



OF 케이블의 절연열화 진단기술

김 정 태 <대전대학교 전기공학과 교수>

구 자 윤 <한양대학교 전기공학과 교수>

1. 서 론

OF 케이블의 역사는 케이블의 역사라고 할만큼 오래 전부터 사용되어왔고 또 지금도 계속 사용되고 있는 케이블이다. 그만큼, OF 케이블은 운전에 신뢰를 갖고 있으며 효과적인 전력 전송 수단의 하나이다.

그러나, 초고압화가 진행되면서 기존의 저전압에서 수행하던 단순 점검(유압 점검 및 누유 점검 등)에서 벗어나 케이블의 절연 열화를 진단할 수 있는 이상 진단기술이 개발되고 현장 적용되고 있다.

이러한 OF 케이블의 이상 진단기술에 대해서는 지금까지 각 전력회사 또는 케이블 제조업체에서 자체적으로 실험 및 현장 사고자료 분석 등을 통해 각자에 맞는 진단기술이나 판단 기준을 사용해 왔다. 국내의 경우에도 크게 다르지 않아 이러한 진단기술 및 판단 기준을 외국의 문헌 및 자체 자료를 이용하여 적용시켜 왔다.

최근 일본에서는 보다 확실하고 광범위하게 적용시키기 위해 'OF 케이블 보수기술 전문연구회'라는 전기협동연구회가 발족되어 약 2 년간의 협의를 거쳐 'OF 케이블의 보수기술'이라는 전기협동연구 제 55권 제 2호를 1999년 말에 발간하였다. 여기에서는 OF 케이블의 보수 기술과 관련된 사항들이 광범위하

게 망라되어 있으며, 각종 진단기술에 대한 설명과 아울러 판단기준까지 자세하게 언급하고 있다. 국제적으로 CIGRE WG 21에서 OF 케이블의 절연유 분석이라는 주제로서 언급한 경우(Electra No.176, 1998)나 미국에서 유증가스분석 방법으로 EPOSS 법을 제시한 EPRI 연구보고 등이 있으나, 이들은 단순히 절연유 분석에 대해서만 언급하였지 일본 전기협동연구회와 같이 총괄적으로 다루지는 않았다.

따라서, 본 고에서는 최근 발간된 일본의 전기협동연구회 보고서를 근간으로, OF 케이블의 절연 진단 방법 부분에 대해 가장 중요시 되는 유증가스분석 방법에 대한 소개와 판단기준, 수분함량 분석의 판단기준, 코어 이동시의 문제점 및 부분방전 진단의 효율성 등에 대해 소개하고자 한다.

2. 유증가스분석

2.1. 주요 분석 가스

OF 케이블이 운전되는 동안 발생한 결합 또는 비정상적인 운전으로 인한 열화 등에 의하여 발생된 가스는 절연유 속에 남아 있게 되므로 이를 분석함으로써 케이블의 상태를 판정할 수 있으며, 이를 유증가스분석(DGA : Dissolved Gas Analysis)이라 한다.

이 방법으로 특히 초기 결함을 미리 알 수 있으며 또한 케이블 파괴사고 후 케이블의 상태를 확인할 수 있기 때문에 가장 강력한 분석방법으로 OF 케이블의 진단방법으로도 널리 적용되는 방법이다.

OF 케이블의 절연층을 구성하고 있는 절연유와 절연지는 비정상적인 열적 스트레스나 전기적 스트레스를 받으면 여러 종류의 휘발성 가스 및 비휘발성 열화부산물을 생성하게 되는데, 이에 대한 주요 열화 메카니즘은 열적 열화, 부분방전 및 아크방전 등으로, 이들 열화 메카니즘은 동시에 발생하기도 하고 연속적으로 발생하기도 한다. 이러한 열화에 의하여 발생하는 주요 가스는 수소(H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 아세틸렌(C₂H₂) 그리고 일산화탄소(CO) 등이다. 표 1에 발생 gas와 열적, 전기적 열화 메카니즘과의 상관관계를 나타내었다. 절연유를 채취하여 이러한 종류의 가스를 분석하게 되면 발생한 종류와 양에 따라 절연유의 열화 정도를 판단할 수 있게 된다.

절연유 채취는 주로 접속부위나 단말부위에서 이루어진다. 이렇게 채취된 절연유로부터 진공추출법에 의하여 가스를 포집한 후 가스 크로마토그래피(GC : gas chromatography)를 이용하여 가스의 종류 및 함량을 분석한다. 케이블로부터의 시료 추출 및 각 성분의 정량분석 방법은 IEC 567과 ASTM D3612에 나와 있다.

절연지와 절연유가 열화되면 표 1에 나타난 바와

같이 그 원인에 따라 각각 다른 종류의 gas와 발생량에 차이가 있다. 그 예로, 열적 열화의 경우, 절연유가 과열되면 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ 등이 발생하고 절연지가 과열되면 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ 등이 발생한다. 전기적 열화의 경우, 방전이 일어나면 절연유에서는 H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₂ 등이 발생하며, 절연지에서는 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₂ 등이 발생한다.

결국, 열적 열화와 전기적 열화에서의 차이는 C₂H₂ gas의 발생이라 할 수 있으며, 이는 아크 방전 등의 강력한 에너지에 기인한다. 표 1에 나타난 것처럼, 전기적 분해에 의한 gas의 종류와 함량을 열분해의 경우와 다르나 보통 gas의 종류는 중복이 된다. 절연유 또는 절연지가 아크 또는 부분방전에 의하여 분해되는 경우 주로 H₂와 C₂H₂가 생성되는데 고장난 케이블의 오일을 분석하면 상당량의 H₂와 C₂H₂가 검출되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, C₂H₂ gas의 존재 여부는 OF 케이블의 열화 상태를 말해 줄 수 있는 가장 중요한 주요 gas이다.

또한, 절연유와 절연지의 차이는 CO₂ 및 CO gas로서, 이는 절연지의 셀룰로오스가 열화 분해되며 발생하는 gas이다. 열화가 진전되면 CO₂ gas 보다는 CO gas의 발생량이 상대적으로 많아지게 되는데, 이는 열화가 진전됨에 따라 분해될 수 있는 셀룰로오스의 양이 감소하기 때문이다. 따라서, CO gas에 대한 CO₂ gas의 비율이 낮은 경우에는(예, CO₂ / CO < 3)

표 1. 발생 gas와 열화 메카니즘

	다 량	소 량	미 량	미발생
열적 파괴	H ₂ , CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
부분 방전	H ₂ , CH ₄	-	C ₂ H ₂	-
저에너지 전기 방전	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂	-
아크 방전	C ₂ H ₂ , H ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄	-	-
절연지의 부분방전 : CO, CO ₂				

절연지의 열화가 상당히 일어났다고 볼 수 있어 이를 절연지 열화의 판단 기준으로도 보고 있다.

따라서, 절연유 속에 녹아있는 유증가스를 분석하는데 있어서 가장 주로 주목하여야 할 것은 C_2H_2 가스를 필두로 한 가연성 가스들이다. 전술한 바와 같이 C_2H_2 가스는 강력한 방전 즉, 아크 방전과 같이 전기적 열화가 심각할 때 나타나는 가스이며, 이러한 방전의 발생이 많아지거나 지속되면 C_2H_2 가스의 양이 많아지게 된다. 이러한 측면에서 용해가스 분석중 가장 주목하여야 할 것이 C_2H_2 가스이다. 아울러, 방전시에는 다른 가스들도 발생되며 방전량에 따라 H_2 , CH_4 , C_2H_6 및 C_2H_4 가스들이 발생된다. 그러나, 이러한 가스들이 발생하였다는 것은 케이블의 절연이 열화되어 간다는 것을 의미하지만 치명적이라고 말할 수는 없다. 따라서, 모든 가연성 가스의 총량으로 열화상태를 판단하는 것이 통상적이다. 한편, CO 가스는 절연유가 아니라 절연지가 열화되었음을 알려주는 가스이므로 경우에 따라서는 CO와 CO_2 가스의 비율로서 절연지의 열화상태를 판단하기도 한다. 그러나, CO 가스는 표 2에서 나타낸 바와 같이 커다란 전기적 방전이 일어나게 되면 오히려 발생량이 줄어든다. 따라서, CO 가스의 검출로써 판단기준을 설정하기는 어려우므로, 이보다는 C_2H_2 가스를 검출하는 것이 타당하다. 또한, C_2H_2 가스의 발생량은 미미하더라도 다른 가스 즉, 가연성 가스들이 많이 발생되면 이 역시 케이블의 상태가 위험하다고 볼 수 있으므로 가연성 가스의 총량으로 케이블의 열화 상태를 판단하게 된다. 이 때, 가연성 가스 총량의 측정에는 포함되는 가스는 H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 및 CO의 6 종류를 일반적으로 검출하게 된다.

표 2. 전기적 방전 크기에 따른 CO 가스와 C_2H_2 가스의 발생 정도

방전량	CO 가스	C_2H_2 가스
0.1 nC	전체발생량의 30%	검출안됨.
10 nC	미미함.	전체발생량의 20%

2.2. 절연유 채취용기

OF 케이블의 용해가스 분석에서는 케이블의 종류에 따라 케이블의 운전압력과 오일의 점도가 다르기 때문에 이에 맞는 시료 채취방법을 택해야 하며, 일단 오일을 케이블에서 채취하면 운반, 저장 등에 주의해야 한다. 채취 오일을 대기 중에 방치하면 산소와 수분에 의하여 오염이 되고, 수소와 같이 가벼워서 유동성이 좋은 가스나 오일에 용해도가 낮은 가스는 손실된다. DGA에서 다량의 산소가 발견됐다면 이는 공기와 접촉되었기 때문으로 분석 결과의 신뢰도가 떨어진다.

OF 케이블에서 절연유를 채취할 때의 용기로는 주사기, 캔 또는 유리병 등이 일반적으로 사용되고 있으며 그림 1에 채취용기를 나타내었다. 여기서 중요한 점은 가능한한 공기와의 접촉으로 피하여 유증가스의 손실을 줄이고 보관 중에도 깨지거나 기름이 누출되거나 가스의 손실이 없는 채취 방법이나 용기라야 한다는 점이다.

일본에서는 주로 주사기를 이용하여 절연유를 채취하고 있다. 주사기의 경우, 주사기 끝에 맞는 호스를 연결하면 긴 호스를 따라 운반된 절연유가 바로 주사기를 채우기 때문에 채취시에는 가장 외부공기와의 접촉이 없다. 그러나, 주사기의 밀봉 방법 문제와 보관상의 문제가 있다.

미국에서는 EPOSS 방법으로 절연유를 채취하지 않고 이미 진공되어 있는 용기를 케이블에 장착하여 절연유 속에 녹아있는 가스를 포집하는 장비를 사용하고 있다. 그러나, 이 방법은 HP(High Pressure) OF 케이블에 적용되고 있어 국내와 같은 SC(self-contained) OF 케이블에 적합한지는 확인되지 않고 있다.

국내에서는 알루미늄 캔을 이용하여 절연유를 채취하고 있다. 이 방법은 보관과 운송 등에 상당한 장점이 있지만, 내부가 보이지 않고 절연유 채취시에 공기와의 접촉이 불가피하며 입구가 좁아 세척이 어렵다는 단점이 있다. 그러나, 캔을 이용하여도 유증가스 분석에서는 큰 차이는 없고 다만 채취시에 공

표 3. 유증가스 추출방법의 비교

명 칭	추출 방법 개요
토리첼리 방식	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 수은을 이용한 진공(토리첼리 진공)관 에 절연유를 넣어 유증가스를 추출시킴. ◦ 테플러 펌프 방법에 비해 추출효과는 낮음.
테플러 펌프 방식	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 테플러 펌프와 수은 확산 펌프를 병용하여 유증가스를 추출함. ◦ 추출효과가 높고, 특히 C₃, C₄ 계 탄화수소 가스를 추출하는데 효과적임. ◦ 고가이고 조작성이 번거로움.
피스톤 방식 (이동병 이용방식)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 이동병이 내장된 실린더의 왕복운동으로 감압된 공간에 절연유의 유증가스가 방출됨. ◦ 테플러 펌프 방식에서 수은확산펌프를 사용하지 않는 것이므로 안전함.
스트리핑 방식 (버블링 법)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 절연유에 N₂, Ar 등의 불활성 가스 또는 공기를 흡입시켜 유증가스를 추출함. ◦ 절연유가 많을 때 간편하고 저가로 사용할 수 있으나, 추출율은 떨어짐.
벨로우즈 방식	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 벨로우즈의 상하운동에 의해 생긴 공간에 절연유를 방출시켜 추출함. ◦ 원리는 토리첼리 방법과 유사하나 수은을 사용하지 않아 안전함.
Autosampler 방식	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 소량의 절연유를 작은 용기(샘플 셀)에 담아 일정 온도로 가열하여 약간의 기계적 진동을 주면서 일정시간동안 추출시킴. ◦ 추출효과는 낮음.

진공)을 사용한다. 그러나, 수은을 사용하는 가스추출 방법은 수은의 유해성 때문에 사용이 줄어들고 있어, 실린더를 이용하여 진공을 만들면서 가스를 추출하는 방법 또는 불활성 가스를 캐리어 가스로서 이용하여 미세 주사기로 불활성 가스 내로 분사시켜 유증가스를 추출하는 스트리핑 법 등이 제시되고 있다. 하지만, 아직도 확실한 진공을 위해 수은을 이용한 진공에 절연유를 분사하여 절연유의 표면적을 크게 함으로써 가스 추출의 효율을 높이는 방법을 ASTM D3612에서 제시하고 있는데, 이는 다른 방법보다 유증가스의 추출율이 높기 때문이다. 미국에서는 미리 가스 포집용기를 OF 케이블 시스템에 장착시켜 놓고 주기적으로 포집된 가스를 분석하는 EPOSS(EPRI Pressurized Oil Sampling System) 방법을 이용하고 있는데, 유증 가스의 추출과 분석이 같은 용기에서 이루어지며 자동화 되어있으므로 실험자에 의한 오차를 배제할 수 있다. EPOSS 방법의 장점은 적용이 쉽고 절연유 채취시 용기 내에 기포의 발생이 없

며 수은을 사용하지 않으므로 환경오염이 없고 여러 농도 범위의 분석이 가능하며, 여러 가지 점도의 오일에 대한 분석이 가능하고 오일의 저장기간이 길며 자동화에 따른 오차가 적다. 그러나, EPOSS 방법은 SCOF 보다는 압력이 걸려있는 HPOF 케이블에 적용되는 방법으로 국내에의 적용에는 문제가 있다.

상기한 여러 가지 유증가스 추출방법 이외에 또 다른 방법은 Hewlett Packard 사에서 시판하고 있는 Headspace auto-sampler 방법이 있으며, 현재 국내에서도 일부 사용되고 있다. 이 방법은 소량의 절연유를 작은 용기(샘플 셀)에 담아 일정 온도로 가열하여 약간의 기계적 진동을 주면서 일정시간동안 추출하는 방법이다.

이상 언급한 여러 가지 유증가스 추출방법에 따라 절연유 속에 녹아 있는 가스가 추출되는 비율인 유증가스 추출율에는 차이가 있다. 따라서, 추출방법에 따른 추출율의 차이를 고려하여 사용하여야 할 필요가 있다.

표 3에 각 추출방법을 간략히 정리하였다.

2.4. 유증가스 판단 기준

현재 국내에서 사용하고 있는 판단기준을 표 4에 나타내었다. 이것은 일본에서 적용하던 자료로서, 국내의 OF 케이블 시스템이 일본과 비슷하기 때문에 발생가스의 종류와 함량은 비슷할 것으로 보인다. 그러나, 이 판단기준은 OF 케이블이 정상인지 아니면 이상이 있는지에 대한 판단기준이지, 이상으로 판단될 때 케이블의 교체나 보수를 하여야 한다는 판단 기준은 아니다.

한편, 일본 전기협동연구에서 1999년 말에 제시한 판단 기준을 보면 표 4보다 훨씬 상세하게 구분되어 있다.

표 5에 이 새로운 판단 기준을 나타내었다. 이 표에서 주요한 점은 교체 및 요주의(재진단)의 판단기준을 C_2H_2 가스와 가연성 가스 총량인 TCG(Total Combustible Gas : H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO 가스의 총량)로만 판정을 내리고 있다. 그 만큼 절연유에 C_2H_2 가스가 존재한다면 2.1 절에서 언급한 바와 같이 위험한 방전이 일어나고 있다는 증거

표 4. 현재 국내 OF 케이블 특성시험 항목과 평가 기준치

분석항목	기준값	정상판단기준치 [ppm]	판 단 항 목
가스합량		10,000 이하	이상검출시 원인
가스 분석 항목	O_2	-	대기의 영향
	N_2		
	H_2	500 이하	코로나 방전
	CH_4	200 이하	오일의 저온 열분해
	C_2H_6	200 이하	저에너지 코로나 방전
	C_2H_4	200 이하	오일의 고온 열분해, 코로나 방전
	C_2H_2	Trace	고에너지 방전
	CO	100 이하	절연지 열분해, 코로나 방전
	CO_2	1,000 이하	절연지 열분해, 수분혼입
	TCG	1,500 이하	이상가스 발생의 전체적 평가
시험 항목	수분함량 [ppm]	10 이하	기밀성 평가 및 절연지 열화
	전산가 [mg/KOH]	0.02 이하	절연유의 산화열화 정도
	절연파괴전압 [kV] (25 [mm])	40 이상	절연성의 평가
	유전정접시험 [$\Omega \cdot cm$]	1×10^{13} 이상	
	채적저항율 [%]	2 이하	

표 5. 일본 전기협동연구의 새로운 유증가스분석 기준

판정 내역	판단 기준
즉시 교체	$C_2H_2 \geq 50$ [ppm] 또는 $10 \leq C_2H_2 < 50$ [ppm]과 $TCG_6 \geq 2,000$ [ppm]
6개월후 재진단 및 결과에 따라 교체일정 결정	$10 \leq C_2H_2 < 50$ [ppm]과 $TCG_6 < 2,000$ [ppm] 또는 미검출 < $C_2H_2 < 10$ [ppm]과 $TCG_6 \geq 10,000$ [ppm]
1년후 재진단	미검출 < $C_2H_2 < 10$ [ppm]과 $100 \leq TCG_6 < 10,000$ [ppm] 또는 $C_2H_2 =$ 미검출과 $1,000 \leq TCG_6 < 10,000$ [ppm]
3년후 재진단	미검출 < $C_2H_2 < 10$ [ppm]과 $TCG_6 < 100$ [ppm] 또는 $C_2H_2 =$ 미검출과 $TCG_6 < 1,000$ [ppm]

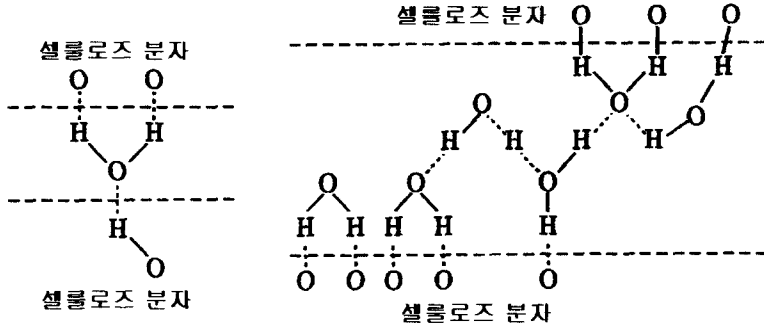


그림 3. 셀룰로스의 수분 흡착 모델

이기 때문이다. 아울러, 참고로 표 5에서 ‘교체’ 판정은 OF 케이블의 접속함을 교체하는 것을 의미한다. 일본의 OF 케이블 역시 우리와 같은 SCOF 케이블이고 이 케이블에서는 절연유의 유동은 거의 없기 때문에, 케이블 자체의 열화로 발생한 가스가 이동하여 절연유 채취부위인 접속부까지 이동하지는 않으므로, 만일 유증가스가 발생하였다면 그것은 접속부에서 발생한 것이기 때문이다. 또한, 절연유 속에 가스가 포함되어 있으므로 절연유를 정제하거나 절연유만을 교체하는 방법은 사용되지 않는다. 이것은 절연유를 정제한다고 하여도 열화의 원인 자체는 없어지지 않기 때문이다. 따라서, ‘교체’ 판정이 내려지면 접속함 자체를 교체하여야 하면 이를 위해 필요하다면 케이블의 일부도 교체하여야 할 것이다.

3. 수분함량 분석

OF 케이블 시스템 내에 수분이 존재하는 원인은 포설이나 보수 작업시 외부로부터 유입된 것이나 아니면 절연지의 열화 즉, 셀룰로스의 열화로 인한 부산물로 발생된 것이다. 어떠한 원인에 의한 존재하는 것이든 수분이 케이블 내부에 존재하면 주로 절연지에 흡착되고 이로 인해 절연 내력이 저하된다.

그림 3은 절연지에 수분이 흡착되는 모델을 나타낸 것으로 주로 셀룰로스를 구성하는 분자중 산소(·OH 기)에 수분이 수소 결합(일종의 Van der Waals

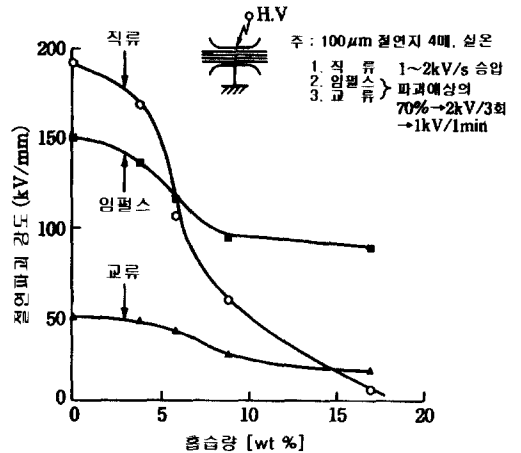


그림 4. 흡습된 유침지(절연유+절연지)의 절연파괴 특성

결합)에 의해 흡착된다. 이에 따라 (절연유+절연지)의 절연 구조로 된 OF 케이블의 수분함량 분석에서는 절연지를 채취하여 분석할 수는 없으므로, 절연유를 채취하여 수분함량을 분석하고 이를 토대로 절연지에 흡착된 양을 평가하여 절연내력의 저하 정도를 판별하게 된다.

그림 4는 유침지(절연유+절연지)에서 절연파괴 특성을 나타낸 것이다. 직류, 임펄스 및 교류 전압은 비교적 폭넓은 범위에서 변화되는 것을 알 수 있다. 대체로 보면 직류 전압에서의 절연파괴 강도가 수분함량의 증가에 따라 급속히 저하되고 있다. 이러한 이유는 직류 전압을 인가하는 경우 수분이 고전계 쪽으로

끌러가는 유전영동(dielectrophoresis) 현상으로 인해 수분이 모이게 되고 전극 간의 교락 현상을 일으키기가 교류나 임펄스의 경우보다 수월하기 때문이다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 대체로 수분함량이 3~4% 이상될 때를 위험한 수준으로 보고 있다.

전술한 바와 같이 OF 케이블에 대한 수분함량을 분석할 때에는 절연유를 채취하여 분석할 수 밖에 없으므로, 각 전력회사나 업체에서는 절연유에 포함된 수분함량을 측정하고 이를 이용하여 유중 수분량과 지중 수분량의 관계를 도출하고 있다. 현재 실제로 사용되는 근사식은 다음과 같다.

$$W_p = W_o \times K \times 10^{-7} \times \exp\left[\frac{3.84 \times 10^3}{T}\right]$$

단, W_p : 추정 지중 수분량 [%]

W_o : 유중 수분량 [ppm]

K : 케이블 업체별 계수 (1.7~2.6 : 표 6 참조)

T : 절연유 온도 [K]

표 6. 케이블 업체별 계수 K

업체	계수 K
a	1.70
b	2.09
c	1.80
d	1.19
e	1.84
f	2.60

측정한 유중 수분량에 의한 추정 지중 수분량의 관리 기준에 대해서는 실제 선로에 대한 과거의 경험을 바탕으로 지중 수분량이 4% 정도일 때 전기적 특성이 크게 저하되어 절연파괴의 위험성이 있으나, 측정 오차를 감안하여 3%로 관리 기준을 추천하고 있다.

4. 코어 이동

경사진 곳에 포설된 OF 케이블 시스템은 자체적인 하중 및 외부의 진동(차량 소동 등)으로 인해 알루미늄 쉬스 내의 케이블 코어가 이동하는 코어 이동 현상이 일어나게 된다. 코어 이동이 클 때에는 접속부에서 동관과 코어 사이에 길이 방향으로 힘이 작용하여 반도체층 및 보강 절연층이나 차폐층의 위치 변형이 일어나 손상되는 이상이 발생하며, 그림 5에 코어 이동으로 인한 이상 발생 위치를 나타내었다. 그리고, 이로 인해 접속부 내의 전계 분포가 달라지고 전계 집중이 일어나게 되면 부분방전이 발생되고 최악의 경우에는 절연파괴에 이르게 된다.

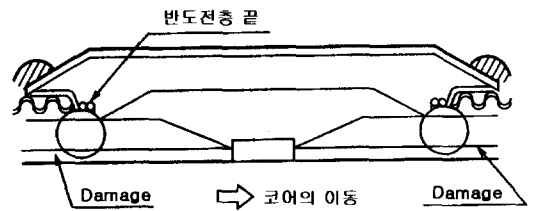


그림 5. 코어 이동에 의한 이상 발생 위치

이러한 코어 이동의 점검에 대해서는 케이블 및 접속부의 이동 유무를 확인하거나 이동량의 결함을 추적 관리할 필요가 있다. 이동량의 측정은 관로나 포설된 주변의 물체에 기준점을 표시하고 케이블 표면에 테이프 등으로 표시하여 위치의 변화를 관측한다. 또한, 방사선 사진 촬영을 이용하여 초기의 사진과 코어 이동 후의 사진을 비교하여 이동 정도를 판독한다.

코어 이동이 일어날 때 케이블의 중간 접속제에서 도체의 이동량과 파괴전압과의 실험 데이터를 그림 6에 나타내었다. 이 실험 결과 파괴전압에 따른 허용 코어 이동량은 30[mm] 정도로 나타났다.

이와 같이 30[mm] 이상의 코어 이동이 일어나면 케이블에 위험하다고 판단하고는 있으나, 코어 이동

으로 인한 전계의 집중으로 부분방전 등이 일어나 절연유 분석을 통해 이상이 있는지를 먼저 판단할 수 있으므로 30[mm] 이상의 코어 이동이 중요하다 기 보다는 향후에도 계속해서 코어 이동이 진행되는 가를 관찰하는 것이 중요하다.

국내의 경우, 경사진 곳에 케이블의 포설하여 코어 이동이 일어나는 경우는 아니더라도, 다른 작업 예를 들면 지하철 공사 등으로 인해 케이블의 접속함을 옮겼다가 원 위치하는 경우가 발생하고 있다. 이러한 경우에도 코어 이동의 경우와 유사하게 적용할 수 있다.

즉, 안전을 위하여 접속함의 이동 전에 X-선 사진을 촬영하고 이동 후의 사진과 비교하여 내부의 전계 분포 변화가 일어났는지를 파악한다. 또한, 원 위치되었다 하더라도 이동으로 인해 내부 절연층의 변화가 일어나 문제로 된다면 부분방전 등의 열화가 진행될 것이므로 절연유 채취/분석에 의한 검사로서 절연층 내의 열화를 판단할 수 있다.

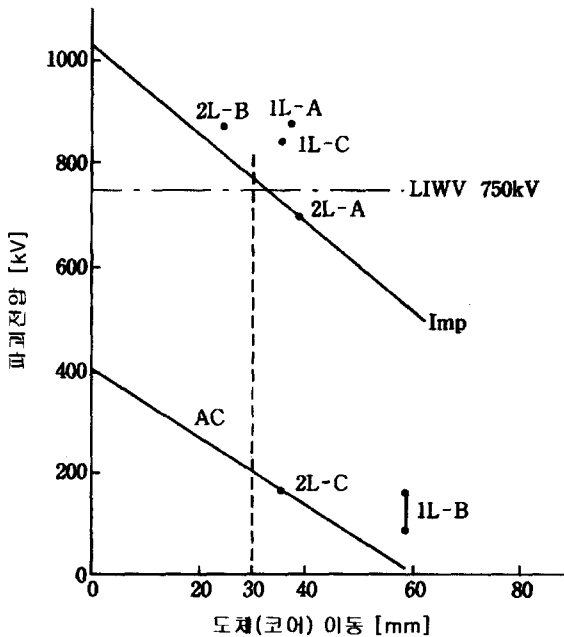


그림 6. 도체(코어) 이동량과 파괴전압과의 관계

5. 부분방전 측정방법의 적용 가능성

XLPE 케이블의 경우에는 열화진단의 가장 효과적인 방법으로 부분방전(HFPD : 고주파 부분방전)을 측정하는 방법이 논의되고 현재 외국의 경우에는 현장 적용중에 있다. 따라서, 부분방전 측정 방법이 OF 케이블의 경우에도 유효한지를 분석하여 적용 가능하면 절연유 분석 방법보다 간편하므로 보다 유용한 방법이 될 수 있다. 이러한 측면에서 OF 케이블에 대해 수행한 부분방전 측정 결과를 소개하도록 한다.

표 7은 OF 케이블 선로에서 부분방전을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보면, 200~300 [pC] 정도의 간헐적인 부분방전이 나타난 경우에는 절연차폐 보강 절연층이 균열되었던 것으로 판명되었으며 이 때의 C₂H₂ 가스의 측정량은 작게 나타났지만, 5~15[pC] 정도로 작지만 지속적으로 부분방전이 측정된 경우에는 외층 절연지 8매 탄화되었으며 616[ppm] 정도로 크게 나타났다. 이러한 결과로서 크고 간헐적인 부분방전 보다는 작고 지속적인 부분방전으로 인해 가스 발생이 많은 것을 알 수 있다.

아울러, 부분방전 측정시에는 지속적으로 측정하여 부분방전 전하량의 증가 추이를 보아 케이블의 이상 유무를 판단할 수 있게 된다. 또한, 부분방전 측정시 2 개소 사이의 방전 신호를 측정하고 전파 시간의 차이를 분석하여 방전의 발생 지점을 판단할 수 있으므로, 절연유의 채취가 어려운 곳에 대해 이상 판단을 수행할 수 있는 장점이 있다. 물론, 방전 발생시 가스가 발생하므로 부분방전 측정과 유증 가스 분석을 동시에 수행하면 보다 확실한 진단이 가능하다고 판단된다.

그러나, 아직까지 부분방전량과 C₂H₂ 가스의 측정량 간에 비례적인 관계가 도출되지는 않았고, 부분방전량이 이상 진단의 기준으로서 정립되지는 않았기 때문에, OF 케이블의 열화진단 방법으로 부분방전 측정방법만을 적용하기는 어렵다. 앞으로 이 부분에 대한 데이터 축적을 통해 보다 확실한 방법으로 정립되어야 할 것이다.

표 7. OF 케이블 선로에서 부분방전 측정 결과

선로 명		A-1L		A-2L				B-1L		C		D-2L		
전압/크기		154[kV] 2,000[mm ²]		154[kV] 2,000[mm ²]				77[kV] 1,000[mm ²]		77[kV] 1,000[mm ²]		154[kV] 2,000[mm ²]		
측정 조건	대상	I-183-Cφ M-193-Bφ		1회차		2회차		A-094-Cφ A-095-Aφ		CX-07-A,B,C φ		A-193-Cφ		
				M-195-A,B,Cφ M-196-A,B,Cφ		L-183-A,B,Cφ M-193-A,B,Cφ M-196-A,B,Cφ								
	주파수 [MHz]	f ₁	20~24		22		16~30		48		24		20	
		f ₂	6~10		2.5		6~10		6		6		8	
	Item	φ-q-n		q-f		φ-q-n		φ-q, q-f		φ-q-n		φ-q-n		
결과	방전 없음.		방전 없음.		M-196-A,B,Cφ 방전 있음.		A-094-Cφ A-095-Aφ 방전 있음.		방전 없음.		방전 없음.			
유증 가스 분석	M/H No.		I-183	M-193	I-183	M-193	M-194	M-195	M-196	A-094	A-095	C-X 07	A-198	
	접속부		IJ	IJ	IJ	IJ	IJ	NJ	IJ	IJ	NJ	IJ	IJ	
	C ₂ H ₂ 가스 [ppm]	Aφ	ND	ND	Trace	ND	Trace	5	Trace	ND	ND	ND	-	
		Bφ	ND	ND	ND	ND	ND	4	Trace	Trace	Trace	50	-	
Cφ		ND	ND	ND	ND	ND	8	Trace	616	6	ND	12		
선로명	M/H No.		부분방전				C ₂ H ₂ 가스 [ppm]		해체 결과					
			방전전하량 [pC]		조건									
A-2L	M-196		200~300		간헐적		Trace		절연차폐 보강 절연층이 균열됨.					
B-1L	A-094		5~15		연속		616		외층 절연지 8매 탄화됨.					

* ND : Not Detected, Trace : 1 ppm 이하의 측정 경향이 있는 것을 의미

6. 기타 OF 케이블 진단방법에 대한 고찰

기본적으로 절연유의 특성 분석을 통한 OF 케이블의 절연진단에서 가장 중요한 것은 전술한 바와 같이 유증 가스 분석과 수분함량 분석이다. 이 외에 tanδ, DC 비저항, 교류 절연과과전압, 전산가 측정 등 여러 가지 절연진단 방법이 제시되어 있다.

그러나, tanδ는 수분이나 유극성 불순물 및 이온 등에 의해 영향을 받으며, DC 비저항은 수분과 산성

열화 부산물 및 불순물 이온, 교류 절연과과 전압은 수분과 불순물, 산가는 산화 열화 부산물에 의해 영향받게 된다. 따라서, tanδ, DC 비저항, 교류 절연과과전압 등의 방법은 수분의 영향을 크게 받으며, 아울러 영향을 미칠 수 있는 유극성 불순물 및 이온과 산화 열화 부산물은 초기 절연유의 오염 상태 및 열화 정도에 따라 다르므로 유증 가스 분석에서의 결과와 어느 정도 중복된다. 즉, 유증 가스 분석과 수분함량 분석의 결과로서 어느 정도 이러한 진단방법에서의 결과를 유추할 수 있다. 또한, 이러한 방법은

유중 가스 분석이나 수분함량 분석에 비해 외기와의 접촉이 많다든지 측정 용기의 불순물 등에 의한 영향을 더욱 받는다든지 하는 오차가 발생할 수 있는 소지가 더욱 많다. 다만, 이러한 방법들은 전기적인 측정방법이므로 OF 케이블의 용도가 전기 분야인 만큼 신뢰를 주고 있다.

따라서, 유중 가스 분석과 수분함량 분석을 기본으로 하고, 보완적으로 $\tan\delta$ 와 DC 비저항 측정을 수행하여 비교하는 것이 타당하다고 판단된다. 교류 절연과피 실험의 경우에는 직접적으로 절연유의 절연성을 입증하긴 하지만 열화 상태를 판단하기에는 부족하며 여기에 필요한 절연유의 양도 가장 많이 소요된다. 그리고, 전산가의 측정은 산화 열화 부산물에 대한 측정이지만 이 역시 절연 상태에 대한 판단을 내리기에는 부족하다. 따라서, 교류 절연과피 시험과 전산가 측정 시험은 케이블 교체 판단시의 검증 자료로 수행하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

7. 결 론

본 고에서는 OF 케이블의 절연진단 방안에 대해 소개하였다. 여기서, 가장 중요한 부분은 역시 유중 가스분석(DGA) 방법이다. 유중 가스 분석은 (절연지 + 절연유) 복합 절연인 경우에 가장 효과적으로 적용되고 있는 방법으로 외국에서도 가장 중요하게 다루고 있다.

유중 가스 분석을 제대로 수행하기 위한 절연유 채취 및 분석 방법도 중요하지만, 이 분석을 토대로 케이블의 절연상태를 판단할 수 있는 기준의 정립이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 이러한 판단 기준은 케이블의 종류와 운전 조건과 같은 환경에 따라 다를 수 있으므로, 외국의 판단 기준을 그대로 사용하기 보다는 많은 분석 경험을 통해 자체적으로 구축하는 것이 반드시 필요하다. 그러나, 이 부분에 대한 경험이 일천한 국내의 경우에는 국내의 조건과 유사한 외국의 기준을 일단 적용하는 것도 차선책이

라 할 수 있다.

국내의 OF 케이블은 전술한 바와 같이 일본의 기술이 주로 적용되었으므로, 유중 가스 분석의 판단 기준 역시 일단 일본의 기준을 사용하는 것이 타당하다고 생각된다. 그러나, 국내에서 분석을 지속적으로 수행하여 일본의 기준을 보완하여 국내의 기준을 제정하여야 할 것이다.

한편, OF 케이블 시스템에서 가스 발생의 주요 원인을 부분방전으로 보고 있으나, 아직까지 OF 케이블에 대한 부분방전 측정은 실용화되어 있지 않은 것이 세계적인 실정이다. 따라서, 향후 이러한 부분에 대해서도 연구가 필요하리라 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) "송전케이블의 절연열화 진단기법의 정립 및 수명예측에 관한 연구", 전력연구원 연구보고서, 1999.11.
- (2) 日本 電氣協同研究, "OF케이블의保守技術", OF케이블保守技術專門委員會, 電氣協同研究會, 第55卷 第2号, 1999.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 정 태(金正泰)

1960년 1월 1일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1992년~1995년 대한주택공사 주택연구소 선임연구원 1995년~현재 대전대 전기공학과 교수.



구 자 윤(具滋允)

1951년 2월 7일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 프랑스 ENSEEIHT 졸업(석사) 1992년 프랑스 ENSIEG 졸업(박사) 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 한양대 전자재료 및 부품연구센터(EM&C) 소장.