

LNG 연료 추진선의 연료 탱크로서 탱크컨테이너의 적용성 연구 및 구조설계

김태우¹ · 서용석¹ · 장기복¹ · 전민성^{1,†} · 이강대² · 차경호²
삼성중공업¹
연세대학교²

A Study and Design on Tank Container for Fuel Tank of LNG Fueled Ship

Tae-Woo Kim¹ · Yong-Suk Suh¹ · Ki-Bok Jang¹ · Min-Sung Chun^{1,†} · Kang-Dae Lee² · Kyong-Ho Cha²
Samsung Heavy industries¹
Yonsei University²

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.

The objective of this study is to investigate tank container to be used as fuel tank for LNG fueled ship. Feasibility of tank container to the fuel tank of LNG fueled ship is addressed and the advantage of tank container as fuel tank of ship is investigated. Conceptual configuration of the tank container is designed as well as structural analyses based on finite element method are carried out to meet the design regulation suggested by shipping register. Static loading is considered by structural analysis and impact test is performed. It is necessary to require SRS(shock response spectrum) in order to investigate structural safety which can meet.

Keywords : Tank container(탱크 컨테이너), LNG fueled ship(LNG 추진선박), Dynamic impact test(동적 충돌 시험), SRS(충격응답스펙트럼)

1. 서론

지구 온난화 및 고유가로 인하여 기존의 석유에 비하여 온실가스 및 유해 가스의 발생이 적고 가격이 저렴한 천연가스의 수요가 점차적으로 증가하고 있는 추세이다. 자동차 분야는 이미 천연가스를 연료로 사용하는 버스들이 등장하여 사용되고 있고, 가정용 연료로서 천연가스를 사용하는 도시가스의 보급이 점차 확산되는 추세이다.

또한, 최근 IMO(International Maritime Organization)에서 선박의 운항 시 발생하는 온실가스를 제한하는 국제 규약의 제정을 추진하고 있으며, 북아메리카와 유럽 등의 선진국을 중심으로 ECA(Emission Control Area)를 설정하고 선박에 의한 배기가스 배출 규제를 강화되고 있다. 특히 선박의 운항으로부터 유기되는 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NOx) 그리고 황산화물(SOx)의 배출 규제가 점차적으로 강화됨에 따라, 성능개선을 통한 선박의 운항 에너지 효율을 높이기 위한 연구와, 유해물질의 배출을 줄일 수 있는 엔진 및 유해가스 처리장치 개발이 검토되고 있으며, 이와 더불어 LNG를 대체 연료로 개발하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

LNG를 선박의 추진연료로 사용하면 기존 MDO(Marine Diesel Oil)대비 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx)의 배출이 각각 85~90%, 100% 저감되고, 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO₂)의

배출이 15~20% 줄어든다고 알려져 있다 (Det Norske Veritas (DNV), 2010; DNV, 2011).

그러나 액체상태의 LNG를 추진연료로 사용하기 위하여는 기체상태의 NG(Natural Gas)로 상변화가 선행되어야 하며, 이러한 과정에 필요한 여러 장치들이 추가로 설치됨에 따라 추진시스템의 구성이 다소 복잡해지고 추진시스템 구성을 위한 추가의 공간이 요구되어 선박 건조비가 상승 될 수 있다. 그러나 상대적으로 가격이 저렴한 LNG의 사용으로 선박의 운영비가 줄어들어 2.5~5년 운영을 하면 투자비 회수가 가능한 것으로 알려져 있다 (Rolls Royce, 2011).

이러한 장점에도 불구하고 지금까지 건조된 LNG연료 추진 선박은 약 15척으로 추정되며, 대부분 연근해를 운행하는 페리(Ferry) 또는 소형 해양지원선 등에 제한되어 있다. 이는 LNG 연료 추진 시스템의 기술적 문제보다는 낮은 LNG의 연료 효율과 LNG bunker 링(Bunkering)을 위한 인프라 구축에 소요되는 비용 등의 경제적 관점의 제한으로 인하여 개발이 지연되고 있는 실정이다. 따라서 최근에는 정부기관, 대형 조선소, 선사 및 LNG 관련 사업자를 중심으로 LNG를 연료로 사용하는 대형 선박 및 LNG bunker 링 시스템을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 (Danish Maritime Authority (DMA), 2012), 또한 몇몇 선급에서는 LNG 연료 추진 시스템의 설계규정(Design guidance)을 제정하여 LNG

연료 추진 선박 개발을 준비를 하고 있다 (American Bureau of Shipping (ABS), 2011).

LNG를 연료로 사용하는 선박의 개발을 위하여는 LNG의 벙커링을 통한 LNG의 저장, 엔진 구동을 위한 연료공급 및 선박의 설계와 운항을 포함한 전체적인 시스템에 대한 효율성과 적정성이 평가되어야 한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 LNG를 선박에 공급하고 저장하는 시스템 중의 하나로 탱크컨테이너를 제안하고 LNG 연료 추진선박의 연료 탱크로 적용성을 검토하였으며, 아울러 제안된 탱크컨테이너에 대한 구조설계 및 구조안전성 검증을 수행하였다. 또한 동적 충돌시험에 대한 절차(procedure)를 분석하고 실제 시험을 수행함으로써 그 안전성을 확인하였다. Fig. 1은 대표적인 탱크컨테이너의 형상을 보여준다 (China International Marine Containers (CIMC), 2012).



Fig. 1 Typical shape of tank container

2. LNG 추진선박의 연료 탱크로서 탱크컨테이너의 적용성 연구

LNG를 연료로 추진하는 선박의 개발을 위하여는 LNG 벙커링에서부터 엔진의 구동까지 일련의 프로세스에 대한 효율성 뿐만 아니라 선박의 운용 및 안전성 확보에 대한 관점에서도 세밀한 기술적 검토를 거쳐야 한다. 이러한 관점에서 LNG 추진선박의 개발을 위하여 검토되어야 할 기술적 요소를 아래와 같이 분류할 수 있다.

1. LNG를 연료로 구동되는 엔진의 사양에 따른 연료 공급장치의 설계 관련 기술
2. 극저온의 LNG 을 저장하는 연료 탱크의 설계 관련 기술
3. 선박의 효율적 운용과 성능에 관련된 설계 기술
4. LNG 운용에 따른 위험성 분석과 안전성 확보를 위한 기술
5. LNG 벙커링을 위한 제반 기술

LNG 연료 추진선박의 개발을 위하여는 전술한 모든 기술 요소에 대한 검토가 상세히 되어야 하지만 여기서는 엔진과 연계된

연료 공급장치의 설계, LNG 연료 탱크의 배치, 그리고 벙커링의 관점에서 LNG 연료 탱크로서의 탱크컨테이너의 유용성을 검토하였다.

2.1 선박용 LNG 연료 탱크의 고찰

LNG 연료 탱크는 선박 운항시 발생할 수 있는 극심한 환경 하중에 대하여 극저온 ($-163^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$) 상태의 LNG를 안전하게 저장하고 엔진의 구동을 위한 연료 공급 장치에 연료를 원활히 공급할 수 있도록 설계 되어야 한다. 현재 LNG를 저장 및 운송하는 목적으로 개발된 선박용 LNG 저장 탱크로는 멤브레인 (Membrane) 타입의 LNG 탱크와 IMO A, B, C-type 독립탱크가 있다 (International Maritime Organization (IMO), 2010).

멤브레인 타입 탱크는 동일한 선박의 크기에서 LNG를 많이 저장할 수 있는 장점이 있으나, LNG 기화에 따른 탱크 내부 압력 상승에 취약하고, 선박 운항 중 발생하는 슬로싱 현상에 대한 구조적 안전성을 확보하기가 어려워 LNG 연료탱크로서 적용이 어려운 것으로 알려져 있다 (Harperscheidt, 2011).

IMO A-type 및 B-type 탱크는 탱크 내부의 보강을 통하여 슬로싱에 대한 안전성 확보가 가능하고 C-type 탱크에 비하여 공간의 활용성이 우수하여 LNG 연료탱크로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 탱크내부 압력을 높게 설계할 수 없어 BOG(Boil off Gas) 발생이 많아 이에 대한 대책이 요구된다. 반면 IMO C-type의 탱크는 슬로싱에 대한 구조적 보강이 가능하고 입력용기 (Pressure vessel)의 개념으로 설계됨에 따라 높은 탱크 내부압력에 의하여 LNG 기화온도가 상승하여 BOG 발생을 현저히 줄일 수 있으며, 설치 방법이 간단하고 유지보수 비용이 적게 드는 장점이 있다. 그러나 탱크 중량이 증가하고 공간 효율성이 떨어져 대량의 연료를 적재해야 하는 장거리 운항을 하는 대형선의 경우는 적용이 어려울 것으로 사료된다.

연료의 에너지 효율성을 단위 부피에 대한 일량 (Equivalent work)으로 표현하면, LNG의 연료 효율성은 디젤연료 대비 50% 수준으로 알려져 있다 (Paulo, 2000). 따라서, 장거리 운항을 하는 10만 톤급 유조선은 LNG 연료로 운항한다면, LNG 연료탱크의 크기는 $5,000\text{m}^3$ 이상이 되어야 할 것으로 추정되며, 이런 경우 상대적으로 공간 효율성이 떨어지는 C-type 탱크는 탱크 제작 비용과 선박의 공간 효율성 관점에서 적용이 어려울 것으로 판단된다. 반면, 100m^3 이하의 연료 탱크를 사용하는 소형의 선박은 연료탱크의 자체의 중량이나 공간 효율성 보다 벙커링과 엔진에 연료를 공급하는 시스템의 구성이 상대적으로 중요한 설계 인자가 되므로 탱크 내부 압력을 가지는 C-type 탱크가 더 효율적일 수 있다. 지금까지 개발된 LNG 연료 추진 선박은 모두 IMO C-type 독립 탱크를 연료탱크로 채택하고 있는데, 이는 현재 개발된 대부분의 LNG 연료 추진선박이 연료 소모량이 적고 상대적으로 작은 엔진마력을 요구하는 연근해를 운항하는 소형선박이기 때문으로 추정된다.

이러한 관점에서 본 연구에서 제안하는 탱크컨테이너는 컨테이너 전체 부피대비 LNG 적재 용량이 약 30%의 낮은 공간 효율

성에도 불구하고 내부 압력을 가지는 탱크로 설계가 가능하고 선박에 탑재가 용이하여, 소형선박의 LNG 연료 탱크로서 적용 가능성이 있다고 사료된다.

2.2 엔진 및 연료 공급장치와 연계한 탱크컨테이너 유용성

현재 개발된 LNG를 연료로 사용하는 선박용 엔진은 엔진에 분사되는 가스 압력에 따라 25MPa 이상의 고압의 가스를 분사하는 엔진과 1MPa 내외의 중저압의 가스를 분사하는 엔진으로 나누어질 수 있다. 고압의 가스를 분사하는 경우 에너지 효율이 높은 장점이 있으나, 고압의 가스를 만들기 위한 펌프가 추가되어야 하는 단점이 있다. 반면에 중저압의 가스를 분사하는 엔진의 경우 승압을 위한 별도의 장치가 필요 없이 연료 탱크에서 직접 기화기로 연료를 공급하는 시스템을 설계함으로써 연료공급 장치를 간단하게 구성할 수 있다.

따라서 연료 소모량이 많고 큰 엔진 마력을 요구하는 대형선의 경우 고압의 가스를 사용하는 엔진이 적합하고 상대적으로 작은 엔진 마력에서 구동하는 소형선의 경우 연료공급 장치의 시스템이 간단한 중저압의 가스를 분사하는 엔진이 적합할 것으로 사료된다. 아울러 소형선에 중저압의 가스를 분사하는 엔진을 사용하는 경우 탱크컨테이너의 내부 압력을 엔진에 분사하는 가스의 압력 이상으로 설계 함으로써 연료공급장치를 비교적 간단하게 설계를 할 수 있을 것으로 생각된다.

2.3 LNG 병커링을 고려한 탱크컨테이너의 유용성

LNG 연료 추진선박의 개발을 위하여는 선박 내부의 장치 및 시스템의 개발뿐 아니라, 외부로부터 LNG를 선박에 공급하는 병커링에 관한 부분도 함께 검토되어야 한다. 현재 알려진 LNG 병커링 방법은 아래의 3가지로 알려져 있다 (DMA, 2012).

- 육상의 LNG 터미널에서 파이프라인을 이용하여 병커링 하는 방법
- 육상에서 탱크로리를 이용하여 병커링 하는 방법
- 해상의 병커링 선박을 이용하는 방법

육상의 LNG 터미널에서 파이프라인을 이용하여 병커링 하는 방법은 LNG 터미널에서 병커링을 위하여 지정된 장소로 파이프라인을 설치하여 병커링을 하는 방법으로 대량의 LNG를 짧은 시간에 선박에 주입할 수 있는 장점이 있으나 파이프라인 설치에 따른 초기 투자 비용이 많이 들고, 병커링을 위하여 지정된 장소로 선박이 이동해야 하는 불편함이 있다. 따라서 선박의 이동에 따른 시간적 손실을 줄이기 위하여 해상에서 LNG 병커링 전용선을 이용한 병커링을 수행하는 방법도 고려되고 있으며 (Swedish Marine Technology Forum (SMTF), 2010), 100m³~200m³ 소량의 LNG 병커링을 하는 경우는 육상에서 탱크로리(Tank Lorry)를 이용하여 간단히 LNG 연료를 공급하는 것이 더 효과적인 것으로

알려져 있다 (DMA, 2012).

병커링에 있어 탱크컨테이너는 매우 실용적인 대안으로 제시될 수 있다. 즉, 지금까지 제시되고 있는 병커링 방법은 시간이 많이 소요되는 것으로 알려져 있으며, 또한 병커링 작업에 따른 위험성도 내재하고 있다. 반면 규격화된 탱크컨테이너를 이용하는 경우 크레인을 이용하여 간단히 탑재만 함으로써 LNG 병커링이 가능한 장점이 있다. 이런 경우 병커링 시간의 단축과 함께 LNG 병커링에 따른 위험성이 줄어들 수 있는 장점이 있다.

2.4 선박 배치 관점에서 탱크컨테이너의 유용성

LNG 연료 추진선을 설계함에 있어, 연료탱크를 어디에 배치하느냐는 또 하나의 고려해야 할 인자이다. 특히 기존의 선박을 LNG 연료 추진선박으로 개조하는 경우 연료탱크의 배치 및 설치방법 그리고 병커링을 위한 별도의 공간을 확보하기 위한 제약이 따른다. 그러나 탱크컨테이너를 적용하면 연료 탱크를 외부 노출 갑판 상부에 쉽게 설치할 수 있어 이러한 제약을 받지 않고 설계를 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 탱크컨테이너의 탑재를 위하여 크레인이 필요하고 여러 개의 탱크컨테이너가 서로 연결되어 운용되어야 하므로 배관망이 복잡해질 수 있으며, 공간효율성이 떨어져 많은 연료를 필요로 하는 대형선에는 적용이 어려울 것으로 사료된다.

Fig. 2는 탱크컨테이너가 탑재된 예를 보여주고 있다 (Levander, 2011).

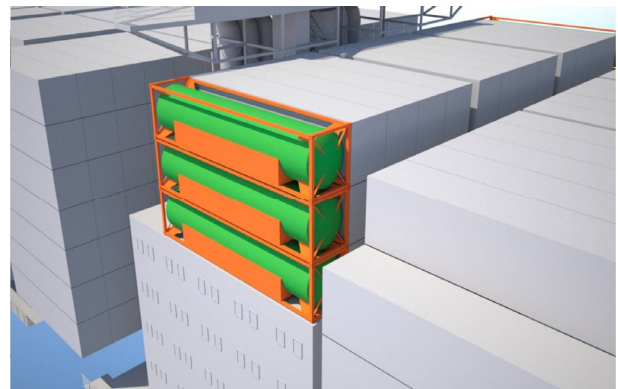


Fig. 2 Typical configuration of tank container for container ship

이상과 같이 선박의 LNG 연료 탱크로서 탱크컨테이너의 유용성에 대하여 간략히 검토하였다. 탱크컨테이너는 컨테이너 전체 부피에 비하여 탱크의 용적이 작아 대량의 연료를 적재하는 대형선에는 적용이 어려우나, 연근해를 운항하는 소형 선박에서는 적용상 장점이 있을 것으로 사료된다.

3. 탱크컨테이너의 구조설계

여기서는 개발된 탱크컨테이너에 대한 구조설계 내용을 소개함으로써 탱크컨테이너의 구조 설계시 중요하게 고려되어야 할

기술적 요소에 대하여 기술하고자 한다.

탱크컨테이너는 엔진의 운용조건에 적합한 탱크 설계 조건을 갖추어야 함과 동시에, LNG 저장기로부터 병커링을 하는 부두까지의 탱크컨테이너의 운송을 위하여 필요한 도로운송, 철도운송 및 해상운송을 포함하는 조건으로 선급의 규정을 만족할 수 있도록 설계하여야 한다 (Korea Register of shipping (KR), 2008; International Organization for Standardization (ISO), 1995).

본 연구에서 개발된 탱크컨테이너의 설계는 크게 두 가지 관점에서 이루어졌다. 하나는 구조적 안전성을 확보하는 관점에서 설계가 이루어졌으며, 또 하나는 적절한 단열성능을 확보하여 탱크 내부 LNG의 기화량을 최소화 하는 관점에서 수행되었다.

먼저, 탱크컨테이너의 단열 성능을 높이기 위하여 탱크를 이중 각 구조로 설계하고 내부 탱크와 외부 탱크 사이 공간을 0.05 torr 이하의 진공으로 유지하여 전도 및 대류에 의한 열 손실을 최소화 하였다. 또한 이 단열 공간에 퍼얼라이트(Perlite)를 충전하여 복사 열의 차단을 도모함과 동시에 예상치 않은 문제로 인한 진공성능 저하에 따른 급격한 내부 온도 변화를 방지 하도록 하였다.

탱크컨테이너의 구조는 크게 내압을 가지는 압력용기의 역할을 하는 탱크부분과 운송시 탱크를 고정하고 안전하게 보호하는 프레임 부분으로 나눌 수 있다. 현재 탱크컨테이너를 LNG연료 추진선의 연료 탱크로서 사용하기 위한 관련 규정이 정립되지 않음에 따라 본 연구에서는 내압을 담당하는 탱크 부 구조는 IGC code (IMO, 1990; IMO, 2010), American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2011), 고압가스안전관리법 (Korea Gas Safety corporation (KGS), 2011)을 모두 만족하는 조건으로 설계를 하고, 프레임 부분은 한국선급 해상 컨테이너지침 (korea Register (KR), 2008)에 따라 설계를 하였다.

Table 1 Specification for tank Container

Type	Vacuum insulation ISO Frame Cryogenic Container(40ft)	
Dimension	Length mm	12,196
	Breadth mm	2,438
	Height mm	2,591
Weight	Empty kg	13,900
	Fluid kg	12,040
	Gross kg	25,940
Design Data		
Internal volume Litter		29,401
Storage volume Litter		26,461
Fluid		LNG
Capacity kg		12,040
Pressure	Design MPa	0.9
	Operating MPa	0.6

3.1 탱크컨테이너 제원 및 사양

본 연구에서 개발된 탱크컨테이너는 아래 Table 1에 명시된 바와 같이 디자인 되었다.

3.2 탱크컨테이너의 구조 강도 설계

탱크컨테이너의 구조 강도 설계를 위하여 AC111 (KGS, 2011) 에 따라 아래와 같이 내부 설계 압력에 따른 내부 탱크의 동판과 경판의 두께를 각각 계산하였다.

$$t_c = \frac{P_d D}{2\sigma_a \eta - 1.2P_d} \quad (1)$$

$$t_h = \frac{P_d D V}{2\sigma_a \eta - 0.2P_d} \quad (2)$$

여기서, t_c 는 최소 동체 두께, t_h 는 최소 경판 두께, P_d 는 설계 압력, D 는 탱크직경, η 는 용접효율, σ_a 는 최대허용응력 그리고 V 는 경판의 형상계수를 의미한다.

탱크컨테이너는 일정한 곳에 설치하여 운용되는 일반 압력탱크와 달리 선박, 트럭 및 철도 등을 이용한 운송이 가능해야 하므로 이에 따른 구조안전성 평가도 수행되어야 한다. 운송 관점에서 선급 지침에 명시 되어 있는 구조 안전성 검증을 위하여 요구하는 시험 항목은 아래와 같다 (KR, 2008).

1. Stacking(겹침 적재)
2. Lifting from the four top corner fitting(상부 들어올리기)
3. Lifting from the four bottom corner fitting(하부 들어올리기)
4. External restraint(longitudinal)(종방향 외부 구속)
5. Dynamic longitudinal impact test(종방향 내부 동적 구속)
6. Internal restraint(lateral)(측면 내부 구속)
7. Transverse racking test
8. Longitudinal racking test
9. Walk way(보행로 판)
10. ladders(사다리)
11. pressure test(내압시험)

상기 시험 항목의 대부분은 탱크컨테이너를 인양하고 적재하면서 발생할 수 있는 하중에 대하여 프레임의 강도를 주로 검증하는 정적 하중 시험이나, 종방향 내부 동적 구속시험은 철도운송에서 화차간 저속 충격으로 인하여 발생할 수 있는 하중에 대한 동적 구조안전성을 평가하는 시험을 수행해야 한다. 본 연구에서는 탱크컨테이너의 구조설계를 위하여 종방향 동적 구속시험을 제외한 상기 시험 항목에 대한 구조해석을 수행하였다.

3.2.1 정적 하중 시험에 대한 구조해석

본 절에서는 상기 언급한 탱크컨테이너 시험 조건 중 탱크컨테이너의 인양과 운송의 관점에서 수행되는 시험조건에 대하여 정적 구조해석을 수행하여 탱크컨테이너의 안전성을 검증하였다. 다만, 보행로 및 사다리 실험은 탱크 컨테이너 자체에 크게 영향을 주는 항목이 아니므로 본 논문에서는 검토하지 않았다. 각 실험 항목들은, 실제 다수의 컨테이너가 상부로 적재 될 때, 크레인을 이용해서 들어올려 질 때, 컨테이너 각각이 길이방향 혹은 폭 방향으로 서로 영향을 미칠 때 등을 모사하여 선정되었으며, 실험 방법에 대한 상세사항은 한국선급 해상 컨테이너지침 (KR, 2008)에 따랐다.

구조해석은 범용 유한요소해석 코드인 Nastran2004을 사용하여 정적 해석을 수행하였다. Fig. 3에서 완성된 탱크컨테이너의 유한요소 모델을 보여주고 있다.

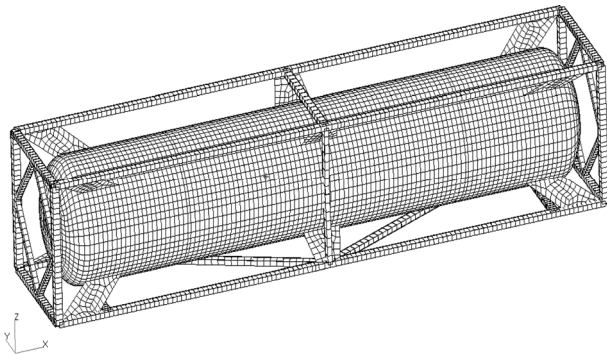


Fig. 3 FE model of tank container

정적 하중 시험에 사용되는 하중 조건은 탱크컨테이너의 운용 시 발생할 수 있는 동적 하중까지 포함한 설계하중으로서 상부 및 하부 달아 올리기 시험에서 사용하는 하중은 아래와 같이 정의된다 (KR, 2008).

$$L_t = 2 \times R \tag{3}$$

여기서, L_t 는 시험 하중, R 는 최대 총 중량으로서 컨테이너의 실제 하중에 관계없이 30,480kg로 적용한다.

이러한 실험 조건은 현재 설계된 40ft 탱크컨테이너의 최대 중량이 25,940 kg임을 고려하면 탱크컨테이너 실제 중량의 2.35배에 해당하는 중량을 매달아서 실험을 하는 것이 되어 보수적인 관점의 설계를 유도한다고 사료된다.

시험결과의 평가 기준은 시험 완료 후 사용상 지장을 초래하는 영구변형 또는 이상이 있어서는 안된다는 것으로 되어 있으며 (KR, 2008), 이는 시험에서 고려된 하중 조건이 충분히 보수적으로 정의 됨에 따라 육안상으로 발견하기 어려운 국부적인 재료의 소성은 허용한다는 의미로 풀이될 수 있으며, 이러한 관점에서 구조해석에 사용된 허용응력은 추가의 안전계수(Safety factor)를 고려하지 않고 재료 항복응력으로 하였다.

Table 2 에 탱크컨테이너의 사용재질에 대한 허용응력을 정리하였다.

Table 2 Allowable stress

	von-Mises Stress : plate (MPa)	Combined Stress : beam (MPa)	Shear Stress (MPa)
HT36	355	355	205
SUS304	215	215	124

전술한 실험방법을 이용하여 구조해석을 수행하였으며, Table 3에 전체 해석결과를 정리하였다.

Table 3 Result of analysis for static test

Load case	Maximum stress(MPa)		
	von-Mises (MPa)	Shear (MPa)	beam (MPa)
Stacking	74.6 ¹⁾	42.6 ¹⁾	- 198 ²⁾
Upper lifting	125 ¹⁾	72.1 ¹⁾	- 242 ²⁾
Lower lifting	132 ¹⁾	71.5 ¹⁾	- 194 ²⁾
External restraint	132 ¹⁾	72.9 ¹⁾	- 162 ²⁾
Internal restraint	160 ¹⁾	89.1 ¹⁾	- 63.3 ²⁾
Transverse racking	41.6 ¹⁾	23.6 ¹⁾	- 70.9 ²⁾
Longitudinal racking	35.6 ¹⁾	18.2 ¹⁾	- 36.9 ²⁾
Pressure	184 ¹⁾	105 ¹⁾	- 12.8 ²⁾

- 1) HT36 재질에서 최대응력 발생
- 2) SUS304재질에서 최대응력 발생

최대응력은 주로 외부 탱크 구조에서 도출되었는데, 이는 탱크 컨테이너의 외부를 감싸고 있는 프레임구조에서 발생한 하중이 프레임과 탱크를 연결해주는 지지구조를 통하여 외부 탱크 구조에 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

이상과 같이 탱크컨테이너의 운송 시 발생할 수 있는 다양한

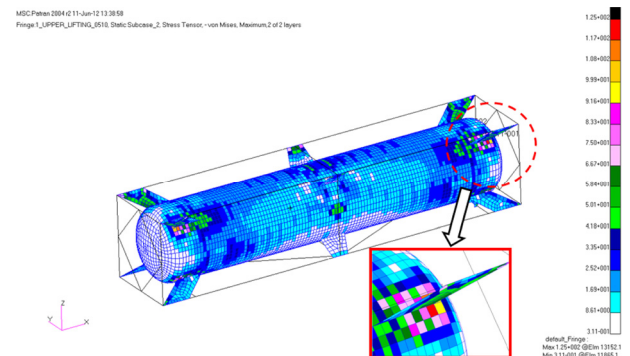


Fig. 4 von-Mises stress distribution for upper lifting test condition

하중 상태에 대하여 구조적인 안전성을 검증할 수 있는 시험 조건에 대한 구조해석을 수행함으로써, 상대적으로 취약한 구조 부위를 찾고 이에 대한 적절한 구조 보강을 통하여 운송 중에 구조적 안전성을 확보할 수 있는 탱크컨테이너 구조를 개발하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 최대응력이 도출된 상부 들어올리기 조건에 대한 해석 결과를 보여주고 있다.

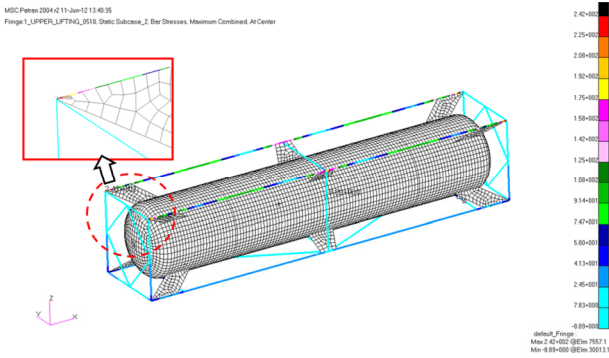
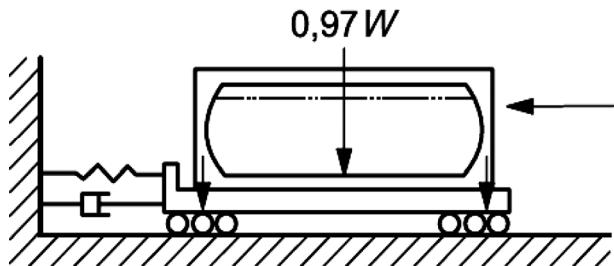


Fig. 5 Beam stress distribution for upper lifting test condition

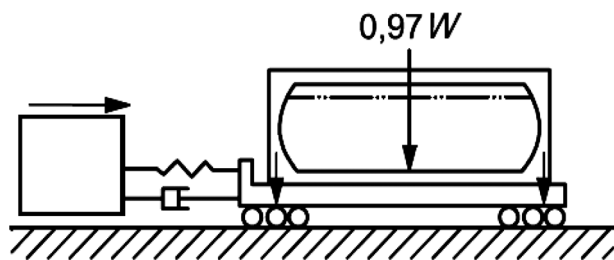
3.2.2 동적 하중 시험

본 절에서는 탱크컨테이너의 철도 운송시 발생할 수 있는 화차 간의 충격 조건에서의 동적 하중시험에 대해 검토하고 실제 충돌 시험을 수행하였다. 동적 하중 시험방법 및 평가는 International Organization for Standardization(ISO) 1496-3(1995)과 한국선급 해상 컨테이너지침 (KR, 2008)에 따랐다.

탱크컨테이너의 동적 하중 시험은 Fig. 6에 보이는 바와 같은



(a) Tank container striking a stationary mass



(b) Tank container being struck by a moving mass

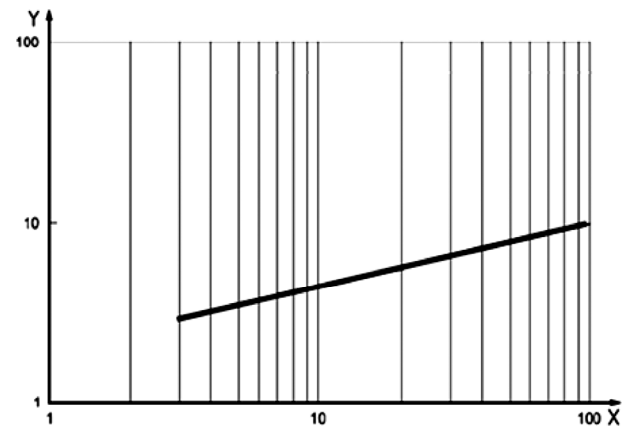
Fig. 6 The scheme of dynamic longitudinal impact test (KR, 2008)

두 가지 방법으로 이루어 질 수 있다. 즉, 물이나 비기압 유체를 전체 탱크 부피의 97%까지 채운 탱크컨테이너를 바퀴가 달린 실험플랫폼에 적재한 후 하부 모서리끼움쇠(Corner fittings)를 이용하여 실험플랫폼에 고정한다. 이후 플랫폼에 속도를 가하여 고정 벽에 충돌시키는 방법과 임의의 질량을 가진 충돌체에 속도를 가하여 실험플랫폼에 충돌을 시키는 방법을 통하여 충격을 발생시킨다. 이 때 충돌체와 피충돌체 사이에는 적절한 완충장치를 설치하여 실험에서 요구하는 충격응답스펙트럼(Sock Response Spectrum) (Julius, 2000)이 나오도록 충돌을 하여야 한다.

Fig. 7은 ISO 1496-3(1995)에서 요구하는 가속도에 대한 최소 충격응답스펙트럼 선도를 보여주고 있다. 이 곡선은 충돌시 발생하는 여러 가지 진동 주기에 대한 가속도의 최대응답을 나타내는 것으로서 충돌시 발생하는 충격의 크기를 정량적으로 나타내는 지표로 사용될 수 있다. 즉, 가속도가 크면 충격도 크다는 의미를 포함한다. 따라서 ISO 1496-3(1995)에서는 탱크컨테이너의 동적 하중 시험에서 충격 크기를 가속도에 대한 충격응답스펙트럼으로서 정의하고 동적 하중 시험 시 발생하는 가속도의 크기가 모든 주파수 영역에서 아래의 값 이상이 되도록 하는 시험을 요구하고 있다.

$$Acc = 1.95 \times f^{0.355} \tag{4}$$

여기서, Acc 는 탱크컨테이너의 가속도이고 f 는 가속도에 해당하는 주파수이다.



Key

X Frequency (Hz)

Y Acceleration, g (m/s²)

Equation for generating the above minimum SRS curve: $ACCEL = 1.95FREQ^{0.355}$

Fig. 7 The minimum shock response spectrum curve (KR, 2008)

이러한 주파수와 가속도의 관계는 시험에 사용되는 탱크컨테이너와 실험플랫폼의 질량, 초기 충돌속도 그리고 충돌체와 피충돌체 사이에 설치되는 완충장치의 성능 등의 여러 가지 요소에 복합적인 영향을 받는다. 따라서, 시험 전 결과에 대한 예측을 잘못하

는 경우 요구되는 최소응답스펙트럼을 만족하는 실험 조건을 찾기 위하여 여러 번의 시험을 반복 수행해야 할 수도 있다. 본 연구에서는 실제 컨테이너의 예비 충돌실험을 통하여 동적 하중 시험조건을 찾고 전술한 충돌 절차에 따라 시험을 수행하였다.

실제 실험은 Fig. 6에 도시한 2가지 방법중 a)의 방법으로 수행되었으며 화차 전면부에 완충기를 설치하여, 충돌시의 duration time을 늘려 적정 SRS가 도출될 수 있도록 하였다. Fig. 8은 실제 탱크컨테이너를 화차에 탑재한 후 시험이 수행되는 모습을 보인다.

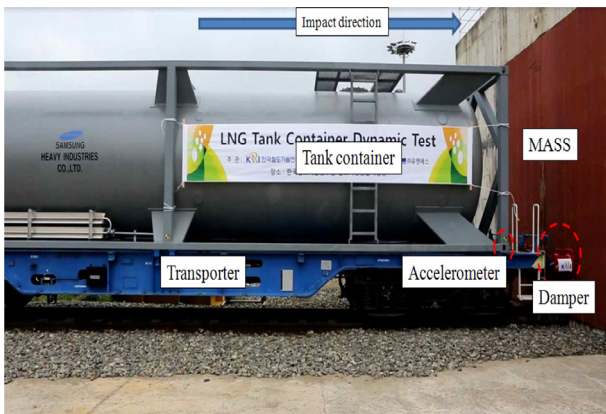


Fig. 8 Impact test for tank container

적절 SRS를 도출하는 충돌조건을 찾기 위해 예비 시험이 수행되었고 최종적으로 약 7km/h의 충돌속도에서 기준 SRS를 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 아래 Fig. 9, SRS결과를 보인다. Acceleration #1,2는 컨테이너 프레임 하부 전면에 2군데에 부착된 가속도계에서 도출된 결과를 나타낸다.

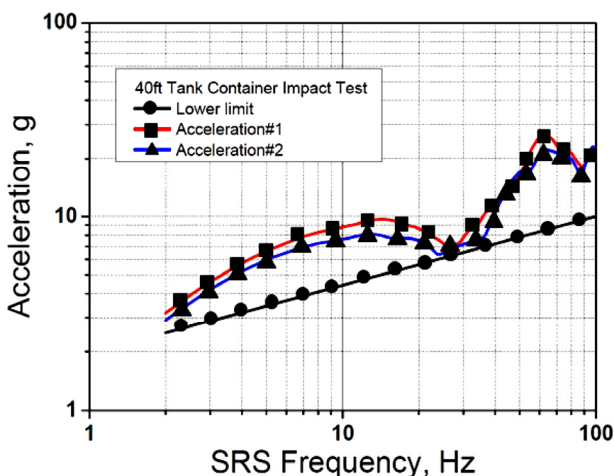


Fig. 9 Shock response spectrum

SRS 분석결과, 선급에서 제시된 조건을 모두 만족하고 있었으며, 시험 후 탱크컨테이너 사용상에 문제가 될 만한 누수 및 연구 변형, 이상이 발견되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 연근해를 운항하는 소형의 LNG연료 추진 선박에 효율적으로 연료를 공급하기 위한 시스템으로서 LNG 탱크컨테이너의 개념을 소개하고 이에 대한 유용성 검토를 수행하였다. 또한, 탱크컨테이너의 설계를 위하여 필요한 관련 지침을 조사하고 이에 따른 탱크컨테이너의 구조설계를 수행하였다.

특히 탱크컨테이너의 운송을 위하여 요구되는 선급 지침에 의거하여 수행되는 각종 시험조건에 대하여 구조해석을 수행하고 실제 충돌시험을 수행함으로써 그 안전성을 검토하였다.

본 연구결과를 간략히 요약하면 아래와 같다.

1. LNG 연료 추진선박의 연료탱크설계의 설계를 위하여 고려해야 할 기술적 사항에 대하여 전반적으로 검토를 하였다.
2. 현재 개발된 선박용 LNG 탱크의 특성에 대하여 고찰하고 LNG 연료 추진선박의 연료탱크로서 탱크컨테이너의 적용성에 대하여 검토하였다.
3. 탱크컨테이너를 LNG 연료추진선의 연료탱크로 사용하는 경우, 기존의 IMO C-type 탱크가 가지는 장점에 추가하여 버킹 링 관점에서 상당한 장점을 가질 수 있음을 확인하였다.
4. 탱크컨테이너의 구조 설계에 대한 연구를 수행하고 현재 개발된 선급 승인조건에 따라 구조설계를 수행하였다.
5. 탱크컨테이너의 동적충돌시험에 대한 절차(procedure)를 분석하고 실제 시험을 통해 개발된 탱크컨테이너의 안전성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2011년도 국토해양부 기술연구개발사업(교통체계 효율화사업)의 결과로 작성된 것이며, 연구를 위하여 지원해주신 모든 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

American Bureau of Shipping (ABS), 2011. *Propulsion and auxiliary systems for gas fueled ships*.

American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2011. *Rule for Construction of Pressure Vessels*, Section VIII Division 1.

China International Marine Containers (CIMC), 2012. *China International Marine Containers* [Online] Available at: <http://www.cimc.com> [Accessed 27 September 2012].

Danish Maritime Authority (DMA), 2012. *A feasibility study for an LNG filling station infrastructure and test of recommendations*, North European LNG Infrastructure Project.

Det Norske Veritas (DNV), 2010. *Greener Shipping in the Baltic Sea*, Technical report.

Det Norske Veritas (DNV), 2011. *Greener Shipping in North America*, Technical report.

Harperscheidt, J., 2011. *LNG as a Ship's Fuel*, Green Ship Technology.

International Maritime Organization (IMO), 1990. *International Maritime Dangerous Goods Codes*.

International Maritime Organization (IMO), 2010. *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk*.

International Organization for Standardization (ISO), 1995. *Series 1 freight containers—Specification and testing, Part 3, ISO 1496-3*.

Julius, S.B., 2000. *Random data analysis and Measurement Procedures*, WILEY INTER SCIENCE.

Korea Gas Safety corporation (KGS), 2011. *Korea Gas Safety Code*, KGS AC111.

Korea Gas Safety corporation (KGS), 2011. *Korea Gas Safety Code*, KGS AC113.

Korean Register of shipping (KR), 2008. *The guidance of marine container*.

Levander, O., 2011. *Fuel selection for Ro-Ro Vessels*, Ro-Ro Shipping Conference.

Paulo, B.S., 2000. *UK LNG Fast Ferry Program and Challenges*, US Maritime Administration Workshop.

Rolls-Royce, 2011. *The use of LNG as fuel for propulsion on board merchant ships*, European Fuels Conference.

Swedish Marine Technology Forum (SMTF), 2010. *LNG ship to ship bunkering procedure*.

