

# 電氣設備의 診斷技術

②

## 1.2 金屬材料

金屬材料는 金屬元素로 되어 있으며 固體 상태에서 展性, 延性이 풍부하여 각종 기계가공이 가능하고 電氣, 磁氣, 熱을 잘 傳導할 수 있기 때문에 발전, 송전, 변전 및 전기응용 각 분야의 電氣設備에 널리 이용되고 있다.

크게 나누어 構造材料和 電氣材料로서의 이용방법이 있으며 전기재료는 다시 세분하여 導電材料, 磁氣材料, 抵抗材料, 센서材料, 機構材料 등의 이용방법이 있다. 이項에서는 각종 금속재료의 전기설비에 관한 용도와 특성 및 初期健全性を 확인하기 위한 검사 및 시험기술에 대해 기술한다.

### 1.2.1 금속재료의 電氣設備에의 用途와 特性

#### 1. 構造材料

構造材料는 電氣設備의 組立에 사용되는 재료로서 鐵鋼材料가 중심이지만 非鐵金屬도 잘 사용되고 있다. 여기서는 화력발전 설비의 주요한 구조재료를 소개한다.

a. 보일러(Boiler) : 보일러는 연료의 연소에 의하여 발생하는 熱을 물에 보내어 蒸氣를 발생, 터빈에 공급하는 장치이다. 구조상 중요한 耐壓部는 용

기와 管으로 되어 있으며 構成部材는 高溫強度, 耐酸化性, 耐蝕性, 加工性, 鎔接性 및 장시간 加熱에 대한 安全性이 우수할 것이 요구되고 있다.

특히 高溫強度가 중요하며 각종 鋼材에 대하여 發電用 技術基準에 許容應力이 규정되어 있어 이것을 기준으로 鋼材의 사용온도와 응력조건에 따라 450°C 이하에서는 炭素鋼이, 600°C 이상에서는 오스테나이트系 스테인리스鋼이 그리고 중간의 溫度域에서는 페라이트系 低合金鋼이 일반적으로 사용되고 있다.

이밖에 드럼, 氣水分離器 등도 炭素鋼, 低合金鋼으로 제작되고 있다. 또한 蒸氣條件을 高溫高壓化하고 성능을 향상시키기 위하여 보일러管에는 오스테나이트系 스테인리스鋼의 2重管이나 크로마이즈드管 등의 실용화가 진행되고 있다.

b. 터빈(Turbine) : 蒸氣터빈과 가스터빈이 있으며 각기 증기 또는 燃燒가스의 熱에너지를 機械運動으로 변환시키는 장치로서 構造材料로는 鐵鋼이나 超合金이 사용된다.

증기터빈의 高壓과 中壓段落에서는 入口증기 온도가 538°C 또는 556°C나 되는 고온이므로 구성재료는 기본적으로 高溫強度에 뛰어나며 低溫段落에서는 入口증기 온도는 약 350°C로 낮아 高強度이며 高靱性인 것이 요구된다.

高溫域의 두께가 두꺼운 부품인 회전자(로터),

케이싱, 밸브 등은 熱疲勞強度가 우수한 것과 강도, 금속조직의 균일성, 장시간 安全性이, 그리고 케이싱과 밸브는 양호한 銲接性이 필요하다.

低溫域의 회전자는 불안정 파괴에 대한 抵抗性이 요구되며 블레이드에는 사용온도에 관계없이 蒸氣勵振力에 따른 高사이클 진동에 대한 疲勞強度나 振動減衰能도 필요하다.

표 1.11에 증기터빈의 주요부분 재료와 요구되는 특성을 종합하여 표시한 바와 같이 페라이트系 低合金鋼이나 마르텐사이트系 스테인리스鋼이 주로

사용되며 炭素鋼이나 析出硬化系 스테인리스鋼, 超合金도 사용된다. 더욱이 증기터빈의 효율향상을 지향하여 증기조건의 고온고압화가 진행중에 있으며 마르텐사이트系 스테인리스鋼인 改良 12Cr 耐熱鋼回轉子の 실용화 등이 추진되고 있다.

가스터빈은 증기터빈에 비하여 急速始動이 가능하고 출력당 중량이 적어 제작과 건설기간이 짧은 이점이 있으며 최근에는 고효율이 달성되는 증기터빈과 조합한 複合사이클 發電이 각광을 받고 있

다. 가스터빈의 入口가스온도는 증기터빈의 입구증기온도에 비하면 훨씬 높아 高溫가스 通路部의 주요 부품에는 耐蝕性, 耐酸化性도 고려한 超耐熱合金이 사용된다. 또한 이들의 部品는 냉각구조로 되어 내열피로성, 내열충격성, 靱性도 필요하다.

燃燒器는 압축기로 압축된 공기를 연료와 혼합하여 연소가스를 발생시키는 장치이지만, 연소가스에 의한 燒損, 變形, 酸化, 腐蝕에 견딜 수 있도록 크롬이 많이 함유된 耐熱合金을 사용하여 특히 세라믹스의 플라즈마코팅 등에 의하여 耐酸化性과 遮熱효과를 향상시키고 있다. 動翼 및 靜翼은 연소가스 에너지를 回轉에너지로 변환시키는 역할을 담당해야 하며 사용조건은 가장 가혹한 상태이기 때문에, 材料에는 고온강도 외에 耐熱피로성, 耐蝕性, 耐酸化性 등을 고려하여 코발트(Co)나 니켈(Ni)基의 耐熱合金이 많이 사용된다.

Co基 合金은 耐高溫 酸化性이나 내열피로성, 용접성이나 鑄造性에서도 우수하여 靜翼에, 그리고 Ni基 合金은 고온강도가 우수한 鑄造合金으로서

〈표 1.11〉 대형화력 터빈 주요부품의 사용재료

	部 品 名	代表鋼種 및 相當規格	要求되는 主된 特性
高 壓 · 中 壓 터 빈	回 轉 子	1Cr-1Mo-1/4V鋼(ASTM A470C1.8) 12Cr-Mo-V-Ta-N鋼(일본특허) 12Cr-Mo-V-Nb-N鋼(미국특허)	크리프(破斷) 強度, 延性, 靱性, 熱疲勞강도, 高溫안정성, 大形鑄造品の 製造性
	블레이드 노 즐	12Cr-Mo-V-W鋼(AIS 1422, SUH616) 12Cr-Mo-V-Nb-N鋼(H46) 12Cr鋼(AISI403, SUS403) Ni基礎合金(Refractaloy 26 등)	크리프(破斷) 強度, 延性, 靱性, 疲勞강도, 耐蝕性, 高溫안정성
	케 이 싱 蒸氣밸브	1Cr-1Mo-V鋼(ASTM A356Gr8-9, SCPH23) 1Cr-0.5~1Mo鋼(ASTM A356 Gr6, SCPH21.22) 21/4Cr-1Mo鋼(ASTM A356 Gr10, SCPH32)	크리프(破斷) 強度, 延性, 靱性, 熱疲勞강도, 高溫안정성, 銲接性
	締結볼트	1Cr-Mo-V鋼 12Cr-Mo-V-W鋼(AISI422, SUH616) 12Cr-Mo-V-Nb-N鋼(H46) Ni基礎合金	크리프(破斷) 強度, 延性, 靱性, 疲勞강도
低 壓 터 빈	回 轉 子	3~3.5Ni-Cr-Mo-V鋼(ASTM A470 C1.7)	引張강도, 延性, 靱性, 大形鑄造品の 製造性
	블레이드 노 즐	12Cr鋼(AISI 403, SUS 403) 12Cr-Mo-V鋼(X20Cr-Mo-V121) 12Cr-Ni-Mo-V-N鋼(JET HEAT, M152, M154) 17-4PH(SUS630)	引張강도, 延性, 靱性, 疲勞강도
	케 이 싱	炭素鋼	引張강도, 延性, 銲接性

날개에 많이 사용되고 있다.

c. 터빈發電機(Turbine Generator) : 발전기는 回轉에너지를 電氣에너지로 변환하는 장치로서 構造와 電氣의 양측면의 기능을 가지며 구조적으로는 발전기회전자와 코일을 회전자에 유지시키는 코일 固定책기와 엔드링이 주요하다.

發電機回轉子材는 고속회전으로 인한 높은 遠心力에 견딜 것과 발전기의 돌발적 短絡事故나 非同期투입시에 발생하는 電磁토크, 특히 再閉路운용을 실시하는 경우에는 과도토크에 견딜 수 있어야 한다. 또한 효율이나 勵磁容量을 좌우하기 때문에 높은 透磁率을 갖는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 고속회전하는 대용량의 발전기회전자는 Ni-Cr-Mo-V鋼 또는 Ni-Mo-V鋼이 사용된다. 발전기회전자에는 슬롯이 있어 코일을 수용하고 있는데 회전자의 회전에 의한 遠心力으로 코일이 튀어나오지 않도록 코일의 直線部에는 코일고정 책기가 삽입되어 있고, 또한 코일의 엔드턴部에는 엔드링이 燒附되어 이것을 유지하고 있다.

코일 固定책기는 高強度의 알루미늄합금 또는 銅合金이 많이 사용되고 엔드링材에는 非磁性 및 磁性材가 있으나 大容量機에는 비자성의 18M<sub>N</sub>-5Cr鋼이 많이 쓰여진다. 최근에는 水分에 의한 應力腐蝕 균열에 대한 배려에서 18M<sub>N</sub>-18Cr系의 비자성鋼도 등장하고 있다.

## 2. 電氣材料

金屬材料는 導電性이나 磁性 등, 전기재료로서의 특성을 이용하여 전기설비에 많이 사용되고 있으나 여기서는 발전, 송전, 변전설비의 주요부분에 사용되는 金屬재료를 소개한다.

a. 터빈발전기 : 導電材料인 코일銅線과 磁性材料인 발전기 회전자 및 고정자의 철심재료가 대표적인 금속재료이다.

발전기 회전자가 고정자내에서 회전할 때 회전자端의 슬립링을 통하여 외부로부터 회전자 계자 코일에 전류가 공급되어 界磁코일과 磁性材인 回

轉子材가 만드는 자계가 외측의 고정자코일과 銷交하여 電磁誘導現象이 일어남으로써 고정자 코일에 전류가 발생한다.

따라서 회전자 계자코일, 고정자 코일 어느 것이나 도전성이 뛰어난 銅線이 사용된다. 발전기 회전자는 전술한 바와 같이 構造材料일 것과 동시에 磁極을 형성하기 위한 磁性材料이기도 하다. 固定子鐵心은 회전자에 의한 자계의 통로로서 효율적으로 電磁誘導現象을 일으키기 위하여 數%의 硅素를 첨가한 硅素鋼이 사용된다. 고성능이 요구되는 발전기에는 표 1.12 중에서 方向性 硅素鋼帶가 사용된다.

b. 電線·케이블 : 전선, 케이블은 송배전, 정보전달, 전자코일, 전기·전자기기의 내부배선 등에 導電材料로서 사용되어 전압강하(또는 전력손실)가 적은 상태에서 전류가 흐르도록 하는 것을 목적으로 하기 때문에 저항률이 작은 재료가 바람직하고 2차적으로는 기계적 강도, 가공성, 경제성도 필요하다.

이것을 고려하여 전선, 케이블용 도전재료로서 銅 및 銅合金, 알루미늄 및 알루미늄합금이 일반적으로 사용되고 있다.

전선, 케이블에 많이 사용되는 銅은 電氣銅에 의해 정제된 純銅으로서 산소를 함유하고 導電率은 銀 다음으로 加工性, 機械的 性質, 耐蝕性에 있어서도 우수하다.

또한 水素脆性을 방지하여 특히 도전율과 耐屈曲性이 우수한 無酸素銅도 사용된다. 송전선, 가공지선 및 통신선으로는 기계적 강도와 내열성을 중시한 銅覆銅이 사용된다.

알루미늄의 도전성은 동 다음이지만 경량이며 비교적 耐蝕性도 좋기 때문에 導電材料로서도 많이 사용되며 기계적 강도가 필요한 架空地線이나 給電線에는 甲號알루미늄합금이, 架空送電線에는 耐熱性이 양호한 내열알루미늄합금이, 그리고 長徑間 송전선, 가공지선 등에는 기계적 강도가 크고 도전율이 높은 알루미늄覆鋼線이 사용된다.

〈표 1.12〉 電磁鋼板의 種類와 記號

	두께 0.50[mm]의 W <sub>15,50</sub> (最大値)	JIS C 2552 無方向性電磁鋼帶	新日本製鐵 H	川崎製鐵 RM	舊JIS	
					記號	W <sub>15,50</sub> (最大値)
無 方 向 性	2.70	50A270	50H270	50RM270		
	2.90	50A290	50H290	50RM290	S 9	2.90
	3.10	50A310	50H310	50RM310	S10	3.10
	3.50	50A350	50H350	50RM350	S12	3.60
	4.00	50A400	50H400	50RM400	S14	4.00
	4.70	50A470	50H470	50RM470	S18	4.70
	6.00	50A600	50H600	50RM600	S23	6.20
	7.00	50A700	50H700	50RM700		
	8.00	50A800	50H800	50RM800	S30	8.00
	10.00	50A1000	50H1000	50RM1000	S40	10.50
	13.00	50A1300	50H1300	50RM1300	S50	13.00
	두께 0.30[mm]의 W <sub>17,50</sub> (最大値)	JIS C 2553 方向性硅素鋼帶	新日本製鐵 ZH, Z	用崎製鐵 RGH, RG	舊JIS	
					記號	W <sub>17,50</sub> (最大値)
方 向 性	1.10	30P110	30ZH110	30RGH110		
	1.20	30P120	30ZH120	30RGH120		
	1.30	30G130	30Z130	30RG130	G 9	1.33
	1.40	30G140				
	1.50	30G150			G10	1.47

【備考】 W<sub>15,50</sub>은 최대磁束密度 1.5T일 때의 鐵損[W/kg]

W<sub>17,50</sub>은 최대磁束密度 1.7T일 때의 鐵損[W/kg]

두께는 기타에, 無方向性에는 0.35와 0.65mm가 있으며, 또는 方向性에는 0.27과 0.35mm가 있다.

c. 變壓器 : 변압기는 電磁誘導現象을 이용하여 전압을 변화시키는 장치로서 코일과 철심으로 되어 있으며 이들 재료는 발전기의 코일이나 철심의 재료와 기본적으로 다른 것은 아니다.

d. 電動機 : 전동기 코일에는 발전기와 마찬가지로 電氣銅(純銅)이 많이 이용되고 있으나 亞鉛이나 니켈을 포함한 銅合金 혹은 다이캐스트나 알루미늄도 사용된다. 철심에는 無方向性的 硅素鋼板이 사용된다. 회전자축(로터샤프트)에는 발전기회전자 정도의 강도는 필요치 않기 때문에 炭素鋼이 사용될 경우가 많다.

### 1.2.2 檢査・試驗技術

電氣設備은 높은 신뢰성이 요구되기 때문에 제조과정의 각 단계에서 각종 검사 및 시험기술이 채용되어 엄격한 품질 관리가 행하여진다. 전기설비에 관련되는 金屬材料의 검사와 시험방법은 JIS를 위시하여 각종 규격에서 알 수 있으므로 상세

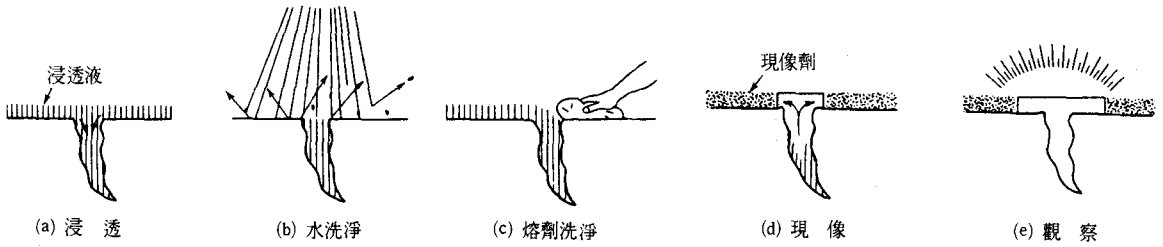
한 것은 생략하고 여기서는 金屬재료의 구조특성과 전기특성에 관한 검사와 주된 시험방법을 소개한다.

#### 1. 構造特性

構造材料素材의 건전성을 확인하기 위하여 화학성분의 분석, 기계적 특성시험이나 金屬組織檢査를 실시하는 이외에 구조물의 결함 有無를 검사하기 위하여 전술한 바와 같은 어떠한 構造材料에 대해서도 다음에 기술하는 각종 非破壞檢査가 일반적으로 실시되고 있다.

a. 浸透探傷試驗 : 표면에 사이가 벌어져 開口된 상태를 육안으로 관찰하기 위하여 황녹색의 螢光浸透液 또는 적색의 染色浸透液에 의해 사이가 벌어진 指示모양을 나타내는 방법으로 그림 1.6에 표시하는 처리절차에 따르게 된다.

指示모양은 紫外線에 의해 강한 형광을 照射하지만 自然光을 기초로 赤色을 나타내기 때문에 육안의 관찰이 가능하다. 침투탐상시험은 다른 非破



〈그림 1.6〉 浸透探傷試驗의 基本處理

壞檢査에 비하여 간단하게 할 수 있어 구조재료의 검사에 널리 적용되고 있다.

b. 磁粉探傷試驗: 鐵鋼材料와 같은 強磁性體는 磁界에 의해서 강하게 磁化된다. 그림 1.7에 나타난 바와 같이 사이가 벌어진 開口가 있는 재료에 그 開口와 수직으로 자화시키면 사이가 벌어진 부분은 자기적으로 불연속이며 磁束이 누설되어 磁粉이 부착하게 된다. 자분탐상시험은 이러한 현상을 이용하여 결함을 검출하는 방법이다.

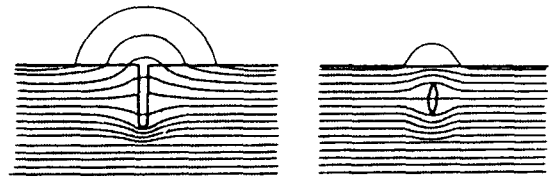
磁粉探傷試驗의 장점은 強磁性體의 表面결함의 위치와 길이를 잘 검출할 수 있으며 開口되어 나타나 있지 않은 내부상처의 결함도 검출할 수 있다. 그러나 非磁性體에는 적용이 안되고 표면 결함의 깊이나 내부결함의 검출은 불가능하다. 자분탐상시험은 구조재료로 널리 적용되고 있다.

c. 電磁誘導試驗: 도전성을 가진 시험체에 와전류를 발생시켜 변화를 측정하고 探傷試驗과 材質試驗을 행하는 것으로서 過電流試驗 또는 過流試驗이라고도 한다.

코일에 교류를 흘리면 시간적으로 변화하는 磁束이 발생하게 되고 여기에 도체를 접근시키면 電磁誘導現象에 의하여 도체에 交流過電流가 발생하게 된다.

이 전류의 強度는 코일의 형상, 교류주파수, 도체의 도전율, 형상의 크기, 결함의 유무 등에 의하여 변화하므로 시험품에 흐르는 전류를 검지함으로써 재질시험이나 탐상시험을 할 수 있다.

電磁誘導試驗은 導電性 재료에 적용되어 비접촉



(a) 表面缺陷 (b) 內部缺陷

〈그림 1.7〉 缺陷에 의한 누설 磁束

으로 시험속도가 빠른 표면 결함의 검출에는 적합하나 복잡한 형상의 부품에는 적용이 곤란하고 내부 결함의 探傷이 불가능하며 또한 材料因子에 영향을 받는 단점이 있다. 전자유도시험은 열교환기 傳熱管 등의 탐상에 많이 이용되고 있다.

d. 放射線 透過試驗: 放射線(또는 電離 放射線)에는 여러 가지 종류가 있으나 X선,  $\gamma$ 선 및 중성자선의 3가지는 물질을 통과하기 쉽다. 이들이 물질을 투과하는 동안 흡수나 산란을 받게 되면 투과후의 강도는 저하하고 반대로 블로홀 등 방사선이 흡수되지 않는 경우에는 투과하기 쉽다.

따라서 試驗品에 일정한 강도의 방사선을 조사하고 투과시켜 이것을 사진필름으로 감광하여 현상하면 결함이나 내부구조에 대응하는 濃淡 모양의 것이 얻어지는데 이것으로서 결함의 크기, 형상 등의 檢知試驗을 행할 수 있다.

방사선투과시험은 내부 결함의 검출에 적합한 非破壞檢査 방법이며 투과사진을 관찰하면 內在하는 결함의 2차적 형상, 크기, 분포 등이 직감적으로 파악되고 결함의 종류도 추정할 수 있어 구조

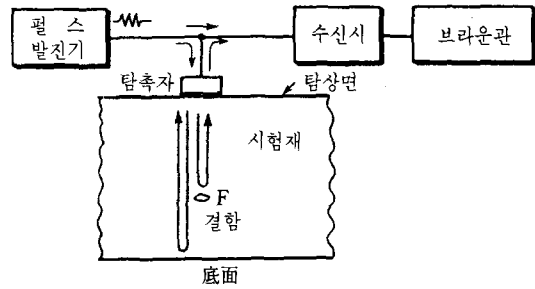
물의 용접부 등에 널리 응용되고 있다.

e. 超音波探傷試驗 : 초음파 탐상시험은 높은 주파수(통상 1MHz)의 음파를 시험품에 투입하고 내부에 결함이 있으면 投入超音波의 일부가 반사되어 探觸子에 受信되는 현상을 이용하여 결함의 존재위치와 크기의 정도를 비파괴적으로 알 수 있는 방법이다.

여기에는 펄스 반사법, 투과법, 공진법이 있으며 그림 1.8은 많이 이용되고 있는 펄스반사법으로서 이중에서도 垂直探傷法에 관한 원리를 나타낸 것이다.

각종 試驗材에 대한 超音波探傷의 적용을 그림 1.9에 나타내었으며 超音波는 상당히 먼거리까지 도달하기 때문에 직경 수m의 대형 鍛鋼品 내부 검사도 가능하다.

최근에는 信號處理技術을 구사하여 보다 高精度의 결함 검출법으로서 ALOK법(Amplitude und

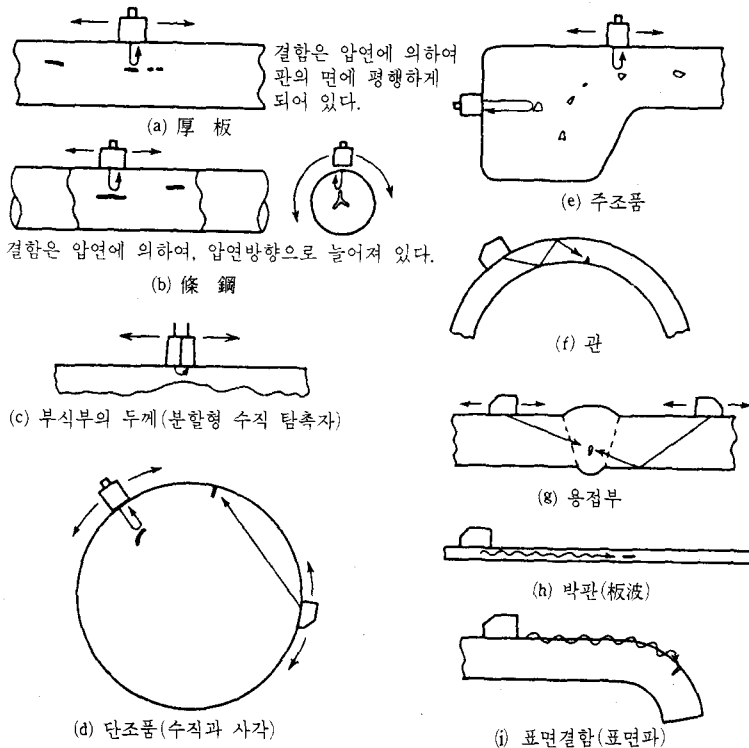


<그림 1.8> 펄스 반사법의 원리

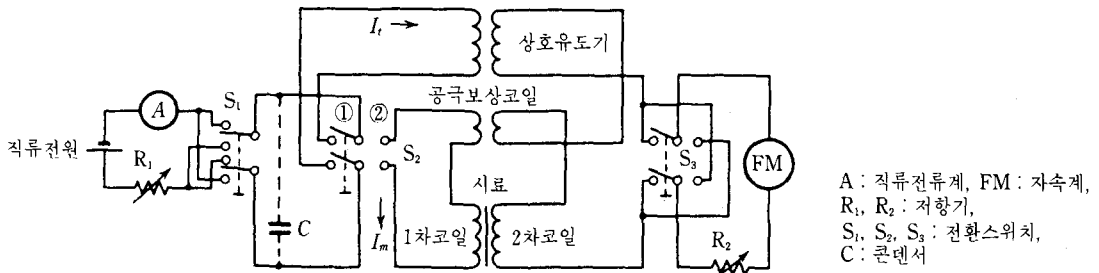
Laubzeit Ortskurve), 電子스캔법, 開口合成法 등 새로운 超音波 探傷法도 연구되어 그 일부가 실용화되고 있다.

## 2. 電氣特性

電氣材料의 품질관리를 위하여 素材의 화학성분 및 기계적 성질에 관한 시험 이외에 여러 종류의 전기적, 자기적 특성을 확인하는 시험이 있다. 여



<그림 1.9> 초음파 탐상의 적용



〈그림 1.10〉 25cm업스타인 시험프레임에 의한 直流測定回路

A : 직류전류계, FM : 자속계,  
 $R_1, R_2$  : 저항기,  
 $S_1, S_2, S_3$  : 전환스위치,  
 C : 콘덴서

기서는 1.2.1항에서 설명한 전기재료에 관련된 대표적인 電氣的·磁氣的 特性試驗을 소개한다.

a. 導電率과 試驗 : 도전율은 도체의 기본적 특성으로서 중요하며 20°C에서 단위 길이와 단위 단면적을 갖는 재료의 導電率과 標準軟銅의 것과의 비를 100분율로 나타낸 것이다. 도전율 시험에 사용되는 試驗片은 전체 길이에 걸쳐 한가지 모양의 단면적을 갖고 있어 통상 길이 350mm 이상, 전기저항도  $10\mu\Omega$  이상으로 한 것이며 電氣抵抗은 더블 브리지 또는 電位差計를 이용하여 측정하고 있다.

동시에 시험편의 단면적과 길이(평균 단면적법 시험편의 경우) 혹은 중량, 밀도, 길이(중량법 시험편의 경우)가 측정된다. 이들의 측정치를 기초로 하여 %導電率을 산출한다.

b. 磁化特性 試驗 : 磁化曲線上에서 어떤 磁化力  $H(A/m)$ 에 대한 磁束密度를  $B_{0.01H}$ 로 표시한 것을 磁化特性이라고 한다. 直流磁化特性和 交流磁化特性이 있으며 전자는 발전기 回轉子材에 대하여, 후자는 발전기 고정자나 變壓器鐵心材에 대하여 매우 중요하다. 여기서는 직류자화특성 측정법의 한 예에 대하여 기술한다.

자화특성 측정용의 시험편은 폭 30mm, 길이 280~320mm의 長方形으로 25cm 업스타인 프레임에 차입된 磁氣回路를 형성하며 그림 1.10과 같은 直流磁化特性 測定回路를 구성한다. 측정시에는 相互誘導體를 이용하여 미리 磁束計를 교정한 후 전환스위치  $S_2$ 를 ①측으로 Off하고  $S_1$ 과  $S_2$ 를 Off

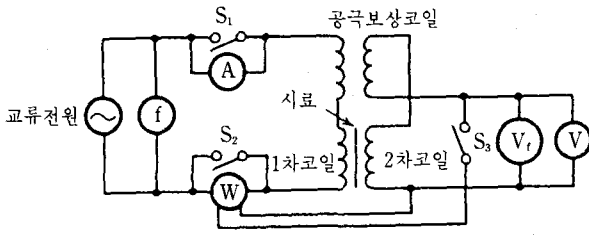
한 다음 저항기  $R_1$ 을 조정하여 較正電流  $I_1$ 를 흐르게 한다.

다음에  $S_1$ 을 反轉시키고 磁束計의 흔들리는 변화  $\phi_1$ 를 읽어낸다. 이 때에 校正係數  $K$ 를 산출한다. 그리고 試料를 消磁시킨 후  $S_2$ 를 ②측으로 Off하고  $S_1$ 과  $S_3$ 를 Off한 후 저항기  $R_1$ 에 의하여 1차코일에 흐르는 전류  $I_m$ 을 증가시켜 磁化力  $H$ 가 소정의 質에 이르도록 조정하여  $H$ 를 구한다. 계속해서  $S_1$ 을 反轉시켜 磁束計의 진동변화  $\phi$ 를 읽어 내어 磁束密度  $B$ 를 구한다.

이들의 較正係數  $K$ , 磁化力  $H$ , 磁束密度  $B$ 의 산출식에 관해서는 인용문헌을 참고하기 바란다. 직류자화특성 측정법에는 여기서 기술한 방법 이외에 直流自己 磁束計에 의한 試驗法도 있다.

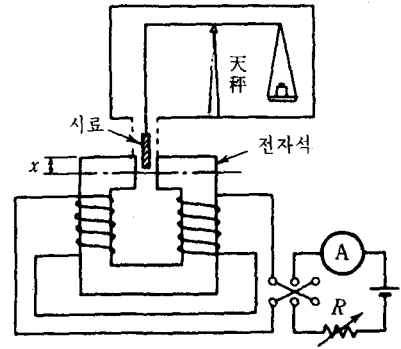
c. 鐵損試驗 : 철손(Core Loss)은 시료를 交流磁化力에 의해 磁化시켰을 때 試料중에 소비되는 전력을 말하며 발전기 고정자와 변압기의 철심에 중요한 특성이 된다. 鐵損의 측정은 다음과 같이 행한다.

측정용의 시료는 前項의 磁化特性 측정에 사용되는 것과 같으며 그림 1.11에 표시한 鐵損測定回路로 되어 있다. 먼저  $S_2$ 를 Off하여 시료는 交流消磁한 후  $S_1$ 과  $S_3$ 를 Off하고  $S_2$ 를 On한 다음 磁束電壓計를 읽어  $E_f$ 가 미리 자속밀도의 波高値가 되도록 전원전압을 조정하고 주파수를 규정치로 유지시키면서 磁束電壓計의 判讀値  $E_f$ 를 구한다. 다음에, 이 상태에서 電力計를 읽어  $P$ 와 實效電壓計를 읽고  $E$ 를 구하여 鐵損  $W_c, W_s$ 를 구한다.



f: 周波數計, A: 實效值, V<sub>1</sub>: 磁束電壓計, V: 實效值電壓計  
S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>: 전환스위치, W: 電力計

<그림 1.11> 철손측정회로



<그림 1.12> 低 投資率 재료시험법

d. 透磁率試驗: 물질중의 자화력  $H$ 와 자속밀도  $B$ 와의 관계를 나타내는  $B$ 와  $H$ 의 비를 透磁率 (Permeability)이라고 한다. 磁性材의 투자율은 앞에서 설명한 바와 같이 磁化特性 측정법에 의해 얻어지는 자화곡선상의 각 점에서 구할 수 있게 된다.

대용량의 발전기에서는 磁束 누설을 방지하기 위하여 엔드링材에 非磁性鋼이 사용되고 있으나 투자율이 적은 것을 확인할 필요가 있다. 이하 非磁性材의 투자율 측정법에 대하여 그 대표적인 예인 吸引力法에 의한 시험법을 기술한다.

시험편은 균일 단면의 棒, 線 또는 管材로서 길이 65mm 이상, 폭 12.5mm 이하, 단면적 0.1cm<sup>2</sup> 이상의 것이 사용된다. 그림 1.12는 먼저 電磁石을

磁化하지 않은 상태에서 시료를 天秤에 달아 평형을 취한 후에 전자석을 자화시켜 시료에 작용되는 吸引力을 측정한다. 이에 따라 얻어진 흡인력  $P$ 와 전자석에 삽입된 시료에 의한 에너지 變化分  $W$ 로부터 透磁率  $\mu$ 가 산출된다.

## 1.3 絶緣材料

### 1.3.1 絶緣재료의 種類와 用途

전기설비에는 도체를 지지하고 특히 도체간을 전기적으로 분리하기 위하여 고체, 액체 또는 기체의 絶緣材料가 각기의 특징을 살려 여러 곳에 사용되고 있다. 표 1.13은 전기기기에 사용되고 있는

<표 1.13> 전기설비에 사용되는 주요 絶緣제도와 특징 및 용도

絶緣재료	주요 구성 재료	특징	용도
마이카絶緣물	마이카(프레그마이카, 집성마이카) 열경화성레진(주로 에폭시) 보강재(유리섬유, 아라미드지, 폴리에스텔 필름 등)	固體絶緣, 高强度, 高耐熱, 高耐部分放電	회전기
유침絶緣물	絶緣油 { 鑛油 合成油 } 絶緣紙(그라프트紙, 그래프紙 등) 固體絶緣物 { 半合成紙(라미네이트紙, 混抄紙 등) 필름(폴리프로필렌 등) 프레스보드	液體絶緣, 高電壓絶緣, 高耐電計	변압기, 콘덴서, 케이블
注型絶緣物	열경화성 레진(주로 에폭시) 충진재(알루미나, 실리카 등)	固體絶緣, 難燃性, 高强度, 高耐熱	변압기, 변성기, 가스기기 스페이서
6불화 유황가스	6불화 유황가스	氣體絶緣, 高耐電計, 高消强性	가스 변전기기
가교폴리에틸렌	가교폴리에틸렌	固體絶緣, 高耐電計	케이블



주요 절연재료의 특징과 용도를 나타낸 것이다.

마이카 절연물은 주로 회전기의 고전압 코일의 주 절연에 사용되고 있으며 구성은 글라스纖維, 아라미트紙 또는 폴리에스테르 필름 등의 마이카 補强材와 얇은 마이카 조각이 여러 層에 배치되어 있으며 이들의 틈 사이에 에폭시 등의 樹脂가 채워져 있다.

즉 耐部分放電性, 機械的 强度, 耐熱性이 우수한 마이카판을 高耐熱性的 熱硬化性 수지로 결합하여一體化시킨 복합절연물이다.

마이카 절연물에서는 마이카片間에 보이드의 殘存이나 片間的 剝離에 의한 보이드 生成이 아주 없는 것이 아니고 다소 존재하지만 어느 量 이하의 부분방전에 대해서는 마이카의 우수한 耐部分放電性으로 인하여 실제의 손상은 없다. 표 1.14는 마이카 절연물의 특성예를 나타낸 것이다.

油浸絶緣物은 변압기, 전력케이블, 콘덴서 등에 가장 많이 사용되는 절연물로서 세룰로스나 필름 모양의 고분자 절연체를 多層構造로 한 것으로서 프레스 보드에 절연유를 흡수시킨 것이다.

전력케이블 또는 콘덴서의 誘電損失이나 절연두께를 저감하기 위하여는 半合成紙나 필름을 사용할 수 있도록 하였고 변압기에서는 高電界 集中部에 고밀도의 프레스 보드가 사용될 수 있게 하였다. 또한 절연유로는 絶緣耐力이 우수한 合成油가 사용되고 있으며 표 1.15는 油浸絶緣物의 특성예를 나타낸 것이다.

注型絶緣物은 몰드 변압기나 절연기기의 스페이스 절연물로 사용되는데 주로 에폭시레진을 사용하고 있다. 이것은 熱的(열전도율, 열팽창률 등), 기계적 특성을 향상시킬 목적으로 無機質의 실리

〈표 1.14〉 마이카 절연물의 특성예

마이카 含有量 (重量 %)	54
레진 含有量 (重量 %)	36
比誘電率(50Hz)	4.25
誘電正接(50Hz) [%]	0.75
絶緣破壊强度 [kV/mm]	30

【註】 모델코일의 특성을 나타냄.

〈표 1.15〉 유침절연물의 특성예

比誘電率	3.4
誘電正接(195kV, 85℃) [%]	0.2~0.3
絶緣破壊强度 [kV/mm]	대개 40

【註】 275kV케이블(그라프트지 절연)의 특성을 나타냄.

〈표 1.16〉 주형절연물의 특성예

比誘電率(50Hz, 25℃)	4.0
誘電正接(50Hz, 25℃) [%]	1.3
體積抵抗率(25℃) [ $\Omega$ cm]	$7 \times 10^{15}$
絶緣破壊强度 [kV/mm]	20

카 또는 알루미늄을 증진시킨 복합절연물로서 표 1.16은 注型絶緣物의 특성예를 나타낸 것이다.

6弗化硫黃(SF<sub>6</sub>) 가스의 절연성능이 우수하다는 것은 이미 알려진 사실이지만 아크消弧性能이 매우 뛰어나다는 것이 발견된 이래 SF<sub>6</sub>가스차단기용의 消弧媒體와 절연물로서 널리 사용되고 있으며 또한 가스절연(CGI) 케이블의 절연체로서도 사용되고 있다.

SF<sub>6</sub>가스를 차단기용으로 사용하는 경우에는 차단기容器內를 1mmHg 정도의 진공상태로 한 후에 충전하게 되지만 이때 混入할 가능성이 있는 공기, 수분 등의 불순물에 대해서는 絶緣性能에 영향을 미치지 않을 量 이하로 관리하고 있다.

SF<sub>6</sub> 가스는 가스壓이 높을수록 차단내력과 더불어 절연내력이 향상되지만 高壓이 되면 가스가 液化하기 때문에 통상 4~6kgf/cm<sup>2</sup>-ab(20℃)에서 사용되고 있다.

架橋폴리에틸렌은 절연내력이 높으며 더욱이 誘電體損이 적은 우수한 고체절연재료로서 架橋폴리에틸렌 케이블(통칭 CV케이블)의 절연체 재료로서 널리 사용되고 있다. 표 1.17은 가교폴리에틸렌의 특성예를 나타낸 것이다.

### 1.3.2 절연재료의 特性과 評價方法

절연재료로서 요구되는 특성은 전기적 특성, 기계적 특성, 열적성질, 물리화학적 특성 등에 있으

<표 1.17> 가교폴리에틸렌의 일반특성

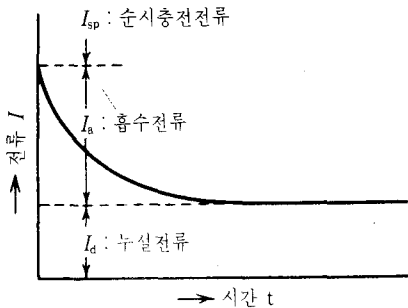
密度	0.91~0.93
融點 $T_m$	102~120
比誘電率 $\epsilon_r$ (60Hz)	2.3
誘電正接 ( $\tan\delta$ ) [%]	<0.05
體積抵抗率 [ $\Omega\text{cm}$ ]	> $10^{18}$
絶緣破壊强度 [kV/mm]	> 200

그림 1.16(d)의 전극에 의한 교류과파 강도

며 이들의 특성을 측정하는 것으로서 健全성을 평가할 수가 있다. 특히 電氣의 특성은 중요한 것으로서 누설전류나 절연저항 등의 電氣傳導特性 또는 誘電率, 誘電正接 등의 유전특성은 절연재료의 건전성 평가에 중요한 포인트가 되고 있다.

### 1. 누설전류, 절연저항, 유전률 및 유전정접

절연재료에 직류전압을 인가하면 그림 1.13 과 같이 시간과 더불어 감소하는 전류  $I$ 가 관측되는(유



<그림 1.13> 電流-時間 特性

전체 흡수현상) 그림 중의  $I_d$ (누설전류)는 절연재료 중에 존재하는 電荷擔體(전자, 이온 등)에 기인하는 전류이며 누설전류  $I_d$ 를 측정함으로써 절연저항  $R$ 이 평가되는데 이 양자는 절연재료에 있어서 성능 판정의 중요한 포인트가 되고 있다.

누설전류의 측정에는 재료에 적합한 전극이 이용되지만 고체절연재료의 경우는 예를 들면 評板 모양의 시료에 대한 그림 1.14와 같은 전극이 사용된다. 그림 (a)의 전극과 같이 主電極(A)와 가드電極(B)를 설치함으로써 재료의 표면에 흐르는 表面電流과 試料內部를 흐르는 體積電流를 나누어 측정할 수 있다.

실제로  $I$  또는  $R$ 를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 최근에는  $10^{-15}\text{A}$  정도까지의 미약한 전류를 측정할 수 있는 電子回路式 측정기가 개발되어 이용할 수 있게 되었다.

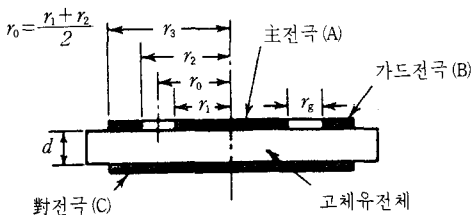
한편 절연재료에 交番電壓을 가했을 때 재료가 이상적인 誘電體라면 전압과 전류의 位相差  $\theta$ 는  $90^\circ$ 가 되지만 일반적인 절연재료에서는  $\theta < 90^\circ$ 가 되어 전압과 같은 相의 전류성분  $I_r$ 이 흘러 電力損失(유전체손)이 발생하게 된다.

그림 1.15는 이 관계를 나타내는 벡터圖로서 그림중의  $\delta$ 가 誘電損角,  $\delta$ 의 正接  $\tan\delta$ 가 誘電正接이다. 유전체손에 의한 소비전력을  $W$ , 인가전압을  $E$ , 정전용량을  $C$ 라고 하면

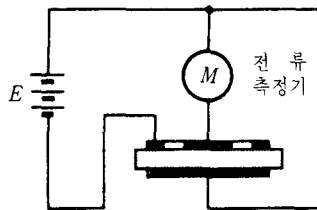
$$W = EI \cos\theta = E^2 \omega C_0 \epsilon_s \zeta \cos\theta$$

$$= E^2 \omega C_0 \epsilon_s \zeta \tan\delta$$

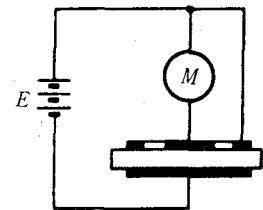
여기서  $\epsilon_s$ : 比誘電率,  $C_0$ : 幾何學的 靜電容量이 되고  $W$ 는 재료의  $\epsilon_s \cdot \tan\delta$ 에 比例한다.



(a) 전극구성

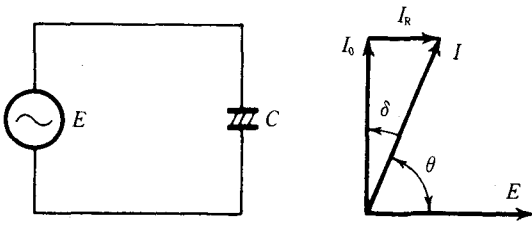


(b) 표면전류측정계



(c) 체적전류측정계

<그림 1.14> 電極構成과 表面電流測定系



〈그림 1.15〉 유전손이 있는 경우의 벡터도

따라서 유전율  $\epsilon$ (실용적으로는 비유전률  $\epsilon_s$ ) 그리고 誘電正接  $\tan\delta$ 는 절연재료에 대한 特性評價의 중요한 지표가 된다.

유전율이나 유전정접의 측정은 고체재료, 액체재료의 측정에 적합한 전극을 사용하고 있다. 측정방법에는 브리지법, 공진법 등의 여러 가지 방법이 개발되어 있다.

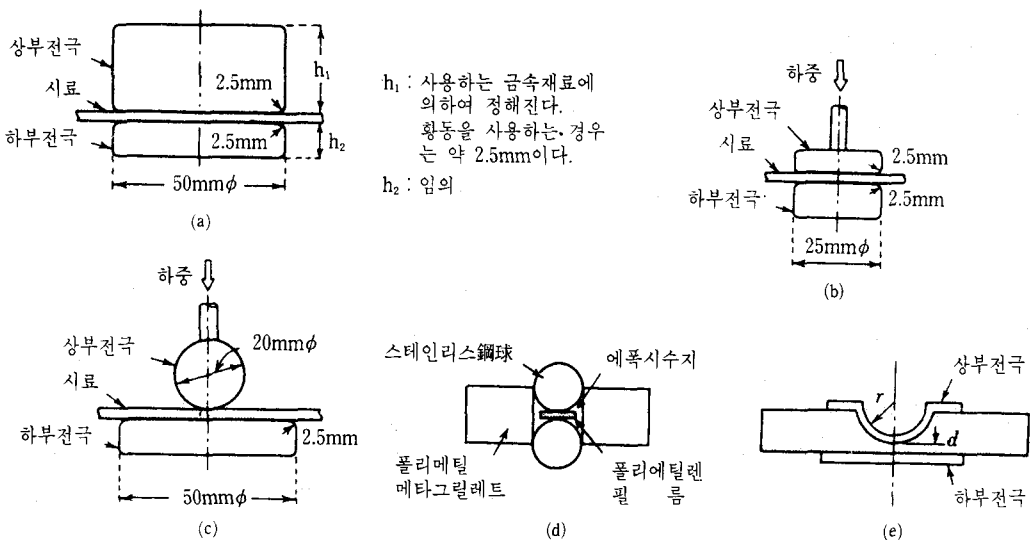
건전한 재료로서는 누설전류, 절연저항, 유전률, 유전정접 등은 재료의 고유값을 나타내고 있으나 절연재료가 吸濕되거나 불순물의 혼입 또는 기기의 절연구성에 결함이 생기면 이들 값은 고유의 값을 나타내지 못하고 일반적으로 절연저항은 저하되면서 누설전류, 유전률 및 유전正接은 증가하게 된다.

## 2. 絶緣破壞強度

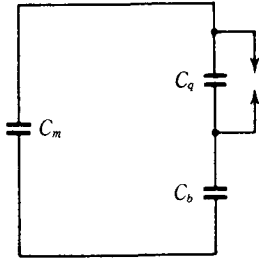
절연재료에 가해진 전계를 증가시키면 어느 전계 이상에서는 전류의 급격한 증가 현상이 일어나 절연파괴를 일으킨다. 이 절연파괴를 일으키는 전압(절연파괴전압) 또는 이 때의 전계(절연파괴강도)는 재료가 절연성능을 유지할 수 있는 한계를 나타내는 것으로 絶緣材料의 初期健全性에 대한 가장 중요한 지표가 된다. 절연파괴 강도는 일반적으로 인가되는 전압의 종류나 전압인가방법, 온도, 시료의 형상 및 크기 등에 따라서 달라지므로 목적에 따른 시험방법으로 평가할 필요가 있다.

그림 1.16은 固體絶緣材料에 대한 절연파괴 강도의 評價試驗에 사용되는 電極形狀의 例이다. 실용적인 입장에서 절연재료의 절연파괴 강도를 평가하기 위하여 전극이나 전압인가 방법의 규격화도 행하여지고 있으며 재료를 상호 비교할 수 있도록 한 것이다.

더욱이 전압의 인가방법으로서 일정한 電壓上昇率로 승압되는 短期間 破壞試驗法과 一定電壓(예를 들면 예상파괴 전압의 1/2)까지 신속하게 승압시킨 후에 미리 정한 전압스텝으로 단계적으로 승압시키는 段階上昇試驗法이 있다.



〈그림 1.16〉 절연파괴강도의 평가시험용 전극



〈그림 1.17〉 部分放電의 電氣的 等價回路

### 3. 部分放電

실용적인 기기의 絶緣破壞는 절연체중의 결함부에서 일어나는 경우가 많다. 특히 고체재료나 2종 이상의 재료로된 복합재료에 있어서는 보이드 등의 결함부에 생기는 部分放電이 파괴의 발단이 되는 경우가 많다. 따라서 부분방전의 측정은 健全性 評價의 중요한 수단이 되고 있다.

그림 1.17은 절연체중에 발생하는 부분방전의 電氣的 等價回路이다. 일반적으로 부분방전의 측정에 있어서는 放電開始電壓( $V_i$ ), 放電電荷量( $Q=C_b V_g$ ), 放電發生頻度(교류전압 半사이클 부근에서의 방전발생 개수) 등을 측정하게 되지만 재료의 健全性 評價(즉 결함 有無의 판정)을 위해서는 방전 개시전압  $V_i$ 의 측정이 중요하다. 부분방전 측정방법에 관한 상세한 설명은 생략한다.

#### 1.3.3 各種 絶緣재료의 初期健全性 評價

전기기기에 사용되고 있는 절연재료의 초기 건전성은 構成材의 품질과 제작프로세스에 크게 좌우된다. 따라서 개개의 材料規格에 의한 구성재의 품질검사와 제작프로세스 조건의 검사가 모든 절연재료에 대하여 실시되고 있다. 또한 절연재료가 만들어진 상태를 점검하는 육안점검도 실시되고 있으며 절연재료에 대한 초기 건전성의 대부분은 제작과정에서 검사에 의하여 보증되고 있다. 다음에 각 절연재료별로 주요한 사항을 기술한다.

마이카 절연물의 초기 건전성에 대한 평가는 치수, 誘電正接-電壓특성, 部分放電특성 등으로 검

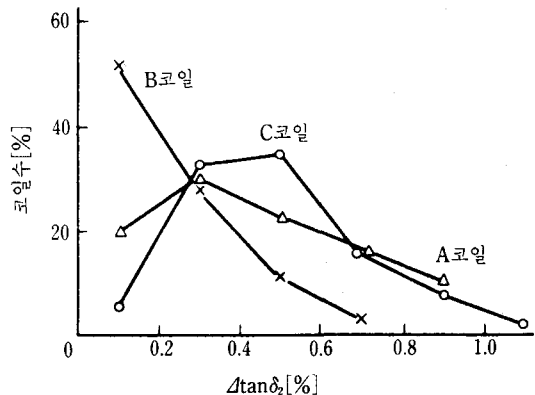
사되며 이들의 검사는 특성의 절대치보다는 적절한 범위에 분포되어 있는 것을 관리하고 異常이 있는지를 체크하는 개념으로 실시되고 있다. 이것은 현대의 기계에도 다수의 코일이 사용되기 때문에 제작프로세스가 동일하지 않은 즉 제작로트가 다른 절연물이 混在하기 때문이다.

치수는 捲線을 철심의 슬롯에 짜 넣어야 할 정도로 중요한 管理値가 되고 있으나 眞空加壓含浸法이나 레진리치法으로 제작되는 경우에는 마이카와 레진의 적당한 含有量과 관계되는 量이다.

誘電正接-電壓特性으로 절연층의 매크로적인 性狀을 파악할 수 있다.  $\tan\delta_0$ (낮은 전압, 통상 2kV를 인가하였을 때의 誘電正接)는 절연물의 乾燥度나 硬化度 그리고  $\Delta\tan\delta_2$ (정격전압을 인가하였을 때와 2kV 전압을 인가하였을 때의 誘電正接의 差)는 절연물내의 보이드량과 관계있는 것으로 생각되고 있다.

또한 부분방전특성은 국부적인 결함과 관계있는 것으로 생각되고 있으며 일반적으로 이것들은 마이카절연물의 종류에 따라 예를 들면 그림 1.18과 같이  $\Delta\tan\delta_2$ 의 값이 달라지므로 管理目標値도 달라지고 있다.

유침절연물에서는 部分放電특성에 의해서 결함과 異常部를 체크하게 된다. 이것은 油中 부분방전이 한번 발생하게 되면 그 에너지가 커지거나 전압을 내려도 방전의 지속이 용이하게 되는 등 절



〈그림 1.18〉  $\Delta\tan\delta_2$  특성的一例 (코일에 있어서  $\Delta\tan\delta_2$ 의 분포를 나타냄)

연과괴의 前驅現象으로 생각되기 때문이다.

誘電正接은 유침절연물의 구성에 의해 정해지지만 吸濕, 汚損 등에 의해서 증가하기 때문에 표 1.18 과 같이 許容値가 규격화되어 있는 것도 있다. 誘浸絶緣物을 구성하는 절연재료인 절연유의 절연 성능은 油中가스分 또는 油中水分에 의하여 영향을 받기 때문에 예를 들면 표 1.19 의 예와 같이 관리되고 있다.

또한 絶緣紙의 重合度는 품질관리의 한 항목이 되나 重合도는 기계적 강도의 劣化의 상호관계가 있으므로 健全性 평가의 중요한 기준이 되어 조치가 체크되고 있는 경우도 있다.

절연지의 평균 重合度는 예를 들면 銅에틸렌지아민 熔液에 試料를 녹이고 그 용액의 極限粘度를 측정하여 산정할 수 있다.

注型絶緣物에서는 미소한 보이드나 크랙이 건전성에 영향을 주기 때문에 국부적인 결함의 검출에 적합한 部分放電 特性으로 체크되고 있다.

예를 들면 計器用 變壓器에 있어서는 최고 전압

〈표 1.20〉 超超高壓用 架橋폴리에틸렌의 異物, 보이드의 許容例

項目		通用電壓		
		154kV	275kV	500kV
보이드	[ $\mu\text{m}$ ]	50	30	약 20
半導電性突起	[ $\mu\text{m}$ ]	250	250	약 80
異物 [ $\mu\text{m}$ ]	언버(unber)	250	250	
	메탈프러그	100	100	

의 1.05배에 상당하는 전압을 10초간 加한 후 이것을 서서히 내려서 최고 전압의  $1.05/\sqrt{3}$  배에 상당하는 전압에서 1분간 이상 유지시켰을 경우의 電荷가 100pC를 초과해서는 안되도록 하고 있다.

SF<sub>6</sub>가스는 가스에 混入된 異物 및 불순물에 의하여 절연성능이 저하되는 경우가 있다. 공기나 기타 기체는 10%를 초과하는 量이 아니면 문제가 되지 않으나 가스絶緣機器의 整備基準에서는 純度の 관리치를 97%, 허용치를 95%로 하고 있다.

SF<sub>6</sub>가스중의 水分은 절연성능에는 직접 영향을 주지 않지만 물방울이 되어 스페이서 등에 부착하면 絶緣耐力이 저하되는 경우가 있다. 이것이 얼음으로 되었을 경우는 거의 영향을 받지 않기에 露點이 0°C 이하가 되도록 管理値가 정해져 있다.

조립이나 수송중에 발생, 混入된 導電性 異物은 절연성능을 크게 저하시키는 일이 있으므로 混入防止를 위하여 각별한 주의가 요구되고 있다. 또한 도전성 이물질로부터의 部分放電이나 微小振動을 측정하여 혼입의 유무를 체크하고 있다.

架橋폴리에틸렌에서는 素材인 폴리에틸렌의 物理化學性(引張強度, 伸張, 熱老化 특성 등)이나 電氣特性(유전율,  $\tan\delta$ , 절연과괴 강도 등) 이외에 異物에 대한 검사가 행하여지고 있다.

다시 말하면 架橋폴리에틸렌 케이블에서는 部分放電試驗의 보충적인 시험으로써 케이블에서 取집어 낸 절연체중의 보이드異物質이 목표규정치 이하일 것을 검사하고 있다. 154~500kV급의 케이블에 사용되는 架橋폴리에틸렌에서는 표 1.20 과 같은 엄격한 기준에서 검사되고 있다.

☞ 다음 호에 계속

〈표 1.18〉 油浸絶緣物の  $\tan\delta$  許容値의 例

種 類	溫 度	$\tan\theta$ [%]	標準規格
鉛被 OF케이블	常 溫	0.4	JIS C 3607(1978)
알루미늄被 OF케이블	常 溫	0.4	JIS C 3613(1981)
低壓進相 콘덴서	常溫 및 75°C	0.6	JIS C 4901(1974)
高壓 및 特別高壓進相콘덴서	常 溫	0.35	
	80°C	0.40	JIS C 4902(1977)

【註】 케이블 및 콘덴서에 대한 허용치를 나타냄.

〈표 1.19〉 絶緣油의 油中水分, 가스分 管理値의 例

測定 期日	對象變壓器	絶緣破壊電壓 [kV/2.5mm]	油中水分量 [ppm]	油中全가스量 [%]
現地受入時	500kV급	> 40	< 30	-
	275kV급 이하	> 40	-	-
現地組立時	500kV급	> 50	< 15	-
	275kV급 이하	> 40	-	-
組立完了時	500kV급	> 60	< 10	0.5
	275kV급	> 50	< 15	1.0
	154kV급	> 50	< 20	2.0

【註】 變壓器의 現地作業, 受入, 組立完了時인 경우를 나타냄.