

## 3축 로드 시뮬레이터 개발 Development of 3-Axis Road Simulator

최경락 · 전승배 · 황성호

G. R. Choi, S. B. Jeon and S. H. Hwang

### 1. 서 론

새로운 자동차나 부품을 개발, 상용화하는데 있어 중요한 요소인 내구 안정성에 대한 검증은 많은 경우 실제 프로토타입의 차량을 제작한 후 내구 도로의 주행 시험을 통하여 이루어지고 있다. 일반적으로 새로운 차량의 개발을 위하여 30~50대 정도의 실차 시험을 수행하고 있으며 시험기간 또한 20개월 정도로, 차량 개발 프로세스 중 가장 중요한 부분을 차지한다. 그러나 이러한 방법은 많은 비용과 개발 기간을 필요로 하며, 따라서 이것에 대한 대체 방법으로 실험실에서의 로드 시뮬레이터를 이용한 시험이 점차 보편화되고 있는 실정이다.

로드 시뮬레이터는 1960년대에 처음 사용되었는데, 오늘날 전차량 로드 시뮬레이터는 승용차는 물론 오토바이로부터 대형 농업용 차량까지 다양한 크기의 차량 시편에 동시에 20개의 동적 입력 신호를 발생시켜 사용할 수 있다.<sup>1)</sup>

이러한 로드 시뮬레이터는 차량 내구로 주행 시험과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 시험 시간이 일반적으로 차량 주행 시험에 요구되는 시간의 1/4 정도만이 소요된다.
- 실차 시험보다 더 다양한 조건의 제어 입력이 가능하며, 시험에 대한 반복 재현성이 뛰어나다.
- 부품 시편에 대하여 동적으로 작동되는 데이터를 훨씬 편리하게 수집할 수 있다.
- 일반적으로 차량 주행시험보다 비용측면에서 훨씬 더 경제적이다.
- 검증되지 않은 부품에 대한 주행 시험시 발생될 수 있는 안전사고의 위험성이 적다.

이렇듯 많은 장점을 갖고 있는 시뮬레이터를 이용하는 것에 대한 전제 조건은 실제 주행 상황을 시뮬레이터가 얼마나 정확히 재현시켜 주는가에 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 노력으로 시뮬레이터의 구조물 설계에 대한 개선 작업과 함께 노면 신

호를 정확히 재현해 주기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 오늘날 자동차 부품 내구 시험을 위해서는 스피들이 연계된 로드 시뮬레이터(spindle-coupled road simulator)가 많이 이용되고 있는데, 이것은 자동차의 내구 안정성 평가를 위하여 표준화된 실차 내구 주행 도로를 시험실에서 구현 할 수 있는 시험 장비이다. 이 로드 시뮬레이터는 자동차가 지면 상태 및 운전조건에 따라 내구 도로 주행시 받는 휠(wheel)의 하중특성을 수집한 후, 실험실내에서 유압 장치와 제어시스템에 의해 실제와 동일한 3축 방향으로의 하중특성을 부여함으로써 자동차의 내구성 평가를 수행할 수 있도록 하는 시스템이다. 이러한 시험 조건을 재현시키기 위해서 로드 시뮬레이터는 각 축별로 연성작용(coupled motion)이 적어야 하며, 진동과 피로하중에 견딜 수 있는 구조를 가져야 한다.<sup>2)</sup>

본 해설에서는 각 축별 연성 작용이 최소화될 수 있는 3축 로드 시뮬레이터에 대한 기구 설계 사례를 소개한다. 이 시뮬레이터에는 보다 정확한 도로면 가진 성능을 구현시킬 수 있도록 반복제어 알고리즘(iteration control algorithm)을 통한 노면 형상 재현 알고리즘을 탑재하였다. 본 해설기사에서 소개한 내용은 국내 독자 기술로 3축 로드 시뮬레이터를 개발하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

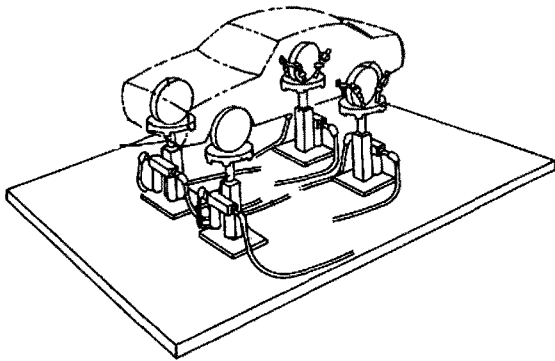
### 2. 로드 시뮬레이터 구성

#### 2.1 전차량 로드 시뮬레이터

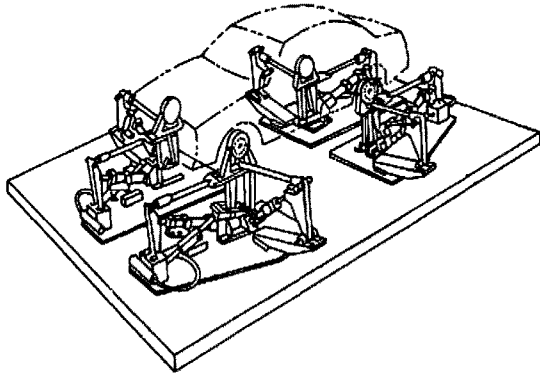
전차량 로드 시뮬레이터는 일반적으로 그림 1과 같이 두 가지 형태의 구성을 갖는다.<sup>2)</sup>

일명 4-포스터(4-posters)라고 불리는 타이어 연계 로드 시뮬레이터(tire-coupled road simulator)는 차량의 타이어 각각에 포스터가 설치되어 차체와 차량 부품의 구조적 내구 시험에 사용된다. 그러나 이 방식은 종방향, 횡방향 하중 및 제동 토크를 재현할 수 없다는 단점을 갖는다. 반면, 스피들 연계 로드 시뮬레이터(spindle-coupled road simulator)는 각각의 차량 스피들에 3~5가지 힘과 모멘트를 재현할 수 있어

차량 부품의 완전한 내구 시험이 가능하다. 따라서 구조가 복잡하고, 비용이 비싸다는 단점에도 불구하고, 내부 파워트레인 부품을 제외한 차량 부품의 내구 시험에 점차 그 활용도가 높아지는 추세이다.<sup>3~5)</sup>



(a) 4-poster tire-coupled road simulator



(b) spindle-coupled road simulator  
그림 1 Full-vehicle road simulators

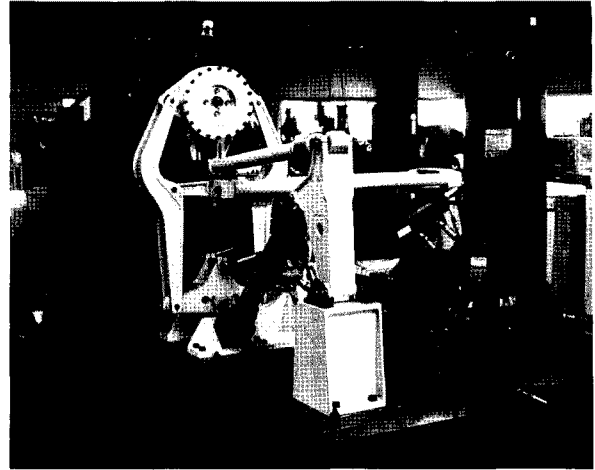


그림 2 Developed road simulator (JKS model)

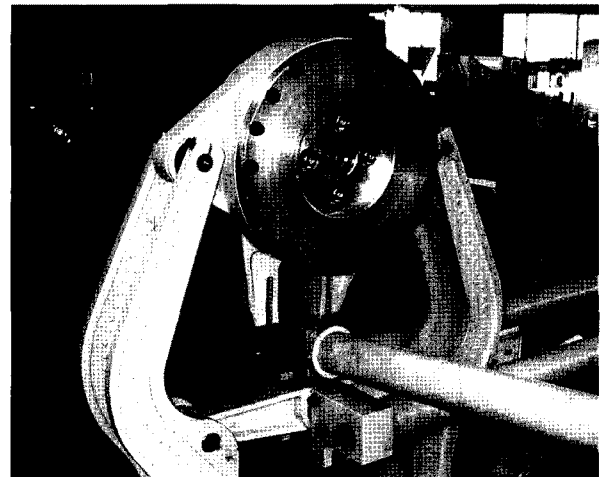


그림 3 Wheel adapter housing

## 2.2 기구 구조물 구성

본 해설에서 소개하는 로드 시뮬레이터에서는 스피들-연계 로드 시뮬레이터를 대상으로 하여 기구학적 링크 메커니즘을 설계하고, 노면 형상 재현을 위한 제어 알고리즘을 개발하였다. 그림 2는 개발된 로드 시뮬레이터의 전체적인 모습을 보여준다.

### 2.2.1 휠 장착 하우징부

휠 장착 하우징(wheel adapter housing)부는 수직운동 제어용 스트럿(vertical control strut)과 고무 부시로 연결되어 있으며, 고무 부시의 안쪽 파이프 내에 롤러 베어링으로 지지되어 있다. 또한, 허브부와 볼트로 체결할 수 있게 되어 있으며, 허브-볼트 장착 직경의 변경에 따라 허브를 교체하면서 시험이 가능하도록 구성되어 있다.

### 2.2.2 교차 링크부

교차 링크부(cross link)는 수직운동 제어용 스트럿을 중간에서 연결하는 부분으로 내부는 고무 부시와 베어링으로 지지되며, 이의 중앙에 종방향 로딩바(longitudinal loading bar)가 연결되어 있다.

### 2.2.3 수직축 벨 크랭크

수직운동 제어용 스트럿의 하부는 수직축 벨 크랭크와 부시 베어링으로 양쪽이 지지되어 있다. 수직축 벨 크랭크는 수직축 링크(vertical link)와 부시 베어링으로 연결, 지지되어 있으며, 수직축 링크의 수평운동은 이 벨 크랭크에 의해 수직방향으로 변환되어 수직운동 제어용 스트럿을 통해 휠에 수직방향 운동으로 전달하게 된다. 또한, 비틀림 없이 수직방향의 운동 재현을 위하여 추가적인 링크가 위 부분에 좌우로 설치되어 있다.

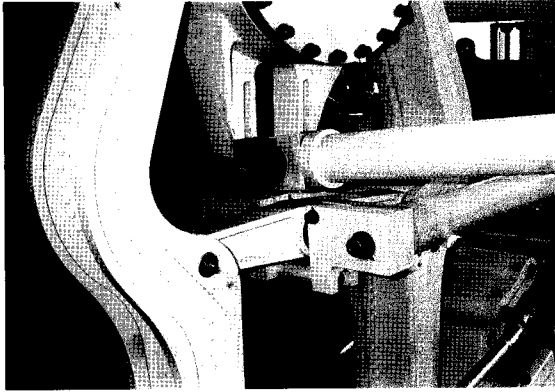


그림 4 Cross link

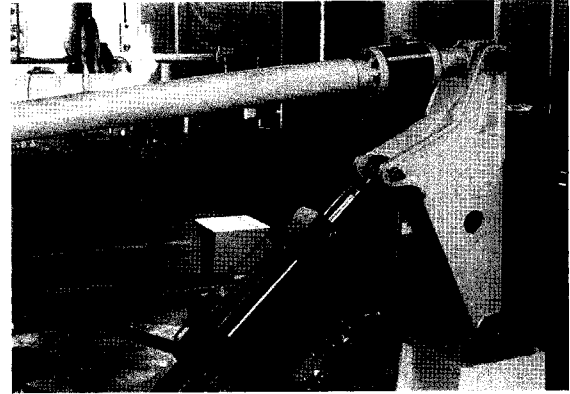


그림 6 Lateral bell crank & loading bar

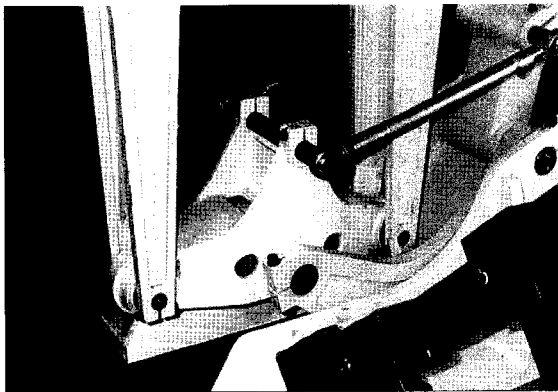


그림 5 Vertical bell crank

그림 7은 로드 시뮬레이터의 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 유압 서보 액추에이터, 벨 크랭크와 링크들로 구성된 구조물에 각종 센서와 앰프들을 거쳐 PC에서 신호처리 보드(digital signal processor board)를 통해 제어와 신호 입출력을 담당하게 된다.

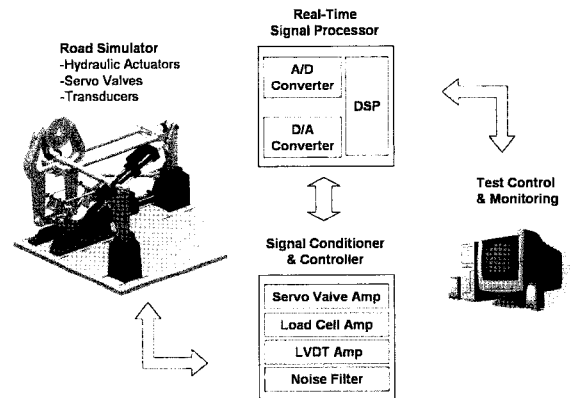


그림 7 System layout of road simulator

#### 2.2.4 로딩바 연결부

횡방향 로딩바(lateral loading bar)는 휠 장착 하우징 아래쪽 브라켓에 장착되어 부시의 변화에 따라 하중이 가해지게 되며, 종방향 로딩바는 교차 링크부에 장착되어 움직인다. 수직방향 운동에 따라 횡방향 로딩바와 종방향 로딩바의 움직임이 서로 비연성화(uncoupled)되도록 링크 구조를 설계하는 것이 중요하다.

#### 2.3 제어 시스템 구성

일반적으로 로드 시뮬레이터는 응답 시뮬레이션(response simulation)의 원리를 기본으로 한다. 즉, 차량에 주어지는 특정한 입력보다는 목표로 하는 차량 응답을 재현하도록 시뮬레이터를 제어한다. 전형적인 응답 시뮬레이션은 시편이 결합된 시뮬레이터 시스템의 역동역학(inverse dynamics)을 나타내는 MIMO 제어 모델을 이용하여 수행하게 된다.

이러한 제어 방법에는 대부분 시험 시스템의 역동역학을 추정하기 위하여 실험에 의한 선형 모델을 이용하는데, 그 모델은 대개 주파수 영역에서의 전달 함수이다.

### 3. 노면 형상 재현 시뮬레이션

#### 3.1 노면형상 재현 알고리즘

그림 8은 기준 신호로부터 시험기에 입력되는 내구 시험 신호를 만드는 제어 흐름도를 보여준다.

그림에서와 같이 실차 신호를 편집하여 얻은 기준 신호와 재현 프로그램을 이용하여 시험 신호를 만든다. 이 신호를 이용하여 시험하고자 하는 부품에 대한 시험을 수행하며, 이때 실차 시험에서 측정하였던 기준 신호를 다시 측정한다. 실험실에서 측정한 신호와 실차 시험의 신호를 가지고 재현성을 평가하여 재현성이 만족되지 않으면 시험 신호를 수정한다. 수정된 시험 신호를 이용하여 재현성이 만족될 때까지 이와 같은 수정 작업을 계속 한다.

입력 신호와 출력 신호의 벡터  $x(t)$ ,  $y(t)$ 와 이의 선형 스펙트럼  $X(f)$ ,  $Y(f)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} x(t) &= [x_1, x_2, \dots, x_q]^T \\ y(t) &= [y_1, y_2, \dots, y_q]^T \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} X &= [X_1, X_2, \dots, X_q]^T \\ Y &= [Y_1, Y_2, \dots, Y_q]^T \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X_i &= X_i(f) = F[x_i(t)], i = 1, 2, \dots, q \\ Y_i &= Y_i(f) = F[y_i(t)], i = 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (3)$$

자기 스펙트럼을  $G_{XX}(f)$ ,  $G_{YY}(f)$ , 상호 스펙트럼을  $G_{XY}(f)$ ,  $G_{YX}(f)$ 라 하면 이는 다음과 같이 구할 수 있으며,

$$\begin{aligned} G_{XX} &= \frac{2}{T} E[ X^* X^T ] \\ G_{YY} &= \frac{2}{T} E[ Y^* Y^T ] \\ G_{XY} &= \frac{2}{T} E[ X^* Y^T ] \\ G_{YX} &= \frac{2}{T} E[ Y^* X^T ] \end{aligned} \quad (4)$$

시스템의 응답함수는  $H_{XY}(f)$ 라 정의하면 다음과 같다.

$$H_{XY} = H_{XY}(f) = \begin{bmatrix} H_{1y_1} & H_{1y_2} & \dots & H_{1y_q} \\ H_{2y_1} & H_{2y_2} & \dots & H_{2y_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{qy_1} & H_{qy_2} & \dots & H_{qy_q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때, X, Y, H의 관계는

$$Y = H_{XY}^T \cdot X \quad (6)$$

이며,  $H_{XY}$ 는

$$H_{XY} = G_{XX}^{-1} G_{XY} = G_{YX}^{-1} G_{YY} \quad (7)$$

로 구할 수 있다.

실차 시험에서 측정된 신호로부터 만들어진 기준 신호를  $y_d(t)$ 라 하고,  $k$ 번째 반복 시험에 사용한 시험 신호를  $x_k(t)$ , 측정 신호를  $y_k(t)$ 라 하였을 때,  $y_d(t)$ 와  $y_k(t)$ 가 차이가 있어 수정해야 하는 경우 다음 단계에서 수정될  $\Delta y_{dk}(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta y_{dk}(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (8)$$

이로부터 주파수 응답함수를 이용하면 수정된 다음 단계의 입력신호  $x_{k+1}(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>6,7)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta Y_{dk}(f) &= F[\Delta y_{dk}(t)] \\ \Delta x_k(f) &= H_{XYk}^{-T}(f) \Delta Y_{dk}(f) \\ x_{k+1}(t) &= x_k(t) + \Delta x_k(t) \\ k &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.2 컴퓨터 시뮬레이션

노면형상 재현 알고리즘의 검증은 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 시스템의 모델링을 수행하였는데, 실험 결과와의 비교를 통해 시스템 모델을 결정하였다. 대상으로 한 모델은 z축에 대한 모델로서, 2차 시스템과 1차 시간 지연 요소가 결합된 시스템으로 모델링하였다. 2차 시스템의 고유진동수는 20Hz, 감쇠비는 0.6으로 설정하였으며, 1차 시간 지연 요소의 시상수는 0.02sec로 하였다. 모델의 전달함수는 식 (10)과 같다.

$$G(s) = \frac{1}{\tau_d s + 1} \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

시뮬레이션의 입력 조건은 벨지언 로드(Belgian road)를 기준으로 하였다. 그림 9는 입력 데이터의 형상을 보여준다.

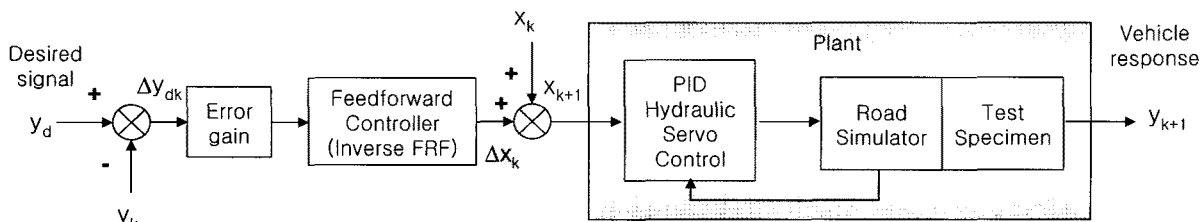


그림 8 Simulator control method

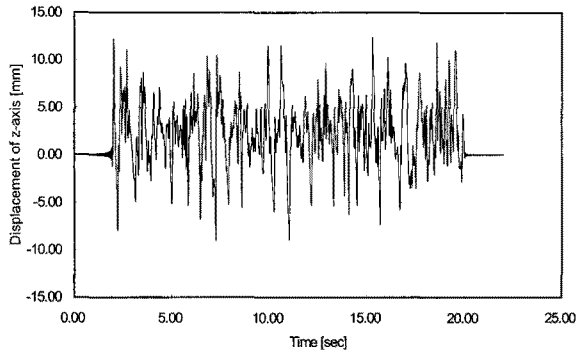


그림 9 Road input data (Belgian road)

벨지언 로드(Belgian road) 입력에 대한 시뮬레이션 모델 출력과 실험 결과를 그림 10에 나타내었다.

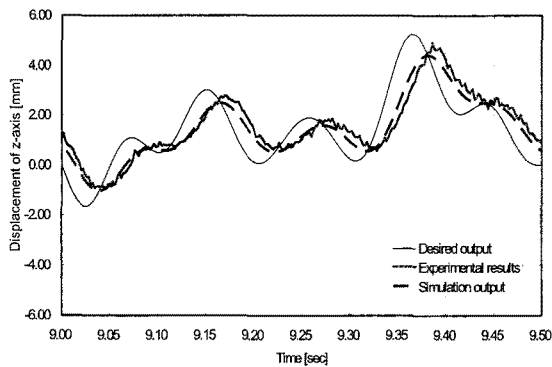


그림 10 Comparison simulation results with experimental results

식 (10)의 모델에 대하여 3.1절의 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 반복회수에 따른 시뮬레이션 결과로부터 1회 이상 반복 알고리즘(iteration algorithm)을 적용하면 요구되는 출력 결과에 근접하게 로드 시뮬레이터 액추에이터를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그림 11은 1회부터 5회까지 반복 알고리즘을 적용하였을 때의 출력 결과를 보여준다.

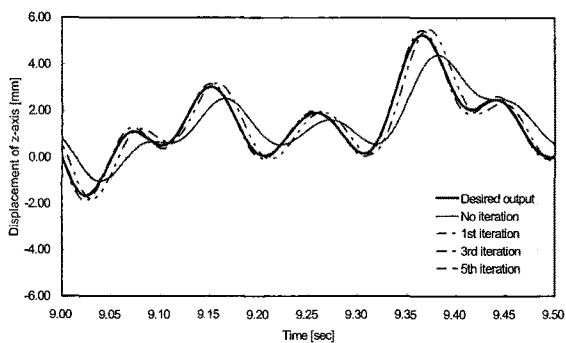


그림 11 Simulation results applying iteration algorithm

그림 12는 반복 알고리즘의 반복회수에 따른 오차의 RMS 값을 나타낸 것이다.

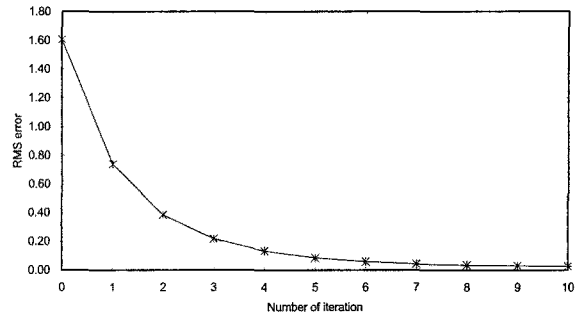


그림 12 RMS errors according to number of iteration

### 3.3 실험 결과

개발된 3축 로드 시뮬레이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 13은 z축에 대하여 벨지언 로드 입력을 가했을 때의 결과를 보여준다. 시뮬레이션에서와 마찬가지로 1회 이상 반복 알고리즘을 적용하면 요구되는 출력에 대한 오차가 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다.

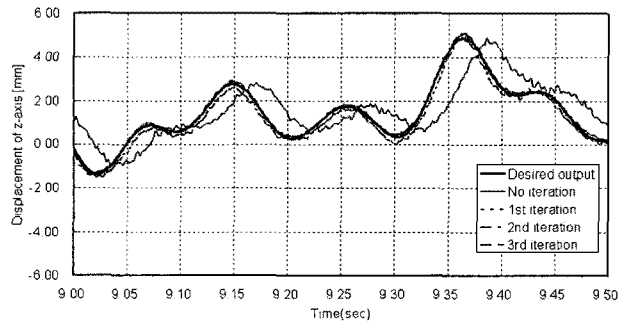


그림 13 Experimental results to Belgian road input

3축 로드시뮬레이터에 사용된 유압 시스템 및 제어기의 신뢰성과 안정성을 확인하기 위하여 앞바퀴 현가부를 구성하는 부품에 대하여 실제 자동차 회사에서 수행하는 내구 시험을 행하였다.

먼저 정해진 도로 프로파일 (Ltl, Chuck, Rhin, Test hill, Corr, Lwp, River, Pave, Fig8, Laclol, Rho, Kerb, Postel)을 실차 주행하여 x, y 축의 기준 신호를 측정하였다. 그 후 측정된 신호를 바탕으로 시험기에서 해당 신호를 재현하는 시험을 수행하였다. 실차에서 시험하고자 하는 부품에 직각 방향으로 2개의 스트레인 센서를 장착하였으며, 그림 14는 시험장치 설치 모습을 보여준다.

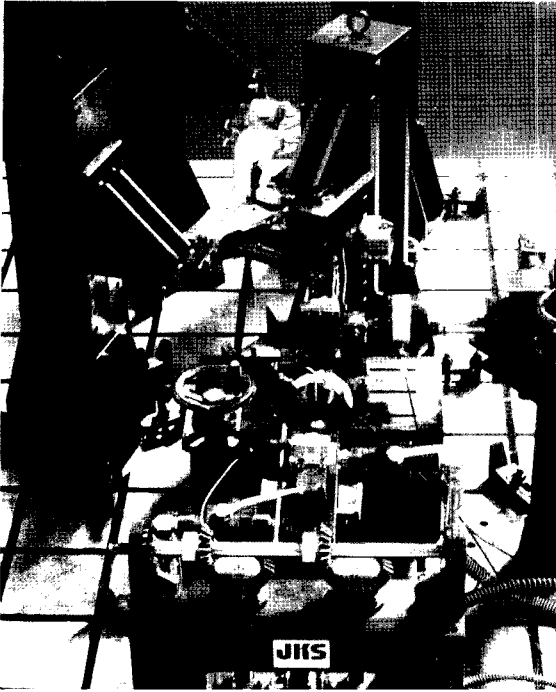


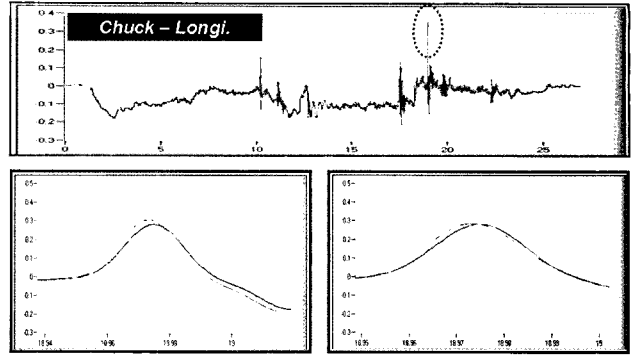
그림 14 2-Axis Durability test

시험 절차는 표 1과 같으며 전체 시험에 소요된 시간은 하루 24시간 시험하여 약 16일 정도 소요되었다.

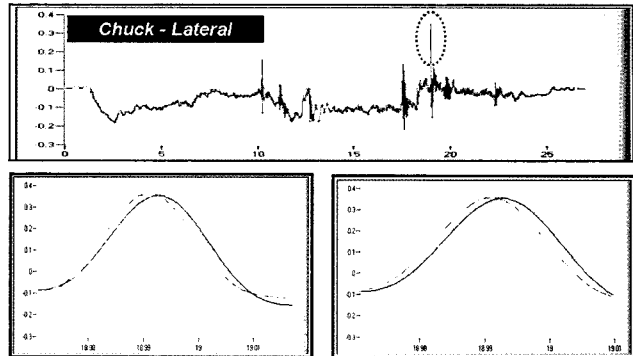
그림 15, 16, 17은 표 1의 절차로 내구 시험을 수행한 다음, 앞의 도로 조건 가운데 chuck, pave, postel 도로에 대한 x, y축 스트레인 신호를 실차에서 측정된 신호와 비교한 그래프이며, 표 2는 그 결과를 정리한 것이다.

표 1 Test procedure of durability test

Car Dura 1							
Load Name	Repeats	Whole repeats	STEP	Load Name	Repeats	Whole repeats	STEP
Lti	3	128	STEP 1	River	4	128	STEP2
Chuck	4	128		Pave	1	128	
Rhin	4	128		Fig8	3	128	
Test hill	2	128		Laclol	1	128	
Fig8	2	128		Kerb	4	16	
Chuck	4	128		Postel	1	64	STEP4
Corr	6	128		Kerb	1	64	
Lwp	1	128					

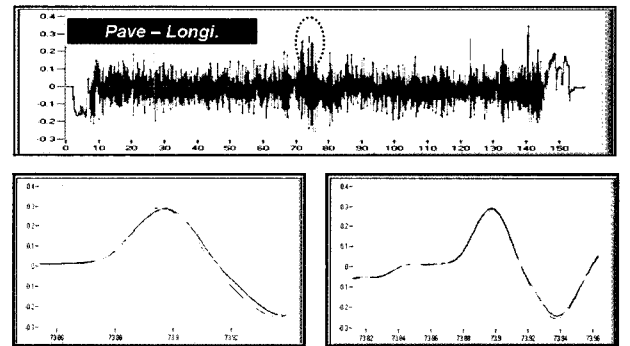


(a) Longitudinal axis

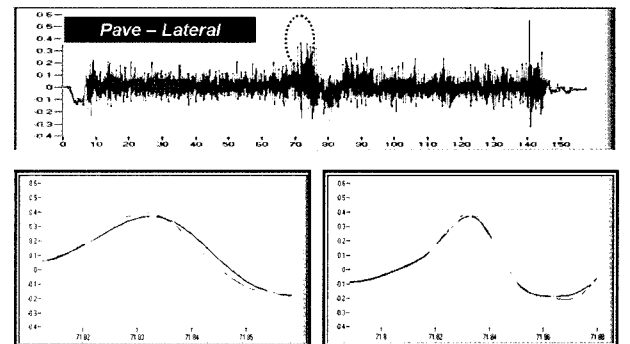


(b) Lateral axis

그림 15 Experimental results to chuck road input

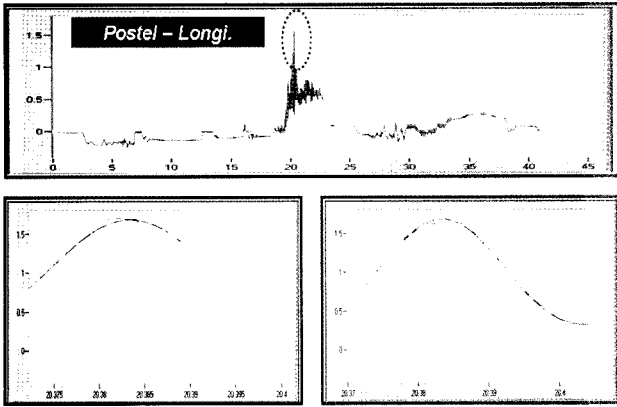


(a) Longitudinal axis

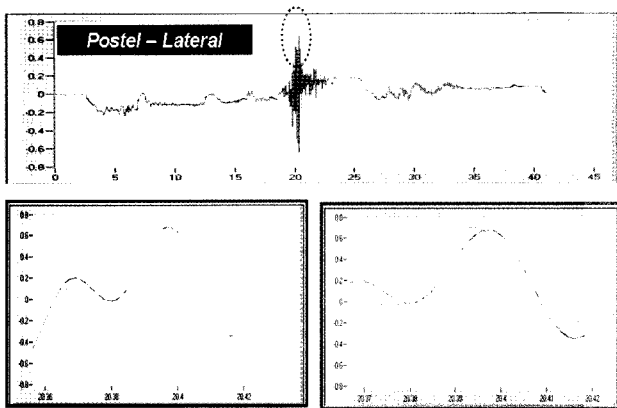


(b) Lateral axis

그림 16 Experimental results to pavement road input



(a) Longitudinal axis



(b) Lateral axis

그림 17 Experimental results to postel road input

표 2 Summary of error results

(unit : kgf(%))

Load Name	Sample 1		Sample 2	
	Long.	Lateral	Long.	Lateral
Chuck	20(5%)	10(2.5%)	5(1.25%)	5(1.25%)
Pave	10(4%)	20(5.7%)	5(2%)	10(2.8%)
Postel	5(0.3%)	60(9.2%)	50(3.1%)	30(4.6%)

2개의 시편에 대한 시험 결과, 가장 큰 힘이 작용하는 postel 조건에서만 내구 시험 전후 최대 약 9.2%의 오차를 보이며, 그 외의 나머지 도로 조건에서는 5% 이내의 오차를 유지하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 개발된 시스템의 신뢰성 및 안정성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 해설에서는 자동차 부품의 내구시험을 위한 스피들-연계 로드 시뮬레이터 개발결과를 소개하였다.

본 해설에서 소개한 로드 시뮬레이터에는 실제 주행상황을 정확히 재현시킬 수 있도록 노면 형상 재현 알고리즘을 탑재하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 유용성을 검증하였다.

시뮬레이션 입력 조건으로 표준 노면 중의 하나인 벨지언 로드 데이터를 사용하였을 때, 1회 이상의 반복 알고리즘 적용으로 원하는 출력 신호와의 오차를 급격히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후 3축 동시 가진에 대한 알고리즘 적용 시험을 수행할 것이며, 보다 다양한 노면 입력 데이터에 대한 검증도 수행할 예정이다. 이러한 로드 시뮬레이터를 활용한다면, 자동차 부품 개발에 소요되는 시간과 노력을 현저히 감소시킬 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- 1) L. Mianzo, D. Fricke, and R. Chabaan, "Road profile control methods for laboratory vehicle road simulators", IEEE, pp. 222~228, 1998.
- 2) D. M. Fricke, et al. "Effective road profile control method for a spindle-coupled road simulator" US Patent 5610330, 1997.
- 3) <http://www.mts.com>
- 4) <http://www.instron.com>
- 5) <http://www.saginomiya.co.jp>
- 6) 문영수, "운동 재현기의 재현 알고리즘 개발", 한국과학기술원석사학위 논문, 1991.
- 7) J. S. Bendat and A. G. Piersol, "Engineering applications of correlation and spectral analysis", Wiley-Interscience, 1980.

#### [저자 소개]



최경락(책임저자)

E-mail: grchoi@kitech.re.kr

Tel: 041-589-8475

1962년 11월 14일생

1987년 한양대학교 정밀기계공학과 석사

과정 졸업, 1988년 한국과학기술연구원

입사, 1990년 3월 1일 한국생산기술연구

원 입사, 현재 수석연구원, 유압액추에이터를 이용한 차량 부품 내구 시험 시스템 개발에 종사, 기계공학회, 제어정밀공학회 및 SPIE 회원



전승배

E-mail: jsbjg@hanmail.net

Tel: 062-973-6688

1955년 4월 7일생

1982년 전남대학교 기계공학과 학사, 2005년 동 대학원 석사, 1982년~1986년 동명중공업 근무, 1986년~현재 (주)제이케이

에스 이사, 관심연구 분야는 유공압 시스템 설계, 유압 제어



황성호(책임저자)

E-mail: hsh@me.skku.ac.kr

Tel: 031-290-7464

1965년 8월 18일생

1988년 서울대학교 기계설계학과 학사, 1990년 동 대학원 석사, 1997년 동 대학원 박사, 1992년~2002년 한국생산기술연구원 선임연구원, 2002년~현재 성균관대학교

기계공학부 부교수, 관심연구 분야는 자동차 메카트로닉스, 하이브리드 자동차, 유공압 제어시스템, 대한기계학회, 한국자동차공학회, 제어·자동화시스템공학회, 유공압시스템학회, SAE(미), ASME(미) 회원, 현재 유공압시스템학회 총무이사, NET마크/장영실상 심사위원