

Type C 연료탱크에 적용되는 분말형 단열 소재의 상온/극저온 기계적 특성에 관한 연구

A Study of Mechanical Characteristics at Room/Cryogenic Temperature of Powder Insulation Materials Applied to Type C Fuel Tank

김태욱¹, 오재원¹, 서영균¹, 한성종¹, 이제명^{2*}

Tae-Wook Kim¹, Jae-Won Oh¹, Young-Kyun Seo¹, Seong-Jong Han¹, Jae-Myung Lee^{2*}

〈Abstract〉

The global demand for Liquefied Natural Gas(LNG) continues to increase and is facing a big cycle. To keep pace with the increase in international demand for LNG, the demand for LNG fueled ships is also increasing. Since LNG fuel tanks are operated in a cryogenic environment, insulation technology is very important, and although there are various types of insulation applied to Type C tanks, multi-layer insulation and vacuum insulation are typically applied. Powder insulation materials are widely used for storage and transportation of cryogenic liquids in tanks with such a complex insulation structure. In this study, compression tests at room and cryogenic temperature were performed on closed perlite, glass bubble, and fumed silica, which are representative powder insulation material candidates. Finally, the applicability to the Type C fuel tank was reviewed by analyzing the experimental results of this study.

Keywords : Cryogenic Characteristics, Insulation, Mechanical Characteristics, Powder Materials, Type C Fuel Tank

¹ 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터

^{2*} 교신저자, 부산대학교 조선해양공학과

E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr

¹ Offshore Industries R&BD Center, KRISO

^{2*} Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,

Pusan National University

1. 서론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 배출가스 통제구역(ECA, Emission Control Areas) 설정 및 후처리 장치 사용 권고에 따라, 세계적으로 천연가스(NG)의 수요가 지속적으로 증가하며 빅 사이클을 맞이하고 있다. 전 세계 가스 수요는 점차 증가하여 현재 3.8TCM(Trillion cubic meter)에서 2035년에는 5.1TCM에 도달할 것으로 전망되고 있으며, 2030년에는 천연가스가 석탄 수요 비중을 추월할 것으로 예상되고 있다 [1-3]. 이에 따라 조선해양산업 분야에서도 고도의 극저온 저장 기술이 필요하여 고부가 가치 선박으로 분류되는 액화천연가스(LNG) 연료추진선의 수주가 꾸준히 이루어지고 있으며, 2030년에는 국내 건조 선박의 약 60% 수준인 200여 척이 건조될 것이라 예상되고 있다[4-5]. LNG 연료추진선에서 가장 핵심인 기자재는 1/600의 부피로 액화시킨 천연가스를 극저온인 영하 163도에서 저장하는 연료탱크이다.

LNG 연료추진선의 연료탱크는 IGF Code(International code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels)에 따라 독립형(Independent Type A, B, C)과 일체형(Membrane) 탱크로 나눌 수 있다[6]. IMO에서 규정하는 Type A, B, C 탱크 중 Type A 탱크는 일반 액체탱크로써 액체 화물의 유출 가능성이 있다고 가정하여 만일의 유출에 대비하여 선체 전체가 이중 방벽으로 제작된다. Type B 탱크는 탱크의 균열(Crack) 발생을 가정하여 파괴해석을 통해 누출량을 산정하며 이를 적재할 수 있을 만큼의 부분 2차 방벽을 요구한다. Type C 탱크는 압력용기 형태로 누출의 우려가 없으므로 2차 방벽이 불필요하다. 일반적으로 LNG 연료추진선의 연료탱크의 경우 BOG 제어가 용이한 Type C 탱크를 주로 적용하고 있다[7]. 또한 LNG 등 극저온 연료탱크 뿐만 아니라, 최근에 많은 연구기관에

서 개발 중인 수소 추진 선박의 연료탱크 또는 암모니아 추진 선박의 연료탱크의 경우에도 Type C 탱크를 적용할 것이라 생각된다.

LNG 연료탱크는 극저온 환경에서 운용되기 때문에 단열 기술이 상당히 중요하며, Type C 탱크에 적용되는 단열의 형태는 다양하지만 대표적으로 다층단열 및 진공단열이 적용된다. 분말형 단열 소재는 이러한 복잡한 단열 구조를 갖는 탱크의 극저온 액체 저장 및 운송에 널리 사용되고 있으며, 이는 진공단열시 단열층에 충전되어 함께 사용할 경우 더 효과적이다. 위에서 언급한 바와 같이 추후 개발될 수소 추진 선박과 암모니아 추진 선박에도 Type C 탱크를 적용하게 되고, 이에 분말형 단열 소재가 충전된 진공 단열 방식이 필수적으로 채택될 것이다. 이러한 분말형 단열소재에 대해서는 다양한 입자 형태, 입자 크기 분포, 기공크기 등에 따른 단열성능과 기계적 특성에 대한 실험적 연구가 많이 진행되어져왔지만, 아직도 최선의 단열 방법 및 소재에 대해서는 많은 논의가 이어지고 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 연료추진선의 Type C 탱크에 적용하기 위한 분말형 단열소재 후보군인 폐기공 펄라이트(Closed Cell Perlite), 글라스 버블(Glass Bubbles), 흡드 실리카(Fumed Silica)에 대한 상온 및 극저온 환경에서의 재료 단위 성능평가를 수행하였고, 재료 시험 결과를 통해 소재별, 온도별 기계적 특성을 분석함으로써 Type C 연료탱크에 대한 적용성을 검토하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 재료

본 연구에서 선정한 대상 재료는 Type C 연료탱크에 진공단열의 충전재료 사용되는 대표적인

분말형 단열 소재 후보군인 폐기공 펄라이트, 글라스 버블, 흠드 실리카이다.

먼저, 펄라이트는 미세 공극을 가지는 경량 구상형의 불연성 단열소재로, 극저온 유체를 저장하는 Type C 연료탱크에는 가장 일반적으로 진공 펄라이트 단열방식의 내외 이중으로 구성되는 이중단열 탱크가 적용된다. 내부 공간에는 펄라이트 분말 단열재가 240 mm 충전되고, 10^{-2} Torr의 진공이 적용된다[8]. 또한, 흠드 실리카는 규소를 이용해 만드는 친환경 소재로 뛰어난 단열성으로 인해 예전부터 진공단열의 충전재로써 적용되어져 왔고, 여전히 검토되어지는 소재이다.

마지막으로, 글라스 버블은 수분에 대한 저항력이 강하고, 화학적으로 매우 안정된 분말형 단열 소재이며, 이러한 특성을 유지하면서 동시에 다양한 고분자 소재와 혼합이 가능하기 때문에 극저온 탱크의 대표적인 단열재인 폴리우레탄 폼 등 다양한 소재에 첨가되어 적용이 되고 있다. 또한, 진공단열 충전재로 적용 시에도 볼 베어링 효과로 인하여 흐름성에 대한 우려 없이 많은 양을 충전할 수 있기 때문에 NASA에서도 액화수소 저장탱크의 진공 단열을 위해 글라스 버블의 적용을 오래전부터 검토 및 실증해오고 있다[9].

해당 분말형 단열 소재들에 대해 Type C 연료탱크의 진공단열을 위한 충전재로써의 적용시 검토되어야 할 물리적 물성들은 너무 많고, 분말형 단열소재의 특성상 제조사의 제작공법이나 제품에 따라 밀도, 강도 등 물성치의 편차가 상당히 크기 때문에, 각 소재에 대한 가장 대표적인 물성치인 열전도율을 Table 1에 나타내었다[10-11].

Table 1. Types of power materials

Materials	Thermal Conductivity (W/mK)
Glass Bubbles	0.025
Closed Perlite	0.035
Fumed silica	0.01~0.03

2.2 실험 장비 및 방법

본 연구에서는 분말형 단열소재 후보군에 대해 상온 및 극저온 환경 하에서의 재료 단위 성능평가를 수행하기 위해 특수 제작된 극저온 챔버와 만능재료시험기(KSU-5M)를 이용하여 압축시험을 수행하였다. LNG 연료추진선의 연료탱크 운용 온도인 영하 163도의 극저온 환경 구현을 위해 극저온 챔버 내에 질소가스를 분사하고 자동온도조절 시스템을 통해 유지하여 압축시험을 수행하였으며, 분말형 단열소재의 압축시험에 필요한 시험 보조 장비인 시험 지그에 대해서는 자체적으로 특수 제작하여 활용하였다. 극저온 시험 시 시험편의 열적 평형 후 시험을 수행하기 위해 1시간동안 예비 냉각을 수행한 후 모든 극저온 시험을 수행하였다. 본 연구의 상온 및 극저온 분말소재 압축시험을 위해 특수 제작한 지그를 장착한 만능재료시험기를 Fig. 1에 나타내었다.

분말형 단열 소재의 압축시험에 대한 규격은 정확하게 명시된 바가 없어서, 일반적인 복합소재의 압축시험 속도를 참고하여 임의로 각 분말 소재의 높이를 30mm, 직경을 70mm로 설정한 후



Fig. 1 Photograph of experimental apparatus for compression test at room and cryogenic temperature

5mm/min의 변형률 속도로 압축시험을 수행하였다. 또한, 실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 각 케이스 별로 5번의 반복시험을 수행하였고, 평균값과 가장 유사한 데이터를 채택하여 결과를 비교 분석하였다. 최종적으로, 본 연구의 압축시험을 위한 실험 시나리오를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Compression test scenario for powder insulation materials

Materials	Temperature [°C]	Strain rate [mm/min]	Height [mm]
Glass Bubbles	20	5	30
	-163	5	30
Closed Perlite	20	5	30
	-163	5	30
Fumed silica	20	5	30
	-163	5	30

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 상온 및 저온 실험 결과

먼저, 본 연구의 대상인 Type C 연료탱크의 경우 IGF Code 설계 지침상 압력이 0.07 MPa 이상으로 되어있으며, 최대 2MPa까지도 설계가 되긴 하지만 기본적으로는 0~1MPa의 압력으로 운용된다[7]. 따라서, 본 연구의 대상인 분말형 단열소재들의 압축 강도는 적용 대상인 Type C 연료탱크의 운용 조건에 부합하는 2MPa를 훨씬 넘기 때문에 시험 수행시 중요 인자로 크게 고려할 필요가 없다고 판단하였으며, 본 연구에서는 분말형 단열소재의 강도 측면이 아닌 변형 측면에서의 적용성 검토에 대한 연구를 수행하였다.

결과적으로, 본 연구에서 Type C 연료탱크에 적용되는 3개의 분말형 단열소재 후보군의 상온 및

극저온 압축시험 결과인 응력-변형률 선도는 다음 Fig. 2와 3에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 2MPa 이상의 응력 데이터는 본 연구에서 큰 의미를 갖지 않기 때문에 그래프의 가시성을 위해 10MPa까지의 응력만을 그래프에 나타내었다.

Fig. 2와 같이, 동일한 초기상태의 시편과 동일

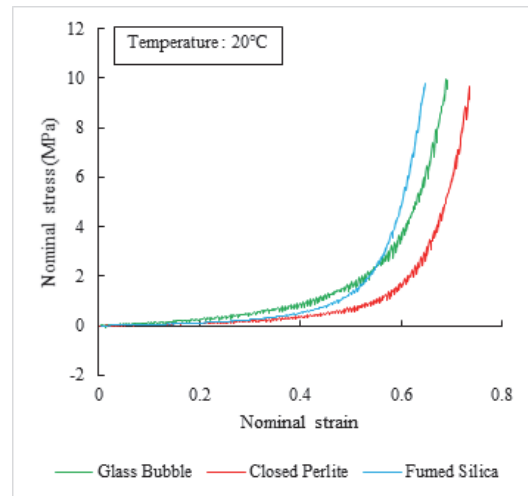


Fig. 2 Compression stress-strain curve for powder insulation materials at room temperature

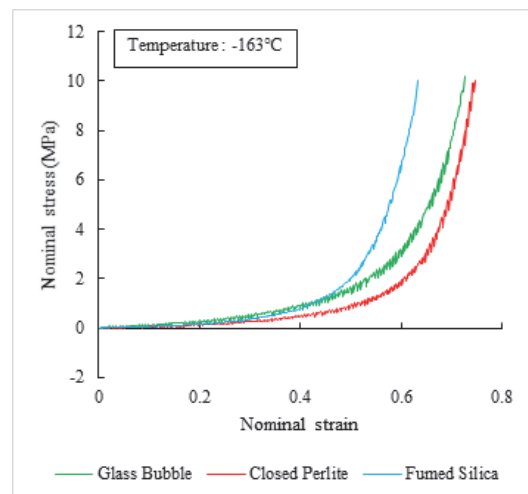


Fig. 3 Compression stress-strain curve for powder insulation materials at cryogenic temperature

한 조건에서 수행한 상온 시험에서 1MPa와 2MPa의 응력에 도달할 때까지의 변형이 펄라이트가 가장 큰 것을 확인하였다. 또한, Fig. 3과 같이 극저온에 시험서도 1MPa와 2MPa의 응력에 도달할 때까지의 변형이 펄라이트가 가장 크다는 것을 확인할 수 있었다. 더 정량적인 비교를 위해, 측정된 변형률과 응력값을 기반으로 Type C 연료탱크의 기본 운용 조건인 0~1MPa와 최대 운용 조건인 0~2MPa까지의 변형률 값과 선형 기울기 값을 각각 구하여 Table 3과 Table 4에 나타내었고, 이를 통해 Type C 연료탱크의 실제 운용 압력 조건에 대해 각 분말형 단열 소재가 얼마나 변형에 저항하는지를 수치적으로 비교하였다. 본 연구의 결과를 통해 Type C 연료탱크의 운용 조건 내의 같은 압력을 받을 때 글라스 버블, 흠드 실리카, 펄라이트 순으로 변형의 크기가 증가한다는 것을

알 수 있다. 이에 따라, 진공 단열의 진공이 파괴되는 상황에서 분말형 단열소재가 온전히 단열 및 지지를 수행해야 할 때 펄라이트를 적용한 경우 더 변형에 유의하여 설계해야 한다고 판단된다.

추가로, Fig. 4, 5, 6과 같이 글라스 버블, 펄라이트, 흠드 실리카의 상온 및 극저온에서의 압축 응력-변형률 선도를 비교하여 나타내었다. 3개의

Table 3. Strain and slope at a stress level of 1 MPa in each test

Materials	Temperature [°C]	Strain [%]	Slope
Glass Bubbles	20	0.41	2.07
	-163	0.40	2.24
Closed Perlite	20	0.54	1.51
	-163	0.52	1.80
Fumed silica	20	0.47	1.72
	-163	0.42	2.08

Table 4. Strain and slope at a stress level of 2 MPa in each test

Materials	Temperature [°C]	Strain [%]	Slope
Glass Bubbles	20	0.52	3.07
	-163	0.53	3.25
Closed Perlite	20	0.61	2.26
	-163	0.61	2.71
Fumed silica	20	0.54	2.68
	-163	0.50	3.13

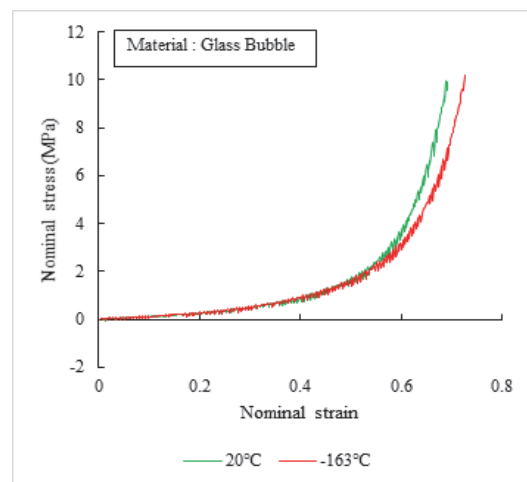


Fig. 4 Compression stress-strain curve for glass bubble at room and cryogenic temperature

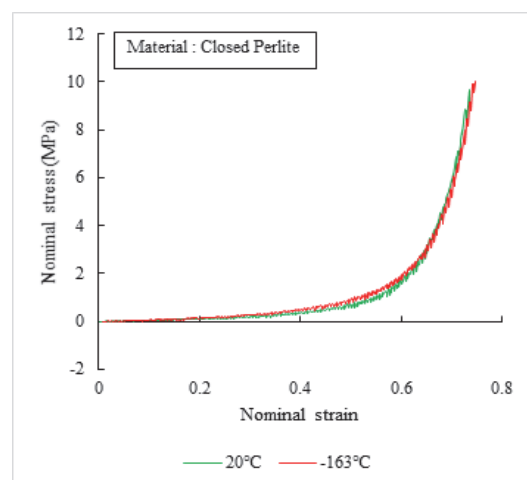


Fig. 5 Compression stress-strain curve for closed perlite at room and cryogenic temperature

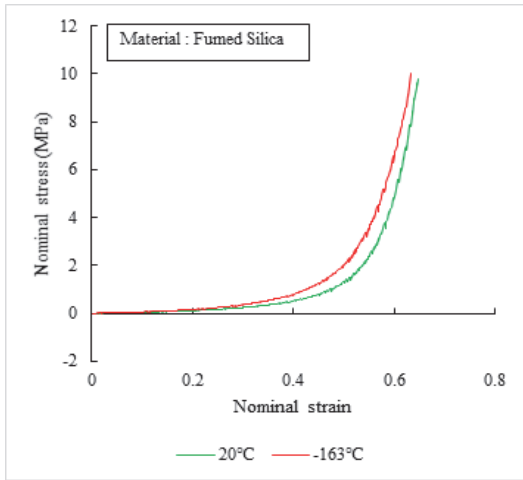


Fig. 6 Compression stress-strain curve for fumed silica at room and cryogenic temperature

Figs와 Table 3을 통해서 상온에 비해 극저온에서 모든 분말형 단열소재가 1MPa까지 변형하는 변형량은 더 작다는 것을 알 수 있다. 이는 단순히 일반적인 단열 소재의 특성상 저온으로 갈수록 기울기인 탄성계수가 높아지는 경향과 같다고 생각할 수 있다. 하지만, 분말형 단열 소재의 경우 이러한 경향성에 대해 정확한 원인 분석은 추가로 수행해야 판단할 수 있을 것이라 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 LNG 연료추진선의 Type C 연료탱크에 적용하기 위한 분말형 단열소재의 기계적 특성 검토를 위해, 대표적인 분말형 단열소재 후보군인 펄라이트, 글라스 버블, 흙드 실리카에 대해 상온 및 극저온 환경에서의 재료단위 성능평가를 수행하고 분석함으로써 Type C 연료탱크에 대한 적용성을 검토하였다.

본 연구의 결과를 통해 Type C 연료탱크의 운용 조건 내의 같은 압력을 받을 때 글라스 버블, 흙드

실리카, 펄라이트 순으로 변형의 크기가 증가한다는 것을 알 수 있으며, 진공 단열의 진공이 파괴되는 상황에서 분말형 단열소재가 온전히 단열 및 지지를 수행해야 할 때 펄라이트를 적용한 경우 더 변형에 유의하여 설계해야 한다고 판단된다. 추가로, 분말형 단열소재의 상온 및 극저온에서의 기계적 특성에 대한 경향성은 알 수 있지만, 원인 분석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단되며, 추후에 이에 대한 추가적인 연구 또한 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “수소 해상 공급체인 개념설계 평가 모델 및 기자재 시험평가 기술 개발” 사업(PES3950)에 의해 수행되었습니다.

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다(20006644).

참고문헌

- [1] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook: Are We Entering a Golden Age of Gas?”, Special Report, Paris, France, (2011).
- [2] Det Norske Veritas (DNV), “Greener Shipping in the Baltic Sea”, Technical report, (2010).
- [3] T. Unseki, “Environmentally Superior LNG-Fueled Vessels”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 50, no. 2, pp. 37-43, (2013).
- [4] K. D. Chung, “Competition status and future prospects in the eco-friendly ship sector, where newbuilding orders will be concentrated”, POSRI Issue report, vol. 2020, no. 8 pp. 1-13. (2020).
- [5] S. C. Jang, J. P. Eom, and H. C. Jung, “CFD/

- CAE Analysis of QC/DC Bellows for LNG Bunkering”, *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 21, no. 5, pp. 191-195, (2018).
- [6] Maritime Safety Committee, International code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels(IGF code), International Maritime Organization (IMO), (2016).
- [7] G. Y. Park, J. M. Cheon, and K. H. Cho, “Operational characteristics of high-pressure LNG fuel gas supply systems”, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 419-426, (2018).
- [8] S. Yun, "Thermal Analysis of LNG Storage Tank for LNG Bunkering System", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 9, pp. 876-880, (2015).
- [9] J. P. Sass, W. S. Cyr, T. M. Barrett, R. G. Baumgartner, J. W. Lott, and J. E. Fesmire, “Glass bubbles insulation for liquid hydrogen storage tanks”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1218, no. 1, pp. 772-779. American Institute of Physics. (2010).
- [10] J. W. Kim, J. Y. Jeong, and D. J. Chang, “Optimal Shape and Boil-Off Gas Generation of Fuel Tank for LNG Fueled Tugboat”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 19-25, (2020).
- [11] H. Y. Jo, S. J. Oh, M. N. Kim, H. M. Lim, and S. H. Lee, “Effects of SiC particle size and inorganic binder on heat insulation of fumed silica-based heat insulation plates”, *Journal of the Korean Ceramic Society*, vol. 53, no. 4, pp. 386-392, (2016).

(접수: 2021.10.29. 수정: 2021.11.29. 게재확정: 2021.12.01.)