

MOSS형 LNG 선박의 열공학적 특성에 관한 연구

이세동*, 송성옥*, 이종원**, 김춘식***, 최두열****

A Study on the Thermal Characteristics of MOSS Type LNG Carrier

S.D. Lee · S.O.Song · J.W. Lee · C.S. Kim · D.Y.Choi

Key words : LNG(액화천연가스), LNG Carrier(LNG 운반선), Cooling Down(예냉), Unsteady State(비정상상태)

Abstract

This paper introduced the thermal characteristics of Moss Rosenberg Verft spherical tank type LNG Carrier. Especially described the temperature variation during cooling down condition. It is not easy task to calculate the temperature variation because of unsteady state condition.

In this paper, computer simulation program is developed by using a Tomas Algorithm on unsteady state condition and compared with calculation results and experimental results on existing LNG Carrier voyage.

기호설명

Cp : Specific Heat at Constant Pressure (kJ/kg ℃)
 T : Temperature (℃)
 P : Pressure (mPa)
 ρ : Density (kg/m³)
 θ : Degree
 ν : Specific Volume (m³/kg)

1. 서 론

최근의 극심한 대기환경오염과 이산화탄소의 급증등으로 인하여 지구대기온난화가 가속되고 있고 이러한 대책의 일환으로 최근 대도시 부근에서는 LNG사용이 의무화되고 있으며, 따라서 국내 LNG 소비량도 급격히 증가하고 있다. 한편 LNG의 수송은 국내의 경우 전량이 선박에 의한 수송이 이루어지고 있으며, 2002년까지 20척의 LNG선이 투입될 예정으로 있다. 또한 이러한 수요는 일본

* 한국선급 (원고접수일 : 97년 4월)
 ** 경희대
 *** 한국해양대
 **** 한국열유체

및 대만등에서도 마찬가지로 LNG선의 건조수요는 급격히 증가할 것으로 판단된다. 따라서 현재 외국의 기술을 도입하여 건조되고 있는 초부가가치 선박인 LNG선의 국산화도 시급한 과제이다.^{1,2)}

LNG(액화천연가스 Liquefied Natural Gas)는 메탄을 주성분으로 하는 파라핀계 저분자 탄화수소의 혼합물이다. 이런 혼합물의 해상수송은 일반적으로 대기압하에서 -162℃의 액체상태로 수송하고 있으며, 하역 또한 액체상태에서 행하고 있다. 따라서 LNG선이 일반선박과 크게 다르다는 것은 화물이 초저온이라는 점에 대한 대책이 매우 신중히 검토되어야 한다는 것이다. 현재 이에 대한 대책으로 선체에 대하여서는 저온에 강한 재료를 사용하고 있으며, 화물탱크는 외부로부터 열적으로 차단하는 방법을 모색하고 있다.^{3,4,5)}

그러나 화물의 열적 차단은 LNG의 증발량을 LNG의 수송계획상 경제효과를 손실하지 않는 범위내에서 억제하고, 선체구조부재를 최저허용온도 이하로 낮아지는 것을 방지하는 중요한 기능을 갖고 있으나, 기술적 문제점으로서선 선박의 운항 안전성 측면에서 선급규칙등에서 요구되는 사항과 시공상의 품질관리라는 문제도 현존하고 있다.^{6,7)}

본 연구에서는 이러한 LNG선의 단열에 관해서 제반 기술적 문제점과 함께 선박의 안정적인 운항의 관점에서 요구되는 선박운용기술의 확립과 이에 관한 기술과 자료를 축적하기 위한 기초연구로서 주로 열공학적 관점에서 연구를 수행하였다.

2. LNG 조성성분 및 질소가스에 대한 물성치 전산수식화

LNG선은 운항시의 연료유로서 일반 선박과 달리 선적화물을 선박 추진 연료로서 사용한다. 즉 화물탱크에서 자연증발된 천연가스를 선박 주기관인 주보일러의 연료유로서 사용하는 시스템이다. 따라서 화물탱크에서 자연 증발된 연료유를 보일러에 이송하기 위한 별도의 장치를 필요로 하게 되며, 자연증발 가스의 양이 부족하였을 경우 강제로 화물을 증발시켜야 하기 때문에 강제증발기 및 가열기 그리고 가스의 보일러이송을 위한 콤프레

샤등이 필요로 하게 된다. 여기서 가스 이송시의 콤프레샤는 블로워 타입의 고압압축기가 사용되는데 압축시의 가스의 물성 변화예측은 선박의 안전운항 등에 중요한 사항이다. 따라서 본 연구에서는 LNG선박 설계시에 필요로 하는 LNG의 열적 물성치의 전산화를 위한 연구를 행하였다.

LNG는 메탄을 주성분으로 이루어졌으나, 생산 기지에 따라 그 성분이 약간 다르다. LNG를 하역 또는 적하시 그리고 LNG를 가열하거나 증발시키는 과정은 LNG선박의 운항중에 일어나는 매우 중요한 업무이다. 이러한 운항 조작은 저온의 가스상태에서 행하여지는 관계로 그의 압축 또는 증발 팽창 과정에서 온도의 변화 등을 사전에 예측하고 판단하는 것은 LNG 선박의 설계 또는 운항중 매우 중요한 사항이다.

증기의 물성치는 일반적으로 열역학 일반관계식으로 부터 구할 수 있다. 즉 Van der Waals의 상태방정식으로 부터

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v-b)T^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$P = \frac{RT}{v-b} + \sum_{i=2}^5 \frac{1}{(v-b)^i} (A_i + B_i T + C_i e^{-\frac{dT}{T_c}}) + \frac{\alpha_6 + B_6 T + C_6 e^{-\frac{dT}{T_c}}}{e^{\alpha}(1 + C e^{\alpha})} \quad (2)$$

와 같이 전개가 가능하며, 실측으로 통하여 윗식의 우변의 각항 상수값을 구하면 실제의 상태방정식을 정할 수 있으므로 필요한 물성치들을 열역학 일반관계식을 이용하여 구할 수가 있다.

또한 Helmholtz의 식과 Gibbs의 식을 이용하여서도 필요한 식을 구할 수 있는데 구체적인 방법은 김의 식⁸⁾을 이용하였다. 본연구에서는 메탄, 에탄 가스뿐만 아니라 프로판, 부탄가스, 그리고 질소가스 등의 물성치를 전산화하였으며, 포화온도 및 밀도, 정적, 정압비열, 발열량 까지 LNG 선에서 운항시 또는 설계시에 필요로 하는 모든 물성치 등을 전산화 완료하였다. 각각의 계수는 참고문헌⁷⁾을 참조하였다.

그림 1, 2는 메탄가스와 에탄가스의 물성치의 일부를 보여주고 있다. 파라메타로서는 압력을 취하

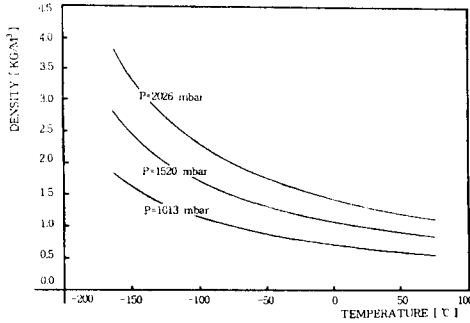


그림 1. 메탄가스 물성치 계산결과

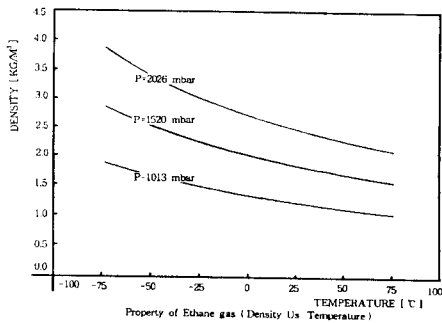


그림 2. 에탄가스 물성치 계산결과

었다. 상기식으로부터 구한 물성치는 사용 운전 조건에서 1% 이내의 정확도를 가지고 있으며, 유용하게 사용될 수 있다.

3. 예냉시 탱크내의 온도거동

극저온의 LNG에 의하여 발생되어지는 화물탱크의 열응력 해석은 통상의 응력해석, 굴절강도해석과 함께 LNG선의 설계상의 중요한 과제중의 하나이다. 특히 MOSS TYPE 구형 탱크 LNG선박에 있어서 이 열응력발생은 선박의 안전운항측면에 있어서 매우 중요한 변수로서 주로 화물을 적재할 때 발생하며, 이때 과도한 증발가스를 발생시킨다. 한편 멤브레인형 선박의 경우에는 선박의 구조상 열응력 발생적 측면보다는 적재시의 과도한 증발가스가 문제시 된다.

따라서 상기의 문제점등으로 인하여 화물을 적재하기 전에 어느 정도 화물탱크에 대하여 예냉을 하는 즉 쿨 다운(Cool Down)조작이 행하여 진다.

이러한 쿨 다운 조작은 하역 효율상 가능하는 한 빠른 시간내에 최소한의 냉매량으로 행하여지는 것이 요구되어 진다. 이러한 요인을 고려한 최적의 쿨 다운 조작법은 분사 냉매의 양, 스프레이 노즐의 배치, 탱크의 냉각속도 및 온도분포를 고려하여 이때 발생하는 열응력과의 관계등을 미리 추정하여 조사할 필요가 있다.

MOSS Type 구형탱크에서의 예냉은 파이프 타워의 상측부분에서 냉매를 분사시켜 탱크내부의 가스 온도를 낮추어 주고, 주위 온도의 하강에 따라 주위가스와 탱크표면과의 자연대류에 의하여 탱크가 냉각된다고 볼 수 있다. 해석은 먼저 다음과 같은 가정하에서 행하였다.

탱크 및 탱크내의 증기는 집중 질량계로 보고 균일한 온도분포를 갖는다고 가정하여, 임의의 분사 냉매와 탱크내의 증기의 온도와의 열교환으로부터 탱크내가 열평형을 이룬다고 가정하였을 때의 온도를 구한다. 즉 분사된 냉매가 증발, 승온되어 탱크내의 증기로부터 빼앗은 열량, 탱크내의 단열재 및 외부로부터 침입된 열량 등을 고려하여 비정상 상태의 온도분포를 구하였다. 해석방법 및 해석 모델은 다음과 같다.

탱크 예냉은 비정상상태 열전도문제로 시간에 따라 온도가 변화하는 상태를 말하는 것으로서 열평형방정식 (3) 식에서 우변항이 어떠한 값을 가지고 있는 것을 말한다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Sh \quad (3)$$

여기서 우변항은 시간에 대한 온도변화항으로서 비정상상태에서는 어떤 값을 갖게 된다. 상기식(3)을 본 연구에서 적용되는 그림 3과 같은 구형 탱크표면에 적용시키면 상기식은 다음과 같이 이산화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\chi \sin \theta \frac{dT}{d\theta} \right]_E - \left[\chi \sin \theta \frac{dT}{d\theta} \right]_W \\ & + \left[\frac{1}{\sin \theta} \chi \frac{dT}{d\theta} \right]_N d\theta - \left[\frac{1}{\sin \theta} \chi \frac{dT}{d\theta} \right]_S d\theta \\ & = \rho C_p \sin \theta_p \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\Delta t} T_p \end{aligned} \quad (4)$$

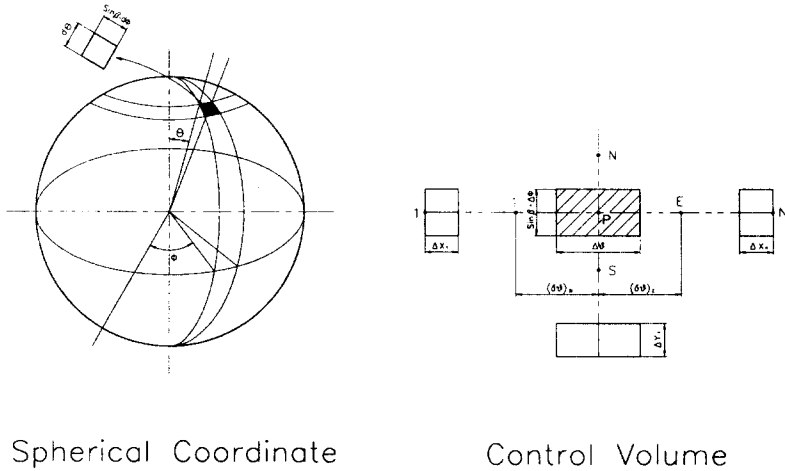


그림 3. 구형탱크 표면

상식 (4)는 비정상상태하에서 시간에 대해 Δt 만큼 증분시켜가면서 그때마다 온도를 구하여야 한다. 방법은 TDMA 방법에 의하여 구하였다.

그림 4, 5은 시간당 각각 10,000 Kg, 18,000Kg

의 냉매를 구형탱크내에 분사시켰을 경우의 스킨트부의 온도분포를 보여주고 있다. 예냉 초기의 온도는 대기온도와 같은 30°C 로 한다. 그림의 횡축은 스킨트의 길이를 1로 하였을 경우의 무차원 길이를 나타내며 종축은 온도를 나타낸다. 예냉시간을 파라메타로서 시간간격은 2시간이다. 그림에서 보는 바와 같이 화물적재가능 온도인 -110°C 까지 냉각되는 시간은 냉매량이 10,000Kg/hr 인 경우는 약 21시간 18,000Kg/hr 인 경우는 약 17시간이 소요됨을 알 수 있다. 이것은 냉매량이 증가함에 따라 탱크내의 분위기 온도가 급강하 하게 되고 가스와 탱크벽면과의 자연대류 열전달이 촉진되기 때문에 탱크내벽의 온도가 냉매량이 적은 경우에 비하여 급격이 낮아지며, 따라서 스킨트부의 온도도 냉매량이 증가함에 따라 빨라 낮아진다. 그러

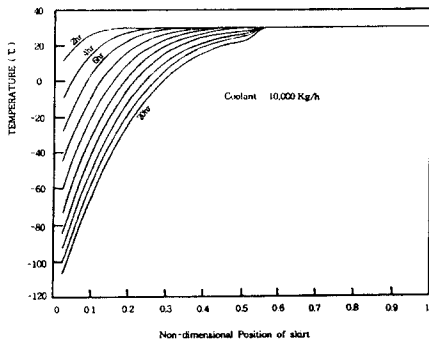


그림 4. 스킨트부의 온도응답특성(냉매량 10,000Kg/h)

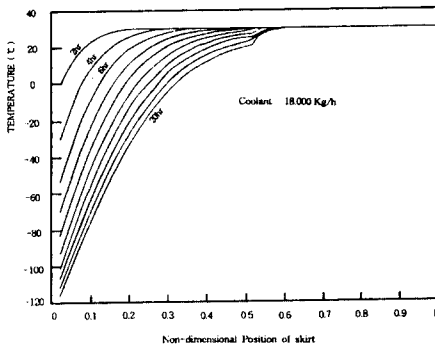


그림 5. 스킨트부의 온도응답특성(냉매량 18,000Kg/h)

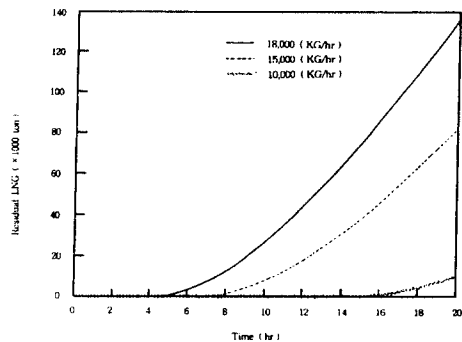


그림 6. 잔류냉매량

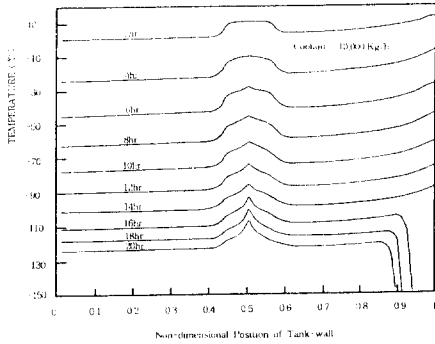


그림 7. 탱크벽면의 온도응답성 (냉매량 10,000Kg/h)

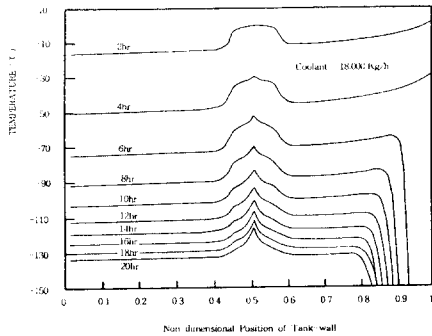


그림 8. 탱크벽면의 온도응답성 (냉매량 18,000Kg/h)

나 이것은 냉매분사초기에 급격히 이루어지며 시간이 지남에 따라 그 강하 폭은 급격히 둔화되는 경향이 있다. 이것은 그림 6에서도 알 수 있는 바와 같이 탱크내부의 온도가 하강함에 따라 분무된 냉매의 일부는 증발되지 않고 탱크저부에 액상상태로 남아 탱크내부의 냉각효율을 떨어뜨리기 때문에 이 경우 증발 안된 양만큼 탱크내에 분사되는 양이 줄어든다고 볼 수 있다. 이 분사효율을 구하는 것은 탱크내부의 각종 열적 응답특성을 예측하는데 있어서 매우 중요한 변수로서 주로 경험식을 도입한 이론적 접근에 의하여 구하고 있다.

그림 7, 8 은 냉매분사량이 각각 10,000 Kg/hr, 18,000Kg/hr일때의 탱크벽의 온도분포를 나타내고 있다. 파라메타로서는 예냉시간으로 간격은 2 시간이다. 그림의 횡축은 구의 북극을 시점 0으로 하여 각지점을 탱크의 북극과 이루어지는 각 θ/π 로 표현되는 무차원 각으로 남극은 $1(\pi/\pi)$ 이 된다. 그림의 횡축의 0.5은 구면 적도부를 나타내는데 그림에서 알 수 있는 바와 같이 적도부위의 온도는

주위의 구면온도보다 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 탱크 온도가 냉각됨에 따라 상대적으로 온도가 높은 스키투로부터 열이 침입하는 것으로 이 적도부의 온도가 주위의 온도에 비하여 높으면 이부분에 열응력이 집중되어 스키투의 파괴를 초래할 수 있다. 특히 이 상대적 온도차는 냉매량이 증가할수록 그 경향은 뚜렷히 나타나고 있다.

또한 시간이 경과함에 따라 탱크저부에는 냉매의 온도에 근접하는 저온대가 발생하는데 이것은 상기에서도 설명한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 냉매의 일부가 증발하지 않고 탱크저부에 적재되기 때문인데 탱크에 액상의 냉매가 적재되면 그 즉시 탱크 저부의 온도는 급격히 하강하게 된다.

한편 멤브레인형의 경우는 열응력의 문제보다는 화물적재시의 과도한 가스의 증발을 억제하기 위하여 예냉을 실시한다. 그러나 멤브레인형 LNG 선박은 단열재가 화물의 하중을 받기 때문에 단열재의 강도가 요구되며, 어느정도의 두께를 가지고 있어 상당량의 열용량도 가진다. 따라서 화물 적재시 단열재의 온도하강분의 열용량만큼 화물을 증발시키게 된다. 그러나 단열재는 단열재의 특성상 온도의 변화가 크지 않기 때문에 이러한 온도의 변화는 서서히 이루어지며, 이러한 온도변화는 항해중에도 계속 일어나기 때문에 정상상태 운전에 비하여 BOG가 증가한다. 그림 9는 멤브레인형 LNG

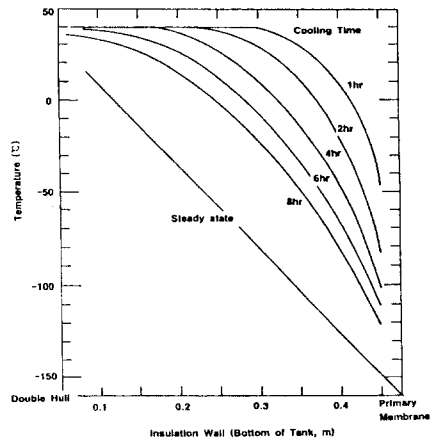


그림 9. 멤브레인선박 단열재 온도 분포

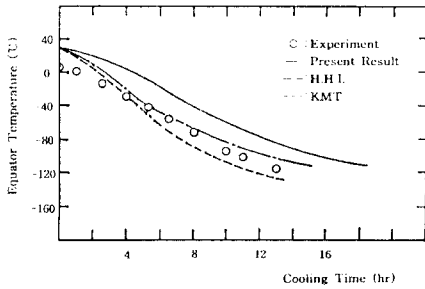


그림 10. 실측선 계측결과

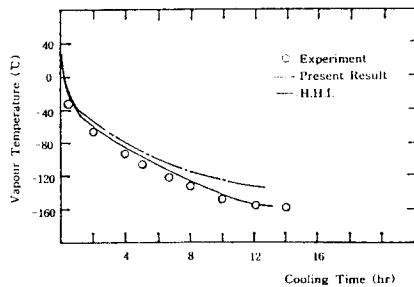


그림 11. 실측선 계측결과

선박의 단열재내의 온도변화를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 온도의 변화가 없는 정상상태까지 도달하는데 약 48시간 정도가 걸리며, 예냉초기에 그 폭이 상대적으로 크며, 예냉이 완료된 시점으로 판단되는 8시간이후에도 온도는 계속 하강함을 알 수 있다.

그림 10, 11은 운항성의 계측 자료와 본 계산에 의한 예상성능 그리고 MOSS Type LNG선의 기술용역회사인 크배너사(K.M.T.)⁹⁾의 예측곡선 그리고 H중공업(H.H.I.) 예측자료⁹⁾를 비교한 그림이다. 실측곡선과 본 연구에서 개발된 프로그램과 상당히 일치함을 알 수 있으며, 크배너사의 계산 결과는 실측선 결과 또는 본 연구개발 결과보다 상당히 적도부의 온도가 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

이는 본 연구에서는 적도부의 온도예측은 탱크 내부의 온도를 기준으로 하였으나, 실제 온도는 탱크 외측의 온도기준으로 하여 측정하였기 때문에 탱크와 단열재 사이의 공간에 의한 대류가 발생하였기 때문이라고 판단되며, 스커트의 침입열에 의한 영향을 받았으리라 판단된다. 한편 탱크내부의 증기온도와 본 연구의 결과를 비교 분석하여 보면

본 연구결과가 실측 온도보다 약간 높게 나타내고 있는데 이 이유는 본 연구결과는 탱크내의 온도 변화를 탱크 전공간에 대한 평균치를 나타내고 있는 반면, 실제 계측한 부분은 냉매가 분무되는 펌프타워 부근의 온도로서 이 부근은 직접 냉매의 증발이 일어나기 때문에 온도가 낮다고 판단된다.

5. 결 론

지난 10년간의 깨끗한 지구를 위한 대책의 일환으로 LNG(액화천연가스)의 사용량은 전 세계적으로 증가추세에 있고 또 LNG를 산지에서 수유지까지 운송하는 LNG 선박과 육상 플랜트 등은 국내 외의 지속적인 관심의 대상이 되고 있다.

그동안 국내외 조선, 해운업계, 학계등에서는 LNG 선박의 기술개발과 안정성 확보는 중요한 과제로 인식하고 이를 위하여 노력하여 왔다. 현재 5척의 선박을 국내에서 건조하고 국내의 승무원에 의한 안정적운항이 가능할 수 있다는 것은 이러한 노력의 결과라고 판단된다.

본 연구에서는 이러한 목적에서 선박의 안정적 운항과 설계의 국산화를 위한 기초자료로서 선박의 기초설계가 되는 열설계의 기본인 선체 온도분포 해석 및 예냉 프로그램을 개발 하고 실선 운항 계측을 통한 프로그램의 신뢰성 확보에 역점을 두었다. 본 연구 결과는 다음과 같다.

1. 항해중의 해상 기상조건에 따른 선체온도분포를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하고 실선 계측을 통한 신뢰성을 확보하였다.
2. 탱크 예냉시의 탱크내온도 및 스커트부의 온도 해석 프로그램을 개발하고 그 결과를 운항선의 실측온도와 비교한 결과 본 연구 결과가 실측 온도보다 온도응답특성이 시간적으로 빨리이루어 짐을 알았다.
3. 본 연구결과는 운항조건시에서는 KMT⁹⁾에서 제시한 예측치보다 유용하게 사용될 수 있다.
4. 또한 본 연구에서 개발된 프로그램은 탱크내의 예냉 시간에 따른 가스 온도와 실측치와 약간의 차

이가 있으나, 이는 실측치의 온도는 탱크하부의 온도를 측정하였으며, 본 연구계산 결과는 탱크내의 평균온도를 계산한 결과로서 실측치와는 약간의 차이가 있음을 알았다.

후기 : 이 논문은 유공해운 및 삼성중공업 관계자의 협조하에 이루어졌음을 밝히며 관계자 여러분들께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) LNG 편람, 한국가스공사, pp 385 - 420 (1885.6)
- (2) 윤상국, LNG 냉열이용의 현황과 전망, 냉동공조기술, Vol.10, No.4 한국냉동공조기술협회, pp 34 - 42(1993).
- (3) 系山直之, LNG船, 成山堂書店(1991).
- (4) 中山健吾, 官崎秀雄의 3명, 球形タンク式 LNG船の建造三菱重工技報 Vol.21 No.2 pp 54 - 63(1984)
- (5) 中山健吾, 외 3명, 球形タンク式 LNG船の防熱特性, 三菱重工技報 Vol.21 No.2 pp 74 - 82(1984)
- (6) 김춘식, 김경근, 김용모, 천병일, 송성욱, 오주원 MOSS방식 LNG선박의 선체온도분포계산을 위한 전산프로그램 개발, (사) 한국선급 (1993.3)
- (7) 한국열유체, 삼성중공업 LNG운반선 화물기기의 용량산정 S/W개발에 관한 연구(1994)
- (8) 김경석, 증기이젝터의 성능특성 및 전산설계에 관한 연구 한국해양대학 박사논문(1993)
- (9) (사) 한국선급, LNG 선박운항 기술자료 (1992)