

다축 제어용 가진기의 구동소프트웨어 개발 및 보정에 관한 연구

A Study on Operational Software Development and Calibration of Multi-Axis Vibration Testing Device

정상화*, 김재열*, 류신호**
Sanghwa Jeong, Jaeyeal Kim, Sinho Ryu,

ABSTRACT

In the recent day, fatigue life prediction techniques play a major role in the design of components in the ground vehicle industry. Full scale durability testing in the laboratory is an essential of any fatigue life evaluation of components or structure 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, Multi-axis durability testing device is used to carry out the fatigue test.

In this paper, The operation software for simultaneously driving Multi-axis vibration testing device is developed and the input and output data are displayed in windows of PC controller with real time. Moreover the characteristics of the displacement and the load of Multi-axis actuators are calibrated separately

주요기술용어 : Multi-axis vibration testing device(MVTD, 다축제어용 가진기), Servo valve(서보밸브), Hydraulic actuator(유압 액츄에이터), Compensation coefficient(보정계수), Division coefficient(분할계수)

1. 서론

고도화, 전문화되어가는 현대 산업기술의 진보에 힘입어 새로운 금속재료, 반도체, 섬유강화 복합재료, 고분자 플라스틱 재료 등의

신소재와 첨단기술 재료들이 개발되고 재료 또는 부품에 대한 기대 등이 높아짐에 따라 소재 및 부품시험은 고도의 기술이 필요하며 한층 더 중요시되고 있다.¹⁾

기계 또는 구조물을 설계할 때 가장 필요한 것이 강도이다. 과거에는 정적강도가 설계시 우선적인 고려대상이었지만 최근에는 동적강도에 많은 관심을 가지고 연구됨에 따라 피로

* 회원, 조선대학교 기계공학부

** 회원, 조선대학교 대학원

(fatigue), 충격(impact)등이 더욱 부각되는 상황이다. 반복 피로하중을 받는 부재는 축방향 회전각, 하중범위의 변수, 두께에 따른 매개변수 등 많은 인자의 영향과 제품에 대한 내구성(durability), 안전성(safety)이 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히, 국외의 자동차 수입국에서 자동차 부품의 3차원 내구성 시험자료를 요구하고 있는 상황에서 이들 주요부품을 측정·분석할 수 있는 시뮬레이터의 개발은 필수불가결하며, 보다 실제 시스템과 동일한 조건의 실험을 하기 위한 다축 제어용 가진기의 소프트웨어 개발이 요구되고 있다.¹⁾

국내의 연구동향을 살펴보면, 김재옥은 상태변수를 사용하여 불규칙 노면을 지날 때의 동적특성에 관하여 연구하였으며,²⁾ 박기효는 LMS(least mean square) 알고리즘을 이용하여 적응 진동제어를 수행하였고, 실험을 통한 알고리즘의 수렴특성 및 안정성을 판별하였다. 또한, 1자유도계 현가장치를 구성하여 진동제어 실험을 통해 랜덤(random)진동을 줄이는 실험을 수행하였다.³⁾ 송지호는 랜덤 하중하에서의 표면피로균열의 진동거동과 수명예측에 관하여 연구하였으며,⁴⁾ 이성래는 서보밸브, 액츄에이터, 부하, 위치센서 등에 대한 수학적 모델실을 유도하고 C-언어로 실시간 프로그램을 작성하여 DSP(digital signal process) 보드에 로드 시킴으로서 유압시스템의 모의시험기를 개발하였고, 실제 제어를 통한 모의시험기를 실시간으로 제어하는 실험을 행하였다.⁵⁾

본 논문에서는 자동차용 구조부품인 현가장치의 경우처럼 피칭, 롤링, 바운싱이 고려되어야 하는 부재들과 볼조인트처럼 유연하게 다각도로 회전하는 부재들의 하중, 피로 및 내구성을 시험하기 위하여 전후(Y축)·좌우(Z축)·상하방향(X축)의 다축 시뮬레이터(MVTD)를 이용하여 복합적인 요소와 변수들을 입력하며 원하는 출력 데이터만을 도출할 수 있도록 동시 3축을 제어할 수 있는 프로그램을 개발하여 가

진시의 하중과 변위의 출력값을 출력하여 비교·검증하였다. 또한, 데이터 구현과 입/출력 시험상태들을 실시간으로 구현할 수 있도록 설계하여 소재 및 부품의 개발에 일조할 것으로 기대되며, 외국의 몇몇 업체들로부터 수입해왔으나 프로그램상의 문제로 아직 활용도가 미진한 시험기에도 활용도가 높을 것으로 예측된다.⁶⁾

2. 다축 제어용 가진기의 구성 및 동작 원리

2.1 다축 제어용 가진기의 구성

다축 제어용 가진기는 액츄에이터를 요동, 회전시키면서 X축·Y축·Z축방향에 하중, 변위, 주파수 등의 입력변수를 주어 복합적인 피로시험을 행할 수 있도록 설계되었으며, Fig.1은 다축 제어용 가진기의 구성도이다.

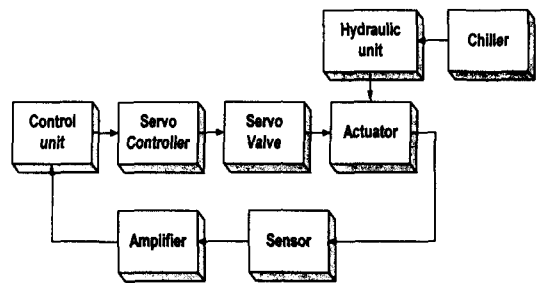


Fig. 1 Configuration of MVTD

다축제어용 가진기는 크게 유압원(hydraulic unit), 제어장치(control unit), 데이터 처리장치, 항온조(chiller) 및 액츄에이터(actuator)로 구성되어 있다.

유압원은 내구성을 고려하여 설계되었으며, 6마력의 기어모터를 사용함으로써 펌프의 회전수를 낮게 하여 펌프의 수명을 향상시켰으며, 오일탱크를 유압펌프의 하부에 설치하여 펌프에 부가되는 압력이 없도록 하였고, 공기의 출입이 전혀 없도록 설계되었다. 최대 작동압력

은 250 kg/cm^2 이며, 토출량은 57.8 l/min 이다.

제어용 가진기에 정확한 시험조건을 주기 위하여 액츄에이터의 움직임은 센서로 측정하였고, 폐루프로 구성된 제어장치는 PC를 제어본체로 하며 프로그램에 따라 시험조건을 설정하여 제어기에 입력하며, 서보밸브를 시험조건에 따라 제어한다. 또한, 설정치의 백업기능, 한계치 설정, 반복횟수 조절기능과 최초의 설정진폭이 시편의 변형에 의해 변화하는 경우나 유온과열, 유연저하, 필터고장 등 유압원의 이상시에 가진기를 정지할 수 있는 기능이 갖추어져 있다.

데이터 처리장치는 PC와 소프트웨어로 구성되며, X·Y·Z축 방향의 시험조건을 설정한다. 유압원의 유온을 일정한도로 유지하기 위하여 설계된 항온조는 $-40^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ 범위의 설정온도에서 제어되며, 항온조 내를 스테인레스 재료로 구성하여 부식을 방지하였다. 승강용 시간은 -40°C 에서 90분 이내(무부하시), $+80^\circ\text{C}$ 에서 60분 이내이며, 제어방식은 디지털 설정, PID 제어방식이다.

유압 서보밸브에 의해 시스템에 가진력을 줄 수 있도록 설계된 액츄에이터는 각각의 링크기구를 이용하여 회전부의 각도를 변하게 할 수 있기 때문에 반복되는 하중의 영향을 각 축으로 자유로이 선택하는 것이 가능하다. 또한, X·Y·Z축 방향의 하중이 필요한 경우는 양방향의 비율에 대응하는 각도를 설정하여 각 축의 합성하중을 도출할 수 있다.

2.2 다축 제어용 가진기의 동작원리

제어장치의 입력 신호계로부터 입력신호는 서보컨트롤러에 보내져 액츄에이터부의 서보밸브를 작동하며, 서보밸브는 입력신호의 크기에 비례하여 유압원에 의하여 액츄에이터 내에 가해지는 고압유의 유량을 제어함으로써 실린더를 구동시킨다. 동시에 액츄에이터에 내장된 변위 검출기(linear displacement transducer,

LDT)와 하중검출기(load cell)에 의하여 하중과 변위가 검출되고, 증폭기에 의해 증폭되어 피드백하는 폐루프로 구성된다. 또한, 입력신호와 피드백신호를 비교하여 이 에러신호가 영이 되게 동작함으로써 입력신호에 비례하여 제어되도록 설계되었다.

3. 다축 동시구동 소프트웨어 개발

3.1 다축 동시구동 프로그램의 구성

PC에서 보내어진 입력신호는 D/A 보드를 거쳐서 서보밸브로 보내어지며, 일정하중을 받는 액츄에이터의 실린더를 구동시키게 된다. 각 축에 부착된 변위검출기와 하중검출기의 측정신호는 A/D 보드와 컨트롤박스에 장착된 액정표시기(LED)로 전달되며, 또다른 신호는 출력되는 데이터를 검증하기 위하여 부착된 센서에서 독립적으로 측정되어 증폭된 다음 오실로스코프로 보내어져 PC에서 데이터베이스화 할 수 있도록 구성되었다. Fig.2는 구성한 프로그램의 신호처리과정을 나타낸다.

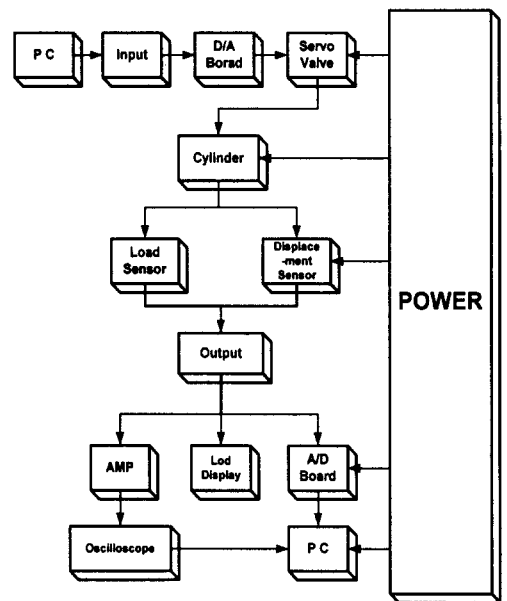


Fig. 2 Signal processing of program

3.2 입력프로그램의 구조

프로그램은 Visual Basic 5.0을 사용하였고, 입력신호는 액추에이터의 구동성능면에서 적절한 정현파로 설정하였으며, 0~±5V에서 셋팅이 가능하도록 하였다.

A/D 보드는 AXIOM사의 AX5212 모델을 선정하였고, 베이스 어드레스는 200~205를 사용하였으며, 채널은 3축 3채널을 사용하였다. 개발된 프로그램은 3축 동시구동을 목적으로 하였지만 원하는 조건에 따라 임의의 축만을 구동시킬 수 있도록 제작되었고, 각 축당 동시변위의 오차는 약 3×10^{-4} sec이다.⁹⁾ Fig.3은 입력프로그램의 순서도이며, 입력프로그램의 화면 구성은 Fig.4에 나타내었다.

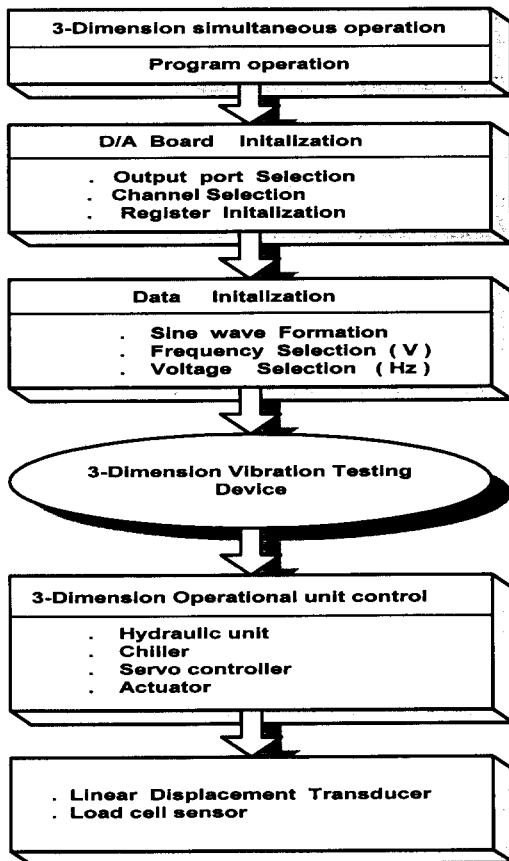


Fig. 3 Flow chart of input program

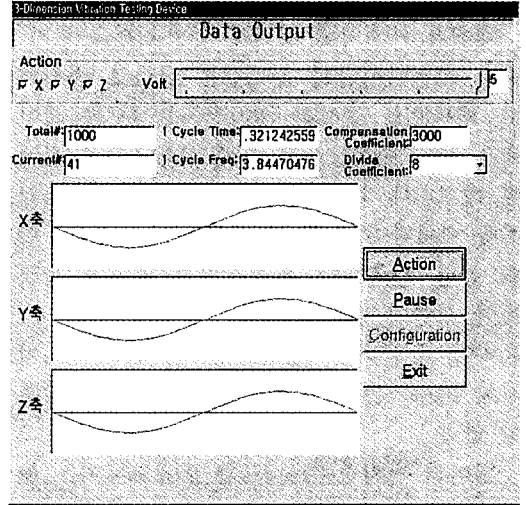


Fig. 4 Monitoring display of input program

화면의 보정계수(compensation coefficient)는 실험에서 주어지는 주파수에 도달하기 위한 구간별 데이터 간격(interval)이고, 분할계수(division coefficient)는 반복 사이클당 입력신호의 개수이며, 1~90까지의 범위를 주었다. 또한, 본 프로그램은 설정된 반복사이클 횟수를 계산하여 자동정지가 가능하도록 설계하였고, 입력신호의 최대 주파수는 30Hz이다.

3.3 출력프로그램의 구조

A/D 보드는 AXIOM사의 AX5622B 모델을 사용하였고, 베이스 어드레스는 240~245로 설정하였다.¹⁰⁾ Fig.5는 출력프로그램의 순서도이며, Fig.6은 출력프로그램의 화면구성을 나타낸다.

변위와 하중센서에서 보내어진 출력신호는 화면창에 표시되며, 또한, 파일로 저장되어 데이터 해석이 가능하도록 하였다. 그리고 출력프로그램에 원하는 축만의 출력신호와 구간별 데이터만을 출력할 수 있는 기능을 포함시켜 다축제어가 가지는 효율성을 극대화시켰다.

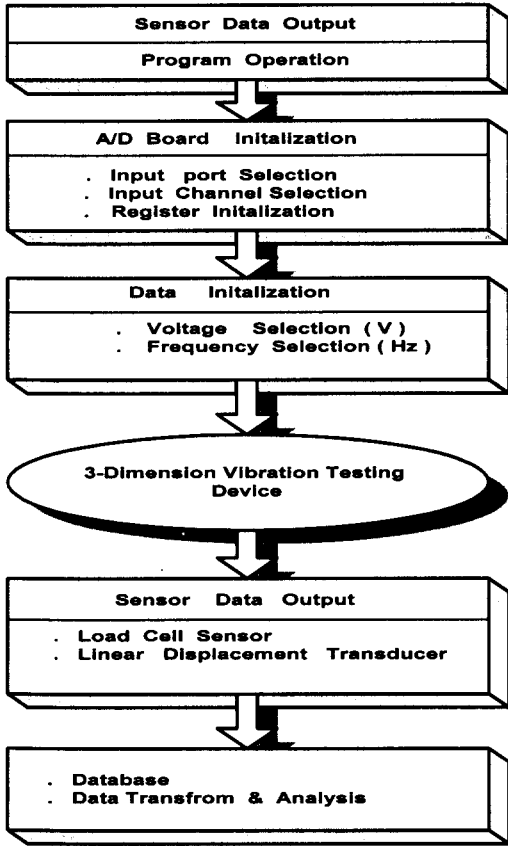


Fig. 5 Flow chart of output program

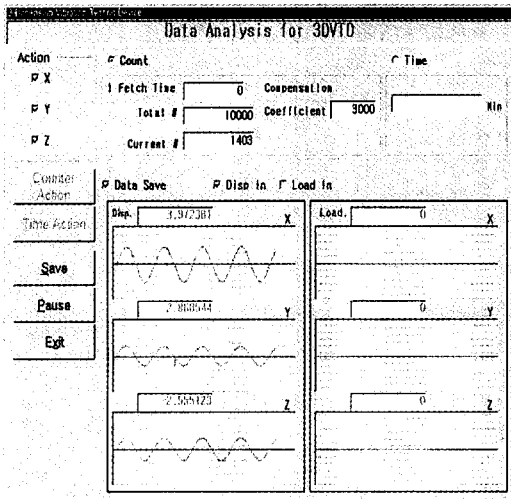


Fig. 6 Monitoring display of output program

4. 실험 방법

본 실험에서는 다축제어용 가진기의 구동소프트웨어에 대한 신뢰성 평가에 초점을 맞추었으므로 X·Y·Z축을 무부하에서 구동하였다. 각각의 축에는 사인파형의 일정한 반복신호를 주었고 주파수는 측정센서의 한계치인 0.5~10.0Hz까지로 설정하였다. Table 1은 시험에 사용된 센서들의 사양이다.

4.1 변위보정 실험

출력신호는 액츄에이터에 직접 부착되어 실린더의 움직임을 감지하는 변위센서(LDT-200)와 컨트롤러의 변위센서(S-CON100), 그리고 보정을 위하여 독립적으로 부착된 센서(DLT-200AS)에서 오실로스코프로 받아 비교·검증하였다.

초기위치와 진폭범위는 서보컨트롤러에서 조정이 가능하며, 출력신호는 ± 10.0 볼트, 초기위치는 출력신호가 0이 되는 지점으로 설정하였고, 각 축당 주파수별로 최대 변위까지 실험하였다. 액츄에이터의 정적 변위는 각 축마다 약간의 차이가 있으며, X축이 ± 80.75 mm, Y축 ± 80.0 mm, Z축이 ± 81.0 mm이다.

Table 1 Specification of 3DVRT sensor

Item	Model	Spec.	Maker
Load cell	LRT-1T	$\pm 1,000\text{kgf}$	NTS
Load cell	LUH-2TF	$\pm 2,000\text{kgf}$	KYOWA
Linear Displacement Transducer	LDT-200	$\pm 100\text{mm}$	MTS
Linear Displacement Transducer	DLT-200AS	$\pm 200\text{mm}$	KYOWA
Servo valve	J076-103	38 l /min	MOOG
Servo Controller	SVC-100		DUX CO.
Strain Amplifier	YA-506A	5KHz	KYOWA
Oscilloscope	9310A	400MHz	LeCroy

4.2 하중보정 실험

유압은 각축마다 $210 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 으로 일정하게 설정하였고, 유온은 40°C 에서 유지되도록 항온조를 셋팅하였다. 출력신호는 액추에이터에 직접 부착된 하중센서(LRN 1T, 2T)에서 검출되며, 주시험 대상인 현가장치의 경우 수직방향의 하중이 가장 크므로 허용하중이 Y축, Z축의 2배인 하중센서가 사용되었다.

또한, 부착된 하중센서의 출력신호를 보정하기 위하여 센터가 일치하는 지그를 설계, 제작하여 그 위에 하중센서(LUH-2TF)를 부착하였고, 출력된 신호를 비교·검증하였다. 하중센서의 보정은 정적상태에서 유압을 변화시키며 주어지는 정하중을 계산하고, 액추에이터 하중센서와 보정용 하중센서의 출력데이터를 비교하였으며, 선형성을 검증하였다. 초기위치와 출력범위는 서보컨트롤러에서 조정이 가능하며, 초기위치는 출력신호가 0이 되는 지점으로 설정하였고, 각 축을 최대하중이 걸리도록 서보컨트롤러를 조정하여 실험하였다. 액추에이터에 걸리는 정하중(static force)은 X축이 $\pm 1484.4 \text{ kg}_f$ 이며, Y축, Z축이 $\pm 1213.8 \text{ kg}_f$ 이다.

5. 실험결과 및 보정

5.1 변위 보정결과

일정한 사인파형의 입력신호를 구동 소프트웨어에서 보내어 출력받은 결과를 검증하기 위하여 액추에이터에 부착된 변위센서의 출력값(A/D축)과 독립적인 변위센서를 부착하여 실험한 결과값(Cal축)을 Fig.7, Fig.8, Fig.9에 나타내었다. X축과 Y축, Z축의 변위 측정결과는 3축 모두가 실험데이터들이 유사한 형태로 나타남을 알 수 있다. 여기서 증폭기 이득은 변위를 조절하기 위하여 서보컨트롤러에 부착되어 있는 게이지의 가능범위이며, 정지위치인 0.0부터 최대 변위인 10.0까지 1.0단위로 측정하였다.

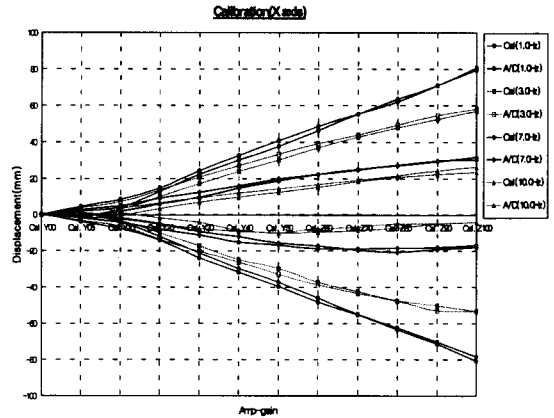


Fig. 7 Displacement in X axis actuator

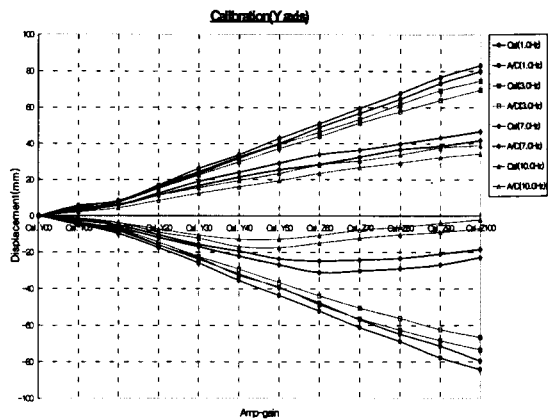


Fig. 8 Displacement in Y axis actuator

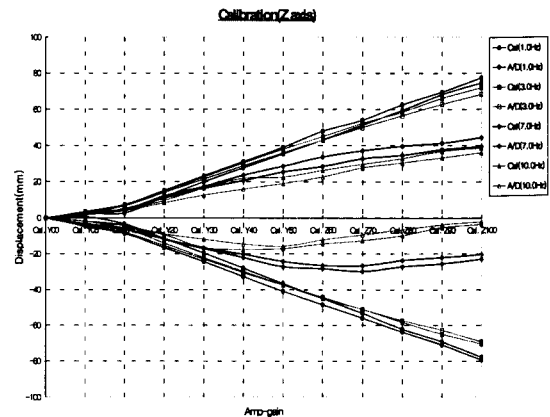


Fig. 9 Displacement in Z axis actuator

Fig.7의 데이터에서 0.5Hz에서 3.0Hz까지의 변위는 최대 변위에서도 선형적으로 증가함을 보여주고 있으며, 인장과 압축에서 오차가 없었다. 또한, 반복횟수에 따른 오차도 없었다. 설정 주파수를 5.0Hz로 높여줌에 변위는 다소 불안정해지며, 10Hz의 주파수에서는 그 값이 현저히 감소함을 알 수 있다. Fig.8과 Fig.9도 유사한 형태의 변위를 가지며, 최대 주파수 허용 변위는 X축이 10Hz에서 16.97 mm이며, Y축은 22.96mm, Z축은 24.57mm이다. 독자적인 변위 센서(Cal측)는 최대변위가 ± 200 mm이고, 가능 주파수대가 10.0Hz이므로 다축 제어용 가진기의 실험범위는 10.0Hz에서 각 축의 최대변위까지로 한정하였다.

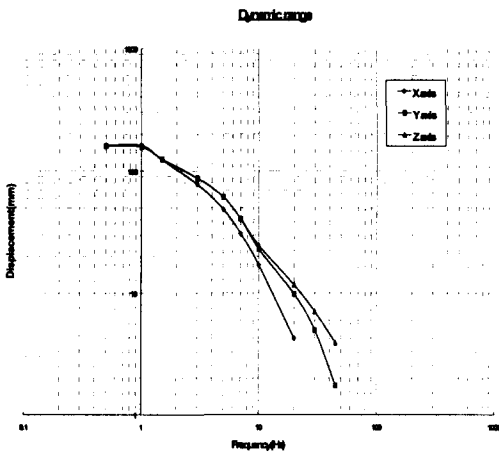


Fig. 10 Dynamic range in multi-axis simulator

Fig. 10은 각 축의 액츄에이터의 동특성을 나타낸 것인데 실제 출력된 데이터를 토대로 최소자승법에 의해 구한 결과이다. 액츄에이터의 성능은 X축이 설정 주파수 45Hz까지 구현이 가능한 것으로 판단되나 액츄에이터의 추종 성능이 인장측에서 구현이 되지 않은 것을 알 수 있었다. 또한, X축보다 Y축, Z축 가진기가 동특성면에서 우수하며, Y축, Z축은 같은 설계 사양으로 제작되었기 때문에 거의 유사한 유사

한 형태의 특성곡선을 보여주고 있으며, Z축에서 보다 양호한 결과를 보이고 있다. X축 액츄에이터의 가능주파수 범위는 20Hz이며 진폭은 약 4.23mm로 판단된다. 또한, Y축과 Z축은 모두 45Hz까지 구현이 가능할 것으로 판단되며, 진폭은 각각 1.73mm, 3.98mm임을 확인하였다.

5.2 하중 보정결과

Fig.11, 12, 13은 X축과 Y축, Z축의 각 주파수별 하중보정결과이며 3축 모두 증폭기 이득을 높여줌에 따라 유사한 형태의 곡선을 보임을 알 수 있다.

Fig.11은 X축의 하중보정결과로서 측정된 주파수는 0.5~10Hz이다. 각 주파수대별로 독자적인 하중센서(Cal측)과 액츄에이터에 부착된 하중센서(A/D측)의 값은 동일한 값을 유지하며 증가하고 인장하중과 압축하중의 값들은 일치함을 확인하였다. 또한, 주파수를 높여줌에 따라 인장측과 압축측에서 가진속도와 지그의 유격으로 인하여 하중값이 30 kg 정도 다소 증가하였으며 최대 증폭기 이득은 DY-60이다. 10Hz에서 최대 임계하중은 인장이 1451.7 kg, 압축이 1436.1 kg임을 알 수 있었다.

Fig.12와 13은 Y축과 Z축의 결과이며, 같은 실린더 단면적을 갖는 액츄에이터이므로 측정 결과 역시 유사한 데이터를 얻을 수 있었다. 증폭기 이득을 높여줌에 따라 각 축들은 점진적으로 증가하며, 최대 증폭기 이득은 DY-60이었다. 특히, X축과 마찬가지로 인장하중시 입력주파수를 높여줌에 따라 가진속도와 지그의 유격으로 인하여 하중에 변화가 있었는데 설계상에서 지그의 고정문제를 면밀히 검토해야 할 것으로 판단된다. 10Hz에서 최대 임계하중은 Y축의 인장이 1171.2 kg, 압축이 1220.5 kg이며, Z축은 인장이 1212.8 kg, 압축이 1254.9 kg로 측정되었다.

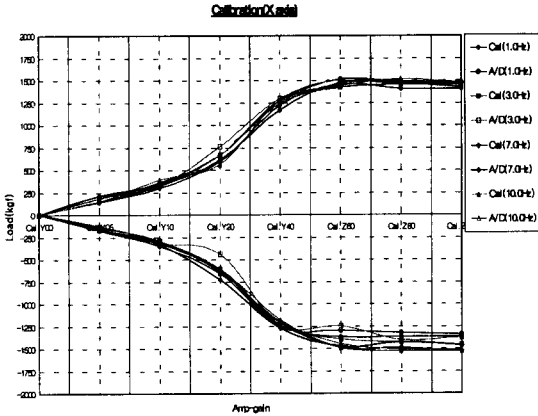


Fig. 11 Load of X axis actuator

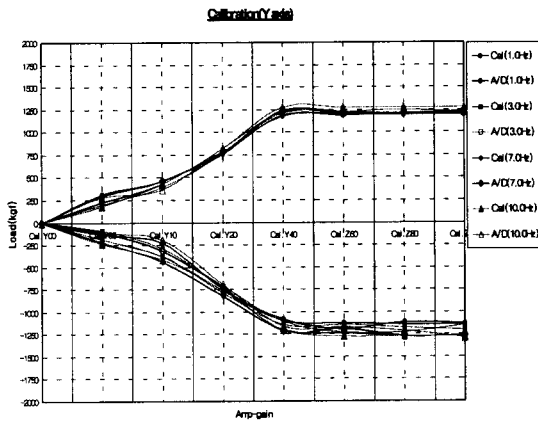


Fig. 12 Load of Y axis actuator

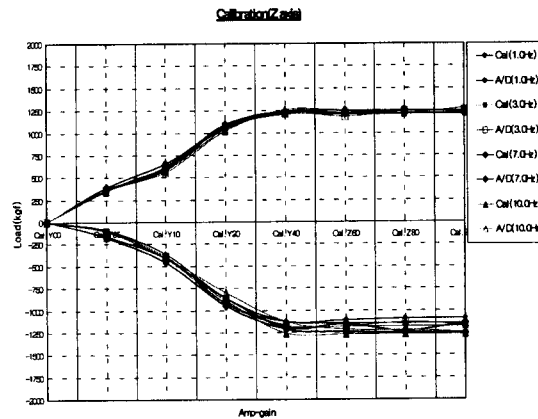


Fig. 13 Load of Z axis actuator

6. 결론

다축 제어용 가진기의 구동소프트웨어를 개발하여 신뢰성을 평가하여 본 결과 각 축의 변위는 3Hz이하의 주파수대에서는 반복정밀도가 0.1%로 아주 양호하였고, 5Hz에서 10Hz까지는 증폭기 이득을 높여짐에 따라 다소 정밀도가 떨어짐을 알 수 있었다. 또한, 12Hz이상의 범위에서의 반복정밀도는 좋지 않으나 구동 소프트웨어상의 오류로 인한 것이라기 보다는 유압 액추에이터가 설정 주파수대를 추종하지 못하는데 따른 성능한계로 보여진다.

다축 제어용 가진기의 성능한계를 나타내는 변위가 각 축에 따라 약간의 차이는 있으나 주파수 10Hz에서 X축 16.97mm, Y축 22.96mm, Z축 24.57mm로 비교적 양호한 동특성을 나타냄을 알 수 있었다.

하중은 변위와 달리 출력값은 선형이 아니며 최대 임계하중까지 액추에이터가 추종함을 알 수 있었고, 인장축과 압축축의 일관성을 확인하였다. 또한, 고정지그의 완전한 설계가 이루어진다면 주파수대별로 다소의 증가폭은 크게 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 최대하중은 10Hz에서 X축이 약 $\pm 1450 \text{ kg}_f$, Y축이 약 $\pm 1200 \text{ kg}_f$, Z축이 $\pm 1250 \text{ kg}_f$ 로 측정되었다.

하중은 각각의 축 모두 최대 임계하중까지 증폭기 이득을 나누어 조절이 가능하였으며, 출력하중의 데이터베이스화로 추후 있게될 실험에서 그 활용성이 증대될 것으로 보인다.

후 기

이 논문의 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Fatigue design handbook, Society of Automotive Engineers, AE-10, Inc. pp.1- 13.

- 2) 김재욱, "A study on dynamic characteristics and optimization of a special weapon vehicle moving on random road profile, using the state variable technique", 한국과학기술원 석사학위논문, pp.105, 1979.
- 3) 박기효, "Active vibration control of a single D.O.F. suspension system using an adaptive filter", 한국과학기술원 석사학위논문, pp.51, 1992.
- 4) 송지호, "A Study on Surface Fatigue Crack Growth Behavior and Life Prediction under Random Loading", 한국과학재단 연구보고서, pp.41, 1992.
- 5) 이성래, "Development of a Hydraulic System Simulator Using a DSP Board", 한국과학재단연구보고서, pp.51, 1996.
- 6) D. Bastow, G.P.Howard, Car Suspension and Handling, Society of Automotive Engineers, INC., pp.6-8, 1993.
- 7) 가야바공업주식회사, Automotive Suspension, 에드텍, pp.57-63, 1997.
- 8) J. A. Bannantine, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, pp.12-19, 1990.
- 9) 8 channel Analog Out board User's manual, AXIOM Co. Ltd. pp.2-5.
- 10) AX5622B DA&C Board User's manual, AXIOM Co. Ltd. pp.3-27.
- 11) 정상화의 2인, "Development of operating software of 3-axis Vibration Testing Device", 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp.507-412, 1999.
- 12) 정상화의 2인, "A Study on Operational Software Development and Calibration of 3-axis Vibration Testing Device", 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp.234-239, 1999.
- 13) 정상화의 4인, "A study on Displacement Load Calibration of Multi-Axis Simulator", 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp.591-594, 2000.