

## 미분게임 이론을 이용한 차량 전복 방지 제어기 설계

임 성 진\*†

\* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

### Design of Rollover Prevention Controller Using Game-Theoretic Approach

Seongjin Yim\*†

\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Sci. and Tech.

(Received April 23, 2013 ; Revised July 25, 2013 ; Accepted September 11, 2013)

**Key Words:** Differential Game Theory(미분게임 이론), Multi-Level Programming(다수준 계획법), Active Suspension(능동 현가장치), Electronic Stability Program(전자식 자세제어 장치)

**초록:** 본 논문에서는 미분게임 이론과 다수준 계획법을 이용하여 차량 전복 방지 제어기를 설계하는 방법을 제안한다. 차량 전복 방지 문제는 비협조적 제로섬 2인 미분게임으로 정식화된다. 미분게임의 균형해로 얻어지는 제어기는 모든 가능한 조향 입력에 대해 최악의 성능을 보장한다. 적은 계산량으로 미분 게임의 균형해를 찾기 위해 완화 과정을 가지는 다수준 계획법을 이용한다. 차량의 롤 운동을 억제하기 위해 능동 현가장치를 사용하면 차량의 횡방향 안정성이 상실되므로 이를 방지하기 위해 자세제어 장치(ESP)를 이용한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법이 미분게임의 균형해를 찾는데 효과적임을 보이고 설계된 제어기가 차량의 전복을 방지함을 보인다.

**Abstract:** This study presents an approach for designing a vehicle rollover prevention controller using differential game theory and multi-level programming. The rollover prevention problem can be modeled as a non-cooperative zero-sum two-player differential game. A controller as an equilibrium solution of the differential game guarantees the worst-case performance against every possible steering input. To obtain an equilibrium solution to the differential game with a small amount of computational effort, a multi-level programming approach with a relaxation procedure is used. To cope with the loss of maneuverability caused by the active suspension, an electronic stability program (ESP) is adopted. Through simulations, the proposed method is shown to be effective in obtaining an equilibrium solution of the differential game.

- 기호설명 -

$a_y$  : 횡가속도 ( $m/s^2$ )  
 $g$  : 중력가속도 상수 ( $=9.81 m/s^2$ )  
 $b_s$  : 현가장치 감쇠계수 ( $N\cdot s/m$ )  
 $J, g$  : 평가 함수 또는 목적 함수  
 $h_s$  : 롤 센터에서 무게중심까지의 높이 (m)  
 $K$  : 현가장치 제어기 게인 행렬  
 $I_x$  : 롤 축에 대한 관성모멘트 ( $kg\cdot m^2$ )  
 $k_s$  : 현가장치 스프링의 강성계수 ( $N/m$ )  
 $k_t$  : 타이어 강성계수 ( $N/m$ )

$L$  : 임의의 목적 함수  
 $m_s$  : 스프링상 질량 (kg)  
 $m_{u1}, m_{u2}$ : 스프링하 질량 (kg)  
 $t_f$  : 전륜 윤거 (m)  
 $x$  : 상태 변수 벡터  
 $u$  : 제어 입력 벡터  
 $U$  : 모든 가능한 제어 입력의 집합  
 $u_1, u_2$  : 현가장치의 제어력  
 $w$  : 외란 벡터  
 $W$  : 모든 가능한 외란의 집합  
 $y$  : 센서 출력 벡터  
 $z_c$  : 스프링상 질량의 수직 변위(m)  
 $z_{s1}, z_{s2}$  : 좌우측 스프링상 질량의 변위(m)  
 $z_{u1}, z_{u2}$  : 좌우측 스프링하 질량의 변위(m)

† Corresponding Author, [acebtif@seoultech.ac.kr](mailto:acebtif@seoultech.ac.kr)  
 © 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $z_{r1}, z_{r2}$  : 노면 입력(m)  
 $\phi, \dot{\phi}$  : 롤 각 (rad)과 롤 각속도(rad/s)  
 $\delta_f$  : 전륜 조향각(deg)  
 $\delta_{max}$  : 최대 전륜 조향각(deg)  
 $\sigma, \rho$  : 평가함수의 값

## 1. 서 론

지난 10 여년간 SUV 와 같이 차고가 높은 차량의 광범위한 보급으로 인해 차량 전복 사고는 크게 증가하였다. 대부분의 차량 전복 사고는 매우 치명적이다. 예를 들어 2002 년 미국의 통계를 보면, 차량 전복 사고는 전체 사고의 3%만을 차지하지만 사망자는 33%를 차지한다.<sup>(1)</sup> 따라서 자동차공학에 관련된 다양한 연구자들이 차량 전복 사고를 줄이기 위해 많은 노력을 했지만 지난 10 여년간 차량 전복 사고는 크게 줄어들지 않았다.<sup>(2)</sup> 따라서 차량 전복 사고를 줄이기 위해 능동 제어가 필요하며 이를 위해 차량의 롤 운동을 제어하는 제어를 설계할 필요가 있다.

횡가속도가 차량 전복에서 가장 큰 영향을 미치는 동적 요소이기 때문에 차량 전복을 방지하는 전형적인 방법은 횡가속도를 줄이는 것이다. 여기에는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 자세 제어장치에서 기준 요율을 줄이는 것이다.<sup>(3-6)</sup> 하지만 이 방법은 차량이 언더스티어 경향을 가지게 만들어 이로 인해 또 다른 사고를 유발할 수 있다. 두 번째 방법은 횡가속도를 제어 불가능한 외란으로 보고 능동 현가장치나 능동 안티롤바를 이용하여 차량의 롤 운동을 억제하는 것이다.<sup>(7,8)</sup> 이 방법은 차량 전복 방지에 있어서 뛰어난 성능을 보여주지만 모든 가능한 운전자의 조향 입력에 대해 차량 전복 방지를 보장하지는 못한다. 이를 위해 기존의 연구는 미분게임과 공진화 알고리즘을 적용하여 차량 전복 방지 제어를 설계하는 방법을 제시하였다.<sup>(11)</sup> 제안된 방법은 최악의 상황에서도 차량의 전복 방지를 보장했으나 균형해를 구하기 위해 상당한 계산량을 요구하였고 균형해로 수렴하는데 불안정함을 보였다. 이에 본 연구에서는 적은 계산량으로 미분게임의 균형해를 안정적으로 구하기 위해 완화 과정(relaxation procedure)을 가지는 다수준 계획법을 차량 전복 방지 문제에 적용하는 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2 장에서는 차량 전복 방지 문제를 미분게임으로 정식화하고 이를 풀기 위해 다수준 계획법이 적용된다. 제안된 방

법의 유효성을 검증하기 위해 3 장에서는 시물레이션을 수행한다. 4 장에서 결론을 맺는다.

## 2. 차량전복방지를 위한 제어기 설계

### 2.1 미분게임 이론

일반적으로 차량 전복 방지 문제는 미분 방정식으로 표현된다. 앞서도 언급했듯이 차량 전복 상황에서는 2 인의 참여자, 즉 능동 현가장치로 표현되는 제어기와 차량을 전복시키려는 미친 운전자로 표현되는 외란이 있다. 이러한 이유로 차량 전복 방지는 2 인의 참여자를 가지는 미분게임으로 정식화될 수 있다. 이 미분게임은 한 참여자의 이익이 다른 참여자의 손해이므로 제로섬이며 한 참여자가 다른 참여자의 전략을 알 수 없기 때문에 비협조적이다. 따라서 차량 전복 방지는 비협조적 제로섬 2 인 미분게임으로 정식화될 수 있다.<sup>(13)</sup> 이후로 차량 전복 방지 문제는 차량 전복 방지 게임(Rollover prevention game: RPG)으로 부르기로 한다.

식 (1)과 (2)는 차량 시스템의 상태 방정식과 미분게임의 평가함수(payoff function)를 보여 준다. 식 (1)에서  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{u}$ , 그리고  $\mathbf{w}$ 는 상태변수, 제어 입력, 그리고 외란이다. 차량 시스템에서  $\mathbf{u}$ 는 능동 현가장치이며  $\mathbf{w}$ 는 운전자의 조향 입력을 나타낸다. 식 (1)과 (2)에서 제어 입력  $\mathbf{u}$ 는 평가함수  $J$ 를 최소화하려 하며 외란  $\mathbf{w}$ 는  $J$ 를 최대화하려 한다. 따라서 미분게임은 식 (3)과 같이 최소최대 최적화(minimax optimization: MMO) 문제가 된다. 식 (3)에서 차량 전복시 롤각이 발산한다는 점을 고려하여 평가함수는 특정 시물레이션 이후 얻어지는 롤각의 절대값의 최대값으로 설정하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, t) \quad (1)$$

$$J = g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \quad (2)$$

$$\min_{\mathbf{u}} \max_{\mathbf{w}} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) = \min_{\mathbf{u}} \max_{\mathbf{w}} \{ \max |\phi| \} \quad (3)$$

지금까지 미분게임에 대해 균형해를 얻기 위해 비선형 최적제어,<sup>(1)</sup> 다수준 계획법,<sup>(15)</sup> 그리고 공진화 알고리즘<sup>(12)</sup>과 같은 다양한 방법들이 제안되었다. 비선형 최적제어는 차량시스템과 같이 비선형성이 심한 시스템에 적용할 때에는 상태 방정식을 요구하므로 적용이 너무 복잡하다는 단점이 있다.<sup>(10)</sup> 공진화 알고리즘은 균형해를 얻는데 좋은 성능을 보이지만 많은 계산량을 필요로 하고 수렴이 불안해지는 단점이 있다.<sup>(12)</sup> 계산량을 줄이고

안정된 수렴을 보장하기 위해 본 논문에서는 완화 과정을 가지는 다수준 계획법을 적용하였다.

### 2.2 다수준 계획법

앞서 언급했듯이, 미분게임은 MMO 문제로 정식화된다. 본 절에서는 MMO 문제를 풀기 위해 완화 과정(relaxation procedure)을 가지는 다수준 계획법(multi-level programming: MLP)을 소개한다.<sup>(15)</sup> 식 (3)의 MMO는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{\mathbf{u}} \max_{\mathbf{w}} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{u} \in U, \mathbf{w} \in W \quad (4)$$

식 (4)에서  $U$  와  $W$  는 각각 모든 가능한 제어 입력과 외란의 집합을 나타낸다. 최적화 문제 (4)는 식 (5)와 같은 MLP 로 변환가능하다. 식 (4)에서  $L$  은 임의의 목적함수이다. 이러한 변환을 통해 식 (4)의 최적화 문제는 식 (6)과 같은 MLP 형태로 쓸 수 있다.

$$\min_{\mathbf{u} \in U} L(\mathbf{u}) \Rightarrow \min_{\mathbf{u}, \sigma} \sigma \quad \text{s.t.} \quad L(\mathbf{u}) \leq \sigma \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}, \sigma} \sigma \\ & \text{s.t.} \quad \mathbf{u} \in U, \max_{\mathbf{w} \in W} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \leq \sigma \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 제한조건은 반복 과정을 통해 완화될 수 있다. MLP 의 틀 안에서 MMO 의 완화과정은 다음과 같다.

**Step1.** 임의의 초기 외란  $\mathbf{w}^1 \in W$  을 할당하고  $k=1$  로 설정한다.

**Step2.** 해  $\mathbf{u}$  와 최소화된 목적함수 값  $\sigma$  를 구하기 위해 다음과 같은 완화된 문제를 푼다. 얻어진 해와 목적함수 값을  $\mathbf{u}^k$  와  $\sigma^k$  로 놓는다.

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{u}, \sigma} \sigma \\ & \text{s.t.} \quad g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}^i) \leq \sigma, i = 1, \dots, k \end{aligned}$$

**Step3.** 아래와 같은 최대화 문제를 풀어서 얻어진 해  $\mathbf{w}$  를  $\mathbf{w}^{k+1}$  로 놓는다.

$$\max_{\mathbf{w} \in W} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}^k, \mathbf{w})$$

**Step4.** 앞서 구해진  $\mathbf{u}^k$  와  $\mathbf{w}^{k+1}$  를 이용하여  $\rho(\mathbf{u}^k) = g(\mathbf{x}, \mathbf{u}^k, \mathbf{w}^{k+1})$  를 평가하고  $\rho$  의 값을 구한다.

**Step5.** 만약  $\rho(\mathbf{u}^k) \leq \sigma^k$  이면 반복을 중지하고 이때  $\mathbf{u}^k$  와  $\mathbf{w}^{k+1}$  는 균형해가 된다. 그렇지 않으면  $k=k+1$

로 설정하고 **Step2** 로 간다.

일반적으로, MMO 에 대해 식 (7)의 조건이 만족된다.

$$\max_{\mathbf{w} \in W} \min_{\mathbf{u} \in U} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \leq \min_{\mathbf{u} \in U} \max_{\mathbf{w} \in W} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \quad (7)$$

다음과 같은 두 개의 독립된 최적화 문제를 고려해 보자. 만약 식 (8)이  $\mathbf{u}$  에 대해 볼록이고 식 (9)가  $\mathbf{w}$  에 대해 오목이라면 식 (10)과 같이 saddle-point 부등식이 성립한다.

$$\min_{\mathbf{u} \in U} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \quad (8)$$

$$\max_{\mathbf{w} \in W} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}) \quad (9)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \mathbf{w}) \leq g(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \mathbf{w}^*) \leq g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}^*) \quad (10)$$

식 (10)은 해  $(\mathbf{u}^*, \mathbf{w}^*)$  가 내쉬(Nash) 균형해로서  $\mathbf{u}^*$  는 평가함수  $J$  를 최대화하는 최악의 외란  $\mathbf{w}^*$  에 대해  $J$  를 최소화하는 최선의 제어기임을 나타낸다. 만약  $\mathbf{u}$  의 볼록성과  $\mathbf{w}$  의 오목성 조건이 만족되지 않는다면 식 (7)은 단지 완화 과정의 종료 조건으로 사용된다. 동일한 이유로 식 (10)은 만족되지 않는다.

MLP 에서 최소화와 최대화 문제를 풀기 위해 진화 전략 가운데 하나인 CMA-ES 를 적용한다.<sup>(16)</sup> RPG 의 평가함수는 주어진 능동 현가장치 제어기와 운전자의 조향 입력에 대해 CarSim 에서 시뮬레이션을 통해 얻어지는 롤각( $\phi$ )의 절대값의 최대값이다. CMA-ES 는 100 번 이상의 반복 과정 동안 향상이 없으면 종료하도록 설정하였다. 이 방법의 단점은 평가 함수의 값이 CarSim 에서의 시뮬레이션으로 구해지기 때문에 최적화 문제를 푸는데 해석적인 구배를 구하지 못한다는 것이다.

### 2.3 능동 현가장치 제어기의 설계

본 논문에서는 차량 전복 방지를 위한 제어기는 능동 현가장치이다.<sup>(17)</sup> Fig. 1 은 능동 현가장치를 장착한 차량의 자유 물체도를 나타낸다. Fig. 1 에서  $u_1$  과  $u_2$  는 능동 현가장치에 의해 만들어지는 제어력이며 외란은 노면 입력인  $z_{r1}$  과  $z_{r2}$ , 그리고 횡가속도  $a_y$  이며 횡가속도는 운전자의 조향 입력에 의해 만들진다. 따라서 제어 입력 및 외란은 식 (11)과 같이 주어진다. 차량 전복 방지에서 노면 입력은 외란으로 고려하지 않는다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} & \equiv [u_1 \quad u_2]^T \\ \mathbf{w} & \equiv \delta_f \end{aligned} \quad (11)$$

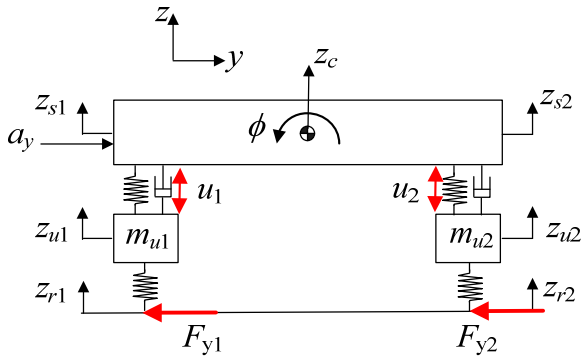


Fig. 1 Schematic front view of a vehicle

본 논문에서 능동 현가장치의 제어에는  $u=Ky$  형태의 정적 출력 피드백 제어를 이용한다.<sup>(17)</sup> 정적 출력 피드백에 이용하는 출력 신호는 식 (12)에서 보듯이 롤각속도와 현가장치 변위이다. 능동 현가장치는 왼쪽과 오른쪽에 두 개의 제어 입력이 필요하므로 식 (13)과 같은 형태가 된다. 만약 스프링상 질량의 수직 운동이 없고 롤 운동이 대칭이라고 가정하면 식 (14)와 같은 형태가 된다. 따라서 능동 현가장치 제어기는  $k_{11}$  과  $k_{12}$  의 2 개의 게인만을 가지며 MLP 는 이 두 값을 최적화하게 된다.

$$y = \begin{bmatrix} \dot{\phi} & (z_{s1} - z_{u1}) & (z_{s2} - z_{u2}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & -k_{12} \\ -k_{11} & -k_{12} & k_{12} \end{bmatrix} \quad (14)$$

능동 현가장치는 차량을 오버스티어로 만드는 경향이 있어서 고속에서 과도한 조향을 하는 경우 차량의 조종안정성이 상실된다.<sup>(8,17,20)</sup> 본 논문에서는 조종안정성을 유지하기 위해 자세제어장치(ESP)를 이용한다. ESP 는 기존의 방법을 이용하여 설계된다.<sup>(17)</sup> 기존의 연구에서 지적했듯이 ESP 는 차량의 롤 운동에 영향을 미치지 않는다.<sup>(8)</sup>

2.4 운전자의 조향 입력 표현

본 논문에서 외란은 운전자의 조향 입력이다. MLP 를 차량 전복 방지에 적용하기 위해서는 운전자의 조향 입력을 수학적 계획법의 해의 형태로 표현해야 한다.

이를 위해 Fig. 2 에서와 같이 일정하게 분할된 시간 구간 내의 시점  $t_i$  에서  $[-\delta_{max}, \delta_{max}]$  사이의 무작위 값들을 만들어서 cubic spline 을 적용함으로써

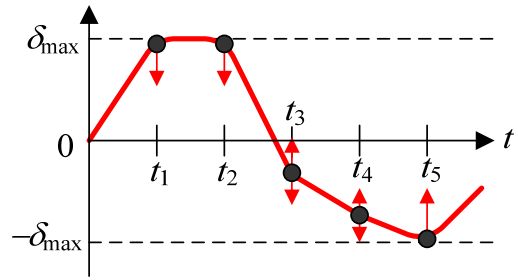


Fig. 2 Steering input representation using a point-wise cubic spline

운전자의 조향 입력을 만들어 낸다.<sup>(19)</sup> 차량 전복이 일어나는 조향 입력의 주파수는 1 Hz 이하이므로 시간 간격은 0.5 초로 한다. 예를 들어, 시뮬레이션이 5 초 동안 수행된다면 10 개의 시점이 있게 된다. 따라서 수학적 계획법에서 조향 입력은 10 개의 해로 표현되며 MLP 는 시스템의 성능을 최적으로 하는 10 개의 값을 찾게 된다.

3. 시뮬레이션

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 운전자 조향 입력의 최대값  $\delta_{max}$  는 270 도로 설정하였다. 높은 게인값으로 인해 생기는 채터링을 방지하기 위해 능동 현가장치의 게인값은  $[-100,000, 100,000]$  사이에 있게 했으며 현가장치에서 낼 수 있는 최대의 힘은 3000N 으로 제한하였다. 차량 전복 방지를 위한 평가 함수는 롤각의 절대값의 최대값으로 설정하였다. 이 값은 차량 시뮬레이션 패키지 CarSim 에서 주어진 능동 현가장치 게인값과 운전자의 조향 입력에 대해 시뮬레이션을 수행함으로써 얻어진다. 시뮬레이션 수행시 노면 입력은 없다고 가정했으며 ESP 는 항상 작동한다고 가정하였다. 또한 ESP 에 의해 과도한 제동 압력이 가해져 차륜이 잠기는 것을 방지하기 위해 ABS 모델을 이용하였다.<sup>(14)</sup>

시뮬레이션에서 사용된 차량 모델은 CarSim 에서 제공하는 SmallSUV 로서 스프링상 질량, 4 개의 차륜, 4 개의 현가장치와 1 개의 조향 메커니즘으로 구성된 27 자유도 모델이다.<sup>(14)</sup> SmallSUV 의 현가장치 구성은 전륜은 독립, 후륜은 축으로 연결된 형태이다. Fig. 1 에서 사용된 롤 평면 모델과 ESP 설계를 위한 자전거 모델의 파라미터들은 SmallSUV 에서 얻었다.<sup>(17)</sup> 차량의 초기속도는 80km/h 로 설정하였고 차량 속도 유지를 위한 제어는 하지 않았다. 노면 마찰계수는 1.0 으로 설정하였다. SmallSUV 모델은 이 조건에서 초기속도 64km/h 에서 최대각도 270 도

의 fishhook 조향으로 전복이 일어난다. 제동장치와 능동 현가장치는 각각 시상수 0.12와 0.08 초의 1차 시스템으로 모델링했다.

기존의 방법과 비교하기 위해 참고문헌<sup>(17)</sup>에서 제시된 LQR과 LQ SOF 제어기를 적용하였다. LQ SOF는 식 (14)와 동일한 구조이다. LQR과 LQ SOF의 최적 게인값을 구하기 위해 MATLAB에서 제공하는 fminsearch를 이용하였다.

Fig. 3은 MLP의 최대 및 최소화 과정을 보여준다. Fig. 3에서 보듯이 3번의 반복 이후 종료 조건 (7)을 만족해서 해는 균형해로 수렴하는 것을 알 수 있다. 기존의 연구에서 공진화 알고리즘은 60개의 모집단을 가지고 100번 반복해서 평가함수를 6,000번 평가했지만 본 논문에서 이용한 MLP는 878번만 평가해서 계산량이 크게 감소했음을 알 수 있다.

종료조건 (7)이 만족되었으므로 얻어진 해는 균형해로 간주할 수 있다. 3번의 반복 이후 얻어진 평가함수의 값은 1.52도이다. 이것은 최악의 조향 입력 하에서 제어기는 1.52도의 최대 롤각을 보장한다는 것이며 반대로 최선의 제어기 하에서 운전자의 조

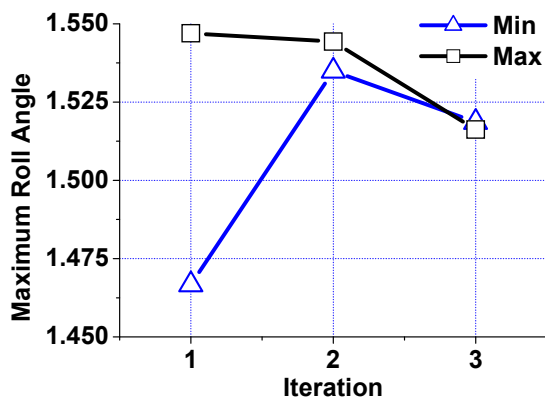


Fig. 3 History of iterations in MLPRP

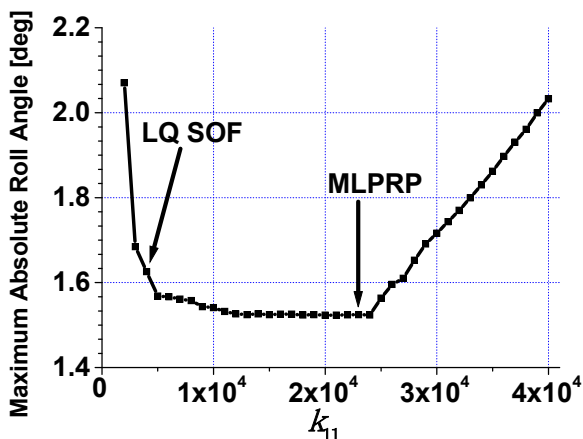
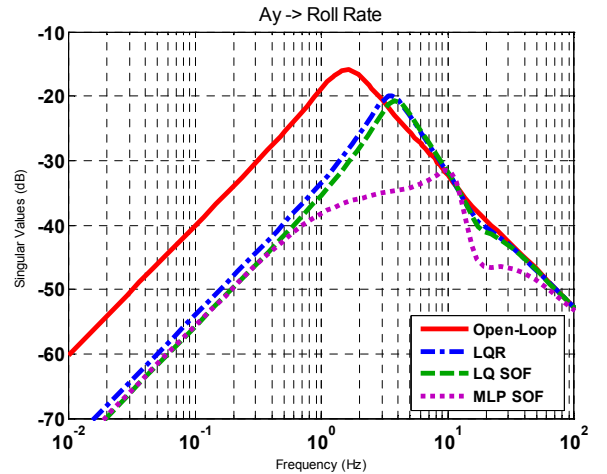
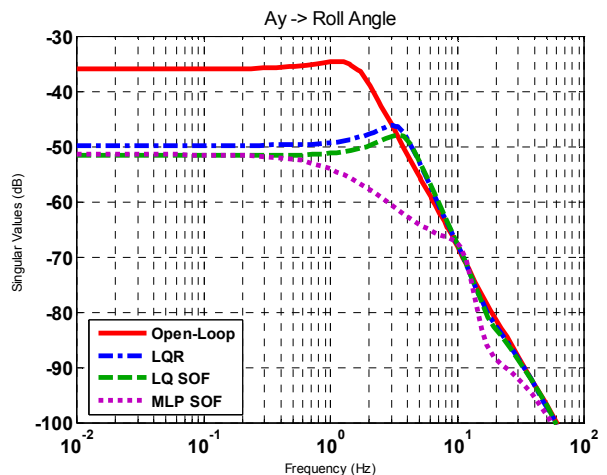


Fig. 4 The maximum absolute roll angles over  $k_{11}$

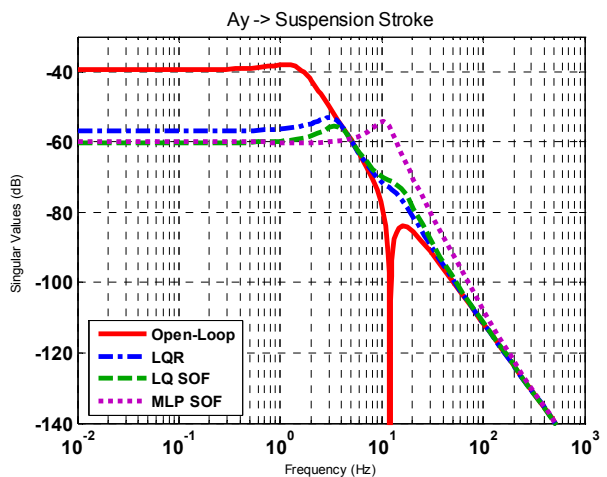
향 입력은 최대 1.52도의 롤각을 만들어 낸다는 것을 의미한다. 따라서 균형해에서 얻어지는 제어기와 조향 입력은 각각 최선의 제어기와 최악의 조향 입



(a)  $a_y \rightarrow \dot{\phi}$



(b)  $a_y \rightarrow \phi$



(c)  $a_y \rightarrow (z_s - z_u)$

Fig. 5 Bode plots from the lateral acceleration to the roll angle and the roll rate

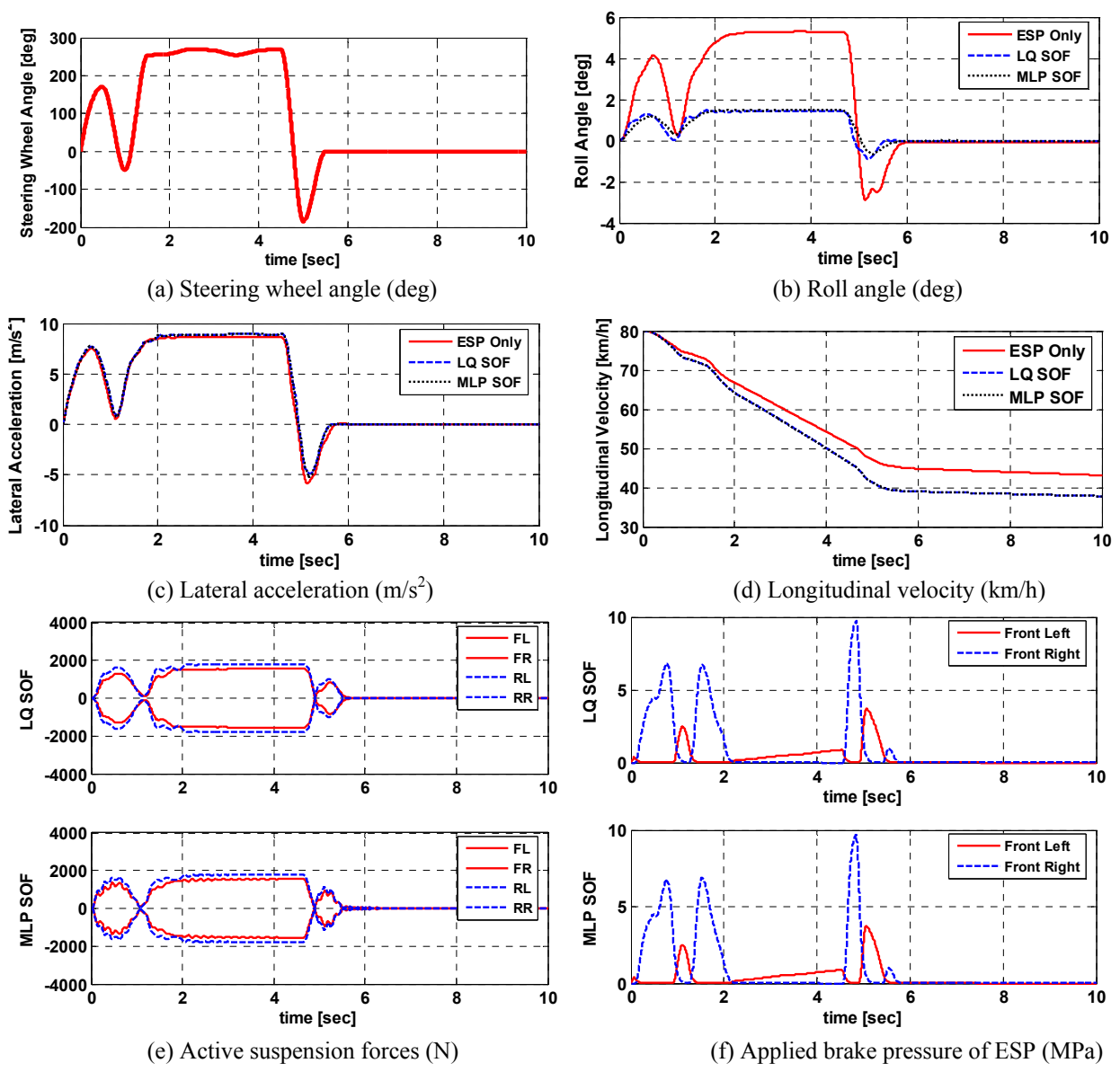


Fig. 6 Simulation results on the obtained equilibrium solution

입력으로 불리운다.

제어기 게인과 운전자의 조향 입력에 대해 평가 함수 값의 형태를 파악하기 위해 각 제어기 게인의 값에 대해 최대 룰각의 값을 최대화하였다. 이를 위해 진화전략인 CMA-ES 와 Differential Evolution (DE) 를 이용하였다.<sup>(16,23)</sup> LQR 과 LQ SOF, 그리고 MLP 에서  $k_{12}$  의 값은 모두 100,000 으로 수립했으므로  $k_{11}$  의 값을 2,000 에서 40,000 까지 변화시키면서 최대 룰각의 최대값을 구했다. Fig. 4 는 게인  $k_{11}$  의 값에 대해 CMA-ES 와 DE 에 의해 구해진 최대 룰각의 값을 보여 준다. Fig. 4 에서 보듯이  $k_{11}$  의 값이 13,000 에서 24,000 까지 균형해로 수 있다. 즉, 이 값들은 최악의 조향 입력에 대해 차량 전복 방

지 성능을 보장한다. 앞서 Fig. 3 에서 MLP 에서 구해진 값은 22,900 이었으며 이 값은 최악의 조향 입력에 대해 1.52 도의 최대 룰각을 주었다. LQ SOF 에서  $k_{11}$  의 값은 4,000 이었으며 최악의 조향 입력에 대해 1.63 도의 최대 룰각을 주었다.

균형해에서 얻어진 제어기의 성능을 평가하기 위해, Bode 선도 해 을 수행한다. Fig. 5 는 횡가속도 입력에 대한 룰각속도, 룰각, 그리고 현가장치 변위의 을 보여 준다. 이들 Bode 선도는 Fig. 4 의 차량 모델에서 구한 선형 모델을 이용하여 구하였다.<sup>(17)</sup> Fig. 5 에서 LQR, LQ SOF, 그리고 MLP SOF 는 각각 LQR, LQ SOF, 그리고 MLP 로 구해진 SOF 제어기를 나타낸다.

Fig. 5 의 (a), (b), 그리고 (c)에서 보듯이 횡가속도 외란에 대해 롤각, 롤각속도, 그리고 현가장치 변위는 크게 감소함을 알 수 있다. 차량 전복이 발생하는 횡가속도의 주파수가 0.5 Hz 이하이므로 0.5 Hz 이하의 을 주 해 한다. 이러한 결과는 MLP 의 평가함수가 롤각으로 설정되었기에 연하다고 수 있다.

MLP 에 의해 구해진 균형해에서 최선의 제어기와 최악의 조향 입력을 이용하여 차량 시뮬레이션 패키지 CarSim 에서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6 은 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 비교를 위해 ESP 만 있는 경우, LQ SOF 와 ESP 를 적용한 경우, 그리고 MLP SOF 와 ESP 를 적용한 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6 에서 ESP Only, LQ SOF, 그리고 MLP SOF 는 각각의 경우를 나타낸다. Fig. 6 의 (e)에서 FL, FR, RL, 그리고 RR 은 각각 전륜 , 전륜 우 , 후륜 , 그리고 후륜 우 을 나타낸다.

Fig. 6 의 (a)는 균형해의 외란 값에 cubic spline 을 적용하여 얻은 최악의 조향 입력이다. Fig. 6 의 (b)와 (f)에서 보듯이 각 값들은 각 제어기마다 유사함을 알 수 있다. 따라서 이 결과들은 최악의 조향 입력에 대해 각기 다른 최대 롤각값을 주기는 하지만 LQ SOF 와 MLP SOF 가 동 한 차량 전복 방지 성능을 가진다는 것을 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 최악의 조향 입력에 대해서도 차량 전복 방지 성능을 보장하는 제어기 설계 방법을 제시하였다. 차량 전복 방지 문제는 비협조적 제로섬 2인 미분게임으로 정식화되었다. 능동 현가장치 제어기는 정적 출력 피드백 제어를 해 설계했으며 운전자의 조향 입력은 cubic spline을 해 표현되었다. 완화 과정을 가지는 다수준 계획법을 이용하였으며 결과적으로 공진화 알고리즘의 6,000번의 계산에 비해 적은 878번의 계산으로 미분 게임의 균형해를 구했다. 차량 전복 게임의 해의 특성을 파악하기 위해 제어기 게임의 각 값에 대해 최대화를 수행하였고 그 결과 제어기 게임이 일정한 영 에서 다양한 균형해가 존 한다는 것을 보였다. Bode 선도 해 과 CarSim에서의 시뮬레이션을 해 균형해에서 구해진 능동 현가장치 제어기가 최악의 조향 입력 하에서도 차량의 전복을 방지함을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교의 연구비 지원에

의해 수행되었음

#### 참고문헌

- (1) National Highway Traffic Safety Administration., 2003, "Motor Vehicle Traffic Crash Injury and Fatality Estimates, 2002 Early Assessment," NCSA(National Center for Statistics and Analysis) Advanced Research and Analysis.
- (2) Fatality Analysis Reporting System(FARS), <http://www-fars.nhtsa.dot.gov>
- (3) Odenthal, D., Bunte, T. and Ackermann, J., 1999, "Nonlinear Steering and Braking Control for Vehicle Rollover Avoidance," *European Control Conference*, Karlsruhe, Germany.
- (4) Chen, B. and Peng, H., 2001, "Differential-Braking-Based Rollover Prevention for Sports Utility Vehicles with Human-in-the-Loop Evaluations," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 36 . No. 4-5, pp.359~389.
- (5) Ungoren, A. Y. and Peng, H., 2004, "Evaluation of Vehicle Dynamic Control for Rollover Prevention," *International Journal of Automotive Technology*, Vol.5, No.2, pp.115~122.
- (6) Yoon, J., Yi, K. and Kim, D., 2006, "Rollover Index-Based Rollover Mitigation System," *International Journal of Automotive Technology*, Vol.7, No.7, pp.821~826.
- (7) Rajamani, R., 2006, *Vehicle Dynamics and Control*, New York, Springer.
- (8) Yim, S., Yoon, J., Cho, W., and Yi, K., 2011, "An Investigation on Rollover Prevention Systems: Unified Chassis Control Versus ESC with Active Anti-Roll Bar," *Proceedings of IMechE, Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol. 225, No.1, pp.1~14.
- (9) Ma, W. and Peng, H., 1999, "Worst-Case Evaluation Methodology - Examples on Truck Rollover/Jackknifing and Active Yaw Control Systems," *Vehicle System Dynamics*, Vol.32, No.4-5, pp.389~408.
- (10) Ma, W., 1998, *Worst-Case Evaluation Methods For Vehicles And Vehicle Control Systems*, Ph.D. dissertation, University of Michigan.
- (11) Yim, S., 2011, "Design of a Rollover Prevention Controller with Differential Game Theory and Coevolutionary Genetic Algorithm," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.25, No.6, pp.1565~1571.
- (12) Tahk, M. J., 1998, "Co-evolution for Engineering Optimization Problems: Minimax Design and Constrained Optimization," *Proceedings of JSASS Aircraft Symposium*, Yokosuka, Japan.
- (13) Basar, T. and Olsder, G. J., 1982, *Dynamic Noncooperative Game Theory*, Academic Press.
- (14) Mechanical Simulation Corporation., 2001, *CarSim*

*User Manual Version 5.*

- (15) Shimizu, K. and Aiyoshi, E., 1980, "Necessary Conditions for Min-Max Problems and Algorithms by a Relaxation Procedure," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.25, No.1, pp.62~66.
- (16) Hansen, N. Muller, S. D. and Koumoutsakos, P., 2003, "Reducing the Time Complexity of the Derandomized Evolution Strategy with Covariance Matrix Adaptation (CMA-ES)," *Evolutionary Computation*, Vol.11, No.1, pp.1~18.
- (17) Yim, S., Park, Y. and Yi, K., 2010, "Design of Active Suspension and Electronic Stability Control for Rollover Prevention," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No.2, pp.147~153.
- (18) Bryson, A. E. and Ho, Y. C., 1975, *Applied Optimal Control*, New York: Hemisphere.
- (19) Kou, Y., Peng, H. and Jung, D., 2008, "Worst-Case Evaluation for Integrated Chassis Control Systems," *Vehicle System Dynamics*, Vol.46, No.1, pp.329~340.
- (20) Smakman, H., 2000, "Functional Integration of Active Suspension with Slip Control for Improved Lateral Vehicle Dynamics," *Proceedings of AVEC2000*, August 22-24, Ann Arbor, Michigan.
- (21) Uematsu, K. and Gerdes, J. C., 2002, "A Comparison of Several Sliding Surfaces for Stability Control," *Proceedings of AVEC 2002*, Japan, September 9-13, 2002.
- (22) Levine, W. S. and Athans, M., 1970, "On the Determination of Optimal Constant Output Feedback Gains for Linear Multivariable Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.15, pp.44~48.
- (23) Storn, R. and Price, K., 1996, "Minimizing the Real Functions of the ICEC'96 Contest by Differential Evolution," *IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Nagoya, pp.842~844.
- (24) Hac, A., 1990, "Optimal Linear Preview Control of Active Vehicle Suspension," *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii, December.