

産学協同 시리즈

化學工場 建設에 있어서 大 單位化의 추세와 問題點

金 炳 珍*

1. 序 論

石油 化學 産業의 發展과 더불어 60年代에 들어와 工場의 大 單位化 傾向이 두드러져 世界的인 注目を 끌었다. 卽 그 單位 容量이 急激히 增大되었다는 點에 特徵이 있었으며 最近의 추세로 보아 더욱 빠른 増大率을 豫想케 하고 있다. 特히 암모니아 合成 工場, 精油 工場, 에틸렌 系列 工場들은 그 大 單位化에 따른 여러가지의 有利한 經濟性 때문에 大規模化의 速度가 가장 현저했다. 따라서 小規模 工場 製品으로서는 國際市場에서의 競爭이 不可能하게 되었고 國家政策으로서 關稅保護의 特惠下에서도 適正 規模以下로서는 그 妥當性을 찾기 어렵게 되었으며 우리나라 實情에 最適한 工場의 規模를 찾아내는 일이 큰 課題로 登場하게 되었다.

經濟性에 이어 신중히 고려되어야 할 點은 大單位化에 따른 技術的인 問題點들이다. 上記 問題點들은 觀點에 따라 여러가지로 細分될 수 있겠으나 本稿에서는 主로 大單位 化學 工場에 所要되는 主要 機器 裝置의 設計 製作에 따른 技術的 問題點 및 工場 運轉의 reliability에 미치는 問題點들을 考察하여 보고자 하였다.

2. 大單位化의 추세

(1) 大單位化의 利點

化學工場의 大單位化 傾向의 利點을 檢討하여 보면 대략 다음과 같이 集約할 수 있을 것이다.

즉 ① 生産 容量의 增加에 따라 製品의 原價가 節減된다.

② 工場 建設費는 容量의 增加에 따라 그 增加率이 鈍化되어 훨씬 低廉하게 된다는 結論이 된다.

③ 경우에 따라서 容量이 增加하면 單位機器의 設計

變更이 可能하여 機器 購買費, utility 費 등의 節減을 가져온다. 한 例로 암모니아 工場에서 centrifugal compressor를 사용하는 경향을 들 수 있다. 위의 利點들은 精유공장, Naphtha 分解工場 및 암모니아 工場에 대한 다음 표의 統計 數値에서 쉽게 찾아 볼 수 있다.

Table 1. Fluid Catalytic Cracking capacity vs. manufacturing cost.

Capacity,		
Bbl/Stream Dry	20,000	50,000
Investment, \$/Bbl.	370	260
Direct Operating Costs,		
\$/Bbl.		
Catalyst	0.0495	0.0495
Utilities	0.0595	0.0595
Labor	0.0247	0.0145
Sub Total	0.1337	0.1235
Indirect Operating Costs, \$/Bbl.		
Maintenance		
Depreciation, Interest,		
Taxes, Insurance	0.2580	0.1812
TOTAL	0.3917	0.3047

Table 2. Naphtha-based ethylene capacity vs. manufacturing cost.

Capacity, MM lb./yr.	330	1,000
Investment, \$ MM	15.0	30.0
Working Capital, \$ MM	2.5	5.0
Total Capital, \$ MM	17.5	35.0
Direct Operating Costs,		
c/lb. Ethylene		
Feedstock	3.26	3.26
Utilities	0.73	0.66
Catalysts & Chemicals	0.04	0.04
Labor	0.15	0.05
Sub Total	4.18	4.01
Indirect Operating Costs,		
c/lb. Ethylene		
Maintenance, Depreciation,		
Interest, Taxes, Insurance	0.43	0.29

* 有限會社 코리아 엔지니어링

Sub Total	4.61	4.30
Co-Product Credits, c/lb. Ethylene	3.67	3.67
TOTAL	0.94	0.63

Table 3. Ammonia capacity vs. manufacturing cost

Capacity, ton/day	333	1,000
Compressor-Driver	Recip-Motor	Centrif-Turbine
Investment, \$ MM	7.5	14.0
Working Capital, \$ MM	1.1	2.1
TOTAL	8.6	16.1
Direct Operating Costs, \$/Ton		
Natural Gas @ 25¢/MM Btu	7.42	8.00
Utilities	6.66	.56
Catalysts & Chemicals	.55	.70
Labor	2.70	.90
Sub Total	17.33	10.16
Indirect Operating Costs, \$/Ton		
Maintenance, Depreciation, Interest, Taxes Insurance	15.52	9.20
TOTAL	32.85	19.36

(2) 大單位化의 速度

위에서 例示한 암모니아 공장, 에틸렌 공장 및 精油工場에 對하여 그 大單位化의 추세를 살펴 보고자 한다. 市場 問題가 解決될 수 있는 先進國에서는 아래 그림과 같이 3,000 MT/day의 single train 암모니아 공장 또는 100萬~200萬 MT/year의 에틸렌 공장의 建

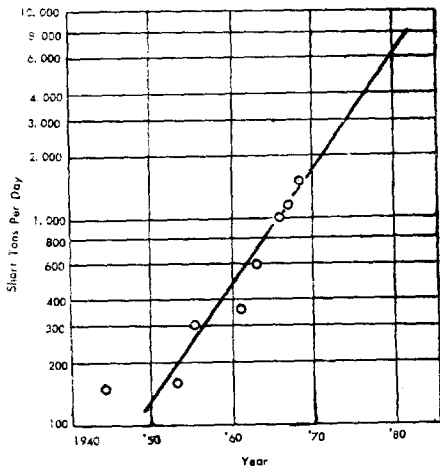


Fig. 1. Largest single-train ammonia plant vs. year onstream.

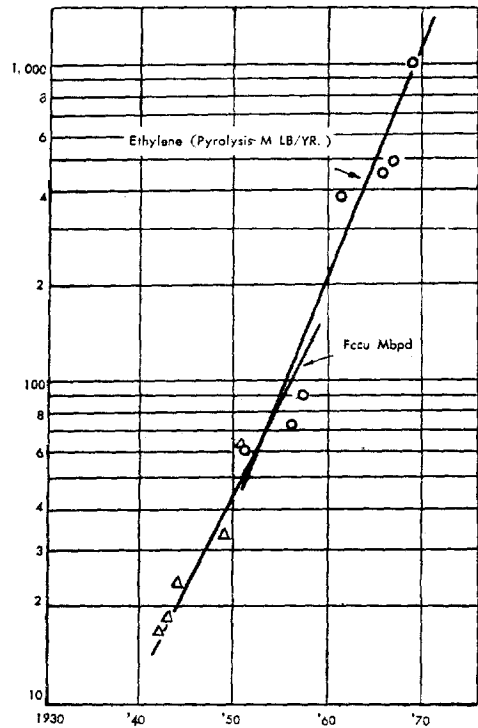


Fig. 2. Largest ethylene and FCC units by date.

設이 可能하리라고 보고 있다.

물론 암모니아 공장에 있어서의 大容量 원심 압축기製作의 問題點, 에틸렌 공장에 있어서의 cracking tube의 材質 및 Fractionator製作上 容量에 따른 問題點, 또는 FCCU의 fluidized bed design에 관한 問題點 등의 難題들이 끊임없이 수반되었지만 FCCU의 境遇와 같이 不可抗力의 것이 아니면 이들 공장의 大單位化의 速度를 늦추지는 못했고 앞으로도 어느 時點까지는 이 추세가 계속되리라 본다. 그러나 우리나라와 같이 협소한 市場의 與件下에서는 大單位化를 爲한 技術的 問題點의 解決에 앞서 충분한 市場 開拓이 先行되어야 하기 때문에 다른 角度에서의 檢討가 必要할 것이다.

(3) 經濟 單位의 選定

한 化學 工場의 經濟 單位를 決定하기 爲하여는 技術的인 面은 勿論 經濟的인 面에서의 檢討가 先行되어야 한다. 따라서 가장 重要한 點이 市場調査라고 본다. 市場調査에 있어서는 여러가지 點들을 고려하여야 겠지만 輸入統計를 土台로 하여 輸入代替에 그칠것이 아니라 실 수요자의 수요傾向, 잠재수요, 輸出 增大에 따른 需要量 增加率, 世界的인 需要傾向을 감안하여 正確한 市場性을 豫測해야 한다. 위의 資料를 基礎로 하여 經濟的, 技術的 問題點들을 檢討, 經濟單位의 決

정이 뒤 따라야 한다. 지금까지 주로 海外 機關에 위촉, 遂行되어온 市場 調査 및 妥當性 調査는 國家政策 樹立에 기여할 수 있고 또한 國內外의 市場 事情에 밝은 國內의 特定 機關에 依해 遂行되어야 할 것이다.

3. 大 單位化의 問題點

(1) 主要 裝置의 容量에 關하여

化學 工場의 大 單位化에 따른 技術的인 面에서의 問題點들은 製品別로 또는 process 別로 差異가 있겠지만 一般적으로 主要 機器 裝置의 設計, 製作에 따른 事項들을 몇가지 部類로 나누어 살펴 보기로 한다.

① 回轉 機器類

펌프類는 큰 制約을 받지 않는 機器로 配管群 內에 設置할 때에는 NPSH 條件으로 因하여 制限을 받게 된다. 따라서 大 單位化하면 複數의 펌프를 並列로 使用하거나 booster pump 類를 使用하는 傾向이 많다.

壓縮機類는 大 單位化할수록 centrifugal 이나 axial type 을 選擇하는 것이 經濟的이며 400 kg/cm^2 以上の 壓力, 百萬 m^3/hour 以上 容量의 壓縮機도 設計, 製作 可能하며 single case 의 許容 load 는 30,000 Hp 까지 可能하다.

Gas turbine 類도 30,000 Hp 以上 製作되고 있으며 單一 power wheel 用 jet engine 類는 100,000 Hp 以上도 製作된다. Steam turbine 類는 驅動 對象에 따라 다르겠지만 容量의 制限이 없다.

전동기類는 發電機類와 大同 小異하여 容量의 큰 制限은 없으나 10,000 Hp 가 넘으면 始動을 爲한 特殊 配慮가 必要하다.

一般적으로 回轉機器類의 購買費는 容量의 增加에 따라 正比例로 增加하거나 또는 若干 적게 들거나 하는 것이 普通이지만 single train 일 境遇와 그렇지 않을 경우 維持費의 差異는 훨씬 큰 것이 常例이다.

② 其他 裝置類

Process furnace 類 및 heater 類는 multiple component 를 사용하여 容量의 制限을 받지 않고 製作할 수 있다. 에틸렌 공장의 경우와 같이 multiple furnace 를 使用해야 하는 境遇도 勿論 많다. 아주 小規模일 경우를 除外하고는 現場組立하는 것이 普通이며 建設費는 容量의 增加에 따라 거의 正比例한다.

熱 交換器類는 shell 의 直徑과 運轉 壓力에 따라 制限을 많이 받는다. Removable tube bundle 을 사용할 때에는 傳熱面積 $8,000 \sim 10,000 \text{ ft}^2$ 까지, fixed tube sheet 일 境遇에는 $50,000 \text{ ft}^2$ 까지 사용되고 있다. 따라서 大 單位 工場에서는 multiple exchanger 를 쓰는 것

이 普通이다. 配管類는 工場의 容量이 增加함에 따라 그들 直徑이 容量比의 제곱근에 比例하며 그들 두께는 壓力에 變함이 없는限 그 直徑에 比例하여 增加하는 것이 普通이다. 따라서 配管類의 單位 길이당 두께는 容量에 比例하여 增加한다. 配管에는 여기에 부수되는 valve, fitting 등이 고려되어야 하므로 이 費用은 容量에 따라 正比例 以上の 比率로 增加하는 것이 普通이다. 大 單位化의 매력은 process design에 있어서의 進歩된 技術에 달려 있다고 볼 수 있겠다. 卽 材質의 開發, 裝置의 수용능력의 增進, 裝置 製作 技術의 發展, 建設 能力의 改善 등 여러가지 項目들이 大 單位化에 따른 費用 節減에 기여하였지만 무엇보다도 化工 機器의 開發이 수반되는 process 開發이 차지하는 比重이 크다고 보겠다.

(2) 工場의 Reliability에 關하여

① 大單位 工場의 特殊性

工場을 大 單位化함에 있어서 工場의 reliability 및 safety의 問題는 가장 신중히 考慮해야 할 問題이며 이 觀點에서 본다면 다음의 몇가지 基本的인 要素들을 注視, 設計에 反映시켜야 할 것이다.

(가) Plot density (Investment density)

Plot density 또는 (Investment density)는 (그림 3)에서와 같이 單位 面積當 製品 生産 容量으로 表示할 수 있다. 大 單位化할수록 密集度가 增加함을 보이고 있다.

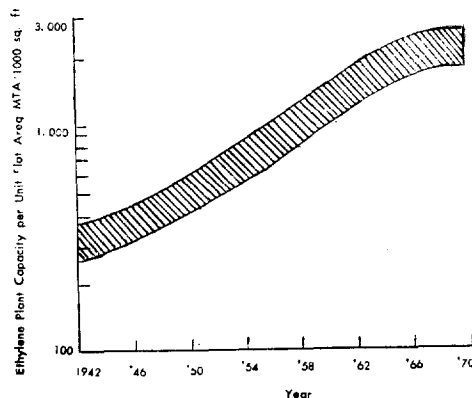


Fig. 3. Plot density

高密度의 工場일수록 設計, 建設時 reliability 및 safety에 新중을 期해야 한다는 것은 當然한 事項이다.

(나) Plant Inventories

大 單位化 할수록 單位 面積當 總 plant inventory가 增加한다는 事實이다. Plant inventory의 增加는 些少한 事故에 依해서도 莫大한 損失을 입을 可能性을 提示하는 것이다.

(다) 壓縮機의 大型化

工場の回轉機器중 가장 큰比重을 차지하는 것이亦是壓縮機인데 大單位化할수록 壓縮機도 大型化되는데에 問題點이 있다. 에티렌 공장의 경우 Raw gas 壓縮機의 馬力數는 普通年間生産容量(MT)의 7~8%로 推定된다. 따라서 이 壓縮機의 reliability가 工場の reliability에 미치는 영향은 看過할 수 없는 것이다.

(라) Systems integration

大單位化 할수록 process와 utility system과는 緊密해 지기 때문에 process dynamics, start-up, part-load operation, process heat recovery, steam generation system 등에 더욱 細密한 檢討가 必要하다.

(마) Pollution control

大單位化 할수록 公害 防止法의 變化추세를 감안하여 新축성 있는 設計가 要求된다. 條件이 硬化될 境遇設備들 追加하는데 必要한 工場 運休 및 經費 支出을 過多하게 하지 않도록 해야 한다.

② 經濟性에 對한 問題點

工場이 大單位化함에 따라 製造 原價가 節減된다는 하는 長點이 있는 反面 다음과 같은 損失을 입을 可能性이 많다는 것을 注意해야 한다.

(가) 長期間의 操業短縮

妥當性 調査時 需要量 推定을 過大하게 하여 長期間의 操業短縮을 不可避하게 하는 境遇를 생각한다면 純利益 또는 減價 상각을 등에 미치는 영향은 치명적인 것이다. (그림 4)에서 그 한 예를 볼 수 있다.

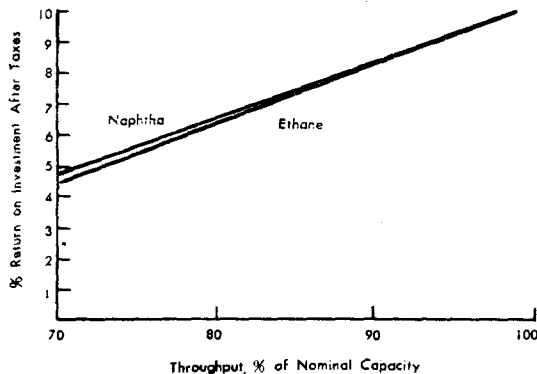


Fig. 4. Effect of reduction in plant throughput on return on investment

(나) 短期間の 操業短縮

시운전 기간의 연장이나 unscheduled shutdown 등과 같은 短期間の 操業中斷으로 인한 損害도 大單位工場일수록 그 比重이 크다는 點을 考慮해야 한다.

③ 工場 性能에 對한 問題點

工場の稼働率は 그 工場の reliability를 表示하여

주는 좋은 資料가 된다. 이 稼働率을 低下시키는 要素들을 發見, 除去하는 것이 또한 重要な 일이다. 工場建設後 主要 問題點들이 대개 解消되는 六個月間の 實績에 의거 統計를 綜合해 본 結果 運轉時間의 90%가 다음 세가지 部類의 原因으로 因해 惹起되었다고 한다.

(가) 設計, 製作 및 應用의 잘못으로 因한 機器裝置의 결함.

(나) 사람의 잘못된 運轉, 整備의 未熟.

(다) 原料의 不足, 停電 등과 같은 外的 要因.

위 要因들 중 機器裝置의 결함에 依한것이 가장 比重이 커서 全體의 40~60%에 이르고 있다.

④ Reliability 增進의 問題點

工場の reliability에 미치는 影響力이 가장 큰 다음 問題點들에 對하여 그 reliability 增進에 기여할 수 있는 方案의 模索을 中心으로 하여 檢討하고자 한다.

(가) 回轉 機器의 性能

工場 運休의 主要한 理由의 하나는 回轉 機器, 그중에서도 特別 壓縮機의 결함으로 因한 것이다. 普通의 回轉 機器類는 stand-by machine을 設置하지만 壓縮機의 境遇는 그렇지 못하기 때문에 運休는 勿論 事故의 반도를 最小限으로 줄일수 있도록 다음 事項들을 參考해야 한다.

(1) 壓縮機, 原動機 및 그 부대 施設들은 한 製作者에게 그 性能 保障의 責任을 지우는 것이 原則이다.

(2) 壓縮機 設計 資料의 檢査는 部門別로 分散시켜 精密을 期해야 한다.

(3) 製作先에서 原動機 結合後 完全한 test-run을 포함한 모든 檢査를 해야 한다.

(4) 停止狀態에서는 勿論 稼働中에 alignment를 檢査하여야 한다.

(5) 壓縮機 shut-down device의 作動 不良은 恒常 부딪히는 問題이므로 二重, 三重의 保護 裝置가 必要하다.

(6) 振動 및 軸 移動 등을 點檢하는 設備이 있어야 한다.

(나) Utility system의 性能

Utility system 特別 steam system의 問題로서 보이라의 性能과 이에 연관된 steam quality가 問題가 된다. 卽 보이라의 境遇 flame scanning device의 作動不良으로 全工場에 steam 供給을 中斷시켜 運休를 來한다든가 steam quality가 나빠 各 回轉 機器나 superheater tube에 deposit를 만들어 工場の 稼働率을 低下시키는 등의 諸 要因을 除去하는 努力이 加重되어야 한다.

(다) 運轉 및 整備의 熱練度

運轉이나整備의未熟으로因하여생기는사람의失手는大單位工場에서意外의큰被害를주는境遇가 많다. Emergency에對處한徹底한訓練, prestartup planning의細密한實踐,整備의完全等の努力으로工場稼動率을最大로増進시켜야한다.

⑤ Safety factor

工場の完全한操業을爲한要件들로서다음과같은點들을檢討해야한다.

(가) Relief system

機器裝置의保護를爲하여 safety valve를設置하는問題,工場에서排出되는危害物質의收集處理問題들이總망라된다.

(나) Plant layout

危險度가 많은裝置를隔離시킨다거나 heater類의位置는바람方向이主로 process쪽으로向하는곳으로한다든가,或은 drain이나 blow-down을 section別로分離시키는等の措置 등이 포함된다.

(다) Instrumentation

大單位化할수록 모든 계기의 성능이 완전해야 하고 process內的 upset는些少한 것이라도調整室에서 발견할 수 있도록設計해야한다.

(라) 材 質

壓力에 관한限別로問題가되지 않지만溫度 부식의程度에 따라서는 아직도問題點들이 많이 남아 있다.

4. 結 論

化學工場の建設에 있어서技術的,經濟的面을檢討해본結果大單位化하는것이有利하다는것은明白하다.그러나經濟單位를選定하는데는市場調査및需要推定이先行되어야한다.國際間的競爭을 감안하여 위妥當性調査는國內의特定機關에서遂行하는것이合理的일 것이다.

大單位化의추세를技術的인側面에서본다면主要機器裝置의製作能力에따라制限된다고보겠다.그러나이들制限은技術의開發에依하여不斷히修正되고있으므로問題가크지않다.

Reliability에對하여는 maximum safety, maximum reliability, minimum cost의相互대치되는必要條件下에서 가장妥當한線을긋는일이重要的點이다.即最少의人員으로自動化하고,進歩된技術을適用하며 가장 reliable한材質을使用하는等등의生産原價를切下시키는項目들은工場の safety나 reliability를増進시켜주는다음事項들과는兩立할수없는일이다.即裝置를 충분히隔離시킨다거나, 폐기물의排出를完全히調節한다든가,人員을餘裕있게確保한다든가하는等이다.

따라서規模에따라合理的인線에서決定하는問題는工場建設에서基本的인事項이므로工場主,機器裝置의供給者 및用役會社間的緊密한協調아래 신중히檢討되어야한다.

引 用 文 獻

- 1) Sir Ronald Holyroyd; "Ultra Large Single Train Chemical Plants," *Chemistry and Industry*, Aug. (1967).
- 2) L. Axelrod, et. al.; "The Large Plant Concept", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 64 No. 7(1968).
- 3) J. A. Finneran, et. al.; "Startup Performance of Large Ammonia Plants," *Chemical Engineering Progress*, Aug. (1968).
- 4) William Tucker, et. al.; "Plant Reliability and its Impact on Large Plant Design and Economics" Presented at third joint meeting of Instituto De Ingenieros Quimicos De Puerto Rico and AIChE, May (1970).