

赤外線撮像法の 電氣工學에의 應用

宋 鎮 洙*

目 次

- 1. 序 論
- 2. 赤外線撮像法の 基本原理
- 3. 시스템의 構成
 - 3.1 scanner
 - 3.2 display unit
 - 3.3 color monitor
 - 3.4 polaroid camera 와 video recorder
- 4. 測定 및 分析方法
 - 4.1 測定方法
 - 4.2 結果의 分析
 - 4.3 應用例
- 5. 結 論
- 參考文獻

1. 序 論

赤外線撮像法(Infra-Red Thermography)은, 絶對零度 이상의 溫度를 가진 被測物의 表面에서 放出되는 電磁波중 赤外線을 檢出, 映像化함으로서 表面溫度的 分布를 定性的, 定量的으로 測定하는 技法이다. 最近, 이러한 技術은 모든 工學分野의 熱的 問題點을 改善하기 위한 研究에 廣範圍하게 活用되고 있으며, 代表的인 應用分野로서는^[1] 工業窯炉, 보일러 등 熱機器 및 建物에서의 에너지節約對策, 陸地, 海上에서의 熱公害檢出, 品質改善을 위한 熱工程改善, 排氣熱에 의한 空氣기 추적, 惡性腫瘍등의 醫療診斷등을 들 수 있다.

本稿에서는, 現在 動力資源研究所 材料研究室에서 研究課題 遂行에 活用中인 赤外線撮像法の 技術과 經驗을 토대로 基本原理, 시스템의 構成, 測定 및 分析方法을 소개함으로서 향후 電氣工學 分野에서의 제반 熱的 問題點의 改善 研究에 도움이 되고자 한다.

2. 赤外線撮像法の 基本原理^{[2] [3]}

自然界의 모든 물체는 絶對溫度 0°K 이상에서는 그

* 正會員 : 韓國動力資源研究所 材料研究室長

물체의 溫度와 放射率에 對應하는 電磁波를 表面으로부터 放射한다. 溫度 T °K의 黑體로부터 放射되는 電磁에너지의 세기는 Planck의 法則에 따라

$$W_{\lambda}(\lambda \cdot T) d\lambda = C_1 \cdot \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} d\lambda \quad (1)$$

W_{λ} : 放射된 赤外線의 強度 ($W \cdot cm^{-2} \cdot \mu^{-1}$)

C_1, C_2 : 定數

λ : 波長, T : 物體表面의 溫度分布 (°K)

로 表示되며, 全 波長에서 放射된 에너지는 (1)式을 $\lambda = 0$ 에서 $\lambda = \infty$ 까지 積分하여 얻어지며 Stefan-Boltzmann 式이라 한다.

$$W(T) = \int_0^{\infty} W_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2)$$

σ : Stefan-Boltzmann 定數

$$= 5.7 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot ^\circ K^4$$

한편 일반적인 물질에 대해서는 (2)式을 放射率 (ϵ : emissivity)로서 補正하여

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있으며, 黑體 放射에너지중 最大強度를 가진 波長은 Wine의 法則에 따라

$$\lambda_m = 2898/T [\mu m] \quad (4)$$

이다. 따라서 (1)式으로부터 100°K~1000°K 범위

에서 黑體의 電磁에너지와 波長의 關係를 나타내면 그림 1 과 같으며, 그림에서의 점선은 (4)式的 λ_m 을 의미한다.

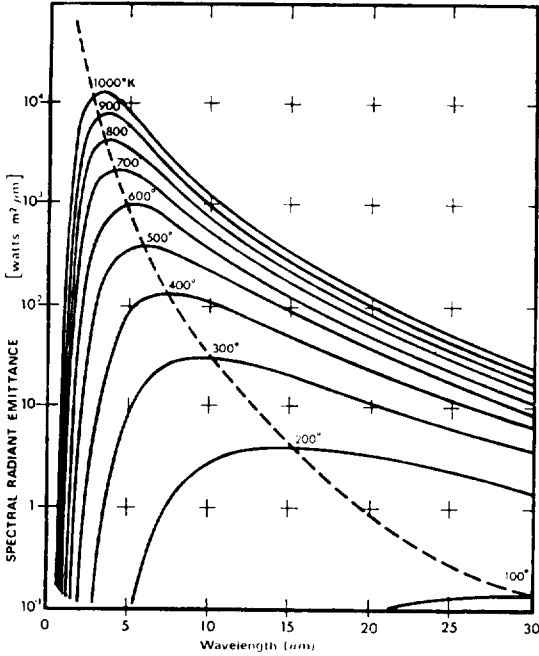


그림 1. 波長에 따른 黑體의 電磁에너지 變化

이러한 基本原理를 이용하여 물체에서 放射되는 赤外線을 檢出하고, 그 強度로서 물체 表面의 溫度를 測定할 수 있으며, 赤外線을 檢出하는 素子를 赤外線檢出器 (infra-red detector) 라고 한다.

赤外線 檢出器^[4,5]는 mechanism에 따라 熱形(the thermal detectors)과 光子形(photon detectors)으로 區分되며, 熱形의 경우 赤外線의 熱에너지를 吸收한 結晶內에 自發分極作用이 發生함으로써 溫度變化에 比例하여 表面에 電荷가 誘起되므로 感度의 peak值

$$R_{pk} = \frac{\eta A_d}{GC} \left(\frac{dP_s}{dT} \right) \quad (5)$$

P_s : 自發分極, T : 素子の 溫度

η : 熱의 吸收係數, A_d : 素子の 面積

G : 熱傳導率, C : 素子の 電氣容量

을 가진다. 한편 光子形은 素子 材料의 赤外線 吸收機構에 따라 價電子帶의 電子가 赤外線에너지에 의해 傳導帶로 遷移될 수 있는 energy gap(E_g)의 限界를 가지며 이 E_g 에 相當하는 波長을 遮斷波長 λ_c (cut-off wave length)라고 하고,

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} [\mu m] \quad (6)$$

로 나타낸다.

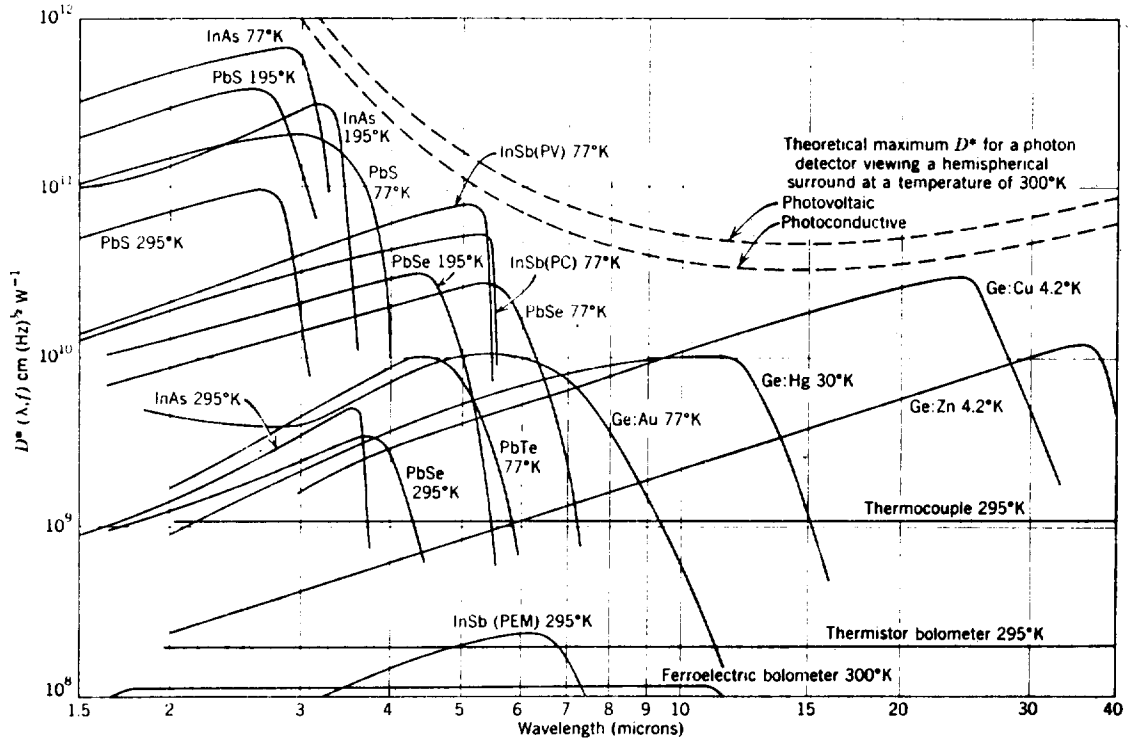


그림 2. 赤外線 檢出器의 波長特性和 性能

그림 2는 現在 사용되고 있는 赤外線 檢出器의 波長 特性과 性能을 나타낸 것이다. 여기에서 $D^* \lambda_p$ 는 檢出器의 面積과 band 幅을 基準化한 檢出器의 性能을 의미하며, 絶對溫度의 表記는 最適 檢出狀態를 위한 材料別 使用溫度를 의미한다.

3. 시스템의 構成

赤外線撮像裝置는 크게 나누어 scanner, display unit, color monitor, polaroid camera 및 video recorder 등으로 構成되어 있으며 시스템의 개략적인 構成圖는 그림 3과 같다. 各 部門別 特性은 현재 動力資源研究所 材料研究室에서 保有하고 있는 Sweden의 AGA社 製品인 Thermovision #782를 중심으로 說明코자 한다.

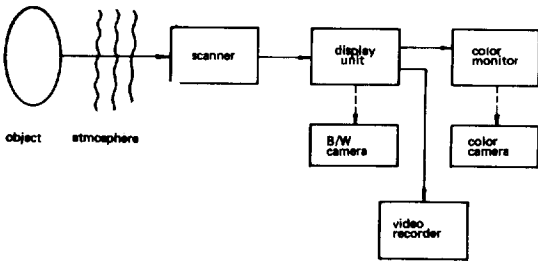


그림 3. 赤外線 撮像裝置의 構成

3.1 scanner

scanner는 被測物(object)에서 放射되는 赤外線을 效率의으로 集光하기 위한 렌즈와 光學的 走査機構, 赤外線 檢出器 및 最適 使用溫度를 유지하기 위한 dewar 등으로 構成되어 있다. 렌즈는 거리에 따라 4종류($7^\circ \times 7^\circ$, $12^\circ \times 12^\circ$, $20^\circ \times 20^\circ$, $40^\circ \times 40^\circ$)中에서 選擇하고, 被測物의 豫見되는 溫度分布로서 aperture를 調整하며 高溫일 경우에는 특수 filter를 사용하여 測定한다.

scanner 內의 赤外線檢出器는, Thermovision[®]의 경우 光子形인 InSb(Indium Antimonide) sensor를 採擇하고 있어 2~5.6 μm 波長領域의 赤외선을 檢出하여 電氣的인 信號로 變換하며, 使用溫度를 77°K로 유지하기 위하여 液體窒素로서 冷却시킨다.

3.2 display unit

display unit는 scanner로 부터의 電氣信號를 映像化하고, 映像의 畫面狀態 및 測定條件을 調整하는 部門이다. 即 赤外線映像에서의 等溫部位를 檢出할 수 있는 두개의 isotherm level 被測物의 測定溫度範圍 및

temperature deviation을 결정하는 thermal range와 thermal level로 構成되어 있다. 또한 畫面의 종류에 따라 normal, inverted, black, gray scale을 選擇할 수 있는 picture mode와 畫面狀態를 調整할 수 있는 brightness, contrast knob가 부착되어 있다.

3.3 color monitor

display unit上的 赤外線 映像은 被測物의 溫度分布에 따라 黑白으로 나타나므로 表面溫度의 微細한 分布는 識別하기 困難하다. color monitor는 이러한 缺點을 補完하기 위하여 連續的인 黑白映像을 同時에 10가지 色으로 變換시킴으로서 溫度分布의 識別이 容易할 뿐만 아니라 各 色度의 溫度範圍를 算出하여 被測物의 表面溫度를 定量的으로 分析할 수 있는 裝置이다.

3.4 polaroid camera 와 video recorder

polaroid camera는 display unit 또는 color monitor에 나타난 連續的인 赤外線 映像을, 畫面狀態의 調整 또는 表面溫度, 放射率, 放熱量등 測定結果의 分析을 위해 黑白 및 color의 순간적인 映像으로 撮影할 수 있는 사진기이며, video recorder는 連續的인 溫度分布를 錄畫하기 위한 裝置이다.

이외에도 isotherm level 사용시 level이 지시하는 部位의 溫度를 精密하게 나타낼 수 있는 reference로서의 黑體發熱體와, 定電壓 電源裝置, 溫度 測定裝置 등의 부속장치가 있으며 測定結果를 신속하게 分析할 수 있는 computer 裝置도 最近 市販되고 있다.

4. 測定 및 分析方法

4.1 測定方法

赤外線 映像을 얻기 위한 實驗은, 被測物의 種類, 크기 또는 應用分野에 따라 設置方法 및 準備物이 조금씩 달라지나 일반적으로 赤外線 撮像裝置 이외에 溫度計, 表面溫度計, 風速計, 濕度計, reference, 各種 film, 熱流計, 液體窒素 및 용기등의 부수 장비가 必要하다. 또한 lens cleaner, 工具類와 必要에 따라 transceiver를 準備해야 하며 實驗이전에 各 裝置의 結線과 power line을 確認해야 한다.

測定方法은 우선 被測物의 크기와 거리에 따라 렌즈를 選擇하고 最適 映像을 얻기 위해 display unit上에 나타나는 畫面을 調整한다. 또한 被測物의 溫度範圍에 따라 thermal range와 thermal level을 調整後 固定시킨다. 이러한 調整은 모든 測定이 同一條件에서 이루어질 수 있도록 고려되어야 하며, 특히 被測物

이 畫面的 크기를 초과할 경우에는 mosaic에 의한 反復測定을 해야하고 異常部位에 대해서는 必要에 따라 近接攝影을 해야 하므로 유의해야 한다.

赤外線 映像은 일반적으로 isotherm level을 주지 않은 狀態, level #1 狀態, level #2 狀態등 새가지로 분류하여 黑白 및 color 映像을 同時에 撮影하며 測定結果 分析時 赤外線 映像과 對比하기 위해 被測物의 實體를 일반 카메라로서 同一 位置에서 撮影한다. 여기서 isotherm level을 주지 않은 映像은 被測物의 溫度分布를 定性的으로 分析하기 위한 資料이며, level #1 狀態는 溫度의 精密 調整이 可能하고 放射率을 알고 있는 黑體發熱體를 reference로 하여 赤外線 映像에서 reference와 동일한 溫度部位를 檢出하기 위한 資料이다. 또 level #2는 異常部位 또는 測定對象部位의 溫度分布를 알기 위해 level #1과는 다른 溫度에서의 等溫部位를 檢出하며 이때 level #2部位의 溫度는 精密 表面溫度計로서 測定하고 동시에 風速, 濕度, 大氣狀態(H₂O, CO₂, 먼지등 赤外線의 吸收要因) 및 太陽光의 遮蔽狀態등과 제한 實驗條件을 測定, 記錄한다.

4.2 結果의 分析

이러한 赤外線映像으로 부터 被測物의 定量的 溫度分布 및 放熱量을 算出하기 위하여,

- T₀ : 被測物의 表面溫度
- ε₀ : " 放射率
- T_r : reference의 表面溫度
- ε_r : " 放射率
- T_a : 測定時의 周邊溫度
- Δi_{or} : isotherm level의 差(i₀-i_r)
- τ : 補正係數

라고 하면

$$I_o = \frac{\Delta i_{or}}{\tau \epsilon_o} + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o} I_r + (1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o}) I_a \quad (7)$$

의 式이 成立한다. 이때 I_o는 溫度를 算出하기 위한 absolute isotherm level이며,

$$I = \frac{P}{e \frac{q}{T} - 1} \quad (8)$$

- T : 絕對溫度
- P·q : aperture constants

$$\tau = e^{-\alpha(\sqrt{d_o} - 1)} \quad (9)$$

- α : 減衰常數(=0.046)
- d_o : 被測物까지의 거리

이므로 I_r과 I_a는, T_r과 T_a 및 data card에 의한 P

·q로서 計算될 수 있고, τ는 (9)式에 의해 計算될 수 있으므로 구해진 I_r, I_a, τ 및 赤外線映像에서의 Δi_{or}과 ε_r의 값을 代入함으로써 I_o를 算出할 수 있다. 따라서 測定하고자 하는 溫度 T₀는 I_o의 값을 다시 (8)式에 代入하여 구할 수 있다. 또한 i_r과 color monitor에서의 各 色度가 位置한 isotherm level의 差를 Δi_{or}로 하여 色度別 溫度範圍를 구할 수 있으므로 color monitor上에 나타난 赤外線映像으로 부터 被測物의 전체적인 溫度分布를 算出할 수 있다.

한편 各 部位에서의 放熱量은, convection에 의한 放熱量의 경우,

$$Q_c = 1.94(T_o - T_a) (5/4) \sqrt{\frac{v+0.35}{0.35}} [W/m^2] \quad (10)$$

v : 風速
radiation에 의한 放熱量의 경우

$$Q_r = 5.67 \times \epsilon_o \times [(\frac{T_o}{100})^4 - (\frac{T_a}{100})^4] [W/m^2] \quad (11)$$

의 式으로 부터 算出된다.

4.3 應用例

赤外線 撮像法을 電氣工學 分野에 應用한 例로서, 放熱板上에 부착된 太陽電池의 表面溫度 分布를 前項에서 記述된 方法으로 測定, 分析하였다. 使用된 太陽電池는 그림4와 같은 直徑 5.7cm의 單結晶 실리콘 太陽電池이며 太陽光下에서의 最大電流時 7°×7°(測定 可能한 最大크기: 10cm×10cm) 렌즈로서 aperture: 1.8, 測定距離: 1m, thermal range: 5.0, 風速: 0.3m/sec, 周邊溫度: 27°C의 條件에서 測定되었다.

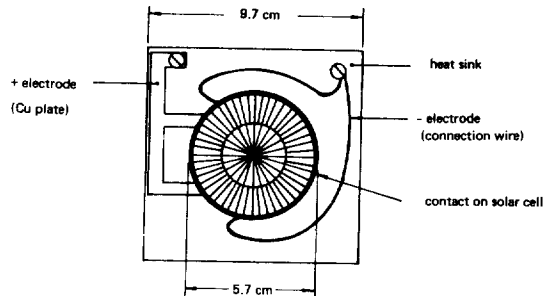
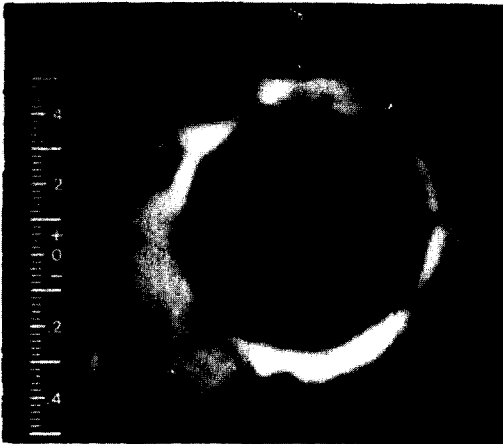
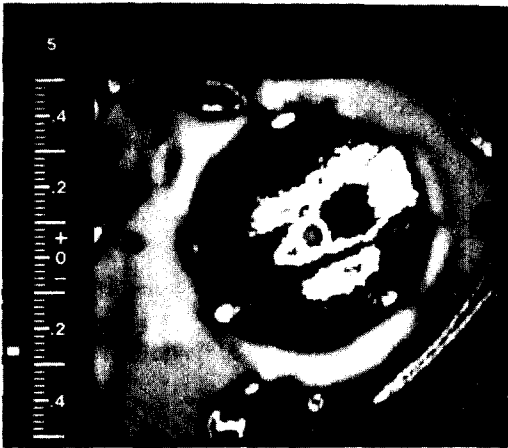


그림 4. 測定된 太陽電池의 構造

그림 5의 測定結果中 그림 5(a)는 isotherm level을 주지 않은 狀態, 그림 5(b), (c)는 각각 level #1과 level #2 狀態에서의 赤外線映像이다. 그림 5(a)는, 太陽電池 表面의 溫度分布가 不均一하며 특히 中心과 가



(a) no level 상태



(b) level # 1 상태



(c) level # 2 상태

그림 5. 赤外線 映像

장자리 部位가 高溫임을 나타내고 있다. 또한 太陽電池의 表面보다 放熱板의 溫度가 높게 나타나고 있으며 이는 作動中인 太陽電池에서 發生된 熱이 放熱板을 통하여 放熱되고 있음을 의미한다. 그림 5(b)에서의 흰 반점은 太陽電池 表面上의 低溫部位를 reference로 하여 level #1 狀態에서의 等溫部位를 나타내고 있으며, 그림 5(c)는 level #2 를 가장자리의 高溫部位에 맞추었을 때의 等溫部位와 그림 5(b)를 復合시킨 赤外線 映像이다. 따라서 그림 5(b), (c)로 부터 算出된 $\Delta i_{or} = 0.64$ 와 測定된 $\epsilon_r = 0.97$, $T_r = 32^\circ\text{C}$ 및 測定條件을 (7)式~(11)式을 이용한 computer program에 代 入하여 各 部位의 溫度 및 放熱量을 算出할 수 있다.

表 1은 그림 5와 同時에 撮影된 color 赤外線 映像으로부터 computer로서 計算된 色度別 溫度分布 및 放熱量, 即 太陽電池 및 放熱板의 部位別 溫度分布과 放熱量을 計算한 結果이다.

表에서 알 수 있는 바와 같이 太陽電池의 表面溫度는 中央의 高溫部位: 34.7°C , 가장자리의 高溫部位: 37.5°C 를 제외하고는 $30.8^\circ\text{C} \sim 33.2^\circ\text{C}$ 範圍에서 약간의 不均一한 分布를 나타내고 있다. 이러한 高溫部位의 發生原因은 放射狀으로 設計된 太陽電池의 contact 中 幅이 넓은 部位에서 熱이 發生되고 있음을 의미하며, 특히 高溫部位가 集中된 右下端部位는 太陽電池와 放熱板의 接觸不良에 의한 蓄熱現象 및 接着劑의 熱傳導度에 起因된 것으로 推측된다.

이러한 表面溫度分布의 測定結果는 設計上의 要因들과 比較檢討하고 별도로 測定된 電流-電壓 特性曲線 및 變換效率에서의 問題點을 分析함으로써 보다 精密한 原因分析 및 改善方案이 提示될 수 있으며, 測定된 放熱量은 放熱設計 條件과 對比하여 放熱板을 改善함으로써 太陽電池의 熱的 損失을 減少시켜 效率向上에 기여할 수 있다. 특히 最近 활발히 研究되고 있는 集光形 太陽電池의 경우 高集光에 의한 溫度上昇으로 效率減少를 초래하고 있으며 集光裝置 材料의 熱的 劣化現象도 야기되고 있으므로⁶⁾ 赤外線 撮像法을 應用하여 連續的인 溫度分布를 測定함으로써 效率向上과 材料의 耐久性등을 研究할 수 있을 것으로 思料된다.

5. 結 論

이상과 같이 赤外線 撮像法の 電氣工學 分野에의 應用에 關係 소개하였으며 太陽電池에의 應用例을 概述하였다. 그러나 赤外線 撮像法の 應用範圍는 太陽電池 이외에도 高集積化, 大容量化, 高信賴度가 要求되고 있는 電子部品 및 裝置의 熱設計, high power

표1. 表面溫도와 放熱量的 分析結果

COLOR	TEMPERATURE RANGE	HEAT OF RADIATION	HEAT OF CONVECTION	TOTAL HEAT
PUR BLUE	30.86-31.68 DEG C	22.29	13.96	36.26
GRE BLUE	31.68-32.48 DEG C	26.63	17.35	43.97
SKY BLUE	32.48-33.26 DEG C	30.90	20.79	51.69
BLUE	33.26-34.03 DEG C	35.11	24.28	59.39
VIOLET	34.03-34.78 DEG C	39.27	27.79	67.07
RED	34.78-35.52 DEG C	43.38	31.33	74.71
ORANGE	35.52-36.24 DEG C	47.44	34.87	82.31
GREEN	36.24-36.95 DEG C	51.45	38.42	89.87
WHITE	36.95-37.64 DEG C	55.40	41.97	97.38

device 의 熱的 安定性, 絶緣材料의 劣化現象 및 熱的 破壞機構, 送配電 系統의 放電現象등 많은 分野의 研究에 活用될 것으로 기대된다.

當 研究所는 赤外線 攝像裝置를 이용한 研究課題의 遂行中 定立된 測定 및 分析技術을 普及擴大하고 상호 情報交換, 共同研究등을 積極 추진함으로서 電氣工學 分野에서의 熱的 問題點에 關한 研究에 조금이라도 기여하고자 한다.

參 考 文 獻

[1] C. Warren; Proceedings of the 3rd Biennial

Infrared Information Exchange, St. Louis, August 24-26, '76.

[2] R.D. Hudson; Infrared System Engineering Wiley-Interscience, '69.

[3] W.L. Wolfe & G.J. Zissis; The Infrared Handbook, Office of Naval Research, '78.

[4] 宮尾巨; 電子技術, 第20卷 第5號, pp. 28~35, '78.

[5] R.D. Hudson; Infrared Detectors, DH&R Inc. '75.

[6] 宋鎮洙; 電氣學會誌, 第30卷 第10號, pp. 57~63. '81.

<P 15에서 계속>

統의 連系가 複雜하게 되어 過度時의 條件이 어렵게 된다. 이것을 克服하기 위해서는 解析의 正確性を 높이고 實測에 의해서 檢證한 技術을 確立하는 것이 必要하다.

또한 保安을 위해서 各機器의 内部診斷, 監視技術

등도 重要한 課題이다. 電力機器는 電力電子技術과 더불어 더욱 進歩될 것이다.

끝으로 電力機器의 支柱는 材料技術이고 各種의 新材料의 活用に 의해서 에너지節約, 資源節約의 要請에 符合되어야 한다.