

LNG FPSO에 적용가능한 신액화 사이클의 효율 및 엑서지 분석

윤정인¹ · 손창효[†] · 백승문² · 곽진우³ · 심규진⁴

(원고접수일 : 2012년 4월 17일, 원고수정일 : 2012년 5월 10일, 심사완료일 : 2012년 5월 21일)

Efficiency and Exergy Analysis of New Liquefaction Cycles Applied for LNG FPSO

Jung-In Yoon¹ · Chang-Hyo Son[†] · Seung-Moon Baek² · Jin-Woo Kwag³ · Gyu-Jin Shim⁴

요약 : 본 논문에서는 CO₂-C₂H₆-N₂와 CO₂-N₂를 각각 적용한 캐스케이드 액화사이클을 새롭게 제안하고, HYSYS를 이용하여 이에 대한 성능 및 엑서지를 분석한 후, 이 사이클이 LNG-FPSO선에 적용가능 여부를 확인하였다. 그 분석 결과로부터, 효율적인 측면에서는 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클이 우수하였고, 엑서지 손실측면에서는 장치 수가 적은 CO₂-N₂ 액화사이클이 오히려 높게 나왔다. 그리고 CO₂-N₂ 냉매용 액화사이클은 기존의 C₃H₈-C₂H₄-C₁H₄ 보다 낮은 효율과 높은 압축일량을 보였다. 하지만, N₂ 사이클의 효율이 더 개선된다면 액화사이클의 구조가 간단하기 때문에 LNG-FPSO용 액화사이클로서 적합할 것으로 생각된다.

주제어 : LNG-FPSO선, 엑서지, 압축일량, 액화냉동사이클, 캐스케이드냉동사이클

Abstract: This paper presents the new cascade liquefaction cycles using CO₂-C₂H₆-N₂ and CO₂-N₂. The performance and exergy of cascade liquefaction cycles are analyzed using HYSYS software and then confirmed the possibility of these cycles for LNG-FPSO ship. From the comparison of performance and exergy loss of these cycles, the cascade liquefaction cycles using CO₂-C₂H₆-N₂ showed higher performance and the cycle using CO₂-N₂ presented higher exergy loss. The cascade liquefaction cycle using CO₂-N₂ is lower efficiency and higher compressor work compared to the optimized cascade liquefaction cycle using C₃H₈-C₂H₄-C₁H₄. But, if the efficiency of N₂ cycle in these liquefaction cycles is improved, it is possible to apply the cascade liquefaction cycle using CO₂-C₂H₆-N₂ and CO₂-N₂ to LNG-FPSO ship due to the simple composition device of these cycles.

Key words: LNG-FPSO ship, Exergy, Compressor work, Liquefaction process of natural gas, Cascade refrigeration cycle

1. 서론

국제적인 고유가 현상과 지구 온난화에 대한 환경규제 강화 등으로 인해 대체에너지원인 천연가스에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 석유 생산의 90%이상을 차지하는 중동지역의 분쟁으로 인해 향후 천연가스의 사용 및 생산 비중은 계속해서

증가될 것으로 예상된다. 지금까지 가스전에서 채굴한 천연가스를 육상에 있는 목적지까지 이송하는데 사용되는 방식에는 크게 3가지가 있다. 즉, 배관을 통해 가스상태의 천연가스를 이송하는 PNG(Pipeline Natural Gas) 방식, 생산지에서 천연가스를 액화시켜 액체상태로 선박을 이용하여 이

[†] 교신저자(부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-621-6802)

1 부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

2 부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: hottock77@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

3 (주)LG전자HA냉장고사업부연구기획, E-mail: boisvent@naver.com, Tel: 010-4590-6432

4 The University of Oklahoma. USA, E-mail: gyujinshim@ou.edu, Tel: 010-9339-8512

송하는 LNG(Liquefied Natural Gas)방식, 그리고 가스전에서 천연가스 하이드레이트(Hydrate)를 이용하는 GTL(Gas-To-Liquid)방식이 있다[1]. 또한 이들 방식은 가스전이 육상 혹은 해상에 있느냐에 따라서 달라지게 된다. 즉, 가스전이 육상에 있는 경우에는 천연가스를 채굴해서 액화사이클로 -160℃정도까지 액화시켜 저장탱크에 저장하면 된다. 그러나 해상에 있는 경우에는 액화사이클과 저장탱크가 탑재되어 있는 LNG-FPSO(Floating Production Storage Offloading)선을 이용하여 -160℃까지 액화시켜 저장한 후, LNG 운반선을 이용하여 육상용 LNG 저장탱크로 이송하여 저장하게 된다. 최근 들어 LNG-FPSO선을 이용하여 해양에 있는 가스전에서부터 천연가스를 채굴하는 사례가 많이 증가하는 추세에 있다. 따라서 해양 가스전에서부터 천연가스를 채굴하기 위해서는 반드시 LNG-FPSO선이 필요하고, 무엇보다도 LNG-FPSO선에 적용가능한 액화사이클의 개발이 절실히 필요하다.

관련된 종래의 문헌[2-4] 중에서 Shukri[3] 등은 LNG-FPSO선에 적용하는 LNG 액화사이클은 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 논문은 대부분 육상에 적용되고 있는 LNG 액화사이클을 LNG-FPSO선에 적용하고자 한다. 그 중에서 대표적인 육상용 LNG 액화사이클에는 MR(Mixture Refrigerant) 액화사이클이 가장 많이 적용되고 있다. 하지만, MR 사이

클의 경우 운전 중 냉매 누설이 발생하면, 냉매 조성비가 변하여 성능이 급격히 감소할 뿐만 아니라, 최적의 운전조건을 실현하는 것이 대단히 어렵다. 반면에 캐스케이드 액화사이클은 단일 냉매를 사용하기 때문에 누설시 조성비 변화에 따른 효율저하가 적고, 유지관리가 MR 사이클에 비해 용이한 장점이 있다. 그러므로 해양용 가스전의 개발에 필요한 LNG-FPSO선에 적용 가능한 액화사이클은 육상용에 비해 액화사이클이 간단하고, 유지관리 비용이 저렴하며, 파도와 같은 진동에 대한 내구성을 가질 수 있어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 Optimized 캐스케이드 액화사이클을 기본으로 하여, 지구환경에 무해한 천연냉매를 적용한 캐스케이드 액화사이클을 개발하고자 한다. 이를 위해 우선 CO₂-C₂H₆-N₂와 CO₂-N₂를 각각 적용한 캐스케이드 액화사이클을 새롭게 제안하고, HYSYS를 이용하여 이에 대한 성능 및 엑서지를 분석한 후, 이 사이클이 LNG-FPSO선에 적용 가능한 여부를 확인하고자 한다.

2. 액화사이클과 시뮬레이션 방법

2.1 캐스케이드 액화 사이클

천연가스 액화 사이클에는 여러 가지가 있지만 가장 대표적으로 사용되는 액화공정은 Phillips optimized cascade process가 있다. Figure 1은 본

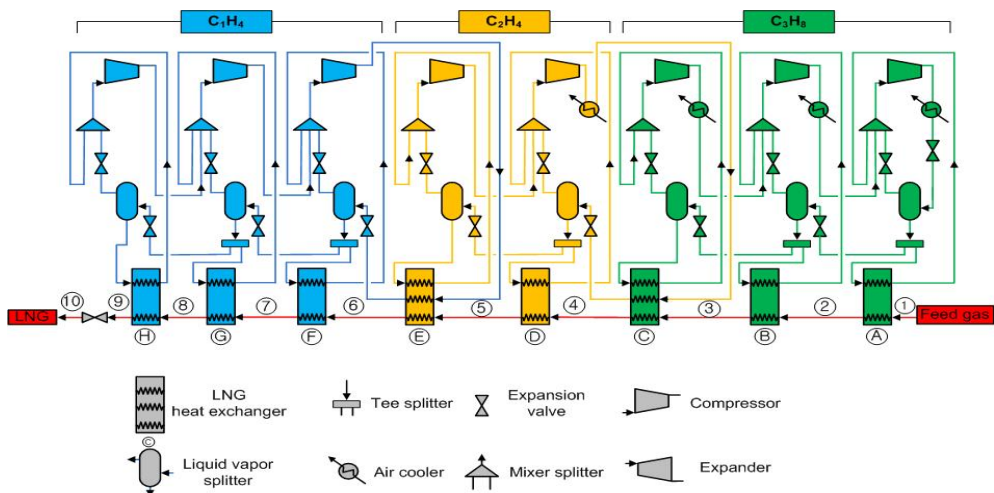


Figure 1: Detailed configuration of cryogenic cascade cycle using C₃H₈-C₂H₄-C₁H₄

논문에서 분석하고자 하는 $C_3H_8-C_2H_4-C_1H_4$ (Propane-Ethylene-Methane) 냉매용 캐스케이드 액화 사이클의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 3개의 독립적인 사이클인 프로판 사이클, 에틸렌 사이클, 메탄 사이클로 구성되어 있으며 LNG 열교환기 ①에서 ③까지는 프로판이, ④에서 ⑥까지는 에틸렌이, ⑦에서 ⑨까지는 메탄이 각각 냉매로써 작용하여 천연가스(Feed gas)를 액화시킨다.

동시에 3개의 독립된 사이클에서 프로판 사이클의 증발기는 에틸렌 사이클의 응축기 역할을 하며, 에틸렌 사이클의 증발기는 메탄 사이클의 응축기 역할도 한다. 천연가스인 피드가스(Feed Gas)는 8개의 LNG 열교환기를 거치면서 단계적으로 온도가 낮아지게 된다. 즉 천연가스는 프로판 사이클에서 약 $-40^{\circ}C$ 까지, 에틸렌 사이클에서 약 $-80^{\circ}C$ 정도까지, 메탄 사이클을 지나고 팽창밸브(⑨-⑩사이)를 거쳐 $-162^{\circ}C$ 정도의 액화된 천연가스(LNG)로 된다. 이때 LNG의 액화율은 팽창밸브(⑨-⑩사이) 통과시 가스가 일부 발생하기 때문에 약 90%내외가 된다.

$C_3H_8-C_2H_4-C_1H_4$ (Propane-Ethylene-Methane) 냉매용 캐스케이드 액화 사이클을 기본으로 하여 새로운 액화 사이클을 설계하였다.

Figure 2는 CO_2, C_2H_6, N_2 를 냉매로 하는 $CO_2-C_2H_6-N_2$ (Carbon dioxide-Ethane-Nitrogen) 냉매용 캐스케이드 액화 사이클이다. 3개의 독립적인 사이클인 CO_2 사이클, C_2H_6 사이클, N_2 사이클로 구성되어 있으며 LNG 열교환기 ①에서 CO_2 , ②에서 C_2H_6 , ③에서는 N_2 가 각각 냉매로써 작용하여 천연가스를 액화시킨다. 동시에 3개의 독립된 사이클에서 CO_2 사이클의 증발기는 C_2H_6 사이클의 응축기 역할을 하며, C_2H_6 사이클의 증발기는 N_2 사이클의 응축기 역할도 한다. 기존의 캐스케이드 액화 사이클 방식과 마찬가지로 피드 가스는 3개의 LNG 열교환기를 거치면서 단계적으로 온도가 낮아진다. 즉 천연가스는 CO_2 사이클에서 약 $-25^{\circ}C$ 까지, C_2H_6 사이클에서 약 $-75^{\circ}C$ 정도까지, N_2 사이클을 지나고 팽창밸브(④-⑤사이)를 거쳐 $-158.5^{\circ}C$ 정도의 액화된 천연가스로 된다. 이때 LNG의 액화율은 팽창밸브에 의해 발생하는 가스가 있으므로 약 92%

내외가 된다.

Figure 3은 해양용 가스전의 개발에 필요한 LNG-FPSO선에 적용가능한 액화 사이클을 위하여 CO_2, N_2 냉매를 이용하여 CO_2-N_2 (Carbon dioxide-Nitrogen) 냉매용 캐스케이드 액화 사이클을 설계하였다. 기존의 3원 액화 사이클에서 중간단 냉매를 없애고, 사이클의 단순성을 좀 더 높여 유지관리 비용이 저렴하며, 파도와 같은 진동에 대한 내구성을 가질 수 있을 것으로 기대된다. 2개의 독립적인 사이클인 CO_2 사이클과 N_2 사이클로 구성되어 있으며 LNG 열교환기 ①에서 CO_2 , ②에서는 N_2 가 각각 냉매로써 작용하여 천연가스를 액화시킨다. 동시에 2개의 독립된 사이클에서 CO_2 사이클의 증발기는 N_2 사이클의 응축기 역할을 한다. 기존의 캐스케이드 액화 사이클 방식과 마찬가지로 피드 가

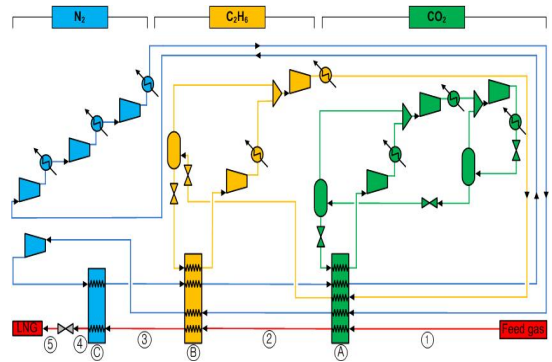


Figure 2: Detailed configuration of cryogenic cascade cycle using $CO_2-C_2H_6-N_2$

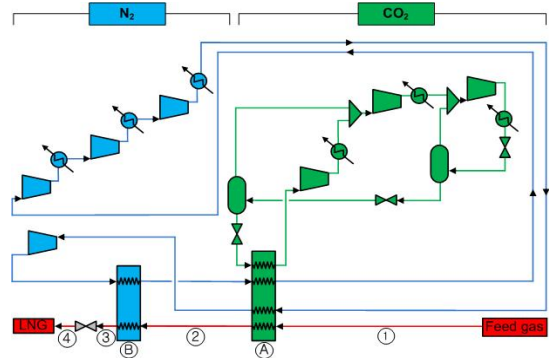


Figure 3: Detailed configuration of cryogenic cascade cycle using CO_2-N_2

스는 2개의 LNG 열교환기를 거치면서 단계적으로 온도가 낮아진다. 즉 천연가스는 CO₂ 사이클에서 약 -55℃까지, N₂ 사이클을 지나고 팽창밸브(③-④ 사이)를 거쳐 -159℃ 정도의 액화된 천연가스로 된다. 이때 LNG의 액화율은 팽창밸브에 의해 발생하는 가스가 있으므로 약 92% 내외가 된다.

2.2 시뮬레이션 가정 조건

세계 곳곳의 가스전에서 추출되는 천연가스의 조성은 다르기 때문에 HYSYS[5]를 이용하여 초저온 액화사이클을 시뮬레이션할 경우 그 결과값도 달라진다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 적용되고 있는 나이지리아 가스전의 천연가스 조성비를 HYSYS에 적용하여 시뮬레이션하였다. Table 1은 HYSYS를 이용하여 시뮬레이션하기 위해서 필요한 가정 조건을 나타낸 것으로, 천연가스의 유량은 트레인 용량 5 MTPA(Million Ton Per Annum)를 기준으로 설정하였다. 이러한 가정조건 및 트레인 용량은 한국가스공사에서 개발하고자 하는 기준이다.

2.3 상태방정식 및 성능평가 지표

천연가스는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 질소, 에틸렌 등과 같은 여러 가지 성분들이 혼합되어 있는 혼합물이다. 따라서 혼합물에 대한 상태방정식은 각 성분 간의 상호작용 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson 식을 적용하였다. 그리고 천연가스 혼합물의 엔탈피와 엔트로피는 Lee-Kesler-Plöcker 식을 적용하여 계산하였다[6]. 전처리를 마친 즉, 수분, 이산화탄소, 수은, 중질의 탄화수소계 가스를 제외한 나이지리아 가스전의 피드가스 조성비는 [6]에서 확인 가능하다. 이 계산식을 기본으로 새롭게 설계한 사이클의 엑서지 손실을 비교 및 분석하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 절에서는 2.1절에서 제시한 3개의 액화사이클에 대한 성능과 엑서지를 서로 비교하여 LNG-FPSO의 적용가능성에 대해서 알아보려고 한다.

Table 1: Modeling assumptions of cryogenic cascade refrigeration cycle[6].

Feed gas mass flow [kg/s]	158.5
Feed gas temperature [°C]	32
Feed gas pressure [kPa]	5,000
Liquefaction temperature [°C]	-162
Air cooler outlet temperature[°C]	40

Figure 4는 3개의 액화 사이클의 압축일량(Compressor Work), 성능계수(COP), 비에너지(Specific Power) 값을 서로 비교한 것이다. 여기서, 성능계수(COP)는 LNG 열교환기에서의 흡수열량(Q_e)을 압축기의 전체일량(W)으로 나눈 것으로 다음의 식과 같다.

$$COP = Q_e / W \quad (1)$$

Figure 4로부터 C₃H₈-C₂H₄-C₁H₄ 액화사이클을 기준으로 압축일량은 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클은 3%, CO₂-N₂ 액화사이클은 55.2% 정도 증가하였으며, 성능계수는 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클은 2.2% 향상되었지만, CO₂-N₂ 액화사이클은 오히려 41.6% 정도 감소하였다. 마지막으로 생산되는 LNG양에 대한 압축일량의 비를 나타내는 비에너지값을 서로 비교해본 결과, CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클과 CO₂-N₂ 액화사이클은 모두 11.4% 정도 증가하였다. 각각의 새로운 사이클의 효율측면에서 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클은 기존의 C₃H₈-C₂H₄-C₁H₄ 액화사이클보다 조금 향상됨을 확인하였지만, CO₂-N₂ 액화사이클은 그렇지 못함을 알 수 있었다.

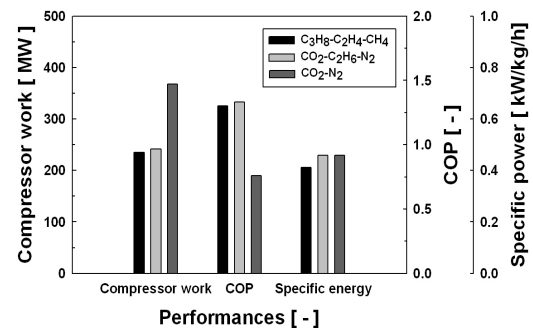
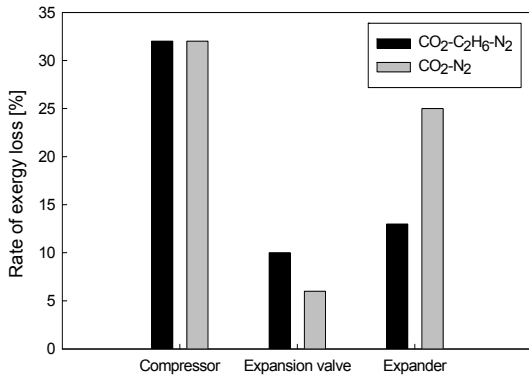
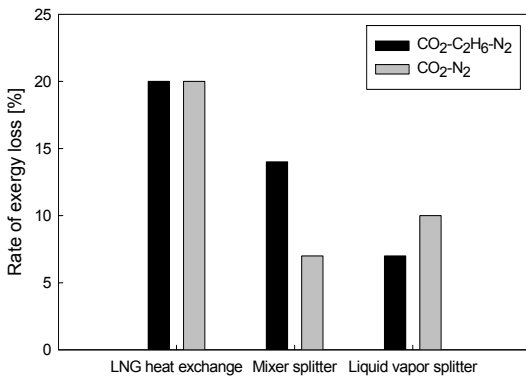


Figure 4: Comparison of performance



(a) Compressor, expansion valve and expander



(b) LNG heat exchanger, mixer splitter and liquid vapor splitter

Figure 5: The rate of exergy loss in CO₂-C₂H₆-N₂ and CO₂-N₂ cycle

이는 CO₂-N₂ 액화사이클이 천연가스의 중간단 온도영역을 처리해 줄 수 있는 독립된 사이클, 즉 프로판(C₂H₆)이 없기 때문에 오히려 성능면에서는 좋지 않다.

Figure 5는 장치들의 엑서지를 구한 값으로 CO₂-C₂H₆-N₂, CO₂-N₂ 액화 사이클내에서 각각의 구성기기들의 엑서지 손실 비율을 비교한 것이다. 압축기의 엑서지 손실은 CO₂-C₂H₆-N₂과 CO₂-N₂ 사이클 모두 32%로 다른 구성 기기들에 비해 높은 엑서지 손실 비율을 보였으며, 그리고 LNG 열교환기의 엑서지 손실은 CO₂-C₂H₆-N₂와 CO₂-N₂ 사이클 모두 20%의 엑서지 손실을 나타내었다. 반면에 팽

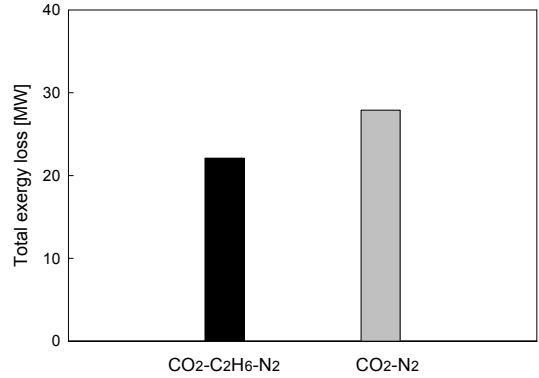


Figure 6: Comparison of total exergy loss

창기는 CO₂-N₂ 액화사이클이 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클보다 엑서지 손실이 12% 높게 나타났다.

이는 CO₂-N₂ 사이클에서 N₂ 사이클이 팽창기를 가지고 있으며, 이 팽창기는 천연가스의 상변화와 과냉각 구간(-40℃~-160℃)까지 담당하기 때문에 상대적으로 CO₂-N₂ 사이클의 N₂ 사이클에서의 팽창기 엑서지 손실이 증가하는 것으로 보인다. 팽창기가 있는 부분은 N₂ 사이클 구간으로 CO₂-N₂ 액화 사이클은 높은 압축일량을 가지고 있으므로 이에 팽창기의 엑서지 손실에 영향을 준 것으로 보인다.

Figure 6은 CO₂-C₂H₆-N₂, CO₂-N₂ 액화 사이클의 전체 엑서지 손실값을 비교한 것이다. CO₂-N₂ 액화 사이클은 약 27.9 MW 정도로 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화 사이클보다 5.8 MW 많은 것으로 나타났다. 이 값은 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화 사이클의 전체 엑서지 손실에 27%에 해당하는 수치로 상대적으로 큰 차이가 나는 것으로 보인다. 장치의 수는 CO₂-N₂ 액화 사이클이 현저히 작지만 실제 전체 엑서지 손실은 오히려 더 크게 나타났다. 이는 전체 엑서지 손실이 액화사이클의 구성기기 수보다 각각의 액화 사이클의 담당하는 온도 구간에서의 온도나 압력차에 더 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉, 3개의 냉매가 담당하는 온도구역을 2개의 냉매로 담당함으로써 CO₂-N₂ 액화 사이클의 N₂ 사이클은 압축일량이 크게 증가하고, 이로 인해 성능이 저하한다.

4. 결 론

논문집. pp. 225-228. 2009

본 연구에서는 3개의 액화사이클에 대해서 압축 일량, 성능계수, 비에너지를 비교하고, 추가로 액화 사이클 내에서의 엑서지 손실을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 3개의 액화사이클의 효율적인 측면에서는 CO₂-C₂H₆-N₂ 액화사이클이 우수하였고, 엑서지 손실측면에서는 장치 수가 적은 CO₂-N₂ 액화사이클이 오히려 높게 나왔다. 이는 장치수가 엑서지 손실에 큰 영향을 주기 보다는 사이클의 효율부분이 큰 영향을 준 것이라고 본다.

(2) CO₂-N₂ 액화사이클은 2개의 냉매로 기존의 3개의 냉매의 온도 구간을 담당함으로써 기존의 C₃H₈-C₂H₄-C₁H₄ 보다 낮은 효율과 높은 압축일량을 보였다. 하지만, 향후 N₂ 사이클의 효율을 보다 더 개선한다면 장치의 구성기기가 작아 고장이 적으며, 액화사이클이 간단한 장점이 있기 때문에 공간 제약이 있는 LNG-FPSO용 액화사이클로서 적합할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2010-016).

참고문헌

- [1] 윤용승, “천연가스 플랜트 산업의 발전 전망”, 가스연맹, 여름호, pp. 22-29, 2008.
- [2] Michael Barclay, “Noel Denton”, LNG Journal, pp. 34-36, 2005.
- [3] T. Shukri, “LNG technology selection”, Hydrocarbon Engineering, Feb. 2004.
- [4] M. Meyer, “LNG liquefaction process - Why the big fuss about selection”, IChemE London SONG Meeting, Nov. 9. 2004.
- [5] HYSYS 2.2 Documentation. Customization Guide. AEA Technology-Hyprotech, Ltd: Calgary; Canada.
- [6] 오승택, 김현우, 이호생, 이경범, 윤정인, “이상규, 2단 인터쿨러를 적용한 LNG 액화 사이클 시뮬레이션,” 한국가스학회 춘계 학술발표회