

LNG-FPSO(Liquefied Natural Gas-Floating Production Storage and Offloading)용 질소 팽창 사이클의 효율 개선에 대한 연구

백 승 환[†], 정 상 권, 김 선 영
KAIST 기계공학과

Investigation on Efficiency Improvement of the Nitrogen Expander Cycle : Natural Gas Liquefaction Process for LNG-FPSO

Seungwhan Baek[†], Sangkwon Jeong, Sunyoung Kim
Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received December 11, 2009; revision received April 20, 2010)

ABSTRACT: FPSO (Floating Production Storage and Offloading) method for LNG industry is efficient and facile compared to onshore NG (Natural Gas) treatment facility. Five simple natural gas liquefaction cycles for FPSO are presented and simulated in this paper. SMR (Single Mixed Refrigerant) cycle, SNE (Single Nitrogen Expander) cycle, DNE (Double Nitrogen Expander) cycle, PNE (Precooled Nitrogen Expander) cycle, and PDNE (Precooled Double Nitrogen Expander) cycle are compared. Simple analysis results in this paper show that precooling process and adding an expander in the liquefaction cycle is an effective way to increase liquefaction efficiency.

Key words: FPSO, LNG(액화 천연가스), Liquefaction(액화), Nitrogen(질소), Expander(팽창기)

기 호 설 명

- m : mass flow [kg/h]
- w : Work input for LNG per mass flow [kWh/kg]
- W : Work input for LNG [kW]

1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas)는 액체 상태의 천연 가스를 일컫는 말로, $-155^{\circ}\text{C} \sim -165^{\circ}\text{C}$ ($118\text{ K} \sim 108\text{ K}$) 범위에서 액화가 된다.⁽¹⁾ 세계 여러 곳에서 생산되고 있는 천연가스(Natural gas)는 산지마다 조성이

다양하지만 메탄(CH_4)이 주성분이다. 이러한 LNG는 천연가스를 액화함으로써 기체상태의 천연가스에 비해 에너지 밀도가 높고, 운송이나 저장에 용이하다.

에너지의 수요가 급증함에 따라 세계적으로 LNG의 수요가 점차 증가하는 추세인데, 한국의 경우에는 에너지 생산에서 LNG가 담당하는 비중이 2005년 26%에 불과하였던 것이 점차 증가하여 2015년에는 50%를 초과할 전망이다.⁽²⁾ 또한 향후 천연가스 수요가 크게 증가할 가능성이 높은 가운데, 2008년 이후부터 중장단기 계약이 만료되어 공급 부족이 예상되기 때문에 적기에 물량을 확보해야 할 필요성이 대두되고 있다.

천연가스는 전 세계적으로 확인된 매장량의 20% 정도가 해상에 매장되어 있으며 최근에는 해양 가스전 개발의 경제성이 재평가 되어 해상에서 LNG를 생산하고 저장, 수송하는 새로운 개발 시스템이 요구되고 있다.

FPSO(Floating Production Storage and Offloading)은 해상 천연 가스전 근처에 위치하여 생산되

[†] Corresponding author
Tel.: +82-42-350-3079 fax: +82-42-350-8207
E-mail address: s.baek@kaist.ac.kr

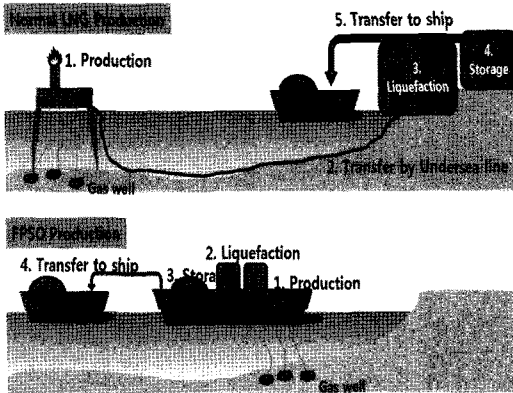


Fig. 1 FPSO LNG production.

는 가스를 처리하여 LNG로 액화하는 시설과 저장하는 탱크, 그리고 하역하는 설비를 탑재한 해상 구조물로 LNG의 생산, 처리, 보관 등이 가능하며, 필요에 따라 이동할 수 있다(Fig. 1).⁽³⁾ 따라서 해상에서 생산한 LNG를 육지까지 운반할 필요 없이, 직접 수출할 수 있기 때문에 비용절감의 효과가 크다.

국외에서는 FPSO를 위한 액화 공정에 대한 논의가 많지만^(4,6) 국내에서는 아직 미비하다. 본 논문에서는 FPSO를 위한 액화 공정의 효율 증가 방법에 대해 논의해 보고자 한다.

2. FPSO를 위한 천연가스 액화 공정

FPSO를 위한 천연가스 액화공정은 다음과 같은 조건을 만족해야 할 것이다.⁽⁷⁾

- 가벼운 무게
- 집적화
- 안정성
- 여러 가스전에서의 액화 공정 운용

현재 높은 효율을 보이며 가장 많이 사용되고 있는 육상에서의 혼합냉매(MR : Mixed Refrigerant) 액화공정을 그대로 FPSO에 적용하기에는 다소 무리가 있다. 육상의 액화 공정은 천연가스 생산지의 가스 조성에 따라 최적화 되어 있는 특성이 있지만 FPSO에 적용하기 위해서는 아래와 같은 문제점도 동시에 존재한다.

MR(Mixed Refrigerant : 혼합냉매)를 보관하고 운전하기 위해서는 가스 저장공간의 확보, 상당한 크기의 열교환기, 혼합냉매의 화재 가능성, 배의 움직임에 대한 운전 확인 등 여러 가지 어려움이 존재한다.

FPSO를 위한 액화 공정으로 가장 먼저, 그리고

Table 1 LNG power input for different cycles

Cycles	LNG power input (kW-h/kg)
Mixed refrigerant (C3/MR)	0.28~0.31
Single Expander cycle	0.60~0.84
Double Expander cycle	0.48~0.60
Cascade Cycle	0.31~0.33

많이 고려되는 것이 질소 팽창 공정이며, 이 공정은 다음과 같은 특성이 있다.

질소 팽창 공정은 질소 가스를 냉매로 사용하기 때문에, 액체 냉매 저장 시설이 불필요하며, 액화 시설이 집적화되고 가벼워진다. 질소 냉매는 인화 가능성이 없어 시설의 간격사이를 줄일 수 있으며 시설 배치에 유리해진다. 또한 질소 팽창 공정의 가장 큰 장점은 운전이 용이하다는 것이다.⁽⁷⁾ 하지만 육상의 액화 공정, C3/MR, Cascade 등과 같이 혼합냉매 사이클에 비하여 액화 효율이 낮다는 것이 단점으로 지적되고 있다(Table 1).

이미 여러 방향으로 질소 팽창 공정의 효율증가 방법에 대한 논의가 되고 있는데, 본 논문에서는 구체적으로 그 방법들에 대해 고찰해 보고자 한다.

3. 공정 모사

본 논문에서의 공정 모사는 Aspen HYSYS V7.1을 사용하였으며, Peng-Robinson 상태방정식을 적용하였다. 작동 압력, 유량 분배 등에 대한 최적화 과정은 Aspen HYSYS 내의 최적화 도구인 Hyprotech SQP를 사용하였다. 공정에 사용되는 열교환기나 압축기, 팽창기의 설정은 Table 2에서 확인할 수 있다.⁽⁹⁾

FPSO에서 처리되는 천연가스는 1 MTPA(million tons per annum = 2739 ton/day)⁽⁸⁾으로 가정하였으며 그에 맞는 냉매 양을 설정하였다.

천연가스의 조성은 전처리가 된 천연가스의 조성(Table 3)에서 액화가 순수 메탄보다 어려운 상태인 C₁:C₂:C₃:N₂=85:7:3:5(mol%)로 정하였다.⁽⁹⁾

본 논문에서는 액화 공정의 성능 평가 지표를 식(1)과 같이 설정하였다.

$$w = \frac{W_{\text{input}}}{m_{\text{LNG flow}}} \quad (1)$$

Table 2 Design specifications

Component	Value
Compressor adiabatic efficiency	80%
Turbine adiabatic efficiency	80%
Heat Exchanger minimum temperature approach	1K
Compressor suction pressure	5bar
Natural gas feed pressure	60bar

Table 3 Natural gas composition

Component	Mol %
N ₂ (Nitrogen)	0~1
C ₁ (Methane)	84~96
C ₂ (Ethane)	2~11
C ₃ (Propane)	0.35~3.21
iC ₄ (i-Butane)	0~0.7
nC ₄ (n-Butane)	0~1.3
iC ₅ (i-Pentane)	0~0.02
nC ₅ (n-Pentane)	0~0.04

이는 생산된 LNG kg 당 소요 에너지를 나타낸다. 액화공정에 들어가는 일은, 식(2)와 같이 정의되었다

$$W_{input} = W_{comp} - W_{turbine} \quad (2)$$

압축기 또는 팽창기에서의 일은 각 부품의 입, 출 구에서 냉매의 유량과 온도에 의해서 정의된다.⁽¹⁰⁾

3.1 SMR(Single Mixed Refrigerant)

혼합냉매를 사용하는 공정은 해상에 적용될 경우 단점이 더 부각되기 때문에, FPSO에 적용 가능성이 낮다고 앞서 서술했었지만, 그 중에서도 SMR 공정은 혼합냉매를 사용하면서 기액 분리기 (phase separator)를 사용하지 않고 공정의 단순함과 높은 효율의 장점으로 인하여 FPSO를 위한 액화공정으로 적용될 가능성⁽¹¹⁾이 큰 공정이다(Fig. 2). SMR 공정에서의 혼합 냉매의 조성은 공정을 개발한 회사, 가스전의 지역에 따라 상이하다(Table 4).⁽¹²⁾ 본 논문에서 고려하는 SMR 공정은 혼합냉매(MR : Mixed Refrigerant)를 사용함으로써 액화 효율을 높인 공정이다. 단순 SMR 공정은 하나의 열교환기, 압축기, 냉매의 후냉각기(Aftercooler), JT 밸브로 이루어

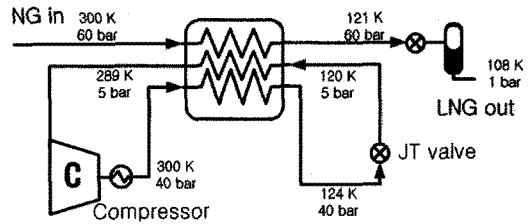


Fig. 2 SMR(Single Mixed Refrigerant) process.

Table 4 Mixed refrigerant composition for SMR

Component	Mol %
N ₂ (Nitrogen)	0~12
CH ₄ (Methane)	20~36
C ₂ (Ethane)	20~40
C ₃ (Propane)	2~12
C ₄ (Butane)	6~24
C ₅ (Pentane)	2~14

어져 있다. 본 논문에서 계산을 위하여 고려한 냉매 조성은 C₁ : C₂ : C₃ : nC₄ : iC₅ : N₂ = 28.4 : 30.7 : 14 : 5.7 : 9.5 : 11.6(mol %)며 작동압력은 40 bar이다.⁽¹³⁾

3.2 SNE(Single Nitrogen Expander)

SNE 공정은 역브레이튼(reverse-Brayton) 사이클로서, 압축기와 팽창기가 한 공정 안에 있으며 팽창기를 이용하여 냉매의 압력강하와 온도 강하가 동시에 일어난다. 온도가 낮아진 냉매를 이용하여 천연가스가 냉각 및 액화되며, 팽창기에서는 압력강하로 얻어진 에너지를 회수 할 수 있다(Fig. 3).

냉매의 조성은 질소 단일 유체를 사용하기도 하며, 질소와 메탄의 혼합 유체를 사용하기도 한다.⁽¹²⁾ 본 논문에서는 질소 단일 유체를 사용하는 공정에 대한 해석을 수행하였다.

3.3 PNE(Precooled Nitrogen Expander)

Fig. 4 는 PNE 공정을 나타낸 것으로서 첫 번째 단에서 두 가지 공정의 냉매가 첫 번째 열교환기를 지나며 천연가스를 냉각하는 공정을 나타내었다. 후에 질소 냉매는 더욱 냉각이 되어, 팽창기를 지나 낮은 온도를 생성하여 천연가스를 액화시키는 과정이 포함되어 있다.

예냉(precooling) 과정에서의 냉매 조성은 탄화수

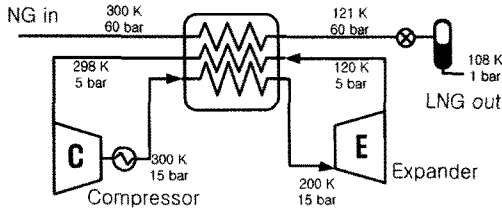


Fig. 3 SNE(Single Nitrogen Expander) process.

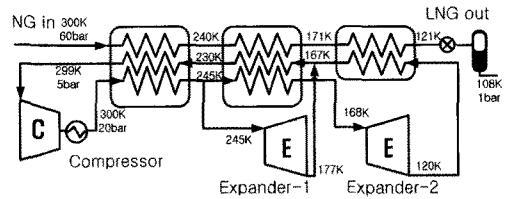


Fig. 5 DNE(Double Nitrogen Expander) process.

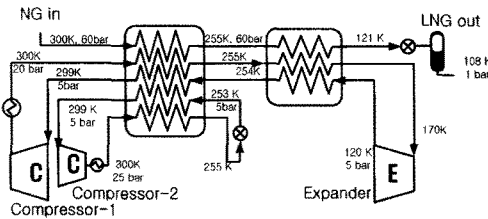


Fig. 4 PNE(Precooled Nitrogen Expander) process.

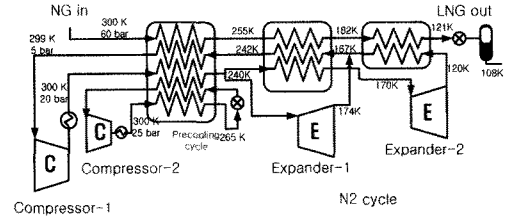


Fig. 6 PDNE(Precooled Double Nitrogen Expander) process.

소 계열의 혼합냉매를 사용하며, 예냉 온도에 따라 상이하다. 대부분의 문헌에서의 예냉온도는 250 K 부근이며 프로판(C₃)을 주로 사용하며 경우에 따라 에탄(C₂), 부탄(C₄)을 함께 사용하며, 예냉 온도를 250 K 이하로 낮추는 경우에는 소량의 메탄(C₁)을 섞어 사용하기도 한다. PNE 공정의 혼합냉매 조성은 C₂ : C₃ : C₄ = 31 : 36 : 33(mol%)이다.⁽¹²⁾

3.4 DNE(Double Nitrogen Expander)

본 공정은 고전적인 단일 유체 냉매 공정인 클로드(Claude) 공정의 일부를 SNE 공정과 더한 것이다. Fig. 5 에서 보듯이 공정 중간의 질소 냉매 일부를 첫 번째 팽창기를 통하여 압력 및 온도를 강하하고, 남은 질소 냉매는 두 번째 팽창기를 통하여 압력 및 온도강하를 한다. 한 공정 안에 두 개의 팽창기를 가지고 있으며 질소 냉매가 첫 번째 열교환기를 통과하고 난 후 62%의 유량은 두 번째 팽창기로 향하고 나머지는 세 번째 열교환기에서 나오는 차가운 냉매와 만나게 된다.

3.5 PDNE(Precooled Double Nitrogen Expander)

일반적으로 예냉 과정과 팽창기의 동시 사용은 전체 액화 공정의 효율을 증가시킨다고 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 따라서 본 논문에서 고려하는 PDNE 공정은, 예냉공정을 사용하는 PNE 공정과 두 개의 팽창기를 사용하는 DNE 공정을 혼합시킨 것으로서, 첫 번

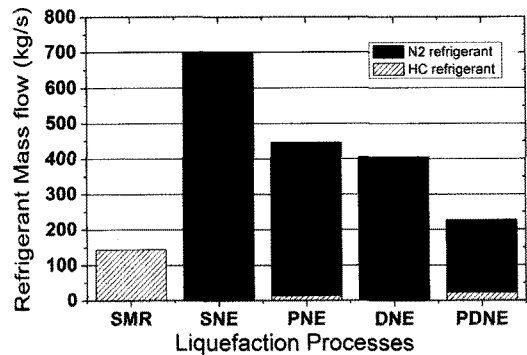


Fig. 7 Refrigerant mass flow for different liquefaction processes.

째 열교환기에서 예냉 공정을 통해 질소 냉매 및 천연가스가 동시에 냉각되는 공정을 나타내었다. (Fig. 6) 예냉 공정의 냉매는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄의 혼합물 (10 : 40 : 40 : 10 mol%)을 사용하였고, 질소 팽창공정의 냉매는 질소 단일 유체를 사용하였다.

4. 액화 공정 결과 분석

각각의 공정 결과는 앞 절의 그림에 나타내었다 (Fig. 2~Fig. 6). SMR, SNE, PNE, DNE 그리고 PDNE 공정은 모두 NG를 121 K, 60 bar 상태로 냉각시켰으며, 이를 1 bar로 팽창시켜 108 K의 LNG 상태가 되도록 모사하였다.⁽⁶⁾

공정에 필요한 냉매의 질량 유량은 Fig. 7에 나타

내었다. 질소 팽창 공정에 필요한 질소의 유량은 SMR에 비해 많은 것을 확인하였고, 이는 생산 LNG kg 당 들어가는 일이 SMR에 비해 크다는 것을 알 수 있으며, 장치의 크기도 커질 수 있다.

하지만, 기존 질소 팽창 공정에다 혼합 냉매를 통한 예냉 과정을 더함으로써(PNE, PDNE 공정), 압축기에 들어가는 일은 물론, 총 필요한 냉매의 유량도 감소가 되었다.

팽창기에서 회수되는 에너지는 질소 냉매 유량의

감소와 크게 관계는 없었지만, 질소 냉매 유량의 감소는 압축기에 필요한 에너지를 감소시킬 수 있었다(Fig. 8, Fig. 9).

Fig. 10에서 보는 바와 같이 SMR에서의 열교환기의 온도는 고온 측과 저온 측이 차이가 작다. 하지만, SNE에서는 크게 벌어져 있는 것을 볼 수 있다. 이는 냉매의 열용량과 천연가스의 열용량의 차이 때문에 나타나며, 이러한 현상이 전체 액화 공정의 엔트로피 생성을 증가시키고 액화 효율을 감소시키는 주요인이다. 예냉 공정을 더한 PNE에서는,

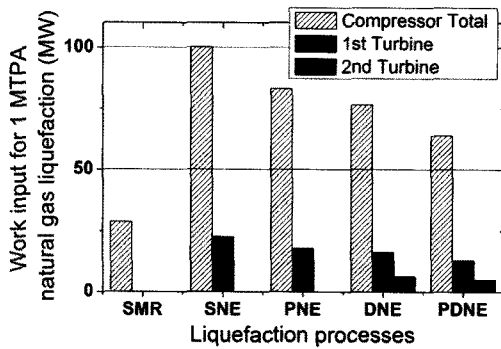


Fig. 8 Compressor and turbine work for different liquefaction processes.

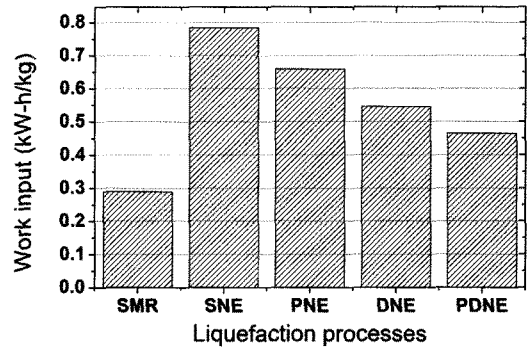


Fig. 9 Work input for 1 kg/h LNG production.

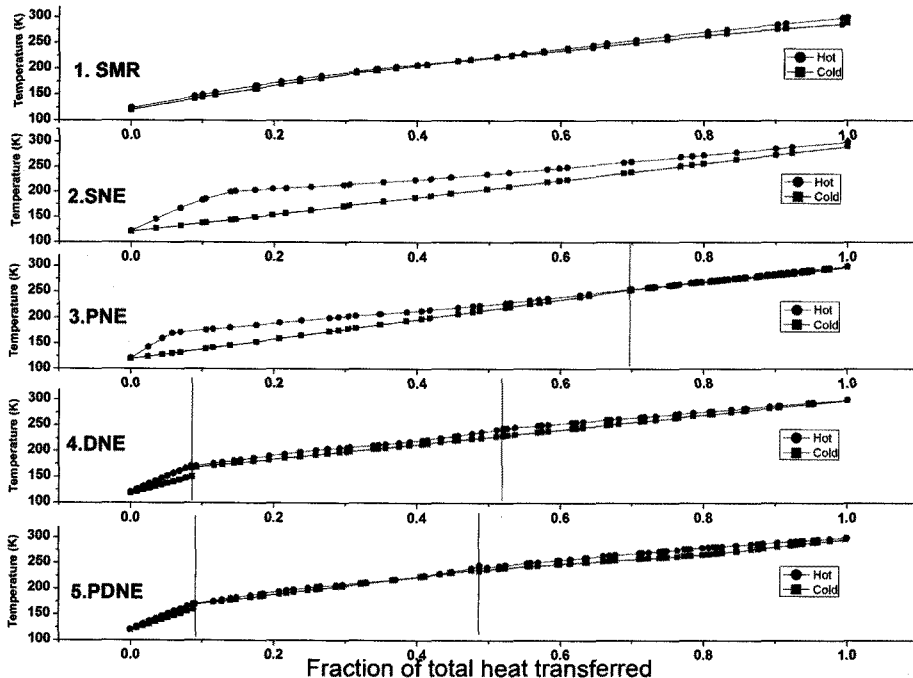


Fig. 10 Temperature profiles of hot fluid and cold fluid streams in heat exchangers of (1) SMR, (2) SNE, (3) PNE, (4) DNE, and (5) PDNE.

열교환기 전단부의 온도 차이는 줄어들지만 후단부의 온도 차이가 SNE와 마찬가지로 벌어져 있음을 확인할 수 있다. DNE와 PDNE 공정에서는 열교환기 후단부에서의 고온측과 저온측의 온도차이를 줄임으로서 SMR의 열교환기 특성과 비슷한 형상을 나타내었다. 이로 인하여 열교환기에서의 열용량 mismatch이 전체 DNE와 PDNE의 효율향상을 이끌어 내었음을 유추 할 수 있다(Fig. 9).

5. 결 론

LNG FPSO는 육상의 LNG 액화 공정을 해상으로 옮겨, 비용 절감과 시간절약의 큰 장점을 가지고 있다. 하지만 육상의 혼합냉매를 이용한 LNG 액화 공정은 넓이와 무게의 단점 때문에 운전이 용이한 질소 팽창 공정이 각광받고 있다. 질소 팽창 공정은 팽창기를 이용하여 에너지를 회수할 수 있는 장점이 있지만 혼합 냉매 액화 공정에 비해 들어가는 에너지가 많다는 단점이 있다.

이를 극복하기 위해 질소 팽창 공정에 단순한 혼합냉매를 이용한 예냉 과정을 더한 PNE(Precooled Nitrogen Expander) 공정 외에 두 개의 팽창기를 동시에 사용하는 DNE(Double Nitrogen Expander) 공정과 예냉공정과 두 개의 팽창기를 사용하는 PDNE(Precooled Double Nitrogen Expander) 공정에 대한 공정 모사를 진행하였다.

예냉 과정이 포함되고, 팽창기의 수가 늘어난 질소 팽창 공정은 비록 SMR 공정 보다 열역학적 효율은 낮더라도, 기존의 단순 질소 팽창 공정에 비하여 압축기의 일이 현저하게 감소되었으며, 열교환기의 고온과 저온의 온도 차이가 감소되었음을 확인하였다. 이로 인하여 액화 공정 효율을 높일 수 있다는 가능성을 고찰하였다. 본 논문에서는 이러한 다양한 액화 사이클에 대하여, 동일한 요구조건을 만족 시키도록 공정 모사 계산을 하여 정량적인 결과를 서로 비교하였다. 추후의 연구에는 열교환기의 압력강하가 고려되며, 그 크기가 고려되는 최적화 작업이 뒤따라야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-20062-0).

참고문헌

1. Waldmann, and Inga Bettina., 2008, Evaluation of process systems for floating LNG Production Units. Tekna Conference, p. 18.
2. Allison Ball, 2003, LNG in Korea, Australian Government Department of Industry, Tourism and Resources.
3. Hyochul Kim, 2006. Ship of Korea, Jisungsa, Seoul.
4. Remelje, C. W. and Hoadley, A. F. A., 2006, An exergy analysis of small-scale liquefied natural gas(LNG) liquefaction processes, Energy, Vol. 31, pp. 2005-2019.
5. Barclay, M. and Shukri T., 2007, Enhanced single mixed refrigerant process for stranded gas liquefaction, LNG15.
6. Barclay, M. A., 2006, Offshore LNG : The perfect starting point for the 2-phase expander?, Offshore Technology conference.
7. Michael Barclay and Noel Denton, 2005, Selecting offshore LNG processes, LNG journal, pp. 34-36.
8. David Wood, Oct. 2008, Energy tribune.
9. Kidnay, and Parrish, 2006, Fundamentals of natural gas processing, Taylor and Francis, Florida, pp. 265-314.
10. Aspen Technology, 2009, Aspen HYSYS User manual.
11. Chen-Hwa Chiu, 2006, Commercial and technical considerations in the developments of offshore liquefaction plant, 23rd World Gas Conference.
12. Venkatarathnam, G., 2009, Cryogenic mixed refrigerant processes, pp. 149-220.
13. James Bernard Maher, Method and apparatus for liquefying gases, US Patent, 3914949.
14. Shell, 1962, Improvements in or relating to process and apparatus for liquefying natural gas. G. B. Patent 895094.
15. Dubar, C. A. T. and Tu, O. L. M. 2001, Liquefaction apparatus, US Patent 6250244.
16. Jorge H. F., 2002, LNG production using dual independent expander refrigeration cycles, US Patent 6412302.