

# 터어빈 발전기의 화재 예방프로그램

## 1. 서 론

터어빈 발전기는 매우 신뢰성이 높은 기계이다. 그러나, 터어빈 발전기는 많은 양의 가연성 윤활유를 가진 압력 배관설비가 있고, 폭발성 가스인 수소에 존재하여 운전된다. 이 위험한 물질들은 광범위한 발화원을 가진 고속 회전기기의 부근에 위치한다. 발전설비가 갑자기 멈추는 결과를 초래하는 화재는 주의깊은 분석이 필요하며 중대한 위험요소이다.

터어빈 발전기 화재에 관한 최종 보고서인 전력연구소에서 발표한 '스프링클러에 의한 터어빈 발전기 화재 예방'은 최근 발생한 터어빈 발전소의 많은 화재로부터 재검토되어야 하는 것을 지적하고 있다.

먼저, 동작 중인 터어빈 발전기를 위한 화재위험의 본질을 재검토한다. 화재와 관련이 있는 3가지 측면은 베어링 윤활유, 수소봉입 냉각유설비, 조속기 제어설비이다.

NFPA에서는 대표적인 윤활유(발화점 204.4℃ ~ 260℃, 자연발화온도 371.1℃)를 Class III B인 가연성 액체로 분류한다. 베어링 윤활유 압력 1.757~2.108kg/cm<sup>2</sup>, 수소봉입 냉각유 압력 5.27~7.03kg/cm<sup>2</sup>, 112.44kg/cm<sup>2</sup> 이상 조속기 윤활장치 압력으로 발전설비는 운전되고 있다. 이 시스템에서 기름이 순환되는 양은 37,854.3ℓ를 초과한다.

## 2. 기능상 위험

터어빈 발전기의 운전시 연속적인 윤활작용은 매우 중요하다. 화재 예방 관점에서 발전기 운전 중 가장 중요한 펌프는 구동축 펌프이다. 구동축이 회전할 때 베어링에 계속적으로 윤활유를 공급하도록 구동축 펌

프는 운전한다. 또한, 이것은 화재의 심도측면에서 가장 영향력이 큰 요인이다. 윤활장치 손상으로 기름이 방출하면 발전기 동작 중지 기간 동안에 구동축 펌프는 제동장치로 기름을 누출시킬 것이다. 기름 누출 시간은 약 45~50분 가량 소요된다. 누출된 기름이 증기배관과 전기설비와 같은 유효한 발화원 중 어느 것에 의해서라도 인화되면 심각한 화재가 발생한다.

이와 유사한 위험은 수소봉입 냉각유 장치에도 있다. 윤활유 설비와 결합된 수소전자제어설비(EHC, Electrohydraulic Control)가 있는 기존 설비는 화재위험을 증가시킨다. 1970년대 초에 개발된 새로운 설비는 인산에스테르(phosphate-esters)와 같은 가연성이 적은 합성액체를 분리하는 EHC설비를 이용하여 화재위험을 경감시키고 있다.

누출된 기름은 압력분출(pressure jet), 3차원(three-dimensional), 공동누출(pool/spill) 중 3 종류의 화재 혼합 또는 한 종류의 화재를 초래할 수 있다. 따라서, 대표적인 발전소 환경이 주어지면 3가지 종류의 화재는 모두 고려하여야 한다.

## 3. 최근 터어빈 발전기 화재

최근 3년 동안 대형 터어빈 발전기 화재가 5번 있었다. 화재로 인한 부속설비의 휴지손실은 33개월 이상 이었고, 사망자는 없었으나 3명의 부상자와 150만 \$로 추정되는 물질적인 손해가 발생하였다. 여기에는 핵발전소와 비핵발전소가 포함되었다. 발전소 설비 용량은 150MW에서 900MW, 설비 경과 년수는 최신 제품에서부터 19년까지로 분류된다.

5번의 화재 원인은 진동 2번, 회전자 날개깃 불량, 금속재료의 열화, 사람의 부주의이다. 4번의 화재시

근무자들이 주조정실에서 피난하여야 할 만큼 매우 심각하였다. 화재는 45분에서 거의 7시간까지 진행되었다.

화재로 인한 기름 소비량은 한 장소에서는 18.93ℓ, 다른 장소에서는 34,068.87ℓ로 매우 광범위하다. 18.93ℓ의 기름을 소비한 작은 화재장소는 기름이 인화되었으며, 케이블 설비에도 연소가 확대되었다. 이로 인하여 483km 이상 케이블을 교체하였다. 각각의 경우에 중대한 설비손상이 있었다. 3번 화재에서는 터어빈 밑의 건물에 대한 구조적인 파손이 있었고, 2번 화재에서는 터어빈 발전소의 지붕에 심각한 손상이 있을 만큼 열균형의 차이가 매우 심하다는 것을 경험하였다. 또한, 화재로 인하여 인접 국가에 위치한 핵발전소의 지붕에 구멍이 뚫렸다. 조사 결과 화재가 발생하였을 때, 화재지역에서 근무하는 사람들이 피난하도록 경보를 발하였다.

두 장소에서는 열과 연소로 인한 생성물로 터어빈 홀의 크레인 제어장치가 손상을 입었다. 진화 후에 손해를 사정하고 복구하기 위하여 크레인은 중요한 기기이다. 크레인을 사용하지 못하면 발전기 부속설비를 재배치하는 과정에서 많은 문제점들이 노출된다.

한번의 화재에서는 연소로 인한 부식성이 매우 강한 생성물 때문에 화재 지역 부근의 제어실, 케이블 실, 버너 유지관리실, 기타 모든 설비를 대체하기 위한 고감도 전자설비에도 상당한 손상을 입혔다. 또한, 방화구획선상의 관통부분은 손상 정도에 매우 큰 영향을 주는 요인이다.

5번 화재 중에서 4번은 발전소 자체소방대가 출동하였다. 모든 경우에 관할소방대도 화재 현장으로 출동하였다. 4번 화재시 화재진압작업은 발전소 자체소방대가 진화하였고, 주로 관할 소방대가 지휘하였다.

1번 화재의 경우에는 발전소 자체소방대는 진화작업을 전개하였으나 출동한 청원소방대는 화재진압을 하지 않았다. 이 발전소는 체계적으로 진화활동에 숙련되고 화재의 신속한 진화에 능숙한 소방대가 있었다.

산업안전보건국(The Occupation Safety and Health Administration)의 체계적인 소방대 설치기준에는 진화 숙련도와 소화활동설비의 투자를 중요한 요인으로 정의한다. 진화 활동계획이 유효하지 않은 것은 재정적인 제한으로 소방설비에 대한 투자를 줄

였기 때문이다. 최소한 진화연습과 소화활동설비의 투자가 필요한 소방대의 구성에 제한적인 요인은 여러가지가 있다. 이 경우, 발전소에서는 관할 소방대의 출동에 전적으로 의존한다.

이것이 24시간 동안 공공소방대가 출동 가능한 지역에서는 적절한 소방전략일 수도 있다. 공공소방대가 가까운 곳에 위치하는 경우, 진화계획은 비상계획으로 무시하기도 한다. 대부분 발전소가 멀리 위치하는 것은 관할 소방대의 보호가 부적절하다는 것을 의미한다.

#### 4. 소방시설 선택과 적응성

기술적인 정보를 기초로 분석하면, 위에서 설명한 화재발생 발전소 5개소 중에서 어느 곳도 완벽하고 유효하게 설계된 소방시설은 설치되지 않았다. 한 장소에서는 터어빈 발전기 베어링 부분에 설치한 수동식 이산화탄소 소화설비가 동작하였다. 그러나, 누출된 윤활유가 뜨거운 기름 표면 위에서 재발화되어 화재 진압에 실패하였다. 다른 발전소에서는 윤활유 배관을 따라 자동식 물분무 소화설비를 설치하고, 각 노즐 부근에는 배관 지지물이 파손되지 않도록 특수한 설비를 설치하였다. 이것은 윤활유 배관설비의 손실에 대한 원가 이상으로 그 지역에서 발생한 화재로 인한 손해와 현저한 차이가 있다.

수동식 스프링클러설비는 현장에 근무하는 관리자가 화재시 제어밸브를 동작시키는 경우, 매우 효과적인 설비로 증명되었다. 이러한 경우는 대형 화재 현장에서 수동식 소화설비의 최대 단점이 될 수 있다. 어떤 곳에서는 윤활유를 안전하게 보호하는 대책으로 윤활유 배관을 집중적으로 보호된 여러 배관과 함께 설계한 경우도 있었다. 이것은 권장할 수 있는 방법이나 터어빈 발전기 화재의 전체적인 대책으로는 신뢰성이 떨어진다. 보호설비가 집중적으로 설치된 여러 가지 배관의 결함으로 가연성 기름이 누출될 수도 있기 때문이다.

베어링 부근에는 보호설비가 있는 배관을 설치하지 않고 터어빈 발전기가 설치된 바닥 위에 윤활유 배관을 설치하는 것도 고려하여야 한다. 기존 터어빈 발전기들은 터어빈 옆 오픈공간에 보호설비가 없는 배관을 사용하고 있다.

최근의 사고에서 1/2in. 배관이 파열되고 372℃ 증기가 분출되었다. 1/2in. 기계배관이 4in. 파열된 유힘유 배관을 지지하고 있는 14in. 다른 배관 내에 기름이 침투하였다. 누출된 증기로부터 열로 기화된 기름을 인화시켰다. 그 결과 화재는 두개의 660MW 보조 발전설비의 발전기 아래 부분으로 확대되어 보조 설비들을 파손하고 철골지지대가 휘어지고 콘크리트가 산산조각으로 부서졌다.

에디슨전기연구소에 구성된 화재예방연구위원회의 연구로 터어빈 발전기 화재위험을 전기설비제조업체가 인정하였다. 이에 따라 전력연구소(EPRI, The Electric Power Research Institute)에서는 규모가 크고 현대적인 터어빈 발전설비에 적절한 소화설비를 개발하기 위하여 화재실험을 통하여 심도있게 연구하였다.

## 5. 전력연구소의 연구 결과

최근 터어빈 발전기 화재의 빈번한 발생으로 전력

연구소의 보고서로서 운전 중인 발전소 특히, 발전소 수명연장계획을 진행 중인 발전소의 유지관리에 적용할 수 있는 소방시설의 재검토가 필요하다는 것이 밝혀졌다.

보고서에서는 물분무소화설비를 부주의로 동작한 결과, 터어빈 부속기기와 보조설비에 열로 인한 손해를 입혔다는 것이 밝혀졌다. 따라서, 연구원들은 설비 운영면에서 유효하게 설치된 소화설비의 동작을 포함하여 뜨거운 터어빈 주위에 있는 물의 접촉에 대한 연구를 집중하였다. 24번 화재실험 중에서 물의 접촉에 의해서 어떠한 손상은 나타나지 않았으며, 가장 심한 손실은 300\$의 회전기어 전동기의 손실이다.

터어빈 발전기 제조업체 2개소에서는 터어빈 발전기와 부속설비의 화재 또는 물로 인한 여러가지 다른 역효과에 대하여도 보고서에 포함하였다. 보고서의 4장에서는 많은 위험의 발생 가능성을 경감시킬 수 있는 실질적인 단계를 논의하였다. 이 단계에는 노즐 배치, 물 반사 차폐막, 방수용 재료들도 포함되었다. 터어빈 발전기의 화재위험과 적응 소화설비는 다음과 같다.

터어빈 발전기 화재위험과 적응 소화설비

장 소	화재위험장소	소 화 설 비	비 고
발전기 운전용 바닥 상부	베어링	방향성 분무노즐로 설치한 자동식 스프링클러설비	스프링클러설비가 수동식인 경우, 자동식 가스계소화설비(이산화탄소 소화설비, 하론 소화설비)로 보완
	보온덮개(Skirt)	자동식 스프링클러설비	
	여자기실	자동식 이산화탄소 소화설비	
발전기 운전용 바닥 하부	중2층, 콘덴서실을 포함한 일반지역	면적 278㎡를 초과하는 경우, 살수밀도 12ℓ/min/㎡, 면적 9,290㎡를 초과하는 경우, 살수밀도 8ℓ/min/㎡으로 설계한 자동식 스프링클러설비	대체설비로는 포소화설비
	유힘유 탱크, 운전시설, 내화액체를 사용하지 않는 수소제어설비	자동식 스프링클러설비	대체설비로는 물분무소화설비, 포소화설비, 기타 가스계 소화설비
	수소봉입 냉각유	자동식 스프링클러설비	.

## 6. 터어빈 발전기 화재 예방대책

이론적인 측면에서는 현재 가연성 유힘유를 많

이 사용하는 모든 터어빈 발전기는 소방시설이 필요하다. 또한, 실질적인 측면에서 모든 신 설비는 화재예방을 위한 설비를 설치하여야 하고, 수

명연장을 위하여 유지관리 중인 설비는 한층 더 효과적인 소방시설이 필요하다. 운전 중인 터어빈 발전기에 효과적인 소방시설을 설치하는 경우, 가치있는 설비투자를 결정하기 위하여 주의깊은 연구가 필요하다.

연구 결과 주요한 요인들은 다음 사항을 포함한다.

- 터어빈 발전기의 사용 가능한 예상년수
- 대체부품의 유용성과 부품대체의 계획에서 완성까지 필요한 시간
- 소화활동 능력
- 유틸리티 설비의 구성
- 설비의 효율성
- 주변기기 또는 보조설비의 노출 정도
- 케이블과 같은 다른 가연성 물체의 노출 정도
- 고정식 소화설비
- 전체적인 설비의 중요성
- 보험가입사항
- 화폐가치
- 정부, 조정자와 주주와의 관계

본 연구에서 강조할 중요 요소는 사용 가능한 소화활동의 숙련도이다. 터어빈 발전기 화재는 경험상 진화에 어려움이 많고, 소방대원의 안전을 위협한다는 것을 알 수 있다. 보통 유류화재는 가시거리를 좁히는 대량의 연기와 신속한 진화를 방해하는 고온으로 인하여 복잡하다. 따라서, 효율성이 적고 위험성이 높은 수동적인 소화활동보다 유효하게 설계되고 신속하게 동작되는 고정식 소화설비의 혼합형에 의존하는 것이 현명한 방식이다.

## 7. 소방설비의 개선에 대한 원가 분석

소방설비의 원가는 설비의 크기와 보호설비에 따라 변화한다. 대표적으로 위에서 약술한 모든 위험들은 중2층과 콘덴서실 부분과 같은 터어빈 운전 부분의 면적을 포함하여 열거하였다. 터어빈 하부 위치에서 재 적용할 수 있는 일반적인 소방시설의 원가는 기존 설비를 기초로 계산하면 1㎡ 당 약 750\$에서 900\$까지 필요하다.

이 가격은 소방시설의 선택에 필요한 기술 비용이 포함되지 않았다. 대표적으로 터어빈 발전소는 높이가 높기 때문에 설비와 시스템을 높은 위치로 이동하는 것이 어려우므로 가격이 비싼 편이다. 스프링클러설비업자는 이러한 복잡한 작업을 선택사항으로 계약한다.

참고적으로 전력연구소(EPRI) 보고서 5장에서는 위험에 대한 경제적인 가치를 발표하였다.

모든 설비에서 물질적인 손해는 화재 1건 당 평균 850,000\$이고, 간접 유지 손실은 39일이다. 최근 5번 화재에서 물질적인 손실은 평균 300,000\$이었고, 간접 휴지 손실은 200일 이상이었다.

유효하게 설계된 소방시설로 인하여 발전소가 우량한 보험요율을 적용받으면 보험가격면에서 원가를 감소시킬 수 있다. 그러나, 이것은 보험시장의 주기적인 성질 때문에 어떠한 경우, 터어빈 발전소 소유주가 화재위험을 인식하여 소방시설의 개선에 대한 결정을 보험 가격 측면에서가 아니라 앞에서 기술한 주요 원인 중에서 권장한 연구 결과를 기준으로 한다.

## 8. 결 론

최근 터어빈 발전기의 화재경험으로부터 전력연구소의 결론이 적중하였다. 여기에서는 진동, 배관의 파손, 사람의 부주의와 같은 과거의 실수를 화재의 원인으로 판단할 수 있다고 가정하지 않아야 한다. 빈도수는 적고 손상 정도가 높은 경우, 복합적인 설비에서의 예측할 수 없는 원인으로 화재가 발생하는 것도 있을 수 있다.

경험은 가장 확실한 스승이다. 화재경험은 추후 화재 실험 방법과 소화활동에 대한 교훈을 준다. 전통적으로 화재예방대책은 직접적인 과거 화재사건을 근거로 규정되었다. 전력연구소 보고서와 같은 다른 사실로부터 배운 교훈을 적용하고 이해하는 과정을 통하여 화재예방에 대한 대책을 수정, 검토할 필요가 있다.

Fire Journal '90, 5-6호

“Turbine-Generator Fire Prevention Programs cut Costs” 발췌