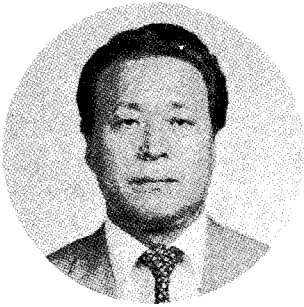


LNG를 이용한 冷熱發電技術

- LNG保有 冷熱 및 특성과 冷熱發電 시스템에 대한 考察 -



LNG負荷가 큰 시간대에 冷熱發電을 운전하고 負荷가 적은 시간대에는 정지시켜 冷熱Energy를 회수하기 위한 冷熱發電시스템에 대한 運用 및 檢討는 큰 의의가 있다.

鮮 于 賢 範

韓國가스公社 副社長

1. 개 요
2. LNG의 보유 냉열 및 특성
3. 냉열 발전 시스템
 - 가. 시스템개요
 - 나. Rankine Cycle 방식
 - 1) 1단 단일매체 Rankine Cycle
 - 2) 재생식 2단 Rankine Cycle
 - 3) 혼합 매체 Rankine Cycle
 - 다. 천연가스 직접 팽창 방식
 - 라. Rankine Cycle과 직접팽창의 혼합시스템
 - 마. Brayton Cycle 방식
 - 1) 폐쇄 가스 터빈 Cycle 시스템
 - 2) 개방 가스터빈 Cycle 시스템
 - 3) 복합 Cycle 시스템

1. 概 要

導入 LNG의 대부분은 發電用 및 가스이용 産業體와 都市가스용으로 주로 사용되고 있으나, 이들은

모두 시간적으로 큰 需要 變動으로 인해, 시간 변화에 따른 LNG의 冷熱利用 범위를 크게 확장하지 못하고 있다.

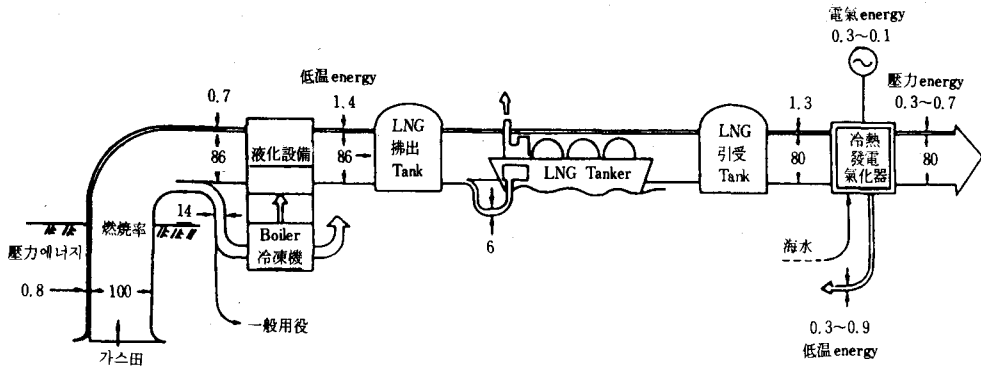
이러한 시간변동에 따른 冷熱利用의 사용범위를 높이기 위하여 즉, LNG 負荷가 큰 시간대에 冷熱發電을 운전하고 負荷가 적은 시간대에는 정지시켜 冷熱 Energy를 회수하기 위한 冷熱發電 시스템에 대한 運用 및 檢討는 큰 의의가 있는 것이다.

여기서는 LNG의 保有 冷熱 및 특성과 冷熱發電 시스템에 대하여 고찰하여 본다.

2. LNG의 保有 冷熱 및 특성

LNG는 메탄을 주성분으로 한 炭化水素의 혼합물인 천연가스를 液化基地에서 정제하여 -162°C 로 액화한 것으로서, LNG를 산지로 부터 수송하여 인수기지에 저장, 氣化의 과정을 거쳐 각 需用家에 천연가스를 공급하게 된다.

그 과정에서의 연소열 및 압력, 온도에 따른 유효 에너지의 변천을 살펴보면 그림 1과 같다.



(그림 1) LNG 연소열 압력, 온도 유효 Energy Balance

LNG는 산지에 따라 다소 성분이 다르나 LNG 1Kg을 압력 1 Kg/Cm²G 기준, -160°C에서 0°C까지 氣化시키기 위하여는 약 200Kcal가 소요된다. 따라서, 상대적으로 이용 가능한 冷에너지는 LNG 1 Kg당 약 200Kcal가 된다.

LNG 보유 冷熱量은 조성, 壓力, 溫度에 따라 다르며, 그 평가법으로 그림 2에 나타낸 바와 같이 Enthalpy 평가도 가능한데 유효에너지 즉 Exergy

개념을 이용하는 것이 편리하다.

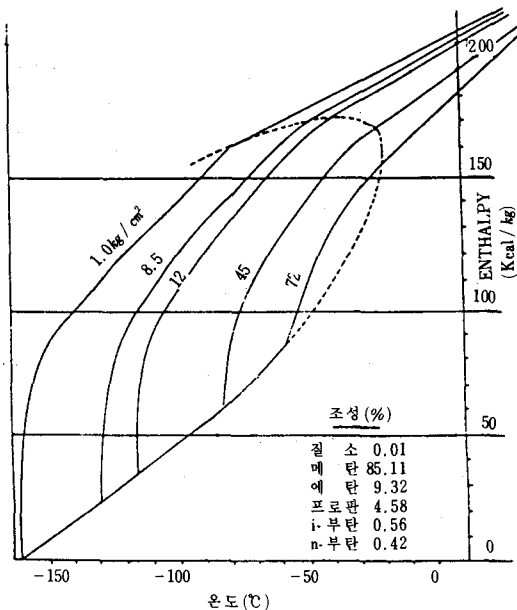
이 경우, 冷熱 Exergy는 低温 Exergy와 壓力 Exergy로 나누어 생각할 수 있다.

LNG가 온도 T, 압력 P인 상태에서 외계(온도 To, 압력 P)와 평형에 달하기까지 하는 일 즉, 저온 Exergy(Et)는 다음과 같다.

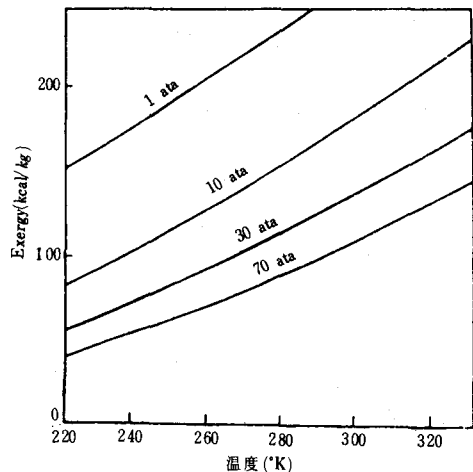
$$E_t = \int_r^{r_0} \frac{T_0 - T}{T} di \dots\dots\dots (\text{Kcal/Kg})$$

이 값이 LNG T-i선도에서 구한다.

압력 P가 변하면 T-i 선도도 달라져 저온 Exergy도 변화된다. 그 예는 그림 3에서 알 수 있다.



(그림 2) LNG 온도-엔탈피 선도



(그림 3) 압력에 따른 저온 Exergy 변화

한편, 압력 Exerty(Ep)는 온도 T, 압력 P 상태로 부터 외계(온도 T, 압력 Po)와 평형이 되기까지의 일량으로써 이것은 다음 식과 같다.

$$E_p = R'T \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \dots\dots\dots (\text{Kcal/Nm}^3)$$

R : 기체상수

3. 冷熱發電 시스템

가. 시스템개요

冷熱發電은 LNG의 冷熱 Exergy를 電力의 형태로 회수하는 것을 전제로 한다. 이 시스템은 비교적 기동 정지가 용이하여 LNG 부하변동이 많은 경우에 冷熱 Exergy를 보다 유효하게 회수할 수가 있다.

LNG의 기화압력이 고압(20-100Kg/Cm²G)인 경우에는 압력 Exergy로서 유효하게 이용되지만 低温 Exergy는 적고, 기화압력이 저압(5-10 Kg/Cm²G)인 경우에는 冷熱發電에 사용되는 저온 Exergy가 크게 된다.

이 냉열 Exergy(저온 Exergy, 압력 Exergy)를 이용한 발전 방식으로는,

- (1) 低温 Exergy를 이용하는 Rankine Cycle 방식
- (2) 壓力 Exergy를 이용한 천연가스 직접 팽창 방식
- (3) 低温 Exergy에 의한 압축 동력을 감소시키는 Brayton Cycle 방식

이 있으며, 각 방식마다 열효율을 높이기 위해 재생 시스템을 이용할 수 있고 또한 각각의 시스템을 조합한 혼합 방식도 이를 수가 있다.

나. Rankine Cycle 방식

이 방식은 중간매체(프로판, 프레온등)를 (1) 凝縮 (2) 昇壓 (3) 蒸發 (4) 膨脹 Cycle을 갖고 순환하는 것으로 응축과정에서 LNG의 저온 Exergy를 이용하며, 응축된 중간 매체를 순환 펌프로 순환하여 열원(해수 또는 폐열)으로 기화시킨 가스를 팽창 과정에서 터빈을 회전시켜 發電을 한다.

중간매체로서는 단일 매체(프로판, 프레온등)와 저온 Exergy 효율을 높이기 위해 탄화수소계의 물질을 혼합한 혼합매체를 사용한다.

이 시스템에서의 發電 出力 G(KW)는 아래 식으로 표시된다.

$$G = \left(\frac{F \times \Delta iTh \times \eta T}{860.6} - ML \right) \times \eta G$$

F : 작동 매체 유량(Kg/H)

ΔiTh : 터빈 입·출구간 매체의 엔탈피 낙차 (Kcal/Kg)

ηT : 터빈효율

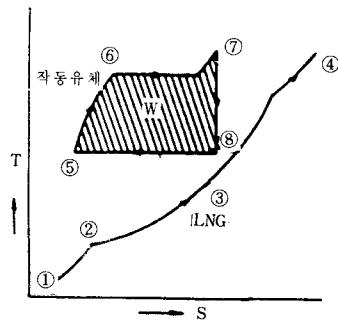
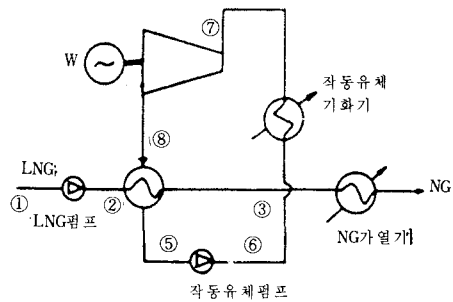
ML : 기계적 손실(KW)

ηG : 발전기 효율

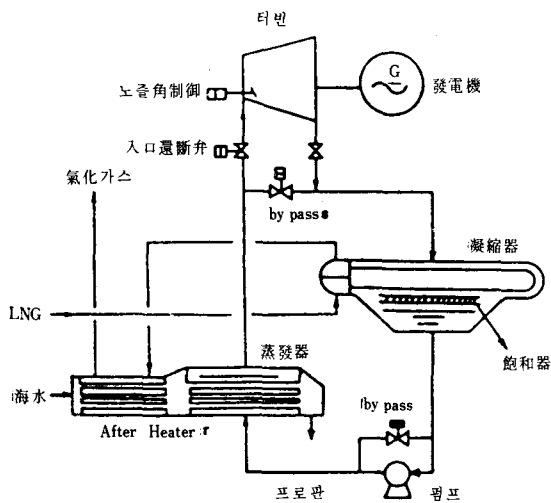
1) 1단 단일매체 Rankine Cycle

프로판, R22, R13, R23 등의 단일 성분매체를 이용하여 發電하는 방식으로 그림 4는 이의 공정과 T-S 선도를 나타낸다.

그림 5는 일본에서 실용화 되고 있는 OSAKA GAS의 단단 단일매체 Rankine Cycle 공정도이다.



(그림 4) 2차 작동 매체방식 공정도 및 T-S 선도



(그림 5) 단단 단일매체 Rankine Cycle(Osaka Gas)

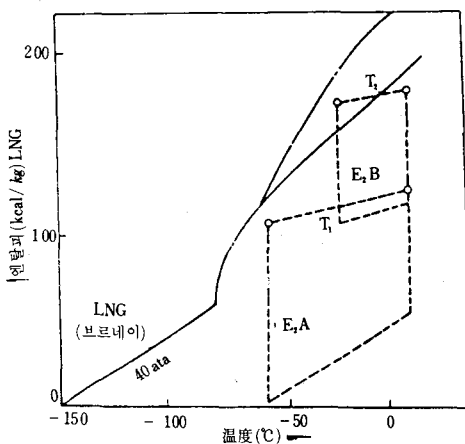
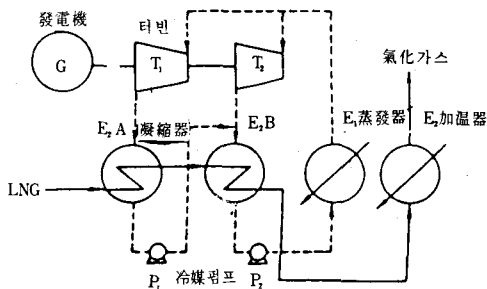
2) 재생식 2단 Rankine Cycle

그림 6은 재생식 2단 Rankine Cycle의 공정도 및 T-i 선도이다. 전술한 1단 단일매체 방식보다 動力 回收量을 증가시킬 수가 있다.

그림에서 터빈은 병렬로 되어 있으나, 조건에 따라서는 직렬로도 된다. 이 방식은 보다 많은 단으로 하면 동력 회수량이 많아지나 터빈, 열교환기의 수가 증가하고 시스템도 복잡하게 되어 운전성 및 경제성의 검토가 요망된다.

3) 혼합 매체 Rankine Cycle

중간매체로 탄화수소계의 물질인 메탄, 에탄, 프로판, 부탄등의 혼합물을 사용한다. 이 공정은 그림 7에서와 같이 다유체 열교환기가 사용되어 매체 자신의 현열도 이용되기 때문에 매체 순환량이 많아져 동력 회수량을 크게 할 수가 있다. 이 Cycle은 간단하나 매체가 혼합 성분이기 때문에 매체 자신의 열교환과 함께 응축기에서의 전열량이 커져 온도차가 적게 되기 때문에 단일성분에 비해 큰 전열면적이 필요하여, 열교환기 Type으로서는 다관식, 코일권 다관식 및 알루미늄핀식 등이 고려되고 있다.



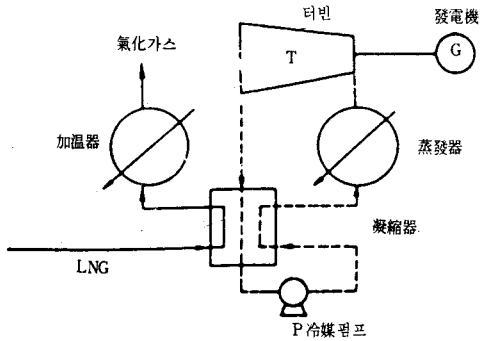
(그림 6) 재생식 2단 Rankine Cycle 및 T-i 선도

다. 천연가스 직접 팽창 방식

이 시스템은 LNG의 Exergy를 이용하는 것으로 LNG 펌프에서 고압으로(20-100 Kg/Cm²G) 승압시켜 열원(해수)에 의해 기화시킨 후 터빈에서 팽창시켜 발전을 하는 방식으로 그림 8은 이의 공정과 T-i 선도를 나타낸다.

라. Rankine Cycle과 직접 팽창의 혼합 시스템

LNG의 압력 Exergy를 이용하는 직접 팽창 시스템에서 LNG의 冷熱을 전부 壓力 Exergy로 변환하는 것은 불가능하므로, LNG저온 Exergy를 이용한 Rankine Cycle과의 조합한 시스템은 각각의 시스템 보다 큰 動力을 회수할 수가 있으며, 冷熱

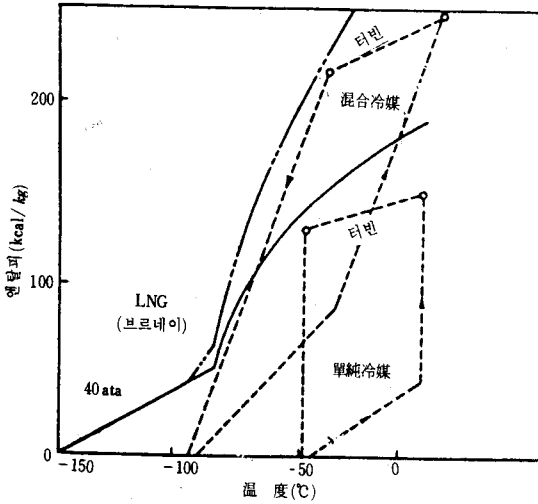


이 시스템에서의 LNG 저온 Exergy는 압축기의 기동 동력 감소에 의한 출력효율을 증가시키는데 그 목적이 있다.

Brayton Cycle 방식은 Rankine Cycle 방식에 비해 높은 효율의 전력을 얻을 수 있지만 현재로서는 연구단계에 있고 실용화 되고 있지 않다.

1) Closed Gas Turbine Cycle System(폐쇄 가스 터빈 사이클 시스템)

이 Cycle은 질소가스와 같은 작동매체를 압축기로 들어가기 전에 LNG로 예냉시켜 압축기의 기동 동력을 감소시킨다.



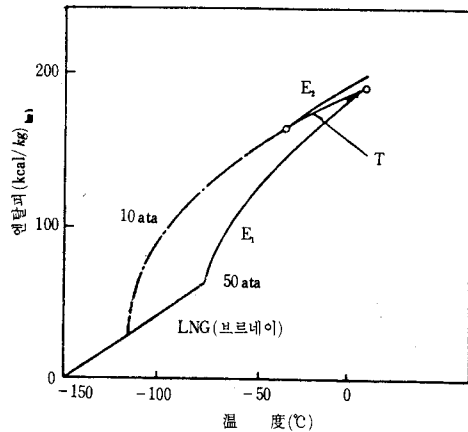
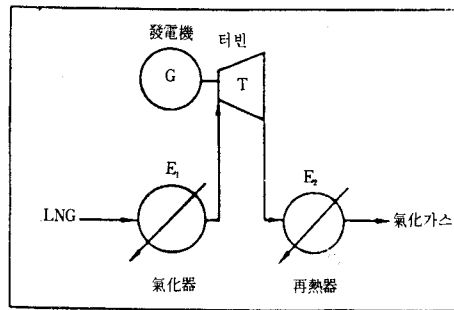
(그림 7) 혼합매체 Rankine Cycle 공정 및 T-i 선도

이용도를 증가시킬 수 있다.

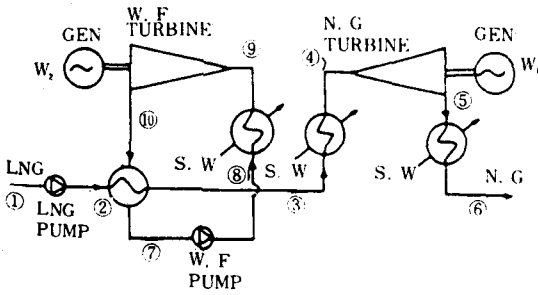
이 경우의 공정 및 T-i 선도는 그림 9와 같다.

마. Brayton Cycle 방식

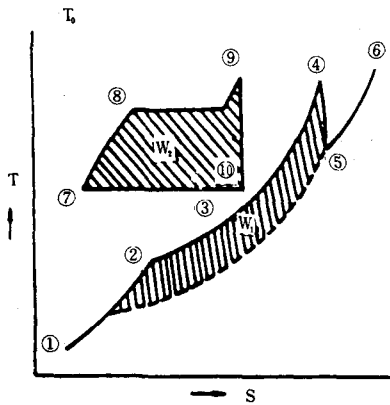
가스터빈을 이용한 Brayton Cycle 방식에는 Closed Gas Turbine Cycle System과 Open Gas Turbine Cycle System이 있다.



(그림 8) 천연가스 직접예냉방식 공정 및 T-i 선도



PROCESS FLOW DIAG



LNG. W. F. T-S DIAG

(그림 9) 혼합방식 냉열발전 공정 및 T-s 선도

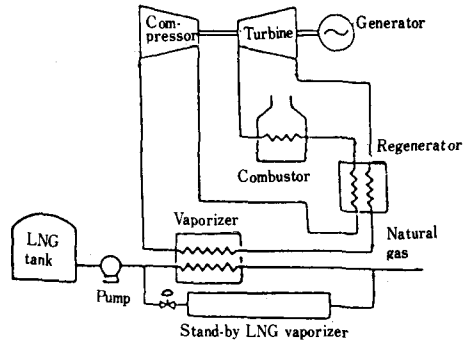
압축기로 보내진 작동매체를 가압하여 연소기로 가열시킨 후 터빈으로 보내어 동력을 발생한다. 팽창된 작동매체 가스는 예열기를 통하여 부분적으로 재생시킨 후 LNG로 다시 냉각되어 순환하게 된다.

이 공정은 건설비가 높게 되고 규모가 크지 않으면 경제성이 없다.

2) Open Gas Turbine Cycle System(개방 가스 터빈 사이클 시스템)

이 시스템은 연소에 사용되는 공기를 LNG 냉열을 이용하여 압축기의 기동 동력을 감소시키며, 압축기로 보내어진 공기를 가압시킨 후 연소기로 보내어 고온의 연소가스로 변환하여 일을 수행한다.

일을 수행한 가스는 재생기로 일부 재생, 재열을

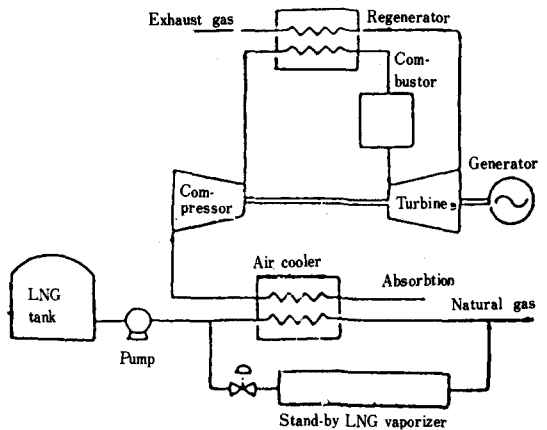


(그림 10) Closed Gas Turbine System

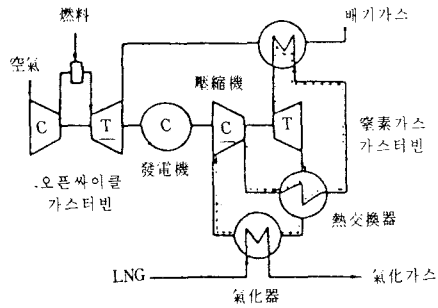
수행한 후 방출하게 된다. 이 사이클에서는 공기를 냉각시킬때 수분과 얼음이 생기는 문제를 고려하여야 한다.

3) 폐쇄 가스터빈 사이클과 개방 가스터빈 사이클의 복합 Cycle 시스템

LNG 需要에 관계되는 실제 중요한 부하 변동에 따른 문제점을 해결하기 위하여 질소가스(폐쇄)터빈 사이클과 개방 가스터빈 사이클의 혼합 시스템으로 電力을 얻는 방법이다.



(그림 11) Open Gas Turbine System



(그림 12) Open Gas Turbine과 질소 Gas Turbine
과의 복합사이클

일본의 냉열발전 Plant

Plant 회사명	Platn 위치	발전 출력 (KW)	LNG유량	공 정	2차작동매체	운전시작일	계 약 자
Osaka Gas	Senbok II	1,450	60	Rankine	Propane	79. 12	Kobe Steel
		6,000	150	직접팽창+ Rankine	〃	82. 2	〃
	Himeji	2,500	120	Rankine	Freon	87. 3	〃
Kyushu E.P.Co	Kita Kyu-shu-LNG	9,400	150	직접팽창+ Rankine	〃	82. 11	Toshiba + Kobe Steel
Toho Gas	Chita Kyodo	1,000	40	Rankine	Propane	82. 1	Hitachi
Chubu E.P.Co	Chita -LNG	7,200	130	직접팽창+ Rankine	Freon	83. 6	〃
		7,200	130	〃	〃	84. 3	
Tohoku E.P Co	Nihonkai -LNG	5,600	175	직접팽창	-	84. 6	Mithubishi Heavy Industry
Tokyo Gas	Negishi	130	5	Rankine	HC-MCR	80. 10	Chiyoda Chemical Construc- tion
		4,000	100	〃	〃	86. 1	
Tokyo E.P.Co	Sodegaura	442	10	직접팽창+ Rankine	Propane	79. 10	Ishikawa- jima Harima H. I
		241	5	Rankine	HC-MCR	80. 10	
	Higashi- Ogishima	3,300	100	직접팽창	-	86. 5	
		8,000	175	〃	-	87. 5	
	Futtsu	7,500	160	직접팽창+ Rankine	Freon	계 획 중	