

# 발전용 비상디젤발전기 엔진 상태진단 프로그램 개발 연구

## A Study on the Development of EDG Engine Condition Diagnosis Program in Power Plant

이상국\*† · 김대웅\*  
Sang-Guk Lee\*† and Dae-Woong Kim\*

(Received 21 August 2015, Revision received 08 September 2015, Accepted 08 September 2015)

**Abstract** : The reliable operation of onsite emergency diesel generator(EDG) should be ensured by a conditioning monitoring system designed to maintain, monitor and forecast the reliability level of diesel generator. The purpose of this paper is to develop condition diagnosis algorithm(logic) and analysis program of engine for the accurate diagnosis in actual condition of emergency diesel generator engine. As a result of this study, we confirmed that developed engine condition diagnosis algorithm and analysis program could be efficiently applied for actual EDG engine in nuclear power plant.

**Key Words** : Emergency Diesel Generator, Engine, Condition Diagnosis, Diagnosis Algorithm, Analysis Program, Nuclear Power Plant

### 1. 서 론

현재까지의 비상디젤발전기(EDG, emergency diesel generator) 신뢰도 관리는 정기점검 및 신뢰도 프로그램을 통하여 수행되어져 왔다. 신뢰도 프로그램에서는 성능감시 및 제작사 권고지침에 따른 주기적 정비를 기반으로 하고 있다. 그러나 제작사 권고지침에 따른 주기적 정비는 필요 이상의 과도한 분해정비를 권고하고 있기 때문에 설비의 운영 및 관리측면에서 다소 비효율적이라고 할 수 있다. 따라서 이를 개선하기 위하여 미국 등 선진국에서는 1990년대 말부터 기기의 상태에 기반한 정비를 수행하는 상태기반

정비(CBM, condition based maintenance) 체계로 전환하여 수행하고 있다.<sup>1-2)</sup> 이 중에 엔진 상태기반정비는 각 엔진별 실린더의 성능상태, 배기가스 상태, 연료랙 위치 및 윤활유 계통의 상태 등을 토대로 엔진의 상태를 진단 및 감시함으로써 엔진의 건전성을 확인하는 방법이다.<sup>3-4)</sup> EDG 엔진의 및 주요 계통의 상태를 정밀하게 진단하기 위해서는 엔진 시험데이터 취득 전용 시스템 개발 및 취득된 엔진시험 데이터를 효율적으로 분석할 수 있는 EDG 엔진 상태진단기술과 상태진단 프로그램이 필요하다. 엔진 시험데이터 취득 전용 시스템은 엔진의 상태진단에 전문적으로 사용할 수 있도록 개발되어야 하고, 엔진 상

\*† 이상국(교신저자) : 한국수력원자력(주) 중앙연구원  
E-mail : Sangguklee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5514

\* 김대웅 : 한국수력원자력(주) 중앙연구원

\*† Sang-Guk Lee(corresponding author) : Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

E-mail : Sangguklee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5514

\* Dae-Woong Kim : Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

태진단기술은 엔진의 연소상태, 흡배기 밸브의 동작상태, 연료펌프의 동작상태, 그리고 엔진 헤드부위의 이상 초음파 및 진동신호, 캠 롤러의 이상상태 등을 진단할 수 있으며, 엔진 상태에 따른 신호 측정 및 분석이 가능한 기술로의 개발이 필요하다.

그리고 상태진단 프로그램은 엔진 시험데이터 취득시스템으로부터 취득된 압력, 초음파, 진동 시험 데이터와 각 디젤엔진 및 주요 계통 운전 변수를 체계적으로 관리 및 분석할 수 있는 데이터베이스 구축과 EDG 엔진 및 주요 계통의 상태를 평가할 수 있는 상태진단이 가능하도록 개발되어야 한다.

따라서 우리 연구팀은 개발된 엔진 시험데이터 취득 전용 시스템 및 엔진상태진단 기술을 토대로 EDG 엔진 상태진단 프로그램(ECDP, engine condition diagnosis program)을 개발하게 되었다.

본 논문은 개발된 EDG 엔진 상태진단 프로그램의 상태진단 프로그램 모듈, 상태진단 분석 알고리즘 개발 결과 및 현장적용의 예를 소개하고자 한다.

## 2. 상태진단 프로그램 구성 및 모듈

### 2.1 엔진정보 관리모듈

ECDP의 가장 기본이 되는 모듈로써 진단시험 대상이 되는 전체 EDG에 대한 사양을 비롯한 관련 정보를 관리하며 상태진단 시험자 또는 상태진단분석 전문가가 해당 업무를 수행할 시에 필요한 정보를 적시에 제공할 수 있도록 한다. 엔진정보 화면 사용자 인터페이스는 발전소, 호기, 계열, 엔진타입 및 엔진기능위치 등을 검색조건으로 입력하여 조회할 수 있도록 구현하였으며, 목록검색과 특정엔진에 대한 세부검색이 가능하도록 하였다.

또한 공장시험 데이터 조회 화면 사용자 인터페이스는 발전소, 호기, EDG 계열, 엔진타입(type), 엔진 S/N(serial number), 운전변수, 공장시험 일자, 부하분담, 제동마력 및 제동평균 유효압력을 검색하여 조회할 수 있도록 하였다.

### 2.2 진단시험 관리 모듈

엔진의 상태진단분석을 위하여 ECDP에 입력되는 진단시험 데이터를 수집하는 모듈로써 진행된 진단 시험에 대한 이력관리를 통하여 진단시험 데이터를 조회하는 진단시험 현황관리 모듈과 데이터취득시스템을 통하여 수집된 엔진진단 시험데이터와 EDG 운전변수에 관련된 데이터를 입력 관리하는 모듈이 포함되어 있다. 엔진 진단시험데이터는 정량적 데이터와 정성적 데이터를 구분하여 입력할 수 있도록 구현하였으며, 정량적 데이터는 엑셀로 저장된 파일을 등록할 수 있도록 설계하였다.

또한 각 진단시험 인자별로 엔진평균과 분산 및 표준편차 등을 자동으로 계산해 주는 기능도 내장하였다. 지시마력, 평균유효압력 등과 같은 정량적 데이터는 각 실린더별로 데이터가 입력되면 엔진 전체,뱅크별 및 실린더별로 평균값, 최대값, 최소값 및 분산 등이 자동적으로 산출되도록 프로그램을 개발하였으며, 정성적 데이터는 진단시험시스템에서 작성된 그래프 이미지를 종류별로 쉽게 저장 관리될 수 있도록 프로그램을 설계하였다.

### 2.3 상태진단 분석 모듈

상태진단 분석모듈에는 수집된 진단시험데이터가 적용되어 엔진의 상태를 분석하는 상태진단 로직(분석알고리즘)이 내장되어 있다. 진단시험 관리모듈에서 수집된 데이터를 상태진단 분석로직에 대입하여 EDG 엔진의 상태를 분석하는 프로그램으로 구성되어 있다. 엔진 상태진단 매트릭스가 내장되어 있어 설정된 알고리즘에 정량적 데이터와 정성적 데이터 및 운전변수 데이터를 적용하면 해당 EDG 엔진에 대한 상태진단이 가능하다.

## 3. 상태진단 분석 알고리즘

ECDP의 상태진단 분석모듈에는 수집된 진단 시험데이터가 적용되어 엔진의 상태를 분석하는 분석 알고리즘에 해당하는 상태진단 로직이 내장되어 있다. 또한 상태진단 분석모듈은 시스템을 통해 엔진의 상태를 정확하게 분석하기 위하여, 수집된 진단시험 데이터와 운전변수 데이터

및 기준치 그리고 분석전문가의 판단 등이 적용되는 진단 알고리즘 매트릭스를 시스템으로 구현한 프로그램이다. 평가표와 기준값을 통해 진단한 결과를 근거로 각 중요계통과 관련된 이상 상태에 대한 원인을 다중질문방식으로 평가하거나 확인하기 위한 논리도가 적용되어 있다.

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에 연료분사계통의 연료펌프 내부누설, 흡기계통의 흡기베어링 로커 아암 베어링 손상, 배기계통의 배기밸브의 틈새과소, 엔진본체 계통의 실린더 라이너 긁힘 및 파임, 터보차저 계통의 로터 카본 축적, 발전기계통의 발전기 베어링 손상의 대표적인 계통별 주요 상태진단 분석 알고리즘을 각각 나타내었다.

Fig. 1은 연료분사계통의 연료펌프 내부누설을 진단하는 논리도를 나타낸 것이다. 최대연소압력 저하, 최대연소 압력각의 느림, 연료분사시점(진동 및 초음파신호로 측정)의 느림에 따라 증상이 있음을 감지하고 실린더 배기가스 온도가 낮는지 확인하여 연료펌프 내부누설을 진단하게 되는 논리도이다.

Fig. 2는 흡기계통의 흡기베어링 로커 아암 베어링 손상유무를 진단하는 논리도이다. 진동 및 초음파 신호로 흡기밸브의 단힘 상태(속도 및 단힘신호 발생여부)의 비정상조건, 낮은 최고폭발 및 압축참조 압력으로 손상유무를 판단하고 이상소음 발생시 최종 베어링 손상으로 진단한다. 이때 밸브가 작동하지 않거나 연소가 되지 않는 현상이 나타난다.

Fig. 3은 배기계통의 배기밸브의 틈새과소를 진단하는 논리도이다. 진동 및 초음파 신호에서 배기밸브의 단힘속도가 빠르는지 또는 최종 배출압력이 높은지를 평가하여 틈새과다를 판단하고, 이와 동시에 이상소음이 발생시 최종 배기밸브 틈새과다로 진단한다. 이때 밸브의 열림이 느리고 단힘이 빨라지는 현상이 나타나게 된다.

Fig. 4는 엔진 본체계통의 실린더 라이너 긁힘 및 파임을 진단하는 논리도이다. 상사점 및 하사점 주변 기준으로 같은 각도에 진동 및 초음파 신호가 있는지를 보고 실린더 라이너 긁힘 및 파임을 의심하고 이와 동시에 크랭크 챔버압력이

높은지, 냉각수 온도가 높은지, 실린더 배기가스 온도가 낮은지, 윤활유에 금속 마모입자성분이 있는지, 윤활유에 금속 철분 성분이 있는지에 따라 실린더 라이너 긁힘 및 파임으로 진단한다.

Fig. 5는 터보차저 계통의 로터 카본 축적을 진단하는 논리도를 나타낸 것이다. 터보차저 입구 및 출구의 배기가스 온도가 높은지와 터보차저 케이싱의 진동이 높은지를 측정하여 터보차저 로터의 카본 축적으로 진단하며, 이때 터보차저의 회전수 및 엔진 흡입공기 압력 저하가 발생하게 된다.

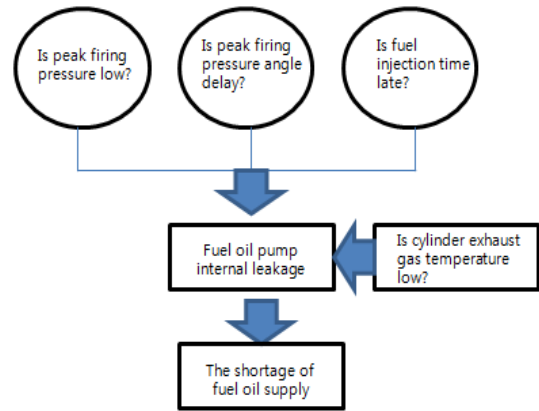


Fig. 1 Fuel pump internal leakage in fuel injection subsystem

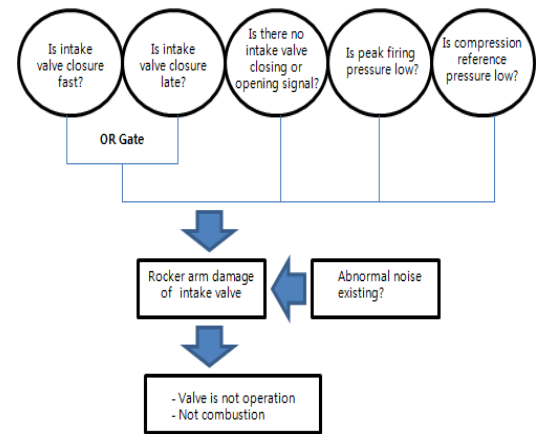


Fig. 2 Intake valve rocker arm bearing damage in intake subsystem

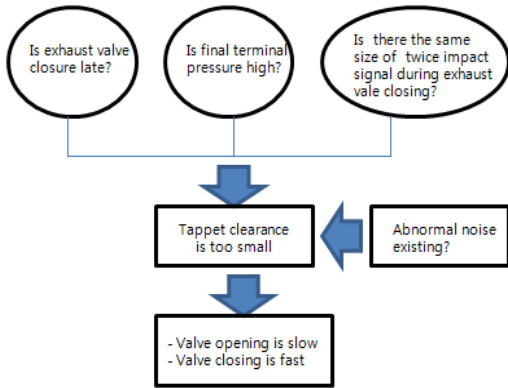


Fig. 3 Exhaust valve tappet clearance in exhaust subsystem

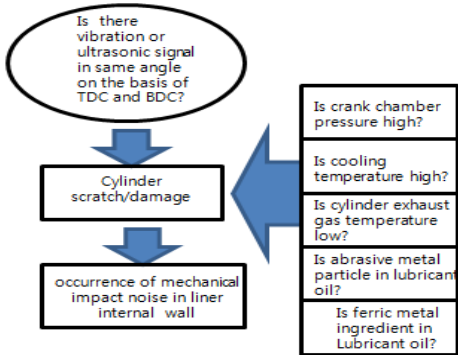


Fig. 4 Cylinder liner scratch in engine subsystem

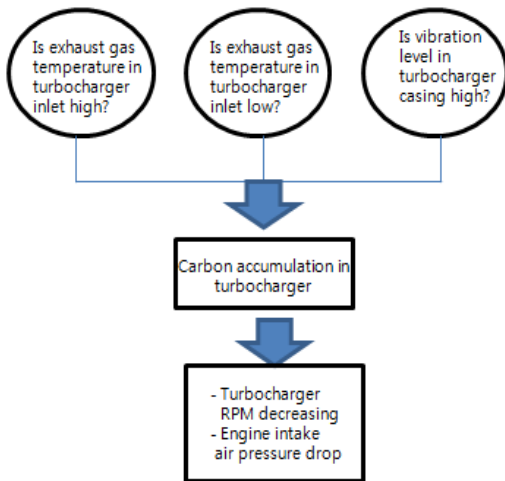


Fig. 5 Rotor carbon accumulation in turbocharger subsystem

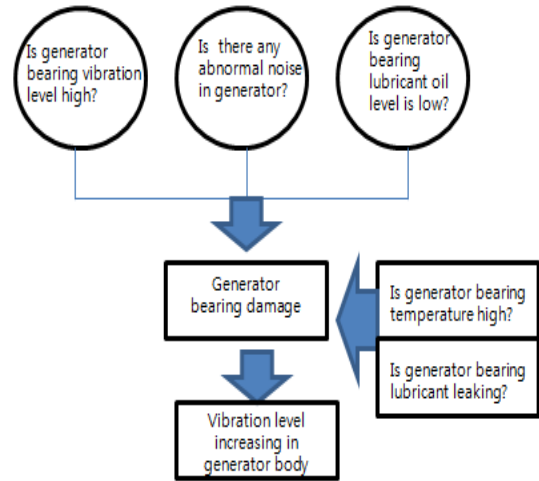


Fig. 6 Generator bearing damage in generator subsystem

Fig. 6은 발전기계통의 발전기 베어링 손상을 진단하는 논리도를 나타낸 것이다. 발전기의 베어링의 진동 및 발전기 내부의 초음파 신호를 측정하여 진동이 높은지와 이상음이 있는지를 확인하고 이와 동시에 발전기 윤활유 유위가 낮은지를 관찰하여 베어링손상의 증상을 감지하고 높은 베어링 온도 발생 및 베어링 윤활유 누유시 최종적으로 베어링손상으로 진단한다. 이때 발전기 본체의 진동이 증가하게 된다.

### 3. 상태진단분석 데이터 소스

ECDP의 상태진단을 위한 로직에 적용되는 데이터에는 수집된 진단시험 데이터, 운전변수 데이터 및 기준치 그리고 분석전문가의 판단 등이 있다. 프로그램에서는 데이터 소스(data source)를 분석하여 자동적으로 데이터를 가져올 항목과 상태진단분석 전문가가 입력할 항목을 분류하여 제시함으로써 상태진단분석이 좀 더 효과적으로 진행되도록 질문표 작성부분을 설계하였다. 전문가의 판단(yes/no)을 필요로 하는 데이터항목에는 해당 이미지(그래프) 데이터를 쉽게 호출할 수 있도록 구현하였다.

Table 1, Table 2 및 Table 3에 흡기계통, 터보차저 계통 및 연료분사계통의 증상에 따른 상태 진단에 필요한 데이터 소스에 대한 예시를 각각 나타내었다.

Table 1 Symptoms and data source for air injection subsystem

No	Symptoms	Data source
1	Is intake valve closure fast? (Vibration & Ultrasonic signal)	Intake valve closing angle
2	Is intake valve closure late? (Vibration & Ultrasonic signal)	Intake valve closing angle
3	Is intake valve closure signal small? (Vibration & Ultrasonic signal)	Analyst judgment (Yes/No)
4	Is there no signal opening or closing? (Vibration & Ultrasonic signal)	Analyst judgment (Yes/No)
5	Is intake air temperature high?	Combustion air temperature
6	Is intake air temperature low?	Combustion air temperature
7	Is intake air pressure low?	Combustion air pressure
8	Is there various type of impact signal decreasing amplitude as intake valve closure? (Vibration & Ultrasonic signal)	Analyst judgment (Yes/No)
9	Is there the same size of twice impact signal during exhaust valve closing? (Vibration & Ultrasonic signal)	Analyst judgment (Yes/No)
10	Is signal amplitude level during exhaust valve closing too high? (Vibration & Ultrasonic signal)	Analyst judgment (Yes/No)

Table 2 Symptoms and data source for turbocharger subsystem

No	Symptoms	Data source
11	Is exhaust gas temperature in turbocharger inlet high?	Exhaust gas temperature of turbocharger inlet
12	Is exhaust gas temperature in turbocharger outlet high?	Exhaust gas temperature of turbocharger (fan) outlet
13	Is cooling water temperature in turbocharger casing high?	Cooling water temperature of turbocharger casing
14	Is lubricant oil in turbocharger leaking?	Analyst judgment (Yes/No)
15	Is lubricant oil pressure in turbocharger inlet low? (pressure sensor needed)	Lubricant oil pressure of turbo fan
16	Is lubricant oil level in turbocharger inlet low? (See sight-glass)	Analyst judgment (Yes/No)
17	Is turbocharger RPM in excess of reference value?	Analyst judgment (Yes/No)
18	Is vibration level in turbocharger casing high?	Analyst judgment (Yes/No)
19	Is abnormal noise in turbocharger?	Analyst judgment (Yes/No)

Table 3 Symptoms and data source for fuel oil injection subsystem

No	Symptoms	Data source
20	Is fuel oil injection time late?(Vibration & Ultrasonic signal)	Start of Combustion Angle
21	Is there no abnormal signal from the fuel oil injection pump?(Vibration& Ultrasonic signal)	Analyst judgment (Yes/No)
22	Is fuel rack location high?	Fuel rack location data
23	Is body temperature of fuel oil pump high?	Fuel oil pump temperature

### 4. 시범 발전소 적용

ECDP의 상태진단 프로그램의 평가 검증 및 정확도 확인을 위하여 시범발전소를 선정하여 데이터취득 및 상태진단을 수행하였다. 최근 측정데이터를 기준으로 EDG 엔진상태진단 프로그램(EDG-ECDP)으로 엔진 상태진단을 수행한 결과, 시범발전소 모두 엔진의 기계적 손상은 발견할 수 없었으며, 개별 실린더의 문제점으로 예상되는 부분을 권고조치 사항(recommended)으로 도출할 수 있었다. Fig. 7에 시범 발전소 EDG B계열 엔진 상태진단 분석을 수행하고 분석결과를 출력한 화면이다.

순번	구분	증상	상태진단 평가결과															
			A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4	B5			
14	공기공급상태	흡기밸브의 닫힘이 빠른가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	공기공급상태	흡기밸브의 닫힘이 늦은가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	공기공급상태	흡기밸브의 문이 신호가 미약한가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	공기공급상태	흡기밸브가 열리거나 닫히는 신호가 없는가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	공기공급상태	흡입공기온도가 높은가?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	공기공급상태	흡입공기온도가 낮은가?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	공기공급상태	흡입공기압력이 낮은가?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	공기공급상태	흡기밸브가 닫힐 때 진폭이 낮아지는 형태의 다양한 충격신호가 있는가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	공기공급상태	흡기밸브가 닫힐 때 짧은 크기의 두 번 충격 형태가 있는가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	공기공급상태	흡기밸브가 열릴 때 진폭이 너무 큰가(진동 및 소음과 신호)?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	공기공급상태	터보차저 입구 배기가스 온도가 높은가?																

Fig. 7 Example of condition diagnosis results using ECDP for EDG engine in model power plant

### 5. 결론

비상디젤발전기 엔진 상태진단 연구로 개발된 엔진 시험데이터 취득 전용 시스템 및 엔진상태진단 기술을 토대로 엔진 상태진단 전산프로그램을 개발하였으며, 아래와 같은 결론을 얻을

수 있었다.

1. 구축된 시험 데이터베이스 기반으로 국내 최초로 발전소 디젤발전기 엔진 상태진단을 위한 전용 엔진상태진단 전산프로그램(ECDP)을 개발하였다.
2. 개발된 엔진상태진단 프로그램을 이용하면, 각 엔진 상태진단 신호들의 조합으로 어느 부품에 이상이 있는지의 평가가 가능하므로 진단결과의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있다.
3. 진단 프로그램을 통하여 도출된 진단 결과는 진단결과보고서의 권고 조치사항으로 출력하여 발전소 실무 설비담당자에게 정비를 위한 효율적인 정보로 제공될 수 있다.
4. 개발된 ECDP는 원자력발전소 EDG 뿐만 아니라 다양한 엔진상태진단에 응용 및 활용 가능할 것으로 판단된다.

### References

1. Heywood, John et al., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill
2. Mark O’Connell, Mark Staley and Christian Haller, 2008, Engine Signature Analysis Training Manual
3. S. G. Lee, et al., 2012, “A Study on the Condition Diagnosis for Diesel Engine Valves Using Ultrasonic and Vibration Signal Measurement, Spring Conference”, The Korean Society for Power System Engineering, June 7-8, pp. 7-11.
4. S. G. Lee, et al., 2013, “Study on Development of Condition Diagnosis Program for Power Plant Diesel Engine, Autumn Conference”, The Korean Society for Power System Engineering, November 28-29, pp. 111-112.