

동적 모사를 이용한 천연가스 액화 공정에서 혼합냉매 공정 제어 연구

†이재용·박찬국

고등기술연구원 플랜트엔지니어링 본부
(2015년 10월 2일 접수, 2015년 12월 11일 수정, 2015년 12월 24일 채택)

A Study of Mixed Refrigerant Process Control in Liquefied Natural Gas Process using Dynamic Simulation

†Jae Yong Lee · 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 October 2, 2015; Revised December 11, 2015; Accepted December 24, 2015)

요약

천연가스의 이송을 위해 현재까지 가장 효율적인 방법은 액화를 통한 운반이다. 천연가스를 액화하기 위해서는 -160°C 이하로 냉각시켜야 하는데, 그 방법에는 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 가장 대표적인 액화 공정인 C3MR 공정에 대한 제어 방법에 대해 연구하였다. 천연가스 액화 공정의 제어는 천연가스 품질을 유지할 수 있는 도구이며 안정된 운전을 보장하는 수단이다. C3MR 공정을 분석하고 제어 밸브에 대한 제어 변수를 선택하고 제어 변수의 계단 응답 결과를 통해 혼합냉매의 제어 구조를 도출하였다. 도출된 제어 결과를 동적 모사를 통해서 임의의 외란을 주어 정상상태를 유지하는 결과를 확인 하였다.

Abstract - Today the most efficient way to transport the natural gas is carried via the liquid. In order to liquefy the natural gas to be cooled to -160°C or less. Cooling method has a number of different ways. In this paper, we studied control method for the representative liquefaction process, C3MR. Natural gas liquefaction control is a tool that can maintain the quality of natural gas is a means to ensure stable operation. Analyzing the C3MR process, and select the control parameters for the control valve. We find control structure for mixed refrigerant cycle through the step response. A control result obtained through the dynamic simulation arbitrarily given a disturbance was found to maintain a steady-state results.

Key words : C3MR, process control, dynamic simulation, liquefied natural gas

1. 서론

LNG(Liquefied Natural Gas)의 성분은 85~99%의 메탄과 미량의 에탄 및 프로판으로 구성되는데, 이는 생산지에 따라서 결정된다. 현재 천연가스는 전력생산과 일상생활에서 친환경적인 요인으로 석탄 및 석유를 대체해서 광범위하게 사용되고 있다.[1] 천연가스를 액화 시켜서 LNG로 만드는 이유는 천연가스의 부피를 약 1/600으로 줄일 수 있기

때문인데 천연가스를 LNG로 만들기 위해서는 많은 양의 기계적 에너지가 필요하다. 알려진 바로는 LNG 1톤 당 약 500kWh의 전기에너지가 필요하다.[2] 이와 같이 많은 양의 에너지를 필요로 하는 천연가스 액화 공정에서 LNG 생산량 대비 소비 전력은 액화 플랜트의 설계 및 운영 부분에서 가장 큰 고려사항이다. 특히 천연가스 액화 플랜트는 오늘날 생산량이 5MTPA(Million Ton Per Annum) 이상으로 그 비중이 점점 늘어나고 있으며, 최초 단일 냉매를 사용하여 냉매 사이클을 다단으로 늘려가는 방법에서 혼합냉매를 사용하는 추세로 발전하고 있다.[3]

천연가스 액화공정에서 혼합냉매를 사용하는 주된

†Corresponding author:young2004@iae.re.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

이유는 단일 냉매를 사용하는 것에 비해 더 큰 효율을 낼 수 있기 때문인데, 이것은 단일냉매와 달리 등압 조건에서 넓은 온도 범위에서 냉매의 증발이 있기 때문이다.[4] 천연가스 액화 공정에서 사용되는 혼합냉매는 단일 성분의 탄화수소 계열(보통 메탄, 에탄, 프로판, 부탄)과 질소를 이용하는데 이는 천연가스 액화의 냉동 특성에 기인하며, 질소를 사용하는 이유는 낮은 액화 온도 때문이다.[5]

LNG 플랜트에서 혼합냉매를 사용하는 공정 중에서 가장 널리 알려진 공정은 C3MR(Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant)로 전 세계 주요 LNG 공정에서 사용되고 있다. 용량은 현재 계속 증가하여 2015년까지 연간 10%씩 증가할 것으로 추정된다.[6] C3MR 공정은 프로판(C₃H₈)을 이용하여 약 -35°C 부근까지 예냉하고 탄화수소 계열의 혼합냉매를 이용하여 -160°C 이하로 냉각하여 천연가스를 액화하는 공정으로 전 세계 LNG 생산에서 약 80% 정도 이 공정을 사용하고 있다.[7]

본 연구에서는 C3MR이 가진 동적 특성을 파악하고 각 제어 변수와 조절 변수 간의 단위 응답을 통해서 변수간 관계를 통해서 천연가스 액화 공정에서의 적절한 제어 방법에 대해 서술 하였다. 기존의 C3MR 공정의 제어 구조는 여러 방법들이 있는데, 이와 같은 방법으로 새로운 제어 방법을 도출 할 수 있다는 것에 의의를 둔다.

II. 공정 모사

2.1. 대상 공정

혼합 냉매를 이용한 천연가스 액화 공정은 다수

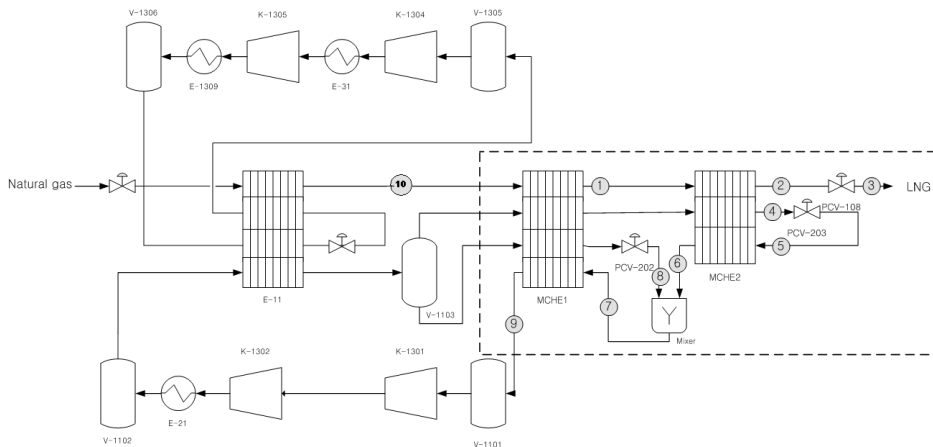


Fig. 1. C3MR process diagram.

개발되어 왔으며, 앞서 언급했듯 에너지 효율에서 상당한 이점이 있기 때문에 최근에는 대부분이 혼합냉매를 이용해서 액화 공정을 구성하고 있다. 본 논문에서 혼합냉매의 공정제어를 구성하기 위해 사용하는 공정은 C3MR이며, 대략적인 구성은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1의 C3MR에서 위쪽의 압축기가 프로판 냉매로 예비냉각을 하는 프로판 사이클에서의 프로판 압축기이며, 아래쪽의 압축기가 천연가스 액화를 위해서 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)에서 냉매역할을 하는 혼합냉매를 압축하기 위한 압축기이다. 점선으로 표시된 부분이 해당 부분으로 본 논문에서 제어를 하기 위한 대상이라 할 수 있다.

2.2. 모사 환경

천연가스 액화공정을 시뮬레이션 하기 위해서 Aspen Hysys를 이용하였으며, 대상 공정은 C3MR로 하였다. 시뮬레이션을 하기 위한 동적 모델을 구성하는 중요한 절차 중 하나가 물성치를 정하는 것이다. 시뮬레이터에는 다양한 물성치 환경이 제공되는데, 많은 학자들은 혼합냉매에 대한 상태 방정식을 연구하여 왔지만 정확한 상태방정식을 확인 할 수는 없었다.[8-9] 그 중에서 Peng-Robinson EoS(Equation of State)가 가장 좋은 상태 방정식 중 하나라고 알려져 있다.[10] 따라서 본 논문에서 대상으로 하는 C3MR을 모델링하기 위해서 Peng-Robinson 상태방정식을 이용하였다.

2.3. 공정 모델

혼합냉매를 사용한 액화 공정 제어를 시뮬레이션 하기 위해서 동적 모델이 필요한데, Aspen Hysys를

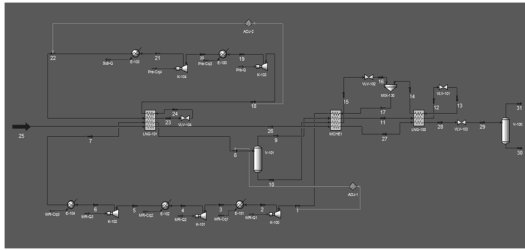


Fig. 2. C3MR steady state model(30kg/h).

Table 1. Main controlled variables of steady state model

Natural gas Feed Pressure ①	70 bar
Natural gas pre-cooled temperature ⑩	-32 °C
Natural gas final temperature ③	-160 °C
Natural gas flow rate ③	30kg/h
Mixed refrigerant high pressure ④	60 bar
Mixed refrigerant flow rate ⑦	60 kg/h
Mixed refrigerant evaporated temperature ⑨	-32 °C
MRV/MRL flow ratio ④/⑧	1/5

이용해서 동적 모델을 구성하였다. 동적 모델을 구성하는 데는 여러 가지 정보들이 필요한데, 본 논문에서는 30kg/h급 Bench Scale Unit을 대상으로 액화 공정을 시뮬레이션 하였다. 동적 모델을 구성하기 위해서 우선적으로 정적 상태의 공정 모델이 필요한데 아래의 Fig. 2 와 같이 30kg/h 급의 천연가스 액화 공정 정적 모사를 진행하였다.

Fig. 2의 정적 모사를 통해서 C3MR 모델의 주요 제어 변수들의 온도, 압력 및 유량 값들을 나타내보면 Table 1과 같다.

III. 동적 모사 - 단위 응답

C3MR에 대한 정적모사가 완료되면 압축기 및 열교환기 등의 주요 기자재에 대한 사양 등을 입력하고 밸브의 사이징을 수행하여 동적 모사 환경을 구성한다. 각각의 제어변수의 변화에 따른 응답을 확인하고 제어를 설치 및 튜닝해야 하기 때문에 제어기는 매뉴얼 모드로 셋팅을 하고 변화에 대한 응답을 살펴본다.

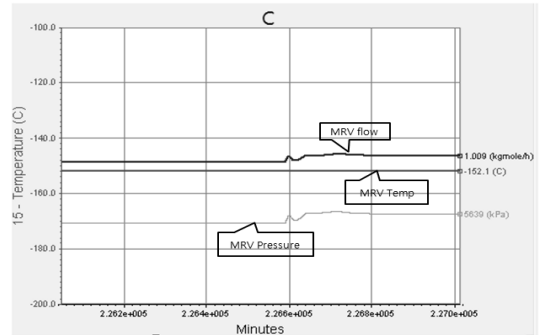
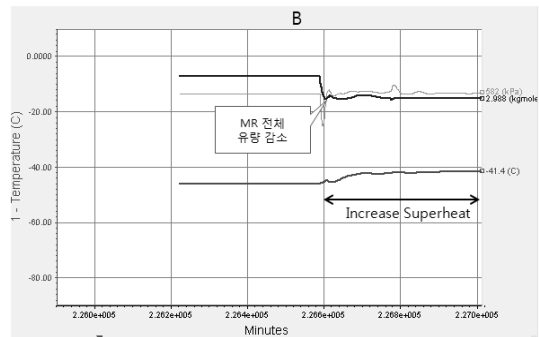
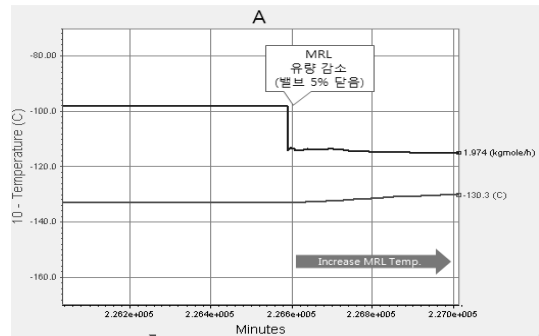


Fig. 3. Step response of mixed refrigerant(MRL) decrease flow.

3.1. 냉매 유량 감소 응답

C3MR공정에서 냉동을 위한 냉매의 제어밸브는 Fig. 1의 PCV-202에 해당하는 MRL(Mixed Refrigerant Liquid) 부분의 제어밸브와 Fig. 1의 PCV-203에 해당하는 MRV(Mixed Refrigerant Vapor) 부분의 제어밸브가 있는데, 이를 통해서 냉매의 유량을 적절히 제어할 수 있다. 정상 상태에서 각각의 밸브를 단았을 때의 공정 응답을 확인한 것이 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 A가 인위적으로 MRL의 유량을 감소시켰을 때의 그림이다. MRL의 유량이 감소됨에 따라서 MRL의 온도가 상승하는 트렌드를 확인 할 수

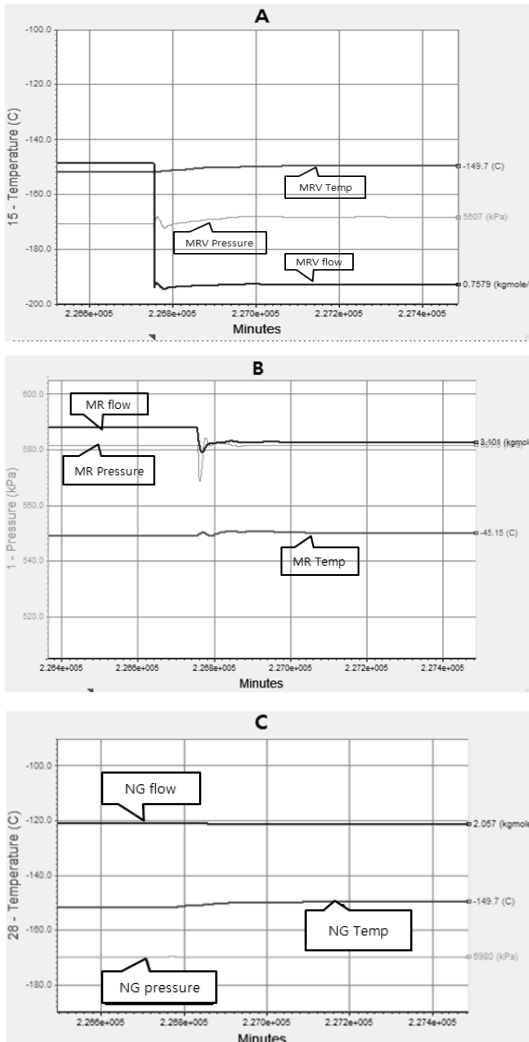


Fig. 4. Step response of mixed refrigerant(MRV) decrease flow.

있다. Fig. 3 B에서는 MRL의 유량이 감소하였으므로, 전체 MR의 유량이 감소한 모습을 보이며, MCHE1에서의 과열도가 높아진 것을 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있는 것은 냉매의 유량이 줄었을 때 냉매 자체의 온도는 서서히 상승하는데, MCHE1의 과열도는 비교적 빠르게 상승한 것을 확인할 수 있다. 이것은 MCHE1에서의 냉매의 과열도가 상승하면 냉매가 부족한 것으로 판단하고 냉매의 유량을 늘려주면 된다. C에서는 MRV의 온도로 MRL 유량의 감소로 인해 MCHE1에서의 온도 상승으로 MCHE2

에 영향을 주어 MRV의 온도가 서서히 상승하는데 그 영향이 미미하고 속도 또한 느리다. 그림에서 나타나듯 냉매의 온도 변화보다 과열도 상승이 비교적 더 빠르게 일어나는 것을 볼 수 있어 냉매 유량이 부족하다는 것을 과열도로 판단 할 수 있다. 즉 냉매의 온도 보다 MCHE1의 과열도가 더 좋은 제어변수가 될 수 있다.

Fig. 4에서는 MRV의 유량을 줄이기 위해 밸브를 20%정도 닫았을 때 나타나는 현상을 나타낸 것으로서 그림 A에서는 MRV 유량이 줄면서 MRV 자신의 온도도 상승하는 트렌드를 볼 수 있다. 그림 B에서는 전체적인 혼합냉매의 유량이 줄고 Fig. 3과 마찬가지로 온도가 상승하는 것을 볼 수 있는데, Fig. 3에 비해 적은 온도 상승률을 보인다. 이것은 MRL에 비해서 MRV의 유량이 절대적으로 적은 것에 기인한다고 볼 수 있다. 그림 C는 천연가스 최종 후단의 온도인데 점점 천연가스의 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 천연가스의 온도 상승은 결국 천연가스의 수율에 영향을 미치게 되므로 제어에서 중요한 요소라 할 수 있다. MRL의 유량의 변화에 비해서 MRV의 유량 변화에 천연가스 최종 온도가 민감하게 반응하는 것을 Fig. 4의 그림 C에서 확인할 수 있다.

IV. 동적 모사 - 자동 제어

아래의 Fig.5는 천연가스 유량이 증가하였을 때의 단위 응답을 나타낸다.

Fig. 5 A에서 천연가스 유량이 증가했을 때 천연가스의 액화 온도가 서서히 증가하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 천연가스 온도의 증가는 LNG의 수율에 직접적인 영향을 주기 때문에 중요한 제어 대상이라 할 수 있다. 그림 B의 MCHE1 과열도 온도 트렌드를 보면 천연가스 유량이 증가하고 빠르게 MCHE1의 과열도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 C는 MCHE1의 후단 온도를 나타내고 과열도에 비해서 반응이 늦게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 정리하면 혼합냉매에서 MRL은 MCHE1의 온도를 제어하기에 가장 적합하며 유량의 변화에 가장 빠른 응답을 나타내는 것은 MCHE1의 과열도로 그것을 제어변수로 이용하는 것이 적합하다고 볼 수 있다. 그리고 천연가스의 조건에 가장 민감한 반응을 보이는 MRV는 천연가스의 온도에 대한 제어변수로 적합하다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 2의 정적 모델을 동적 모델로 구성한 그림이다. MRL의 제어밸브는 MCHE 1의 과열도에 따라서 제어할 수 있게 하는데, MRL의 유량을 primary controller로 하는 cascade control을 구성

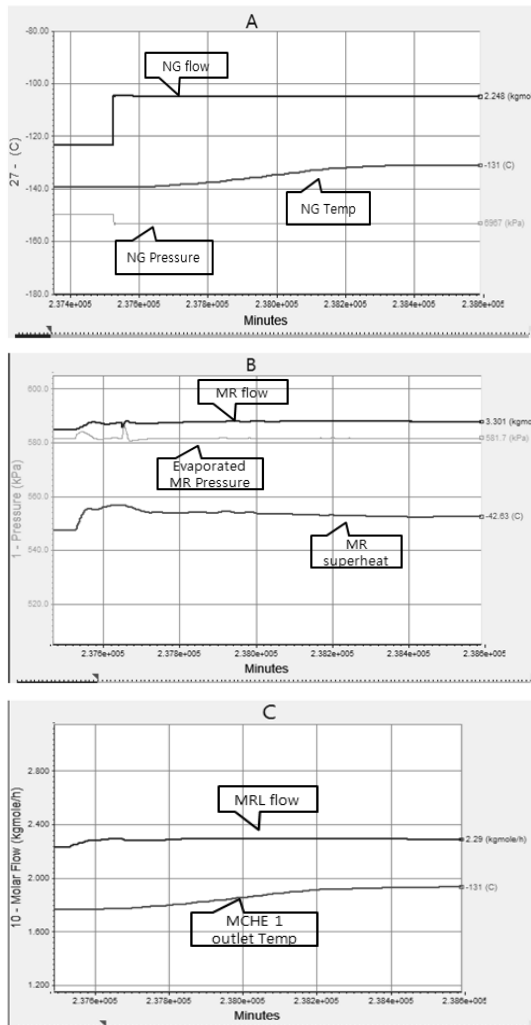


Fig. 5. Step response of natural gas increase flow.

하였다. 그리고 MRV 제어밸브는 천연가스의 온도를 제어 할 수 있게 구성하였는데, 혼합냉매에서 MRL과 MRV의 유량비는 예냉 온도에 따라 결정되어 MRV의 유량을 무작정 늘릴 수는 없기 때문에 MRV와 MRL의 유량비를 primary controller로 하는 cascade control을 구성하였다. 제어기 구성에서 PID 제어기의 tuning parameter는 Hysys 내의 auto tuning을 사용하였다. 제어변수와 조절변수와의 관계를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 7은 Fig. 5에서와 같이 천연가스 유량 증가에 따른 반응을 나타낸다. 그림 A에서 천연가스 유량이 늘어남에 따라서 상대적으로 냉매의 유량이 부족

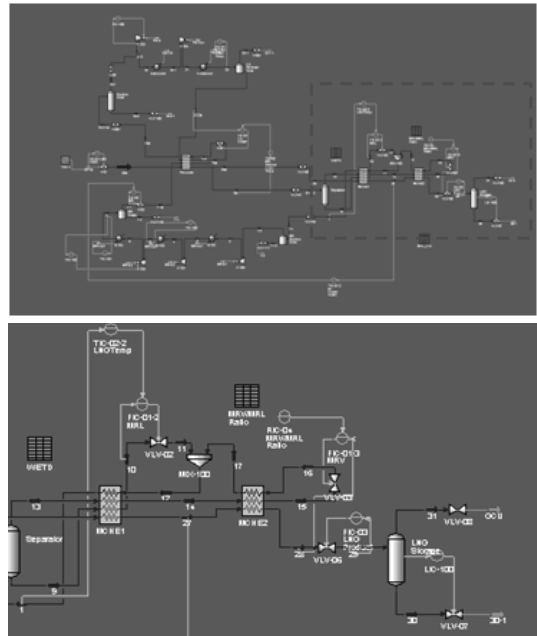


Fig. 6. C3MR dynamic simulation model.

Table 2. Controlled variables and Manipulated Variables of the model

No.	Controlled Variables	Manipulated Variables
1	MRL flowrate	MRL control valve
	MCHE1 superheat	
2	MRL/MRV flow ratio	MRV control valve
	Natural gas temp.	

하게 되어 그림 B의 과열도가 증가하게 되고 과열도의 set point에 따라서 MRL의 유량이 증가하는 것을 볼 수 있다. MRL의 유량 증가에 따라 과열도는 다시 원래의 값으로 돌아가는 것을 확인할 수 있고, C 그림에서 MCHE1 후단의 온도 분포 역시 천연가스 유량의 증가에 따라 상승하다가 바로 원래의 값으로 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

천연가스 액화 공정 중에서 가장 대표적인 C3MR 공정을 동적 모사를 통해서 각 제어 변수에 따른 반

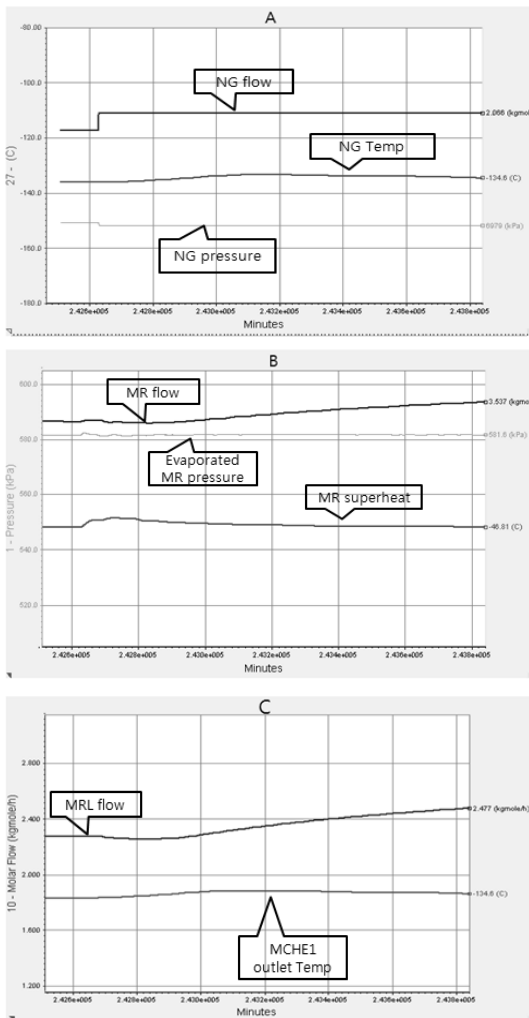


Fig. 7. Result of C3MR dynamic simulation.

응을 확인하고 이를 통해서 자동제어 방법에 대해서 제시하였다. 실제로 천연가스의 유량이 급격히 상승하는 일은 없겠지만 외기 온도 상승 및 냉각 장치 이상 등으로 냉매의 공급에 차질이 빚어 질 때와 유사한 상황을 모사하기 위해서 천연가스 유량을 증가시켜 냉매의 유량 제어 결과를 확인하였다. 냉매의 유량의 변동에 가장 빠르게 반응하는 값은 MCH1의 과열도로 이것의 정상상태 값을 set point로 하고 제어한 결과 MCH1의 후단 온도가 안정적으로 나오는 것을 확인하였고 이를 통해서 LNG 생산 수율을 확보 할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 LNG 플랜트 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Lu, T. and Wang, K.s., , Analysis and optimization of cascading power cycle with liquefied natural gas(LNG) cold energy recovery, Applied thermal Engineering, Vol. 29, No. 8-9, 1478-1484, (2009)
- [2] Liu, M., Lior, N., Zhang, N. and Han, W., Thermoeconomic analysis of a novel zero-CO2-emission high-efficiency power cycle using LNG coldness, Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 11, 2768-2781, (2009)
- [3] Arthur J. Kidnay, William R. Parrish, Fundamentals of Natural Gas Processing, 1, 289, CRC press, Boca Raton. (2006)
- [4] Nogal, F.D., Kim, J.K, Perry, S. and Smith, R., Optimal design of mixed refrigerant cycles, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 47, No. 22, 8274-8740, (2008)
- [5] Lee, G.C., Smith, R. and Zhu, X.X., Optimal synthesis of mixed-refrigerant systems for low temperature process“, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 41, No. 20, 5016-5028, (2002)
- [6] A Global Market, LNG Industry, Autumn, (2006)
- [7] M. J. Roberts and Y. N. Liu and J. C Bronfenbrenner, Reducing LNG Capital Cost in Today's Competitive Environment, 14th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas(LNG 14), PS2 -6, 1-12, Doha - Qatar, (2004)
- [8] Patel, N.C. and Teja, A.S., A new cubic equation of state for fluids and fluid mixtures, Chemical Engineering Science, Vol. 37, No. 3, 463-473, (1985)
- [9] Lee, M. J. and Sun, H. C., Thermodynamic property prediction for refrigerant mixtures, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 31, No. 4, 1212-1216, (1992)
- [10] Peng, D.Y. and Robinson, D.B., A new two-constant equation of state, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 15, No. 1, 59-64, (1976)