■ 技術報告

相変化가 없는 熱交換器의 最適設計

宋泰鎬 *· 吳鎭國 **· 尹昌鉉 ***

Optimal Design of Heat Exchangers with No Phase Transition

Tae Ho Song *· *Jin Kook Oh* **· *Chang Hyun Yoon* ***

1. 序 論

熱交換器 設計의 電算化는 設計上의 人件費, 正確度, 迅速性및 最適化에 따른 經濟性 등의 여러 면에서 매우 시급한 과제라 할 수 있을 것이나 現今까지도 국내의 실정은 단순한 手動式 反復計算에 의존하여 온 것이 사실이다. 이에 따라 本室 研究팀은 가장 보편적인 胴및 管型 熱交換器를 電算設計하기 위한 프로그램 개발에 착수하였으며, 그 一次事業으로 相変化가 없는 熱交換器의 最適設計를 目標로 하였다. 본 설계에 있어서 그 대상이 되는 熱交換器는 TEMA規格에 준한 것이나, 妨害板은 가장 보편적인 欠丹型을 취하였고, 胴 및 管側의 패스数는 1과 2인 경우로 국한시켰다.

熱交換器의 設計 및 最適化 方式은 数多한 変数의 連續的 概念에 의한 방식이 다소 행해지고 있으나,[1,2] 이 경우에는 많은 경험적 자료가 필요하고 현실적 応用性이 박약하므로, 가급적 規格値를 따라서 不連續的인 変数変化를 행하는 편이 현실적이다.

따라서, 본 보고에서는 이러한 사실을 감안하여 사용된 計算方法과 그 순서를 소개하기로 한다. 또한 개발된 프로그램을 사용하여 計算된 결과를 他社의 것과 비교 검토함으로써 본 설계의 타당성 여부를 논의할 것이다.

2. 変数의 函数的 関係에 관한 考察

하나의 熱交換器를 設計할 때 주어져 있거나 결정해야 할 設計因子들은 다음과 같은 것들이다.[3]

(i) 胴 및 管側 流体의 流量, 入·出口 温度 및 그 物性値
(ii) 熱交換器의 形態
(iii) 管의 外径, 두께 및 길이, 配列方式 및 피치
(iv) 胴 및 管側의 許容圧力損失
(v) 妨害板의 形態, 開放率, 間隔 및 個数

* 昌原本所 熱流体機械室, Member of Thermo-and Hydraulic Machinery Lab.
** 〃 〃
*** 昌原本所 熱流体機械室長 : Head of Thermo-and Hydraulic Machinery Lab, Ph. D.
註*:) 내의 숫자는 참고문헌의 번호임.

(vi) 胴의 内径 및 管의 갯수
(vii) 각 부분의 材質 및 두께 등

이들 중 (vii)項 이외의 모든 값들이 伝熱量 및 圧力損失 計算에 직접 관계하며, 이들의 函数的 구속관계 때문에 모두 独立変数가 되지 않음을 알 수 있다. 이러한 관계들을 나열해 보면
(1)心要伝熱量에 관한 条件
(2)胴 및 管側의 許容圧力損失에 의한 制限条件
(3)주어진 胴内径, 管의 치수 및 配置方式에 따른 管의 個数

이러한 조건들이 모두 만족되는 解에 대하여서 다음으로 強性에 관한 제반조건이 검토되어야 한다.

위에 나열된 変数 중에서 独立変数를 추려 보도록 한다. 変数 중에서 (i) 및 (ii)項은 주어지는 것들이다. 設計計算 과정에 있어서 一次的으로 伝熱量에 관한 조건을 만족시키는 解를 구하고 이를 圧力損失量에 관하여 그 適格 여부를 断定한다고 하자. 이때 許容圧力損失値 및 圧力損失量에 관한 関係式은 不等号로 연결되게 되어 단순히 変数의 범위만을 제한하는 조건으로 되므로 独立変数의 数를 감소시키지 않는다. 許容圧力損失 자체를 연속적 変数로 취하여 価格函数(또는 目的函数)에 포함시키지 않고 이와 같은 計算方式을 취한 이유는, 일반적으로 熱交換器의 설계 이전에 市販되는 펌프의 規格을 검토하여 圧力損失의 한계를 결정하는 바, 이렇듯 특정한 펌프를 염두에 두고 圧力損失値를 결정할 때에는 그 規格値(즉, 限界値)보다 圧力損失量이 적다고 하더라도 펌프의 特性上 流量이 要求量보다 증가하게 되어[4] 이를 막기 위한 밸브를 設置, 총 圧力損失(밸브 및 熱交換器에서의)을 規格値와 동일하게 유지해 주게 되므로 電力費에 있어서 득이 되는 바가 없기 때문이다.

따라서 이제 (iii), (v), (vi)項의 変数들이 남는데, 이 중에서 管의 配置方式과 妨害板의 형태는 주어 지는 것이고, 管의 두께는 強性 및 부식이 고려되는 한 작을수록 좋고, 그 길이에 있어서도 가급적 긴 것이 単位伝熱面積에 대하여 附属되는 諸装置를 줄이는 첩경이므로 변화시킬 여지가 없다. 또한 이에 따라 妨害板의 갯수는 곧바로 그 간격을 결정하게 된다. 따라서, 管의 外径, 配列 피치, 妨害板의 開放率과 個数, 胴内径 및 管数가 変数로 남는데 条件 (1) 및 (3)에 의해 管数와 妨害板 갯수가 제거된다.

한편 이상과 같이 단일의 熱交換器가 아닌 直·並列로 이루어진 熱交換器群 (그림 1 참조)으로써 소기의 목적을 달성하고자 할 때에는 直列配列数 및 並列配列数가 変数로 첨가되는데, 이 중 直列配列数는 有効平均温度差(Effective Mean Temperature Difference)[5] , 또는 사용자의 입장에서 결정된다고 보아 独立変数에서 제외시켰다.

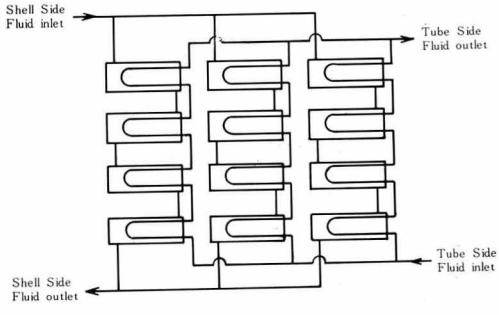

Fig. 1 직렬 및 병렬로 구성된 열교환기 시스템

3. 計算方式

3.1 서브 프로그램

本 프로그램은 약 30개의 서브프로그램과 메인프로그램으로 구성되어 있으며, 物性値, 伝熱係数, 圧力損失, 強度計算, 原価計算 및 기타 세부적 계산은 주로 서브프로그램에 의존하고 있다. 서브프로그램의 구성은 대단히 다양하고 경우별로 나뉘어 一意的으로 설명할 수는 없으나, 그 計算式의 근거를 기준으로 분류해보면 대략 다음과 같다.

3.1.1 数式에 근거한 경우

이러한 경우는 간단히 그 数値의 入力에 의해 各 상황마다의 数値를 계산해내는 것으로 가능하다.

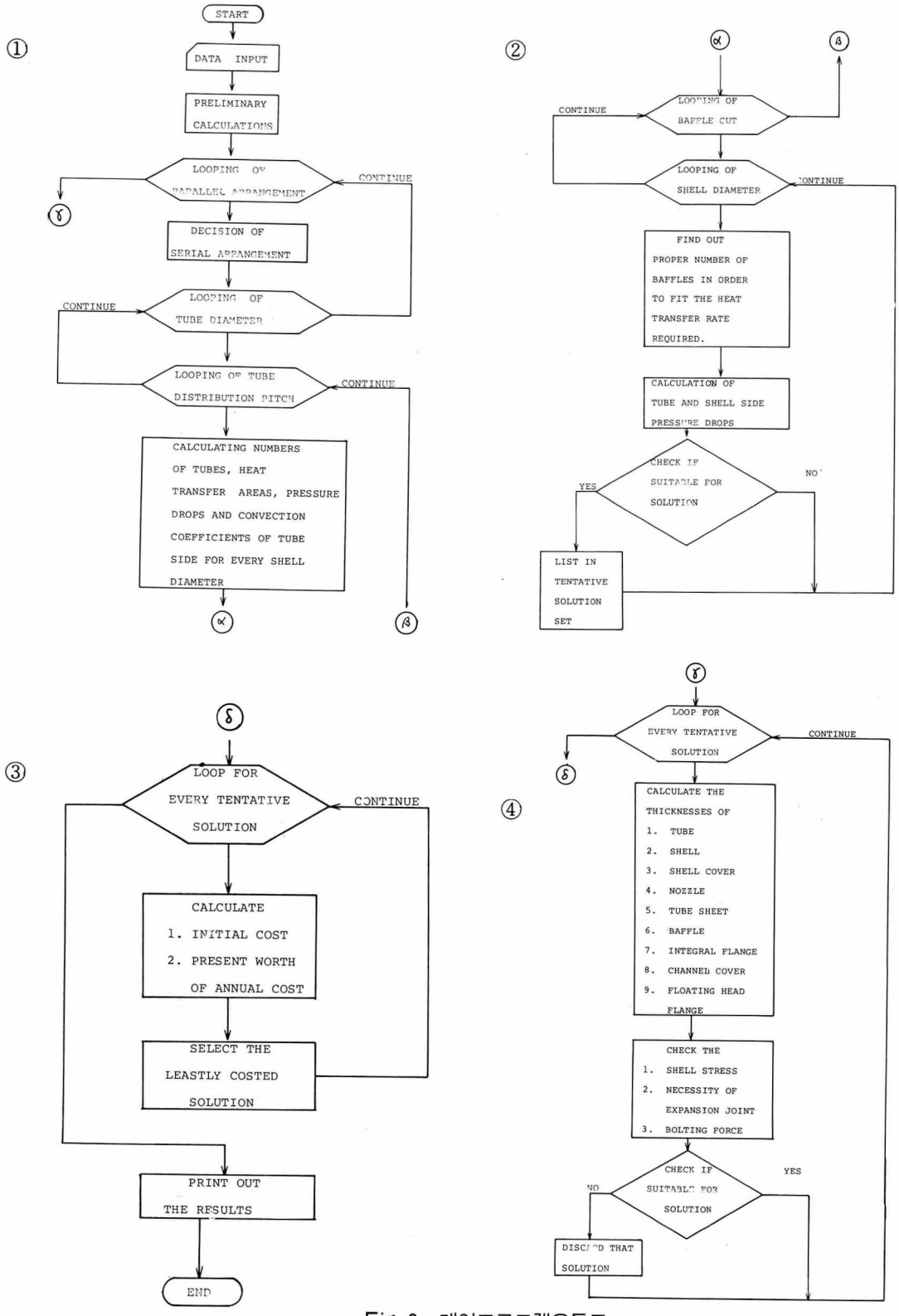

Fig. 2. 메인프로그램유통도

3.1.2 圖式에 의한 경우

그림으로 나타난 計算方式은 일일이 그 그래프를 최소제곱피팅(Least Square Fitting)을 하였다. 独立変数가 하나인 경우는 一次元 피팅[6]을 하였고, 두개인 경우에는 二次元 피팅[7]을 행하였다.

3.1.3 표에 의한 경우

표에 의한 경우는 주로 行列로서 入力시키거나 数式化가 필요한 경우에는 그래프 피팅을 하는 方式을 이용하였다.

3.2 메인 프로그램

메인 프로그램은 정수형 프로그래밍을 행하되, 그 함수적 관계가 段階的인 것이 아니므로, 動的計劃(Dynamic Programmining)[8]은 적용하기 곤란하고 철저한 探索方法[9]이 타당하다고 판단된다. 따라서 철저한 探索方法(Exhaustive Search Method)[6,9]을 이용하여 規格化된 変数들을 루우핑(Looping)시켰다. 이 変数들은 앞서 언급한 独立変数들이며 이들 중 최소의 루우프에는 解가되는 방해판 갯수를 찾기 위한 探索이 들어 있다. 그림 2는 메인 프로그램의 流通圖를 보인다.

프로그램은 갖가지 필요한 데이터의 入力으로부터 시작된다. 이 入力은 사용자가 편리하도록 구성하며 각종의 規格値는 이미 내부에 저장되어 있도록 한다. 이로부터 物性値, 中心温度(Caloric Temperature), 各 変数의 変化限界등을 計算및 확인한다.

이어서 伝熱量 및 圧力損失의 계산에 착수한다. 최초로 변화시킬 変数는 並列配列数이며 이로부터 直列配列의 数 및 各 熱交換器마다의 負荷가 계산된다.

다음으로, 管径 및 配列上의 피치를 결정하여 보며, 이때 変化 범위内의 各胴径에 대한 管数, 伝熱面積 管側의 圧力損失 및 対流熱伝達係数(또는 境膜係数 ; Film Coefficient)들이 구해 질 수 있다.

이어서 放害板의 開放率 및 胴径을 결정하여 본다. 그러면, 이제 독립적인 変数의 변화는 모두 끝나고 이 경우 解가 되는 방해판의 個数를 구하게 된다. 우선 그 胴径에서 伝熱条件을 만족시키는 妨害板数가 존재할 수 있는가 확인한 후 존재할 수 있으면 다소의 시행착오로 그 값을 구해 낸다.

이어서 圧力損失量을 계산한 후 여러가지 許容圧力損失値(즉, 대상이 되는 여러가지 펌프) 중에서 적합한 값이 있는가 확인한다. 이렇게 확인된 바가 모두 긍정적일 때 그 解는 일단 伝熱量 및 圧力損失의 측면에서 実用化될 수 있음을 보이는 것이다.

이렇게 구해진 여러개의 解를 대상으로 強性解析 및 価格計算을 행하여 본다. 強性解析은 각 부품의 두께 및 기타 칫수를 算出하여 제도상 필요한 데이터를 직접적으로 제공하기도 하고 위에서 나타난 잠정해(Tentative Solution)가 力学的으로 실현가능한가를 확인한다.

이러한 과정을 모두 거친 解들은 실용화가 될 수 있는 段階이나, 이중에서 가장 경제적인 解를 추려서 最終案으로 제시하게 된다. 이때 価格函数가 필요하게 되는데, 이는 熱交換器 初期의 가격 및 現在価(Present Worth)[6]로 표현된 定期的 電力費로 구성하였다.

4. 計算結果

이와 같이 구성된 프로그램을 다음과 같은 設計条件下에서 伝熱量및 圧力損失에 관하여 執行하여 보았다. 表1은 그 결과이며, 이 결과를 동일한 조건하에서 設計製作된 이태리의 Foster Wheeler Italiana社의 製品과 비교하여 보았다.

設計条件

- ○ 型式 : 固定管板型(Filxed Tube Sheet Type)
- ○ 流動方式 : 対向流
- ○ 伝熱管 : 25.4 mm
- ○ 配列피치 : 32 mm
- ○ 配列方式 : Staggered Distribution
- ○ 放害板 : 15% 또는 25 % 欠丹型
- ○ 胴側流体및 流量, 入出口温度 : Kerosene (44.8° API), 26,140 kg/h 186.1℃ → 73.9℃
- ○ 管側流体및 流量, 入出口温度 : Crude Oil (26.3° API), 355,580 kg/h 63.3℃ → 73.3℃

Table 1. 설계결과 비교표

Description	단 위	Foster Wheeler Italiana	KIMM Program	
형 식		Fixed	Fixed	Fixed
방해판 개방율	%	15	15	25
방해판 갯수	ea.	34	9	12
병 렬 배 열	〃	1	1	1
직 렬 배 열	〃	2	2	2
동측 pass수	〃	1	1	1
관측 〃	〃	2	2	2
동의 내경	mm	686	610	610
전열관 갯수	ea.	284	224	224
전열 길이	mm	4,877	5,000	5,000
전열 면적	m^2	107.1/unit	83.1/unit	83.1/unit
오 염 계 수	m^2 ℃/W	0.00057	0.00057	0.00057
총괄 전열 계수	W/m^2 ℃	203.8	308.7	307.0
전 열 량	KW	2016	2098.5	2086.9
관측 압력 손실량	kgf / cm^2	1.565	1.236	1.236
동측 〃	〃	0.204	0.211	0.320

Table 1에서 보는 바와 같이 동일하게 주어진 妨害板의 開妨率, 直列 및 並列配列의 数, 胴 및 管側의 패스数와 오염계수에 대해 伝熱面積이 24 m^2 정도 적게 나타났다. 이는 거의 동일한 伝熱길이에 대해 보다 적게 나타난 胴内径과 伝熱管 갯수에 의한 것이라는 것을 알 수가 있다. 그러나 総括伝熱係数는 大同小異한 胴및 管側압력손실량에 대해 오히려 약 105W/m^2 ℃ 만큼 크게 증가해서 伝熱面積이 적음에도 불구하고 伝熱量이 82KW 만큼이나 증가하였다. 妨害板의 開放率을 15%에서 25%로 증가시켜 얻은 결과도 15%에 의해 얻은 것과 거의 같은 양상을 Table 1에서 볼 수가 있다.

5. 討議 및 結論

計算結果를 비교해 볼 때, 현재의 프로그램은 더 적은 管数 및 胴径에서도 要求条件을 충족시킬 수 있다는 결론을 얻게 된다. 그러나 현재의 프로그램은 安全率을 고려하지 않은 것임을 附言하며, 기타 独逸의 TÜV (Teknishe Überwachungs Verein)의 기존 프로그램과 비교할 때 본 프로그램이 더 応用性이 있으며 安全이 더 고려된 것으로 나타났다. 기타의 서적[3]에 나타난 결과와도 비교할 때 본 프로그램은 매우 정확하며 현실적이라는 결론을 얻는다.

현재의 프로그램은 作動流体의 相変化까지 고려한 프로그램으로 확장 중에 있으며, 사용상의 容易度, 적용 범위의 확대 등의 문제를 해결하고 있다.

参 考 文 献

1) T. W. Hoffman, The Optimal Design of Heat Exchanger Networks - A Review and Evaluation of Current Procedures, Chapter 6, Heat Exchangers, edited by N. Afgan and E. U. Schlünder, McGraw-Hill.

2) D. H. Fax and R. R. Mills, Jr, Generalized Optimal Heat Exchanger Design, Trans. ASME, April, 1957.

3) 奥出, 熱交換器ハンドブック," 日刊工業 新聞社, 1965. "

4) 李澤植, "水力機械," 東明社, 1974

5) R. A. Bowman et al. "Mean Temperature Difference in Design," Trans ASME, May,

1940.
6) Stocker, Design of Thermal Systems, McGraw-Hill, 1971.
7) 韓国機械研究所, 컴퓨터에 의한 열교환기 最適設計 프로그램의 開発에 관한 研究(I), 1981.
8) Sanford M. Roberts, Dynamic Programing in Chemical Engineering and Process Control, Academic Press, 1964.
9) 戸川集人, 数値計算入門, 2nd edi., オーム社, 1970.