

技 術 解 說

高 溫 太 陽 爐 와 應 用

梁 興 錫

※ 次 列 ※

- 1. 序 言
- 2. 太陽爐의 光學系
- 3. 拋物面鏡의 集光特性
- 4. 太陽爐의 構造
 - 4.1 光學系
 - 4.2 太陽追尾系
 - 4.3 溫度制御系
- 5. 太陽爐의 應用分野
- 6. 大形 太陽爐의 課題

1. 序 言

太陽에너지의 利用은 光電變換技術을 除外한다면 溫度레벨에 의해서 많은 分野로 나눌 수 있다. 즉 溫室, 乾燥등의 農業分野나 溫水器, 暖房 또는 冷暖房 및 給湯과 같은 比較的 低溫領域의 利用으로부터 熱發電, 熱機關, 熱電子發電등에 이르는 約 1000°C前後의 中溫領域과 2,000~4,000°C의 高溫領域을 目標로하는 太陽爐를 들 수 있다.

그러나 太陽에너지의 本質은 稀薄성과 間歇性으로 指摘되는 바와같이 直射光으로는 最高 約 1kW/m²이며 더욱이 惡天候나 夜間에는 使用할 수 없으므로 普通 熱에너지시스템과 달라서 太陽에너지 시스템에 대하여는 特別히 研究할 必要가 있다고 생각되고 있다.

太陽爐가 太陽에너지의 利用分野에 있어서 集光裝置의 一部로 着眼되었고 또한 高溫發生手段으로서 매우 優秀한 特性이 있다고 認識한지 約 20년이 經過되었다.

長點을 든다면 數秒以內에 2,000~3,500°C의 高溫에 到達할 수 있으며 또한 加熱霧團氣의 制御가 容易하고 電磁場등의 影響을 받지않는 反面에 氣象條件에 따라서 稼動이 左右되며 夜間에는 使用할 수 없고 더욱이 高溫에서 使用되기 때문에 蓄熱이 困難하다는 것이 短點으로 指摘되고 있다.

一般的으로 太陽爐라고 하는 것은 高溫發生裝置로서 回轉拋物面反射鏡을 使用한 시스템을 意味하나 最近 課題로 登場한 것은 太陽熱發電의 槓形拋物面이나 헬리오스탯平面鏡의 集合에 의한 塔型集光方式과 같은 500~1,000°C의 溫度領域에서 使用되는 光學系로서 때로는 廣義의 太陽爐에 包含되는 경우가 있다. 그러나 本稿에서는 回轉拋物面鏡을 利用한 集光시스템에 대하여 記述하고자 한다.

2. 太陽爐의 光學系

太陽爐의 形式은 太陽放射를 集中시키는 回轉拋物面鏡의 設置方式和 補助光學系의 使用如否로서 分類할 수 있다.

그림 1은 光學系를 나타낸다. 太陽爐는 直射光을 利用하기 때문에 恒常 軌道를 追尾할 必要가 있다. 한편 拋物面反射鏡의 口徑이 1~3m以內의 小形 太陽爐에서는 目的에 따라서 任意의 形式을 取할 수 있으며 反射鏡自體도 1枚의 鏡으로 構成되는 경우가 많으나 補助平面鏡은 分割해서 세그먼트의 組合形式을 取하고 있다.

그러나 口徑 10m以上의 大形爐에서는 拋物面反射鏡이나 補助平面鏡도 機械的 強度나 剛性 및 風壓등의 外亂에 對應하기 때문에 세그먼트의 組合方式을 取하며 또한 光學系의 反射回數가 增加함에 따라서 反射에 의한 損失이 많으므로 直接式이 理想的이나 實際로 使

* 正會員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授, 工博

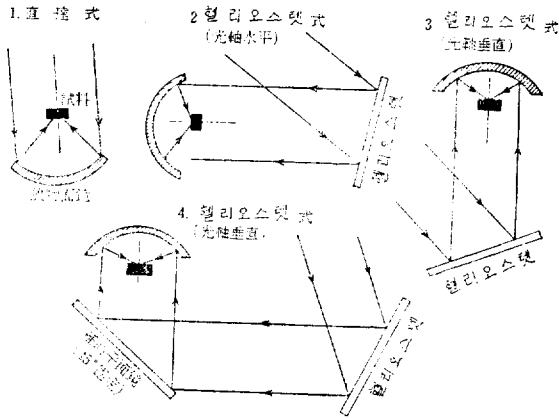


그림 1. 태양爐의 광學系

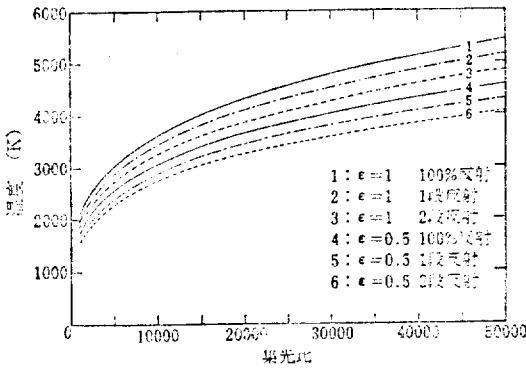


그림 2. 태양爐의 集光比와 到達溫度의 關係

用하는 경우 本 形式은 集點이 反射鏡의 上部空間에 位置하기 때문에 照射試料의 支持나 取扱이 不便하는 등 問題點이 많다.

한편 태양爐에 의한 最高到達溫度는 入力에너지에 따라서 直線的으로 比例하지 않으나 反射率 80%의 平面鏡과 拋物面鏡을 組合시키면 組合反射率이 64%가 되면서 入力는 急激히 減少된다.

그림 2는 태양爐의 到達溫度와 集光比의 關係를 圖示한 것이다. 集光比는 拋物面反射鏡의 有效面積內에 入射되는 單位面積當 放射束密度와 太陽爐의 焦平面에 있어서 太陽像內 單位面積當 放射束密度의 比로서 나타낸 것으로서 反射鏡의 反射率은 전부 80%로 假定해서 Stefan-Boltzman의 式으로부터 單純히 算出한 것이다.

實用爐는 25,000~35,000倍의 集光比를 갖는 것이

많으며 또한 照射加熱試料의 放射率 ϵ 를 파라메타로 여서 프룻트했으나 여기에 變換効率이나 反射率의 低下를 加味한다면 낮은 값이 된다. 그리고 平面鏡이 적은 것을 파라볼라화한 反射鏡을 1960年度에 美國 MIT에서 試作하였는데 到達溫度는 最高 數千度라고 하며 經驗의 으로 보아 2,000°C以上の 高溫을 얻기에는 幾何學的으로 精度가 높은 拋物面鏡이 必要하다고 한다.

1~3m의 口徑을 갖는 小形爐는 1955年 以來 各國에서 研究目的으로 建設하여 總數가 約 160基에 達했으며 口徑 10m以上の 太陽爐는 알제리에 直接式이, 그리고 프랑스 Odeillo의 몬루이에 光軸水平形이 65年頃에 稼動되었다.

現在 使用되고 있는 것은 東北大學科學計測研究所에 1基, 뉴멕시코州의 Las Cruces의 美陸軍미사일試驗發射場에 1基 프랑스 Odeillo의 프랑스陸軍의 太陽爐가 1基, 또한 同一한 프랑스 CNRS의 太陽에너지研究所의 1,000kW爐 1基등을 들 수 있다.

그러나 1935年 美國 california 工科大学에서 直徑 2ft.의 렌즈 19枚를 利用해서 만든 렌즈式 直射形 太陽爐 1基가 있었으나 이것은 그 當時 355萬의 經費가 所要되었고 또한 렌즈의 入手難과 加工의 困難등으로 因하여 今後 렌즈式 太陽爐는 建設되지 않을 것으로 생각되고 있다.

3. 拋物面鏡의 集光特性

太陽放射는 嚴密히 平行은 아니고 約 32'의 立體角을 갖고 있다. 따라서 太陽爐의 光學系에 入射하는 太陽에너지의 取扱에는 注意를 要한다. 즉 拋物面鏡의 焦點에 맞는 太陽像은 點이 아니며 一定한 넓이를 갖는 像이 되는데 그림 3과 같이 焦平面에서 反射鏡의 光軸에 垂直方向으로 近軸光線과 交叉하는 點이 太陽像의

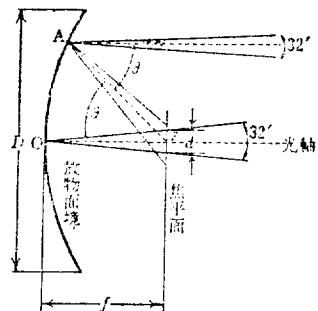


그림 3. 回轉拋物面反射鏡의 斷面圖

直徑을 나타내며 立體的인 太陽像形은 32'의 開度를 갖는 反射光의 包絡面으로 둘러싸여진 菱形 回轉體가 된다.

지금 理想的인 回轉拋物面의 焦點 距離를 f 라 하고 太陽像의 直徑을 d 라하면

$$d=2\tan 16'. f=0.0093f$$

가 되며 太陽像의 面積은 光學系 焦點距離의 파라메타가 되는데 反射鏡口徑의 크기와는 一義的으로 決定되지 않는다. 더욱이 反射鏡의 口徑을 크게하면 焦點거리도 이에 따라서 길어지고 太陽像의 直徑도 增大된다.

또한 反射鏡의 口徑을 D 라고하면 D/f 는 口徑比 η 으로 定義되며 反射光과 光軸의 角을 Q 라하면

$$\eta=D/f=4(1-\cos Q)/(1+\cos Q)^{1/2}$$

의 關係가 成立하며 直徑 d 가 되는 圓內에 入射되는 最大放射束密度 Ed 는 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$Ed=\{4RCaS/(0.0093)^2\}\sin^2Q$$

여기서 R ; 拋物面鏡의 反射率, Ca ; 大氣의 吸收係數, S ; 太陽定數($1.35w/cm^2$)이다.

한편 그림 3과 같이 直徑 d 인 圓의 外側에 橢圓像과 長軸을 直徑으로하는 圓像도 存在하나 에너지密度는 적기 때문에 高溫에서 試料를 處理하는 目的에는 使用할 수 없다.

4. 太陽爐의 構造

太陽爐의 構造는 大別하여 光學系, 太陽追尾系, 溫度制御系 및 照射試料系 등으로 나눌 수 있으며 이들의 서브시스템은 各各 獨立된 機能을 갖고 있다.

4.1 光學系

光學系를 構成하는 要系는 回轉拋物面과 헬리오스탯 平面鏡으로서 表 1은 最近活發히 進行되고 있는 것을 나타낸다.

口徑 2~3m以下의 小形 太陽爐인 경우 拋物面은 1枚의 유리反射鏡으로 構成되어 있는 것이 많으며 또한 10m以上의 口徑를 갖는 大形 太陽爐는 세그멘트로 分割해서 組立한 後 調整하는 方式을 取하고 있다.

日本 東北大學의 科學計測研究所에서 保有하고 있는 10m級의 太陽爐를 보면 反射鏡의 幾何學의 精度는 매우 높았으나 經濟的으로 高價라는 것이 指摘되고 있으며 其他 大形爐는 東北大學과 같이 세그멘트가 回轉拋物面體의 一部를 構成하는 研磨手法을 取하지 않고 平面鏡을 使用한 近似曲面의 形成을 取하고 있다.

예를들면 프랑스의 1,000kW爐는 $500 \times 500 \times 5mm$ 의

表 1. 太陽爐의 諸元(헬리오스탯光軸水平形)

	名 工 試	東北大科計研	프 랑 스 Odeillo	美 陸 軍 Las Cruces
反射鏡口徑(m)	1.5	10.0	45.0	9.1×9.1
焦點距離(m)	0.64	3.2	18.0	10.7
口徑比	2.3	3.1	2.2	1.0
太陽像의 直徑(mm)	6.0	33.0	170.0	124.0
反射率(%)	75	90	—	87
最大放射束密度(cal/cm ² s)	500	—	—	100
備 考	$3,500^\circ C <$	$< 3,400^\circ C$	$< 3,200^\circ C$	球面鏡의 組合

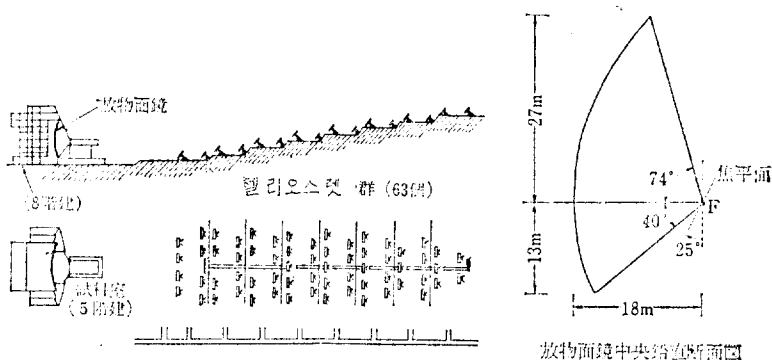


그림 4. 프랑스 Odeillo의 1,000kW太陽爐

유리판을 4개의 코너로서 支持해서 中央部の 4點을 引張하도록 파라보라曲面을 形成하고 있으며 彎曲量은 最大가 1.4mm이다. 또한 平面強化유리 5枚×10枚가 1組로서 1枚의 패널을 形成하고 있는데 總 9,500枚가 平面유리로 構成되어 있다.

한편 유리의, 中央部 載荷點이 4點으로 되어있는 것은 1點인 경우에 中央部 近方이 理論曲面보다 깊으므로 中央部에서 引張力의 分散을 圖謀하도록 한 것이다.

그러나 美陸軍에서 所有하고 있는 太陽爐는 熱衝擊 試驗이나 ablation test 등에 使用되도록 될 수 있는한 均一한 溫度場이 큰 것을 目標로 하고 있으므로 最高 到達溫度는 約 2,000°C로서 其他 爐에 比較하면 매우 낮다. 또한 反射鏡의 세그먼트도 파라보라뿐만이 아니라 球面鏡으로서 形材類를 加熱軟化시켜 反射鏡을 製作한 것이다.

反射鏡의 反射膜은 알루미늄 또는 銀을 裏面 또는 表面에 蒸着鍍金한 것이 많으며 이들의 反射率은 裏面 銀鏡으로서 70~75%, 또한 表面鏡(알루미늄 蒸着)은 80

~85% 정도이다. 단 이들의 數字는 세렌光電池와 日射計를 使用해서 測定한 값이다.

다음에 補助光學系로서 헬리오스텝이 있으나 風壓과 其他 外亂과의 強度上 問題때문에 역시 拋物面鏡과 同一한 세그먼트로 分割하여 組立한 後 調整해서 使用하고 있다.

表面鏡인 경우 東北大學에서는 플라스틱 薄膜을 鍍金해서 數年間 使用하고 있다. 一般的으로 平面鏡의 有效面積은 太陽高度가 높은 夏至인 경우에도 拋物面鏡을 充分히 커버할 수 있어야하며 各 세그먼트는 調整이 容易한 3點支持方式을 採擇하고 있다. 그림 5의 (a), (b)는 各各 平面鏡과 拋物面鏡과의 附着狀態를 나타낸다.

4.2 太陽追尾系

直射光을 利用하는 경우 日周運動에 의한 太陽의 移動 즉 太陽高度의 變化에 의한 速度의 變化나 季節에 의한 軌道變化를 追跡해서 反射鏡에 의한 反射光을 太陽爐의 1點에 指向시켜야 한다.

日本名工試研究報告에 의하면 第1號 太陽爐는 直射形 補助平面鏡을 使用하지 않는 形式을 取하고 있으며 同期電動機의 回轉을 減速시켜서 時刻의 變化를 追尾하고 季節變化는 別度の 手動기어로서 行하고 있다. 그러나 以上과 같은 單純한 方式을 使用할 수 없는 것은 아니나 電源사이클의 微小한 變動이나 手動部分이 있어서 精度가 낮으므로 第2號爐에서는 光電管을 檢出素子로서 서어 機構과 組合시켜서 太陽追尾의 全自動화를 圖謀하고 있다. (그림 6 參照)

以上과 같은 形式의 太陽追尾는 거의 太陽爐에 使用되고 있으나 日本名工試驗研究所의 2號爐를 보면 外亂에 의한 靜的 追尾誤差는 約 ±0.5以內, 追尾裝置의 最大應答速度는 10~20°/S, 또한 過渡의인 誤差는 平均風速 5m/S 정도로서 最大 約 ±1' 그리고 過渡振動은 0.5~1S로서 減衰되었으므로 헬리오스텝의 鏡面誤差를 考慮한 경우 約 ±1'以內였다.

現在 建設中인 第3號爐는 電算機에 의한 프로그램 追尾와 光學的 追尾 및 手動式인 3가지 方法을 組合한 것이다.

한편 헬리오스텝의 驅動은 前後 左右兩方의 回轉을 自由로 行할 必要가 있다. 左右回轉軸은 中心軸에 依存시키거나 前後回轉中心을 反射鏡의 中心으로 하든가 또는 反射鏡의 外側에 設置한 카운터베런스의 方式을 使用하고 있는데 日本名工試의 第2號爐는 後者의 것을, 그리고 第3號爐는 前者의 것을 採用하고 있다.

예를들어 AZ-EL마운트를 使用할 경우 헬리오스텝의 回轉角速度는 그림 7과 같으며 그림 8은 3號爐의

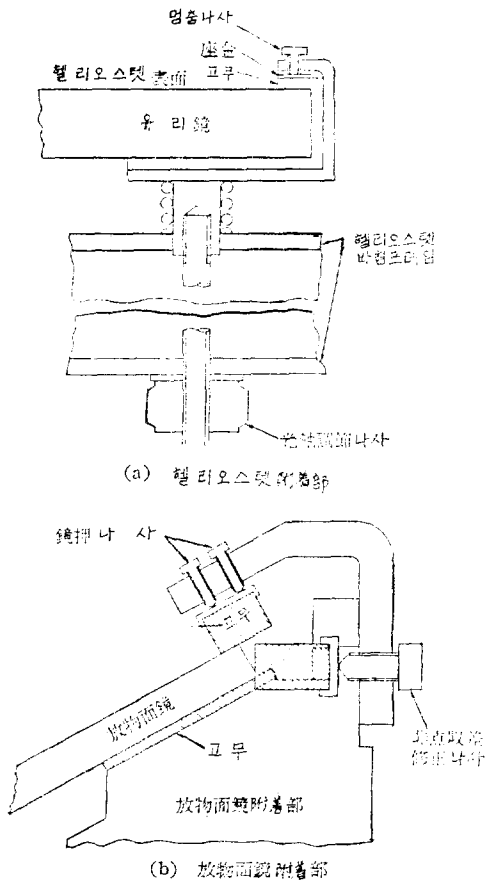


그림 5. 平面鏡과 拋物面鏡의 附着部

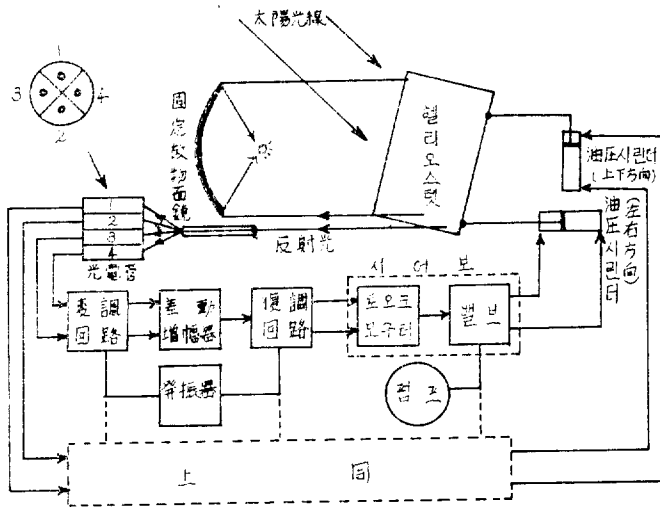
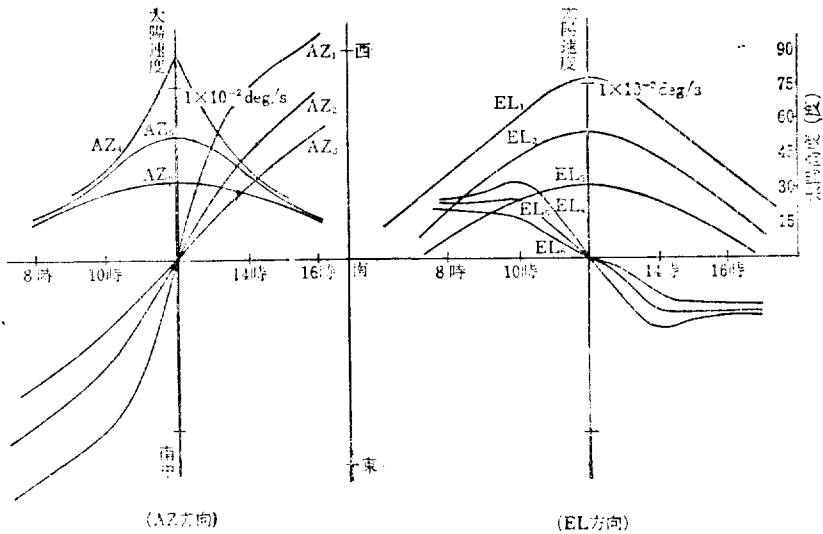


그림 6. 第 2 號 太陽爐의 自動追尾시스템

自動追尾시스템의 블록圖로서 헬리오스탯의 指向角度와 實際角度의 誤差를 檢出하고 이것을 增幅하여 驅動系의 入力으로서 電動機를 回轉시키는데 恒常 헬리오스탯의 角度가 指向해야 할 角度와 一致되도록 動作되고 있다.

즉 프로그램모우드에서는 太陽軌道로부터 求한 헬리오스탯의 指向角度와 헬리오스탯軸에서 檢出한 實際角度의 差를 檢出하여 誤差가 零이 되도록 驅動系가 動作되고 있다. 한편 光學的 追尾모우드에서는 光學的 太陽檢出器의 上下, 左右 1 對의 光電變換素子出力이 均等하도록 驅動系가 作動되고 있다.

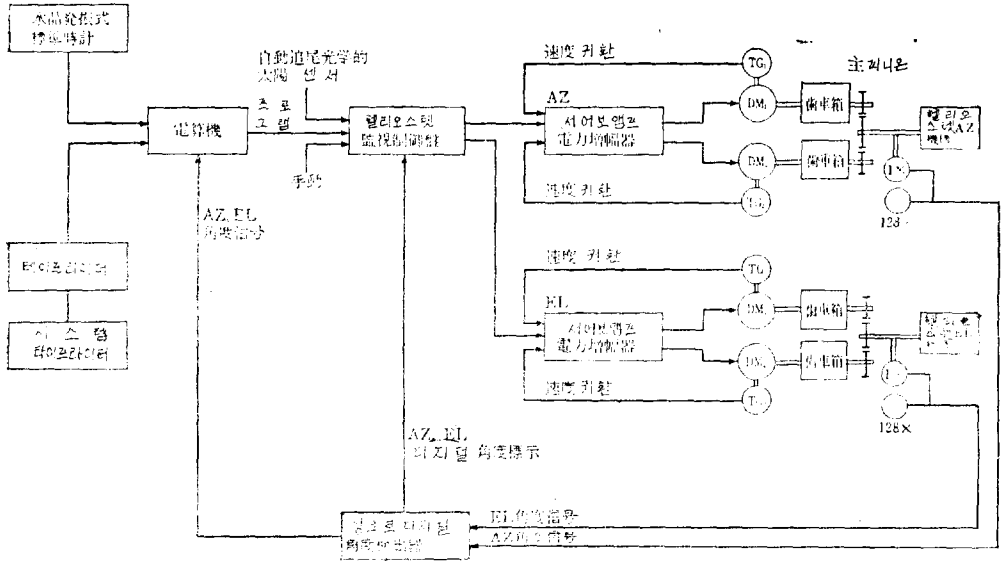
또한 手動모우드는 格納位置까지 最大速度로서 驅動하는 경우가거나 最初로 太陽像을 探知할 때 便利하



- AZ₁: 太陽의 方位角 (夏至)
- AZ₂: " (春分/秋分)
- AZ₃: " (冬至)
- AZ₄: 太陽의 速度 (夏至)
- AZ₅: " (春分/秋分)
- AZ₆: " (冬至)

- EL₁: 太陽速 (夏至)
- EL₂: " (春分/秋分)
- EL₃: " (冬至)
- EL₄: 太陽의 速度 (夏至)

그림 7. 헬리오스탯의 回轉角速度



DM: 直流電動機, TG: 타코메타미터, 1x: (軸速 1倍) 싱크로發信器, 128x: (128倍速) 싱크로發信器

그림 8. 헬리오스콧制御裝置의 블록圖

도록 可變速度와 逆轉이 可能한 速度指令모우드로 되어 있다.

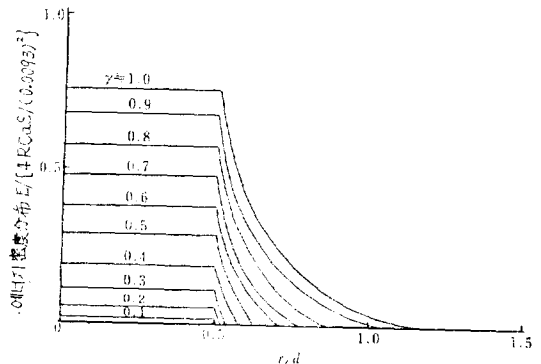
4.3 溫度制御系

太陽爐로서 照射加熱을 行할 경우 溫度制御는 첫째, 拋物面에의 入射光量의 調節 둘째, 試料에 대한 入射光量의 調節 셋째, 試料의 支持位置를 光軸方向으로 移動시키는 方法 등이 考慮되고 있다.

둘째 方法은 集光된 에너지束을 遮斷하기 때문에 強制冷却의 必要性이 있으며 또한 셋째 方法은 焦點近方의 放射束密度分布로 因하여 溫度勾配가 매우 急하므로 溫度制御가 困難하다. 따라서 첫째 方法이 溫度制御로서 가장 容易한 方法으로 알려져 있다.

한편 拋物面鏡에 대한 入射光量의 調節에도 各種 方法이 있으며 拋物面鏡의 幾何學的 精度는 中心部가 높으므로 溫度制御의 精度를 높이기 위해서는 非回轉形 對稱狀 셔터보다는 回轉對稱形 鏡이 有望하다고 한다. 예를들면 日本名工試驗研究所의 2號爐는 1,800~2,300 °C/S의 急熱急冷方式을 使用하고 있는데 이 경우 輝度溫度計에 의한 總合測溫誤差는 3,000K±25K였고 셔터의 開도가 手動에서는 約 1/10S이었다.

또한 本方式으로서 溫度制御를 行한 實驗結果3,000



r: 太陽像內 中心부터의 距離, r: 셔터開閉度 (半徑比=Ri/Ro)

그림 9. 셔터開閉에 의한 焦點面의 에너지密度分布의 變化

K에서 ±10K의 調節을 1時間以上 行할 수 있었다. 研究에 의하면 機械的인 시스템誤差는 除去할 수 있었으며 本質的으로 溫度計의 溫度誤差가 重要한 因子가 되었다.

5. 太陽爐의 應用分野

小形 太陽爐를 利用하여 開發된 利用分野는 高溫物性과 高溫反應에 대한 研究가 中心이 되었으며 太陽爐는 研究室에 있어서 高溫發生의 手段이 되고 있다.

高融點金屬酸化物的 凝固點과 分光放射率의 測定은 프랑스의 Laboratories des ultra-Refractaires에서 10年間 行하였으며 Ln_2O_3 를 비롯해서 數十種의 酸化物 메이타가 發表되었다.

또한 IUPAC 高溫委員會의 主催로서 1966年以來 2,000°C以上의 高溫領域에 있어서 2次高溫設定에 대한 國際協同研究에도 參加하여 이미 Al_2O_3 , Y_2O_3 에 대한 作業도 完了하였다.

이미 記述한 冷却曲線에 의한 熱分解方法으로서 日本名工試驗研究所에서는 ZrO_2-CaO , ZrO_2-MgO , $ZrO_2-Y_2O_3$, ZrO_2-TiO_2 , ZrO_2-HfO_2 , ZrO_2-SrO , $ZrO_2-Sc_2O_3$, $Al_2O_3-Y_2O_3$, $Al_2O_3-CeO_3$, $Al_2O_3-Ga_2O_3$, $Al_2O_3-La_2O_3$ 및 $La_2O_3-Y_2O_3$ 系 등의 2成分系 高溫相平衡狀態圖를 만들었다.

한편 프랑스에서도 $ZrO_2-Sm_2O_3$, $ZrO_2-La_2O_3$, $ZrO_2-Gd_2O_3$, $ZrO_2-Er_2O_3$, $ZrO_2-Yb_2O_3$ 系나 ThO_2 , Ln_2O_3 系 및 $Ga_2O_3-Ln_2O_3$ 系에 대해서도 研究를 進行하고 있으며 日本東北大學에는 ThO_2-ZrO_2 系의 相平衡을 研究하고 있다.

그리고 高溫에 있어서 太陽爐와 組合도 各種 測定機器의 開發을 行하고 있으며 材料의 機械의 強度의 測定과 解析을 비롯해서 高溫×線回折裝置, 電導變의 測定이나 高溫放射率 및 反射率測定用 分光計의 開發등도 進行시키고 있다.

앞으로는 熱傳導率, 熱擴散率, 蒸發率 등의 測定과 thermophysical properties을 얻기 위한 測定技術의 開發 및 高溫熱性狀을 究明할 豫定이다.

또한 高溫反應分野에서는 이미 固相-液相, 固相反應에 의한 炭化物, 硼化物 등의 合成이나 複酸化物的 熔融合成이 多數試圖되고 있으며 以外에 耐熱材料의 高溫에 있어서 分解, 酸化, 窒化 및 蒸發 등의 問題에 대해서도 프랑스와 日本名工試驗研究所가 研究를 進行하고 있다.

6. 大形 太陽爐의 課題

太陽에너지의 經費가 石油등의 化石燃料보다 높은 現時點에서 太陽爐를 産業用熱源으로 直結하여 實用化를 圖謀한다는 것은 無理이나 長期的인 觀點에서 化石燃料의 枯渴에 對備하기 위하여 代替에너지資源의 開發은 不可缺한 것이다.

한편 高溫熱源으로서 太陽爐에 賦課된 役割은 매우 重大하며 Odeillo大形 太陽爐에서도 실리카, 알루미나, 스피넬 등의 熔融耐火物을 數百 kg/h의 比率로서 製造試驗을 行하고 있으나 本格的인 生産計劃은 아직 없다고 한다.

그러나 日本工業技術院에 의하면 先사인計劃인 太陽에너지프로젝트중에서도 소프트테크놀로지의 하나로서 日本電機工業會에 太陽爐利用專門委員會를 設置하였으며 太陽爐의 經濟性, 立地條件 등 以外에 太陽爐利用에 관한 妥當性調査를 行하고 있다. 그런데 專門委員會中 熔融耐火物의 生産과 실리콘 등의 金屬生産 및 高溫化學反應에 따르는 利用등의 3個 分科委員會로 나누어 檢討를 行하고 있다.

論文掲載料變更案内

當學會에서는 會員여러분의 負擔을 줄이고자 아래와 같이 掲載料를 變更하였으니 諒知하시기 바랍니다.

	現 行	改 定
審 查 料	없 음	12,000원
掲 載 料	전 액 負擔 (1page當 8,000원)	4 page까지 學會負擔 5 page부터 投稿者負擔 (1page當 8,000)
備 考	投稿時掲載料納付	投稿時審査料納付

※1981年 4月 15日 施行