

Analysis of Produced By-products Due to Oil/Paper Degradation on Power Transformers

金 載 勳^{*} · 韓 相 玉^{*}
(Jae-Hoon Kim · Sang-Ok Han)

Abstract - According to thermal degradation on power transformers, it is known that electrical, mechanical and chemical characteristics for power transformer's oil-paper are changed. In the chemical property, especially, when the kraft paper is aged, the cellulose polymer chains break down into shorter lengths. It causes decrease in both tensile strength and degree of polymerization of paper insulation. Also the paper breakdown is accompanied by an increase in the content of various furanic compounds within the dielectric liquid. It is known that furanic components in transformer oil come only from the decomposition of insulating paper rather than from the oil itself. Therefore the analysis of furanic degradation products provides a complementary technique to dissolved gas analysis for monitoring transformers when we evaluate the aging of insulating paper by the total concentration of carbon monoxide and carbon dioxide dissolved in oil only. Recently, the analysis of furanic compounds by high performance liquid chromatography(HPLC) using IEC 61198 method for estimating degradation of paper insulation in power transformers has been used more conveniently for assessment of oil-paper. It is known that the main products which is produced by aging are 2-furfuryl alcohol, 2-furaldehyde(furfural), 2-furoic acid, 2-acetylfuran, 5-methyl-2-furaldehyde, and 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde.

For investigating the accelerated aging process of oil-paper samples we manufactured accelerating aging equipment and we estimated variation of insulations at 140°C temp. during 500 hours. Typical transformer proportions of copper, silicon steel and iron have been added to oil-paper insulation during the aging process. The oil-paper insulation samples have been measured at intervals of 100 hours. Finally we have analyzed that 2-furoic acid and 2-acetylfuran products of furanic compounds were detected by HPLC, and their concentrations were increased with accelerated aging time.

Key Words : Furanic Compounds, Thermal Degradation, HPLC, Transformer Oil-paper

1. 서 론

산업 고도화로 인해 사회 전반적인 부분에서 전력수요의 급증 및 전력의 고품질화가 요구되고 있는 추세이다. 이를 위해 송배전시스템의 체계화와 더불어 송배전기기의 합리적 유지관리, 고장 시 보수의 신속성이 요구되어지고 있다.[1]

송배전설비에 대한 연구는 과거부터 현재까지 꾸준히 지속되어 왔으며, 특히, 큰 비중을 차지하고 있는 전력용 변압기에 대한 폭넓은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 전력용 변압기의 열화 및 수명에 대한 끊임없는 연구에도 불구하고 변압기 사고 등과 같은 전력설비 사고가 빈번히 발생하여 경제적 손실은 물론 인명피해에 대한 위협을 받고 있는 실정이다. 따라서, 전력설비에 대한 사전 고장방지 및 보수작업을 통하여 전력의 고품질화를 꾀해야 할 것이다.[3]

이러한 전력용 변압기의 수명은 제조상 결함이 없고 운전 중 과부하에 의한 열적 열화나 외적인 스트레스가 없다면 일반적으로 30년 이상 될 것이라고 알려져 있다. 전력용 변압기가 받는 주요한 열화 메카니즘은 과부하 고온 운전에서 따른 열적 열화현상, 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상, 진동에 의한 기계적 손상, 부분방전 열화현상으로 구분할 수 있다. 이러한 열화현상은 변압기 절연물의 전기적, 기계적 성능이 점차 저하시켜 변압기 고장을 유발시킨다.[6]

전력용 변압기는 내부의 절연을 위해 절연유, 절연지 등을 사용하고 있는데, 변압기 층간 절연물로 사용되고 있는 셀룰로오스 절연지는 좋은 유전상수 값을 가지고 있으며 취급하기 용이하기 때문에 대부분의 변압기에서 많이 사용되고 있다. 또한, 변압기 절연유로는 광유가 대부분 사용되고 있지만, 최근 친환경적 절연유로써 식물유가 연구 개발되어 기존의 광유 대체용으로 제조 보급되고 있는 실정이다.

전력용 변압기는 일반적으로 절연유의 전기적 특성 보다는 절연지의 기계적 특성 변화에 의해 영향을 받고 있다고 알려져 있다. 열적 스트레스를 받은 절연지의 경우

^{*} 교신저자, 正 會 員 : 忠南大學校 工大 電氣工學科 博士課程
E-mail : geez011@cnu.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 忠南大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 2007年 6月 5日
最終完了 : 2007年 7月 10日

전기적, 기계적, 화학적인 열화를 받게 되는데, 특히, 기계적, 화학적 열화는 상관관계가 있다고 알려져 있다. 즉, 절연지의 열 열화에 의해 절연지 내부의 글루코오스 분해 생성물이 절연지 내에 남게 되고 이 글루코오스는 또 다시 분해되어 푸란계 물질이라고 불리는 화합물을 생성하는데, 이러한 푸란계 생성물이 절연지에서 빠져나와 절연유에 스며들게 되어 결국 절연지의 기계적 내력의 지표인 중합도를 약화시키게 된다. 따라서 푸란계 생성물에 대한 연구는 절연지의 열화정도를 판단할 수 있는 중요한 요인이 될 수 있다.[2]

일반적으로 절연지의 열화로 인해 생성되는 푸란계 물질은 2-furoic acid, 2-furfuryl alcohol, 5-methyl-2-furaldehyde, 2-acetyl furan, 2-furaldehyde, 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde 등으로 알려져 있다.[11,12]

본 연구에서는 배전용 변압기의 열적 열화에 의한 열화 특성을 평가하기 위해 특별히 제작한 가속 열 열화 시험장치를 적용하여 140[°C] 온도에서 500시간 동안 변압기 절연물을 열화시켰다. 가속 열 열화시험을 통해 절연지가 열화되었을 때 생성되는 푸란계 물질의 정량분석을 위해 고성능 액체 크로마토그래프(HPLC)를 사용하여 열화 경과 시간에 따른 푸란계 생성물질에 대한 분석을 수행하였다.

2. 이론 및 분석방법

2.1 가속 열 열화시험

변압기 내부의 절연물은 열에 의해 화학적, 기계적으로 변형되어 전기적 절연특성에 악영향을 미치게 된다. 이러한 열화정도를 평가하고 분석하기 위해 실제 변압기를 등가화한 밀폐된 소형 시험 용기 안에 절연물을 넣고 밀폐시켜 장시간 고온으로 균등하게 가열하는 중탕방법을 본 연구에서는 사용하였으며, 시험 셀 내부의 시료는 주상변압기 50[kVA]급에서 사용되고 있는 구성 자재와 동일한 비율로 절연지, 절연유, 에나멜 동선, 규소강판 등을 적용하였다. 그림 1과 표 1은 각각 가속 열 열화 모의 시험장치 및 실제 50[kVA] 변압기에서 제조 시 각 재료의 구성 비율을 보여주고 있다.[9]

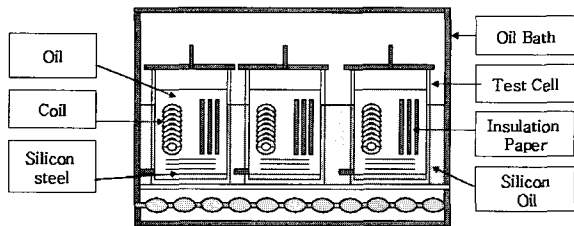


그림 1 가속 열 열화시험장치
Fig. 1 Experimental equipment for accelerated aging

표 1 배전용 변압기 구성비율

Table 1 Proportions of component materials in distribution transformers[50kVA class]

| Contents | Core | Oil | Coil | Paper | etc. |
|----------|------|------|------|-------|------|
| Rate(%) | 51.6 | 28.6 | 17.4 | 2.3 | 0.1 |

또한, 변압기 절연유 및 절연지의 가속 열 열화특성을 평가하기 위해 현재 유입식 변압기에 사용되는 광유(1종 제2호) 및 식물성 절연유와 셀룰로오스 절연지를 준비하였다. 셀룰로오스 절연지의 경우 바니시 처리한 절연지와 바니시 처리가 되지 않은 절연지 두 종류를 사용하여 절연유에 함침하였다. 절연지를 포함한 광유 및 식물유를 가속열화 셀에 넣기 전에 진공펌프를 이용하여 약 700 [torr]의 압력으로 오일 속에 존재하고 있는 기포를 제거하였으며 각 절연지는 210×25[mm²]의 크기로 절단하여 가속 열화 셀에 넣기 전 절연지 내부 수분을 제거하기 위해 105[°C]의 진공건조 오븐에서 약 10시간 동안 건조시켰다.

이와 같이 준비된 가속 열 열화셀을 140[°C]에서 500시간(약 20일) 동안 항온조에 넣어 열화시켰으며 열화의 진행 상태를 파악하기 위해 100시간마다 시험 셀을 꺼내 각 절연유를 채취하여 분석하였다.

2.2 HPLC 분석방법

본 연구에서는 IEC 61198에서 규정하고 있는 HPLC 분석 방법 중 SPE(Solid Phase Extraction)법에 따라 절연유의 분석을 수행하였다.

2.2.1 시료 전처리

SPE법은 HPLC 분석을 위해 시료의 전처리 과정을 필요로 한다. 절연유 10[g]을 10[mL] 펜탄(Pentane) 표준원액에 희석시키고 일정 시간이 경과한 후 시료를 채취하여 간섭물질을 제거하기 위해 Sep-Pak C18 Si 카트리지에 통과시켜 검출 한계 이하의 농도로 농축시킨다. 이때 사용된 카트리지에는 Waters社에서 제조한 XTerra C18 5[μm], 4.6×250[mm²]의 칼럼(column)을 사용했으며, 이후 세정을 위해 20[mL] 펜탄 표준원액으로 시료를 깨끗하게 처리한 후에 푸란계 생성물을 검출하기 위해 20:80의 비율로 아세토니트릴(Acetonitrile)과 물을 혼합한 용액에 2[mL]의 측정시료를 통과시켜 측정하고자 하는 푸란계 물질을 다른 물질들과 분리시켜 주는 작업을 거친 후에 이를 60분 동안 안정화시킨다. 그림 2는 시료의 전처리 과정을 보여주고 있다.

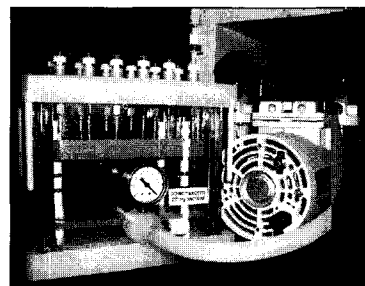


그림 2 시료 전처리 과정
Fig. 2 Pre-process for Solid Phase Extraction

2.2.2 HPLC 분석

전처리된 시료 중 10[μL]를 HPLC에 주입하여 분석을 수행한다. 본 연구에서는 Waters社에서 제조한 Alliance 2690 separation이며, UV 검출기(Waters社 996 Photo Diode

Array, Model 996)를 이용하여 HPLC 분석을 수행하였으며 220[nm] 파장에서 분석하고자 하는 절연유의 푸란계 표준시료 화합물의 광대역 투과파장을 검출해 내었다. 이때 검출된 파장의 피크값은 표준물의 고유 파장구역으로써 기준이 된다. 그림 3과 4는 각각 HPLC 기기 및 HPLC 분석 구성도를 보여주고 있으며, 표 2에서는 HPLC 분석 조건을 보여주고 있다.

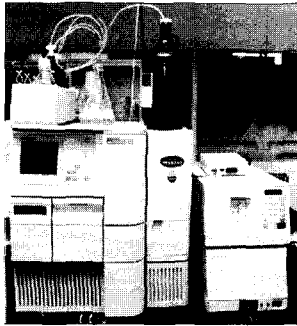


그림 3 HPLC 분석기기
Fig. 3 Apparatus for HPLC

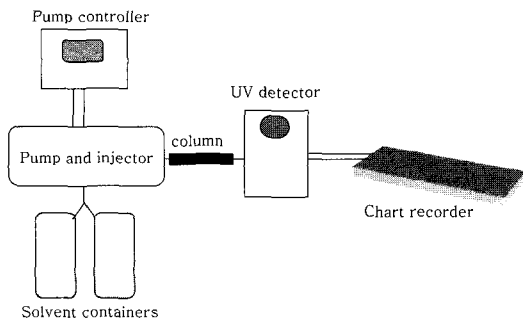


그림 4 HPLC 분석 구조
Fig. 4 Construction of HPLC analysis

표 2 HPLC 분석조건

Table 2 Chromatographic conditions used for the analysis of furanic compounds

| | |
|---------------------------|--|
| Column | Waters XTerra C18 (5 μ m, 4.6 \times 250 [mm ²]) |
| Injection Volume | 30 [mm ³] |
| Mobile phase | acetonitrile : water=20 : 80 (v/v), Isocratic condition |
| Flow rate | 0.5 [mL/min] |
| Analysis time | 30 [min] |
| Column cleanup time | 100% acetonitrile, 10 [min] |
| Equilibrium | acetonitrile : water=20 : 80 (v/v), 5 [min] |
| Wavelength in UV detector | 220 [nm] |

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 신품 및 열화된 시료에 대한 푸란계 물질의 분석에 대한 결과를 그림 5~8에서 보여주고 있다.

일반적으로 알려진 6개의 푸란계 생성물 중 2-furfuryl alcohol, 2-acetyl furan, 그리고 2-furoic acid 등 3가지 생성물을 검출하였다. 특히, 2-furfuryl alcohol과 2-acetyl furan의 양이 전체 시료에서 검출되었으며, 절연물의 열화시간에 따라 그 양이 증가하고 있음을 알 수 있다.

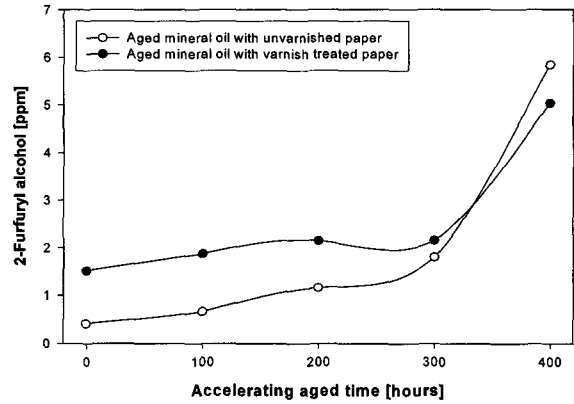


그림 5 광유에 용존된 2-furfuryl alcohol의 정량분석
Fig. 5 Quantitative analysis of 2-furfuryl alcohol in mineral oil

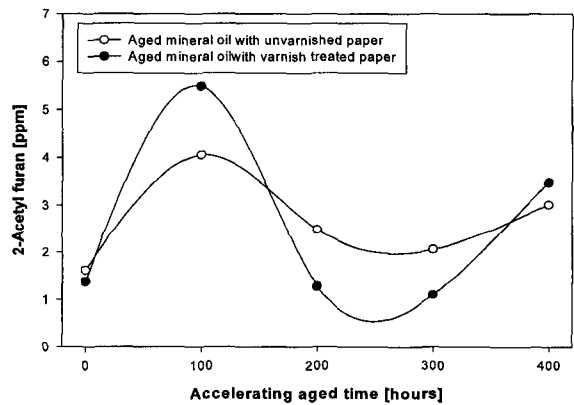


그림 6 광유에 용존된 2-acetyl furan의 정량분석
Fig. 6 Quantitative analysis of 2-acetyl furan in mineral oil

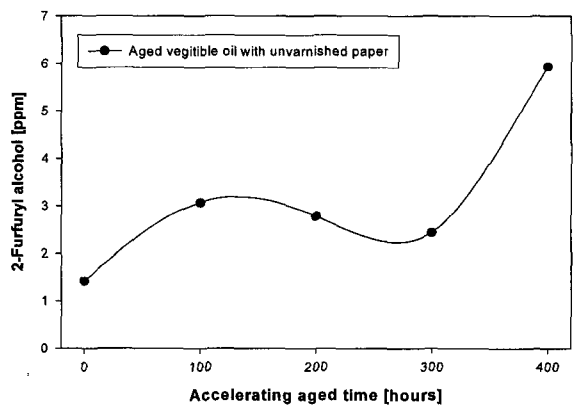


그림 7 식물유에 용존된 2-furfuryl alcohol의 정량분석
Fig. 7 Quantitative analysis of 2-furfuryl alcohol in vegetable oil

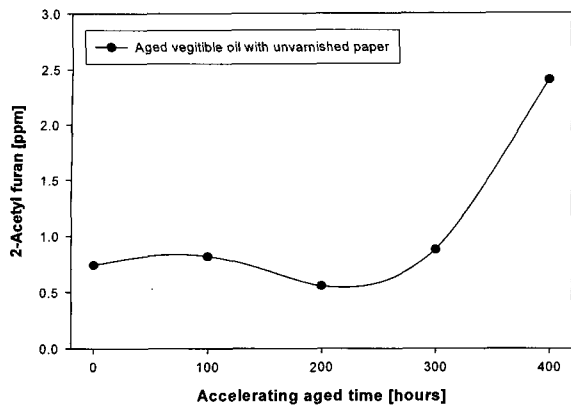


그림 8 식물유에 용존된 2-acetyl furan의 정량분석
 Fig. 8 Quantitative analysis of 2-acetyl furan in vegetable oil

그림 5와 6은 광유에 함침한 바니시 처리된 셀룰로오스 절연지와 바니시 처리되지 않은 셀룰로오스 절연지와 광유의 경년 열화에 따른 HPLC 분석 결과를 나타내고 있다.

그림 5에서 알 수 있듯이 열화 시간의 경과에 따라 2-furfuryl alcohol의 양이 서서히 증가하다가 특히, 열화가 300시간 경과한 후에 최고 5.8[ppm]까지 급격하게 증가함을 알 수 있다. 즉, 열화가 진행함에 따라 절연지가 열적 스트레스를 받아 내부의 글루코오스 사슬이 끊어지게 되고 이때 푸란계 물질이 절연지로부터 떨어져나가 절연유 속에 스며들기 때문에 절연유 속에 푸란계 생성물의 양이 열화에 따라 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한, 그림 5에서처럼 절연지의 바니시 처리된 절연지 역시 열화시간에 따라 푸란계 물질이 증가하며, 특히 열화 초기에는 바니시 처리되지 않은 절연지보다 많은 푸란계 물질이 검출됨을 알 수 있는데, 이는 열 열화가 진행되면서 절연지에 처리된 바니시가 절연지의 일부 분자사슬을 포함한 상태로 절연유에 스며들게 된 것으로 추측된다. 따라서, 바니시 처리하지 않은 절연지보다 바니시의 열 열화가 더 빨리 진행되었기 때문에 열화 초기의 푸란계 생성물이 상대적으로 많이 검출되었다고 예측할 수 있다.

한편, 그림 6과 같은 경우, 2-acetyl furan의 양은 일정한 경향을 보이지 않고 있지만, 그림 5의 경우와 마찬가지로 100시간의 분석 값을 제외시켰을 때 열화시간에 따라 그 양이 전반적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이에 대해서는 추후 추가적인 실험을 통하여 재분석이 필요할 것으로 생각된다.

다음으로 그림 7과 8은 식물유에 함침한 바니시 처리되지 않은 셀룰로오스 절연지의 경년 열화에 따른 HPLC 분석 결과를 나타내고 있다. 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 광유에서와 마찬가지로 식물유에서도 열화 시간의 경과에 따라 푸란계 물질의 양이 서서히 증가하다가 300시간 경과 후에 급격하게 증가함을 알 수 있다.

하지만, 본 실험에서는 일반적으로 푸란계 물질의 분석에 주로 이용되고 있는 2-furaldehyde의 양은 아주 적게 검출되었거나 또는 검출되지 않았다. Furfural이라 불리는 2-furaldehyde는 절연지의 열화에 따라 절연유 속으로

용존되는 푸란계 생성물 중 대부분을 차지하며 일반적으로 평균중합도(DP : Degree of Polymerization)와 함께 변압기의 기계적 응력에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다. 본 분석에서 2-furaldehyde 물질이 검출되지 않은 것은 검출 파장을 220[nm]에서 분석하였기 때문이라 여겨진다. 일반적으로 2-furaldehyde는 220[nm]와 275 [nm]에서 검출되지만 특히 275[nm]에서 많은 양이 검출되기 때문이다. 따라서, 추후 실험분석에서는 다양한 파장에서 분석을 수행하여 보다 의미있는 결과를 얻을 필요가 있다.

이와 같은 결과를 바탕으로 절연유의 푸란계 생성물 양이 증가한다는 것은 곧 절연지의 열화가 진행되어 푸란계 물질이 절연지에서 떨어져 나가 절연유에 용존되었기 때문이라는 것을 알 수 있었고, 이는 위에 언급하였던 절연지 평균중합도의 감소로 이어지면 결국은 절연지의 기계적 응력, 즉, 인장강도가 감소하게 되어 절연지의 수명을 단축시키게 됨을 알 수 있다.

이상에서와 같은 결과는 절연지가 열적 스트레스에 의해 열화가 빠르게 진행됨에 따라 파생물의 양도 증가함을 보여줌으로써 절연지 열화 정도 및 수명 평가하는데 있어 중요한 열화 요인으로 적용할 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

변압기의 열화에 의해 생성된 부산물의 분석을 위한 변압기의 가속 열 열화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서는 변압기의 실제 환경을 고려하여 가속 열 열화 시험장치를 구성하였으며 이를 이용하여 장시간 열화시험을 수행하였다.
2. 가속 열 열화실험을 통한 절연지의 HPLC에 의한 분석 결과 일반적으로 알려진 2-furaldehyde는 극히 적은 양이 검출되었지만, 2-furfuryl alcohol, 2-acetyl furan 등이 검출되었으며, 이를 통해 열화 시간의 경과에 따라 푸란계 파생물의 양은 증가함을 알 수 있었고, 이는 열화를 통해 절연지에서 푸란계 물질이 빠져나가 절연유 속에 용해되었기 때문임을 확인할 수 있었다.
3. 따라서, 절연지가 열적 스트레스에 의해 열화가 빠르게 진행됨에 따라 부산물의 양도 증가함을 보여줌으로써 절연지 열화 정도 및 수명 평가하는데 있어 중요한 열화 요인으로 적용가능 함을 알 수 있었다.

최근에 변압기 진단 및 수명에 대한 연구와 함께 푸란계 생성물검출과의 관계에 대한 연구가 이루어지고 있으나 아직까지 HPLC 분석에 대한 명확한 지표가 밝혀지지 않았기 때문에 추후의 추가적인 분석을 통해서 푸란계 생성물질의 정상적인 분석을 규명하고 더 나아가 평균중합도 및 인장강도와의 관계, 그리고 전기적 특성을 토대로 한 복합적인 연구를 통해 변압기 수명에 대한 신뢰성 향상을 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김상준 외, “지상변압기의 품질개선 및 적용기술개발 연구”, 전력연구원, 1993
- [2] 김귀열, “절연지의 응용 현황”, 전기전자재료학회지 1993 pp.491-497
- [3] 송일근 외, “주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구”, 전력연구원, 2002
- [4] James L. etc, “Environmental and life cycle considerations for distribution and small power transformer selection and specification”, IEEE, 2002 pp. 353-358
- [5] M. J. Mousavi etc, “Experimental investigation of distribution transformer aged solid insulation”, IEEE, 2002 pp. 192-195
- [6] 송일근 외, “배전용 변압기의 고장원인 분석기술”, 조명전기설비학회지, 2001, pp.61-67
- [7] 윤경현 외, “주상 변압기 절연재료의 열화 반응에 관한 연구”, 화학공학의 이론과 응용 제 1권 제 2호, 1995 pp.123-126
- [8] Mineral Insulating Oils - Methods for the Determination of 2-Furfural and Related Compounds, IEC 61198
- [9] Il-Keun Song, etc., “Thermal analysis of varnish treated insulating papers for transformers”, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, 2003. Proceedings, 23-25 Sept. 2003
Page(s):583 - 586
- [10] 김정훈 외, “바니쉬의 절연성 평가”, 1999년 대한전기학회 추계학술대회 논문집
- [11] J.Unsworth, etc., “Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography”, Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on], Volume: 25, Issue: 4, Aug. 1990, p.737-746
- [12] M.C.lessard, etc., “Determination of Paper Degradation By-products by Direct injection on an HPLC Column”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. Annual Report., Conference on, 22-25 Oct. 1995 pp. 230-234
- [13] 김재훈 외, “변압기에 용존된 Furan계 물질 분석, 2005년 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [14] 김재훈 외, “investigation of Furanic Compounds for the Aged Oil-Paper in Power Transformers, 2006 ISH International Conference, 2006. 10

저 자 소 개



김재훈(金載勳)

1997년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000-2003년 (주)진로산업 기술연구소 주임연구원, 현재 대덕대학 전기과 겸임교수, 충남대학교 전기공학과 박사과정수료

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : geez011@cnu.ac.kr



한상옥(韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박).

1985년 독일 하노버대 객원교수

1989년 일본 나고야대 객원교수

현재 충남대학교 전기공학과 교수,

Tel : 042-821-5655

Fax : 042-821-8895

E-mail : sohan@cnu.ac.kr