

여러 복잡한 장비들이 설치되어 있는 선박기관실과는 달리 주변압기실에는 1대 또는 3대(상부리형의 경우)의 변압기만 설치되어 있기 때문에 IMO 규정에 의한 화재 시나리오를 직접 적용할 수 없다. 따라서, 주변압기실 화재하중의 크기 및 시나리오 선정에 있어서 아래와 같은 조건을 적용하였다.

- 주변압기실의 체적은 1,000m³이며, 공기중의 산소는 21%임
- 주변 산소농도가 15%이하일 경우 화재가 소화[3]
- 화석연료 1kg당 이론 연소공기량이 대략 12m³인 것으로 가정

표 1. 1,000m³ 밀폐공간 내 산소농도 저감 시간

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

표 1의 계산결과에서 화재하중이 클수록 주변압기실 내부에서 산소결핍에 의한 자연소화가 일어날 것으로 예측되어, 화재시나리오 선정시 과도한 화재하중을 제한하였다.

본 연구에서는, 한전 주변압기실의 구조 및 과거 고장 사례 분석을 통하여 표 2와 같이 주변압기실에서 발생 가능하며 Water Mist 소화설비 특성평가의 시험기준이 되는 6가지 화재 시나리오를 제안한다.

표 2. 제안된 주변압기실의 화재시나리오

No	화재 시나리오	화원위치	비고
1	Spray fire (1MW)	Mock-up 1m 상단	Full-cone(120°), 경유, 0.03kg/s 분사압력 : 8.5bar
2	Spray fire (6MW)	Mock-up 1m 상단	Full-cone(80°), 경유, 0.16kg/s 분사압력 : 8bar
3	Pool fire (10MW)	Mock-up 하단 주변압기 모서리부분	0.6m×1.4m:4ea, Heptane
4	Pool fire (6MW)	Mock-up 상단	0.6m×1.4m:2ea, Heptane (화원면적 : 주변압기 상단면적 1/3로 가정)
5	Pool fire (1MW)	Mock-up 바닥 가운데 피트 변압기 하부	0.6m×0.7m:1ea, Heptane
6	Cascade Fire (12MW)	모델 변압기 전면	모의변압기 상부로부터 "0.25kg/s"로 흐르는 화재 Heptane

3. 모의실험

3.1 소화특성 평가

Water Mist 소화특성을 평가하기 위하여 작동압력 13Bar 및 80Bar의 Water Mist 소화설비를 표 2로 제안한 6개의 화재시나리오에 따라 실물 화재진압실험을 수행하였다. 소화설비는 점화 후 15초가 경과된 후 작동시켰으며, 10여회의 소화설비 배치변경 및 총 71회 저압 및 고압 소화설비의 화재진압 비교실험을 수행하였다.

3.1.1 6MW Spray Fire

그림 2는 화재크기가 6MW 분무화재의 소화시간을 비교한 것으로 고압이 저압 소화설비보다 훨씬 빨리 소화됨을 나타내고 있다.

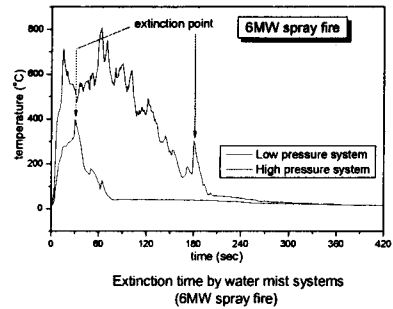


그림 2. 6MW Spray Fire에서의 소화시간

그림 3은 산소농도 변화를 나타내며, 그림 4는 실험실의 공간온도 분포를 나타낸다.

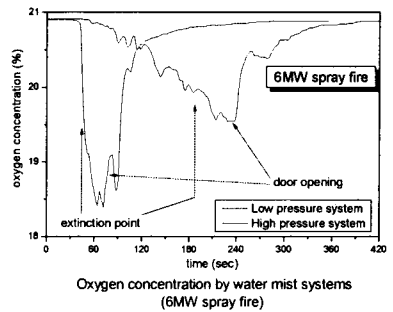


그림 3. 6MW Spray Fire에서의 시간에 따른 산소농도 변화

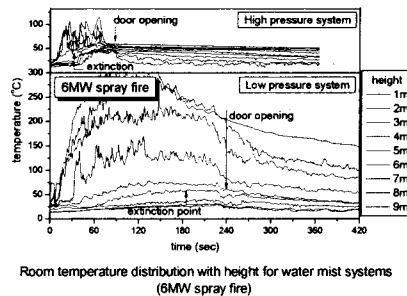


그림 4. 6MW Spray Fire에서의 공간온도 분포

3.1.2 소화특성 실험 결과

저압 및 고압 소화설비에 대하여 6가지 화재시나리오의 비교 소화실험 결과 고압 소화설비가 우수한 소화능을 나타내었다. 고압 소화설비가 저압에 비하여 소화 시간이 짧았으며, 산소농도 변화곡선과 실험실내 공간온도 분포곡선이 이를 뒷받침해 주고 있는데 고압 소화설비의 경우 소화설비가 작동됨과 동시에 산소농도 계측점에서 급격한 산소농도 감소가 일어나고 공간의 온도가 급격히 혼합되면서 실험실 상부와 하부의 온도가 거의 동일하게 되지만, 저압의 경우 산소농도도 서서히 감소되며 공간의 온도 변화가 미미하다. 이를 통하여 고압 소화설비의 경우 상부의 산소농도가 저하된 연소가스를 화원 근처로 신속히 이동시키는 역할이 우수하여 소화가 촉진됨을 알 수 있다.

표 3. 화재시나리오별 소화실험 결과

화재시나리오	사용압력	평균 소화시간
6MW Spray Fire	13 Bar	03분 16초
	80 Bar	00분 30초
1MW Spray Fire	13 Bar	01분 06초
	80 Bar	00분 35초
6MW 상단 Pool Fire	13 Bar	08분 13초
	80 Bar	06분 30초
10MW 하단 Pool Fire	13 Bar	x
	80 Bar	07분 06초
1MW 하단 Pool Fire	13 Bar	x
	80 Bar	18분 00초
12MW Cascade Fire	13 Bar	02분 48초
	80 Bar	01분 40초

3.2 냉각특성 평가

이상 운전 조건으로 주변압기 내부철심이 가열되어 화재 발생하게 되면 발생한 화재를 진압한 후 소화과정 중에 내부철심(잠열체)의 온도가 절연유의 발화온도 이하로 충분히 낮춰지지 않으면 잠열체가 계속 절연유를 가열하여 재발화가 발생하게 된다. 이러한 소화 후의 재발화 가능성을 차단하기 위하여 소화과정 중에 잠열체의 온도를 특정온도 이하로 냉각시켜주기 위한 Water Mist 분무시간(냉각시간)의 예측이 필요하다.

냉각시간의 예측을 위한 최선의 방법은 소화특성 평가와 동일하게 실험실실험을 통하여 예측하는 것이다. 그러나 현실적으로 실제 주변압기(154kV 일괄형 60MVA)의 경우 자체 중량 60,000kg, 사용 절연유량 26,700리터가 되어 현실적인 실험에 많은 제약을 수반하게 된다. 따라서 상사법칙에 근거한 축소모델 실험을 통하여 최적의 냉각 시간을 예측하고 3차원 전산시뮬레이션을 통하여 그 결과를 입증하고자 한다.

3.2.1 실험 방법론

실제 주변압기 외형 및 내부철심을 축소하여 제작하고, 내부철심을 700℃까지 가열한 후 절연유가 채워진 축소모델 변압기의 외형에 투입하고, 투입 후 발생하는 현상을 계속하고 실험 결과를 분석, 상사법칙을 토대로 실제 주변압기에서의 냉각성능을 예측하고자 한다[7]. 이를 위하여 아래의 실험 방법론을 수립하였다.

- 안전한 실험 방법론을 마련하고, 잠열체 투입시 발생하는 물리적 특성을 규명하고 이를 토대로 보다 축소비가 작은 모형실험을 계획하기 위하여 예비실험으로 1/18 축소모델 실험을 수행한다.
- 축소모델 실험이 실험에서 적용이 가능한지 3차원 전산시뮬레이션을 수행한다.
- 모든 조건을 만족시키는 상사법칙은 존재하기 않기 때문에 상사법칙이 정확히 적용되지 않는 구간에서의 보간을 위하여 3조건에 대한 실험을 수행한다.
- 축소비율이 클 경우 실험과 모델사이의 열전달현상이 다를 가능성이 크기 때문에 축소비가 너무 큰 경우 적용이 불가능하다.

3.2.2 예비 1/18 축소모델 실험

그림 5에서와 같이 예비실험에서 잠열체의 재질은 철강을 사용하였으며, 무게는 9kg이다. 절연유는 KS 1종 4호를 사용하였다. 실험은 700℃로 가열된 잠열체를 절연유에 잠기도록 투입한 후 시간에 따른 잠열체와 절연유의 온도변화를 계속하였다.

그림 6은 잠열체 투입시 각 부위의 온도 측정 결과이다. 잠열체는 투입 후 급속히 온도가 하강한 후 시간이 지나면서 하강 속도가 느려진다. 이는 잠열체 투입 초기에 강한 비등열전달이 일어나 잠열체 내부의 열이 급속히 절연유로 전달되기 때문이다. 절연유의 경우 투입 초기에 온도가 급속히 상승하고 투입 후기에는 상승 속도가

느려진다. 이는 잠열체의 경우와 마찬가지로 투입 초반에는 잠열체와 절연유 사이의 강한 비등열전달이, 투입 후기에는 약한 전도 및 대류 열전달이 일어나기 때문이다.

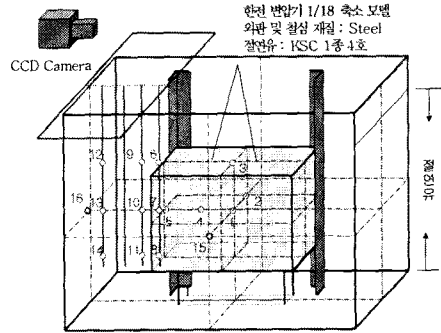


그림 5. 1/18 축소모형실험 개요도

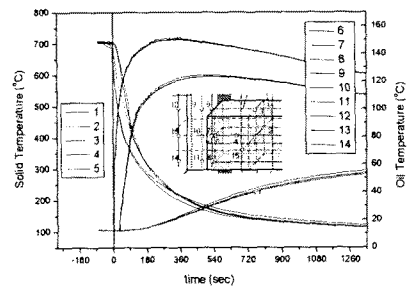


그림 6. 1/18 축소모형실험에서의 잠열체와 절연유의 온도 변화

결과적으로, 잠열체와 절연유 사이의 비등열전달이 열전달의 대부분을 차지하며 이를 제외한 전도나 대류에 의한 잠열체로부터 절연유로의 열전달량은 무시할 만큼 작다. 외부의 Water Mist 분무에 의한 열전달은 비등열전달에 영향을 주지 못하고 외압 부근 절연유의 잠열을 빼앗아 외벽 부근의 성층화를 파괴하는 역할을 하게 된다. 그러나 이 양은 비등열전달에 비해 미미하기 때문에 전체적인 냉각 성능에 중요한 역할을 하지 못한다. 따라서, 저압과 고압 소화설비 사이의 냉각성능은 큰 차이가 없을 것으로 예측된다.

3.2.3 3차원 전산 시뮬레이션

축소모델 실험이 실험에서 적용이 가능한지 검증하기 위하여 3차원 전산 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 전산 해석 결과를 보여준다. 해석 결과 절연유의 유동이 매우 느리고 잠열체의 수직 벽을 따라 수직 방향으로 유동이 발생하여 상층부로 잔과된 후 외판을 따라 아래로 이동하는 것을 보여준다. 일정 시간이 흐르면 온도분포는 잠열체 주위로 성층화된 형태를 보여주는 것을 알 수 있다. 이는 실험 크기에서도 1/18 축소모델 실험에서 확인된 유동 및 온도 성층화 현상이 나타남을 위하며 축소모델 실험결과가 실험에서도 적용될 수 있음을 보여주었다.

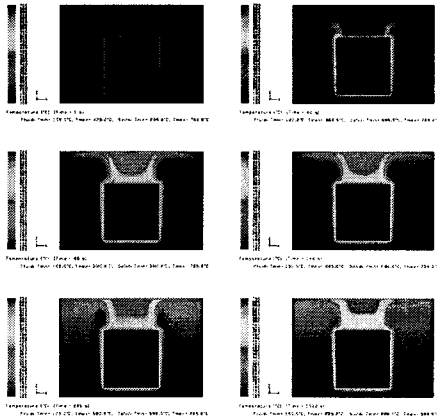


그림 7. 실물크기 잠열체 냉각 전산 해석 결과 - 성층화

3.2.4 축소모델(1/9, 1/5) 실험

그림 8은 절연유로 1종 4호를 사용한 경우의 실험 결과이다.

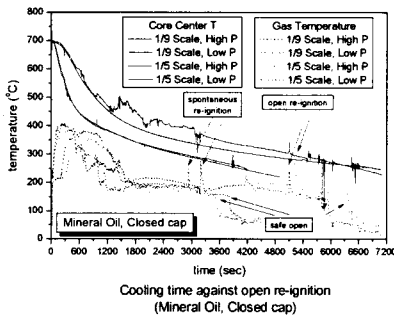


그림 8. 축소모형 냉각특성 실험결과

축소모델 실험 결과의 실제 적용을 위한 시간 상사성은 아래와 같이 적용하였다.

$$t_{Full} = N^{1.5} \times t_{\frac{1}{N}}, T_{core} \geq 500^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$t_{Full} = N \times t_{\frac{1}{N}}, T_{core} \leq 500^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

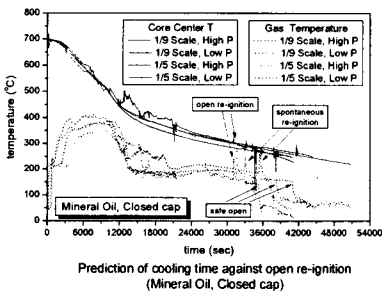


그림 9. 실물모형 냉각특성 시간 예측

각각의 축소모델 실험결과로부터 시간상사성을 적용하여 실물 스케일에서의 냉각특성을 예측한 결과, 모든

축소모형 실험결과들이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 예측 결과 일반광유의 경우 잠열체 투입(화재사고) 후 약 36,000초(10시간) 후에도 자연 재발화가 일어날 수 있음을 알 수 있다. 그림 9는 실물 스케일에서의 냉각특성 시간을 예측한 결과이다.

3.2.5 냉각특성 실험 결과

3차원 전산 시뮬레이션을 통하여 축소모델 실험에서 예측한 물리적 현상이 실물 주변압기에서도 재현됨을 확인하였고, 냉각성능에서는 예측하였던 바와 같이 고압과 저압의 Water Mist 소화설비에서 공히 큰 차이를 보이지 않았다. 축소모델 실험과 실물 예측을 통하여 주변압기 화재발생시 주변압기 내부철심이 전부 700°C까지 가열된 최악의 경우 표 4와 같은 결과를 얻었다. 그러나, 이 결과는 실험 기법상 최악의 조건을 상정하였기 때문에 실제 재발화를 방지하는데 Water Mist 분무시간은 이보다 짧을 것이다.

표 4. 재발화 방지를 위한 Water Mist 분무시간 예측 결과

절연유	축소비	조건	재발화 방지 시간(hr)	
			축소모델 실험	실물 예측
1종 4호 광유	1/9	80 Bar	1.06	11.37
		13 Bar	0.97	10.62
	1/5	80 Bar	1.77	10.39
		13 Bar	1.65	9.80

4. 결 론

본 연구에서 주변압기실 화재 및 잠열체에 의한 재발화 방지를 위하여 제안한 Water Mist 소화설비가 주변압기실내 발생 가능한 모든 화재에 대하여 완벽한 소화성능을 보여주었다.

본 연구를 통하여 한전에서는 지하복합발전소 주변압기실 Water Mist 소화설비 설계기준 및 시험기준을 제정하였으며, 기본방침을 요약하면 다음과 같다.

- (1) Water Mist 소화설비는 1개 주변압기실에서 화재가 발생하는 것을 고려하여 설계하며, 동시에 2개 이상의 주변압기실에서 화재가 발생하는 것은 고려하지 않는다.
- (2) Water Mist 소화설비의 성능은 6가지 화재시나리오에 대하여 점화 또는 발화 후 15분 이내에 소화함을 원칙으로 한다.
- (3) 주변압기실에 설치하는 Water Mist 소화설비는 국가공인시험기관에서 한전의 시험기준에 따라 시험을 통과한 제품을 설치한다.

상기 기준을 통하여 한전에서는 2005년부터 주변압기실 Water Mist 소화설비를 설치할 예정이다. 이를 통하여 공공 안전의 확보 및 안정적 전력공급에 크게 이바지하여 공기업으로써의 사회적 책임을 다 할 것이며, 또한 몬트리올 협약에 의하여 규제되고 있는 환경파괴물질인 가스계 소화설비의 대체 소화설비로써 일반 수용가로까지의 파급이 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한전, 송변전처, "주변압기 운영기준", 2002.08
- [2] 일진중공업, "강도보강형 변압기 탱크 강도 계산", 2004
- [3] NFPA, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition", 2002
- [4] John Wilet & Sons, "An Introduction to Fire Dynamics", 1985
- [5] NFPA, "NFPA 750 Code", 2000
- [6] IMO MSC/Circ.668, "Alternative Arrangement for Halon Fire-Extinguishing Systems in Machinery Spaces and Pump-Rooms", 1996
- [7] Victor Streeter, "Fluid Mechanics", 1979