

## 차량자세제어 최악상황 개발 및 UCC HILS 시스템 기반 성능 평가

김진용\* · 정도현 · 정창현 · 최형진

자동차부품연구원 차체사시기술연구센터

### Worst-case Development and Evaluation for Vehicle Dynamics Controller in UCC HILS

Jinyong Kim\* · Dohyun Jung · Changhyun Jeong · Hyungjeen Choi

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

(Received 30 November 2010 / Accepted 13 June 2011)

**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 Sine with dwell 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 useful worst case based upon the existing worst case scenarios mentioned above and worst case evaluation for vehicle dynamic controller in simulation basis and UCC HILS. 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 both yaw rate and side slip angle. The obtained scenarios were enough to generate the worst case to meet NHTSA worst case definition. It has been concluded that the new procedure in this paper is adequate to create other feasible worst case scenarios for a vehicle dynamic control system.

**Key words** : Worst case in vehicle system(차량최악조건), Worst case scenario generation procedure(최악조건 생성 과정), NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration, 미국 도로교통안전국), Sine-with-dwell, ESC(Electronic Stability Control, 전자식 자세제어), UCC(Unified Chassis Control, 샤시통합제어), HILS(Hardware-in-the-loop-simulation, 가상통합개발환경)

#### 1. 서론

차량의 고성능화가 진행됨에 따라 안전에 대한 요구가 증폭되면서 차량주행제어시스템은 날로 발전하고 있다. 이에 따라 차량주행제어시스템을 평가하는 여러 가지 시험 시나리오들이 개발되고 있다. 차량 시스템이 다양한 외란에 노출되어 있음에도 불구하고 차량제어시스템의 성능평가 시나리오를 최악조건(worst case)으로 만드는 외란에 대한 연

구는 많지 않은 실정이다.<sup>1)</sup> 차량주행 제어 시스템의 안전성과 신뢰성을 평가하기 위한 기존 방식들은 주로 경험과 법규에 의존하는 방법들이 대부분이고 시험평가 시나리오를 만들기 위한 체계적인 방법과 고찰이 부족한 실정으로, 실제 일어날 수 있는 차량의 다양한 최악주행 상황을 예측하기란 어려운 일이다.<sup>2)</sup> 그러므로 가능한 최악 주행상황을 체계적으로 파악 할 수 있는 프로시저를 개발하여 차량주행 제어시스템 개발에 적용하는 것은 좋은 대안이 될 수 있다.<sup>3)</sup>

\*Corresponding author, E-mail: kimjy@katech.re.kr

본 연구는 기존의 평가 방법인 NHTSA<sup>4)</sup> Sine with dwell을 기준값(Reference value)으로 하여 국내 H사 중형세단(Sedan)차량을 대상으로 차량동역학 시뮬레이션과 최적화 기법이 포함된 프로시저를 통해 또 다른 최악 주행 상황 시나리오를 탐색하였고 도출된 최악 상황 시나리오를 시뮬레이션 환경과 사시통합제어 시스템(UCC) HILS 환경에서 기존 결과들과 비교하여 유용성을 검토하였다.

## 2. 최악상황 도출을 위한 프로시저

### 2.1 기본개념

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 최악주행상황 도출 프로시저의 기본적인 개념도를 보여 주고 있다.<sup>5-7)</sup> 각 시간 스텝에서 차량 주행 중의 최악상황을 최적화기법을 통해 도출하여 그 값들을 시간영역(time-domain)상에서 연결하는 프로세스로 최악 주행상황 시나리오를 도출 하였다.

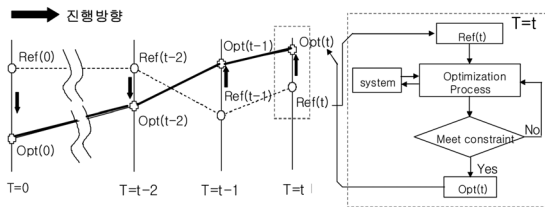


Fig. 1 Worst case development process

### 2.2 최악상황 정의

운전자의 의도는 조향 입력으로 표현되는데 이것은 차량에서 기준 요율(reference yaw rate)로 표현된다. 또한 차량의 횡방향 안정성은 횡슬립각(side slip angle)으로 표현된다. 따라서 횡방향 안정성 관점에서 차량 시스템이 최악의 상황을 보이는 것은 기준 요율로부터 최대한 벗어나면서 횡슬립각이 최대한 커질 때이다. 이러한 사실을 고려해서 본 연구에서는 식 (1)과 같이 최대화되어야 할 목적함수로서 기준 요율과 실제 요율의 차이의 합과 차체 횡슬립각의 합을 이용하였다.<sup>8)</sup>

$$\begin{aligned} & \text{minimize } L(\delta(t_i)) & (1) \\ & = \frac{C_1}{(\gamma(\delta(t_i)) - \gamma_{desire}(\delta(t_i)))^2 + \beta(\delta(t_i))^2} \end{aligned}$$

$$C_1 = 2,000$$

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

$$\left| \frac{\delta(t_{i+1} + t_i) - \delta(t_i)}{t_i} \right| \leq 1400 \text{ deg/sec} \quad (2)$$

$\delta(t_i)$ ,  $\gamma(t_i)$ ,  $\gamma_{desire}(t_i)$ ,  $\beta(t_i)$ ,  $t(t_i)$ 는 각각 조향입력, 요율, 기준요율, 횡슬립 각, 시간 간격을 나타낸다.

실제 요율이 기준 요율과 차이가 크고 횡슬립각이 커질수록 목적함수 값  $L(\delta)$ 은 작아지게 된다. 따라서  $L(\delta)$ 를 가장 작게 하는 조향 입력을 구하게 되면 이 입력은 차량의 상황을 최악으로 하는 조향이 된다. 물리적으로 의미 있는 조향 입력탐색을 위하여 식 (2)와 같이 조향입력의 최대값과 최소값을 설정하고, 조향입력의 각속도를 제한하는 조건을 포함시켰다(약 1400 deg/sec). 따라서 횡방향 관점의 최악상황을 구하는 식 (1), (2)는 최적화 문제로 정의되고 이를 해결하기 위해 검증된 세단(Sedan) 차량 모델(S/W:CARSIM)을 기반으로 한 동역학 시뮬레이션과 Matlab / Simulink 최적화 알고리즘을 이용하였다.<sup>9,10)</sup>

### 2.3 최적화 탐색방법

최적화 방법에는 결정론적인 방법(Deterministic method)과 통계적인 방법(Stochastic method)이 있다. 결정론적인 방법은 기울기 정보를 사용하는 방법으로 수렴 속도가 빠르지만 일반적으로 전역(global) 최적해를 구할 수 있는 가능성이 통계적인 방법보다는 적다. 통계적인 방법은 통계기법을 사용하는 방법으로 수렴속도는 느리지만, 전역 최적해를 구할 가능성이 상당히 크다. 결정론적인 방법의 예는 linear programming, quadratic programming 등 대부분의 최적화 알고리즘이고, 통계적인 방법은 유전자 알고리즘(Genetic algorithm), PS(Pattern Search) 알고리즘 등이 있다.

본 연구에서는 PS(Pattern Search)알고리즘을 이용하여 식 (1), (2)를 해결하고 최악상황을 도출하였다. PS(Pattern Search) 최적화 알고리즘 기법은 미분값을 이용하지 않고 경험과 임의성에 근거한 규칙에 의해 최적해를 단계적으로 향상시켜 나가는 통계적인 방법으로써 메쉬 지점들(mesh points)에서 목적함수를 평가한다. Fig. 2는 PS 방법을 이용한 최

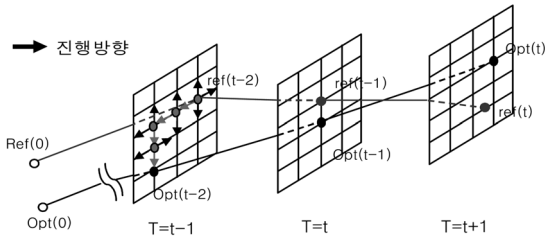


Fig. 2 Worst case evaluation process using PS method

악 주행상황 도출 프로시저의 기본적인 개념도를 보여주고 있다. 각 시간 step에 대해 메쉬(mesh)를 나누고 그 메쉬 안의 초기값 보다 더 적은 값을 탐색하여 초기값 보다 최적화된 값을 찾는다. 이러한 방식으로 iteration하여 최적화된 값을 각 시간 스텝에서 찾아낸다.

### 3. NHTSA Sine with dwell 조향입력에 대한 최악상황 주행 시나리오 도출

국내 H사 중형세단(Sedan)차량을 대상으로 NHTSA Sine with dwell 조향입력을 초기값으로 하여 기준 스피나아웃이 일어날 최악상황 시나리오를 도출하고 기준입력(Sine with dwell)과 비교분석하였다. Sine with dwell 시험은 NHTSA에서 수년간의 연구 끝에 ESC 성능을 검증하는 시험으로 선정한 방법으로 일반 운전자가 일상 주행 상황에서 발생할 수 있는 긴급 상황에서 장애물을 피하는 조향 입력을 평가할 수 있는 대표적인 시험방법이다. 이 시험은 식 (3), (4)와 같이 ESC의 understeer 특성을 판단하는 Responsiveness Criterion과 oversteer 특성을 판단하는 Lateral Stability Criterion이 있으며, 이 두가지 판단기준을 반드시 동시에 만족하여야 한다. ESC 제어가 없는 차량의 경우 상기와 같은 기준 시험방법에서 이미 최악상황(스피나아웃)에 도달하기 때문에 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 간단한 ESC (Electronic Stability Control) 제어가 내장된 차량에 대하여 최악상황 주행 시나리오를 도출하였다.

Responsiveness criterion :

$$Lateral\ displacement = \int_0^{t_0+1.07} a_{yC.G.}(t) dt \geq 1.83 [m] \quad (3)$$

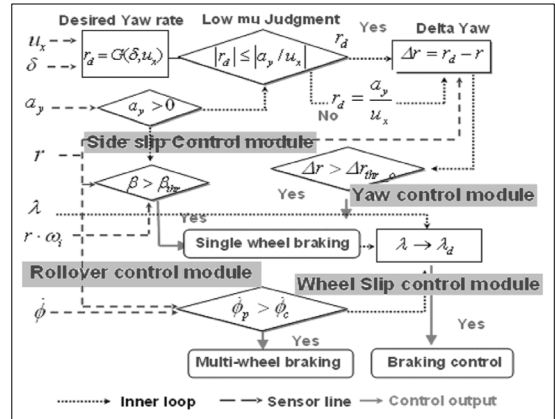


Fig. 3 Flow chart of ESP control logic

Lateral Stability criterion :

$$\frac{\gamma(t_0+1.00)}{\gamma_{peak}} \times 100 \leq 35\% , \quad (4)$$

$$\frac{\gamma(t_0+1.75)}{\gamma_{peak}} \times 100 \leq 20\%$$

$a_y, \gamma, \gamma_{peak}, t_0$ 는 각각 횡가속도, 요율, 최대요율, 조향입력완료시간을 나타낸다.

초기 속도 80(km/h)에서 NHTSA의 Sine with dwell 조향입력기준(최대 270도)으로 초기값을 설정하여 구해진 최악상황 주행 시나리오를 Fig. 4에 나타냈다.

앞에서 구한 NHTSA Sine with dwell (270도) 조향입력 기준조건에 대한 최악상황 유발 조향입력 시나리오가 스피나아웃 위험성 측면에서 최악상황을 발생시킬 수 있는지 검토하였다. 이때 노면마찰계수는 속도가 감소하는 상황을 고려하여 0.8로 설정하

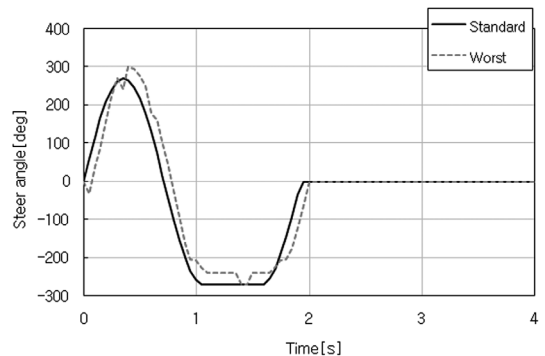


Fig. 4 Reference input (NHTSA Sine with dwell) and its worst case scenario

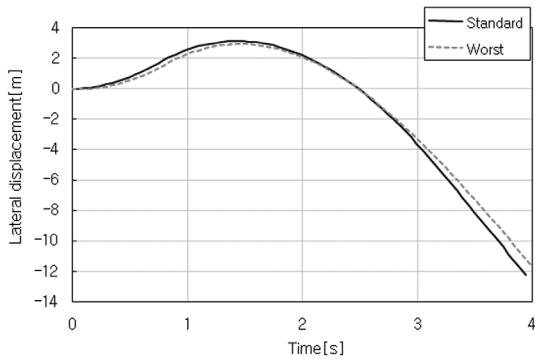


Fig. 5 Lateral displacement simulation results for the reference input (NHTSA Sine with dwell) and its worst case scenario

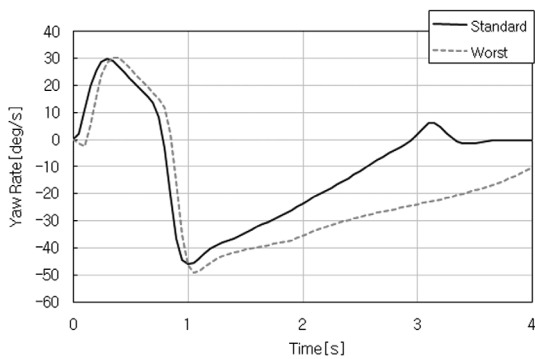


Fig. 6 Yaw rate simulation results for the reference input (NHTSA Sine with dwell) and its worst case scenario

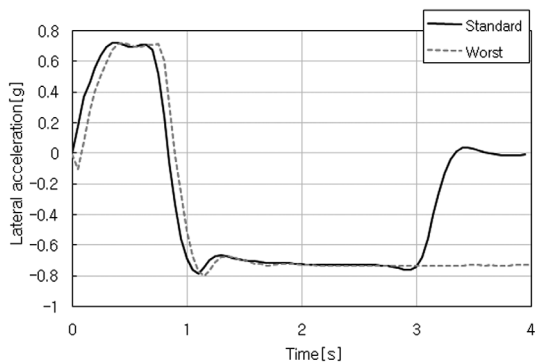


Fig. 7 Lateral acceleration simulation results for the reference input (NHTSA Sine with dwell) and its worst case scenario

였다. Fig. 5 ~ 7와 Table 1에 Sine with dwell (270도) 조향 입력과 최악상황 조향입력에 대한 횡방향 이동량, 요각속도, 횡가속도 그리고 NHTSA에서 제시

Table 1 Maximum values of various performance index

Case	Responsiveness (Understeer)	Lateral Stability (Oversteer)		Remark
	Lateral displacement at steering input 1.07s[m]	Yaw rate ratio at steering out 1.0s after[%]	Yaw rate ratio at steering out 1.75s after[%]	
Criterion	$\geq 1.83$	$\leq 35$	$\leq 20$	
Standard Test	2.71	3.94	0.33	13.73
Worst Test	2.44	48.48	30.92	48.48
Increase(%)	-9.96	1130.46	9269.70	253.10

한 스피나아웃 판단조건을 중심으로 보여준다. Fig. 6 및 Fig. 7에서 보는 바와 같이 최악상황 조향입력에서 스피나아웃현상이 나타나고 있다. 좀더 자세히 살펴보면 Fig. 5, Fig. 6 및 Table 1와 같이 최악조건 결과는 understeer 측면에서는 평가기준을 만족하고 있으나 기존시험방법보다 10%정도 나쁜 조건을 나타냈고, oversteer 측면에서는 평가기준을 만족 못하였으며 기존시험방법보다 조향완료 후 1초 지점에서 11배, 1.75초 지점에서 93배 더 악조건 효과가 나타났다. 여기서 NHTSA의 oversteer 평가기준은 일정지점의 값을 보고 판단하는데 이 경우 요율이 음과 양을 교차하면서 판단지점에 0점이 위치할 경우 효과적인 평가가 이루어지지 못하는 오류가 나타날 수 있다. 이에 본 연구에서는 조향완료 후 1초이후에 요율 비율의 절대값이 최대가 되는 값을 가지고 최악조건을 비교 평가하였고 그 결과 최악조건이 2.5배정도 악조건을 나타내는 것으로 분석되었다.

위의 결과들을 종합하여 보았을 때, 도출된 최악상황 시나리오를 기반으로 ESC를 장착한 차량에서도 기존의 Sine with dwell에 비해 보다 더 불안정한 상황(스피나아웃)을 유도함을 알 수 있다.

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

#### 4. UCC HILS를 이용한 최악상황 시나리오 평가

최근 극한상황 하에서 차량의 안정성을 증대하기 위해 많은 지능형 능동 차시 시스템이 개발되고 있다. 이러한 시스템을 개발하는데 있어서 여러 가지 가상 설계 및 해석 방법이 연구되고 있지만 실제 차

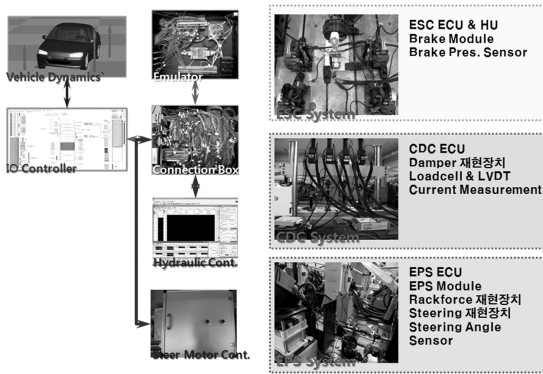


Fig. 8 UCC HILS system configuration

랑 거동과 연계된 지능형 능동 차시 시스템의 응답을 정확히 모사하는 데는 한계를 가지고 있다. 또한 실차를 이용한 시험 평가방법은 동일한 조건 하에서 재현성을 확보하는데 한계를 갖고, 상대적으로 많은 비용이 요구된다. 이러한 한계점들을 극복하기 위해서 가상 해석 기술 및 실차 시험이 결합된 HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation) 기반의 연구가 진행되고 있다.<sup>11)</sup>

본 연구에서 제한한 최악상황 시나리오를 평가하기 위해서 UCC(Unified Chassis Control, 차시통합제어) HILS 시스템을 활용하였다. UCC HILS 시스템은 Fig. 8에 도시된 것처럼 ESC, CDC, EPS 개별 HILS 시스템으로 구성되어 있고, UCC 로직은 ESC ECU에 내장되어 있다. 본 연구에 적용된 UCC 제어 시스템의 제어모드는 ESC/ CDC의 협응 제어모드와 ESC/ EPS의 협응 제어모드로 구성되고, 경우에 따라서 상기 두개의 제어모드가 동시에 구동된다.

UCC HILS 시스템을 이용하여 여러 가지 지능형 능동제어 시스템 작동 시 도출된 최악상황 시나리오의 영향도 평가를 수행하였다. 각 제어시스템에 대한 최악상황 시나리오 영향도 평가를 위해서 Table 2와 같이 각 제어기 별 작동 유무 및 협응제어 모드별로 Sine with Dwell 시험 및 최악상황 시나리오 시험을 실시하였고, Fig. 9에는 각 제어성능별 최악상황 시나리오의 요각속도 비율을 각각 비교한 결과를 도시하고 있다.

ESC 제어성능은 횡방향 안정성에서 도출한 최악상황 시나리오에서 기존시험 방법대비 약7배 정도 더 악화되는 것으로 나타났다. Fig. 10에서 나타난

Table 2 Combination modes of HILS test to evaluate worst case scenario

	EPS	CDC	ESC	UCC
NoCon	X	X	X	X
ESC_Only	X	X	O	X
EPS_ESC	O	X	O	X
ESC_CDC	X	O	O	X
UCC	O	O	O	O

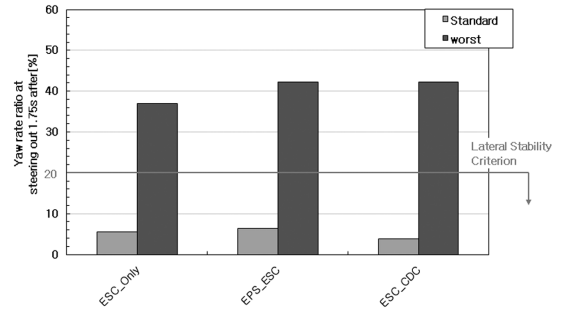


Fig. 9 Yaw rate ratio comparison at steering out 1.75s after [%] (lateral stability criterion)

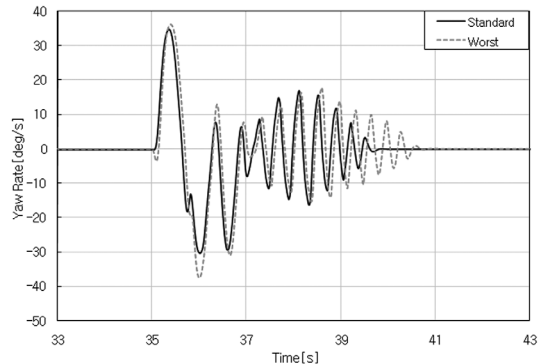


Fig. 10 Yaw rate simulation results for the reference input (NHTSA Sine with dwell) and its worst case scenario in ESC HILS

것과 같이 요율이 안정화되는 시간도 도출한 최악상황에서 1초이상 더 소요되고 있다.

반면 UCC 제어성능은 횡방향 안정성에서 도출한 최악상황에서 기존시험 방법과 유사한 것으로 나타났으며, Fig. 11과 같이 요율이 안정화되는 시간도 도출한 최악상황과 기존시험방법에서 유사하게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 UCC 제어시스템은 최악상황에서 ESC보다 제어성능이 우수함을 알 수 있다.

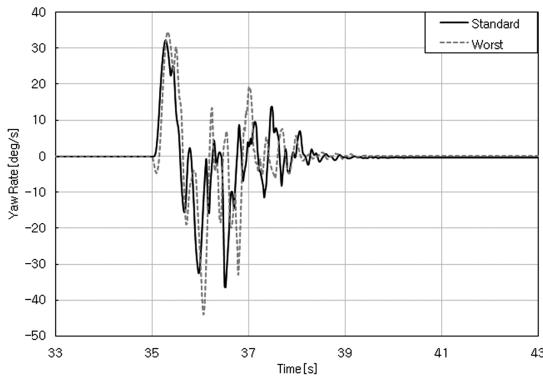


Fig. 11 Yaw rate simulation results for the reference input (NHTSA Sine with dwell) and its worst case scenario in UCC HILS

### 5. 결론

본 논문에서는 기존의 NHTSA 기준의 Sine with dwell 조향입력을 초기 조건으로 새로운 최악상황 조향입력 시나리오를 제시하였고, UCC HILS 시스템을 통해 차량 거동들을 비교 분석하였다.

본 연구 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 차량 횡방향 스핀아웃의 관점에서 제시된 최악 상황 조향입력을 통해 차량의 주행거동이 기존의 조향입력보다 더 악화됨을 확인하였다. 특히 Sine with dwell(270도) 기준 조향입력 조건을 초기값으로 도출된 최악상황 시나리오는 시뮬레이션 상에서 ESC 제어기가 있는 차량에서도 스핀아웃을 유발하였다.
- 2) 시뮬레이션을 통하여 도출한 최악상황 조향입력 시나리오를 UCC HILS 시스템 환경에서 차량의 자세제어성능 평가를 위해 사용하였다. ESC 만 작동했을 때는 횡방향 안정성에서 제시한 최악상황 시나리오가 기존시험보다 약 7 배 악화되었고 UCC 모드에서는 유사하게 나타나는 것을 볼 때 도출한 최악상황 시나리오가 차량 자세제어시스템 성능을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 최악상황 시나리오는 원하지 않는 극한상황을 제어하는 제어 로직의 강건성 및 신뢰성을 평가할 수 있는 방법이 될 수 있으며, 차량거동을 평가하는 새로운 시험 방법의 개발에 중요한 프로

시저로서 활용될 수 있다.

본 연구에서 제시한 최악상황 시나리오는 수많은 최악상황을 재현하는 시나리오중의 하나이며 횡방향 안정성 평가 관점에서 제시됐다. 다양한 주행상황을 고려할 수 있는 시나리오를 찾아내기 위하여 HILS를 기반으로 신뢰성 있는 프로시저 및 최적화 알고리즘에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 미래형자동차기술개발 사업 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 Onroad 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 Edn., New York, 1989.
- 8) S.-J. Yim, Y.-J. Park and Y.-S. Park, "Worst-case Evaluation for Vehicle Dynamics Controller Systems," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.II, pp.656-661, 2004.
- 9) D. Jung, D. Jung, K. Moon, C. Jeong, K. Noh and H. Choi, "Worst Case Scenario Generation on Vehicle Dynamic Stability and Its Application," Transactions of KSAE, Vol.16, No.6,

- pp.1-9, 2008.
- 10) MATLAB/SIMULINK User Manual, <http://www.mathwork.com>
- 11) H.-J. Choi, D.-H. Jung, C.-H. Jeong, K.-H. Noh, S.-H. Lee and J.-Y. Kim, “Development of HILS System for UCC,” Annual Conference Proceedings, KSAE, p.64, 2009.