

# 활선중 절연유 분석을 통한 유입변압기 건전성 평가 방법에 관한 연구

신연진<sup>1</sup> · 임재용<sup>2†</sup>

## A Study on the Health Evaluation Method of Oil-immersed Transformer through Analysis of Insulating Oil

Youn-Jin Shin<sup>1</sup> · Jae-Yong Lim<sup>2†</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Jae-Yong Lim

Tel : +82-2-970-6388

E-mail : jyylim@seoultech.ac.kr

Received : October 4, 2023

Revised : November 21, 2023

Accepted : November 22, 2023

**Abstract** : The health state of the oil transformer is evaluated by the age of use and the state of internal defects. Mineral Oil, used as an insulator for oil transformers, creates specific gases and compounds through chemical reactions caused by heat, moisture, and partial discharge inside the transformer. It is possible to determine the aging and defect of the transformer through these gases and compounds. So, it is an important indicator to evaluate the health of a transformer. In this study, factors for assessing the health of transformers were hierarchically categorized, and key factors for each hierarchy were selected for design weighting. These weights were determined through surveys conducted with experts in the fields of transformer design, operation, and quality. For the health of a transformer, defect-related factors are approximately three times more important than factors related to aging. Additionally, defect-related factors showed a higher weighting for gases generated at high temperatures. Furthermore, Furan was determined to have a high weight, directly associated with insulating paper aging. Based on these findings, a health index was proposed, and a comparative analysis was conducted by categorizing 40 operational transformers into normal and comparison groups to evaluate and validate it.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : oil-immersed transformer, health index, dissolved gas in oil, furan, AHP(Analytic Hierarchy Process)

## 1. 서론

1960년대 이후 급속한 경제, 산업발달로 인하여 변압기를 비롯한 전력 설비의 설치 및 용량이 급격하게 증가하였으며 현재 많은 전력 설비가 노후화로 인한 교체가 고려되고 있다. 이중 전력용 변압기는 전력 네트워크에서 효율적 송전 및 배전을 위한 핵심 전력 설비로서 고장 시 광범위한 정전을 수반하여 사회적, 경제적으로 막대한 피해를 일으킨다<sup>1)</sup>. 또한, CIGRE WG 37.27에서 조사된 전 세계 변압기 노후화 경향 및 국내 전력용 변압기 운전 현황 조사에 따르면 국내외적으로 많은 변압기가 수명인 20년에 도래했거나 근접하고 있음이 보고되고 있다<sup>2,3)</sup>.

이와 같이 고장 영향력이 크고 노후화된 변압기의 고

장을 사전 예방하고 보전 및 교체 시기를 최적화하기 위한 보전 기술들이 발달되어 왔다.

1950년대까지는 고장 발생 후 보수를 수행하는 사후정비(Breakdown Maintenance : BM, Corrective Maintenance : CM) 기술이 주로 사용되었다. 1970년대까지는 예방정비(Prevention Maintenance : PM) 기술 중 최소로 사용된 유지 보전 기술은 자산의 부품을 일정 시간마다 교체하는 시간기준 정비(Time Based Maintenance : TBM) 기술이 사용되었다. 2000년대는 센서기술 및 디지털 기술이 발달되어 신뢰성기반 정비(Reliability Centered Maintenance : RCM) 기술과 상태기반 정비(Condition Based Maintenance : CBM) 기술이 사용되었다<sup>4)</sup>. 이 중 상태기반 정비는 건전도 지수(Health Index)를 개발을 기반으로 하여 변압기 최적

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 안전환경기술융합학과 석사과정 (Dept. of Safety and Environment Technology, Seoul National University of Science and Technology)

<sup>2</sup>서울과학기술대학교 안전공학과 교수 (Dept. of Safety and Environment Technology, Seoul National University of Science and Technology)

보전에 활용되고 있다.

기존 관련 연구를 보면 건전도 지수는 점검 및 진단 항목에 다양한 방법으로 가중치를 부여하고 합산하여 건전성을 판단한다. 장정호<sup>5)</sup> 등은 변압기의 건전도 평가기술을 기술성 평가와 경제성 평가로 구분하고 이를 종합하여 상태평가 알고리즘을 연구하였으며 가중치는 전문가 설문문을 통해 진행하였다. A. Alqudsi<sup>6)</sup> 등은 절연유의 용존가스, 절연유 품질, Furan 분석 결과를 인공지능 학습을 통해 건전도 지수를 예측하는 방법을 연구하였고 가중치는 산업표준 및 전력회사 전문가 판단을 포함하였다. A. Naderian<sup>7)</sup> 등은 다양한 점검 요소를 건전도 요소와 상태순위, K factor로 구분하여 종합 건전도 지수를 계산하는 공식을 연구하였고 항목별 가중치는 요소별 고장율 및 산업표준 판단을 포함하였다. R. A. Prasajo<sup>8-9)</sup> 등은 절연유의 품질, 변압기 고장, 절연지 상태 요소들에 대해 계층화 분석(AHP) 기술을 이용하여 건전도 지수를 연구하였고 계층별 가중치는 전문가 의견, 통계 등을 활용하였다. 상기 관련 연구들<sup>5-9)</sup>은 정전 상태에서 측정가능한 평가항목을 선정하고 다양한 방법을 통해 가중치를 부여하여 건전도 지수를 판단하였다. 무정전 상태 변압기 연구사례를 보면 김봉석<sup>10)</sup>은 변압기에 네 개의 센서 Data를 기반으로 Big data를 활용하여 이상상태 판단을 연구하였고 Q. T. Tran<sup>11)</sup> 등은 온도, 전압, 전류 센서를 통한 감시 시스템을 구축하고 퍼지합수를 통해 다양한 지표들 전체 상태 지수로 결합한 평가 방법을 제안하였다.

많은 사업장에서 생산 중단 및 점검 중 고장 위험성을 이유로 정전 후 내부 점검이 곤란하며 또한 변압기에 고가의 감시 시스템 구현도 쉽지 않은 현실이다. 변압기 절연유는 인간의 혈액과 같이 많은 정보를 포함하고 있어 절연유 분석만을 통해 변압기의 상태평가가 가능하다<sup>12)</sup>. 본 논문에서는 무정전 상태에서 채유 가능한 절연유 분석을 통한 건전성 지수를 제안하고, 이를 검증하고자 한다. 변압기의 건전도는 노후화와 직접 연관이 있는 절연지의 경년열화 상태와 변압기 결함에 의해 발생하는 절연유의 이상 상태로 구분하여 각각의 핵심 평가 인자를 선정하였으며 계층화 분석법(AHP)을 활용하여 단계별 가중치를 부여하여 건전도 지수를 개발하였다. 또한 대용량 전력을 사용하는 사업장에 운영되는 유입변압기 절연유 분석을 통해 건전도를 평가하고 본 연구를 통해 제안된 건전도 지수를 검증하였다.

## 2. 본론

### 2.1 절연유 분석 평가 핵심인자 선정

유입변압기의 절연물은 액체 절연물과 고체 절연물

로 구성되어 있다. 일반적으로 액체 절연물인 절연유는 1종 4호 등의 광유가 사용되고 있으며, 고체 절연물은 셀룰로오스계 절연지와 프레스보드, 절연목 등이 사용된다. 절연유는 탄화수소 (Hydrocarbon) 화합물로 구성되어 있어 변압기 결함에 의한 국부과열, 내부방전 및 아크 등에 의한 열 에너지가 탄화수소 화합물에 영향을 주어 특정 가스들을 형성한다. 이 때 발생하는 가스는 온도에 따라 아세틸렌( $C_2H_2$ ), 수소( $H_2$ ), 메탄( $CH_4$ ), 에탄( $C_2H_6$ ), 에틸렌( $C_2H_4$ ) 등이다. 셀룰로오스계 고체 절연물은 경년열화에 의해 주로 일산화탄소(CO)와 이산화탄소( $CO_2$ )를 생성한다. 발생한 가스는 주로 절연유에 용해되며 절연유 샘플채취 및 유증가스분석(DGA)을 통해 그 농도와 조성비를 확인할 수 있다<sup>13)</sup>.

또한 고체 절연물의 경년열화 및 분해에 의해 Furan 화합물을 생성하며 절연지의 노후화 정도를 가장 잘 파악할 수 있는 인자로 활용된다<sup>14)</sup>.

#### 2.1.1 변압기 결함상태 평가인자 선정

변압기 내부 결함에 의해 발생하는 가스는 영향온도에 따라 그 구성이 다르며 Fig. 1과 같은 특성이 있다.

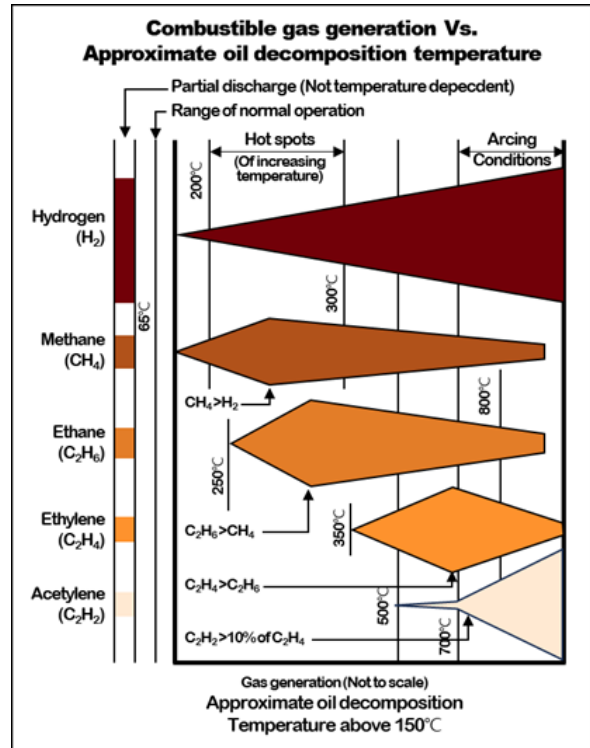


Fig. 1. Dissolved gas in oil gas generation chart.

- ① 수소( $H_2$ ) : 가장 광범위한 온도에 분포하며 고온의 부분방전 발생 시에도 다량의 수소가스 발생
- ② 메탄( $CH_4$ ) : 약 200°C에서 발생이 시작되어 광범

위한 온도에서 발생하며 250~300°C 사이에 집중 발생

- ③ 에탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) : 약 250°C에서 발생이 시작되어 광범위한 온도에서 발생하며 350°C까지 집중 발생
- ④ 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) : 국부과열, 부분방전 등에 의해 발생 (350~800°C)
- ⑤ 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) : 부분방전 및 도체 간 아크방전으로 발생 (1,000°C 이상)

이 중 1,000°C 이상의 아크에 의해 발생하는 아세틸렌은 발생 시 내부 점검 또는 교체가 이루어져야 하므로 가중치 부여가 무의미해 제약조건으로 두어 건전도 평가에 핵심인자로 선정하지 않았다.

즉, 절연유 분석을 통해 얻을 수 있는 평가 핵심 인자는 수소, 메탄, 에탄, 에틸렌으로 선정하였다.

### 2.1.2 변압기 경년열화 평가인자 선정

변압기는 권선을 이루고 있는 구리(Copper)와 철심을 이루고 있는 철(Steel)의 금속 성분과 액체 및 고체 절연물로 구성되어 있다. 금속보다 상대적으로 수명이 짧은 절연물이 변압기의 수명과 일치한다. 이 중 셀룰로즈계 고체 절연물의 인장강도는 열화가 진행될수록 줄어들어 수명과 밀접한 연관이 있다. 셀룰로즈가 열화하게 되면 일산화탄소와 이산화탄소 등의 가스를 생성하고 절연유 속에 용해된다. 또한 셀룰로즈는 열화에 의해 글루코오스로 분해되고 열, 빛, 아크, 수분 등 다양한 요인에 의해 Furan 화합물을 형성하게 된다. 결론적으로 경년열화 평가 인자는 일산화탄소, 이산화탄소, Furan 화합물로 선정하였고 다음과 같은 특성이 있다<sup>15)</sup>.

- ① 일산화탄소(CO) : 절연지와 절연유 열 분해에 의해 파생(200°C ↓)되나 부분방전, 수분 등 이상 상태에 따라서도 발생
- ② 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) : 상동
- ③ Furan : 수명과 직접 연관된 절연지 및 절연목의 경년 열화에 의해서 생성

## 2.2 평가인자 별 가중치 설정

본 연구에서는 평가인자에 대한 가중치 설정을 위해 계층화분석법을 이용하였다. 계층화분석법(AHP)은 다수의 속성들을 계층적으로 분류하고 해당 속성들의 중요도를 파악하여 가장 나은 대안을 선정하는 분석 도구로 1980년대 초반 미국 펜실베이니아 대학 T. Saaty 교수에 의해 개발되었다<sup>16)</sup>. AHP의 가장 큰 특징 중 하나는

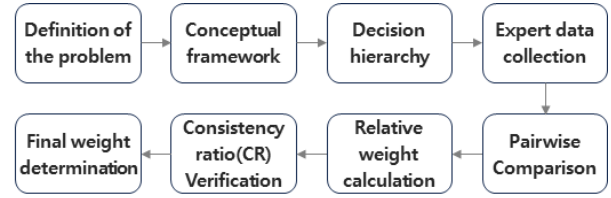


Fig. 2. AHP Process.

쌍대비교(Pairwise comparison)를 통해 상호비교를 진행하여 각각의 중요도를 도출한다. Fig. 2는 AHP의 일반적 프로세스를 나타낸다<sup>17)</sup>.

### 2.2.1 변압기 건전도 평가 의사결정 계층구조

변압기 건전도는 Fig. 3과 같이 2개의 계층구조로서, 절연유 분석을 통해 얻어지는 절연지 경년열화 인자와 변압기 결함 인자로 상위 계층을 구성하였다. 그리고, 각 인자별 핵심 항목을 하위 계층으로 구성하였다.

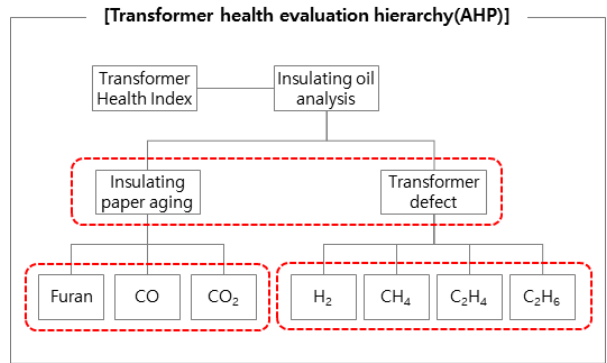


Fig. 3. AHP model frame for transformer health.

### 2.2.2 전문가 Data 수집 및 가중치 계산

평가인자별 가중치 산정을 위해 전문가 집단구성, 전문가집단에 대한 설문조사, 응답결과처리 및 가중치 계산의 3단계로 나누어 진행하였다.

#### ① 전문가 집단구성

평가 인자별 가중치 설계를 위해 유입변압기 밀접관련 직군인 설계 및 품질 전문가, 운영 전문가, 진단전문가 15명을 선정하였다. 또한 Table 1과 같이 직급 및 학력에

Table 1. Selection of expert groups

Division	Position	Level of education	Career
Manufacturer experts(5)	Manager(2)	Bachelor(5)	Over 15 years
	General Manager(3)		
Operating experts(5)	Manager(3)	Bachelor(4) Ph.D(1)	
	General Manager(2)		
Diagnostic experts(5)	General Manager(3)	Bachelor(3) Ph.D(2)	
	Director(2)		

대한 추가 가중치 부여를 방지하기 위해 15년 이상 근무 경력의 전문가를 대상으로 설문을 조사하였다.

② 설문조사 (9점척도 및 쌍대비교)

AHP 분석에서 판단자료는 계층 내 요소 사이의 쌍대비교를 통해 도출한 상대적 중요도를 나타낸다. 쌍대비교를 통한 계량적인 판단을 수행하기 위해서는 신뢰할만하고 이용 가능한 척도가 필요하며, 9점 척도가 많이 활용되고 있어 본 논문의 설문도 Table 2와 같이 9점 척도로 구성하였다.

Table 2. Pairwise comparison importance scale

Importance scale	Explanation
1	Equal importance
3	Moderate importance of one over another
5	Strong importance
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2,4,6,8	Median value between adjacent judgments
Reciprocal numbers	If activity i has one of the above numbers assigned to it when compared with activity j, then j has the reciprocal value when compared with i

AHP 계층 모형을 통한 쌍대비교 횟수는 상위 계층이나 하위 계층 모두 항목 수가 n개라고 가정할 때  $n(n-1)/2$ 의 개수가 비교되어야 한다.

본 설문의 AHP 구성은 2계층 3개의 쌍대비교로 경년열화와 변압기 결합 쌍대비교, 경년열화 평가 인자 중 Furan과 이산화탄소, 일산화탄소 쌍대비교 그리고 결합 평가 인자 중 수소, 메탄, 에탄, 에틸렌의 쌍대비교 설문을 실시 하였다.

③ 응답결과 및 가중치 계산

전문가 집단 설문 결과 각 계층 간 상대적 중요도는 Table 3 ~ Table 5와 같이 평가되었다.

Table 3. Pairwise comparison : Defect, Aging

Respondent	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
Defect/aging	7.0	1.0	0.2	0.2	7.0	3.0	5.0	7.0	5.0	7.0	5.0	1.0	5.0	5.0	9.0

Table 4. Pairwise comparison : Furan, CO, CO<sub>2</sub>

Respondent	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
Furan/CO	9.00	7.00	0.25	5.00	7.00	5.00	5.00	9.00	9.00	8.00	7.00	9.00	9.00	8.00	9.00
Furan/CO <sub>2</sub>	5.00	9.00	0.50	7.00	7.00	7.00	9.00	5.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
CO/CO <sub>2</sub>	0.11	9.00	1.00	3.00	2.00	2.00	3.00	0.33	1.00	2.00	3.00	2.00	1.00	3.00	3.00

Table 5. Pairwise comparison : H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

Respondent	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
H <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub>	5.00	3.00	0.14	0.17	0.20	0.14	5.00	5.00	0.20	0.33	3.00	1.00	3.00	2.00	3.00
H <sub>2</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.14	3.00	0.14	0.14	0.20	0.14	0.14	0.20	0.20	0.33	3.00	1.00	0.33	2.00	0.33
H <sub>2</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.00	3.00	0.20	0.20	0.20	0.17	5.00	5.00	0.11	0.33	3.00	1.00	3.00	2.00	3.00
CH <sub>4</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.11	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.14	0.20	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33
CH <sub>4</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	9.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	7.00	5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00

AHP 계산 방법은 먹승법에 의한 고유치법, 간이계산법, 절대평가법, 기하평균법 등이 있다. 본 연구에서는 그룹에 의한 집단 의사결정 시 극단값의 영향력을 감소시켜 주는 기하 평균법을 사용하였다. 15명의 설문 결과에 대한 응답별 쌍대비교 행렬을 Table 6 ~ Table 8과 같이 구하였다.

Table 6. Geometric mean matrix : Defect, Aging

Division	Defect	Aging
Defect	1.000	2.888
Aging	0.346	1.000

Table 7. Geometric mean matrix : Furan, CO, CO<sub>2</sub>

Aging factors	Furan	CO	CO <sub>2</sub>
Furan	1.000	5.899	6.527
CO	0.170	1.000	1.613
CO <sub>2</sub>	0.153	0.620	1.000

Table 8. Geometric mean matrix : H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

Defect factors	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
H <sub>2</sub>	1.000	0.994	0.369	1.000
CH <sub>4</sub>	1.006	1.000	0.547	0.0955
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.712	1.828	1.000	1.828
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.000	2.712	0.547	1.000

이를 정규화하고 정규화된 속성의 행의 평균이 항목별 가중치가 되고 Table 9와 같이 산출하였다.

Table 9. Hierarchy weight factor

Division	Weight	
Hierarchy 1	Defect	74.3%
	Aging	25.7%
Hierarchy 2 (Aging factors)	Furan	75.2%
	CO	14.6%
	CO <sub>2</sub>	10.3%
Hierarchy 2 (Defect factors)	H <sub>2</sub>	17.1%
	CH <sub>4</sub>	18.8%
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	38.6%
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	25.5%

2.2.3 일관성 비율 검증

평가 응답자가 내린 판단의 논리적 모순을 측정하기 위해 일관성 평가를 진행하였다. 응답의 일관성 정도는 일관성 지수(CI : Consistency Index)와 일관성 비율(CR : Consistency Ratio)을 통해 계산된다.

$$\text{일관성지수} = CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$\text{일관성비율} = CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

RI는 무작위 지수(Random Index)로 Saaty 교수가 제시한 Table 10의 RI값을 적용하였다. 일반적으로 비교 대상의 수가 많아질수록 일관성을 유지하기 어렵기 때문에 행렬이 커질 경우 큰 RI값을 적용하여 일관성 비율(CR)값을 보정한다.

Table 10. RI : Random Index

Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

각 계층구조의 일관성 비율을 식 (1)을 이용하여 Table 11과 같이 산출 하였다.

Table 11. Consistency Ratio

Division	n	$\lambda_{\max}$	CI	RI	CR
Hierarchy 1	2	2.000	0.000	0.000	-
Hierarchy 2 Aging factor	3	3.016	0.008	0.580	0.014
Hierarchy 2 Defect factor	4	4.386	0.129	0.900	0.143

일관성 비율은 계층구조의 복잡성에 따라 상이하지만 0.2 이하인 경우 용납할 수준의 비일관성을 가지고 있다고 판단하며 0.2 이상이면 일관성 문제를 재검토 또는 재조사가 필요하다<sup>18)</sup>. 본 연구에서 설문조사 결과 계층별 일관성 비율은 0.014, 0.143으로 나왔으며 허용 가능한 일관성 비율을 가지고 있다고 판단된다.

2.2.4 종합 가중치 도출

유입 변압기 건전도 평가를 위한 각 인자별 종합 가중치를 Table 12와 같이 산출하였다.

종합적으로 계층 1의 절연지 경년열화와 변압기 결합에 대한 가중치를 고려하면 각 핵심인자 별 가중치는 에틸렌 가스가 25.6%로 가장 높은 가중치가 확인되었고 Furan 및 에탄이 19.3%, 19.0%으로 다음 순위를 이었다.

Table 12. Total weight value

Division		Hierarchy weight factor	Total weight
Hierarchy 1	Defect	74.3%	
	Aging	25.7%	
Hierarchy 2 (Aging factor-Wi)	Furan	75.2%	19.3%
	CO	14.6%	3.8%
	CO <sub>2</sub>	10.3%	2.6%
Hierarchy 2 (Defect factor-Wj)	H <sub>2</sub>	17.1%	12.7%
	CH <sub>4</sub>	18.8%	13.9%
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	38.6%	25.6%
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	25.5%	19.0%

가중치를 고려한 건전도 지표는 다음의 공식으로 표현하였다.

$$HI_{total} = 0.257HI_{aging} + 0.743HI_{defect} \quad (3)$$

unless C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> is detected.

where,

$$HI_{aging} = \sum_{i=1}^n Si \times Wi \quad (4)$$

$$HI_{defect} = \sum_{j=1}^m Sj \times Wj \quad (5)$$

식 (3)과 (4)에서 Si, Sj는 각각 절연지의 경년열화 인자(Furan, CO, CO<sub>2</sub>)와 변압기 결합 인자(H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)를 의미하며, Wi와 Wj는 Table 12에서 도출한 각각의 가중치(Hierarchy weight factor)를 의미한다.

2.3 사례분석을 통한 건전도 지표검증

2.2절에서 제안한 건전도 지표를 검증하기 위해 대용량 사업장에 운영 중인 유입변압기를 대상으로 절연유 분석을 통해 건전도 평가를 진행하였다. 변압기는 비교를 위해 정상 그룹, 수명 근접 그룹, 상태이상 그룹 및 수명 근접과 상태이상 그룹으로 구분하여 지표를 검증하였다.

2.3.1 측정대상 선정

2.2절에서 제안한 건전도 지표의 검증을 위해 상태를 미리 알고 있는 변압기 40대를 대상으로 검증을 실행하였다. 변압기의 건전성 상태에 따른 측정 대상은 Table 13과 같이 총 4개의 그룹으로 분류하였다.

이 중 수명근접 그룹은 각 문헌 및 규격마다 차이는 있지만 IEC 국제기준 등과 같이 일반적인 20년 수명을 참고하여 15년 이상 사용 변압기로 정의하였다<sup>19)</sup>. 또한,

Table 13. Selection of measurement group

Division	Test subject	Period of use	Defect(Gases)
① Normal group	10	Under 10 years	X
② Aging group	10	Over 15 years	X
③ Defect group	10	Under 15 years	○
④ '②+③'	10	Over 15 years	○

한국전기안전공사 점검 결과 가스 발생 등 이상 판정을 받은 변압기를 상태이상그룹으로 선정하였다. 다만, 측정 대상의 전압은 154 kV부터 6.6 kV까지 다양하지만 가스 및 Furan 화합물 생성 원리는 동일하기 때문에 구분하지 않았다.

2.3.2 측정결과

절연유 가스분석(DGA)은 한국전기안전공사를 통해 측정하였다. Furan 화합물 분석은 한국전력에서 개발한 Furan 간이 측정 장비를 이용하여 각 변압기 그룹의 절연유 샘플 채취를 하고 직접 측정하였다<sup>20)</sup>.

측정 결과는 인자별 기준치가 상이하기 때문에 한국전기안전공사에서 제시하는 Table 14의 인자별 정상범위 기준으로 나누어 정규화하였다.

Table 14. Examples of the structure formula

Division	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	Furan	CO	CO <sub>2</sub>
Acceptance criteria	Under 200 ppm	Under 100 ppm	Under 200 ppm	Under 150 ppm	Under 100 ppb	Under 800 ppm	Under 5000 ppm

각 그룹 별로 구분된 총 40대의 변압기 절연유 분석 및 건전도 측정 결과를 도식화하면 Fig. 4와 같다.

정상 그룹과 수명근접 그룹은 모두 건전도 지수가 양호하고 결합 요소가 포함되어 있는 상태이상 그룹과 수명근접 및 상태이상 그룹은 건전도 지수에서 확연한 경계를 보였다. 측정된 총 40대의 변압기의 종합 건전도 지표를 정리하면 Table 15와 같다.

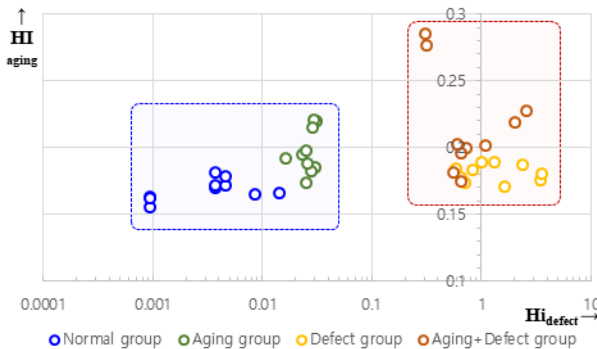


Fig. 4. Score distribution by each groups.

Table 15. Measurement result of each groups

Division	①Normal group		②Aging group		③Defect group		④ '②+③'	
	Aging	Defect	Aging	Defect	Aging	Defect	Aging	Defect
Max.	0.181	0.014	0.221	0.031	0.189	3.549	0.285	2.595
Min.	0.155	0.001	0.174	0.016	0.171	0.592	0.175	0.304
Avg.	0.169	0.005	0.197	0.026	0.181	1.614	0.216	0.954

정상그룹은 수명 및 상태 건전도 지수가 4개 그룹 중 평균이 가장 낮아 매우 양호함을 나타내고 있다. 수명 근접 그룹은 정상군에 비해 수명 및 상태 건전도 지수가 약간 상승함을 볼 수 있으나 수명점수 최저치가 정상그룹의 최대치 보다 낮게 측정되었다. 이는 참고 수명 20년을 초과하지 않은 변압기를 대상으로 측정하여 발생할 수 있는 오차라고 판단된다. 반면 상태이상 그룹과 수명근접 및 상태이상 그룹은 결합점수에서 큰 차이를 보였다. 이는 운전 중인 변압기 내부의 결합 상태는 경년열화와 밀접 관련이 없으며 전문가 가중치 점수에서 보는 것과 같이 건전도 지수의 중요한 인자로 판단될 수 있다. 변압기별 건전도 지표 및 점수에 따른 위험(보전) 우선순위를 Table 16에 정리하였다.

건전도 지표 검증 결과 정상그룹과 수명근접 그룹은 각 그룹 안에서 건전도 지표(보전순위) 변동은 있지만

Table 16. Final health Index

Group	TR. No.	HI_defect	HI_aging	HI_total	Risk rank
Defect	28	3.550	0.180	3.730	1
Defect	27	3.473	0.176	3.649	2
Aging, Defect	34	2.596	0.228	2.824	3
Defect	21	2.357	0.187	2.544	4
Aging, Defect	33	2.036	0.219	2.255	5
Defect	24	1.643	0.171	1.813	6
Defect	26	1.312	0.189	1.500	7
Aging, Defect	40	1.092	0.201	1.294	8
Defect	29	1.017	0.189	1.206	9
Defect	22	0.832	0.183	1.015	10
Aging, Defect	31	0.738	0.199	0.937	11
Defect	23	0.707	0.174	0.880	12
Aging, Defect	32	0.654	0.195	0.849	13
Defect	30	0.662	0.178	0.840	14
Aging, Defect	38	0.649	0.175	0.824	15
Aging, Defect	39	0.602	0.202	0.804	16
Defect	25	0.592	0.184	0.776	17
Aging, Defect	37	0.558	0.182	0.739	18
Aging, Defect	35	0.315	0.276	0.591	19
Aging, Defect	36	0.304	0.285	0.589	20

Table 16. Final health Index (continued)

Group	TR. No.	HI_defect	HI_aging	HI_total	Risk rank
Aging Group	13	0.031	0.220	0.251	21
	15	0.030	0.221	0.250	22
	19	0.029	0.215	0.244	23
	20	0.025	0.197	0.222	24
	11	0.023	0.195	0.218	25
	14	0.031	0.185	0.215	26
	18	0.026	0.188	0.214	27
	17	0.028	0.182	0.210	28
	12	0.016	0.192	0.208	29
	16	0.025	0.174	0.199	30
Normal Group	7	0.004	0.181	0.185	31
	6	0.005	0.179	0.183	32
	9	0.014	0.166	0.180	33
	5	0.005	0.172	0.176	34
	10	0.004	0.171	0.175	35
	8	0.004	0.170	0.173	36
	3	0.009	0.165	0.173	37
	2	0.001	0.163	0.164	38
	4	0.001	0.162	0.163	39
	1	0.001	0.155	0.156	40

그룹 간 변동은 없는 것으로 확인되었다. 반면 상태이상 그룹과 수명근접 및 상태이상 그룹은 결합점수에 따라 보전 우선순위가 그룹 간 변동할 수 있음을 확인하였다. 이는 전문가 설문문을 통해 결정된 가중치에서 결합 가중치가 경년열화 가중치에 비해 3배 높기 때문에 도출된 결과라고 설명할 수 있다. 결과적으로 상태이상을 포함한 그룹은 모두 위험우선 순위에서 높은 점수를 받은 것으로 확인되었고 본 논문에서 제안한 건전도 지표는 유효한 것으로 검증되었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 활선상태의 유입변압기 건전도 평가를 위한 건전도 지수(HI)를 계층화 분석법을 활용하여 개발하고 사업장에 운영중인 변압기에 적용하여 보전 우선순위를 제시하였다. 변압기 건전도 평가를 위한 절연유의 핵심인자를 도출하고 전문가 쌍대비교 설문문을 통해 가중치를 조사한 결과 상태 가중치가 74.3%로 수명 가중치인 25.7%에 비해 약 3배 정도 높은 것으로 도출되었다. 변압기 결합을 평가하는 핵심요소 중에는 에틸렌이 38.6%로 가장 중요한 요소로 도출되었다. 그리고 절연지 경년열화를 평가하는 핵심요소 중에서는 Furan 화합물이 75.2%로 가장 중요한 요소로 도출되었

다. 종합적으로 상태 및 수명 가중치를 반영한 건전도 평가 요소별 중요도는 에틸렌(25.6%), Furan(19.3%), 에탄(19%), 메탄(13.9%), 수소(12.7%), 일산화탄소(3.8%), 이산화탄소(2.6%) 순으로 나타났다. 실제 변압기 건전도 평가에 가장 큰 영향을 주는 주요인자는 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)이지만 발견되면 즉시 수리 및 교체가 필요한 위험한 상태이기 때문에 제약조건으로 두어 적절한 가중치 분포가 이루어진 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안한 변압기 건전도 지수(HI)를 활용하여 대용량 사업장에 운영 중인 변압기의 건전도 지수를 평가하고 보전 우선순위를 제시하였다. 이를 통해 관리자 또는 운영자의 유지보수 계획 의사결정에 활용할 수 있음을 확인하였다. 앞으로 생산 중단 및 정전 Risk로 인해 정기적 정전 유지보수가 곤란한 사업장에서 유입변압기의 건전도를 평가하는데 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

### References

- 1) S. H. Kim and T. S. Park, "Internal Defect Analysis of Transformers using DGA" j.inst. Korean. Electr. Electron. Eng., Vol. 24, No. 1, pp. 354-359, 2020.
- 2) CIGRE WG 37.27, TB 176, Ageing of the System Impact on Planning, CIGRE, 2000.
- 3) D. H. Kim, O. B. Lee and B. S. Ju, "KEPCO Substation Power Transformer Status and Fault Analysis" KIEE Summer Conference, pp. 912-0914, 2000.
- 4) O. Y. Lee, H. S. Lee, S. S. Jeon, M. K. Jeong and H. K. Kang, "Lifetime Loss Calculation for Asset Management of a Power Transformer", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67P, No. 2, pp. 70-74, 2018.
- 5) J. H. Chang, S. H. Lee and H. H. Lee, "A Study on Deterioration Evaluation Method by Condition Monitoring and Diagnosis for Aging Oil-immersed Power Transformers", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63, No. 2, pp. 297-305, 2014.
- 6) A. Alqudsi and A. El-Hag, "Application of Machine Learning in Transformer Health Index Prediction" Energies, Vol. 12, Issue 14, p. 2694, 2019.
- 7) A. Naderian, R. Piercy, S. Cress, F. Wang and J. Service, "An Approach to Determine the Health Index of Power Transformers" In: Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, pp. 192-196, 2008.

- 8) R. A. Prasajo, A. Setiawan, Suwarno, N. U. Maulidevi and B. A. Soedjarno, "Development of Analytic Hierarchy Process Technique in Determining Weighting Factor for Power Transformer Health Index" In: 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), IEEE, pp. 1-5, 2019.
- 9) R. A. Prasajo, Suwarno, N. U. Maulidevi and B. A. Soedjarno, "A Multiple Expert Consensus Model for Transformer Assessment Index Weighting Factor Determination" In: 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), IEEE, pp. 234-237, 2020.
- 10) B. S. Kim, "A Study on the Detection of Outliers in Inflow Transformers Using Big Data", Department of Industrial & Systems Engineering Graduate School of Kongju National University Gong Ju, Korea, 2020.
- 11) Q. T. Tran, L. Roose, B. D. Van and Q. N. Nguyen, "A Low-Cost Online Health Assessment System for Oil-Immersed Service Transformers Using Real-Time Grid Energy Monitoring" *Energies*, Vol. 15, Issue 16, p. 5932, 2022.
- 12) S. Hernanda, A. C. Mulyana, D. A. Asfani, I. M. Y. Negara, D. Fahmi, "Application of Health Index Method for Transformer Condition Assessment", TENCON IEEE Region 10 Conference, IEEE, pp. 1-6, 2014.
- 13) J. H. Sun, S. H. Yi and K. H. Kim, "Degradation Diagnosis of Insulation Paper Using CO and CO<sub>2</sub> Gases in Oil Immersed Transformers", *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 53C, Issue 10, pp. 523-529, 2004.
- 14) G. B. Choi, S. Y. Eo, D. J. Kweon and D. J. Lee, "Diagnosis for the Transformer depend on Moisture and Furfural Detecting in Oil", *Trans. KIEE*, Vol 54C, No. 12, pp. 546-552, 2005.
- 15) J. H. Kim and S. O. Han, "The Thermal Aging Characteristics of Cellulose Paper using Analysis for CO, CO<sub>2</sub> Gas and Furan Compounds", *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 58P, Issue 4, pp. 499-504, 2009.
- 16) J. H. Lee, Y. G. Kim, J. W. Lee and J. H. Kim, "Risk Assessment of Mechanical Parking Facility during Construction based on AHP Analysis" *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 37, No. 5, pp. 33-41, 2022.
- 17) J. Y. Moon, "A Study on the Importance and Order of Priority of the Major Control Item for DMSMS by using AHP Analysis," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 10, pp. 48-54, 2020.
- 18) J. H. Seong and Y. Byun, "A Study on the Weights of the Condition Evaluation of Rock Slope used in Entropy and AHP Method" *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 31, No. 5, pp. 61-66, 2016.
- 19) IEC 60076-7, "Power Transformer-Part 7, : Loading Guide for Oil-immersed Power Transformer", 2018.
- 20) Y. Shang, L. Yang, Z. J. Guo and A. Yan, "Assessing aging of large transformers by FURFURAL Investigation", *IEEE*, 272-274, 2001 Structural Importance and Fault Analysis", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, Issue 4, pp. 23-30, 2013.