



# 에폭시 수지가 적용된 유리섬유 복합재료의 극저온 환경 기계적 특성 분석을 통한 LNG CCS 적용성 평가

염동주<sup>1</sup>·방승길<sup>1</sup>·정연제<sup>1</sup>·김희태<sup>1</sup>·박성보<sup>3</sup>·김용태<sup>3</sup>·오훈규<sup>3</sup>·이제명<sup>1,2,†</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
부산대학교 수소선박기술센터<sup>2</sup>  
(주)현대중공업 선박연구소<sup>3</sup>

## Applicability Assessment of Epoxy Resin Reinforced Glass Fiber Composites Through Mechanical Properties in Cryogenic Environment for LNG CCS

Dong-Ju Yeom<sup>1</sup>·Seung-Gil Bang<sup>1</sup>·Yeon-Jae Jeong<sup>1</sup>·Hee-Tae Kim<sup>1</sup>·Seong-Bo Park<sup>3</sup>·Yong-Tai Kim<sup>3</sup>·  
Hoon-Gyu Oh<sup>3</sup>·Jae-Myung Lee<sup>1,2,†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>1</sup>  
Hydrogen Ship Technology Center, Pusan National University<sup>2</sup>  
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd<sup>3</sup>

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.

Consumption of Liquefied Natural Gas (LNG) has increased due to environmental pollution; therefore, the need for LNG carriers can efficiently transport large quantities of LNG, is increased. In various types of LNG Cargo Containment System (CCS), Membrane-type MARK-III composed of composite materials is generally employed in the construction of an LNG carrier. Among composite materials in a Mark-III system, glass-fiber composites act as a secondary barrier to prevent the inner hull structure from leakage of LNG when the primary barrier is damaged. Nevertheless, several cases of damage to the secondary barriers have been reported and if damage occurs, LNG can flow into the inner hull structure, causing a brittle fracture. To prevent those problems, this study conducted the applicability assessment of composite material manufactured by bonding glass-fiber and aluminum with epoxy resin and increasing layer from three-ply (triplex) to five-ply (pentaplex). Tensile tests were performed in five temperature points (25, -20, -70, -120, and -170° C) considering temperature gradient in CCS. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Coefficient of Thermal Expansion (CTE) analyses were carried out to evaluate the microstructure and thermos-mechanical properties of the pentaplex. The results showed epoxy resin and increasing layer number contributed to improving the mechanical properties over the whole temperature range.

**Keywords** : Liquefied Natural Gas Cargo Containment System(액화천연가스 화물시스템), Cryogenic environment(극저온 환경), Secondary barrier(이차방벽), Epoxy resin reinforced glass fiber composites(에폭시 수지가 적용된 유리섬유 복합재료), Mechanical properties(기계적 물성)

## 1. 서론

환경오염문제의 심각성이 대두됨에 따라 친환경에너지에 대한 관심이 증대되고 있으며, 천연가스의 소비량이 늘어나면서 대형 LNG 운반선의 수주량 또한 증가하고 있다 (Volker, 2020). 천연

가스는 영하 163°C에서 액화시켜 운반하기 때문에 공간 활용도는 훌륭하지만 극저온 환경이라는 극한의 상황에서 화물창의 연성 저하로 인해 파손 문제가 계속해서 제기되고 있으며 (Kim & Chun (2014)), 또한 화물창 내부 극저온 온도를 유지하기 위한 단열시스템 구축에 고도의 기술이 필요하다.

화물창은 일반적으로 모스 타입과 멤브레인 타입으로 나뉘는

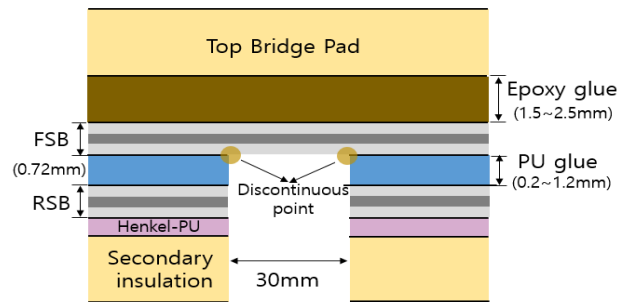
데, 그 중 GTT 사의 멤브레인 타입 탱크인 MARK-III CCS (Cargo Containment System)가 뛰어난 경제성과 공간효율성으로 최근에 많이 채택되고 있다. 하지만 멤브레인 타입은 특성상 선체 내벽과 붙어있는 일체형 이므로 운항중 선박의 6자유도 운동, 파도의 운동에 따른 다양한 하중에 직, 간접적으로 노출되는데 단점을 가진다 (Han et al., 2009). 또한 LNG 선박의 대형화에 따라 화물창의 크기도 커지면서 기존보다 높은 수준의 기계적 물성치가 요구되고 있으며, 산·학·연 모두 연구 및 기술개발에 힘쓰고 있다. 하지만 화물창 단열 패널의 두께는 기존에 비해 48% 증가한 반면, 이차방벽에 대한 보강은 이루어지지 않은 것으로 보고된다. 따라서 극저온 환경에서의 이차방벽 기계적 물성치에 대한 연구가 수행되어야 하고, 보강된 이차방벽 재료 개발에 대한 연구가 필수적이다.

기존 이차방벽에는 Triplex가 사용되는데, FSB(Flexible Secondary Barrier)와 RSB(Rigid Secondary Barrier)로 구성되어 있다. FSB는 유연함, RSB는 단단하면서 높은 강도를 특징으로 가지며, FSB와 RSB는 각각 다른 곳에 위치하여 역할을 수행하며, 이차단열 패널, RSB, FSB, 일차단열 패널 순서로 적층되어 있다. Fig. 1에 실제 LNG CCS 이차방벽 시공을 위한 도식화된 그림을 나타내었다. 이차단열 패널은 액화천연가스의 선적, 하역 과정에서 발생하는 열충격 및 열응력에 의해 팽창, 수축하기 때문에 연속되지 않고 패널과 패널사이에 약 30 mm의 틈을 적용하여 시공한다 (Yoon et al., 2013). 이에 따라 FSB는 빈 틈 위에 접착되어 패널 모서리에 위치한 불연속점에 발생하는 응력집중을 견디고, 유연하기 때문에 더 큰 변형을 수반할 수 있다. 하지만 이차방벽의 대부분은 FSB가 아닌 RSB로 이루어져 있으며, RSB는 이차 단열패널과 일차 단열패널 사이에 위치하여 운항 중 화물창에 발생할 수 있는 힘응력 및 국부 하중을 수반하게 된다. 따라서 RSB가 손상된다면 일, 이차 단열패널이 직접적으로 만나게 되고 화물창 시스템 전체의 붕괴를 불러일으키게 된다. 또한 최근 이차방벽에 대한 손상이 수차례나 보고되고 있으며, 이차단열열재에 대한 개발 및 연구는 필수적이라고 판단된다.

하지만 기존의 이차방벽에 대한 연구 결과는 대부분 FSB에 관한 것으로, RSB에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 뿐만 아니라 LNG CCS의 대형화에 따라 MARK-III 시스템은 MARK-III flex, flex+ 시스템으로 대체되는데, 이차단열 패널의 두께가 170 mm에서 300 mm, 370 mm로 늘어난 반면에 일차단열 패널의 두께는 변함없음에 따라 중립축이 RSB로부터 멀어진다. 이에 따라 RSB에 작용하는 응력이 증가하지만, RSB의 성능개선은 거의 이루어지지 않았다. 이를 고려하면, CCS 이차방벽의 구조적 안정성을 확보하기 위해 RSB에 대한 기계적 성능 평가 및 복합재료 개발에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 기존 유리섬유-알루미늄-유리섬유 형태의 RSB를 유리섬유-알루미늄-유리섬유-알루미늄-유리섬유 형태의 Pentaplex로 구성을 바꾸어 기계적 성능 향상을 이루고자 하였다. 또한 에폭시 수지로 단단해진 RSB 및 Pentaplex의 내부 미세구조를 관찰하여 계면에서의 기계적 강도 강화 메커니즘을 분석하고자 하였다. 기계적 성능 평가에서 보수적인 결과를 도출하기 위해 실제



(a)



(b)

Fig. 1 Structure of Secondary Barrier in MARK-III type (a) photography, (b) schematic

천연가스의 액화온도인  $-163^{\circ}\text{C}$ 보다 더 낮은  $-170^{\circ}\text{C}$  환경에서 상온( $25^{\circ}\text{C}$ )까지 온도환경에서 섬유 방향에 따른 준정적 인장시험을 수행하였으며, 추가적인 열 기계적 특성을 분석하기 위해 섬유 방향을 변수로 열팽창계수를 측정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편 및 실험 장비

본 연구에서는 MARK-III 타입 LNG CCS의 이차방벽에 새로 적용하기 위해 기존 유리섬유 2층, 알루미늄 1층으로 이루어진 Triplex를 유리섬유 3층, 알루미늄 2층으로 이루어진 Pentaplex로 섬유와 금속의 구성을 바꾸었고 이를 Fig. 2에 나타내었으며, 편의상 두께 방향은 Z, warp는 X, weft는 Y로 표기하였다. ISO 1421 스트립 시험 규격에 따라  $250\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  크기로 가공된 Pentaplex로 온도 및 섬유방향에 의존한 준정적 인장시험을 수행하였다. 시험편의 두께는 직접 계측 하였으며, 각 시나리오마다 임의로 선정된 5개의 시편들의 평균값으로 결정하였다. 그 결과 Pentaplex는 약  $0.98\text{ mm}$ 의 두께를 가지는 것으로 확인할 수 있었으며, Fig. 3은 인장 시험에 사용한 실제 시험편이다.

준비된 시험편으로 두 가지 섬유방향과 상온에서 극저온까지 온도 범위에서 인장시험 수행을 위해 Fig. 5에 보이는 것과 같이 만능재료시험기(KSU-5M, KYONG SUNG)와 극저온 환경 챔버를 사용하였다. 액체질소와 자동온도조절장치를 통해 극저온 환경을

모사하였고, 챔버에 부착된 순환장치를 이용하여 균일한 온도 환경을 구현하였다.

Pentaplex의 미세구조를 분석하기 위해 ZEISS사의 주사전자현미경(FE-SEM SUPRA25)를 사용하였고, 유리섬유 분리에 따른 현미경 손상을 방지하기 위해 유리섬유 복합재료를 Fig. 6과 같이 제작하여 촬영하였다.

또한 열팽창계수 측정을 위해 열기계분석기(TMA 402 F1, NETZSCH)를 사용하였으며, Fig. 4에 열기계분석기 사진을 나타내었다.

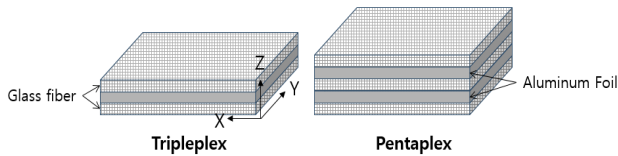


Fig. 2 Tripleplex and Pentaplex

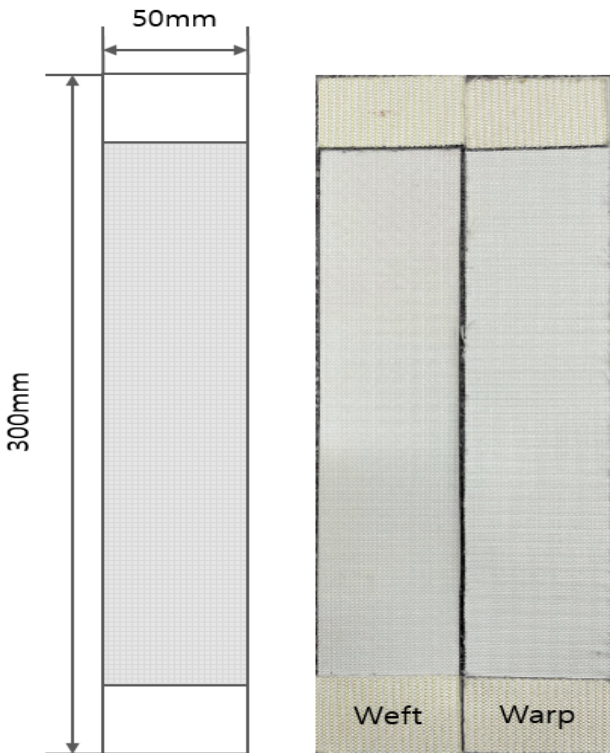


Fig. 3 Warp(X), Weft(Y) specimen for test

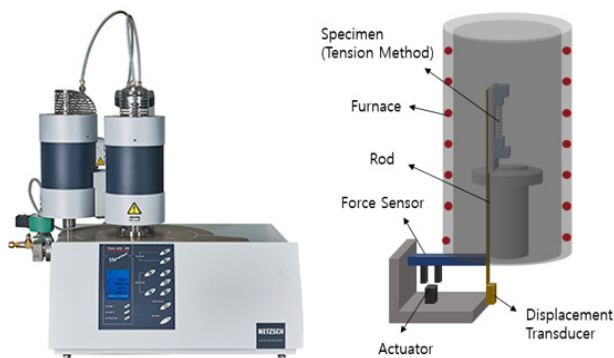


Fig. 4 Apparatus for thermo-mechanical analyzer



Fig. 5 UTM with cryogenic chamber and Liquid nitrogen

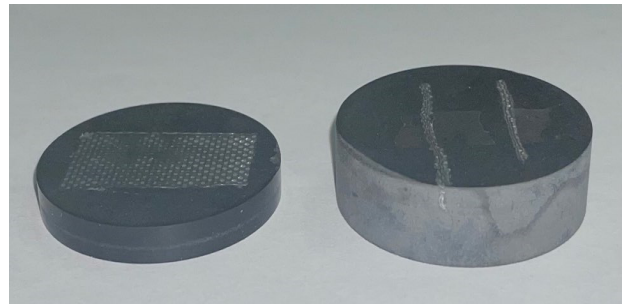


Fig. 6 Pentaplex mounting specimen for SEM

## 2.2 실험 방법

본 연구에서는 Table 1에 나타난 것처럼 실험온도, 섬유방향에 의존하여 시험편의 준정적 인장시험을 수행하였으며, 신뢰성 검증을 위해 각 케이스 별로 5회 반복실험을 수행하였다. 가장 대표성을 띄는 값 선정을 위하여 각 특성의 최댓값, 최솟값을 제외한 3가지 경우의 평균값으로 선정하였다.

시험편이 이방성재료 특성을 가진 섬유임을 고려하여 실제 2차 방벽의 기계방향(machine direction)과 평행한 WARP 방향, 기계횡방향인 WEFT 방향으로 케이스를 나누었다. 천연가스의 액화온도가  $-163^{\circ}\text{C}$ 임을 고려하고 상온에서 극저온까지의 온도별 경향성을 평가하기 위하여 실험온도를 설정하였다. 각 실험에



Table 1 Tensile test scenario for evaluation of secondary barrier with material, test environment (temperature, direction for test)

Material	Temperature (°C)	Direction for test
Pentaplex	25	WARP (X)
	-20	
	-70	WEFT (Y)
	-120	
	-170	

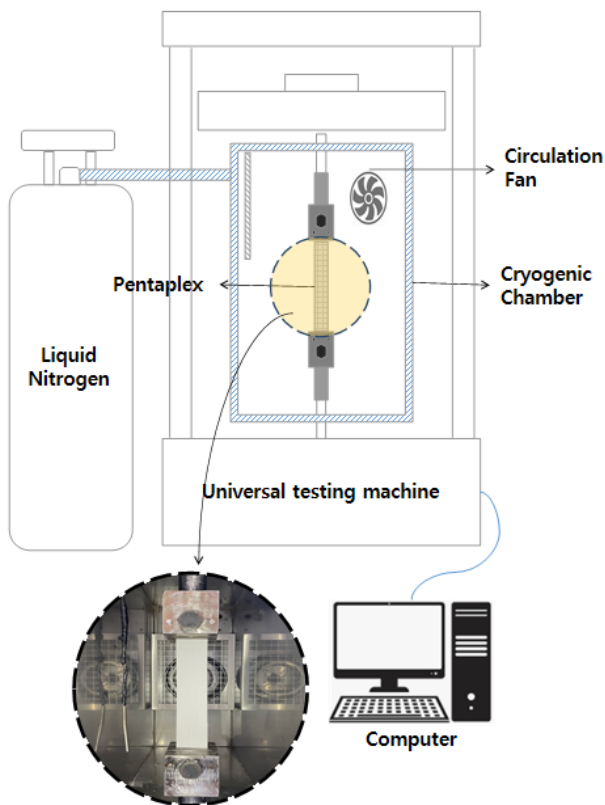


Fig. 7 Schematic diagram of cryogenic tensile test

앞서 제시된 온도범위에서 시험편의 열평형상태를 고려하기 위해 1시간 30분 동안의 예비 냉각을 실시한 후 모든 시나리오에서 변위 제어 방식으로 5 mm/min의 크로스헤드 속도로 인장시험을 수행하였으며, Fig. 7에 개략적인 본 인장시험의 구상도를 나타내었다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 온도 관점 인장시험

5가지 온도범위(20°C, -20°C, -70°C, -120°C, -170°C)에서 준정적 인장시험 결과를 통한 이차방향 Pentaplex의 섬유방향별 탄성 계수, 인장 강도, 연신율을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Tensile test results of pentaplex with young's modulus, tensile strength, elongation

Material	Temperature [°C]	Direction	Young's Modulus [GPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [mm/mm]
Pentaplex	25	warp	10.4809	312.0922	0.0268
		weft	10.8049	303.9007	0.0255
	-20	warp	12.2466	359.1490	0.0279
		weft	12.7603	365.6028	0.0258
	-70	warp	13.2628	404.1489	0.0293
		weft	13.7987	405.2128	0.0268
	-120	warp	13.8324	438.8777	0.0333
		weft	14.3590	434.6521	0.0360
	-170	warp	13.9139	477.3591	0.0364
		weft	14.7577	491.7228	0.0369

유리섬유는 대표적인 취성재료의 특성을 가지며, 인장 시험 시 재료가 항복하기 전에 파단이 발생하여 응력의 재분배가 발생하지 않는다. 따라서 인장 시험 시 선형적인 응력-변형률관계를 보이기 때문에 기계적 성능을 평가하기 위해선 연신율 값이 중요하다 (Kim, 2019). Table 3은 기존 RSB의 온도 범위 내에서 연신율을 나타낸 데이터이다 (Jeong et al., 2019). RSB는 모든 온도 범위 25, -20, -70, -120, -170°C의 환경에서 대체적으로 저온으로 갈수록 연신율이 증가하는 경향을 보였고, 극저온(-170°C)에서의 연신율은 상온(25°C) 대비 X 방향, Y 방향에서 각각 약 17%, 18% 증가하였다.

Pentaplex 또한 온도 범위 내에서 저온으로 갈수록 연신율이 증가하는 경향을 보이는데, 상온 대비 극저온에서의 연신율은 X 방향, Y 방향에서 각각 약 36%, 44% 증가하였다. 이차 방향의 기계적 물성에 영향을 미치는 유리섬유의 특성을 확인하기 위해 본 연구의 복합재료에 적용된 단일 유리섬유를 20°C, -80°C, -170°C 온도 영역에서 인장 연신율을 측정하였고, 연신율 측정 실험 결과를 Table 4에 나타내었다. 그 결과 유리섬유 복합재료의 기계적 특성에 크게 영향을 미치는 단일 유리섬유의 저온 연신

Table 3 Elongation of RSB (Jeong et al., 2019)

Material	Temperature [°C]	Elongation [mm/mm]	
RSB	25	warp	0.0273
		weft	0.0253
	-20	warp	0.0249
		weft	0.0258
	-70	warp	0.0291
		weft	0.0283
	-120	warp	0.0283
		weft	0.0282
	-170	warp	0.0320
		weft	0.0298

특성을 확인할 수 있었으며 (Morkavuk et al., 2018), 이차방벽 복합재료의 저온 연신율 증가에 영향을 준 것으로 사료된다 (Shindo et al., 2006).

Table 4 Elongation of Glass Fiber in 20°C, -80°C, -170°C

Material	Temperature [°C]	Elongation [mm/mm]	
Glass fiber	20	warp	0.02355
		weft	0.01653
	-80	warp	0.02721
		weft	0.02013
	-170	warp	0.03504
		weft	0.02609

탄성계수와 인장강도 관점에서 재료의 기계적 거동을 분석해 보면, Pentaplex는 저온으로 갈수록 탄성계수 및 인장강도가 증가하였다. 기계방향(warp) 관점의 Pentaplex는 극저온에서 상온 대비 인장강도가 약 53% 상승하였고, 기계횡방향(weft) 관점의 Pentaplex는 극저온에서 상온 대비 인장강도가 약 62% 상승하였다. 이는 복합재료의 저온 취성화가 발생하여 기계적 성능이 향상되었다고 사료된다. 특히 탄성계수는 25°C ~ -20°C 사이에서 가장 큰 차이인 약 18% 증가율을 확인하였다. 이는 에폭시 수지의 DBTT(Ductile Brittle Transition Temperature)가 -20°C 근처에서 나타나는 것과 유사한 경향을 보이며, 유리섬유에 침투되어 경화된 수지가 인장에너지를 흡수하여 유리섬유 복합재료의 강성에 영향을 준 것으로 사료된다 (Botelho, 2004). Fig. 9은 Pentaplex의 단면(XY, YZ)을 50배율 현미경으로 촬영한 사진이다. Fig. 8(a)는 일반적인 유리섬유의 단면을 1000:1의 축척비로

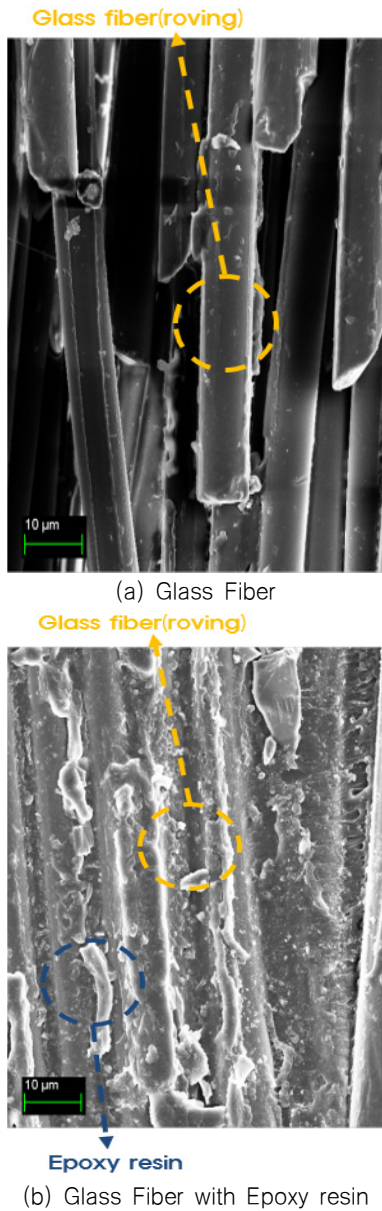


Fig. 8 SEM images of glass fiber, glass fiber with epoxy resin

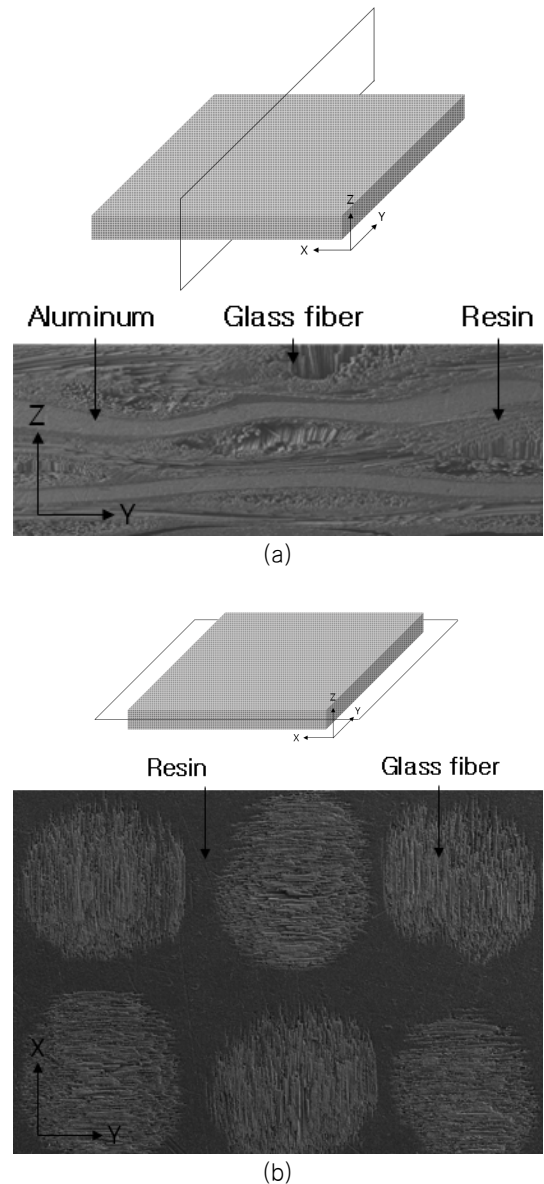


Fig. 9 Photography (a),(b) cross section(YZ, XY)

촬영한 사진이며, 유리섬유와 모재사이가 확연히 구분되어 얽히지 않고 비교적 매끈한 형상을 보인다. Fig. 8(b)는 에폭시 수지가 적용된 유리섬유의 단면을 1000:1의 축척비로 촬영한 사진이며, 유리섬유와 모재 사이가 불분명하여 구분할 수 없고, 에폭시 수지가 모재와 섬유를 얽히게 하여 더욱 밀접한 연결의 형상을 확인할 수 있었다.

또한 측정된 기계적 성능을 바탕으로 기존 RSB와 비교해봤을 때 모든 온도 범위에서 인장강도, 탄성계수가 높은 경향을 보였다. Fig. 10에 Pentaplex와 RSB의 인장강도와 탄성계수를 비교한 그래프를 나타내었다. 인장강도는 RSB 보다 상온(25°C)과 극저온(-170°C)에서 각각 약 41%, 34%, 탄성계수는 각각 약 46%, 27% 높았다. 세 겹의 RSB와는 달리 다섯 겹의 계면에서 더 강한 경화된 수지의 결합이 만들어 지고 (Ion et al., 2010), 유리섬유 복합재료의 경우 단일층으로 직조된 유리섬유에서의

강도 뿐만 아니라 층간의 접착에 의한 전단력이 더해져 비슷한 두께에서도 더 많은 층을 가진 유리섬유 복합재료의 강도가 더 높다고 보고되며 (Bhat et al., 2019), 이에 따라 Pentaplex가 기존 RSB에 비해 기계적 성능이 더 향상되었다고 사료된다.

### 3.2 섬유방향 관점 인장시험

Woven-roving으로 직조된 유리섬유 중 경사와 위사의 꼬임이 동일한 경우 섬유방향(warp, weft)에 따라 기계적 특성이 크게 다르지 않다. 하지만 본 연구에 사용된 유리섬유는 경사와 위사의 꼬임이 동일하지 않으며, 일반적인 유리섬유 복합재료의 경사와 위사의 꼬임이 동일하지 않을 때 위사 방향으로 인장력을 받을 경우 그 사이 경사방향으로 유리섬유가 구속역할을 하게 된다. 이에 전단력이 함께 작용하여 stick-slip 현상이 나타나 섬유

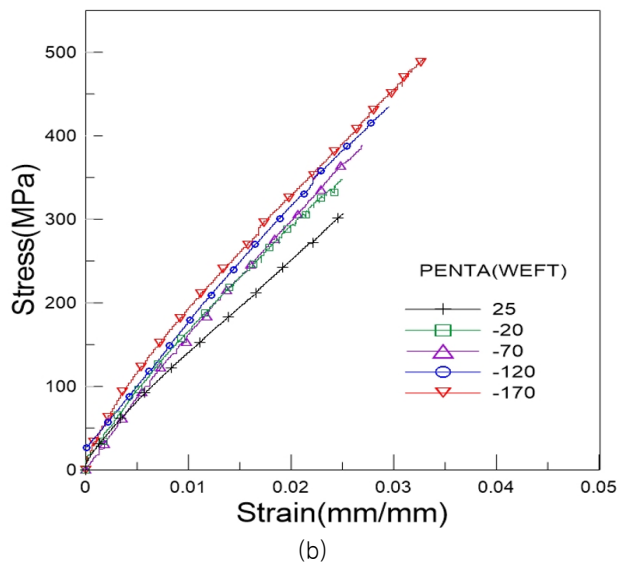
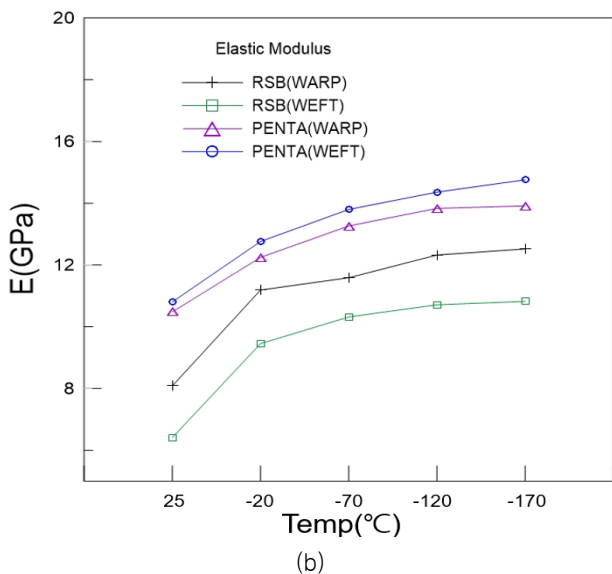
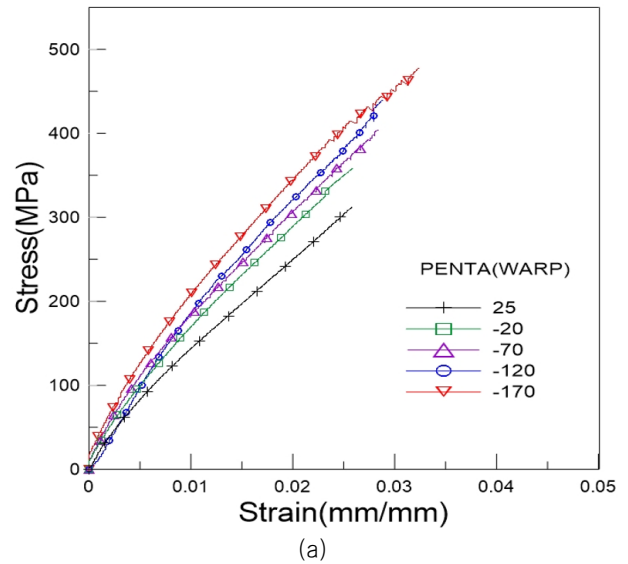
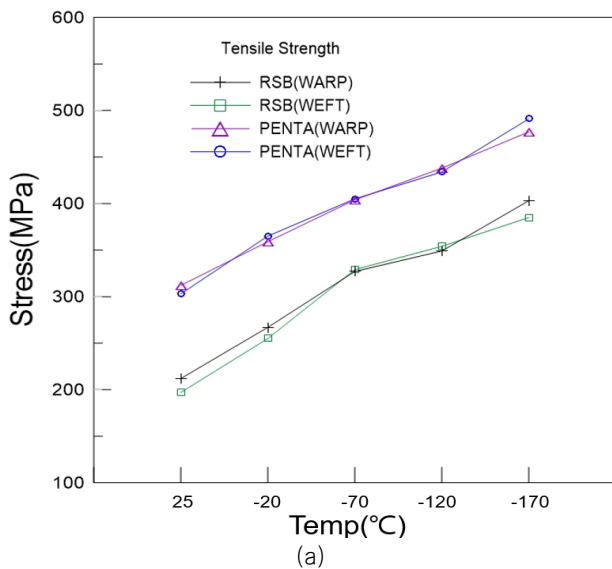


Fig. 10 Mechanical Properties Graph of RSB, Pentaplex (a) tensile strength, (b) elastic modulus

Fig. 11 Stress-Strain Curve of Cryogenic Tensile test (a) warp direction, (b) weft direction

방향에 따라 기계적 성능차이가 많이 나타난다고 보고된다 (Bai et al., 2020). 하지만 본 연구에서 Pentaplex의 경우 섬유 방향 별 응력 변형을 선도 양상이 모든 온도 범위에서 비슷하게 나타난다. Fig. 11에 Pentaplex의 방향별 온도에 따른 각 케이스의 대표값을 인장시험 응력 변형을 선도로 나타내었다. 또한 Table 2의 온도, 방향에 따른 인장시험 결과값을 봤을 때, 방향별 탄성 계수 및 인장강도 등의 기계적 특성 또한 모든 온도범위에서 오차범위 10% 이내의 비슷한 수치임을 보여준다. 이는 Pentaplex는 유리섬유를 알루미늄 호일과 접착할 때 에폭시 수지를 사용하는데, 경화된 수지가 응력을 수반하면서 경사와 위사의 교묘 차이에 의한 stick-slip 현상이 발생하지 않고 안정적인 취성의 경향을 보여, 재료의 횡 등방성(transverselt isotropic) 특성에 영향을 준 것으로 사료된다 (Humberto., 2014).

### 3.3 열팽창계수 측정

열응력 관점에서 복합재료의 섬유 방향별 열 특성을 분석하기 위하여 본 연구의 대상인 Pentaplex를 warp, weft 방향으로 각각 열팽창계수 측정을 수행하였고, 측정결과와 방향 별 열팽창 계수가 서로 다름을 확인하였다. Fig. 12에 섬유 방향(warp, weft)에 따른 열팽창계수의 차이를 그래프로 나타내었다.

-160°C에서 10°C 사이 모든 온도 범위에서 열팽창계수의 차이는 약9% 이내의 결과를 나타내었는데, -20°C~20°C사이에서 열팽창계수의 차이가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 에폭시 접착제의 유리전이온도가 -20°C~20°C사이인 것을 고려할 때, -20°C 보다 낮은 온도 영역에서 복합재료가 더욱 안정적인 취성을 띄게 되면서 생긴 결과로 사료된다. 따라서 실제 LNG CCS 극저온 환경에서 운용되는 이차방벽 복합재료의 경우 모든 온도 영역에서 섬유 방향별 열팽창계수 차이는 5% 이내 이므로 오차범위내의 큰 차이가 없는 결과를 얻을 수 있고, 재료의

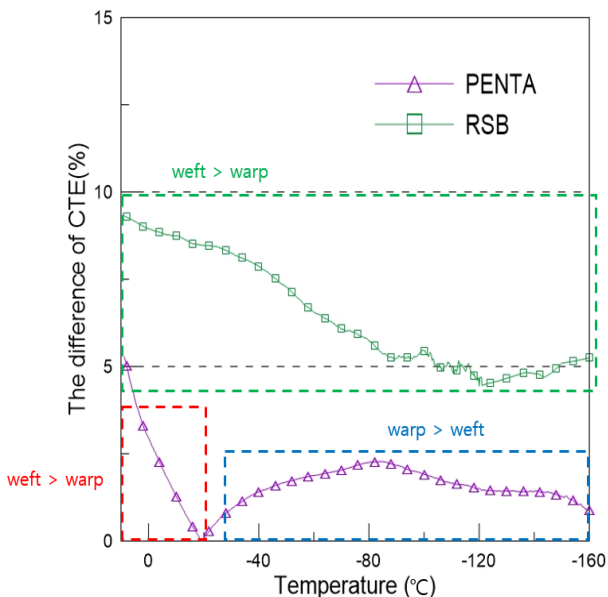


Fig. 12 The difference of CTE for Pentaplex and RSB

두께 방향을 제외한 나머지 방향에 대해 균일한 기계적, 열적 특성을 가진다고 사료된다.

또한 본 연구의 복합재료는 이차방벽 샌드위치 구조의 일부로 다른 재료와 접합된다. FSB와 Pentaplex 사이에는 PU glue가 사용되고, TBP(Top Bridge Pad)와 FSB 사이에는 Epoxy glue가 접착제로 사용되는데, 이차방벽과 접착제의 열팽창계수 차이에 따라 잔류응력이 발생하며 접합부문에 발생한 잔류응력은 기계적 특성과 접착 성능을 저하시키는 것으로 보고된다 (Shin & Lee (2006)). Table 5에 이차방벽 접착 시 사용되는 접착제와 Pentaplex, RSB의 열팽창계수를 온도에 따라 나타내었으며, Fig. 13에 측정값을 그래프로 표현하였다. Pentaplex, 기존에 사용되는 RSB를 접착제와의 열팽창계수 차이를 분석한 결과 PU15, PU45, Epoxy 각각 RSB는 모든 온도 범위에서 평균적으로 약 79%, 69%, 65%의 차이를 나타냈지만 Pentaplex의 경우 각각 약 38%, 24%, 15%로 기존 RSB 대비 모재와 접착제사이 열팽창계수의 차이가 현저히 줄어든 결과를

Table 5 CTE (Coefficient of Thermal Expansion) of Resins applied to secondary barriers bonding, Pentaplex, RSB

Temperature [°C]	CTE (Coefficient of Thermal Expansion) [mm/mm]	
10	PU45	6.1578
	PU15	5.1835
	Epoxy	4.4112
	Pentaplex	3.5593
	RSB	1.9803
-20	PU45	5.2140
	PU15	4.4419
	Epoxy	4.0476
	Pentaplex	3.3709
	RSB	1.9443
-70	PU45	4.4085
	PU15	3.7616
	Epoxy	3.5457
	Pentaplex	3.0461
	RSB	1.8506
-110	PU45	3.7554
	PU15	3.0715
	Epoxy	2.9040
	Pentaplex	2.8694
	RSB	1.6053
-150	PU45	1.1611
	PU15	1.8809
	Epoxy	2.3036
	Pentaplex	2.7148
	RSB	1.0747



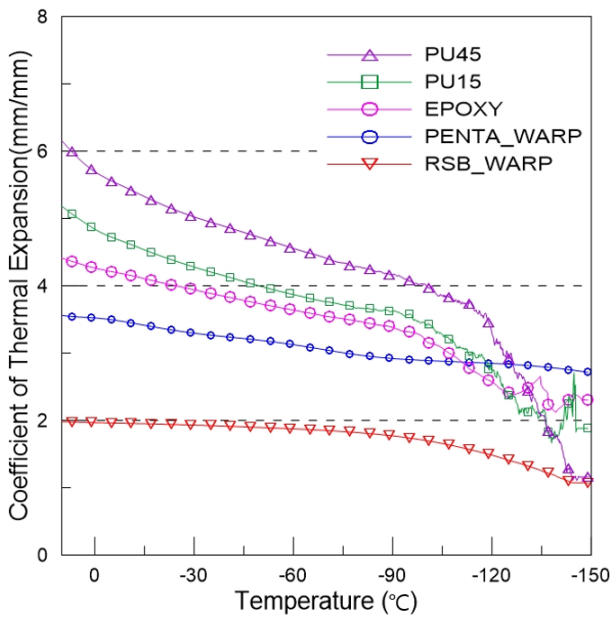


Fig. 13 CTE of PU45, PU15, Epoxy, Pentaplex(WARP), RSB(WARP)

확인하였다. 이는 열팽창, 수축에 따른 잔류응력의 영향을 고려하여 적용성을 검토할 때 접착 시공 시 확인한 성능향상을 확인할 수 있다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 LNG CCS에 적용될 Pentaplex 이차방벽에 대해 온도와 섬유방향을 변수로 한 준정적 인장시험과 SEM 촬영, 열팽창계수 측정을 수행 등 기계적 성능평가를 통해 Pentaplex의 LNG CCS 이차방벽에 대한 적용성을 평가하여 다음과 같이 요약하였다.

1) 알루미늄과 유리섬유로 이루어진 복합재료인 Pentaplex는 저온으로 갈수록 취성재료의 파단강도에 영향을 크게 미치는 연신율이 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 현상은 극저온에서 유리섬유 복합재료의 기계적 특성에 크게 영향을 미치는 유리섬유의 저온 연신율 증가에 따른 결과로 사료된다.

2) Pentaplex는 저온으로 갈수록 인장강도와 탄성계수가 증가하는 경향을 보이는데 복합재의 저온 취성화에 따른 결과로 사료된다. 특히 25°C~-20°C 사이에 가장 큰 증가율을 보였으며, 이는 에폭시 수지의 DBTT가 -20°C인 것을 고려할 때 수지의 경화가 복합재의 기계적 특성에 영향을 준 것으로 사료된다.

3) 모든 온도 범위에서 기존 RSB에 비해 향상된 기계적 강도 특성을 보인다. 이는 세 겹에서 다섯 겹으로 증가한 수치 층이 기존 RSB 보다 강한 결합을 생성하고, 유리섬유 복합재료의 경우 층간의 전단력이 강도를 향상시키는데, 이에 따라 복합재의 기계적 특성 향상의 원인이 된 것으로 보고된다.

4) 섬유 방향별 기계적 특성을 비교한 결과, 일반적으로 섬유는 방향별 특성이 상이한 것에 비해 Pentaplex는 방향별 차이가

거의 없었다. 이는 침투되어 경화된 수지가 인장력을 흡수하여 stick-slip 현상이 발생하지 않고 안정적인 취성이 이루어져 두께 방향을 제외한 횡 등방성 특성에 영향을 준 것으로 사료된다.

5) 열팽창계수 측정을 분석한 결과, warp, weft 방향에 따른 열팽창계수의 차이는 오차범위 이내의 무의미한 수치였으며, 이는 안정적인 취성을 통해 두께 방향을 제외한 나머지 방향에서 균일한 열적 특성을 나타낸다고 사료된다.

6) 기존 RSB와 Pentaplex의 접착제와의 열팽창계수 차이를 비교, 분석한 결과 PU15, PU45, Epoxy glue 모든 접착제에서 Pentaplex의 경우 차이가 작았다. 이는 접합부의 열팽창계수 차이에 기인한 잔류응력이 기존 대비 감소하여 접착 성능과 기계적 특성이 향상될 것이라고 사료된다.

본 연구를 통해 Pentaplex의 상온과 극저온사이 온도범위에서의 기계적 성능을 확인하였으며, 기존 이차방벽과 비교함으로써, 추후 선박 대형화에 기인한 응력 증가를 만족할 수 있는 복합재료임을 검증하였다. 하지만 실제 LNG CCS의 이차방벽 재료로 활용되기 위해서는 우수한 기계적 성능뿐만 아니라 접합성 및 투과성에 대한 검증이 필수적이라고 판단되며, 추후 연구를 통해 Pentaplex의 이종 재료간 접합성과 액화천연가스의 투과성을 평가하여 LNG CCS 적용성을 검토할 계획이다.

#### 후기

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20006644, 20006632).

#### References

Bai, R., et al., 2020. Shear deformation and energy absorption analysis of flexible fabric in yarn pullout test. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1281, 105678.

Bhat, R., et al., 2019. Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(4), pp.3653-3661.

Botelho, E.C., Silva, R.A., Pardini, L.C. & Rezende, M.C., 2004. Evaluation of adhesion of continuous fiber-epoxy composite/aluminum laminates. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 18(15-16), pp.1799-1813.

Han, S.M. et al., 2009. Experimental study on the structural behavior of secondary barrier of MARK-III LNG CCS. *28 International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Hawaii, USA, 31 May-5 June 2009.

Humberto, S.A., Clarissa, C.A., Edson, C.B. & Sandro, C.A., 2014. Effect fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites. *Materials & Design*, 65, pp.789-795.



Ion, D., Adriana, S. & Ana, S., 2010. Aluminum/glass fibre and aluminum/carbon fibre hybrid laminates. *Incas Bulletin*, 2(2), pp.33-39.

Jeong, Y.J. et al., 2019. Evaluation of mechanical performance of membrane type secondary barrier anisotropic composites depending on fiber direction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57, pp.168-174.

Kim, J.H. & Chun, K.W., 2014 Technical trends of LNG fueled ship and bunkering. *Korea Evaluation Institute of Industrial Technology*, Daegu, South Korea.

Kim, Y.G., 2019. Evaluation and modification of tensile properties of carbon fiber reinforced polymer(CFRP) as brittle material with probability distribution. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(3), pp.17-24.

Morkavuk, S., Koklu, U., Bagci, M. & Gemi, L., 2018. Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties:A comparative study. *Composites Part B*, 18.

Shin, K.C. & Lee, J.J., 2006. Effects of thermal stresses on failure of co-cured lap joints with steel and carbon fiber-epoxy composite adherends under static and fatigue tensile loads. *Composites: Part A*, 37, pp.476-487.

Shindo, Y., Takano, S., Narita, F. & Horiguchi, K., 2006. Tensile and damage behavior of plane weave glass/epoxy composites at cryogenic temperatures. *Fusion Engineering and Design*, 81, pp.2479-2483.

Volker, B., 2020. Technology trends for ships and shipping of tomorrow. *Maritime Technology and Research*, 2, pp.1-18.

Yoon, S.H., Kim, K.H. & Lee, D.G., 2013. Improvement of the adhesive peel strength of the secondary barrier with level difference for LNG containment system. *Composite Structures*, 95, pp.528-538.

