

〈解 說〉

最近의 高性能傳熱管의 開發

“Recent Developments in High-Flux Heat Transfer Tubes

徐 正 閔*

Jeong-Yun Seo

1. 序 論

最近의 energy 消費의 急激한 增加와 石油供給의 削減 및 石油價格의 昂등에 의한 energy 危機는 先進諸國의 政策, 經濟, 社會活動에 큰 變化를 가져왔다. 이 energy 問題의 解決을 위해서 各國에서는 새 energy 源, energy 節約에 관한 研究 및 技術開發의 必要性을 痛感하고 있는 實情이다. 새 energy의 開發을 위해서 最近 우리 政府에서도 太陽 energy 研究計劃을 發表, 推進中에 있는 것은 때늦은 감은 있으나 多幸한 일이다.

그런데 太陽 energy 技術, 石炭 gat化 技術, 水素 energy 技術 등은 모두 基礎的 研究로부터 시작하여 實用化하기까지는 長期間이 要한 것으로 생각된다.

특히 앞으로는 繼續 工業國으로서 發展을 持續하려면 物質의 再循環使用 資源의 有効利用, 環境汚染防止 用裝置의 活用등이 必然的으로 要求되며 따라서 이들의 實用化를 위해서는 또 다른 側面에서의 energy의 消費增加가 豫想된다.

現在 우리나라의 energy 源中에서 約 11%를 차지하고 있는 水力을 除外하고는 石油, 石炭 및 原子力등은 모두 熱 energy로 變換되어 그 一部는 熱 energy 그대로의 狀態로 사용되는 외에 電氣 energy 혹은 力學 energy로 變換되어 利用되고 있다.

그리고 앞서 말한 새 energy는 모두 熱 energy와 直接關係된다. 따라서 energy 問題에는 產油國의 石油 政策에 適한 向方과 더불어 工學技術의 對策으로서는 熱 energy에 관한 基礎研究와 技術開發이 매우 重要한 意味를 갖게 됨은 두말 할 나위가 없다.

工業과 技術面에서의 energy 問題의 具體的인 內容으로서 energy의 需要量과 供給量의 過不足, energy 價格의 昂등 energy의 大量消費에 의한 環境汚染등을 들

수 있으며 이 때문에 一次的으로 energy 節約을 위한 強力한 推進이 要望된다.

energy 節約을 위한 技術은 大部分 熱 energy 節約을 위한 方策을 구하는데 있으며, 그 方策이란 모두 熱交換 技術에 관한 것이라고 할 수 있다.

이러한 意味에서 볼 때 energy 問題에 對應하기 위해서는 適切한 熱交換技術의 研究開發의 積極的인 推進이 必須的이라고 해도 過言은 아닐 것이다.

여기서 熱 energy 節約을 위한 熱交換技術중에서 熱 energy 利用의 效率化는 熱交換器의 傳熱特性向上에 의한 性能의 改善, 排熱 등의 未利用 energy의 活用, 熱 energy 節約을 위한 熱交換器의 設置등이 主要內容이 될 것이다.

熱交換器에는 boiler와 같이 多量의 熱 energy를 取扱하는 것을 비롯하여 家庭用 冷蔵庫, 冷房機器와 같이 比較的 적은 量의 熱 energy를 取扱하는 것, 各種 高溫 gas-gas 熱交換器, 超電導送電 등의 超低溫機器에 附屬되는 低溫熱交換器 혹은 排熱回收, 太陽熱利用을 위한 裝置에 포함되는 熱交換器등이 있으며, 그 種類와 內容에 있어서 多樣하다.

따라서 새 型式의 熱交換器 혹은 優秀한 傳熱特性을 갖는 表面, 形狀을 갖는 傳熱管의 研究·開發은 尙층 더 切實하게 要望된다.

最近注目을 받고 있는 熱交換器用傳熱管중에는 管軸 方向을 따라 表面을 波狀으로 加工한 것(corrugate式)¹⁾과 軸과 平行이 되게 만든 좁은 홈을 갖는 管(fluted tube)²⁾ 등이 있는데 이들에 있어서는 다같이 表面의 凹凸에 의한 面附近의 亂動을 促進시켜서 優秀한 對流 熱傳達의 特性을 갖도록 하고 있다. 한편 凝縮과 沸騰 등의 相變化를 同伴하는 熱傳達에 대해서는 細溝, 氣孔質金屬層, 細孔 등을 갖는 面에 관해서 새로운 關心

* 正會員, 仁荷大學校 工科大學

이 集中되고 있다.

이 後者의 傳熱面은 凝縮熱傳達에서는 平滑面보다 약10배의 높은 熱傳達率을 가지며 沸騰熱傳達에서는 礫面과 液의 溫度差는 平滑面의 경우보다 약1/5의 값을 갖는다. 동시에 限界熱流束은 5割以上으로 增加시킬 수 있음이 알려져 있다.

따라서 本論에서는 後者의 傳熱面中에서 最近에 알려진 飛躍的으로 높은 傳熱性能을 갖는 傳熱面에 關係서 紹介하기로 한다.

2. 沸騰과 凝縮熱傳達

熱이 傳達되는 方式을 分類하면 周知되어 있는 바와 같이 輻射傳導, 對流 및 沸騰과 凝縮이 있다. 이들 中에서 流體의 相變化를 同伴하는 沸騰과 凝縮은 가장 複雜한 現象이며, 이 現象에 對해서는 아직도 알려지지 않는 部分이 많은 만큼 熱傳達의 促進을 위한 새로운 着想이 많이 나올 可能性도 내포하고 있다.

本論에서는 沸騰과 凝縮現象을 促進시키며 傳熱性能을 向上시키는 特殊한 微細構造를 갖는 傳熱面(thermoexcel 이라고 命名되고 있다)에 對해서 다루고자 한다.

沸騰熱傳達에서는 蒸氣泡이 되도록 많이 傳熱面에서 發生하여 周圍의 液을 심하게 攪拌케 하는 것이 바람직하다.

觀察에 의하면 蒸氣泡이 發生하는 곳은 定해져 있는 것은 아니며 表面粗度가 클수록 發生하는 確率이 크다

Fig. 1과 같이 多孔質인 燒結金屬層으로 된 傳熱面은 表面을 단순히 거칠게 한 面보다 熱傳達率이 훨씬 크다.^{5,4)}

凝縮現象도 沸騰現象과 마찬가지로 日常生活에서 흔히 接하는 現象이다. 一般적으로 凝縮熱傳達에서는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 이미 凝縮된 液의 層을 통하여 蒸氣分子의 energy를 빼앗아야 한다.

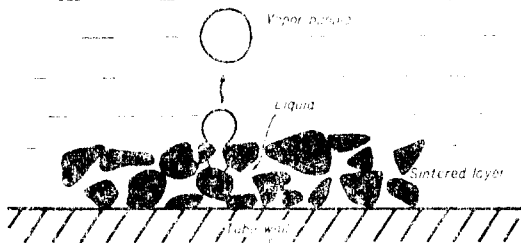


Fig. 1 Sintered Metallic Layer.

The porous sintered metal layer serves as the nucleus for vapor bubble generation, thereby increasing boiling heat transfer.

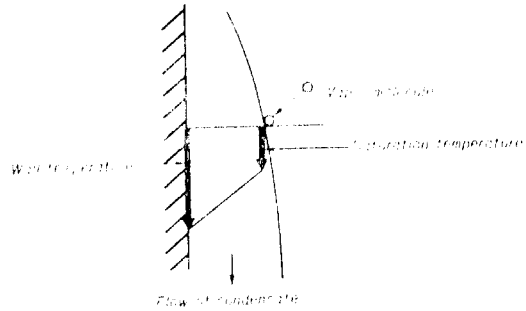


Fig. 2. Condensation.

As the condensate layer thickens, a larger temperature difference will be necessary for heat transfer.

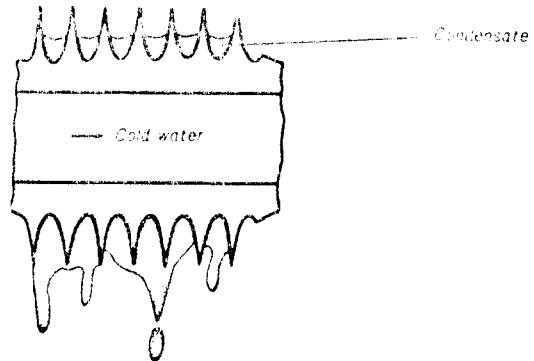


Fig. 3. Low-finned Tube.

Condensation heat transfer coefficient is increased by the combined effects of increased heat transfer area and thinning of condensate layer near the fin tips.

蒸氣分子는 거의 飽和溫度에서 凝縮되므로 液層이 두꺼울수록 傳熱面의 溫度를 낮게 保持해야만 된다. 이렇게 되던 結局 熱移動을 위해서 큰 溫度差를 必要로 하게 되어 따라서 熱傳達率은 작아진다. 從前부터 凝縮傳熱管에 사용되어 온 方法은 Fig. 3과 같이 키가 낮은 fin을 多數設置하는 方法을 썼다. 왜냐 하면 이렇게 하므로서 傳熱面積이 增大할 뿐만 아니라 fin의 先端近傍에서 液膜의 얇은 領域이 생기게 되어, 熱傳達率이 增加하기 때문이다. 또 滴狀凝縮은 膜狀凝縮에 비하여 2~20배의 熱量을 傳할 수가 있다. 이것도 液滴周邊部의 液層이 極端의 薄으로 얇아지기 때문이다. 그러나 이 滴狀凝縮을 工業적으로 利用하고자 하는 試圖는 現在로서는 거의 成功을 거두지 못하고 있다.

3. 高性能傳熱面의 構造와 性能^{5,6)}

沸騰 或은 凝縮의 傳熱促進法에 對해서는 그동안 많은 案이 나왔으나, 工業的인 實用化的 實例는 매우 적다.

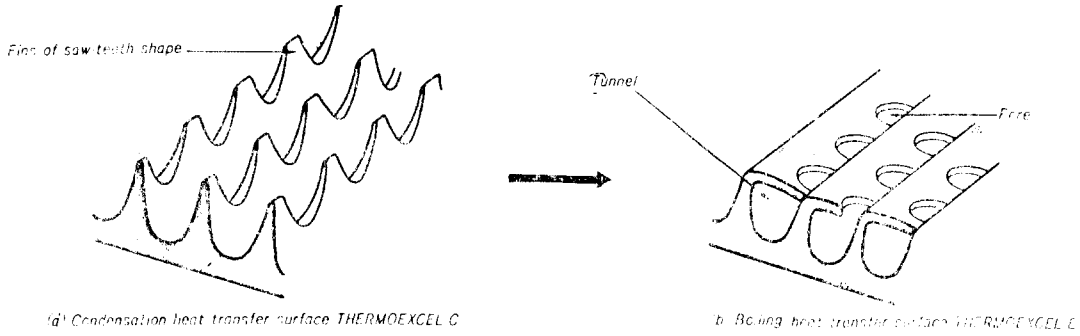


Fig. 4. Manufacture of THERMOEXCEL.

The condensation heat transfer surface has numerous fins of saw-teeth shape. On the boiling heat transfer surface, the saw-teeth are bent to horizontal position, to form tunnels with regularly spaced pores on the roof.

그것은 價格이 비싸게 되고 또 燒結金屬層과 같은 傳熱面에서는 品質管理가 어렵기 때문이다.

따라서 實用化의 見地에서 생각되어야 할 高性能傳熱面(thermoexcel이라고 命名되고 있다)은 傳熱面으로서의 性能이 優秀해야 할은 勿論, 製造工程이 간단해야 한다. 高性能傳熱面으로서 提案된 것으로서는 Fig.4 (a)와 같이 表面에 톱니모양의 突起를 만들어 凝縮熱傳達을 促進하도록 한 微細管(앞으로 thermoexcel-C라고 한다)과 Fig. 4(b)와 같이 構造가 tunnel모양으로 되고 表面에 規則的인 細孔을 뚫어서 沸騰熱傳達을 促進하도록 考案한 細孔面管(앞으로 thermoexcel-E라고 한다)이 있다.

이것들은 製造原價도 싸며 機械的으로 加工이 可能하기 때문에 品質管理도 容易하여 實用化面에서도 有利하다.

① Thermoexcel-C의 性能

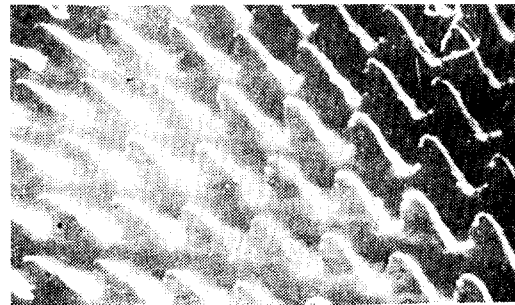
Fig. 5에는 thermoexcel-C의 斷面과 表面의 顯微鏡寫眞을 표시하였다. 液體의 凝縮에 있어서는 凝縮量과 滴下量이 같은 때 凝縮은 安定狀態에 돌입하게 되며 따라서 凝縮量을 增加시키려면 滴下量이 보다 많으면 된다. 즉 傳熱面은 보다 滴下에 適合한 形狀으로 하면 된다.

Fig. 6에 의하면 low-finned tube의 圓板狀의 fin은 fin이 없는 普通銅管에 비하면 液의 滴下를 위해서 相當히 有利하다.

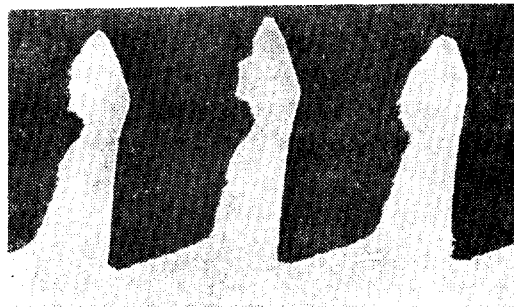
그런데 thermoexcel-C는 끝이 銳利한 톱니모양의 直立된 fin을 갖기 때문에 앞서 말한 바와 같이 液의 滴下는 더욱 效果의으로 이루어지며 언제나 傳熱面의 液膜이 얇아지므로 이로 인한 熱抵抗도 작어진다.

따라서 結果의으로는 높은 傳熱效率을 얻게 된다.

thermoexcel-C의 性能調査를 위해서 實施한 實驗結



(a) Surface



(b) Cross section (x50)

Fig. 5. Enlarged View of THERMOEXCEL-C.

The photomicrographs show numerous saw-teeth fins standing upright.

果는 다음과 같다. 먼저 銅板上에 thermoexcel-C의 加工을 하여 이것을 冷媒 R-113의 蒸氣中에 垂直으로 세워서 銅板의 裏面을 물로 冷却하여 凝縮시키도록 하였다.

Fig. 7은 縱軸에 熱傳達率, 橫軸에 蒸氣溫度와 傳熱面의 表面溫度와의 差를表示하며 비교를 위해서 平滑面의 實驗結果와 普通 사용되던 낮은 키의 fin을 갖는 면(19 fins per inch)의 性能도 表示하였다. 實質的인

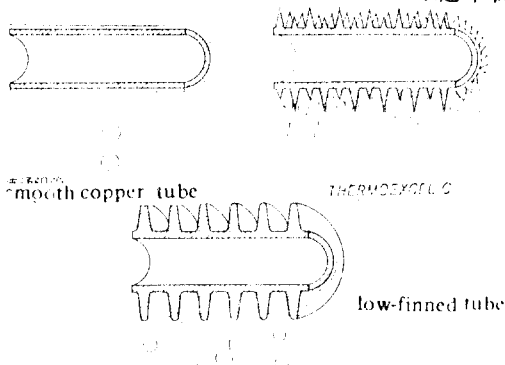


Fig. 6.

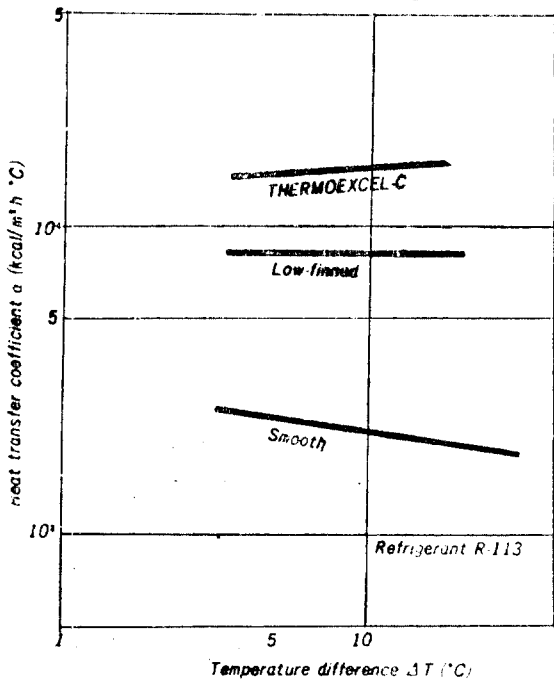


Fig. 7. Performance of THERMOEXCEL-C
A THERMOEXCEL-C surface has a heat transfer coefficient about seven times better than that of a smooth surface.

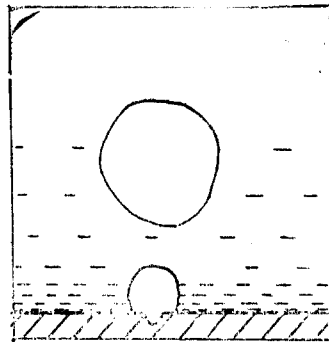
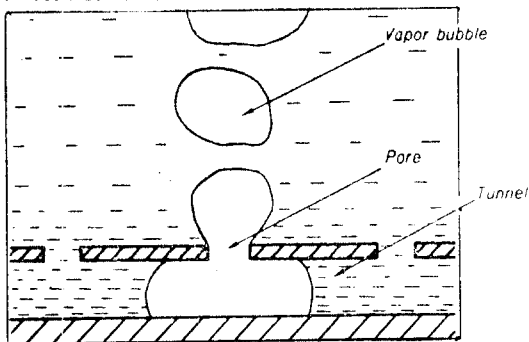


Fig. 9. Boiling Model (superheated liquid) This is an explanation of boiling heat transfer.

傳熱面積의 增加는 平滑面에 대해서 fin이 있는 면에서는 2.9倍, thermoexcel-C에서는 3.5倍이치라는面積의 增加以上의 性能이 나타나고 있으며 thermoexcel-C의 熱傳達率이 매우 높다는 것을 알 수 있다.

③ Thermoexcel-E의 性能

Fig. 8은 thermoexcel-E의 斷面과 表面의 顯微鏡寫眞을 表示한다. tunnel의 pitch는 각각 用途에 따라 다르지 않는 0.1~0.8mm程度가 有効하다.

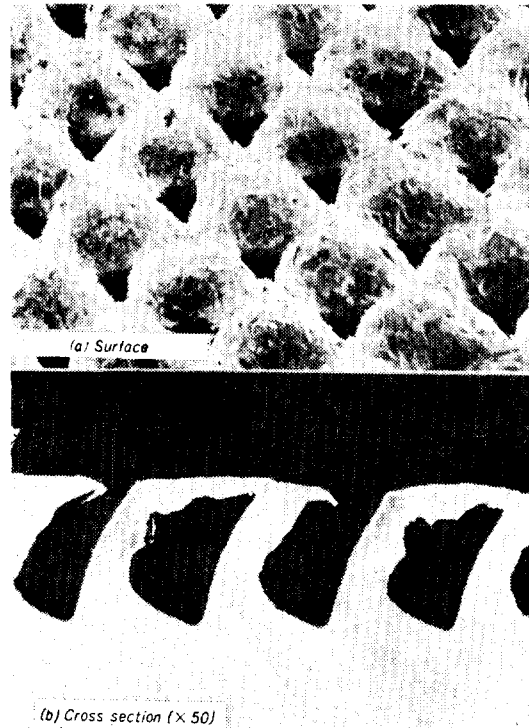


Fig. 8. Enlarged View of THERMOEXCEL-E.
The photomicrographs show the tunnels on the heat transfer surface and the pores on the tunnels.

傳熱面の 溫度를 液의 飽和溫度以上으로 높이면 tunnel內的 液은 過熱되어 蒸氣泡가 發生하기 쉽게 된다. 일단 氣泡가 發生하면 Fig. 9(a)와 같이 tunnel內部에는 蒸氣가 언제나 保持되어 이것을 核으로 하여 氣泡의 成長·離脫이 活潑하게 反復되게 된다.

Fig. 9에는 過熱된 液의 領域이 표시되어 있으며 thermoexcel-E에서는 tunnel 內部에 있는 過熱液이 蒸發하여 多量의 蒸氣를 供給하게 된다. 이것에 比하여 普通平滑面에서는 Fig. 9(b)와 같이 傳熱面上의 過熱層이 얇으며 이 過熱液이 蒸發하여 氣泡가 成長하기까지에는 長時間을 必要로 한다. 다시 말해서 thermoexcel과 同一한 방법으로 氣泡를 發生시키려면 傳熱面の 溫度를 높게 保持하여 過熱液層의 溫度를 높여야 한다.

따라서 Fig. 10에서와 같이 普通銅管 low-finned tube

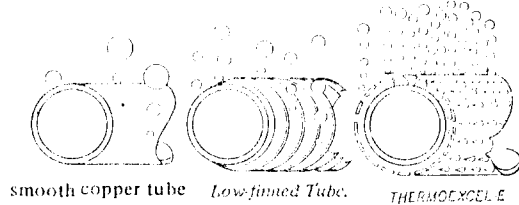


Fig. 10

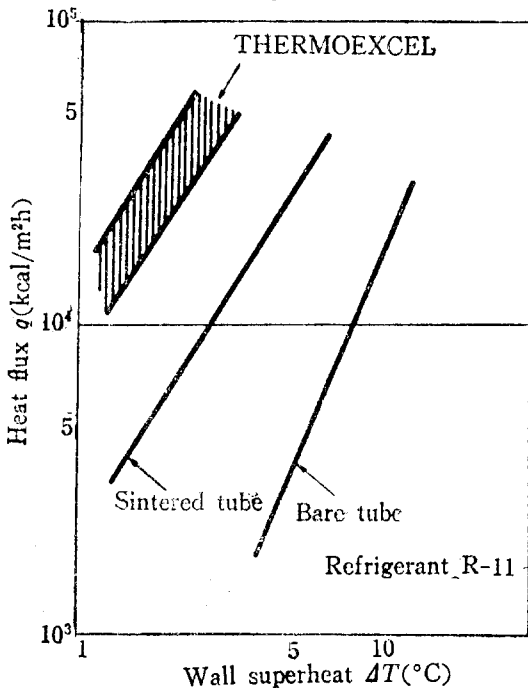


Fig. 11. Performance of THERMOEXCEL-E
THERMOEXCEL-E tube requires only about one-fifth the super heat needed by a bare tube, to transfer the same amount of heat flux.

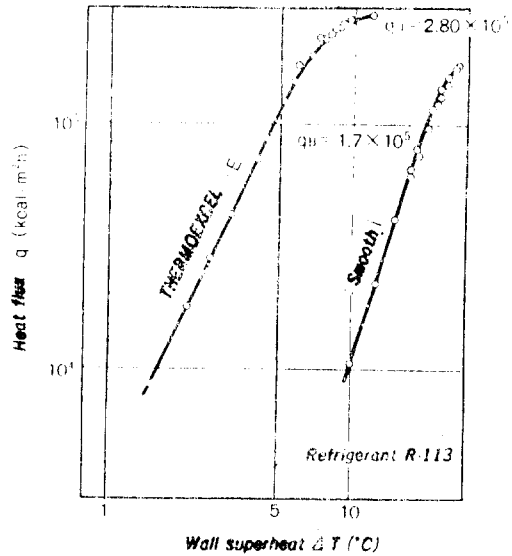


Fig. 12. Critical heat flux compared for thermoexcel-E and smooth surface.

및 thermoexcel-E에서의 氣泡發生狀態는 달라질 것이다.

實際로 傳熱面上의 熱流束과 過熱度(傳熱面の 壁溫-飽和液의 溫度)를 測定한 結果는 Fig. 11과 같다.

이것은 銅管內部에 蒸氣 heater를 넣고 이것을 加熱하여 管外側에서 冷媒 R-11을 沸騰시켜서 얻은 것이다. 여기서 銅管은 表面이 平滑한 것, 燒結金屬層으로 된 것, 및 thermoexcel의 加工을 한 것등, 3種을 사용하였으며 이것들을 비교한 것이다.

이것에 의하면 thermoexcel은 작은 過熱度下에서도 많은 氣泡가 빈번하게 發生하기 때문에 큰 熱流束을 얻을 수 있으며, 또 同一한 熱流束을 傳하는데 있어서 必要한 過熱度는 平滑面과 比較하면 約 1/5이 되며, 또 同一한 過熱度에서는 約 10倍의 熱流束을 傳할 수 있음을 알 수 있다.

또 thermoexcel-E는 傳熱性能이 높을 뿐만 아니라, Fig. 12에서와 같이 臨界熱流束도 平滑面과 比較할 때 約 5割以上의 매우 높은 값을 갖는 特性을 갖는다.

4. Thermoexcel의 用途

熱源으로부터 沸騰에 의하여 熱을 吸收하고 蒸氣를 放熱源에 유도하여 凝縮시키는 熱輸送方法은 從前부터 많이 利用되고 있다.

一般의 으로 熱交換裝置는 製法, 價格, 使用狀況등에 따라 制約을 받게 되므로 thermoexcel의 適用을 試圖 하려면 그 나름대로의 研究가 必要함은 勿論이다.

그러나 thermoexcel이 加工도 平面, 圓管의 外面, 或은 適當한 크기의 徑을 갖는 管이면 內面加工도, 可能하며 또 母材의 材質은 銅, 알루미늄, 鋼등 어느 것이든 무방하다.

따라서 用途는 금후의 研究에 따라 廣範圍하게 適用되리라 期待되지만 特히 thermoexcel의 장점을 가장 잘 살릴 수 있는 用途는 다음의 두 가지를 들 수 있다.

① 多管式高効率熱交換器

thermoexcel은 작은 溫度差에서도 大量의 熱을 傳할 수 있으므로 低溫度의 熱源으로부터 energy를 이끌어 내는데 有效하다.

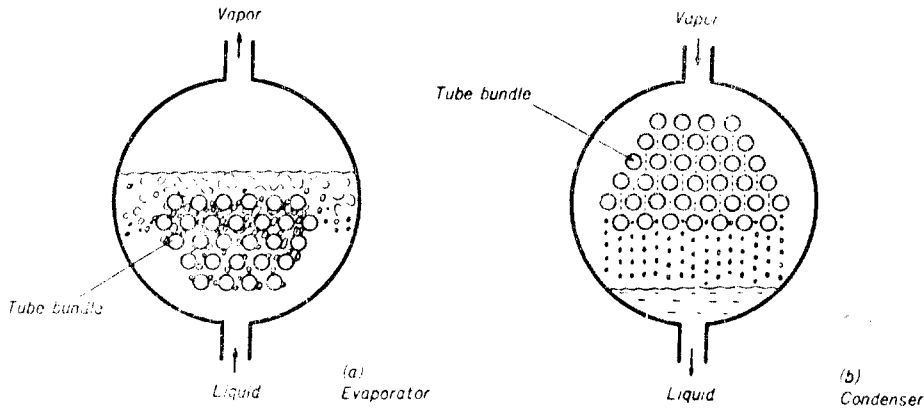


Fig. 13. Multitube Heat Exchanger.

Show are the states of boiling and condensation in a multitube heat exchanger to which THERMOEXCEL machining has been applied

이에 關한 調査를 위해서 Fig. 14와 같이 thermoexcel 傳熱管으로 管群을 만들어서 傳熱實驗을 한 結果, 管群으로서의 傳熱性能도 Fig. 7, 11에 나타난 性能向上과 같은 程度의 增加가 있음을 알게 되었다.⁷⁾

이 理由에 대해서는 다음과 같이 말할 수 있다. 沸騰의 경우, thermoexcel에서는 微小한 氣泡의 發生密度가 크며, 活潑히 噴出하기 때문에 周圍의 影響을 거의 받지 않게 된다. 또 凝縮의 경우도 上部의 管으로부터 落下하는 液이 微細한 fin을 덮지는 못할 것이며, 따라서 극히 銳利한 fin效果는 언제나 유지된다.

이와같이 thermoexcel은 多管式 熱交換器의 性能을 向上시키며 300冷凍ton級의 冷凍機의 蒸發器, 凝縮器에 대해서 試算하였더니 low-finned tube를 사용한 경우보다 容積에 있어서 約 30%의 縮小가 可能하였다고 한다.

② 高性能 thermosiphon cooler

發電機, 變壓器 등의 電氣機械, 혹은 半導體를 사용

예를 들면 먼저 排熱을 回收하는 熱交換器에 사용할 수 있을 것이다. 또 建物冷房에 사용되는 冷凍機의 熱交換器도 比較的 작은 溫度差에서 作動하고 있다. 이들 熱交換器는 多數의 傳熱管을 shell中에 좁은 間隔으로 配列하여 可能한 限, 小型으로 만들고 있다. Fig. 13은 shell內에 管群(tube bundle)을 配置한 개요도로써 (a)는 管外面의 液體가 沸騰을 일으키는 경우이며, (b)는 管外面의 蒸氣가 凝縮을 일으키는 경우이다.

이와 같은 管群에서는 他管으로부터 發生하는 氣泡, 或은 흘러서 밑으로 떨어지는 凝縮液이 thermoexcel의 效果에 어떤 影響을 미치느냐가 問題된다.

한 電子機器에 있어서 이들 機器의 壽命을 保證하기 위해서는 發熱源에서부터 熱을 빨리 끌어내는 效果的인 高性能 冷却器를 만들 必要가 있다.

이를 위해서 最近 heat pipe가 檢討의 對象이 되고 있다. heat pipe는 wick材의 毛細管力을 驅動力으로 하여 動作流體의 循環을 이룩하고 있다. 따라서 放熱部를 發熱源의 밑에 設置하므로써 凝縮液은 重力에 이겨서 蒸發部로 되돌려 보낼 수 있다. 즉 매우 좁은 場所로부터 任意의 方向으로 熱을 이끄러낼 수 있는 것이 heat-pipe가 갖는 最大利點이다.

그러나 性能이 良好한 wick材는 價格이 비싸기 때문에 이 點이 廣範圍한 普及을 가로 막고 있는 難點이라고 할 수 있다.

그러나 實際機器에서는 重力을 利用하여 循環이 이루어지는 경우가 大部分이다. 한 例로서 Fig. 15는 大容量 thyristor를 冷却하는 放熱器를 표시한 것이다. 放熱器는 中空容器로서 內部에는 冷媒가 封入되어 있

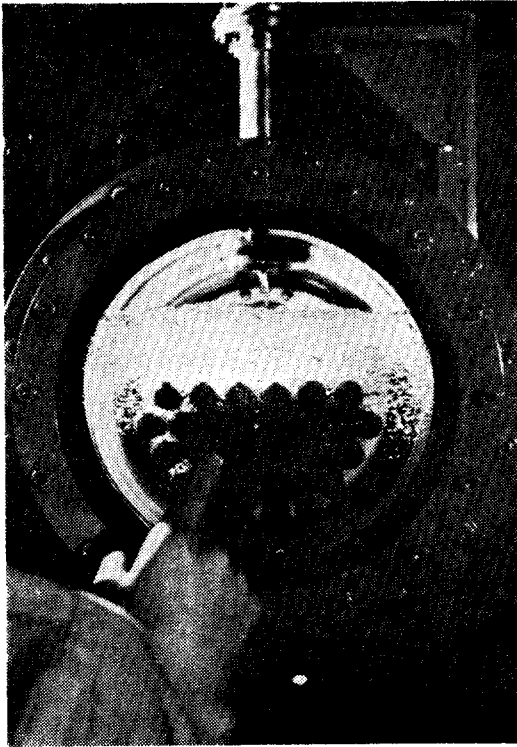


Fig. 14. Experiment of boiling in a multitube (thermoexcel-E)

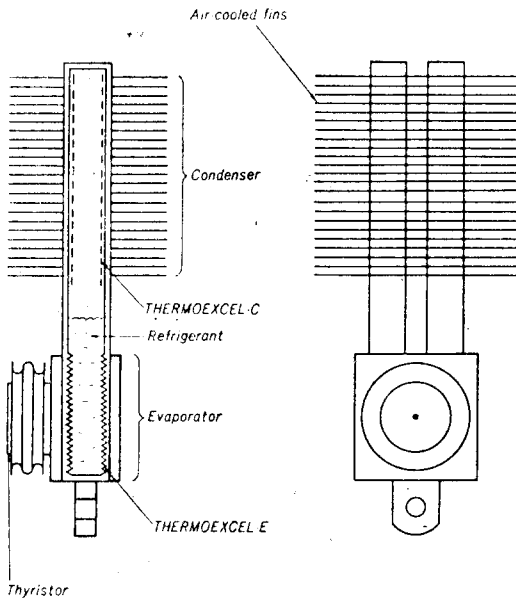


Fig. 15. Cooler for Thyristor.

Thermoexcel machining has been applied to the inside wall of a thermosiphon. This is an example of application of Thermoexcel to thyristor cooling.

으며 蒸發部와 凝縮部로 구성되고 있다.

蒸發器에는 thyristor가 壓着되어 있어서 thyristor로부터의 熱은 容器壁을 통하여 冷媒에 傳해지며 이것을 沸騰시키게 된다.

蒸氣가 된 冷媒는 凝縮部로 上昇하며, 空冷 fin을 통하여 熱이 뱃기면서 凝縮하게 된다.

이때 凝縮液은 重力에 의해서 蒸發部로 되돌아 간다 蒸發部와 凝縮部の 傳熱壁은 thermoexcel 加工을 하면 放熱器를 小形으로 할 수 있을 뿐만 아니라 thyristor의 負荷를 增加시킬 수 있다. 例로서 1.5Kw容量을 갖는 thyristor의 冷却器는 蒸發部の 容積을 平滑面의 경우와 비교할 때 約 1/4로 小形化된다고 한다.

또 凝縮部에서는 空冷 fin이 있기 때문에 容積을 감소시킬 수는 없지만 thermoexcel-C를 採用하므로서 熱抵抗은 減少하게 된다. 따라서 thyristor의 溫度低減을 위해서 有用하게 利用될 수 있다.

5. 結 論

傳熱性能이 優秀한 傳熱面 thermoexcel의 普及을 위해서는 傳熱面の 汚染(fouling), 腐蝕 등에 의해서 성능이 어떤 影響을 받느냐 하는 問題를 밝히는 일일 것이다. 이에 대한 檢討에 의하면 燒結管에 비하여 汚染의 影響은 적으며 또 表面의 酸化로 인한 影響도 받지 않는다는 것이 確認되고 있다.

따라서 앞으로는 各方面에서의 應用이 가능하도록 試圖하면서 아울러 長期間에 걸친 耐久性에 관한 調査研究을 併行시키고, 同時에 지금까지의 結果로 보아서 물에 관한 熱傳達率의 向上과 汚染問題를 研究하는 일이 今後の 重要な 課題라고 본다.

그리고 傳熱管의 性能向上에서 오는 熱交換器의 材料의 削減은 資源節約과도 關聯된다는 點을 留意해야 한다. 이상에서 高性能傳熱面의 開發이 아닐로 energy의 節約을 위한 問題의 解決과 直結됨을 다시 한번 強調하는 바이다.

參 考 文 獻

- 1) 丸誠重工業株式會社, 資料(昭 49-8)
- 2) Carmavos, T.C.: Int Seminar, Trogir Yugoslavia (1972)
- 3) P.S. O'Neill and others: Heat Transfer Symp., 68th National Meeting, AIChE (1971~2)
- 4) 徐正閔: 大韓機械學會 Vol. 13, No. 3, (1973)
- 5) Fujie, K.W. Nakayama, et al: 14th I.I.R. Symposium paper Bl.97
- 6) 中山, 大黑ほか; 日立評論 57, 637(50-8)
- 7) 荒井, 福島; 機械の研究 Vol. 29, No. 7. (1977).