

# 주상변압기 절연유의 경년열화반응 속도론에 관한 연구

(A Study on the Age Degradation Kinetics of Pole Transformer Oil)

南 泳 雨\*  
(Young-Woo Nam)

## 요 약

본 논문에서는 주상변압기 절연유의 가속열화반응을 수행하였다. 유증가스를 air bubbling법으로 추출하여 가스크로마토그래프로 성분을 분석하였으며 가스농도는 각 가스의 추출율을 감안하여 보정하였다. 절연재료의 열화는 열분해반응과 산화반응에 의하여 진행되었으며 두종류의 반응은 모두 0차반응의 특성을 보였고 탄화수소류, CO+CO<sub>2</sub> 및 수소가스의 생성속도식을 얻었다. 유증가스 분석과 UV-Visible 분광광도법에 의하여 변압기내의 철심과 동코일이 열화과정에서 촉매역활을 함을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, aging of insulating oil in pole transformer has been studied by performing accelerated thermal aging test. Dissolved gases were extracted by air bubbling method. Concentration of dissolved gases were modified by extraction ratio of each gases in insulating oil. Aging of insulating materials were proceeded by thermal degradation and oxidation reaction. Both of the reactions followed zeroth order kinetics. Formation rate equations for hydrocarbons, carbon oxides, and hydrogen were derived. It was conformed by gas analysis and UV-Visible spectrophotometric method that iron core and copper coil in pole transformer act as catalyst during the aging process.

## 1. 서 론

산업이 급속히 발전함에 따라 전력 수용자는 양질의 전력과 전력공급의 신뢰성을 요구하게 되었다. 따라서 합리적인 전력설비의 진단에 관한 연구가 최근에 관심이 되고 있으며, 15[kV] 이상

의 대용량 변압기에서는 사고예방진단에 관하여 오래전부터 연구되어 유증 개스분석에 의한 변압기의 절연열화진단법이 효과적으로 활용되고 있다. 대용량 변압기는 돌발사고로 인한 영향이 광범위하므로 예방진단법에 관한 연구가 많이 되고 있으나 1~3), 배전용 변압기(22.9 [kV])의 예방진단에 관한 연구는 미미한 실정이다. 우리나라의 22.9[kV]급 배전용 주상변압기의 총 대수는 약 80만대('94. 6. 기준)로써 급속히 증가하고

\*正會員: 崇實大 工科大学 化學工學科 教授  
接受日字: 1995年 11月 19日

있으나 배전용 주상변압기의 절연유에 대한 연구는 아직까지 기초연구가 미약한 실정이다. 배전용 주상변압기는 특별한 진단을 하지 않고 간이 수리(8년 경과 후)와 중 수리(13년 경과 후)를 실시하고 있다. 이러한 수리 점검과정은 많은 인력과 막대한 수리비용을 초래하고 있어 수용가에 피해가 직결되는 배전용 변압기의 돌발사고를 방지하기 위한 예방진단기법의 개발이 시급한 실정이며, 학술적인 연구를 통하여 예방진단에 대한 기초자료 및 예방진단기법을 제시함으로써 돌발사고의 예방 및 경제적인 손실을 최소화할 필요성이 대두되고 있다.<sup>4)</sup>

변압기의 열화는 열, 흡습, 부분방전 및 기계적 응력에 의하여 진행되나 일반적으로 가장 큰 영향을 미치는 요인은 열적 열화요인으로 알려져 있다. 열 열화는 절연유나 절연지 등 절연재료의 분해중합과 열산화반응에 의하여 진행되며 이 결과로 가연성 탄화수소계 가스나 CO<sub>2</sub>, CO 가스를 방출한다. 이 가스들은 대부분 절연유중에 용해되며<sup>5), 6)</sup> 대용량변압기에서는 절연유중의 가스를 추출하여 변압기의 내부이상의 유무와 이상의 내용을 진단하고 있다.<sup>7)</sup> 그러나 배전용 주상변압기의 절연유(1종 2호)는 대용량변압기의 절연유(1종 4호)와는 종류가 다르고, 밀폐방식도 다를 뿐만 아니라 절연유의 열화과정도 다르므로 국내에서 사용되는 배전용 주상변압기 절연유의 열화반응에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 아직까지 연구가 별로 되지 않은 배전용 주상변압기를 대상으로 절연유의 열화반응에 대한 여러 인자들의 영향을 실험함으로써 (1) 반응온도와 절연재료등이 열화반응에 미치는 영향을 규명하고, (2) 유중가스 분석과 UV-Visible 흡광도를 측정하여 각 가스의 생성속도식을 도출하며, (3) 열화반응 속도식으로부터 가스의 생성량을 추정함으로써 현재의 배전용 주상변압기 수리주기의 타당성을 검증하며, (4) 주상변압기 예방진단의 기초자료를 제공함을 목적으로 한다.

## 2. 실험

### 2.1 가속열화실험

주상변압기 내에서의 열화반응은 서서히 진행되므로 속도론적 연구가 어려우므로 가속열화장치를 2대 제작하여 열화실험을 수행하였다. 반응기의 직경은 9.8[cm], 높이는 27.8[cm]로 전체용량이 약 2[ℓ]가 되게 하였다. 반응기는 stainless steel로 제작하였으며 상부에 safety valve를 부착하였다. 절연유를 열화시키는 발열장치로 내부에 히터를 설치하였으며, on-off 제어방식을 사용하여 절연유의 온도를 설정온도±2[℃] 내에서 유지하였다.

절연유의 열화조건으로는 주상변압기(30[kVA])의 내부 구성성분 중량비(절연지 0.06[kg], 철심 3.168[kg], 동코일 1.152[kg])를 참고하여 아래와 같은 내용으로 열화실험을 수행하였다.

- 시료유: 광유 1종 2호
- 내용물: 절연지 40.5[g], 철심 800[g], 동코일 778[g]
- 열화온도: 130[℃]~250[℃]
- 절연유: 1.35[ℓ]~2[ℓ]
- 열화기간: 17일~80일

열화실험은 절연재료를 모두 투입한 경우와 절연유만 투입한 경우로 나누어 수행되었다.

### 2.2 가스추출실험

유중가스 분석에는 Torricelli 방식, Toepler 펌프방식 등 진공탈기법이 사용되나<sup>8)</sup> 본 연구에서는 Bubbling 방식의 가스추출법을 사용하였다. 추출병에 73[ml]의 절연유를 투입하여 유면 위 공간과 같은 부피가 되도록 설계하였다. 공기를 carrier 가스로 사용하여 순환펌프로 300[ml/min]의 유량으로 15분간 순환시켜 유중가스를 추출하였고, 추출된 가스와 carrier gas인 공기의 혼합가스를 일정시간 순환시켜 시료유와 시료유 상부공간의 가스가 기액평형을 이루어 추출이 완료되면 gas sampler로 포집하여 GC로 분석하였다.

각 가스의 추출을 실험에서는 절연유와 고체 절연물의 열분해에 의하여 생성되는 7종의 가스를 각각 2151[ppm] 주입하여 절연유에 충분히 용

해시킨 후 용해된 각 기체의 농도를 분석하였고, 이들을 추출하여 추출율을 산출하였다.

### 2.3 시료 분석

가스추출장치에서 추출된 가스 혼합물은 가스 크로마토그래프를 사용하여 분석하였다. 가연성 가스중 메탄, 에탄, 에틸렌, 아세틸렌의 분석은 gas sampler가 장착된 Shimadzu-9A GC를 사용하였다. 분석 컬럼으로 porapak N (1/8[in] ID×6[ft])을 사용하였으며, 불꽃이온화검출기(FID)를 사용하였다. 수소, CO, CO<sub>2</sub>는 가스추출장치의 sampling port에서 채취한 시료를 가스 크로마토그래프(영인과학-680D)로 분석하였다. 검출기로는 열전도도검출기(TCD)를 사용하였다. 수소와 일산화탄소의 분석에는 Molecular sieve 5A, 이산화탄소의 분석에는 활성탄을 사용하였다.

변압기내의 절연유는 열화되면 분해산물이 유중에 축적되어 절연유의 색상이 변한다. UV-Visible 분광광도법을 사용하여 측정된 흡광도 값으로 부터 절연유의 열화정도를 추정할 수 있다. 실 변압기 조건에서 열화된 시료와 절연유만을 가속열화시킨 시료를 UV-Visible 분광 분석법으로 흡광도를 측정하였다. UV-Visible 분광분석실험에 사용된 기기는 Shimadzu 사의 UV-3101 PC 이며 시료는 시료:hexane=0.5:9.5(ml)로 희석하여 사용하였고, 흡수과장은 최대의 흡광도를 나타내는 380(nm)를 선택하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 유중 가스 추출율

추출율 실험에서 절연유에 용해된 각 기체의 농도를 분석한 결과 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>가 가장 많이 용해되었으며 수소의 용해도가 제일 작았다. 탄화수소 가스중 탄소수가 2인 C<sub>2</sub> 성분의 용해도가 C<sub>1</sub> 성분의 용해도 보다 크게 나타났다.

추출율은 용해도와 반비례하였으며 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>가 13%, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>가 15%, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>의 경우 27%, CO<sub>2</sub> 30%, CH<sub>4</sub> 81%, CO 92%였으며 H<sub>2</sub>는 97%가 추출되

표 1. 유중가스의 추출율

Table 1. Extraction ratio of dissolved gases

단위 : [ppm]

	용해량	용해율	추출량	추출율
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1473	0.685	191	0.13
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1252	0.582	188	0.15
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	736	0.342	199	0.27
CO <sub>2</sub>	663	0.308	199	0.30
CH <sub>4</sub>	243	0.113	197	0.81
CO	53	0.0246	49	0.92
H <sub>2</sub>	33	0.0154	32	0.97

표 2. 가속열화실험 결과

(절연유+철심+동코일+절연지)

Table 2. Results of accelerated aging test

(oil+iron core+copper coil+paper)

단위 : [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.	
신 유	5	0	8	0	0	0	0	13	
200℃	5월	21	7	23	4	32	14	357	101
	10월	27	20	154	7	1306	28	643	1542
	15월	251	100	192	7	1428	72	1470	2050
	20월	404	133	1277	7	1438	113	2120	3372
	33월	2572	727	2523	11	3781	212	3673	9826
	40월	4767	1167	4531	19	4111	283	4550	14878
230℃	76월	7537	3140	2346	30	36705	608	9100	50966
	6월	121	200	1858	4	137	29	737	2349
	10월	477	467	4215	10	5487	52	1160	10708
	14월	663	493	4638	11	5998	112	2287	11915
	17월	890	507	5569	15	6042	198	3737	13221
250℃	21월	1586	830	8643	19	20632	266	4950	31776
	33월	2832	3213	16662	130	22103	467	8120	45407
	8월	874	774	5184	7	14234	200	4493	21273
	10월	1382	894	8338	11	23101	311	6120	33537
13월	4320	20633	16615	13	26458	749	14233	68788	
	17월	5500	23020	24862	22	36424	891	16373	90719

었다. 여기서 얻어진 추출율은 GC에서 측정된 각 가스의 실제 유중농도를 구할 때 사용된다. 추출율 실험결과를 표 1에 수록하였다.

### 3.2 가속 열화 실험

200[°C], 230[°C], 250[°C]에서 실 변압기 구성비대로 절연재료를 투입하여 수행한 절연유의 가속 열화실험결과를 표 2에 나타내었다. 각 가스의 농도는 열화온도가 높을수록, 시간이 경과할수록 증가하였다. 실제 변압기의 경우에는 통상적으로 약 50[°C]의 온도를 유지하며 이상에 의한 과열시 80~90[°C]까지 온도가 상승하므로 본 연구에서 선택한 200[°C] 이상의 조건은 실제 주상 변압기와는 다른 실험 조건이나 반응속도론 연구를 위하여 열화과정을 촉진시키기 위하여 선택하였다.

신유의 분석 결과는 유중 가스가 거의 없음을 보여주고 있으며, 방전에 의하여 주로 생성되는 것으로 알려진 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가스도 아주 낮은 농도를 보이고 있다. 절연유의 산화나 cellulose 성분의 열분해에 의하여 생성되는 CO와 CO<sub>2</sub> 중 CO의 농도도 비교적 낮게 나타났다.

열화장치에 절연유만 투입하여 가속열화 시킨 실험은 180[°C], 200[°C], 및 250[°C]에서 수행되었으며 실험결과를 표 3에 표시하였다. 200[°C]와 250[°C]에서 수행된 실험에서 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>계의 탄화수소와 수소의 유중농도는 동일한 온도에서 실 변압기 조건에서 수행된 결과와 비교하면 상당히 작은 값을 보여주었다. 이는 절연유의 분해에 철심이나 동코일이 촉매작용을 하고 있음을 의미한다. 산화반응에 의하여 생성되는 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도도 절연재료가 모두 투입된 실험과 비교하면 상당히 작은 값을 보여주었다. 그러나 절연유만의 열화실험에서 CO와 CO<sub>2</sub>가 생성되므로 CO와 CO<sub>2</sub> 가스가 절연지뿐만 아니라 절연유에서도 생성이 됨을 확인하였으며, 따라서 본 실험에서 CO와 CO<sub>2</sub>의 생성량이 작은 이유가 금속물질의 촉매작용이 배제된 결과인지 아니면 탄소원으로서 절연지가 투입되지 않은 결과인지는 결론을 내릴 수 없었다.

### 3.3 반응속도론

절연유의 열화반응은 분해생성물의 종류도 다양하고 절연유 자체의 구성성분도 복잡한 혼합물 상태이므로<sup>4)</sup> 속도론 연구가 어렵다. 가속 열화 실험에서 얻어진 7종의 가스중 절연유의 열분해

표 3. 가속열화실험 결과(절연유)

Table 3. Results of accelerated aging test(oil only)  
단위 : (ppm)

		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	T.C.G
180°C	10일	3	0	0	1	3619	0	407	3622
	20일	4	0	0	2	3845	0	501	3851
	30일	29	5	40	2	4713	0	1715	4789
	40일	103	11	49	0	5285	0	1878	5448
	51일	121	16	58	3	6392	0	2315	6590
200°C	10일	0	0	0	0	178	59	414	237
	20일	3	0	0	0	1360	93	862	1456
	30일	4	0	0	0	3134	163	1258	3300
	40일	7	0	0	0	5324	322	1856	5653
	51일	54	3	9	1	7023	585	2491	7675
250°C	10일	3	1	0	0	1076	0	624	1080
	15일	3	9	48	0	3320	413	1180	3793
	21일	717	64	253	5	3239	544	1925	4822
	30일	8	2	26	1	2697	182	1291	2916
	35일	139	59	255	2	3085	646	1670	4186

반응에 의하여 생성되는 탄화수소류 기체의 농도를 합산하여 반응시간과의 관계를 그림 1에 도시하였다. 수소는 탄소성분을 포함하지 않으며 탄화수소의 탈 수소 분해반응에 의하여 생성되므로 일단 제외시켰다.

그림 1에서 농도-시간 곡선이 각 온도에서 직선으로 표시되는 반응은 반응물 농도의 영향을 받지 않는 0차 반응이다.<sup>5)</sup> 그림 1에서 각 직선의 기울기는 해당온도에서의 반응속도상수(k<sub>d</sub>)이므로 각 온도에서 k<sub>d</sub> 값을 구한 후 Arrhenius plot (ln k<sub>d</sub> vs. 1/T) 하면 기울기로부터 활성화에너지(E<sub>a</sub>)를 구할 수 있다.<sup>6)</sup> 이 결과를 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 직선의 기울기는 -E<sub>a</sub>/R 이며 이로부터 구한 활성화에너지의 값은 25,800[cal/mol]이며 빈도인자 값은 1.3×10<sup>14</sup> [ppm/day]이다. 따라서 절연유로 탄화수소 가스의 생성속도(열분해 반응속도)는 다음과 같이 표시된다.

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

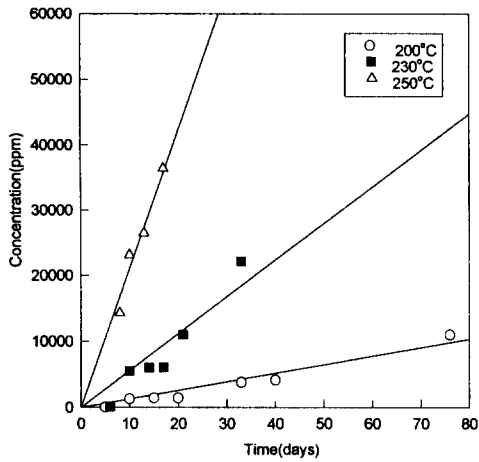


그림 1. 가속열화 실험에서 탄화수소 농도와 열화시간과의 관계  
Fig. 1. Hydrocarbon concentration-aging time curve according to aging temperature

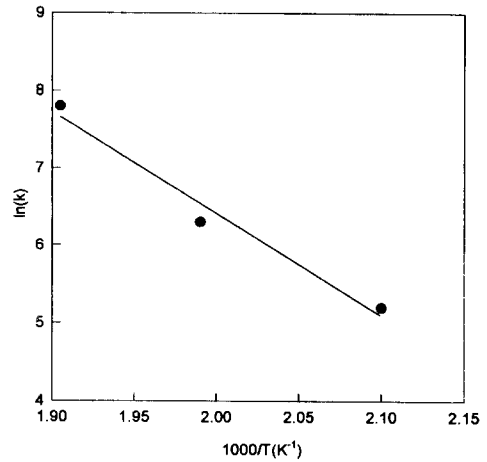


그림 2. 탄화수소 생성반응의 Arrhenius plot  
Fig. 2. Arrhenius plot of hydrocarbon formation reaction

주상변압기는 대용량 변압기와는 달리 완전 밀폐가 되지 않기 때문에 열화에 의해서 생성된 가스들이 일부분만 유중에 용해되고 대부분의 가스는 대기 중에 방출된다. 특히 수소는 절연유에 대한 용해도가 작기 때문에 대부분이 생성 즉시 방출되는 것으로 추정된다. 그러나 수소의 생성 속도는 탄화수소 생성속도와 함께 절연유 열화정도를 판단하는 지표로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

그림 3에 열화온도에 따르는 수소의 농도-시간 관계를 도시하였다. 각 온도에서 수소의 농도-시간 곡선이 직선성을 보였다. 따라서 탄화수소의 생성반응과 같이 수소의 생성반응도 절연유의 농도와 무관한 0차 반응으로 간주할 수 있으며, 그림 3에서 직선의 기울기로부터 속도상수를 구한 후 Arrhenius plot을 한 결과로부터 계산된 수소 생성반응의 활성화에너지는 21,000[cal/mole]이며, 빈도인자의 값은  $9.28 \times 10^{11}$ [ppm/day]이었다. 따라서 수소 생성반응 속도식은 다음과 같이 표시된다.

$$r_H = (9.28 \times 10^{11}) \exp(-21,000/RT) \text{ [ppm/day]}$$

절연유도 유중의 수분이나 용존산소에 의한 산화반응에 의하여 CO와 CO<sub>2</sub>를 발생시킨다. 절연유와 절연지로부터 각각 생성되는 CO와 CO<sub>2</sub>의 생성량을 정량화하기 어려우므로 편의상 CO와

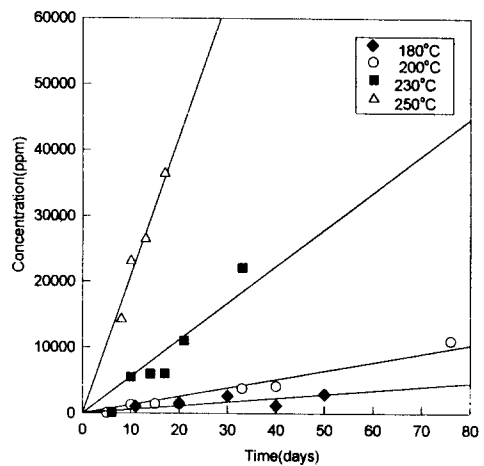


그림 3. 열화온도별 수소 농도-열화시간 곡선  
Fig. 3. Hydrocarbon concentration-aging time curve according to aging temperature

CO<sub>2</sub>는 절연재료로부터 산화반응에 의하여 생성되는 것으로 간주한다. CO+CO<sub>2</sub> 농도-시간 곡선이 각 온도에서 직선성을 보임을 확인하였다. 앞서서와 같은 방법으로 속도상수 값을 구하고 이를 Arrhenius plot 하여 활성화에너지를 구하였다. 이로부터 구한 산화반응의 속도식은 다음과 같다.

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

### 3.4 열화에 의한 절연유의 흡광도 변화

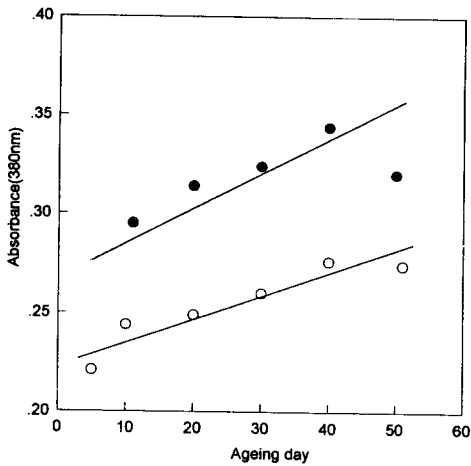


그림 4. 180°C에서 가속열화에 따른 흡광도 변화  
 (○: 절연유, ●: 절연유+변압기 구성성분)  
 Fig. 4. Variation of absorbance of aged oil at 180°C  
 (○: oil only, ●: oil+transformer components)

180[°C]와 200[°C]에서 변압기 구성 성분비대로 철심, 동코일, 절연지와 절연보드를 투입하여 수행한 가속열화 결과와 같은 온도에서 절연유만을 투입하여 실험한 결과를 비교하여 그림 4와 5에 각각 수록하였다. 180[°C]에서 실험한 그림 4에서 절연유만 투입한 경우에는 흡광도값의 변화가 그다지 많지 않았으며, 변압기 구성성분이 투입된 경우의 흡광도 변화는 절연유만의 실험보다 흡광도 값과 증가율이 더 크게 나타났다. 이는 철심이나 동코일이 절연유의 열화에 어떤 역할을 함을 의미하며 앞의 유증가스 분석에서도 같은 경향이 관찰된바 있다. 200[°C]에서 수행된 그림 5에서도 변압기 구성성분이 모두 투입된 경우 흡광도의 증가율과 값이 절연유만의 경우와 비교하여 상당히 큰 차이를 보이며 이는 변압기 재료중 금속성분이 절연유 열화에 촉매 역할을 한다는 앞의 결론을 확인해 주는 결과로 생각된다.

#### 4. 반응속도식을 이용한 각 가스의 발생량 추정

앞에서 유도된 반응속도식을 이용하면 각 가스의 하루 발생량을 추정할 수 있다. 이 경우 변압

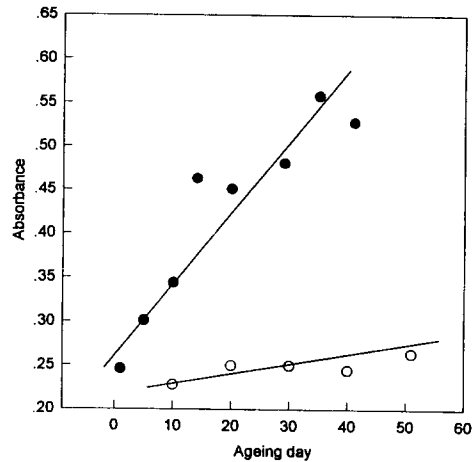


그림 5. 200°C에서 가속열화에 따른 흡광도 변화  
 (○: 절연유, ●: 절연유+변압기 구성성분)  
 Fig. 5. Variation of absorbance of aged oil at 200°C  
 (○: oil only, ●: oil+transformer components)

기의 가동온도를 설정하여야 하며 변압기의 온도는 변하지 않는다고 가정한다. 반응속도식으로부터 각 온도별 탄화수소, 수소 및 CO+CO<sub>2</sub>의 하루 발생량을 계산하면 표 5와 같다. 반응속도식들은 180[°C]~250[°C]에서 실험한 자료를 이용하여 구하였기 때문에 저온영역에 적용할 경우 오차가 발생할 수 있다. 그러나 저온에서 적용할 수 있는 속도식을 구하려면 열화반응을 몇 년간 수행해야 하기 때문에 현실적으로 불가능하다.

표 4를 이용하여 현재 한전에서 수행하고 있는 주상변압기 수리주기의 타당성을 검증해 보자. 주상변압기의 상태를 판정하는 기준은 아직 설정되어 있지 않으므로 유증가스 농도에 의한 대용량 변압기의 판정기준을 적용할 수 있을 것이다.

가동중인 주상변압기는 보통 50[°C] 정도를 유지하며 부하가 커지면 온도도 80~90[°C]까지 상승한다. 비현실적이지만 변압기가 90[°C]의 온도에서 연속적으로 가동되는 경우 간이수리 주기인 8년동안 발생하는 가스량을 표 4를 이용하여 계산해 보자. 탄화수소 류는 0.038[ppm/day] × 365일 × 8년 = 111[ppm]이 발생하며, 수소는 0.21[ppm/day] × 365일 × 8년 = 613[ppm], CO+CO<sub>2</sub>는 0.13[ppm/day] × 365 일 × 8년 = 380[ppm]이 발

표 4. 온도별 각종가스의 하루 발생량 추정치  
Table 4. Estimated gas concentration formed per day at various temperature

단위 : [ppm]

	탄화수소류	수소	CO+CO <sub>2</sub>
40℃	1.25 × 10 <sup>-4</sup>	2.01 × 10 <sup>-3</sup>	1.36 × 10 <sup>-3</sup>
50℃	4.52 × 10 <sup>-4</sup>	5.72 × 10 <sup>-3</sup>	3.79 × 10 <sup>-3</sup>
60℃	1.51 × 10 <sup>-3</sup>	1.53 × 10 <sup>-2</sup>	9.94 × 10 <sup>-3</sup>
70℃	4.72 × 10 <sup>-3</sup>	3.85 × 10 <sup>-2</sup>	2.46 × 10 <sup>-2</sup>
80℃	1.38 × 10 <sup>-2</sup>	9.22 × 10 <sup>-2</sup>	5.80 × 10 <sup>-2</sup>
90℃	3.80 × 10 <sup>-2</sup>	2.10 × 10 <sup>-1</sup>	1.30 × 10 <sup>-1</sup>
100℃	9.90 × 10 <sup>-2</sup>	4.59 × 10 <sup>-1</sup>	2.80 × 10 <sup>-1</sup>
110℃	2.46 × 10 <sup>-1</sup>	9.63 × 10 <sup>-1</sup>	5.79 × 10 <sup>-1</sup>

생한다. 이와 같이 발생된 가스가 누출되지 않고 절연유중에 축적된다면 90[℃]에서 8년간 가동된 주상변압기의 상태를 대용량 변압기의 판정기준을 도입하여 평가할 수 있다. 이기간중 발생하는 총 가스량은 약 1,100[ppm]이며 이를 총가연성 가스로 간주하면 요주의 수준이다. 각 가스를 기준으로 하는 경우 탄화수소류는 모두 정상상태이며, 수소는 요주의 수준이고, CO+CO<sub>2</sub>는 정상수준이다. 총가연성가스의 경시증가량[ppm/year]은 정상상태로 볼 수 있다. 8년간 발생된 총 가연성 가스량과 수소의 발생량이 요주의 상태임을 보여주나 이는 변압기가 8년동안 90[℃]를 유지한다는 비현실적인 조건에서 발생량을 계산하였기 때문이다. 실 변압기 조건이라면 모든 상태가 정상적인 조건에 있을 것으로 예상되며 따라서 8년이라는 간이수리 주기는 대체로 적절하다고 판단된다.

### 5. 결 론

유증가스를 탄화수소류, 수소 및 CO+CO<sub>2</sub> 등 3종류로 분류하여 각 가스들의 생성반응을 연구한 결과 각 가스들의 생성반응은 0차반응으로 표시되었으며 반응속도식은 다음과 같았다.

$$r_{H_2} = (1.3 \times 10^{14}) \exp(-25,800/RT) [\text{ppm}/\text{day}]$$

$$r_H = (9.28 \times 10^{11}) \exp(-21,000/RT) [\text{ppm}/\text{day}]$$

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

반응속도식을 이용하여 각 가스의 발생량을 추정하였다. 수소의 발생량이 가장 많았고 CO+CO<sub>2</sub>, 탄화수소류 순이었다. 변압기가 8년간 90[℃]에서 가동된다고 가정할 때, 대용량 변압기의 판정기준을 적용할 경우 가스 발생량은 일부 항목이 요주의인 것을 제외하면 대부분 정상수준이었다. 본 연구에서 절연재료를 단순히 유중에 혼합한 형태로 실험을 진행하였기 때문에 실제 변압기 권선의 변화를 모델링하기에는 한계가 있으며 개선의 여지가 많다고 생각된다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.  
과제관리번호:95-61

### 참 고 문 헌

- 1) 전민호, "변압기의 내외부 점검 및 예방판정 (2)," 전기기사, 1995.4
- 2) "변압기 절연유 열화센서 진단용 계측기 개발연구," 과학기술처, 1994, 1~265
- 3) "Trend Analysis: Performance Monitoring of Transformers," 1988, MIT Transformer Project Final Report, Vol.1, 171~184
- 4) "재생절연유의 경년열화연구," 한국전력공사 기술연구원, 1987, 1~834
- 5) C. Lamarre et al., "Influence of oxidation on the electrical properties of inhibited Naphtenic and Paraffinic transformer oils", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-22, No. 1, 1987, pp57~62
- 6) H. Yoshida et al., "Degradation of insulating materials of transformers," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol EI-22, No. 6, pp 795~800
- 7) "변압기 유증가스 상시감시 시스템의 운영연구," 한국전력공사 기술연구원, 1994.8
- 8) O. Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering", 2nd ed., 1972, pp.29~53.

### ◇ 著 者 紹 介 ◇



남영우(南泳雨)

1953年 6月 21日生. 1975年 서울대 化工科 卒業. 1984年 서울대 大 學 院 化工科 卒業(博士). 1981年~現在 崇實大 學 校 化 工 科 教 授