

유리섬유 강화 폴리이소시아누레이트 폼 개발 및 극저온 환경 하 기계적 성능평가

김정대¹ · 김정현² · 안재혁³ · 박성균⁴ · 박강현⁵ · 이제명[†]

(Received August 10, 2017 ; Revised August 22, 2017 ; Accepted November 14, 2017)

Synthesis and cryogenic mechanical performance of chopped-glass-fiber-reinforced polyisocyanurate foam

Jeong-Dae Kim¹ · Jeong-Hyeon Kim² · Jae-Hyeok Ahn³ · Sungkyun Park⁴ · Kang Hyun Park⁵ · Jae-Myung Lee[†]

요약: 폴리이소시아누레이트 폼(PIF)은 구조적 안정성과 기계적 강도 및 단열성과 같은 다양한 기계적 장점으로 LNG 단열재와 같은 산업 구조물의 단열재로 채택되어 왔다. 본 연구에서는 PIF의 기계적 강도를 증가시키기 위한 시도로써 폴리올과 이소시아네이트에 유리섬유를 첨가하여 유리섬유 강화 폴리이소시아누레이트 폼(CGR-PIF)을 합성하였다. 유리섬유가 PIF에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다양한 온도에서 기계적 성능(밀도를 고려한 압축강도, 복원율, 파손특성)을 분석하였다. 그리고 CGR-PIF의 단열성과 기계적 성능에 영향을 미치는 셀의 구조를 파악하기 위해 PIF의 SEM 사진과 비교하여 SEM 분석을 하였다. 본 연구의 실험 결과를 통해 유리섬유 강화 폴리이소시아누레이트 폼 즉, CGR-PIF는 유리섬유의 첨가를 통해 셀의 형성의 방해를 받게 되어 비교적 높은 열전도도를 갖는 반면에 극저온에서 상당히 높은 기계적 강도를 확인할 수 있었다.

주제어: 유리섬유 강화 폴리이소시아누레이트 폼, 단열재, 극저온, 기계적 성능, 열전도도

Abstract: Polyisocyanurate foam (PIF) has been adopted by the industrial sector as an LNG(Liquefied Natural Gas) insulating material due to its various mechanical merits such as high structural stability and mechanical strength, and excellent insulating ability. In an attempt to increase the mechanical strength of PIF, chopped-glass-fiber-reinforced polyisocyanurate foam (CGR-PIF) was synthesized by adding chopped glass fiber to polyol and isocyanate, which are the raw materials used in the polymerization process to produce PIF. The mechanical properties (compressive strength considering density, recovery ratio, and failure characteristics) were measured at various temperatures to study the effect of the chopped glass fiber on PIF. In addition, SEM analysis was performed to investigate the microstructural characteristics of CGR-PIF, and the SEM images of the CGR-PIF and PIF were compared in order to evaluate the effect of the chopped glass fiber on mechanical and heat insulation properties of the reinforced PIF. Our results, confirm that the compressive strength of the CGR-PIF significantly increases at cryogenic temperatures; moreover, a relatively higher thermal conductivity was observed for CGR-PIF compared to PIF, owing to the chopped glass fiber in the former.

Keywords: Chopped glass fiber reinforced polyisocyanurate foam (CGR-PIF), Insulating material, Cryogenic temperature, Mechanical property, Thermal conductivity

1. 서론

폴리머 폼은 낮은 밀도와 낮은 열전도도 그리고 낮은 가격으로 구조물의 단열재로 사용되고 있고, 다른 단열재에 비해 기계적 성능이 우수해 현재 LNG 선박의 탱크를 포함한 여러 산업 현장에서 사용되고 있다. Figure 1에서 볼 수 있듯이 LNG 저장 탱크에서 사용되는 폴리머 폼은

선박의 6자유도 운동에 의해 발생하는 슬로싱(sloshing)으로 정의되는 유체 충격 하중을 받는 단열재로서 극저온의 영향으로부터 선체를 보호하고, 열전달을 최소화하여 BOR(Boil Off Rate)을 줄이는 역할을 한다[1]. 그 중에서도 폴리이소시아누레이트 폼(Polyisocyanurate foam, PIF)은 극저온에서 고온(-235℃~230℃)까지 사용되는 단열재로서

† 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 609-836, Korea, E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2342

1 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: jeongdae3416@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340

2 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: honeybee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340

3 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: hll0130@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2340

4 Department of Physics, Pusan National University, E-mail: psk@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2595

5 Department of Chemistry, Pusan National University, E-mail: chemistry@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2238

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.

육상용 LNG 탱크에서 사용되고 있고, 현재 선박의 LNG 연료 탱크에서 사용되고 있는 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam, PUF), 유리섬유 강화 폴리우레탄 폼(Reinforced Polyurethane foam, R-PUF)보다 열전도도가 우수하다고 알려져 있다. 하지만, 현재 단열시스템에 사용되고 있는 폴리머 폼의 파손문제가 계속적으로 야기되고 있고, 상대적으로 높은 밀도의 폴리머 폼을 사용할 시 선체의 중량을 높이는 결과를 초래하여 경제적 손실의 문제가 제기되고 있는 실정이다[2]. 본 연구에서는 R-PUF와 PUF보다 밀도와 열전도도가 낮은 PIF에 유리섬유를 첨가함으로써 보다 높은 기계적 강도의 PIF를 합성하여 LNG 선박 및 해양구조물에 적용되는 단열재의 한계를 극복하기 위한 연구를 수행하였다. 과거 폴리머 폼의 기계적 성능에 대한 연구는 이미 수행되었으며, 다양한 온도 그리고 변형률 속도에서 수행되었다[3]. Han *et al.* [4]은 유리섬유의 첨가가 PUF의 기계적 거동에 미치는 영향에 대해서 연구를 하였고, PUF에 비해 R-PUF가 20%정도 향상된 압축강도를 갖고 있다는 점을 밝혀냈다. Park *et al.* [5]은 극저온 환경에서의 거동을 온도와 변형률 속도를 변수로 실험을 하였고, 이를 밀도를 고려하여 강도를 비교하였으며 폴리이소시아네이트 폼(PIF)이 폴리우레탄 폼(PUF) 보다 극저온 상에서 밀도 대비 강도가 좋다는 점을 밝혔다. A.Siegmann *et al.* [6]은 유리섬유를 첨가함으로써 우레탄 폼의 기계적 성능이 향상된다는 것을 밝혔다. 그리고 D. A. Serban *et al.* [7]은 유리섬유의 양을 5%,10%,20%로 나누고 유리섬유의 길이를 변수로 두어 압축시험, 3점 굽힘 시험, 인장시험 등을 수행하였고, 그 결과 유리섬유의 양이 10%일 때까지는 순차적으로 강도가 증가하나 그 이상의 유리섬유의 양에서는 강도가 더 이상 증가하지 않는 것을 밝혔다. PIF는 PUF와 화학적 조성이 비슷하지만, 3개의 이소시아네이트(isocyanate)가 자체 반응으로 이소시아누레이트(isocyanurate)를 형성하도록 유도하여, 이를 주 원료로 발포 성형한 제품을 말한다. PUF와 비슷한 성질을 가지고 있으나, PUF에 비해 동일 밀도에서 열전도도 계수가 낮은 특징을 가지고 있으며 내화성이 우수하여 불에도 홀러내리지 않는다. 밀도는 보통 35~60 kg/m³이며 현재 LNG 단열시스템에 사용되고 있는 PUF (110kg/m³)와 R-PUF (133kg/m³) Park *et al.* [5]에 비하여 상대적으로 작아 동일 부피에서 질량을 작은 장점이 있다.

그러나 유리섬유를 첨가하여 PIF의 기계적 성능 평가에 대한 연구는 없으며, 액화천연가스 환경을 고려한 극저온 기계적 성능 평가는 수행되지 않았다. 이에 PIF의 기계적 성능을 향상시키기 위하여 폴리올과 이소시아누레이트 원액에 유리섬유를 섞어 합성하였으며 다양한 온도에서의 기계적 성능을 측정하였다. 그리고 단열성과 기계적 성능에 영향을 미치는 셀의 구조를 파악하기 위해 SEM 분석을 하였고, 추가로 열전도도 측정장비를 이용하여 열전도도를 분석하였다.

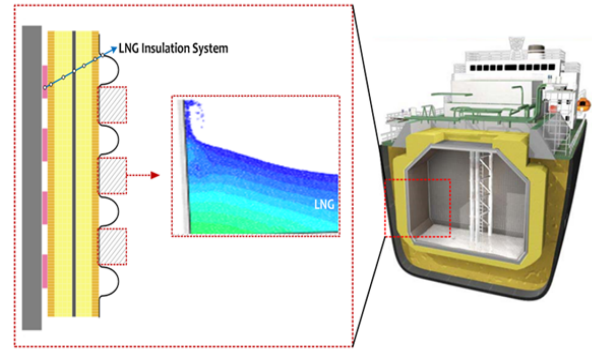


Figure 1: Schematic of sloshing loads caused by the six degrees of freedom of motion of waves in the LNG CCS

2. 실험 준비

2.1 CGR-PIF 합성

본 연구에서는 유리섬유가 폴리이소시아누레이트 폼(PIF)에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유리섬유로 강화된 폴리이소시아누레이트 폼(CGR-PIF)을 제작하였다. 실험에 사용된 폴리이소시아누레이트 폼은 폴리올과 M50을 100:190의 비율로 합성하였다. 그리고 유리섬유 강화 폴리이소시아누레이트 폼은 R-PUF가 10~15wt%의 유리섬유로 제작되는 것을 고려하여 폴리올, M50 그리고 유리섬유를 100:190:44의 비율로 합성하였다[5]. Figure 2는 CGR-PIF의 합성 과정을 나타낸다. 유리섬유를 첨가하기 이전에 homogenizer을 이용하여 6000rpm의 속도로 15초간 섞는다. 그리고 잘 혼합된 PIF용액을 유리섬유를 깔아놓은 개방형의 종이박스 틀(350mm×350mm×300mm)에 붓고 수평방향으로 발포 될 수 있도록 유리섬유를 압착 한 뒤 상온에서 자연 발포 시킨다. 마지막으로 약 24시간 후에 발포가 완료된 PIF와 CRG-PIF를 종이박스 틀에서 분리시켜 PIF와 CRG-PIF의 벌크를 완성하였다.

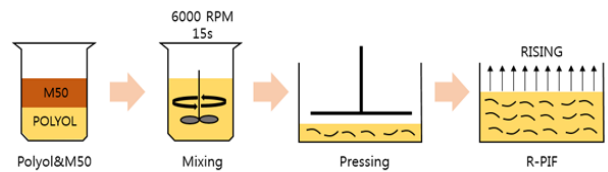


Figure 2: Manufacturing process of CGR-PIF

2.2 시험편 제작

Figure 3 (a)는 실험을 하기 위해 제작된 압축 시험편의 제작 과정을 보여준다. 개방형의 종이 박스 틀에서 분리된 PIF와 CRG-PIF의 벌크에서 50(B) mm × 50(W) mm × 25(H) mm의 크기로 시험편을 제작하였다. 압축실험을 위해 제작된 모든 압축 시험편은 한국 산업규격(KS M ISO 844)를 준수하여 제작하였다[8]. Figure 3 (b)는 제작된 PIF와 CRG-PIF의 사진이다. 압축시험편 중 20개를 임의로 선정하여 평균값으로 밀도를 결정하였다. 그 결과 PIF (59kg/m³)

,CRG-PIF (75kg/m³)의 밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 유리섬유를 첨가하게 되면 첨가량의 증가뿐만 아니라, 작아진 셀과 열린 셀의 구조로 인해 밀도가 증가 한다[9]. SEM 분석을 위한 시험편은 압축 실험을 시행하지 않은 PIF와 CGR-PIF의 X-Y평면과 Z방향 평면을 채취하여 분석하였다. 그리고 열전도도 분석을 위한 시험편은 1(B) mm × 1(W) mm × 0.2(H) mm 의 크기로 제작하였고, 벌크의 임의로 5군데 채취하여 제작하였고, 빛의 흡수성을 높이기 위하여 그래파이트 코팅을 하였다.

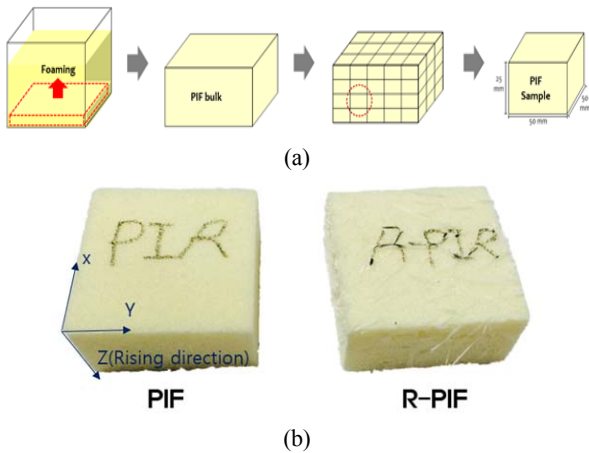


Figure 3: (a) Schematic diagram of sample preparation for compressive tests and (b) Photograph of test specimens of PIF and CGR-PIF

2.3 실험 장비 및 실험조건

본 연구에서는 경화시간이 짧은 PIF 용액 혼합 시 폴리올과 M50을 높은 회전 속도로 혼합시키기 위하여 IKA사의 호모게나이저 (T50-digital ULTRA-TURRAX)를 사용하였다. 그리고 제작된 PIF와 CGR-PIF의 미세구조를 분석하기 위하여 주사전자현미경(FE-SEM SUPRA25,ZEISS)을 사용하였다. 압축 시험은 복합재 용 만능재료시험기 (KSU-5M,KYOUNGSUNG)을 이용하여 실험하였으며, 극저온용 챔버와 자동 온도 조절 시스템을 이용하여 극저온 시험을 수행하였다. 극저온 환경을 구현하기 위해 액화질소를 극저온용 챔버에 주입하는 방식으로 실험을 진행하였다. 특히, 실험 온도는 LNG의 온도를 포함한 단일체가 노출될 수 있는 여러 극저온 온도(20℃,-40℃,-100℃,-163℃)를 고려하여 설정하였다. 그리고 정적 하중을 고려하여 변형률 속도는 0.001/s의 속도로 실험을 수행하였고, 시편의 열적 평형을 위해 1시간의 예냉을 거친 뒤 압축 실험을 수행하였다. **Table 1**은 기계적 성능을 평가하기 위한 실험조건을 표로 정리하였다. PIF의 열전도도를 측정하기 위해서 레이저 플래쉬 열전도도 측정기(LFA, Netzsch)를 사용하였다. LFA는 레이저를 이용하여 시편을 가열하면 발생하는 시간에 따른 온도변화를 감지하여 열적 물성을 측정하는 원리

의 실험 기기이다. 본 연구에서는 상온에서의 PIF와 CGR-PIF의 열전도도를 측정하였다. 실험은 신뢰성을 위하여 5번 시행하였다. **Figure 4**는 본 연구에 이용된 장비의 모식도와 사진이다.

Table 1: Conditions for the cryogenic compression tests

Test material	Glass fiber (wt%)	Temperature (°C)
PIF	0%	20
		-40
		-100
		-163
CGR-PIF	15%	20
		-40
		-100
		-163

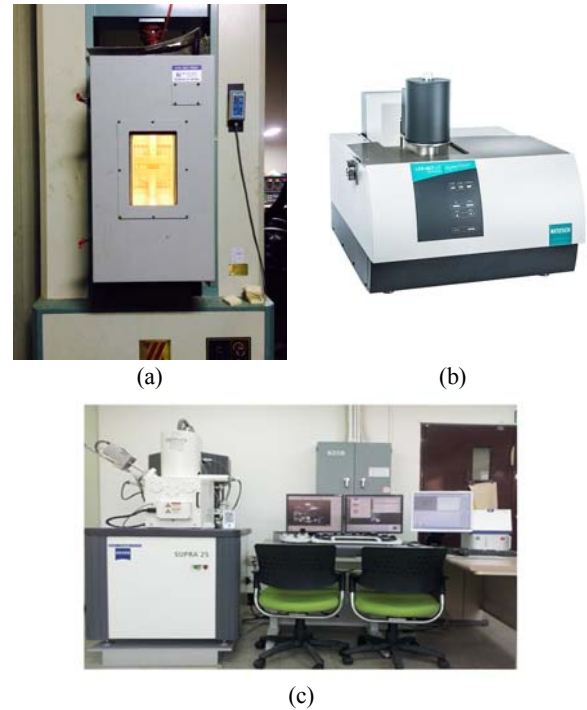


Figure 4: Photographs of test apparatus; (a) universal testing machine with cryogenic chamber, (b) LFA, and (c) scanning electron microscope

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SEM 분석

폴리머 폼의 기계적 특성과 열적 특성은 폴리머 셀의 구조와 배열의 의해 결정된다고 알려져 있다. 폴리머 폼은 열린 셀(open-cell)구조와 닫힌 셀 (closed-cell)구조로 나눌 수 있다[10]. 닫힌 셀 (closed-cell)구조의 경우가 열린 셀 (open-cell)의 경우보다 열 유량을 줄여주는 R-value를 더 많

이 함유하고 있어 더 높은 단열성능을 갖고 있다고 보고되고 있다. **Figure 5**는 압축 시편의 X-Y평면을 촬영한 PIF와 CGR-PIF의 SEM 사진이다. 그리고 **Figure 6**는 압축 시편의 Z방향 평면을 촬영한 PIF와 CGR-PIF의 FE-SEM 사진이다. **Figure 5**에서 PIF의 경우 셀이 전반적으로 균일하고 닫힌 셀(closed-cell)구조로 이뤄진 것을 확인할 수 있었으나 CGR-PIF의 경우 유리섬유의 영향으로 일부 셀이 파괴된 것을 확인할 수 있었다. 이로 인하여 CGR-PIF는 열린 셀(open-cell)의 비율이 상대적으로 PIF의 비해 높아질 것으로 사료된다. **Figure 6**에서는 PIF의 경우 셀의 크기가 균일하지 않고 X-Y평면의 셀의 모습보다 타원형의 셀의 모습을 볼 수 있다. 이는 발포 시 발생하는 폼의 특성에 의해 나타나는 것으로 판단되며, 이와 같은 이유로 폼이 이방성의 성질을 갖는 것으로 판단된다[11]. 그리고 압축강도가 폴리머 폼보다 높은 유리섬유가 첨가되어 기계적 성능은 향상되었으나, 유리섬유가 폼의 발포과정에서 셀의 형성을 방해하였고 [9], 그 결과 셀이 제대로 형성되지 못하거나 상대적으로 크기가 작은 셀이 형성이 되 열전도도는 높아진 것으로 사료된다. 실제로도 유리섬유를 첨가하여 강화한 R-PIF의 경우에도 열전도도가 상대적으로 더 높다고 보고되고 있다[5].

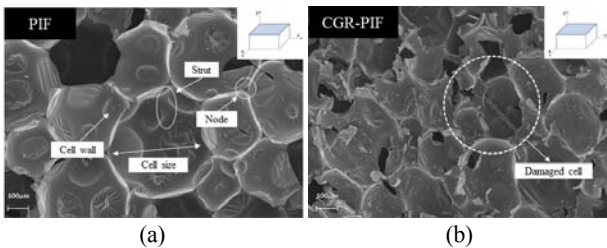


Figure 5: FE-SEM images of PIF and CGR-PIF with the X-Y plane direction; (a) PIF and (b) CGR-PIF

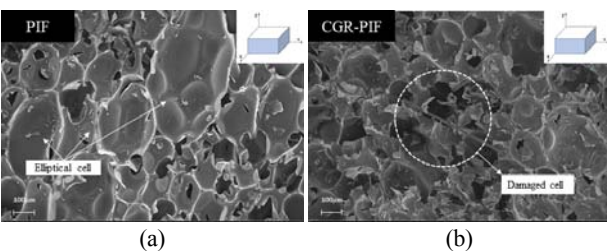


Figure 6: FE-SEM images of PIF and CGR-PIF with the Z direction; (a) PIF and (b) CGR-PIF

3.2 기계적 거동 분석

3.2.1 밀도를 고려한 압축강도

본 연구에서는 신뢰성 있는 응력-변형률 관계를 얻기 위해 각 case 별로 5회의 실험을 수행하였으며, 5번의 실험 중에서 평균에 가까운 3개의 데이터의 평균값을 이용하여 각 실험조건의 대푯값으로 설정하였다. **Figure 7**은 상온과 극저온 상에서의 PIF와 CGR-PIF 압축 시험 3개의 데이터를 나타냈다. 그래프에서 볼 수 있는 것과 같이 3개의 데이

터 사이에는 편차가 작은 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 3개의 데이터 중에 1개를 대푯값으로 사용하였다.

Figure 8은 PIF와 CGR-PIF의 온도 별 응력-변형률 그래프를 나타낸다. 각각의 응력-변형률 그래프는 선형 탄성(Linear elasticity), 평탄부(Plateau), 고밀도화(densification)의 3구간으로 나눌 수 있다. 선형 탄성(linear elasticity)구간은 응력과 변형이 선형적으로 증가하는 구간이며, 힘이 제거되면 원상태로 돌아간다. 보통 5%에서 10%의 변형률에서 나타나며 응력과 변형률의 기울기는 탄성계수(Young's modulus)를 나타낸다 [12]. 이 구간에서는 셀의 벽에 굽힘 또는 인장 하중이 가해진다고 알려져 있다[5]. 선형 탄성구간이 끝나는 항복응력(yield stress) 지점에서부터 긴 평탄부(Plateau) 구간이 이어지는데 이 구간에서는 변형률이 증가하여도 응력이 거의 일정하다. 이의 원인으로는 탄성좌굴(elastic buckling), 소성항복(plastic yielding), 혹은 취성압괴(brittle crushing)에 의한 점진적인 셀의 붕괴로 보고되고 있다. 고밀도화 구간에서는 재료의 전체적인 셀 붕괴가 일어나는 구간이다. 본 연구에서의 압축 실험결과 PIF와 CGR-PIF 모두 3구간을 확인할 수 있었다. 각 재료별 온도의 의한 압축강도에 대한 영향을 비교해 봤을 때, 대체적으로 온도가 낮아질수록 압축강도가 높아지는 경향성을 볼 수 있었다. PIF의 경우에는 -100℃보다 온도가 더 낮아지는 경우에는 압축강도가 더 이상 증가하지 않았다. 그리고 PIF에 유리섬유를 섞어 합성한 결과, PIF와 CGR-PIF를 비교하면 상온을 제외하고 -40℃, -100℃, -163℃에서 각각 15%, 22%, 30% 정도 압축강도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 이는 향상된 밀도의 의한 영향[13][14] 외에도 폴리머 폼보다 인장강도가 강한 유리섬유의 첨가로 압축강도가 증가한 것으로 사료된다. PIF의 경우 항복 이후 응력이 일정한 평탄부 구간이 나타난 반면에 CGR-PIF의 경우 평탄부 구간에서 셀의 붕괴 외에도 유리섬유의 좌굴로 인하여 응력이 증가하는 경화 현상을 확인할 수 있었다. 그리고 밀도의 영향을 배제하기 위해 단위 밀도 당 압축강도를 고려했을 때 -40℃와 -100℃에서는 압축강도의 향상이 거의 없으나 -163℃에서 10%의 압축강도 향상을 확인할 수 있었다. 따라서 CGR-PIF의 경우 -163℃ 극저온 환경에서 PIF보다 동일 밀도에서 압축강도가 높다는 것을 알 수 있다. **Figure 9**은 압축강도와 밀도를 고려한 압축강도를 나타내서 각 온도에서 비교한 그래프이다.

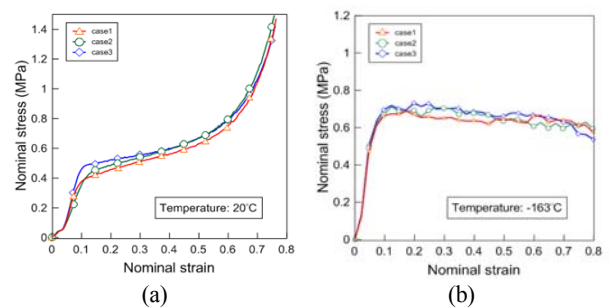


Figure 7: Stress-strain curve of (a) CGR-PIF at ambient and (b) PIF at cryogenic temperature

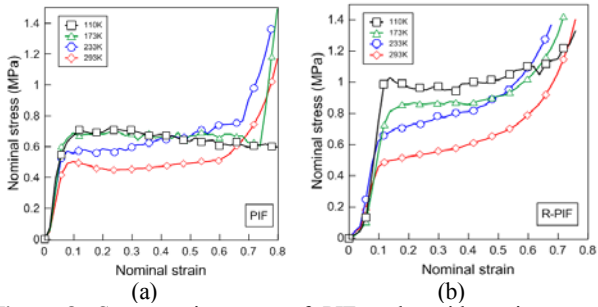


Figure 8: Stress-strain curve of PIF and with various graphene oxide ratio; (a) ambient and (b) cryogenic temperature

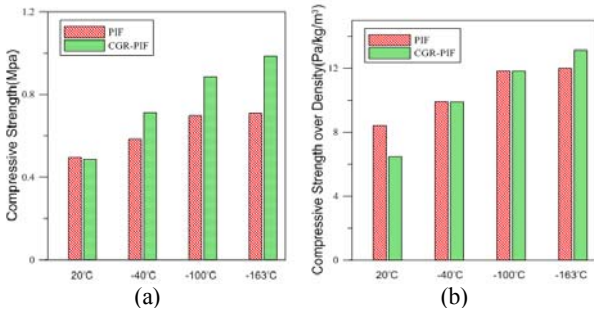


Figure 9: Stress-strain curve of PIF and with various graphene oxide ratio; (a) ambient and (b) cryogenic temperature

3.2.2 파손특성

Figure 10은 압축 시험 전의 높이와 압축 시험 후 복원된 높이를 나누어 복원율을 비교한 그래프이다. 전반적으로 CGR-PIF가 PIF보다 복원율이 높았다. 이는 탄성계수가 높은 유리섬유의 영향으로 판단된다. 또한, 극저온 환경 중 -100°C에서의 복원율이 가장 높았다. Figure 11은 압축실험 후 변형된 시험편들을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 상온에서는 압축실험 후 파손 현상이 보이지 않으나 온도가 내려갈수록 PIF와 CGR-PIF보다 깨지는 현상을 관찰할 수 있었다. 특히 -163°C의 극저온에서 PIF는 잘 부서져서 복원율을 측정하기 어려울 정도로 복원이 거의 되지 않는 반면에 CGR-PIF의 경우 19%의 비교적 높은 복원율을 확인 할 수 있었고, 약간의 변형만 있을 뿐 비교적 온전한 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 압축강도 평가에서도 볼 수 있듯이 PIF의 경우 -100°C보다 온도가 더 낮아질 경우에는 재료가 잘 부서지는 상태가 되어 압축강도가 더 이상 증가하지 않는 현상을 설명하는 원인이 될 수 있을 것이라 판단된다.

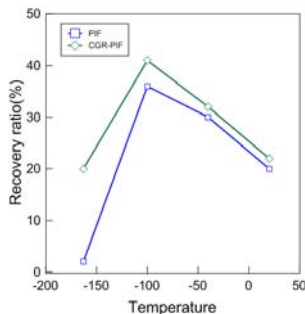


Figure 10: Comparison of recovery ratios

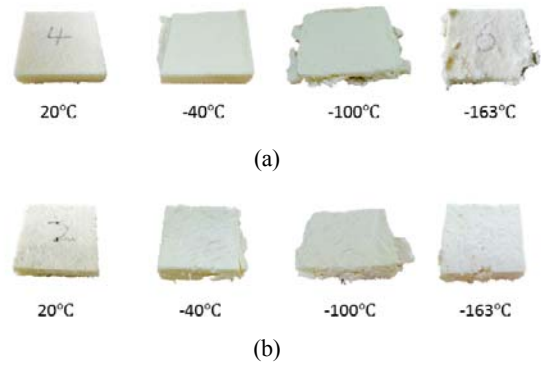


Figure 11: Permanently deformed shape of PIF and CGR-PIF after compressive test; (a)PIF and (b)CGR-PIF

3.3 열적 성능 분석

본 연구에서 열전도도는 레이저 플래쉬 방법에 의해 측정되었다. 식 (1)을 기반으로 한 LFA-467 분석 프로그램을 이용하였다.

$$\lambda(T) = \alpha(T) \cdot C_p(T) \cdot \rho(T) \tag{1}$$

여기서 $\alpha(T)$ 는 열확산도, $C_p(T)$ 는 비열, $\rho(T)$ 는 밀도이며, 그리고 $\lambda(T)$ 는 열전도도이다. Table 2과 Table 3은 PIF와 CGR-PIF의 열적특성을 나타낸다. PIF는 CGR-PIF보다 19% 높은 열확산도를 가진 반면에 CGR-PIF는 PIF보다 30% 높은 비열을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 PIF는 0.024-0.028W/mK, CGR-PIF는 0.035-0.036W/mK의 열전도도를 갖는 것을 확인할 수 있다. CGR-PIF는 유리섬유의 첨가로 인하여 작아진 셀은 열 저항을 높여 열전도도를 낮추지만[10] PIF보다 열전도도가 높은 유리섬유로 인한 열전달[5]과 유리섬유로 인한 열린 셀(open-cell)의 증가로 열전도도가 높아진 것으로 사료된다[15].

Table 2: Thermal properties of PIF

	shot number	Diffusivity (mm ² /s)	Specific heat (J/g/K)	Conductivity (W/mK)
PIF	1	0.428	1.123	0.028
	2	0.425	1.090	0.027
	3	0.422	0.962	0.024
	4	0.425	1.122	0.028
	5	0.423	1.088	0.027

Table 3: Thermal properties of CGR-PIF

	shot number	Diffusivity (mm ² /s)	Specific heat (J/g/K)	Conductivity (W/mK)
CGR-PIF	1	0.354	1.267	0.035
	2	0.360	1.339	0.036
	3	0.356	1.296	0.035
	4	0.357	1.301	0.035
	5	0.359	1.299	0.035

4. 결 론

본 연구에서는 유리섬유가 폴리이소시아누레이트 폼(PIF)의 기계적 성능 및 열적 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해, 상용화 되어있는 R-PUF의 유리섬유 첨가량을 참고하여 유리섬유 강화 폴리이소시아누레이트 폼(CGR-PIF)을 개발하였다. 본 연구 결과 획득한 결과를 아래에 정리 하였다.

- 합성된 CGR-PIF와 PIF의 셀의 형상을 비교해 본 결과 PIF는 셀의 모양이 상대적으로 균일하고 닫힌 형태의 셀이 온전하게 존재하였다. 그러나 CGR-PIF의 경우 유리섬유가 셀의 형성을 방해하여 닫힌 셀의 구조가 파괴 되는 것을 확인할 수 있었다.
- PIF와 CGR-PIF의 기계적 거동의 경우 -163°C 에서 CGR-PIF가 단위 밀도 당 높은 압축강도를 갖는 것을 확인 할 수 있었다.
- CGR-PIF가 PIF보다 극저온에서 높은 복원율을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 극저온에서도 압축 시험 후에 비교적 온전한 시편의 형태를 유지하는 것을 확인 할 수 있었다.
- 열전도도의 경우 PIF가 $0.024\text{-}0.028\text{W/mK}$, CGR-PIF가 $0.035\text{-}0.036\text{W/mK}$ 의 열전도도로 유리섬유의 첨가로 인해 상대적으로 높은 열전도도를 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

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] 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.
- [2] V. N. AvE, "Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR)," *Properties-manufacture*, vol. 6, pp. 1-33, 2006.
- [3] S. B. Park, S. W. Choi, J. H. Kim, C. S. Bang, and J. M. Lee, "Effect of the blowing agent on the low-temperature mechanical properties of CO₂- and HFC-245fa-blown glass-fiber-reinforced polyurethane foams," *Composite Part B*, vol. 93, pp. 317-327, 2016.
- [4] D. S. Han, I. B. Park, M. H. Kim, B. J. Noh, W. S. Kim, and J. M. Lee, "The effects of glass fiber reinforcement on the mechanical behavior of polyurethane foam," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, pp. 263-266, 2010.
- [5] 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, 2016.
- [6] A. Siegmann, S. Kenig, D. Alperstein, and M. Narkis, "Mechanical behavior of reinforced polyurethane foams," *Polymer Composites*, vol. 4, no. 2, pp. 113-119, 1983.
- [7] D. A. Serban, O. Weissenborn, S. Geller, L. Marsavina, and M. Gude, "Evaluation of the mechanical and morphological properties of long fibre reinforced polyurethane foams," *Polymer Testing*, vol. 49, pp. 121-127, 2016.
- [8] M. Thirumal, D. Khastgir, N. K. Singha, B. S. Manjunath, and Y. P. Naik, "Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 108, pp. 1810-1817, 2008.
- [9] S. H. Kim, H. C. Park, H. M. Jeong, and B. K. Kim, "Glass fiber reinforced rigid polyurethane foams," *Journal of Material Science*, vol. 45, pp. 2675-2680, 2010.
- [10] L. J. Gibson and M. F. Ashby, "Cellular Solids," *Structure & properties*, Cambridge University, Cambridge University Press, 1999.
- [11] J. M. Kim, J. H. Kim, Y. R. Choe, S. K. Park, K. H. Park, and J. M. Lee, "Effect of graphene oxide on mechanical characteristics of polyurethane foam," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 6, pp. 493-498, 2016 (in Korean).
- [12] J. V. Mane, S. Chandra, S. Sharma, H. Ali, V. M. Chavan, B. S. Manjunath, and R. J. Patel, "Mechanical property evaluation of polyurethane foam under quasi-static and dynamic strain rates-an experimental study," *Procedia Engineering*, vol. 173, pp. 726-731, 2017.
- [13] W. J. Seo, H. C. Jung, J. C. Hyun, W. N. Kim, Y. B. Lee, K. H. Choe, and S. B. Kim, "Mechanical, morphological, and thermal properties of rigid polyurethane foams blown by distilled water," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 90, pp. 12-21, 2003.
- [14] H. Shen and S. Nutt, "Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam," *Composites: Part A*, vol. 34, pp. 899-906, 2003.
- [15] C. Zhao, Y. Yan, Z. Hu, L. Li, and X. Fan, "Preparation and characterization of granular silica aerogel/polyisocyanurate rigid foam composites," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 309-316, 2015.