

論 文
34~12~1

# 高分子 絶縁材料의 트래킹 現象에 관한 研究

## A Study on the Tracking Phenomena of the Polymeric Insulating Material

崔 元 銀\* · 趙 基 善\*\* · 李 承 于\*\*\*  
(Won-Eun Choi · Ki-Sun Cho · Seung-U Lee)

### Abstract

This paper studies on the tracking phenomena by the IEC recommended method with various polymeric insulating materials which are used in industrial fields.

Under the same experimental condition, according to the materials it is observed that there are the type of tracking breakdown and the type of tracking erosion.

In the tracking breakdown type materials, the tracking breakdown is occurred at a small number of drops in creasing of test voltage and solution density.

In the tracking erosion type materials, the erosion depth is saturated or proportioned as increasing of test voltage and solution density.

### 1. 序 論

高分子 材料는 고분자 물질 구성에서 기대되는 우수한 電氣 絶縁性과 광범위하게 변화할 수 있는 기계적 특성 및 화학적 안정성이 높게 평가되어 각종 기기의 絶縁분야 및 電子部品の 지지물이나 구조물 등 여러 분야에 폭넓게 이용되고 있다.

이와 같이 高分子 材料가 여러 분야에 활용빈도가 많아짐에 따라 高分子 材料 자체의 電氣的 특성을 검토하는 것도 중요하지만 고분자 재료가 사용되는 주위 환경의 조건에 따라 劣化되어가는 현상을 규명하여 두는 것도 연구해야할 과제라 하겠다.

실제 고분자 재료가 옥내외에 사용되는 경우 먼지 등 불순물의 부착, 高 濕度, 監海性 분위기 및 부식성 가스 속에 있게 되므로써 표면이 汚損되면 漏洩抵抗이 저하하고 局部的으로 沿面に 전류가 흐

르며 主熱에 의해 그 液脈의 導電路가 分斷되어 微小發光放電(scintillation)이 발생하고 絶縁物 表面에 局部的인 炭化 生成物이 생긴다.

이러한 炭化 生成物이<sup>1)</sup>炭化導電路를 형성하므로써 트래킹 파괴가 일어나고 만다. 따라서 유기절연재료의 트래킹 파괴를 방지하기 위해서는 직접적인 원인인 微小發光放電의 발생을 억제하는 대책이 필요하다.

M. Nishida<sup>4)</sup> 연구팀은 트래킹 파괴는 微小發光放電의 발생으로 인하여 급격히 材料 表面이 炭化 劣化되므로써 생긴다고 제시하였고, 트래킹 劣化에 수반하는 放電의 發光에 대한 파장 분포를 기초로하여 트래킹 劣化<sup>3),4)</sup>과정을 검토하려고 시도하고 있다.

G. Sawa<sup>6)</sup> 연구팀은 微小發光放電이 熱源으로 작용하기 때문에 재료의 물질구조에 따라 微小發光放電이 증가되어 트래킹 劣化를 촉진하는 경우가 있음을 제시하였다.

J. L. Douglas<sup>11)</sup> 연구팀은 유기절연재료의 耐트래킹성은 재료 고유의 결합에너지에 좌우된다는 것으로 해석하고 있다.

이러한 트래킹 현상은 주로 고압인하선, 전력용

\*正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*正 會 員 : 柳韓工專大 電氣科 副教授 · 工博  
\*\*\*正 會 員 : 柳韓工專大 電氣科 講師  
接受日字 : 1985年 4月 12日

케이블의 단말, 배전선의 스페이서(spacer) 遮斷器나 油入閉開器의 접속부분 등 전기공작물에서 일어나기 쉬우며 최근에는 가전제품의 小型化, 輕量化 및 가격 저렴화에 수반하여 가전제품의 絶緣物에서도 트랙킹이 원인이 되어 絶緣破壞 사고나 절연물의 劣化가 종종 발생하기 시작하자 高分子 材料의 트랙킹現象에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다.

본 연구에서는 현재 실용화되고 있는 각종 高分子 絶緣材料들을 試料로 하고 IEC推獎法<sup>7)</sup>에 준한 실험방법에 의하여 트랙킹 현상을 규명한다.

試料에 따라 트랙킹 파괴가 일어나는 破壞形과 破壞가 일어나지 않고 浸蝕形으로 분류되며 破壞形에 대해서는 試驗電壓 및 電解液 농도 변화, 電解液 抵抗率의 溫度依存, 乾燥帶 形成時間과 滴下數 등의 변화에 따라 트랙킹 현상을 연구하였고 浸蝕形에 대해서도 試料表面의 劣化, 浸蝕깊이에 대한 電壓 및 電解液 濃度依存 등에 관해서 연구하였다.

## 2. 實驗

### 2.1 電極

電極의 材質로서는 白金을 사용하는 것이 바람직하나 본 실험에서는 黃銅을 사용하였다. 微小發光放電으로 인하여 전극표면이 탄화되거나 불순물이 부착되었기에 매 실험마다 電極表面의 부착물을 제거하고 규정된 형상을 갖기 위하여 오일스톤으로 연마하였다.

전극은 길이 97mm, 폭 5mm, 두께 2mm이며, 선단의 각도는 그림 1에 도시한 바와 같이 30°이다. 兩

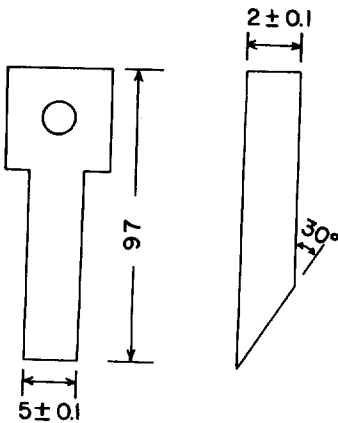


그림 1. 電極의 構造  
Fig. 1. Structure of electrodes.

전극은 시료면상에 4 ± 0.1mm의 간격을 두고 시료의 수직면에 대하여 대칭으로 배치하였다. 電極의 構造全景은 사진 1과 같다.

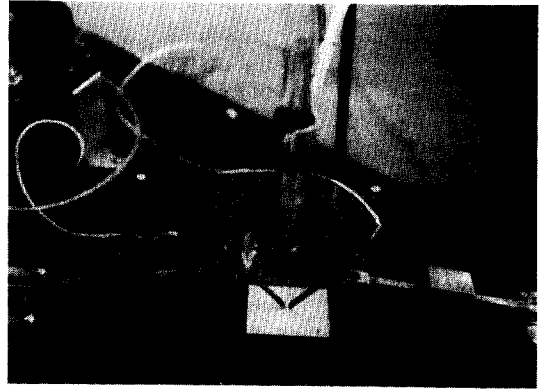


사진 1. 電極裝置의 全景  
Photo. 1. Photograph of electrodes apparatus

### 2.2 電解液과 滴下器

염화암모늄(NH<sub>4</sub>Cl)을 증류수에 용해시켜서 電解液으로 사용하였으며 濃度は 실험 목적에 따라 0.1 ± 0.01% ~ 0.5 ± 0.01%로 하고 저항율은 온도 23 ± 1°C에서 395 ± 5 Ωcm로 IEC추장법에 규정되어 있으므로 본 실험에서도 도전율계를 이용하여 위 규격에 맞도록 도전율을 조정하였다.

전해액 적하기는 30sec간격으로 일정량의 電解液(23mm<sup>3</sup>) 滴下할 수 있도록 설계 제작하였다. 적하기의 적하 노즐은 주사침(침의 직경 1.2φ)를 부착했고 소형전동기의 速度를 일정하게 1회轉시키므로서 연결된 레바가 전해액 용기와 연결된 고무주머니에 충격을 주어 압력이 전해액 용기에 전달되므로서 주사침을 통하여 滴下되도록 하였다.

### 2.3 試料

본 실험에 使用된 試料로서는 페놀류인 폴리염화비닐(PVC), 폴리카보나이트(PC), 알데히드류를 산 또는 알칼리로 縮合시켜 얻어진 폴리硬化性樹脂인 紙基材 페놀樹脂적층板(이하 PBP), FRP 등을 주로 사용하였다.

試料의 크기는 대체적으로 20 × 20mm<sup>2</sup>의 넓이로 일정하게 하였으나 두께는 시중에서 구입했기 때문에 PVC 3mm, PC 5mm, PBP 5mm, FRP 2mm로 사용하였다.

試料 表面은 에틸알콜로 깨끗이 닦은 후 恒온조에서 乾燥시킨 다음 사용한다.

2.4 實驗 方法

本 實驗에 사용한 實驗裝置의 회로도는 그림 2 에 도시한다.

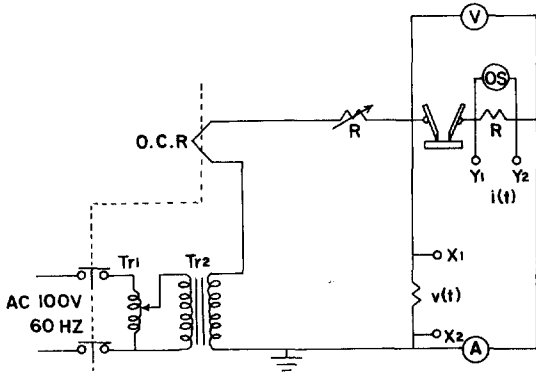


그림 2. 試驗回路  
Fig. 2. Experimental circuit.

본 장치에서 사용한 회로는 시료가 단락되었을 때 시험 회로에 흐르는 短絡電流를 역률 0.9~1 에서  $1 \pm 0.1A$ 로 제한되도록 電流制限用 抵抗R와 過電流保護裝置로서 0.5A의 전류가 2秒間 흐를 때 동작되는 過電流계산기를 사용하였다.

試驗電壓을 요구하는 소정의 전압, 즉 100, 200, 300, 400, 500V로 결정한 후 시험회로의 短絡電流가  $1 \pm 0.1A$  되도록 電流制限用 抵抗을 조절한다.

50적 적하 직후 트래킹 파괴가 생기지 않으면 51적 적하 직후 浸蝕깊이를 측정하였다. 그리고 각 시료에 시험전압 100~500V를 印加하여 트래킹 파괴가 일어나면 過電流계산기가 동작하여 전원이 遮斷되므로 이때의 滴下數를 가지고 적하수 특성을 평가하였다.

浸蝕의 깊이 및 炭化의 길이 측정은 현미경 및 다이얼게이지, 다이얼附 버니어 캘리퍼스로 측정하였다.

트래킹 파괴 및 浸蝕깊이는 소정의 동일 시험전압에서 5 개의 시료를 사용하고 요구되는 값을 측정하여 최대치와 최소치를 버리고 중간치로 평균하여 評價하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 試料表面에서 발생하는 放電現象

각종의 試料表面에서 發生하는 放電의 상태는 試驗電壓 및 시간이 경과함에 따라 변한다. 試驗電壓

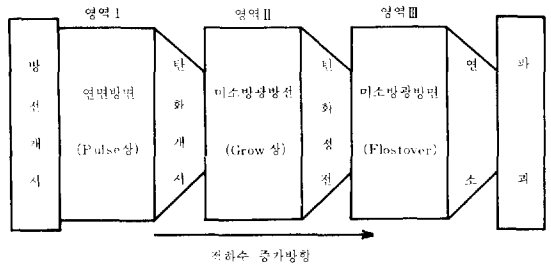
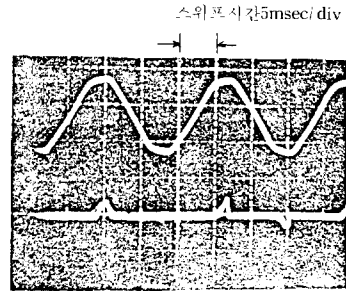


그림 3. 트래킹 破壞의 進展過程  
Fig. 3. Progressive process of the tracking breakdown.

을 400V로 하고 電解液을 電極間에 滴下하였을 때 發生되는 放電形態의 개요를 그림 3에 도시한다.

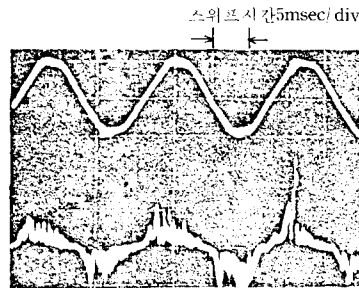
영역 I은 시험 개시로 부터 처음 微小發光放電이 發生하기 까지의 영역이고 진극간의 乾燥帶에서 비



波形上: 電壓波形50mv/div  
波形下: 電流波形50mv/div

사진 2. 放電時의 電壓電流波形

Photo. 2. Voltage current wave form during discharge.



波形上: 電壓波形20mv/div

사진 3. 微小發光放電時의 電壓 電流波形

Photo. 3. Voltage current wave form during scintillation.

교적 전류값이 크고 放電거리가 긴 펄스(Pulse) 상의 紫色放電이 발생하는 영역이다. 이때의 전압 전류파형은 사진 2와 같다.

이 영역에서 시간의 경과와 더불어 방전거리가 짧은 글로우(Glow)상 微小發光放電이 발생하게 되는 영역을 영역Ⅱ라 하고 試料表面이 흑색화로 변화하기에 炭化 개시지점으로 定하였다. 이때의 전압, 전류파형은 사진 3과 같다.

또 이 영역에서 電解液의 滴下數가 증가하면 微小發光放電이 매우 현저하면서 지속적으로 발생하여 試料表面은 劣化하고 또한 흑색화로 빨리 확대되어감을 관측할 수 있었고 炭化가 進展하는 시점을 영역Ⅲ으로 한다.

그 후 炭化導電路는 전극방향으로 進展하고 최종적으로 트래킹 파괴에 도달한다. 그러나 시료에 따라 트래킹 파괴는 일어나지 않고 試料表面을 침식하는 현상도 있다.

### 3.2 트래킹 破壞

본 실험에 사용한 試料중 PC와 PBP는 트래킹 破壞形 시료임이 판명되었고 이들 시료에 대하여 試驗電壓의 變化 滴下數 및 電解液의 濃度變化에 따른 破壞特性을 檢討한다.

#### (1) 印加電壓의 依存性

滴下數 電解液의 濃度를 0.1%로 일정하게 하고 試驗電壓을 100~500V까지 변화시키면서 PC 만의 試料에 대하여 트래킹 파괴가 일어나는 적하수와 의 관계를 그림 4에 도시한다.

그림 4에서도 알 수 있듯이 印加電壓이 100~300

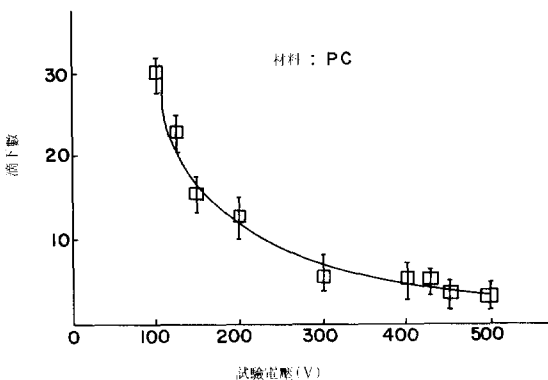


그림 4. 트래킹 破壞滴下數의 電壓依存性  
Fig. 4. Dependence on test voltage of the number of drops in tracking breakdown.

V 범위에서는 파괴가 일어날 때 까지의 적하수가 매우 감소하고 300~400V 범위에서는 거의 같은 값을 나타내는 현상이 있다. 이러한 사실은 전압이 높아짐에 따라 트래킹 파괴를 일으키는 원인인 炭化劣化의 進展이 빠르고 低電壓에서는 炭化進展이 늦어지고 있다는 것을 제시해주고 있다.

따라서 300~400V 범위에서는 거의 같은 滴下數에서 파괴하고 있으나 400~500V에서는 더 낮은 적하수에서 試料表面이 炭化함과 동시에 트래킹 파괴가 일어남을 관측할 수 있다.

그리고 100~300V 범위에서 적하수가 급격히 저하하는 것은 적하 직후 液滴의 증발에 요하는 시간이 길게 되므로서 발생한 수증기 熱이 시료표면에 많이 전달되어 炭化進展이 빠르게 형성되는 것이 원인으로 추정될 수 있다.

이를 확인하기 위하여 측정된 건조대 형성시간과 적하수 특성과의 관계를 그림 5에서 도시한다.

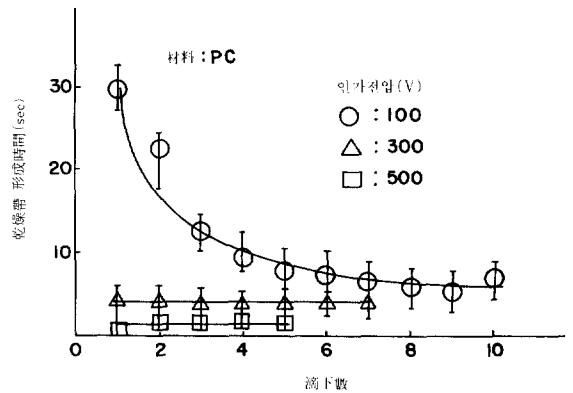


그림 5. 乾燥帶 形成時間과 滴下數  
Fig. 5. Forming time to dry band and the number of drops.

이 실험 결과에서 電解液이 적하로 부터 증발이 완료하기 까지의 시간인 건조대 형성시간  $t_b$ 는 300 이하의 시험전압에서는 적하수가 증가할 수록 짧게 되고 300V 이상의 시험전압에서는 거의 변화가 없다.

그리고 적하수가 동일한 경우에는 시험전압이 높을 수록  $t_b$ 가 짧게되는 경향이 있다. 이와 같이 시험전압 및 적하수가  $t_b$ 에 의존하는 것은 액의 증발 및 분단이 발생하기 때문이라 해석할 수 있으므로 상기 시험전압과 적하수에 의한 특성은 규명될 수 있다.

#### (2) 電解液 濃度依存性

電解液의 농도변화로 트래킹 파괴가 일어날 때 까지의 試驗電壓과 滴下數와의 特性을 알아보기 위해 電解液의 濃度를 0.1%, 0.2%, 0.4%로 변화시켰을 때 試料PC에서의 트래킹 파괴 特性을 그림 6에 도시한다.

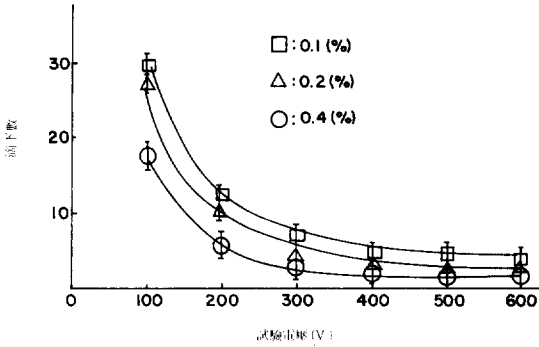


그림 6. PC에 대한 試驗電壓 對 滴下數  
Fig. 6. Test voltage vs the number of drops for sample of PC.

濃度가 增加할 수록 트래킹 파괴가 일어날 때 까지의 滴下數는 減少하는 傾向이다. 이로부터 試料表面에 水分, 汚染物 등 불순물의 濃도가 증대하면 耐트래킹성이 저하되리라고 제시할 수 있다.

이러한 현상은 EPR에서도 볼 수 있었다. 이는 전해액의 농도가 증가함에 따라 시료표면에서 많은 이온성 전류가 흐르게 되어 주열熱로 발생열량이 크게 작용되는 것이라 추정된다. 이를 확인하기 위하여 전해액의 저항률과 온도와의 관계를 그림 7에 도시한다.

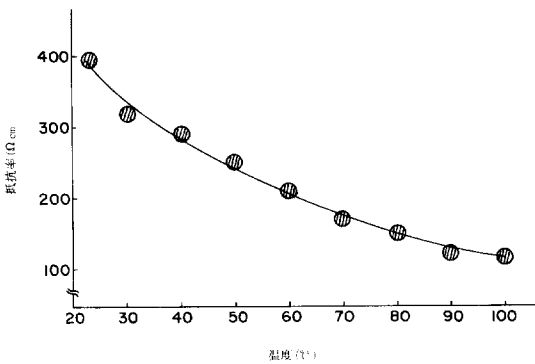


그림 7. 電解液 抵抗率의 溫度依存性  
Fig. 7. Dependence on temperature of electrolyte resistivity.

이 결과로부터 電解液이 주열熱에 의해 溫度가 상승하게 되고 이로 인하여 抵抗이 저하하기 때문에 試料 表面에 흐르는 電流가 증대될 것이므로 전해액의 농도 및 濃度에 따라 트래킹 現象에 영향을 준다는 사실을 지지해주고 있다.

### 3.3 트래킹으로 인한 浸蝕

本 研究에 사용한 試料中 PVC는 실험방법에 의거 電解液을 50적 滴下하여도 트래킹 파괴가 발생하지 않고 放電에 의하여 試料 表面이 浸蝕되고마는 浸蝕形 試料에 속하므로 試驗電壓 및 滴下數 변화에 따른 浸蝕의 깊이와 넓이의 변화를 관찰한다.

#### (1) 試料表面劣化의 관찰

試驗電壓을 400V로 하고 滴下數 변화에 의한 試料表面의 劣化상태는 사진 4와 같다.

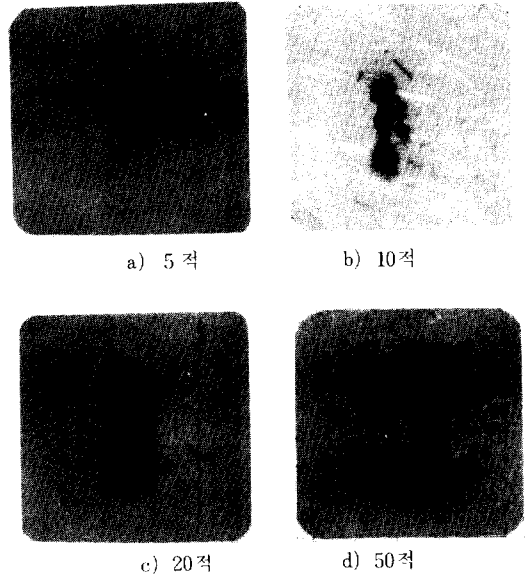


사진 4. 試料表面의 劣化現象

Photo. 4. Degrading phenomena of the sample surface.

滴下數가 적은 범위에서 表面劣化는 最初 어느 한 쪽이 電極 부근에서 進展하다가 滴下數가 증대하면 전체적으로 확대되어 가는 傾向이 있고 그 現象을 관찰하면 처음에는 I자형으로 되다가 滴下數가 증가함에 따라 X자형으로 擴大되어 가는 모양으로 된다.

#### (2) 浸蝕깊이의 電壓依存性

電解液의 濃度를 0.1(%)로 하고 試驗電壓에 대

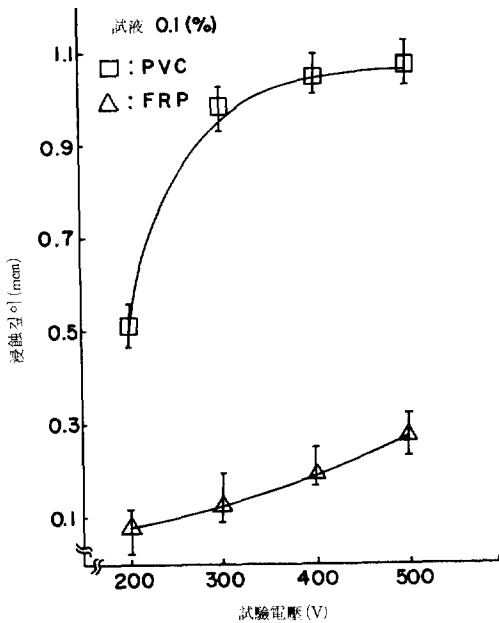


그림 8. 시험 전압 대 침식 깊이의 특성  
 Fig. 8. Characteristics of erosion depth vs test voltage.

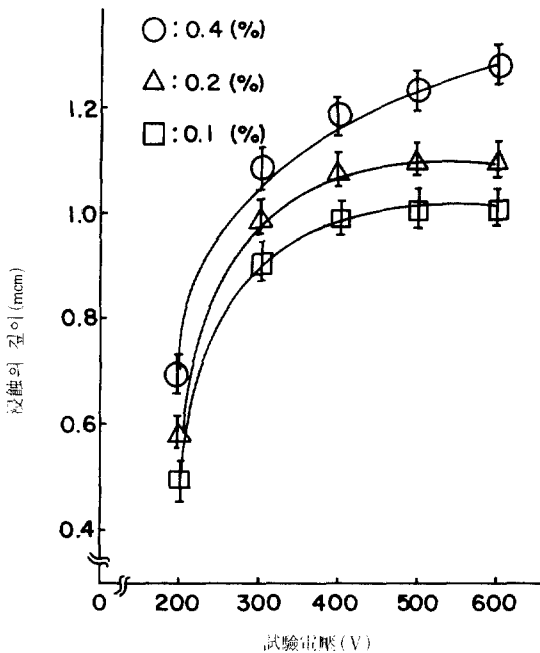
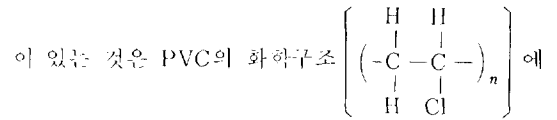


그림 9. PVC에 대한 전압 대 침식의 깊이  
 Fig. 9. Test voltage vs erosion depth for sample of PVC.

한 침식 깊이를 그림 8 에 도시한다.

PVC는 시험 전압 300V 이하에서 침식 깊이가 전압에 의존하여 進展하지만 300V 이상의 전압에서는 거의 일정하게 되는 경향이다. 그러나 FRP는 시험 전압 100~500V 범위내에서는 침식 깊이나 전압에 비례하여 증대하는 경향이다.

전압이 증가함에 따라 PVC의 침식 깊이는 FRP와는 다르게 전압이 증가함에 따라 포함되는 경향



서 연소시 Cl이 분출되므로 消焰작용을 하는 것이 원인이 되리라 추정할 수 있지만 금후 화학구조적으로 더욱 세밀하게 검토하려 한다.

(3) 침식 깊이의 電解液 濃度依存性

電解液의 농도를 변화시킬 때 PVC의 침식 깊이를 변화시킨 것을 그림 9 에 도시한다.

일반적으로 電解液의 농도 증가에 따라 침식 깊이의 進展을 助長하는 경향이 있다.

재료의 물질구조중 탄소를 炭素화시키려고 하는 결합에너지의 합을  $\Delta H_F$  라 하고 揮發生成物로서 탄소를 제거시키려고 하는 결합에너지의 합을  $\Delta H_E$  라 하면 1 분자당의 결합에너지  $\Delta H_{FPD}$  는  $\Delta H_{FPD} = \Delta H_F + \Delta H_E$  라는 관계가 성립한다

따라서  $\Delta H_F / \Delta H_{FPD}$  의 값이 0.4 이상이 되면 트랙킹 破壞形이고 0.4 이하 0.2까지는 방전에 의한 침식形이라고 보고를 인용한다면 전해액의 농도 변화는 탄소의 생성, 소멸의 반응속도에 관련되리라 추정되지만 확실한 원인은 현재 분명치 않다. 금후 시료표면에 부착될 수 있는 염분이나 수증기, 그리고 표면상태 변화 등 종합적인 검토가 필요한 것으로 생각된다.

4. 結 論

산업분야에 실용화되고 있는 여러가지 시료에 대하여 IEC推獎法에 의해 트랙킹현상을 관측한 바 트랙킹破壞현상과 침식현상으로 분류되고 이들 현상을 시험전압 및 농도변화 의존성으로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1) PC는 트랙킹과괴형 시료이고 시험전압 증가에 따라 대체적으로 작은 적하수에서 트랙킹과괴가 발생한다.

그리고 시험전압이 100~300V 범위에서는 급격히 저하하는 특성을 가진다.

2) 시험전압과 트래킹과괴특성은 電解液의 농도가 증대할 수록 매우 적은 滴下數에서 파괴가 발생된다. 이로써 試料表面의 水分, 汚染物 등 불순물의 농도가 증대하면 耐트래킹성이 저하됨을 제시할 수 있다.

3) PVC는 트래킹과괴가 발생하지 않고 표면에서 내부로 浸蝕하는 浸蝕形 시료이고 시험전압이 증가에 따라 浸蝕의 깊이는 일반적으로 증가되는 경향이지만 침식의 깊이가 포화되는 PVC와 포화되지 않고 비례되는 FRP로 분류된다.

이상 각종 시료에 대해 트래킹 파괴를 현상적으로 분류하여 트래킹 특성을 기초적으로 제시하였으나 금후 시료의 화학구조별 검토와 시료에 첨가제 혼입 및 시료표면처리 등에 대해서도 상세한 연구와 구체적인 해석이 필요하다고 생각하며 앞으로 수행해야 할 연구과제이다.

본 연구에 필요한 실험장치의 제작 및 조립 그리고 부분적인 실험에 협조해 주신 최 중길선생님께 심심한 사의를 표하는 바이다.

參考文獻

1) 絶縁材料耐トラッキング性試験法専門委員會: 絶縁材料の耐トラッキング性試験について, 電氣學會技報 (I 部) No.82 (昭42-9)  
 2) 鳥居・一色・關口・根本, “各種試験法による有機材料の耐トラッキング”, 藤倉電線技報, 28,

13 (昭39)  
 3) 澤・田・増大・大川・菅・一色・關口, 「ゴム・プラスチック電線の塩害(2)」同上, 29, 33 (昭40)  
 4) Nishida, M, Yoshimura, N. and Note, F., 1984, Trans of IEE of Japan. 104-A. 41-48 [in Japanese]  
 5) Billings, M J. Smith, A, and Wilkins, R, 1967, I-EEE Trans on Elect Insulation, EI-2, 131-137.  
 6) 西田 眞 外トラッキング破壊にちける微小放電の分光特性と炭化進展過程 (日)電氣學會 57-A26  
 7) “IEC Publication 112による絶縁材料の耐トラッキング性,” 電氣學會技報, (II 部) 第115號 (昭56-6)  
 8) 西田 眞 外, 霧でぬれた有機絶縁材料表面のトラッキング破壊, (日)電氣學會 54-A16  
 9) 例えば, 能登, “最近の絶縁材料試験法,” 電學誌 88, 802 (昭43-5)  
 10) 砂塚・一色, “難然, 耐熱性配電用ケーブル絶縁材料(ケーブル絶縁),” 電學誌 95, 400 (昭50-5)  
 11) J. L. Douglas & R. M. Searisbrik, Recent research on tracking of electrical insulation, “Proceedings of the seventh Electrical Insulation Conference, IEEE Pub. No.32C 79-41 (1967)  
 12) 李徳出, 高分子材料의 絶縁破壊 電氣學會, vol. 28 No. 8 1979年.