

## 熱交換器의 製作

裴 洵 勳\*

### 序 論

熱交換器는 그 用途가 多樣한 만큼 그 形態도 多樣하여 그 製作을 一般적으로 記述하기는 힘들 나 가장 많이 쓰이는 形態 中에서 公同적인 製作 技術에 關하여 종래에 사용하던 方法과 새로운 方法에 關하여 소개하고자 한다.

一般적으로 熱交換器의 設計는 特殊한 用途에 適合한 形狀을 選擇하기 때문에 製作이 機械化되지 못하고 아직도 많은 部分을 人力에 依存하기 때문에 製作者의 技術水準에 따라서 그 成能이 크게 달라지고 이 成能의 變化는 熱交換器의 外形으로는 判別할 수 없기 때문에 信用있는 製作所의 製品에 依存하게 된다. 冷凍시스템에서도 空氣調告機와 같이 標準화된 商品을 除外하고는 産業用인 경우 特殊 設計이기 때문에 製作에서 注意하지 않으면 成能和 壽命에 크게 影響을 미친다.

### 熱傳達表面의 形態

熱傳達는 보통 두개의 流體 間에 서로 섞이지 않고 일어나야 하기 때문에 流體 間에 金屬 表面이 서로를 分離하고 있는데 이 表面을 熱傳達 表面이라고 한다. 이 表面은 平板으로 되어 있는 경우와 管으로 되어 있는 경우로 區分할 수 있다

平板을 쓰는 경우에는 板材를 구부리거나(corrugating) 金型으로 成形(stamping)하여 板 여러장을 겹쳐서 그 사이를 soldering, brazing, 熔接等의 方法으로 接着하여 폐쇄된 流動路를 形成

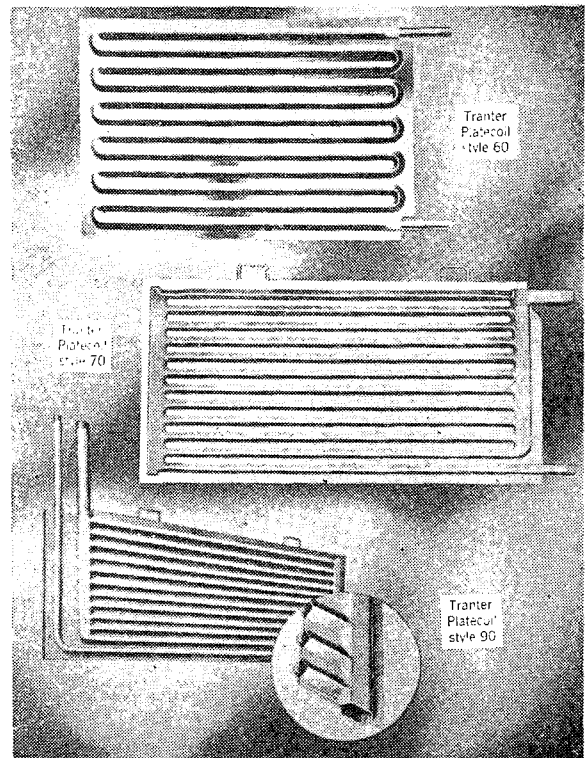


그림 1 板材로 만든 熱交換器

한다. 이 경우에는 管을 熱傳達 表面으로 使用하는 경우 보다 材料費가 싸고 形態를 比較的 自由로 할 수 있기 때문에 流動路의 設計를 熱傳達 效果는 높고 壓力損失을 最少로 할 수 있는 長點이 있다. 最近에는 合成接着劑의 使用도 좋은 結果를 준다는 것이 立證되어 製作費가 더욱 節減되게 되었다. 그러나 板材를 接着하여 製作하는 경우 高壓이 걸리면 接着部分에서 集中應力이 發

\*正會員, 韓國科學院

生하고 crack 이 發展하여 熱交換器가 파괴되기도 한다. 또한 溫度가 극심하게 差異가 나는 경우에는 熱應力 때문에 剪斷應力에 의한 破壞도 可能하다. 폐쇄 回路로 된 流動路의 洗滌도 또한 板材를 쓰는 경우의 結점이다. 그러나 大量生産이 必要한 自動車의 放熱器, 빌딩 暖房用 加熱板 空氣調和機의 蒸發器 等에는 特殊한 強力 brazing 方法이나 熔接을 하여 使用하는데 이때 熱交換器 內部를 흐르는 流體는 깨끗하여 scale 이 생기지 않도록 한다. 空調機의 brazed aluminun 熱交換器는 新製品으로 開發 도중에 있다. 그림 1은 現在 國內에서 製作되고 있는 暖房用 放熱器이다. 鐵板을 stamping 하여 seam-welding 하여 製作한다.

管과 筒(shell-and-tube) 熱交換器의 製作

圓管을 使用하여 熱傳達 表面을 만들고 이 管

群을 筒안에 設置하여 管의 內部와 外部를 흐르는 두 流體 間의 熱傳達시키는 交換器를 管筒形 熱交換器라고 부른다. 이 管筒形은 가장 많은 熱交換器의 形態이다. 熱傳達 表面은 수백 또는 수천 개의 管을 平行하게 筒 內部에 設置하여 流體가 管內部로 흐르게 되어 있는데 이 때 管들은 보통 管板(tube sheets)에 連結되어 있다. 管板에는 수천개의 管이 좁은 間격으로 連結되어 있기 때문에 管의 設置는 힘든 문제이고 製作費가 높아 簡單하고 견고한 方法이 繼續開發되고 있다. 一般的으로 管板에 구멍을 뚫고 管을 그 구멍에 rolling 하거나 熔接해서 結合한다. 이 때 구멍과 管의 外徑의 公差는 重要한 問題이다. 代表的인 公差가 表 1에 나열되었다. 구멍은 drilling 에 reaming 까지 하여 구멍 內部的 表面 粗度를 작게 한다.

表 1 管板에서의 公差\*

管의 外徑 in	管의 公差		
	標準管外徑公差 in	보통 管板구멍의 公差 in	特別꼭거린마춤 in
0.250	± 0.003	0.008	0.004
0.375	± 0.003	0.008	0.004
0.500	± 0.004	0.008	0.004
0.625	± 0.004	0.008	0.004
0.750	± 0.004	0.010	0.005
1.000	± 0.005	0.010	0.006
1.250	± 0.005	0.015	0.008
1.500	± 0.005	0.018	0.009

管板 구멍의 치수

管板 구멍크기

管의 外徑 in	표준마춤 in	끼인마춤 in	구멍의 公差 in
0.250	0.258	0.254	± 0.002
0.375	0.383	0.379	± 0.002
0.500	0.508	0.504	± 0.002
0.675	0.683	0.629	± 0.002
0.750	0.760	0.755	± 0.002
1.000	1.010	1.006	± 0.002
1.250	1.265	1.258	± 0.002
1.500	1.518	1.509	± 0.003

\* A. P. Fraas and M. N. Ozisik, Heat Exchanger Design, John Wiley Son, Inc. 1965

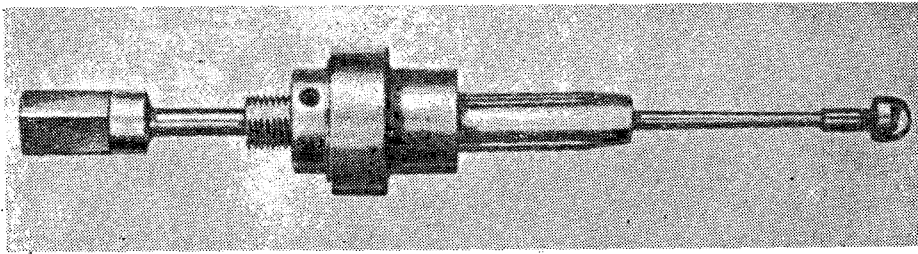


그림 2 Roller head

管板에 管을 結合하는 方法은 여러가지 있으나 가장 많이 쓰는 方法이 rolling이다. 이 作業은 그림 2와 같은 roller head를 hand drill에 부착시켜 管板 구멍에 設置된 管의 內徑을 rolling으로 擴管하여 管壁이 소성 變形을 일으킬때 생기는 殘留壓縮應力으로 管을 管板에 固定시키는 方法이다. 이 roller head는 直徑이 0.15~16in까지 商品化되어 있고 壓縮空氣를 使用하는 pneumatic tool을 使用하면 1分間에 15個의 管을 rolling할 수 있다. 最近에 開發된 自動化된 生産用工具를 使用하면 1時間에 1200個까지 rolling할 수 있다. 그러나 大部分의 熱交換器는 受注品으로 그 規格이 一定하지 않고 같은 設計의 熱交換器를 多量生産하는 경우는 드물기 때문에 自動化 生産이 보편화되어 있지 않고 아직도 管의 rolling은 rolling head가 한개 혹은 두개 달린 工具로 人力으로 rolling하는 것이 보통이다. 이 경우 人件費가 대단히 많이 드는데 美國의 경우 管 한개 rolling하는데 \$0.70~1.00돈다. 이것은 遠心冷凍機의 凝縮器나 蒸發器인 경우에 銅管의 材料費에 약 20~30%나 되는 셈이므로 우리나라에서와 같이 技術水準이 높고 人件費가 저렴한 곳에서 生産價 節約이 현저하리라고 豫測된다.

管을 rolling할때 壁管의 變形은 漏泄인 경우 防止될 정도로 그쳐야 한다. 만약에 rolling이 지나쳐서 管壁이 너무 얇아지면 管材質의 延性(ductility)가 감소되어 脆弱해져서 crack이 發生할 우려가 있다. rolling때는 管이 길이 方向으로도 늘어나기 때문에 管에 따라서 늘어난 길이가 다른 경우 이때문에 생기는 殘留應力도 管의 破壞原因이 될 수 있다. 管板이 얇거나 구멍의 距離가 가까워서 rolling할 때 管板 구멍까지

變形되고 심지어는 管板 전체가 늘어나는 수도 있다. rolling은 管壁의 두께가 4~5% 減少하는 정도에서 그치는 것이 適當하다. 材質에 따라서 rolling을 4~5% 이상하는 수도 있으나 最近에는 合成接着을 같이 使用하여 rolling은 더욱 微弱하게 한다. rolling 作業을 同時 制御하기 위하여 管 內徑變化를 rolling하면서 繼續 測定하여야 하는데 現在 많이 쓰이는 方法은 管 內徑을 直接 測定하는 대신에 工具의 回轉力을 測定하여 內徑變化를 간접적으로 測定하는 方法이다. 이때에 回轉力과 管壁 두께 變化는 材質에 따라 전혀 다르므로 標準 管板과 管을 使用하여 그때 그때 보정하여야 한다 現在 商用化되어 있는 rolling machine은 대개 torque meter가 附着되어 있다.

管板 구멍의 內徑表面과 管 外徑表面의 粗度는 漏泄機密度에 큰 影響을 미친다. 보통 drilling이 끝난 후 deburring을 하고 reaming을 하여 表面을 매끄럽게 하는데 完全하게 하기 위하여 그림 3과 같이 두개의 홈을 파서 이 홈에 金屬이 밀려 들어 가도록 한다. 이 홈은 漏泄 防止 뿐만 아니라 管의 길이 方向에 作用하는 殘留應力

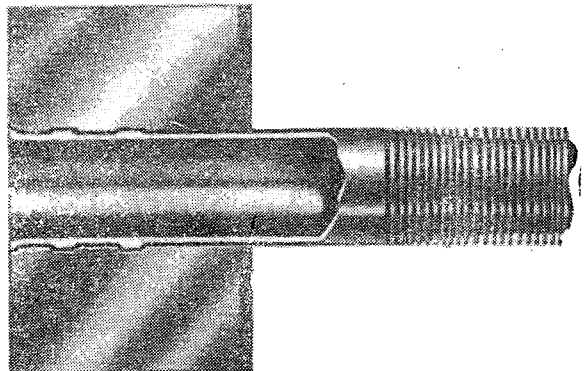


그림 3 管板 구멍에 홈이 파이는 경우

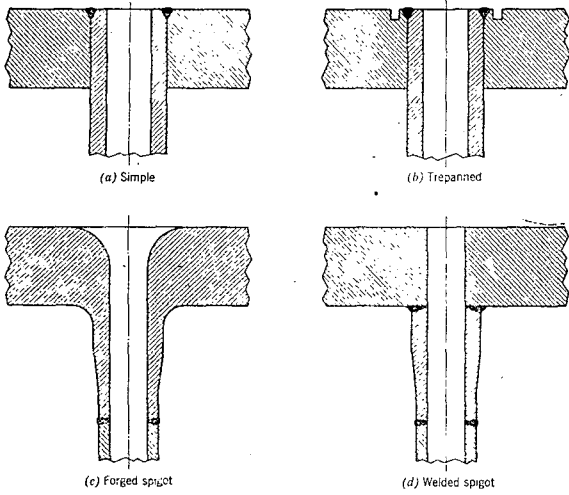


그림 4 용접부의 네가지 形態

對應하는 強度를 준다. 美國에서는 이 홈을 파기 위한 boring에 人件費가 비싸서 最近에는 Loctite와 같은 合成接着劑를 使用하고. 홈 없이 rolling을 하여 原價를 節減하고 漏泄 防止에도 좋은 結果를 얻고 있는데 아직 Loctite 값이 비싸서 日本에서는 종전대로 홈을 사용하고 있다.

大量生産을 除外하고는 아직도 홈을 正確히 加工하여 rolling하는 方法이 견고하다.

관의 rolling은 比較的 壓力이 낮은 곳에서는 만족한 結果를 주지만 壓力이 높은 곳에서는 creep 現象이 일어나기 쉽다. 특히 溫度가 높으면 더욱 심하다. 따라서 製作當時는 檢査에 合格하더라도 時間이 지남에 따라 漏泄이 發生하게 된다. 이런 곳에는 rolling보다 熔接을 하여야 한다. 熔接은 두꺼운 管板과 얇은 管壁의 熔接이기 때문에 熱容量에 현저한 差異로 殘留應力이 發生하기 쉽다. 이 熱應力 때문에 熔接部의 應力集中現象이 생겨 crack이 發生할 可能性이 많기 때문에 熔接部分을 特殊하게 設計하여 機械加工한 후에 熔接을 한다. 그림 4는 몇가지 例이다. 그림 4b의 경우에는 熔接할 장소에 管板을 trepanning하여 熱容量을 減少시킨 것이고 그림 4c와 d는 熱應力이 큰 影響을 미치는 경우 管板에 단조는 熔接으로 突出部를 만들어 이 突出部에 管을 熔接하는 方法으로 製作費는 매우 높으나 높은 強度를 가지고 있다. 管의 振動이 심한 곳이나 溫度의 變化가 심하여 큰 熱應力이 發生하는

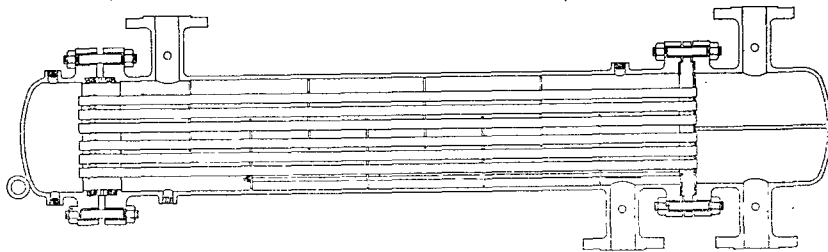


그림 5-a 逆流熱交換器, 中央의 toroidal expansion joint가 熱膨脹을 받아 應力을 除去하게 되어있음. 管板도 二重으로 두개의 流體가 섞이지 않도록 하였음.

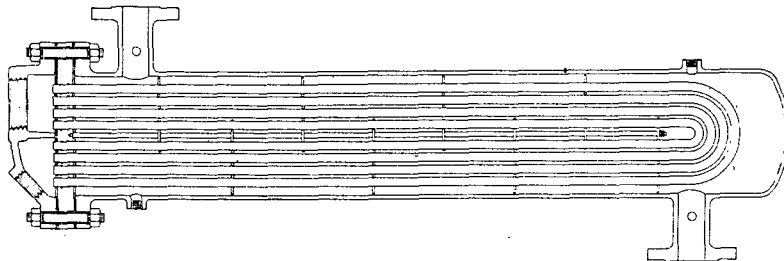


그림 5-b U-5be 熱交換器, 管群을 筒에서 分離하여 보수하게 되어있음.

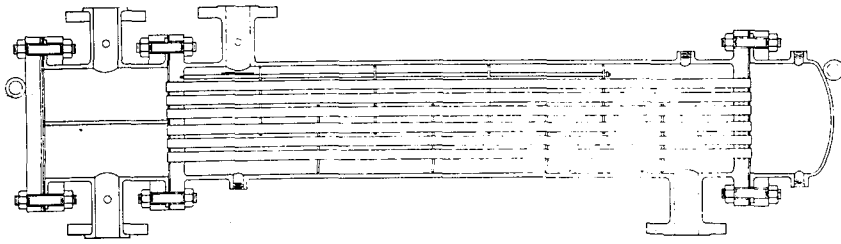


그림 5-c 2-pass 열교환기 内部 管의 機械的인 洗滌이 편리하게 設計되어 있음.

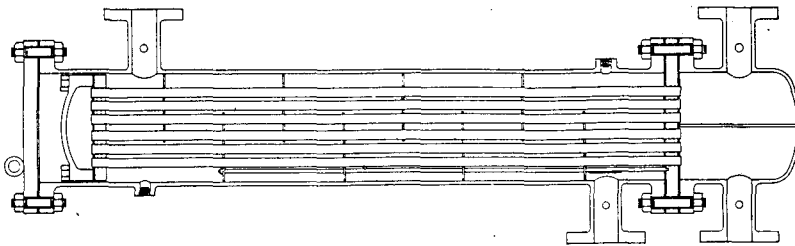


그림 5-d 5c와 비슷하나 floating head가 있어 열팽창을 받아들일 수 있게 설계되어 있음.

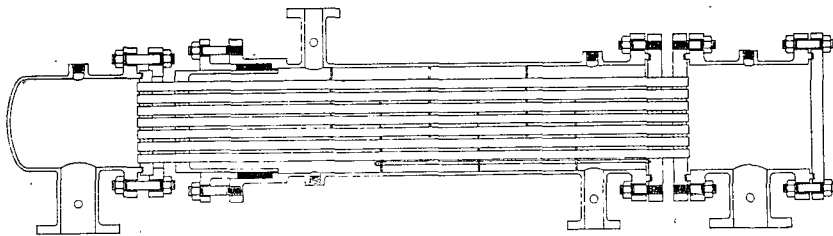


그림 5-e 5d와 비슷하나 다른 형태의 floating head



그림 5-f 二重管板으로 二流體가 서로 섞이지 않게 設計되어 있음

곳에는 이러한 방법으로 제작하여야 한다.

溶接 中에 생기는 缺陷은 應力集中의 原因이 되는 것은 一般的인 溶接에서와 마찬가지로 再論할 必要가 없겠다. 그림 4a 와 b의 경우에는 crevice corrosion이 생길 우려가 있는데 腐蝕과

漏泄을 同時에 防止하기 위하여 rolling이나 溶接을 한 후에 結合部를 rubber latex나 合成樹脂로 皮膜을 입히는 方法도 많이 채택하고 있다. rubber latex를 利用하는 경우 皮膜을 입힌 후에 vulcanizing을 하여 接着性이 좋도록 한다. 國內

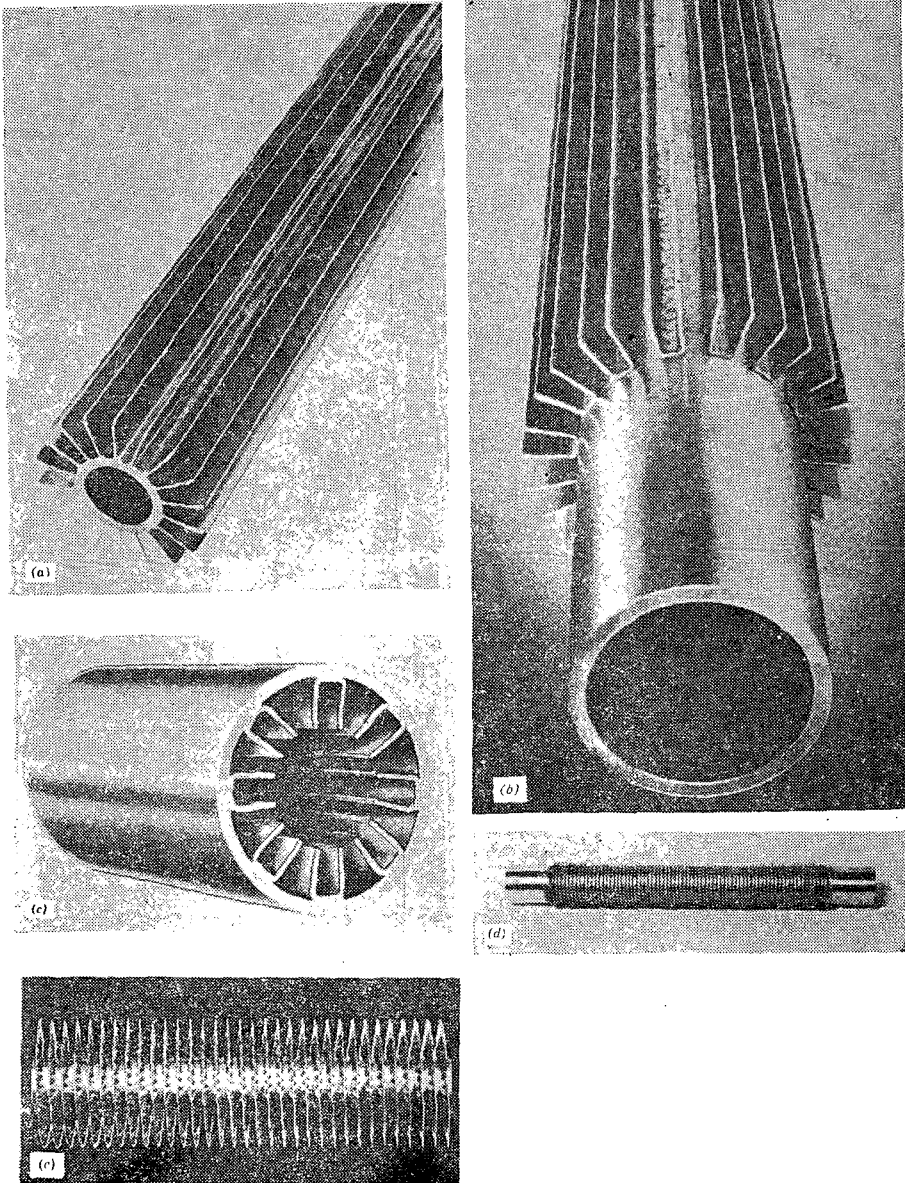


그림 6 a) 軸方向의 Aluminum fin, rolling 하였음.  
 b)와 c) spot 接溶한 fin  
 d) rolling 으로 製作한 integral fin  
 e) ribbon 을 나선형으로 감은다음 납땜을 한 fin

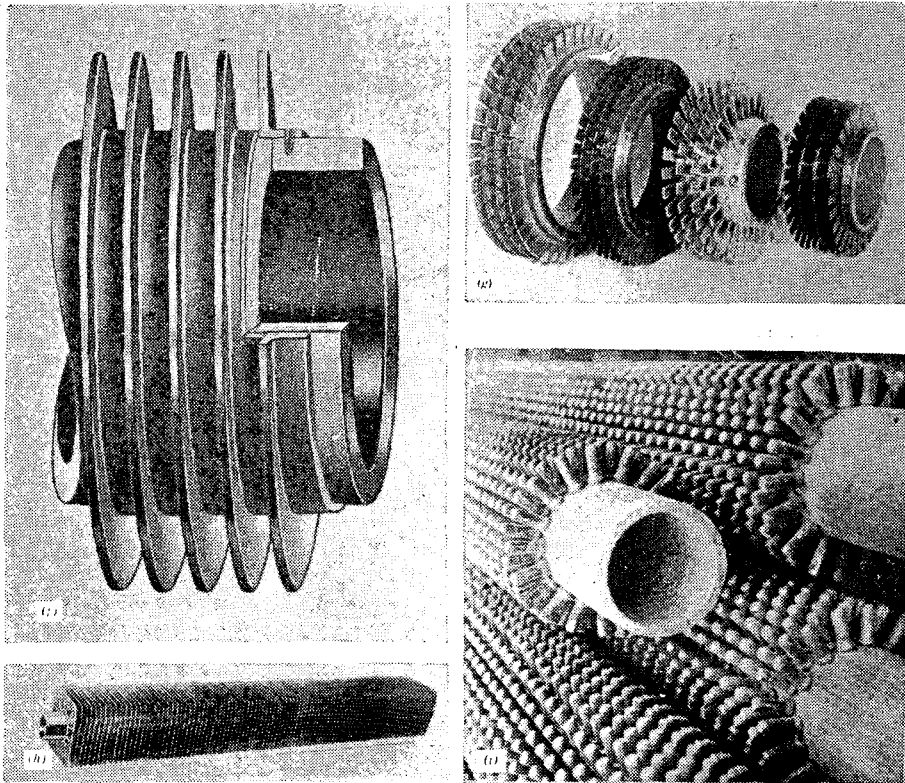


그림 6. f)와 g) 나선형 fin 을 tube 에 감은것  
 h) stamping 한 fin 을 tube 에 꼭끼이도록 한것  
 i) stud fin 을 용접한 경우

에서도 polyester 나 Taflon 皮膜을 입혀서 化工藥品을 다루는 熱交換器를 製作한다. 皮膜을 腐蝕防止로 適用하는 경우는 바늘구멍이라도 있으면 그곳으로 腐蝕이 일어나기 때문에 세심한 注意를 하여야 한다.

特殊한 경우 예를 들면 Aluminum 熱交換器인 경우에 管과 管板을 brazing 하는데 brazing 을 하면 應力集中이라든가 crevice 腐蝕問題가 없다. brazing 은 brazing 合金을 washer 形態로 管外徑에 附着하거나 또는 low-ash methyle methacrylate cement 와 섞어서 管外徑에 칠하여 管板에 設置한 다음 熔融鹽湯에 담겨서 aluminum 熱交換器를 製作한다. 熔融鹽湯은 加熱하는 目的外에 brazing 할 表面에 酸化皮膜을 除去하는 目的으로도 쓰인다. 鐵熱交換器의 brazing 은 不活性分圍氣하거나 hydrogen reduction 으로 酸化

皮膜을 除去한 후에 水素분위기에서 加熱하여 brazing 한다. 水素 brazing 은 特別 stainless steel 이나 high-nickel 合金에 適合하다.

Brazing 은 stainless steel 이나 그와 비슷한 合金에서는 1000°C 에서 1200°C 사이에서 nickeliron-chrome-silicon-boron brazing 合金을 쓰는데 이때 分圍氣는 乾燥한 水素를 쓴다. 이런 brazing 合金은 母體에 擴散되어 들어가기 때문에 強度가 母體와 비슷하다. 그러나 brazing 合金을 脆性이 강해서 brazing 한 곳근처에는 熔接을 하면 안된다. 보통 炭素鋼은 구리를 使用하여 brazing 한다.

#### 管筒의 設計

管板을 筒에 設置하는 方法은 熱膨脹問題를 考慮하고 熱傳達表面의 보수 문제를 생각하여 設計

한다. 그림 5a~f에 몇가지 예가 있는데 大部分 熱應力과 漏泄 防止를 겸하는 設計이다. 冷凍에 쓰이는 熱交換器는 이 보다 훨씬 簡單하게 양쪽의 管板을 管筒(shell)에 直接 熔接하고 여기에 water box를 管板에 熔接된 studs를 利用하여 組立한다. 이러한 溫度差異가 걱정하지 않은 경우에는 만족할 만한 結果를 주나 低溫冷凍에서는 熱收縮을 考慮한 設計가 必要하다.

### 熱傳達表面의 製作

熱交換器에서 成能에 直接的인 影響을 미치는 部分이 熱傳達表面이 되겠는데 熱傳達表面은 될 수록 좁은 面積에서 많은 熱量을 짧은 시간에 傳達할수 있는 能力에 따라서 優劣이 決定된다고 할수 있다. 가장 많이 쓰는 熱傳達表面으로는 管

에 平板 fin을 附着한 形態가 있는데 그 중 몇가지 예가 그림 6a~e에 나타나 있다. fin을 부착하는 方法은 fin의 幾何的 形狀에 따라 다르지만 fin이 軸의 平行方向으로 設置된 경우와 fin이 軸의 直角方向으로 設置된 경우를 나누어 생각할 수 있고 fin이 管材質과 同一體(integral)로 되어있는 경우와 fin은 다른 材質로 管에 熔接, 납땜 또는 brazing하는 경우로 나누어 생각할 수 있다. 軸平行方向의 fin은 押出로 管과 同一體로 만들기 쉽다. 이 경우에는 管外部의 流體의 流動이 軸平行方向이어야 壓力 損失이 적고 熱傳達 成能이 좋다. fin을 押出로 製作하지 않고 管表面에 seam-welding을 하는 경우에는 熔接部의 接着狀態는 熱傳達成能에 크게 影響을 미친다.