



혼합냉매를 이용한 천연가스 액화공정의 제어변수 분석

†이재용 · 김문현 · 박찬국

고등기술연구원

(2013년 6월 11일 접수, 2013년 8월 13일 수정, 2013년 8월 13일 채택)

Analysis of the Control Variables for Natural Gas Liquefied Process Using Mixed Refrigerant

†Jae Yong Lee · Mun-Hyun Kim · Chan-Cook Park

*Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51beon-gil Baegam-myeon
Cheoin-gu Yongin-si Gyeonggi-do, 449-863, Korea*

(Received June 11, 2013; Revised August 13, 2013; Accepted August 13, 2013)

요약

천연가스 액화 공정은 상온의 천연가스를 상압 -160°C 이하로 냉각해서 액화시키는 공정으로, 안정된 LNG 생산을 위해서는 최적의 제어 전략이 필요하다. 제어 전략을 수립할 때 가장 중요한 작업 중 하나가 공정의 분석인데, 조절 변수의 변화에 따른 제어 변수의 변화를 파악하는 것이다. 본 논문에서는 C3MR(Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant) 공정으로 BSU(Bench Scale Unit)를 제작하여 천연가스 액화 공정을 실험하였다. 각 조절변수의 조작에 따른 유량의 변화가 공정에 미치는 영향을 알아보기 위해서 냉매의 유량변화에 따른 냉매 온도 변화 및 천연가스의 온도 변화를 분석하였고, 천연가스 자체의 유량 변화에 따른 냉매의 온도 변화를 분석함으로써 3개의 조절 변수와 공정의 제어변수들과의 관계를 알아보았다. 각 제어변수들은 독립적인 요소들이 아닌 서로 연관되어 유기적인 움직임을 보였으나, 특정 조절 변수의 변화에 따라 큰 반응을 보이는 제어 변수를 확인 할 수 있었다.

Abstract - The process of liquefied natural gas is less than -160°C to natural gas by cooling at atmospheric pressure. When control strategy was made, one of the most significant is analysis of process. It is important to understand the control variable change according to manipulated variable change. In this study, we experiment natural gas liquefied process using C3MR(Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant) process by BSU(Bench Scale Unit). We analyzed the change of refrigerant temperature and natural gas temperature according to the change of refrigerant flow rate so as to search an influence flow rate according to adjust each manipulated variables. One of the manipulated variable affected a number of control variables, but were able to confirm a control variable with a large response.

Key words : natural gas, liquefied process, bench scale unit, control variables

1. 서론

천연가스는 메탄(CH₄)이 주성분을 이루는 가연성 가스로 일상생활에서 주로 사용하는 휘발유, 디젤과 같은 연료에 비해 청정하고 안정적이기 때문에

최근 활용도가 높아지고 있다. 특히 천연가스는 화력 발전소에서의 에너지원으로 많이 사용하는데, 미 에너지부에 따르면 비용적인 측면에서 천연가스를 이용한 전기 생산이 가장 효율적이라는 보고가 있다 [1]. 천연가스를 생산하여 저장하는 방법은 상온에서 200 bar 이상의 고압으로 저장하는 방법과 5 bar 이하의 저압에서 -150°C 이하로 액화하는 방법이 있다. 천연가스를 저장하는 가장 큰 이유는 사용처로

†Corresponding author:young2004@iae.re.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

운반하기 위함인데, 주로 LNG (Liquified Natural Gas) 선을 이용해서 운반한다. LNG로 저장하는 방법에 비해서 CNG(Compressed Natural Gas)는 고압을 유지해야하며, 저장 효율이 떨어진다. 천연가스를 액화 시킨 LNG는 그 부피가 1/600으로 줄어들어 저장 및 운송에 더 효율적이라 할 수 있다[2]. 천연가스를 5 bar 이하에서 -150°C 이하의 온도로 냉각해야 하는데, 일반적으로 LNG 플랜트 내에 액화 시설에서 천연가스를 액화 시킨다. 천연가스 액화 플랜트는 생산량이 오늘날 5 MTPA(Million Ton Per Annum) 이상의 대규모로 건설되어 단위 시간당 생산량이 중요시하게 여겨진다. 5 MTPA 이상의 대규모로 천연가스를 액화하기 위해서 액화 공정이 발전되어 왔는데 단일 냉매를 사용해서 냉매 사이클을 다단으로 늘려가는 방법에서 각 단일냉매를 혼합하여 하나의 압축기로 단일 사이클을 형성하는 공정으로 발전되어 왔다[3].

천연가스 액화 공정은 1960년대부터 개발되어 왔으며, 단일 냉매를 이용해서 순차적으로 천연가스의 온도를 냉각하는 cascade 공정과 각각의 단일 냉매를 혼합해서 사용하는 혼합냉매 공정으로 크게 나눌 수 있다. 현존하는 LNG 플랜트 중 95% 이상이 혼합냉매를 이용하며, 그 중에서 프로판 예냉 혼합냉매(C3MR) 공정이 가장 많이 사용되는 공정으로 알려져 있다. 혼합 냉매를 이용한 공정의 이점은 단일 냉매에 비해서 운전 압력이 낮고, 기상과 액상이 분리된 이상(2-phase) 구간이 크기 때문에 열교환기의 열전달 효율이 좋다는 것이다[4].

천연가스의 생산의 효율을 늘리는 방법에는 액화 공정의 발전이 크지만, 액화 공정의 제어 전략도 뒷받침이 되어야 한다. 특히 LNG 플랜트와 같이 계속해서 가동해야하는 플랜트는 외부 교란에 대한 반응에 따라서 생산량 및 제품의 품질에 큰 영향을 끼치게 된다. LNG 플랜트의 운전에서 외란을 최소화하기 위해서 플랜트의 자동제어는 중요한 요소로 여겨진다. LNG 플랜트는 용량 및 장소 등 건설 환경에 따라서 다양한 공정이 존재하며, 각 공정에 따라 최적의 제어 전략이 도출 될 수 있다. 최적의 제어 전략 도출에서 가장 먼저 고려해야 할 것이 제어변수와 그에 따른 조절변수의 선정이다[5]. 제어 변수와 조절변수를 선정할 때, 어떤 제어변수의 값이 전체 공정에서 어떤 영향을 미치는지 정확히 파악해야 안정한 제어 전략을 수립할 수 있는데, 본 논문에서는 천연가스 액화 플랜트의 BSU(Bench Scale Unit)를 운전하여, 조절 변수인 제어밸브의 변화에 따른 제어변수의 변화와 그에 따른 전체 공정의 변화를 분석하였다.

II. 실험

2.1. 실험 장치

천연가스 액화 플랜트의 조절변수 변화에 따른 제어변수를 분석하기 위해 상용 LNG 플랜트의 액화 플랜트를 스케일 다운한 BSU(Bench Scale Unit)를 제작하였다. BSU의 천연가스 액화 용량은 30kg/h로 설계되었다.

2.1.1. 압축기

천연가스 액화 공정에서 가장 큰 비중을 차지하는 기자재라 할 수 있는 것이 압축기이다. 냉매 사이클에서 압축기의 역할은 증발기에서 나온 기상 냉매를 다시 증발기 까지 밀어서 냉매 사이클을 유지하는 것과 냉매의 압력을 높여서 압축-팽창으로 인한 냉매 온도 강하를 유도하는 것이다[6]. 압축기는 여러 형태가 있는데, 크게 왕복동형 압축기와 원심식 압축기로 나눌 수 있다. 본 실험에서 사용한 압축기는 왕복동형 압축기로 Fig. 1과 같은 형태의 압축기를 사용하였다.

두 압축기는 모두 공통으로, 흡입 측에서 버퍼 역할을 할 수 있는 vessel과 토출 측에서 압축된 냉매를 저장할 수 있는 vessel, 그리고 토출 용량의 조절을 위한 제어 밸브가 포함된 스키드 형태로 만들어 졌다. 각각 2단 압축을 하게 되며 각 단에는 수냉식 inter-cooler와 후단의 after-cooler를 포함한다.

2.1.2. 열교환기

천연가스 액화를 위해 프로판 냉매와 혼합냉매를 이용해서 냉각하는 열교환기로 Plate-fin 형 열교환기를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 Plate-fin 형 열교환기는 멀티 스트림 열교환기로 프로판 사이클에 4개의 스트림과 혼합냉매 사이클에서 4개의 스트림을 가지는 열교환기와 3개의 스트림을 가지는 열교환기가 사용되는데, spiral-wound 형 열교환기와 더불어 초저온 산업, 특히 LNG 플랜트에서 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)로 가장 많이 사용하고 있는 열교환기이다[7].

2.1.3. 가스공급 설비

실험에 사용하는 가스로는 천연가스와 프로판 및 혼합냉매, 그리고 공압 및 퍼지에 사용되는 질소가 있다. 천연가스는 펌프 가스기지에서 LNG 상태로 공급 받아 사용하였으며, 혼합냉매는 가스 제조사로부터 제조한 냉매를 직접 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 천연가스와 혼합냉매의 조성이 Table 1에 나

Table 1. Natural gas and refrigerant composition
(unit : mole %)

	Natural gas	Mixed refrigerant
Methane	91.34	52.25
Ethane	5.37	32.30
Propane	2.15	9.42
Nitrogen	0.20	6.01

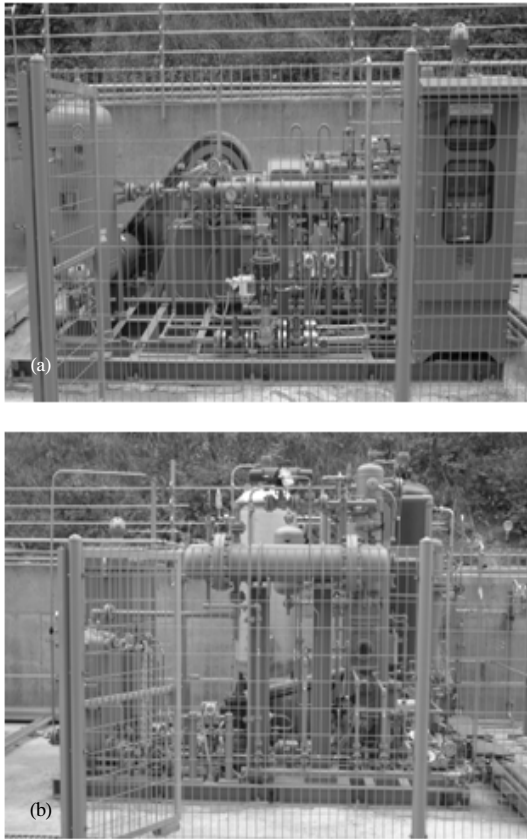


Fig. 1. (a) Mixed refrigerant compressor skid, (b) Propane compressor skid.

타내었으며, 천연가스의 경우 한국가스공사에 나타난 천연가스의 조성을 따랐으며, 혼합냉매는 실제로 실험에서 GC(Gas Chromatography)를 이용해서 측정된 조성이다.

가스 주입 설비는 천연가스, 혼합냉매, 프로판 냉매 각각이 Fig. 2와 같은 형태로 두 냉매는 압축기

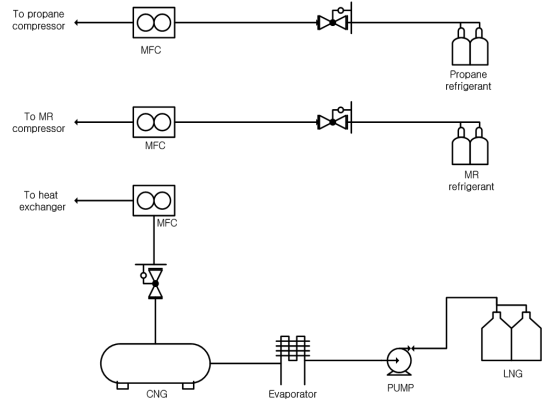


Fig. 2. Schematic diagram of gas supply utilities.

흡입측으로 천연가스는 열교환기 스킴으로 공급되게 되어있다.

2.1.4. 제어 시스템

천연가스 액화를 위한 BSU의 제어는 PLC(Programmable Logic Controller) 기반으로 구성되었으며, PLC는 Siemens의 SIMATIC S7-400기종을 사용하였으며, HMI(Human Machine Interface)는 같은 회사의 WinCC를 사용하였다. BSU에서 측정된 데이터가 PLC를 통해서 HMI로 보여지게 되며, HMI에서 사용자의 명령에 의해 PLC를 통해 밸브를 조작할 수 있다. Fig. 3는 실험에 사용한 HMI 화면이며, 제어변수로 온도, 압력, 유량 및 레벨 등이 표시되며, 조절 변수는 그림에서 PCV-202, PCV-203, PCV-108을 사용하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. Startup

냉매 사이클은 기본적으로 페루프이기 때문에 외부와 차단되어야 한다. 특히 외부로부터의 수분 침투를 가장 경계해야하며, 냉매의 순도 유지를 위해서 프로판 냉매 배관과 혼합냉매 배관 각각에 대해서 진공 펌프를 이용해서 배관 내의 공기를 빼낸다. 본 실험에서 사용되는 파일럿 플랜트는 진공을 계속해서 유지할 수 없기 때문에 진공 후 즉시 상압 이상으로 냉매를 채워준다.

왕복동형 압축기의 흡입측에 설계 압력 및 유량을 밀돌 경우 압축기의 내구도에 영향을 미칠 수 있기 때문에 냉매의 공급 후 석션측의 압력이 설계압력에 도달할 때, 압축기를 구동한다. 압축기에는 압축한 고온의 가스를 냉각하기 위한 수냉식 쿨러가 있는데 여기에 공급될 냉각수를 압축기 구동 전에

2.2.3. Data acquisition

운전을 통해 수집된 운전 데이터는 WinCC HMI 프로그램 내의 DB로 저장된다. 이와 같이 저장된 데이터를 원하는 제어변수의 측정값과 측정 시간으로 얻기 위해서 WinCC Data Monitor 프로그램을 이용해서 데이터를 가공하였다. 이 후 제시될 MS Excel을 이용한 운전 트렌드는 운전 시작부터 안정상태에 접어들 때까지의 시간을 분 단위 해상도로 나타내었으며, 측정값은 소수 둘째자리 값까지 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

본 논문에서 기술하는 실험장치인 천연가스 액화장치, 즉 BSU는 프로판 냉매 사이클과 혼합냉매 사이클로 구성 되어 있는데, 프로판 사이클을 이용한 천연가스의 냉각은 냉매 성분이 단일 물질이며, 하나의 사이클로 일반적인 냉동 시스템에서의 제어와 다르지 않다. 반면 혼합냉매 사이클은 예냉으로 한번 상이 분리되고 각각 분리된 상이 각각의 스트림으로 천연가스를 냉각시키는 공정으로 프로판 사이클에 비해서 다소 복잡하다. 따라서 혼합냉매의 예냉 후 기상상태가 흘러가는 스트림(MRV)과 액상상태의 스트림(MRL)의 흐름에 따른 제어변수의 변화를 분석하였다. Fig. 5에서 해당 부분을 점선으로 표시하였다.

3.1. MRL 유량에 따른 온도 변화

MRL 유량은 Fig. 5에서 PCV-202의 제어밸브에 의해서 조절이 되며, 그에 따른 열교환기 주변 온도

변화에 따른 변화를 분석하였다. Fig. 6은 MRL의 유량 변화에 따른 열교환기 MCHE1 주변 온도 변화의 트렌드를 나타내었다. 그림에서 MRL의 이동 경로에 MCHE2 열교환기는 없기 때문에 영향을 주지 않고 그렇게 확인되었기 때문에 분석에서 제외하였다.

Fig. 6의 MRL flow rate는 오직 제어밸브 PCV-202에만 영향을 받는다. 그림에서 1, 2, 3번은 모두 천연가스의 온도이며, 9번은 MCHE1에서 혼합냉매의 증발온도이다. 여기서 혼합냉매는 MRL 성분만이 아닌 MRL과 MRV의 성분을 합한 전체 혼합냉매이다. 전체적으로 MRL의 유량 변화에 따라서 온도 변화를 확인 할 수 있지만, 특히 혼합냉매의 증발온도에 많은 영향을 끼치는 것을 확인 할 수 있었다. 시간축에서 70분경에서 혼합냉매의 유량이 급격히 감소하면서 9번의 증발온도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 같은 열교환기를 통해서 열교환하는 천연가스의 온도 역시 상승하는 것을 볼 수 있다.

반대로 100분경 혼합냉매의 유량이 커졌을 때 혼

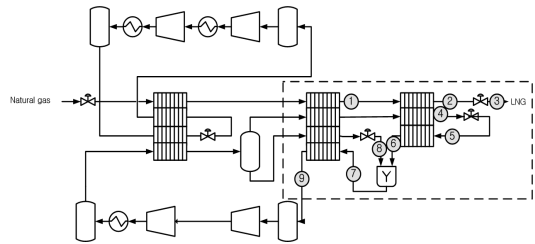


Fig. 5. BSU process flow diagram.

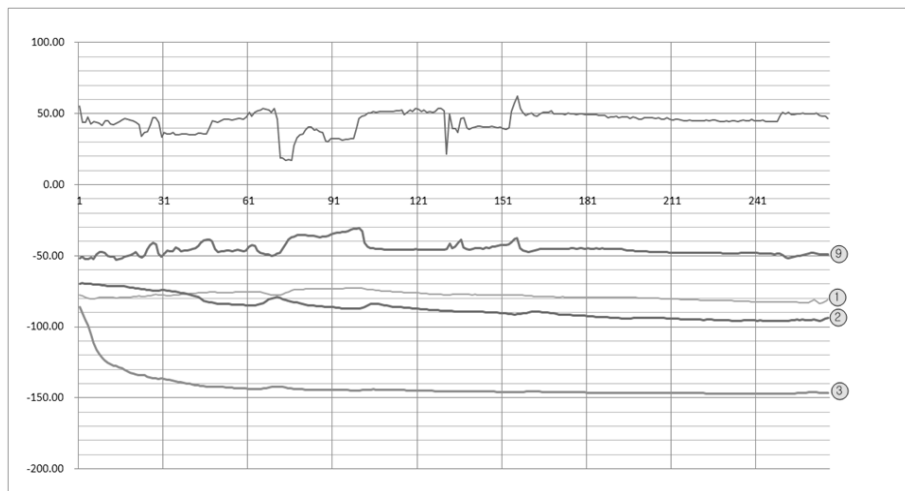


Fig. 6. The trend of MRL flow rate and natural gas temperature.

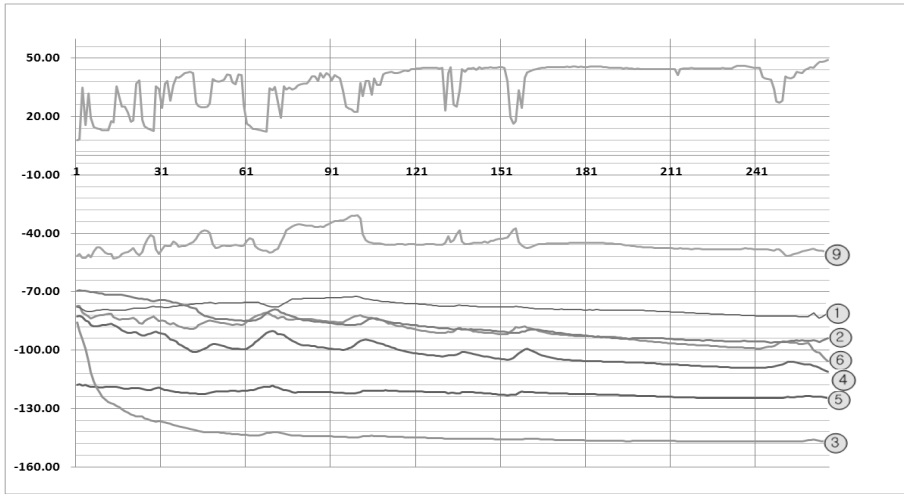


Fig. 7. The trend of MRV flow rate and natural gas temperature.

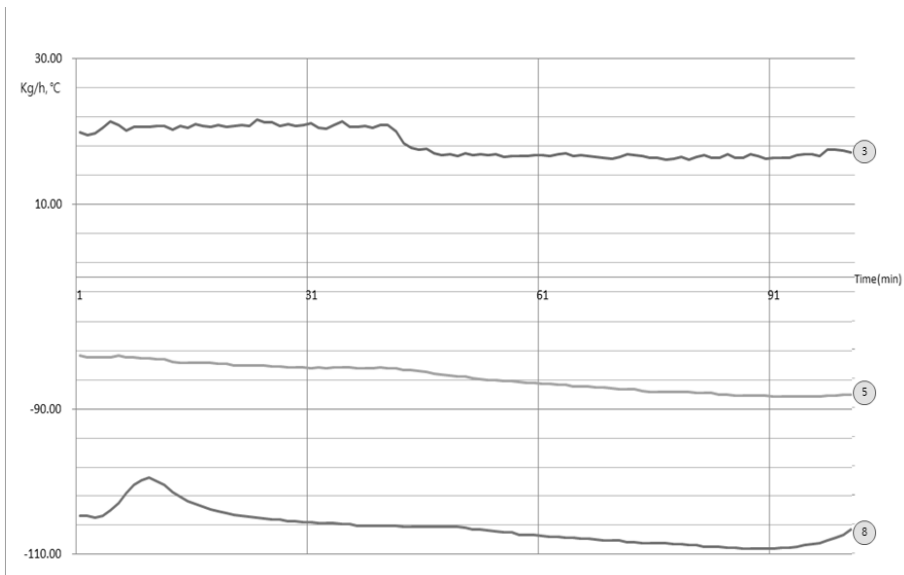


Fig. 8. The trend of LNG flow rate and natural gas temperature.

합냉매의 증발온도는 다시 하강하며, 천연가스의 온도 역시 서서히 하강하는 것을 확인 할 수 있다. 혼합냉매의 증발온도가 높다는 것은 냉매의 과열도가 높다는 것으로, 냉매의 유량이 부족하다는 것을 의미한다. 공정에서 3개의 조절 변수 중 하나인 PCV-202는 MRL의 유량을 조절할 수 있으며, MRL의 유량은 MCHE1에서 냉매의 증발온도에 가장 큰 영향을 미친다고 분석할 수 있다.

3.2. MRV 유량에 따른 온도 변화

MRV의 유량이 전체 공정에 미치는 영향을 분석해보면, MRV는 MRL과는 다르게 MCHE1과 MCHE2 두 열교환기에 관여됨을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 따라서 운전 데이터 중 Fig. 6에서 기록된 4개의 제어변수와 MCHE2에 관련된 4, 5, 6의 온도를 함께 그림으로 나타내보면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 MRV의 유량이 60분, 100분, 130분, 150

분에서 떨어지는데, 이 때의 반응에 가장 크게 반응하는 것은 4번과 6번으로 4번은 MCHE2를 통해서 냉각되는 MRV 자신이고, 6번은 MCHE2에서 MRV의 과열도이다. MRL과 마찬가지로 증발 온도가 유량에 민감한 반응을 보였고, 또한 MCHE2에서 냉각되는 유체의 온도 역시 비슷한 반응을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 반면에 MCHE1에서 냉각되는 1, 2, 3 영향이 적다는 것을 알 수 있다. PCV-203은 MRV의 유량을 조절할 수 있으며, MRV의 유량은 냉매의 증발온도와 MCHE2에서 냉각되는 유체에 직접적으로 영향을 주게 되는 것을 알 수 있다.

3.3. LNG 유량에 따른 냉매 온도 변화

천연가스 액화 공정에서 천연가스의 생산량과 냉매의 양은 비례관계를 형성한다. 즉 천연가스를 액화시키는 양이 많을수록 냉매의 유량은 커져야 한다. 반대로 어떠한 원인으로 인해서 정상상태에서 냉매의 유량이 줄어들게 되면, 천연가스의 유량도 줄어들어야 한다. 이와 같은 관계를 나타낸 것이 Fig. 8과 같다. Fig. 8은 천연가스의 유량에 따른 MRL과 MRV의 온도 변화 추이를 나타낸다. 그림에서 나타나듯 시작 후 약 40분이 경과 하였을 때, 천연가스의 유량을 줄이게 되면 거의 일정하던 냉매의 온도가 점차 내려가는 것을 확인 할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 천연가스 액화 공정 중 가장 널리 쓰이는 C3MR 공정을 대상으로 파일럿 플랜트를 제작하고 운전하여 세 개의 조절변수인 혼합냉매(MRL, MRV)와 천연가스의 제어밸브가 공정에 미치는 영향을 파악하였다. 제한한 시스템에서 혼합냉매와 천연가스는 기본적으로 천연가스의 유량이 증가하면 혼합냉매의 유량이 증가해야 하는 시스템이지만, 혼합냉매의 기상 부분과 액상 부분이 차지하는 역할이 다르고, 이 세 유체의 상관관계가 단순하지 않기 때문에 단순 regulatory 제어를 통해서 안정적인 운전을 하는데 무리가 있을 것이라 판단된다. 실험결과 MRL의 유량 변화는 MCHE1에서 증발온도가 가장 크게 반응하였으며, MRV의 유량변화는 MCHE2를 통해 냉각되는 유체들이 가장 큰 반응을 보였다. 또한 천연가스 투입량에 따라서 혼합냉매의 온도 변화를 야기할 수 있으며, 혼합냉매의 온도 변화는 결국 천연가스 자신의 온도에 영향을 주었다.

기본적으로 MRL은 MCHE1에서의 온도를 제어

하는 역할을 수행하지만, MRV의 유량 및 온도의 상태에 따라서 조절 변수의 값이 틀려질 수 있고, 또한 천연가스의 유량에 따라라도 달라져야 한다. 마찬가지로 MRV의 MCHE2의 온도를 제어하는 역할을 하지만 MRL의 유량과 LNG의 유량에 따라서 조절 변수의 값이 달라져야 한다. 따라서 각 조절변수들에 따른 주요 제어변수의 변화가 존재하고 그에 따른 종속 변수들의 변화가 공존하는 공정으로 단일 루프를 통한 유량 및 온도 제어의 개념보다는 2개 이상의 변수에 대한 변화에 적합한 cascade control이 더 효과적인 제어 방법이 될 수 있을 것이며, 나아가 MPC (Model Predictive Control)와 같은 APC(Advanced Process Control)과 같은 제어 기법이 효과적일 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 LNG 플랜트 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] DOE study on domestic natural gas in the energy supply chain at Natural gas technology assessment. DOE/NETL. 1539 (2012)
- [2] Ibrahim Dincer, Mehmet Kanoglu, Refrigeration Systems and Applications, 1, 241, John Willy & Sons, Ltd, Hoboken (2010).
- [3] Arthur J. Kidnay, William R. Parrish, Fundamentals of Natural Gas Processing, 1, 289, CRC press, Boca Raton (2006).
- [4] G. Venkatarathnam, Cryogenic Mixed Refrigerant Process, 1, 149, Springer Science, New York (2008)
- [5] Tomas E. Marlin, Process Control: Designing processes and control systems for dynamic performance, 1, 216, McGraw-Hill, Boston (2000).
- [6] Ibrahim Dincer, Mehmet Kanoglu, Refrigeration Systems and Applications, 1, 109, John Willy & Sons, Ltd, Hoboken (2010).
- [7] M. M. Faruque Hasan, I. A. Karimi, Operational Modeling of Multistream Heat Exchangers with Phase Changes, 55, 150, AIChE Journal, New York (2008).