Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 9 pp. 807~812, 2017
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
https://doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.9.807

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

멤브레인 타입 NO96 단열시스템에 적용되는 그라스울의 해수 및 액체질소 환경에 따른 열적 성능

김태욱[1] · 박기범[2] · 이제명†

(Received August 11, 2017 ; Revised September 22, 2017 ; Accepted October 16, 2017)

Thermal performance of glass wool for membrane-type NO96 insulation system in sea water and liquid nitrogen

Tae-Wook Kim[1] · Gi-Beom Park[2] · Jae-Myung Lee+

요약: 액화천연가스 (LNG)의 수요가 상승함에 따라 조선해양산업 분야에서도 LNG 운반선의 수주가 꾸준히 이루어지고 있다. 이러한 LNG 운반선에서 주요한 이슈 중 하나는 LNG CCS 단열시스템이며, 이에 따라 LNG를 저장 및 수송하기 위한 단열시스템에 적용되는 극저온 단열소재 관련 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 제한된 LNG 저장 탱크의 공간효율을 증가시키기 위해서는 기존에 적용되는 단열 소재의 정확한 열적 특성 분석을 바탕으로 단열재의 성능에 신뢰성을 부여하는 것이 중요하므로 본 연구에서는 멤브레인 타입 NO96 단열시스템에 적용되는 그라스울의 대상으로 밀도와 극저온 환경의 해수와 액체질소 함침 조건에 따른 열전도율을 측정하였다. 이에 따라 시험 결과를 정량적으로 제시하여 환경에 따른 LNG선 단열시스템의 단열소재로써의 성능을 검토하였고, 그라스울이 멤브레인 타입 NO96 단열시스템에 적용되기에 합리적인 수준임을 검증하였다.

주제어: 그라스울, NO96 단열시스템, 열전도율, 해수 함침, 액체질소 함침

Abstract: In recent years, the consumption of liquefied natural gas (LNG) has increased rapidly, compared to other available energy resources that are known to be less environmentally-friendly. Owing to the rise in the global demand for LNG, there has been a drastic increase in the number of LNG carriers. One of the most important components of LNG carriers is the cargo containment system. Studies on cryogenic insulation materials for use in membrane-type tanks of LNG carriers for storing and transporting LNG have been actively conducted. To maximize the utilization of space in the limited size of an LNG storage tank, thermal characteristics of the glass wool should be analyzed. Therefore, the thermal conductivity of glass wool, which is the insulating material in a NO96-type LNG cargo containment system operated in a cryogenic environment, was measured and investigated under density and immersion conditions. Thus, the performance of glass wool as a heat-insulating material for the insulation system under various environmental conditions was examined quantitatively, and it was verified that glass wool is suitable for application in a membrane-type NO96 insulation system.

Keywords: Glass wool, NO96 insulation system, Thermal conductivity, Sea water immersion, Liquid nitrogen immersion

1. 서 론

우리나라의 에너지 소비는 크게 증가하였으나, 빈약한 천연자원으로 수요의 97% 이상을 수입에 의존하고 있으며, 화석 연료의 고갈 및 환경 보호의 관점에서 LNG의 수요 급증, 셰일가스 개발에 따른 LNG 가격의 하락 또한 LNG 수요 상승에 기여하였다. 이에 따라 조선해양산업 분야에서도 LNG 운반선, LNG-FPSO, LNG-FSRU 등 액화천연가스의 채취, 포집, 운송을 담당하는 고부가가치선박 및 해양플랜트의 수주가 꾸준히 이루어지고 있다. 이 중에서도 LNG 운반선이 조선해양산업 분야 LNG 시장에서 가장 높은 점유율을 지니고 있다. 이러한 LNG 운반선에서 주요한 이슈 중 하나는 LNG CCS (Cargo Containment System)의 단열시스템이다.

LNG 운반선의 탱크 설계방식 중 하나인 멤브레인 타입이 높은 용적성 및 경제성을 인정받아 널리 건조되고 있다.

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8096-4306): Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea, E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2342
1 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: kty2345@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340
2 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: rlwkeoeld@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340

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.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

멤브레인 타입 탱크의 단열시스템은 Mark-III 타입과 NO96 타입으로 나눌 수 있다. Mark-III 타입의 경우 1차 방벽인 AISI 304L 스테인리스강과 R-PUF (Reinforced Polyurethane Foam)로 구성된 플라이우드로 구성되며, NO96타입은 1차 방벽인 36% 니켈강과 그라스울이 충진된 플라이우드 박스로 구성된다**[1][2]**. 각각 플라이우드 박스 내부의 R-PUF와 그라스울이 LNG의 저장 및 운반시의 운용 온도인 영하 163도를 유지시켜주는 역할을 수행한다**[3]**.

단연 LNG CCS의 가장 핵심 기술은 외부의 열 유입을 차단하고 방지해주는 단열시스템의 단열 기술이며, 단열성능이 좋을수록 LNG CCS의 성능이 좋아진다**[4]**. 탱크 내부로의 열 유입에 의해 LNG가 증발하는데 이러한 증발가스를 BOG(Boil-Off-Gas)라 하며, 증발에 따라 탱크 내부의 압력이 증가하게 된다. 단열시스템의 단열 성능을 판단하는 지표는 CCS내의 LNG의 하루 증발량 BOR(Boil-Off-Rate)이다**[5]**. 멤브레인 타입 탱크의 경우 평균적으로 하루에 전체 부피 대비 0.15%가 기화되며, 통계에 의하면 BOR을 0.005%만 줄여도 LNG 운반선의 수명기간 동안 약 120억 원의 LNG 자연손실을 줄일 수 있다고 보고되고 있다**[6]**. LNG를 저장 및 수송하기 위한 단열시스템에 적용되는 극저온 단열소재 관련 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다**[7]-[9]**.

따라서 제한된 LNG 저장 탱크의 공간효율을 증가시키기 위해서는 기존에 적용되는 단열 소재의 정확한 열적 특성 분석을 바탕으로 단열재의 성능에 신뢰성을 부여하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 **Figure 1**에 나타낸 바와 같이 멤브레인 타입 NO96 단열시스템의 격자형 박스 형태로 구성된 플라이우드 박스에 적용되는 단열 소재인 그라스울을 대상으로 열적 특성 분석을 수행하고자 하였다.

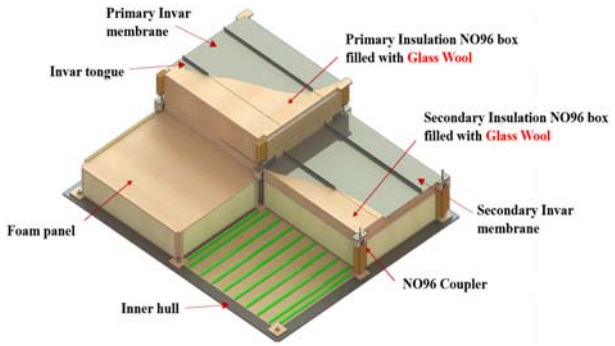


Figure 1: Organization of a NO96 type insulation system (GTT)

그라스울은 기본적으로 폐유리를 고온에 녹인 후 섬유처럼 뽑아내어 만든 무기질 광물섬유 단열재이며, 내화성, 내구성이 좋은 자재로 인정받고 있다. 과거 연구에서는 그라스울의 함수율에 따른 단열 특성, 내화성능, 화재안전 성능 등에 관한 연구는 꾸준히 수행되었고**[10]-[13]**, LNG CCS구조에의 적용을 위한 수치 해석적 연구 또한 수행되었다**[14][15]**. 그라스울의 밀도에 따른 열전도율은 KS에서 제시하고 있지만, 그라스울의 극저온 환경에의 노출에 따른 열적 특성에 관한 연구는 찾아 볼 수 없다. 하지만, 단열시스템의 내, 외부 충격에 의해 Primary Invar membrane와 단열박스가 손상되는 경우 LNG에 노출될 가능성이 있으며, 또한 충돌(Collision)이나 좌초(Grounding)에 의해 선체의 내부 선각 일부분이 파손되는 경우에 밸러스트 탱크 내부에서 유입된 해수에 노출될 가능성도 있다.

따라서 본 연구에서는 두 제조사에서 각각 그라스울을 입수하여 밀도와 함침 조건에 따른 열적 특성을 평가하였으며, 시험 결과를 정량적으로 제시하여 환경에 따른 LNG CCS 단열시스템의 단열소재로써의 성능을 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 실험 장비

본 연구의 대상 재료는 멤브레인 타입 NO96 단열시스템에 적용되는 단열 소재인 그라스울이며, 그라스울은 대표적 무기질 단열재이다. 이러한 단열재의 고유 열물성인 열전도율은 단열성능을 나타내는 지표로 활용된다. 기본적으로 그라스울의 단열 성능은 밀도에 따라 달라지는데, 보통 24k가 정상밀도이며 아래 **Table 1**은 그라스울 밀도별 열전도율의 KS값이다. 본 연구에서 이용한 그라스울의 밀도는 22, 35, 40 kg/m^{3}이며, 육안으로는 이들의 밀도에 따른 차이를 알 수 없다. KS규격에 명시된 밀도의 그라스울을 사용하지 못하고 위의 밀도를 설정한 이유는 상용적으로 사용되어 입수 가능한 그라스울이기 때문이며, 실험을 통해 경향성을 분석한 후 더 높은 밀도의 그라스울을 대상으로 실험을 수행 할 계획이다.

Table 1: Types of glass wool (KS L 9102)

Type	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity (W/mK)
24k	24 ± 2	0.037
32k	32 ± 4	0.036
40k	40 ± 3	0.035
48k ~ 120k	48 ~ 120	0.034

열전도율을 측정하는 방법으로는 평판열류법과 보호열판법이 대표적이다. 본 연구에서는 열전도율을 측정하는 방법 중에 'KS L 9016 보온재의 열전도율 측정 방법'을 따라 평판열류법으로 측정하는 Heat Flow Meter 436 (HFM 436)을 사용하였다.

Figure 2에 본 연구에서 열전도율 측정을 위해 사용된 실험 장비 HFM 436을 나타내었다. HFM 436은 가로 × 세로 300 mm × 300 mm, 두께 5-200 mm의 건축용 단열재, 산업용 단열재, 건축용 나무, 콘크리트, 폼 등의 시료에 대한 열전도율을 측정하는 장비로, 온도범위 0 - 60 ℃, 열전도율 범위 0.005 - 0.5 W/mK이 측정 가능하며, 본 연구에서는 시편의 건조 후 상온에서 측정을 수행하였다.

본 장비의 원리는 **Figure 3**과 같이 측정하고자 하는 시편을 내부의 두 가열판 (hot plate, cold plate)의 사이에 놓고, 한 면을 가열하고 반대면을 냉각하여 두 개의 가열판의 온도차를 주면, 열이 수직 방향으로 흐르게 되는데, 이때 시편를 통과하는 열량은 보정된 열량 센서 (heat flux transducer)에 의해 측정되며, 정상상태에 도달하면 측정된 열량 값을 시편의 두께 및 온도의 함수로 나누어 열전도율을 측정하게 된다.

본 논문에서는 위와 같이 국내 열전도율 측정기준에 있는 HFM 436을 이용하여 그라스울의 열전도율을 측정하였다. 또한 시험편에 15일 동안의 장기간 함침을 수행하기 위해 연구실에서 자체 제작한 **Figure 2** 우측의 단열 박스를 이용하였다. 극저온 액체의 손실을 최소화할 수 있도록 제작된 단열 박스는 온도차로 인한 액체질소와 해수의 기화를 억제시켜 장시간 보관이 가능하도록 하였다.

Figure 2: Heat flow meter and Insulation box for test

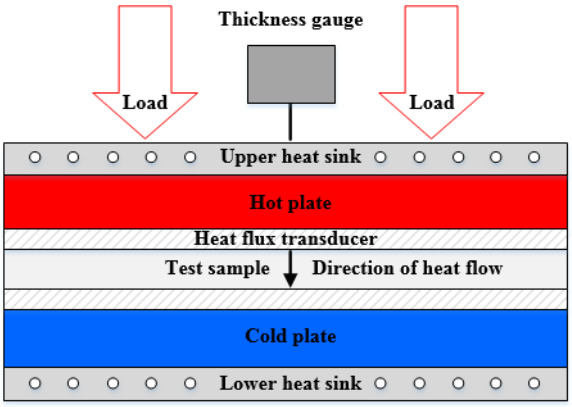


Figure 3: Schematic design of the HFM 436

2.2 실험 방법 및 시나리오

본 연구에서는 열전도율 측정 장비 HFM 436을 이용하여 열전도율 측정을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 두 제조사의 시편은 패널 형식으로 일정하며, 3가지의 환경조건으로 나뉜다. 첫 번째는 기존 시편이며, 두 번째는 내, 외부 충격에 의한 NO96 단열박스의 손상으로 인한 LNG의 누수 가능성을 고려하여 그라스울이 노출될 가능성이 있는 환경인 LNG 환경을 구현한 액체질소를 함침한 시편이다. 또한, 충돌이나 좌초에 의해 선체의 내부 선각 일부분이 파손되어 보수하게 되는 경우에 밸러스트 탱크 내부에서 유입된 해수에 노출될 가능성도 있으며, 실제 SOLAS XII/12, IMO Res. MSC. 145(77), IACS SC 180 규정에 따라 LNG CCS에 유입되는 해수를 감지하기 위해 해수감지 장치를 설치하여 운항한다. 세 번째는 이러한 환경을 고려하여 해수에 함침한 시편이다. 함침한 시편들은 연구팀에서 자체적으로 제작한 단열박스를 이용하여 15일간 함침 시킨 후 상온 환경에서 7일 건조시켜 둔 시편이다. 이러한 함침과 건조의 이유는 GTT사에서 그라스울의 성능을 평가할 때 일반적으로 이러한 조건들도 함께 평가하게 되기 때문이다. 시편은 완전히 건조시킨 후 상온에서 측정하게 되며, 해수의 염분 농도는 1.027ppm, 액체질소의 온도는 영하 196℃이다. 실제 측정에 이용한 실험 시편은 **Figure 4**에 나타내었고, 각 재료 시편의 치수는 장비의 규격에 맞게 300 mm × 300 mm × 25 mm (가로×세로×높이)로 제작하였다. 또한, 실험 시나리오는 다음 Table 2와 같으며, 각각 다른 밀도 (22, 35, 40 kg/m^3)와 여러 환경 조건 (상온, 해수 함침, 액체질소 함침)의 시나리오에 따라 열전도율을 측정을 수행하였다.

Table 2: Test scenario for glass wool

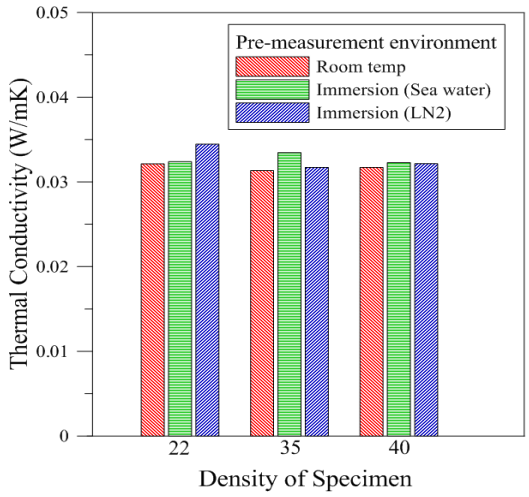
No	Model	Density (kg/m^3)	Pre-measurement environment	
1	Glasswool Board A	22	Room temperature	
2			Immersion	Sea water
3				LN2
4		35	Room temperature	
5			Immersion	Sea water
6				LN2
7		40	Room temperature	
8			Immersion	Sea water
9				LN2
10	Glasswool Board B	22	Room temperature	
11			Immersion	Sea water
12				LN2
13		35	Room temperature	
14			Immersion	Sea water
15				LN2
16		40	Room temperature	
17			Immersion	Sea water
18				LN2

Figure 4: Photograph of test specimens

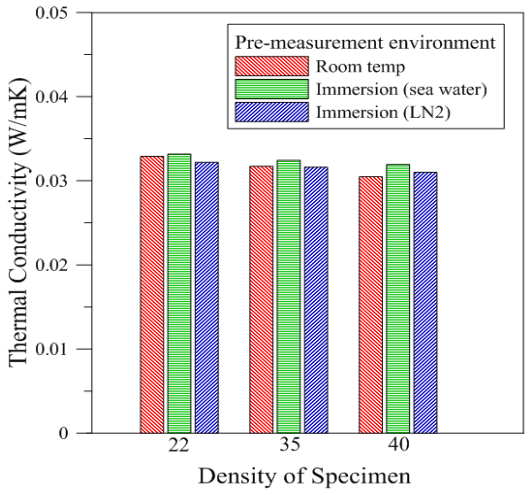
3. 실험 결과 및 분석

3.1 열전도율에 대한 밀도의 영향

각 시나리오의 케이스에 대한 열전도율 측정하고, 영향 변수인 밀도와 함침 조건에 따라 분석을 하였다. 먼저, 3가지 밀도 22, 35, 40kg/m^{3}에 따른 그라스울의 열전도율을 **Figure 5**에 나타내었다.



(a) Glasswool Board A



(b) Glasswool Board B

Figure 5: Thermal conductivity according to density

함침을 수행하지 않은 기존의 시편에 대해 밀도에 따른 열전도율을 살펴보면, KS 규격에 따라 두 종류의 그라스울 모두 밀도 값이 증가할수록 열전도율이 낮아짐을 보이며, 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 이는 밀도가 높아 단열재를 통한 공기의 흐름이 차단될 수 있기 때문이다.

상온에서의 각각의 열전도율은 KS규격에 명시된 열전도율 값보다 밀도 22, 35, 40kg/m^{3}에서 각각 평균적으로 약 0.0045, 0.0045, 0.004 낮음을 알 수 있었다. 이는 규격이 상당히 유연하여 설계에 적용할 때 어느 정도 오차를 감안하고 적용해도 된다고 판단된다.

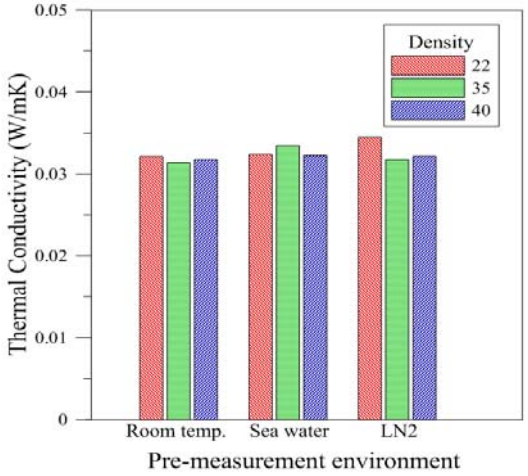
또한, 밀도 22kg/m^{3}에서 35kg/m^{3}으로 밀도가 증가할 때는 평균 약 2.5% 열전도율이 개선되었고, 35kg/m^{3}에서 40kg/m^{3}으로 밀도가 증가한 경우에는 평균 약 1.4% 열전도율이 개선됨을 보였다.

통상적으로 그라스울은 밀도가 올라가면 공극의 크기가 작아지기 때문에 열전도율이 낮아진다는 것은 이미 알려진 사실이다. 하지만, 특정 밀도를 넘어가면 공극의 면적보다 소재의 면적이 더 많아지게 되므로 열전도율이 상승하게 된다. 이러한 변곡점이 되는 밀도는 소재별로 상이하다.

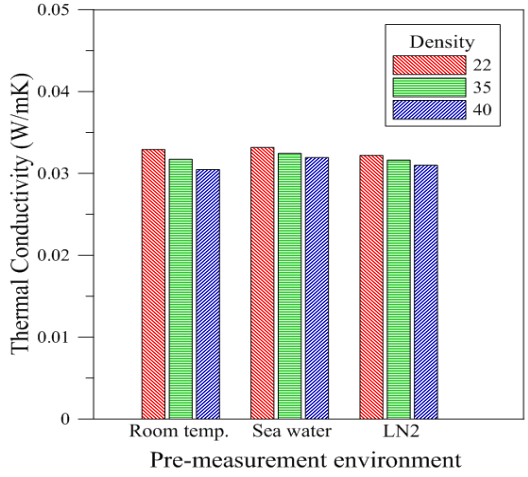
본 연구의 실험을 통하여 섬유질인 그라스울은 밀도 22~40kg/m^3 범위에서는 밀도가 상승할수록 열전도율이 개선되는 결과를 보임에 따라 공극의 크기가 작아지는 범위라고 생각된다. 참고로 KS 규격에서 알 수 있듯이 그라스울 소재는 120kg/m^3 까지는 밀도의 상승에 따라 점점 열전도율의 감소폭은 줄어들지만 계속 열전도율이 감소할 것으로 예상된다.

3.2 함침 조건에 따른 열전도율 평가

두 번째로, 열전도율을 측정하기 전 그라스울 시편을 3가지 환경조건 상온, 해수 함침, 액체질소 함침 조건을 주어 측정한 결과를 **Figure 6**에 나타내었다.



(a) Glasswool Board A



(b) Glasswool Board B

Figure 6: Thermal conductivity according to immersion condition

함침 조건에 따른 시편의 열전도율을 살펴보면, 상온 대비 해수 함침 수행시 평균 약 2.8% 열전도율이 저하되었고, 상온 대비 액체질소 함침 수행시 평균 약 1.5% 열전도율이 저하되었다.

또한, 그라스울 보드 B의 액체질소 함침 케이스만을 제외하고 모든 밀도 구간에서 해수 함침을 수행하였을 때의 열전도율이 가장 높게 측정되었다. 이는 그라스울 내부에 염분이 침투하여 열전달 저항을 만들어 열전도를 방해하는 결과를 초래하였다고 판단된다. 이에 따라 함침을 수행한 그라스울의 미세구조 분석 등의 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

하지만 해수에 함침 하여 그라스울의 열전도율이 저하되었음에도 KS 규격에 명시된 열전도율보다는 평균 약 0.0044 낮았고, 액체질소에 노출시킨 경우에도 상온환경에서보다 수치상으로 약간의 열전도율 증가 폭을 보였지만 상당히 낮은 열전도율을 보인다.

본 연구를 통해서 그라스울이 해수 환경이나 LNG 환경에 노출 되어도 그라스울의 단열성능은 규격상으로는 합리적 범위에 있음을 알 수 있었다. 하지만 단열 시스템의 단열 성능이 저하되는 것은 곧 저장할 LNG의 양이 줄어드는 것을 뜻하므로 제작시 이러한 환경에 노출되지 않도록 하는 것이 중요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2 종류의 그라스울을 입수하여 밀도와 극저온 환경의 함침 조건에 따른 열적 특성을 평가하였으며, 시험 결과를 정량적으로 제시하여 환경에 따른 LNG CCS 단열시스템의 단열소재로써의 성능을 검토하였다. 본 연구의 결과를 아래에 간략히 정리하였다.

- 밀도 값이 증가할수록 열전도율이 낮아짐을 보이며, 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였고, 이는 밀도가 높아 단열재를 통한 공기의 흐름이 차단될 수 있기 때문이다.
- 상온 뿐만 아니라 해수 환경이나 LNG 환경에 노출 되어도 그라스울의 열전도율은 KS 규격에 명시된 열전도율보다는 상당히 낮고 합리적 범위에 있음을 알 수 있었다.
- 섬유질인 그라스울은 밀도 22~40kg/m^3 범위에서는 밀도가 상승할수록 열전도율이 개선되는 결과를 보임에 따라 공극의 크기가 작아지는 범위 내에 있다고 생각된다.
- 대부분의 밀도 구간에서 해수 함침을 수행하였을 때 상온 대비 열전도율이 가장 높게 측정되었고, 이러한 결과는 그라스울 내부에 염분이 침투하여 열전도를 방해하는 결과를 초래하였다고 판단된다.

본 연구를 통하여 내, 외부 충격에 의한 NO96 단열박스의 손상이나 충돌 및 좌초에 의해 선체의 내부 선각 일부가 파손되는 경우에 대한 가능성을 고려하여 그라스울의 밀도와 환경조건에 따른 열전도율을 측정하고 분석하였다. 이에 따라 두 종류의 그라스울이 멤브레인타입 NO96 단열시스템에 적용되기에 합리적인 수준임을 검증하였다. 하지만 단열 시스템의 단열 성능이 저하되는 것은 곧 저장할 LNG의 양이 줄어드는 것을 뜻하므로 제작시 이러한 환경에 노출되지 않도록 하는 것이 중요하다고 사료된다. 또한, LNG선에 적용되는 단열시스템의 주 단열재로 사용되는 데는 우수한 열적 특성뿐만 아니라 기계적 성능 또한 갖추고 있어야 하므로 추후 연구를 통해 그라스울을 적용한 NO96 단열시스템의 극저온 기계적 성능 분석을 수행하여 적용성을 검토 할 계획이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A1A15052688). 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

[1] C. W. Jang, C. S. Shim, H. C. Song, and C. Y. Song, “Study on crogenic behavior of reinforced polyurethane foam for membrane type LNG carrier,” Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 27, no. 1, pp. 74-79, 2013 (in Korean).

[2] J. H. Kim, S. K. Kim, M. S. Kim, and J. M. Lee, “Numerical simulation of membrane of LNG insulation system using user defined material subroutine,” Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, vol. 27, no. 4, pp. 265-271, 2014 (in Korean).

[3] M. S. Chun, M. H, Kim, W. S. Kim, S. H. Kim, and J. M. Lee, “Experimental investigation on the impact behavior of membrane-type LNG carrier insulation system,” Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 22, no. 6, pp. 901-907, 2009 (in Korean).

[4] S. W. Choi, J. U. Roh, M. S. Kim, and W. I. Lee, “Thermal analysis of two main CCS (Cargo Containment System) insulation box by using experimental thermal properties,” Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, vol. 24, no. 4, pp. 429-438, 2011 (in Korean).

[5] M. S. Zakaria, K. Osman, A. A. Yusof, M. H. M. Hanafi, M. N. A. Saadun, and M. Z. A. Manaf,

"Parametric analysis on boil-off gas rate inside liquefied natural gas storage tank," Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol. 6, pp. 845-853. 2014.

[6] M. M. F. Hasan, A. M. Zheng, and I. A. Karimi, "Minimizing boil-off losses in liquefied natural gas transportation," Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 48, no. 21, pp. 9571-9580. 2009.

[7] S. B. Park, C. S. Lee, S. W. Choi, J. H. Kim, C. S. Bang, and J. M. Lee, "Polymeric foams for cryogenic temperature application: Temperature range for non-recovery and brittle-fracture of microstructure," Composite Structures, vol. 136, pp. 258-269.

[8] Y. H. Yu, I. Choi, S. Nam, and D. G. Lee, "Cryogenic characteristics of chopped glass fiber reinforced polyurethane foam," Composite Structures, vol. 107, pp. 476-481, 2014.

[9] A. Hofmann, "The thermal conductivity of cryogenic insulation materials and its temperature dependence," Cryogenics, vol. 46, no. 11, pp. 815-824, 2006.

[10] H. U. Shin, H. Song, Y. S. Chu, and J. K. Lee, "Characteristic of Insulation with Moisture Content Light-weight Inorganic Foam Ceramic Board," Proceedings of Korea Institute of Building Construction, vol. 13, no. 2, pp. 198-199, 2013 (in Korean).

[11] J. H. An, I. H. Yeo, K. H. In, and B. Y. Min, "A Study on Fire Resistance Performance Improvement of Glasswool Sandwich Panel," Proceedings of Archtectural Institute of Korea, vol. 10, pp. 559-562, 2009 (in Korean).

[12] O. S. Kweon, Y. H. Yoo, H. Y. Kim, and S. H. Min, "An Experimental Study on Fire Safety Performance of Glass Wool Sandwich Panel," Fire Science and Engineering, vol. 10, no. 10, pp. 21-27, 2012 (in Korean).

[13] M. H. Cho and S. C. Hong, "A study on insulation·fire proof materials using silica aerogels," Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 10, pp. 6816-6822, 2015 (in Korean).

[14] S. Y. Hwang and J. H. Lee, "Comparative study on the thermal insulation of membrane LNG CCS by heat transfer analysis," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, vol. 29, no. 1, pp. 53-60, 2016 (in Korean).

[15] J. H. Lee, Y. J. Kim, and S. Y. Hwang, "Numerical model of heat diffusion and evaporation by LNG leakage at membrane insulation," Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 28, no. 6, pp. 517-526, 2014 (in Korean).