



## 차량용 LNG 연료 용기의 내진동 단열지지구조 설계 및 최적화

†권현욱 · 황인철\*

포항산업과학연구원 시스템솔루션연구센터, \*제우기공(주)  
(2014년 4월 22일 접수, 2014년 9월 22일 수정, 2014년 9월 23일 채택)

### Design and Optimization of Vibration-resistant and Heat-insulating Support Structure of Fuel Cylinder for LNG Vehicles

†Hyun-Wook Kwon · In-Cheol Hwang\*

Dept. of System Solution, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang  
790-600, Korea

\*Jewoo Engineering Co. Ltd., Ulsan 683-360, Korea

(Received January 8, 2014; Revised August 15, 2014; Accepted August 16, 2014)

#### 요 약

차량용 LNG 연료 용기의 내진동 단열 지지구조 최적화 설계 개발을 위하여 종래의 해외특허구조 설계를 기본으로 한 특성요인도 분석으로 용기의 내조 및 외조 지지부 구조설계의 주요 설계 인자를 도출하였다. 도출된 설계 인자 중에서 우선적으로 지지 봉재의 직경과 단열 격판 연결부 곡률을 대상으로 하여 최적화를 수행하였다. 차량용 LNG 연료 용기 설계안에 대한 평가를 위해 설계안을 MSC/MARC 상용유한 요소해석 패키지를 활용하여 유한 요소 모델링하여 진동모드해석과 열전달 및 열응력해석을 수행하였다. 최적화 설계 결과를 통하여 도출된 설계안은 고유진동해석을 통한 1차 모드 고유진동수(1st Mode Natural Frequency), 열전달해석을 통한 초저온 용기 내 조 외조간 지지부를 통한 총전열량 및 열응력해석을 통한 최대 Von-Mises 응력이 모두 설계 목표치를 만족하였으며, 개발된 설계안에 따라 차량용 LNG 연료 용기의 제작하여 3차원 진동 시험과 단열성능 시험을 통해 설계를 검증하였다.

**Abstract** - To optimize the design of fuel cylinder for LNG vehicles, we introduced the design parameters of the inner and the outer tank of the vessel support structure by analyzing the structural characteristics of conventional design. We selected the inner and outer diameter of the hollow support bars and a dimension of the inner structure of the vessel among the design parameters for design optimization. In this study the temperature distribution and thermal stress of the support structure were evaluated by using the utility program as MSC/MARC. The evaluation criteria are first mode natural frequency, total transferred energy through support structure and thermal stress. The developed design satisfied the design criteria and it was made of prototype. The prototype was verified through three-dimensional vibration testing and thermal performance test.

**Key words** : cryogenic, thermal stress, thermal deformation, finite element analysis, modal analysis

†Corresponding author:kwonhw@rist.re.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

청정에너지인 LNG(액화천연가스)의 이용분야가 산업용, 발전용에서 민생용, 차량용 분야로 확대되기 시작함으로써 초저온 저장탱크의 수요가 급증하고 있는 실정이다. 상온에서 기체 상태로 존재하는 대부분의 가스들이  $-40^{\circ}\text{C}$  이상의 온도에서 액화되나 헬륨, 수소, 네온, 질소, 산소, 알곤, 공기, 메탄 등의 초저온 가스는  $-150^{\circ}\text{C}$  이하로 온도가 떨어져야만 액화가 되며, 액화 후에는 체적이 수백분의 1로 감소하게 된다. 초저온 가스를 액화상태로 저장하면 고압의 압축가스(기체상태)로 저장하는 것에 비하여 동일 크기의 저장용기에 비하여 저장능력을 수배로 증대시킬 수 있으며 충전압력을 보다 낮게 유지할 수 있으므로 안전성이 크게 높아지게 된다. 이에 따라 차량용 LNG 연료 용기의 설계 개발이 요구되고 있다. 각 국가별 및 주요 도시별 온실가스 규제에 LNG 차량 보급이 확대되어 왔다. 국내에서도 차량용 LNG 연료 용기가 한국가스공사의 주관으로 개발되었다[1]. 모든 기계 부품의 발전과정에서와 동일하게, LNG 연료용기에 있어서도 차량용으로 사용될 경우 장기간의 사용에도 내구성을 보장할 수 있는 진동 내구설계 개발이 지속적으로 필요하다[2,3]. 기존에 차량용 LNG 연료용기의 단열구조에 대한 단열 성능측면의 연구가 수행된 사례가 있으며[4,5], 차량용 LNG 연료용기의 내외조 간의 지지구조에 대한 단열 및 열응력에 대한 연구가[6] 수행되어 왔다. 관련으로 내진동 측면의 설계에 대한 연구는 드물다고 할 수 있다. 본 연구에서는 차량용 초저온 용기의 내조 및 외조 간의 연결지지 구조에 대한 내진동 단열 지지구조 설계를 특성요인도 분석, 반응 최적화 등의 설계 기법을 적용하여 개발하였으며 3차원 진동 시험과 단열성능 시험을 통해 설계를 검증하였다.

## II. 차량용 LNG 연료 용기의 내진동 단열 지지구조 설계 개발

### 2.1. 차량용 LNG 연료 용기의 내진동 단열 지지구조 설계 파라미터 분석

LNG 연료용 초저온 용기는 영하  $162^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 유지하고 차량용으로서의 내진동 구조를 보장하여야 한다. 이를 위해 해당 초저온 용기는 기본적으로 내조 및 외조의 이중 용기 구조를 가지며, 내조와 외조를 연결하는 연결부 및 지지구조가 설계의 주요점이다.

내진동 내구성을 갖춘 LNG 초저온용기의 최적화 설계 개발을 위해 기 개발되었던 국내의 차량용

LNG 연료용기 설계에 대한 검토를 수행하였다. 기존의 설계는 단열성능 향상을 목적으로 전열면적을 최소화하기 위해 후면부의 내조 외조 간의 지지부의 전열면적을 최소화하거나, 열전달 경로를 변경하여 설계되었다[14]. 이로 인해 구조적으로 횡방향의 진동에 대한 내진동 내구성의 확보에 상대적으로 제약이 있다. 이는 단열을 목적으로 전열면적 최소화 위해 연료 용기 후면 지지부를 최소한의 단면적을 가지도록 하는 설계가 하였기 때문이다. LNG 연료용기가 차량용으로 사용되기 위해서는 장기간의 사용에도 내구성을 보장할 수 있는 진동 내구설계 개발이 지속적으로 필요하며, 특히 산악지형과 과속방지턱 등이 많은 한국적 운행환경에서는 그 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

이를 위해 차량용 LNG 연료 용기의 내진동 단열 지지구조 최적화 설계 개발을 위한 설계 파라미터를 도출하였다. 초저온 용기의 단열 지지구조와 관련하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 종래의 해외특허 구조 설계를 바탕으로, Fig.2에 나타낸 바와 같은 특성요

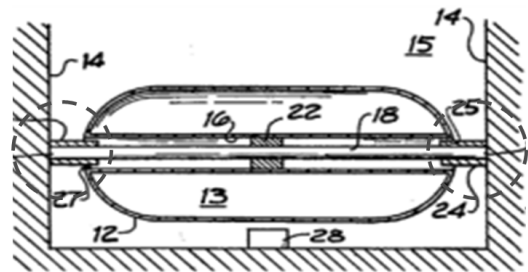


Fig. 1. Conventional patent design of cryogenic tank support structure[9].

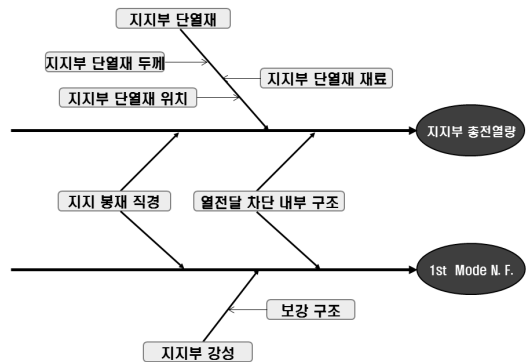


Fig. 2. Cause effect diagram for LNG tank design.

**Table 1.** Design parameters and objectives of detail design

Parts	Design parameters	Objectives of detail design
Support bar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diameters</li> <li>• Sectional area</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximization of section modulus</li> <li>• Minimization of heat transfer area</li> </ul>
Insulator at supports	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Location of insulator</li> <li>• Insulator material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Between support bar and outer shell</li> <li>• Maximization of thermal conductivity and stiffness</li> </ul>
Structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrangement</li> <li>• Reinforcement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptability to thermal shrinkage</li> <li>• Space for insulation</li> <li>• Reinforcement for outer shell support</li> </ul>

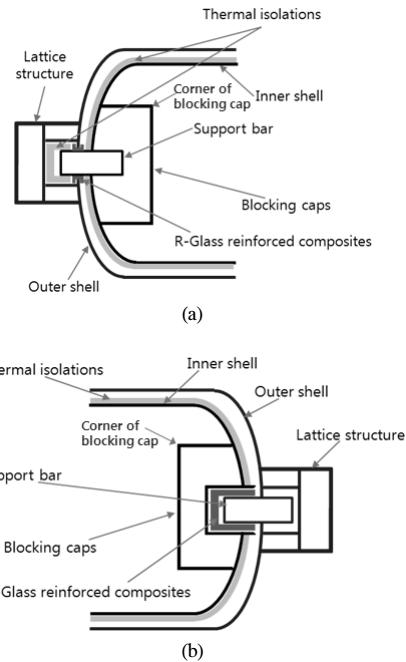
인도 분석을 수행하여 용기의 내조 및 외조 지지부 구조설계를 위한 기본 구성요소를 도출하였으며, 이를 통해 내진동 단열지지구조 설계를 위한 주요 설계 파라미터 및 상세 설계 목표를 Table 1과 같이 설정하였다.

내진동 단열 지지구조 설계를 위한 주요 설계 파라미터는 지지봉재의 직경 및 단면적의 크기, 단열재의 배치 위치와 단열 소재의 단열특성 및 강성, 구조 측면에서는 해당 구조의 배치와 형상으로 구분할 수 있다.

용기의 단열 지지구조 설계를 위한 기본 방향으로 내외조 연결 지지봉재를 내진동 성능 향상을 목적으로 중공봉(Hollow rod)으로 선정하였으며, 내조와 연결되는 외조 좌우측면 강성 확보를 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 해당 위치의 외조의 외측부를 격자구조(Lattice structure)로 하였다. 그리고, 지지부를 통한 전열의 차단을 위해 내조 내측으로 단열 격판 구조(Blocking cap)를 추가하였다. 단열을 위해 내조 외피와 지지부를 통한 주요 전열 경로에 구조용 단열재를 배치하였다.

이러한 기본 설계 하에서 본 연구에서 최적화의 대상으로 삼은 설계 파라미터로는 내진동 내구성과 단열 성능에 동시에 영향을 주는 파라미터를 우선적으로 선정하고자 중공형의 지지봉재 내경 및 외경과 단열 격판 구조의 코너부 곡률을 우선적으로 선정하였다.

내진동 내구성과 단열성능 및 열기계적 내구성 확보를 위한 차량용 LNG 연료용기의 설계안에 대



**Fig. 3.** Cross sectional view of support structures of cylinder for LNG vehicle - (a) Fixed support side (b) Sliding support side.

한 평가를 위하여 각각의 주요 설계 목표에 대한 제품 설계 기준 항목으로 고유진동해석을 통한 1차 모드 고유진동수(1st Mode Natural Frequency), 열전달해석을 통한 초저온 용기 내조 외조간 지지부를 통한 총전열량 및 열응력해석을 통한 최대 Von-Mises 응력을 선정하였다. 각각에 대한 기준치는 1차 모드 고유진동수가 50Hz 이상일 것 과 내조 외조간 지지부를 통한 총전열량이 최대 열손실 허용 기준 이하일 것 그리고, 열응력이 소재 항복강도의 1/2 이하이어야 한다.

전술한 최대 열손실 허용 기준은 LNG 연료 용기의 임계압력 해당 온도인 -113 ℃까지 승온 소요 총열량으로서 LNG의 비열인 3,429 J/kg℃, LNG 총중량인 400 kg, 초기 온도인 -162 ℃와 임계 승온 온도와와의 온도차로부터 산출한 값인  $6.72084 \times 10^7$  J의 85%에 해당되는  $5.712714 \times 10^7$  J을 적용하였다. 85%를 적용한 이유는 차량용 LNG 연료용기에 대한 기존의 연구에서 연료용기의 부위별 열침입 중 지지부를 통한 열침입이 전체의 약 85%를 차지한다는 연구 결과에 근거한 것이다[4,7-8].

최적화를 통해 도출된 설계안은 시제품을 제작하

여 액화천연가스 자동차용 용기 제조의 시설·기술·검사 기준(KGS AC416 2010)에 따라 3차원 진동 가속도 조건하에서의 시험과, 단일성능 시험을 만족하여야 한다.

### III. 차량용 LNG 연료 용기 유한요소해석 및 최적화 설계

#### 3.1. 차량용 LNG 연료 용기 유한요소해석

차량용 LNG 연료 용기 설계안에 대한 평가를 위하여 MSC/MARC 상용유한 요소해석 패키지를 활용한 유한요소 모델링과 이를 활용한 진동모드해석, 열전달 및 열응력해석을 수행하였다. 진동모드해석은 LNG 연료용기 3차원으로 모델링하여 해석을 수행하였으며 열전달 및 열응력해석은 축대칭 형상의 특성을 고려하여 2차원 축대칭 해석을 수행하였다. 유한요소 모델링 및 유한요소해석의 주요 사항은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

진동모드해석에서의 평가 기준은 전술한 바와 같이 1차 모드 고유진동수 50 Hz 이상이며, 해석 결과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 618.9 Hz로 나타나 유한요소해석상으로 설계 목표를 충분히 만족하는 것으로 나타났다[10]. LNG 저장용 초저온용기 설계안에 대한 단일성능의 해석적 평가를 위해 열전달 해석을 수행한 결과, 총전열량 제한 기준  $5.712714 \times 10^7$  J 이하 대비 Fig. 5에 나타낸 바와 같은 열속(Heat flux) 해석 결과를 활용한 총전열량 계산 결과 총전열량은  $8.3846 \times 10^6$  J이며 유한요소해석상으로 설계 목표를 만족하는 것으로 나타났다[11].

차량용 LNG 연료 용기의 열응력 해석을 위하여, 열전달해석 결과를 응력해석으로 연계하는 연성해석(Coupled analysis)을 수행하였다. 이를 통해 초저온의 조건으로 인한 열수축과 이로 인한 열응력을 평가하였다. 용기의 내조와 외조 사이의 열전달은

Table 2. Finite element modeling

Analysis type	Modal	Heat Transfer/Transient Thermal-Mechanical
Dimension	3D	2D-axisymmetry
No. of elements	15,017	417
No. of nodes	29,746	836
Element type	3D Solid (Hexagonal)	Coupled/ Axisymmetry Solid/ Full Integration

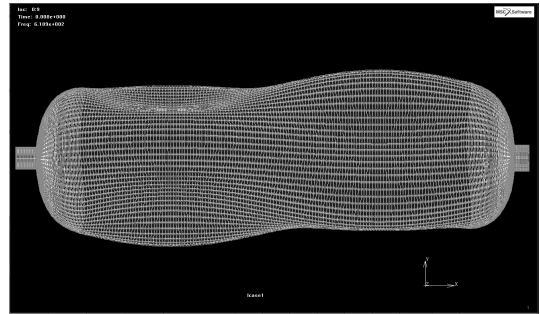


Fig. 4. Analysis result : natural frequency analysis of cylinder for LNG vehicle : 1st mode natural frequency 618.9 Hz.

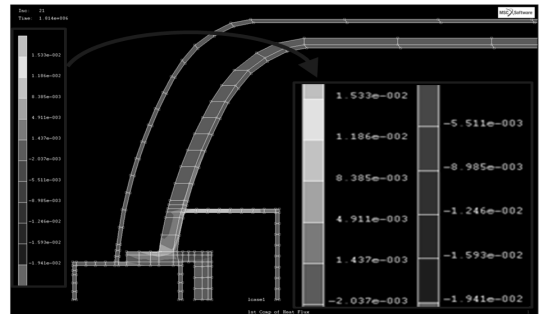


Fig. 5. Analysis result : heat transfer analysis of cylinder for LNG vehicle (2D axisymmetry model - enlarged figure of the supporting structure part).

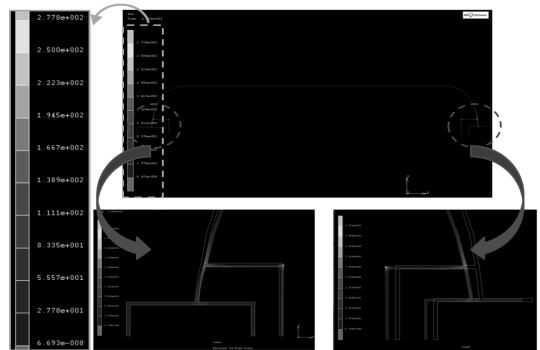


Fig. 6. Analysis result : thermal stress analysis of cylinder for LNG vehicle - Von-Mises Stress (2D axisymmetry model - total model and enlarged figure of the supporting structure parts).

**Table 3.** Design level and design value for optimization of cylinder for LNG vehicle

Design parameters	Design level	Design value [mm]	Remarks
Diameter of support bar	D-1	(D <sub>i</sub> , D <sub>o</sub> ) = (21, 29)	
	D-2	(D <sub>i</sub> , D <sub>o</sub> ) = (46, 54)	Middle point
	D-3	(D <sub>i</sub> , D <sub>o</sub> ) = (71, 79)	
Corner radius of blocking cap	R-1	R = 0	
	R-2	R = 20	Middle point
	R-3	R = 40	

**Table 4.** Design level and Performance values for optimization of cylinder for LNG vehicle

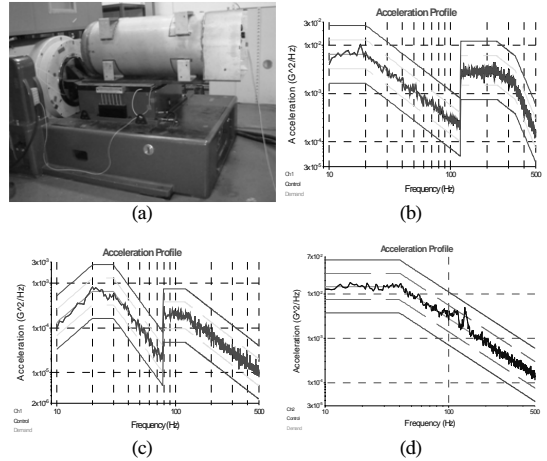
Design level	Performance values		
	Natural frequency	Thermal Energy	Thermal stress
D-1, R-1	0.8951 Hz	2.546728×10 <sup>6</sup> J	277.8 MPa
D-2, R-2	57.84 Hz	5.050560×10 <sup>6</sup> J	171.1 MPa
D-3, R-3	130.8 Hz	8.362754×10 <sup>6</sup> J	161.3 MPa
D-1, R-3	0.8946 Hz	2.528745×10 <sup>6</sup> J	161.1 MPa
D-3, R-1	131.6 Hz	8.384601×10 <sup>6</sup> J	277.8 MPa

고진공의 Super-insulation 단열 조건이 적용되었다. 해석 결과 Fig. 6에 나타난 바와 같이 열응력 제한 기준 196.9 MPa 이하 대비 277.8 MPa의 열응력이 발생하였으며 최대응력 발생 위치는 단열격판(Blocking cap)의 직각 코너부위로 나타났다. 이에 대한 보완 설계로서 응력집중이 발생하는 단열 격판의 코너부를 라운드 타입으로 수정하였다.

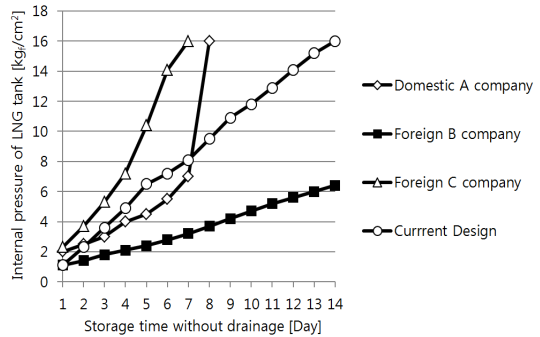
**3.2. 차량용 LNG 연료 용기 최적화 설계**

차량용 LNG 연료 용기 설계안에 대한 유한요소 해석 및 minitab<sup>®</sup>을 활용한 최적화 설계를 수행하였다[12].

단열격판 코너부에서의 응력집중에 대한 보완 설계로서 해당 코너부를 라운드 타입으로 수정하였으며, 최적화를 위한 설계변수를 지지부 직경(중공축의 내경 및 외경), 단열격판 코너부의 곡률반경으로



**Fig. 7.** Three dimensional vibration test : (a) Test apparatus (b) X-directional test result (c) Y-directional test result (d) Normal directional test result.



**Fig. 8.** Thermal performance test results of cryogenic tanks [kgf/cm<sup>2</sup>].

선정하였으며 설계수준은 Table 3에 나타난 바와 같이 3수준으로 하여 최적화를 수행하였다. minitab<sup>®</sup>의 반응최적화(Response optimization) 툴을 사용하여 각 설계변수들에 대한 최적치를 구하였으며, 최적화 결과는 각각 지지 봉재 내부 직경(D<sub>i</sub>)=71 mm, 외부직경(D<sub>o</sub>)=79 mm 격판곡률은 27.8 mm의 값을 얻었다. 선정된 최적 설계 변수에 따른 차량용 LNG 연료 용기 최적설계안에 대한 유한요소해석 수행결과 1차 모드 고유진동수는 131.044 Hz, 지지부 총진열량은 8.37×10<sup>6</sup> J, 최대 열응력은 196.83 MPa로 나타나 모두 설계 기준을 만족하였다.

## IV. 설계 검증

### 4.1. 3차원 진동내구시험

LNG 연료용기는 액화천연가스 자동차용 용기 제조의 시설·기술·검사 기준(KGS AC416 2010)에 따라 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 3차원 진동시험기를 사용하여 용기의 길이방향(X-direction), 횡방향(Y-direction) 및 수직방향(Normal-direction)에 대하여 진동시험을 수행하여 설계를 검증하였다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 ASD(Acceleration Spectral Density,  $g^2/Hz$ )값이 용기의 길이방향, 횡방향 및 수직방향에서 규격을 모두 만족하였다. Fig. 7의 각각의 (b), (c), (d) 그래프의 상단과 하단의 선들은 각각 규격 상한과 하한을 나타내며, 그 사이의 진동그래프는 실시간으로 측정된 ASC값을 나타낸다.

### 4.2. 단열성능시험

진동내구성 시험에 이어, 본 연구를 통해 개발 제작된 차량용 LNG 연료용기의 단열성능 평가를 위해 보형시험을 실시하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 국내 A사의 차량용 LNG 연료 용기와 외국 선진사의 제품과 저가의 외국산 제품 및 본 연구를 통해 설계 제작된 용기를 비교 시험하였다. 시험은 액화천연가스 자동차용 용기의 최고충전압력(1.6 MPa 또는  $16.3 \text{ kg/cm}^2$ )을 기준으로 각각의 용기에 액체 질소를 동일한 충전량(190kg)으로 충전 후, 시간의 경과에 따른 내부 압력 변화를 압력계를 통하여 측정하였다. 외국 선진사(Foreign B사)의 제품과 본 연구 결과물은 총 14일 이상 동안 용기 내부 가스의 배출 없이 최고충전압력 이하를 유지하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 차량용 LNG 연료용기의 단열지지구조 설계 개발과 이에 대한 유한요소해석을 활용한 설계수준 평가 및 반응최적화 기법을 활용한 최적화를 통해 단열 성능 및 진동내구성 목표치를 만족하는 차량용 LNG 연료용기 단열지지구조를 개발하였다. 내진동 내구성을 고려한 내외조 연결부 지지 봉재 구조 설계안을 도출하였으며 단열을 위한 내조 내부 단열격판구조 설계안을 도출하였다. 설계수준을 3 수준으로 한 반응최적화를 통해 지지 봉재의 내경 및 외경의 최적화 치수는 각각 71mm, 79mm 였으며, 단열격판 코너부 곡률의 최적화 치수는 27.8mm 였다. 차량용 LNG 연료용기 최적화 설계안에 대한 유한요소해석을 통해 설계 기준의 만족 여부를 평가하여 설계에 대한 전산해석적인 검증을 완

료하였다. 개발된 설계는 시제품으로 제작하여 3차원 진동시험을 통과하였으며, 단열시험을 통해 목표 단열성능에 도달함을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Jungmin Chae, "The Development of LNG Vehicle" Report, Korea Gas Corporation R&D div. (2006)
- [2] Han Goo Kim, Seung Hyun Cho and Chung Kyun Kim, "The Study of Vibration Characteristics on the LNG Storage Tank Roof Structure," *Proceedings of '04 KIGAS Autumn conference*, 153-157.
- [3] J. P. Koh, J. H. Kim and S. K. Hong, "The evaluation of LNG Cryogenic Secondary pump vibration," *KIGAS*, 8(2), 48-53, (2004)
- [4] Jungmin Chae, Yongcheol Kim, Bonggyu Kim, Cheolman Kim and Seongho Hong, "Insulation Structure Analysis of LNG Fuel Tank and Experiment of Alternative Insulation Material," *Proceedings of '08 KIGAS Autumn conference*, 238-243.
- [5] Joengok Han and Youngwon Lee, "Study on Adiabatic Performance of LNG Storage Tank for Vehicles," *KIGAS*, 12(1), 31-35, (2008)
- [6] Sang-Kook Yun, Dong-Hyuk Kim, "A Study on the Structural Analysis of the Supporting System for LNG Vehicle Fuel Tank," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 32(6), 841-846, (2008)
- [7] Bayazitoglu, Y. and Ozisik, M. N., *Elements of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, (1988)
- [8] Flynn, T. M., *Cryogenic Engineering*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, (2005)
- [9] "Cryogenic Tank Support System," *US Patent* 3,905,508, (1975)
- [10] Bathe, K. -J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, New Jersey, (1996)
- [11] MSC Software Corporation, *MARC Manual*, (2008)
- [12] Sunhoe Kim, "Optimization of Cathod Flow Field Design for a PEMFC with Six Sigma Technique," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 20(6), 492-498, (2009)