

디젤발전기 엔진 상태 진단 기술의 발전소 적용 연구

A Study on the Power Plant Application of Engine Condition Diagnosis Technology for Diesel Generator

최광희** · 이상국**

Kwang-Hee Choi** and Sang-Guk Lee**

(접수일 : 2013년 06월 24일, 수정일 : 2013년 08월 8일, 채택확정 : 2013년 08월 9일)

Abstract: Diesel generator of nuclear power plant has a role for supply of emergency electric power to protect reactor core system in event of loss of off-site power supply. Therefore diesel generator should be tested periodically to verify the function that can supply specified frequency and voltage at design power level within limited time. For this purpose, appropriate maintenances in case that abnormal conditions were found are required in allowed time. In this paper, results of development of engine condition diagnosis technology and study on power plant of its technology for diesel generator are described.

Key Words : Diesel Generator, Abnormal Signature, Engine Condition, Pressure Curve, Exhaust Valve

1. 서 론

발전소 디젤발전기 엔진 상태의 신호 분석에는 연소, 진동 및 초음파 분석이 중요한 비중을 차지한다. 연소 분석은 디젤발전기 엔진의 개별 실린더에 대한 연소 성능에 대한 정보를 제공한다. 진동 및 초음파 분석은 이벤트 타이밍과 기계적 상태에 대한 정보를 알려준다. 이들 신호는 디젤발전기 엔진의 운전에 영향을 미치지 않고 수집할 수 있다. 많은 시간이 소요되는 주기적인 분해정비 프로그램과 비교하여 엔진 상태의 신호분석 결과를 이용한 정비 프로그램은 디젤발전기 엔진의 신뢰도와 가용성을 증진시키는 것으로 보고되고 있다. 즉, 엔진의 고장을 사전에 예방하여 디젤발

전기의 신뢰도를 향상시키며, 주기적인 정비로 발생할 수 있는 분해 및 조립 시의 인적실수, 직관적인 검사 및 부품 교체를 방지하여 디젤 발전기의 신뢰도를 향상시킨다. 또한, 유지 보수를 위한 엔진 정지 시간이 줄어들게 되어 디젤발전기의 가용성을 향상시키게 된다. 이를 위해 미국에서는 엔진상태 신호측정 장비를 개발하여 많은 발전소에서 사용하고 있다.

본 논문에서는 엔진의 상태를 감시하고 평가하기 위한 엔진 상태 신호 분석 기술을 자체 개발한 결과와 발전소 현장의 디젤발전기에 적용한 결과를 기술하였다.

*† 최광희(교신저자) : 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : choikhi@khnpc.co.kr, Tel : 042-870-5512
**이상국 : 한국수력원자력(주) 중앙연구원

*† Kwang-Hee Choi(corresponding author) : Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Company, LTD.
E-mail : choikhi@khnpc.co.kr, Tel : 042-870-5512
**Sang-Guk Lee : Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Company, LTD.

2. 본 론

2.1 엔진 상태 신호 분석 기술 개발

고온 고압상태 (약 500 °C, 110 bar)에서 운전되는 디젤발전기 엔진의 16개 실린더 각각의 상태를 진단하기 위한 데이터 수집 및 평가를 수행하는 엔진 상태 신호 분석시스템을 개발하였다.

엔진 상태를 진단하기 위한 측정 물리량은 실린더 내부 연소 최고압력, 흡기와 배기 밸브의 구동 시간을 확인하기 위한 초음파와 진동 신호, 연료 펌프 후단의 온도이다. 각 상태량은 크랭크 각도를 동기시켜 신호 발생시점을 각도 좌표로 읽을 수 있게 하여야 한다. 위의 신호를 측정하기 위해서는 데이터 취득 시 고속의 샘플링이 가능하고, 여러 채널을 동시에 측정 시 채널 간 측정 시간이 동기화 되어야 한다. 또한 측정 신호의 노이즈 차단에 의한 간섭 방지와 신호 왜곡을 막을 수 있는 신호 안정화가 필수이다. 디젤발전기 엔진 상태의 신호 분석시스템은 운용자가 엔진의 여러 위치를 측정하기 위하여 이동이 용이하고 견고하게 제작 되어야 한다. Fig. 1에서 나타난 것과 같이 디젤발전기 엔진 상태진단을 위한 센서는 압력, 진동, 초음파, 온도, 타코미터센서로 구성된다. 압력센서는 엔진 내부의 폭발압력을 계측하며, 진동센서, 초음파 센서는 밸브의 움직임 감지한다. 온도센서는 배기가스의 온도를 측정한다. 타코센서는 모든 계측신호의 측정 시점을 파악하기 위한 목적으로 설치된다.

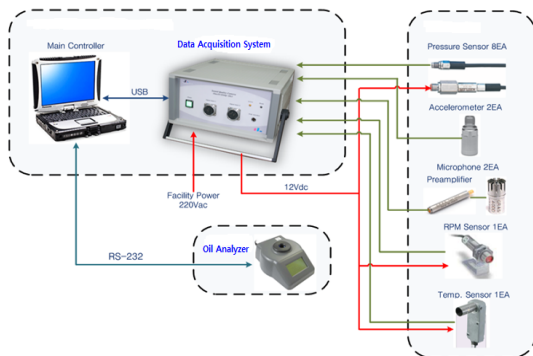


Fig. 1 Construction of engine condition diagnosis system for diesel generator

시험대상 디젤발전기는 총 16개의 실린더로 구성되어, 상태 신호 분석시스템 운영자는 1개의 실린더씩 측정하여 16회를 측정한다. 다만, 압력센서는 측정의 편의를 위하여 8개의 실린더를 동시에 측정하여 총 2회 측정한다. 타코미터는 모든 측정에 포함되어 각 측정의 상대적인 비교를 가능하게 한다. 디젤발전기의 윤활유 상태점검은 별도의 분석기를 이용하여 수행되며, 디젤발전기 상태 신호 분석시스템은 이 정보를 분석기로부터 수령하여 분석결과로 표현한다. 계측시스템은 설치된 센서에 파워를 공급하고 측정된 신호의 증폭 및 필터링, 아날로그-디지털 신호변환 등의 역할을 수행한다.

계측시스템에서 아날로그에서 디지털로 변환된 신호는 주제어기에서 분석된다. 주제어기 내부에는 계측과 분석 및 보고를 위한 비상디젤발전기 상태진단 소프트웨어가 탑재된다. 상태진단 소프트웨어는 분석된 데이터를 정해진 규격에 따라 보고서 형태로 출력한다.

Fig. 2는 디젤엔진 상태 신호 분석시스템의 메인 화면이다. 실린더별로 연소압력 곡선, 실린더 블록의 진동 및 초음파신호, 그리고 필요한 부위의 진동초음파 신호를 추가로 나타낼 수 있도록 하였다. 그리고 연료분사 시점과 연소시작시점을 측정 가능하도록 각도대비 압력상승률을 계산하여 나타내도록 하였다.^{1),2)}

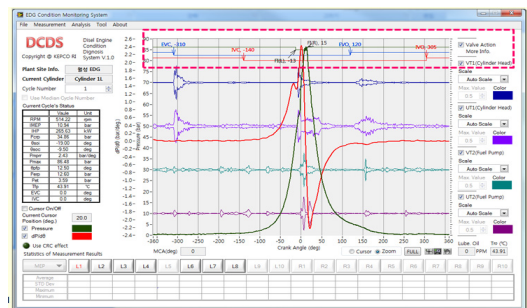


Fig. 2 Main view of engine condition diagnosis system for diesel generator

엔진 상태 신호 측정시 기준이 되는 것은 흡입, 압축, 폭발, 배기의 4행정이 일어나는 동안 각 실린더별 크랭크축 각도이다. 이는 연료분사시점, 연

소시작시점, 최대 폭발압력 도달 시점을 계측할 수 있도록 하여야 하기 때문이다. 이를 위해 크랭크 속도를 360° 회전마다 최소 매 1°에 1회씩 측정하여야 한다. 이는 크랭크축에서 반사되어 나오는 신호를 취득하여 측정하고자 하는 엔진 상태량을 각도별 좌표로 정확히 나타내어야 하기 때문이다. 진동 및 초음파 신호 역시 크랭크 각도별로 크기를 나타냄으로써 흡, 배기 밸브의 열리고 닫히는 시점을 계측하여야 한다. 이를 위해 진동/초음파의 반복측정 횟수 입력기능과 중간값을 산출하고 표시 할 수 있는 기능을 갖도록 하였다. 각 실린더별 주요 상태량을 최대값, 최소값, 표준편차 그리고 편차(최대-최소)를 산출할 수 있다. 측정 결과는 보고서 양식으로 출력하여 각 실린더별 평균 최대 폭발시점, 연소분사시점, 연소시작시점, 및 흡배기 밸브 개,폐 시점을 산출할 수 있게 하고 비교 분석할 수 있다.

Fig. 3은 엔진 실린더의 체적(volume) 대비 각도(angle) 곡선에 대한 엑셀 출력 기능을 나타내었다. 이는 각 실린더별 출력에 사용된다.

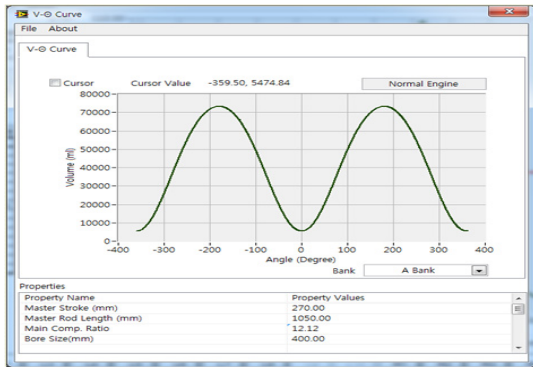


Fig. 3 Excel sheet for V-θ curve of engine cylinder

실린더별 크랭크 각도에 대한 초기치 보정 기능을 갖도록 하였다. 이는 각 신호가 720°에서 한 행정이 일어나는데 신호가 360° shift되는 경우가 발생한다. 이를 보정하기 위한 기능을 위해 Fig. 4에서 속도센서의 파형을 자동 감지하는 기능과 측정후 shift된 실린더에 대해 각도보정을 할 수 있는 기능을 Fig. 5와 같이 구현하였다.

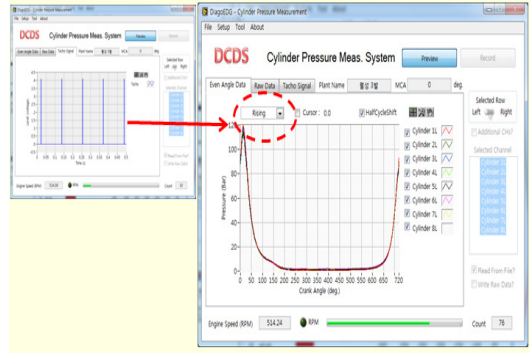


Fig. 4 Auto detection for wave of tacho sensor

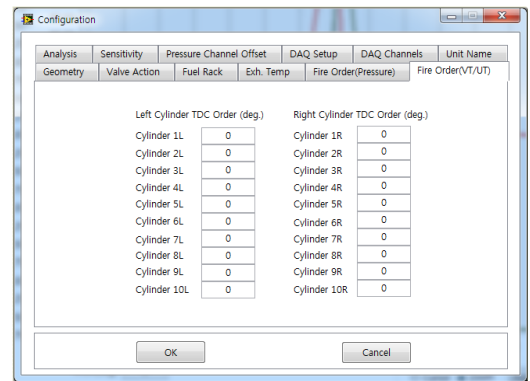


Fig. 5 Compensation of angel for vibration-ultrasonic signal

2.2 현장 시험적용 결과 분석

기존 엔진상태 신호분석 RT-9260 장비와 개발된 엔진상태 신호분석 시스템 DCDS(diesel engine condition diagnosis system)의 성능을 비교분석하기 위하여 디젤발전기 엔진 형식별 및 엔진별 중요변수를 취득하였다. 엔진 형식 대상은 A형과 B형 엔진이며, 주요지표 성능을 비교하였다. 기존 장비와 개발된 시스템에서 취득한 데이터 값에 대해 비교 분석한 결과 상호 유사한 특성을 나타내었다. 그러나 측정방법, 압력 센서 특성 및 회전각 변환 방법으로 인하여 취득된 데이터 값에서 차이가 발생되었다. 진동 및 초음파 신호 분석은 정량적인 것보다는 패턴을 기반으로 한 정성적인 방법으로 비교분석하였다.

기존 장비(RT-9260)는 엔진의 상태를 분석하기

위해 미국의 많은 발전소에서 2000년대 초부터 사용하기 시작하여 신뢰성이 입증되었다고 볼 수 있다. 이 장비는 엔진별 연소 최고압력과, 초음파 및 진동신호를 측정하여 엔진상태를 분석한다. 그러나 기존장비는 소스프로그램의 미공개로 측정 데이터를 데이터베이스화하는데 어려움이 있다. 그리고 한 실린더씩 측정함으로써 측정의 동시성이 결여되어 있는 단점이 있다. 반면에 DCDS는 데이터를 데이터베이스화하여 경향분석을 용이하게 할 수 있고, 8개 실린더를 동시에 측정함으로써 측정의 동시성을 갖도록 하였다.

본 절에서는 기존 장비의 센서에서 취득한 진폭과 DCDS의 센서에서 취득한 밸브 닫힘 진폭을 기준으로 데이터 값을 취득하여 비교분석하였다. 배기밸브 닫힘(EVC, exhaust valve closure), 흡기밸브 닫힘(IVC, intake valve closure) 각도가 엔진 외부 노이즈로 인하여 식별하기 곤란한 부분은 분석가의 판단에 의하였으며, 취득된 데이터 값을 엑셀 차트를 사용하여 비교 분석한 결과 유사한 진동 패턴이 발생하는 것을 알 수 있었다.²⁾ 개발한 엔진 상태 신호 분석시스템을 이용하여 A형 및 B형 디젤발전기 엔진에서 측정하였다. A, B형 모두 4행정 16기통이며, A형, B형 엔진은 각각 PC2.5V형과 DSRV16형이다.

2.2.1 A형 엔진 분석결과

엔진 상태 신호 분석시스템의 주요 분석지표에 대한 측정결과를 Table 1에 나타내었다. 기존 외국장비(R)의 측정결과와 비교하였을 때 연소 최고압력각도(Θ_{PPF}) 및 배기밸브 닫힘 각도(Θ_{EVC})는 기준값을 만족하여 양호한 성능을 나타내고 있다.

Table 1 Measurement results of developed system(1)

Type	Items	Baseline	Measured Value (avg)	
			R	DCDS
A	Θ_{PPF}	(Designed) $\pm 2^\circ$	7.10	7.23
	Θ_{EVC}	$-320 \pm 10^\circ$	-310.9	-309.3

2.2.2 B형 엔진 분석결과

엔진 상태 신호 분석시스템의 주요 분석지표에 대한 측정결과를 Table 2에 나타내었다. 기존 외국장비의 측정결과와 비교하였을 때 연소최고압력각도 및 배기밸브 닫힘 각도는 기준값을 만족하여 양호한 성능을 나타내고 있다.

Table 2 Measurement results of developed system(2)

Type	Items	Baseline	Measured Value (avg)	
			R	DCDS
B	Θ_{PPF}	(Designed) $\pm 2^\circ$	8.94	10.79
	Θ_{EVC}	$-310 \pm 10^\circ$	-313.0	-310.8

위의 상태 신호 측정데이터는 디젤발전기 타입별로 차이가 있어 비교 검증을 위해서는 더 많은 기간의 시험이 필요하다고 판단된다.

2.3 실린더별 엔진 상태 신호 비교

대표적으로 한 발전소를 선택하여 시험을 수행하고 그 결과를 실린더별로 비교하였다. Fig. 6과 같이 연소 최고압력이 발생하는 시점을 나타내는 Θ_{PPF} 는 거의 동일한 경향과 1° 내지 2° 의 차이를 보이고 있다.

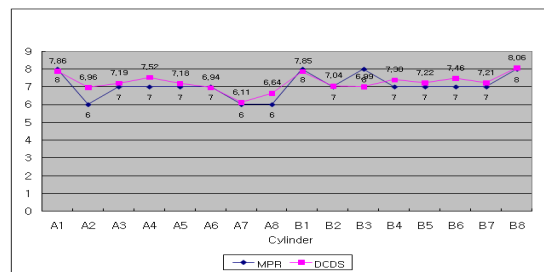


Fig. 6 Comparison of Θ_{PPF} data

Fig. 7에서 보면 배기밸브의 닫힘 동작시점을 확인할 수 있는 EVC는 1~2개 실린더를 제외하고 차이가 거의 없었으며 평균값은 2도 범위 이내인 것으로 나타났다.

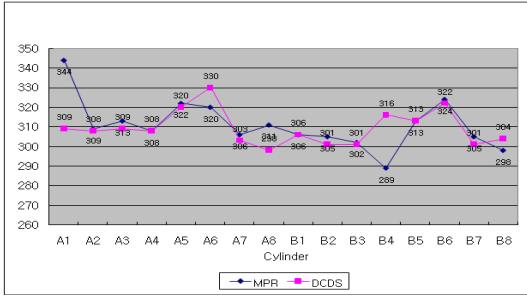
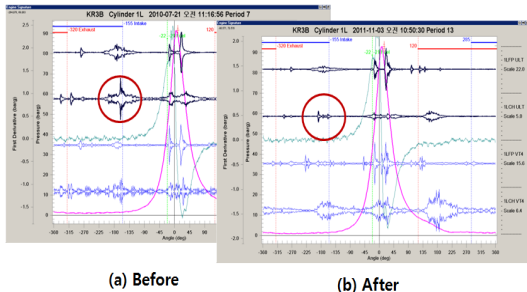


Fig. 7 Comparison of EVC data

2.4 상태 신호 분석 및 진단 사례

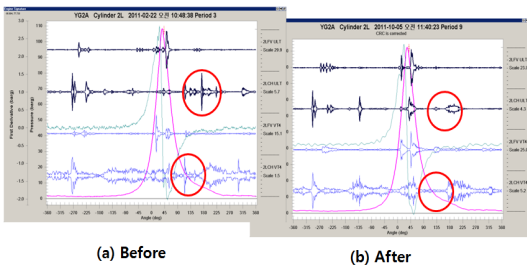
발전소에서 디젤발전기 계획예방정비기간 전후에 엔진상태 신호를 측정하여 정비작업 전/후의 신호를 비교하였다. 실린더별 엔진의 상태신호를 그래픽 화면으로 나타내어 서로 비교할 수 있다.

아래 Fig. 8에서는 정비전 흡기밸브에서의 bouncing 현상이 나타났으나 밸브의 분해 점검시 밸브 시트의 청소를 수행한 결과 bouncing 현상이 없어진 것으로 나타났다. 이는 밸브 시트면의 침착된 탄소에 기인한 것으로 평가되었다.



(a) Before (b) After

Fig. 8 Improvement for bouncing of intake valve



(a) Before (b) After

Fig. 9 Comparison before/after main bearing exchange

다음 사례는 메인 베어링의 교체 전후의 진동 및 초음파 신호에서 측정된 결과를 아래 Fig. 9에서 보여주고 있다. 베어링 교체 전에는 실린더의 90~180° 사이에서 큰 이벤트가 나타났으나 베어링 교체 후에는 정상적인 신호로 계측되었다. 이에 대한 원인은 추가 적인 분석이 필요하다.

디젤엔진에서 피스톤과 실린더벽 사이의 밀봉기능이 상실되면 연료, 공기 및 배기가스가 실린더 라이너와 피스톤링 사이에서 누설된다. 이는 실린더 내부 압력이 매우 높기 때문에 압력을 유지 하지 못하는 경우 압력 감소에서 뿐 아니라 진동, 초음파 신호에서도 이상상태를 알 수 있다. 이러한 경우 엔진 상태 신호 분석 시스템을 사용하면 이러한 현상을 진단할 수 있다. 아래 Fig. 10은 해외 발전소에서 측정된 데이터에서 측정된 자료를 인용하였다.³⁾

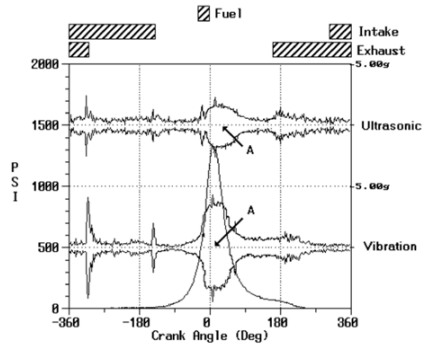


Fig. 10 Signal of engine status for blowby

3. 결 론

고온 고압상태에서 운전되는 디젤발전기 엔진의 16개 실린더 각각의 상태를 진단하기 위한 데이터 수집 및 평가를 수행하는 엔진 상태 신호 분석시스템을 개발하였다.

1. 엔진 상태 신호 분석시스템은 엔진의 연소압력, 진동 및 초음파신호, 그리고 위의 신호와 연동되는 크랭크 축 각도 신호를 측정할 수 있다.

2. 개발된 시스템은 기존 장비와 비교 측정된 결과, 연소 최고압력이 발생하는 시점을 나타내는 Θ_{PPF} 가 엔진 형에 따라 약 0.2도 내지 2도 정도 차

이가 발생하였다.

3. 배기밸브의 닫힘 신호는 기존 장비와 2도 정도 차이가 있었으나 모두 기준값 대비 만족한 수준으로 판단된다.

4. 실린더별로 비교한 결과 연소 최고압력 각도 (Θ_{PEP})는 거의 동일한 경향과 1° 내지 2°의 차이를 보이고 있다.

5. 실린더별로 비교한 결과 배기밸브 닫힘신호 (EVC)는 1~2개 실린더를 제외하고 차이가 거의 없었으며 평균값은 2도 범위 이내인 것으로 나타났다. 따라서, 개발된 엔진 상태 신호 분석시스템은 발전소 비상 디젤발전기 엔진의 상태를 분석하고 진단하기 위한 데이터를 수집하고 분석하는데 유용하게 사용할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문에서 사용한 상태 분석기술을 발전소에 적용하기 위하여 실시한 시험에 적극적으로 협조하여 주신 해당 발전소 실무자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

References

1. K.H. Choi et al, 2012, "Development of Engine Condition Diagnosis Technology and test database for Emergency Diesel Generator at Nuclear Power Plant", KHNP, 2nd Interim Project Report, Vol 1, pp 40-53
2. K. H. Choi, S. G. Lee and Y. S. Choi, 2011 "Study on Application and Analysis of Engine Condition Signature for Diesel Generator in Power Plant", Proceedings of the Korea Society for Power System Engineering Fall conference. pp 267-270
3. M. O'Connell et al, 2008, "KEPRI Engine Signature Analysis Training Manual" KEPRI, MPR-3171 Rev1, pp 7-9