

化學工場の 熱經濟

崔 熙 云 · 李 世 鍾

韓國科學技術研究所 化工設計室

1. 序 論

Engineering이란 말은 여러가지로 解釋이 되겠지만 그 內容의 主된 흐름과 가장 뚜렷한 目的은 費用의 節減 (Cost economization)에 있고 또 效率의 極大化, 最適化에 있다고 생각된다. 다시 말해서 Engineering=Optimization 또는 Economization 인것이다. 構造力學이 그렇고 材料力學, 化學裝置의 設計, 工場配管의 設計, 工程設計에 이르기까지 經濟乃至는 費用과 關聯되지 않는것이 없으며 또 그 窮極의 目的이 위에 말한 最適化, 經濟에 있지 않은것이 없다.

化學工場の 工程開發이나 工程改良, 工程設計에 있어서 效率 또는 收率의 増大, Utilities의 節減, 그 效率의인 利用等은 우리 化工技術者가 하는 일의 殆半이라 하여도 過言이 아니다.

1974年을 前後해서 일어난 油類波動은, 原油의 價格을 BbL當 \$2.5線에서 \$12.0台로 믿어지기 어려우리만치 올려 놓았고, 더욱 올라갈 可能性마저 보이고있다. 이것은 現在대로의 油類消費傾向으로는 앞으로 30年分の 埋藏밖에 없으니 이 貴重한 石油을 Energy源의 主宗으로 쓰고만 있을것이 아니라, Energy源은 다른 곳에서 찾고 石油는 燃料로서가 아닌 化學工業의 原料로서 使用토록하는 努力을 해야될것이라는 Global한 警鐘이 되기도 했지만, 于先 當場에 化學工業製品 나아가서는 모든 工業製品의 原價上昇을 不可避하게 만들었다.

Fig. 1에 우리나라의 年度別 原油導入量, 原油의 BbL當 導入價 또 이에따르는 外貨支出을 表示하였다. '73년에 3億弗이던것이 '76년에 16

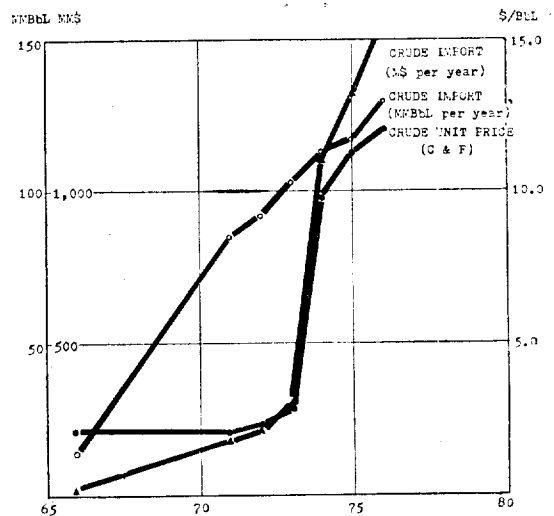


Fig. 1. Crude Import & unit price.

億弗이 되었다. 한편 Table 1은 美國에 있어서의 Energy 또는 Utilities의 單價와 앞으로의 展望을 나타낸것이다. 우리나라 油類消費의 類型이 火力發電을 包含한 重化學工業에 約 65%가 使用되고있고, 이 중에서 純粹한 原料로서의 消費는 不過 몇%에 지나지 않는것을 볼때 (Fig. 2 參照) 徹底한 熱管理의 必要性을 새삼 切感하게 한다. 그러나 絶緣을 잘했는가, steam trap을 제대로 알았는가, Boiler, 工業爐의 空氣量이 適切한가 등의 熱消失 (Heat leakage)을 主眼點으로 하는 一般的인 熱管理가 爲先 急先務이긴 하지만 나아가서 工程自體를 分析檢討하므로써 工程全般的 熱濟經를 따지고, 熱 Energy 利用의 最適化를 꾀하는것은 化工技術者의 本然의 任務가

Table 1. Typical energy price (U. S. A.)

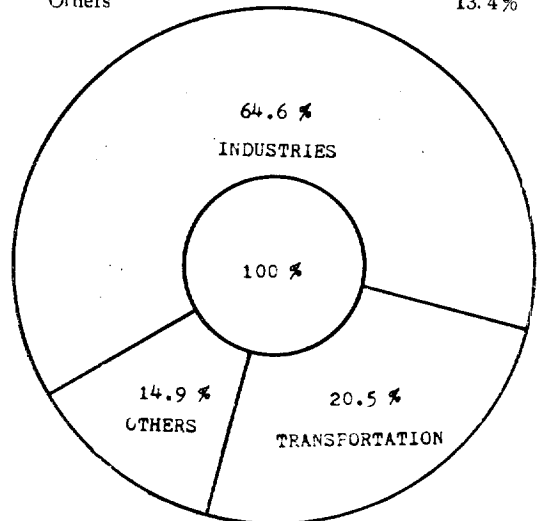
	1960	1974	1975	1980
Crude Oil, \$/Bbl	3.50	10.00	12.00	14.00
Fuel Oil, \$/MMBtu	0.70	1.20	2.00	2.80
Light HC Fuel, \$/MMBtu	1.00	1.50	2.50	3.50
Fuel Gas, \$/MMBtu	0.20	0.80	1.20	3.00
Steam, \$/1000 lbs				
1200-1500 Psig				5.00
500-750 Psig	0.50	2.00	3.50	4.00
150-200 Psig	0.20	1.50	3.00	3.50
20-50 Psig	0.20	0.50	2.50	3.00
15-20 Psig				2.00
Cooling water, \$/1000 Gal	0.20	0.04	0.05	0.06
BFW \$/100 Gal				3.00
Power, \$/KWH	0.010	0.015	0.02	0.03
Coal, \$/MMBtu	0.30-0.50	0.70	0.75	1.00

아닌가 생각된다.

工場全體의 熱精算, Steam Balance를 嚴格히 再檢討하여 이 系統을 最適化하는것, 蒸溜塔의 段數를 增加시키므로써 還流比를 줄이는 方案, 蒸溜塔의 中間 Reboiler나 中間Condenser를 追加하는 檢討, 追加熱交換面積에 依한 熱의 回收等, 좀더 具體的인 工程上的 熱管理가 追加施設 投資를 正當化하고 經濟的으로 妥當하게끔 形便이 바뀐것이다. 有効熱의 Kcal當 單價는 數年前과는 달라졌으며, 그 價値概念도 當然히 달라져야 할것이다. 기름 값이 4倍以上 오른대 比해서 裝置의 값이 2~3 倍올랐다면, 熱回收, 熱經濟의 最適條件은 技術的, 經濟的인 面에서 當然히 달라지게 마련이다. 150°C—200°C의 廢熱은 回收할 價値가 없던것인데 이제는 이의 適切한 回收가 正當化되는 時代가 되었다.

熱經濟面에서의 化學工場의 工程分析에서 오는 熱의 合理的인 利用方案, 熱回收에 必要한 適切한 追加投資는 오래지않아 補償 (pay) 될것이며, 企業合理化에 寄與할것을 믿고, 工程上的 改良, 低溫度 廢熱의 回收에 關한 一般의인 事項을 紹介하고자 한다.

Industries	64.4 %
Power Generation	21.2 %
Petrochemicals	10.0 %
Fertilizer	3.6 %
Cement	9.9 %
Steel	0.4 %
Textiles	3.0 %
Paper Mills	0.9 %
Glass	1.3 %
Chemicals	0.9 %
Others	13.4 %



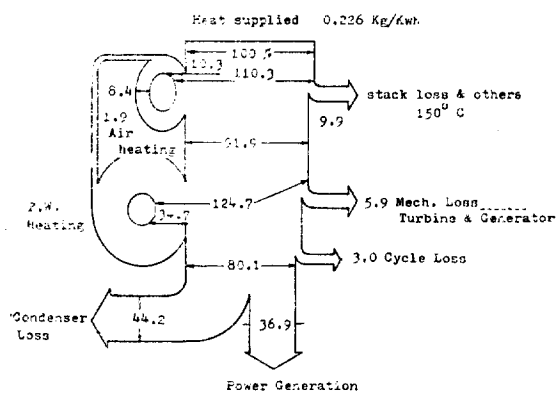
OTHERS	14.9 %	TRANSPORTATION	20.5 %
Home use	7.0 %	Railroad	2.5 %
Export	7.1 %	Marine	4.9 %
Fishery	0.8 %	Airways	0.9 %
		Road	12.2 %

Fig. 2 Petroleum consumption structure (Korea).

2. 主要工場의 熱精算(廢熱은 얼마나 되나?)

油類消費型의 몇가지 工場에 對해서 그 代表的인 熱收支를 따져 보았다.

25萬KW級 火力發電所의 熱精算을 圖示한것이 Fig. 3이다. 電力 KWH當 기름의 消費는 0.226kg이고 發電所全體의 熱效率은 36.9%로 나타났다. 熱損失中 가장 많은것은 Condenser에서 冷却水로 빠져나가는 44.2%이고 煙突로의 Stack Loss (150°C 程度)가 그 다음의 主要損失이다. Condenser Loss는 熱力學第二法則의 制約



$$\text{Thermal Efficiency } \eta = \frac{\text{Power Generation}}{\text{Heat Supplied}} = 36.9\%$$

Total Losses :	63.1%
Boiler Losses	9.9%
Stack Loss	3.8%
Refuses	0.1%
Radiation	0.3%
H ₂ O Vap.	5.5%
Others	0.2%
Turbine & Generator Loss	5.9%
Condenser Loss	44.2%
Cycle & Blowdown	3.0%

Fig. 3. Heat balance & heat losses of thermal power plant.

에 따르는 할수없는 損失이라 하더라도 煙突을 통한 150°C의 熱만이라도 回收하는 努力이 必要하게된다. 勿論여기에는 硫黃化合物에 因한 腐蝕問題, 同搬固形物의 處理等 技術的인 解決이 先行되어야 할것이다.

우리나라의 發電系統에는 이와 類似한 規模, 樣式으로 365萬KW의 發電能力이 있으니, 平均 9%의 節減은 年間 535,000噸의 油類節約에 該當하는 것이다.

바야흐로 1,500萬噸의 生産能力을 保有하게되는 우리나라 Cement 工業은 또 하나의 油類多消費型生産業이다. 그 典型的인 Cement mill의 熱精算은 Fig.4와 같다. Clinker 1MT當 燃料消費는 80.2kg으로 反應에 所要되는 熱量은 43.5%이다. 平均 350°C의 Preheater off gas와 200°C의 Cooler off gas는 總投入熱량의 約35%를 가

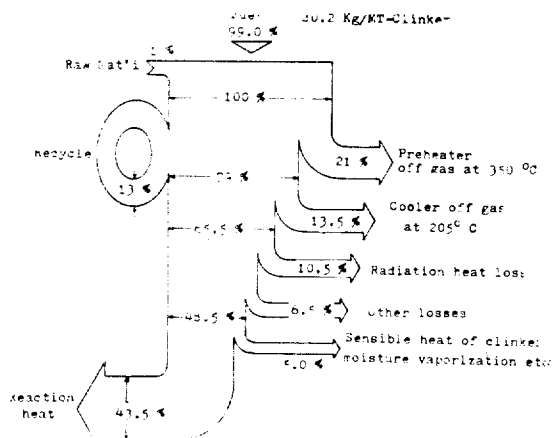


Fig. 4. Heat balance of cement mill.

지고 나간다. 이 熱量은 年間 415,000噸의 기름에 該當된다.

기름을 태워 기름을 만든다고 할수있는 精油工場은 原油 1Bbl을 精油하는데 約 0.1Bbl이消費된다는데 그 熱의 消費狀況은 Fig.5과 같다 反應熱, 發電等에 有効하게 쓰이는 熱은 約20%에 不過하고, Cooler Loss가 48%, Stack Loss가

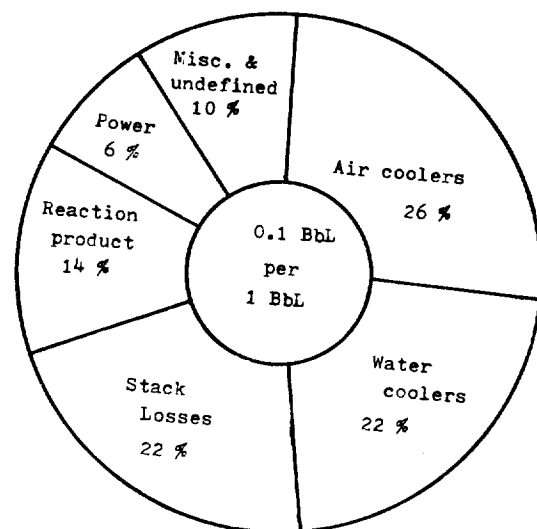


Fig. 5. Refinery fuel balance.

Table 2. Stack and offgas losses in three industries.

THERMAL POWER PLANT

Total	: 3,650,000KW
Fuel consumption	: 0.226kg/KWH
Stack loss	: ~9%
Stack losses in oil	: 535,000 MT/Y

CEMENT MILL

Total capacity	: 15,000,000 MT/Y
Fuel consumption	: 80.2kg/MT
Off gas losses	: ~34.5%
Off gas losses in Oil	: 415,000 MT/Y

REFINERY

Total capacity	: 400,000 BbL/D
Fuel consumption	: 0.1 BbL/BbL
Stack losses	: ~22%
Stack losses in Oil	: 392,000 MT/Y

STACK & OFFGAS LOSSES IN THREE INDUSTRIES:

Quantity	: 1,340,000 MT/Y
Amount	: 120,000,000 \$/Y

22%로 되어있다 400,000 BbL/D의處理能力에 Stack Loss만 생각하더라도年間 392,000톤의 기름으로換算된다.

위의 3가지主要工場의 우리나라生産規模에對한 Stack Loss, Off gas Loss만 생각하더라도 다음과 같이年間 134萬MT이며原油값으로만計算해도 1億 2,000 \$萬弗이 되는 것이다 (Table 2 参照).

3. 工程의 改良

化學工程의開發 또는發達이라는 것은窮局의으로는 새로운製品의製造나 보다底廉한既存製品의製造方式의開發乃至는改良을 뜻하는데原料의代替나機器의改良,大型化等副隨的인要件도 있겠지만그主內容은解煤 또는 새로운單位工程의開發과Energy面에서의工程의合理化,最適化에歸着된다고 생각된다. Engineering이關與되는局面은이中에서도後者인工程의合理化에있다 하겠다.

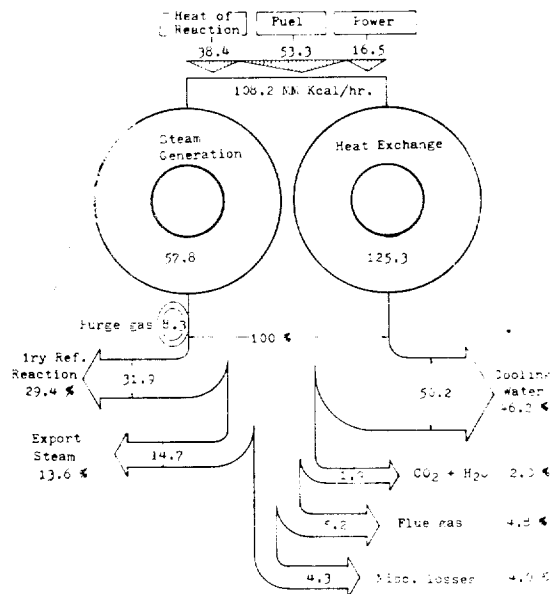
우리나라에過去 15年 동안에建設된 6個Ammonia製造工場의工程을比較할때 위에言

及한事實이 뒷받침된다.

觸媒나單位工程의發展은Naphtha steam reforming catalyst를爲始한脫硫,低溫轉換(Low temperature shift conversion),methane化等反應用觸媒의發達에따르는原料의代替,空氣分離가스分離等低溫工程의略省으로全體的인原單位の向上을갖어왔고,效率의인熱回收나Gas turbine, steam turbine의導入과大型Centrifugal compressor의發達は效率의이고最適化된Energy cycle의形成에많은改良을가져오므로써大單位化와함께그製造原價節減에刮目할만한寄與를하였다.特히Energy回收系統의發達は工場Steam所要를完全自給 또는過剩供給할수있게되어있고,直接操業費도1/2~1/3程度로의節減을可能케하였다.

우리나라肥料工場中比較的後期에세워진中規模乃至는大規模Ammonia工場3個를概括的으로比較하였다.

Fig. 6은 1967년에세워진日産 500MT規模의韓國肥料Ammonia工場의全體熱收支圖이며, Fig. 7은 1974년에稼動한綜合化學忠州Ammonia Center의熱收支圖이다.後者はGas turbine

Fig. 6. Heat balance of NH₃ plant. (Hankook Fertilizer)

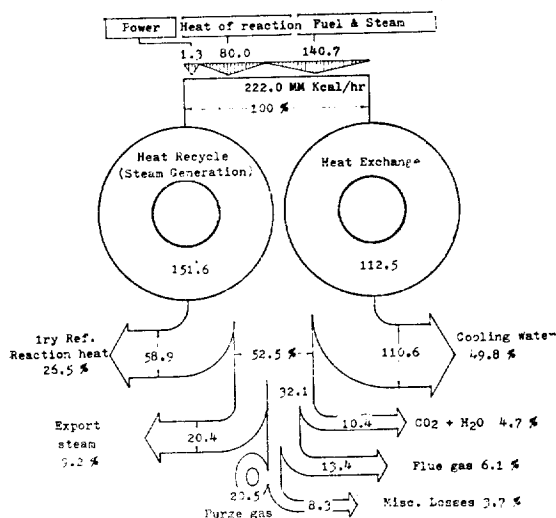


Fig. 7. Heat balance of NH_3 Plant. (General Chemical)

과 Centrifugal Compressor를導入한 最新工程이라 할수있다. 3個工場 Energy 및 Fuel 所要 또는 消費라는 觀點에서 比較하면 大略 다음과 같다 (Table 3 參照)

Table 3. Energy and fuel consumption in three chemical companies.

	Unit	Yong Nam	Hankook	General Chem.
Process Naphtha	MT/MT	0.544	0.547	0.548
Fuel Naphtha	MT/MT	0.239	0.188	0.19
Diesel on Bunker c	MT/MT	0.011	—	0.05
Power	KWH/MT	680	785	35.8
Steam	MT/MT	0.44 exp	1.0 exp	0.3 exp
Energy Total*	MMKcal/MT	3.80	3.05	2.69
Energy rate		1.41	1.14	1

* Energy total

$$1 \text{ KWH} = \frac{860}{0.36} = 2380 \text{ Kcal}$$

$$\text{Heating Value of Fuel} = 10,000 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{steam credit MT} = \frac{600}{0.85} = 700 \text{ kcal/kg}$$

韓國肥料와 嶺南化學은 steam을 尿素 其他工

場에 Export 하기 爲하여 代身 power 供給이 많고 綜合化學의 境遇는 steam을 自足하는 代身 power 供給이 越等 적게 設計되어있다. 그러나 Ammonia MT 當의 Total Energy 所要는 大型인 綜合化學이 Scale merit도 있겠지만, 1 : 1.14 : 1.41 程度の 比率로 적어 有利하게 設計되었음을 알 수 있다. 3個工場 供히 冷却水로의 熱損失이 約50%臺이고, Flue gas Loss가 約5% CO_2 (Vent)에 依한 損失이 2~4%臺임을 알 수 있다.

CO_2 wash 工程에 있어서 再生 Hot potash lean solution을 冷却後 CO_2 吸收塔으로 보내는 것이 常例인데 이 熱을 Li-Br-Water System의 吸收式冷凍機로 Energy 回收하므로써 Hydrogen Booster Compressor의 段間 Gas 溫度를 冷却, 電力 消耗을 6% 節減했다는 다음의 事例은 工程을 檢討分析하므로써 化學工場의 熱經濟를 試圖한 좋은 본보기라고 생각되어 여기 紹介한다 (Table 4 參照).

Table 4. Case study of energy management.

PROCESS ASPECTS :

Heat source for recovery : Lean solution (sensible heat) of CO_2 washing at 243°F

Heat recovering : By Li-Br-Water absorption refrigeration

Usage of refrigeration : Reducing Interstage gas temp. of hydrogen booster compressor, From 100°F to 60°F

Energy saving : 6% of compressor Hp.

ECONOMIC JUSTIFICATION :

Incremental capital investment

Exchangers	\$69,000
Pumps	10,000
Refrigerations system	140,000
Compressor savings	-100,000
	\$119,000

Annual op. cost savings	2.5¢/KWH
Compressor power	82,500
Additional pumping cost	-11,250
Total	\$71,250

4. Process plant의 工程改良 및 廢熱回收

Process plant의 工程을 Energy optimization의 觀點에서 銳意 檢討分析하면 改良의 餘地가 아직도 많이 있으리라고 생각된다. 美國의 精油業界는 油類波動以後, Energy 節約에 積極的인 改良과 投資를 하므로써 7.8%의 Energy Conservation을 이룩했다하는데 그 寄與度를 方法別로 記述하면 다음과 같다(Table 5 參照)

Table 5. Energy conservation of U. S. refineries.

Energy Conservation:	7.8%
Conservation According to Type:	
Heat Transfer Equipm't:	44%
Increased heat exch.	28%
(Furnace & Exchanger)	
Combustion Equipm't	8%
Combustion Auditing	10%
Optimization of Process. OP.	20%
Plant Revision	14%
Insulation, Leakage Improve	22%

化學工場과 같은 Process plant의 Energy conservation을 爲하여 觀察하여야 할 一般的인 Check point를 추려보았다 (Table 6 및 Table 7 參照).

Table 6. Energy saving by better Plant design.

PROCESS IMPROVEMENTS

- *Improved heat conservation of hot and cold streams entering and leaving the plant
- *Improved pressure energy recovery methods
- *Improved integration of streams within the plant
- *Improved catalysts
- *Improved solvents and absorbents
- *Improvement of cyclic operations
- *Use of intermediate reboilers or condensers

FURNACES IMPROVEMENTS

- *Convection bank of tubes
- *Combustion air preheating
- *Control of combustion
- *Reduction of fouling
- *Improved burners & insulations

PUMPS COMPRESSORS & PRESSURE ENERGY RECOVERY

- *Pressure drops
- *Proper pump sizing
- *Recovery of pressure energy (hydraulic or gas-turbines)

FRACTIONATION

- *Reboiling
- *Reflux
- *Reflux vs. trays
- *Instrumentation

WASTE HEAT RECOVERY

Table 7. Problems in waste heat recovery.

ASPECTS TO BE EXAMINED:

- What is the weight of gases discharged?
- What is their temperature?
- Any chemically active substances (eg. sulfur)?
In what quantity?
- Any physically active substances (eg. abrasive dust)?
In what quantity?
- Heat & energy demand within economic distance?
- Relative times of heat recovery and demand?
- Any justification for supplementary firing?

PROBLEMS IN WASTE HEAT RECOVERY:

- Control Source vs. demand
- Fouling Dust, alkali metal, deposit
- Corrosion SO₃, Cl.
- Erosion

追加熱交換에 의한 Heat recovery의 境遇는 投資와 回收價値를 比較하므로써 比較的 簡單하게 熱回收의 妥當性을 檢討할 수 있을것이다.

Q: Heat recovered kcal/hr

H: Op. hours per year Hrs.

W: Value of heat recovered Won/10,000kcal

C: Investment for heat recovery Won

d: Depreciation for Investment

i: Interest rate for Investment.

Co: Operating cost won/year.

年間 熱回收價値는 $\frac{QHW}{10,000}$ 이 될것이

고, 이에 所要되는 年間熱回費用은 $C(d+i) + Co$

가 될 것이다.

$\frac{Q_{HW}}{10,000} > C(d+i) + C_o$ 이면 熱回收가 正當化된다.

5. 廢熱回收利用의 工業的인 方法

前述한 바와같이 150°C—200°C의 廢熱은 그 熱量으로 보아 莫大한 量이 廢熱로 버려지고 있는데 이것을 回收利用하는 方案으로서 工業的으로 實施되고 있는 두가지 方法을 略述하고자 한다. 하나는 Boiler-Turbine의 steam 代身 Freon 등의 低沸點 媒體를 써서 動力의形態 熱 Energy를 回收하자는 方案이고, 다른 하나는 NH₃-

Water系나 LiBr-water系의 吸收式冷凍機가 그것으로, 廢熱 Energy를 Cdd energy로 回收使用하자는 것이다.

5-1. Freon Turbine에 依한廢熱의 回收

Freon과 같은 低沸點物質로서 Boiler-Turbine 熱回收系에 使用할 媒體로는 低沸點, 高蒸氣壓, 熱安定性, 熱傳達特性, 腐蝕性, 火氣安全性, 潛熱等熱特性 등의 性質이 考慮되어야 한다.

이러한 性質을 考慮하여 使用할 수 있는 Freon 11, Freon 12, Propane, Ammonia 등에 關하여 그 熱的特性을 Table 8에 羅列했다.

이러한 媒體를 使用한 Boiler-Turbine 系의

Table 8. Working media of turbine.

THERMODYNAMIC PROPERTIES	R-12		R-12		Propane		Ammonia	
Gas generating temp. °C	80	120	80	106	80	100	80	100
Req. min. superheating, °C	0	0	5	9	3	5	55	75
Gas generation press kg/cm ² a	5.34	12.69	23.5	37.9	31.6	41.0	35.2	77.5
Condensing press*, kg/cm ²	1.52		8.64		14.0		14.0	
Adiabatic Δi, kcal/kg	5.26	9.41	4.13	6.0	6.1	11.1	36.6	59.9
Req. heat Input ΔH, kcal/kg	47.4	51.1	35.5	37.0	56.7	60.4	298.5	318.0
Rankine cycle eff. η Ran	0.111	0.184	0.116	0.162	0.108	0.187	0.123	0.189
Flow rate per ΔH, $\frac{\text{kg/h}}{10^4 \text{kcal/h}}$	212	196	281	270	176	166	33.5	31.4
Adiabatic out put per unit ΔH, $\frac{\text{KW}}{10^4 \text{kcal/h}}$	1.29	2.14	1.35	1.88	1.25	2.18	1.42	2.19

*Condensing temp = 35°C

Heat transfer properties

Forced convection at 80°C
Boiling at 80°C
Condensing at 38°C

1.0	0.94	3.21	7.27
1.0		21.7	42.0
1.0	0.87	1.12	4.16

Flow diagram과 Cycle diagram은 Fig. 8에 圖示했다. 一義的으로 어떤 media를 使用하는 것이 좋다는것은 말할 수 없고 境遇에 따라 選擇되어야 할 것이나, 蒸發溫度와 Turbine capacity에 따라 흔히 使用되는 範圍가 Fig. 9에 나타나 있다.

Freon Turbine에 對해서는 여러나라에서 研究 開發商用化하고 있는듯 하나 日本의 IHI (Ishikawasihima Co.)가 開發商用化된 例는 다음

과 같이 冷凍機驅動力이 많다 (Table 9 參照).

Table 9. Commercialized freon turbines.

Application	200RT	2,000RT	800RT	490kW
	Refrigerating m/c	Refrigerating	Refrigerating	Power generation
Completed	1966	1968	1969	1974
Heat source	5Atm. Sat. Stm	Process gas Vapor	1.8Atm. Stm.	3Atm. Steam
Freon Working	R-11	R-11	R-11	R-11
Output, kW	190	3,800	475	520

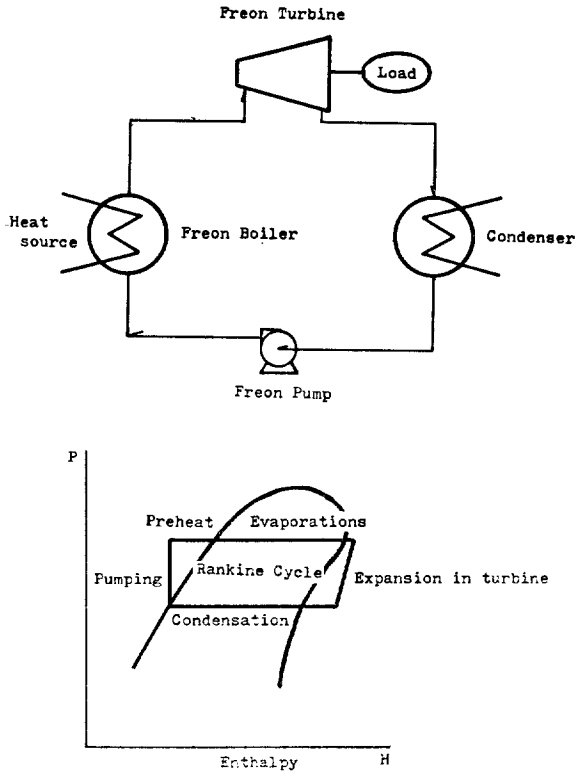


Fig. 8. Freon turbine, generals.

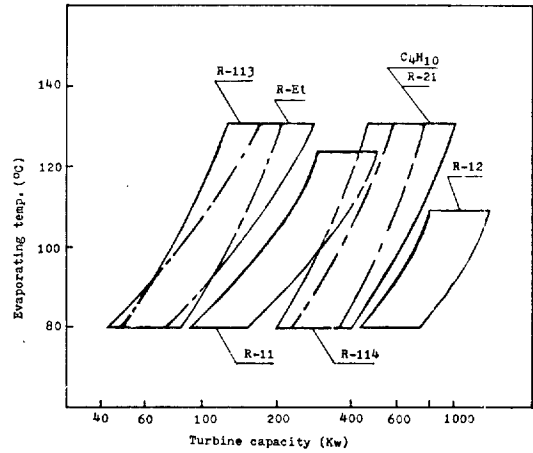


Fig. 9. Output covered by turbines of same size with various working media.

5-2. 吸收式冷凍機에 의한 廢熱의 回收

壓縮式冷凍機 Cycle의 Compressor 部分을 Gas-Generator, Absorber로 代替하여 熱源을 利用 Cold를 얻는 吸收式冷凍機에 對해서는, 代表的인 Schematic Diagram (Fig. 10參照) NH_3 -Water

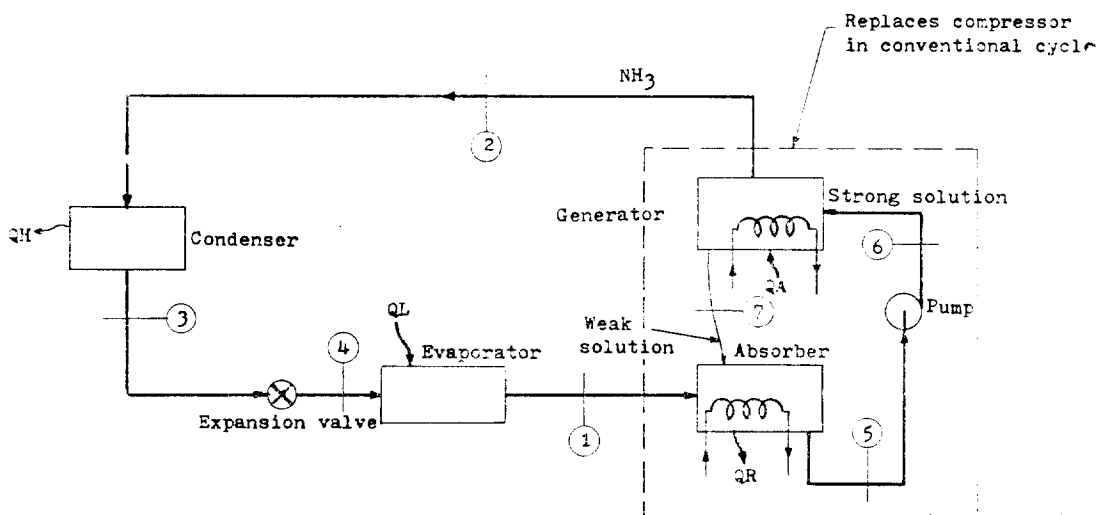


Fig. 10. Schematic of absorption refrigeration system.

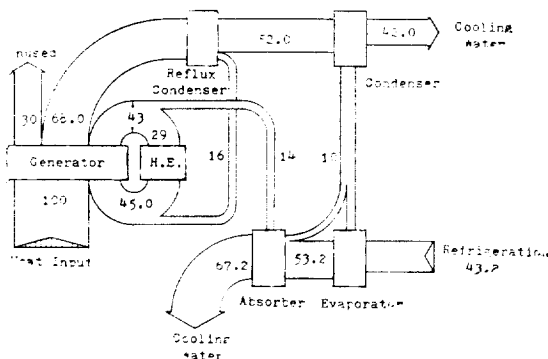
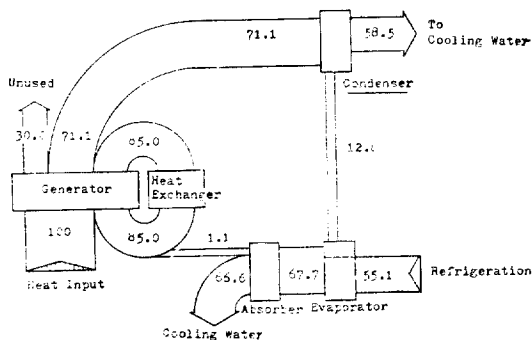
Fig. 13. Heat flow for NH_3 -Water system.

Fig. 14. Heat flow for LiBr-Water system.

System의 Flow Diagram (Fig. 11 參照) LiBr-Water system의 Flow Diagram (Fig. 12 參照) 을 提示하였다.

NH_3 -Water system은 廢熱의 熱源에 依해서 水溶液中の NH_3 蒸氣를 氣化 凝縮하여 이 液體 NH_3 가 Evaporator에서 蒸發할때의 Latent heat 를 利用하여 冷凍 Cold를 얻는 原理이며 LiBr-Water system은 LiBr 無機鹽의 溶解熱을 利用한 冷凍 Cycle이다. 詳細한 內容과 工學的인 說明은 專門參考書籍에 미루고 이 두 System의 Heat Balances 例를 Fig. 13와 Fig. 14에 圖示하여 參考에 供하고자 한다. 熱單位로 55% 以上の Cold를 얻는다는 것은 大端히 有效한 일이다.

6. 結 言

油價昂騰으로 因한 生産工場의 製造原價에 Energy 部分이 占하는 率은 점차 높아지고 國家的으로 보드라도 Energy Conservation이란 一連의 技術은 大命題의 하나인가 싶다. 化學工場의 工程改良과 廢熱利用이라는 觀點에서 若干의 資料蒐集을 거쳐 括概적으로 論述하였다. 工場一線에서 直接 이러한 일에 從事하는 專門化工技術者의 山 經體에서 오는 生生한 事例가 앞으로 많이 紹介되기를 期待하여 마지않는다.

資料提供에 協力해주신 綜合化學 忠州工場, 嶺南化學 및 韓國肥料의 工場長外 여러분께 感謝드리는 바이다.