

Corona방전에 의한 유전체의 열화현상

The Deterioration Phenomena for Dielectrics Causing Corona Discharge

논 문
19~6~4

성영권* 백영학** 차균현***

(Yung Kwon Sung, Yung Hak Pack, Kyun Hyun Tchah)

[ABSTRACT]

The object of this project is to manifest the mechanism of deterioration phenomena for dielectrics causing corona discharge and applies it for determine the standard corona detection technique. As the results, we observed that corona discharges may occur more strongly around cylindrical shape electrode in air than hemisphere shape electrode in vacuum, so that it depends on effects such as shape of the electrode, moisture, surface conditions, etc. According to observed the deterioration of dielectrics takes place in following stages. At first the attacked surface by an electron avalanche is uniformly eroded; then pits are formed; after that sharp channels are formed which lead to break-down as a treeing. The test are accelerated with higher frequencies by the cylindrical bar shape electrode in the pulse stright detection method more sensitive than Lissajous patterns.

Lissajous patterns detection method is simple but usually insensitive and has disadvantage that the magnitude of the individual discharge is not measured.

1. 서 론

근래에 와서 전력기기 및 전력 Cable의 고압화 소형화의 경향에 따라 그것에 사용되는 전기절연재료에 요구되는 여러 성능도 고도화, 다양화로 되어 새로운 문제점이 많이 생기게 되었다.

특히 전력기기의 단기용량의 경향에 따라 절연물의 표면 및 내부 Void등에 발생하는 Corona의 해결에 관심이 쏟아져 세계각국에서 여러가지 방법으로 Corona방전에 의한 절연재료의 열화해결에 대해서 연구가 행해지고 있다. 또 절연재료의 성능의 실용적인 평가라는 점에서 재료의 내(耐) Corona성의 표준 시험법의 확립이 요망되고 각종의 시험법이 제안되고 있다.

그러나 이때까지 발표되고 있는 여러 연구성과를 정리 검토해 보면 실험방법 및 공시물(供試物)의 종류에 따라 그 결과가 대단히 복잡하고 더욱 실험조건에 미소한 차이에 의해 결과가 전연 달라져서 통측적인 표준시험법의 확립이 대단히 곤란한것 같다. 이와같은 시험법의 측정을 지지하는 원인으로서는 주로 Corona열화 또는 Treeing열화등이 각각의 조건에 따라 시료에

미치는 작용의 기구가 요소적으로 해명되지 않은 것에 있다. 가령 지금 Corona 열화의 과정을 요소적으로 도식화 하면 대체로 그림 1처럼 되어서 복잡한 요소가 혼합하여 가지각색의 결과가 생기는 것이 용이하게 이해된다. 특히 Treeing과 같은 불균일 열화는 예측불능한 불확정 요소를 가지고 현단계에서는 그 behavior에 대해서 현상적인 관찰등이 행해지고 있을 뿐이다.

우선 이와같은 Corona열화 또는 Treeing열화의 형식을 가지고 최종적으로 절연 구성물의 전로파괴(全路破壞)에 이르기 까지에는 열화전전과정과 최종절연파괴 과정이 중첩되어 작용하고 있을 것이나 이때의 Corona방전은 단지 고체의 유전체의 전계를 증강시키는 역할만을 하는것인지 또는 Corona방전속에서 생성된 하전입자가 고체내에 침입해서 고체의 절연파괴기구 그 자체에 Corona방전이 영향을 주는 것인지는 그 기본적 과정은 명확하지 않다.

최근 Boek씨(1)는 Corona열화 과정중에 기체방전공간에 생긴 전자가 고체내에 서서히 침입해서 그 공간전하에 의한 고체의 절연파괴를 보고하고 있다.

이상의 관점에서 우리는 우선 균일적인 열화기구의 개요를 명백히 해서 표준시험법을 확립시키기 위해 고체로서 대표적인 고분자의 Polyethylene을 또 표준적인 기체로서 공기를 택해서 공기와 Polyethylene으로

*정회원 : 고려대학교 이공대학 전기공학과교수

** " : 과학기술처

*** " : 체신부전기통신연구소

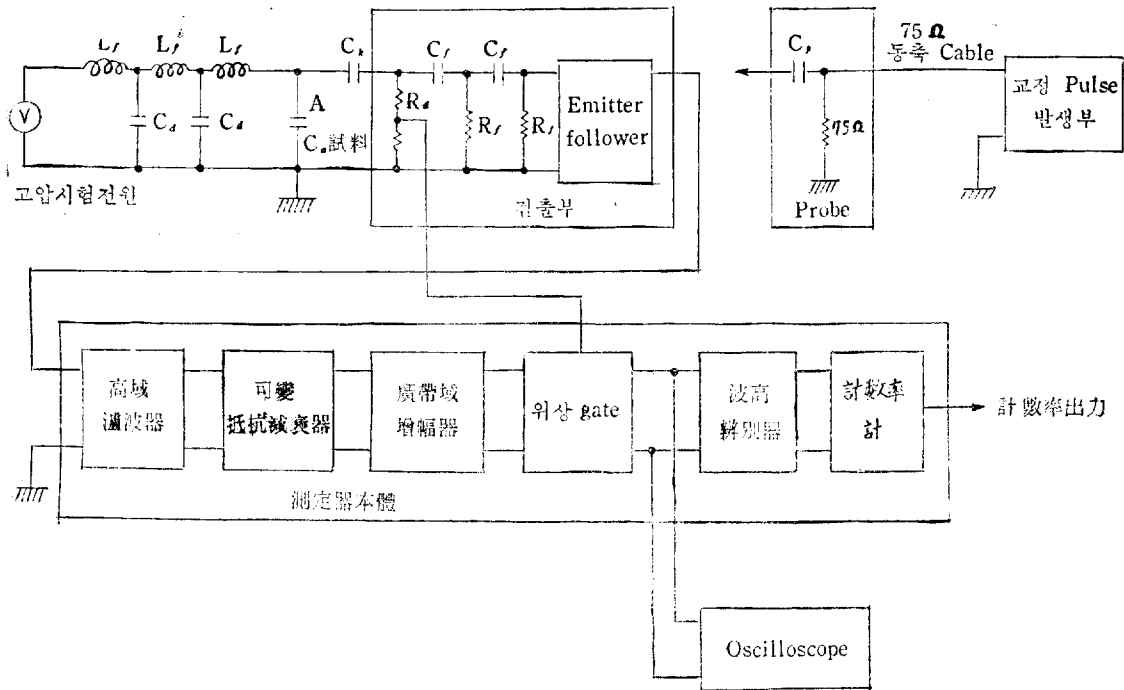


그림 3. Corona 방전 검출회로의 block diagram

측정은 측정장치 (그림 2)로 부터 C_1 에 corona 전류를 충전시켜 발생하는 전압 $V_c = Q/C_1$ 에 의해 구했다. C_1 의 값은 삼입 condenser 및 측정회로의 cable의 정

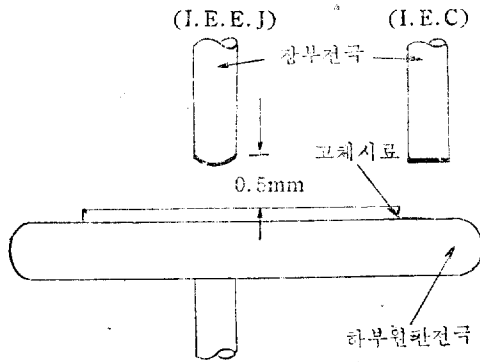


그림 4. 전극계의 기하학적 배치

와 Cryostat내에 놓아서 P_2O_5 로서 진공밀폐한 장치 공기속과 진공속의 두가지로 주위환경을 제어하여 적류 및 교류를 인가 방전시켜 시료가 파괴할때까지의 시간을 측정해서 여러가지 corona방전량을 측정하면서 절연체의 열화과정을 살폈다.

우선 corona방전에 의한 절보기의 방전 전하량의 Q

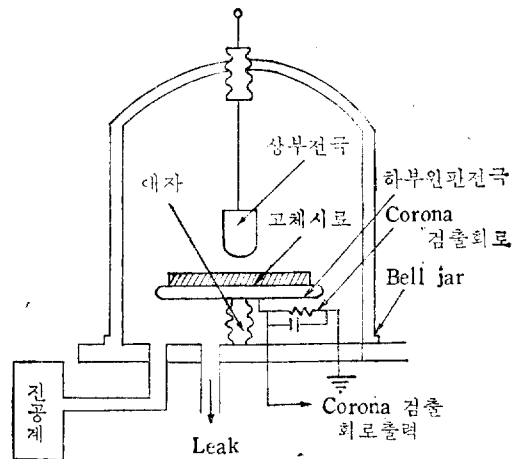


그림 5. 주위환경 제어장치

전용량 및 stray capacity를 포함한 실측치이다. 즉 검출회로와 synchroscope에서 구했다.

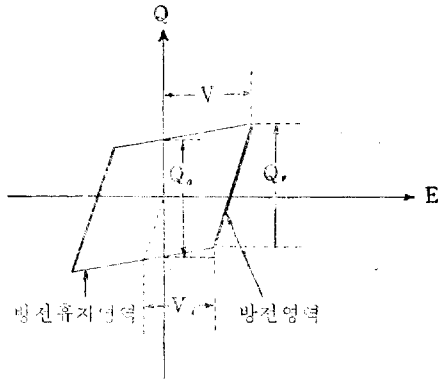
다음 corona pulse전압 V_c 도 역시 synchroscope로부터 구했다. 또 corona방전에 의하여 시료가 파괴될 때 까지의 총 방전량은 다음과 같이 해서 구했다.

즉 검출저항 R 에 나타나는 전압 V_c 는 방전전하량과의 사이에 $Q=V_c C$ 의 관계가 있어서 어떤 분포를 가진 corona방전은 R 위의 같은 분포의 전압을 발생시키기 때문에 VQ 의 분포를 구하면 Q 의 분포를 알수가 있다. 따라서 지금 그 방전전하 분포를 ΔQ 로 등분화해서 그 등분화에 대한 발생빈도 Δn 을 구해서 하나의 분할의 중앙치 $(Q+\Delta Q/2)$ 에 Δn 를 곱한것이 단위시간당 $Q \sim Q+\Delta Q$ 의 corona방전전하량으로 된다. 이것을 인가전압에 의해 corona가 발생할때 부터 파괴에 이르기까지의 시간에 대한 화(冊)를 구하면 파괴에 이르는 총 방전전하량이 구해진다.

또 열화(劣化)에 의한 절연파괴를 일으키기 까지의 수명은 corona방전에 의한 유전체의 열화율이 인가전압 주파수 f 와 전압인가 시간 t 의 곱에 비례하여 다음 식으로 나타나기 때문에 60Hz. 환산수명을 구하는 방법을 채용했다.

$$f_t = 7.2 \times 10^{10} (V_i / V)^{8.4}$$

여기서 V_i 는 corona개시전압 V 는 인가전압이다. 한편 위의 측정 및 계산값을 정확히 하기 위하여 그림6과 같은 Lissajous 도형을 관측하여 그 도형으로부터 방전전하량 방전에너지등을 구해서 앞에서 구한값과 비



- V : 인가전압(파고치)
- V_i : corona개시전압
- U : cycle당의 방전에너지 ($U=2V_i Q_0$)
- Q_0 : 반cycle당의 절보기 방전전하량
- Q_c : 반cycle당의 방전전하량

그림 6. Lissajous도형에 의한 corona강도측정법

교해서 정확도를 기했다.

또 corona방전에 의한 유전체의 열화율의 척도로써 열화가 진행함에 따라 시료의 두께가 얇아지므로써 시료의 파괴확률이 증가하기 때문에 같은 두께의 시료 N 개를 시험한 경우 그중에서 n 개가 파괴한 경우에 $n/N \times 100(\%)$ 를 파괴율로 정의하여 %절연파괴 전계를 구했다.

다음에 열화시료에 대해 X-ray diffraction-pattern을 측정하여 시료내부구조에 대한 지견(知見)도 어느정도 구했다.

3. 실험결과 및 검토

(i) Corona방전 전하량

여기서 사용한 두가지 전극계에 대한 기중(氣中) corona개시전압과 기압과의 관계는 그림 7과 같이 이때까지 보고되지 않은 금속간 불꽃전압의 값과 흡사하다. 이 기중 corona개시전압은 절보기의 방전전하량이

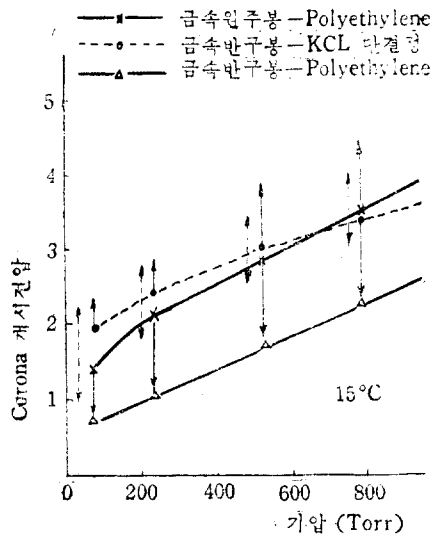


그림 7. 기중 Corona개시전압

synchroscope의 전압감도로 부터 약 $10^{-10}C$ 이상의 것이 발생하기 시작하는 전압이라고 하고 1~2Kv/min의 전압상승 속도로 직류전압으로 측정 한 것이다. 대체로 r 기구의 차로써 그런지 확실치 않으나 반구봉 전극이 원주전극보다 높다.

이에대한 상세한 이유는 앞으로 검토 할 문제로 둔다. 이러한 기중 corona방전 개시까지의 Time lag는 통계적인 Broadness를 나타내어 (5ms~20ms)대체로 90%까지는 5ms이하로 그사이의 인가전압의 저하는 대단히 적고 최대치에 대해서 1%이내였다. 또 corona방전 지속시간은 대체로 $10^{-8}s$ 이하이며 corona 방전에 의해 C에 발생하는 pulse 전압의 파두(波頭)는 상세하게는 관측하기 어려워 파형에 의한 corona방전의 성분해석은 다음으로 미루기로 했다.

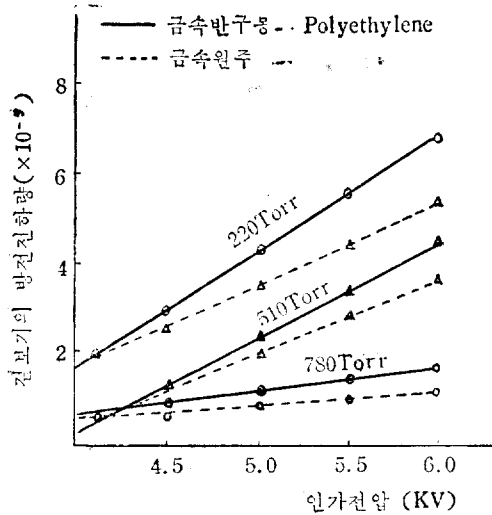


그림 8. 절보기 방전하량의 기압 및 인가전압에 의한 변화

이와같은 기중 corona의 절보기 방전하량은 그림 8에 나타난것 처럼 기압 및 전압에 따라 변화하여 기압이 낮을수록 또 전압이 높을수록 크게 나타난다. 이와같은 방전하량이 시간적 변화를 Corona pulse파형이나 Lissajous도형으로 부터 살펴보면 그림 9처럼 진공속에서는 비교적 안정하여 표 1에서 보는 바와같이 에너지 U 는 2×10^{-6} J/C/S 정도이다.

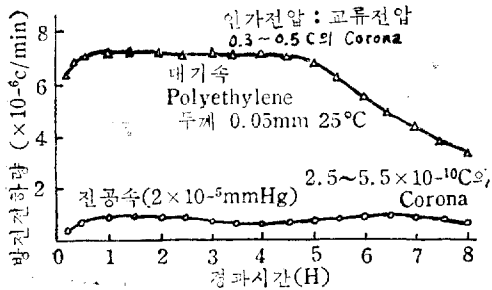


그림 9. 대기속 및 진공속에서의 Corona 방전하량의 시간적변화

그런데 여기서 Corona pulse파형에 의한 관측법과 Lissajous도형에 의한 관측법의 두가지 방법을 실험한 결과 Lissajous도형에 의한것은 방전의 발생원순 간혹 알수가 있으나 신뢰도가 문제가 되기때문에 다른 방법으로 다시 check 해야하는 것과 정확한 정량(定量)을 측정하지 못하는 결점이 있다.

다만 그 도형의 면적으로 대체로의 방전양상과 방전

표 1. Corona 방전량(Polyethylene 반구봉전극 4KV 60 C/S)

분위기	경과시간	V_1 (KV)	Q_1 $\times 10^{-9}$ C/½C/S	Q_2 $\times 10^{-9}$ C/½C/S	U $\times 10^{-5}$ (J/C/S)
공기	0	2.8	8.5	7.1	3.9
	1	2.9	8.3	7.2	4.2
	2	3.0	8.7	7.3	5.6
	5	2.9	8.2	7.1	4.1
속	7	3.3	6.5	6.1	4.0
	10	3.5	6.1	6	4.2
진	0	3.2	0.85	0.28	0.18
	1	3.2	0.5	0.42	0.27
공	2	3.1	0.45	0.38	0.24
	5	3.3	0.42	0.37	0.24
속	7	3.2	0.48	0.41	0.26
	10	3.2	0.45	0.38	0.24

량을 쉽사리 알수가 있다. 이에 비하여 corona pulse 파형에 의한 것은 대체로의 방전양상은 즉시로 파악하기 어려우나 방전이 나타나는 순간과 비교적 정확한 방전량을 구할수가 있다. 따라서 우리들은 거의 corona pulse파형에 의한 관측법으로 실험을 했다.

한편 대기속에서는 대체로 corona 방전의 시간과 더불어 6시간 정도까지는 비교적 안정하나 7시간 이후는 점차 감소하는 경향이 있다. 이것이 후술하는 바와같이 polyethylene film 자체가 corona 방전에 의해 표면으로부터 침식되어서 film 두께가 점차 얇어짐에 따라 전극간의 gap 길이가 증대해 감으로 V_1 가 높아지고 따라서 방전량이 감소한다고 생각한다.

(ii) Corona방전 열화에 의한 유전체의 절연파괴.

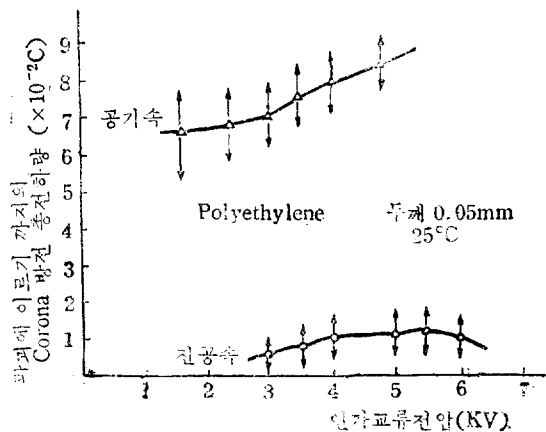


그림 10. Corona파괴에 이르기까지의 총 방전하량

그림 10은 corona방전 열화에 의한 시료의 절연파괴에 이르기까지의 총 방전전하량의 인가전압 특성이 다. 동일시료로서 대체로 변동계수가 50%정도로 비교적 크기 때문에 시간의 미소차를 검토할수가 없다. 그러나 공기속에서는 대체로 인가 전압과 더불어 corona 방전 총전하량이 상승해가는데 진공속에서는 그러한 경향이 나타나지 않고 총방전량의 포화현상을 나타내면서 파괴에 이른다.

한편 기중 corona방전을 일정하게 하기위하여 인가전압을 일정하게 고정시켜서 시료의 두께만을 바꾸어서 절연파괴강도 E를 변화시켰다. 즉 대기압(750torr) 인가전압(4.5KV)에 있어서의 파괴율과 시료 두께와의 관계에 대해서 종축(縱軸)에 파괴율, 횡축(橫軸)에 시료두께의 역수를 취한 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 보는 바와같이 최소 2승법에 의해 근사하면 대체로 직선으로 나타난다.

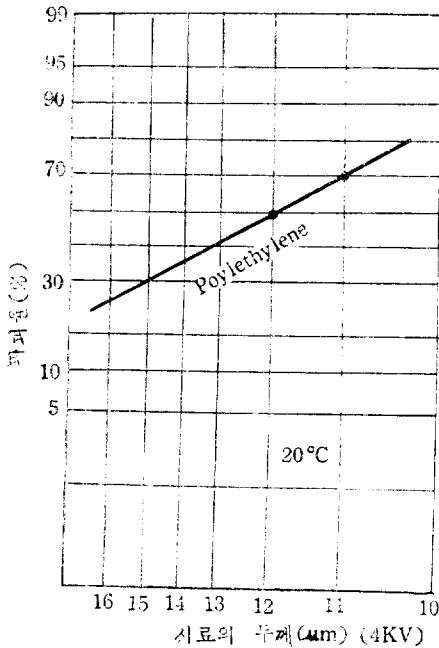


그림 11. 파괴율과 시료두께와의 관계

이 Data로부터 파괴율이 50%로 되는 시료의 두께를 구해서 그 두께로서 인가전압을 제한것을 50% 절연파괴전계라고하고 이 corona 방전열화에 의한 유전체의 절연파괴 강도와 그렇지 않은 급속간 유전체의 절연파괴강도의 인가전압 의존성을 비교해보면 그림 12처럼 나타나며 corona 방전 열화에 의한 파괴강도가 낮고 그것도 진공속보다는 대기속의 파괴강도가 인가전압의

상승에 따라 저하하는 현상이 나타난다. 또 진공속에서나 대기속에서나 파괴강도 전계계효과는 반구봉 전극보다 원주봉전극이 훨씬 낮다. 이와같이 Corona방전

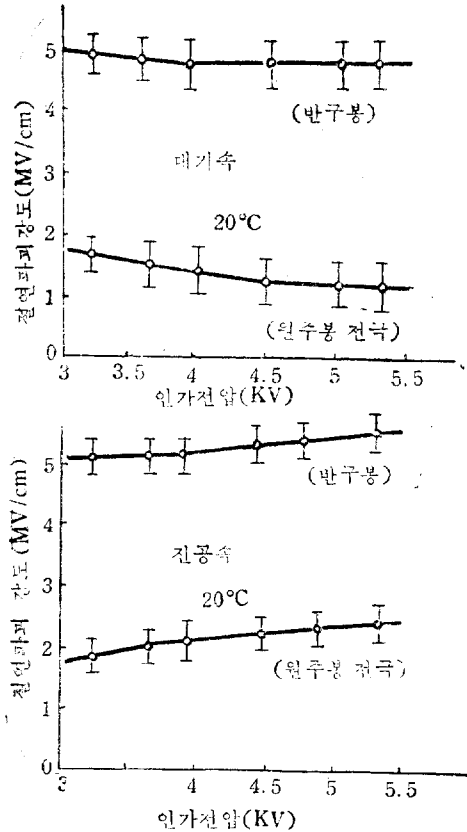


그림 12. 인가전압과 파괴강도와의 관계

열화에 의한 유전체 파괴강도가 낮은것의 이유로서는 전자침입에 의한 고체내의 공간전하형성과 아울러 열화에 의한 두께의 감소가 중첩되기 때문이라고 생각되며 Boeck(11) 씨가 보고한 열화과정에서의 고체내의 전자축적 효과와 후술하는 X-ray Diffraction pattern 측정에서 나타난 결정화도의 붕괴현상에 의한 실질적 절연두께의 감소 때문이라고 생각된다. 일반적으로 인가전압 V를 corona개시전압 이상으로 올리면 corona 방전 전력 $W=4\sqrt{2} fC, V_1 (V-V_1)$ 이 생겨 그 일부가 corona열화를 일으키게 하기때문에 corona열화는 인가전압주파수와 전압인가시간의 곱에 비례하는 것이 기대된다. 그림 13은 전압인가 시간에 의한 파괴전계와의 관계를 나타낸것으로 대체로 직선관계를 나

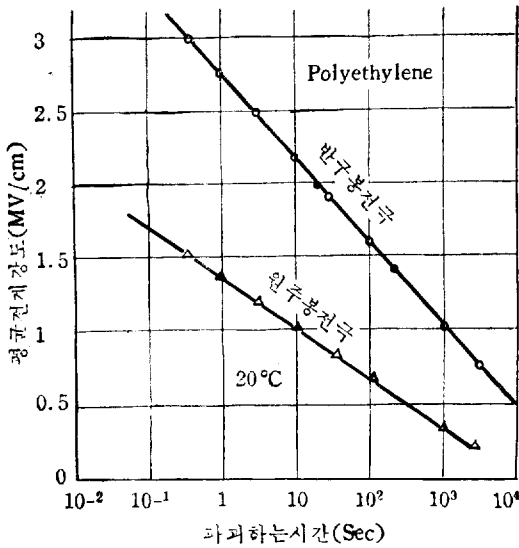


그림 13. 전압인가시간에 의한 파괴전계

타내며 반구봉전극이 원주봉전극보다 약 두배 크다. 이상의 실험결과로써 단시간내 corona(短時間耐 corona)시험법은 전주계로서 원주봉전극을 사용하고 인가 전압 주파수를 높여서 가속열화시험을 하는것이 좋다는것을 알수가 있다.

(iii) X-ray Diffraction pattern

corona방전에 의한 polyethylene의 열화기구를 결정

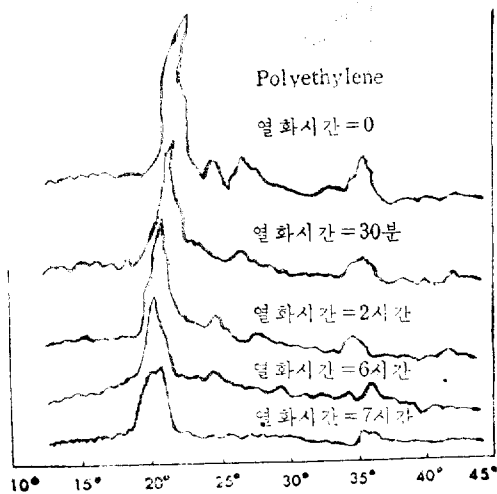
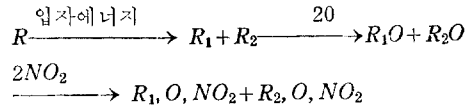


그림 14. X선 회절선

구조적으로 살펴기위해 corona 방전기간을 Parameter로한 시료의 X-ray diffraction pattern를 측정했다.

그 결과는 그림 14에 나타난것 처럼 corona방전 개시후 6시간 까지는 각각의 peak치(d=4.13A°, 3.72 A°, 2.47A°)가 점점 저하하며 파괴적전의 corona방전 열화에 있어서 peak치가 소멸해간다.

이러한 현상은 corona방전에 의해 polyethylene의 결정화도의 붕괴현상을 나타내는 것이며 그 결과가 그림 9에 나타난 corona방전 전하량의 시간 의존성의 시험결과 및 해석을 확증 시키고 있다. corona방전에 의해 polyethylene 결정화도의 감소는 주쇄(主鎖)에 대한 입자충격효과의 일부로서 다음과 같이 풀이 할 수가 있다. 즉 방전에 의해 여러가지 산화질소가 생기는데 이중에서 특히 2산화질소 [NO₂]는 17개의 하전자를 가지고 그하나는 부대전자(不對電子)로서 대단히 반응성이 커서 유리기(遊離基) 또는 불포화기(不飽和基)와 쉽게 결합한다. 따라서 입자충격작용과 공존해서



와 같은 산소의 직접적 부가작용이 크게 역할해서 초산 ester이 생성하므로 polyethylene이 침식(侵食)당하여 결정화도가 감소하는 열화과정이 생긴다고 생각된다. 물론 더욱 상세한 열화기구의 검토에는 I.R 및 E.S.R의 관측등에 의해서 과도적인 유틸기를 분석해서 해명해야 할 것이다.

결론

이상과 같이 우리는 유전체(주로 polyethylene)의 corona열화기구를 검토하여 내(耐) corona성 실용시험법 확립을 위한 자료를 얻기위해 I.E.C.제안의 원주전극과 I.E.E.J.제안의 반구봉전극에 의한 실험과 고찰을 행해왔다. 그 결과 treeing으로 인한 열화실험이나 void内の 내부방전에 의한 시험등 여러가지 남겨진 문제가 많으나 재료의 내 corona성 시험법의 실시나 corona방전에 의한 유전체의 열화기구에 대해서는 어느정도의 해명과 중요한 기초적 자료를 얻었다.

가령 내 corona성 시험법에 있어서 전극계(電極系)로서는 I.E.C.제안의 원주봉 전극보다 I.E.E.J.제안의 반구봉 전극이 수명이 길고 안전성이 좋다.

그러나 corona개시전압은 반구봉 전극이 훨씬높다. 따라서 내 corona성 시험을 단시간내로 결론을 얻기 위해서는 원주봉 전극을 쓰고 인가전압주파수를 높여서 가속열화시험을 하는 것이 편리하다.

또 내 corona성 시험의 corona열화나 Treeing의 진전(進展)기구의 영향을 적게하기 위해서는 void와 진

극단부(電極端部) 전계를 낮게 하면 어느정도 해결이 된다. 또한 내 corona성 시험의 최종과파단계의 절연 파괴 기구에 대해서는 그 단계에서 발생한 기중 corona 방전은 우선 저 1차 근사로서 방전주(放電柱)를 도체로 쓰고 전극전위를 polyethylene표면까지 이행(移行)시켜서 그 유전체의 표면을 침식함과 동시에 그 내부의 전계형성에 기여해서 파괴가 일어남을 암시했다.

이외에도 corona열화는 여러가지 인자가 중첩되어서 복잡한 현상을 나타내나 본 연구에서 그 요인이 어느 정도 명백해졌고 실험조건에 따라 결과가 변동하는 원인에 대해서도 약간의 정보를 얻었다. 따라서 본 연구결과는 내-corona성 시험법의 확립이나 그 시험에 있어서 큰 도움이 될것이다.

참 고 문 헌

- (1) W. Boeck:Electro Tech. Z(E.T.Z.)-A88., 64 7(1967)
- (2) T.W. Dakin:A.S.T. MS qec. Teck. Pub. 1 8. No.420 .1 (1967)
- (3) G.D. Cooper and M. Prober: J of Poly Scie. XLIV. 397 (1960)
- (4) J.H. Mason:Electrical Insulation 1, 68 (1956)
- (5) S. Zeledziowski:I.E.E.E. Trans Power Apparatus Syst. P.A.S.-87, 1397 (1968)
- (6) J. Banks et al:Proc. Instrum. Elect. Engrs. Paper, 4012(1962)
- (7) E. Baumann:Elektro Tech Z, 81, Feb.(1960)
- (8) W. K. Hogg. et al:J.S.I. 43, 11 (1966)
- (9) S. Whitehead:Dielectrics Breakdown of Solids(1951)Oxford Press.
- (10) R. Cooper. et. al:Nature 197, 633 (1963)
- (11) W.G. Oakes:J. Inst. Elect. Engrs. 95,39 (1948)