

환경 정보를 이용한 상용차량 전복 방지 알고리즘 개발

박동우* · 허현동* · 이경수*

Development of Roll Stability Control of Commercial Vehicles with Environment Information

Dongwoo Park*, Hyundong Her*, Kyongsu Yi*

Key Words : Load Transfer Ratio(하중 전달 비율), Predicted Load Transfer Ratio(예측 하중 전달 비율), Rollover prediction(전복 예측), Electronic Stability Control(차량자세제어 장치), Commercial Vehicle(상용 차량)

ABSTRACT

When it comes to commercial vehicles, their unique characteristics - center of gravity, size, weight distribution - make them particularly vulnerable to rollover. On top of that, conventional heavy vehicle brake exhibits longer actuation delays caused in part by long air lines from brake pedal to tires. This paper describes rollover prevention algorithm that copes with the characteristics of commercial vehicles. In regard of compensating for high actuating delay, predicted rollover index with short preview time has been designed. Moreover, predicted rollover index with longer preview time has been calculated by using road curvature information based on environment information. When rollover index becomes larger than specific threshold value, desired braking force is calculated in order to decrease the index. At the same time, braking force is distributed to each tire to make yaw rate track desired value.

1. 서론

차량 전복 사고는 다른 교통사고에 비하여 발생비율이 높지는 않지만 사고가 발생하였을 경우 상대적으로 치사율이 높다. 게다가 상용차량의 경우 승용차에 비해 상대적으로 높은 전복 위험성을 가지고 있으며 사고 발생시 그 피해가 더욱 크기 때문에 전복 사고 방지를 위한 기술의 중요성이 대두되고 있다. 이에 따라 미국 고속도로 안전관리국(NHTSA)은 26,000 파운드가 넘는 차량에 대해서 ESC 장착을 의무화하고 있다. NHTSA에 따르면 ESC는 전복 사고와 운전자가 제어 능력을 잃는 사고를 28%에서 36% 줄일 수 있다고 추정한다. 따라서 NHTS는 미국 모든 상용차량에

ESC를 장착 하면 매년 1,332건에서 1,854건의 전복 사고와 475건의 운전자가 제어 능력을 잃는 사고를 막을 수 있을 것이라고 예상한다¹⁾.

2. 전복위험지수 및 예측전복위험지수

전복위험지수를 나타내는 방법은 여러 방법이 있다. 한 방법으로 차량 고유의 파라미터와 롤각-롤각속도 위상평면 해석을 통한 표현 방법²⁾이 있으며 또 다른 방법으로는 하중 전달 비율(Load Transfer Ratio)을 이용한 방법이 있다. 본 논문에서는 하중 전달 비율을 이용하여 전복위험지수를, 더 나아가 예측전복위험지수를 계산하였다. 예측전복위험지수는 환경정보를 이용하지 않고 짧은 시간을 예측하는 PRI(Predicted Rollover Index), 환경정보를 이용하여 상대적으로 긴

* 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : mclaren89@snu.ac.kr

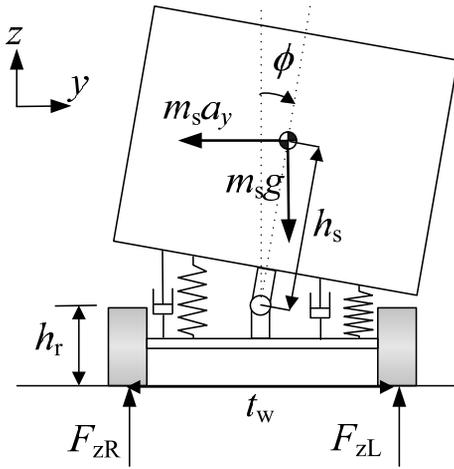


Fig. 1 Vehicle roll model

시간을 예측하는 PRIE(Predicted Rollover Index with Environment Information)로 구분되었다. 환경정보를 이용하여 전복위험성을 예측하는 연구는 이미 진행된 사례가 있지만³⁾, 여러 곡률을 가진 도로 및 여러 속력으로 수행한 실험 데이터를 바탕으로 전복위험성을 예측하기 때문에 많은 시뮬레이션 및 실험이 요구된다. 또한 이와 같은 방법의 경우 차량의 파라미터가 바뀌거나 차량이 바뀌게 되면 다시 실험 데이터를 얻어야 한다는 큰 단점이 있다. 하지만 본 논문에서는 이런 데이터 기반이 아닌 수식을 이용하여 전복위험성을 예측한다.

2.1 전복위험지수

하중 전달 비율을 통한 전복위험지수는 Fig.1의 roll model을 통하여 계산된다. 하중 전달 비율은 정의에 의하여 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$RI = LTR = \frac{F_{zR} - F_{zL}}{F_{zR} + F_{zL}} = \frac{2m_s \left\{ (h_r + h_s \cos \phi) \frac{a_y}{g} + h_s \sin \phi \right\}}{m t_w} \quad (1)$$

여기서 m_s 는 sprung mass, m_u 는 unsprung mass, m 은 총질량이다. 여기서 ϕ 이 매우 작다고 가정하고 m 과 m_s 이 거의 같다고 가정하면 식 (1)은

다음과 같이 간단히 나타내어진다.

$$RI = \frac{2(h_r + h_s)a_y}{t_w g} \quad (2)$$

이 때 횡가속도 a_y 는 간단한 roll dynamics에 의하여 롤각, 롤각속도로 나타내어질 수 있다. 먼저 roll dynamics는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\ddot{\phi} = -\frac{C_\phi}{I_{x1}} \dot{\phi} - \frac{K_\phi}{I_{x1}} \phi + \frac{m_s(a_y + g \sin \phi)h_s}{I_{x1}} \quad (3)$$

여기서 롤각가속도는 0, 롤각은 매우 작다고 간주하고 $h_s \ll h_r$ 가정한 뒤 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 보면 다음과 같이 하중 전달 비율을 롤각, 롤각속도로 나타낼 수 있다.

$$RI = \frac{2(C_\phi \dot{\phi} + K_\phi \phi)}{m g t_w} \quad (4)$$

따라서 전복위험지수를 롤각, 롤각속도와 차량파라미터의 함수로 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 전복위험지수를 나타내면 직접 측정할 수 없는 여러 신호들을 이용하여 전복위험지수를 계산하는 방법들과는 달리 롤 상태만을 이용하여 전복위험지수를 계산할 수 있다.

2.2 PRI(Predicted Rollover Index)

하중 전달 비율의 시간에 대한 도함수를 이용하여 짧은 시간의 하중 전달 비율 예측을 할 수 있다. 특정 시점 t_0 에서의 전복위험지수를 $RI(t_0)$, 동시에 짧은 시간인 Δt 동안 예측되는 전복위험지수를 $PRI(t_0)$ 라고 한다면 이들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} PRI(t_0) &= RI(t_0) + \frac{d}{dt} RI(t_0) \Delta t \\ &= \frac{2(C_\phi \dot{\phi}(t_0) + K_\phi \phi(t_0))}{m \cdot g \cdot t_w} + \frac{2(C_\phi \ddot{\phi}(t_0) + K_\phi \dot{\phi}(t_0))}{m \cdot g \cdot t_w} \\ &= \frac{2(C_\phi \dot{\phi}(t_0) + K_\phi \phi(t_0))}{m \cdot g \cdot t_w} \\ &\quad + \frac{2C_\phi}{m \cdot g \cdot t_w} \left(-\frac{C_\phi}{I_x} \dot{\phi} - \frac{K_\phi}{I_x} \phi + \frac{m_s(a_y + g \sin \phi)h_s}{I_x} \right) + \frac{K_\phi \dot{\phi}(t_0)}{m \cdot g \cdot t_w} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Δt 는 약 0.3초이다. 예측전복위험지수 역시롤 상태, 가속도 신호와 차량 파라미터들만을 통해 계산할 수 있다. 따라서 비슷한 방법으로 하중전달비율을 예측하지만, 많은 센서 신호 및 추정 신호를 이용해야 하는 경우⁴⁾에 비하여 구현이 쉽다.

2.3 PRIE(Predicted Rollover Index with Environment Information)

차량이 주행하고 있는 도로에 대한 곡률정보가 Vision Sensor, GPS, 지리정보 시스템(GIS) 등의 환경 정보로부터 미리 얻어진다면, $PRI(t_0)$ 에 비해 상대적으로 긴 시간 뒤의 전복위험지수를 예측할 수 있다.

차량이 예측하고자 하는 지점, 즉 곡률정보가 주어진 지점에서 도로를 잘 추종한다고 간주하고 현재 주행하고 있는 속도로 그 지점을 지날 것이라고 예상해보면 그 지점에서의 요 레이트를 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\dot{\psi}_{prediction} = \frac{v_x}{R} \quad (6)$$

이 예측 요 레이트를 이용하여 예측 지점에서의 횡가속도는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$a_{y,prediction} = \dot{v}_{y,prediction} + v_x \dot{\psi}_{prediction} \approx v_x \dot{\psi}_{prediction} \quad (7)$$

예측 지점에서 운전자가 횡방향으로의 position error가 없이 주행한다고 가정하면 예측 지점에서의 조향각은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta_{prediction} = \frac{L}{R} + K_v a_{y,prediction} \quad (8)$$

where, $L = l_f + l_r$, $K_v = \frac{l_r m}{2C_f(l_f + l_r)} - \frac{l_f m}{2C_r(l_f + l_r)}$

따라서 곡률정보를 통한 예측 요 레이트, 예측 조향각을 이용하여 다음과 같이 4개의 상태를 지닌 모델을 이용하여 롤 상태를 예측할 수 있다⁵⁾.

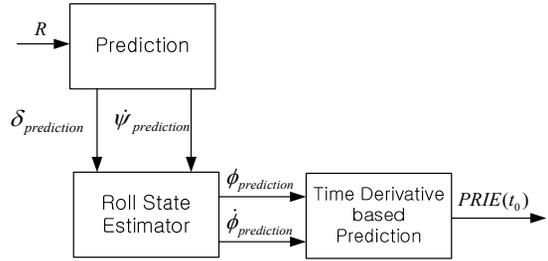


Fig. 2 Predictive Rollover Index with Environment Information

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

where,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\sigma I_{x,eq}}{m I_x v_x} & \frac{\rho I_{x,eq}}{m I_x v_x^2} - 1 & -\frac{h C_\phi}{I_x v_x} & \frac{h(m_s g h - k_\phi)}{I_x v_x} \\ \frac{\rho}{I_z} & -\frac{\tau}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ -\frac{m_s h \sigma}{m I_x} & \frac{m_s h \rho}{m I_x v_x} & -\frac{C_\phi}{I_x} & \frac{(m_s g h - k_\phi)}{I_x} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 2 \frac{C_f I_{x,eq}}{m I_x v_x} & 2 \frac{C_f I_f}{I_z} & 2 \frac{m_s h C_f}{m I_x} & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0],$$

$$\sigma = 2(C_r + C_f),$$

$$\rho = 2(l_r C_r - l_f C_f),$$

$$\tau = 2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r) \quad (9)$$

환경 정보를 이용하여 구한 예측전복위험지수를 $PRIE(t_0)$ 라고 한다면 Fig. 2와 같은 절차로 계산할 수 있다.

앞서 언급한 $RI(t_0)$, $PRI(t_0)$, $PRIE(t_0)$ 를 직각 코너를 가진 도로에 대하여 시뮬레이션을 통해 구해보면 Fig. 3과 같다.

3. 제동력 결정 및 분배

현재 시점에서 $RI(t_0)$, $PRI(t_0)$, $PRIE(t_0)$ 중 가장 큰 값이 특정 한계값보다 커지면 전복 방지 모드로 전환되며 전복 방지를 위한 제동력을 결정한다.

3.1 제동력 결정

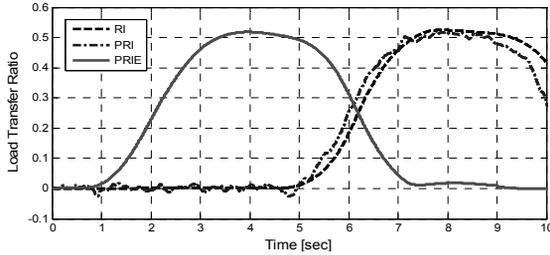


Fig. 3 RI, PRI, PRIE with velocity of 45 kph

$RI(t_0)$, $PRI(t_0)$, $PRIE(t_0)$ 중 가장 큰 값이 특정 한계값보다 커지면 목표 횡가속도를 3.5 m/s^2 로 설정하여 목표 횡가속도로 횡가속도가 줄어들도록 제동력을 결정한다. 제동력 결정을 위한 목표 속도는 다음과 같이 구해진다⁶⁾.

$$v_{x,des} = \frac{1}{\gamma} \{a_{y,des} - (a_{y,m} - v_x \dot{\gamma})\} \quad (10)$$

제동력을 구하기 위해 Sliding Mode Control이 적용되었다. 이를 위해 필요한 종방향의 힘평형식은 다음과 같이 계산된다.

$$m\dot{v}_x = F_{xr} + F_{xr} \cos \delta_f - F_{yf} \sin \delta_f + m v_y \gamma - \Delta F_x \quad (11)$$

따라서 sliding surface와 sliding condition은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$s_1 = v_x - v_{x,des}, \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s_1^2 = s_1 \dot{s}_1 \leq -\eta_1 s_1^2 \quad (12)$$

여기서 η_1 은 양수이며 sliding mode control의 equivalent control input을 $\dot{s}_1 = 0$ 조건을 통해 구하면 다음과 같다.

$$\Delta F_{x,eq} = (F_{xf} + F_{xr} - F_{yf} \delta_f) + m(v_y \gamma - \dot{v}_{x,des}) \quad (13)$$

마지막으로 모델의 불확실성을 고려하고 식 (12)의 sliding condition을 만족시키기 위하여 control input을 다음과 같이 완성시킬 수 있다.

$$\Delta F_x = \Delta F_{x,eq} - K_1 \text{sat}(s_1 / \Phi_1) \quad (14)$$

where $K_1 \leq -\eta_1 m$

3.2 요모멘트 결정

4개의 독립 브레이크를 통해 원하는 제동력을 얻으면서 동시에 운전자의 의도된 요 레이트를 추종하기 위하여 필요 요 모멘트를 결정한다. 먼저 운전자의 의도된 요 레이트는 다음과 같이 계산될 수 있다⁷⁾.

$$\gamma_{des} = \frac{C_f \cdot C_r \cdot (l_f + l_r) \cdot v_x}{C_f \cdot C_r \cdot (l_f + l_r)^2 + m \cdot v_x^2 \cdot (l_r \cdot C_r - l_f \cdot C_f)} \cdot \delta_f \quad (15)$$

제동력 결정의 경우와 마찬가지로 sliding mode control을 적용한다. Sliding surface와 sliding condition은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$s_2 = \gamma - \gamma_{des}, \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s_2^2 = s_2 \dot{s}_2 \leq -\eta_2 |s_2| \quad (16)$$

Equivalent control input은 다음과 같이 구해진다.

$$M_{z,eq} = -I_z \left(\frac{2(-l_f C_f + l_r C_r)}{I_z} \beta - \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} \gamma + \frac{2l_f C_f}{I_z} \delta_f \right) \quad (17)$$

모델의 불확실성과 sliding condition을 고려한 최종 control input은 다음과 같이 구해진다.

$$M_z = M_{z,eq} - K_2 \cdot \text{sat}\left(\frac{\gamma - \gamma_{des}}{\Phi}\right)$$

where,

$$K_2 \geq I_z \left\{ \frac{F_{yf}}{I_z} |l_f \beta - l_f^2 \gamma + l_f \delta_f| + \frac{F_{yr}}{I_z} |l_r \beta - l_r^2 \gamma| + |\dot{\gamma}_{des}| + \eta_2 \right\} \quad (18)$$

3.3 제동력 분배

앞서 구한 제동력과 요모멘트를 통해 4개의 독립 브레이크에 분배가 가능하다. 우선 좌측과 우측에 해제해야 할 제동력은 다음과 같이 계산이 가능하다⁶⁾.

$$\begin{cases} \Delta F_x = \Delta F_{x,left} + \Delta F_{x,right} \\ M_z = \Delta F_{x,left} \frac{t}{2} - \Delta F_{x,right} \frac{t}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta F_{x,left} = \frac{1}{2} \Delta F_x + \frac{M_z}{t} \\ \Delta F_{x,right} = \frac{1}{2} \Delta F_x - \frac{M_z}{t} \end{cases} \quad (19)$$



Fig. 4 Simulation Setup

좌측, 우측에서 전후의 제동력 배분은 friction circle 을 고려하여 최대의 힘이 걸릴 수 있도록 분배한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta F_{x,fl} &= \frac{|\Delta F_{x,fl,max}|}{|\Delta F_{x,fl,max} + \Delta F_{x,rl,max}|} \Delta F_{x,left}, \\ \Delta F_{x,rl} &= \frac{|\Delta F_{x,rl,max}|}{|\Delta F_{x,fl,max} + \Delta F_{x,rl,max}|} \Delta F_{x,left}, \\ \Delta F_{x,fr} &= \frac{|\Delta F_{x,fr,max}|}{|\Delta F_{x,fr,max} + \Delta F_{x,rr,max}|} \Delta F_{x,right}, \\ \Delta F_{x,rr} &= \frac{|\Delta F_{x,rr,max}|}{|\Delta F_{x,fr,max} + \Delta F_{x,rr,max}|} \Delta F_{x,right} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 $\Delta F_{x,fl,max}$, $\Delta F_{x,rl,max}$, $\Delta F_{x,fr,max}$, $\Delta F_{x,rr,max}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta F_{x,fl,max} &= F_{x,fl} - \sqrt{(\mu F_{z,fl})^2 - (F_{y,fl})^2} \\ \Delta F_{x,rl,max} &= -F_{x,rl} - \sqrt{(\mu F_{z,rl})^2 - (F_{y,rl})^2} \\ \Delta F_{x,fr,max} &= F_{x,fr} - \sqrt{(\mu F_{z,fr})^2 - (F_{y,fr})^2} \\ \Delta F_{x,rr,max} &= -F_{x,rr} - \sqrt{(\mu F_{z,rr})^2 - (F_{y,rr})^2} \end{aligned} \quad (21)$$

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 Fig. 4와 같은 6360kg의 질량과 4.49m의 축간거리를 가지는 버스에 대하여 수행하였다. Fig. 4의 직각 코너를 주행하는 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 제어에 사용되는 전복위험지수를 제어전복위험지수라고 정의하고, 제어전복위험지수를 RI, PRI, max(RI,PRI,PRIE)로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였을 때 전복이 일어나지 않는 코너 진입속도는 이를 safe speed라고 정의하였을 때 Table 1과 같다. 코너 진입의 정의는 도로의 직각 부분보다 약 50 m 앞선 부분으로 정의한다. 또한 여기서 환경정보는 차량의 전방으로 50 m 부분의 정보가 차량에게 전달된다고 간주한다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 환경정보를 통한 곡률정보가 주어졌을 때의 전복방지 효과는 상대적으로 매우 크다. 또한 환경정보가 주어지지 않을 경우에도

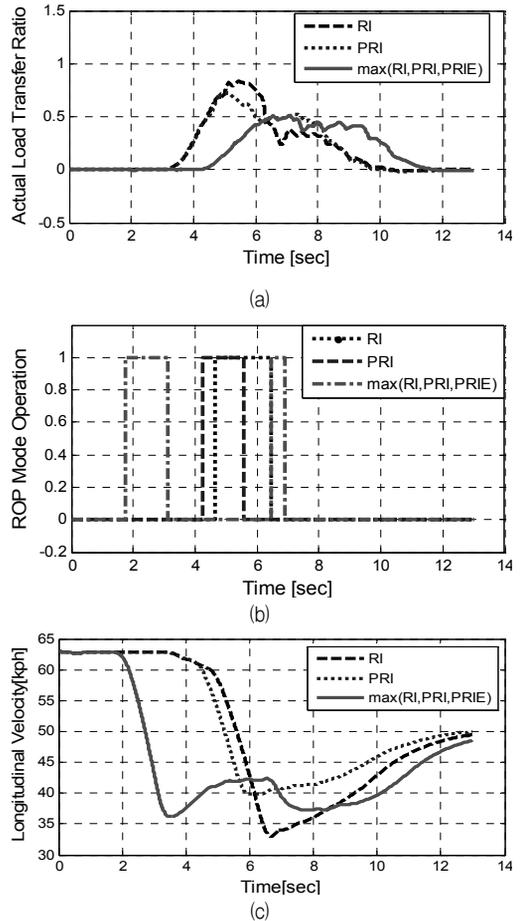


Fig. 5 Actual load transfer ratio, rollover prevention mode operation, longitudinal velocity with different control rollover index

Table 1 Safe speed with respect to control rollover index

Control Rollover Index	Safe Speed (kph)
RI	63
PRI	71
max(RI,PRI,PRIE)	113

PRI의 적용으로도 safe speed 관점에서 상당한 효과를 볼 수 있다. 제어전복위험지수를 RI, PRI, max(RI, PRI, PRIE)로 설정하여 제어전복위험지수를 RI로 설정하였을 때의 safe speed인 시속 63 kph로 코너에 진입하는 시나리오를 설정한다. 시뮬레이션을 통해 실제 하중 전달 비율, 전복방지모드(Rollover prevention mode) 제어 시점, 속도를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 이로부터 RI를 제어전복위험지수로 사용하는 것보다

PRI, $\max(RI, PRI, PRIE)$ 를 제어전복위험지수로 이용하는 것이 실제 하중 전달 비율로 보았을 때 전복위험성 관점에서 안전하다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5-(b)에서 보는 바와 같이 PRI를 통해서는 RI보다 빠른 시점에, PRIE를 통해서는 PRI보다 빠른 시점에 전복방지가 시작되기 때문이다. 그 결과 Fig. 5-(c)에서와 같이 PRI, $\max(RI, PRI, PRIE)$ 를 제어전복위험지수로 설정할 경우 감속을 미리 하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전복방지알고리즘에서 전복방지 시점을 위한 전복위험지수를 다양한 방법으로 설계해보고 MATLAB, CarSim을 이용한 시뮬레이션을 통해 그 효과를 검증하였으며 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 여러 종류의 전복위험지수는 많은 센서 신호를 필요로 하지 않으므로 실제로 구현하기 쉽다.

짧은 시간을 예측하는 PRI를 이용하는 것만으로도 전복방지효과를 높일 수 있으며 환경정보를 통해 곡률 정보가 얻어 PRIE를 이용하면 전복방지효과를 더욱 극대화할 수 있다.

브레이크의 최대 한계 때문에 제한되는 코너 진입 속도를 환경정보를 이용하여 상당히 올릴 수 있다.

본 연구를 통해 얻을 수 있는 가장 큰 이득은 운전자가 환경정보 없이 미래의 곡률을 예측하지 못한 상태로 고속으로 주행 시 브레이크의 물리적 한계로 인해 전복을 막을 수 없는 상황을 효과적으로 예방할 수 있다는 점이다.

하지만 제안된 전복위험지수 및 예측전복위험지수는 많은 가정들이 필요하였으므로 이 외의 조건에서는 실제 하중 전달 비율과 잘 맞지 않는 경우도 있다. 따라서 더욱 정확한 값을 얻도록 하는 방법도 연구되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 연구비지원(11PTSI-C054118-03), 서울대학교 정밀기계연구소, 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(20120000922)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) National Highway Traffic Safety Administration, 2012, "FMVSS No. 136, Electronic Stability Control Systems on Heavy Vehicles" Office of Regulatory Analysis and Evaluation.
- (2) Jangyeol Yoon, Dongshin Kim, Kyongsu Yi, 2007, "Design of a rollover index-based vehicle stability control scheme", Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 5.
- (3) 윤장열, 조완기, 이경수, 2009, "ITS기반 차량 전복 예측 및 방지 알고리즘 개발", 한국자동차공학회
- (4) Vasilios Tsourapas, Damrongrit Piyabongkarn, Alexander C. Williams, Rajesh Rajamani, 2009, "New Method of Identifying Real-Time Predictive Lateral Load Transfer Ratio for Rollover Prevention Systems", 2009 American Control Conference.
- (5) H. Dahmani, M. Chadli, A. Rabhi and A.El Hajjaji, 2010, "Fuzzy observer for detection of impending vehicle rollover with Road bank angle considerations", IEEE 18th Mediterranean Conference on Control & Automation.
- (6) Jangyeol Yoon, Wanki Cho, Bongyeong Koo, Kyongsu Yi, 2009, "Unified Chassis Control for Rollover Prevention and Lateral Stability", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 2.
- (7) Rajesh Rajamani, 2007, Vehicle Dynamics and Control, Springer