

# 서스펜션 내구시험용 Road Simulator의 설계 및 제작

최경락\*(한국생산기술연구원), 황성호(한국생산기술연구원), 전승배(정광기공)

## Design and Manufacture of Road Simulator for Suspension Durability Test

G. R. Choi(KITECH), S. H. Hwang(KITECH), S. B. Jeon(JungKwang Machinery)

### ABSTRACT

The road simulator system can simulate the longitudinal, lateral, and vertical movement changed by road conditions and vehicle dynamic characteristics while driving. This system provides the durability evaluation of vehicle suspensions. The system consists of hydraulic actuators, link mechanism, and servo controller. The hydraulic actuators are specially manufactured using low friction seals to endure high speed movement. The link mechanism is designed in order to minimize the dynamic effect during motion and remove the interference between 3 axes actuators. The servo controller is composed of sensors, sensor amplifiers - displacement transducers and load cells, and an industrial PC with DSP board which calculates the control algorithm to control hydraulic actuators. The test results are included to evaluate the performance of this simulator comparing vehicle driving test.

**Key Words** . Road Simulator, Vehicle Suspension(차량 현가장치), Durability Test(내구시험), Hydraulic Servo Control(유압 서보 제어), DSP Board

### 1. 서론

오늘날 자동차에 대한 소비자의 요구는 매우 다양하고 빠르게 바뀌어가고 있다. 이에 따라 자동차 모델 변경 시기가 매우 빨라지고 있으며, 이와 함께 각종 부품의 개발 주기 또한 짧아지고 있다. 한편, 날로 더해가는 소비자의 안전 의식과 소비자 주권에 대한 각성은 부품의 사소한 결함으로 인한 사고가 회사의 대외적인 이미지 손상은 물론, 경우에 따라서는 막대한 피해 보상에 따른 경제적 손실을 일으킬 수 있게 되었다. 이와 같은 부품 결함에 의한 리콜은 최근들어 선진외국에서뿐만 아니라 국내에서도 점차 자주 일어나는 문제로 대두되었다.

이에 따라 자동차를 만드는 회사에서는 사용되는 각종 부품에 대한 기능 및 내구 규격을 강화하고 있으며, 이에 대한 검증을 부품 업체에 요구하고 있다. 따라서 부품 업체에서는 빨라진 제품 개발 주기 및 기존의 단순한 생산 및 품질 관리만을 하던 차원에서 벗어나 보다 정확한 성능 및 내구 시험을 위한 시설을 갖추어야 하는 실정이며, 이러한 이유로 인하여 빠른 시간 내에 정확한 성능 및 내구 시험을 할 수 있는 부품 시험기에 대한 수요는

날로 늘어나고 있다.

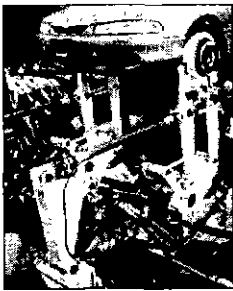
다양한 자동차 부품 시험기 가운데 본 논문에서 개발한 시험기는 자동차의 조향 성능 및 승차감을 결정하는 중요한 부품인 서스펜션에 대해 실제 차가 운전되는 조건과 유사한 조건으로 반복하여 하중 및 변위를 가하여 그 내구성을 시험하기 위한 장비이다.

이러한 서스펜션 내구 시험기는 시험기 자체의 강인성 및 고신뢰성이 요구되어 유압 서보 시스템이 많이 사용되고 있다. 그러나, 자체 감쇠 기능의 미약, 비선형성, 압축성 등의 유압 시스템 고유 성질과 서스펜션 자체의 복잡한 운동 특성 때문에 용도와 작동 조건에 맞게 제어하기 위해서는 높은 수준의 서보 제어 기술이 필수적이다.

현재, 국내 유수 시험기 업체에서 만능재료시험기를 비롯하여 자동차 부품용 내구 시험기에 이르기까지 1990년대 초부터 활발한 개발을 하고 있다. 그러나, 유압 서보 제어를 이용하는 경우 단순 반복 내구 시험기 정도의 개발에 그치고 있으며, 아직까지 많은 경우 MTS, IST(Instron-Schenck Test Systems), Saginomiya 등 국외 시험기 업체로부터 수입하여 사용하고 있는 실정이다[1].

특히 MTS와 IST에서는 다양한 종류의 차량 부품 관련 시험기를 만들고 있으며, 대부분의 세계 시장을 점유하고 있다.

다음 그림은 본 논문에서 개발한 서스펜션 내구 시험기와 유사한 MTS와 IST의 시험기에 대한 사진을 보여준다. 이중 MTS의 road simulator는 각각의 spindle에 대해 전후, 좌우, 상하방향 하중 및 변위제어와 함께 제동과 조향까지 할 수 있는 특징을 갖고 있다[5, 6].



MTS Road Simulator  
(from www.mts.com)



IST Road Simulator  
(from www.instron.com/ist)

Fig. 1 Various road simulators

본 논문에서는 MTS Road Simulator를 모델로 하여 순수 국내 기술로 설계 제작된 서스펜션 Road Simulator에 대해 소개하였으며, 가진 신호를 생성하는 알고리즘을 개발하고 실차 시험과의 비교를 통하여 시험기의 성능을 분석하였으며 이것이 차량 서스펜션 성능 시험에 충분히 활용될 수 있음을 보였다.

## 2. 시험기 구성

### 2.1 시험기 개요

그림 2는 suspension simulator를 이용한 시험 과정에 대한 개념도이다. 먼저, 실차 시험을 통하여 노면 및 하중 데이터 측정 후 실차 데이터를 편집하여 기준신호(reference signal)를 만들고, 기준 신호로부터 시험기에서 이용 가능한 시험 신호로 만든 후 최종적으로 내구 시험을 실시하게 된다.

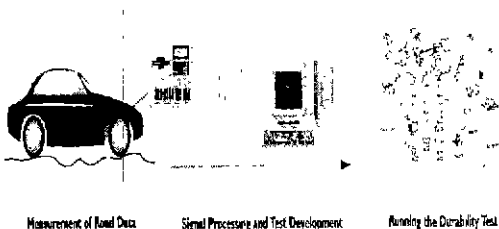


Fig. 2 Test procedure for road simulator

### 2.2 시험기 구성

서스펜션 시뮬레이터의 전체 구성은 다음 그림과 같다.

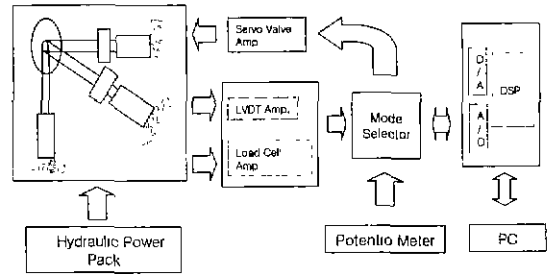


Fig. 3 Configuration of suspension simulator

시뮬레이터는 그림에서와 같이 유압 공급원과 3개의 유압 서보 액츄에이터로 이루어진 유압부, 유압 실린더의 힘을 시험 부품에 전달하기 위한 기구부 및 이에 대한 센서 신호 감지 및 제어 신호를 발생시키는 제어부로 나뉘어진다.

#### 2.2.1 유압부

시험기의 유압 실린더에 유압 동력원을 제공하고 시험 부품에 변위 또는 힘을 가하는 유압 서보 액츄에이터로 구성된다.

각 축별 사양을 살펴보면 다음과 같다.

Table 1 Specifications of Hydraulic Actuators

Actuator	Static Stroke [mm]	Force [kgf]	Peak Velocity [mm/sec]	Max. Accel. [G]
Vertical	168	7,500	1,500	15
Longitudinal	250	3,000	979	12
Lateral	250	3,000	545	12

각 유압 액츄에이터에는 변위센서(LVDT)와 하중센서(Load cell)가 부착되어 있으며, 센서 앰프로부터 전압신호로 변환되어 PC제어의 Data Acquisition Board에 피드백 신호로서 입력된다.

이러한 유압 액츄에이터를 가진시키기 위하여 압력 210  $kgf/cm^2$ , 유량 250  $l/min$ , 150HP의 유압 파워팩이 사용되었다.

#### 2.2.2 기구부

기구부는 시험기가 설치된 test bed와 유압 실린더에서 발생하는 힘을 jig에 고정된 시험 부품에 전달하는 링크부 및 부품을 고정하기 위한 받침대로 구성된다.

링크부는 강도를 키우면서 고주파 진동에 견딜 수 있도록 중공축으로 설계하였으며, 최대변형과 최대 응력을 고려하여 베드부를 설계하였다. 이는 dummy wheel과 함께 수직, 수평, 길이 방향 link와 beelcrank로 구성되어 각 축간의 하중과 변위가 최대한 독립적으로 작용될 수 있도록 설계되었다.

그림 4는 본 연구에서 설계 제작한 기구부의 모습을 보여준다.

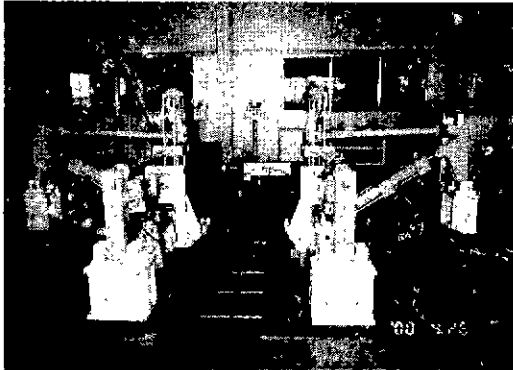


Fig. 4 Link mechanism of suspension simulator

### 2.2.3 제어부

본 논문에서 소개하는 서스펜션 시뮬레이터의 제어기는 산업용 PC와 DSP Board, A/D, D/A Board를 이용하여 설계 제작하였다.

또한, 시험기를 개발하는 과정에서의 안전한 작업과 시험 부품을 설치할 때의 편의성 및 실제 시험하는 중에 생길 수 있는 비상 상태 때의 응급 복구와 같은 이유로 시험기에는 상대적으로 간단한 방법으로 시험기를 제어하는 기능이 필요하다. 이를 위하여 포텐서미터를 이용하여 사용자가 수동으로 제어를 하거나 컴퓨터가 자동적으로 제어할 수 있는 제어 선택기를 개발하여 사용하였다. 그림 5는 개발된 제어기와 시험기 모습을 보여주고 있다.

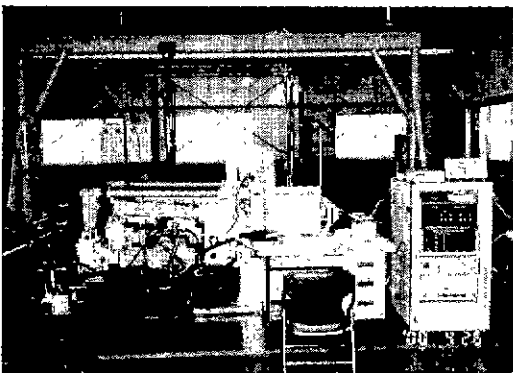


Fig. 5 Developed controller and test rig

제어용 S/W는 독립적으로 유압 서보 액추에이터를 제어하는 DSP용 프로그램과 사용자로서 다양한 시험 조건을 입력받고 결과를 출력해 주는 윈도우즈용 사용자 인터페이스 프로그램 2가지로 구성되어 있다.

사용자 인터페이스 프로그램의 전체 화면은 그림 6과 같다. 프로그램을 설치할 때 가능한 쉽게 사용할 수 있게 하는 것을 목적으로 하였으며, 따라서 프로그램의 모든 기능이 한 화면에 나타나도록 구성하였다.

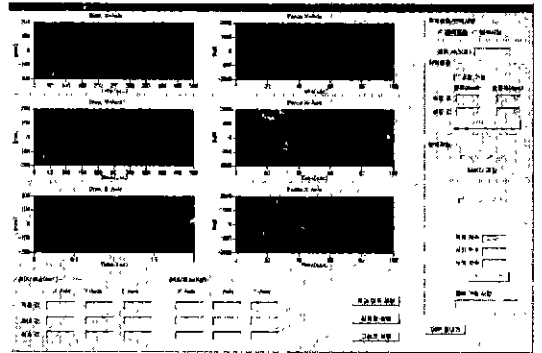


Fig. 6 User interface software

## 3. 가진 신호 생성 알고리즘

그림 7은 기준 신호로부터 시험기 입력으로 사용되는 내구 시험 신호를 만드는 과정에 대한 개략도를 나타낸다.

그림에서와 같이 실차 신호를 편집하여 얻은 기준신호와 재현 프로그램을 이용하여 시험 신호를 만든다. 이 신호를 이용하여 시험하고자 하는 부품에 대한 시험을 수행하며, 이때 실차 시험에서 측정하였던 기준 신호를 다시 측정한다. 실험실에서 측정된 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.

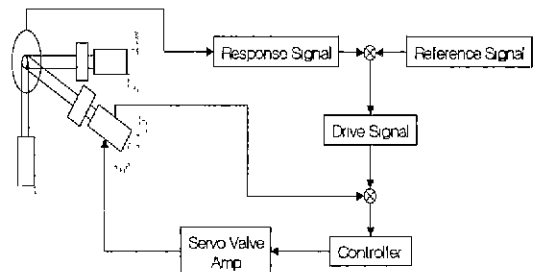


Fig. 7 Excitation signal generation procedure

이상과 같은 신호 재현 과정은 다음과 같이 계산된다[2, 3, 4].

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

$$x(t) = [x_1, x_2, \dots, x_q]^T \quad (1)$$

$$y(t) = [y_1, y_2, \dots, y_q]^T$$

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_q]^T \quad (2)$$

$$Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_q]^T$$

$$X_i = X_i(f) = F[x_i(t)], \quad i=1, 2, \dots, q \quad (3)$$

$$Y_i = Y_i(f) = F[y_i(t)], \quad i=1, 2, \dots, q$$

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

$$G_{XX} = \frac{2}{T} E[X \cdot X^T], \quad G_{YY} = \frac{2}{T} E[Y \cdot Y^T] \quad (4)$$

$$G_{XY} = \frac{2}{T} E[X \cdot Y^T], \quad G_{YX} = \frac{2}{T} E[Y \cdot X^T]$$

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

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

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, k번째 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 입력 신호  $x_{k+1}(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다

$$\Delta Y_{dk}(f) = F[\Delta y_{dk}(t)]$$

$$\Delta X_{k+1}(f) = H_{XYk}^{-T}(f) \Delta Y_{dk}(f) \quad (9)$$

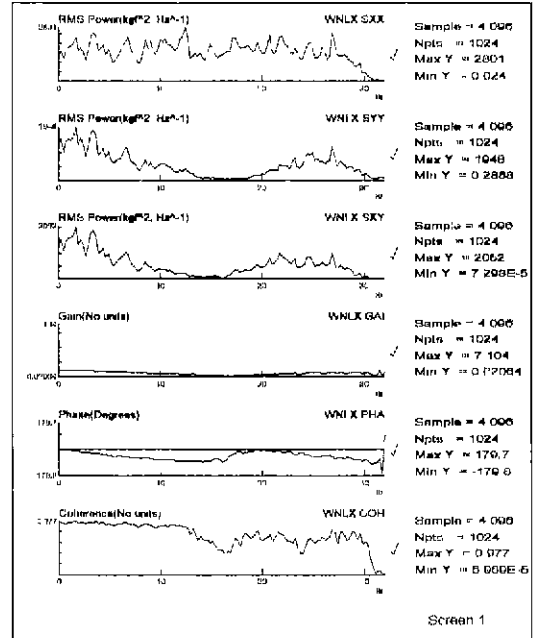
$$x_{k+1}(t) = x_k(t) + \Delta x_{k+1}(t), \quad k=0, 1, 2, \dots$$

#### 4. 시험 및 결과

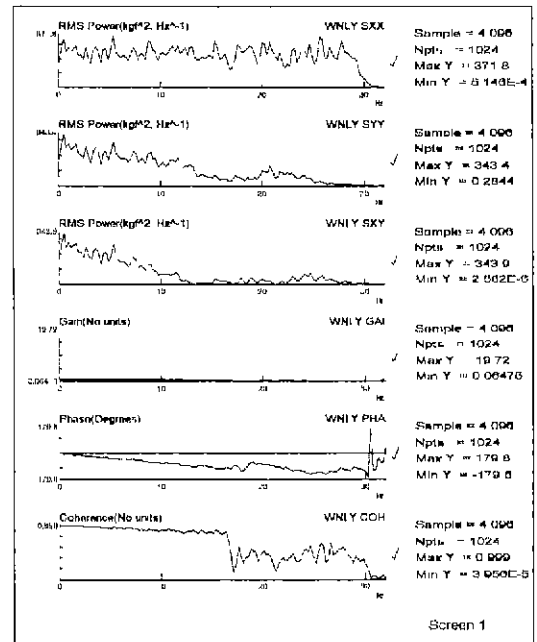
시험은 시험기 자체의 동특성을 확인하기 위한 30Hz 까지의 white noise 신호 시험과 실차 시험에서 구한 신호를 이용한 재현 시험 2가지를 수행하였다.

그럼 8은 신호 개선없이 X, Y 축을 30Hz까지의 white noise 신호로 가진 시험한 결과이다.

X, Y 축 모두 15Hz 이상에서는 입력 신호에 대한 출력이 거의 없는 것으로 보아 시스템 자체의 동특성이 15Hz 이상을 재현하기에는 무리가 있음을 알 수 있다. 또한 15Hz 이하에서도 5Hz 이상에서는 입력신호에 대한 출력신호에 많은 차이가 있음을 알 수 있다



(a) X-axis

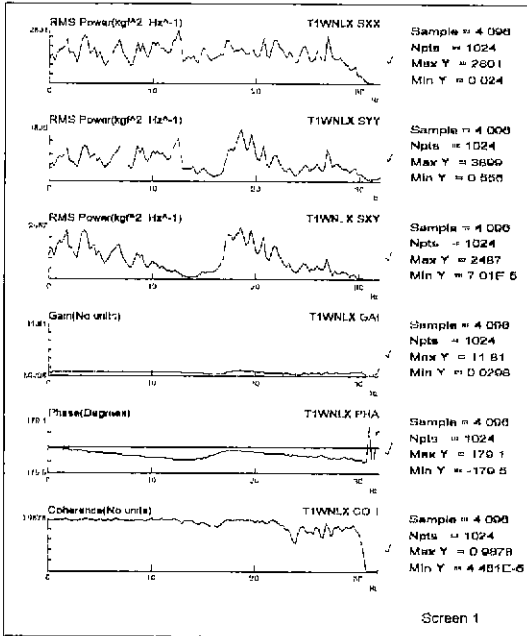


(b) Y-axis

Fig. 8 White noise test results with original signals

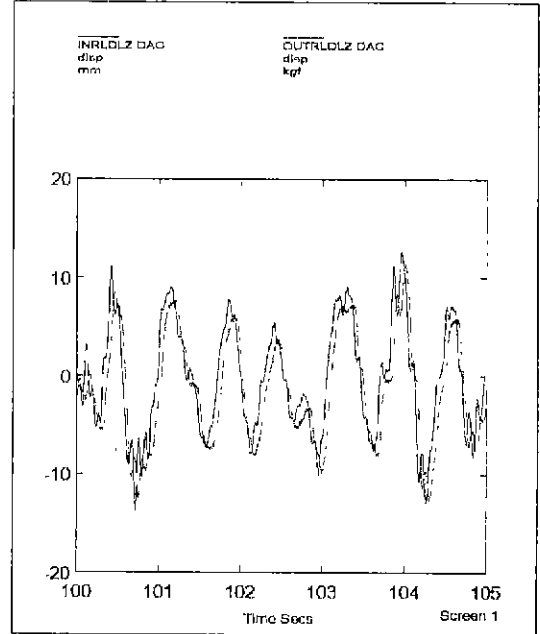
그림 9는 X, Y 축을 앞에서 제시한 가진 신호 생성 알고리즘을 이용하여 개선된 white noise 신호로 시험한 결과이다

X, Y 축 모두 5Hz 이상에서 15Hz 까지 신호에 대하여 신호 재현성이 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

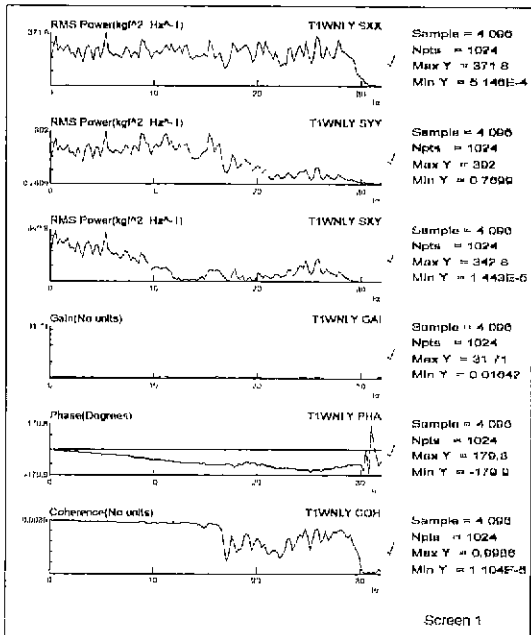


(a) X-axis

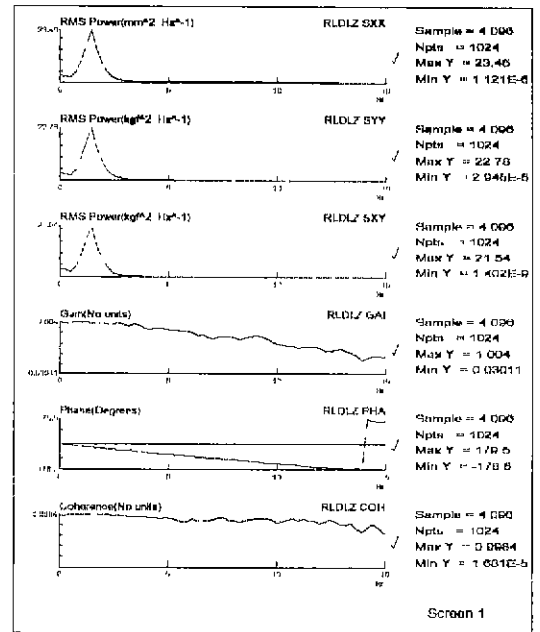
다음 그림은 실차 시험 데이터를 이용한 시험 결과 가운데, Z축의 입력 신호와 출력 신호에 대한 시간 영역과 주파수 영역에서의 비교 결과이다. X, Y축과는 달리 입력 신호의 주파수 특성이 10Hz 이하에 있는 관계로 신호에 대한 개선이 이루어지지 않아도 충분히 운동이 재현됨을 확인할 수 있다.



(a) Time domain response



(b) Y-axis



(b) Frequency domain response

Fig. 9 White noise test results with modified signals

Fig. 10 White noise test results of Z-axis

#### 4. 결론

본 논문에서는 차량 좌우측 2바퀴의 suspension을 동시에 내구 시험할 수 있는 6-axis road simulator를 개발하였다.

기구부 링크 메커니즘을 설계 제작하고, 유압 서보 액츄에이터를 이용하여 실차시험과 유사한 조건의 내구시험을 구현하였으며, 사용자 편의성을 증대시킨 제어기 및 S/W를 개발하였다.

개발된 시험기에 대한 성능 및 안전성을 검증하였으며, 시험 과정에서 시험기 자체의 동특성이 목표 사양으로 하고 있는 30Hz까지의 주파수 범위를 재현하기에는 미흡함을 확인하였다. 그러나 제시된 가진 신호 생성 알고리즘을 통하여 어느 정도까지 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였고, 향후 경량 고강성 재질의 사용 등 기구부 메커니즘을 함께 보완한다면 목표사양까지 가진 시험을 재현할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구를 통해 확보된 시험기 및 제어기 설계 기술은 향후 국내의 유압 서보 시스템을 활용한 시뮬레이터 개발에 폭넓게 활용될 수 있으리라 사료된다.

#### 참고문헌

- 1 김영일, "4-Channel Road Simulator 소개," *아시아자동차기보*, pp.63-74, 1991
- 2 문영수, *운동 재현기의 재현 알고리즘 개발*, 한국과학기술원석사학위 논문, 1991.
- 3 김우영, 윤대성, 오철성, 황원걸, "동특성 시뮬레이터용 가진신호 생성 알고리즘에 관한 연구." *한국정밀공학회 2000년도 춘계 학술대회논문집*, pp.449-452, 2000.
- 4 Julius S. Bendat and Allan G. Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, Wiley-Interscience, 1980
- 5 <http://www.instron.com/ist/systems/fullvehicle.htm>
- 6 <http://www.mts.com>