

## 현무암섬유를 이용한 LNG 화물창 2차 방벽의 기계적 특성에 대한 연구

### Effects of Basalt Fiber on the Mechanical Properties of Secondary Barrier for LNG Cargo Containment System

노우승<sup>1</sup>, 신해름<sup>2</sup>, 여승준<sup>3</sup>, 김만태<sup>3\*</sup>

Woo-Seung Noh<sup>1</sup>, Hae-Reum Shin<sup>2</sup>, Seung-June Yeo<sup>3</sup>, Man-Tae Kim<sup>3\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Recently, with the strengthening of environmental regulations, there has been an increasing interest in eco-friendly energy sources, leading to a trend of the increasing scale of Cargo Containment Systems (CCS) for Liquefied Natural Gas (LNG) carriers. Among these systems, membrane tanks have gained popularity in LNG transport vessels due to their superior spatial utilization and competitiveness. However, due to high initial investment costs and the difficulty in repair in case of damage, a safety layer, the secondary barrier, must be installed without fail. In this study, in order to apply a new secondary barrier to the existing membrane-type LNG CCS, tests were conducted on the fiberglass layer previously used in the Triplex-Flexible Secondary Barrier (FSB), substituting it with basalt fiber. Tensile and vertical tensile tests were performed to assess the newly applied material. Environmental tests were conducted at room temperature (25°C) and extremely low temperatures (-170°C), considering the temperatures to which substances may be exposed during LNG vessel operations. The basalt-FSB produced in this study demonstrated superior results compared to the specifications of the existing product, confirming its potential applicability for implementation.

**Keywords :** *Secondary Barrier, Basalt Fiber, LNG CCS, Membrane, Tensile Strength*

1 부산대학교 기계공학부, 대학원생

2 부산대학교 융합학부, 대학원생

3 한국세라믹기술원, 우주항공융복합소재센터

3\* 한국세라믹기술원, 우주항공융복합소재센터, 책임연구원  
E-mail: ginggiscan@kicet.re.kr

1 Graduate Student, Department of Mechanical Engineering,  
Pusan National University

2 Graduate Student, Department of Convergence, Pusan  
National University

3 Aerospace Composite Material Center, Korea Institute of Ceramic  
& Technology

3\* Principal Researcher, Aerospace Composite Material Center,  
Korea Institute of Ceramic & Technology  
E-mail: ginggiscan@kicet.re.kr

## 1. 서론

세계 각국에서는 환경 규제가 강화되면서 친환경 에너지에 대한 관심이 증가하고 있어 LNG (Liquified Natural Gas) 수요, 생산 및 수출이 지속적으로 증가하는 추세이다. 이에 따라 LNG 운반선의 수주량 또한 증가하고 있어 LNG 운반선의 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. LNG 운반선은 천연가스를 액화시켜 운송하며  $-163^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는 조건에서 부피 감소로 대량 운송이 가능해져 경제적인 측면에서 유리한 장점을 가지고 있다[1].

LNG 운반선에 초저온의 액화 천연가스를 보관하는 LNG 화물격납시스템(CCS: Cargo Containment System)은 선박의 운송 능력과 안전성을 결정하는 가장 중요한 구성 요소 중 하나이며 선박의 구조에 따라 선박의 구조와 일체화 되는 멤브레인(membrane) 타입 탱크와 선박의 구조와 독립되어 지지구조로 받쳐서 제작되는 독립형 탱크로 구분된다. 멤브레인 탱크는 독립형 탱크 대비 공간 이용 효율 및 경쟁성이 우수하여 최근 대형 LNG 운반선에 많이 채택되고 있다[2].

멤브레인 탱크는 설계하고 제작하는데 필요한 특수 소재와 기술적 노하우 때문에 초기 투자 비용이 상대적으로 높고 고압의 가스 환경에서 사용되기 때문에, 손상이 발생하거나 파열되면 복구하기가 어려울 수 있으며 심각한 문제를 야기할 수 있다. 이로 인해 멤브레인 탱크에는 선박의 운동으로 인한 LNG의 슬로싱을 줄이고 LNG의 적재

유무에 따른 열응력에 의한 변형을 관리하기 위해 1차 방벽 외에 추가적인 안전 계층인 2차 방벽을 반드시 설치하여야 한다. 멤브레인 탱크의 일반적인 구조는 Fig. 1과 같이 반복적인 열변형에 의한 변형을 최소화하는 주름부가 있는 스테인리스강 1차 방벽과 1차 방벽의 손상 발생 시, 일정기간 동안 LNG가 누설되는 것을 방지하는 2차 방벽으로 이중 방벽 구조를 적용하고 있다.

1차 방벽의 경우, Insulation panel 설치 후 비교적 쉽게 설치할 수 있지만, 2차 방벽의 경우 Insulation panel 설치와 고려하여 구성해야 하기 때문에 상당히 복잡한 기술을 필요하며 가장 핵심적인 구성 요소이다. 최근에는 2차 방벽의 손상 사례가 보고됨에 따라 2차 방벽에 대한 신소재 개발과 기계적 특성에 대한 연구가 진행되고 있다.[3 ~ 4]

기존의 2차 방벽에 사용되는 소재는 비용이 저렴하고 이에 비해 특성이 우수한 유리섬유(Glass Fiber)를 제품으로 적용하고 있으나, 유리섬유의 환경적 문제와 손상 이력으로 이를 보완하고자 본 연구에서는 친환경적이고, 특성이 보다 우수한 현무암섬유(Basalt Fiber)로 대체하는 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 기존 사용되고 있는 멤브레인 타입 LNG CCS의 2차 방벽에 새로운 소재를 적용하여 FSB 요구강도(Reference)와 비교를 통해 Flexible type의 2차 방벽에 대해 적용가능성을 확인하였고, 현무암섬유가 적용된 2차 방벽의 기계적 특성에 대해 연구를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편 및 시험 장비

본 연구에서는 사용된 현무암 섬유는 두 가지

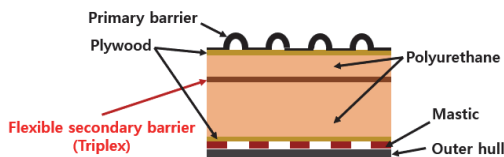


Fig. 1 LNG Cargo Containment System components

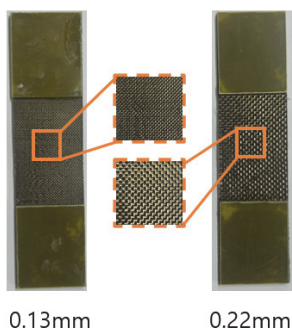


Fig. 2 Tensile test specimen

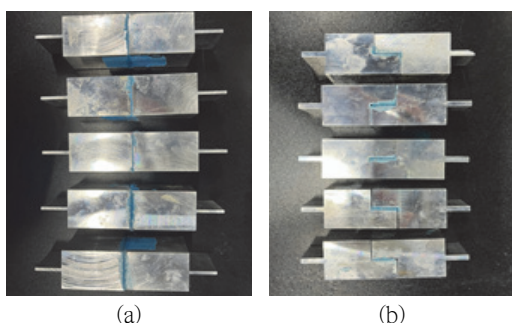


Fig. 3 (a) Perpendicular tensile & (b) Shear specimen

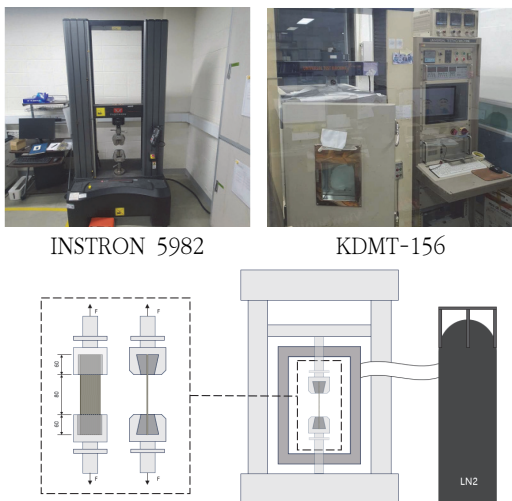


Fig. 4 Universal material testing machine for room temperature and cryogenic temperature & Schematic diagram

타입의 평직(Woven type)으로 두께 0.13 mm와 0.22 mm의 섬유를 사용하였다. 접착필름은 열가소성 수지계열의 필름형 접착제를 이용하였다. 성형공정은 롤투롤(Roll to Roll) 공정장비를 이용하여 400 \* 400 cm 크기로 제작하였다.

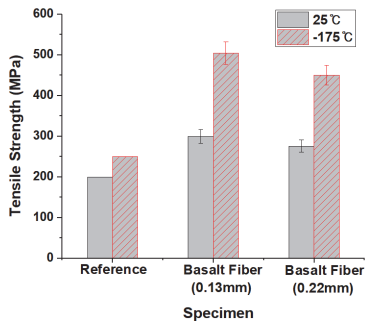
제작된 시편은 2차 방벽의 재료시험규격에 따라 수행되었으며, 인장시험(Tensile Test)은 ISO 1421 규격에 따라 각 5개씩 제작하여 시험을 수행하였다. Fig. 2는 인장시험 규격에 따라 제작된 시편의 형상을 나타내었다. 또한 접착력을 확인하기 위해 Fig. 3에 나타나듯이 수직인장시험(Perpendicular Tensile Test)와 전단시험을 각 ASTM D2095과 ISO 11003-2 규격에 따라 제작하여 수행하였다.

시편의 기계적 특성을 확인하기 상온 및 극저온(-170±5 °C) 환경 조건에서 만능재료시험기를 이용하여 기계적 특성에 대해 시험을 수행하였다. Fig. 4는 본 연구에서 사용된 상온 및 극저온용 만능재료시험기와 모식도를 나타내었다.

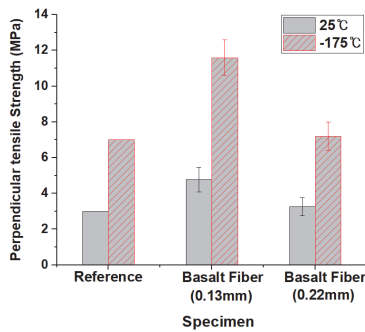
### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 기계적 거동 분석

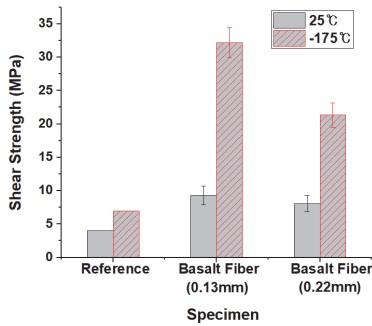
본 연구에서는 두 가지 Type의 현무암섬유를 이용하여 Flexible type의 2차 방벽에 대한 기계적 특성에 연구를 수행하였다. 인장 강도는 Fig. 5(a)에 나타나듯이 Reference와 비교하였을 때 현무암섬유가 상온이나 극저온 환경하에서 훨씬 높은 인장강도를 나타내었고, 현무암섬유의 경우 두께가 얇을수록 더 높은 인장강도 값을 나타내었다. 이는 두께가 얇은 경우 비교적 섬유상 간의 간격이 훨씬 촘촘하기 때문에 수지와의 접착면적이 훨씬 높기 때문으로 판단된다. 특히 극저온 환경하에서 이러한 경향이 더 뚜렷하게 나타내는 것



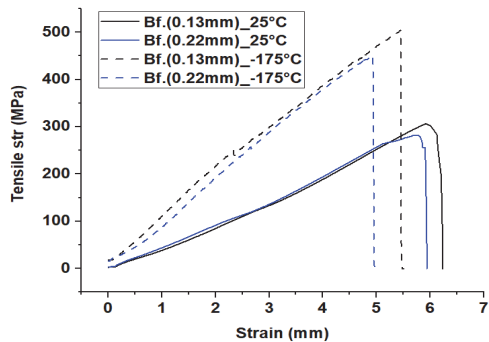
(a) Tensile strength



(b) Perpendicular tensile strength



(c) Shear strength

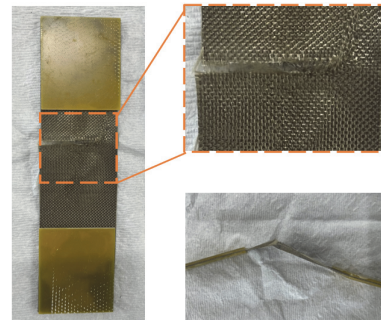


(d) Stress-strain curve according of Tensile test

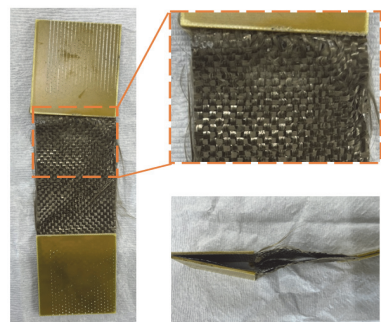
Fig. 5 Test strength of Reference & Basalt-FSB

을 알 수 있다. 저온의 환경에서는 수지가 얼면서 섬유와 국부적인 계면의 접촉특성에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 5(b)와 (c)에서 나타나듯이 섬유와 알루미늄 사이 접착력 또한 현무암섬유와 열가소성 계열의 수지를 사용했을 때 FSB 요구강도 보다 훨씬 좋은 접착특성이 나타나는 것을 확인하였다. 전단 접착특성의 경우 현무암섬유(0.13mm)가 FSB 요구강도 대비 약 360% 향상되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(d)와 같이 상온과 극저온 환경하에서 현무암섬유 두께에 대한 차이 역시 두께가 얇을수록 상온 뿐만아니라 극저온 환경에서도 더 좋은 특성을 가지는 것으로 나타났다. 재료의 변형적인 측면에서도 두꺼운 섬유 보다 얇은 소재의 섬유가 더 좋은 기계적 특성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.



(a) Basalt fiber(0.13mm) specimen fracture



(b) Basalt fiber(0.22mm) specimen fracture

Fig. 6 Test strength of Reference & Basalt-FSB



### 3.2 파단면 및 파손 특성 분석 결과

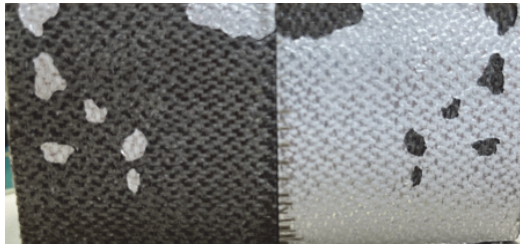
Fig. 6은 파손의 형태와 계면의 분석을 통해 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 검토하였다. Fig. 6 (a)의 경우 상온 인장 시험 후 파손된 시편의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 나타나듯이 두께가 얇은 섬유의 경우 섬유 간 파단이 발생한 반면 Fig. 6(b)에서 나타나듯이 섬유가 두꺼운 경

우는 섬유 간 슬립이 발생한 것으로 나타났다. 이는 섬유가 두꺼울수록 섬유간 슬립현상으로 강도 측면에서 오히려 불리한 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 알루미늄 시트와의 계면에서도 분리 현상이 발생하여 비교적 두께가 얇은 시편에 비해 강도와 접착력이 약하게 나타남을 알 수 있었다.

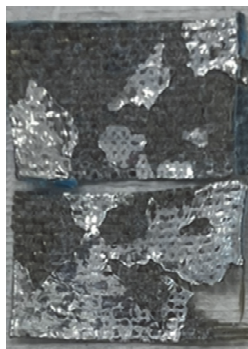
또한 Fig. 7에서 나타나듯이 수직인장시험과 전단인장 시험을 통한 알루미늄과 섬유간의 계면의 접착 역시 두께가 얇은 섬유가 높은 접착강도를 나타내었다. 이는 Fig 7(a)와 (b)에서 나타나듯이 두께가 얇은 섬유가 알루미늄과 섬유 계면상에 수지가 넓고 고르게 분포되어 있는 반면, 섬유가 두꺼운 (b)의 경우 수지가 골고루 섬유상부에 분포되지 않고 뭉쳐져 있음을 알 수 있었다. Fig. 7(c)와 (d)의 경우도 두께가 얇은 섬유 (c)의 경우 섬유 사이에 잘 분포되어 있고, 섬유와의 접착력이 높기 때문에 알루미늄이 같이 접착되어 있음을 알 수 있었다. 하지만 (d)와 같이 두꺼운 섬유의 경우 섬유의 파단면이 굉장히 깨끗하게 떨어져 나갔음을 알 수 있다. 이는 섬유와 알루미늄 사이의 계면의 접착력이 상대적으로 약하다는 것을 나타내며, 이는 섬유의 두께가 커질수록 접착면적이 제한적이게 되며, 수지의 흐름성에 영향을 미쳐 계면의 접착특성에 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있었다.



(a) Perpendicular tensile fracture (0.13mm)



(b) Perpendicular tensile fracture (0.22mm)



(c) Shear fracture (0.13mm)



(d) Shear fracture (0.22mm)

Fig. 7 Perpendicular tensile & Shear test specimen fracture

### 4. 결론

본 연구에서는 기존 사용되고 있는 유리섬유 기반의 2차 방벽소재를 보다 친환경적이고 물성이 좋은 현무암섬유로 대체하여 LNG CCS용 2차 방벽으로 적용 가능성과 섬유의 특성에 따른 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다.

- 1) 현무암섬유를 이용한 2차 방벽에 대한 요구 물성은 모두 만족하였고, 특히 기존의 소재보다 약 2배의 기계적 특성이 나타남을 확인하였다. 특히 전단 접착 저온 특성이 FSB 요구강도 대비 약 360%가 향상된 것으로 나타났다.
- 2) 섬유 두께가 얇은 섬유기 두꺼운 섬유보다 기계적 특성에 더 유리하다는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 섬유의 두께가 얇을수록 수지와 계면에서의 접착력이 더 좋게 발현됨을 파단면을 통해 확인하였다. 또한 두꺼운 섬유의 경우 섬유상의 슬립이 일어나 오히려 계면의 접착력이 나빠짐을 알 수 있었다.

## 사 사

본 논문은 “극저온 멤브레인용 세라믹섬유복합재 기술 개발 사업(과제번호 KFB23002-0-01)”에 지원받아 연구되었음

## 참고문헌

- [1] Park, Jin Hyeong, et al. "Estimation of Fatigue Characteristics Using Weibull Statistical Analysis with Aramid Fiber on LNGC Secondary Barrier." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 54.5, pp. 415-420, 2017
- [2] Yeom, Dong-Ju, et al. "Applicability Assessment of Epoxy Resin Reinforced Glass Fiber Composites Through Mechanical Properties in Cryogenic Environment for LNG CCS." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 58.4, pp. 262-270, 2021
- [3] Kim, J.H., and Chun, K.W., 2014. Technical trends of LNG fueledship and bunkering. Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, Daegu, South Korea.
- [4] Bang, Seoung-Gil, et al. "Effects of Aramid Fiber on the Mechanical Properties of Secondary Barrier for LNG Cargo Containment System." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 58.4, pp. 206-213, 2021
- [5] Arrington, M., and B. Harris. "Some properties of mixed fibre cfrp." *Composites* 9.3 (1978): 149-152.