

油入變壓器의 外部診斷 技術

전력공급에 대한 고신뢰성에의 요구는 점차 높아지고 있으며, 변압기의 보수관리 기술이 중요성을 띄고 있는 현재, 변압기의 보수관리는 조기발견에 중점을 두고 내부와 외부로 부터 섬세하게 행해지고 있다.

여기서는 유중가스분석, 부분방전 검출등의 내부진단법 가운데 유입변압기를 대상으로한 유중가스 분석 진단에 대해 기술하기로 한다.

전력공급의 가일층의 고신뢰성 요청에서 변압기의 보수관리기술의 중요성은 증가되고 있다. 현재 변압기의 보수관리는 외부와 내부로 부터 섬세하게 행해지며, 고장의 조기발견에 노력하고 있다.

변압기의 외부에 있어서는 본체 부속장치등에 이상이 없는지를 정기적으로 순시점검하고 있다.

내부에 있어서는 유중가스분석, 부분방전 검출등에 의해 정상으로 운전되고 있는지를 진단하고 있다.

여기에서 유중가스분석은 절연유중에 용재하고 있는 가스물질에서 변압기 내부의 이상의 유무 및 이상의 종류를 진단하는 것이다.

이 방법은 1960년대에 적극적으로 연구가 이루어져, 1970년대에 들어서 실용화된 것이다. 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 보수관리 기술이다.

여기서는 유입변압기를 대상으로한 유중가스 분석에 의한 이상 및 수명의 진단기술을 기술한다.

1. 現行의 異狀診斷 技術

변압기 내부에서는 정상으로 운전되고 있을 때도 절연유 혹은 油浸재료가 서서히 분해하여 가스상물질로서 H_2 , CO_2 , CO 및 CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6

...등의 탄화수소가 생성하여 절연유 중에 용존하여 이상시에는 그것이 증대한다. 또 변압기 내부의 이상은 국부적인 과열과 방전으로 대별되어 각각의 경우에서 특정의 가스가 증대한다. 이러한 일로해서 기름속의 가스를 조사하면 변압기가 정상으로 운전되어 있거나 이상의 경우는 어떠한 이상이 일어나고 있는지를 알 수가 있다.

유중가스에 의한 이상진단은 먼저 ① 변압기로부터의 절연유의 채취 ② 절연유로부터의 가스 추출 ③ 가스크로마토그래프에 의한 분석 ④ 진단의 순서에 의해 실시된다.

이하 이들의 개요를 기술한다.

(1) 절연유의 채취

일반으로 절연유는 변압기 하부의 배유변에 접속기구를 부착하여 채취용기에 채취한다. 채취에 있어서는 (1) 대기를 혼입하지 않을 것 (2) 거품이 나오지 않도록 할 것 (3) 접속용기, 채유용기는 세정한 것을 사용할 것 (4) 배유파이프, 배유밸브내의 절연유는 흘려서 버린후 채유할 것등의 주의가 필요하다.

(2) 채유용기

현재 사용되고 있는 채유용기는 특히 재료, 형상

등이 한정된 것이 아니다. 단, ① 유중가스가 외부에 달아나지 않을 것 ② 이동, 수송에 안전할 것 ③ 절연유 충전시, 용기내에 공기가 잔존하지 않을 것 ④ 유온 저하시에 공격이 생기기 어렵다는 것 등의 조건이 만족되어야 한다.

(3) 유중가스 추출

유중가스의 추출은 가스의 分析值의 精度 감도에 주는 영향이 크므로 중요하다. 일반적으로 ① 추출효율이 좋을 것, ② 추출한 가스가 절연유에 재용해하기 어려운 구조를 가질 것 ③ 추출한 가스를 분석기에 쉽게 보낼 수 있을 것 ④ 조작하기 쉬운 것 등의 조건을 충족시킬 수 있는 것이 바람직한 것으로 되어 있다.

표 1은 유중가스 추출방식의 개요를 표시한 것이다. 이 가운데 I~III은 세계적으로 널리 사용되고 있으며 IEC(International Electrotechnical Commission)에도 기재되어 있는 것이다. III~V는 수운을 사용하지 않는다. 자동화 할 수 있다는 등의 요구를 충족할 수 있는 것으로 개발된 것이다. 추출효율의 면에서는 II가 가장 높다.

(4) 가스분석

가스의 정량분석에는 가스크로마토그래프가 사용된다. 검출기는 열전도 검출기(TCD)가 사용되나, 탄화수소계 가스의 검출감도를 높이는 데는 水素炎이온 검출기(FID)를 병용하지 않으면 안된다. 또 CO₂와 CO의 검출감도를 높이는 데는 메타나이저를 사용한다. 메타나이저는 CO₂와 CO를 촉매로 CH₄로 바꾸는 장치로서 검출은 FID로 행한다.

표 2는 가스크로마토그래프에 의한 분석조건 예를 나타낸 것이다.


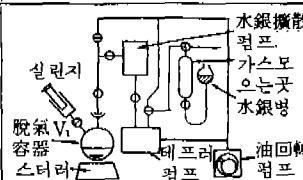
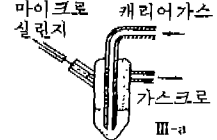
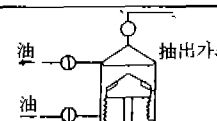
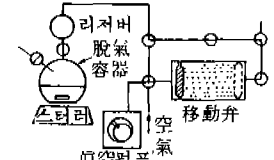
(5) 진단

변압기 내부의 이상의 유무는 定格別로 5개 종류의 가스와 가연성가스총량 및 가연성가스의 증가속도부터 진단하도록 되어 있다. 이러한 것을 종합 표 3에 표시한다.

C₂H₂는 소량이라 할지라도 검출되면 요주의로서 추적조사하도록 되어 있다.

이상이라고 진단되었을 경우 어떠한 이상인가 하는 것은 CH₄/H₂, C₂H₂/C₂H₄, C₂H₄/C₂H₆의 値의

〈표-1〉 各種油中가스抽出裝置

種類	裝置의 概要	
I 眞空方法 트리체리		水銀의 上下操作에 의해 트리체리 眞空을 만들어 그 속의 油中 가스를 방출시켜서採取한다.
II 배퍼퍼 펌프 방법		一般으로 배퍼퍼 펌프와 水銀확장 펌프를 併用하여 油中 가스를 抽出한다.
III 스트리퍼 방법		絶緣油中에 N ₂ , Ar 등의 不活性 가스 혹은 空氣를 불어넣어 油中 가스를 방출시켜서 採取한다.
IV 베로즈를 사용한 방법		베로즈의 上下作用에 의해 생성되는 空間을 油中 가스를 放出시켜서 採取한다.
V 移動밸브를 사용한 방법		移動밸브를 내장한 실린더의 往復運動으로 減壓된 油面上 空間에 가스를 放出시켜서 採取한다.

조합으로 진단된다.

연구회에서 이들의 가스성분비에 대해서 코드번호를 붙인 코드표와 그것을 조합한 이상의 종류를 대비시킨 이상진단표를 만들면, 양자의 조합으로 이상의 종류를 진단하도록 되어 있다. 이들을 종합한 것이 그림 1이다. 방전의 경우에 있어서는 그 에너지의 고저, 과열의 경우는 그 온도의 고·중·저를 진단할 수 있도록 되어 있다. 여기서 방전에너지의 고저는 C₂H₂/C₂H₄의 値에서 과열온도는 주로 C₂H₄/C₂H₆의 値에서 진단되고 있는 것을 알 수 있다.

C₂H₄/C₂H₆의 値와 과열온도와와의 관계는 별도로

〈표-2〉 가스 크로마토그래프의 分析條件例

條件		가스		
		H ₂	C ₁ ~C ₄ 의 炭化水素	CO, CO ₂
分離 條件	充填劑	活性炭 30~60 메슈	알루미너 30~60 메슈 + 스크아랑 [1.5wt%]	活性炭 30~60메슈
	充填劑의 前處理 (°C/h)	350/4	75/8	350/4
	길이 (m)	3	3	3
	內徑 (mm)	3	3	3
	溫度 (°C)	60	40	150
反應 條件	充填劑 充填劑의 前處理 (°C/h)			酸硝니켈 處理 C-22* 350/15
	길이 (m)			0.2
	內徑 (mm)			3
	溫度 (°C)			350
	H ₂ 의 流速 (ml/min)			15
캐리어 가스	Ar	N ₂	N ₂	
캐리어 가스의 流速 (ml/min)	12	15	20	
檢出器	TCD	FID	FID	

(注) * 硅藻土

〈표-3〉 可燃性 가스의 總量(TCG) 各 가스量 및 TCG의 增加率의 要注意레벨과 異常레벨

判定種別	變壓器定器	各 가스 量(ppm)						TCG 增加率
		TCG	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	
要注意	275KV 以下	1,000	400	200	150	300	300	350 ppm/年
	10MVA 以下	700	400	150	150	200	300	250 ppm/年
	10MVA 超過	400	300	100	50	100	200	150 ppm/年
異常	500KV	2,000	800	400	300	600	600	100 ppm/月
	275KV 以下	1,400	800	300	300	400	600	70 ppm/月
	10MVA 超過	800	600	200	100	200	400	40 ppm/月

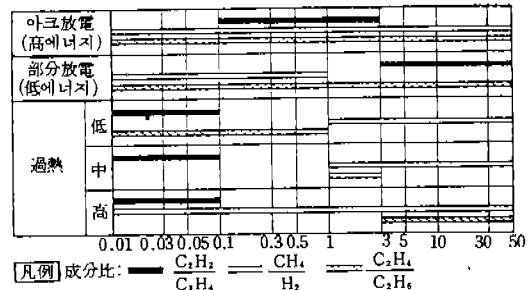
件例量 表示한 것

상세한 보고가 있다. 또 CH₄, C₂H₄, C₂H₆의 3자의 비율에서 과열온도를 추정하는 방법도 보고되고 있다.

외에도 H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆의 가운데서

도 가장 많은 가스를 1로한 비를 패턴화하여 그 패턴에서 이상의 종류를 진단하는 방법도 종합되고 있다. 이 방법은 감각적으로 이해하기 쉬우나 이상의 정도, 규모의 대소를 진단할 수 없다. 앞에서 기술한 그림 1에 표시한 방법과 병용하여 사용하는 것이 필요로 되고 있다.

그외에 IEC, ANSI (American National Standard) 의 방법과 연구자에 의해 보고되고 있는 것이 있다.



〈그림-1〉 研究會에 의한 異常診斷方法

2. 今後的 異常診斷技術과 課題

前述의 유증가스분석방법은 복잡한 순서를 필요로 하며, 노력, 경비도 필요한 데서 그것을 자동화한 장치의 개발이 일찍부터 시작되고 있다. 또 최근 유증가스 분리부를 변압기에 부착하여 온라인으로 자동적으로 분석, 진단하는 방법도 개발되고 있다.

이하, 그 개요에 대해 기술한다.

(1) 現행의 方式을 자동화한 것

이것은 표 1에 표시한 것과 같이 III~V의 유증가스 추출방식을 자동화하여 그것들을 자동화한 가스 크로마토그래프분석과 진단장치에 조합한 것이다

III의 스토리핑방식을 사용한 것은 캐리어 가스를 試料油中에 불어 넣는 것만으로 가스를 추출할 수 있는 것이 특징이다. 기계적 조작을 하는 곳이 적은 제점이 있다. 유증가스 추출효율은 높지 않으나 추출이 언제나 일정한 조건에서 행할 수 있도록 하면 반복하여 精度는 높게 된다. 특히 III-a의 방식은 간단하며 試料油는 1ml 정도로 충분하며, 가스 추출에 요하는 시간도 극히 짧다. 단지 추출되는

가스량은 적으므로 가스크로마토그래프 분석의 때는 FID와 메터나이지의 병용이 필요하다. III-b의 방식은 온라인에서 사용할 수 있는 것으로도 보고 되고 있다.

IV의 벨로즈를 사용한 것은 벨로즈의 상하조작을 많게 할수록 추출효율이 좋게되어 실용적으로는 30회 정도의 조작을 필요로 하고 있다. 추출 및 분석조작을 거쳐 진단결과가 나올 때까지 약 60분이 걸린다.

V의 이동밸브를 사용할 방법은 이동밸브의 조작의 반복회수가 많을수록 가스의 추출효율이 높으나 실용적으로는 3회 정도로 충분하다고 되어 있다.

(2) 절연유를 채취하지 않고 자동적으로 분석하는 방법

고분자막은 일반적으로 액체를 투과시키지 않고, 가스만을 투과시키는 성질이 있다. 이 성질을 응용하여, 변압기에 고분자막을 부착하여 절연유를 채취하지 않고, 가스의 추출·검출을 자동적으로 행하는 것이 있다.

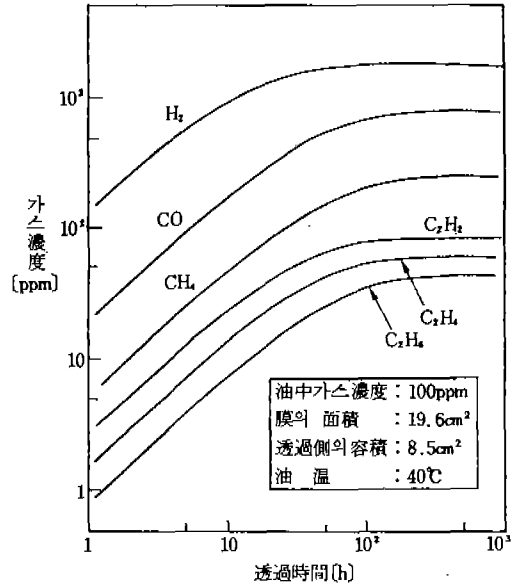
고분자막은 弗素계 수지와 폴리아미드수지가 사용되고 있다. 전자는 가스투과 속도가 크다. 후자는 특히 H₂의 투과 속도가 다른 가스에 비해 크다는 등의 특징이 있다.

고분자막에서 절연유로부터 분리되는 가스농도는 다음식이 주어진다.

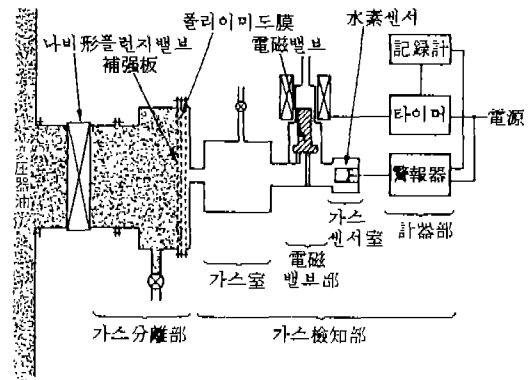
$$C = (1.3 \times 10^4 kv - C_0) \left(1 - \exp \left[- \frac{76 PA}{Vd} t \right] \right) + C_0 \quad (1)$$

여기서 C : 투과측 용기의 가스농도 [ppm], K : 헨리-정수 [cmHg/ppm], v : 유중 가스농도 [ppm], C₀ : 투과측용기에 있어서의 초기의 가스농도 [ppm] P : 투과계수 [ml · cm/cm² · S · cmHg], A : 막의 면적 [cm²], V : 투과측 용기의 용적 [cm³] d : 막의 두께 [cm], t : 가스투과시간 [s]이다.

그림 2는 6개종류 가스의 유중농도가 어느 것도 100ppm의 경우의 투과시간 특성을 표시한 것이다. 이 경우의 예에서는 가장 투과시간이 빠른 H₂가 약 50시간, 가장 늦은 C₂H₆이 약 260시간에서 포화한다. 따라서 포화후의 막을 투과한 가스를 측정하면 (1)식에서 유중가스농도를 알 수가 있다.



〈그림-2〉 PFA 膜에 대한 油中가스



〈그림-3〉 変圧器用油中水素가스常時監視裝置

고분자막은 변압기 하부의 배유밸브를 이용하여 부착하는 것이 보통이다. 그림 3은 변압기 유중의 H₂를 상시감시하는 장치의 예에 대해서 나타낸 것이다. 이 장치는 막을 투과한 H₂를 일정시간 간격에서 電磁閥을 열고 가스센서로 검출하는 것이다. H₂의 외에도 CO, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆도 자동측정하여 이상진단할 수 있는 장치가 개발되고 있다.

단지 이 경우는 막을 투과한 가스를 크로마트 분리하고 가스센서로 검출하도록 되어있다. 이러한 것들은 자동화되고 있다.

현재 변압기에는 상시감시에 의한 멘테넌스 플리

화가 요구되고 있다. 고분자막과 가스센서를 조합한 새로운 유증가스 검출방식은 이러한 요구를 충족시켜 줄 것으로 생각된다.

(3) 分析値의 精度와 진단의 신뢰성

공동실험 결과에 의하면 현행의 유증가스 분석치의 반복精度는 변동계수에서 10%이하, 측정기관별에 의한 재현성은 30~40%로 되어있다. 수 10ppm 이하의 농도가 되면 변동계수는 다시 크게 된다. 재현성이 좋다고는 결코 말할 수 없다.

그 원인은 절연유의 채취에서 가스크로마트 그래프 분석에 이르기까지의 모든 조작에 포함되어 있는 것으로 생각된다. 이러한 생각이라, IEC는 再現향상의 검토를 진행시키고 있다.

진단은 진출한 바와 같이 그 결과는 대체로 일치하는 것이라고 말할 수 있다. 그러나 이상의 유무나 구분의 진단에는 보다 가일층의 향상의 여지가 남아있다.

구체적으로는 ① C_2H_2 에 의한 이상 레벨의 설정 값을 어떻게 하는가, ② H_2 가 이상하게 많은 경우에도 정상인 경우가 있다. ③ 紙재로 중의 흡착가스와 절연유중의 가스와는 각 온도에서 평형관계를 유지하고 있으므로 채유시의 온도로 부터의 補正을 어떻게 하느냐 등의 문제가 있다. 앞으로 이러한 문제를 포함한 전반적인 재검토가 필요한 것으로 생각된다.

3. 壽命診斷

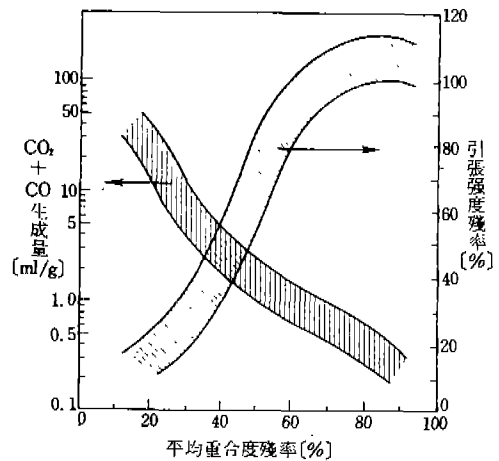
최근, 특히 中·大形 변압기로서 운전개시후 20~30년 경과하는 것이 증가하고 있는데 그러한 것들은 앞으로 몇년 운전할 수 있는지를 판정하지 않으면 안되는 시기에 와 있다. 이러한 일로 해서 최근 변압기의 수명진단 기술의 개발이 요구되고 있다.

변압기에 사용되고 있는 재료로서는 절연 재료의 열화속도가 비교적 빠르다. 그래서 종래 절연유, 절연지, 프레스보드등의 온도—가열시간 특성에서 각각 재료의 수명특성이 검토되고 있다. 그러나 변압기의 수명추정에까지 미치지 않고 있다.

최근 절연재료의 절연특성은 변압기를 장시간 운전해도 비교적 저하가 작고, 그것보다는 器內에서

도 가장 고온이 되는 巻線部の 절연지의 기계 강도 저하가 문제이며 그에 따라 변압기의 수명이 좌우될 것이라는 생각방법이 보고 되었다. 이러한 생각방법은 권선부 절연지의 인장강도가 저하하며 외부에서 전기적력이 가해졌을 경우에 절연지가 파손함으로써 부분방전, 절연파괴등에 이행할 것이라는 것이다. 이에 따르면 절연지 수명의 목표는 인장강도 殘率이 60%인 때가 된다.

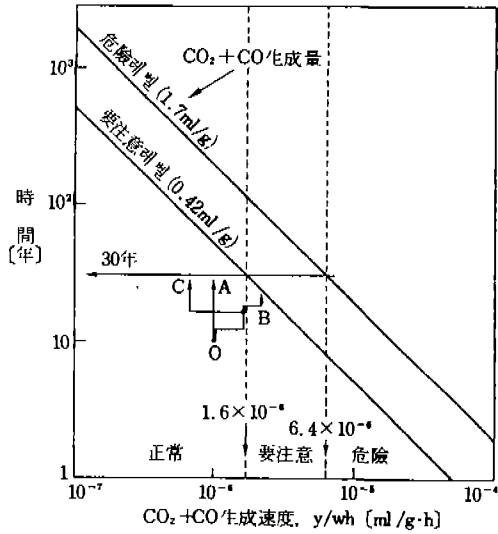
한편 引張강도잔율은 절연지의 열화의 기본적인 지표인 平均重合度殘率과 절연지에서 생성하는 $CO_2 + CO$ 량과 그림 4와 같은 일정한 관계가 있으므로, 절연지의 인장강도잔율 60%인 때의 $CO_2 + CO$ 량은 1~4 ml/g가 된다. 따라서 유증가스분석에 의한 $CO_2 + CO$ 량의 측정에서 절연지의 열화의 정도를 추정할 수 있으며 또한 변압기의 경년열화도를 진단할 수 있다.



〈그림-4〉 絶緣紙를 油中加熱劣化했을 경우의 平均重合度殘率에 對한 引張強度殘率과 $CO_2 + CO$ 生産量과의 關係

그런데 상술의 1~4 ml/g은 절연지가 모두 동일 온도에서 가열된 경우의 값이다. 그러나 實器에 있어서의 온도는 균일하지 않다. 그래서 그 수치를 실용적인 실측할 수 있는 것으로 다시 계산해 보면 0.42~1.7 ml/g가 된다.

이러한 생각에서 $CO_2 + CO$ 량에 의한 변압기의 경년열화 진단방법을 정리하여 표시한 것이 그림 5이다. 이 그림의 구체적 보는 방법으로는 예로 운전년수 10년의 변압기가 0점에 있다고 했을 때, 열



〈그림-5〉 絶緣紙의 經年劣化時間과 CO₂+CO 生成速度와의 關係

화가 그 상태에서 진행하면 30년 이상의 수명이 된다.

그러나 절연지의 가열열화속도가 크게 되어 B의

경로가 진행하면 30년이하의 수명이 된다. 도중에서 열화속도가 저하하면 C와 같이 30년 이상이 된다.

상술한 것은 변압기의 경년열화도·수명을 진단하는 구체적인 하나의 방법을 표시한 것이다.



유중가스 분석에 의한 변압기 이상진단 기술은, 공식으로 확립된지 약 10년이 되어 현재는 세계적으로 보급되고 있다. 그동안 분석기술은 향상하는 한편, 컴퓨터, 가스센서등의 기술도 진보하고 있다. 절연유중의 CO₂+CO에 의한 변압기의 경년열화도·수명진단방법은 이제 겨우 연구를 시작할때 불과하다.

앞으로 분석치의 취급방법 實器와의 대응등에 대해서 검토해 나가지 않으면 안된다.

이상 최근의 유중가스 분석에 의한 변압기 이상진단기술과 앞으로의 과제, 응용등의 개략을 정리했다. 앞으로 이러한 기술은 더욱 발전할 것으로 확신한다.

(본문중 연구소 보고등은 일본의 경우임) *

(85페이지에서 계속)

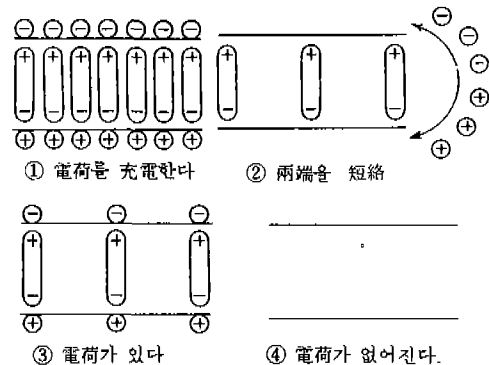
명한다.

사고방식은 실드 검출방식과 마찬가지로인데 이 방식이 좋다고 생각되지는 않는다. 그 이유의 첫째는 이 방식이면 PAS, MOF 등의 열화를 알 수가 없다. 진단은 CV 케이블이 주목적인데 설비의 진단도 할 필요가 있다. 둘째로는 케이블에 흐르는 전류를 보는 것이 아니고 발생측의 전류도 불필요가 있다. 케이블에 흐르고 있는 전류가 변동하고 있을 경우에 유도에 의한 것인지 발생측에 의한 것인지를 판단할 필요가 있기 때문이다.

(6) 케이블 진단의 주의사항에서 매가를 가한 후 電荷를 방전시키기 위해 충전부를 단락하여 전하를 방전하고 3분 정도 기다린 후...가 있다. 이것을 보충설명하다.

직류전압을 가하면 그림 8 과 같이 誘電體의 양쪽에 전하가 모여 電氣雙極子는 규칙적으로 배열된다. 전압을 제거하고 양단을 단락하면 그 순간 전하는 없어지는데 전기쌍극자는 일부 규칙적으로 배

열되어 있으므로 전하가 다시 모인다. 따라서 이시점에서 진단을 시작하면 이 전하가 누설전류에 영



〈그림-8〉 電荷의 放電

향을 미친다. 미소한 전류치를 취급하므로 이 전하가 큰 영향을 미친다. 3분 정도 기다리면 전기쌍극자가 여러 가지 방향으로 향하게 되므로 전하도 소멸된다. *