사용자 주행 환경을 고려한 능동 현가 시스템의 PG 내구 시험 모드 개발

우 종 윤¹⁾ · 이 선 봉^{*2)}

대구경북자동차부품진흥재단 시험평가팀¹⁾ · 계명대학교 기계자동차공학과²⁾

Development of Proving Ground Test Mode for Durability Test of Active Suspension System

Jongwoon Woo¹⁾ · Seonbong Lee^{*2)}

¹⁾Test & Evaluation Team, Daegu-Gyeongbuk Automotive Parts Foundation, 2800 Dalgubeoldaero, Daeseo-gu, Daegu 704-701, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
(Received 25 October 2012 / Revised 23 January 2013 / Accepted 26 April 2013)

Abstract : It is important that proving ground damage is correlated with target customer usage. This paper describes the test mode for durability test of active suspension control system for proving ground correlation and optimization. Acceleration, strain, wheel force and other types of data are collected on a vehicle as it traverses different proving ground surfaces. The primary objective of the analysis is to determine which mixture of proving ground surfaces offers the best representation of customer usage while minimizing the total test time. And durability testing offers the best way to assess the capability of a product to reach its reliability target. The test should be representative of the real environmental load and replicate the same customer usage.

Key words : Active suspension system(능동현가시스템), Proving ground test(주행시험), Durability test(내구시험), Accelerated test(가속시험), Fatigue damage(피로손상)

1. 서 론

최근 차량 성능의 고급화에 따른 승차감과 조종성, 안전성을 높여주는 다양한 기술들이 연구 중에 있다. 이러한 고성능 차량에서 적용되는 기술 중의 하나인 능동현가시스템(active suspension system)은 많이 보편화 되고 있으며, 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

현재 개발 되는 주요 기술로는 반능동현가방식의 EDC(Electronic Damper Control)와 전자식 댐퍼 방식의 CES(Computerized Electronic Suspension), CDC(Continuous Damping Control), 능동형 현가 방식의 ABC(Active Body Control), ARC(Active Roll, Control), AGCS

(Active Geometry Suspension Geometry) 등이 있다.

최근에 제안되는 새로운 설계 기술과 제어 시스템의 동향은 현가시스템(suspension system)을 구성하는 각각의 제어시스템(sub-system)들을 통합 제어하는 통합현가제어시스템(integrated suspension control system)으로 발전하고 있으며, 현가시스템뿐만 아니라 새시시스템(chassis system)을 구성하는 주요 개별시스템들을 통합 제어하는 새시 통합 제어시스템(integrated chassis control system)으로 연구개발이 진행되고 있다.

이러한 능동현가시스템이 장착되어 있는 차량의 승차감과 조종성, 안전성을 향상시키는 성능평가방법들이 연구^{1,2)}되어 왔으며, 최근 내구성을 검증하는 방법으로는 내구수명에 영향을 미치는 하중을

*Corresponding author, E-mail: seonbong@kmu.ac.kr

동역학 해석과 다물체 동역학 차량 모델을 이용하는 가상시험기술^{3,4)}이 연구되고 있다.

그럼에도 불구하고 이러한 시스템은 사용자 주행 환경을 고려한 내구 평가가 상대적으로 미약하여 관련 기술개발이 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 능동현가시스템의 동작부와 노면하중에 대한 실 사용자 조건과 PG(Proving Ground) 노면의 상대적인 손상도를 비교하여 내구 시험모드를 개발하는 새로운 연구를 진행하였다.

2. 능동현가시스템(Active Suspension System)

능동현가시스템은 Fig. 1과 같이 차량 속도와 조향각으로부터 주행상황을 ECU에서 판단하여 액추에이터(actuator)를 제어함으로써 최적의 주행안정성 및 승차감을 향상시켜주는 시스템이다.

Fig. 1 Active suspension system layout

이러한 능동현가시스템을 온/오프(on/off)로 비교해보면 롤 각(roll angle), 요 모멘트(yaw rate), 횡 슬립각(side slip angle)이 개선되는 것을 알 수 있다. 전반적으로 고속 직진주행이나 저속 선회에서는 범프(bump) 토우(toe)의 크기를 작게 하여 직진성을 향상시키며, 차체의 롤 거동이 수반되는 고속 선회에서와 횡풍 혹은 급조향에 의한 고 횡가속도 발생에는 범프 토우의 크기를 크게 제어하여 언더스티어(understeer) 경향을 증대시켜 한계 선회안정성을 향상시키는 시스템이다.^{5,6)}

3. 사용자 주행 환경 계측 및 분석

일반적으로 자동차 부품의 신뢰성은 고장 없이 초기의 기능과 성능을 만족시키면서 사용할 수 있는 기간을 평가 대상으로 하고 있으며 실제 사용자 조건에서 통계적 기법을 이용하여 목표하는 신뢰도와 신뢰수준을 만족할 수 있도록 반드시 검증해야 한다. 이러한 시험 중에 내구성을 평가하는 시험방법은 실사용자 조건을 고려한 내구시험모드(mode) 개발이 가장 중요하다.

자동차부품의 내구 조건은 실사용 조건에 근사할수록 재현성이 높으므로 실차 주행시험에서의 데이터 측정 기술과 이를 처리하는 신호 분석 기술이 필수적이다.

차량은 주행할 때 발생하는 여러 형태의 랜덤(random) 하중을 받으므로 이러한 랜덤 하중을 건널 수 있는 강성 설계는 필수적이다. 이렇게 부하되는 하중은 실제 측정된 하중 이력을 통하여 등가의 손상을 부여할 수 있는 등가의 일정진폭 하중으로 나타나고, 이를 이용하여 부품의 내구 수명을 평가하게 된다.

최근에는 실제도로 주행 중에 발생하는 하중이력을 측정하여 이를 기초로 대표되는 하중 이력을 설정하고 짧은 시간 내 내구성능을 시험하고 평가할 수 있는 모듈 및 부품단위의 가속내구시험을 이용하여 더 정확한 내구 성능과 설계 시행착오를 최소화할 수 있는 내구 시험 방법을 사용하고 있다.

가속 내구시험은 부품에 작용하는 하중 이력을 측정하기 위해 실차 주행시험이 필요하며 여러 가지 특수로를 조합한 종합로 내구시험과 대표성을 갖는 특수로를 반복하여 주행하는 극악로 내구시험인 가속 주행 내구시험 등의 방법으로 짧은 시간 내 내구성능을 시험하고 평가할 수 있는 내구 시험 방법을 사용하고 있다. 이 방법을 사용하여 내구 시험을 수행할 경우 차량에 가해지는 피로 손상도(fatigue damage)는 실제로 차량이 사용 중에 받는 피로도도와 동등한 수준이어야 하며, 부품에 있어서도 부품이 사용 중에 받는 하중 조건과 동등한 조건으로 내구 시험모드를 구성하고 이를 바탕으로 가속 내구시험을 수행하여 차량 및 부품의 내구성을 평가한다.

내구 목표하중이란 차량이 목표수명 또는 목표주

행거리를 다할 때까지 일반도로를 주행하는 누적 하중을 의미한다. 본 연구에서는 일반 도로에 대한 내구 목표하중과 등가 손상도를 갖는 가속 내구로 조합 모드를 개발했다.

이러한 조합 모드의 개발에서 정확한 도로 하중을 비교하기 위해서 각 부품의 위치에서 발생하는 응력이나 변형률을 측정하여 실제도로에서 얻은 손상도(damage)와 특수로의 조합에서 얻은 손상도를 사용하여 이 값이 서로 같을 때의 거리비율을 가속도로 한다. 이때 각각의 손상도는 변형률 수명선도(strain-life curve)나 응력 수명선도(stress-life curve)에 의한 Miner 법칙을 기초로 누적손상 D와 파손수명 N을 적용하여 구한다.⁷⁻⁹⁾

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad N = \frac{1}{\sum_i \frac{n_i}{N_i}} \quad (1)$$

where

D : cumulative damage

n_i : the number of cycles accumulated at stress S_i

N : number of cycles required to fail at the same load level as n

식 (1)의 누적손상이론에서 D가 1에 도달하면 파손된다는 것을 의미한다. 여기서 N_i 는 응력크기 S_i 에서의 피로수명을 나타내며, n_i 는 응력크기 S_i 에서의 반복수를 나타낸다.

3.1 사용자 주행 조건 계측 시스템 구성

사용자 주행 조건 계측을 위한 시스템 구성안은 아래 Fig. 2와 같다. PG 주행 하중 계측 시스템의 구성은 크게 휠에 동적 하중 및 모멘트를 측정할 수 있는 WFT(Wheel Force Transducer), 주행 중에 발생하는 assist link부와 rear spring 응력을 계측하기 위해 스트레인게이지(strain gage), 차량 속도 및 위치 정보를 위해 GPS, 내구 시험 전·후 차량 동특성 측정을 위한 Inertial & GPS measurement system, 각종 센서로부터 데이터 수집을 위한 DAQ(Data Acquisition System)으로 구성했다.

DAQ 시스템은 64channel, 10kHz sample rates를 가지는 데이터 수집부와 피로 해석을 위한 데이터 처리부로 나눌 수 있다. 신호처리는 HBM사의 nCode GlyphWorks를 사용하여 분석하였다.

3.2 부품 센서화 및 Calibration

주행 중 능동현가시스템의 변형량을 측정하는 방법은 스트레인 게이지를 이용하여 센서화된 현가 스프링을 이용한다. 현가 스프링 표면에 스트레인 게이지를 부착하여 스프링의 변형과 스트레인 게이지 출력값 사이의 관계성을 calibration 시험을 통해 찾음으로써 스프링을 센서화한다. 실차 내구 시험 시 rear spring에 가해지는 차량 z방향의 응력 및 변위 계측을 위해 스트레인게이지(strain gage)를 부착하여 Fig. 3과 같이 계측하였다. 또한, assist link의 하

Fig. 2 Diagram of test environment

Fig. 3 Detail view of strain gauges on suspension system

중을 측정하기 위해 스트레인 게이지를 휘스톤 브릿지 회로(wheatstone bridge circuit)로 구성하여 인장(tension(+), 압축(compression(-))을 측정할 수 tensile cell을 제작하여 Fig. 3과 같이 계측하였다.

3.3 일반 도로 실차 하중 데이터 수집 및 분석

세계적으로 각 나라마다 도로의 사용 빈도와 사용량, 포장률에 따라 도로 사정이 다르기 때문에 지역에 따라 도로 특성별 사용 비율에 차이가 있다. 따라서 대표적인 도로 특성을 정의하기 위하여 서로 다른 구성을 가진 operating profile을 가지고 있으며 이를 토대로 목표 내구 하중을 설정하고 있다. 실제 자동차는 사용되는 동안 고속도로, 일반도로, 지방도, 시내도로와 같이 다양한 종류의 도로를 주행하게 되며, 실제 부품에 작용하는 하중이 노면 종류에 따라 상이하게 나타난다. 또한, 이러한 사용자조건 계측은 내구 하중 조건을 설계할 때 매우 중요하다.

유럽지역 완성차 업체와 부품업체의 하중 표준화 작업을 위한 협의체인 CARLOS(CAR Loading Standard)에서도 유럽지역의 operating profile을 Table 1과 같이 제시하고 있다.

현재 국내에서 자동차가 사용하는 도로는 주행성능 및 관리 등급에 따라 크게 고속도로, 국도, 지방도, 시내도로로 나눌 수 있다. 이러한 유럽의 operating profile 바탕으로 국내의 실정을 감안하여 operating profile을 구성하였다. 따라서 도로에 특성에 따라 차체에 입력되는 노면 하중을 구분하기 위해 앞서

Table 1 Operating profile of CARLOS

도로구분	고속도로	비포장	시내	국도	지방도
구성비율(%)	30.0	4.0	23.0	29.0	14.0

Fig. 4 Driving path for road load data acquisition

구분된 도로 유형별로 전체 약 100km에 대하여 Fig. 4와 같이 노면 하중을 계측하였다.

Fig. 5는 고속도로, 국도, 지방도, 시내도로로 rear spring부와 assist link부를 시간이력데이터(time history data)로 계측되었다.

고속도로, 국도, 지방도, 시내도로의 특성에 따라 rear spring부와 assist link부를 시간이력데이터로 계측하여 상대손상도 스펙트럼(Relative Damage Spectrum, RDS) 기능을 사용하여 각 도로별로 손상도를 분석하였다. 각 도로별 rear spring, assist link의 손상도 비교 결과는 Fig. 6과 같다.

3.4 PG 주행 하중 계측 및 평가

3.4.1 PG 주행 하중 평가

PG에서 다양한 노면 조건에 따른 노면 하중(F_x , F_y , F_z) 및 모멘트(M_x , M_y , M_z) 계측을 위해 WFT를 장착 후 각각의 시험로별(belgian, chuck hole, cobble stone, rough road, washboard)로 Fig. 7과 같이 계측하였다.

3.4.2 WFT vs Assist Link 상관관계분석

휠에서 전달되는 노면 하중(F_x , F_y , F_z) 및 모멘트(M_x , M_y , M_z) 입력 값들이 능동현가시스템의 작동

Fig. 5 Measured time history data

Fig. 6 Damage summary for rear spring & assist link

Fig. 7 Measured time history data of PG

부인 assist link에 가장 많은 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해서 상관관계 분석을 수행하였다. 상관계수는 다음 식에 의해 얻을 수 있다.¹⁰⁾

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

where

r : correlation coefficient

x : the mean of the x_i s

y : the mean of the y_i s

Fig. 8은 WFT Fy와 assist link부의 산포도를 나타낸다. WFT에서 나온 하중 신호 중 가장 큰 손상도는 Fz방향으로 분석되었지만, Table 2와 같이 상관관계 분석 결과 WFT의 Fy방향과 assist link의 손상도 상관관계가 0.72로 가장 높다는 것을 알 수 있다.

이러한 상관관계분석을 바탕으로 주파수 특성을 확인할 필요가 있다. WFT와 assist link의 주파수 특성을 분석 결과 Fig. 9와 같다.

주파수 특성 분석 결과 WFT의 Fy 성분과 assist link의 주파수 응답이 유사하여 동적인 거동이 같음을 알 수 있다.

Fig. 8 Scatter plot, WFT vs Assist link

Table 2 Correlation coefficient

구분	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
상관계수 (%)	0.14	0.72	0.44	0.27	0.00	0.32

Fig. 9 Analysis of the frequency spectrum

4. 최적화로 인한 PG 시험모드개발

PG 시험 모드의 최적화 하는 목적은 기존의 방식은 필드데이터(field data)에서 빈도가 낮으나 손상도의 크기가 큰 응력이 존재하여 전체를 덮어 너무 가혹한 결과가 되는 문제점이 되어 왔다. PG최적화 기법을 이용하여 사용자 조건과 PG노면의 주파수 특성을 고려하여 원본 필드데이터와 피로손상도 관점에서 동등한 가속내구시험을 보장하는 게 목적이다.

따라서, 일반적으로에서의 사용자 주행조건 계측 데이터와 PG의 각 노면별 데이터의 상대 손상도(relative damage)를 계산하여 손상도 증가를 통해 상관 관계를 수행하였으며, 이러한 PG 시험 모드의 최적화 하는 방법은 아래 Fig. 10과 같은 식에 의해 얻을 수 있다.¹¹⁾ 이러한 최적화 알고리즘은 선형제약(linear constraint) 조건을 가정하여 상관분석을 진행하였다.

이러한 PG 최적화 분석법을 사용하여 가장 최적화된 능동현가시스템의 내구모드는 Fig. 11과 같다.

Table 3과 같이 이러한 PG최적화 분석결과 일반적으로 100km에 해당하는 PG의 반복횟수는 벨지안로 30회, 빨래판로 28회의 조합으로 결과가 도출되었으며, 이때의 손상도 유지비율은 86.47%로 나왔다.

Table 3 Field to PG correlation results

TestName	Number of Repeats	Total Contribution	Total damage retention
RDS_belgian	30	30.47	86.47% (total test sum 293,142 / total target sum 339,008)
RDS_chuck holes	0	0	
RDS_cobble stone	0	0	
RDS_rough road	0	0	
RDS_washboard	28	69.53

Fig. 10 Linear matrix representation of the optimization problem

Fig. 11 PG optimization

5. 결론

본 연구에서는 능동현가시스템에 대한 일반도로 사용자 조건계측과 각 도로별 손상도를 비교하였고, PG 주행하중을 통해 각 노면별 손상도를 비교 분석하였다. 이러한 일반도로 및 PG 상대손상도를 분석을 통해 PG 최적화 알고리즘을 통하여 일반 사용자 주행조건과 거의 유사한 상대손상도를 가지는 PG 내구시험모드를 개발하였고, 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 능동현가시스템의 휠 하중에서 계측된 F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z 신호와 assist link부의 손상도의 상관성 분석결과 F_y 방향과 상관성이 제일 높은 것으로 확인할 수 있었고, 주파수 특성도 같은 결과를 얻었다.
- 2) 일반도로와 PG 데이터를 주파수를 고려한 상대 손상도를 계산하여 상관관계 분석결과 일반도로의 86.5%정도의 상대 손상도를 가진 벨지안로와 빨래판로의 조합에 의하여 PG 모드를 구성할 수 있었다.
- 3) 향후 이러한 최적화 기법을 이용하여 국내PG와 해외PG의 상관 분석을 통해 동등한 손상도를 가진 시험로 조합으로도 개발이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지능형자동차 상용화 연구기반구축사업 “지오메트리 능동제어 시스템 신뢰성 평가 기술 개발”의 연구지원으로 수행되었습니다. (과제번호: 10036654)

References

- 1) S. Lee, H. Sung, J. Kim and U. Lee, "Investigation on the SUV Rollover Performance by the AGCS System," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.660-664, 2006.
- 2) M. A. Eltantawie, "Decentralized Neuro-fuzzy Control for Half Car with Semi-active Suspension System," Int. J. Automotive Technology, Vol.13, No.3, pp.423-431, 2012.
- 3) I. H. Kim, I. H. Kim and S. J. Heo, "Durability Load Prediction of Active Suspension using ED-VPG Combination Method," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.900-904, 2011.
- 4) S. Son and S. J. Heo "Virtual Durability Test Procedures and Applications on Design of a Vehicle Suspension Module," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.144-150, 2003.
- 5) S. Lee, H. Sung, J. Kim and U. Lee., "The Development of Active Geometry Control Suspension (AGCS) System," SAE 2005-01-1927,

- 2005.
- 6) S. Lee, H. Sung, J. Kim and U. Lee, "A Study on the Enhancement of Vehicle Stability by Active Geometry Control Suspension (AGCS) System," 13th IPC, 2005.
 - 7) A. S. R. Murty, U. C. Gupta and A. Radha, "A New Approach to Fatigue Strength Distribution for Fatigue Reliability Evaluation," Int. J. Fatigue, Vol.17, No.2, pp.85-89, 1995.
 - 8) A. S. R. Murty, U. C. Gupta and A. Radha, "On the Prediction of P-S-N Curves of 45steel Notched Elements and Probability Distribution of Fatigue Life under Variable Amplitude Loading from Tensile Properties," Int. J. Fatigue, Vol.17, No.2, pp.85-89, 1995.
 - 9) M. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue," J. Appl. Mech., Vol.12, pp.159-164, 1945.
 - 10) W. B. Pearson, A Handbook of Lattice Spacings and Structure of Metals and Alloys, Vol.2, Pergamon Press, London, 1958.
 - 11) A. Halfpenny and M. Pompetzki, "Proving Ground Optimization and Damage Correlation with Customer Usage," SAE 2011-01-0484, pp.620-631, 2011.