

解 說

L N G 冷 熱 發 電

金 永 仁 *

The Power Generation Utilizing LNG Cold Energy

Young In Kim *

1. 서 언

LNG는 메탄(CH_4)을 주성분으로 한 천연 가스를 영하 $160^\circ C$ 로 냉동액화한 액화천연가스(Liquefied Natural Gas)의 略字로서 천연가스를 냉동액화하는 과정에서 유황분등의 불순물이 제거된 무색무취의 액체이므로 깨끗한 에너지원(Clean Energy)이다.

우리나라에서도 에너지원의 다변화 정책의 일환으로 86년말에 인도네시아로 부터의 LNG도입 시작으로 87년에는 연간 155만톤, 88년도부터는 연간 200만톤의 LNG를 도입하여 사용할 계획이다. LNG는 영하 $160^\circ C$ 의 상태로 도입되므로 LNG가 보유하고 있는 냉열(1kg 당 약 200 Kcal의 냉열에너지 보유)을 이용하는 연구가 국내에서 진행중에 있다. 특히 LNG 냉열이용 산업중에서 LNG 냉열발전의 연구는 일본에서 많은 진전을 보여 발전시스템이 상용화되어 가동중이며 우리나라에서도 설치여부를 검토중이다.

본 해설에서는 LNG 냉열발전의 원리, 냉열발전 시스템의 종류와 장단점, 일본의 LNG 냉열

발전현황에 대해 간단히 정리해 보고자 한다.

2. LNG 냉열 발전원리

그림 1에서 보는바와 같이 열을 동력으로 변환하는 열기관에서는 열원(Heat source)과 수열부(Heat sink)가 필요하므로 일반적인 고온 열기관은 고온의 연소열을 열원으로 하고 주위의 자연환경을 수열부(Sink)로 사용하는 데 반하여 LNG 냉열 발전시스템은 자연환경을 열원으로 하고 LNG를 수열부로서 사용한다. 이 경우에 자연환경(해수 등)의 열원으로 부터 LNG를 기화시켜 일부는 전력생산에 사용되고 나머지 일부는 LNG 기화에 다시 사용되곤 한다.

그림 2는 LNG의 T-S 선도로서 70 기압의 LNG가 1 기압, $20^\circ C$ 의 천연가스로 변할 때 얻을 수 있는 이론적 유효엑서지(Exergy)는 면적 ①-②-④-①로 나타나진다. 이 중에서 면적 ①-③-④-①은 한냉 Exergy이고 면적 ①-②-③-①은 압력 Exergy를 나타낸다. LNG의 냉열 Exergy를 그림 3에서 볼 수 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 주위온도(외계온도)가 높으면 높을 수록 많은 냉열 Exergy를 얻을 수 있음을 볼

* 正會員 : 한국과학기술원, 기계공학부

수 있다. 외계온도가 20°C인 경우 이론적으로 얻을 수 있는 최대 냉열 Exergy는 약 200Kcal/kg임을 알 수 있다.

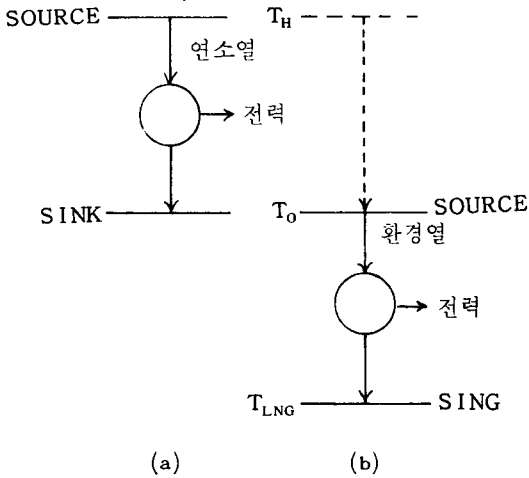


그림 1. Symbolic representation

- (a) 고온 열기관
- (b) LNG 냉열발전 시스템

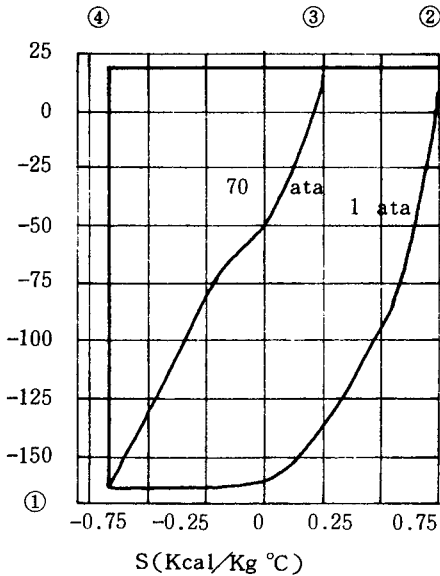


그림 2. LNG T-S 선도

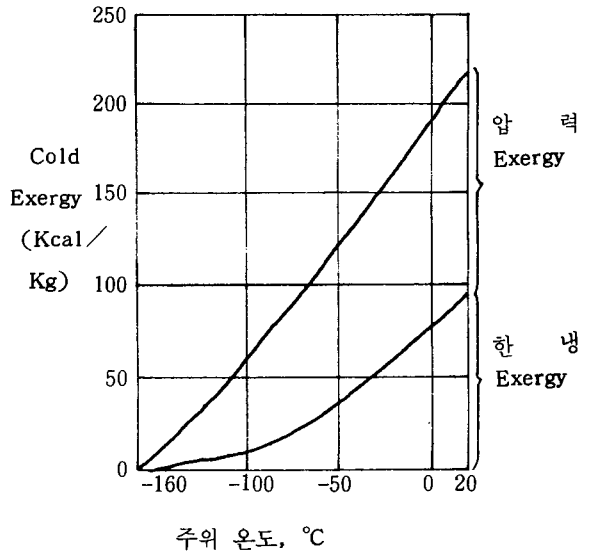


그림 3. LNG 냉열 Exergy

3. LNG 냉열 발전방식

LNG 냉열 발전방식은 그림 4와 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다. 즉 통상의 스팀터빈과 같이 기상(gas phase)과 액상(liquid phase)의 상변화(phase change)를 동반하는 Rankine 사이클 방식과 통상의 가스터빈과 같이 열매체가 기체 상태(gas phase)에서 상변화를 동반하지 않고 작동하는 Brayton 사이클 방식이 있다.

Rankine 사이클은 다시 세 종류로 분류되어 LNG의 압력 Exergy를 이용하는 직접팽창 방식과 한냉 Exergy를 이용하여 중간열매체의 상변화에 의한 중간열매체 방식, 그리고 위의 두가지 방식을 복합한 방식이 있다.

Brayton 사이클방식은 질소가스등을 열매체로 하여 가스터빈 사이클을 구성한 Closed Cycle 방식과 공기를 열매체로 한 Open Cycle 방식이 있다.

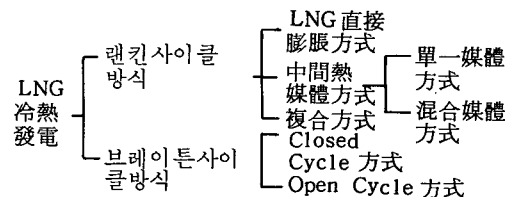


그림 4. LNG 냉열발전방식

(1) LNG 직접 팽창 방식(LNG direct expansion)

제일 단순한 방식으로 LNG가 사이클의 매체로 사용되며 LNG는 증압 펌프로 가압되며 LNG 기화기에서 해수(sea water)에 의해 가열, 기화된 후 터빈에 들어간다. 터빈에서 전력을 생산한 후 감압, 감온된 천연가스는 다시 해수와 열교환하여 상온의 가스상태로 되어 송출된다.

그림 5는 LNG 직접팽창 방식의 (a)계통도, (b) 온도-엔트로피 선도(T-S diagram), (c)압력-엔탈피선도(P-h diagram)이다. T-S 선도상의 빗금친 부분이 터빈에서의 일량을 표시한다. 이 방식은 시스템이 간단하나 천연가스의 송출압력에 따라 출력이 크게 좌우되므로 다단 터빈등을 사용하여 열회수율을 높이기도 한다.

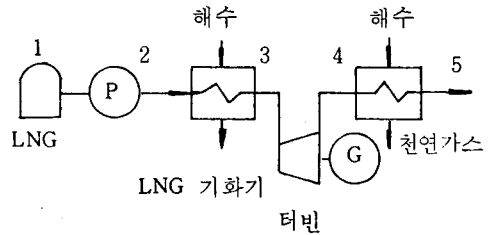
(2) 단일매체 랭킨 사이클방식(Single component Rankine Cycle)

이 방식은 LNG 냉열을 이용하여 LNG기화기에서 중간매체를 응축시키고 LNG는 기화시켜 천연가스를 외부에 송출시키며 응축된 중간매체는 중간매체펌프에 의해 증압된 후에 해수에 의해 증발기에서 증발되어 터빈에서 팽창하는 사이클로 이루어 진다. 발전출력은 중간매체의 종류, LNG장 증발용 열원(해수의 온도) 등에 크게 좌우된다.

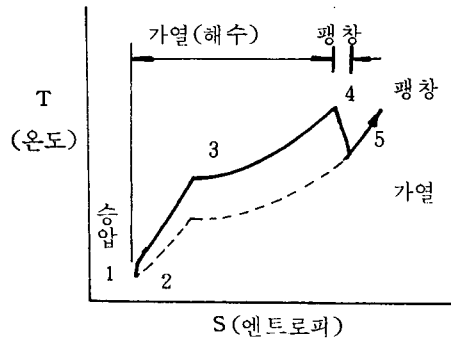
그림 6은 단일매체 Rankine Cycle 방식의 (a)계통도, (b) T-S선도 (c) P-h 선도를 보여주고 있다. 단일매체로 사용되는 중간매체로는 프로판, R-22, R-13, R-23 등이 사용된다.

T-S 선도에서 알 수 있듯이 LNG 냉열을 유효하게 이용하여 출력을 크게 하기 위해서는 LNG의 기화곡선과 중간매체의 응축곡선을 접근시킬 필요가 있다. 그러나 단일매체를 사용한 Single Rankine Cycle System에서는 출력을 크게 할 수 없으므로 재열 또는 재생사이클을 부가한다거나, 서로 다른 단일매체 Rankine Cycle System을 Cascade 형태로 조합하여 시스템을 구성하므로써 출력을 향상시킬 수가 있다. 이 경

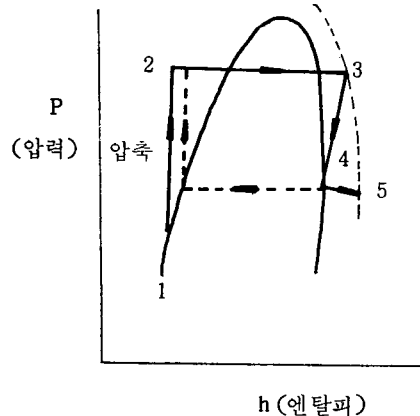
우에 단점으로는 시스템이 복잡해지고 운전제어 신뢰성이 낮아지며, 건설단가가 높아지는 것으로 알려지고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. LNG 직접 팽창 방식
(a) 계통도, (b) T-S diagram
(c) P-h diagram

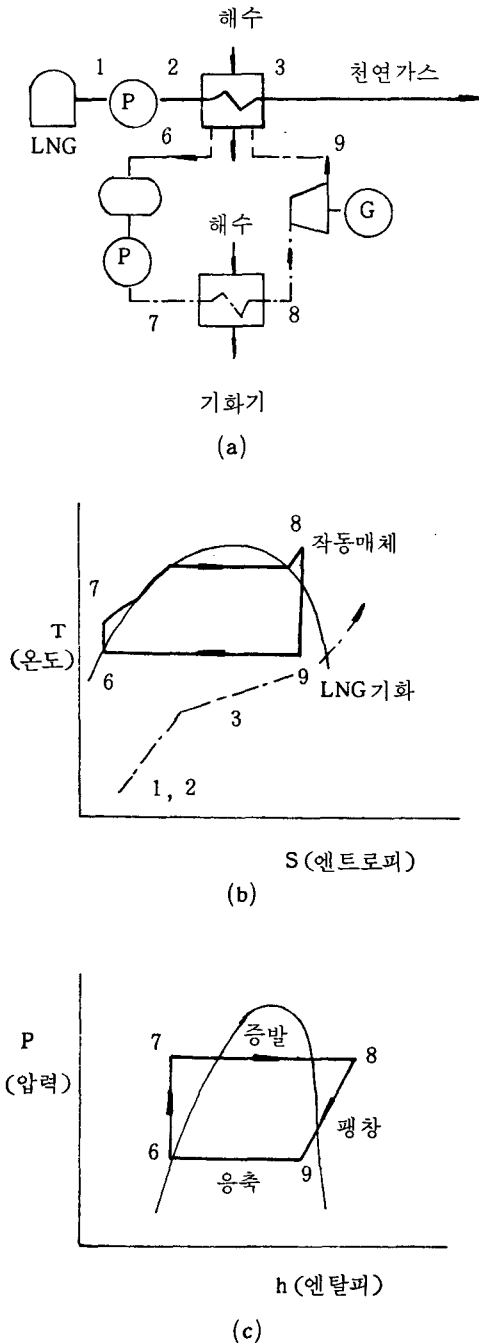


그림 6. 단일매체 Rankine Cycle 방식
 (a) 계통도
 (b) T-S diagram
 (c) P-h diagram

(3) 혼합매체 Rankine Cycle 방식

본 방식은 중간매체로서 단일매체를 사용하지 않고 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 등 비등점이 다른 탄화수소의 혼합물을 사용하므로써 LNG의 기화곡선과 혼합매체의 응축곡선을 접근시킴으로써 LNG의 냉열을 더욱 더 효과적으로 이용할 수 있도록 한 방식이다.

그림 7 (a)의 혼합매체 Rankine Cycle 방식의 계통도에서 알 수 있듯이 터빈에서 나가는 혼합매체 가스는 LNG의 냉열과 작동매체 펌프로 승압된 혼합매체액에 의해서 응축이 이루어지므로 냉열의 재생이용이 효과적으로 이루어져 출력이 상승된다.

본 방식은 혼합물을 중간매체로 이용하므로 MFR 사이클(Multi-Fluid-Rankine Cycle)이라고도 불리운다.

(4) 랭킨 사이클과 LNG 직접팽창사이클의 복합방식

LNG 직접팽창사이클은 압력유효에너지를 이용하는 것이므로 LNG의 한냉에너지 및 압력에너지 모두를 효과적으로 이용하기 위하여 LNG 직접팽창사이클과 중간매체 랭킨사이클을 복합하여 보다 큰 동력을 회수하는 복합방식이 많이 사용되고 있다. 이 방식은 구성기구가 복잡해지고 운전제어면에서 신뢰성이 저하되지만 LNG 냉열에너지를 제일 효과적으로 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그림 8은 복합방식의 계통도, T-S 선도 및 P-h 선도를 보여주고 있다. 승압펌프에 의해 승압된 LNG는 기화기를 통해서 가열기화되는 동시에 작동매체를 냉각응축시킴으로써 Rankine 사이클의 효율을 증가시키는 역할을 한다.

(5) 폐쇄 브레이튼 사이클방식

질소가스는 LNG의 최저온도(-162°C)에서도 액화, 응축하지 않으므로 질소가스를 작동매체로 하여 가스터빈 폐쇄사이클을 구성한 것이 그림 9에 보이는 폐쇄브레이튼 사이클방식이다.

LNG의 냉열은 압축기 입구의 질소가스를 냉

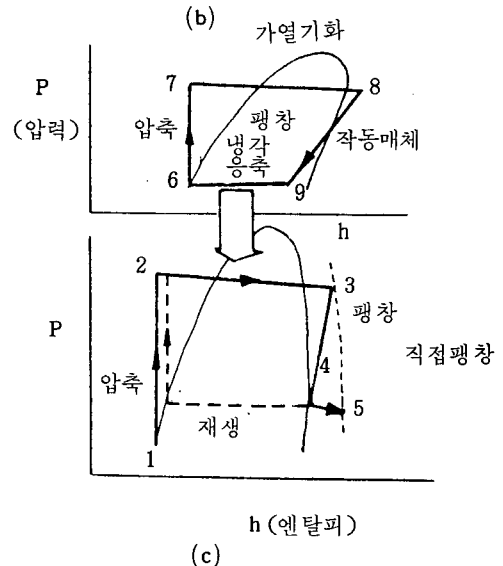
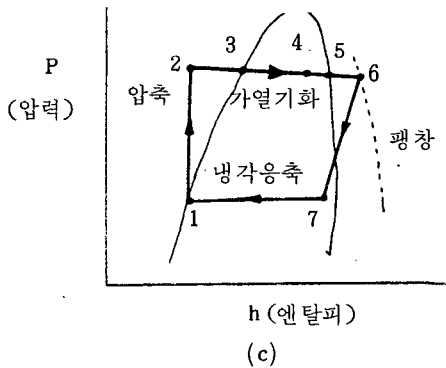
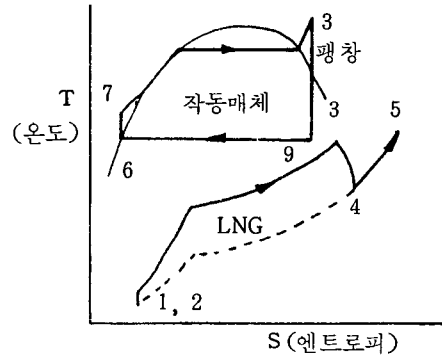
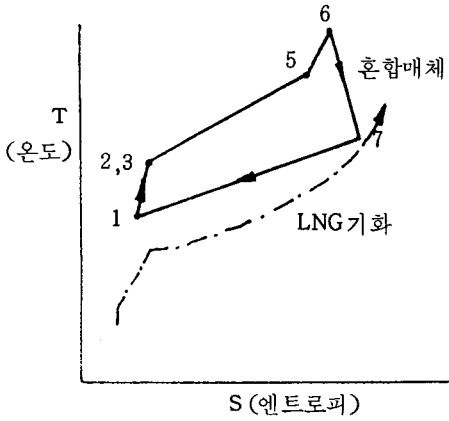
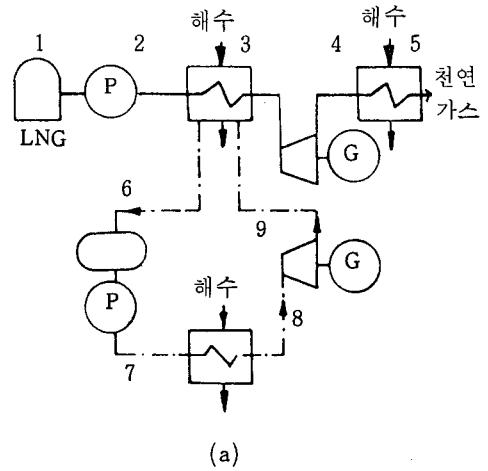
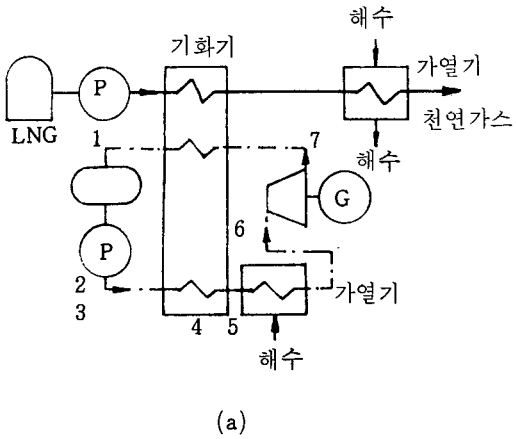


그림 7. 혼합매체 Rankine Cycle 방식

- (a) 계통도
- (b) T-S diagram
- (c) P-h diagram

그림 8. 직접 단일매체 Rankine Cycle 방식 (복합 Rankine Cycle 방식)

- (a) 계통도
- (b) T-S diagram
- (c) P-h diagram

작하기 위해 사용되고, 냉각에 의한 부피감소는 압축기의 동력을 절감시키므로 유효출력이 증가한다. 압축기에서 압축된 질소가스는 재생기 및 가열기에서 가열되어 터빈에서 일을 하여 전력을 생산한다.

이 방식은 터빈입구의 가열기에서 기화된 천연가스를 사용하여 터빈입구의 질소가스온도를 높이기 때문에 출력은 증가하나 LNG의 냉열에너지 이용효과는 적다. 발전출력이 크고 질소가스를 작동매체로 사용하므로 안정성이 높지만 시스템구성부품의 고장시에는 LNG 냉열이용에 문제가 있으므로 현 단계에서는 실현성이 적은 것으로 판단되고 있다.

(6) 개방 브레이튼 사이클방식

폐쇄 브레이튼 사이클방식은 작동매체를 질소가스로 하여 반복하여 사용하나 본 개방브레이튼 사이클방식에서는 작동매체로서 공기를 사용하며 한번 사용된 공기는 배기가스로서 대기중에 방출된다. 이 방식은 폐쇄브레이튼 사이클방식의 흐름과 유사하다.

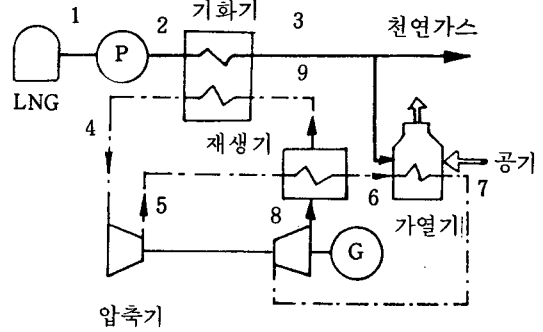
흡입되는 공기는 기화기에서 열교환을 하여 약 -120°C 까지 냉각되어 그 결과 압축기의 동력을 줄이므로 열효율을 증가시킨다. 이론적으로는 발전 효율이나 LNG 냉열 이용효율이 가장 높다.

표 1은 각종 냉열발전방식의 비교를 나타내고 있다. 즉 같은 계산 조건에서의 냉열이용 출력, 냉열이용효율, 특징과 장단점 및 실용화 사례등을 볼 수 있다.

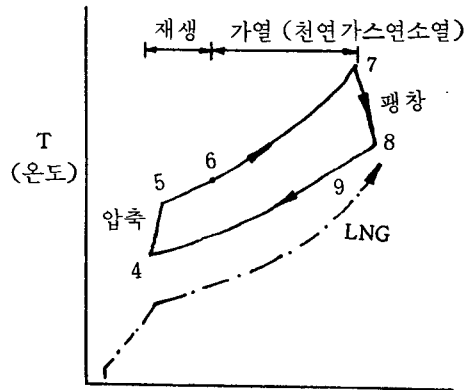
여러가지 냉열발전방식 가운데에서 개방브레이튼 사이클방식이 냉열이용효율이 가장 높으나 아직 실용화된 사례는 없다. LNG 직접팽창방식과 Rankine 사이클을 복합한 방식과 혼합매체 Rankine 사이클방식이 냉열이용효율이 비교적 높으므로 실용화된 사례가 많음을 알 수 있다.

4. 일본의 LNG 냉열발전 현황

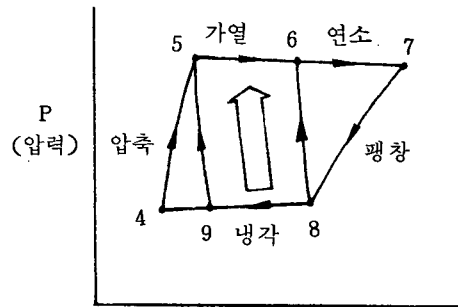
LNG가 가스상태에서 연소할 때의 발열량은



(a)



(b) S(엔트로피)



(c)

그림 9. 폐쇄 브레이튼 사이클 방식
(a) 계통도
(b) T-S diagram
(c) P-h diagram

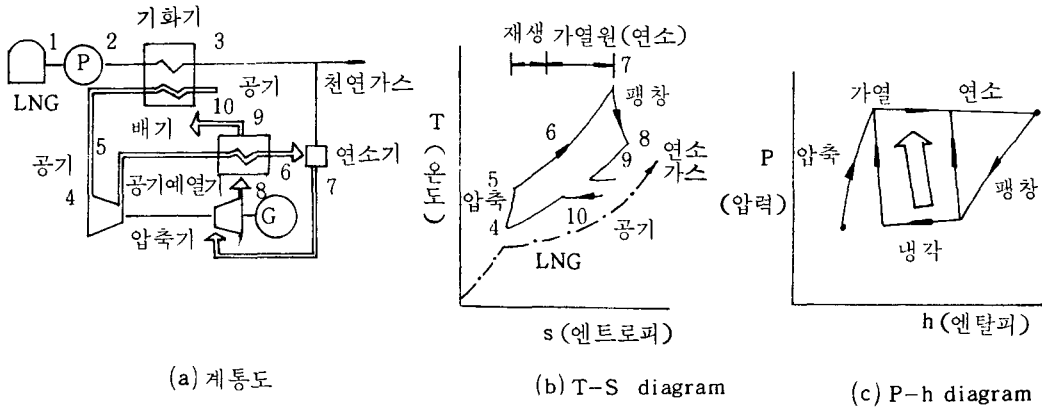


그림 10. 개방 브레이튼 사이클 방식

표 1. 냉열발전방식의 비교

비교 항목	냉열발전방식	직접 팽창식	직접 팽창과 Rankine 사이클 복합방식	혼합매체 Rankine 사이클	Closed 가스터빈 방식	Open 가스터빈 방식
시산조건		송출가스압력 5.5 기압, LNG 사용량 180 Ton/h, 해수온도 17°C				
출력 kw		7,900	11,900	11,900	54,000 (연료사용량 7.8 Ton/h)	78,000 (연료사용량 11.5 Ton/h)
냉열이용 출력 kw		7,900	11,900	11,900	8,500	14,800
냉열이용 효율 %		24	36	36	26	45
특징과 문제점		<ul style="list-style-type: none"> 출력이 적다. 송출가스압력이 낮은 경우에 유효 발전단가가 낮다. 구성이 간단하여 차지하는 공간도 작다. 기존기술로 실시 가능 LNG 이외의 매체는 사용하지 않음. 환경에 영향이 없다. 	<ul style="list-style-type: none"> 출력이 크다. 기존기술의 조합으로 실시 가능 2차매체로서 탄화수소 또는 프레온 등이 쓰임 환경영향 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 출력이 크다 혼합매체로서 탄화수소의 혼합물이 쓰임. 매체의 특성이 복잡 각종의 운전에 대하여 검토가 필요 환경영향없음. 	<ul style="list-style-type: none"> 냉열이용출력은 적다 복잡하고 대규모이다 대형의 고온가스 가열가공 필요 연소가 일어나므로 대기오염이 있다. 추가연료필요 	<ul style="list-style-type: none"> 냉열이용효율과 출력이 제일 클 것으로 기대된다. 복잡하고 대규모 공기중에 혼합 제거기술의 확립이 필요 연소를 동반하므로 대기오염이 있다. 안전장치 필요
실시예		Tokyo Electric (Higashi - gishima) Tohoku Electric	Kansai: Electric, Chita LNG, Tokyo Electric (Sodegaura I) Osaka Gas (Senboku II) Kitakyshu LNG	Tokyo Electric (Sodegaura II) Tokyo Gas	적용예 없음	적용예 없음

1 kg 당 10,000 ~ 13,000 kcal 이고 LNG냉열 Exergy는 1 kg 당 약 200kcal/kg (그림 3 참조)이므로 LNG 연소 발전가능량에 대한 LNG 냉열발

전 가능량의 비율은 약 2% 정도이므로 LNG냉열발전에 대한 이론적인 연구는 많이 진행되어 왔으나 경제적인 효과가 적으므로 실용화된 사

레는 많지 않다. 에너지 자원이 부족한 일본은 2% 정도에 불과한 열량이라도 이용해 보겠다는 생각으로 LNG 냉열발전을 세계에서 처음으로 실용화 하여 1979년 부터 운전을 시작하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 현재 17기의 LNG 냉열발전 시스템이 가동중이거나 계획중에 있다.

여러가지 발전방식 중에서 LNG 직접팽창사이클 방식과 중간매체 Rankine Cycle 방식을 복합한 복합사이클방식이 규모도 크고 냉열이용효율이 비교적 높음을 알 수 있다. 그림 3에서의 이론적으로 이용 가능한 냉열 Exergy 는 약 250 kwh/ton 이나 실제공정에서는 24 kwh/t ~ 62 kwh/t 으로서 냉열이용효율이 10~25% 정도임

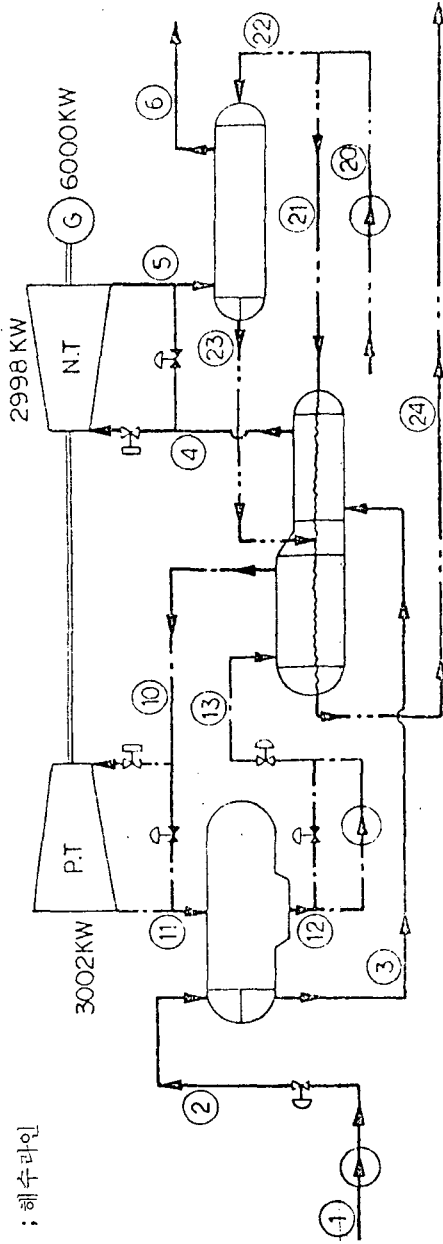
을 알 수 있다.

그림 11 은 현재 가동중인 일본의 Osaka Gas Co.의 Senboku II 공장의 LNG 직접팽창방식과 프로판(C₃H₈) Rankine Cycle 방식을 복합한 복합사이클방식의 Flow diagram을 보여주고 있다. 시간당 150 ton의 LNG를 이용하여 6000 kwh의 전력을 생산하여 냉열이용도가 약 16%임을 계산으로 유추할 수 있다.

표 2. 일본의 LNG 냉열발전소현황

No.	Utility Name	Plant Name	Sys. Composition	Rating (kw)	LNG Used (t/h)	Commission Date	Const. Period	Remark
1	Tokyo Gas	Negishi I	MFR 랭킨	130	5	80. 9	79.12~80.9	직접팽창 : NG 직접 팽창
2	"	Negishi II	"	4,000	100	85. 4	~85.4	
3	Tokyo Electric	Sodegaura I	C ₃ H ₈ 랭킨 +직접팽창	442	10	79.12	75. 5~79.12	
4	"	Sodegaura II	MFR 랭킨	241	5	80.12	~80.12	(): 계획중
5	"	Futtsu	복합시스템	7,500×2	340	(88.11)		
6	"	Higashio-gishima	직접팽창 "	8,000×2 3,300	340 100	(86. 9) (84. 9)	83.5~86.12	
7	Osaka Gas	Senboku I	C ₃ H ₈ 랭킨	1,450	60	79.12	79.6~79.12	
8	"	Senboku II	C ₃ H ₈ 랭킨 +직접팽창	6,000	150	82. 2	81.8~82. 2	
9	Chita LNG	New Chita	R-13BI 랭킨 +직접팽창	6,000×2	130 × 2	83. 6, 84. 3	81.10~84.3	
10	Kansai Electric	Hime - J1	R-13 BI 랭킨 +직접팽창	400	10	80.12	80.5~80.12	
11	Toho Gas	Chita	C ₃ H ₈ (Propane) 랭킨	1,000	40	81.12	81.4~81.12	
12	Nihonkai LNG (Tohoku electric)	Nigata	직접팽창 (재열)	5,600	175	(85)	83.4~85	
13	Kitakyshu LNG	Tobata	R-23 랭킨 +직접팽창	9,400	150	82.11	81. ~82.11	

범 레
 — ; LNG 라인
 - - - ; C₃H₈ 라인
 ····· ; 해수라인



위 치	번 호	①	②	③	④	⑤	⑥	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	
유 체	명	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	LNG	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	S.W	S.W	S.W	S.W	S.W	S.W	S.W	S.W	S.W
온 도(°C)			-154	-46	23	-25.2	19	14	-38.2	-35.2	-35.2	-35.2	-35.2	-35.2									
압력(kg/cm ² ab)			46.5		45.7	19.6	19.3	6.9	1.24	1.23	8.2												
유 량(t/h)			158		158	158	158	200	200	200	200	200	200	200	6000								
Enthalpy(kcal/kg)			-78	48.96	112	94.34	123	194.27	180.3	80	81												

그림 11 . Osaka Gas Eng. 공정

5. 결 언

본 해설은 LNG 냉열발전에 대한 개요이므로 자세한 내용은 하기의 참고문헌에서 찾아볼 수 있을 것이다. 특히 LNG 냉열발전에 대한 경제성 분석은 참고문헌 3에 자세히 서술되어 있다.

아직 국내에서는 LNG 냉열발전설치사례가 없고 또한 전체시스템 및 부품에 대한 기술적인 측면에서의 연구도 진행되지 않고 있는 실정이다. 일본의 경우에는 현재 작동 Cycle이나 열매체의 적절한 선택에 의한 효율향상, 적정설비 규모선정에 의한 경제성 향상, 가스 수요 변동에 신속 대비하는 신뢰성 확보, 운전비와 보수비 절감요인 탐색, 열교환기의 성능 향상(특히 open rack type, tube type, plate fin type의 기화기에 대한 성능 향상)등에 주력을 두어 연구를 진행하고 있다.

참 고 문 헌

1. 김영인, LNG를 이용한 냉열발전 기술 현황, 1984년도 하계 특별 강연회, 1984.8.25 전주, 사단법인 공기조화 냉동공학회.
2. 김지동, 조순행, 박수억, LNG COLD UTILIZATION, LNG 이용과 에너지정책위크샷, 1984.11.20 서울, 한국동력자원연구소.
3. 송희중, LNG 냉열발전 기술연구 종합연구 보고서, 한국전력공사 기술연구원 보고서, KRC-84G-JO6, 1985.2 한국전력기술.
4. 宮原茂悦, LNG 冷熱發電, 日本機械學會誌, 第82卷, 第725號, pp. 358-364, 1979.5.
5. 赤川浩爾, 藤井照重, LNG 冷熱利用の動力發生, 日本機械學會誌, 第83卷, 第739號, pp. 650-656, 1980.6.
6. 堀内 清, 田島 茂, LNG 冷熱利用發電システム, 日本機械學會誌, 第86卷, 第776號, pp. 735-739, 1983. 7.
7. 中田敏男, LNG 冷熱發電システムの開發狀況, 省エネルギー, Vol. 35, No.8, pp.27-31, 1983.
8. Shigeetsu Miyahara, POWER GENERATION FROM CRYOGENIC ENERGY, Sixth International Conference on Liquefied Natural Gas, April 7-10, 1980. Kyoto, Japan, Session II paper 8.