

LNG 터미널 송출 운전 최적화 사례 연구

박찬샘 · 한중훈[†]

서울대학교 화학생물공학부
 151-744 서울시 관악구 관악로 1
 (2014년 7월 2일 접수, 2014년 8월 20일 수정본 접수, 2014년 8월 25일 채택)

Case Study on Optimization of Send-out Operation in Liquefied Natural Gas Receiving Terminal

Chansaem Park and Chonghun Han[†]

School of chemical and biological engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea
 (Received 2 July 2014; Received in revised form 20 August 2014; accepted 25 August 2014)

요 약

최근 전세계적인 액화천연가스(LNG) 수요의 증가로 인해 LNG 터미널의 건설이 크게 늘어나고 있으며 기존의 LNG 터미널도 저장시설을 확장하고 있는 추세이다. 이에 따라 LNG 터미널의 다수의 저장탱크가 존재할 때 LNG를 송출 하게 될 탱크와 각 송출량을 선택하는 것은 전체 공정 운전 중 중대한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 전체 송출 량이 정해져 있을 경우 레벨이 각기 다른 탱크들에 대해 발생하는 BOG 양을 최소화 할 수 있도록 각 탱크의 송출량을 최 적화하는 연구를 수행하였다. 저장 탱크의 특성과 구조에 맞게 벽면과 바닥면에서 유입되는 열과 탱크 재질의 열전도 도를 고려한 동적모델을 구성하였고, 레벨을 변화시켜 각 레벨에 따른 BOG 양을 계산하여 얻은 BOG 발생량을 탱크 레벨에 따라 지수함수로 회귀분석하였다. 이를 통해 탱크의 특성과 레벨에 따라 BOG 발생량을 예측할 수 있는 BOR(Boil-off Rate) 모델을 얻을 수 있었다. 개발한 BOR 모델을 이용하여 BOG 발생량을 최소화하는 목적함수를 설 정하고 요구되는 송출량, 탱크내 레벨 제한, 탱크 당 가능한 송출량을 제한조건으로 설정하여 각 탱크의 최적 송출량을 결 정하는 운전 최적화를 수행하였다. 이를 실제 운전되고 있는 인천 LNG 터미널의 18개 저장탱크에 적용하여 다양한 레벨이 분포되어 있고 총 송출량이 80,000 m³/day(최대 송출량)이 요구되는 시나리오에 대해 최적화를 수행하여 가장 한 기존의 운전방법과 비교하였을 때 BOG 양을 약 9% 감소시킬 수 있었다.

Abstract – Recently, LNG receiving terminals have been widely constructed and expanded for an increase in LNG demand. Selection of the storage tank for send-out and estimation of send-out flow rate have significant influence to process operation and economics. In this study, a send-out flow rate of each storage tank is optimized in order to minimize the total BOG generation rate. Considering a size and characteristic of each storage tanks, BOG flow rates are estimated using a dynamic simulation with varying liquid levels in the tanks. The regression model is developed fitting BOG flow rates and tank liquid levels, which are boil off rate model to predict BOG flow rates with particular level data. The objective function and constraints including required total send-out flow rate and level limit in the tanks are formulated to optimize a send-out flow rate of each tank. This method for optimization of send-out operation is applied to the Incheon LNG receiving terminal considering two scenarios for various liquid levels and maximum and minimum required send-out flow rates. For maximum required send-out flow rate, this method achieves BOG reduction of 9% comparing with assumed conventional operation.

Key words: LNG, LNG Receiving Terminal, Dynamic Modeling, Send-out Operation, Optimization

1. 서 론

에너지의 사용이 증가하고 가스공급 드라이브 정책이 활성화됨에 따라 국내의 LNG (liquefied natural gas) 저장시설 및 수송시설은

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: chhan@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

양적으로 크게 팽창하여 왔다. 수입된 LNG는 Fig. 1의 가치 사슬에 따라 LNG 선으로부터 LNG 터미널에 공급되고 저장탱크에 보관되어 있다가 수요량에 맞춰 파이프 라인을 통해 수요지로 송출된다. LNG의 수입량은 일정하지만 송출량은 계절에 따라 크게 변하기 때 문에 수요량이 적은 시즌에는 저장량이 많고 송출량이 적은 조건이 되고 수요량이 많은 시즌에는 저장량이 적고 송출량은 많은 조건이 된 다[1]. 이 외에도 시즌에 따라 다양한 조건에서 송출운전이 수행되고 있는데, 저장 방식과 용량, 레벨이 다른 여러 개의 탱크 중 어떤 탱크

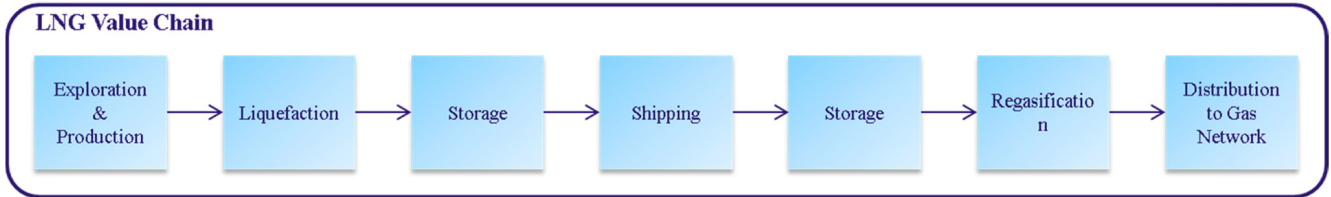


Fig. 1. LNG value chain.

에서 어느 정도의 양을 송출할 지를 결정하는 문제는 LNG 터미널 전체 공정운전 및 운전비용에 큰 영향을 줄 수 있다. 이에 다양한 환경 조건에서 송출 운전 방법이 LNG 터미널 전체 운전에서 어떤 영향을 줄 수 있는지 분석하고 최적 송출 운전 방법을 모색할 필요가 있다.

기존의 LNG 터미널 운전에는 대한 연구는 주로 LNG 초저온 에너지를 이용한 동력사이클에 대한 연구를 중심으로 특정 설비의 운전이나 boil off gas(BOG) 처리 방법에 대해 연구 되어 왔다. LNG 터미널의 초저온 에너지를 이용한 동력사이클에 대한 연구는 새로운 동력사이클의 개발이나 개선에 대한 연구[2-4], 다양한 동력사이클에 대한 에너지 효율 분석[5-7], 동력사이클의 최적화[8] 등에 대해 수행되어 왔다. 또한 LNG 터미널의 운전에서 지중 탱크와 지상탱크의 혼용 운전에서 적합한 운전 방법에 대한 연구[9], 계절별 최적화된 재순환 운전에 대한 연구[10], LNG의 초저온 에너지를 이용하여 BOG 처리량을 향상시키는 공정에 대한 연구[11], 저장탱크별 LNG 발열량 측정에 대한 연구[12]가 수행되어 왔다. 그 외에도 LNG 터미널을 구성하는 특정 설비 중 BOG 컴프레서의 최적 운전에 대한 연구[13,14], 재충족기의 최적 운전에 대한 연구[15] 등이 수행되어 왔다.

본 연구는 기존 문헌에서는 깊게 다루지지 않았지만, 실제 LNG 터미널 운전에서 지속적으로 수행해야 하는 탱크의 송출운전을 대상으로 송출운전 방법에 따라 탱크에서 발생하는 BOG 양을 예측하는 모델을 구성하고 이를 바탕으로 주어진 송출조건에 따라 BOG 발생량을 최소화 할 수 있는 각 탱크 별 최적의 송출 운전 방법을 찾는 것을 목표로 한다. 이 연구방법은 인천 LNG인수기지에 존재하는 100,000 m³ 탱크 10기(TK1~10), 140,000 m³ 탱크 2기(TK11~12), 200,000 m³ 탱크 6기(TK13~18) 총 18대의 저장탱크를 대상으로 사례연구를 수행하여 기존 운전방법과 최적운전 방법의 결과를 비교하여 연구방법의 효과를 검증하였다.

2. 연구 방법

2-1. Boil-off gas 발생량 모델

LNG 터미널은 대부분의 운전 시간 동안 터미널의 하역 배관 온도를 극저온으로 유지시키기 위해 송출 유량 중 일부를 하역라인에 순환시키는 재순환 운전 상태를 유지한다[10]. 따라서 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 재순환 운전 상태에서 저장 탱크는 재순환 유량이 하역라인을 따라 탱크로 유입되고, 탱크 내 열 유입에 의해 발생하는 BOG는 탱크 내 압력을 유지시켜 주기 위해 BOG 컴프레서를 통해 밖으로 뽑아낸다. 송출 운전을 하는 탱크 외에는 송출되는 LNG 흐름이 없는 상태이다. HYSYS Dynamics를 이용해 저장탱크를 모델링 하고 실제와 같은 운전 조건인 -162 °C의 온도와 상압에서 위의 흐름을 구성하고 동적 시뮬레이션을 통해 발생하는 BOG 량을 계산하였다. 탱크로 유입되는 재순환 유량은 문헌 데이터[10]를 이용하

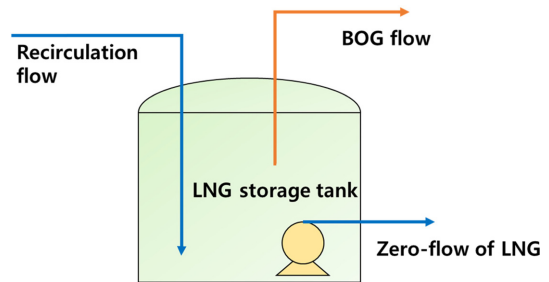


Fig. 2. Scheme of recirculation operation in storage tank.

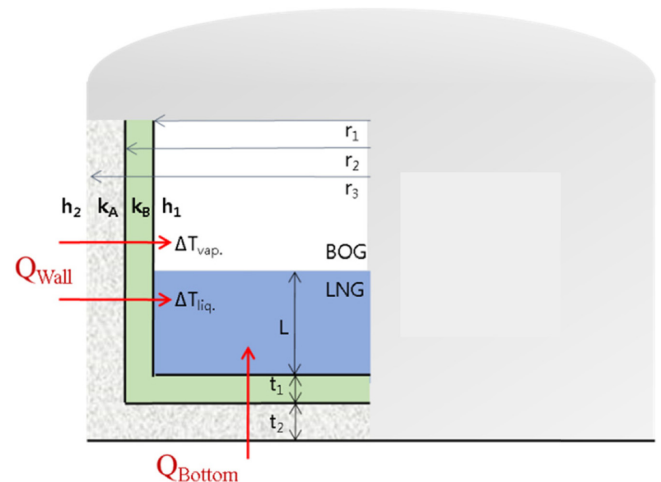


Fig. 3. Scheme of heat transfer through tank.

고, 송출되는 LNG 양은 없다고 가정하였다. 빠져나가는 BOG 양은 탱크 내부압력이 상압으로 유지시킬 수 있도록 유량을 결정하여 실제와 유사한 환경을 구성하였다. 탱크 내에서 액상이 기상으로 전환되고 BOG 흐름을 통해 빠져 나오는 양을 측정하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 탱크 내에서 발생하는 BOG는 주로 탱크 내의 열 유입에 의해 발생하게 되기 때문에 열 손실 모델을 구성하여 탱크 모델에 열 유입값을 반영하였다. 아래의 equation (1), (3)을 이용하여 측면과 바닥면의 overall U를 계산하고 equation (2), (4)를 통해 레벨의 변화에 따라 변화하는 열 손실을 계산할 수 있었다.

$$U_{wall} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1}{k_A} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{k_B} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_1}{r_3} \frac{1}{h_3}} \quad (1)$$

$$Q_{wall} = U_{wall} A_{wall} \left(\Delta T_{liq} \frac{L}{100} + \Delta T_{vap} \left(1 - \frac{L}{100} \right) \right) \quad (2)$$

$$U_{Bottom} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{t_1}{k_A} + \frac{t_2}{k_B} + \frac{1}{h_2}} \quad (3)$$

$$Q_{Bottom} = U_{Bottom} A_{Bottom} \Delta T_{liq} \quad (4)$$

계산한 열 손실을 저장 탱크에 대한 동적 시뮬레이션에 반영하였고, 탱크 모델의 레벨을 10~80%의 범위에서 각각 설정하여 각 레벨에 따라 1시간(60분) 동안 발생하는 BOG량을 계산하였다. 계산된 BOG량을 레벨 데이터에 회귀분석하여 탱크의 특성과 구조 및 레벨에 따라 발생하는 BOG 양을 예측하는 BOR 모델을 구성하였다.

2-2. 최적화

2.1절에서 개발한 BOR (Boil off rate) 모델을 이용하여 최적화 문제를 구성하였다. 목적함수는 식 (5)에 나타나 있듯이 2개의 항으로 구성되어 있다. 첫번째 항은 24시간의 송출 운전과정에서 발생하는 전체 탱크 BOG량의 합으로 식 (6)에 나타나 있는 시간 별로 탱크 레벨에 따른 BOG량을 계산하여 24시간에 대해 합친 값이다. 그리고 두번째 항은 복잡한 송출운전에 대한 벌칙항으로 ϵ 는 작은 양의 값을 갖는다. 조작 변수는 각 탱크에 포함되어 있는 송출펌프의 운전 상태와 운전 시간이다. 각 탱크마다 송출 펌프는 3개씩 고정되어 있고, 각 펌프의 송출 용량은 동일하며, 펌프는 on/off 운전만 가능하기 때문에 각 펌프의 운전 상태는 이진변수가 된다. 펌프의 운전 시간인 $t_{i,j}$ 의 단위는 h로 시간당 펌프의 유량인 F_p 와 곱해서 탱크의 송출량을 계산한다. 또한 각 탱크 송출량의 총합이 요구하는 송출량과 같아야 하는 조건, 탱크의 레벨이 0과 최대값 사이에 존재해야 하는 조건이 추가적으로 만족 되어야 한다. 각 탱크는 on/off만 가능한 펌프를 3대씩 가지고 있다고 가정하였기 때문에 최적화 문제를 MINLP로 구성하여 아래의 equations (5-10)에 나타내었고, 최적화 툴로는 What's Best를 이용하였다.

$$\text{minimize } \sum_i F_{BOG,i} + \epsilon \sum_i \sum_j x_{i,j} \text{ with respect to } x_{i,j}, t_{i,j} \quad (5)$$

Subject to

BOG flow rate:

$$F_{BOG,i} = \sum_{k=1}^{24} BOR_i(L_{i,k}) \quad (6)$$

LNG flow rate:

$$F_{LNG,i} = F_p \sum_j x_{i,j} t_{i,j}, 0 \leq t_{i,j} \leq 24 \quad (7)$$

Total send-out flow rate:

$$F_{send-out} = \sum_i F_{LNG,i} \quad (8)$$

Level constraints:

$$0 \leq L_i \leq L_{i,max} \quad (9)$$

Integer constraints:

$$x_{i,j} = 0 \text{ or } 1, i = 1, \dots, n, j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

추가적으로 $F_{BOG,i}$ 는 저장탱크 i 에서 빠져나가는 BOG 유량을 나타내고, $x_{i,j}$ 는 각 펌프의 binary 변수로 i 탱크의 j 펌프가 가동(1)하는지 비가동(0)되었는지를 나타낸다. BOR_i 는 i 탱크에서 레벨에 따라 BOG 발생량을 계산하는 함수로 2.1절에서 자세히 설명되어 있다. $F_{LNG,i}$ 는 저장탱크에서 빠져나가는 LNG의 유량이고, $F_{send-out}$ 은 전체적으로 요구되는 LNG의 수요량, L_i 는 저장 탱크 i 의 액상 레벨이다. $L_{i,max}$ 는 저장탱크 i 의 최대 레벨이다.

3. 사례 연구

3-1. 적용 대상

2장에서 설명한 송출 운전 최적화 방법의 효과를 검증하기 위해 실제 운전되고 있는 LNG 터미널의 데이터를 이용하여 사례연구를 수행하였다. 현재 인천 LNG 인수기지는 100,000 m³급 10기, 140,000 m³급 2기, 200,000 m³급 6기 총 18개의 저장탱크가 운전 중에 있다[16,17]. 본 연구에서는 실제 인천 LNG 인수기지 탱크의 외벽 및 인슐레이션 데이터를 반영하여 모사 및 최적화에 대한 사례연구 수행하였다. 저장 탱크의 용량별로 저장 방식과 탱크의 크기 및 외벽의 두께가 다르기 때문에 유입되는 열량에 차이가 있다. 단열재의 두께는 3종류의 탱크 모두 동일하다는 가정을 이용하였고, 사용한 데이터는 Table 1과 같다. 열용량, 밀도, 열전도도는 각 물질에 따라 문헌을 통해 구할 수 있었다.

3-2. BOR 모델

위의 저장탱크 데이터를 반영한 탱크 모델을 이용하여 탱크의 레벨을 10~80%까지 변화시키면서 각 레벨에 따라 1시간(60분) 동안 발생하는 BOG량을 계산하여 지수함수로 회귀분석 하였다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 회귀분석을 통해 레벨에 따른 BOG 유량을 예측할 수 있는 BOR 모델을 구성하였다. 지수함수로 모델링 되었기 때문에 레벨이 낮을수록 BOG의 발생량은 레벨 감소량보다 크게 증가하기 때문에 같은 종류의 탱크로 구성된 LNG 터미널에서는 레벨이 높은 탱크를 우선 운전하는 것이 유리함을 예측할 수 있다. 하지만 본 사례연구에서는 3종류의 탱크가 혼용 운전되고 있기 때문에 3종

Table 1. Information of storage tank in Incheon LNG receiving terminal

	TK 1~10(100,000m ³) In-ground [16,18,19]		TK 11~12(140,000m ³) Above-ground [18,19]		TK 13~18(200,000 m ³) Above-ground [17,20]	
	Concrete	Insulation (Perlite Cellurglass Glasswool) [21]	Concrete	Insulation(PU) [21]	Concrete	Insulation(PU) [21]
Thickness (m)	1.1	0.21	2.5	0.21	3.15	0.21
Heat capacity (J/kgK)	1000	1000	1000	1400	1000	1400
Density (kg/m ³)	2300	25	2300	30	2300	30
Thermal conductivity (W/mK)	1.630	0.035	1.630	0.025	1.630	0.025
Height (m)		27.54		43.52		49.12
Radius (m)		68.00		64.00		72.00
h_1 (W/m ² K)		7200		7200		7200
h_2 (W/m ² K)		54		Not convection		Not convection

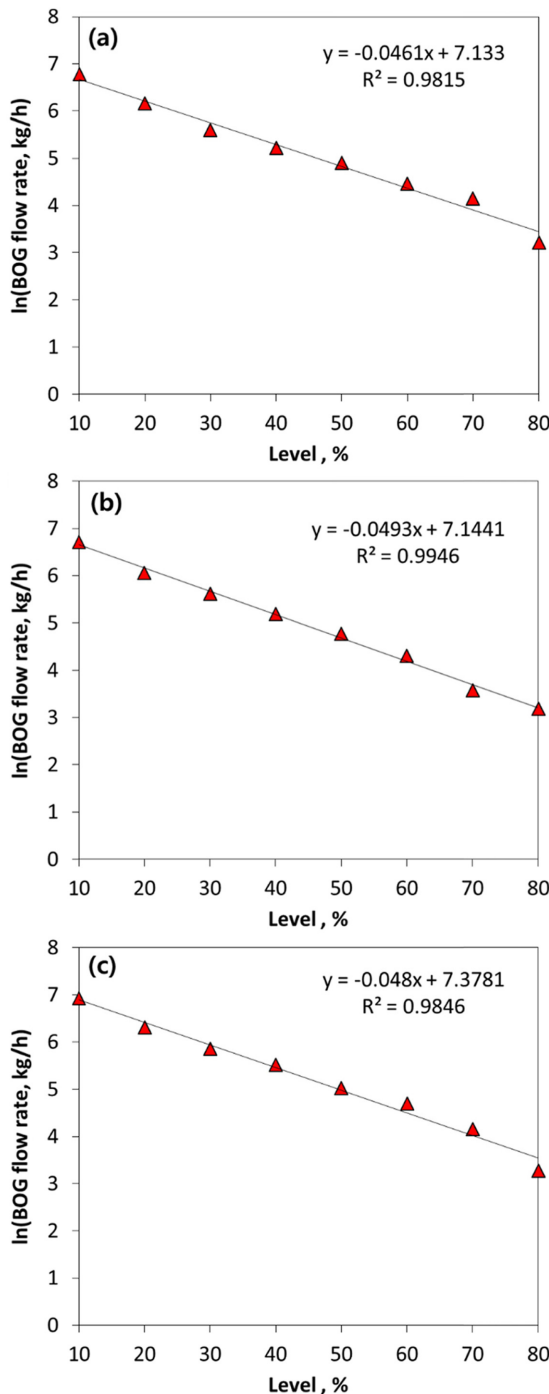


Fig. 4. BOG generation rate of TK1~10(a), TK11~12(b), TK13~18(c) with tank level.

Table 2. Initial condition of minimum send-out scenario

tank #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Initial level (%)	80	70	60	70	80	60	80	70	60	70	80	70	80	70	60	70	80	60

Table 3. Optimal operation of minimum send-out scenario

tank #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pump operation	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	on (2.59)	off	on (24)	off	off	off	on (24)	off
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off

류의 탱크가 모두 같은 레벨을 갖고 있을 때 송출할 탱크를 결정해야 하는 문제나 BOG가 적게 발생하는 종류의 탱크가 낮은 레벨에 있고, BOG가 많이 발생하는 종류의 탱크가 높은 레벨에 있을 때 송출할 탱크를 결정하는 문제의 경우 최적화를 통해 운전 방법을 결정해야 한다.

기존의 Hashemi BOR 모델[22]을 참고하면 BOG 발생량은 액상 상부의 온도와 메탄의 포화 온도(약-160도) 차이의 4/3승에 비례하는데 레벨이 높을수록 액상의 양이 많아 열로 인한 온도상승이 작기 때문에 BOG 발생량도 작아질 것으로 예상된다. 따라서 송출 최적화를 위해 구한 BOR 모델의 레벨과 BOG 발생량의 경향도 일치한다.

3-3. 결과 및 고찰

LNG 최소송출 시나리오와 최대송출 시나리오를 가정하여 각 시나리오에서 송출량이 주어질 때 최적 송출 운전 방법을 나타내었다. 제한한 최적 운전 방법은 가정한 기존 운전 방법과 비교하여 개선효과를 나타내었다.

3-3-1. 최소 송출 시나리오

최소 송출 시나리오를 가정하기 위해 송출량이 가장 적은 10월을 선정하여 대부분의 탱크가 가득 채워져 있고, 국내 10월 LNG 소비량 48000 m³/day([23])의 1/3을 송출하는 조건에서의 최적 송출 운전 방법을 구하였다. 가정한 초기 레벨 조건은 Table 2에 나타내었다.

송출 운전 최적화를 통해 구한 각 탱크의 송출 운전방법은 Table 3에 나타내었고 최적화된 운전방법과의 비교를 위해 Table 4와 같이 기존의 운전방법을 가정하여 나타내었다. 기존의 운전방법은 Tank 순번에 따라 차례로 펌프를 가동시키는 방법이다. 펌프 가동의 괄호 안의 값은 운전한 시간이다. 반면에 최적화된 운전 방법은 200,000 m³ 규모의 탱크 중 가장 레벨이 높은 탱크의 펌프만 하나씩 운전하였다. 이는 앞서 구성한 BOR 회귀분석 모델이 레벨과 BOG 유량사이의 지수함수 관계를 갖고 있기 때문에 레벨의 감소가 같더라도 레벨이 높은 구간에서 BOG 증가량이 레벨이 낮은 구간에서의 BOG 증가량 보다 낮은 값을 갖는다. 따라서 레벨이 높은 탱크부터 펌프를 가동하는 것이 BOG 발생량을 줄이는 전략이 될 수 있기 때문에 앞서 구한 최적 운전 결과를 얻게 된 것이다.

기존 운전방법과 최적화된 운전방법을 적용하여 송출운전을 수행하였을 때 BOG 유량을 비교하여 Table 5에 나타내었다. 결과적으로 최적운전을 통해 약 0.3%의 절감 효과가 나타남을 확인할 수 있다.

3-3-2. 최대송출 시나리오

송출량이 가장 많은 12월을 가정하여 다양하게 레벨이 분포 되어 있고 국내 12월 LNG 소비량 240000 m³/day([23])의 1/3을 송출하는

Table 4. Conventional operation of minimum send-out scenario (assumed)

tank #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pump operation	on (24)	on (24)	on (2.59)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off

Table 5. Comparison of BOG generation rate of minimum send-out scenario

	Conventional operation (assumed)	Optimal operation
BOG generation rate	22354.6 kg/d	22287.6 kg/d

Table 6. Initial condition of maximum send-out scenario

tank #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Initial level (%)	20	30	40	50	60	70	80	20	20	80	30	70	30	40	50	60	70	80

Table 7. Optimal operation of maximum send-out scenario

tank #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pump operation	off	off	off	off	off	off	on (24)	off	off	on (24)	off	on (24)	off	off	off	off	on (24)	on (24)
	off	off	off	off	off	off	on (24)	off	off	on (13)	off	on (24)	off	off	off	off	on (24)	on (24)
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	on (24)	on (24)

Table 8. Conventional operation of maximum send-out scenario (assumed)

tank #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pump operation	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (24)	on (13)	off	off	off	off	off	off	off
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off

조건에서의 최적 송출 운전 방법을 구하였다. 가정된 초기 레벨 조건은 Table 6과 같다.

송출 운전 최적화를 통해 구한 각 탱크의 송출 운전방법은 Table 7에 나타내었고 최적화된 운전방법과의 비교를 위해 Table 8와 같이 기존의 운전방법을 가정하여 나타내었다. 기존의 운전방법은 최소 송출 운전 시나리오와 마찬가지로 탱크의 순번에 따라 차례로 펌프를 가동시키는 방법이다. 이에 반해 최적화된 송출 운전 방법은 앞서 최소송출 시나리오에서 설명한 대로 레벨이 높은 탱크의 펌프를 먼저 가동시킨다. 하지만 최대송출 시나리오에서는 송출해야 할 양이 많기 때문에 최적화 결과에서 좀 더 다양한 운전 전략이 나타나는데, 탱크의 종류가 100,000, 140,000, 200,000m³ 급으로 3종류가 있기 때문에 레벨이 변화할 때 BOG 발생량이 가장 적은 탱크의 펌프를 우선 송출해야 한다. 최적화 결과를 통해 200,000m³의 저장탱크가 송출운전에도 가장 BOG 증가량이 적으며, 140,000m³, 100,000m³의 순으로 송출량 대비 BOG 증가량이 적다. 이는 용량이 클수록 저장 용량 대비 열 유입량이 적어 BOG 발생량이 작고, 용량이 크기 때문에 송출 운전 시 레벨 변화에도 덜 민감하기 때문이다. 따라서 용량이 크고, 레벨이 높은 탱크부터 송출 펌프를 가동하는 것이 최적의 송출 운전 전략이라 할 수 있다.

위의 운전방법을 적용하여 송출운전을 수행하였을 때 BOG 발생

량을 비교하여 Table 9에 나타내었고, 결과적으로 최적운전을 통해 약 9%의 절감 효과가 나타난다.

4. 결 론

본 연구는 LNG 터미널에서 최적 송출 운전 방법을 제시하기 위해 탱크 구조와 크기에 대해 열 유입량을 계산하고, 상용 시뮬레이션 툴을 이용하여 레벨에 따라 동적 시뮬레이션을 수행하여 BOG 발생량을 구하고 BOR 모델을 구성하였다. 이를 실제 운영중인 LNG 터미널에 적용하였고, 제시된 최적 송출운전 방법은 가정된 기존의 운전방법과 비교하였을 때 BOG 발생량을 최대 9%까지 감소시킬 수 있었다. 송출 운전방법의 최적화 결과는 용량이 크고, 레벨이 높은 탱크부터 최대 송출을 시키는 경향을 나타내기 때문에 용량이 크고, 레벨이 높은 탱크부터 최대송출을 시키는 운전방법이 적절한 송출 운전임을 얻을 수 있다. 이는 기존 LNG 터미널 관련 연구에서 제시하지 않았던 탱크 특성과 레벨에 따른 최적 송출 운전 방법을 제시함으로써 LNG 저장 탱크의 송출 전략을 구성하는데 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 또한 여기서는 송출 시나리오를 가정하여 구성하였지만 실제 운전 조건을 적용함으로써 좀 더 현실적인 운전 방법 결과를 얻을 수 있을 것이다.

감 사

본 연구는 국토해양부 LNG 플랜트 사업단 및 2014년도 2단계 두뇌한국21사업과 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지

Table 9. Comparison of BOG generation rate of maximum send-out scenario

	Conventional operation (assumed)	Optimal operation
BOG generation rate	94366.77 kg/d	85231.39 kg/d

기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No, 20132010500050).

References

1. Jung, M.-J., Cho, J. H., Ryu, W., LNG terminal design feedback from operator's practical improvements. Conference LNG terminal design feedback from operator's practical improvements.
2. Deng, S., Jin, H., Cai, R. and Lin, R., "Novel Cogeneration Power System with Liquefied Natural Gas (LNG) Cryogenic Exergy Utilization," *Energy*, **29**(4), 497-512(2004).
3. Kim, T. and Ro, S., "Power Augmentation of Combined Cycle Power Plants Using Cold Energy of Liquefied Natural Gas," *Energy*, **25**(9), 841-856(2000).
4. Miyazaki, T., Kang, Y., Akisawa, A., Kashiwagi, T., "A Combined Power Cycle Using Refuse Incineration and LNG Cold Energy," *Energy*, **25**(7), 639-655(2000).
5. Liu, H. and You, L., "Characteristics and Applications of the Cold Heat Exergy of Liquefied Natural Gas," *Energy Conv. Manag.*, **40**(14), 1515-1525(1999).
6. Qiang, W., Yanzhong, L. and Jiang, W., "Analysis of Power Cycle Based on Cold Energy of Liquefied Natural Gas and Low-grade Heat Source," *Appl. Therm. Eng.*, **24**(4), 539-548(2004).
7. Qiang, W., Yanzhong, L., Xi, C., "Exergy Analysis of Liquefied Natural Gas Cold Energy Recovering Cycles," *Int. J. Energy Res.*, **29**(1), 65-78(2005).
8. Szargut, J., Szczygiel, I., "Utilization of the Cryogenic Exergy of Liquid Natural Gas (LNG) for the Production of Electricity," *Energy*, **34**(7), 827-837(2009).
9. Lee, C.-J., Lim, Y., Park, C., Lee, S. and Han, C., Optimal Unloading Procedure for a Mixed Operation of Above-ground and In-ground LNG Storage Tank using Dynamic Simulation. Conference Optimal Unloading Procedure for a Mixed Operation of Above-ground and In-ground LNG Storage Tank using Dynamic Simulation. Elsevier, p. 437-44.
10. Park, C., Lee, C.-J., Lim, Y., Lee, S. and Han, C., "Optimization of Recirculation Operating in Liquefied Natural Gas Receiving Terminal," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **41**(4), 482-91(2010).
11. Park, C., Song, K., Lee, S., Lim, Y. and Han, C., "Retrofit Design of a Boil-off Gas Handling Process in Liquefied Natural Gas Receiving Terminals," *Energy*, **44**(1), 69-78(2012).
12. Ha, Y. and Lee, S., "A Study on the Method for Measuring the Live Calorific Value of LNG in Storage Tank Using LNG Densitometer," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(1), 35-40(2011).
13. Shin, M. W., Shin, D., Choi, S. H. and Yoon, E. S., "Optimal Operation of the Boil-off Gas Compression Process Using a Boil-off Rate Model for LNG Storage Tanks," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**(1), 7-12(2008).
14. Shin, M. W., Shin, D., Choi, S. H., Yoon, E. S. and Han, C., "Optimization of the Operation of Boil-off Gas Compressors at a Liquefied Natural Gas Gasification Plant," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**(20), 6540-6545(2007).
15. Li, Y., Chen, X., Chein, M.-H., "Flexible and Cost-effective Optimization of BOG (boil-off gas) Recondensation Process at LNG Receiving Terminals," *Chem. Eng. Res. Des.*, **90**(10), 1500-1555(2012).
16. Kwon, Y.-H., "Construction Site of Daewoo E&C-Incheon LNG Receiving Terminal," *Journal of the Korea Concrete Institute*, **11**(5), 85-89(1999).
17. Son, Y., Ha, J., Um, T., Lee, J., Baek, S. and Park, C., "The Method of Thermal Crack Control About the LNG Tank Wall in Water," *Spring Conference of the Korea Concrete Institute*, 637-640(2008).
18. Kim, T., Ha, J., Ryu, J., Lee, J. and Kwon, Y., "Thermal Crack Control of LNG Tank Roof," *Autumn Conference of the Korea Concrete Institute*, 421-424(2002).
19. Yang, I. H. and Kim, J. K., "Construction of Above-Ground Storage Tanks in Incheon LNG Receiving Terminal," *Journal of the Korea Concrete Institute*, **13**(4), 89-93(2001).
20. Lee, K., Lee, S. and Kim, Y. K., "Establishment of Realtime Monitoring System for the Analysis of Soil Behavior at Incheon LNG Receiving Terminal," *Autumn Conference of the Korea Institute of Gas*, 71-77(2004).
21. Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M. and Rudolphi, A., Insulating materials: principles, materials, applications: Walter de Gruyter, 2012.
22. Hashemi, H. and Wesson, H., "Cut LNG Storage Costs," *Hydrocarb. Process.*, **50**(8), 117-120(1971).
23. Park, S., Park, C., Lee, U., Jung, I., Na, J., Kshetrimayum, K. and Han, C., "Comparative Study of Process Integration and Retrofit Design of Liquefied Natural gas (LNG) Regasification Process Based on Exergy Analyses: A Case Study of LNG Regasification Process in South Korea," *Ind. Eng. Chem. Res.*, accepted(2014).