

## 주상변압기의 절연매질인 광유의 절연파괴특성에서 분해생성물의 영향

(Effect of Decomposition Product on the Insulation Characteristics of Mineral Oil as  
Insulation Medium of Distribution Transformer)

임동영\* · 박승규 · 박철호 · 김기채 · 이광식 · 최은혁\*\*

(Dong-Young Lim · Sung-Gyn Park · Cheol-Ho Park · Ki-Chai Kim · Kwang-Sik Lee · Eun-Hyeok Choi)

### Abstract

This paper deals with the effect of decomposition products which occur in breakdown of mineral oil, on the insulation characteristics of its oil. Breakdown tests in the oil were conducted by the proposed experimental methods under a quasi-uniform field and AC HV (60Hz). The breakdown voltage in the oil shows characteristics of dispersion from successive breakdowns and, it is found that there are three patterns of the decomposition products behavior at the process of breakdown progress in the oil. Finally, the breakdown voltage dispersion in the oil can be described in detail based on the behavior patterns of the decomposition products and its diffusion time.

Key Words : Breakdown Voltage, Decomposition Product, Discharge Path, Mineral Oil

### 1. 서 론

절연매질인 기체와 액체 중 고전압에 의해 초래되는 고전압, 방전현상은 이론적, 실험적 고찰로부터 설명하기 난해한 특성을 보인다. CO<sub>2</sub> 가스의 절연강도는

평등전계에서 N<sub>2</sub> 가스의 88%인[1] 반면에 불평등전계에서 그 강도는 공기보다 28% 더 우수하였다[2]. 그리고 임펄스 전압에 대한 CO<sub>2</sub> 가스의 극성효과는 N<sub>2</sub> 가스와 달리 음극성이 더 낮았다[3-5]. 게다가, 공기 중 습도에 의한 절연파괴특성도 평등전계와 불평등전계에서 상이한 특성을 보였다[6-7]. 액체 절연매질중에서 난해한 고전압 현상은 액체질소(LN<sub>2</sub>)와 액체 SF<sub>6</sub>(LSF<sub>6</sub>)의 상반된 절연특성으로 보고되었다. 절연 파괴전압은 ( $V_B$ ) LN<sub>2</sub> 중 침대 평판전극계 (N-P)가 평판대 평판전극계 (P-P)보다 더 높았지만[8], LSF<sub>6</sub>는 P-P 전극계가 더 높은  $V_B$ 를 보였다. 이러한 현상은 정기포현상(Positive Bubble Effect)으로 알려져 있다[9]. 이 뿐만 아니라 변압기의 절연매질인 절연유 (Mineral Oil, 광유)에서  $V_B$ 의 분산도 난해한 고전압

\* 주저자 : (주)형진 연구소장  
\*\* 교신저자 : 한국폴리텍대학 대구캠퍼스 스마트전기과 교수  
\* Main author : Director of Research Institute at Hyeong Jin Corp.  
\*\* Corresponding author : Professor of Smart Electrics at Korea Polytechnic College  
Tel : 053-523-2356, Fax : 053-556-7338  
E-mail : without38@naver.com  
접수일자 : 2014년 3월 3일  
1차심사 : 2014년 3월 5일  
심사완료 : 2014년 4월 18일

현상 중 하나이다.

액체 유전체 중 절연특성을 구명하는 것과 변압기 절연유에 관한 연구는 수십년간 많은 수의 결과가 보고되었다. 극저온 액체 중 절연특성은 기포발생, 기포 거동, 그 기포의 아크소호능력에 상당한 영향이 있음이 보고되었으며[8-10], 이로 말미암아, 그 기포의 운동과 기포 내부의 스트리머 진전, 액체 유전체 중 스트리머 구조에 대한 깊은 연구가 수행되었다[11-13]. 아울러, 절연유의 절연특성에 관한 연구가 불평등 전계 중 뇌임펄스전압에 대한 극성효과가 과두시간에 따라 역전하는 현상[14], 배전 변압기에 사용하기 위한 실리콘유와 에스테르 유의 유전체 거동에서 열적, 전기적 스트레스의 영향[15], 변압기의 호흡작용을 고려한 절연유들의 공기 중 수분흡수율에 관한 연구[16], 실리콘 유 중 복합절연에서 뇌임펄스전압에 대한 연면 방전특성[17] 등으로 수행, 보고되었다.

절연유에 관한 절연특성은 수많은 연구로부터 오랫동안 연구되었음에도 불구하고, 본 논문 또한 절연유의 절연특성을 설명하였다. 그 이유는 절연유의  $V_B$ 의 분산특성이 여전히 명확하게 구명되지 않았으며, 주상 변압기 내부고장검출을 위한 방사전자파를 검출하는데 유효하기 때문이다. 일반적으로 절연유의  $V_B$ 는 부분방전과 절연과피에 의한 분해생성물의 영향으로 연속적인 측정에서 상당히 분산하는 특성을 보이지만, 절연유에 대한 연구와 그 외 대부분의 연구들은 절연유의 절연내력 적합성 판단, 절연유 중 분해생성물의 영향을 받지 않는 조건에서 절연특성만을 연구하였다[11-17]. 게다가 주상변압기 내부의 부분방전과 그에 기인한 방사전자파를 유용하게 검출하기 위해서, 그 변압기에 사용된 광유의 절연특성을 연구하는 것이 필수적이다. 그 전자파의 검출은 주상변압기 내부고장검출을 가능하게 하므로, 전력공급의 신뢰성, 불시정전예방 등의 이득을 제공할 것이다. 따라서, 절연유의 절연특성은 본 저자들에게 충분한 연구동기를 유발하였다.

본 논문에서 저자들은 광유의 절연과피메커니즘을 구명하는 것을 목표로 광유의  $V_B$  분산에 집중하였고 그 분산을 설명하기 위해, 저자들은 준평등전계에서

광유의  $V_B$ 와 전극간 방전로를 각각 측정, 촬영하였다.

## 2. 실험장치와 방법

그림 1은 광유 중  $V_B$ 와 방전로를 각각 측정, 관측하기 위한 실험회로를 도식하였다. 그 실험회로는 AC 전원장치, 고전압 장치, 테스트 챔버, HV 분압기로 구성하였다. AC 전원장치는 교류 60Hz의 교류 고전압을 발생시키고, 2차측의 고전압장치는 승압된 교류고전압을 병렬로 연결된 테스트 챔버에 인가시키는 역할을 한다. 테스트 챔버는 광유의 절연특성을 연구하기 위해 아크릴로 제작하였으며, 그 크기와 형상은 각각 163mm×163mm×460mm, 원통형이다. 그림 1에서  $R_1$ ,  $R_2$ 로 표현된 고전압 분압기(3000:1)는 테스트 챔버에 인가된 고전압을 측정하기 위해 사용하였다. 추가적으로 오실로스코프(Lecory 9350, 500MHz)가 절연과피 시 전압과 전류파형을 관측하기 위해 사용되었다.

추가적으로 광유와 전극이 연구를 위한 실험재료로 사용되었다. 광유는 탄화수소의 액체인 파라핀과 나프텐이 주성분이며, 다른 절연유에 비해 낮은 유전율과 인화점, 광범위한 이용과 낮은 비용의 장점을 가진다[16]. 본 실험을 위한 광유는 KS C[18]에서 규정한 1종 2호를 사용하였다. 광유가 대기 중 수분을 흡수하기 때문에[16], 그 흡수에 대한 영향을 고려하여 주위 온도를  $7\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정한 환경에서 광유를 취급하였다. 본 연구는 절연유의 절연내력 적합성을 판단하는 것이 아니므로, 전극은 평등전계 대신에 준평등전계를 형성하는 구와 원형평판전극을 사용하였다. 구전극과 원형평판전극의 지름은 각각 41mm, 59mm이다. 두 전극은 모두 스테인레스로 제작하였다.

실험방법은 광유를 테스트 챔버에 충전하기 전에 테스트 챔버와 전극에 대한 세척작업이 먼저 수행되었다. 그런 후 테스트 챔버 하부에 평판전극을 설치하고 테스트 챔버에 광유를 충전하였다. 구전극은 테스트 챔버의 부상에 연결하여 설치하였고, gap은 부상 상부의 조절갭에 의해 2.5, 5, 7.5, 10mm로 설정하였다. 최종적으로 AC 고전압을 인가하여 광유의  $V_B$  측정과 동시에 방전로가 함께 촬영되었다.

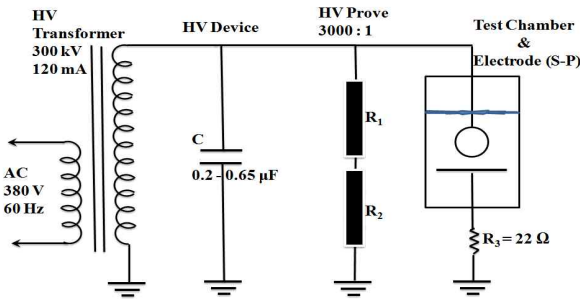


그림 1. 광유의 절연특성을 위한 실험회로  
Fig. 1. Experiment circuit for insulation properties in mineral oil

본 논문에서 광유의  $V_B$ 를 측정하기 위해 2개의 실험기법이 도입되었다. 그 기법 중 하나는 KS 규정을 [19] 준수한 것으로 E-method 1로, 다른 하나는 저자들이 제안한 것으로 E-method 2로 정의하였다. 이들 두 기법의 특징은 표 1에 요약하였다. E-method 1은 KS 규정에 충실하기 위함이고, E-method 2는 방전 후 전극주위에 형성된 분해생성물의 영향을 확인하는데 유효하리라 판단된다.

표 1. 두 실험기법의 특징  
Table 1. The features of experimental techniques

구분	$V_B$ 측정횟수	절연과괴 후 다시 고전압을 인가하는 시간
E-method 1	6	180초
E-method 2	100	5초

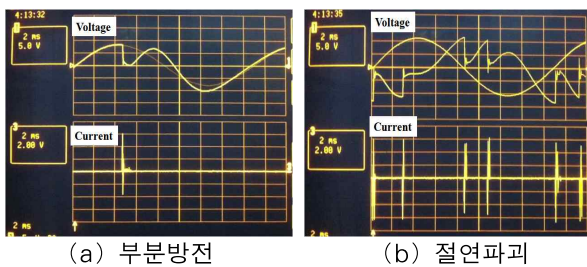


그림 2. 부분방전과 절연과괴에 대한 전압-전류파형  
Fig. 2. Waveform of voltage-current on partial discharge and breakdown in mineral oil

광유의  $V_B$  측정기준은 그림 2에서 보여주는 전압-전류파형으로 확립하였다.  $V_B$ 는 그림 2 (b)와

같이 전압파형의 모든 피크 부근의 위상에서 전류가 급증하고 전압이 급감할 때 인가전압으로 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 광유의 절연내력과 실험기법의 검토

그림 3은 두 실험기법에 의한 광유의 절연특성을 gap의 함수로 나타낸 것이다. E-method 1과 E-method 2 모두 측정한 평균값을 이용하였다. E-method 1의 기법에서 2.5mm의 gap에 대한 실험은 광유의 절연내력적합성을 판단하기 위한 것이다. 두 실험기법에 의한 광유의 평균  $V_B$ 는 gap와 함께 선형적으로 상승하였다. 그리고 KS규정에서 1종 2호인 광유에 대한 절연내력은 2.5mm의 gap에서 30kV 이상이다[18]. 하지만 본 실험에서는 그 조건을 충족하지 않았으며,  $V_B$ 의 분산은 그림 3 곡선의 예러바로부터 E-method 2에서 상당히 크게 나타남을 확인하였다.

광유가 신유임에도 불구하고, 절연내력이 KS 기준보다 낮은 것은 전극의 영향으로 설명할 수 있다. 본 실험에 사용한 전극은 KS 기준의 전극계보다 불평등 전계에 더 가까우며, 상부 구전극의 지름이 약 3.3배 더 길었다. 이것은 전극 표면적의 넓어짐에 기인하므로, 절연과괴가 발생할 확률이 증가하게 된다. 그 결과  $V_B$ 가 낮아지게 되는 것이다. 이러한 결과는 변압기유에서 보고된 다른 실험결과와도 부합한다[20]. 추가적으로 E-method 1과 2에 의한  $V_B$ 의 분산은 E-method 2가 더 뚜렷하였다. 두 기법을 이용한 실험에서 분해생성물은 절연과괴로부터 모두 발생하였기 때문에, 연속적인 절연과괴에서  $V_B$ 는 그 생성물의 영향을 받게 된다.  $V_B$ 의 분산이 큰 것은 분해생성물의 영향이 더 지배적이라 할 수 있다. 그러므로 제안된 E-method 2 기법은  $V_B$ 의 연속적인 측정에서 분해생성물의 영향을 확인하는데 유효한 기법임이 분명하다.  $V_B$ 의 분산과 분해생성물의 거동은 다음 항에서 상세히 설명할 것이다.

### 3.2 실험기법에 의한 광유 중 절연파괴전압의 분산과 절연특성의 고찰

본 항은 두 기법에 의해 측정된 각각의  $V_B$  수치와 분산경향을 대조하고 액체유전체에서 절연파괴에 영향을 미치는 인자(기포와 절연매질의 온도)로부터  $V_B$  분산을 고찰하였다.

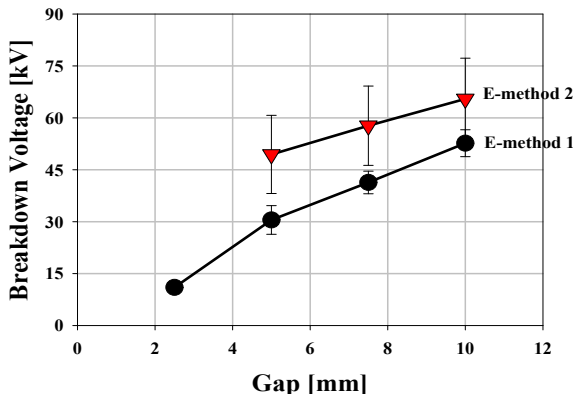
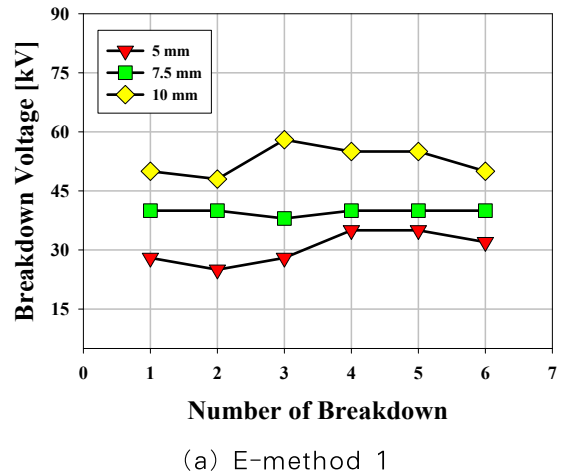


그림 3. gap의 함수인 광유의  $V_B$  특성  
Fig. 3. Characteristics of  $V_B$  in mineral oil as a function of gap

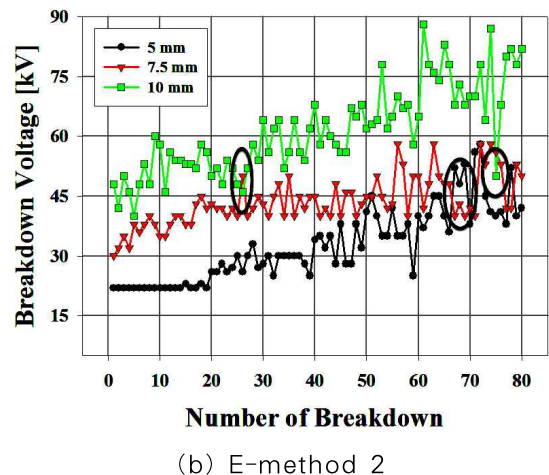
그림 4는 연속적인 절연파괴로부터 측정된  $V_B$ 를 보여준다. 그림 4 (a)와 4 (b)는 각각 E-method 1과 E-method 2에 의해 측정되었다. E-method 2로 측정된  $V_B$ 는 100번을 측정하였지만 80번의 데이터만을 나타내었다. 이는 80번의 데이터만으로  $V_B$ 의 분산을 확인할 수 있기 때문이다.  $V_B$ 의 분산경향은 그림 4 (b)가 더욱더 명확하게 나타났다. 그림 4 (a)와 (b)에서  $V_B$ 에 대한 최대 분산은 각각 10kV와 37kV였다. 이 분산은 절연파괴 후 재차 고전압을 인가하는 시간과 분해생성물의 영향이라 판단된다. 절연파괴 후 분해생성물은 구전극 주위와 전극 사이에 분포하였다. 그 두 위치의 분해생성물은 시간의 경과와 함께 구전극 표면을 따라 챔버상부의 절연유 표면을 향하여 서서히 이동하였다. 즉 절연파괴 후 고전압을 다시 인가하는 시간이 짧을수록,  $V_B$ 는 분해생성물의 영향을 더욱더 받게 된다. 그러므로, E-method 2를 기반으로 하는 그림 4 (b)가 4 (a)보다  $V_B$  분산이 더 크게 되는 것이다.

그림 5는 절연파괴 후 분해생성물의 분포를 보여준다.

그림 4 (b)는 연속적인 절연파괴와 함께  $V_B$ 가 증가와 감소를 반복하면서 최종적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 특성은 진공 중 컨디셔닝 효과와 유사하다. 잇따른 절연파괴로 전극의 표면거칠기개선과 방전개시지점의 변화가 컨디셔닝 효과에 기인하므로, 그 효과는 절연파괴에 지배적인 요소가 전극인 조건에서 발생한다. 그림 4 (b)에서  $V_B$ 의 분산은 절연파괴 후 재차 전압을 인가하는 시간과 분해생성물의 영향이기 때문에 컨디셔닝 효과 보다는 절연매질인 광유의 고유한 절연특성이라 함이 더욱더 적합하다.



(a) E-method 1



(b) E-method 2

그림 4. 절연파괴 측정횟수에 대한 광유의  $V_B$   
Fig. 4.  $V_B$  on measuring number of breakdown in mineral oil

추가적으로 저자들은 액체 유전체의 절연파괴에 기인하는 인자를 고려하였다. 그 인자는 기포와 액체 유전체의 온도이다. 기포에 의한 절연파괴메커니즘은 외부열과 코로나 방전의 미약한 전류가 발생시키는 기포의 증첩과 거동이다[8-10]. 그리고 온도에 의한 절연파괴메커니즘은 온도의 상승이 분자들의 활발한 운동에 기인하여 전극 사이에 전자기동과 거동에 영향을 미치는 것이다. 본 실험에서 광유는 실험 온도 (7°C)에서 액체를 유지하기 때문에, 외부열의 침입으로 기포가 발생하지 않았다. 기포는 코로나 방전으로 생성되지만, 본 실험을 위한 전극계는 코로나 방전이 발생하기 어려운 구조이므로, 절연파괴에서 기포의 영향은 크지 않다고 판단된다. 그리고 첫 번째 절연파괴 전과 100번의 절연파괴 후, 광유의 온도는 각각 6.8°C와 7.3°C였으며 온도차이는 0.5°C였다. 이 온도변화는 절연파괴에 결정적인 인자가 되지 못한다. 따라서, 기포와 액체유전체의 온도변화는  $V_B$  분산에 관한 만족스러운 설명을 이끌기에 적합하지 않다.

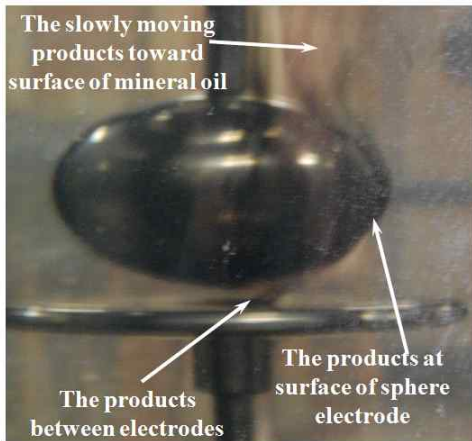


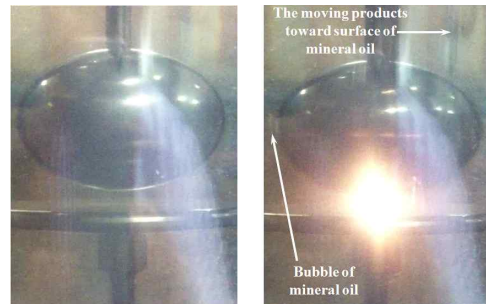
그림 5. 방전 후 구전극 표면과 전극사이에 분해생성물  
Fig. 5. Decomposition products of electrode environs after discharge

그림 4 (b)에서 타원으로 표시한 부분은 짧은 gap의  $V_B$ 가 더 긴 gap의  $V_B$ 보다 높게 나타남을 강조한 것이다. 이 특이한 절연특성은 분해생성물 거동과 함께 다음 항에서 설명할 것이다.

### 3.3 분해생성물의 거동과 절연파괴전압의 분산

3.2항에서  $V_B$  분산에 영향을 미치는 요소가 절연파괴 후 재차 전압을 인가하는 시간과 전극주위에 분해생성물임을 파악하였다. 본 항은  $V_B$  분산의 만족스러운 설명과 고찰을 위해, 분해생성물의 거동을 다룬다. 그 거동은  $V_B$  분산을 설명하는 중요한 요소이며, 방전로의 관측으로부터 분석하였다.

그림 6은 광유 중 첫 번째 절연파괴 시 방전로를 촬영한 사진이다. 첫 번째 절연파괴의 과정에서 특별한 방전현상은 나타나지 않았다. 부분방전 또한 발생하지 않았으며, 기포와 분해생성물은 절연파괴와 함께 발생하였다.



(a) AC HV 인가 중 (b) 절연파괴

그림 6. 광유 중 첫 번째 절연파괴에 대한 방전로  
Fig. 6. Discharge path on first breakdown in mineral oil (gap 5mm)

그림 7은 gap 5mm에서 E-method 2에 의한 절연파괴 중 촬영한 방전로를 보여준다. 분해생성물의 거동은 그림 6과 분명히 다르다. 그림 7 (a)는 분해생성물이 전극 사이에 집중한 후 인가전압의 증가와 함께 좌우 양쪽으로 확산하는 것을 보여주며 (패턴 1), 그림 7 (b)는 전극 사이에서 좌측으로만 확산함을 보여준다 (패턴 2). 이외에도, 그 생성물의 거동은 전극 사이에서 좌우로 움직이다가 양쪽이나 한쪽 방향으로 확산하는 경우가 (패턴 3) 존재하였다. 패턴 3은 약 40번의 절연파괴를 경유하여 나타났지만 40번의 절연파괴로 발생한 분해생성물이 구전극과 전극 사이를 에워싸기 때문에 패턴 3은 촬영하기 어려웠다. 그리고 그림 6과



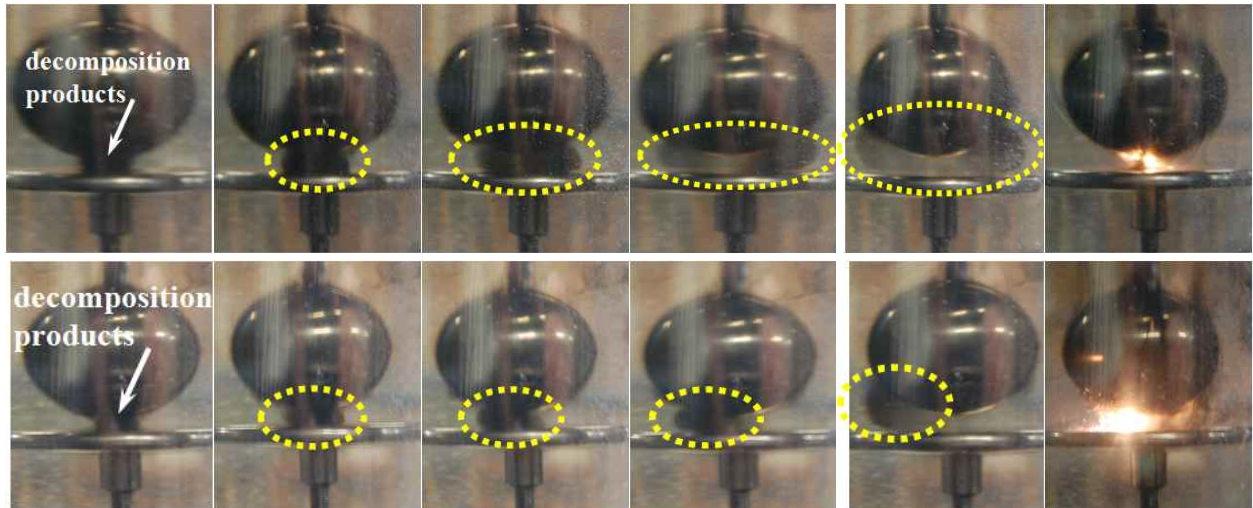


그림 7. 20-30번 사이의 절연파괴에서 관측한 분해생성물의 거동과 방전로 (gap 5mm)

Fig. 7. Decomposition products behavior and discharge path observed between 20-30 times of breakdown (gap 5mm)

같이 절연파괴의 진전과정동안 부분방전과 기포는 발생하지 않았다. 이러한 현상은 부분방전과 기포가 분해생성물 거동에 영향을 미치지 않는 것으로 해석할 수 있다.

표 2. 분해생성물 거동패턴에 관한 특성과 절연파괴 데이터(gap 5mm)

Table 2. Properties and breakdown data on behavior patterns of decomposition products(gap 5mm)

분해생성물 거동패턴	거동특징	$V_B$ 의 값 [kV] / 절연파괴 구간
패턴 1	전극사이에 집중 후 양방향으로 확산	25-32 / 20-80
패턴 2	전극사이에 집중 후 한방향으로 확산	25-30 / 10-80
패턴 3	전극 사이에서 좌우 거동 후 한쪽, 양쪽으로 확산	40-57 / 40-80

표 2는 gap 5mm에서 언급한 각각의 패턴에 관한  $V_B$ 의 값, 거동특징, 그 거동을 보이는 절연파괴 횟수의 범위를 정리하였다. 그 결과  $V_B$ 는 분해생성물의 거동패턴과 관계가 있음을 명백하게 알 수 있다. 그리고

그 거동패턴은 절연파괴 횟수로 구분되며, 패턴 1-3은 각각 20, 10, 40번의 절연파괴 후에 나타났다. 게다가,  $V_B$ 의 값 또한 그 거동패턴별로 차이가 발생하였으며  $V_B$ 는 거동패턴 3에서 가장 높았고, 패턴 2에서 가장 낮았다.

그림 7과 표 2로부터 절연파괴발생과 분해생성물의 확산소요시간을 추측할 수 있다. 절연파괴발생은 전극 사이에 분해생성물이 확산된 후 발생하였고, 분해생성물의 확산소요시간은 패턴 3이 가장 긴 것이 자명하다. 따라서 분해생성물의 양이 많고, 분해생성물의 확산소요시간이 길수록  $V_B$ 가 높으며, 연속적인 절연파괴는 분해생성물의 양과 거동패턴 3이 나타나는 확률을 증가시킨다. 언급한 고찰로부터 gap 5mm에서  $V_B$ 의 분산은 다음과 같이 구체적으로 해석할 수 있다.

- 1) 절연파괴횟수 0-10 : 분해생성물이 형성되나 그 영향이 미비하여 일정한  $V_B$ 로 나타난다.
- 2) 절연파괴횟수 10-40 : 분해생성물의 양이 증가하여 거동패턴 1과 2에 의해  $V_B$ 의 분산이 나타난다. 표 2에서 거동패턴 1과 2에 기인한  $V_B$ 값은 차이가 거의 없으므로, 이 구간의  $V_B$ 분산은 거동패턴보다는 그들 패턴에서 확산소요시간에 더 의존하게 된다.

- 3) 절연파괴횟수 40-80 : 거동패턴 1-3이 혼재하는 구간으로  $V_B$  분산은 거동패턴으로부터 최대 32kV이다. 그 분산의 경향은 거동패턴과 확산소요시간에 의존하기 때문에 언급한 두 구간보다 더욱더 현저하게 나타나게 된다.

마지막으로 더 짧은 gap에서  $V_B$ 가 더 높은 특이현상이 있음을 3.2항에서 언급하였다. 이러한 특이현상은 거동패턴과 분해생성물의 확산시간에 기인하는 것으로 판단된다. 짧은 gap에서 더 긴 확산시간을 가지는 거동패턴 3이 나타나고, 긴 gap에서 더 짧은 확산시간의 거동패턴 1이나 2가 나타나면 그 특이현상이 초래된다. 그림 4 (b)로부터 이 특이현상은 40번의 절연파괴 후에 나타날 확률이 높음을 확인할 수 있다. 절연파괴 횟수에 대한 특이현상은 일정한 패턴을 가지고 나타나지 않는다. 이는 거동패턴과 확산소요시간이 연속적인 절연파괴과정에서 불규칙적으로 나타난다는 것으로 해석할 수 있다. 더욱이 절연파괴 횟수에 따른 거동패턴과 확산시간의 일정한 관계는 본 실험의 결과만으로 도출하기 어렵다.

#### 4. 결 론

본 논문은 주상변압기의 절연매질인 광유 중 절연파괴전압의 분산에 대하여 집중적으로 연구하였다. 본 논문의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 저자들이 제안한 실험기법은 (E-method 2) 광유의 절연특성에서 절연파괴로 인한 분해생성물의 영향을 확인하는데 유효하였다.
- 2) 절연파괴로부터 발생한 분해생성물은 구전극 표면과 전극 사이에 분포하였고, 시간이 경과함에 따라 광유의 표면으로 서서히 이동하였다.
- 3) E-method 2에 의한 절연파괴실험은 광유 중 절연파괴전압의 분산을 초래하였고, 그 분산에 영향을 미치는 요소는 잇따른 절연파괴에서 발생한 분해생성물임을 확인하였다.
- 4) 분해생성물의 거동패턴은 세 가지가 존재하였고, 그 패턴에 의한 절연파괴전압의 차이는 5mm gap에서 최대 32kV였다. 그 전압의 차이는 분해생성물의 거동, 확산시간 및 그 양과 관련된다.

- 5) 분해생성물의 거동패턴과 확산시간은 광유 중 절연파괴전압분산의 특성을 해석, 설명하는데 유용하였고, 뚜렷한 절연특성을 보이는 세 구간을 명확히 구분가능하게 하였다.
- 6) 더 짧은 전극 거리를 가지는 경우가 더 긴 경우보다 절연파괴전압이 높게 나타나는 특이현상이 관측되었는데, 이러한 현상은 분해생성물의 거동패턴과 확산시간에 의해 초래되었다. 그 특이현상은 40번을 초과하는 절연파괴횟수에서 더욱더 잘 나타나는 경향을 보였다.

본 논문의 결과는 변압기 절연유의 유전특성을 고찰하는데 활용할 수 있으며, 향후 연구는 불평등 전계에 대한 절연유의 절연특성과 분해생성물 거동에 관한 깊은 연구가 필요하리라 판단된다.

본 연구는 중소기업청 첫걸음기술개발사업 (C0103793)의 지원으로 수행하였으며 관계부처에 감사드립니다.

#### References

- [1] A. K. Vijn, "Electric Strength and Molecular Properties of Gaseous Dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-12, No. 4, pp. 313-315, 1997.
- [2] A. R. Martinez, and H. Sobral, "Effect of the Pressure on the Development of an Impulse Arc in CO<sub>2</sub>", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 17, No. 5, pp. 1536-1542, 2010.
- [3] Y. Hoshina, M. Sato, M. Shiiki, M. Hanai and E. Kaneko, "Lightning impulse breakdown characteristics of SF<sub>6</sub> alternative gases for gas-insulated switchgear", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 153, No. 1, pp. 1-6, 2006.
- [4] H. Goshima, S. Okabe, T. Ueda, H. Morii, N. Yamachi, K. Takahata and M. Hikita, "Fundamental Insulation Characteristics of High-Pressure CO<sub>2</sub> Gas for Gas-Insulated Power Equipment - Effect of Coating Conductor on Insulation Performance and Effect of Decomposition Products on Creeping Insulation of Spacer -", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 15, No. 4, pp. 1023-1030, 2008.
- [5] S. Okabe, H. Goshima, A. Tanimura, S. Tsuru, Y. Yaegashi, E. Fujie and H. Okubo, "Fundamental Insulation Characteristic of High-Pressure CO<sub>2</sub> Gas under Actual Equipment Conditions", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 14, No. 1, pp. 83-90, 2007.
- [6] D. Rodriguez, R. S. Gorur and P. M. Hansen, "Effect of Humidity on the Breakdown Characteristics of Air in Uniform Field for the Very Low Frequency (MLF) Band", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 16, No. 5, pp. 1397-1403, 2009.

[7] D. Rodriguez, R. S. Gorur, P. M. Hansen, "Effect of Humidity on the Breakdown Characteristics of Air in Non-uniform Fields at 30 kHz", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 17, No. 1, pp. 45-52, 2010.

[8] K. S. Lee, D. I. Lee, J. H. Ju, Y. G. Lee and E. C. Shin, "A Study on the Discharge Characteristics of Liquid Nitrogen at Atmospheric Pressure", Trans KIEE, Vol. 45, No. 7, pp. 1026-1032, 1996.

[9] E. H. Choi, K. C. Kim and K. S. Lee, "Breakdown Characteristics of SF<sub>6</sub> and Liquefied SF<sub>6</sub> at Decreased Temperature", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 765-771, 2012.

[10] K. S. Park, H. Y. Shin, B. J. Choi, W. J. Park and K. S. Lee, "The Characteristics of Tracking Phenomena and Surface Discharge Using Various Types of Electrode Arrangement in LN<sub>2</sub> at the Atmospheric Pressure", Journal of KIEE, Vol. 17, No. 3, pp. 49-55, 2003.

[11] M. Hara, K. Satia, and H. Satio, "Analysis of Bubble Behavior in Cryogenic Liquids under Non-Uniform Electric Fields", T. IEE Japan, Vol. 113-A, No. 4, pp. 337-344, 1993.

[12] B. S. Sommers, J. E. Foster, N. Y. Babaeva and M. J. Kushner, "Observations of Electric Discharge Streamer Propagation and Capillary Oscillations on the Surface of Air Bubbles in Water", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 44, pp. 1-6, 2011.

[13] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A. J. Schwabe, H. Yamashita, K. Y. Amazawa, M. Danikas, W. G. Chadband and Y. Torshin, "Propagation and Structure of Streamers in Liquid Dielectrics", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No. 2, pp. 6-17, 1998.

[14] Y. Kamata and Y. Kako, "Flashover Characteristics of Extremely Long Gaps in Transformer Oil under Non-Uniform Field Conditions", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-15, No.1, pp. 18-26, 1980.

[15] H. Borsi, "Dielectric Behavior of Silicone and Ester Fluids for Use in Distribution Transformers", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 26, No. 4, pp. 755-762, 1991.

[16] I. Fofana, H. Borsi and E. Gockenbach, "Fundamental Investigations on Some Transformer Liquids under Various Outdoor Conditions", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 8, No. 6, pp. 1040-1047, 2001.

[17] J. Wada, A. Nakajima, H. Miyahara, T. Takuma, S. Yanabu, S. Okabe and M. Kohtoh, "Surface Breakdown Characteristics of Silicone Oil for Electric Power Apparatus", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 13, No. 4, pp. 830-837, 2006.

[18] Korea Standards Association, "Electrical insulating Oils", KS C 2301, 2006.

[19] Korea Standards Association, "Insulating Liquids-Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency-Test Method", KS C IEC 60156, 2003.

[20] IEEJ, "Discharge Handbook", IEEJ Discharge Handbook Publication committee, pp. 553-558, 1998.

◇ 저자소개 ◇



**임동영 (林東永)**

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. (주)형진연구소장.



**박승규 (朴崇圭)**

1964년 9월 7일생. 2002년 영남대 전기공학과 졸업. 2008년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주)신덕엔지니어링 대표.



**박철호 (朴徹鎬)**

1958년 12월 4일생. 2002년 영남대 전기공학과 졸업. 2006년 3월 한국전력공사 대구전력관리처 자문위원. 현재 (주)형진대표이사.



**김기채 (金基采)**

1959년 10월 19일생. 1984년 영남대학교 전자공학과 졸업. 1986년 일본 Keio Univ. 대학원 졸업(석사). 1989년 동대학원 졸업(박사). 1989~1993년 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원. 1993~1995년 일본 후쿠오카공업대학 조교수. 현재 영남대학교 전기공학과 교수. 한국전자파학회 명예회장.



**이광식 (李廣植)**

1948년 10월 25일생. 1971년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전 고전압 연구회 간사장 역임. 현재 본 학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 명예교수.



**최은혁 (崔殷赫)**

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국폴리텍 VI대학 대구캠퍼스 스마트전기과 교수.