

LNG 냉열 이용 발전기술동향

2003년 2월 10일

전문연구위원 김 지 동

<목차>

제 1 장 서론	1
제 2 장 LNG 냉열 이용 발전기술	3
1. 기술의 특성	3
1.1 LNG 냉열발전의 원리	6
1.2 냉열발전 출력에 영향을 주는 요인	7
2. LNG 냉열 발전 방식	8
2.1 직접팽창방식	9
2.2 단일매체 Rankine 사이클 방식	10
2.3 혼합매체 Rankine 사이클방식	11
2.4 직접팽창과 Rankine 사이클의 복합방식	12
2.5 Closed Brayton 사이클 방식	13
2.6 Open Brayton 사이클 방식	14
2.7 각종 방식의 비교	14
3. 기술현황	16
3.1 국외 현황	18
3.2 국내 현황	27
제 3 장 결론	32
<참고자료>	33

<표차례>

<표 2-1> 냉열발전 방식의 비교	15
<표 2-2> 현존 LNG 장기계약 프로젝트	28

<그림차례>

<그림 2-1> 냉열을 얻는데 필요한 일	5
<그림 2-2> LNG냉열 이용방식의 분류	6
<그림 2-3> 냉열발전의 원리	7
<그림 2-4> LNG 냉열발전 방식	8
<그림 2-5> LNG 직접팽창방식	9
<그림 2-6> 단일매체 Rankine 사이클 방식	10
<그림 2-7> 혼합매체 Rankine 사이클	11
<그림 2-8> 직접팽창과 Rankine 사이클 복합방식	12

<그림 2-9> Closed Cycle 방식	13
<그림 2-10> Open Cycle 방식	14
<그림 2-11> 가스터빈과 고효율 LNG 냉열발전 조합시스템의 공정흐름도	23

제 1 장 서론

천연가스는 기체이기 때문에 대량저장이 어렵고 배관에 의한 수송수단 이외에는 대량수송이 어려우나 액화하여 저장하고 수송함으로써 생산지에서 멀리 떨어진 해외에서도 천연가스의 이용이 가능하다. 이와 같이 천연가스를 액화한 것이 LNG(Liquefied Natural Gas)이며, 성분은 경질의 탄화수소로서 보통 메탄이 80 ~ 100 Vol %이고 약간의 중질탄화수소($C_2 \sim C_5$) 및 질소가스를 함유하고있다.

우리나라는 천연가스 생산국가와 장기계약에 의해서 거의 LNG 1,700만톤/년은 도입을 확보한 상태이며, 세계에서 일본에 이어 두 번째의 LNG 수입 국가이다. LNG 도입이 2002년에 1,700만톤에 이르렀으며 2003년에는 1,800만톤을 초과할 것이다. 현재 평택, 인천 LNG 수입기지에 이어 제3기지가 통영에 건설되었으며, 또한 2003년 1월 현재로 전국 총 2,442Km의 천연가스 공급배관과 공급관리소 총 153개가 준공 완료됨으로써, 전국 천연가스 공급배관망 인프라가 구축된 상태이다.

LNG는 -162°C 의 초저온으로 저장되어 상온으로 사용하기 위해서는 다량의 에너지를 소비하여 기화하여야 한다. 그러나 -162°C 의 냉열은 상당히 가치가 있는 것이므로 이것을 냉열이 필요한 산업에 활용한다면 기화에너지의 절약뿐만 아니라 그보다 몇 배 더 많은 에너지를 절약할 수가 있다.

일본은 1969년 LNG 도입이 개시되어 1971년에 세계 최초로 LNG 냉열을 이용한 공기액화분리공장을 건설하였으며, 그후 냉열발전, 냉동 및 냉장, 냉동식품의 제조, 저온분쇄 등 다양하게 활용하고 있으며, 계속 새로운 활용분야를 넓혀왔다. 우리나라는 최근 통영에 LNG 제3 수입기지를 완공하였으며, 이런 때를 맞추어 LNG냉열의 적절한 활용방안을 알아 볼 필요가 있다.

LNG 냉열을 회수하는 방법은 이용방법에 따라 크게 직접이용방법과 간접이용방법을 생각할 수가 있다. LNG 수입기지에 인접한 지역에서는 직접

LNG의 냉열을 사용할 수가 있으며, LNG 수입기지에서 멀리 떨어진 지역에서는 배관 및 수송의 문제가 있으므로 간접이용방법을 적용해야 하는데 액체질소나 액체산소 등을 만들어 사용할 수 있다.

LNG 냉열을 저온에서 이용할수록 LNG 냉열의 이용효율은 크므로, 기술적으로나 경제적으로 가능하면 저온 영역에서 LNG냉열을 충분히 사용하도록 해야 할 것이다. 저온영역에서 사용할 수 있는 기술들로는 공기의 액화분리, 냉열발전, 수소나 헬륨의 액화, 저온분쇄를 이용한 폐기물처리 등이 있으며, 중간온도범위에서는 식품의 냉동, 드라이아이스의 제조 등이 있으며, 0℃ 근처의 비교적 고온영역을 이용할 수 있는 분야로는 식품의 냉동냉장창고, 제빙, 해수의 담수화, 등을 고려 할 수 있다.

본고에서는 냉열이용 대상 중 냉열발전에 관해서 기술적 활용 방식에 관해서 설명하였으며 국내외 기술동향에 관해서 조사하였다.

제 2 장 LNG 냉열 이용 발전기술

1. 기술의 특성

천연가스는 생산지에서 정제된 후 장거리 수송을 목적으로 부피를 줄이기 위하여 액화공정을 거친 후 액체상태로 변화시켜 운송한다. 액체상태로 된 천연가스를 액화천연가스(LNG)라 하며 부피가 천연가스(NG)의 600분의 1로 감소된다.

천연가스의 주성분인 메탄을 영하 162°C 까지 냉각하여 액화하면 약 1/600로 부피가 준다. 천연가스는 임계온도가 낮기 때문에 보통의 냉동기로는 액화가 어려움으로 다음의 3가지 방법을 이용한다.

첫째 방법은 팽창법(Turbo Expander Cycle)으로 가압된 천연가스를 급격히 터빈 안에서 단열팽창 시켜, 팽창된 천연가스의 온도가 급강하되어 상이 액상으로 되는 원리를 이용한 공정이다. 둘째 방법인 다단냉동법(The cascade Cycle)은 천연가스를 압축하여 냉각시키는 냉각회로에 에틸렌 냉각기를 사용하고 이 에틸렌 냉각기의 냉각회로에는 프로판 냉각기를 사용하는 방법이다. 그리고 세 번째 방법인 혼합냉매법(Multi-Component Refrigerant Cycle)은 탄화수소와 질소혼합물을 냉매로 이용하여 응축한 후 팽창시켜서 천연가스를 액화하는 공정이다.

LNG 수송선에 실려온 액화천연가스는 인수기지에서 하역 배관을 통해 저장 탱크에 저장된다. 그리고 가스 공급망을 통해 가정이나, 천연가스이용 발전소로 이송하기 위하여 다시 가스상태로 변환시켜야 한다. 저장된 LNG는 펌프에 의하여 가압되어 기화기로 이송되고, 기화기에서는 해수를 이용하여 LNG를 기체상태의 천연가스로 상 변환을 시킨 후 주배관로에 공급한다. LNG는 생산지에서 생산된 천연가스를 -162°C 까지 냉각 액화하기 전에 CO_2 , H_2S , 중질 탄화수소 등을 정제하기 때문에 기화된 천연가스는 불순물을 포함하지 않는 가스이다.

액화천연가스(LNG)냉열의 가치는 매우 크다. LNG를 사용하기 위하여 상온 가까이 온도를 높여 기화하는 과정에서 증발잠열 약 120 Kcal/kg과 현열 약 80Kcal/kg을 흡수하게되어 합하여 약 200 Kcal/kg의 냉열 에너지를 발생하게된다. 보통의 기화공정에서는 이러한 냉열이 버려지게되고, 상당량의 에너지가 추가로 소비된다.

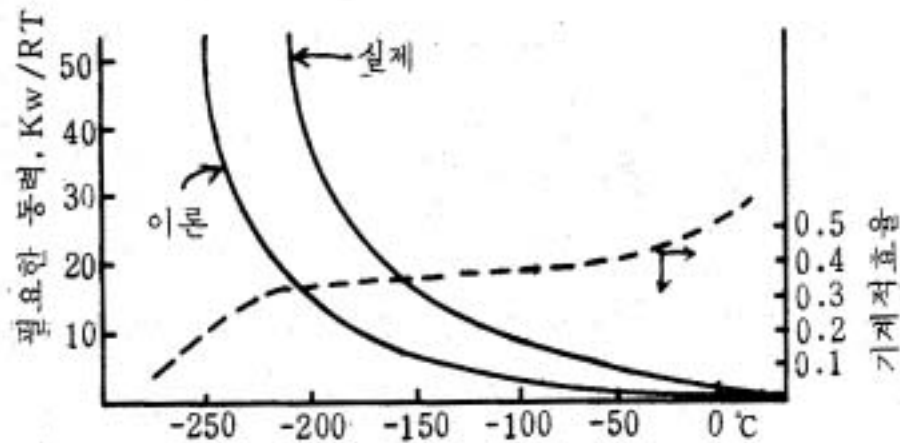
바닷물을 이용하여 기화하는 경우에는 연료가 직접 소비되지는 않지만 바닷물을 덤핑하기 위하여 LNG가 보유한 열량의 약 0.7%에 해당하는 전기에너지가 소비되며, 천연가스를 직접 연소하여 LNG를 기화시키는 경우에는 LNG의 약 1.5%를 가열용으로 소비하게되어 덤핑에 필요한 에너지를 합하면 기화되는 LNG의 약 2%에 상당하는 에너지를 소비하게된다.

LNG 냉열은 양적으로는 전술한 바와 같지만, 그 온도가 -162°C 의 저온이므로 질적인 측면에서 검토해 보면, 상온근처의 200 Kcal/kg 과는 상당히 다른 가치가 있는 것이다. 가역 Carnot 엔진에서 저온 T_1 에서 Q_1 Kcal로부터 얻을 수 있는 일량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = Q_1 (T_0/T_1 - 1), \text{여기에서 } T_0 \text{는 대기온도이다.}$$

여기에서 만일 $T_0 = 300^{\circ}\text{K}$, $T_1 = 111^{\circ}\text{K} (-162^{\circ}\text{C})$, $Q_1 = 1$ Kcal 라 하면 $W = 1.7$ Kcal를 얻게되지만, $T_1 = 273^{\circ}\text{K} (0^{\circ}\text{C})$ 라고 하면 $W = 0.1$ Kcal가 손실이 0일 때 -162°C 에서 얻을 수 있는 일은 0°C 일때의 일보다 약 17배 정도 더 크게된다. 역으로 -162°C 에서 1 Kcal 에너지를 얻기 위해서는 0°C 의 경우 보다 17 배 정도의 일이 필요하다. 실제의 공정에서는 온도가 낮아질수록 기계적인 효율이 낮아지므로 필요한 일량은 훨씬 더 커지게 된다. 1 kg의 LNG를 액화하기 위하여 이론적으로는 340 Kcal 정도가 필요하지만 기계적 효율이 30%일 때 약 1,000 kcal의 일이 사용되어야하며, 1 kg의 냉열이 -160°C 에 가까운 공정에 사용될 때에는 1,000 kcal 정도 일이 가치가 있는 것으로, 이것은 0°C 근처의 냉열보다 약 50배 정도 가치가 있다고 생각할 수 있다<그림 2-1>.

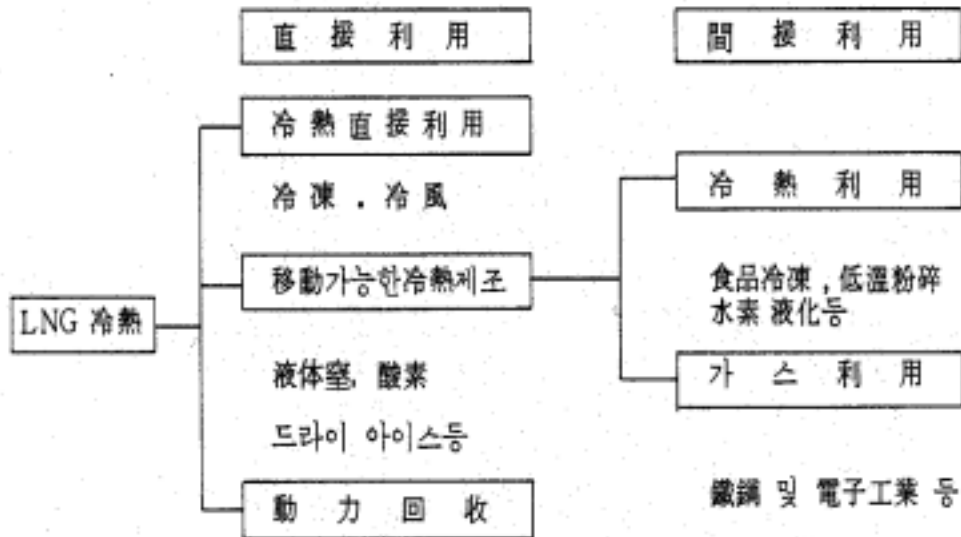
<그림 2-1> 냉열을 얻는데 필요한 일



냉열 이용에 사용되는 LNG는 일반적으로 기지로부터 냉열 이용 공장까지 액체 배관에 의하여 이송되는데, 냉열 이용 공장 입구의 LNG 온도는 이송 도중에 열을 받아 상승하게 되고 압력은 떨어진다. 특히 저온 레벨에서 사용할 때는 온도상승이 불리하게 된다. 한편, 냉열 이용공장에서 재 기화된 천연가스는 가스배관에 의하여 반송되는데 가스가 돌아가는 온도는 배관재료 등을 고려하여 일반적으로 0 °C 이상으로 하는데, 경우에 따라서 냉열 사용 후에 아직 영하 수십 도의 천연가스를 상온까지 온도회복 시키기 위해 가열 과정이 필요하며, 이로 인하여 냉열 이용 효과가 감소될 수 있다.

LNG 냉열을 회수하는 방법을 이용방법에 따라 분류하면 <그림 2-2>와 같이 나타낼 수 있다. 액화천연가스의 냉열을 효율적으로 이용하기 위해서는 전술한바와 같이 저온에서 이용할수록 LNG 냉열의 이용효율은 크므로, 가능하다면 저온 영역에서 LNG냉열을 충분히 사용하도록 해야 할 것이다. 저온 영역에서 사용할 수 있는 기술들로는 공기의 액화분리, 냉열발전, 수소나 헬륨의 액화, 저온분쇄를 이용한 폐기물처리 등이 있으며, 이중에도 가장 효율적 이용방법으로 알려진 것이 냉열발전과 공기의 액화분리 이용방법이다. 본 고에서는 냉열이용 대상 중 냉열발전에 관해서 기술적 활용 방식에 관해서 설명하였으며 국내외 기술동향에 관해서 조사하였다.

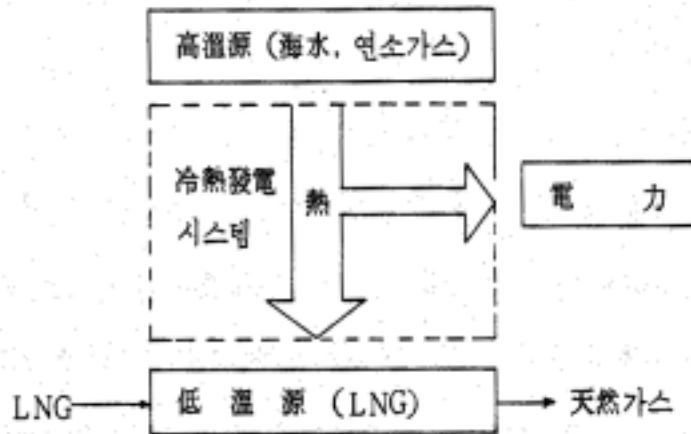
<그림 2-2> LNG냉열 이용방식의 분류



1.1 LNG 냉열발전의 원리

열을 동력으로 변환하는 열기관에서는 열의 공급원(heat source)과 열의 배출처(heat sink)가 필요하다. 화력발전소의 증기터빈이나 자동차엔진 등, 일반적인 열기관은 연료의 연소열을 열의 공급원으로 하고 주위의 자연환경을 배출처로 하는데 대하여 냉열발전시스템은 이와 반대로 주위의 자연환경(해수 등) 또는 연소열을 열의 공급원으로 하고, LNG를 열의 배출처로 사용한다. 이 경우 자연환경 등의 열원으로부터 얻은 열의 일부는 전력으로 되고, 나머지는 LNG에 배출되어 LNG의 기화열로 사용된다<그림 2-3>. 연소열을 열원으로 하는 냉열발전의 경우에는 해수를 열원으로 하는 경우보다 출력이 크지만 연료 소비분을 제외한 것을 순수한 냉열이용효과로 생각해야 할 것이다.

<그림 2-3> 냉열발전의 원리



자연환경(해수)을 열원으로 한 냉열발전의 경우 LNG 냉열 약 200Kcal/Kg의 20~30%인 40~70 Kcal/Kg이 전기에너지화하여 LNG 1 Ton당 30~80KWH의 발전이 가능하다.

1.2 냉열발전 출력에 영향을 주는 요인

냉열발전 원가의 거의를 설비비가 차지하므로 규모가 큰 것이 바람직하지만 LNG 유량에 변화가 있기 때문에 적절한 이용율을 유지하도록 규모를 선정해야한다.

냉열발전에 의하여 기화된 천연가스는 도시가스나 일부 화력발전소에서 사용이 되어야 하므로 송출가스의 압력이 높으면 냉열이용효과는 감소하여 발전출력이 떨어지게된다.

LNG 기지는 일반적으로 임해지역에 설치 되어 하기 때문에 냉열발전의 고온원(heat source)으로는 해수가 사용된다. 해수온도는 여름과 겨울에 약 20⁰C의 차이가 있으므로 겨울에는 출력이 상당히 저하된다. 한편 화력발전소의 온배수를 이용하는 경우에는 냉열이용효과율이 높아져서 출력은 훨씬 높아진다.

고원원으로 화력발전소 터빈의 추기를 이용하는 경우에는 LNG기화기를 상당히 소형화하는 것이 가능하며, 냉열이용효율도 증가하여 발전출력도 커지게 되지만 설비가 복잡해져 운영상의 제약이 따르기 때문에 상세한 검토가 필요하다.

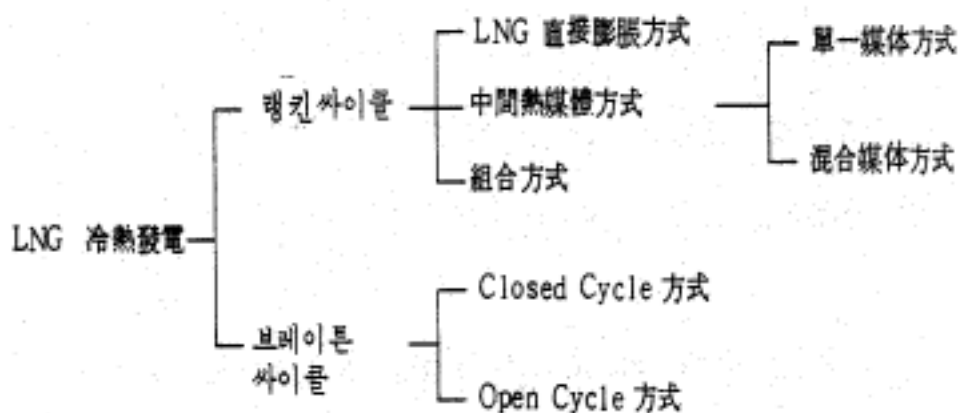
2. LNG 냉열 발전 방식

냉열발전은 여러 가지 방식이 고려될 수 있으나 <그림 II-4>와 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 통상의 스팀터빈과 같이 기상과 액상의 상변화를 동반하는 Rankine 사이클 방식과 통상의 가스터빈과 같이 열매체가 기상의 상태에서 상변화를 동반하는 Brayton 사이클 방식이 있다.

Rankine 사이클은 다시 세 종류로 분류되어 LNG의 압력 Exergy를 이용하는 직접팽창방식, 한냉 Exergy를 이용하는 중간매체 Rankine 사이클방식, 그리고 위의 두 가지 방식을 조합한 방식이 있다.

Bryton 사이클 방식은 질소가스 등을 열매체로 하여 가스터빈 사이클을 구성한 Closed 사이클 방식과 공기를 열매체로 한 Open 사이클 방식이 있다.

<그림 2-4> LNG 냉열발전 방식

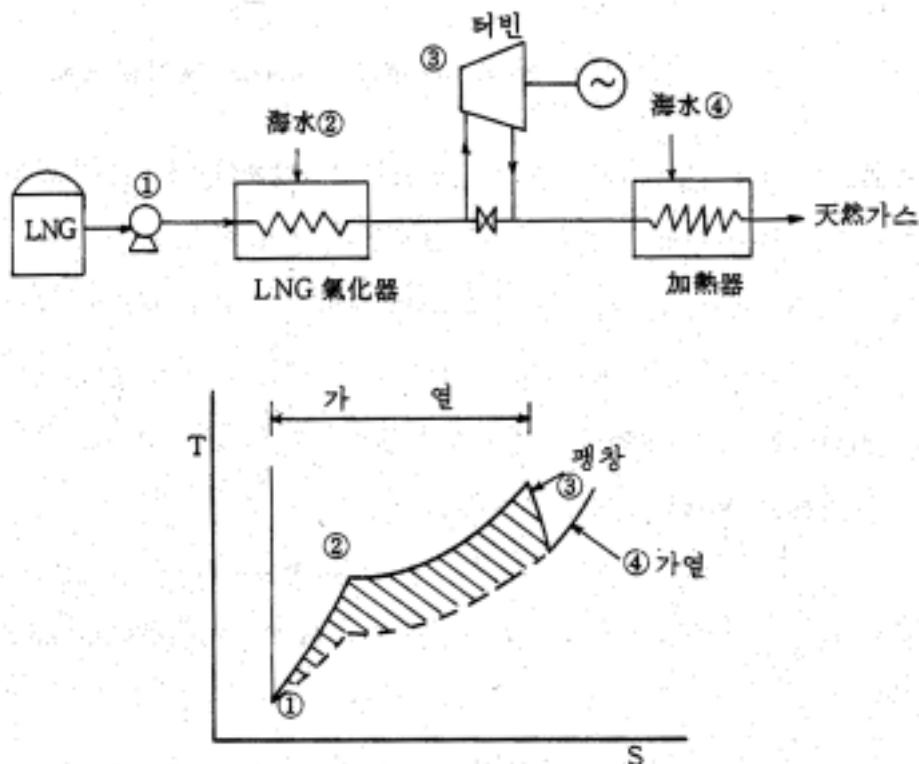


2.1 직접팽창방식

제일 단순한 방식으로 LNG는 송압펌프로 가압되어 LNG 기화기에서 해수에 의하여 가열되어 기화된 후 팽창터빈에 들어간다. 팽창터빈에서 전력을 생산한 후 감압, 감온된 천연가스는 다시 해수와 열교환하여 상온의 가스로 송출된다.

<그림 2-5>의 T-S 선도중의 빗금친 부분이 터빈에서의 일 양을 표시한다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 이 방식은 천연가스의 송출압력이 높은 경우에는 LNG펌프의 구동 동력에 비해서 터빈발전기의 출력이 적어서 냉열이용 효과가 적으므로 충분한 검토가 필요하다. 그러나 터빈 입출구의 압력차가 큰 경우에는 다단터빈을 사용하고 중간에 해수 가열기를 설치하여 Exergy의 회수율을 높이는 방법도 있다.

<그림 2-5> LNG 직접팽창방식



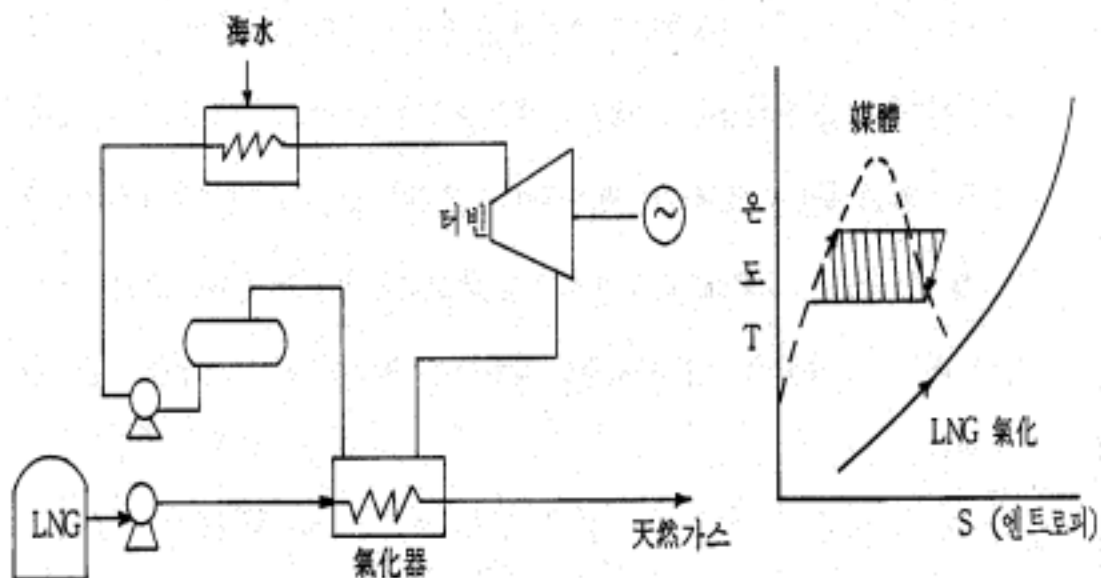
2.2 단일매체 Rankine 사이클 방식

프로판 등의 탄화수소나 프레온 등을 중간열매체로 이용하는 것으로, 중간 열매체의 상변화는 복수형 스팀터빈과 같으나 운전온도레벨이 다르다. 이 방식의 흐름은 <그림 2-6>에 나타낸 바와 같다.

LNG는 여러 성분의 탄화수소로 되어 있어서 증발과 온도상승이 동시에 일어나며, LNG 냉열을 유효하게 이용하여 출력을 크게 하기 위해서는 LNG 기화곡선과 매체의 응축곡선을 근접시킬 필요가 있다. 그러나 단일매체인 경우에는 매체의 압력, 해수 등의 문제와 관련되어 만족스러운 결과를 얻기가 어렵다.

그러므로 재열 또는 재생사이클을 부가한다거나 여러 가지 종류의 매체를 Cascade 사이클로 조합하여 출력을 상승시킬 수는 있으나, 시스템이 복잡해지고 운전제어 면에서 신뢰성이 떨어지고 건설단가를 높게 한다.

<그림 2-6> 단일매체 Rankine 사이클 방식



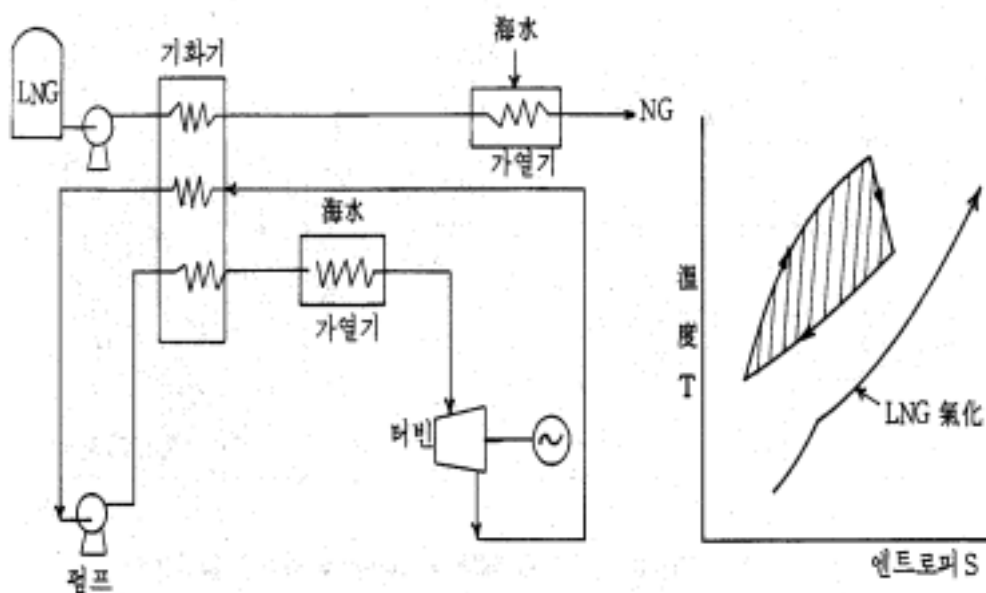
2.3 혼합매체 Rankine 사이클방식

이 방식은 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 등 비등점이 다른 탄화수소의 혼합물을 중간매체로 이용하는 것으로 MFR 사이클(Multi Fluid Rankine Cycle)이라고도 부른다. 기본적인 흐름은 <그림 II-7>과 같으며 단일매체 사이클과 비슷하지만 혼합매체의 경우에는 LNG 기화곡선과 비슷하게 증발과 온도상승이 동시에 일어나기 때문에 혼합매체의 응축곡선과 LNG기화곡선을 근접시킬 수가 있다.

그리고, 터빈을 돌리고 난 후의 혼합매체가스는 LNG와 펌프로 송압된 혼합매체액의 두 가지에 의해서 응축이 이루어져서 냉열의 재생이용이 효과적으로 이루어질 수 있기 때문에 단일매체방식과 비교해서 LNG 단위량당 터빈출력을 크게 하는 특징을 가진다.

LNG 기화기에서는 LNG - 증발되는 혼합매체 - 응축되는 혼합매체의 세 유체가 동시에 열교환된다.

<그림 2-7> 혼합매체 Rankine 사이클

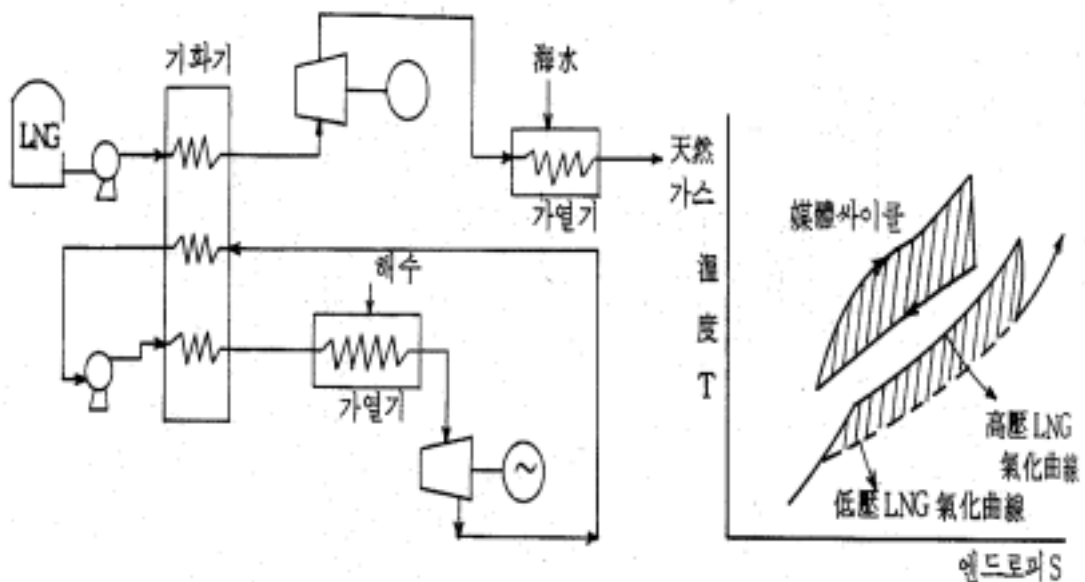


2.4 직접팽창과 Rankine 사이클의 복합방식

이 방식은 중간열매체를 사용한 Rankine 사이클과 기화한 천연가스의 직접팽창 사이클을 조합한 것으로 그 흐름과 T-S 선도가 <그림 2-8>과 같다. T-S 선도의 Rankine 사이클은 혼합매체사용의 경우를 나타낸다. 이 방식은 구성 기기가 복잡해지고 운전제어 면에서 신뢰성이 저하되지만, LNG 냉열을 가장 효과적으로 회수 가능한 방법이며 구성기기도 기존기술로 가능하고 신뢰성도 있는 것으로 알려졌다.

Rankine 사이클에 사용하는 매체는 각종매체가 될 수 있으나 직접팽창 사이클과 합해진 총합출력을 보면 매체에 따른 차이는 그다지 크지 않다. 그러나 혼합매체 Rankine 사이클과 조합한 방법이 Exergy 이용효율이 제일 높은 방식이다.

<그림 2-8> 직접팽창과 Rankine 사이클 복합방식



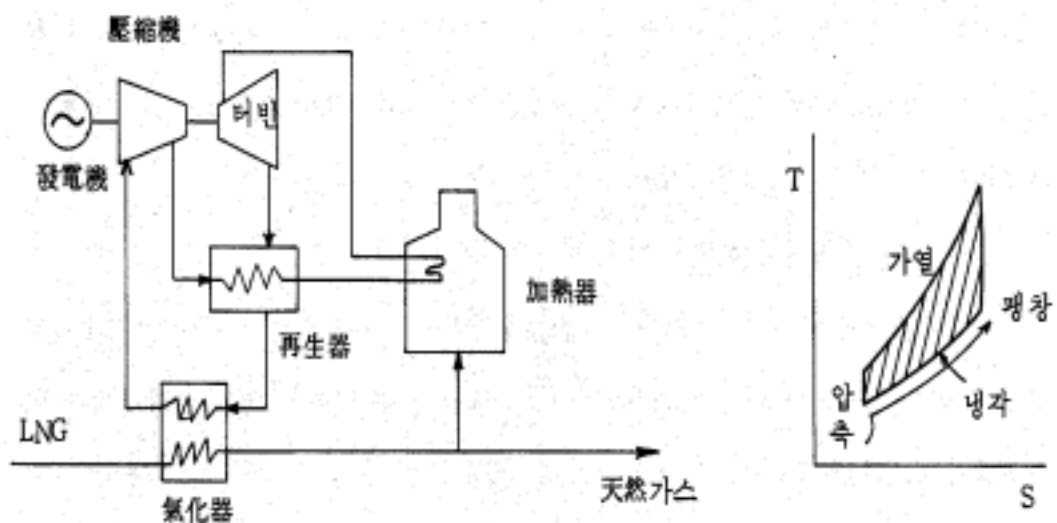
2.5 Closed Brayton 사이클 방식

이 방식은 LNG의 최저온도에서도 응축하지 않는 질소가스를 매체로 하는 closed 사이클 가스터빈으로 그 흐름도는 <그림 2-9>와 같다. LNG의 냉열은 응축기 입구의 질소를 냉각하기 위하여 사용하고, 이로 인하여 응축기 동력을 절감하여 유효출력을 증대시키는 방식이다.

LNG를 연소하여 가열을 하지 않고 터빈출구의 더운 질소가스로 가열하여 기화하기 때문에 안정성은 높지만 다른 방식과 달리 LNG 시스템만 단독으로 운전할 수가 없어서 터빈, 발전기계통에 문제가 생길 경우에 LNG 기화 시스템에 적절한 제어가 어렵다.

또한 LNG의 부하변동에 대하여 응축기의 흡입온도변화와 압축기의 흡입 가스 량의 변화가 생기기 때문에 시스템의 안정성이 문제가 된다. 이 방식은 터빈입구의 가열기에 연료를 사용하여 터빈입구온도를 높이기 때문에 고효율 출력은 대단히 크지만 LNG 냉열이용 효과는 비교적 적다. 또한 발전출력이 큰 장점은 있으나, 이미 기술한 제어성의 문제, 예비 LNG 기화기의 필요성 등 고려해야 할 문제가 많아 실현가능성이 적다.

<그림 2-9> Closed Cycle 방식

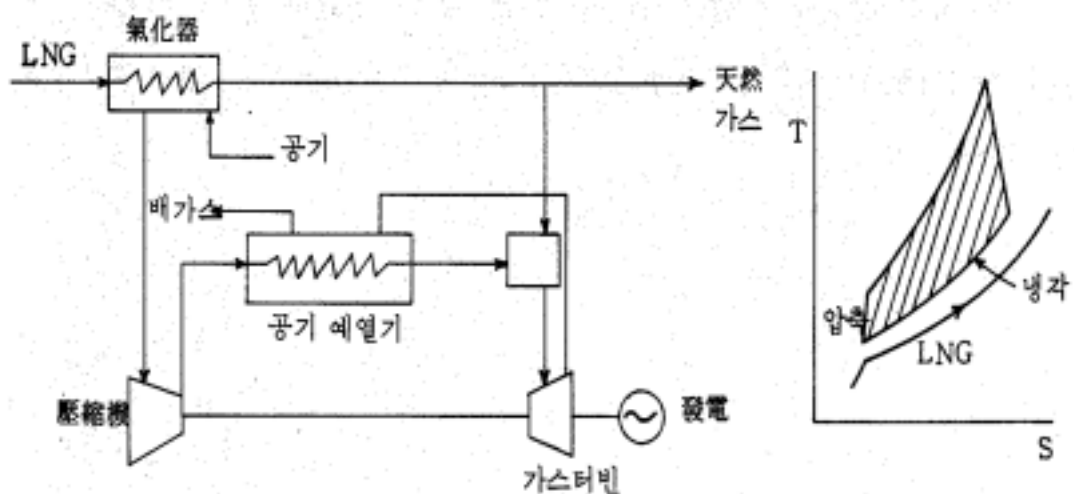


2.6 Open Brayton 사이클 방식

이 방식은 closed 사이클 방식과 흐름은 유사하나 매체로서 공기를 한번만 사용한다. LNG의 냉열은 압축기에 흡입되는 공기를 냉각하는데 사용이 되어 응축기의 동력을 대폭 줄인다. Closed 사이클에 비하여 드라이보일러(가열기)가 없어서 가스터빈에서의 출력이 더 높아지며, 이론적으로는 발전효율이나 LNG 냉열 이용효율이 가장 높게 기대된다.

그러나 이 방식의 제일 큰 단점은 LNG에 의하여 냉각되는 공기 중에 포함된 수분이나 탄산가스 등의 전처리 문제와 열교환기에 어름이 생기는 것을 방지하는 기술을 경제성이 있도록 효과적으로 해결하는 것이 문제이다. 기본적인 흐름과 T-S 선도는 <그림 2-10>과 같다.

<그림 2-10> Open Cycle 방식



2.7 각종 방식의 비교

냉열발전 시스템은 앞에서 본 바와 같이 여러 형태의 방식이 있으므로 공장 설계 및 실용화는 세밀한 검토를 해야 한다. 냉열발전용 시스템방식별 LNG송출압력의 영향, 발전할 때 파생하는 냉각효과, 전기적 출력 등의 특성

에 차이가 많으며, 설치장소의 조건을 고려하여 최적방법을 선정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다. 즉, LNG 수입기지내의 LNG 연간 사용량의 사용형태, 기지주변의 전력수요구성 및 발생전력의 용도, 배가스 및 온배수 등의 이용가능성, 연료사용가능성, 최적 싸이클 작동유체 선정 등을 면밀히 검토해야 할 것이다.

<표 2-1>에 대표적인 냉열발전 방식을 비교하였다. 혼합매체 Rankine 사이클 방식과 직접팽창과 Rankine 사이클의 복합방식이 냉열이용효율 및 출력이 좋으며, 몇 가지 문제점을 극복한다면 Open 가스터빈 방식이 냉열이용효율을 높이고 발전출력을 최대로 하는 방법이 될 수 있을 것이다

<표 2-1> 냉열발전 방식의 비교

냉열발전 방식	특징과 문제점
직접팽창 방식	◦ 출력이 작다 ◦ 송출가스압력이 낮은 경우에 유효 ◦ 발전코스트가 낮다 ◦ 구성이 간단하여 차지하는 공간도 작다. ◦ 기존기술로 실시가능 ◦ LNG 이외의 매체는 사용하지 않음 ◦ 환경에 영향이 없다
직접팽창과 Rankine 사이클 복합방식	◦ 출력이 크다 ◦ 기존 기술의 조합으로 실시가능 ◦ 이차매체로서 탄화수소 또는 프레온 등이 쓰임 ◦ 환경영향 없음
혼합매체 Rankine 사이클	◦ 출력이 크다 ◦ 혼합매체로서 탄화수소의 혼합물이 쓰임 ◦ 매체의 특성이 복잡 ◦ 각종의 운전에 대하여 검토가 필요 ◦ 환경영향 없음
Closed 가스터빈 방식	◦ 냉열이용출력은 작다 ◦ 복잡하고 대규모이다 ◦ 대형의 고온 가스 가열소가 필요 ◦ 연소가 일어나므로 대기에 영향이 있다
Open 가스터빈 방식	◦ 냉열이용 효율과 출력이 제일 클 것으로 기대됨 ◦ 복잡하고 대규모 ◦ 공기 중의 습분제거기술의 확립이 필요 ◦ 연소를 동반하므로 대기에 영향이 있음

3. 기술현황

액화천연가스(LNG)는 도시 가스의 원료나, 화력발전용의 연료 등에 쓰기 위해서 다량 수입하고 있다. 우리나라는 2002년 1,700만 톤의 LNG를 수입하였으며, 금년 2003년에는 1,800만 톤을 초과할 것으로 추정하고 있다. LNG를 세계에서 가장 많이 수입하는 일본의 경우 1997년에 LNG 수입량은, 약 4,800만 톤에 달하고, 그중 3,100만 ton이 발전용 연료로서 사용하였다.

천연가스 생산지의 LNG 액화기지에서는, 1 ton의 천연가스를 액화하는데 약 380 kWh의 동력을 필요로 한다. 이러한 동력은, LNG의 냉열의 형태로 변환됨으로서 LNG는 대기압의 상태에서는 1 ton당 약250 kWh의 냉열 exergy를 갖고 있다. LNG를 펌프로 예컨대 4 MPa로 압력을 높이면, 상온에서 기화할 때까지 약 반의 냉열 exergy를 이용할 수가 있다. 나머지의 냉열 exergy는 gas의 송출압력이나 천연가스직접팽창터빈으로 터빈에 의해, 압력 exergy로서 회수할 수가 있다.

현재 실용화되고 있는 LNG 냉열발전 방식에서는 열원으로 해수를 사용하는 것이 일반적이다. 일본의 LNG 냉열발전 설비는, 도시가스 공급스테이션이나 전력회사의 화력발전소에 설치한다. 도시가스 공급스테이션에서는, 도시가스의 공급압력을 낮추어 조정하는 governor 대신에 팽창 turbine를 설치하여 압력 차로부터 energy를 회수하는 경우도 있다. 회수출력은, LNG의 기화송출압력이나 사용하는 냉매의 종류에 따라서 크게 변한다.

도시 가스회사에서는, LNG의 기화송출압력이 높기 때문에 단일냉매나 혼합냉매의 랭킨사이클을 채용하고 있다. 일반적으로 가스터빈과 증기터빈을 조합한 combined cycle과, 혼합냉매의 랭킨사이클을 채용한 액화천연가스기화발전장치를 채용하는 경우가 많다.

종래의 LNG 냉열발전 방식에 의한 설비에서는 LNG 1 ton당의 회수동력은, 20 kWh~40 kWh 이다. 한편, 전력회사에서는, LNG 도입당시, LNG가

보일러 연료에 쓰이었기 때문에, LNG 기화압력을 도시가스회사보다도 낮게 할 수가 있어서 천연가스직접팽창 cycle이 주로 채용되어 있다. 또한 랭킨사이클과 조합한 공장에서는, LNG 1 ton당의 회수동력은, 60 kWh를 초과한다.

또한, 연료로서 이용하는 LNG 1 ton당의 발전출력은, 증기터빈 시스템으로 6,000 kWh이다. 최근의 고효율 복합사이클 발전에서는 가스터빈의 브레이드 냉각기술이나 터빈 브레이드 코팅기술의 향상으로 인하여 터빈 입구의 연소온도가 1500 °C까지 상승할 수 있는데, 그 발전출력은 약 7,900 kWh가 된다. 또한, 고발열량기준의 발전효율은 52%에 달하고 있다. 이 발전출력에서 LNG의 기화압력에 의한 기여 분은 약 90 kWh이며, 지금까지의 LNG 냉열발전에 의한 정미회수출력이 약 20 kWh~60 kWh인 것과 비교하면, LNG의 냉열exergy의 이용효율이 오르고 있다고 할 수 있다.

석유과동 후인 1979년부터 일본은 에너지 절약정책의 일환으로, 주로 전력회사나 도시 gas회사에서 각종 LNG 냉열발전 기술을 개발하여 실제로 공장을 건설하고 활발하게 가동하였다. 그러나, LNG 냉열발전은, 1990년대 이후에는 에너지가격의 안정과 건설비용의 상승 등의 경제적 이유 때문에 많이 건설되지 않게 되었다. 특히, 고효율의 복합사이클발전의 채용으로, LNG의 기화압력이 상승하여 LNG 냉열발전으로 회수할 수가 있는 출력이 저하한 것이 LNG 냉열발전을 기대하지 않게 한 큰 요인이다. 또한, 냉열 이용 복합사이클에서는, 비교적 비싼 증기터빈을 사용해야만 하기 때문에 건설비용이 문제가 된다. 이러한 이유들 때문에, 현재는 대량의 LNG 냉열을 이용하고자 하는 냉열발전 공장이 건설되지 않게 되어, LNG의 냉열 exergy의 대부분이, LNG 기화용의 열원으로 사용되는 해수에 버려지는 경우가 많게 되었다. 그러나 이러한 어려움을 극복하고, LNG 냉열을 유효하게 이용하여 발전을 할 수 있는 액화천연가스 냉열이용 발전장치를 제공하기 위하여 기술개발이 꾸준히 이루어지고 있다.

3.1 국외 현황

LNG 냉열이용기술의 활용에 있어서는 일본이 선두주자로서, 발명특허도 주로 일본에서 이루어지고 있다. 미국특허와 유럽특허로 나타난 것은 제한되어있는데, 미국특허번호 US-5198311(19930330)은 출원회사는 일본회사인 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.이며, 특허의 명칭은 “LNG cryogenic power generation system using molten carbonate fuel cells”이다. CO₂ 격리판을 갖춘 용융탄산염 연료전지를 이용한 LNG심냉발전시스템에 관한 기술이다. 이 미국특허의 출원회사는 유럽특허도 같은 명칭과 같은 내용으로 출원하였는데, 유럽특허번호는 EP-0467051(19920122)이다. 또 다른 미국특허로는 미국회사인 Petrocarbon Developments Limited 가 획득한 미국특허번호 US-4400947로서 특허명칭은 “Producing power from a cryogenic liquid”이다. 두 개의 다른 냉매를 사용한 열교환기를 조합한 시스템에서 팽창압력에 의해서 발전기를 구동하여 전기를 생산하는 방법에 관한 기술이다. 이 미국회사는 유럽특허도 같은 명칭으로 출원하였는데, 유럽특허번호는 EP-0043212(19820106)이다.

일본에서는 LNG냉열발전은 실용화되고 있으며, 앞으로 에너지절약효과가 높고 운전제어를 용이하게 하는 방법으로 개선이 될 것이다. 일본에서는 LNG기지에 냉열발전 설비가 많이 설치되어있으며, 발전방식으로는 Rankine 사이클과 직접팽창을 조합한 방식과 혼합매체를 사용한 방식이 많이 차지하고 있으며, LNG가 가진 냉열 Exergy를 효과적으로 회수하는 방향으로 기술을 개발하고있다.

Osaka Gas Co.는 LNG의 냉열을 유효하게 이용하여 효율적으로 발전을 할 수 있는 복합사이클 발전장치를 특허 획득하였다. 발명의 명칭은 LNG 냉열을 이용한 복합사이클 발전장치(combined-cycle generating device utilizing cryogenic LNG)이며 특허번호는 JP-0004813(20020109)이다. 흡입기에 의해서 공기를 끌어들인 후, 공기탈습냉각기에서 습기를 제거하고 0 °C 이하까지 냉각한 후에 공기 압축기에 보낸다. 공기 압축기에서 압축된 공기

는 연소기에서 연료와 동시에 연소하여, 고온고압의 가스는 가스터빈에서 팽창하여 발전기를 구동하여 발전한다. 가스터빈을 나간 배기가스는, 증기과열기, 증기보일러, 급수가열기의 순으로 열 교환을 하여, 물을 과열증기로 대기에 방출한다. 과열증기는 증기터빈에 의해서 팽창하여, 발전기를 구동하여 발전을 한다. 증기터빈을 나간 저압증기는 복수기에서 LNG로 냉각되어 회수되어, 급수펌프에 의해서 재순환된다. 이와 같이 LNG 냉열을 이용한 복합 사이클발전장치에 관한 특허이다.

Mitsui Eng & Shipbuild 회사는 LNG 냉열을 이용하여 발전효율을 높이는 한편, 안전하고, 구성이 간단하고, 또한, NOx 대책이 불필요한 냉열발전장치를 개발하여 발명특허를 획득하였다. 발명의 명칭은 “cryogenic power generating device”이며 특허번호는 JP-2001159318(20010612)이다. 이 냉열이용 발전장치는 액체탄산가스를 저장하는 저장탱크, 저장탱크로 액체탄산가스를 운송할 수 있는 펌프, 터빈배기가스중의 탄산가스를 분리하는 탄산 가스 분리기, 연소기, 연소기의 연소가스를 동력원으로서 발전기를 구동하는 가스터빈, 탄산가스분리기로 분리한 탄산가스를 LNG를 사용하여 액화하는 동시에 LNG를 가스화 시키는 기화기, 가스터빈에 병설되어, 탄산가스를 분리한 나머지의 터빈배기가스를 도입하는 팽창터빈들로 구성되어있다. 이 발명은 액화천연가스가 보유하고 있는 냉열을 효율적으로 이용하여 고효율의 발전을 하는 냉열발전장치에 관한 것이다.

발명자는 내용에서 강조하기를 LNG를 재 기화시키는 경우, 종래는 해수를 사용하여 가스화 시키고 있었기 때문에, LNG냉열의 막대한 energy의 대부분이 바다에 버려졌고 효율적으로 이용되지 않은 것이 실정이라고 주장하며, LNG가 보유하고 있는 냉열을 이용하는 방법으로서, 예컨대, 냉열발전, 공기 액화분리, 냉동 창고, 등의 여러 방법이 있지만, 그 중에서도 냉열발전이 가장 유효한 냉열 회수방법이라고 주장하고 있다.

종래의 냉열발전 방식으로서, 랭킨사이클방식, 천연가스직접팽창방식, 또는 복수매체적용방식 등이 있는데 작동매체에 프레온가스를 사용하는 프레

온 랭킨사이클방식은, 앞으로 사용이 불가능하고 또한, 천연가스직접팽창방식은 구성이 간단하지만, 발전출력이 작기 때문에 대 출력 화가 곤란하며 또한 효율도 낮다고 중장하고 있다. 또한, 복수매체적용방식은, 기존기술로 가능하지만, 가스터빈 사이클, 프레온가스 사이클 및 증기사이클 등의 세 가지의 사이클에 의해 구성되어 있기 때문에, 발전시스템 자체가 대단히 복잡하고 또한, 프레온가스 사이클은, 냉매에 대체가 필요하다. 더욱, 연소기에 공기를 넣고 있기 때문에, 생성되는 NOx 대책이 필요하다고 주장하고 있다. 이 발명은, 이상 열거한 종래의 문제를 극복하기 위해서 개발된 것으로서, LNG가 보유하고 있는 냉열을 효율적으로 이용하여 고효율의 발전을 하는 한편, 안전하고 기기 구성이 간편하고, 더욱이 NOx 대책이 불필요한 냉열발전장치를 제공한다고 주장하고 있다.

Mitsui Eng & Shipbuild 회사는 또 다른 발명인 “cryogenic power generation system”으로 특허를 획득하였는데, 특허번호는 JP-2001132472 (20010515)이다. 이 냉열이용발전 시스템은 LNG의 냉열을 효율적으로 이용하여 고효율의 발전을 한다. 시스템은 연소기, 가스터빈, 폐열보일러, 응축기, 압축기, 기화기, 저장탱크, 펌프, 등으로 구성되어있으며 폐회로를 형성한다. 기화기에서 LNG의 냉열을 이용하여 증압된 이산화탄소를 0 °C 이하로 냉각하는 동시에 LNG를 가스화 한다. 이 이산화탄소는 순수한 물 및 용매와 혼합 반응하여 포집화합물을 생성한다. 탱크내의 포집화합물을 펌프로 응축기에 보내어 가스터빈배기가스에서 이산화탄소를 분리하고 포집화합물 자신을 열분해 시킨다. 열분해에 의해 생긴 고압의 이산화탄소 및 증기를 연소기에 공급하여, 이산화탄소, 증기 및 산소 의 존재 하에 연료를 연소시켜, 생긴 연소가스를 가스터빈에 공급하여 발전기를 구동하도록 설계되었다. 이와 같이 이 발명은, 액화천연가스(LNG)가 보유하고 있는 냉열을 효율적으로 이용하여 발전을 하는 냉열이용발전시스템에 관한 것이다.

일본특허번호 JP-2000204909(20000725)는 “LNG cryogenic power generation system”에 관한 특허로 Osaka Gas Co Ltd에서 출원하여 특허를 획득하였다. 이 발명특허 “냉열이용발전시스템”은 LNG 냉열발전의 효율을 높이기

위해서 LNG 냉열발전에 증기분사재생식 가스터빈장치를 결합하였다. 가스터빈의 배기가스는 배열회수장치의 공기가열기로 연소공기를 가열하여, 보일러로 연소공기에 혼합하는 수증기를 발생시켜, 고압천연가스과열기 및 저압천연가스과열기로 천연가스를 가열하여, LNG 기화기에서 액화천연가스를 승온시키고 기화를 한다. LNG의 냉열은, LNG 주열교환기로 랭킨사이클의 혼합 프레온냉매에 열 교환하여 흡입공기를 냉각해 주기 때문에 공기냉각기에서 필요로 하는 동력을 삭감할 수가 있다. 앞에서 말한 열교환기에서 액화천연가스와 프론 냉매와의 사이의 온도차가 작은 상태로 열 교환이 가능토록 한 것이 특징이다. 이 특허에 대하여 좀더 상세히 아래에 설명하였다.

이 발명은, 가스연료의 연소가스로 회전구동 되는 가스터빈과 가스터빈의 회전출력에 의해서 구동되고 가스연료의 연소용 공기를 압축하는 공기압축기와, 가스터빈으로부터 나온 배기가스가 갖는 배열을 회수하여, 공기압축기로 압축된 가스연료의 연소용 공기를 가열하여, 연소용 공기에 혼합시키는 수증기를 발생시켜, 액화천연가스를 승온하여 기화시키고, 그리고 가열하는 배열회수장치, 액화천연가스의 냉열을 이용하여 응축을 하는 혼합프론 냉매가 순환하는 랭킨사이클, 배열회수장치로 승온 및 기화를 하기 위해서 공급되는 액화천연가스, 랭킨사이클을 순환하는 혼합 프론 냉매가 열 교환하는 열교환기, 열교환기에 도입되는 혼합프론에 의해서 회전 구동되는 프론 팽창터빈, 배열회수장치로 가열된 천연가스로 회전 구동되는 천연가스팽창터빈, 가스터빈 및 각 팽창터빈의 회전출력으로 구동되는 발전기, 열교환기로 냉각된 랭킨사이클의 혼합 프론 냉매에 의해서, 공기압축기에 흡입되는 공기를 냉각하는 공기냉각기를 포함하여, 랭킨사이클에서는, 혼합 프론 냉매를 공기냉각기 뒤에서 배열회수장치로, 배기가스를 냉각시키고 나서 프론 팽창터빈에 보내는 것을 특징으로 하는 액화천연가스 냉열이용 발전장치이다.

이 특허에 따르면, 가스터빈을 구동하는 연소가스에 수증기를 혼합시켜 출력을 높여, 가스터빈의 배기가스의 열로 수증기발생 및 연소용 공기를 가열하여, 연소가스의 온도를 높여 배기가스의 열 exergy를 효율적으로 회수하여, 가스터빈 출력을 더욱 높일 수 있다. 또한, 액화천연가스의 냉열은 랭킨

싸이클을 이용하여, 공기압축기로의 흡기를 생각하는 공기냉각기에서 효율적으로 이용할 수가 있고, 공기압축기의 동력을 줄일 수 있다. 배기가스에 의해서 발생시키는 수증기를 줄이면, 수증기와 공기와의 혼합에 의한 exergy 손실을 억제할 수 있다.

이 발명특허의 열교환기에서는, 액화천연가스와 혼합프론 냉매와의 사이의 온도차가 작은 상태로 열 교환이 가능한 것을 특징으로 한다. 이 특허에 따르면, 열교환기로 효율적으로 열 교환을 하여, 액화천연가스가 갖는 냉열 energy를 랭킨사이클의 혼합프론 냉매에 보내어 공기냉각기나 배열회수장치를 거쳐 효율적으로 이용할 수가 있다. 배열회수장치에서 발생하는 수증기는, 혼합프론 냉매로 냉각된 배기 가스중의 수분을 가열하여 발생시키는 것을 특징으로 한다. 배기가스 중에서 회수하는 수분으로 가스터빈의 연소가스와 혼합시키는 수증기를 발생시키기 때문에, 수증기발생을 위한 물의 공급을 필요로 하지 않는다.

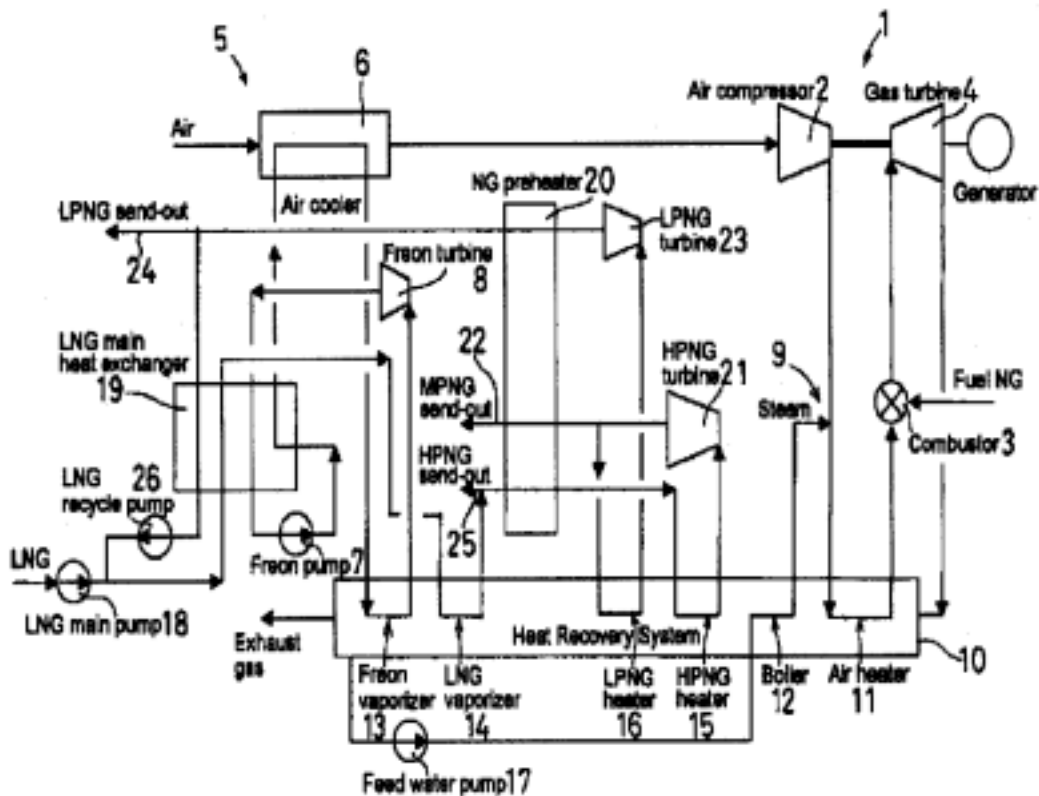
천연가스팽창 터빈은 천연가스의 압력에 따라 여러 단으로 설정되어, 고압 측의 천연가스팽창 터빈으로부터의 배기가스는, 배열회수장치로 추가적으로 가열되고 나서, 저압 측의 천연가스팽창터빈을 회전 구동한다. 천연가스를 공급하는 압력에 따라, 천연가스팽창 터빈으로 동력을 회수할 수가 있기 때문에, 액화천연가스가 갖는 exergy를 효과적으로 이용 할 수가 있다.

다음에 보인 <그림 2-11>은 이 발명특허 내용에서 실행된 가스터빈과 고효율 LNG 냉열발전을 조합하여 구성하는 시스템의 개략 공정흐름을 나타낸다. 이 시스템은, 증기분사재생식 가스터빈의 배열을 활용하여, 천연가스팽창 터빈과 혼합프론 팽창터빈을 효과적으로 조합한 것이다.

다음 공정도에서 공정의 흐름에 관해서 설명한다. 증기분사재생식 가스터빈 장치1은, 공기압축기2, 연소기3 및 가스터빈4를 포함한다. 연소기3으로의 흡기는, 랭킨사이클5의 공기냉각기6에서 HFC계 혼합프론 에 의해서 냉각되어, 공기압축기2에서 압축된다. 랭킨사이클 5는, 공기냉각기6과 합쳐 프레온

펌프7 및 프레온 터빈8로 구성되어 있다. 공기압축기2에서 압축된 흡기는, 혼합부9에서 포화증기와 혼합되고, 배열회수장치10의 공기가열기11을 통과하는 사이에 가스터빈4의 배기로 예열된 후에 천연가스를 연료로 하는 연소기3에서 연소용공기로 사용된다. 연소기3으로부터의 연소 가스는, 가스터빈4에 도입되어, 동력이 회수된다. 가스터빈4부터의 배기가스는, 배열회수장치10에 보내어져 배열이 회수된다.

<그림 2-11> 가스터빈과 고효율 LNG 냉열발전 조합시스템의 공정흐름도



배열회수장치10에는, 공기가열기11과함께 보일러12, 프레온기화기13, LNG 기화기14, 고압천연가스가열기15 및 저압천연가스가열기16이 갖추어져있고 가스터빈4부터의 배기가스와 열 교환을 하여, 배기가스가 갖는 열에너지를 이용하는 가열이 각각 행하여진다. 가스터빈4로부터 배출되는 가장 고온의 상태의 배기가스는, 공기과열기11로 연소기3으로 공급하는 연소용 공기를 가열한다. 다음에, 배기가스는 보일러12를 가열하여, 공기압축기2에서 압축된

뒤에 공기과열기11로 가열되기 전의 공기에, 혼합부9로 혼합되는 수증기를 발생시킨다. 다음에, 배기가스는 고압천연가스가열기15 및 저압천연가스가열기16에서 고압 및 저압의 천연가스를 각각 가열하여, LNG 기화기14에서 LNG를 증발시킨다. 마지막으로, 프레온기화기13에서 HFC계 혼합프론 인 프레온을 증발시킨다.

이러한 열교환의 과정에서 배기가스를 냉각하여, 열에너지를 효율적으로 회수하면, 배기가스 중에서는 수분도 얻을 수 있다. 천연가스는 메탄 등의 각종 탄화수소의 혼합물이며, 연소의 배기가스는 이산화탄소가스와 수증기가 주성분이다. 또한, 혼합부9로 공기에 혼합하는 수증기도 배기가스로서 나온다. 배기가스를 프레온기화기13으로 냉각하면, 배열회수장치10은 복수기로서도 기능을 하여, 혼합부9로 혼합시킨 수증기양보다도 많은 수증기를 응축시켜, 수분으로서 회수할 수가 있다. 회수한 수분은, 급수펌프17에서 보일러12에 보내서 수증기를 발생시킨다.

또한, HFC계 혼합 flon의 조성은, R134a($C_2F_4H_2$)와 R23(CHF_3)이다. R134a의 Mol 조성은, 40%~45%이 최적이며, 이 HFC계 혼합 flon은, LNG와 열교환하더라도 응고하지 않은 특성이 있다.

한편, LNG 탱크에서 LNG 주 펌프18로 송압 되는 LNG는 LNG 주열교환기19에 들어가기 전에 액화된 천연가스와 혼합된다. 혼합된 LNG는, LNG 주열교환기19로부터 LNG 기화기14로 상온까지 기화 승온 된다.

LNG 기화기14로 기화 승온된 천연가스는, 천연가스 예열기20을 지나, 고압천연가스가열기15에서 가스터빈4부터의 배기가스에 의해서 가열되어, 고압 천연가스 터빈21에서 팽창하여, 천연가스 예열기20에서 냉각된 뒤, 중간압력 line22로, 예를 들면 3.5 MPa의 압력으로 송출된다. 또한 고압천연가스 터빈21을 나온 일부의 천연가스는, 저압천연가스가열기16에서 다시 가열된 후, 저압천연가스 터빈23으로 다시 팽창하여, 동력을 회수된 뒤, 천연가스 예열기20으로 냉각된 뒤, 저압 line24로부터 송출된다. 천연가스 예열기20에서는, 고압의 천연가스와, 중간압력 또는 저압의 천연가스가 열 교환하여, 고압의 천연가스는 온도가 상승되고 중간압력 또는 저압의 천연가스는 냉각된다.

기화한 천연가스는, 가스수요에 따라 <그림 2-11>에 표시된 고압 line25로, 예를 들면 7 MPa의 압력으로, 또는 저압 line24로, 예를 들면 1.8 MPa의 압력으로, 송출 할 수도 있다. 또한, 저압 line24의 천연가스는, LNG 주열교환기19에서 LNG에 의해 냉각되어, 응축된 뒤, LNG 회수 펌프26에서 가압되어, LNG 주 펌프18로부터 공급되는 LNG와 혼합시킨다. 순환하는 저압의 천연가스의 유량을 제어함으로서, LNG 주열교환기19에서 열 교환을 하는 상대인 LNG와의 온도차가 작아져 LNG의 냉열 energy를 효율적으로 회수할 수 있다.

HFC계 혼합 flon은, 프레온기화기13에서 증발 가열되어, 프레온 터빈8에서 동력을 회수된 뒤, LNG 주열교환기19에서의 열 교환으로, LNG 온도를 상승 시킴과 동시에, LNG에 의해서 냉각 액화된다. 더욱이 프레온 펌프7에서 압력이 상승된 HFC계 혼합flon은, 순환 양을 늘리기 위해서 LNG 주열교환기 19에 되돌린 후, 공기냉각기6에 도입된다. 혼합 flon의 팽창 터빈인 프레온 터빈8의 회전출력은, 천연가스의 팽창터빈인 고압천연가스 터빈21과 저압천연가스팽창 터빈23의 회전출력과 함께 발전기를 구동하여 전력으로 변환할 수가 있다. 각 터빈이 별개로 발전기를 구동하는 것으로 하고, 회전출력에 회전기 효율을 곱하면, 발전출력을 산출할 수가 있다.

공정도 <그림 2-11>의 시스템을, 다른 발전 시스템과 비교하여 본다. 우선, 해수를 열원으로 하는 냉열발전 시스템과 비교를 한다. 그림의 보일러12의 출구배기 가스 대신에, 온도 20 °C의 해수를 열원으로 사용하여 중간압력 line22에 천연가스를 송출하는 냉열발전의 축출력은, LNG 기화유량 100 ton/h의 경우, 약 5,500 kW로 계산된다. 내용은, 프레온 turbine8이 1,610 kW, 고압천연가스 turbine21이 2,640 kW, 저압천연가스 turbine23이 1,250 kW가된다. 또한 LNG를 기화시키기 위한 해수 펌프의 전력으로서, 약 460 kW가 필요하다. 이러한 방식은, 탄화수소계 혼합냉매 랭킨사이클의 발전출력4,000 kW에 비하여, 터빈이 3 기가 필요하게 되지만, 높은 송출압력으로 높은 발전출력을 얻을 수 있다고 하는 특징이 있다. 그러나 해수온도가 내려간 경우, 터빈 blade의 보호를 위하여 혼합 flon의 증발온도를 노점이상으로

높일 필요가 있어, flon의 증발압력을 내릴 필요가 있다. 그 때문에 프레온 터빈8의 출력이 대폭 내려간다. 예를 들면, 해수온도가 8 °C의 경우, 시스템의 총 축출력은, 4,650 kW로 내려간다. 즉, 해수를 열원에 쓰는 시스템은 다음과 같은 문제가 있다. 해수온도가 계절에 따라 변화하기 때문에 일년 내내 설계점에서 운전을 할 수 없게 되어, 발전출력의 저하가 생긴다. 해수용 열교환기로서, open rack식이나 titanium관의 열교환기를 쓸 필요가 있어, 가격이 비싸고 설치장소도 커진다.

다음 가스터빈을 쓰는 LNG 화력발전 사이클의 exergy 평가와 문제점을 검토하여본다. LNG 화력발전은, 전원구성의 약 25%를 차지하여, ACC(고효율의 복합사이클)의 효율향상과 합쳐서, 전력회사에서, 앞으로도 중설이 될 것으로 예상된다. 또한, 최근에는 건설비용의 저감이나 내륙이기 때문에 냉각수를 사용할 수 없는 이유로, 가스터빈만으로 높은 발전효율을 얻을 수 있는 시스템이 개발되어 있다. 실용화되어 있는 것에, 가스터빈에 고압증기를 분사하는 체인 사이클이나 이류체 사이클, 또한 규모가 큰 STIG(스팀분사가 터빈) 사이클이라고 불리는 방식이 있다. 그 밖에 고 습도 가스터빈(HAT)도 개발되고 있다.

아래에서는 Mitsubishi Heavy Ind. 사의 발명특허 두 건에 관해서 간단히 설명하겠다. 그 한건은 LNG 냉열을 이용하여 산소를 예냉 함으로서, LNG 냉열을 효율적으로 활용할 수 있는 가스터빈장치를 발명하였다. 특허번호는 JP-2000130184(20000509)이며, 발명특허의 명칭은 “가스터빈 장치(gas turbine device)”이다. 종래의 동력발생장치의 단점을 해소하여, 열효율이 우수하고 다량의 동력을 출력할 수 있음과 동시에, 염가에 제작할 수 있는 가스터빈장치이다.

연료로서 사용하는 LNG의 냉열을 이용하여 산소를 예냉 함과 동시에 LNG를 가스 상태의 천연가스로 하는 냉각기, 천연가스와 압축된 산소의 연소에 의해 고온연소 가스를 발생시킴과 동시에, 이 속에 포화상태의 고압의 물을 분사시켜 수증기성분을 다량 포함하는 연소가스를 발생시키는 연소기,

연소기로부터 공급되는 연소가스로 작동하여 동력을 외부에 출력하는 가스터빈, 펌프로 승압된 고압수를 가스터빈으로부터 뽑아낸 연소가스로 포화물로 하는 열교환기 및 추기되지 않고 가스터빈으로부터 배출되는 연소가스를 냉각하여 수증기를 응축시켜 CO₂를 분리하는 응축기로 구성되어있다.

역시 Mitsubishi Heavy Ind 회사에서 기술 개발하여 획득한 발명특허번호 JP-0343865(19991214)는 발명특허명칭이 "심냉터빈발전시스템(cryogenic turbine power generation system)"로서 이 심냉터빈발전시스템에 의해서 그 출력을 증대시킨다. 심냉설비에서는 저압압축기 및 고압압축기의 공기로부터 압축열을 내부냉각기로 복수를 가열하여 회수하고, 그 공기는 다시 LNG 공냉열교환기로 -100⁰C 정도에 냉각되어, 예컨대 팽창터빈으로 팽창시켜, -230⁰C의 저온으로 한다. 이 공기는 응축기에서 일부를 액화하여 액공탱크에 저장하여, 나머지는 냉각공기로 복합사이클 발전설비에 보내어, 흡기혼합냉각기로 보내고, 흡기실로부터의 대기와 혼합하여, 그리고 필요에 따라 액체공기를 직접 분사하여, 압축기에 공급하여 가스터빈의 출력을 증대시키는 것 외에 액체공기를 GT 급기타로 증발시켜 CAES 용 공기원으로 한다. 가스터빈의 배기는 배열회수 보일러로 증기를 발생시켜, 이 증기와 내부냉각기부터의 압축열을 회수한 증기로 증기터빈의 출력도 증대시킨다.

이상에서 LNG 냉열발전에 관한 비교적 최근의 외국의 발명특허에 대하여 설명하였다. 냉열이용 효율이 높고 운전제어를 용이하게 하는 방법으로 개선을 하기위하여 기술을 개발하고 있다.

3.2 국내 현황

우리나라는 2003년 1월 현재로 전국 천연가스 공급배관은 수도권 광역 729km, 중부권역 476km, 호남권역 403km, 영남권역 657km, 강원권역 177km 등 총 2,442km와 공급관리소 총 153개가 준공 완료되어, 전국 천연가스 공급배관망 인프라가 구축되었다. 우리나라는 세계에서 일본에 이어 두 번째의 LNG 수입국이다. 평택, 인천 LNG 수입기지에 이어 최근에 제3기지가 통영

에 건설되었으며, 1987년에 162만 톤을 공급함으로써 천연가스 사용시대가 시작된 이래로 2001년에는 10배나 되는 1,600만 톤, 2002년에는 1,700만 톤에 이르렀으며 2003년에는 1,800만 톤을 초과할 것으로 예측된다. 한국가스공사에 의하면, 인도네시아 등 5개국으로부터 전년보다 7.6% 늘어난 1,827만 톤의 LNG를 도입하여 전년보다 4% 증가한 1,822만 톤의 천연가스를 판매한다는 계획이다. 우리나라는 <표 2-2>에서 보는바와 같이 7개의 장기계약에 의해서 거의 LNG 1,700만 톤은 도입을 확보한 상태이다.

<표 2-2> 현존 LNG 장기계약 프로젝트

Source	Project Name	Amount(million tonnes/year)	Agreement period
Indonesia	Arun III	2.3	Dec. 1986-Nov.2007
Indonesia.	Korea II	2	Jul. 1994-Jun 2014
Indonesia	Badak V	1	Jan. 1998-Dec 2017
Malaysia	MLNG II	2	Jun 1995-Mar 2015
Qatar	Ras laffan	4.8	Aug 1999-Dec.2024
Oman	OLNG	4.06	Feb. 2000-Dec2024
Brunei	BLNG	0.7	Apr.1997-Mar.2013

자료: Energy Policies of IEA countries - 2002 Review

현재 건설된 평택, 인천 및 통영 제3기지 외에 포스코는 2002년 11월 민간 기업으로는 최초로 연간 170만 톤의 LNG를 처리할 수 있는 LNG터미널을 건설하기 위한 착공을 하였으며, 2005년 6월말에 준공예정이다. 포스코는 기존 발전용 연료로 사용하던 중유를 LNG로 대체하여 포항과 광양에 각각 345MW, 500MW 규모의 LNG 발전소를 건립하여 가동 중이다.

또한 한국가스공사는 2003년도 총 예산규모를 8조6,786억 원으로 편성하고 이중 6,635억 원을 생산설비, 공급설비, 경상설비 등에 투자할 계획이다. 2003년 건설투자에서는 인천 15-18호 LNG 저장탱크, 평택 11-14호 탱크, 통

영 4-7호 탱크, 통영 8-10호 탱크 건설 및 인천 서측 공유수면 매립, 평택 북측 공유수면 매립 등에 3,884억 원을 투자할 계획으로 알려져 있다.

LNG 냉열이용의 시작은 일본에서 1969년 LNG 도입이 개시되어 1971년에 세계 최초로 LNG 냉열을 이용한 공기액화분리공장을 건설하였으며, 그 후 냉열발전, 냉동 및 냉장, 냉동식품의 제조, 저온 분쇄 등 다양하게 활용하고 있으며, 계속 새로운 활용분야를 넓혀왔다. 이에 비하면, 국내에서는 냉열이용이 미비한 상태라고 할 수밖에 없는 실정이다. 우리나라는 최근 통영에 LNG 제3 수입기지를 건설하였으며, 이런 때를 맞추어 LNG냉열의 적절한 활용방안을 알아 볼 필요가 있다. 통영 제 3의 LNG 인수기지는 현재 연간 300만 톤의 LNG를 처리하는 LNG 저장탱크 3기(1-3호탱크), 기화송출설비, 항만시설 및 관련 부대설비를 갖춘 ‘통영 LNG기지 1단계 건설사업’이 완료된 상태이다. 또 LNG 저장탱크 4기(4-7호 탱크) 및 관련 부대설비를 갖춘 ‘통영LNG기지 2단계 1차 건설사업과 LNG 저장탱크(8-10호탱크) 및 관련 부대설비를 갖춘 ‘통영LNG기지 2단계 2차 건설사업’이 추진 중이다. 남부지역의 안정적인 천연가스 수급을 담당하게 되며 평택, 인천기지와는 달리 청정 해안에 위치해 연중 해수온도가 5⁰C 이상으로 유지, 동절기 가장 저렴하게 천연가스를 기화 송출할 수 있다.

국내에서 LNG 냉열 이용은 실질적으로 활발히 이루어지고 있지는 않고 있는 실정이다. 이러한 현실에서도 냉열이용 기술개발과 연구는 국내에서도 이루어져왔다. 코오롱건설은 LNG냉열을 이용한 페타이어 냉동분쇄 시스템을 개발하였다. 가스화 과정에서 바닷물에 버려지는 LNG냉열을 이용해 페타이어 냉동분쇄 시스템을 개발, 신기술인정서(KT)를 획득했다. 이 시스템은 LNG냉열 회수설비를 통해 LNG로부터 냉열을 흡수한 초저온상태의 냉매를 동결장치에 순환 공급시켜 지속적인 냉열공급이 이루어진다. 그리고 냉매가 채워져 있는 초 저온 동결조에 페타이어 등 피분쇄물을 투입시킨 후 강제적으로 피분쇄물을 눌러 침지 이송시켜 초 저온 상태로 냉각시키고 초 저온 분쇄기로 공급한다. 초 저온 분쇄기에 의해 분쇄된 분쇄물은 선별 및 분리공정을 거쳐 최종 상품이 된다. 이 기술을 활용하여 가스공사와 코오롱건설 회

사는 미세한 고무분말을 생산할 계획을 수립한 것으로 알려져 있다. 이 사업은 가스공사 통영 LNG기지 내에 공장을 건설하여 기화공정에서 폐기되는 LNG 냉열을 이용, 폐타이어를 냉동 분쇄해 미세한 고무분말을 생산하는 사업으로 타이어, 고무아스팔트, 고무플라스틱 등 각종 고무제품과 산업제품의 원료로 사용되며 2003년에 가동되어 생산을 시작할 것으로 기대하고 있다.

이외에 국내연구로서는 “아이스링크 및 LNG냉열이용을 위한 열교환시스템 개발”을 영남대학교 가스공사 연구개발원 연구팀에서 수행하여 보고한바 있다. 냉열회수를 위한 열교환기 설계에 필요한 열전달계수, 압력강하 양을 측정하기 위하여 이중관형으로 시험장치를 제작하였으며 사용유체는 액체질소, 에틸렌글리콜 수용액을 사용하여 이상 유동상태 및 수평 관 상태에서 시험하였다.

이상에서 언급한 LNG냉열이용 분쇄기술과 LNG냉열이용을 위한 열교환시스템 개발 외에도 냉열이용 공기분리기술과 냉동저장기술 등이 일부 실용화된 예는 있으나, 국내에서는 LNG냉열이용 발전기술은 연구는 계속되었으나 실용화되지는 못하였다. 국내에서 LNG냉열이용 발전기술과 관련된 연구를 발표한 학위논문과 국내학술잡지에 발표된 논문의 제목과 연구기관 및 연구자들을 아래에 소개하였다.

※ LNG 냉열이용 발전과 관련된 학위논문:

- ① 폐열을 이용한 LNG냉열발전에서 최적 Cycle 선정 및 최적치 설계에 관한 연구 / 홍성철(경희대 대학원, 1988).
- ② ASPEN Plus를 이용한 LNG 인수기지용 냉열발전 시스템 성능 연구 / 김동수(아주대 대학원, 1994).
- ③ LNG냉열을 이용한 폐회로 열기관의 설계 및 해석 / 이근식 (서울대대 학원, 1995).
- ④ LNG냉열을 이용한 습공기터빈의 성능해석/송찬호(서울대 대학원,1997).
- ⑤ LNG 냉열을 이용한 복합 발전플랜트의 성능향상에 관한 연구 /김병일 (아주대 대학원, 1998).

- ⑥ LNG 냉열을 이용한 복합발전 시스템의 성능해석 / 김정환(서울대 대학원, 1998).

※ LNG 냉열이용 발전과 관련된 학술논문:

- ① LNG 냉열이용 유틸리티산업의 타당성 분석 / 박수익(한국경제과학회지, 1988, 5(1), 71-82).
- ② LNG냉열이용 BOG 재액화공정 해석연구 / 윤상국(한국박용기관학회지, 2002, 26(2), 256-263).
- ③ LNG 냉열을 이용하는 동력사이클 열역학 해석 / 최권일(한국초전도·저온공학회논문지, 1999, 1994년 4월 1권 1호, 48-55).
- ④ 액화 천연 가스의 냉열을 이용한 가스 터빈의 성능 향상 / 김동섭(대한기계학회논문집, 1999, 23(5), P653-660).
- ⑤ LNG 냉열을 이용하는 동력사이클 열역학 해석 / 최권일 (초전도와 저온공학, 1999, 1(1), 48-55).

이상의 조사에서 나타난바와 같이 국내에서는 LNG 냉열 이용 실용화는 실질적으로 활발히 이루어지고 있지는 않으나, 기술개발과 연구는 국내에서도 이루어져왔다. 냉열이용 발전에 관한 연구는 주로 대학에서 학위논문으로 연구가 이루어졌다. 국내의 경우 이미 통영에 제 3 LNG 인수기지가 건설되었고, LNG 연간 수입량도 증가하여 1,800만 톤을 초과하게 되었다. LNG 냉열을 유용하게 이용하는 한 방법인 냉열발전시스템에 관한 기술개발이 더욱 활발히 이루어지기를 바란다.

제 3 장 결론

국내 액화천연가스(LNG) 도입은 2002년에 1,700만 톤이었으며, 2003년에는 1,800만 톤을 초과할 것으로 예상된다. 현재 평택, 인천 LNG 수입기지에 이어 제3기지가 통영에 건설되었으므로 이에 맞추어 LNG냉열이용 기술에 대하여 조사해보는 것은 의의가 크다.

LNG는 -162°C 의 저온으로부터 기화되기 때문에 0°C 근처의 냉열보다는 수십 배나 가치가 있는 것이며, 저온에서 활용할수록 그 효율이 높다. 이 기술동향분석보고서에서는 냉열발전기술방식을 설명하였으며 기술동향을 조사하였다. 냉열발전은 LNG 1톤당 30 ~ 80kWh의 발전이 가능하며 냉열이용 효율은 24 ~ 25%로서 실용화 가능한 것은 혼합매체·랭킨사이클방식과 직접 팽창을 랭킨사이클과 조합한 방식이 가장 효율적이다.

LNG 냉열이용발전기술 활용에 있어서는 일본이 선두주자로서, 미국특허와 유럽특허는 특허 건 수가 극히 제한되어있으며 발명특허는 주로 일본에서 이루어지고 있다. 일본에서는 LNG냉열발전은 실용화 되고 있으며 앞으로 에너지절약효과가 높고 운전제어를 용이하게 하는 방법으로 개선이 도도록 기술개발을 하고 있다.

국내에서는 LNG 냉열 이용 실용화는 실질적으로 활발히 이루어지고 있는 않고 있는 실정이다. 그러나 냉열이용 기술개발과 연구는 국내에서도 이루어져왔다. 냉열이용 발전에 관한 연구는 주로 대학에서 학위논문으로 연구가 이루어졌다. 국내의 경우 이미 통영에 제 3 LNG 인수기지가 건설되었고, LNG 수입량도 세계에서 일본 다음으로 많은 양을 도입함으로 냉열발전 실용화를 추진토록 노력하는 것은 중요하다고 생각한다. 과다한 초기투자비, 기술적인 문제 등의 어려움이 있겠으나 LNG 냉열의 효율적 이용과 에너지 절약의 측면에서 신중히 검토하는 것이 바람직할 것이다. 그러나 냉열발전시스템은 여러 형태의 방식이 있으므로 공장설계 및 실용화는 세밀한 분석을 해야 할 것이다.

<참고자료>

1. LNG냉열이용기술연구, 김지동, 조순행, 박수익, 김종남, 유윤종, KE-84-17, 한국동력자원연구소
2. google 검색 - 최인수기자 ischoi@enn.co.k
3. 한국가스공사 홈페이지
4. Energy Policies of IEA countries - Republic of Korea 2002 Review
5. 아이스링크 및 LNG냉열이용을 위한 열교환시스템 개발, 보고서 출판사 한국가스공사, 11월 (1997).
6. Orrit J.E. and J.m. Laupretre, Advances in Cryogenic Engineering, 21, 566(1976).
7. Frost Formation on a Flate Horizontal plate under Forced Convection, M.S. Theseis, Kaist(1985)
8. LNG 냉열이용, Osaka Gas 홈페이지.
9. LNG 냉열이용, Tokyo Gas 홈페이지
10. http://gasworld.netian.com/kogasmen_page1.html, 서울냉열공급설비(주)
11. <http://www.gas.or.jp/>, Japan gas association