

# 원전용 비상디젤발전기 국외 손상사례 분석에 관한 연구

장정환<sup>†</sup> · 김진성<sup>\*</sup> · 정해동<sup>\*</sup> · 조권희<sup>\*\*</sup>

## A Study on the Analysis of Failures Related to Emergency Diesel Generators in Overseas Nuclear Power Plants

Jung-Hwan Chang<sup>†</sup>, Jin-Sung Kim<sup>\*</sup>, Hae-Dong Chung<sup>\*</sup> and Kwon-Hae Cho<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

The emergency diesel generator (EDG) in a nuclear power plant (NPP) shall start within 10 secondss and supply electrical power to engineered safety features within one minute and less if a loss of offsite power (LOOP), A design-basis event, or their combination occur. Each NPP has an EDG set consisting of two diesel generators for redundancy. In addition to the EDG set, an alternate Alternating Current Diesel Generator (AAC DG) is installed and shared by several units to cope with a station black out (SBO), i.e., loss of the offsite power concurrent with reactor trip and unavailability of the EDG set. The objective of this study is to analyze the failure data of emergency diesel generators reported in overseas nuclear power plants.

**Key Words** : Emergency Diesel Generator(비상디젤발전기), Failure(손상사례), Station Black Out(소내정전), NPP(원자력발전소), AAC DG(대체교류전원 디젤발전기)

### 1. 서 론

원자력발전소에 설치되어 있는 비상디젤발전기(EDG)는 원자로 출력 운전 중 외부전원상실사고(LOOP) 또는, 냉각재상실사고(LOCA)와 외부전원상실사고가 동시에 발생하였을 때 10초 내에 기동을 해야만 하고 1분 내에 원자로를 안전하게 정지시키기 위한 안전성관련 설비(ESFS 등)에 전원을 공급해야 하는 중요한 계통이다. 따라서, 대부분의 모든 원자력발전소에는 원자로 한 호기당 비상 디젤 발전기가 두 대씩 설치되어 있으며 비상 시 한 대가 예상하지 못한 어떤 원인에 의해 기동이 실패되더라도 나머지 한 대가 기동되어 발전소

비상사태에 적절히 대응할 수 있게 다중 방어 개념으로 설치되어 있다. 또한, 여기에 더하여 대체 교류디젤발전기(AAC DG)를 한 대 부가적으로 설치하여 소외전원상실사고와 비상디젤발전기 2대 모두가 기동 실패하는 발전소정전사고(SBO)가 발생되었을 경우를 대비하고 있다.

원전용 비상디젤발전기는 원자력발전소 안전관련 설비에 비상전원을 공급하는 역할을 하며 이중 또는 삼중의 다중으로 설치되어 혹시라도 예상치 못한 발전소 비상사태에 대비하고 있다. 본 연구에서는 이러한 원전용 비상디젤발전기와 선박용 디젤엔진을 비교하고 원전용 비상디젤발전기의 운전 특성을 이해하며 국내외 사고 관련 정보체계를 조사하였다. 더 나아가, 해외의 비상디젤발전기 손상 사례(915건)를 조사 분석하여 국내 원자력발전소 비상디젤발전기 사고예방 및 신뢰도 향상에 기여코자 한다.

<sup>†</sup> 장정환, 회원, 한국원자력안전기술원

E-mail : k408cjh@kins.re.kr

TE: : (042)868-0595 FAX : (042)-868-0730

<sup>\*</sup> 한국원자력안전기술원 기계재료실

<sup>\*\*</sup> 한국해양대학교 기관시스템공학과

## 2. 원전용 EDG와 선박용 디젤엔진의 비교

### 2.1 원전 비상디젤발전기(EDG) 개요<sup>1)</sup>

원전대기용 비상디젤발전기로는 1,750-8,800kW 발전기를 구동하는 대구경 중속 디젤엔진이 사용된다. 이런 많은 종류의 디젤엔진이 선박용, 천연가스 이송, 그리고 철도 기관차에 적용하기 위해서 1950년대에 설계되었다. 위와 같은 산업에 적용된 엔진의 설계는 장기간 운전 즉 몇 주 또는 몇 달 동안의 연속운전을 내포한다. 그러나, 원전대기용 EDG는 보통 일년에 150-200시간도 운전하지 않는다. 이 운전시간들은 엔진이 비상시 잘 기동될 수 있는지 확인하기 위하여 원자력규제기관의 요구에 따른 정기적인 감시시험운전 시간들을 합한 것이다.

엔진은 보통 기동을 돕고 기동시 마모를 줄이기 위하여 자켓 냉각수와 윤활유를 37.8°C-76.7°C (100°F-170°F)로 조절하여 대기상태를 유지한다. 감시시험운전은 매번 단지 각 1-4 시간뿐이기 때문에, 시동 횟수에 대한 운전시간의 비율은 일반적으로 원전대기용 발전소의 엔진이 상업용 엔진보다 매우 낮다. 원전 EDG의 경우 한번 기동시 운전시간은 약 1시간이고 상업용 엔진은 한번 기동시 운전시간은 100에서 1000시간이다. Fig. 1은 엔진의 운전시간과 마모관계를 보여주고 있다.

원전 비상발전기는 성능의 건전성을 확인하기 위

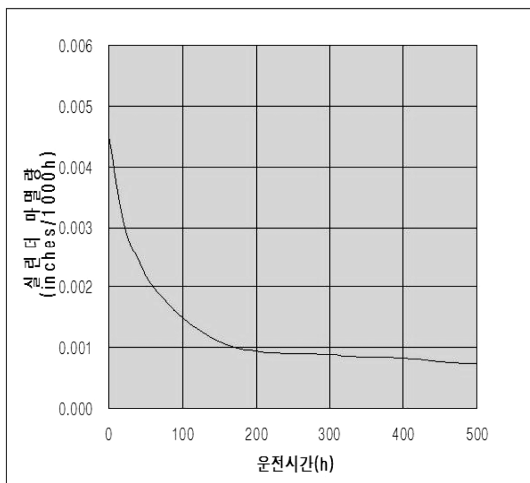


Fig. 1 Correlation of engine operating time and wear<sup>2)</sup>

하여 주기적인 시험운전을 통해 디젤 발전기의 상태를 파악하여야 한다. 따라서, 엔진이 부하운전을 할 때마다, 운전 파라미터들의 완전한 기록은 주기적으로 수집되어야 한다. 엔진이 장착되어 운전 에 들어가기까지는 공장시운전에서 다양한 시험을 거쳐 신뢰성과 내구성을 인정받으며, 특히 보증출력에서 연속적으로 안전하게 운전이 가능하다는 것을 확인받게 된다. 공장시운전의 목적은 기계 및 기기의 정확한 조립과 성능에 관한 확인을 위하여, 기동시험(starting test), 하중시험(load test), 조속기 시험(governor test), 병렬운전시험(parallel running test), 엔진 보호장치시험(engine protecting device test), 전압 및 속도조절시험(voltage & speed regulation test), 비상정지 및 기동(emergency stop and run), 안전장치시험(safety device test), 과속도시험(overspeed test), 분해점검(overhaul inspection), 엔진의 연료소비량 및 소비율 등의 시험 및 검사가 수행된다.

원전용 비상디젤발전기와 같이 수명기간의 대부분을 대기상태로 있는 엔진에 있어서는 비상사태에 대응하기 위한 능력의 증명과 성능의 유지가 대단히 중요한 과제이다. 실제로 과거 수년간 많은 원자력발전소에서 실행되고 있는 수많은 정기점검(Surveillance Test)이 비상에 대응하기 위한 디젤 엔진 발전기 시스템의 능력을 증명하고 있다고 추정된다. 종합성능시험에 있어서, 원전용 비상발전기는 특성상 급속기동과 100% 또는 110% 과부하운전의 가혹한 조건에서 신뢰성이 확보되어야 하는 관계로 공장 시운전 및 실제 운전시 각각 취득한 데이터간의 비교검토를 통한 교정이 지속적으로 이루어져야 한다.

### 2.2 운전특성비교

원전용 비상디젤발전기와 선박용 디젤엔진의 운전특성을 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.2.1 원전용 비상디젤발전기의 운전특성

- 가. 10초 이내에 비상디젤엔진이 기동되어야 한다.
- 나. 60초 이내에 100% 부하 투입이 가능해야 한다.
- 다. 110% 과부하 운전이 수시로 가능해야 한다.

#### 2.2.2 선박용 디젤발전기의 운전특성[3]

- 가. MCR(연속최대출력)의 50% 범위 즉, 엔진 조

중대역에서 조종운전이 허용가능해야 한다.

나. 엔진 조종대역 최대점에서 상용출력(MCR의 85, 90%)까지는 load program이 작동되어야 하며, 저속으로 열부하를 고려하면서 부하를 증가시켜야 한다.

### 3. 국내외 원전 손상사례 관련 정보 체계<sup>4)</sup>

#### 3.1 국내 원전 손상사례 관련 정보 체계

한국수력원자력(주)는 국내 원자력발전 사업자이며 원자력발전소 사고 발생시 원자력법에 의해 정부(주무부서:교육과학기술부)에 보고해야 할 의무를 가지고 있다. 한국원자력안전기술원은 이와 관련하여 정부에 원자력안전관련 기술지원을 한다.

#### 3.2 WANO(World Association of Nuclear Operators)

- 세계원자력사업자협회

세계원자력사업자협회는 1986년에 있었던 체르노빌 원전 사고 이후 원자력 산업의 국제적 협력과 전문성을 고취하기 위해 만들어진 국제기구이다. 원자력발전을 하고 있는 단체는 누구나 회원으로 가입할 수 있다.

#### 3.3 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)

- 미국원자력사업자협회

미국원자력사업자협회는 1979년 미국 TMI 원전 사고 이후 미국내 원자력사업자간에 설립된 기구이다. INPO는 원자력발전사업자간의 발전경험의 공유 및 전문성 고취를 위해 설립되었다.

#### 3.4 NRC(Nuclear Regulatory Commission)

- 미국원자력규제위원회

미국원자력규제위원회는 1975년 설립된 미국내 원자력관련 규제를 담당하는 정부기관이다.

### 4. 해외 비상디젤발전기 손상사례 분석

본 자료는 1974년부터 2008년까지 세계원자력사업자협회 WANO(World Association of Nuclear Operators)<sup>5)</sup>에 보고된 해외 비상디젤발전기 관련

**Table 1** Occurrence of accident by Systems

Occurrence type		Accident (Number)	Accident Rate(%)
Engine and mechanical auxiliary systems	Fuel oil sys.	120	13.1
	Engine	94	10.3
	Cooling water sys.	86	9.4
	Lubrication sys.	72	7.9
	Starting air sys.	45	4.9
	Intake · exhaust sys.	43	4.7
	Sub. total	460	50.3
Generator and electrical-control sys.		455	49.7
Total		915	100.0

손상사례 915건을 바탕으로 분석한 자료이다. Table 1은 전체 비상디젤발전기 관련 손상사례 915건에 대해 크게 두 분야인 엔진 및 기계보조계통과 발전기 및 전기/계측제어 분야로 나누어 각각의 손상사례 건수와 비율을 나타낸 표이다. 또한, 엔진 및 기계보조계통을 엔진, 연료유, 냉각수, 윤활, 기동 및 흡배기의 6개 계통으로 세분하여 분석하였으며, 각 계통의 손상사례를 또다시 주요기기별로 분류하여 분석하였다.

#### 4.1 EDG 기계 및 계측분야 손상사례 분석

- 디젤엔진 및 기계보조계통 손상사례

(전체 915건 중 460건, 50.3%)

- 발전기 및 전기/계측제어분야 손상사례

(전체 915건 중 455건, 49.7%)

- 분석결과, 엔진 및 기계보조계통과 발전기 및 전기/계측제어분야가 비슷한 사고·고장 발생률을 보였다.

#### 4.2 EDG 엔진 및 기계보조계통 손상사례 분석

- 디젤엔진 및 기계보조계통 손상사례를 디젤엔진 및 부속기계통(연료유계통, 냉각수계통, 기동계통, 윤활계통 및 흡·배기계통)으로 분류하였다.

- 분석결과, 연료유계통(26.2%), 디젤엔진(20.6%), 냉각수계통(18.8%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.(Fig. 2)

##### 4.2.1 디젤엔진 손상사례 분석

- 디젤엔진 손상사례를 8개의 주요기기(조속기, 베어링, 크랭크샤프트, 실린더, 커넥팅로드, 크랭크 케이스, 피스톤 및 실린더 헤드)로 분류하였다.

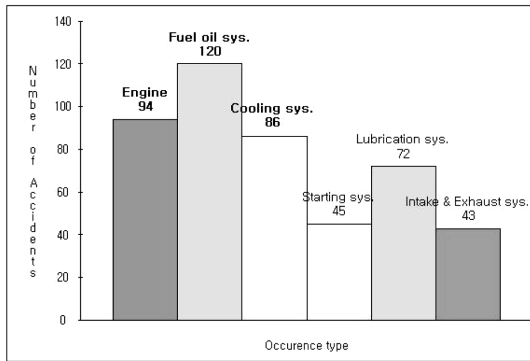


Fig. 2 Occurrent rate of Engine and Auxiliary system

- 조속기(29.8%), 실린더(19.1%), 실린더헤드(17.0%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.

4.2.1.1 조속기 주요 손상원인

조속기는 엔진의 하중의 변화에 따라 설정된 엔진 속도를 유지하기 위해 연료량을 조절하여 연료량을 제어하는 엔진의 주요 부속 기기이다. 조속기가 속도제어에 실패하면 비상디젤발전기는 과속도 트립이나 저주파수 트립 등에 의해 정지한다. 따라서, 조속기는 다른 어떤 기기보다도 정교함을 요구된다. 이런 조속기의 주요 손상원인은 다음과 같다.

- 제어회로시스템의 전기전자 부품고장
- 진동에 의한 체결볼트, 잠금너트 등 부품의 이완
- 작동링크와 연료랙 부분의 베어링 마모 등 기계적 열화에 의한 부품손상
- 부적절한 정비로 인한 성능저하

4.2.1.2 실린더 주요 손상원인

실린더는 엔진의 연소가 이루어지는 곳으로 항상 고온고압의 환경에 노출되어 있는 엔진의 주요 기기이다. 엔진의 효율을 높이기 위해 실린더는 일정 온도를 유지되도록 자켓냉각수에 의해 적절하게 냉각되어야 한다. 실린더의 주요 손상원인을 보면, 냉각수 누설의 실린더 수력학적 잠김상태에 의한 엔진 기동실패와 피스톤과의 기계적 마찰에 의한 크랙 및 균열 손상 등이 주요 원인으로 나타났다.

4.2.1.3 실린더 헤드 주요 손상원인

실린더 헤드는 흡배기 밸브 및 연료노즐 등이 위치한 실린더 상부를 덮고 있는 엔진의 주요 기

기이다. 실린더 헤드 역시 실린더와 마찬가지로 엔진 연소에 따른 흡기와 배기가 반복되어 항상 고온 고압의 환경과 접해 있고 밸브들의 기계적 개폐가 반복적으로 발생함으로써 기계적 윤활이 중요하게 필요로 되는 기기이다. 분석결과, 밸브 및 로커암 관련 기계적 파손이나 가스켓 누설에 의한 냉각수 오염 등이 실린더 헤드의 주요 손상원인이었다.

4.2.2 연료유계통 손상사례 분석

- 연료유계통 손상사례를 9개의 주요기기(배관, 밸브, 연료유품질, 연료랙, 연료펌프, 인젝터, 탱크, 펌프, 필터&스트레이너)로 분류하였다.
- 펌프(17.5%), 연료유품질(15.0%), 배관(14.2%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.

4.2.2.1 펌프 주요 손상원인

연료유계통의 펌프는 지하 연료저장탱크로부터 일일연료유탱크까지 그리고 일일연료유탱크에서 연료주입펌프까지 연료유를 이송하는 역할을 한다. 분석 결과, 고속으로 회전하는 커플링, 축 및 임펠러 등에서 많은 손상사례가 있었다. 손상원인에는 기계적 파손, 축 alignment 불량, 진동에 의한 부품의 이완 등이 있었다. 그 밖의 손상사례로는 제어 회로 고장, Sealing 및 접촉자의 노후화 등이 있었다. 특이사항으로 인적실수나 절차서 불량으로 인한 기동실패가 있었다.

4.2.2.2 연료유품질 불량에 의한 손상원인

엔진성능에 직접적으로 영향을 주는 연료유품질과 관련하여 주요 손상사례를 살펴보면, 수분, 미립자, 침전물 및 박테리아와 같은 이물질에 의한 오염과 세탄가 및 유헴성분과 관련한 품질불량이 대부분이었다. 이는 해당 절차서에 따른 품질관리 상태가 미흡하여 발생한 사례이다.

4.2.2.3 배관 손상원인

배관 누설이 대부분의 손상사례로 나타났으며 원인은 설치, 제작, 정비 중에 인적실수나 피로와 진동에 의한 균열과 같은 일반적인 원인이었다.

4.2.3 냉각수계통 손상사례 분석

- 냉각수계통 손상사례를 11개의 주요기기(가스

켓, 계측제어, 라디에이터, 배관, 밸브, 열교환기, 전열기, 인터쿨러, 탱크, 펌프, 냉각수품질)로 분류하였다.

- 펌프(18.6%), 배관(17.4%), 밸브(17.4%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.

#### 4.2.3.1 열교환기 손상원인

냉각수계통의 열교환기는 필수기기냉각계통 및 윤활유 계통과 열을 교환하는 주요 기기이다. 주요 손상사례는 튜브 부식에 의한 누설이었고 원인은 경년열화부식, 미생물에 의한 부식, 유량유발부식 등이 있었다.

#### 4.2.3.2 펌프 손상원인

냉각수계통의 펌프는 계통내에 냉각수를 순환시키는 기기이다. 주요 손상사례는 전기제어관련 전원 및 타이머 고장과 기계적인 원인의 축 밀봉 손상이나 임펠라 손상이었다. 전기신호에 의해 작동하는 펌프의 특성상 전기적인 원인으로 작동불능을 초래한 경우나 회전하는 축의 밀봉 손상 및 임펠라 손상에 따른 기계적 원인에 의한 성능저하가 주요 원인이었다.

#### 4.2.3.3 배관 및 밸브 손상원인

냉각수계통의 배관과 밸브 손상사례는 주로 부식에 의한 배관 누설 및 온도조절밸브 고장이었다. 손상원인은 냉각수에 의한 부식과 경년열화 및 이물질 밸브막힘 등이었다.

#### 4.2.4 기동계통 손상사례 분석

- 기동계통 손상사례를 7개의 주요기기(필터/건조기, 계측제어, 공기분배기, 공기모터, 배관, 밸브, 압축기)로 분류하였다.

- 밸브(35.6%), 계측제어(15.6%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.

#### 4.2.4.1 밸브 손상원인

기동공기계통의 높은 압력 특성상 밸브에 관한 손상사례가 가장 높은 것으로 판단된다. 밸브 손상사례는 솔레노이드밸브 고장 및 기동밸브 고장이 있었다. 엔진기동을 위한 기동공기 설정압력이 높아 밸브의 실링이나 개폐에 문제가 발생하는 것으로 조사되었다.

#### 4.2.4.2 계측제어(I&C) 손상원인

기동공기계통의 계측제어관련 손상사례는 압력 스위치 오작동관련 사례가 많았으며 이물질에 의한 기동용 계전기 불량과 다이오드 단락으로 인한 기동실패의 경우도 있었다.

#### 4.2.5 윤활계통 손상사례 분석

- 윤활계통 손상사례를 9개의 주요기기(펌프, 배관, 밸브, 윤활유품질, 섬프, 스트레이너, 열교환기, 계측제어, 기타)로 분류하였다.

- 윤활유품질(36.1%), 배관(20.84%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.

#### 4.2.5.1 윤활유 손상원인

윤활유 손상사례는 주로 금속부스러기에 의한 오염 및 공기유입에 의한 윤활유 압력불량 발생 등이 있었다. 이러한 손상은 주요 베어링 윤활유 공급에도 영향을 주어 베어링 파손으로 이어진다. 또한, 윤활유 성분 및 정비와 관련하여 인적 실수가 연관된 것으로 분석되었다.

#### 4.2.5.2 배관 손상원인

윤활계통의 배관 손상 원인은 기계적인 피로와 진동에 의한 균열과 같은 원인이었다.

#### 4.2.6 흡·배기계통 손상사례 분석

- 흡·배기계통 손상사례를 9개의 주요기기(필터, 배기다기관, 배기구, 배기밸브, 흡입구, 인터쿨러, 계측제어, 터보차저)로 분류하였다.

- 터보차저(32.6%), 배기다기관(16.3%) 순으로 높은 손상 비율을 보였다.

#### 4.2.6.1 터보차저 손상원인

흡·배기계통의 주요 기기인 터보차저는 고속으로 운전되고 고온 고압의 환경에 노출되어 있기 때문에 가장 높은 손상을 일으키는 것으로 판단된다. 주요 손상 내용은 케이싱, 볼트, 베어링 및 블레이드의 기계적인 손상이었으며 원인은 진동에 의한 피로 파손 및 마모이었다.

#### 4.2.6.2 배기다기관 손상원인

배기다기관의 손상은 주로 진동 및 고온 고압에 의한 기계적 균열 및 파손에 기인되었다.

## 5. 결 론

해외 비상디젤발전기 관련 손상사례를 분석한 결과, 전체 손상사례 발생 건수의 50% 이상이 엔진 및 기계보조계통에서 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 그 중에 특히 연료유계통에서 가장 많이 발생하는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 연료유계통의 주요기기 중 펌프가 가장 높은 손상 비율을 보였으며, 손상원인에는 기계적 파손, 축 alignment 불량, 진동에 의한 부품의 이완 등이 있었음을 파악할 수 있었다.

본 연구를 통해 국내 원전 비상디젤발전기 운영에 있어 고유 운전특성을 반영하고 해외 손상사례 분석을 고려한 개선된 정비 방안을 수립할 수 있는 계기를 마련하였으며, 향후 국내 원전 비상디젤발전기 건전성 및 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. EPRI TR-107135 “Diesel Engine Analysis Guide”, P 2-1,1997
2. 최재성, 전효중, “내연기관강의”, 효성출판사, P 256, 2005
3. 조권희, “비상디젤발전기 보조계통 경수로형 원전 안전심사지침 기술검토”, KINS/HR-489, P 2-7, 2002
4. 해외기관 정보 구성체계(원자력환경기술원 원자력기술정보그룹), 2004
5. WANO, OE1926 : PVNGs Unit3 Diesel Generator Malfuction, 1986 외 914건