한국동력기계공학회지 제13권 제1호 pp.53~58 2009년 2월

원자력발전소 비상디젤발전기 상태감시 기술 적용 연구
Application Study of Condition Monitoring Technology for Emergency Diesel Generator at Nuclear Power Plant

최광희 · 박종혁 · 박종은 · 이상국
K. H. Choi, J. H. Park, J. E. Park and S. G. Lee

(접수일 : 2008년 10월 10일, 수정일 : 2009년 1월 20일, 채택확정 : 2009년 2월 16일)

Key Words : Condition Monitoring(상태감시), Operating Parameter(운전인자), Engine Performance(엔진성능), Emergency Diesel Generator(비상디젤발전기), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

Abstract : The emergency diesel generator(EDG) of the nuclear power plant is designed to supply the power to the nuclear reactor on Station Black Out(SBO) condition. The operation reliability of onsite emergency diesel generator should be ensured by a conditioning monitoring system designed to monitor and analysis the condition of diesel generator. For this purpose, we have developing the technologies of condition monitoring for the wolsong unit 3&4 standby diesel generator including diesel engine performance. In this paper, technologies of condition monitoring for the wolsong standby diesel generator are described about three step. First is for selection of operating parameter for monitoring. Second is for technologies of online condition monitoring, Third is for monitoring of engine performance.

1. 서 론

원자력발전소에서의 비상교류전원계통은 원자력발전소의 안전성 확보에 매우 중요한 역할을 담당한다. 그 이유는 소외 전원이 상실되는 경우 비상교류전원을 공급함으로써 원자로의 안전을 담보할 수 있는 전원이 필수적이기 때문이다. 그러므로 원전에서 안전성에 중요한 영향을 미치는 기기에 대해 성능진단, 상태감시, 고장 근본원인 치유 등을 통한 철저한 유지 관리를 필요로 한다. 특별히 원자력발전소의 비상교류전력계통은 단일고장 시에도 안전기능을 수행할 수 있도록 충분한 독립성, 다중성, 시험성 등을 확보해야하며, 소외 교류전원 상실시 짧은 시간 내에 안전관련 부하에 전력을 공급하기 위하여 비상교류전력계통의 모선에는 비상디젤발전기가 설치되어 있다. 그러나 소외 교류전원 상실과 동시에 비상디젤발전기마저 운전불능인 경우 원자력발전소내의 교류전원이 완전히 상실되는 소내정전(station blackout: SBO)사고가 발생하게 되어 적절한 시간 내에 비상전원이 복구되지 않으면 발전소를 안전하게 정지시킬 수 없게 된다. 이러한 원자력발전소 정전사고가 발생할 경우 원자로 노심 손상사고로 진전될 가능성이 크며, 발전소내 정전사고 발생가능성을 줄이는 가장 중요한 척도는 비상디젤발전기의 신뢰도를 높게 유지하여 항상 운전이 가능 하도록 유지·관리하여야 한다. 이를 위해 비상디젤발전기의 성능을 실시간 감시하고 이상상태를 예측함으로써 성능을 최적으로 유지할 수 있어야 한다[1]. 이러한 기술 개발을 위해 다음과 같이 세 단계로 연구를 수행하고 있다. 첫째 비상디젤발전기의 상태 감시 대상 운전 인자 및 경보인자의 선정, 둘째 운전 인자 감시 진단 기술 개발 그리고 셋째 엔진 성능 감시 및 진단 기술 개발이다. 본 논문은 현재 전력연구원에서 개발하고 있는 디젤발전기 상태 감시 시스템 위주로 기술하였고 엔진 성능 감시 기술에 대해서 추가로 약술하였다.

최광희(책임저자) : 한전전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : choikhi@kepco.co.kr, Tel : 042-865-5591
박종혁, 이상국, 박종은 : 한전전력연구원

2. 운전 인자 선정

2.1 기존 운영중인 계통별 운전 인자

현재 국내 원전의 디젤엔진에서 감시 변수로 활용 가능한 운전 인자는 Table 1 과 같이 고온냉각수 계통 12개 항목 등 등 114개 항목으로 나타났다. 이러한 운전 인자들은 발전기 계통 일부를 제외하곤 모두 발전기가 설치된 현장에서 수작업으로 계측할 수 있게 되어 있다.

Table 1 Present operating parameter

Name of System	Para-meter (ea)	Range of Temp(℃)	Range of Pressure(bar)
Hot Temp Cooling	12	56~82	1.2~3
Low Temp Cooling	10	47~55	1~3
Lub oil	11	45~63	0.005~5.5
Fuel oil	11	37	0.2~5
Exhaust/Intake air	26	<630	-
Starting/Control air	13	-	7~40
Engine	16	<95	-
Generator	15	<135	-

2.2 운전인자 선정 기준

상태감시 인자의 선정기준으로 활용한 중요도 선정기준은 아래 Table 2 와 같다.

Table 2 Categorization of monitoring factors

Category	Criteria for selection
Heavy	Parameter for Direct effect on safety operation(Trip and Starting Interlock related)
Middle	Parameter for effect on operation performance and diagnosis of failure
Light	Others
Work Permission	Refueling period or normal operation period

2.3 감시대상 운전인자 선정 결과

상기 선정기준에 따라 비상디젤발전기 운전상태 감시용 운전인자를 비상디젤발전기 운전인자와 경보인자로 구분하여 선정하였으며, 최종적인 상태감시용 운전인자로 총 165개를 선정하였다[2-3].

2.3.1 운전인자

현재 운영중인 비상디젤발전기의 운전상태를 감시하기 위한 운전인자의 최종 선정을 위하여 전문가 회의를 개최하였다. 최종 선정을 위한 선정기준으로는 운전인자를 경보인자로 대체할 수 있는지 여부, 온도제어밸브의 영향으로 온도이상 상태 감시 부정확 여부, 다른 인자를 통해 데이터 값 취득가능 여부, 중요도와 사용빈도 고려, 압력 변화치의 고저 및 설치위치에 따른 온도측정 부정확 등을 고려하였다. 이러한 고려사항을 기준에 따라서 84개 인자를 선정하였다.

2.3.2 경보인자

경보인자에 대해서는 현재 운영중인 PLC 카드 입력 측에서 확장하지 않고 출력 측에서 확장하기로 전문가 회의에서 결정함에 따라 당초 보다 축소한 60개소인자를 선정하였으나, 비상디젤발전기 운전상태와 제어를 용이하게 하기 위하여 21개소를 추가하여 총 81개로 선정하였다.

3. 운전인자 감시 기술 개발

3.1 국내외 감시 기술 분석

국내외 디젤엔진 및 선박엔진에서 사용하고 있는 성능감시 방법에 대해 조사하였다.

비상디젤 발전기의 상태감시 및 진단시스템을 구현하기 위해 선정된 인자들을 DMDS(Diesel Engine Performance Monitoring and Diagnosis System), 한수원(주)의 신뢰도 관리 프로그램 및 IEEE 387 -1995에서 권장하는 인자들과 비교하여 각각의 시스템 및 각종 인자들이 갖는 성능을 파악하였으며, 각각의 유사인자들을 계통별로 분류하여 비교하여 보았다.

3.1.1 국내 원전 디젤엔진 운전인자 감시방법 조사

월성원자력발전소의 비상발전기 신뢰도 관리 프로그램의 적용인자를 분류해 보면 냉각수 계통 7개 인자, 윤활유 계통 3개 인자, 연료유 계통 2개 인자, 배기 계통 22개 인자, 엔진 계통 7개 인자, 발전정보 8개 인자로 나뉜다. 그러나 위의 적용인자는 실시간 감시 인자가 아닌 엔진 운전 중 작업자의 수동 입력으로 각 인자 값의 분석을 하는 관계로 엔진의 정보값 취득이나 입력시간 소모 등의 이유로 엔진 운전상태의 분석결과 도출에 있어서 시간지연이 불가피하다. 이러한 사항을 고려하여 각종 인자들의 실시간 정보를 신뢰도 프로그램과 공유한다면 제안인자

의 상태감시 및 진단에서 오는 비상발전기 신뢰도의 증진 및 신뢰도 프로그램과의 상호보완 측면에서 또한 효율을 극대화 시킬 수 있다. 또한 울진 원자력 발전소 5, 6호기에서 사용 중인 DMDS(Diesel Engine Performance Monitoring and Diagnosis System)의 인자 성격을 분석해 본 결과 고온냉각수 출구(공통), 윤활유 엔진 입구 압력/온도, 배기가스 온도, 터보 챠저 입/출구 온도, 베어링 온도, 흡기 압력/온도의 엔진의 성능감시의 필수인자들만을 실시간으로 감시하였고, 그 외의 인자는 경보인자에 적용시켜 상태감시를 하고 있다.

3.1.2 경보인자 구성요소 조사

대부분의 원자력발전소에서는 경보에 대해서는 감시 시스템이 구축되어 있지 않았다. DMDS 경우에는 조사대상 원전보다 더 많은 118개의 경보인자를 사용하고 있다. DMDS의 경우 발전정보 측면에서 보다 많은 정보를 감시할 수 있는 것으로 나타났다.

3.1.3 선박엔진의 성능감시

MAN B&W선박의 COOS 시스템의 엔진 진단 기능은 주로 엔진의 상태를 평가할 수 있는 기능을 갖추었다. 자료 로깅 기능, 감시기능, 진단 기능으로 구분되어 있다. 엔진의 운전변수를 온라인으로 전송받아 모니터 상에서 표현하여 주고 그 측정값을 통해 엔진을 감시하는 기능에 초점이 맞추어 있다. 선박의 특성상 영 출력부터 전 출력 운전까지의 엔진 특성곡선 감시를 위해 주로 엔진 출력과 RPM(Revolutions Per Minute)그리고 배기압력, 온도를 상시 감시하도록 되어있다.

3.2 운전 인자 감시 시스템

운전 인자 상태 감시는 크게 모니터링 기능과 Trending 기능으로 나누어진다. 이를 각각의 8개 부 계통으로 나누어 구성하며 전계통의 주요 상태를 한 화면에 볼 수 있도록 통합 감시 기능을 추가로 구성하였다. 상태감시 시스템은 디젤발전기 운전 중 운전상태의 감시, 기기들의 정상상태 유지 확인 및 정비, 엔진의 비정상 상태를 실시간으로 확인 시켜 주어, 빠른 조치를 취함을 목적으로 하고, GUI(Graphic User Interface) 환경을 통한 중앙 집중적인 운전감시를 위해 월성 디젤발전기 파이프 계통을 기반으로 하여 상용프로그램인 In-touch를 이용하여 GUI 부분을 완성하였다.

상태감시 시스템의 GUI 화면 구성은 디젤발전기 운전 중 감시되어야할 중요 인자를 중심으로 실제 도면에 따라서 작성하였다. 디젤발전기의 감시되는 인자들은 실시간 계측 시스템(DAS: Data Acquisition System)을 통해서 획득한 실시간 데이터를 LAN(Local Area Network) 통신을 통하여 전송되어진다. 실시간 계측시스템에서 전송된 실시간 데이터를 가지고 각 계통별 GUI 화면을 구성하였다.

3.2.1 아날로그 신호로 입력되는 운전인자

실시간 데이터 계측시스템(DAS)에서 LAN 통신을 이용하여 전송한 데이터 중에서 아날로그 형 데이터인 운전인자는 실시간으로 숫자, 바, 트렌드 형태로 표시되도록 제작하고, 알람 발생은 In-touch 자체기능을 이용하며 알람 발생 한계 값은 원전용 디젤기관에서 제시하는 한계 값을 기준으로 알람이 발생할 수 있도록 하였다.

3.2.2 디지털 신호로 입력되는 경보인자

실시간으로 전송받은 디지털 신호의 경보인자는 디젤발전기 각부에 설치된 센서가 ON/OFF 작동만으로 정보를 상태감시 시스템에 전달하는 경보인자를 의미한다. GUI 화면상에서 정상일 때는 항상 녹색으로 표시가 되며 알람이 발생하면 빨간색으로 깜빡이게 하였다. Table 3은 감시되는 대상의 운전인자와 경보인자의 개수를 보여주고 있다. 월성 디젤엔진의 감시대상 운전인자는 총 165개로서 상태감시 시스템을 구축하였다.

Table 3 Operating parameter for monitoring

System	Operation	Alarm
Fuel oil	1	5
Lub oil	3	9
Low Temp Cooling	4	7
Hot Temp Cooling	18	8
Engine	22	29
Generator	10	0
Exhaust/Intake air	25	0
Starting/Control air	1	3
Etc.	0	20
Sub-Total	84	81
Total	165	

경보인자로부터 입력되는 입력신호 81개 및 조합신호 4개를 Fig. 1과 같이 한 화면에서 효과적으로 감시할 수 있도록 하였다. 81개는 단일 경보 신호에 의한 값이며 조합신호 4개는 2개 이상의 신호가 조합하여 만들어지는 신호이다. 이러한 신호 85개를 입력 신호에 따라서 Trip, Interlock, Alarm, Control, Status로 구분하였고 이를 Table 4와 같이 분류하였다.

Table 4 Categories of Input signals

Category		Signals			Display	
		Single Input	Combin-ation	Sum	True	False
1	Trip	13	3	16	Red	Green
2	Interlock	8	1	9	Red	Green
3	Alarm	40		40	Red	Green
4	Control	12		12	Red	Green
5	Status	8		8	Red	Green
Total		81	4	85		

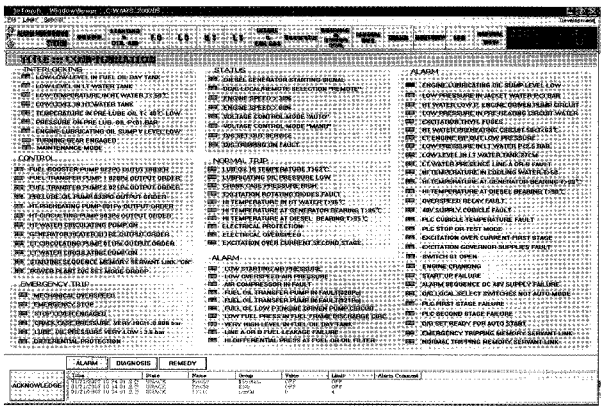

Fig. 1 Configuration

3.3 계통별 감시 방안

본 논문에서는 계통별 감시방안을 설명하기 위해 전체 계통 중에서 구동 및 공기계통에 대해서 기술하기로 한다.

3.3.1 운전인자 감시

Fig. 2와 같이 엔진 기동 시에 유체의 흐름을 보여주고, 공기계통의 운전인자를 실시간으로 감시한다. 엔진 기동 시에 시퀀스를 초단위로 나타내어 완전히 기동되는 시간과 회전수, 발전기 모선전압, 주파수를 한 화면에 보여준다. 기동 시 기동 Interlock에 있는 항목 중에 하나라도 "진실" 신호가 온다면 Starting up Failure가 깜빡이면서 기동이 실패가 된다.

본 계통의 운전인자는 공기계통 1개와 발전기 계통 3개로 이루어져있다. 공기계통의 운전인자는 실시간 데이터 값을 막대그래프로 나타내며

제한 값을 적색라인으로 표시하고 비정상상태를 황색으로 나타낸다. 엔진발전 정보 상태를 확인하는 발전기 계통의 운전인자는 엔진스피드, 발전기 모선전압, 주파수를 표시하고 각각의 실시간 정보를 제공한다.

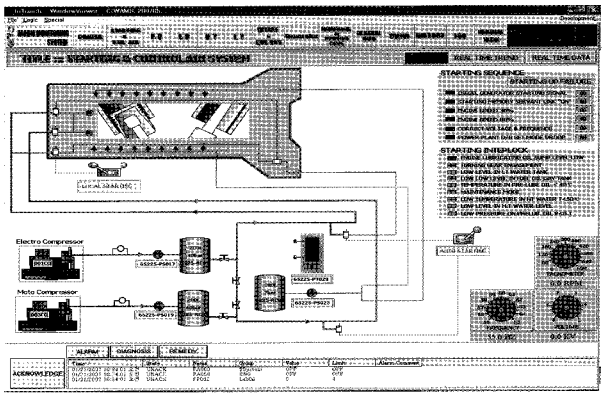

Fig. 2 Starting and control diagram

3.3.2 경보인자 감시

경보인자는 공기계통 3개와 Interlock 신호에 따른 경보인자와 엔진의 기동에 관련된 경보인자 로 표시된다. 공기계통의 경보인자 조건에 따라 "진실" 상태는 Red로, "거짓"상태는 Green으로 표시된다. Interlock 신호 중 어느 하나의 신호라도 "진실"상태가 되면 Starting Up Failure 패널의 테두리가 Red로 점멸하게 되고 엔진 기동은 실패하게 된다.

3.3.3 실시간 추이 분석

최근 기동 시간을 기준하여 발전기 발전 정보 운전인자 Tachometer, 발전기, 전압, 주파수에 경향을 History 선형 그래프로 Fig. 3과 같이 표현하였다.

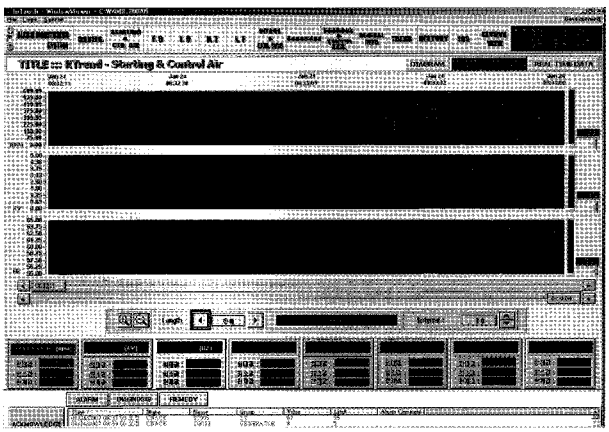

Fig. 3 Starting and control air system real time trend

4. 엔진 성능 감시 및 진단 기술

원자력발전소의 디젤엔진 성능은 각 실린더별 연소 상태 및 흡기, 배기 밸브의 동작시간과 진동 값을 계측함으로써 실린더의 성능을 정확히 감시, 진단 할 수 있다. 이를 위해서는 다음과 같은 계측 값을 측정할 수 있는 별도의 측정기가 필요하다. 즉 크랭크 축 위상각과 실린더별 폭발압력, 실린더 내 밸브 및 연료펌프의 동작상태를 감시할 수 있는 초음파 신호, 그리고 각 실린더 상단에서의 진동 값을 종합하여 각 실린더의 성능을 감시, 진단 할 수 있다[4].

4.1 감시대상 변수

실린더 상부 및 연료주입펌프 상단 초음파 신호 계측은 Fig. 4와 같이 특정영역의 주파수 대역을 갖는 초음파 센서를 통해 신호를 취득한다.

실린더의 진동은 5.6 kHz~40 kHz 주파수 대역을 갖는 진동센서를 통해 계측한다. 그리고 각 실린더별 폭발압력은 기준 실린더의 크랭크 위상각을 함께 측정한다. 이 성능 값의 진단을 위하여 각 실린더의 연료주입이 적정한지 분석이 필요하며 이를 위해서는 연료 랙의 측정도 동시에 필요하다. 그리고 각 실린더의 성능측정은 출력을 가장 최대로 올리고 안정된 상태에서 각 감시대상 변수를 순차적으로 측정한다. 그리고 연료 인젝터 상부의 온도를 마지막으로 측정한다.

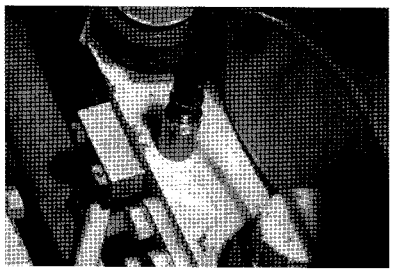

Fig. 4 Vibration and ultrasonic signal measurement

4.2 엔진 성능 감시

엔진의 성능은 매 핵연료 주기의 전후로 측정하여 비교하는 것이 바람직하다. 다음은 월성 3,4디젤 엔진의 정기시험 중에 측정한 엔진의 성능감시 변수를 측정한 결과이다. Fig. 5 및 Fig. 6은 실린더의 주요 성능 값을 보여주고 있다. 5개의 측정 데이터 중 맨 위는 실린더 상부에서 측정한 초음파 신호이며 두 번째는 연료펌프 상부에서의 초음파 신호 그리고 세 번째, 네 번째는 각각 실린더 상부의 진동 신호와 연료펌프 상부의 진동신호를 측정한 결과이다. 그리고 그림 중간의 곡선은 실린더 내 최고 압력을 나타낸다.

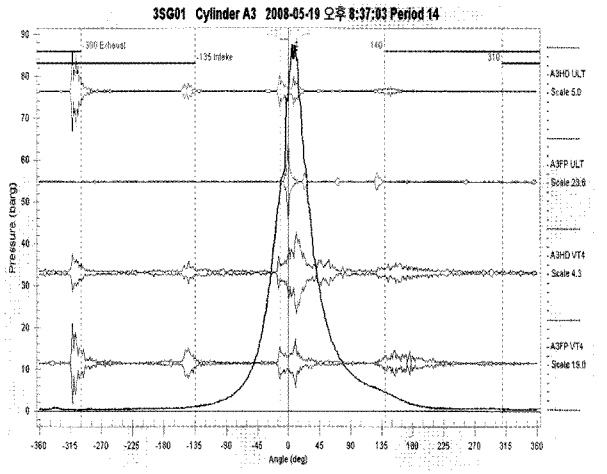

Fig. 5 Engine performance condition(1)

이 시험결과에서 흡, 배기 밸브의 개폐 시점을 알 수 있으며, 실린더의 최고폭발압력은 정상적인지 감시할 수 있다. 대체로 정상적인 지시치를 나타내고 있다.

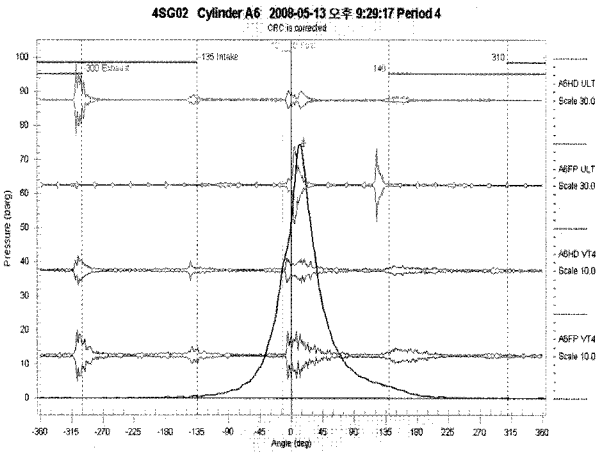

Fig. 6 Engine performance condition(2)

Fig. 6에서 위로 부터 두 번째 그래프에서 반복적인 소 진폭의 초음파 신호가 계측되었다. 이는 연료주입펌프 관련 계통에의 이상 상태발생 가능성이 있으므로 계속적인 감시가 필요함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 소외전원 상실시 원자로의 안전성을 확보하기 위하여 최소한의 소내

교류전력을 공급하는 비상디젤발전기의 상태감시를 위한 기술 개발과 적용 연구 결과를 기술하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 비상디젤발전기 상태감시용 운전인자를 선정하기 위해서 실시간 데이터 감시요소와 각 운전인자가 엔진상태에 영향을 주는 중요도에 따라서 감시할 대상 운전인자를 선정하였다. 운전인자의 경우 84개 인자를 선정하였으며, 경보인자의 경우 81개를 선정하여 총 165개 인자를 감시 대상인자로 선정하였다.

2) 운전 인자 감시를 위한 감시시스템을 상용프로그램인 In-touch를 사용하여 개발하였다. 부 계통별 화면에서 각 운전인자의 상태를 모니터링하여 경보의 발생 전에 감지할 수 있도록 하였고, 기간 및 변수를 정하여 성능 값의 추이를 비교할 수 있도록 하였다.

3) 엔진 성능을 감시, 진단 할 수 있는 방법으로 초음파 및 진동 그리고 위상각과 함께 실린더 폭발압력을 측정하여 실린더별 성능을 감시 할 수 있게 하였다.

향후 이러한 기술이 원자력발전소의 비상디젤발전기의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 기술로 활용되기를 기대하며, 좋은 결과를 얻도록 계속 노력해 나갈 예정이다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주)와 전력연구원의 협약연구과제로 수행되었으며 이를 위해 협력해주신 한국수력원자력(주)의 관련자 분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. US NRC, 1993, "Selection, Design, Qualifica-tion and Testing of EDG Units used as Class 1E on Site Electric Power Systems at Nuclear Power Plants", Reg Guide 1.9 Rev.3, pp. 3.
2. K. H. Choi, et al., 2007, "Development of Technology for monitoring and diagnosis of abnormal condition of SDG at Wolsong 3,4 NPP", Korea Hydro and Nuclear Power Company, R&D midterm report, pp. 106~120.
3. J. H. Park, et al., 2007, "Selection and Analysis of Operating Parameters for Condition Monitoring of Emergency Diesel Generator at Nuclear Power Plant", The Korea Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 3~83.
4. Mark O'connell, Mark Staley, Christian Haller, 2008, "KEPRI Engine Signature Analysis Training Manual", MPR, pp. 4-1~4-30.