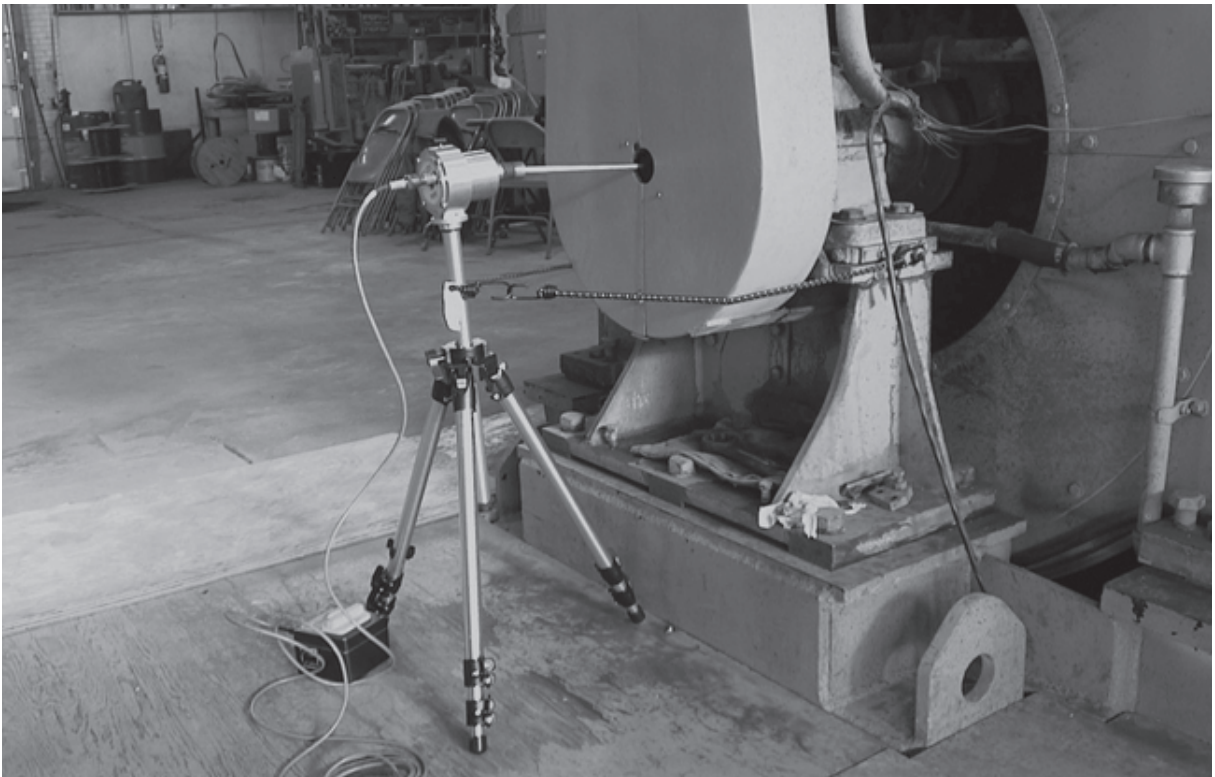


# 원전 비상디젤발전기 상태진단 기술 개발 현황



이상국  
한수원 중앙연구원 책임연구원

## 1. 개황

최근에 발생한 일본 후쿠시마 원전 사고는 지진과 쓰나미에 의한 재해로부터 출발했지만, 비상디젤발전기(EDG, Emergency Diesel Generator)의 비상전원공급 능력이 얼마나 원자력발전소에 중요한 역할을 하는지 깨닫게 해주는 계기가 되었다.

원자력발전소의 안전성 확보를 위해서는 안전성에 중요한 영향을 미치는 기기에 대한 신뢰성, 즉 성능상태를 최적으로 유지하여야 한다. 특히 원자력발전소의 비상교류전원계통은 소의 교류전원 상실시 짧은 시간 내에 안전부하에 전력을 공급

하기 위하여 비상디젤발전기가 설치되어 있다. 경수로에서는 EDG가 그 역할을 담당하며, 중수로에서는 예비디젤발전기(SDG, Standby Diesel Generator)와 비상전원시스템(EPS)이 부하를 나누어 담당하고 있다.

EDG는 안전성을 확보하는데 매우 중요한 역할을 담당하기 때문에 원전 운영자는 그 성능을 최적으로 유지 관리하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 EDG의 성능상태를 온라인으로 감시하여 이상상태를 예측하고 고장을 방지하기 위한 기술개발이 필요하다.

또한, 디젤발전기에 연결되어 엔진의 연소 및 폭발 구동력으로 전력을 생산하는 핵심기능을 수행하는 EDG 엔진의 경우 현재까지는 엔진의 상태와 관계없이 매년 두개씩의 엔진을 분해 점검하여 8주기(약 12년)에 걸쳐 전체 엔진을 분해 점검하여 왔다.

이와 같이 EDG 엔진 및 베어링의 분해정비를 매년 차례로 되풀이하는 불필요한 정비방식에서 탈피하여 엔진 상태를 감시 및 평가하여 상태가 나쁘다고 판단되는 엔진만을 대상으로 분해정비하는 상태기반정비 방식(CBM, Condition Based Maintenance)으로의 전환이 필요하다. 이는 정기적으로 엔진을 분해하지 않고 외부 센서를 사용해서 디젤 엔진 구성 기기의 상태를 모니터링하는 프로세스이다. EDG 엔진에 CBM 정비방식을 적용하기 위해서는 EDG의 엔진 상태를 정확하게 진단 가능한 기술개발이 필요하다.

이에 따라 한국수력원자력(주) 중앙연구원에서는 2006년부터 2013년까지 약 7년 동안 EDG 온라인 상태감시기술, 엔진 상태진단 신호분석 시스템, 엔진 상태진단 신호분석기술 및 상태진단 프로그램을 각각 개발함으로써 EDG 상태진단 기술개발을 완성하였다. 이러한 상태진단 기술개발은 EDG의 신뢰도를 높일 뿐 아니라 정비를 최적화함으로써 원자력발전소의 안전성 증진에 크게 기여할 것으로 판단된다.

## 2. EDG 설치 및 운영 현황

### 가. EDG 역할 및 기능

EDG 계통은 소외전원 상실사고(Loss of Offsite Power)시 원자로를 안전하게 정지시키고 냉각재 상실사고 상황 하에서도 방사능의 소외 방출량을 10CFR100 기준치 이하로 유지시키기 위해 안전등급 필수부하에 전원을 공급한다. 각 호기마다 100% 용량 2대의 디젤발전기가 설치되어 있다.

#### ① 설계기준

EDG 가동신호 발생 후 10초 이내에 정격전압( $4,160 \pm 416V$  AC), 정격주파수( $60 \pm 1.2Hz$ )에 도달해야 하며, 공학적 안전설비 작동신호(SIAS, AFAS, CSAS) 발생 시 자동 기동되어야 한다. 또 부하 재투입 시 2초 이내에 속도는 98%(58.7Hz), 전압은 90%(3,744V AC) 이상 유지되어야 한다.

#### ② 운전기능

소외전원 상실시 안전등급 모션 저전압 계전기 동작에 의해 EDG가 기동되며 정상전원 차단기가 차단되고, EDG 전압 및 주파수 정상에 도달되면 출력차단기가 투입되고 부하재투입(Load Sequence) 순서에 따라 필수부하가 자동 기동된다.

공학적 안전설비 작동신호 발생시 EDG는 자동 기동되나 정상교류 전원이 이용가능하면(LOOP 없을 시) 안전모션에 연결되지 않고 단지 무부하 운전된다. 디젤발전기가 비상운전모드로 운전 시 대부분의 정지신호는 우회되고, 단지, 수동비상정지, 엔진과속도, 발전기 차동계전기, 정지레버(Stop Lever)에 의해서만 디젤발전기가 정지된다.

#### ③ EDG 계통의 구성

각 계열별로 디젤발전기가 있으며 이들은 IEEE-279 및 384에 따라 물리적·전기적으로 격리되어 있

다. 각 발전기당 저온 냉각수 계통(LT Cooling Water System), 고온 냉각수 계통(HT Cooling Water System), 윤활유 계통(HT Cooling Water System), 기동용 공기 계통(HT Cooling Water System), 연료유 계통(HT Cooling Water System), 연소용 공기 및 배기가스계통(HT Cooling Water System) 등과 같은 보조설비가 있다.

**나. 국내 원전 EDG 운영 현황**

현재 원자력발전소는 경수로의 EDG 및 대체교류 디젤발전기(AAC DG, Alternate Alternating Current Diesel Generator), 중수로의 예비디젤발전기(SDG, Standby Diesel Generator) 및 AAC DG와 기능이 동일한 비상전력공급시스템(EPS, Emergency Power Supply System)을 모두 합해 28개 호기에 69대가 설치되어 있으며 12대는 건설 중이며 57대가 가동되고 있다. 세부적인 설치 현황은 [표 1]과 같다.

[표 1] 국내 원전 EDG 운영 현황

구분	호기	설치 수량(대)	전압 (kV)	용량 (kW)	제작사 (엔진/발전기)	회전수 (RPM)
고리 원자력	고리1	2	4.16	3,500	Himsen:9L32/40, Hyundai	720
	고리2	2	6.9	4,400	GMD:EMD16-645-E4, WH	900
	고리3/4	4	4.16	7,000	Cooper:DSRV-16-4, GEC	450
	AAC 1,2,3,4	1	4.16	5,500	Doosan-MBD:14V32/40, Hyundai	720
	신고리1/2	4	4.16	6,000	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	AAC 1,2	1	4.16	7,200	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	신고리3/4	4	4.16	8,000	Doosan-MDT:16PC2.6B, Alstom	600
	AAC 3,4	1	4.16	7,200	Doosan-MDT:16PC2.6B, Alstom	600
한빛 원자력	한빛1/2	4	4.16	7,000	Cooper:DSRV-16-4, GEC	450
	AAC 1,2	1	4.16	5,500	Doosan-MBD:14V32/40, Hyundai	720
	한빛3/4	4	4.16	6,500	Doosan-SACM:UD45V20S5D, JeumontSch.	1,200
	AAC 3,4	1	4.16	6,500	Doosan-SACM:UD45V20S5D, JeumontSch.	1,200
	한빛5/6	4	4.16	7,200	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
월성 원자력	월성1	2	4.16	5,750	CrossleyPielstic:16PC2VMK3, Alstom	514
	월성2	2	4.16	6,500	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	EPS	2	4.16	1,000	Waukesha:L6670DSIV, KATO	1,200
	월성3/4	4	4.16	6,500	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	EPS	2	4.16	1,200	Caterpillar:3516DITA, KATO	1,800
	신월성1/2	4	4.16	6,000	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	AAC 1,2	1	4.16	7,200	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
한울 원자력	한울1/2	4	6.6	4,500	SACM:UD45V12S5D, JeumontScheider	1,200
	AAC 1,2	1	6.6	5,500	Doosan-MBD:14V32/40, Hyundai	720
	한울3/4	4	4.16	7,000	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	AAC 3,4,5,6	1	4.16	7,000	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	한울5/6	4	4.16	6,500	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	신한울1/2	4	4.16	7,200	Doosan-SEMT:16PC2-5V400, Alstom	514
	AAC 1,2	1	4.16	7,200	Doosan-MBD:18V32/40, Hyundai	720

### 3. EDG 상태진단기술 개발 현황

#### 가. EDG 온라인 상태감시기술 개발

EDG의 신뢰도를 높게 유지하여 항상 운전가능하도록 관리하기 위해서는 EDG의 성능을 실시간 감시하고 이상상태를 예측함으로써 성능을 최적으로 유지할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 EDG의 상태감시 대상으로 하는 운전인자 및 경보인자의 이상상태 감시 기술 개발과 엔진 성능감시 및 진단기술 개발이 필요하다. [그림 1]은 한수원 중앙연구원에서 개발한 EDG 온라인 상태감시 및 진단 시스템 구성도를 나타낸다.

#### 나. EDG 엔진 상태진단기술 개발

##### ① 기술개발 배경

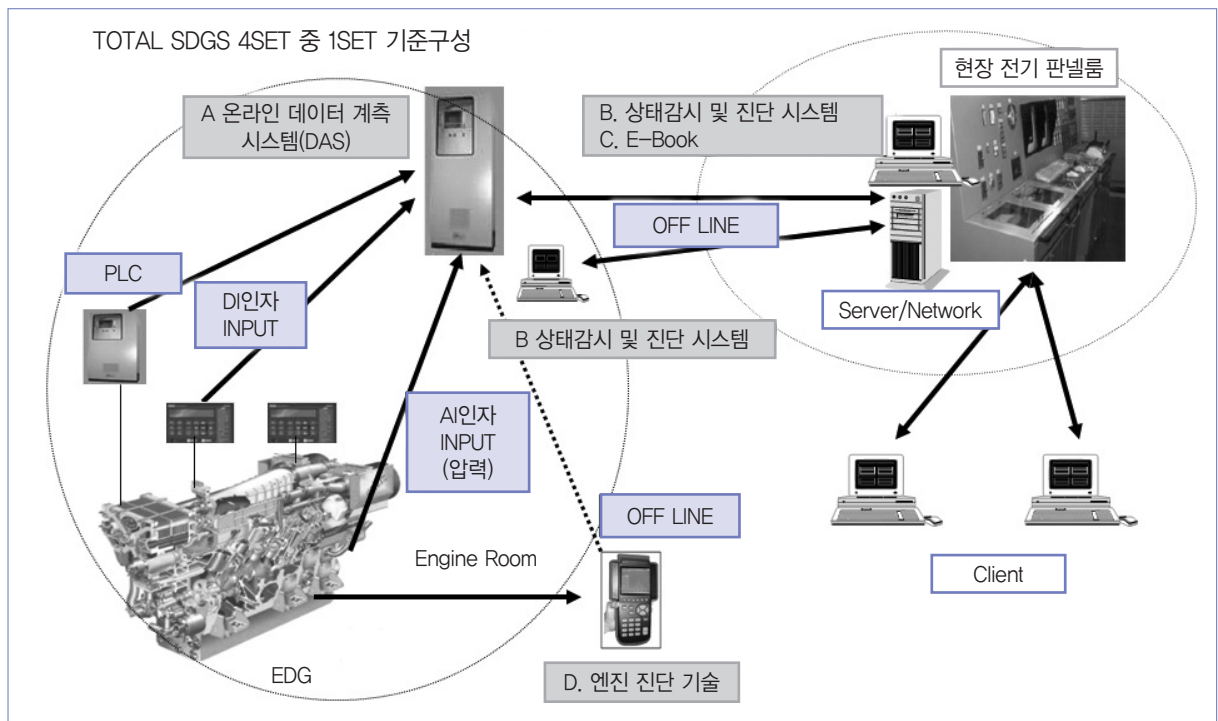
현재까지 EDG 엔진의 상태진단기술이 충분히 개발되지 못한 관계로 인해 엔진 상태의 좋고 나쁨보다 초기의 제작사의 권고사항에 따라 일정한 시기가 되

면 주기적으로 엔진 분해정비를 하고 있다. 그러나 이 경우 엔진을 분해하여도 상태가 나쁘지 않은 경우가 발생할 수 있다.

EDG 엔진 및 베어링의 분해정비를 매년 차례로 분해정비하는 방식을 탈피하여 엔진 상태를 감시 평가하여 상태가 나쁘다고 판단되는 엔진을 대상으로 분해정비하는 상태기반정비 방식으로 전환이 필요하다. 이와 같이 정확한 판단을 위해서는 신뢰도 높은 상태진단기술 개발이 필요하다.

##### ② EDG 엔진 성능감시 및 상태진단기술

EDG 엔진은 총 16개의 실린더로 구성된 16기통 4행정 엔진으로서, 고온·고압상태(약 550°C, 300bar)에서 운전되며 실린더, 피스톤, 커넥팅로드, 크랭크축, 플라이휠, 조속기 및 터보차저 등으로 구성, 디젤 발전기에 연결되어 엔진의 연소 및 폭발 구동력으로 전력을 생산하는 기능을 한다. EDG의 신뢰도를 최적으로 유지하면서 불필요한 엔진 정비를 줄이기 위



[그림 1] EDG 온라인 상태 감시 및 진단 시스템 구성도

해 EDG에 상태기반정비기술을 적용하기 위한 엔진 상태진단시험을 수행한다.

원자력발전소의 디젤엔진 성능은 각 실린더별 연소상태 및 흡기, 배기 밸브의 동작시간과 연료펌프의 동작상태를 감시할 수 있는 초음파 신호, 그리고 각 실린더 상단에서의 진동값을 계측함으로써 정확히 감시하고 진단할 수 있다.

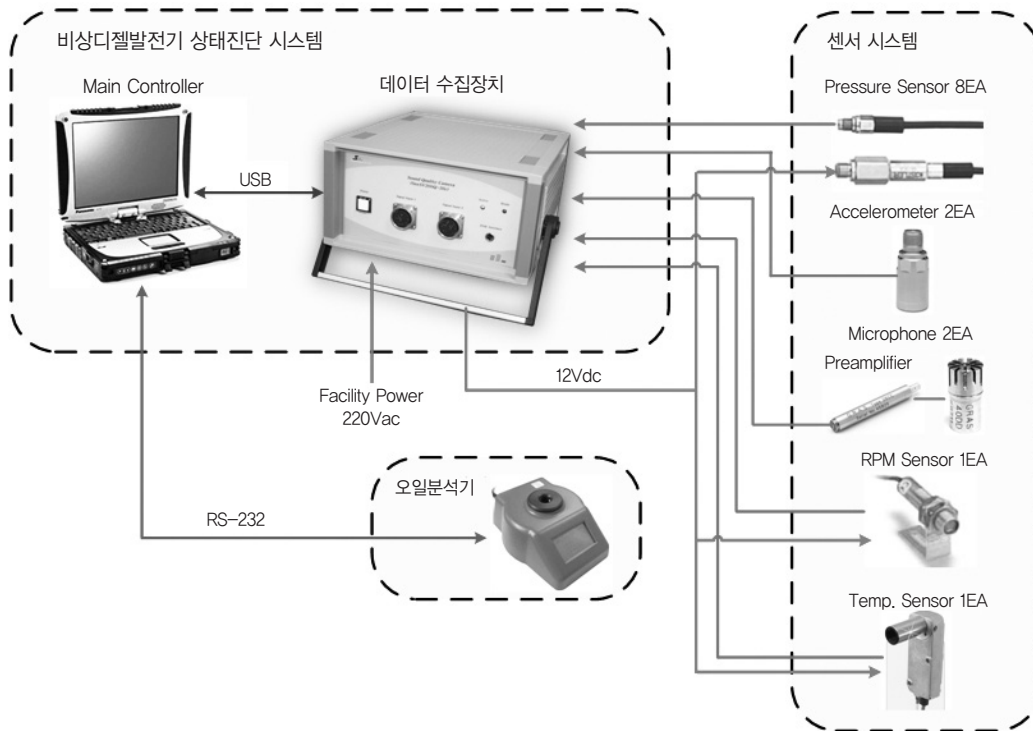
### 다. 엔진 상태진단 신호분석 시스템 및 상태진단 프로그램 개발

#### ① EDG 엔진 상태진단 신호분석 시스템 개발

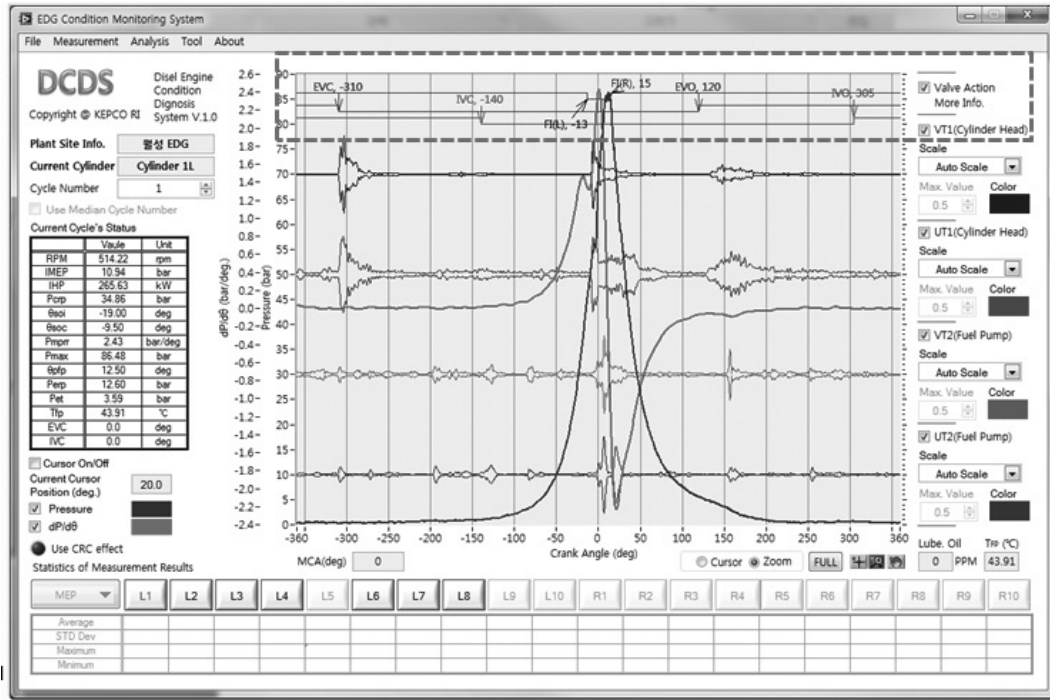
EDG 엔진 상태진단 신호분석 시스템은 계측센서/분석기, 데이터취득 시스템(DAS) 및 주제어기(PC)로 구성되며, 센서에서 계측된 신호는 데이터취득 시스템에 의한 분석 가능한 신호로 변환되며, 주제어기에 탑재된 소프트웨어를 통해 분석된다.

상태진단을 위한 센서는 압력센서, 진동센서, 초음파센서, 온도센서, 타코센서로 구성된다. 압력센서는 엔진 내부의 폭발압력을 계측하며, 진동센서, 초음파센서는 밸브의 동작상태를 감시한다. 온도센서는 배기가스의 온도를 측정한다. 타코센서는 모든 계측신호의 측정 시점을 파악하기 위한 목적으로 설치된다.

EDG 엔진의 윤활유 상태점검은 별도의 분석기를 이용하여 수행되며, EDG 엔진 상태분석 시스템은 이 정보를 분석기로부터 수령하여 분석결과로 표현한다. 데이터취득 시스템(DAS)은 설치된 센서에 파워를 공급하고 측정된 신호의 증폭 및 필터링, 아날로그-디지털 신호변환(Analog to Digital Conversion) 등의 역할을 수행하며, 아날로그-디지털 신호 변환된 신호는 주제어기(Main Controller)에서 분석된다. [그림 2]는 한수원 중앙연구원에서 개발한 EDG 엔진 상태진단 신호분석 시스템 개요도를 나타내며, [그림 3]은 EDG 엔진 상태진단 분석 화면을 보여준다.



[그림 2] EDG 엔진 상태진단 신호분석 시스템 개요도



[그림 3] EDG 엔진 상태진단 신호분석 화면

② 엔진 상태진단 프로그램 개발

EDG 엔진 상태기반정비는 각 엔진별 실린더의 성능 상태, 배기가스 상태, 연료 랙 위치 및 윤활유 계통의 상태 등을 토대로 엔진의 상태를 진단 및 감시함으로써 엔진의 건전성을 확인하는 방법이다. EDG 상태를 진단하기 위하여 엔진 시험데이터 취득 시스템을 활용하고 있으며 이들로부터 취득된 엔진시험 데이터를 효율적으로 분석하여 EDG 엔진 및 주요 계통의 상태진단을 수행하여야 한다.

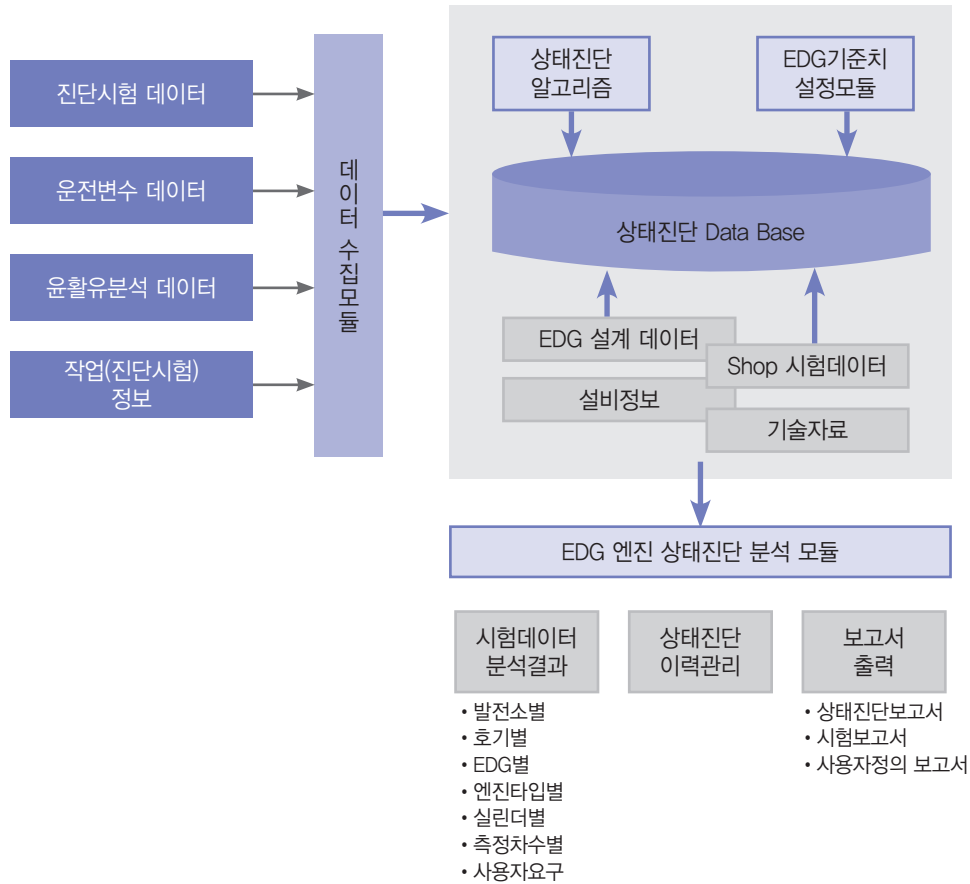
이를 위해 엔진 상태진단 시험 데이터를 체계적으로 관리하고 분석하는 EDG 엔진 상태진단 프로그램을 개발하게 되었다. EDG 엔진 상태진단 프로그램은 데이터취득 시스템으로부터 취득된 압력, 초음파, 진동시험 데이터와 각 디젤엔진 및 주요 계통 운전변수를 체계적으로 관리할 수 있는 데이터베이스 관리 기능과 이들 데이터를 토대로 EDG 엔진 및 주요 계통의 상태를 평가할 수 있는 상태진단 기능을 포함하

고 있다. [그림 4]는 엔진 상태진단 프로그램 모듈 간 연관도를 보여준다.

4. 전망


EDG는 가장 높은 품질등급으로 유지되어야 하므로 보다 신뢰성 높은 상태진단 기법의 적용이 수반되어야 한다. 이를 위해 EDG 온라인 상태감시 및 엔진 상태진단기술 개발이 수행되었다. 본 연구개발을 통하여 개발된 EDG 온라인 상태감시기술, 엔진 상태진단 신호분석 시스템, 엔진 상태진단 신호분석기술 및 엔진 상태진단 전산프로그램을 활용하여 EDG의 신뢰성과 엔진의 성능관리를 보다 체계적으로 관리할 수 있어 원전의 안전성 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 개발된 상태감시 및 진단기술의 발전소 적용



[그림 4] 엔진 상태진단 프로그램 모듈 간 연관도

으로 EDG 정비의 최적화를 통한 상시 운전가능 체제를 유지할 수 있으며, EDG 운전과 정비의 연계성을 확보하는 채널을 제공함으로써 EDG의 건전성 유지에

도 기여할 수 있을 것으로 전망된다. 앞으로 모든 발전소에 확대 적용 및 진단 신뢰도 향상을 위해서는 관련 기술의 지속적인 개발이 필요할 것으로 판단된다. 

[참고문헌]

1. Reg Guide 1.9 Rev.3, "Selection, Design, Qualification and Testing of EDG Units used as Class 1E on Site Electric Power Systems at Nuclear Power Plants", pp3, 1993.7
2. Mark O'connell, Mark Staley, Christian Haller, "KEPRI Engine Signature Analysis Training Manual" MPR, pp4-1 to 4-30, 2008.4
3. 이상국 외 한국수력원자력(주) 중앙연구원, "EDG 엔진 성능진단기술 개발 및 시험 데이터베이스 구축 연구", 연구개발 최종보고서, 2013.3