

# 조향 외란 차량의 강건 롤 제어

## Robust roll control of a steer-maneuvered vehicle

\*#김효준<sup>1</sup>, 박현<sup>2</sup>, 류봉조<sup>3</sup>

\*#H. J. Kim(hjkimm@kangwon.ac.kr)<sup>1</sup>, H. Park<sup>2</sup>, B.J.Ryu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 강원대학교 대학원, <sup>3</sup> 한밭대학교 기계공학부

Key words : Robust control, Roll motion, Integrated strategy

### 1. 서론

전기-전자 기술과 연관된 기반 기술의 발전과 더불어, 운전 조작에 의한 차량 응답 특성을 능동적으로 개선하여 차량 운전이 전적으로 운전자의 감각 및 조작에 의존됨으로서 야기되는 사고를 사전에 예방하는 지능형 고안전 자동차에 대한 연구를 가속화시키고 있다.

운전자의 조향 조작으로 인한 선회 운동시 발생하는 횡방향 하중이동(lateral load transfer)과 이로 인한 롤 안정성 문제는 차량의 동적 안정성과 관련된 성능요소로서, 차량의 롤 안정성 개선을 위한 방안으로는 수동적 개념으로 롤 안정바(stabilizer bar)를 이용한 롤 강성 증가 방법이 적용되지만 승차감과 좌절이 요구되는 등 그 특성 개선에 제약이 따른다.

따라서 일반적인 성능대비 능동형 현가시스템(active suspension system)의 실 적용상 단점을 보완하는 시스템으로서, 반능동형 현가시스템(semi-active suspension system)의 한계점에 대한 옵션으로 선회 조향시 차체에 발생하는 롤 운동에 대응되는 롤 모우멘트를 능동적으로 제어하는 방식의 ARC(Active Roll Control) 시스템에 대한 연구가 진행되어왔다<sup>1-6</sup>. 실제 차량의 롤 운동에 대한 동특성은 설계 변수 뿐 아니라 승차 조건, 타이어 특성 등으로 인한 파라미터 변동의 영향을 받게 되며, ARC 시스템 구축을 위해서는 이러한 차량 특성 및 작동 시스템의 동특성을 고려한 연구가 요구된다.

### 2. 차량 모델 및 제어기 설계

ARC 시스템을 위한 제어기 설계에 있어서 대상 모델이 복잡해 지면 샘플링시간, 하드웨어 구성 등 제어시스템의 구현에 어려움이 따르므로 본 논문에서는 운전자의 조향 조작에 의한 응답 특성을 반영한 횡운동, 요운동 그리고 롤 운동에 대한 3자유도 차량 모델을 적용하였다<sup>7</sup>.

도로상을 속도  $V$ 로 주행하는 차량의 전륜 타이어 조향각  $\delta_f$  외란과 이로 인한 롤 운동을 제어하기 위한 능동 제어 모우멘트  $M_d$ 를 제어입력 으로서 하는 차량 모델에 대한 상태방정식은 다음과 같으며, 여기서 횡속도  $v$ , 요각속도  $r$ , 롤각도  $\phi$ , 롤각속도  $p$ 로 나타낸다.

$$E \dot{x}_p = A_p x_p + B_p M_d + L_o \delta_f$$

$$y = C_p x_p + D_p M_d$$

여기서,

$$x_p = [v \quad r \quad \phi \quad p]^T$$

$$E = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & M_s h_s \\ 0 & I_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ M_s h_s & 0 & 0 & I_x \end{bmatrix},$$

$$B_o = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$C_p = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

$$D_p = [0]$$

$$L_o = [K_f \quad K_f l_f \quad 0 \quad 0]^T$$

$$A_o =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{(K_f+K_r)}{V} & (-MV-\frac{K_f l_f}{V}+\frac{K_r l_r}{V}) & & & & & \\ & (K_f a_f+K_r a_r) & & 0 & & & \\ -\frac{(K_f l_f-K_r l_r)}{V} & -\frac{(K_f l_f^2+K_r l_r^2)}{V} & & & & & \\ & (K_f a_f l_f-K_r a_r l_r) & & 0 & & & \\ 0 & 0 & & 0 & & 0 & 1 \\ 0 & -M_s h_s V & & & & -K_o & -C_o \end{bmatrix}$$

진술한 차량 모델을 기반으로, 조향외란과 파라미터 변동을 고려하여 실제 차량과 모델간의 오차에 대해서 강건한 제어 성능을 얻을 수 있는 제어기  $K(s)$ 를 설계하기 위하여 출력귀환  $H_\infty$  제어 기법을 적용하였다. 혼합감도 문제를 적용한  $H_\infty$  제어기 설계에 있어서 조향 외란에 의한 롤 운동을 억제하기 위하여 외란-출력간의 전달함수  $M(s)$ 와 가중함수  $W_s(s)$ 를 포함한 식이 다음을 만족하도록 한다.

$$\|W_s(s)M(s)\|_\infty < 1$$

또한 실제 차량과 모델간의 차이를 덧셈형 모델링 오차로 고려하여, 외란-제어입력 사이의 전달함수  $N(s)$ 와 가중함수  $W_a(s)$ 를 포함한 식이 다음과 같이 강건 안정성을 만족하도록 한다.

$$\|W_a(s)N(s)\|_\infty < 1$$

가중함수  $W_a(s)$ ,  $W_s(s)$ 의 형상과 크기는 제어기  $K(s)$ 의 특성 결정에 중요한 역할을 하므로 이의 적절한 선정이 요구되는데,  $W_a(s)$ 는 차량 가변 조건을 고려하고  $W_s(s)$ 는 주파수 대역폭이 지나치게 넓으면 제어효과가 저하되므로 저주파 영역에서 크기가 크도록 한다.

설계된 제어기는 차체에 부착된 센서를 통해 롤각도를 측정하여 롤 운동을 제어하도록 다음의 식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_K = A_K x_K + B_K \phi$$

$$M_d = C_K x_K + D_K \phi$$

### 3. 전차량 시뮬레이션

ARC 시스템의 실차 적용 특성을 검토하기 위하여, 실제의 차량 조건에서와 같이 타이어 특성과 현가 장치의 특성 등을 고려할 수 있는 전차량 모델<sup>7,8</sup>에 설계된 제어기를 적용한 전차량 능동 제어 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다.

전차량 모델은 종방향, 횡방향, 요 운동과 강제로 고려된 차체의 수직, 롤, 피치 운동 및 차륜의 수직 운동을 포함하는 10자유도 모델로 적용하였고, 롤 모우멘트의 전/후륜 배분(roll moment distribution)을 가변적으로 적용하는 제어 방식을 고려할 수 있으나, 타이어 슬립각을 측정/추정해야 하는 등 실차 적용에 어려움이 있으며, 요 평면(yaw-plane)상에서의 조종안정성은 제동력을 이용한 요 모우멘트 제어를 적용하는 것이 더욱 효과적이므로, 본 논문에서는 능동 롤 모우멘트의 전/후륜 배분 제어는 고려하지 않았다.

Fig. 1에 공칭파라미터를 갖는 차량에 대하여 단일 차선 변경 형태의 조향 외란을 가한 경우, 롤각도-롤각속도의 시간응답으로부터 롤 응답 특성을 도식적으로 잘 나타낼 수 있는 롤 모드선도를 도식하였다. 제어 전/후를 비교하면 수동형 차량대비 ARC 시스템 적용 차량의 롤 응답 개선효과를 비교할 수 있다. 또한 차량의 승차조건, 적재하중 등의 파라미터 변동 요인에 따라 변화하는 롤 운동 특성 조건에 대해서도 제어 결과를 함께 비교해

볼 수 있다.

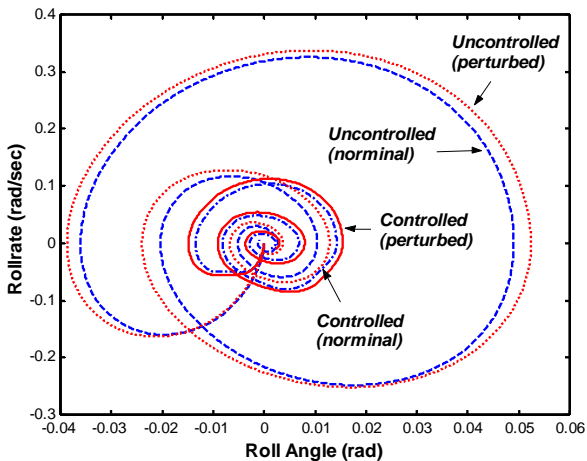


Fig. 1 Comparison of simulated roll stability for passive and active vehicle

이러한 파라미터 가변 요인과 더불어 차량의 조작 조건을 함께 고려할 필요가 있는데, 차량의 롤 응답은 조향 입력 크기와 주행 속도의 영향을 받게 되므로, 공칭 파라미터를 갖는 차량을 기준으로, 이들의 각각의 조작 조건에 대한 시뮬레이션 결과로부터 수동 및 제어 차량의 롤 응답을 구하여 Fig. 2에 정리하여 도시하였으며, 제어 전/후 대비 롤 응답의 개선 효과를 비교하여 확인할 수 있다.

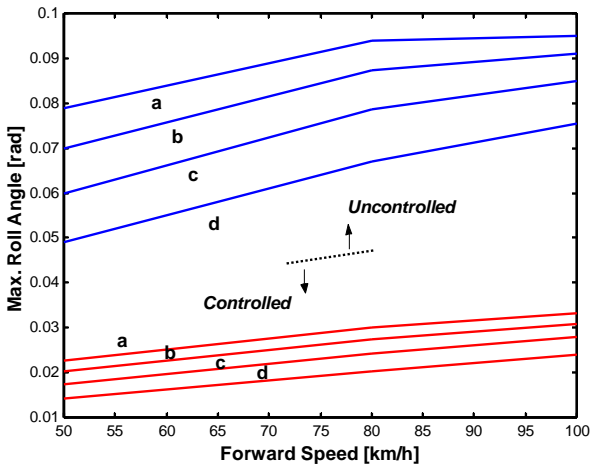


Fig. 1 Comparison of roll angle responses in variations of forward speed and steer input (steering input a: 3.5, b: 4.8, c: 6.2, d: 7 deg)

전술한 제어 성능은 작동 시스템의 응답특성이 이상적인 경우 기대할 수 있는 목표성능으로 실제로 이러한 시스템을 구현하는 경우에는, 작동 시스템의 동특성이 고려되어야 한다. 즉, 실제 시스템을 구현하는 경우에는 그 응답 대역폭의 영향이 반영되어 나타나게 되는데, 광대역의 응답 특성을 갖는 작동시스템의 적용은 그 원가비용 등의 제약이 따르게 된다.

이러한 문제를 고려하여 응답 대역폭이 제한된 작동시스템을 적용한 경우, 스텝 조향 외란에 대한 결과를 Fig.3에 나타내었다. 수동형 차량 대비 정상상태에서의 롤 운동 특성의 개선은 이루어지고 있으나, 작동 시스템의 영향을 확인할 수 있다. 이에 대한 대안으로 반능동형 현가시스템과의 통합제어 방식을 적용한 결과를 Fig.3에 함께 도시하였다. 반능동형 현가시스템은 그 작동 원리상 정상상태에서의 응답에는 영향을 주지 못하지만, 응답 대역폭이 제한된 ARC시스템과의 통합 제어를 통하여 스텝 조향 외란에 대하여 과도응답 특성을 개선할 수 있음을 확인할 수 있다.

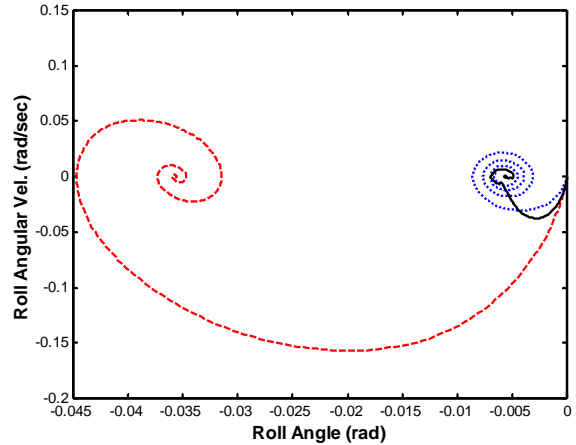


Fig. 3 Comparison of roll mode phase portraits (dashed:uncontrolled, dotted:ARC only, solid:integrate control)

#### 4. 결론

자동차의 동적 안정성과 관련된 성능요소인 롤 안정성을 개선하기 위한 능동 롤 제어시스템에 대한 결과로 대상 차량의 변동 파라미터의 영향과 작동시스템의 동특성을 고려하여 강건한 제어성능을 얻을 수 있었으며, 제한된 대역폭을 갖는 작동시스템의 동특성을 고려하여 반능동형 현가시스템과의 통합 제어를 통하여 정상상태 및 과도 응답 특성 개선에 효과적임을 확인 하였다.

#### 참고문헌

1. Li, H. and Goodall, R.M., "Linear and non-linear skyhook damping control laws for active railway suspensions," Control Engineering Practice, 7(7), 843-850, 1999.
2. Lin, R.C., Cebon, D. and Cole, D.J., "Optimal Roll Control of a Single-unit Lorry," Proc. Instn. Mech. Engrs. Part D, 210, 45-55, 1996.
3. Darling, J., Dorey, R.E. and Martin, T.J., "A Low Cost Active Anti-Roll Suspension for Passenger Cars," ASME J. of Dyn. Sys., Meas., and Control, 114,599-605, 1992.
4. Darling, J. and Hickson, L.R., "An Investigation of a Roll Control Suspension Hydraulically Actuation System," ASME Fluid Power Systems and Technology, 5, 49-54, 1998.
5. Daring, J. and Ross-Martin, T.J., "A Theoretical Investigation of a Prototype Active Roll Control System," Proc. Instn. Mech. Engrs. Part D, 211,3-12, 1997.
6. Harovat, D., "Applications of optimal control to advanced automotive suspension design," J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Trans. ASME, 328-342, 1993.
7. Bakker, E., Pacejka, H.B. and Linder, L., "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Paper 890087 83-95, 1989.
8. Kim, H.J. and Park, Y.P., "Hybrid attitude control in steering maneuver using ARC Hil setup," Control Engineering Practice, 10(12),1339-1345, 2002.