

비틀림 진동 측정 및 분석

쌍용중공업 (주) 2공장
A/S 품질보증부 오광석

1. 개론

가. 비틀림진동

회전운동을 하는 동일축(ℓ)을 두고 원주 상에 임의의 점(A, B)을 정하였을 때 이 두 점간의 위상(Phase)이 주기적(Frequency)으로 변동하는 현상을 비틀림진동(Torsional Vibration)이라 한다.

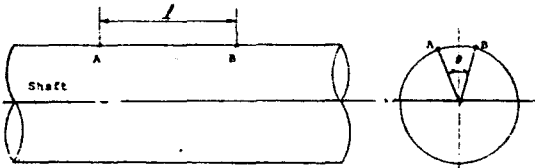


그림 1-1

구동용엔진의 선단에서부터 동력전달장치 (Power Transmission → Shaft, Clutch, Gear Box Element 등) 및 피동부하장치(주기의 경우 Propeller, 보기의 경우 Generator, Pump 등)끝단에 이르는 축계장치를 하나의 진동계 (Vibratory System)로 보았을 경우이다.

특히, 동력원 (Prime Mover)인 구동장치가 Diesel Engine 으로서 Cylinder내에서 폭발력에 의한 왕복운동을 Crank 기구에 의하여 회전운동으로 변환시키기 때문에 Crank Shaft 회전 중 복합적인 각속도 변화요인을 갖게 되며 이것은 Crank Shaft 자체의 비틀림진동 발생은 물론, 순차적으로 동력전달장치를 거

쳐 축계 끝단까지 파생되어지고 이들에게 또 다른 형태의 비틀림진동을 유발시킨다.

나. 비틀림진동의 추정

복합적인 요인에 의하여 발생된 비틀림진동은 축계의 사용범위 (Operating Speed Range) 내에서 일어날 수 있는 공진점 (고유진동수) 및 그때의 진폭(응력)을 사전에 추정하여 공진점의 회피(축계의 직경 및 관성 Moment 변화) 또는 진폭의 축소(Vibration Damper 부착)를 유도하는 일은 Engine 및 축계의 초기 설계단계부터 중요한 부분을 차지한다.

다행히 진동공학자들에 의한 이론적 뒷받침과 산업체에서의 반복적으로 얻어진 경험치 및 Computer 등의 도움으로 신뢰성 있는 추정을 할 수 있게 되었다.

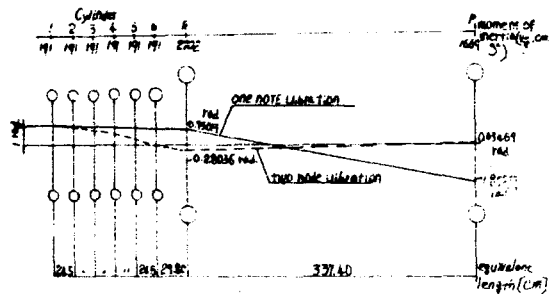


그림 1-2 선박용 추진축계의 비틀림 진동계 (System)

2. 비틀림진동의 실측(Measuring of Torsional Vibration)

가. 목 적

비틀림진동을 측정하는 목적은 크게 2가지로 대별할 수 있다.

첫째, 비틀림진동의 추정이 신뢰성 있을 정도의 정확도를 가지고 실행되고 있으나 그 결과치는 역시 추정량(Estimated Volume)일 수 밖에 없다.

특히, 진동계(Vibratory System)내에 탄성 Coupling(Elastic Coupling)등이 포함되어 있을 경우 탄성체(Elastic Mechanism → Rubber, Urethane 등)의 진동특성을 정확히 해석한다는 것은 거의 불가능한 일이며 따라서 추정신뢰도도 저하될 수 밖에 없다. 이에 반복측정한 결과치를 추정작업자에게 Feed Back 하여 추정입력인자 등의 수치보정에 의한 추정신뢰도를 높인다.

둘째, 설계치에 대한 추정이 정확할지라도 축계 형상오차, 재질의 불균일, Misalignment, 선체의 영향 등으로 인하여 진동계의 고유진동수 및 진폭의 변화를 초래한다.

그러므로 비틀림진동을 실측, 그 진동계가 보유하고 있는 진동특성을 정확히 분석하여야 하며, 상기와 같은 이유들로 인하여 각국 선급협회(Ship Register) 등에서는 제한적인 하지만 실측을 규정화하고 있다.

나. 비틀림진동 측정기(Measuring Instrument of Torsional Vibration)

1) 기계식 측정기(Torsiograph)

관성력(Moment of Inertia)이 큰 Flywheel 과 관성력이 미세한 Driving Pulley 사이를 탄성계수(Elastic Coefficient)가 극히 작은 Coil Spring으로 연결하여 Driving Pulley를 Belt 또는 Shaft에 의해 Crank Shaft에 연결, 구동시키게 되면 구동 초기에는 Driving Pulley와 Flywheel 사이에 각속도의 차이가 생기지만 시간이 경과함에 따라 두회전체는 일정한 각속도를 가진 동일한 회전을 하게

된다. 이때 Crank Shaft의 각속도 변화가 전달되어 Driving Pulley에 각속도의 변화가 발생하여도 Flywheel은 상대적으로 발생하지 않으며 Flywheel과 Driving Pulley 사이에는 각속도 변화에 비례하는 위상차(Phase Differential)가 발생한다.

이 변화를 Link 장치에 의하여 직선운동으로 변환, 증폭시켜 기록지에 진동선도(Vibratory Amplitude Diagram)로 기록하는 구조로 여러가지 형상이 있으나 원리는 동일하며 Geiger Type가 가장 널리 사용된다. 증폭의 한계, 분석의 부정확 등과 같은 문제점이 있으나 공진점은 손쉽게 발견할 수 있다.

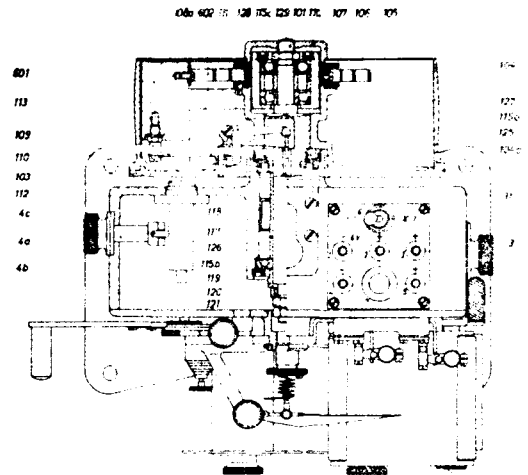


그림 2-1 Geiger Type Torsiograph

2) 전기신호식 측정기(T/V Measuring Instrument by Electric Signal)

전기신호식 측정기의 구성품은 Sensor(Vibration, Speed), Charge Amplifier & Converter, Monitor, Filter, Vibration Level Meter, Graphic Recorder 등이 있다.

그림 2-2는 일반적인 비틀림진동 측정 장비의 구성요소 관계를 나타낸다.

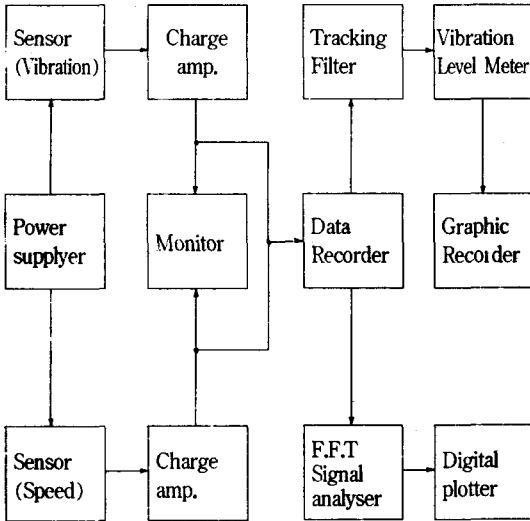


그림 2-2 전기신호식 측정기 Block Diagram

가) Sensor(Pick-Up)

a. Encorder

기본원리와 형상은 Pulse - Motor 와 유사하다. Rotor Shaft 의주면에 일정한 간격을 두고 축 길이방향으로 홈이 가공되어져 있고 이 밖으로 Stator 가 미세한 간극을 두고 위치한다. 이 상태에서 Rotor Shaft 를 회전시키면 Stator 에 일정한 수의 Pulse(정밀도에 따라 1회전에 256, 512, 1024 등 8의 배수)를 발생시키며 회전의 증감에 따라 단위시간당 Pulse 의 수(주파수)는 변화하게 된다.

비틀림진동은 회전수의 변화가 아닌 순간 가속도의 변화이므로 1회전을 일정한 간격(기준주파수 : 32, 64, 128 등)으로 분할하여 그 구간의 주파수변화를 통하여 가속도 변화를 읽을 수 있다.

※ Encorder 의 정밀도

1024Pulse/회전, 기준주파수 128의 경우 $360 \div 128 = 2.815^\circ$. Amplifier 정격출력이 DC 10 V의 경우 $10 \div 2.8125 = 3.56V / Degree$ 이다.

b. Strain Gage

기계식, 또는 Encorder 측정기의 경우 축의 자유단, 또는 축 중간에 Sensor를 연결하여 측정하는 구조로서 측정기 자체의 문제는 아니나 측정 방법상 가속도 변화를 전량 비틀림진동의 진폭으로 해석하는 실수를 범하게 된다. 즉, 저속-소기통수 엔진(200 rpm, 6기통이하)에서의 기통간 폭발간격(Explosion Interval)이 길게 되므로 인해서 발생하는 동력의 맥동, 파도 및 기타의 영향으로 인한 순간회전수 변화를 들 수 있다.

이에 비하여 Strain Gage Type는 축 표면에 Gage를 부착하여 축 표면의 변형량을 측정하게 되므로 순간회전수 변화에 관계없이 축의 변형 즉, 비틀림량만을 측정하게 되는 것으로 이것이 실질적인 비틀림진동 진폭(Amplitude)이라 할 수 있다.

여기서 간단히 Strain Gage의 측정원리를 소개하면 미세 Coil을 박판 위에 일정한 간격(L)을 두고 밀집되게 펼쳐 놓아 여기에 전기량을 가하면 일정한 전기저항값(Resistance, R)을 갖게 된다. 이때, 외력에 의하여 박판에 변형(ΔL)이 생기면 저항값(ΔR)도 변하게 되며 이것은 전기적으로 계측이 가능하므로 쉽게 변형량(Strain Volume)을 알 수 있게 된다.

$$\text{즉, } F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

F = Gage Factor

R = Gage 고유 저항값

ΔR = 변동 저항값

L = Gage Element Length

ΔL = 변동 Element Length

여기서 변동도(ϵ) = $\Delta L/L$ 이 되므로

$\epsilon = 1/F \times \Delta R/R$ 의 식을 유도할 수 있다.

(*F 값은 Gage Maker에서 지정되며 편차 $\pm 1\%$ 미만의 고정밀도를 유지한다.)

전단응력(τ) = $\pm 2 \cdot G \cdot \epsilon$ (G = 상수)이므로

$\therefore \tau = \pm 2 \cdot G \cdot 1/F \cdot \Delta R/R$ 이 된다.

윗식에서 알 수 있듯이 전단응력(Share

Stress, τ)은 축이 전달하고 있는 동력(Power \rightarrow Torque)으로, 비틀림진동은 전단응력의 반복적 변동량이며 순간적인 변동량이 비틀림진동 응력(Torsional Vibration Stress)이 된다.

실질적인 Strain Gage를 이용한 측정에 있어서는 전단응력은 축 길이방향에 대하여 45° 방향으로 인장(Tensile Stress), 압축(Compression Stress)운동이 반복적으로 작용하게 되므로 Strain Gage를 Bridge Circuit로 조합하여 사용하게 된다.

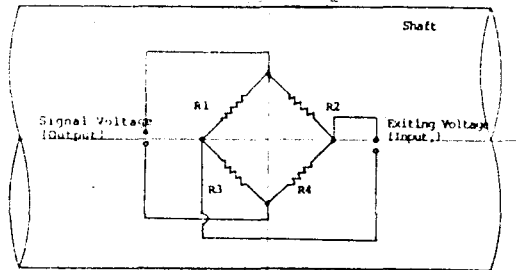


그림 2-3 Bridge Circuit

나) 전치 증폭기 (Charge Amplifier)

Sensor에서 출력되는 전기신호(Output Signal)는 수 m에서 수십 mV 정도로 극히 미세하므로 이것을 Data Recorder에 저장, 또는 Level Meter 등에 입력시키기에는 부족하다. Amplifier에서는 이 미세한 신호를 수 V 정도로 증폭하여 출력시키게 되며 Sensor가 Encorder, Strain Gage, Inductive type Accelerometer 등은 인가전압(Exitng voltage)이 필요하게 되므로 Sensor에서 필요로 하는 양질의 전력을 공급하는 Power-Supplier 역할도 겸하게 된다.

다) Filter

Sensor 또는 Charge Amplifier에서 출력되는 신호는 Sensor에서 측정된 정상진동신호(Steady Signal)뿐 아니라 Sensor 또는 Amplifier에서 전기적 잡음(Electric Noise)이

혼합된 Random Signal 이다.

Filter에서는 이러한 잡음을 제거하는 역할을 하며 목적에 따라 저역통과(Low-Pass), 고역통과(High-pass), 대역통과(Band-Pass), 대역제거(Band Notch \rightarrow 60Hz), 추적(Tracking) Filter 등이 있으며 신호(Signal)의 종류에 따라 Analogue 및 Digital Filter 등이 있다.

라) Data Recorder

Amplifier에서 증폭, 출력된 전기신호는 곧 신호분석기(Signal Analyzer \rightarrow Vibration-Level Meter+Tracking Filter, F. F. T. Analyzer)에 입력되어 분석(Analyzing)을 행하게 되지만 분석기(Analyzer)를 현장에서 취급하기란 용이하지가 않다. 따라서 현장에서 측정된 전기신호를 Data-Recorder에 저장(Storage), 시험실에서 재생하여 분석기에 입력, 분석을 실행하는 경우가 대부분이다. 이때 사용하는 Data Recorder는 Tape 종류에 따라 Casette type, Open Real type이 있으며 녹음(Recording) 방식에 따라 Direct Recording, Frequency Modulation Recording, V. H. S Recording 방식이 있고 Channel 수에 따라 Single, Dual, Multi-Channel 등이 있다.

Data Recorder는 저장(Storage)하고자 하는 신호의 주파수에 따라 Tape의 이송속도 및 사용시간(Recording Time/Tape)에 많은 제약이 따르게 되므로 이 점을 필히 검토, 기종을 선정하여야 한다.

3. 비틀림진동 기록의 분석

(Analysis of Torsional Vibration Signal)

가. 기계식 측정기록

기계식 측정기(여기서는 Geiger type Torsionograph)를 중심으로 하며 여타 종류도 유사함)의 측정기록을 기록지에 진동선도(Vibratory Diagram)로 나타나게 되므로 이것을 분석하는 데는 육안에 의한 수작업분석을 행하게 된다.

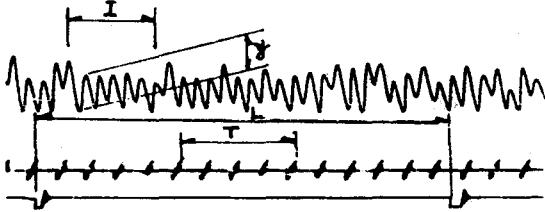


그림 3-1 Torsiograph에서의 진동기록Tape

그림 3-1은 Torsiograph에 의해 채취된 진동기록으로 기록지 상에는 3가지 종류의 선도가 기록되어 진다.

L선도 : 측정기 Driven Pulley 10회전간 이송된 Tape 길이(mm)

T선도 : Pulse Timer에 의해 1/2초에 1회씩 Pulse 기록(mm)

진동선도 : Crank Shaft 선단에 나타난 비틀림진동 진폭선도(측정기 내부구조에 의하여 증폭된 상태, mm)

여기에서 $N = T/L\rho \times 300$

$N =$ Crank Shaft 회전수(rpm)

$T =$ T선도 2초간의 길이(mm)

$L =$ L선도 1구간의 길이(mm)

$\rho =$ Pulley 구동비율(148/148 = 1)

$$\therefore N = \frac{96}{161 \times 1} \times 300 = 178.9\text{rpm}$$

$I = L/10\rho$ $I =$ Crank Shaft 1회전간의 Tape 이송길이(mm. 'I' 값안에 들어있는 산의 수가 차수(Order)이다.)

$$\therefore I = \frac{161}{10 \times 1} = 16.1 \text{ mm} \rightarrow 6\text{차 진동}$$

$y =$ 진동선도(단) 진폭((Single) Amplitude, mm)

$$\therefore y = 3.85\text{mm}$$

$$\theta = y \times M \times \rho$$

$\theta =$ 비틀림진동 진폭(Degree, 실질적인 Crank Shaft 진폭)

$M =$ 측정기 증폭배율

$$(3 = 0.129, 6 = 0.0645, 12 = 0.03225)$$

$$\therefore \theta = 3.85 \times 0.129 \times 1 = 0.497^\circ$$

$$\sigma^p = \frac{T_{\max}}{Z_p} \times \frac{\pi}{180} \times \theta_{\max}$$

σ^p : Propeller Shaft 진동응력(kg/cm²)

T_{\max} : Propeller Shaft에 전달되는 최대 Torque(kg - m)

Z_p : Propeller Shaft 극단면계수

$$Z_p = \frac{\pi D^3}{16}$$

$D =$ Propeller Shaft D.a(cm)

나. 전기신호식 측정기록

Amplifier 또는 Data Recorder에서 출력된 전기적 신호는 Sensor의 종류에 관계없이 전압변동에 의한 Analogue 신호로 출력되게 된다.(단, Speed Sensor에 의한 신호는 Pulse 형태일 수도 있다.)

결국, 전기신호 역시 Monitor를 통하여 관찰하면 Torsiograph에서 기록하는 진동선도와 같은 형태로 분석기(Analyzer)에 입력된다.

신호분석기(Signal Analyzer)에는 입력된 Analogue 신호를 그대로 분석에 입력시키는 Analogue 분석기와 Digital 신호로 변환, 분석을 수행하는 Digital 분석기 2가지 종류가 있으며, Analogue 분석기는 Tracking Filter와 진동계(Vibration Level Meter)를 조합, 사용하게 되지만 분석오차, 분석시간의 증대, Computer와의 호환성 등을 고려하여 간단한 측정에만 이용된다.

Digital 분석기에는 F. F. T Signal Analyzer가 그 대표적인 예로서 현재 복잡한 전기적 신호는 거의 F. F. T Analyzer를 통하여 분석하고 있다.

그림 3-2는 일반적인 F. F. T Analyzer의 내부 Block Diagram 및 외부기기와의 연결

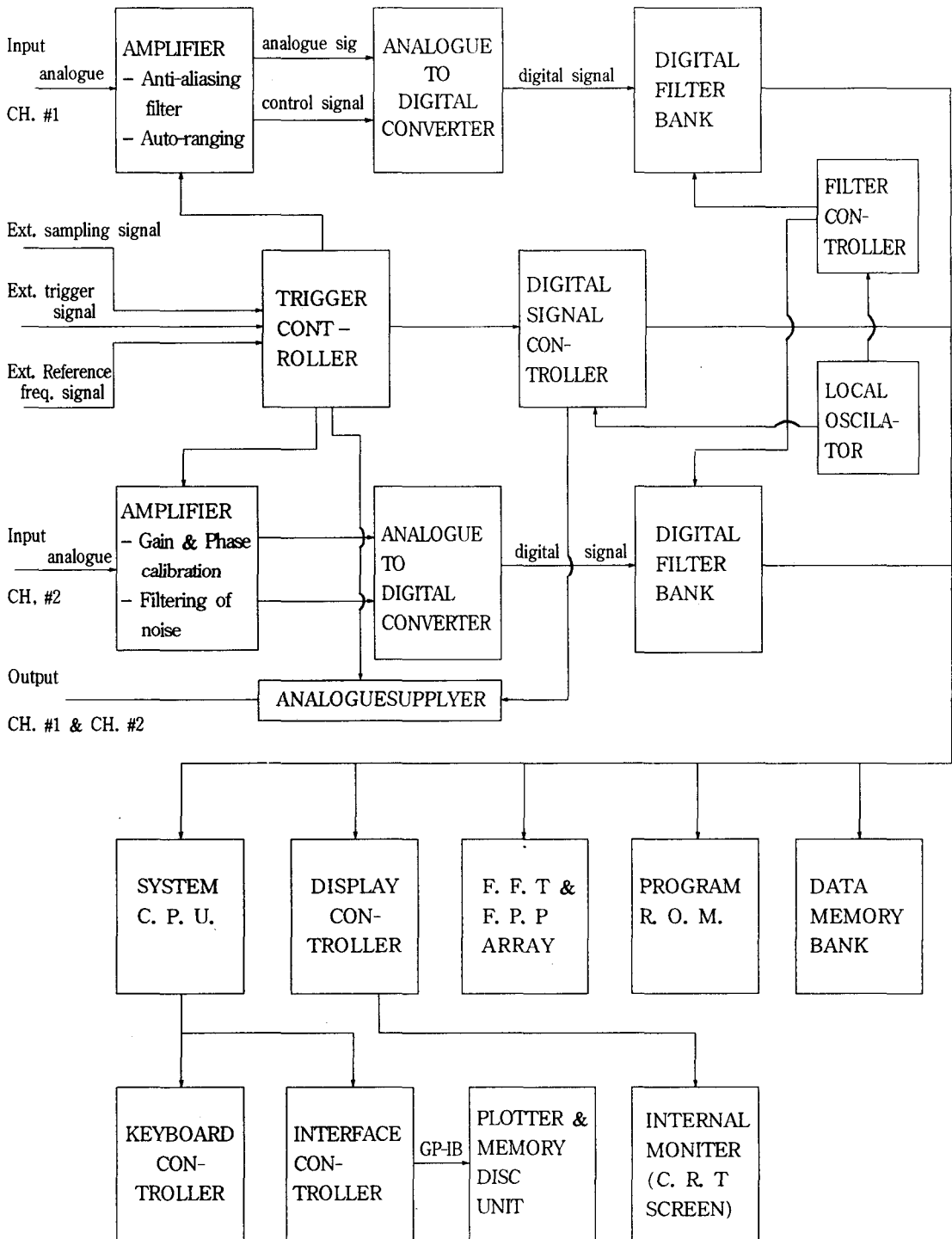


그림 3-2 Block Diagram of F. F. T Signal Analyzer

상태를 보여주고 있는데, 그림에서와 같이 F. F. T에 입력된 Analogue 신호는 내부 Filter에 의해 Noise 제거, Level 선정, 위상조정 (Phase Calibration → Dual Channel 이상의 경우) 등을 거친 후 A/D Converter (Analogue to Digital Converter)를 통하여 Digital 신호로 변환되며 이 신호는 동시에 Furier Transformer에 의해 분류, Digital Filter Bank에 분산, 입력된다. 이때, 외부 또는 내부 동기신호 (Trigger Signal)에 의해 Filter를 Control하며 Filter를 통과한 Digital 신호는 Operator의 Key-Board 조작에 의한 내부 Controller에 의하여 재조합, 필요한 형태의 출력을 CRT Screen에 나타낸다.

그림 3-3에서와 같은 형태의 출력에 의해 각 Speed에서의 진동Level과 Peak 점을 찾을 수 있으므로, 이때의 진동Level(화면에서 Voltage 단위)은 Sensor에서 출력되는 각 속도 변화 또는 변형치 (Degree)와 비례관계를 가지므로 수치변화에 의하여 축계의 진동Level을 알 수 있으며 기계식측정 신호분석에서와 같은 방법으로 진동응력 (Torsional Vibration Stress)을 계산할 수 있게 된다.

4. 결 론

지금까지 개략적이거나 비틀림진동의 발생원인에서부터 추정, 실측, 분석과정 및 관련장비에 대하여 소개하였지만 주지의 사실과 같이 진동의 실체를 이해한다는 것은 그리 손쉬운 일이 아니다.

좀더 진동이라는 문제에 접근하기 위해서는 고성능의 측정, 분석장비 및 이들을 위한 Operator의 기술능력과 숙련, Application에 대한 Technique가 요구되고 있다.

현재 당사(2공장)에서는 1988 ~ 1989 년도에 걸쳐 새로운 장비를 도입함으로써 종래 Torsiograph에 의존하여 중저속 엔진의 비틀림진동 측정 및 분석이 가능했던 것에 비하여 측정능력면에서는 Application에 따라 모든 생산기종의 비틀림진동은 물론, 힘 (Dynamic and Static), 변형 (Strain), 주파수 (Frequency), 종진동 (Axial Vibration) 및 전압변동량 (Voltage Variable) 등에 이르기까지 측정범위의 확대와 정밀도 향상을 도모하였으며 분석능력 역시 고정밀 신호분석기 (Signal Analyzer)를 사용함으로써 제반 전기신호 (Electric Signal)의 분석과 Data의 전산화에 의한 분석신뢰도를 향상시키는 등 Engine Maker로서 여러가지 진동문제에 종합적으로 대처할 수 있는 능력이 크게 발전하였다.

하지만, 날로 첨단화되고 있는 진동문제 (기관 - 선체진동 관련성, Modal Analysis, 소음 (Noise) 분석, 신제품 개발 및 실험 등)에 적극적으로 대처하기에는 아직도 미흡한 점이 없지 않다.

따라서, 이러한 문제들의 해결 및 기술발전을 위하여는 정비의 보완과 병행하여 이들을 효율적으로 사용할 수 있는 전문기술 인력의 양성이 계속되어야 할 것이다.

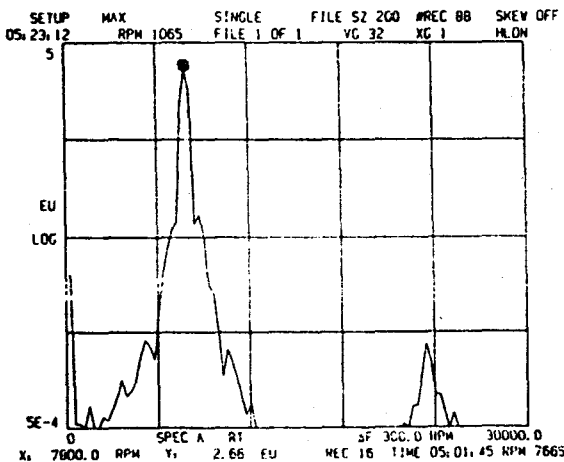


그림 3-3 F. F. T Analyzer에 의해 분석된 진동신호 출력화면