

# 선박용 엔진/회전체 진동 분석 및 모니터링 시스템(EVAMOS) 개발에 관하여

## Development of Engine/Rotor Vibration Analysis and Monitoring System(EVAMOS) for Marine Vessels

이돈출† · 주기세\* · 남택근\*\* · 김은석\*\*\* · 김상환\*\*\*  
D. C. Lee, G. S. Joo, T. K. Nam, E. S. Kim and S. H. Kim

**Key Words** : Analysis(분석), Fast Fourier Transform(고속 푸리에 변환), Marine Engine(선박용 엔진), Rotor(회전체), Vibration Monitoring System(진동모니터링 시스템)

### ABSTRACT

Engine builders have separately developed and applied torsional, axial and structural vibration monitoring system on most marine engines. These systems displayed their results for engine or ship operation engineers and were not regularly stored at the hardware of computer. So, the history and trend of various engine and hull vibrations was not supported for preventive maintenance and to protect the failure of these activity or function. The integrated vibration or stress monitoring system(EVAMOS : Engine/Rotor Analysis and Monitoring System) in marine diesel engine, its machineries and hull have been developed by the dynamics laboratory of Mokpo Maritime University during last 3 years. This paper introduces the design conception and ability of commercial software EVAMOS with field data on several actual tests.

### 1. 서 론

선박용 엔진과 그와 관련된 회전체의 진동 분석에 의한 경향관리와 함께 적합한 시간에 수리보수 계획 및 이를 실시하는 것은 매우 중요하다.<sup>(1-2)</sup> 지금까지는 선박에 적용되는 진동 모니터링장치는 비틀림진동 댐퍼가 적용된 디젤엔진에서 크랭크축을 보호하기 위하여 비틀림진동 모니터링장치가 개발되어 일부 적용되어 왔다. 그리고 저속 2행정 디젤엔진에서 중진동 모니터링장치가 분리 적용되어 왔고, 눈으로 볼 수 있는 단순한 디스플레이 기능만 제공되고 있었다. 이외에도 주요부품 중의 하나인 과급기, 감속기 및 각종 베어링의 진동을 모니터링하는 장치가 별도로 설치되기는 하였지만 선박에서 통합적인 진동 모니터링장치가 적용된 사례는 거의 찾아보기 힘들었다.

국내에 사용되는 종합적인 진동모니터링장치는 대부분 육상에 사용되어 왔고 외국에서 수입하는 관계로 가격이 비싸고 적용상 많은 제약을 받아 왔다. 그리고 발전소와 같이 특수한 분야에만 적용되어 왔으며, 심지어 한국에서 제작된 모든 원(Raw) 데이터가 진동모니터링장치를 제공한 회사의 외국 서버에 저장보관 됨으로써 기술적 노하우와 경험이 유출된 사례도 종종 있어 왔다.

따라서 목포해양대학교 동역학연구실은 이러한 진동모니터링 시스템 개발의 필요성을 인지하고 미국 NI(National Instrument)사에서 제공하는 보급형인 아날로그-디지털(A/D) 변환기를 하드웨어로 보편화된 Visual Studio .Net 언어를 이용한 약 5만 라인의 소프트웨어 EVAMOS(Engine/Rotor Vibration Analysis and Monitoring System)를 지난 3년 동안 개발하여 왔다.<sup>(3)</sup> 그리고 검증을 위하여 최근 6개월간 실험실 모사 실험 장치와 실제 선박용 디젤엔진에 적용하여 현장 테스트를 통해서 사용자 측면에서 많이 개선하였다. 이 시스템은 상업화를 위한 프로토타입(Prototype)으로 계속 수정 보완을 전제로 하고 있으며, 저렴한 가격으로 진동에 대한 초보자도 기존 상업용 장비보다 편리하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 진동 분석과 모니터링 기능을 겸하고 있으

† 교신저자; 목포해양대학교 기관시스템공학부  
E-mail : ldcvib@mmu.ac.kr  
Tel : (061)240-7219, Fax : (061)240-7201

\* 목포해양대학교 해상운송시스템학부

\*\* 목포해양대학교 기관시스템공학부

\*\*\* (주) 바이텍

며 본 연구를 통해서 이를 소개하고자 한다.

## 2. 신호 분석 및 진동모니터링 방법

진동신호 분석 및 모니터링에서 FFT(Fast Fourier Transform) 분석 처리는 가장 중요하고 핵심이다. 기본적으로 이 FFT 알고리즘은 잘 알려져 있으며<sup>(4-5)</sup> 기본 이론식을 정리하면 식(1)~(3)과<sup>(4)</sup> 같다.

$$W \equiv e^{2\pi i/N} \quad (1)$$

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} W^{nk} h_k \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_k &= \sum_{j=0}^{N-1} e^{2\pi i k j / N} f_j \quad (3) \\ &= \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i k(2j)/N} f_{2j} + \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i k(2j+1)/N} f_{2j+1} \\ &= \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i k j / (N/2)} f_{2j} + W^k \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i k j / (N/2)} f_{2j+1} \\ &= F_k^e + W^k F_k^o \end{aligned}$$

이 알고리즘은 1960년대 중반 미국 IBM사에 근무하던 J. W. Cooley와 J. W. Turkey에 의해서 개발되었다고 하지만, 실제로는 이보다 앞선 1942년 Danielson과 Lanczos가 이산 푸리에 변환을 정리하였고 이를 재발견한 것이라 보는 관점도 있다. 여기서  $N$ 은 2의 멱승으로 EVAMOS에서는 1,024부터 시작하도록 하였으며 디젤엔진의 실린더 내 연소특성에 의한 충격 펄스를 아날로그 필

터처리 없이 수행하기 위하여 샘플링속도 8k/s와 ISO<sup>(6)</sup> 규정을 감안하여 131,072(51,200 라인)까지 분석을 할 수 있도록 하였으며, 이 가혹한 조건하에서도 Laptop Samsung Q45(연산속도 1.86GHz)를 이용한 결과 16채널 동시 데이터 저장 및 FFT분석이 가능하였다.  $h_k$ 는  $n, k$ 의 승에 대한 벡터이며 식(3)의 하단에서  $F_k^e$ 는 우수(Even)에 대한 계산결과이며  $F_k^o$ 는 기수(Odd)에 대한 결과이다. 여기서  $F_k$ 에서 얻은 2 사이클(Cycle)의 반복 계산에 의해서 계산횟수를 일반 푸리에 급수 계산  $N^2$ 회 계산 대신에  $N \log_2 N$ 회로 줄일 수 있다.

EVAMOS의 초기 화면은 Fig. 1과 같고 좌측상단은 각 채널마다의 정보를 입력할 수 있도록 하였으며 실시간으로 시간영역에서 최대 16개의 신호를 동시에 볼 수 있도록 하였다. 상단에는 엔진 또는 회전체의 속도를 4초 간격으로 계산하여 보여주고 있으며, 모니터링에 의해서 데이터를 받고 처리할 경우는 상단 Data receiving, Data processing 아이콘에 점등되어 가급적 다른 작업을 피하도록 하고 있다. 그리고 각 채널마다 시간영역의 주어진 스케일에 의해서 값을 확인할 수 있으며 진동수준이 알람 세팅 값보다 클 경우 각 채널 상단 위에 빨간 불이 들어오면서 경보음이 울린다. 이 경보음은 전체 크기가 아니라 FFT분석을 한 결과를 기준으로 하고 있다. 좌측, 하단에서 Graph 를 시작 및 정지 메뉴를 이용하여 스크린에서 볼 수 있도록 하였다. 바로 밑에는 수동으로(Manual)로 데

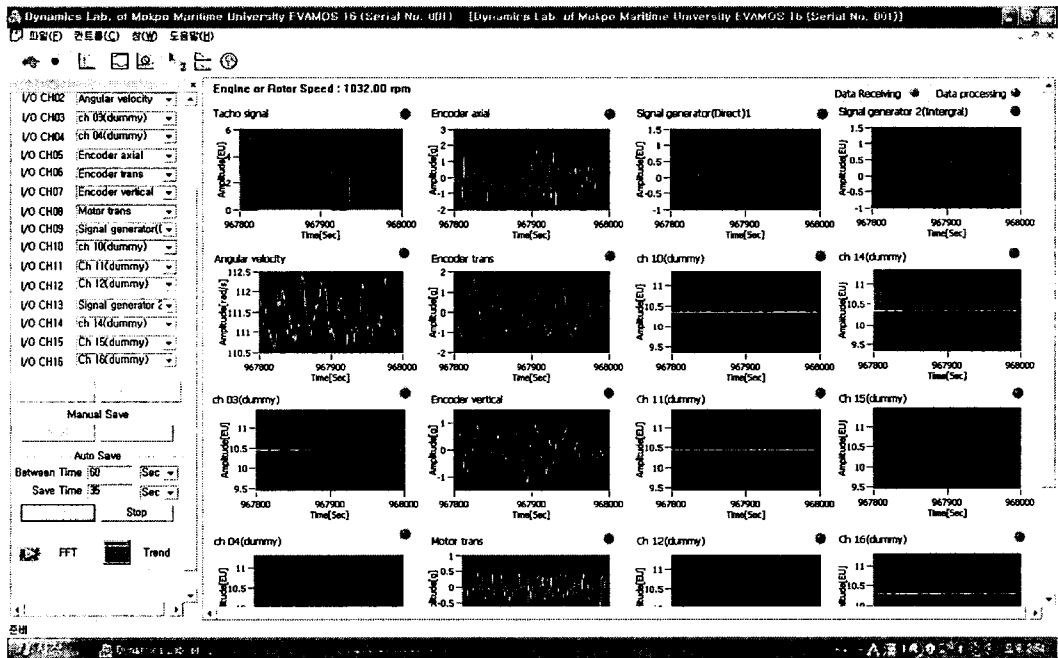


Fig. 1 Initial display screen in EVAMOS

이터를 저장할 경우는 일반진동 또는 과도진동 계측 시 필요할 때 시작 및 종료키를 사용하여 데이터를 저장할 수 있다. 자동 저장 기능은 초, 분 및 시간 단위로 모니터링 주기를 임의로 줄 수 있고, 데이터 저장시간은 ISO<sup>(6)</sup> 기준에 부합할 수 있도록 매번 최대 90초까지 저장할 수 있다. 데이터도 해당 폴더 내에서 하부 폴더를 자동적으로 생성시켜 저장한다. 그리고 이 자동 기능을 이용하면 주기적으로 시간영역의 원 데이터와 동시에 FFT 분석 및 경향 관리를 할 수 있다. 진동분석은 일반 계측장비와 동일한 수준의 기능을 갖추고 상단의 여러 가지 아이콘과 아래 FFT, Trend 아이콘을 클릭하면 진동 분석과 함께 분석 결과들을 Fig 2와 같이 제공한다.

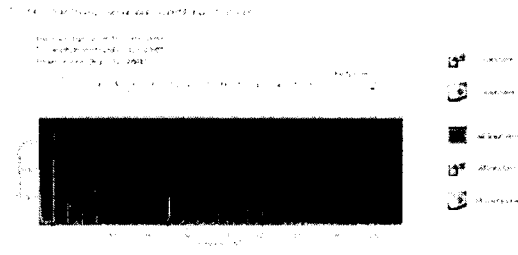


Fig. 2 FFT analysis results by EVAMOS

여기서 각 채널별로 FFT 결과를 또는 16채널을 동시에 볼 수도 있고, 두 채널(x, y)을 결합하여 궤적(Obit)을 볼

수 있다.

2개 이상의 자동 저장 또는 수동으로 저장된 Sweep up & down 자료를 클릭하여 각 채널에 대한 차수 분석, Contour, Waterfall 그림을 자체 소프트웨어를 이용 그래프 상으로 볼 수 있다. 그러나 보고서용은 각 채널 별로 분석 저장된 FFT결과를 이용하여 다른(Matlab 또는 Origin 등) 그래픽 툴을 이용하는 것이 보다 깔끔하여 효과적이다. 각 채널에 대한 적분은 Fig. 3에 보인 Integral code 에 있는 기능을 이용 2회까지 할 수 있다. 예를 들어 가속도를 변위진폭으로 바꾸기 위해서는 Two time 을 클릭하면 된다. 윈도우는 Hanning 사용할 수 있으며 동시에 엔진의 과급기와 같이 엔진진동과 관계없는 과급기 회전체의 진동성분을 볼 수 있도록 하기 위하여 High pass 필터를 사용할 수 있도록 하였다. 또한 회전체의 궤적이나 입력 신호를 매끄럽게 하기 위하여 Moving 필터를 사용할 수 있다. 진동단위는 기본적으로 많이 사용하고 있는 6개 단위와 엔지니어링 유닛 중에서 선택하도록 하였고, 센서의 감도, 채널의 명칭 및 알람 값을 차례로 입력하면 된다.

EVAMOS는 진동의 위상과 변화를 확인하기 위하여 Fig. 4의 우측하단에 보인바와 같이 타코 신호를 이용하여 트리거를 잡아서 진동신호를 분석하여 각 회전수 및 주파수에 대한 진폭과 위상을 제공하고 있다. 이들은 특히 회전체의 진동모드 분석에 유용하게 사용할 수 있고, 차수분석을 쉽게 할 수 있다. 또한 타코 신호 없이도 비틀림진동 모

Initialization Settings								
Data Config		Channel Config						
Channels Configuration Setting								
	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8
Integral Code		No int	No int	No int	One time	One time	No int	No int
Filter Code	No	No	No	No	No	No	No	No
Unit Code	Angular Vel	Engineering	Engineering	Accelerator	Accelerator	Accelerator	Accelerator	Accelerator
Sensitivity	13.962	1	1	10	10	10	10	10
Channel Name	Angular velocit	ch 03(dummy)	ch 04(dummy)	Encoder axial	Encoder trans	Encoder vertice	Motor trans	
Alarm Factor	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005
	Channel 9	Channel 10	Channel 11	Channel 12	Channel 13	Channel 14	Channel 15	Channel 16
Integral Code	No int	No int	No int	No int	No int	No int	No int	No int
Filter Code	No	No	No	No	No	No	No	No
Unit Code	Engineering	Engineering	Engineering	Engineering	Engineering	Engineering	Engineering	Engineering
Sensitivity	1	1	1	1	1	1	1	1
Channel Name	Signal generat	ch 10(dummy)	Ch 11(dummy)	Ch 12(dummy)	Signal generat	ch 14(dummy)	Ch 15(dummy)	Ch 16(dummy)
Alarm Factor	1e+005	0.3	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005	1e+005	0.5

Fig. 3 Channel configuration setting in EVAMOS

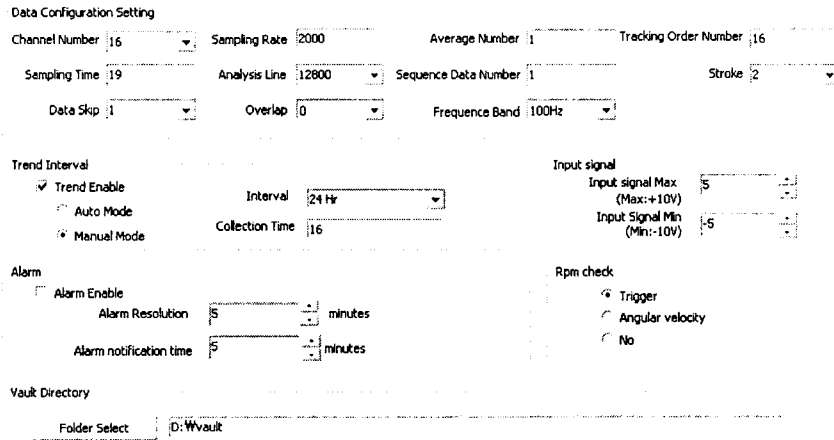


Fig. 4 Data configuration setting in EVAMOS

니터링 시 얻어지는 회전각속도를 이용하여 회전속도를 얻어 차수분석을 할 수는 있지만 회전수 변화에 따른 진폭의 위상 비교는 어렵다. 회전체의 회전수에 대한 정보가 없을 경우 단순히 FFT 분석만을 수행하게 된다. 채널수는 Fig. 4의 좌측상단에 보인 바와 같이 1~16채널까지 클릭하여 선택할 수 있도록 하였으며, 샘플링 시간은 샘플링속도와 분석 라인( $N/2.56$ )에 의해서 자동으로 계산된다. 데이터 스킵(Skip)은 NI A/D변환기의 최소 샘플링 속도가 2k/s이고 선박의 분석 주파수의 상한선(선박의 구조진동은 약 80 Hz)이 낮을 경우 또는 온도 압력 등과 같이 시간을 기준으로 변화 폭이 작은 신호에 대하여 스킵의 단위를 1, 10, 100 중에서 선택하여 컴퓨터 내 원 신호의 저장 메모리 용량을 대폭적으로 줄일 수 있도록 하였다.

차수분석은 2행정엔진과 일반 회전체는 1, 2, 3, ...차 그리고 4행정 엔진은 0.5, 1, 1.5, 2, ...차로 구분하여 분석을 할 수 있도록 하였다. 알람은 인식의 지속시간을 Fig.3의 아이콘에서 입력할 수 있다. 진동 데이터는 Fig. 4의 하단에 보인바와 같이 지정된 폴더에 저장되는데 초기 시작하기 전 폴더를 만들어서 시작하면 편리하다. 원 데이터는 날짜 별로 폴더를 만들어서(예 : 20080929) 그 안에 모니터링 시작하는 시점을 기준으로 시간, 분, 초 단위로 세분하여 txt파일로(예 : 20080929121211.txt) 구분 저장하여 관리가 편리하도록 하였다. 또한 경향 관리는 각 채널별로 세분된 원 자료를 FFT 분석하여 일련번호에 의해서 저장되고 이 파일 안에는 머리말에 초 단위까지의 분석 시간, 분석 라인 수 및 회전체의 회전수 그리고 각주파수별로 진폭과 진폭에 대한 위상각이 포함되어 있다. 또한 경향 관리를 위하여 앞에서 언급한 각각의 주파수 분석 결과의 시간 회전수 및 Rms값을 누적하여 한 파일에 저장함으로써 시간대 및 회전수별로 전체적인 진동의 경향을 파악할

수 있도록 하였다. 그리고 문제가 되는 시간대를 찾아 원 데이터의 FFT 결과를 검토하거나 원 데이터를 재분석하여 원인을 규명하고 조치할 수 있도록 하였다.

### 3. 선박의 주 기관 및 비상 발전기 엔진 실험

Fig. 4에 보인 바와 같이 실제 초대형 컨테이너 선박에 적용되는 주 기관(14RT-flex96C-B : 108,920 bhp×102 rpm)의 시운전 시 EVAMOS를 이용하여 선급에서 요구하는 비틀림, 엔진구조 및 선체진동을 계측하였으며 ISO<sup>(6)</sup> 규정에 따라 엔진 회전수를 단계적으로 올리면서 계측하였으며 이때 중간측에서 스트레인 게이지로 계측한 비틀림진동의 응력을 Laptop에 자동으로 저장하였다.

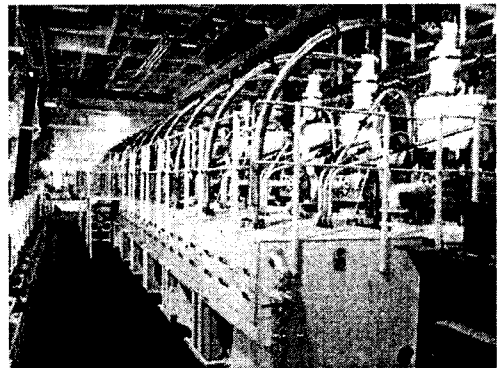


Fig. 5 EVAMOS test on the 14RT-flex96C-B engine(108,920 bhp × 102 rpm)

이때 저장된 FFT 파일들을 Matlab을 이용 차수분석 후 가장 큰 4차 성분과 FFT 스펙트럼의 전체적인 Waterfall 그림을 각각 Fig. 6, 7에 보인다. Fig. 8은

비교적 엔진회전수가 높은 비상발전기(PL180 FE : 770 bhp × 1,800 rpm)에서 EVAMOS와 레이저 토션메터를 이용 각속도를 측정한 사진을 보인다. 이 엔진은 조속기를 조정하여 엔진회전수를 천천히 올리면서 약 10분 정도 데이터를 수동 모드로 받아서 차수분석을 한 결과를 Fig. 9에 보이다. 이때 4초 단위로 분석한 스펙트럼을 모아서 Waterfall 그림으로 표시한 결과를 Fig. 10에 보인다. 이 두 엔진 모델 실험을 통해서 회전체의 속도가 100~1,800rpm까지 그리고 자동과 수동 모드의 진동신호를 모니터링 및 분석한 결과 양호한 결과를 가져왔다. 또한 기본적으로 시간 영역에서의 원 신호 자료와 FFT 분석 자료가 같이 중복 저장되기 때문에 필요시 재분석 및 후처리에 대한 유연성이 크다.

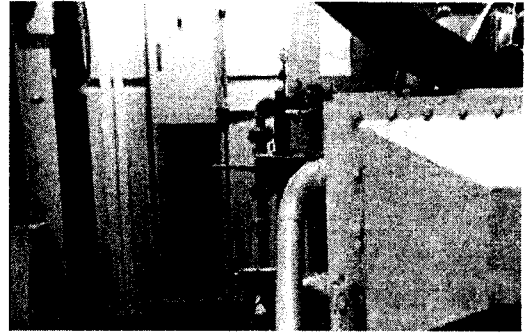


Fig. 8 EVAMOS test on the PL 180 FE engine(770 bhp × 1,800 rpm)

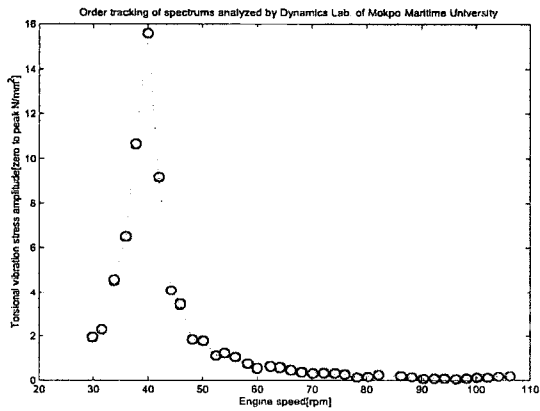


Fig. 6 The 4th order amplitude of measured torsional vibration stress at intermediate shaft of 14RT-flex96C-B engine

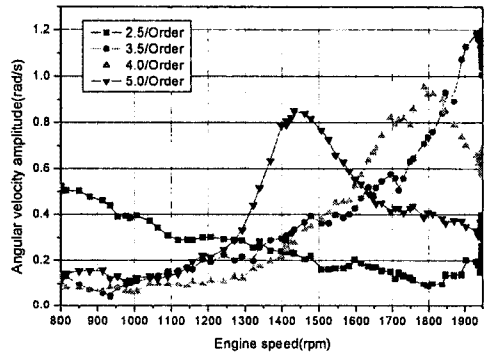


Fig. 9 The order tracking results of measured angular velocity amplitude stress at crankshaft free end of PL 180 FE engine

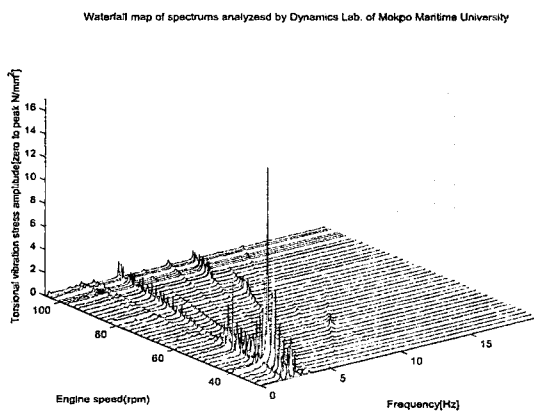


Fig. 7 Waterfall map of measured torsional vibration stress at intermediate shaft of 14RT-flex96C-B engine

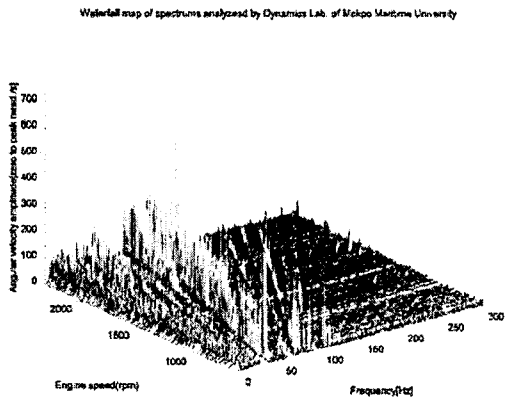


Fig. 10 Waterfall map of measured angular velocity amplitude at crank shaft free end of PL 180 FE engine

특히 저속 2행정 디젤엔진에서 중간축의 비틀림응력 계측결과를 이용하여 동력측정을 측정 및 분석하는 과정에서 원격측정장치의 영향으로 예상치 못한 잡음이 심하여 후처리로 Moving 필터를 이용하여 신호를 매끄럽게 처리할 수 있었다. 또한 축의 횡진동 측정 시 불필요한 잡음이 포함되더라도 재분석 및 후처리 과정에서 이를 제거할 수 있어 계측에 대한 신뢰성이 높을 것으로 판단된다. 다만 엔진진동 계측 시 실린더 내 폭발에 의한 충격으로 인한 영향은 낮은 샘플링속도로 받은 원 데이터를 재분석 및 후처리하더라도 충격음에 의해 교란되어 신호의 재현성이 없으므로 샘플링속도를 증가시키는 방법과 아날로그 필터를 사용하는 방법 이외에는 대안이 없다.

#### 4. 결 론

EVAMOS는 주 저자가 지난 25년간 진동 계측 및 분석 업무에 종사하면서 가격 및 기능상으로 만족할만한 장비가 없었다. 따라서 사용자 입장에서 지금까지의 경험들을 바탕으로 보다 편리하게 진동계측업무를 수행하기 위하여 지난 3년간 개발 완성하였으며 이를 정리 요약 하면 다음과 같다.

- 1) 초기 대학 실험실에서 진동계측업무를 편리하게 수행하기 위하여 개발하였으나, 검증단계에서 상업적으로 충분한 가치가 있다고 판단되어, 독자적인 디자인에 상업화된 모니터링의 많은 부분들을 반영하였으며, 프로토타입으로 사용상 개선 점들을 점차 보완해 나갈 예정이다.
- 2) 현재 미국 NI사의 4채널씩 유닛화된 A/D 변환기 모듈 9215/9233를 이용하여 최대 16채널까지 사용할 수 있도록 개발하였고, 한 개의 새시(Chassis) 최대 용량이 32채널로 동일한 32채널로 확대 개발 중이다. 또한 C++를 기반으로 Visual Studio .Net 언어를 사용하여 A/D 변환기 제조사의 구동 드라이브만 운영 PC에 로딩하면 본 프로그램을 실행할 수 있어 별도로 NI사에서 제공하는 Labview나 다른 전문 OS가 불필요하다.
- 3) 네트워크 기반의 계측 시스템 구성이 용이하며 향후에 네트워크상 데이터를 받아 회사별 장비 별로 데이터베이스화함으로써 이력관리, 경향관리, 보수교체 시기 예측 등의 기능을 추가함으로써 계측의 무인화 및 실시간화 기반 구축이 가능하다.

#### 참 고 문 헌

(1) Geislinger GmbH, 2006, Geislinger monitoring

, Monitoring\_2006.pdf.

- (2) 양보석, 2006, 기계설비의 상태 감시 및 진단, 인터비전.
- (3) 이돈출 외 3명, 2007, 선박용 디젤 엔진의 종합 진동 모니터링 시스템 개발을 위한 실험적인 연구, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, KSNVE07A-32-01
- (4) William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling and Brian P. Flannery, 1992, Numerical recipes in fortran, Cambridge university press. pp490~592.
- (5) Emmanuel C. Ifeakor and Barrie W. Jervis, 1993, Digital Signal Processing-A Practical Approach, Addison-wesley Publishing. pp.93~102.
- (6) ISO/FDIS 20283-2:2008(E), 2008, "Mechanical vibration - Measurement of vibration on ships - Part 2 : Structural vibration"