

■ 論 文 ■

# 개별차량 주행패턴 분석을 통한 교통사고 위험도 분석 기법

Methodology for Evaluating Collision Risks Using Vehicle Trajectory Data

**김 준 형**

(한양대학교 교통시스템공학과 석사과정)

**송 태 진**

(한양대학교 교통시스템공학과 석사과정)

**오 철**

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

**성 낙 문**

(한국교통연구원 도로교통연구실 연구위원)

## 목 차

- I. 서론
- II. 국내외 관련 연구 고찰
  - 1. 국외 교통상충관련 연구
  - 2. 국내 교통상충관련 연구
  - 3. 본 연구의 의의
- III. 위험도 분석 알고리즘 정립
  - 1. 개념정립
  - 2. SDI 및 RSI 산출
  - 3. TTC 및 TTCl, 충돌에너지 산출
  - 4. 연속류 도로구간 교통상충분석 알고리즘
- IV. 위험도 분석
  - 1. 자료수집
  - 2. 자료분석
  - 3. Discussions
- V. 결론  
참고문헌

Key Words : 교통안전, 주행궤적, 차량이미지추적, 안전도평가, 차량추종 및 차로변경  
Traffic Safety, Vehicle Trajectory, Vehicle Image Tracking, Safety Evaluation, Car Following and Lane Changing

## 요 약

최근 각종 센서 및 통신기술의 발달은 다양한 교통류의 정보를 실시간으로 수집하고 관리, 제공 할 수 있는 환경을 제공하게 되었다. 본 연구에서는 이러한 실시간 모니터링 환경에서 차량추종 및 차로변경 이벤트 발생 시 안전도를 평가할 수 있는 방법론을 개발하였다. 이를 위해 이미지 트래킹을 통해 추출된 개별차량 주행 정보와 기존 교통상충분석 기법을 응용하였다. 차량 간 안전거리 개념을 반영한 RSI(Real-time Safety Index)와 첨단안전차량의 효과 및 성능 평가 등에 주로 사용되는 TTC(Time-to-Collision), 모멘텀 보존의 법칙을 이용한 충돌에너지 개념을 추출된 개별차량의 주행정보에 적용하여 교통사고 위험도를 분석하였다. 본 연구에서 제시된 방법론은 향후 교통사고 분석 및 실시간 안전평가를 위한 자료수집이 가능한 검지시스템의 개발과 평가 등에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

An innovative feature of this study is to propose a methodology for evaluating safety performance in real time based on vehicle trajectory data extracted from video images. The essence of evaluating safety performance is to capture unsafe car-following and lane-changing events generated by individual vehicles traveling within video surveillance area. The proposed methodology derived three indices including real-time safety index(RSI) based on the concept of safe stopping distance, time-to-collision(TTC), and the collision energy based on the conservation of momentum. It is believed that outcomes would be greatly utilized in developing a new generation of video images processing(VIP) based traffic detection systems capable of producing safety performance measurements. Relevant technical challenges for such detection systems are also discussed.

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비 지원(06-교통핵심-C01)에 의해 수행되었습니다.

## 1. 서론

도로위의 모든 차량들은 차량추종 및 차로변경 등의 상호작용을 가지고, 끊임없이 상충을 발생시키며 주행한다. 이런 상호작용으로 인한 상충과 교통사고와의 연관성은 기존의 다양한 연구 결과가 충분히 입증하고 있다. 따라서 개별차량의 주행궤적을 모니터링하고 차량추종 이벤트와 차로변경 이벤트 진행 중의 차량간 상호작용의 안전성을 평가하고 분석하는 것은, 사고의 원인 분석 및 예방의 시작이라고 할 수 있다.

최근 각종 센서 및 통신기술의 발달은 과거에 비해 보다 미시적이고 폭넓은 교통자료의 취득을 가능하도록 하였다. 이런 기술력은 개별차량의 주행궤적 자료를 더욱 수월하게 수집할 수 있는 환경을 제공하였다. 사고 이력 자료를 이용할 수밖에 없던 과거와 달리, 발달된 기술력은 현재의 교통상황과 정보를 바로 수집할 수 있는 실시간 모니터링 시스템 환경을 제공할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 다양한 상용기술 개발이 활발히 진행되고 있는 차량 영상이미지 분석 시스템의 주행궤적자료를 이용하여 실시간 교통모니터링 환경에서 교통안전도를 평가할 수 있는 방법론을 정립하고자 한다. 개별차량의 주행궤적 자료를 이용하여 차량추종 및 차로변경 이벤트 진행 중 각 차량간 상충을 분석하여 교통안전도를 평가할 수 있는 기법을 제안 한다. 이를 위해 국내외 발표된 기존의 교통상충 관련 연구를 고찰하여, 본 연구에 적합한 방법들을 도출 해내고, 이를 실시간 모니터링 환경에서 수집 및 분석 가능 하도록 새롭게 정의 하였다.

## II. 국내외 관련 연구 고찰

관련 문헌고찰은 교통상충분석과 관련된 내용 위주로 수행 하였다. 국내외의 관련 연구고찰의 주목적은 본 연구에서 제안한 교통상충기법에 적용 될 수 있는 기법들을 도출하기 위함이다.

### 1. 국외 교통상충 관련 연구

Perkins 등(1968)은 교통상충을 잠재적 사고 상황으로 정의하여 교차로 사고형태에 따라 20가지 이상의 객관적인 교통상충 기준들을 제시하였다. Paddock(1974)은 Ohio州에서 신호교차로와 미신호교차로를 대상으로 교통상충기법을 적용하여 안전도 평가를 분석 하였다. Trantonio

et al.(2005)은 보행자와 차량 간의 상충분석 기법을 최초로 제안하였다. Hyden(1996)에 의하면 교통상충분석 기법의 일종으로 1971년 미국의 Hayward가 처음으로 차량 추종상황에서 선행 및 후행차량의 속도가 현 상태를 유지하는 경우 충돌이 발생할 수 있는 시간간격을 Time-To-Collision(TTC)으로서 정의한 것으로 보고 하였다. TTC와 유사한 안전성지표(safety indicator)로서 충격과 건수(VanArem and Devos,1997), Time-To-Accident(TTA), Post-Encroachment-Time(PET), Deceleration-To-Safety-time(DTS) 등이 관련연구(Hyden, 1996; Topp, 1998)에서 발표되었다. 한편, Oh et al (2006)등에 의해 발표된 논문에서는 루프검지기에서 수집된 개별차량의 자기신호자료를 이용하여 후미추돌가능성을 정량화하는 방법론을 제안하였다.

### 2. 국내 교통상충관련 연구

하태준 등(1998)은 교통상충기법을 사용하여 신호교차로에서 사고위험정도를 효과적으로 예측하고 평가할 수 있기 때문에 교통사고다발지역의 선정이나 감소대책을 위한 도로개선 우선순위를 정할 때 효과적으로 개선할 수 있다고 제시하였다. 김현상(1997)은 추돌유형상충에서 차량의 급제동이 요구되는 상황으로 안전차두시간 1.3초 이하를 기준으로 할 때, 상충수와 교통사고 발생의 빈도수가 높게 나타나는 것으로 보고하였다. 이수범 등(1999)은 교차로 및 짧은 도로구간의 상충조사기법과 분석방법론을 소개 하고, 상충건수와 사고건수간의 관계성을 규명 하였다. 김원철 등(2002)은 퍼지추론을 상충 분석 기법에 응용하는 방법론을 제시하였다. 이기영(2006)은 엇갈림구간에서 발생하는 상충유형을 추정하여 교통조건과 상충과의 연관성을 고려한 상충추정모형을 개발 하였다. 오철 등(2007)은 영상 이미지 트랙킹을 통해 추출되는 개별차량의 주행정보와 기존 교통상충분석기법을 응용한 실시간 교통안전평가 방법론을 제시하였다. 오주택 등(2007)은 Tripwire기반의 영상검지 알고리즘과 Tracking 기반의 개별차량 추적기술을 통하여 기본 교통정보를 산출하고 성능을 비교하였다.

### 3. 본 연구의 의의

본 연구는 개별 차량의 미시적 주행궤적 자료를 실시간으로 수집할 수 있는, 교통상황의 실시간 모니터링 환

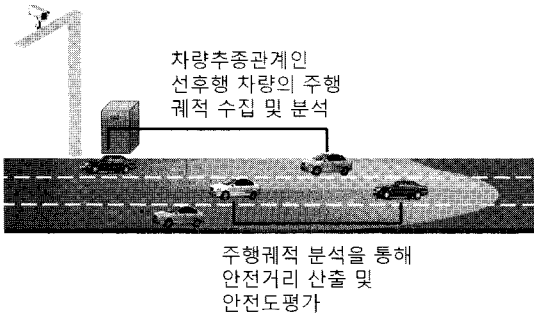
경에서 적용 가능한 교통 안전도 평가 기법을 제시하는데 의의를 둔다. 선행 연구에서 제시한 차량 추종 이벤트 분석 기법에 차로 변경 이벤트 분석 기법을 추가하고, 검지영역내 차량 주행 패턴 분석을 통해 교통안전도 평가가 가능한 통합알고리즘을 제시하고자 한다.

### III. 위험도 분석 알고리즘 정립

#### 1. 개념정립

##### 1) 차량추종 이벤트

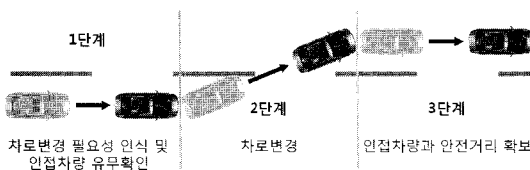
차량추종 이벤트는 <그림 1>과 같이 연속류 구간에서 주행중인 선·후행 두 차량간의 주행궤적자료를 이용하여 분석한다. 검지영역을 주행하는 동안 두 차량의 매 순간 속도와 위치를 분석하여, 차량간 안전거리와 차두시간(headway)을 산정하고 이를 통해 안전도를 평가한다.



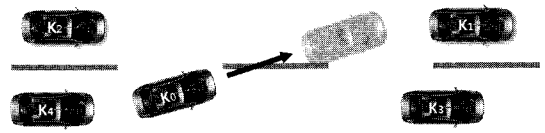
<그림 1> 차량추종 이벤트 분석

##### 2) 차로변경 이벤트

차로변경 이벤트는 <그림 2>와 같이 크게 3단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는, 운전자가 차로변경의 필요성을 느끼고 주행차로와 목적차로의 선·후행 차량을 살펴며 차로변경을 수행하기 직전의 단계이다. 두 번째 단계는, 운전자가 차로변경을 수행하기 시작하여 주행차로에서 목적



<그림 2> 차로변경의 3단계



<그림 3> 차로변경차량과 인접차량

차로로 차로를 변경하는 단계이다. 세 번째 단계는, 목적차로로 차로를 변경한 뒤 차량의 4개의 바퀴가 모두 평행을 이루고 선·후행 차량과의 안전차두거리를 유지하는 상태까지의 단계이다. 차로변경 이벤트 분석의 가장 어려운 부분은 위의 각 단계별 시작시점과 종료시점이 정확히 언제인지 관찰자의 관점에서는 알 수 없다는 점이다.

본 연구에서는 위의 3단계 중 두 번째 단계를 분석한다. 차량이 차로변경을 수행하는 단계로, 차량의 앞부분이 차선을 침범하는 순간부터 차량의 뒷부분까지 모두 목적차로로 넘어오는 순간까지를 분석한다. 차로변경 차량이 주행차로에서 목적차로로 차로변경을 하는 과정에서, <그림 3>과 같이 목적차로의 선행(K1j), 후행(K2j)차량과 주행차로의 선행(K3j), 후행(K4j)차량과의 관계를 분석한다.

##### 3) 충돌에너지

차량 충돌 사고는 <그림 4>와 같이 크게 3단계로 이루어진다. 최초 접촉은 충돌이 시작되는 단계이다. 최대 접합은 두 차량이 충돌 후 공통속도에 이른 단계로 두 차량이 최대한 맞물린 단계이다. 분리 및 정지는 각 차량의 운동에너지에 따라 서로 다른 속도와 정지거리를 가지고 최종 정지하는 단계이다. 두 차량이 같은 중심선 상에서 일직선으로 충돌하여 충돌 후 조향 변동이 없이 이동한다고 가정한다면, 모멘텀 보존의 법칙을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}_c + E_D = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (1)$$

$m_1, m_2$  : 질량(Kg)

$v_1, v_2$  : 충돌전속도(m/s)

$v'_1, v'_2$  : 충돌후속도(m/s)

$v_c$  : 최대 접합 상태의 공통속도(m/s)

$E_D$  : 충돌로 인한 손실에너지



<그림 4> 차량 충돌 사고의 3단계

두 차량이 충돌하기 전에는 각 차량마다 운동에너지를 가지고 있고, 충돌 후에도 분리 및 정지 전 약간의 운동에너지를 가지고 있다. 차량이 가진 최초의 운동에너지는 충돌이 진행되는 과정에서 차량이 파손될 때 소모된다. 소모된 에너지가 모두 파손에 사용되었다고 가정한다면, 두 차량의 중량과 충돌 전 속도, 최대 접촉 상태에서의 공통속도를 알기 때문에, 운동에너지 보존의 법칙을 이용하여 충돌에너지를 산출할 수 있다.

실제 사고에서는 충돌 직전 두 차량이 감속운동의 성격을 보일 가능성이 높다. 그러나, 감속운동을 보이지 않을 가능성도 있기 때문에, 본 연구에서는 worst case 분석을 위해 현재의 속도가 유지된다는 가정 하에 충돌에너지가 최대인 경우를 분석한다.

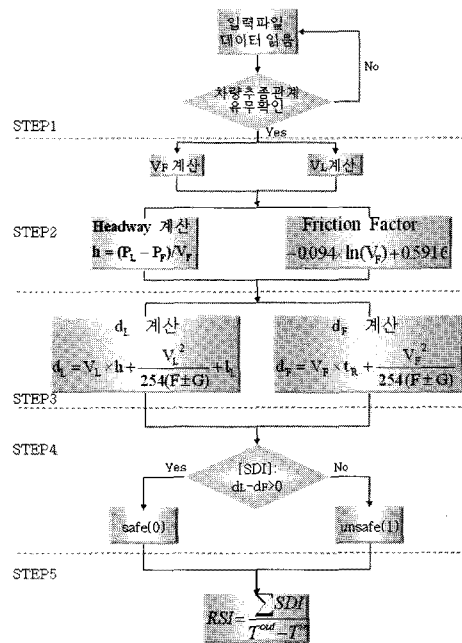
4) 주행패턴별 RSSM

개별차량의 주행궤적 자료를 통해 전술한 차량추종과 차로변경, 충돌에너지에 대한 분석을 수행한다. <그림 5>와 같이 주행궤적자료의 주행 패턴을 분류하여 각 이벤트의 RSSM을 산출한다.

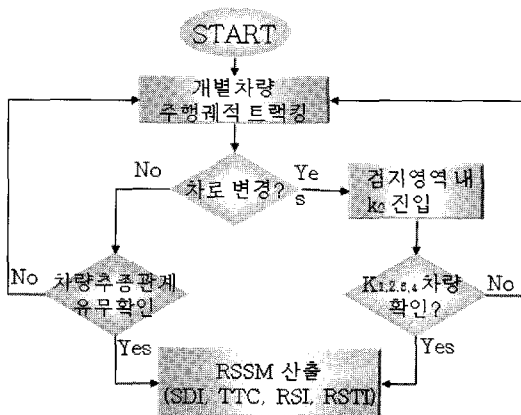
RSSM은 실시간 안전성을 평가하기 위한 지표로, SDI, TTC, RSI, RSTI 등이 이에 포함된다. SDI와 TTC는 선·후행차량의 순간 속도와 간격 등을 분석하여 충돌여부, 혹은 임계값 이하 여부를 판단하는 지표이다. SDI의 경우 선·후행차량의 정지거리를 비교하여 충돌 여부를 판단하기 때문에, 기본가정에서 차량의 감속운동을 분석한다. 그러나, TTC의 경우 선·후행차량의 현재 속도가 유지된다는 가정에서의 충돌여부를 판단하기 때문에, SDI와 달리 차량의 등속운동을 분석 한다.

2. SDI 및 RSI 산출

도로를 주행하는 모든 차량들은 지속적으로 차량 추종 이벤트를 발생시킨다. 이때 돌발 상황이 발생하여 선행차량이 급정거를 할 경우, 후행차량이 충분한 안전거리가 확보되지 않으면 최대 감속도로 감속을 하여 정지하여도 선행차량과의 물리적인 충돌을 회피할 수 없게 된다. 따라서 사고가 나지 않더라도 이러한 상황은 불안전 하다고 판단할 수 있다. 이와 같이 선·후행 차량간 안전거리가 미확보된 상황을 불안전 이벤트로 정의하고, <그림 6>과 같이 두 차량 간의 주행궤적자료를 분석한다.



<그림 6> RSI 산출을 위한 알고리즘



<그림 5> 주행패턴별 RSSM 산출 개념도

1) STEP 1 : 관찰영역의 차량존재여부 확인

관찰영역 내의 각각의 차로별로 두 차량 이상이 존재해야 추종관계가 성립하므로 각각 차로별로 두 차량 이상이 관찰되고 있는지 여부를 확인한다.

2) STEP 2 : 교통변수 산출

영상검지기를 통하여 수집된 개별차량 주행궤적 자료를 이용하여 선행차량 속도(Vl) 및 후행차량 속도(Vf)를 산출한다. 후행차량의 속도를 가지고 각각 식(4)와 식(5)을 이용하여 차두시간과 마찰계수를 산출한다. 여

기서 마찰계수는 Roess et al. (2004)에서 제시된 마찰계수와 속도와의 관계를 단순회귀분석을 이용하여 수식화 한 것이다.

$$V_L = \frac{\text{선행차량의 위치변화}}{1/m초} \quad (2)$$

$$V_F = \frac{\text{후행차량의 위치변화}}{1/m초} \quad (3)$$

$$h = \frac{\text{차간간격}}{V_F} \quad (4)$$

$$F = -0.0914 \ln(V_F) + 0.5916 \quad (5)$$

$V_L$  : 선행차량속도(km/h)

$V_F$  : 후행차량속도(km/h)

### 3) STEP3: 최소정지거리 계산

위의 단계에서 계산된 교통변수들을 이용하여 식(6), 식(7)을 이용하여 선·후행차량의 최소 정지거리를 각각 산출한다.

$$d_L = V_L \times h + \frac{V_L^2}{254(F \pm G)} + L \quad (6)$$

$$d_F = V_F \times t_R + \frac{V_F^2}{254(F \pm G)} \quad (7)$$

$t_R$  : 인지반응시간(1.7s)

$h$  : 선행차량의 길이(m)

### 4) STEP 4 : 안전도평가지표 계산

산출된 선·후행차량의 최소정지거리를 이용하여 실시간으로 교통안전도(안전 or 불안전)를 평가 한다. 이 알고리즘의 안전도평가지표(SDI: Safety Distance Index)를 정의 하여 식(8)에 제시 하였다. SDI는 개별차량의 모니터링구간을 주행하는 동안 지속적으로 누적 된다.

$$SDI = \begin{cases} 0(\text{safe}), & \text{if } d_L - d_F > 0 \\ 1(\text{unsafe}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

### 5) STEP 5 : 개별차량 RSI 산출

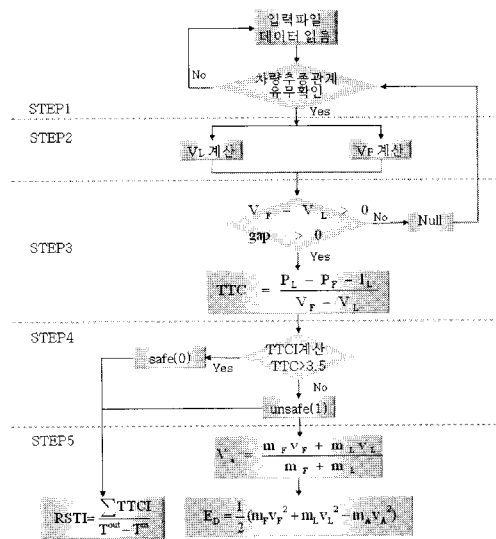
매순간 누적된 안전도평가지표(SDI)값을 식(9)와 같이 전체 검지영역을 주행하는데 걸린 총 시간에 대한 누적

안전도 평가지표값의 비율로서 나타낸다. 이를 관찰차량 K에 대한 실시간 안전성지표, RSI(Real-time Safety Index)로 정의 하였다. RSI는 관찰영역을 주행한 차량이 불안정한 상황에 노출되는 시간의 비율을 의미한다.

$$RSI = \frac{\text{관찰영역의 총 Unsafe시간}}{\text{관찰영역의 총주행시간}} = \frac{\sum SDI}{T_k^{\text{전출}} - T_k^{\text{전입}}} \quad (9)$$

## 3. TTC 및 TTCI, 충돌에너지 산출

첨단안전차량의 성능 및 효과 등의 평가에 사용되어 오고 있는 TTC(Time-To-collision)는 다음과 같이 정의 한다. '개별차량의 차량충돌 이벤트 상에서 선·후행차량이 속도변화가 없이 현재의 속도를 유지할 경우, 후행차량의 속도가 빠르다면 충돌이 발생하게 된다. 이때 현재시점(t)와 충돌시점(t+α)간의 시간차이 α를 TTC라 한다.' TTC는 추종이벤트 진행 중 어느 한 순간 선·후행차량의 TTC값이 산출될 당시의 속도가 유지 될 것이라는 가정을 가지고 있다. TTC값이 작을수록 불안정한 상태라고 할 수 있다. 본 연구에서는 손실에너지를 적용하여 이런 불안정한 상황의 위험도를 측정하는 방법에 대하여 제시 하고 분석절차를 <그림 7>에서 제시 하였다.



<그림 7> TTC 및 충돌에너지 산출을 위한 알고리즘

### 1) STEP 1 : 관찰영역의 차량존재 여부확인

관찰영역 내의 각각의 차로별로 두 차량 이상이 존재

해야 추종관계가 성립하므로 각각 차로별로 두 차량 이상이 관찰되고 있는지 여부를 확인한다.

## 2) STEP 2 : 교통변수 산출

영상검지기를 통하여 수집된 개별차량 주행궤적 데이터를 이용하여 1/m초 단위로 차량의 위치변화를 검지하여 선·후행 차량의 각각의 속도를 산출한다.

$$V_L = \frac{\text{선행차량의 위치변화}}{1/m\text{초}} \quad (10)$$

$$V_F = \frac{\text{후행차량의 위치변화}}{1/m\text{초}} \quad (11)$$

## 3) STEP 3 : TTC 분석

산출된 속도 중  $V_F$  가 더 크고 gap이 0보다 큰 경우에만 TTC를 산출 하게 된다. TTC값은 두 차량의 간격과 선행 차량의 길이, 두 차량의 속도차이를 이용하여 식(12)를 통해 산출 하도록 한다.

$$TTC_i = \frac{\Delta d(t)}{V_i(t) - V_{i-1}(t)}, \forall V_i(t) > V_{i-1}(t) \quad (12)$$

$\Delta d$  : 양 차량 사이의 거리(m)

$\Delta d$  :  $P_L - P_F$ (m)

$P_L$  : 선행차량의 위치

## 4) STEP 4 : 안전성 판단

TTC값을 이용한 안전도 평가는, 사전에 임계치(K)를 설정하여 안전도 여부를 판단해야한다. 본 연구에서는 TTC의 안전도평가지표인 TTCI(TTC Index)를 식(13)과 같이 정의 하고 안전도(안전 or 불안전)를 평가하였다. TTCI는 각각의 차량추종 이벤트에 대해 time frame별로 판단되어 개별차량의 모니터링 구간을 주행하는 동안 누적된다.

$$TTCI = \begin{cases} 0(\text{safe}), & \text{if } TTC > K \\ 1(\text{unsafe}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

## 5) STEP 5 : 충돌에너지를 통한 심각도 판단 및 RSTI 산출

불안정한 이벤트의 심각도를 계량화하기 위해 충돌에너지를 이용하여 사고의 심각도를 판단한다. 충돌에너지는 두

차량의 충돌사고 전후의 운동에너지를 비교하여 손실된 에너지가 파손에 모두 소모되었다는 가정 하에 산출하게 된다. 모멘텀 보존의 법칙과 운동에너지 보존의 법칙을 이용하여 완전비탄성 충돌사고의 충돌 후 속도( $V_a$ )를 식(14)를 이용하여 구한다. 충돌에너지( $E_D$ )는 사고 전의 각 차량의 운동에너지들이 사고가 난 후 차량의 파손 등으로 인하여 손실된 에너지이므로 식(15)를 이용하여 산출 한다.

$$V_a = \frac{m_f v_f + m_l v_l}{m_f + m_l} \quad (14)$$

$$E_D = \frac{1}{2}(m_f v_f^2 + m_l v_l^2 - m_a v_a^2) \quad (15)$$

산출된 충돌에너지는 일정한 범위를 지정하여 위험도 수준을 구분 한다면 위험 정도의 크기를 파악할 수 있을 것이다. 또한 SDI와 마찬가지로 누적 TTCI값을 이용하여 나온 안전성 지표를 RSTI (Real-time Safety TTC Index)라 정의 하고 식(16)에 나타내었다. RSTI 관찰영역을 주행한 차량이 불안정한 상황에 노출되는 시간의 비율을 의미한다.

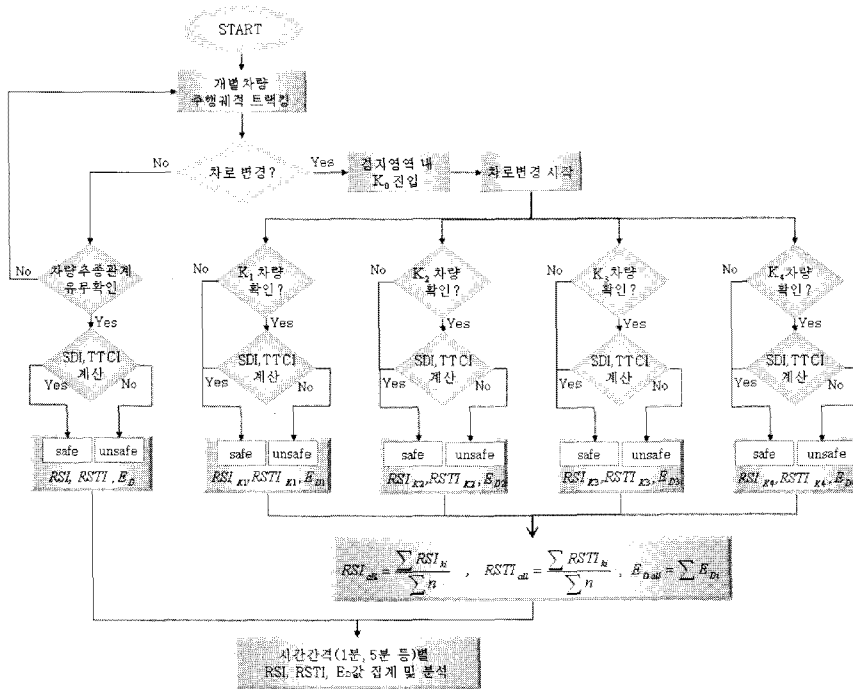
$$RSTI = \frac{\text{관찰영역의 총 Unsafe시간}}{\text{관찰영역의 총주행시간}} = \frac{\sum TTCI}{T_k^{\text{전출}} - T_k^{\text{전입}}} \quad (16)$$

## 4. 연속류 도로구간 교통상충분석 알고리즘

도로에서 교통상충은 차량추종 이벤트뿐만 아니라 차로변경이벤트도 지속적으로 발생된다. 차량추종 이벤트에서는 동일 차로의 선·후행 차량 간의 상충이 발생하기 때문에, 동일차로의 선·후행차량 간의 상충분석으로 안전성판단이 가능하다. 반면에 차로변경 이벤트는 차로변경차량과 목적차로의 선·후행차량, 주행차로의 선·후행 차량들과의 상충을 고려해야 하기 때문에 4가지 상충을 모두 고려하여 분석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 주행패턴을 차로변경과 차량추종 이벤트로 분류 하였다. 각 이벤트에서 발생한 상충을 RSI와 RSTI를 이용하여 교통안전도를 평가하는, RSSM 산출 통합 알고리즘을 <그림 8>에서 제시 하였다.

### 1) 개별차량 주행궤적 트래킹 및 주행패턴 판단

개별차량의 주행궤적 자료를 받아들이면서, 차량추종 이벤트와 차로변경 이벤트를 판단한다.



〈그림 8〉 연속류 도로구간 알고리즘 제시

2) 차량추종이벤트

선·후행 차량간의 안전정지거리 개념을 이용한 SDI (Stop Distance Index)를 통해 교통안전도 평가를 수행한다.

3) 차로변경 이벤트

차로변경 이벤트가 발생하여 차량이 검지영역에 진입하면 차로변경차량(K0)를 제외한 최소 한 대의 차량이 검지영역 내에 존재해야 상충이 발생하기 때문에 K1~K4차량의 존재여부를 확인한다. 각 차량의 존재여부가 파악되면 차로변경차량(K0)과 K1~K4 차량 간의 TTCI, SDI값을 각각 산출 한다. 검지영역내에 지속적으로 누적되는 TTCI, SDI값은 식(17)을 이용하여 개별 RSI<sub>ki</sub>, RSTI<sub>ki</sub> 값들을 산출 하게 된다.

$$RSI_k = \frac{\text{관찰영역의 총 Unsafe 시간}}{\text{관찰영역의 총 주행 시간}} \quad (17)$$

$$= \frac{\sum SDI_i \text{ or } TTCI_i}{T_k^{\text{전출}} - T_k^{\text{전입}}}$$

차로변경 이벤트 상황에서는 K1~K4차량까지 최대 4

개의 차량추종 이벤트가 발생한다고 볼 수 있다. 이는 차량추종 이벤트 상황과 다르게 K0차량은 단순히 하나의 차량추종이벤트 상에서의 관계가 아닌 K0차량과 K1~K4차량의 복합적인 차량추종이벤트가 발생된다고 볼 수 있다. 따라서 차로변경 하나의 이벤트에서 발생하는 각 차량과의 누적 안전도 평가 지표 값을 차로변경 이벤트 하나의 안전성지표로 도출하여야 한다.

(1) SDI or TTC : K0차량에 대한 차로변경 이벤트 상에서의 안전도 평가이기 때문에 관찰영역 주행시간이 검지 영역 내에서의 총 주행시간이므로 K1~K4차량들과의 RSI 및 RSTI 관찰영역의 총 주행시간, K0 주행시간에만 산출되게 된다. 따라서 관찰영역의 주행시간은 동일하다고 하면 각 차량과의 관계에서 나온 RSI 및 RSTI 합한 값은 차로 변경 이벤트 상에서의 안전성지표의 척도가 될 수 있다고 판단하고 RSI<sub>all</sub> 과 RSTI<sub>all</sub> 이라고 정의 한다. 두 안전성지표를 식(18)과 식(19)와 같이 정의 한다.

$$RSI_{all} = \frac{\sum RSI_{ki}}{\sum n} \quad (18)$$

$$RSTI_{all} = \frac{\sum RSTI_{K_i}}{\sum n} \quad (19)$$

- $RSTI_{all}$  : 개별차량  $RSTI_{K_i}$ 들의 평균값
- $RSTI_{K_i}$  : 개별차량  $RSTI_{K_i}$ 들의 평균값
- $n$  : 존재 차량수,  $0 \leq n \leq 4$
- $K_i$  : 각 대상차량( $K_1 \sim K_4$ )

(2)  $E_D$  :  $E_D$ 는 TTC가 Unsafe값으로 판단 될 경우에만 나오게 된다. <그림 7>에서와 같이 TTC의 불안 전 상황의 위험도를 측정하기 위하여 사용된 손실 에너지는 차로변경 이벤트 상에서  $K_0$ 차량과 각  $K_1 \sim K_4$ 간 산출된 값들을 하나의 통합 안전성지표로 산출 하여야 한다. 손실 에너지는 위의 경우와 달리 RSI의 값들의 평균 값을 사용하지 않고 각 차량과의 손실 에너지에서 나온 값들의 합을 사용 하여 안전성지표로 산출 하였다. 이러한 이유는 손실 에너지 같은 경우 TTC값이 산출 되었을 때만 손실 에너지가 발생되기 때문에 그 자체만으로 unsafe한 상황이라고 할 수 있다. 따라서 평균값을 나타내지 않고  $K_0$ 의 차량과  $K_1 \sim K_4$  차량에서 산출된 손실 에너지를 합산하여 차로변경 이벤트의 안전성 지표로 정의 하였다.

$$Ed_{all} = \sum Ed_i \quad (20)$$

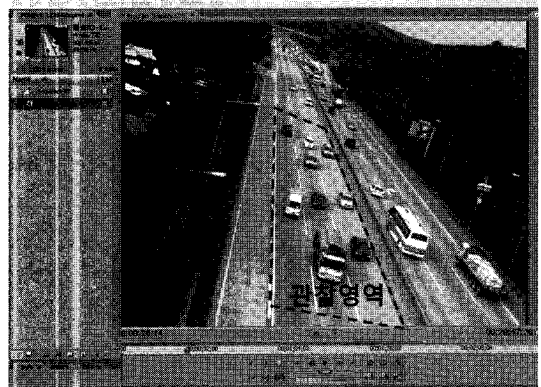
각 frame 별로 안전성 여부를 판단하고 위의 절차에 따라 분석된 각 차량의 자료는 분석가의 요구에 의해 주어 진 집계간격으로 (ex. 1분, 5분) 추가 집계 될 수 있다.

#### IV. 위험도 분석

III장에서 제시한 방법론의 적용을 위해서는 이미지 트래킹을 통한 개별차량 주행궤적 자료가 필요하다. 실제 이미지 트래킹 시스템을 통한 자료수집이 이상적인 접근이나, 본 연구에서는 현실적 한계로 인해 off-line 으로 차량의 주행궤적 자료를 수집하여 적용한다.

##### 1. 자료수집

자료수집 구간은 2개 구간으로 영동고속도로 월곡-안산IC 3차로 70m 구간과 서해안고속도로 매송 IC 3차



<그림 9> 동영상 편집 프로그램 Adobe Premiere Pro 2.0

<표 1> 자료수집 구간 기초 통계

	차량추종			차로변경			
통행량 (대/15min)	386	366	272	947	743	973	898
평균속도 (kph)	87.5	78.7	72.9	82.5	91.6	78.9	85.3
이벤트 수	292	268	139	17	11	29	35

로 100m 구간이다. 자료수집은 <그림 9>와 같이 동영상 편집 프로그램 Adobe Premiere Pro 2.0를 통해 수집한다. 고속도로의 차선 도색 시, 각 1개 차선의 길이가 20m(차선간격 포함)라는 가정 하에, 1/30초 단위로 개별차량의 주행궤적을 수집한다. 차량이 20m 주행시 소요되는 프레임수를 관찰하여 주행 속도를 산출한다. 각 이벤트의 기초통계는 <표 1>과 같다.

##### 2. 자료분석

Adobe Premiere Pro 2.0를 이용하여 수집한 개별차량의 주행궤적 자료를 JAVA 프로그램의 코딩 작업을 거쳐 각 이벤트 발생시 개별차량의 속도, 차주시간, 정지거리, 차간간격을 추출하였다. 추출된 자료를 통해 SDI 와 TTC를 이용한 RSI분석과 충돌에너지 분석을 수행하였다.

차량추종 이벤트 분석의 경우 각 차로별로 시간 흐름에 따른 RSI와 TTC, 충돌에너지의 변화를 분석하였다. 선행연구에서는 TTC 임계값으로 기존의 연구(Hirst and Graham, 1997)에서 제시하고 있는 3초를 적용하였다. 그러나 본 연구에서는 충돌에너지 개념이 추가되어 TTC 3초 이상의 충돌에너지와 TTC의 관계를 분석하기 위해 3.5초 까지 분석하였다. 15분 동안의 각 차로별 SDI와



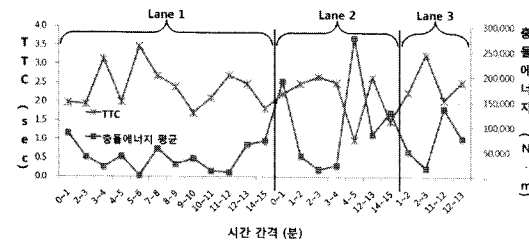
〈표 2〉 차로별 TTC 발생건수

	Lane 1	Lane 2	Lane 3
TTC(3.5초)	412 (10%)	235 (5%)	76 (5%)
TTC 발생건수	4,304	5,044	1,402
차량추종 분석횟수	9,890	10,135	2,957

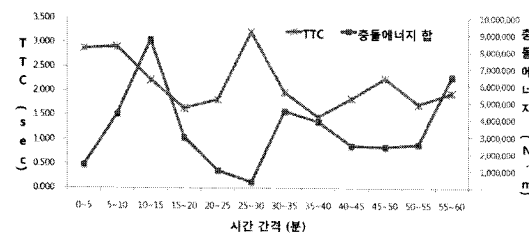
TTC, 충돌에너지를 분석하여 1분 단위로 집계하였다. 각 차로별 TTC 분석 결과는 〈표 2〉와 같다.

각 차로별 3.5초 미만의 TTC와 그때의 충돌에너지의 평균을 1분 단위로 집계하여 〈그림 10〉에 제시하였다. 누락된 시간대는 3.5초 미만의 TTC가 발생하지 않은 시간대이다. 각 RSSM의 상관도를 분석하기 위해 피어슨 상관계수를 〈표 3〉과 〈표 4〉에 제시하였다. 차량추종 이벤트의 경우 TTC와 충돌에너지가 서로 음의 상관관계를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

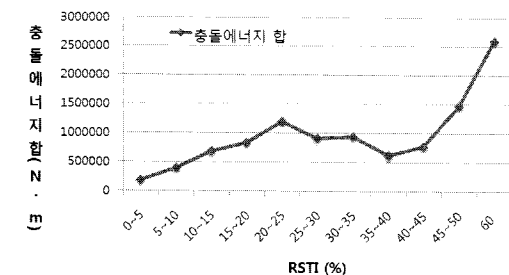
차로변경 이벤트는 RSTI와 이벤트 중 발생하는 충돌에너지의 합을 분석한다. 차량추종 이벤트는 선·후행



〈그림 10〉 차량추종 이벤트에서의 TTC와 충돌에너지



〈그림 11〉차로변경 이벤트에서의 TTC와 충돌에너지



〈그림 12〉 차로변경 이벤트 RSTI에 따른 충돌에너지 합

〈표 3〉 차량추종 이벤트의 피어슨 상관계수 분석

	TTC vs. 충돌에너지			
	전체	Lane1	Lane2	Lane3
상관계수	-0.604	-0.532	-0.835	-0.684
유의확률(양쪽)	0.049	0.075	0.019	0.000

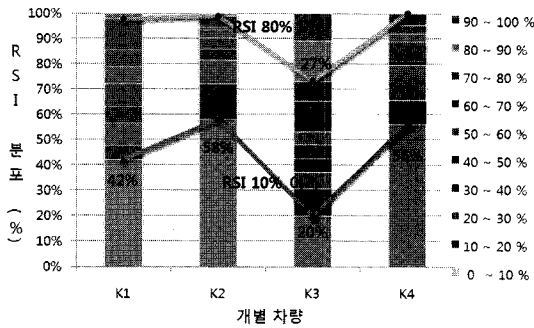
〈표 4〉 차로변경 이벤트의 피어슨 상관계수 분석

	TTC vs. 충돌에너지 합	RSTI vs. 충돌에너지 합
	상관계수	-0.457
유의확률(양쪽)	0.135	0.05

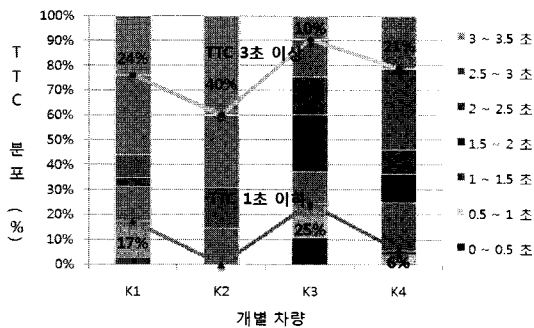
차량의 일대일 관계이나, 차로변경이벤트는 인접차량 4대와의 관계이다. 따라서, 이벤트 진행 중 임계값 이하의 TTC가 발생한 비율과 충돌에너지 전체를 분석한다. 차량추종 이벤트와 같이 TTC와 충돌에너지를 분석할 경우 〈그림 11〉과 같이 나타나며, 피어슨 상관분석을 통해 〈표 3〉과 〈표 4〉와 같이 대체적으로 음의 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 각 차로변경 이벤트의 RSTI와 충돌에너지 합을 분석하여 RSTI에 따른 충돌에너지 변화를 〈그림 12〉에 제시하였다.

차로변경 이벤트 중 차로변경 차량과 인접차량 4대와의 RSI와 TTC를 분석하여 〈그림 13〉와 〈그림 14〉에 제시하였다. 개별 차로별 차로변경 이벤트 중 발생하는 RSI와 3.5초 미만의 TTC의 분포를 분석하였다. RSI의 경우 비교적 위험한 상태인 80%이상인 상태가, K<sub>3</sub> 차량에서 27%로 가장 많이 분포 하고 있다. 반대로 비교적 안전한 상태인 10% 이하인 상태는 20% 가장 적게 분포하고 있다. TTC의 경우 비교적 위험한 상태인 1초 이하의 상태가 K<sub>3</sub> 차량에서 25%로 가장 많이 분포하고 있다. 반대로 기존연구에서 제시한 임계값 3초 이상의 상태는 10% 분포하고 있다.

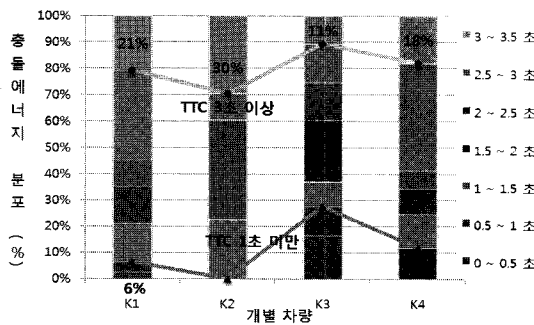
위와 같은 결과를 통해 차로변경 이벤트 중 차로변경 차량 주행차로의 선행차량인 K<sub>3</sub> 차량이 가장 위험한 것을 확인할 수 있다. 이런 결과가 도출된 이유는 본 연구의 차로변경 이벤트 대상이 〈그림 2〉에서와 같이 목적차로의 선·후행 차량간의 간격을 확인 후, 차로변경이 시작된 순간부터 차선을 완전히 넘어간 순간까지이기 때문이라 할 수 있다. 목적차로의 선·후행 차량인 K<sub>1</sub>과 K<sub>2</sub>와는 이미 안전하다고 판단된 이후 차로변경을 하기 때문에 K<sub>1</sub>과 K<sub>2</sub>는 RSI와 TTC 분석에서 비교적 안전한 결과가 도출된다. 그러나, K<sub>3</sub>의 경우 차로변경 수행 중 차로변경차량인 K<sub>0</sub>와 간격이 감소되어 TTC가 짧아지거



〈그림 13〉 차로변경 이벤트상 인접차량별 RSI 분포



〈그림 14〉 차로변경 이벤트상 인접차량별 3.5초 미만 TTC 분포



〈그림 15〉 차로변경 이벤트상 인접차량별 충돌에너지 분포

나, 돌발상황이나 K<sub>3</sub>차량의 감속으로 인해 TTC가 짧아질 가능성이 있기 때문에 다른 인접차량에 비해 위험한 결과가 나온다고 판단할 수 있다.

이를 바탕으로 TTC 3.5초 이하에서 발생한 인접차량별 충돌에너지의 합에 대한 TTC 0.5초 단위별 분포비율을 〈그림 15〉에 제시하였다. 충돌에너지 역시 1초 이하 구간에서 K<sub>3</sub>차량의 비율이 27%로 가장 높았으며, 3초 이상의 구간에서는 11%로 가장 낮은 비율을 나타내고 있다.

### 3. Discussions

#### 1) RSSM 정의 및 해석

SDI의 경우 분석 시점에서 선·후행 차량이 감속한다는 가정 하에 산출되지만, TTC와 충돌에너지의 경우 충돌하는 순간까지 선·후행 차량이 등속운동 한다는 가정 하에 산출된다. 두 RSSM의 기본 가정의 차이로 인해 결과가 조금은 다른 양상을 보이는 경우가 있다. 또한, RSI와 RSTI는 각 이벤트의 사고 잠재율을 의미하나, 충돌에너지의 경우 사고 발생시 심각도를 의미한다. 따라서, 각 RSSM의 특성에 맞게 해석해야한다. 각 RSSM에 영향을 주는 요소가 서로 다르고 다양하기 때문에, 향후 연구에서는 이를 대표할 수 있는 새로운 RSSM, 혹은 모형식의 개발이 필요할 것이다.

#### 2) 파손심각도 산출

본 연구에서 적용한 충돌에너지의 개념은 차량의 모멘텀을 이용하여 산출된 충돌 후 최대접합 상태의 공통 속도를 이용하여, 충돌 전·후의 운동에너지를 비교하여 손실된 에너지를 산출한 것이다. 여기서의 충돌사고는 선·후행 차량이 같은 중심선상에서 일직선상으로 충돌하여, 충돌 후 조향조작이 없다는 가정이 필요하다. 그러나, 실제 차량 추종 이벤트 및 차로변경 이벤트에서는 충돌부위와 충돌각도에 따라 다양한 충돌사고 유형이 존재하기 때문에, 향후 연구에서는 보다 현실묘사력이 개선된 방법론이 적용되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서의 충돌에너지는 단순히 충돌사고 후 손실된 에너지이기 때문에, 충돌사고 차량의 파손 정도와 운전자 상해정도는 알 수 없다. 차종에 따라 차량 제원과 탄성도, 내구성 등 여러 특성이 다르기 때문에, 향후 연구에서는 차종별 파손심각도와 운전자의 상해심각도, 실제 차량 실험을 통한 충돌에너지 등급화 기준이 연구되어야 할 것이다.

#### 3) 위험도 분석 결과의 해석 및 활용

차량추종 및 차로변경 이벤트의 위험도는 각 이벤트 별로 분석되어 산출된다. 이벤트에 직접 관련된 개별차량의 위치와 속도차 등에 의해 위험도가 산출된다. 그러나 차량추종 및 차로변경 이벤트의 시종점이 관찰영역 내에 있는 경우는 많지 않기 때문에 이벤트 진행 중 위치에 따른 위험도는 분석하기 어렵다. 또한 정확한 위험도 산출을 위해서는 충돌면적과 충돌 각도, 중량 등의 요소

가 반영되어야 하지만, 영상검지를 통해서서는 자료수집이 불가능하다. 충돌 위험도는 차량의 위치보다는 두 차량의 속도차와 중량에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 두 차량의 속도차와 중량을 이용하여 충돌 위험도를 분석하였다. 향후 연구에서는 영상검지 기술의 개발을 통해, 차량 위치에 따른 간격, 충돌각도, 충돌면적 등이 고려된 위험도 분석이 이루어져야한다.

개별차량이 영상검지영역을 통과하는 3초 내외의 짧은 시간동안 주행궤적 수집 및 분석, 위험도 평가, 제공까지 이루어져야 한다. 이를 위해서는 검지영역의 확대, 차량간 혹은 차량과 인프라 시설간의 통신, 정보제공 콘텐츠 개발 등의 관련 기술 개발이 필요하다. 또한, 차량 추종 및 차로변경 이벤트는 이벤트에 직접 관련된 차량 외에 인접 차량에도 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 관찰영역 전체의 위험도를 평가하기 위해 영역내 통과 차량의 위험도를 시간별로 집계하여 표현하였다. 개별차량의 위험도는 차량추종 및 차로변경 이벤트에 직접 관련된 차량의 운전자에게 도움이 될 수 있고, 본 연구와 같이 관찰영역 전체 위험도의 시간별 집계는 해당 도로의 운전자에게 도움이 될 수 있다. 향후 연구에서는 개별 차량별 위험도와 관찰영역 전체의 위험도 분석 결과의 도로 이용자 및 운전자에 대한 제공 전략과 활용 방안에 관한 연구가 이루어져야한다.

#### 4) 수집 자료의 신뢰도 평가

본 연구에서는 동영상 편집 프로그램 Adobe Premiere pro 2.0 을 이용하여 개별차량의 주행궤적 자료를 수집하였다. 이 과정에서 동영상의 품질과 동영상 촬영 위치 및 환경, 동영상 분석자의 개인 특성 등에 의해 주행궤적 자료의 오차가 발생할 수 있다. 본 연구의 목적은 영상이미지 트래킹 환경에 적용할 수 있는 안전도 분석 기법의 제시이기 때문에, 수집된 자료의 신뢰도 평가는 이루어지지 않았다. 개발 중인 영상이미지 트래킹 프로그램이 개발 완료되면, 향후 연구에서는 수집된 자료의 신뢰도 평가 및 알고리즘의 성능평가가 이루어져야 한다.

#### 5) 관련 기술 개발

본 연구의 차로변경 이벤트 분석은 차량이 차로변경을 수행하는 동안의 위험도를 분석하였다. 그 이전의 차량주행패턴 분석을 위해서는, 검지영역의 확대와 이를 뒷받침할 수 있는 영상 취득기술의 발전이 필요하다. 또

한, 분석결과 K<sub>3</sub> 차량의 위험도가 가장 높은 것으로 나타남에 따라, K<sub>3</sub> 차량 전방의 돌발상황이나 급제동을 검지할 수 있는 기술의 개발이 필요할 것이다. 더불어 이와 같은 경고정보와 검지영역내 RSSM 제공 전략도 함께 연구되어야 할 것이다.

### V. 결론

본 연구는 개별 차량의 미시적 주행궤적 자료를 실시간으로 수집할 수 있는, 교통상황의 실시간 모니터링 환경에서 적용 가능한 교통 안전도 평가 기법을 제시하는데 목적을 두고 있다.

본 연구에서는 차량의 영상 이미지 프로세싱을 통해 추출되는 개별차량의 주행궤적 자료를 이용하여 SDI와 TTC, 충돌에너지 기반의 교통사고 심각도 분석 방법론을 제시하였다. 선행 연구의 차량추종 이벤트 분석에서 나아가, 차로변경 이벤트 분석이 추가된 차량 주행패턴의 통합 분석 알고리즘을 제시하였다. SDI와 TTC를 기반으로 하여 차량추종과 차로변경 이벤트를 분석하였고, 모멘텀 개념을 이용하여 이벤트 진행 중 상충 차량간의 충돌에너지를 도출하여 사고 심각도를 분석하였다.

본 연구에서 제안하는 방법론은 실시간 교통 모니터링 환경 교통안전도 평가 및 교통상황 자료 수집을 위한 검지 시스템과 정보제공 시스템의 개발에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다. 이를 위해서는 현실 묘사력과 예측력, 적용성이 뛰어난 방법론과 모형의 개발에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것이다. 아울러 다양한 도로여건 및 교통상황에 적용 가능한 시스템의 개발과 자료수집의 신뢰성 평가 및 알고리즘의 성능평가가 함께 진행되어야 한다.

### 참고문헌

1. 김원철 · 이수범 · 남궁문 · 今田寛典(2002), "퍼지추론을 적용한 교통상황기법(TCT) 개발", 대한교통학회지, 제20권 제1호, 대한교통학회, pp.55~63.
2. 김현상(1997), "신호교차로 교통상충 측정방법의 개발과 평가" 한양대학교 대학원 석사학위논문.
3. 오주택 · 민준영 · 김승우 · 허병도 · 김명섭(2007), "Tripwire 및 Tracking 기반의 영상검지시스템개발을 위한 성능비교 및 분석", 대한교통학회 57회 학술발

- 표회, 대한교통학회, pp.907~914.
4. 오철 · 조정일 · 김준형 · 오주택(2007), "영상기반 실시간 후미추돌 위험도 분석기법 개발" 대한교통학회지, 제25권 제5호, 대한교통학회, pp.173~182.
  5. 이기영(2006), "교통상충 및 사고분석에 의한 잇갈림 구간의 안전도평가기준개발", 한양대학교대학원 박사학위논문.
  6. 이수범 · 강인숙(1999), "상충기법을 이용한 교차로 안전진단에 관한 연구", 대한교통학회지, 제17권 제4호, 대한교통학회, pp.9~17.
  7. 하태준 · 김진현(1998), "신호교차로 교통상충 측정 방법의 적용성 평가" 교통안전연구논집, 제17권.
  8. Hirst, S, Graham, R.(1997), "The format and presentation of collision warnings." In: Noy, N.I.(Ed), Ergonomics and safety of intelligent Driver Interfaces.
  9. Hyden, C. (1987), "The development of a method for Traffic Safety Evaluation", Lund Institute of Technology.
  10. Hyden, C. (1996) "Traffic conflict technique: state of the art". In: Topp, H.H.(Ed.), Traffic safety work with video processing. University Kaisersautern, Transportation Department, 1996, Green Series No. 37, pp.3~14.
  11. Oh, C., Park, S., and Ritchie, S.(2006), "A method for Identifying rear-end collision risks using inductive loop detectors" Accident Analysis Prevention 38, pp.291~301.
  12. Paddock, R.D. (1974), "The Traffic Conflicts Technique: An accident Prediction Method" TRR 486.
  13. Perkins, S. R(1968), "Traffic Conflict Characteristic-Accident Potential at Intersections", HIGHWAY RESEARCH RECORD Number 225, Traffic Safety and Accident Research 6 Report.
  14. Roess R. P., Prass, E., and Mcshane, W. (2004), Traffic Engineering, Pearson Education, Inc.
  15. Trantonio, H. , Tourinho, L. F. B (2005), "Parameters for evaluating pedestrian safety problem in signalized intersection using the traffic conflict analysis technique - A study in Sao Paulo, Brazil" TRB 2005 Annual Meeting.
  16. VanArem, B., and Devos, A.P. (1997), "The effect of a special lane for intelligent vehicles on traffic flows". TNO-INRO Reprt 1997-02a. Delft, The Netherlands.

✉ 주 작성자 : 김준형

✉ 교신저자 : 오철

✉ 논문투고일 : 2008. 2. 23

✉ 논문심사일 : 2008. 4. 22 (1차)

2008. 7. 14 (2차)

2008. 7. 28 (3차)

✉ 심사판정일 : 2008. 7. 28

✉ 반론접수기한 : 2009. 2. 28

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필