技術解說

焦電形赤外線檢出器와 그 應用

金垠東 · 吳明煥
(韓國電氣硏究所), (韓國科學技術院)

차 례

1. 序 論
2. 檢出原理
2.1 輻射赤外線
2.2 焦電效果와 赤外線檢出原理
2.3 應答特性
3. 檢出器의 構造
4. 應 用
參考文獻

1. 序 論

溫度와 熱輻射(혹은 放射)의 理論的 根據는 今世期初 Max Plank에 의하여 定立되었지만 그 以前부터 赤外線(赤外可視光의 外側線)은 熱과 깊은 關係가 있는 電磁氣波의 一種이라고 알려져 있었다.

赤外線을 利用한 溫度計測法은 2次大戰中, 夜間監視體系의 必要性에 따라 利用이 加速化되었다. 最近에는 光을 利用한 計測技術이 自動制御시스템에 成功的으로 利用됨에 따라, 그 活用度는 날로 增加하고 있다. 또한 信號傳達시스템에 光纖維가 利用되므로써 信號/雜音比가 크게 改善되어 通信分野에서 技術革命이 일어나고 있다. 利用되는 光도 점차 長波長의 것이 要求되고 있는데, 이는 CO_2레이즈와 같은 새로운 光原의 開發, 高感度의 赤外線受光素子의 開發등으로 檢出能이 크게 增進된데 起因한다고 생각된다.

한편, 輻射赤外線을 利用한 計測시스템 에서는 情報를 影像으로 處理하려는 努力이 70年代 以後 크게 擡頭되고 있는데 現在 熱影像裝置(thermal image device)는 半導體를 利用한 것은 물론 焦電形의 것도 직접 Si-CCD(電荷結合裝置, charge coupled device)板上에 焦電體를 結合시킨(hybrid化한)高技能裝置가 實用化되고 있다.

오늘날 非接触測溫技術이나 熱影像化技術은, 日本과 같은 境遇에는 工業計測技術의 새로운 分野로서 그 長點이 잘 認識되어 溫度計測 그自體뿐만 아니라 自動制御시스템에의 應用이 活發하게 이루어지고 있다.

過法의 溫度計測은 주로 接触方式에 依存하였기 때문에 特定部分의 測定溫度로써 全體를 代身하거나 몇몇의 地點을 不連續的으로 檢測하여 얻은 情報로 부터 全體의 溫度分布를 類推하는 것이 고작이었다. 그러나 現代와 같은 技術發展推移로 볼 때, 生産性增進을 위해서는 製

品의 品質管理 및 生産設備의 維持管理를 自動制御시스템을 利用하여 嚴格히 하지 않으면 안될 것이다. 따라서 放射温度計나 熱影像裝置같은 精密計測시스템의 應用이 크게 늘어날 展望이다.

本稿에서는 焦電形赤外線센서(pyroelectric infrared sensor)를 利用한 赤外線檢出器에 대하여 주로 言及하고 그 應用分野에 대하여 論해 보고자 한다.

2. 檢出原理

2.1 輻射赤外線

모든 物體는 그 物體의 温度에 對應하는 輻射線을 내고 있다. 이의 理論的 根據는 Plank 의 黑體輻射理論으로 잘 알려져 있다. 한편 Wien 의 法則으로 부터는 어떤 温度의 黑體로 부터 輻射되는 最大에너지를 갖는 波長(λ_m)을 알 수 있다. 따라서 黑體의 使用温度範囲를 알면 어떤 波長範囲를 利用할 것인가를 알 수 있다.

黑體로 부터 放射되는 總에너지는 Stefan-Boltzmann法則으로 잘 알려진 바와 같이 T^4에 비례하므로 黑體의 微細한 温度變化가 큰 輻射에너지變化를 가져다 준다.

따라서 赤外線의 光量子(photon)에너지나 輻射에너지를 檢測하므로써 그 物體의 温度를 쉽게 알아 낼 수 있다. 여기서 한가지 留意해야 할 점은 대부분의 赤外線센서들이 應答能의 波長依存性이 있다는 것이다. 한편, 一般的인 物體는 같은 温度의 黑體에 비하여 輻射線의 放射 및 吸收가 작아 放射率은 항상 1보다 작다. 그러므로 放射率이 각기 다른 物體를 검측하려면 각 物體의 放射率을 미리 觀測하여 補整해 주어야 한다. 뿐만아니라 大氣의 赤外線透過率을 보면 波長에 따라 크게 달라지므로 遠距離計測의 境遇, 이와 같은 赤外線透過特性을 顧慮해야만 할 것이다. 반면 特定氣體分子에 의한 赤外線吸收現像을 利用하면 赤外線센서를 利用하여 氣體檢出器도 製作可能하다.

一般的으로 赤外線이라 하면 0.75～1000μm 範囲의 波長을 갖는 電磁氣波로서 0.75～3 μm 範囲의 것을 近赤外線(near infrared), 3～30 μm의 것을 中赤外線(medium infrared), 30～1000μm의 것을 遠赤外線(far infrared)라 하는데 완전히 통일된 定義는 아니다. 700℃ 정도의 物體가 放出하는 최대에너지를 갖는 赤外線波長은 3 μm정도로 近赤外線에 속하는데 이를 檢出하는데는 應答速度가 빠른 量子形赤外線檢出器가 보다 效率的이다. 반면 300°K (常温) 정도의 物體가 放出하는 λ_m은 9 μm정도로 이를 檢測하는 데는 冷却裝置가 必要없는 焦電形과 같은 熱形赤外線檢出器가 보다 有利하게 應用될 수 있다. 이와 같이 輻射赤外線의 特性을 정확히 파악하므로써 必要한 赤外線檢出器를 정확히 選擇하거나 製作할 수 있을 것이다.

2.2 焦電效果와 赤外線檢出原理

赤外線센서에는 光量子에너지, 즉, photon을 檢出하는 量子形의 것과 輻射線의 熱에너지를 利用하는 熱形이 있는데, 前者는 半導體에 吸收되는 photon이 自由電荷를 만드는 現像을 利用한 것이고 後者는 素子가 輻射에너지를 吸收하므로써 일어나는 素子의 温度變化가 가져다 주는 物性變化를 檢出하는 형이다.

檢出原理에 따른 赤外線檢出器의 種類를 分類해 보면 表1과 같다.

半導體센서의 境遇에는 밴드갭에너지(band gap energy)이상의 에너지를 갖는 波長만이 吸收되므로 이 波長을 遮蔽波長(cut-off wave length)라 한다. 따라서 이 形의 센서는 材料에 따라 適正使用波長範囲가 달라진다. 대체로 近赤外線用의 境遇는 常温, 中赤外線用의 境遇 液體窒素温度(77°K), 遠赤外線의 境遇 液体 헬륨温度(4.2°K)에서 使用하는 것이 보통이다.

반면 熱形은 應答能의 波長依存性이 없으며 常温에서 使用可能하다. 熱形과 量子形의 長短點을 比較해 보면 表2와 같다.

熱形中에서 熱電堆(thermopile)란 熱電對(thermocouple)를 20개 정도 直列連結한 것이다. (현재 IR spectroscope의 detector로 많이 이용하고 있음)

自發電氣雙極子(spontaneous electric dipole)

표 1. 작동원리에 따른 적외선검출기의 분류

	동　작 (mode)	검　출　기
量子型檢出器 (photon detector)	光電導效果 (photoconductive)	HgCdTe, InSb, Pbs, Ge(Hg) 등 S
	光起電力效果 (photovoltaic)	InSb, HgTe 등
	光電磁效果 (photoelectromagnetic)	HgCdTe, InAs, CdHgTe 등
	光電子放出效果 (photoemissive)	GaAs－Cs－Cs_2O
熱型檢出器 (thermal detector)	熱膨脹 (thermopneumatic)	
	電氣抵抗變化 (bolometric)	金屬 bolometer, thermister
	熱起電力效果 (thermovoltaic)	熱電對, thermopile
	熱電效果 (pyroelectric)	TGS, PVDF, $LiTaO_3$, PLZT 등

표 2. 열형과 양자형 적외선센서의 특성비교

	열　형	양　자　형
응답속도	늦다(～msec)	빠르다(μ sec～m sec) m
응답특성의 파장의 손실	없　다	있　다
응답파장의 한계	없　다	있　다
감　도	낮다($D^* \leq 10^9$)	높다($D^* \geq 10^9$)
냉각장치	불　필　요	고온용 : 불필요 저온용 : 필　요
가　격	비교적싸다	비교적 비싸다

를 갖는 極性材料(polar materials)는 温度에 따라 그 自發分極(spontaneous polarization)狀態가 變하는데－焦電效果 (pyroelectric effect)라고 함－이를 利用하는 赤外線檢出素子를 焦電形赤外線센서라고 부르며 焦電特性을 나타내는 材料를 焦電體(pyroelectrics)라고 한다. 한편 焦電體의 自發分極(P_s)의 温度依存性을 보면 그림 1과 같다. 따라서 焦電體에 赤外線이 入射되어 焦電體의 温度가 △T만큼 變하면 自發分極은 △Ps만큼 변하게 될 것이다. 이때 温度에 따른 自發分極의 變化率을 焦電係數(pyroelectric coefficient)라고 하는데 흔히,

$$P = dPs/dT \ [C/K \cdot cm^2] \qquad (1)$$

로 표시한다.

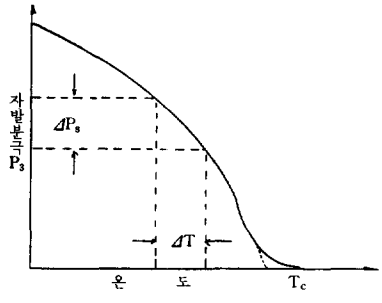


그림 1. 초전체의 일반적인 P_s의 온도의존성(1차 상전이를 갖는 경우)

受光面積 A를 갖는 焦電體에서 △T만큼의 温度變化가 일어 나면 生成되는 電荷 Q는,

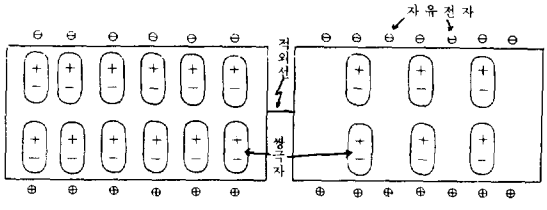
$$Q = P \cdot A \cdot \Delta T \ [C] \qquad (2)$$

이 될 것이다. 따라서 開放電壓(open circuit voltage)에서의 變化는

$$\triangle V = P \cdot A \cdot \triangle T / \varepsilon_s \ [V] \qquad (3)$$

로 표시 될 것이다(단 $\varepsilon_s = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r$).

실제 P_s의 變化에 따른 電荷生成過程을 그림으로 나타내어 보면 그림 2 와 같다. 한편 양쪽 면에 電極을 附着시켜 焦電電流(pyroelectic current) I_P를 檢出하면



(a) at T°C (b) at (T+ΔT)℃

그림 2. 초전체에서 적외선에 의한 자유전하 생성과정

$$I_P = dQ/dt = P \cdot (dW/dt) \cdot (A/h)(1/C_V \cdot \rho) \ [A] \qquad (4)$$

으로 표시될 것이다. 여기서 $W/C_V \cdot \rho \cdot h$는 焦電體에 W의 赤外線에너지가 吸收될 때의 焦電體의 溫度變化를 나타낸다. 한편 위 式에서 보면 連續的인 應答을 얻기 위해서는 照射되는 赤外線이 時間依存性을 가져야만 한다. 熱速(heat flux)의 時間依存性을 侵入者警報器에서와 같이 被檢測體의 움직임에 의해서 얻어지는 境遇도 있으나, 대부분의 境遇에는 赤外線放射溫度計에서와 같이 放射體와 센서 사이의 遮光器를 두어 週期的으로 遮光하므로써 얻는다.

2.3 應答特性

焦電形赤外線檢出素子와 이를 利用한 檢出器의 가장 初步的인 增幅回路圖를 보면 그림 3 과 같다.

前節에서 言及한 바와 같이 照射線이 時間의 函數 $W \cdot \exp(j\omega t)$로 나타내어지면 焦電體의 溫溫度變化는

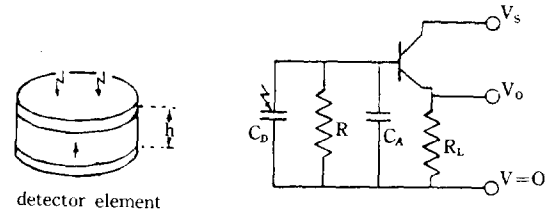


그림 3. 초전형 적외선검출기를 위한 증폭기의 첫 단계

$$\triangle T = \eta \cdot W \cdot A(\gamma^2 A^2 + \omega^2 K_C^2)^{-1/2} \ [K] \qquad (5)$$

(단, η : 赤外線의 吸收係數
K_c : $(\rho \cdot C_V \cdot A \cdot h)$의 값
γ : 檢出素子의 熱損失係數
ρ, C_V : 焦電體의 비중 및 비열)

로 표시되므로 素子의 赤外線吸收係數는 커야하고 熱損失係數는 작을 수록 좋다. 그러나, 각 材料마다 赤外線吸收係數의 波長依存性이 다르므로 이에 유의 할 필요가 있다. 電流應答能 $\gamma_I = (dQ/dt)(1/W \cdot A)$로 표시되므로

$$\gamma_I = \eta P \omega \gamma^{-1}(1 + \omega^2 \tau_D)^{-1/2} \ [C \cdot J^{-1}] \qquad (6)$$

(단, $\tau_D = K_c/\gamma A$ [sec]임)

로 정리된다. 만약 $\omega \tau_P \gg 1$ 이면 윗 式은

$$\gamma_I = \eta P / \rho C_V h \qquad (7)$$

로 되므로 電流應答能을 增進시키려면 焦電係係數가 큰 材料를 選擇하지 않으면 안된다. 또한 γ과 τ_D가 작은 센서를 選擇하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있을 것이다.

電壓을 信號로 얻는 경우에는 증폭회로에서의 R을 매우 크게하여야 하며 生成된 電荷는 다음 赤外線의 入射前까지 除去되어야만 한다. 또한 트랜지스터는 큰 임피던스를 갖는 FET(field-effect transistor)가 利用되는 것이 보통이다.

電壓應答能은

$$\gamma_V = (dV/dt)(1/W \cdot A) = \gamma_I \cdot Z \ [V \cdot sec \cdot \tau^{-1}) \qquad (8)$$

(단, Z : 檢出素子와 增幅器의 임피던스합) 으

로 표시되므로 R_L이 R에 비해 매우 작다면 $Z=R(1+\omega^2\tau_E^2)^{-1/2}$ [Ω] (여기서, $\tau_E=R(C_D+C_A)$ 이며, C_D와 C_A는 각각 檢出素子 및 增幅器의 靜電容量임)이 된다. 사용 주파수가 $1/\tau_D$와 $1/\tau_E$에 비해 높으면 $C_D>C_A$라고 볼 수 있으므로 결국

$$\gamma_V=\eta\cdot P/\rho\cdot C_V\cdot\varepsilon_S\cdot\omega\cdot A \qquad (9)$$

가 될 것이다. 따라서 주파수가 增加하면 應答能이 낮아지므로 焦電形赤外線檢出器는 使用週波數가 대체로 10^3Hz 이하로 제한된다.

만일 ω가 $1/\tau_D$와 $1/\tau_E$사이에 있으면 γ_V의週波數依存性은 비교적 낮아지며 통상 τ_D는 0.1~10초, τ_E는 100초를 넘지 않는다.

赤外線檢出器의 性能에 미치는 또하나의 parameter는 檢出素子 自身이나 檢出回路에서 發生하는 雜音들이다. 現在까지 알려진 雜音原으로서는 다음과 같은 4가지가 있다.

가) 檢出素子의 誘電損失
나) 並列抵抗의 Johnson 雜音
다) 檢出素子에서의 熱攪亂에 의한 雜音
라) 增幅回路에서의 雜音 { ○電壓雜音 ○電流雜音

이와 같은 雜音을 最少化 시키기 위해서는 檢出素子의 誘電損失과 靜電容量이 작은 것을 선택해야만 할 것이다. 그리고 雜音들은 週波數의 函數이므로 사용주파수를 적절히 結定하지 않으면 안된다.

檢出素子의 性能을 表示하는 方法은 그 用度에 따라 달라지는데 간략하게 紹介해 보면 다음과 같다.

$M_1=P/\rho\cdot C$; 낮은 임피던스의 增幅器를 利用할 境遇

$M_2=P/\rho\cdot\alpha_T\cdot\varepsilon$ 큰 임피던스의 增幅器를 利用할 境遇

$M_3=P/\rho\cdot C_V\cdot\alpha_T\cdot\varepsilon_r$; 熱影像裝置에 利用할 境遇

$M_4=P/\rho\cdot C_V\cdot\varepsilon_r^{1/2}\cdot D^{1/2}$; 焦電體의 誘電損失이 크고 큰 임피던스의 增幅器를 利用할 境遇

여기서, α_T : 熱擴散係數
D : 誘電損失

熱影像裝置의 境遇 target面內에서의 熱擴散은 影像에서의 contrast變化地點을 흐리게 한다. 따라서 熱擴散係數가 크면 熱分解能이 낮아진다.

3. 檢出器의 構造

焦電形赤外線檢出器는 檢出部의 形態에 따라 單素子形(single element type), 雙素子形(twin type)과 熱影像裝置의 標的센서로서는 點形, array形 및 2차원(平面)形이 있다.

가장 簡單한 單素子形의 形態를 보면 그림 4와 같다.

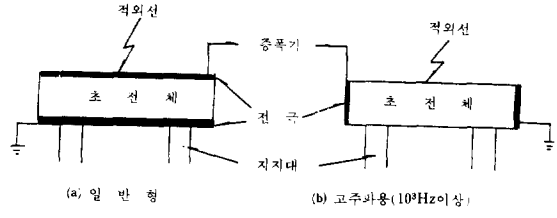


그림 4. 단소자형 적외선검출기의 형태

焦電體板의 두께는 通常 40~50 μm정도 이고 임피던스變化와 外部雜音의 影響을 줄이기 위하여 FET回路를 내장한 후 赤外線透過窓이 붙은 金屬캡으로 封合한다. 熱散亂을 막기 위 하여서는 素子를 package로 부터 띄우는 방법도 있으

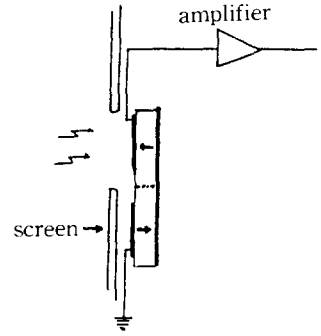
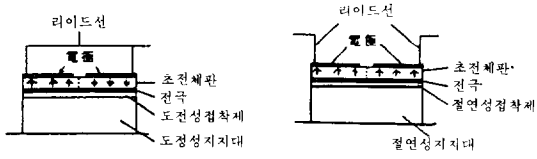
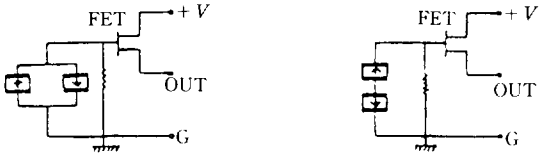


그림 5. 보완형의 단소자형 IR검출기구조 형태는 쌍소자형이나 검출부는 한개이다.



(a) 병렬역접속 (b) 직렬역접속

그림 6. 쌍소자형 초전체소자의 구조



(a) 병렬역접속 (b) 직렬역접속

그림 7. 쌍소자형에 대한 등가회로

나 양산체계를 세우는데 어려움이 있어 중앙에 구멍이 뚫린 알루미나(alumina, Al_2O_3) 基板위에 焦電體의 周邊部만 닿도록 한 方法이 利用되고 있다.

그림 5의 境遇를 보면 素子는 雙으로 되어 있으나 受光部는 하나인데, 주변의 振動이나 溫度變化등과 같은 영향들에 의한 雜音은 두 檢出部에 서로 반대부호의 信號를 만들므로 相殺시킬 수 있다.

그림 6은 雙素子形센서의 構造를 보여 주고 있는데, 그 等價回路는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 焦電體의 分極方向이 서로 반대여서 주위의 영향을 상쇄시킬 수 있는 장점이 있다. 한편, 電壓感度(voltage resposibility)는 直列逆接續의 것이 並列逆接續의 것보다 좋다.

雙素子形의 境遇는 대상물이 어떤 方向으로 움직일 때 出力波形은 (+)信號→(−)信號 혹은 그와 반대의 順序로 나타날 것이다. 따라서 최초의 出力符號를 알아내므로써 대상물의 움직임방향을 알아낼 수 있다.

마지막으로 紹介할 것은 熱影像裝置의 標的센서인데 이때 使用되는 波長은 2～20μm정도로 비교적 狹小한 領域으로 制限된다. 한편 0.7～2μm領域에서는 可視光用의 非冷却形 비디콘이 보다 效率的이다.

2차원영상을 構成하는 方法에는 3가지가 있는데 가장 簡單한 形態로는 점형의 標的센서와 機械的走査式의 光學界를 갖는 것으로 走査時間이 길어 微細한 것을 影像으로 옮기는 데는 否適當하다. 두번째의 形態는 linear array센서와 그것에 直角한 方向의 機械的 光學走査界로 構成된 것으로 주로 畵素數가 비교적 작은 畵面을 構成하는데 利用된다. 세번째는 2차원센서를 利用한 境遇로 光學界의 機械的走査가 必要없다. 이 境遇 問題가 되는 것은 標的센서內에서의 熱擴散이다. 즉, 標的面內에서의 熱擴散은 溫度分布의 平均化現像을 가져와 畵質을 低下시킨다. 이와 같은 現象을 막기 위하여 標的面을 島狀化하여 利用하고 있다.

실제 開發된 赤外線비디콘의 構成圖를 보면 그림 8과 같다.

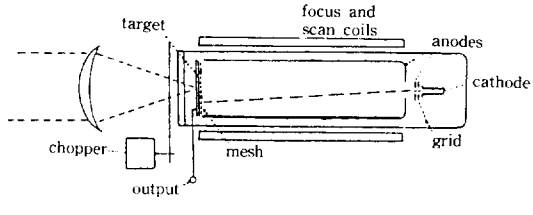


그림 8. 비디콘 IR영상장치

可視비디콘과 크게 다른 점은 赤外線透過窓이 利用된다는 점과, 電子beam이 正電荷만 읽어내므로 target上에 畜積된 負電荷를 다음 照射時까지 없애려면 正bias를 걸어주어야 한다는 점이다.

焦電形赤外線影像裝置의 標的으로 焦電體와 Si-CCD를 hybrid化한 焦電CCD가 開發되었는데, 그 構造의 한 例를 보면 그림 9와 같다. Solder는 인듐을 利用하는데 실리콘과 焦電體의 熱膨脹係數가 크게 차이가 나므로 많은 畵素數를 갖는 것을 製作하기는 어렵다. 이러한 製造상 단점을 보완하기 위하여 Si-CCD의 入力電

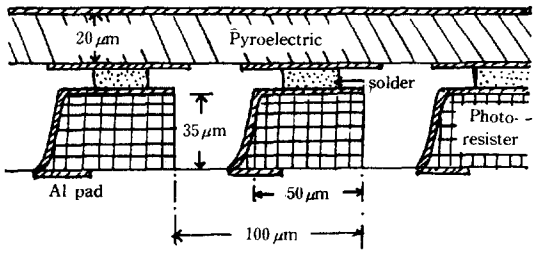


그림 9. 열전도억제에 의하여 고감도화를 이룩한 초전(CCD(R. Watton et al., Int. Conf on Adv. IR Sensors and Systems (1983), p. 49)

極面上에 직접 焦電體를 입히는 方法이 고려되고 있다. 이 境遇에도 정·부전하를 모두 전송하기 위해서는 chopper의 開閉時期와 같은 時間에 bias電流가 생기도록 장치하여야 한다.

4. 應　用

赤外線檢出器의 應用分野는 赤外線의 利用方法에 따라 다음과 같이 3가지로 分類될 수 있다.

1) 輻射赤外線을 利用하는 境遇

被檢測物의 温度에 衣하여 정해지는 赤外線에너지를 測定하여 標準物體의 温度와 비교하므로써 測定對象物의 温度를 檢測한다. 이와 같은 放射温度計는 극히 낮은 온도로 부터 약2000℃정도까지 測温可能하다. 또한 移動物體의 測温이 가능하고 위험물의 경우 remote sensing으로 測定時 위험을 방지할 수 있으며, 微少物體를 檢測하는 데는 가장 效果的이다. 한편 接触式은 接触에 의한 센서나 保護裝具의 劣化現象이 일어나지만 이와 같은 非接触式에서는 그러한 問題는 없다. 그리고 thermography에의 應用이 쉽고 遠隔表示, 自動記録 및 自動制御시스템에의 應用이 매우 편리한 장점이 있다. 反面에 放射率의 評價誤差와 測定環境에 영향받기 쉬운 단점이 있다.

2) 赤外線反射를 利用하는 境遇

赤外線反射스펙트럼은 物質의 構造에 따라 달라지므로 物質의 構造分析에도 赤外線檢出器를 利用할 수 있다. 한편 反射赤外線을 利用하는赤外線레이다는 軍事的으로 매우 중요한 裝置이다. 赤外線레이저와 같은 光線의 開發은 이와 같은 分野에서의 應用을 더욱 활발하게 만들 것이다.

3) 吸收스펙트럼을 利用하는 境遇

氣體分子의 赤外線領域에서의 選擇的 吸收 現象을 利用하여 gas分析등을 할 수 있다. 예를 들면 有毒性gas感知器, 火災警報器등이 있다. 液體 및 固體의 境遇도 마찬가지이다.

實在 應用面을 살펴 보면, 防犯 및 防火시스템, 自動間의 訪問客感知器 温度計測 및 制御시스템은 물론 照明機具, 玩具에 이르기 까 지 매우 다양하다. 그리고 家電製品등 電子·電氣機器에의 응용이 확대되어 産業界에서의 응용도 활발해지고 있으며 앞으로는 의료등에서의 응용도 크게 이루어 질 것으로 전망된다.應用面에서의 説明은 紙面關係로 이것으로 끝맺고자 하며, 한편 焦電材料등에 관한 説明도 다음 기회로 미루고자 한다.

參 考 文 獻

1) J.M. Merbert,"Ferroelectric Transducers and Sensors," Gordon and Breach Science Pub., (New York, 1982).
2) R.D. Hudson, "Infrared System Engineering," John Wiely and Sons(New York, 1969).
3) R.A. Smith, F.E. Jones, and R.P. Chasmer, "The Detection and Measurement of Infra-red Radiation," Oxford Univ. Press(Oxford, 1968).
4) E. Fatuzzo and W. Mertz, "Ferroelectricity," North Holland Pub. Co.(London, 1967).
5) I.F. Nye, "Physical Properties of Crystals," Claredon Press(Oxford, 1969).
6) J.C. Burfoot and G. W. Taylor, "Polar dielectrics and Their Applications," The Macmillan Press Ltd.(New York, 1979)
7) M.E. Lines and A.M.Glass, "Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials," Claredon Press(Oxford, 1984).

8) J.o. Dimmock, "Infrared Detectors and Applications," J. Elect. Mater., 1(2), 255–309(1972).
9) H.P. Beerman, "Pyroelectric Infrared Radiation Detector," Ceram. Bull., 48(8), 727–740 (1967).
10) R.G. F.Taylor and M.A.H. Boot, "Pyroelectric Image Tubes," Contemp. Phys., 14(1), 55–87(1773).
11) E.H.Putley, R. Watton, and J.H. Ludlow, "Pyroelectric Thermal Imaging Devices," IEEE Trans. Sonics and ultra sonics,SU-19, 163–169(1972).
12) 自動化技術 編集部編,"センサ技術," 工業調査會 (1983).
13) 田中哲郎, 畸清, 一ノ昇, "壓電セラミツク材料," 學獻社(1978).
14) 電子材料工業會編, "壓電セラミツクスとその應用," 電波新聞社(1975).
15) 大森明編, "センサ實用便覽," フジ・テノツステム(1981).
16) 寺西昭男等, "センサの基礎と應用," ツンポジラム溝 演豫橋集(1981).
17) 監畸忠(監修),"壓電材料の製造と應用",CMC(1984).
18) センサ技術編集部, "赤外線センサの市場 動向," センサ技術, 5(5), 36—39(1985)