

복합 단열 매트 보강 폴리우레탄 폼의 열적 성능 및 내충격성 평가

황병관* · 배진호* · 이제명*†

Thermal Performance and Impact Resistance Evaluations of Composite Insulation Mat Reinforced Polyurethane Foam

Byeong-Kwan Hwang*, Jin-Ho Bae*, Jae-Myung Lee*†

ABSTRACT: In the present study, composite insulation mat was reinforced over polyurethane foam (PUF) to improve the thermal performance and impact resistance of the PUF applied to the liquefied natural gas carrier insulation system. The composite insulation mat used Kevlar, aerogel, and cryogel composite mat that can be applied in a cryogenic environment. The thermal conductivity was measured at 20°C to investigate the thermal performance, and the drop impact test was carried out under impact energy of 30 J at 20°C, -163°C to investigate the impact resistance. The measured thermal performance was compared with neat PUF through effective thermal conductivity theoretical value. The shock resistance was evaluated of contact force, contact time, and absorb energy. In experimental results, cryogel composite mat was the best performance in terms of thermal performance, and aerogel composite mat was the best performance in terms of impact resistance.

초 록: 본 연구에서는 액화 천연 가스 운반선 단열 시스템에 적용되는 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam, PUF)의 열적 성능 및 내충격성을 향상시키기 위한 목적으로, PUF에 복합 단열 매트를 보강하였다. 복합 단열 매트는 극저온 환경에서 운용이 가능한 케블라, 에어로겔, 그리고 크라이오겔 매트를 선정하였다. 열적 성능은 20°C의 상온에서 열전도율을 측정하였으며, 내충격성은 20°C의 상온 및 -163°C의 극저온에서 30 J의 충격에너지로 낙하 충격 시험을 수행하여 측정하였다. 측정된 열전도율은 유효 열전도율 이론 값을 통해 보강되지 않은 PUF와 비교하였으며, 내충격성은 접촉력, 접촉 시간, 그리고 흡수 에너지를 평가하였다. 실험 결과 크라이오겔 복합 매트 보강 시 가장 우수한 열적 성능을 나타냈으며, 내충격성은 에어로겔 복합 매트 보강 시 가장 우수하게 나타났다.

Key Words: 열전도율(Thermal conductivity), 복합 단열 매트(Composite insulation mat), 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam), 동적 압축 시험(Dynamic compression test)

1. 서 론

유해물질 배출량을 줄이기 위한 에너지 전환 정책이 추진되면서, 천연가스와 같은 친환경 에너지의 수요가 증가하고 있다. 천연가스 에너지는 대부분 상온에서 기체 상태로 존재하기 때문에 저장 및 수송 효율을 증가시키기 위하

여 압축, 액화 등의 방법을 이용하며, 액화를 통한 저장 방법은 단위 부피당 가장 높은 저장 및 수송 효율을 지니고 있다. 천연가스를 액화시키기 위한 온도는 -163°C이며, 액화된 천연가스를 운반하기 위해서는 운반선 화물창, 저장 탱크, 파이프 등과 같은 운반 및 저장 장비 내부에 극저온 환경을 유지시키기 위한 단열시스템이 필수적으로 구축되어야 한

Received 15 February 2019, received in revised form 29 October 2019, accepted 30 October 2019

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

*†Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Corresponding author (E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr)

다. 이러한 극저온 단열시스템은 극저온용 금속 및 복합 단열 재료 등이 다층으로 이루어진 구조로 되어 있으며, 내부 열 손실 및 외부 열 침입을 방지하고 슬로싱 하중, 열 하중, 탱크 내부 압력 등과 같은 다양한 하중에서의 안정성 확보가 핵심 기술이다[1,2].

극저온 단열시스템의 열적 성능, 구조 안정성 등을 확보하기 위한 방안으로 복합 단열 재료 자체의 개발, 이중 단열 재료를 첨가하는 방법 등이 있으며, 이 중 우수한 열적 성능과 복원력을 가진 복합 단열 매트를 첨가하는 방법은 기존 단열시스템의 열적 성능 향상 및 단열시스템에 가해지는 하중을 완충시키는 효과를 얻을 수 있다. Yan[3]는 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam, PUF)에 케블라 및 저 용점 폴리에스테르(Low melting point polyester, LMPET) 매트, 유리섬유를 보강한 하이브리드 복합 재료를 샌드위치 구조로 제작하여 정적 및 동적 성능을 비교 분석하였다. 그 결과, 제작된 샌드위치 복합재가 기존 PUF 복합 재료보다 하중에 대한 우수한 저항성을 보인다는 것을 보고하였다. Berge[4]는 PUF의 에어로겔 복합 매트 및 진공 단열재 패널을 보강한 단열재의 유효 열전도와 열 손실 감소 성능을 분석하였으며, 에어로겔 복합 매트 및 진공 단열재 패널을 보강한 단열재는 기존 PUF보다 열적 성능이 우수하다는 것을 보고하였다. Bardy[5]는 선택틱 폼의 에어로겔 복합 매트를 보강한 하이브리드 단열재와 기존 선택틱 폼에 대하여 연속 압력 사이클 동안의 잔류 압축 변형을 및 열 저항을 비교 분석하였으며, 에어로겔 복합 매트가 보강된 단열재가 기존 선택틱 폼보다 우수한 열 저항성을 가지고 있다는 것을 보고하였다. Smith[6]는 TEEK Polyimide 폼과 에어로겔 비즈 및 에어로겔 복합 매트를 보강한 TEEK Polyimide 폼에 대한 열적 및 동적 압축 성능을 비교 분석하였으며, 에어로겔 복합 매트 보강 시 열적 성능과 진동 감쇠 성질을 향상시킨다는 것을 보고하였다.

본 연구에서는 상기 전술한 내용에 기인하여, 액화천연가스 단열시스템의 열적 성능 및 내충격성 향상을 목적으로, 액화천연가스 단열시스템에 적용되는 PUF에 대하여 복합 단열 매트를 보강하였다. 복합 단열 매트는 극저온 환경에서 운용이 가능한 케블라, 에어로겔, 크라이오겔 매트를 선정하였다. 열적 성능 평가를 위해 열전도율을 유효 열전도율 이론 값과 비교 분석하였으며, 내충격성을 평가하기 위해 동적 압축 시험을 수행하였다.

2. 실험 준비

2.1 시험편 제작

본 연구에서는 앞서 전술한 복합 단열 매트를 보강한 PUF의 열적 성능 및 내충격성 평가를 목적으로 시험편을 제작하였다. PUF를 제작하기 위하여 폴리올(Polyol), 이소시아네이트(Isocyanate) 및 발포제(HFC-245fa) 용액을 1000:

Table 1. Specification of composite insulation mat

Materials	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)
Kevlar mat	230	10
Aerogel mat	150	
Cryogel mat	150	

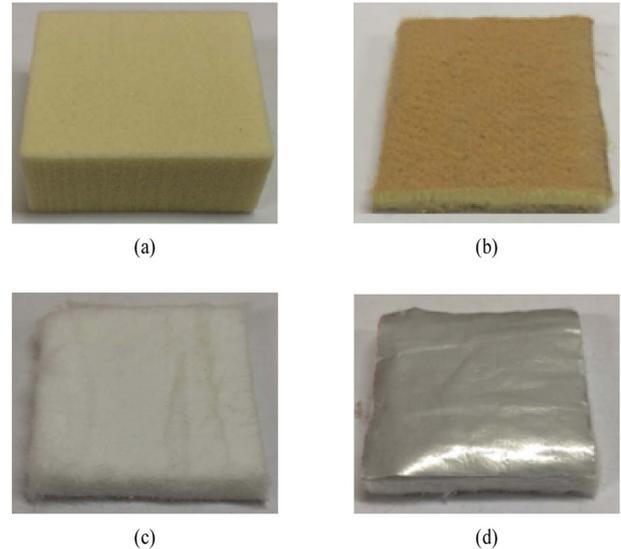


Fig. 1. Photograph of (a) PUF, (b) Kevlar composite mat, (c) Aerogel composite mat, and (d) Cryogel composite mat

1160:60의 비율로 1분간 균일하게 혼합하였으며, 혼합된 용액을 개방형 종이박스에 부은 후, 상온에서 24시간의 자연 발포를 시켰다. 가공된 PUF의 열전도율 및 동적 압축 시험을 수행하기 위하여 각각 300(B) × 300(W) × 20(H) mm³와 50(B) × 50(W) × 20(H) mm³의 크기로 가공하였으며, 겉보기 밀도는 150 kg/m³이다. PUF에 복합 단열 매트를 보강하기 위해 에폭시 접착제(Araldite® 2011)를 이용하였다. Table 1은 각각의 복합 단열 매트에 대한 재료 물성치를 나타내었으며, Fig. 1은 제작된 PUF와 각각의 복합 단열 매트에 대한 측면부를 촬영한 사진을 나타내었다.

2.2 실험 장비

본 연구에서 PUF 제작 시 균일한 혼합을 위해 호모제나 이저를 이용하였으며, 제작된 PUF와 복합 단열 매트가 보강된 PUF에 대한 열전도율 측정은 KS L 9016(보온재의 열전도율 측정 방법)에 따라 평판열류계법(Heat flow meter, HFM)을 적용한 HFM436 lambda 장비를 이용하였다. 열전도율 측정은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 시험편을 삽입하여 상판 부와 하판 부의 온도 차이를 통해 측정하였으며, 측정 장비의 온도 범위는 -20°C~100°C이고 열전도율 측정 범위는 0.002~2 W/mK까지 가능하다. 또한, 열전도율 측정을 위한 시험편의 크기는 가로, 세로 각각 300 mm, 300 mm 및 두께는 1~200 mm이다. 다음으로, 내충격성은 Instron사의

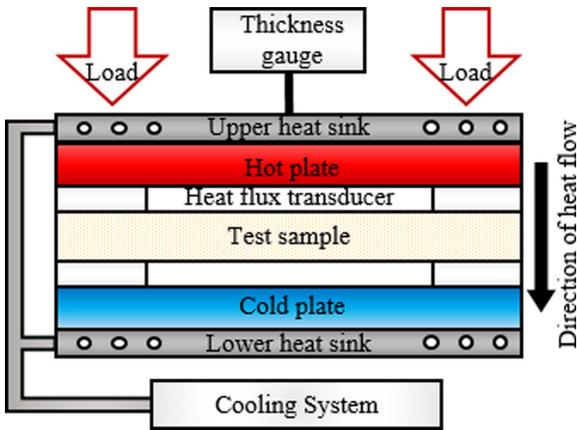


Fig. 2. Measuring principle of heat flow meter

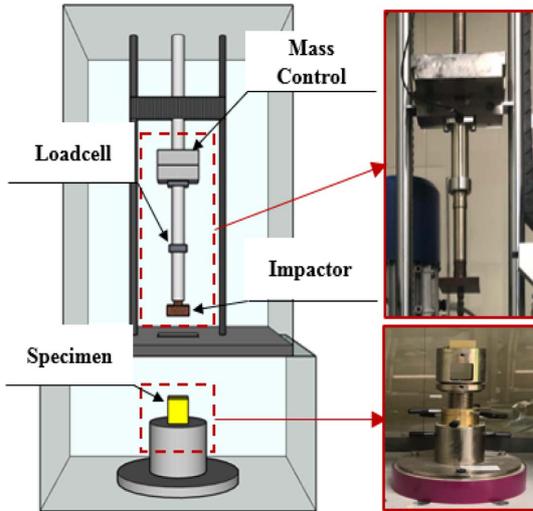


Fig. 3. Schematic design of impact test machine

Ceast 9340 Drop Tower Impact System을 이용하여 동적 압축 시험을 수행하였으며, 시편 윗면을 전체 덮을 수 있는 30 × 30 mm²의 크기로 제작된 임팩터를 이용하여 충격을 가했다. 온도의 영향을 분석하기 위해서 저온 및 극저온 환경을 구축할 수 있는 극저온 챔버를 이용하였으며, 자동 온도 조절 장치를 이용하여 챔버 내부의 액체 질소를 주입하는 방식으로 저온 환경을 유지하였다. Fig. 3는 본 논문에서 이용된 동적 압축 시험 장비를 도식적으로 나타내었다.

2.3 실험 시나리오

본 연구에서 온도와 복합 단열 매트를 변수로 선정하여 실험을 수행하였다. 먼저, PUF 및 복합 단열 매트가 보강된 PUF간에 열적 성능을 비교하기 위해 20°C의 상온에 대한 열전도율을 측정하였으며, KS A 0006(시험 장소의 표준 상태)에 따라 온도 20 ± 5°C, 상대 습도 50 ± 5%의 환경에서 수행하였다. 다음으로, 내충격성 평가를 위한 동적 압축 시험은 극저온 환경의 액화천연가스 온도를 고려하여 상온과

Table 2. Experimental scenario

Materials	Thermal performance		Impact resistance
	Temp. (°C)	Temp. (°C)	Impact energy (J)
PUF	20	20	30
Kevlar mat+PUF			
Aerogel mat+PUF		-163	
Cryogel mat+PUF			

-163°C의 극저온 온도에서 실험을 수행하였으며, 극단적인 환경을 모사하기 위해 낙하 질량 8.475 kg 및 낙하 속도 2.66 m/s로 30 J의 충격에너지를 채택하였다. 극저온 동적 압축 시험은 시험편의 내부 열 평형 상태를 고려하여 챔버 내에서 2시간의 예비 냉각 후 수행하였으며, 챔버에서 꺼낸 시편의 열 교환을 최소화하기 위해 5초 이내의 시험을 수행하였다[7]. 모든 시험에 대하여 PUF는 실제 하중을 받게 되는 방향인 발포 방향만을 고려하여 수행하였으며, 실험 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 시나리오당 5회의 반복 실험에서 평균값과 가장 가까운 3개의 데이터 평균값을 결과값으로 채택하였다. 열적 성능 및 내충격성을 분석하기 위한 시험 시나리오를 Table 2에 나타내었다.

3. 열전도 실험 결과

3.1 PUF 및 복합 단열 매트

본 논문에서 PUF의 복합 단열 매트를 보강하기 이전, PUF 및 복합 단열 매트의 열적 성능을 비교하기 위해 열전도율을 측정하였다. 열전도율은 열 용량, 밀도, 그리고 열 확산율에 의해 결정되므로 [8], 각기 다른 밀도에 대한 PUF 및 복합 단열 매트를 비교하기 위하여 밀도대비 열전도율을 Table 3의 나타내었다. 열전도율 측정 시 PUF 및 복합 단열 매트의 동일한 밀도를 확보하기 위해 겉보기 밀도가 오차 범위 ±2 kg/m³ 내의 시험편만을 사용하였다.

3.2 복합 단열 매트 보강 후 PUF

상기 기술한 바와 같이, 복합 단열 매트가 보강된 PUF의 열적 성능을 분석하기 위하여 열전도율을 측정하였으며,

Table 3. Thermal performance of PUF and composite insulation mat

Materials	Density (kg/m ³)	Specific Thermal conductivity ((W/m·K)/(kg/m ³))
PUF	150	0.00019574
Kevlar mat+PUF	236	0.000294483
Aerogel mat+PUF	154.5	0.000121456
Cryogel mat+PUF	154	0.000119656

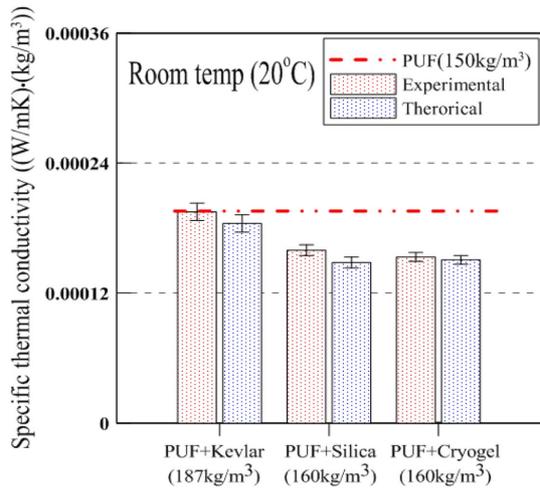


Fig. 4. Thermal conductivity of PUF and PUF with composite insulation mat

이전 측정된 PUF의 열전도율 실험 결과를 기준으로 비교 분석하였다. 또한, 복합 단열 매트 보강 시 발생하는 접촉 열 저항을 분석하기 위하여, 아래의 접촉 열 저항을 무시한 유효 열전도율 이론식을 이용하였다[9].

$$k_{eff} = \frac{l_{total}}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1)$$

여기서, k_{eff} 는 열전도율 이론 값, l_{total} 는 시편 전체 길이, R_1 는 PUF의 열 저항 값, R_2 는 복합 단열 매트 열 저항 값, R_3 는 접착층의 열 저항 값을 의미한다. PUF 및 복합 단열 매트 열 저항 값은 각각의 길이에 대하여 상기 측정된 열전도율을 나누어 계산하였으며, 접착층은 에폭시가 도포된 0.3 mm의 두께에 0.22 W/m·K의 열전도율을 나누어 계산하였다. Fig. 4는 PUF 및 복합 단열 매트 보강 PUF의 밀도 대비 열전도율 측정 및 이론 값을 나타내었다.

보강되지 않은 PUF를 기준으로 복합 단열 매트 보강된 PUF의 열적 성능 측정 결과는 케블라 복합 매트 경우, 밀도대비 열전도율은 유사하게 예측되었으며, 열전도율의 값은 25.2% 높게 예측되었다. 에어로겔 매트 경우에는 밀도대비 열전도율은 19.1% 감소하였으며, 열전도율의 값은 13.1% 감소하였다. 크라이오겔 복합 매트 경우에는 밀도대비 열전도율은 22.1% 감소하였으며, 열전도율의 값은 16.4% 감소하여 가장 우수한 열적 성능을 확보하였다.

밀도대비 열전도율 이론 값에 대한 측정값의 결과를 보면, 모든 복합 단열 매트에서 측정값이 이론 값보다 증가하는 경향이 있었으며, 이는 PUF, 에폭시, 그리고 복합 단열 매트 사이의 접촉 열 저항으로 인해 열전도율이 증가한 것으로 판단된다[10]. 각각의 시험편에 대한 접촉 열 저항의 영향을 보면, 케블라 복합 매트 경우 이론 값 대비 열전도도 측정값은 6.3% 증가하였으며, 에어로겔 매트 경우에는 5.6% 증가하였다. 크라이오겔 복합 매트 경우에는

3.4% 증가하였으며, 접촉 열 저항의 영향이 가장 적게 나타났다. 이는 에폭시 접착층과 접촉되는 크라이오겔 복합 매트 알루미늄 장벽 라미네이트가 섬유가 접촉되는 케블라 및 에어로겔 매트보다 접촉 열 저항을 감소시키는 것으로 판단된다.

4. 동적 압축 실험 결과

4.1 접촉력 및 접촉 시간

PUF와 복합 단열 매트 보강된 PUF의 내충격성을 평가하기 위하여 온도를 변수로 접촉력 및 접촉 시간, 흡수 에너지를 분석하였으며, 반복 실험에서 평균값과 가장 유사한 데이터를 대푯값으로 설정하여 온도에 따른 접촉력-시간(Contact force-time curve) 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 상온과 극저온에서의 접촉력-시간 곡선을 거시적으로

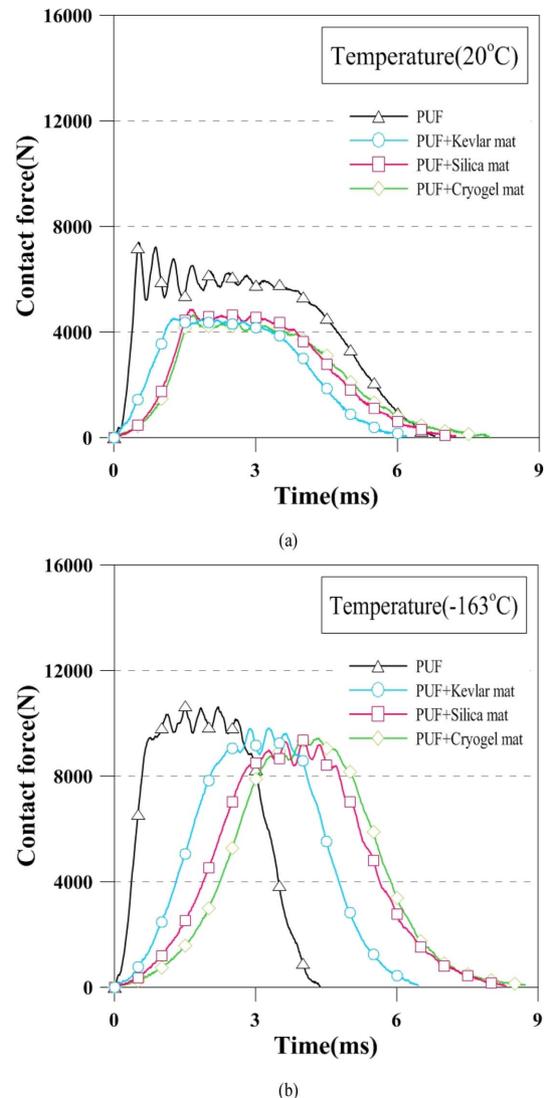


Fig. 5. Impact force-time curve of the (a) 20°C, (b) -163°C at impact energy 30 J

분석하면, 모든 곡선에서 충격에너지를 받는 시험편은 접촉력이 시간에 선형적으로 비례하여 초기 최대 접촉력에 도달하였다. 이후 시험편의 파손이 발생함과 동시에 접촉력이 일정하게 유지되는 평탄 부 구간이 발생하였으며, 마지막으로 시험편의 변형과 임팩터의 마찰로 인한 접촉력이 감소하는 구간이 발생하였다. 온도의 영향은 극저온에서 PUF가 취성화되어 모든 곡선에서 강성이 증가함에 따라 충격에너지에 대한 접촉력이 증가하였으며, 복합 단열매트를 보강한 PUF의 접촉 시간이 증가하는 경향이 있었다. 일반적으로 우수한 완충 재료는 충격에너지에 대한 접촉력을 감소시킬수록, 그리고 전체 충격이 가해지는 접촉 시간을 증가시킬수록 에너지 전달 속도가 감소됨에 따라 더 많은 충격에너지를 소산시킬 수 있다[11].

Fig. 5의 PUF 및 복합 단열매트를 보강한 PUF의 동적 압축 시험을 보면, 상온 시험 결과 복합 단열매트를 보강한 모든 시험편에서 접촉력은 보강되지 않은 PUF보다 2.5 kN 이상 감소하였으며, 접촉 시간은 케블라 복합매트를 보강하는 경우는 오히려 0.5 ms 감소하였고 에어로겔 및 크라이오겔 복합매트를 보강하는 경우에는 0.5 ms 이상 증가하였다. 극저온 시험 결과에서는 복합 단열매트를 보강한 모든 시험편에서 보강되지 않은 PUF보다 접촉력은 1kN 이상 감소하였으며, 에어로겔 및 크라이오겔 복합매트 보강하는 방법이 가장 많은 하중을 감소시켰다. 접촉 시간은 복합 단열매트를 보강한 모든 시험편에서 2 ms 이상 증가하였으며, 에어로겔 및 크라이오겔 복합매트 보강하는 방법이 접촉 시간을 가장 크게 증가시켰다.

PUF 및 복합 단열매트를 보강한 PUF의 종합적인 거동을 보면, 극저온에서 PUF는 취성화되어 강성이 증가하기 때문에 상온대비 접촉력이 증가하고 접촉 시간은 감소하였으나, 복합 단열매트 보강 시 접촉 시간은 증가하였다. 또한, 복합 단열매트 보강의 영향은 상온과 극저온 모두에서 PUF에서 발생하는 충격에너지에 대한 접촉력을 감소시켰으며, 접촉 시간을 증가시키는 경향이 있었다. 이에 따라 충격에너지에서의 복합 단열매트 보강은 상온과 극저온에서 보강되지 않은 PUF보다 내충격성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 온도에 따른 복합 단열매트 보강의 영향은 상온에서 모든 복합 단열매트가 유사한 내충격성을 나타내었으며, 극저온에서는 에어로겔 및 크라이오겔 복합매트를 보강하는 방법이 가장 우수한 내충격성을 나타내었다. 이는 에어로겔 및 크라이오겔 복합매트가 케블라 복합매트보다 극저온 환경에서 우수한 저온 유연성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

4.2 흡수에너지

흡수에너지는 충격에너지가 가해지는 시험편의 파손에 대한 정량적인 데이터를 나타내며, 흡수에너지가 높을수록 더 많은 파손이 발생하게 된다[12]. 일반적인 흡수에너지

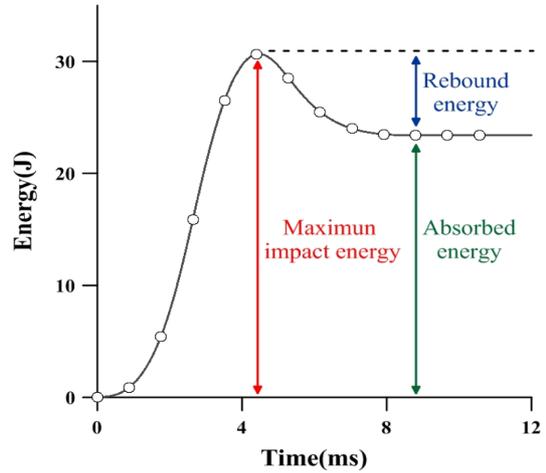


Fig. 6. Typical energy-time curve of impact test

Table 4. Absorbed energy and strain under impact energy of 30 J

Materials	Temp. (°C)	Absorbed energy (J)	Strain (%)
PUF	20	29.08	23.09
	-163	27.47	15.77
Kevlar mat+PUF	20	29.71	28.12
	-163	26.45	15.36
Aerogel mat+PUF	20	28.96	28.74
	-163	23.42	13.82
Cryogel mat+PUF	20	29.09	30.01
	-163	24.39	15.51

를 Fig. 6에 시간-에너지 곡선(Time-energy curve)으로 나타내었으며, 곡선의 최댓값은 시험편에 가해지는 충격에너지로 정의된다. 최대 충격에너지 이후 평탄 부분의 에너지는 흡수에너지로 정의되며, 충격에너지와 흡수에너지의 차이는 임팩터에 반동되는 리바운드 에너지로 정의된다[13].

Fig. 6를 바탕으로 Table 4의 상온과 극저온에서 PUF 및 복합 단열매트가 보강된 PUF의 충격에너지에 대한 흡수에너지 및 변형률을 나타내었다. 본 연구에서 수행된 충격에너지에 대해 상온 실험은 모든 시험편에서 변형이 크게 발생함에 따라 복합 단열매트 보강과 상관없이 흡수에너지와 충격에너지는 유사하게 나타났으며, 이에 따라 리바운드 에너지가 발생하지 않았다. 극저온 실험에서는 모든 시험편에서 취성화되어 강성의 증가와 함께 변형이 감소하여 내충격성이 증가합니다. 동일한 충격에너지에서의 내충격성 증가는 시험의 전해지는 하중을 감소시켜 반동에너지가 증가됨에 따라 흡수에너지는 감소된다[11]. 극저온에서의 실험 결과, 에어로겔, 크라이오겔, 케블라 복합매트 보강 순으로 보강되지 않은 PUF보다 흡수에너지는 크게 감소하였다. 복합 단열매트 보강에 따른 흡수에너지의 감

소는 복합 단열 매트가 극저온에서도 유연성과 복원력을 유지함에 따라 충격에너지를 크게 소산시키는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 극저온 액화천연가스 단열시스템의 열적 성능 및 내충격성 향상을 목적으로, 액화천연가스 단열시스템에 적용되는 단열재인 PUF에 대해 케블라, 에어로겔, 그리고 크라이오겔 복합 매트를 보강하였다. 열적 성능의 변화를 확인하기 위해서 상온에서의 열전도율을 측정하였으며, 내충격성을 분석하기 위해 상온과 극저온에서 동적 압축 시험을 수행하였다. 본 연구에서의 시험 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) 보강되지 않은 PUF를 기준으로 복합 단열 매트 보강된 PUF의 열적 성능을 비교한 결과, 에어로겔 및 크라이오겔 복합 매트 보강 시 열적 성능이 향상되었으며, 이 중 크라이오겔 복합 매트 보강은 케블라 및 에어로겔 매트의 보강보다 접촉 열 저항이 감소함에 따라 가장 우수한 열적 성능을 보였다.

(2) 상온 및 극저온 환경에서의 동적 압축 시험에 대한 복합 단열 매트 보강은 보강되지 않은 PUF보다 안정적인 충격 거동을 나타내었으며, 상온에서 세 가지 복합 단열 매트 모두 유사하게 나타났다. 극저온 환경에서는 에어로겔 및 크라이오겔 복합 매트를 보강하는 방법이 케블라 복합 매트를 보강하는 방법보다 우수하게 나타났으며, 이는 에어로겔 및 크라이오겔 복합 매트가 케블라 복합 매트보다 우수한 극저온 유연성을 가지고 있는 것으로 사료된다.

(3) 30 J의 충격에너지에 대한 흡수에너지는 변형이 크게 발생하는 상온 환경에서는 복합 단열 매트 보강에 따른 영향은 크게 발생하지 않았지만, 변형이 비교적 적게 발생하는 극저온 환경에서는 복합 단열 매트 보강 시 충격에너지를 크게 소산시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

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. Bae, J.H., Oh, J.H., Byun, J.S., and Lee, J.M., "Experimental Study of Thermal Conductivity for Glass Wool by Inserted Dis-

similar Materials based on Structural Composites," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 55, No. 5, 2018, pp. 448-455.

- Kim, J.H., Park, D.H., Choi, S.W., and Lee, J.M., "Cryogenic Mechanical Characteristics of Laminated Plywood for LNG Carrier Insulation System," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 3, 2017, pp. 241-247.
- Yan, R., Wang, R., Lou, C.W., Huang, S.Y., and Lin, J.H., "Quasi-static and Dynamic Mechanical Responses of Hybrid Laminated Composites Based on High-density Flexible Polyurethane Foam," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 83, 2015, pp. 253-263.
- Berge, A., and Adl-Zarrabi, B., "Using High Performance Insulation in District Heating Pipes," *In 13th International Symposium on District Heating and Cooling*, Copenhagen, Denmark, Sep. 2012, pp. 156-162.
- Bardy, E., Mollendorf, J., and Pendergast, D., "Thermal Resistance and Compressive Strain of underWater Aerogel-syntactic Foam Hybrid Insulation at Atmospheric and Elevated Hydrostatic Pressure," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 39, No. 9, 2006, pp. 1908-1918.
- Smith, T.M., Williams, M.K., Fesmire, J.E., Sass, J.P., and Weiser, E.S., "Fire and Engineering Properties of Polyimide-aerogel Hybrid Foam Composites for Advanced Applications," *In ACS Symposium Series*, Vol. 1013, 2009, pp. 148-173.
- McGee, S.D., Batt, G.S., Gibert, J.M., and Darby, D.O., "Predicting the Effect of Temperature on the Shock Absorption Properties of Polyethylene Foam," *Packaging Technology and Science*, Vol. 30, No. 8, 2017, pp. 477-494.
- Kim, J.H., Jeong, E., and Lee, Y.S., "Preparation and characterization of graphite foams," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 32, 2015, pp. 21-33.
- Quintana, J.M., and Mower, T.M., "Thermomechanical Behavior of Sandwich Panels with Graphitic-foam Cores," *Materials & Design*, Vol. 135, 2017, pp. 411-422.
- De Jaeger, P., T'Joel, C., Huisseune, H., Ameel, B., De Schampheleire, S., and De Paepe, M., "Assessing the Influence of Four Bonding Methods on the Thermal Contact Resistance of Open-cell Aluminum Foam," *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 55, No. 21-22, 2012, pp. 6200-6210.
- Zhou, L., Zeng, J., Jiang, L., and Hu, H., "Low-velocity Impact Properties of 3D Auxetic Textile Composite," *Journal of Materials Science*, Vol. 53, No. 5, 2018, pp. 3899-3914.
- Mozafari, H., Khatami, S., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., and Guglielmino, E., "Finite Element Analysis of Foam-filled Honeycomb Structures under Impact Loading and Crashworthiness Design," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 21 No. 2, 2016, pp. 148-160.
- Gideon, R.K., Hu, H., Wambua, P., and Gu, B., "Characterizations of Basalt Unsaturated Polyester Laminates under Static Three-point Bending and Low-velocity Impact Loadings," *Polymer Composites*, Vol. 35, No. 11, 2014, pp. 2203-2213.