

주행 안정성을 고려한 최악 상황 시나리오 도출 및 적용

정 대 이* · 정 도 현 · 문 기 현 · 정 창 현 · 노 기 한 · 최 형 진

자동차부품연구원 차체사시연구센터

Worst Case Scenario Generation on Vehicle Dynamic Stability and Its Application

Daeyi Jung* · Dohyun Jung · Kihyun Moon · Changhyun Jeong · Kihan Noh · Hyungjeen Choi

Body & Chassis Engineering Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 13 July 2007 / Accepted 18 April 2008)

Abstract : The current test methods are insufficient to evaluate and ensure the safety and reliability of vehicle system for all possible dynamic situation including the worst case such as rollover, spin-out and so on. Although the known NHTSA J-turn and Fish-hook steering maneuvers are applied for the vehicle performance assessment, they aren't enough to estimate other possible worst case scenarios. Therefore, it is crucial for us to verify the various worst cases including the existing severe steering maneuvers. This paper includes the procedure to search for other useful worst case based upon the existing worst case scenarios mentioned above and its application in simulation basis. The only human steering angle is selected as a design parameter here and optimized to maximize the index function to be expressed in terms of either roll angle or yaw rate. The obtained scenarios were enough to generate the worst case to meet NHTSA worst case definition (ex.2-inch wheel lift). Additionally, as an application, the worst case steering maneuver is acquired for the vehicle to operate with a simple ESP system. It has been concluded that the new procedure in this paper is adequate to create other feasible worst case scenarios for a vehicle system both with an intelligent safety control system and without it.

Key words : Worst case in vehicle system(차량최악조건), Worst case scenario generation procedure(최악조건 생성 과정), NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration, 미국 도로교통안전국), J-turn/Fish-hook/Sine-with-dwell, ESP (Electronic Stability Program, 전자식 자세제어 프로그램)

1. 서 론

오늘날 차량 시스템이 복잡해지면서 사시 부품이나 그 제어 시스템의 취약점을 보완하여 신뢰성을 확보하는 방법은 점점 더 어려워지고 있다. 현재 많이 이용되는 평가방법들은 여러 가지 시험 시나리오를 통해 상대적인 성능을 비교적 정확하게 예측할 수 있지만, 차량 주행 제어 시스템의 다양한 최악

조건(worst case)을 평가하는 데는 한계가 있다.¹⁾ 주행 제어 시스템의 안전성과 신뢰성을 평가하기 위한 기존 방식들은 주로 경험과 법규에 의존하는 방법들이 대부분이고 시험 시나리오를 만들기 위한 체계적인 방법과 고찰이 부족한 실정으로, 실제 일어날 수 있는 차량의 다양한 최악주행 상황을 예측하기란 어려운 일이다.²⁾ 그러므로 가능한 최악 주행 상황을 체계적으로 파악 할 수 있는 프로시저를 개발하여 차량주행제어시스템 개발에 적용하는 것은

*Corresponding author, E-mail: one4all77@hotmail.com

좋은 대안이 될 수 있다.³⁾

본 연구는 최악주행상황 시나리오들을 도출하는 방법으로서 기존의 평가 방법들인 NHTSA⁴⁾ J-turn, Fish-hook, Sine-with-dwell 등을 기준값(Reference value)으로 하여 차량동역학 시뮬레이션과 최적화를 통해 또 다른 최악 주행 상황 시나리오를 탐색할 수 있는 프로시저를 개발했고 도출된 최악 상황 시나리오들을 기존 결과들과 비교하여 유용성을 검토하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 최악주행상황 도출 프로시저의 기본적인 개념도를 보여 주고 있다.^{5,7)}

차량이 주행 중의 각 시간 스텝에 대한 최악상황을 도출하여 그 값들을 시간영역(time-domain)상에서 연결하는 프로세스로 최악 주행상황 시나리오를 도출 하였다.

식 (2)와 같이 주어진 비선형 차량 시스템의 각 시간 스텝에서 초기값을 기준으로 하여 식 (1)의 목적 함수와 식 (3)의 제한조건을 정식화했다. 조향각이나 브레이크 압력과 같은 입력 변수는 식 (4)와 같이 도출 할 수 있다.⁸⁾

$$\text{Maximize } L(x_{t,k}, u_{t,k}) \quad (1)$$

$$\dot{x}_{t,k} = F(x_{t,k}, u_{t,k}) \quad (2)$$

$$u_{t,k,\min} \leq u_{t,k} \leq u_{t,k,\max} \text{ and,} \quad (3)$$

$$\Delta u_{t,k,\min} \leq \Delta u_{t,k} \leq \Delta u_{t,k,\max}$$

$$u = [u_{t_1, \beta_1}, u_{t_2, \beta_2}, u_{t_3, \beta_3}, \dots, u_{t_{(n-1)}, \beta_{(n-1)}}, u_{t_n, \beta_n}] \quad (4)$$

x : state variable, u : design variable, t : time,

k : iteration number, L : cost function,

Δ : gradient of input, t_n : time step,

β_n : final iteration number in each time step

차량시스템의 최악상황 시나리오 도출을 위해 차량거동의 최악조건을 탐색하는 최적화를 통해 각 시간 스텝에서 차량의 조향입력을 선택하였으며, 이를 연결함으로써 최악상황 입력값을 결정하였다. 차량주행의 최악상황을 전복(Rollover)으로 판단하였고 이를 최대화 하는 목적함수로서 롤각(Roll angle)을 선정 하였다. 최악상황을 재현하기 위한 조향입력을 찾기 위해 검증된 SUV 차량 모델(S/W : CARSIM)과 Matlab / Simulink 최적화 알고리즘을 이용하였다.^{9,10)} 본 연구에서는 최악상황을 전복(Rollover)이 일어 날 수 있는 극한 상황으로 가정하여 목적함수로서 롤 앵글(Roll angle)을 이용하여 정식화 했다. 본 연구에서는 이와 같은 기본적인 개념을 바탕으로 첫 번째로는 주행안전 제어시스템이 부착되지 않은 차량에 대해서 최악상황 시나리오 도출에 대한 연구를 실시하였고, 두 번째로는 간단한 주행안전시스템이 부착된 차량에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 최악상황 도출을 위한 최적화 프로시저

우선 최악상황 도출에 관한 최적화 프로시저를 정립하기 전에, 대상 시스템인 차량의 정확한 모델링이 필요하다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 실제 차량 시험데이터로 검증된 국내 H사 SUV 차량 모델(S/W : CARSIM)을 사용하였다. 차량시험의 조건은 NHTSA J-turn 조향입력과 차속 80km/h이다.

Fig. 3은 최악상황 도출을 위한 최적화 알고리즘의 순서도를 나타낸 것이다.

Fig. 3에 표현된 최적화 프로시저는 각 시간 간격 (0, ..., i-1, i, i+1, ..., N)에서 기준 조향입력(기준 입

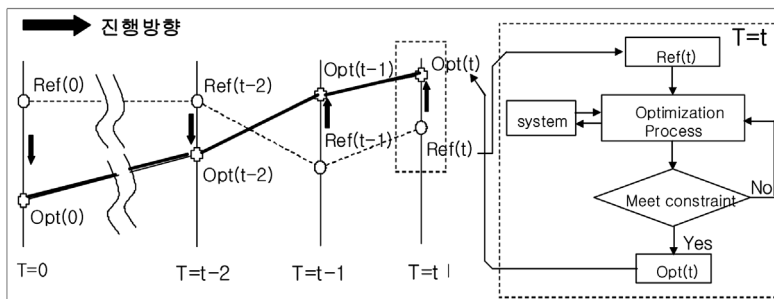


Fig. 1 Worst case evaluation process

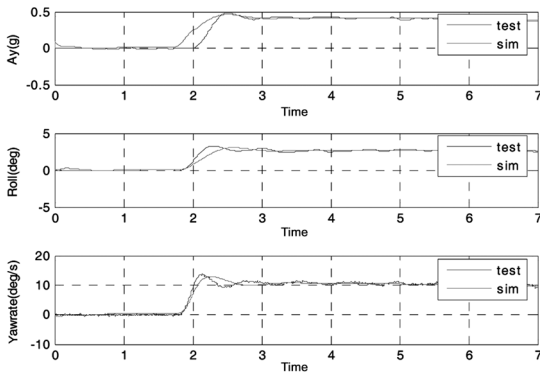


Fig. 2 Comparison between field test data and simulation results for SUV

력 예, NHTSA J-turn, Fish-hook)을 초기값으로 최적화를 수행하여 최악상황을 재현하는 조향입력을 연속적으로 구하는 과정이다. 차량 모델을 해석하는 Carsim과 연동하는 Simulink 환경을 구성하였고, 이로부터 계산된 차량의 성능지표와 목적함수 값을 기반으로 조향입력을 탐색하기 위해, 최적화 알고리즘 중의 하나인 SQP(Sequential Quadratic Programming)기법을 활용하였다.¹⁰⁾ 각 시간 간격마다 최악 상황 도출을 위해 제안된 최적화 수식은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \frac{C_1}{f_1(\delta)} \text{ or } \frac{C_2}{f_2(\delta)} \quad (5)$$

$$\text{subject to } \delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max} \text{ and } \dot{\delta}_{\min} \leq \dot{\delta} \leq \dot{\delta}_{\max} \quad (6)$$

$\delta / \dot{\delta}$: steering angle / steering angle rate

C_1, C_2 : constant consideration sensitivity

f_1, f_2 : roll angle or yaw rate

물리적으로 의미 있는 조향 입력탐색을 위하여 조향입력의 최대값과 최소값을 설정하고, 조향입력의 각속도를 제한하는 조건을 포함시켰다.⁸⁾ (약 980deg/sec)

극한 상황을 재현하는 NHTSA J-trun, Fish-hook 조향입력을 기준 조건으로 선정하여 기준 조건보다 최악인 상황을 재현하는 조향입력과 차량의 거동을 다음 절에 수록하였다.

2.1 NHTSA J-turn 조향입력에 대한 최악상황 재현 조향입력 도출

차량의 롤 주행특성을 최대화시키는 조향입력을 도출하기 위해 식 (7), (8)과 같은 목적함수와 제한 조건을 설정하였다. 이와 같은 조건은 각 시간 간격에 적용되어 각 구간마다 연속적으로 목적함수를 최소화하는 조향입력을 탐색한다.

$\delta(t_i), \phi(t_i), t_i$ 각각 조향입력, 롤각, 시간 간격을 나타낸다.

$$\text{minimize } L(\delta(t_i)) = \frac{100}{|\phi(\delta(t_i))|^2} \quad (7)$$

$$\text{subject to } \delta_{\min} \leq \delta(t_i) \leq \delta_{\max} \text{ and}$$

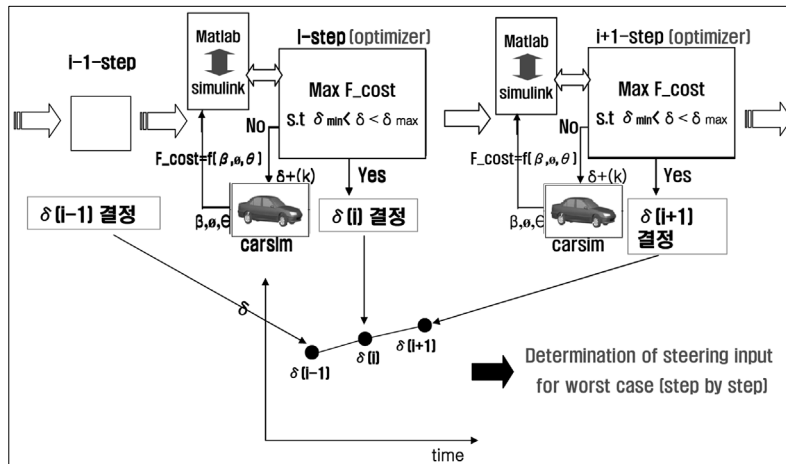


Fig. 3 Optimization algorithm flow chart for worst case development

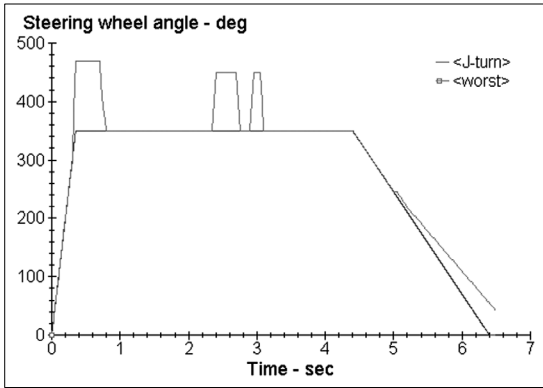


Fig. 4 Reference input (NHTSA J-turn) and its worst case scenario

$$\left| \frac{\delta(t_{i+1} + t_i) - \delta(t_i)}{t_i} \right| \leq 980 \text{ deg/sec} \quad (8)$$

일정한 속도 80km/h에서 NHTSA⁴⁾의 J-turn 조향 입력을 기준조건으로 설정하여 구해진 최악 주행 상황 시나리오를 Fig. 4에 나타냈다.

앞에서 구한 NHTSA J-turn 조향입력 기준조건에 대한 최악상황 유발 조향입력 시나리오가 전복 위험성 측면에서 최악상황을 발생 시킬 수 있는지 검토하였다. Fig. 5 ~ 7에 J-turn 조향 입력과 최악상황 조향입력에 대한 롤각, 요각속도, 그리고 NHTSA에서 제시한 전복위험성 판단조건을 중심으로 보여 준다.

Table 1에서 보는 바와 같이 차량 거동의 최대값들이 전반적으로 증가하였으며, 롤각, 요각속도, 차

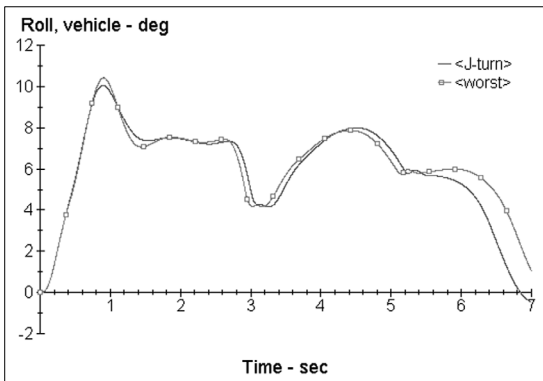


Fig. 5 Roll angle simulation results for the reference input (NHTSA J-turn) and its worst case scenario

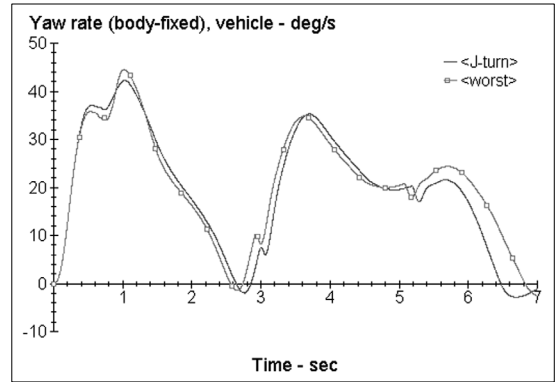


Fig. 6 Yaw rate simulation results for the reference input (NHTSA J-turn) and its worst case scenario

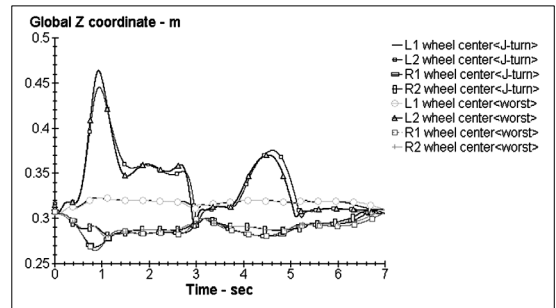


Fig. 7 Vehicle wheel center lift simulation results for the reference input(NHTSA J-turn) and its worst case scenario

Table 4 Maximum values of various performance index

Case	Roll (deg)	Yaw_rate (deg/sec)	Wheel_center lift (m)
J-turn	10.02	42.6	0.13
Worst	10.42	45.5	0.15
Increase	3.9(%)	6.8(%)	15.3(%)

륜 들림(wheel lift)의 증가량은 각각 3.9%, 6.8%, 15.3% 정도이다.

조향입력에 대한 롤각의 변화 경향을 Fig. 8에 나타냈다. 같은 조향 입력 값에 대해 전반적으로 롤각이 증가했음을 알 수 있다. 이로써, 최악상황 조향입력이 J-turn 입력보다 차량의 거동을 좀 더 불안정하게 함을 알 수 있다.

2.2 NHTSA Fish-hook 조향입력에 대한 최악상황 재현 조향입력 도출

Fish-hook test는 차량의 전복 가능성을 평가하는

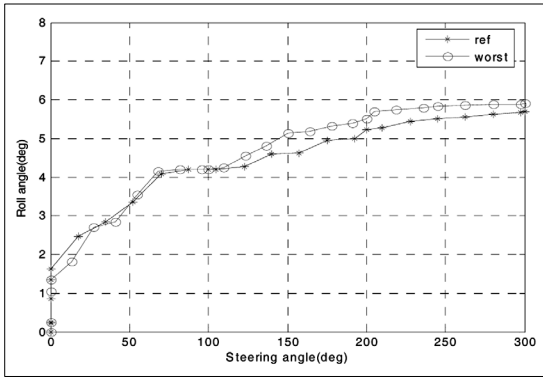


Fig. 8 Steering input vs Roll angle

시험 방법으로서 최근 NHTSA에서 SUV 차종들의 시험 결과를 분석하여 전복 안정성을 공표하고 있다.³⁾ 본 연구에서는 Fish-hook 조향입력을 기준조건으로 차량의 물각을 최대화시키기 위해 식 (9) ~ (10) 과 같은 목적함수와 제한 조건을 설정하였다.

$$\text{Minimize } L(\delta(t_i)) = \frac{1000}{|\phi(\delta(t_i))|^2} \quad (9)$$

subject to $\delta_{\min} \leq \delta(t_i) \leq \delta_{\max}$ and

$$\left| \frac{\delta(t_{i+1} + t_i) - \delta(t_i)}{t_i} \right| \leq 880 \text{ deg/sec} \quad (10)$$

일정한 주행속도 80km/h에서 NHTSA의 Fish-hook 조향입력을 기준조건으로 구해진 최악상황 조향 입력 시나리오를 Fig. 9에 나타냈다.

다음은 Fish-hook 조향 입력과 최악상황 조향 입력에 대한 차량의 물각(Fig. 10)과 지면으로부터 차

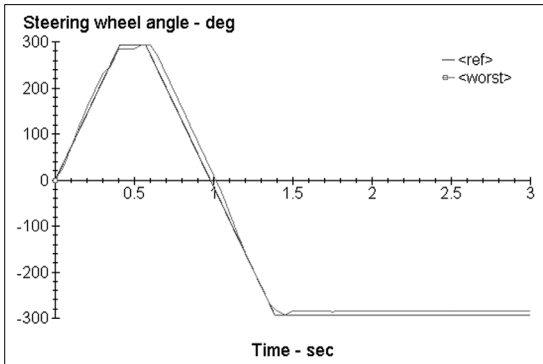


Fig. 9 Reference input (NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

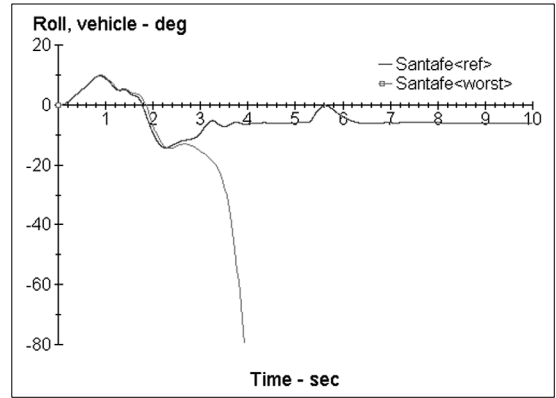


Fig. 10 Roll angle simulation results for the reference input (NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

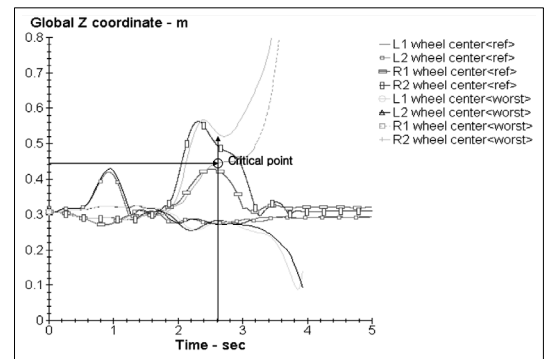


Fig. 11 Wheel center lift simulation results for the reference input(NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

륜 중심까지의 거리 결과(Fig. 11)를 나타낸 것이다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 최악상황의 경우에 차량이 2.5~3.5sec에 차량이 전복됨을 알 수 있다. Fig. 11에서는 약 2.6sec에서 차량의 두 바퀴(오른쪽 전/후 : R1, R2)가 2 inch 이상 들리면서, 차체의 물 복 원력보다 차체의 원심력이 더 커지면서 차량이 전 복됨을 알 수 있다. 즉 NHTSA Fish-hook 초기 조건 으로부터 구한 최악 주행 상황 조향입력은 전복 위 험성 관점에서 차량을 좀 더 최악조건으로 유도할 수 있다.

다음은 기준 Fish-hook 조향 입력과 구해진 최악 주행상황 조향 입력에 대하여 차량의 차륜 들림량 이 2 inch가 되는 임계속도를 차량동역학 시뮬레이 션을 통해 추정된 결과이다.

Fig. 12에서 보는 바와 2 inch 차륜 들림이 일어나 는 임계속도의 차이는 대략 4km/h 로서 최악주행 상

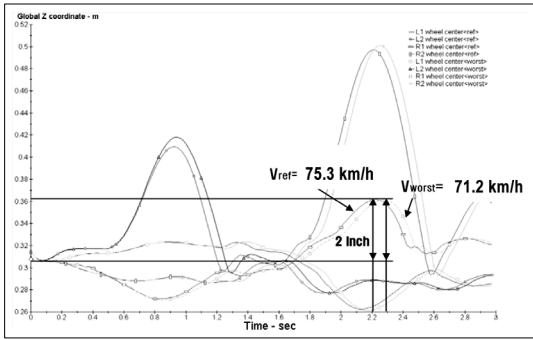


Fig. 12 Critical speed for 2 inch wheel lift

Table 2 Critical speed and sensitivity of wheel lift

Case	Ref.	Worst
2inch wheel_lift critical speed(km/h)	75.3	71.2
2 inch/critical speed (in/km/h)	0.0266	0.0281

황은 기존 Fish-hook보다 낮은 속도에서 전복이 일어날 가능성을 보여준다. 또한 Table 2에서는 속도 변화에 대한 차륜 들림의 증가율이 상대적으로 최악 주행상황 조향입력이 더 큼을 알 수 있다.

3. 최악상황 시나리오 활용

차량의 안정성을 평가하는데 있어서, 예측하지 못한 상황에 대한 제어시스템 설계가 필수적이다. 이를 위해 불확실성이 포함된 최악상황 시나리오가 차량의 안정성 한계를 평가하는데 중요한 항목이 될 수 있다.²⁾

본 연구에서 개발된 최악 상황 도출 프로시저를 제어로직이 달린 차량에 적용시킴으로써 ESP(Electronic Stability Program), CDC(Continuous Damping Control)등을 장착한 차량의 제어 로직 최악 상황을 예측할 수 있으며, 그에 따른 대책 등을 추가적으로 보완하여 보다 나은 제어 로직의 개발을 수행할 수 있다. 간단한 ESP 제어 로직을 장착한 차량 모델에 Fish-hook 조향입력을 기반으로 롤각을 최대화 시키는 최적화를 수행하여 최악상황 조향입력을 도출하였다.

ESP 제어 로직(Simulink 모델)을 SUV 차량 모델(Carsim 모델)에 연계하여 최악상황을 도출하는데 이용하였으며, 해석용 ESP 제어 로직은 Fig. 13과 같

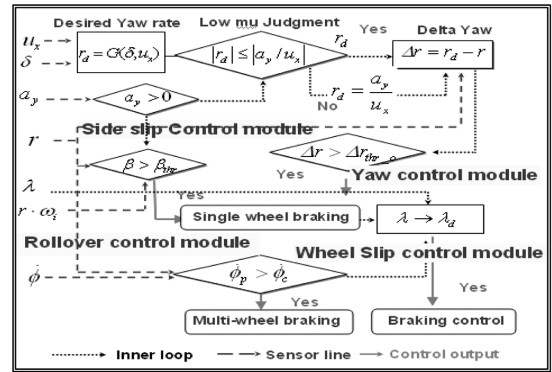


Fig. 13 Flow chart of ESP control logic

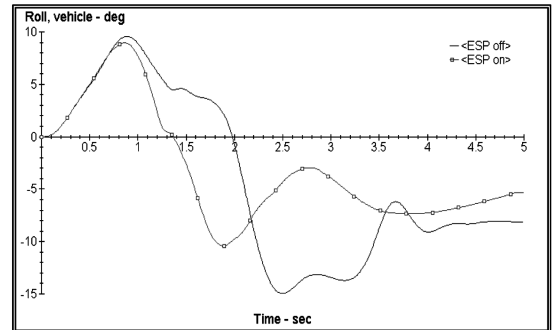
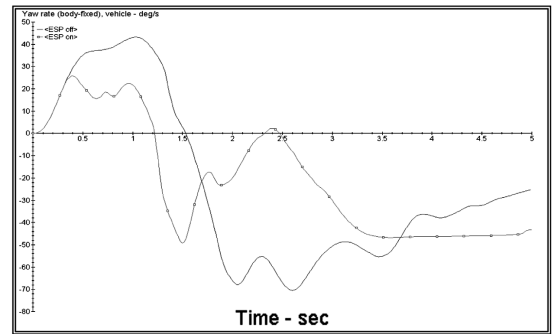


Fig. 14 “ESP off” vs “ESP on” performance (upper : yaw rate, under : roll angle)

이 구성되어 있다.

Fig. 14에는 Fish-hook 조향입력을 기반으로 ESP 성능을 요각속도와 롤각의 감소량으로서 나타냈다.

요각속도의 최대값은 68.9에서 49.2deg/sec로 줄었으며, 롤각은 14.5에서 10.5deg/sec로 줄었으며, 따라서 ESP의 장착으로 차량 성능이 대략 20~30% 향상되었음을 알 수 있다.

ESP가 장착된 차량모델을 이용하여, Fish-hook

기반의 최악상황 즉, 롤각을 최대화 시키는 최적화를 수행하여 조향입력을 도출하였다. 최적화수행을 위한 조건은 식 (11) ~ (12)와 같다.

$$\text{minimize } f(\delta(t_i)) = \frac{1000}{|\phi(t_i)|^2} \quad (11)$$

subject to $\delta_{\min} \leq \delta(t_i) \leq \delta_{\max}$ and

$$\left| \frac{\delta(t_{i+1} + t_i) - \delta(t_i)}{t_i} \right| \leq 890 \text{ deg/sec} \quad (12)$$

본 연구에서는 Simulink 환경으로 구축된 ESP 제어 로직을 SUV 차량 모델에 적용하여 NHTSA Fish-hook 조향입력과 최적화를 수행하여 얻은 조향 입력에 대해 차량의 거동을 비교했다. Fig. 15와 Fig. 16은 최악상황 재현을 위해 도출된 차량의 조향입력과 그때의 롤각을 나타냈다.

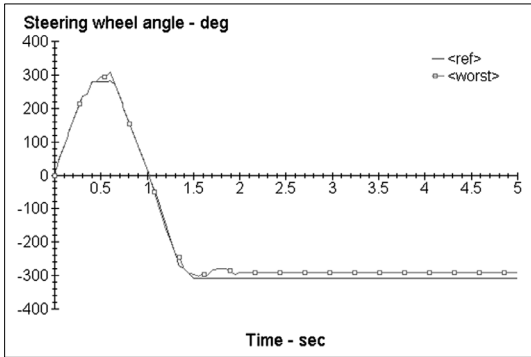


Fig. 15 Reference input (NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

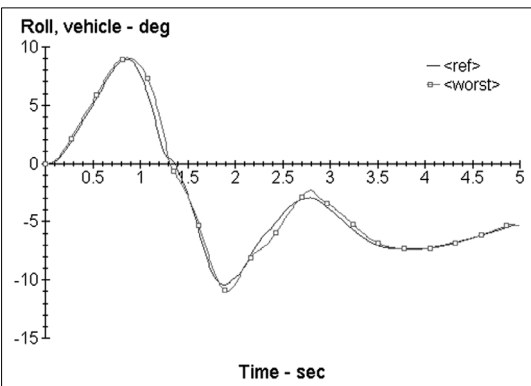


Fig. 16 Roll angle simulation results for the reference input (NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

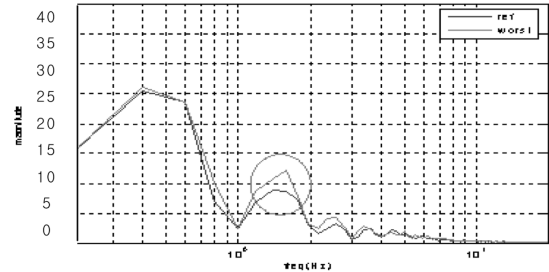
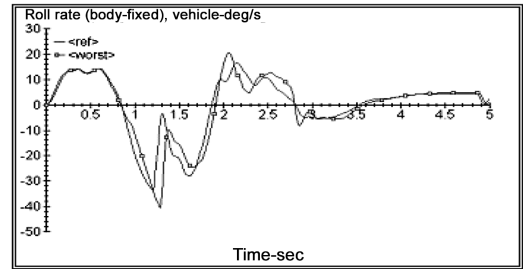


Fig. 17 Roll rate and its frequency analysis

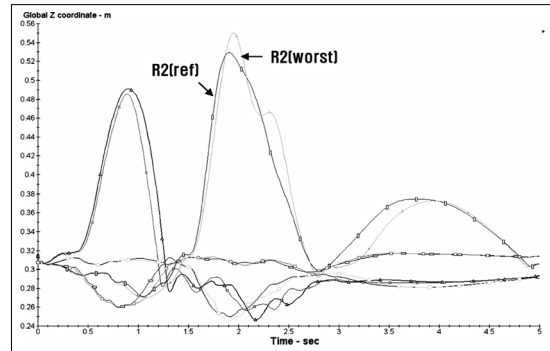


Fig. 18 Wheel center lift simulation results for the reference input(NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

Fig. 16에서처럼 최악상황 조향입력에 의해 생성된 롤각의 최대 값이 1.71 sec에서 발생하며, 기준 조향입력보다 0.73° 정도 더 큰 값을 알 수 있다. Fig. 17에서는 차량의 롤각속도(Roll rate)와 이에 대한 주파수 분석을 나타내었다.

Fig. 17에서 롤각속도는 최대값들의 차이가 7.5deg/sec이며, 주파수역(Frequency domain) 상에서 붉은색 원내에서 보는 바와 같이 절대값이 1~2 hz 범위에서는 더 큰 차이를 나타남을 알 수 있다. 다음 Fig. 18은 차륜의 중심 들림을 나타내었다.

약 1.85~2.3 sec에서 차량의 오른쪽 후륜(R2)의 차륜 들림을 비교하여 보았을 때, 그 차이는 0.031(m)

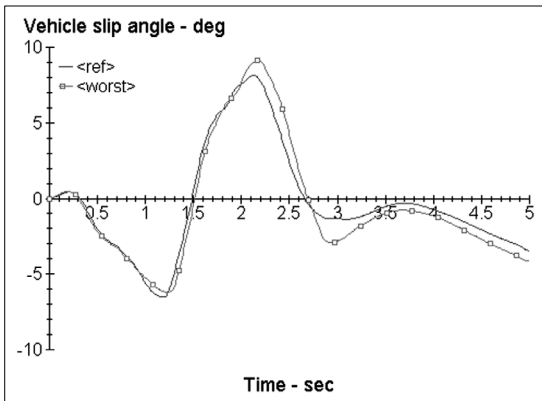


Fig. 19 Slip angle simulation results for the reference input (NHTSA Fish-hook) and its worst case scenario

이다. 약 1 inch 이상의 차륜 들림이 발생했으며 이는 NHTSA가 규정한 2 inch 차륜 들림의 반에 해당되는 값이다.

Fig. 19에 나타난 차량 옆 미끄럼각을 살펴보면, 2~2.3 sec에서 각각 최대 미끄럼이 발생되었으며 두 차이는 2.125°이며, 3~5sec 에서는 지속적으로 최악 조건 차량이 더 미끄러짐을 알 수 있다.

위의 결과들을 종합하여 보았을 때, 비록 ESP를 장착한 차량에서도 도출된 최악상황 시나리오가 기존의 Fish-hook에 비해 보다 더 불안정한 상황을 유도함을 알 수 있다.

이러한 최악 상황 시나리오는 제어 로직의 설계를 다시 한 번 검토할 수 있는 하나의 평가 기준으로 활용 될 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 NHTSA 기준의 J-turn, Fish-hook 등 2가지 조향입력을 기준 조건으로, 최적화 프로시저를 구축했다. 또한 새로운 최악상황 조향입력시나리오를 제시하였고, SUV 차량 모델을 통해 그 거동들을 비교 분석하였다.

연구 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 제시된 최악상황 조향입력으로 차량의 주행거동이 기존의 3가지 조향입력보다 더 악화됨을 확인하였다. 특히 Fish-hook 조향 기반의 최악상황 시나리오는 차량의 전복을 유발하였다.
- 2) ESP 제어 로직을 장착한 차량 모델에 대해 Fish-

hook 조건을 기반으로 최악 조향입력시나리오를 도출했다. 기존의 Fish-hook 조향입력의 거동보다 차량거동 측면에서 차량의 안정성에 미치는 중요한 인자들이 대략 평균적으로 1.25 배 악화되는 것을 확인할 수 있었다.

- 3) 최악상황 시나리오는 원하지 않는 상황을 제어하는 제어 로직의 강건성 설계 방법이 될 수 있으며, 차량거동을 평가하는 새로운 시험 방법의 개발에 중요한 기준으로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 제시한 최악상황 시나리오는 수많은 최악상황을 재현하는 시나리오중의 하나이며 유일한 해답이 될 수는 없다. 다양한 주행상황을 고려할 수 있는 시나리오를 찾아내기 위하여 보다 신뢰성 있는 프로시저 및 최적화 알고리즘에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 미래형자동차 기술개발사업(HILS 기반 신뢰성 평가 기술 개발)의 연구결과입니다.

References

- 1) W. Ma and H. Peng, "A Worst-Case Evaluation Method for Dynamic Systems," ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.121, No.2, pp.191-199, 1999.
- 2) A. Y. Ungoren and H. Peng, "Evaluation of Vehicle Dynamic Control for Rollover Prevention," Int. J. Automotive Technology, Vol.5, No.2, pp.115-122, 2004.
- 3) T. J. Wielenga, "A Method for Reducing On-road Rollovers - Anti-rollover Braking," SAE 1999-01-0123, 1999.
- 4) National Highway Traffic Safety Administration, <http://www.nhtsa.gov>
- 5) M. Athans and P. L. Falb, Optimal Control, McGraw-Hill, New York, 1966.
- 6) S. K. Agrawal and B. C. Fabien, Optimizaiton of Dynamic Systems, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1999.
- 7) J. S. Arora, Introduction to Optimum Design,

McGraw-Hill International Editions.

- 8) P. Y. Papalambros and D. J. Wilde, Principle of Optimal Design, Modeling and Computation, 2nd Edn, 2003.
- 9) CARSIM User Manual, <http://www.carsim.com>
- 10) MATLAB/SIMULINK User Manual, <http://www.mathwork.com>