

다축 로드 시뮬레이터의 3축 재현 알고리즘 개발

류신호*(조선대 대학원), 정상화(조선대), 김종태(조선대 대학원)

Development of 3-axial Realization Algorithm of Road Profile for Multi-axial Road Simulator

Sinho Ryu(Graduate School, Chosun Univ.), Sanghwa Jeong(Chosun Univ.), Jongtye Kim(Graduate School, Chosun Univ.)

ABSTRACT

Full scale durability test in the laboratory is an essential of any fatigue life evaluation of components or structures of the automotive vehicle. Component testing is particularly important in today's highly competitive industries where the design to reduce weight and production costs must be balanced with the necessity to avoid expensive service failure. Generally, Hydraulic road simulator is used to carry out the fatigue test and the vibration test.

In this paper, the algorithm and software to realize the real road profile are developed. The operation software for simultaneously controlled multi-axial simulator is developed and the input and output data are displayed window based PC controller in real time.

The software to generate the real road profile are developed. This paper developed a road profile reappearance software and simultaneously apply 3-axial actuator to white noise, so we verified the propriety of reappearance software through accomplishes an real test.

Keywords : Multi-axial Road Simulator(다축 로드 시뮬레이터), White Noise(화이트 노이즈), FRF(주파수 응답함수), Hydraulic Actuator(유압 액츄에이터), Road Profile(로드 프로파일) ASD(Auto Spectral Density), CSD(Cross Spectral Density)

1. 서 론

차량, 항공기 그리고 각종 기계 구조물에 대한 진동 평가나 설계를 위한 실제 실험은 비용이나 실험 환경 등에 있어 많은 제한을 받게 된다. 그러므로 실제 운동조건과 같은 환경을 제공하는 다축 로드 시뮬레이터는 설계나 평가에 있어 대단히 편리하면서도 경제적인 이점을 제공하여 준다. 일반적으로 자동차의 경우 설계에서부터 개발, 실험에 이르기까지 막대한 비용이 소모되고 있다.¹⁾ 최근 자동차의 신제품 수명 사이클이 짧아짐에 따라 제품 생산비용의 절감뿐만 아니라 제품 설계시간을 줄일 수 있는 방법이 선호되고 있다. 자동차의 실차 실험을 통해 알 수 있는 자동차의 진동 특성을 그와 유사한 환경을 제시해 줄 수 있는 다축 로드 시뮬레이터로 그와 같은 실험을 대체할 수 있다면 다축 로드 시뮬레이터의 개발은 그 응용면에서 상당히 큰 이점이 있다고 하겠다.²⁾ 현재 실시간 차량 시뮬레이터는 시각/음향시스템, 운동시스템 및 제어 힘 로딩시스템을 포함하는 시뮬레이터를 개발하기 위한 연구³⁾가 진행중이지만 유압 액츄에이터를 실제 노면조건과 일치하게 입력신호로 주어 다축 시

뮬레이션을 위한 시뮬레이터의 설계와 기구학적 해석, 그리고 다축 로드 시뮬레이터의 동특성에 대한 연구는 아직 기대에 미치지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 로드 프로파일 재현 소프트웨어를 개발하여 입력신호로 화이트 노이즈(white noise)를 3축에 동시에 주어 주파수 응답함수를 구하였고 측정된 로드 프로파일을 입력하여 다축 초기 구동화일을 생성함으로써 3축 재현 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 다축 로드 시뮬레이터의 구성

다축 로드 시뮬레이터는 액츄에이터를 가진시키면서 X축, Y축, Z축방향에 하중, 변위, 주파수 등의 입력변수를 주어 복합적인 실험을 할 수 있도록 설계되었으며, Fig.1은 다축 로드 시뮬레이터의 구성도이며, 크게 유압원(hydraulic unit), 제어장치(control unit), 데이터 처리장치, 항온조(chiller) 및 액츄에이터(actuator)로 구성되어 있다.

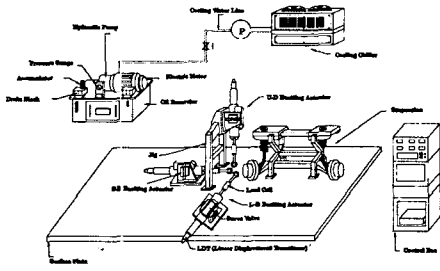


Fig.1 Configuration of multi-axial road simulator

유압 액추에이터는 서보밸브를 장착한 복동 실린더 부착 액추에이터이며 주어진 하중과 변위를 견딜 수 있도록 설계·제작 되었다. 시스템의 오동작으로 인하여 액추에이터 내부의 피스톤이 급격히 하강하여 헤드커버와 충돌할 때 유압 액추에이터가 파손되는 것을 방지하기 위해 유압 액추에이터 상하내부에 쿠션장치가 설치되었다. 또한, 피스톤의 위치감지 및 시스템 제어를 위한 피드백 정보를 전달하는 변위센서(LVDT)와 하중센서(load cell) 그리고 고장이 생길 경우 수리를 원활히 하기 위한 니이들 밸브, 전기적 입력신호에 비례하여 정확하게 액추에이터에 유량을 공급하는 서보밸브로 구성되어 있다. 서보밸브는 현재 널리 사용되고 있는 노즐 플래퍼 방식의 2단 서보밸브를 사용하였다.

3. 로드 프로파일 재현 소프트웨어

3.1 가진 신호생성 알고리즘

가진신호 생성 알고리즘은 시스템의 동적 특성에 대한 구체적인 해석을 하지 않고도 신호처리 기법을 이용하여 실제 상황에서 측정된 신호나 원하는 함수 형태의 신호를 3축 로드 시뮬레이터에서 재현하기 위한 것이다. 컴퓨터에서 만들어진 가진신호를 유압 액추에이터로 보내 시험대상을 가진 시킨후, 시험대상에 부착된 센서로부터 응답신호를 받아 컴퓨터에서 응답신호의 재현성을 평가하여 가진신호를 개선하며, 개선된 가진신호를 다시 입력시켜 응답신호의 재현성이 만족될 때까지 이와 같은 반복 개선작업을 수행하게 된다. 초기 가진신호는 주파수응답함수 $H_{xy}(f)$ 와 출력 $Y(f)$ 가 주어질 때, 입력 $X(f)$ 는 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X(f) &= H_{xy}^{-T} \cdot Y(f) \\ Y_d(f) &= F[y_d(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $Y_d(f)$ 는 구하고자 하는 출력신호이다. 식 (1)을 이용한 초기 입력신호는 다음과 같다.

$$X_0(f) = H_{xy}^{-T} \cdot Y_d(f) \quad (2)$$

$$x_d(t) = F^{-1}[X_d(f)]$$

여기서 $x_d(t)$ 는 구하고자 하는 입력신호이다. 식의 계산은 재현하고자 하는 주파수 영역 내에서만 계산을 하며, 그 이상의 주파수에서는 $X_0(f)$ 를 0으로 하였다. 그리고 주파수 응답함수의 역변환 과정에서 특이성을 방지하고 $X_0(f)$ 가 너무 커지는 것을 방지하기 위해서 $H_{xy}(f)$ 의 최소 크기를 일정값 이상으로 하였다. 또한, 이 계산과정에서도 $x_0(t)$ 가 프레임 단위로 계산되므로 가중치 함수를 이용한 데이터의 연결과정이 필요하다. 만일, 시스템이 선형특성만 갖는다면 위에서 구한 $x_0(t)$ 로 가진 했을 때 시스템에서 바로 $y_d(t)$ 를 얻을 수 있지만 실제 시스템은 비선형 특성이 강하므로 처음에 구한 $H_{xy}(f)$ 가 시스템을 완전하게 표현한다고 볼 수 없으므로, $x_0(t)$ 에 의한 출력신호와 $y_d(t)$ 와는 차이가 있게 된다. 따라서 입력 및 주파수 응답 함수의 개선 작업이 필요하다.

입력신호 개선과정은 크게 두 부분으로 나누어진다. 가진 입력 신호 $x_k(t)$ 를 실제로 유압 액추에이터에 가하여 출력신호 $y_k(t)$ 를 얻는다. 그리고 이 신호와 실제 실험을 통해 측정된 신호 $y_d(t)$ 를 비교하여 그 차이 $\Delta y_{dk}(t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta y_{dk}(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (3)$$

그리고 이 신호와 실제 실험을 통해 측정된 신호 $y_d(t)$ 를 비교하여 그 차이가 기준치 이하이면 개선과정을 끝내고 가진 입력 신호를 저장하여 이 신호는 실제 실험에 필요한 입력신호가 된다. 그러나 앞에서의 두 비교신호의 차이가 기준치를 넘는 경우에는 비교신호의 차 $\Delta y_{dk}(t)$ 로 부터 다음 단계의 개선 입력신호를 계산하는데 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta Y_{dk}(f) &= F[\Delta y_{dk}(t)] \\ \Delta X_{k+1}(f) &= H_{xy}^{-T}(f) \Delta Y_{dk}(f) \\ \Delta x_{k+1}(t) &= x_k(t) + \Delta x_{k+1}(t) \\ k &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

전달함수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{xy}(f) = \begin{Bmatrix} H_1(f) \\ H_2(f) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $H_1(f)$ 은 과소평가(under-estimated)로 구해지는 주파수 응답함수이고, $H_2(f)$ 는 과대평가(upper-estimated)

로 구해지는 주파수 응답함수이다. Fig. 2는 주파수 응답함수를 구하기 위한 알고리즘이다.

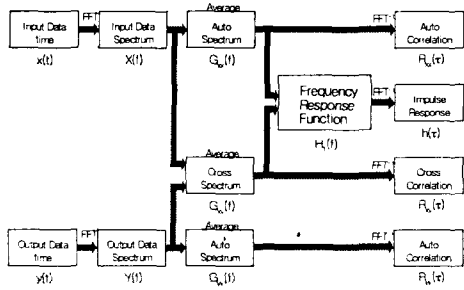


Fig. 2 Algorithm for solving the frequency response function

3.2 재현소프트웨어

시뮬레이터를 구동하기 위해 상용 소프트웨어인 LabView 6i를 사용하였고, 유압 액츄에이터에 입력되는 가진신호와 출력신호를 이용한 시스템의 특성을 나타내는 주파수 응답함수의 결정과 역주파수 응답함수를 이용하여 입력신호를 결정하는 모듈, 그리고 반복개선프로세스는 LabView에서는 구현하기 어려운 부분으로서 Visual C++을 이용하여 프로그램한 다음 출력결과를 LabView 프로그램에 링크하여 해석하였다. 개발된 구동프로그램의 하드웨어는 NI사의 PXI-1000B를 기반으로 하였다. Fig. 3은 LabView 소프트웨어의 화면구성을 나타낸 것이다.

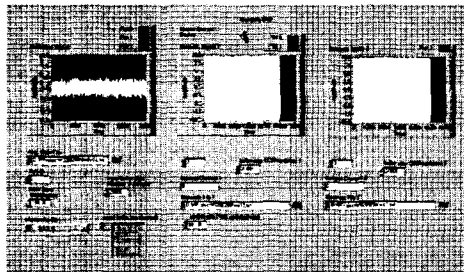


Fig. 3 Monitoring display of LabView

4. 실험방법

본 실험에서는 다축 시뮬레이터의 재현 소프트웨어를 개발하여 신뢰성을 검증하기 위한 첫 단계로서 타이어 접촉면에 가해지는 노면신호와 휠부의 응답신호와의 차이를 규명하기 위한 전달함수인 주파수 응답함수를 구하는 과정으로서 화이트 노이즈를 기준입력으로 주어 주파수 응답함수를 구하였다. 또한, 각 축에 초기 구동파일을 입력함으로써 주어 시뮬레이터에서 출력되는 데이터와 로드 프로파일의 오차율을 검토하였다. 출력되는 값은 실제 측정위치인 현가장치 축부분의

휠에 가장 가까운 위치로 하여 오차를 최소화하였다. Fig. 4는 다축 로드 시뮬레이터에 현가장치를 부착한 사진이다. 전달함수와 스펙트럼의 계산은 개발된 프로그램을 이용하였고 3축 가속도계를 이용하였다.

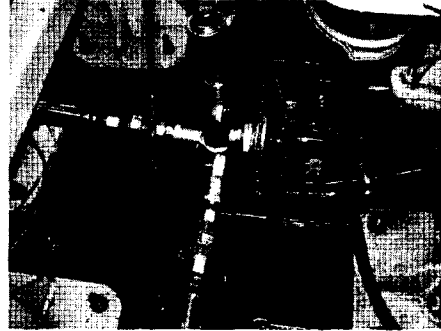


Fig. 4 Experimental figure for road profile realization

5. 실험결과 및 고찰

3축 로드 프로파일을 재현하기 위한 알고리즘은 시스템의 동적 특성에 대한 구체적인 해석을 거치지 않고도 신호처리 기법을 이용하여 실험차량에서 측정된 신호와 원하는 함수 형태의 신호를 다축 로드 시뮬레이터에서 재현하기 위한 것으로 본 실험에서는 벨지안로의 노면데이터를 특성값이 잘 나타나는 부분만 편집하여 로드 시뮬레이터에 입력신호로 주어 현가장치를 가진하였다. Fig. 5는 시험로를 주행한 차량의 로드프로파일을 FFT한 결과로서 x축은 주파수대역을 나타내며, y축은 차량이 받는 그때의 출력값을 하중으로 나타낸 것으로서 재현알고리즘을 통하여 재현하고자 하는 대상이다. 차체에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되는 50Hz 이상의 데이터는 노면데이터에서 필터링하였다. Fig. 6은 신호처리과정을 거치지 않고 Fig. 6의 로드프로파일을 3축 시뮬레이터에 입력하여 가진한 결과로서 현가계 특성은 상하방향(Z축)의 저주파수대에서만 일부 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 다축 로드 시뮬레이터의 특성을 파악하기 위하여 화이트 노이즈를 입력신호로 하여 출력받은 결과로서 3축의 상관관계가 포함된 FRF를 구한 그래프이다. 실험에 사용된 현가계는 각축에 화이트 노이즈로 가진한 경우 그 특성이 전 주파수대에 걸쳐서 나타남을 알 수 있다. Fig. 8은 3축 재현 알고리즘을 통하여 최초의 가진신호를 구하여 이 데이터를 다축 로드 시뮬레이터에 입력하여 출력 받은 결과로서 재현하고자 하는 로드 프로파일인 Fig. 5의 그래프와 비교하면 완벽한 재현은 이루어지지 않고 있으나 시스템의 특성을 포함하여 3축이 동시에 작용하는 주파수대인 10Hz, 30Hz, 43Hz의 성분은 충실한 반응하는 걸로 나타났

다.

따라서 실험을 통하여 검증된 초기가진 신호와 다축 재현 알고리즘 이용한 반복개선작업은 3축 재현에 적합할 것으로 판단된다.

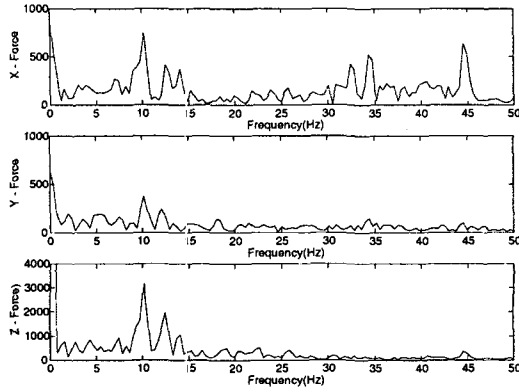


Fig. 5 FFT of Road profile(belgian road)

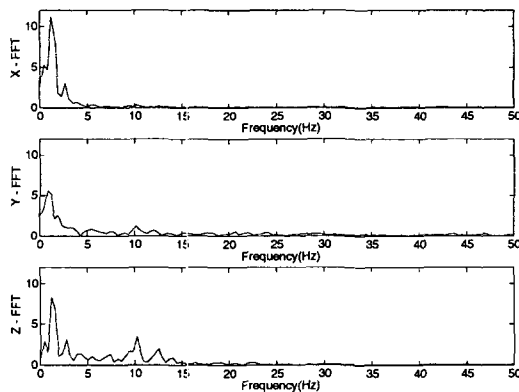


Fig. 6 Road profile at no signal processing

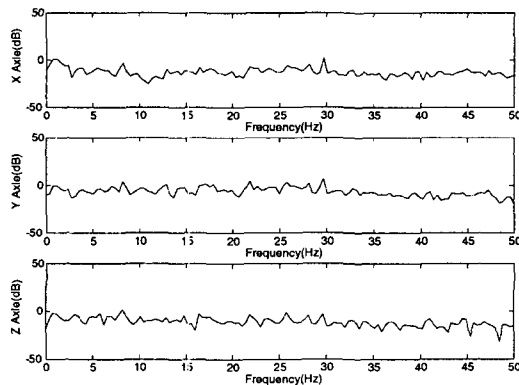


Fig. 7 Output data according to white noise

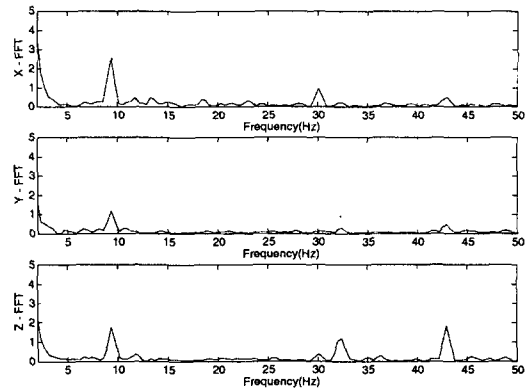


Fig. 8 FFT of initial excitation signal

5. 결 론

3축 로드 프로파일 재현 알고리즘을 바탕으로 개발된 3축 재현 소프트웨어에 화이트 노이즈를 구동신호로 주어 현가계를 가진하여 출력된 응답신호의 주파수 응답특성을 평가하고, 초기 구동화일을 생성한 결과는 다음과 같다.

첫째, 다축 로드 프로파일 재현 알고리즘은 시스템의 동적 특성에 대한 구체적인 해석을 하지 않고도 신호처리기법을 이용하여 다축 시뮬레이터에서 재현이 가능하였다.

둘째, 하중조건에 따른 다축 유압 시뮬레이터의 초기 구동화일은 재현하고자 하는 현가계의 특성을 잘 나타내 주었고, 재현하고자 하는 다축 로드 프로파일의 오차율 최소화 방안을 가능해 볼 수 있었다.

셋째, 3축 주파수 응답함수의 결과는 다축 유압 시뮬레이터를 이용한 현가계의 다축 재현실험을 위해 필요한 실험데이터로서 추후 각 축에 실제 노면데이터를 입력하여 재현성을 평가하는데 있어서 기초가 되는 실험으로 판단된다.

참고문헌

- 1) D. H. Weir, S. M. Bourne, "An Overview of the Driving simulator", SAE 950173, 1995.
- 2) J. R. Ellis, "Vehicle Handling Dynamics", MEP, pp.89-91, 1994.
- 3) W. R. Garrott, P. A. Grygier, J. P. Chrstos, K. Salaani, "Methodology for Validating the National Advanced Driving Simulator's Vehicle Dynamics(NADSdyna), SAE 970562, 1997.