

Boil-off Gas 재액화 시스템의 동적모사 및 제어

윤문규, 이윤표¹, 신유환¹, 이문용*
 영남대학교 공과대학 디스플레이화학공학부
¹한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터
 (mynlee@yu.ac.kr)

Dynamic simulation and Control of Boil-off Gas reliquefaction System

Yoon Mun kyu, Yoon Pyo Lee¹, Shin You Hwan¹, Lee Moon yong*
 School of display & Chem. Eng., Yeungnam University,
¹Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology
 (mynlee@yu.ac.kr)

1. 서론

우리나라 LNG 소비는 매우 빠르게 증가하고 있으며 고유가의 지속등으로 인하여 더욱 더 많은 양을 필요로 하게 되었다. 이러한 LNG의 수요시장의 확대로 LNG를 운반하기 위한 LNG공급선의 수요도 증가할 전망이다. 현재까지 LNG선은 운반 시 필연적으로 발생하는 BOG(Boil-off gas)는 GCU(Gas combustion unit)로 보내 연소시킨 후 대기로 방출하거나 선박의 연료로써 이용되었다. 그러나 이는 에너지 효율이 떨어지고 에너지 손실이 많아 보다 더 효율적인 시스템 개발이 요구되어졌다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 BOG 재액화시스템에 관한 연구가 진행 중이다. BOG 재액화시스템은 그 효율성과 경제적인 측면에서 많은 이점을 가지고 있으며 곧 상용화가 될 것으로 예측된다. 현재 선박용 BOG 재액화시스템의 pilot plant가 건설중에 있으나 아직 제어기법의 연구는 잘 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 AspenHYSYS를 이용하여 Reverse Brayton cycle을 이용한 재액화 시스템을 구성하여 dynamic simulation을 수행하고 이를 바탕으로 재액화 시스템의 특성 및 제어 시스템을 구성하였다.

2. Reverse Brayton cycle을 이용한 재액화 시스템 설계

Reverse Brayton cycle을 이용한 재액화 시스템은 LNG cycle과 N₂ cycle의 2가지 과정으로 구분된다. Reverse Brayton cycle을 이용한 BOG 재액화시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. LNG 사이클에서는 극저온의 LNG 운반선의 저장탱크 내에서 외부 열전달로 인하여 발생하는 BOG는 압축기를 통해 3.6bar로 압축되고, 이 압력하에서 초저온 열교환기인 BOG 응축기를 통과하면서 -160℃로 재액화된다. N₂ cycle에서는 고온 저압의 질소가 3단 원심 압축기와 중간냉각기를 통과한 후 압력이 상승되어 고온 고압으로 압축된다. 압축된 질소는 cold box 내부의 질소 열교환기에서 저온부 질소와 내부 열교환을 통하여 냉각되고 냉각된 질소는 팽창터빈을 지나면서 액화점에 가까운 저온, 저압 가스로 변화되어 BOG 응축기를 통과하며 BOG 재액화를 수행한 후 질소가스는 질소 열교환기를 통과하면서 다시 고온으로 상태로 변화하게 된다.

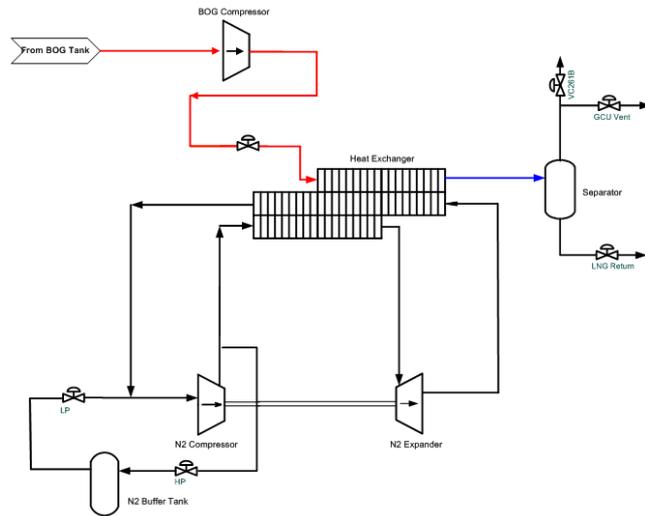


Fig. 1 BOG reliquefaction system base on Reverse Brayton cycle

2-1. Control System

BOG를 재액화하기 위하여 N2 Buffer Tank 양단에 설치된 control valve를 이용하여 N2 cycle의 순환량의 조절을 통해 Separator의 압력을 일정하게 제어한다. Control system은 최종제어요소인 Separator의 압력이 강한 비선형성을 가지고 있어 Fig. 2와 같이 N2 compressor 입구 압력을 제어하기 위한 secondary 제어 loop와 초저온용 열교환기 후단의 압력을 제어하는 primary loop를 가진 cascade 제어기에 의해 제어된다. master controller는 setpoint와 현재 separator의 압력을 비교하여 slave 제어기의 setpoint를 제어출력으로 하고 slave controller는 split range controller를 사용하여 setpoint가 50%이상일 때는 LP valve를 조작하고 50%이하의 HP valve의 opening을 조절하여 N2 compressor suction pressure를 제어하여 최종 BOG 응축기 후단의 압력을 제어하는 방식이다.

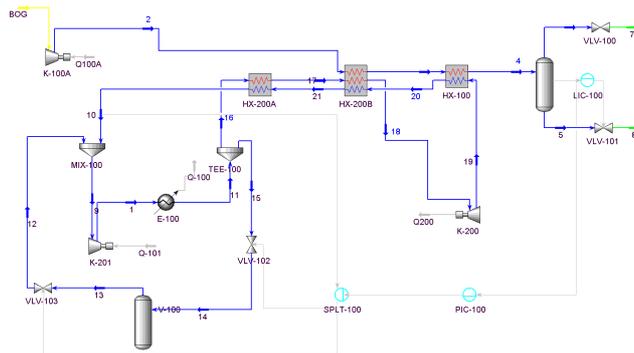


Fig. 2 control structure of BOG reliquefaction system

2-2. Simulation

Open loop test한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. N2 buffer tank 양단에 있는 밸브의 동특성이 달라 비선형적인 거동을 보이는 것을 Fig. 3에 나타내었다. 이러한 비선형적인 거동으로 인해 서로 다른 tuning parameter를 적용하여야 하나 simulator의 특성상 split range controller가 하나의 parameter를 사용하므로 tuning값을 좀 더 보수적인

공정인 HP valve의 특성에 맞추어 tuning하였다.

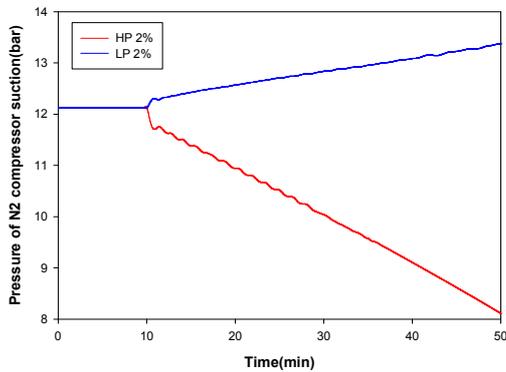


Fig. 3 Open loop test of Secondary loop

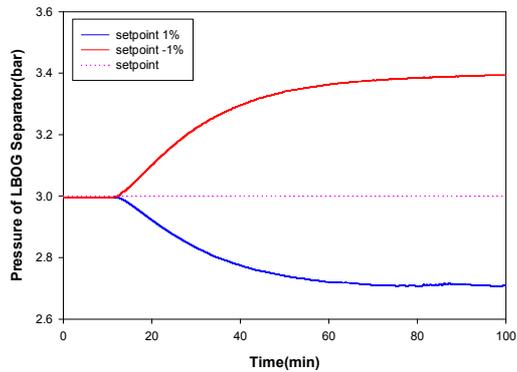


Fig. 4 Open loop test of primary loop

Fig. 4에서 보듯이 separator의 특성 또한 비선형적인 움직임을 보이므로 master controller의 tuning값도 보수적인 응답에 맞추어 tuning하였다. 각각의 전달함수와 tuning값은 Table. 1과 같고 Fig. 6에 system의 Block diagram을 표현하였다.

Table. 1 process model & tunig parameters

	secondary loop	primary loop
process model	$p_2 = \frac{0.0006}{s}$	$p_1 = \frac{0.3499}{19.2308s + 1}$
K_c	1.412	0.1
τ_1	0.1449	10

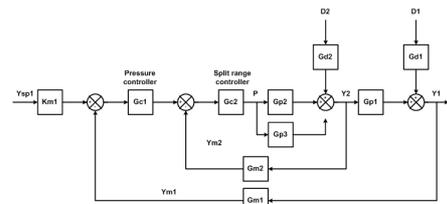


Fig. 5 Block diagram of cascade control BOG reliquefaction system

Fig. 6과 Fig. 7은 BOG flow rate의 ±5% step change에 대한 system의 응답형태를 나타내었다.

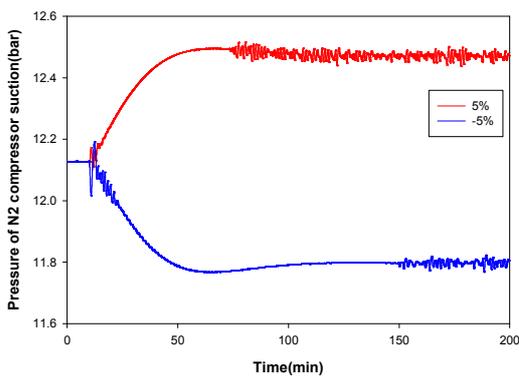


Fig. 6 Disturbance rejection test of primary loop

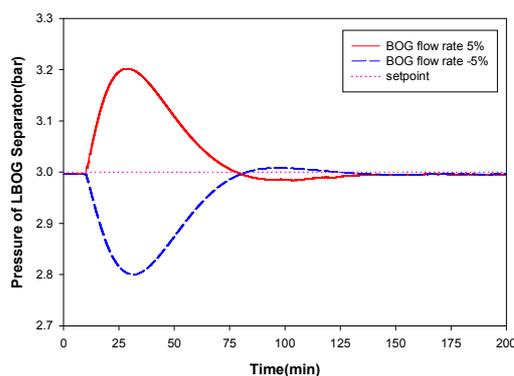


Fig. 7 Colse loop response of disturbance

BOG의 양의 증가는 열교환기 후단의 압력증가를 가져오고 증가된 압력을 제거하기 위하여 LP valve를 조절하여 N₂ 순환량을 증가시킨다. 증가된 냉각 부하량만큼의 N₂ 순환량이 조절되어 Fig. 8에서 보듯이 초기에는 fration이 약간 증가하였다가 약 28min

이후에서는 열교환기를 거처나오는 LNG의 fraction이 0에 가깝게 제어되어 BOG가 전량 액화됨을 알 수 있다. 온도 또한 BOG의 액화온도인 -160°C 에 근접하여 제어됨을 보여준다.

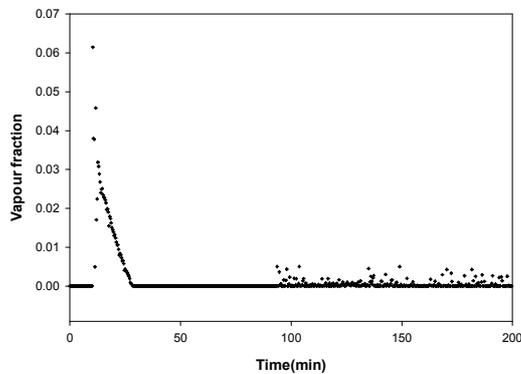


Fig. 8 vapour fraction at the heat exchanger exit

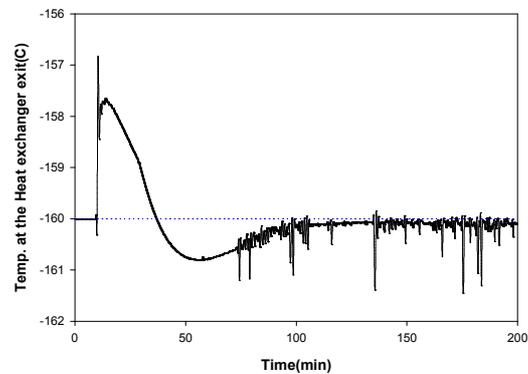


Fig. 9 Temp. at the heat exchanger exit

3. 결론

현재 건설 중인 선박용 BOG 재액화시스템의 pilot plant 운전 특성을 예측하기 위하여 공정모사 동특성 모델을 개발하고 시뮬레이션하였다. Cascade control loop와 splitrange controller를 사용하여 BOG 재액화 system의 제어성능을 알아보았다. 그 결과 여러 장치들의 동특성을 파악하여 잠열로 발생하는 BOG의 전량 액화가 가능함을 확인할 수 있었다.

감사

이 과제는 에너지 관리공단의 2006 에너지자원기술개발과제와 2단계 BK사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, NJ(2003)
2. Yongho Lee, Sunwon Park, Moonyong Lee, PID Controller Tuning To Obtain Desired Closed Loop Response for Cascade Control Systems, Ind. Eng. Chem. Res., 37(5), 1859-1865(1998)
3. Panagiotis D. Christofides, Control of Nonlinear Distributed Process Systems: Recent Development and Challenges, AIChE Journal, 47(3), 514-518(2001)
4. Jongpal Jeon, Yoonpyo Lee, Moonyong Lee, The Study of Dynamics of Boil-off Gas Re-liquefaction System of LNG Carrier, Proceeding of 2007 KICChE Fall Meeting, Submitted