

국의 원전 고장사례 분석을 통한 국내 비상디젤엔진계통 신뢰도개선 연구

A Study on Reliability Improvement of Domestic Emergency Diesel Generator Systems through the Analysis of Overseas Failure Cases

조권희
한국해양대학교,
부산광역시 영도구 동삼동 1번지

성계용, 정연기
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

안수길
부경대학교
부산광역시 남구 용당동 산 100

요 약

원전용 비상디젤엔진 계통의 신뢰도는 원전의 안전성 및 신뢰성에 직결되는 중요한 사안 중의 하나이다. 원전용 비상디젤발전기는 대부분 중속대형디젤엔진으로 선박용 엔진에 기초를 두고 있으며, 수명기간의 대부분을 대기상태로 있다. 그러나 급속기동, 잦은 시동, 급속부하투입, 고부하운전 등의 원전 특유의 운전조건으로 인하여 고장의 빈도가 그다지 낮지 않다. 본 논문에서는 비상디젤엔진 계통의 신뢰도 향상 방안을 마련하고자 국내 원전 비상디젤엔진 계통에서 일어날 수 있는 대표적인 고장사례를 미국의 예에서 발췌하여 분석하고 개선 방향을 제시하였다.

Abstract

The reliability of Emergency Diesel Generator(EDG) System is considered one of the most important system linked directly with safety and reliability of nuclear power plants(NPPs). EDGs in NPPs adopt medium-speed large diesel engines, which were designed on the basis of marine's, and are in standby during normal plant operation. However, the failure rate of the EDGs in NPPs is not so much lower than that in the marine engines due to the peculiar operation condition such as fast start, frequent starting test, fast loading, high running load, etc. In this paper, the suggestion for reliability improvement of domestic EDGs were provided through the analysis of the failure cases in USA.

I. 서론

원자력 발전소에 설치되어 있는 비상디젤발전기(EDG : Emergency Diesel Generator)는 원자력발전소 소내 정전이나 외부전원 상실 등의 비상사태 발생시 10여초 안에 긴급 기동되고 1분 이내에 비상부하를 담당하여 원자로의 잔열을 제거하는 등 발전소 안전계통 주요 기기에 비상전원을 공급하는 중요한 기기이다. 이와 같이 비상시 최후의 안전을 보장하기 위해 설치되어 있는 EDG는 그 운전 신뢰성이 원자력발전소의 신뢰도 평가에 미치는 중요한 영향에도 불구하고 국내에서는 원자력과 직간접적으로 관련된 계통과 전기계통에 관한 분야가 주요 관심대상이었기 때문에 상대적으로 소홀히 다루어진 점이 없지 않았다.

이에 비해 미국은 EDG를 원자력발전소의 주요 구성기기 중 중요기기¹⁾로 비중있게 다루었으며 EDG 기계계통에 대한 열화특성 및 신뢰도 향상을 위하여 이미 원전 열화연구 프로젝트의 일환으로 EDG의 열화에 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔고, 최근에도 각 원전별 신뢰도 해석과 정비 규정과 관련하여 중요한 기기로 인식되어 EDG 엔진과 보조기계 계통에 대한 연구 및 평가가 수행되고 있다.

국내 원전 EDG 계통 열화평가 및 신뢰도 개선을 위한 연구가 원전 EDG의 사고 및 고장정보를 체계적으로 분석하고, 외국의 열화 및 신뢰도 개선 연구결과를 파악하는 것으로부터 시작되고 있다²⁾. 또한 최근에는 EDG 신뢰도 프로그램의 중요한 요소인 보수 및 점검 프로그램을 보완하기 위해 선진방식인 상태기준 정비프로그램의 도입을 일부 원전에서 추진하고 있다.

원전 비상디젤발전기는 대부분 중속대형(Large, Medium Speed)디젤엔진으로 선박용 엔진에 그 기초를 두고 있으나, 사고유형과 내용면에서는 대동소이하게 나타나고 있다. 그러나 운전조건이 확연히 다르고, 몹시 가혹할 뿐만 아니라 사고시에 그 대처 환경 및 시간이 촉박한 관계로 선박용 엔진의 경우와는 다른 대처방안이 논의되어야 한다. 타 산업용 엔진과 다르게 원전 EDG는 급속기동 및 급속부하투입조건에 따라, 피스톤-라이너부위, 캠 부위가 정상 유효력이 생성되기 전에 운전되어 금속과 금속 마찰에 의한 스커핑(scuffing)을 유발하고, 크랭크축의 과도 비틀림진동으로 인해 절손이 발생하기도 한다. 그리고 열평형에 다다르지 못한 급속운전은 열부하에 의한 고정부의 변형과 운동부의 스커핑을 초래하고, 연소가스의 블로우바이에 의한 과열이 크랭크실 폭발을 야기하기도 한다. 또한 과급기는 기동초기 베어링부위의 유효부족에 의하여 급속마모를 유발하고, 단기운전-장기대기로 인해 연료유에 박테리아 등 생물학적 오염과 응축수 발생 등의 문제가 보고되고 있다.

본 논문은 상기의 시험 및 운전조건으로 인한 손상 발생가능성에도 신뢰성 있는 운전을 확보하기 위해서 미국원자력발전소의 고장사례를 샘플링하고 그 원인을 분석, 예방대책을 강구하여 이들을 비상디젤발전기계통의 초기 설계단계에 적용함으로써 설계의 신뢰성을 제고하고, 운영절차서를 보장하여 더욱 안전한 원자력발전소를 유지하는 방안에 대해 검토하였다.

II. 사고내용과 원인³⁾

원자력발전소의 비상디젤발전기는 1977년 San Onofre 원전에서 TDI(Transamerica Delaval Inc.)엔진⁴⁾이 운전되기 시작한 후, 엔진구조물, 운동부, 밸브기구, 시동장치, 흡·배기장치, 계기들

과 제어장치, 전기시스템, 연료계통, 윤활계통, 냉각계통, 발전기 등 시스템의 전부분에서 고장이 발생하고 있다. 고장사례를 10CFR Part 21 Report, Information Notice 등에서 발췌, 분석하고 이들을 배관계통을 중심으로 6개군으로 분류해서 운전의 신뢰성을 확보하기 위해 설계 및 운전시에 EDG 기계계통에 고려되어야 할 사항들을 검토한다.

1. 연료유 계통

연료유 계통에 관련된 사고로는 이물질과 생물학적 오염 즉 박테리아나 곰팡이의 번식에 의한 스트레이너 폐색에 의해 연료의 정상공급이 방해받는 문제와 동한기 연료유의 유동성 악화문제, 운전중 연료유 계통의 누설문제 또는 그 누설에 의한 화재발생 문제 등이 있다.

가. 1985년에는 Limerick Generating Station, Philadelphia Electric Co.에서 EDG용 연료유 저장탱크내부 도장의 껍질이 일어나 그대로 사용할 경우, 엔진 운전불능을 야기할 수 있는 문제점이 발견되었다. Inorganic zinc primer를 칠한 후에 epoxy phenolic 코팅을 도장하였고 최종검사에서 탱크하부에 도포한 epoxy phenolic 코팅의 껍질이 벗겨져 일어나 문제부위를 sand blasting하여 white metal 상태에 epoxy phenolic 코팅을 재도장하였다. 이는 zinc primer와 epoxy 코팅간의 불친화성⁵⁾과 zinc primer의 부적당한 경화를 인지하지 못하였기 때문이었다.

1986년 Arkansas Nuclear One Unit에서는 EDG 정기 24시간 Endurance 시험운전중에 일일 연료 공급탱크와 엔진사이에 위치한 연료유 Y-스트레이너가 막혀 엔진이 정지된 사고가 발생하였다. 스트레이너 엘리먼트를 분해하여본 결과 산소 토오치로 가열해야 청소가 될 만큼 굳은 탄소질의 찌꺼기가 막혀 있었으며 실험실에서 연료유를 성분 분석하여 본 결과 기름이 산화되고 생물학적으로 오염이 되어있었다.

나. 1990년과 1992년 Vermont Yankee 발전소에서는 EDG의 운전성에 관한 기름이송의 문제로서 추운날씨에 연료유의 유동성 확보 문제점을 발견하였다. 사용 연료유는 그 지역 규정설계의외기온도 -11℃보다 6℃ 더 낮은 유동점을 갖는 것(ASTM 규정)이었으나, 문제지역의 9년 동안에 최저온도는 -36℃ 였다. 문제 전에는 -18℃의 기름을 구입하였으나 문제점을 양지한 이후에는 -24℃ 연료유를 구입하고 있고, 부가적으로 몹시 추운 날씨에는 저장탱크를 재순환시키면서 온도를 감시하고 있으며, 극히 추운 날씨에는 연료유를 적재한 트럭을 따뜻한 건물 안에 대기시켜 놓고 있다.

2. 윤활유 계통

EDG 계통 중 윤활유 계통에 관련된 사고가 가장 많이 발생하고 있다. 사고 유형도 윤활유 자체의 문제와 냉각수와 연관된 문제 등 다양하다. 윤활유 계통에 관련된 사고를 사고사례를 통해 분류해 보면 시동초기 윤활부족에 따른 과급기 사고, 윤활계통의 불량에 따른 윤활부족 또는 냉각수의 선프탱크 유입사고에 의한 피스톤과 라이너, 메인베어링의 손상문제, 윤활유와 연료유의 불친화성 문제, 윤활유 냉각기의 누설문제, 원전용 기관의 특성을 무시한 예윤활(pre-lubrication) 없는 시동으로 인한 메인베어링과 축, 연접봉베어링, 라이너의 손상 그리고 진동에 의한 압력센서의 고장 등이다.

가. 1979년 Monticello Nuclear Generating Station에서 Transamerica Delaval EDG(TDI)의 과급기의 초기윤활부족에 관한 문제점이 발견되었다. 원래의 설계는 운전중에만 과급기에 윤활유를 보내고, 대기모드에서는 윤활유를 보내지 않고 바이패스 시켰는데 그 이유는 대기상태에서 계속 윤활유를 보내면 시일링(sealing)이 완전히 되지않아 윤활유가 고온가스측인 임펠러부로 스며들어 기동시에 화재의 위험이 있었기 때문이었다. 이와 같은 불충분한 윤활 때문에 한달에 한번 잠깐 운전하는 모드의 100시간 사용 베어링마모율이 연속운전의 15,000에서 20,000시간의 마모율⁶⁾과 같게 나타나고 있다. 기동시의 적절한 윤활을 위해 오리피스를 사용하여 주어진 배급율을 유지하면서 윤활하는 oil drip system으로 개조가 이루어졌다. 대안은 월간시운전 전에 보조 윤활펌프를 30-60초간 수동으로 돌려주어 엔진기동 후 유압이 생성되기까지 윤활작용을 하게하는 절차상의 변경을 하는 것이다.

나. 1989년 Cooper-Bessemer KSV diesel engine, Susquehanna Steam Electric Station & Pennsylvania Power and Light에서 피스톤과 라이너의 윤활불량이 원인이 되어 마찰열에 의한 크랭크실 폭발사고가 발생하였고, 1995년 Calvert Cliffs Nuclear Power Plant SACM Diesel Engine에서는 EDG사용 연료유와 윤활유의 불친화에 의한 라이너 스커핑과 피스톤에 과도한 카아본 퇴적이 일어나는 사고가 있었다. 전자는 다음의 원인 즉 ①급속부하투하 ②윤활유의 질 ③흡입공기의 온도 등의 인자들에 의해 피스톤과 라이너의 시동초기 윤활불량을 야기하여, 피스톤 스커트부의 주석이 너무 많이 라이너쪽으로 옮겨가 운전중 유막을 깨뜨렸기 때문이다. 라이너 조직에는 15-25%의 기공⁷⁾이 있어 여기에 채워진 오일이 윤활작용을 돕고 있지만, 주석이 이 구멍들을 메워버렸다. 후속 조치로 모든 피스톤과 라이너를 교체했고, 주석기인 pin end cap을 제거하고, 맨 아래쪽 oil scraper ring을 제거해서 피스톤과 라이너 접촉부위의 윤활을 향상시켰으며, 후자는 1995년 12월, 시운전시험(preoperational testing)시에 발견된 사고로, 운전중 가끔 쿵쿵치는 소리가 나고 윤활유가 크랭크축 시일로부터 새어나와 엔진 정지후 조사한 결과 한 실린더의 스커핑 및 비정상적인 마모를 발견했고, 1996년 1월의 2년 정비검사시에 모든 실린더에서 똑같은 징후를 발견한 사고다. 그 원인은 1995년 초, 새 EPA 규정에 따라 연료유 유황 함유량이 0.3%인 기름사용을 중지하고 0.05% 이하인 기름으로 공급하여 사용한 결과였다.

다. 1979년, 1980년 Arkansas Nuclear Station에서 엔진 정기시험중 윤활유 쿨러 누설로 인한 냉각수가 윤활유에 섞여 엔진 트립(trip)이 발생하였고, 1985년-1992년 기간 많은 발전소에서 실린더 라이너 하부에 위치한 냉각수 시일링 손상이 원인이 되어 엔진 차켓 냉각수가 손상된 시일 부위로 누설하여 윤활유 sump tank로 흘러 내려와 크랭크 케이스 내부 윤활유와 섞이는 사고와 그로 인해 피스톤, 라이너 손상과 메인베어링의 손상을 초래한 사고들이 발생하였다. 전자는 물이 L.O.cooler의 튜브와 튜브시트의 접촉부 크랙을 통해 유입되었다. 튜브와 시트를 납땜으로 밀착하고 sealer로서 epoxy를 사용하여 약 9년간 사용했는데 궁극적으로 내구성이 보장되지 않았다. 새 쿨러는 시트 두께를 1/8"에서 1/2"로 증가하고 튜빙 방법을 튜브 확관기(tube expander)를 사용한 롤링(rolling)방법으로 바꾸었다. 또한 이 부위는 심각한 침식이 발생하는 부위였다. 후자는 냉각수 누설의 1차 사고에 이어 피스톤링 절손, 피스톤의 라이너에 고착 그리고 메인베어링과 연접봉베어링의 2차 손상사고를 유발하였다.

라. 1984년 William B. McGuire Nuclear Station Unit에서 정기시험 직전에 엔진 윤활유 저압경보와 함께 엔진이 트립된 사고가 발생하였다. 윤활유 계통 스트레이너에서 황동 메탈 성분이 발견되어 엔진을 분해, 점검한 결과 11개중 4개 메인 베어링이 손상받았고, 모든 커넥팅로드 베어링과 메인베어링을 교환하고, 크랭크샤프트와 피스톤 한 개를 교환하였다. 이 사고는 fast start 동안의 부적절한 윤활이 문제였다. 이 엔진은 Fairbanks-Morse Model No. 38D8 1/8, 대향피스톤형 엔진이다. 각 엔진은 keep-warm system, 수동제어 예윤활시스템과 상부크랭크축은 L.O.booster를 갖고있다. 부스터는 2갈론의 오일이 채워지고 시동압축공기에 의해서 상부크랭크라인베어링으로 간다. 부스터는 11, 12번 발전기에는 1982년에 다른 2대에는 1983년에 설치되었다. 이 발전소는 1984년 1월에 수동 예윤활을 중지했다. 11번 발전기는 수동 예윤활없이 100회 정도 시동을 했으며 결국 대형사고를 초래했다.

3. 냉각수 계통

냉각수 계통에 관련된 사고로는 냉각수 펌프의 내부 부품이나 베어링의 고장에 따라 냉각능력이 떨어져 냉각수온도가 상승하여 엔진이 트립되는 사고와 열교환기의 오손으로 역시 냉각능력이 저하되는 문제, 진동에 의한 압력센서의 고장에 의한 사고 그리고 wax형 thermostatic control 밸브의 손상에 의한 사고 등이 있다.

가. 1982년 Dresden Station발전소와 1983년 Sequoyah 2에서는 냉각수 펌프의 고장으로 인한 정지사고가 있었다. 전자는 EDG 성능 시험 중 냉각수펌프의 토출측 체크밸브의 pivot arm이 부러져, 여기서 빠져나온 체크 밸브 디스크가 토출측을 막아 냉각수압이 떨어져서 자켓냉각수 열교환기를 냉각시키지 못해 엔진이 트립된 경우이고 후자는 자켓냉각수순환펌프(Cooling jacket circulation pump)의 볼 베어링이 파손, 펌프의 운전이 원활하지 못하여 운전중인 엔진의 냉각을 위한 냉각수의 순환이 정지되어 결과적으로 엔진 정지를 초래한 사례이다.

나. 1983년 Quad-Cities 2발전소에서는 월간 비상디젤발전기 시험 운전중 부하 투입후 10여분 뒤에 냉각수 고온으로 엔진이 트립되는 사고가 발생하였다. 사고원인은 엔진 냉각수 열교환기의 냉각측 튜브의 오손에 의해, 엔진 운전중 자켓 냉각수를 충분하게 냉각하지 못하여 엔진의 온도가 상승하여 트립을 유발하였다.

다. 1991년 Catawba 원전, unit 2에서 EDG 냉각청수용 Thermostatic control valve 손상으로 인한 크랭크케이스 폭발사고가 있었다. 사고 내용은 계획정비후 100% 부하 시험운전중 냉각청수온도가 비정상적으로 올라 결국 윤활유의 고온으로 트립되었고 이윽고 크랭크케이스에서 폭발이 발생하였다(고온경보 79.4℃/175°F, 고온트립 93.3℃/200°F). 이는 자켓-윤활유냉각기-air intercooler-조속기윤활유냉각기의 폐회로의 냉각을 조절하는 밀랍형 조절밸브의 엘레먼트(element)가 장기사용(5년 이상)으로 손상되어 제기능을 못하였고, 이에 따라 높아진 온도는 다량의 윤활유증기를 발산시키며, 운동부의 간격에도 영향을 미쳐 윤활의 질을 감소시킨다. 여기에 피스톤과 라이너의 마찰에 의해 생긴 열은 증기를 착화시켜 압력상승을 초래하여 폭발을 야기했다.

4. 시동공기 계통

시동공기 계통에 관련된 사고로는 시동공기 저장탱크의 안전밸브 분기 후 재안착이 되지 않는 사고와 시동밸브들이 정상적으로 작동하지 않아 시동이 잘 되지 않는 사고 그리고 시동공기 저장탱크의 공기를 이용하여 엔진을 제어하는 EDG의 경우, 원전 사고 이후 EDG의 운전이 필요한 기간을 EDG의 운전을 위해 보관하여할 기름의 양을 규정한 Technical specification에 있는 7일을 사용할 때, 탱크 용량이 문제점으로 등장하였다.

가. 1990년 Perry Unit 1발전소에서 비상디젤발전기 시동용 공기저장탱크의 안전밸브가 분출 후 재안착(Reseat)이 되지 않는 사고가 발생하였다. 이는 엔진을 시동하기 위한 시동공기저장탱크의 안전밸브가 분출(Open)된 후 규정 압력에서 Close되지 않아 엔진작동불능을 초래한 고장으로, 안전밸브의 정비 잘못으로 발생한 사고였다.

나. 1999년 2월 Cook Nuclear Plant Unit 1에서 EDG의 장기운전을 지원하는 시동공기/제어공기 시스템의 능력이 압축기의 설계조건 미비로 인해 문제가 되었다⁸⁾. 시동공기가 EDG의 제어공기를 제공하고, 공기의 손실은 엔진을 정지하게 할 수 있다는 것을 고려하지 않았다.

5. 흡배기 계통

흡배기 계통에 관련된 사고로는 과급기와 흡기매니폴드 사이에 위치하여 엔진의 저부하 운전 중 과급기가 엔진 부하에 따라서 연소용 흡입공기를 엔진에 공급하는 데에 보조 역할을 하는 밸브들의 탈락사고, 연관의 열팽창에 의한 지지물의 파손사고와 통풍계의 설계오류 등이 있다.

가. 통풍팬 용량 설계미비로 인한 고온 환경의 영향에 대한 문제점이 아래와 같이 대두 되었다.

(1) 1987년, Carolina Power and Light Company에서 EDG실 냉각 설계결함이 인지되었다. EDG실 냉각팬의 용량미비로 제어 패널(panel) 온도가 상승하여 제어반내의 전기·전자부품이 열화되거나 손상을 입을 수 있는 온도 104°F(40°C)를 넘을 가능성을 양지하였다..

(2) 1989년, Omaha public power 등 다수 원전에서 고온환경이 문제가 되었다. Panel cabinet이 140°F(60°C)을 넘자 고정여자기회로 트랜지스터가 파손되었다. 엔진룸 온도가 대기온도보다 20°F 이상 높으면 많은 사고들로 엔진이 정지되는데(9°F까지는 영향 없음), 이는 냉각청수온도와 과급기 입구 공기온도를 상승시켜 엔진의 효율을 떨어뜨리며, 열화를 가져와 엔진이 정지되거나 정격시간을 운전할 수 없게 된다. 엔진룸 온도가 90°F를 넘으면 panel의 문을 뜯어내는 조치를 보완 수정조치가 끝날 때까지의 하나의 방법으로 사용하였다.

(3) 1997년 Illinis Power Co.에서 통풍계의 기설계기준과 최신화된 안전치가 상이해 운전조건을 맞출 수가 없는 문제가 발생하였다. 설치당시의 기준은 외기조건 겨울 -19°C, 여름 35.6°C였으나 실제로는 겨울 -30°C, 여름 44.4°C가 기록된다. 평가결과는 엔진룸 온도가 60°C까지는 EDG 부속품들이 정상 작동될 수 있다고 판정되어, 대기온도 감시시스템 구축, 초과시에 패널도어를 열고 운전할 것과 위 결과에 따라 통풍계를 새기준으로 설계하도록 했다.

6. 엔진운동부

엔진운동부에 관련된 사고로는 흡입계통으로 유입한 이물질에 의한 피스톤/라이너 손상, 설계 오류와 과부하운전에 따른 크랭크축 절손, 연소실 유입 누설수의 축적에 의한 엔진기동시의 액압 축과 그로 인한 엔진내부 주요부품 파손 및 조속기 고장으로 인한 과속도의 발생과 그로 인한 중요부품(연접봉, 연접봉베어링, 메인베어링 등)의 파손 등이다.

가. 1990년 Susquehanna Steam Electric Station에서 계획예방정비중 비상디젤발전기 엔진의 에어 인터쿨러 정비시에 잔류한 모래 알갱이에 의해 엔진 운전중 피스톤, 피스톤링, 실린더 라이너가 손상되어 비상디젤발전기 운전이 불가능한 사고가 발생하였다. 사고내용과 원인을 보면, 계획예방정비 기간중 엔진의 에어인터 쿨러 튜브측 및 셸측의 이물질을 청소하기 위하여 sand blasting 기법을 이용하여 깨끗이 청소하고 페인트를 재 도장하여 엔진에 설치한 후 모든 엔진 정비가 완료되었음을 확인 후에 시운전을 하였으나 발전기 출력을 100%로 하여 운전하는 것이 불가능해지고 시간이 지날수록 엔진을 전혀 운전할 수 없게 되었다. 따라서 내시경(borescope)을 이용하여 엔진의 실린더 내부를 점검한 결과 모든 실린더 라이너 내부벽이 심하게 상하로 굽혀 있음을 확인하였고, 고장의 원인을 분석한 결과 인터쿨러 정비시에 sand blasting 방법을 이용하여 튜브 및 셸 측 내부를 청소할 때 잔류한 모래 알갱이가 엔진 운전시 흡입 공기를 통하여 실린더 내부로 들어가서 피스톤 링과 실린더 라이너의 습동 부위에 끼여져서 마치 끌로 나무재료를 파내듯이 실린더 라이너 벽면을 파내어서 엔진을 전혀 운전 불가능하게 모든 실린더 내부를 손상시킨 것으로 판정되었다.

나. 1983년 Shoreham 발전소에서 운전중 TDI 엔진의 크랭크 축 절손 사고가 발생하였다. 사고내용은 8개의 새 실린더헤드를 교환 후 2시간 110% 과부하 시험운전의 마지막 15분에 102호기의 핀과 웨브사이가 절단되었다. 사고축은 크랭크축 직경 13", 크랭크핀 직경 11"로 사고 후에 크랭크핀 직경 12"로 모두 교체하였다. 101, 103호기도 조사해보니 102호기와 같은 위치와 방위에서 크랙을 발견하였다. 1997년 Zion에서는 실린더 라이너가 설계 잘못으로 깨어졌고, 이어 냉각수의 연소실 침입으로 피스톤 파손 그리고 윤활유 오손으로 타기통 피스톤의 고착 사고가 발생하였다.

다. 1991년, San Onofre Nuclear Generating Station, Palo Verde Nuclear Generating station 발전소에서는 실린더 헤더 상부 가스켓 및 실린더 헤더 크랙에 의한 누설 자켓 냉각수가 피스톤 상부에 축적되어 엔진 기동시 액압축 발생으로 엔진내부 주요부품을 파손하는 사고가 있었다. 고장원인은 실린더 헤더 가스켓에서 소량의 누설 냉각수가 엔진 대기기간에 실린더 내부로 흘러 들어가 피스톤 상부에 축적됨. 주철 제품으로 제작된 실린더 헤더에 크랙이 발생하였고 이 크랙된 부분으로 냉각수가 EDG가 대기하고 있는 동안에 소량씩 실린더 내부로 누설되어 피스톤 상부에 모여 고이게 되었다. 이 상태에서 엔진 터닝이나 air blowing을 수행하여 실린더 내부 이물질 검사를 수행하는 절차가 생략된 채로 엔진 월간시험을 위한 엔진 기동중에 실린더 내부에서 누설, 축적된 자켓 냉각수가 원인으로 액압축 현상이 발생하여 EDG 엔진이 완전히 파손되었다. 엔진의 연소용 흡입공기인 기체는 피스톤이 상사점(TDC)에 도달해도 압축이 잘 되지만 액체는 전혀 압축이 되지 않으므로 연소실 내부 벽을 형성하여 압축시에 힘을 받는 실린더 라이너, 피스톤, 실린더 헤더가 파손되고 커넥팅 로드가 굽어지며 크랭크 축이 부러지고 혹은 심하게 굽어져서 엔진을 운전

불가능의 상태로 만들게 된다.

라. 1986년, Grand Gulf Unit 1에서 조속기 액츄에이터를 검교정하기 위해 외주 수리 후 엔진에 설치하여 비상디젤발전기 시운전중 약 15초 동안 계속하여 과속도(overspeed)로 엔진이 운전되어 중요부품인 커넥팅로드, 커넥팅로드 베어링, 메인 베어링, 링크핀 부시, 피스톤핀 부시, 엔진 베이스 등이 손상된 사고로 고장원인은 조속기 액츄에이터 외부 수리중에 전기적 조속기 측과 기계적 조속기 측의 설정값 검교정을 잘못된 것과 액츄에이터 내부 윤활유를 적정 유압을 형성할 수 있는 규격품을 사용하지 않고 액츄에이터에 윤활유 보충후 충분한 에어 빼기 작업을 하지 않은 것이 원인으로 추정되었다. 또한 과속도시 엔진에 연료 공급을 제한하는 기계적 리미트 설정치가 잘못 설정된 것으로 추정하였다.

III. 고장의 분석과 국내 EDG 계통 신뢰도 개선 방안

1. 연료유 계통

가. 모든 연료유는 오랜 저장중에 다음의 두가지로 품질이 저하되는 경향이 있다. 첫째는 용해와 불용해성 고무질을 생성하는 연료의 산화와 중합이며 둘째는 저장탱크하부의 연료유와 물의 공유 영역에서의 박테리아, 곰팡이 또는 이스트의 미생물 성장이 밀집하는 것이다⁹⁾. 따라서 다음의 사항이 연료유 계통에 설계 및 시공시에 고려되어야 한다.

(1) EDG설치 이전에 도면검사승인제도를 도입하여 사용자가 도면검토단계에서 연료유 계통을 포함한 모든 기기에 대해 코멘트할 수 있어야 한다..

(2) 연료유의 청결도 관리를 위한 고려사항으로 장기보관에 따른 품질저하 정도는 연료유의 원산지, 정제방법(직류법, 유동 촉매분해법), 저장조건 등에 의해서도 영향을 받으므로 정기적인 교체 주기를 지켜야 한다. 일일탱크의 출구는 탱크저부에 두지말고 high suction 즉 탱크의 저부에서 상당히 높은 위치에 두어 하부 침전물의 흡입을 방지한다.

(3) 연료유 저장탱크 내부는 원칙적으로 코팅을 하지 않는다. 그러나 탱크내부의 응결에 의한 내부의 부식을 방지하기 위해 코팅(blasting & epoxy phenolic coating)을 하기도 하는데 코팅에 대한 주의가 필요하다. 즉, 연료유는 어떤 금속과 접촉시에 품질의 저하가 촉진된다. 구체적으로 탱크내부의 아연코팅(galvanizing)으로 인한 아연은 연료유와 오래 반응하면 실온에 서는 용해비누를 형성하나 고온인 연료분사 인젝터를 통과시에는 불용성고무질로 되어 노즐에 침적하고 궁극적으로는 엔진출력의 저하를 가져온다. 한편, 구리는 고무질을 형성하여 저장유의 품질저하와 필터를 막는 경향이 있다.

(4) 연료유는 장기보관시, 통기관(air vent pipe)를 통한 수분의 응결유입이나 기타의 수분유입으로 가열장치를 하지않는 경우나 A중유 저장탱크에서 곰팡이 등 균사가 발생해 스트레이너를 폐쇄하는 사고를 유발할 수도 있다. 연료중에 번식하는 곰팡이의 영양원은 연료중의 탄소와 수소 등이고, 산소는 수분과 탄산가스에서 공급받는다. 이 곰팡이의 최적생활환경은 pH4-6, 20-40℃이므로 약산성의 연료중에 잘 번식한다¹⁰⁾. 그러므로 원전에서 사용하는 경우나 A중유라면 보유후부터 기관입구까지가 항상 적온이며, 필요한 수분은 외부에서 누입하지 않아도 항상 습공기가 공기통(air

vent)을 출입하므로 그 응결수가 공급해 준다. 따라서 수시로 탱크드레인 밸브나 콕을 열어 물을 배출해 주어야 하고, 곰팡이로 오염된 경우에는 즉시 연료유를 빼내고 탱크 및 배관을 소제한 후 다시 수유해야하고 Destol-F와 같은 곰팡이 생육억제제를 장기간에 걸쳐 투입하여야 한다.

(5) 통기관 헤더에는 반드시 철사망을 설치하여 유분은 역류시키며 외부화염을 차단하고 모래같은 이물질의 탱크유입도 차단해야 한다.

나. 겨울 동한기에는 경유도 유동성의 저하로 인해 문제가 될 수 있다. 한지에 위치한 원전의 경우에는, 연료유의 유동점 확인이 절대 필요하다. 유동점이 높은 기름은 겨울에는 왁스가 석출되어 스트레이너를 막고, 파이프내에서는 둘레에 점착하여 유로를 조임으로 연료이송을 불가능하게 한다. 국내 원전용 사용연료유의 유동점¹¹⁾은 선박용(-12.5℃)에 비해 낮아 여름에는 0℃ 이하, 겨울에는 -17.5℃ 이하로 규정하고 있지만, 연료유 수급시 어느 사양 못지않게 유동점에 관심을 두어야 한다. 저장중에는 연료유가 유동점 가까이에 노출되지 않도록 주의해야 한다. 왜냐하면 높은 유동점은 파라핀 결정체의 함유를 암시하는 것이며 이것은 일단 형성이 되고 나면 유동점 6-12℃ 이상에서도 펌핑에 영향을 주기 때문이다. 유동점이 높은 연료유의 실제적인 장애로는 탱크내 연료의 응고, 흡입관내 연료의 응고, 여과기내 연료의 응고 등이 있을 수 있다.

2. 윤활유 계통

가. TDI 엔진 과급기의 문제점은 장기 대기 엔진의 과급기에 주유가 됨으로써 시일링(sealing)을 통과해 배기가스 측에 축적되고 기동시 화재 또는 폭발로 이어지는 문제, 이를 방지하고자 대기상태에서 주유를 중단함으로써 필요 기동시에 베어링의 급속마모로 진행되어 과급기가 운전불능으로 빠지는 문제 등이 있다. 본 사고는 1979년 이후 배관의 개조가 이루어 졌으나 잠재적인 사고개연성은 계속 존재하고 있으며, 실제적으로도 사고가 계속되기 때문에 운용면에서는 언제나 주의가 요구된다. 국내의 고리원전 2발, 영광 1발이 해당된다. TDI 과급기 결함의 총체적인 연구결과는 시동초기 윤활문제, 100-110%부하운전에 의한 제작자사양을 넘어서는 고온문제, 급속기동/가속 즉 과도기간 중의 서지(surge)가 과급기에 미치는 영향 등을 고려하여 drip & full flow 예윤활 시스템 채용, 베어링의 정기적인 검사 프로그램 도입, 윤활유의 매분기 분석, 엔진의 배기온도 특히 과급기 입구온도 감시, 제작자의 설계와 재질향상 등을 권고하게 되었다.

나. 엔진의 사용윤활유는 사용연료유에 따라 결정되는데, 연료유의 유황함유량이 얼마인가가 요점이다. 선박용 연료유는 대부분 유황함유량이 3% 내외인데, 1% 이상이면 실린더유로는 TBN 70의 고알칼리유를 사용하고 1% 이하에서는 TBN40 정도의 실린더유를 사용해 중화도를 맞추어 준다¹²⁾. 문제의 사고와 같이 저산성연료유-고알칼리윤활유의 경우, 카아본이 많이 끼는 것은 고알칼리첨가제의 중화하고 남은 양이 연소하게 되어 잔류물을 형성 피스톤과 피스톤링의 배면에 부착하게 되어 링을 바깥으로 밀어내기 때문에 라이너를 긁게 된다. 그리고 저유황유는 특히 분무연소특성을 불안하게하여 보일러유로는 문제가 되지않으나 디젤엔진에는 문제가 된다. 저유황유는 윤활성 향상제의 추가투입으로 연소시 연소기간이 길어지며(slow burning) 이는 화염이 실린더벽의 많은 표면에 접촉하여 유막을 파괴한다. 국내원전의 경우, 황함량 0.5%¹¹⁾(육상규제는 0.3%)를 기

준으로 윤활유를 매칭시키고 있으나, 상업용 등유는 0.08%, 경유는 0.1%정도까지, 실제로는 0.05% 짜리 기름도 출시되므로 수급사양검토시 앞에 언급한 유동점과 함께 관심을 가져야 할 사항이다.

평소에 윤활유 소비율(liter/hr)을 인지하고 있어야 하며, 비정상적인 과도한 소모성향을 보일 경우, 엔진분해정비 등의 대비책을 세워야 한다. 일반적으로 피스톤링의 교환을 하나, 실린더라이너가 clover-leaf(윤활 불량에 원인으로 연료유와 윤활유의 매칭, 기타 이유 등으로 라이너가 균일하게 마모되지 않고 불균일하게 마모되는 현상) 같은 모양으로 불균등하게 마멸되는 경우, 윤활유소모량은 극적으로 증가하게 되는데 라이너를 교환해야 한다. 폭발위험이 있는 유증기는 대부분 윤활유에 연료유성분이 침투해 들어왔기 때문이므로, 엔진의 유지관리를 잘하여 윤활유의 오손에 주의를 기울여야 한다. 크랭크실 폭발원은 블로우바이(blow-by)된 가스나 윤활부족에 의해 과열된 베어링이나 라이너와 피스톤의 마찰열이다.

다. 물이 EDG의 윤활유계통에 유입되어 엔진운전이 불가능하게 된 경우인데, 대부분은 윤활유 냉각기의 튜브 파공에 기인한다. 특히 튜브와 튜브시트부의 확관부가 우선적으로 파공되므로 튜브와 시트 밀착부의 내구성 및 신뢰성 향상을 위해서는 확관시에 기량이 절대 요구된다. 또한 쿨러에서는 냉각수의 도입부에서 물의 유속이 빨라지기 때문에 유출부 보다 침식에 의한 손상이 쉽게 된다. 장기 대기상태에 있는 쿨러는 각종 부식에 노출되는데, 위에 언급한 침식과 냉각수가 흐르지 않고 고여있는 곳의 산소농담부식도 고려해야 하며, 재질에 맞는 부식억제제가 사용되어야 한다. 물유입부의 침식손상을 방지하기 위해 plastic convergent piece(plastic insert)를 꽂아 상대적으로 얇게된 확장부를 감싸주고 규정 냉각수 양과 속도를 도입부에서 유지시켜 침식을 방지하기도 하는데(고리 3,4호기 실시중), 고온이 되는 쿨러에서는 사용에 주의를 요한다. 고온에 플라스틱이 녹아 냉각계통을 막는 사고를 야기하기도 하기 때문이다. 올진 3호기부터는 티타늄 관형 열교환기가 채용되기 시작하였다. 모든 쿨러에 대해서는 주기적인 압력(누설)테스트를 실시한다. 디젤엔진 냉각수에 첨가한 부식억제제가 윤활유 쿨러의 튜브재질에는 적절하지 못한 것이어서 부식을 억제하지 못하고 오히려 화학반응에 의해 튜브와 튜브시트를 회복 불가능한 상태로 심하게 손상시킨 경우도 있으므로 엔진 제작사가 권고하는 부식억제제 대신에 다른 회사의 유사 제품을 사용하여서는 아니된다.

윤활불량은 결국은 베어링의 파손형태로 나타난다. 최근의 윤활유분석에서 오염도가 높게 나타났고, 운전중에 윤활유 저압/차압으로 정지가 되었다면 윤활계통 및 크랭크실내의 베어링 계통을 총점검 후 후속운전을 실시해야 한다. 2000년 발생한 Seabrook Generating Station. Unit 1의 대형사고¹³⁾가 차압경보를 무시하다 일어난 대표적인 사고이다..

라. Fermi와 North Anna의 윤활계통에 의한 여러 사고에서 보여주듯이, 다른 형태의 모든 엔진에도 적용되는 것이지만, 시동시의 난기(warming-up)와 윤활확보가 대단히 중요하다. 이 엔진은 시동전에 윤활유부스터에 채워진 2갈론 정도의 윤활유를 시동공기 압력으로 미리 보내는 방식으로, 엔진을 터닝하면서, 수동으로 핸드펌프를 저어 윤활유를 보내 습동부위를 미리 윤활하는 초기방식을 개량한 것이다. 요즘에는 수동방식, 부스터방식은 사용하지않고 예윤활 펌프를 계속 운전하는 방식을 쓰고 있다. 한편, 본 건에서는 수동윤활의 사용을 중지한 채로 1년정도, 시동횟수로는 100회 정도 시동을 하였던바, 엄청난 대형사고에 이르렀다. 모든 습동부위가 무윤활상태로 즉 고체마

찰을 일으키며 급속기동과 부하운전에 들어가 버림으로써 고장은 예견되었다. 사고 후에 감시시험 운전에서 따른 절차는 Detroit Edison Co.가 엔진제작자와 협의하여 개정되었는데 ①시동전에는 반드시 윤활을 시킬 것이며, 특히 터닝을 병행해야한다. ②시동은 idle speed로 해서 5분간 운전하고 정격속도로 올리고, 부하도 점진적으로 증가시킨다(load-up). 엔진정지시에도 점진적으로 부하를 줄여 나간다(load-down) ③운전 후에는 기름 스트레이너를 소제하고 검사해둔다(분기기준) ④베어링검사(after 20 unplanned starts or after 18 months), 크랭크 실 검사, 윤활유 검사 프로그램(월간기준)을 실행한다. 여기서 주목할 것은 규제기관이 규정을 고집하지 않고 엔진 특성에 따른 운전절차를 인정하는 점¹⁴⁾이다. 한국의 규제기관들도 그간의 경험과 자신감을 기반으로 문제가 되고 있는 규정과 실정과의 차이를 해결하는 방법을 찾아야 할 것이다.

3. 냉각수 계통

가. 엔진 냉각수 순환펌프 (Cooling jacket circulation water pump) 고장으로 인한 정지는 엔진 냉각수 고온을 야기하여 운전이 불가능할 수 밖에 없다. 원전용 EDG는 선박용과 다르게 냉각시스템에 다중개념을 도입하지 않아 예비펌프가 없는 단일펌프시스템이다. 가능하다면 연료유계통처럼 펌프를 2대 채용하면 가장 좋은 대안이나 차선책으로 내부 부품 점검 프로그램을 정비절차서에 삽입하는 것이다. 주기적인 점검으로 사고발생을 줄여야 한다. 부품결함이 발생하는 경우에는, 동일 회사, 동일 모델의 제품에 대해서는 일괄 검사를 시행하여야 한다. 베어링에 대해서는 권장 시간내에 필히 교환해 주어야 한다. 권장시간이 지나면 급격히 나빠진다. 특히 발전소의 고진동부에 부득이 기기가 설치될 때도 있는 데, 이와 같은 고진동부의 베어링은 운전중 주의를 크게 기울여야 하고, 베어링 교환시기를 조금 당겨 주어야 한다. 펌프의 진동 스펙트럼 분석이 가능한 곳이면 주기적으로 진동을 측정하여 베어링 성능을 감시하고 이상 발견시 분해점검을 한다. 또한 예측정비를 할 수 있는 열영상 분석기가 갖추어져 있다면 엔진 시험운전시 주기적으로 부계통 주요 펌프의 베어링 부위를 촬영하여 열영상 분석을 통한 불 베어링의 성능을 감시한다. 이러한 예방정비나 예측정비를 적용하기 곤란한 펌프일 경우는 주기적인 계획에 의한 분해, 점검을 통해서 펌프 불베어링을 정비한다. 시스템적으로는 이러한 필수펌프는 이중으로 설치하여 한 펌프가 압력을 상실시 다른 펌프가 자동기동되도록 하여야 한다(선박용 적용기준).

나. 주기적인 계획에 의해 냉각수 쿨러를 개방하여 튜브내부에 축적된 진흙이나 뽕, 조개 껍질 등을 제거한다. 시험 운전중 열교환기 입, 출구 온도, 압력 등의 변수를 감시하여 막힘의 징후가 발견될 시는 사전에 개방 검사를 수행한다. PMS에 있어 소제 간격을 정하는데, 메이커의 의견을 우선 따르겠으나, 발전소의 위치에 따라 냉각수로 쓰이는 해수상태가 달라지므로 정비기사의 판단과 경험이 필요하다. 원전 EDG와 같이 간헐운전을 하는 경우에는 운전전, 쿨러의 카버를 들어내지 않고도 보호방식판이 설치된 판 즉, 보호방식판 카버를 들어내어 쿨러의 카버측 내부를 간단히 검사할 수 있다.

다. 왁스형 밸브 엘레먼트는 2, 3년 간격으로 필히 검사를 하고, 5년 주기로 왁스 엘레먼트를 교체해 주어야 한다. 선박에서는 중·소형엔진에만 이 왁스형 밸브(세팅온도 고정임)를 사용하고, 중·

대형의 대부분의 엔진에는 콘트롤러를 갖는 공기조절밸브 또는 컴퓨터 제어 공기조절밸브를 사용하여 온도 세팅치의 자유변경이 가능하게 하고 있다. 한국원전도 이 추세에 있다.

라. 여기에서 하나 더 고려해야 할 것은 특히 다실린더기관과 같이 정비가 어렵고 공수가 많아가는 비상발전기는 충분한 공수가 공급되지 않으면 크랭크챔버같은 다공수작업을 회피한다는데 문제가 있다. 운전전에 크랭크챔버의 개방점검으로 냉각수 시일의 누설은 어느 정도 감지할 수 있고, 실제로 선박용엔진에서는 크랭크실이 크고 소수이기 때문에 확실히 시행하고 있는 사항이다.

4. 시동공기 계통

가. 시동공기 저장탱크의 안전밸브는 주기적인 검사시(선박에서는 5년)에 취외하여 Bench Test를 수행하고 열림 설정값, 닫힘 설정값을 조정하는데 익숙해야한다. 이 과정이 완벽하다해도 과압으로 인해 분출이 발생시에 기계적인 결함(스프링 절손, 장력감쇠, 스프링 위치불량 등)으로 가끔 reseal가 되지않을 때도 있는데 이 때는 밸브에 충격을 주어서 작동되도록 하기도 하나, 공기압축기 토출측에 공기탱크 안전밸브 세팅치 아래의 값으로 세팅된 배관용 릴리프밸브를 설치하여 안전밸브 분출은 발생하지 않도록 해야한다.

나. 현 규정상 EDG는 원전 사고 후 7일간의 운전이 보장되어야 한다. 그리고 지진이 발생하여 소외전원이 상실된 경우에 소외전원을 복구하는데는 최소 9시간 이상이 걸린다. 제어공기로의 누설율을 고,저로 나누어 평가한 결과 Cook 원전의 EDG는 9.5시간, 62시간의 가용시간이 나왔다. 내진형 공기압축기를 설치하든지, 탱크용량을 크게하든지 또는 제어용 공기보급라인을 별도로 설치하든지의 대안을 생각해 볼 수 있으며 한국의 원전에도 해당되는 사항이다.

5. 흡배기 계통

가. 냉각수체크밸브의 사고에서와 같이 고온부, 고압부, 고회전부, 고진동부에서 작동되는 기기들의 정기적인 내부검사 프로그램을 운용해야한다.

나. 연관의 열팽창부 문제, 통풍팬의 용량 부족의 문제 외에 과급기의 공진에 따른 고장 등을 고려해야 한다. 또한 지구환경변화에 의하여 여름과 겨울온도의 평균치가 변하고 있으므로 설계시에 설계마진을 충분히 주어 이에 대비해야 한다.

6. 엔진운동부

가. 디젤엔진에 있어서 운전중 실린더 라이너 내부벽 마모율에 가장 큰 영향을 주는 것이 황에 의한 황산(저온)부식과 엔진 흡입공기 필터에서 걸러지지 않고 실린더의 연소실 내부로 들어오는 모래 및 먼지에 의한 마모를 포함한 물리적인 마멸이다. Sand blasting 방법으로 과급기 터빈측 블레이드나 그 외의 녹슨 기기부품들을 청소하면 블레이드가 빛이 날 정도로 청소가 깨끗하게 되므

로 작업자가 에어 인터쿨러의 튜브 청소에도 이 방법을 사용한 것으로 판단된다. 그러나 일반 냉각수계통의 열교환기나 쿨러의 튜브측에는 이 sand blasting 청소 방법을 사용해도 모래 알갱이에 의한 장해의 위험이 없으나 디젤엔진의 경우에는 에어인터쿨러의 셸 측을 청소한 후에 모래나 이물질이 그곳에 조금이라도 잔류하면 그러한 이물질들이 엔진 운전중에 연소용 흡입공기에 섞여 실린더 내부 연소실로 들어가게 되어 디젤엔진 고장 발생의 원인이 되므로 이러한 기법의 튜브 청소 방법 대신에 화학약품을 이용한 엔진의 에어인터쿨러 튜브 및 셸 측 청소를 하는 것이 무방하며 일반적으로 많이 이용되고 있다.

나. 본 크랭크축(TDI DSR-4)의 절손사고는 미국의 owner's group이 형성되는 계기가 되었으며 EDG에 대한 철저한 분석을 촉발한 사고이다¹⁵⁾. 사고원인은 고주기비틀림피로(high cycle torsional fatigue)로 판정나 크랭크축을 11"에서 12"로 증가시켰다. 한국의 고리 2발과 영광 1발에 도입된 타입은 DSRV-16-4로 이 타입 역시 메인 저널 오일 홀에서 시작된 비틀림 피로에 의해 크랙사고가 발생하였으나 한국에 설치되기 전에 oil hole의 위치를 변경시키고, 4개의 평형추를 달아 4차 위험회전수 446rpm을 430rpm(정격속도는 450rpm)으로 낮추는 등 수정 후 제조된 엔진이 공급되었다. 그러나 이 엔진은 oil hole이 여전히 응력집중부위로서 피로균열의 시점이 될 수 있고, 440 rpm 이하로는 시동시를 제외하고는 운전하지 말아야 한다. 왜냐하면 4차 공진회전수가 432rpm 이기 때문이다. 또한 만약 엔진이 심하게 불균형 상태에서 운전이 되었다면 피로균열에 대해 oil hole을 재검사할 필요가 있다. Torsional 분석과 torsiograph test에서 확인된바 실린더불균형은 크랭크축 응력에 심각한 영향을 끼치는 것이 확인되었다. 따라서 운전중 배기온도가 모니터되어, 각 실린더간의 온도와 전 실린더 평균온도와의 차이가 TDI의 권고치 이내에 있도록 해야 하며, 부가해서 Pmax 활취도 TDI가 권고한 주기 이내에서 하도록 해야한다. NRC는 불균형상태에서의 지속운전을 막기위해 모든 엔진 모델에 대한 적절한 예방책이 취해져야 한다고 믿고 있다. 크랭크축의 절손사고를 방지하기 위해 TDI엔진에 대해 PNL은 연료재장전 후에는 실린더 배기온도와 압력을 1시간 간격으로 모니터해서 ①온도차에 의한 엔진의 불균형 감지 ②배기온도가 1050°F(565.55°C)가 넘지 않도록 관찰을 요구했다. 엔진 출력감지장치가 없는 엔진의 경우, 엔진의 상태가 정상일 때는 배기가스온도가 그 실린더의 출력을 나타내고 있기 때문이다. 일반적으로 축계를 절손시키는 요인은 ①축 Ingot 불량 - 재료불량 ②설계오류 - DSR/48의 경우, 100% 부하에서는 축계가 견뎌내지 못하는 설계로 되어있었다 ③과토크 - 100%부하+안전허용치의 설계가 되었다고 해도, 운전은 선박용처럼 80-85%로 하는 것이 좋다. 그 이유는 계산상 100% 내구성을 보장한다고 해도 실제 원전에서의 정기적인 운전이 그것을 입증하는 실험운전이 되고 있으며, 또 하나는 100%라는 것은 각 실린더가 균일한 출력을 낸다고 하는 조건인데, 언급된 바와 같이 각 실린더는 어떤 이유로든 불균일 운전상태가 되기 때문이다. 실제로 DSRV-20엔진은 사고 후에 크랙의 진전이 엔진의 출력수준에 비례하기 때문에 정격출력 6000kW를 4500kW±5%로 제한했다¹⁶⁾. 이 때부터 저속기동(slow start)의 장점이 논의되어 누적피로를 감소하기 위해 월간시험에서는 저속기동을, 18개월 정기시험에는 급속기동(fast start)을 사용하는 모델이 시작됐다.

다. 기동시의 액압축 사고 방지를 위해서는 엔진 설계 및 제작시 인디케이터 밸브 및 실린더 헤드 안전밸브(cylinder head safety valve)를 부착해야한다. 선박용 엔진을 제작시에는 실린더 내부에

액압축 및 이상 과압형성에 의한 엔진 대형 파손사고 예방을 위해 실린더 지름 230mm이상의 디젤엔진에는 실린더 헤더 안전밸브를 필수적으로 부착하도록 법규로 규정하고 있다. 또한 발전소 비상사태 발생시나 급속기동시험을 제외한 월간시험시는 엔진을 운전하기 전에 터닝 및 air blowing을 수행하여 실린더 내부 연소실에 이물질 존재 여부를 사전 점검하는 방법이 예방대책이다. 국내원전의 경우, Ruston엔진은 대기시에 공급되는 로커암 윤활유가 흡배기밸브가이드를 통해 연소실로 유입하여 액압축사고의 위험성이 상존하며, SACM엔진의 경우, 터닝기어가 없고 인디케이터밸브가 없어 이 사고는 항상 존재한다.

라. 조속기의 사고로는 윤활유 관련 사고가 대부분이어서 조속기의 윤활유 관리를 철저히 해야한다. 조속기 액추에이터 분해, 점검, 검교정을 외주 수리 할 때에는 공신력있는 회사를 선택할 필요성이 있다. 또한 기계적 과속도 연료leck 제한 장치의 정확한 설정치를 주기적으로 점검할 필요성이 있다..

IV. 결 론

비상디젤발전기 계통의 신뢰도는 원전 안전성 및 신뢰성에 직결되는 중요한 사안중의 하나로 이제는 국내에서도 그 중요성을 인식하기 시작하였다. 본 연구에서는 EDG 계통의 신뢰도 향상 방안을 마련하고자 국내 원전 비상디젤엔진 계통에서 일어날 수 있는 대표적인 고장사례를 미국의 예에서 발취하여 분석하고 향상 방안을 제시하였다. 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연료유 계통에서는 연료유 청결도 유지를 위한 방안과 장기보관에 따른 생물학적 오염원과 관리 방법을 제시하였다.
- (2) 윤활유 계통에서는 TDI 엔진용 과급기의 관리방법과, 윤활유-연료유의 친화성 관계를 분석하였고, 윤활유쿨러의 관리 방법 그리고 무윤활상태에서의 급속기동의 폐해를 분석하였다.
- (3) 냉각수 계통에서는 냉각수 펌프의 관리방법, 최신진단기법 및 다중시스템을 제시하였고, 쿨러와 왁스형 제어밸브의 정비방법과 크랭크실 검사의 중요성을 강조하였다.
- (4) 시동공기 계통에서는 안전밸브 분기를 피하는 방법과 탱크용량에 대해 검토하였다.
- (5) 흡배기 계통에서는 통풍계의 용량부족에 따른 문제를 분석하였다.
- (6) 엔진운동부에서는 외부 이물질에 의한 라이너의 마모문제, 크랭크 축 절손사고가 분석되고 대안이 제시되었다. 또한 액압축 사고방지를 위한 고려사항을 제시하였다.

엔진에 치명적인 손상을 주는 대형사고는 주로 윤활계통 및 엔진 운동부의 사고였다. 여기에서 고려되어야 할 사항은 국내 원전에 채용된 몇몇 EDG는 시험운전 전 선행조치를 취하지 않으면 큰 사고를 야기할 수 있는 개연성이 존재하고 있다. 미국의 예처럼 원전의 안전범위 안에서 규정의 유연한 적용이 요구된다. 그리고 대부분의 사고는 급속기동/가속 그리고 고부하 운전에서 비롯되었다. 통계적으로는 미국내 원전에서 불가피하게 원전이 기동되는 즉 자동 급속기동이 되는 경우는 2% 정도(나머지는 시험상 급속기동)이며, 그 중에서도 부하를 투입해야 하는 경우는 그것의 절반정도였다. 즉 평균 1년에 5건 정도다¹⁷⁾. 따라서 시운전시험(preoperational test)이나 월별 감시시험(surveillance test)에는 저속기동으로 기동하고, 6개월에 한번은 급속기동 또는 급속기동

에 준하는 시험을 시행하는 모델의 도입을 제안한다. 또한 매년 110% 과부하 운전의 시연이 엔진 기동/부하의 신뢰도를 보증하는 것이 아니기 때문에, 엔진의 여러 부분에 무리한 응력을 가하는 110% 시험요건의 완화를 검토하여야 한다¹⁸⁾.

참고문헌

1. Prioritization of the major PWR components,
<http://www.cannon.net/~gonyeau/epri/alsurvey/tsld003.htm>
2. 비상디젤발전기 기계계통 열화평가 및 신뢰도 개선방안 연구, 최재성, 조권희, 한국원자력안전기술원, KINS/HR-366, KINS/HR-435, 2000, 2001,
3. Information notice related to Emergency diesel generator, 2000.1,
<http://www.nrc.gov/NRC/GENACT/IN/1983-2000>
4. NUREG-1216, Safety evaluation report related to the operability and reliability of EDG manufactured by TDI, 1986. 7, p.1-1,
5. Industry experience on certain materials used in safety-related equipment, IN85-08, 1985.1
6. Diesel generator events, IN83-51, p.4/4, 1983.8
7. Piston to cyl. liner tin smearing on cooper-bessemer KSV engine, IN92-78, 1982.3
8. Air system for EDG may not support long time operability due to original design error, LER 315/1999-011-01, 2000.3
9. Introduction to marine engineering, D.A.Taylor, FIMarE, Frina, Butterworth Heinemann, pp.161-162, 1999
10. 선박유류관리, 전대회, 일중사, pp.45-46, 1990
11. 원전 비상디젤발전기용 경유 규격 변경 알림, 원단발(화) 747.22-1138, 1994.11
12. 선박의 경제적 운항 관리, 한국박용기관학회 기관관리연구위원회, 한국선원선박문제연구소, pp.200-201, 1987
13. Seabrook station LER 00-008-00 for emergency diesel generator failure surveillance testing, December 29, 2000, pp.1~11
14. Recent engine failures of EDG, IN85-32, pp.3/4-4/4
15. PNL-5718, Review of TDI D/G owner's group engine requalification program, p.1, 1985
16. PNL-5600, Review of resolution of known problems in engine components for TDI EDG, p.4.133, 1985.12
17. NUREG/CR-5057 Aging mitigation and improved programs for nuclear service diesel generators, p.3.3(EPRI 1987), 1989
18. NUREG/CR-5057 Aging mitigation and improved programs for nuclear service diesel generators, p.7.1, 1989