

# 단열 파우더를 채운 LNGCC의 BOR예측에 관한 연구

## A Study on the Boil-Off Rate Prediction of LNG Cargo Containment Filled with Insulation Powders

한 기 철\*      황 순 옥\*      조 진 래†      김 준 수\*\*\*  
Han, Ki-Chul    Hwang, Soon-Wook    Cho, Jin-Rae    Kim, Joon-Soo  
윤 종 원\*\*\*\*      임 오 강\*\*      이 시 복\*\*  
Yoon, Jong-Won    Lim, O-Kaung    Lee, Shi-Bok

### 요 지

본 연구를 통해 superlite라 불리는 단열 파우더를 채운 NO96 멤브레인 타입 LNG선 단열 화물창의 만선행해 시 LNG의 BOR(Boil-Off Rate) 예측모델을 제시하였다. LNGCC(LNG Cargo Containment)의 비정상상태 열전달 FEM모델은 만선행해 시 대기 및 해수 조건을 반영하고 복잡한 화물창 단열구조에 균질화 기법을 적용하여 구축하였다. BOR은 만선행해 중 LNGCC 내부로 침입하는 총 열량을 이용하여 평가되었으며, 주요 변수에 따른 BOR의 변화는 파라메트릭 열전달해석을 통하여 분석하였다. 그리고 파라메트릭 BOR 특성해석 결과를 토대로 LNG선의 탱크 크기, 단열층의 두께 그리고 superlite의 열전도율을 함수로 하는 BOR 예측모델을 유도하였다. 비선형 과도 열전달해석을 통해 직접 구한 BOR과의 비교를 통해 유도한 예측모델은 최대 1% 이내의 상대오차를 나타내었다.

**핵심용어** : LNG선 화물창, 단열 파우더, 단열성능, BOR 예측모델, 등가 물성치, 비선형 과도 열전달해석

### Abstract

A BOR(Boil-Off Rate) prediction model for the NO96 membrane-type LNG insulation containment filled with superlite powders during laden voyage is presented in this paper. Finite element model for the unsteady-state heat transfer analysis is constructed by considering the air and water conditions and by employing the homogenization method to simplify the complex insulation material composition. BOR is evaluated in terms of the total amount of heat invaded into LNGCC and its variation to the major variables is investigated by the parametric heat transfer analysis. Based upon the parametric results, a BOR prediction model which is in function of the LNG tank size, the insulation layer thickness and the powder thermal conductivity is derived. Through the verification experiment, the accuracy of the derived prediction model is justified such that the maximum relative difference is less than 1% when compared with the direct numerical estimation using the FEM analysis.

**Keywords** : LNG cargo containment(LNGCC), insulation powder, insulation performance, boR(Boil-Off Rate) prediction model, equivalent material properties, nonlinear transient heat transfer

### 1. 서 론

LNG선은 천연가스(NG: natural gas)를 바다를 통해 원산지로부터 각 나라로 운송하도록 특수하게 제작된 대형 선박

이다. LNG선 내부에는 천연가스를 적재할 수 있는 LNGCC라 불리는 다수의 화물창(cargo)이 설치되어 있으며, 1회 운항시 운송효율을 최대화하기 위하여 천연가스는  $-160^{\circ}\text{C}$ 이하로 액화된 상태로 적재된다. 극저온으로 액화된 천연가스는 운

† 책임저자. 정회원 · (주)마이더스아이티 기술연구소 부소장  
Tel: 051-510-3080 ; Fax: 051-514-7640  
E-mail: jrcho@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 기계공학부 대학원 석사과정

\*\* 부산대학교 기계공학부 교수

\*\*\* 한국에너지기술연구원 책임연구원

\*\*\*\* (주)경동세라텍 중앙기술연구소 소장

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

항 중 LNG선의 요동에 따른 슬로싱(sloshing)이라 불리는 극심한 출렁임과 외부로부터 열침입을 받게 된다(Abramson 등, 1974). 특히 외부로부터의 과도한 열침입은 액화상태 천연가스의 기화에 따른 부피팽창으로 한정된 화물창 공간내에 엄청난 압력증가를 야기한다(허진욱 등, 2003). 따라서, 화물창은 외부로부터 열침입을 차단할 수 있도록 다수의 복합 단열층으로 구성되어 있을뿐더러, 내부 슬로싱 충격응답에 대하여 충분한 구조적 강도를 지녀야 한다(Cho 등, 2008).

LNGCC의 단열시스템은 구성재질과 구조적인 측면에서 크게 두가지로 분류된다(박성우 등, 2003). 폴리우레탄 폼, 나무층 그리고 스텐인레스 membrane 강판을 적층시킨 타입과 honey comb와 유사한 나무 상자에 단열 파우더를 채운 NO96 타입이 있다. 이러한 타입과는 무관하게 화물창의 크기는 LNG선의 크기에 제약을 받게 되는데, 항해시 운하를 통과해야 하는 특성상 LNG선의 크기는 무한정 증가시킬 수 없다. 따라서 단열층 두께를 감소시켜 화물창 내부 체적을 증가시키는 방안이 대두되고 있다.

본 연구는 135,000m<sup>3</sup>급 NO96 타입의 멤브레인 LNGCC를 대상으로 하며, 보다 구체적으로는 superlite라 불리는 파우더 형태 단열재의 단열성능 예측모델을 비선형 과도 열전달 해석을 이용하여 유도하는 것이다. superlite 단열 파우더는 파우더 자체의 열전달 특성 실험으로부터 기존의 perlite보다 우수하다고 알려져 있다. 하지만 이러한 파우더 자체의 열전달 실험은 LNGCC의 구조적인 특성을 전혀 반영하고 있지 않기 때문에 그 신뢰성을 입증하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 BOR에 따른 위험성이 높은 만선향해 조건과 단열구조의 복잡성을 해결하기 위한 등가 물성치 개념을 적용하였다. 그리고 주요 인자들을 변수로 한 파라메트릭 비선형 과도 열전달 해석을 통해 superlite의 BOR 발생량을 예측할 수 있는 모델을 유도하고자 한다.

## 2. 단열 파우더를 채용한 LNG선의 화물창

### 2.1 단열 파우더의 열기계적 특성

멤브레인형 LNG선 중 NO96의 경우 Mark-III형과 다르게 단열재를 우레탄 폼을 사용하지 않고 단열 파우더를 사용한다. 기존에 운항되고 있는 많은 선박에 사용되고 있는 대표적 단열 파우더는 perlite이다. 본 연구에서는 경동세라텍에서 개발한 superlite를 단열재로 적용하여 BOR를 예측하였으며 그림 1은 기존의 단열 파우더인 perlite와 개발품인 superlite의 특성을 비교한 것이다. Superlite의 밀도는 perlite의 60~70%이지만 열전도율이 구간에 따라 20%~

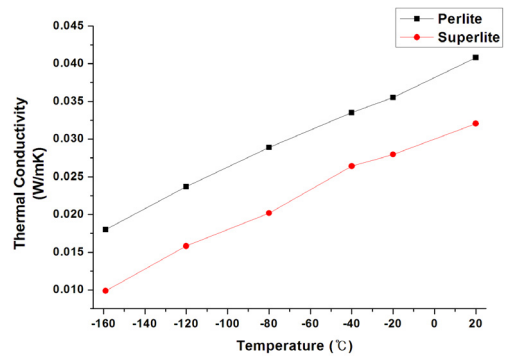


그림 1 단열 파우더의 열전도 계수 비교

45% 낮으며 밀도는 약 32.5% 낮아 LNG선에 적용 시 단열 구조를 슬림화 가능하며 외부에서의 열 침입에 대한 LNG의 증발량을 줄여 안전성을 향상시킬 수 있다.

### 2.2 LNG 화물탱크의 구조 및 만선향해

본 연구의 대상인 LNG선은 135,000m<sup>3</sup>급 NO96 멤브레인형 선박으로 4개의 화물탱크를 가지고 있으며 각 탱크사이

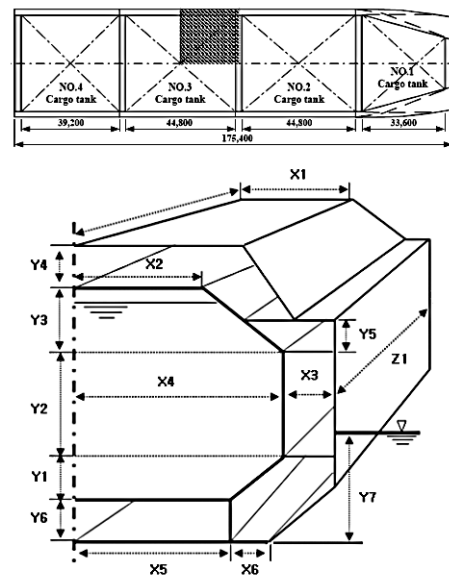


그림 2 NO96 LNG선 화물탱크의 구조 및 단면

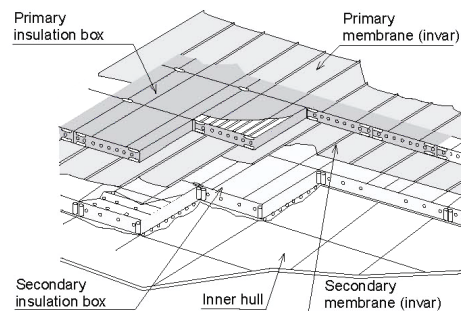


그림 3 NO96 LNGCC의 구조

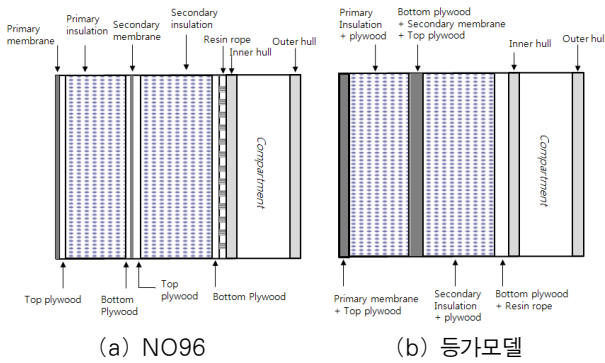


그림 4 NO96 화물창 단열 복합층의 등가 모델링

에는 선체부재가 허용온도 이하로 떨어지는 것을 방지하기 위해서 cofferdam이 설치되어 있다. 그림 2는 NO96 선박의 단면 및 탱크의 크기를 나타내고 있으며 본 연구에서는 4개의 탱크 중 3번 탱크에 대해 수치계산의 복잡성을 피하고 해석 시간을 단축하기 위해 탱크의 1/4모델을 사용하였다.

그림 3과 4(a)는 NO96 LNGCC의 단열구조를 나타낸 그림이다. 멤브레인형 NO96의 단열 구조는 ① Primary membrane, ② Primary insulation box, ③ Secondary membrane, ④ Secondary insulation box, ⑤ Resin rope, ⑥ Inner hull 순으로 적층 구조로 형성되어 있다. Insulation box의 경우 plywood로 구성된 상자와 내부 격자 속에 단열 파우더가 채워져 있으며 일정 크기의 박스가 화물창 내부에 쌓여져 있다. 본 연구에서 BOR 예측을 위한 유한요소해석을 위해 단열적층 구조를 모델링해야 한다. 하지만 단열층의 일부는 상대적으로 두께가 아주 작으며 Insulation box 각각을 모델링을 하는데에는 많은 시간뿐 아니라 수치적 오류를 발생할 수 있으므로 그림 4(b)와 같이 등가모델로 모델링하여 해석을 수행하였다.

등가모델에 대한 물성치를 산출하기 위해 균질할 기법 중 5가지를 선택하여 단일 단열 박스의 열전달 해석을 수행하여, 가장 오류가 작은 균질화 기법을 선택하여 해석에 적용하였다. 식 (1)은 가장 단순한 Pallel 모델, 식 (2)와 (3)은 변분접근법에 기초한 Hashin-Shtrikman의 상한 및 하한, 식 (4)는 다공성 복합체를 위한 Effective medium이론, 식 (5)는 Series 모델이다. 여기서,  $V_m$ 과  $V_f$ 는 구성 재료의 체적분율,  $k_m$ ,  $k_f$ 는 구성 재료의 물성치,  $k_h$ 는 균질화된 재료 물성치이다(Cho 등, 2000; Lee, 2007).

$$k_h = \frac{k_m V_m + k_f V_f}{V_m + V_f} \quad (1)$$

$$k_h = k_f \frac{(3-2f)k_m + 2fk_f}{fk_m + (3-f)k_f} \quad (2)$$

표 1 항로 및 평가 기준에 따른 외부 온도조건

기준	해수 온도(°C)	공기 온도(°C)
인도네시아항로	29	28
IMO	32	45
USCG	0	-18

$$k_h = k_m \frac{2(1-f)k_m + (1+2f)k_f}{(2+f)k_m + (1-f)k_f} \quad (3)$$

$$k_h = \frac{1}{4} \left( \frac{(3f-1)k_f + (2-3f)k_m}{\sqrt{[(3f-1)k_f + (2-3f)k_m]^2 + 8k_m k_f}} \right) \quad (4)$$

$$k_h = \frac{1}{(1-f)/k_m + f/k_f} \quad (5)$$

LNG선의 BOR산정을 위해 현재 표준 설계에 사용하고 있는 IMO, USCG 기준과 인도네시아 항로의 조건을 이용하여 수행하였으며 각각의 온도조건은 표 1에 나타내었다 (Song 등, 1999).

LNG선은 1회 운항 시 공선항해기간, 쿨다운과정, 적재과정, 만선항해기간, 하역과정을 거친다(허진욱 등, 2003). 이 중 만선항해의 경우 비정상상태에서 시간이 흐르면서 정상상태가 되며 운송 중 온도상승에 의한 LNG의 증발로 큰 사고를 초래할 수 있기 때문에 정확한 BOR 산정이 필요하다. 따라서 본 연구는 각각의 유한요소해석에서 만선항해기간 동안의 BOR를 산정하는 연구를 수행하였다.

### 3. 비선형 과도 열전달 해석 및 BOR 예측

공간상의 고정된 영역에서 내부 생성량이 없는 3차원 비정상 상태 열전달 방정식은 식 (6)과 같다.

$$(kT_{,i})_{,i} = \rho c \dot{T}, \quad i = x, y, z \quad (6)$$

여기서,  $T$ 는 온도(°C),  $\rho$ 는 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $c$ 는 비열(J/kg°C),  $k(T)$ 는 열전도계수(W/m°C)를 나타낸다.

표면 경계영역  $S$ 는 온도 경계영역  $S_T$ 와 열유속이 주어지는 경계영역  $S_q$ 로 구분되며,  $S_T \cup S_q = S$ 와  $S_T \cap S_q = \emptyset$ 을 만족한다.

$$T = T_0 \quad \text{in } \Omega \quad (7)$$

$$T = T_S \quad \text{on } S_T \quad (8)$$

$$q_n = k_n T_{n,n} = h(T_S - T) \quad \text{on } S_q \quad (9)$$

여기서,  $T_0$ 는 초기온도(°C),  $T_S$ 는 표면온도(°C),  $q_n$ 는 heat

flux(W/m<sup>2</sup>), h는 대류 열전달계수(W/m<sup>2</sup>°C)를 나타낸다.

변분정식화와 유한요소 근사화를 통해 식 (10)과 같은 행렬형태의 미분방정식을 얻을 수 있다(Bathe, 1996).

$$C\dot{\bar{T}} + K\bar{T} = Q \quad (10)$$

여기서, **C**와 **K**는 각각 ρc와 κ로부터 얻어지는 행렬이며 **Q**는 경계조건으로부터 얻어지는 하중벡터이다.

한편, 시간 이산화를 위해 사다리꼴 공식(generalized trapezoid rule; Logan, 1993)을 적용하였다.

$$\bar{T}_{n+1} = \bar{T}_n + \left[ (1-\beta)\dot{\bar{T}}_n + \beta\dot{\bar{T}}_{n+1} \right] (\Delta t) \quad (11)$$

여기서,  $\bar{T}_n$ 은 시간  $t_n$ 에서 온도상태,  $\bar{T}_{n+1}$ 은 시간  $t_{n+1}$ 에서 온도상태를 나타내며, 파라미터  $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$ 는 사용자에 의해 결정된다. 식 (10)을  $t_n$ 과  $t_{n+1}$  시점으로 표현하고 각각에 식 (11)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 반복계산 행렬식을 유도할 수 있다.

$$\left( \frac{1}{\Delta t} C + \beta K \right) \bar{T}_{n+1} = \left[ \frac{1}{\Delta t} C - (1-\beta)K \right] \bar{T}_n + (1-\beta)Q_n + \beta Q_{n+1} \quad (12)$$

LNG선이 해상에서 일정 속도로 항해 시 선체 외부는 해수와 공기의 접촉으로 인해 강제대류가 발생한다. 강제대류는 고체표면과 유동하는 유체사이에 일어나는 열전달을 나타내는 것으로서 전도와 함께 물체의 온도변화를 일으키는 주요한 인자 중에 하나이다. 수치해석을 통해 BOR를 산정하기 위해서는 선체 표면에서의 대류 열전달계수 h를 결정해야 한다. 선체와 강제 대류가 발생하는 해수 및 공기에 대해서는 운항조건을 이용하여 레이놀즈 수를 산정한 후 Schultz-Grunow의 실험식으로부터 Colburn 유사성을 적용하여 열전달계수를 무차원화 한 Nusselt 수 Nu를 결정하였다(허진욱 등, 2003).

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (13)$$

$$Nu = 0.185 Re (\log Re)^{-2.584} Pr^{1/3} \quad (14)$$

식 (13)의 레이놀즈 수를 이용하여 식 (14)의 Nusselt 수를 구할 수 있다. 식 (13)과 식 (14)로부터 구한 값을  $h = Nu k/L$ 에 대입하면 대류 열전달계수를 구할 수 있다. 열

전달계수 κ가 온도함수이므로 대류 열전달계수 역시 4.2절의 설명과 같이 온도의 3차함수로 곡선맞춤 하였다.

식 (15)는 KOGAS에서 제시하고 있는 BOR(%/day) 평가방법으로서(Chauvin, 1992), LNG를 적재하여 출항할 때와 목표로 하는 항구에 입항하였을 때 각각 실측한 LNG의 적재체적, 비중량, 시간, 온도변화로 표현된다.

$$BOR = \frac{(V_1\gamma_1 - V_2\gamma_2)L + V_2\gamma_2 C_p (T_1 - T_2)}{V_1\gamma_1 L t} \times 100 \quad (15)$$

여기서,  $V_1$ (m<sup>3</sup>),  $\gamma_1$ (kg/m<sup>3</sup>) 그리고  $T_1$ (°C) 출항시 LNG 총 적하체적, 비중량 그리고 온도를,  $V_2$ (m<sup>3</sup>),  $\gamma_2$ (kg/m<sup>3</sup>) 그리고  $T_2$ (°C)는 입항시 LNG 총 적하체적, 비중량 그리고 온도를 각각 나타낸다. 한편, L(kJ/kg)과  $C_p$ (kJ/kg°C)는 LNG의 증발잠열 과 비열(kJ/kg°C)을 의미한다.

식 (15)에서 우변 1항은 운항 중 LNG의 밀도변화를 나타낸 것이며 2항은 온도변화에 의한 현열을 나타낸 값이다. 하지만 본 연구는 유한요소해석을 통해 BOR을 산정하기 때문에 실제로 측정된 데이터를 사용한 위의 식 (15)를 사용할 수 없다. 그래서 아래와 같이 탱크에 침입한 열량을 계산하여 BOR을 산정하였다.

$$BOR(\%/day) = \frac{24Q_T}{V\gamma L} \times 100 \quad (16)$$

## 4. 수치해석 및 결과

### 4.1 수치해석 모델

NO96 LNGCC는 앞에서 언급한 것과 같이 4개의 화물탱크로 이루어져 있으며 각 탱크 사이에는 선체의 온도가 기준 이하로 떨어지는 것을 막기 위해 cofferdam이 설치되어 있다. 화물 탱크는 구조의 특성상 선체의 길이 방향과 폭 방향으로 대칭을 이루고 있으며, 열적 경계조건 역시 대칭으로 되어 있기 때문에 수치해석상 시간을 단축하기 위해 탱크의 1/4모델을 이용하였으며 탱크의 크기는 표 2에 나타냈었다.

표 2 LNG선 화물창의 기하학적 치수

구분	길이(mm)	구분	길이(mm)
X1	13,535	Y3	14,790
X2	10,535	Y4	4,094
X3	15,395	Y5	3,200
X4	3,105	Y6	3,916
Y1	1,912	Y7	11,300
Y2	8,954	Z1	22,400

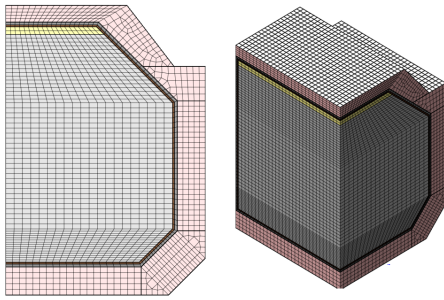


그림 5 NO96 LNGCC의 유한요소 모델

그리고 LNG선의 BOR 예측모델을 위해 화물탱크의 크기 변화는 기존 모델의 각 치수에 ±10%를 적용하였다.

유한요소해석 및 격자 생성은 Nastran Fx를 이용하여 그림 5에 나타내었으며 요소와 질점의 총 개수는 97,290개, 102,690개로 절점 6, 8요소로 구성되어 있다(Midas, 2009).

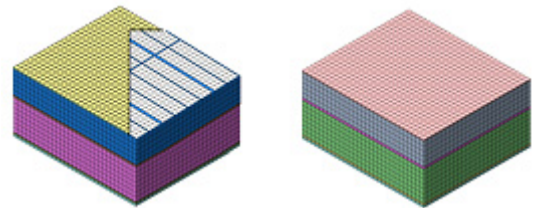
#### 4.2 해석 조건

본 연구에서는 LNG선 각각의 항로에 대해 만선 시 BOR을 산정하였다. 만선 시 화물 탱크 내 LNG의 적재량은 화물 적재용량 40,440m<sup>3</sup>의 98%를 차지하고 있다. 그리고 선체, 해수와 공기 사이의 강제대류가 발생하는데, 이 때 온도 조건은 표 1과 같으며 접촉부에 강제대류 경계조건을 적용하였으며 LNG선의 홀수는 11.3m이다. LNG선의 운항속도는 19.5knot이며 온도 경계조건인 경우 일정온도를 유지하는 cofferdam의 온도는 5℃, 적재된 LNG의 경우 -160℃ 그리고 NG의 경우 운항 중 압력변화를 고려하여 -158~-152.52℃로 18시간 주기로 온도를 변화시켰다. 열전달 해석은 총 7일을 1200초 간격으로 비선형 과도 열전달 해석을 수행하였다. 참고로 본 연구에서는 균질화 모델을 사용하였기 때문에 각 적층간 열접촉 저항은 고려되지 않았다.

또한 기존 NO96 LNGCC에 대한 BOR예측과 더불어 단열 박스의 총 두께, 단열재의 열전도 계수와 적재용량에 대한 파라메트릭 BOR 해석을 통해 3가지 변수에 따른 BOR 예측 함수를 유도하였다. 참고로 superlite의 열전도 계수는 제조공법에 따라 어느 정도 증감시킬 수 있기 때문에 변수로 설정하였다. 각 파라메터를 3 case씩 하여 총 27case에 대해 해석하였다. 단열박스 두께의 경우 기존 두께(490.5mm)의 -15%, -30%로, 적재용량과 관련하여 4.1에서 언급한 것과 같이 길이 비를 ±10%로 변화시켰다. 단열재의 열전도 계수는 superlite의 열전도계수를 곡선 맞춤한 함수 크기를 ±20%로 변화시켰으며, 온도변수의 곡선맞춤한 함수는 식 (17)~(19)과 같다.

표 3 재료 물성치

구 분	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thickness (mm)	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
Primary membrane	Invar	8140	0.7	385	11.395
Top plywood	Plywood	710	12	1,255	0.085
Primary insulation	Perlite	30	209	837	그림 1
Bottom plywood	Plywood	710	9	1,255	0.085
Secondary membrane	Invar	8140	0.7	385	11.395
Top plywood	Plywood	710	12	1,255	0.085
Secondary insulation	Perlite	30	281.5	837	그림 1
Bottom plywood	Plywood	710	6.5	1,255	0.085
Resin rope	Epoxy & air	495	10	1046.7	0.1675
Inner hull	Steel	7833	18	400	45.3
Outer hull	Steel	7833	18	400	45.3



(a) 실제 단열박스 모델 (b) 등가모델  
그림 6 단열박스의 유한요소 모델

표 4 균질화 기법에 따른 단열박스의 열전달 비교

구 분	Total heat transfer (kcal/h)	비교 (%)
실제 모델	11.7954	-
등가 모델	Parallel model	+7.68
	Hasin-Shtrikman (upper)	+3.79
	Effective medium theory	-0.8
	Hasin-Shtrikman (lower)	-1.29
	Series model	-6.12

$$k_s = ax^3 + bx^2 + cx + d \tag{17}$$

$$k_{-20\%} = ax^3 + bx^2 + cx + 0.8 \times d \tag{18}$$

$$k_{+20\%} = ax^3 + bx^2 + cx + 1.2 \times d \tag{19}$$

여기서,  $a = -7.189 \times 10^{-10}$ ,  $b = -2.964 \times 10^{-7}$ ,  $c = 9.845 \times 10^{-5}$ ,  $d = 0.03203$ 이며  $d$ 는 0℃ 열전도계수를 나타낸다.

표 3은 LNGCC의 재료 물성치를 나타낸 것이며 해석을 위해 2.2 절에서 언급한 균질화 기법들로 등가모델과 물성치

를 생성하였다. 그림 6과 같이 실제 단열박스를 모델링하고 각각의 균질화 기법이 적용된 등가모델과 비선형 과도 열전달 해석을 수행하였다. 해석조건은 LNG와 접하는 부위를  $-160^{\circ}\text{C}$ , 반대쪽을  $20^{\circ}\text{C}$ 로 온도경계 조건을 적용하여 30시간 동안 해석을 수행하였다.

표 4는 실제 단열박스 모델과 등가모델에 대해 해석 수행결과를 나타낸 것이다. 여기서 실제 단열박스 모델과 열전달의 차이가 가장 작은 균질화 기법은 effective medium theory로  $-0.8\%$ 차이가 발생하였다. 이후 BOR예측을 위한 해석 시 등가모델에는 effective medium theory를 이용하여 재료 물성치를 각각 경우에 대해 산정하여 해석을 수행하였다.

### 4.3 해석 결과

#### 4.3.1 단열 파우더와 향로에 따른 BOR 결과

표 5는 NO96 LNGCC에 기존의 단열 파우더 perlite와 개발품인 superlite를 각각 적용하여 인도네시아 향로 기준으로 BOR를 산정한 결과를 나타낸 것이다. superlite를 적용한 모델의 경우 perlite에 비해 침입 열량과 BOR이 약 19% 정도 감소하였음을 알 수 있으며, 이를 통해 superlite를 적용한 선박일 경우 기존의 경우 보다 운항 중 LNG의 손실 감소와 안정성에서 더 큰 효과를 낼 수 있다.

그림 7은 만선헬해 중 NO96 LNGCC에 단열 파우더 superlite가 적용된 모델에 대해 비선형 열전달 해석 결과를 온도 분포와 heat flux를 나타낸 그림이다. 본 연구에서 BOR을 산정하기 위해 열 침입의 측정은 LNG와 직접 맞닿아 있는 primary membrane에서 측정하였다. 단열 파우더 superlite가 적용된 모델뿐 아니라 향로에 따라 열전달 해석을 수행했을 때 그림과 같이 LNG쪽으로 외부에서 열 침입은 다른 부분에 비해 탱크 내의 모서리 부분에서 많은 침입 열량이 발생함을 알 수 있다.

표 6은 BOR을 산정하는 향로 및 기준에 대해 단열 파우더 superlite를 적용하여 BOR를 산정한 결과이다. 외부 온도 조건이 높은 IMO가 다른 두 조건에 비해 높은 BOR이 계산되었으며 외부 온도 조건이 가장 낮은 USCG의 경우가

표 5 단열 파우더에 따른 BOR 비교(인도네시아 향로)

Time (hr)	Perlite		Superlite	
	Q(kcal/s)	BOR (%/day)	Q(kcal/s)	BOR (%/day)
26.33	11.1125	0.1569	8.8153	0.1245
56.33	9.9879	0.1411	8.1079	0.1145
86.33	9.5786	0.1353	7.7944	0.1101
116.33	9.4765	0.1339	7.6981	0.1088
146.33	9.4693	0.1338	7.6762	0.1084
168.33	9.4723	0.1338	7.6807	0.1085

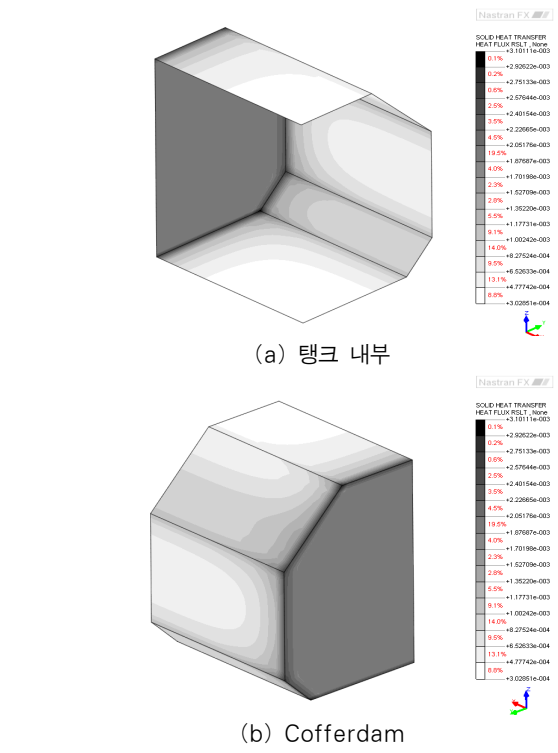


그림 7 Primary membrane의 heat flux 분포 (Superlite 적용)

표 6 Superlite 적용한 NO96 LNGCC의 향로에 따른 BOR

Time (hr)	인도네시아향로		IMO		USCG	
	Q (kcal/s)	BOR (%/day)	Q (kcal/s)	BOR (%/day)	Q (kcal/s)	BOR (%/day)
26.3	8.8153	0.1245	8.9083	0.1259	8.5029	0.1201
56.3	8.1079	0.1145	8.2592	0.1167	7.5992	0.1074
86.3	7.7944	0.1101	7.9668	0.1126	7.2128	0.1019
116.3	7.6981	0.1088	7.8792	0.1113	7.0848	0.1000
146.3	7.6762	0.1084	7.8612	0.1111	7.0483	0.0996
168.3	7.6807	0.1085	7.8672	0.1111	7.0470	0.0996

장 낮은 BOR이 계산되었다. 일반적으로 선주나 선급에서는 BOR를 0.15%이하로 요구하고 있으며, 본 연구에서 적용된 superlite 경우 향로 및 기준에 모두 만족함을 알 수 있다.

#### 4.3.2 파라메트릭 분석을 통한 BOR 예측

NO96 LNGCC의 BOR을 예측하기 위해 적재 탱크 크기, 총 단열재 두께, 단열재의  $0^{\circ}\text{C}$  열전도 계수에 대해 각각 3 case 생성하여 총 27 case을 향로 기준 중 높은 온도 조건을 가지고 있는 IMO에 적용하여 해석을 수행하였다. 여기서 LNGCC 적재탱크는 그림 2와 같은 형태이며 각각의 치수 비 항상 일정하여야 한다. 적재 탱크 크기는 선박의 진행 방향의 탱크 길이를 대표 길이로 설정하여 LNG적재량을 길이와 단열재 두께 변화에 대해 측정하였다.

표 7과 그림 8에 각 Case별 LNGCC의 BOR을 나타내

표 7 Case별 조건 및 BOR

Case	화물창길이 (m)	LNG 적재량	단열재 총 두께	0°C 열전도율	BOR
1	40.32	28606.15	490.5	0.02081	0.10258
2				0.02601	0.12982
3				0.03138	0.15330
4		28997.08	416.925	0.02080	0.11403
5				0.02601	0.14420
6				0.03138	0.17019
7		29401.04	343.35	0.02081	0.12969
8				0.02601	0.16385
9				0.03138	0.19330
10	44.8	39631.08	490.5	0.02081	0.08764
11				0.02601	0.11081
12				0.03138	0.13076
13		40128.11	416.925	0.02081	0.09747
14				0.02601	0.12320
15				0.03138	0.14539
16		40629.42	343.35	0.02081	0.11096
17				0.02601	0.14020
18				0.03138	0.16545
19	49.28	53191.20	490.5	0.02081	0.07590
20				0.02601	0.09584
21				0.03138	0.11306
22		53795.36	416.925	0.02081	0.08431
23				0.02601	0.10654
24				0.03138	0.12573
25		54404.52	416.925	0.02081	0.09598
26				0.02601	0.12130
27				0.03138	0.14325

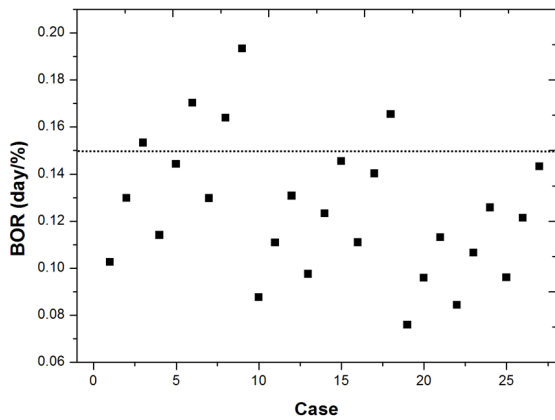


그림 8 각 Case별 BOR

었으며, 여기서 BOR은 적재 탱크의 크기와 총 단열재의 두께에 반비례하며 열전도계수에 비례함을 알 수 있다. 그리고 Case 3, 6, 8, 9, 18의 경우 BOR 값이 선급에서 요구하는 0.15(%/day)를 초과하였다.

식 (20)과 표 7의 해석 결과를 이용하여 근사식으로 나타내었으며, 이 근사식은 이용하여 BOR을 예측할 수 있는

표 8 근사식 속의 포함되어 있는 계수값

미지수	적재탱크길이	LNG 적재량
a	$3.75 \times 10^{-7}$	$4.615 \times 10^{-7}$
b	-73.6871	-75.093
c	$1.006 \times 10^{-4}$	$2.53 \times 10^{-11}$
d	$-7.028 \times 10^{-3}$	$-7.276 \times 10^{-3}$
e	-0.1566	$-5.437 \times 10^{-5}$
f	$5.552 \times 10^{-6}$	$2.462 \times 10^{-9}$
g	$-5.765 \times 10^{-4}$	$-5.033 \times 10^{-4}$
h	18.4485	13.839
i	-0.01146	$-3.207 \times 10^{-6}$
j	0.3349	0.1236

표 9 유한요소해석과 근사식으로 구한 BOR의 비교

Case	BOR from FEA	적재탱크길이		LNG 적재량	
		Approximation BOR	Error (%)	Approximation BOR	Error (%)
1	0.10258	0.10249	0.0947	0.10260	-0.0131
2	0.12982	0.12973	0.0712	0.12964	0.1389
3	0.15330	0.15369	-0.2565	0.15332	-0.0132
4	0.11403	0.11416	-0.1096	0.11405	-0.0158
5	0.14420	0.14409	0.0745	0.14377	0.2972
6	0.17019	0.17083	-0.3719	0.17020	-0.0062
7	0.12969	0.12989	-0.1507	0.13034	-0.4992
8	0.16385	0.16251	0.8185	0.16273	0.6853
9	0.19330	0.19202	0.6616	0.19192	0.7147
10	0.08764	0.08711	0.6074	0.08712	0.6024
11	0.11081	0.11071	0.0941	0.11104	-0.2102
12	0.13076	0.13089	-0.0977	0.13149	-0.5574
13	0.09747	0.09695	0.5366	0.09665	0.8427
14	0.12320	0.12323	-0.0266	0.12322	-0.0175
15	0.14539	0.14620	-0.5559	0.14641	-0.6973
16	0.11096	0.11085	0.0987	0.11101	-0.0470
17	0.14020	0.13982	0.2684	0.14023	-0.0183
18	0.16545	0.16557	-0.0726	0.16614	-0.4173
19	0.07590	0.07577	0.1674	0.07651	-0.8000
20	0.09584	0.09572	0.1292	0.09660	-0.7904
21	0.11306	0.11213	0.8202	0.11309	-0.0230
22	0.08431	0.08378	0.6283	0.08386	0.5302
23	0.10654	0.10642	0.1125	0.10657	-0.0319
24	0.12573	0.12561	0.0970	0.12576	-0.0203
25	0.09598	0.09585	0.1368	0.09601	-0.0336
26	0.12130	0.12118	0.1055	0.12133	-0.0242
27	0.14325	0.14315	0.0680	0.14322	0.0184

BOR 예측 모델이다. 근사식은 2차로 이루어져 있으며 표 8과 같이 적재탱크길이와 LNG 적재량 기준에 대해 근사식 속에 포함되어 있는 계수를 나타내었다.

$$aX^2 + bY^2 + cZ^2 + dXY + eYZ + fZX + gX + hY + iZ + j = BOR \quad (20)$$

여기서,  $X$ 는 총 단열재 두께,  $Y$ 는 0°C 단열재의 열전도 계수,  $Z$ 는 적재탱크길이 혹은 만선향해 시 LNG 적재량을 나타낸다.

표 9는 앞에서 구한 근사식 식 (20)을 이용하여 유한요소 해석을 통해 구해진 BOR값에 대해 오류를 비교하기 위해서로 비교한 표이다. 여기서 근사식에서 구해진 BOR은 유한요소해석에서 산정된 BOR에 대해 최고 0.84% 오차를 가지고 있다.

## 8. 결 론

본 연구를 통해 superlite를 채택한 경우가 perlite를 사용한 경우에 비해 침입 열량과 BOR이 19% 감소된 단열 성능 향상을 나타내었다. 그리고 superlite를 채용하였을 때, 항로와 평가기준에 따라 평가한 BOR은 모두 KOGAS 기준을 만족하였다. 그리고 NO96 LNGCC의 크기, 총 단열재 두께 그리고 단열재의 열전도계수에 대한 파라메트릭 분석을 기초로 유도한 BOR 예측모델은 1%내 오차의 높은 신뢰성을 나타내었다. 본 연구의 결과는 superlite를 채용한 LNGCC의 설계는 물론 LNG선의 1회 운송량 증대에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 확신한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 2010년도 위탁연구로 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

**박성우, 조진래** (2003) 전역-국부 해석기법에 의한 LNG 운반선 화물창의 유탄성 해석에 관한 연구, 한국전산구조공학 회 논문집 20(1), pp.83~92.

**송성욱, 이정혜, 전현필, 성부용, 김경근, 김성규** (1999) Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태 온도분포 및 BOR 계산 프로그램 개발에 관한 연구, 한국박용기관학회 지 23(2), pp.140~149.

**전철호, 장길홍** (2004) 열전달, 보성각, pp.496.

**허진욱, 이영주, 조진래, 하문근, 이중남** (2003) 멤브레인형 LNG선 Cargo의 만선향해시 열전달 해석 및 BOG 평가, 대한기계학회 논문집 A권 27(3), pp.393~400.

**Abramson, H.N, Bass R.L, Faltinsen, O, Olsen, H.A.** (1974) Liquid Sloshing in LNG Carriers, *The 10th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Cambridge, pp.371~388.

**Chauvin, J.M.** (1992) Mark III Containment System, *Technical Report of S.N. Technogaz*.

**Cho, J.R., Oden, J.T.** (2000) Functionally Graded Material: A Parametric Study on Thermal-Stress Characteristics using the Crank-Nicolson-Galerkin Scheme, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 188, pp.17~38.

**Cho, J.R., Park, S.W., Kim, H.S., Rashed, S.** (2008) Hydroelastic Analysis of Insulation Containment of LNG Carrier by Global-Local Approach, *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, 76, pp.749~774.

**Lee, J.K.** (2007) Prediction of Thermal Conductivity of Composites with Spherical Fillers by successive Embedding, *Arch Appl Mech.*, 77, pp.453~460.

**Midas IT** (2009), Nastran FX on-line manual.

- 논문접수일 2010년 10월 18일
- 논문심사일
  - 1차 2010년 10월 20일
  - 2차 2010년 12월 30일
- 게재확정일 2011년 1월 7일