

## 가변 파장형 적외선 센서를 이용한 변압기 결함 진단

이근호<sup>1</sup> · 이승환<sup>1,\*</sup>

### Fault Analysis of Transformer using Tunable Infrared Gas Sensors

Gun-Ho Lee<sup>1</sup> and Seung-Hwan Yi<sup>1,\*</sup>

#### Abstract

The objective of this study is to determine the concentrations of mixed gases by establishing a diagnosis method of a transformer using tunable-wavelength optical infrared sensors. Absorption of infrared light by methane, acetylene, and ethylene gases injected is measured from the outputs of the infrared sensors. Regression analysis equations of the gas concentrations are acquired from their respective measured absorption. The obtained concentrations are as follows: -3-9 % errors above 600 ppm(methane), 3 % errors above 1200 ppm(acetylene), and 10 % errors above 500 ppm(ethylene). The concentration inference equations obtained using the individual gases are applicable when the absorption wavelength bands do not overlap. The results of the fault analysis of a transformer using the Duval triangle method and the tunable infrared gas sensors are as follows: temperature faults with -1-1% errors and energy faults with -7-7 % errors.

**Keywords:** Gas sensors, Transformer, Duval Triangle, Methane, Acetylene, Ethylene

#### 1. 서 론

안전하고 안정적인 전력공급을 위해서 변압기 관리는 중요한 사항이다. 변압기 관리 부실은 전력공급의 차질을 야기하며, 심할 경우 폭발 사고로 이어지게 된다[1]. 이러한 사고를 막기 위해 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)와 한전에서는 절연유를 채취하여 실험실에서 DGA(Dissolved Gas Analysis)를 진행한다. 한전에서는 DGA를 통해 얻은 유중가스 농도와 가연성 유중가스 판정 기준[2]을 통해 변압기를 관리한다. 변압기의 유중가스 농도가 기준보다 높아 결함이 있을 것으로 예상되는 상태가 되면, 변압기 운전을 중지하고, 결함 진단을 진행하게 된다.

변압기 결함은 유중가스의 비율을 사용하여 진단하는 Duval Triangle과 Rogers Ratios 방법이 존재한다[3]. Rogers Ratios는 메탄, 에탄, 아세틸렌, 에틸렌 4종의 유중가스 농도 비를 사용하

여 진단하지만, 진단을 진행하지 못하는 농도 비 구간이 존재한다. 반면에 Duval Triangle의 경우 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 3종의 유중가스 농도 비를 사용하며 진단하지 못하는 농도 비가 존재하지 않는다[4]. 이러한 변압기 관리 방법은 문제점이 존재하는데, 한달에 한번 또는 일년에 한번 사람이 직접 절연유를 채취 해야한다는 문제점과 변압기의 급격한 열화에 대해서는 대응하기 힘들다는 문제점이 존재한다. 그로 인해, 포토어쿠스틱 센서를 이용한 변압기 모니터링 방법[5]과 적외선 이미지 센서를 이용하여 변압기의 상태를 진단하려는 시도가 이어지고 있다[6]. 하지만 제시된 방법들의 경우 많은 수의 센서를 사용하거나 고가의 센서를 사용한다는 단점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 FPI (Fabry Perot Interferometer)와 초전센서로 구성된 가변파장형 적외선 가스센서를 이용하여 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 가스의 개별 농도 및 혼합 가스 상태에서 각 가스의 농도를 추론할 수 있는 방법과 이를 통한 변압기 결함 진단 가능성을 제시하고자 한다.

#### 2. 이론적 고찰 및 실험 방법

##### 2.1 가스별 흡수 계수

특정 가스는 적외선을 흡수하는 성질을 가진다. 그로 인해 적외선의 흡수가 발생하는 가스를 통과하면서 초기 광 강도가 감

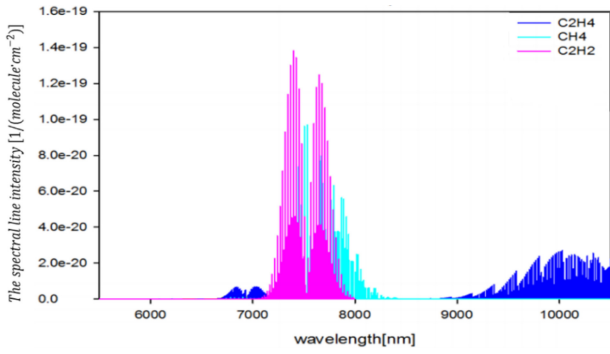
<sup>1</sup> 한국교통대학교 융합기술대학 (College of Convergence Technology, Korea National University of Transportation)

50, Daehakro, Chungjushi, Chungbuk 27469, Republic of Korea

\*Corresponding author: isaac\_yi@ut.ac.kr

(Received: Dec. 28, 2023, Revised: Jan. 25, 2023, Accepted: Jan. 27, 2023)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



**Fig. 1.** The spectral line intensity of methane, acetylene, and ethylene.

**Table 1.** Average absorption coefficients of each gas @25°C, 1 atm. [1/(molecule·cm<sup>2</sup>)]

	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Absorption coefficient	7.00×10 <sup>-16</sup>	6.00×10 <sup>-16</sup>	8.20×10 <sup>-14</sup>

소되며, 감소되는 정도는 Beer-Lambert의 (1) 식을 따른다 [7, 8].

$$I = I_0 e^{-kL} \tag{1}$$

단,  $I$  는 가스 주입 후 가스에 의해 흡수가 일어난 후의 광 강도,  $I_0$  는 초기 광 강도,  $k$  는 흡수 계수 [1/cm],  $L$  은 광경로 [cm].

식 (1)을 살펴보면, 광 경로가 일정한 경우 센서에 도달하는 광 강도는 흡수 계수에 영향을 받는다. 그러므로 적외선 파장 범위에서 메탄, 아세틸렌, 에틸렌의 흡수 계수를 파악하는 것은 중요하며, HITRAN (High Resolution Transmission)에서 제시하는 스펙트럼 선 강도(The spectral line intensity)를 살펴보면 Fig. 1과 같다 [9-11].

HITRAN에서 제시하는 스펙트럼 선 강도는 부피 1 cm<sup>3</sup>안에 하나의 분자가 존재할 경우 분자가 빛을 흡수하는 정도를 말하며, 이를 온도 25°C, 1 atm 상태로 변환하면, Table 1과 같다.

Table 1은 메탄(7120~8210 nm), 아세틸렌(7090~ 8000 nm), 에틸렌(9560~10500 nm) 가스별로 흡수가 주요하게 발생하는 파장구간에서 30 nm 간격으로 파장이 증가할 때 각 가스 별 흡수계수의 평균값을 의미한다.

### 2.2 데이터 분석

FPI를 구비한 적외선 센서의 경우 여러 개의 파장을 동시에 살필 수 있다는 장점이 존재한다[12]. 그로 인해 단일 파장에 대해서만 우수한 정확성을 보이는 Beer-Lambert 식을 바로 적용하기에는 어려움이 존재하므로 [7-8], FPI를 탑재한 초전센서의 데이터 분석 방법을 제시하려 한다.

적외선 초기 광 강도를  $I_0$ , 적외선 흡수가 발생하는 가스 주입 후 적외선 광 강도를  $I$  로 정의하면, 하나의 파장에 대한 흡수도  $A_p$  는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$A_p = \frac{I_0 - I}{I_0} \tag{2}$$

FPI를 구비한 적외선 센서는 특정 파장 영역에서의 파장 별 특성 확인이 가능하다. 그리고 확인 가능한 파장 영역에서 가스에 의해 흡수가 일어나는 파장은  $n$  개 존재한다. 그러므로 흡수가 일어나는 파장 영역에서 가스에 의한 적외선 흡수를 측정하기 위해서는 측정 가능한 파장 영역에서 흡수가 발생한  $n$  개 파장의 흡수를 모두 더해야 한다. 이로 인해 식(2)는 식(3)으로 표현된다.

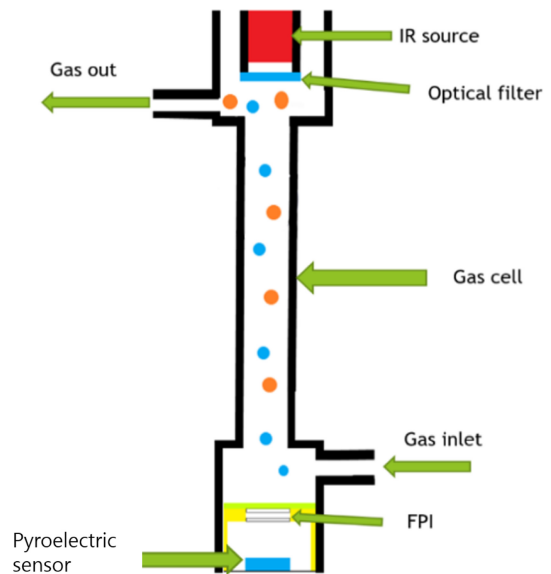
$$A_p = \frac{(I_{0_1} + I_{0_1} + \dots + I_{0_n}) - (I_1 + I_2 + \dots + I_n)}{I_{0_1} + I_{0_1} + \dots + I_{0_n}} \tag{3}$$

또한 출력 전압  $V_{N_2}$  는 적외선 흡수가 발생하지 않는 질소상태에서 센서의 출력전압,  $V_{gas}$  는 가스가 존재할 때 센서의 출력 전압으로 표현할 수 있고, 각 상태에서 출력되는 전압은 식 (4)로 각각 표현할 수 있다.

$$I_0 = V_{N_2}, I = V_{gas} \tag{4}$$

질소 가스 상태의 경우, 측정 적외선 파장에서 광 흡수가 발생하지 않아, 가스를 주입하지 않은 상태의 광 강도가 그대로 센서의 출력전압으로 나타나고, 가스가 존재할 경우 감소된 광 강도가 적외선 센서에 입사되어 출력 전압으로 나타나게 된다. 따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같이 표현된다.

$$A_p = \frac{(V_{N_{2_1}} + V_{N_{2_1}} + \dots + V_{N_{2_n}}) - (V_{gas_1} + V_{gas_2} + \dots + V_{gas_n})}{V_{N_{2_1}} + V_{N_{2_1}} + \dots + V_{N_{2_n}}} \tag{5}$$



**Fig. 2.** Schematic diagram of gas sensor.

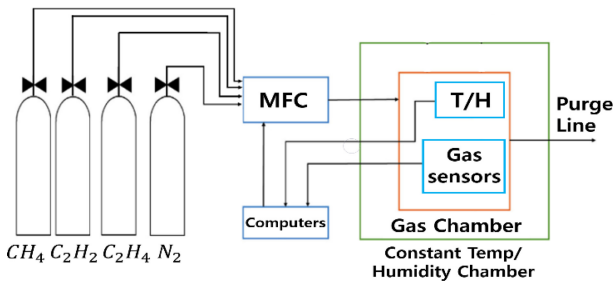


Fig. 3. Schematic diagram of measurement setup.

### 2.3 실험장치

본 연구에서 사용한 광원은 1.0~20 μm 범위의 연속광을 방사하는 IMORTEC사의 INTX MILR17-900을 사용하였고, 가스 측정을 위한 센서로는 인가 전압에 따라 30 nm 간격으로 적외선 센서에 도달하는 적외선 파장을 각각 5500~8000 nm, 8000~10500 nm까지 조절 가능한 InfraTec사의 LFP-5580C와 LFP-80105C를 사용하였으며, 가스센서의 구성은 Fig. 2와 같다

측정 시스템의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 주변온도변화에 민감한 적외선 센서가 주변 온도 변화에 받는 영향을 최소화하기 위해 모든 실험은 온도 25°C, 습도 60%인 환경에서 실험하였고, 가스센서의 셀에 공급되는 가스는 CMOSens® Technology사의 SFC5400 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 농도를 조절하여 가스를 주입 하였다.

### 2.4 실험방법

#### 2.4.1 독립 가스 실험 방법

본 실험은 변압기 진단에 활용되는 메탄, 아세틸렌, 에틸렌의 독립 가스 농도 변화에 따른 적외선 가스 센서의 출력 변화를 확인하기 위함이다. 각 가스의 농도 범위는 한전에서 변압기 “이상” 판정하는 기준을 포함하는 범위이며, 유증가스 농도 기준이 아닌 기체 가스로 변환하여 실험을 진행해야 한다. 유증가스 농도를 기체 상태의 변환은 Ostwald Solubility Coefficients를 통해 변환하였고[14], 그 결과 메탄은 0~3000 ppm (7120~8210 nm), 아세틸렌은 0~1500 ppm (7090~8000 nm), 에틸렌은 0~1000 ppm (9560~10500 nm)범위이다. 각 범위에서 모든 가스를 100 ppm단위로 농도를 증가하며, 50 번의 반복 측정을 진행하여 그 결과를 분석하였다.

#### 2.4.2 결합가스 실험 방법

실제 변압기 점검 시, 결합이 발견된 변압기들의 유증가스 농도[13] 중 한전의 결합 분류 규정의 “이상” 판정보다 높은 농도를 선정하여 모의실험을 구성하였다. 또한 고농도 실험들은 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 세 가스의 비율을 유지하여 진행하였으며,

Table 2. Injection gas concentration.

Fault	Gas concentrations [ppm]		
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
T1	2850	0	150
T2	2500	0	500
T3	2250	0	750
PD	2700	0	0
D1	1875	938	188
D2	1800	780	420

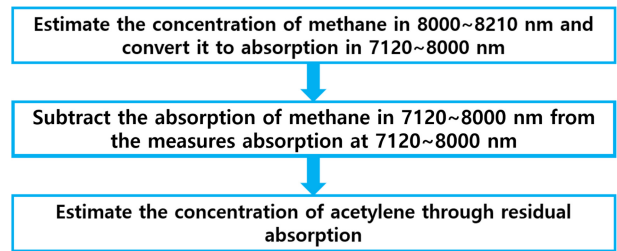


Fig. 4. Flow chart of concentration inference of methane-acetylene mixed gas.

각 항목에 대하여 신뢰성을 확보하기 위해 50 번의 반복 측정을 진행하였으며, 모의실험에 응용된 각 가스 별 농도는 Table 2와 같다.

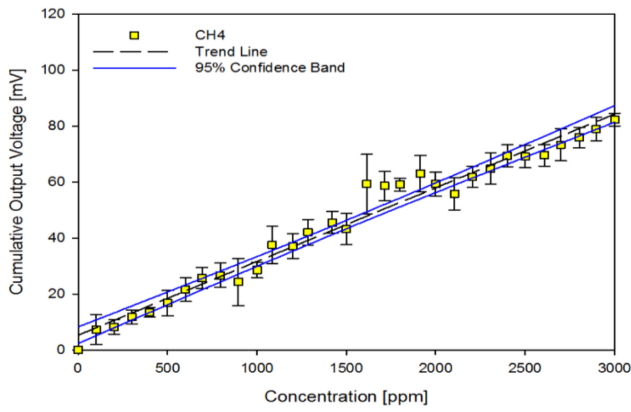
에틸렌의 경우 메탄, 아세틸렌과의 중복 파장이 존재하지 않아, 혼합가스 상태에서도 독립 가스 농도를 추론하는 것이 가능하다. 하지만 메탄과 아세틸렌의 경우 흡수 파장의 중복으로, 이들을 분해하는 과정이 요구되어 Fig. 4과 같은 흐름도를 작성하여 농도 추론을 시도하였다.

7120~8000 nm 범위에서는 메탄과 아세틸렌 모두 흡수가 발생하지만, 8000~8120 nm 구간에서는 메탄의 흡수 파장만 존재한다. 그러므로 메탄-아세틸렌 혼합 가스에서 8000~8120 nm 범위의 흡수도를 통해 메탄의 농도 추론 후 7120~8000 nm 범위에서 측정된 흡수도에서 메탄에 의해 발생한 흡수도를 제거함으로써 아세틸렌에 대한 농도 추론을 진행할 수 있을 것으로 사료되어, 혼합가스 상태에서의 개별 가스 농도를 추정하겠다.

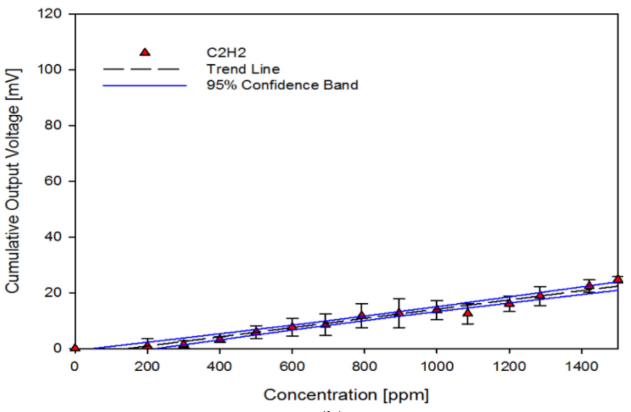
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 독립가스 실험 결과

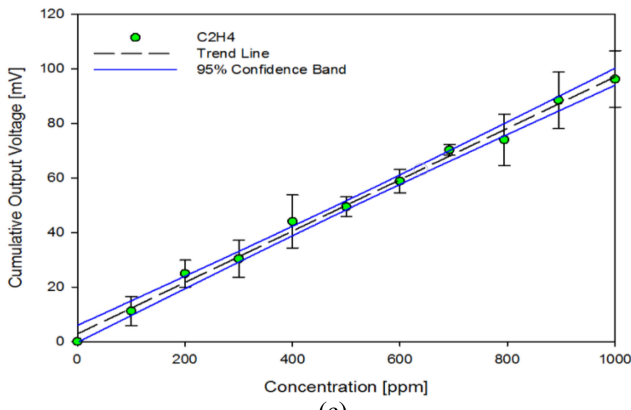
가스에 의해 적외선의 흡수가 주요하게 발생하는 파장 범위에서 질소만 존재할 때 센서 출력과 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 가스가 존재할 때 센서 출력의 차를 모두 더하여 Fig. 5에 나타냈다. 그 결과 식(6)에서 (8)에 제시한 것과 같은 결정계수(R<sup>2</sup>)와 농도에 따른 전압 추세선 수식을 얻을 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

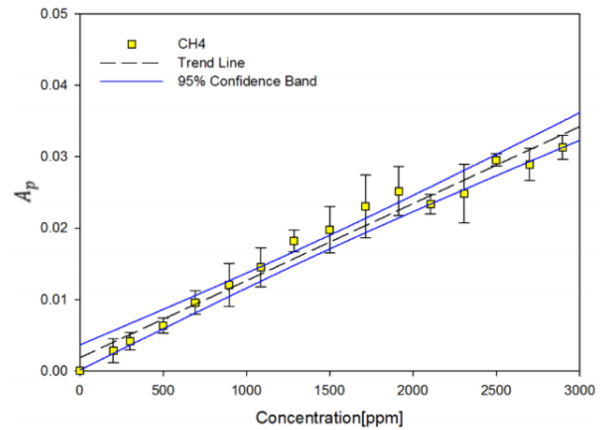
**Fig. 5.** Cumulative output voltage according to independent gas concentration: (a) methane, (b) acetylene, (c) ethylene.

메탄:  $V_{CH_4} = 2.636 \times 10^{-2}x + 5.258$ ,  $R^2 = 0.972$  (6)

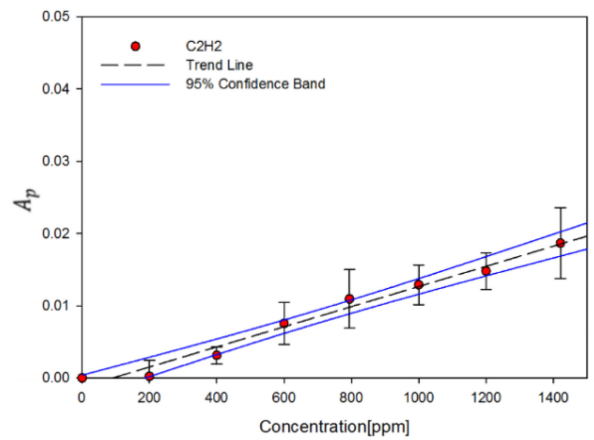
아세틸렌:  $V_{C_2H_2} = 1.654 \times 10^{-2}x - 2.44$ ,  $R^2 = 0.994$  (7)

에틸렌:  $V_{C_2H_4} = 9.432 \times 10^{-2}x + 2.783$ ,  $R^2 = 0.994$  (8)

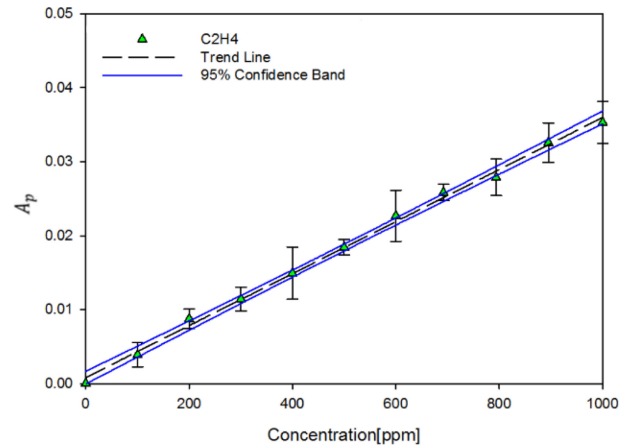
질소만 존재할 때 센서 출력과 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 가스가 존재할 때 센서 출력의 차의 변화량이 다른 이유는 HITRAN 스펙트럼 선 강도에서 제공하는 바와 같이 서로 다른 흡수 계수를 가지고 있기 때문으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 6.** Absorption ( $A_p$ ) according to gas concentration: (a) methane, (b) acetylene, (c) ethylene.

가스의 농도와 흡수도( $A_p$ )의 관계를 살피기 위해 각 가스에 대한 농도에 따른 흡수도 ( $A_p$ )를 식(5)을 통해 계산하고, 이를 독립가스의 농도의 그래프로 제시하면 Fig. 6와 같고, 그래프를 통해 도출된 추세선에서 메탄의 흡수도를  $A_{p,CH_4}$ , 아세틸렌의 흡수도를  $A_{p,C_2H_2}$ , 에틸렌의 흡수도를  $A_{p,C_2H_4}$ 로 표현하는 것이

가능하다. 메탄의 농도를  $x_{CH_4}$ , 아세틸렌의 농도를  $x_{C_2H_2}$ , 에틸렌의 농도를  $x_{C_2H_4}$ 로 표현하게 되면 식(9)에서 식(11)와 같은 농도 추론식을 얻게 된다.

$$x_{CH_4} = \frac{A_{p,CH_4} - 1.498 \times 10^{-3}}{1.112 \times 10^{-5}} \quad (9)$$

$$x_{C_2H_2} = \frac{A_{p,C_2H_2} + 2.119 \times 10^{-3}}{1.481 \times 10^{-5}} \quad (10)$$

$$x_{C_2H_4} = \frac{A_{p,C_2H_4} - 9.852 \times 10^{-4}}{3.461 \times 10^{-5}} \quad (11)$$

농도 추론식에 기반하여 센서의 출력을 통해 농도를 역산해 보면, 메탄의 경우 600 ppm 이상의 농도에서 -3~9 %의 오차를 보였고, 아세틸렌의 경우 1200 ppm의 농도를 3 % 오차로 추론하는 것이 가능했다. 또한, 에틸렌의 경우 500 ppm이상의 농도에서 약 10 % 오차로 농도를 추론하는 것이 가능했다.

### 3.2 결합가스 실험 결과

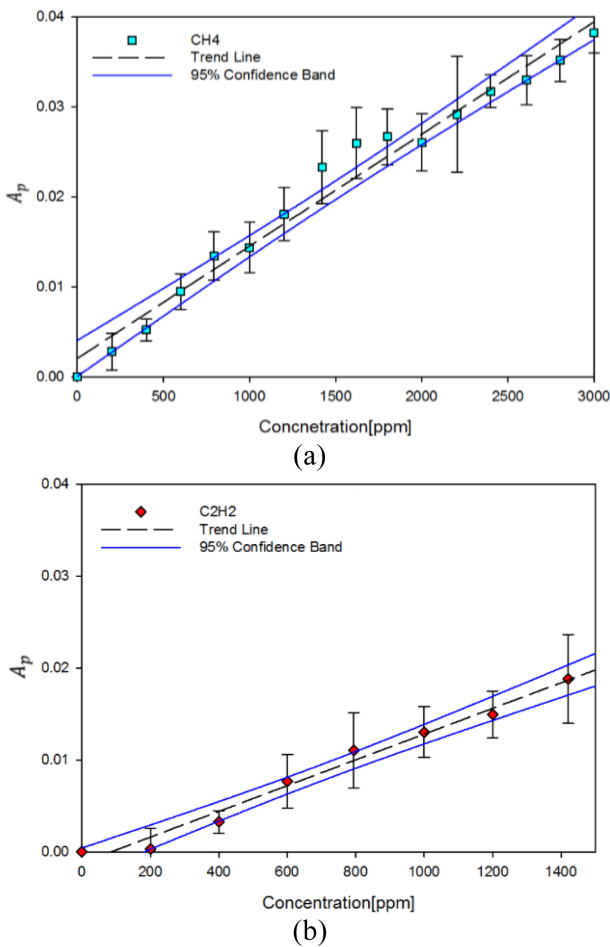


Fig. 7. The absorption of methane and acetylene gas from 7120 nm to 8000 nm: (a) methane, (b) acetylene.

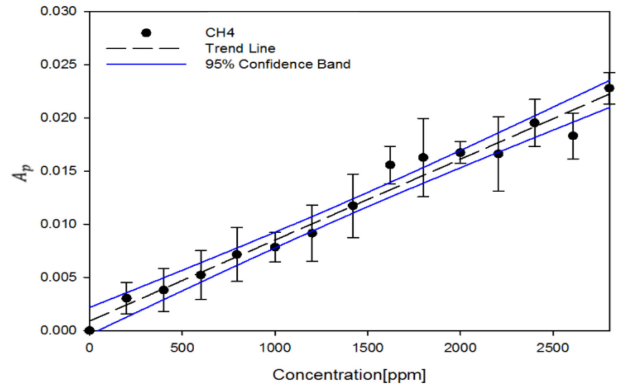


Fig. 8. The absorption according to the concentration of methane gas. (@8000~8210 nm)

7120~8000 nm구간에서 메탄과 아세틸렌을 분해하기 위해 각각의 독립 가스 농도와 흡수도의 관계를 그래프로 표기하면, Fig. 7과 같고, 그래프를 통해 도출된 추세선을 통해 농도 추론식을 작성하면 메탄과 아세틸렌의 농도 추론식은 각각 식(12), 식(13)과 같다.

$$x_{CH_4} = \frac{A_{p,CH_4} - 1.872 \times 10^{-3}}{1.264 \times 10^{-5}} \quad (12)$$

$$x_{C_2H_2} = \frac{A_{p,C_2H_2} + 1.210 \times 10^{-3}}{14 \times 10^{-5}} \quad (13)$$

제시된 농도 추론식으로 독립 가스 농도를 추론한 결과 메탄은 600 ppm 이상에서 -5.9~8.9 %의 오차를 보였고, 아세틸렌은 600 ppm에서 -4~10 %의 오차를 보였다.

혼합가스에서 메탄을 분해하기 위해 메탄의 흡수과장만 존재하는 8000~8210 nm 구간에서 메탄 독립 가스 농도에 따른 흡수도 그래프를 Fig. 8에 제시하였고, 농도 추론식은 식(14)과 같다.

$$x_{CH_4} = \frac{A_{p,CH_4} - 8.911 \times 10^{-4}}{7.617 \times 10^{-6}} \quad (14)$$

식(14)을 통한 메탄 독립가스농도 추론은 600 ppm 이상에서 -9.7~12%의 오차를 가지고 농도를 추론하는 것이 가능했다.

7120~8000 nm과장에서 메탄과 아세틸렌의 농도 추론식과 8000~8210 nm과장에서 메탄의 농도 추론식을 통해 Fig. 4에서 제시한 흐름도를 통해 Table 3에서 제시하는 바와 같이 농도 추론이 가능하였다. 추론된 농도는 Table 4에서 제시하는 바와 같은 비율과 진단 결과를 보이며, 괄호안에는 실제 주입한 가스 비율을 기입하였다.

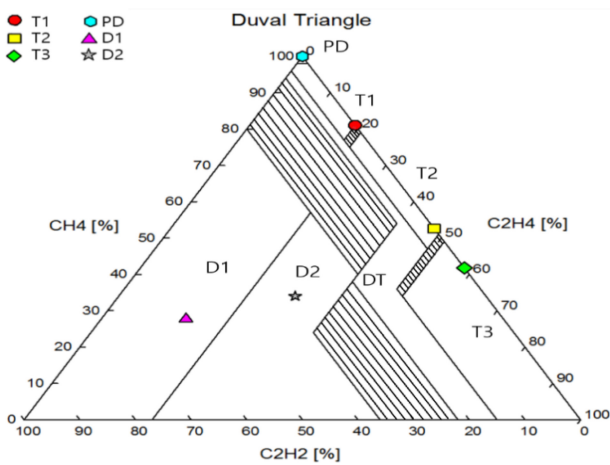
메탄, 아세틸렌, 에틸렌 가스의 비율은 온도 결함의 경우 -1~1 %의 오차를 가지고 비율을 추론하는 것이 가능했고, D1, D2 결함의 경우 -7~7 %의 오차를 가지고 비율을 추론하는 것이 가능했다. 따라서 Duval Triangle에서 정확한 진단이 어려운 부분이 존재하였으며, 진단이 어려운 부분은 Duval Triangle에 사선

**Table 3.** The injected gas concentrations and estimated gas concentrations.

Fault	Concentration of injected gases[ppm]			Estimated Gas concentrations[ppm]		
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
T1	2850	0	150	2721	0	149
T2	2500	0	500	2503	0	526
T3	2250	0	750	2649	0	861
PD	2700	0	0	2831	0	0
D1	1875	937	187	1607	1142	205
D2	1800	780	420	1995	696	433

**Table 4.** Diagnostic results from estimated concentration.

Fault	CH <sub>4</sub> [%]	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [%]	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [%]	Diagnostic result
T1	(81)82	(0)0	(19)18	T1
T2	(53)54	(0)0	(47)46	T2
T3	(42)41	(0)0	(58)59	T3
PD	(100)100	(0)0	(0)0	PD
D1	(28)35	(57)50	(15)15	D1
D2	(34)31	(34)39	(32)31	D2



**Fig. 9.** The diagnostic results of transformer fault through infrared sensor.

으로 표현하고, 모의 실험 진단 결과를 Duval Triangle에 나타낸 것이 Fig. 9이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 모의 실험을 통해 FPI를 탑재한 초전센서를 이용하여 변압기 진단 가능성에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과, 가스의 흡수 파장을 이용하여 메탄, 아세틸렌, 에틸렌 혼합 가

스를 분해하는 것이 가능하였으며, 이를 통해 농도를 추론하는 것이 가능하였다. 또한 결함을 가진 변압기의 유증가스 농도를 조정하여 모의 실험을 진행한 결과 추론된 농도를 통해 결함을 진단하는 것이 가능하였다. 그러므로 FPI를 탑재한 초전센서를 활용하면 실제 변압기를 관리하고 결함을 진단하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부에서 지원하는 한국 기초과학연구원보조금(2019R1A6C1010047)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] C. W. Lee, M. K. Kim, D. M. Choi, and S. J. Lee, "Cause and Countermeasure of Fire Explosion in Transformer", *J. of Korean of Fire Investigation*, Vol. 9, No. 1, pp. 35-46, 2006.
- [2] S. D. Jeon, T. I. Kim, and M. S. Shin, *Substation Equipment Maintenance Standards*, KEPCO, Korea, pp. 242-258, 2016.
- [3] PES Transformers Committee, *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*, IEEE Std C57.104™, USA, pp. 40-42, 2019.
- [4] M. Duval, "The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 24, No. 6, pp. 22-29, 2008.
- [5] Y. Yun, W. Chen, Y. Wang, and C. Pan, "Photoacoustic detection of dissolved gases in transformer oil", *Euro. Trans. Electr. Power*, Vol. 18, No. 6, pp. 562-576, 2008.
- [6] Z. Xuwei and L. Hanshan, "Research on transformer fault diagnosis method and calculation model by using fuzzy data fusion in multi-sensor detection system", *Optik*, Vol. 176, pp. 716-723, 2019.
- [7] D. A. Skoog, *Fundamentals of analytical chemistry*, 9th, USA, pp. 650-682, 2014.
- [8] D. P. Shoemaker, C. W. Garland, and J. W. Nibler, *Experiments in physical chemistry*, McGraw-Hill, USA, pp. 280-281, 2018.
- [9] <https://hitran.org/results/635b5671.par>, (retrieved on Sep. 8, 2022).
- [10] <https://hitran.org/results/635b56aa.par>, (retrieved on Sep. 8, 2022).
- [11] <https://hitran.org/results/635b56d0.par>, (retrieved on Sep. 8, 2022).
- [12] S. H. Yi, "Analysis of biomarkers with tunable infrared gas sensors", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 5, pp. 314-319, 2021.
- [13] M. Duval, and A. Depabla, "Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 17, No. 2, pp. 31-

- 41, 2001.
- [14] International Electrotechnical Commission, International Standard Norme Internationale, *IEC*, Edition 3.0, France, 2015.