

LNG 액화 사이클 효율에 미치는 2단 압축 인터쿨러의 영향

유선일³ · 오승택¹ · 이호생² · 윤정인[†] · 최건형³ · 이상규³

(원고접수일 : 2009년 9월 15일, 원고수정일 : 2009년 11월 9일, 심사완료일 : 2009년 12월 22일)

Effect of Two staged Inter-cooler on Efficiency of LNG Liquefaction Process

Sun-il Yoo³ · Seung-taek Oh¹ · Ho-saeng Lee² · Jung-in Yoon[†] · Keun-hyung Choi³ · Sang-gyu Lee³

요 약 : 본 논문에서는 천연가스 액화 플랜트 산업에서의 경쟁력 확보를 위한 핵심기술인 2단 압축 인터쿨러 방식을 적용한 액화공정에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이 공정들은 기본 캐스케이드 공정을 기초로 하였으며, 모든 공정에 2단 압축 방식을 적용하였다. 먼저 프로판, 에틸렌, 메탄 사이클에 각각 인터쿨러를 적용하였으며 성능 특성을 비교하였다. 모든 사이클에 인터쿨러를 적용한 공정의 COP가 13.7 ~ 20.5%로 가장 크게 증가하였고, LNG 단위 생산량 당 소요 에너지는 기본 캐스케이드 공정에 비해 23.8% ~ 35%로 가장 크게 감소하였다.

주제어 : 인터쿨러, 초저온, 액화 천연가스, 캐스케이드

Abstract: In this study, several types of natural gas liquefaction processes using two staged Inter-cooler are simulated and designed to secure a competitiveness in the industry of natural gas liquefaction plant. These processes are based on basic cascade process, and all of these are improved with two staged compressors type. One of types is applied Inter-cooler to each cycle such as propane, ethylene, methane, the other type is applied Inter-cooler to whole cycle. These processes are compared characteristics of performance with basic process. Cascade process with two staged Inter-cooler in the whole cycle is on the top ranked with increment ratio of COP about 13.7 ~ 20.5%, and yield efficiency of this process are improved comparing with the basic process by 23.8% ~ 35% lower specific power, respectively.

Key words: Inter-cooler, Cryogenic, LNG, Cascade

기호 설명

P_h	: 압축기 고단축 압력	[kPa]
P_m	: 압축기 저단축 압력	[kPa]
W	: 압축일량	[MW]
R	: 냉동능력	[MW]
COP	: 성능계수	[-]

1. 서 론

천연가스는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 등과 같이 여러 가지 성분들이 혼합되어있고 메탄이 80% 이상 차지하고 있으며, 약 -162°C 정도의 비등점을 가지고 있는 화합물로써, 현재 우리나라의 1차 에너지의 약 14%를 차지하는 주요 에너지원의 하나로 연간 약 26백만 톤을 해외에서 LNG

[†] 교신저자(부경대학교 기계공학부, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180)

1 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

2 부경대학교 기계공학부

3 한국가스공사

(Liquefied Natural Gas) 상태로 수입하고 있다[1]. 또한 천연가스는 무색, 무취, 무독성으로 오염물질이 없기에 청정연료에 대한 요구와 맞물려 친환경 에너지로써 각광 받고 있으며, 국제 유가 상승으로 인하여 세계적으로 천연가스의 수요가 급증하고 있다[2]. 이로 인해 LNG 플랜트 사업이 고부가 가치 산업으로 각광받고 있다. 하지만 LNG 플랜트 산업에서 가장 핵심 기술인 액화 공정 기술을 보유하고 있는 몇몇의 선진 업체들이 독점하여, 시장 카르텔을 형성하여 후발 업체의 시장 진입이 어려운 상황이다.

LNG 플랜트 시장은 일본과 미국이 97%정도를 차지하고 있으며, Bechtel사는 Phillips사와, Chiyoda 화공은 Shell사와, JGC와 KBR사는 APCI사와 카르텔을 형성하여 플랜트 시장을 독점하고 있다는 것을 알 수 있다. 특허에서 미국이 대부분인 80%를 차지하고 있으며, 우리나라도 1.1% 차지하고 있는 것을 알 수 있지만, 이는 아주 낮은 경쟁력을 나타낸다. 특허 동향을 살펴본 결과로 미국은 액화공정 기술에 주력하고 있으며, 일본과 프랑스는 전처리 공정에, 한국과 독일은 저장기술에 주력하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 미국은 미국 내 특허의 65%, 유럽 내 특허의 40%,

한국 내 특허의 20%를 차지하고 있으며, 이중 APCI사의 특허 점유율이 가장 높게 나타났다.^[3] 액화 공정에 대한 연구 및 개발은 1960년대부터 시작되었으며, Phillips사의 D. L. Address는 Optimized cascade 공정의 발전사에 대해 기술하였고[4], Kikkawa 외는 CHEMCADⅢ를 이용하여 예냉각 루프와 팽창기를 적용한 혼합냉매 액화공정을 시뮬레이션 하였으며[5], Terry 외는 Hysys를 이용하여 대표 액화 사이클들을 해석하여 비교 분석 하였으며[6]. Wen-Sheng Cao 외는 Hysys를 이용해서 질소와 메탄을 이용한 액화공정을 시뮬레이션 하여 혼합냉매 공정과 비교 분석하였다[7]. 국내에서는 Yoon 등은 Hysys를 이용하여 케스케이드 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 기초 자료를 제공하였다[8~11].

이러한 LNG 플랜트 시장에 진입을 하기 위해서는 독자적인 액화공정 라이선스와 EPC (Engineering Procurement and Construction) 기술 개발이 요구된다. 본 연구에서는 LNG 플랜트 시장 진입을 위한 액화 공정 기술 개발의 기초 자료를 제공하고자 액화 공정의 기초가 되는 케스케이드 공정에 대한 Hysys software를 이용한 시뮬레이션을 통해 특성 분석을 하고자 한다.

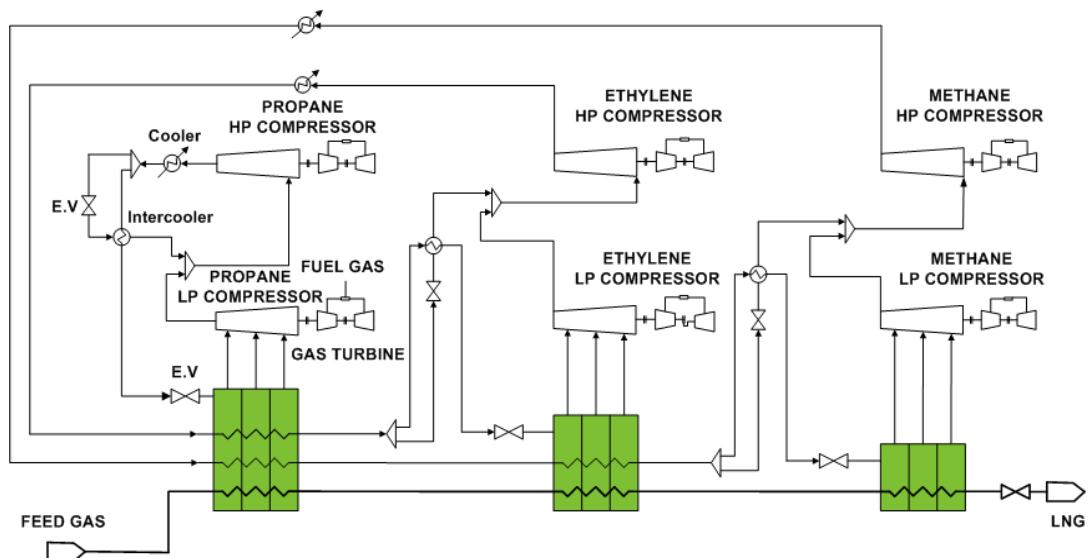


Figure 1: Cascade process using Inter-cooler in whole cycles

2. 액화공정

2.1 기본 케스케이드 공정

서로 다른 비등점을 갖는 세 가지 순수 냉매 프로판, 에틸렌, 메탄으로 이루어져 있으며, 이 냉매들을 이용하여 프로판 사이클에서 약 -40°C , 에틸렌 사이클에서 약 -90°C , 메탄 사이클에서 약 -162°C 까지 단계적으로 천연가스를 냉각시켜 액화시키는 사이클이다.

2.2 인터쿨러를 적용한 케스케이드 공정

Figure 1은 기존 케스케이드 사이클의 효율을 높이기 위하여 모든 사이클에 2단 압축 인터쿨러 방식을 적용한 것을 나타내었다. 압축기는 2단 압축 방식을 적용 하였으며, 응축기 출구 측 액 냉매의 일부를 바이패스 시켜서 팽창시킨 후 메인 열교환기로 유입되는 주냉매 스트림을 인터쿨러에서 과냉각시켜 천연가스를 냉각시키는 방식을 적용하였으며, 이 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 인터쿨러 적용 시 변화를 살펴보기 위해 각각의 사이클에 인터쿨러를 먼저 적용하여 시뮬레이션하였다.

3. 시뮬레이션 및 가정조건

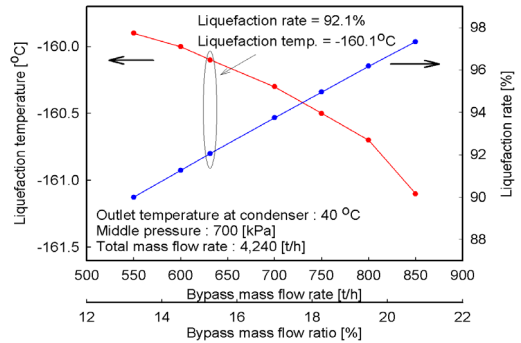
본 시뮬레이션에서 사용하는 천연가스의 조성비는 Nigeria 플랜트에서 생산되는 천연가스의 조성비를 사용하였으며, 전처리 공정을 마친 정제된 천연가스로 가정하여 수분, 이산화탄소, 수은, 중질의 탄화수소계 가스를 제외하고 평균화하여 사용하였다. 피드 가스 조성비는 Table 1에 나타내었다.

Table 1: Composition of natural gas

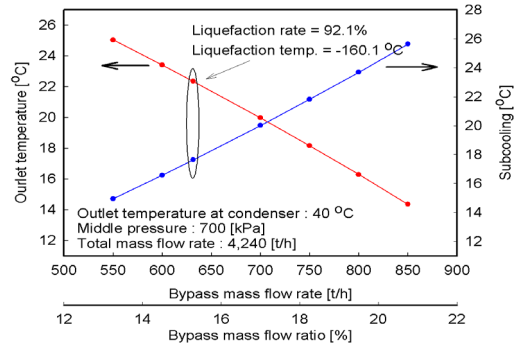
Component	Mole fraction [%]
Nitrogen	0.007
Methane	0.82
Ethane	0.112
Propane	0.04
iso-Butane	0.012
normal-Butane	0.009
Total	1

Table 2: Simulation conditions

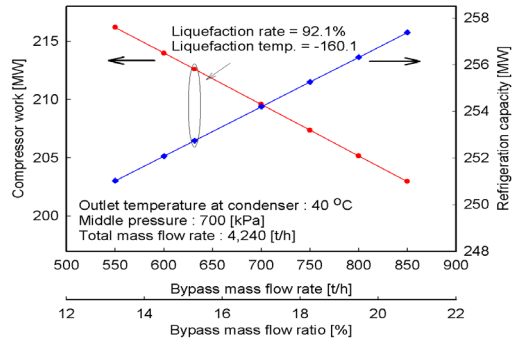
Feed gas mass flow	[kg/s]	158.5
Feed gas temperature	[$^{\circ}\text{C}$]	32
Feed gas pressure	[kPa]	5,000
2nd fluid temperature	[$^{\circ}\text{C}$]	Water 30
		Air 40
Refrigerant	[-]	Methane, Ethylene, Propane
Bypass flow rate	[%]	15
Middle pressure	[%]	50



(a) Liquefaction rate & temperature



(b) Sub-cooling temp. & outlet temp. of Inter-cooler



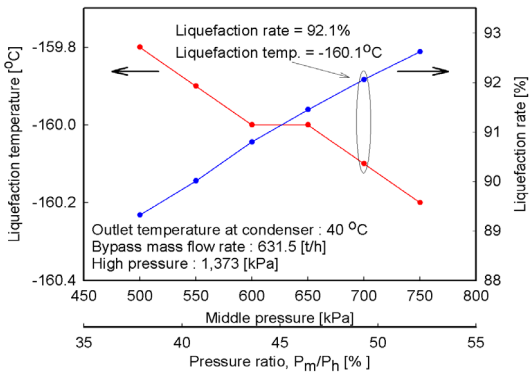
(c) Compressor work & refrigeration capacity

Figure 2: Performance as bypass mass flow rate

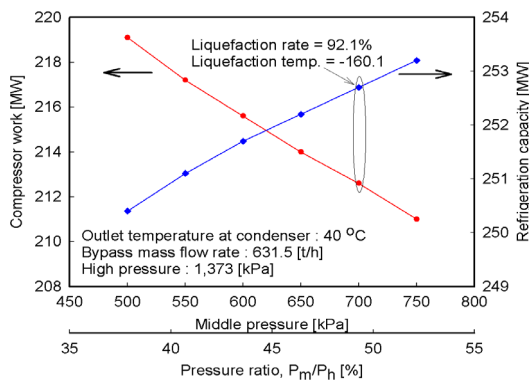
다음은 시뮬레이션에서의 가정조건을 Table 2에 나타내었다. 천연가스의 유량은 트레인 용량 5MTPA를 기준으로 설정하였으며, 바이패스 유량은 각 사이클 유량의 15%, 중간압력은 고압의 50%로 설정하였으며, 인터쿨러 입구 측 팽창밸브 출구 압력은 중간압력과 같다고 가정하였다.

4. 결과 및 고찰

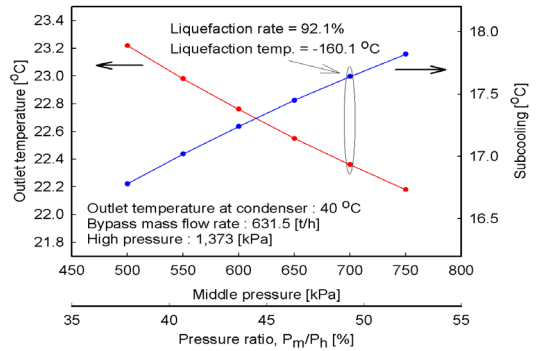
시뮬레이션을 수행하기 앞서 인터쿨러 적용의 타당성을 입증하기 위해 프로판 사이클에 먼저 인터쿨러를 적용하였다. 다음은 바이패스 유량 및 중간압력 변화에 따른 성능 변화에 대해 시뮬레이션을 해보았다. Figure 2 와 Figure 3 은 바이패스 유량 변화와 중간압력 변화에 따른 성능변화에 대해서 나타낸 것이다.



(a) Liquefaction rate & temperature



(b) Sub-cooling ratio, & outlet temp. of Inter-cooler



(c) Compressor work & refrigeration capacity

Figure 3: Performance as middle pressure

먼저 Figure 2는 바이패스 유량 변화에 따른 시스템 성능변화를 나타낸 것이다. (a)는 바이패스 유량 변화에 따른 액화율과 액화온도의 변화를 나타낸 것으로 바이패스 유량 증가에 따라 액화율은 증가하고 액화 온도는 낮아지는 것을 알 수 있다. (b)는 바이패스 유량 변화에 따른 과냉각도와 인터쿨러 출구 온도 변화를 나타낸 것으로, 이 또한 바이패스 유량 증가에 의해 과냉각도가 증가하여 인터쿨러 출구 냉매 온도가 낮아진다는 것을 알 수 있다. (c)는 압축일량과 냉동능력변화를 나타낸 것으로, 바이패스 유량 증가에 따라 압축일량은 감소하고 냉동능력은 증가하는 경향을 나타내었다. 바이패스 유량이 증가 할수록 전체적인 성능이 향상되지만 15% 이상인 영역에서는 바이패스유량이 증가함에 따라 과냉각도가 증가되어 주냉매가 비등점 이하의 온도까지 냉각이 되는 Temperature cross 현상이 일어난다. 바이패스 유량이 15%이하인 영역에서는 본 연구의 목표 액화율인 92% 보다 저하 된다.이러한 이유로 바이패스 유량을 15%로 결정하였다.

Figure 3은 다음은 중간압력 변화에 따른 성능 변화를 나타낸 것이다. 이는 바이패스 유량 변화와 마찬가지로 중간압력이 높아짐에 따라 액화율 및 전체적인 성능이 향상되지만 고단과 저단의 압축비가 50% 이상인 영역에서는 주냉매의 비등점보다 더 낮은 온도까지 냉각되는 Temperature cross 현상이 발생하고, 압력비가 50% 이하인 영역부터는 액화율이 92%보다 저하되었기 때문에 중간압

력을 고단의 50%로 결정하였다.

다음은 프로판, 에틸렌, 메탄 사이클 전체에 각각 인터쿨러와 2단 압축방식을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Figure 4는 각각의 프로판, 에틸렌, 메탄 사이클에 2단 압축방식과 인터쿨러를 적용한 케이스케이드 사이클과 기본 케이스케이드 사이클의 성능특성을 동일한 액화율에 대해 비교한 것이다[8]. 그림에서 C3, C2, C1은 각각 프로판, 에틸렌, 메탄을 나타낸다. 그림에서와 같이 전체적으로 변형 시킨 사이클의 압축일량이 감소한 것을 알 수 있는데, 이는 과냉기를 적용함으로써 주 냉매의 과냉각도가 증가하여 냉동능력이 증가한 것이다. 이로 인해 냉매 순환량이 기존의 사이클에 비해 줄어든다.

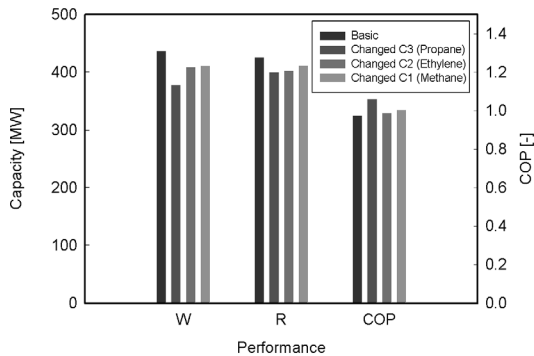


Figure 4: Comparison between basic and changed each cycle

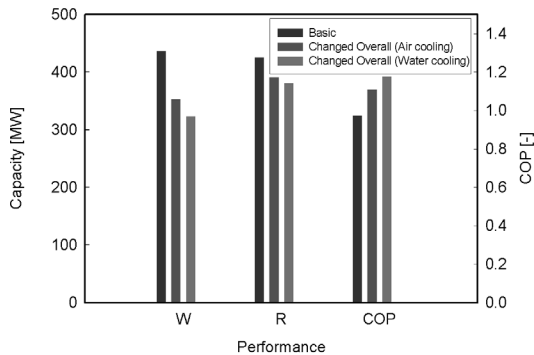


Figure 5: Comparison between basic and changed overall cycle

또한, 프로판 사이클을 변형 시켰을 때에 압축일

량이 가장 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 프로판 열교환기가 에틸렌 사이클에는 응축기, 메탄 사이클에는 과냉기 역할을 하고 냉매 순환량 또한 다른 냉매 순환량에 비해 3 ~ 10배 정도 많기 때문에 프로판 사이클의 역할이 지배적이라고 볼 수 있으며, 이로 인해 프로판 사이클의 냉매 순환량이 크게 감소함에 따라 전체적인 압축일량이 감소한다고 볼 수 있다. 또한 냉동능력이 감소하는 것을 알 수 있는데, 이 또한 냉매 순환량이 감소하기 때문이라고 볼 수 있으며, 프로판 사이클을 변형시켰을 때의 성능인 COP가 8.6%로 가장 높게 향상 되었다.

Figure 5는 2단 압축방식과 인터쿨러를 세 가지 사이클 모두 적용시켰을 때의 성능 특성을 비교 하였다[8].

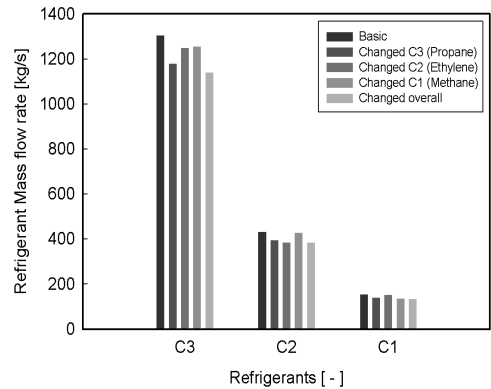


Figure 6: Comparison of mass flow rate

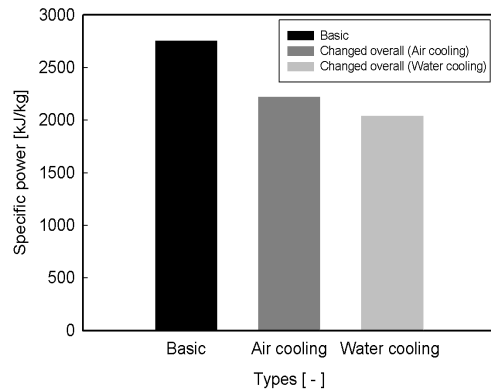


Figure 7: Specific power vs types

전체적으로 변형된 사이클의 성능이 기존 사이클보다 13.7% ~ 20.5% 가량 높게 나타났으며, 수냉식 냉각기를 사용하여 30℃로 냉각한 방식이 공랭식 냉각기를 사용하여 40℃로 냉각한 방식보다 6% 정도 성능이 향상됨을 알 수 있다.

각 변형에 따른 냉매 순환량의 비교를 Figure 6에 LNG 단위 생산량 당 소비동력(Specific Power)에 대한 비교를 Figure 7에 나타내었다 [8]. 그림에서 나타난 것과 같이 프로판의 냉매 순환량이 가장 크게 감소하는 것을 알 수 있으며, 전체 사이클을 변형 시켰을 때 14.4%로 가장 크게 감소하였다. LNG 단위 생산량 당 소비동력은 공랭식 냉각기를 사용하였을 때 23.8%, 수냉식 냉각기를 사용하였을 때 35% 가량 감소하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 액화공정에서 가장 큰 영향을 미치는 소요 동력을 감소시킴으로써 단위 LNG 생산량 당 소요 동력을 감소시키는 것에 중점을 두고 시뮬레이션을 수행하여 분석하였으며, 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 모든 변형 사이클에 있어서 프로판 냉매 순환량이 가장 크게 감소하였으며, 전체 사이클에 2단 압축방식 인터쿨러를 적용 하였을 때 14.4% 정도 가장 크게 감소하였다.

2. 각 사이클에 2단 압축방식과 인터쿨러 적용 시 압축일량, 냉동능력이 감소하고 COP는 증가하며, 프로판 사이클에 적용 시 8.6% 가량 가장 높게 성능이 향상 되었다.

3. 전체 사이클에 2단 압축방식과 인터쿨러 적용 시 기존 사이클 보다 13.7 ~ 20.5% 가량 성능이 향상 되었고, 수냉식 냉각기 적용 시 공랭식 냉각기 보다 6% 가량 성능이 향상 되었다.

4. 천연가스 단위 질량당 소요 에너지는 기존 사이클 보다 공랭식일 때 23.8%, 수냉식일 때 35% 정도 감소하였다.

이 결과들을 추후 실 공정에서 사용되는 기존의 케이스케이드 공정보다 더 나은 효율의 액화공정 개발 연구에 활용 할 것이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 이상규, 최건형, 양영명, "LNG 액화플랜트의 기술 및 개발 현황, 한국 냉동공학 학술대회", vol. 3, pp. 65 - 68, 2009
- [2] 장현승, 이복남, 구분상, "해외플랜트시장에서 국내 업체의 경쟁력 제고방안", 건설사업 동향, vol. 19, pp. 2-30, 2007
- [3] 오승택, 이호생, 윤정인, 이상규, "LNG 액화 사이클 개발현황", 설비저널, vol. 38, no. 3, pp. 13-17, 2007
- [4] D. L. Address, "The Phillips optimized cascade LNG process a quarter century of improvement", The Permission of the Institute of Gas Technology, 1996
- [5] Yoshitugi Kikkawa et. al, "Development of liquefaction process for natural gas", Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 30, no. 4, pp. 625-630, 1997
- [6] L. Terry, "Comparison of liquefaction Process", LNG Journal 21, no. 3, pp. 28-33, 1998
- [7] Wen-sheng Cao et. al, "Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction process in skid-mounted Packages", Applies Thermal Engineering, no. 26, pp. 898-904, 2006
- [8] 오승택, 김현우, 이호생, 이경범, 윤정인, 이상규, "2단 인터쿨러를 적용한 LNG 액화 사이클 시뮬레이션", 한국 가스학회 춘계 학술발표회 논문집, pp. 225-228, 2009
- [9] H. S. Lee, S. T. Oh, H. W. Kim, J. I. Yoon, G. B. Yi, S. G. Lee, "Analysis of cryogenic refrigeration cycle using two stage intercooler", Proceedings of the

5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, pp. 40-41, 2009

- [10] 이호생, 오승택, 김현우, 최원재, 윤정인, 이상규, “팽창기를 적용한 초저온 액화공정 특성 비교”, 한국 동력기계공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 250-254, 2009
- [11] 오승택, 이호생, 이경범, 윤정인, 이상규, “2단 압축 방식을 적용한 초저온 액화 사이클 특성”, 대한설비공학회 하계 학술발표대회 논문집, pp. 109, 2009



최건형(崔健亨)

2004년 연세대학교 화학공학과 졸업(공학 박사), 현재 한국 가스공사 연구개발원 수석연구원



이상규(李祥圭)

한국과학기술원(KAIST) 화학공학과 졸업(공학 박사), 현재 한국 가스공사 연구개발원 책임연구원

저 자 소 개



유선일(劉善日)

1985년 고려대학교 기계공학과 졸업(공학 석사), 2000년 부경대학교 냉동공조공학과 박사과정 수료, 현재 가스플랜트 사업단 팀장



오승택(吳承澤)

2008년 동의대학교 기계공학과 졸업(공학 학사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 석사 과정 중



이호생(李虎生)

2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학 박사), 2007년 The University of Illinois, ACRC, post-doc, 현재 부경대학교 기계공학부 전임연구원



윤정인(尹政仁)

1995년 Tokyo University of A&T 졸업(공학 박사), 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 한국마린엔지니어링학회 편집이사, 대한설비공학회 편집이사, 한국 동력기계공학회 편집이사