

일회용 폐마스크를 활용한 폴리우레탄 폼 강도 개선 연구 Development of Polyurethane Foam with Strength Improvement Using Disposable Waste Masks

유지훈* · 양현경***
Ji-Hoon Yoo* and Hyun-Kyoung Yang***

(Received 25 April 2023, Revised 08 June 2023, Accepted 12 June 2023)

초록 : 폴리우레탄은 우수한 단열성능으로 건축, 선박 등의 분야에서 단열재로 사용되고 있으며 다양한 분야에 적용하기 위하여 높은 기계적 강도가 요구되고 있다. 코로나 19 이후 일회용 마스크의 사용량이 급증하였고, 심각한 환경오염을 유발하는 일회용 폐마스크의 재활용 방안에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서는 일회용 폐마스크의 섬유와 폴리우레탄을 혼합하여 압축강도를 향상시키는 연구를 진행하였다. 마스크 섬유는 폴리우레탄 중량을 기준으로 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 wt.%를 첨가하여 혼합하였다. 마스크 섬유 2.0 wt.%를 첨가하였을 때 최대 하중이 가장 높게 나타났으며 압축강도가 40% 증가하였다. 이러한 연구결과는 일회용 폐마스크의 재활용 방안을 제시하고 마스크 섬유가 폴리우레탄 폼의 강도 개선에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

키워드 : 폴리우레탄, 일회용 폐마스크, 재활용, 압축강도

Abstract : Polyurethane is used as a thermal insulator in the fields of construction and ships, and high mechanical strength is required for application in various fields. Since the Covid-19, the use of disposable masks has increased rapidly, and interest in recycling methods for waste masks that cause serious environmental pollution is increasing. In this paper, a study was conducted to improve the compressive strength by mixing the mask fiber with polyurethane. Polyurethane were mixed by adding 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 wt.% of the mask fiber based on the polyurethane weight. When 2.0 wt.% of mask fiber was added, the maximum load was the highest and the compressive strength increased by 40%. The result shows that mask fibers can be used to improve the strength of polyurethane.

Key Words : Polyurethane, Disposable Waste Mask, Recycle, Compressive Strength

1. 서 론

폴리우레탄은 수산기(hydroxyl, -OH)를 갖는 폴

리올(polyol), 발포제, 첨가제 등의 화합물과 이소시아네이트기(isocyanate, $-N=C=O$)를 갖는 이소시아네이트의 중합반응에 의해 우레테인(urethane)기

*** 양현경(<https://orcid.org/0000-0003-2166-5135>) : 교수, 부경대학교 전기전자소프트웨어공학과
E-mail : hkyang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6868
*유지훈(<https://orcid.org/0009-0005-5030-4357>) : 대학원생, 부경대학교 인공지능융합학과

*** Hyun-Kyoung Yang(<https://orcid.org/0000-0003-2166-5135>) : Professor, Department of Electrical, Electronics and Software Engineering, Pukyong National University.
E-mail : hkyang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6868
*Ji-Hoon Yoo(<https://orcid.org/0009-0005-5030-4357>) : Graduate student, Department of Artificial Intelligence Convergence, Pukyong National University.

가 반복적으로 만들어지면서 생성되는 고분자 수지를 의미한다. 폴리우레탄 폼은 우레테인기의 공통된 결합을 갖지만 폴리올의 분자구조, 분자량, 작용기의 종류, 폴리올과 이소시아네이트의 비율, 발포제의 양에 따라 폼의 기계적 물성과 열적 특성은 변한다. 이러한 폴리우레탄 폼은 연질, 반경질, 경질로 구분된다.¹⁾ 연질 폴리우레탄 폼은 Open cell 구조로 형성되어 공기투과, 복원력의 장점을 가지며, 스폰지 형태인 자동차 내장재, 침구류 쿠션, 포장재 등으로 사용되고 있다. 반경질 폴리우레탄 폼은 자동차의 스티어링휠, 손잡이 등으로 사용되고 있다.^{2,3)} 경질 폴리우레탄 폼은 독립적인 셀의 구조를 가지는 Closed cell로 형성되어 낮은 열전도도와 낮은 밀도를 가지고 있다. 이러한 특성을 가진 경질 우레탄 폼은 경량성, 단열성의 장점을 가지고 있어 단열재, 경량 구조재, 완충재 등 매우 광범위한 분야에서 사용되고 있다.^{4,6)}

이 중 경질 폴리우레탄 폼은 매우 낮은 열전도도로 단열능이 우수하여 단열재료의 응용이 전체의 80~90%를 차지하고 있다.⁷⁾ 현재 냉장고, 건축, 선박 등의 분야에서 단열재료로 사용되고 있으며, 다양한 분야에 적용하기 위하여 높은 기계적 강도가 요구되고 있다. 이러한 요구에 기존 폴리우레탄 폼에 케블라 펄프,⁸⁾ 글라스 버블,⁹⁾ 나노입자^{10,11)} 유리섬유¹²⁾ 등을 첨가하여 기계적 강도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구에서 사용되고 있는 첨가물은 높은 생산 비용을 야기시키는 단점을 가지고 있다.

2019년에 발생한 코로나19는 전 세계적으로 확산되었고, 마스크는 코로나19 바이러스 확산을 방지하기 위한 가장 효과적이고 효율적인 수단으로 코로나19의 방역 필수품이 되었다. 마스크가 생활 필수품이 되면서 사용량은 코로나19 발생 전에 비해 급증하게 되었는데, 2020년에 국내에서 일회용 마스크 약 67억 개, 하루 약 1,800만 장이 사용되었다. 이 중 일회용 페마스크 약 38억 개가 소각으로, 약 21억 개가 매립으로 폐기되었다.¹³⁾ 현재 페마스크를 처리하는 소각, 매립 방법은 모두 심각한 2차 환경오염을 유발한다. 일회용 마스크의 주요 재질은 플라스틱의 일종인 폴리프로필렌

으로 소각할 때 세계보건기구(WHO)에서 지정한 1급 발암물질인 다이옥신 같은 유해물질이 배출된다. 일회용 페마스크 1톤을 태울 때 온실가스 3.07톤이 발생하는데, 이는 페트병을 소각할 때보다 36% 더 많은 양이 발생하게 되는 것이다.¹³⁾ 또한 매립했을 때에는 페마스크가 완전히 분해되는데, 약 450년 정도로 매우 긴 시간이 소요된다.^{14,15)} 이와 같이 일회용 페마스크 소각, 매립으로 인한 환경오염 문제가 심각한 상황으로 일회용 페마스크의 처리 대안으로 재활용 연구는 필수적인 상황이 되었다.

일회용 마스크는 피부에 닿는 부분은 폴리프로필렌이나 폴리에스터 직물로 만들고, 바이러스를 거르는 여과층은 멜트 블로운(melt blown) 초극세 폴리프로필렌 섬유로 구성되어 있다. 이러한 섬유로 구성된 일회용 마스크는 인장/굽힘 강도 및 균열 저항성 개선에 사용되는 기존 폴리프로필렌 섬유와 유사한 역할을 한다.^{16,17)} 이에 본 연구에서는 기존의 강도 개선 연구에 사용되고 있는 첨가물보다 매우 낮은 비용으로 생산이 가능한 일회용 페마스크의 섬유를 폴리우레탄과 혼합하여 폴리우레탄 폼의 강도 개선 연구를 진행하였으며, 2차 환경오염을 유발하는 일회용 페마스크의 재활용 방안을 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에서는 폴리우레탄 폼의 강도를 개선하기 위하여 일회용 페마스크를 첨가하였다. 이를 위하여 사용된 페마스크의 귀걸이 부분과 코 받침 부분을 제거하고 남은 부분을 약 1×1 cm의 정사각형 형태로 절단한 뒤, 소비전력 800 W, 분쇄용량 2 L의 블렌더에 물 1.2 L를 넣은 후 10개 분량의 일회용 페마스크 조각을 넣어 10분간 분쇄하였다. 이때, 마스크의 섬유조직의 효율적인 분쇄를 위하여 마스크 조각의 질량 대비 0.1 wt%의 계면활성제를 첨가하여 분쇄를 진행하였다. 분쇄된 마스크의 표면에 존재하는 계면활성제를 제거하기 위하여 여러 차례 세척을 진행한 뒤, 70℃의

건조로에서 24시간 건조를 진행하여 최종 마스크 섬유를 회수하였다.

폴리우레탄 폼을 제작하기 위하여 이액형 우레탄(PPG-434, 금호석유화학)을 사용하였다. 이때 주재와 경화제의 질량비는 1:1로 합성하였으며, bottom ash와 팽창흑연의 첨가량은 폴리우레탄 질량 대비 각각 50 wt.%, 5 wt.%로 고정하였다. 마스크 섬유를 일정 중량 이상 첨가하게 되면 폴리우레탄 교반에 방해가 될 수 있다.¹⁸⁾ 마스크 섬유 첨가량을 3 wt.% 첨가하였을 때 점도가 올라가 폴리우레탄 교반이 불가능한 것을 확인하였다. 따라서 폴리우레탄 교반에 방해가 되지 않는 최대 질량을 2.5 wt.%로 선정하여, 마스크 섬유 첨가량은 폴리우레탄의 질량 대비 각각 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 wt.%로 첨가하였다. 폴리우레탄 주재, 마스크 섬유, bottom ash, 팽창흑연을 사전 혼합하여 제조하였으며, 이후 경화제를 첨가하고 기계식 교반기로 30초 동안 2500 rpm에서 교반 후 closed mold 발포를 진행하였다. Closed mold 발포는 자체 제작한 150×150×30 mm(W×L×H)와 300×300×30 mm(W×L×H) mold를 사용하였으며 몰드의 내부 온도는 50℃로 예열하였다. 폴리우레탄의 발포는 50℃ 조건의 건조로에서 20분간 진행하고 실온에서 20분간 경화시킨 후 몰드에서 탈형하였다.

2.2 실험 장비 및 측정 방법

본 연구에서 제작된 폴리우레탄 폼의 압축강도를 확인하기 위하여 만능재료시험기(UNITEST M2, TEST ONE)를 사용하였다. 압축강도는 KS M ISO844에 준하여 시편의 크기를 50×50×30 mm(W×L×H)로 제조하였으며, 3 mm/min의 재하속도에서 압축시험을 수행하였다.

열전도도 측정에는 KS L 9016에 준하여 측정하였으며, 열전도율 측정기(HFM-100, 다운테크)를 사용하여 평판 열류계법 방법으로 분석을 진행하였다. 시편의 크기는 300×300×30 mm(W×L×H)로 하였으며, 상판의 온도는 38℃, 하판의 온도는 10℃로 28℃의 온도차를 두어 측정하였다.

폴리우레탄 폼의 셀 형상 및 강도 변화의 원인을 분석하기 위하여 주사전자현미경(JSM-6700F,

JEOL) 및 광학현미경(Amscope, SME-F8BH)을 용하여 분석하였다. 시편은 폼의 스킨 층에서 15 mm 안쪽 지점을 채취하였으며, 발포 방향의 수직 부분을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전도도 시험

마스크 섬유 첨가에 따른 폴리우레탄 폼의 단열 성능의 특성 변화를 확인하기 위하여, 열전도도 시험을 실시하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 열전도도는 아래의 식 (1)을 이용하였다.

$$\lambda = \frac{Q}{A} \frac{L}{\Delta T} \quad (1)$$

여기서, λ 는 열전도율(W/m·K), ΔT 는 상단과 하단 플레이트 사이의 온도차이, Q/A 는 ΔT 로 인해 발생하는 열량, L 은 시료의 두께이다.

열전도도 시험 결과, 마스크 섬유가 첨가된 폴리우레탄 폼의 경우 마스크 섬유를 첨가하지 않은 폴리우레탄 폼보다 열전도도가 약 15% 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 마스크 섬유를 첨가한 폴리우레탄 폼의 밀도가 증가하게 되면 내부 셀의 폴리머 전도가 커져 열전도도가 증가되기 때문이다.¹⁹⁾ 하지만 마스크 섬유의 첨가량 변화에 따른 열전도도는 크게 변하지 않는 것을 확인하였다.

Table 1 Thermal conductivity of polyurethane foam for various disposable waste mask concentration

Mask Concentration (wt.%)	Thermal Conductivity (W/m·K)
0	0.0375
0.5	0.0429
1	0.0434
1.5	0.0428
2	0.0437
2.5	0.0435

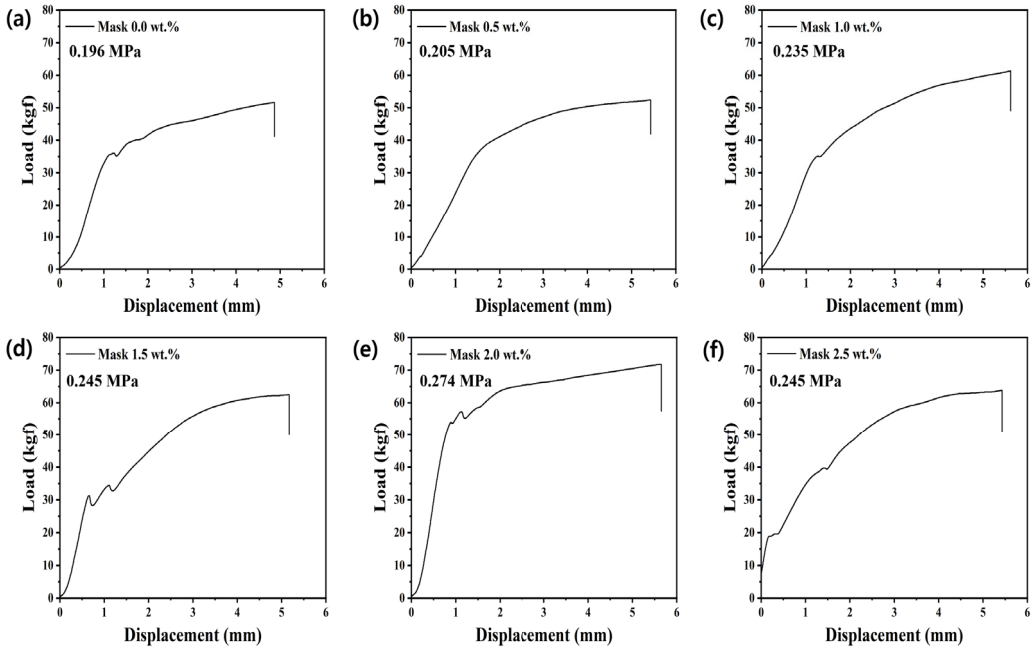


Fig. 1 Universal testing machine result of polyurethane foam samples according to (a) 0.0 wt.%, (b) 0.5 wt.%, (c) 1.0 wt.%, (d) 1.5 wt.%, (e) 2.0 wt.%, (f) 2.5 wt.% by mask fiber content

3.2 압축시험

마스크 섬유를 첨가하여 제작한 폴리우레탄 폼의 강도를 확인하기 위하여, 만능재료시험기를 통하여 압축강도 시험을 수행하였으며, 압축강도는 식 (2)를 이용하였다.

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad (2)$$

Table 2 Compressive strength of polyurethane foam for various disposable waste mask concentration

Mask Concentration (wt.%)	Compressive Strength (MPa)
0	0.196
0.5	0.205
1	0.235
1.5	0.245
2	0.274
2.5	0.245

여기서, f_c 는 압축강도, P 는 시험편이 받는 압력, A_c 는 폴리우레탄 폼의 면적이다.

전체적으로 마스크 섬유를 첨가한 폴리우레탄 폼의 압축강도는 마스크 섬유가 첨가되지 않은 폴리우레탄 폼에 비해 증가하는 것을 확인하였으며, 압축시험 raw data를 Fig. 1과 Table 2에 나타내었다. 또한, 마스크 섬유의 첨가량이 증가할수록 압축강도는 증가하였으며, 마스크 섬유의 첨가량이 2 wt.%에서 압축강도가 가장 높게 나타났다. 마스크 섬유가 2 wt.% 첨가된 폴리우레탄 폼의 압축강도는 0.274 MPa로 마스크 섬유가 첨가되지 않은 폴리우레탄 폼의 압축강도인 0.196 MPa에 비해 40% 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 마스크 섬유를 2.5 wt.% 첨가하였을 때 오히려 압축강도가 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 이유는 마스크 섬유 첨가 시 특정 첨가량 이후 마스크 섬유와 폴리우레탄 폼의 계면 결합이 약해짐으로써, 셀 형성에 영향을 미치기 때문이다.¹⁸⁾ 따라서 첨가량이 2.5 wt.%일 때 마스크 섬유가 폴리우레탄

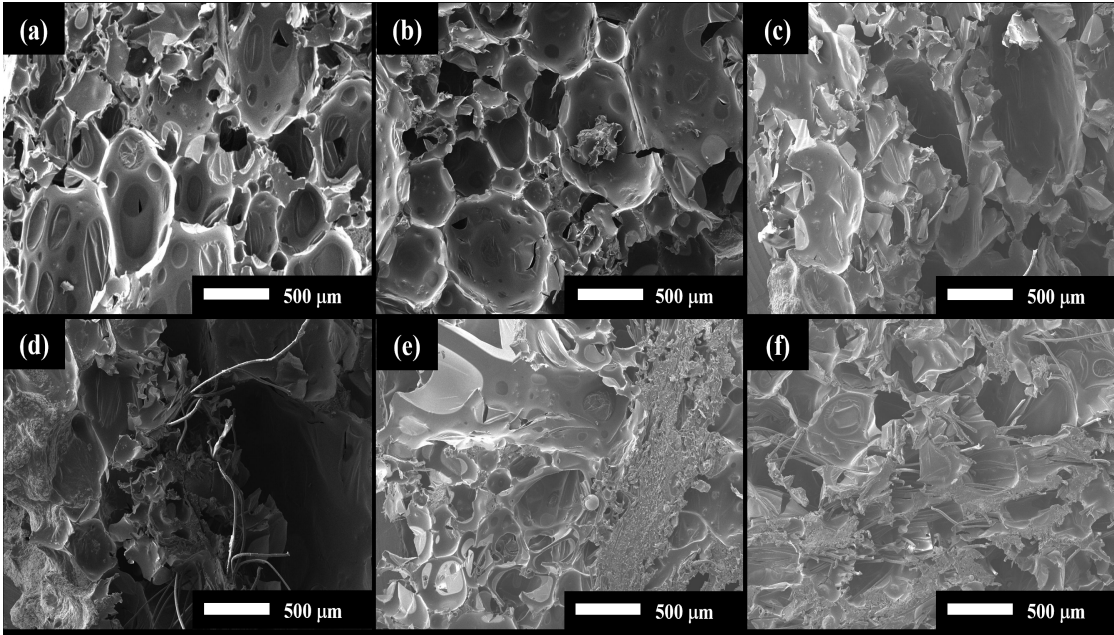


Fig. 3 Sem images of polyurethane foam samples by mask fiber contents (a) 0.0 wt.%, (b) 0.5 wt.%, (c) 1.0 wt.%, (d) 1.5 wt.%, (e) 2.0 wt.%, (f) 2.5 wt.%

폼의 셀 형성에 방해요소로 작용하여 Fig. 2와 같이 폼 내부에 균일한 셀 구조가 형성되지 못하고 큰 기공이 형성되는 것을 확인하였다. 폴리우레탄 폼 내부에 형성된 큰 기공은 하중을 받을 때 취약한 부분으로 작용되어 압축강도가 감소하게 된 것으로 판단된다.

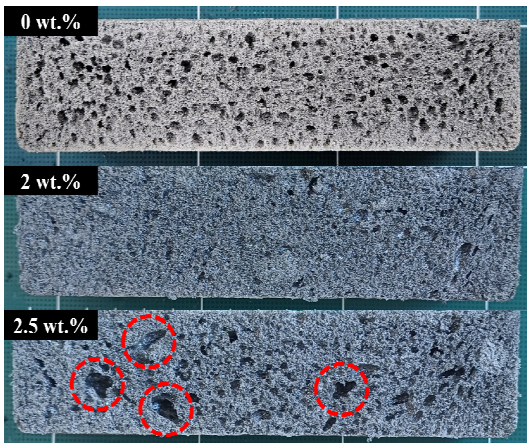


Fig. 2 Cross-section of mask fiber reinforced

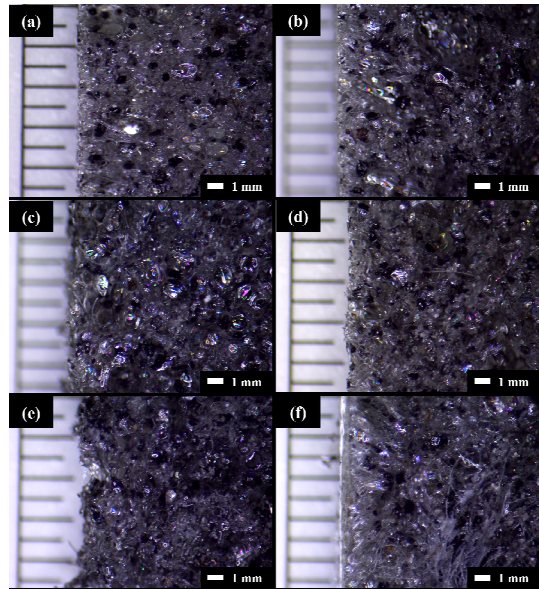


Fig. 4 Optical microscopy images of polyurethane foam samples by mask fiber contents (a) 0.0 wt.%, (b) 0.5 wt.%, (c) 1.0 wt.%, (d) 1.5 wt.%, (e) 2.0 wt.%, (f) 2.5 wt.%

3.3 셀 구조 분석

마스크 섬유가 폴리우레탄 폼의 셀 구조에 미치는 영향을 확인하기 위하여 마스크 섬유의 첨가량을 달리하여 제작된 폴리우레탄 폼의 단면을 관측한 SEM 사진, 광학현미경 사진을 각각 Fig. 3 과 Fig. 4에 보여 준다. 폴리우레탄 폼의 내부에 마스크 섬유의 섬유질이 결합되어 있으며, 마스크 섬유의 첨가량이 증가할수록 마스크 섬유가 더 촘촘히 결합된 것을 볼 수 있다. 하지만 마스크 섬유 첨가량이 증가할수록 폼 내부의 셀이 섬유질과 결합하면서, closed cell 구조가 붕괴되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 마스크 섬유를 첨가하였을 때, 열전도도가 증가하는 원인 중의 하나로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 코로나 19 이후 급격히 늘어난 일회용 페마스크의 재활용 방안을 제시하고, 폴리우레탄 폼의 강도 개선에 대한 연구를 수행하였다.

마스크 섬유의 첨가량에 따라 제작된 폴리우레탄 폼은 열전도도 및 압축강도를 측정하였다. 열전도도 측정 결과로부터 마스크 섬유가 첨가된 폴리우레탄 폼은 마스크 섬유를 첨가하지 않은 폴리우레탄 폼보다 열전도도가 약 15% 증가하였다. 그러나 마스크 섬유의 첨가량 변화에 대한 열전도도의 경향성은 없는 것으로 판단된다. 만능재료시험기를 통하여 압축시험을 실시한 결과, 마스크 섬유가 첨가된 경우 압축강도가 증가하였으며, 첨가량이 2 wt.%일 때 압축강도가 약 40% 증가하여 가장 크게 증가하는 것을 확인하였다. 압축강도가 증가된 원인을 확인하기 위하여, SEM과 광학현미경을 이용하여 폴리우레탄 폼의 내부 셀의 구조를 확인하였다. 마스크 섬유가 함유된 폴리우레탄 폼은 내부 셀과 마스크 섬유 조직이 서로 결합되어 있음을 확인하였다. 폴리우레탄 폼 내부의 셀들과 결합된 마스크의 섬유 조직이 폼의 셀 간 결합을 강화시켜 폴리우레탄 폼의 강도가 향상되는 것으로 판단된다.

이러한 연구결과는 일회용 페마스크의 재활용

방안을 제시하고, 폴리우레탄 폼의 강도 개선을 통한 다양한 분야로의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Author contributions

J. H. Yoo; Data curation, Form analysis, Investigation, Visualization, Writing-original draft. H. K. Yang; Conceptualization, Funding acquisition, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. X. Cao, L. J. Lee, T. Widya and C. Macosko, 2005, "Polyurethane/clay Nanocomposites Foams: Processing", Structure and Properties, Polymer, 46(3), 775-783. (<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.028>)
2. I. Javni, K. Song, J. Lin and Z. S. Petrovic, 2011, "Structure and Properties of Flexible Polyurethane Foams with Nano and Micro-Fillers", Journal of Cellular Plastics, 47(4), 357-372. (DOI:10.1177/0021955X11398115)
3. S. S. Kim and J. N. Park, 1999, "Industrial Application of Polyurethane", Polymer Science and Technology 10(5), 614-620.
4. N. V. Gama, A. Ferreira and A. B. Timmons, 2018, "Polyurethane Foams : Past, Present, and Future", Materials, 11(10), 1841-1875. (<https://doi.org/10.3390/ma11101841>)
5. M. Modesti, A. Lorenzetti and S. Besco, 2007, "Influence of Nanofillers on Thermal Insulating Properties of Polyurethane Nanocomposites Foams", Polymer Engineering and Science, 47(9), 1351-1358. (<https://doi.org/10.1002/pen.20819>)
6. A. Guo, I. Javni and Z. Petrovic, 2000, "Rigid Polyurethane Foams Based on Soybean Oil", Journal of Applied Polymer Science, 77(2),

- 467-473.
([https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(20000711\)77:2<467::AID-APP25>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(20000711)77:2<467::AID-APP25>3.0.CO;2-F))
7. J. M. Kim et al., 2016, “Effect of Graphene Oxide on Mechanical Characteristics of Polyurethane Foam”, *Journal of Korean Society of Marine Engineering*, 40(6), 493-498.
(<http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2016.40.6.493>)
 8. J. H. Oh, J. H. Bae and J. M. Lee, 2018, “The Effects of Kevlar Pulp on Polyurethane Foam for Cryogenic Temperature”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(6), 514-520.
(<https://doi.org/10.3744/SNAK.2018.55.6.514>)
 9. J. D. Kim, J. H. Kim, J. H. Ahn and J. M. Lee, 2020, “Glass bubble reinforced polyurethane foams with high mechanical strength for cryogenic temperature insulation”, *The Journal of Applied Polymer Science*, 138(12), 1-16.
(<https://doi.org/10.1002/app.50060>)
 10. D. Yan et al., 2012, “Enhanced Mechanical and Thermal Properties of Rigid Polyurethane Foam Composites Containing Graphene Nanosheets and Carbon Nanotubes”, *Polymer International*, 61(7), 1107-1114.
(<https://doi.org/10.1002/pi.4188>)
 11. M. C. Saha, Md. E. Kabir and S. Jeelani, 2008, “Enhancement in Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Foam Infused with Nanoparticles”, *Materials Science and Engineering A*, 479(1-2), 213-222.
(<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.06.060>)
 12. J. H. Lee et al., 2015, “Modified Gurson Model to Describe Non-linear Compressive Behaviour of Polyurethane Foam with Considering Density Effect”, *Journal of the Computational Structure Engineering Institute of Korea*, 28(5), 543-551.
(<https://doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.5.543>)
 13. H. L. Lee, 2023, *Chosunilbo*, 14, February.
(https://health.chosun.com/site/data/html_dir/2023/02/14/2023021401867.html)
 14. J. W. Choi, 2023, *JTBC*, 25, March.
(https://news.jtbc.co.kr/article/article.aspx?news_id=NB121197901)
 15. J. W. Chung, H. K. Yang, 2022, “Development of Multi-functional Composite Cement with Strength Improvement Using Disposable Waste Masks”, *Journal of Power System Engineering*, 26(3), 31-39.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.3.031>)
 16. Z. Li, Z. Zhang, M. Fei and X. Shi, 2022, “Upcycling Waste Mask PP Microfibers in Portland Cement Paste : Surface Treatment by Graphene Oxide”, *Materials Letters*, 318(1), 1-4.
(<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132238>)
 17. Y. Liu, L. Wang, K. Cao and L. Sun, 2021, “Review on the Durability of Polyurethane Fibre-Reinforced Concrete”, *Advanced in Civil Engineering*, 2021, 1-13.
(<https://doi.org/10.1155/2021/6652077>)
 18. S. G. Jeon et al., 2022, “Evaluation of Thermal Performance and Mechanical Properties in the Cryogenic Environment of Basalt Fiber Reinforced Polyurethane Foam”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(4), 207-213.
(<https://doi.org/10.3744/SNAK.2022.59.4.207>)
 19. S. Sair et al., 2018, “Mechanical and Thermal Conductivity Properties of Hemp Fiber Reinforced Polyurethane Composite”, *Case Studies in Construction Materials*, 8, 203-212.
(<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.02.001>)