

LNG 선박 Dual Fuel 엔진용 BOG 재액화 시스템의 성능 시뮬레이션

이 상 훈, 신 유 환^{*†}, 이 윤 표^{*}, 유 호 선^{**}
승실대학교 대학원 기계공학과, ^{*}한국과학기술연구원, ^{**}승실대학교 기계공학과

Performance Simulation of BOG Reliquefaction System for Dual Fuel Engine of LNG Carrier

Sang Hoon Lee, You Hwan Shin^{*†}, Yoon Pyo Lee^{*}, Hoseon Yoo^{**}

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

^{}Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

*^{**}Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea*

ABSTRACT: As the oil price is dramatically jumping up, the consumption of LNG is rapidly expanding and the size of LNG carriers becomes bigger. For LNG ships, the application of DF (Dual-Fuel) engines gradually increases because of high efficiency, which alternatively use diesel or BOG (Boil-Off Gas) from cargo tank as a fuel. The surplus BOG from LNG cargo tank should be exhausted by GCU or liquefied through the BOG reliquefaction system and returned back. This study focused into its operational characteristics through the process simulation using HYSYS and discussed details on the influence of the variations of some operational parameters such as a distribution ratio by the change of fuel mass flow into the DF engine.

Key words: LNG(액화 천연가스), BOG(기화 가스), DF Engine(이중 연료 엔진), Reliquefaction(재액화), Distribution Ratio(분배율)

기 호 설 명

W_N : 순수하게 LBOG 생산에 투입된 동력 [kW]
 W_S : 단위 LBOG 생산에 투입된 동력 [kWh/kg]

γ : Separator C에서의 액화율

그 리 스 문 자

α : 분배기 A 에서의 유량 분배율
 β : 분배기 B 에서의 유량 분배율

하첨자

FBOG : 공급되는 BOG
 R_{sys} : 분배기 A 이후 재액화 장치로 유입된 BOG
DF : 분배기 A 이후 DF 엔진에 유입된 BOG
LBOG : 분배기 B 이후 액화되는 BOG
R : 분배기 B 이후 냉매로 작용하는 BOG
GAS : Separator 이후 비응축 BOG
LNG : Separator 이후 액화된 BOG

† Corresponding author
Tel.: +82-2-958-5586; fax: +82-2-958-5689
E-mail address: yhshin@kist.re.kr

1. 서론

에너지 수요의 증가에 따라, 기존의 석유 뿐 아니라 천연 가스의 사용량도 증가하는 추세이다. 특히, 최근 석유가의 급등에 따라 상대적으로 저렴한 액화 천연 가스(LNG)의 이용이 크게 증가되고 있으며, LNG와 관련한 새로운 시스템 및 장치, 이용처 등의 개발이 요구되고 있다. 천연 가스는 체적을 줄이기 위해 산지에서 액화되어 LNG 선박의 탱크에 선적되어 운송 되는데, LNG 운송량 증대를 위해서, 근년에 새롭게 건조 계약 되는 LNG 선박은 점차적으로 대형화 추세에 있다. LNG는 경우에 따라서 산지에서 부터 생산되어 소비지까지 운송하는데 약 한 달 이상이 소요되기도 하는데, 운송하는 과정에서 일사에 의한 복사열의 유입 및 선체의 흔들림 등에 의해 탱크 내부에서 약 6,000 kg/h 정도의 LNG가 기화된다.⁽¹⁾ 기화된 천연가스 즉, BOG (boil-off gas)는 탱크의 압력을 상승 시키게 되는데, 이러한 압력 상승은 LNG선박의 안전을 위협하므로 발생한 BOG를 소모 또는 제거해 주거나, 아니면 다시 재액화시켜 탱크 압력을 강하시켜야 한다.

기존의 LNG 선박은 스팀 터빈 추진 엔진을 채택하고 있어서, 발생하는 BOG의 대부분을 보일러 열원으로 사용하였으나 연료 효율성이 30% 정도로 낮아서, 최근에는 효율이 10% 정도 개선

되고, 디젤연료를 번갈아 사용할 수 있는 이중 연료(DF; dual fuel)엔진을 채택한 LNG선이 도입되고 있다.⁽²⁾ DF엔진을 장착한 LNG 선박이 운행 중 발생하는 BOG를 엔진 연료로 전량 처리하지 못할 경우에 잉여 BOG에 대해서 가스연소기(GCU; gas combustion unit)를 통해 태워서 대기로 소진한다. 그러나 가스연소기를 통하여 잉여 BOG를 처리하는 기존의 방식은 LNG의 이용 및 가격이 상승함에 따라 BOG 재액화 장치를 사용하여 재순환 시키는 방식으로의 전환이 요구되고 있다.

본 연구는 DF 엔진에 보조적으로 설치 가능한 재액화 장치를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 운전특성 및 효율적인 운전조건에 대하여 고찰하였다.

2. DF엔진용 재액화 장치

2.1 재액화 장치의 설계

산지에서 생산된 천연가스를 액화하는 시스템은 Claude System 인데, 이 시스템은 압축기와 팽창기(Expander) 및 팽창밸브(Expansion valve)와 수 개의 극저온용 열교환기(Heat Exchanger)로 구성된다.⁽³⁾

DF 엔진에 사용되는 BOG의 공급조건은 일반

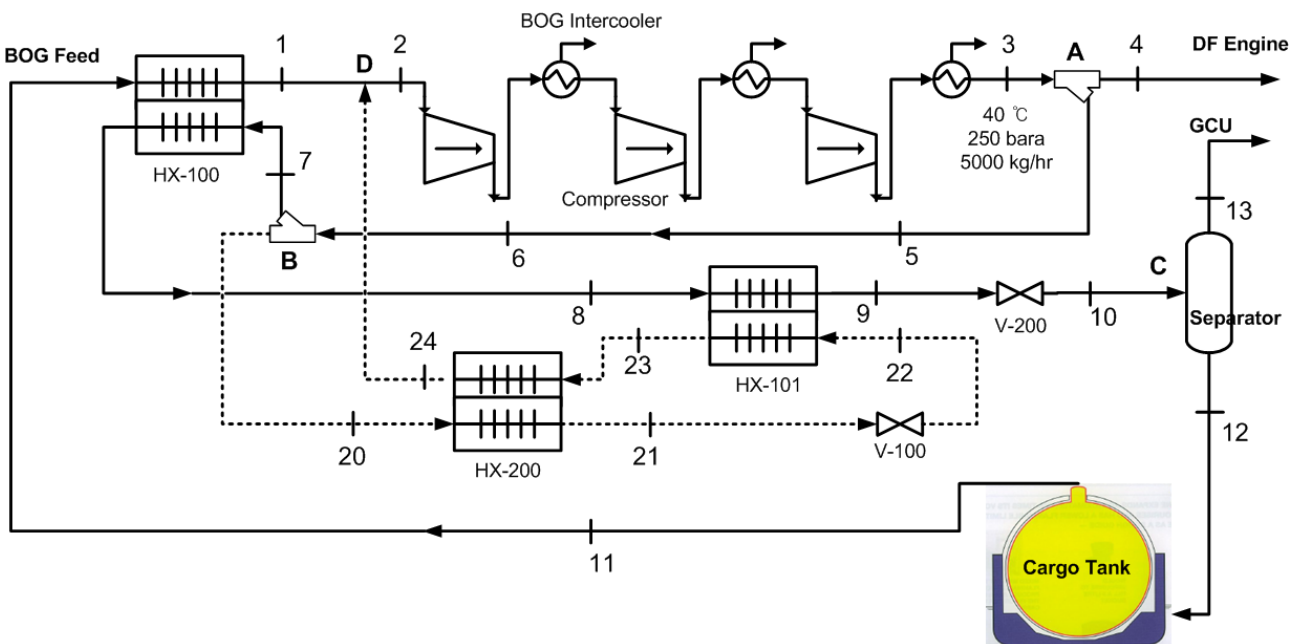


Fig. 1 Schematic diagram of BOG Reliquefaction system for DF Engine.

Table 1 Feed BOG composition

Componet	BOG composition (mole %)
Nitrogen (N2)	8.53
Methane (C1)	91.46
Ethane (C2)	0.01

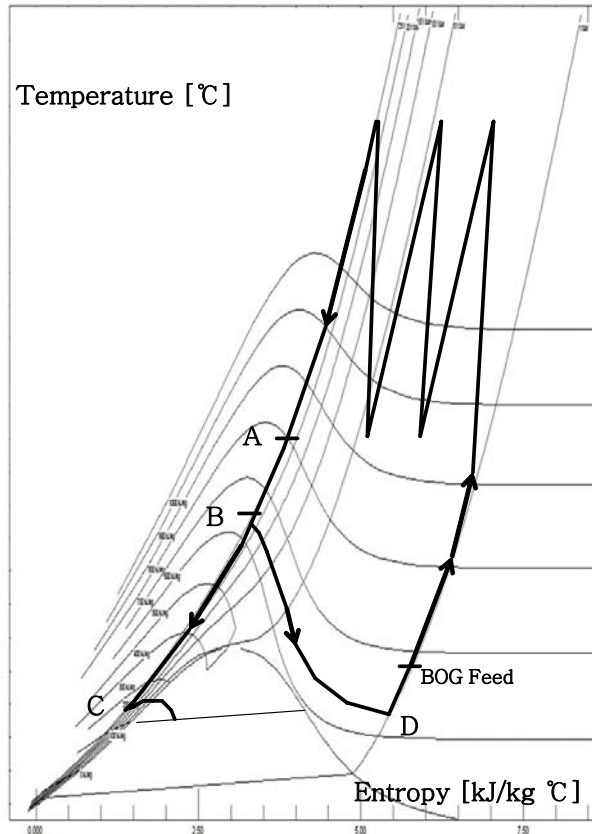


Fig. 2 T-S diagram of Reliquefacing Cycle

적으로 250 bar, 40°C 정도이다. 이런 공정조건을 충족하기 위하여 DF엔진을 장착한 LNG선박에는 다단의 BOG압축기와 해수를 이용한 중간냉각기(intercooler)가 구비되어 있으므로, 열교환기와 팽창밸브를 추가적으로 설치, 조합하여 재액화 시스템을 구성하였다. 재액화 장치의 간략한 구성은 Fig. 1과 같다. 선박의 저장탱크(cargo tank)에서 발생한 BOG는 상부로 기화되어 시스템으로 유입되는데, 이때 압력 및 온도는 각각 -100°C, 1.046 bar가 되며, 그 조성은 Table 1 과 같다. 재액화 시스템으로 유입된 BOG는 예열기(HX-100)를 거치면서 압축기를 통과한 40°C, 250 bar의 고온, 고압 BOG와 열교환을 하여 상온 근처의 온도로 압축기에 유입된다. 압축기를 통과

한 250 bar, 40°C의 BOG는 분배기 A에서 분리되어 일부는 DF엔진의 연료로 공급되고, 나머지는 재액화 장치로 각각 분배된다. 재액화 장치로 유입된 BOG는 분배기 B에서 다시 일부는 액화 대상이 되고, 나머지는 냉매로 나누어진다. 냉매로서 작용하는 BOG는 HX-200을 거치면서 1차 예냉되고 팽창밸브(V-100)에서 압축기 입구단 압력인 1 bar 정도로 팽창되어 Fig. 2에 표시된 등엔탈피 선도를 따라 이동하면서 냉각되어, HX-101을 통해 액화대상인 BOG를 최종 팽창단 입구 온도까지 끌어내리는 작용을 한다. 이후 23~24 경로(Fig.1)를 거쳐 압축기 입구단인 D지점으로 리턴하여 재순환 된다. 분배기 B에서 분기된 액화대상 BOG는 열교환기(HX-100, HX-101)를 거치면서 차례로 냉각 되면서도 여전히 250 bar를 유지하고 있다가 최종 팽창밸브(V-200)를 통과하면서 액화되고 분리기(Separator)를 거쳐 저장 탱크의 하단으로 공급된다. BOG가 100% 액화가 되지 않을 경우에는 분리기에서 기체는 가스연소기를 통해 소각, 방출한다.

2.2 재액화 장치의 운전모드

장치의 구조를 통해 살펴본 바와 같이, 분배기 A와 분배기 B의 유량 분배 및 C지점에서의 액화율의 정도가 재액화 장치의 성능에 영향을 미치는 주요한 변수임을 알 수 있다. 각 지점에서 운전조건을 적당히 적용하여 변수의 조합에 따른 재액화 장치의 성능 및 운전특성을 계산을 통해 살펴보고, 최적 운전점에 관하여 고찰하였다. 각각의 운전조건에 대한 계산은 상용 프로그램인 AspenTech社의 HYSYS ver. 2006를 이용하여 수행 하였다.⁽⁴⁾ 계산의 편의상 저장 탱크로부터 발생하여 시스템으로 유입되는 BOG 유량(Feed BOG, \dot{m}_{FOG})은 5,000 kg/h로 고정하였다.

2.1.1 분배기 A에서의 운전조건

전술한 바와 같이 분배기 A에서의 유량 분배는 DF엔진의 운전모드에 따라 결정되어 진다. 분배기 A에서 DF엔진으로 유입되는 유량을 \dot{m}_{DF} 라고 하고, 재액화 냉동장치로 유입되는 유량을 \dot{m}_{Rsys} 라고 할 때, 분배기 A에서의 유량 분배율

α 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{DF}}{\dot{m}_{FBOG}} \quad (1)$$

\dot{m}_{FBOG} 는 최초에 탱크로부터 유입되는 feed BOG 5000 kg/h 이다. \dot{m}_{FBOG} 의 전량이 재액화 장치로 유입되는 경우 즉, BOG가 DF엔진의 연료로 사용되지 않을 경우 $\alpha = 0$ 이 되고, 이와 반대로 $\dot{m}_{DF} = 5,000$ kg/h 이면 $\alpha = 1$ 이 되는 데, 이 경우는 $\dot{m}_{Rsys} = 0$ 이므로 재액화 장치가 가동되지 않는 경우이므로, 계산에서는 제외되었다.

2.1.2 분배기 B 에서의 운전조건

B 분배기에서는 \dot{m}_{Rsys} 가 액화대상이 되는 유량 \dot{m}_{LBOG} 와 냉매로서 작용하는 유량 \dot{m}_R 로 분기된다. 또한, \dot{m}_R 은 D지점으로 회수되어 순환되는 내부순환 유량이다. 그 관계는 식 (2)와 같고, 분배기 B에서의 유량 분배율 β 는 식 (3)와 같이 정의 하였다.

$$\dot{m}_{Rsys} = \dot{m}_{LBOG} + \dot{m}_R \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\dot{m}_{LBOG}}{\dot{m}_R} \quad (3)$$

분배기 B에서의 계산조건은, $\dot{m}_{LBOG} : \dot{m}_R = 10\% : 90\%$ 인 $\beta = 0.11$ 에서부터 \dot{m}_R 을 10% 씩 감소시키며 재액화 장치의 운전특성을 고찰하였다. 이때, \dot{m}_{LBOG} 는 10%씩 증가하게 되므로 각 경우에 대한 β 값은 Table 2와 같다.

2.1.3 C 지점에서의 운전조건

C 지점에서의 운전 상태란, 팽창밸브 (V-200)를 통과한 BOG가 분리기(separator)에서 어느정도 액화가 진행되었는지를 나타내는 재액화 장치의 액화율 γ 를 뜻하며, 식(4)와 같이 정의될 수 있다.

$$\gamma = \frac{\dot{m}_{LNG}}{\dot{m}_{LBOG}} \quad (4)$$

Table 2 Calculation table of β

	$\dot{m}_R : \dot{m}_{LBOG}$ (%)								
\dot{m}_R	90	80	70	60	50	40	30	20	10
\dot{m}_{LBOG}	10	20	30	40	50	60	70	80	90
β	0.11	0.25	0.43	0.67	1.0	1.5	2.33	4	9

Table 3 Nomenclature of flow lines in Fig. 1

BOG Feed~1	\dot{m}_{FBOG}
2~3	$\dot{m}_{FBOG} + \dot{m}_R$
4	\dot{m}_{DF}
5~6	\dot{m}_{Rsys}
7~9	\dot{m}_{LBOG}
12	\dot{m}_{LNG}
13	\dot{m}_{GAS}
20~24	\dot{m}_R

분리기를 거쳐서, 저장탱크로 유입되는 액화된 BOG유량을 \dot{m}_{LNG} , 가스연소기를 통해 처리되는 불응축 BOG유량을 \dot{m}_{GAS} 로 정의 하였다. 기본적으로 100% 재액화가 되지 않을 경우엔, 분리기에서 액화되지 못한 BOG를 가스연소기를 통해 태워서 방출한다. BOG의 액화에 있어서 주성분인 메탄과 질소 중 주로 메탄성분의 액화점이 높은 관계로 먼저 액화가 진행되고, 이때 불응축 가스 속에 남아있는 비응축된 질소성분의 비율이 커지므로, \dot{m}_{GAS} 에서의 질소비율은 \dot{m}_{FBOG} 의 그것보다 크다. 본 연구에서의 시뮬레이션 결과 $\gamma = 89\%$ 일때, \dot{m}_{GAS} 의 질소비율은 0.385 이고, $\gamma = 99\%$ 일때, \dot{m}_{GAS} 의 질소비율은 0.54 정도로 증가됨을 보였다.

Table 1과 같은 조성비를 갖는 BOG의 액화점은 1 bar에서 -176°C 이다. LNG선박의 탱크 내부 압은 1 bar 정도이므로, 탱크로부터의 역류를 방지하기 위해 재액화 장치의 최종 팽창압력(분리기 압력)은 1 bar 이상으로 운전하여야 한다. 또한 최종 온도는 cargo 탱크로의 재순환시 발생하는 Flash를 방지하기 위해 액화온도 보다 과냉이 되도록 운전 하여야 한다. 본 연구의 계산에서는 최종 팽창압은 계산의 편의상 5.75 bar로 설정하였고, 이때의 액화 온도는 -150°C 정도로 약간 과냉 되도록 조건을 주었다. Table 3은

Fig. 1 각 지점에서의 유량을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분배율 α 및 액화율 γ 변화에 따른 시스템 특성

Fig. 3, 4 및 5는 분배기 A에서의 분배율(α)에 따른 재액화 시스템의 운전특성을 보여준다. 이때, 분배기 B에서의 분배율 β 는 0.25로 고정하였다. 이 상태에서 $\gamma=100\%$, 80% , 60% 인 시스템들에 대하여, 분배기 A에서의 α 값을 변화시키면서 계산을 수행하였다. 시스템의 성능 평가를 위한 주요한 지표인 재액화 동력을 산출하기 위해서는 시스템의 전체 투입동력(W_{total})에서 \dot{m}_{DF} 를 위해 쓰여진 동력은 제외하여야 한다. 이를 W_N 로 식 (5)와 같이 정의 할 수 있다.

$$W_N = W_{total} \times \frac{(\dot{m}_{FBOG} + \dot{m}_R) - \dot{m}_{DF}}{\dot{m}_{FBOG} + \dot{m}_R} \quad (5)$$

재액화 장치에서 \dot{m}_{LNG} 의 생산을 위해 투입된 W_N 의 비를 단위생산 일 (specific work, W_s) 이라고 정의하였다.

$$W_s = \frac{W_N}{\dot{m}_{LNG}} \quad (6)$$

Fig. 4는 식(6)에서 W_N 대신 W_{total} 을 사용하여 계산된 결과이다. $\alpha=0.6, 0.8$ 지점에서는 상대적으로 \dot{m}_{Rsys} 이 작고, \dot{m}_{DF} 에 소요된 동력은 크기 때문에 그 값이 크게 증가하는 추이를 보이고 있다. 따라서 정확한 W_s 값의 평가를 위해서 W_{total} 이 아닌 W_N 이 적용 되어야 한다.

Fig. 3에 의하면 α 값의 증가에 따라 투입되는 동력은 선형적으로 감소하며, 이때 γ 의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. \dot{m}_{Rsys} 와 \dot{m}_{DF} 증감에 따라 각 각 동력의 크기도 증감함을 보여준다. 이 때, β 값은 고정되어 있으므로, \dot{m}_{Rsys} 가 감소하면, 일정한 비율로 \dot{m}_R 도 감소하므로, 동일한 γ 값 상황에서는 W_N 도 크게 차이가 나지 않음을

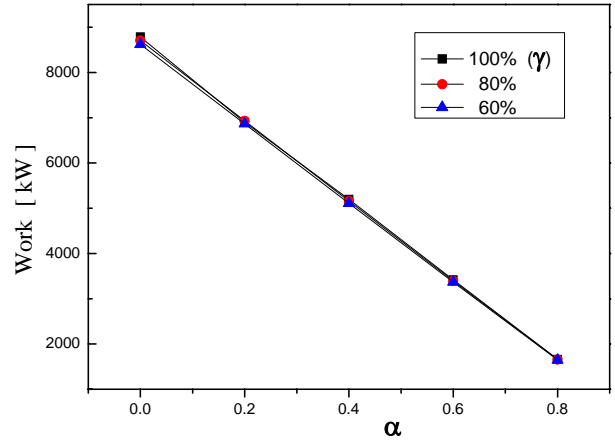


Fig. 3 Work variations with α ($\beta=0.25$)

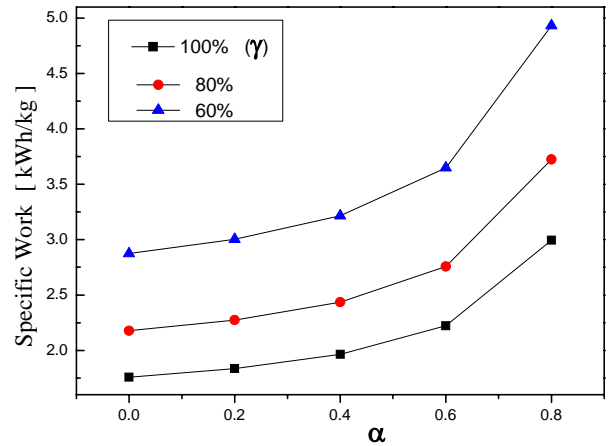


Fig. 4 Specific work variations with α ($\beta=0.25$)

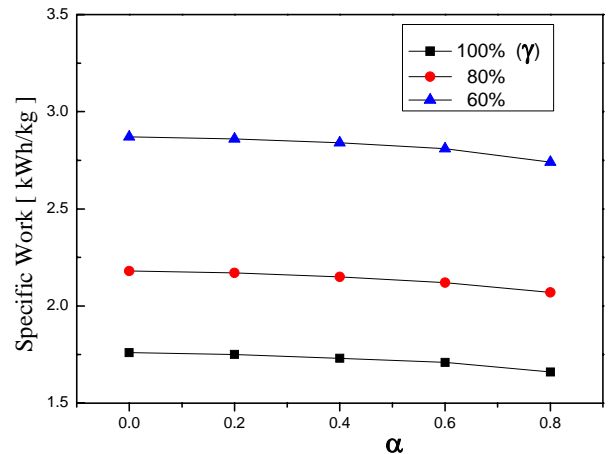


Fig. 5 Specific work variations with α ($\beta=0.25$)

Fig. 5를 통해 알 수 있다. Fig. 5에서 $\gamma=100\%$ 일 때, $\alpha=0$ 과 0.8 사이에 투입된 동력의 차는 $6,000$ kW (Fig.3)정도이나 비동력(W_s)의 차이는

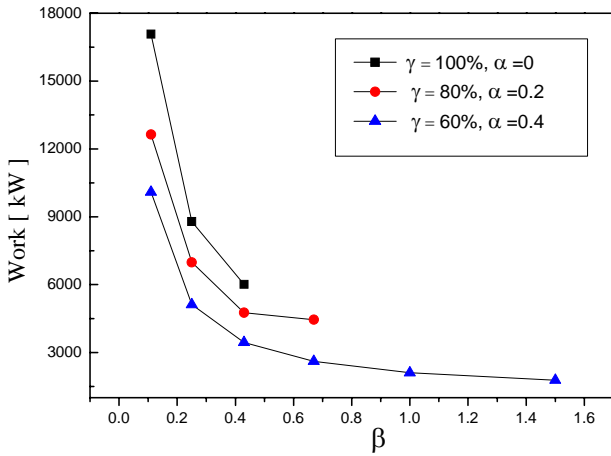


Fig. 6 Work variations with β

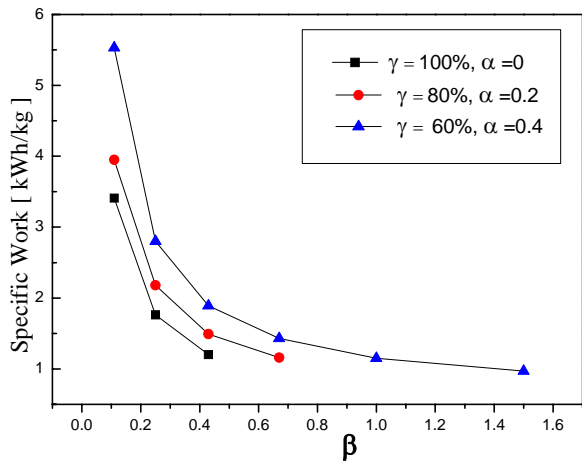


Fig. 7 Specific work variations with β

약 5% 정도이다. 따라서, α 값이 시스템의 액화율에 미치는 영향은 미미하며, 시스템의 용량에 관계하는 인자임을 알 수 있다.

3.2 분배율 β 및 액화율 γ 변화에 따른 시스템 특성

본 절에서는 γ 값이 100%, 80%, 60% 일 때, β 의 변화에 대한 영향을 살펴보았다. 이 때 β 값은 10% 씩 증감 시켰다. Fig. 6은 β 의 변화에 대한 동력의 변화를 보여주고 있다. Fig. 3과 비교하여 보면, 같은 β 값 선상의 γ 값 점들은 유사한 간격을 유지하면서 β 값에 따라 변화한다. β 값의 증가는 \dot{m}_{LBOG} 가 증가하고 \dot{m}_R 이 감소함을 뜻한다. $\gamma = 100\%$ 일 때, $\beta = 0.43$ 이상, 즉 \dot{m}_R 의 비율이 감소하는 경우에는 더 이상 100% 액화를 수행 할

수 없음을 뜻한다. 즉, 액화율이 낮을수록 팽창밸브(V-200) 입구단의 온도는 상승하게 되어, 상대적으로 냉각에 필요한 냉열의 수요가 감소하므로 \dot{m}_R 의 감소가 가능하다. 그런데, \dot{m}_R 의 감소는 내부순환유량의 감소를 의미하며, 이는 투입 동력의 감소를 유발하므로, 비교적 β 값이 상승하는 지점에서의 운전이 효율적인 측면에서는 유리하다고 할 수 있다. $\gamma = 80\%$ 의 $\beta = 0.67$ 도 같은 의미이며, 10% 단위의 계산임을 감안할 때, 이 점들은 각 γ 값들의 대략적인 운전한계 지점임을 알 수 있다. 즉, β 값에 따라 액화율이 결정됨은 물론이고, 최저동력이 소요되는 최적 유량비가 존재함을 알 수 있다. Fig. 7은 γ 값들의 한계 β 값에서 $\gamma = 100\%$, 80%, 60% 각 각, $W_S = 1.20, 1.16, 0.97$ 의 최저 동력값을 나타내고 있다.

4. 결론

DF엔진에 보조적으로 설치된 재액화 장치의 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

분배기 A에서의 유량 분배율은 시스템의 액화율과는 무관하다. 분배기 B에서의 유량 분배율은 BOG의 액화율에 큰 영향을 미친다. 또한 액화율에 따른 유량분배의 한계점이 존재한다. 이 결과들을 활용하면 여러 가지 운전조건에 따른 최적 설계의 자료로 활용이 가능하다.

후 기

이 연구는 부품소재 기술개발사업의 연구지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Mate, O. M., Diaz, A. M., IZAR BOG Reliquefaction system for marine applications, World maritime conference, 17-20 October 2003, San Francisco, U.S.A.
2. <http://www.hhi.co.kr/korea/presscenter/news/Data.asp?mode=read&code=1434>
3. Randall F. Barron, 1985, Cryogenic systems second edition, Oxford university press, newyork, pp. 85-89.
4. Aspen Technology Inc., HYSYS 2006 manual