한국화재소방학회 논문지, 제19권 제4호, 2005년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 19, No. 4, 2005

변압기실 화재에 대한 미분무수 소화시스템의 적용 -냉각특성을 중심으로(Part 2)

Application of Water Mist System for a Power Transformer Room -Cooling Characteristics (Part 2)

최병일† · 한용식 · 김명배

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

한국기계연구원 에너지기계연구센터 화재폭발연구팀

(2005. 10. 20. 접수/2005. 12. 21. 채택)

요 약

본 연구에서는 미분무수 소화시스템의 변압기에 대한 냉각성능을 기술한다. 재발화를 방지하기 위한 냉각성능은 변압기의 철심으로부터 절연유에 전달되어 축적된 열에너지를 효과적으로 소산시키는 것을 의미한다. 철심이 매우 무겁기 때문에 축소 규모의 변압기를 이용하여 실험을 수행하였고, 이 결과로부터 냉각시간을 결정하기 위하여 상사해석을 수행하였다. 해석 및 실험을 통한 상사법칙으로부터 재발화 방지를 위한 미분무수 소화시스템의 소화시간은 약 12시간으로 나타났다.

ABSTRACT

The present study describes the cooling performance of two kinds of water mist systems used in fire extinguishment. The cooling is necessary for the prevention of an auto re-ignition of the power transformer. A heat source for such the re-ignition is the accumulated thermal energy in the dielectric oil from the transformer core. Because of the weight of the real core, reduced-scale experiments are carried out. A similarity analysis is also performed to determine the discharge time of the water mist systems from the experimental results. The discharge time to prevent the re-ignition in the real-scale transformer is estimated about 12 hour from the similarity analysis of the reduced-scale experiments.

Keywords: Water mist, Cooling, Re-ignition, Power transformer

1. 서 론

다양한 분야에서 미분무수 소화설비[1]가 적용되고 있지만 전기적인 시스템도 적용 대상중의 하나이다. 이러한 미분무수 소화시스템은 미분무수가 가진 탁월한 냉각 성능으로 인하여 큰 잠열을 가진 화재에 성공적으로 적용되고 있다[2].

Part 1의 소화실험에서 기술된 것처럼 철심은 절연유를 통하여 열에너지를 계속 공급하기 때문에 절연유의 일부가 기화하여 변압기 외부로 누출되면서 재발화가 이루어지며 이러한 재발화 사례가 보고되고 있다[3]. 유증기가 누출되더라도 점화되지 않을 정도로 주변을 충분히 냉각시키기 위한 조건을 결정하는 것이 본 연구의 목적이다. 미분무수 시스템의 노즐과 배치 및 유량 등은 part 1의 소화실험에서 사용된 것과 동일하다.

2. 실험장치

소화실험과 비교하여 달라진 것은 축소 모델의 변압기를 실험에 사용하는 것이다. 그 개념도를 Fig. 1에 표시하였는데 절연유속에 철심이 잠기어 있는 것을 알 수 있다. 축소모델은 Table 1과 같이 전부 4종류를 이용하였고, 사고 분석시에 제시된 철심의 에너지와 축소모델의 에너지가 정리되어있다. 이 중 1/18 모델은 보다 큰 실험에서 예상되는 물리적 현상을 미리 파악하기 위하여 사용되었기 때문에 정확하게 모델하지는 않고 개략적으로 치수를 정하였다.

† E-mail: cbisey@kimm.re.kr

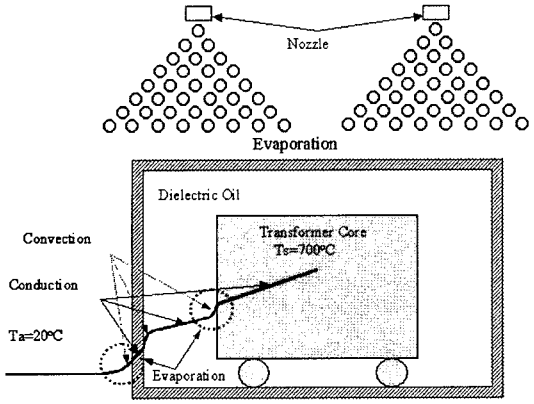

Fig. 1. Cooling characteristics required to prevent re-ignition.

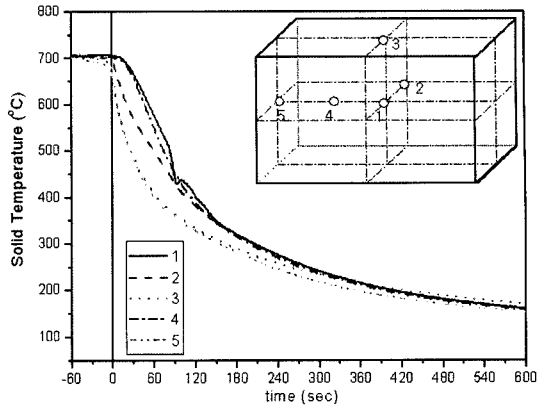

Fig. 2. Temperatures of the transformer core in the 1/18-scale model.

Table 1. Outline of the small- and full-scale energy budgets (core temperature = 700C)

Scale	Core weight (kg)	Core dimensions; height/width/ depth (m)	Oil volume (liter)	Energy of core (kJ)
1/18	9	0.13/0.13/0.13	7.9	5,724
1/9	82	0.37/0.13/0.21	36	26,502
1/5	480	0.66/0.24/0.39	214	154,560
1/3	2,222	1.10/0.40/0.64	989	715,484
1/1	60,000	3.30/1.20/1.92	26,700	*19,320,000

*Heat of 10 MW fire for 5.3 hours.

3. 실험 및 상사성 해석 결과

3.1 1/18 모델 실험결과

보다 큰 규모의 실험에서 안정성을 확보하고 냉각실험의 전반적인 물리적 현상을 파악하기 위하여 본 실험이 수행되었다. 700°C로 가열된 철심을 상온의 절연유속에 투입한 결과, 초기에 매우 강한 비등 열전달 현상이 철심 표면에서 관찰 되었다. 절연유의 비등점이 370°C이기 때문이며, 절연유와의 열전달현상을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 철심의 5개소에 열전대를 설치하였다.

철심의 온도는 투입 시점부터 270초 이전의 초기 구간에서는 급격하게 감소하였지만, 이후의 후기 구간에서는 느리게 감소하였다. 이러한 초기 구간에서는 철심내부에 온도분포가 존재하지만 후기로 진행될수록 철심내부의 온도차이가 줄어들어 480초 후에는 철심 전체가 동일한 온도가 되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 초기의 강력한 비등 열전달이 후기로 갈수록 철심의 온도 저하에 의하여 약해지기 때문이다. 절연유의 비등 온도가 370°C이기 때문에 150초 근방에서 실제로 이러한 현상이 사라진다.

철심과 절연유사이의 열전달은 철심표면에서의 대류와 철심 내부의 전도로 이루어지게 되지만, 투입 초기에만 철심의 전도 현상이 존재하고 후기로 가면 Fig. 2와 같이 철심내의 전도 현상은 무시 될 수 있다. 이러한 사실은 실물규모와 축소규모의 상사성을 분석하는데에 이용된다.

3.2 상사성 해석

변압기 화재에 대한 미분무수 소화설비의 관계에서 적용되어야 할 상사성은 다음과 같은 내용으로 구성되어야한다: 1) 변압기 내부에서의 철심과 절연유사이의 열전달; 2) 변압기 외부에서의 미분무수와 화염과의 상호작용. 두 번째의 관계는 매우 복잡한 물리적 현상을 동반하고 있으며[4] 화염대의 길이 척도 차원의 실험 자료를 필요로 한다. 이러한 자료는 본 연구의 내용 밖에 있는 것으로, 철심과 절연유 사이의 열전달 관계를 분석하는 것만을 목표로 한다 이를 위하여 Fig. 3과 같이 간단한 해석 모델을 구성하였다.

초기 구간에서는 철심 표면에서의 비등 열전달이 철

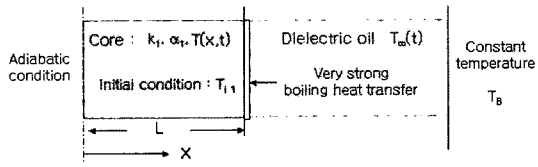

Fig. 3. Heat transfer model in a power transformer.

심내의 전도 열전달에 의하여 주로 영향을 받기 때문에 다음 식 (1)과 같이 지배 방정식을 구성할 수 있다[5].

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} \quad (0 \le x^* \le 1) \tag{1}$$

여기에서

$$T^* = \frac{T - T_B}{T_{i1} - T_B}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad t^* = \frac{\alpha_1 t}{L^2}$$

T는 철심의 온도, T_B는 절연유의 비등 온도, t는 시간, α_1은 철심의 열확산계수, L은 철심의 대표적 길이이다. 따라서 초기 구간에서의 시간 척도는 다음과 같다:

$$t = \frac{L^2}{\alpha_1} t^*, \quad t_{full} = \frac{L^2}{\alpha_1} t^*, \quad t_{1/N} = \frac{(L/N)^2}{\alpha_1} t^* \tag{2}$$

여기에서 t_{full}은 실물규모에서의 시간 척도이며, $t_{1/N}$은 1/N 축소 모형 실험에서 얻어질 시간 척도이다.

후기 구간에서는 비등열전달이 더 이상 일어나지 않고, 철심내의 전도 열전달이 무시될 수 있어 철심은 균일한 온도를 갖게 된다. 절연유의 전도 열전달은 대류 열전달에 비해 무시 할 수 있기 때문에 철심의 지배방정식은 다음 식 (3)과 같이 간단해 진다.

$$\frac{\partial T^*}{dt^*} = T^*, \quad T^*(0) = 1 \tag{3}$$

여기에서

$$T^* = \frac{T - T_\infty}{T_{i1} - T_\infty}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad t^* = \frac{ht}{\rho C_p L}$$

C_p는 철심의 비열, ρ는 철심의 밀도, h는 절연유에서의 열전달 계수이다. 열전달 계수가 척도와 무관하다고 가정하면 다음 식 (4)와 같이 실물규모와 축소규모에서의 시간 척도들이 얻어진다.

$$t = \frac{\rho C_p L}{h} t, \quad t_{full} = \frac{\rho C_p L}{h} t^*, \quad t_{1/N} = \frac{\rho C_p (L/N)}{h} t^* \tag{4}$$

그러므로 실물규모에서 필요한 냉각시간은 다음 식 (5)와 같이 축소규모의 실험으로부터 얻을 수 있다.

$$t_{full} = N^2 t_{1/N}; \text{ 초기구간}$$
$$t_{full} = N t_{1/N} \text{ ; 후기구간} \tag{5}$$

식 (5)를 이용하여 축소규모의 실험결과로부터 재발화 방지를 위한 냉각시간을 얻기 위해서는 초기구간과 후기구간의 정확한 시간 비중을 알아야 한다. Fig. 2와 같은 그래프로부터 그 것을 계산하기 위하여 초기와 후기의 경계점을 선정하여야 하나, 부정확할 수 있으므로 본 연구에서는 여러개의 축소모델 실험에서 얻어진 데이터를 이용하여 냉각시간을 구한다. 초기구간과 후기구간의 시간척도들 사이의 관계는 극한적인 의미를 갖고 있기 때문에 실험에서 얻어진 관계는 이 양극한 사이의 값으로 결정되는 것을 알 수 있게 된다. 즉, 냉각시간이 축소비 N의 선형적인 관계와 제곱의 관계 사이에 존재하게 된다.

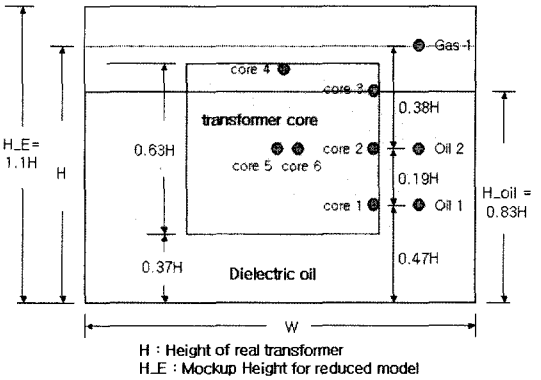

Fig. 4. Reduced mockup and thermocouple tree in core and oil bath.

3.3 실험결과 및 토의

냉각실험은 세가지 종류의 축소모형 (1/9, 1/5, 1/3)에 대하여 분무량을 변화시키지 않고 소화실험에서 사용된 노즐의 배치를 그대로 이용하였다. 변압기 모형과 열전대의 위치를 Fig. 4에 표시하였다. 철심의 온도 측정을 위하여 중앙부분 2개소를 포함 전부 6개소에 열전대(core1-6)가 설치되었으며, 절연유의 온도측정을 위하여 2개소에도 열전대가(oil1-2)가 설치되었고, 기화된 절연유의 온도는 Gas1에서 측정된다. 실험시작 시에는 철심의 63%가 철연유속에 잠겨있다. 변압기 모형의 상부 판은 덮개 형태로 제작되었다.

냉각시험의 전형적인 사진이 Fig. 5에 제시되었다. 700°C로 가열된 철심이 변압기 모형의 절연유속으로 침투되고, 철심의 열에 의해 증발된 유증기가 보이며 모형의 덮개로 덮고, 유증기가 자연적으로 발화되고, 미분무수가 작동되며, 일시적으로 소화가 일어나며, 미분무수를 중단하면 재발화가 발생된다. 만일 미분무수를 계속 작동시키면 재발화는 발생하지 않게 된다. 시간이 흘러감에 따라 변압기 모형의 내부에서 냉각이 진행되고 철심의 온도가 충분히 낮아지면 절연유의 증발도 멈추게 되어 재발화는 더 이상 일어나지 않게 된

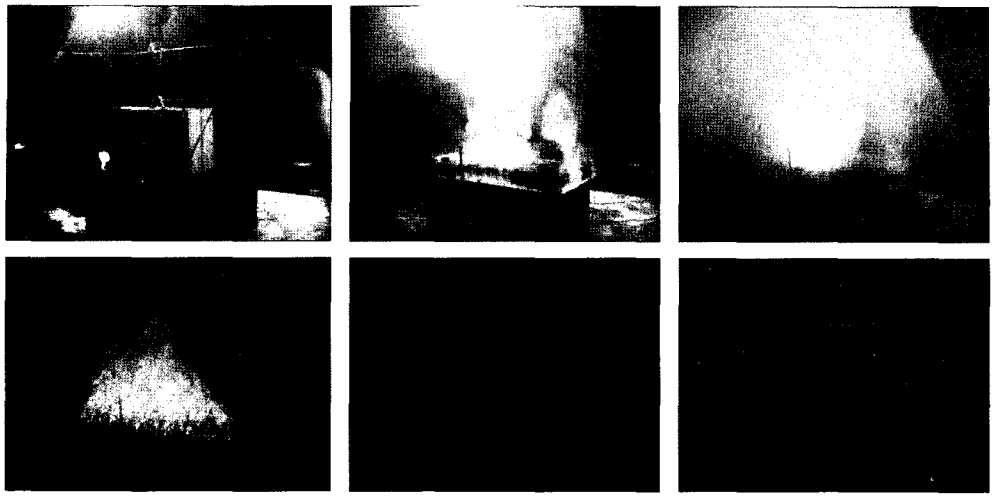

Fig. 5. Typical photos of the cooling experiments.

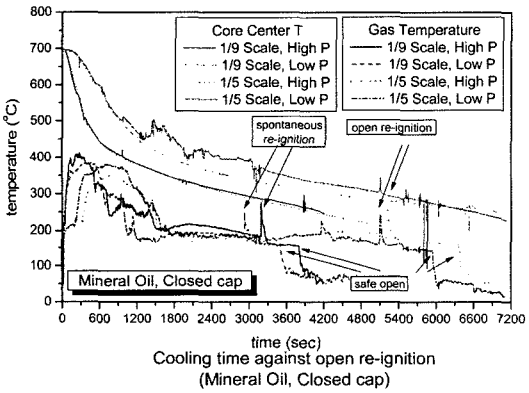

Fig. 6. Cooling simulations for the reduced-scale models.

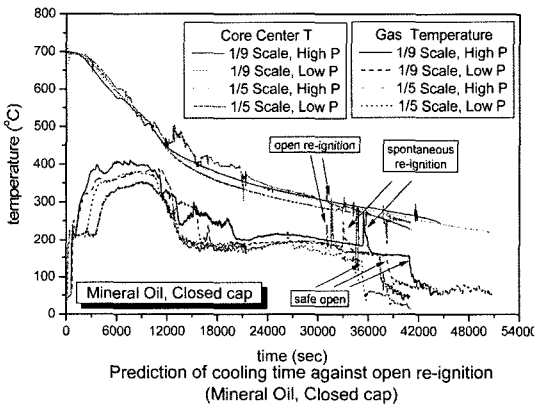

Fig. 7. Prediction of full-scale situation.

다. 따라서 재발화를 방지할 수 있는 미분무수의 최소 방수 지속시간을 실험적으로 구할 수 있게 된다. 실제 실험에서는 덮개를 열어 재발화 여부를 확인하였다.

실험결과를 Fig. 6에 제시한다. 1/3 축소모형에 대한 실험중에 열전대가 손상되어 이 모델에 대한 실험결과는 얻지 못 하였다. 철심의 온도가 지속적으로 하강하여 재발화가 발생되지 않는 시간을 이 결과로부터 알 수 있게 된다. 실험에서는 재발화가 일어나면 미분무수로 소화하고 냉각시킨 다음 다시 재발화를 확인하는 절차로 실험을 수행하였다. safe-open은 덮개를 열어도 발화되지 않는 것을 의미하며, open re-ignition은 덮개를 열었을 때 발화되는 것을 의미한다.

Fig. 7에 제시된 실물규모로 환산된 데이터는 철심의 온도 측정결과로부터 얻어진 다음과 같은 상사성에 의하여 예측되었다:

$$t_{full} = N^{1.5} t_{1/N} \quad T_{core} \geq 500^{\circ}C$$
$$t_{full} = N t_{1/N} \quad T_{core} \leq 500^{\circ}C \qquad (6)$$

식 (6)에 나타난 상사규칙은 식 (5)와 비교하여 초기 구간에서는 다르지만, 후기구간과는 일치하고 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 철심의 온도가 절연유 가스의 온도에 비하여 상사규칙을 잘 만족시키고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로 미루어 다소 간략화된 상사규칙이지만 엔지니어링을 위한 계산으로서는 만족할 만한 결과로 판단된다.

이상의 실험결과가 Table 2에 정리되었다. safe-open-time은 변압기 모형의 덮개를 열었을 때, 발화되지 않은 시간을 의미한다. 이로부터 재발화를 방지하기 위한 냉각시간은 안전율을 고려하여 12시간이면 충분할 것으로 평가된다. 고압시스템과 저압시스템은 그 유량

Table 2. Estimated cooling times required to prevent re-ignition

Oil type	Scale	System	Spontaneous re-ignition	Safe-open time(hr)	
				Small-scale	Prediction for full-scale
Mineral oil	1/9	High pressure	○	1.06	11.37
		Low pressure	○	0.97	10.62
	1/5	High pressure	○	1.77	10.39
		Low pressure	○	1.65	9.80
	1/3	High pressure	○	N/A	N/A

의 차이, 193 *l*/min와 320 *l*/min에도 불구하고 냉각시간에는 현저한 차이를 보이지 않는다. 보다 정확한 냉각시간을 얻기 위하여는 더 많은 수의 모델과 상사해석의 엄밀성을 확대시켜야 할 것이다.

4. 결 론

미분무수 소화설비를 변압기의 재발화 방지를 위한 냉각 설비로 활용하기 위하여, 소화실험에서 사용된 것과 동일한 사양과 배치를 가진 2가지의 시스템의 냉각성능을 평가하였다. 이 평가로부터 냉각시간, 즉 미분무수 설비의 최소 방수 지속시간이 얻어진다.

실물규모의 냉각성능 평가가 현실적인 이유로 매우 어렵기 때문에 3개의 변압기 축소모델과 1개의 모델이 철심표면의 비등 열전달 및 제반 물리적 현상을 파악하는 데에 이용되었다. 축소모델로부터 실물규모의 냉각시간을 얻기 위하여 상사규칙을 유도하였으며 실험데이터로 보정하였다.

그 결과 안전율을 고려하여 12시간의 냉각시간이 변압기의 재발화 방지를 위하여 필요하다고 판단되었으며, 고압과 저압시스템의 유량 차이에도 불구하고 냉각시간의 차이는 매우 작았다.

감사의 글

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

참고문헌

1. NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 2000 ed., NFPA.
2. Fire Extinguishment Tests with Water Mist Systems, KIMM report BSG154-1059.M, Korea Institute of Machinery and Materials(2004).
3. Analysis of Transformer Incidents, Korea Electric Power Corporation(2003).
4. G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale, "Fire Suppression by Water Spray", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26, 79-130(2000).
5. M. N. Ozisik, Basic Heat Transfer, Wiley(1987).