

변압기 오일에 자성나노입자 첨가에 따른 절연파괴전압 특성변화에 관한 실험적 연구

서현석\*, 이원호\*\*, 이세희\*\*\*, 이종철\*\*  
 성균관대\*, 강릉원주대\*\*, 경북대\*\*\*

Experimental Study on the Dielectric Breakdown Voltage with the Addition of Magnetic Nanoparticles in a Transformer Oil

Hyun-Seok Seo\*, Won-Ho Lee\*\*, Se-Hee Lee\*\*\*, Jong-Chul Lee\*\*  
 Sungkyunkwan University\*, Gangneung-Wonju National University\*\*, Kyungbook National University\*\*\*

**Abstract** - In this study, we have investigated the dielectric breakdown by measuring AC (60Hz) breakdown strength of the fluids in accordance with IEC 156 standard and have compared the results with references. It was found that the dielectric breakdown voltage of pure transformer oil is around 12 [kV] with the gap distance of 1.5mm between electrodes. In case of our transformer oil based magnetic fluids with  $0.1\% < \Phi$  (volume concentration of magnetic particles)  $< 0.6\%$ , the dielectric breakdown voltage above 30 [kV], which is 2.5 times higher than that of pure transformer oil. It can be explained by the changed ionization process by adding nanoparticles in pure transformer oil, which is due to trapped fast electrons and slow negative nanoparticles. Moreover, in case of the fluid with applied magnetic field, the dielectric breakdown voltage increases above 40 [kV], which is 3.3 times higher than that of pure transformer oil.

<표 1> 실험에 사용된 자성나노입자의 체적농도 및 포화자화도

OT-4 [ml]	EFH-1 [ml]	MNP's volume concentration [%]	Saturation magnetization [G]
300	0	0	0
300	5	0.08	0.32
300	10	0.16	0.64
300	15	0.23	0.95
300	20	0.31	1.24
300	25	0.38	1.53
300	30	0.45	1.81
300	35	0.52	2.09

1. 서 론

자성나노유체를 이용한 많은 연구가 되고 있지만 자성유체의 구조가 복잡하기 때문에 자성유체에 관한 이론적 연구는 확립되지 않고 있다. 나노유체(nanofluids)의 획기적인 열전달 특성이 1995년 Choi 등 [1]에 의해 알려진 이후로 최근 열유체 분야에서 유체의 냉각 및 유탄 특성을 향상시키기 위해 많은 연구가 되고 있으며, 나노유체의 열전달 특성은 열유체의 열전도가 낮을수록 높게 나타나기 때문에 변압기(transformer)와 차단기(circuit breaker) 같은 전력기기에 적용되는 절연유와 같은 오일류에 적용할 때 더욱 유리하다. 절연유는 물보다 열전도도가 작기 때문에 동일한 고형입자를 같은 농도로 첨가했을 경우에 훨씬 높은 열특성 향상이 기대된다. 하지만 자성나노유체를 변압기와 같은 전력기기에 적용하기 위해서는 열전달 특성 뿐만 아니라 절연특성에 관한 검토가 필요하다. 자성나노유체의 절연특성(dielectric strength)은 자성절연효과(magnetodielectric effect)로 불리는 자성나노입자(magnetic nanoparticle, MNP)의 체적농도(volume concentration) 및 인가된 자기장의 방향과 크기에 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2].

Segal 등[3]은 변압기 오일과 자성나노유체가 분산된 변압기 오일의 너임펄스전압의 극성에 따라 절연파괴전압을 측정하였다. 실험결과 변압기 오일에서는 부극성(negative needle)이 정극성(positive)보다 높았으며 자성나노입자가 분산된 변압기 오일에서는 정극성에서 절연파괴전압이 급격히 상승한 결과를 확인하였다. 자성나노유체에 자기장 구배를 인가

한 경우에는 내부의 자성입자들은 자기장의 방향에 맞게 배열이 되며 이러한 운동으로 인해 자성유체의 유동 특성이 다르게 나타난다. 본 연구에서는 자성나노유체의 절연특성 측정으로 자성나노유체와 변압기 절연유의 혼합비에 따라 자성나노유체 내부의 자성나노입자 체적을 및 인가된 자기장과 자기장의 방향에 따른 절연파괴전압을 측정함으로써 자성나노입자 체적을 변화와 자기장 인가에 따라 절연유 절연특성에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하고자 한다.

2. 본 론

연구에 사용된 실험용 절연유는 현재 널리 사용되고 있는 변압기용 절연유(KS C 2301 1-4)로 사용되는 OT-4와 미국 FerroTec사에서 상용화된 자성나노유체(EFH-1)를 혼합하여 사용하였다. 자성나노유체에 포함된 자성나노입자는 마그네타이트(magnetite)이며 크기는 약 10[nm]이다. 변압기 오일에 포함된 자성나노유체의 체적농도( $\Phi$ )를 Table 1에 나타내었다.

절연파괴전압은 그림 1(a)와 같은 High voltage Dielectric사 BA75장비를 사용하여 측정하였으며 국제표준 규격인 IEC 60156에 따라 실험을 진행하였다. 실험용기(vessel)의 크기는 108mm× 105mm×88mm 이며, 그림 1(b)에 변압기용 절연유(OT-4)와 변압기용 절연유에 자성나노유체(EFH-1)를 혼합한 절연유가 충전되어 있는 것을 나타내었다. 내부에 설

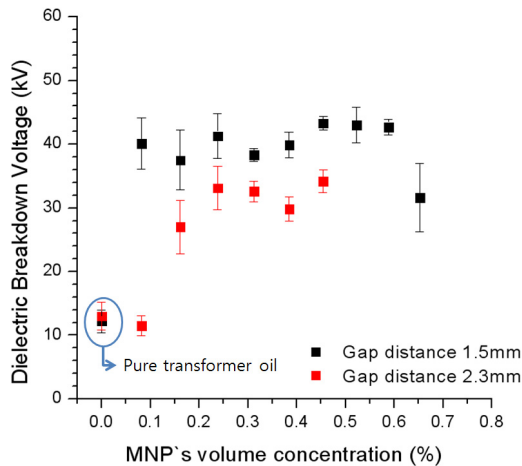


(a) 절연파괴전압 측정장비 (BA75)



(b) 실험용기

<그림 1> 절연파괴전압 측정장비 및 실험용기



〈그림 2〉 자성나노입자 체적농도 및 전극간 거리에 따른 절연파괴전압

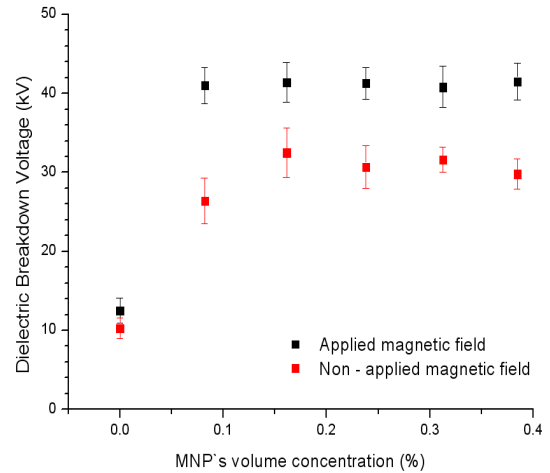
치된 전극의 부피로 인해 최대용량은 400 [ml]이다. 자성나노유체와 혼합하여 실험을 하기 때문에 변압기용 절연유의 용량은 300 [ml]로 설정하였다. 변압기용 절연유가 충전된 유리용기와 내부에 설치된 방전전극한 쌍으로 구성되어 있다. 전극의 모양은 구형전극으로 지름은 36mm이며 전극사이의 거리는 0.1mm~15mm로 조절이 가능하다. 절연파괴전압 측정 장비의 최대 측정 가능한 범위는 75 [kV]이다. 전압상승률은 2.0 [kV/s]로 설정하였고, 최초 1회 측정 시 기포가 없는 상태를 유지하며 5분의 대기시간을 가지며 처음 절연파괴전압이 발생한 후 2분간 지연시간을 두어가며 5회 측정하였다. 총 6회를 측정한 후 평균값과 표준편차를 구하게 되며 이것을 10회 반복 실험을 통하여 총 60회 측정하였다.

그림 2는 전극간 거리 d=1.5mm와 d=2.3mm에서 자성나노유체 체적농도에 따른 절연파괴전압을 나타내고 있다. 변압기용 절연유 OT-4 에 포함된 자성나노입자의 체적농도는  $\Phi=0.08-0.45$  [%]이며, 포화자기화 (saturation magnetization)는  $I_s=0.328-1.81$  [Gauss]이다. 전극간 거리 d=1.5mm에서 자성나노입자 체적농도  $\Phi=0.08-0.45$  [%] 사이인 경우에 절연파괴전압은 순수한 변압기 절연유 절연파괴전압 12.2 [kV]보다 3배 이상 큰 40 [kV]를 나타내었다.

전극간 거리 d=2.3mm에서는 자성나노입자 체적농도  $\Phi=0.08$  [%],  $I_s=0.328$  [Gauss] 인 경우 절연파괴전압은 11.6 [kV]로 순수한 변압기 절연유 절연파괴전압 13 [kV]보다 약간 작은 값을 나타냈다. 이는 전극간 거리가 d=1.5mm에서 d=2.3mm로 넓어 졌기 때문에 절연파괴전압의 감소보다는 변화가 없다고 생각할 수 있다. 하지만 자성나노입자 체적농도  $\Phi=0.16-0.45$  [%],  $I_s=0.644-1.81$  [Gauss] 에서는 전극간 거리 d=1.5mm와 마찬가지로 순수한 변압기 절연유 절연파괴전압 13 [kV]보다 2배 이상 큰 31.3 [kV]를 나타내었다. 이는 Segal 등 [3]이 상용 변압기 오일(Univolt60 and Nytro 10X)을 이용한 연구결과와 일치한다. 절연유 내에 도전성 입자가 존재하면 절연파괴강도가 감소될 것이라는 보편적인 인식과 경험에 모순하는 결과이다. 순수한 변압기 절연유에 자성나노입자의 첨가로 인한 절연파괴전압의 증가는 첨가된 도전성 나노입자가 전기적으로 스트레스된 전자포착체 (electron scavenger)로 작용하면서 빠른 전자를 느린 음으로 대전된 나노입자로 변화시키기 때문으로 사료된다 [4]. 즉, 이러한 음으로 대전된 나노입자의 정미 공간 대전영역 (net space charge zone)에서 확장이 방해되고 절연유 내에서 발생하는 스트리머 전파 (streamer propagation)에 필요한 전기장 과장 전파를 제한하기 때문이다.

자성나노유체는 외부 자기장의 유무에 따라 모양 및 특성이 달라지기 때문에 외부 자기장을 인가함에 따라 절연유의 절연특성에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 그림 3은 전극간 거리 d=1.5mm에서 자성나노입자의 체적농도 및 인가된 외부자기장에 따른 절연파괴전압을 나타내고 있다. 변압기용 절연유에 포함된 자성나노입자의 체적농도는  $\Phi=0.08-0.45$  [%]이며, 포화자기화는  $I_s=0.32-1.81$  [Gauss]이다.

외부 자기장을 인가하지 않은 경우 자성나노입자의 체적농도  $\Phi=0.08-0.38$  [%],  $I_s=0.32-1.5$  [Gauss] 사이인 경우의 절연파괴전압은 30 [kV]로 나타났고, 외부 자기장을 인가한 경우 절연파괴전압 41 [kV]로 자기장을 인가하지 않은 경우의 절연파괴전압보다 30% 증가한 결과를 나타내었다. 이는 외부 자기장을 인가한 경우 자성나노입자들이 자기장 구배가 가장 강한 자석주위와 전극간의 절연파괴가 발생하는 곳에 모이게 되며 이를 통해 나노입자의 정미 공간 대전영역의 확장이 방해가 되고 절연유 내에서 발생하는 스트리머 전파를 제한한다고 사료된다.



〈그림 3〉 자성나노입자 체적농도 및 인가자정에 따른 절연파괴전압

### 3. 결 론

본 연구에서는 변압기용 절연유에 자성나노입자를 추가한 자성나노유체에 대하여 자성입자 체적농도 및 자기장 인가에 따른 절연파괴전압 (dielectric breakdown voltage)을 고찰하였다. 전극간 거리 d=1.5mm에서 순수한 변압기 절연유의 절연파괴전압 12.2 [kV]이며, 자성나노입자가 추가된 자성나노유체의 절연파괴전압은 30 [kV]로 상승되었다. 순수한 변압기 절연유에 자성나노입자의 첨가로 인한 절연파괴전압의 증가는 첨가된 도전성 나노입자가 전기적으로 스트레스된 전자포착체 (electron scavenger)로 작용하면서 빠른 전자를 느린 음으로 대전된 나노입자로 변화시키기 때문으로 사료된다. 또한 자기장 인가로 인한 자성나노유체의 절연파괴전압은 41 [kV]로 상승되었는데, 이는 외부 자기장을 인가한 경우 자성나노입자들이 자기장 구배가 가장 강한 자석주위와 전극간의 절연파괴가 발생하는 곳에 모이게 되며 이를 통해 나노입자의 정미 공간 대전영역의 확장이 방해가 되고 절연유 내에서 발생하는 스트리머 전파를 제한한다고 사료된다. 향후 스트리머 전파에 관한 나노입자의 재료와 물성치에 따른 수치해석적 연구를 추가로 수행하여 체계적인 이론 정립 및 현상 규명을 수행할 것이다.

### [후 기]

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0027689)

### [참 고 문 헌]

- [1] Choi, U. S., "Enhanced thermal conductivity of fluids with nanoparticulates", ASME FED 231, pp. 99-103, 1995
- [2] Kopcansky, P., Tomco, L., Marton, K., Koneracka, M., Potocova, I., Timco, M., Jadzyn, J., and Czechowski, G., "Dielectric breakdown strength in magnetic fluids", Phys. stat. sol. (b) 236, No. 2, pp. 454-457, 2003
- [3] Segal, V., Hjorstberg, A., Rabinovich, A., Natrass, D., and Raj, K., "AC(60Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 619-622, 1998
- [4] O'Sullivan, F. M., "A modeling for the initiation and propagation of electrical streamers in transformer oil and transformer oil based nanofluids", Ph.D. Thesis of MIT, 2007