

# 폴리머 폼의 선박 및 해양구조물 적용을 위한 극저온 기계적 거동 특성 분석

박성보·김정현·이제명<sup>†</sup>  
부산대학교 조선해양공학과

## Comparative Study on Mechanical Behavior of Low Temperature Characteristics of Polymeric Foams for Ships and Offshore Structures

Seong-Bo Park · Jeong-Hyeon Kim · Jae-Myung Lee<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

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.

Glass-reinforced polyurethane foam (R-PUF) is widely used as the primary and secondary insulation of Mark-III type liquefied natural gas (LNG) cargo system. And, polyurethane foam (PUF) and polyisocyanurate foam (PIR) are often used for insulation of onshore structures or LNG storage and pipeline system. These polymeric foam materials are known for the characteristics that mechanical properties are dependent on strain rate and temperature. In this study, compression tests for R-PUF, PIR, and PUF were carried out for the estimation of mechanical behaviors under the cryogenic environment. The range of thermal condition was from room temperature to 110K and strain rates were  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  and  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . The test results were analyzed based on the conditions of strain-rate and temperature.

**Keywords** : Glass-reinforced polyurethane foam(R-PUF, 유리섬유 강화 폴리우레탄 폼), Polyisocyanurate foam(PIR, 폴리이소시아누레이트 폼), Polyurethane foam(PUF, 폴리우레탄 폼), Cryogenic compression test(극저온 압축 실험)

### 1. 서론

최근 선진국들을 중심으로 대기오염의 주범인 이산화탄소 배출제한 움직임과 중국, 인도 등의 BICs 국가의 산업 발전이 맞물려 천연가스의 사용이 급속도로 증가하고 있는 추세이다. 또한 최근 셰일가스의 개발에 힘입어 천연가스의 가격이 안정화되고 있어, 향후 이러한 추세는 지속될 전망이며, 이에 따라, 천연가스의 저장 및 이송에 관련된 제품의 수요가 크게 증가하고 있다. 천연가스는 기체 상태에서 운반하게 되면 큰 부피를 차지하게 되어 그 효율이 떨어지므로 액화되어 저장 및 운송되는데, 이를 LNG(Liquefied Natural Gas)라 한다. LNG의 저장 온도는 110K의 극저온 환경이기에 이를 운반하는 LNG 운반선은 BOR(Boil-off Rate)을 최소화하고, 매우 낮은 온도로 인한 선체 구조 부재의 취성화를 막기 위하여 높은 단열성을 가지는 단열재를 필요로 한다.

전 세계적으로 건조되고 있는 LNG선박의 경우 단열시스템(insulation system)의 종류 및 형태에 따라 모스타입(moss type)과 멤브레인타입(membrane type)으로 분류되며, 멤브레인타입

단열시스템은 다시 Mark-III 및 NO96 type으로 나눌 수 있다. 최근 그 수요가 증가하고 있는 Mark-III type의 경우, Fig. 1에서 보는 바와 같이 SUS 304L로 이루어진 1차 방벽(primary barrier) 아래에 열 차단용 목적으로 한 두 개의 층으로 구성된 R-PUF(Reinforced Polyurethane Foam)를 가진다. 단열시스템의 안전설계를 위해, 이들 단열시스템의 주 재료들에 대한 기계적 성능을 평가하는 것이 필요하나 지금까지의 연구는 주로 1차 방벽의 강재에 대해 초점이 맞추어져 있었으며, 단열과 완충 역할을 하는 R-PUF에 대한 연구는 많이 보고되지 않았다.

특히, LNG 선박의 화물창에서 고려해야 하는 주된 하중요소로는, LNG 선박의 6 자유도 운동에 의한 내부 LNG와 LNG 용기 사이에서 발생하는 슬로싱(sloshing) 현상을 들 수 있다. 이러한 슬로싱 하중으로 인해 내부 단열부재는 열 차단 성능뿐만 아니라 구조변형을 방지하고 에너지를 흡수하는 중요한 역할을 수행해야 하며 그 결과, LNG 선박의 화물창에서 주로 하중을 받는 방향인 발포 방향에 대한 압축 성능 평가가 필요하다.

몇몇 연구자들에 의해 섬유(fiber)의 함량, 밀도에 따른 R-PUF의 상온 기계적 거동에 관한 비교 연구가 보고된 바 있다.

Siegmann, et al. (1983)은 PUF(Polyurethane Foam)와 R-PUF의 발포 방향에 대한 상온 인장 및 압축 시험에 대한 연구를 수행하였고, Han, et al. (2010)은 R-PUF의 반복충격시험에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 열 차단 성능이 뛰어난 PUF가 육상 구조물의 단열재로 사용된 이후, PUF의 기계적 성질에 관한 연구도 몇몇 보고된 바 있다. Tu, et al. (2001)은 25.6kg/m<sup>3</sup>의 밀도를 가지는 PUF의 발포 방향과 발포 방향에 수직인 방향에 관한 상온 압축시험을 진행하여 기계적 성능을 비교 분석 하였으며, Sherwood and Frost (1992)에 의해 PUF의 변형률 속도와 밀도 별로 상온 압축 실험을 시행하여 구성방정식(constitutive equation)을 이용한 결과와 비교한 연구 또한 수행 되었다. 하지만, 지금까지의 연구는 상온에서의 고분자 폼(polymeric foam)에 대한 거동평가에 초점을 맞추었으며, 실제로 단열재가 운항 및 적용되는 환경을 고려한 기계적 성능평가는 거의 수행되지 않았다. 다시 말해, 극저온 환경에 대한 기계적 거동에 관한 연구는 매우 부족한 상황이다.

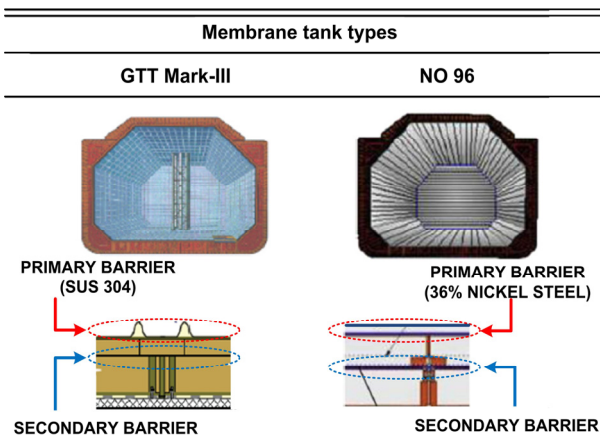


Fig. 1 Membrane tank type LNG carrier insulation system

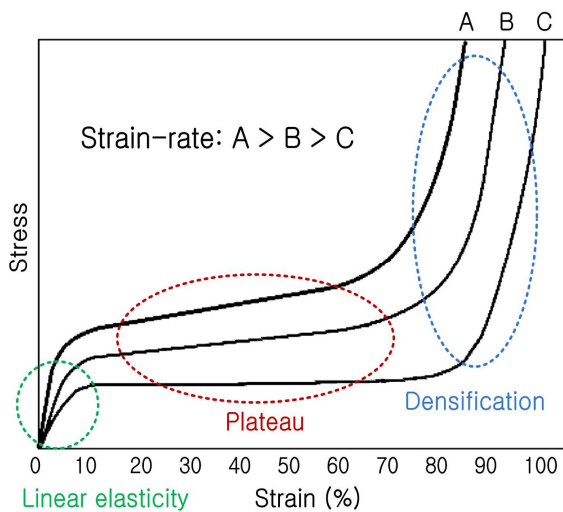


Fig. 2 General compressive stress-strain behavior of polymer foam

Mark-III type의 단열시스템의 경우, 기술 자립도가 심각하게 낮아, 핵심 특허 보유자에게 매년 막대한 특허료를 지급하고 있는 실정하기에, 이러한 불필요한 비용을 줄여서 선가 측면에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 이를 대체할 수 있는 방열시스템을 개발 하는 것이 요구된다. 이를 위해서는 현재 육상에서 사용되고 있는 단열재 중 열 차단 성능이 뛰어나다고 알려진 PIR(Polyisocyanurate Foam)과 PUF에 대한 기계적 성능을 평가하여, LNG 화물창 단열시스템으로의 적용가능성을 평가하는 것이 필요하다. 육상구조물의 단열재로 자주 사용되는 PIR의 경우, 기계적 성질을 평가하고 분석한 연구는 매우 부족한 상황이며, 특히 극저온에서의 기계적 성질을 평가한 연구는 거의 전무한 실정이다. 이러한 PIR의 LNG 운반선 단열재로의 적용가능성 평가를 위해서는 이러한 재료의 극저온 거동을 평가하는 연구가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 극저온 영역에서의 PUF, PIR, R-PUF의 압축 특성을 면밀히 분석함으로써, 이들의 극저온에서의 기계적 성능을 평가하기 위한 실험적 근거를 확보하고자 하였다. 온도 의존적인 단열재의 현상학적 특성을 정확하게 파악할 수 있도록, 296, 223, 163, 110K의 온도에서 재료 단위 압축 실험을 수행 하였으며, 또한 변형률 속도에 의존적인 부재들의 변형률 속도의 변화에 따른 압축 특성을 비교하기 위하여, 변형률 속도를 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> 에서 압축 실험을 수행하였다. 이들 결과를 이용하여 R-PUF의 온도 의존 압축 거동을 평가하고, PUF, PIR의 LNG 운반선의 화물창 단열재로의 적용 가능성 평가에 필요한 실험적 근거를 확보하였다.

## 2. 실험 재료

본 연구에서는 단열 재료로 자주 사용되는 PUF, PIR, R-PUF에 대한 극저온 압축 실험이 수행 되었다. Fig. 2는 일반적인 고분자 폼의 압축 응력-변형률 선도에서 나타나는 일반적인 세 가지 단계를 나타낸다. 첫 번째 구간은 선형탄성(linear elasticity) 구간으로써, 변형이 증가함에 따라 응력도 선형적으로 비례하여 증가하는 구간이며, 힘이 제거되면 원상태로 회복될 수 있다. 이 구간에서는 주로 셀(cell)의 벽(wall)에 굽힘 또는 인장 하중이 가해진다고 알려져 있다. 이러한 선형탄성 구간이 끝나는 항복응력(yield stress) 지점에서부터 평탄부(plateau) 구간이 시작되는데 다른 두 구간에 비교하여 변형률이 증가해도 응력이 거의 증가하지 않는다. 이는 탄성좌굴(elastic buckling), 소성항복(plastic yielding), 혹은 취성압괴(brittle crushing)에 의한 점진적인 셀의 붕괴 때문에 발생한다고 보고되고 있다. 마지막으로 재료의 전체적인 셀 붕괴가 일어나는 고밀도화(densification) 구간이 나타난다 (Gibson, 2005). 또한 많은 종류의 고분자 폼이 변형률 속도에 민감하게 반응한다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 변형률 속도가 증가함에 따라 탄성계수(elastic modulus)와 평탄부 응력은 증가하고, 고밀도화가 시작되는 변형률 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 압축 하중으로 인하여 고분자 폼의 셀 내부의 공

기가 빠져나갈 때 발생하는 점성력(viscous forces)이 변형률 속도가 증가함에 따라 비례해서 증가하기 때문이다 (Ouellet, et al., 2006). Fig. 3에 본 연구에서 이용된 시편의 형상 및 치수를 나타내었다.

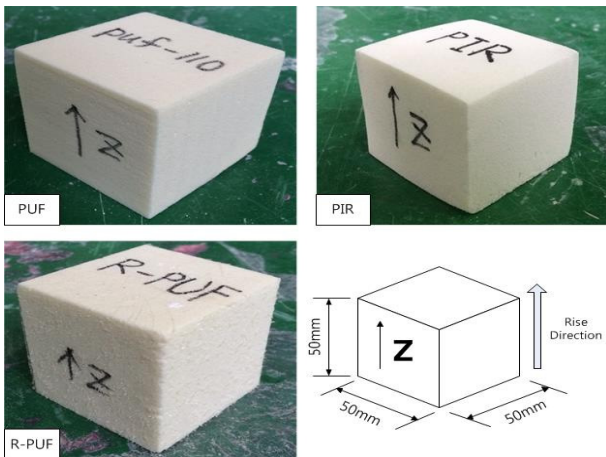


Fig. 3 Compression test specimens

### 2.1 PUF

PUF란, 폴리올(polyol)과 디이소시아네이트(diisocyanate)를 이용하여 제작되는 다공성 물질로써, 이들의 중합반응을 이용해 고분자 폼의 형태로 발포시킨 것을 말한다. 이러한 PUF는 다른 단열재들에 비해 단열 효과가 우수하고, 무게가 가벼우며, 완충성이 좋아 다양한 분야에 사용되고 있다. 본 연구에서는 R-PUF에 유리섬유를 추가하기 전과 비슷한 겉보기 밀도를 설정하기 위해 밀도 110kg/m<sup>3</sup>의 PUF를 실험 재료로 선정하였다.

### 2.2 PIR

PIR이란, PUF와 화학적 조성이 비슷하지만, 3개의 이소시아네이트(isocyanate)가 자체 반응으로 이소시아누레이트 (isocyanurate)를 형성하도록 유도하여, 이를 주 원료로 하여 발포 성형한 제품을 말한다. PIR은 PUF과 비슷한 성질을 가지고 있으나, PUF에 비해 동일 밀도에서 열전도도 계수가 낮은 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 육상 구조물 단열에 일반적으로 사용되는 겉보기 밀도 37kg/m<sup>3</sup>의 PIR을 실험재료로 선정하였다.

### 2.3 R-PUF

R-PUF란 고밀도의 폴리우레탄 원액과 유리섬유를 함께 사용하여 발포시킨 제품으로, 유리섬유를 x-y 평면에 위치시킴으로써, x-와 y-방향의 강성을 강화시킨 대표적인 복합재료로 알려져 있다. 이러한 R-PUF는 훌륭한 기계적 성능과 단열 성능을 가지므로, 현재 Mark-III type의 단열재로 사용되고 있다. 기본이 되는 폴리우레탄 원액의 밀도는 주로 115kg/m<sup>3</sup>인데, 유리섬유의

함유량에 따라 R-PUF 최종 밀도는 다양하게 만들어 진다. 본 연구에서는 115kg/m<sup>3</sup> 밀도를 가지는 폴리우레탄 원액에 유리섬유가 추가되어 최종 133kg/m<sup>3</sup>의 겉보기 밀도를 가지는 R-PUF를 채택하였다.

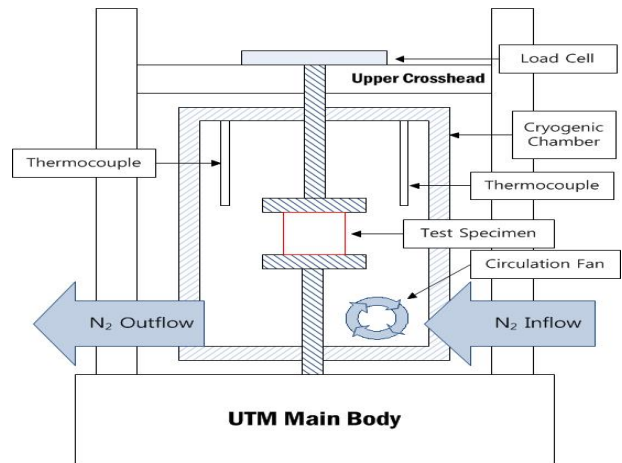


Fig. 4 Schematic of the experimental apparatus

## 3. 실험

### 3.1 실험 장비

본 연구에서는 극저온 환경에서의 시험을 수행하기 위하여, 특수 제작된 형태의 시험 시스템을 사용하였다. 극저온용 챔버가 장착된 만능재료시험기(KSU-5M)를 이용하여 극저온 시험을 수행하였다. 극저온 챔버 내부에 설치되어 있는 세 개의 온도계를 통해 내부 온도를 측정하여 질소 가스의 유동을 제어하는 방법으로 일정한 온도를 유지하는 자동 온도 조절 시스템을 이용하였다. 실험에 사용된 시편은 한국산업규격에 따라 제작 되었으며, 시편 내부의 열 평형 상태를 고려하여 실험 전 2시간의 예냉을 실시하였다 (KS, 2008). Fig. 4에 시험 시 이용된 극저온용 만능재료시험기 및 극저온용 챔버를 도식화하였다.

### 3.2 실험 조건

온도 및 변형률 의존성을 분석하기 위해 Table 1과 같이 시험 시나리오를 설정하였다. 실험 온도는 LNG와 LPG(Liquefied Petroleum Gas)의 저장 온도를 고려하여 상온을 포함한 4개의 실험 온도를 설정하였으며, 변형률 속도의 경우 준 정적 변형률 속도 범위에서 두 개의 변형률 속도를 선정하였다. 실험 결과의 반복성을 확인하기 위하여 조건 별 5회 이상의 실험을 수행하였으며 그 중에서 평균에 가깝다고 판단되는 3개의 데이터를 이용하여 결과값을 도출하였다. Fig. 5는 반복성 검증 결과를 나타내는데, 여기서 R-PUF\_T1, R-PUF\_T2, R-PUF\_T3은 각각 동일한 실험 환경에서 수행한 3 차례의 반복 실험의 결과를 나타낸다. Fig. 5의 그래프에서 볼 수 있듯이 오차가 크게 발생하지 않는

것을 알 수 있다. 총 120회의 실험이 수행되었으며, 각 실험 결과는 10% 이내의 오차를 나타냈다.

Table 1 Conditions for the cryogenic compression test

No.	Temperature	Strain rate
1	296K	$10^{-3} \text{ s}^{-1}$
2		$10^{-4} \text{ s}^{-1}$
3	223K	$10^{-3} \text{ s}^{-1}$
4		$10^{-4} \text{ s}^{-1}$
5	163K	$10^{-3} \text{ s}^{-1}$
6		$10^{-4} \text{ s}^{-1}$
7	110K	$10^{-4} \text{ s}^{-1}$
8		$10^{-2} \text{ s}^{-1}$

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 전반적인 실험결과

전반적인 거동을 살펴보면 296, 223, 163K의 온도 환경에서 뚜렷한 경향성이 관찰되었으나 110K 환경에서는 변형을 0.4 이전까지는 어느 정도 경향을 따른다고 판단할 수 있었지만, 그 이후부터는 편차가 심해짐을 볼 수 있었다. 또한 이러한 고분자 폼은 실험 중 70% 이상까지 변형이 발생하게 되고, 실험 후 이를 상온 환경 하에서 보관 시, 변형이 최대 90%까지 복원되는 현상을 보였다. 실험 온도가 낮아질수록, 이러한 복원된 변형의 양은 커짐을 알 수 있었고, 복원되는 속도 또한 빨라짐을 확인할 수 있었다. 또한 상온에서는 압축 실험 후의 시편의 측면부 벽면에 국부적인 파단이 발생하는 현상이 관찰되지 않았으나, 온도가 낮아짐에 따라, 압축 실험 후의 시편의 측면부 벽면에 국부 파단이 발생한 부분이 점점 많아지고, 시험 후 시편이 작은 외부 충격에도 그 구조가 쉽게 가루 형태로 붕괴됨을 확인할 수 있었다.

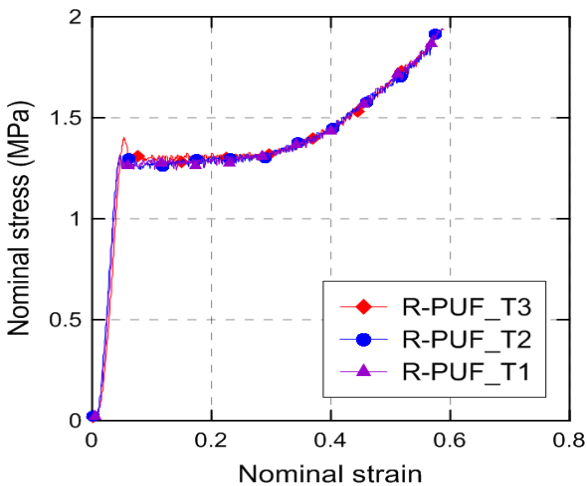


Fig. 5 Stress-strain curve for R-PUF at room temperature and strain rate  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$

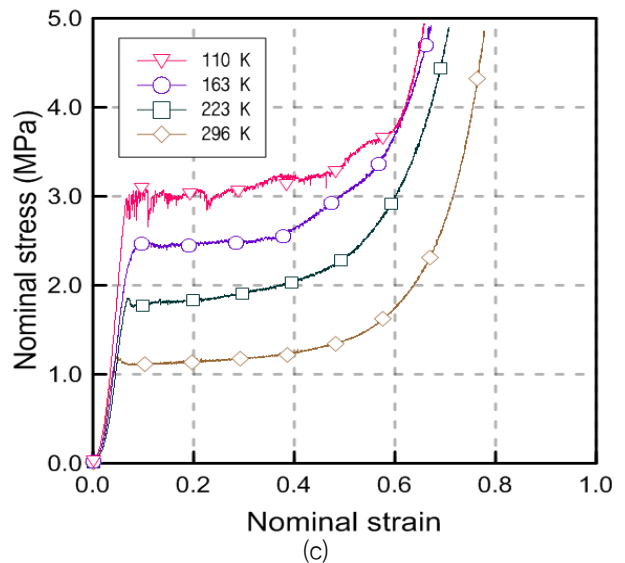
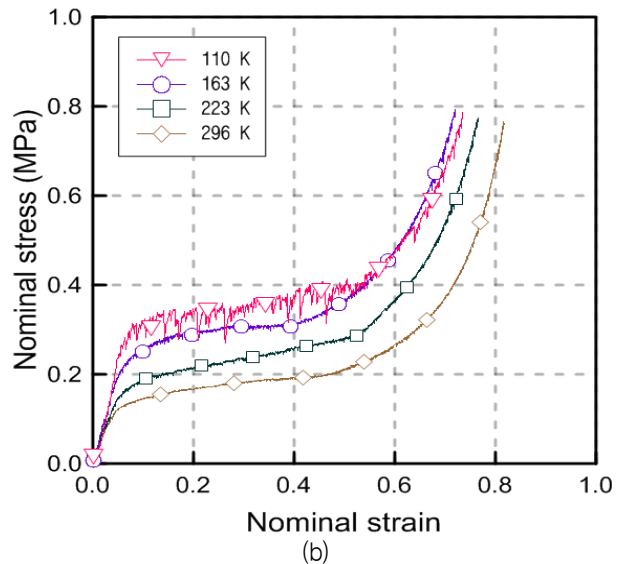
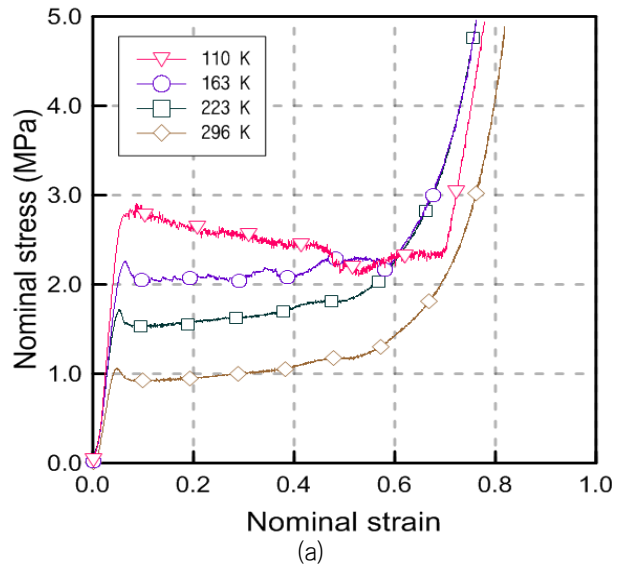
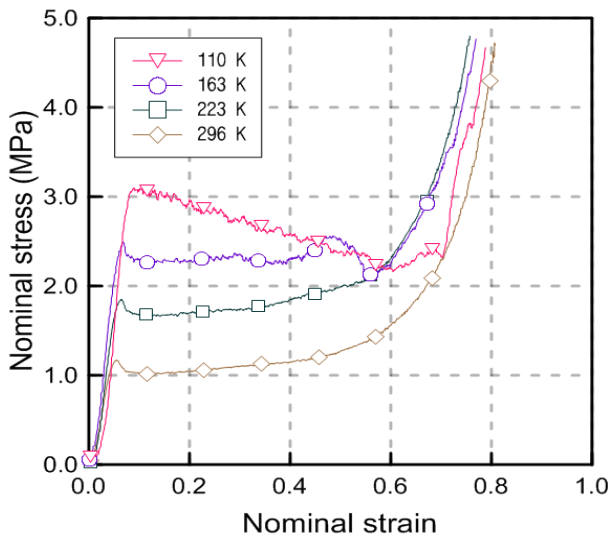
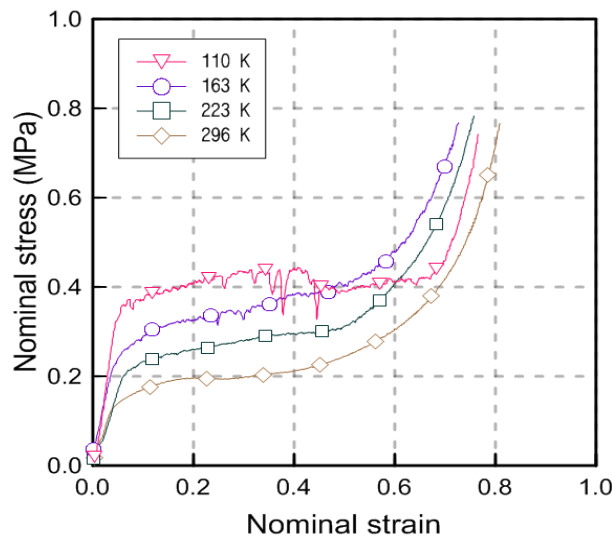


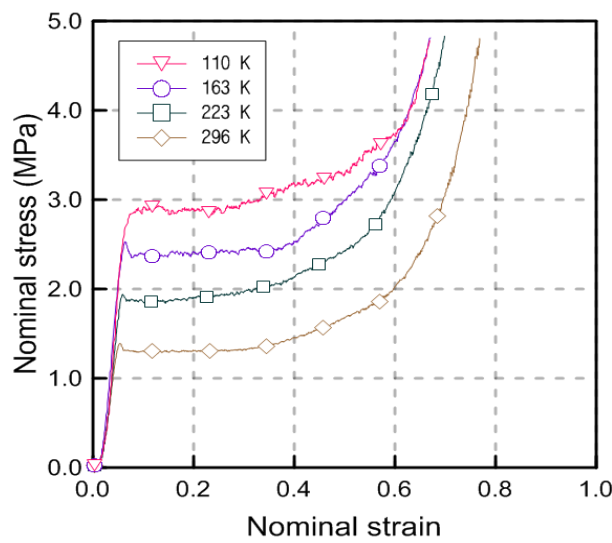
Fig. 6 Temperature dependent stress-strain curves of the (a) PUF, (b) PIR, and (c) R-PUF at strain rate  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$



(a)

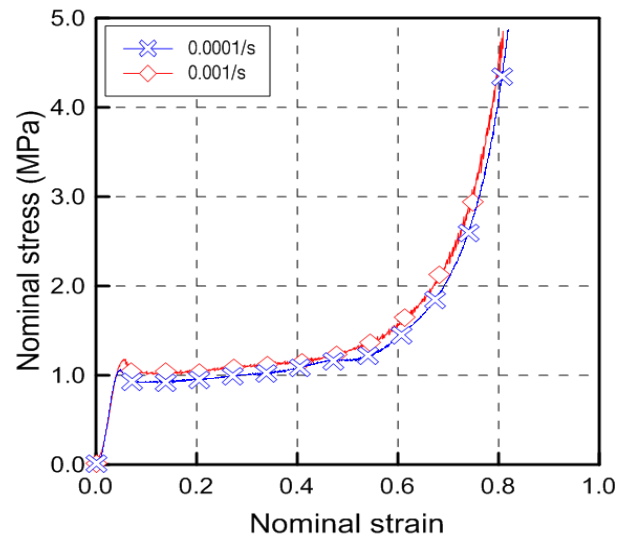


(b)

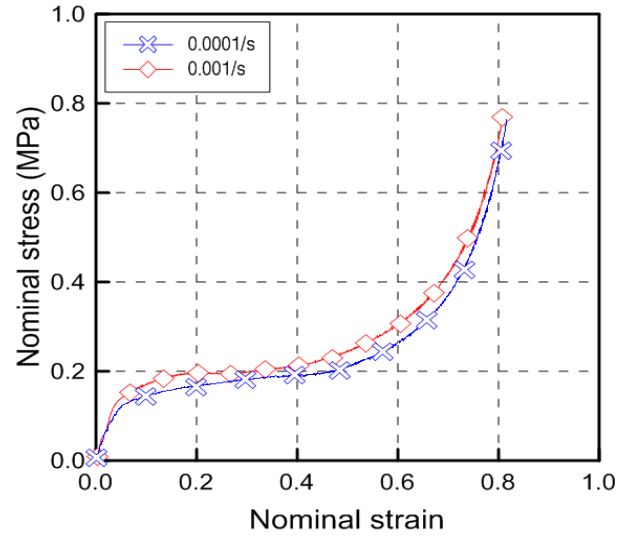


(c)

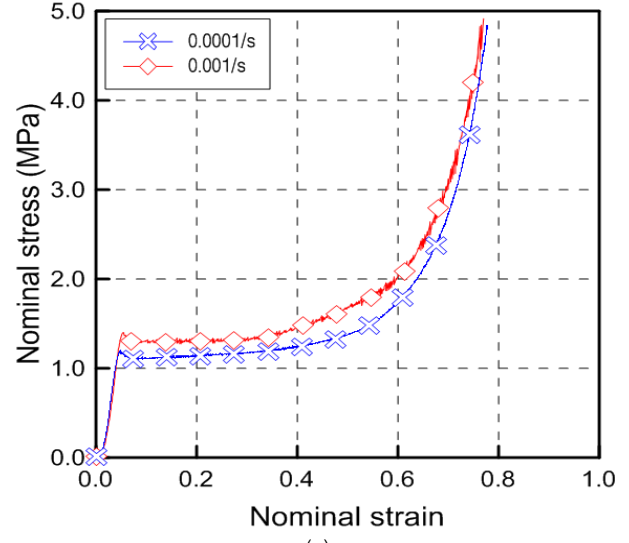
Fig. 7 Temperature dependent stress–strain curve of (a) PUF, (b) PIR, and (c) R-PUF at strain rate  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Strain rate dependent stress–strain curve of (a) PUF, (b) PIR and (c) R-PUF at the temperature of 296K

### 4.2 온도에 따른 응력-변형률 관계 비교

Fig. 6과 Fig. 7은 각 실험 재료의 변형률 속도 별 대표 온도 의존 응력-변형률 관계를 나타낸다. PUF의 경우, 온도가 낮아질수록 압축탄성계수와 항복응력은 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며 온도가 증가할수록 압축탄성계수가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이는 과거 연구에 제시된 온도 별 압축탄성계수의 경향과 유사한 결과이다 (Tragger, 1967). 하지만, 110K에서는 평탄부 구간이 뚜렷하게 나타나지 않았고, 변형률이 증가할수록 오히려 응력이 줄어드는 현상을 보였으며, 이 구간에서, PUF와 상부 혹은 하부 지그가 닿아있는 부분부터 국부 파단이 발생하는 현상을 보였다. 이러한 현상은 극저온 환경에서 PUF의 셀 조직이 취성화되어 강도가 증가함으로 인해, 하중이 가해지는 상부 혹은 하부 지그와 직접 접촉해 있는 부분이 집중하중을 받게 되어 해당 부분의 셀 조직이 파괴되며 변형이 진행되고, 이로 인해 하중을 견딜 수 있는 영역이 줄어들기 때문인 것으로 사료된다. 마지막으로 PUF의 296K(상온)환경에서의 응력-변형률 관계는 과거 연구에서 제시된 압축 응력-변형률 관계와 유사한 결과를 보인다 (Huber & Gibson, 1988).

이에 반해 PIR은 296, 223K에서는 경향성을 보이며 증가하였고, 110 K에서는 Fig. 6의 (b)와 Fig. 7의 (b)의 응력이 급격하게 감소하는 부분에서 국부 파단이 드물게 발생하였지만, 변형률의 값이 0.4에 도달하기 전까지는 응력이 다른 온도에서와 비교하여 어느 정도 경향성 있게 증가하다가 그 이후 구간에서 응력이 불규칙해지는 경향을 보였다. 하지만 PUF와 마찬가지로 온도가 낮아질수록 압축탄성계수는 증가함을 확인할 수 있었다.

R-PUF는 PUF와 마찬가지로 296, 223K 온도 환경에서는 응력-변형률 관계가 일정한 경향성을 가지며 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 특히 296K의 경우 과거 연구에서 보고된 응력-변형률 관계가 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다 (Han, et al., 2010). 110K에서는 어느 정도의 편차가 발생하지만 대체적으로 경향성을 띄면서 증가하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 고밀도화 구간에서는 PIR, PUF와 마찬가지로 변형률 0.4를 기점으로 불규칙성이 증가함을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과를 종합적으로 살펴보면, 실험된 모든 재료는 상온 대비 저온에서 더욱 우수한 강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한, PUF의 경우 163K에서는 변형률이 증가할수록 응력이 오히려 줄어드는 독특한 결과를 확인할 수 있었다. 110K의 경우에는 PUF, PIR, R-PUF 모두에서 전체적으로 편차가 다른 온도들에 비해 훨씬 크게 발생하였고, 변형률 0.4 이상에서 이러한 편차가 커지는 경향을 발견하였다. 이러한 현상은 고밀도화 구간에도 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 이를 분석하기 위해 압축 실험 후의 시편을 살펴본 결과, 국부 파단이 발생한 옆면 부분을 제외한 하중을 견딜 수 있는 부분의 면적이 다름을 확인할 수 있었다. 이 때문에 평탄부 구간 및 고밀도화 구간에 편차가 발생하였을 가능성이 있는 것으로 사료된다.

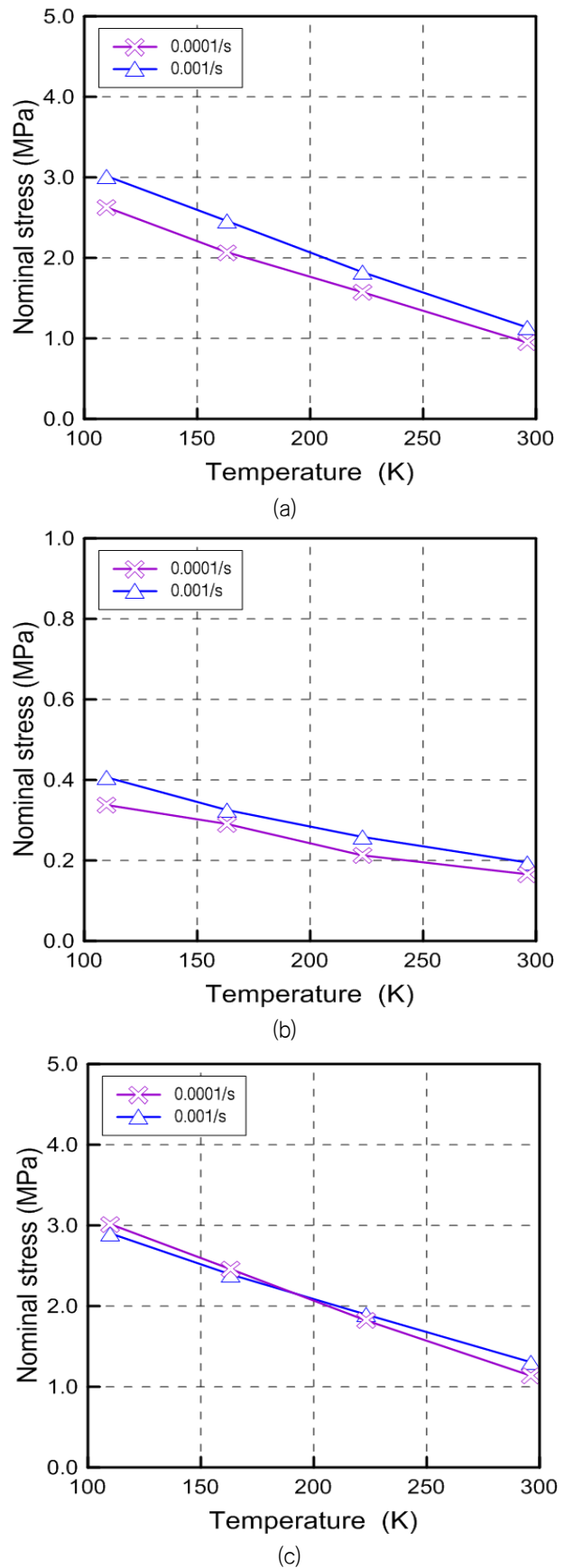


Fig. 9 Temperature dependent plateau stress of (a) PUF, (b) PIR and (c) R-PUF

### 4.3 변형률 속도에 따른 응력-변형률 관계 비교

Fig. 8은 각 실험 재료별 296K에서의 변형률 속도 의존 응력-변형률 선도를 나타낸다. R-PUF, PIR, PUF 모두에서, 변형률 속도가 증가함에 따라 탄성 구간에서의 압축탄성계수가 증가하는 것을 볼 수 있었고, 항복 응력과 평탄부 응력 또한 증가하는 경향을 보였으며, 고밀도화 구간의 시작점이 앞으로 옮겨짐을 확인할 수 있었다 (Ouellet, et al., 2006).

### 4.4 온도에 따른 평탄부 응력 분석

Fig. 9는 각 실험재료의 온도 별 평탄부 응력을 분석한 결과를 나타낸다. 여기서 평탄부 응력은 Fig.2의 평탄부 구간에서의 응력 값을 나타내며, 본 연구에서는 변형률 값이 0.2에서의 응력 값을 평탄부 응력으로 채택하였다. PUF, PIR에서는 두 변형률 속도 모두에서 온도에 반비례해서 강도가 커짐을 알 수 있었다. 이는 온도가 낮아질 수록 취성화 되어 그 강도가 증가하기 때문이다. 모두에서 평탄부 응력이 모든 온도에서 변형률 속도가 빠를 수록 더 큰 값을 가짐을 볼 수 있었다. 온도가 낮아질수록 점점 평탄부 응력 값의 차이가 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 과거 연구에서 제시된 PUF에 대한 온도 별 10%의 변형이 발생하였을 때의 응력 값과 비슷한 경향을 가짐을 확인할 수 있었다 (Traeger, 1967).

반면, R-PUF의 경우에는 온도에 반비례해서 강도가 커지는 경향은 다른 두 재료와 동일하지만, 296, 223K에서는 변형률 속도가 빠를 수록 평탄부 응력이 커짐을 볼 수 있지만 그 차이는 온도가 낮아질 수록 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, 163, 110K에서는 오히려 역전되어 변형률 속도가 빠를수록 오히려 평탄부 응력의 크기가 작아지고, 특히 110K에서는 그 차이가 163K에 비해 더욱 커지는 특이한 현상이 발견되었다. 유리섬유가 들어가지 않은 PIR, PUF에서는 이러한 현상이 발생하지 않는 것으로 미루어 볼 때, 유리섬유가 이러한 현상에 영향을 미친 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 극저온 단열재로써 LNG 선박의 화물창에 사용되고 있는 R-PUF, 육상 구조물에서 극저온 단열 부재로 사용되는 PUF와 PIR에 대한 극저온 압축실험이 수행되었다. 극저온 단열 재료의 압축 성질에 대한 온도 별, 변형률 속도 의존 경향성이 파악되었으며, 평탄부 응력의 비교를 통해 온도에 따른 경향성이 분석되었다. 본 연구결과를 아래와 같이 간단히 요약한다.

온도가 감소함에 따라 응력-변형률 선도에서 압축탄성계수, 항복응력, 평탄부 응력이 전반적으로 증가하는 현상이 관찰되었다. PUF의 경우, 223K, 296K에서는 경향성을 보였지만, 110K에서는 변형률이 증가함에 따라 응력이 줄어드는 경향을 보였다.

PIR과 R-PUF의 경우, 모든 온도에서 경향성을 확인할 수 있었으나, 110K에서는 편차가 커짐을 알 수 있었다.

296K에서는 변형률 속도가 증가할수록, 모든 재료에서 탄성계수, 항복응력, 평탄부 응력이 증가함을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 고분자 폼이 압축 변형을 할 때, 폼의 셀 내부의 공기가 빠져나갈 때 발생한 점성력이 변형률 속도가 증가함에 따라 비례해서 증가하기 때문에 발생한 것으로 사료된다.

세 가지 재료 모두에서 온도가 낮아질수록 평탄부 응력은 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. PUF와 PIR의 경우, 모든 온도에서 변형률 속도가 빠를수록 평탄부 응력 값이 큰 것을 확인할 수 있었으나, R-PUF의 경우에는 223, 296K에서는 변형률 속도가 빠를수록, 110, 163K에서는 변형률 속도가 느릴수록 평탄부 응력의 값이 큰 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 현재 LNG 운반선 화물창에 사용되고 있는 R-PUF의 온도 의존 압축 거동을 평가하고 육상 구조물의 단열재로 사용되고 있는 PUF의 온도 의존 압축 거동을 평가하여, 상기 두 재료를 비교/분석하고, 육상 구조물의 단열재로 널리 사용되고 있는 저밀도 PIR에 대한 LNG 운반선의 단열재로의 적용성을 평가하기 위한 기초 연구로 수행되었다. 향후 R-PUF, PUF와 비슷한 수준의 밀도를 가지는 PIR에 대한 온도 의존 압축 거동을 평가하고 비교/분석 연구를 수행할 예정이다. 본 연구 결과는 LNG 운반선 화물창의 구조 안전성을 평가하기 위한 중요한 실험적 근거로써, 조선 분야 뿐만 아니라 극저온에 관련된 여러 산업분야에 응용하여 사용될 수 있으리라 사료된다.

## 후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2013 시범사업)으로 수행된 연구결과임(NRF-2013H1B8A2078346). 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

## References

- Gibson, L.J., 2005. Biomechanics of Cellular Solids. *Journal of Biomechanics*, 38, pp.377-399.
- Han, D.S. Park, I.B. Kim, M.H. Noh, B.J. Kim, W.S. & Lee, J.M., 2010. The Effects of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Behavior of Polyurethane Foam. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24, pp.263-266.
- Huber, A.T. & Gibson, L.J., 1988. Anisotropy of Foams. *Journal of Materials Science*, 23, pp.3031-3040.
- Korean Standards Information Center (KS), 2008. *Thermal insulation Material Made of Rigid Urethane Foam KS M 3809*. Korean Industrial standard: South Korea.

Ouellet, S. Cronin, D. & Worswick, M., 2006. Compressive Response of Polymeric Foams under Quasi-static, Medium and High Strain Rate Conditions. *Polymer Testing*, 25, pp.731-743.

Sherwood, J.A. & Frost, C.C., 1992. Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam under Impact Loading. *Polymer Engineering and Science*, 32(16), pp.1138-1146.

Siegmann, A., Kenig, S., Alperstein, D. & Narkis, M., 1983. Mechanical Behavior of Reinforced Polyurethane Foams. *Polymer Composites*, 4(2), pp.113-119.

Traeger, R.K., 1967. Physical Properties of Rigid Polyurethane Foams. *Journal of Cellular Plastics*, 3, pp.405-418.

Tu, Z.H., Shim, V.P.W. & Lim, C.T., 2001. Plastic Deformation Modes in Rigid Polyurethane Foam under Static Loading. *International Journal of Solids and Structures*, 38, pp.9267-9279.

