

변압기용 절연유의 특성에 관한 실험적 연구

김성대^{1*}, 박일수²

¹동명대학교 전기공학과, ²동명대학교 냉동공조공학과

A study on an experimental basis a special character of insulating oil the use of a transformers

Sung-Dae Kim^{1*} and il-Soo Park²

¹Department of Electrical Engineering, Tongmyong University

²Department of Refrigeration Engineering, Tongmyong University

요약 본 연구는 변압기 내부에 있는 절연유의 온도제어를 목적으로 열전소자인 펠티어 소자와 무전력 냉각장치인 Heat pipe를 이용한 다양한 시스템을 설계 제작하여, 절연유의 용량별 온도제어에 적용함으로써 최적의 시스템을 구현할 수 있었다. 실험을 통하여 60 °C 이내의 상태에서는 Heat pipe 100 W + 펠티어 100 W의 조합형이 순수 Heat pipe 300 W보다 탁월한 성능을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 조합형의 적정설계 방식이 우수하다는 것을 증명하고, 조합형을 사용함으로써 전기절약 효과와 수배전반의 보다 더 효율적인 관리에 기여하고자 한다.

Abstract This research is for temperature control of insulating oil inside the transformer. After I designed and manufactured various systems using Peltier element, which was thermal element, and Heat pipe, which was a cooling system, without electric power. The optimum system could be made by applying them to the temperature control for the insulating oil. I could verify that the combination type of Heat pipe 100 W+ Peltier 100W has a more outstanding capacity than pure Heat pipe 300 W within 60 degrees Celsius through experiments. Through this, I verify that the method of a proper design is prominent, and make an attempt at contribution to power saving effect and more effective control of Distributing board by using this combination type.

Key Words : Peltier element, Heat pipe, Temperature control, Distributing board, Insulating oil

1. 서론

현재 22.9 kV급에서 사용되는 수배전반 시스템은 주로 각 건축현장의 가장 외진지역이나 지하실 혹은 외곽에 설치되었던 관계로 수배전반 기기자체의 효율성, 안전성, 노후화로 인한 전력낭비 및 대형 사고에 노출되는 등 불합리한 점이 많았다. 각 수용가의 정전원인이 수배전반 내부기기의 노후화로 인한 내부기기 부식과 단락사고, 결과현상으로 정전 및 2차적으로 대형화재가 발생하여 인명피해와 더불어 경제적 손실이 매우 크다. 또한 사고발생시 복구에 시간이 많이 걸리며 이로 인한 유지관리 인원이 많이 소요된다. 이러한 산재된 문제점들을 해결하기 위하여 요즘 들어 전력IT를 응용한 원격감시시스템 개발

이 변화하고 있으며, 가격은 다소 상승하더라도 수배전반이 소형화되고 수배전반 에너지 효율을 극대화하면서 유지보수비용이 저렴한 신뢰도가 높은 제품이 선호되고 있는 추세이다.

따라서 수배전반의 노후화 문제를 개선함과 동시에 수배전반 내부의 온-습도를 최적화하여 수배전반의 전기적 효율을 극대화를 목적으로 하였다. 이러한 시스템을 구상하기 위하여 기존의 수배전반의 온-습도 효율을 개선하기 위하여 열전소자인 펠티어 소자와 무전력 냉각장치인 Heat pipe를 적용하여 수배전반의 내부온도를 상승시키는 가장 큰 원인을 제공하는 변압기의 온도를 저하시킴으로써 수배전반 내부기기의 수명연장 및 기기의 전기적 효율을 극대화하고자 한다.

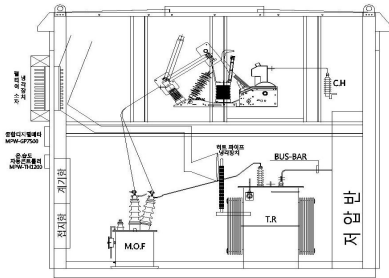
*교신저자 : 김성대(jbksd@tu.ac.kr)

접수일 11년 10월 20일

수정일 11년 11월 03일

게재확정일 11년 11월 10일

본 논문은 변압기 내부의 절연유를 온도제어를 통하여 열전소자인 펠티어 소자와 무전력 냉각장치인 Heat pipe를 이용하여 각 온도영역대별로 온도변화를 고찰하여 수배전반의 보다 더 효율적인 관리에 기여하고자 한다. 그림 1은 수배전반에서 적용될 펠티어 소자와 Heat pipe가 설치된 모델링이다.

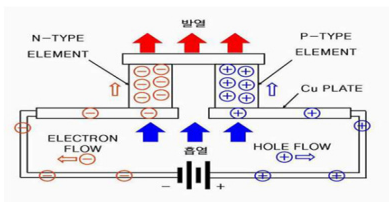


[그림 1] 펠티어 소자와 Heat pipe가 적용된 수배전반 모델링
[Fig. 1] Modeling of Distributing board applied peltier element and heat pipe

2. 펠티어 소자와 Heat pipe 시스템

2.1 펠티어 소자 원리 및 적용

펠티어 소자는 다른 두 금속으로 구성되어 있어 소자에 직류전류를 흘리면 소자의 한 면에서는 열을 흡수하고 다른 면에서는 흡수된 열을 방출시키므로 냉매가 필요 없으며 친환경적인 소재이며 또한 저전력 사용으로 전기료를 절약할 수 있는 경제적 효과를 극대화 할 수 있다.



[그림 2] 펠티어 소자의 원리도
[Fig. 2] Principle diagram of peltier element

그리하여 본 연구의 수배전반의 내부 온도를 조절하는데 펠티어 소자가 적절하다고 판단되어 적용하였다. 그림 2는 연구에 적용된 펠티어 소자의 원리도를 나타내고 있다.

2.2 Heat pipe 원리 및 적용

히트파이프는 관의 양 끝에 열을 흡수하는 증발부와 열을 방출하는 응축부로 이루어졌으며 관의 중간은 단열

부와 관의 내부에는 끓는점이 낮은 액체를 사용하여 증발부에서 열을 흡수하면 관 속의 액체가 기화되어 단열부를 지나 방열판이 있는 응축부로 전달되어 열을 방출하면서 기체가 액화되어 다시 증발부로 돌아가는 방식으로 전력의 사용이 필요 없다는 장점을 착안하였으며 변압기 내부의 절연유를 직접 접촉 냉각시킴으로써 냉각효과의 향상을 도모할 수 있다. 그리고 본 연구에서는 히트파이프의 증발부와 응축부에 각각 방열판을 설치하여 냉각성능을 향상시켰다.

3. 실험장치 설계 요소

3.1 변압기 온도 저감 고려사항

(1) 온도와 저항의 관계

도체의 저항은 온도에 따라서 변화하며 온도의 상승에 따라서 저항 값이 증가하는 것과 반대로 감소하는 것이 있다. 일반적으로 금속은 온도의 상승에 따라 저항 값이 증가하지만 탄소, 반도체 및 절연 등은 감소한다. 금속의 저항 값은 온도 상승에 비례하여 직선적으로 증가한다.

(2) 온도계수(TCR)

모든 물질은 온도에 따라 전기 저항 값이 변화하며 저항기 역시 온도에 따라 저항 값이 변한다. 온도계수는 이 변화를 나타내기 위한 값이며, 재료의 저항 값은 온도의 증감에 따라 저항 값이 직선적으로 변화하는 경우에는 저항온도계수(TCR)를 사용한다.

$$\alpha_{t_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

t_1 에서의 온도계수는,

$$\alpha_{t_1} = \frac{\left(\frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \right)}{R_1} (1/^\circ C) \quad (2)$$

이다. 온도 변화에 따른 저항의 변화를 구하는 식은,

$$\alpha_{t_1} R_1 = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1}, \quad \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha_{t_1} (t_2 - t_1)$$

$$\frac{R_2}{R_1} - 1 = \alpha_{t_1} (t_2 - t_1), \quad \frac{R_2}{R_1} = 1 + \alpha_{t_1} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

3.2 온도 제어기 설계

기존에 있는 제어장치는 온도의 편차가 크기 때문에 사용에 어려움이 히터를 실험 목적에 알맞게 설계하였으며, 변압기의 내부 환경과 동일하게 설계하기 위해서는 히터의 열량제어도 필요하다. 히터의 열용량 $Q(cal)$ 는,

$$Q = mc\Delta T \quad (4)$$

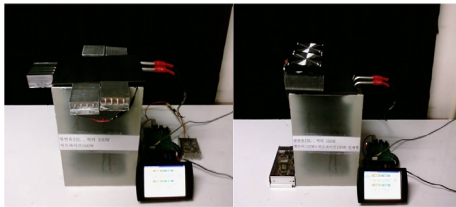
m : 질량(g), c : 비열($cal/g^{\circ}C$), ΔT : 온도변화 ($^{\circ}C$)이며, 전력은

$$P = EI = (IR)I = I^2R (W) \quad (5)$$

주울열은,

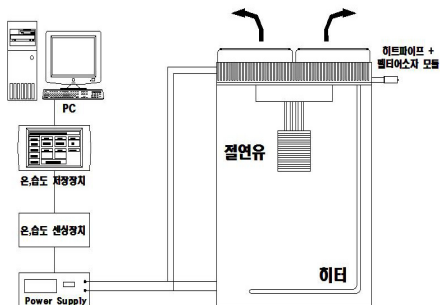
$$W = \frac{I^2 R t}{4.186} = 0.24 I^2 R t (cal) \quad (6)$$

이다. 변압기 온도 저감 고려사항과 온도 제어기설계의 이론적 근거를 토대로 히터용량과 펠티어 소자 용량을 산정하는데 참고하여 설계하였다.



[그림 3] 실험장치 사진
[Fig. 3] Experimental device photo

그림 3은 실험사진이며, 그림 4는 실험장치 구성도를 나타내고 있다.



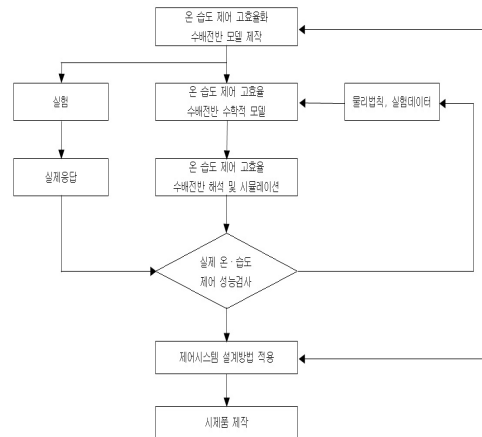
[그림 4] 실험장치 구성도
[Fig. 4] Experimental device configuration

4. 실험 결과 고찰

변압기 내부의 절연유를 냉각시키기 위하여 Heat의 용량을 100 W, 200 W, 300 W, 500 W의 4가지 조건과 절연유 10 l, 15 l, 20 l의 3가지 조건으로 2시간동안 각각 5회 반복하여 정적보정과 동적보정을 위하여 반복 측정하여 온도의 변화를 고찰하였다.

[표 1] 실험 조건
[Table 1] Experimental conditions

절연유	히터	100 W	150 W	200 W
10 l		●	●	●
15 l		●		●
20 l		●		●



[그림 5] 실험분석 흐름도
[Fig. 5] Event diagram of experimental analysis

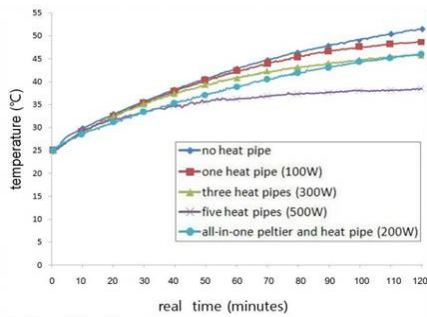
실험의 조건은 5가지 종류 Heat pipe 없는 경우, 100 W(Heat pipe), 200 W(펠티어 100 W+ Heat pipe 100 W), 300 W(Heat pipe), 500 W(Heat pipe)의 조건을 같이한 상태에서 실험을 수행하였으며 그림 7부터 그림 12까지 동일 조건을 비교 분석하였다. 표 1은 실험조건을 간단하게 나타내었다. 또한 그림 5는 실험분석 흐름도이다.

다음의 그림 6은 순수 Heat pipe 100 W와 Heat pipe 100 W+ 펠티어 100 W 조합형을 직접 설계 제작하여 실험수행에 사용한 사진이다.

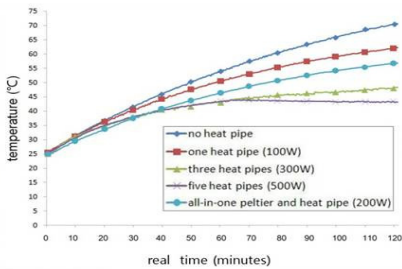


(a) Heat pipe (b) Heat pipe+펠티어 조합형
 [그림 6] Heat pipe(100 W+5=500 W)와 펠티어 (100 W) + Heat pipe(100 W) 조합형 사진
 [Fig. 6] Photo of combined Heat pipe(100 W+5=500 W) and peltier(100W)+heat pipe(100W)

그림 7은 절연유 10 ℓ와 Heat 100 W를 투입한 상태에서 동일조건으로 실험을 수행하여 비교 측정된 값들을 나타낸 것이다. 실험결과 전체적으로 온도계수의 영향에 따라 비례적인 상태를 나타내고 있으나 Heat pipe 300 W와 Heat pipe 100 W+펠티어 100 W의 조합형이 100분 이후부터는 같은 온도분포를 보여 효과적인 온도제어력과 절전효과를 보여주고 있다.



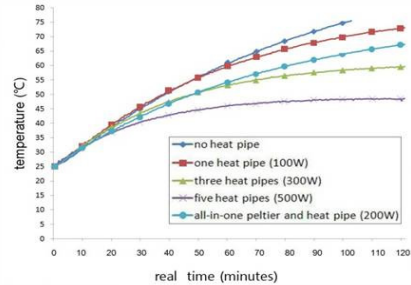
[그림 7] 절연유 10 ℓ - Heat 100 W의 실험 Data
 [Fig. 7] Experimental data of haet 100W



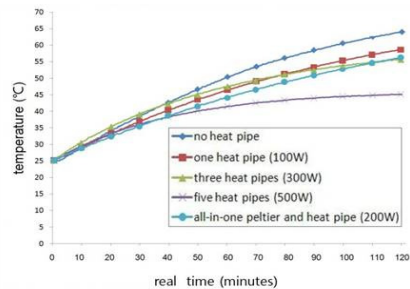
[그림 8] 절연유 10 ℓ - Heat 150 W의 실험 Data
 [Fig. 8] Experimental data of haet 150W

그림 8은 절연유 10 ℓ와 Heat 150 W를 투입한 상태에서 동일조건으로 실험을 수행하여 비교 측정된 값들을 나타낸 것이다. 실험결과 그림 7에서 나타난 200 W 조합형의 효과가 조건별로 별다른 특징이 없는 이유는 온도

상승속도가 온도제어력의 한계보다 빠르게 반응하여 효과가 없는 것으로 판단된다.



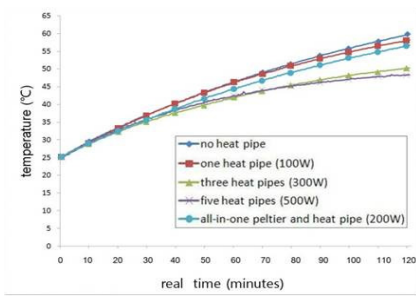
[그림 9] 절연유 10 ℓ - Heat 200 W의 실험 Data
 [Fig. 9] Experimental data of haet 200W



[그림 10] 절연유 15 ℓ - Heat 200 W의 실험 Data
 [Fig. 10] Experimental data of haet 200W

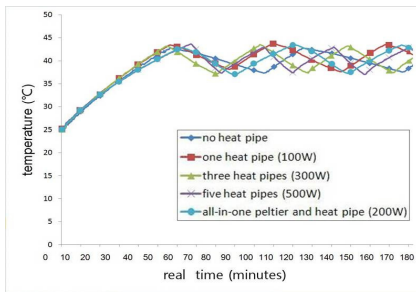
그림 9는 절연유 10 ℓ와 Heat 100 W를 투입한 상태에서 동일조건으로 실험을 수행하여 비교 측정된 값들을 나타낸 것이다. 실험 결과 Heat 용량이 증가함에 더욱더 확연히 온도의 비례적 현상을 나타내고 있다. 이상과 같이 절연유 10 ℓ에 히터의 용량을 50 W씩 단계적으로 상승시켜 본 결과 변압기의 온도가 60 ℃이상 상승이 되면 Heat pipe 100 W+펠티어 100 W의 조합형이 별 효과가 없다는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 10은 절연유 15 ℓ와 Heat 200 W를 투입한 상태에서 동일조건으로 실험을 수행하여 비교 측정된 값들을 나타낸 것이다. 실험결과 그림 8과 같은 현상을 보이고 있으며 절연유의 용량과 Heat의 용량의 상관성에 대하여 기준을 찾을 수 있었다. 여기에서도 Heat pipe 100 W+펠티어 100 W의 조합형이 우수한 성능을 보이고 있다.



[그림 11] 절연유 20 ℓ - Heat 200 W의 실험 Data
 [Fig. 11] Experimental data of haet 200W

그림 11은 절연유 20 ℓ와 Heat 200 W를 투입한 상태에서 동일조건으로 실험을 수행하여 비교 측정된 값들을 나타낸 것이다. 실험결과 그림 10보다는 각 용량별 온도의 격차 폭이 조밀한 형태를 보이고 있다. 이러한 이유는 Heat pipe의 냉각 성능에 한계점을 가진 것으로 사료된다.



[그림 12] 절연유 10 ℓ - Heat 100 W일 때 38~43 °C 자동 온도 제어 실험 Data
 [Fig. 12] Auto temperature control experimental data of haet 100W of 38~43 °C

그림 12는 절연유 10 ℓ와 Heat 100 W를 투입한 상태에서 2시간동안 자동 온도 조절기 38~43 °C를 사용하여 동일조건으로 실험을 수행하여 비교 측정된 값들을 나타낸 것이다. 실험결과에서 보듯이 Heat pipe 100 W+ 펠티어 100 W의 조합형이 온도의 변화에 따른 제어 능력이 안정적이라는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

펠티어 소자와 히트파이프를 이용한 절연유의 냉각 성능 향상을 위한 실험적 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 위 실험조건에서 확인한 결과 절연유의 온도가 60 °C를 초과하면 Heat pipe의 성능이 크게 저하한다.
2. 60 °C이내의 상태에서는 Heat pipe 100 W+펠티어 100 W의 조합형이 순수 Heat pipe 300 W보다 탁월한 성능을 보였다.
3. 온도절기기를 부착한 상태에서는 더욱더 조합형이 성능 발휘가 우수하다는 것을 확인하였다.
4. 이상과 같은 실험에서 조합형의 적정설계 방식이 우수하다는 것을 증명하고, 조합형을 사용함으로써 전기절약 효과와 수배전반의 보다 더 효율적인 관리에 기여하고자 한다.

References

- [1] Sadik, K. and Hongtan, L., "Heat Exchangers selection, rating and thermal design, 2ed.," CRC press, 2002.
- [2] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4ed.," John Wiley & Sons, 1996.
- [3] Lee, Y. S., Park, K. H., Ra, H. s. and Kang, H. K., " A Study on the Operating Characteristics of the Naphthalene Heat Pipe," Proceedings of the KSME Spring Annual Conference, pp. 2100-2104, 2005.
- [4] Vogel, M., Xu, G., " Low Profile Heat Sink Cooling Technologies for Next Generation CPU Thermal Designs," ElectronicsCooling, Vol. 11, No. 1, pp. 20-26, 2005.
- [5] N. J. Lamfon, M. Akyurt. and Y. S. H. Najjar, " Waste Heat Recovery Using Looped Heat Pipers for Air Cooling," Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 4, pp. 365-376, 1994.
- [6] S. Chengming, X. Mingdal and C. Yuanguo, "Analysis of Three-Fluid Separate Type Heat Pipe Exchanger," Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 12, No. 4, pp. 317-322, 1992

김 성 대(Sung-dae Kim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 동아대학교 일반대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 동아대학교 일반대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 전기공학과 부교수

<관심분야>

계측 및 제어, 전자공학

박 일 수(Il-soo Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 2001년 2월 : 동아대학교 생산기술연구소연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 교수

<관심분야>

생산 및 제어, 기계공학