

# LNG 화물창 정밀 구조해석을 위한 에폭시와 폴리우레탄 접착제 기계적 물성치 분석

정용철<sup>1</sup>·정연제<sup>1</sup>·김정대<sup>1</sup>·박성보<sup>2</sup>·김용태<sup>2</sup>·오훈규<sup>2</sup>·이제명<sup>1†</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
㈜현대중공업 선박연구소<sup>2</sup>

## Mechanical Properties Analysis of Epoxy and Polyurethane Adhesive for Accurate Structural Analysis of LNG Cargo Hold

Yong-Cheol Jeong<sup>1</sup>·Yeon-Jae Jeong<sup>1</sup>·Jeong-Dae Kim<sup>1</sup>·Seong-Bo Park<sup>2</sup>·Yong-Tai Kim<sup>2</sup>·Hoon-Gyu Oh<sup>2</sup>·Jae-Myung Lee<sup>1†</sup>  
Department of Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>1</sup>  
Maritime Research institute, Hyundai Heavy Industries Co. Ltd<sup>2</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.

As the demand for natural gas that satisfies environmental regulations increases, the quantities of natural gas cargo that carrier can load is also increasing. Natural gas is transported in a liquefied state at  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  to increase loading efficiency. Among several LNG CCS types, MARK-III types are generally adopted in terms of loading efficiency. The secondary barrier adhesives of the MARK-III, nevertheless, is subjected to tensile stress due to thermal contraction and tension in the environment. In terms of these reasons, local analysis of the adhesive to evaluate the stress state must be carried out. According to previous studies, local analysis is unavailable since material properties for secondary barrier adhesives have not been reported. Thus, in this study, the cryogenic tensile test and coefficient of thermal expansion of epoxy and polyurethane (PU15, PU45), which are most widely used at cryogenic temperatures, were experimentally analyzed. At cryogenic temperature, the mechanical behavior of the polyurethane adhesive was better than epoxy of the adhesive, the joint of FSB and epoxy adhesive of the secondary barrier has the maximum coefficient of thermal expansion difference at  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and minimum at  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively.

**Keywords** : LNG CCS(LNG 화물시스템), Epoxy adhesive(에폭시 접착제), Polyurethane adhesive(폴리우레탄 접착제), Cryogenic tensile test(극저온 인장실험), Coefficient of thermal expansion(열팽창계수)

## 1. 서론

LNG운반선은 모스 타입과 멤브레인 타입으로 분류되며, 멤브레인 타입이 적재 효율 면에서 가장 우수하여 널리 사용되는 추세이다. 또한 멤브레인 타입은 MARK-III와 NO.96 단열시스템으로 나뉘며, 최근에는 경제성이 좋은 MARK-III가 많이 활용되고 있다. LNG 화물시스템(Liquefied Natural Gas Cargo Containment System, LNG CCS)은 선박의 6자유도 운동에 따른 액화천연가스의 슬로싱 하중과 화물창 열 수축으로 인한 인장응력을 받는다. 특히, 열 수축으로 인한 인장응력은 화물창

내부에 하역 시 지속적으로 작용하며 단열 시스템의 손상을 야기하는 주된 원인이 된다. 단열시스템의 손상은 인적자원(human resource)뿐만 아니라 열 침입에 의한 액화천연가스의 자연기화율(Boil Off Rate, BOR) 발생량을 급격하게 증가시키는 원인이 된다.

MARK-III 타입의 단열시스템은 다층박막단열재(multi-layer insulation)로 LNG를 직접적으로 접하며, LNG의 슬로싱 하중과 내부압력을 견디는 1차 방벽과 유리섬유로 강화된 단열재 폴리우레탄 폼(Reinforced Polyurethane Foam, R-PUF)과 1차 방벽 손상 시 LNG 누출 방지 역할을 하는 2차 방벽이 Fig. 1과 같이 접착제로 본딩(Bonding)되어 다층을 이루고 있다.

Table 1 Input mechanical properties of component of LNG CCS for finite element analysis

| Component           | Material | Tensile modulus (GPa)     | Tensile strength (MPa)     | CTE (10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|----------|---------------------------|----------------------------|---|
| Insulating material | R-PUF    | 0.185 Yoon et al. (2013)  | 1.95 Yu et al. (2014)      | 3.7 Yoon et al. (2013)                  |
| Secondary barrier   | FSB      | 11.09 Jeong et al. (2020) | 299.83 Jeong et al. (2020) | 2.37 Jeong et al. (2020)                |
| Secondary barrier   | RSB      | 12.33 Jeong et al. (2020) | 221.31 Jeong et al. (2020) | 1.85 Jeong et al. (2020)                |
| Adhesive            | Epoxy    | N.A                       | N.A                        | N.A                                     |
| Adhesive            | PU       | N.A                       | N.A                        | N.A                                     |

2차 방벽은 유리섬유와 알루미늄 호일로 이루어진 복합재료이며 유연성을 가진 FSB(Flexible Secondary Barrier)와 견고한 RSB(Rigid Secondary Barrier)로 이루어져 있다. FSB는 RSB와 달리, 알루미늄 호일에 유연성을 유지하기 위해 고무, 유리섬유로 이루어진 샌드위치(Sandwich)구조이다. 실제 MARK-III 타입 단열시스템의 2차 방벽은 극저온 환경에서도 기계적 성능이 좋고 구조 결합용으로 널리 사용되며, 다른 접착제들보다 접착 성능이 우수한 에폭시(Epoxy)와 폴리우레탄(Polyurethane, PU) 접착제로 본딩(Bonding) 되어있다 (Yoon et al., 2014). Epoxy 접착제에 의해 FSB와 TBP(Top Bridge Pad)가, FSB와 RSB는 PU접착제에 의해, RSB와 2차 단열재는 다시 Epoxy접착제에 의해 본딩 되어 있다 (Bang et al., 2013).

LNG 운반선 화물창 구조는 양하역 과정에 따라 극저온과 상온 사이에서 다양한 온도변화를 겪으며 이로 인해 단열시스템 접착부위는 열팽창 및 수축에 기인한 복잡한 응력 상태에 놓이게 된다(Fig. 1). 특히 2차 방벽과 접착제 사이에서는 열팽창계수의 차이로 인해 접착부 피로수명을 저하시키는 열잔류응력의 발생도 문제가 된다 (Albedah et al., 2018). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 정밀 국부해석을 통한 응력상태 평가가 필수적이다. 하지만 다양한 재료들의 계면으로 구성되는 2차 방벽 접착 부는 각 재료들의 기계적 특성치의 확보 수준에 따라 해석 결과의 편차가 존재하게 된다. LNG 2차 방벽 접착 부 구조실험 시 반복하중에 의한 균열진전은 접착제에서 발생한다고 보고된다 (Oh et al., 2017). 하지만 재료의 물성치 뿐만 아니라 두께에 따라 균열과 인장응력에 의한 거동이 다르기 때문에, 접착제의 물성치와 두께를 고려하지 않은 구조해석은 균열진전과 접착제 자체에 작용하는 인장응력에 관한 정밀한 구조해석이 불가하다고 판단된다. Table 1에 정리한 기존 선행연구들에 의하면 LNG 화물창 2차 방벽 접착제에 대한 재료 물성치 확보는 불가한 것으로 분석되며, 이러한 재료 데이터의 부족은 LNG운반선 화물창 건설설계에 장애요소로 작용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 LNG운반선 화물창 단열시스템 정밀 국부해석을 지원할 수 있는 2차 방벽 접착제의 기계적 물성치 확보를 위한 재료실험을 수행하였다. 본 연구에서는 MARK-III 2차 방벽 접착제인 Epoxy와 PU15, PU45의 인장시험을 수행하였고, 접착제의 온도별 최종인장강도를 분석하였다. 또한, LNG 운반선의 실제 운항환경을 고려하여 주기적인 열 사이클을 가지는 2차 방벽과 접착제의 열팽창계수를 측정하였고 각 접착 부(joint)별 열팽창계수 차이를 비교 평가하였다.

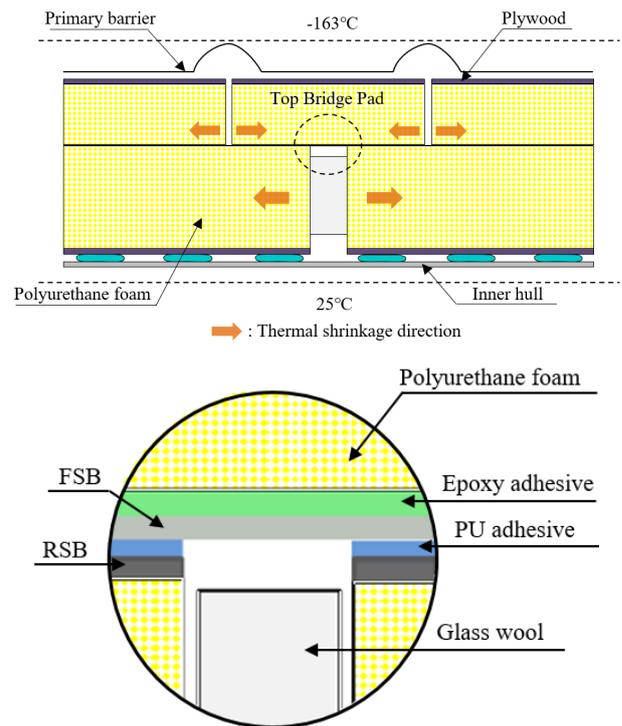


Fig. 1 Schematic of triplex bonded with adhesives in LNG CCS

## 2. 실험

### 2.1 시험편

에폭시와 폴리우레탄 접착제는 복합재료 접착제로 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 에폭시 접착제는 높은 접착력, 낮은 수축률, 습윤성 등의 장점이 있어 건축, 자동차나 항공 산업 등에서 널리 쓰이고 있다. 하지만 에폭시 접착제는 저온에서 취성화 되기 때문에 여러 환경을 고려하여 사용되어야 한다. 반면에 폴리우레탄 접착제는 우수한 기계적 강도와 연성 등의 장점이 있어 나무나 유리 복합재료의 접착제로 널리 사용되고 있다.

본 연구에서 사용된 에폭시 접착제는 Uni-Tech사의 UEA-100/300를 사용하였고 폴리우레탄 접착제는 Bostik사의 XPU 18411 A3n+B (PU15)와 XPU 18045 An/B(PU45)를 사용하였다. 접착부의 국부 응력 해석 시 필요한 물성치인 Tensile modulus와 열팽창계수를 얻기 위해 인장실험과 열팽창계수

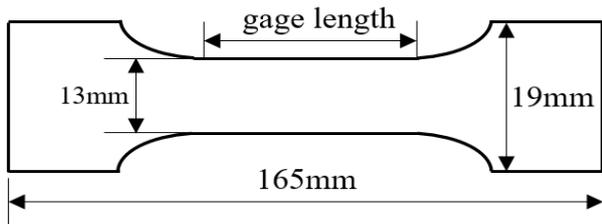
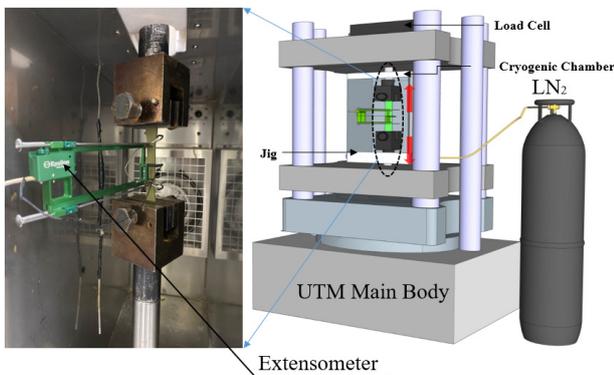


Fig. 2 Schematic diagram of tensile test specimen

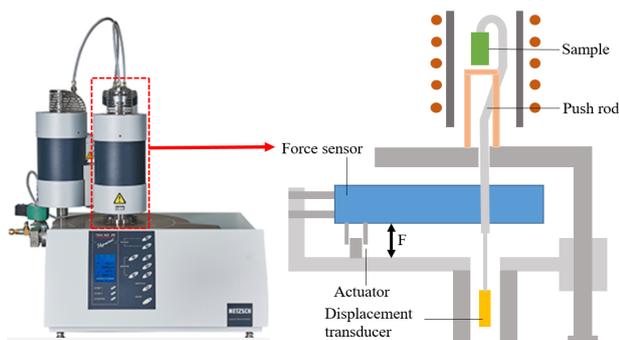
측정을 수행하였다. 인장시험편과 열팽창계수 시험편은 각각 ASTM D638와 ISO 11359-2 규격을 따라 제작하였다(Fig. 2). LNG 화물창의 2차 방벽(triplex)은 FSB와 RSB의 복합재료가 샌드위치 구조로 구성되어 있고 각 복합재료는 Fig. 1과 같이 에폭시와 폴리우레탄 접착제로 본딩 되어있다.

## 2.2 실험장비

본 연구에서는 2차 방벽 접착제의 온도별 인장시험을 수행하기 위해 만능재료시험기(KSU-5M)와 시험편의 정확한 신율을 측정하기 위해 극저온용 신율계(3542-050-100-LT, Epsilon)를 사용하였다. 일정한 속도로 움직이는 만능재료시험기의 크로스헤드를 통해 인장력과 신율을 측정하였다. 또한, 특수 제작된 극저온용 챔버(Chamber) 안에 액체 질소를 분사하여 저온환경을 구현하였다. 챔버 내부의 온도계 및 제어시스템을 통해 설정 온도를 유지한 후에 온도별 접착제 인장시험을 수행하였다.



(a) Universal testing machine (KSU-5M)



(b) Thermo-mechanical Analyzer (TMA 402 F1)

Fig. 3 Schematic of test apparatus

열팽창계수를 측정하기 위해 수직형 열팽창계수 측정 장비 (TMA 402 F1, NETZSCH)를 사용했다. 샘플에 가해지는 하중은 전자기적으로 발생되며, force sensor와 displacement transducer가 각각 하중과 변위를 동시에 측정하여 샘플의 열팽창계수를 측정하는 방식이다. 또한, 접착제의 화학 결합을 검출하기 위해 적외선 분광 분석기(Spectrum GX, PerkinElmer Inc)로 FT-IR 분석을 하였다. 분사된 적외선은 샘플과 beam splitter을 지나 detector에 도달하고 이 신호는 detector에 의해 디지털 데이터로 변환된다. Fast Fourier Transform(FFT)으로 변환된 데이터는 컴퓨터로 인식하는 방식으로 접착제들을 분석 하였다. 본 연구에서 사용된 인장 시험기는 Fig. 3-(a)에 나타내었고 열팽창계수 측정기는 Fig. 3-(b)에 나타내었다.

## 2.3 실험 시나리오

본 연구에서는 Table 2와 같이 온도별 2차 방벽 접착제의 온도별 인장시험을 수행하였다. 특히, 극저온 시험의 경우 실제 환경과 유사하게 구현하기 위해 실험 시 해당 시험편을 1 시간 정도 예냉하여 시험편 내부의 온도가 주위 온도와 동일해지도록 한 후에 인장시험을 진행하였다. 접착제의 실험 온도마다 5 mm/min의 속도로 인장시험을 수행하였다. 실험 결과의 유효성 검증을 위해 각 온도별로 5회 반복실험을 하였고 최댓값과 최솟값을 제외한 측정값의 평균값을 결과값으로 나타내었다. Table 3에 열팽창계수 시험 시나리오를 나타내었다. FT-IR 분석은 파장의 길이가 4000-650/cm인 중 적외선으로 수행하였고 소음을 줄이기 위해 32개의 scenes로 설정하였다.

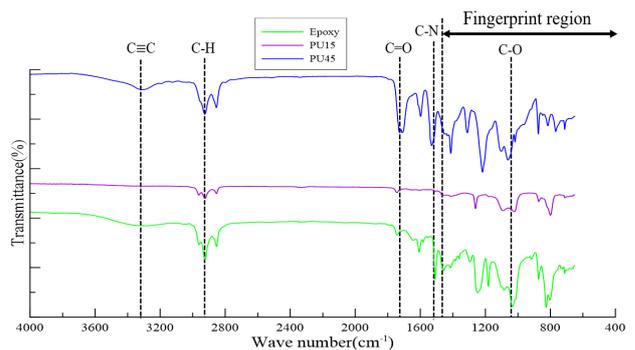


Fig. 4 FT-IR spectra for adhesives at different irradiation doses

Table 2 Tensile test scenario of adhesives

| Adhesive | Temperature |
|----------|-------------|
| Epoxy    | 25°C        |
|          | -20°C       |
| PU15     | -70°C       |
|          | -120°C      |
| PU45     | -170°C      |

Table 3 Test scenario of coefficient of thermal expansion

| Adhesive              | Sample material | Standard calibration material  | Temp.           | Temp. Rise        |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|
| Epoxy<br>PU15<br>PU45 | Fused Silica    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20°C~<br>-150°C | 0.01~50<br>(K/mm) |

### 3. 실험결과

#### 3.1 FT-IR 분석

접착제의 인장강도와 같은 기계적 물성치는 분자결합 및 결합의 비중에 따라 다르다 (Zhang et al., 2012). 접착제는 분자결합에 따라 기계적 물성치가 상이하기 때문에 동일한 폴리우레탄 계열의 PU15와 PU45 접착제의 분자결합을 확인하기 위해 FT-IR 분석을 수행하였다. 또한, 에폭시 접착제와 폴리우레탄 접착제의 분자결합의 차이와 비중을 확인하였다.

Fingerprint region은 wave number가 1500/cm이하인 구간을 말하며, 다른 구간에 비해 stretching과 굽힘 진동에 의해 피크(peak) 서로 중첩되어 복잡하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 Fingerprint region의 각각의 피크에 대해 심도 있게 고려하지 않았다. 2차 방벽 접착제의 FT-IR 분석 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4와 같이 에폭시 접착제에서 아미드 결합인 C=O 와 C-N 결합을 확인하였고, 에테르 결합인 C-O 결합을 가지는 접착제임을 확인하였다. PU45 접착제는 PU15 접착제와 달리 삼중결합 C≡C이 존재하고, 에폭시 접착제와 같이 에테르 결합을 가지는 접착제다. PU15 접착제는 일반적인 폴리우레탄 분자구조임을 확인하였다. 삼중 결합이 다른 결합에 비해 대체적으로 높은 결합력은 가지고 있으므로, 이는 PU45 접착제가 PU15 접착제보다 인장강도가 높은 이유 중 하나로 사료된다. 또한 폴리에테르 결합이 기반인 PU45 접착제와 PU15 접착제는 에폭시 접착제보다 극저온에서 기계적 성능이 우수하다고 보고된다 (Petrie, 2000).

#### 3.2 Quasi-static tensile test

본 연구에서는 온도별 2차 방벽 접착제의 기계적 거동을 분석하기 위해 인장시험 결과값을 온도별 최종인장강도-변형률 선도로 나타내었다. 폴리우레탄 계 접착제의 실험 결과값은 25°C에서 측정된 신율이 다른 온도 신율과 큰 차이를 보였고, -20°C이후의 PU15, PU45의 신율은 매우 유사하였다. 측정된 하중을 시편의 단면적으로 나누어 응력을 계산하였고, 변형된 길이는 표점거리 50mm(Fig. 2)로 나누어 변형률을 계산하였다. 인장시험 결과값은 Fig. 5에 나타내었다.

접착제는 저온에서 취성을 보이기 때문에 대부분의 시편들이 소성구간 전에 파단이 일어났지만 상온에서의 폴리우레탄 접착

제는 연신율이 높고 인장강도가 낮은 고무와 유사한 거동을 보였다 (Wang et al., 2020). 에폭시 접착제는 상온에서 탄성구간과 소성구간을 확인 할 수 있으며, 저온에서는 탄성구간 후에 취성으로 인해 소성변형이 없이 파괴된 것을 확인 할 수 있었다. 폴리우레탄 접착제는 상온에서 고무와 성질이 비슷하게 나타났고 저온으로 갈수록 취성화로 인해 인장강도가 높아졌고 변형률은 낮아졌다.

연신을 관점에서 에폭시 접착제가 폴리우레탄 접착제보다 모든 온도에서 연신율이 낮았으며 이는 에폭시 접착제가 폴리우레탄 접착제보다 취성이 높기 때문이라고 사료된다. 인장강도 관점에서 상온에서 -20°C까지 에폭시 접착제가 폴리우레탄 접착제보다 최종강도가 높았지만 -70°C 이하의 온도에서는 폴리우레탄 접착제의 최종강도가 더 높았다. 이는 에폭시 접착제가 폴리우레탄 접착제보다 극저온에서 취성재료이기 때문이라고 사료된다 (Surendra et al., 2008).

Epoxy 접착제는 상온에서 극저온까지 최종강도가 크게 달라지지 않았지만 -20°C 이후로 연신율이 급격하게 감소하고 최종강도도 높아져서 -170°C에서의 Young's modulus는 약 8049MPa로 상온과 비교하여 약 2배가량 증가하였다. PU15와 PU45 접착제는

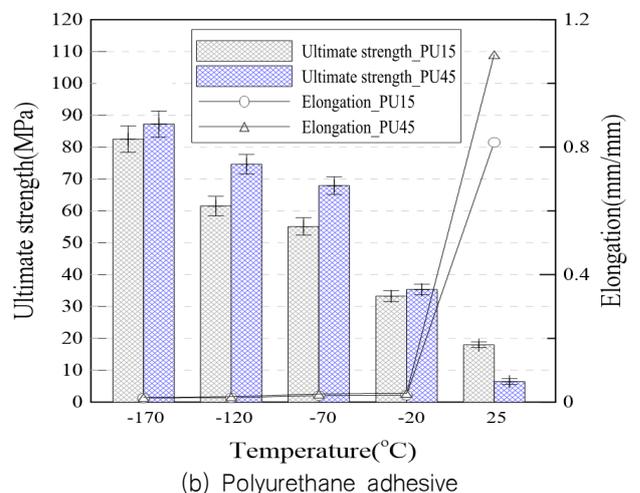
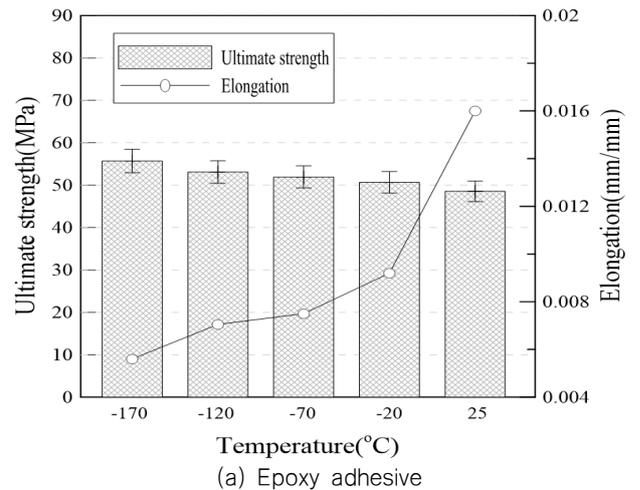


Fig. 5 Tension diagram of adhesives

극저온으로 갈수록 최종강도가 높아졌고 연신율은 상온을 제외하고 모든 온도에서 유사하며, Young's modulus는 각각 6424, 6067 MPa로 상온과 비교하여 1000배 이상 증가하였다.

Table 4를 통해 에폭시 접착제의 상변화가 일어나는 유리전이 온도( $T_g$ )는 25°C ~ -20°C 사이로 사료되며, 기계적 거동이 급격히 변했다. MARK-III 2차 방벽 접착제로 쓰이는 폴리우레탄 계열의 접착제의 유리전이 온도는 25°C ~ -20°C 사이로 사료된다 (Galvez et al., 2020). PU45는 PU15보다 25°C를 제외한 모든 온도에서 최종강도가 높았으며, 모든 온도에서 PU45의 연신율이 PU15보다 높았다. 반면에, Young's modulus는 대체적으로 PU15가 높았다. 실제 운항환경을 고려하면, LNG 화물창 접착제는 25°C ~ -163°C의 반복적인 열 순환을 가지는데 폴리우레탄 접착제와 같이 상온과 극저온에서 Young's modulus의 큰 차이는 화물창의 손상을 야기하는 주된 원인이 될 수 있다고 사료된다. PU45가 열 사이클에 의한 인장응력에 대한 내성이 PU15보다 우수하다고 사료되며, Young's modulus의 큰 차이를 보이는 PU45가 상온과 극저온 열 사이클 시 열응력 차이가 클 것으로 사료된다.

### 3.3 Coefficient of Thermal Expansion (CTE)

본 연구에서는 에폭시 접착제와 폴리우레탄 접착제 PU15, PU45의 열팽창계수를 측정하였다. 에폭시 접착제의 열팽창계수는 폴리우레탄 접착제보다 낮았으며, -130°C 이하의 온도와 같은 극저온부터 에폭시 접착제의 열팽창계수가 폴리우레탄 접착제들보다 높아졌다. 에폭시 접착제와 PU15, PU45 접착제의 열팽창 계수 측정 결과값은 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 접착제는 LNG CCS MARK-III 2차 방벽 접착제이므로 접착제의 열팽창계수와 2차 방벽의 열팽창계수와도 비교 분석하였다 (Joeng et al., 2020). 열팽창계수 차이는 접착부의 열 잔류응력을 증가시키는 원인이 되며, 열 잔류응력은 피로에 대한 저항성을 낮추는 원인으로 작용 할 것으로 판단된다.

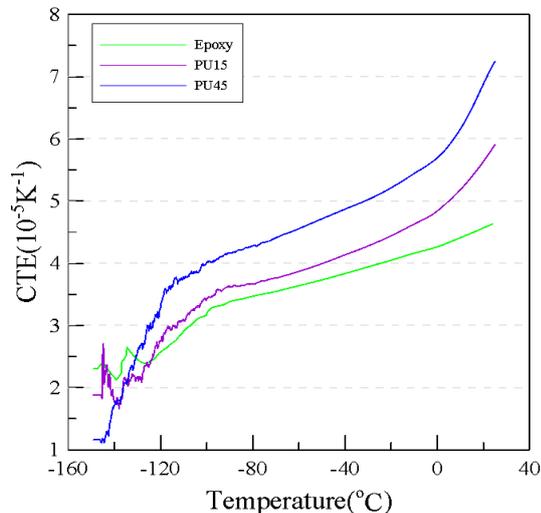


Fig. 6 CTE curve of adhesives

Table 4 Mechanical properties of adhesives

| Material | Temp [°C] | Ultimate tensile strength [MPa] | Elongation [mm/mm] | Tensile modulus [MPa] |
|----------|-----------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Epoxy    | 25        | 48.534                          | 0.016              | 4401.01               |
|          |           | 17.953                          | 0.815              | 524.97                |
|          |           | 6.450                           | 1.091              | 11.474                |
| Epoxy    | -20       | 50.657                          | 0.0092             | 5204.71               |
|          |           | 33.251                          | 0.022              | 2830.27               |
|          |           | 35.330                          | 0.0274             | 3029.4                |
| PU15     | -70       | 51.923                          | 0.0075             | 6465.53               |
|          |           | 55.109                          | 0.021              | 4568.41               |
| PU45     | -120      | 67.921                          | 0.0255             | 4038.6                |
|          |           | 53.077                          | 0.0071             | 7417.73               |
|          |           | 61.505                          | 0.014              | 5000.76               |
| PU45     | -170      | 74.633                          | 0.017              | 4270.61               |
|          |           | 55.697                          | 0.0056             | 8048.50               |
|          |           | 82.501                          | 0.0130             | 6424.29               |
|          |           | 87.222                          | 0.015              | 6067.05               |

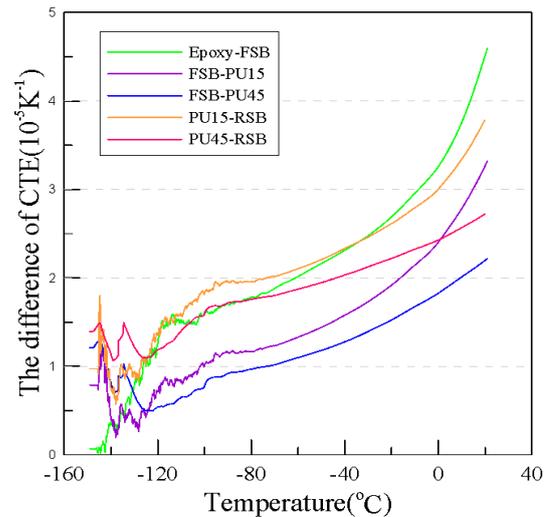


Fig. 7 CTE difference curve of each second barrier adhesively joints

MARK-III 2차 방벽(FSB, RSB)은 Fig. 1와 같이 접착제로 분당 되어있으므로 각 접착부에서의 열팽창계수 차이의 절대값을 Fig. 7에 나타내었다. 2차 방벽 접착부 중 열팽창계수의 차이가 20°C Epoxy-FSB 접착부에서 4.59로 최대였으며, -150°C Epoxy-FSB 접착부에서 0.0692로 최소임을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 MARK-III 2차 방벽 접착제의 온도별 인장시험 및 열팽창계수 측정을 수행하였다. 온도별 접착제의 인장거동을 분석하였고 또한, 2차 방벽의 접착제임을 고려하여 2차 방

Table 5 Input Mechanical properties of component of LNG CCS for Finite Element Analysis

| Component           | Material | Tensile modulus (GPa)     | Tensile strength (MPa)     | CTE ( $10^{-5}K^{-1}$ )  |
|---------------------|----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Insulating material | R-PUF    | 0.185 Yoon et al. (2013)  | 1.95 Yu et al. (2014)      | 3.7 Yoon et al. (2013)   |
| Secondary barrier   | FSB      | 11.09 Jeong et al. (2020) | 299.83 Jeong et al. (2020) | 2.37 Jeong et al. (2020) |
| Secondary barrier   | RSB      | 12.33 Jeong et al. (2020) | 221.31 Jeong et al. (2020) | 1.85 Jeong et al. (2020) |
| Adhesive            | Epoxy    | 8.048 In this study       | 55.7 In this study         | 1.68 In this study       |
| Adhesive            | PU15     | 6.424 In this study       | 82.5 In this study         | 2.15 In this study       |
| Adhesive            | PU45     | 6.067 In this study       | 87.2 In this study         | 1.61 In this study       |

벽의 열팽창계수와 비교하였다. 2차 방벽 접착제의 시험결과를 통한 분석 결과는 아래와 같다.

(1) 접착제의 FT-IR 분석결과, Epoxy 접착제는 아미드 결합과 에테르 결합을 하는 반면에 PU 접착제는 에테르 결합이 기반인 접착제이며 이는 폴리우레탄 계열의 접착제가 Epoxy 접착제보다 인장강도가 높은 원인으로 사료된다.

(2) Epoxy 접착제의 경우, 상온에서 탄성구간과 소성구간을 확인 할 수 있는 반면에 저온에서는 취성화로 인해 소성구간 없이 탄성구간 후에 파괴가 일어났다. 이는 Epoxy 접착제가 취성 재료이기 때문이라고 사료된다.

(3) PU15 접착제의 경우, 상온에서는 고무와 같은 인장 거동을 보였으며 저온으로 갈수록 신율은 급격하게 줄었고 인장강도는 급격하게 증가하였다. 이는 폴리우레탄 계열의 접착제의 유리전이 온도( $T_g$ )가 보통  $-40^{\circ}C$  이전이기 때문이라고 사료된다.

(4) PU45 접착제의 경우, PU15 접착제의 인장거동과 유사하였지만 인장강도는 PU45가 PU15보다 높은 결과를 보였다. 이는 PU45 접착제의 경우에는 삼중결합을 포함하고 있어 PU45의 인장강도가 가장 높은 원인으로 사료된다.

(5) 열팽창계수 측정 결과, 상온에서  $-130^{\circ}C$  구간에서는 PU45, PU15, Epoxy 접착제 순으로 열팽창계수가 높았으며,  $-130^{\circ}C$  이하의 온도에서는 Epoxy 접착제가 PU 접착제보다 높은 것으로 확인된다.

(6) 2차 방벽 접착부의 열팽창계수 차이를 분석한 결과, Epoxy와 FSB 접착부에서 최대 최솟값을 보였으며 각각의 온도는 상온과  $-150^{\circ}C$ 이다. 다른 접착부에서는 열팽창계수 차이가 상온에서가 가장 높았으며 보통  $-140^{\circ}C$  부근에서 최솟값을 보였다.

열팽창계수의 차이는 접착부에 열 잔류응력을 야기해 피로수명에 영향을 줄 것으로 사료된다.

본 연구에서는 LNG CCS 2차 방벽 접착부의 국부 응력 해석에 필요한 2차 방벽 접착제의 물성치를 얻기 위해 2차 방벽 접착제의 인장실험 및 열팽창계수 측정을 수행하였고 Epoxy 접착제와 PU 계열의 접착제의 온도별 기계적 거동과 특성을 비교 분석하였다. 또한 온도별 2차 방벽과 접착제 접촉부에 열팽창계수의 차이가 큰 것을 확인하였다. 이로 인해 발생한 열 잔류응력에 의해 피로수명이 감소할 것으로 사료된다. 또한, 기존 선행연구들에서 확보가 불가하였던 2차 방벽 접착제의 기계적 물성치를 확보하였고 Table 5를 통해 추후 LNG 운반선 화물창 정밀 국부해석을 통한 응력상태 평가가 가능할 것이라 판단된다.

## 후기

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20006644, 20006632). 이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0001968, 2020년 산업혁신인재성장지원사업).

## References

- Albedah, A., Bouiadjra, B.B., Benyahia, F., & Mohammed, S. M. k. 2018. Effects of adhesive disbond and thermal residual stresses on the fatigue life of cracked 2024-T3 aluminum panels repaired with a composite patch. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87, pp.22-30.
- Bang, C.S., Kim, J.G. & Lee, D.G., 2013. Performance improvement by glass fiber of adhesively bonded metal joints at the cryogenic temperature. *Composite Structures*, 96, pp.321-331.
- Galvez, P., de Armentia, S.L., Abenojar, J., & Martinez, M. A., 2020. Effect of moisture and temperature on thermal and mechanical properties of structural polyurethane adhesive joints. *Composite Structures*, 112443.
- Jeong, Y.J., et al., 2020. 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(3), pp.168-174.
- Oh, D.J., et al., 2017. Reliability evaluation of a LNGC insulation system with a metallic secondary barrier. *Composite Structures*, 171, pp.43-52.
- Petrie, E.M., 2000. *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill Education. Elsevier.
- Surendra, K.M., Sharma, N. & Ray, B.C., 2008. Mechanical behavior of glass/epoxy composites at liquid nitrogen temperature. *Journal of reinforced plastics and composites*, 27(9), pp.937-944.

Wang, Y., Li, Z., Li, X., Li, Zi., & Wang, Y., 2020. Effect of the temperature and strain rate on the tension response of uncured rubber: experiments and modeling. *Mechanics of Materials*, 103480.

Yoon, S.H., et al., 2014. Cryogenic strength of adhesive bridge joints for thermal insulation sandwich constructions. *Composite Structures*, 111, pp.1-12.

Yu, Y.H., et al., 2014. Cryogenic characteristics of chopped glass fiber reinforced polyurethane foam. *Composite Structures*, 107, pp.476-481.

Yoon, S.H., et al., 2013. Improvement of the adhesive peel strength of the secondary barrier with level difference for LNG containment system. *Composite Structures*, 95, pp.528-538.

Zhang, Y.Y., PEI, Q.X., WANG, C.M., 2012. Mechanical properties of graphynes under tension: a molecular dynamics study. *Applied Physics Letters*, 101.8, 081909.

