KIGAS Vol. 15, No. 6, December, 2011
(Journal of the Korean Institute of Gas)

C3-MR 공정의 프로판 사이클 압력 레벨에 따른 에너지효율 최적화를 위한 사례연구

이인규 · 탁경재 · 임원섭 · †문일 · 김학성* · 최광호*
연세대학교 화공생명공학과, GS 건설*
(2011년 11월 15일 접수, 2011년 12월 27일 수정, 2011년 12월 27일 채택)

Case Studies for Optimizing Energy Efficiency of Propane Cycle Pressure Levels on C3-MR Process

Inkyu Lee · Kyungjae Tak · Wonsub Lim · † †Il Moon · Haksung Kim* · Kwangho Choi*
Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea†*
GS Const, Seoul 135-916, Korea
(Received November 15, 2011; Revised December 27, 2011; Accepted December 27, 2011)

요 약

천연가스 액화공정은 극저온에서 운전되며 에너지 소비가 매우 크기 때문에 압축기의 에너지 소모를 최소화하는 것이 공정의 효율 측면에서 중요하다. 여러 가지 천연가스 액화공정 중 C3-MR(Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant) 공정의 경우 순수냉매인 프로판과 혼합냉매를 사용하는 두 개의 냉각 사이클로 구성되어있다. 본 연구에서는 C3-MR 공정에서 최적의 프로판 압력 레벨을 찾기 위해 프로판 사이클을 별개로 구성하여 모사하였다. 또한, 압력 레벨에 따른 조건을 변화시켜가며 사례 연구를 수행하고 이를 통해 압축기에서 소모되는 에너지양을 비교하였다. 그 결과 압력 레벨이 높을수록 총 에너지 소모량이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 압력 레벨이 3일 때 보다 압력 레벨이 5일 때 에너지 소모는 약 23.7% 감소하는 값을 얻을 수 있었다.

Abstract - Natural gas liquefaction process runs under cryogenic condition, and it spends large amount of energy. Minimizing energy consumption of natural gas liquefaction process is an important issue because of its physical characteristics. Among many kinds of natural gas liquefaction processes, C3-MR(Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant) process uses two kind of refrigerants. One is the propane as the pure refrigerant(PR) and the other is the mixed refrigerant(MR). In this study, to find the optimal compressing level, propane cycle is simulated on different pressure level. The case study result shows relationship between energy consumption and pressure level. As a result, the conclusion is that at a higher pressure level, process consumes lower energy. At 5 pressure-levels, energy consumption is 23.7% lower than 3 pressure-levels.

Key words : LNG, natural gas liquefaction process, C3-MR, propane pre-cooled mixed refrigerant process, pure refrigerant, propane cycle

Ⅰ. 서 론

전 세계적인 에너지 자원 수급의 불안정성과 더불어 온실가스에 대한 규제로 인해 국내 뿐 아니라 국제적으로도 에너지 시장의 구조가 변화하고 있다. 기존의 대표적인 화석연료인 석탄, 석유의 대체 에너지원으로 천연가스(Natural Gas, NG)의 역할은 점점 커지고 있다[1]. 또한 최근에는 LNG 플랜트의 수주 또한 활발해 지면서 천연가스 액화공정에 대한 관심이 급증하고 있는 추세이다[2].

†교신저자:ilmoon@yonsei.ac.kr

천연가스를 액화시키게 되면 전체 부피가 약 1/600로 감소하게 된다. 따라서 장거리 수송에 액체상태의 천연가스가 많이 쓰인다. 액화를 하려면 천연가스의 주성분인 메탄(CH_4)의 정상 끓는점(약-162℃)까지 온도를 낮추어야 한다[3]. 이렇듯 극저온에서 운전되는 특성 때문에 천연가스 액화공정은 많은 양의 에너지를 필요로 한다. 천연가스 액화공정은 에너지 소모가 크기 때문에 최적화 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 천연가스 액화공정에서 가장 중요한 부분은 열교환기의 열전달 효율을 최대화 하는 것과 압축기에 소모되는 에너지를 최소화 하는 것이다[5].

가장 널리 상용화된 천연가스 액화공정인 C3-MR 공정은 프로판을 냉매로 사용하는 1개의 순수 냉매 사이클과 1개의 혼합냉매 사이클로 구성되어 있다[6]. 본 연구에서는 C3-MR 공정 내 프로판 사이클의 에너지 소모량을 최소화하기 위해 압력 레벨에 따른 에너지 소모량을 분석하고자 한다.

Ⅱ. C3-MR 공정의 구성 및 특징

C3-MR 공정은 혼합냉매를 통해 천연가스를 액화시키기 전에 프로판을 냉매로 예비 냉각을 하는 특징이 있다. 또한 프로판은 혼합냉매를 냉각시키기 위해서도 사용된다. C3-MR 공정의 전체적인 공정도를 Fig. 1에 나타내었다.

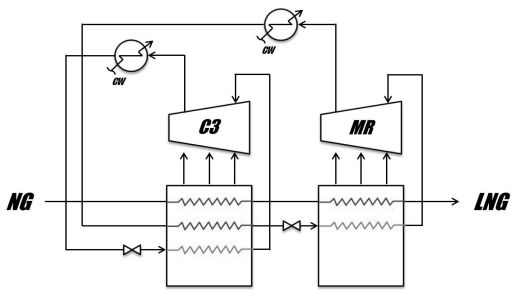

Fig. 1. C3-MR Process Diagram[7].

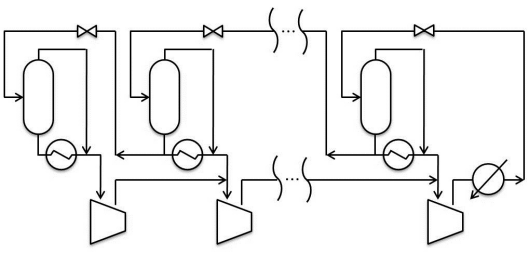

Fig. 2. C3 Cycle Flow Sheet.

순수 냉매로 사용된 프로판은 다음과 같은 원리로 냉각에 이용된다. 압축기를 통해 기체 상태의 프로판을 압축시킨 후 액체 상태로 냉각시킨다. 이후 밸브를 통해 팽창시켜 온도를 더 낮춘다. 팽창된 액체의 프로판은 냉매 및 천연가스를 냉각시키기 위해 사용되며 이 과정에서 기화하게 된다. 따라서 열교환기 내부에서 프로판의 온도 변화는 없으며 오직 기화열만이 냉각에 이용된다. 이렇게 열교환기를 지나 기화된 프로판은 다시 압축기를 통해 압축된다. 이러한 일련의 과정을 반복적으로 거치게 되는데, 이 때 압축기에 소모되는 에너지는 압력 레벨에 따라 달라진다.

순수 냉매를 사용하여 열교환을 할 경우 상변화로 인해 차가운 흐름의 온도가 일정하다는 특징이 있다. 이때 여러 온도의 냉매로 냉각을 시키게 되면 열교환 효율이 증가한다. 때문에 Fig. 2에 나타낸 공정도와 같이 여러 압력 레벨을 가지도록 다단으로 설계한다. 프로판 사이클에서 압력 레벨을 한 단계 더 상승시키기 위해서는 압축기, 열교환기, 플래쉬 드럼, 그리고 밸브로 구성된 한 세트를 추가하여야 한다. 냉각기는 가장 높은 압력까지 압축 시킨 후 단지 한 번의 액화를 위해서만 필요하다[8].

Ⅲ. 수학적 모델

열교환기를 통해 천연가스 및 혼합냉매를 원하는 온도까지 냉각시키기 위해서 프로판의 유량을 결정해야 한다. 이를 결정하기 위해 다음과 같은 에너지 수지식을 사용한다.

$$\dot{Q}_h = (H_{h\ inlet} - H_{h\ outlet}) \times \dot{m}_h \quad (1)$$

$$\dot{Q}_c = (H_{c\ inlet} - H_{c\ outlet}) \times \dot{m}_c \quad (2)$$

식 (1)은 열교환기를 통과하는 뜨거운 흐름의 엔탈피 수지식이며 식 (2)는 열교환기를 통과하는 차가운 흐름의 에너지 수지식이다. 열교환기 내부에서 뜨거운 흐름이 잃은 열은 차가운 흐름이 얻은 열과 같아야 하기 때문에 이를 통해 식 (3)을 얻을 수 있다[9].

$$\dot{Q}_h = -\dot{Q}_c \quad (3)$$

위 수식들을 통해 각각의 열교환기에서 필요로 하는 프로판의 유량을 얻었다.

Ⅳ. 프로판 사이클 모사

각각의 압력 레벨에 따른 비교 분석을 위해 100 TPD (ton per day) 기준으로 다음과 같은 모사 조건을 설정하였다.

- 프로판 사이클을 거치기 전, 후의 혼합냉매와 천연가스의 온도는 압력 레벨에 상관없이 일정하다.
- 액체상태의 프로판은 열교환기를 지나면서 100% 기화된다.
- 열교환기 내 최소 온도 차는 5℃이다.

본 연구에서는 프로판 사이클의 모사를 위해 Aspen HYSYS v7.2를 사용하였으며 상태방정식으로는 Peng-Robinson Equation을 사용하였다. 2개의 압축기를 사용하는 경우 압축기를 거치기 전 압력, 압축기를 한 번 거친 후의 압력, 압축기를 모두 거친 후의 압력, 이렇게 3가지의 압력 레벨이 존재하게 된다. 따라서 압력 레벨 3을 구성하기 위하여 2개의 압축기를, 레벨 4를 위해서 3개의 압축기를, 레벨 5를 위해서 4개의 압축기를 사용하였다. Fig. 3 에 나타낸 것 처럼 압력 레벨 3의 프로판 사이클은 2개의 열교환기를 거쳐 혼합냉매와 천연가스를 냉각하게 된다. 압력 레벨 4의 프로판 사이클은 3개의 열교환기를, 압력 레벨 5의 프로판 사이클은 4개의 열교환기를 거쳐 혼합냉매와 천연가스를 냉각시킨다. 압력 레벨 5에 대한 공정도를 Fig. 4 에 추가적으로 나타내었다.

위 조건들에 따라 설정한 온도, 압력, 그리고 유량

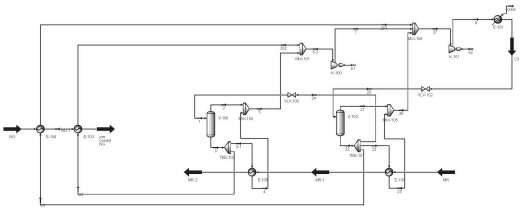

Fig. 3. C3 Cycle Pressure Level 3.

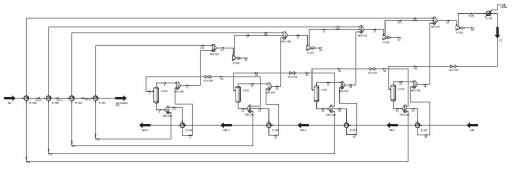

Fig. 4. C3 Cycle Pressure Level 5.

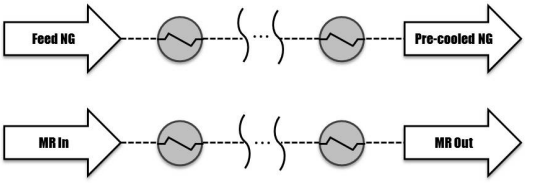

Fig. 5. Cooling of NG and MR.

Table 1. NG and MR Temperature, Pressure, Mass flow

	Feed NG	Pre-cooled NG	MR In	MR Out
Temper-ature (℃)	15.00	-37.49	45.00	-37.49
Pressure (kPa)	6150	6150	6150	6150
Mass Flow (kg·mol/h)	4973	4973	8761	8761

조건을 Fig. 5 와 Table 1 에 나타내었다. 천연가스와 혼합냉매는 6150 kPa의 고압으로 운전된다. 프로판 사이클의 압력 레벨과 에너지 소모량에 대한 관계를 파악하기 위해 천연가스와 혼합냉매의 최종 유입 및 유출 온도뿐만 아니라 다른 기타 조건들도 모두 고정하였다. 또한 가장 낮은 압력의 프로판은 100 kPa로, 가장 높은 압력의 프로판은 750 kPa로 고정하였다.

Ⅴ. 모사 결과 및 사례 연구

압축기의 압력 변화를 어떻게 주느냐에 따라 압력 레벨에서의 에너지 소모는 달라진다. 때문에 본 연구에서는 중간 압력을 설정하는데 있어서 등온도차로 조건을 설정하였다. 압력 레벨 3에 대하여 ΔT = 29.22℃, 압력 레벨 4에 대하여 ΔT = 19.48℃, 압력 레벨 5에 대하여 ΔT = 14.61℃로 각각 계산하였다. 압력 레벨에 따른 온도와 압력 조건들을 레벨별로 Table 2, Table 3, Table 4에 각각 나타내었다.

또 다른 주요한 장치인 열교환기에서의 열교환 효율을 알아보기 위해 천연가스와 프로판 사이의 T-h 선도를 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 혼합냉매와 다르게 순수냉매는 상변화로 인하여 온도에 따른 열 흐름의 거동이 그래프 내에서 계단형으로 나타난다. 뜨거운 흐름과 차가운 흐름 사이의 면적이 작을수록 고효율을 의미하기 때문에 이론적으로

Table 2. Temperature and Pressure at Pressure Level 3

	Temperature (℃)	Pressure (kPa)
Stream 1	15.95	750
Stream 2	-13.27	308.8
Stream 3	-42.49	100

Table 3. Temperature and Pressure at Pressure Level 4

	Temperature (℃)	Pressure (kPa)
Stream 1	15.95	750
Stream 2	-3.54	424.4
Stream 3	-23.01	208.9
Stream 4	-42.49	100

Table 4. Temperature and Pressure at Pressure Level 5

	Temperature (℃)	Pressure (kPa)
Stream 1	15.95	750
Stream 2	1.34	493.2
Stream 3	-13.07	308.8
Stream 4	-27.88	182.2
Stream 5	-42.49	100

압력 레벨이 무한대로 갈수록 열교환 효율이 좋아진다고 생각 할 수 있다[10]. 혼합냉매와 프로판 사이의 T-h 선도역시 같은 양상을 보였으며 이를 통해 이론과 모사결과가 같음을 확인 할 수 있다.

압력 레벨 간 등온도차로 구성 하였을 때 압축기 각각에 대한 압축비를 Table 5에, 단위 시간동안 압축기에서 압축해야 하는 프로판 유량을 Table 6에 나타내었다. Table 7에서 보듯 압축비가 높을수록, 압축해야 하는 유량이 많을수록 에너지 소모가 큼을 알 수 있었다. 또한 공정 전체적인 에너지 소모는 압력 레벨 5에서 가장 낮게 나타났다.

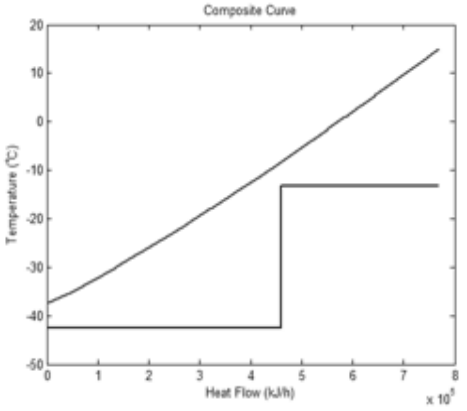

Fig. 6. 3 Level Composite Curve Between Natural Gas and Propane.

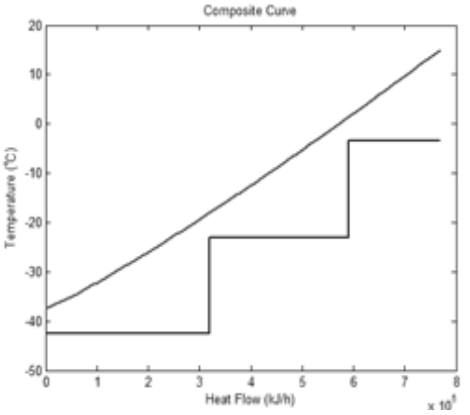

Fig. 7. 3 Level Composite Curve between Natural Gas and Propane.

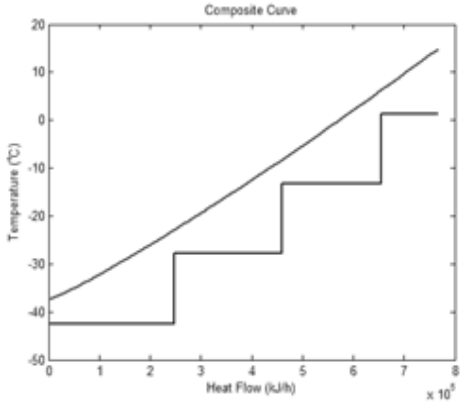

Fig. 8. 3 Level Composite Curve between Natural Gas and Propane.

Table 5. Compressing Ratio

	Pressure Level 3	Pressure Level 4	Pressure Level 5
comp.1	3.088	2.189	1.822
comp.2	2.429	1.939	1.695
comp.3	-	1.767	1.597
comp.4	-	-	1.521

Table 6. Propane Flow Rate into Compressor

	Pressure Level 3	Pressure Level 4	Pressure Level 5
comp.1	5009 kg/h	3103 kg/h	2257 kg/h
comp.2	13546 kg/h	6999 kg/h	4874 kg/h
comp.3	-	13246 kg/h	8093 kg/h
comp.4	-	-	13036 kg/h

Table 7. Energy Consumption

	Pressure Level 3	Pressure Level 4	Pressure Level 5
C3 Flow Rate	13546 kg/h	13246 kg/h	13036 kg/h
comp.1 Energy	93.41 kW	39.54 kW	21.81 kW
comp.2 Energy	213.9 kW	80.5 kW	43.79 kW
comp.3 Energy	-	135.4 kW	67.01 kW
comp.4 Energy	-	-	98.93 kW
Total kW	307.31 kW	255.44 kW	231.54 kW

VI. 결 론

본 연구에서는 프로판 압력 레벨의 변화에 따른 에너지 소모량의 관계를 살펴보고 최소의 에너지를 사용하는 압력 레벨을 선택하였다. 그 결과 압력 레벨이 높아질수록 열교환 효율이 좋아지는 것과 높은 압력 레벨에서 압축기에 소모되는 총 에너지의 값이 적음을 확인 하였다. 본 연구에서 수행한 모사 결과로 압력 레벨 3의 공정을 선택했을 때 보다 압력 레벨 5의 공정을 선택했을 때 약 25.7%의 에너지 소모량을 줄일 수 있었다. 열교환 효율 역시 압력 레벨 3, 압력 레벨 4 보다 압력 레벨 5에서 가장 높다. 결국 압력 레벨이 높으면 높을수록 에너지 소모 및 열교환 효율 측면에서 더 좋아진다는 결론을 얻을 수 있다.

프로판 사이클에서 압력레벨을 한 단계 더 상승시키기 위해서는 압축기, 열교환기, 플래쉬 드럼, 그리고 밸브로 구성된 한 세트를 추가하여야 한다. 압력 레벨이 증가하면 이들 장치의 설치비용 및 운전비용이 추가로 소요된다. 에너지 소모량과 장치의 설치비용 및 운전비용은 서로 상충 관계(Trade-off)에 있기 때문에 추가적으로 장치의 가격정보를 고려할 필요가 있다. 이들 정보를 고려한다면 비용측면에서 최적화 된 결과를 얻을 수 있기 때문에 장치가격까지 고려한 순수냉매 사이클의 최적화가 추가 연구되어야 할 필요성이 있다. 또한 순수냉매 뿐 아니라 혼합냉매까지 통합하여 C3-MR 공정 전체의 최적화 역시 추가 연구되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

사용기호

$\dot{Q}_h$: heat flow of hot stream
$\dot{Q}_c$: heat flow of cold stream
$H_{h\ inlet}$: Enthalpy of hot stream inlet
$H_{c\ inlet}$: Enthalpy of cold stream inlet
$H_{h\ outlet}$: Enthalpy of hot stream outlet
$H_{c\ outlet}$: Enthalpy of cold stream outlet
$\dot{m}_h$: mass flow of hot stream
$\dot{m}_c$: mass flow of cold stream

참고문헌

[1] Kyungjae Tak, Wonsub Lim, Daeho Ko, Kwang-ho Choi, Il Moon, “Optimization of Mixed- Refrigerant System in LNG Liquefaction Process”, May 30, ESCAPE 21, (2011)
[2] Satish Kumar, Hyouk-Tae Kwon, Kwang-Ho Choi, Jae Hyun Cho, Wonsub Lim, Il Moon, “Current status and future projections of LNG demand and supplies: A global prospective”, *Energy Policy*, **39**, 4097-4104, (2011)
[3] Abdullah Alabdulkarem, Amir Mortazavi, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, Peter Rogers, “Optimization of propane pre-cooled mixed refrigerant LNG plant”, *Applied Thermal Engineering*, **31**, 1091-1098, (2011)
[4] 임원섭, 탁경재, 이인규, 최광호, 이선근, 문 일,

"공정모사와 최적화를 이용한 천연가스 액화공정의 에너지 효율 개선", October 27, 한국화학공학회 가을 총회 및 학술대회, (2011)

[5] Bengt O. Neeraas, Arne O. Fredheim, Bjorn Aunan, a "Experimental data and model for heat transfer, in liquid falling film flow on shell-side, for spiral-wound LNG heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, 3565-3572, (2004)

[6] Ho-Myung Chang, Mynng Jin Chung, Sanggyu Lee, Kun Hyung Chae, "An efficient multi-stage Brayton-JT cycle for liquefaction of natural gas", *Cryogenics*, **51**, 278-286, (2011)

[7] 탁경재, 임원섭, 이인규, 고대호, 최광호, 문 일, "SMR 공정을 적용한 LNG 플랜트 냉매 시스템 최적화", April 29, 한국화학공학회 봄 총회 및 학술대회, (2011)

[8] Alexandre Morin, Per Eilif Wahl, Mona Molmuik, "Using evolutionary search to optimise the energy consumption for natural gas liquefaction", *Chemical Engineering Research and Design*, **89**, 2428-2441, (2011)

[9] Satish Kumar, 임원섭, 권혁태, 최광호, 문 일, "Development of a thermodynamix model for simulation of LNG liquefaction amenities", October 27, 한국화학공학회 가을 총회 및 학술대회, (2011)

[10] 임원섭, 탁경재, 이인규, 최광호, 문 일, "LNG플랜트 액화공정의 에너지 효율 향상을 위한 엑서지 분석과 최저온도 접근법의 적용", April 29, 한국화학공학회 봄 총회 및 학술대회, (2011)