

## 열과 방전에 의한 주상변압기 절연재료의 열화

남영우<sup>†</sup> · 윤경현 · 박희로<sup>\*</sup>

송실대학교 공과대학 화학공학과

<sup>\*</sup>송실대학교 전기공학과

(1996년 1월 8일 접수, 1996년 12월 6일 채택)

## Aging of Insulating Material in Pole Transformer by Heat and Arc Discharge

Young-Woo Nam<sup>†</sup>, Kyeoung-Hyun Yoon and Hee-Ro Kwak<sup>\*</sup>

Department of Chemical Engineering, Soong-Sil University

<sup>\*</sup>Department of Electrical Engineering, Soong-Sil University

(Received 8 January 1996; accepted 6 December 1996)

### 요 약

가속 열열화 실험과 방전 실험을 수행하여 주상변압기 절연재료의 열화반응을 연구하였다. 유증가스는 air bubbling 방식을 사용하여 추출하였으며 각 기체의 추출물로부터 용존된 유증가스량을 구하였다. 절연재료의 열화는 열분해와 산화반응에 의하여 진행되며 두 종류의 반응은 모두 0차 반응으로 표시될 수 있었다. 열분해 반응의 경우 활성화 에너지는 25,800 cal/mol였고, 산화 반응의 경우 활성화 에너지는 20,600 cal/mol였다.  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ 를 대상으로 한 gas pattern은 가속 열열화시 수소 주도형이었으며, 온도가 200 °C에서 250 °C로 상승함에 따라 탄화수소계 가스 중 최대 농도를 보이는 성분은  $CH_4$ 에서  $C_2H_6$ 와  $C_3H_8$ 로 변화하였다. 방전 실험에서는 초기에 수소가 다량 발생하였으나 방전이 많이 진행되면 열 열화에서 거의 검출되지 않았던  $C_2H_6$ 가 많이 발생하였다.

**Abstract**—Aging of insulating material in a pole transformer has been studied by performing accelerated thermal aging test as well as arc discharge test. Dissolved gases were extracted by air bubbling method. Concentrations of dissolved gases were modified by extraction ratios of each gases in insulating oil. Aging of insulating material was proceeded by both thermal degradation and oxidation reaction. Both of the reactions in insulating oil were shown to follow zeroth order kinetics. The activation energy for the thermal degradation was estimated to be about 25,800 cal/mol and 20,600 cal/mol for oxidation reaction. Gas patterns considering  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$  and  $C_4H_{10}$  for accelerated thermal aging test showed  $H_2$  domination pattern. Species of maximum hydrocarbon concentration shifted from  $CH_4$  to  $C_2H_6$  and  $C_3H_8$  as the reaction temperature increased from 200 °C to 250 °C. During the initial stage of discharge test  $H_2$  was the major component. However,  $C_2H_6$  which was hardly detected in thermal aging test became the maximum concentration species as the discharge time increased.

**Key words**: Aging, Pole Transformer, Insulating Oil, Dissolved Gases, Gas Pattern

### 1. 서 론

경제가 성장함에 따라 전력 수요가 증가되고, 이에 비례하여 전력 공급장치도 크게 확장되어 이로 인한 사고가 증가하고 있다. 변압기의 돌발 사고는 복구에 따른 경제적인 손실과 정전으로 인한 생산차질 및 사회에 미치는 심리적인 영향이 크기 때문에 고신뢰도 운전이 필수적이다. 변압기 사고는 절연재료의 장기적 열화에 의한 절연파괴에 의하여 진행되므로 변압기의 이상 진단법이 중요한 연구과제가 되고 있으며 최근에는 운전상태에서 변압기를 진단할 수 있는 예방진단법에 관심이 집중되어 있다[1-4].

변압기 이상 진단법은 크게 세 가지로 나누어진다. 전기적 특성치를 이용하는 진단법은  $\tan \delta$ , 절연파괴전압, 유전손실률을 이용하고

있으며, 물리 화학적 특성치를 이용하는 방법은 절연유의 수분량, 전산가 등을 측정하여 이상진단에 사용한다[5]. 유증가스분석법은 변압기의 예방진단에 주로 사용되며 154 KV급 대용량 변압기의 경우 수소 센서를 이용한 on-line진단법이 개발되어 있다[6]. 최근에는 아크방전법[7], uv/vis 비색법[8]이 연구되고 있다.

주상변압기는 돌발사고로 인한 영향이 광범위함에도 불구하고 연구 사례는 찾아보기가 어려운 실정이다. 우리나라의 22.9 KV급 배전용 주상변압기의 총 대수는 약 80만대('94. 6. 기준)로서 그 수가 계속 증가하고 있으며, '94년에는 장기간의 폭염으로 인하여 주상변압기의 사고가 빈발하였으며 이에 따른 피해도 크게 발생되었다. 현재 주상 변압기는 특별한 진단을 하지 않고 간이수리(8년 경과 후)와 중수리(13년 경과 후)를 실시함으로써 주상변압기의 소손 사고를

방지하고 있는 실정이다. 이러한 수리 및 점검 과정은 많은 인력과 비용을 초래하고 있다. 따라서 수용가에 피해가 직결되는 주상변압기의 돌발사고를 방지하기 위한 연구가 시급한 실정이다[9, 10].

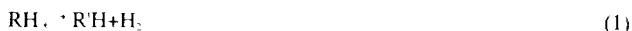
변압기는 장기간의 운전에 의하여 절연재료가 열화된다. 절연유, pressboard 및 절연지 등의 절연재료는 서서히 분해되어  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  및  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  등의 탄화수소계 가스를 방출하며, 그 대부분은 절연유 중에 용해된다[11, 12]. 대용량 변압기에서는 절연유 중의 가스를 추출하여 변압기의 내부 이상의 유무 및 이상의 내용을 진단하고 있다. 그러나, 주상 변압기의 절연유(1종 2호)는 주 변압기의 절연유(1종 4호)와는 종류가 다르고, 변압기 구조도 다르기 때문에 대용량 변압기에 적용되는 이상 진단법을 그대로 주상변압기에 적용하는 것이 어렵다. 절연유는 변압기 내부의 철심과 권선, 권선 상호간, 통전부와 접지 사이의 절연을 유지시킬 뿐만 아니라, 철심 및 권선 내부에서 발생하는 열을 방산하는 냉각매체이므로 기능이 저하되면 절연과파괴나 소손과 같은 중대사고로 파급될 위험성이 있다. 따라서, 절연유의 열화 정도를 연구하는 것은 변압기 이상 유무 및 그 정도를 파악하는데 의의가 크다.

본 연구에서는 변압기 절연재료의 대표적인 열화요인인 열열화와 방전열화실험을 수행하고 유중가스분석법을 이용하여 절연재료의 열화반응속도식을 얻었다. 유중가스는 air bubbling 방법으로 추출하였다. 유중가스는 air bubbling 방법으로 100% 추출이 되지 않으므로 절연유에 용해되어 있는 가스 성분 각각에 대하여 추출률을 산출하여 유중가스의 농도를 구하였다. 절연재료의 열화에 대한 반응 공학적 접근 방법은 본 연구에서 처음 시도되었으며, 이와 같은 연구방법이 변압기 절연재료의 경년 열화 연구에 기여할 것으로 기대한다.

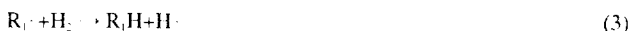
## 2. 유중가스의 생성

### 2-1. 수소가스의 방출

절연유는 알칸족, 사이클로알칸족, 방향족과 그 이성질체들의 혼합물이며 비교적 저온에서 절연유로부터 수소가스의 방출은 다음의 (1)식과 (2)식으로 설명할 수 있다.

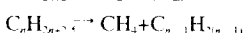
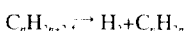


여기서, RH는 파라핀계 탄화수소이고, R'H와 R''H는 올레핀계 탄화수소이다. 파라핀계 탄화수소가 탈수소 과정을 거치면 올레핀계의 탄화수소와 수소로 분해된다. 이와 같이 생성된  $\text{H}_2$ 는 탄화수소의 분해가 충분히 행해진 경우 일반적으로 다음과 같은 반응에 의하여 탄화수소의 분해를 촉진한다.



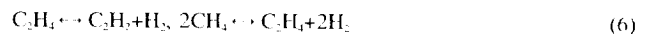
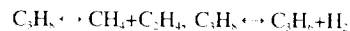
### 2-2. 절연유의 열분해

절연유의 주요성분은 알칸, 사이클로알칸, 방향족, 알켄, 알킨 및 그 이성질체들이다. 변압기에서 hot spot의 온도가 비교적 낮아도 고온이지만 hot spot에서 오일의 접촉시간이 짧을 때에는 1차 분해가 지배적이다. 1차 분해에서는 주로 알칸족 탄화수소가 고려되는데 알칸족은 탄소결합고리의 분리와 탈수소화에 의해 분해된다. 하나의 알칸은 저분자량 알칸과 알켄으로 분해되며 알칸의 탄화수소에 의해 알켄과 수소를 방출한다. 이 과정은 다음 (5)식으로 표기된다.



알칸과 마찬가지로 알켄들은 탄소결합고리의 분리와 탈수소화에 의하여 분해된다. 탄소결합고리의 분리에 의해 알켄은 두 개의 알켄, 한 개의 알칸, 또는 알킨으로 분해된다. 탈수소화에 의해서는 수소화 알킨을 방출하게 된다. 알킨은 알칸보다 열적으로 더 안정하다. 사이클로알칸은 탄소고리의 개방에 의해 알켄으로 분해된다.

2차 분해는 1차 분해보다 더 높은 온도에서 진행되는데, 절연유의 1차 분해에 의하여 생성된 저분자량 탄화수소(에탄, 에틸렌, 프로판 등)가 고온에서 분자량이 더 작은 탄화수소로 분해되는 것을 2차 분해라고 한다. 2차 분해의 한 예로 프로판은 메탄과 에틸렌으로 1차 분해되고 2차 분해에서 에틸렌은 아세틸렌과 수소로 분해된다. 프로판의 가능한 분해 반응식을 나타내면 아래와 같다.



이상에서와 같이 저온에서 주로 지배적인 1차 분해에서는 포화탄화수소가 불포화탄화수소보다 더 많이 방출되고, 고온에서는 2차 분해가 주로 진행된다.

### 2-3. 절연지의 열화

절연지의 cellulose 분자는 열, 유중산소, 수분 등의 열화요인에 의하여 분해되고 저분자량화가 진행되어 평균중합도의 저하가 일어난다. Cellulose 분자는 분해가 진행되면 알데히드에서 산을 거쳐  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ 와 물로 분해되고  $\text{CO}$ 와  $\text{CO}_2$ 는 절연유에 용해된다. 이 현상은 온도가 높아지면 유중산소와 수분이 많아져 급속히 진행되고 유중의  $\text{CO} + \text{CO}_2$ 의 농도가 현저하게 증가한다. 이  $\text{CO} + \text{CO}_2$ 량은 절연지의 평균중합도 및 밀도와 관계가 있고, 유중가스분석으로  $\text{CO} + \text{CO}_2$ 량을 측정하는 것으로 절연지의 열화정도, 나아가 잔여수명을 추정할 수 있다[12, 13].

## 3. 실험

### 3-1. 가속 열화 실험

주상변압기내에서의 열화현상은 서서히 진행되어 속도론적 연구가 어려우므로 가속열화 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 반응기는 절연유의 증기압을 견딜 수 있도록 stainless steel로 제작하였으며, 반경 4.9cm, 높이 27.8cm로 반응기 전체 용량이 2L가 되게 하였다. 반응기에는 safety valve를 설치하여 폭발에 대비하였으며, 온도조절기를 이용하여 절연유의 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 하였다.

반응기에는 주상변압기의 재료가 절연유의 열화에 영향을 미칠 것으로 판단하여 실 변압기 재료와 동일한 중량비의 절연유, 철심, 동선 및 절연지 등을 투입하여(절연유:철심:동선:절연지 = 1.35 L:800 g:778 g:40.5 g) 200 °C에서 76일간, 230 °C에서 33일간, 그리고 250 °C에서 17일간 반응시켰다. 절연유는 주상변압기용 광유 1종 2호를 사용하였다.

### 3-2. 방전 열화실험

주상변압기 가스 발생의 주된 원인은 열원의 접촉에 의한 열 열화와 방전에 의한 열화이다. 두 종류의 열화현상에 의하여 생성되는 가스의 종류와 양에는 차이가 있다. 방전 열화실험에서 발생된 가스량과 종류를 조사함으로써 변압기 내부의 이상유형을 추정하고 있다[4].

방전 열화실험에는 7.5 cm(H) × 12.5 cm(W) × 12.5 cm(D)인 아크릴 용기 내부에 직경이 12.5 mm인 두 개의 구형 방전극을 2.5 mm 간격

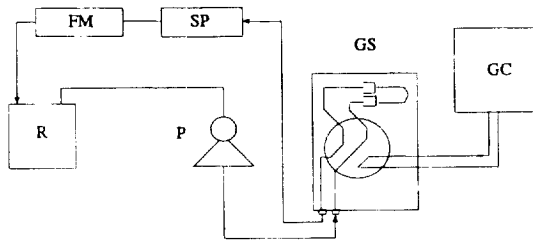


Fig. 1. Schematic diagram of the bubbling gas extraction system.

FM : Flow meter  
R : Extraction bottle  
P : Gas circulation pump  
GS : Gas sampler  
GC : Gas chromatography  
SP : Sampling port

을 두고 설치하였다. 구형의 방전극은 KSC 2101에 나타난 절연 파괴 전압 측정법에 근거하여 제작하였다. 저항을 통하여 두 방전극에 16 KV의 전압을 걸어 방전 열화실험을 수행하였다.

### 3.3. 가스 추출장치 및 추출물 실험

유중가스 추출에는 Torricelli 방식, Toepler 펌프방식 등 진공탈기법이 사용되나 장치가 복잡하므로 본 연구에서는 air bubbling 방식의 가스추출법을 사용하였다[10, 14]. 가스추출장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 추출장치는 폐쇄회로이며 추출병에 73 mL의 절연유를 투입하면 시료유와 유면 위 공간이 같은 부피가 되도록 설계하였다. 추출병에 73 mL의 절연유를 투입한 후 air pump를 작동시켜 발생된 air bubble을 추출병으로 주입시켜 시료에 용존된 가스를 추출하였다. 추출된 가스와 carrier gas인 공기의 혼합가스를 일정시간 순환시켜 시료유와 시료유 상부공간의 가스가 평형이 되게 하여 추출이 완료되면 가스포집기로 일정량을 포집하여 가스크로마토그래프로 분석하였다. 순환펌프로 300 mL/min의 유량으로 15분간 순환시키면 기액평형에 도달하였다.

Air bubbling 방식으로는 유중가스를 100% 추출하는 것이 불가능하므로 7종의 분석대상가스( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $C_5H_{12}$ , CO 및  $CO_2$ )에 대한 추출물 실험을 수행하였다. 7종의 가스를 sampling port를 통하여 추출장치에 주입하여 각각의 농도가 2151 ppm이 되게 하였으며 이 가스를 순환시켜 절연유에 충분히 용해시킨 후 용해된 각 기체의 농도를 구하였다. 용해되지 않은 가스를 배출시킨 후 air bubbling을 15분간 실시한 후 각 가스의 추출된 농도를 분석하여 추출물을 산출하였다. 추출물 실험에는 Supelco사의 Scotty II를 표준가스로 사용하였다.

### 3.4. 가스 분석

탄화수소계 가스인 메탄, 에탄, 에틸렌 및 아세틸렌은 가스 추출장치에서 추출된 가스혼합물 1 cc를 가스포집기로 포집한 후 FID가 장착된 GC(Shimadzu, GC 9A)로 분석하였다. 헬륨을 수송기체로 사용하였고 분석칼럼으로 porapak N이 충전된 1/8 in. SS tube를 사용하였다. 나머지 3종의 가스는 추출장치의 sampling port에서 채취하여 TCD가 장착된 GC(영인과학, M680D)로 분석하였다. 수소와 일산화탄소의 분석에는 molecular sieve 5A, 이산화탄소의 분석에는 activated charcoal을 사용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 유중가스 추출물

주상변압기의 내부에 이상이 발생되어 절연유, 또는 고체 절연물이 열 분해되어 가스가 발생하는 경우, 그 가스는 대부분 절연유 중

Table 1. Extraction ratio of dissolved gases in insulating oil

unit: [ppm]			
	Dissolved amount	Dissolved ratio	Extraction ratio
$C_2H_6$	1473	0.685	191
$C_2H_4$	1252	0.582	188
$C_2H_2$	736	0.342	199
$CO_2$	663	0.308	199
$CH_4$	243	0.113	197
CO	53	0.0246	49
$H_2$	33	0.0154	32

Feed: 2151 ppm for each gases.

에 용해한다. 본 연구에서 사용한 공기 주입에 의한 bubbling 방식으로 유중 가스가 100% 추출되지 않았다. 분석 대상인  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ , CO 및  $CO_2$  등 7가지 가스의 추출물 실험결과를 Table 1에 수록하였다. 각 기체를 2151 ppm 주입하여 절연유에 충분히 용해시킨 후 용해된 각 기체의 농도를 분석한 결과  $C_2H_6$ 가 가장 많이 절연유에 용해되었으며 수소의 용해도가 제일 작았다.  $C_2$  성분의 용해도가  $C_1$  성분의 용해도보다 크게 나타났으며 탄소수가 같을 경우 포화탄화수소가 불포화탄화수소보다 용해량이 많았다. 용해율 실험결과를 절연유에 대한 가스의 포화용해량을 나타내는 각 가스의 분산계수의 크기 순서와 일치하였다[14].

추출물은 용해율과 반비례하였으며  $C_2H_6$ 가 13%,  $C_2H_4$ 가 15%,  $C_2H_2$ 의 경우 27%,  $CO_2$  30%,  $CH_4$  81%, CO 92%였으며  $H_2$ 는 97%가 추출되었다. 본 연구에서는 추출물의 산출을 한 가지 농도에서 수행하였으나 기액 평형이 Henry의 법칙으로 표시되는 저 농도영역에서는 추출물의 변화가 별로 없을 것으로 예상된다.

### 4.2. 가속 열화실험

200 °C, 230 °C 및 250 °C에서 수행한 절연유의 가속 열화실험결과를 Table 2에 수록하였다. 각 가스의 농도는 추출물을 감안하여 보정된 값이며 T.C.G(total combustible gas)는 가연성 가스의 농도로 7종의 가스 중  $CO_2$ 를 제외한 가스의 총량이다. 각 기체는 열화 온도가 높을수록, 시간이 경과할수록 농도가 증가하였다. 실제 변압기의 경우에는 통상적으로 약 50 °C의 온도를 유지하며 이상에 의한 과열시 80-90 °C까지 온도가 상승하므로 본 연구에서 선택한 200 °C 이상의 조건은 실제 주상변압기의 운전조건과는 다른 실험조건이지만 열화반응속도론 연구를 위하여 열화과정을 촉진시키기 위하여 선택하였다.

신유의 분석 결과는 유중가스가 거의 없는 결과를 보이고 있으며, 방전에 의하여 주로 생성되는 것으로 알려진  $C_2H_2$  가스도 아주 낮은 농도를 보이고 있다. 절연유의 산화나 cellulose 성분의 열분해에 의하여 생성되는 CO와  $CO_2$  중 CO의 농도도  $CO_2$ 에 비하여 비교적 낮게 나타났다.

### 4.3. 반응속도론

절연유의 열화반응은 분해생성물의 종류도 다양하고 절연유 자체의 구성성분도 복잡한 혼합물 상태이므로 속도론 연구가 어려우며 아직 시도된 바가 없다. 가속 열화실험에서 분석된 7종의 가스 중 절연유의 열분해반응에 의하여 생성되는 탄화수소류 가스의 농도를 합산하여 반응시간과의 관계를 Fig. 2에 도시하였다. 수소는 탄소 성분을 포함하지 않으며 탄화수소의 탈수소 분해반응에 의하여도 생성될 뿐만 아니라 용해도가 작기 때문에 장기간의 실험시 누출현상이 발생하여 농도 분석결과와 신빙성이 문제가 되므로 제외시켰다.

Table 2. Concentration of dissolved gases in insulating oil for accelerated aging test

unit: [ppm]

		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	T.C.G
	Fresh oil	5	0	8	0	0	0	0	13
200 °C	5 days	21	7	23	4	32	14	357	101
	10 days	27	20	154	7	1306	28	643	1542
	15 days	251	100	192	7	1428	72	1470	2050
	20 days	404	133	1277	7	1438	113	2120	3372
	33 days	2572	727	2523	11	3781	212	3673	9826
	40 days	4767	1167	4531	19	4111	283	4550	14878
	76 days	7537	3140	2946	30	36705	608	9100	50966
230 °C	6 days	121	200	1858	4	137	29	737	2349
	10 days	477	467	4215	10	5487	52	1160	10708
	14 days	663	493	4638	11	5998	112	2287	11915
	17 days	890	507	5569	15	6042	198	3737	13221
	21 days	1586	830	8643	19	20632	266	4950	31776
	33 days	2832	3213	16662	130	22103	467	8120	45407
250 °C	8 days	874	774	5184	7	14234	200	4493	21273
	10 days	1382	894	8338	11	23101	311	6120	33537
	13 days	4320	20633	16615	13	26458	749	14233	68788
	17 days	5500	23020	24862	22	36424	891	16373	90719

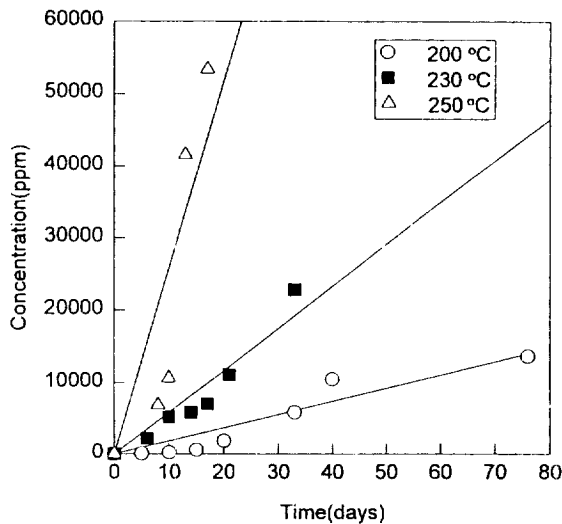


Fig. 2. Hydrocarbon concentration as a function of time for accelerated aging test at three different temperatures.

Fig. 2에서 농도-시간 곡선이 각 온도에서 대체로 직선성을 보이고 있다. 농도-시간 곡선이 직선으로 표시되는 반응은 반응속도가 반응물농도의 영향을 받지 않는 0차 반응이므로 절연유의 열분해반응은 다음과 같은 속도식으로 표시할 수 있다.

$$r_{HC} = k_d = A \exp(-E_d/RT) \quad (9)$$

위 식에서  $r_{HC}$ 는 탄화수소가스의 생성속도이고  $E_d$ 는 이 반응의 활성화에너지이다. 활성화에너지는 Fig. 2에서 각 직선의 기울기를 구한 후 Arrhenius plot하면 구할 수 있다. 이 결과를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에서 구한 활성화에너지( $E_d$ )의 값은 25,800 cal/mol이다. 따라서 절연유 열 열화 반응의 속도식은 다음과 같이 표시된다.

$$r_{HC} = k_d = (1.3 \times 10^{14}) \exp(-25,800/RT) \text{ [ppm/day]} \quad (10)$$

물론 저분자량의 탄화수소도 2차 분해에 의하여 생성될 수 있기 때문에 모든 탄화수소의 농도를 단순히 합산하여 사용한 본 연구의 방법이 이론적인 타당성을 갖지는 않는다. 그러나 앞에서 언급한 바

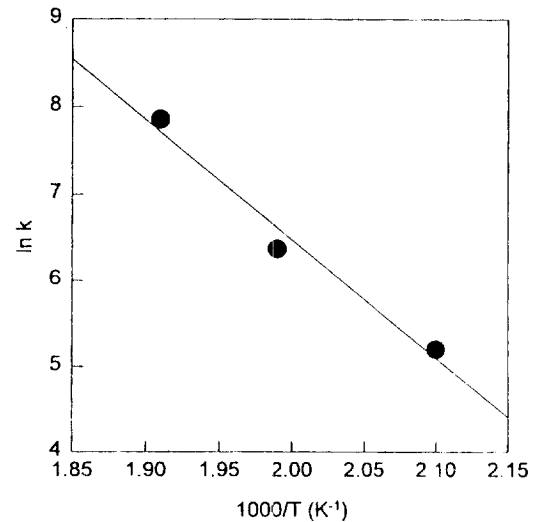


Fig. 3. Arrhenius plot of thermal degradation reaction of insulating oil.

와 같이 반응계의 복잡성을 감안하면 본 연구의 시도에 나름대로의 의미를 부여할 수 있다.

절연유는 절연유 중의 수분이나 용존산소에 의한 산화반응에 의하여 CO와 CO<sub>2</sub>를 발생한다. CO와 CO<sub>2</sub>는 절연지의 구성 성분인 cellulose의 열분해반응에 의해서도 생성된다. 그러나, 두 종류의 반응이 CO와 CO<sub>2</sub>생성에 기여하는 정도를 정량화하지 않았기 때문에 편의상 두 반응을 하나로 생각하여 절연재료의 산화반응으로 표기하고자 한다. 이 산화반응의 반응속도식을 구하기 위하여 CO+CO<sub>2</sub> 농도와 반응시간과의 관계를 Fig. 4에 도시하였다. 농도-시간 곡선이 각 온도에서 직선성을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 절연재료의 산화반응은 0차 반응으로 간주할 수 있으며 다음과 같은 속도식으로 표시된다.

$$r_o = k_o = A' \exp(-E_o/RT) \quad (11)$$

위 식에서  $r_o$ 는 CO+CO<sub>2</sub>의 생성 속도이고  $E_o$ 는 산화반응의 활성화에너지이다. 활성화에너지는 Fig. 4에서 각 직선의 기울기를 구한

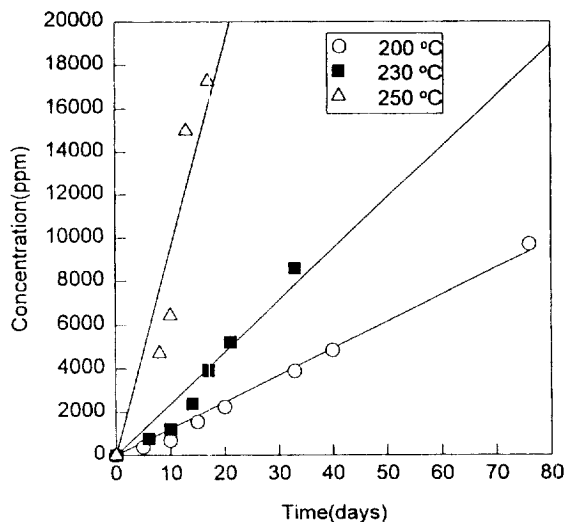


Fig. 4. CO+CO<sub>2</sub> concentration as a function of time for accelerated aging test at three different temperatures.

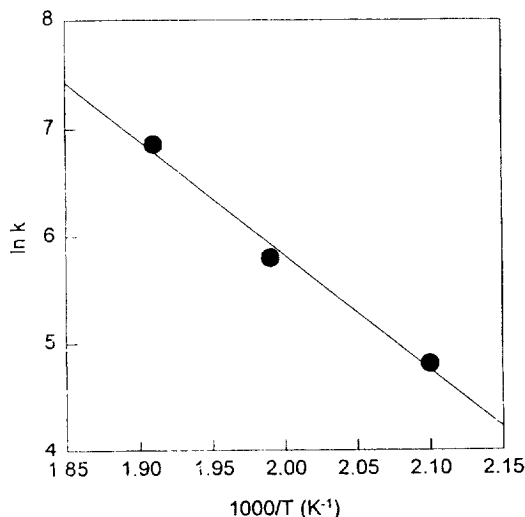


Fig. 5. Arrhenius plot of oxidation reaction of insulating material.

후 Arrhenius plot하면 구할 수 있다. 이 결과를 Fig. 5에 도식하였다. Fig. 5에서 구한 산화반응의 활성화에너지( $E_a$ )의 값은 20,600 cal/mol 이었다. 따라서 절연 재료의 산화반응속도식은 다음과 같이 표시 된다.

$$r = k_a = (3.3 \times 10^{11}) \exp(-20,600/RT) \text{ [ppm/day]} \quad (12)$$

#### 4.4. 가스 패턴의 변화

가스 패턴법은 변압기의 이상진단에 사용되며 횡축에 가스 성분율, 종축에 가스의 상대 농도를 표시한다. 유증가스 중 최대농도를 보인 성분의 상대 농도를 1.0으로 하고 가스 성분은 H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>의 순으로 배열한다. 이와 같은 방법으로 작성된 가스 패턴의 형상으로부터 실제 변압기에서 초래된 이상의 내용을 추적해 낼 수가 있다.

200 °C에서 수행된 가속열화의 가스 패턴을 Fig. 6에 나타내었다. 10일, 20일, 33일에서 가스 패턴은 수소 주도형이며, 40일째에는 메탄 주도형으로 경향이 바뀌었다. 수소를 제외한 탄화수소 중 CH<sub>4</sub>의 발생량이 비교적 많았으며 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>과 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>도 열화가 진행되면서 점차

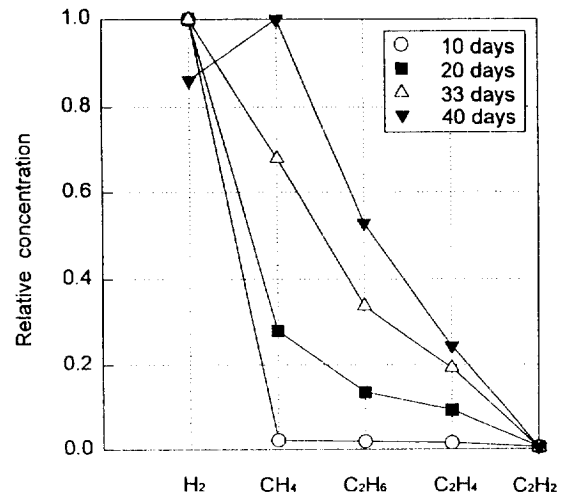


Fig. 6. Gas compositional change with reaction time in accelerated aging test conducted at 200 °C.

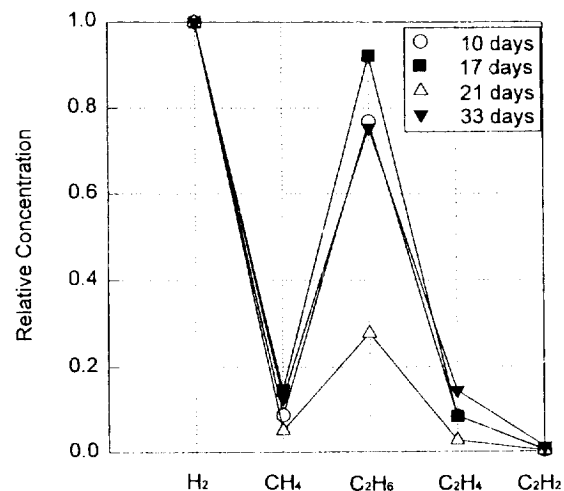


Fig. 7. Gas compositional change with reaction time in accelerated aging test conducted at 230 °C.

로 그 농도가 증가하였다. 본 실험은 가속 열화의 경우이지만, 실제 주상 변압기(약 50 °C 정도로 운전)에서는 (1) 코일의 층간 단락, (2) 코일의 용단, (3) arc 발생 등이 있을 때 H<sub>2</sub> 주도형 가스 패턴을 보이게 된다.

230 °C에서의 가스 패턴을 Fig. 7에 도식하였다. 200 °C에서는 H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 주도형이었으나, 230 °C에서는 H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 주도형으로 가스 패턴이 변화하였다. CH<sub>4</sub>과 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>는 포화탄화수소이고, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 발생량이 그다지 많지 않은 것으로 보아 230 °C에서는 탈수소화 반응이 많이 진행되지 않은 것으로 생각된다. 포화탄화수소 주도형 가스 패턴에 속하는 변압기 이상의 구체적인 사례로 (1) 탭 절환기 접촉 불량, (2) 절연 불량, (3) 국부과열 등을 들 수 있다.

250 °C의 가스 패턴을 Fig. 8에 도식하였다. 250 °C의 가속열화 실험의 결과도 앞의 경우와 마찬가지로 수소 주도형 가스 패턴을 보이고 있다. C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>가 많이 발생하고 있으며 불포화 탄화수소인 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>의 양이 230 °C의 결과보다 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 즉, 포화탄화수소의 탈수소화 반응이 상당히 진행됨을 보여준다.

가속열화시 가스 패턴 연구에서 알 수 있는 것은 온도가 상승하고 반응이 진행될수록 탄화수소의 주도형이 CH<sub>4</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>로 변

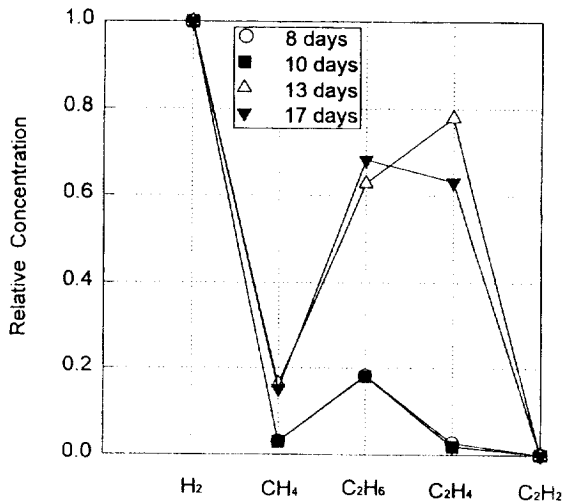


Fig. 8. Gas compositional change with reaction time in accelerated aging test conducted at 250 °C.

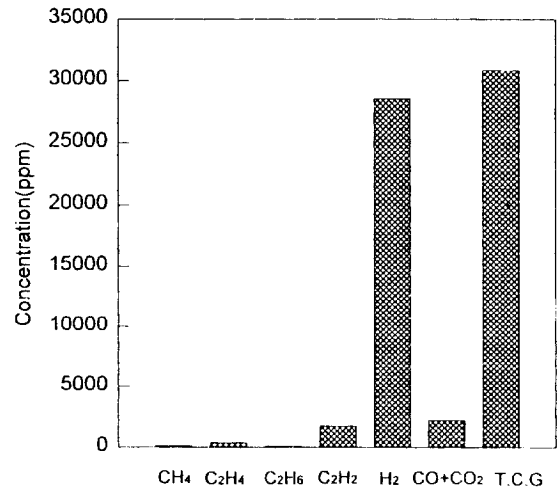


Fig. 10. Results of arc discharge during 20 min.

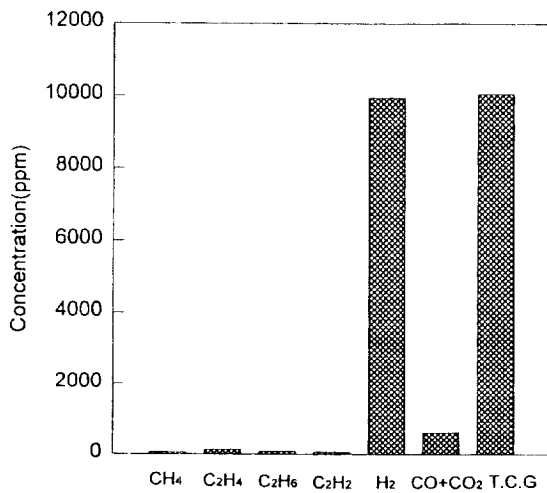


Fig. 9. Results of arc discharge during 90 sec.

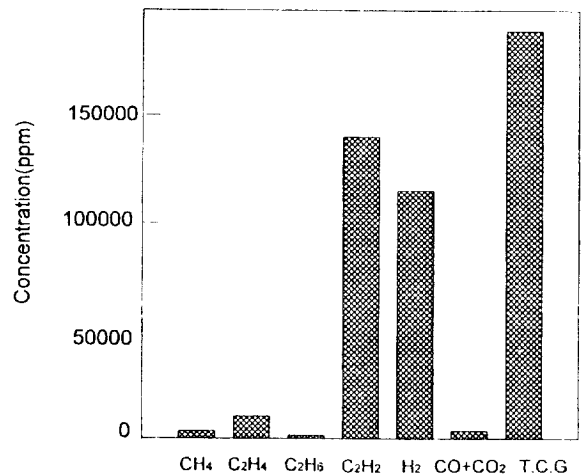


Fig. 11. Results of arc discharge during 3 hr.

화한다는 것과 탈수소 반응에 의한 불포화 탄화수소의 생성이 고온에서 촉진된다는 것이다. 가속열화반응에서는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>는 거의 검출되지 않고 있으며 이는 종래의 연구 결과와 부합된다[15].

#### 4-5. 방전 열화실험

가속열화와 방전 열화의 영향을 비교하기 위하여 방전 열화실험이 수행되었으며, 1분 30초 동안 방전시킨 실험결과를 Fig. 9에 도시하였다. 단시간 동안 방전시켰으나 다량의 수소가 발생하였고 나머지 기체는 상대적으로 미량 검출되었다. 실제 변압기에서는 본 실험과 같은 방전 현상은 거의 일어나지 않으며 부분방전 현상이 주로 일어난다. 따라서 본 연구의 방전 실험은 실제 변압기의 부분방전 현상을 가속시킨 결과라고 할 수 있으며, 정성적인 영향은 나름대로의 의미를 갖고 있다고 생각된다.

변압기의 이상 진단법 중 특징적인 가스에 착안하는 방법에 사용되는 대표적인 가스는 CO와 CO<sub>2</sub>(고체 절연물의 과열) 및 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(절연유의 arc와 고온 열분해)이다. 특히 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>의 경우 다량으로 검출되면 권선의 층간 단락과 아크 방전 등 중대한 사고를 의미한다. Fig. 10과 같이 20분간 방전하였을 경우 가속열화실험에서 거의 검출되지 않았던 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가 상당량 검출되었고 총 가연성 가스량은 90초 방전에 비하여 3배 정도 증가하였다. 방전 실험은 고체 절연물을 배제한

절연유에 대하여 수행되었으나 CO와 CO<sub>2</sub>가스가 상당량 검출되었으며 이는 CO와 CO<sub>2</sub>의 발생이 절연지(보드)의 과열뿐만 아니라 절연유의 산화에 의하여도 진행됨을 보여주는 결과이다.

Fig. 11의 3시간 방전의 경우 앞의 두 경우와 달리 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가스가 가장 많이 검출되었다. 이론적으로는 포화탄화수소의 탈수소 반응에 의하여 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가 생성되므로 H<sub>2</sub>의 양이 가장 많이 검출될 것으로 생각하였으나 실험결과는 H<sub>2</sub>보다 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가 더 높은 농도를 보여준다. 이는 H<sub>2</sub>가 실험도중 누출되었기 때문인 것으로 생각된다.

방전열화시 항상 수소는 다량 검출되었으나, 방전 시간이 경과할수록 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>량이 증가하고 다른 탄화수소의 발생량이 그다지 많지 않은 것으로 보아 열 열화와는 다른 반응기구에 의하여 열화가 진행되는 것으로 추정된다.

## 5. 결 론

변압기 절연유의 가속 열 열화와 방전열화실험을 수행하고 유중 가스를 air bubbling방식에 의하여 추출하였다. 분석결과를 반응 공학적인 방법으로 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 절연유에 대한 가스의 용해도는 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>,

CO 및 H<sub>2</sub>순으로 감소하였으며 공기에 의한 추출률은 용해도의 역순이었다.

(2) 절연 재료의 열 열화 및 산화반응은 각각 0차 반응으로 표시되었으며 반응속도식은 다음과 같았다.

$$\text{열분해반응 : } r_{H_2} = k_d = (1.3 \times 10^{-14}) \times e^{-25800/RT} \text{ [ppm/day]}$$

$$\text{산화반응 : } r_o = k_o = (3.3 \times 10^{-11}) \times e^{-20600/RT} \text{ [ppm/day]}$$

(3) 가속 열 열화 반응은 가스 패턴이 수소 주도형이며, 초기에는 H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>가 주로 생성되나 온도가 상승함에 따라 C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub> 성분이 많이 생성되었다.

(4) 방전 열화의 경우 아크 방전 초기에는 유증 가스 패턴은 수소 주도형이나, 시간이 경과함에 따라 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 주도형으로 변화하였으며, 열 열화와는 다른 반응 기구에 의하여 열화가 진행되는 것으로 추정된다.

## 감 사

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구과제 연구비에 의하여 연구된 "가스분석에 의한 주상변압기의 예방진단에 관한 연구"의 일부이며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 전영갑, 강동식, 선종호, 김영석: "변압기 절연유 열화센서 진단용 계측기 개발 연구", 한국전기연구소 보고서(1994).
2. Kamata, Y.: *IEEE Trans. Elec. Insul.*, **21**, 1045(1986).
3. Andrzej, B. S.: *IEEE Elec. Insul. Magazine*, **11**, 8(1995).
4. 전민호: 전기기사, **4**, 48(1995).
5. Choi, J. K.: M.S. Thesis, Seoul National Univ., Seoul, Korea (1990).
6. 大容量 變壓器 事故防止對策 專門委員會: 日本電氣協同研究, **30**(6), 1(1975).
7. Musil, R. et al.: *IEEE Elec. Insul. Magazine*, **11**, 21(1995).
8. Lee, J. H., Kwak, H. R. and Han, M. K.: *Trans. KIEE*, **40**, 799 (1991).
9. 권태원, 서순교, 홍원표, 윤용범: "전력기기 예방진단 기술 연구", 한전기술연구원 보고서(1987).
10. 윤경석, 김택제, 오박균, 신규식, 심응호: "재생절연유 경년 열화 연구", 한전기술연구원 보고서(1987).
11. Lamarre, C., Crone, J. P. and Duval, M.: *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **22**, 57(1987).
12. Sirai, M., Ishii, T. and Makino, M.: *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **12**, 266(1977).
13. Szepes, L. et al.: *IEEE Trans. Elec. Insul.*, **17**, 345(1982).
14. 남창현: "변압기 유증가스 상시 감시 시스템의 운용연구", 한전기술연구원 보고서(1994).
15. 日豪科學技術 심포지움 國內委員會: "高電壓電力設備의 絶緣診斷과 監視技術", 76(1984).