LNG FPSO Topside의 액화 공정에 대한 이중 혼합 냉매 사이클의 최적 운전 조건 결정

이준채¹·치주환²·노명일^{3,†}·황지현¹·이규열⁴ 서울대학교 조선해양공학과 대학원¹ 목포대학교 해양시스템공학과² 울산대학교 조선해양공학부³ 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소⁴

Determination of the Optimal Operating Condition of Dual Mixed Refrigerant Cycle of LNG FPSO Topside Liquefaction Process

Joon-Chae Lee¹·Ju-Hwan Cha²·Myung-II Roh^{3,†}·Ji-Hyun Hwang¹·Kyu-Yeul Lee⁴

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹

Department of Ocean Engineering, Mokpo National University²

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan³

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University⁴

Abstract

In this study, the optimal operating conditions for the dual mixed refrigerant(DMR) cycle were determined by considering the power efficiency. The DMR cycle consists of compressors, heat exchangers, seawater coolers, valves, phase separators, tees, and common headers, and the operating conditions include the equipment's flow rate, pressure, temperature, and refrigerant composition per flow. First, a mathematical model of the DMR cycle was formulated in this study by referring to the results of a past study that formulated a mathematical model of the single mixed refrigerant(SMR) cycle, which consists of compressors, heat exchangers, seawater coolers, and valves, and by considering as well the tees, phase separators, and common headers. Finally, in this study, the optimal operating conditions from the formulated mathematical model was obtained using a hybrid optimization method that consists of the genetic algorithm(GA) and sequential quadratic programming(SQP). Moreover, the required power at the obtained conditions was decreased by 1,4% compared with the corresponding value from the past relevant study of Venkatarathnam.

Keywords : LNG FPSO(부유식 LNG 생산, 저장, 하역 장치), Topside liquefaction process(Topside 액화 공정), Dual mixed refrigerant cycle (이중 혼합 냉매 사이클), Optimization(최적화)

1. 서 론

1.1 연구 배경

LNG수요량의 증가에 따라 새로운 개념의 LNG-FPSO(Liquefied Natural Gas-Floating, Production, Storage and Offloading unit)의 수요가 발생하고 있다(Lee, et al., 2010). LNG FPSO는 크게 hull과 topside로 구성되어 있으며, topside는 process system과 utility system으로 나눠진다. 이 중 process system에는 분리 공 정(separation process), 전처리 공정(pretreatment process) 그 리고 액화 공정(liquefaction process)이 있다(Hwang, et al., 2009, 2010). 이러한 LNG-FPSO는 유정(well, 오일과 가스가 존재하는 심해 광구)에서 올라오는 오일, 가스, 물의 혼합물 중 가스(light hydrocarbon 성분)를 분리한 후 불순물(H₂O, N₂, CO₂, H₂S)을 허용 기준 이하로 제거하여 저장한다. 이때 천연 가스(NG: Natural Gas)를 액화하여 부피가 약 1/600 인 액화 천연 가스 (LNG: Liquefied Natural Gas) 상태로 저장한다(Cha, et al., 2010). 따라서 LNG-FPSO topside process system 중에서 액화 공정이 중요하며, 액화 공정은 LNG FPSO topside process system 건조 비용의 70%, 전체 건조 비용의 30~40%를 차지한 다(Shukri, 2004). LNG-FPSO의 액화 공정은 육상 플랜트에서 요구되는 생산 효율 외에도 공정의 간결성(compactness) 및 경 랑성(lightness), 고유 안전성(inherit safeness), 해상 환경의 고 려(marine environmental consideration)가 요구된다. 본 연구에서는 먼저 천연 가스 액화 공정 사이클의 분류를 소 개하였고, 그 중 최근 LNG FPSO 적용에 검토되고 있는 액화 공 정 사이클인 Dual Mixed Refrigerant(DMR) 사이클을 수학적 최 적화 모델로 정식화 하였다. 그리고 최적화 기법을 이용, 정립된 최적화 모델로부터 DMR 사이클의 연간 운전 비용, 즉 사이클에 서 요구되는 총 에너지를 최소로 하는 액화 공정의 운전 조건 (operating condition)을 도출 하였다.

1.2 관련 연구 현황

현재까지 진행된 액화 공정 사이클의 최적화 또는 최적 운전 조건 결정과 관련된 연구에서는 주로 상용 시뮬레이션 프로그램 과 연동하여 최적화를 수행하였다. Kim, et al.(2010)은 Propane Pre-cooler Mixed Refrigerant(C3MR) 사이클에 대해 최적 운전 조건 결정을 위한 목적 함수를 도출 하였고 AspenTech사의 HYSYS라는 상용 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 최적화를 수행 하였다. 그리고 Jensen (2008)은 Process Systems Enterprise사 의 gPROMS을 이용하여 간단한 액화 공정 사이클 중 하나인 Single Mixed Refrigerant(SMR) 사이클의 최적화를 수행하였으며, Venkatarathnam (2008)은 AspenTech사의 Aspen Plus를 이용하 여 여러 액화 공정 사이클(cascade liquefaction process cycle, mixed refrigerant process cycle, turbine-based process cycle) 에 대해 최적화를 수행하였다. 그 외 Lee, et al.(2010)은 상용 시 뮬레이션 프로그램인 Honeywell사의 Unisim을 이용하여 N2 확장 (expansion) 사이클과 C3MR 사이클의 성능을 비교하였다.

이와 달리 Cha, et al.(2010)은 상용 시뮬레이션 프로그램을 사용하지 않고, 대부분의 액화 공정 사이클의 기반이 되며 질소 를 냉매로 사용하는 Brayton 사이클(Hamworthy Mark I에 적용된 사이클)에 대해 설계 변수, 제약 조건, 목적 함수를 도출하여 최 적화 문제로 정식화 하였으며, 최적의 운전 조건을 결정하는 최 적화를 수행하였다.

2. 천연 가스 액화 공정 사이클

Table 1은 천연 가스 액화 공정 사이클을 크게 3가지 기준에 따라 분류한 것이다. 3가지 분류 기준에는 크게 1) 사이클의 개 수, 2) 터빈(turbine) 사용 유무, 3) 혼합 냉매(mixed refrigerant) 사용 유무가 있다. 우선, '1) 사이클의 개수'는 액화 공정 사이클 에서 천연 가스를 예냉각(precooling), 액화(liquefaction), 과냉각 (subcooling)할 때, 이들이 몇 개의 작동 냉매에 의해 수행되는지 를 나타낸다. 즉, 3 사이클은 예냉각, 액화, 과냉각을 담당하는 각각의 서로 다른 작동 냉매가 있다는 것이고, 2 사이클은 예냉 각이 한 작동 냉매에 의해 그리고 액화와 과냉각이 다른 작동 냉 매에 의해 냉각되는 것으로 총 2개의 냉매가 있다는 것이다. 그 리고 1 사이클은 예냉각, 액화, 과냉각이 하나의 작동 냉매에 의 해 수행되는 것을 말한다(Barclay & Shukri, 2007). '2) 터빈 사 용 유무'는 액화 공정 사이클에서 터빈, 즉 팽창기(expander)의

1) No. of Cycle	2) Turbine	3) Mixed Refrigerant	Cycle Name
		None	
		Precooling	
			_
		Subcooling	_
		Broccoling	_
	With	Liquefaction	_
	Turbine	Propooling	
		Subcooling,	_
		Broccoling	
		Frecooling,	
		Subcooling	_
		Subcooling	
			Classical Cascade
0 090105		None	Cycle,
			Optimal Cascade Cycle
		Precooling	-
		Liquefaction	AP-X Cvcle
	\\//ithout	Subcooling	-
	Turbipo	Precooling	
		Liquefaction	-
		Precooling	
		Subcooling,	-
		Procooling	
		Frecooling,	Multifluid Cascade
		Subcooling	Cycle
		Subcooling	Divel la deve eve devet
		Nama	
		INONE	Expander
			Retrigerant Cycle
	With	Precooling	-
	Turbine	Liquetaction,	_
		Subcooling	
		Precooling,	
		Liquefaction,	_
2 Cycles		Subcooling	
2 0 0 0 0 0 0		None	_
		Precooling	-
			Propane Precooled
	Without	Liquefaction,	Mixed
	Turbino	Subcooling	Refrigerant(C3MR)
			Cycle
		Precooling,	Dual Mixed
		Liquefaction,	
		Subcooling	Reingeranii(Divir) Cycle
		None	(Reverse)Brayton Cycle
	With	Precooling,	
	Turbine	Liquefaction.	-
		Subcooling	
1 Cycle		None	-
		Proceeding	
		Liquefaction	Single Mixed
			Refrigerant Cycle
		Subcooling	

Table	1	Classification	of	the	LNG	liquefaction	process
	C	cycles					

사용 유무를 나타내는 기준이다. 팽창기를 사용할 경우 작동을 멈춘 후 빠른 재시동이 가능하기 때문에 peak shaving plant에 적합하나(Venkatarathnam, 2008), 수용 가능 냉매 용량이 적고 액체 냉매를 팽창시키기에 적합하지 못하다는 단점이 있다. 따라 서 액화 공정 사이클에서 액체 또는 대용량의 냉매를 다룰 경우 팽창기 대신 팽창 밸브를 사용하게 된다. '3) 혼합 냉매 사용 유 무'는 액화 공정 사이클에서 순수 냉매(pure refrigerant)를 사용 하는지 또는 혼합 냉매(mixed refrigerant)를 사용하는지에 대한 기준이다(Venkatarathnam, 2008). 특히, 혼합 냉매가 예냉각, 액 화 또는 과냉각 중 어느 단계에서 사용되는 지에 따라 분류가 가 능하다. 혼합 냉매를 사용할 경우 순수 냉매를 사용할 때 보다 액 화 시 열역학적 효율은 높으나, 적절한 냉매의 조합 비율을 조절 하기가 어려우며 혼합 시 메탄과 같은 탄소 화합물 냉매를 추가 하기 때문에 폭발의 위험성이 존재한다(Finn, 2000).

3. DMR 사이클의 수학적 최적화 모델

본 장에서는 천연 가스 액화 공정 사이클 중 Fig. 1과 같이 최 근 LNG FPSO에 적용이 검토되고 있는 액화 공정 사이클인 DMR 사이클을 수학적 최적화 모델로 정식화 하였다.

3.1 DMR(Dual Mixed Refrigerant) 사이클

DMR Cycle은 Fig. 1에 나타나 있듯이 해수를 이용한 냉각기 (Sea Water(SW) cooler로 열 교환기의 일종) 2개와 3개의 압축 기(compressor), 4 개의 열 교환기(heat exchanger) 그리고 5개 의 밸브(valve) 및 2개의 상 분리기(phase separator)로 구성된 다. DMR 사이클은 Table 1에 나타나 있듯이 2 사이클에 해당하 며, 팽창기가 아닌 팽창 밸브를 사용한다. 그리고 예냉각, 액화, 그리고 과냉각 단계에서 혼합 냉매가 쓰이고 있으며, 예냉각 단 계에 쓰이는 혼합 냉매(precooling refrigerant)는 메탄, 에탄, 프 로판 및 부탄의 혼합이다. 이 냉매는 예냉각 단계에서 사용되는 천연 가스와 액화 및 과냉각 단계에 사용되는 혼합 냉매(main refrigerant, 질소, 메탄, 에탄, 프로판의 혼합)를 냉각시킨다. 그 후 main refrigerant가 액화 및 과냉각 단계에서 천연 가스(NG)를 액화 천연 가스(LNG)로 액화시킨다(Venkatarathnam, 2008).

우선, precooling refrigerant는 precooler cold box에서 순환 을 하며 NG, main refrigerant, 그리고 자기 자신(precooling



Fig. 1 Configuration of a DMR cycle

refrigerant)의 온도를 낮추고 있다. Precooling refrigerant는 흐름 1(Fig. 1의 ①)의 고온 고압의 상태에서 시작하며 해수를 냉매로 사용하는 'SW cooler 1'을 지나 온도가 낮아진다. 이어서 'Heat Exchanger 1'을 통과하며 추가적으로 온도가 낮아지고 흐름 3(Fig. 1의 ③)에서 precooling refrigerant 일부분이 분리되어 흐 름 4(Fig. 1의 ④)로 흐르게 된다. 이렇게 분리된 precooling refrigerant의 일부분은 'Valve 1'을 통과하며 저온 저압의 상태 (Fig. 1의 ⑤)가 된다. 이 냉매가 'Heat Exchanger 1'을 통과하며 자기 자신(precooling refrigerant)과 main refrigerant, 그리고 NG 의 온도를 낮추게 된다. 흐름 3(Fig. 1의 ③)에서 분리되어 흐름 7(Fig. 1의 ⑦)로 흐르는 냉매는 'Heat Exchanger 2'를 통과하며 온도가 낮아지고, 'Valve 2'를 통과하며 저온 저압의 상태(Fig. 1 의 ⑨)가 되고 이는 'Heat Exchanger 2'를 통과하며 자기 자신 (precooling refrigerant), main refrigerant 그리고 NG의 온도를 낮추게 된다. 그 후 'Compressor 2'로 들어가 고온 고압의 상태 (Fig. 1의 ⑪)가 된다. 그리고 흐름 6(Fig. 1의 ⑥)과 합쳐진 후 다시 'Compressor 1'로 들어가 고온 고압의 상태(Fig. 1의 ①)가 된다.

다음으로 main refrigerant는 흐름 13(Fig. 1의 ⑬)에서 시작, precooler cold box를 통과하며 온도가 낮아지고, cold box를 통 과하며 NG를 액화 및 과생각시키고 자기 자신(main refrigerant) 의 온도 역시 낮추고 있다. Main refrigerant는 흐름 13(Fig. 1의 ③)의 고온 고압의 상태에서 시작하며, 해수를 냉매로 사용하는 'SW cooler 2'를 지나며 온도가 낮아진다. 그리고 'Heat Exchanger 1'과 'Heat Exchanger 2'를 통과하며 추가적으로 온 도가 낮아진다. 그 후 'Phase Separator 1'을 통과하며 냉매 중 증기 상태인 부분은 흐름 20(Fig. 1의 20)으로, 액체 상태인 부분 은 흐름 17(Fig. 1의 ⑦)로 나눠져 흐르게 된다. 액체 상태의 냉 매 흐름 17(Fig. 1의 ⑪)은 'Heat Exchanger 3'를 통과하며 온도 가 낮아지고 'Valve 3'을 통과하며 저온 저압의 상태(Fig. 1의 19) 가 된다. 기체 상태의 냉매 흐름 20(Fig. 1의 20)은 'Heat Exchanger 3, 4'를 통과하며 온도가 낮아지고 'Valve 4'를 통과하 며 저온 저압의 상태(Fig. 1의 23)가 된다. 그리고 'Heat Exchanger 4'를 통과하면서 NG와 자기 자신(main refrigerant)의 온도를 낮춘다. 그리고 흐름 19(Fig. 1의 (19)와 합쳐지고 'Heat Exchanger 3'를 통과하며 NG와 자기 자신(main refrigerant)의 온도를 한 번 더 낮춘다. 그 후 'Compressor 3'을 통과하며 고온 고압의 상태(Fig. 1의 (13)가 된다.

천연 가스는 precooling refrigerant와 main refrigerant에 의해 'Heat Exchanger 1, 2, 3, 4'를 통과하며 온도가 -160.15°C까지 낮아진다. 그리고 'Valve 5'를 통과하며 저온 저압의 상태(Fig. 1 의 ⑳)가 되는데, 'Phase Separator 2'를 통과하며 증기 부분은 flash gas라 하여 흐름 33(Fig. 1의 ㉓)으로 분리되고, 나머지 액 체 부분은 LNG로 흐름 34(Fig. 1의 ㉓)로 분리되어 흐른 후 LNG 탱크에 저장된다.

3.2 설계 변수(design variables)

DMR 사이클의 수학적 최적화 모델에서 설계 변수는 흐름

1~31(Fig. 1의 ①~③)에서의 프로세스 정보, 즉 압력(pressure, [bar]), 온도(temperature, [K]), 유량(flow rate, [kg/h]), 각 구 성 냉매의 몰 분율(mole fraction)과 건도(quality), 제어 밸브에서 냉매를 나누는 몰 분율(mole fraction), 그리고 압축기가 등엔트 로피 공정일 때의 출력 온도를 포함한다. 따라서 이 공정의 수학 적 최적화 모델링을 위해서는 총 351개의 설계 변수가 요구되며, 이를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Design variables for mathematical model of the DMR cycle

-			
Streams	1	2	 12
Pressure[bar]	P_1	P_2	 P ₁₂
Temperature[K]	T_1	T_2	 T ₁₂
Flow rate[kg/h]	f_1	f2	 f ₁₂
Ethane mole			
fraction	<i>y</i> ∈₁	<i>YE</i> 2	 <i>YE</i> 12
Propane mole		_	
fraction	yP_1	уР ₂	 уР ₁₂
n-Butane mole			
fraction	ynB1	ynB ₂	 ynB ₁₂
Ethane vapor			
fraction	xE1	xE ₂	 xE ₁₂
Propago vapor			
	xP1	xP2	 xP ₁₂
n-Butane vapor	xnB1	xnB ₂	 xnB ₁₂
fraction	,	2	12
Streams	13	14	 26
Pressure[bar]	P ₁₃	P ₁₄	 P ₂₆
Temperature[K]	T ₁₃	T ₁₄	 T ₂₆
Flow rate[kg/h]	f ₁₃	f ₁₄	 F ₂₆
Nitrogen mole	VN12	VN14	 VNac
fraction	J , 1 /3	J , 1 /4	<i>J</i> , v ₂₀
Methane mole	111	141	 111
fraction	<i>yivi₁₃</i>	<i>yivi₁₄</i>	 <i>yivi₂₆</i>
Ethane mole	_	_	
fraction	<i>Y</i> E ₁₃	<i>YE</i> ₁₄	 <i>YE</i> 26
Propane mole	_	_	_
fraction	уР ₁₃	уP ₁₄	 уР ₂₆
Nitrogen vapor			
fraction	xN ₁₃	xN ₁₄	 xN ₂₆
Methane vanor			
fraction	хM ₁₃	хM14	 xM26
Ethano vanor			
	xE ₁₃	xE14	 xE_26
traction			
Propane vapor	xP ₁₃	xP14	 xP ₂₆
fraction	,		20
Streams	27	28	 31
Pressure[bar]	P ₂₇	P ₂₈	 P ₃₁
Temperature[K]	T ₂₇	T ₂₈	 T ₃₁
Flow rate[kg/h]	t ₂₇	f ₂₈	 F_{31}
Nitrogen mole	VN27	VN28	 VN21
fraction	J' *2/	J, 120	J , 1 3/

Methane mole	Maz	Maa		Mai
fraction	<i>y</i> 1v127	<i>y</i> 1V128		<i>yivi</i> 3/
Ethane mole	VFaz	VEne		VF21
fraction	J=2/	J=20		<i>JC</i> 37
Propane mole	VP27	VP28		VP31
fraction	J. 2/	J. 20		<i>J.</i> 37
n-Butane mole	vnB ₂₇	vnB28		VnB31
fraction	J= 27	<i>J</i> =20		<i></i>
i-Butane mole	viBaz	viBaa		viBat
fraction	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	<i>J</i> , <i>D</i> ₂₀		J ,237
i-Pentane mole	viPaz	viPao		viPat
fraction	J" 2/	J'' 20		<i>J</i> " 3/
Nitrogen vapor	xN ₂₇	XN20		xN21
fraction	7.0.127	,		,,,,,,,
Methane vapor	XM27	xM28		XM31
fraction		11120		
Ethane vapor	xE27	xE28		XE31
fraction				
Propane vapor	xP27	xP28		xP31
fraction	7.0 27	78 20		,
n-Butane vapor	xnB ₂₇	xnB ₂₈		xnB31
fraction	707-27	787-20		, , , _ , ,
i-Butane vapor	xiB ₂₇	xiB ₂₈		xiB31
fraction				
i-Pentane vapor	xiP27	xiP ₂₈		xiP341
fraction				
Mole fraction for		(0	
the control valve			_	
Output temperature				
of compressor in		T _{s, 1} , T _{s,}	11 , T _{s, 13}	
isentropic condition				

3.3 제약 조건(constraints)

3.3.1 등호 제약 조건(equality constraints)

(1) 질량 보존(mass conservation) 법칙

압축기, 열 교환기 등과 같은 장비를 통과하는 흐름에서 질량 의 손실이 없다고 기정하면, 'Phase Separator 1, 2', 'Control Valve' 그리고 'Common Head 1, 2'를 제외한 나머지 장비에서 는 입력되는 흐름과 출력되는 흐름의 유량은 동일하다. 즉, 장비 에 입력되는 흐름과 출력되는 흐름 사이에 질량 보존 법칙이 성 립한다. 각 흐름에 대해 이를 정리하면 아래의 식과 같다.

$$f_i = f_{i+1} \tag{1}$$

(*i* = 1~2, 4~5, 7~10, 13~15, 17~18, 20~23, 25, 27~30) 여기서, *f*_i 는 흐름 *i* 의 유량을 나타낸다. 그리고 냉매가 상 분리기에서 냉매 질량의 손실 없이 두 흐름 으로 나눠지며, 'Common Head 1, 2'에서 질량의 손실 없이 냉 매가 합쳐진다면 장비의 유입 전과 유입 후의 각각의 냉매 총량 은 서로 같으며, 질량 보존 법칙이 성립한다고 할 수 있다. 각각 의 'Common Head 1, 2'에 대해 적용하면 아래의 식과 같다.

$$\bar{\circ} \vec{=} \hat{(6)} + \bar{\circ} \vec{=} \hat{(1)} = \bar{\circ} \vec{=} \hat{(2)}$$

 $f_6 + f_{11} = f_{12}$ (2)

흐름 (9) + 흐름 29) = 흐름 25):
$$f_{19} + f_{24} = f_{25}$$
 (3)

또한 제어 밸브에서 몰 분율(C)에 따라 흐름을 2개로 나누며, 이때 냉매의 손실이 없다고 가정한다면 'Control Valve'에 대해 적용하였을 때 아래의 식과 같다.

$$f_4 = C \cdot f_3 \tag{4}$$

$$f_7 = (1 - C) \cdot f_3 \tag{5}$$

따라서 질량 보존 법칙으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조 건은 총 26개이다.

(2) 등압 조건(isobaric condition)

열 교환기 및 냉각기를 통과하는 흐름에서는 통과 전후 압력의 변화가 생기지 않는다(Venkatarathnam, 2008). 이러한 특성을 DMR 사이클의 'Heat Exchanger 1~4'와 'SW Cooler 1, 2'에 대 해 적용하면 아래의 식과 같다.

효금
$$i = \overline{\mathfrak{o}}$$
금 $i + 1$:
 $P_i = P_{i+1}$
(6)

(*i* = 1, 2, 5, 7, 9, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 23, 25, 27, 28, 29, 30)

그리고 또한 상 분리기, 제어 밸브, 그리고 common head를 지나는 흐름에서도 통과 전후의 압력의 변화가 없다고 가정을 한 다. 이를 'Control Valve', 'Phase Separator 1', 그리고 'Common Head 1, 2'에 적용을 시키면 아래의 식과 같다.

효름
$$(3) = \overline{2} = (4)$$
:
 $P_3 = P_4$
(7)

흐름
$$(3) = 흐름 (7):$$

 $P_3 = P_7$ (8)

호름 (6) = 호름 (12):

$$P_6 = P_{12}$$
 (9)

호름 (6) = 호름 (20):

$$P_{16} = P_{20}$$
 (11)

흐름
$$(9) = 흐름 (25):$$

 $P_{19} = P_{25}$ (12)

그리고 common head에서 유입되는 두 냉매의 압력 또한 서 로 같다고 가정한다. 이를, 'Common Head 1, 2'에 적용하면 아 래의 식과 같다.

효름 (6) = 효름 (1):
$$P_6 = P_{11}$$
 (13)

호름 (9) = 호름 24):
$$P_{19} = P_{24}$$
 (14)

따라서 등압 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 25개이다.

(3) 에너지 보존(energy conservation) 법칙

열 교환기에서는 물질이 직접적으로 만나지는 않지만, 물질간 의 열 에너지 교환이 일어난다. 이때 에너지 보존 법칙에 따라 각 각의 흐름에서의 에너지 변화의 총합은 0으로 일정하다(Cengel, 2008). 먼저 'Heat Exchanger 1'에서의 에너지 보존 법칙을 수식 으로 나타내면 식 (15)과 같다.

$$\begin{aligned} &f_3(h_3(T_3,P_3) - h_2(T_2,P_2)) + \\ &f_6(h_6(T_6,P_6) - h_5(T_5,P_5)) + \\ &f_{15}(h_{15}(T_{15},P_{15}) - h_{14}(T_{14},P_{14})) + \\ &f_{28}(h_{28}(T_{28},P_{28}) - h_{27}(T_{27},P_{27})) = 0 \end{aligned}$$

여기서 *h*(*T*, *P*)는 흐름 *i* 에서의 혼합물에 대한 엔탈피(enthalpy) 이다. 이는 혼합물을 구성하는 순수 성분에 대한 엔탈피의 합으 로 식 (16)과 같이 계산할 수 있다(Smith, 2005).

$$h_{i}(T_{i}, P_{i}) = \sum_{j}^{n} y_{i,j} \cdot h_{i,j}(T_{i}, y \cdot P_{i})$$
(16)

이때 ỵ,는 흐름 / 에서 혼합물 중 성분 / 의 몰 분율(mole fraction)이다. 그리고 이때의 ħ,는 흐름 / 에서 순수 성분 / 에 대 한 엔탈피 값이다. 그리고 순수 성분에 대한 엔탈피 값은 식 (17) 과 같이 계산할 수 있다(Smith, 2005).

$$\begin{aligned} & h_{i,j}(T_i, y \cdot P_i) = (1 - x_{v,i,j}) \cdot h_{i,j,l}(T_i, y \cdot P_i) \\ & + x_{v,i,j} \cdot h_{i,j,v}(T_i, y \cdot P_i) \end{aligned} \tag{17}$$

여기서 X_{v,i,j}는 흐름 / 에서 성분 / 의 건도, 즉 성분 / 에서 증

기가 차지하는 몰 분율을 나타내는 것으로 모두 증기 상태라면 1 이 된다. 그리고 $h_{i,j,i}$ 는 흐름 / 에서 성분 / 가 액체 상태일 때의 엔탈피 값이며, $h_{i,j,v}$ 는 흐름 / 에서 성분 / 가 기체 상태일 때의 엔 탈피 값을 나타낸다. 본 연구에서 각각에 대한 엔탈피 값은 Smith (2005)의 논문을 참조하여 계산하였다.

이와 동일한 방법으로 'Heat Exchanger 2,3,4'에 적용하면 식 (18)~(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{split} &f_8(h_8(T_8,P_8)-h_7(T_7,P_7))+ \\ &f_{10}(h_{10}(T_{10},P_{10})-h_9(T_9,P_9))+ \\ &f_{16}(h_{16}(T_{16},P_{16})-h_{15}(T_{15},P_{15}))+ \\ &f_{29}(h_{29}(T_{29},P_{29})-h_{28}(T_{28},P_{28}))=0 \end{split}$$

$$\begin{split} &f_{18} \left(h_{18} \left(T_{18}, P_{18} \right) - h_{17} \left(T_{17}, P_{17} \right) \right) + \\ &f_{21} \left(h_{21} \left(T_{21}, P_{21} \right) - h_{20} \left(T_{20}, P_{20} \right) \right) + \\ &f_{30} \left(h_{30} \left(T_{30}, P_{30} \right) - h_{29} \left(T_{29}, P_{29} \right) \right) + \\ &f_{26} \left(h_{26} \left(T_{26}, P_{26} \right) - h_{25} \left(T_{25}, P_{25} \right) \right) = 0 \end{split}$$

$$\begin{aligned} &f_{31}(h_{31}(T_{31},P_{31})-h_{30}(T_{30},P_{30})) + \\ &f_{22}(h_{22}(T_{22},P_{22})-h_{21}(T_{21},P_{21})) + \\ &f_{24}(h_{24}(T_{24},P_{24})-h_{23}(T_{23},P_{23})) = 0 \end{aligned}$$

따라서 에너지 보존 법칙으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 4개이다.

(4) 등엔트로피 조건(isoentropic condition)

이상적인 가역 과정(reversible process)을 거치고, 외부와의 열 출입이 없는 단열 과정(isothermal process)을 거친 다면, 등 엔트로피 과정(isentropic process)이라 볼 수 있다(Smith, 2005).

이때, 'Compressor 1'에 대해 엔트로피 변화는 식 (21)과 같다 (Smith, 2005).

$$\Delta S_{C,1} = S_1(T_{S,1}, P_1) - S_{12}(T_{12}, P_{12})) \tag{21}$$

여기서 T_{S1}은 압축기가 등엔트로피 공정에 따라 작동할 때 압축 기에서 출력되는 냉매의 온도이며, 아래 '(5) 압축기 효율 조건'에 서 사용되는 변수이다. 그리고 *S*(*T_i*, *P*)는흐름 / 에서의 혼합물에 대한 엔트로피 값이다. 이는 혼합물을 구성하는 순수 성분에 대 한 엔트로피의 합으로 식 (22)와 같이 계산할 수 있다(Smith, 2005).

$$S_i(T_i, P_i) = \sum_{j=1}^{n} y_{i,j} \cdot S_{i,j}(T_i, y \cdot P_i)$$
(22)

이때 _{火,}는 흐름 *i*에서 혼합물 중 성분 *j*의 몰 분율이다. 그리고 이때의 _{오,}는 흐름 *i*에서 순수 성분 *j*에 대한 엔트로피 값이다. 본 연구에서 순수 성분에 대한 엔트로피 값은 Smith (2005)의 논 문을 참조하여 계산하였다. 이와 동일한 방법으로 'Compressor 2, 3'에 적용하면 식 (23), (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta S_{C,2} = S_{11}(T_{S,11}, P_{11}) - S_{10}(T_{10}, P_{10}))$$
(23)

$$\Delta S_{C,3} = S_{13}(T_{S,13}, P_{13}) - S_{26}(T_{26}, P_{26})) \tag{24}$$

따라서 등엔트로피 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조 건은 총 3개이다.

(5) 압축기 효율 조건

본 연구에서 DMR 사이클 내 'Compressor 1, 2, 3'의 효율(ŋ) 은 80%로 가정하였다. 'Compressor 1'의 압축기 효율은 식 (25) 와 같이 나타낼 수 있다(Smith, 2005).

$$\eta = \frac{h_1(T_{S,1}, P_1) - h_{12}(T_{12}, P_{12})}{h_1(T_1, P_1) - h_{12}(T_{12}, P_{12})}$$
(25)

여기서, 식 (27)의 분자는 'Compressor 1'이 등엔트로피 공정에 따라 작동할 때 요구되는 단위 질량 당 일률을 의미하며, 분모는 실제로 작동 시 요구되는 단위 질량 당 일률을 의미한다.

이와 동일한 방법으로 'Compressor 2, 3'에 적용하면 식 (26),(27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{h_{11}(T_{S,11}, P_{11}) - h_{10}(T_{10}, P_{10})}{h_{11}(T_{11}, P_{11}) - h_{10}(T_{10}, P_{10})}$$
(26)

$$\eta = \frac{h_{13}(T_{S,13}, P_{13}) - h_{26}(T_{26}, P_{26})}{h_{13}(T_{13}, P_{13}) - h_{26}(T_{26}, P_{26})}$$
(27)

따라서 압축기 효율 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 3개이다.

(6) 몰 분율 보존 조건

압축기, 열 교환기 등과 같은 장비를 통과하는 흐름에서 질량 의 손실이 없고 구성 성분의 변화가 없다고 가정하면, 상 분리기, 제어 밸브, 그리고 common head를 제외한 나머지 장비에서는 입력되는 흐름과 출력되는 흐름의 각 성분의 몰 분율은 동일하다. 즉, 장비에 입력되는 흐름과 출력되는 흐름 사이에 구성 성분의 몰 분율 보존 조건이 성립하며, 각 흐름에 대해 이를 정리하면 식 (28)과 같이 나타낼 수 있다.

호름
$$i = 호름 i + 1$$
:
 $y_{i,j} = y_{i+1,j}$ (28)

(*i* = 1~2, 4~5, 7~10, 13~15, 17~18, 20~23, 25, 27~30) 여기서, *y_{ij}* 는 흐름 *i* 에서 혼합물 중 성분 *j* 의 몰 분율이다. 또한 제어 밸브에서 두 흐름으로 나누어 질 때, 혼합물이 충분 히 섞여 있어 균일하게 분포하고 있다는 가정 하에 똑같은 몰 분 율을 가지고 두 흐름으로 나누어진다고 할 수 있으며, 이를 정리 하면 식 (29), (30)과 같이 나타낼 수 있다.

효름
$$(3) = 호름 (4):$$

 $y_{3,j} = y_{4,j}$ (29)

$$\underline{\circ}_{i} = \underline{\circ}_{i} = \underline{\circ}_{i}$$

 $y_{3,j} = y_{7,j}$ (30)

그리고 'Common Head 1, 2'에서 두 흐름이 합쳐졌을 때의 몰 분율은 중간 과정에서 질량의 손실이 없으므로 두 흐름으로 나누어지기 이전의 몰 분율과 동일할 것이다. 이를 정리하면 식 (31), (32)와 같이 나타낼 수 있다.

호름 (한) = 흐름 (3):
$$y_{12,j} = y_{3,j}$$
 (31)

$$\bar{a} = \bar{a} = \bar{a} = \bar{a} = \bar{a}$$

 $y_{25,j} = y_{16,j}$ (32)

흐름 ①~⑫ 관련 몰 분율 보존 조건이 11개이며 구성 성분은 3개, 흐름 ⑬~⑫ 관련 제약 조건이 11개이며 구성 성분은 4개, 흐름 ⑫~鄧 관련 제약 조건이 4개이며 구성 성분은 7개이므로 몰 분율 보존 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 105개(= 11×3 + 11×4 + 4×7)이다.

(7) 등온 조건(isothermal condition)

상 분리기와 제어 밸브를 통과하며 두 흐름으로 나누어질 때 외부와의 열 출입이 없다고 가정하면 장비 전후의 온도 변화가 없다고 할 수 있다. 이를 'Phase Separator 1, 2', 'Control Valve' 에 적용하면 아래의 식과 같다.

호름
$$(3) = 호름 (4):$$

 $T_3 = T_4$ (33)

호름
$$(3) = 호름 (7):$$

 $T_3 = T_7$ (34)

호름 (6) = 호름 (1):

$$T_{16} = T_{17}$$
(35)

호름 (6) = 호름 (2):

$$T_{16} = T_{20}$$
 (36)

따라서 등온 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 4개이다.

(8) 등엔탈피 조건(isoenthalpic condition)

팽창 밸브 경우 외부에서 가해진 일이나 열 전달이 없으며, 속 도 변화에 따른 냉매의 운동 에너지 변화와 입출구 사이의 운동 에너지 변화를 무시할 수 있다고 가정할 때, 팽창 밸브에 입출력 되는 흐름에서의 엔탈피 변화량은 0이 된다(Moran, 2008). 이를 'Valve 1~4'에 적용하면 아래의 식과 같다.

$$h_5(T_5, P_5) - h_4(T_4, P_4) = 0 \tag{37}$$

$$h_9(T_9, P_9) - h_8(T_8, P_8) = 0 \tag{38}$$

$$h_{19}(T_{19}, P_{19}) - h_{18}(T_{18}, P_{18}) = 0 \tag{39}$$

$$h_{23}(T_{23}, P_{23}) - h_{22}(T_{22}, P_{22}) = 0$$
(40)

따라서 등엔탈피 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건 은 총 4개이다.

(9) 상 분리기의 분리 조건

상 분리기의 경우 입력된 흐름에 대해 액체 성분과 기체 성분 을 나눠 흐르게 한다. Heavy hydrocarbon 성분이 light hydrocarbon 성분 보다 끓는점이 높기 때문에 비교적 쉽게 액화 가 되며 따라서 상 분리기에서 액체 성분으로 분리되는 부분은 대부분 heavy hydrocarbon 성분이다. 본 연구에서는 출력되는 흐름들의 몰 분율을 계산할 때 각각의 구성 성분들이 각자 자신 의 건도(quality)에 따라 나눠진다고 가정하였다. 이를 'Phase Separator 1'에 대해 적용하면 아래의 식과 같다.

$$xN_{16} \cdot yN_{16} = yN_{20} \tag{41}$$

$$xM_{16} \cdot yM_{16} = yM_{20} \tag{42}$$

$$xE_{16} \cdot yE_{16} = yE_{20} \tag{43}$$

$$xP_{16} \cdot yP_{16} = yP_{20} \tag{44}$$

$$(1 - xN_{16}) \cdot yN_{16} = yN_{17} \tag{45}$$

$$(1 - xM_{16}) \cdot yM_{16} = yM_{17} \tag{46}$$

$$(1 - xE_{16}) \cdot yE_{16} = yE_{17} \tag{47}$$

$$(1 - xP_{16}) \cdot yP_{16} = yP_{17} \tag{48}$$

그리고 나눠지는 흐름의 유량의 경우, 건도와 몰 분율의 곱을 통해 구성 성분의 증기 또는 액체가 차지하는 유량을 구할 수 있다. 이를 'Phase Separator 1'에 대해 적용하면 아래의 식과 같다.

$$\begin{split} & [(1-xN_{16})\cdot yN_{16} & (49) \\ & +(1-xM_{16})\cdot yM_{16}+(1-xE_{16})\cdot yE_{16} \\ & +(1-xP_{16})\cdot yP_{16}]\cdot f_{16}=f_{17} \end{split}$$

$$\begin{bmatrix} xN_{16} \cdot yN_{16} + xM_{16} \cdot yM_{16} \\ + xE_{16} \cdot yE_{16} + xP_{16} \cdot yP_{16} \end{bmatrix} \cdot f_{16} = f_{20}$$
 (50)

따라서 상 분리기의 분리 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 10개이다.

(10) 열 교환기의 출력 온도 조건

본 연구에서는 열 교환기에서 출력되는 흐름들의 온도의 경우, 효율 측면에서 동일하다고 가정하였다. 이를 'Heat Exchanger 1' 에 대해 적용하면 아래의 식과 같다.

$$T_3 = T_{15}$$
 (51)

$$T_3 = T_{28}$$
 (52)

'Heat Exchanger 2~4'에 대해서도 동일하게 적용할 수 있으며, 그 결과 열 교환기의 출력 온도 조건으로부터 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 총 7개이다.

(11) 건도 조건

건도(quality)는 전체 계에서 증기가 차지하는 몰 분율을 나타 내며, 이는 아래와 같은 식을 통해 구할 수 있다(Smith, 2005). $h_{i,j}(T_i, y \cdot P_i) = (1 - x_{v,i,j}) \cdot h_{i,j,l}(T_i, y \cdot P_i)$ (53) $+ x_{v,i,j} \cdot h_{i,j,v}(T_i, y \cdot P_i)$

여기서, X_{V,i}는 흐름 / 에서 성분 / 의 건도, 즉 성분 / 에서 증기가 차지하는 몰 분율을 나타내는 것으로 모두 증기 상태라면 1이 된 다. 그리고 h_i, 은 흐름 / 에서 성분 / 가 액체 상태일 때의 엔탈피 값이며, h_i, v는 흐름 / 에서 성분 / 가 기체 상태일 때의 엔탈피 값 을 나타낸다. 본 연구에서 각각에 대한 엔탈피 값은 Smith (2005) 의 논문을 참조하여 계산하였다. 건도 조건에서 유도할 수 있는 등호 제약 조건은 각 흐름에서의 냉매 구성 성분의 수와 동일하 므로 총 127개이다.

3.3.2 부등호 제약 조건(inequality constraints)

(1) 각 흐름의 온도 제약 조건

각 흐름의 온도는 열역학 제 3법칙에 따라, 절대 영도(OK) 보 다는 커야 하며, 일반적으로 3K 보다는 크다는 조건을 적용하게 된다(Venkatarathnam, 2008). 각 흐름에 대해 이를 적용하면 아 래의 식과 같다.

$$T_i \ge 3, \ (i=1,...,31)$$
 (54)

따라서 식 (54)로부터 얻어지는 부등호 제약 조건은 총 31개 이다.

(2) 압축기 작동을 위한 제약 조건

압축기는 유입되는 흐름이 액체일 경우 운전 이상 및 기기 손 상 문제가 발생한다(Kim, et al., 2010). 그러므로 압축기에 유입 되는 냉매의 온도는 그 압력에서의 포화 온도보다 높아야 한다. 이를 'Compressor 1~3'에 적용하면 아래의 식과 같다.

$$T_{12} > T_{sat}(P_{12}) \tag{55}$$

 $T_{10} > T_{sat}(P_{10}) \tag{56}$

$$T_{26} > T_{sat}(P_{26}) \tag{57}$$

여기서, *T_{sal}(P*)는 냉매의 포화 온도이며 이는 그때의 압력에 관한 함수이다. 본 연구에서 포화 온도의 값은 Smith (2005)의 논문을 참조하였다. 따라서 압축기 작동을 위한 제약 조건으로부터 얻어 지는 부등호 제약 조건은 총 3개이다.

(3) 열 교환기의 작동을 위한 유체의 온도 제약 조건

팽창기와 유사하게 열 교환기의 경우 원활한 작동을 위해 유입 되는 흐름의 온도에 대한 제약 조건이 있다(Venkatarathnam, 2008). 이를 'Heat Exchanger 1'에서 유입되는 흐름에 대해 적용 하면 식 (58), (59)와 같다.

 $T_{14} \le 150 \degree C = 423.15K \tag{58}$

$$T_2 \le 150 \degree C = 423.15K \tag{59}$$

'Heat Exchanger 1'에서 흐름 27(Fig. 1의 ⑦)의 경우 천연 가 스가 들어가는 곳으로 보통 20°C의 온도를 가지므로 위와 같은 조건이 필요 없으며, 흐름 5(Fig. 1의 ⑤)의 경우 팽창 밸브에 의 해 저온의 냉매가 들어가므로 역시 위와 같은 조건이 필요 없다. 그 외 'Heat Exchanger 2~4'에서 유입되는 냉매와 천연 가스의 온도는 'Heat Exchanger 1'의 다음 단계로 모두 'Heat Exchanger 1'의 유입되는 냉매와 천연 가스의 온도보다 낮기 때 문에 역시 위와 같은 조건이 필요 없다. 따라서 열 교환기의 작동 을 위한 유체의 온도 제약 조건으로부터 얻어지는 부등호 제약 조건은 총 2개이다. 이상과 같이 각 흐름의 온도 제약 조건(31개), 압축기의 작동 을 위한 제약 조건(3개), 열 교환기의 작동을 위한 유체의 온도 제약 조건(2개)으로부터 얻을 수 있는 부등호 제약 조건은 총 36 개이다.

3.4 목적 함수(objective function)

천연 가스 액화 공정의 최적 설계 문제에서는 일반적으로 목적 함수를 연간 운전 비용과 장비 비용의 합의 최소화로 나타낸다 (Jensen, 2008). 본 연구에서는 액화 공정을 위한 장비는 이미 선정된 것으로 가정하였기 때문에, 수학적 최적화 모델에서는 운 전 비용의 최소화를 목적 함수로 선정하였다. 즉, LNG 연간 생산 량을 고정해두고 천연 가스 액화에 소요되는 총 에너지(정확히 말하면, 일률)의 최소화를 목적 함수로 선정하였다. 일반적인 액 화 공정 사이클에서 액화에 소요되는 총 일률은 압축기에 소요되 는 일률과 팽창기에서 발생하는 일률의 합으로 생각할 수 있다 (Jensen, 2008). 그런데 DMR 사이클에서는 팽창기가 사용되지 않으므로, 압축기에서 소요되는 일률의 합을 목적 함수로 둘 수 있다. 'Compressor 1~3'에서의 일률을 각각 *W*, *W*, *W*,이라고 가정하면, 목적 함수는 식 (64)와 같이 이들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \tag{60}$$

이때, 압축기에서 소요되는 일률은 다음과 같이 구할 수 있다 (Smith, 2005). 먼저 'Compressor 1'에 필요한 일률은 다음과 같 이 나타낼 수 있다.

$$W_1 = f_1(h_1(T_1, P_1) - h_{12}(T_{12}, P_{12}))$$
(61)

위와 같은 동일한 방법으로 'Compressor 2', 'Compressor 3' 에서 필요한 일률을 각각 계산하면 식 (62), (63)과 같다.

$$W_2 = f_{11}(h_{11}(T_{11}, P_{11}) - h_{10}(T_{10}, P_{10}))$$
(62)

$$W_3 = f_{13}(h_{26}(T_{26}, P_{26}) - h_{13}(T_{13}, P_{13}))$$
(63)

3.5 DMR 사이클의 수학적 최적화 모델 요약

이상과 같이 DMR 사이클의 수학적 최적화 모델을 요약하면 다음과 같다([] 안의 숫자는 해당 조건의 개수).

```
목적 함수: Minimize W (X)
제약 조건:
(등호제약 조건) [318]
- 질량 보존 법칙 [26]
- 등압조건 [25]
- 에너지 보존 법칙 [4]
```

- 등엔트로피 조건 [3]
- 압축기 효율 조건 [3]
- 몰분율 보존 조건 [105]
- 등온 조건 [4]
- 등엔탈피 조건 [4]
- 상분리기의 분리 조건 [10]
- 열교환기 출력온도 조건 [7]
- 건도 조건 [127]
- (부등호 제약 조건) [36]
 - 각 흐름의 온도 제약 조건[31]
 - 압축기 작동을 위한 제약조건 [3]
 - 열 교환기 작동을 위한 제약 조건 [2]

여기서, 설계 변수 X = {*P_i*, *T_i*, *f_i*, …, *xP_i*, *i* = 1, …, 31}.

즉, DMR 사이클의 최적 운전 조건을 구하는 최적화 문제는 351개의 설계 변수, 318개의 등호 제약 조건, 36개의 부등호 제 약 조건을 가진 최적화 문제임을 알 수 있다.

4. 상용 프로그램을 이용한 DMR 사이클의 수학적 최적화 모델 검증

본 연구에서는 앞서 정식화된 수학적 최적화 모델의 검증, 특 히 등호 제약 조건들의 유효성 및 정확성을 검증하기 위해 해양 플랜트의 프로세스 설계를 위해 가장 많이 활용되고 있는 AspenTech사의 HYSYS 시스템(AspenTech, 2011)과의 결과를 비교하였다. HYSYS는 특정 공정을 모델링 한 후 일부 흐름에서 의 압력, 온도, 유량 등을 정의해 주면 앞서 소개한 열역학적 상 태 방정식 등을 통해 미정의 흐름에서의 압력, 온도, 유량 등을 계산해 주는 상용 프로그램이다. 즉, HYSYS는 온도, 압력, 유량 등 상태 변수로 구성된 식들의 해를 풀어 주는 연립 방정식 풀이 프로그램이라고 볼 수 있다.

일반적으로 설계 변수(미지수)의 수가 등호 제약 조건(등식) 보다 많은 문제를 최적화 문제(부정 방정식)라고 하며, 설계 변수 의 수가 등호 제약 조건의 수와 같은 문제를 연립 방정식 문제라 고 한다. 본 연구에서는 HYSYS와의 결과 비교를 위해 DMR 사이 클에 대한 최적화 문제를 연립 방정식 문제로 변환시켰다. 즉, 설 계 변수의 수(351 개)와 등호 제약 조건의 수(318개) 차이만큼 추가적인 등호 제약 조건(예, P1=19.2[bar]와 같은 형태를 351-318=29개)을 부여하여 원래의 최적화 문제를 351개의 식으 로 구성된 연립 방정식 문제로 표현한 후, 이들의 해(설계 변수 총 351개)를 구했으며, 그 결과를 HYSYS의 결과와 비교하였다. Table 3은 본 연구에서 정식화된 수학적 최적화 모델에 의한 결 과와 HYSYS에 의한 결과를 비교한 것이다.

Table 3에 나타나 있듯이, 본 연구에 의한 결과와 HYSYS에 의한 결과가 거의 동일함을 알 수 있으며, 약간씩의 오차는 본 연

구와 HYSYS에서 이용한 물질별 특성치의 차이에서 온 오차라고 예상된다. 참고로, HYSYS에서 이용하는 물질별 특성치는 알려져 있지 않다.

5. DMR 사이클의 최적 운전 조건 결정

본 연구에서는 앞서 정식화 된 수학적 최적화 모델을 이용하여 DMR 사이클의 최적 운전 조건을 도출하고 이를 기존의 운전 조 건(Venkatarathnam, 2008)과 비교하였다.

최적화 문제를 풀기 위해 본 연구에서는 전역 최적화 알고리즘 중의 하나인 GA와 국부 최적화 알고리즘 중의 하나인 SQP를 혼 합한 hybrid 최적화 방법을 활용하였으며, 본 저자들이 기존에 개 발한 비선형 최적화 프로그램인 EzOptimizer(Roh, 1999; Lee, et al., 2002)에 내장된 hybrid 최적화 방법을 이용하였다.

아래 Table 4는 DMR 사이클에 의한 한 천연 가스의 액화 공 정을 위한 기존의 운전 조건(Venkatarathnam, 2008)과 본 연구 에서 정식화 된 수학적 최적화 모델로부터 얻어진 최적 운전 조 건을 비교한 것이다. Table 4에 나타나 있듯이, 49.21[kg/h]의 LNG를 생산할 때 기존의 운전 조건에 의한 천연 가스 액화를 위 해 요구되는 일률은 43,073[kJ/h]인 반면 최적 운전 조건에 의한 요구 일률은 42,455[kJ/h]로 약 1.4%(= 618[kJ/h] = 0.172[kW])의 요구되는 일률의 감소가 가능함을 알 수 있다. 매 시간 절약할 수 있는 에너지가 LNG 생산량에 비례한다고 가정하 고, 9.6[MTPA](= 1.096×10⁶[kg/h])의 LNG를 생산하는 LNG FPSO에 최적 운전 조건을 적용할 경우, 기존 운전 조건 대비 약 3,831[kW](= 1.096×10⁶/49.21×0.172)의 에너지를 절감할 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 LNG FPSO에의 적용을 검토 중인 DMR 사이클 의 최적 운전 조건을 도출하였다. 이를 위해, 천연 가스의 액화를 위해 요구되는 다양한 열역학적 방정식을 만족시키면서 액화에 요구되는 일률을 최소화(목적 함수)하는 운전 조건(설계 변수)을 결정하기 위한 수학적 최적화 모델, 즉 최적화 문제를 정식화하 였다. 정식화에 포함된 다양한 제약 조건의 적합성을 검증하기 위해 상용 프로그램에 의한 결과와 비교하였으며, 검증이 완료된 문제를 GA(Genetic Algorithm) 방법과 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 혼합한 Hybrid 최적화 방법을 활용하여 풀 었다. 그리고 그 결과를 기존의 DMR 사이클의 운전조건과 비교 하였다. 그 결과, 기존의 운전 조건 대비 약 1.4%의 액화 요구 일률을 감소시킬 수 있는 최적 운전 조건을 도출 하였다.

향후에는 기존의 액화 공정에 대한 최적 운전 조건의 도출을 넘어서, 새로운 최적화 모델 제안 또는 제안된 모델의 보완을 통 해 기존의 액화 공정을 개선할 수 있는 새로운 액화 공정을 제안 하고자 한다.

The res	ult of this St	udy													
	호름	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
F	Pi [bar]	19.2	19.2	19.2	19.2	7.6	7.6	19.2	19.2	2.8	2.8	7.6	7.6		
	TI (K)	353.5	309.5	273.1	273.1	270.0	302.1	273.0	240.0	236.5	267.8	312.6	307.2		
fl	[mol/s]	0.913	0.913	0.913	0.546	0.546	0.546	0.366	0.366	0.366	0.366	0.366	0.913		
Vapor	fraction, xv	1	0	0	0	0.026	1	0	0	0.023	1	1	1		
Mass	Ethane yp1	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482		
fraction	Propane yp2	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416		
(p.193)	nButane yp3	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103		
	호통	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
F	Pi [bar]	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	3.0	48.6	48.6	48.6	3.0	3.0	3.0	3.0
	II [K]	413.8	305.0	2/3.1	240.0	240.0	143.8	138.2	240.0	144./	112.8	106./	139.2	140.2	234.3
Vapor	fraction w	1.000	1.000	1.000	0.300	0.710	0.710	0.710	1.000	0.290	0.290	0.290	0.290	0.376	1.000
Vapor	Nitrogen vm1	1.000	0.07	0.010	0.290	0.000	0.000	0.029	0.171	0.171	0.000	0.033	0.171	0.270	0.07
Mass	Methane ym2	0.418	0.418	0.418	0.418	0.32	0.32	0.32	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.418	0.418
fractionx	Ethane vm3	0.299	0.299	0.299	0.299	0.35	0.35	0.35	0.139	0.139	0.139	0.139	0.139	0.299	0.299
(p.182)	Propane vm4	0.213	0.213	0.213	0.213	0.301	0.301	0.301	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.213	0.213
	흐름	27	28	29	30	31									
F	Pi [bar]	65	65	65	65	65									
	Ti [K]	300	273	240	144.7	112.8									
fi	[mol/s]	0.748	0.748	0.748	0.748	0.748									
Vapor	fraction, xv	1	1	1	0	0									
	Nitrogen ng1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04									
	Methane ng2	0.875	0.875	0.875	0.875	0.875									
Mass	Ethane ng3	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055									
fractionx	Propane ng4	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021									
(p.182)	nButane ng5	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005									
	IButane ng6	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003									
	IRoptopo pg7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001									
	in entrane rig/	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001									
The res	ult of HYSYS	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001								1	
The res	ult of HYSYS 흐름	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12]	
The res	alt of HYSYS 프롬 Pi [bar]	19.2	2	3 19.2	4	5	6 7.6	7	8	9	10	11	12		
The res	in fertance ing) 호급 Pi [bar] Ti [K]	19.2 355.6	2 19.2 310.0	3 19.2 273.1	4 19.2 273.1	5 7.6 270.0	6 7.6 306.2	7 19.2 273.0	8 19.2 240.0	9 2.8 237.0	10 2.8 267.8	11 7.6 312.6	12 7.6 308.8		
The res	프롭 HYSYS 프롬 Pi [bar] Ti [K] [mol/s]	1 19.2 355.6 0.913	2 19.2 310.0 0.913	3 19.2 273.1 0.913	4 19.2 273.1 0.546	5 7.6 270.0 0.546	6 7.6 306.2 0.546	7 19.2 273.0 0.366	8 19.2 240.0 0.366	9 2.8 237.0 0.366	10 2.8 267.8 0.366	11 7.6 312.6 0.366	12 7.6 308.8 0.913		
The res	iult of HYSYS 흐름 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv	19.20 19.2 355.6 0.913	2 19.2 310.0 0.913 0	3 19.2 273.1 0.913 0	4 19.2 273.1 0.546 0	5 7.6 270.0 0.546 0.026	6 7.6 306.2 0.546 1	7 19.2 273.0 0.366 0	8 19.2 240.0 0.366 0	9 2.8 237.0 0.366 0.023	10 2.8 267.8 0.366	11 7.6 312.6 0.366 1	12 7.6 308.8 0.913 1		
The res	int of HYSYS 호름 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] fraction, xv Ethane yp1	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482	2 19.2 310.0 0.913 0.2482	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482	4 19.2 273.1 0.546 0 0.2482	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2482	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2482	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482		
The res	initial of HYSYS init	0.001 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416	0.001 19.2 310.0 0.913 0.2482 0.6416	0.001 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416	0.001 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2482 0.6416	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2482 0.6416	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482 0.6416	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482 0.6416	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482 0.6416	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2482 0.6416	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416		
The res	international internatione international international international international	0.001 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103	4 19.2 273.1 0.546 0 0.2482 0.6416 0.1103	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2482 0.6416 0.1103	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103		
The res	in entaine ing/ sult of HYSYS E = Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv Ethane yp1 Propane yp2 nButane yp3 E = Butane	0.001 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 49.6	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 14	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15	4 19.2 273.1 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 166	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103 19 20	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103 200	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 22 2 49.6	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 23	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 2	25	26
The res	in entance ing / acialt of HYSYS acialt of HYSYS acialt of HYSYS pi [bar] fraction, xv Ethane yp1 Propane yp2 nButane yp3 空高 Pi [bar] Ti [K]	0.301 1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1	4 19.2 273.1 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 16 48.6 240.0	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 139.2	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 113.0	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 23 3.0 106.7	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 141.1	25 3.0	26 3.0
The res	교내 of HYSYS 고응 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] Ffaction, xv Ethane yp1 Propane yp2 nButane yp3 호응 Pi [bar] Ti [K] [mol/s]	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.000	2 19.2 310.0 0.913 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1 1.000	4 19.2 273.1 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 16 48.6 240.0 1.000	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710	6 7.6 306.2 0.546 0.1 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 139.2 0.710	8 19.2 240.0 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 113.0 0.290	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 23 3.0 106.7 0.290	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 141.1 0.290	25 3.0 140.2	26 3.0 234.3 1.000
The res	교립t of HySYS 프롭 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] ffaction, xv [Ethane yp1 Propane yp2 nButane yp3 호름 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] ffaction, xv	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.000 1.000	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1 1.000 0.616	4 19.2 273.1 0.546 0.1103 16 48.6 240.0 1.000 0.290	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.000	6 7.6 306.2 0.546 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.0000	7 19.2 273.0 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 139.2 0.710 0.084	8 19.2 240.0 0.366 0.0 0 0.2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 0.290 0.1000	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000	10 2.8 267.8 0.366 1 1 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 113.0 0.290 0.000	11 7.6 312.6 0.366 0.103 23 3.0 106.7 0.290 0.095	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 141.1 0.290 0.761	25 3.0 140.2 1.000 0.276	26 3.0 234.3 1.000
The res	in entaine ing/ inglit of HVSYS DEB Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv Propane yp2 nButane yp3 DEB Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv fraction, xv Nitrogen ym1	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 48.6 414.9 1.000 1.000 0.07	2 19.2 310.0 0.913 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000 1.000 0.07	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07	4 19.2 273.1 0.546 0.103 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.029	6 7.6 306.2 0.546 0.1103 1.8 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029	7 19.2 273.0 0.366 0.0 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 0.710 0.710 0.084 0.029	8 19.2 240.0 0.366 0.0 0.2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.290 0.000 0.171	10 2.8 267.8 0.366 0.1 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 113.0 0.290 0.290 0.000	11 7.6 312.6 0.366 0.1 0.2482 0.6416 0.1103 23 3.0 0.290 0.290 0.290 0.095 0.171	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 0.290 0.761 0.171	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07
The res	int of HYSYS a∈ Pi [bar] Ti [K] [mol/a] fraction, xv [Ethane yp1 Propane yp2 nButane yp3 a∈ Pi [bar] Ti [K] [mol/s] fraction, xv [Nitrogen ym1] Methane ym2	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.000 1.000 0.07 0.418	2 19.2 310.0 0.913 0.2482 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000 1.000 0.07 0.418	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418	4 19.2 273.1 0.546 0.1103 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.029 0.321	6 7.6 306.2 0.546 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321	7 19.2 273.0 0.366 0.0 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.029 0.321	8 19.2 240.0 0.366 0.0 0.2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.655	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.0171 0.655	10 2.8 267.8 0.366 0.1103 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.171 0.655	11 7.6 312.6 0.366 0.1 1 0.2482 0.6416 0.1103 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.171 0.655	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.771 0.655	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418
The res fi Vapor Mass fraction (p.193)	Jie entaine ing/ and of HVSYS and be an anti- propane yp1 propane yp2 propane yp2 propane yp3 propane yp3 p1 [bar] Ti [K] [mol/s] fraction, xv fraction, xv fraction, xv fraction, sv fraction, sv f	0.001 1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299	2 19.2 310.0 0.913 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299	3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.007 0.418 0.299	4 19.2 273.1 0.546 0.1103 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418 0.299	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364	6 7.6 306.2 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364	7 19.2 273.0 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 199 2.0 139.2 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364	8 19.2 240.0 0.366 0.2482 20.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 0.290 0.290 0.171 0.655 0.141	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 20.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141	10 2.8 267.8 1 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141	11 7.6 312.6 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.171 0.655 0.141	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.771 0.655 0.141	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.418 0.299	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299
The res finite field of the second se	init of HYSYS all of HYSYS Pi [bar] Ti [K] Imol/s] fropane yp2 nButane yp3 All bar] Ti [K] Imol/s] fraction, xv Initrogen ym1 Nitrogen ym1 Nitrogen ym3 Ethane ym3 Ethane ym3	0.301 1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 43.6 414.9 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213	3 19.2 273.1 0.913 0 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.007 0.418 0.299 0.213	4 19.2 273.1 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.290 0.07 0.418 0.299 0.213	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.020 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.0 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 19 2.0 0.710 0.710 0.084 0.029 0.321 0.321 0.364	8 19.2 240.0 0.366 0.0 2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 0.290 0.290 0.171 0.655 0.141 0.033	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141 0.033	10 2.8 267.8 0.366 0.103 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141 0.033	111 7.6 312.6 0.3663 1 0.6416 0.1103 23 3.00 106.7 0.290 0.095 0.171 0.655 0.171 0.655	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 0.240 0.761 0.290 0.761 0.171 0.655 0.141 0.033	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.276 0.273 0.213	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res The res fraction (p.193) fraction fraction (p.193) fractionx (p.182)	inferience my inferience in	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.293 0.213 27	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000 0.077 0.478 0.299 0.213 28	3 19,2 273.1 0,913 0 0,2482 0,6416 0,1103 15 48,6 273.1 1,000 0,616 0,07 0,418 0,299 0,213 29	4 19.2 273.1 0.5416 0.1103 166 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418 0.299 0.213 30	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2482 0.6416 0.1103 177 48.6 240.0 0.710 0.710 0.710 0.710 0.321 0.364 0.286 31	6 7.6 306.2 0.5416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.0 0.3666 0.0 0.2482 0.6416 0.1103 199 3.0 139.2 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364 0.286	8 19.2 240.0 0.3666 0.1103 200 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.6515 0.141 0.033	9 2.8 237.0 0.3666 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 211 48.6 144.7 0.290 0.000 0.0171 0.6555 0.141 0.033	10 2.8 267.8 0.3566 0.1103 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.0171 0.6515 0.141 0.033	111 7.6 312.6 0.3646 0.1103 23 3.0 106.7 0.2900 0.095 0.171 0.6515 0.141 0.033	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.771 0.6515 0.141 0.033	25 3.00 140.2 1.000 0.276 0.077 0.418 0.299 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res The res ration (p.193) fraction (p.182)	in entance my/ isolat of HYSYS ≥ Pi [bar] Ti [K] [Ethane yp1 [Ethane yp2] Butane yp2 Butane yp3 ≥ 2 Butane yp3 S 2 Butane yp3 S 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	1 1 1 1 2 3 5 6 0 0 1 2 3 5 6 0 0 2 4 2 6 5 6 0 1 3 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 1 6 0 2 4 8 6 0 9 1 3 5 1 6 0 1 3 5 1 6 0 1 1 3 1 1 0 0 2 4 8 6 0 1 1 3 1 1 0 0 2 4 8 6 0 1 1 3 1 1 0 0 1 1 3 1 1 0 0 1 1 3 1 1 0 0 1 1 3 1 1 0 0 1 1 3 1 1 0 0 1 1 3 1 1 0 0 1 0 3 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 14 48.6 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	3 19.2 273.1 0.913 0.0482 0.6416 0.1103 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.07 0.418 0.299 0.213 299 0.213	4 19.2 273.11 0.546 0.2482 0.6416 0.1103 16 48.6 240.0 0.290 0.290 0.290 0.200 0.0000 0.0000 0.0	5.001 5.270.00 0.546 0.026 0.2482 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286 311 65	6 7.6 306.2 0.546 0.103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.0 0.366 0.02482 0.6416 0.1103 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364 0.286	8 19.2 240.0 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.655 0.1411 0.033	9 2.8 237.00 0.366 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.0171 0.655 0.141 0.033	10 2.8 267.8 0.3666 1 0.2482 48.6 113.0 0.290 0.103 113.0 0.000 0.171 0.655 0.0411 0.033	111 7.6 312.6 0.3461 0.2482 3.0 106.7 0.290 0.103 0.095 0.171 0.655 0.141 0.033	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.171 0.655 0.141 0.033	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418 0.299 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res The res Vapor Mass fraction (p.193)	Jie entering and of HVSYS and bi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv fraction, xv Ti [K] [bar] Propane ym4 and Propane ym4 and Pro	1 1 1 1 2 3 5 6 6 1 1 0 2 4 2 2 7 6 5 3 0 2 2 7 6 5 3 0 2 4 2 7 5 5 6 6 7 1 1 1 2 4 2 6 6 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 5 6 6 0 9 1 3 5 1 1 1 0 .2 4 2 6 0 .1 1 3 1 1 1 0 .2 4 2 6 0 .1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 1 1 3 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	2 19.2 310.0 0,913 0,6416 0,1103 14 48.6 305.0 1,000 0,07 0,418 0,299 0,213 28 65 273 273 273	3 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.299 0.293 0.213 0.213 0.295 0.213 0.295 0.213 0.295 0.213 0.295 0.214 0.214 0.215 0.2145 0.21	4 19.2 273.11 0.546 0 0.2482 0.6416 0.1003 1.000 0.290 0.290 0.07 0.4183 0.299 0.213 30 0.219 0.229 0.2299 0.219 0	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2482 0.6416 0.026 0.1003 17 48.6 240.0 0.710 0.029 0.029 0.321 0.364 0.286 31 0.364 0.286 31 0.364	6 7.6 306.2 0.546 1 1 0.2482 0.6416 0.1103 1 8 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.00 0.366 0 0 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.00 139.2 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364 0.286	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482 0.3416 0.1103 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.655 0.141 0.033	9 2.8 237.0 0.366 0.02482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.1171 0.6555 0.1411 0.033	10 2.8 267.8 0.366 11 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 0.290 0.000 0.0171 0.6555 0.141 0.033	111 7.6 312.6 0.366 0.103 23 3.0 0.6416 0.1103 2.3 3.0 0.6416 0.2482 2.3 3.0 0.6416 0.290 0.095 0.171 0.655 0.141 0.033	12 7.6 308.8 0.913 1 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 0.1013 0.2900 0.761 0.771 0.6555 0.1411 0.033	25 3.0 1.40.2 0.276 0.077 0.418 0.299 0.213	26 2.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res fit Vapor Mass fraction (p.193) fractionx (p.182)	Jie entaine tray wilt of HYSYS Pi [bar] Ti [K] [mol/s] * fraction, xv * fraction, xv * fraction, xv * fraction, xv # fraction, xv *	0.0001 1 19.2 355.6 0.913 10.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.0000 0.071 0.418 0.299 0.213 27 65 3000 0.748	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 144 48.6 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748	3 19.2 2773.1 0.913 0 0.2482 0.6416 0.616 273.1 1.000 0.616 0.616 0.007 0.418 0.299 0.213 299 0.213 299 0.213 290 0.240 290 0.240 290 0.240 290 0.24	4 19.2 273.11 0.546 0.6416 0.1103 16 48.6 240.0 0.299 0.213 300 65 144.7 0.748	5 7.6 270.0 0.546 0.2482 0.6416 0.2482 0.6416 0.710 0.710 0.710 0.700 0.029 0.321 0.364 0.286 311 3.5748	6 7.6 306.2 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.00 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.00 139.2 0.710 0.364 0.364 0.286	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2482 0.6416 240.0 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.655 0.141 0.033	9 2.8 237.0 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.071 0.655 0.141 0.033	10 2.8 267.8 0.366 10.2482 22 48.6 113.0 0.290 0.290 0.000 0.171 0.6555 0.141 0.033	11 7.6 312.6 0.366 0.2482 33 0.106.7 0.290 0.095 0.171 0.655 0.141 0.033	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 24 3.0 0.1103 24 3.0 0.1103 0.1411 0.7615 0.141 0.033	25 3.0 1.40.2 1.000 0.276 0.077 0.418 0.299 0.213	26 3.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res final second se	Jie entaine ing/ action and action action and action	1 1 1 1 2 3 5 6 1 1 1 2 3 5 6 6 1 1 0 2 4 8 6 1 1 0 2 4 8 2 6 4 1 1 1 0 2 4 8 5 5 1 1 1 0 2 4 8 5 5 1 1 1 0 2 4 8 5 5 1 1 1 0 2 4 8 5 5 1 1 1 0 2 4 8 5 1 1 1 1 0 2 4 8 5 1 1 1 1 0 6 4 4 6 6 1 6 1 1 3 1 1 1 0 6 4 4 6 6 1 6 1 1 3 1 1 1 0 6 4 1 6 1 1 0 6 4 1 6 1 1 0 6 4 1 6 1 1 0 6 4 1 6 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.6416 0.6416 305.0 1.000 0.007 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748 0.748 0.299 0.213 28 0.748 0.299 0.213 0.0 0.213 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.	3 19.22 273.1 0.913 0.2482 0.6416 0.1103 155 48.6 273.1 1.000 0.616 0.616 0.07 0.418 0.299 0.2249 29 0.2249 29 0.213 29 0.249 29 0.249 29 0.249 29 0.416 0.07	4 19.2 273.11 0.546 0 0.6416 0.6416 0.6416 240.0 1.000 0.290 0.290 0.213 30 65 144.7 0.748 0.299 0.213 30 0.5 144.7 0.748 0.000 0.299 0.213 0.000 0.299 0.213 0.000 0.299 0.213 0.000 0.299 0.213 0.000 0.299 0.299 0.213 0.000 0.299 0.29	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.6416 0.1103 17 48.6 240.0 0.710 0.0710 0.020 0.321 0.364 0.321 0.364 0.286 331 65 5 113 0.264 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.0000 0.000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.000000	6 7.6 306.2 0.546 1 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.00 0.366 0 0 0.2482 0.6416 0.1103 139.2 0.710 0.710 0.084 0.321 0.364 0.286	8 19.2 240.0 0.366 0.0 0.2482 0.6416 240.0 0.290 1.000 0.171 0.655 0.141 0.033	9 2.8 237.0 0.2482 0.62482 0.62482 0.103 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141 0.033	10 2.8 267.8 0.366 1 1 0.2482 0.6416 0.1103 22 48.6 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141 0.033	11 7.6 312.6 0.34282 0.6416 0.1103 23 0.2482 0.106.7 0.290 0.095 0.171 0.655 0.141 0.033	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 0.1013 0.290 0.761 0.761 0.655 0.141 0.033	25 3.0 140.2 0.276 0.276 0.273 0.213	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The ress fraction (p.193) fraction (p.182) fractionx (p.182) fractionx fractors	in errarie reg/ ist of HYSYS E Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv fraction, xv fraction, xv fraction, xv Nitrogen ng1 Propane ym4 Ethane ym3 Propane ym4 Ethane ym3 Propane ym4 Ethane ym3 Propane ym4 Se Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv Nitrogen ng1 Nitrogen ng2 Se Pi fbar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv	1 19.2 355.6 0.913 10.2482 0.6416 0.1103 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 277 65 3000 0.0418 0.299 0.213 277 65 3000 0.041 0.040 0.875	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 144 48.6 305.0 1.000 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748 1.02 0.233 2.03 0.041 0.041 0.041 0.04	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	4 19.2 273.1 0.546 0 0.2482 0.6416 48.6 240.0 1.000 0.290 0.290 0.290 0.290 0.290 0.213 300 65 144.7 0.748 0.04 0.04	5.001 5.7.66 270.0 0.546 0.026 0.6416 0.1103 177 48.6 240.0 0.6416 0.103 117 48.6 240.0 0.029 0.321 0.3644 0.286 311 65 311 0.364 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.328 0.309 0.3	6 7.6 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 49.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.0 0.366 0 0.6416 0.103 19 3.0 710 0.364 0.029 0.321 0.364 0.286	8 19,2 240,0 0,366 0 0,2482 0,6416 0,1103 200 0,290 1,000 0,171 0,655 0,141 0,033	9 2.8 237.00 0.366 0.023 0.6416 0.1103 211 48.6 0.4016 0.6416 0.4103 0.6416 0.033	10 2.8 267.8 0.366 0.1103 0.6416 0.1103 222 48.6 0.020 0.6290 0.020 0.171 0.655 0.141 0.033	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 223 3.0 0.6416 0.103 20.6416 0.0416 0.6416 0.0416 0.055 0.171 0.655 0.171	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.103 24 4 3.0 0.761 0.290 0.761 0.761 0.655 0.141 0.033	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.276 0.299 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The ress in figure 1 Mass fraction (p.193) figure 1 Vapor Mass fractionx (p.182)	Jin entante Ing/ action of HVSYS action, sv Fricking Fropane yp1 Propane yp2 Istane yp1 Propane yp2 Istane yp1 Propane yp2 Pilparj Ti [K] Imol/s] Fraction, sv Nitrogen ym1 Methane ym2 Bilparj Propane ym4 action, sv Istane ym3 Propane ym4 action, sv Istane ym3 Propane ym4 action, sv Istane ng2 Methane ng2	0.0001 1922 355.6 0.913 0.2482 0.6416 0.1103 10.2482 0.6416 0.4113 48.6 414.9 1.000 0.07 0.07 65 3000 0.2499 0.213 27 65 3000 0.2492 0.2492 0.0416 1.000 0.07 1.000 0.07 0.0418 0.07 0.0418 0.07 0.	2 19:2 310:0 0.2482 0.6416 0.1103 144 48:6 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748 11 0.748 0.575 0.7488 0.7488 0.7488 0.7488 0.7488 0.7488	3 3 19.2 273.1 0.913 0.0103 0.0416 0.103 15 48.6 0.0103 15 48.6 0.0103 15 48.6 0.0103 15 0.0418 0.0418 0.0418 0.0248 0.0418 0.0248 0.0	4 19.2 273.1 0.546 0 0.2482 0.6416 0.1103 1.000 0.290 0.290 0.290 0.213 300 0.290 0.213 300 0.290 0.213 300 0.213 0.000 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.071 0.075	5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2482 0.6416 0.1103 117 48.6 0.710 0.000 0.021 0.364 0.286 0.321 0.321 0.364 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.286 0.026 0.0000000000	6 7.6 306.2 0.5416 0.2482 0.6416 0.1103 188 48.6 144.7 0.710 0.0000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.22 273.0 0.366 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364	8 19-2 240.0 0.366 0.1103 200 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.6555 0.1411 0.033	9 2.8 2.37.0 0.366 0.023 0.6416 0.1103 21 48.6 144.7 0.290 0.0000 0.171 0.0005 0.0171 0.033	10 2.63 267.8 0.366 0.1103 222 48.6 113.0 0.290 0.000 0.171 0.033	11 7.6 312.6 0.366 1 0.416 0.416 0.416 0.416 0.416 0.416 0.416 0.6416 0.6416 0.6416 0.6416 0.655 0.171 0.655 0.171 0.633	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.1103 24 4 3.0 141.1 0.290 0.7611 0.171 0.6515 0.1411 0.033	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.279 0.213	26 3.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res fit Vapor Mass fraction (p.182) fit Vapor Mass fractions (p.182) Mass fractons fractons (p.182)	ine entaine my/ silt of HVSYS Se Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv fraction, xv fraction, xv propane yp2 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv Nitrogen ym1 Se Pi [bar] Pi [0.6301 1 19.2 355.6 0.913 1 0.2482 0.6416 0.103 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 27 65 3000 0.748 1.000 0.748 0.299 0.213 27 65 3000 0.748 1.000 0.748 1.000 0.0748 1.000 0.0748 1.000 0.875 0.025 0.025	2 19:2 310:0 0.913 0 0.2482 0.6416 0.1103 144 48.6 305.0 1.000 0.007 0.418 0.299 0.218 229 65 273 0.748 1.004 0.299 0.416 0.299 0.416 0.299 0.416 0.041 0.040 0.299 0.416 0.041 0.041 0.040 0.040 0.045 0.04	3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	4 19:2 273:1 0.546 0 0.2482 0.6416 48:6 240.0 0.290 0.213 300 65 0.213 300 65 144.7 0.748 0.029 0.655 0.0418	5 7.66 270.0 0.546 0.026 0.6416 0.1103 177 48.6 240.0 0.029 0.321 0.364 0.286 0.326 311 65 311 65 311 65 311 65 311 0.364 0.326 0.000 0.000 0.326 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.0000 0.0000 0.0000 0.000000	6 7.6 0.546 1 0.2482 0.6416 0.1103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19.2 273.0 0.366 0 0.2482 0.6416 0.103 19 3.0 139.2 0.710 0.364 0.029 0.321 0.364 0.286	8 19.2 240.0 0.366 0 0.1103 200 48.6 240.0 0.290 1.000 0.171 0.655 0.141 0.033	9 237.00 0.366 0.0233 0.6416 0.1103 211 48.6 144.7 0.290 0.000 0.171 0.655 0.141 0.033	10 2.8 267.8 0.366 1 0.1103 222 48.6 113.0 0.290 0.1103 0.000 0.171 0.655 0.141 0.033	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2482 0.6416 0.1103 23 3.0 0.6416 0.6416 0.0455 0.171 0.655 0.171 0.655	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2482 0.6416 0.103 24 4 3.0 1411 0.290 0.761 0.171 0.655 0.141 0.033	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.279 0.418 0.299 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res The res finite of the second second the second second second second the second second second second second the second seco	internation ing/ init of HVSY3 ≥ē Pi [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, sv Fropane yp1 Propane yp2 pi [bar] Ti [K] [mol/s] fraction, sv fraction, sv Nitrogen ym1 Nitrogen ym3 Pi [bar] Ti [K] [mol/s] reaction, sv Nitrogen ng1 Methane ng2 Propane ng4 Propane ng4 Propane ng4 Propane ng5	0.6001 1 19.2 355.6 0.913 0.2482 10.2412 0.6416 0.4183 414.9 1.0000 0.07 0.418 0.299 0.213 27 65 3000 0.748 0.748 0.748 0.748 0.748 0.741 0.074 0.741 0.074 0.741	2 19:2 310.0 0.913 0.913 0.2482 0.2482 0.2482 14 48.6 305.0 0.307 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748 11 0.041 0.213 0.299 0.213 28 65 273 0.748 0.041 0.041 0.055 0.0551 0.0551 0.0551 0.0551 0.05555 0.05555 0.05555 0.05555 0.05555 0.05555 0.05555 0.0555	3 3 19.2 273.1 0.913 0.0412 0.6416 0.103 15 48.6 0.610 0.616 0.073 0.418 0.6219 0.2492 2.73.1 1.000 0.616 0.021 2.73.2 2.400 0.2482 2.400 0.2492 2.400 0.2482 2.400 0.2492 2.400 0.0475 0.055	4 19.2 2.73.1 0.546 0.2482 0.6416 48.6 240.0 0.299 0.299 0.219 0.299 0.219 0.219 0.219 0.210 0.299 0.213 30 65 5 144.7 0.748 0.055 0.041 0.005 0	5 7,66 2,70,0 0,546 0,026 0,026 0,026 0,026 1137 48.6 2,40,0 0,0710 0,029 0,029 0,029 0,029 0,029 0,321 113 0,048 0,026 0,1107 1137 0,0364 0,000 0,000 0,0364 0,000 0,000 0,000 0,0364 0,000	6 7.66 306.2 0.54482 0.4103 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.029 0.321 0.364 0.286	7 19,22 273.0 0.364 0.2482 0.6416 0.1103 139,2 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364 0.286	8 19:22 240:0 0.366 0.416 200 48:6 240:0 0.290 1.000 0.171 0.6555 0.141 0.033	9 2.8 2.37.0 0.023 0.6416 0.1103 211 48.6 144.7 0.290 0.000 0.171 0.6555 0.141 0.033	10 2.68 2.67.8 0.366 0.4103 0.2482 0.6416 0.1103 0.290 0.290 0.113.0 0.000 0.171 0.033	11 7.66 312.6 0.361 0.2482 0.6416 0.1103 223 3.0 0.6416 0.095 0.171 0.095 0.171 0.6555 0.141	12 7.66 3.06.8 0.913 0.2482 0.6416 0.1103 2.24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.171 0.6555 0.141 0.033	25 3.0 1.40.2 1.000 0.276 0.07 0.418 0.299 0.213	26 3.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
The res finite of the second	ini entane ing/ isit of HYSYS Di [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv fraction, xv Fropane yp2 Propane yp3 Di [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv Nitrogen ng1 Propane ym4 Di [bar] Ti [K] [mol/s] r fraction, xv Nitrogen ng3 Propane ng4 Di thone ng2 Ethane ng3 Ethane ng3 Ethane ng3 Ethane ng6 IButane ng6	1 19.2 355.6 0.913 0.913 1 0.2482 0.6416 0.103 13 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 1.3 0.442 0.6416 0.103 1.3 1.3000 0.077 0.418 0.007 0.418 0.0748 0.299 0.213 27 65 3000 0.0748 1.00.055 0.0055 0.025 0.0251 0.0003 0.0003	2 19.2 310.0 0.913 0.2482 0.6416 0.103 1.000 1.000 0.07 0.4188 0.299 0.213 273 0.748 0.299 0.213 273 0.748 0.091 0.075 0.055 0.025 0.005 0.	3 3 19.2 273.1 0.913 0.9416 0.94566 0.9456 0.9456 0.9456 0.9456 0.9456 0.9456 0.9456 0.9	4 19.2 273.1 0.5446 0.0416 0.2482 0.6416 0.1003 16 240.0 0.290 0.213 16 240.0 0.290 0.213 300 0.0748 0.0213 300 0.0748 0.0416 0.0748 0.0416 0.0748 0.0055 0.055 0.055 0.00	5 7.66 0.548 0.6416 0.2482 0.6416 0.103 17 48.6 0.6416 0.0103 0.700 0.0000 0.020 0.321 0.321 0.321 0.321 113 0.748 0.321 0.0000 0.025 0.005 0.005	6 7.6.6 306.2 0.5446 0.1103 1.1 48.6 0.1103 1.1 48.6 0.710 0.0209 0.321 0.324 0.286	7 1922 273.0 0.3566 0.0 0.2482 0.6416 0.1103 19 3.0 0.710 0.084 0.200 0.710 0.084 0.029 0.321 0.364 0.286	8 1922 240.0 0.3666 0.0 0.2482 20 0.4416 0.1103 20 1.000 0.1203 0.200 240.0 0.200 1.000 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.035 0.040 0.055 0.055 0.0	9 2.8 0.3666 0.023 0.2482 0.6416 0.1103 0.1103 0.1103 0.1103 0.1103 0.1103 0.000 0.000 0.071 0.655 0.1411 0.033	10 2.8 2.67.8 0.3666 11 0.2482 22 4.8.6 0.103 0.103 0.103 0.103 0.103 0.000 0.071 0.655 0.141 0.033	11 7.6 0.312.6 0.366 1 0.6416 0.1103 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.171 0.6515 0.171 0.6555 0.141	12 7.66 308.8 0.913 0.2482 0.6416 0.1103 24 3.0 0.1103 0.290 0.761 0.761 0.761 0.033	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.418 0.299 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.007 0.418 0.299 0.213

Table 3 Comparison of the process simulation result between this study and HYSYS

Table 4 Comparison of the operating condition for natural gas liquefaction between the existing condition and this study

					Exist	ting co	ndition								
호름		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Pi [ba	r]	19.2	19.2	19.2	19.2	7.6	7.6	19.2	19.2	2.8	2.8	7.6	7.6		
Ti [K]]	355.6	310.0	273.1	273.1	270.0	306.2	273.0	240.0	237.0	267.8	312.6	308.8		
fi [mol,	/s]	0.913	0.913	0.913	0.546	0.546	0.546	0.366	0.366	0.366	0.366	0.366	0.913		
Vapor fract	ion, xv	1	0	0	0	0.026	1	0	0	0.023	1	1	1		
Mass fraction	Ethane yp	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482	0.2482		
(p.193)	Propane y	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416	0.6416		
	nButane y	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.1103	0.5	2.0
으 등	-	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	rj	48.6	48.6	48.6	48.6	48.6	46.6	3.0	48.6	48.6	48.6	3.0	3.0	3.0	3.0
fi [mol	/e1	1 000	1 000	2/3.1	240.0	240.0	0.710	0.710	240.0	0.290	0.290	0.290	0.290	1.000	234.3
Vapor fract	ion xy	1.000	1.000	0.616	0.290	0.000	0.000	0.084	1.000	0.000	0.000	0.095	0.261	0.276	1.000
tupor nucl	Nitrogen	0.07	0.07	0.07	0.07	0.029	0.029	0.029	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.07	0.07
Mass fractionx	Methane	0.418	0.418	0.418	0.418	0.321	0.321	0.321	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.418	0.418
(p.182)	Ethane vm	0.299	0.299	0.299	0.299	0.364	0.364	0.364	0.141	0.141	0.141	0.141	0.141	0.299	0.299
(,	Propane v	0.213	0.213	0.213	0.213	0.286	0.286	0.286	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.213	0.213
应昌		27	28	29	30	31									
Pi [ba	r]	65	65	65	65	65									
Ti [K]	1	300	273	240	144.7	113									
fi [mol,	/s]	0.748	0.748	0.748	0.748	0.748									
Vapor fract	ion, xv	1	1	1	0	0									
	Nitrogen r	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		W1	W2	W3	w	(kJ/h)			
	Methane r	0.875	0.875	0.875	0.875	0.875		3,593	9,092	30,388	43,073				
Mass fractiony	Ethane ng	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055									
(p.182)	Propane n	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021									
(p.1202)	nButane n	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005									
	iButane ng	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003									
	iPentane r	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001									
				Opti	imal co	ndition	of this	s study							
호름		1	2	Opt 3	imal co 4	ndition 5	of this 6	s study 7	8	9	10	11	12		
흐름 Pi[ba	r]	19.2	2 19.2	Opt 3 19.2	imal co 4 19.2	ndition 5 7.6	of this 6 7.6	s study 7 19.2	8	9	10	11 7.6	12 7.6		
	r]	1 19.2 355.6	2 19.2 310.0	Opt 3 19.2 273.1	imal co 4 19.2 273.1	ndition 5 7.6 270.0	of this 6 7.6 306.2	s study 7 19.2 273.0	8 19.2 240.0	9 2.8 237.0	10 2.8 267.8	11 7.6 312.6	12 7.6 308.8		
호름 Pi [ba Ti [K] fi [mol/	r]] /s]	1 19.2 355.6 0.913	2 19.2 310.0 0.913	Opt 3 19.2 273.1 0.913	mal co 4 19.2 273.1 0.546	ndition 5 7.6 270.0 0.546	of this 6 7.6 306.2 0.546	s study 7 19.2 273.0 0.366	8 19.2 240.0 0.366	9 2.8 237.0 0.366	10 2.8 267.8 0.366	11 7.6 312.6 0.366	12 7.6 308.8 0.913		
호름 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract	r]] /s] :ion, xv	1 19.2 355.6 0.913 1	2 19.2 310.0 0.913 0	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026	of this 6 7.6 306.2 0.546 1	study 7 19.2 273.0 0.366 0	8 19.2 240.0 0.366 0	9 2.8 237.0 0.366 0.023	10 2.8 267.8 0.366 1	11 7.6 312.6 0.366 1	12 7.6 308.8 0.913 1		
支 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract	r]] /s] iion, xv Ethane ypi	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202	Opti 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202	study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202		
호름 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction	r] /s] 	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530	study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530		
支吾 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193)	r] /s] iion, xv Ethane ypi Propane y nButane y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268	study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268		
호름 Pi [ba Ti [K] Vapor fract Mass fraction (p.193) 흐름	r] /s] Ethane yp Propane y nButane y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 15	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18	study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.6530 0.1268 20	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 22	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24	25	26
호름 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 흐름 Pi [ba	r] /s] Ethane yp Propane y nButane y r]	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6	study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 20 48.6	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6	10 2.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0	25	<u>26</u> 3.0
交 등 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 章 등 Pi [ba Ti [K]	r] /s] Ethane yp Propane y nButane y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 3.0 139.2	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 20 48.6 240.0	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 106.7	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1	25 3.0 140.2	26 3.0 234,3
支告 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 章言 Pi [ba Ti [K] fi [mol,	r] /s] icion, xv Ethane yp Propane y nButane y r] /s]	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000	2 19,2 310.0 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.66 273.1 1.000	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0 1.000	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.00 139.2 0.710	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 20 48.6 240.0 0.290	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 106.7 0.290	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1 0.290	25 3.0 140.2 1.000	26 3.0 234.3 1.000
交 등 Pi [bas Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 章 등 Pi [ba Tī [K] (fi [mol, Vapor fract	r] /s] ion, xv Ethane yp Propane y nButane y r] /s] ion, xv	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 1.000	2 19.2 310.0 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 1.000	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0 1.000 0.290	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000	of this 6 7.6 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 20 48.6 240.0 0.290 1.000	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290 0.000	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 106.7 0.290 0.095	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1 0.290 0.761	25 3.0 140.2 1.000 0.276	26 3.0 234.3 1.000
支信 Pi [ba Tī [K] fi [mo], Vapor fract Mass fraction (p.193) 宣言 Pi [ba Tī [K] fi [mo], Vapor fract	r] //s] ion, xv Ethane yp Propane y nButane y r] /s] ion, xv Nitrogen y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 1.000 0.07	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 1.000 0.07	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.710 0.000	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.710 0.000	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.03	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.174	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.290 0.000 0.174	10 2.8 267.8 0.366 11 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290 0.290 0.000 0.174	111 7.6 0.312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.174	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.174	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07
空音 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) (p.193) ロート Pi [ba Ti [K] Vapor fract Vapor fract	r] /<] ition, xv Ethane yp Propane y nButane y r] / /s] ition, xv Nitrogen y Methane v	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 1.000 0.07 0.418	2 19.2 310.0 0.913 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 1.000 0.07 0.418	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418	ndition 5 7.6 0.546 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.010 0.03 0.322	of this 6 7.6 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322	study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.03 0.322	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.174 0.659	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.174 0.659	10 2.8 267.8 0.366 1 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.174 0.659	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 0.1268 23 3.0 0.0290 0.095 0.174 0.659	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 0.1268 24 3.0 0.1268 0.1269 0.761 0.774 0.659	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418
支 島 Pi [ba Ti [K] fi [mo], Vapor fract Mass fraction (p.193) 章 号 Pi [ba Ti [K] fi [mo], Vapor fract Mass fractionx (p.182)	r] /4] /4] Ethane yp Propane y nButane y r]] /s] Mitrogen y Methane yr	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 0.007 0.07 0.418 0.299	2 19.2 310.0 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 166 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418 0.299	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.03 0.322 0.363	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 20 48.6 240.0 0.290 0.290 1.000 0.174 0.659 0.137	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.074 0.659 0.137	10 2.8 267.8 0.366 11 0.2202 48.6 113.0 0.290 0.000 0.000 0.174 0.659 0.137	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.174 0.659 0.137	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.174 0.659 0.137	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418 0.229	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299
志告 Pi [ba Tī [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 定言 Pi [ba Tī [K] Vapor fract Vapor fract	r] //s] tion, xv Ethane yp Propane y nButane y r] //s] tion, xv Nitrogen y Ethane ym Propane y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213	Opt 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.213	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418 0.299 0.213	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.031 0.322 0.363 0.285	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 0.1268 19 3.0 0.139.2 0.710 0.084 0.03 0.322 0.363 0.285	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 0.290 0.290 0.174 0.659 0.137 0.03	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290 0.0290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	11 7.6 312.6 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 0.095 0.126 0.095 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 0.1268 24 3.0 0.1268 0.141.1 0.290 0.761 0.174 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
本 Pi [ba Ti [K] (ba Fi [mol, (p.193) 定言 Pi [ba Ti [K] 「[mol, Vapor fract Mass fraction Ti [K] 「[mol, Vapor fract (p.193)	r] /s] Ethane yp Propane y nButane y r] /s] Nitrogen y Methane ym Propane y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 27	2 19.2 310.0 0.913 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28	Opti 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.213 29	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.6530 0.1268 16 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418 0.299 0.213 30	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.010 0.000 0.03 0.322 0.363 0.325 311	of this 6 7.6.6 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	study 7 19.2 273.0 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.032 0.363 0.322 0.363 0.285	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 0.6530 0.1268 200 48.6 240.0 0.290 0.290 0.174 0.659 1.000 0.174 0.659 0.137 0.03	9 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.366 11 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	111 7.66 312.6 0.3666 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.66 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1 0.290 0.761 0.774 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
<u> </u>	r]] [Ethane yp; Propane y nButane y r]] [Ion, xv Nitrogen y Rethane yr Propane y]	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 27 65	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 144 48.6 305.0 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65	Opti 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.213 29 655	mal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2202 0.6530 0.12688 16 48.6 240.0 0.2900 0.07 0.418 0.290 0.213 30	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.6530 0.26530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.225 31 655	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	s study 7 19,2 273,0 0,366 0 0,6530 0,1268 199 3,0 139,2 0,710 0,084 0,310 0,322 0,363 0,322 0,363 0,285	8 19.2 240.0 0.366 0 0.2202 20 48.6 240.0 0.290 1.000 0.174 0.659 0.137 0.03	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.366 0.1 0.2202 48.6 113.0 0.290 0.0290 0.0290 0.174 0.659 0.137 0.03	111 7.6 312.6 0.366 1 1 0.2202 23 3.0 0.1268 3.0 0.095 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 3.0 1.1268 3.0 0.1264 3.0 0.761 0.290 0.761 0.174 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.077 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
	r] //=] //=] Propane y Propane y nButane y r] //=] //a] Nitrogen y Methane ym Propane y I	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 414.9 1.000 0.07 0.07 0.418 0.299 0.213 27 65 300	2 19.2 310.0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 0.07 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.213 2.029 0.212 0.029 0.0200 0.029 0.0000000000	Opti 3 19.2 273.1 0.913 0 0 0.2202 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6563 0.6530 0.6563 0.6530 0.25300 0.25300	mal co 4 19.2 273.1 0.540 0 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 1.000 0.290 0.07 0.418 0.299 0.213 300 65 1447	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.010 0.030 0.322 0.363 0.285 311 65	of this 6 7.6 306.2 0.540 1 0.2202 0.6530 0.1268 148.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.022 0.363 0.285	s study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.063 0.0285	8 19.2 240.0 0.3663 0 0.5202 0.6530 0.486 240.0 0.290 0.290 0.1000 0.174 0.6539 0.137 0.03	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.2202 0.6530 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.366 1 10.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 113.0 0.290 0.000 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	111 7.6 312.6 0.366 0.6530 0.6530 0.1268 23 3.0 0.0657 0.205 0.1268 0.095 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.6530 0.1268 3.0 0.1268 3.0 0.761 0.774 0.774 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.276 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
空 号 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 回 号 Pi [ba Ti [K] Vapor fract Mass fractionx (p.182) 回 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同	r] j ion, xv Ethane yp Propane y nButane y r] j /a] Nitrogen y Methane ym Propane y r] propane y r] 	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 27 65 300 0,748	2 19.2 310.0 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 144 48.6 305.0 0.1000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748	Opti 3 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.29 0.213 29 65 240 0.748	imal co- ima control (1997) (1	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.323 0.325 1113 0.748	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 148.7 0.710 0.000 0.003 0.322 0.322 0.285	s study 7 19.2 273.0 0.3666 0 0.2202 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.031 0.322 0.363 0.225	8 19.2 240.0 0.3666 0 0.6530 0.1268 240.0 0.290 1.000 0.174 0.659 0.137 0.03	9 2.8 237.0 0.366 0.023 0.6530 0.1268 211 48.6 144,7 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.366 1 0.2202 0.6530 0.1268 222 48.6 113.0 0.290 0.0290 0.174 0.659 0.137 0.03	11 7.6 312.6 0.3666 0.1268 23 3.0 106.7 0.290 0.095 0.174 0.659 0.174 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 244 3.0 141.1 0.290 0.761 0.7761 0.7761 0.7761 0.7761 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.276 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
	r] /=] /=] Propane y Propane y r] /=] /=] /=] /=] /=] /=] Propane y Methane ym Propane y Propane y f] 	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 133 48.6 414.9 1.000 1.000 0.077 0.418 0.299 0.213 27 65 300 0.030 0.055 1.000 0.0418 0.299 0.215 0.220 0.215 0.055 0.00 0.055 0.00 0.055 0.005 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.055 0.005 0.055 0.055 0.055 0.055 0.005 0.055 0.055 0.055 0.005 0.055 0.005 0.007 0.055 0.005 0.007 0.055 0.005 0.007 0.075 0.055 0.005 0.007 0.055 0.005 0.007 0.055 0.005	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.2268 144 48.6 305.0 1.000 0.007 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748	Opti 3 19.2 273.1 0.73.1 0 0.2202 0.6530 0.6530 0.2682 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.655 0.219 229 655 240 0.219 240 0.219 29 655 240 0.2202 1.000 0.2102 29 29 20 29 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	mal co 4 4 19.2 273.1 0.546 0 0.202 0.6530 0.1268 16 48.6 240.0 1.000 0.290 0.0418 0.213 30 65 144.7 0.707	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 0.710 0.710 0.710 0.710 0.710 0.322 0.363 0.322 0.363 0.285 3.31 65 1113 0.748	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 188 184.6 144.7 0.710 0.000 0.000 0.322 0.363 0.285	s study 7 19.2 273.0 0.3666 0.0 0.62002 0.6530 0.1268 19 3.0 139.2 0.710 0.084 0.03 0.085 0.363 0.285	8 19.2 240.0 0.3666 0 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 0.290 1.000 0.174 0.659 0.137 0.03	9 2.8 237.0 0.3566 0.023 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.0200 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.366 0.2202 0.6530 0.222 48.6 113.0 0.0200 0.1268 0.0290 0.037 0.030	111 7.6 312.6 0.3660 1 0.2202 0.6530 0.1268 3.3 0.0 0.025 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 0.1268 3.0 0.1268 0.137 0.761 0.761 0.174 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
空 号 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 回 号 Pi [ba Ti [K] Vapor fract Mass fractionx (p.182) 回 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同 同	r] ////////////////////////////////////	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 207 65 3000 0.748 1 1 0.748 1 0.748 1 0.2102 0.2002 0.000 0.007 0.0200 0.007 0.007 0.0213 0.2002 0.007 0.007 0.007 0.0213 0.0200 0.0213 0.007 0.0213 0.000 0.007	2 19.2 310.0 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 144 48.6 305.0 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 273 0.213 273 0.748 65 273 0.748	Opti 3 3 19.2 273.1 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.213 279 0.213 240 0.273 240 0.273 240 0.273 240 0.274 240 0.77 0.77 0.775 0	imal co imal co 4 4 4 4 19.2 273.1 0.546 0.0546 0.2002 0.6530 0.2202 0.6530 0.2202 0.2202 0.2202 0.2202 0.2400 0.007 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.007 0.213 0.00700000000	ndition 7.6 270.0 0.546 0.0546 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.2002 0.0363 0.0385 0.285 0.285 0.113 0.748 0.0748 0.0740 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.000000	of this 6 7.6 306.2 0.546 1 0.2202 0.6530 0.1268 188 48.6 144.7 0.710 0.003 0.322 0.363 0.285	s study 7 19,2 273,0 0,366 0 0,2202 0,6530 0,2202 0,6530 0,2202 0,6530 0,2268 19 3,0 139,2 0,710 0,084 0,0363 0,322 0,363 0,285	8 19.2 240.0 0.3666 0 0.6530 0.1268 240.0 0.2900 1.000 0.174 0.659 0.033 0.03	9 2.8 237.0 0.3666 0.023 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	10 2.8 267.8 0.3666 1 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 0.290 0.000 0.174 0.659 0.137 0.03	11 7.6 312.6 0.3666 1 1 0.2202 0.6530 0.025 0.202 0.202 0.202 0.202 0.202 0.202 0.200 0.03 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 244 3.0 141.1 0.290 0.761 0.761 0.174 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.270 0.418 0.229 0.223	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
志 信 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 章 言 Pi (ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fractionx (p.182) 章 言 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract	r] /= /= /= /= /= /= /= /= /= /=	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 27 65 300 0,748 1 0.300 0,748 1 0.300 0,748 1 0,875 1 0,875 1 0,875 1 0,975 1 0,075 1 0,075 1 0,975 1 0,075 1 0,975 1 0,000 1 0,075 1 0,000 1 0,075 1 0,000 0	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 288 65 273 0.748 10 0.44 0.65 0.2748 10 0.44 0.65 0.2002 0.200	Opti 3 3 19.2 273.1 0.913 0.0202 0.6530 0.2202 0.6530 0.21268 48.6 273.1 1.000 0.616 0.07 0.418 0.299 0.219 0.219 0.418 0.299 0.219 0.418 0.299 0.219 0.418 0.299 0.219 0.418 0.299 0.219 0.418 0.299 0.219 0.418 0.299 0.219 0.418 0.299 0.219 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.219 0.210 0.418 0.299 0.219 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.219 0.210 0.418 0.299 0.218 0.299 0.218 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.418 0.299 0.210 0.200 0.200 0.299 0.210 0.200 0.200 0.200 0.418 0.299 0.210 0.200 0.200 0.200 0.200 0.200 0.200 0.210 0.418 0.200 0	imal co 4 4 19.2 273.1 0.546 0 0.556 0.0546 0.0 0.2022 0.6530 0.1268 240.0 0.290 0.017 0.418 0.299 0.213 30 65 144.7 0 0.048	ndition 7.6 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2002 0.6530 0.2002 0.6530 0.2002 0.1268 0.440.0 0.710 0.710 0.000 0.030 0.322 0.363 0.322 0.363 311 65 311 65 311 0.748 0 0.04 0.874	of this 6 306.2 0.546 0.2020 0.6530 0.1268 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	 study study 7 19.2 273.0 0.366 0 0.366 0.2020 0.6530 0.1268 19 3.0 0.139.2 0.710 0.084 0.03 0.222 0.363 0.285 	8 19.2 240.0 0.3666 0.2002 0.6530 0.1268 240.0 0.290 1.000 0.174 0.659 0.137 0.03 W2 8.860	9 2.8 237.00 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.000 0.074 0.659 0.37 0.03	10 2.8 267.8 0.366 0.2202 0.6530 0.26530 0.226 48.6 113.0 0.200 0.074 48.6 0.290 0.03 0.37 0.03 W 42.455	111 7.6 312.6 0.3666 2.3 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 0.095 0.1268 0.095 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 141.1 0.761 0.761 0.761 0.761 0.763	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.276 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
惑音 Pi [baa Ti [K] fi [mol, 0 [mol, 0] [mol, 0	r] ////////////////////////////////////	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1263 13 48.6 414.9 1.000 0.007 0.418 0.299 0.213 277 65 300 0.748 1 0.0748 1 0.0485 0.054 0.055 0.057 0.057 0.055 0.057 0.057 0.057 0.057 0.057 0.077 0.077 0.077 0.078 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.0748 0.007 0.007 0.0748 0.007 0.007 0.007 0.007 0.0748 0.007	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 0.007 0.418 0.293 2.23 2.23 0.653 0.0418 0.2012 0.653 0.214 0.213 0.213 0.213 0.213 0.213 0.213 0.213 0.214 0.213 0.213 0.214 0.213 0.213 0.214 0.213 0.214 0.213 0.214 0.215	Opti 3 3 19.2 273.1 0.2102 0.6530 0.2202 0.6530 0.1268 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.074 0.612 0.017 0.418 0.213 29 65 240 0.7418 0.213 0.0.7448 0.213 0.0.7448 0.213 0.0.7448 0.0.004 0.0.7448 0.0.004	imal coordination 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2002 0.6530 0.1268 1.000 0.290 0.070 0.418 0.2013 30 655 1.44.7 0.7448	ndition 7.6 7.6 270.0 0.546 0.0546 0.2002 0.6530 0.2002 0.45630 0.2002 0.45630 0.2002 0.45630 0.4563 0.000 0.000 0.003 0.3633 0.0320 0.3633 0.285 311 3 0.748 0.044 0.044 0.044 0.044 0.0455	of this 66 7.6 306.2 0.546 0.1262 0.6530 0.1262 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	 study study r 19.2 273.0 0.366 0 0.2002 0.6530 0.1268 139.2 0.710 0.084 0.322 0.710 0.084 0.323 0.285 0.285 	8 19.2 240.0 0.3666 0 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 0.2902 1.0000 0.174 0.659 0.137 0.03 W2 8,860	9 2.8 237.0 0.023 0.023 0.023 0.023 0.1268 0.1268 0.1268 0.447 0.250 0.029 0.029 0.037 0.037 0.03 0.03 0.03 0.03 0.03 0.	10 2.8 2.67.8 0.366 11 0.6530 0.1268 2.2 2.48.6 113.0 0.000 0.174 0.659 0.037 0.137 0.03	111 7.6 312.6 0.3666 1 1 0.2202 0.6530 0.0268 23 3.0 0.290 0.095 0.174 0.659 0.174 0.659 0.174 0.659 0.174 0.659 0.174	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 244 3.0 141.1 0.290 0.761 0.174 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418 0.229 0.223	26 3.0 234.3 1.000 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
志 信 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 章言 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Mass fractionx (p.182) 章言 Pi [ba Ti [K] fi [mol, Vapor fract Xapor fract Napor fract	r] /*] /*] Propane y InButane y r] /*] /*] Nitrogen y Methane ym Propane y Propane y /*] /*] /*] Nitrogen n Propane y Propane y Propane y Propane y Propane y Propane y Propane y Propane y Propane y Propane y Nitrogen n Propane y Propane y Nitrogen n Propane y Propane y Nitrogen n Propane y Propane y	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 48.6 414.9 1.000 0.070 0.418 0.299 0.213 0.219 0.213 0.219 0.210 0.418 0.299 0.213 0.210 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.200 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.418 0.000 0.077 0.418 0.000 0.078 0.020 0.048 0.000 0.078 0.000 0.048 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.000000 0.0000000	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 28 65 5273 0.748 10.004 0.875 0.025 0.025	Opti 3 19.2 273.1 0 0.513 0 0.6530 0.1268 273.1 1.000 0.6166 0.616 0.616 0.617 0.618 0.299 6 0.214 0.213 0.213 0.213 0.213 0.214 0.616 0.617 0.618 0.299 6 2400 0.748 1 0.041 0.875 0.025	imal co 4 4 19.2 273.1 0.546 0 0.547 0 0.548 0 0.2002 0.6530 0.1268 240.0 0.240.0 0.290 0.213 0.213 0.216 5 144.7 0.748 0 0.041 0.875 0.025 0.025	ndition 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2002 0.6530 0.1268 240.0 0.710 0.710 0.710 0.030 0.322 0.363 0.322 0.363 0.385 0.285 0.285 0.285 0.285 0.024	of this 6 7.6 306.2 0.546 0.540 0.6202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	 study study ray <liray< li=""> <liray< li=""> <liray< li=""></liray<></liray<></liray<>	8 19.2 240.0 0.3666 0.2002 0.2002 0.290 1.000 0.174 0.659 0.137 0.03 W2 8,860	9 2.8 237.00 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.074 0.659 0.137 0.03 W3 29.944	10 2.8 267.8 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 1113.0 0.0200 0.074 48.6 0.290 0.077 0.03	111 7.6 312.6 0.3666 1 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 0.095 0.1268 0.095 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 144.1 0.761 0.761 0.761 0.761 0.763 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.07 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
惑音 Pi [ba Pi ba Ti [K] fi [mol, (p.193) (p.193) (p.193) (p.193) (p.193) (p.193) (p.193) (p.182) (p.182) (p.182) (p.182) (p.182)	r] ////////////////////////////////////	1 19.2 355.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 13 48.6 414.9 1.000 1.000 0.077 0.418 0.299 0.213 27 65 300 0.748 1 0.748 1 0.0748 1 0.0748 1 0.0748 0.749 0.749 0.748 0.748 0.749 0.748	2 19.2 310.0 0.913 0 0.2202 0.6530 0.1268 14 48.6 305.0 1.000 0.077 0.418 0.299 0.213 28 65 273 0.748 1 1 0.748 0.749 0.213 0.748 0.290 0.213 0.200 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000	Opti 3 19.2 273.1 0.2002 0.6530 0.12668 15 48.6 273.1 1.000 0.616 0.007 0.418 0.213 0.213 0.0748 0.7478 0.748 0.748 0.749 65 0.0744	imal co 4 19.2 273.1 0.546 0 0.2002 0.6530 0.1268 16 240.0 1.000 0.290 0.027 0.418 0.290 0.017 0.418 0.290 0.213 30 655 144.7 0.7448 0.7044 0.704 0.044 0.704 0.044 0.041 0.055 0.051	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.202 0.6530 0.202 0.6530 0.1268 17 48.6 240.0 0.710 0.000 0.000 0.363 0.322 0.363 31 31 30 .285 0.748 0.0 0.5 0.000 0.322 0.363 0.285 0.202 0.363 0.202 0.1268 0.710 0.000 0.202 0.1268 0.710 0.000 0.202 0.1268 0.710 0.000 0.202 0.1268 0.710 0.000 0.202 0.1268 0.710 0.0000 0.00000 0.0000 0.00000 0.00000 0.0000 0.0000 0.00000000	of this 6 7.6 306.22 0.5406 1 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.000 0.03 0.322 0.363 0.285	 study study 7 7 19.2 273.0 0.366 0 0.2002 0.6530 0.1268 139.2 0.710 0.084 0.363 0.322 0.363 0.285 	8 19.2 240.0 0.3665 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 0.724 48.6 240.0 0.790 0.137 0.03 W2 8,860	99 2.8 237.00 0.023 0.023 0.023 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.447 0.0290 0.0290 0.174 0.0290 0.037 0.033 0.137 0.033	10 2.8 267.8 0.366 11 0.6530 0.1268 0.1330 0.290 0.3174 0.659 0.000 0.174 0.659 0.039 0.137 0.03	111 7.6 312.6 0.3663 10.2202 0.6530 0.1268 23 3.00 0.1268 0.137 0.290 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 0.913 1 0.2202 0.6530 0.1268 0.1268 0.1268 0.1267 0.0174 0.659 0.137 0.03	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.418 0.229 0.213	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213
本 言 Pi [ba Ti [K] 「f [mol, Vapor fract Mass fraction (p.193) 章言 Pi [ba Ti [K] (f [mol, Vapor fract Mass fractionx (p.182) 章言 Pi [ba Ti [K] f [mol, Vapor fract Mass fractionx (p.182)	r] /*] /*] Propane y nButane y nButane y r] /*] /*] Methane y Propane y Propane y Propane y Nitrogen r Propane y Nitrogen n Propane y Nitrogen y Propane y Nitrogen y	1 19.2 355.6 0.535.0 0.1268 0.1268 0.1268 414.9 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 277 65 300 0.748 1 0.04 0.8755 0.025 0.005 0.025 0.005 0.005 0.025 0.005	2 19.2 310.0 0.2202 0.6530 0.1268 0.1268 305.0 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213 288 65 273 288 10 0.04 0.299 0.213 288 0.299 0.213 0.005	Opti 3 19.2 273.1 0.6530 0.6530 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1268 0.1273 0.007 0.128 0.014 0.029 0.233 240 0.0748 1 0.04 0.875 0.025 0.025	imal comparison 44 19.2 273.1 0.546 0.6530 0.1268 0.1268 240.0 1.000 0.290 0.021 0.000 0.0290 0.013 300 65 144.7 0.04 0.875 0.025 0.025 0.025	ndition 5 7.6 270.0 0.546 0.026 0.2202 0.6530 0.1268 0.1268 240.0 0.710 0.000 0.3633 0.285 311 65 311 0.748 0 0.04 0.8755 0.0255 0.02	of this 6 7.6 306.2 0.546 0.540 0.6530 0.2202 0.6530 0.1268 18 48.6 144.7 0.710 0.030 0.032 0.323 0.325	 study study ray <liray< li=""> <liray< li=""> <liray< li=""></liray<></liray<></liray<>	8 19,2 240.0 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 240.0 0.290 1.000 0.1748.6 240.0 0.290 0.037 0.03 W2 8,860	9 2.8 237.00 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 21 48.6 144.7 0.290 0.074 0.659 0.137 0.03 0.03 W3 29,944	10 2.8 267.8 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 22 48.6 1113.0 0.0200 0.074 48.6 0.290 0.077 0.03	111 7.6 312.6 0.366 0.2202 0.6530 0.1268 23 3.0 0.095 0.174 0.659 0.174 0.659 0.137 0.03	12 7.6 308.8 0.913 0.2202 0.6530 0.1268 24 3.0 0.761 0.7761 0.7761 0.7761 0.037	25 3.0 140.2 1.000 0.276 0.418 0.229 0.223	26 3.0 234.3 1.000 0.07 0.418 0.299 0.213

후 기

본 연구는

(a) 한국연구재단(KRF-2008-314-D00494,

KRF-2009-0086033, R33-2008-000-10150-0)

(b) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331) "시뮬레이 션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발"

(c) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11과제 "수 중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트 워크 기반의 가상 복합 시스템 모델 구조 연구"

(d) 서울대학교 해양시스템공학연구소 및 BK21 해양기술인력 양성사업단

(e) 한국에너지기술평가원 에너지인력양성사업 미래형 해상 풍력 발전 시스템 GET-Future 연구실(No. 20114030200050)의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립 니다.

참 고 문 헌

- AspenTech, 2011. *HYSYS official homepage*, Available at http://www.aspentech.com/core/aspen-hysys.cfm [Accessed 1 June 2011].
- Barclay, M. & Shukri, T., 2007. Enhanced Single Mixed Refrigerant Process for Stranded Gas Liquefaction. *LNG 15 Conference*, Barcelona, Spain, 24–27 April 2007.
- Cengel, Y.A., 2008. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. 2nd Edition, McGraw–Hill.
- Cha, J.H. Lee, J.C. Roh, M.I. & Lee, K.Y., 2010. Determination of the Optimal Operating Condition of the Hamworthy Mark I Cycle for LNG–FPSO. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.733–742.
- Finn, A.J. Johnson, G.L. & Tomlinson, T.R., 2000, LNG Technology for Offshore and Midscale Plants", *79th Annual GPA Convention*, Atlanta, U.S.A., 13–15 March 2000.
- Hwang, J.H. Roh, M.I. Cha, J.H. & Lee, K.Y., 2010. Offshore Process FEED(Front End Engineering Design) Method for Integrated Process Engineering. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.265–277.
- Hwang, J.H. et al., 2009. Application of an Integrated FEED Process Engineering Solution to Generic LNG FPSO Topsides. *Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, 21–26 June 2009.
- Jensen, J.B., 2008. *Optimal Operation of Refrigeration Cycles.* Ph.D. Thesis, Norweglan University of Science and Technology.

- Kim, H.J. Park, C.K. Lee, J.Y. & Kim, W.B., 2010. Optimization of the Degree of Superheating of the Cryogenic Liquefaction Process for LNG FPSO. *Proceedings of the Annual Spring Meeting*, The Society of Naval Architects of Korea, Jeju, Korea, 3–4 June 2010.
- Lee, K.Y. Cho, S.H. & Roh, M.I., 2002. An Efficient Global–Local Hybrid Optimization Method Using Design Sensitivity Analysis. *International Journal of Vehicle Design*, 28(4), pp.300–317.
- Lee, J.Y. Kim, W.B. Kim, H.J. & Park, C.K., 2010. Comparison of a Ship LNG Liquefaction Plant and a Large Size LNG Liquefaction Plant. *Proceedings of the Annual Spring Meeting*, The Society of Naval Architects of Korea, Jeju, Korea, 3–4 June 2010.
- Moran, M.J. & Shapiro, H.N., 2008. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 6th Edition, John Wiley & Sons.
- Roh, M.I. & Lee K.Y., 1999. A Study on the Multidisciplinary Design Optimization(MDO) using Collaborative Optimization Approach. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, The Society of Naval Architects of Korea, Daejeon, Korea, 11–12 November 1999.
- Shukri, T., 2004. LNG Technology Selection. *Hydrocarbon Engineering*, 9(2), pp.71–74.
- Smith, J.M., 2005. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics,* 7th Edition, McGraw–Hill.
- Venkatarathnam, G., 2008. *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes*, Springer.



이 규 열