

# LNG를 이용한 냉열발전의 엑서지 및 경제성 분석

김호연, 홍성호, 최양미, 박승민

한국가스공사 연구개발원

## Availability and Economy Analysis on LNG Cold Power Generation

Hoyeon Kim, Seongho Hong, Yangmi Choi, Seungmin Park,

R&D Division, Korea Gas Corporation

### 1. 서론

에너지 시장에서 원유 생산량의 제한과 수요량 증가는 유가상승을 부채질하고 있다. 이런 고유가시대에서 국가적인 차원의 에너지 절감 활성화 및 신재생 에너지 개발 다각화는 절실히 요구되고 있으며 앞으로 비산유국들의 에너지 수급은 점점 어려워질 것으로 전망되고 있다. 본 연구는 국가적인 차원의 신재생 에너지 개발에 부합하고자 LNG(Liquefied Natural Gas) 냉열에 대한 생산기지 내의 냉열이용 가능량 및 냉열발전 적용시 엑서지 이용률과 경제성 분석을 수행하였다.

LNG 냉열발전 프로세스들인 Toshiba 프로세스, Hitachi 프로세스, Osaka 프로세스, 그리고 Linde 프로세스는 에너지 해석과 엑서지 해석을 토대로 비교 분석하였고 경제성 분석은 Osaka 프로세스와 Linde 프로세스에 대하여 내부수익률법, 순현재가법, 투자회수율법을 가지고 분석하였다. 특히, LNG 냉열의 이용가치는 에너지 해석만으로 평가할 수 없으며, 엑서지 해석을 토대로 LNG 냉열의 이용가치를 분석하는 것이 반드시 필요하다.

### 2. 해석이론

생산기지 내의 LNG 냉열이용 가능량 및 LNG 냉열발전에 대한 기술적인 검토는 에너지 해석과 엑서지 해석을 가지고 비교 분석하였다. 에너지 해석은 열역학 제 1법칙을 기초로 한 해석법으로 식 (1)과 같다.

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (1)$$

여기서,  $dE/dt$ 는 에너지 변화율로 정상상태에서 0이며,  $\dot{Q}$ 는 열전달율,  $\dot{W}$ 는 일률을 나타내며,  $h$ 는 엔탈피,  $V$ 는 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $z$ 는 위치이다. 엑서지 해석<sup>(1)</sup>은 열역학 제 2법칙을 근거로 한 해석법으로 식 (2)와 같다.

$$\frac{dA_{cv}}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W}_{cv} - P_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \right) + \sum_i \dot{m}_i a_{fi} - \sum_e \dot{m}_e a_{fe} - \dot{I}_{cv} \quad (2)$$

여기서,  $dA/dt$ 는 엑서지 변화율로 정상상태에서 0이고, 우측에서 첫번째 항은 열전달에 동반된 엑서지유이며, 두번째 항은 일에 수반된 엑서지유이고, 세번째 및 네번째항은 유입량 및 유출량에 수반된 엑서지유, 그리고 마지막 항은 시스템에 의해서 파괴된 비가역성이다.

냉열발전에 대한 경제성 분석은 내부수익률법, 순현재가법, 투자회수율법을 토대로 분석하였다. 내부수익률법(Internal Rate of Return)은 식 (3)과 같다.

$$\sum_i^n \left( \frac{CI_i}{(1+r)^i} \right) = \sum_i^n \left( \frac{CO_i}{(1+r)^i} \right) \quad (3)$$

여기서,  $CI$  및  $CO$ 는 현금유입과 현금유출,  $n$ 은 분석기간, 그리고  $r$ 는 내부수익율을 의미한다.

다. 순현재가치(Net Present Value)은 식 (4)와 같다.

$$\sum_j^n \left( \frac{CI_j}{(1+K^*)^j} \right) = \sum_j^n \left( \frac{CO_j}{(1+K^*)^j} \right) \quad (4)$$

여기서,  $K^*$ 는 현금유입과 현금유출을 동일하게 만드는 할인율이다. 그리고 투자회수율법(Rate of Return)은 식 (5)와 같다.

$$\sum_t^n \left( \frac{CI_t}{(1+K)^t} \right) = \sum_t^n \left( \frac{CO_t}{(1+K)^t} \right) \quad (5)$$

여기서,  $K$ 는 할인율을 나타낸다.

### 3. 생산기지 내의 냉열이용 가능량

생산기지 내의 LNG 냉열이용 가능량은 저장탱크 및 배관에서 발생된 BOG(Boil-Off Gas)와 NG(Natural Gas) 송출량의 관계에 따라서 달라진다. Figure 1의 (A)에서 보는 바와 같이 동절기에는 NG 송출량이 많고 BOG 발생량이 적기 때문에 BOG 재액화기를 통과한 LNG 냉열은 에너지가 2.7%, 엑서지는 3.6%가 소모되지만 춘추하절기에는 BOG 발생량이 증가되며 NG 송출량이 적어지기 때문에 (B)에서 보는 바와 같이 LNG 냉열은 에너지 소모가 9.9%, 엑서지 소모가 11.8%가 된다. 또한, 동절기에는 해수식 기화기(ORV)를 통과한 후의 LNG 냉열의 에너지는 12.4%가 되며, 엑서지는 63.1%가 된다. 춘추하절기에는 에너지가 13.1%, 엑서지가 58.5%인 것으로 나타났다. 특히, 동절기에 해수에 전달된 냉열 에너지 및 엑서지는 84.9%, 4.2%이고 ORV에 유입된 에너지는 9.2%, 비가역성은 29.1%이다. 춘추하절기에는 에너지 및 엑서지가 77.0%, 0.1%로 나타났으며 에너지 유입 및 비가역성은 10.6%, 29.7%이다. 여기서 에너지 손실(EL)은 실질적으로 대기온도보다 낮은 상태에서 열전달이 이루어지기 때문에 해수식 기화기 내로 에너지가 유입된다.

결론적으로 에너지 관점에서 보면 동절기에는 84.9%, 춘추하절기에는 77.0%가 활용 가능한 것으로 나타나고 있으며 현재 해수에 동일한 양의 냉열 에너지를 버리고 있는 것으로 알려져 있다. 이것은 에너지를 양적인 관점에서만 보고 실질적으로 얻을 수 있는 에너지의 가치를 평가하지 않기 때문이다. 일례로 한강에 흐르는 강물은 천문학적인 에너지를 가지고 있지만 활용가치가 거의 없다. 즉 에너지의 포텐셜이 낮기 때문에 활용가치가 낮아지는 것이다. 열역학적으로 에너지 해석의 모순점을 해결하기 위하여 열역학 제 2법칙을 이용한 엑서지 해석법이 개발되어 있다. 엑서지는 어떤 상태에서 시스템의 환경(Environment) 또는 사상태(Dead State)까지 할 수 있는 최대 일량을 의미한다. 엑서지 관점에서 보면 해수에 전달된 냉열 엑서지는 동절기에 4.2%, 춘추하절기에 0.1%로 극히 적은 양이 전달되고 있으며

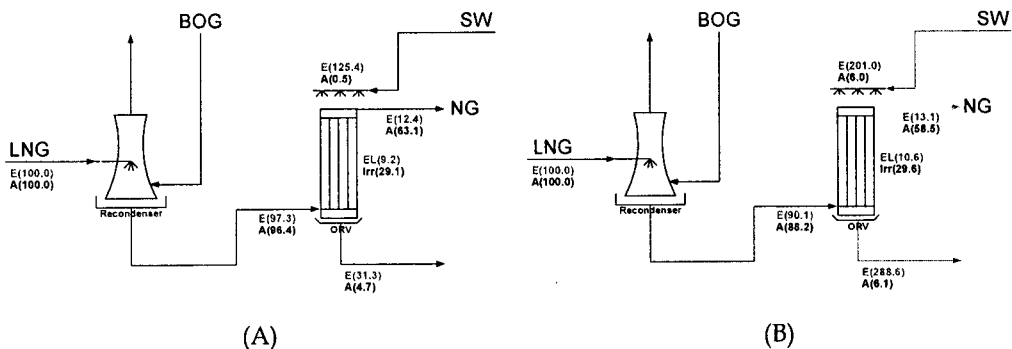


Figure 1. Energy & exergy flow diagram in LNG receiving terminal.  
(A) Winter season, (B) Spring, summer, and fall seasons

냉열 엑서지는 해수식 기화기의 비가역성에 의해 약 30%가 파괴되고 있지만 본 기화기는 해수를 공급하는 펌프의 운전비용만으로 가동되기 때문에 저가로 NG를 공급할 수 있는 최상의 LNG 기화시스템이다. 그리고 냉열 엑서지의 나머지 약 60%는 NG를 수요처까지 보내는 수송에너지 등에 사용하고 있는 것이다.

Table 1은 생산기지 내에서 LNG 1톤당 냉열이용 가능량을 보여 주고 있다. 이용가능량이 BOG 처리량과 LNG 송출량에 의해 크게 영향을 받지만, 본 결과는 동절기의 사상태와 춘추하절기의 사상태가 각각 Normal state(0.0℃, 1.0 atm)와 Standard state(25.0℃, 1.0 atm)를 적용했기 때문에 사상태의 온도상승분 만큼 증가된 값으로 나타났다. 결과적으로 동절기나 춘추하절기에서 생산기지 내의 냉열이용 가능량은 LNG 1톤당 70 kW선으로 극히 제한적임을 판단할 수 있다.

Table 1. Cold energy and exergy available in an LNG receiving terminal (unit : kW)

구 분	동 절 기	춘추하절기	비 율 (%)	
			동절기	춘추하절기
냉열에너지 총량	222.0	236.5	100.0	100.0
냉열엑서지 총량	218.9	259.8	100.0	100.0
재액화기 소모에너지	6.0	23.4	2.7	9.9
재액화기 소모엑서지	7.9	30.7	3.6	11.8
해수 전달 에너지	188.5	182.1	84.9	77.0
해수 전달 엑서지	9.2	0.3	4.2	0.1
기화기내 비가역성	63.6	76.9	29.1	29.6
송출 에너지	27.5	31.0	12.4	13.1
송출 엑서지	138.1	152.0	63.1	58.5
<b>냉열이용 가능 엑서지량</b>	<b>72.9</b>	<b>77.2</b>	<b>33.3</b>	<b>29.7</b>

#### 4. 에너지 및 엑서지 분석

LNG를 이용한 냉열발전 설비의 프로세스는<sup>(2)</sup> Toshiba, Hitachi, Osaka, Linde 프로세스들이 알려져 있다. 본 연구는 네가지 프로세스들에 대한 에너지 및 엑서지 해석을 수행하였고 우리공사 생산기지에 적용했을 때 얻을 수 있는 냉열발전량을 기존 공정들과 비교 산출하였다.

Figure 2는 냉열발전 프로세스들을 보여 주고 있다. Toshiba 프로세스는 2단 터빈을 사용해서 발전을 하며 LNG는 저압열교환기와 고압열교환기에서 R-23 작동유체에 냉열을 주고 최종적으로 해수식 열교환기를 통과한다. Hitachi 프로세스는 1단 터빈을 사용하며 LNG는 저압열교환기에서 냉열을 R-13B1 작동유체 냉열을 전달한다. Osaka 프로세스는 저압측 및 고압측 열교환기에서 냉열을 작동유체인 프로판에 공급한다. 특히, Osaka 프로세스는 Tri-EX형의 열교환기를 고압측에 적용하고 있다. 다른 프로세스에서는 Open Rack형의 열교환기를 사용하고 있다. Linde 프로세스는 실용화 사례가 없으며, 현재 프로세스 자체의 개발된 공정을 가지고 분석을 수행했으며, 2대의 터빈을 사용하며, 1대는 프로판으로 전력을 발생하고 다른 1대는 송출되는 천연가스 일부를 회수하여 전력을 발생시킨다. Linde 프로세스는 가장 복잡한 프로세스를 가지고 있고 냉열활용 차원에서는 비교적 유리한 결과를 얻었다.

냉열발전 프로세스들의 에너지 및 엑서지 분석 결과는 Table 2에 보여 주고 있다. 엑서지 이용율과 엑서지 효율을 고려할 때, Linde 프로세스가 가장 유리하나 초기투자비와 실용화 사례가 없는 연구단계의 공정으로 확인할 수 없는 어려움이 있다. 그 외의 프로세스 중

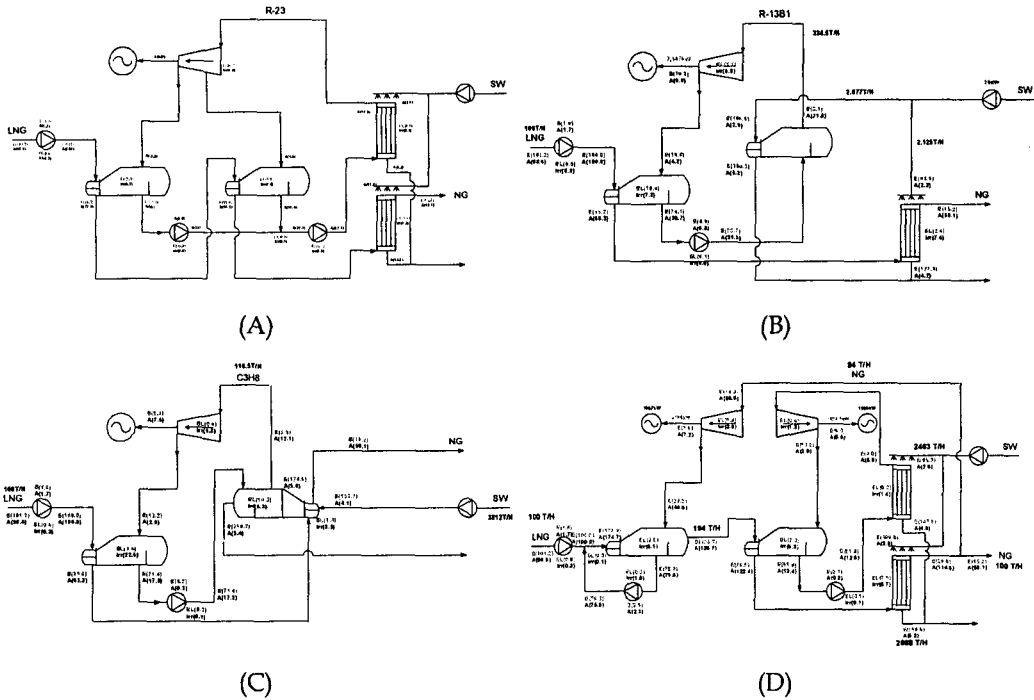


Figure 2. Cold power generation processes utilizing LNG  
 (A) Toshiba process, (B) Hitachi process, (C) Osaka process, (D) Linde process

에서는 Osaka 프로세스가 엑서지 이용률 36.7%로 가장 높고 발전량도 LNG 1톤당 17.6 kW로 가장 높은 것으로 나타났다. Toshiba 프로세스는 2단 터빈을 사용하기 때문에 엑서지 이용률은 31.9%로 낮지만 엑서지 효율은 19.2%로 비교적 우위에 있는 것으로 나타났다.

KOGAS는 앞서 분석된 생산기지 내에서의 LNG 냉열이용 가능 엑서지량으로부터 발전량을 예측해 본 결과 LNG 1톤당 14.8 kW 정도인 것으로 나타났다. 이것은 Osaka 프로세스에서 얻을 수 있는 발전량의 84%인 것으로 판명되었다. 결론적으로 KOGAS 생산기지에서의 LNG를 이용하여 냉열을 발전하는 데 필요한 냉열은 기존 프로세스 비해 93.9%의 냉열에너지와 84.3%의 냉열 엑서지를 가지고 있다. 이것은 냉열발전으로부터 얻을 수 있는 수익이 감소한다는 것을 의미하며 경제성 분석을 통해 그 차이를 분명히 할 필요가 있다.

Table 2. Comparisons on LNG cold power generation processes (unit : kW)

구 분	KOGAS*	Toshiba	Hitachi	Osaka	Linde
에너지 총량	222.0	236.5	236.5	236.5	236.5
엑서지 총량	218.9	259.8	259.8	259.8	259.8
에너지 이용량	135.5	106.4	105.9	144.3	145.3
엑서지 이용량	80.3	82.8	82.4	95.3	95.8
발전량	14.8	15.9	14.5	17.6	29.5
에너지 효율	10.9	14.9	13.7	12.2	20.3
엑서지 효율 (%)	18.4	19.2	17.6	18.5	30.8
엑서지 이용률	36.7	31.9	31.7	36.7	36.9

\*KOGAS는 LNG 냉열이용 가능 엑서지량을 가지고 예측한 결과

### 5. 경제성 분석

LNG를 이용한 냉열발전의 경제성 분석은 Osaka 프로세스와 Linde 프로세스에 대하여 분석을 수행하였다. 기존 KOPEC 보고서의 경제성 분석결과와 현 시점에서 KOGAS 생산기지 내에서 활용 가능한 냉열을 가지고 Osaka 프로세스 및 Linde 프로세스로 적용하였을 때의 결과를 비교 검토하였다.

Figure 3은 Osaka 프로세스와 Linde 프로세스에 관한 설비의 수명기간동안 IRR과 NPV를 보여 주고 있다. KOPEC 보고서에 의하면 Osaka 및 Linde 프로세스의 IRR과 NPV는 8.75%, 24.41% 및  $\Delta 0.50$ 백만원,  $\Delta 0.52$ 백만원이며 ROR은 각 11.7년, 4.2년으로 보고된 바 있다. 이것은 냉열발전 프로세스 자체만을 보고 분석을 수행했기 때문에 발생한 것으로 BOG 처리에 사용되고 남은 냉열을 가지고 분석하면, Osaka 및 Linde 프로세스의 IRR, NPV, ROR은 Table 3에서 보는 바와 같이 2.64%, 2.70%, 1.69백만원,  $\Delta 4.39$ 백만원, 18.6년, 17.5년으로 나타났다. KOPEC 보고서와 KOGAS 연구결과의 큰 차이가 발생하는 것은 Osaka 프로세

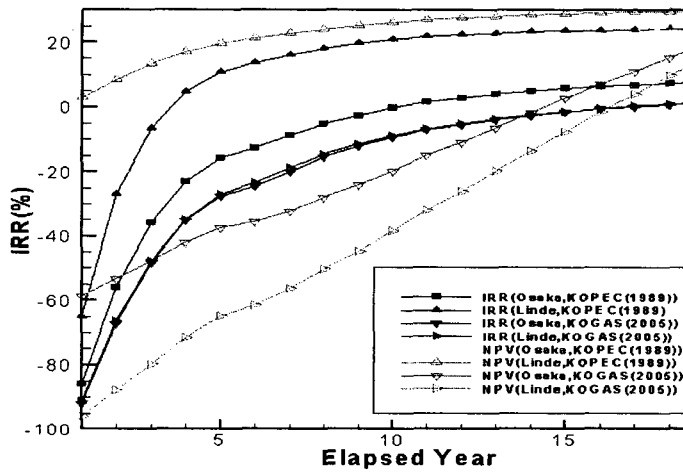


Figure 3. IRR and NPV on Osaka and Linde processes

스나 Linde 프로세스를 적용할 때 KOGAS의 냉열이 BOG를 처리하는 데 사용되는 것을 고려하지 않았기 때문이며, 해수식 기화기의 대체편익을 과잉계산함으로써 수익률이 상승된 것으로 판명되었다.

결론적으로 냉열발전을 KOGAS 생산기지에 적용하는 것은 내부수익률, 순현재가, 투자비회수를 측면에서 낮은 경제성을 보여 주고 있기 때문에 투자 가치가 존재하지 않는다. 객관적으로 한전에서 수전하는 전력단가보다 냉열발전에 의해서 발전한 전력단가는 40% 이상 상승하는 것으로 나타났다. KOPEC 보고서에서 냉열발전단가는 Osaka 프로세스가 수전단가보다 10% 낮았고 Linde 프로세스에서는 60% 낮게 나타났다.

Table 3. IRR, NPV, and ROR on Osaka and Linde processes

구 분		KOGAS (2005)		KOPEC (1989)	
		Osaka process	Linde process	Osaka process	Linde process
IRR	(%)	2.64	2.70	8.57	24.41
NPV	(MM₩)	1.69	$\Delta 4.39$	$\Delta 0.50$	$\Delta 0.52$
ROR	(Year)	18.6	17.5	11.7	4.2

## 6. 결 론

본 연구는 KOGAS 생산기지의 LNG 냉열이용 가능량을 토대로 기존 냉열발전 프로세스에 적용하여 얻을 수 있는 엑서지량과 수익률을 비교 분석하였다. 특히, 1989년 KOPEC 보고서에 발표된 연구결과와 비교분석 함으로서 본 연구결과의 신뢰도를 높일 수 있었다.

현재 KOGAS 생산기지에 이용 가능한 냉열엑서지량은 LNG 1톤당 70 kW 선이고 엑서지 이용율은 36%이며 냉열발전 프로세스에서 엑서지 효율은 18%로 나타났다. 또한 냉열발전을 위해 Osaka 프로세스나 Linde 프로세스에 적용할 시 내부수익률은 2% 선으로 나타났으며, 투자비 회수기간도 약 17년 정도로 경제성이 매우 낮은 것으로 판명되었다.

결과적으로 KOGAS 생산기지에 냉열발전 설비를 설립하여 운영하는 것은 손실을 가중시키며, 부대설비의 증가로 천연가스의 안정적 공급에 문제를 발생시킬 수 있는 소지가 있다. 현재 해수식 기화기로 LNG를 기화시켜 수요처에 공급하는 단순한 시스템에서 천연가스 공급라인에 부대설비의 증가는 바로 설비의 트러블 빈도를 높이기 때문에 많은 어려움이 발생될 것으로 사료된다.

## 7. 참고문헌

1. Moran, M.J. and Shapiro, H.N., Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 3rd ed., John Wiley & Sons, (1995)
2. KOPEC, "냉열발전 타당성 조사", (1989)