대한기계학회논문집 A권, 제35권 제11호, pp. 1529~1535, 2011

<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.11.1529 ISSN 1226-4873

엔진 회전속도 변화를 이용한 상태진단 기법에 관한 연구§

이병열* · 하승진* · 임옥택**†
* 현대중공업 엔진기계사업부, ** 울산대학교 기계·자동차공학부

Methodology of Engine Fitness Diagnosis Using Variation of Crankshaft Angular Speed

Byungyeol Lee*, Seungjin Ha* and Ocktaeck Lim**†
* Engine & Machinery Division, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.,
** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan Univ.

(Received June 27, 2011 ; Revised August 26, 2011 ; Accepted August 26, 2011)

Key Words: Low Speed Engine(저속엔진), Medium Speed Engine(중속엔진), Condition Diagnosis(상태진단), Engine Fitness Ratio(EFR)

초록: 해상 운송 분야와 발전 플랜트 분야에서 사용되는 엔진은 저·중속에서 운전효율향상이 계속해서 요구되고 있다. 엔진의 운전효율향상을 위해서는 엔진상태를 나타내는 변수의 확인이 반드시 필요하다. 지금까지 가스압력, 가스온도, 진동 등이 주요변수로써 제안되고 있으나 이 변수들은 응답속도와 진단 정확성에 한계가 있다. 본 연구에서는 엔진 크랭크 축 각속도 변화를 수치화한 EFR(Engine Fitness Ratio)을 검출하고, 이를 기반으로 엔진의 상태를 진단하는 기법을 개발하였다. EFR은 주파수 영역에서 특정 주파수의 비로써 정의되며 엔진상태를 나타낸다. EFR은 크랭크 각속도의 변화 거동으로부터 계산되며, EFR을 이용한 엔진 상태진단 기법을 실제 선박 추진용 저속엔진을 이용한 실험과 발전용 중속엔진을 이용한 해석을 수행하여 엔진의 이상 발생 감지가 가능함을 검증하였다.

Abstract: Improvement of the thermal efficiency in operation and maintenance of low- and medium-speed engines is a kind of never-ending requirement in the maritime power plant business. For the purpose of improving engine management efficiency, a principal factor that represents the fitness of the engine should be identified. Gas pressure, gas temperature, and vibration have all been used as this factor. However, they have limitations in terms of response speed and diagnosis accuracy. The EFR (engine fitness ratio) is suggested as a new diagnostic factor in this paper. The EFR is defined as the ratio of particular frequencies in the frequency domain and represents the fitness of an engine. It is calculated from the fluctuation pattern of the crankshaft angular speed. The EFR was verified using an experimental method for a low-speed engine and an analytic method for a medium-speed engine.

1. 서 론

해상 운송 분야와 발전 플랜트 분야에서 사용되는 엔진의 운전 성능은 사업의 효율성을 결정하는 중요한 문제이다. 엔진의 상태를 직관적으로 알려주는 인자들에 대한 연구는 지속적으로 수행되고 있지만, 실시간으로 변하는 엔진의 상태를 자동으로 확인할 수 있는 방법에 관한 연구는 많이 부족하다. 엔진의 상태를 수치적으로 확인할 수 있는 방법으로써 엔진 회전속도 변화의 분석을 통해 확인하는 방법이 제시되고 있다. 이와 같은 형태의 작업이 엔진의 경우에도 발생하는데 이것이 각 실린더의 폭발 압력에 의한 엔진 회전속도의 변화이다. 따라서 엔진 실린더의 효율이 정상적인 경우라면 엔진이 보여주는 맥동은 정상적인 사인 파형을 보이게 된다. 하지만 엔진 실린더 효율이 저하된 경우, 실린더 간의 부하의 불균등 또는 연소상태의 불안정 문제가 발생할 경우 엔진의 거동은 달라진다.

본 연구에서는 엔진 크랭크 축 각속도 변화를 수치화한 EFR(Engine Fitness Ratio)을 검출하고, 이를

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 울산지회 춘계 학술대회(2011. 5. 13., 울산대) 발표논문임
† Corresponding Author, otlim@ulsan.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

기반으로 엔진의 상태를 진단하는 기법을 개발하였다. 또한 EFR을 이용한 엔진 상태진단 기법을 실제 선박 추진용 저속엔진(Low-speed Engine)을 이용한 실험과 발전용 중속엔진(Medium-speed Engine)을 이용한 해석(Simulation) 을 수행하여 엔진의 이상 발생 감지가 가능함을 검증하였다.

2. 엔진 상태 모니터링 및 진단기술의 연구 동향

엔진의 상태를 감시하고 진단하는 방법에 관한 연구로써 여러가지 방법이 제시되고 있다.[1,2] Fig. 1은 현재 적용되고 있는 엔진 상태 모니터링 및 진단기법을 나타낸다. 보통 사용되고 있는 방법은 엔진에 센서(Sensor)를 설치하고 엔진의 운전기간 동안 해당 센서 값이 엔진 설계 시 정해진 상태값을 얼마나 벗어나는지 모니터링 하는 방법이다. 엔진 설계시 정해진 상태값을 벗어나지 않으면, 엔진이 정상적인 상태에서 운전되고 있다고 판단하는 것으로써 현재도 가장 일반적으로 사용되고 있는 진단 방법이다. 이 경우 상태 진단시스템은 엔진 각 부위에 설치된 센서로부터 엔진의 현재 상태를 나타내는 물리값을 검출하고 운전 허용 범위와 비교하는 레벨(Level) 감시를 수행한다. 레벨 감시의 대상이 되는 엔진 상태 값 중 가장 중요한 것이 실린더 내부 압력이다. 실린더 내부 압력은 각 실린더에 압력센서를 설치하고 압축 행정시의 압력(Pcomp)과 폭발시의 압력(Pmax)을 계측하여 실린더 내 유효 압력(Pmep)을 계산하여 검출한다. 이 방법은 보통 작업자가 수작업으로 여러 실린더의 압력을 순차적으로 측정하는 방식으로 진행된다. 실린더 압력 데이터를 이용하는 엔진상태 진단방식은 실린더 내부 압력을 직접 이용하므로 가장 확실한 방식이지만 고가의 압력센서를 각 실린더별로 설치하여야 하므로 비교적 비용이 많이 소요되고, 열응력에 의한 센서 자체의 수명이 한정되므로 온라인 감시에 적용하기는 적당하지 않다. 엔진 흡/배기 압력 및 흡/배기 온도를 이용하는 방식은 온라인화는 가능하지만 반응속도가 느리고 문제 발생 부위를 정확하게 파악하기 어렵다는 단점이 있다. 한편, 진동량을 이용하는 방식은 일반적인 산업용 기계 장비의 구동부 상태를 진단하는데 가장 일반적으로 사용되며 지식 데이터베이스가 가장 많이 축적된 방식이다. 하지만 대형 기계설비의 경우 크랭크축을 지지하기 위해서 저널 베어링을 사용하므로 크랭크축의 진동 성분이 저널 베어링을 지지하는 유막을 통과하는 과정에서 중요한 데이터가 손실되어서 사용에 제약을 받게 된다. 또, 윤활유 분석 기법은 엔진의 특정 부위의 마모정보 등을 정확히 얻을 수 있으나 작동유의 경우 엔진의 운전에 따라 장기간 사용되므로 광 투과성이 떨어지게 되고, 대부분의 온라인 윤활유 분석 센서는 광투과 성질을 이용하여 작동유 내부 불순물(Particle)의 수량, 크기 및 성분을 측정하는 시스템이므로 온라인 분석에 한계가 있다. 현재는 레벨감시 이외에 엔진 상태값 경향(Trend)을 이용하여 레벨 감시 방식으로 검출되지 않는 영역에서의 상태 변화를 감지하는 기법을 적용하고 있다. 또한 이러한 데이터들을 적절히 조합함으로써 엔진 상태 이상을 유발한 원인을 추정하는 것도 가능하다.

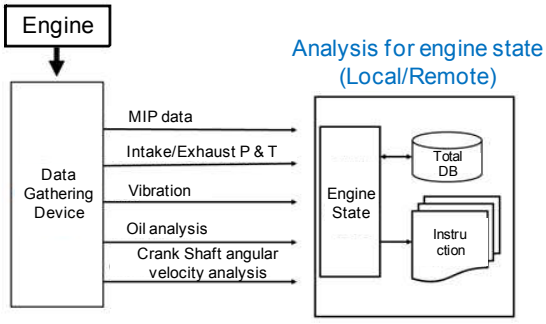

Fig. 1 Methods of engine condition diagnosis

3. EPR을 이용한 엔진 상태진단 기법의 개요

엔진 원격 모니터링 시스템에서 사용하는 엔진 상태 데이터를 이용하는 종래의 방식은 현재 유용하게 사용되고 있지만 센서의 설치 및 유지 비용이 많이 들고, 장비의 상태가 어느 정도 악화된 후에야 이상발생을 감지할 수 있으며,

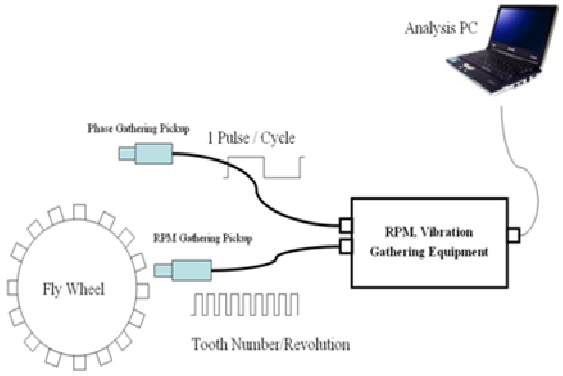

Fig. 2 Configuration of engine fitness diagnosis system

이상발생에 대한 응답속도가 느리다는 한계가 있다. 또한, 기술적 또는 비용적 측면에서 온라인 모니터링이 어려운 상태 값이 존재하고, 순간적으로 발생하였다가 사라지는 이상 징후나 점진적으로 상황이 악화되는 이상 상태는 감지하기 어려운 측면이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기존의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 EFR(Engine Fitness Ratio)을 이용한 엔진 상태진단 시스템(Engine Fitness Diagnosis System)을 개발하였다. 엔진은 흡기, 압축, 폭발 및 배기의 상태가 연속적으로 반복되는 왕복동 운동 장치이므로 폭발에너지를 운동에너지로 바꿔주는 크랭크 축의 회전속도는 각 실린더의 폭발 행정에서 순간적으로 변하게 된다. 이때 변화하는 속도값은 각 실린더의 상태에 따라 달라지게되고 각속도 변화를 연속적으로 감시함으로써 엔진 개별 실린더의 상태를 추정할 수 있다.[3,4]

본 연구에서는 크랭크축 속도변화를 이용하여 엔진 회전축의 순간적인 속도 변화를 검출하는 방식을 통해 엔진 각 실린더의 상태를 진단하고, 그 결과 특정 실린더의 이상발생이 고장을 일으킬 정도까지 진전되지 않은 상태에서 필요한 조치를 빠른 시간 내에 취할 수 있는 예지 보전(Preventive Maintenance) 시스템 구축 기법을 개발하였다. EFR은 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$EFR = \frac{Amplitude\ \ at\ 1X}{Amplitude\ \ at\ NX} \tag{1}$$

1X: Frequency of RPS (Revolution Per Second)
NX: Frequency of RPS × Cylinder Number

EFR을 이용한 엔진 상태진단 시스템의 구성도는 Fig. 2와 같다. 엔진 크랭크 축과 연결된 플라이 휠에 속도 검출 센서를 설치하여 크랭크 축의 각속도에 비례하는 주파수의 펄스 신호로 회전속도를 검출하였다. 실시간으로 검출되는 회전속도 펄스를 필터링 처리 후 저장하고, 엔진상태 분석 기능을 통해 이를 분석하였다. 엔진의 부하측에 연결된 플라이 휠을 이용하여 엔진의 각속도 변화를 정밀하게 측정하는 경우에는 플라이휠의 가공 오차 및 샘플링 오차에 기인하는 여러 가지 노이즈 성분이 원신호와 함께 측정된다. 이를 제거하기 위해서는 샘플링 된 신호에 LPF(Low Pass Filter)를 적용하여 불필요한 신호를 제거할 수 있었다. LPF의 차단 주파수는 엔진의 회전수, 플라이휠 이빨의 갯수 및 샘플링 주파수 등의 여러 가지 조건에 의해 결정되어야 한다. 크랭크축의 각속도 검출은 식 (2)와 같다.

$$\omega_i = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta t} \tag{2}$$

ω : Instant angular velocity
θ : Angle of fly-wheel
Δt : Time interval

엔진 크랭크 축과 연결된 플라이휠에 속도 검출 센서를 설치하여 크랭크 축의 각속도에 비례하는 주파수의 펄스 신호로 회전속도를 검출하게 된다. 실시간으로 검출되는 회전속도 펄스를 적절한 필터링(filtering) 처리 후 이를 분석하였다. 수집된 정상상태 엔진의 속도변화 데이터를 Fig 3에 도시하였다. Fig. 3과 같은 각속도 변화 곡선을 보고 엔진의 상태를 검출하기는 여러 가지 문제점이 있다. 첫째는 그림 18과 같이 정상적인 동작 상태에도 크랭크 축 속도변화는 완전한 사인파를 그리지 못한다는 것이다. 두 번째는 추진용 엔진의 경우 부하의 변화가 연속적으로 발생하게 되므로 크랭크 축 각속도에도 영향을 미치게 된다. 그러므로

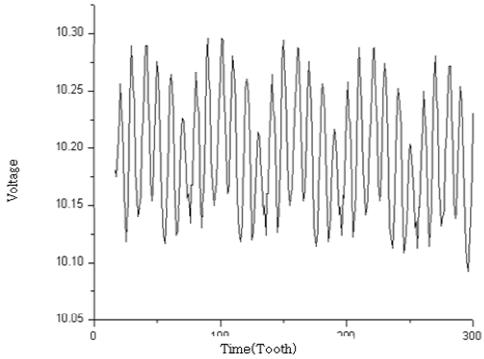

Fig. 3 RPM fluctuation at normal condition for low speed engine

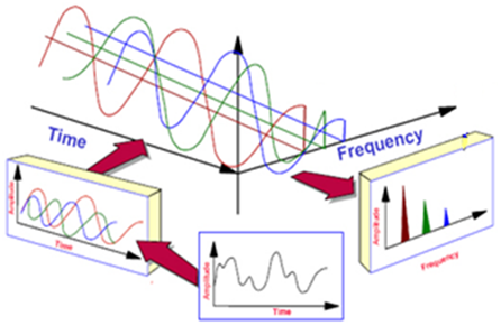

Fig. 4 Concept of frequency based condition diagnosis

크랭크축 각속도 변화 데이터를 이용해서 실린더 이상을 검출하는 것은 여러가지 신호처리 기법을 사용하여도 신뢰성 있는 방식을 찾기가 힘든 상황이다. 본 연구에서는 전통적인 설비진단 기법에서 사용하는 주파수 영역 모니터링 기법을 도입하였다. 주파수 영역 모니터링의 개념은 Fig. 4와 같다. 주파수 영역의 신호 크기는 문제 발생 위치와 문제의 심각성을 표시하게 된다.

주파수 영역으로 변환된 각속도 정보로부터 식 (1)의 EFR를 계산하고 이 값을 이용하여 엔진의 상태를 진단할 수 있다는 것을 저속엔진 대상의 실험적 검증과 중속엔진 대상의 해석적인 검증을 수행하였다.

4. 저속엔진 대상의 EFR 기반 상태 진단의 실험적 진단

EFR을 이용한 엔진 상태진단 기법을 검증하기 위하여 실 엔진을 이용하여 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 엔진은 Table 1과 같다. 본 실험에서 사용한 6S60MC 엔진은 선박추진용으로 사용되는 엔진으로 실제 선박에 탑재되기 전 공장 테스트(Shop Test) 단계에서 수행하였다. Fig. 3은 시간 축에 대한 엔진 각속도 변화를 보여주고 있다. Fig. 3과 같이 엔진 크랭크축이 한 바퀴 회전하는 동안에 실린더간의 크랭크축 각속도 변화가 존재함을 확인할 수 있다. 이에 비해서 사이클간의 각속도는 유사한 경향을 보이고 있다. 6S60MC 엔진은 6기통 엔진이므로 사인파형 6개가 크랭크 축 한 바퀴 회전을 나타낸다. Fig 5는 정상적인 상태에서 테스트 엔진의 크랭크축 회전속도 신호의 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 테스트 엔진이 정상 운전되는 상태에서의 EFR은 식 (3)에서 0.03이다. 엔진이 운전 중 실린더 한 개에 착화실패 (Misfire)가 발생하면 크랭크 축 회전속도에 변화가 생기게 된다. Fig 6에 실린더 한 개에 착화실패를 일으키고 감통 운전을 하는 경우 크랭크 축 각속도 변화를 도시하였다. Fig 6과 같이 실린더의 폭발 행정에서 폭발이 일어나지 못하므로 크랭크 축 각속도가 급격히 떨어지게 되고, 연속된 실린더의 폭발행정에서 크랭크 축 각속도를 가속시키는 형태를 보이고 있다. 착화실패가 발생한 경우 EFR은 식 (4)의 1.79로 증가하게 된다.

$$EFR = \frac{0.0748}{0.0417} = 1.79 \qquad (4)$$

Table 1 Specification of tested concept of frequency based condition diagnosis

Item	Specification
Engine Model	6S60MC
Cylinder Number	6
Engine Output	12,240 kW
Bore	600 mm
Stroke	2,292 mm
Speed	90 RPM
MEP	18 bar
Firing Order	1-4-3-6-5-2

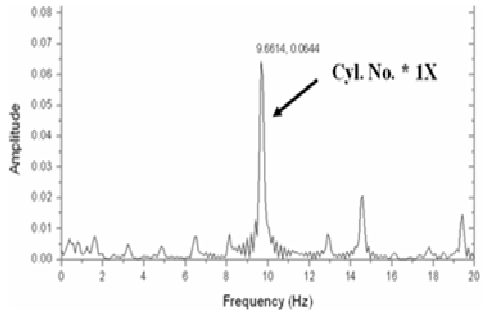

Fig. 5 FFT result at normal condition for 6S60MC test engine

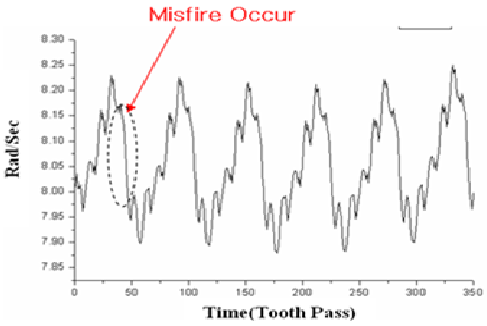

Fig. 6 RPM fluctuation at single cylinder misfire for 6S60MC test engine

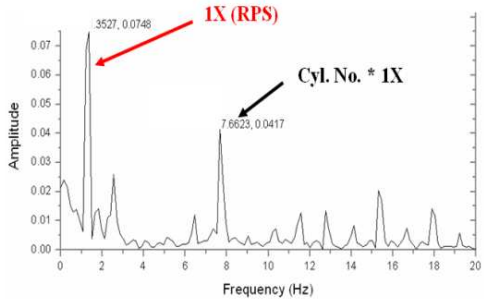

Fig. 7 FFT result at cylinder misfire for 6S60MC test engine

Table 2 Specification of tested ME engine

Item	Specification
Engine Model	7K80ME
Cylinder Number	7
Engine Output	25,480 kW
Bore	800 mm
Stroke	3,056 mm
Speed	70 RPM
MEP	18 bar
Firing Order	1-7-2-5-4-3-6

Table 3 Specification of simulated medium speed engine

Item	Specification
Engine Model	6H21/32
Cylinder Number	6
Engine Output	1,200 kW
Bore	210 mm
Stroke	320 mm
Speed	900 RPM
MEP	24.1 bar
Damper	Metaldyne. Co

EFR을 이용한 엔진 상태진단 기법이 현재 적용되고 있는 전자제어 ME 엔진에도 유용하게 적용되는지 확인하기 위하여 Table 2의 ME 엔진을 이용하여 테스트를 수행하였다. Fig. 8은 정상상태에서 테스트 엔진 크랭크 축 속도변화의 FFT 스펙트럼을 나타내고 있다. 이 경우 EFR 은 식 (5)의 0.03이다.

$$EFR = \frac{0.0014}{0.0419} = 0.03 \qquad (5)$$

테스트 엔진의 한 개 실린더에 착화실패를 일으킨 경우 각속도 변화 FFT 스펙트럼은 Fig. 9와 같다. 이때 EFR은 식 (6)의 0.73으로 커지게 된다.

$$EFR = \frac{0.0302}{0.0416} = 0.73 \qquad (6)$$

선박 추진용 저속엔진을 이용하여 EFR이 엔진

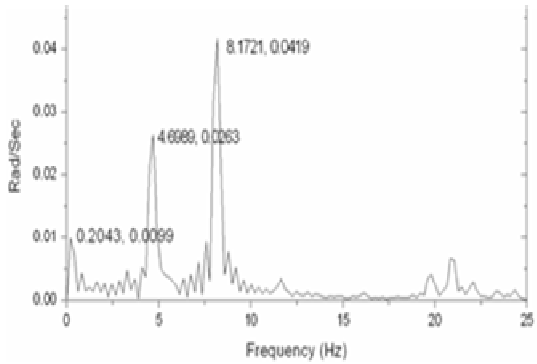

Fig. 8 FFT result of normal condition for 7K80ME test engine

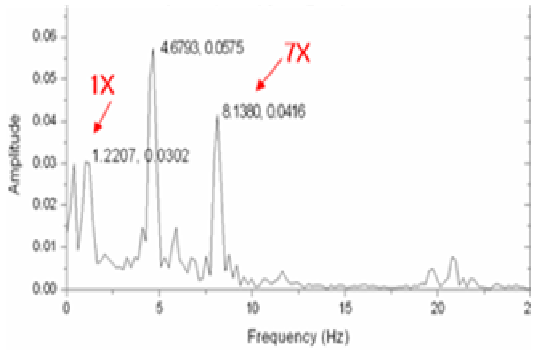

Fig. 9 FFT result of misfiring condition for 7K80 Me test engine

실린더 상태, 특히 엔진 실화를 찾아내는데 유용한 방법인 것을 확인하였다 실제 엔진으로 특정 실린더의 효율을 조절하는 테스트를 실시하는 것은 아주 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 EFR을 이용한 엔진 상태진단 기법이 엔진의 효율이 부분적으로 저하되었을 경우에도 이상을 감지할 수 있는지 확인하기 위하여 해석적인 검증을 수행하였다.

5. 중속엔진 대상의 EFR 기반 상태 진단의 실험적 진단

본 연구에서는 EFR이 엔진의 상태가 미세하게 악화되는 경우에도 엔진 상태를 진단하는데 유용한 기법인가를 확인하기 위하여 중속엔진에 대한 해석적 검증을 실시하였다. 실험적 기법으로 엔진 실린더 효율을 미세하게 조절하는 것이 현실적으로 어려우므로 여러 가지 시나리오를 적용한 실험을 수행하기 위하여 해석적 검증을 사용하도록 한 것이다. 본 연구에서는 현대중공업 고유 모델인 힘센 엔진을 대상으로 해석적 검증을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용된 힘센

Table 4 Result of EFR value depending on the cylinder condition

Cylinder Pressure (Efficiency)	45Hz (44.82)	7.5Hz (7.91)	15Hz (15.82)	EFR (7.5)	EFR (15)
#3 Cyl. Press (100%)	0.2411	0.0076	0.01	0.03	0.03
#3 Cyl. Press (75%)	0.2228	0.0682	0.06	0.31	0.25
#3 Cyl. Press (50%)	0.2032	0.133	0.11	0.65	0.53
#3 Cyl. Press (25%)	0.1858	0.1952	0.15	1.05	0.83
#3 Cyl. Press (0%)	0.1742	0.2472	0.18	1.42	1.06

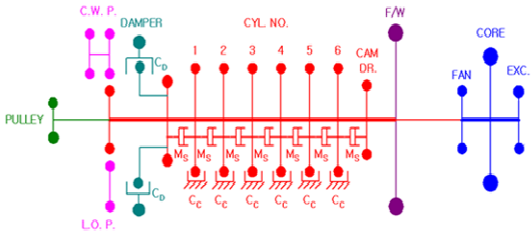

Fig. 10 Modeling of simulated mid-engine

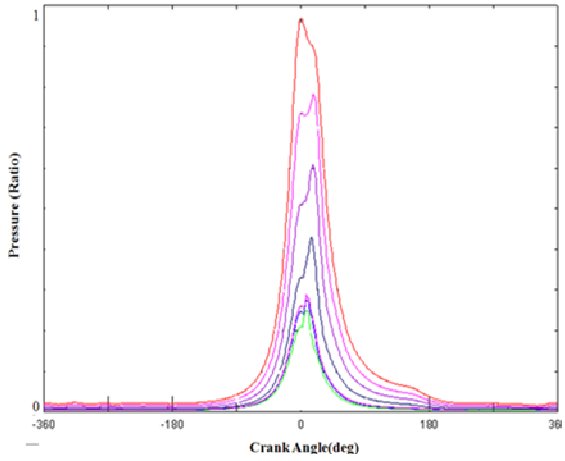

Fig. 11 Measured cylinder pressure depending on the engine load

엔진과 주변장치의 사양은 Table 3과 같다. 시뮬레이션은 선박해양연구소에서 자체 개발한 해석 프로그램 을 사용하여 실시하였다. 시뮬레이션에서는 대상 엔진의 주요 부위를 Fig 10과 같이 모델링 하였다.

중속엔진에 대하여 해석적 검증을 수행하기 위하여 본 연구에서는 100% 부하(Load)에서 엔진의 특정 실린더만이 효율이 저하되는 상황을 설정하였다. 즉, Fig. 10의 6기통 엔진에서 5개 실린더는 정상적인 작동을 하는데 반해서 1개의 실린더는 연소 효율이 저하된 경우 EFR이 이를 어떤 식으로 표현하는지 검증하고자 한 것이다. 이를 위해서는 연소 효율이 저하된 상태를 정확하게 재현하기 위하여 문제가 발생한 실린더에서 발생하는 압력 변화를 정확하게 입력하는 것이 가장 중요하다. 본 연구에서는 실험적으로 측정한 엔진의 압력 발생 패턴을 해석 데이터에 입력하여 보다 실제 엔진의 거동에 가까운 시뮬레이션을 수행하고자 하였다. Fig 11은 해석 대상인 엔진의 부하별 엔진 실린더 내부압력 변화와 크랭크 축 각도간 상관관계의 측정값을 표시한 것이다. Fig. 11의 각 압력은 정속운전 조건에서 0%, 25%, 50%, 75% 및 100%의 경우에 발생하는 압력변화를 보여주고 있다. Y축의 압력은 100% 압력 Load일 때의 압력을 100%로 했을 때 상대적인 압력 분포를 보여주고 있다.

해석 시 6기통 힘센 엔진의 5개 실린더는 100% 로드의 압력을 토출할 때 3번 실린더는 효율이 저하되는 것으로 가정하여 Table 4와 같이 75%, 50%, 25% 및 0%의 압력 효율을 보이도록 설정하였다. 엔진 실린더의 압력 효율 저하에 따른 각 조건별 EFR의 결과 값은 Table 4와 같다.

6. 결 론

효율 향상은 해상 운송 분야와 발전 플랜트 분야 등 저속엔진과 중속엔진을 사용하는 분야에서 계속적으로 요구되고 있는 상황이다. 이를 위해서는 엔진의 상태를 직관적으로 표현할 수 있는 파라메터가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 EFR을 엔진의 상태 진단이 가능한 주요 인자로 제시하였다. EFR 기법은 엔진 회전수 변화를 주파수 영역으로 변환하고 EFR를 계산하여 엔진의 상태를 분석하는 기법이다.

EFR을 이용하여 실린더 효율 저하뿐만 아니라 실린더 간의 부하의 불균등, 연소상태 불량 등의 문제를 문제발생 초기에 진단하는 것이 가능하며 엔진의 운전 및 수리보수(Maintenance)에 유용할 것으로 판단된다.

개발된 EFR 기법의 적용 가능성을 검증하기 위하여 저속엔진을 이용한 실험적 검증과 중속엔진을 이용한 해석적 검증을 실시하였다. 검증결과 EFR은 엔진 실린더 효율 변화에 대하여 민감하고 일관된 경향을 보였다. 따라서

EFR 기법을 엔진 상태 변화에 매우 민감한 진단 파라메터로 사용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) Motohiro, T. and Shigeji, T., 2004, “Performance and Combustion Analysis of High-speed Diesel Engine in Fast Ferry under Normal Service Condition," *CIMAC Conference*, Paper No. 43.

(2) Senichi, S., 2004, “Vibration Monitoring for Fault Diagnosis of Cylinders in Marine Diesel Engine," *CIMAC Conference*, Paper No. 69.

(3) Taner, T., 2003, "On-Line Individual Fuel Injector Diagnostics from Instantaneous Wngine Apeed Measurements," United States Patent, Patent No : US 6,546,912.

(4) Jianguo, Y. and Lijun, P., 2001, “Fault Detection in a Diesel Engine by Analyzing the Instantaneous Angular Speed," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 15, pp.549~564.