

DME FPSO 저장탱크의 액충전량에 따른 온도 및 압력변화에 대한 해석 연구

윤 상 국†

(원고접수일 : 2012년 8월 16일, 원고수정일 : 2012년 10월 9일, 심사완료일 : 2012년 10월 31일)

Analytical Study on the Temperature and Pressure Changes in DME FPSO Storage Tank with Liquid Filling level

Sangkook Yun†

요 약 : DME는 천연가스로부터 합성할 수 있는 대량의 미래 에너지원으로 한국가스공사는 이의 국내 공급을 위해 해외 자원 확보와 함께 해양에서 생산과 저장을 할 수 있는 FPSO의 건조를 추진하고 있다. 본 논문은 저장탱크 내부에서의 DME의 거동을 분석하여 제시함으로써 관련 기술자의 설계나 DME운영에 도움이 되고자 하였다. DME 증발량과 압력변화의 해석결과는 DME탱크 내 액체의 저장량이 증가할수록 증가하였다. 만선인 98%의 충전에서는 저장압력이 급격히 상승하게 되므로 하루 이상 장기간 저장하여야 할 경우는 만선저장을 피하는 것이 바람직하다.

주제어 : 디메틸에테르, 부유식 생산저장선박, 증발, 액충전량, 온도분포, 압력변화

Abstract: As DME (Dimethyl ether) is the one of the future possible massive energy sources synthesized from natural gas, KOGAS has been doing to obtain overseas resources to meet the domestic needs. and tried to build new DME FPSO ship. This paper presents that it can help for the DME storage tank designers and storage management engineers doing proper work by understood the evaporation phenomena and pressure change of DME by thermal intake in storage tank. The experimental result shows that the evaporation rate and pressure are increased with higher liquid filling level. The proper DME liquid filling level in tank is obtained as lower than full 98% volume of tank in case of storing longer than a day, because the pressure is increased rapidly with full 98% filled level of storage tank.

Key words: DME (Dimethyl ether), FPSO, Evaporation, Liquid filling quantity, Temperature distribution, Pressure change

1. 서 론

21세기는 석유자원 보유국의 불안전성과 향후 불예측성에 따른 유가의 상승, 화석에너지 소비의 증가에 의한 대기 및 환경오염 심화, 지구온난화 가스 배출의 증가 등으로 청정에너지원의 개발 및 사용 확대가 모든 국가들에 필수적으로 요구되어지고 있다. 우리나라도 국민생활의 안정과 경제성장에 필요불가결한 에너지 수요를 충족시키면서

환경에 긍정적인 새로운 에너지원의 도출 및 제조 기술 확보는 우리나라 미래 성장 동력과 경쟁력 확보를 위해 매우 중요한 시점에 있다.

DME는 액화점 등 물성이 액화석유가스(LPG)와 유사하여 기존의 LPG 유통 인프라 구조를 이용하여 저렴한 비용으로 수송용, 가정용 및 상업용으로 보급이 가능한 연료이다. 이는 천연가스(NG)와 온실가스인 CO₂가 반응하여 생산 제조되고, 연소과

† 교신저자(한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, E-mail:skyun@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4363)

정에서도 다른 화석연료에 비해 CO₂ 배출이 적은 청정연료이면서, 특히 액체상태로 보관과 유통이 용이한 장점을 보유하고 있는 새로운 다목적 에너지원이라고 판단된다. 이에 따라 현재 세계 각국에서는 화석연료가 야기하는 제반 환경문제의 해결과 천연가스 변환에 의한 액체상태 이용이라는 효과를 얻을 수 있는 차세대 연료로서 이의 연료화 사업을 위하여 활발한 기술개발 및 정책들이 추진되고 있다. 우리나라에서도 정부와 한국가스공사가 DME 생산플랜트의 독자 개발을 추진하였고, 단계적 DME 저장설비와 공급배관 등 인프라 구축, 해외 생산플랜트 건설 추진, 발전용, 디젤엔진 연료 등으로 보급을 확대한다는 정책을 적극 추진하고 있다. 그 추진계획을 보면, 2011년까지 시범사업으로 DME를 20% 혼합한 LPG와 DME의 혼합연료를 보급하였고, 2013년부터 상용화가 시작될 예정이며, 수송용 LPG에 대해서는 5%를 혼합해 LPG 자동차에 사용할 계획에 있다. 이에 따라 DME 혼합시장 규모는 가정용은 2013년 25만4000톤 규모 그리고 수송용의 경우 2013년 26만5000톤으로 형성돼 가정용과 수송용을 포함한 DME시장 규모는 2013년 이후 약 52만톤 규모에 이를 전망이다[1,2].

이에 따라 최근에는 DME를 선박에서 천연가스로부터 합성, 생산하는 해양에 위치한 FPSO (Floating, production, storage and offloading)의 건조를 추진하고 있다. 이 FPSO는 천연가스를 생산, DME를 제조, 저장 그리고 DME를 운송선박에 공급하는 기능을 갖는다, 그러나, DME FPSO는 세계 최초의 플랜트선박으로서 해양환경에서 문제없이 운용하기 위한 DME 생산공정이 위치하는 Topside 설비와 DME가 저장되는 Hull part에 대한 DME에의 거동, 영향 기술의 파악 및 이해가 부족한 실정에 있다. 향후 DME FPSO의 안전한 제조 및 운영 기술의 확보를 위해서는 DME 화물창 내 DME의 물리적 동적 거동에 대한 파악이 필요한 것이다.

DME의 경우 단열 처리된 상압 독립형 탱크에 저장되지만 외부의 열유입으로 인하여 필연적으로 유체의 증발 현상이 발생하고, 그에 따라 대형 저장용기 내의 압력 증가가 수반되어 물리적 변화가 따르게 된다. 즉, 액체-기체 계면에서의 액의 증발

로 기체의 압력이 증가하게 되면 액체의 상부와 하부의 온도, 밀도의 불평형(Unequilibrium)을 초래하게 되며, 이에 따른 성층화(Stratification)와 Roll-over 등의 교란이 발생할 수도 있게 되는 것이다 [3,4].

그러므로 본 연구는 DME FPSO의 저장탱크 내부의 증발 및 압력증가 상황을 분석, 제시함으로써, DME FPSO Cargo 저장 탱크의 관련 기술자들이 그 영향을 예측하고 적정 압력 상승 방법을 강구하는 등 설계 및 현장 운영에 도움을 주고자 하는 데 목적이 있다.

2. DME 온도분포 모델링

2.1 기액포화용액 기화모델

탱크 내부에 액체와 기체가 존재할 때 기액 계면에서 증발하는 율과 액화하는 율이 일정할 때 이를 포화용액의 평형상태라 하며, 탱크 내부에 있는 기체와 액체의 온도($T_o=T_i$)와 압력이 동일한 $P_{iL}=P_{iV}$ 상태가 된다. **Figure 1**은 기액 포화상태를 보여주며 이 상태에서는 외부와 평형상태를 유지하고 있으므로 기액 계면에서 액체의 기화율과 기체의 액화율 즉 $m_e=m_c$ 가 동일하게 된다.

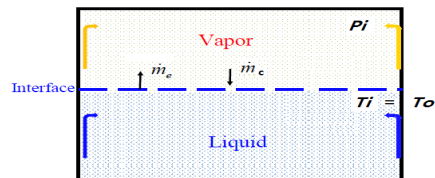


Figure 1: Liquid-vapor equilibrium of saturated condition

DME의 경우 대기 온도 29℃에서 기액이 공존하는 포화압력은 661KPa이 된다. 즉, 대기온도 29℃, 압력 6.61bar에서 DME는 액체와 기체 상태가 공존하게 된다. 그러나 DME FPSO와 같이 DME를 저장하고 있는 탱크의 내부 압력이 대기압 상태이면 액체로 존재하는 DME 온도는 -25℃가 된다. 그러므로 저장동안 외기 온도차에 의하여 지속적인 열유입이 발생하게 된다. 기액 계면에서는 **Figure 2**와 같이 지속적인 증발과 액화가 발생하나 액화

보다 증발이 훨씬 크게 된다. 또한 열전달은 주로 벽체를 통한 전도 열전달이 발생하게 되며, 기체공간보다 액체측에 전열량이 크게 된다. 액체측에 유입된 열은 기화잠열에 이용되므로 온도가 일정하게 되며, 기체측은 온도가 상승하게 된다. 그러므로 계면에서는 액체 자체의 증발뿐만 아니라, 접촉하는 기체의 온도가 액체보다 높아서 기체로부터 액체로 열이 유입되게 된다.

압력은 증기측 기체의 압력이 지속적으로 증가하면서 액체의 압력도 상승하게 된다. 그러나 대형 탱크의 경우 액체의 압력은 액체의 하중인 Hydraulic 압력이 용기 내부 기체의 압력에 더하여진다. 본 해석은 벽체의 열유입이 시간에 따라 일정한 정상상태로 해석하였다.

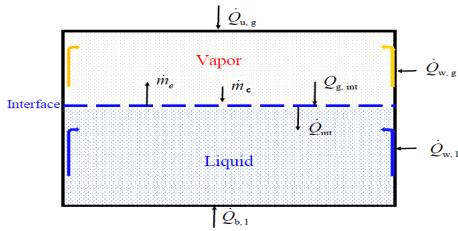


Figure 2: Thermal equilibrium in DME storage tank

2.2 액수위 98%의 온도 및 압력분포

DME FPSO 액높이가 만선인 98% 충전되어 있을 때 열유입에 의한 액의 증발유동을 유한체적 해석 프로그램인 Ansys CFD를 사용하여 해석을 수행하였다. 열유동 해석은 연속방정식, 운동방정식 그리고 에너지방정식이 적용되었다[5]. 본 해석에 적용한 경계조건은 다음 Table 1과 같다. DME FPSO 1개 저장탱크의 규격은 폭49m x 높이 27.5m x 길이 24m이며, 탱크 1개의 용량은 27,800m³로 화물창 1개의 하루 설계 증발량인 0.1%를 기준하여 전체 벽체면적을 통한 열유입량을 66kW으로면적당 11W/m²을 적용하였다. 또한 DME FPSO의 벽체구조(내벽 탄소강 12mm, 우레탄 단열이 120mm, 0.7mm 철 거푸집, Hull)를 기준으로 열전달 해석을 수행하여 벽체온도를 -19℃로 적용하였다.

Figure 3은 탱크 내 98% 액충전 상태의 모델이며,

Table 1: Boundary conditions for CFD analysis

Item	Value
Heat intake rate	11W/m ²
Initial DME temperature(vap/liq)	-25℃
Wall temperature	-19℃

Figure 4는 98% 충전된 탱크 내부 DME액의 온도 분포로 외부 열유입으로 액이 탱크 벽체로부터 중앙부로 순환되는 큰 대류 현상이 발생하며 기체공간은 매우 적어 일정한 온도와 압력이 형성된다. 액체의 온도분포를 보면 포화온도인 248K가 유지되나 대류가 발생하는 중앙부와 벽체의 온도가 250K가 되었다. Figure 5는 용액의 속도장 및 대류 상태를 나타낸다. 기액계면에서 기체 속도장을 보면 열유입과 대류로 인하여 지속적인 증발이 발생하고 계면의 측면에서 증발량이 매우 크게 발생됨을 알 수 있다.

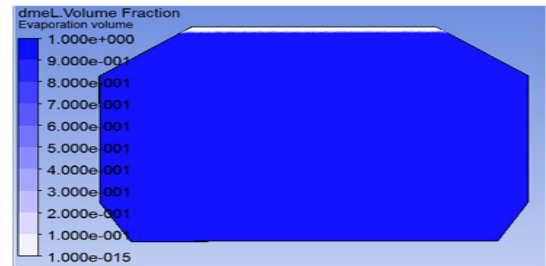


Figure 3: Modeling of 98% DME fill in tank

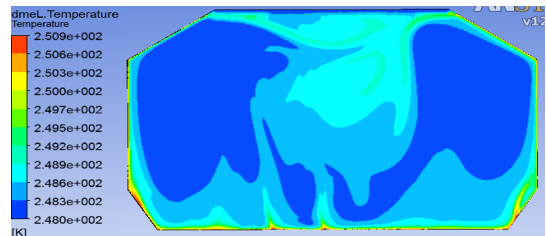


Figure 4: Temperature distribution and convection of 98% DME liquid

Figure 6은 탱크 내부의 압력분포로 계면에서는 액체와 기체의 압력이 동일하게 형성되나 탱크 하부의 압력은 DME 밀도와 중력으로 인한 Hydraulic 압력이 적용되어 압력이 계면보다 크게 된다.

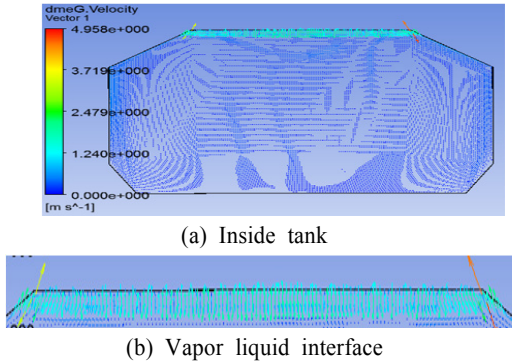


Figure 5: Evaporation velocity at the interface of 98% DME Liquid

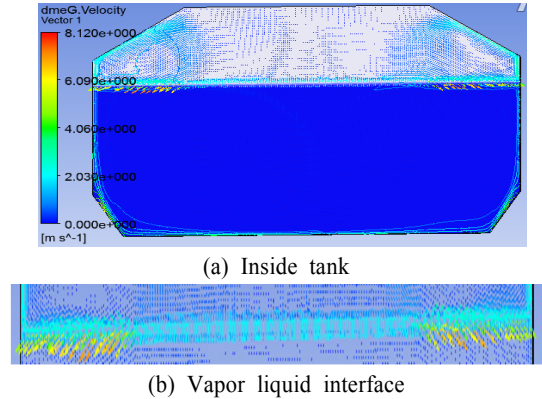


Figure 9: Evaporation velocity at the interface of 70% DME Liquid

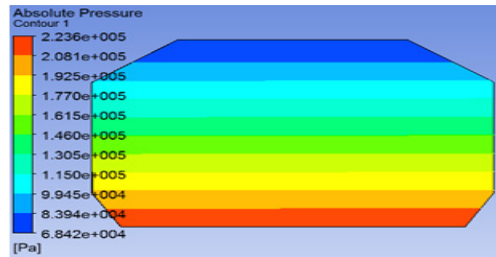


Figure 6: Pressure distribution of 98% DME fill

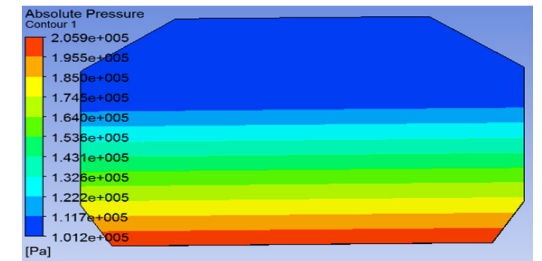


Figure 9: Pressure distribution of 98% Liquid fill

2.3 액수위 70%의 온도 및 압력분포

DME 액 높이가 70% 충전되어 있을 때 열유입에 의한 액의 증발 그리고 이에 따른 압력의 변화

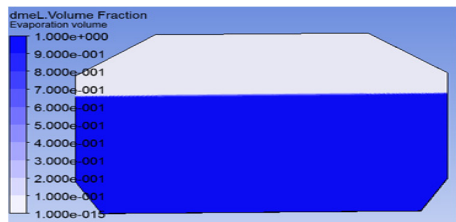


Figure 7: Modeling of 70% DME fill in tank

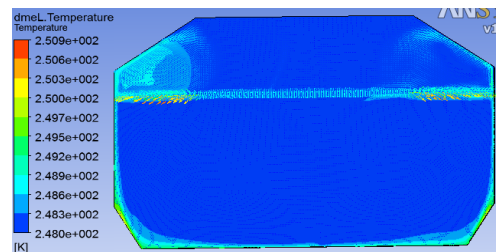


Figure 8: Temperature distribution and convection of 70% DME liquid

이다. Figure 7은 탱크 내 70% 액충전 모델이며, Figure 8은 탱크 내 액의 온도 분포 및 대류 상태를 나타낸다. 외부 열유입으로 탱크 내 액체부는 벽체로부터 중앙부로 용액이 순환되는 대류 현상이 발생하고, 기체부의 순환은 중앙부에서 기화된 DME가 벽체에서 온도가 상승하여 하류로 흐르는 순환이 발생하고 있다. 액체의 온도는 248K를 유지하고 있으나 대류가 활발히 발생하는 기체부는 250K까지 상승하고 있다. 계면에서의 흐름을 보면 탱크 중앙부에서는 응축보다 증발이 활발하게 발생하게 되며, 측면 벽체부에서는 기체의 하류 대류에 의한 증발속도장보다 응축속도장이 크게 발생하고 있다.

Figure 10은 탱크 내부의 압력분포로 탱크 하부는 DME 액체 하중으로 Hydraulic 압력이 크게 된다. 계면에서는 액체와 기체의 압력이 동일하게 형성되며 기체의 압력은 외부 열유입에 의한 대류에도 불구하고 동일한 압력을 나타내고 있다.

2.4 액수위 10%의 온도 및 압력분포

DME 액 높이가 10% 충전되어 있을 때 열유입에 의한 액의 증발 그리고 이에 따른 압력의 변화이다. Figure 11은 탱크 내 10% 액충전 모델이며, Figure 12와 13은 탱크 내 액의 온도 분포, 대류 및 속도장을 나타낸다. 탱크 내 상대적으로 매우 적은 액체는 바닥으로 부터 전도 열전달에 의하여 용액이 활발하게 증발하게 되며, 큰 기체 공간은 하부의 증발과 측면의 열유입으로 인하여 온도가 전반적으로 상승하면서 대류가 형성되고 온도 상승영역은 주로 기액 계면과 벽체에 형성되고 있다. 기액 계면의 측면부는 하강하는 기체가 접촉하여 중앙부의 증발을 촉진하게 된다.

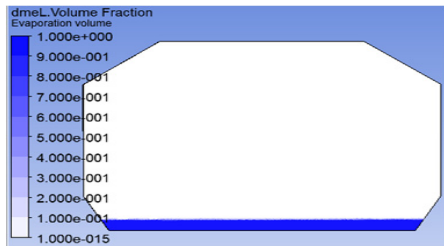


Figure 11: Modeling of 10% DME fill in tank

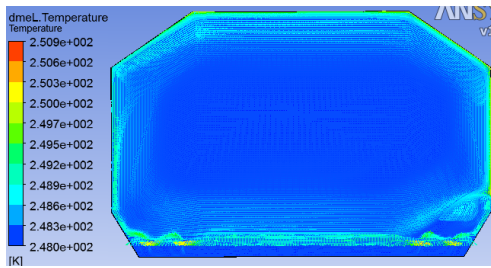


Figure 12: Temperature distribution and convection of 10% DME liquid

Figure 14는 기액 계면에서 DME의 증발 속도로 10% 충전시는 바닥부를 통한 전도 열전달로 중앙부에서 증발이 발생한다. 중앙부의 증발은 층류(Laminar) 형태의 증발층이 형성된다. Figure 14는 탱크 내부의 압력분포로 탱크 대부분을 차지하는 기체 층의 압력은 정상상태에서 동일한 압력을 나타내고 있다. 적은 양의 하부 DME는 액높이가 낮아 계면의 압력과 거의 동일하게 형성된다.

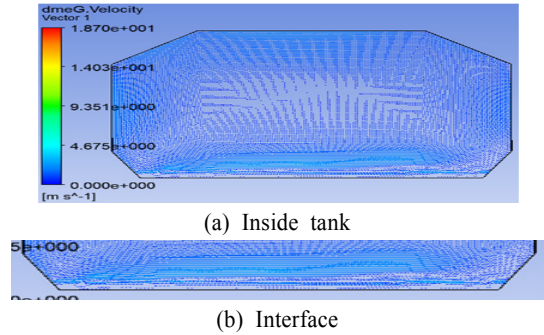


Figure 13: Evaporation velocity at the interface of 10% DME Liquid filled

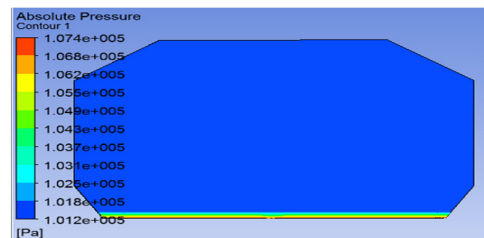


Figure 14: Pressure distribution of 10% DME fill

3. 탱크내부 기체 압력변화

3.1 액수위 98%의 기체압력

Figure 15는 정상상태 열유입으로 DME가 증발할 때 시간에 따른 기체공간의 압력 변화로 DME 증발량은 평균 증발량인 하루 0.1% 기화되는 것을 기준하였다.

액이 98% 충전된 탱크내 기체 공간의 압력 변화는 초기 101.3kPa에서 24시간에 1,350kPa까지 크게 상승하게 되는 데, 이는 증발량에 비하여 기체의 공간이 적은 데 기인한다

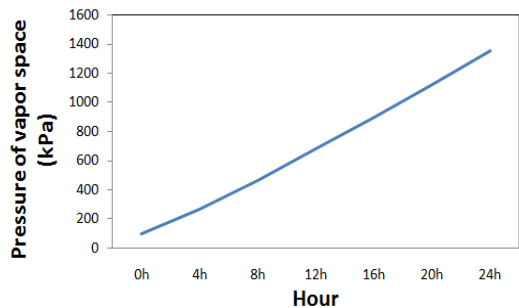


Figure 15: Pressure change of vapor space in 98% liquid filled

3.2 액수위 70%의 기체압력

Figure 16은 액이 70% 충전된 경우 DME 증발에 따른 기체 공간의 압력 변화로 기체 공간의 압력은 초기 101.3kPa에서 24시간 후에 170kPa로 상승하게 된다. 이는 98% 충전시보다 압력이 크게 낮은 값이며 98%에 비하여 기체의 공간이 증가한 데 기인한 것이다.

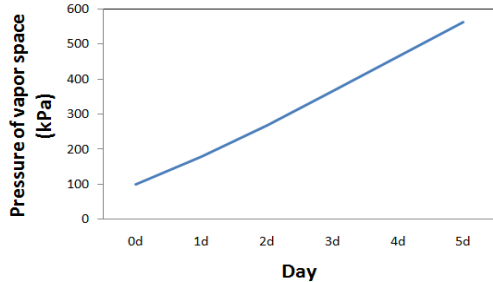


Figure 16: Pressure change of vapor space in 70% liquid filled

3.3 액수위 10%의 기체압력

Figure 17은 액이 10% 충전된 경우 DME 증발에 따른 Vapor공간의 압력 변화를 나타낸다. 기체 공간의 압력은 초기 101.3kPa에서 24시간 후에 105kPa로 상승하여 5일 후에도 124kPa에 불과하게 된다. 이는 증발하는 액체량에 비하여 기체의 공간이 매우 크기 때문에 압력의 증가는 매우 미미하게 된다.

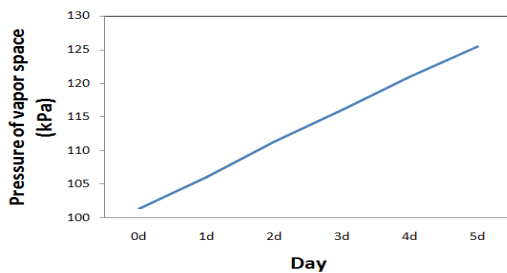


Figure 17: Pressure change of vapor space in 10% liquid filled

4. 결 론

본 연구를 통하여 해상의 FPSO 저장탱크의 열설계에 있어 기본이 되는 DME저장 중 유체 거동을 파악하고자 열유입으로 인한 증발현상 및 탱크 내 압력변화를 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) DME FPSO 저장탱크 내부의 DME는 액의 충전량이 만선인 98% 충전때는 내부 액체의 대류현상이 측면에서 중앙으로 크게 발생하고 탱크 내부의 압력 변화도 급격히 상승하게 되는 반면, 70%일 때는 압력의 상승 속도가 느리므로 DME 생산 후 장기간의 저장이 요구될 때는 만선 저장을 피하는 것이 바람직하다.

(2) 액의 충전이 10%정도 적게 되면 저장탱크 내부 기체 온도의 상승, 그리고 벽체면 온도의 상승 등으로 액체의 재충전 시 급격한 증기의 발생을 초래하게 되므로 10% 이하의 저수위 유지는 피하는 것이 운영에 바람직하게 된다.

본 연구에서 DME FPSO선박의 유체거동을 해석적으로 밝혀 향후 저온 유체 생산, 저장탱크의 열설계에 있어 중요 설계기준을 제공한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Y.-G. Mo and W.-J. Cho et al., "The study of KOGAS DME process in small and medium sized gas field containing CO₂", Journal of the Korean Institute of Gas, vol. 14, no. 4, pp. 51-55, 2010 (in Korean).
- [2] Y.-G. Mo, W.-J. Cho et al., "Development of direct synthesis process", Journal of the Korean Institute of Gas, vol. 14, no. 4, pp. 41-45, 2010 (in Korean).
- [3] S.-O. Song, J.-H. Lee et al., "A study on the Three-Dimensional steady state temperature distributions and BOR calculation program development for the membrane type LNG carrier", Journal of Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 5, pp. 637-645, 2009 (in Korean).
- [4] Y.-M. Kim, S.-C. Ko et al., "A study on the thermal design of the cryogenic LNG carrier", Journal of Korean Society of Marine Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 227-236, 1993 (in Korean).
- [5] Taesung Software and Engineering, Inc., ANSYS CFX Training (12.0), pp. 131. 2009.