

電氣設備의 診斷技術

⑥

3.2 劣化診斷파라미터

3.2.1 劣化와 診斷파라미터

재료에 각종 스트레스가 가해지면 電氣的 性質이나 機械的 性質 등이 변한다. 이 변화가 有害한 방향이라면 劣化가 된다. 이러한 劣化를 어떠한 방법으로 검출할까 하는 것이 劣化診斷이다. 그러나 電力用機器는 裝置自體가 복잡하므로 동일한 특성변화를 일으키는 원인이 반드시 한가지에만 국한되는 것은 아니다. 때로는 아주 다른 원인이 겹보기로는 똑같은 변화를 일으키는 것이 있다. 예를 들면 XLPE케이블의 절연진단에 이용되는 직류누설전류는 케이블本體의 절연체 열화로서 증가되나 이것과는 관계가 없는 端末部의 汚損에 의해서도 똑같이 증가한다. 한편, 재료의 열화에는 熱스트레스劣化, 電壓스트레스劣化, 機械스트레스劣化, 環境스트레스劣化 및 複合스트레스劣化 등 많은 모드가 있다.

이와 같이 電力用機器 그 자체가 복잡하고 다수의 異質의인 材料, 構成部品을 사용한다든가 이에 따르는 劣化의 종류(모드)가 많으므로 劣化現象과 診斷파라미터에 의해서 검출되는 特性變化的 因果關係는 반드시 명확히 되어 있는 것만은 아니다. 이 때문에 電力用機器의 劣化診斷에는 한가지의 진단파라미터만으로 진단하는 것이 아니고 몇개의 파라미터를 조합해서 劣化診斷을 실시한다.

진단파라미터는 대략 분류하면 2가지 종류, 즉 재료의 변화를 직접검출하는 방법과 재료가 變質, 變形된 것에 의한 幾何形狀의 변화 등 2차적인 변화를 검출하는 간접적인 방법이 있다.

직접적인 방법으로서 直流特性, 交流特性, 發生가스검출 등이 있고, 간접적인 방법으로는 部分放電特性, 超音波(AE 포함) 및 電磁波(X선 포함) 등이 있다.

各 劣化모드와 진단파라미터의 개략적인 因果關係는 그림 3.15 와 같다. 熱스트레스劣化는 주로 재료의 변질을 초래하며 그 결과 抵抗率의 變化(直流特性), 誘電正接($\tan\delta$)의 變化(交流特性) 및 炭化水素가스의 發生(分解가스) 등이 생긴다. 電壓스트레스劣化, 環境스트레스劣化, 複合스트레스劣化는 거의 모든 파라미터에 변화를 일으키며 각각 機器特有의 劣化檢出파라미터가 있다. 機械스트레스劣化는 電極의 變形, 절연체의 크랙, 剝離의 生成 등 幾何形狀의 변화를 일으키기 때문에 部分放電特性, 超音波 및 X線 등이 유효한 劣化檢出手段이 되고 있다. 다음에 이들 劣化檢出파라미터에 대한 특징을 기술한다.

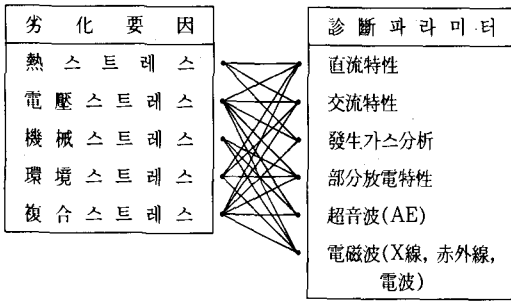
3.2.2 직류특성

직류특성은 절연재료의 열화(예를 들면, 재료의 흡습이나 熱열화에 의한 分解生成物의 축적)를 導電性의 증가에 의해서 검출하도록 한 것이다. 즉 測定對象機器에 直流高電壓 V 를 인가하고 이때에 흐르는 전류 I 를 진단파라미터로 하는 방법이다.

이 導電性의 변화에 의한 經年劣化의 檢出原理는 다음과 같은 옴(Ohm)法則에 따른다.

$$I = \frac{I}{R} V \quad (3.9)$$

여기서 I , V , R 은 각각 전류, 전압, 전기저항이



<그림 3.15> 劣化모드와 診斷모드

다. 이 음法則을 單位面積, 單位길이에 해당하는 식으로 다시 쓰면 다음식과 같이 된다.

$$J = \sigma E \quad (3.10)$$

여기서 J , σ , E 는 각각 전류밀도, 도전률(=저항률의 逆數), 전기장도이다. 이 식 중에서 導電率 σ 는 다음식과 같이 다시 고쳐 쓸 수 있다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^n q_i \cdot n_i \cdot \mu_i \quad (3.11)$$

여기서 q_i , n_i , μ_i , n 은 각각 절연체중의 i 번째 종류의 電荷擔體(캐리어라고도 한다)의 電荷(이온이나 電子 등), 濃度, 移動度, 여기에 電荷擔體의 종류수이다. 식 (3.10)중의 σ 를 식 (3.11)로 바꾸면 식 (3.12)와 같이 된다.

$$J = \left(\sum_{i=1}^n q_i \cdot n_i \cdot \mu_i \right) E \quad (3.12)$$

이 식이 Ohm法則의 材料學的인 해석이다. 經年劣化(吸濕이나 熱分解)에 의해서 재료중의 이온數가 증가하여 식 (3.10)중의 n_i 가 증가한다든지 또는 캐리어종류의 數가 증가하고 결과적으로 σ 가 증가하여 전류밀도 J 가 증가되므로 劣化를 검출할 수 있다.

이 특성을 劣化診斷에 이용하고 있는 것이 XLPE케이블의 직류누설 전류법, 발전기권선법의 PI법, 전동기의 권선절연에 대한 CR법 및 어레스터의 吸濕劣化檢出 등이 있다. 한편 메가시험 등의 簡易絶緣抵抗試驗도 빈번히 행하여지고 있으나 이 시험은 재료의 劣化라고 말하기보다는 結線間의 相異, 接觸不良, 絶緣被覆에 대한 破損 등의 檢출을 主體로 하는 것으로서 缺陷檢出에 有効하다.

3.2.3 교류특성

交流特性은 材料의 劣化를 誘電特性的 변화에 의해서 檢출하도록 한 것으로서 對象機器에 교류 전압 V 를 印加해서 靜電容量이나 誘電正接을 측정하고 이것을 診斷파라미터로 하는 방법이다.

이 방법에 의한 經年劣化의 檢出原理는 다음식에 의한다.

$$I = j\omega CV \quad (3.13)$$

여기서 I , V , C , j 는 각각 전류, 전압, 정전용량, 단위虛數이다. 또한 ω 는 角周波數로서 印加電壓의 주파수를 f 라고 하면 $\omega = 2\pi f$ 가 된다. 식 (3.13)을 단위면적, 단위길이당의 식 즉, 재료학적인 식으로 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$J = j\omega \epsilon E \quad (3.14)$$

여기에서 J , ϵ , E 는 複素數이고 각기 전류밀도, 複素誘電率, 전기장도이다.

이 式中の ϵ 는 다음 식과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.15)$$

여기서 ϵ' , ϵ'' 는 實數로서 각각 誘電率, 誘電損失率이다. 또한 ϵ'' 와 ϵ' 의 比를 誘電正接($\tan \delta$)라고 부르며 $\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$ 의 관계가 있다.

그런데 ϵ 는 다음식과 같이 몇개의 成分이 重合으로 되어 있다.

$$\epsilon = \epsilon_c + \epsilon_x + \epsilon_d + \epsilon_i \quad (3.16)$$

여기서 ϵ_c , ϵ_x , ϵ_d , ϵ_i 는 각각 電氣傳導에 의한 誘電率, 캐리어의 電氣變位에 의한 誘電率, 永久雙極子에 의한 유전율, 界面電荷의 축적에 의한 유전율이다.

이들의 誘電率에 대한 劣化와의 개략적인 관계는 다음과 같다. 식 (3.16)의 제 1항에서 電氣傳導에 의한 誘電率은 $\epsilon_c = -j \cdot \sigma / \omega$ 이 되고 σ 는 식 (3.11)과 똑같이 劣化에 의해서 σ 가 증가하면 E 와 同相分의 J 가 증가하여 $\tan \delta$ 의 증가로 나타난다. ϵ_x 는 電子나 原子에 의한 誘電率로서 劣化에 의한 변화는 거의 없다.

또한 재료가 흡습한다든지 酸化劣化하면 이에 따라서 재료중에 永久雙極子が 증가하기 때문에 결과적으로 ϵ_d 가 커져서 靜電容量이 증가한다. ϵ_i

는 異種材料의 界面狀態로서 결정되므로 劣化와의 직접적인 관계는 명확하지 않고 界面을 구성하는 각기 재료의 ϵ/σ 비에 의해서 증가하거나 감소하기도 한다.

교류특성은 발전기권선, 전동기의 권선절연에 있어서 정전용량이나 $\tan \delta$ 에 의한 劣化診斷, XLPE케이블의 $\tan \delta$ 에 의한 劣化診斷 등에 널리 이용되고 있다.

3.2.4 部分放電 特性

부분방전특성은 가장 중요한 劣化診斷과라미터의 하나로서 대부분 高電壓機器의 劣化診斷에 이용되며 部分放電劣化에 관한 文獻도 많다. 部分放電이 발생하는 것은 가스절연체중의 局所的인 電界集中, 油浸絶緣中の 局所加熱에 의한 氣泡의 발생, 기계스트레스劣化에 의한 固體絶緣體中の 크랙이나 剝離의 生成 등이 主要因이 되고 있다.

또한 部分放電自體는 3.1.3항에서 설명한 바와 같이 高分子絶緣體에 대해서는 劣化를 일으키는 要因이 된다. 결국 부분방전은 그 자체가 劣化要因이 됨과 더불어 몇가지의 劣化要因에 의해서 절연체중에 발생된 局所缺陷의 검출에 유효한 信號源도 존재하게 된다.

고체절연체중 空隙(보이드)에서의 부분방전신호의 檢出原理는 그림 3.16 와 같이 等價回路로서 설명된다. 보이드내부에 부분방전이 발생하면 이 보이드에는 放電前에 印加되어 있는 電壓 v_s 가 제로가 되고 그 전압변화가 절연체의 외부로 전해져 ΔV 의 電壓變化로서 검출된다. 통상 $C_a \gg C_b$ 가 성립되므로

$$\Delta V = \frac{C_b}{C_a + C_b} \cdot v_s = \frac{C_b}{C_a} \cdot v_s \quad (3.17)$$

가 된다. 또한 부분방전에 의해서 보이드를 橫切하는 眞의 放電電荷 q_r 은

$$q_r = (C_a + \frac{C_a \cdot C_b}{C_a + C_b}) \cdot v_s \quad (3.18)$$

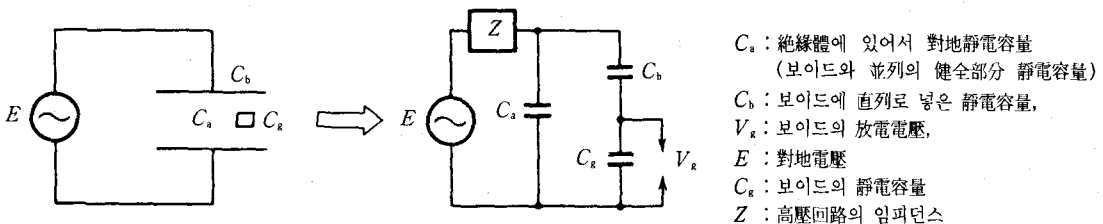
이 되나 C_a 와 C_b 의 측정은 곤란한 것이 많고 q_r 은 알 수 없다. 그러나 ΔV 와 C_a 는 측정할 수 있으므로 絶보기의 放電電荷 q_a 는 측정할 수 있다.

$$q_a = C_a \cdot \Delta V \approx C_b \cdot v_s \quad (3.19)$$

부분방전특성에 의해서 열화진단으로 측정되는 것은 q_a 이다.

측정시간내에 발생된 部分放電 q_a 중에서 최대의 것을 最大放電電荷 q_{max} 라고 하며 劣化診斷에 있어서 가장 중요한 파라미터가 된다. 왜냐하면 q_{max} 를 알면 想定되는 보이드缺陷의 존재를 경험적으로 알 수 있기 때문이다. 대부분의 高電壓機器에 있어서 部分放電試驗은 q_{max} 의 크기나 發生頻度를 판정기준으로 하고 있다. 보이드결함의 존재는 q_{max} 에서 거의 판정할 수 있으나 보이드결함의 성질에 대해서는 q_a 와 보이드缺陷의 관련성을 재차 검토하지 않으면 안된다.

交流電壓印加時에 발생하는 部分放電으로 측정할 수 있는 것은 q_a 의 크기와 그의 發生位相角 ϕ 인데 이것을 조합하는데 따라서 각종 정보를 얻을 수 있다. 예를 들면 직경과 반경을 여러 가지로 변경시켜서 偏平한 보이드로부터 針狀보이드까지 모의실험함으로써 보이드形狀에 의하여 ϕ 와 q_a 의 크기의 관계가 변화한다는 것이 판명되었다. 즉 ϕ 에 대한 평균적인 q_a 의 크기를 측정하고 그림 3.17에 나타난 分布(이것을 ϕ -분포라고 부른다)

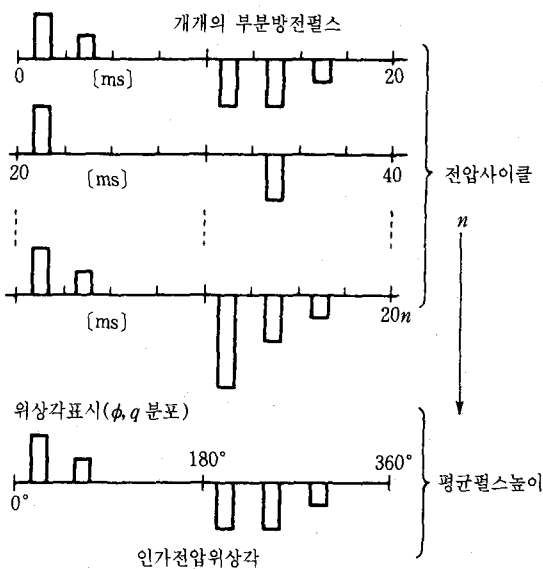


<그림 3.16> 결함(보이드)이 있는 절연물의 등가회로

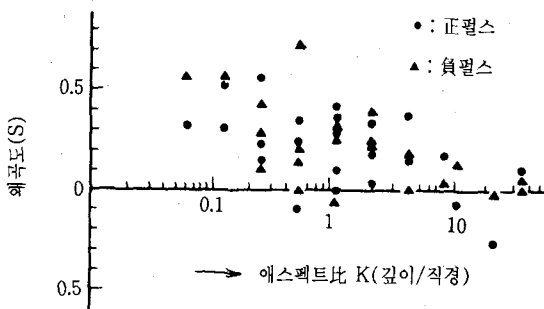
를 측정해서 식 (3.20)과 같이 그 分布의 平均値에 가까운 3차 모멘트를 그 분포의 평균치 주위의 標準偏差 3승으로 나눈 값(이것을 分布歪曲度 S 라고 한다)을 산출한다.

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \cdot q_i(\phi)}{\sum_{i=1}^n q_i(\phi)} \\ \sigma_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - m)^2 \cdot q_i(\phi)}{\sum_{i=1}^n q_i(\phi)} \\ S &= \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - m)^3 \cdot q_i(\phi)}{\{\sigma_2^3 \cdot \sum_{i=1}^n q_i(\phi)\}} \end{aligned} \right\} (3.20)$$

여기서 n 은 全位相角(360°)의 分割數이다. 이



<그림 3.17> 部分對電펄스列로부터 ϕ - q 분포를 도출하는 과정



<그림 3.18> 원통형보이드의 에스펙트(Aspect) 비 (깊이/직경)와 歪曲도의 관계

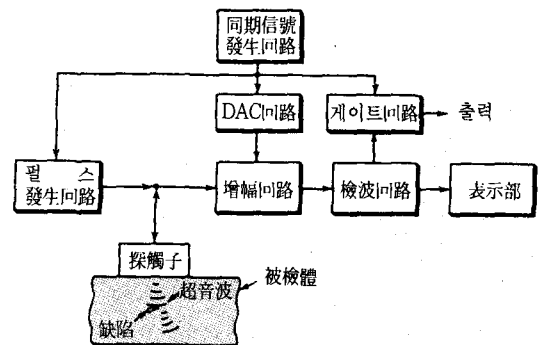
S가 원통형 보이드의 에스펙트(Aspect)비 $K(K = \text{보이드 깊이}/\text{보이드 직경})$ 와 그림 3.18에 나타난 바와 같은 관계가 있으며 細長보이드가 되면 S가 적어진다. 또한 전기트리와 같이 매우 가늘고 긴 보이드에서는 S가 더욱 적어진다. 이와 같이 보이드 형상을 어느 정도 추정할 수 있기 때문에 部分放電特性은 缺陷檢出의 有効한 信號源으로 볼 수 있다.

3.2.5 기타의 特性

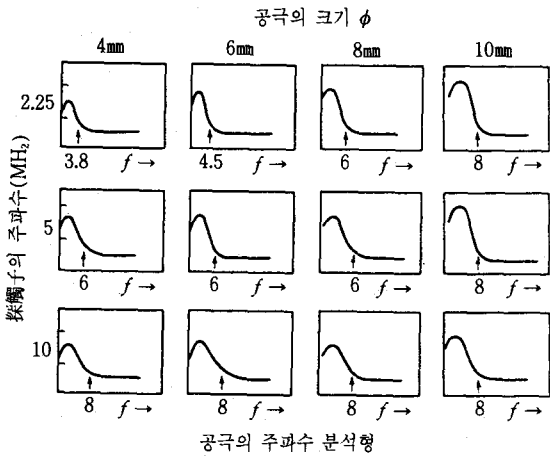
전항까지에서 설명한 直流特性, 交流特性, 部分放電特性은 필요로 하는 진단파라미터를 전기신호로서 검출하였으나 電氣信號로서 검출되지 않는 많은 診斷파라미터가 있다. 이 중에서 超音波, X線, 赤外線 등에 의한 2차적인 변화(구조결함 등)를 검출하는 방법에 대해서는 다음에 순차적으로 설명한다.

超音波法은 對象機器와 物理的인 접촉을 할 수 있다면 原理적으로는 거의 모든 材質의 機器에도 적용할 수 있다. 그림 3.19에 信號檢出의 原理圖를 나타내었다. 探觸子에 電氣信號를 보내고 超音波를 펄스의으로 발생시켜 被檢體에 초음파를 보낸 후 被檢體中の 缺陷部로부터 반사되어 오는 초음파를 검출한다.

그림 3.20은 각종 보이드缺陷으로 얻은 超音波信號強度의 周波數依存性(超音波스펙틀)을 나타낸



<그림 3.19> 超音波探傷裝置의 블록도



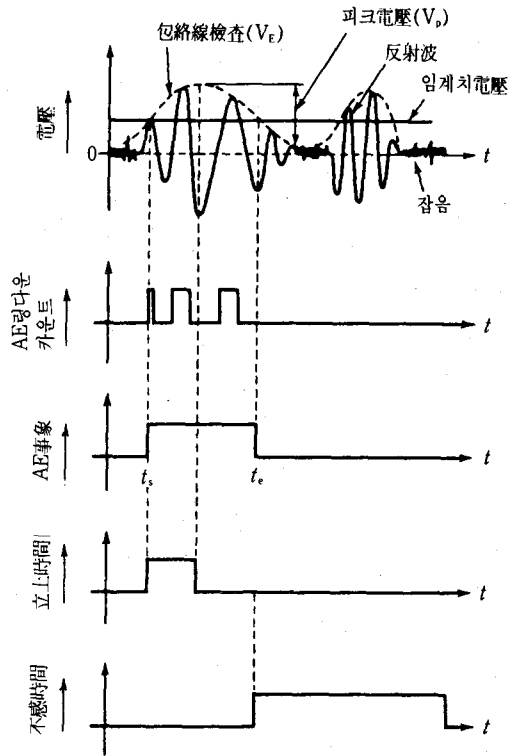
<그림 3.20> 空腔과 스펙터分析圖

다. 이 스펙틀로부터 어느 정도 缺陷의 性質을 알 수 있다.

超音波法과 비슷하나 原理적으로 다른 缺陷檢出法인 AE法(Acoustic Emission : 음향방출)이 있다.

초음파법은 피검체에 초음파를 보내어 그 반사파를 이용하는 것이었으나 이 방법은 재료에 기계적인 스트레스를 加하였을 때에 몇 개의 缺陷部를 起點으로 하여 크랙이 성장할 때에 발생하는 衝擊派를 檢출하는 방법으로서 構造缺陷의 檢출이라는 것보다도 材料劣化의 進行狀態檢出을 목적으로 하는 것이다.

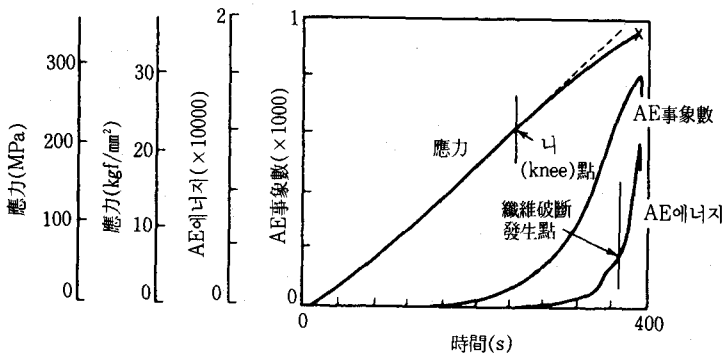
그림 3.21에 檢出信號波形과 그 波形處理過程을 나타내었다. 이 방법으로 檢출된 GFRP적층판의 파괴진행에 따르는 AE信號發生狀況을 그림 3.22에 나타내었다. 이 AE法을 사용하면 破壞豫知의



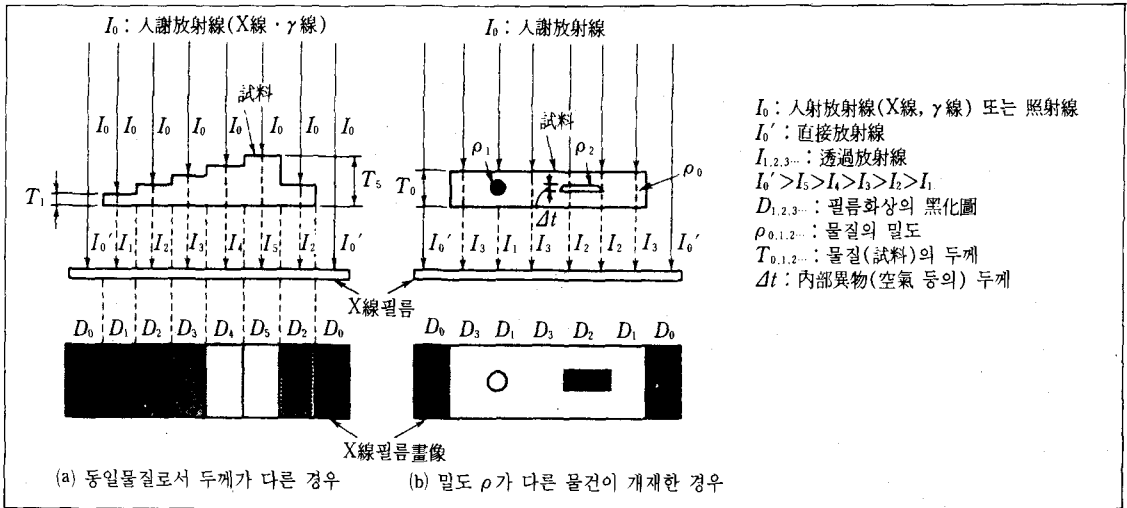
<그림 3.21> AE파형 처리방식

가능성도 있다.

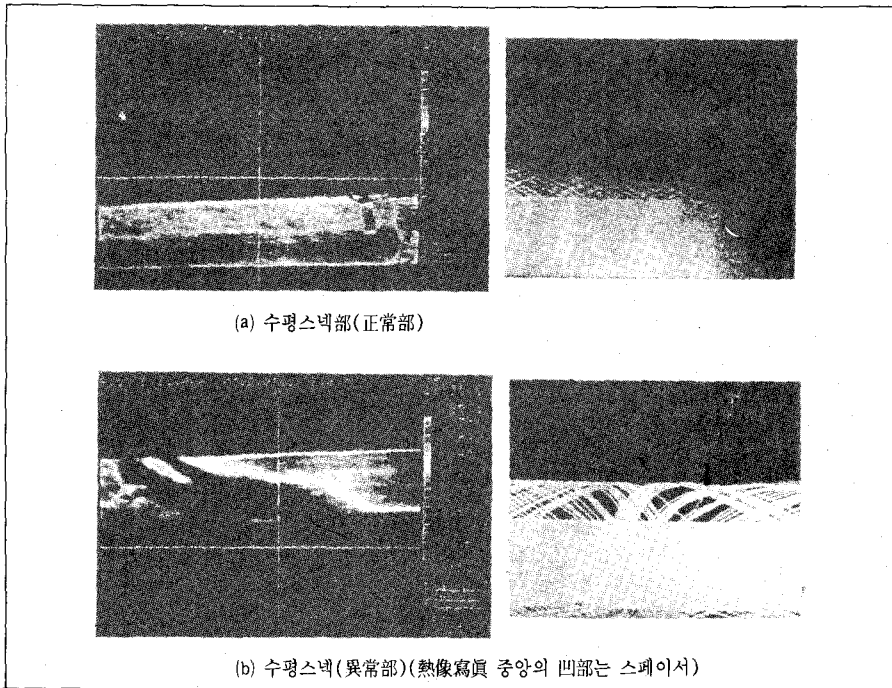
非破壞檢査의 대표적인 존재인 X線接視檢査法의 原理는 그림 3.23과 같이 材料의 X線에 대한 透過線 強度가 다른 것을 이용하고 있다. 同質의 材料에서는 두께가 다른 것을 檢출할 수 있는데 동일한 두께일지라도 透過率이 다르다면 구별할 수 있다. 이 방법은 각각 다수의 電力機器를 설치한 직후의 檢査 등에 널리 이용되고 있다.



<그림 3.22> GFRP적층판의 시간-응력, 이벤트, 에너지 곡선 에



<그림 3.23> X線檢査의 原理圖



<그림 3.24> 模擬 CV케이블의 熱像에 의한 異常檢出과 X線透視圖

非接觸으로 간단하게 異常檢出할 수 있는 방법에는 赤外線을 이용한 熱像法이 있다. 이 방법은 적외선에 의한 TV畫像을 관찰하는 방법으로서 어떠한 異常(發熱, 接觸不良 등)이 있으면 異常이 없는 경우의 表面溫度分布로부터 변화하는 것을 이용하는 것이다.

그림 3.24는 이러한 방법으로 검출된 模擬 KLPE케이블에 있어서 와이어실드의 異常과 이때의 X線透視圖를 나타낸다. 熱像法은 X線透視法에 비교하면 매우 간편하므로 常時監視시스템을 구축할 때에 유효한 수단이 된다.

☞ 다음 호에 계속