

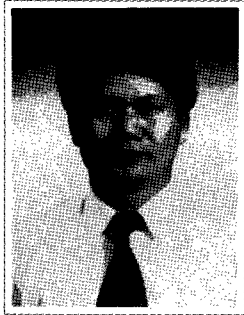


해외 원전의 비상 디젤 발전기 연구

- 고장 사례와 원인 분석 및 예방 대책 -

박 정 현

한전기공(주) 원자력처 과장



원 자력발전소에 설치되어 있는 비상 디젤 발전기는 원자력발전소 내부 소 내 정전이나 외부 전원 상실 등의 원자력발전소 비상 사태 발생시 10초 안에 긴급 기동되어 1분 이내에 비상 부하를 담당하여 원자로의 잔열을 제거하는 등 발전소 내부 안전계통 주요 기기에 비상 전원을 공급하는 중요한 기기이다.

따라서 거의 모든 원자력발전소

에는 원자로 한 호기당 비상 디젤 발전기가 두 대씩 설치되어 있으며 비상시 한 대가 예상하지 못한 어떤 원인에 의해 기동이 실패되더라도 나머지 한 대가 기동되어 발전소 비상 사태에 적절히 대응할 수 있게 다중 방어 개념으로 설치되어 있다.

최근 국내에 신규로 건설되는 원자력발전소에는 여기에 더하여 AAC 디젤 발전기를 한 대 더 중복 설치하여 비상 디젤 발전기 2대 모두 기동 실패 되었을 경우에 AAC 디젤 발전기가 기동하여 비상 사태 발생시 안전하게 원자로를 정지할 수 있도록 대응하고 있다.

즉 원자력발전소 자체가 매우 안전하도록 5중 혹은 그 이상의 다중 방어 개념으로 설계되어 있지만, 그것에 더하여 혹시라도 예상치 못한 발전소 비상 사태가 발생하면 원자력발전소의 안전을 보다 더 확실하게 보장할 수 있도록 소 내에 비상

전원을 공급하는 비상 디젤 발전기를 3중으로 중복하여 설치하여 수 백만분의 일의 확률로도 비상 전원 공급 실패가 일어날 수 없도록 철저히 안전을 고려한 다중 방어 개념으로 설계되어 있다고 볼 수 있다.

따라서 원자력발전소 비상시 최후의 안전을 보장하기 위해 설치되어 있는 비상 디젤 발전기에 관한 외국 원자력발전소에서 실제로 발생하였던 고장 사례를 연구하여 그 원인을 분석하고 예방 대책을 연구함으로써, 국내 원자력발전소 비상 디젤 발전기에서는 단 한건의 경미한 고장도 일어나지 않도록 사전에 예방하여 더욱 안전한 원자력발전소를 유지하는 데에 참고로 함이 바람직할 것으로 판단되어 외국 원전에서 실제로 있었던 고장의 사례들을 파악하여 연구해 보았다.

다음에 기술한 원자력발전소 비상 디젤 발전기의 고장 사례들은 미

국의 원자력 규제 위원회(US NRC)에서 실제로 미국 내의 원자력발전소에서 발생했던 사례들에 관하여 발행한 자료를 참고로 하여 작성한 것이다.

해외 원전 비상 디젤 발전기 고장 사례 파악

(1) 비상 디젤 발전기 엔진 운전중 연료유 일일 공급 탱크 레벨 감소로 인하여 엔진 정지-Cooper Nuclear Station 발전소의 사례

① 고장 원인 : 연료유 일일 탱크의 연료유는 엔진이 운전되어 연료유가 점점 소모되어 적정 레벨에 이르면 플롯트 밸브가 동작하여 연료유 이송 펌프에 자동으로 기동 신호를 제공하게 되어 있다. 따라서 연료유 이송 펌프가 기동되어 연료 저장 탱크의 연료유를 일일 탱크로 이송하게 되어 있는데, 정상적으로 신호가 작동하여 펌프는 기동되었으나 펌프 토출측 라인에 위치한 스트레이너가 막혀 연료 이송이 되지 않았다. 즉 일일 연료 탱크 내부에 플롯트 밸브가 있는데 연료가 플롯트 밸브의 스트레이너를 거쳐서 탱크로 공급되도록 되어 있었다.

따라서 디젤 엔진 관리자가 스트레이너의 위치를 알지 못하여 주기적인 점검을 하지 않은 것으로, 연료유 이송 시스템이 일반적인 시스템과 다르게 되어 있었음을 인식하

지 못한 것이다.

② 예방 방법 : 연료유 이송 계통에 스트레이너와 필터가 어디에 위치하고 있는지를 확실하게 인지하여야 하며, 주기적으로 연료 이송 계통의 모든 필터엘리먼트를 분해하여 청소하고, 또한 펌프가 운전중일 때는 토출 압력을 관찰하여 압력이 정상치보다 비정상적으로 증가 혹은 감소하는지를 파악해야 한다.

(2) 비상 디젤 발전기 운전중 Sump Tank 윤활유 저유위 경보에 엔진 담당자가 적절히 대응하지 못함-Kewaunee Nuclear Power Plant의 사례

① 고장 원인 : 비상 디젤 발전기가 정상적으로 기동되었으나 크랭크 케이스 윤활유 Sump Tank 레벨이 낮음을 파악하고 엔진 운전중 윤활유를 보충하기 위해 윤활유 보충 라인처럼 보이는 곳으로 엔진 담당자가 펌프를 연결하여 이 펌프를 통하여 윤활유 5갤런을 보충하였으나 엔진의 윤활유 Sump Tank 레벨이 전혀 증가되지 않았다.

디젤 엔진 관련자 모두가 당황하여 십여분 동안 우왕좌왕하다가 다시 다른 윤활유 라인으로 3갤런을 더 보충하자 그제서야 레벨이 증가하기 시작하여 정상 레벨을 유지하였다.

엔진이 정지되고 난 후에 조사를 해본 결과, 처음에 보충한 5갤런의

윤활유가 Air Box(정확한 용어로 기록되지 않았지만 추측으로는 인터쿨러 공기측으로 추정됨)의 드레인 라인에서 흘러나온 것으로, 윤활유 라인이 아닌 Air 계통 라인으로 윤활유를 5갤런이나 보충하였던 것이다. 만일 이 상태에서 엔진을 다시 기동하였다면 엔진이 파손되는 대형 사고를 유발하였을 것이다.

② 예방 방법 : 평소 윤활유 Sump Tank 레벨을 적절히 유지하여 운전중 저유위 레벨 경보가 없도록 하여야 하지만, 설령 운전중 어떤 불가항력적인 원인으로 Sump Tank 레벨이 낮아졌다면 운전중인 디젤 엔진의 윤활유 Sump Tank에 윤활유를 보충하는 방법을 디젤 엔진 담당자가 숙지하고 있어야 한다. 즉 엔진이 운전중일 때는 크랭크 케이스 내부에 다량의 유증기가 발생하므로 크랭크 케이스를 개방하면 안된다.

유증기가 대기중의 산소와 화학적으로 쉽게 결합하여 화재가 발생하며 엔진이 폭발하는 대형 사고가 발생할 수도 있다.

따라서 각자가 담당하고 있는 원전 비상 디젤 발전기 엔진의 윤활유 계통 라인을 확실하게 숙지하고 있어야 하며, 운전중인 엔진 Sump Tank에 윤활유를 보충하는 방법은 정지하고 있는 엔진 Sump Tank에 윤활유를 보충하는 것과는 다른 형식의 엔진이 있으므로 담당하고



있는 엔진의 Sump Tank에 운전 중에도 윤활유를 보충하는 방법을 평소에 숙지하고 있어야 한다.

또한 운전중에 윤활유를 보충할 수 있는 라인과 밸브에는 특별한 색깔의 페인팅을 하여 표시를 해두는 것도 한 방법이 될 수 있다.

(3) 엔진 정기 시험중 윤활유 쿨러 누설로 인한 냉각수가 윤활유에 섞여 엔진 TRIP 발생—Arkansas Nuclear One Unit No.1 발전소의 사례

① 고장 원인 : 냉각수의 유로인 윤활유 쿨러의 튜브와 튜브 시트를 연결하는 곳에서 심각한 부식이 발생하여 냉각수가 운전중 윤활유로 누설되었다.

원인 조사 결과, 디젤 엔진 냉각수에 첨가한 부식 억제제가 윤활유 쿨러의 튜브 재질에는 적절하지 못한 것이어서 부식을 억제하지 못하고 오히려 화학 반응에 의해 튜브와 튜브 시트를 회복 불가능한 상태로 심하게 손상시킨 경우이다.

즉 엔진 제작사가 권고하는 부식 억제제 대신에 다른 회사의 유사 제품을 사용하였는데 이것이 고장을 유발한 원인이 된 사례이다.

② 예방 방법 : 디젤 엔진 냉각수에 첨가하는 부식 억제제 및 부동액은 가능하면 엔진 제작사가 권고하는 약품을 사용하도록 하고 사정상 그것이 곤란한 경우에는 약품의 계열(예 : 붕소-아질산 계열인가, 혹은

다른 계열의 약품인지를 확인)을 파악하여 각종 쿨러 및 열교환기, 터보 차저 케이싱, 실린더 라이너, 엔진 냉각수 자켓 등 냉각수가 순환하는 유로를 형성하고 있는 시스템의 금속 재질을 파악하여 냉각수 계통에 첨가된 부식 억제제 및 부동액이 오히려 부식을 촉진할 수 있는 금속으로 제작된 부속 기기의 부품이 있는지를 파악하여 그에 따른 대책을 세운다.

주기적으로 냉각수의 화학 약품 성분을 분석하고 적절한 점검 주기가 되면 쿨러 및 열교환기를 개방하여 누설 가능성, 부식 여부를 점검한다. 부식 억제제 약품 공급 회사의 권고 지침서를 준수한다.

(4) 월간 비상 디젤 발전기 시험 운전중 엔진 냉각수 고온으로 인한 엔진 트립—Dresden Station 발전소의 사례

① 고장 원인 : 냉각수 열교환기에 냉각수를 공급하는 DG CWP 펌프의 토출측 체크 밸브의 PIVOT ARM이 부러져서 체크 밸브 디스크가 정상적으로 작동되지 않아 디젤 엔진 자켓 냉각수 열교환기를 냉각시키지 못해서 엔진이 TRIP된 경우이다.

② 예방 대책 : 주기적으로 일정한 계획에 의해 엔진 냉각수 계통에 있는 체크 밸브의 동작 상태를 확인하고 분해 점검에 의한 정비를 수행

해야 한다.

(5) LOV(Loss of Offsite) 시험 중 비상 디젤 발전기가 자동으로 기동되지 않음—North Anna Unit 2 Station 발전소의 사례

① 고장 원인 : 자동 기동 시스템의 전기적 시퀀서 로직에 위치하고 있는 엔진 기동 관련 릴레이가 작동하지 않았다. 시험을 위해 모의 외부 전원 상실 신호를 투입했으나 비상 디젤 발전기가 기동이 되지 않는 현상이 발생했다.

② 예방 대책 : 계획 예방 정비 점검시 엔진 기동 계통에 관련되는 릴레이들은 특별히 세심하게 철저히 작동 시험 및 점검·정비해야 할 것으로 판단된다.

(6) 월간 비상 디젤 발전기 시험 운전중 부하 투입 후 10여분 뒤에 냉각수 고온으로 엔진 Trip—Quad Cities 2 발전소의 사례

① 고장 원인 : 엔진 냉각수 열교환기 튜브 내부가 이물질에 의해서 막혀 엔진 운전중 자켓 냉각수를 충분하게 냉각하지 못하여 엔진의 온도가 고온으로 트립을 유발하였다.

② 예방 대책 : 주기적인 계획에 의해 냉각수 쿨러를 개방하여 튜브 내부에 축적된 진흙이나 찌꺼기 등을 제거한다. 시험 운전중 열교환기 입·출구 온도, 압력 등의 변수를 감시하여 막힘의 징후가 발

견될시는 사전에 개방 검사를 수행한다.

(7) 비상 디젤 발전기 성능 시험중 엔진 냉각수 순환 펌프(Cooling Jacket Circulation Water Pump) 고장으로 인한 정지-Sequoyah 2 발전소의 사례

① 고장 원인 : Cooling Jacket Circulation Pump의 볼 베어링이 파손되어 펌프의 운전이 원활하지 못하여 운전중인 엔진의 냉각을 위한 냉각수의 순환이 정지되어 결과적으로 엔진 정지를 초래한 사례이다.

② 예방 대책 : 펌프의 진동 스펙트럼 분석이 가능한 곳이면 주기적으로 진동을 측정하여 베어링 성능을 감시하고 이상 발견시 분해 점검을 한다.

또한 예측 정비를 할 수 있는 열영상 분석기가 갖추어져 있다면 엔진 시험 운전시 주기적으로 부계통 주요 펌프의 베어링 부위를 촬영하여 열 영상 분석을 통한 볼 베어링의 성능을 감시한다.

이러한 예방 정비나 예측 정비를 적용하기 곤란한 펌프일 경우는 주기적인 계획에 의한 분해·점검을 통해서 펌프 볼베어링을 정비한다.

(8) 비상 디젤 발전기 성능 시험중 고진동에 의하여 엔진 Trip -Susquehanna 발전소의 사례

① 고장 원인 : 성능 시험을 위해 엔진을 운전중 진동 감지 스위치(Vibration Switch)의 고장으로 인해 실제로는 엔진의 진동이 높지 않음에도 불구하고 고장난 진동 감지 스위치가 엔진 정지 신호를 전기적 콘트롤 시퀀서 로직에 보내어 엔진이 Trip된 경우이다.

② 예방 대책 : 자칫 소홀하기 쉬운 엔진 트립과 관련된 리미트 스위치나 압력 스위치 등의 점검 및 동작 상태 점검을 주기적으로 수행하는 것이 적절한 예방 대책으로 판단된다.

(9) 비상 디젤 발전기 긴급 기동 시험 수행중 윤활유 압력 낮음으로 엔진이 기동되자마자 곧바로 Trip됨. 다시 2일 후에 재시험을 수행하던 중 계속하여 동일한 현상이 재발함 -Brunswick 1 발전소의 사례

① 고장 원인 : 일반적으로 엔진이 기동하고 나면 기어 트레인에서 기어 휠을 통하여 크랭크 축으로부터 동력을 전달받은 엔진 구동 윤활유 펌프가 운전되게 된다. 그렇지만 윤활유 펌프가 운전되어 윤활유 순환 압력이 적절히 상승되는 데는 수초간의 시간 지연이 있게 된다.

따라서 비상 디젤 발전기 엔진이 기동된 후 10여초가 지난 후에도 윤활유 압력이 정상적으로 상승하지 않으면 엔진 보호를 위해서 윤활유 압력 낮음 경보와 함께 엔진이

Trip되는 것이다.

즉 윤활유 압력을 감지하여 트립 신호를 보내는 전기적 시퀀서 계통에 시간 지연 Time Relay가 설치되어 있는데, 이 발전소의 고장 사례의 경우는 시간 지연 Time Relay가 제 역할을 하지 못하고 엔진이 기동하자마자 바로 윤활유 압력 낮음(Low Low Lube Oil Pressure Signal) 신호를 발생하여 엔진이 Trip되는 고장을 유발한 사례이다.

② 예방 대책 : 계획 예방 정비 점검 시간 지연 Time Relay의 동작 시험, 점검 상태 점검, 타이머 설정 시간 값 점검을 수행하는 것이 적절한 예방 대책으로 판단된다.

또한 윤활유 압력을 감지하여 타이머에 신호를 보내는 윤활유 압력 감지 스위치가 적절한 압력에 작동하는지를 확인하기 위하여 동작 상태 점검도 병행할 필요가 있다.

(10) 비상 디젤 발전기 정기 시험중 냉각수 압력 낮음으로 엔진 Trip-Dresden 3 발전소의 사례

① 고장 원인 : 비상 디젤 발전기를 시험중 실제의 냉각수 펌프도 정상적으로 운전되고 있었으며 엔진 자켓 냉각수 온도 및 압력이 정상을 유지하고 있었으나 냉각수 압력을 감지하여 시퀀서 회로로 신호를 보내는 엔진 냉각수 압력 감지 스위치의 접점이 불량하여 엔진 자켓 냉각수 낮음 신호를 전송하여 엔진을 트



립시킨 고장을 유발하였다.

② 예방 대책 : 계획 예방 정비시 냉각수 압력 감지 스위치의 점접 작동 상태, 압력 설정치를 점검함이 적절한 예방 대책으로 판단된다.

(11) 엔진의 Intake Air Check Valve 고장-Calvert Cliff 발전소의 사례

① 고장 원인 : 주기 점검중 체크 밸브의 홀딩 핀이 굽어져 있고 체크 밸브가 풀려져 있음을 발견하였다. 이 밸브는 터보 차저와 흡기 메니폴드 사이에 위치하고 있으며 엔진 운전중 터보 차저가 엔진 부하에 따라서 연소용 흡입 공기를 엔진에 공급하는 데에 보조 역할을 한다.

② 예방 대책 : 계획 예방 정비시 터보 차저와 흡기 메니폴드 사이에 위치하고 있는 체크 밸브의 상태를 육안 점검하고 동작 상태를 점검하는 것이 적절한 예방 대책으로 판단한다.

(12) 비상 디젤 발전기 시험 운전중 배기 가스 소음기 케이스(Exhaust Silencer Tank)가 크랙 및 찢어짐 발생-Seabrook, River Bend, Shearon Harris, Bradwood 등의 발전소에서의 사례

① 고장 원인 : 비상 디젤 발전기 운전중 배기 가스의 온도가 소음기 내부를 통과할 때 200°F 이상으로 상승할 경우도 있는데 이러한 고온

에서 소음기의 금속 재료 열팽창을 전혀 고려하지 않고 소음기 지지 금속판을 시공한 것으로 인한 고장 사례이다.

② 예방 대책 : 이 고장은 엔진 시공시 배기 가스 굴뚝(Stack) 및 배기 가스 소음기(Exhaust silencer)를 콘크리트 벽에 완전히 고정하여 열팽창을 할 수 없게 시공한 것이 원인이므로, 온도가 증가함에 따라서 배기 가스 굴뚝이 팽창 가능하도록 Expansion joint를 설치하고 소음기 케이스가 온도 변화에 대응하여 지지대에서 충분한 슬라이딩을 할 수 있도록 소음기 지지대 부위를 주의하여 시공하여야 할 것으로 판단된다.

(13) 비상 디젤 발전기 윤활유 압력 낮음(순환 불량)으로 인한 각종 중요 베어링 손상-Enrico Fermi Atomic Power Plant Unit 2의 사례

① 고장 원인 : 평소 윤활유 펌프 정비 불량 혹은 윤활유 필터 엘리먼트 정비 불량이 원인이 되어 운전중 윤활유 압력 저하에 의한 엔진 주요 부품 습동 부분에 윤활유 공급 부족 현상을 유발하여 커넥팅로드 대단부 베어링, 메인 베어링, 크랭크샤프트 저널 부위가 크게 손상된 고장 사례이다.

② 예방 대책 : 계획 예방 정비시에 윤활유 필터 엘리먼트의 정비를

철저히 하고 운전중에는 윤활유 압력 저하 유무를 초기에 발견하여 정비해야 할 것으로 판명된다. 또한 운전중에는 윤활유 공급 펌프의 예방 정비·예측 정비를 철저히 하여 상태 감시를 하는 것이 고장 방지 대책이다.

(14) 엔진 피스톤 상부 부분에서 누설로 인해 비상 디젤 발전기 운전 불가능 현상 초래-North Anna Power Station Unit 2의 사례

① 고장 원인 : Upper Piston were Leaking으로 표시된 영문으로만은 정확한 원인이 무엇이며 고장의 형태가 어떤 것인지를 정확히 파악할 수는 없으나 엔진 운전이 불가능하였다는 것으로 보아서 피스톤 상부의 압축링이 비정상적인 급격 마모 현상으로 인해 운전중 연소 가스의 Blow-by가 발생된 것으로 추정된다.

② 예방 대책 : 엔진 운전중에는 주기적으로 부하에 따른 최고 폭발 압력 측정, 배기 가스 온도 변화 유무, 윤활유 압력의 정상 유지 등을 감시하고 계획 예방 정비 기간에는 주기적인 계획에 의한 피스톤 링 점검, 실린더 라이너 내부벽 점검, Bore Scope를 이용한 주기적인 실린더 내부 벽 상태 점검 및 확인 등이 적절한 예방 대책이다.

(15) 비상 디젤 발전기 운전중 피

스톤이 실린더 라이너 내부에 고착되어 엔진이 정지하고 메인 베어링이 손상됨 - North Anna Power Station Unit 1, 2 의 사례

① 고장 원인 : Jacket Water Tank의 엔진 냉각수가 계속하여 줄어들어 조사 결과 실린더 라이너의 하부측 냉각수 씰링(O-Ring) 손상이 원인으로 엔진 자켓 냉각수가 손상된 씰링 부위로 누설하여 Crank Case 내부 윤활유 Sump Tank로 흘러 내려 엔진 윤활유와 섞였다. 이것이 원인이 되어 운전중 피스톤이 실린더 라이너에 고착되고 3개 실린더의 메인 베어링이 손상되었다.

② 예방 대책 : 실린더 라이너의 씰링(O-Ring) 수명은 엔진 제작사에 따라 약간씩의 차이가 있으며 일반적으로 15년 정도로 추정된다. 평소에 엔진 냉각수 관리를 잘 해야 하며 적절한 화학 약품 처리를 해야 한다.

15년 이상 된 디젤 엔진에서는 실린더 라이너의 냉각수 씰을 신제품으로 교환하든가 아니면 주기적인 수압 시험을 통하여 씰의 건전성을 확인하는 것이 고장 예방 대책이다.

(16) 비상 디젤 발전기 운전중 크랭크 케이스 압력 높음으로 엔진이 정지됨 - North Anna Power Station Unit 2 의 사례

① 고장 원인 : 두 개의 실린더에

서 실린더 라이너 하부에 위치한 냉각수 씰링 손상이 원인으로 엔진 자켓 냉각수가 손상된 씰 부위로 누설하여 윤활유 Sump Tank로 흘러 내려 크랭크 케이스 내부 윤활유와 섞였다.

이것이 원인이 되어 뜨거운 윤활유 속에 섞인 냉각수가 급격히 증발하여 운전중 크랭크 케이스 내부에서 발생하는 유증기와 혼합되고 크랭크 케이스 내부 압력이 증가하여 크랭크 케이스에 설치된 압력 감지기가 자동으로 이를 감지한 후 트립 신호를 발생하여 엔진을 보호한 경우이다. 엔진 정지 후 피스톤 분해 결과 수개 실린더에서 피스톤 링이 손상된 것을 발견하였다.

② 예방 대책 : (15) 사례와 동일

(17) 비상 디젤 발전기 운전중 과도한 진동 현상이 있어 운전원이 수동으로 엔진을 정지함 - William B. McGuire Nuclear Station Unit 2 의 사례

① 고장 원인 : 정기 시험 직전에 엔진 윤활유 낮음 경보와 함께 엔진이 Trip된 경우가 있었다. 윤활유 계통 스트레이너에서 황동 메탈 성분이 발견되어 엔진을 분해·점검한 결과 거의 모든 메인 베어링이 손상되어 있고 한 개의 피스톤, 커넥팅로드 베어링, 크랭크샤프트가 손상되었다.

이 고장 원인은 윤활유 펌프의 성

능 저하로 윤활유 순환 상태가 불량한 상태에서 엔진을 계속하여 운전한 경우와 윤활유 필터 및 스트레이너 엘리먼트가 막힌 상태에서 엔진을 계속하여 운전한 경우로 추정할 수 있다.

② 예방 대책 : 주기적으로 윤활유 펌프를 분해·점검하여 이상 유무를 확인하고 이상 발견시는 부품을 신제품으로 교체하며 엔진 운전중에는 윤활유 압력 감시, 윤활유 온도 감시, 윤활유 펌프의 진동, 소음 등을 감시하고 윤활유 계통 스트레이너 엘리먼트의 상태도 항상 양호하게 유지한다.

예측 정비의 한 방법인 엔진 윤활유 성분 분석을 주기적으로 수행하고 이 때 금속성 마모 입자가 윤활유 속에 포함되어 있는지를 확인한다.

4행정 트렁크 피스톤 형식의 엔진인지, 2행정 크로스헤드형 엔진인지를 구별하여 특정 엔진의 형식에 맞는 적절한 규격의 윤활유를 사용한다.

즉 저유황 연료유를 사용할시는 전알카리가(Total Basic Number)가 약간 낮은 윤활유를 사용하고 유황분이 많이 포함된 연료유에는 전알카리가가 높은 윤활유를 선택하여 사용한다. 엔진 제작사와 윤활유 제품 회사의 권고 사항들을 준수한다.



(18) 가버너 액츄에이터를 검교정하기 위해 외주 수리 후 엔진에 설치하여 비상 디젤 발전기 시운전중 약 15초 동안 계속하여 과속도(Overspeed)로 엔진이 운전되어 중요 부품인 커넥팅 로드, 커넥팅 로드 베어링, 메인 베어링, 링크핀 부싱, 엔진 베이스 등이 파손됨-Grand Gulf Unit 1의 사례

① 고장 원인 : 가버너 액츄에이터 외부 수리중에 전기적 가버너 측과 기계적 가버너 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. 과속도시 엔진에 연료 공급을 제한하는 기계적 리미트 설정치가 잘못 설정된 것으로 추정된다.

② 예방 대책 : 가버너 액츄에이터 분해·점검·검교정을 외주 수리할 때에는 공신력있는 회사를 선택할 필요성이 있다. 또한 기계적 과속도 연료액 제한 장치의 정확한 설정치를 주기적으로 점검할 필요성이 있다.

(19) 비상 디젤 발전기 운전중 연료유 계통 라인을 지지하는 Hold Down Clamp 부위에서 연료유 누설로 인한 엔진 정지-Nine Mile Point 2 발전소의 사례

① 고장 원인 : 운전중 발생하는 연료유 라인의 반복되는 진동에 의해 라인을 지지하기 위해 채워둔 클램프 부위에서 마찰에 의한 마모 현상이 발생하여 연료유가 누설된 경우이다.

② 예방 대책 : 엔진의 연료유 라인뿐만 아니라 모든 유체 라인의 움직임을 방지하는 클램프에는 유체의 온도를 고려한 플라스틱 제품이나 고무 제품을 적절하게 삽입하여 파이프 라인과 클램프의 마찰을 없애는 것이 적절한 예방 방법으로 판단된다.

(20) 정상 운전시는 900RPM, 무부하 운전은 450RPM으로 운전되는 원자력발전소 비상 디젤 발전기 월간 시험 운전중 월간 시험을 완료하기 위해 발전기에서 부하를 제거하고 엔진 정지를 위해서 무부하 상태로 10분 정도 운전하는 중 갑작스런 발전소 비상 사태 발생으로 비상 디젤 발전기 긴급 기동 요구 신호가 투입되었다. 이 때 엔진은 정상적인 제어로 900RPM으로 회전수가 급속히 상승되어 부하를 담당할 준비를 완료하였으나 발전기 Field가 여자되지 않아서 출력 전압이 전혀 형성되지 않음-Watts Bar Nuclear Plant의 사례

① 고장 원인 : 전기적 로직 계통의 설계 및 시공이 잘못된 것으로 추정한다.

② 예방 대책 : 원자력발전소 건

설 후 처음 비상 디젤 발전기를 시운전할시에 이러한 고장에 대처할 수 있게 여러 종류의 상황 발생에 대비한 충분한 시운전을 수행하는 것이 예방 대책으로 판단된다.

(21) 비상 디젤 발전기 정기 24시간 견딜(Endurance Test) 여부를 시험 운전하던 도중에 일일 연료 공급 탱크와 엔진 사이에 위치한 연료유 스트레이너가 막혀 엔진이 정지됨-Arkansas Nuclear One Unit 2의 사례

① 고장 원인 : 스트레이너 엘리먼트를 분해하여 본 결과 산소 토오치로 가열해야 청소가 될만큼 엄청난 양의 연료유 찌꺼기가 막혀 있었다. 실험실에서 연료유를 성분 분석하여 본 결과, 미생물질(연료유 곰팡이 종류)이 번식하고 있음을 발견했다.

② 예방 대책 : 연료유에 미생물질(연료유 곰팡이·박테리아류) 번식을 방지하는 첨가제를 주입하고 주기적으로 연료유 성분을 분석할 때 박테리아나 미생물질들이 존재하는지 여부를 분석하여 적절한 대책을 세운다.

또한 엔진 운전중에는 주기적으로 필터의 차압을 감시하여 상태 감시를 하고 필터 엘리먼트를 청소하여 항상 청결한 상태로 유지하는 것이 예방 대책으로 판단된다.

그리고 연료유 필터의 설계시는

Dual Filter로 하여 운전중에 하나가 막히면 병렬로 연결된 다른 하나를 사용 가능하도록 하고, 두 개의 필터 모두 완전히 막혔을 경우는 짧은 시간 동안만이라도 연료유가 필터를 자동적으로 By-pass되어 비상 디젤 발전기 긴급 기동 요구에 의해서 운전되는 동안에는 엔진이 절대로 트립되는 일이 없도록 하는 것이 적절한 예방 방법으로 판단된다.

(22) 비상 디젤 발전기 운전중 1/4-inch 연료유 라인 누설로 화재 발생, 엔진 수동 정지함 - Wolf Creek Generating Station의 사례

① 고장 원인 : 비상 디젤 발전기 24시간 견딤(Endurance test) 운전 시험중에 운전원이 순찰중 엔진에 부착된 1/4-inch 연료유 라인에서 연료유가 한 방울씩 주기적으로 누설되는 것을 발견하였으나 24시간 시험을 성공하기 위해 대수롭지 않게 여기고 그대로 두었다.

45분 정도 지난 후 다시 확인했을 때는 연료유가 다량으로 엔진룸 공간을 향해 분무하고 있었으며 곧이어 화재가 발생하였다. 가느다란 라인에서의 누설을 대수롭지 않게 생각한 것이 사고의 원인이 된 것이다.

엔진이 운전중 반복되는 진동에 의해 직경이 적은 가느다란 파이프 라인이 바로 옆에 인접한 직경이 큰

유체 파이프 혹은 엔진 본체의 금속 부품과 마찰하여 마찰된 부위가 마멸에 의해서 파공된 것이 누설 원인으로 추정된다.

② 예방 대책 : 엔진 운전중 각종 유체 라인의 압력 감지를 위한 튜빙 라인을 진동이나 마찰에 의한 마모 현상이 발생하지 않도록 설치하는 것이 적절한 방법으로 판단된다. 운전원이 순찰중 외부로 누설되는 유체가 없는지를 철저히 감시하는 것이 예방 방법으로 판단된다.

(23) 비상 디젤 발전기 시동용 공기 저장 탱크의 안전 밸브가 분출 후 재안착(Reseat)이 되지 않음 - Perry Unit 1의 사례

① 고장 원인 : 엔진을 시동하기 위한 시동 공기 저장 탱크의 안전 밸브가 어떤 원인으로 분출(Open)된 후 과압을 배출 후 적절한 압력에서 Close되어야 하지만 역할을 하지 못하였다. 따라서 엔진 대기시 긴급 기동 요구에 대응할 수 있도록 적절한 압력의 시동용 공기를 탱크에 저장하고 있어야 하는데 그것이 불가능해진 것이다. 그 원인은 안전 밸브의 설정값 조정이 잘못되었거나 밸브 자체가 불량한 것으로 추정된다.

② 예방 대책 : 주기적으로 안전 밸브를 취외하여 Bench Test를 수행하고 열림 설정값, 닫힘 설정값을 조정하는 것이 고장을 방지하는 적

절한 예방 방법으로 판단된다.

(24) 계획 예방 정비중 비상 디젤 발전기 엔진의 에어 인터쿨러 정비시에 잔류한 모래 알갱이에 의해 엔진 운전중 피스톤·피스톤링·실린더 라이너가 손상되어 비상 디젤 발전기 운전 불가능 상태 발생 - Susquehanna Steam Electric Station의 사례

① 고장 원인 : 계획 예방 정비 기간중 엔진의 에어 인터쿨러 튜브측 및 셸측의 이물질을 청소하기 위하여 Sand Blasting 기법을 이용하여 깨끗이 청소하고 페인트를 재도장하여 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.

Borecope(내시경)를 이용하여 엔진의 실린더 내부를 점검한 결과, 모든 실린더 라이너 내부벽이 심하게 상하로 굽혀 있음을 확인하게 되었다. 고장의 원인을 분석한 결과, 인터쿨러 정비시에 Sand Blasting 방법을 이용하여 튜브 및 셸측 내부를 청소할 때 잔류한 모래 알갱이가 엔진 운전시 흡입 공기를 통하여 실린더 내부로 들어가서 피스톤 링과 실린더 라이너의 습동 부위에 끼여 저서 마치 조각가가 끌로 나무 재료를 파내듯이 실린더 라이너 벽면을 파내어서 엔진을 전혀 운전 불가능



하도록 모든 실린더 내부를 손상시킨 것으로 판정된다.

② 예방 대책 : 엔진 관련 전문 지식이 전혀 없는 수준 미달의 작업자에 의한 정비 작업을 금지하는 것이 대형 사고 발생을 막는 하나의 예방 방법으로 판단된다. 디젤 엔진에 있어서 운전중 실린더 라이너 내부벽 마모율에 가장 큰 영향을 주는 것이 엔진 흡입 공기 공급 필터에서 걸러지지 않고 엔진의 흡입 공기(Suction Air) 속에 섞여 실린더의 연소실 내부로 들어오는 모래 및 먼지에 의한 것임을 기본적으로 숙지하지 못한 작업자에 의한 정비 업무가 원자력발전소의 비상 디젤 발전기 엔진을 완전히 망가뜨린 대표적인 사례로 추정된다.

Sand Blasting 방법으로 터보차저 터빈축 브레이드나 그 외의 녹슨 기기 부품들을 청소하면 브레이드가 빛이 날 정도로 청소가 깨끗하게 되므로 작업자가 에어 인터쿨러의 튜브 청소에도 이 방법을 사용한 것으로 판단된다.

그러나 일반 냉각수 계통의 열교환기나 쿨러의 튜브측에는 이 Sand Blasting 청소 방법을 사용해도 모래 알갱이에 의한 장해의 위험이 없으나 디젤 엔진의 경우에는 에어 인터쿨러의 셀축을 청소한 후에 모래나 이물질이 그곳에 조금이라도 잔류하면 그러한 이물질들이 엔진 운전중에 연소용 흡입 공기에

섞여 실린더 내부 연소실로 들어가게 되어 디젤 엔진 고장 발생의 원인이 되므로 이러한 기법의 튜브 청소 방법 대신에 화학 약품을 이용한 엔진의 에어 인터쿨러 튜브 및 셀축 청소를 하는 것이 무방하며 일반적으로 많이 이용되고 있다.

(25) 미관을 위해 도색한 페인트로 인한 비상 디젤 발전기 운전 장애 발생—McGuire Unit 1, Palo Verde Unit 3의 사례

① 고장 원인 : 비상 디젤 발전기 엔진을 외관상 보기 좋게 하기 위해서 페인트 스프레이기를 이용하여 엔진을 도색한 후 정기 점검시 100% 출력으로 부하를 상승하였으나 엔진의 출력 증가가 불가능한 고장이 발생했다. 원인 분석 결과 연료 제어 랙의 Pivot 부위와 연료 인젝션 펌프 제어 랙 부위에 두껍게 도색된 페인트로 인하여 엔진 연료 제어가 되지 않는 고장으로 판단된다.

② 예방 대책 : 비상 디젤 발전기의 외관을 보기 좋게 하는 것도 바람직한 일이지만 페인트를 도색하여야 할 엔진의 부속 기기와 하지 말아야 할 기기를 분명하게 구별하여야 한다.

또한 엔진 본체에 너무 두껍게 페인트를 도색하는 것은 운전중 엔진에서 발생하는 열의 냉각을 위해서도 바람직한 것은 아니므로 페인트

도색 여부를 신중하게 판단하여야 한다.

운전중 고온의 배기 가스가 통과하는 배기관이나 연료 인젝션 펌프, 연료 고압 파이프, 연료 인젝터, 엔진의 Name Plate 등에는 페인트를 도색하면 안된다.

(26) 실린더 헤더 상부 가스켓 및 실린더 헤더 크랙에 의한 누설 자켓 냉각수가 피스톤 상부에 축적되어 엔진 기동시 액 압축 발생으로 엔진 내부 주요 부품 파손—San Onofre Nuclear Generating Station, Palo Verde Nuclear Generating station의 사례

① 고장 원인 : 실린더 헤더 가스켓에서 소량의 누설 냉각수가 엔진 대기 기간에 실린더 내부로 흘러 들어가 피스톤 상부에 축적되었다. 주강 제품으로 제작된 실린더 헤더에 크랙이 발생하였고 이 크랙된 부분으로 냉각수가 비상 디젤 발전기 엔진이 대기하고 있는 동안에 소량씩 실린더 내부로 누설되어 피스톤 상부에 모여 고이게 되었다.

이 상태에서 엔진 터닝이나 Air Blow를 수행하여 실린더 내부 이물질 검사를 수행하는 절차가 생략된 채로 엔진 월간 시험을 위한 엔진 기동중에 실린더 내부에서 누설, 축적된 자켓 냉각수가 원인으로 액 압축 현상이 발생하여 비상 디젤 발전기 엔진이 완전히 파손된 고장 형

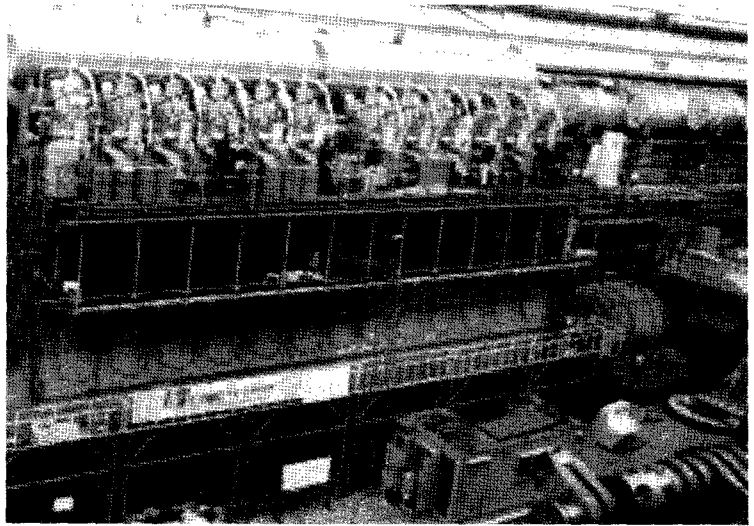
태의 사례이다.

엔진의 연소용 흡입 공기인 기체는 피스톤이 상사점(Top Dead Center)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 구부러져 엔진을 운전 불가능의 상태로 만들게 되었다.

② 예방 대책 : 엔진 설계 및 제작시 실린더 헤더 안전 밸브(Cylinder Head Safety Valve)를 부착해야 한다.

일반적으로 원자력발전소 비상 디젤 발전기로 사용되는 디젤 엔진은 소형의 자동차용 디젤 엔진이 아니고 선박용으로 제작된 중속 중형 혹은 중속 대형 4행정 V-Type 엔진이 주로 사용되고 있다.

대부분의 국가에서 선박용 엔진 제작시에는 실린더 내부에 액 압축 및 이상 과압 형성에 의한 엔진 대형 파손 사고 예방을 위해 실린더 지름 230mm 이상의 디젤 엔진에는 실린더 헤더 안전 밸브(Cylinder Head Safety Valve)를 필수적으로 부착하도록 법규로 규정하고 있으며 각국 선급을 통해 설치 여부 검사 업무를 수행하고 있다. 발전소 비상 사태 발생시나 급속 기동 시험을 제외한 월간 시험시는 엔진을 운



원자력발전소에 설치되어 있는 비상 디젤 발전기는 원자력발전소 내부 소내 정전이나 외부 전원 상실 등의 원자력발전소 비상 사태 발생시 10초 안에 긴급 기동되어 1분 이내에 비상 부하를 담당하여 원자로의 잔열을 제거하는 등 발전소 내부 안전 계통 주요 기기에 비상 전원을 공급하는 중요한 기기이다.

전하기 전에 터닝 및 Air Blow를 수행하여 실린더 내부 연소실에 이물질 존재 여부를 사전 점검하는 방법이 예방 대책이다.

이를 위해서는 엔진 설계 및 제작시에 현장에서 쉽게 이러한 점검 절차를 수행할 수 있게 모터 구동 엔진 터닝 설비를 고려하고 형식만 갖춘 것이 아닌 실제적으로 신뢰성이 있고 사용하기에 편리한 Indicator Cock(Test cock)을 설치하는 것을 고려하는 것이 최적의 예방 방법으로 판단된다.

고장 사례 파악에서 얻은 교훈

1. 인적 실수의 감소 필요성

앞에서 조사한 해외 원자력발전소 비상 디젤 발전기 고장 사례 중에서 운전원이나 정비원들이 조금 더 세심하게 관찰하고 관심을 가

졌더라면 예방 가능했던 고장들이 많이 있다.

비상 디젤 발전기 관련 담당자가 신이 아닌 사람인 이상 누구나 실수를 할 수가 있으므로 이러한 실수를 얼마나 적은 횟수로 줄이느냐가 중요하다라는 생각이 든다.

과거에 점검·순찰중이나 정비중 어떠한 인적 실수로 일어났던 중요 고장이나 문제점을 더 많은 사람들이 알게 될까 부끄럽게 생각하여 감추는 경우도 있으나 잘 기록하여 두어 동일한 사례가 재발하는 일이 없도록 노력하는 것이 중요하다고 판단된다.

고장이 일어난 부속 기기의 종류, 고장의 유형, 고장 원인, 발생된 고장이 발전소 내부 계통의 기능에 미친 영향, 동일한 고장의 재발 방지를 위해서는 주기적인 상태 감시 작업이 적절한지 아니면 분해 정비 작



업이 적절한지를 적절히 파악하여 동일한 고장이 계속하여 되풀이되는 현상을 제거하여야 할 것이다.

2. 비상 디젤 발전기 담당자의 전문 능력 향상 필요성

원자력발전소 비상 디젤 발전기와 관련된 기술의 발전은 최근 하루가 다르게 변화하고 있다. 이러한 기술의 변화에 적응하기 위해서는 관련자들의 부단한 노력이 필요하다고 판단된다.

국내 일부 원자력발전소에서는 예측 정비의 기법이 일부 포함된 엔진 자기 진단 프로그램의 한 방법으로서 디젤 엔진 성능 감시 시스템이 도입된 곳도 있다. 이러한 우수하고 실용적인 예측 진단 프로그램도 담당자의 디젤 엔진 관련 전문 지식의 부족하면 무용지물이 되고 만다.

최근 산업계에서는 연료유 계통에 Homonizer라는 새로운 기기를 설치하여 33.3%의 물(증류수)을 연료유에 섞어서 발전용 대형 디젤 엔진에 혼합 연소하는 방법이 실용화되고 있다.

이 방법의 성공으로 연기통(Stack or Funnel)에 설치한 NO₂ 제거 설비인 Denox 시스템이 필요없게 되었으며, 디젤 엔진의 배기 가스에 섞여 배출되어 대기를 오염시키던 유해 화학 성분의 농도가 혁신적으로 감소하게 되었다.

불과 수 년 전까지만 해도 당시의

공학적인 지식으로는 도저히 불가능할 것으로 생각되던 현상이 실제로 가능한 것으로 변화하고 있는 것이다.

따라서 관련 담당자들은 반복적인 연수원 교육이나 세미나 등을 통하여 새로운 기술에 대한 지식의 습득으로 각자가 담당하고 있는 원자력발전소 비상 디젤 발전기의 신뢰성 향상에 기여할 수 있도록 노력하여야 할 것으로 판단된다.

3. 설계 및 시공 철저

해외 원자력발전소의 비상 디젤 엔진에서 발생했던 고장 사례에서 알 수 있듯이 건설시에 시공을 잘못된 것이 그 원인으로 밝혀진 것들도 있다. 물론 한정된 건설 기간 안에 작업을 완료하기 위해서 너무 빨리 서두르다 실수로 인한 것들도 있었지만 근본적으로 설계 잘못에 의한 것들도 있다.

위의 해외 원전 사례 내용에서는 열거하지 않았지만 비상 디젤 발전기 엔진이 담당할 수 있는 최대 출력 용량이 작게 설계되어 실제 발전소 긴급 사태 발생시 소내에서 요구하는 출력을 비상 디젤 발전기가 감당해내지 못하여 큰 곤경에 처한 해외 원자력발전소의 사례도 있었다.

이 발전소의 경우 기존에 설치된 비상 디젤 발전기 엔진을 모두 철거하고 더 큰 출력을 낼 수 있는 용량의 비상 디젤 발전기 엔진으로

재설치했다. 물론 국내에서는 이러한 획극적인 일이 절대로 일어나지 않겠지만 초기 설계 및 시공의 중요성을 입증하는 하나의 사례로 볼 수 있다.

4. 다양한 방법의 예측 진단 및 예측 정비 방법 연구 필요성

최근 미국 NRC에서는 원자력발전소 비상 디젤 발전기에 대한 시험 규정이 너무 까다롭고 고장 횟수에 따른 시험 주기 단축 조항이 비현실적으로 너무 엄격하다고 판단하여 규제 지침 Reg.Guide 1.155 및 Reg.Guide 1.9Rev 3에서는 완화 시켜주고 있는 추세이다. 그러나 완화하는 대신에 사업자가 비상 디젤 발전기에 대한 신뢰도 프로그램을 수립하여 신뢰도를 보증하도록 요구하고 있다.

이 신뢰도 프로그램에서는 고장의 근본 원인 분석, 적절한 정비 프로그램 개발, 신뢰도 데이터 시스템 개발, 성능 감시 시스템 적용 등을 요구하고 있다.

따라서 장기적으로는 국내 원자력발전소 비상 디젤 발전기에도 이러한 프로그램들이 점차 적용되어 실용화될 것으로 예상된다.

이러한 프로그램들은 신뢰도 중심 정비 기법(Reliability Centered Maintenance)에 포함되는 예방 혹은 예측 정비 방법과도 연관성이 있으므로 비상 디젤 발전기 관련 담당

자들은 예측 진단 및 예측 정비에 관한 지식을 각자 나름대로 습득하도록 노력하는 것이 필요하다고 판단된다.

최근 다양하게 개발되고 있는 예측 정비 기법들을 운전중 진단이나 정비 프로그램, 성능 감시 시스템에 적용하면 비상 디젤 발전기의 고장을 사전에 예방할 수 있고 정비 비용을 절감할 수 있으며 기기의 높은 신뢰성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 정보의 개방화, 공유화 필요성

해외 및 국내 원자력발전소 비상 디젤 발전기와 관련된 정보의 공유화가 필요하다고 판단된다. 이를 위해서는 모든 원자력발전소 비상 디젤 발전기 관련자들의 과감한 사고의 전환이 있어야 할 것이다. 일례로 정비원 상호간에서도 혼자만이 전문 지식과 경험을 간직하고 있으려는 경향이 있다. 이것은 담당 기기에 관하여 일인자가 아니면 혹시나 직장에서 퇴출될 위험성이 있지 않을까하는 기우에서 비롯된 이유도 있겠지만 과거부터 내려오던 보이지 않는 나쁜 전통 때문으로 판단된다.

물론 어렵고 힘들게 습득한 지식을 남에게 전수하는 것보다는 혼자만이 간직하고 싶은 마음이 들 수도 있겠지만 이제는 이러한 사고들을 과감하게 버리고 비상 디젤 발전기

정비중 또는 운전중의 경험, 예상치 못했던 고장 관련 사례, 고장시 신속히 대응했던 조치 방법들, 원자력발전소 비상 디젤 엔진과 관련된 최근의 기술 동향, 새로이 입수한 기기 관련 선진 기술 등을 국내 모든 원자력발전소 비상 디젤 발전기 담당자가 함께 공유하여 원전 비상 디젤 발전기 운영에 관한 기술력을 세계 제일의 수준으로 향상시킬 필요가 있다고 판단된다.

결론

원자력발전소에 종사하는 소수의 직원 중에는 그까지 디젤 엔진이야 어떻게 되던간에 비상시 요구되는 출력만 잠시 동안 유지할 수 있으면 발전소 비상 디젤 발전기의 기능은 다한 것이 아니냐라고 생각하는 사람도 있을 것이다.

그러나 평소에 관리가 잘못된 불량한 엔진이 발전소 비상 사태 발생시 적절히 잘 대응할 수가 없을 것은 명약관화한 사실이다.

불가항력적인 천재지변으로 인하여 외부 전원이 손실되거나 소내 정전시 비상 디젤 발전기 긴급 기동 요구 신호가 투입되어도 전혀 기동이 되지 않는다든지 혹은 기동은 되었으나 소내 비상 계통에서 요구되는 부하 투입이 되지 않으면 원자력발전소 전체의 안전에 중대한 영향을 미칠 수도 있다.

따라서 원자력발전소에서 비상 디젤 발전기 운전 및 정비를 직접적으로 담당하는 직원뿐만이 아니라 모든 종사자들이 원자력발전소 비상 디젤 발전기의 역할과 중요성에 더욱더 관심을 가질 필요성이 있다고 판단된다.

비상 디젤 발전기의 고장은 여러 가지 형태로 나타나게 된다. 위의 예에서 나타난 해외 원자력발전소에서 실제로 발생한 고장 사례들뿐만이 아니라 과열·누수·누유·헛팅·이상 진동·소음 과대·과속도·제어 실패·기동 실패·저속도·부하 투입 및 계통 병입 실패·노킹 현상·매연 과대 배출·유체의 압력 저하·열교환기 막힘·중요 부품 파손·운전중 폭발·화재 발생 등 수많은 고장의 형태들 중에서 어떤 하나의 현상으로 어느날 갑자기 나타날 수도 있다.

본고의 목적은 해외 원자력발전소 비상 디젤 발전기에서 여러 가지 다양한 형태의 고장이 발생된 실제 사례들을 분석하여 고장 근본 원인을 여러 각도에서 분석·파악하여 본 후 그러한 고장 사례를 교훈으로 하여 동일 형태의 고장 발생을 예방하고자 하는 데 조금이나마 참고가 되도록 하기 위해서이다. 아무쪼록 이 글이 원자력발전소에 종사하시는 분들께 조금이나마 참고가 되었으면 하는 바램이다. ☸