

LNG차량용 연료탱크의 지지시스템 구조해석에 관한 연구

윤상국† · 김동혁*

(원고접수일 : 2008년 4월 8일, 원고수정일 : 2008년 9월 18일, 심사완료일 : 2008년 9월 18일)

A Study on the Structural Analysis of the Supporting System for LNG Vehicle Fuel Tank

Sang-Kook Yun† · Dong-Hyuk Kim*

Abstract : Recently the LNG(liquified natural gas) public buses have been introduced to prevent the air pollution in metropolitan areas. As the LNG temperature in fuel tank is as low as -162°C , the thermal and structural effects of tank components need to be studied for safe introduction in the market. Especially the support system of LNG fuel tank in vehicle, which has connected with inside and outside of tanks, should put attention to reduce the structural stress due to cryogenic temperature and to restrict the heat flux from ambient. There are two supporting systems in the tank, that one is connected between inside and outside tanks by welding, and the other is the inserted support system which is a cylindrical SUS bar inserted in a hole of the supporting plate. In this study the temperature distribution and thermal stress of the inserted support system were evaluated by using the utility program as ANSYS. The results showed that the rate of heat transfer to inner tank through this support system was quite small due to limited contact of support bar with plate, but the thermal stress of support plate was obtained beyond the limited tensile value of SUS304. The cautious design for the support plate part, therefore, should be given to make the safe support system of LNG vehicle fuel tank.

Key words : Support system(지지시스템), Heat transfer(열전달), LNG bus(액화천연가스 버스), Fuel tank(연료탱크), Thermal stress(열응력), Thermal strain(열변형)

기호설명

	Q' : 열생성 [W]
	t : 시간 [sec]
C_p : 정압비열 [J/kg · K]	T : 온도[$^{\circ}\text{C}$]
E : 열경계 전위	x : 길이 [m]
k : 열전도도 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	ρ : 밀도 [kg/m^3]

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

* 한국해양대학교 기계정보공학부

1. 서 론

국내 주된 에너지원인 천연가스는 1986년부터 중동, 말레이시아 등의 산지에서 액체상태인 LNG로 도입, 기체상태로 변환되어 발전소, 도시가스 등에 공급되어져 왔다. 최근에는 대도시 대기 오염을 막기 위하여 대중교통 수단 중의 하나인 시내버스에도 압축천연가스(CNG)가 이용, 보급되고 있다. 이 CNG버스는 연료탱크에 천연가스를 200bar 고압으로 충전하여 운영되고 있다. 이 CNG버스 체계는 쾌적한 도심을 유지할 수 있는 반면, 충전 압력이 높다는 것과 주행거리가 200km 정도로 상대적으로 짧은 단점을 지니고 있다. 따라서 미국 등 외국에서는 보다 장거리 주행과 낮은 압력으로 안전성을 보장 받을 수 있는 LNG버스가 널리 보급되고 있다^{[1]-[3]}. 국내에서도 이 액체 연료체계의 도입을 위하여 현재 LNG버스를 시범운행 중에 있다.

LNG버스는 천연가스를 액체상태로 충전하는 것으로 저장압력이 낮아 안전성이 크게 향상 되는 장점을 지니나, 액체 상태의 저장은 -162°C 의 극저온 상태에서 이루어지므로 장기간 보관이 어려운 단점을 갖게 된다. LNG탱크는 연료를 장기간 저장하기 위해서 내외부 실린더 즉 2중 탱크로 이루어져 있다. 현재 적용되고 있는 이중 탱크 사이의 단열방법은 다층 진공 단열로 다겹의 Mylar를 사용하여 복사열을 차단함으로써 단열 효과를 얻고 있다. 또한 배관을 통한 열전달 차단은 외부 실린더 벽까지의 배관을 진공 2중 튜브 형태를 취하여 전열량을 최소화 하고 있다. 그러나 내부탱크와 외부탱크를 연결, 지지하고 있는 지지 시스템을 통한 전열은 실린더 하중과 액체연료의 무게를 지지하여야 하는 목적 때문에 피할 수 없게 된다. 또한 지지시스템은 -162°C 의 극저온으로 인한 내부탱크의 수축 응력을 흡수하는 기능도 갖추어야 한다. 그러므로 LNG차량용 연료탱크 지지시스템은 전열을 최소화하면서 극저온 특성을 만족할 수 있도록 설계되어야만 한다.

본 연구에서는 현재 적용되고 있는 LNG차량용 연료저장탱크 지지시스템을 통한 전열 해석과 극저

온의 온도차에 의한 열수축 응력을 분석하여 이 시스템의 안정성 및 안전성을 판단하고자 하였다^[4]. 또한 이를 통하여 향후 새로운 지지시스템 개발의 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. LNG연료탱크의 구조

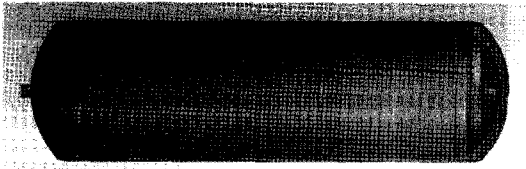
Fig. 1은 LNG연료탱크 및 지지시스템의 그림이다. LNG연료탱크의 재료는 SUS 316, 304 등이 적용된다. LNG연료탱크의 구조를 보면 좌측부는 내통과 외통이 용접에 의하여 견고하게 지지되고 있고, 우측부는 내부통과 외부통이 분리될 수 있도록 지지시스템이 설계되어 있다. 이 우측 연결 지지시스템은 내부 통에 저장되는 -162°C LNG 연료의 양에 따라 발생하는 수축과 팽창 변형을 흡수하고 내통 하중을 지지하는 기능을 하게 된다. 통상 극저온 저장설비의 지지 시스템으로는 응력이 가해진 고강도 SUS튜브, 금속이나 플라스틱 버팀대 등이 있다^[5].

Fig. 1의 (c)는 본 연구에서 해석하고자 하는 LNG연료탱크 지지 시스템으로 그 구조를 보면 내부 경판부에 직경 20mm의 SUS봉이 용접, 설치되고, 외통의 경판부 안쪽에는 C형강 형태의 bar가 용접 고정되어 있다. 이 bar에는 내통 지지봉이 주입될 수 있도록 구멍이 뚫어져 있어 내통의 수축 열응력을 흡수할 수 있도록 하고 있으며 접촉 면적을 줄여 열전달도 최소화하고 있다.

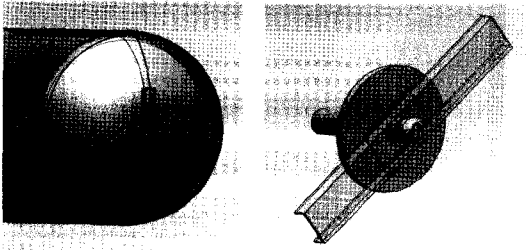
본 연구에서는 탱크 내부에 LNG 충전량이 20%, 50%, 90%로 변화될 때 이 지지시스템의 열전달과 응력 해석을 수행하여 분석하였다. 해석 대상의 형상 모델링은 UGS NX4를 이용하였으며, 구조해석과 열해석은 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 11을 이용하여 수행하였다.

3. 지지시스템의 전도열전달 관계식

극저온에서 전도열전달 산정을 보다 정밀하게 수행하기 위하여는 열경계 전위방법을 적용한다. 이 방법은 온도에 따라 열전도도가 바뀌는 물질의 열전달량을 보다 정확하게 산정할 수 있는 방법이다.



(a) Typical model of LNG fuel tank



(b) Support structure (c) Support bar and plate

Fig. 1 Typical support system of LNG fuel tank

SUS의 경우 LNG의 온도인 -162°C 와 상온 25°C 의 열전도도 값은 약 6배의 차이를 나타낸다. 즉 모든 물질은 온도에 따라 열전도도 값이 변하며, 열경계 전위법을 통하여 열전도도를 정확하게 산정하게 된다⁽⁶⁾.

열경계 전위 $E(T)$ 는 기준온도에서 적용온도까지 열전도도를 적분한 값으로 정의된다.

$$E(T) = \int_{T_r}^T k(T) dT \quad (1)$$

열전도도가 전체 온도 범위에서 일정할 때의 전도 열전달 일반식은 다음과 같다.

$$Q' = -\nabla^2 T + \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

이를 열경계 전위법의 식으로 변형하면,

$$\frac{dE(T)}{dT} = k(T) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = \frac{d^2 E}{dx^2} \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{k} \frac{dE}{dt} \quad (5)$$

식 (2)를 식 (3), (4), (5)로 치환하여 정리하면,

$$Q' + \nabla^2 E = \left(\frac{\rho \cdot C_p}{k} \right) \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

와 같이 된다. 전도열전달에 의한 총 전열량은 다음 식에서 얻어진다.

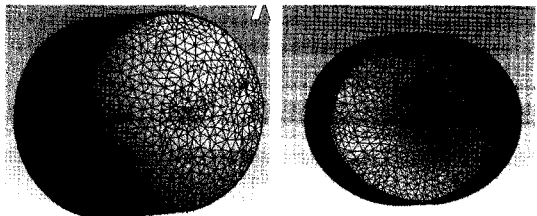
$$\frac{dE}{dx} = k(E(x) - E_{\infty}) \quad (7)$$

4. 해석결과 및 고찰

가. 열전달 해석

내부 탱크와 외부 탱크 사이의 열전달은 고진공의 Super-insulation 단열이 적용된다. 열전달에 의한 온도구배 해석은 Ansys를 사용하였으며, 모델형상은 좌우가 대칭이므로 1/2 면만을 대상으로 하였다. 탱크 좌측부는 내부 탱크와 외부 탱크가 용접으로 연결되어 있으므로 해석의 좌측면을 고정면으로 설정하였다. Fig. 2는 열전달과 열응력 해석을 위한 각 부분별 격자 형상을 보여준다.

Fig. 3은 내부 탱크에 LNG가 50% 충전되어 있을 때 지지봉의 각 지점에 따른 온도 분포 해석으로 (a)는 격자이며 (b)는 온도구배 결과이다. 지지봉이 LNG와 접촉되는 부분의 온도는 최저 온도인 -162°C 이고 외통에 접하고 있는 부분은 -82°C 를 보이고 있다.



(a) Inner tank (b) Support plate of outer tank

Fig. 2 Grid for thermal and structural analysis

Fig. 4는 내부 탱크 온도 -162°C , 외부 탱크 온도를 상온 25°C 로 설정하여 해석한 내부 탱크의 온도 구배를 나타낸다. 열전달 해석은 내부 탱크에 LNG 충전량이 20%, 50%, 90%으로 변화될 때

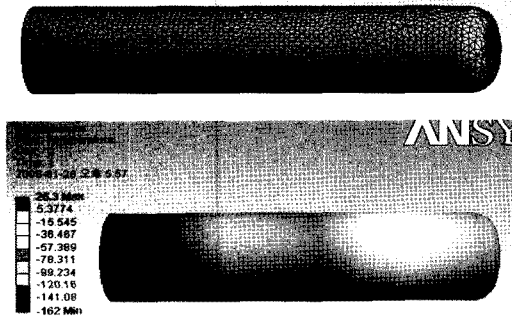
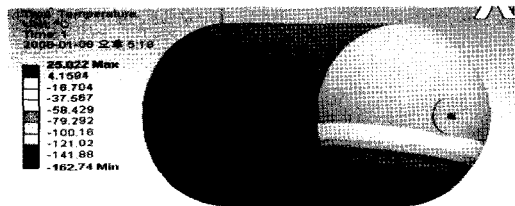
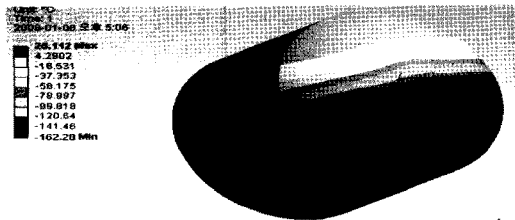


Fig. 3 Grid model and temperature distribution of support bar.



(a) 20% LNG filled



(b) 50% LNG filled



(c) 90% LNG filled

Fig. 4 Temperature contour of inside tank and support bar.

의 해석을 수행하였다. 그림 (a)는 20%, (b)는 50% 그리고 (c)는 90% 충전시의 온도구배이다. 내부 탱크의 온도는 외벽이 단열로 차단됨에도 불구하고 LNG 액체부와 기체부의 온도차가 크게 나타나고 있다. 이는 LNG충전량의 변화 즉 충전과 운행에 의하여 LNG 수위가 변화되면 내부 탱크벽의 온도 차이가 크게 발생함을 알 수 있다.

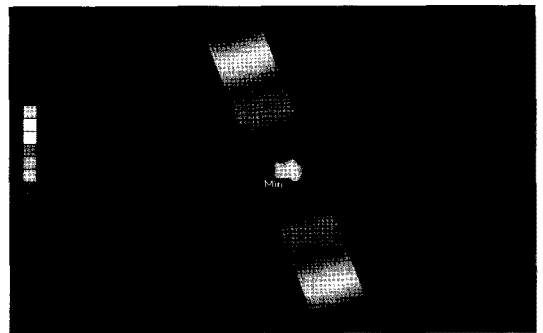


Fig. 5 Temperature distribution of support plate of outer tank

Fig. 5는 내부 탱크에 LNG가 90% 충전되어 있을 때 지지봉이 연결되지 되는 외부 탱크의 지지판 부 온도 구배이다. 지지봉에 접촉되는 부분의 온도는 -162°C 로 가장 낮고 외부 통에 용접된 부분은 외기온도를 보여준다.

이 지지 시스템을 통한 총 전열량은 90% 충전 때를 기준하여 식 (7)을 이용 산정하였으며, 그 값은 3.7081W 가 된다. 이는 탱크 일일 기화량 설계 값인 12W 를 기준할 때 31%에 해당한다.

이 값은 비교적 낮은 것으로 이 지지 방법이 LNG 연료 저장 탱크의 지지 시스템에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

나. 열응력 해석

Table 1은 응력 해석에 사용된 물성치이다. Fig. 6은 내부 탱크에 90%의 LNG가 충전되고 내부온도 -162°C , 외부 25°C 일 때 열변형에 의한 상하 즉 Y방향 변위를 보여준다. 변위 경계조건으로 좌우가 대칭이고 좌측부는 용접 고정되므로 좌측면의 변위를 0로 하였다. 열변형에 의한 Y방향

변위로 고정된 좌측은 변위가 없고 탱크를 따라 수축하여 탱크 지지봉 부분에서 최대 변위값으로 2.46mm 수축하였다. LNG 탱크 전체 길이를 고려하면 내부탱크는 총 4.92mm가 수축하게 되므로 이를 고려하여 우측 지지시스템을 설계하여야 함을 알 수 있다.

과 접촉하는 부위의 온도 -80°C 에서 응력값이 122~145MPa로 나타났다. 이는 재료의 항복강도 값인 129.2MPa 보다 약간 큰 값으로 지지판부 지지시스템을 안전하게 적용하기 위하여는 구조적 개선이 필요함을 알 수 있다.

Table 1 Properties of materials in the support system.

Items	SUS
Thermal conductivities	14.9~1.9 W/m K
Coefficients of thermal expansion	$35 \times 10^{-5} \sim 307 \times 10^{-5}$
Elastic moduli	210.000 MPa
Poisson's ratios	0.3
Density(kg/mm ³)	$7850e^{-9}$

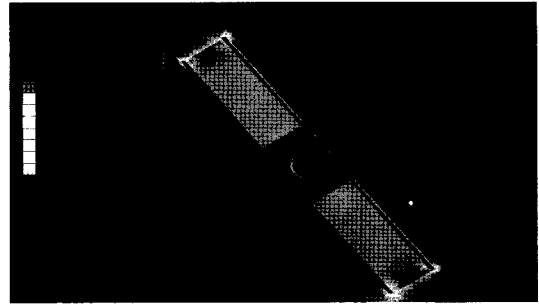


Fig. 8 Von Mises stress of support plate

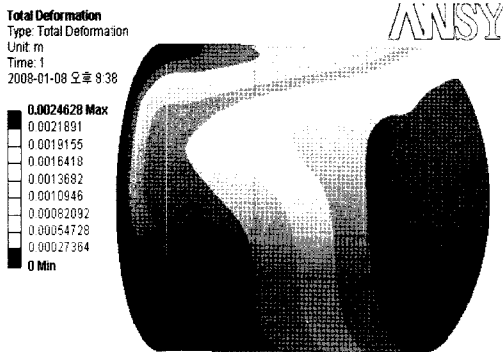


Fig. 6 Y-direction strain from thermal strain

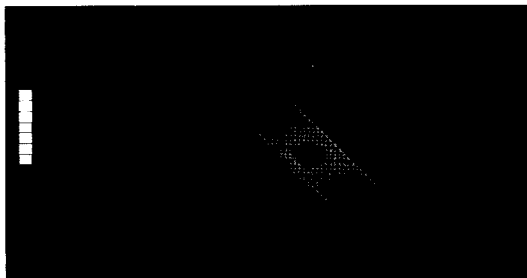


Fig. 7 Total deformation of support plate

Fig. 7은 지지판 부 열변형을 나타낸 것이다. 내부 탱크를 지지하는 지지봉과 접촉하는 부위의 변형이 0.025cm이 되었다. Fig. 8은 지지판 부의 등가응력 값으로 내부 탱크를 지지하는 지지봉

5. 결 론

본 연구에서는 차량용 LNG연료탱크 지지시스템을 통한 전열량을 최소화하기 위하여 지지시스템의 열전달 및 열응력을 해석하였고, 그 시스템의 적용성 판단을 위하여 열적 그리고 기계적 응력을 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 지지시스템의 전열량은 전체 침입량의 30% 정도로 침입열량을 감소시킬 수 있어 LNG용 초저온 연료탱크의 지지시스템으로 적절함을 알 수 있다.
- 2) 내부탱크의 탱크 지지봉 부는 -162°C 의 LNG에 의하여 최대 변위 4.92mm가 수축되며 이를 고려한 설계가 필요하다.
- 3) 온도에 따른 기계적 응력을 해석한 결과 최대 열응력 값이 한계허용치보다 커, 본 지지시스템이 차량용 LNG 저장탱크 지지시스템으로 적용하기 위하여는 구조적 개선이 필요함을 알 수 있다.

참고문헌

[1] J. Wegrzyn, "DOE/BNL Liquid Natural Gas Heavy Vehicle Program", Future Transportation Technology Conference.

- CA, pp. 11~13, SAE Paper No. 981919, 1998.
- [2] Hanshaw G., Pope G., "Liquefied Natural Gas - Heavy Duty Truck Applications," SAE Paper No. 952740, 1998.
- [3] LNG Vehicle Markets and Infrastructure", GRI by Zeus Development Co., 1998.
- [4] LNG Vehicle Fuel Tank Installation and Operation Manual, Taylor-Wharton Co., pp. 1~29, 2004.
- [5] Barron R. F., Cryogenic Systems, Oxford University Press, pp. 372~377, 1985.
- [6] 윤상국, 박동훈, 액체수소 저장탱크용 고효율지지 시스템 개발 및 해석, 한국마린엔지니어링학회논문집, 제31권, 제4호, pp. 363~369, 2007.

저 자 소 개



윤상국(尹相國)

1955년생. 1977년 성균관대학교 화학공학과 졸업(학사), 1982년 연세대학교 대학원졸업(공학석사), 1989년 Southampton 대학교 초저온공학과 졸업(공학박사), 1993~현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수



김동혁(金東赫)

1953년생. 1976~1982년 국방과학연구소. 1988 Johns Hopkins대 졸업(공학박사), 1988 - 1992 한국표준과학연구원, 1992 - 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수.