

창립
40주년 학술대회
논문 87-H-20-2

절연내력에 미치는 주변효과의 방지에
관한 연구

오 국 의 보*
송실대 교수

신 의 응**
한국전력공사 부장

A study on the prevention of edge effect
reducing dielectric strength

Hee-Ro Kwak
Soong Sil Univ.

Hee-Yong Shin
KEPCO

Abstract

The test cell for preventing the edge effect reducing the intrinsic breakdown strength of polypropylene film and measuring the intrinsic breakdown strength of the film was developed. The new approach was to develop an electrode system with an edge region which is carefully graded over an extended distance. The new test arrangement employed a central circular electrode at high voltage and a set of nine concentric surrounding rings each controlled in potential by external grading resistors to be at decreasing potentials from that at the center in 10% increments. Two different size structures using the same basic principle were tried and were both found to be successful. The test electrodes were manufactured using standard printed circuit technology and were chosen to be copper on high dielectric constant G10 board.

1. 서 론

고체유전체의 전기적 특성을 평가하는 데는 여러가지 요소가 있으나 고전압 전기기기에 절연물로서 사용될 경우 절연내력은 가장 중요한 특성 중의 하나이다.

고체절연물의 절연내력을 측정할 경우 보통 판상 시

료를 사용하며 그 면에 금속 전극을 밀착시켜 전압을 인가하고 절연파괴될 때 까지 전압을 상승시켜 측정한다. 절연파괴전압을 시료의 두께로 나누어 [KV/cm] 또는 [KV/mm]로 보통 표시되어진다.

그러나 시료가 절연파괴되어 관통한 구멍은 대개 전극의 주변 또는 거기서 떨어진 부분에서 발견된다. 또한 관통되기전 주변에서 유중 코로나가 발생하고 유중 코로나에 의해 파괴가 촉진된다.

이러한 주변효과 때문에 진성절연내력을 구하는 것은 용이하지 않다.[1][2]

진성절연내력을 얻기 위하여 그 동안 많은 연구가 진행되어 많은 논문이 발표되었으나[3][4][5] 대부분 실험실에서 진행된 것이고 현장에서 실용되기에는 시료제작이 어렵고 전극 제사용이 곤란하고 면적효과를 얻기가 곤란하므로 IEC, JIS, KS 규격 등에 규정된 전극구조[6][7][8]로 현장에서는 절연내력을 시험하나 규격에 규정된 전극구조를 사용시 주변효과 때문에 진성절연내력보다 훨씬 낮은 값에서 절연파괴가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 평판전극 주위의 전계분포를 균등하게 하기 위하여 동축 환형 전극들을 사용함으로써 주변효과를 방지하여 진성절연내력을 얻는 전극구조를 고안 제작하여 실용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 주변효과 방지에 대한 고찰

그림.1(a)와 같은 전극구조 사용시 주변효과 때문에

절연내력에 미치는 주변효과의 방지에 관한 연구

진성절연과괴전압보다 훨씬 낮은 값에서 고체유전체의 절연과괴가 발생한다.[1][2]

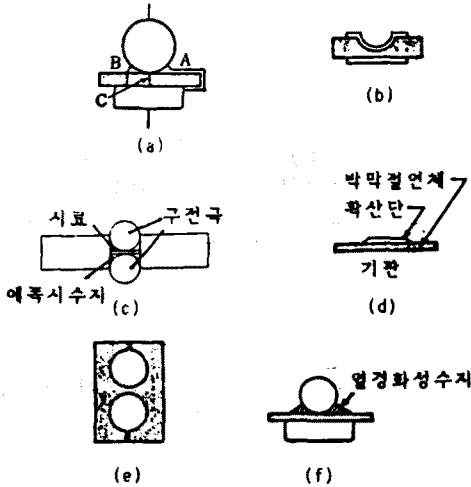


그림 1. 각종 전극구조

Fig. 1. Various Electrode System

주변효과를 방지함으로써 진성절연내력을 구하기 위하여 Vermeer[3]는 그림.1(b)와 같은 recessed시료를 사용하여 진성절연내력에 근사한 값을 얻었으나 전계가 가해진 부분의 냉각 문제와 시료의 제작 곤란 등 단점이 있다.

McKeown[4]은 그림.1(c)와 같이 두개의 구전극 사이에 시료를 넣고 구전극과 시료 사이에 주변효과를 방지하기 위하여 열경화성수지를 충전시킨 McKeown시료를 사용하여 recessed시료를 사용하여 얻은 절연내력보다 높은 진성절연내력을 얻었다.

또한 주변효과를 방지하기 위하여 그림.1(d)와 같이 금속증착 전극을 사용하여 만든 확산단형 전극(diffused edge electrode)[5]이 많이 사용되어지고 있다.

이 방법은 금속증착시 전극의 끝부분이 넓게 되어 이 부분의 전기저항이 증가하므로 끝부분의 고전계를 완화하는 효과 때문에 주변효과가 방지되어 진다.

그 이외에 그림.1(e)(f)등과 같은 다른 여러가지 방법이 있으나 진성절연내력을 얻는데 효과적이 못되어 별로 사용되고 있지 않다.

Recessed시료, McKeown시료, 확산단형 전극 방법 등은 진성절연내력을 얻기 위하여 실험실에서 많이 사용되어지고 있으나 시료 제작이 어렵고 전극의 재사용이

불가능하고 전극면적 부분만 전계가 인가되기 때문에 전력용 콘덴서 등과 같이 전계가 인가되는 면적이 큰 경우의 절연특성을 평가하기는 곤란하다.

이와 같은 시료제작의 어려움을 극복하고 전극의 재사용이 가능하고 면적효과를 얻기 위하여 실용상 전극 가장자리 모서리는 원형으로 만든 평판-평판 전극[6][7][8]을 사용하여 얻은 값을 같은 실험조건하에서 상대비교하므로써 진성절연내력이 아니더라도 재료 상호간 비교 또는 균질성을 알아내는 목적에 이용되고 있다. 그러나 이러한 절연내력은 진성절연내력보다 훨씬 낮은 값에서 절연과괴가 발생되므로 절연 특성을 평가하는 방법으로 적합하지 않다.

3. 실험

(1) 방사상 전계 그레이딩 전극 구조

평판-평판전극에 고체유전체를 삽입하고 전압을 인가하면 전속밀도는 그림.2와 같이 분포된다.[10]

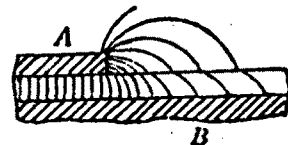


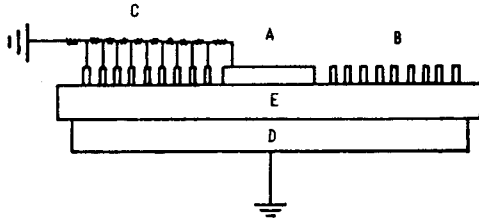
그림 2. 평판-평판전극의 전속밀도 분포

Fig. 2. Flux Density Distribution of plane-plane electrode

그림.2에서와 같이 전극 끝부분의 전속밀도가 다른 곳에 비하여 훨씬 크므로 전압을 점점 증가할 경우 전극 끝부분의 전기장도가 점점 크게 되어 크로나가 발생한다. 이와 같은 주변효과 때문에 고체유전체의 진성절연내력보다 훨씬 낮은 값에서 절연과괴된다.

본 실험에서는 주변효과를 방지하고 진성절연내력을 측정하기 위하여 Test Cell이 개발되었다. 현재까지 사용되어 왔던 진성절연강도 측정을 위한 Test Cell들을 검토하고 단점을 보완하기 위하여 새로운 방법이 시도되었다. 새로운 방법은 전극주변의 전계 집중현상

을 방지하고 전계분포를 균등하게 하기 위한 새로운 그레이딩전극(graded electrode) 구조를 고안, 제작하였다. 새로 고안, 제작된 전극구조를 그림.3에 나타내었다.



- A : 중심전극 (center electrode)
- B : 그레이딩·링 (grading ring)
- C : 저항 (resistor)
- D : 접지전극 (ground electrode)
- E : 시료 (sample)

그림 3. 주변효과 방지용 방사상 전계 그레이딩 전극구조

Fig. 3. Radial Stress Graded Electrode system for the prevention of edge effect

그림.3에서 전극구조는 평판-평판전극이며 고전압측 중심전극은 직경 1" (25.4mm) 이고 재질은 구리이다. 그리고 그레이딩·링도 중심전극과 같은 재질인 구리를 사용하였으며 주변효과를 방지하고 전계분포를 균등하게 하기 위하여 고전압측 중심전극 주위에 9개의 동축 그레이딩·링을 사용하였으며 중심전극과 첫번째 그레이딩·링 사이, 그레이딩·링과 그레이딩·링 사이 및 9번째 그레이딩·링과 접지 사이에서 저항을 삽입하여 고전압측 중심전극 부터 접지 까지 전계분포가 10%씩 점진적으로 감소되도록 하였다. 즉 그레이딩·링 사이에 인가되는 전압이 전체 인가전압의 1/10이 걸리게 하였다. 따라서 중심전극과 첫번째 그레이딩·링 사이에 전체 인가전압의 1/10밖에 인가되지 않으므로 중심전극 가장자리에서의 주변효과를 방지할 수 있다.

또한 그레이딩전극구조를 2가지 종류로 제작하여 시험하였다. 큰 그레이딩 전극구조는 중심전극 직경을 25.4mm, 제일 바깥쪽 즉 9번째 그레이딩·링의 외경을

78mm로 하고 그레이딩·링의 폭을 약 2.0mm, 그레이딩·링과 그레이딩·링 사이의 간격을 약 1.0mm로 하였다. 작은 그레이딩 전극구조는 중심전극의 직경은 25.4mm 즉 큰 그레이딩 전극구조의 중심전극과 같은 크기이고 제일 바깥쪽 즉 9번째 그레이딩·링의 외경을 38mm, 그레이딩·링의 폭을 약 0.4mm, 그레이딩·링과 그레이딩·링 사이의 간격을 약 0.3mm로 하였다.

중심전극과 9개의 동축 그레이딩·링들은 표준회로 프린트 기술을 사용하여 고유전율 G10기판에 부착하였다.

(2) 실험 방법

본 실험에서 제작한 방사상 전계 그레이딩전극을 전력용 콘덴서의 절연특성실험에의 응용을 검토하기 위하여 전력용 콘덴서에 사용되는 castor oil 중에서 시료를 실험하였다. 시료는 10μm Polypropylene(PP) 필름을 사용하였으며 castor oil 속에서 시료를 그레이딩전극과 접지전극 사이에 삽입하고 전극과 시료 사이의 접을 제거하기 위하여 약 1.6kg의 무게로 상부전극에 압력을 가하여 약 10분간 방제한 후 직류전압을 인가하였다. 직류전압은 약 200V/sec의 속도로 절연파괴될 때 까지 상승시켰다.

절연내력은 절연파괴 전압을 시료 두께로 나누어 구하였다. 또한 주변효과 방지 여부를 확인하기 위하여 절연파괴에 의해서 관통된 구멍 위치를 절연파괴 발생 때 마다 관측하였다.

4. 결과 및 고찰

(1) 중심전극 직경이 25.4mm, 9번째 그레이딩·링의 외경이 78mm인 큰 그레이딩전극 구조를 사용하여 10μm Polypropylene(PP) 필름의 절연내력 실험한 결과를 표1에 나타내었다. 표1에 나타난 바와 같이 절연파괴되어 관통한 구멍의 위치는 전극 가장자리에서 안쪽으로 1 - 5mm 거리에 위치하고 있다.

보통 평판-평판전극에서 절연내력을 시험하면 주변효과 때문에 전극 가장자리 또는 가장자리에서 바깥으로 떨어진 부분에서 발견되나, 본 실험에서 그레이딩 전극을 사용하여 실험한 결과는 관통 구멍이 가장자리 안쪽에서 발견되었으므로 주변효과를 방지할 수 있음이 확인되었다.

절연내력에 미치는 주변효과 방지에 관한 연구

표1. PP 필름의 절연내력 및 관통위치 (큰 그레이딩 전극 사용)

| No. | 시료 두께 [μm] | 절연파괴 전압 [KV] | 절연내력 [MV/cm] | 관통위치 (전극주변에서) |
|-----|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1 | 10 | 6.70 | 6.70 | 3mm 안쪽 |
| 2 | " | 6.79 | 6.79 | 1mm 안쪽 |
| 3 | " | 7.14 | 7.14 | 5mm 안쪽 |
| 4 | " | 7.14 | 7.14 | 2mm 안쪽 |
| 5 | " | 6.20 | 6.20 | 3mm 안쪽 |
| 평균 | | 6.79 ± 0.39 | 6.79 ± 0.39 | |

또한 10 μm Polypropylene(PP) 필름 시료 5개의 절연내력의 평균치는 6.79 ± 0.39 [MV/cm]이다. 이러한 절연내력 값은 기 발표된 전성절연내력치와 유사하므로 본 실험에서 제작한 그레이딩전극으로 전성절연내력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그리고 표준편차 0.39 [MV/cm]는 절연내력평균치 6.79 [MV/cm]의 약 5.7% 이므로 절연내력이 거의 균일하고 같은 전극을 여러 개 사용하여도 절연내력의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

(2) 중심전극 직경이 25.4mm, 9번째 그레이딩·링의 외경이 38mm인 작은 그레이딩전극 구조를 사용하여 10 μm Polypropylene(PP) 필름의 절연내력을 실험한 결과를 표2에 나타내었다. 표2에 나타난 바와 같이 5개 중 4개 시료의 절연파괴되어 관통한 구멍의 위치는

표2. PP 필름의 절연내력 및 관통 위치 (작은 그레이딩전극 사용)

| No. | 시료 두께 [μm] | 절연파괴 전압 [KV] | 절연내력 [MV/cm] | 관통위치 (전극주변에서) |
|-----|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1 | 10 | 6.03 | 6.03 | 5mm 안쪽 |
| 2 | " | 6.96 | 6.96 | 전극주변 |
| 3 | " | 6.50 | 6.50 | 3.5mm 안쪽 |
| 4 | " | 6.72 | 6.72 | 1.5mm 안쪽 |
| 5 | " | 6.81 | 6.81 | 6mm 안쪽 |
| 평균 | | 6.60 ± 0.36 | 6.60 ± 0.36 | |

전극주변에서 1.5 - 6mm 안쪽으로 위치하고 있어 앞에서 언급한 큰 그레이딩전극의 실험결과와 유사하나 1개 시료만이 전극주변에서 발생하였다. 이것은 확률적으로 전극주변에서 발생할 수도 있으므로 주변효과에 의한 절연파괴되는 생각되지 않는다. 따라서 38mm의 작은 전극구조를 사용한 실험 결과에서도 주변효과가 방지되었음을 알 수 있다.

또한 10 μm Polypropylene(PP) 필름 시료 5개의 절연내력 평균치는 6.60 ± 0.36 [MV/cm]이므로 이 값은 78mm의 큰 전극구조를 사용하여 얻은 결과와 비슷하다 따라서 작은 전극구조를 사용하여도 전성절연내력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그리고 표준편차 0.36 [MV/cm]는 절연내력평균치 6.6 [MV/cm]의 5.6% 이므로 78mm의 큰 전극구조와 거의 비슷한 결과를 얻었다.

5. 결 론

주변효과를 방지하기 위한 방사상 전계 그레이딩전극구조를 고안 제작하여 전성절연내력 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중심전극에 방사상으로 9개의 전계 그레이딩·링을 사용하여 주변효과를 방지할 수 있음이 확인되었다
- (2) 방사상 전계 그레이딩전극 구조를 사용하여 Polypropylene(PP) 필름의 절연내력 측정결과 가장 외측 그레이딩·링의 외경이 78mm인 경우 6.79 [MV/cm], 38mm인 경우 6.60 [MV/cm]을 얻어 전성절연내력에 유사한 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 절연내력 측정값들의 표준편차가 각각 0.39 [MV/cm] 및 0.36 [MV/cm] 측 평균치의 약 5.7% 및 5.6% 이므로 동일한 전극을 재사용할 수 있음이 입증되었다.

참 고 문 헌

- (1) 犬石嘉雄 外3人, 誘電表現叢論, 日電氣学会 1983, pp 259 - 299
- (2) L.L. Alston, High-Voltage Technology, Oxford Univ. Press, 1968, pp 144 - 157

- (3) J. Vermeer, "The impulse breakdown strength of Pyrex glass", Physica 20, 313 (1954);
"The electric strength of glasses with different of glass at high field-strength", Ibid.22, 1257(1956); "On the relation between ionic conductivity and breakdown strength of glass", Ibid.22, 1269 (1956)
- (4) J.J. McKeown, "Intrinsic electric strength of organic polymeric dielectrics", Proc. Instn. elect. Engrs, 112, 824 (1965)
- (5) M. Yoshimura, M. Nishida and F. Noto, "Dielectric breakdown of Polyethersulfone (PES) film under DC voltage conditions", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. EI-17, No.4, pp 359 - 362, 1982
- (6) KSC 2105
- (7) JISC 2120
- (8) IEC 394
- (9) 家田正文, 高电压工学, 才人社 1985, pp 36 - 55
- (10) 정성계, 이덕출, 고전압공학, 문운당, 1982, pp 171 - 200