

# 유증가스분석에 의한 변압기 이상진단법 기술동향

■ 선종호, 김광화 / 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단 연구그룹

## 서 론

유입식 변압기의 내부에 국부과열, 부분방전, 아크방전과 같은 이상이 발생하여 고장이 진행되면 변압기는 최종적으로 절연파괴된다. 절연파괴시 유입식 변압기의 특성상 폭발 등과 같은 고장이 발생하여 큰 경제적 손실과 보수기간의 장기화 등으로 다른 전력기기의 고장에 비해서 큰 손실을 초래하게 된다. 유입식변압기가 절연파괴와 같은 큰 고장에 도달하기 전에 고장을 발견하고 보수하기 위한 진단법에 대한 연구가 많이 수행되어 왔지만 그 중 유증가스분석법이 현재에도 가장 신뢰성있고 일반적으로 사용되고 있다.

유입식변압기의 주절연물로서 사용되고 있는 절연유와 세룰로즈 절연지는 다양한 탄화수소(hydrocarbon)화합물로 구성되어 있다. 이러한 화합물에 어느 정도 이상의 온도나 혹은 부분방전, 아크방전 등이 일어나면 이 때 가해진 에너지와 화합물을 구성하고 있는 각 분자들의 결합에너지 혹은 분해에너지 등에 따라서 여러 가지 가스들이 형성된다. 이 때 질량분석기나 가스크로마토그래피를 이용하여 형성된 가스의 종류나 구성비 등을 측정하면 고장의 원인을 밝힐 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 현재 여러 가지 유증가스분석법들이 전력회사나 연구자들에 의하여 개발되어 사용되고 있다. 이와 같은 기존의 유증가스 분석법을 크게 두 가지로 분류하면 주요가스를 이용

한 것과 주요가스의 성분비를 이용한 것의 두가지로 분류할 수 있다. 이러한 분석법들은 1960년대부터 개발되어 현재까지 사용되고 있지만 정확한 진단을 위해서 전문가의 도움을 필요로 하는 문제점이 지적되고 있다. 1990년대 이후에는 퍼지나 신경회로망을 이용하여 기존에 사용되고 있는 진단법의 문제점을 개선하기 위한 지능형 유증가스진단법이 연구되기 시작하여 그 가능성이 보고되고 있다. 본 논문에서는 유증가스분석에 대한 시간적 변천 및 기존의 유증가스진단법과 앞으로의 연구방향에 대하여 기술하고자 한다.

## 유증가스분석법의 변천

유증가스 분석은 변압기 내부에서 발생한 방전, 국부과열 등의 초기적인 고장을 파악하기 위하여 실시하는 변압기 이상 진단법이다.

변압기 내부의 고장의 유무를 내부에서 발생한 가스에 의해서 검출하는 시험은 1950년대부터 시작하고 있다. 처음에는 주로 부gm홀쯔 계전기내 또는 유면상의 가스를 검출하여 변압기 내부의 이상유무를 파악하였지만 후에는 액체 속에 용해되어 있는 가스를 추출하여 GC로서 분석하는 기술이 개발되면서 절연유 중에 용해되어 있는 가스를 압출 분석하여 변압기 내부의 고장과의 관계에 대해서도 검토하게 되었다. 이 방법은 1960년대에 들어서 본격적으로 연구되

기 시작하여 1960년대 후반부터 1970년대에 들어서기 까지 Dornenburg, Davies, Rogers, Muller, Duval, Kelly 등에 의한 연구결과가 보고 되었다. 이러한 연구결과를 크게 나누면, 첫째, 가스를 절연유로부터 분리하는 방법, 둘째, 유중가스 분석결과와 변압기 내부이상과의 대응관계, 셋째, 유중가스 성분비와 내부이상관계 관계로 되어있다. 세 번째 연구에 대해서는 1972년에 Davies가 1974년에 Duval, Doernenburg, Rogers, Muller가 각각 연구결과를 보고하고 있다. 그 후 이 방법은 IEC TC IOA에서 논의되어 1979년에 IEC 599로 규정되었으며 IEEE에서도 동년에 IEEE C57-104로 규정하였으며, 두 규격은 1999년과 1991년에 각각 개정되었다. 1990년대 부터는 기존의 가스 조성비를 이용한 유중가스 분석법의 문제점을 해결하기 위하여 퍼지나 신경회로망을 이용한 유중가스 진단법이 연구되어 그 가능성에 대한 연구결과를 보고하고 있다. 표 1에 유중가스 분석법의 역사를 정리 하였다.

### 변압기고장과 유중가스

변압기에서의 고장은 변압기내 철심이나, 권선, 부싱 등과 같은 여러 부위에서 발생하여 다양한 형태로 고장의 원인이나 양상을 보이면서 고장이 진전하여 최종적으로 절연파고 등에 의한 변압기 정지로 이행

한다. 이러한 흐름을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서와 같이 대부분의 고장은 열과 방전을 동반하게 되며 그에 따라 특징적인 가스를 발생하게 된다. 따라서 절연유속에 용해되어 있는 유중가스를 측정하여 분석하면 고장의 원인을 추정하는 것이 가능하다.

표 1에서와 같이 변압기의 고장은 매우 다양하지만 고장부위와 고장원인은 대표적으로 절연유중과 고체 절연체 및 과열, 부분방전, 아크방전 형태로 나타나게 되며, 이러한 고장들은 절연유를 분해시키고 가스를 형성시킨다. 각각의 고장원인은 온도차가 있으며 그에 따른 에너지 차에 의해서 발생하는 가스의 종류도 달라지게 된다. 이상원인에 따라 절연유중에서 발생하는 대표적인 분해가스를 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서와 같이 코로나나 부분방전에 의해서 나타나는 주도가스는 H<sub>2</sub>이며, 스파킹은 CH<sub>4</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 과열은 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 아크는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가 된다. 이와 같이 이상원인에 따라 나타나는 주도가스는 key 가스에 의한 진단방법으로 사용된다.

고체 절연물인 셀룰로즈는 그림 2에서와 같이 an hydro glucose ring과 C-O 분자결합으로 되어 있고 절연유온도보다 훨씬 낮은 온도에서 열적분해가 시작되어 정상적인 운전온도에서도 분해가스성분이 발견되며, 105°C 이상의 온도에서 큰 고분자 절단율을 보이며, 300°C이상에서 완전한 분해와 탄화가 발생한다. 분해가스량은 온도에 지수함수적으로 비례하

표 1 유중가스분석법의 변천

| 1920~1950                            | 1960   | 1970   | 1980                                 | 1990~현재  |
|--------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--|
| 1. Buchholz Relay 내 Gas Blanket 가스분석 | 1. GC를 유중가스분석에 적용<br>2. Hugh와 Waner 유중가스와 고장유형 관련연구<br>3. CEGB에서 정상운전가스농도 결정 | 1. Halstead는 온도에 따른 가스생성율과의 관계로 key gas 연구(1973)<br>2. Dornenburg는 가스비를 고장유형에 처음적용(1974)<br>3. Rogers는 개선된 가스비적용법을 발표(1977)<br>4. IEC 599(1978), IEEE C57-104(1978) 제정 | 1. Halstead는 nomograph를 이용하여 유중가스 분석 | 1. 신경회로암과 fuzzy를 이용한 인공지능형 유중가스분석법 연구<br>2. IEC 60599 개정(1999)<br>3. IEEE C57-104 개정(1991) |



표 3 조성비를 이용한 가스분석방법

| 분 석 법                        | 조성가스 종류  | 특 징  |
|------------------------------|--|--|
| Donenburg                    | CH <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ,<br>C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> ,<br>C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 가스량이 기준치 이상일 때 적용, 과열, 코로나, 아크의 3가지 고장원인을 진단                     |
| New Rogers (IEEE C57-104-91) | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> ,<br>C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>   | 가스량 적용 한계치가 없음, 부분방전, 아크, 저온, 중온, 고온과열의 5가지 고장원인을 진단             |
| Rogers                       | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> ,<br>C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ,<br>C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub> | 가스량 적용 한계치가 없음, 12가지의 고장원인을 진단                                   |
| IEC 60599 (1999)             | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> ,<br>C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>   | 가스량 적용 한계치가 없음, 부분방전, 저에너지방전, 고에너지방전, 저온, 중온, 고온과열의 6가지 고장원인을 진단 |
| Duval                        | CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 가스량 적용 한계치가 없음, 과열, 코로나, 아크의 3가지 고장원인을 진단                        |

와 같은 가스조성비를 이용한 장점으로서는 변압기의 용량이나 부피에 무관하며, 정량화에 따른 판정이 쉽고, 프로그램화도 가능한 이점 등이 있다. 표 3은 그 개발 예와 조성가스종류를 보여주고 있다.

표 3의 가스분석법의 예로 nomograph법 등 여러 가지 분석법이 있으나 대부분이 H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>의 5가지 가스를 조합하여 진단을 수행하고 있으며, 진단결과도 크게 부분방전(코로나), 아크방전, 과열의 3가지로 분류하고 있다. 또한 Donenburg법에서는 가스량이 어느 정도 이상일 때만 적용할 수 있도록 규정하고 있지만 나머지 3가지 방법에서는 이러한 기준을 적용하고 있지 않다. 일반적으로 변압기는 열분해가스가 아니더라도 공기나 봉입가스와의 접촉, 정상운전온도에서의 가스발생, 산화에 의한 가스발생 등으로 일정량의 가스가 발생

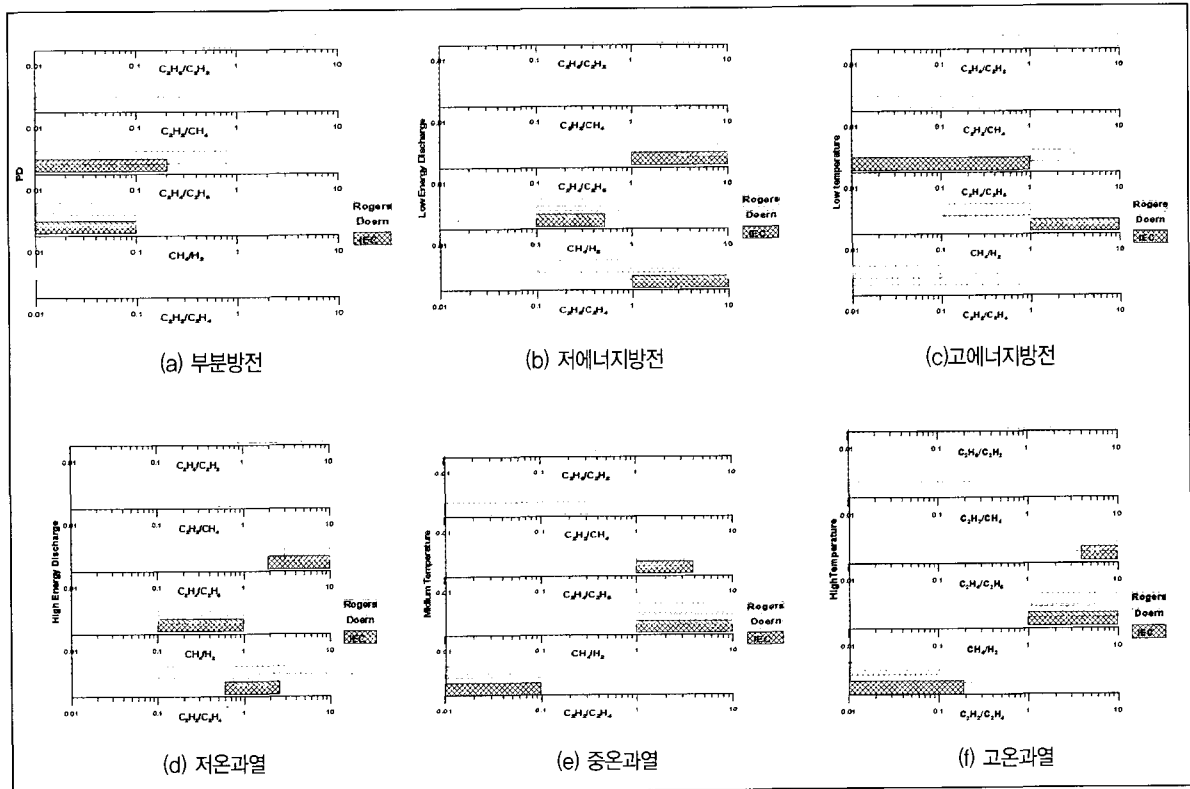


그림 4 고장원인에 따른 유증가스분석법의 비교

하는 것으로 알려져 있다. 만약 고장이 발생할 경우 가스량은 이 정상치보다 커지게 된다. 따라서 가스조성비법을 사용하기 위해서는 고장의 징후를 알 수 있는 각 가스량의 최소기준치와 같이 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

가스조성비법에 대한 사용상의 이점 때문에 유증 가스분석법중 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 것으로 알려져 있다. 유가스조성비에 의한 유증가스분석법의 특성비교를 위하여 표 3의 Donenburg법, Rogers법, IEC법에 대한 각 고장원인별 조성비의 특성비교를 실시하였다. 각 방법마다 고장원인의 종류가 일치하고 있지 않지만 고장의 원인을 IEC에서 사용하고 있는 부분방전, 저에너지방전, 고에너지방전, 저온, 중온, 고온과열의 6가지로 분류하였다. 따라서 Donenburg법과 같이 고장원인이 부분방전, 아크, 과열로 분류되어 있을 경우 부분방전은 부분방전, 아크 방전은 저에너지방전과 고에너지방전, 과열은 저온, 중온, 고온과열에 같은 기준으로 중복하여 적용하도록 하였다.

그림 4는 각 진단법의 6가지 고장원인에 대한 조성비구성특성을 보여주고 있다. 그림 4에서 Rogers법과 IEC법은 사용되는 가스조성이 일치하지만 Doeneburg법에서는 두 가지 진단법에 대하여 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>가 없는 반면 두 진단법에서는 없는 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>가 있음을 알 수 있다. 그러

므로 Rogers, IEC법과 Donenburg법에 의한 진단결과는 일치할 수 없음을 알 수 있다. 또한 Rogers법과 IEC법을 비교했을 때 각 고장원인에서 각 조성비가 비슷한 경향을 보이지만 완전히 일치하지는 않으며, 특히 저온과열의 경우 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>는 조성비가 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성으로 비추어 하나의 가스분석결과에 대하여 3가지 진단법의 진단결과는 일치하지 않을 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 3가지 분석법의 고장원인에 따른 가스비 분포를 보여주고 있다. 그림 5의 (a)는 IEC법을 보여주고 있으며, PD는 부분방전, D1은 저에너지방전, D2는 고에너지방전, T1은 저온과열, T2는 중온과열, T3는 고온과열을 뜻한다. 그림 (b)는 Donenburg법을 보여주고 있으며, 고장원인으로는 부분방전, 아크 방전, 과열의 3종류로 되어있다. 그림(c)는 Rogers법으로서 5가지의 고장원인으로 나누어져 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 3가지의 가스조성비에서 각 조성비기준의 경계점을 기준으로 고장원인이 분류되어 있으며, 이는 가스조성비가 경계점 근처에 분포할 경우 고장원인을 잘못 판정할 수 있다. 또한 그림 (a)의 IEC진단법중 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>인 경우 가스조성비가 0.2-0.5사이에는 어떠한 고장원인도 정의되어 있지 않으므로 이 부분에서는 고장의 판별이 불가능함을 알 수 있다.

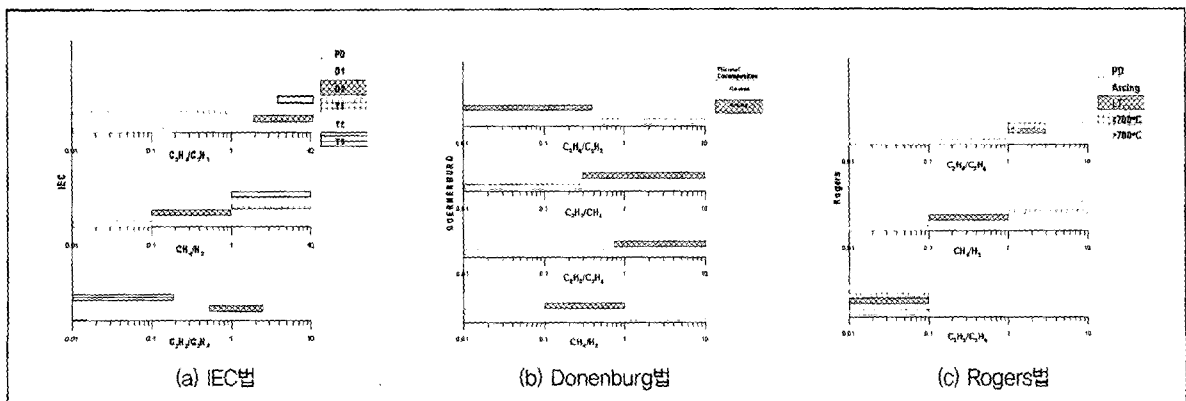


그림 5 고장원인에 따른 가스조성비의 분포

유증가스분석법의 최근의 연구동향

전항에서 분석된 기존분석법의 제반 문제점들을 해결하기 위하여 1990년대부터 퍼지나 신경회로망을 이용한 지능형 유증가스분석 연구가 수행되고 있다. 우선 퍼지이론을 유증가스분석연구에 도입한 연구예로서 K. Tomsovic는 1992년 변압기 유증가스 분석에 퍼지이론 도입에 필요한 관련 상수 연구를 하였고, 1993년 James.J.Dukarm은 IEC 유증가스분석법을 퍼지화한 논문을 발표하였다. 1997년 Y. C. Huang 등은 실제 데이터를 이용한 퍼지이론을 도입하여 가스조성비 이론을 지능화 하므로써 기존의 진단법이 가지고 있는 문제점들을 해결하고자 하였으며, 2000년 S. M. Islam은 IEC법과 Rogers법을 중복시킨 퍼지알고리즘을 도입하여 지능형 유증가스분석법을 연구하였다. 이와 같이 퍼지를 이용한 유증가스분석이론은 대부분이 기존의 진단법을 토대로 연구되고 있는 것으로 보였다. 한편 신경회로망을 이용한 연구에서는 1997년에 Y. Zhang 등이 가스량을 입력값으로 한 지능형 유증가스분석 연구를 하였으며, 같은 해에 Z. Wang 등은 진단결과의 신뢰성을 높이기 위한 신경회로망 상수 결정에 관한 연구결과를 발표하였고, 2001년 A. S. Farag 등은 여러 가지 기존의 진단법을 적용하여 최적의 지능형 기존의 진단법을 발표하였다. 이상과 같이 최근 기존의 진단법이 가지고 있는 문제점들을 해결하기 위한 지능형 유증가스진단 연구결과가 계속하여 발표되고 있다.

한국전기연구원에서는 신경회로망을 이용하여 지능형 유증가스분석 프로그램을 개발하고 있다. 본 프로그램은 실제 현장에서 고장원인이 발견된 데이터로서 학습되었다. 그림 6은 설계된 신경회로망의 구조를 보여주고 있으며, 그림 7은 유증가스분포 및 실행결과를 보여주고 있다. 그림 7에서와 같이 본 프로그램에서는 가스분포에 의해서 고장원인이 진단되도록 되어 있으며, 그림 7에서 고장원인은 아크 1로 되어있음을 알 수 있다.

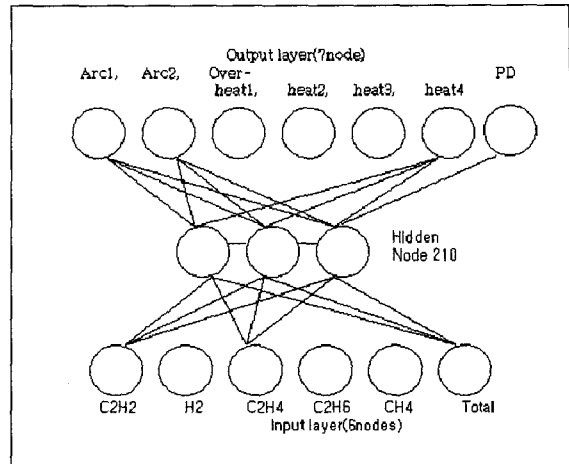


그림 6 유증가스진단을 위한 신경회로망 설계 예

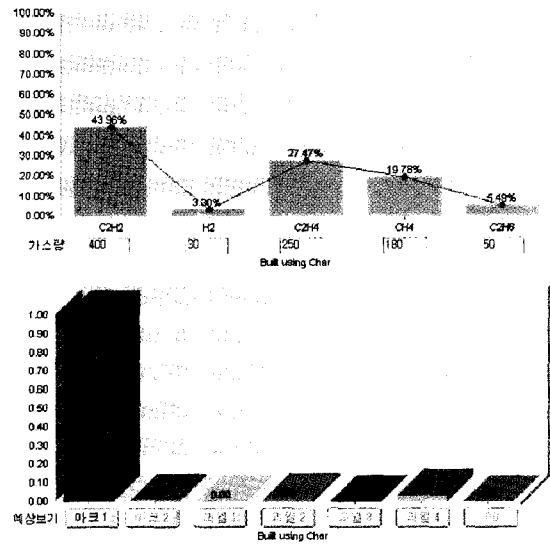
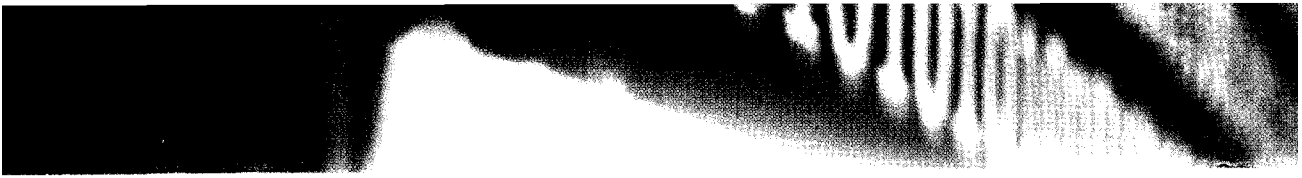


그림 7 신경회로망을 이용한 유증가스분석결과 예

결 론

이상에서와 같이 본 고에서는 유증가스진단법의 역사부터 기초이론, 여러 가지 유증가스진단법에 대하여 기술하였다. 변압기 진단법 중에서 높은 신뢰성 때문에 가장 보편적으로 사용되고 있는 유증가스진단법의 사용목적은 변압기 고장의 조기진단에 있으



므로 진단결과에 대한 신뢰성은 더욱 중요하다고 할 수 있다. 기존에 사용되고 있는 프로그램의 특성을 분석한 결과 잘 못된 진단이나 진단결과의 누락 같은 문제점이 발생할 수 있으며, 최근 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 퍼지나 신경회로망을 이용한 지능형 유증가스진단법이 다수 연구되고 있고 그 일례로서 한국전기연구원에서 개발 중인 신경회로망을 이용한 지능형 유증가스분석프로그램을 소개하였다.

#### [참고문헌]

- [1] E. Dornenburg et al., "Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis", *Brown-Boveri Rev.* 61, p.238-247, May 1974
- [2] ANSI/IEEE C57.104-1978, "Guide for the detection and determination of generated gases in oil-immersed transformer and their relation to the serviceability of the equipment"
- [3] IEC Publication 60599, Interpretation of the Analysis of Gases in Transformers and Other Oil-Filled Electrical Equipment in service, First Edition, 1999
- [4] R. R. Rogers, "UK Experience in the Interpretation of Incipient Faults in Power Transformers By Dissolved Gas-in-Oil Chromatographic Analysis", *Doble Client Conference 1975 Paper 42 AIC 75*
- [5] R.R.Rogers, "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers using Gas in Oil Analysis." *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 5, pp. 349-354, October 1978
- [6] J.J.Kelly, "Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-Gas Analysis" *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 16, No. 6, pp. 777-782, November 1980.
- [7] X. Ding et al., "ANN Based transformer fault diagnosis using gas-in-oil analysis", *57th American Power Conference*, April 1995, Chicago IL.
- [8] S. K. Bhattacharyya et al., "A neural network approach to transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis data", *NAPS*, 1993
- [9] C. E. Lin, J. M. Ling and C. L. Huang, "An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis", *IEEE Trans. on Power Delivery* Vol., No. 1, January 1993.
- [10] W. D. Halstead, "A thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers", *J. Inst. Petroleum* 59 (Sept. 1973) 569 pp 239-241.