

LNG추출과정과 냉열이용의 열역학적 해석

Thermodynamic Analysis of the Extraction Process and the Cold Energy Utilization of LNG

이 근 식*, 장 영 수**, 노 승 탁***
G. S. Lee, Y.S.Chang, S. T. Ro

Key words : LNG(액화천연가스), Extraction Process(추출과정), Cold Energy(냉열), Thermodynamic Properties(열역학적 물성치)

Abstract

Thermodynamic analysis of extraction process from the constant pressure LNG(Liquefied Natural Gas) vessel was performed in this study. LNG was assumed as a binary mixture of 90% methane and 10% ethane by mole fraction. The thermodynamic properties such as temperature, composition, specific volume and the amount of cold energy were predicted during extraction process. Pressure as a parameter ranges from 101.3kPa to 2000kPa. The result shows the peculiar phenomena for the LNG as a mixture.

Both vapor and liquid extraction processes were investigated by a computer model. The property changes are negligible in the liquid extraction process. For the vapor extraction process, the temperature in the vessel increases rapidly and the extracted composition of methane decreases rapidly near the end of extracting process. Specific volume of vapor has the maximum and that of liquid has the minimum during the process. When pressure is increased, specific volume of vapor decreases and that of liquid increases.

It was found that specific volume of vapor phase had a major effect on the heat absorption at constant pressure during vapor extraction process. If the pressure of the vessel increases, the total cold energy which can be utilized from LNG decreased.

기 호 설 명

H : 엔탈피[kJ]
 h : 비엔탈피[kJ/kg]
 m : 질량[kg]

m_r : 잔여질량비(초기충전질량에 대한 용기내 질량의 비율)
 \dot{m} : 용기내 질량변화율[kg/s]
 \dot{m}_e : 추출질량유량[kg/s]
 P : 압력[kPa]
 \dot{Q}_c : 용기냉열(용기등압유지시 이용가능한 냉열량)[kW]
 \dot{Q}_E : 외부냉열(용기의 출구상태에서부터 0°C까지

* 울산대학교 공과대학 기계공학과
** 서울대학교 대학원 기계공학과
*** 서울대학교 공과대학 기계공학과

	냉열량)[kW]
\dot{Q}_{net}	: 순냉열량(= $\dot{Q}_{tot} - \dot{Q}_o$)[kW]
\dot{Q}_o	: 외부로부터 용기로의 침투열량[kW]
\dot{Q}_T	: 용기가 등압과정에서 흡수한 열량 (= $\dot{Q}_c + \dot{Q}_o$) [kW]
\dot{Q}_{tot}	: 총냉열량(= $\dot{Q}_T + \dot{Q}_E$)[kW]
q	: 건도
q_T	: 단위추출량에 대한 등압상태에서의 흡수열 량(= \dot{Q}_T / \dot{m}_c)[kJ/kg]
q_{tot}	: 단위추출량에 대한 총냉열량(= $\dot{Q}_{tot} / \dot{m}_c$) [kJ/kg]
T	: 온도[°C, K]
t	: 시간[s]
U	: 내부에너지[kJ]
V	: 용기체적[m ³]
ν	: 비체적[m ³ /kg]
X_i	: i성분 몰기준 액상성분비
x_i	: i성분 질량기준 액상성분비
Y_i	: i성분 몰기준 기상성분비
y_i	: i성분 질량기준 기상성분비
Z_i	: i성분 몰기준 총성분비
z_i	: i성분 질량기준 총성분비

하 첨 자

f	: 액상
g	: 기상
cv	: 검사체적
1	: 메탄
2	: 에탄

1. 서 론

고도의 산업화와 교통량의 증가는 많은 에너지의 소비를 필요로 하고, 이러한 에너지의 대부분은 화석연료의 연소에 의하여 얻어진다. 화석연료 사용량의 증가로 인해 대기오염 및 지구온난화가 가속되고 있으며, 전세계적으로 지구환경보존에 대한 인식이 고조되고 있는 실정이다. 따라서 저공해 에너지원의 개발 뿐만 아니라 근본적으로 에너지 사용량의 감소를 위하여 이용 가능한 에너지의 효율적 사용기술개발이 필요하다. 또한 냉

방용 공조기기 등의 사용으로 인하여 여름철 전력수요가 급격히 증가하여 에너지원의 계절별 소비량의 불균형이 심화되고 있다. 정부의 에너지 정책도 이에 발맞추어 집중형발전소 건설을 지양하고 소규모 열병합 발전을 추진하고 있으며, 에너지원의 다원화, 저공해연료 사용, 대체에너지 개발 등을 추진하고 있다.¹⁾

천연가스(natural gas, NG)는 그 성분이 산지에 따라 다소 다르나 85~99%의 메탄이 주성분이며 나머지는 에탄과 프로판 등으로 구성되어 있다.²⁾ 이 천연가스를 탈수, 탈황, 탈탄산과정을 거쳐 불순물을 제거한 후 액화공정을 통하여 액체상태로 만든 것을 액화천연가스(liquefied natural gas, LNG)라 부른다. 액화천연가스는 연소시 오염물질의 발생이 적은 저공해 청정연료로서, 공기보다 가볍고 발화점이 높고 연소범위가 좁아서 안전성이 높다.³⁾ 또한 매장량이 풍부하여 향후 약 2500년간 사용가능하다. 우리나라에서도 1993년 총 411만톤을 인도네시아, 호주, 말레이시아에서 도입한 이래, 2000년대에는 1천만톤이상을 도입할 예정이다.¹⁾

천연가스는 액화된 상태로 저장 및 수송을 하는데 1기압에서 약 -160°C의 저온상태이며, 선박수송시 LNG의 저온상태를 유지하기 위해 대개 0.15%/day의 증발율(boil off ratio)을 가진다.¹⁾ 증발된 기상의 주성분은 메탄으로 선박추진용 연료로서 사용되며 부족할 경우 추가로 액상의 LNG를 추출, 가열하여 이용한다. 한편 인수기지에 저장된 LNG는 액을 추출한 후 펌프로 가압(70기압)하고 해수로 가열하여 기체상태의 천연가스로 만든 후 발전용, 산업용, 가정용으로 공급된다.

이와 같이 액화천연가스로부터 천연가스로의 가열과정에서 유용도가 높은 상당한 열량(냉열)이 버려지고 있으며, 이 냉열량을 예측하고 활용할 대상을 찾는 것은 에너지의 효율적 이용 관점에서 매우 의미있는 일이다. 그 한 예로서 최근들어 에너지의 효율적인 이용이 요구되면서 널리 이용되고 있는 소규모 열병합발전의 연료로 사용하면 연소가스의 고온폐열을 이용할 수 있을 뿐만 아니라, LNG의 저온냉열을 활용하여 에너지 절약 효과를 얻을 수 있는 이점이 있다.

LNG는 혼합물이므로 저장용기에서 뽑아낼 때 추출성분 및 온도가 일정하게 유지되지 않는다.

따라서 연소과정의 해석과 연소기 설계에 문제점이 발생하게 되고, 이용냉열량의 변화도 예상된다. 따라서 LNG의 추출과정에서 발생하는 온도 및 성분의 변화와 흡수열량 및 이용냉열량의 예측해석이 필요하다. LNG용기에 관한 연구로는, 대형 LNG용기의 증발을 산정⁴⁾과 인수기지에서의 LNG저장용기의 설계⁵⁾가 고찰된 것이 있다. 질량출입이 있는 용기에 대한 해석으로는 김민수⁶⁾에 의해 혼합냉매의 등온누출과정에 대한 해석이 이루어졌으나, LNG용기의 등압추출과정에 대한 열역학적 해석은 그 중요성에도 불구하고 잘 알려져 있지 않다.

본 연구에서는 소규모 열병합발전용으로 공급될 LNG의 저장용기나 선박추진용으로 사용될 LNG의 저장용기에서 추출과정시 발생하는 열역학적 물성의 변화와 냉열량을 추산하고자 한다. 연구내용으로는 등압과정으로 기상 및 액상에서 LNG를 추출할 때, 성분비, 온도, 건도의 변화를 예측하고 등압유지를 위한 흡수열량(즉, 침투열량+이용가능한 냉열)과 추출후부터 0°C까지 이용 가능한 냉열량을 합한 총냉열량을 예측하는 것이다. 여기서 냉열을 이용할 수 있는 최고온도는 대기와의 적정온도차를 고려하여 0°C로 하였다. 이하 본문에서 등압유지를 위한 흡수열량 및 흡수열량 중 이용가능한 냉열은 각각 등압흡수열량 및 용기냉열로, 추출후부터 0°C까지 이용 가능한 냉열량은 외부냉열이라 한다.

2. 추출과정의 해석

저장용기로부터 LNG를 추출하여 사용하는 방법은 여러가지가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 기상을 추출하는 방법과 액상을 추출하는 방법의 2가지 경우에 대해 해석을 하고자 한다. Fig.1에 LNG추출과정을 개략적으로 나타내었다.

저장용기로부터 추출되어 공급되는 천연가스는 일정한 압력을 유지하는 것이 바람직하므로 추출과정동안 용기내부의 압력은 일정하다고 가정하였다. 저장용기 내부를 등압으로 유지하기 위해 용기로의 열의 공급이 필요하고, 이 열 \dot{Q}_T 은 외부로부터 LNG저장용기로의 침투열 \dot{Q}_0 과 용기냉열 \dot{Q}_c 을 합한 것이다. 또 추출된 LNG는 아직 저온상태로 이용할 수 있는 많은 양의 냉열을 가지고

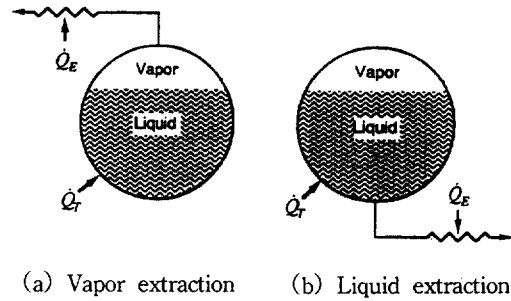


Fig.1 Schematic diagram of isobaric extraction process.

있다. LNG의 온도가 0°C까지 변화할때 이용할 수 있는 냉열을 \dot{Q}_E 라 하면 총냉열량 \dot{Q}_{tot} 은 \dot{Q}_T 와 \dot{Q}_E 를 합한 양이고, 순냉열 \dot{Q}_{net} 은 $\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{tot} - \dot{Q}_0$ 로 된다.

기상추출과정에서 어떤 순간에 추출한 기체의 성분비는 저장용기내의 기상성분비와 동일하다고 가정하였으며, 액상추출의 경우도 저장용기내의 액상성분비와 추출되는 LNG의 성분은 동일하다고 가정하였다. LNG는 산지에 따라 그 성분비가 조금씩 차이가 있으나,²⁾ 대표적으로 메탄과 에탄이 물비로 90 : 10으로 혼합된 것으로 가정하였다.

추출과정은 초기에 저장용기체적의 90%를 액으로 채우는 것으로 하여 용기내부를 등압으로 유지하면서 해석하였으며, 압력을 매개변수로 하여 101.3kPa에서 2000kPa까지 변화시키면서 물성과 냉열량의 변화를 고찰하였다. 추출과정 중 LNG의 각 상태에서의 온도 및 엔탈피 등의 열물성은 물성치 계산프로그램⁷⁾을 이용하여 구하였다.

초기에 저장용기속에 충전시킬 LNG의 질량을 1kg으로 하고 저장용기에 충전된 LNG의 액상체적이 90%가 되는것으로 가정하였으므로 다음의 관계식이 성립한다.

$$\frac{V_l}{V} = 0.9 = \frac{(1-q)V_l}{\nu} \tag{1}$$

혼합물에 대한 상태방정식

$$f(p, \nu, T, z_i) = 0 \tag{2}$$

Table 1 Initial condition in LNG vessel under 90% liquid charge (methane : ethane=90 : 10 by mole)

P(kPa)	$\nu(m^3/kg)$	T(°C)
101.3	0.002450	-160.54
200	0.002524	-151.21
400	0.002620	-139.88
600	0.002694	-132.19
1000	0.002811	-121.18
1500	0.002936	-111.23
2000	0.003050	-103.42

에서 압력과 총성분비가 주어졌으므로 독립변수는 온도 혹은 비체적 중에 하나이다. 한 예로서 초기 온도를 가정하면 비체적, 건도, 액상비체적이 정해지므로 이것이 식(1)을 만족하도록 초기 온도를 찾을 수 있다. 각 용기압력에서의 초기조건(T, ν)를 Table 1에 정리하였다. 이렇게 하면 m kg LNG를 충전시킬 용기의 체적은, 해당압력에서 구한 비체적에 단순히 m만 곱하면 된다.

이후 일련의 계산과정은 Fig.2의 순서대로 나타내었다. Table 1의 초기조건에 의해 초기물성치들을 구하고, 준평형상태로 가정할 수 있는 미소량을 추출하면서 계산을 수행한다.

기상추출시 추출 경로를 알기 위해, 검사체적내의 총성분비와 액상성분비, 기상성분비의 관계를 다음과같이 표시할 수 있다.

$$z_i = x_i(1-q) + y_i q \quad (3)$$

여기서 q는 m_g/m 로 정의되는 질량 기준 건도로서 q=0 일때는 용기내에 포화액만 존재하고 q=1 일때는 용기내에 포화증기만 존재함을 의미한다. 비체적 ν 는

$$\nu = \frac{V}{m} \quad (4)$$

로 표시되며 여기서 V는 용기의 체적이다.

용기내에 남아있는 질량 m에서 추출되는 기상의 미소질량 $\Delta m_i (= -\Delta m)$ 를 뽑아내며 용기내의 질량은 $m - \Delta m$ 으로 되고, 추출한 기상성분비는 저장용기에서의 기상성분비와 동일하다고 가정하였으므로 용기내의 총성분비는 다음과 같이 표시된다.

$$z'_i = \frac{x_i m_i + y_i m_g - \Delta m_i}{m - \Delta m} = \frac{x_i(1-q) + y_i q - \epsilon y_i}{1 - \epsilon} \quad (5)$$

여기서 추출량비 $\epsilon = \Delta m_i/m$ 이고 $\Delta m_i = \Delta m_g = (\Delta m)y_i$ 이다. 추출후 비체적 ν 은 다음과 같이 표시된다.

$$\nu = \frac{V}{m - \Delta m} = \frac{\nu}{1 - \epsilon} \quad (6)$$

총성분비가 식(5)에 의해 결정되고 추출후 비체

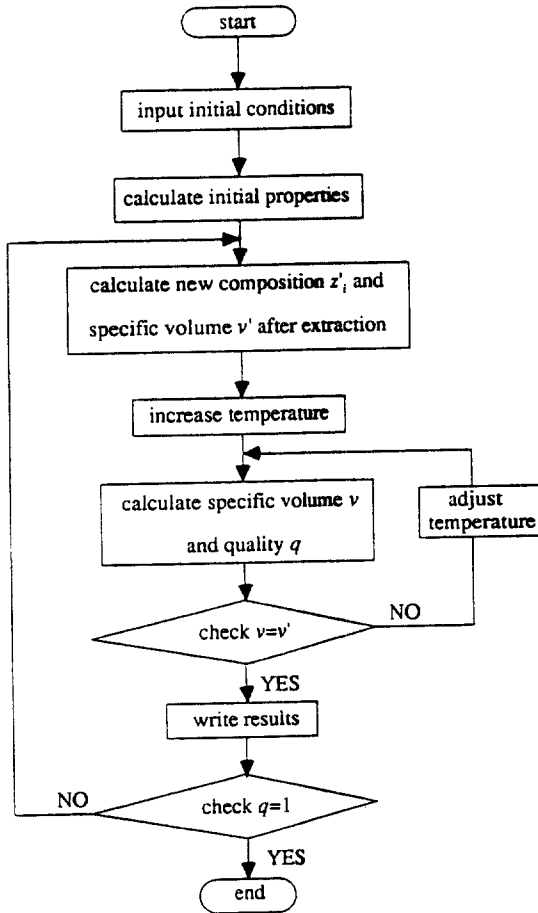


Fig.2 Calculation procedure of isobaric extracting process of LNG.

적이 식(6)에 의해 정해지면, 상태방정식에 의해 구한 비체적 v 와 식(6)의 v 이 일치하는 온도를 반복계산에 의하여 구하여 새로운 평형상태를 결정한다. 이러한 과정을 건도가 1이 될 때까지 추출량비를 일정하게 하면서 반복계산한다.

액상추출의 경우는 저장용기에서의 액상성분비와 추출되는 LNG의 성분은 동일하다는 가정에서 $\Delta m_i = \Delta m_g = (\Delta m)_x$ 이므로 액상추출 후 총성분비 변화는

$$z'_i = \frac{x_i m_f + y_i m_g - \Delta m_i}{m - \Delta m} = \frac{x_i(1-q) + y_i q - \epsilon x_i}{1 - \epsilon} \quad (7)$$

로 되고 추출 후 비체적 v 은 식(6)과 동일하다.

추출과정동안 용기의 등압흡수열량은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_T = \frac{dH}{dt} + \dot{m}_e h_e \quad (8)$$

양변을 \dot{m}_e 로 나눈것을 q_T 라 정의하기로 하고, $H = mh$ 와 $\dot{m} = -\dot{m}_e$ 의 관계를 이용하면

$$q_T = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{m}_e} = -m \frac{dh}{dm} - h + h_e \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 h_e 는 추출되는 LNG의

출구엔탈피로서 기상추출의 경우는 h_g 이고 액상추출의 경우 h_f 가 된다. 식(8)은 시간이 독립변수로 단위시간당 용기의 흡수열량을 표시하는데 비하여, 식(9)는 남아있는 질량이 독립변수로 단위추출량에 대한 용기의 흡수열량을 나타낸다.

혼합물의 경우는 순수물질과 달리 등압조건하에서도 추출경로에 따라 총성분비, 온도, 건도, 비체적, 내부에너지, 엔탈피 등이 변하게 된다. q_T 의 추출 경로에 따른 거동과 그 점근적인 거동을 조사하기 위해 식(9)를 다시 쓰면 아래와 같다. 자세한 유도과정은 부록에 나타내었다.

$$q_T = \frac{v_g (h_g - h_f)}{v_g - v_f} + \frac{h_g - h_f}{v_g - v_f} \left(m_f \frac{dv_f}{dm} + m_g \frac{dv_g}{dm} \right) - \left(m_f \frac{dh_f}{dm} + m_g \frac{dh_g}{dm} \right) \quad (10)$$

여기서 v_x 는 추출되는 LNG의 비체적으로서 기상추출의 경우는 v_g 이고 액상추출의 경우 v_f 가 된다. 편의상 식(10)의 첫항을 q_{pur} , 둘째항을 q_{ddm} , 마지막항을 q_{ddm} 이라 부르기로 한다. 식(10)에서 알 수 있는 바와 같이 단위추출질량당 흡수열량 q_T 는, 검사체적의 상태량들로만 나타나 있는 q_{pur} 뿐 아니라 경로(상태량의 변화량)에 관계된 q_{ddm} 항과 q_{ddm} 항을 포함하고 있다. 여기서 순수물질의 경우 $dX/dm = 0$ ($X = v_f, v_g, h_f, h_g$)이므로 q_{pur} 항만 남게되어 등압흡수열량은 일정한 값을 가지게 된다.

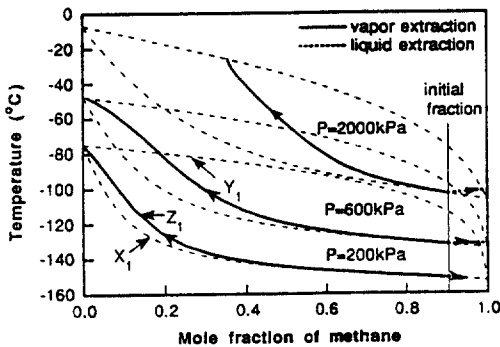


Fig.3 VLE diagram : Mole fraction changes during the vapor and liquid extraction processes at different pressures.

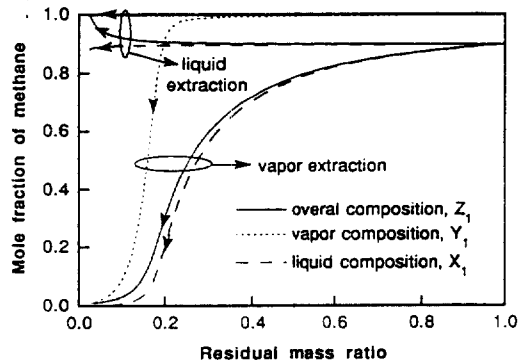


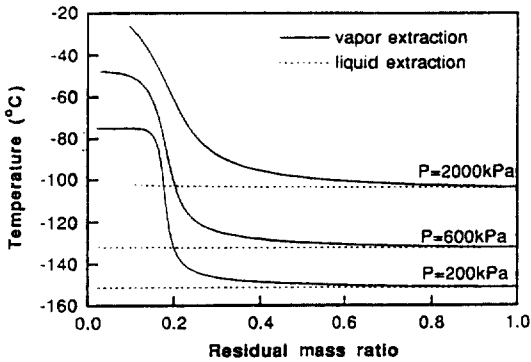
Fig.4 Composition changes in the liquid and vapor phases during the extraction process (P=600 kPa).

3. 결과 및 토의

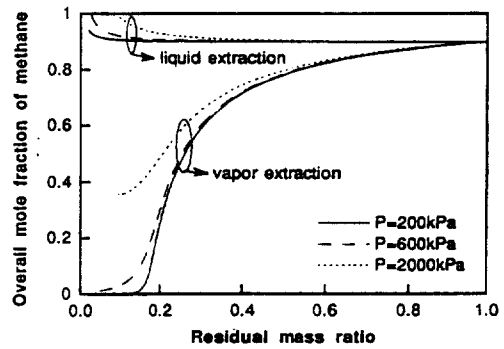
3.1 기상추출

기상추출의 경우 기액평형선도를 Fig.3에 나타내었다. Z_i은 메탄의 총성분비(몰비)를 표시하며 화살표는 추출경로의 진행방향을 표시한다. 초기에 메탄의 몰비는 90%이다. 추출과정이 진행됨에 따라 메탄의 성분비는 감소하며 온도는 증가한다. 추출 초반부에 기상성분은 거의 메탄이며, 액상성분비와 총성분비의 감소는 현저하다. P=600kPa일 때 성분비의 변화를 표시한 Fig.4를 살펴보면, 추출과정 동안의 온도변화를 도시한 Fig.5(a)에 나타난 바와

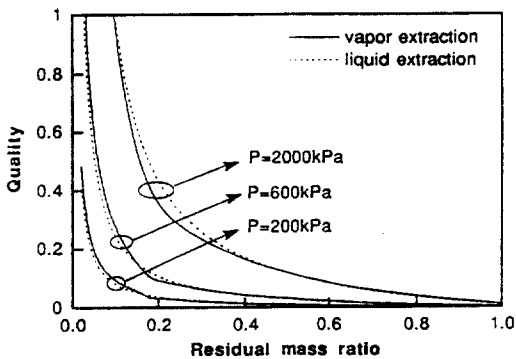
같이 $m_r=0.2$ 부근에서 온도가 급격히 증가함에 따라 메탄의 액상 및 총성분비는 증발과 추출과정에 의하여 급격히 감소하며, 고온증발물질인 에탄이 증발하여 추출성분에 에탄의 몰비가 급격히 증가한다. Fig.3에서 압력이 낮을수록 액상선에 접근하여 총성분비가 변함을 볼 수 있다. 압력이 낮을수록 저온증발물질인 메탄이 저온상태에서도 쉽게 기화하므로 용기내에서는 액상메탄이 줄어들고 기체상태의 메탄이 많이 생긴다. 기상추출로 용기에서 메탄이 빠져나가면 총메탄성분이 줄어들게 된다. 따라서 메탄의 총성분비는 감소하게 되고 그 변화경로는 액상쪽으로 이동하게 된다. 이는 Fig.5(b)에서도 확인할 수 있듯이 압력이 낮을수록 건도가



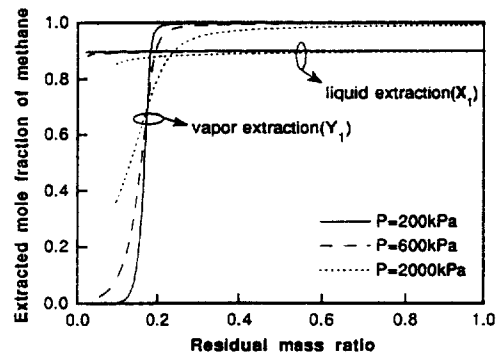
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig.5 Temperature and dryness changes in the vessel with respect to residual mass ratio during the extraction processes ;

- (a) temperature
- (b) quality.

Fig.6 Overall and extracted phase composition change at different pressures during the extraction processes ;

- (a) overall composition
- (b) composition of extracted phase.

낮게 저장용기내의 과정이 진행됨을 알 수 있다. 이때 추출성분은 대부분 메탄이 된다. 따라서 저장용기내의 메탄은 저온상태에서도 현저하게 줄어들게 된다. 이 현상은 Fig.5(a)와 Fig.6에서도 볼 수 있다. 압력이 증가함에 따라 추출온도는 증가하며 온도의 증가율과 메탄총성분비의 감소율이 둔화된다. 또한 용기내 압력이 증가함에 따라 저온증발 물질인 메탄의 증발이 저압인 경우에 비하여 더디게 되어, 추출과정동안 메탄의 추출성분비는 저압인 경우에 비하여 서서히 감소하게 된다.

단위 추출량에 대한 등압흡수열량 q_T 의 거동을 압력 600kPa의 경우 Fig.7에 나타내었다. 용기내 질량의 최초질량에 대한 비율(이하 잔여질량비) 0.3 까지 q_T 는 거의 일정하며 잔여질량비 약 0.2부근에서 최대점을 가지고 그 이후 다시 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 식 (10)의 세항 q_{pure} , $q_{d,dm}$, $q_{d,dm}$ 의 거동을 조사하면 알 수 있다. Fig.7에서 q_{pure} 는 약 430kJ/kg으로 거의 일정하며, $q_{d,dm}$ 은 거의 0이며, $q_{d,dm}$ 은 20~30kJ/kg으로 유지하다가 잔여질량비 0.2부근에 최대점을 가지다가 0.1부근에서 0에 접근한다. 이로부터 $q_{d,dm}$ 이 q_T 의 최대값에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 식(10)의 $q_{d,dm}$ 항 및 q_T 은 독립변수 (ν , T , Z , 중 2개)의 거동과 관계되고, 특히 잔여질량비에 따른 기상과 액상의 비체적을 나타낸 Fig.8의 기상의 비체적 v_g 의 거동과 유사함을 알 수 있다. 추출과정의 초기와 말기에서 열역학적 물성치의 거동은 Fig.4, 5(a)및 8에서와 같이 물성분비, 온도, 비체적이 거의 일정하다. 따라서, 추출과정 초기와 말기에서 등압흡수열량은 순수물질의 거동과 유사하므로, 순수메탄과 순수에탄의 등압흡수열량과 비교할 수 있다. Table 2에서 $P=600kPa$ 일 때, 순수 메탄과 순수에탄의 등압흡수열량은 각각 450kJ/kg 및 430kJ/kg으로, Fig.7의 등압흡수열량의 초기 및 말기의 값과 각각 유사함을 확인할 수 있다.

등압과정에서 비체적은 온도와 메탄의 총성분비를 독립변수로 하여 결정될 수 있다. 그러나 본 연구와 같은 추출과정에서 온도와 메탄의 총성분비는 둘 다 잔여질량비의 함수이므로, 잔여질량비에 따른 비체적, 온도, 메탄의 총성분비 거동을 조사해보기로 한다. Fig.8(a)에서 잔여질량비 $m_r=1$ 에서 0.2부근까지의 기상비체적 v_g 의 증가는 온도증가가 주요인이며, 0.2부근에서 온도증가에 의한 v_g 의 증

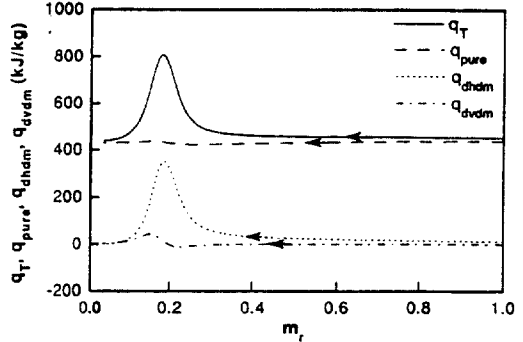


Fig.7 Variation of absorbed heat q_T , q_{pure} , $q_{d,dm}$ in eq. (10) during the vapor extraction process ($P=600kPa$).

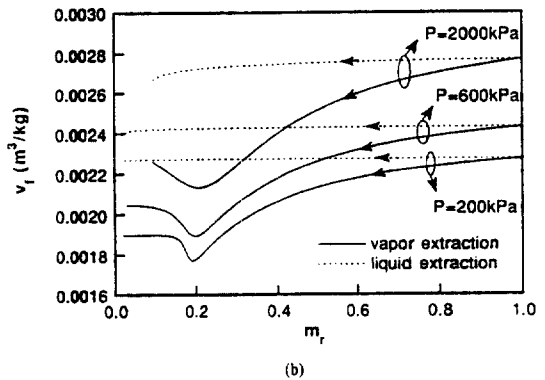
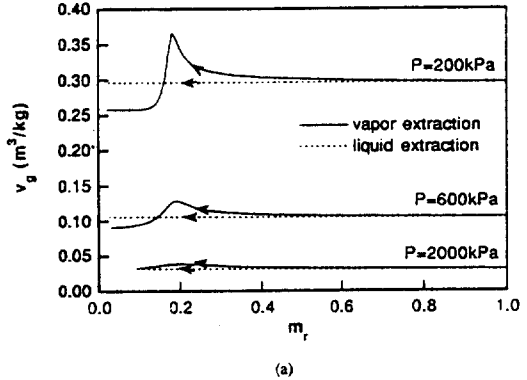


Fig.8 Variations of specific volume of vapor and liquid as a function of residual mass ratio during the extraction processes ;
(a) specific volume of saturated vapor
(b) specific volume of saturated liquid.

가효과와 기상메탄성분비 Y_1 감소로 인한 ν_g 의 감소효과가 상쇄되어 ν_g 의 최대점이 되다가 그 이후 ν_g 의 감소는 Y_1 의 감소가 주요인으로 볼 수 있다. 식(10)에서 등압흡수열량은 물성치와 그 변화량의 함수이므로 기상추출의 경우 기상비체적에 크게 의존한다고 가정하면 유사한 현상을 등압흡수열량 q_T 에 대해서도 적용할 수 있다. Fig.7에서 $m_r=1$ 에서 0.2부근까지 등압흡수열량은 온도증가에 따라 증가한다. 0.2부근에서 온도증가에 의한 q_T 의 증가와 메탄의 총성분비 감소에 의한 q_T 의 감소가 상쇄되어 최대점이 되다가 그 이후 메탄의 총성분비 감소가 주요인으로 q_T 가 감소한다.

압력을 매개변수로 할 때 등압흡수열량 q_T , 외부냉열 q_E , 총열량 q_{tot} 의 거동을 Fig.9에 제시하였다. 압력이 낮을수록 q_T , q_{tot} 의 값은 커지며 최대점상승은 높아짐을 알 수 있고, 이는 Table 2에서 증발잠열은 압력이 낮을수록 크기 때문이다. 또 Fig.5 (b)에서 압력이 낮을수록 건도가 낮아서, 단위기상추출량에 대한 등압흡수열량이 커져야함을 알 수 있다. 따라서 Fig.9에서 추출초기부터 잔여질량비 0.2부근까지 압력이 낮을수록 단위추출량에 대한 등압흡수열량은 커진다. 전술한 바와 같이 등압흡수열량의 거동은 독립변수 중에서 비체적에 가장 큰 영향을 받는데, Fig.8(a)의 기상비체적 거동을 보면 압력이 증가함에 따라 비체적은 작아지고 최대점은 낮아짐을 알 수 있다. Fig.5(a)와 Fig.6(a)에서 동일 잔여질량비 0.2부근에서 온도구배와 총성분비구배는 압력이 낮을수록 커짐을 볼 수 있다. 등압흡수열량은 최대점에 도달하기전에는 주로 온도변화에 의하여 지배받고 그 이후에는 주로 성분비변화에 의하여 지배받는다라는 앞의 설명에 의해

압력이 낮아짐에 따라 등압흡수열량의 최대점이 높아짐을 확인할 수 있다.

용기내압력이 높아짐에 따라 용기출구온도가 높아지고 이에 따라 용기출구 엔탈피가 높아진다.

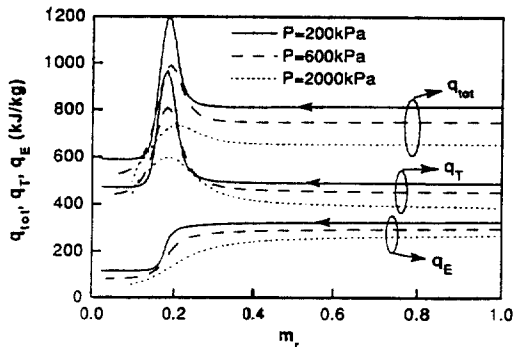


Fig.9 Absorbed, total and external cold energy as a function of residual mass ratio during vapor extraction process.

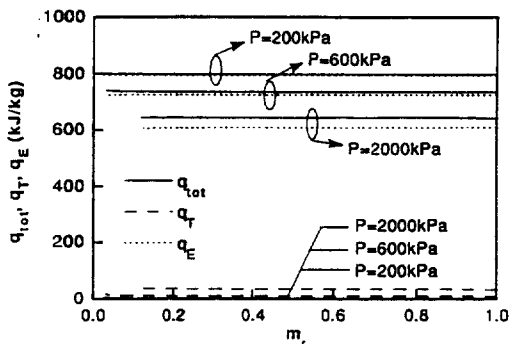


Fig.10 Absorbed, total and external cold energy as a function of residual mass ratio during liquid extraction process.

Table 2 Saturated properties of methane and ethane, isobaric absorbed heat, external and total cold energy at vapor extraction process

P(kPa)		T(°C)	ν_l (m ³ /kg)	ν_g (m ³ /kg)	h_l (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)	q_T (kJ/kg)	q_E (kJ/kg)	q_{tot} (kJ/kg)
200	methane	-152.67	0.002421	0.2922	-814.90	-331.47	487.47	328.42	815.89
	ethane	-74.85	0.001898	0.2581	-590.47	-123.16	470.77	117.83	588.60
600	methane	-134.33	0.002613	0.1035	-784.49	-311.08	448.75	301.92	750.67
	ethane	-47.46	0.002049	0.09075	-519.56	-98.47	430.81	81.90	512.71
2000	methane	-107.12	0.003071	0.02989	-650.45	-311.85	377.37	281.24	658.61
	ethane	-6.96	0.002411	0.02600	-402.78	-82.67	352.59	17.15	369.74

용기출구 엔탈피가 높아지면 냉열이용 최대기준온도로 설정한 0°C일때의 엔탈피와의 차이(외부냉열)가 줄어들게 되므로 외부냉열이 작아진다. 한편 총열량은 등압흡수열량과 외부냉열의 합이므로 앞의 두 거동을 합한 것이 된다. 혼합물로서의 LNG의 점근적인 거동을 확인하기 위해 순수 메탄과 에탄의 기상추출의 경우에 대해 물성치와 냉열량을 Table 2에 정리하였다. 순수물질과의 비교결과, LNG의 물성과 냉열량의 거동은 추출 초기에는 메탄의 거동과 유사하고, 추출이 진행되어 메탄의 총성분비가 0에 가까워지면 에탄의 거동과 유사함을 확인할 수 있다.

3.2 액상추출

액상추출의 경우 기액평형선도가 Fig.3에 제시되어 있다. 추출경로는 메탄의 총성분비가 증가하는 방향으로 진행된다. 초기에 체적비 90% 액의 충전상태에서 포화액을 추출하면 저온증발냉매인 메탄이 먼저 증발하게 된다. 따라서 Fig.3과 Fig.4에서 보듯이 저장용기에는 메탄성분이 늘어나게 되고 추출성분에는 에탄성분이 늘어나게 된다. 이 경향은 Fig.6에서 추출량이 늘어남에 따라, 또 압력이 높아짐에 따라 뚜렷하게 나타난다. Fig.4와 Fig.5(a)에 나타낸 바와 같이 동일압력에서 추출전후의 온도 변화는 거의 없으며 압력을 증가함에 따라 추출 온도는 높아진다. 그러나 추출전체과정을 기상추출의 경우와 비교할 때, 동일 압력에서 메탄의 온도 및 성분비 변화는 매우 작다. 추출과정을 진행함에 따라 액이 빠져나가고 액의 일부가 증발하여 용기를

채우게 되므로 건도는 증가하며 그 경향은 Fig.5(b)에서 보듯이 기상추출의 경우와 비슷하다. 또 압력을 증가하면 등압유지를 위해 더 많은 액을 증발시켜야 하므로 건도는 더욱 높아진다.

압력을 매개변수로하여 등압흡수열량, 외부냉열, 총냉열량을 잔여질량비에 대하여 Fig.10에 제시하였다. 동일압력에서 단위 추출량에 대한 등압흡수열량은 거의 일정하다. 이 경우에 등압흡수열량이 가장 큰 영향을 주는 항은 q_{pure} 이며 나머지 항은 거의 무시할 수 있다. 그런데 Fig.4, Fig.5(a), Fig.8에서 알 수 있는 바와같이 총성분비와 온도 및 비체적이 추출과정동안 거의 변하지 않으므로 v_g, v_g, h_g, h_g 는 거의 일정하며 따라서 식(10)에서 보듯이 등압흡수열량은 거의 일정하게 된다.

Fig.10에서 $P=600kPa$ 인 경우에 등압흡수열량 $q_T=10kJ/kg$ 이고 외부냉열 $q_E=740kJ/kg$, 총냉열량 $q_w=750kJ/kg$ 으로 LNG액상추출시 등압흡수열량은 총냉열량중에서 상당히 작은 부분임을 알 수 있다. 압력이 증가함에 따라 등압흡수열량은 커진다. 액상추출시 등압흡수열량은 앞서 서술한 바와 같이 식 (10)의 q_{pure} 항에 주로 의존하고, q_{pure} 항에서 $(v_g - v_l)$ 는 Fig.8에서 나타낸 바와 같이 압력의 증가에 따라 감소하며 v_l 는 증가한다. 또 $(h_g - h_l)$ 는 압력의 증가에 따라 감소한다. 여기서 $(v_g - v_l)$ 의 감소와 v_l 의 증가는 등압흡수열량의 증가에 기여하고, 반면에 $(h_g - h_l)$ 의 감소는 반대영향을 미친다. 한편 이중에서 $(v_g - v_l)$ 의 변화에 의한 영향이 가장 크며, 따라서 등압흡수열량은 압력증가에 따라 증가한다. 압력이 증가함에 따라 외부 냉열은 감소

Table 3 System condition to calculate cold energy utilization of LNG during liquid extraction process

Electric power required	$\dot{W}=1500kW$
Vessel pressure and temperature	600kPa, 138.82K
Brayton cycle efficiency	$\eta=25\%$
Lower heating value of LNG (a product of Arun, Indonesia methane : ethane : propane =86.96 : 8.40 : 3.66)	$\dot{Q}_L=49122kJ/kg^2$
Combustion efficiency	100%
Specific volume of vapor at 273.15K and 101.3kPa	$v_0=1.2829m^3/kg$

함을 알 수 있다. 이것은 압력이 증가함에 따라 추출 직후의 엔탈피가 커져서 기준출구온도인 0°C까지의 엔탈피 차가 줄어들기 때문이다. 압력이 증가함에 따라 총열량은 감소함을 볼 수 있다. 이는 총열량의 대부분은 외부냉열이므로 외부냉열의 경향에 의존하기 때문이다.

4. 냉열응용예

본절에서는 냉열응용예에 관해 고찰하기 위해 호텔급 소형발전용으로 가스터빈을 사용하고 그 연료로 LNG를 사용하는 예를 들기로 한다. 호텔급에 사용되는 전력은 1500kW 정도이다. 이의 전력 공급용으로 소규모 가스터빈을 사용하고 그 연료로 LNG용기로부터 액을 추출하여 기화시켜 사용하고 가정할 때, 이용할 수 있는 냉열량과 부수적인 효과를 간단히 산정해보기로 한다. 이 계산에 주어진 값 및 가정한 값은 Table 3과 같다. 사이클 효율 $\eta = 0.25 = W/\dot{Q}_i$ 로부터 공급열량 $\dot{Q}_i = 6000\text{kW}$ 이다. 연료소모율 \dot{m}_f 는 \dot{Q}_i 로부터 $\dot{m}_f = 0.1221\text{kg/s}$ 이다. 총냉열량 \dot{Q}_{tot} 는 $\dot{Q}_{tot} = \dot{m}_f \cdot q_{tot} = 91.6\text{kW}$ 이다. 총냉열량중에서 침투열량을 5%로 가정하면 순냉열량 $\dot{Q}_{net} = 0.95 \times 91.6 = 87.03\text{kW}$ 이다. 한개의 객실에 소비되는 냉방부하를 2kW라 하면 대략 43개 정도의 객실냉방이 생산전력외에 부가적으로 얻어진다. 한편 객실냉방을 위하여 냉동기를 구동시켰을 경우 성능계수를 대략 2로 잡는다면, 총냉방부하 87.03kW를 해소하기 위한 냉동기의 압축기에 소모되는 전력은 대략 44kW정도이다. 따라서 냉열을 이용함으로써 실제 생산되는 전력은 요구전력 1500kW과 냉열에 의한 등가전력 44kW를 합한 1544kW이다. 이때 효율은 $\eta = 1544/6000 \approx 25.73\%$ 가 되어, 0.73%의 효율 증진 효과가 있다.

5. 결 론

LNG 저장용기에서 기상 및 액상의 등압추출과정에 대하여 압력을 매개변수로 하여 물성과 냉열량의 변화를 열역학적으로 해석하였다. LNG의 성분은 메탄과 에탄이 폴비로 90:10으로 혼합된 것으로 가정하였으며, 초기충전량은 체적비로 90%의 액상이 채워진 것으로 가정하였다.

기상추출의 경우 추출후반부에서 온도와 성분비 및 기상, 액상비체적이 크게 변하여 혼합물로서의 LNG의 특성과 추출과정의 특징을 보여주었으며, 액상추출의 경우 온도와 성분비 및 기상, 액상비체적의 변화가 거의 없어서 순수물질의 거동과 유사하였다. 따라서 기상추출의 경우 추출후반부에서 연료로서의 사용에 주의를 요한다. 추출되는 LNG의 성분은 기상추출의 경우 잔여질량비가 0.2부근까지 메탄성분이 대부분이나 그 이후 급격히 감소한다. 액상추출의 경우 초기의 성분비를 그대로 유지한다. 압력이 증가함에 따라 기상추출, 액상추출 두 경우 모두 온도와 혼합물내의 에탄성분비가 증가하게 되나, 액상추출의 경우에 에탄성분비의 증가는 상대적으로 아주 작았다.

에너지의 합리적 이용 관점에서 냉열량을 예측하였다. 기상추출의 경우 총냉열량은 등압흡수열량과 외부냉열이 대략 3:2의 비율로 구성되며, 잔여질량비 0.2부근에서 최대값을 가진다. 액상추출의 경우 총냉열량은 최대값 전후를 제외한 기상추출시의 값과 유사하며 이것의 대부분은 외부냉열이며 추출과정동안 일정하다. 압력이 증가함에 따라 기상추출과 액상추출 두 경우 모두 총냉열량이 감소하였으며, 따라서 가능한 한 낮은 용기압력에서 사용하는 것이 많은 냉열을 이용할 수 있다. 등압흡수열량의 거동은, 기상추출의 경우 기상비체적의 거동에 영향을 많이 받는다.

소형열병합 발전용이나 선박추진용으로 LNG저장용기를 사용할 때 용기내 LNG의 온도를 측정하거나 추출누적유량을 측정하면, 본 연구결과를 활용하여 그 때의 열역학적 상태량들과 이용가능한 총냉열량을 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 이진홍, 1994, "한국의 천연가스사업", 대한기계학회 열 및 유체부문 학술강연회 강연집, pp.1-13.
2. 송희중, 1985, LNG냉열발전 기술연구, 한국전력공사 기술연구원.
3. Acker Jr., G., Brett, C.E., Bell, S., Midkiff, K.C.,

and Song, Y.K., 1989, "Experience using LNG as a marine engine fuel", *Technology Society Journal*, Vol.23, No.2, pp.33-39.

4. 천병일, 김용모, 김경근, 1994, "MRV형 LNG선의 선체온도분포 및 증발을 산정에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제18권, 제4호, pp.986-996.
5. Fulford, N.J. and Slatter, M.D., 1988, "Developments in the safe design of LNG tanks", *Cryogenics*, Vol.28, December, pp.810-817.
6. 김민수, 1993, "혼합냉매의 누출과정에 대한 시뮬레이션", 공기조화냉동공학 논문집, 제5권, 제3호, pp.217-235.
7. 김민수, 김동섭, 노승탁, 1991, "수정된 Carnahan-Starling 상태방정식을 이용한 혼합냉매의 물성계산", 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 2189-2205.

부 록

용기로부터 LNG를 추출할때 등압흡수열량 \dot{Q}_T 와 단위추출량당 등압흡수열량 q_T 를 구하기 위해 검사체적을 Fig.1에서 LNG용기로 잡을때 지배방정식 및 주어진 조건은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{dm_c}{dt} = -\dot{m}_c \tag{A.1}$$

에너지방정식 :

$$\dot{Q}_T = \frac{dU}{dt} + \dot{m}_c h_c \tag{A.2}$$

조건 :

$$P = \text{일정} \tag{A.3}$$

$$V(\text{용기체적}) = \text{일정} \tag{A.4}$$

(A.3) 및 (A.4)의 등압 및 등적조건을 이용하면 식 (A.2)는 다음으로 표시된다.

$$\dot{Q}_T = \frac{dH}{dt} + \dot{m}_c h_c \tag{A.5}$$

검사체적의 질량 $m_c = m_f + m_g$ 이므로 식(A.1)은

$$\dot{m}_f + \dot{m}_g = -\dot{m}_c \tag{A.6}$$

이고, 식(A.4)로 부터 아래와 같다.

$$\frac{dV}{dt} = \dot{m}_f v_f + \dot{m}_g v_g + m_f \dot{v}_f + m_g \dot{v}_g = 0 \tag{A.7}$$

(A.6)과 (A.7)에서 \dot{m}_f 와 \dot{m}_g 를 구하면

$$\dot{m}_f = \frac{-\dot{m}_c v_g + m_f \dot{v}_f + m_g \dot{v}_g}{v_g - v_f} \tag{A.8a}$$

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{m}_c v_f}{v_g - v_f} - \frac{m_f \dot{v}_f + m_g \dot{v}_g}{v_g - v_f} \tag{A.8b}$$

이 된다. 이것을 식(A.5)에 대입하여 흡수열량을 구하면 다음과 같다.

먼저 기상추출의 경우 $h_c = h_g$ 이므로

$$\dot{Q}_T = \frac{dH}{dt} + \dot{m}_c h_g \tag{A.9a}$$

$$= \dot{m}_f h_f + \dot{m}_g h_g + m_f \dot{h}_f + m_g \dot{h}_g + \dot{m}_c h_g \tag{A.9b}$$

와 같이 되며 (A.9b)에 (A.8)을 대입하고 정리한 다음 양변을 \dot{m}_c 로 나누어 이것을 q_T 라 하면

$$q_T = \frac{v_g(h_g - h_f)}{v_g - v_f} - \frac{h_g - h_f}{v_g - v_f} \left(m_f \frac{v_f}{m_c} + m_g \frac{v_g}{m_c} \right) + \left(m_f \frac{\dot{h}_f}{m_c} + m_g \frac{\dot{h}_g}{m_c} \right) \tag{A.10a}$$

그런데 $\dot{m} = -\dot{m}_c$ 이므로

$$q_T = \frac{\nu_g(h_g - h_f)}{\nu_g - \nu_f} + \frac{h_g - h_f}{\nu_g - \nu_f} \left(m_f \frac{\nu_f}{m} + m_g \frac{\nu_g}{m} \right) - \left(m_f \frac{h_f}{m} + m_g \frac{h_g}{m} \right) \quad (\text{A.10b})$$

$$= \frac{\nu_g(h_g - h_f)}{\nu_g - \nu_f} + \frac{h_g - h_f}{\nu_g - \nu_f} \left(m_f \frac{d\nu_f}{dm} + m_g \frac{d\nu_g}{dm} \right) - \left(m_f \frac{dh_f}{dm} + m_g \frac{dh_g}{dm} \right) \quad (\text{A.10c})$$

로 되어, 식(A.5)와 (A.9)에서 \dot{Q}_T 는 시간의 함수로 표시되어 있으나, 식(A.10c)에서 q_T 는 잔여질량

m 의 함수로 표시되었다.

유사한 과정을 액상추출의 경우에 대하여 적용하면, $h_c = h_f$ 이므로

$$\dot{Q}_T = \frac{dH}{dt} + \dot{m}_c h_f \quad (\text{A.11})$$

$$q_T = \frac{\nu_f(h_g - h_f)}{\nu_g - \nu_f} + \frac{h_g - h_f}{\nu_g - \nu_f} \left(m_f \frac{d\nu_f}{dm} + m_g \frac{d\nu_g}{dm} \right) - \left(m_f \frac{dh_f}{dm} + m_g \frac{dh_g}{dm} \right) \quad (\text{A.12})$$

와 같이 된다.