

DME FPSO선박의 탱크해석 및 Rolling 유동에 따른 증발 실험연구

윤상국[†] · 조원준¹ · 백영순²

(원고접수일 : 2012년 8월 10일, 원고수정일 : 2012년 9월 20일, 심사완료일 : 2012년 11월 2일)

Analysis for DME FPSO Storage Tank and Experimental Study on the DME Evaporation Rate by Rolling Motion of Ship

Sangkook Yun[†] · Wonjun Cho¹ · Youngsoon Baek²

요약 : DME는 천연가스로부터 합성할 수 있는 대량의 에너지원이 된다. 한국가스공사는 DME 상업규모의 생산플랜트를 개발하고 이의 국내 공급을 위해 해외 자원 확보를 추진하고 있다. 본 논문은 응력과 변형 해석을 통하여 DME저장탱크의 설계기준을 제공하였고, DME FPSO저장탱크의 증발현상을 파악하기 위하여 증발을 발생시키는 원인인 열유입과 선박의 유동에 따른 증발량 실험을 수행하였다. 실험결과, 롤링의 각도가 커지고 액체 충전량이 많을수록 증발량이 증가하였다. 롤링각도가 15도 일 때의 증발량은 정지상태의 열유입 만에 의한 증발량 보다 약 20%가 증가하였다.

주제어 : 디메틸에테르, 부유생산저장선박, 저온액체, 롤링, 증발

Abstract: DME(Dimethyl ether) is the one of the massive energy sources synthesized from natural gas. KOGAS has already developed the commercial-scale production plant of DME and has been doing to obtain overseas resources to meet the domestic needs. This paper presents the DME storage tank design criteria by stress and strain analysis, and the experimental study on the evaporation phenomena of DME by thermal intake and physical rolling movement of DME FPSO or cargo vessel, because the various moving motions along with heat intake cause the evaporation of low temperature liquid. The experimental result shows that the evaporation rate was increased with larger rolling degree and higher liquid level. The rolling motion leads to evaporate about 20% increase with 15 degree rolling based on the evaporation quantity without rolling.

Key words: DME, FPSO, Low temperature liquid, Rolling, Evaporation

1. 서 론

세계 에너지의 수요는 개발도상국을 중심으로 폭발적으로 증가하고 있어 에너지의 안정적 확보 및 공급이 세계 각국의 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 상황에서 세계적으로 넓게 존재하고 있는 대규모 천연가스전 뿐만 아니라 중·소규모의 천연가스를 액체 연료화하여 에너지 공급원으로 확보하는 기술이 새로이 각광을 받고 있다. 그 중 대

표적인 물질이 디메틸에테르(DME, Dimethyl ether)로 국내에서는 지속적이고 다양한 기술개발을 통하여 또 다른 에너지원으로서의 보급을 눈앞에 두고 있는 DME는 대기압하에서 -25℃에 액화되며, 상온에서 약 5~6bar의 압력으로 액체상태가 유지되고 연소 후에도 공해가 배출되지 않는 청정에너지로 LPG와 비슷한 특성을 갖고 있다. 이 DME는 가정용 연료, 산업용 연료, LPG혼합에 의한 자동차 연

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

1 한국가스공사 DME연구개발그룹, E-mail: wicho@kogas.or.kr, Tel: 032-810-0321

2 한국가스공사 DME연구개발그룹, E-mail: ysbaek@kogas.re.kr, Tel: 032-810-0320

료 그리고 매연문제가 있는 디젤연료의 대체연료로 널리 이용될 수 있다.

현재 국내의 DME보급을 위한 추진사항은 한국 가스공사를 중심으로 플라즈마를 이용한 DME합성 생산공정을 독자적으로 개발, DME용 해외 천연가스전의 확보 추진, 그리고 일부 가정용 연료에 DME를 혼합하여 시험 공급 등을 추진하고 있다 [1-3]. 반면, DME를 해상 천연가스전에서 생산, 액화, 저장, 수송할 수 있는 DME FPSO(Floating, production, storage and offloading)의 건조는 아직 이루어진 바 없다.

DME FPSO 및 DME 운송선박의 최적 설계, 제작 및 운용을 위하여 기화를 포함한 DME의 물리적인 특성의 파악과 이해가 필수적으로 요구된다. 선박에서 저온 액체인 DME의 증발은 크게 외부로부터 저장탱크 내부로 열유입에 의한 지속적인 증발과, 선박의 유동에 의한 증발이 발생하게 된다.

종래 저온액체의 증발 연구를 보면 -162℃ LNG 운송선박 등에 있어서 외부로부터 저장탱크로의 전열량 해석 등이 이루어진 바 있으나, 선박의 해수 높이, 혈의 해수 높이, 대류 계수, 상하부 및 측면의 혈과 탱크 사이의 연결구조 등의 구조를 고려한 정확한 산정은 많은 어려움이 있어 가정에 의한 분석이 이루어지고 있다[4,5]. 또한 선박의 유동에 의한 증발은 무시되었고 측정된 바 없다.

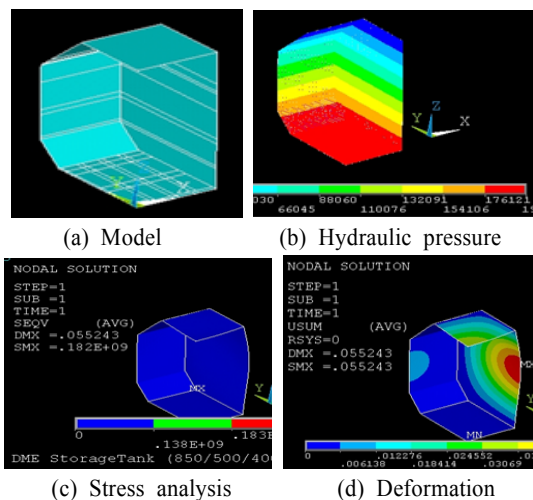


Figure 1: Modeling of DME tank without girders.

본 연구에서는 DME FPSO 선박의 열유입에 의한 증발과 Rolling 등 유동에 따른 저온 액체인 DME의 증발현상을 파악하고자 DME 저장탱크를 설계하여 열유입량을 해석하였고, 유동장치를 제작하여 증발 실험을 수행하였다. 이는 DME FPSO의 설계, 제작 그리고 운용에 도움이 될 뿐만 아니라 DME, LNG, LPG 운송 선박의 설계, 운용관련 기술에도 도움이 될 것이다.

2. DME FPSO 화물창 해석

2.1 화물창 응력해석

Figure 1은 DME FPSO 저장탱크의 모델로 규격은 폭49m x 높이 27.5m x 길이 24m로 하였다. 재료는 탄소강으로 벽체의 두께는 하부 1/3은 800mm, 중간 1/3은 500mm, 그리고 상부 1/3은 400mm로 할 때 탄소강의 허용응력값 이내가 되었다. 이러한 설계는 철판이 매우 두꺼워 현실성이 없게 된다.

Figure 2의 모델링은 탱크의 철판 두께가 얇으면서 용액의 하중에 견디도록 30T의 격막을 3m 간격으로 설치하는 구조를 설계, 해석한 것이다. 벽체의 설계는 두께 11~ 13.5m, 단열재는 우레탄폼 120mm, 그리고 0.7mm의 거푸집 철판으로 구성하였다. 열 및 응력해석을 위하여 대칭이 되는 부분은 생략하였다.

Figure 3은 탱크 내부 유체의 하중을 적용하여 응력해석을 수행한 결과이다. 최대 응력값은 1.635×10^{-8} Pa로 탄소강의 허용치 이내의 값을 나타내었다. Figure 4는 변형값으로 측벽에 11mm의 변형이 발생하였다. 이 응력과 변형값은 본 설계 기준이 DME FPSO 저장탱크 구조로 적절함을 보여준다.

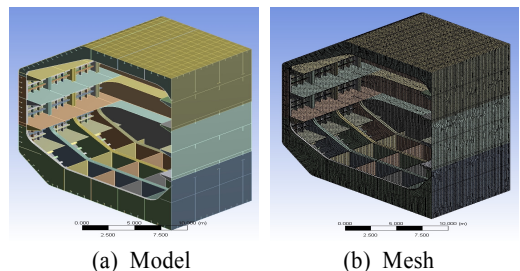


Figure 2: Modeling of DME tank with girders

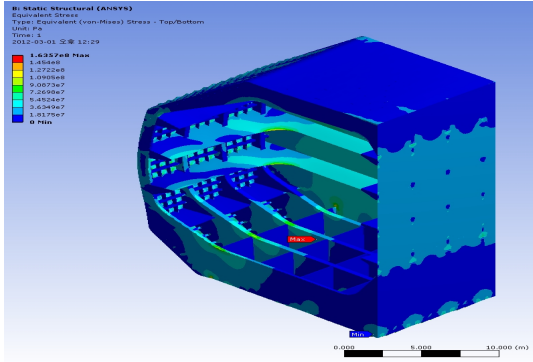


Figure 3: Stress of DME storage tank.

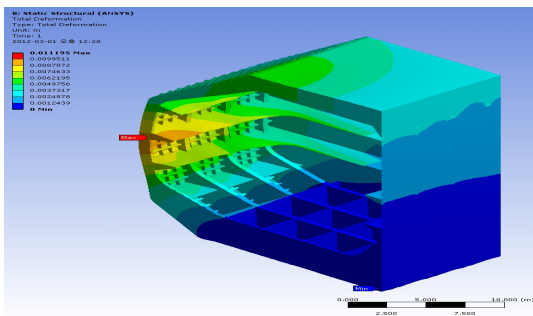


Figure 4: Deformation of DME storage tank.

2.2 화물창 전열 해석

화물창의 열유입량 해석은 내부 온도는 -25°C , 외기 온도는 헐과 거푸집 사이의 온도로 최대 30°C 를 적용하였다. 대류 열전달 계수는 내외부 각각 $200\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 를 적용하였다. Figure 5부터 Figure 8은 각기 상부, 측면, 바닥부 및 앞뒤 격벽(Cofferdam)의 전열량 해석을 나타낸다. 각기 단위 면적당 전열량을 보면 $11.0\text{W}/\text{m}^2$, $11.2\text{W}/\text{m}^2$, $13.5\text{W}/\text{m}^2$, $10.4\text{W}/\text{m}^2$ 가 되었다.

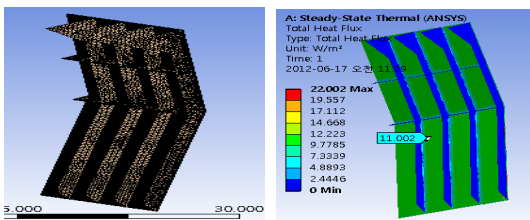


Figure 5: Heat transfer rate of top part.

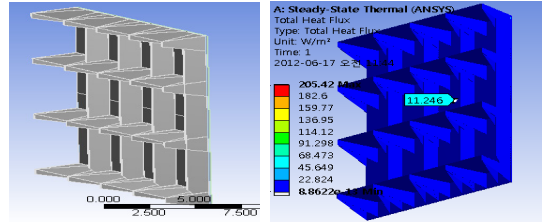


Figure 6: Heat transfer rate of side part.

또한 DME 저장탱크의 하부에는 탱크를 지지하는 지지시스템이 설치된다. 저장탱크 1개의 하부에 설치되는 지지대는 3m 간격으로 총 70개가 설치된다. 규격은 탱크 하부판재 13.5mm, 350mm Plywood, 66mm 두께의 Steel판재로 설계하였다. Figure 9는 DME FPSO 화물창 지지시스템 온도구배 및 열해석으로 열유입량은 $20.0\text{W}/\text{m}^2$ 가 되었다. 본 연구에서 설계한 DME 화물탱크 1개의 용량은 $27,800\text{m}^3$ 로 화물창 1개의 총전열량은 Table 1과 같게 된다. 총 열유입량은 66kW 가 되었으며, 이는 일 12.2톤의 증발량으로 탱크 저장량의 0.06%가 되었다. 이는 저온유체 저장탱크의 설계기준인 일 0.1% 증발량보다 적은 값으로 그 이유는 탱크 측면부와

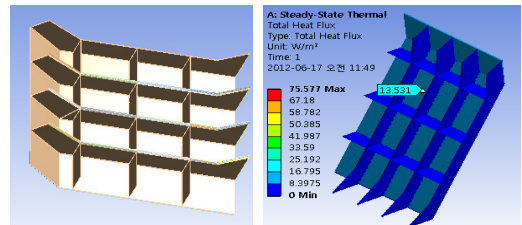


Figure 7: Heat transfer rate of bottom part.

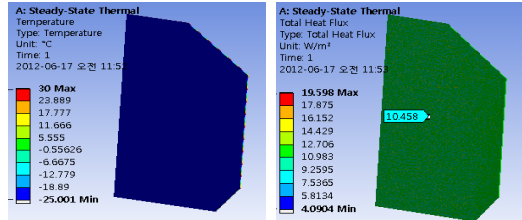


Figure 8: Heat transfer rate of cofferdam part.

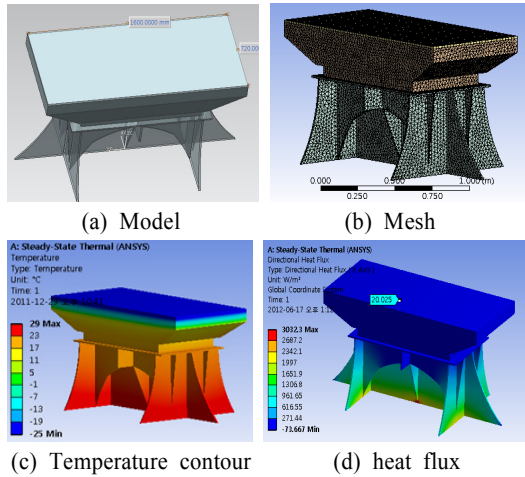


Figure 9: Heat transfer rate of bottom support.

상부를 헬(Hull)과 연결하는 지지대(Stiffener) 등 정확한 탱크구조 설계도면이 없는 관계 이들의 영향을 무시하고 열유입량을 산정하였기 때문에 판단된다.

본 연구에서는 탱크의 전열에 의한 총 열유입량을 판단하기 위하여 먼저 열해석을 수행하였으나 정확한 산정에는 어려움이 있으므로 실제 실험에 의한 열유입량을 분석하고자 하였다. 지금까지 초저온 액체의 열유입에 의한 증발량의 산정은 유동을 무시하고 수행되었으며, 탱크내 유동(Sloshing) 증발 해석은 매우 많은 오차를 갖게 된다. 본 실험의 목적은 이와 같이 해석으로 추정이 어려운 유동에 의한 증발 영향을 실험으로 파악하고자 하였다.

Table 1: Total heat intake rate of DME storage tank.

Part	Area(m ²)	Heat flux(kW)
Top	576	6.34
Side wall	1,785	20.0
Bottom	960	12.96
Cofferdam	2,413	25.1
Support	79.8	1.6

3. DME 증발실험

3.1 실험장치 및 방법

Figure 10은 실험장치를 보여준다. DME 저장탱크 구조는 실규격의 1/200로 제작하였고 내외통의

간격은 60mm으로 하였으며 우레탄폼으로 단열을 하였다. 탱크 하부의 유동기구는 탱크를 단위시간 동안에 좌우 일정 각도로 움직이도록 제작하였다. 탱크 내부의 액체는 인화성이 있는 DME 대신에 기화량을 효과적으로 측정할 수 있는 -196℃의 액체질소를 사용하였으며, 열유입과 유동에 의하여 증발하는 기화율은 적산유량계를 사용하여 단위 시간당 기화량을 측정하였다. 실험종류는 정지상태에서 열유입 만에 의한 증발량의 측정실험과 일정각도로 롤링(Rolling)이 있을 때 증발량을 실험하였다.

유동실험의 각도와 유동 주기는 5도, 10도, 15도 그리고 12초 동안 유동할 때의 증발량을 측정하였다. FPSO선박에서 반응이 발생하는 경우는 유동각도를 5도 이내로 움직이도록 대용량의 트러스트(Thrust)를 설계하여야 하는 것으로 되어 있어 5도 이상의 유동은 발생하지 않을 것이나, 본 실험에서는 DME 운반선이나 LNG운반선 등에서 발생할 수 있는 경우를 고려하여 5도 이상에 대하여도 실험을 수행하였다. 또한 탱크 내 액 충전량에 따라 증발량의 차이가 있을 것이므로 액충전량 98%, 70%, 50%, 10%에 대하여 실험을 수행하였다.

측정방법은 먼저 액체질소를 탱크 내부에 완전히 충전하여 탱크가 충분히 냉각되도록 하였으며, 열전대를 사용하여 온도를 측정하면서 실험하고자 하는 액량을 조절하였다. 실내의 온도는 실험동안 일정한 온도인 18℃가 유지되도록 하였다. 실험에 의한 증발량 측정 결과값은 1시간 동안 증발한 기체의 누적량으로 오차를 감소시키기 위하여 수차 실험을 수행하여 대표적 누적값을 나타내었다.

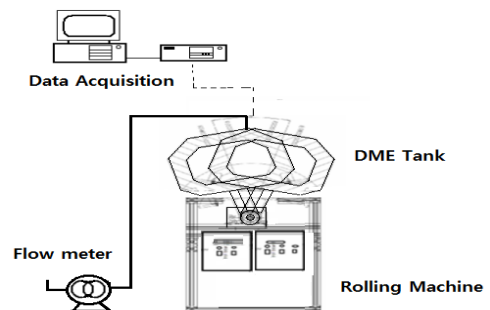


Figure 10: Experimental apparatus for evaporation of rolling movement.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정지상태의 기화량

먼저 열유입 만에 의한 증발량을 측정하기 위하여 각 탱크 충전량별 정지상태에서의 기화율을 측정하였다. Table 2는 충전량별 열유입량과 1시간동안 액체질소의 누적 기화량이다. 액충전량이 증가할수록 증발량이 증가하였으며, 이는 탱크 내벽 액체층의 열전달계수가 증가하기 때문이다. 액충전 98%일 때 1시간동안 기화량은 524.8Liter(액체 : 0.47Liter)로 순 열유입량은 33.18W가 되었다.

Table 2: Heat intake rate without rolling.

Liquid level	10%	50%	70%	98%
Heat rate(W)	23.76	26.46	30.19	33.18
Evaporation rate (liter/h)	375.8	418.5	477.5	524.8

4.2 Rolling에 의한 증발량

Table 3은 Rolling 각도가 5도일 때 액체질소 충전량별 열유입 평균량과 1시간 동안 충전량별 누적 기화량이다. 액충전 98%일 때 1시간 동안 증발량은 기체로 569.0Liter(액체: 0.51Liter)로 순 열유입량은 35.97W가 되었다. Table 4는 Rolling 각도가 10도 일 때의 결과이다. 액충전 98%일 때 1시간 동안 기화량은 604.8Liter로 순 열유입량은 38.24W가 되었다. Table 5는 Rolling 각도가 15도 일 때 1시간동안 액체질소의 충전량별 누적 기화량이며, 충전량별 열유입 평균량이다.

이 결과를 보면 용액의 충전량이 많을수록 유동에 의한 기화량이 증가하게 되나, 유동 각도에 의한 증발량을 보면, 각도가 증가할수록 증가하나 각도 증가에 따른 기화증가율의 폭은 감소함을 나타내었다.

유동에 의한 증발량을 정지상태의 기화량과 비교하면 용액량 98%, 롤링 각도 5도일 때 10%, 15도 일 때는 기화량이 20% 증가율을 나타내었다. 통상 유동에 의한 증발은 유동 운동 에너지가 유체로 전달되어 그 에너지만큼 증발이 발생할 것으로 증발량 증가는 매우 적을 것이나, 실제의 증발 실험 결과를 보면 탱크 내부 액체의 유동(Sloshing)이 열

전달계수를 크게 증가시켜 유동 운동에너지와 함께 전열량이 증가하는 것으로 판단된다.

Table 3: Heat intake rate with 5' rolling.

Liquid level	10%	50%	70%	98%
Heat rate(W)	28.7	31.42	33.82	35.97
Evaporation rate (liter/h)	453.9	496.9	535.0	569.0

Table 4: Heat intake rate with 10' rolling.

Liquid level	10%	50%	70%	98%
Heat rate(W)	31.8	35.02	36.98	38.24
Evaporation rate (liter/h)	502.9	553.9	584.9	604.8

Table 5: Heat intake rate with 15' rolling.

Liquid level	10%	50%	70%	98%
Heat rate(W)	31.8	35.02	36.98	39.83
Evaporation rate (liter/h)	502.9	553.9	584.9	630.0

4. 결 론

본 연구를 통하여 해상의 FPSO 저장탱크의 열설계에 있어 기본이 되는 DME저장 환경이나 운송 중의 유체 열거동을 파악하고자 해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) DME FPSO 저장탱크의 설계는 벽체 두께를 11~13.5mm, 3m의 간격으로 다수 개의 격막을 설치함으로써 재료의 허용값 이내의 안전한 구조가 얻어졌다.

(2) 저장탱크 단열재로는 우레탄 120mm를 적용하였으며 열해석을 수행한 결과, 1개 중간탱크의 총열유입량은 66kW이고, 이는 일 12.2톤의 증발량으로 탱크 저장량의 0.06%가 되었다.

(3) 유동에 의한 증발량을 정지상태의 기화량과 비교하면 용액량 98%, Rolling각도 15도일 때 기화량이 20% 증가하였다. 이는 용액의 충전량이 많을수록 유동에 의한 기화량이 증가하게 되며, 유동 각도가 커지면 증발량도 증가하나 각도 증가에 따른 기화증가율의 폭은 적어짐을 나타내었다.

DME, LNG선박 등의 저온 탱크의 열설계 기준

은 일 0.1% 기화율 이내로 설계되어진다. 본 연구에서는 운항 중 선박의 유동에 의하여 증발하는 양이 총 증발량의 10~20% 정도가 됨을 실험적으로 밝혀 향후 저온 유체 운송탱크의 열설계에 있어 중요 설계기준을 제공하였다.

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.
- [3] Y.-S. Baek, S.-E. Park et al., “DME Production from LNG gas”, Transactions of the Korean Society of Automobile Engineering, vol. 25, no. 4, pp. 38-43, 2003 (in Korean).
- [4] 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).
- [5] 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.