평가기법 개발 연구

박재홍¹ · 오철^{2*} · 윤덕근¹

¹한국건설기술연구원 도로연구소, ²한양대학교 교통물류공학과

A Methodology for Evaluating Vehicle Driving Safety based on the Analysis of Interactions With Roads and Adjacent Vehicles

PARK, Jaehong¹ · OH, Cheol^{2*} · YUN, Dukgeun¹

¹Highway and Transportation Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi 10223, Korea

²Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

Abstract

Traffic accidents can be defined as a physical collision event of vehicles occurred instantaneously when drivers do not perceive the surrounding vehicles and roadway environments properly. Therefore, detecting the high potential events that cause traffic accidents with monitoring the interactions among the surroundings continuously by driver is the prerequisite for prevention the traffic accidents. For the analysis, basic data were collected to analyze interactions using a test vehicle which is equipped the GPS(Global Positioning System)-IMU(Inertial Measurement Unit), camera, radar and RiDAR. From the collected data, highway geometric information and the surrounding traffic situation were analyzed and then safety evaluation algorithm for driving vehicle was developed. In order to detect a dangerous event of interaction with surrounding vehicles, locations and speed data of surrounding vehicles acquired from the radar sensor were used. Using the collected data, the tangent and curve section were divided and the driving safety evaluation algorithm which is considered the highway geometric characteristic were developed. This study also proposed an algorithm that can assess the possibility of collision against surrounding vehicles considering the characteristics of geometric road structure. The methodology proposed in this study is expected to be utilized in the fields of autonomous vehicles in the future since this methodology can assess the driving safety using collectible data from vehicle's sensors.

Keywords: Algorithm, Highway geometric, SDI(Safety Distance Index), SSM(Surrogate Safety Measure), Traffic accident

초록

교통사고는 운전자가 주변 차량 및 도로기하구조 상태 변화에 대한 인지부족과 적절한 회피 행동을 능동적으로 수행하지 못하는 경우에 순간적으로 발생하는 차량의 물리적 충돌사건으로 정의 될 수 있다. 따라서, 운전자가 도로를 주행하면서 만들어 내는 주변 환경과의 상호작용을 지속적으로 모니터링하고, 교통사고를 유발할 개연성이 높은 이벤트를 검지하는 것은 교통사고 예방을 위한 선결조건이다. 본 연구에서는 연속류 도로를 대상으로, GPS(Global Positioning

J. Korean Soc. Transp.
Vol.35, No.2, pp.116-128, April 2017
<https://doi.org/10.7470/jkst.2017.35.2.116>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 10 February 2017

Revised: 27 March 2017

Accepted: 19 April 2017

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

System)-IMU(Inertial Measurement Unit), 카메라, 레이더, 라이다가 부착된 조사 차량을 이용하여 도로기하구조 및 교통환경 정보를 취득하였다. 취득된 정보를 가공하여 차량의 상호 작용 및 도로기하구조 특성을 고려한 주변차량과의 충돌 가능성여부를 평가할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 특히, 도로기하구조를 제한속도(직선부), 안전속도(곡선부)로 구분하여 평가하고, 교통안전지표인 SDI를 이용하여 차량의 주행안전성을 평가하였다. 본 연구에서 개발한 방법론은 도래하는 자율주행시대에 차량의 센서로부터 수집이 가능한 자료를 이용하여 안전성을 평가한다는 관점에서 향후 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 알고리즘, 도로기하구조, SDI, 교통안전지표, 교통사고

서론

최근의 교통사고 발생건수는 감소 경향을 나타내지만, 매년 220,000건 이상의 교통사고(KoROAD, 2015)가 지속적으로 발생하고 있다. 교통사고 발생의 주요 원인은 인적 요인, 도로환경적 요인, 차량 요인으로 구분 될 수 있으며(AASHTO, 2010), 하나 이상의 교통사고 원인들이 복합적으로 결합되어 교통사고가 발생한다. 교통사고는 운전자 주변 차량 및 도로기하구조의 상태변화에 대한 인지부족과 적절한 회피행동을 능동적으로 수행하지 못하는 경우에 순간적으로 발생하는 차량의 물리적 충돌사건으로 정의될 수 있다. 따라서, 운전자가 도로를 주행하면서 만들어 내는 주변 환경과의 상호작용을 지속적으로 모니터링하면서 교통사고를 유발할 개연성이 높은 이벤트를 감지하는 것은 교통사고 예방을 위한 선결조건이라고 할 수 있다.

교통사고 예방을 위한 국내·외의 기존 연구에서는 속도, 가속도, 차간거리 등을 활용한 교통안전지표를 사용하였다. 대표적인 교통안전지표에는 SDI(Safety Distance Index), TTC(Time To Collision), AN(Acceleration Noise), DRAC(Deceleration Rate to Avoid the Crash)(Cunto and Saccomanno, 2008), CPI(Crash Potential Index)(Cunto et al., 2009)등이 있다. 기존연구에서는 교통사고를 유발하는 개연성이 높은 이벤트를 교통안전지표를 사용하여 감지하였으며, 감지된 이벤트 분석을 통해 교통사고를 예방하고자 하였다. 교통사고는 도로환경, 교통환경과 같은 다양한 조건들이 종합적으로 결합되어 발생하므로, 교통안전지표에서 검출된 위험성이 높은 이벤트는 도로기하구조 특성, 교통 특성 등의 요소가 최대한 반영되어야 한다. 그러나, 기존의 교통안전지표를 통해 도출된 결과에는 도로기하구조 특성에 대한 고려보다는 주행 차량의 속도, 가속도 값의 취득에만 중점을 두고 교통류의 관점에서 안전성을 평가하였다. 또한, 교통안전지표에 활용된 자료는 가능한 실제 자료를 수집하여 구현하는 것이 타당하지만, 시뮬레이션에서 추출되는 자료를 분석하였다. 시뮬레이션을 이용하여 차량의 주행안전성을 평가하는 경우, 사전에 프로그래밍된 차량추종, 차로변경 모형을 사용하므로 실제 운전자의 행태 모사에는 한계가 존재한다. 하나의 예로써, 실제 교통상황에서는 정지거리보다 긴 차간거리를 충분히 확보한 차량추종관계 상황에서도, 선행차량의 급감속, 후행차량의 급가속으로 인한 교통사고가 발생 할 수 있으나, 일반적인 시뮬레이션 상황에서는 교통사고의 모사에 한계가 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 도로기하구조 특성이 반영되어 위험운전 이벤트를 검출 할 수 있는 차량의 주행 안전성 평가 알고리즘을 개발하였다. 연속류 구간을 주행한 운전자의 행태를 최대한 반영하기 위해, GPS(Global Positioning System)-IMU(Inertial Measurement Unit), 카메라, 레이더가 부착된 실험차량을 이용하여 자료를 수집하고 알고리즘을 개발하였다. 도로기하구조(직선부, 곡선부)가 반영된 차량의 주행속도를 비교했으며, 이를 통해 차량-도로기하구조에서의 상호작용을 평가 할 수 있도록 하였다. 또한, 도로기하구조 특성(마찰력, 도로기하구조), 인적 특성(운전자 반응시간), 교통 특성(차간 거리)이 복합적으로 반영되어 있는 교통안전지표인 SDI를 활용하여 차량 간의 상호작용을 평가하였다. SDI는 차량이 추종관계에 있는 경우의 사고 가능성을 평가 가능하므로, 본 연구에서는 자료의 구성을 충돌 사고인 경우로 한정하여 평가하였다. 차량의 주행안전성을 평가하기 위한 절차는 4단계로 구성하였다. 1단계에서는 조사차량이 주행한 구간의 교통환경 정보와 교통사고 자료를 수집하였고, 2단계에서는 차량의

주행안전성을 평가하기 위한 자료(도로기하구조, 인적요인)를 수집하였다. 3단계에서는 도로기하구조(직선부, 곡선부)를 고려하여 차량의 주행안전성 여부를 판단했으며, 4단계에서는 대상구간의 사고 자료를 이용하여 사고율, EPDO(Equivalent Property Damage Only)를 산출하였다. 산출된 결과와 알고리즘에서 나타난 위험도 분석 결과를 매칭시켜, 차량의 주행안전성을 평가하는 알고리즘의 활용성을 검토하였다.

본 연구에서 개발한 방법론은 자율주행 차량에서 활용되고 있는 센서를 이용하여 안전성을 판단하는 ADAS(Advanced Driver Assistance System)를 구성하는 알고리즘으로 활용되고, 자율주행시대에 차량의 센서로부터 수집이 가능한 자료를 이용하여 안전성을 평가한다는 관점에서 본 연구의 결과가 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

기존 문헌 고찰

1. 기존 연구 고찰

본 장에서는 차량의 주행안전성을 평가한 기존의 국내·외 연구를 고찰하였다. 먼저 교통안전지표를 이용하여 차량의 주행안전성을 평가한 주요 연구를 살펴보면 다음과 같다. Oh et al.(2007)은 영상 이미지 트래킹을 통해 추출되는 개발차량의 주행정보와 교통상충분석기법을 응용한 실시간 교통안전 평가 방법론을 제시하였다. RSI(Real-Time Safety Index), SDI, TTC 개념을 적용했으며, 연속적으로 안전성을 평가하기 위해 영상 기반 차량추적 기법을 적용한 상황을 기반으로 가정하여 안전거리와 TTC를 이용한 교통안전성을 분석 알고리즘을 제시하였다. Kim et al.(2008)은 실시간 모니터링 환경에서 차량추종 및 차로변경 이벤트 발생 시 안전성을 평가 할 수 있는 방법론을 개발하였다. 개별차량 주행 정보와 교통상충분석기법을 응용했으며, RSI와 TTC, 모멘텀 보존의 법칙을 활용한 충돌에너지 개념을 적용하여 안전성을 분석하였다. Oh et al.(2009)은 교통사고를 유발 할 수 있는 위험한 교통 상황을 검지하고 경고정보를 제공하는 경고정보시스템을 제안하였다. SDI 등을 사용하여 SSM(Surrogate Safety Measure)를 도출하였으며, 긴급영향권, 일반영향권을 설정하여 제공하는 방안을 제안하였다. Park et al.(2015)은 RTK(Real-Time Kinematic)-DGPS(Differential Global Positioning System)를 이용하여 차량의 주행궤적을 취득하고, TTC, DRAC, AN을 이용한 SSM을 사용하면서 발생 할 수 있는 문제점 해결을 중심으로 한 방법론을 설정하였다. 연구에서 검토된 방법론을 이용하여 운전 중 발생하는 차량거동 변화를 관찰하였다. 영동고속도로를 대상으로 했으며, SSM을 다양한 주행 상황에서 위험성을 설명 할 수 있다는 결론을 제시하였다. Minderhoud and Bovy(2001)는 도로 교통안전 분석에 적합한 TTC에 근거하여 2개의 새로운 교통안전지표를 제안하였다. 이러한 교통안전지표는 Intelligent Driver Support System의 소개에서와 같이 본 지표가 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 적용되었다. 횡단 구간에서 측정된 전통적인 TTC와 대조적으로, 본 연구에서 제안하는 지표는 차량의 주행궤적 자료를 사용하였다. 교통안전지표는 운전자 지원 시스템의 잠재적인 안전 충돌 평가에 적용하였다. Son et al.(2011)은 차량의 충돌 가능성을 판단 할 수 있는 새로운 교통안전지표 개발을 목적으로 Unsafe Following Condition을 정의하고 계산하였다. Unsafe Following Condition은 추종하는 차량 간의 충돌 가능성을 의미하며, 버지니아의 실제 취득 자료를 활용하고 예측 모형을 확률통계 모형으로 사용하여 개발하였다. 1.6km를 집계단위로 사용했으며, 6년간의 사고 자료를 활용하였다. PO(The Standard Poisson), NB(Negative Binomial), ZIP(Zero-Inflated Poisson), ZINB(Zero-Inflated Negative Binomial), ZHP(Zero-Hurdle Poisson), ZHNB(Zero-Hurdle Negative Binomial) 모형을 사용하여 비교하였다. 분석 결과, Poisson 모형은 15분 데이터에서 유의한 결과로 나타났으며, ZHP(30분), NB(60분) 모형이 사고 모형을 예측하는데 적합하다고 제시하였다.

또한, 교통안전지표를 이용하지 않고 차량의 주행안전성을 평가한 주요 연구를 제시하였다. Kim et al.(2012)은 차량, 운전자 주행특성, 기상, 도로기하구조 요소를 고려한 안전속도 모형을 개발하는 연구를 수행하였다. 곡선구간에서는 개발된 안전속도 모형에는 곡선반경, 기상·노면상태에 따른 운전자 주행행태 계수를 도출하였다. 직선구간

에서는 비선형회귀분석을 통한 안전속도 모형을 완성했으며, 곡선 진출·입 구간은 곡선과 곡선구간 사이의 거리에 따라 안전속도 산출방법을 제시하였다. Cafiso et al.(2005)는 도로를 평가하는 방법을 정의하기 위해, 지방부 2차로 도로에서 운전자의 실제 주행 자료를 이용하여 도로에 대한 평가를 수행하였다. DIVAS(Driver Instrumented Vehicle Acquisition System)를 이용하여 자료를 수집했으며, 연령대(20대, 30대)를 가지고 있는 15명의 운전자를 대상으로 하였다. 긴 직선 구간 뒤에 급커브 구간이 나타나는 구간과 같이 운전자가 예상하지 못한 도로기하구조에서는 위험 운전 이벤트가 발생했으며, 완화곡선이 부족하면 다른 기하구조 요소에 영향을 미치는 것으로 나타나는 결론을 제시하였다. Wu and Jvanis(2013)은 교통안전성 분석 기법의 강화 목적으로 교통안전을 증진시키기 위한 잠재적인 대응책을 정의하고, 충돌 상황을 구현하기 위한 방법으로 사고 근접 상황을 사용하였다. 본 연구에서는 실제 주행 자료를 이용하여 다단계의 모델링 프레임워크를 적용했고, 통계적으로 의미를 추출함으로써 증명하였다. Talebpour et al.(2014)는 상충을 야기하는 위험운전 행동에 관한 연구를 수행했으며, 다양한 교통상황과 운전자 이질성을 고려하여 차량 궤적 데이터를 이용하여 상충을 판단하였다. 운전자 특성과 교통상황을 고려하여 기존 상충 검지 알고리즘을 발전시키는 방법과 선행차, 추종 속도, 차두시간으로 상충을 검지하는 방법론을 사용했으며, 차량의 위치, 속도, 가속도를 상충 판별 파라미터로 선정하였다. 연구 결과, 교통 상충과 밀도는 상관성이 높으며, 밀도가 높을수록 상충 가능성이 증가한다는 결론을 제시하였다. Wu et al.(2014)는 운전자 특성과 교통안전과의 관계, 교통안전 관련 이벤트와 충돌과의 관계를 연구하였다. 13개월 동안 90명의 운전자 자료를 사용했으며, 단독 차량 사고에 초점을 맞추었다. 본 연구에서는 25세 이하 운전자들은 안전관련 이벤트와 충돌과 관련하여 의미 있는 결과가 나타났으며, Crash, Near crashes, Crash-relevant incidents에는 양의 상관관계가 있다는 결론을 도출하였다.

2. 기존 연구와의 차별성

기존 연구에서는 SDI, TTC 등을 교통안전지표로써 활용했으며, 차량의 속도, 가속도, 감속도 자료를 사용하여 차량의 주행안전성을 평가하였다. 그러나, 효과적인 차량의 주행안전성 평가를 위해서는 속도와 같은 차량 주행 정보 뿐만 아니라, 차량 주행시의 평면, 종단, 횡단 선행 등의 도로기하구조 정보가 필요하다. 도로기하구조는 차량의 주행안전성과 관련성이 높으므로, 효과적인 안전성 평가를 위해서는 차량 주행 정보와 함께 주행하고 있는 구간에 대한 정확한 도로기하구조 정보가 반영되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 횡단경사와 같은 도로정보를 반영할 수 있는 교통안전지표로써, SDI를 이용하였다. SDI는 추종관계에 있는 차량에 대한 사고 위험 가능성을 평가하므로, 본 연구에서는 자료의 구성을 충돌 사고인 경우로 한정하였다. 또한, GPS-IMU 등의 센서가 장착된 차량을 이용하여, 차량 주행시의 도로기하구조 정보를 수집함으로써 기존 연구와의 차별성을 부여하였다.

연구 방법

1. 자료(교통환경, 교통사고) 수집

연속적인 교통류 흐름을 반영 할 수 있도록 연속류 구간(국도 77호선, 당동IC →가양대교, 4차로)의 차량 주행 정보 및 도로기하구조 정보를 수집하였다. 기상상태가 양호한 맑은 날에 주행하였으며, 차량의 유출입이 없는 직선구간의 주행안전성을 평가하는 것으로 연구의 범위를 한정하여 조사하였다. 차량이 주행한 구간을 IC를 기준으로 3개로 구분(구간1: 장항IC-가양대교, 구간2: 성동IC-장항IC, 구간3: 당동IC-성동IC)했으며, Figure 1에는 본 연구에서 활용한 조사차량을 제시하였다. 조사 차량에는 GPS-IMU, 카메라, 레이더, 라이다 센서가 부착되어 있어, 주행구간의 도로기하구조를 분석하고, 도로시설물, 차량(또는 장애물)을 인식 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 GPS-IMU는 GPS 측위 정확도 향상을 위해 SBAS(Satellite Based Augmentation System)신호를 보정했으며, GPS

신호 수신에 따른 오차를 최소화하여 차량이 주행한 구간의 주행궤적 정보를 취득하였다. 외부표정요소가 캘리브레이션된 카메라를 사용하여 영상 정확도를 향상시켜서 주행구간의 영상을 취득했으며, 라이다와 레이더의 FOV(Field of View)를 차량 전방의 도로시설물을 인식 할 수 있도록 설치하여 데이터를 수집하였다. 본 연구에서는 교통상황에 따라 발생 할 수 있는 지·정체 상황에 영향을 받지 않도록, 거리 단위(1m)로 동기화하여 각 센서에 수집되는 자료를 융합하였으며, 센서 각각의 주요 특징을 Table 1에 제시하였다.



Figure 1. Survey vehicle

Table 1. Sensors on survey vehicle

Model	Novatel SPAN-CPT	Velodyne LiDAR	CCD Camera	ESR-Radar
Type	GPS-INS	3D LiDAR	Camera	RADAR
Frequency	100Hz	20Hz	33.3Hz	77Hz
Collected data	Location, Position, Speed	Road Facility	Lane Width	Vehicle

2. 주행안전성 평가 자료 수집

차량의 주행안전성을 평가하는 다양한 교통안전지표 중에서 도로기하구조 요인(횡단경사, 마찰계수), 교통환경 요인(속도), 인적 요인(인지반응시간)이 동시에 반영되는 SDI를 교통안전지표로 선택하였다. 특히, SDI의 평가 결과에 대한 신뢰성을 높이기 위해서는 가능한 실제 정보를 SDI 산출에 적용해야하므로, 주행차량에서 실제로 취득한 도로기하구조와 주행환경 정보를 사용하였다. 그러나, 차량에 장착된 센서에서 직접 취득 할 수 없는 '타이어-노면 마찰계수', '인지반응시간' 등과 같은 일부 값들은 문헌 또는 지침(국토교통부, 2013)에 제시된 값을 이용하였다. 대상구간의 설계속도를 고려하여 '타이어-노면 마찰계수' 0.3, '운전자 반응시간' 2.5초, '선행차량 길이'를 4.7m로 선정하였다. Table 2에는 현장에서 조사차량을 이용하여 직접 취득 할 수 있는 자료와 가정을 통해 취득 할 수 있는 자료를 구분하여 제시하였다.

Table 2. Description of variables

Variable	Description	Sensor	Data Source	Value	Variable	Description	Sensor	Data Source	Value
h	Headway	RADAR	Vehicle	Ground Truth	i	Cross Grade	GPS-IMU (Roll)	Vehicle	Ground Truth
V_L	Speed of Leading Vehicle(km/h)	RADAR	Vehicle	Ground Truth	G	Vertical Grade	GPS-IMU (Z Coordinates)	Vehicle	Ground Truth
V_F	Speed of Following Vehicle(km/h)	RADAR	Vehicle	Ground Truth	d_L	Stopping Distance of Leading Vehicle	-	Vehicle	Ground Truth
V_M	Safety Speed at Curve	-	Vehicle	Ground Truth	d_F	Stopping Distance of Following Vehicle	-	Vehicle	Ground Truth
V_{SL}	Speed Limit	-	Assumption	90km/h	t_R	Perception Reaction time	-	Assumption	2.5s
f	Coefficient of Friction	-	Assumption	0.3 (90km/h)	l_L	Length of Leading Vehicle	-	Assumption	4.7m

레이더를 이용하여 지점(i)에서 교통 정보를 수집하고 있는 사례를 Figure 2에 제시하였다. Figure 2에 제시된 노란 사각형은 레이더에서 검지된 사물(차량, 도로 시설물)을 의미하며, 흰색 사각형은 조사 차량의 관점에서 추적되고 있는 선행차량을 의미한다. 특히, SDI는 추종 관계에 있는 차량의 정지거리를 이용하여 차량의 주행안전성을 평가하므로, 선행·후행 차량의 최소정지거리를 계산하였다. 선행차량의 최소 정지거리가 후행차량의 최소 정지거리보다 짧은 경우에는 이론상으로 충돌이 발생하며, 불안정한 상황으로 판단하였다.

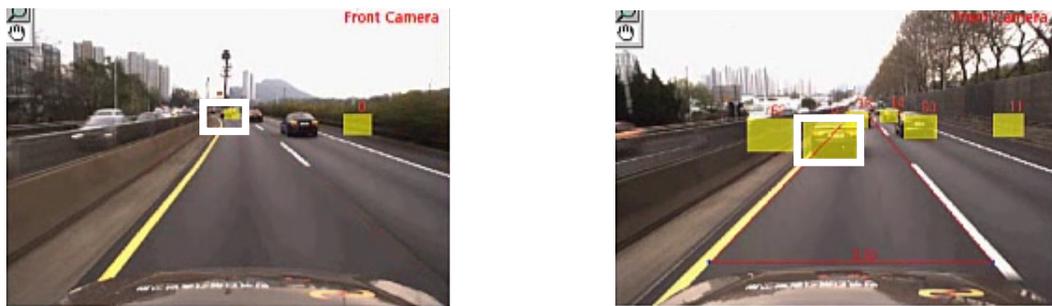


Figure 2. Data acquisition from survey vehicle(L: Circular, R: Tangent)

3. 차량 주행안전성 판단 알고리즘

본 연구에서 제안하고 있는 차량의 주행안전성을 판단하는 알고리즘은 속도를 이용하는 부분과 SDI를 이용하는 부분으로 구분 할 수 있다. 주행안전성 평가 알고리즘에는 도로기하구조 정보와 차량 주행 정보가 필요하며, 지점(i)의 정보는 Table 2에 제시된 자료 취득 방법을 통해 산출한다. 산출된 값은 Figure 3에 제시된 주행안전성 평가 알고리즘에 제시된 절차에 따라 평가되어, 지점(i)의 안전성(안전, 불안정)여부를 판단한다.

속도를 이용하는 부분에서는 차량이 주행하고 있는 지점(i)의 평면선형(직선, 곡선) 정보를 취득하고, 직선으로 구분된 지점에서는 제한속도(V_{SL})와의 비교를 통해 차량의 주행안전성을 판단한다. 곡선으로 구분된 지점에서는 곡선부 안전속도와 비교하며, 곡선부 안전속도를 초과하는 경우에는 위험한 상황으로 판단한다. 본 연구에서 제안

하는 곡선부의 안전속도는 지침(국토교통부, 2013)에 제시된 곡선반경 산출식을 이용하였으며, 지점(i)에서의 곡선부 안전속도를 산출하였다. 지침에는 설계속도에 따른 곡선 반경(R)을 제시하고 있으며, 편경사, 마찰력, 설계속도에 따른 곡선반경 산출식을 Equation(1)에 제시하였다. Equation(1)을 이용하여 곡선부에서 차량이 안전하게 주행할 수 있는 안전속도(V_M)를 산출했으며, Equation(2)에 산출식을 제시하였다. 지점(i)에서 주행하는 차량의 속도가 곡선부의 안전속도 미만이면 안전한 상황, 안전속도를 초과하는 경우에는 불안전 상황으로 판단하였다.

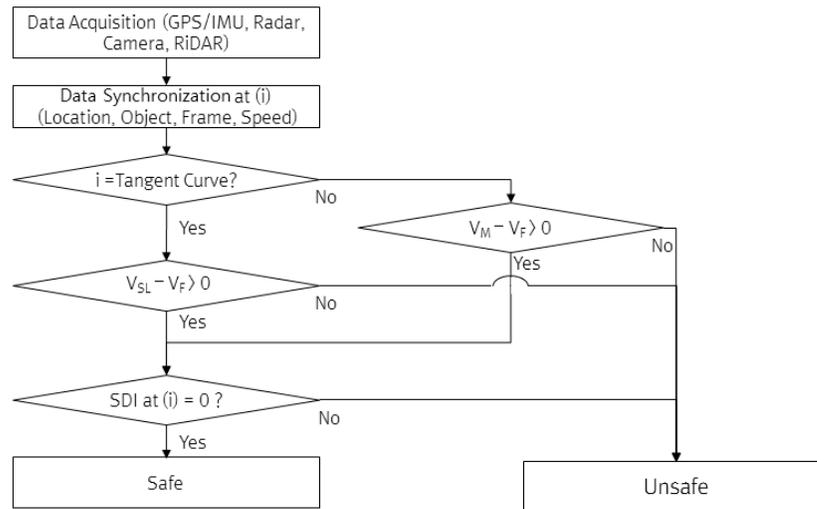


Figure 3. Driving safety evaluation algorithm

제한속도(직선부), 안전속도(곡선부)를 통해 안전하다고 판단된 경우에는 SDI를 이용하여 차량의 주행안전성을 판단하였다. SDI를 적용하기 위하여 동일한 차로에서 차로 변경을 하지 않는 상황의 차량추종 관계만을 고려하였다. 이러한 상황만을 선택하기 위해서 레이더에서 검지된 정보 중에서 주행 차량과 추종관계에 있는 상황을 추출하였다. 차량추종 관계 판단 여부는 주행 차량과의 횡방향(x축)과 종방향(y축) 거리로 판단하였다. 횡방향의 경우, 레이더에서 검지하고 있는 전방의 물체 중에서, 주행 차량이 주행하고 있는 차로에 포함된 차량만을 추종관계를 이루는 것으로 판단하였다. 종방향의 경우, 레이더 센서가 관측 할 수 있는 범위를 초과하는 경우에도 차량추종이 발생하지 않는 것으로 판단하여 분석에서 제외하였다. 검지된 사물이 차량추종 상황으로 판단되면, 선행차량의 정지거리(d_L)와 후행차량의 정지거리(d_F)를 산출했으며, Equation(3), Equation(4)에 산출식을 각각 제시하였다. 선행, 후행 차량의 정지거리를 계산하여 선행차량의 정지거리가 후행차량의 정지거리보다 긴 지점(i)에서는 안전(SDI=0), 짧은 지점(i)에서는 불안전(SDI=1)으로 판단하였고, Equation(5)에 SDI 산출식을 제시하였다.

$$R = \frac{V^2}{127(i+f)} \tag{1}$$

$$V_M = \sqrt{R \times 127(i+f)} \tag{2}$$

$$d_L = V_L \times h + \frac{V_L^2}{254(F+G)} + l_L \tag{3}$$

$$d_F = V_F \times t_r + \frac{V_F^2}{254(F + G)} \tag{4}$$

$$SDI = \begin{cases} 0 (Safe), & \text{if } d_L - d_F > 0 \\ 1 (Unsafe), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

4. 활용방안 검토

차량의 주행안전성 평가에 대한 결과를 검증하기 위해 사고율, EPDO(Equivalent Property Damage Only)를 산출하여 적절성을 평가하였다. 사고율은 구간의 거리와 교통량을 고려하여 교통사고의 발생 빈도를 객관적으로 평가가 가능하도록 하는 방법이다. 대상 구간에서 발생한 연간 사고건수를 연평균일교통량(AADT: Annual Average Daily Traffic volume), 구간 길이(km), 일수(일)로 나누어서 사고율을 산출하며, Equation(6)에 제시하였다. EPDO는 교통사고 피해정도에 의한 대물피해환산법으로 사고 심각도를 계량화하는 방법이다. 1건의 사고 발생에도 사망사고는 12의 가중치, 부상사고에는 3의 가중치를 부여하며, Equation(7)에 산출 식을 제시하였다. 사고건수, 사고율, EPDO를 이용하여 적절성을 평가한 부분은 대상구간에서 발생한 실제 사고 지점과의 일치성을 평가하는 것이 아니라, 본 연구에서 제시한 알고리즘의 활용성을 검토하기 위한 방안으로써 수행하였다.

$$\text{사고율} = \frac{\text{연간 사고건수} \times 10^8}{365 \times \text{AADT} \times \text{구간 길이}(km)} (\text{억대} \cdot km \text{ 당}) \tag{6}$$

$$\text{EPDO} = \text{사망사고건수} \times 12 + \text{부상사고건수} \times 3 \tag{7}$$

분석 결과

1. 차량 주행안전성 평가 결과

본 연구 대상 구간의 연장은 65.365km이며, 전체 연장에서 직선 구간은 50.434km, 곡선 구간은 14.931km이다. 곡선 구간에서의 곡선반경(R) 범위는 11~3,646m, 종단경사는 -3.22%에서 2.95%의 범위로 조사되었다. 주행 차량은 주변 교통환경에 상응하여 주행하였으며, 평균 속도는 77.3km/h, 10~128km/h의 범위로 주행하였다. Table 3에는 3개 구간을 구분하여 각 구간에 대한 직선부 연장, 곡선부 연장, 곡선반경, 종단경사, 평균 주행속도를 제시하였다.

Table 3. Road section information

Section No.	Length of Tangent(m)	Length of Curve(m)	Radius(m)	Vertical Grade(%)	Average Speed(km/h)
Section 1 Janghang IC -Gayang Bridge	18,412	2,444	87~3,646	-2.30~1.12	77.60
Section 2 Sungdong IC -Janghang IC	22,187	5,976	11~2,942	-3.22~2.95	81.13
Section 3 Dangdong IC -Sungdong IC	9,835	6,511	36~2,748	-2.17~1.54	79.26
All	50,434	14,931	11~3,646	-3.22~2.95	77.30

Table 4에는 3개 구간에 대한 차량의 주행안전성 평가 결과를 제시하였다. 직선부와 곡선부에서 주행 안전성 평가 결과가 불안전하다고 나타난 지점은 구간2에서 직선부 1,799건, 곡선부 867건으로 가장 높게 나타났다. 그러나 연장을 고려하여 비율(%)을 산출하는 경우, 직선부는 구간1(8.40%), 구간2(8.10%), 구간3(4.50%), 곡선부는 구간1(32.70%), 구간2(14.50%), 구간3(8.10%)의 순으로 나타나났다. 본 연구에서 제안한 방법론을 적용한 차량의 주행안전성 평가 결과 구간1, 구간2, 구간3의 순서로 위험한 것으로 나타났다.

Table 4. Result of the driving safety evaluation for each section

Section No.	Tangent Section			Curve Section		
	Length(m)	'Unsafe' Point	'Unsafe' rate(%)	Length(m)	'Unsafe' Point	'Unsafe' Rate(%)
Section 1	18,412	1,522	8.40	2,444	799	32.70
Section 2	22,187	1,799	8.10	5,976	867	14.50
Section 3	9,835	440	4.50	6,511	527	8.10

2. 적절성 평가 결과

본 연구에서 제안한 차량의 주행안전성 평가 알고리즘의 활용성을 검토하기 위하여, 3개 구간에서 발생한 실제 교통사고를 이용하여 사고건수, 사고율, EPDO를 산출하였다. Table 5 산출 결과를 제시했으며, 평균 사고건수와 평균 EPDO는 구간1(사고건수 : 61건, EPDO : 225), 구간2(사고건수 : 9.33건, EPDO : 38), 구간3(사고건수 : 3.67건, EPDO : 32.22)의 순서로 높게 나타났다. 그러나, 사고율은 구간1(3.84), 구간3(2.30), 구간2(0.93)의 순서로 위험한 것으로 나타났다.

Table 5. Result of # of accident, accident rate and EPDO for each section

Section No.	# of Accident			Accident Rate			EPDO		
	All	Tangent	Curve	All	Tangent	Curve	All	Tangent	Curve
Section 1	61	51.33	9.67	3.84	3.66	5.19	225	160	65
Section 2	9.33	6.67	2.67	0.93	0.84	1.25	38	20	18
Section 3	3.67	1.67	2	2.30	1.74	3.15	32.22	8.89	23.33

EPDO는 1건의 사고에서도 사망사고 12, 부상사고에는 3의 가중치가 부여되므로, EPDO가 높게 나타난 사고는 사고심각도가 높다는 것으로 해석이 가능하다. 또한, 차량이 과속하여 사고가 발생하는 경우, 사고심각도가 높게 나타난다는 연구결과(Aarts and Schagen, 2006)도 존재한다. 따라서, EPDO 결과와 차량의 주행안전성을 판단하는 알고리즘에서 나타난 결과를 비교하면 본 연구에서 제안한 알고리즘은 적절하다고 판단된다.

또한, 제한속도(직선부), 안전속도(곡선부)를 초과하는 지점이 발생한 비율을 비교하면, 구간1, 구간2, 구간3 순으로 속도 초과 지점 비율이 높게 나타났다. 이러한 결과는 EPDO의 산출 결과 패턴과 유사하게 나타났다. 각 구간의 제한속도(직선부)를 초과한 비율은 구간1(7.50%), 구간2(6.60%), 구간3(4.40%), 안전속도(곡선부)를 초과하는 비율은 구간1(32.10%), 구간2(14.00%), 구간3(7.90%)으로 나타났으며, Table 6에 결과를 제시하였다. EPDO도 가양대교-장항IC(직선부 : 160, 곡선부 : 65), 장항IC-성동IC(직선부 : 20, 곡선부 : 18), 성동IC-당동IC(직선부 : 8.89, 곡선부 : 23.33)로 나타남으로써, 제한속도(직선부) 및 안전속도(곡선부)를 이용하여 위험상황을 판단하는 것은 설득력이 있다.

Table 6. The result of comparison of EPDO for each section

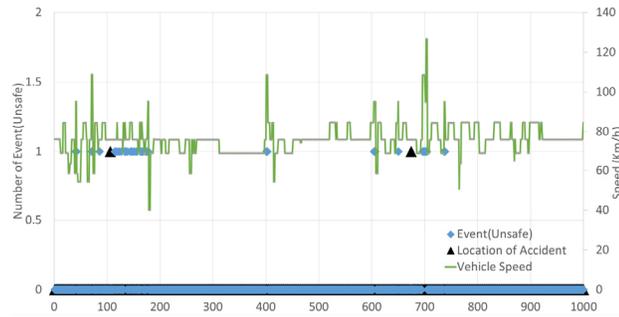
Section No.	Tangent section		Curve section	
	'Unsafe' rate(%)	EPDO	'Unsafe' rate(%)	EPDO
Section 1	7.50	160	32.10	65
Section 2	6.60	20	14.00	18
Section 3	4.40	8.89	7.90	23.33

차량의 주행안전성 평가 알고리즘을 통해 불안전으로 판단된 지점은 차량의 주행안전성이 확보되지 않은 것으로 평가 되며, 차량의 주행안전성을 확보한 경우보다 교통사고 발생 가능성이 높게 나타난다. 차량의 주행안전성이 확보되지 않은 경우, 교통사고 발생 가능성이 높다는 사실에 대한 적절성을 검토하기 위해, 대상 구간에서 발생한 교통사고건수 및 사고율을 비교 하였다. 비교 결과를 Table 7에 제시했으며, 실제 구간에서 발생한 사고건수와 불안전으로 판단된 경우도 동일한 순서로 나타났다. 그러나, 사고율의 경우, 구간1에서 가장 높게 나타났으나(직선 : 3.66, 곡선 : 5.19), 구간3(직선 : 1.74, 곡선 : 3.15)이 구간2(직선 : 0.84, 곡선 : 1.25)보다 높게 나타났다. 비록 사고율의 경우, 주행안전성에 대한 검토 결과와 순서가 동일하지는 않았지만, 전체적인 결과가 유사하게 나타났다. 따라서, 차량의 주행안전성이 확보되지 않은 구간에서는 교통사고 발생 가능성이 상대적으로 높다는 결론을 제시 할 수 있다.

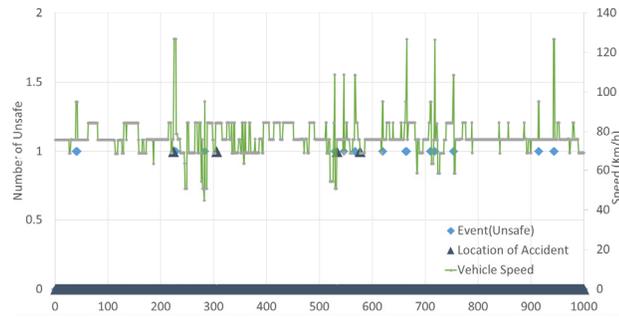
Table 7. The result of comparison of # of accident and accident rate

Section No.	Tangent section			Curve section		
	'Unsafe' Rate(%)	# of accident	Accident rate(%)	'Unsafe' rate(%)	# of accident	Accident rate(%)
Section 1	8.40	51.33	3.66	32.70	9.67	5.19
Section 2	8.10	6.67	0.84	14.50	2.67	1.25
Section 3	4.50	1.67	1.74	8.10	2	3.15

앞 절에서 차량의 주행안전성을 확보하지 못한다고 판단된 구간에서는 실제 교통사고건수, 사고율, EPDO가 높게 나타났다. 이러한 결과는 차량의 주행안전성이 확보되지 않은 구간에서는 사고 발생 가능성이 잠재적으로 높다는 것으로 해석이 가능하다. 실제로 주행안전성 평가 알고리즘의 결과로써 주행안전성을 확보하지 않은 것으로 판단된 지점 인근에서는 교통사고가 발생하였다. 따라서, 주행하는 차량에서 수집되는 위험도 정보를 집계화하거나, 차량의 속도 등을 종합적으로 고려한다면, 특정 지점 또는 구간의 도로 안전성 평가가 가능하다. 하나의 사례로써, Figure 4에는 본 연구에서 제안한 알고리즘에 의해 도출된 위험 운전 결과와 사고 발생 지점, 속도를 매칭한 그래프를 제시하였다. 1km 구간을 직선부(Figure 4(a))와 곡선부(Figure 4(b))로 구분하였으며, 지도에 표시된 흰색 표식은 차량의 주행 궤적, 노란색 표식은 사고 발생 지점을 의미한다. 그래프에서도 직선부, 곡선부 사고 발생(▲)지점을 중심으로 속도의 변화폭은 크게 나타나고, 본 연구에서 제안한 차량의 주행안전성 평가 결과로써 발생한 위험운전 이벤트(◆)가 다수 발생한 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과에 기초하여, 차량의 주행안전성 평가 결과에서 발생하는 위험 상황을 집계화하여 적절한 수준의 임계값을 설정 할 수 있으며, 각 개별차량들의 정보를 복합적으로 수집하여 판단하면 종합적인 도로의 안전성을 평가 할 수 있는 방안의 적용이 가능하다.



(a) Sungdong IC - Janghang IC (Tangent Section)



(b) Dangdong IC - Sungdong IC (Curve Section)

Figure 4. Result of the driving safety evaluation algorithm

결론 및 향후 연구과제

매년 교통사고는 발생하고 있으며, 이러한 교통사고는 하나 이상의 원인들이 복합적으로 결합되어 발생한다. 교통사고는 주변 차량 및 도로기하구조 상태 변화에 대하여 운전자가 적절한 회피행동을 수행하지 못하는 경우에 발생한다. 따라서, 운전자가 도로를 주행하면서 만들어 내는 주변 환경과의 상호작용을 지속적으로 모니터링하면서 교통사고를 유발할 개연성이 높은 이벤트를 검지하는 것은 교통사고 예방을 위한 선결조건이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 교통사고 발생 전 상황을 예측하기 위한 하나의 방법으로, 도로기하구조 특성을 고려한 주변 차

량과의 충돌 가능성여부를 평가할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 자료의 수집을 위하여 실제 기하구조 및 교통상황의 수집이 가능한 차량이 연속류 도로를 주행했으며, 제한속도(직선부), 안전속도(곡선부)와 비교하고, 교통안전지표인 SDI를 이용하여 차량의 주행안전성을 평가하였다. 분석 결과, 제한속도(직선부), 안전속도(곡선부)를 초과하는 지점, 차량의 주행안전성 평가 알고리즘을 통해 불안전으로 판단된 지점에서는 사고건수, 사고율, EPDO 값이 높게 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제안한 속도와 교통안전지표를 이용하여 차량의 주행안전성을 평가하는 방법은 적절하다는 결론을 도출하였다.

향후 발전된 연구 결과의 도출을 위해서는 다음 내용이 고려된 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구에서는 진출입 상황을 고려하지 않은 연속류를 대상으로 교통안전지표를 개발하였다. 향후, 교통안전지표에 대한 타당성과 활용성을 고려하기 위해서는 단속류 구간을 포함한 다양한 구간의 교차로, 분기점을 구분하여 합류, 분류, 엇갈림을 추가적으로 분석하여, 차량의 주행안전성을 평가하는 방법론을 평가해야 한다. 둘째, 본 연구에서는 한 명의 운전자가 주행한 자료를 이용하여 차량의 주행안전성을 평가하였다. 교통류 흐름을 최대한 반영할 수 있도록 주변의 교통 상황에 맞추어 주행하였지만, 한 대의 차량만을 이용하여 교통류 전체를 대표하는 것에는 한계가 존재하므로, 성별, 연령대, 운전 경력 등을 고려한 다수의 차량을 이용한 추가 연구가 필요하다. 셋째, 도로의 안전성을 평가하는 방안 에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 추종 관계에 있는 차량을 대상으로 차량의 주행안전성을 분석하였으므로, 정면 추돌 사고 가능성에 집중하여 평가하였다. 그러나, 인접차량의 차로변경 행태 정보를 포함한 사고 등의 분석은 수행되지 않았으므로, 미시적 시뮬레이션을 이용하여 분석하는 추가 연구가 필요하다.

본 연구의 결과만을 이용하여 도로 안전성을 평가하는 점에는 한계가 존재한다. 사고율, EPDO를 이용한 적절성 판단에서도 차량의 주행안전성 평가 알고리즘에서 나타난 위험상황의 결과가 동일하게 나타나지 않았으며, 기 발생한 사고와의 사고지점과 일치하지 않는 부분에는 한계가 나타났다. 그러나, 구간의 위험상황을 판단하기 위해서는 다수의 주행 차량에서 수집되는 정보가 필요하며, 주행안전성의 평가 결과를 이용하여 도로의 안전성을 평가하는 방법론으로 제시했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 본 연구의 결과물은 자율주행시대에서 센서를 이용한 차량의 주행정보 수집 및 활용이 용이해지고 있으므로, 실시간 적용을 위한 정보 제공, 차량의 주행안전성 및 도로 안전성을 평가할 수 있는 기반 기술로서 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from an Industrial Innovation Research Project (Standard open DB establishment and evaluation system for intelligent vehicle awareness technology support, No.10052941) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제 76회 학술발표회(2017.02.17.)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

- Aarts L., Van Schagen I. (2006), Driving Speed and the Risk of Road Crashes: A Review, *Accident Analysis and Prevention* 38(2), 215-224.
- AASHTO (2010), *Highway Safety Manual*.
- Cafiso S., Graziano A. D., Cava G. L. (2005), Actual Driving Data Analysis for Design Consistency Evaluation, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 1912, 19-30.
- Cunto F., Duong D., Saccomanno F. F. (2009), Comparison of Simulated Freeway Safety Performance to Observed

Crashes, presented at the 88th Transportation Research Board Annu. Meeting, Washington, DC.

- Cunto F., Saccomanno F. F. (2008), Calibration and Validation of Simulated Vehicle Safety Performance at Signalized Intersections, *Accident Analysis and Prevention*, 40(3).
- Kim J. H., Song T. J., Oh C., Sung N. M. (2008), Methodology for Evaluating Collision Risks Using Vehicle Trajectory Data, *J. Korean Soc. Transp.*, 26(5), Korean Society of Transportation, 51-62.
- Kim K. H., Lim J. M., Lee S. B., Kang D. S., Hong J. Y. (2012), Estimation Desirable Safety based on Driving Condition on Rural Highway, *International Journal of Highway Engineering*, 14(4), 149-162.
- KoROAD (2015), Traffic Accident Annularly Report 2014.
- Minderhoud M. M., Bovym P. H. L. (2011), Extended Time-to-collision Measures for Road Traffic Safety Assessment, *Accident Analysis & Prevention*, 33(1), 89-97.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013), Rules About the Road Structure and Facilities Standards Explanation.
- Oh C., Jo J. I., Kim J. H., Oh J. T. (2007), Methodology for Evaluating Real-time Real-end Collision Risks based on Vehicle Trajectory Data Extracted from Video Image Tracking, 25(5), 173-182.
- Oh C., Oh J. T., Song T. J., Park J. H., Kim T. J. (2009), Advanced Freeway Traffic Safety Warning Information System based on Surrogate Safety Measures (SSM): Information Processing Methods, *J. Korean Soc. Transp.*, 27(3), Korean Society of Transportation, 59-70.
- Park S., Lee C., Kho S. Y., Lee Y. G. (2015), Methodology for Calculating Surrogate Safety Measure by Using Vehicular Trajectory and Its Application, *J. Korean Soc. Transp.*, 33(4), Korean Society of Transportation, 323-336.
- Son H. J., Kweon Y. J., Park B. (2011), Development of Crash Prediction Models with Individual Vehicular Data Transportation Research Part C, *Emerging Technologies*, 19(6), 1353-1363.
- Talebpoor A., Mahmassani H., Mete F., Hamdar S. (2014), Near-Crash Identification in a Connected Vehicle Environment, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board* 2424, 20-28.
- Wu K. F., Agüero-Valverde J., Jovanis P. P. (2014), Using Naturalistic Driving Data to Explore the Association Between Traffic Safety-related Events and Crash Risk at Driver Level, *Accident Analysis and Prevention* 72, 210-218.
- Wu K. F., Jovanis P. P. (2013), Defining and Screening Crash Surrogate Events Using Naturalistic Driving Data, *Accident Analysis and Prevention* 61, 10-22.