

## 브리지 특성이 트래킹에 미치는 영향에 관한 연구

(A Study on the Effect of Bridge's Characteristics on Tracking Phenomena)

지승욱\* · 옥경재 · 이춘하 · 이광식\*\*

(Seung-Wook Jee · Kyung-Gea Ok · Chun-Ha Lee · Kwang-Sik Lee)

### 요 약

본 논문은 전해액에 의해 양전극 사이에 형성되는 브리지가 트래킹에 미치는 영향을 기술하고 있다.

IEC(International Electrotechnical Commission) 60589의 방법으로 만들어진 1, 3, 5[wt%] NaCl 용액을 이용하여 KS C IEC 60112의 전극에서 트래킹 실험을 하였다. 트래킹 진전과정 중에서 브리지가 형성되었을 때의 전압, 전류, 저항 및 열화상을 측정하여 분석하였다.

그 결과 전해액의 전도율이 커짐에 따라 브리지에서 발생하는 줄열도 커졌다. 하지만 전해액의 기화열로 인해 전해액의 끓는점을 넘지는 못했다. 다만, 전해액의 전도율이 커짐에 따라 건조대 형성에 소요되는 시간이 짧아졌다. 따라서 다음 적하까지 보다 긴 시간동안 건조대를 유지함으로써, 방전 기회가 증가하기 때문에 트래킹 진전이 빨라짐을 알 수 있었다.

### Abstract

This paper describes the influence of the bridge formed between electrodes by electrolyte for tracking process.

Electrolytes is made by IEC(International Electrotechnical Commission) 60589, NaCl added to deionized water as each 1, 3, 5[wt%]. The used test equipment is made according to KS(Korean Industrial Standard) C IEC 60112. It is investigated voltage, current, value of resistance and thermal image when bridge formed between electrodes on tracking process

As a result, as conductivity of electrolyte gets bigger as Joule's heat on bridge also gets bigger. But It is not over electrolyte's boiling point due to evaporation heat of electrolyte. However as conductivity of electrolyte gets bigger as the necessary time of dry band gets shorter. So dry band is existed more long time ahead of droplet to next droplet and discharge chance at dry band gets much. Therefore tracking process gets faster.

Key Words : Tracking, Bridge, Joule's heat, Conductivity, Evaporation heat

\* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 강사

\*\* 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수

Tel : 053-810-2486, Fax : 053-810-4767, E-mail : kslee@yu.ac.kr

접수일자 : 2008년 5월 16일, 1차심사 : 2008년 5월 28일, 심사완료 : 2008년 6월 16일

## 1. 서 론

우리나라 전체 화재의 30[%]를 차지하는 전기 화재의 원인 중 70[%]가 단락과 누전·절연불량으로 알려져 있다[1]. 한편, 이들 단락과 누전·절연불량의 원인 중 하나로 지목되는 것이 트래킹이다[2].

트래킹은 영국 해군의 선박에 사용되던 전기장치의 절연물에서 탄화흔적의 형태로 처음 발견되었으며 이후, 1980년경에 우리나라와 일본에서 많은 연구가 이루어졌다[3-4].

특히, 트래킹 파괴 기구의 해석과 파괴에 영향을 미치는 요인에 관한 연구는 건조대 형성과정, 탄화 개시과정, 탄화 진전과정으로 나뉘어 매우 체계적으로 이루어져 있다[3, 5-7].

그러나 건조대가 형성되기 위해 반드시 선행되어야 하는 양전극간의 오손물질에 의한 브리지(bridge)가 트래킹 진전에 미치는 영향에 관한 연구는 미흡하다.

이에 본 연구에서는 농도가 다른 전해액을 사용함으로써 브리지 특성에 변화를 주었고, 이에 따라 브리지로 공급되는 전력, 줄열, 발생온도 등의 차이를 분석함으로써 브리지가 트래킹 진전에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 트래킹 진전 과정

일반적으로 습윤 및 오손된 조건하에서의 트래킹 파괴에 이르는 과정은 절연재료 표면의 습윤이나 오손, 표면 누설전류에 의한 전해액 브리지의 증발과 건조대의 형성, 건조대에서의 방전 개시, 탄화 개시 및 진전, 트래킹 파괴의 단계를 거치는 것으로 알려져 있다[3-7].

### 2.2 물의 물리적 성질

물의 비중은 상온에서 1이다. 1[°C] 가열하는데 소요되는 비열은 1[cal/g°C]이고, 기화잠열은 539

[cal/g]이다. 또한, 혼합물의 경우 끓으면서 농도가 진해짐에 따라 끓는점이 점차 높아진다. 물의 경우 끓는점 오름 상수는 1[atm]에서 0.512[°C/kg/mol]이다[8-9].

## 3. 시험용액의 제조 및 전도율 분석

### 3.1 시험용액의 전도율 측정

시험용액은 23±1[°C]에서 탈이온수에 NaCl을 각각 1[wt%], 3[wt%], 5[wt%] 용해시켜 제조하였으며, 이들 각각에 대하여 기호 A\_1, A\_2, A\_3로 나타낸다.

이들 세 가지 시험용액에 대한 전도율은 IEC 60589에 따라 컨덕티비티 미터(conductivity meter, Coretech, CON11)로 측정되었으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 시험용액 전도율과 저항률  
Table 1. conductivity and resistivity of each electrolyte

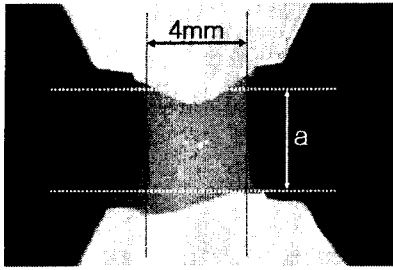
탈이온수 + 무수 염화암모늄			
시험용액별 기호	A_1	A_2	A_3
농도[wt%]	1	3	5
전도율 $\sigma$ [Sm <sup>-1</sup> ]	0.132	0.272	0.415
저항률 $\rho$ [Ωm]	7.58	3.68	2.41

### 3.2 시험용액 브리지의 저항

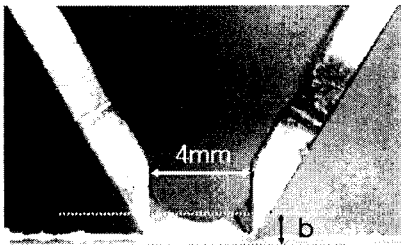
그림 1은 시료 표면에 1회 적하된 시험용액의 형상을 보여준다. 1회 적하량은 0.022±0.002[g]이었다.

그림 1로부터 적하된 시험용액은 단면적  $S$  ( $=a \times b$ )가  $0.43 \times 10^{-5} \sim 0.53 \times 10^{-5}$ [m<sup>2</sup>], 길이  $l$ 이  $0.4 \times 10^{-2}$ [m]이었다. 표 1로부터 구한 저항률  $\rho$ 를 이용하여 시험용액이 양 전극사이에 브리지 역할을 할 때 저항값을 식 (1)을 이용하여 계산하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다.

$$R_{\text{bridge}} = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad (1)$$



(a) The upper side ( $a = 3.9 \sim 4.1$  (mm))



(b) The lateral face ( $b = 1.1 \sim 1.3$  (mm))

그림 1. 시료 표면의 브리지(전해액) 형상  
Fig. 1. Formation of bridge(electrolyte) on sa-  
mple's surface

표 2. 계산에 의한 브리지의 저항값  
Table 2. Calculated resistance value of bridge

시험용액	A_1	A_2	A_3
$R_{bridge}[\Omega]$	5,685 ~ 7,049	2,760 ~ 3,422	1,807 ~ 2,241

전극이 고정되어 있어 브리지의 길이에는 변화가 거의 없는 반면에 적하에 따라 단면적이 변화되는 것을 볼 수 있다. 따라서 브리지의 저항값은 시험용액의 농도에 따른 저항률과 적하에 따른 단면적의 변화가 가장 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 4. 트래킹 내성 측정

### 4.1 실험 장치 및 방법

트래킹 내성 시험을 위해 그림 2와 같이 회로를 구성하였다.

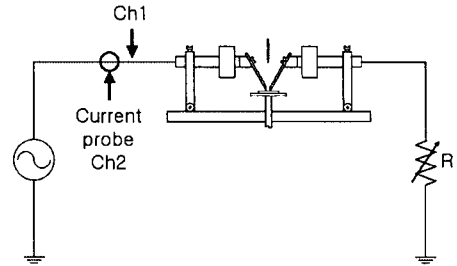


그림 2. 시험회로  
Fig. 2. Experimental circuit

전원은 교류 220[V], 60[Hz]로 하였으며, 전극은 KS C IEC 60112에 따라 제작된 것을 사용하였다.

시료는 누전 차단기들의 절연재료로 많이 사용되는 페놀수지를 30[mm]×30[mm]×2[mm] 규격으로 자른 후 2장을 적층하여 사용하였다.

3장에서 제조한 세 가지 종류의 시험용액이 모두 실험에 사용되었다.

Tektronix사의 TDS2022B 오실로스코프를 이용하여 전압과 전류를 측정하였다. 채널 1(Ch1)에는 100:1 프로브(LeCroy, PPE 2[kV])를 연결하여 전압을 측정하였고, 채널 2(Ch2)에는 전류 프로브(Tektronix, A622 AC/DC Current Probe)를 연결하여 전류를 측정하였다.

가변저항 R은 무유도성으로 회로의 단락 전극 간 전류가, KS C IEC 60112의 권고안인,  $1.0 \pm 0.1$ [A]를 만족하도록 하기 위한 것이다.

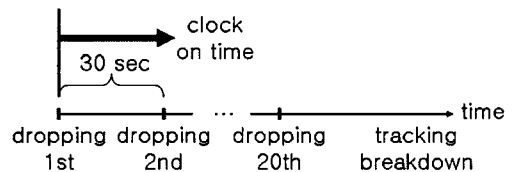


그림 3. 실험 진행 과정  
Fig. 3. Process of experiment

실험의 진행은 그림 3과 같이 수행하였다. 먼저 30초 단위로 1회씩 총 20번의 적하를 한 후 트래킹이 진전되도록 방지하였다. 트래킹 발생 시간은 1번째 적하가 이루어진 후부터의 시간으로 하였다.

### 4.2 실험 결과 및 분석

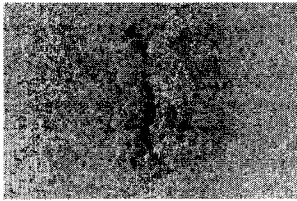
표 3은 트래킹 파괴에 이르기까지의 시간을 시험 용액별로 나타낸 결과이다.

표 3. 트래킹 발생에 소요되는 시간  
Table 3. Required time for tracking breakdown

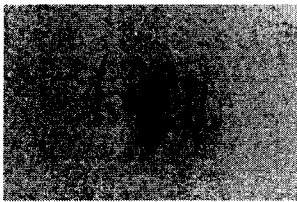
시험용액	A_1	A_2	A_3
트래킹 발생시간[s]	1,485	728	423

농도가 진할수록 트래킹 진전시간이 짧게 나타나고 있다.

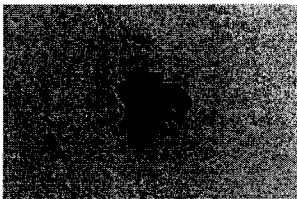
그림 4는 6회 적하 후 시료 표면에 형성된 탄화흔적을 찍은 것이다. 농도가 진할수록 탄화가 많이 진전된 것을 볼 수 있다.



(a) Carbon formation of A\_1



(b) Carbon formation of A\_2

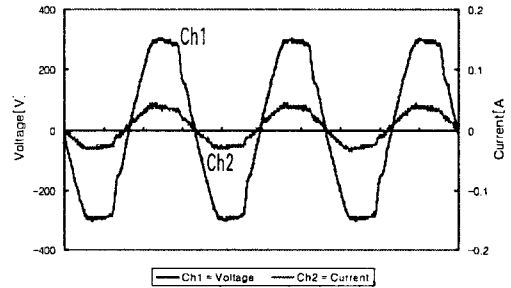


(c) Carbon formation of A\_3

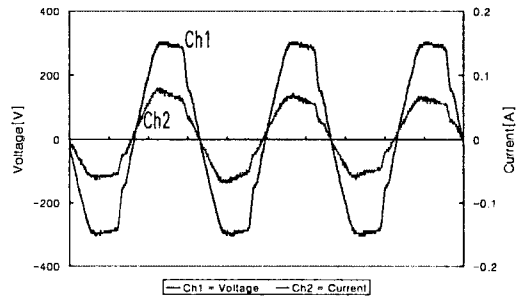
그림 4. 6회 적하 후 탄화형성 모습  
Fig. 4. Image of carbon formation after 6 droplet

그림 5는 농도별로 적하 후 양 전극 간에 브리지가 형성되었을 때의 전압과 전류 파형을 보여준다. 전해액의 전도율이 클수록 전류가 커짐을 알 수 있다.

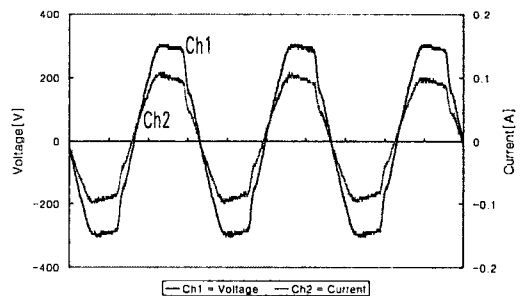
그림 6은 그림 2의 시험회로에서 트래킹에 의해 양 전극 사이에 브리지가 형성되어 전류가 흐를 때, 브리지를 저항으로 취급하여 그린 등가회로이다.



(a) Waveforms of A\_1



(b) Waveforms of A\_2



(c) Waveforms of A\_3

그림 5. 전압, 전류 파형  
Fig. 5. Waveforms of voltage and current

브리지 특성이 트래킹에 미치는 영향에 관한 연구

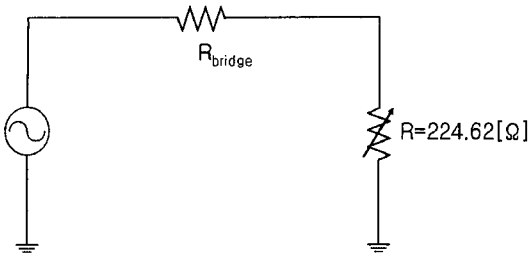


그림 6. 그림 2의 등가회로  
Fig. 6 Equivalent circuit of Fig. 2

그림 6에서 가변저항 R의 값은 RCL 미터(Philips, PM6303)로 측정된 값(224.62[Ω])이고, R<sub>bridge</sub>는 그림 5로부터 각각 전압과 전류의 실효치를 구하고, 여기에 옴의 법칙을 이용한 식 (2)를 이용하여 구한 값으로 표 4에 나타내었다.

$$R_{bridge} = \frac{V}{I} - R [\Omega] \quad (2)$$

전해액에서 발생하는 줄열 P<sub>bridge</sub>는 식 (3)을 이용하여 구하였다.

$$P_{bridge} = R_{bridge} \times I^2 [W] \quad (3)$$

표 4. 브리지 사이의 전압, 전류, 저항  
Table 4. Voltage, current and resistance of bridge

시험용액	A_1	A_2	A_3
V[V]	224.63	225.92	225.59
I[A]	0.026	0.048	0.073
R <sub>bridge</sub> [Ω]	8,415.00	4,482.05	2,865.65
P <sub>bridge</sub> [W]	5.69	10.33	15.27

23[°C]의 물 0.022[g]을 100[°C]까지 올리는 데는 1.69[cal](=비열×질량×온도차=1[cal/g·°C]×0.022[g]×(100-23)[°C])가 필요하다. 또한 100[°C]의 물 0.022[g]을 100[°C]의 수증기로 만드는 데는 11.86[cal](=기화잠열×질량=539[cal/g]×0.022[g])가 필요하다.

따라서 식 (4)와 식 (5)로부터 각각 브리지를 100[°C]까지 올리는데 필요한 시간 t<sub>1</sub>과 브리지를 모두

증발시키는데 소요되는 시간 t<sub>2</sub>를 구할 수 있다. 그 결과를 표 5에 나타내었다.

$$1.69 = P_{bridge} \times t_1 \times 0.24[cal] \quad (4)$$

$$11.86 = P_{bridge} \times t_2 \times 0.24[cal] \quad (5)$$

표 5. 건조대 형성에 소요되는 시간(계산치)  
Table 5. Required time for dry band formation (cal-culated by equation(4), (5))

시험용액	A_1	A_2	A_3
t <sub>1</sub> [s]	1.24	0.68	0.46
t <sub>2</sub> [s]	8.68	4.78	3.24

전도도가 가장 낮은 A\_1 용액조차도 브리지가 형성되고 나서 1.24[s]가 지나고 나면 기화가 일어나면서 브리지의 단면적이 줄어들게 된다. 따라서 저항 값도 점차 커지게 된다. 표 2에서 구한 브리지의 저항값이 표 4보다 낮게 분포하는 것도 그림 5의 전압·전류 파형을 측정한 시점이 이미 브리지가 기화로 인해 단면적이 감소됨으로써 저항이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 그림 4의 등가회로에서 고려하지 못한 전해액과 전극사이의 접촉저항 등이 그 원인으로 생각된다.

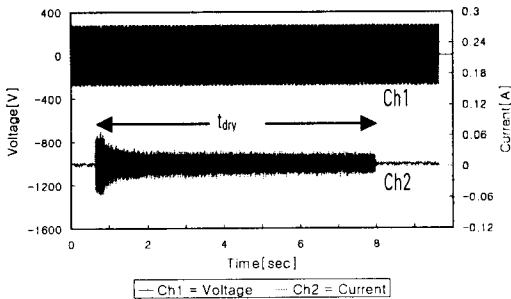
그림 7은 전해액에 의해 브리지가 형성된 후, 줄열에 의해 건조대가 형성되어 전류가 차단될 때까지의 전압, 전류 파형이다. 그림 7로부터 건조대가 형성되는데 걸리는 시간 t<sub>dry</sub>[s]를 알 수 있는데, 표 6과 같다.

그림 7에서 전류값은 브리지가 형성된 후부터 서서히 감소하고 있다. 이는 전해액의 기화로 인해 브리지의 단면적이 감소함으로써 브리지의 저항이 증가하여 전류가 감소하는 것으로 풀이된다. 따라서 건조대 형성에 필요한 에너지를 공급하는데 걸리는 시간 t<sub>dry</sub>[s]는 더욱 증가할 것이다.

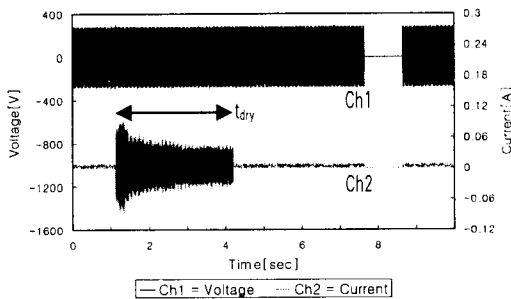
하지만, 표 6에서의 값 t<sub>dry</sub>[s]가 표 5로부터 구한 t<sub>1</sub>+t<sub>2</sub>[s] 보다 짧다. 그 이유는 건조대를 생성하기 위해 브리지의 물을 모두 기화시킬 필요가 없기 때문인 것으로 판단된다.

### 5. 열화상 분석 및 열분석

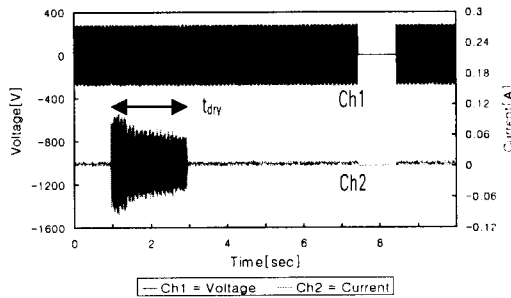
그림 8은 시험용액이 양 전극사이에 브리지 역할을 할 때, 브리지를 열화상카메라(FLUKE, Ti25)로 찍은 것이다.



(a) Waveforms of A\_1



(b) Waveforms of A\_2



(c) Waveforms of A\_3

그림 7. 전압, 전류 파형  
Fig. 7. Waveforms of voltage and current

표 6. 건조대 형성에 소요되는 시간(실험치)  
Table 6. Required time for dry band formation (by experiment)

시험용액	A_1	A_2	A_3
$t_{dry}$ [s]	7.33	3.07	2.00

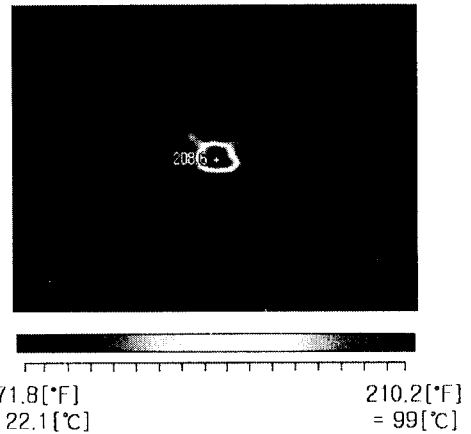


그림 8. 브리지 부분의 열화상 이미지  
Fig. 8. Thermal image of bridge

그림 8로부터 건조대가 생길 때까지 브리지를 통해 흐르는 전류로 인한 줄열은 최대 210.2[°F](=99 [°C])로 나타났다.

브리지의 온도는 전해액의 기화열로 인해 전해액의 끓는점을 넘지는 못한다. 혼합물의 경우 끓으면서 농도가 전해액에 따라 끓는점이 오르지만, 브리지의 경우 일부만 증발해도 건조대가 생겨 줄열이 차단되므로 농도증가에 한계가 있고, 물의 경우 끓는점오름 상수가 작아서 끓는점의 상승 폭도 작기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 내열성이 큰 절연재료들은 줄열의 영향을 크게 받지 않을 것으로 보인다.

또한 전해액과 전극사이의 접촉저항에 의해 발생하는 줄열이 전극을 타고 절연재료에 전달되는 열도 절연재료의 절연내력 열화에 영향을 줄 정도로 높지는 않은 것으로 나타났다.

결국 절연재료의 절연내력 열화에 영향을 미치는 것은 건조대 형성 이후에 발생하는 방전 현상에 의한 것이다. 전해액의 농도에 따라 트래킹 진전이 빠른 것은 전해액의 전도율이 높을수록 발생하는 줄열

## 브리지 특성이 트래킹에 미치는 영향에 관한 연구

도 커짐으로 인해 건조대의 형성시간이 빨라지고, 다음 적하 때까지의 시간도 길어서 방전이 발생할 수 있는 기회를 길게 가질 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

## 6. 결 론

본 논문은 전기화재의 원인 중 하나인 트래킹을 조기에 검출하는데 필요한 기초 연구로서, 오손물질에 의해 형성되는 브리지가 트래킹에 미치는 영향에 대하여 연구한 것이다. 그 결과

- (1) 전해액의 전도율이 클수록 전류도 커지고 발생되는 줄열도 크다.
- (2) 브리지에서 발생되는 줄열도 건조대가 형성되기 전까지는 전해액의 기화열로 인해 전해액의 끓는점을 넘지 못한다. 또한, 혼합물로 인한 끓는점 상승 폭도 브리지의 특성상 높지 못했다.
- (3) 전해액과 전극 사이의 접촉저항이 존재하지만 이곳에서 발생되는 줄열 역시 전해액의 끓는점을 넘지 못한다. 따라서 내열성이 우수한 절연재료를 사용한다면, 브리지에서 발생되는 줄열에 의한 절연내력 열화는 방지할 수 있을 것으로 생각된다.
- (4) 브리지에서 발생되는 줄열이 클수록 건조대 형성에 소요되는 시간은 짧고 따라서 다음 적하 때까지의 시간은 길다. 결국 건조대가 빨리 형성되는 만큼 방전 기회가 증가하고, 그 만큼 트래킹 진전도 빨라지는 것으로 생각된다.

## References

- [1] 한국전기안전공사, “2006년도 전기재해통계보고서”, 전기재해통계정보시스템(<http://www.kesco.net>), 2006.
- [2] 이춘하 외, “전기화재공학”, 동화기술사, pp.242-247, 2004.
- [3] 최병화, “有機絶縁材料의 Tracking 破壊에 관한 研究”, 석사학위논문, 영남대학교, 1985.
- [4] N. Yoshimura, M. Nishida, and F. Noto, “Influence of the electrolyte on tracking breakdown of organic insulating materials”, IEEE. Trans. on Elect. Insul., Vol. E-16, No.6, pp.510-520, Dec. 1981.
- [5] 西田眞, 吉村昇, 能登文敏, “有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程”, 전기학회논문지, A

pp.593-600, 昭58-A72.

- [6] 吉村昇, 西田眞, 能登文敏, “有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における炭火開始過程(IEC 112 方法の場合)”, 전기학회논문지, A pp.429-436, 昭56-A54.
- [7] 吉村昇, 西田眞, 能登文敏, “トラッキング破壊における微小放電の分光特性と炭化進展過程”, 전기학회논문지, A pp.195-202, 昭57-A26.
- [8] 인세진 외, “소화약제화학”, 형설출판사, pp.29-66, 2003.
- [9] 일반화학교재연구회, “일반화학”, 광림사, pp.234-237, 1991.
- [10] KS C IEC 60112, “고체 절연 재료의 내트래킹 및 비교 트래킹 지수 측정 방법”, 2005.
- [11] IEC 60589, “Methods of test for the determination of ionic impurities in electrical insulating materials by extraction with liquids.”, 1977.

## ◇ 저자소개 ◇

### 지승욱 (池昇昱)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 출강.

### 옥경재 (玉卿材)

1975년 7월 14일생. 1999년 호서대 소방학과 졸업. 2006년 동 대학원 수료(박사과정).

### 이춘하 (李春夏)

1953년 10월 20일생. 1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985~1994년 한국기계연구원 실장. 2004~2005년 미국 Worcester 공과대학 객원교수. 현재 방폭기술연구회회장. 전국대학 소방학과 교수협의회 회장. 호서대학교 소방방재학과 교수.

### 이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 영남대학교 산업대학원장 역임. 현재 본 학회 회장. 영남대학교 공대 전기공학과 교수.