



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010년 8월
석사학위논문

4축 유압 시뮬레이터의 진동특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 철 우

4축 유압 시뮬레이터의 진동특성에 관한 연구

A Study on the Vibration Characteristics of 4-axis
Hydraulic Simulator

2010 년 8 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 철 우

4축 유압 시뮬레이터의 진동특성에 관한 연구

지도교수 김 태 현

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2010 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 철 우

김철우의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 정낙규



위원 조선대학교 조교수 박정우



위원 조선대학교 교수 김택현



2010년 5월 일

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	VII
NOMENCLATURES	VIII
ABSTRACT	XI
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구목적 및 방법	4
제 2 장 유압 시뮬레이터의 구성요소	5
2.1 유압 액추에이터	7
2.2 서보밸브	10
2.3 유압 공급장치	13
2.4 서보 컨트롤러	16
2.5 신호처리 장치	17
제 3 장 4축 유압 시뮬레이터의 계측 소프트웨어	19
3.1 출력 프로그램의 구조	20
3.2 입력 프로그램의 구조	22
3.3 이론적 배경	23
3.3.1 Fourier Transform	23
3.3.2 Correlation Function & Spectrum	25

3.3.3 Spectral Density Function	26
3.3.4 Discrete Fourier Transform	27
3.3.5 Fast Fourier Transform Algorithm	28
3.4 충격실험 계측 프로그램	31
3.5 동시 입·출력 계측 프로그램	34
제 4 장 실험 내용 및 고찰	37
4.1 Impulse Hammer를 이용한 충격 실험	37
4.1.1 실험결과 및 고찰	40
4.2 Random 신호를 이용한 가진 실험	67
4.2.1 실험결과 및 고찰	69
제 5 장 결 론	89
참 고 문 헌	

LIST OF TABLES

Table 2.1	Specification of Signal Processing Unit	17
Table 4.1	Differences of the FFT Data in Acc 1	65
Table 4.2	Differences of the FFT Data in Acc 2	66
Table 4.3	Differences of the FFT Data in Acc 3	66
Table 4.4	Differences of the FFT Data in Acc 1	88
Table 4.5	Differences of the FFT Data in Acc 2	88
Table 4.6	Differences of the FFT Data in Acc 3	89

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1	Spindle-Coupled Road Simulator of MTS Co.	3
Fig. 2.1	Schematic diagram of 4-axis hydraulic simulator	6
Fig. 2.2	Configuration of 4-axis hydraulic simulator	8
Fig. 2.3	Assembly of 4-axis hydraulic actuator	9
Fig. 2.4	Schematic diagram of servo valve	11
Fig. 2.5	Hydraulic circuit of 4-axis hydraulic simulator	14
Fig. 2.6	Assembly of hydraulic unit	15
Fig. 2.7	Signal flow diagram of PXI	18
Fig. 3.1	Signal flow diagram of operating program for 4-axis hydraulic simulator	19
Fig. 3.2	Flow chart of output program	20
Fig. 3.3	Flow chart of input program	22
Fig. 3.4	Measurement program's front panel for the impact experiment	32
Fig. 3.5	Measurement program's block diagram for the impact experiment	33
Fig. 3.6	Measurement program's front panel for the impact experiment	35
Fig. 3.7	Measurement program's block diagram for the impact experiment	36
Fig. 4.1	Specification of impact hammer	38
Fig. 4.2	Acceleration of acc 1 about the 1st impact signal	40
Fig. 4.3	FFT magnitude of acc 1 about the 1st impact signal	40
Fig. 4.4	FFT phase of acc 1 about the 1st impact signal	41
Fig. 4.5	Power spectrum of acc 1 about the 1st impact signal	41

Fig. 4.6	Power spectrum density of acc 1 about the 1st impact signal	42
Fig. 4.7	Acceleration of acc 2 about the 1st impact signal	43
Fig. 4.8	FFT magnitude of acc 2 about the 1st impact signal	43
Fig. 4.9	FFT phase of acc 2 about the 1st impact signal	44
Fig. 4.10	Power spectrum of acc 2 about the 1st impact signal	44
Fig. 4.11	Power spectrum density of acc 2 about the 1st impact signal	45
Fig. 4.12	Acceleration of acc 3 about the 1st impact signal	46
Fig. 4.13	FFT magnitude of acc 3 about the 1st impact signal	46
Fig. 4.14	FFT phase of acc 3 about the 1st impact signal	47
Fig. 4.15	Power spectrum of acc 3 about the 1st impact signal	47
Fig. 4.16	Power spectrum density of acc 3 about the 1st impact signal	48
Fig. 4.17	Acceleration of acc 1 about the 2nd impact signal	49
Fig. 4.18	FFT magnitude of acc 1 about the 2nd impact signal	49
Fig. 4.19	FFT phase of acc 1 about the 2nd impact signal	50
Fig. 4.20	Power spectrum of acc 1 about the 2nd impact signal	50
Fig. 4.21	Power spectrum density of acc 1 about the 2nd impact signal	51
Fig. 4.22	Acceleration of acc 2 about the 2nd impact signal	52
Fig. 4.23	FFT magnitude of acc 2 about the 2nd impact signal	52
Fig. 4.24	FFT phase of acc 2 about the 2nd impact signal	53
Fig. 4.25	Power spectrum of acc 2 about the 2nd impact signal	53
Fig. 4.26	Power spectrum density of acc 2 about the 2nd impact signal	54
Fig. 4.27	Acceleration of acc 3 about the 2nd impact signal	55
Fig. 4.28	FFT magnitude of acc 3 about the 2nd impact signal	55
Fig. 4.29	FFT phase of acc 3 about the 2nd impact signal	56

Fig. 4.30	Power spectrum of acc 3 about the 2nd impact signal	56
Fig. 4.31	Power spectrum density of acc 3 about the 2nd impact signal	57
Fig. 4.32	Acceleration of acc 1 about the 3rd impact signal	57
Fig. 4.33	FFT magnitude of acc 1 about the 3rd impact signal	58
Fig. 4.34	FFT phase of acc 1 about the 3rd impact signal	58
Fig. 4.35	Power spectrum of acc 1 about the 3rd impact signal	59
Fig. 4.36	Power spectrum density of acc 1 about the 3rd impact signal	59
Fig. 4.37	Acceleration of acc 2 about the 3rd impact signal	60
Fig. 4.38	FFT magnitude of acc 2 about the 3rd impact signal	60
Fig. 4.39	FFT phase of acc 2 about the 3rd impact signal	61
Fig. 4.40	Power spectrum of acc 2 about the 3rd impact signal	61
Fig. 4.41	Power spectrum density of acc 2 about the 3rd impact signal	62
Fig. 4.42	Acceleration of acc 3 about the 3rd impact signal	63
Fig. 4.43	FFT magnitude of acc 3 about the 3rd impact signal	63
Fig. 4.44	FFT phase of acc 3 about the 3rd impact signal	64
Fig. 4.45	Power spectrum of acc 3 about the 3rd impact signal	64
Fig. 4.46	Power spectrum density of acc 3 about the 3rd impact signal	65
Fig. 4.47	Gaussian white random signal	67
Fig. 4.48	Periodic white random signal	68
Fig. 4.49	Uniform white random signal	68
Fig. 4.50	FFT magnitude of acc 1 about gaussian white random signal	69
Fig. 4.51	FFT phase of acc 1 about gaussian white random signal	69
Fig. 4.52	Power spectrum of acc 1 about gaussian white random signal	70
Fig. 4.53	Power spectrum density of acc 1 about gaussian white	

random signal	70
Fig. 4.54 FFT magnitude of acc 2 about gaussian white random signal	71
Fig. 4.55 FFT phase of acc 2 about gaussian white random signal	71
Fig. 4.56 Power spectrum of acc 2 about gaussian white random signal	72
Fig. 4.57 Power spectrum density of acc 2 about gaussian white random signal	72
Fig. 4.58 FFT magnitude of acc 3 about gaussian white random signal	73
Fig. 4.59 FFT phase of acc 3 about gaussian white random signal	73
Fig. 4.60 Power spectrum of acc 2 about gaussian white random signal	74
Fig. 4.61 Power spectrum density of acc 2 about gaussian white random signal	74
Fig. 4.62 FFT magnitude of acc 1 about periodic random signal	75
Fig. 4.63 FFT phase of acc 1 about periodic random signal	75
Fig. 4.64 Power spectrum of acc 1 about periodic random signal	76
Fig. 4.65 Power spectrum density of acc 1 about periodic random signal	76
Fig. 4.66 FFT magnitude of acc 2 about periodic random signal	77
Fig. 4.67 FFT phase of acc 2 about periodic random signal	77
Fig. 4.68 Power spectrum of acc 2 about periodic random signal	78
Fig. 4.69 Power spectrum density of acc 2 about periodic random signal	78
Fig. 4.70 FFT magnitude of acc 3 about periodic random signal	79
Fig. 4.71 FFT phase of acc 3 about periodic random signal	79
Fig. 4.72 Power spectrum of acc 3 about periodic random signal	80
Fig. 4.73 Power spectrum density of acc 2 about periodic random signal	80
Fig. 4.74 FFT magnitude of acc 1 about uniform white random signal	81

Fig. 4.75 FFT phase of acc 1 about uniform white random signal	81
Fig. 4.76 Power spectrum of acc 1 about uniform white random signal	82
Fig. 4.77 Power spectrum density of acc 1 about uniform white random signal	82
Fig. 4.78 FFT magnitude of acc 2 about uniform white random signal	83
Fig. 4.79 FFT phase of acc 2 about uniform white random signal	83
Fig. 4.80 Power spectrum of acc 2 about uniform white random signal	84
Fig. 4.81 Power spectrum density of acc 2 about uniform white random signal	84
Fig. 4.82 FFT magnitude of acc 3 about uniform white random signal.	85
Fig. 4.83 FFT phase of acc 3 about uniform white random signal	85
Fig. 4.84 Power spectrum of acc 3 about uniform white random signal	86
Fig. 4.85 Power spectrum density of acc 3 about uniform white random signal	86

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 2.1	4 axes hydraulic simulator	5
Photo. 2.2	Servo valve of 4-axis hydraulic simulator	11
Photo. 2.3	Servo controller and signal processing unit of 4-axis hydraulic simulator	16
Photo. 4.1	Impact hammer kit(K219B)	37
Photo. 4.2	Impact hammer	38
Photo. 4.3	Exciting point on the hydraulic simulator	39

NOMENCLATURES

A_c	Area of cylinder
A_r	Ration of input current and output flux
B_i	Relative coordinate of actuator i to the basic coordinate
$C(\tau)$	Correlation function
F	Input load
$G(f)$	Infinite spectrum of real part of frequency
$G_{XX}(f)$	Input spectrum
$G_{YX}(f)$	Output spectrum
$G_{xy}(f, T)$	Correlation spectrum density function between $x(t)$ and $y(t)$
$H(f)$	Frequency response function
$H_I(f)$	Imaginary part of frequency response function
$H_R(f)$	Real part of frequency response function
$H_{XY}(f)$	Frequency response function of transfer function between $X(f)$ and $Y(f)$
$ H_I(f) $	Gain margin of frequency response function
L_M	Capacity of motor
L_i	Length of hydraulic actuator
P_c	Area of validity
P_d	Degree of phase delay
Q_c	Capacity of servo valve
Q_p	Capacity of hydraulic pump

$S(f)$	Spectral density function
T_d	Delay time
$[T_{dw}]$	Homogeneous transform matrix
$X(f)$	Fourier transform of $x(t)$
$\mathbf{X}(f)$	Linear spectrum of $\mathbf{x}(t)$
$\mathbf{X}_d(f)$	Desired input signal
$X_I(f)$	Imaginary part of Fourier transform of $x(t)$
$\mathbf{X}_o(f)$	Fourier transform of initial input signal
$X_R(f)$	Real part of Fourier transform of $x(t)$
$X_T(f)$	Finite Fourier transform
$X^*(f)$	Conjugate complex function of $X(f)$
$\mathbf{Y}(f)$	Linear spectrum of $\mathbf{y}(t)$
$\mathbf{Y}_d(f)$	Fourier transform of desired output signal
$\Delta \mathbf{Y}_{dk}(f)$	Fourier transform of $\Delta \mathbf{y}_{dk}(t)$
a	Amplitude
b_i	Relative coordinate of ball-joint i to the basic coordinate
f	Frequency
f_c	Cut-off frequency of Nyquist
f_k	Optional frequency
$x(t)$	Time-varying function
$\mathbf{x}(t)$	Row vector of input signal
$y(t)$	Output of convolution integral
$\mathbf{y}(t)$	Row vector of output signal
$\Delta \mathbf{y}_{dk}(t)$	Difference between $\mathbf{y}_d(t)$ and $\mathbf{y}_k(t)$
ω	Angular velocity

φ	Angle from the X-axis
θ	Angle from the Y-axis
$\theta(f)$	Phase margin of frequency response function
ϕ	Angle from the Z-axis

ABSTRACT

A Study on the Vibration Characteristics of 4-axis Hydraulic Simulator

Cheol-Woo Kim

Advisor: Prof. Taekhyun Kim Ph.D.

Dept. of Advanced Part & Material
Engineering

Graduate School of Chosun University

The frequency analysis means analysis and interpretation of the own characteristic of the some objects using conversion from time dimension signal to frequency dimension signal. In frequency dimension, one of the analyzed signals sharply changes at special frequency and phase. That frequency is called the eigenfrequency or natural frequency and regarded as the characteristic of the hydraulic simulator. The natural frequency is an important factor when the mechanisms are designed because the special phenomenons(noise, vibration, failure, etc), the influence of the fatigue life of components, occur in natural frequency. So, to understand the vibration characteristics of 4-axis hydraulic simulator is the most important point to increase the reliability of the hydraulic simulator.

In this thesis, measurement program for the impact experiment and simultaneous input-output measurement program are developed for

understanding the vibration characteristics of 4-axis hydraulic simulator. Programs are designed to enable user to measure and analyze the data in various situation and to easily change the variables, for example, the type of input signals, window function, averaging mode, etc.

In the impact experiment, the impact signals made by the impact hammer at the various positions are acquired through the three accelerometers and the natural frequency is analyzed by the measurement program for the impact experiment.

In the random signal experiment, the hydraulic simulator's piston is driven by the random signal using the simultaneous input-output measurement program. Acquired data about the hydraulic simulator are analyzed by simultaneous input-output measurement program to get the hydraulic simulator's natural frequency. Used random signals are Gaussian white random signal, periodic white random signal and uniform white random signal.

Acquired data about the hydraulic simulator's frequency analysis are compared with preceded experiment data about the 4-axis hydraulic load simulator. This comparison will be expected to support the reliability about road profile realization of 4-axis hydraulic simulator.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

다축 유압 시뮬레이터는 다양한 진동 현상이 발생하는 기계 장치에 대한 진동 평가나 내구성 실험에 주로 이용되고 있고, 유압 시뮬레이터를 이용한 진동 실험은 제품의 수명 평가 및 내구 안정성 확보에 중요한 데이터를 제공한다¹⁾.

자동차의 경우 일반적인 내구 안정성 평가는 다수의 프로토타입 차량 제작 후 내구도로 주행 시험을 통해서 이루어지고 있다.

이것은 성능 및 내구성 평가에 많은 신뢰성을 가질 수 있으나, 실차를 주행함으로써 요구되는 시간, 공간, 환경의 제약과 운전자마다의 운전습관 및 주행환경차이에 따른 재현성의 문제뿐만 아니라 외부노출로 인한 차량개발의 보안성 및 실험용 차량의 지속적 관찰 등의 문제점을 가지고 있다.

반면에, 실험실 재현실험은 주어진 실험실내의 공간에서 차량의 주행상태를 반복하고 재현함으로써 많은 시간의 절감과 공간 및 환경의 제약에서 벗어날 수 있으며, 실험의 지속적 재현성과 실험자가 실험중인 차량을 수시로 관찰하고 분석할 수 있어서 문제점 등의 조기 확인이 가능한 장점이 있다. 이러한 이유로 인하여 다축 유압 시뮬레이터를 통한 재현 실험이 보편화되고 있고, 차량개발기간의 단축은 물론 높은 신뢰성을 가진 고품질 자동차의 개발에 활용하고 있다^{2)~4)}.

국외의 연구동향을 살펴보면 60년대 말부터 70년대 초반을 기점으로 하여 실차에 대한 내구성 테스트를 본격적으로 시작하였는데 1968년에 Ford Motors의 B.K. Barrowcliff와 R.E. Ehlert⁵⁾는 단축 유압 액추에이터를 이용하여 실차에서 측정된 노면데이터를 LAB 구현실험을 통하여 구현하였으며, FIAT의 E. Franchini⁶⁾등은 전체 차량에 대한 모의실험을 하였다.

다축 주행시뮬레이터에 대한 연구가 본격화되면서 P. Grote와 J. Fash⁷⁾는 내구성 해석과 동특성에 대한 개념을 명확히 하여 실험기 개발의 근간을 확립

하였으며, GM의 B.W. Cryer, P.E. Nawrocki와 MTS Co.의 R.A. Rund⁸⁾는 노면 응답과 시뮬레이터의 응답을 비교하고 정리하였다.

선진 자동차 회사에서는 1:1 Scale의 가진 시뮬레이터를 개발하여 활용하고 있고, MTS Co.와 Schenck Co.는 1960년대부터 가진 로드 시뮬레이터를 개발하여 현재 6자유도 16채널의 다축 로드 시뮬레이터를 개발하였다. Fig. 1.1은 MTS Co.의 다축 로드 시뮬레이터이며, 국내 자동차 메이커에서 장착하여 사용하고 있다^{9)~14)}.



Fig. 1.1 Spindle-Coupled Road Simulator of MTS Co.

1.2 연구목적 및 방법

유압 시뮬레이터는 수집한 가속도 데이터를 재현하여 실험하기 때문에 재현 데이터의 정확성이 최우선 과제이다. 일반적으로 시뮬레이터의 정확성 및 신뢰도의 검증은 재현 알고리즘으로 시뮬레이션을 수행하고 원 데이터와 주파수 분석을 이용해 비교하여 평가되고 있다^{15)~17)}. 주파수 분석은 시간 영역에서 어떤 물체의 응답유무 및 변화 양상을 주파수 영역으로 변환하여 그 물체가 가지는 고유 특성을 분석하고 해석하는 것을 의미한다^{18)~21)}. 이렇게 분석된 신호는 공진에 의해 측정 주파수에서 크게 반응하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 지점을 고유진동수 또는 공진 주파수라고 하며 이런 공진 주파수가 유압 시뮬레이터가 갖는 고유한 특성이라고 할 수 있다. 공진 주파수는 특정한 주파수 영역에서 과도한 반응을 보이기 때문에 모든 기계 장치의 설계 시에 우선적으로 고려되는 특성이다²²⁾. 특히, 유압 시뮬레이터의 경우 여러 부분품들의 결합으로 이루어져 있어서 시뮬레이터 자체의 진동 특성파악은 시뮬레이터의 신뢰성을 높이는데 중요한 요소로 생각된다.

본 논문에서는 유압 시뮬레이터의 진동 특성 파악을 위하여 첫 번째 충격 시험 프로그램과 동시 입출력 프로그램을 개발하였다.

두 번째 Impact Hammer로 다양한 위치에 충격 신호를 주고 개발한 프로그램을 이용하여 응답 신호에 대한 주파수 분석을 실시하여 유압 시뮬레이터의 공진 주파수를 측정하였다.

세 번째 개발한 프로그램을 이용하여 여러 가지 Random 신호^{23),24)}를 입력하여 유압 피스톤을 구동시키고 그에 대한 가속도계의 응답신호를 습득하고 주파수 분석을 실시하였다. 사용된 Random 신호는 Gaussian White Random Signal, Periodic White Random Signal, Uniform White Random Signal이다.

마지막으로 획득한 유압 시뮬레이터의 주파수 분석 자료와 선행된 4축 유압 로드 시뮬레이터의 주파수 분석 자료를 토대로 유압 시뮬레이터의 공진 주파수 영역과 4축 유압 로드 시뮬레이터 실험 주파수 영역을 비교하였다.

제 2 장 4축 유압 시뮬레이터의 구성요소

4축 유압 시뮬레이터는 유압 액추에이터, 컨트롤러, 데이터 처리장치, 유압원으로 구성되어 있으며 액추에이터를 가진시키면서 4축에 상하 방향의 변위, 주파수 등의 입력변수를 주어 노면형상을 구현할 수 있도록 설계·제작되었다. Fig. 2.1은 실험에 사용된 4축 유압 시뮬레이터이고 Fig. 2.2는 시뮬레이터의 구성도를 나타낸 것이다.



Photo. 2.1 4-axis hydraulic simulator.

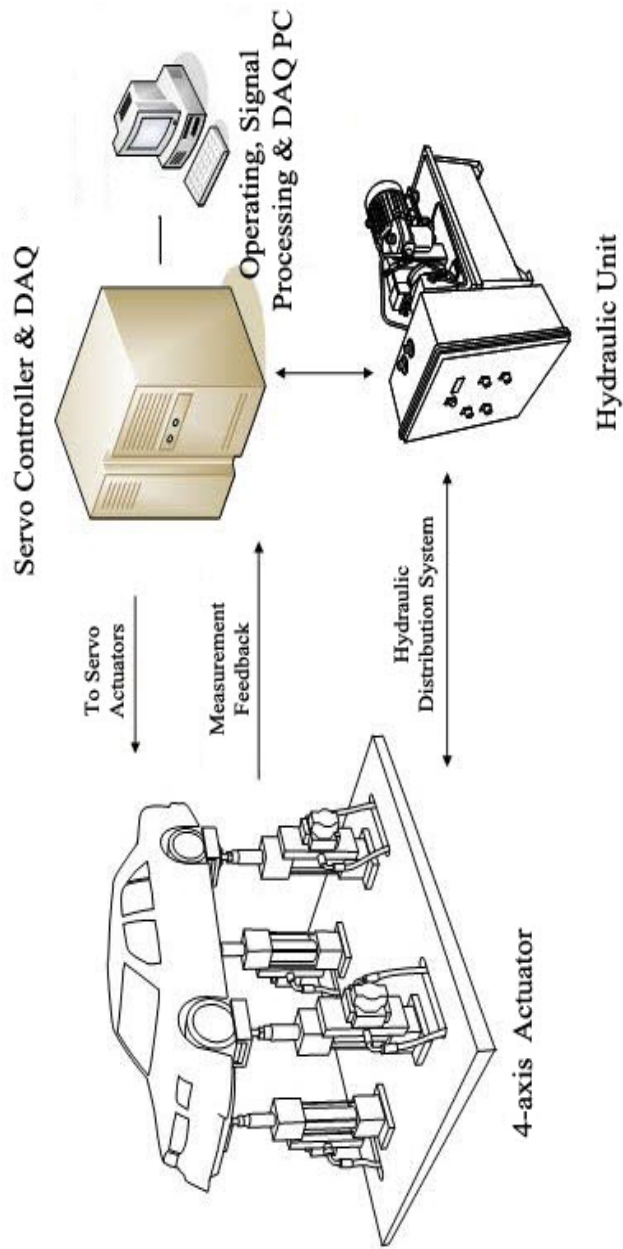


Fig. 2.1 Schematic diagram of 4-axis hydraulic simulator.

2.1 유압 액추에이터

유압 액추에이터는 유압원으로부터 공급되는 유체의 압력을 기계적 에너지로 변환하는 장치를 말하며 운동방식에 따라 직선운동을 하는 유압 실린더, 회전운동을 하는 오일모터와 요동운동을 하는 요동실린더로 나눌 수 있다. 본 시스템에 사용된 유압 액추에이터는 서보밸브를 장착한 복동 실린더를 부착한 액추에이터이며 주어진 하중과 변위를 견딜 수 있도록 설계·제작하였다. 시스템의 오동작으로 인하여 액추에이터 내부의 피스톤이 급격히 하강하여 헤드커버와 충돌할 때 유압 액추에이터가 파손되는 것을 방지하기 위하여 유압 액추에이터 상하 내부에 쿠션장치를 설치하였다. 또한 피스톤의 위치감지 및 시스템 제어를 하기 위하여 피드백 정보를 전달하는 유압 변위센서 (hydraulic displacement transducer)를 설치하였으며 고장이 생길 경우 수리를 원활히 하기 위하여 니들 밸브를 사용하였고 전기적 입력신호에 비례하여 정확하게 액추에이터에 유량을 공급해 주는 서보밸브를 장착하였다.

Fig. 2.3는 유압 액추에이터의 설계도면이고 Fig 2.4은 유압 액추에이터의 조립도이다.

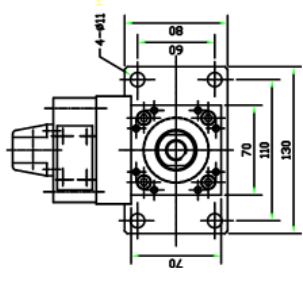
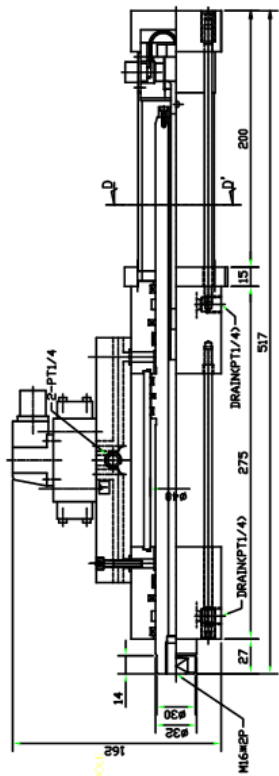
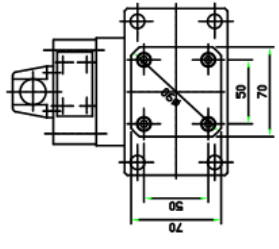
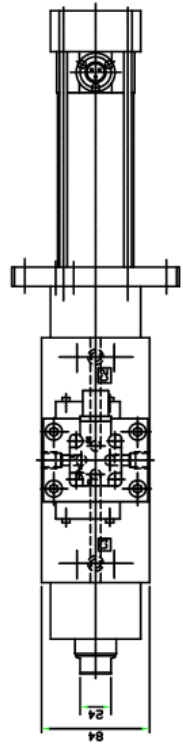
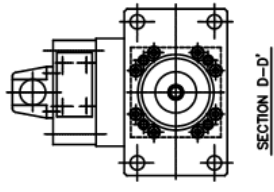


Fig. 2.2 Configuration of 4-axis hydraulic simulator.

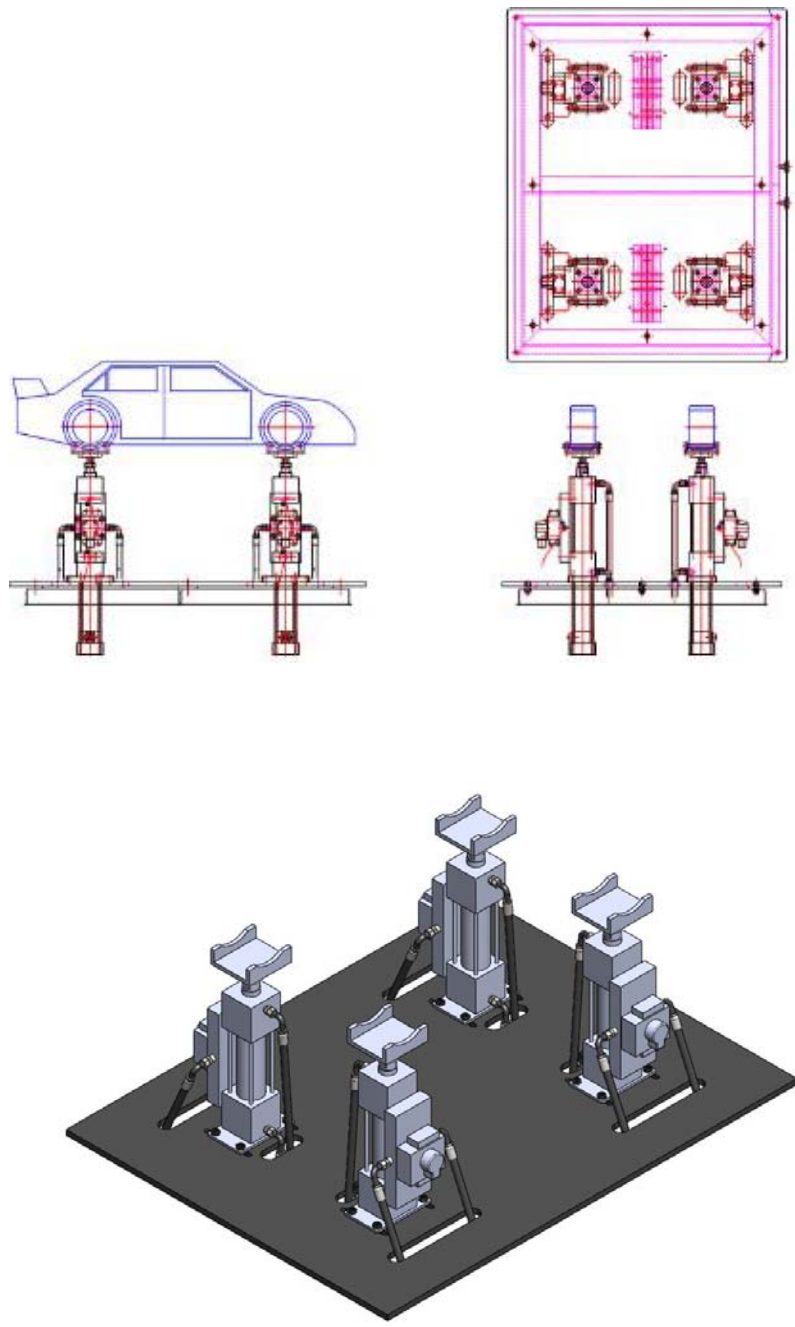


Fig 2.3 Assembly of 4-axis hydraulic actuator.

2.2 서보밸브

유압 액추에이터에 장착된 서보밸브는 현재 널리 사용되고 있는 노즐 플레퍼 방식의 2단 서보밸브를 사용하였다. Fig. 2.5은 서보밸브의 구조도이다.

서보밸브는 입력전류를 플레퍼의 변위로 변환하는 토크모터부, 플레퍼의 변위를 유압의 압력차로 변환하는 유압 전단 증폭부 그리고 주회로의 유량을 제어하는 주 스플부의 3개부분으로 구성되어 있으며 입력전류가 0인 경우 플레퍼는 양쪽 노즐로부터 같은 거리에 있게 되고 양 노즐로부터는 같은 양과 같은 압력의 기름이 분출하여 양쪽 노즐의 배압이 평형을 이루도록 설계되었다.²⁵⁾ 그러나 토크모터에 전류가 입력되어 플레퍼가 움직이기 시작하면 이 평형이 불완전해짐으로 인해 노즐 배압이 변화하는 원리로 작동한다. 채택된 서보밸브의 히스테리시스는 3%이내이며 주어진 입력에 대하여 부하가 0인 경우 부하가 거의 없다. 입력전류를 정현파로 주고 주파수를 변화시켰을 때의 출력유량의 특성은 낮은 주파수 범위에서는 입력전류와 출력유량의 곡선이 일치하지만 주파수가 높아짐에 따라서 위상지연이 생기며 전류값에 대한 유량의 추종성이 저하된다. 위상지연에 관한 특성은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_d = T_d \times f \times 360^\circ \quad (2.1)$$

여기서 P_d 는 위상 지연각(deg), T_d 는 지연시간(sec), f 는 주파수(Hz)이다.

또한 유량에 관한 특성은 다음 식과 같이 나타낼 수 있는데 입력전류와 출력유량의 비는 계인 특성이라 하며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_r = 20 \log_{10} \frac{O_d}{I_d} \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

Fig. 2.6는 4축 유압 시뮬레이터에 장착된 서보밸브의 사진이다.

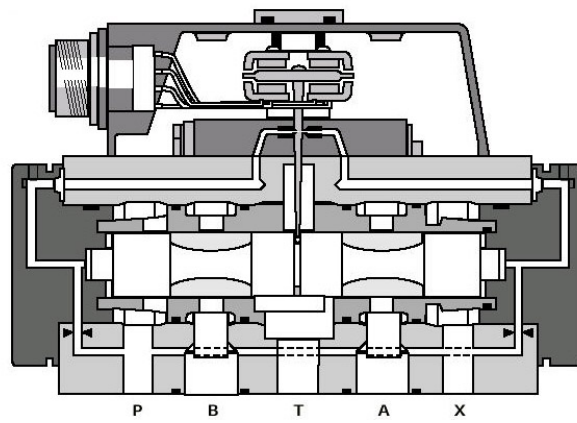


Fig. 2.4 Schematic diagram of servo valve²⁶⁾.

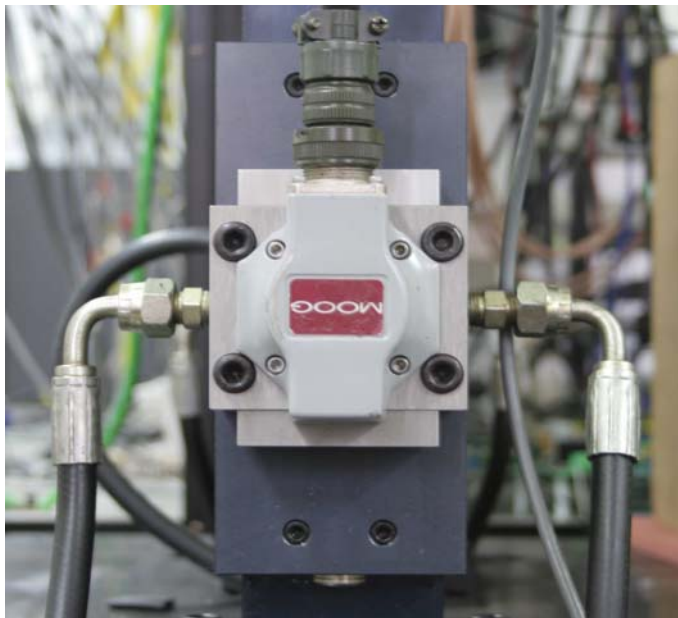


Photo. 2.2 Servo valve of 4-axis hydraulic simulator.

4축 유압 시뮬레이터에서 실린더의 크기를 결정하기 위해 필요한 가진력은 다음 식에 의하여 계산된다²⁷⁾.

$$F = m \cdot \alpha_{\max} = \frac{W}{g} \cdot a \omega^2 \quad (2.3)$$

여기서 F 는 가진력(kgf), W 는 부하중량(kgf), g 는 중력가속도(m/sec²), a 는 진폭(m) 그리고 각속도 $\omega = 2\pi f$ (rad/sec)이다. 원하는 가진을 요구하는 값에 대입하여 정리하면 다음과 같이 가진력을 계산할 수 있다.

$$F = \frac{100}{9.8} \times 0.1 \times (2\pi \times 20)^2 = 1611.4 \text{ kgf}$$

유압 액추에이터의 실린더 사이즈는 펌프 공급압력을 210 kgf/cm², 서보밸브의 압력손실을 70 kgf/cm², 실린더 공급압력을 140 kgf/cm²로 가정하면 실린더 면적은 다음과 같이 계산된다.

$$A_c = \frac{F}{P_c} = \frac{1611.4}{140} = 11.5 \text{ cm}^2 \quad (2.4)$$

여기서 A_c 는 실린더 단면적(cm²)이고 P_c 는 공급압력(kgf/cm²)이다.

계산된 값에 근사하도록 액추에이터 로드직경을 32 mm로 하고 액추에이터 내경 40 mm, 유압면적 7.07 cm²인 유압 액추에이터를 선정하였다. 연직방향 액추에이터는 실제 노면에 입력신호를 주었을 경우 받는 하중이 가장 크기 때문에 유압면적을 크게 주었고 전후방향과 횡방향의 액추에이터는 5.08 cm²로 다소 작은 유압면적을 가지도록 설계하였다. 서보밸브의 용량은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$Q_c = A_c \cdot V_{\max} = A_c \cdot a \cdot \omega \quad (2.5)$$

여기서 Q_c 는 출력유량(l/min), A_c 는 실린더 단면적(cm^2)을 나타낸다.

서보밸브는 실제로 계산된 용량보다 큰 용량을 갖는 모델을 선정하여 무그사의 J761-3005 모델을 채택하였다.

2.3 유압 공급장치³⁰⁾

각 축을 동시 구동할 때 충분한 유압을 서보밸브에 보내 주기 위하여 유압 공급장치의 오일탱크는 100 l의 용량을 갖도록 설계하였으며 다음 식에 의하여 계산된 펌프용량은 28 l/min이며 내접기어 펌프를 채택하였다.

$$Q_P = \left\{ (Q_E + Q_I) / \frac{\pi}{2} \right\} + Q_R \quad (2.6)$$

여기서 Q_P 는 펌프용량(l/min), Q_E 는 실린더 요구유량(l/min), Q_I 는 펌프 내 유출량(l/min) 그리고 Q_R 는 릴리프 유량(l/min)이다. 유압 공급장치에 사용된 유압모터의 용량은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$L_M = \frac{Q_P \times P}{612 \times \eta} [KW] \quad (2.7)$$

여기서 L_M 은 모터용량, P 는 펌프의 공급압력, η 는 펌프 전효율이다. 계산된 결과값에 의하여 유압모터는 1.5 kW의 3상 모터를 채택하였다. Fig. 2.7는 설계된 4축 유압 시뮬레이터의 유압회로이며 Fig 2.7 은 유압 공급장치의 조립도를 그린 것이다.

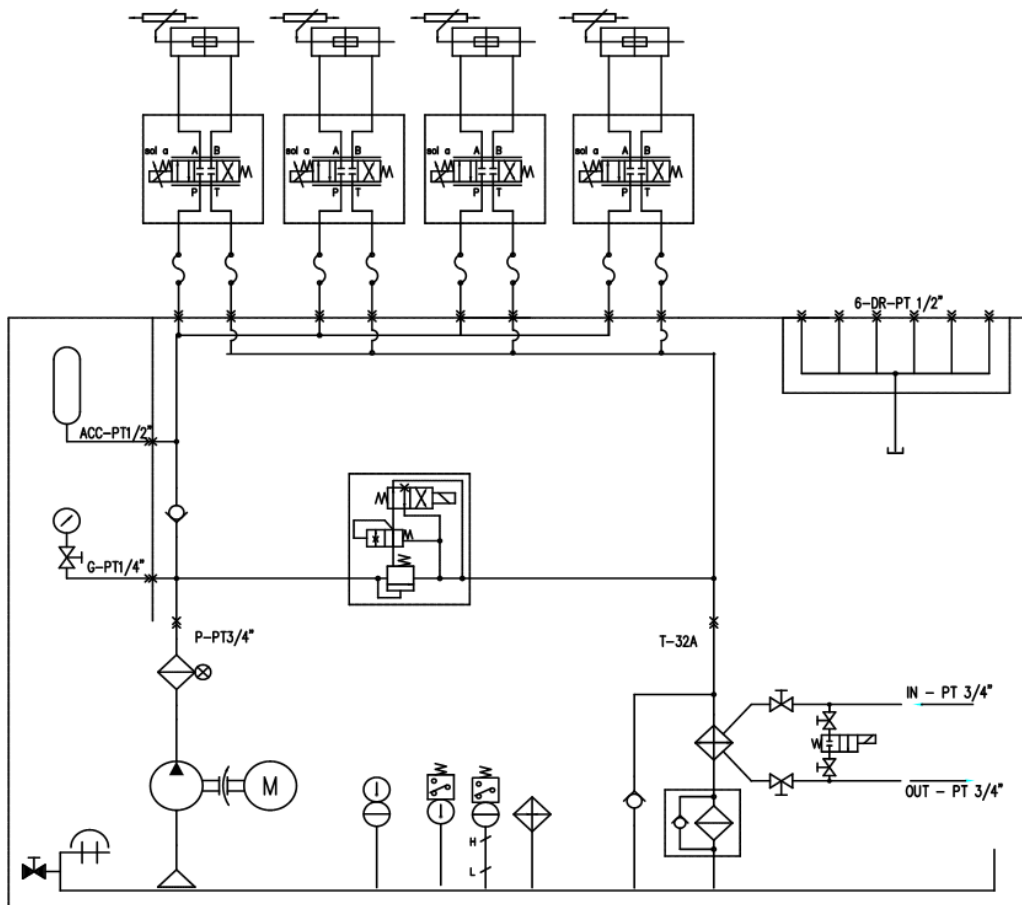


Fig. 2.5 Hydraulic circuit of 4-axis hydraulic simulator.

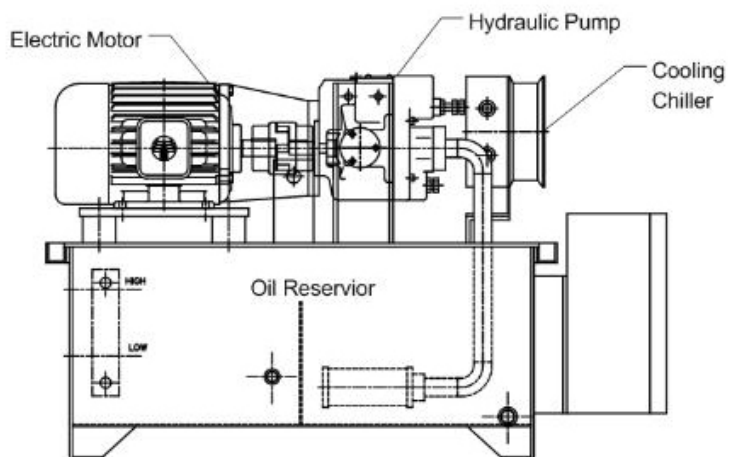
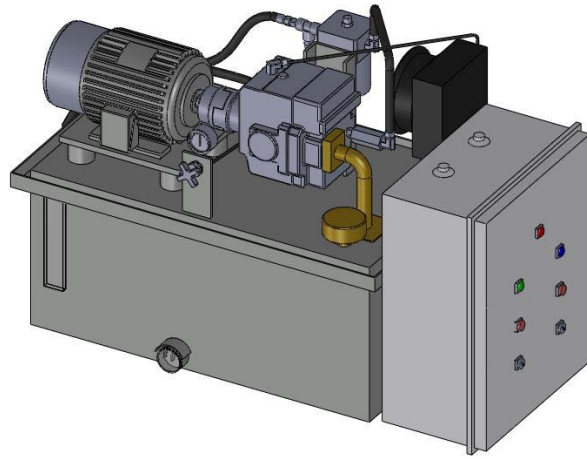


Fig. 2.6 Assembly of hydraulic unit.

2.4 서보 컨트롤러

4축 유압 시뮬레이터의 서보 컨트롤러(G122-202)는 증폭기 이득을 정적 및 동적 성분의 미세조정이 가능하고 각 축을 독립적으로 변위 데이터의 결과를 입력 받을 수 있도록 되어 있다. 또한 가진시에 발생하는 변위 혹은 가속도 데이터는 액추에이터에 부착된 변위센서와 외부에 장착된 가속도계에 의하여 검출되며 이것을 피드백 신호로 사용하여 PC로 부터 입력되고 있는 신호와의 편차가 0이 될 때까지 액추에이터를 작동하게 되므로 액추에이터는 입력 신호에 따라서 정해진 동작을 하게 된다³⁰⁾.

Fig. 2.9는 4축 유압 시뮬레이터의 서보 컨트롤러와 신호처리 장치를 찍은 것이다.



Photo. 2.3 Servo controller and signal processing unit of 4-axis hydraulic simulator.

2. 5 신호처리 장치

신호처리 장치의 구성은 Table 2.1와 같다.

Table 2.1 Specification of Signal Processing Unit²⁸⁾

Module	Specification	No. Channels
Main Interface	<ul style="list-style-type: none"> · MXI-4 · PCI control of PXI/Compact PCI · 78 MB/s sustained throughput 	
LVDT	<ul style="list-style-type: none"> · SCXI (signal conditioner) · Programmable input range per channel (0.05 to 6 Vrms) · Multichannel synchronization · 333kS/s maximum sampling rate · Lowpass filter(250 Hz) 	8 ch
Acceleration	<ul style="list-style-type: none"> · 24-bit resolution · 110 dB dynamic range · 102.4 kS/s maximum sampling rate · 45 kHz alias-free bandwidth · Multiple-device synchronization 	8 ch
A/D	<ul style="list-style-type: none"> · 16 bit resolution · 250 kS/s maximum sampling rate · Programmable lowpass filters 	32 ch
D/A	<ul style="list-style-type: none"> · 13 bit resolution · 800 kS/s Update Rate · Digital triggering and external clocking · Simultaneous updates 	32 ch

다축 시뮬레이터에서 축의 수가 많아짐에 따라 신호를 동기화 시키는 부분이 가장 큰 비중을 차지한다. 이를 해결하기 위해 병렬 컴퓨터인 VME, VXI 와 PXI를 고려해본 결과 최신 기술을 적용시키고 비교적 경제적인 PXI를 선정하게 되었다.

신호처리 시스템의 하드웨어는 National Instrument사의 PXI(PCI Extensions for Instrumentation)를 기반으로 사용하였는데 PXI는 PCI 전기적 버스 기능을 Compact PCI의 견고한 모듈형 유로카드(Euro card) 기계식 패키징에 통합시키고 특수 동기화 버스와 주요 소프트웨어 기능들을 추가한 것으로서 기존에 사용되었던 고가의 VME나 VXI를 대체할 수 있었다. 이를 통해 PXI는 측정 및 자동화 시스템을 위한 성능은 높은 동시에 비용은 낮은 배치 플랫폼으로 평가받고 있다.

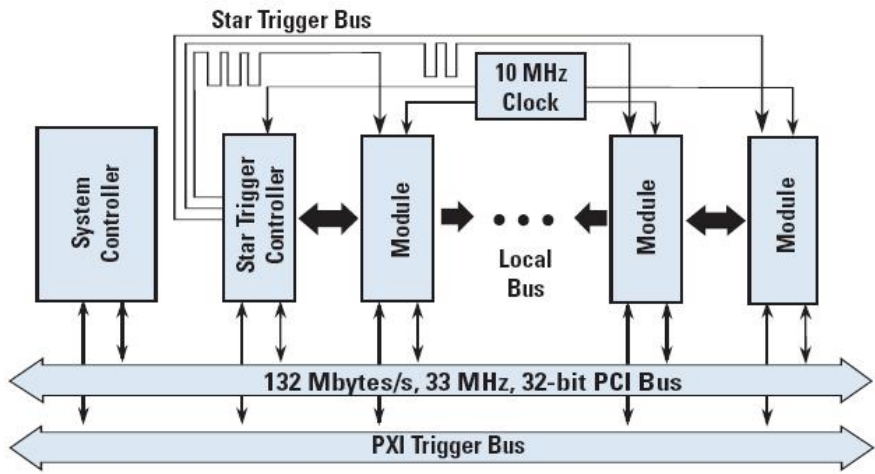


Fig. 2.7 Signal flow diagram of PXI²⁸⁾.

습득된 데이터와 PC와의 통신을 위한 MXI-4 인터페이스는 78 MB/s PCI-PCI 브리지를 사용자의 PC로부터 PXI 새시에 제공함으로써 기존 PC의 33 MB/s를 극복하고 대용량의 데이터를 동기화할 수 있었다.

Table 2.1에 나타난 바와 같이 가속도, 변위 및 아날로그 입·출력 모듈을 통합형으로 신호 컨디셔닝이 가능하고 PCI 버스와 타이밍 및 트리거링 버스를 갖춰 정확한 동기화가 가능하였다. Fig 2.10은 신호처리 장치의 내부 흐름을 나타내는 선도이다. 소프트웨어는 신호의 입출력 부분은 LabVIEW 8.6을 이용하였다.

제 3 장 4축 유압 시뮬레이터의 계측 소프트웨어

본 연구에서는 4축 유압 시뮬레이터의 진동 특성 파악을 위하여 Impact Hammer를 이용한 충격시험을 위한 계측 및 분석 프로그램과 Random 신호를 생성하고 동시에 유압 액추에이터를 구동할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 그래픽 구현기간의 단축과 상용화를 위하여 National Instrument사의 LabVIEW 8.6을 이용하였다²⁹⁾.

PC에서 보내어진 입력신호는 D/A 보드를 거쳐서 서보밸브로 보내어지며, 일정한 파형의 입력신호를 받는 액추에이터의 실린더를 구동시키게 된다. 이후 각 축에 부착된 변위센서와 가속도 센서의 출력신호는 A/D 보드에 전달되며, 다른 출력신호는 오실로스코프로 전달됨으로서 모니터링이 가능하다. 또한 출력신호를 PC에서 데이터베이스화 할 수 있도록 구성되었다. Fig. 3.1은 개발된 4축 유압 시뮬레이터 구동 소프트웨어의 신호흐름도이다.

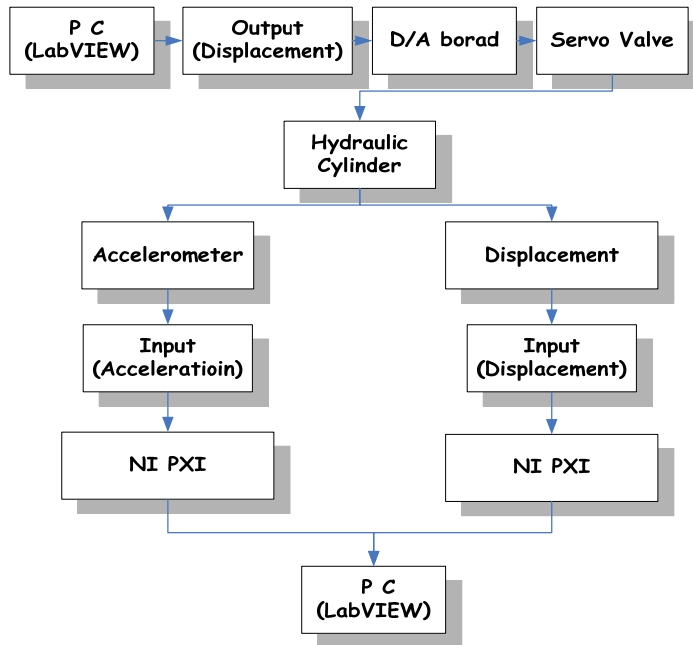


Fig. 3.1 Signal flow diagram of operating program for 4-axial hydraulic simulator.

3.1 출력 프로그램의 구조

출력신호는 액추에이터의 구동 성능면에서 적절한 정현파로 설정하였으며, 0~±5V에서 설정이 가능하도록 하였다. D/A 보드는 National Instrument 사의 M시리즈 모델로 각각 독립적으로 32채널 까지 구성이 가능하고, PXI버스를 사용하며 채널은 4축 4채널을 사용하였다²⁹⁾. 개발된 프로그램은 가진원이 되는 임의의 한 개 축만을 구동시키도록 프로그래밍 하였지만 원하는 조건에 따라서 4축 동시구동까지도 구현할 수 있다.

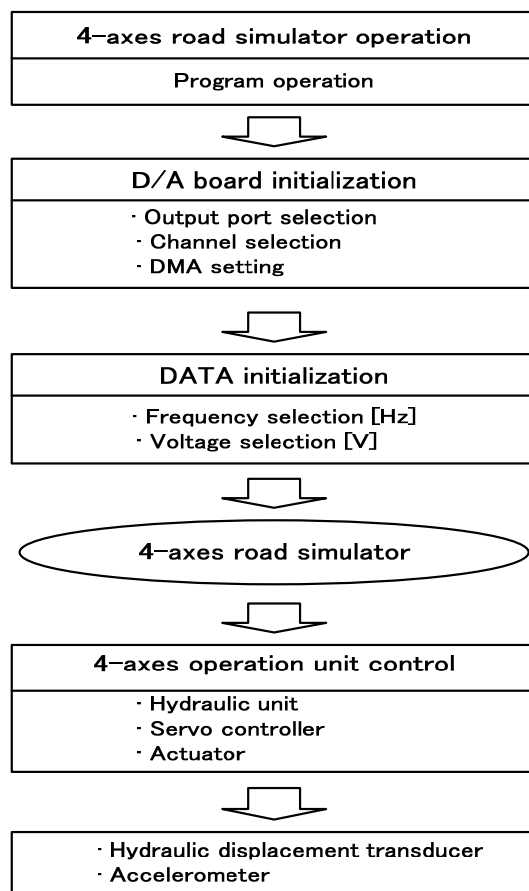


Fig. 3.2 Flow chart of output program

Fig. 3.2는 출력 프로그램의 Flow Chart를 나타낸 것으로서 입력과형, 주파수와 입력전압이 내재된 신호는 초기화되어진 D/A보드를 통하여 서보밸브로 입력되며, 4축 유압 시뮬레이터의 가진이 이루어진다. 또한, 냉각기, 유압원, 서보컨트롤러는 가진에 충분한 조건으로 구동이 되도록 설정하였다. 실험을 행하여 구해진 데이터의 용량은 샘플링 주파수와 샘플링 시간이 길어짐에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다. 이러한 데이터들을 동시에 구동하기 위하여 DMA(Direct Memory Access)를 사용하였다.

기존의 방식은 데이터가 PC의 메모리에서 CPU를 거쳐 하드 디스크로 전송되지만 DMA모드에서는 데이터가 DMA 채널을 통해 CPU를 거치지 않고 곧바로 드라이브로 전송되기 때문에 전송속도가 높아지며 CPU 점유율 또한 현저히 낮아진다. 그리고 입출력을 위한 인터럽트의 횟수가 줄어들어 멀티태스킹과 고속작업이 유리하여 데이터의 손실 없이 구동을 할 수 있다.

3.2 입력 프로그램의 구조

변위, 가속도센서에서 보낸 입력 신호는 서보 컨트롤러와 A/D보드의 시그널컨디셔닝 장치에 입력되어 작동을 하게 된다. 입력되는 신호는 가진변위와 그때의 가속도 입력이 동시에 고려됨으로서 두 조건의 검증이 가능하도록 하였다. 또한, 입력되는 신호는 파일로 저장되어 그래픽 프로그램에서 데이터 해석이 가능하도록 링크하였다. 그리고 입력 프로그램에 원하는 축만의 입력 신호와 구간별 데이터만을 출력할 수 있는 기능을 포함시켜 4축 로드 시뮬레이터가 가지는 효율성을 극대화시켰다. 또한, 반복횟수와 사이클 타임을 옵션으로 주어 구간별 데이터의 입력이 가능하도록 하였다. 화면의 보정계수는 입력되는 데이터의 샘플링 시간을 조정하는 계수로서 저주파수와 고주파수에서의 데이터의 정밀도 보정을 위해서 사용되었다³⁰⁾.

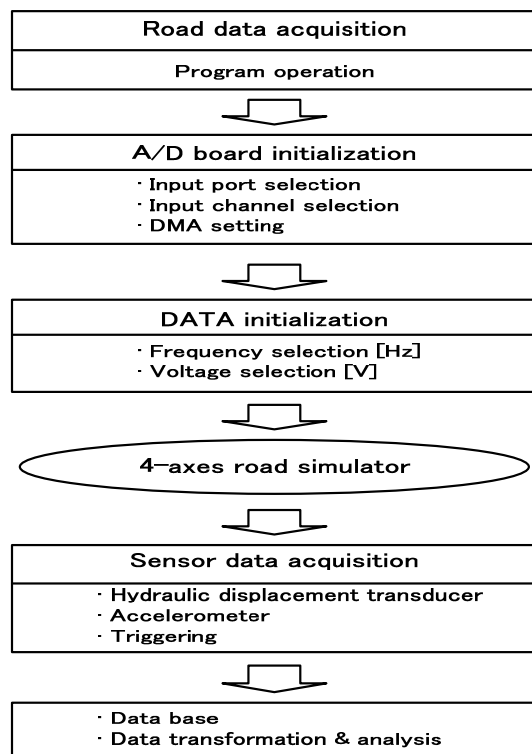


Fig. 3.3 Flow chart of input program

3.3 이론적 배경^{31)~34)}

유압 시뮬레이터에서 재현하게 되는 실제 로드 데이터는 타이어 및 노면의 비선형성으로 인하여 정확한 동특성을 해석하는 것이 난해하다. 그러나 복잡한 동특성을 시간 영역이 아닌 주파수 영역에서 해석 한다면 보다 쉽게 파악 할 수 있다. 이를 위해서는 초기 입력신호와 출력신호를 구하여 주파수 응답함수를 결정하고, 입력신호를 계산하는 과정이 필요하며 출력신호의 오차를 줄이기 위한 과정이 필수적이다. 본 연구를 위해 개발한 프로그램에는 이러한 과정이 모두 포함되어 있고 필요한 수학적 배경 및 알고리즘은 다음과 같다.

3.3.1 Fourier Transform

주기성을 가지고 있는 신호는 푸리에 급수로 나타낼 수 있으나 대부분의 경우 신호는 복잡한 파형으로 나타나게 된다. 푸리에 변환 또는 스펙트럼은 주기가 무한대인 푸리에 급수의 확장된 형태로 나타낼 수 있고 푸리에 변환을 이용하면 복잡한 파형을 단순한 조화함수의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 과도함수(transient function)나 비주기 함수 등을 주기가 무한대인 것으로 생각하면 푸리에 급수의 확장된 형태로 나타낼 수 있다. 임의의 함수 $x(t)$ 의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad -\infty < f < \infty \quad (3.1)$$

여기에서 $x(f)$ 는

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3.2)$$

라면 존재한다. 식(3.1)에 정의된 $X(f)$ 를 $x(t)$ 의 직접 푸리에 변환(또는

spectrum)이라 한다.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad -\infty < t < \infty \quad (3.3)$$

반대로 $x(t)$ 가 알려지면 $X(f)$ 의 역푸리에 변환은 식(3.3)에 의해 $x(t)$ 로 나타낼 수 있다. 이때 식(3.1)과 식(3.2)의 $x(t)$ 와 $X(f)$ 를 푸리에 변환쌍이라고 한다.

일반적으로 $x(t)$ 가 실수범위일 때 $X(f)$ 는 양과 음의 진동수를 갖는 복소함수이다. 이때 실수항과 허수항은 다음 식과 같이 표현된다.

$$X(f) = X_R(f) - j X_I(f)$$

$$X_R(f) = |X(f)|\cos\theta(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\cos 2\pi ft dt \quad (3.4)$$

$$X_I(f) = |X(f)|\sin\theta(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\sin 2\pi ft dt$$

푸리에 변환을 지수함수의 형태로 표현하면 다음 식과 같다.

$$X(f) = |X(f)|e^{-j\theta(f)} \quad (3.5)$$

여기서 $|X(f)|$ 는 진폭 스펙트럼이고 $\theta(f)$ 는 위상스펙트럼이다.

푸리에 변환은 이론상 무한 시간에 걸쳐 존재하는 신호 $x(t)$ 에 대한 적분을 수행하지만 실제 그 무한 영역에서나 실험상에서는 $-\infty$ 에서 ∞ 까지의 어떤 신호 $x(t)$ 를 측정할 수 없다. 대신에 어떤 유한 시간의 구간 T 에서 신호 $x(t)$ 를 측정하는데 이러한 푸리에 변환을 유한 푸리에 변환이라고 하며 다음과 같이 정의된다.

$$X_T(f) = X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.6)$$

식 (3.6)은 별개의 진동수 $f_k = (k/T)$ 에서 유한 푸리에 변환이 $X(f_k, T)$ 라는 것을 나타낸다. $x(t)$ 는 $n = 1, 2, 3, \dots, N$ 에 대해서 $\{x_n\} = \{x(n \cdot \Delta t)\}$ 에 의해 대치되며 연속적인 푸리에 변환 $X(f)$ 는 각각의 푸리에 변환 $\{x_k\} = \{X(k\Delta f)\}$ 에 의해서 대치되어 진다. 여기서 $k = 1, 2, 3, \dots, N$ 이고 $k = (N/2)\Delta f$ 이므로 그 이전의 값들에서 계산될 수 있는데 푸리에 변환쌍 공식은 다음과 같다.

$$X_k = X(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=1}^N x_n \text{Exp}\left(-j2\pi \frac{kn}{N}\right) \quad (3.7)$$

$$x_n = x(n\Delta t) = \Delta f \sum_{k=1}^N X_k \text{Exp}\left(j2\pi \frac{kn}{N}\right)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, N$$

3.3.2 Correlation Function & Spectrum

$x(t)$ 가 주기가 T 이고 τ 만큼의 시간 지연이 있다면 상관함수 $C(\tau)$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t+\tau)dt \quad (3.8)$$

스펙트럼 $S(f)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{X(f) X^*(f)}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X(f)|^2}{T} \quad (3.9)$$

여기서 $X^*(f)$ 는 $X(f)$ 의 공액 복소수이다.

상관함수는 시간영역이고 스펙트럼은 주파수 영역이므로 상관함수를 푸리에 변환하면 스펙트럼이 되고 스펙트럼을 푸리에 역변환하면 상관함수가 된

다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (3.10)$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

정의역을 주파수 f 의 양수범위에 한정된 경우의 스펙트럼을 $G(f)$ 로 표기하여 $G(f)$ 와 $S(f)$ 와의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$G(f) = 2S(f) \quad (3.11)$$

3.3.3 Spectral Density Function

스펙트럼 밀도함수는 주파수 구간 Δt 에서의 함수의 강도를 나타내며 신호의 푸리에 변환의 곱으로 해석된다. 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 에 대하여 유한 푸리에 변환을 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.12)$$

$$Y(f, T) = \int_0^T y(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

이로부터 상호 스펙트럼 밀도함수를 정의하면 식(3.12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{xy}(f, T) = \frac{1}{T} X^*(f, T) Y(f, T) \quad (3.13)$$

여기서 X^* 는 X 의 공액 복소수이다. 식(3.13)에서 주기 T 를 무한으로 하면 다음 식과 같다.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} G_{xy}(f, T) = G_{xy}(f) \quad (3.14)$$

3.3.4 Discrete Fourier Transform

시간 신호로부터 주파수 정보를 얻기 위해서 푸리에 적분 변환 과정이 디지털 형태로 수행된다. 이를 이산 푸리에 변환(DFT)라고 한다.

만약 $x(t)$ 가 주기가 T 인 주기 함수라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad (3.15)$$

여기서

$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \quad (k \geq 0)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \quad (k \geq 1) \quad (3.16)$$

복소수로 표현하면

$$X_k = a_k - ib_k$$

$$e^{-i(2\pi kt/T)} = \cos \frac{2\pi kt}{T} - i \sin \frac{2\pi kt}{T} \text{ 이므로}$$

식(3.16)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$X_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-i(2\pi kt/T)} dt \quad (k \geq 0) \quad (3.17)$$

여기서 연속적인 시간 배열 $x(t)$ 를 모르고 단지 등간격의 샘플만 이용하는 경우를 고려해보자.

Fig. 3.1에서 $t = r\Delta$, $\Delta = T/N$ 인 이산 배열 $\{x_r\}$, $r = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$ 로

표현된다고 하면 식(3.17)의 적분은 근사적인 합의 형태로 바꿀 수 있다.

$$X_k = \frac{1}{T} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi k/T)(r\Delta)} \Delta \quad (3.18)$$

이것은 Fig. 3.2에서 곡선 아래의 전체 면적이 빗금친 부분의 합으로 구할 수 있음을 나타낸다. 식(3.18)에 $T = N\Delta$ 를 대입하면

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi kr/N)} \quad (3.19)$$

이 되는데 이것을 식(3.19)의 푸리에 급수의 계수를 계산하는 근사적인 식으로 생각할 수 있고 급수 $\{x_r\}$ 의 특정값 x_r 은 역변환에 의하여 식(3.20)으로 표현된다.

$$x_r = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i(2\pi kr/N)} \quad (3.20)$$

3.3.5 Fast Fourier Transform Algorithm

고속 푸리에 변환(FFT)은 이산 푸리에 변환(DFT)과 그 역변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘을 말한다.

먼저 이산 배열 $\{x_r\}$, $r = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$ 에 대한 이산 푸리에 변환을 취하면 다음과 같다.

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi kr/N)} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (3.21)$$

식(3.21)을 살펴보면 하나의 주파수 성분을 구하기 위해서 N 번의 복소수 곱과 덧셈을 행하여야하고 모든 주파수 성분을 구하기 위해서는 N^2 의 계산

이 필요하다. 그러나 이것을 $N = 2^M$ 으로 취하여 FFT 알고리즘으로 계산하면 $N \log_2 N$ 번만의 독립적인 연산만으로도 계산할 수 있고 FFT의 결과 역시 DFT의 근사값이 아니라 동일한 값이 구해진다.

가장 일반적으로 사용되는 FFT 알고리즘은 1965년 James W. Cooley와 John W. Tukey가 소개한 Cooley-Tukey 알고리즘이다. 이 알고리즘은 분할 정복 알고리즘을 사용하며, 재귀적으로 n 크기의 DFT를 $n = n_1 n_2$ 가 성립하는 n_1, n_2 크기의 두 DFT로 나눈 뒤 그 결과를 n 시간에 합치는 것이다.

보통 Cooley-Tukey 알고리즘은 크기 n 을 재귀적으로 2등분하여 분할 정복을 적용하기 때문에 $n = 2^k$ 인 경우에 많이 적용된다.

예를 들어 식(3.21)에서 $W = e^{-2\pi/N}$ 로 하고 다시 정리하면

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r W^{kr} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (3.22)$$

이 되는데 $N = 4$ 라고 가정하고 식(3.22)을 행렬로 풀어보면

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

이 행렬을 지수의 짝, 홀을 기준으로 다시 변형하면

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^2 & W^1 & W^3 \\ W^0 & W^4 & W^2 & W^6 \\ W^0 & W^6 & W^3 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^2 & W^1 & W^3 \\ W^0 & W^0 & W^2 & W^6 \\ W^0 & W^2 & W^3 & W^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^1 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} W_2^0 & W_2^0 \\ W_2^0 & W_2^1 \\ W_2^0 & W_2^0 \\ W_2^0 & W_2^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

식(3.24)은 결국 식(3.25)와 같이 쓸 수 있으므로 $N=4$ 인 DFT는 $N=2$ 인 DFT 2개를 사용하여 계산 할 수 있다. 이 과정을 재귀적으로 적용하면 $N=2^k$ 인 DFT를 FFT 알고리즘을 이용할 경우 kN 시간 안에 계산할 수 있게 된다.

3.4 충격실험 계측 프로그램

Impact Hammer를 이용한 충격실험을 위한 계측 프로그램은 앞서 설명한 입력 프로그램의 구조를 기반으로 LabVIEW 8.6을 이용하여 개발하였다²⁹⁾. 입력 신호인 충격 신호를 A/D 변환하여 시간 영역의 신호를 주파수 영역에서 해석하는 프로그램이다. Fig. 3.3과 Fig. 3.4는 개발한 프로그램의 프론트 패널과 블록 다이어그램이다.

가속도계에서 수집된 충격 신호는 FFT알고리즘을 통해 변환되고 주파수 대역에 대한 값으로 표현된다. 이때 대부분의 신호가 비주기 신호이기 때문에 그 특성상 누설 오차가 발생하게 되는데, 이를 줄이기 위해 Window 함수를 이용하여 가중치를 둔다. 사용된 Window 함수는 연속 신호인 경우에 가장 일반적으로 사용되는 Hanning 함수를 사용하였다³⁵⁾.

분석된 스펙트럼에는 수집된 원래의 신호에 노이즈가 더해져 오차가 함께 포함되므로 여러 번 평균하면 오차를 줄여나갈 수 있다. 이와 같은 과정을 Averaging 이라고 한다. 평균된 데이터로 전달함수를 구하면 시스템의 주파수 특성을 알 수 있어 공진주파수를 파악하여 검증된 해석 모델을 얻을 수 있다.

개발한 프로그램의 프론트 패널은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 3.3에서 왼쪽은 신호를 입력받을 가속도의 채널과 그래프 설정을 위한 창이다. 이 창을 통해서 가속도계의 물리적 채널을 선택하고 입력되는 샘플의 속도를 조절할 수 있다. 또한 FFT 샘플의 수를 지정할 수 있고 Averaging의 종류와 세부 설정을 선택할 수 있게 하였으며 컨트롤 버튼을 이용하여 가속도, FFT, 파워스펙트럼에 대한 데이터를 사용자가 원하는 시간에 저장할 수 있도록 하였다.

프론트 패널의 오른쪽에는 푸리에 변환을 통해 주파수 대역으로 변화된 값이 곧바로 표현되도록 했다.

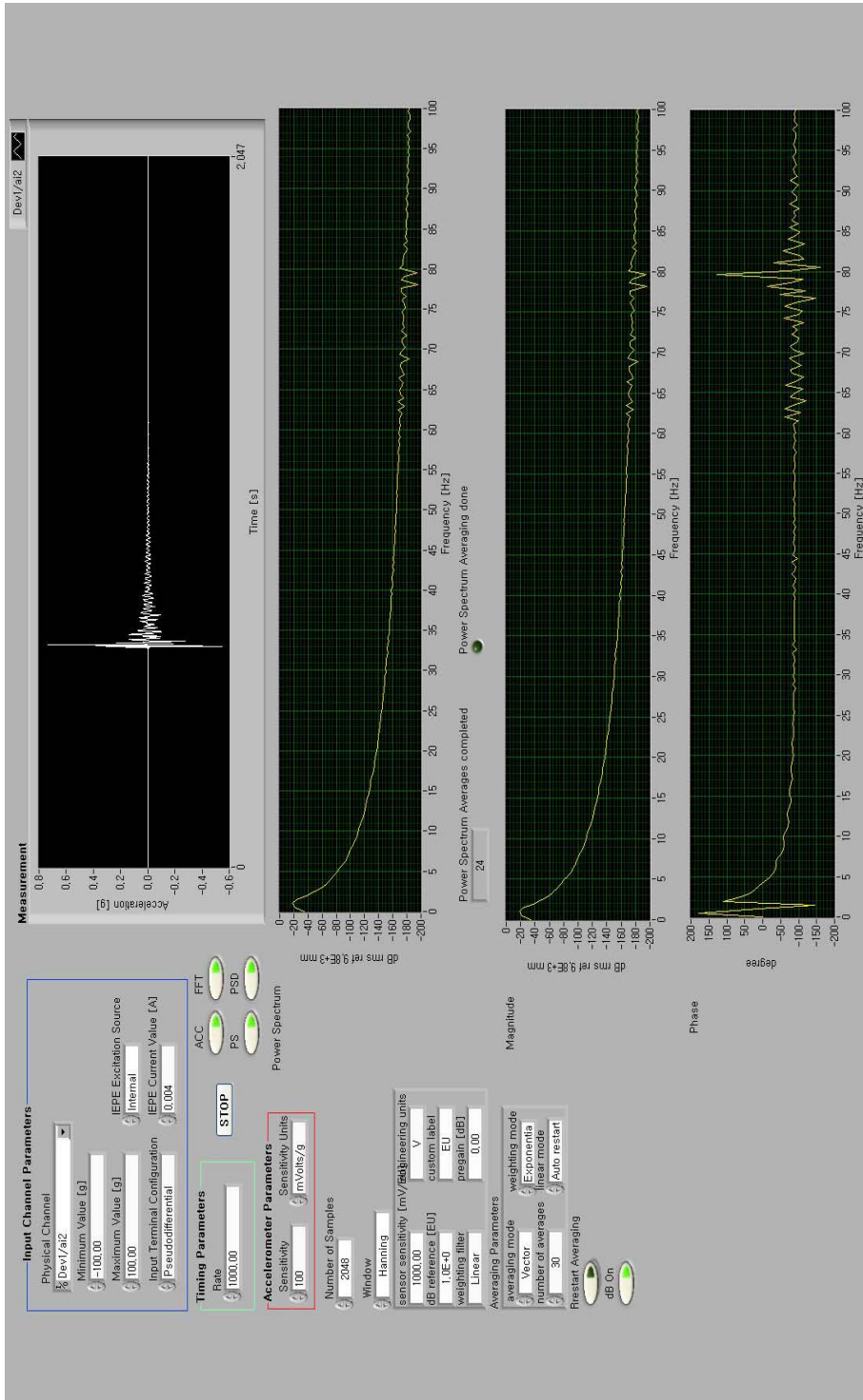


Fig. 3.4 Measurement program's front panel for the impact experiment.

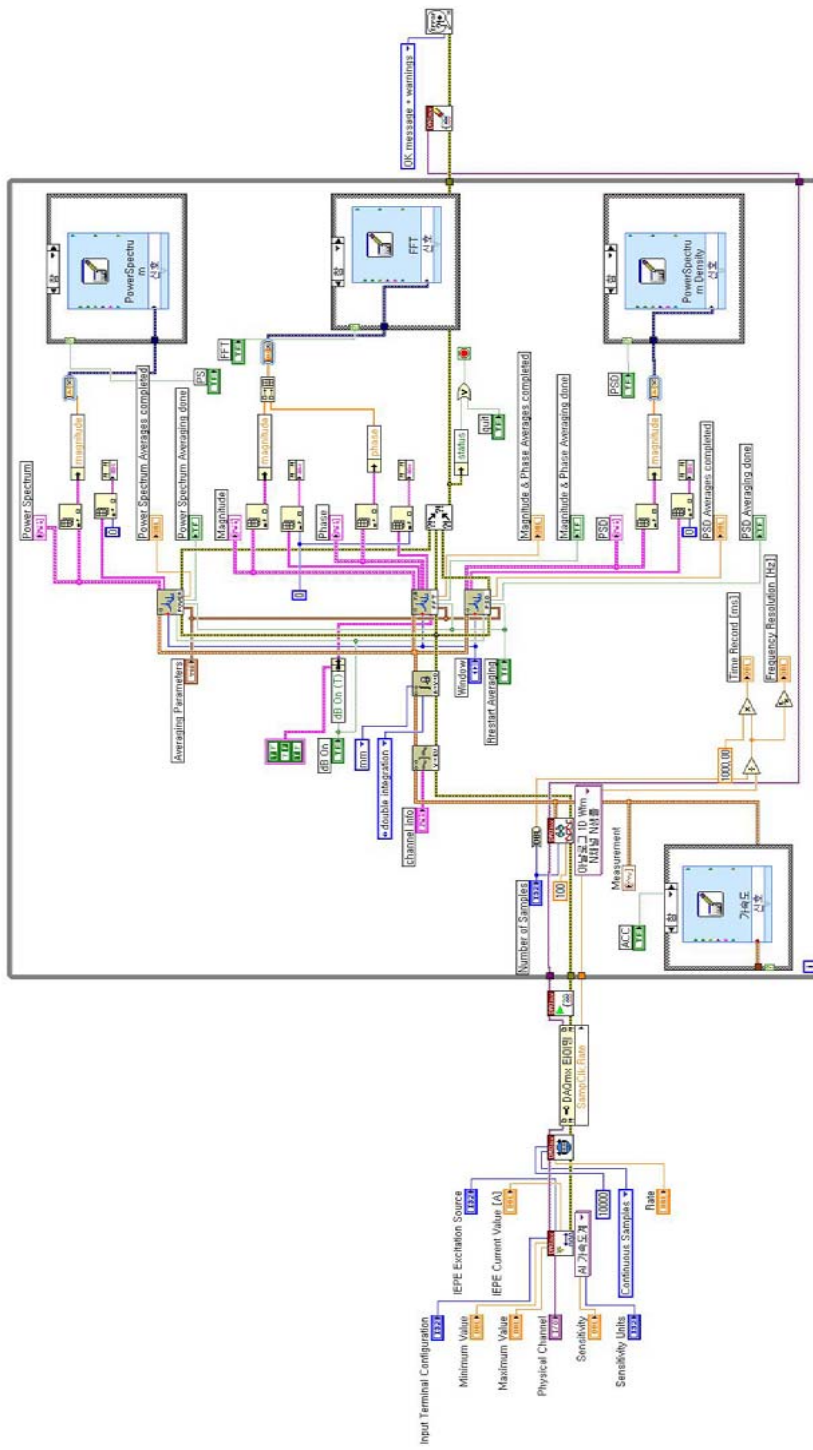


Fig. 3.5 Measurement program's block diagram for the impact experiment.

3.5 동시 입·출력 계측 프로그램

유압 시뮬레이터에 Random 신호를 입력하고 응답신호 해석 및 분석하기 위한 계측 프로그램은 앞서 설명한 입력 및 출력 프로그램의 구조를 기반으로 LabVIEW 8.6을 이용하여 개발하였다²⁹⁾. 본 프로그램은 단 한 대의 구동 컴퓨터를 이용하여 Random 신호를 출력하여 유압 시뮬레이터에 입력하고 동시에 응답신호를 수집, 분석 및 해석 할 수 있도록 설계하였다. 앞서 개발한 충격실험 계측 프로그램을 기반으로 하여 Random 신호를 선택하고 출력할 수 있는 설정 창을 추가하였다. 또한 입력과 출력을 동시에 수행하기 위해서 두 개의 태스크를 생성하고 사용자가 선택하여 실행의 우선순위를 정할 수 있도록 하였다. Fig. 3.5과 Fig. 3.6는 개발한 프로그램의 프론트 패널과 블록 다이어그램이다.

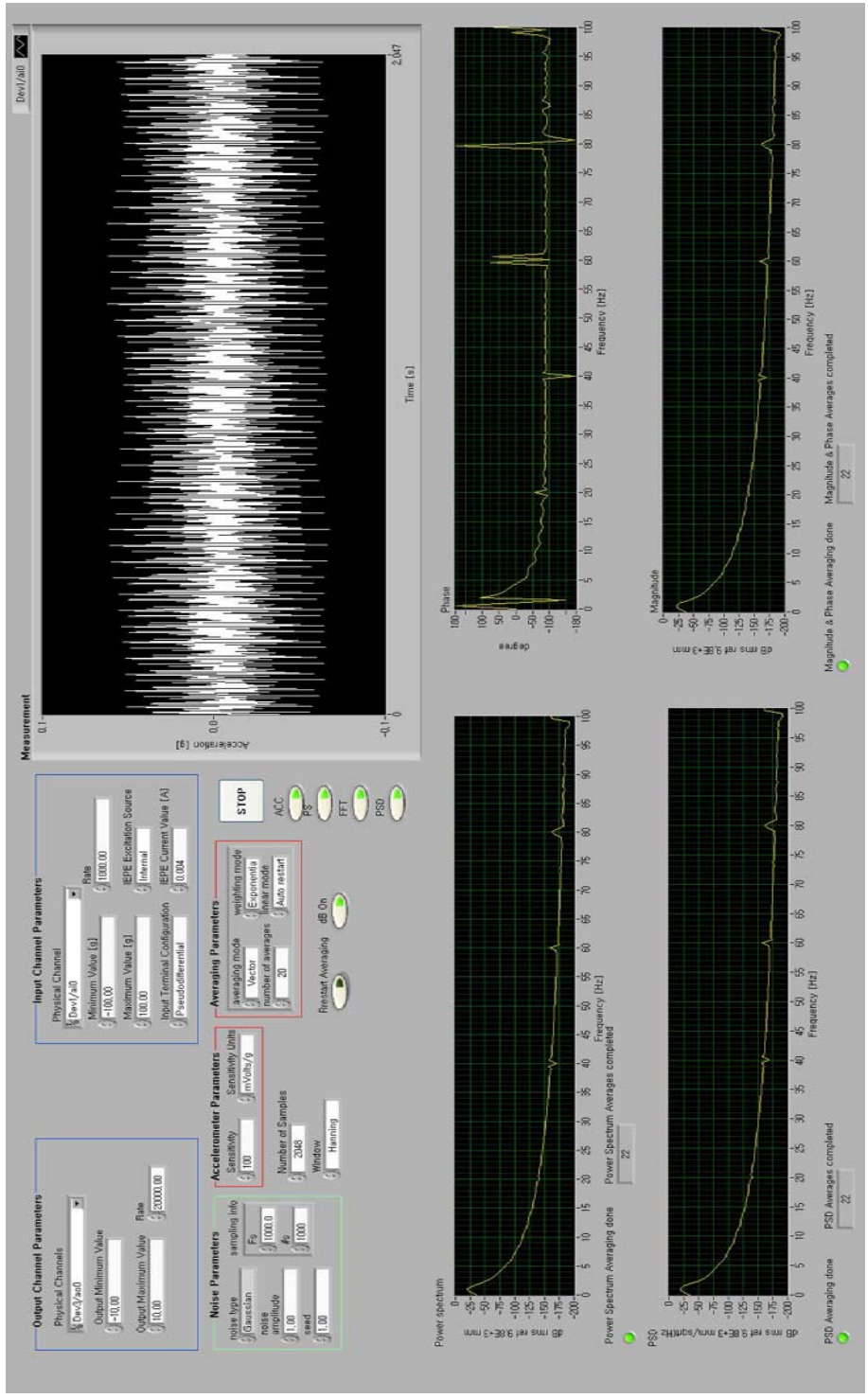


Fig. 3.6 Measurement program's front panel for the random signal experiment.

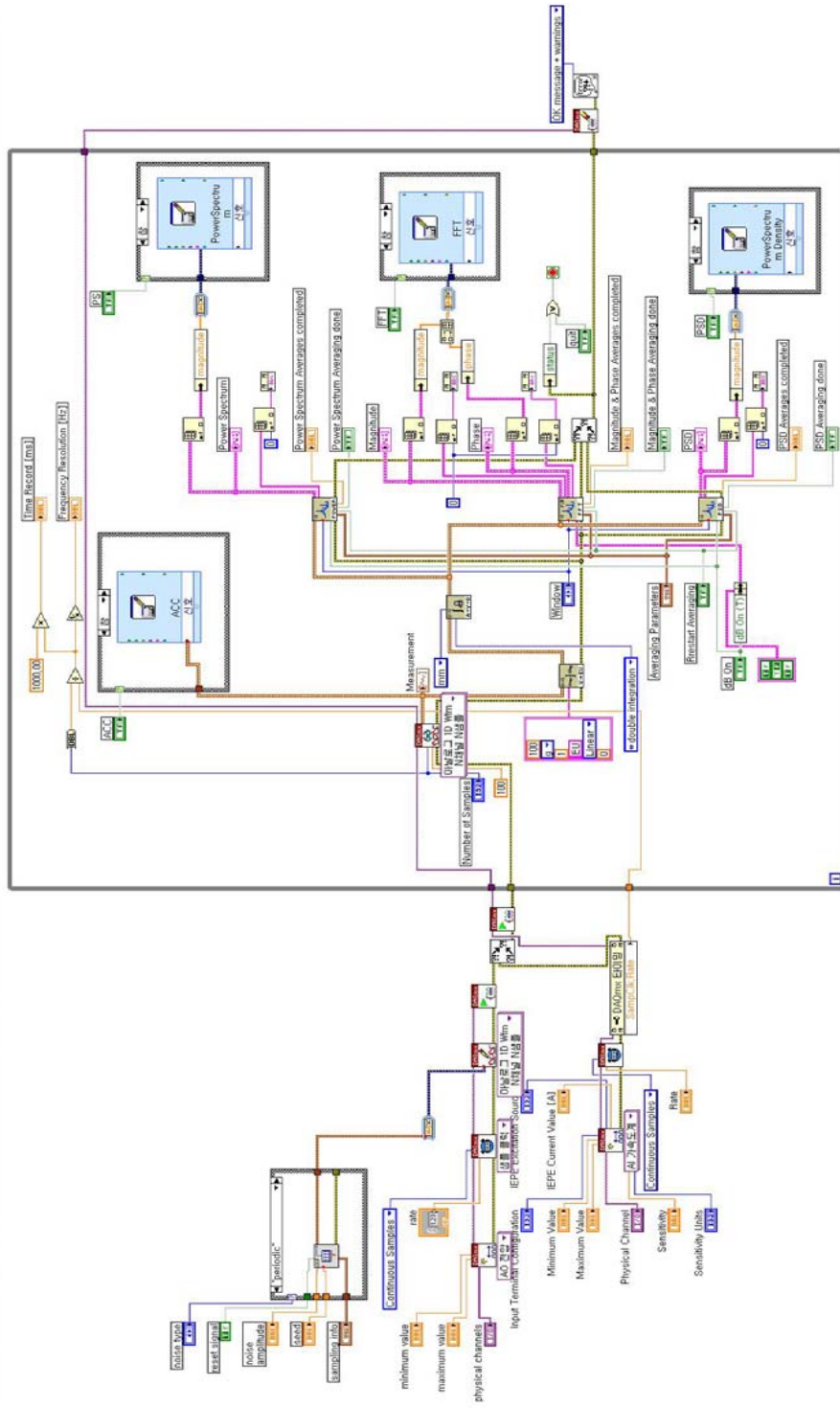


Fig. 3.7 Measurement program's block diagram for the random signal experiment.

제 4 장 실험내용 및 고찰

4.1 Impact Hammer를 이용한 충격 실험

공진 상태 여부를 판단하는 가장 쉬고 저렴한 시험이 충격 시험이다. 이를 위하여 먼저 유압 시뮬레이터의 Hydraulic Unit를 정지 시켜야한다. 그 이유는 Hydraulic Unit의 진동으로 인하여 유압 시뮬레이터의 고유 진동수 측정에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

충격을 받은 모든 물체는 그 고유 진동수에서 진동한다. 좋은 예가 종, Tuning Fork 또는 기타 줄이다. 그러나 충격에 의해 가진된 주파수는 감쇠에 의해 빠른 시간에 소멸된다. 이러한 이유로 주파수 분석을 수행하는데 요하는 시간동안 진동을 유지하기위해 초당 1내지 2회의 충격을 반복하여 가한다.



Photo. 4.1 Impact hammer kit(K219B).



Photo. 4.2 Impact hammer.

Photo. 4.1과 Photo. 4.2는 실험에 사용한 Impact Hammer Kit와 Impact Hammer 로서 PCB PIEZOTRONIC Inc.에서 제작한 K219B 모델이다.

Impact Hammer는 Fig 4.1에서처럼 손잡이(Handle), 부가 질량(Added Mass), 힘 변환기(Force Transducer), 팁(Tip)의 네 부분으로 구성된다.

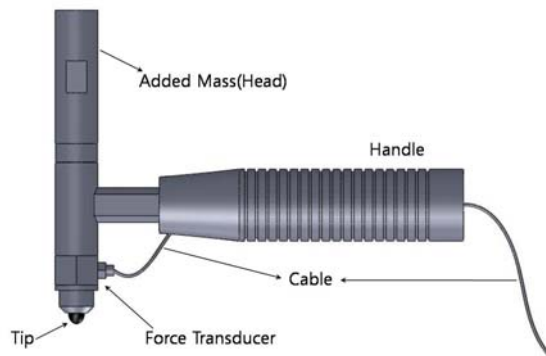


Fig. 4.1 Specification of impact hammer.

가진력의 크기는 충격시 부가 질량과 속도에 영향을 받으며 가진 주파수의 범위는 팁의 강성과 부가 질량에 의해 결정된다.

Impact Hammer를 이용한 충격 실험은 유압 시뮬레이터 양 끝단에 세 개의 가속도계(acc 1, acc 2, acc 3)를 설치하고 20 cm 간격으로 12개의 가진점을 지정한 후 각각의 가진점에서 Impact Hammer로 가진하는 방식으로 총 4회의 실험을 진행하였다. Photo. 4.3은 가진점을 시뮬레이터 표면에 표시한 것이다.

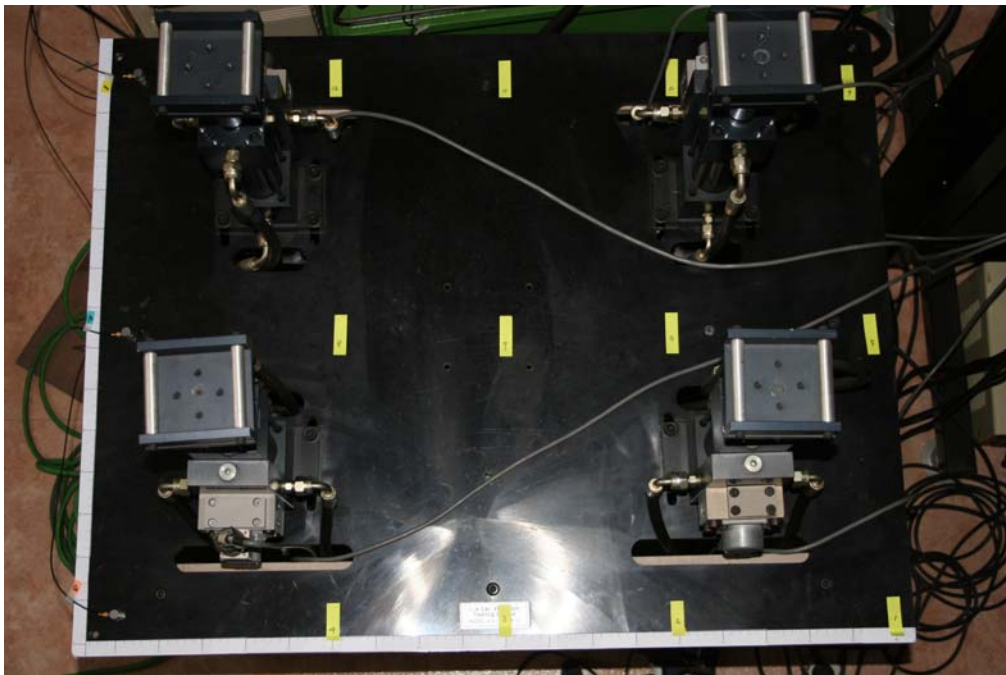


Photo. 4.3 Exciting point on the hydraulic simulator.

각각의 가진점에 입력된 충격에 의한 가진 신호는 가속도계를 통하여 수집되고 앞서 소개한 충격시험 모듈을 이용하여 발생된 주파수를 분석하였다. 특히 충격 가진은 일정 간격을 두고 FFT 그래프의 확연한 위상차가 발생할 때까지 반복하여 가진하였다.

4.1.1 실험결과 및 고찰

정해진 가진점 별로 진행된 4회의 실험을 통해 세 개의 가속도계(acc 1, acc 2, acc 3)에서 수집한 신호를 토대로 각 가속도계별 가속도, FFT, 파워스펙트럼, 파워스펙트럼 밀도함수의 결과는 다음과 같다.

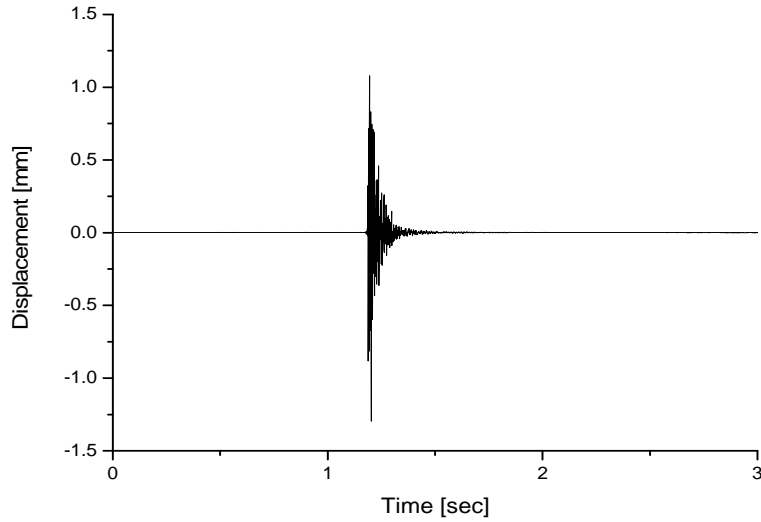


Fig. 4.2 Acceleration of acc 1 about the 1st impact signal.

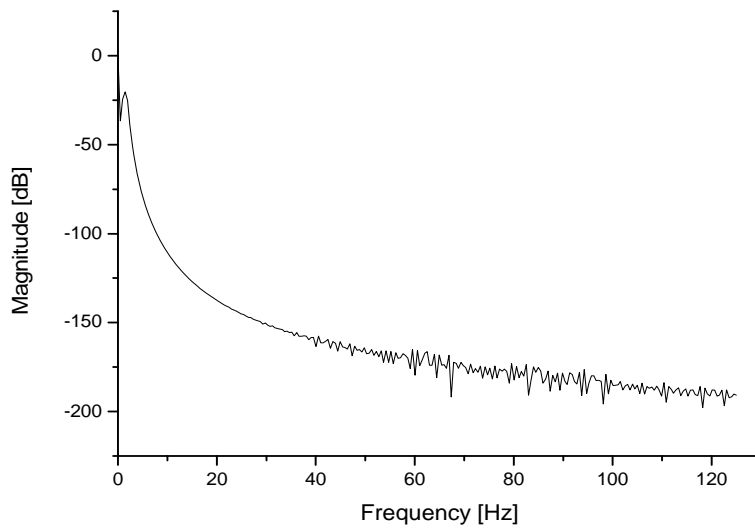


Fig. 4.3 FFT magnitude of acc 1 about the 1st impact signal.

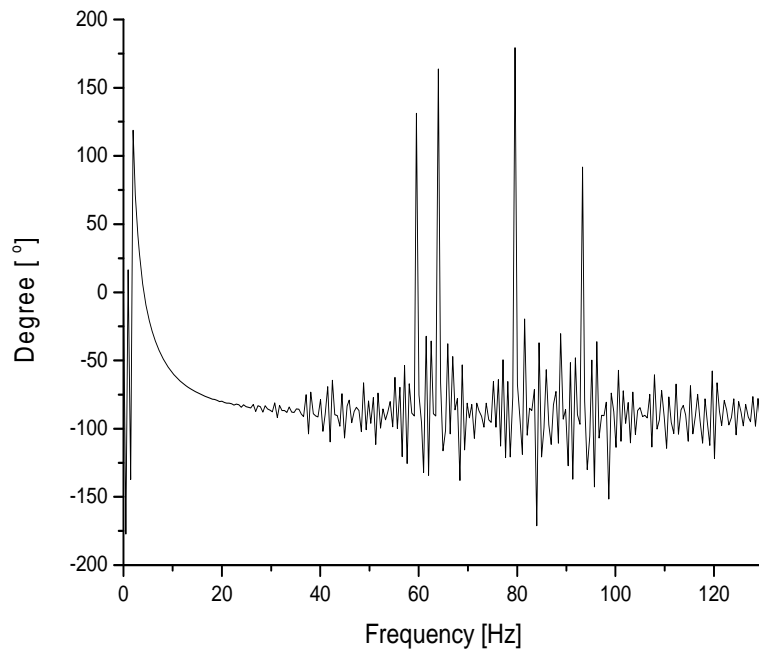


Fig. 4.4 FFT phase of acc 1 about the 1st impact signal.

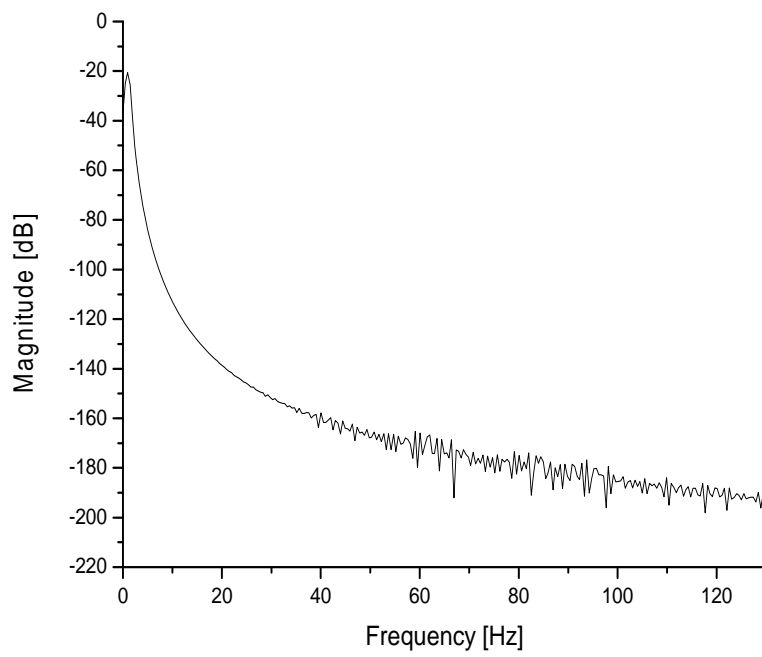


Fig. 4.5 Power spectrum of acc 1 about the 1st impact signal.

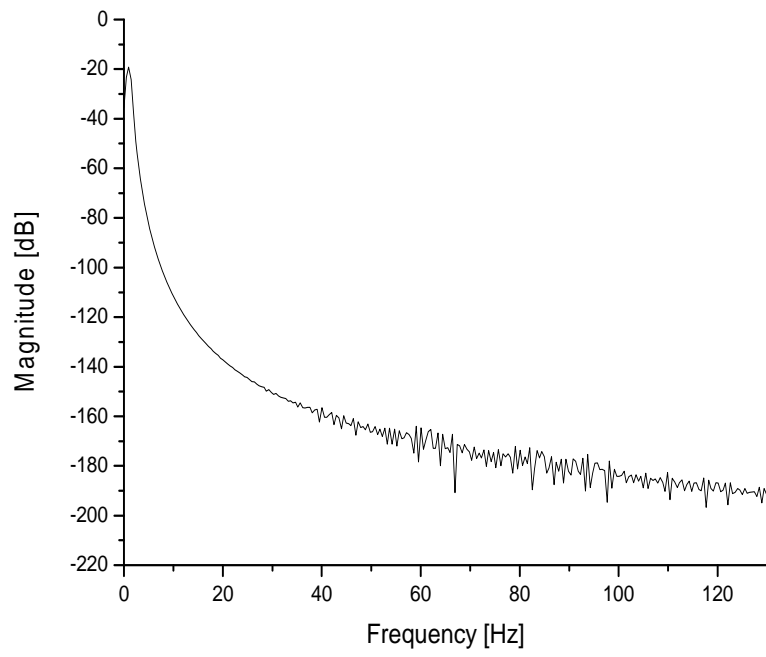


Fig. 4.6 Power spectrum density of acc 1 about the 1st impact signal.

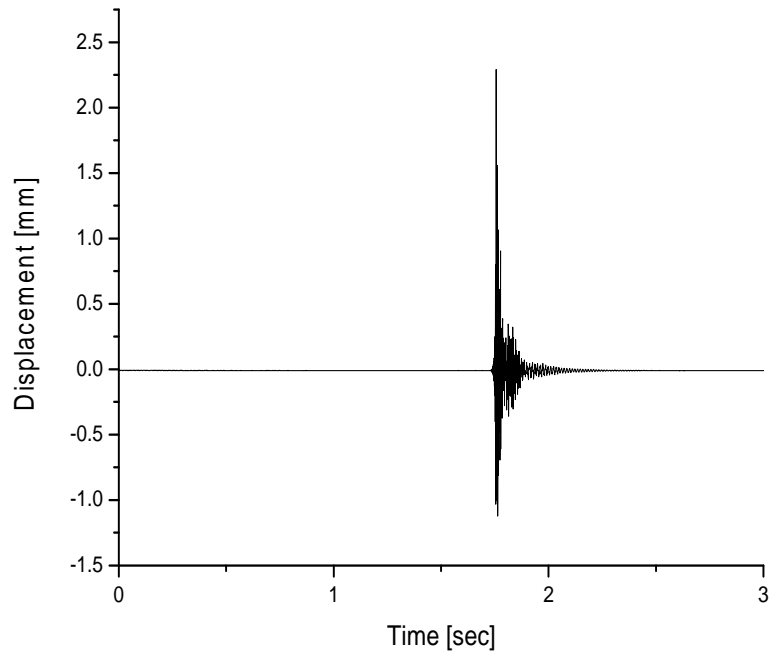


Fig. 4.7 Acceleration of acc 2 about the 1st impact signal.

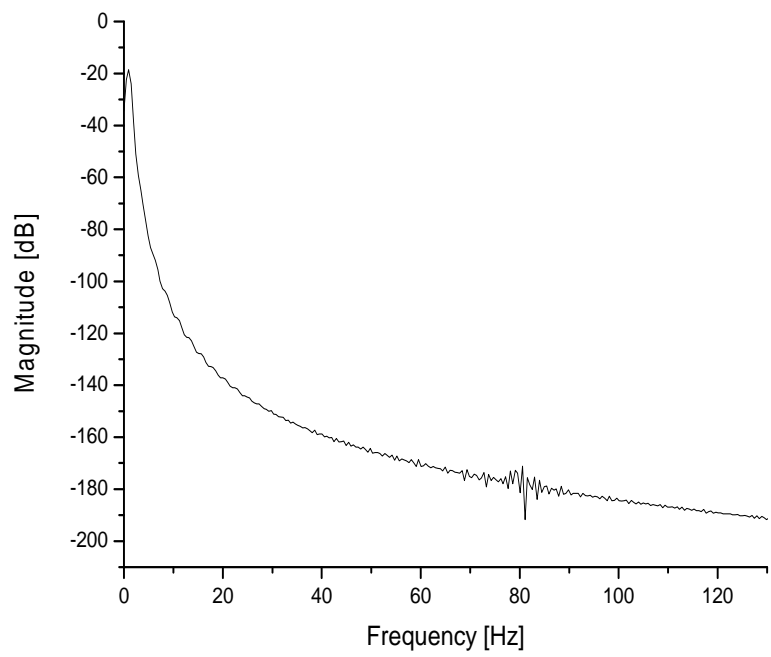


Fig. 4.8 FFT magnitude of acc 2 about the 1st impact signal.

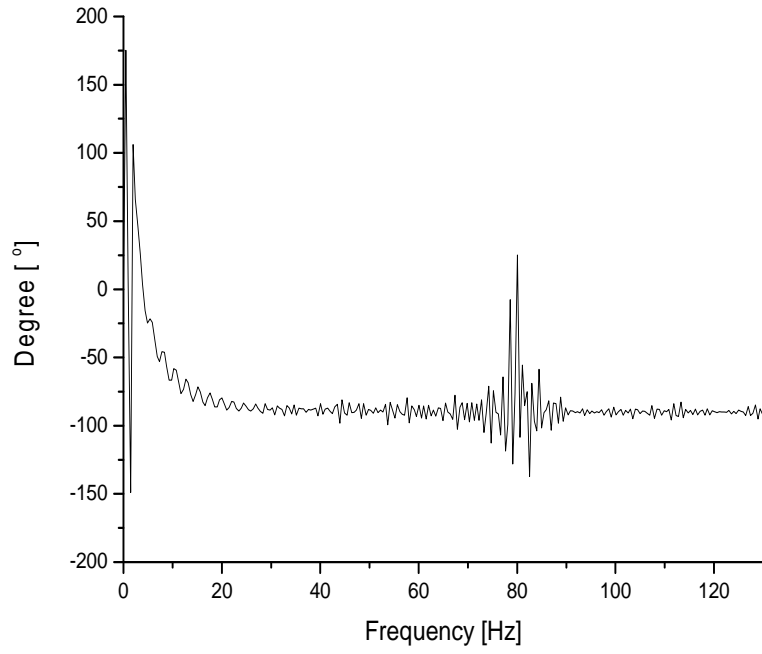


Fig. 4.9 FFT phase of acc 2 about the 1st impact signal.

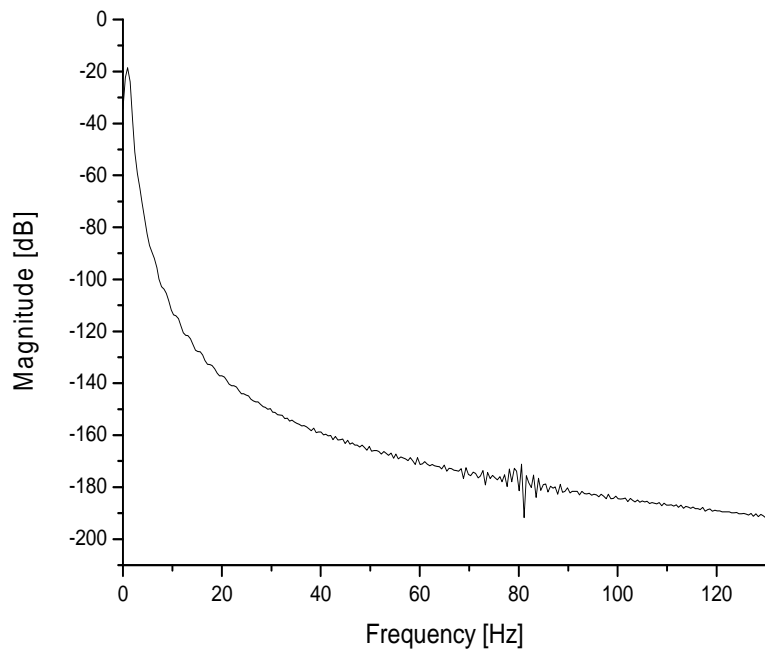


Fig. 4.10 Power spectrum of acc 2 about the 1st impact signal.

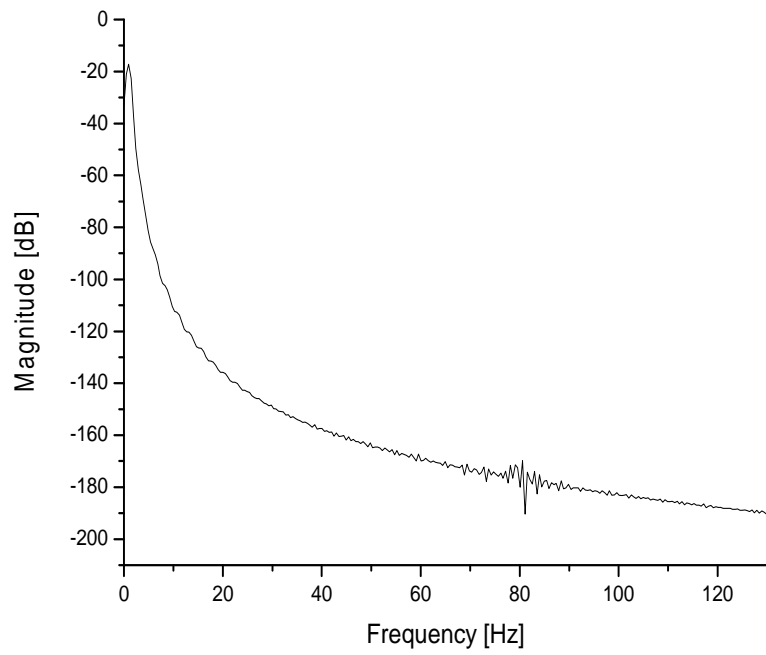


Fig. 4.11 Power spectrum density of acc 2 about the 1st impact signal.

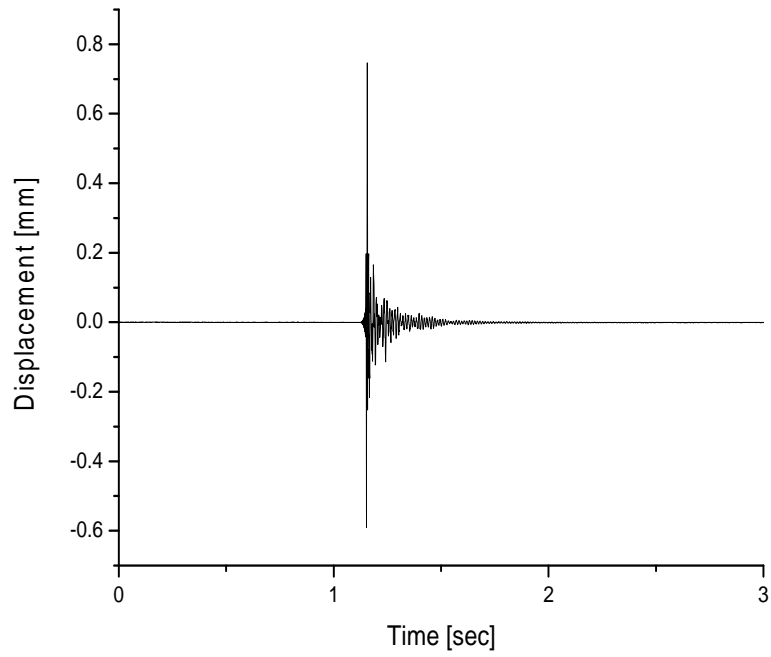


Fig. 4.12 Acceleration of acc 3 about the 1st impact signal.

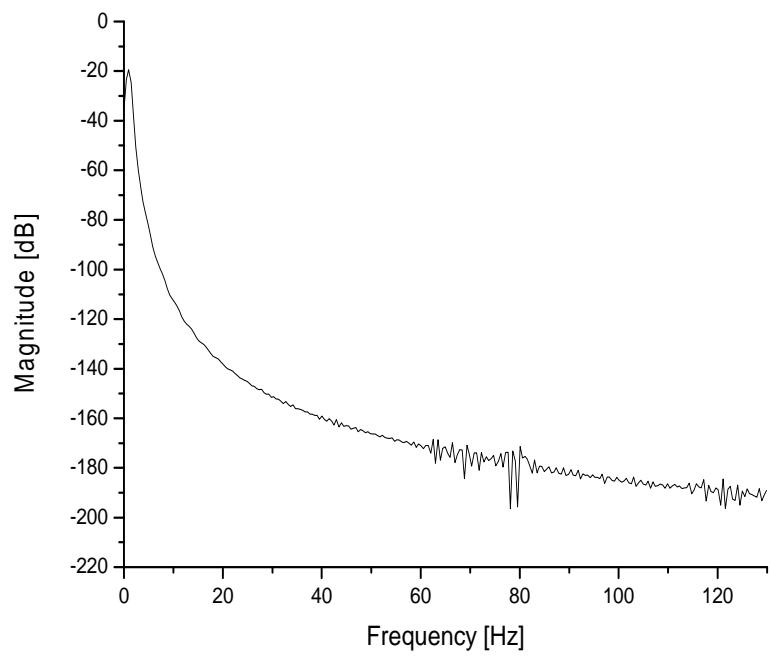


Fig. 4.13 FFT magnitude of acc 3 about the 1st impact signal.

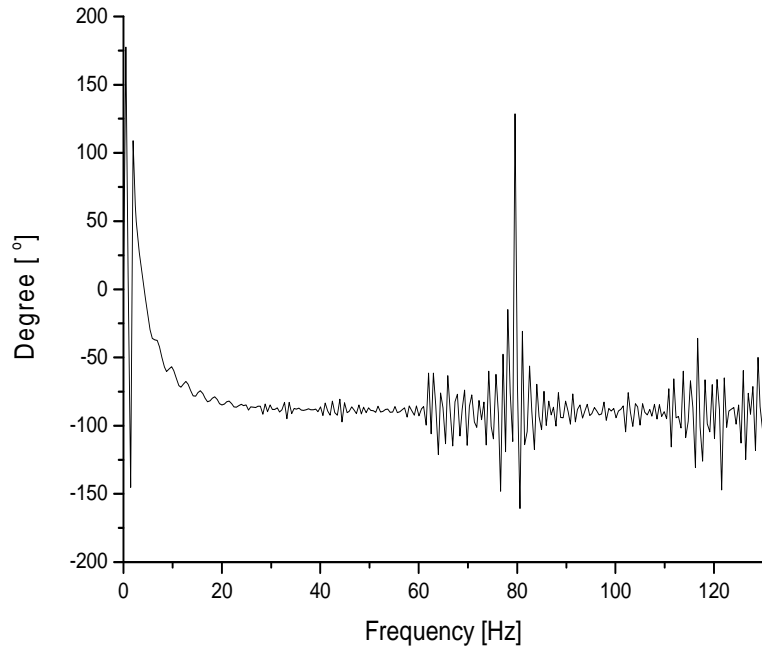


Fig. 4.14 FFT phase of acc 3 about the 1st impact signal.

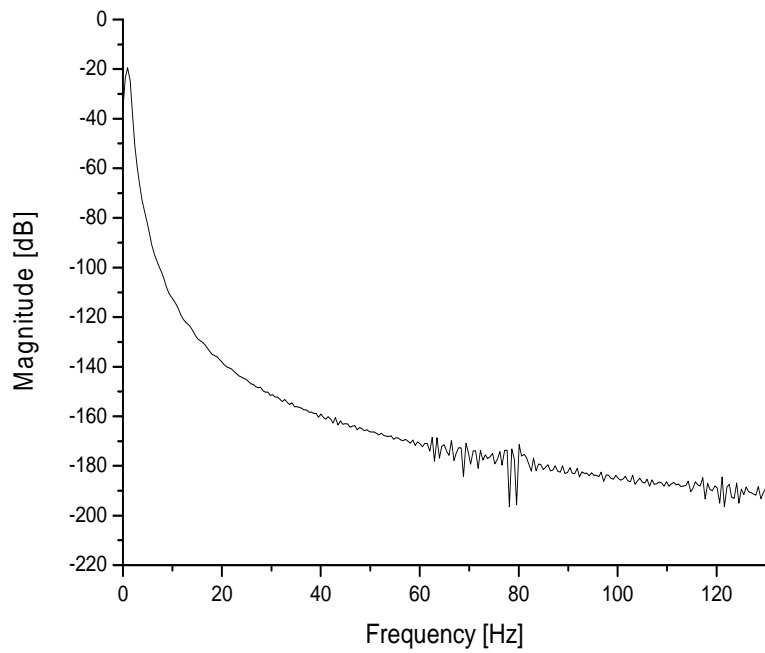


Fig. 4.15 Power spectrum of acc 3 about the 1st impact signal.

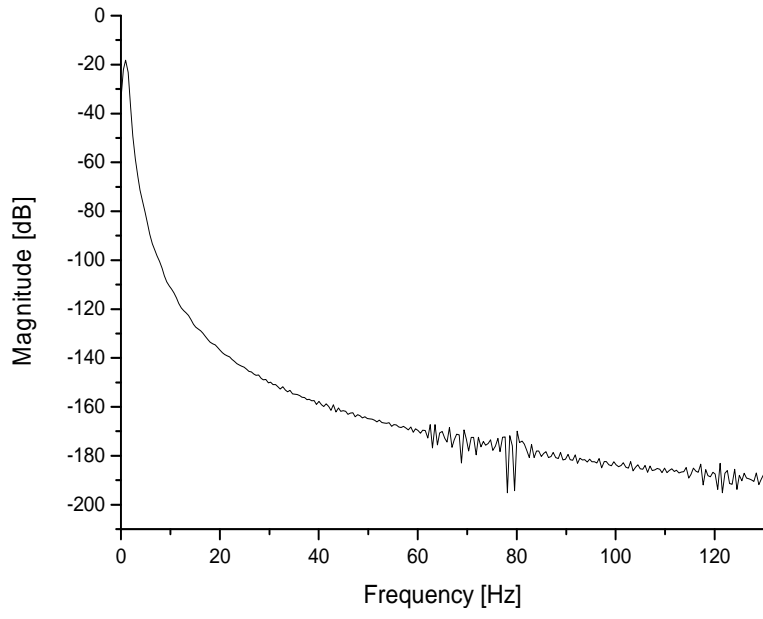


Fig. 4.16 Power spectrum density of acc 3 about the 1st impact signal.

Fig. 4.2~Fig. 4.16까지는 첫 번째 충격신호에 대한 결과이다. 특히, FFT 결과 그래프에서 Phase 부분은 유압 시뮬레이터의 공진 주파수가 80 Hz 부근임을 보여주고 있다. 미세하지만 Magnitude의 변화를 보이면서 180°에 가까운 위상의 변화를 보이고 있기 때문이다. 다음은 두 번째 충격신호에 대한 각 가속도계별 주파수 분석 결과이다.

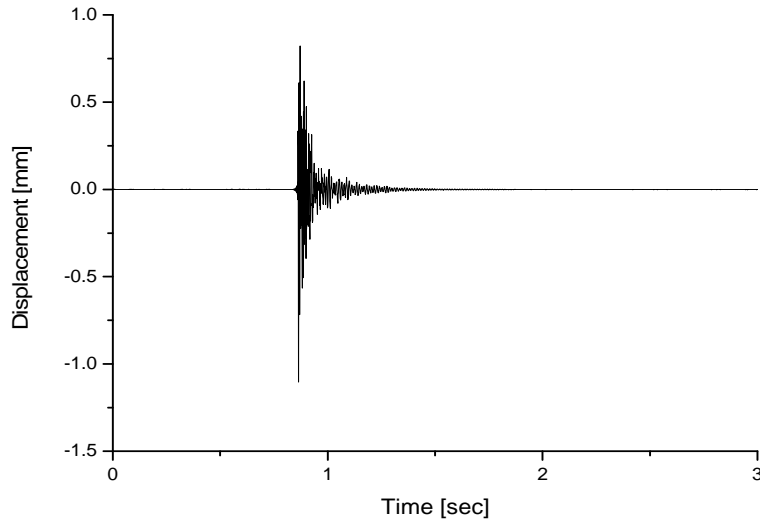


Fig. 4.17 Acceleration of acc 1 about the 2nd impact signal.

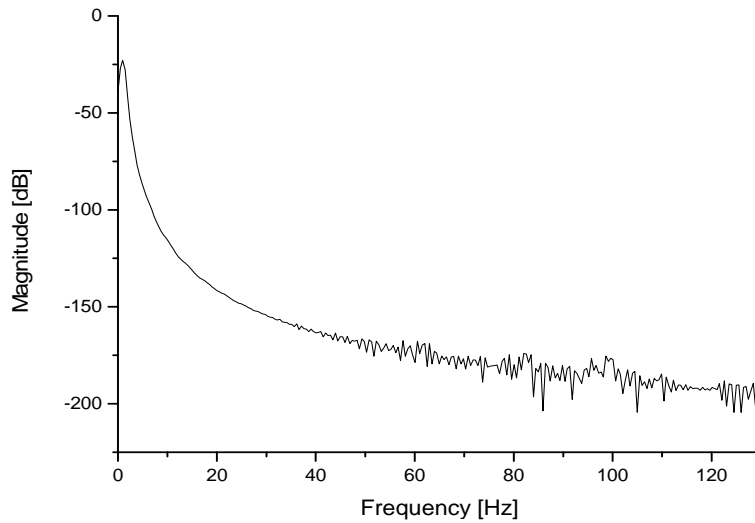


Fig. 4.18 FFT magnitude of acc 1 about the 2nd impact signal.

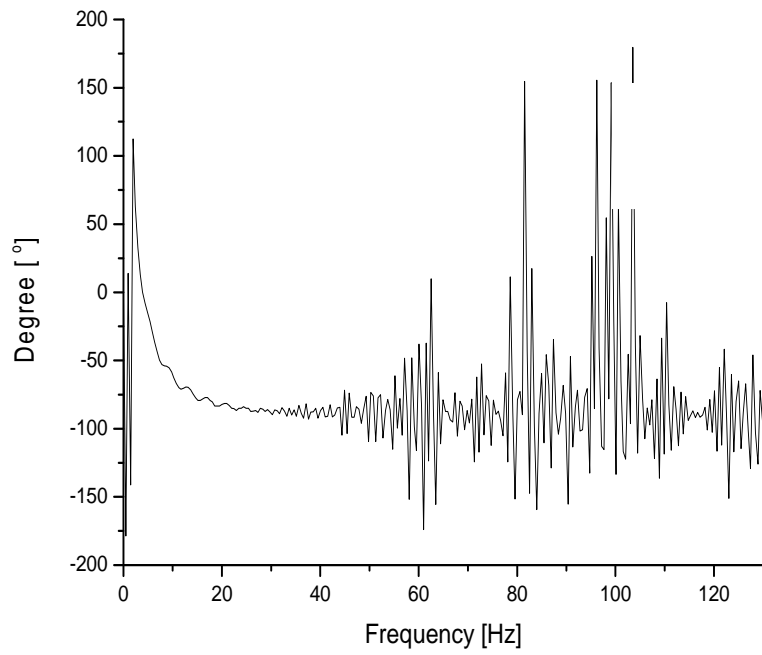


Fig. 4.19 FFT phase of acc 1 about the 2nd impact signal.

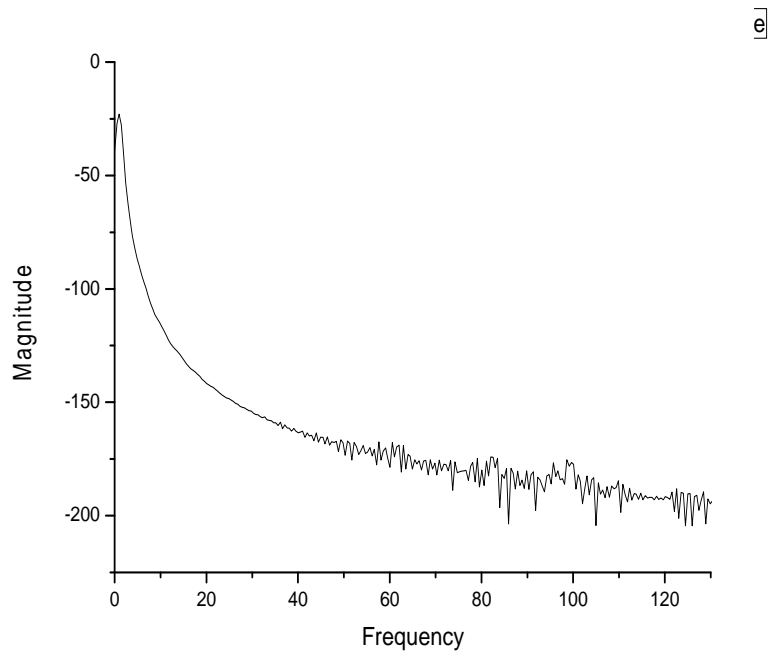


Fig. 4.20 Power spectrum of acc 1 about the 2nd impact signal.

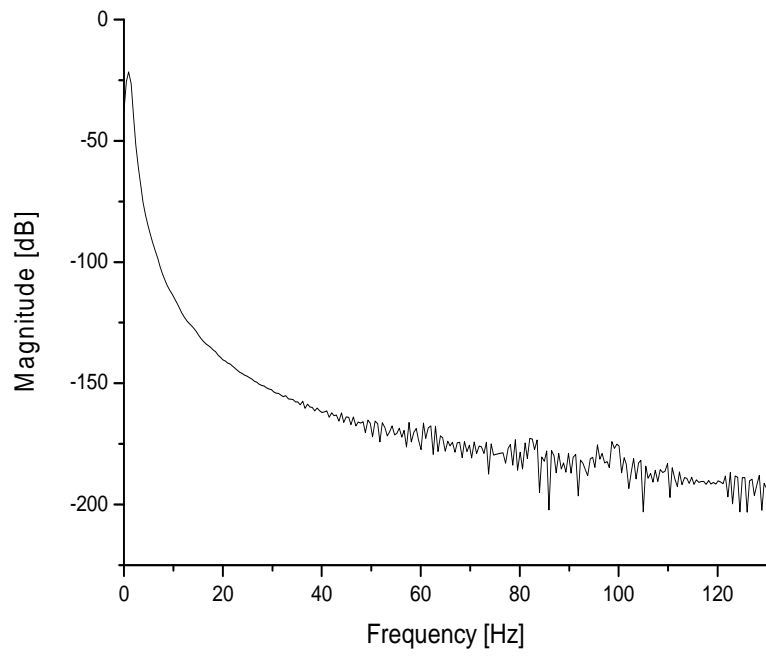


Fig. 4.21 Power spectrum density of acc 1 about the 2nd impact signal.

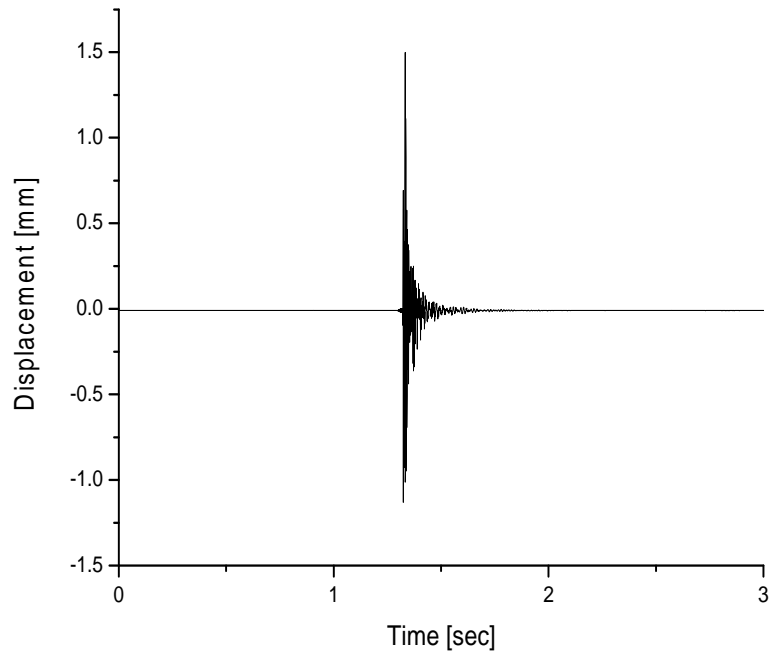


Fig. 4.22 Acceleration of acc 2 about the 2nd impact signal.

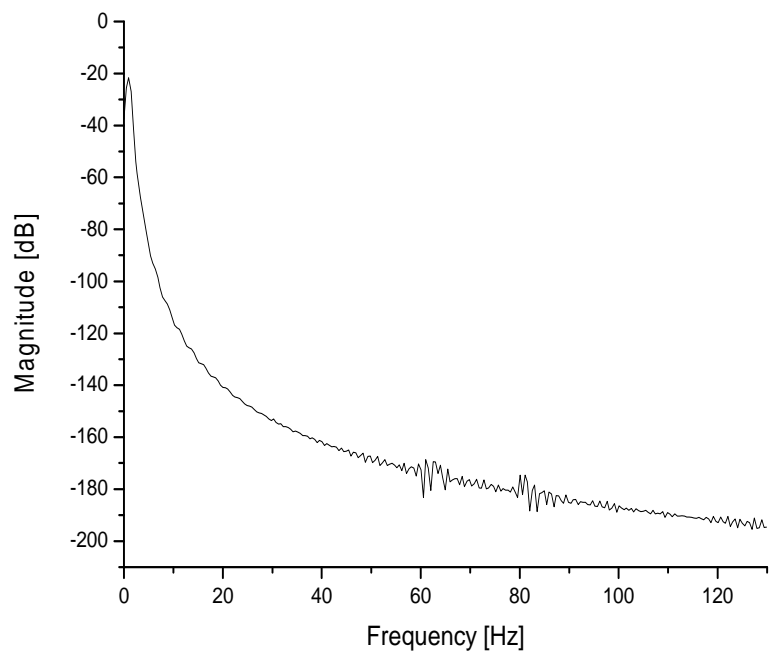


Fig. 4.23 FFT magnitude of acc 2 about the 2nd impact signal.

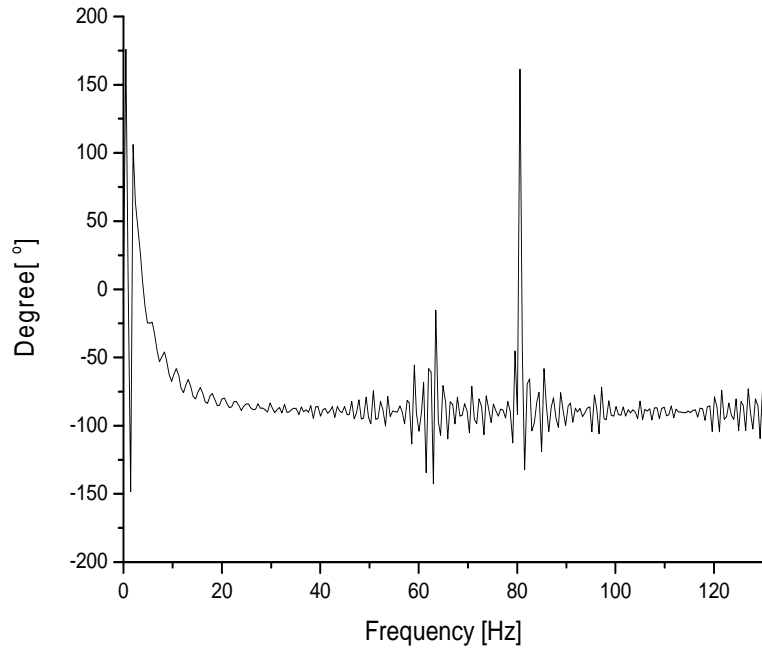


Fig. 4.24 FFT phase of acc 2 about the 2nd impact signal.

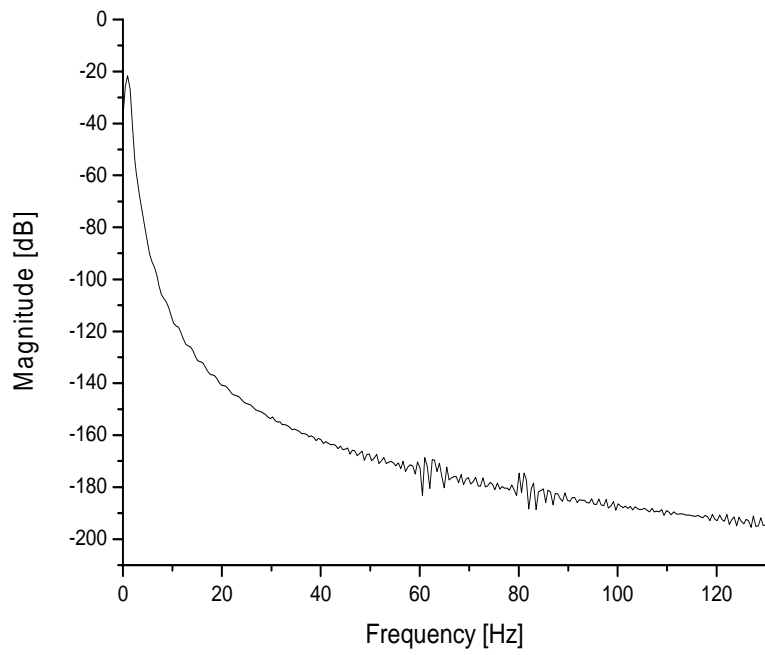


Fig. 4.25 Power spectrum of acc 2 about the 2nd impact signal.

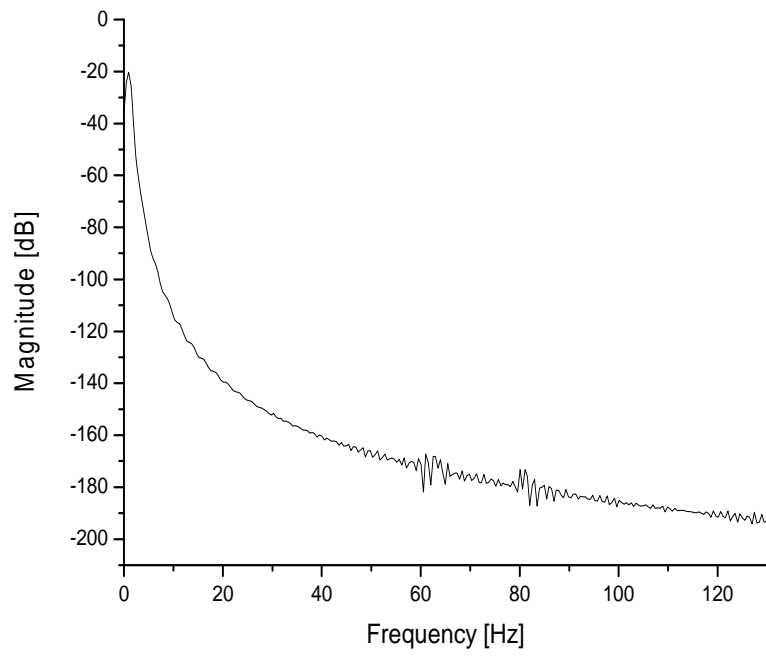


Fig. 4.26 Power spectrum density of acc 2 about the 2nd impact signal.

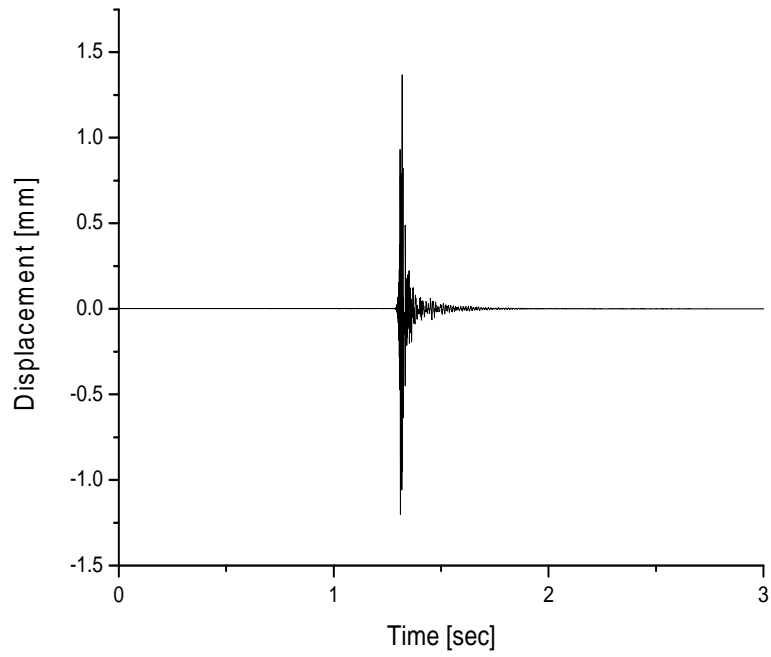


Fig. 4.27 Acceleration of acc 3 about the 2nd impact signal.

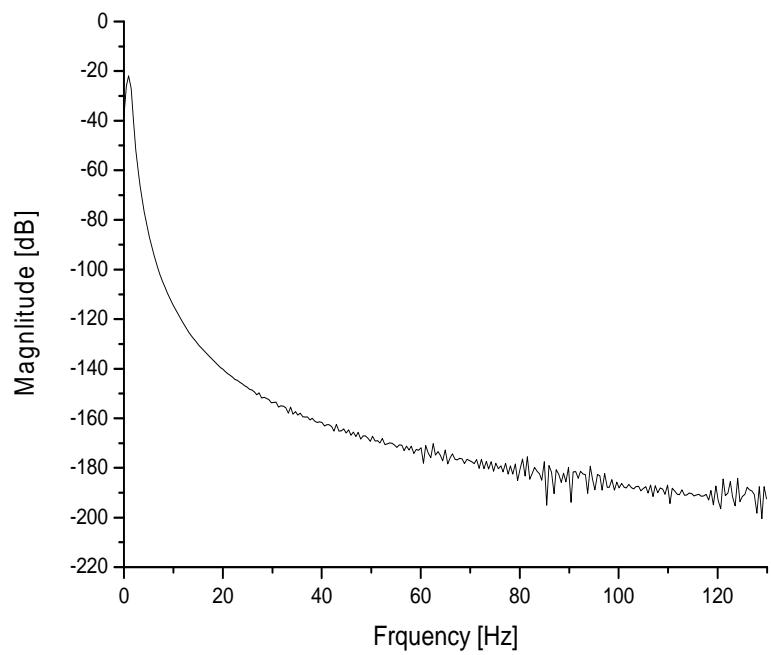


Fig. 4.28 FFT magnitude of acc 3 about the 2nd impact signal.

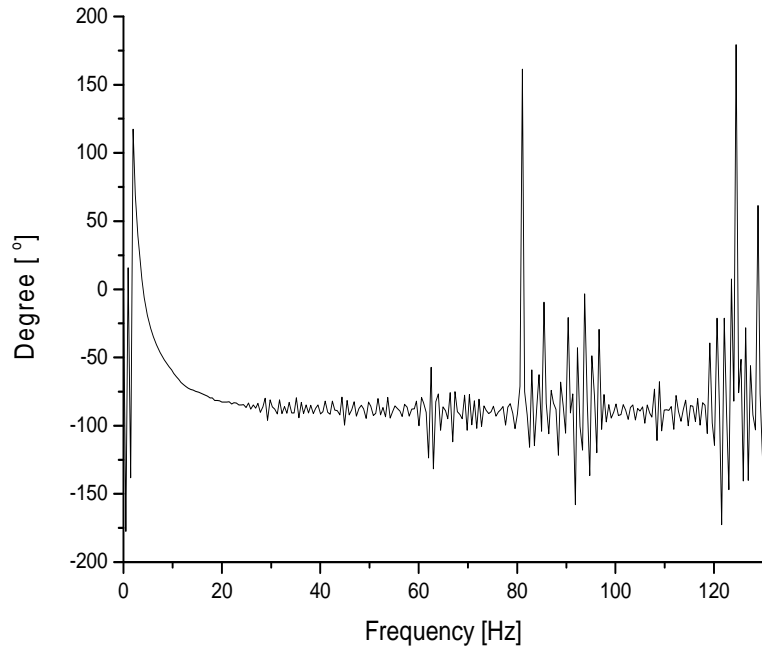


Fig. 4.29 FFT phase of acc 3 about the 2nd impact signal.

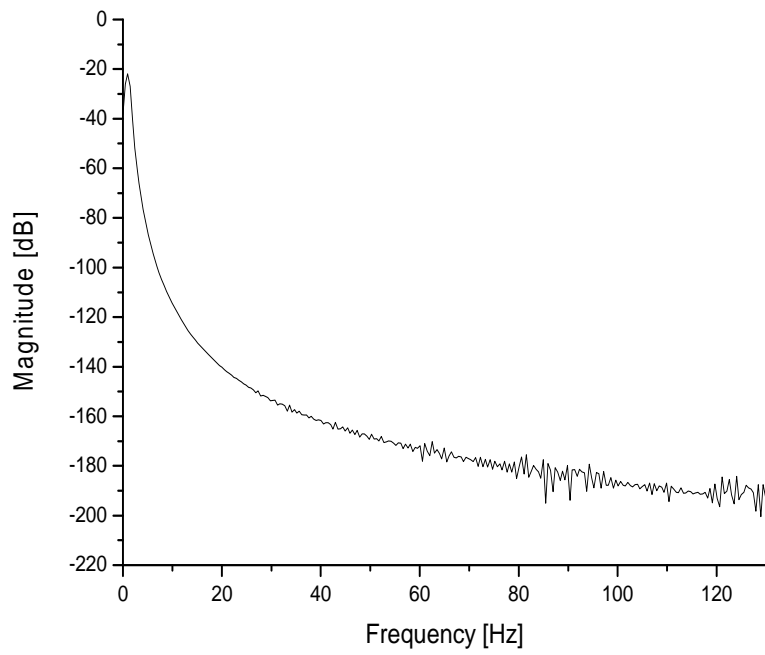


Fig. 4.30 Power spectrum of acc 3 about the 2nd impact signal.

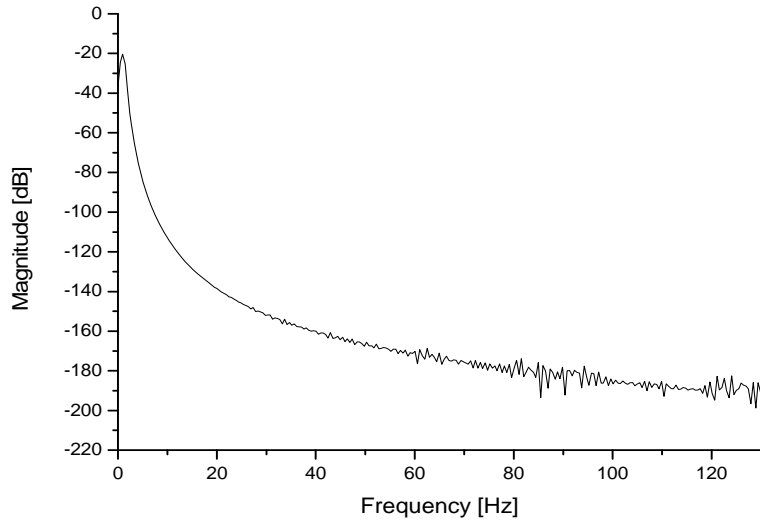


Fig. 4.31 Power spectrum density of acc 3 about the 2nd impact signal.

Fig. 17~Fig. 31까지는 두 번째 충격신호에 대한 결과이다. 두 번째 실험에도 첫 번째 실험 결과와 비슷한 양상으로 약 80 Hz 대역에서 Magnitude의 변화와 Phase의 위상차가 나타나고 있다. 다음은 세 번째 충격신호에 대한 각 가속도계별 주파수 분석 결과이다.

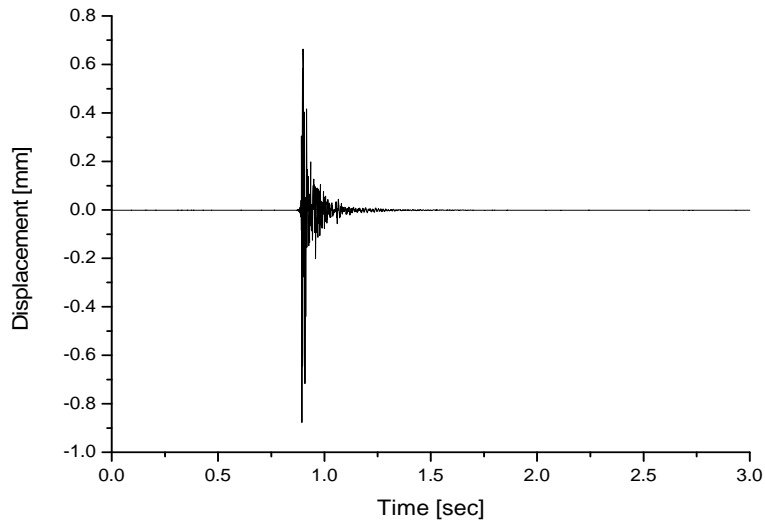


Fig. 4.32 Acceleration of acc 1 about the 3rd impact signal.

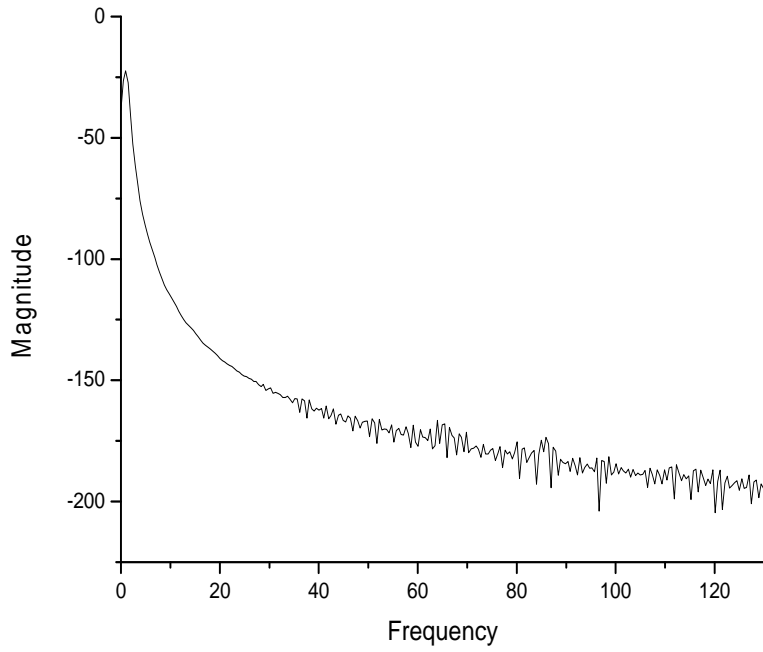


Fig. 4.33 FFT magnitude of acc 1 about the 3rd impact signal.

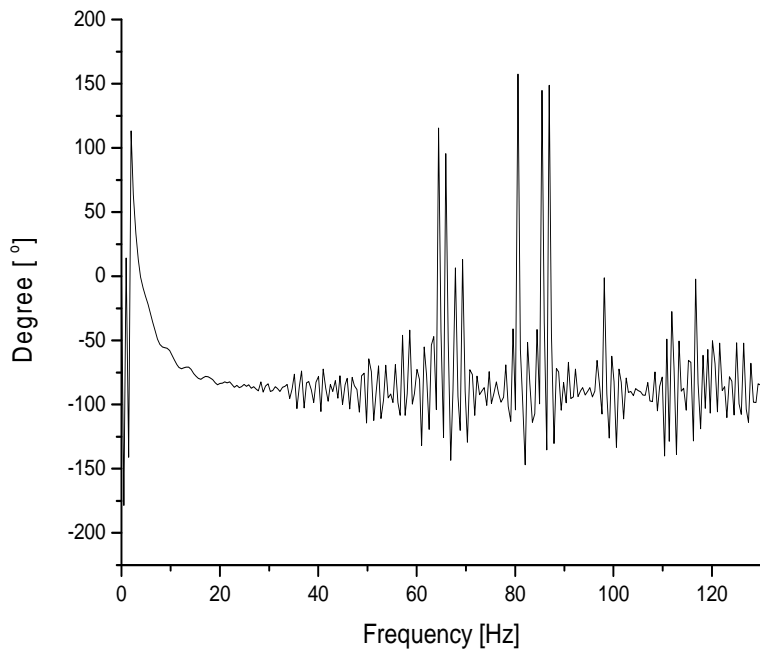


Fig. 4.34 FFT phase of acc 1 about the 3rd impact signal.

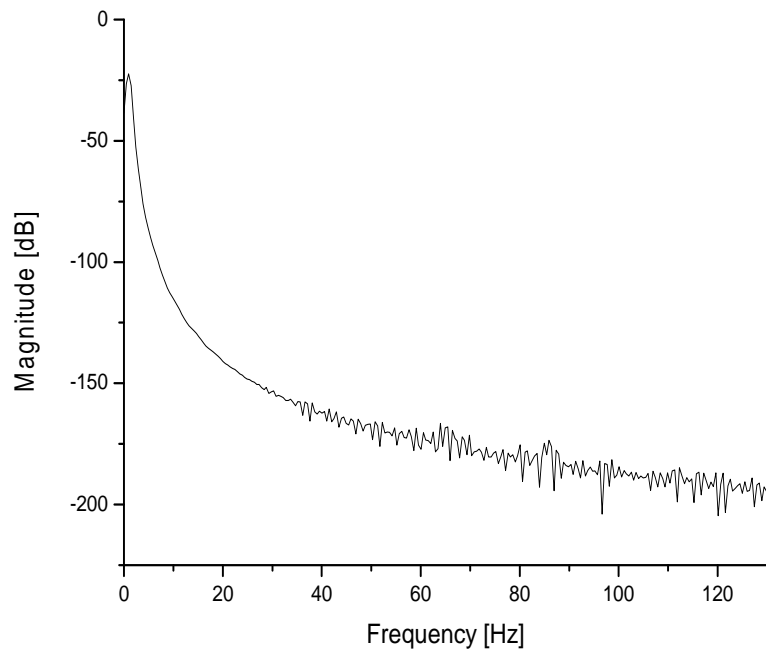


Fig. 4.35 Power spectrum of acc 1 about the 3rd impact signal.

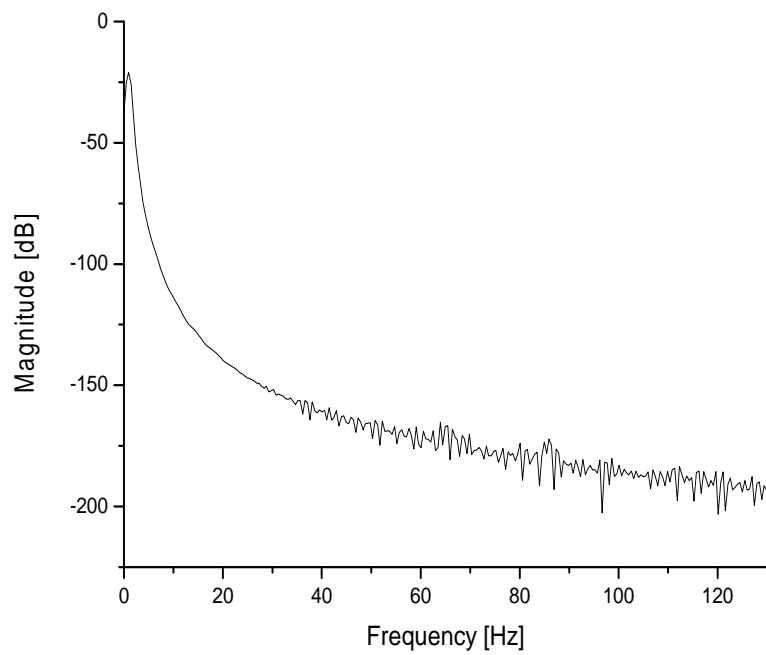


Fig. 4.36 Power spectrum density of acc 1 about the 3rd impact signal.

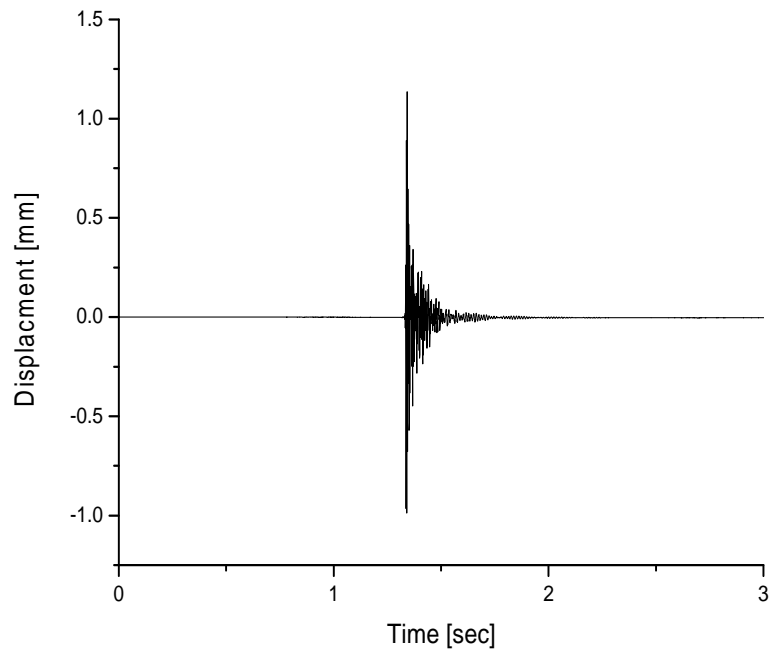


Fig. 4.37 Acceleration of acc 2 about the 3rd impact signal.

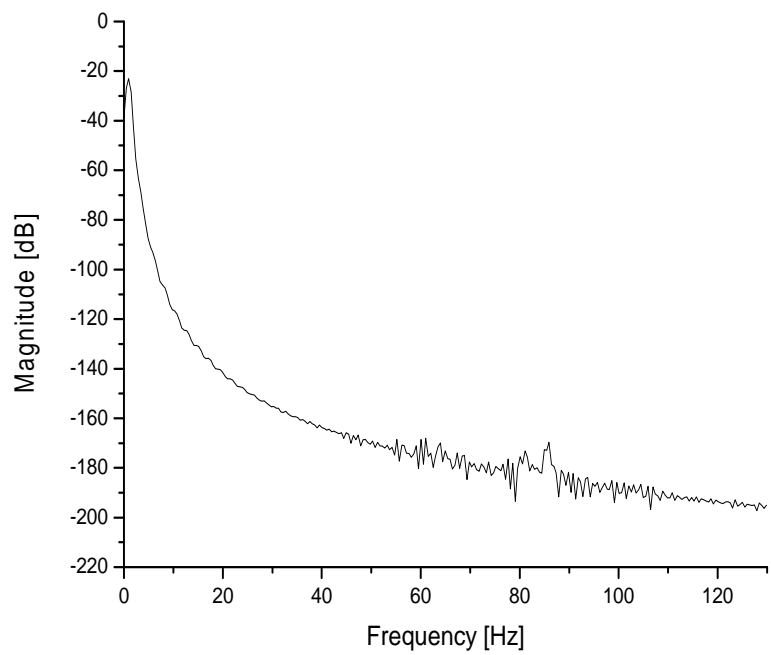


Fig. 4.38 FFT magnitude of acc 2 about the 3rd impact signal.

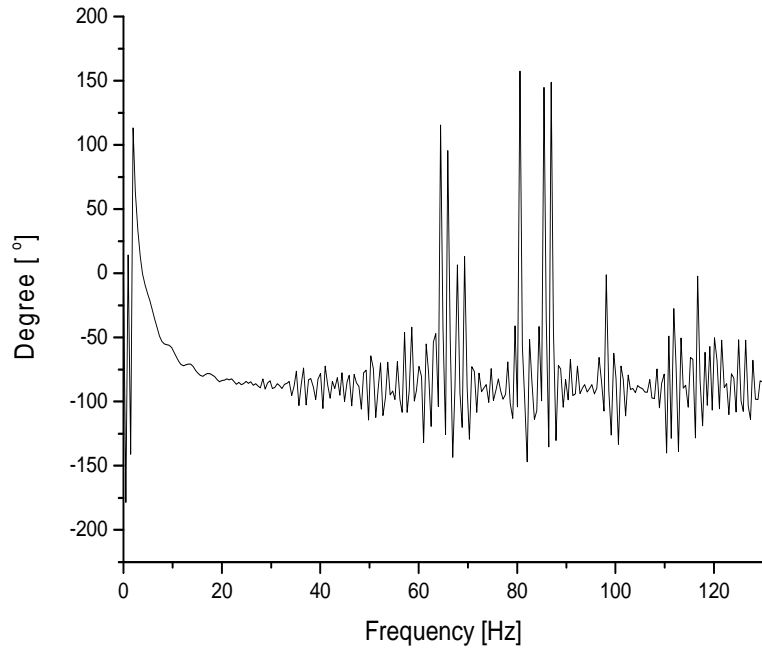


Fig. 4.39 FFT phase of acc 2 about the 3rd impact signal.

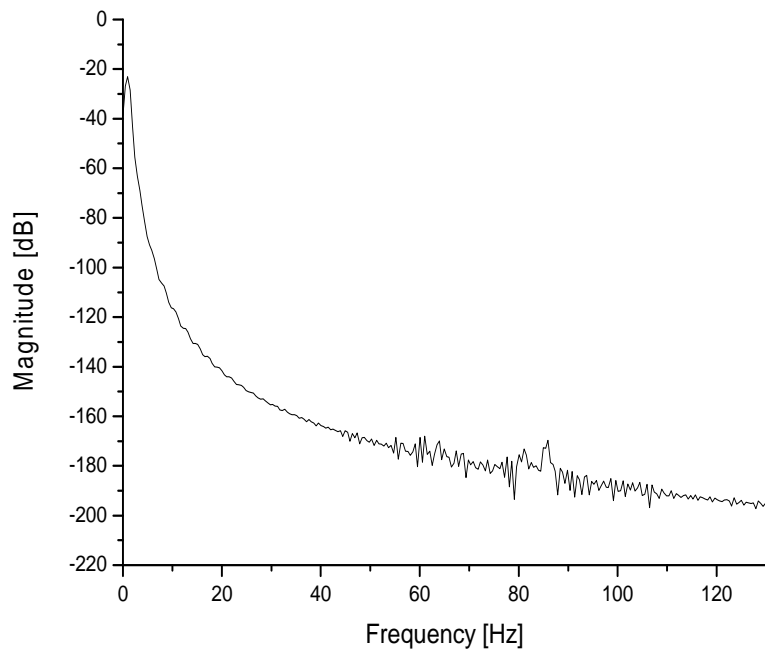


Fig. 4.40 Power spectrum of acc 2 about the 3rd impact signal.

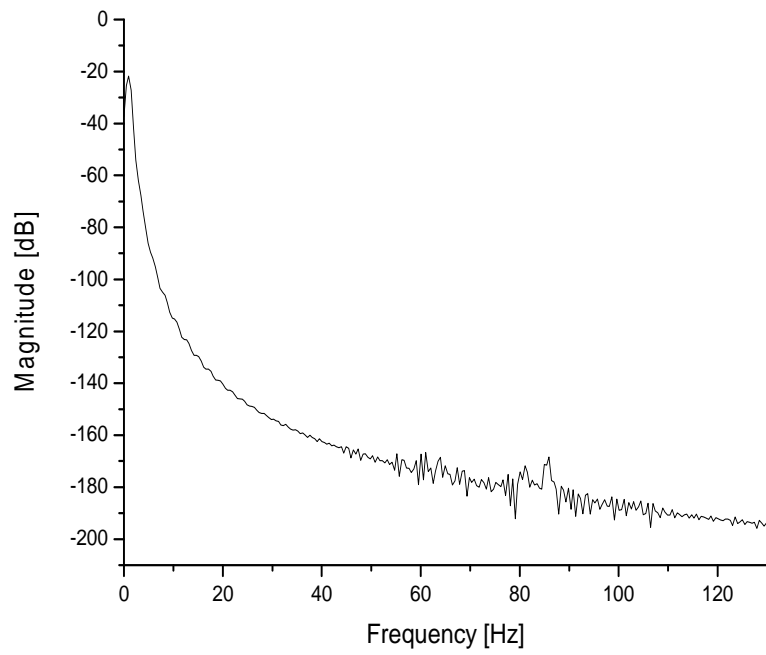


Fig. 4.41 Power spectrum density of acc 2 about the 3rd impact signal.

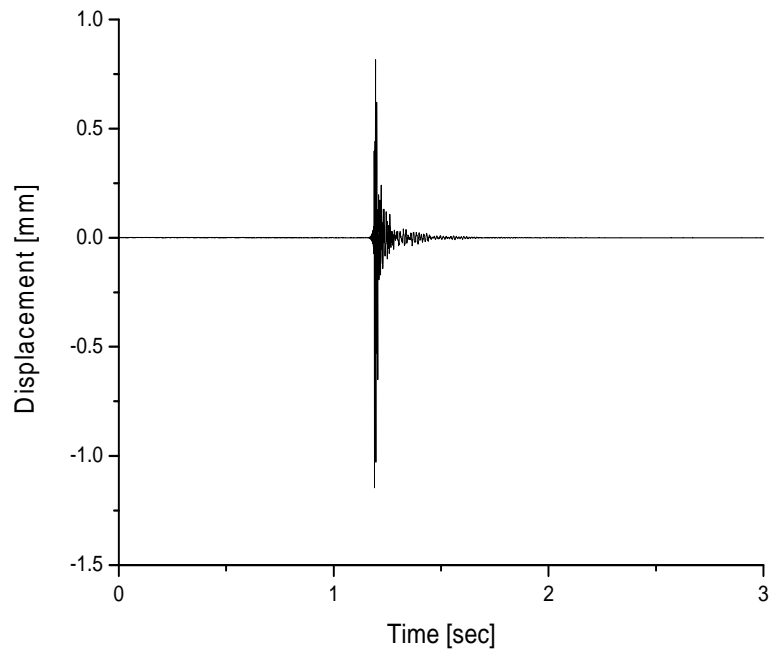


Fig. 4.42 Acceleration of acc 3 about the 3rd impact signal.

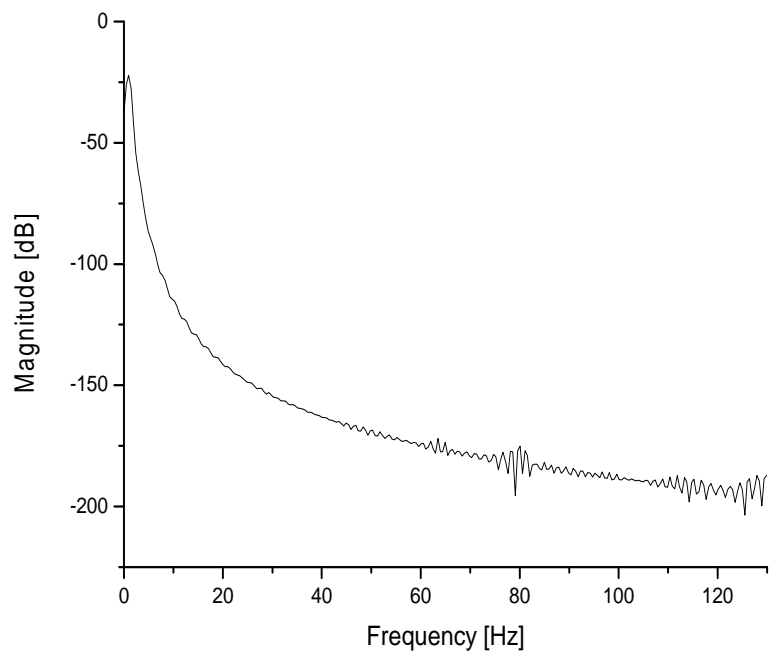


Fig. 4.43 FFT magnitude of acc 3 about the 3rd impact signal.

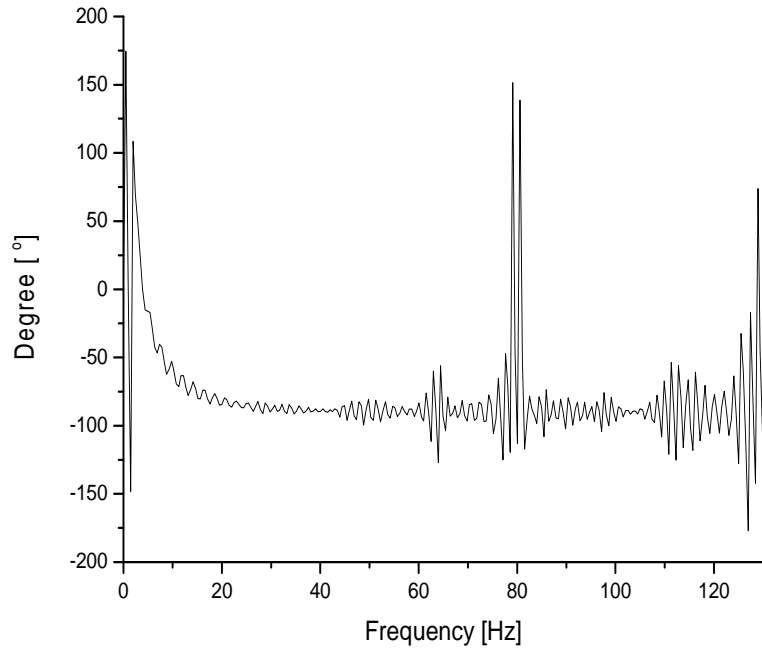


Fig. 4.44 FFT phase of acc 3 about the 3rd impact signal.

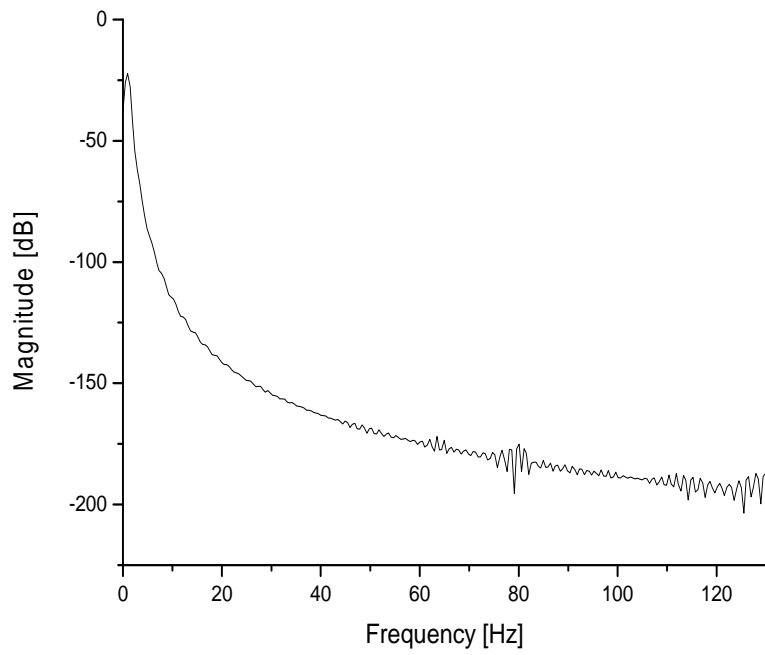


Fig. 4.45 Power spectrum of acc 3 about the 3rd impact signal.

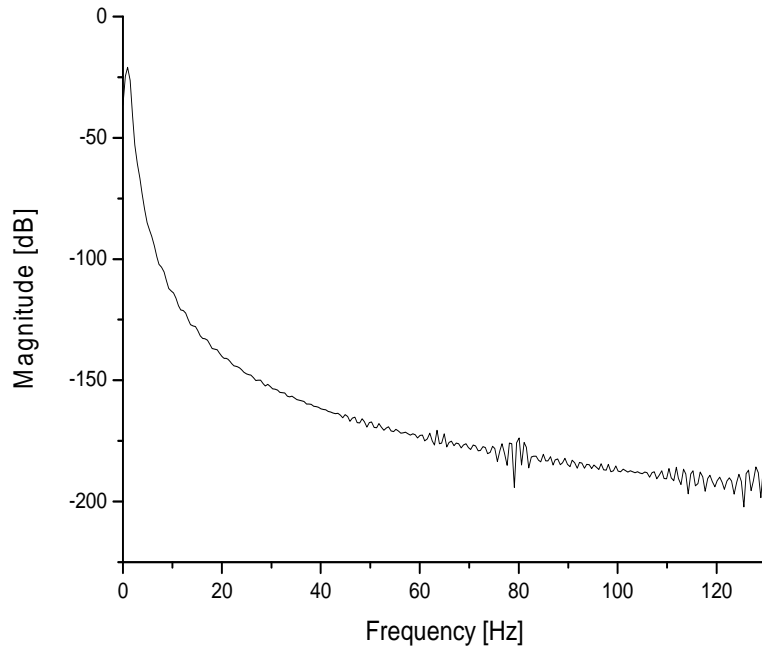


Fig. 4.46 Power spectrum density of acc 3 about the 3rd impact signal.

Fig. 32~Fig. 46까지는 세 번째 충격신호에 대한 결과이다. 세 번째 실험에도 이전 실험 결과와 비슷한 양상으로 약 80 Hz 대역에서 Magnitude의 변화와 Phase의 위상차가 나타나고 있다. 다음은 충격 실험에 대한 각 가속도계별로 Hz 대역별 FFT의 Magnitude와 Phase를 표로 정리한 것이다.

Table 4.1 Differences of the FFT Data in Acc 1

Frequency [Hz]	1st Impact		2nd Impact		3rd Impact	
	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]
20 Hz	1.099	0.218	1.035	1.171	1.106	0.751
40 Hz	5.210	12.782	0.687	5.591	3.905	27.458
60 Hz	14.491	55.966	10.993	90.831	6.819	51.222
80 Hz	9.156	112.018	7.492	72.812	15.187	261.674
100 Hz	2.847	26.015	10.991	111.717	4.311	51.169

Table 4.2 Differences of the FFT Data in Acc 2

Frequency [Hz]	1st Impact		2nd Impact		3rd Impact	
	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]
20 Hz	0.015	1.469	0.935	4.798	1.205	2.497
40 Hz	0.003	8.766	0.425	7.114	1.119	3.535
60 Hz	2.681	8.118	2.334	13.145	11.825	63.399
80 Hz	7.484	101.644	8.605	253.225	13.227	257.296
100 Hz	1.056	5.726	2.469	7.080	4.318	19.689

Table 4.3 Differences of the FFT Data in Acc 3

Frequency [Hz]	1st Impact		2nd Impact		3rd Impact	
	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]
20 Hz	1.081	0.901	0.717	0.807	1.569	4.666
40 Hz	1.252	3.480	1.151	6.553	0.661	1.755
60 Hz	0.818	7.110	7.142	20.865	2.363	10.285
80 Hz	24.348	198.839	7.848	232.430	18.515	189.992
100 Hz	1.219	6.720	3.277	8.412	2.158	10.526

Table 4.1~4.3에서도 알 수 있듯이 FFT 결과의 Phase 부분이 80 Hz에서 가장 크게 변화하고 있다. 또한 Magnitude 역시 80 Hz에서 가장 큰 값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 60 Hz부근에서도 Phase 값이 크게 변화하는 것을 알 수 있었는데 이는 전류의 영향 때문이라고 할 수 있겠다. 이와 같은 실험 결과를 통해 유압 시뮬레이터의 공진 주파수가 80 Hz라는 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

4.2 Random 신호를 이용한 가진 실험

기계 장치에 공진 주파수를 찾는 방법 중에 하나는 Random 신호를 입력하고 주파수 분석을 하는 방법이다. 특히 선형, 비선형의 구조를 모두 포함하고 있는 자동차를 대상으로 하는 유압 시뮬레이터의 경우에 있어서 이와 같은 방법은 매우 유용하다. 동역학적인 특성을 주파수 응답함수를 구함으로써 주파수 영역에서 해석한다면 그 특성을 보다 쉽게 파악 할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 실제 노면 형상 재현 실험을 가정하고 개발한 프로그램에 Random 신호로 가진한 상태에서 유압 시뮬레이터의 공진 주파수를 측정하였다. 입력 신호로 사용된 Random 신호는 White Random 신호 중 일반적으로 사용되는 Gaussian White Random 신호, Periodic White Random 신호, Uniform White Random 신호이다.

입력 신호에 대한 계측과 분석은 개발한 프로그램을 이용하였고 가속도 신호의 데이터 저장은 평균값 연산이 30회 진행 될 때까지 계속 진행했다.

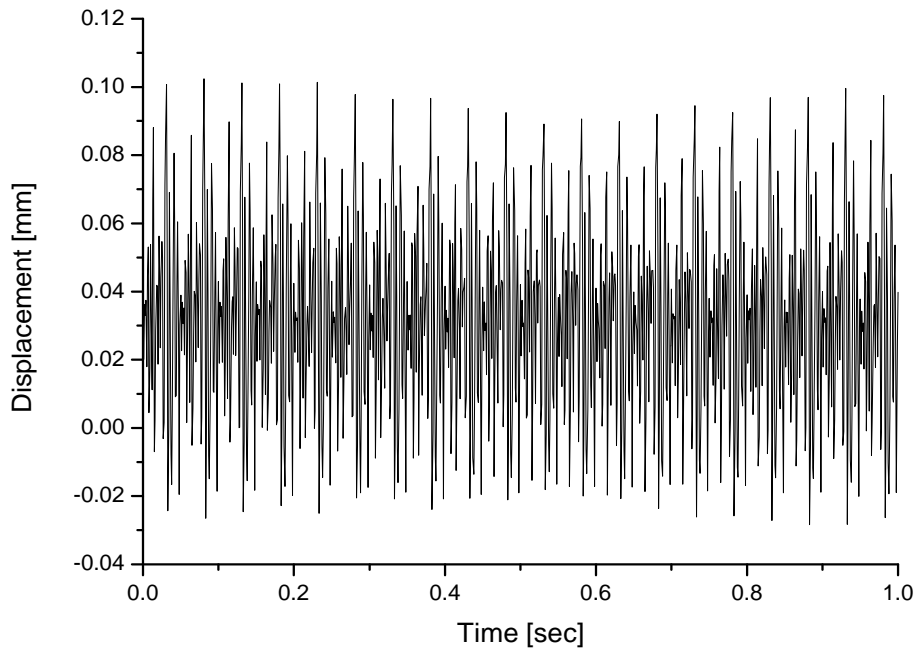


Fig. 4.47 Gaussian white random signal.

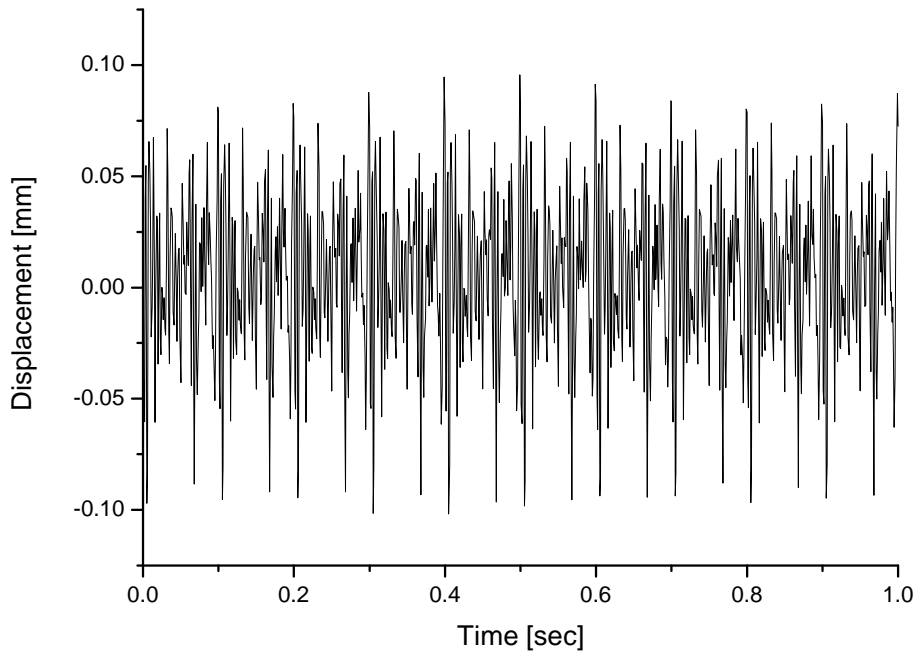


Fig 4.48 Periodic white random signal.

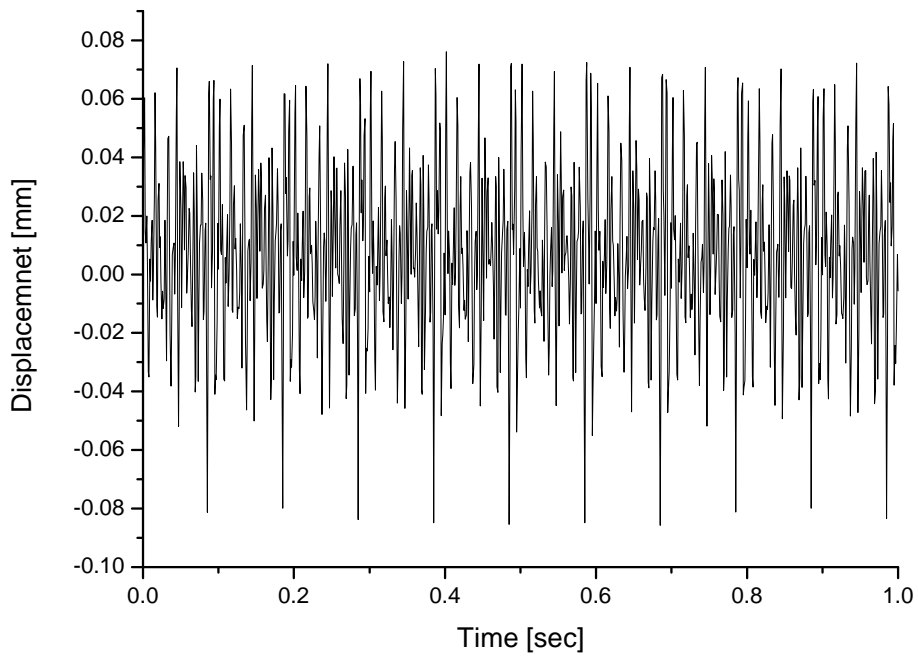


Fig 4.49 Uniform white random signal.

4.2.1 실험결과 및 고찰

입력 신호로 사용된 네 가지 Random 신호를 이용하여 유압 시뮬레이터를 가진하고 30회의 평균값 연산을 완료한 후 각 가속도계별로 FFT, 파워스펙트럼, 파워스펙트럼 밀도함수의 결과를 얻었다.

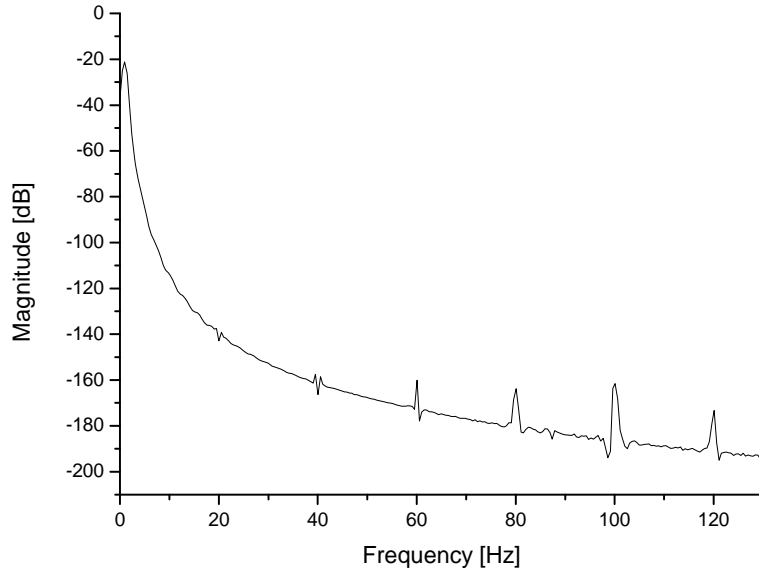


Fig. 4.50 FFT magnitude of acc 1 about gaussian white random signal.

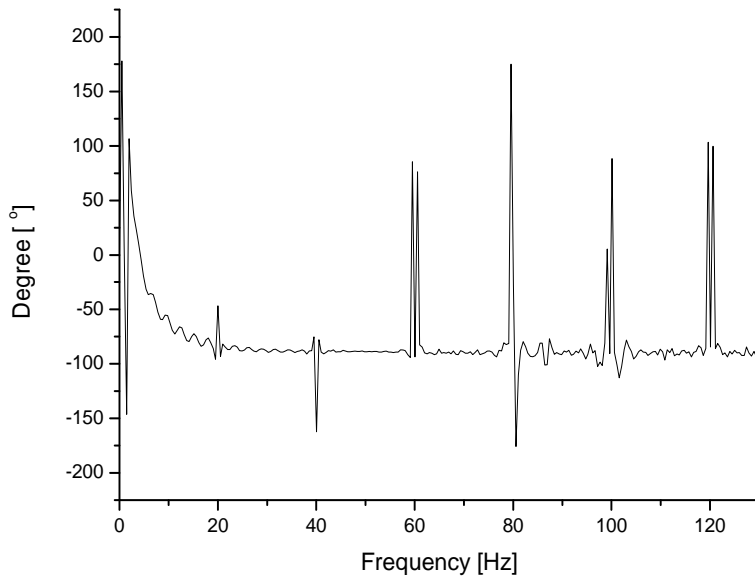


Fig. 4.51 FFT phase of acc 1 about gaussian white random signal.

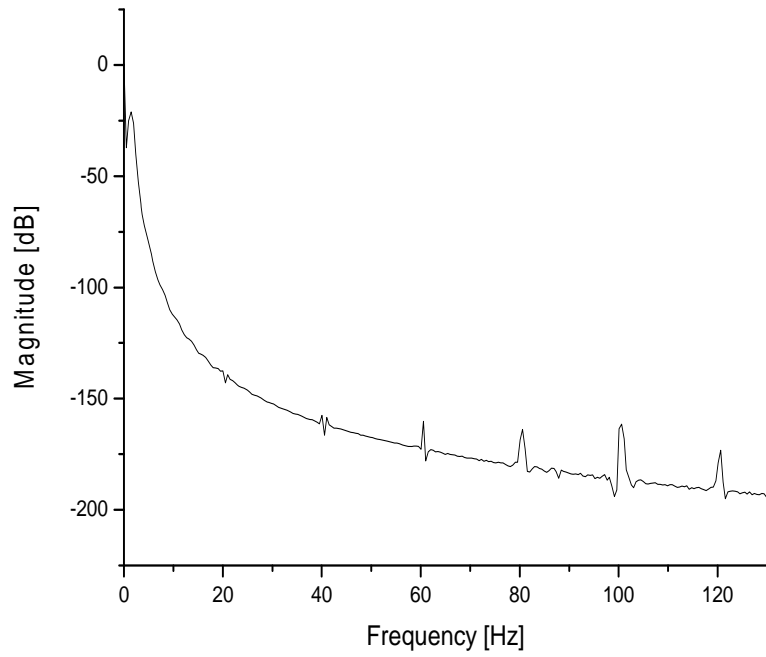


Fig. 4.52 Power spectrum of acc 1 about gaussian white random signal.

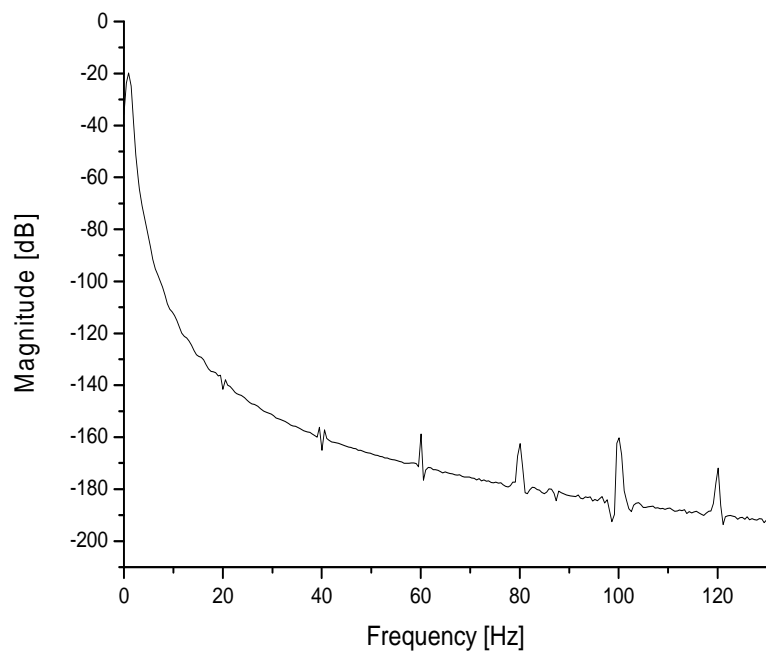


Fig. 4.53 Power spectrum density of acc 1 about gaussian white random signal.

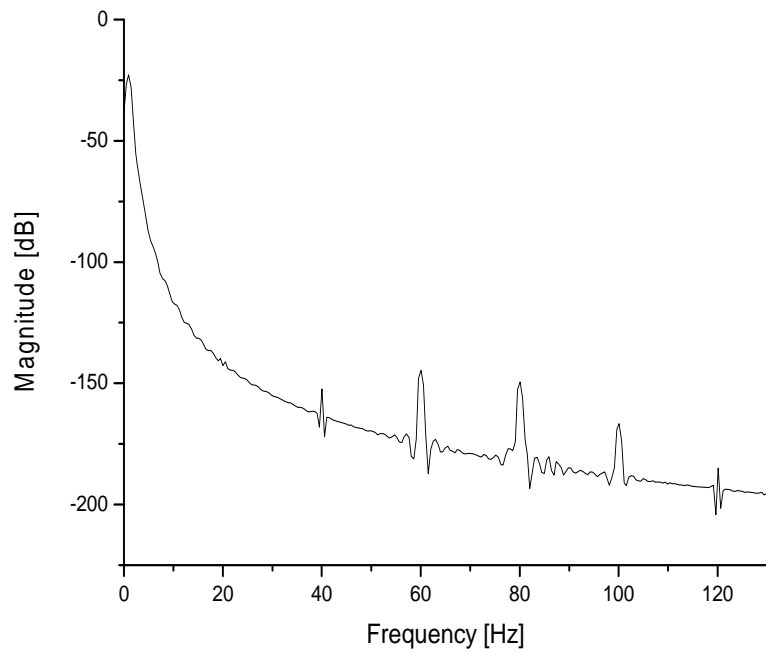


Fig. 4.54 FFT magnitude of acc 2 about gaussian white random signal.

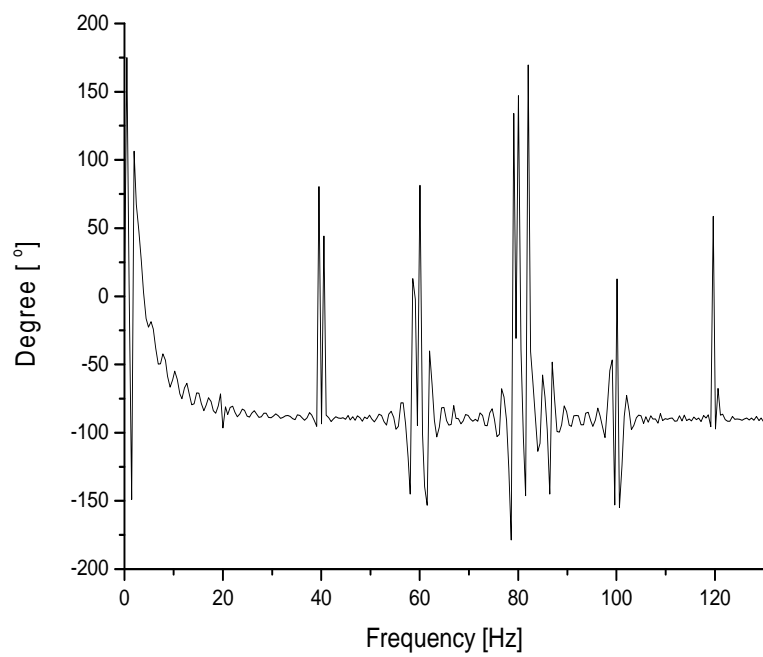


Fig. 4.55 FFT phase of acc 2 about gaussian white random signal.

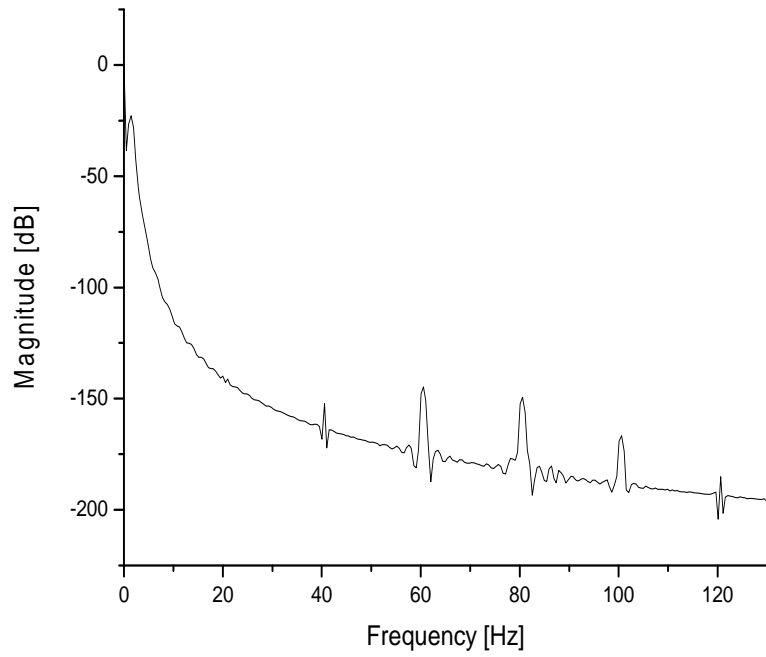


Fig. 4.56 Power spectrum of acc 2 about gaussian white random signal.

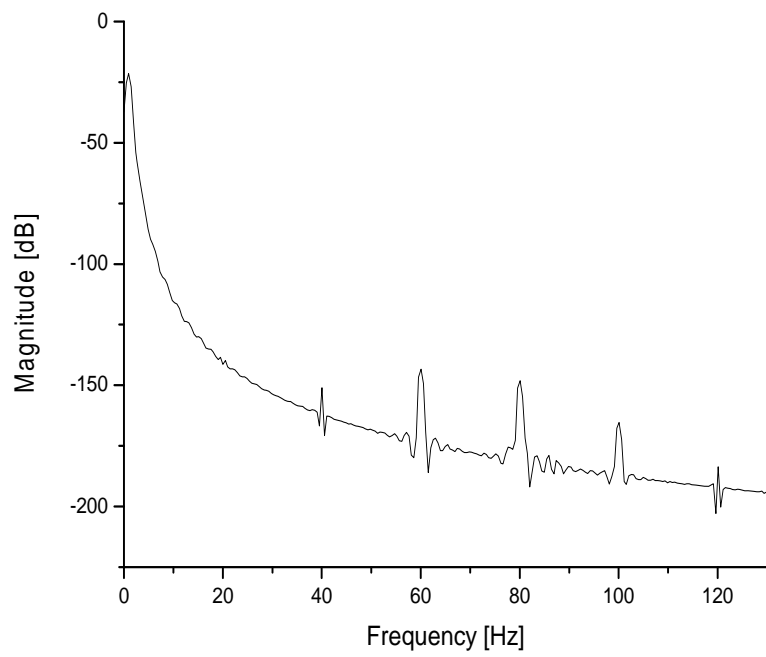


Fig. 4.57 Power spectrum density of acc 2 about gaussian white random signal.

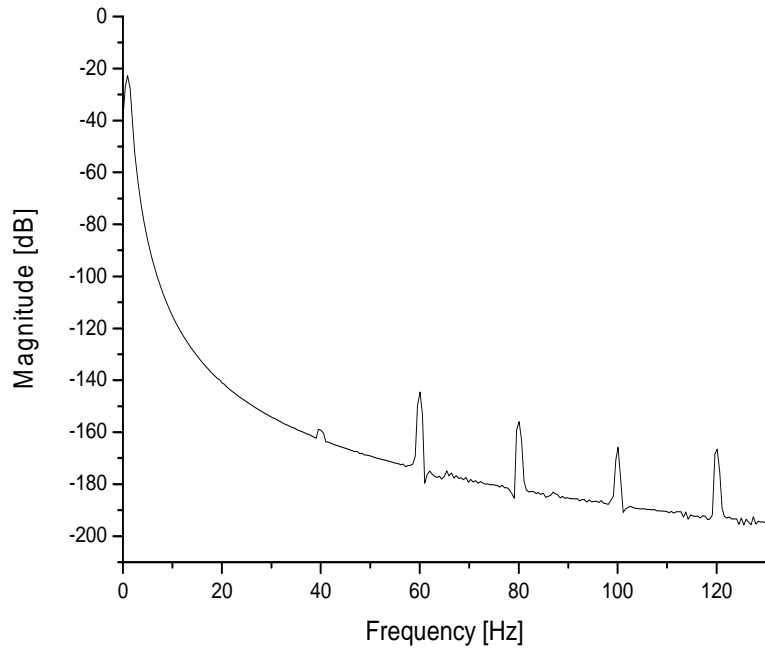


Fig. 4.58 FFT magnitude of acc 3 about gaussian white random signal.

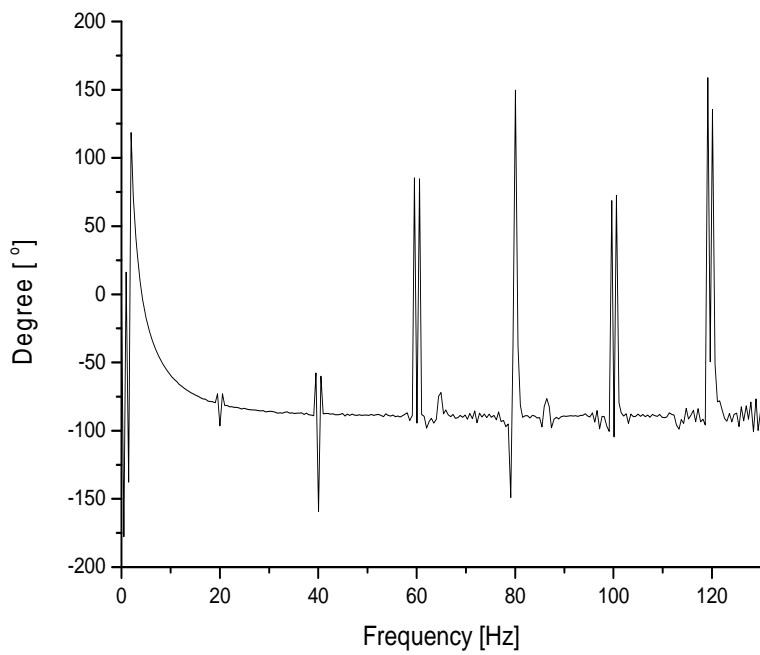


Fig. 4.59 FFT phase of acc 3 about gaussian white random signal.

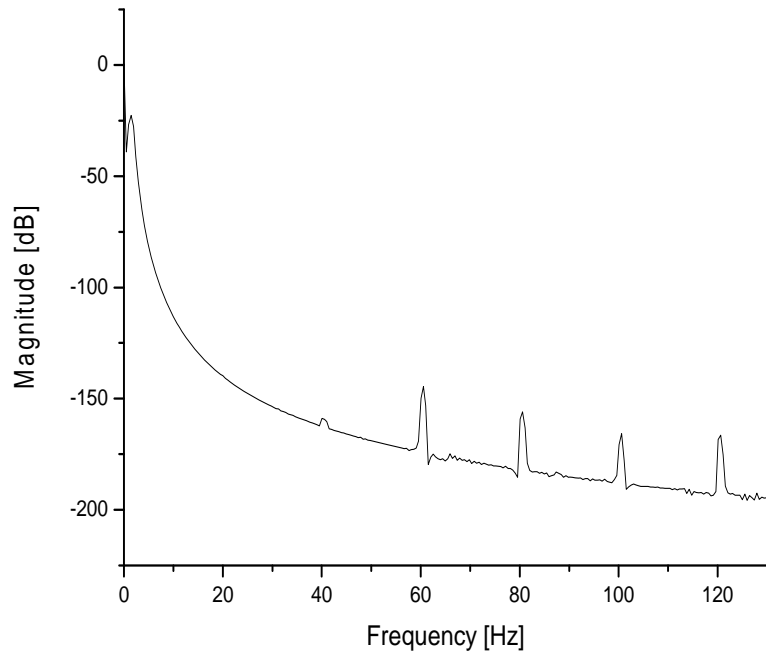


Fig. 4.60 Power spectrum of acc 2 about gaussian white random signal.

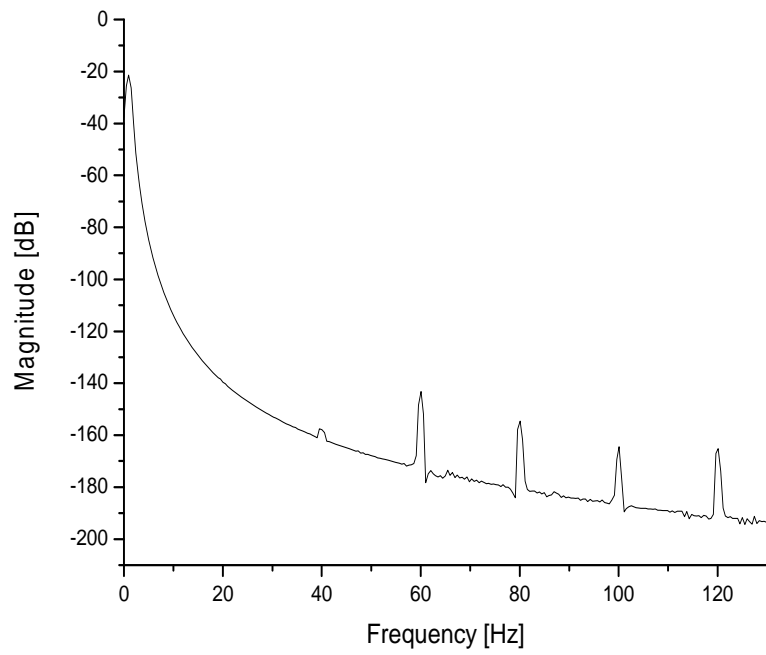


Fig. 4.61 Power spectrum density of acc 2 about gaussian white random signal.

Fig. 4.50~Fig. 4.61까지는 Gaussian White Random 신호에 대한 결과이다. 충격 실험에서와 마찬가지로 80 Hz 부근에서 Magnitude의 변화와 위상의 변화가 나타나고 있다. 그러나 순간적인 충격신호와 다르게 일정시간동안 지속적인 가진 상태에서 진행된 실험이기 때문에 Magnitude의 값은 일정 주기를 가지고 나타났다. 그러나 Phase 값의 역전 현상이 나타나고 최대값과 최소값의 차이가 가장 큰 대역은 80 Hz부근에서 형성되는 것을 알 수 있었다.

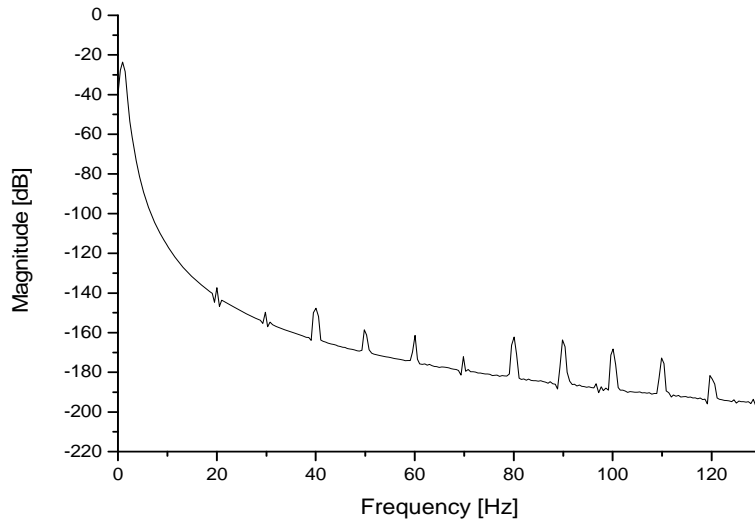


Fig. 4.62 FFT magnitude of acc 1 about periodic random signal.

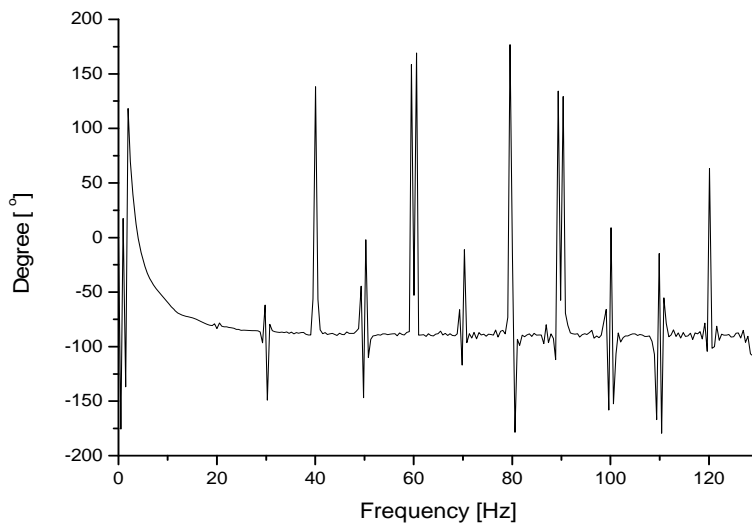


Fig. 4.63 FFT phase of acc 1 about periodic random signal.

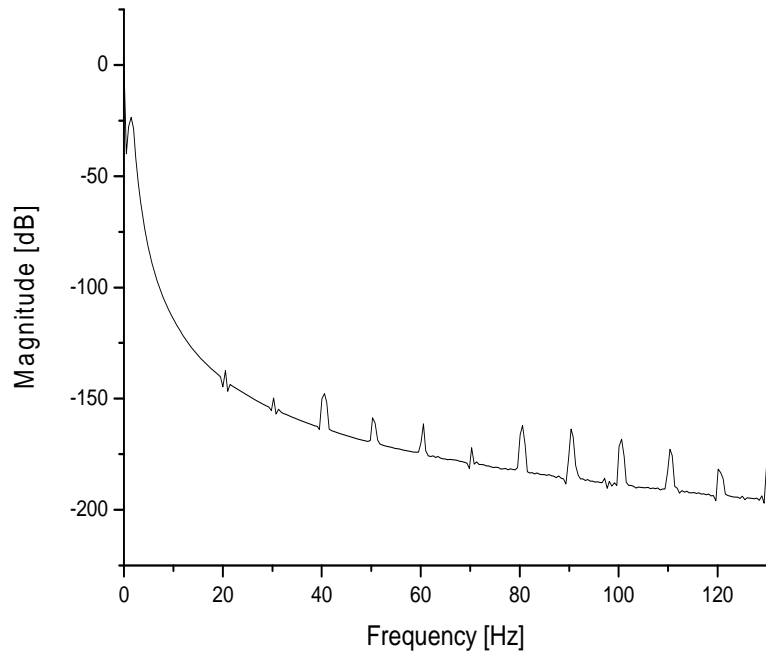


Fig. 4.64 Power spectrum of acc 1 about periodic random signal.

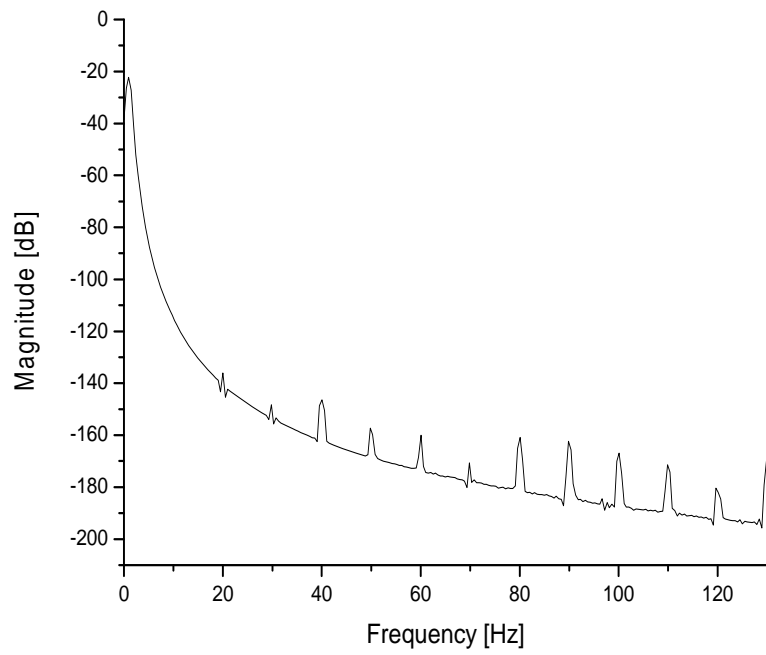


Fig. 4.65 Power spectrum density of acc 1 about periodic random signal.

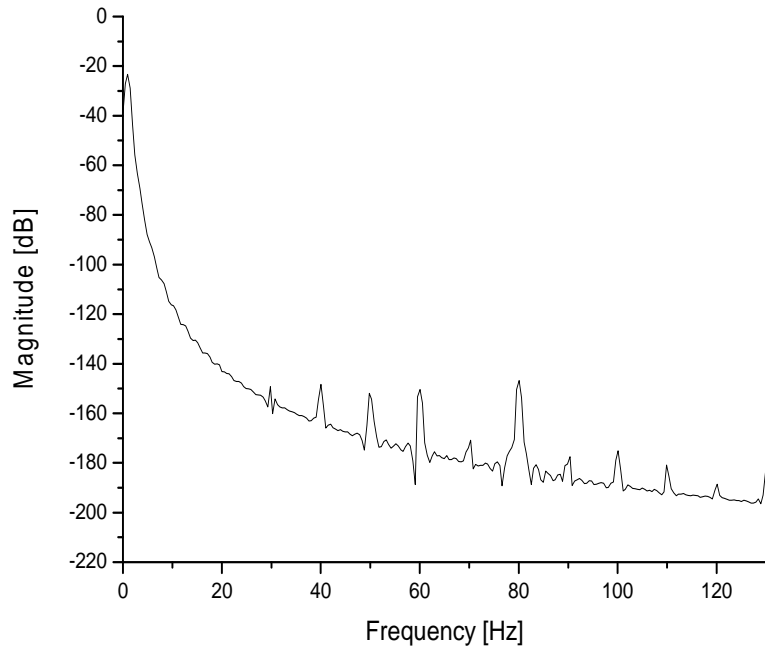


Fig. 4.66 FFT magnitude of acc 2 about periodic random signal.

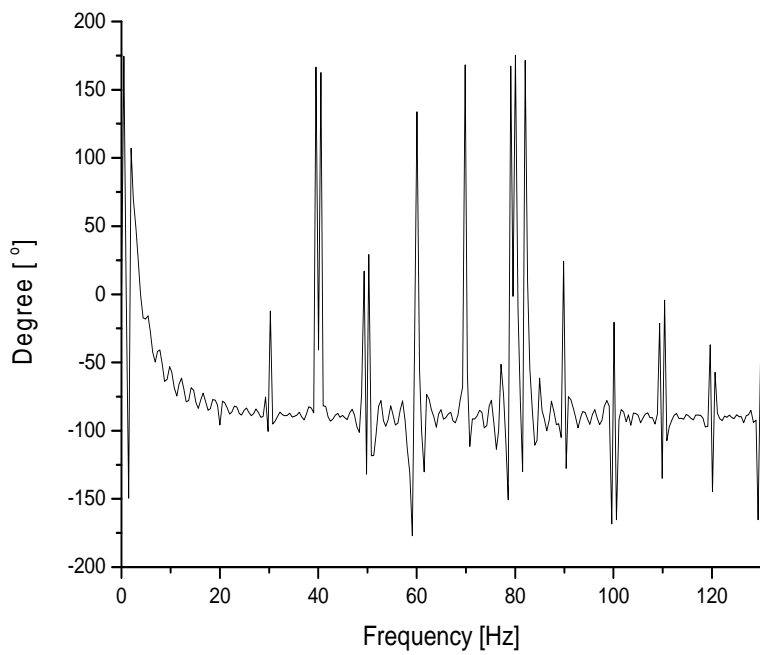


Fig. 4.67 FFT phase of acc 2 about periodic random signal.

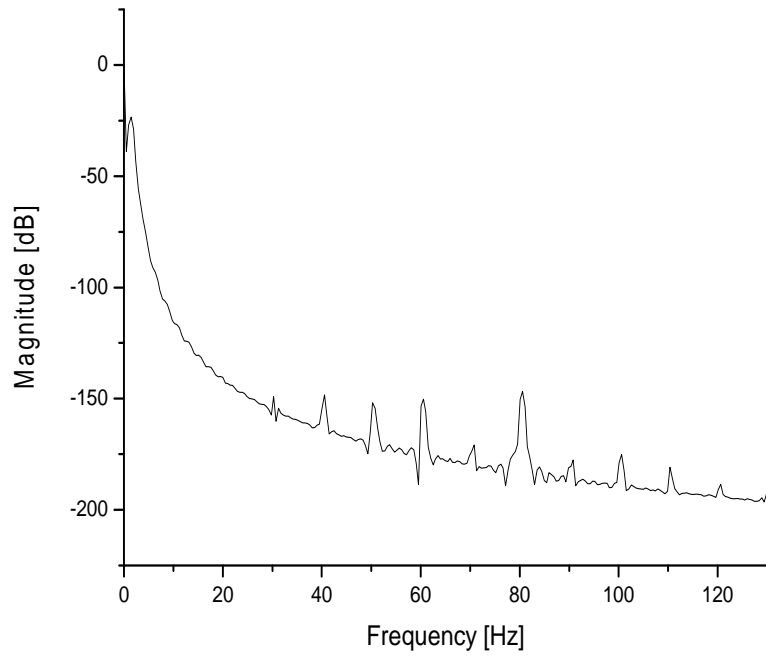


Fig. 4.68 Power spectrum of acc 2 about periodic random signal.

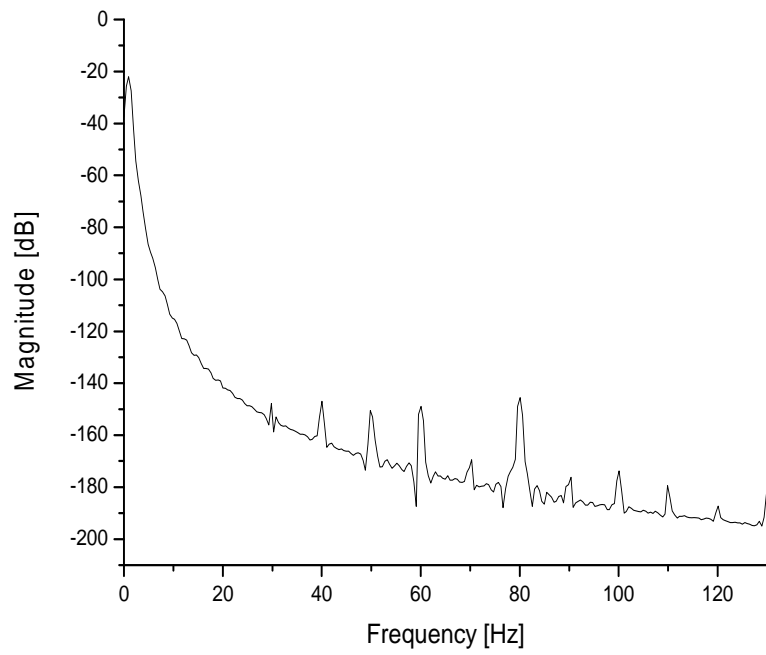


Fig. 4.69 Power spectrum density of acc 2 about periodic random signal.

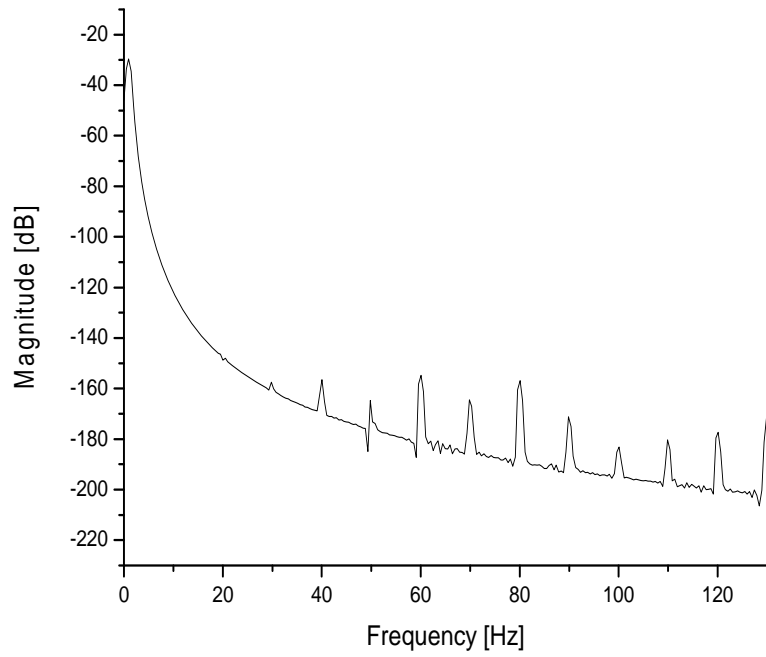


Fig. 4.70 FFT magnitude of acc 3 about periodic random signal.

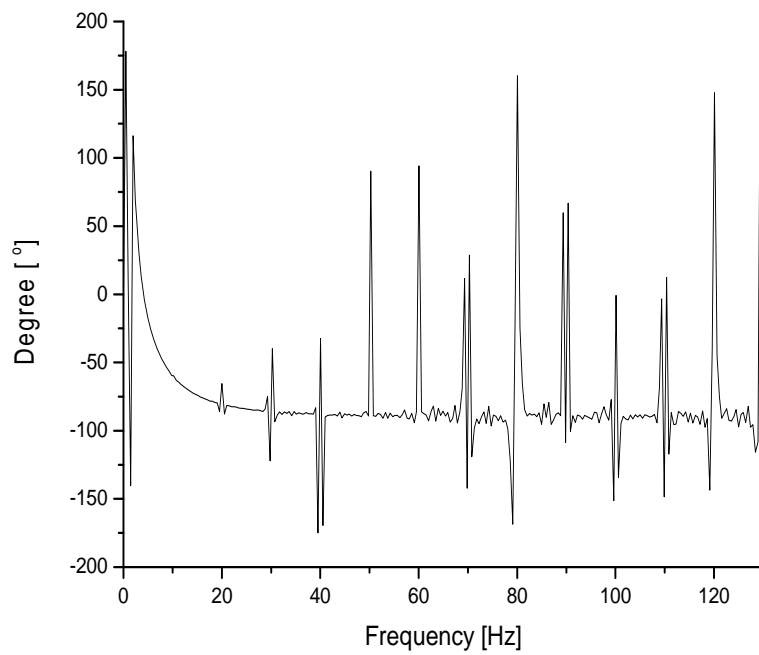


Fig. 4.71 FFT phase of acc 3 about periodic random signal.

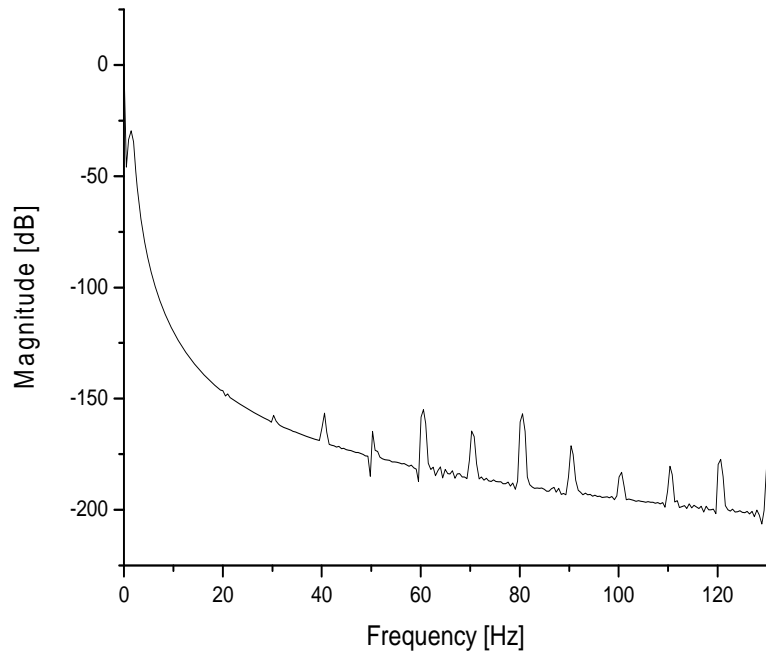


Fig. 4.72 Power spectrum of acc 3 about periodic random signal.

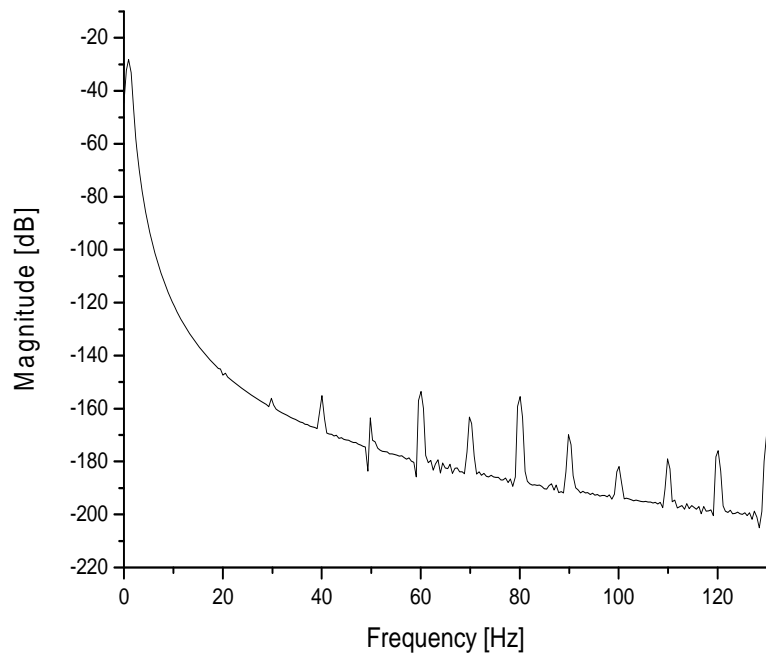


Fig. 4.73 Power spectrum density of acc 2 about periodic random signal.

Fig. 4.62~Fig. 4.73까지는 Periodic White Random 신호에 대한 결과이다. 이전 실험의 결과와 비슷한 양상으로 80 Hz 부근에서 Magnitude의 변화와 위상의 변화가 나타나고 있다. 다음은 Uniform White Random신호에 대한 각 가속도계별 주파수 분석 결과이다.

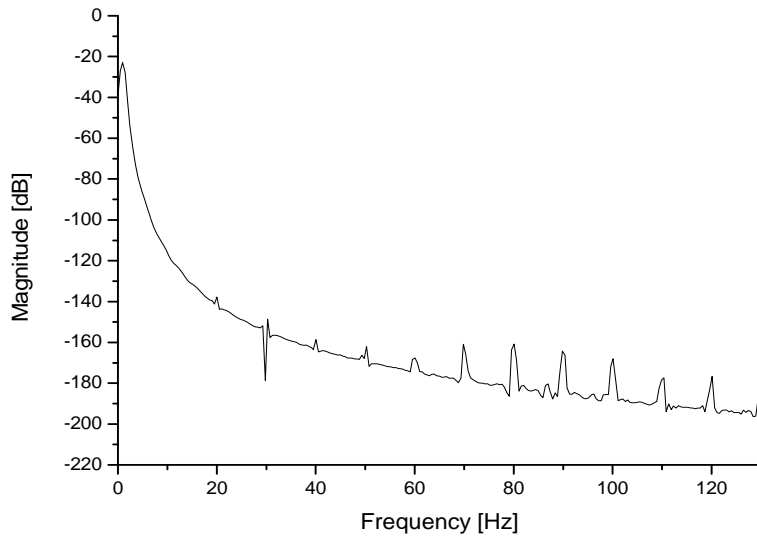


Fig. 4.74 FFT magnitude of acc 1 about uniform white random signal.

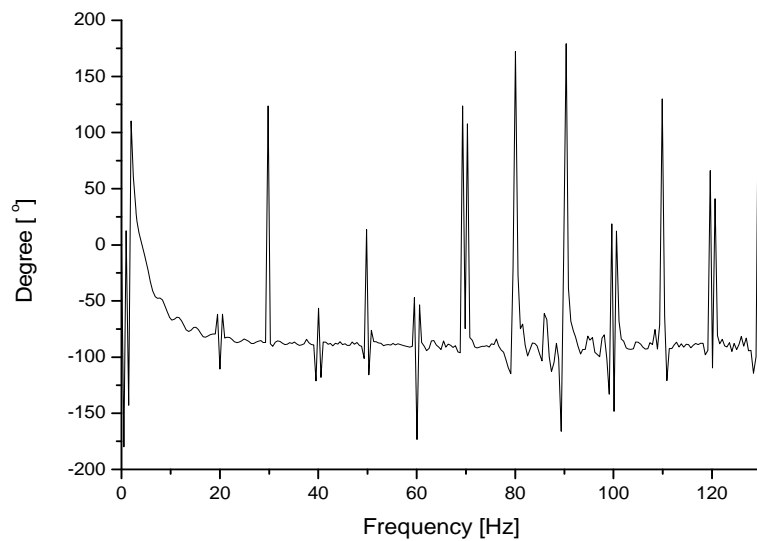


Fig. 4.75 FFT phase of acc 1 about uniform white random signal.

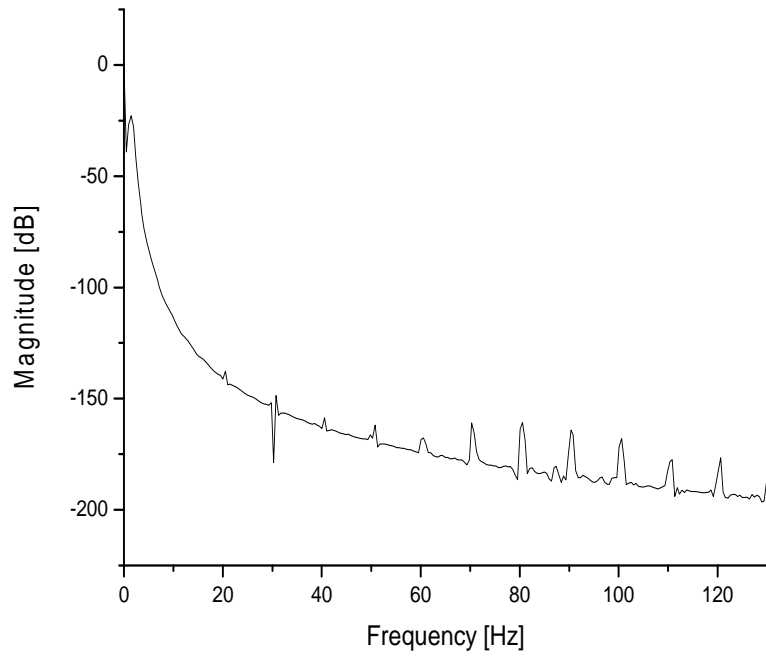


Fig. 4.76 Power spectrum of acc 1 about uniform white random signal.

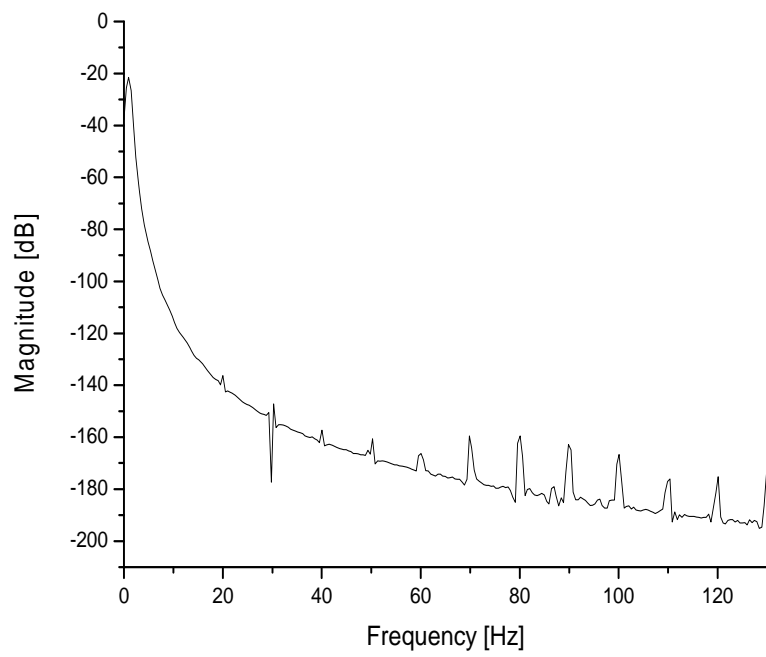


Fig. 4.77 Power spectrum density of acc 1 about uniform white random signal.

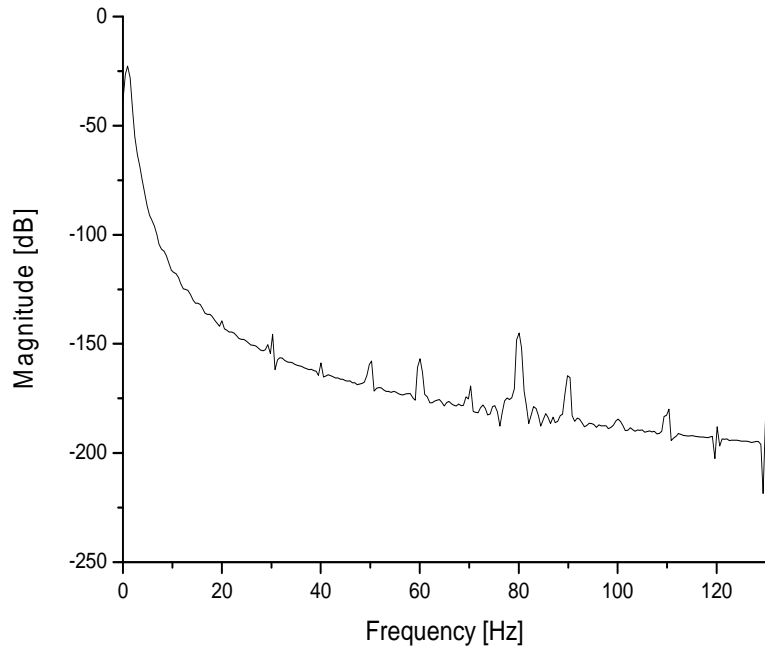


Fig. 4.78 FFT magnitude of acc 2 about uniform white random signal.

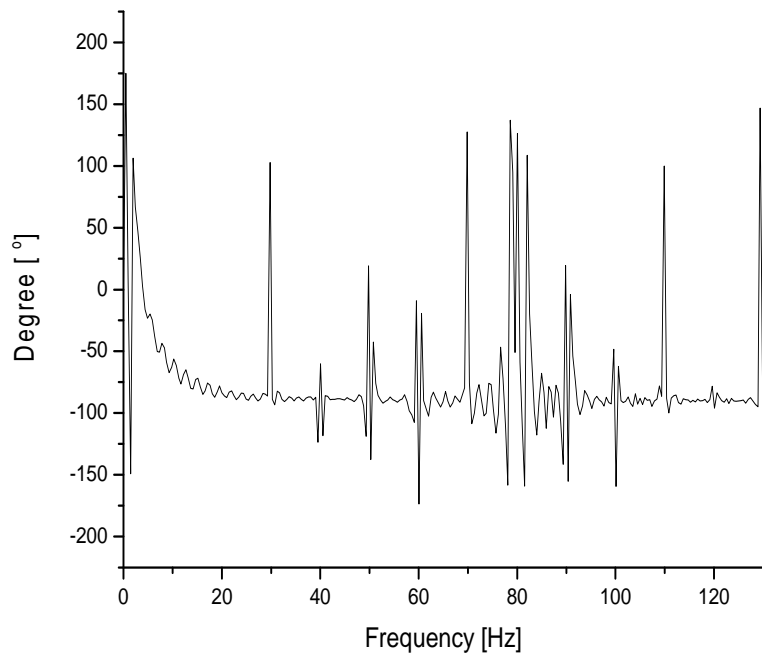


Fig. 4.79 FFT phase of acc 2 about uniform white random signal.

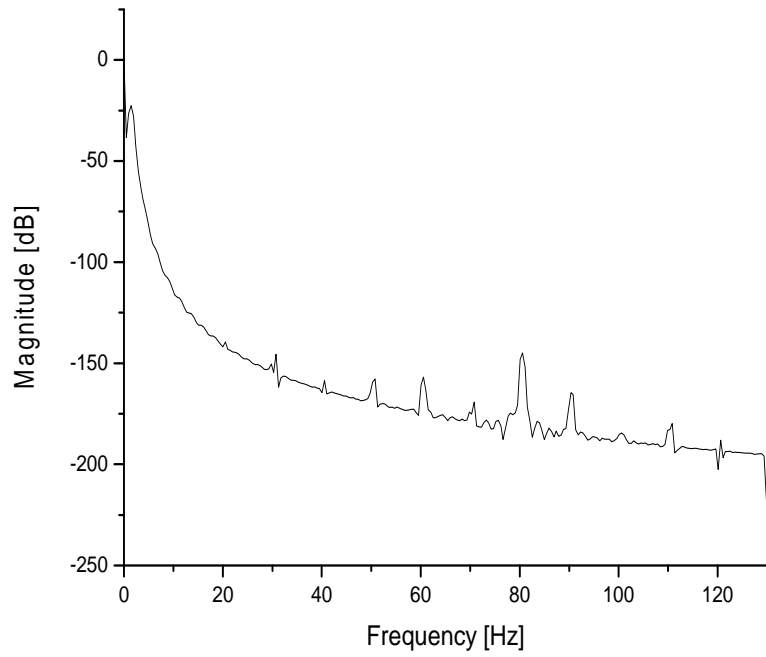


Fig. 4.80 Power spectrum of acc 2 about uniform white random signal.

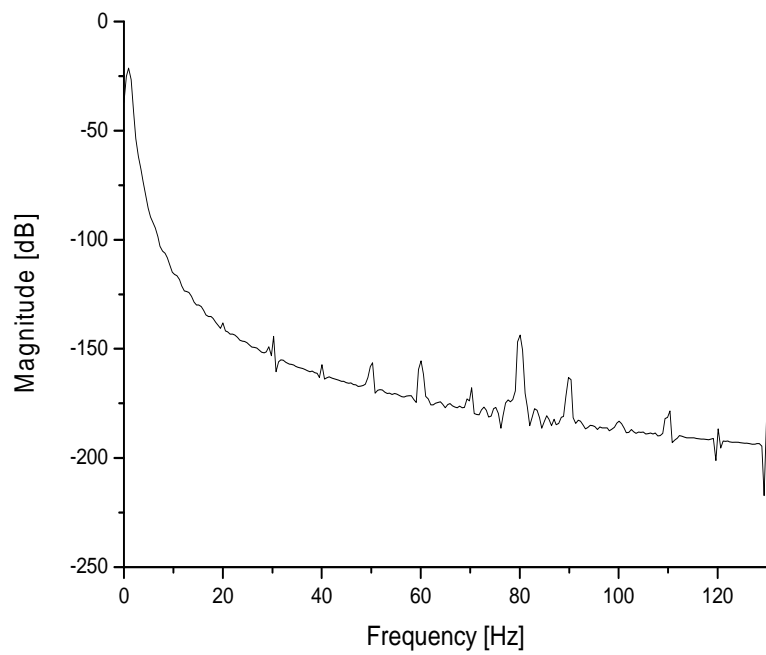


Fig. 4.81 Power spectrum density of acc 2 about uniform white random signal.

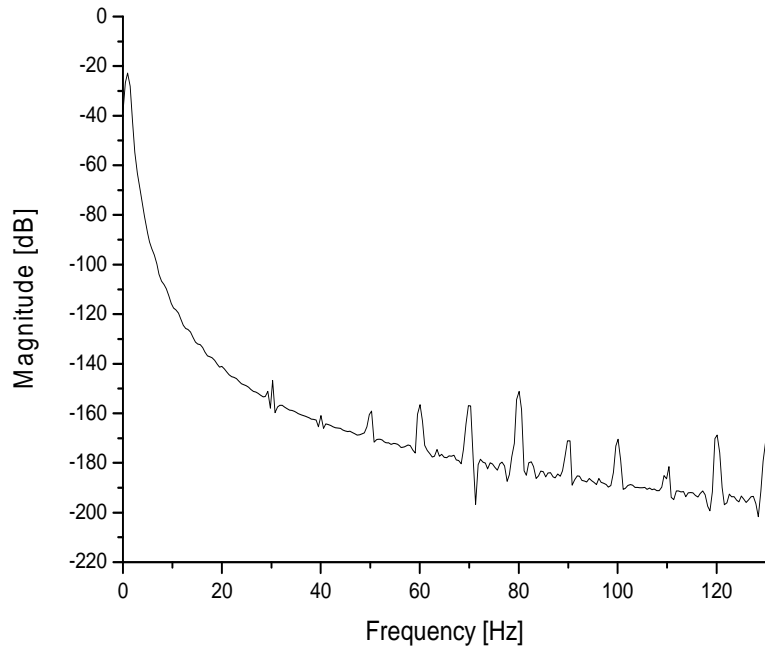


Fig. 4.82 FFT magnitude of acc 3 about uniform white random signal.

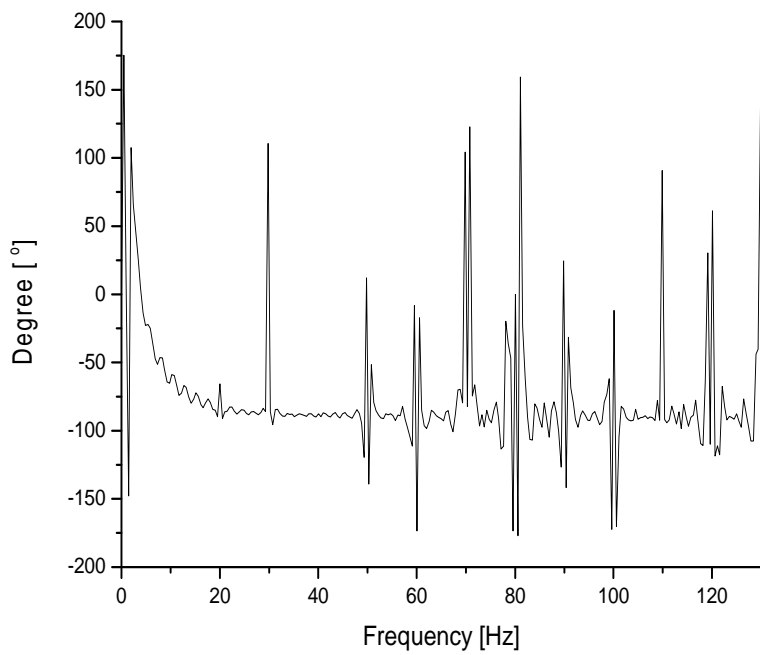


Fig. 4.83 FFT phase of acc 3 about uniform white random signal.

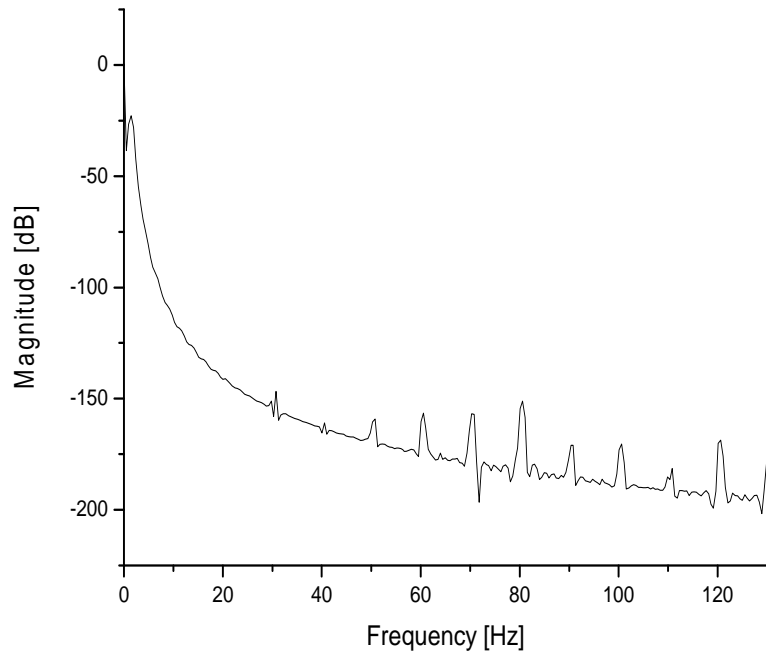


Fig. 4.84 Power spectrum of acc 3 about uniform white random signal.

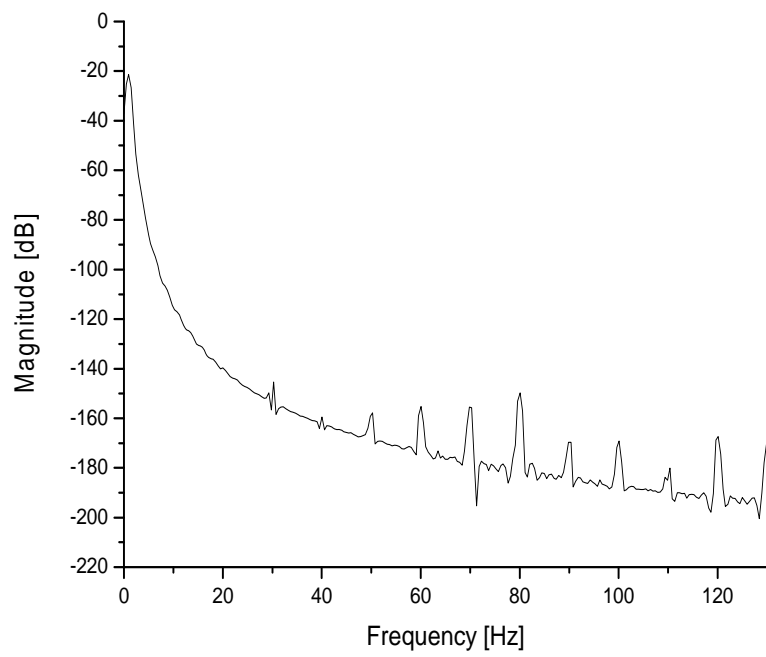


Fig. 4.85 Power spectrum density of acc 3 about uniform white random signal.

Fig. 4.74~Fig. 4.85까지는 Uniform White Random 신호에 대한 결과이다. 앞서 진행된 Gaussian White Random 신호와 Periodic White Random 신호의 실험 결과와 비슷한 양상으로 80 Hz 부근에서 Magnitude의 변화와 위상의 변화가 가장 크게 나타나고 있다. 다음은 입력한 Random 신호에 대한 각 가속도계별 FFT 분석 결과이다.

Table 4.4 Differences of the FFT Data in Acc 1

Frequency [Hz]	Gaussian White Random Signal		Periodic White Random Signal		Uniform White Random Signal	
	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]
20 Hz	5.351	49.044	9.386	5.014	6.158	48.850
40 Hz	8.850	87.236	13.822	194.927	6.012	64.629
60 Hz	17.840	179.053	11.991	258.634	5.986	126.376
80 Hz	10.123	256.169	14.534	249.996	22.790	198.751
100 Hz	27.471	178.77	13.744	167.065	13.786	166.795

Table 4.5 Differences of the FFT Data in Acc 2

Frequency [Hz]	Gaussian White Random Signal		Periodic White Random Signal		Uniform White Random Signal	
	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]
20 Hz	2.877	24.897	2.676	17.390	3.628	5.481
40 Hz	19.773	173.918	8.911	253.613	6.526	63.453
60 Hz	25.058	182.657	15.993	189.077	15.012	164.589
80 Hz	21.611	315.694	20.297	317.802	22.491	295.305
100 Hz	17.374	165.883	8.622	147.826	2.125	111.065

Table 4.6 Differences of the FFT Data in Acc 3

Frequency [Hz]	Gaussian White Random Signal		Periodic White Random Signal		Uniform White Random Signal	
	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]	Magnitude [dB]	Phase [°]
20 Hz	1.171	23.719	2.277	22.603	1.575	25.372
40 Hz	3.411	101.504	8.668	91.652	5.169	2.281
60 Hz	26.460	179.86	28.961	180.406	15.666	165.088
80 Hz	26.256	187.185	20.423	185.088	24.730	336.340
100 Hz	12.930	176.952	6.327	133.48	11.753	160.496

Table 4.4~4.6을 살펴보면 크기의 차이는 있지만 대체적으로 Random 신호에 상관없이 80 Hz 부근에서 FFT의 Phase 부분이 가장 크게 변화하고 있다. 또한 Magnitude 역시 80 Hz에서 가장 큰 값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 유압 시뮬레이터의 공진 주파수가 80 Hz임을 입증하는 것이다. 비록 60 Hz부근에서도 Phase 값이 크게 변화하는 것을 알 수 있었는데 이는 사용된 전류의 주파수가 60 Hz이기 때문에 전류의 영향이라고 할 수 있겠다. 이와 같은 실험 결과를 통해 유압 시뮬레이터의 공진 주파수가 80 Hz라는 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 다축 유압 시뮬레이터 중 자동차 및 기계 전반에 보편적으로 사용되는 4축 유압 시뮬레이터의 진동 특성을 파악하기 위하여 Impact Hammer를 이용한 충격 실험과 Random 신호를 이용한 시뮬레이터 가진 실험을 진행하였다. 이를 위해서 충격 실험 계측 프로그램과 Random 신호를 입력하고 유압 시뮬레이터를 구동하기 위한 프로그램을 개발하였다. 충격 실험과 시뮬레이터 가진 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Impact Hammer를 이용한 충격실험은 주변 가진원으로 인한 실험 결과의 영향을 없애기 위해 Hydraulic Unit의 전원을 차단한 상태로 진행하였다. 충격 신호는 순간적으로 발생하기 때문에 신호의 정확한 분석을 위하여 한 가진점에 대하여 2회 이상의 반복적인 충격을 주었다. 총 3회에 걸쳐 진행된 실험을 통하여 세 개의 가속도계는 동일하게 80 Hz에서 가장 큰 Magnitude와 Phase 차이를 나타냈다. 각 가속도계별 80 Hz의 측정 결과는 다음과 같다.

첫 번째 가속도계에서 측정된 FFT의 Magnitude와 Phase 차이는 15.187 dB와 261.674°이었고 두 번째 가속도계에서는 13.227 dB와 257.296°의 Magnitude와 Phase차이를 얻었다. 세 번째 가속도계에서 Magnitude와 Phase 차이가 24.348 dB, 198.839°로 측정되었다. 세 개의 가속도계는 20 cm의 간격을 두고 설치되었는데 Magnitude와 Phase의 수치 차이는 그로 인한 영향이라고 생각된다.

2. Random 신호를 입력하고 유압 시뮬레이터를 가진 한 상태에서 진행된 실험에서는 Magnitude의 값이 일정한 주기를 가지고 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 충격신호와 달리 Random 신호 가진 실험은 30회의 평균 연산이 완료될 때까지 지속적으로 유압 시뮬레이터를 가진 한 상태에서 측정하기 때문에 발생한 Magnitude값이 누적되면서 발생하는 결과이다. 그러

나 Random 신호 가진 실험에서도 충격실험과 같이 80 Hz에서 가장 큰 Magnitude와 Phase 차이를 얻을 수 있었다. 각 가속도계별 Gaussian White Random 신호, Periodic White Random 신호, Uniform White Random 신호에 대한 80 Hz의 실험 결과는 다음과 같다.

첫 번째 가속도계에서 측정된 Gaussian White Random 신호에 대한 FFT의 Magnitude와 Phase 차이는 10.123 dB와 256.169°이었고 Periodic White Random 신호에 대한 결과는 14.534 dB와 249.996°이었으며 Uniform White Random 신호에 대한 결과는 22.790 dB와 198.751°로 측정되었다. 두 번째 가속도계에서는 Gaussian White Random 신호에 대한 FFT의 Magnitude와 Phase 차이는 21.611 dB와 315.694°이었고 Periodic White Random 신호에 대한 결과는 20.297 dB와 317.802°이었으며 Uniform White Random 신호에 대한 결과는 22.491 dB와 295.305°로 나왔다. 세 번째 가속도계에서는 Gaussian White Random 신호에 대한 FFT의 Magnitude와 Phase 차이는 21.611 dB와 315.694°이었고 Periodic White Random 신호에 대한 결과는 20.297 dB와 318.802°이었으며 Uniform White Random 신호에 대한 결과는 22.491 dB와 295.305°로 측정되었다. 위의 결과를 통해 충격 실험의 결과와 마찬가지로 입력한 Random 신호의 종류와 상관없이 모든 가속도계는 80 Hz에서 가장 큰 Magnitude와 Phase 차이를 보였다.

3. 위의 두 실험을 통하여 유압 시뮬레이터의 공진 주파수가 80 Hz임을 알 수 있었다. 그러나 실험에 사용된 유압 시뮬레이터는 실제 차량의 노면 데이터 재현을 목적으로 하기 때문에 이에 대한 비교가 필요하다. 선행된 노면 데이터 재현 실험의 결과에 따르면 노면 데이터의 진동 특성은 20 Hz~30 Hz에서 나타나는 것으로 확인 되었고³⁰⁾ 차체의 대표적인 고유 주파수 역시 20 Hz~30 Hz 영역에 위치한다³⁶⁾. 이것은 노면 데이터 재현시 유압 시뮬레이터의 진동 특성이 그 결과에 영향을 미치지 않는 것을 의미하며 노면 데이터 재현을 위한 유압 시뮬레이터의 신뢰성을 확인할 수 있는 결과이다.

참 고 문 헌

1. D.H. Weir, S.M. Bourne, "An Overview of the Driving simulator", SAE Inc. pp.107-112, 950173.
2. 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.
3. D.H. Weir, S.M. Bourne, "An Overview of the DRI Driving Simulator", SAE Paper 950173, 1995.
4. L. S. freemn, G. Watson, Y. E. Papelis, "The Iowa Driving Simulator: An Implementation and Application Overview", SAE, Inc pp.113-122, 1995.
5. E. Franchini, C. Rossi, P. Filippa, "Full-Scale Laboratory Testing", SAE Inc. pp.1-10, 730649, 1973.
6. K. D. Zell, "Overview of Advanced Road Simulation Techniques", SAE Inc. pp.1-10, 740946, 1974.
7. P. Groe, J. Fash, "Integration of Structural Dynamics Testing and Durability Analysis", Sound and Vibration, pp.4, 1987.
8. B.W. Cryer, P.E. Nawrocki, R.A. Lund, "A Road Simulation System for Heavy Duty Vehicles", SAE Inc., pp.11-13, 760361, 1976.
9. G. Erdman, G.N. Sandor, "Mechanism Design analysis and synthesis", 3rd edition, Prentice-Hall International, 1997.
10. "Fatigue Design Handbook", Third edition, AE-22, SAE, pp.159-171, 1997.
11. R.W. Allen, T.J. Rosenthal, "A Low Cost PC Based Driving Simulation for Prototyping and Hardware-In-Loop Application", SAE, pp.35-47, 1998.
12. J. Gruening, J. Bernard, "Driving Simulation", SAE, pp.49-59, 980223.
13. "MAST, Multi Axis Simulation Tables", IST Inc., Instron Schenck

Testing Systems.

14. "Labtronic 8400 Controller, Component Test Control System", IST Inc. Instron Schenck Testing Systems.
15. M.S. Kim, W.S. Yoo, J.M. Kim, "Experiments to obtain Data for Driving Simulator", KSAE Fall Conference, pp. 941-946, 2005.
16. J.H. Lee, K.S. Kim, J.H. Sohn, W.S. Yoo, "Development of Four Channel Vibrating System for the Virtual Driving Simulation", KSAE Symposium, pp. 507-511, 2002.
17. G.R. Choi, S.H. Hwang, B.H. Min, S.J. Heo, S.B. Jeon, "Development of Road Simulator with Road Profile Replication Algorithm", KSAE Spring Conference, pp. 1000-1006, 2003.
18. Robert K. Otnes, Loren Enochson, "Applied Time Series Analysis Basic Techniques", John Wiley & Sons, 1978.
19. R. B. Randall.B. Tech, "Frequency analysis", revision, Brüel & Kjær, 1987.
20. R. B. Randall.B. Tech, "Vibration & Noise: Principle and Practice", Brüel & Kjær, 1987.
21. R. B. Randall.B. Tech, "Basic Introduction to the Sound & Vibration", Brüel & Kjær, 1987.
22. D.J. Ewins, "Modal Testing: Theory and Practice", Brüel & Kjær, 1986.
23. Julius S. Bentat, Allan G. Piersol, "Random data: Analysis and Measurement Procedures", 2nd edition, Wiley Interscience, 1986.
24. Robert Grover Brown, Patric Y. C. Hwang "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", John Wiley & Sons, 1997.
25. 김태식, "알고싶은 유압, 회로자료편", 기전연구사, 1995.
26. "J076-103 series", MOOG Co., Catalog, 1996.
27. M.K. Salssni, J.P. Chrstos, D.A. Guenther, "Parameter Measurement and Development of a NDSdyna Validation Data Set for a 1994 Ford

- Taurus", SAE Inc., pp.909-918, 1997.
28. "Measurement and Automation", NI Co., Catalog 2006.
 29. 곽두영, "컴퓨터 기반의 제어와 계측 LabVIEW 8.6", Ohm, 2008.
 30. 김종태, "4축 유압 시뮬레이터의 노면형상 구현에 관한 연구", 조선대학교 박사 학위논문, 2007.
 31. D.E. Newnlad "Random Vibrantion, Spectral & Wavelet Analysis", 3rd edition, Longman, 1995.
 32. James H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A. Yoder, "DSP FIRST A Multimedia Approach", Prentice-Hall International, 1997.
 33. Robert K. Otnes, Loren Enochson, "Applied Time Series Analysis Basic Techniques", John Wiley & Sons, 1978.
 34. 長松昭男, "モード解析入門", (財)學術文獻普及會, 1993.
 35. K.S. Choi, S.H. Jeon, W.B. Jeong, "Developing the Impact Testing Module with LabView", KSME Spring Conference, pp. 194-199, 2007.
 36. 사중성, 강태원 "알기 쉬운 생활 속의 소음진동", 청문각, 2007.