

# 타이어-노면 마찰계수 추정을 이용한 AEBS 알고리즘

한승재\* · 이태영\* · 이경수\*

## AEBS Algorithm with Tire-Road Friction Coefficient Estimation

Seungjae Han\*, Taeyoung Lee\*, Kyongsu Yi\*

*Key Words* : Tire-Road Friction Coefficient Estimation(타이어-노면 마찰계수 추정), Advanced Emergency Braking(자동비상제동), Longitudinal Safety(종방향 안전성), Time To Collision(충돌예상시간), Warning Index(충돌경보지수)

### ABSTRACT

This paper describes an algorithm for Advanced Emergency Braking(AEB) with tire-road friction coefficient estimation. The AEB is a system to avoid a collision or mitigate a collision impact by decelerating the car automatically when forward collision is imminent. Typical AEB system is operated by Time-to-collision(TTC), which considers only relative velocity and clearance from control vehicle to preceding vehicle. AEB operation by TTC has a limit that tire-road friction coefficient is not considered. In this paper, Tire-road friction coefficient is also considered to achieve more safe operation of AEB. Interacting Multiple Model method(IMM) is used for Tire-road friction coefficient estimation. The AEB algorithm consists of friction coefficient estimator and upper level controller and lower level controller. The numerical simulation has been conducted to demonstrate the control performance of the proposed AEB algorithm. The simulation study has been conducted with a closed-loop driver-controller-vehicle system using using MATLAB-Simulink software and CarSim Vehicle model.

### 1. 서론

자동차에 장착되는 전자, 전기 장치가 급증하고 정보화 기술이 급격하게 발달하면서 운전자의 운전을 보조하는 여러 지능형 시스템이 개발되어 자동차에 장착·판매되고 있다. 주차보조 시스템이나 네비게이션, 충돌 경보 시스템과 같이 IT기술을 이용하여 운전과 관련한 정보를 운전자에게 제공하는 기능을 가진 시스템도 있고, 운전과 직접적으로 개입하여 자동차의 속도를 조절하는 순항 제어 시스템이나 자동비상제동장치(AEBS : Advanced Emergency Braking System)와 같이 차량을 제어하는 시스템도 개발·판매되고 있다.

자동비상제동장치는 운전자의 집중력 하락과 같은 상황에 대비하여 종방향의 충돌 위험을 감지하고 자동적으로 브레이크를 작동시켜 충돌을 방지하거나 충돌 속도를 줄여 충돌 피해를 줄이는 장치이다.

본 연구에서는 AEBS의 안전도를 향상시키기 위해 기존의 연구에서 제시된 바 있었던 타이어-노면 마찰계수 추정 알고리즘을 이용하여 추정된 마찰계수를 제어에 반영하는 자동비상제동 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서 AEBS 알고리즘은 다른 연구에서 제시된 바 있는 충돌예상시간(Time To Collision : TTC)과 충돌경보지수(Warning Index : X)를 활용한다. 충돌예상시간의 작동threshold값 선정과 충돌경보지수의 계산에 추정된 타이어-노면 마찰계수를 이용하여 제동모드를

\* 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : antidote@snu.ac.kr

구분하고 최종적으로 차량의 증방향 안전도를 향상시키고자 한다.

## 2. 제어 목표 설정

### 2.1 국제기준동향 기반 목표 충돌 속도

자동비상제동장치 시스템의 안전도를 평가하기 위한 평가 시나리오 및 기준이 국제 표준화 기구(International Organization for Standardization ISO) 및 유럽 신차안전도평가(European New Car Assessment Program: Euro-NCAP) 등의 기관에서 논의되고 있다.

현재 Euro-NCAP에서 제시한 기준은 전방차량이 정지해 있을 경우 50kph이하의 속도에서는 충돌완전방지, 50kph 초과속도에서는 감속을 통한 충돌속도 감소를 하는 것이다.<sup>1)2)</sup>

### 2.2 승차자 상해 연구에 따른 목표 충돌 속도

기존의 차량간 충돌상황에서 충돌속도에 따른 승차인의 상해에 대한 관련 연구에 따르면 후미 충돌상황에서의 유효충돌속도  $\Delta V$ 는 식 (1)과 같다.

$$\Delta V = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_r \quad (1)$$

식의  $m_1, m_2$ 는 충돌하는 차량의 질량,  $v_1, v_2$ 는 충돌하는 차량의 속도,  $v_r$ 은 양 차량의 상대속도이다.

“생체역학적 무상한계는 유효충돌속도 10~15kph 이하 사이에서 존재한다.”<sup>3)</sup>는 기존의 연구결과에 따라 목표 유효충돌속도를 15kph이라고 하면 두 차량의 무게가 동일하다고 가정하면 충돌속도 30kph가 승차인의 안전이 고려된 충돌 속도이다.<sup>4)</sup>

### 2.3 자동비상제동 알고리즘 목표 최종속도

2.1, 2.2에서 살펴본 국제기준동향 및 승차자 상해연구 결과를 반영하여 본 연구에서는 다음과 같은 충돌시 속도 목표를 설정하였다. 마찰계수가 크게 감소하여 기존의 알고리즘으로 문제가 생길 것이라고 예상되는 얇은 눈이 쌓인 도로의 마찰계수인 0.5<sup>5)</sup>를 기준으로 제어 목표를 설정하였다. 50kph를 초과하는 속도에 대해서는 유효충돌속도를 15kph이하로 하고 50kph이하의 속도에서는  $\mu > 0.5$ 인 경우 전방차량과의 충돌방지,  $\mu \leq 0.5$ 인 경우는 유효충돌속도를 10kph이하로 하는 목표를 설정하였다.

- $\mu > 0.5$ , 50kph 이하 : 전방차량과의 충돌 방지
- $\mu > 0.5$ , 50kph 초과 : 충돌속도 30kph이하
- $\mu \leq 0.5$ , 50kph 이하 : 충돌속도 20kph 이하
- $\mu \leq 0.5$ , 50kph 초과 : 충돌속도 30kph이하

## 3. 자동비상제동 알고리즘 설계

2.3에서 설정한 제어 목표에 따라서 본 연구에서는

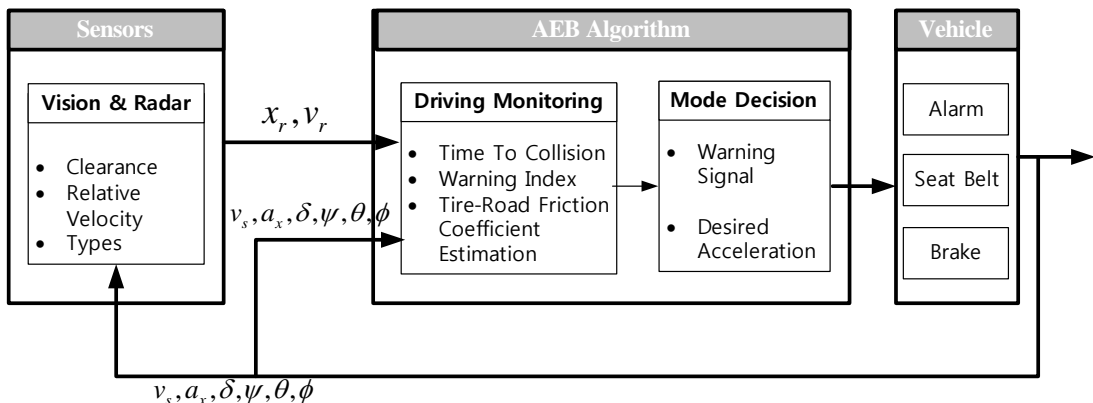


Fig. 1 Control Flow of the AEB Algorithm

기존의 연구에서 충돌시간과 충돌경보지수를 이용하여 AEB의 작동 모드를 결정하던 알고리즘을 변형하여 충돌시간 threshold값과 충돌경보지수에 추정된 타이어-노면 마찰계수를 반영하여 AEB의 작동모드를 결정하는 알고리즘을 설계하였다. 본 논문에서 제안하는 자동비상제동 알고리즘의 구조는 Fig.1과 같다.

### 3.1 타이어-노면 마찰계수 추정 알고리즘

타이어-노면 마찰계수를 기존 연구의 상호작용 다중모델 방식을 이용한 방법을 따른다.<sup>6)</sup>

$$\hat{F}_{x,i} = \frac{1}{r_{w,i}} [I_{w,i} \cdot \dot{\omega}_i + \lambda_i \cdot \omega_i - \hat{\omega}_i + T_{b,i} - T_s + r_{w,i} F_{rr}] \quad (2)$$

센서정보로 들어오는 데이터로 브레이크 토크 및 사프트 토크  $T_b$ ,  $T_s$ 를 알고 있을 경우 그를 통해서 각 타이어의 힘을 계산할 수 있다. 자동차가 각 타이어에 가하는 수직방향의 힘은 식 (3)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{z,FL} &= \frac{1}{2} F_{SWF} - W_{LTF,L} - W_{FA} \\ F_{z,FR} &= \frac{1}{2} F_{SWF} + W_{LTF,R} - W_{FA} \\ F_{z,RL} &= \frac{1}{2} F_{SWR} - W_{LTR,L} + W_{FA} \\ F_{z,RR} &= \frac{1}{2} F_{SWR} + W_{LTR,R} + W_{FA} \\ W_{LTF} + W_{LTR} &= \frac{(m_s h_r + m_u h_a)}{t} a_y \\ &\quad + \frac{m_s e_s (a_y - g\phi - e_s \ddot{\phi}) - I_{xxs} \ddot{\phi}}{t} \\ W_{FA} &= \frac{m_s h_s}{2(l_f + l_r)} a_x \end{aligned} \quad (3)$$

타이어와 노면 사이의 마찰력은 Dugoff의 타이어모델에 따르면 식(4)로 모델링 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{C_s s}{1-s} f(\lambda), F_y = \frac{C_\alpha \tan \alpha}{1-s} f(\lambda) \\ \lambda &= \frac{\mu F_z [1 - \varepsilon_r v_x \sqrt{s^2 + \tan^2 \alpha}]}{2\sqrt{C_s^2 s^2 + C_\alpha^2 \tan^2 \alpha}} (1-s) \\ f(\lambda) &= \begin{cases} \lambda(2-\lambda) & \text{if } \lambda \leq 1 \\ 1 & \text{if } \lambda > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 타이어의 종방향 힘 특성을 알고 있다면 종방향 마찰력은 식(5)와 같이 수직방향 힘과 슬립율, 마찰계수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$F_x = f(F_z, \lambda, \mu) \quad (5)$$

위의 식을 이용하여 어떠한 특정한 타이어와 노면 사이의 마찰계수에 따른 종방향 타이어 힘을 계산할 수 있다. 그러한 마찰계수에 따른 타이어 힘을 하나의 모델로 하여 상호작용 다중모델 방법을 적용해서 각 모델 중 앞서 계산한 타이어 종방향 힘과 가장 유사한 수치를 보이는 마찰계수 수치를 해당 노면의 마찰계수로 추정한다. 특정 마찰계수에 따른 종방향 힘은 식 (6)과 같이 표시하고 식 (7)의 식으로 확률을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 0.9, 0.5, 0.3의 세가지 수치를 모델로 사용하였다.

$$z_k = F_x(F_z, \lambda, \mu_k) \quad (6)$$

$$p(z_k | Z_{k-1}) = \frac{1}{|2\pi S|} e^{-\frac{1}{2}(z_k - \hat{F}_i)^T S^{-1} (z_k - \hat{F}_i)} \quad (7)$$

확률을 계산한 후 이를 식 (8)을 통해 weighting factor로 재계산 하고 식 (9)로 추정 마찰계수의 값을 구한다.

$$w_k^i = \frac{p(z_k | Z_{k-1}, r=i) w_{k-1}^i}{\sum_{j=1}^L p(z_k | Z_{k-1}, r=i) w_{k-1}^j} \quad (8)$$

$$\hat{\mu}_k = w_k^1 \cdot \mu_1 + w_k^2 \cdot \mu_2 + w_k^3 \cdot \mu_3 \quad (9)$$

### 3.2 충돌예상시간 기반 주행상황 판단

선행차량과 자차량의 현재 속도가 변하지 않을 경우 선행차량과 자차량이 충돌하는데 걸리는 시간은 충돌시간(Time To Collision : TTC)이라고 하고 식 (10)으로 계산한다.<sup>4)7)</sup>

$$TTC = \frac{x_r}{v_r} \quad (10)$$

현재 판매되고 있는 AEB장치의 작동시점은 제조사마다 차이가 있다. 판매되고 있는 제품의 경우 일반적

으로 TTC를 기준으로 AEB가 작동하는데, Mercedes-Benz의 Pre-Safe<sup>®</sup> Brake시스템의 AEB작동 시점은 TTC기준 1.6초에 0.4g로 Prebraking을 하고 TTC 기준 0.6 초에 Fullbraking을 한다.<sup>8)</sup> 이러한 작동 시점은 이상적인 브레이크 상황을 가정했을 때 Euro-NCAP의 안전기준을 만족하는 작동 시점으로 본 연구에서 기존의 AEB작동 시점으로 설정하였다.

- TTC 1.6초 : Prebraking(0.4g)
- TTC 0.6초 : Fullbraking

### 3.3 충돌경보지수기반 주행상황 판단

#### 3.3.1 충돌경보지수

충돌경보지수(Warning Index :  $x$ )는 자차량의 급감속상황을 가정하였을 경우 전방차량과의 물리적인 충돌한계에 따라서 위험도를 나타내주는 지표이다.<sup>4)9)</sup>

$$x = \frac{c - d_{br}}{d_w - d_{br}} \quad (11)$$

여기에서  $c$ 는 차간거리,  $d_{br}$  과  $d_w$  은 제동거리 및 경보거리이고 식(12)와 같다.

$$d_{br} = v \cdot T_{s, delay} + g(\mu) \left( \frac{v_s^2 - v_p^2}{2a_{max}} \right) \quad (12)$$

$$d_w = v \cdot T_{s, delay} + v_s T_{h, delay} + g(\mu) \left( \frac{v_s^2 - v_p^2}{2a_{max}} \right)$$

$T_{delay}$  는 시스템 혹은 운전자에 의한 딜레이이다. 충돌경보지수는 운전자나 시스템에 의한 시간 지연을 고려했을 때, 최대 이용가능한 감속도로 감속을 할 경우의 위험도를 나타내는 지표이다. 충돌경보지수가 0인 경우 자동적으로 브레이크로 감속할 경우 물리적으로 충돌회피가 가능한 최종적인 시점이고, 충돌경보지수가 1인 경우 운전자가 브레이크를 작동시킬 경우의 물리적으로 충돌회피가 가능한 최종적인 시점이 된다.

#### 3.3.2 충돌경보지수의 마찰계수

충돌경보지수에서 쓴 마찰계수에 대한 함수  $g(\mu)$  는 마찰계수와 최대 이용가능한 가속도를 고려하면  $g(\mu) = \frac{1}{\mu}$  이다. 평지 주행시 마찰력은 수직항력을 넘지

못하므로  $a_{max}$  가 중력가속도라고 한다면  $\mu a_{max}$  이 이론적으로 차량이 이용가능한 최대의 가속도이기 때문이다. 마찰계수를 고려하지 않을 일반적인 주행상황의 경우  $g(\mu) = 1$ 로 가정할 수 있다.

### 3.4 충돌예상시간과 충돌경보지수를 고려한 작동시점

전방차량의 속도가 0인 상황을 가정하면 자차량의 속도와 상대속도는 같은 값이 된다. 자차량의 속도가 상대속도와 같다고 가정하고 이 때의 충돌경보지수 곡선과 충돌예상시간 곡선을 상대속도와 상대거리평면상에 표시해보면 Fig.2와 같다. 이 경우 TTC 1.6초가 충돌경보지수1과 만나는 시점의 상대속도는 52kph이고, TTC 0.6초가 충돌경보지수0과 만나는 시점의 상대속도는 19kph이다. 이를 기준으로 하여 마찰계수  $\mu$  가 추정된 경우 마찰계수를 충돌경보지수 식에 넣고 계산하여 상대속도가 52kph와 19kph일 때 각각 충돌경보시점 1과 0에 해당하는 TTC를 작동시점으로 결정한다. 추정된 마찰계수가 0.5나 0.3인 경우 TTC는 다음과 같은 제어 시점을 가지게 된다. 추정된  $\mu$  는 얇은 눈이 덮인 아스팔트 도로(loose snow/slush)의  $\mu$  분포 범위(0.2~0.5)의 최대값인 0.5와 도로표면에 얇게 얼음이 언 상태(black ice)의  $\mu$  분포범위(0.15~0.3)의 최대값인 0.3으로 예를 들어서 결정하였다.<sup>5)</sup>

- $\mu = 0.5$  : Prebraking TTC=2.27 FullBraking TTC=0.84
- $\mu = 0.3$  : Prebraking TTC=3.25 FullBraking TTC=1.2

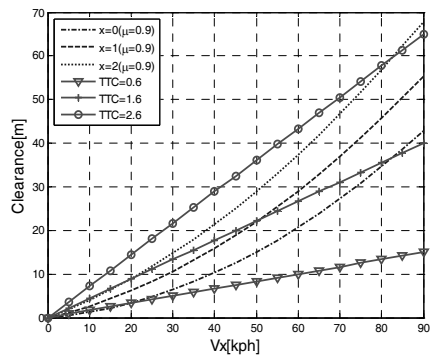


Fig. 2 TTC-X curve in Clearance-relative velocity phase

### 3.5 제어 모드 설정

전방의 차량에 대해서 충돌예상시간과 충돌경보지수에 따른 제어모드는 Fig.3과 같이 구분한다.

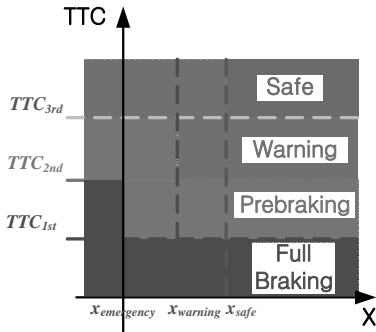


Fig. 3 Control Mode of the AEB in TTC and Warning Index plane

### 4. 시뮬레이션을 통한 알고리즘 성능 검증

설계된 자동비상제동 알고리즘의 검증을 위해 Matlab-Simulink와 CarSim자동차 모델을 이용하여 시뮬레이션 모델을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시나리오는 전방 차량이 정지해있고 타이어-지면 사이의 마찰계수가 0.5인 middle  $\mu$  상황과 0.3의 low  $\mu$  인 상황을 가정하였다.  $\mu$  의 경우 평균적으로 0.3과 0.5인 상황에서 도로상황에 따라서 어느 정도의 변화량이 있을 수 있다고 가정하고 0.1의 표준편차를 가지는 상황으로 가정하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘과 기존 알고리즘간의 성능을 비교하고 유효성을 검증하기 위해서 TTC만으로 작동하는 알고리즘도 시뮬레이션을 수행하였다.

기존에 제시되었던 타이어-노면 마찰계수 추정기의 작동이 가속이 있는 경우에만 이뤄질 수 있기 때문에 초기에 가속과 감속을 하여 마찰계수의 추정이 이뤄지고 이후에 전방 차량을 감지하여 감속하는 상황을 가정하였다. 자차량의 감, 가속도에 대한 시나리오는 다음과 같다. 운전자가 일반적인 상황에서 사용하는 가속도 크기의 절댓값은  $2\text{m/s}^2$ 이하이므로 그에 따라 감속도와 가속도의 크기를 결정하였다. 그에 따라 가

속과 감속을 하여 45kph에서 60kph의 속도로 주행하는 상황을 가정하였으며 전방차량 감지상황에서 50kph의 속도로 자차량이 주행하는 상황에서 AEB가 작동하기 시작하는 상황을 가정하였다. 속도를 50kph로 설정한 이유는 2.3에서 설정하였던 제어의 목표가 50kph에서 충돌속도가 20kph이하로 감속할 수 있어야 속도가 50kph보다 낮은 상황에서 충돌속도가 20kph가 되도록 감속할 수 있기 때문이다.

전방 차량은 정지인 상태로 가정하였는데 Euro-NCAP의 AEB테스트 시나리오 중 정지상태인 전방차량에 대한 감속 테스트를 고려하여 전방차량의 속도를 설정하였다.

- 0~7.7sec :  $1.5\text{m/s}^2$ 의 가속
- 8~10sec :  $-1.8\text{m/s}^2$ 로 감속
- 초기속도 : 45kph
- 속도 : 위의 가속, 감속으로 45kph~60kph의 속도로 가속, 전방차량 감지상황에서 50kph로 작동
- 전방차량 : 정지

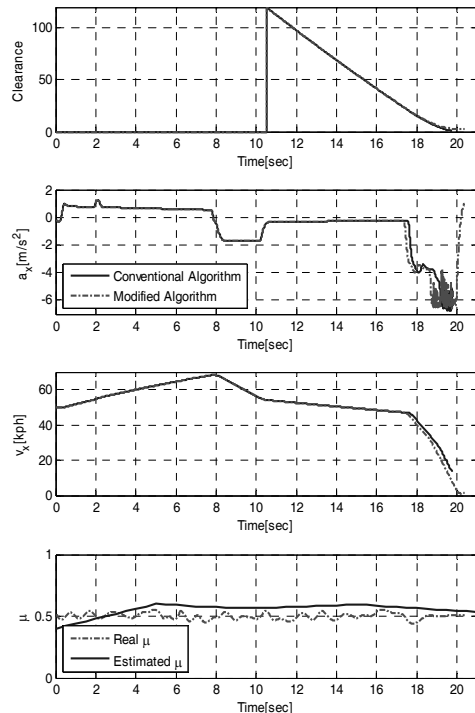


Fig. 4 Simulation Results of middle  $\mu(0.5)$  Situation

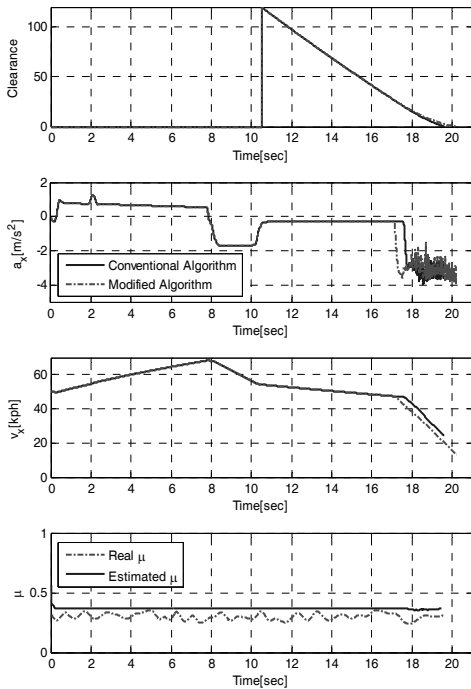


Fig. 5 Simulation Results of low  $\mu(0.3)$  Situation

시뮬레이션 결과는 Fig.4, Fig.5와 같다. 각 시뮬레이션 결과의 첫번째 그래프인 Clearance는 전방차량과의 간격을 표시하였다. Clearance는 초기값이 0이었다가 약 10.3초부터 120m가 되는데 이것은 차량의 전방 레이더의 인식 범위가 120m정도 되는 것을 고려하여 시뮬레이션 하였다.

기존 TTC기반 알고리즘이 약 17.7초부터 감속을 시작하고 연구에서 제시한 알고리즘은  $\mu=0.5$ 는 약 17.4초부터 감속을 시작,  $\mu=0.3$ 는 약 17초부터 감속을 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이론적으로  $\mu=0.5$ 는 약 17초,  $\mu=0.3$ 는 약 16초부터 감속을 시작해야 하나 그렇지 않은 이유는 Fig.4, Fig.5의 4번째 그래프와 같이 마찰계수가 실제보다 높게 추정되어 충돌경보지수가 실제보다 높게 계산되었기 때문이다.

시뮬레이션 결과 마찰계수가 0.3이나 0.5인 상황에서 제어 목표로 설정하였던 50kph 이하에서 충돌속도 20kph이하인 제어목표 달성을 확인하였고 마찰계수가 0.5인 경우 충돌 0.5m전에서 정지하여 충돌방지를 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 타이어-차량 노면 마찰계수 추정을 이용한 자동비상제동 알고리즘을 제안하였다. 제안한 타이어-차량 노면 마찰계수 추정을 이용한 자동비상제동 알고리즘은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 본 연구에서 타이어-차량 노면 마찰계수 추정을 위한 알고리즘은 상호작용 다중모델을 이용하여 타이어-차량 노면 마찰계수를 추정하였다.
- 2) 추정된 타이어-차량 노면 마찰계수를 이용해서 제어모드를 결정할 때에는 노면 마찰계수를 충돌경보지수 계산에 반영하고 브레이크 작동 충돌예상시간(TTC threshold)을 마찰계수에 따라 반영하였다.
- 3) 본 연구에서는 타이어-노면 마찰계수 추정 알고리즘을 이용하여 자동비상제동장치 작동 알고리즘을 설계하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 저 마찰계수 조건에서 본 연구의 알고리즘이 보다 향상된 안전성을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 사용한 타이어-노면 마찰계수 추정 알고리즘은 타이어에 작용하는 수직력과 슬립율에 따른 타이어의 종방향 힘의 실험적인 데이터를 알고 있다는 가정과 타이어와 지면 사이의 마찰계수와 힘의 관계가 Dugoff 타이어 모델과 유사하다는 가정에 추정을 하는 알고리즘이다. 이러한 가정이 합리적인 상황에서 유의미한 연구이고, 실제주행하는 상황에서 어느 정도의 신뢰성을 가지고 있는지 실험을 통해 검증되지 않았으므로 한계가 존재하고 향후의 연구로 보완되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 연구비지원(13PTSI-C054118-05), 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임

## 참고문헌

- (1) Report of Two Years Activities in WP29\_ITS Informal Group, 2007. UN/ECE/WP29

- (2) An introduction to the New Vehicle Safety Regulation. 2008. EU
- (3) 강성모, 안병준, 2008, “후미추돌사고의 유효충돌속도가 승차자 상해에 미치는 영향에 관한 연구”, 2008 한국안전학회지 제 23권 제 2호.
- (4) 이태영, 2013, “중방향 안전도 향상을 위한 자동비상제동 알고리즘 개발”, 한국자동차안전학회 춘계 학술대회 논문집.
- (5) Carl-Gustaf Wallman, 2001, Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety, Swedish National Road and Transport Research Institute.
- (6) 조완기, 2011, “차량 민첩성 및 주행안정성 향상을 위한 타이어 정보기반 사시 통합제어”, 서울대학교 기계공학과 박사 학위 논문.
- (7) Lee, D. N. “A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision”, Perception, 1976, Vol. 5, pp. 437-459.
- (8) Ralf Bongenrieder, 2009, “PRE-SAFE<sup>®</sup> IN REAR-END COLLISION SITUATION”, Daimler AG, Paper Number 09-0129.
- (9) Seungwuk Moon, 2007, “Design and Vehicle Test of a Vehicle Control Algorithm for Integrated ACC/CA System”, KSAE, No. 2, pp. 670~675.