

글라스버블/폴리우레탄 폼 복합재료의 기계적 및 열적 특성평가

안재혁¹ · 김정현² · 김정대³ · 박성균⁴ · 박강현⁵ · 변준석⁶ · 이제명[†]

(Received July 12, 2018 ; Revised October 31, 2018 ; Accepted November 1, 2018)

Development and mechanical and thermal performance evaluation of polyurethane foam composites reinforced with glass bubbles

Jae-Hyeok Ahn¹ · Jeong-Hyeon Kim² · Jeong-Dae Kim³ · Sung-Kyun Park⁴ · Kang-Hyun Park⁵ · Jun-Seok Byun⁶ · Jae-Myung Lee[†]

요약: 환경 규제 강화로 인한 천연가스의 수요가 증가함에 따라 액화천연가스 운반선의 크기 또한 거대해지면서 액체화물의 자중 및 슬로싱 하중이 증가하고 있다. 이에 액화천연가스를 안전하게 보관하기 위한 단열시스템의 성능 개선하고자 본 연구에서는 기존의 LNG 단열시스템에서 사용되는 재료인 폴리우레탄 폼의 기계적 및 열적 성능 강화를 위하여 글라스 버블을 첨가하였다. 글라스 버블 첨가량에 따라 기존 폴리우레탄폼의 재료 물성치 변화를 분석하기 위해서 다양한 중량비(0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 wt.%)로 시험편을 제작하였으며 다양한 온도조건에 적용되는 폴리우레탄 폼을 고려하여 극저온(-163 °C)에서부터 상온(20 °C)까지의 재료 압축 거동을 평가하였다. 열적특성 파악을 위해서 상온(20 °C)에서의 열전도도를 측정하여 기존 폴리우레탄 폼과 비교하였다. 또한, FE-SEM 촬영을 통해서 폴리머 재료의 기계적 특성 및 열적 특성에 영향을 미치는 셀의 구조 및 형태의 미세구조를 분석하였다. 0.75 wt.% 이상의 글라스버블 첨가에서는 압축강도가 크게 증가하는 반면 폴리우레탄 폼 내부 셀의 형태 및 구조가 파괴되는 것을 확인할 수 있었으며 0.25 wt.%와 0.5 wt.%의 글라스 버블을 첨가한 폴리우레탄 폼에서 기존 폴리우레탄 폼 대비 단열성능 및 압축강도가 향상되었다.

주제어: 폴리우레탄 폼, 글라스버블, 재료 합성, 기계적 특성, 열적특성

Abstract: As the demand for natural gas is increasing owing to the environmental regulations becoming more stringent, the size of liquefied natural gas carriers is increasing, and thus, the self-weight of the liquid cargo and the sloshing load are increasing. To enhance the performance of the insulation system to enable safe storage of liquefied natural gas, glass bubbles were used to improve the mechanical and thermal performances of polyurethane foam (PUF). Glass bubbles were added at various weight percentages (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 wt.%) to investigate the changes in the mechanical and thermal properties of the PUF. The effect of addition of the glass bubbles was examined by conducting compression tests at various temperature conditions (-163, -100, -40, 20 °C), measuring the thermal conductivity, and analyzing the cell microstructure. The results showed that the mechanical strength of all PUFs in which glass bubbles were introduced was improved. The maximum improvement in mechanical strength was noted for the case with 0.75 wt.% addition; however, the heat capacity deteriorated owing to the large density increase and the collapse of the microstructure. On the other hand, at 0.25 wt.% and 0.5 wt.% addition, the performance was improved in terms of both insulation performance and mechanical strength.

Keywords: Polyurethane foam, Glass bubble, Material synthesis, Mechanical characteristic, Thermal properties

1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 최근 2020년까지 선박 및 해양산업에 대한 환경오염물 배

출에 대한 규제가 강화됨에 따라 친환경적인 연료인 액화천연가스(LNG, Liquefied natural gas)의 수요가 증가하고 있다[1]. 이에 따라 액화천연가스를 운반할 수 있는 LNG 운

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8096-4306>): Professor, 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 M.S candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: hll0130@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-7746

2 Ph.D, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: honeybee@pusan.ac.kr Tel: 051-510-3986

3 M.S candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, E-mail: jeongdae3416@pusan.ac.kr Tel: 051-510-3986

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

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

6 president, Ukseung Chemical Co.,LTD, E-mail: benjs@ukseung.co.kr Tel: 051-523-1515

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.

반선의 크기 및 수요 또한 증가하고 있으며, LNG를 연료로 사용하는 LNG 연료추진선에 대한 관심이 커지고 있다 [2][3]. 극저온인 -163 °C에서 액화 상태로 저장 및 운반되는 LNG를 안전하게 보관하기 위해서는 선박 내부 단열시스템의 보완이 필수적이다. LNG 단열시스템에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 재료는 폴리우레탄 폼(PUF, Polyurethane foam)으로 재료 고유의 우수한 기계적 강도 및 열적 특성으로 선박뿐만 아니라 다양한 산업에서 사용되고 있다[4][5]. 특히, 선박에 적용되는 PUF는 유리섬유를 첨가한 강화 폴리우레탄 폼(Glass fiber-Reinforced Polyurethane foam)을 사용하고 있다. 하지만 기계적 강도 측면을 고려한 유리섬유 첨가에도 선박의 운항에 의한 내부 저장탱크에서의 액체화물의 이동으로 선체 내벽에 강한 유체 충격하중인 슬로싱(Sloshing)이 발생하여 단열시스템의 파손에 대한 문제가 잇따르고 있다. 또한, 유리섬유 자체의 높은 열전도도 때문에 저장탱크 내부 LNG의 기화 현상인 BOR(Boil Off Rate)이 높아짐에 따라 열 흐름을 차단하기 위해 단열재의 두께를 증가시켜야 하는 경제적인 문제 및 단열재료서의 역할을 수행하는 데 어려움이 있다.

본 연구는 이러한 기존 단열시스템의 문제점을 개선하기 위한 연구로써 수행되었다. 과거 이러한 단점들을 해결하기 위해서 PUF의 성능 개선을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. PUF의 특성을 강화시키기 위해서는 강도, 밀도 혹은 미세구조 등의 변화를 주어야 하며 이러한 변화를 주기 위해 섬유타입(glass,cellulosed fiber), 탄소 기반 나노첨가제(graphite, graphene oxide), 나노클레이(montmorillonite) 그리고 나노 입자(silica, TiO2) 등이 사용되어 왔다[6]-[9].

하지만, 기존 PUF 연구는 LNG를 고려한 극저온 환경에 대한 성능평가가 부족한 실정이며 나노입자인 글라스버블을 첨가한 PUF의 성능 평가에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 기존의 PUF의 재료 합성 시에 글라스버블을 첨가하여 기계적 및 열적 성능을 향상하고자 하였다. 글라스버블의 첨가량에 따라 PUF와 합성 시 재료의 성능 변화를 관찰하기 위해서 Neat-PUF인 0 wt.%부터 0.25 wt.%, 0.5 wt.%, 0.75 wt.%, 1 wt.%까지의 다양한 중량비로 실험을 수행하였다. 기계적 강도를 평가하기 위해서 상온에서부터 극저온까지 다양한 온도조건(-163, -100, -40, 20 °C)에 따른 압축실험을 수행하였으며 단열성능을 비교를 위해 글라스버블 첨가량에 따른 열전도도를 측정하였다. 또한, PUF 내부의 셀은 기계적 강도 및 열적 성능 변화에 큰 연관성이 있기 때문에 FE-SEM 촬영을 통해서 재료 성능과 미세구조의 관계를 조사하였다.

2. 실험 준비

2.1 합성 재료

본 연구에서는 글라스버블의 첨가에 따른 PUF의 성능 변화를 관찰하기 위해서 기존 Neat-PUF 제조에 사용되는

기본 원료인 폴리올(polyol, light yellow liquid), 이소시아네이트(polymeric methylene diphenyl isocyanate, dark brown liquid) 그리고 발포제(HFC-245fa, clear liquid)는 Korea Polytech LTD.를 통해 구매하였으며 재료 합성 시 비율을 각각 1000:1160:50으로 고정하였다. 위 3가지 기본 재료는 직사광선을 피해 약 15 °C의 온도로 냉장 보관하였다. 첨가제로 사용된 3M chemistry사의 글라스버블(glass bubble K15)는 속이 빈 구 형태로 재료 구성 물질은 soda-lime-borosilicate glass이며 주로 구조용 폼, 자동차, 열가소성 플라스틱 등에 주로 사용되는 재료로써 재료의 강도를 향상시키거나 낮은 비중으로 무게를 낮추는 성질을 가지고 있다. 중량비에 따라 0 wt.%, 0.25 wt.%, 0.5 wt.%, 0.75 wt.%, 1 wt.%는 0 g, 5.52 g, 11.05 g, 16.57 g, 21.5 g의 글라스버블이 첨가되었다. Figure 1은 Neat-PUF를 제작하기 위한 기본 재료인 폴리올, 이소시아네이트, 발포제 및 합성 시 사용되는 첨가제인 글라스버블을 나타낸다.



Figure 1: Basic raw materials of polyurethane foam (Polyol, isocyanate, blowing agent) and glass bubble

2.1 시험편 합성 및 제작

글라스버블을 첨가한 PUF를 합성하기 위해서 Figure 2와 같이 먼저 폴리올과 비교하면 상대적으로 점도가 낮은 이소시아네이트를 사용하여 나노입자형태의 글라스버블을 교반하였다. IKA사의 호모게나이저(T50-digital ULTRA-TURRAX)를 통해 글라스버블과 이소시아네이트를 4500 rpm에서 약 60 s 동안 1차 혼합한 후 나노입자의 분산성을 최대로 향상시키기 위해서 초음파 분산기(ultrasonic dispersion)를 사용하여 약 8,000 Hz에서 15 min 동안 2차 혼합을 수행하였다. 이후, 이소시아네이트와 글라스버블이 혼합된 용액에 폴리올과 발포제를 첨가하여 다시 호모게나이저를 사용하여 60 s 동안 균일하게 교반한 뒤 사각 틀에 옮겨 24시간 동안의 상온 약 25 °C에서 자연발포과정을 거쳤다. 발포과정 중, 초기 액체 형태의 cream state에서 점차 발포가 진행됨에 따라 내부 셀이 점성이 생기는 gel state로 변화되는데 이때 평균적인 cream time과 gel time은 각각 300±30 s와 700±60 s로 시험편 제작 과정상 글라스버블 첨가에 따른 큰 영향은 없었다. Figure 3은 자연발포과정을 거친 후 제작된 벌크형태의 PUF 가공순서를 나타낸다. 먼저 열전도도 측정을 수행하기 위해서 발포가 완료된 이후 Bulk 형태의 PUF에서 아랫부분과 윗부분의

밀도 차에 의한 실험 오차를 줄이기 위해 중앙 부분을 열전도도 시험편(300 mm × 300 mm × 25 mm)으로 가공하였다. 열전도도 측정 이후 똑같은 시험편을 통해 압축거동을 확인하기 위해서 다시 압축 시험 시험편(50 mm × 50 mm × 25 mm)으로 2차 가공을 수행하였다. Table 1은 제작된 시험편의 평균 밀도를 나타낸다.

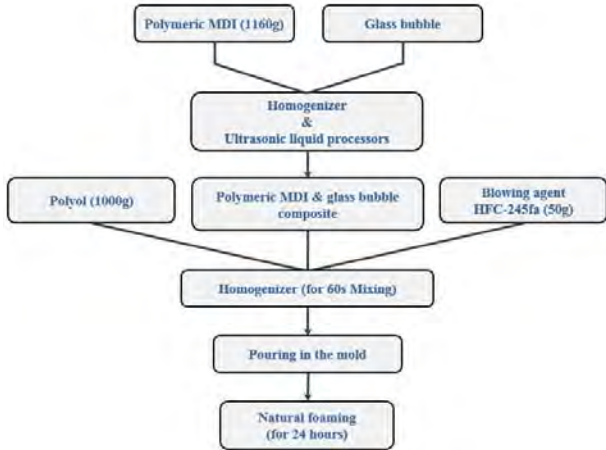


Figure 2: Synthesis process of glass bubble reinforced polyurethane foam

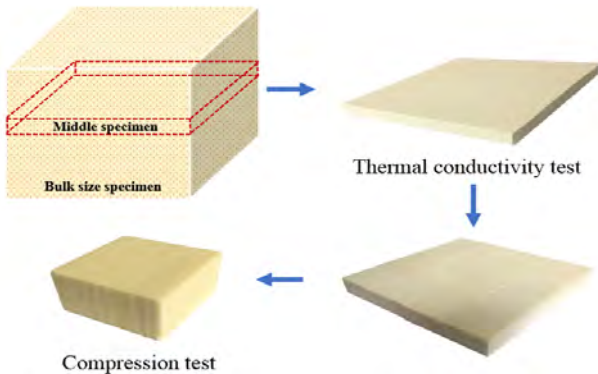


Figure 3: Fabrication process of test specimen

Table 1: Mechanical and Thermal test scenarios

Test material	Glass bubble (wt.%)	Density (kg/m ³)
Neat-PUF	0	155.68
Glass bubble reinforced PUF	0.25	161.44
	0.5	164.98
	0.75	226.87
	1	193.06

2.2 실험 시나리오

본 연구에서 실험 재료의 물성치 변화를 관찰하기 위해서 첨가제인 글라스버블의 첨가량과 시험온도조건에 따른 재료 압축시험 및 열전도도 측정을 수행하였다. 압축 시험은 KS M ISO844를 준수하여 수행되었으며 압축 시험편 두께 25 mm를 고려하여 준정적 압축거동을 관찰하기 위해

1.5 mm/min의 속도로 압축력을 주었다. 상온뿐만 아니라 특히 극저온 환경인 LNG 단열시스템에 적용되는 PUF을 고려하여 -163 °C, -100 °C, -40 °C, 20 °C의 온도조건에서 시험을 수행하였으며 이를 통해 재료의 응력과 변형률에 관계를 분석하고 각 온도 조건에 따라 기계적 강도 및 탄성계수 등의 변화를 확인하였다. 저온 압축 실험 시 제작된 PUF의 내부온도와 바깥 외부온도의 열평형을 유지하기 위해서 시험을 수행하기 전 단계에서 약 1시간 정도의 예비냉각을 수행한 뒤 실험을 진행하였다. 재료의 단열성능을 평가하기 위해서 ASTM C518을 따라 상온 20 °C에서의 열전도도 측정을 통해 기존 Neat-PUF 와의 열적 성능 차이를 비교하였다. 또한, 본 연구의 모든 실험은 실험의 재현성 및 결과 값의 신뢰성을 위해서 총 4번의 반복실험을 수행하여 평균값과 가장 유사한 데이터를 채택하여 비교 분석하였다. 본 연구의 기계적 성능평가 및 단열성능 평가를 위한 시험 시나리오를 Table 2에 정리하였다.

Table 2: Test scenarios

Test method	test material (wt.%)	Temperature (°C)
Compression test	0	20, -40, -100, -163
	0.25	
	0.5	
	0.75	
	1	
Insulation test	0	20
	0.25	
	0.5	
	0.75	
	1	

2.3 실험장비

Figure 4에는 본 연구에서 사용한 실험장비를 나타내었다. 글라스버블을 첨가한 PUF의 압축 거동을 확인하기 위해서 경성시험기의 만능재료시험기(KSU-5M) 장비를 사용하였다. 상온을 제외한 저온(-163 °C, -100 °C, -40 °C) 압축실험 시 주변의 온도를 일정하게 유지하기 위해 극저온 챔버(cryogenic chamber) 및 액체질소(Liquid nitrogen)를 사용하였다. 압축 실험은 원형 지그를 통해 준 정적 재료 압축거동을 파악하기 위해서 변형률 속도를 0.001 /s로 설정하였다. 글라스버블을 첨가한 폴리우레탄 폼의 열전도도를 측정하기 위해 Netzsch사의 heat flow meter(HFM 436)를 사용하였다. 평판열류계법을 통해서 상판(30 °C), 하판(10 °C)의 온도차를 주어 평균온도 약 20 °C에서의 열전도도 값을 측정하였다. 또한, 글라스버블과 PUF의 합성으로 인한 재료의 셀 형태나 구조의 변화를 파악하기 위해 ZEISS사의 scanning electron microscope (FE-SEM SUPRA25)를 사용하여 글라스버블 중량비에 따른 PUF의 미세구조를 분석하였다.



(a)



(b)

Figure 4: Test apparatus; (a) universal testing machine (KSU-5M), (b) heat flow meter(HFM 436)

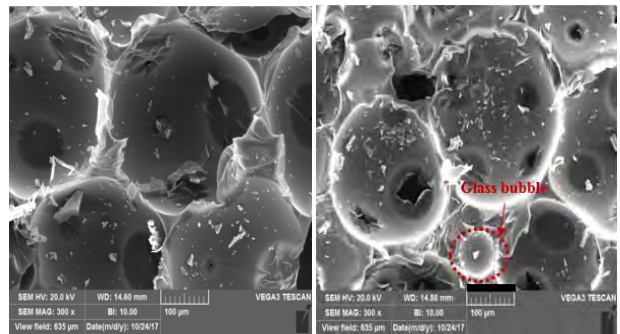
3. 실험 결과

3.1 미세구조

PUF과 같은 폴리머 구조의 재료는 일반적으로 내부 셀이 어떠한 형태로 구성되는지에 따라 재료의 기계적 및 열적 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 글라스버블을 첨가한 PUF과 기존의 Neat-PUF의 미세구조 분석을 수행하기 위해 SEM 촬영을 수행하였다. Figure 5는 기존 Neat-PUF(0 wt.%)과 글라스버블을 첨가한 PUF(0.25, 0.5, 0.75, 1 wt.%)의 SEM 촬영 결과를 나타낸다. 300배율로 PUF의 미세 구조 촬영 결과, 일반적으로 PUF의 미세구조에서 볼 수 있는 닫힌 형태의 셀(closed-cell)을 확인할 수 있었고 글라스버블을 첨가한 PUF에서는 크기 약 30 micron의 글라스버블이 셀 사이에 있는 것을 알 수 있었다.

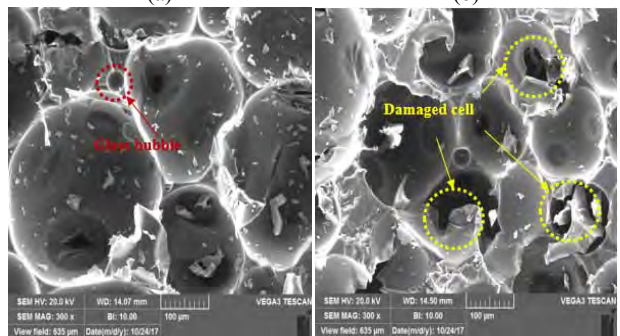
닫힌 형태의 셀 구조는 열린 형태의 셀(open-cell) 구조에 비해서 더 높은 단열 특성이 있기 때문에 단열재로 사용되는 PUF의 경우 닫힌 형태의 셀을 더 많이 형성하는 것이 단열성 확보에 유리하다[10][11]. 기존 Neat-PUF과 0.25

wt.%, 0.5 wt.%의 글라스버블을 첨가한 PUF의 미세구조를 비교해볼 때, 글라스 버블을 첨가한 PUF에서 셀의 형태가 비교적 안정적이고 닫힌 형태의 셀이 더 조직적으로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 하지만, 0.75 wt.%에서 1 wt.%로 글라스버블 첨가량이 점차 증가함에 따라서 온전한 셀이 형성되지 못하고 완전히 닫힌 형태의 셀이 아닌 셀의 window 및 strut이 파괴되는 현상을 확인할 수 있었다. 이는 글라스버블과 같은 나노 입자 형태의 첨가제를 PUF에 적용했을 때 초기 소량의 첨가에서는 PUF의 발포 과정 시 내부 셀의 형성 및 폴리머 구조 형성을 촉진해주는 핵생성제(nucleating agent)로서의 역할을 하게 되지만 입계 첨가량 이상에서는 오히려 폴리우레탄 폼과의 분산 악화 또는 결합을 방해하여 셀이 파괴되거나 온전한 형태를 유지하지 못하게 되기 때문에 발생하는 현상으로 파악된다[12][13].



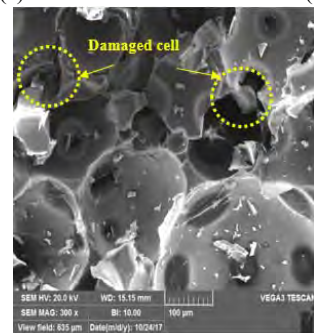
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figure 5: Photographs of cell microstructure by FE-SEM; (a) 0 wt.%, (b) 0.25 wt.%, (c) 0.5 wt.%, (d) 0.75 wt.% (e) 1 wt.% of glass bubble

3.2 열전도도

낮은 열전도도는 단열재로 사용되는 PUF의 성능에서 매우 중요한 요소이다. 그러므로 제작된 시험편의 단열성능을 평가하기 위해서 heat flow meter를 이용하여 열전도도를 측정하였다. 시험편의 열전도도 측정은 시험편이 제작되고 나서 PUF의 발포에 사용되는 HFC-245fa 가스의 영향과 시험편 발포 시 발생하는 내부 가스와 외부 가스의 안정화를 위해 14일 이후 충분한 시간을 거친 후 측정되었다. [14] 열전도도 측정 결과는 Table 3에 나타내었다. 0.25 wt.%와 0.5 wt.%의 글라스버블을 첨가한 PUF에서 기존 Neat-PUF보다 향상된 단열성능을 보였으며 약 7.04 %와 4.74 % 낮아진 열전도도를 확인하였다. 이는 앞서 미세구조에서 셀의 형태 및 구조와 관련된 단열성능 향상으로 보인다. 반대로 0.75 wt.% 이상의 첨가에서는 PUF 내부 셀이 파괴되어 단열성이 더욱 악화되며 또한 다른 중량비와 다르게 급격한 밀도 상승 또한 열전도도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 3: Thermal conductivities of test specimens at 20 °C

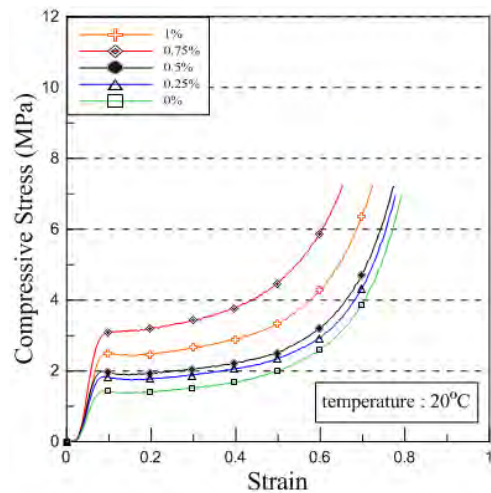
Material	Thermal Conductivity (W/m · K)
0 wt.% PUF	0.03022
0.25 wt.% PUF	0.02823
0.5 wt.% PUF	0.02885
0.75 wt.% PUF	0.03442
1 wt.% PUF	0.03178

3.3 기계적 특성 분석

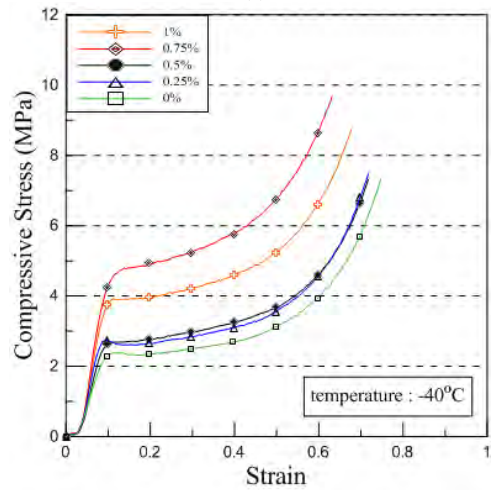
글라스버블을 첨가한 PUF의 중량비 대비 압축강도를 비교하기 위해서 온도조건에 따른 동일한 변형률 속도 0.001 /s에서의 압축실험을 수행하였다. Figure 6은 온도별 압축실험의 응력-변형률 선도를 나타낸다. Figure 6 (a)에 나타낸 것처럼 일반적으로 PUF의 응력-변형률 선도는 선형 탄성 구간(linear elastic section), 평탄부 구간(plateau region), 고밀도화 구간(densification region)으로 총 3가지의 영역으로 나누어진다. 선형 탄성 구간에서는 응력과 변형률이 선형적으로 점차 증가하며 기울기를 통해 탄성계수(elastic modulus)를 계산하였으며 선형 구간에서 변형률 0.1에서의 압축강도(compressive strength)를 통해 재료의 기계적 특성을 비교하였다. 압축강도 및 탄성계수를 비교하였을 때, 글라스버블을 첨가한 모든 PUF에서 기존의 Neat-PUF보다 기계적 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 온도변수를 고려하였을 때, 온도가 극저온으로 갈수록 재료의 압축강도 및 탄성계수 역시 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었고 특히 밀도가 크게 증가한 0.75 wt.%에서의 압축강도는 상온 20 °C에서 3.11 MPa, 극저온 -163 °C에서 8.65 MPa로 기존 Neat-PUF 대비 약 53.84 %, 49.78 % 증가하였다. 이는 0.75 wt.%에서 셀이 파괴되어 단열성이 떨어졌지

만 첨가량이 높아짐에 따라서 응집력이 생겨 셀이 더 조밀하게 형성되어 강도가 향상된 것으로 판단된다. 평탄부 및 고밀도화 구간에서는 전반적으로 온도가 낮아짐에 따라 평탄부 구간이 짧아지는 경향을 나타내었고 -163 °C의 압축실험 시 응력 및 변형률 선도가 다른 온도 영역과는 다른 형상을 보였다. 이는 -163 °C의 극저온 압축실험 시 PUF 재료 내부의 셀 wall 혹은 strut이 저온 효과로 인한 취성 파괴 및 붕괴됨에 따라 응력-변형률 선도가 변화된 것으로 판단된다. 그 이후, 고밀도화 구간에서는 PUF 내부 셀이 더 이상 압축력을 견디지 못하고 붕괴되는 현상을 보인다.

재료 압축 시험을 통해서 PUF의 압축실험 이후 온도 조건별 파손 특성을 관찰하였다. 압축시험 편은 모두 동일한 변형률 속도로 최대 50 kN의 하중을 주어 실험을 수행하였다. 글라스버블을 첨가한 PUF과 기존의 Neat-PUF 모두 상온 20 °C에서는 z 방향으로의 압축하중을 가했을 때 크게 파손되지 않고 z 방향으로의 변형이 발생하였으며 극저온 -163 °C로 갈수록 x 방향과 y 방향으로의 저온 취성에 의한 표면 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Figure 7은 상온과 극저온에서의 압축시험 전과 후의 PUF를 나타낸다.



(a)



(b)

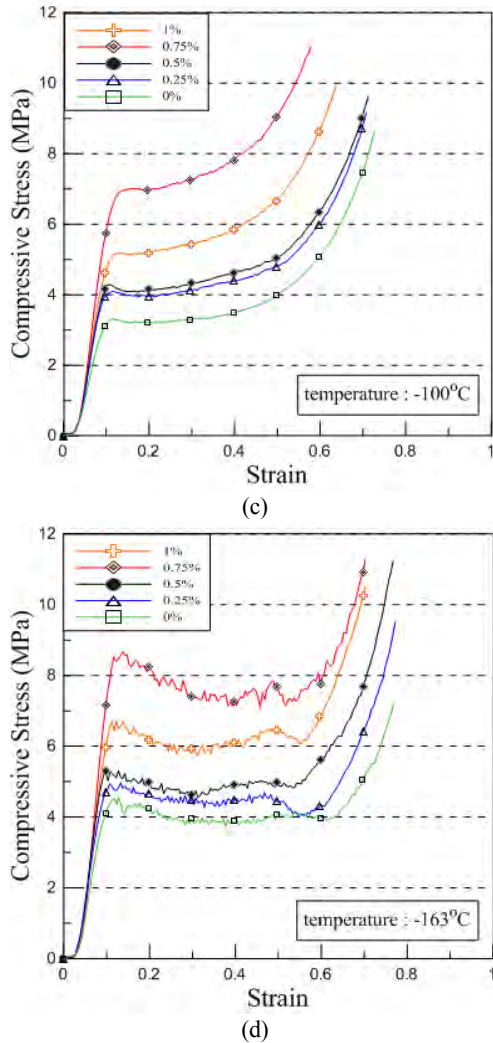


Figure 6: Compression stress-strain curve according with different test temperature; (a) 20 °C, (b) -40 °C, (c) -100 °C, (d) -163 °C at cryogenic temperature

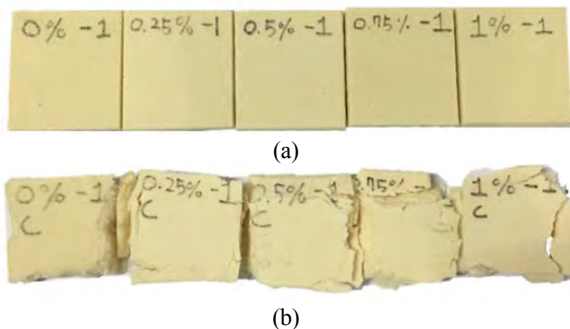


Figure 7: Characteristics of damage on test specimen after compression test by temperature; (a) 20 °C at ambient (b) -163 °C at cryogenic temperature

4. 결론

본 연구는 기존 폴리우레탄 폼의 기계적 및 열적 성능을 향상하기 위해서 재료 합성 시 글라스버블을 첨가하였다.

성능 변화를 확인하기 위해서 다양한 온도조건에서의 압축 시험을 수행하여 기계적 강도를 비교하였으며 미세구조 및 열전도도 측정 등을 통해 단열성을 평가하였다. 본 연구 주요 결과는 아래에 요약하였다.

- Neat-PUF와 재료의 압축강도를 비교한 결과, 글라스버블을 첨가한 모든 폴리우레탄 폼에서 온도와 관계없이 압축강도가 향상되는 것을 확인하였다. 또한, 온도가 감소함에 따라서 폴리우레탄 폼의 압축 거동이 점차적으로 상승하였다.
- 밀도가 크게 증가한 0.75 wt.% 이상의 글라스버블 첨가에서 가장 높은 압축강도가 측정되었지만, 미세구조 상 내부 폴리우레탄 폼 셀 wall과 strut이 파괴 및 붕괴되어 closed-cell을 유지하지 못해 단열성이 감소하였다.
- 글라스버블을 0.25 wt.%와 0.5 wt.%를 첨가한 폴리우레탄 폼에서 기존 neat-PUF 대비 셀의 형태가 상대적으로 일정한 것을 확인할 수 있었으며 이로 인해 열전도도가 0.02823-0.02885 W/m·K로 단열성이 향상됨을 확인하였다.
- 거시적 관점에서 시험편에 압축력을 가했을 때, 글라스버블 첨가 여부에 상관없이 상온 20 °C에서는 시험편 파손이 발생하지 않았으며 극저온 -163 °C로 갈수록 재료의 압축력과 수직인 방향으로의 취성파괴가 발생하였다.

후기

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018R1A2B6007403). 본 연구는 2013년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030013).

References

- [1] O. Schinas and M. Butler, "Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships," Ocean Engineering, vol. 122, pp. 84-96, 2016.
- [2] F. Zhao, W. Yang, W. W. Tan, W. Yu, J. Yang, and S. K. Chou, "Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation," Applied Energy, vol. 161, pp. 124-132, 2016.
- [3] 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.
- [4] D. J. Oh, J. M. Lee, M. S. Chun, and M. H. Kim, "Reliability evaluation of a LNGC insulation system with a metallic secondary barrier," Composite Structures, vol. 171, pp. 43-52, 2017.

- [5] J. M. Kim, J. H. Kim, J. H. Ahn, J. D. Kim, S. K. Park, K. H. Park, and J. M. Lee, "Synthesis of nanoparticle-enhanced polyurethane foams and evaluation of mechanical characteristics," *Composites Part B: Engineering*, vol. 136, pp. 28-38, 2018.
- [6] Y. H. Yu, I. B. Choi, S. H. Nam, and D. G. Lee, "Cryogenic characteristics of chopped glass fiber reinforced polyurethane foam," *Composite Structures*, vol. 107, pp. 476-481, 2014.
- [7] M. Thirumal, D. Khastgir, N. K. Singha, B. S. Manjunath, and Y. P. Naik, "Effect of expandable graphite on the properties of intumescent flame-retardant polyurethane foam," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 110, no. 5, pp. 2586-2594, 2008.
- [8] S. H. Kim, M. C. Lee, H. D. Kim, H. C. Park, H. M. Jeong, K. S. Yoon, and B. K. Kim, "Nanoclay reinforced rigid polyurethane foams," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 117, no. 4, pp. 1992-1997, 2010.
- [9] R. Gayathri, R. Vasanthakumari, and C. Padmanabhan, "Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 5, pp. 301-308, 2013.
- [10] L. Verdolotti, M. R. Dicaprio, M. Lavorgna, and G. G. Buonocore, "Polyurethane nanocomposite foams: Correlation between nanofillers, porous morphology, and structural and functional properties," *Polyurethane Polymers*, pp. 277-310, 2017.
- [11] S. H. Kim, H. Lim, J. C. Song, and B. K. Kim, "Effect of blowing agent type in rigid polyurethane foam," *Journal of Macromolecular Science, Part A*, vol. 45, no. 4, pp. 323-327, 2008.
- [12] S. Estravís, J. Tirado-Mediavilla, M. Santiago-Calvo M, J. L. Ruiz-Herrero, F. Villafañe, and M. Á. Rodríguez-Pérez, "Rigid polyurethane foams with infused nanoclays: Relationship between cellular structure and thermal conductivity," *European Polymer Journal*, vol. 80, pp. 1-15, 2015.
- [13] M. Santiago-Calvo, V. Blasco, C. Ruiz, R. Paris, and F. Villafane, M. Rodríguez-Pérez "Synthesis, characterization and physical properties of rigid polyurethane foams prepared with poly (propylene oxide) polyols containing graphene oxide," *European Polymer Journal*, vol. 97, pp. 230-240, 2017.
- [14] Y. Wang, J. Wu, Z. Xue, and Z. Liu, "Thermal conductivity of HFC-245fa from (243 to 413) K," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 51, no. 4, pp. 1424-1428, 2006.