

Investigation Between Gas in Oil Analysis and the Source of Trouble in Transformer

權 東 震[†] · 郭 周 植^{*} · 殷 鍾 榮^{**} · 閔 丙 文^{**} · 庾 東 均^{**}

(Dong-Jin Kweon, Joo-Sik Kwak, Jong-Young Eun, Byeong-Moon Min, Dong-Gyon Yu)

Abstract - The gas in oil analysis of transformer is the most widely used technology for diagnosis of transformer in the world. It has brought excellent results to prevention of transformer failure. The criteria for maintenance and judgement, however, is still required continuous supplement to improve the accuracy of the diagnosis on the basis of accumulated data of gas analysis and investigations in the transformer. In this study, the relationship between the detection rate of the defects and the source of troubles are analyzed according to the investigation in the transformer, which was conducted by KEPCO in 2004. As a result, the validity of the criteria being used at present was examined thoroughly.

Key Words : Transformer, Gas in Oil, Overheat, Partial Discharge, Analysis

1. 서 론

전력용 변압기에서 고장이 발생하면 전력계에 미치는 영향이 막대하므로, 전력용 변압기의 신뢰성 향상과 고장예방을 위한 진단기술의 중요성이 날로 증대되고 있다. 전력용 변압기는 절연성능과 냉각성능을 확보하기 위하여 절연지와 절연유의 복합절연이 채용되고 있으므로, 변압기 내부에서 국부적인 과열이나 부분적인 방전이 발생하여도 바로 절연파괴에 도달하지 않고, 절연지와 절연유에서 가스가 발생한 후 절연파괴로 이어진다. 전력용 변압기는 고장의 종류에 따라 특정 가스를 발생하고, 발생한 가스는 절연유에 용해되기 때문에 절연유에 용해되어 있는 가스를 분석하면 변압기 내부의 고장 유무와 원인을 진단할 수 있다.

변압기 절연유의 가스분석 기술은 1960년대에 적극적인 연구가 추진되어 1970년대에 실용화된 진단기술로, 한국전력공사에서는 1982년 전력연구원에 가스분석실을 설치하고, 154kV급 이상의 변전용 및 발전용 변압기를 대상으로 절연유 가스분석 업무를 처음으로 실시하였다. 1998년 변압기 수량의 증가에 따른 가스분석 업무의 폭주에 따라 중부이북지역은 서울전력관리처에서, 중부이남지역은 대전전력관리처에서 변전용 변압기에 대한 가스분석 업무를 담당하고, 전력연구원에서는 발전용 변압기에 대한 가스분석 업무를 담당하고 있다.[1,2]

한전에서는 1985년 국내의 가스분석 데이터를 분석하고, 일본전기협동연구회의 가스분석 주기 및 판정기준을 참조하여 한전 자체의 가스분석 판정기준을 최초로 제정하였다. 또한 1998년 200kV 이하 변압기와 345kV 이상 변압기에 대한 판정기준을 별도로 분리하고, 판정기준을 “요주의”, “이상” 및 “위험”의 3단계로 개정하였다. 2002년 C₂H₂ 가스의 판정기준치를 일부 개정하고, C₃H₈ 가스를 분석대상 가스로 추가로 선정하여 오늘에 이르고 있다.[3,4]

일본에서는 1980년에 전기협동연구회에서 “유중가스 분석에 의한 유입기기의 보수관리”를 통하여 판정기준을 제정하여 이용하다가, 1996년 전력용 변압기 보수관리 전문위원회에서 고장이 확인된 변압기의 데이터를 분석하여 판정기준을 개정하여 사용하고 있다.[5]

이와 같이 변압기 절연유의 가스분석 기술은 현재 세계적으로 가장 널리 이용되고 있는 기술이고, 변압기 사고예방에 많은 성과를 거두고 있으나, 진단의 정확도를 향상시키기 위해서는 가스분석 데이터와 변압기 내부점검 결과를 토대로 가스분석 관리기준 및 판정기준을 보완할 필요가 있다. 본 연구에서는 한전에서 운영중인 절연유 가스분석 판정기준치와 일본의 가스분석 판정기준치와 비교하고, 2004년 한전 중부이남지역의 가스분석 결과와 변압기 내부 정밀점검 결과를 토대로, 가스분석에 의한 변압기 내부고장의 발견율과 각 가스별 고장원인을 분석하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

E-Mail : djkweon@kepni.re.kr

^{*} 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

^{**} 正會員 : 韓國電力公社 大田電力管理處

接受日字 : 2005年 6月 3日

最終完了 : 2005年 7月 5日

2. 변압기 절연유 가스분석 판정기준치

2.1 변압기 절연유 가스분석 절차

운전중인 변압기의 절연유에 용해된 가스를 분석하여 내부

의 고장을 진단하기 위해서는, 절연유의 채취에서부터 용존가스의 추출에 이르기까지, 절연유와 외부 공기와의 접촉을 최대한 억제해야 하는 등 세심한 주의가 필요하다. 변압기 절연유의 채취는 전기절연유 시험방법(KSC 1201)의 '사용중인 기름의 시료채취 방법'에 준하여 채취한다. 변압기 내부에서 생성된 가스는 일반적으로 절연유의 강제순환 및 자연순환에 의해 균일하게 대류, 확산하므로, 절연유는 변압기 하부 드레인 밸브(drain valve)에서 채취한 것을 대표시료로 하고 있다.

변압기에서 채취된 절연유는 가스분석장치에서 절연유에 용해되어 있는 가스를 우선 혼합가스 형태로 추출하고, 추출된 혼합가스에서 화학분석장치를 이용하여 가스별로 정량 측정한다. 절연유에 용존된 가스의 추출 방식에는 토리첼리 방식, 토폴러 펌프 방식, 헤드 스페이스 방식, 피스톤 벨로우즈 방식, 스트리핑 방식 및 버블링 방식이 있으며, 전력연구원에서는 토폴러 펌프 방식을 사용하고, 전력관리처에서는 헤드 스페이스 방식을 사용하고 있다. 토폴러 펌프 방식은 정밀분석용으로 가스의 추출성능은 아주 우수한 방식이나 장치가 복잡하여 숙련된 분석자가 요구되며, 헤드 스페이스 방식은 장치가 간단하고, 다량의 절연유를 연속해서 자동분석이 가능하여 1차분석용으로 적합하다. 절연유에서 추출한 혼합가스는 가스크로마토그래피(Gas Chromatography)의 샘플루프(sample loop)에 주입되며, 캐리어 가스(carrier gas, Ar)와 함께 분리관(column)을 통과하면서 충전물과의 친화력 차이에 의하여 가스가 분리된다. 분리된 가스는 열전도도 검출기(thermal conductivity detector)에서 O₂(산소), H₂(수소), N₂(질소) 가스가 검출되고, 불꽃이온화 검출기(flame ionization detector)에서 CH₄(메탄), C₂H₂(아세틸렌), C₂H₄(에틸렌), C₂H₆(에탄), C₃H₈(프로판), CO(일산화탄소), CO₂(이산화탄소) 가스가 검출된다. 여기서 O₂, N₂, CO₂ 가스를 제외한 *는 가연성 가스이며, 가연성 가스의 총량을 TCG(Total Combustible Gas)라 한다.

2.2 한전의 절연유 가스분석 판정기준치

변압기 절연유의 가스를 분석하는 목적은 크게 두 가지로, 변압기의 내부 이상을 조기에 발견하여 변압기 고장을 사전에 예방하기 위한 것과 절연재의 열화 정도를 진단하여 변압기의 잔존 수명을 예측하고 적절한 교체시기를 결정하기 위한 것이다. 변압기의 고장을 사전에 예방하는데 이용되는 가스는 탄화수소계 가스이고, 절연재의 열화 정도를 진단하는데 이용되는 가스는 CO와 CO₂ 가스이다. 절연유 가스분석에 의한 변압기의 진단절차는 먼저 측정된 각 가스농도와 가연성 가스 총량의 증가량으로 한전의 진단기준치에 의해 고장유무와 정도에 대한 상태를 판정하고, 고장원인별 주요 발생가스에 의한 진단방법에 따라 고장의 원인을 추정한다. 또한 고장이 예측될 경우에는 절연파괴전압, 전산가, 유전정점(Tan δ), 수분 및 전기적 시험과 외부 점검 등의 데이터를 종합적으로 검토해 내부 정밀 점검 등의 유지보수 계획을 수립한다.

한전에서 운영중인 전력용 변압기의 가스분석 주기는 신설 변압기와 운전중인 변압기로 구분되어 있다. 신설 변압기는

제작 및 설치상의 결함을 조기에 발견하고, 가스분석의 초기치를 설정하기 위하여 운전 1개월 및 3개월 후에 가스를 분석한다. 운전중인 변압기는 정기분석, 추적분석 및 임시분석으로 구분되며, 정기분석은 변압기의 건전성을 확인하고 고장의 발생여부를 진단하기 위한 것으로 1회/년 가스를 분석한다. 추적분석은 정기분석에서 "요주의" 또는 "이상"으로 판정된 변압기의 가스 변화를 감시하고, 고장으로의 진전을 예측하기 위하여 가스분석 주기를 단축한 것으로, "요주의" 변압기는 1회/3개월, "이상" 변압기는 1회/1개월 가스를 분석한다. 또한 기계적 보호장치나 전기적 보호장치의 동작이나 고장 징후가 확실할 경우에는 절연유의 가스분석 주기에 관계없이 임시로 가스분석을 실시한다.

표 1. 가스분석 판정기준치(1982년)

Table 1. Criteria values of the gas in oil(1982)

	H ₂	CO	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	TCG
요주의	400	300	20	250	250	250	4,000	700
이상	800	800	100	750	750	750	8,000	1,800

한전에서는 1982년~1985년까지 한전에서 수행한 가스분석 데이터를 분석하고, 일본전기협동연구회의 가스분석 주기 및 판정기준을 참조하여, 1985년 표 1과 같이 한전 자체의 가스분석 판정기준을 최초로 제정하였다. 이 당시에는 154kV 변압기를 대상으로 "요주의"와 "이상"의 2단계 판정기준을 정하였다.

표 2. 가스분석 판정기준치(1998년)

Table 2. Criteria values of the gas in oil(1998)

	요주의		이상		위험	
	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상
H ₂	400~800		801~1,200		-	
CO	400~700	350~600	701~1,000	601~800	-	
C ₂ H ₂	25~80	20~60	81~100	61~80	150 이상	120 이상
CH ₄	250~750		751~1,000		-	
C ₂ H ₄	300~750		751~1,000		-	
C ₂ H ₆	250~750		751~1,000		-	
TCG	1,000~2,500		2,500~4,000		4,000 초과	
TCG 증가량	정상상태에서 200/월 이상		요주의 상태에서 200/월 이상		이상상태에서 300/월 이상	
조치사항	추적조사 실시 (3개월/1회)		추적조사 실시 (1개월/1회)		운전정지후 내부점검 실시	
신설 변압기	운전중인 변압기 기준치의 50%, 1개월 주기로 추적조사					

가스	판정	구분	조치사항
CO ₂	정상	5,000 미만	조치사항 없음
		5,000~7,000	변압기 관리방법 변경 - 절연유 유온을 낮춤(냉각장치 추가 가동) - 절연유 절연파괴전압 측정 : 반기 1회 - 절연유 함유 수분 측정 : 반기 1회 - 절연유 전산가 측정 : 반기 1회
	요주의	7,000 초과	변압기 절연재 열화도 진단 - 절연유: CO ₂ , CO Gas 및 Furfural 분석 - 절연재: 인장강도 및 평균중합도 분석

1998년 축적된 국내 변압기의 가스분석 데이터를 분석하여

판정기준을 표 2와 같이 개정하였다. 이때 200kV 이하 변압기와 345kV 이상 변압기에 대한 판정기준을 별도로 분리하였으며, “요주의”, “이상” 및 “위험”의 3단계 판정기준을 정하였다. 또한 TCG의 증가량에 의한 판정기준을 추가하였으며, 신설 변압기(운전개시 1~4개월)에 대한 판정기준을 운전중인 변압기의 판정기준과 분리하여 새로 제정하였다. 신설 변압기의 판정기준은 운전중인 변압기의 판정기준의 하한치 50%를 초과하는 것으로 하였다. 또한 CO₂ 가스의 검출량에 따라 변압기 관리방법을 변경하거나 변압기 절연체의 열화도를 진단하는 방법을 제정하였다.

여기서 “요주의”는 변압기 내부에 고장징후가 있거나 열화가 진행중에 있다고 추정되는 것으로, 분석주기를 단축하여 추적조사를 할 필요가 있는 상태를 의미한다. “이상”은 변압기의 열화정도가 심하여 내부에 고장이 있는 것으로 판단되는 경우로, 분석주기를 단축하고 변압기의 운전가능 여부 등을 종합적인 진단할 필요가 있는 상태를 의미한다. “위험”은 변압기 내부에 고장이 있는 것이 확실시되어 계속적으로 운전할 경우 심각한 사고를 유발시킬 수 있는 경우로, 전기적 시험, 외부 일반점검 및 보수이력 등을 종합하여 변압기 내부 점검을 실시해야 하는 상태를 의미한다.

표 3. 가스분석 판정기준치 변경(2002)

Table 3. Alteration of the criteria values of the gas in oil(2002)

	요주의		이상		위험	
	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상	200kV 이하	345kV 이상
C ₂ H ₂	25~80	20~60	81~150	61~120	150이상	120이상
C ₃ H ₈	250~750		751~1,000			

표 2와 같이 1998년 개정된 판정기준에서 C₂H₂ 가스의 “이상”의 범위는 61~80ppm이고, “위험”의 범위는 120ppm 이상으로 80~120ppm 사이의 가스분석치는 어디에도 속하지 않는 문제점이 있었다. 따라서 이러한 문제점을 개선하여 2002년 C₂H₂ 가스의 판정기준치를 표 3과 같이 개정하였으며, 절연유 가스분석 방법의 기준이 되는 ASTM D 3612의 규정에 따라 C₃H₈ 가스를 추가로 분석대상 가스로 선정하였다. 표 3은 2002년 개정된 가스분석 판정기준치에서 주요 변경사항만을 나타낸 것으로, 나머지 가스는 1998년의 판정기준과 동일하다.

절연유의 가스분석 진단기준치에 의한 변압기의 고장유무와 정도에 대한 상태를 판정하게 되면, 가스가 발생하게 된 고장의 원인을 추정한다. 고장의 원인을 추정하는 방법은 주요 발생가스에 의한 방법, 가스패턴에 의한 방법, 가스조성비에 의한 방법 및 특정가스에 의한 방법 등이 있으며, 한전에서는 주요 발생가스에 의한 방법을 기준으로 하고, 다른 방법들을 참고로 하여 고장의 원인을 판단하고 있다. 변압기 고장의 원인은 절연유 과열, 절연유중 아크방전, 절연유중 부분방전, 고체절연물의 과열 및 절연물 또는 절연유의 열화 등으로 표 4와 같이 분류할 수가 있다.

표 4. 변압기 내부 고장에 따른 발생가스

Table 4. Gases produced due to faults in the transformer

고장원인		주요 발생가스
절연유 과열	저온(300℃ 이하)	C ₂ H ₆ , CH ₄ , C ₂ H ₄
	중온(300~700℃)	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
	고온(700℃ 이상)	C ₂ H ₄ , CH ₄ , C ₂ H ₆
고체절연물의 과열(200℃ 이상)		CO, CO ₂ , CH ₄
절연유중 아크방전		C ₂ H ₂ , H ₂ , C ₂ H ₄ , CH ₄
절연유중 부분방전		H ₂ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , CH ₄
절연물, 절연유의 열화		CO, CO ₂

2.3 일본의 절연유 가스분석 판정기준치

일본에서는 1980년에 전기협동연구회에서 “유중가스 분석에 의한 유입기기의 보수관리(일본전기협동연구 제36권 1호)”를 최초로 제정하여 이용하다가, 1996년 운전중인 변압기의 건전성 진단을 고도화하고 경년 변압기의 열화진단과 수명판정이 필요하게 되어, 전력용 변압기 보수관리 전문위원회에서 각국의 가스분석 판정기준을 조사하고, 고장이 발생된 변압기 157대의 데이터와 요주의 감시 변압기 792대의 데이터 및 정상 운전 변압기 375대의 데이터를 검토하여, 유중가스 분석에 의한 판정기준과 고장 진단방법을 개정하여 사용하고 있다.

일본에서의 변압기 절연유 가스분석 주기는 한전과 비슷하며, 정기측정은 1회/1~3년으로 하고, 추적조사는 “요주의” 또는 “이상”으로 판정되었을 경우나, 내부점검, 고장수리 후의 확인을 위해 주기를 단축해 실시한다. 또한 변압기 절연유 가스분석 초기치는 운전개시 후 1개월~3개월째의 값으로 하고 있다.

일본의 변압기 절연유 가스분석 판정기준은 “요주의 I”, “요주의 II” 및 “이상”의 3단계를 설정하고 있으며, 변압기 전압이나 용량에 따른 가스 발생량의 차이는 없다고 보고, 500kV와 275kV 변압기의 전압별 판정기준치의 구분은 두지 않고 있다. 일본에서 가스분석 판정기준치는 1980년에는 정상 변압기의 가스분석 결과로부터 정상운전 변압기 95~97%를 기준으로 판정기준치를 설정한 것에 비하여, 1996년 개정한 판정기준치는 이상을 확인한 변압기에서 검출된 가스에 주목하여 판정기준치를 정했다.

표 5. “요주의 I” 판정기준치

Table 5. Criteria values of the “Caution I”

H ₂	CO	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	TCG
400	300	0.5	100	10	150	500

일본에서의 “요주의 I”은 한전의 “요주의”와 같은 판정기준으로, 한전에 비해 비교적 낮게 설정되어 있으며, 표 5에서 어느 가스 값이라도 하나만 해당되면 “요주의 I”로 판정한다. 일본의 판정기준치 특징은 C₂H₂ 가스가 검출되면 고장의 가능성이 있기 때문에 가능한 낮게 설정해 0.5ppm을 기준으로

하였으며, C₂H₄ 가스도 고장의 미연방지의 차원에서 보다 낮게 설정해 10ppm으로 하였다. 한전에서의 C₂H₂ 가스는 25ppm, C₂H₄ 가스는 300ppm을 하한치로 설정한 것과는 상당히 비교되는 부분이다. 또한 TCG도 한전의 1,000ppm에 비해 500ppm을 기준으로 하고 있다. 정상적으로 운전되는 변압기도 경년열화에 의해 CO, CO₂, H₂, C₂H₆, CH₄ 등의 가스가 발생하고, 특히 운전초기에는 CO, H₂ 가스가 다량으로 검출되는 경우가 있어, 이러한 원인추정이 곤란한 변압기에 대해서는 내부 고장이라고 판단하지 않고 감시를 주체로 하는 “요주의 I” 기준을 설정했다. 또한 변압기 내부점검 결과에 따라 고장 발견율이 낮은 가스인 H₂ 가스는 400ppm, C₂H₆ 가스는 450ppm 및 CO 가스는 300ppm으로 설정하고, CH₄ 가스는 고장 발견율이 비교적 높기 때문에 100ppm으로 설정하였다. C₂H₂, C₂H₄ 가스는 아크 방전이나 고온 열분해에 의해 발생하는 특징적인 가스이므로, 미량이라도 검출되었을 경우는 추적조사를 실시하도록 판정치를 낮게 설정했다.

표 6. “요주의 II” 판정기준치
Table 6. Criteria values of the “Caution II”

① C ₂ H ₂ ≥ 0.5
② C ₂ H ₄ ≥ 10, TCG ≥ 500

“요주의 II”는 한전의 “이상”과 같은 판정기준으로, C₂H₂ 가스와 C₂H₄ 가스는 고장 발견율이 높기 때문에 “요주의 I”과 같은 기준으로 하고 있으며, ①, ② 어느 쪽이라도 해당되면 “요주의 II”로 판정한다. 또한 C₂H₄ 가스가 10ppm 이상이고, TCG가 500ppm 이상 검출되었을 경우에는 이상의 징후로 추정하여 “요주의 II” 레벨로 판정한다.

표 7. “이상” 판정기준치
Table 7. Criteria values of the “Abnormal”

① C ₂ H ₂ ≥ 5
② C ₂ H ₄ ≥ 100 and TCG ≥ 700
③ C ₂ H ₄ ≥ 100 and TCG 증가량 ≥ 70/月

“이상”의 판정기준은 “요주의 II”에서 변압기의 고장이 진전해 변압기 내부의 고장이 분명하게 발생하고 있다고 판정하는 경우로, 고장판정의 유효성이 높은 특정 가스로서 C₂H₂, C₂H₄ 가스를 선정하고, TCG와 C₂H₄ 가스와의 조합 및 TCG 증가량과 C₂H₄ 가스와의 조합에 의해 표 7의 3가지 조건에서 어느 하나라도 해당되면 “이상”으로 판정한다.

유증가스 분석에 의해 “요주의” 이상으로 판정된 변압기는 가스패턴에 의한 진단, 조성비에 의한 진단 및 특정가스에 의한 진단법을 사용하여 고장의 종류, 위치, 정도 및 긴급성을 진단한다. “요주의 I”로 판정되었을 경우는 가스패턴 및 특정가스에 의한 진단을 실시하고, 추적조사 여부를 결정한다. “요주의 II” 및 “이상”으로 판정되었을 경우는 조성비 진단

을 포함한 전체의 양상진단을 실시해 고장의 내용과 긴급성을 판정한다. 유증가스 분석에 의해 “요주의 II” 또는 “이상”으로 판정되고 내부 고장이 확실할 경우에는, 전기적 시험, 외부 일반점검, 운전이력이나 개보수 실적 등 변압기의 고장진단에 도움이 되는 항목을 종합해 운전의 계속 여부, 내부점검 또는 수리 여부를 최종적으로 결정한다.

3. 가스분석 데이터 및 정밀점검 결과 분석

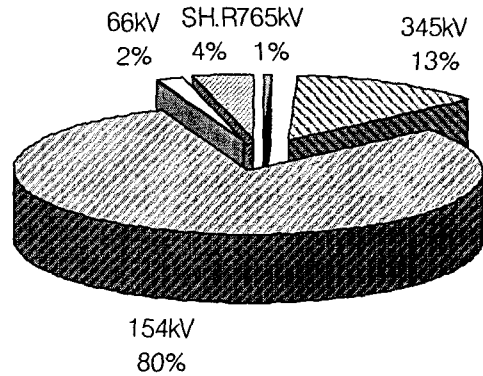


그림 1 가스분석 대상 변압기 수량
Fig. 1 Number of transformer for gas in oil analysis

그림 1과 같이 2004년 한전 중부이남지역의 가스분석 대상 변압기는 2,100대이다. 이 중에서 154kV 단상 변압기가 1,332대로 63.4%를 차지하고 있으며, 154kV 삼상 변압기 351대를 합하면 154kV 변압기가 전체의 80.1%를 차지하고 있다. 또한 765kV 변압기가 11대이며, 345kV 변압기는 279대로 13.3%를 차지하고 있다.

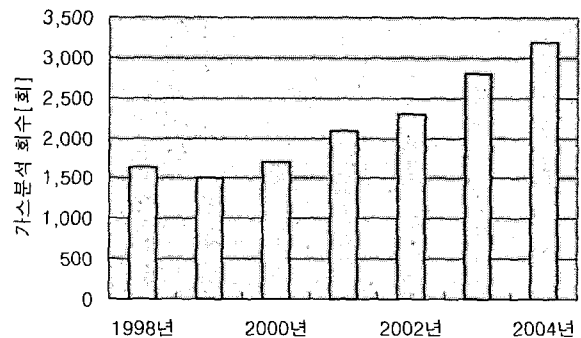


그림 2 가스분석 변화추이
Fig. 2 Trend of gas in oil analysis

그림 2는 1998년부터 2004년까지 가스분석 회수의 변화추이를 나타낸 것으로, 1998년 1,640회에 비해 2004년에는 3,200회로 가스분석 회수가 2배 가까이 증가하였다. 2004년 한전 중부이남지역의 가스분석 대상 변압기 수량이 2,100대인데 비하여 가스분석 회수가 3,200회로 나타난 것은 “요주의” 이상으로 판정된 변압기는 추적조사를 실시하기 때문이다. 연도별 가스분석 회수를 변압기의 전압별로 분류하면, 2001년에

765kV 변압기가 설치되어 초기분석을 포함하여 가스분석이 실시되고 있으며, 345kV 및 154kV 변압기는 가스분석 회수가 점차적으로 늘어나고 있다. 그러나 66kV 이하의 변압기는 점차적으로 가스분석 회수가 감소하고 있다.

2004년에 가스를 분석한 변압기를 전압별로 분석하면, 3,200회의 가스분석 중에서 154kV 변압기의 분석회수가 2,436회로 전체 가스분석 업무의 76.1%를 차지하며, 154kV 변압기 수량이 1,683대인데 비하여 약 145%의 가스분석 비율을 나타내었다. 또한 345kV 변압기는 수량이 279대인데 비하여 가스분석회수는 538회로 193%의 가스분석 비율을 나타내었으며, SH.R의 수량은 88대인데 비하여 가스분석 회수는 165회로 188%의 가스분석 비율을 나타내었다. 765kV 변압기는 최근에 설치되어 년 1회 정기적으로 분석한 것으로 별다른 이상이 없는 것을 나타내었다.

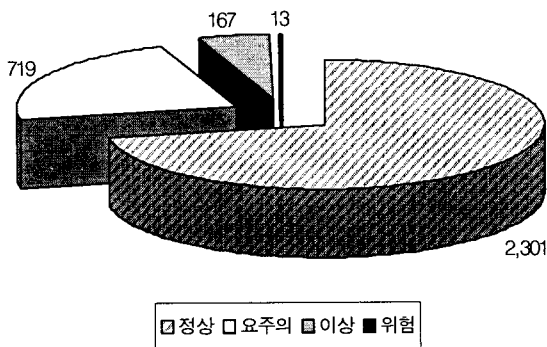


그림 3 2004년도 가스분석 결과
Fig. 3 Results of the gas in oil analysis in 2004

2004년 3,200회의 가스분석에서 “정상”으로 판정된 것은 그림 3과 같이 2,301회로 71.9%를 나타내었으며, “요주의”로 판정된 것은 719회로 22.5%를 나타내었다. 또한 “위험”으로 판정된 변압기도 13회를 나타내었다. 그림 3은 “요주의” 이상으로 판정되어 추적조사가 이루어 가스분석 회수를 포함하여 나타낸 것으로, 2,100대의 변압기별로 “요주의” 이상의 판정 결과는 표 8과 같다.

표 8. 전압별 가스분석 결과
Table 8. Results of the gas in oil analysis with voltage

	정상	요주의	이상	위험	계
765kV	11	0	0	0	11
345kV	212	31	33	3	279
154kV	1,425	217	38	3	1,683
66kV	33	6	0	0	39
SH.R	66	20	0	2	88
계	1,747	274	71	8	2,100

2,100대의 변압기에서 1,747대(83.2%)는 정상으로 판정되었으며, “요주의” 이상으로 판정된 변압기는 353대로 16.8%가 변압기 내부에서 어떤 종류이던 가스가 발생하고 있다. 279

대가 운전중인 345kV 변압기에서 “요주의” 이상으로 판정된 변압기는 67대로 24.0%를 나타내었고, 1,683대가 운전중인 154kV 변압기에서 “요주의” 이상으로 판정된 변압기는 258대로 15.3%를 나타내었다. 또한 “이상”으로 판정된 345kV 변압기의 비율이 11.8%로 154kV 변압기 2.3%에 비해 상당히 높게 나타났다.

표 9. “요주의” 이상으로 판정된 변압기의 가스별 분포
Table 9. Gas distribution in transformer judged as above “Caution”

구분	요주의	이상	위험	계	%
H ₂	3	4	0	7	2.0
C ₂ H ₂	10	1	2	13	3.7
C ₂ H ₄	6	3	0	9	2.5
C ₂ H ₆	53	3	0	56	15.9
CH ₄	1	0	0	1	0.3
C ₃ H ₈	2	0	0	2	0.6
CO	199	60	0	259	73.4
CO ₂	0	0	0	0	0.0
TCG	0	0	6	6	1.7
계	274	71	8	353	100.0
%	77.6	20.1	2.3	100.0	

절연유 가스분석에 의해 “요주의” 이상으로 판정된 가스를 살펴보면, CO 가스가 73.4%를 나타내었으며, 다음으로 C₂H₆ 가스가 15.9%를 나타내어, 이 두 가스가 차지하는 비율이 전체의 89.3%를 차지하였다. 또한 “위험”으로 판정된 가스는 C₂H₂ 가스와 TCG만이 나타났으며, TCG가 “위험”으로 나타난 원인은 H₂ 가스 또는 C₂H₂ 가스가 많이 발생하여 TCG가 증가한 것으로 나타났다.

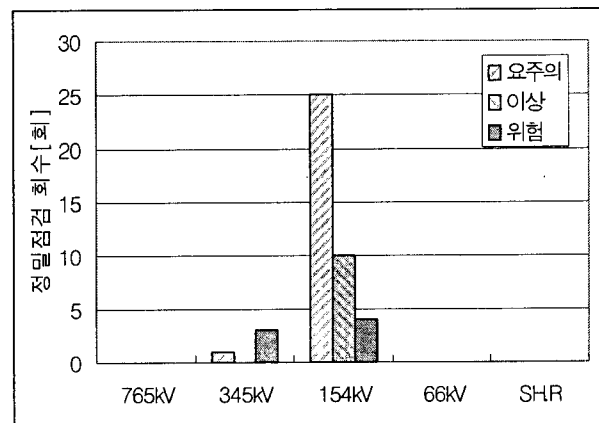


그림 4 변압기 정밀점검 회수
Fig. 4 The number of detailed inspection

절연유 가스분석에 의해 “요주의” 이상으로 판정된 353대의 변압기 중에서 내부 정밀점검을 시행한 변압기는 43대이다. 이 중에서 154kV 변압기가 39대로 그림 4와 같이 약

91%를 차지하고, 66kV 변압기와 SH.R는 내부 정밀점검을 시행하지 않았다. “요주의”로 판정된 변압기는 274대중에서 26대를 정밀점검하여 9.5%의 점검비율을 나타내었으며, “이상”으로 판정된 변압기는 71대중에서 10대를 정밀점검하여 14.1%의 점검비율을 나타내었고, “위험”으로 판정된 변압기는 8대중에서 7대를 정밀점검하여 87.5%의 점검비율을 나타내었다.

표 10. 내부 정밀점검 시기 및 고장 발견

Table 10. The detailed inspection time and the find out of the fault

구분	요주의									이상					위험				계
	회수	1	2	3	4	5	6	9	계	1	2	4	6	11	계	1	2	3	
수량	2	5	7	3	4	4	1	26	5	1	1	2	1	10	3	3	1	7	43
고장 발견	0	3	2	2	0	0	1	8	1	0	1	1	0	3	3	3	1	7	18

내부 정밀점검에 따른 고장원인의 발견여부는 43대의 변압기를 정밀점검하여 18대에서 고장원인을 발견하여 약 42%의 고장발견율을 나타내었다. 이 중에서 “요주의”로 판정된 변압기는 31%, “이상”으로 판정된 변압기는 30%, “위험”으로 판정된 변압기는 100%의 고장발견율을 나타내었다. 일본에 비해 한전의 판정기준이 상당히 높게 설정된 것에 비하여, “요주의” 및 “이상”으로 판정된 변압기의 고장발견율이 30% 정도에 그치고 있어 내부 정밀점검 방식에 대한 검토가 필요하다. “요주의” 이상으로 판정된 가스분석 회수에 따른 고장원인 발견율은 상관관계가 없게 나타났으며, “위험”으로 판정된 변압기는 고장원인이 모두 발견되므로, 가능한 빠른 시기에 내부 정밀점검을 실시하는 것이 바람직하다.

표 11. 가스분석에 의한 예상원인

Table 11. The estimated causes by gas in oil analysis

고장원인		H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	C ₃ H ₈	CO	CO ₂	TCG	계
절연유 과열	저온				7						7
	중온					0	0				0
	고온			5							5
고체절연물 과열								24			24
절연유중 아크방전			3					1			4
절연유중 부분방전		3									3
계		3	3	5	7	0	0	25	0	0	43

표 12. 내부점검에 의한 고장원인

Table 12. The discovered causes by internal inspection

구분	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	C ₃ H ₈	CO	CO ₂	TCG	계
고정볼트 풀림			3	4						7
고체절연물 과열			2				3			5
절연유중 아크방전		1					2			3
절연유중 부분방전	3									3
원인불명		2		3			20			25
계	3	3	5	7	0	0	25	0	0	43

가스분석 결과에 따른 내부 고장의 예상원인은 주요 발생 가스에 의한 방법으로 표 11과 같이 추정하였다. 또한 내부 정밀점검에 의해 확인된 고장원인은 표 12와 같다. 예상원인과 실제 고장원인을 비교하여 보면, H₂ 가스는 절연유중의 부분방전으로 예상하였으며, 내부 정밀점검 결과 변압기 내부에 동가루가 발생하여 절연유중의 부분방전이 발생한 것으로 추정되어 비교적 정확한 예상으로 판단된다. C₂H₂ 가스는 절연유중의 아크에 의한 절연유의 분해나 고체 절연물의 아크방전, 국부방전 등에 의해 발생하는 가스로, 정밀점검 결과 권선 내측으로부터 진전된 것으로 보이는 연면방전 흔적이 발생한 것이 1대 있었고, 나머지 2대는 원인을 발견하지 못했다. C₂H₄ 가스는 고온과열을 예상하였으나, 실제 고장부위는 OLTC 극성절환기에서의 고정볼트 풀림현상이 3건, 이중접지에 의한 아크발생이 2건 발생하였다. C₂H₆ 가스는 절연유의 저온과열로 예상하였으나, 정밀점검에 의한 원인은 볼트 풀림에 의한 아크방전이 4건 발생하였으며, 3건은 원인을 발견하지 못했다. CO 가스는 고체절연물의 과열(200℃ 이상)로 예상하였으나, 절연지 과열현상이 3건, 절연지에서의 탄화흔적과 OLTC 탭 절환기 부위에서의 탄화흔적이 각 1건이 발생하였으며, 80%에 달하는 20건은 원인을 발견하지 못하였다. 이와 같이 CO 가스는 변압기 내부 정밀점검에 의해 이상부위나 원인을 발견하지 못하고 있으며, CO 가스가 가스분석의 추적조사 빈도와 내부 정밀점검 회수를 증가시키는 원인이 되고 있으므로, CO 가스의 판정기준을 재검토할 필요성이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 2004년 한전 중부이남지역의 절연유 가스분석 결과와 변압기 내부 정밀점검 결과를 토대로, 가스분석에 의한 변압기 내부고장의 발견율과 각 가스별 고장의 원인을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 한전에서는 200kV 이하 변압기와 345kV 이상 변압기에 대한 판정기준을 별도로 분리하여 운영하고 있으나, 일본에서는 500kV와 275kV 변압기의 전압별 구분은 두지 않고 있다. 또한 일본의 판정기준치에 비해 한전의 판정기준치가 상당히 높게 설정되어 있으며, 특히 일본에서는 C₂H₂, C₂H₄ 가스가 미량이라도 검출되었을 경우는 추적조사를 실시하도록

판정치를 가능한 낮게 설정하고 있다.

- (2) 가스분석에 의해 운전중인 변압기의 16.8%가 “요주의” 이상으로 판정되었으며, “이상”으로 판정된 345kV 변압기는 11.8%로 154kV 변압기 2.3%에 비해 상당히 높게 나타났다. “요주의” 이상으로 판정된 가스는 CO 가스가 73.4%를 나타내었으나, 변압기 내부 정밀점검에 의해 이상부위나 원인이 발견되지 않아, CO 가스의 판정기준을 재검토할 필요성이 있다.
- (3) 내부 정밀점검에 따른 고장원인의 발견율은 약 42%를 나타내었으며, “요주의”로 판정된 변압기는 31%, “이상”으로 판정된 변압기는 30%, “위험”으로 판정된 변압기는 100%를 나타내었다. 가스분석 판정회수에 따른 고장원인 발견율은 상관관계가 없게 나타났으며, “위험”으로 판정된 변압기는 고장원인이 모두 발견되므로 가능한 빠른 시기에 내부 정밀점검을 실시하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- [1] 은중영 외 “변압기 용존가스 분석에 의한 고장 예방진단,” 한국전력공사 대전전력관리처, pp.1~81, 2001
- [2] 남창현 외, “절연유중 용존가스 분석기술,” 전력연구원, pp.1~103, 1998
- [3] “주변압기 운영기준,” 한국전력공사 송변전처, pp.1~43, 2002
- [4] “변압기 절연유중 CO₂ 및 CO 가스의 관리 기준치 설정연구,” 한전전력연구원 최종보고서, pp.1~101, 1998
- [5] “유입 변압기의 보수관리,” 日本電氣協同研究會, 54卷, 5号, pp.1~474, 1999

저 자 소 개



권 동 진(權 東 震)

1963년 1월 20일생. 1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1992년 송실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 송실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
 Tel : 042-865-5862, Fax : 042-865-5844
 E-mail : djkwon@kepri.re.kr
 E-mail : matt@tge.co.kr



곽 주 식(郭 周 植)

1972년 1월 10일생. 1994년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
 Tel : 042-865-5868, Fax : 042-865-5844
 E-mail : jskwak@kepri.re.kr



은 중 영(殷 鍾 榮)

1953년 2월 16일생. 1972년 이리공업고등학교 전기과 졸업. 1980년~한국전력공사 근무(현 대전전력관리처)
 Tel : 041-373-7601, Fax : 041-9401-473
 E-mail : ejoy@kepco.co.kr



민 병 문(閔 丙 文)

1963년 9월 22일생. 1991년 대전공업대학교 전산학과 졸업. 2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년~한국전력공사 근무(현 대전전력관리처 변전운영과장)
 Tel : 042-620-2361, Fax : 042-620-2369
 E-mail : minbm@kepco.co.kr



유 동 균(庾 東 均)

1953년 6월20일생. 1990년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1977년~한국전력공사 근무(현 대전전력관리처 변전운영부장)
 Tel : 042-620-2360, Fax : 042-620-2369
 E-mail : yoodok@kepco.co.kr