

초저온 케스케이드 냉동사이클의 중간압력 및 바이패스 유량 최적화 Optimization of Middle Pressure and Bypass Mass Flow Rate in Cryogenic Refrigeration Cascade Cycle

오승택 · 최원재 · 이호생 · 윤정인 · 유선일 · 최건형 · 이상규

S. T. Oh, W. J. Choi, H. S. Lee, J. I. Yoon, S. I. Yoo, K. H. Choi and S. G. Lee

(접수일 : 2010년 1월 5일, 수정일 : 2010년 3월 25일, 채택확정 : 2010년 3월 30일)

Key Words : Inter-cooler(인터쿨러), Cryogenic(초저온), LNG(액화 천연가스), Cascade(케스케이드)

Abstract : In this research, cascade liquefaction process was simulated using two-staged direct expansion with inter-cooler. Evaporated gaseous refrigerant which has low pressure and temperature from the inter-cooler is mixed with gaseous refrigerant from outlet of 1st compressor, and flows into 2nd compressor. Therefore this prevents superheating compression. Compressor work of process which includes inter-cooler to all cycles shows the lowest value of 338.68 MW and it is lower 16.34% than that of basic process. Refrigeration capacity shows decreasing tendency as applied inter-cooler and that of process which includes inter-cooler to all cycles shows the lowest value of 449 MW. COP was increased when the inter-cooler was applied, and process which includes inter-cooler to all cycles shows highest value of 1.33. It shows that COP was increased because decrement of compressor work by applying inter-cooler was higher than decrement of refrigeration capacity.

1. 서 론

가스전의 액화플랜트에서 생산되는 LNG(Liquefied Natural Gas)는 -162°C 정도로 메탄이 주성분으로 80%이상 이루어져 있으며 에탄, 프로판, 부탄 등의 화합물로 이루어져 있다.

전체적인 천연가스 액화 공정은 Fig. 1에서와 같이 크게 가스전에서 가스를 추출해 내는 추출 공정, 산성 가스 제거, 수은과 수분 제거, 중질의 가스를 제거하는 전처리 공정, 액화 공정, 저장 공정 등 4가지 공정으로 구성된다. 여기서 가장 핵심 기술인 액화 공정은 냉동장치를 이용하여 정제된 천연가스를 -162°C 이하로 냉각시켜 액화 시키는 기술을 말하며, 본 연구에서는 이 액화 공정에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

천연가스 액화 방식은 기존의 가스전 개발 방식에 비해 취급이 용이한 액체를 다룸으로써 가스운

반에 따른 원거리 수송문제를 해결 할 수 있으며, 수요지로부터 멀리 떨어져 있는 한계 가스전의 활용이 가능한 이점이 있다.

액화 공정에 대한 연구 및 개발은 1960년대부터 시작되었으며, Phillips사의 D. L. Andress¹⁾는 Optimized cascade 공정의 발전사에 대해 기술하였고, Kikkawa 외²⁾는 CHEMCADIII를 이용하여 예냉 각 루프와 팽창기를 적용한 혼합냉매 액화공정을 시뮬레이션 하였으며, Terry 외³⁾는 Hysys를 이용하여 대표 액화 사이클들을 해석하여 비교 분석하였다. 또한, Wen-Sheng Cao 외⁴⁾는 Hysys를 이용해서 질소와 메탄을 이용한 액화공정을 시뮬레이션 하여 혼합냉매 공정과 비교 분석하였다. 국내에서는 Baek 등⁵⁾은 Hysys soft ware를 이용하여 J-T 밸브를 적용한 혼합냉매 액화 공정에 대해 성능을 분석하였으며, Yoon 등^{6,9)}은 Hysys를 이용하여 케스케이드 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 기초 자료를 제공하였다.

본 연구에서는 LNG 플랜트 시장 진입을 위한 액화 공정 기술 개발의 기초 자료를 제공하고자 기본 케스케이드 공정에 2단 압축 인터쿨러 방식 적용의 타당성을 입증하기 위해 중간압력 및 바이패스 유

윤정인(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
오승택, 최원재 : 부경대학교 대학원
이호생 : 한국해양연구원
유선일, 최건형, 이상규 : 한국가스공사

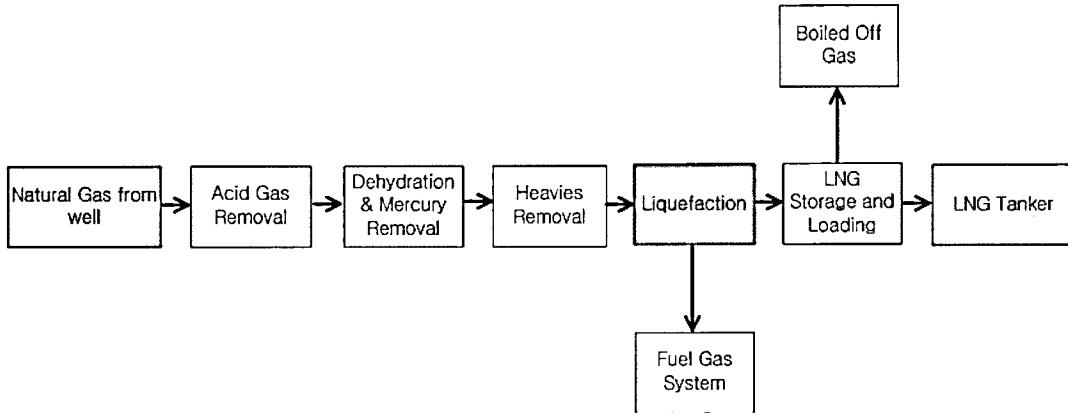


Fig. 1 Natural gas liquefaction process

량의 최적화 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 액화 공정

2.1 기본 캐스케이드 공정

기본 캐스케이드 공정은 세 가지 순수 냉매(메탄, 에탄 혹은 에틸렌, 프로판)를 이용하며, 각 사이클의 냉각기는 공냉식 냉각기를 사용하여 고온 고압의 냉매를 약 40°C까지 냉각시키고 프로판 증발기가 에틸렌의 응축기 역할을, 에틸렌 증발기가 메탄의 응축기 역할을 한다. 각각의 LNG Exchanger(주 열교환기)에서 단계적으로 프로판 사이클에서 약 -40°C까지, 에탄 혹은 에틸렌 사이클에서 약 -95°C까지, 최종 메탄 사이클에서 천연가스를 약 -162°C까지 냉각시켜 액화시키는 공정이다.

2.2 인터쿨러를 적용한 캐스케이드 공정

Fig. 2는 기존 캐스케이드 사이클의 효율을 높이기 위하여 프로판(C3), 에틸렌(C2), 메탄(C1) 3개의 모든 사이클에 2단 압축 인터쿨러 방식을 적용한 것을 나타내었다. 압축기는 2단 압축 방식을 적용하였으며, 응축기 출구 측 액 냉매의 일부를 바이패스 시켜서 팽창시킨 후 메인 열교환기로 유입되는 주 냉매 흐름을 인터쿨러에서 과냉각시켜 천연가스를 냉각시키는 방식을 적용하였다. 2개의 팽창밸브를 사용하며, 1단 팽창후의 저온 저압의 기체 냉매를 1단 압축기 토출 gas와 혼합하여 2단 압축기로 유입함으로써 과열압축을 방지한다. 1단 팽창밸브를 지난 주냉매는 다시 2단 팽창 밸브에서 팽창되어 증발기로 유입된다. 이 또한 냉매를 나누어 2단으로 팽창시킴으로써 팽창밸브 출구 냉매의 건도가 감소되어 냉동효과가 증가하게 된다.

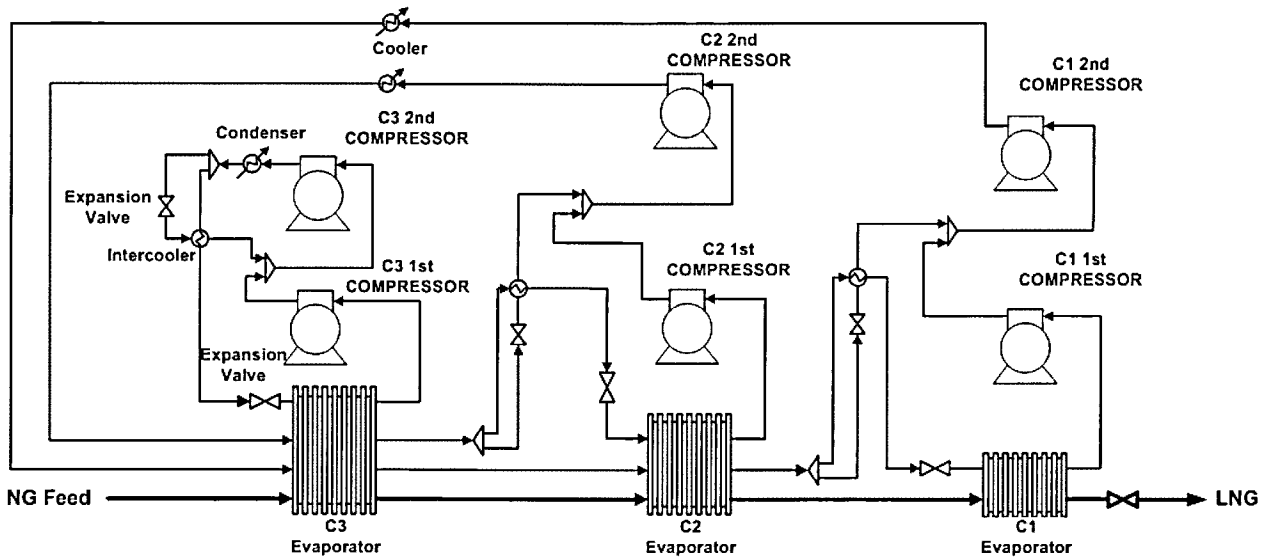


Fig. 2 Cascade process using inter-cooler with liquid-gas heat exchanger

3. 시뮬레이션 조건

각 사이클의 증발기 냉매측 출구의 건도는 1로, 응축기 냉매측 출구의 건도는 0으로 설정하였으며 증발기에서의 냉매와 천연가스를 제외한 피 냉각체의 온도차는 5°C로 설정하였다. 본 연구에 모든 공정의 능력은 5MTPA(Million Ton Per Annum)로 설정하였으며, 시뮬레이션 가정 조건은 Table 1에 나타내었다. 또한, Feed gas는 전처리 공정을 거친 천연가스로 가정하였으며, 실제 나이지리아 가스전에서 생산되는 천연가스, 5000kPa, 32°C의 조성비를 사용하였다. 조성비는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Condition of simulation

Feed gas mass flow rate	[kg/s]	172.4
Liquefaction ratio	[%]	92
Liquefaction temperature	[°C]	-160.1
Evaporator outlet pressure	[kPa]	120
Air cooler outlet temperature	[°C]	40
Evaporator pressure drop	[kPa]	50
Air cooler pressure drop	[kPa]	25

Table 2 Composition of natural gas

Composition	Mole fraction [%]
Nitrogen	0.007
Methane	0.820
Ethane	0.112
Propane	0.040
i-Butane	0.012
n-Butane	0.009
Total	1

본 시뮬레이션 성능비교에 사용된 식은 아래에 식 (1) ~ 식 (3)에 나타내었다.

$$Q_e = G \cdot (h_{Eva,o} - h_{Eva,i}) \quad (1)$$

$$W_c = G \cdot (h_{Comp,o} - h_{Comp,i}) \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_e}{W_c} \quad (3)$$

여기서, Q_e 는 냉동능력, W_c 는 압축일량, G 는 냉매 순환량, h 는 각 지점의 엔탈피 값을 나타내며, 하첨자 Eva 는 증발기 $Comp$ 는 압축기 o 는 출구, i 는 입

구를 각각 나타낸다.

시뮬레이션 초기 중간압력 값을 결정하기 위해 식 (4)을 이용하였다. 식 (4)에서 P_H 와 P_L 은 각각 압축기 고단 및 저단 흡입압력을 나타낸다.

$$P_m = \sqrt{P_H \cdot P_L} \quad (4)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 프로판 사이클의 인터쿨러 적용

먼저 프로판 사이클에 인터쿨러를 적용해서 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서 중간압력이 낮아지면 주 냉매를 더 낮은 온도까지 냉각시킬 수 있으나, 중간압력이 낮아짐에 따라 인터쿨러로 유입되는 바이패스 냉매의 건도가 증가하기 때문에 동일한 과냉각도를 얻기 위해서는 바이패스 냉매 유량이 증가하며, 전체 냉매 순환량 또한 증가하게 된다. 반면에 중간압력이 높아지면 과냉각도는 감소하게 되나 인터쿨러로 유입되는 냉매의 건도가 감소하므로 더 많은 양의 냉매를 과냉각시킬 수 있다. 중간압력과 과냉각은 이러한 상관관계를 가지고 있기 때문에 아래와 같이 중간압력 설계 시뮬레이션을 수행하여 압축일량, 냉동능력, COP와 액화효율에 대해 성능을 비교 분석하였다.

각 중간압력에 대해 바이패스율에 따른 성능 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 압축일량에 대해서 살펴보면, 중간압력이 낮아질수록 과냉각도는 증가하고 압축일량은 감소하지만 500 kPa 이하부터는 과냉각도는 감소하지만 압축일량은 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 바이패스 유량이 증가하면서 증발기로 유입되는 주냉매의 유량이 감소하면서 과열압축에 의해 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 각각의 압력에서 최대 바이패스율 이후부터는 인터쿨러에서 냉매의 증발온도 보다 더 낮은 온도로 과냉각 되는 예러 현상이 나타난다. 중간압력 500 kPa, 바이패스율 26%일 때의 압축일량과 중간압력 600 kPa, 바이패스율 23%일 때의 압축일량이 369.355 MW로 가장 낮게 나타났다.

냉동능력도 마찬가지로 중간압력이 600 kPa 까지 증가하다가 600 kPa 이하부터는 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 과냉각에 의해 냉동효과가 상승하다가 600 kPa 이하부터는 과냉각도 증가에 따른 냉동효과의 상승효과 보다 증발기로 유입되는 냉매 순환량이 감소되기 때문에 냉동능력이 감소하

는 것으로 사료된다. 600 kPa, 23%일 때의 냉동능력이 369.55 MW로 가장 크게 나타났다.

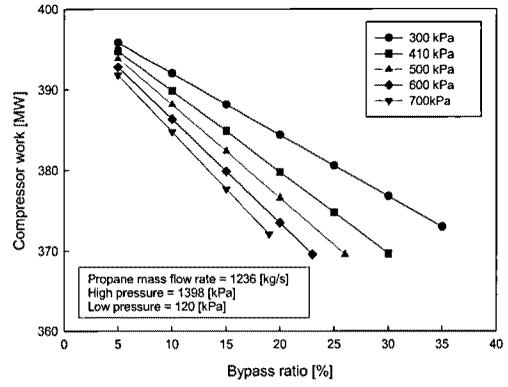
COP도 위에서 언급한 압축일량과 냉동능력과 같이 600 kPa, 23%일 때가 1.26으로 가장 높은 성능을 나타내었으며, 액화율 또한 92.96%로 가장 높게 나타났다. 따라서 가장 능력이 뛰어나게 나타난 600 kPa, 23%를 프로판 사이클의 기준으로 결정하였다. 이때의 액화율이 92.96%로 본 연구의 목표치 보다 높게 나타나 다시 92%로 조정하였으며, 이에 에틸렌과 프로판 사이클에 인터쿨러를 적용하였다.

4.2 에틸렌 사이클의 인터쿨러 적용

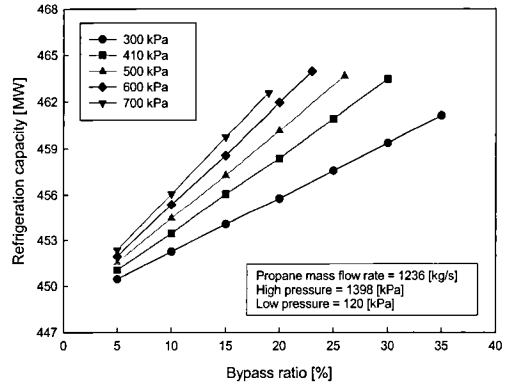
위에서 결정된 프로판 사이클에 에틸렌 2단 압축 인터쿨러 방식을 추가로 적용하였다. 먼저 중간압력은 식(4)에 의해서 구해진 값 527 kPa를 대입하여 시뮬레이션을 수행하였으나 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 사이클의 능력이 낮게 나타나 능력이 높게 나타나는 압력대를 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. 결과에 나타난 바이패스율 이상이 되면 메탄 열교환기에서 천연가스가 메탄 비등점 보다 더 낮은 온도까지 냉각이 되는 에러 현상이 나타나기 때문에 이 현상이 나타나지 않는 범위내의 바이패스율에서 능력을 비교해 보았다. 1400 kPa, 13.1%일 때 압축일량은 356.85 MW로 가장 낮게 나타났고, 냉동능력은 1200 kPa, 13.5%일 때와 1300 kPa, 13.2%일 때와 같이 465.76 MW로 가장 높게 나타났다. COP는 이 세가지 경우 중에 압축일량이 가장 낮게 나타난 1400 kPa, 13.1%가 1.31로 가장 크게 나타났으며, 액화율 또한 94.94%로 가장 높게 나타났다. 이 또한 목표 액화율보다 높게 나타났으므로 92%로 액화율을 낮추어 에틸렌 사이클의 기준 조건으로 결정하였다.

4.3 메탄 사이클의 인터쿨러 적용

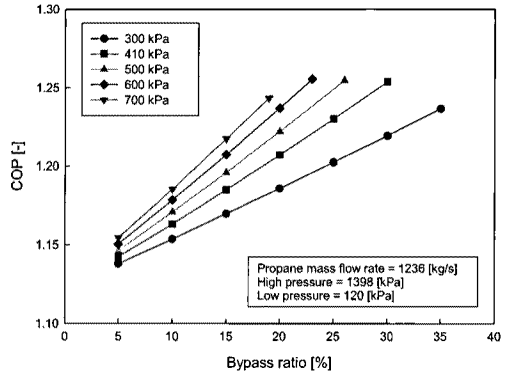
위에서 결정된 공정에 메탄 2단 압축 인터쿨러 방식을 추가로 적용하였다. 먼저 식(4)에 의해 구해진 중간압력 값 679 kPa을 기본 값으로 입력하여 시뮬레이션을 하였으며, 결과는 Fig 5에 나타내었다. 그래프에서 나타난 것과 같이 메탄 사이클에서는 압축일량을 포함한 모든 능력들이 근소한 값의 차이로 비슷하게 나타났지만, 그중에 이 조건일 때의 액화율이 94.96으로 목표치 보다 높게 나타나 다시 92%로 수정하였으며, 이 조건의 중간압력과 바이패스율이 가장 효율이 뛰어나다고 판단할 수 있다.



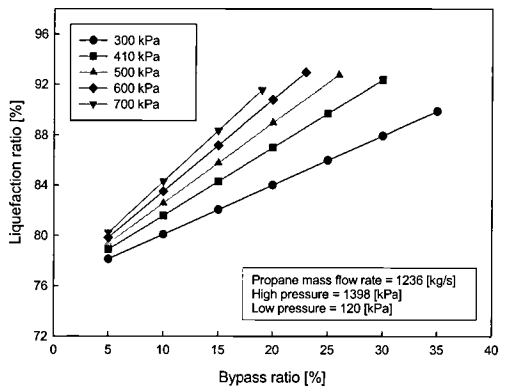
a) Comparison of compressor work vs bypass ratio



b) Comparison of refrigeration capacity work vs bypass ratio

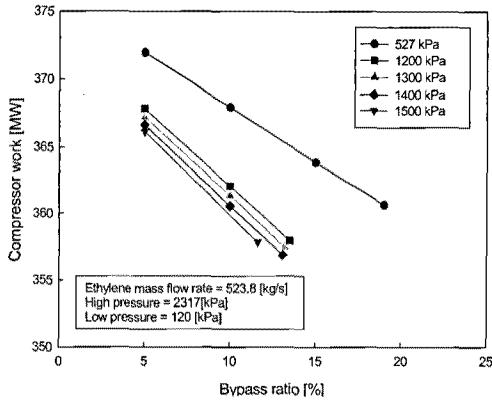


c) Comparison of COP vs bypass ratio

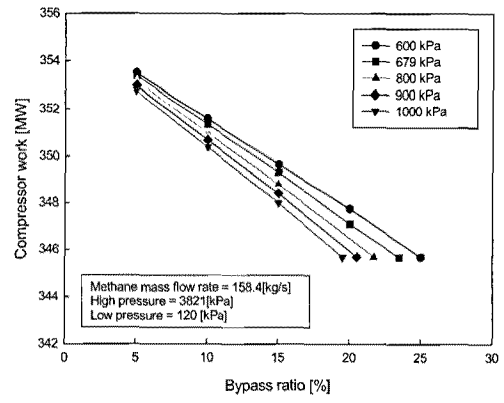


d) Comparison of Liquefaction ratio vs bypass ratio

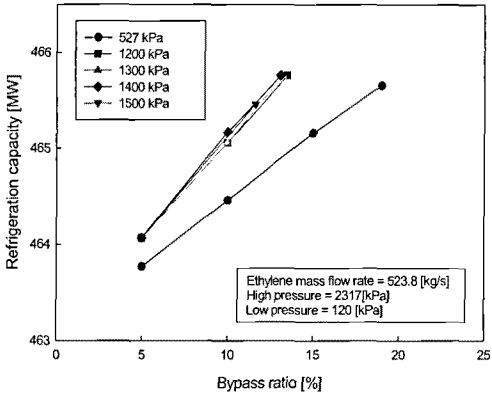
Fig. 3 Performances of modified propane cycle



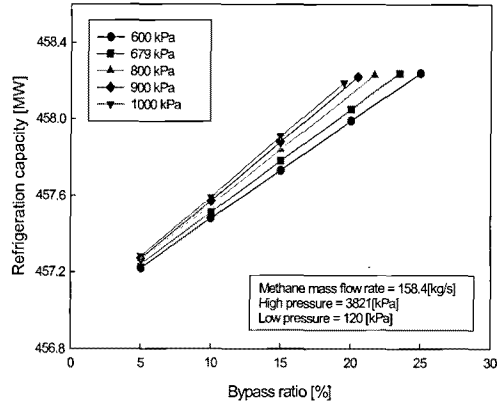
a) Comparison of compressor work vs bypass ratio



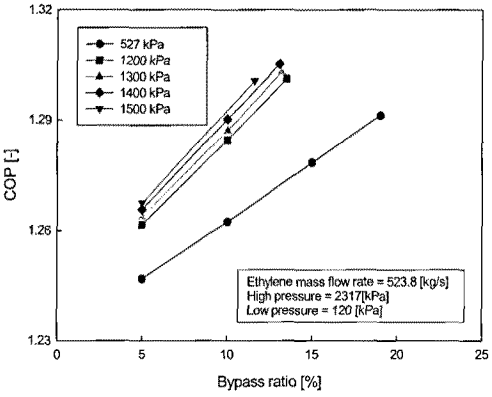
a) Comparison of compressor work vs bypass ratio



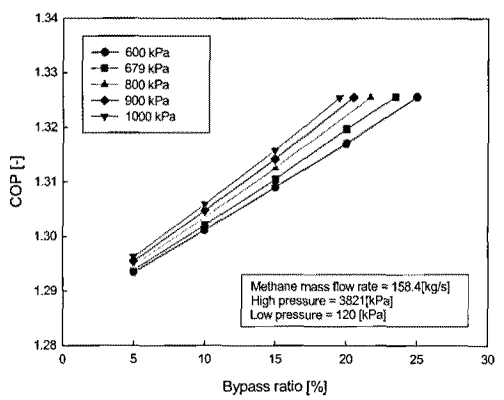
b) Comparison of refrigeration capacity work vs bypass ratio



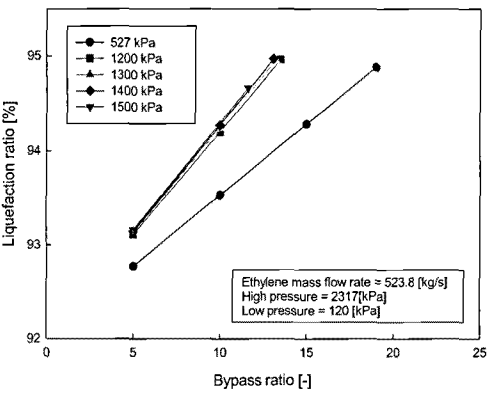
b) Comparison of refrigeration capacity work vs bypass ratio



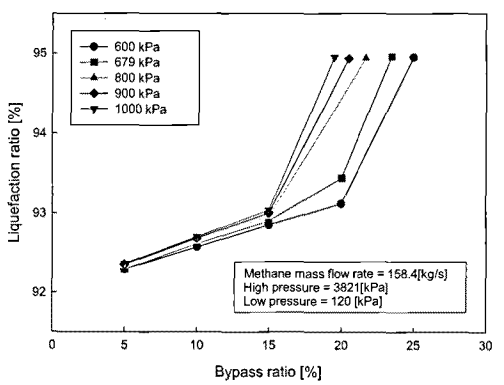
c) Comparison of COP vs bypass ratio



c) Comparison of COP vs bypass ratio



d) Comparison of Liquefaction ratio vs bypass ratio



d) Comparison of Liquefaction ratio vs bypass ratio

Fig. 4 Performances of modified Ethylene cycle

Fig. 5 Performances of modified Methane cycle

5. 결 론

본 연구에서는 액화공정에서 가장 큰 영향을 미치는 소요 동력을 감소시키기 위한 인터쿨러의 적용에 앞서 타당성을 입증하기 위해 각 사이클의 COP를 상승시키는 것에 중점을 두고 시뮬레이션을 수행하여 분석하였으며, 획득된 결론은 다음과 같다.

1. 중간압력 500kPa, 바이패스율 26%와 600kPa, 23%일 때의 압축일량은 동일하게 369.355 MW로 가장 낮게 나타났지만, 600kPa, 23%일 때의 COP가 1.26으로 가장 높게 나타났다.

2. 1400 kPa, 13.1%일 때 압축일량은 356.85 MW로 가장 낮게 나타났고, 냉동능력은 1200 kPa, 13.5%일 때와 1300 kPa, 13.2%일 때와 같이 465.76 MW로 가장 높게 나타났다. 이 세 가지 경우 중에 압축일량이 가장 낮게 나타난 1400 kPa, 13.1%의 COP가 1.31로 가장 크게 나타났다.

3. 모든 성능이 비슷한 값을 나타내지만, 그중 679kPa, 23.5%일 때의 압축일량이 345.67 MW, 냉동능력이 458.24 MW, COP가 1.33으로 가장 뛰어난 성능을 나타내었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. D. L. Andress, 1996, "The Phillips Optimized Cascade LNG Process a Quarter Century of Improvement", The Permission of the Institute of Gas Technology.
2. Yoshitugi Kikkawa et. al, 1997, "Development of Liquefaction Process for Natural Gas", Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 30, No. 4, pp. 625~630.
3. L. Terry, 1988, "Comparison of Liquefaction Process", LNG Journal 21, No. 3, pp. 28-33.
4. Wen-sheng Cao et. al, 2006, "Parameter Comparison of Two Small-scale Natural Gas Liquefaction Process in Skid-mounted Packages", Applies Thermal Engineering, No. 26, pp. 898~904.

5. 백승환, 황규완, 정상권, 2008, "고효율 혼합 냉매 천연 가스 액화 공정에 대한 고찰", 대한 설비공학회 동계 학술발표대회 논문집, pp. 181~185.
6. 오승택 외 6인, 2009, "2단 인터쿨러를 적용한 LNG 액화 사이클 시뮬레이션", 한국 가스학회 춘계 학술발표회 논문집, pp. 225~228.
7. H. S. Lee et al., 2009, "Analysis of Cryogenic Refrigeration Cycle using Two Stage Intercooler", 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, pp. 40~41.
8. 이호생 외 5인, 2009, "팽창기를 적용한 초저온 액화공정 특성 비교", 한국 동력기계공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 250~254.
9. 오승택 외 4인, 2009, "2단 압축 방식을 적용한 초저온 액화 사이클 특성", 대한 설비공학회 하계 학술발표대회 논문집, pp. 109.