



1. FFT의 역사

FFT는 고속 푸리에 변환기(Fast Fourier Transformer)의 약자로 복잡한 시간파형의 신호를 간단한 주파수 그래프로 보여주는 계측기이다. 푸리에(Fourier)는 프랑스의 수학자로 1822년에 푸리에 급수를 개발하여 발표하였다. 푸리에 급수는 시간영역의 데이터를 주파수영역으로 전환하는 것으로, 진동 센서를 사용하여 취득한 복잡한 진동 신호를 간단한 주파수 스펙트럼으로 변환하여 주는 것을 의미한다.

FFT의 이론은 1800년대에 이미 완성되었으나 이것이 계측기로 만들어지기까지는 많은 공학자들의 시간과 노력이 있었다. 초기에는 이러한 주파수 스펙트럼을 볼 수 있는 계측기가 없었으므로 주파수를 알기 위해 공학자들은 oscilloscope로부터 시간파형의 주기를 확인하고 이것의 역수를 구하여 주파수를 산출하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 FFT가 없는 현장에서 지금도 많이 사용되는 방법이다.

* E-mail : sooyong@shinbiro.com

주파수 성분 그래프를 그리기 위한 장비로는 소인필터분석기(swept filter analyzer)라는 것도 있었다. 이것은 대역통과 필터(band pass filter)를 이용하여 해당 주파수 성분의 크기만을 검출해 내는 장치이다. 이러한 대역통과 필터는 지정된 주파수범위를 순차적으로 소인(sweep)하면서 각각의 주파수의 성분의 크기를 검출하여 주파수 스펙트럼을 그리는 장치이다.

복잡한 시간파형으로부터 주파수 스펙트럼을 보려는 많은 노력과 더불어, 컴퓨터의 발달로 드디어 FFT라는 장비가 탄생하게 되었다. 이 장비는, 아날로그 신호를 표본화하여 디지털 신호로 전환한 후에 고속 푸리에 변환이라는 알고리즘을 적용하여 주파수 스펙트럼을 얻어내는 장비이다. FFT가 최초로 나왔을 때는 엄청난 고가이었으며 일반 산업체에서는 쉽게 구입을 할 수 없었다. 10년 전까지만 해도 국내에서는 대학이나 대기업 연구소에서만 볼 수 있었던 장비였다. 그러나 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 이제는 저가의 FFT 계측기를 일반 산업체에서도 손쉽게 구매를 할 수 있게 되었으며, 심지어, 지금은 일반 PC의 음악 재생 프로그램(window

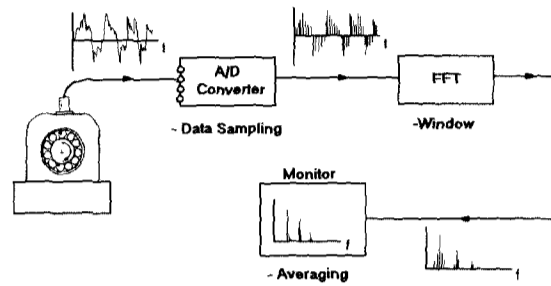
media player)에서도 FFT 변환기를 볼 수가 있다.

컴퓨터 칩이 작아지고 성능이 우수해지면서 FFT장비는 소형화와 경량화가 가능하게 되었다. 예전에 실험실에서만 쓰이던 FFT는 현장에서 들고 다니는 간단한 휴대용부터 실험실에서 전문적인 연구 활동을 위해 사용하는 것까지, 다양한 목적에 맞게 수많은 종류가 개발되어 시판되고 있다. 최근 FFT는 휴대용 노트북에 탑재되어 시판되고 있으며, 노트북의 CPU가 매우 강력해지면서 DSP 칩의 기능을 대신할 수 있게 되었고, 대용량의 하드디스크는 휴대용 레코더의 기능까지 수행하게 되었다. 또한, 모든 작업이 PC내에서 이루어지면서, 내부에서 데이터 호환이 용이하여 강력한 보고서 기능까지 갖추게 되었다.

앞으로의 동향은 FFT가 window CE기반으로 운영되는 PDA에 탑재되는 방향으로 나아가고 있다. PDA에 탑재되는 FFT는 크기가 상당히 줄어들면서, 노트북의 다양한 기능을 상당부분 유지하고 있으며, 몇몇 발빠른 선진 회사에서는 이미 개발을 하여 시판을 하고 있다.

2. FFT의 기본적인 설정방법

FFT를 사용한다는 것은 마치 자동차를 운전하는 것과 비교할 수 있다. 우리가 자동차의 구조를 알지 못해도 자동차를 아주 잘 운전할 수 있다. 엔진의 원리나 브레이크 시스템의 구조, 변속기의 구체적인 작동원리를 알지 못해도 시동을 걸고 핸들을 조작하고 클러치를 밟고 하는 동작으로 능숙하게 자동차를 운전할 수 있다. 오히려



- (1) 기계에서 발생된 진동신호는 센서를 거쳐 전기신호로 변환된다.
- (2) 신호는 A/D 변환기를 거쳐 디지털 신호로 바뀌어진다.
- (3) FFT를 통해서 시간영역의 신호는 주파수 영역의 신호로 변환된다.
- (4) 마지막으로 불안정한 신호는 평균화를 거쳐 안정적인 그래프로 나타난다

그림 1 FFT 장비의 신호처리 과정

자동차의 구조보다는 목적지까지 가는 길을 알고 도로의 교통상황을 아는 것이 훨씬 더 자동차를 운전하는 데 도움이 된다. FFT의 조작도 마찬가지이다. 표본화의 과정이나 FFT의 원리를 아는 것보다는, 어떻게 FFT를 설정하고 FFT상의 주파수 정보들로부터 기계의 현재 상태를 파악하는 것이, FFT를 능숙하게 다루는 사용자라 할 수 있다.

그림 1은 FFT에서 신호가 처리되는 과정을 도식화한 그림이다. 그림 1의 내용을 잘 이해하고, 다음에 언급되는 2.1에서 2.5 절까지의 순서대로 설정을 해나간다면 매우 복잡한 계측기라 하더라도 손쉽게 FFT의 기본적인 기능을 사용할 수 있다.

2.1 센서의 종류와 감도(Sensitivity)의 설정

먼저, 그림 1의 맨 왼쪽 그림을 보면 기

계에서 발생된 진동이 센서를 통해서 전기적인 신호로 바뀌는 그림을 볼 수 있다. 기계에서 진동이 발생하면 센서는 진동신호를 전기적인 신호로 변환하게 된다. 이때 발생하는 진동의 크기에 비례하여, 센서에서는 어느 정도의 전기량을 발생하는지에 대한 정보를 FFT에 알려 주어야 한다. 즉 다시 말해서 센서의 감도를 입력해야 한다. 센서의 감도는 센서의 종류에 따라 다음과 같은 형태로 표현된다.

- 가속도계 : $mV/(m/s^2)$, $pC/(m/s^2)$
- 속도계 : $mV/(mm/s)$, $mV/(inch/s)$
- 변위계 : $mV/\mu m$, mV/mil

2.2 채널의 설정

두 번째로 FFT에서 설정할 항목은, 소위 말하는, 채널을 열어주는 작업이다. 일반적으로 FFT는 동시에 여러 개의 진동신호를 받을 수 있도록 몇 개의 채널을 가지고 있다. 그러므로, 시험자가 센서를 어떤 채널에 연결했는지를 FFT 장비에게 알려주어야 한다. 그림 1에서 A/D 변환기에 표시된 예를 들어보자. 센서로부터 나온 케이블이 A/D 변환기에 연결되어 있으며, 위에서부터 채널1, 2, 3, 4라고 한다면 센서가 연결된 곳은 두 번째 채널이다. 그러므로 FFT에 센서가 2번째 채널에 연결되었다는 사항을 입력해 주어야 한다.

2.3 측정주파수 범위와 라인수의 설정

진동신호가 채널을 통해서 FFT장비에 들어오게 되면 제일 먼저 거치는 곳이 A/D 변환기이다. A/D 변환기는 아날로그/디지털 변환기(analogue/digital

converter)를 나타내는 말이다. 이것은 연속적인 아날로그 신호를 표본화하여 아래의 그림과 같이 디지털 신호로 나타내는 기능을 수행한다. 여기서 문제가 되는 것은 데이터 표본화 간격과 취득시간을 사용자가 설정해야 한다는 점이다.

즉, 다시 말해서 1초에 1000번을 표본화할 것인지 2000번을 할 것인지, 데이터를 1초간 받을 것인지 2초간 받을 것인지 하는 내용을 설정해야 한다.

그러나, 사용자가 FFT 상에서 설정을 할 때에는 1초간 몇 번 표본화할 것인지, 몇 초간 데이터를 받을 것인지를 설정하지는 않게 된다. 대신에 사용자가 접하게 되는 내용은 주파수를 몇 Hz 까지 볼 것인지와 해상도를 몇 line으로 볼 것인지를 설정하면 된다. 이것에 대한 부가적인 내용은 다음 장에서 다루기로 한다.

2.4 윈도우(Window) 함수의 설정

A/D 변환기를 거쳐서 디지털화 된 시간신호는 FFT를 거쳐서 주파수 스펙트럼으로 변환된다. 이 과정에서 사용자는 윈도우 함수를 설정해야 한다. 윈도우 함수는 FFT의 알고리즘에서 생기는 에러를 보상하기 위해 사용되는 함수이다. 일반적으로 정상상태의 신호에 대하여는, 해닝 윈도우(hanning window) 함수를 가장 많이 사용한다.

2.5 평균화(Averaging)

마지막으로 FFT에서 주파수 스펙트럼으로 변환된 시간신호는 모니터를 통해서 사용자가 볼 수 있게 된다. 일반적으로 주파수 스펙트럼은 실시간으로 움직이며, 그

래프의 개형이 불안정하게 흔들리게 된다. 여기서 사용자가 설정하는 내용이 평균화에 관한 내용이다. 평균화를 하게 되면 주파수 그래프의 개형을 명확하고 안정적으로 볼 수 있으며 일반적으로 평균화에는 다음의 두 가지 방법이 있다.

- (1) 주파수 영역에서의 평균화
Linear Averaging
Peak Hold Averaging
- (2) 시간 영역에서의 평균화
Synchronous Averaging
Overlapping Averaging

안정적인 주파수 스펙트럼을 보기 위해서는 선형(linear) 평균화를 많이 사용하며 평균화 시간을 줄이기 위해서는 중첩(overlapping)평균화를 많이 사용한다.

3. FFT의 내부에서 일어나는 일들

앞에서 언급한 바와 같이, 최근에는 FFT가 상당히 범용화 되었고 누구나 쉽게 접할 수 있는 계측기가 되었으며, FFT의 조작은 내부 작동 원리를 알지 못하더라도 손쉽게 설정하여 사용할 수 있다고 하였다.

그렇지만, FFT 장비가 일반인들에게 범용화 된 것에 비해서, FFT의 신호처리 과정에 대하여 아는 이는 별로 많지 않은 것 같다. 보다 더 정확한 계측과 신뢰성 있는 데이터를 위해서는 FFT 내부에서 이루어지는 신호처리 과정에 대해서도 한번쯤 관심을 가져 보는 것도 좋을 듯 하여, 이번 장에서는 신호처리 과정에 대하여 조금 더 언급해 보기로 하자.

3.1 데이터 표본화

진동신호는 A/D 변환기를 거치면서 아날로그에서 디지털 신호로 변환된다고 설명하였다. 여기서 사용자는 데이터 표본화 비율과 취득시간을 설정해 주어야 한다. 그렇지만 사용자가 계측기를 설정할 때에는 측정 주파수 범위와 line 수를 설정하는 방식으로 위의 두 가지 사항을 정하게 된다. 이때 계측기에서는 다음과 같은 공식에 의해 표본화 비율과 취득시간을 설정하게 된다.

$$L = N/2.56, F = L/T$$

L : FFT line수, N : 데이터 표본화 수,
 F : 주파수 범위, T : 취득 시간

예를 들어, 사용자가 측정 주파수 범위는 6400 Hz 까지, line수는 3200 line으로 설정을 했다고 하자. 그렇다면 위의 공식으로부터 데이터 취득시간은 0.5 초가 되며 이 시간 동안에 8192개의 데이터를 표본화하게 된다. 다시 말하면, 사용자는 FFT 스펙트럼 상에서 주파수 범위는 0에서 6400 Hz 까지, 해상도는 2 Hz 간격으로 보게 되고, 이때, FFT스펙트럼은 0.5 초마다 한번씩 변하는 그래프를 보게 된다는 의미이다. 예를 하나 더 들어서 주파수 범위는 200 Hz 까지 해상도는 1600 line으로 보는 것을 가정해보자. 마찬가지로 공식에 따라서 취득시간은 8초이고 분해는 0.125 Hz가 된다. 사용자는 8초에 한번씩 변하는 FFT 그래프를 보게 될 것이다.

3.2 동적범위

A/D 변환기에서는 데이터를 표본화 하

여 시간 축을 디지털화 하는 기능 이외에도 진동의 크기에 대해서도 디지털화 한다. 예를 들어 12 bit 의 해상도를 가진 A/D 변환기라면 212개인 4096개의 단계로 진동의 크기를 구분하게 된다. 이것은 A/D 변환기에서 고정된 사양이며 사용자가 이를 조정하거나 설정하지는 않는다.

그러나 사용자는 여기서 동적 범위라는 것을 설정하게 되는데, 동적 범위란 FFT에서 받아들이는 진동의 크기에 대하여 최저 값과 최고 값의 범위를 말한다. 예를 들어 12 bit의 해상도를 가지는 A/D 변환기에서 동적범위를 0에서 10 G까지의 진동을 받아들이도록 설정했다고 하자. +, -를 고려하면 4096을 2로 나누어야 하고, 그렇다면, 이 계측기에서는 0에서 10 G까지의 진동을 2048개의 단계로 구분하게 된다.

만약에 실제 진동이 10 G이상의 진동이 들어온다면 어떻게 될까? 그러한 경우에는 10 G 이상의 진동은 잘려서 들어오게 되고, 계측기에서는 과부하(overload) 램프나 입력신호가 동적범위를 넘었다는 경고 램프가 깜박이게 된다. 그러므로, 이 때는 동적범위를 20 G나 30 G로 더 높여야 한다. 반대로 실제 진동은 모두 0.1 G 미만이라고 하면 작은 진동들간의 미세한 크고 작음을 서로 구분할 수 없게 될 것이다. 이 경우에는 반대로 동적범위를 0.1 G로 낮추어야 한다.

그러나 요즘 FFT의 대부분은 동적 범위를 위와 같이 수동으로 설정하지 않는다. FFT내부에는 자동 범위 설정 기능(auto ranging)이 있어 입력되는 신호에 맞추어서 자동적으로 계측기 내부에서 동적범위를 설정하게 된다.

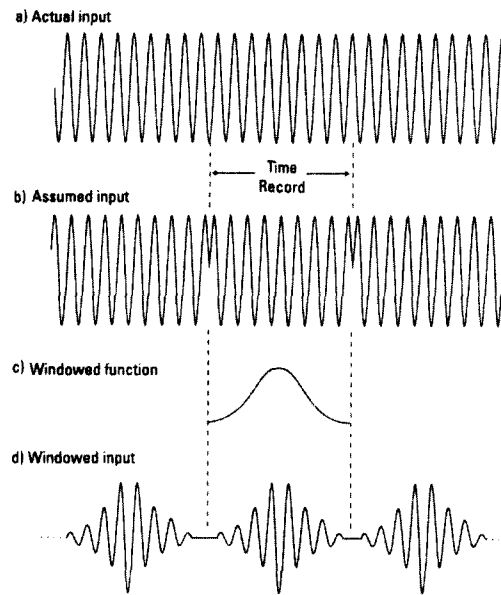


그림 2 FFT 알고리즘에서 윈도우 함수의 적용

3.3 윈도우(Window)함수

그림 2에서 볼 수 있듯이 FFT에서는 실제 신호로부터 일정 구간의 시간 신호를 추출한 뒤, 이것을 연결하여 입력신호로 가정하게 된다.(그림 2.b) 이 과정에서 가상적인 입력신호는 연결점에서 시작과 끝점이 같지 않은 현상을 볼 수 있게 된다. 이러한 경우 주파수 스펙트럼에서는 고주파 성분의 새로운 주파수 성분이 생기게 되며, 이것을 누설(leakage)현상이라고 한다. 여기서 윈도우 함수는 고주파 성분이 생기지 않도록 양끝을 강제적으로 동일하게 맞추어 주는 기능을 하게 된다. 그림 2.c에서 볼 수 있듯이 윈도우 함수를 사용하는 경우 양끝을 강제적으로 0으로 맞추어 주기 때문에 주파수 성분의 왜곡된 성분은 발생하지 않는다. 그렇지만 신호의 전체 진폭은 줄어들기 때문에 윈도우의 특

성에 따라서 진폭에 대한 보상 인자를 고려해야 한다. 사용 용도에 따라서 윈도우 함수는 다음과 같은 종류들이 있다.

- Flat top window : 진폭의 정밀도가 좋음
- Hanning window : 주파수 분해능이 좋음
- Exponential window : 순간신호에 사용
- Force window : 불필요한 성분을 제거함

3.4 평균화(Averaging)

마지막으로 평균화에 대하여 살펴보기로 하자. 앞서 말한 바와 같이 평균화는, 실시간으로 변하는 불안정한 데이터를, 보다 안정적으로 보기 위하여 사용한다고 하였다. 이를 위해서, 일반적으로 선형(linear) 평균화나 peak hold 평균화가 사용된다. 선형 평균화는 말 그대로 여러 개의 주파수 스펙트럼을 산술 평균화하여 주파수의 불규칙성을 제거하는 효과를 얻을 수 있으며, peak hold는 peak값만을 최종적으로 표시하는 방법이다.

중첩평균화의 경우는 평균화 시간을 감소시키기 위해서 사용된다. 그림 3은 중첩평균의 개념을 설명하고 있다. 그림 3의 첫 번째 그림은 중첩평균을 하지 않는 경우이다. 예를 들어 FFT를 한번 보여주기 위해 2초간 데이터를 받는다면 FFT스펙트럼을 3번 보여주기 위해서는 총 6초간의 시간이 필요하다. 두 번째 그림은 중첩평균을 한 예를 보여주고 있다. 시간 데이터를 받는 것을 중첩하여 받기 때문에 총 시간이 감소하는 것을 알 수 있다.

데이터 표본화에서 언급한 예를 다시 한번 적용하기로 하자. 200 Hz를 1600 line으로 보려고 한다면 8초에 한번씩 FFT화

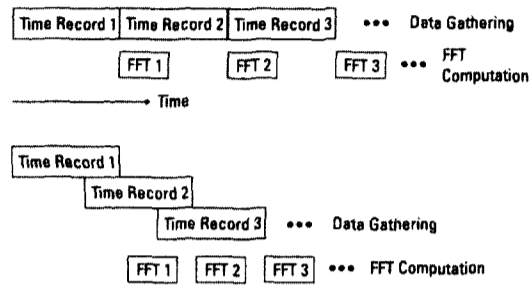


그림 3 중첩 평균화의 개념

면을 얻게 된다. 또한 이러한 주파수 스펙트럼을 10번 정도 취득하여 평균화를 하려 하면 무려 80초를 기다려야 한다.

이때, 데이터 취득시간을 줄이기 위하여 중첩평균화를 적용하여 보자. 이 개념에 따라 75 % 중첩평균을 한다고 하자. 그렇다면 10회 평균에 따른 시간은 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$\begin{aligned} & 10\text{회 중첩평균}(75\%) \text{ 시간} \\ & = 8\text{초} + (8\text{초} \times (1 - 0.75)) \times 9\text{회} \\ & = 8 + 18 = 26\text{초} \end{aligned}$$

무려 80초에서 26초로 줄어드는 시간 감소 효과를 볼 수 있다.

4. FFT조작의 실제 예제

이번 장에서는 FFT를 실제로 조작하는 예를 들어보기로 하자. 진동을 측정하려는 설비는 교반기이다. 이 교반기는 2극 전동기에 의해 구동되고 있으며 교반기와 전동기 사이에는 1단 감속기어 상자가 있다고 한다. 감속기어의 치차 비는 25:101이다. 이 설비에서는 2극 전동기의 air gap문제와 기어의 손상문제가 있는 것으로 추측되

며, 전동기의 슬립주파수는 0.3 Hz이다. 이 때, 적절한 FFT의 주파수 설정범위와 line 수를 고려해 보기로 하자. 먼저 각각의 주파수 성분을 고려해 본다면

- Air gap 문제 : 120 Hz
- 전동기 운전주파수의 2배 성분 : 119.4 Hz
- 기어주파수 : 1493 Hz

이다. 위의 내용을 고려하여 air gap 문제와 전동기의 2배 주파수 성분을 구분하자면 적어도 0.6 Hz 미만의 해상도가 필요하다. 또한, 기어 주파수의 2배 성분까지 고려한다면 주파수 범위를 3000 Hz 이상으로 설정해야 한다. 그러므로 3200 Hz 까지 6400 line 의 해상도를 가지고 보면 주파수 해상도는 0.5 Hz가 되며 위의 조건을 만족시킬 수 있다. 이때의 데이터 취득시간은 2초가 된다.

5. 맺음말

FFT에 대한 간단한 소개와 기본적인 내용에 대하여 설명하였다. 먼저 FFT를 사용하기 위한 기초적인 설정 방법에 대하여 설명하였으며, 이에 따른 FFT의 기본

적인 알고리즘을 살펴보고 마지막으로 간단한 예제를 들어보았다. FFT에 대한 전반적인 부분을 모두 설명하기에는 분량이 많아서 그다지 중요하지 않다고 생각되는 부분은 언급을 생략하였다. 또한 FFT의 기본적인 기능 이외에도 기타 FFT의 다양한 기능들인 waterfall, order tracking, FRF, bode plot 등에 대한 설명도 이 글에서는 언급되지 않았다. 이 글은 FFT를 많이 사용해 온 전문가보다는 FFT에 대하여 초보자나 FFT에 대하여 개략적으로 알고자 하는 사람들에게 도움을 주고자 하는 목적으로 초점을 맞추었으며, 이들에게 많은 도움이 되었으면 하는 바램이다.

참고문헌

- (1) Eshleman, R. L. 1996, "Machinery Vibration Analysis II", Vibration Institute, pp. 47~67.
- (2) Hewlett - Packard, 1985, "The Fundamentals of Signal Analysis - Application Note 243", pp. 25~48.
- (3) 나다에스앤브이, 2001, "기계건강진단사 전문가 II 과정 교육 교재", 3장.