이중너클을 이용한 후륜 토 및 캠버각 변화를 통한 조종안정성 개선

손 정 현^{*1)} · 박 성 준²⁾

부경대학교 기계자동차공학과¹⁾ · 금호타이어 기술연구소²⁾

Improvement of Vehicle Handling Performance due to Toe and Camber Angle Change of Rear Wheel by Using Double Knuckle

Jeonghyun Sohn^{*1)} · Seongjun Park²⁾

¹⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

²⁾R&D Center, Kumho Tire, 555 Sochon-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-711, Korea

(Received 11 May 2012 / Revised 7 August 2012 / Accepted 8 August 2012)

Abstract : In this study, suspension geometry is controlled to improve vehicle handling performance. The toe and camber of the rear suspension is controlled independently by using a double knuckle structure designed to enhance the vehicle cornering stability. Camber and toe changes in the rear wheel during high speed turning maneuver are important factors that influence the vehicle stability. Toe in the rear outer wheel plays a dominant role in cornering. A control algorithm for the camber and the toe angle input is developed to carry out the control simulation of the vehicle such as single lane change, the steady state cornering, the double lane change and the step steering simulation. Effects of the camber and toe angle control are analyzed from the computer simulations. A double lane change simulation revealed that the suspension mechanism with variable camber angle and variable toe angle decreases the peak body slip angle and peak yaw rate, 50% and 10%, respectively.

Key words : Vehicle handling performance(차량조종안정성), Camber angle(캠버각), Toe angle(토각), Suspension(현가장치), Vehicle dynamics(차량동역학), Kinematic analysis(기구해석)

1. 서 론

차량의 조종안정성을 개선하기 위해 지능형 차량에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며 최근에는 차량에 ECU(Electronic Control Unit)를 탑재하여, 차량이 한계상황을 벗어날 수 있도록, 차량 상태정보를 센서를 통해 수집하고 제어로직에 의해 제어를 작동시키는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. ESC(Electronic Stability Control)를 CDC(Continuous Damping Control)와 통합 제어하여 조종안정성을 보다 높이는 연구가 국내에서 수행된 바 있으며,¹⁾ AFS(Active Front Steering System)를 이용하여 비대

칭마찰 노면에서 제동시 안정성을 높이는 방법이 연구되기도 하였다.²⁾ 총륜 구동차량의 지능형 토크 배분제어를 이용한 안정성 향상 방법에 대해 연구,³⁾ 차량 선회 시 작동되는 ESP에 대해 연구,⁴⁾ QFT를 적용한 AFS에 관한 연구⁵⁾ 등을 통해 조종안정성을 높이는 연구를 수행하고 있다. 이들 연구를 살펴보면 견인력, 선회안정성, 조종성능 등을 향상시키기 위해 적절하게 제어를 이용한 것을 알 수 있다. 한편, 현가기구의 자세를 능동 제어하여 성능을 높이고자 하는 연구를 자동차 회사에서 수행한 바 있으며 AGCS(Active Geometry Control Suspension)시스템을 이용하여 롤 오버 방지 성능 향상에 관한 연구가 있었으며,⁶⁾ 전륜에 캠버각을 생성시킬 수 있는 메커

*Corresponding author, E-mail: jhsohn@pknu.ac.kr

니즘이 제안되기도 하였다.⁷⁾

기존의 전륜 캠버 생성기구는 캠버 생성시 토우 각도 함께 바뀌기 때문에 두 휠 얼라인먼트 요소는 종속되어 있었으며 독립제어가 가능하지 않았다. 하지만 이중너클 구조⁸⁾는 이러한 두 인자가 독립적으로 작동하기 때문에 제어가 용이하다는 장점을 가진다.

본 연구에서는 후륜에 이중너클을 탑재하여 토 및 캠버각을 변화시킬 수 있는 구조로 하여, 후륜의 토 및 캠버각 변화를 통한 조종안정성 개선연구를 수행하였다. ADAMS / CAR의 User template를 이용하여 이중너클을 가진 후륜 현가장치 템플릿을 개발하였고, 후륜 토 및 캠버 제어에 따른 조종안정성을 분석하였다.

2. 이중너클타입 서스펜션

Fig. 1에 Adams/Car에서 모델링한 이중너클 후륜 현가장치를 도시하였다. Fig. 2는 이중너클 구조의

Fig. 1 Double knuckle type rear suspension

Fig. 2 Kinematic diagram of suspension including camber creating mechanism

Table 1 Calculation of degrees of freedom for front suspension

좌표수	9bodies × 6coordinates/body = 54coords.
구속식	4spherical × 3constraints/joint = -12 coords.
	2translational × 5const./joint = -10 coords.
	3revolute × 5const./joint = -15 coords.
	2universal × 4const./joint = -8 coords.
	1ground × -6const./joint = -6 coords.
자유도	3 D.O.F

기구학적 연결도를 보여주고 있으며 자유도는 Table 1과 같이 계산된다. 범프리바운드, 조향, 캠버에 의해 자세가 결정된다.

3. 후륜 자세 변화

3.1 후륜 토각 변화

2자유도 선형차량 모델은 횡방향 운동에 대해 단순하지만 제어 알고리즘 개발에 있어서 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 Fig. 3에 도시된 자전거 모델을 이용하여 후륜 토각 변화를 주었다. 조종안정성 향상을 위해 차체 슬립각(Body slip angle)이 코너링 중에 영(Zero)이 되도록 제어 하는 알고리즘^{9,10)}을 이용하였다. 2자유도는 차체 슬립각과 요속도(Yaw rate)를 의미한다. 운동방정식은 식 (1)~(2)로 표현된다. 일정속도로 코너링중에 횡력은 식 (3)~(4)와 같이 표현된다. 식 (3)과 (4)를 식 (1)과 (2)에 대입하면 식 (5)와 같은 상태방정식(State equations)이 만들어진다. 식 (6)은 전륜 조향각을, 식 (7)은 후륜 조향각을 나타낸다. 후륜 조향각은 전륜 조향각과 요속도의 함수로 표현된다. 조향각에 따른 차체 슬립각은 식 (8)과 같이 나타난다. 식 (8)로부터, 정상상태에 차체 슬립각이 영이 되도록 하는 이득(Gain)값이 식 (11)~(12)와 같이 계산된다. 이들 이득값은 코너링 강성(Cornering stiffness), 차체 속도(Vehicle velocity), 차체 파라미터(Vehicle parameters)로 구성된다. Table 2에 본 연구에서 사용한 자전거 모델의 파라미터를 나타내었다.

$$mV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = 2F_{yf} + 2F_{yr} \quad (1)$$

$$I \frac{d\gamma}{dt} = 2l_f F_{yf} - 2l_r F_{yr} \quad (2)$$

Fig. 3 Bicycle model for toe angle change

$$F_{yf} = -K_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta_f \right) \quad (3)$$

$$F_{yr} = -K_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} r - \delta_r \right) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2(C_f + k_\delta C_r)}{mV} & l - \frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{mV^2} \\ \frac{2(l_f C_f - k_\delta l_r C_r)}{I} & \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{IV} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mV} & \frac{2C_r}{mV} \\ \frac{2l_f C_f}{I} & \frac{2l_r C_r}{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix}$$

$$\delta_f = \frac{\delta}{n} \quad (6)$$

$$\delta_r = k_\delta \delta_f + k_r \gamma = \frac{k_\delta}{n} + k_r \gamma \quad (7)$$

$$\frac{\beta(s)}{\delta(s)} = \frac{1}{n} \frac{N(s)}{D(s)} \quad (8)$$

여기서,

$$N(s) = \begin{vmatrix} 2(C_f + k_\delta C_r) & mV + \frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{V} - 2k_r C_r \\ 2(l_f C_f - k_\delta l_r C_r) & Is + \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{V} + 2k_r l_r C_r \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$D(s) = \begin{vmatrix} mVs + 2(C_f + C_r) & mV + \frac{2(l_f C_f - l_r C_r)}{V} - 2k_r C_r \\ 2(l_f C_f - l_r C_r) & Is + \frac{2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{V} + 2k_r l_r C_r \end{vmatrix} \quad (10)$$

$$k_\delta = -\frac{C_f}{C_r} \quad (11)$$

$$k_r = \frac{mV^2 + 2(l_f C_f - l_r C_r)}{2C_r V} \quad (12)$$

Table 2 Comparisons of peak responses at time = 8.7s

Parameters	Values
n	22
C _f , C _r	1160 N/deg
l _f	1.233m
l _r	1.327m
m	1334kg

3.2 후륜 캠버각 변화

조향에 의해 차량이 선회되는 것은 차체 진행방향과 타이어의 변형사이에 발생하는 슬립각만큼 횡력이 발생하기 때문으로 이때 차체의 거동은 언더스티어와 오버스티어 뉴트럴스티어로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 세 가지 특성을 캠버제어기구로 능동 구현하기 위해 차량의 차속과 조향각에 따라 구성된 제어 맵을 이용하였다. 차속에 상관없이 조향각이 작으면 제어입력이 없는 수동상태가 되도록 하고, 고속이면서 조향각이 크면 언더스티어가 되도록 하며 저속이면서 조향각이 크면 오버스티어가 되도록 한다. 저속에서는 이미 안정한 상태이기 때문에 안정성을 높여줄 필요는 없는 것이고, 고속에서는 안정성을 높여주되 조종성이 저하되지 않는 것이 중요하다. Fig. 4에 제어 맵에 대하여 도식적으로 나타냈다. 언더스티어를 만들기 위한 캠버입력은 선회방향으로 후륜 캠버입력을 주는 것을 말하며, 오버스티어는 선회 반대 방향으로 캠버각을 가지도록 하는 것을 뜻한다. 차량과 제어기의 통합 시뮬레이션은 Matlab/Simulink환경에서 Adams/Car와 통합 시뮬레이션을 수행되었으며 Fig. 5에 전체 구성도를 나타냈다.

Fig. 4 Camber angle change map

Fig. 5 Block diagram for toe and camber angle change

4. 전차량 시뮬레이션

4.1 단순차선변경 시뮬레이션

전륜 현가장치는 더블 위시본 현가장치(Double wishbone suspension)이며, 후륜 현가장치는 이중너클을 가진 더블 위시본 현가장치이다. 본 연구에서는 ADAMS/Car를 이용하여 전차량 시뮬레이션을 수행하였으며, 이중너클을 포함한 현가장치를 위해 User template를 사용하였다. 전체 시스템 자유도는 25자유도이며, 차체 6자유도, 프런트와 리어의 프레임이 각각 6자유도를 가지고, 엔진 6자유도 그리고 조향 1자유도를 가진다. 타이어 모델은 Magic formula 타이어 모델을 사용하였다.

리어 서스펜션의 하드 포인트 데이터를 Table 3에 나타내었고, 그 포인트의 위치를 Fig. 6에 도시하였다. 현가스프링 강성과 댐퍼의 특성을 Fig. 7~8에 나타내었다.

단순차선변경은 장애물 회피의 성능을 평가하기 위해 종종 사용된다. 차속은 70km/h이고, 90도 진폭, 2초 주기의 사인과 조향입력을 가하였다. 조향 기어

Table 3 Hard points of rear suspension

Hard Point		Location (mm)		
		X	Y	Z
Left inner knuckle	(a) UCA Front	100	-450	525
	(b) UCA Rear	250	-490	530
	(c)UCA Outer	40	-675	525
	(d) LCA Front	-200	-400	150
	(e) LCA Rear	200	-450	155
	(f) LCA Outer	0	-750	100
	(g) Absorber Upper	40	-500	650
	(h) Absorber Lower	0	-600	150
	(i) Tierod Inner	200	-400	300
	(j) Tierod Outer	150	-750	300
	(k) Toe Actuator	200	-300	300
Left outer knuckle	(l) Universal Joint	0	-700	450
	(m) Spherical Joint	0	-800	350
	(n) Revolute Joint	0	-800	100
	(o) Wheel Center	0	-830	300
	(p) Camber Actuator	0	-600	450

Fig. 6 Representation of hard points of rear suspension

Fig. 7 Spring characteristics

Fig. 8 Damper characteristics

비는 30:1로써 조향 휠 각 90도 입력일 때 조향각은 3도이다. 단순차선변경 시뮬레이션의 차체의 궤적을 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 10과 11에 요속도와 횡가속도를 나타내었다. 그림에서 ‘passive’는 일반적인 더블 위시본 현가장치를 장착한 차량의 결과이

Fig. 9 Lateral displacement vs longitudinal displacement under single lane change maneuver

Fig. 10 Yaw rate under single lane change maneuver

Fig. 11 Lateral acceleration under single lane change maneuver

며, ‘cam_contl.’은 후륜의 캠버각만 변화를 준 결과이고, ‘toe_contl.’은 후륜의 토 각의 변화를 준 결과이며, ‘cam_toe_contl.’은 후륜의 토와 캠버각 모두에 변화를 준 결과를 의미한다. 토 각과 토 및 캠버각 변화를 준 결과에서 요속도와 횡가속도의 최대값이 낮아졌음을 알 수 있다. 따라서, 후륜의 토 각 변화가 피크치를 낮춤을 확인할 수 있다.

4.2 이중차선변경 시뮬레이션

ISO3888에 의하여 차량 속도가 시속 80km일 때 주어진 이중차선을 변경하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이중차선변경을 위한 조향입력은 ADAMS 내의 Smart Driver 모듈을 이용하여 차선 변경 경로에 맞춰 제어입력이 주어지도록 하였다. Fig. 12는 ISO3888에서 제시한 이중차선변경 경로를 나타낸 것이다. Fig. 13~15에 요속도, 횡가속도, 차체슬립각에 대해 도시하였다. Table 4는 최대 응답값을 보여준다. 캠버각과 토각이 모두 변화했을 때가 차체슬립각과 요속도의 피크 값이 각각 50%와 10% 감소됨을 보여준다.

Fig. 12 Path for double lane change (ISO3888)

Fig. 13 Yaw rate under double lane change maneuver

Fig. 14 Lateral acceleration under double lane change maneuver

Fig. 15 Body slip angle under double lane change maneuver

Table 4 Comparisons of peak responses

	Body slip angle (deg)	Yaw rate (deg/s)	Lateral acceleration (m/s ²)
Passive	1.23	19.39	5.76
Cam_contl	1.07	19.11	5.81
Toe_contl	0.81	17.77	5.93
Cam_Toe_contl	0.61	17.36	6.06

5. 결 론

본 연구에서는 이중너클구조의 서스펜션을 통해 후륜의 토각과 캠버각을 생성할 수 있도록 하여 후륜의 자세변화에 따른 차량조종안정성능의 개선효과를 분석하였다. 상용 동역학 해석 프로그램인 ADAMS/CAR 를 이용하여 단순차선변경과 이중차선변경 시뮬레이션을 수행하여 결과를 분석하였다.

이중차선변경 시뮬레이션시 차체 슬립각과 요속도의 최대값을 각각 50%와 10% 감소시켰다. 차량선회 시 요속도 및 차체슬립각은 운전자가 느끼는 조종안정성과 관련된다. 직진-선회-직진의 선회구간 통과시 요속도 및 차체슬립각은 Zero-peak-zero 형태로 발생하게 되며 피크값의 비교를 통해 조종안정성의 향상을 판단할 수 있다.

이중차선변경은 동일한 주행경로에 대해 후륜 제어시 차량응답의 변화를 보고자 하는 것이며, 단순차선변경은 동일한 조향입력에 대해 후륜 제어시 차량응답의 변화를 보고자 한 것이다. 이중너클구조의 서스펜션은 캠버각과 토각을 독립적으로 제어할 수 있는 구조여서 향후 차량 조종안정성능을 포함하여 많은 응용을 할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- 1) K. W. Lee, J. G. Lee, S. K. Oh, J. H. Roh, Y. W. Kim, H. S. Kim, I. D. Kim and J. H. Jang, "A Study of Integrated Chassis Control System with ESC and CDC for Vehicle Stability and Handling Performance Enhancement," KSAE Spring Conference Proceedings, KSAE09-B0093, 2009.
- 2) R. W. Chung, W. J. Sung and H. Sung, "A Study of Stability Control Algorithm in Split- μ Braking Using Active Front Steering System," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.1245-1250, 2009.
- 3) W. J. Bong, Y. K. Kim and H. C. Lee, "AWD Vehicle Simulation with the Intelligent Torque Split Control Strategy for Improving Traction and Handling Performance," Transactions of KSAE, Vol.6, No.2, pp.841-850, 2007.
- 4) J. H. Song and K. S. Boo, "Development and

- Performance Evaluation of ESP Systems for Enhancing the Lateral Stability During Cornering,” Trans. Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.30, No.10, pp.1278-1283, 2006.
- 5) J. Y. Zhang, J. W. Kim, K. B. Lee and Y. B. Kim, “Development of an Active Front Steering System with QFT Control,” Int. J. Automotive Technology, Vol.9, No.6, pp.695-702, 2008.
 - 6) S. H. Lee, H. Sung, J. W. Kim, Y. H. Oh and U. K. Lee, “Investigation on the SUV Rollover Performance by the AGCS System,” Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.II, pp.660-664, 2006.
 - 7) E. S. Kwak, Analysis and Implementation of a Camber Angle Control Mechanism for Improvement of Vehicle Steering Characteristic, M. S. Dissertation, The Korea University, Seoul, Korea, 2007.
 - 8) K. Isao, B. Pernando and F. Cheli, “A Full Vehicle Model for the Development of a Variable Camber Suspension,” Proceedings of the ASME IDETC/CIE 2007, DETC2007-34679, 2007.
 - 9) T. Takiguchi, N. Yasuda, S. Furutani, H. Kanazawa and H. Inoue, “Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle-Speed Steering Four-wheel Steering System,” SAE 860624, 1986.
 - 10) H. Inoue and F. Sugawara, “Comparison of Feedforward and Feedback Control for 4WS,” Vehicle System Dynamics, Vol.22, No.5-6, pp.425-436, 1993.