

변전소 주변압기실 미분무수 소화시스템 성능평가를 위한 화재시나리오 A Fire Scenario for Application of Water Mist System to an Indoor Power Transformer Room

최병일 · 한용식 · 김명배[†]

Byung-Il Choi · Yong-Shik Han · Myung-Bae Kim[†]

한국기계연구원 에너지기계연구센터 화재폭발연구팀
(2005. 7. 11. 접수/2005. 9. 1. 채택)

요 약

미분무수 소화시스템의 소화구조는 분무되는 물의 조건뿐만 아니라 방호대상 공간의 상태에도 의존하기 때문에 일반적인 설계기준을 마련 할 수 없는 실정이다. 따라서 보편적인 성능평가 방법도 있을 수 없기 때문에 방호 대상물과 공간이 결정되면 그에 적절한 성능평가 기준이 마련되어야 한다. 본 연구에서는 변전소 주변압기실에 미분무수 소화시스템을 적용하기 위하여 성능평가 기준을 제안하고자 한다. 이를 위하여 유사 화재사례 조사, 사고 분석, 유사 성능평가기준 분석 등을 수행하였다.

ABSTRACT

It has been known that there is not the general design method for water mist system because the fire extinguishing mechanisms are dependent on both spray characteristics and a fire compartment. It is therefore rational that a general performance-evaluation guideline does not exist. The present work suggests the performance-evaluation guideline for water mist system applied to the power transformer room based upon the investigation and analysis of fire accidents and the similar guideline.

Keywords : Fire scenario, Power transformer, Water mist

1. 서 론

지상의 공간부족, 고밀집화, 님비현상 등으로 인해 변전소가 지하화하고 있기 때문에, 지하 복합변전소의 주변압기가 설치되어 있는 옥내 변전실에서 화재가 발생할 경우 건물 상부로의 화재 및 연기전파로 인해 입주건물 및 인근 건물에 막대한 인명 및 재산상의 피해가 발생할 우려가 상존하고 있다.

변압기의 주요 가연물은 주변압기 철심(core)의 냉각을 위해 사용되는 절연유(dielectric oil)이며, 과전류에 의해 철심온도가 급격하게 상승하면서 절연유의 증발 및 온도상승으로 인한 변압기 내부 압력증가에 의해 파이프나 가스킷을 통해 절연유가 분출하면서 화재가 발생한다. 대표적인 화재 유형으로는 분무화재(spray fire)와 고인 절연유에 의한 고입화재(pool fire) 그리고

절연유가 변압기 벽면을 따라 흐르면서 일으키는 흐름화재(cascade fire)가 있다.

현재 변전실에서 화재가 발생되면 환기용 공조 덕트가 차단되고 가스계 소화설비가 작동하여 화재를 진압하게 된다. 가스계 소화설비는 초동 소화용으로 우수한 성능을 보유하고 있으나, 지속적인 소화 능력이 없어 재발화에 대처할 수 없는 실정이다. 수차례의 사고 조사 분석에서 알려진 바와 같이 변압기 화재에서의 가장 중요한 요소는 재발화이다. 가스계 소화설비에 의해 순간적으로 진화가 이루어져도 변압기의 잠열체와 절연유가 충분히 냉각되지 않으면, 그 곳에 축적되어 있는 열이 재발화의 열원으로 작용하게 된다. 따라서 전력산업 현장에서는 가스계 소화설비의 설치와는 별도로 재발화의 원인인 잠열체를 냉각시키기 위한 미분무수 소화시스템의 도입을 추진하고 있는 실정이다.

미분무수 소화설비와 같은 국내 소방법에 규정되어 있지 않은 새로운 소화시스템을 도입하기 위해서는 설

[†]E-mail: mbkim@kimm.re.kr

치공간에 대한 소화설비의 화재진압 성능평가가 우선적으로 선행되어야 한다. 즉 설치공간에서 일어날 수 있는 화재상황을 고려한 화재시나리오를 기초로 성능평가 실험이 수행되어야 한다. 화재시나리오에는 화재의 종류, 규모 및 성상에 대한 자세한 정보가 포함되어야 하지만 현 상황에서는 변전실 화재와 관련된 자료를 구하기 힘들뿐만 아니라 정량화된 화재사례조차 매우 드문 실정이다. 변전실 후비설비로 도입 예정인 미분무수 소화시스템의 성능평가를 위한 화재 시나리오와 관련하여 선박분야를 중심으로 기관실 및 기계실 등에 적용하기 위한 시험방법들이 국제해사기구(IMO)의 규정으로 제정되어 있으며, 대표적인 것으로는 MSC/circ. 668이 있다¹⁾. 미국의 기준인 NFPA 750²⁾은 선언적인 규정으로 구체적인 시험방법에 대해 기술한 것이 아니라 그 절차와 형식에 대하여 규정한 것이다. 미분무수 소화시스템에 대한 일반적인 성능평가 방법을 규정할 수 없는 상태이기 때문에 NFPA 750과 같은 원리적인 언급에 그칠 수 밖에 없다. 그러나 선박의 경우 방호공간의 유사성, 가연물의 유사성 등으로 인하여 구체적인 성능평가 기준을 마련할 수 있게 된다.

지하복합변전소의 변전실 공간 크기가 IMO MSC/circ. 668에 정의되는 Class 2에 해당되지만 선박 기관실과는 다른 환경적인 요건으로 인하여 직접적인 적용을 위해서는 많은 검토가 필요하다. 본 연구에서는 주변압기가 설치되어 있는 변전실에 미분무수 소화시스템을 적용하기 위한 방법론에 관심을 두고 있다. 즉 미분무수 소화시스템과 같은 새로운 소화설비를 육내 변전실에 적용할 때 소화설비의 성능평가에 기준이 되는 변전실용 화재 시나리오를 화재사례, 관련 규정의 검토 및 현장 조사를 통해 제안하고자 한다.

2. 변전실 화재성상 분석

실험대상인 변전실의 환경은 다음과 같다.

- 공간의 평균 크기 : 10×10×10 m
- 변압기 외형 : 6.0×2.6×5.2 m
- 가연물 : 절연유 26,000L(Mineral oil, R-Temp)
- 변압기 무게 : 80 ton(Core 무게 : 60 ton)
- 공간조건 : 바닥과 천장 : 시멘트
 변압기 전면 : OHD(Over Head Door)
 방화벽(재질 : AI)
 나머지 벽면 : 석고 벽체
 출입문 2개소
- 바닥에 흘러내린 기름을 회수하기 위한 피트(pit)가 존재(0.6×1.4 m: 8곳)

2.1 화재사례 분석

실제 변압기 화재사고와 사고에 의한 손상부분을 Fig. 1과 2에 나타내고 있으며, 변압기 내부에서의 압력 증가에 의해 용접된 철판이 심하게 충격을 받은 것을 알 수 있다. 이러한 부분을 통해 가연물인 고온의 절연유가 방출되면서 화재로 진행될 것으로 예상된다.

변압기에서 화재가 발생하는 과정을 Fig. 3에 간략하게 도식적으로 나타내었다. 변압기 내부 및 외부에서의 단락 등 급격한 부하 상승은 변압기 내부 철심의 온도를 순간적으로 700°C까지 상승시키게 되며, 철심 주위의 절연유 역시 온도가 상승하면서 비등하게 되어 변압기 내부의 압력상승을 일으킨다. 상승된 내부 압력에 의해 변압기를 구성하는 배관, 플랜지이음 등 강도가 약한 부분이 손상을 입고, 그 부분을 통하여 발



Fig. 1. Real transformer fires.

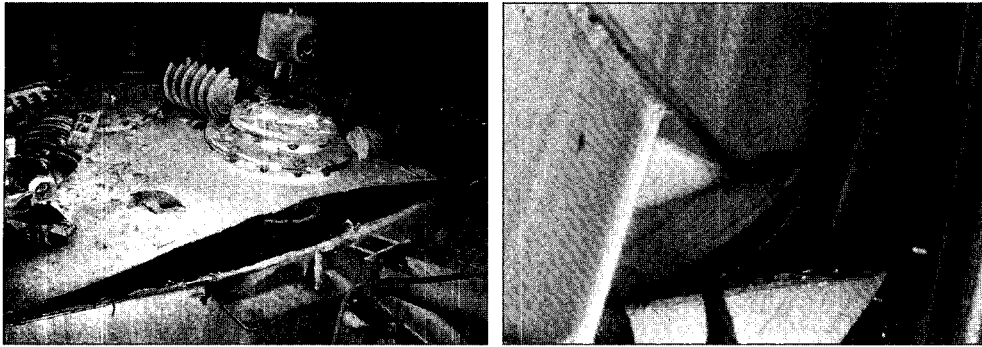


Fig. 2. Damaged part of the transformer.

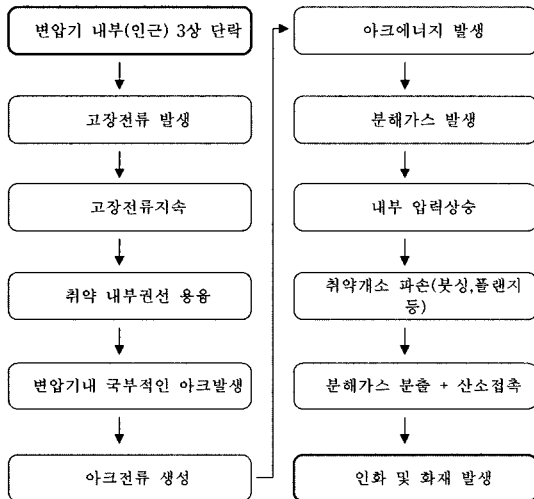


Fig. 3. Analysis of the transformer fire.

화온도 이상의 절연유가 방출되면서 화재가 발생하게 될 것이다.

2.2 유사 화재시나리오 분석

검토대상의 변전소 변전실은 공간 및 화재조건에 있어서 앞서 언급한 선박 기관구역과는 많은 유사성을 가지고 있다. 변전실의 대표적인 공간크기는 1,000 m³ (10×10×10)이며, IMO MSC/circ. 668/728에서 정의하는 선박 기관구역 Class 2(기관구역 체적이 500 m³보다는 크고 3000 m³ 보다는 작은 기관구역 등급)의 범주에 속한다.

국제해사기구에서는 선박기관구역의 화재상황을 모사하기 위해 13종류의 화재시나리오에 대한 시험조건을 Table 1과 같이 규정하고 있으며, 성능이 검증된 소화설비 시스템만이 선박에 설치될 수 있다.

여러 복잡한 장비들이 설치되어 있는 선박기관실과는 달리 변전실에는 1대 혹은 3대(상분리 변압기)의 변압기만 설치되어 있기 때문에 선박기관실의 화재시나리오 전부를 반드시 적용할 필요는 없다. 예를 들어 IMO MSC/circ. 668 2번 시나리오의 경우 12~15 mmφ 붕이 재점화원의 역할을 담당하는 상황을 재현한 것인데, 기관실과 비교하여 간단한 내부환경을 가지는 변전실에는 이에 해당되는 상황을 재현할 필요성이 없다. 따라서 화재 종류 및 화재규모 등의 검토를 통해 변전실에 적용 가능한 화재시나리오가 작성되어야 한다.

변전실 화재 시나리오 작성을 위해 현장답사 및 화재 사례를 통해 변전실에서 발생할 수 있는 화재종류를 조사하였으며, Fig. 4에 간략하게 표시하였다.

- 분무화재(Spray Fire) : 과전류에 의한 용기 내의 온도 및 압력상승으로 인해 고온의 절연유가 파이프나 개스킷의 틈새를 통해 분출되면서 일으키는 화재
- 고임화재(Pool Fire) : 분출된 연료가 변압기의 상단이나 하단 바닥에 고여 계속적으로 연소하는 화재
- 연료고임은 변압기의 상단 표면과 하단 바닥에서 발생되며, 하단 바닥에 흘러내린 기름을 회수하기 위한 피트에 고인 연료가 화원을 형성할 것으로 예상된다
- 흐름화재(Cascade Fire) : 절연유가 상부에서 바닥으로 흘러내리면서 발생하는 화재

2.3 변전실의 개략적 화재규모 및 자연 소화시간

변전실에서 발생할 수 있는 화재규모를 파악하기 위해 대표적인 경우에 대한 화재크기를 산정하였으며, 화재시나리오 작성 시 화재규모 산정의 자료로 사용된다. 고임화재(Pool fire)의 크기를 산정하기 위한 화원 면적은 변압기 상단면적 및 절연유 고임 피트의 크기를 기준으로 삼았다.

Table 1. IMO MSC/circ. 668 Category A

시험번호	화재 시나리오	시험용 연료유
1	소화제 노즐과 모의엔진사이의 모의엔진 상부 저압수평스프레이 화재	상업용 연료유 또는 경디젤유
2	모의엔진 상부의 저압스프레이 화재, 중앙에 위치한 노즐이 1 m 떨어진 위치에서 상방 45° 방향으로 모의엔진의 중앙에 있는 12~15 mmφ 봉에 분사함	상업용 연료유 또는 경디젤유
3	모의엔진 측면의 매립형(Concealed) 저압수평스프레이 화재, 모의 엔진 끝에서부터 0.1 m 떨어진 거리에 노즐이 위치하고 기름을 분무하여 발생시키는 화재	상업용 연료유 또는 경디젤유
4	위 1, 2, 3번 시험과 엔진하부 4 m ² Tray(2번 Tray) 및 엔진상부 3 m ² Tray (1번 Tray)에 복합적으로 일어난 최악의 스프레이 화재	상업용 연료유 또는 경디젤유
5	모의엔진 상부의 고압수평스프레이 화재	상업용 연료유 또는 경디젤유
6	모의엔진 측면의 매립형 저압저유량 수평스프레이 화재, 연료유 스프레이 노즐이 모의엔진 끝에서부터 0.1 m 떨어진 거리에 위치하여 연료유를 분무하여 발생하는 화재와, 바닥 플레이트 안쪽으로 엔진으로부터 1.4 m 떨어진 0.5 m ² Tray(4번 Tray)에 동시에 발생한 화재	상업용 연료유 또는 경디젤유
7	모의엔진 하부중앙의 0.5 m ² Tray(3번 Tray)에 발생한 화재	헵탄
8	모의엔진 하부중앙의 0.5 m ² Tray(3번 Tray)에 발생한 화재	SAE 10W30 광물기 윤활유 (Mineral Based LO)
9	배기 플레이트 아래쪽 빌지 플레이트의 상부중앙에 위치한 0.5 m ² Tray (4번 Tray)에 발생한 화재	헵탄
10	모의엔진 상부로부터 "0.25kg/s"로 흐르는 화재	헵탄
11	A급화재용 2 m ² Tray(5번 Tray)에 각목다발을 쌓고 30초간 예연소한 상태에서의 화재, 이 Tray는 바닥에서 0.75 m 위에 설치해야 함	헵탄
12	20°로 기울어진 철판(30 cm×60 cm×5 cm)을 모의엔진 상부의 저압저유량 스프레이 노즐로 연료유를 스프레이 하여 철판이 350°C로 달궈진 상태에서의 화재. 저압 저유량노즐은 철판의 앞쪽 가장자리에서 수평으로 0.5 m 떨어진 거리에 위치해야 한다. 철판의 온도가 350°C에 이르면 소화장치가 작동하여 소화하고 소화장치가 정지한 다음 그 스프레이에 재발화가 일어나자 않아야 한다.	헵탄
13	모의엔진 하부의 4 m ² Tray(2번 Tray)에 발생한 화재	상업용 연료유 또는 경디젤유

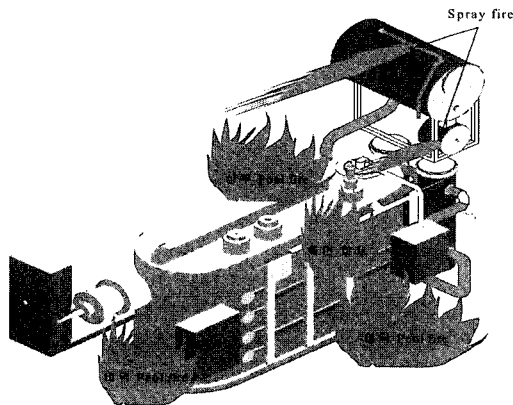


Fig. 4. Fire types induced by the dielectric oil in the transformer.

- 연료 : Transformer oil(발열량 : 46.4 MJ/kg)
- 변압기 상단부 화재크기 : 14.76 MW(화원면적 : 1.5 m×6 m = 9 m²)
- 하단 바닥 : 10.59 MW(화원면적 : 1.4 m×0.6 m×8곳 = 6.72 m²)

분무화재(Spray fire)의 크기는 변압기내부의 압력과 사고에 의한 파손 면적에 의해 결정되어진다. 변압기 제조 사양에 의하면 변압기가 견딜 수 있는 내부압력은 5 kgf/cm²이기 때문에 절연유의 분출압력은 5 kgf/cm² 이하로 유지된다. 변압기 본체의 파손 면적의 산정에 있어서는 사고 유형, 크기 및 종류에 따라 그 크기가 달라지기 때문에 면적산정을 위해서는 많은 사고 사례의 분석으로 결정되어야 하지만 현 상태에서는 이

Table 2. Oxygen concentration in an enclosure

화원크기	산소농도가 15%에 도달되는 시간	산소농도가 0%에 도달되는 시간*
10 MW	92.5초	323.0초
30 MW	35.5초	124.2초

*위의 계산결과에서 30 MW급의 화재가 발생할 경우 주변전실 내부에서 산소 결핍에 의한 자연소화가 일어날 것으로 예측된다.

에 대한 자료가 매우 희박한 실정이다. 본 연구에서는 전술한 이유로 분무화재와 흐름화재(cascade fire)의 화재시나리오에 대해서는 국제해사기구의 규정을 인용하였다. 선박용 엔진이 변압기의 분무압력보다 훨씬 높아 화재규모에 있어서 선박용의 기준이 더 열악한 조건이므로, 그 인용의 타당성이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

변전실이 밀폐공간 특성을 가지기 때문에 외부공기의 유입이 차단되어 있다. 따라서 변전실 내부에서 화재가 발생할 경우 연소에 필요한 산화제인 산소의 총량이 제한되어 있어 화재가 진행됨에 따라 산소가 소비되어 특정 산소농도 이하의 조건에서는 자연적으로 화재가 소화된다. 가연물이 기름일 경우 주변의 산소농도가 15%일 때 소화가 일어나는 것으로 알려져 있기 때문에³⁾ 화재규모에 따른 자연소화시간의 계산이 가능하다. 이들 자료는 화재시나리오 작성의 기초 자료로 활용된다.

- 주변전실의 체적이 1000 m³이며 공기중의 산소는 21%임
- 주변 산소농도가 15% 이하일 경우 화재가 소화됨.

Table 3. Fire scenarios

시험번호	시나리오 기호	화재시나리오	화원 위치	비고
1	S-01M	Spray fire(1 MW)	(Mock-up 1 m 상단)	Full-cone(120°), 경유, 0.03 kg/s 분사압력 : 8.5bar
2	S-06M	Spray fire(6 MW)	(Mock-up 1 m 상단)	Full-cone(80°), 경유, 0.16 kg/s 분사압력 : 8bar
3	L-10M	Pool fire(10 MW)	(Mock-up 하단 주변 압기 모서리부분)	0.6 m × 1.4 m:4 ea, Heptane
4	U-06M	Pool fire(6 MW)	(Mock-up 상단)	0.6 m × 1.4 m:2 ea, Heptane (화원면적 : 주변압기 상단면적 1/3로 가정)
5	L-01M	Pool fire(1 MW)	(Mock-up 바닥 가운데 피트 변압기 하부)	0.6 m × 0.7 m:1 ea, Heptane
6	C-12M	모의변압기 상부로부터 “0.25 kg/s”로 흐르는 화재(12 MW)	모델 변압기 전면	Heptane 사용

- 화석연료 1 kg당 이론 연소공기량이 평균 12 Nm³ 인 것으로 가정.
- 화재가 발생하기 전 주변전실 공기 중에는 210 m³의 산소가 있으며, 소화조건인 산소농도 15%일 때 공간 내에는 150 m³의 산소가 존재함.

3. 변전실 화재시나리오 제안

앞에서 검토한 사항들을 기초로 변전실에 설치될 미분무 소화설비시스템의 성능평가에 적용하기 위한 화재시나리오를 다음과 같이 제안하고자 한다.

초기 화재는 분무에 의한 분무화재(spray fire)로 시작되며, 시간이 경과함에 따라 변압기 상부표면에 미연소된 절연유가 고이게 되어 상부 고임화재(pool fire)를 형성한다. 화재가 진행됨에 따라 상부에 고여있던 절연유가 측면을 따라 바닥으로 흐르면서 흐름화재(cascade fire)가 발생하게 되며, 마지막으로 바닥에 고인 연료에 의한 고임화재(pool fire)가 발생된다. 현재

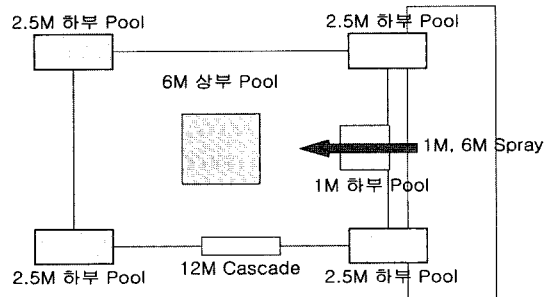


Fig. 5. Location of fire sources.

바닥에 고인 연료를 회수하기 위해 설치한 1.4 m×0.6 m 크기의 피트(pit)가 있기 때문에 바닥 전체 화재는 일어나지 않을 것으로 판단된다. 이러한 화재상황을 고려하여 화재 유형 및 화원의 크기를 Table 3에 나타낸 것과 같이 제안하고자 하며, Fig. 5에 화원의 위치를 개략적으로 표시하였다.

4. 결 론

미분무수 소화시스템은 복합적인-수계소화설비와 가스계 소화설비- 특성 때문에 여러 가지 장점을 가지고 있어 국제적으로는 선박의 기관실은 물론 육상의 여러 분야에서 활용되고 있다. 그러나 스프링클러와는 다르게 일반적인 설계방법이 있을 수 없고 따라서 보편적인 성능평가 기준도 없기 때문에 국내에서는 선박용을 제외하면 전부 보조설비로만 사용되고 있는 실정이다. 이와 같은 상황은 국내 시장의 형성을 억제할 뿐만 아니라 외국 제품의 무분별한 사용을 방지하는 결과를 허용하게 된다.

이러한 상태에서 미흡한 부분이 없지 않지만 변압기실의 미분무수 소화시스템에 대한 성능평가 기준을 제

안하였다. 보다 많은 자료와 토론을 통하여 본 연구에서 제안된 기준이 개정될 수 있을 것이다. 타 분야에서도 이와 유사한 연구개발 활동이 적극적으로 수행되기를 바라며 본 연구에서 제시한 방법론이 여러 연구에 조금이라도 도움이 되기를 희망한다.

감사의 글

본 연구를 수행할 수 있도록 재정적 지원과 고견을 들려주신 한국전력(주) 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. IMO MSC/Circ.668, ALTERNATIVE ARRANGEMENTS FOR HALON FIRE- EXTINGUISHING SYSTEMS IN MACHINERY SPACES AND PUMP- ROOMS(1996).
2. NFPA 750 code, NFPA(2000).
3. SFPE Handbook of Fire protection Engineering 3rd edition, Chapter 2-7 Flammability Limits of Pre-mixed and Diffusion Flames, NFPA(2002).