

발포제에 따른 산무수물계 에폭시 폼의 압축강도 및 포밍특성 분석

권동준* · 김종현** · 박성민* · 권일준* · 박종만**†

Investigation of Compressive Strength and Foaming Characteristics of Acid Anhydride Epoxy Foam by Foaming Agent

Dong-Jun Kwon*, Jong-Hyun Kim**, Sung-Min Park*, Il-Jun Kwon*, Joung-Man Park**†

ABSTRACT: Polymer foams were used to fill the void in the structure in addition to flame retardant and heat insulation. Polymer foams such as polyurethane, polyisocyanurate, poly(vinyl chloride), polyethylene terephthalate were used to weight lighting materials. In this study, epoxy foam was used to improve mechanical properties of polymer foam. Acid anhydride type hardener reacts with polyol. Using this phenomenon, if blowing agent was added into epoxy resin using acid anhydride type hardener, formation and compressive properties of epoxy foam was studied. Formation of polymer foam was compared with type of blowing agent and concentration of blowing agent via compressive test. As these results, optimized condition of epoxy foam was found and epoxy foam had better compressive property than other polymer foam.

초 록: 구조용 폼의 용도는 난연, 단열 기능 이외에 구조적인 목적으로 공극부위를 충전시키는 용도로 사용되고 있다. 경량 소재 개발을 위해 CFRP와 구조용 폼이 이용되고 있으며, PUR, PIR, PVC, PET와 같은 대표적인 폼이 존재한다. 본 연구에서는 구조용 폼의 특성 중 강도 강화를 위한 목적으로 에폭시 폼을 개발하고자 하였다. 에폭시 조성 중 산무수물계 경화제는 기존의 폴리올과 반응을 하기 때문에 산무수물계 에폭시 수지에 발포제를 이용할 경우 폼이 형성되는지, 형성된다면, 압축특성과 포밍 형태를 관하는 연구를 진행하였다. 에폭시 폼을 형성시키기 위한 발포제의 종류에 따른 영향 및 발포제의 농도에 따라 변화되는 폼의 결과 차이를 분석하였으며, 산무수물계 수지의 조성차이에 따른 폼의 압축강도를 평가하였다. 궁극적으로 에폭시 폼을 최적의 발포제 선정으로 구조적 강도가 높은 폼을 형성시킬 수 있음을 확인하였으며, 기존의 구조용 폼 소재에 비해 높은 압축강도 및 비압축강도를 가짐을 확인하였다.

Key Words: 구조용 폼 (Structural foam), 포밍 (Foaming), 압축강도 (Compressive strength), 경량소재 (Lightweight material)

1. 서 론

일반적으로 폼 소재는 시트나 포장용 소재로 충격 및 무게에 대한 하중으로 내부 구성품의 손상을 최소화하기 위

한 충전소재로 사용되어왔다[1,2]. 현재 복합재료 시장에서 구조용 소재로 사용하기 위해 많은 시도를 하고 있으며, 고가의 소재를 경제적으로 사용하면서 경량성과 충격안정성을 높이기 위해 구조용 폼에 대한 적용이 대두화 되고 있

Received 16 July 2018, received in revised form 13 August 2018, accepted 14 August 2018

*Polymer Resin Team, Hybrid New Material Division, Korea Dyeing and Finishing Technology Institute

**Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University

**†Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy Convergence Technology, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

다. 일반적으로 샌드위치형 복합재의 형태로 항공용 소재로 많이 사용되어 왔으며, core 소재와는 다른 폼만의 복잡함 형상에 대한 충진 안정성 때문에 폼과 core를 동시에 적용하는 추세이다[3-5].

구조용 폼은 일반적으로 열가소성계 수지로 제조된 PVC 폼과 PET 폼이 대표적이며, 벤츠 A 클래스 차량에 일부분 적용되면서 많은 관심을 유발하였다[6,7]. PUR이나 PIR 폼과 같은 경우 LNG 선과 같은 특수 목적으로 구조용 폼이 적용되었으며, 섬유를 혼합시켜 폼의 강도를 높이거나, 고분자량을 조절함에 따른 내열, 난연, 단열, 흡음이 안정적인 소재가 상품화 되고 있다[8,9].

구조용 폼에 대한 종류가 다양하게 존재하지만, 공통적으로 폼 소재이기 때문에 셀을 형성하고 있다. close cell의 형태를 가지고 있는 경우가 더 많으며, 발포 공정에 대한 셀의 생성, 성장, 안정화 과정을 통해 셀의 크기와 셀의 형태, 조성이 이루어진다. 이때 가장 중요한 변수가 되는 것은 소재 자체의 자유에너지에 의한 영향이라고 설명할 수 있다. 총 셀이 가지는 계면 면적과 소재 자체의 자유에너지의 영향으로 셀의 표면자유에너지가 설정되기 때문에 구조용 셀을 형성하기 위한 셀 조절에 있어 가장 중요한 부분은 소재의 선정이라고 말할 수 있다[10-12].

발포하기 위한 소재로 가장 용이하게 발포 성형성을 발휘하는 폴리올레핀계, 폴리스티렌계, 폴리우레탄계, PVC 등이 있지만, 현재까지 에폭시 폼의 경우 그 사례가 드물다. 대부분의 폼 소재는 발포제의 영향으로 발포가 이루어질 수 있다. 발포제의 분해로 인해 CO_2 , H_2O , NH_3 , N_2O , N_2 등이 발생되며, 이러한 기체 발생량에 따라 발포 특성에 영향을 미친다고 설명할 수 있다[13-15]. 발포제는 물리발포제와 화학발포제로 나눌 수 있고, 환경문제로 인해 화학발포제 중에서 유기발포제를 주로 사용하고 있다. 소재적인 조성을 설정하고 성형 조건(온도, 압력, 반응시간)에 따른 조건으로 셀의 모양과 구조가 달라지게 되며, 유연한 폼 또는 강직한 폼이 형성되게 된다[16,17].

샌드위치형 복합재 제조를 위해서는 구조용 폼을 이용하여 복합재료와 직접적인 접착을 시도하기도 하지만, 폼을 일단 성형해 두고 접착제를 이용하여 복합소재와의 접착을 시도하는 공정이 더 많은 상황이다[18]. 접착제에 의한 접착으로 복합재료와 샌드위치 구조물을 이루기 때문에 접착면에 대한 안정성이 부족하다. 구조용 접착제의 경우 현재 15 MPa 수준의 접착강도를 나타내고 있는데, 복합재료와 폼 간의 접착면에 비교적 낮은 접착력을 보유하고 있기 때문에 복잡한 형상으로 샌드위치형 복합재가 제조된다면 구조적인 안정성이 낮은 소재라고 생각할 수 있다[18,19].

에폭시를 기반으로 폼을 제조할 수 있게 된다면, 기존의 복합재료와 에폭시/에폭시 결합을 유도하기 때문에 접착력이 높을 수 있으며, 에폭시 자체가 기존의 폼 소재에 비

해 강직한 소재이기 때문에 구조적, 계면안정성 적으로도 효과적인 폼 소재가 될 가능성이 높다[20,21]. 에폭시 폼은 현재 제조사가 적은 편이며, 폼에 대한 유통기한과 수요와 공급 문제로 많은 개발이 진행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 복합재료로 이용되고 있는 산무수물계 에폭시 수지에 발포제를 넣어 에폭시 폼을 제조에 관련된 기초 연구를 진행하였다. 발포제의 종류에 따라 에폭시 수지로 포밍이 적합한지 포밍의 형상과 압축강도를 통해 최적의 발포제를 선정하였다. 발포제에 농도에 따른 영향과 산무수물계 수지의 종류에 따른 영향이 포밍에 미치는 영향을 관찰하였으며, 궁극적으로 구조용 폼 소재와 비교한 에폭시 폼의 장점을 관찰하였다.

2. 실험

2.1 에폭시 폼을 위한 수지 및 발포제

에폭시 폼에 대한 연구를 시작한 이유는 Fig. 1(a)와 같이 화학 구조적으로 프탈릭 산무수물계 구조가 폴리올과 반응하여 이서 폴리올을 제조할 수 있다는 점과 Fig. 1(b)나 (c)의 결과(YD128:KBH1089)와 같이 산무수물계 수지는 경화 단계에서 기공 발생이 쉽게 이루어지는 경험적 결과를 바탕으로 산무수물계 에폭시를 이용하여 구조용 폼을 형성시키고자 연구하였다.

산무수물계 에폭시는 이를 이용하여 구조용 폼을 형성시키고자 연구하였다. 에폭시 수지는 국도화학의 제품을 이용하였다. 산무수물계 수지를 제조하기 위해 사용한 에폭시 주제는 YD128(YD), KFR5131(KFR) 2종류이며, 경화제로는 KBH1089(KBH), KFH9581(KFH)을 이용하였다. 주제와 경화제 2종류를 각각 다르게 혼합시켜 4종류의 산무수물계 에폭시를 제조하였으며, 비교 대조군으로 G640 폴리아마이드계 경화제를 이용할 경우 포밍이 형성되는지 비교하였다.

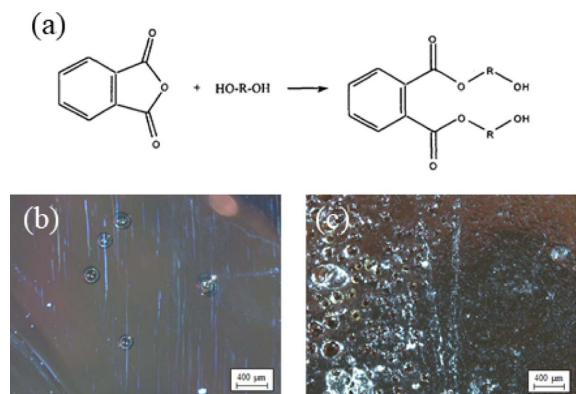


Fig. 1. (a) Synthesis of ester polyol using Phthalic anhydride and Di-ol; (b) good cured epoxy surface; and (c) poorly cured epoxy surface

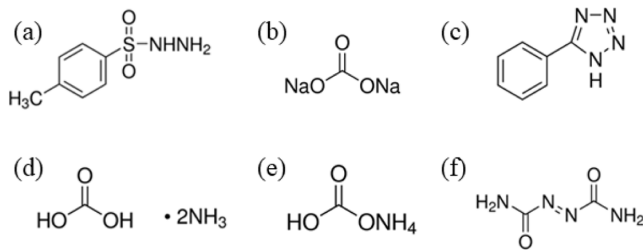


Fig. 2. Chemical structure of foaming agent: (a) p-Toluenesulfonyl hydrazide(TSH); (b) Sodium carbonate(SC); (c) 5-phenyl-1H-tetrazole(5PT); (d) Ammonium carbonate(AC); (e) Ammonium bicarbonate(ABC); and (f) Azodicarboxamide (ACA)

Fig. 2와 같이 발포제는 6종류를 선정하였다. 발포제로 많이 이용되는 ACA 및 TSH 등 범용으로 이용되는 첨가제를 비교 대상으로 설정하였다. 발포제는 모두 시그마 알드리치를 통해 구입하여 사용하였다. 발포제의 종류에 따른 에폭시 폼의 발포 형상과 압축강도를 평가하였다. 최적 발포제를 확인하고 발포제의 농도에 따른 압축강도 및 폼의 형상 변화를 관찰하였다.

발포제는 수지의 무게대비 wt%를 고려하여 에폭시 주제에 발포제를 2,000 rpm/10분동안 교반기를 이용하여 교반시켜 용액을 제조하였다. 에폭시 폼을 형성시키기 위한 조건으로 150도 20분을 설정하였으며, 경화된 에폭시 폼을 1일간 상온 보관하여 잔존응력 및 열기를 제거하였다.

2.2 에폭시 폼의 압축강도 및 폼의 형상 관찰

폼의 형상을 반사현미경(SMZ25, 니콘, 일본)을 사용하였다. 폼의 밀도를 관찰하기 위해 ISO 845 규정에 따라 시편을 평가하였으며, 포밍 조건 및 발포제의 조성에 따른 밀도 차이를 관찰하였다.

폼의 압축 강도를 평가하기 위해 ISO 844 규정을 따랐으며, 만능시험기(AGS-X, 동일시마즈, 일본)를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 시편사이즈는 폭, 너비, 높이 5 cm로 설정하였으며, 조건에 따른 압축강도 차이를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 발포제의 종류에 따른 에폭시 폼의 특성 고찰

Fig. 3은 산무수물계 수지(KFR:KFH) 조합에 발포제를 2 wt% 삽입하여 제조한 뒤 150도 20분 경화시킨 에폭시 폼의 압축강도를 평가한 결과이다. 일반적으로 에폭시 수지의 압축강도는 150 MPa 수준을 나타낸다. Fig. 3의 TSH 발포제를 이용한 결과는 발포가 거의 안된 결과는 나타내었다. 실제 Fig. 4(a)의 결과와 같이 에폭시 폼을 형성시키려고 하였으나, 윗면과 아랫면의 상태가 완벽히 다르듯이 발

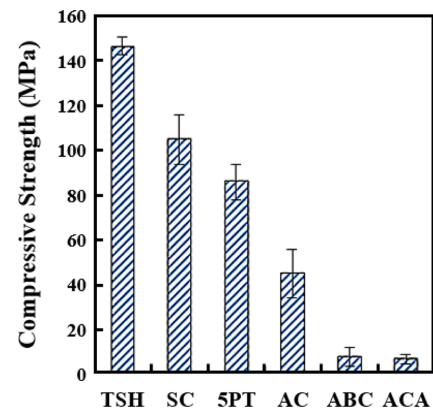


Fig. 3. Compressive strength of epoxy foam with different foaming agent condition

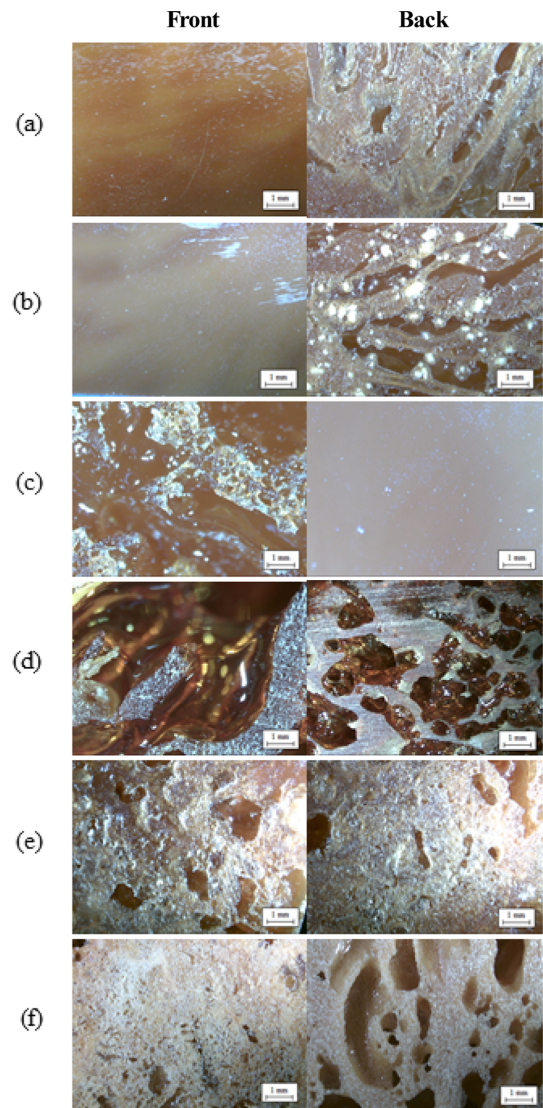


Fig. 4. Foaming condition of epoxy foam: (a) p-Toluenesulfonyl hydrazide(TSH); (b) Sodium carbonate(SC); (c) 5-phenyl-1H-tetrazole(5PT); (d) Ammonium carbonate(AC); (e) Ammonium bicarbonate(ABC); and (f) Azodicarboxamide (ACA)

포가 거의 안된 상태이었다.

SC 발포제의 경우 에폭시 수지에 제대로 스며들지 못하는 상태를 볼 수 있으며, 에폭시 폼을 위한 적절한 발포제가 아님을 확인할 수 있었다. 5PT 발포제의 경우 발포의 특성이 나타나지 않았으며, TSH와 유사한 형상을 나타내었다. AC, AB, ACA 발포제의 경우 에폭시 폼을 형성시키는데 비교적 폼과 유사한 형상을 나타내게끔 변화시켰다고 생각할 수 있지만, 기공의 크기가 너무 크고 1 mm 이상의 직경을 가진 기공이 존재함으로써 구간별로 응력이 비교적 균일하게 전달되지 못한다는 점에서 발포는 가능하나 발포제의 농도 조절이 중요함을 확인하였다. 특히 ACA의 발포 결과를 보면 셀 사이즈가 비교적 큰 사이즈도 존재하지만 평균적으로 100 μ m의 셀이 형성된다는 점에서 적절한 발포제가 ACA라고 생각할 수 있었다. 특히 Fig. 3의 압축강도 역시 타 구조용 폼과 유사한 정도는 AB 조건 또는 ACA 조건이었으며, 투명한 형태의 에폭시 경화물 조성이 아닌 비교적 균일한 셀의 형상을 가지는 조건이 ACA 조건이기 때문에 최적의 발포제라 생각하였다.

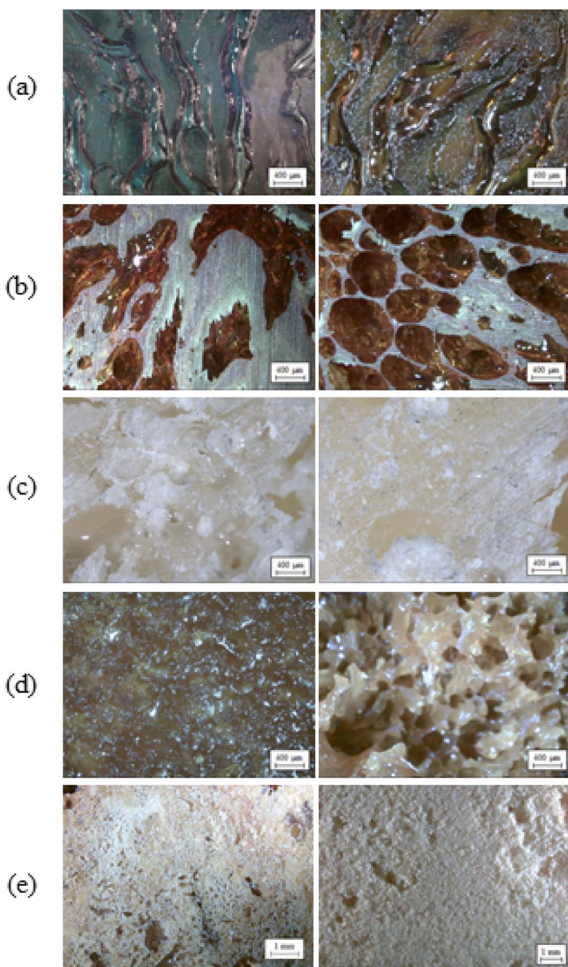


Fig. 5. Foaming condition of epoxy foam with different epoxy resin: (a) YD:KBH; (b) YD:KFH; (c) YD:G640; (d) KFR:KBH; and (e) KFR:KFH

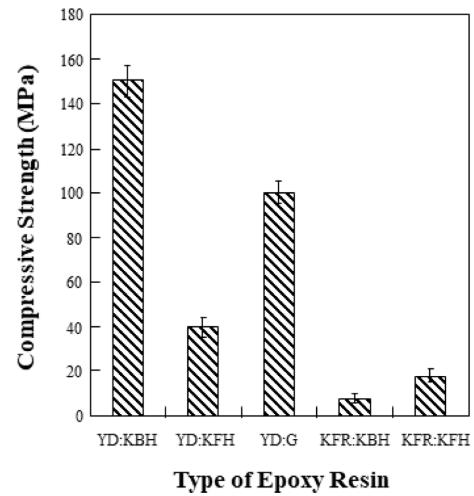


Fig. 6. Compressive strength of epoxy foam with different epoxy formulation

3.2 에폭시 조성에 따른 에폭시 폼의 특성 고찰

Fig. 5와 6은 에폭시 폼을 형성시키는 에폭시 수지 조성에 따른 영향을 정리한 결과이다. 일반적으로 폼 상태가 되면 압축강도는 40 MPa 이하의 상태가 됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 5의 결과와 같이 발포제를 2 wt% 사용하여도 포밍이 잘 안될 경우 에폭시 폼으로 적용하기 어려운 수지 조성임을 확인하였다. Fig. 6의 결과에서 100 MPa 이상의 강도를 가지는 에폭시 경화물들은 폼이 형성되지 않음은 의미한다. 확실한 결과는 산무수물계 에폭시 수지가 발포제에 의해 발포되는 가능성이 높음을 YD:G 결과를 통해 확인할 수 있었다. 적절한 에폭시 수지 조성은 KFR:KFH 수지 조성이었다. 너무 강직한 에폭시로 경화되는 수지 조성에 발포제를 삽입하기보다는 비교적 유연한 특성을 나타낼 수 있는 에폭시 수지 조성에 발포제가 적절하였다.

3.3 에폭시 조성에 따른 에폭시 폼의 특성 고찰

Fig. 7은 KFR:KFH 수지 조건에 ACA 발포제를 혼합할 때 ACA의 농도에 따른 폼의 압축강도를 평가한 결과이다. Fig. 8은 ACA의 농도를 다르게 하여 에폭시 폼을 제조하였을 경우 발생하는 폼의 형태를 나타낸 결과이다.

에폭시 폼이라고 명칭할 수 있는 압축강도를 나타내는 조건은 ACA 2 wt% 조건부터라고 생각할 수 있다. 그러한 이유는 Fig. 8(a),(b),(c)와 같이 폼의 상태를 관찰함에 따라 확인할 수 있다. 0.5 wt% 조건에서도 에폭시 내부에 폼핑은 발생된다. 하지만 구간별 에폭시 경화물의 색상이 다를 수 있음을 확인할 수 있다. 즉 폼이 진행되는 구간과 안되는 구간이 명확히 발생되기 때문에 2 wt% 이하 조건에서는 에폭시 폼에 적절한 조건이 아니라고 생각된다. 그에 비해 ACA의 농도가 높아짐에 따라 3 wt%에서 5 wt% 조건까지는 비교적 균질한 폼의 형상을 나타낸다고 할 수 있다. 하지만 ACA의 농

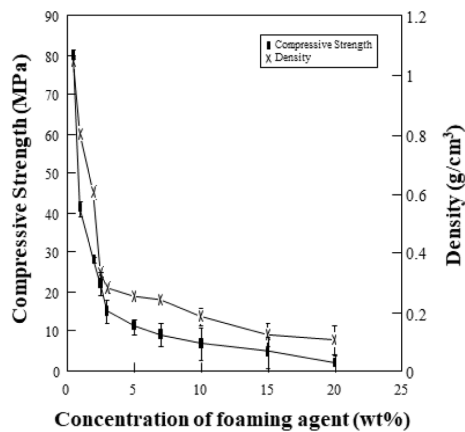


Fig. 7. Density and compressive strength of epoxy foam with different ACA foaming agent wt%

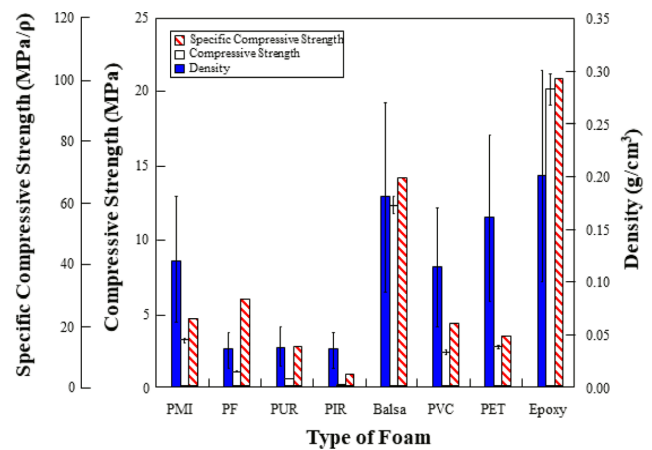


Fig. 9. Compressive properties and density of structural foam with different materials

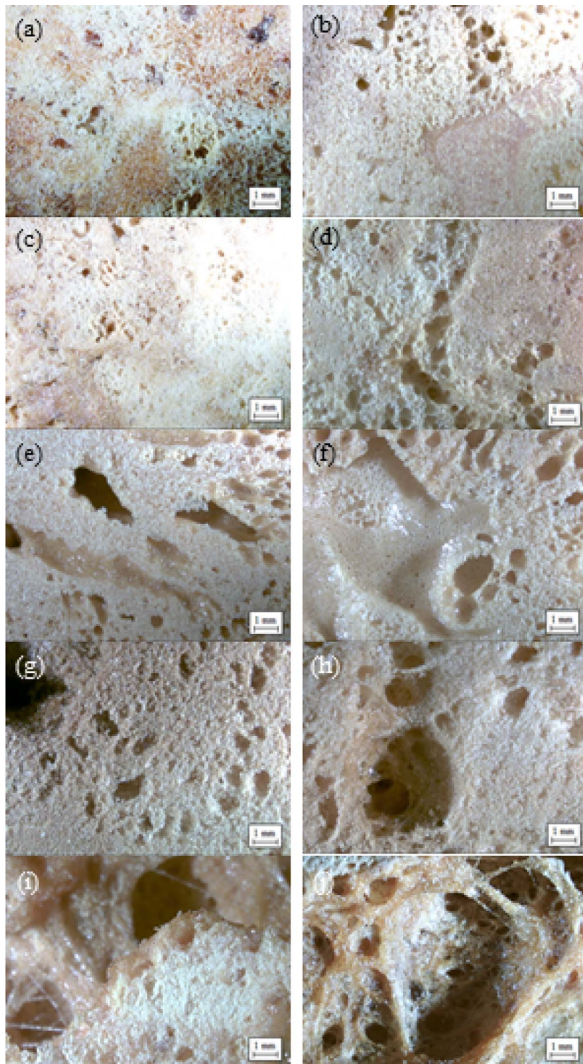


Fig. 8. Foaming condition of epoxy foam with different epoxy resin: (a) 0.5 wt%; (b) 1 wt%; (c) 2 wt%; (d) 2.5 wt%; (e) 3 wt%; (f) 5 wt%; (g) 7 wt%; (h) 10 wt%; (i) 15 wt%; and (j) 20 wt%

도가 증가됨에 따라 폼 내부에 존재하는 기공의 크기가 증가되는 결과를 나타내었다. 또한 10 wt% 이상의 농도로 에폭시 폼을 제조할 경우 폼의 내부에 1 cm 이상의 기공이 형성되며, 폼의 색상에서도 볼 수 있듯이 에폭시 수지 자체의 고분자사슬이 변성되어 생상변화와 Fig. 7의 압축강도 저하 결과를 확인할 수 있었다. 농도에 따른 에폭시 폼 제조에 따른 결과를 정리해보면 ACA 발포제를 KFR:KFH 수지 조성에 3 wt% 삽입하는 것이 적절했다.

Fig. 9의 결과는 궁극적으로 구조용 폼에 대한 압축강도, 밀도, 비압축강도를 비교한 결과이다. PMI(polymethacrylimide)는 로하셀 제품군의 공개스펙을 이용하였고, PF(Phenolic resin), 발사 폼 등은 실제 실험으로 확인한 결과이다. 에폭시 폼의 경우 선택적으로 폼의 조성을 조절할 수 있으며, 현재의 조건으로 비교해 볼 때 타 구조용 폼에 비해 밀도는 0.1 정도 높은 편이지만, 압축강도가 월등히 높기 때문에 타 소재에 비해 비압축강도가 높음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 구조용 폼으로 사용하기 위한 에폭시 폼에 대한 제조 및 포밍의 가능성을 평가한 관찰 논문이다. 산무수물계 에폭시 수지에 발포제를 이용하여 폼의 형상이 발생됨을 확인할 수 있었으며, ACA 발포제를 2 wt% 이상 사용하는 것이 효과적인 발포 상태를 나타내었다. 에폭시 수지는 KFR:KFH 조성이 적합하였다. 구조용 폼 종류에 비해 밀도는 비교적 높은 편이지만, 셀 조절 및 성형 조건 조절을 통해 개선된 구조용 에폭시 폼이 제조될 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부, KEIT가 지원하는 연구과제

(탄소산업기반조성사업, 10083573)로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Choi, W.H., Shin, J.H., Song, T.H., Lee, W.J., and Kim, C.G., "Design and Fabrication of Stratified Microwave Absorbing Structure Consisted of Glass/epoxy-resistive Sheet-foam", *Composites Research*, Vol. 27, 2014, pp. 225-230.
2. Kim, Y.S., and Chang, S.H., "A Study on the Micro-deformation of Plain Weave Carbon/epoxy Composite-polymer Foam Sandwich Structures during Curing", *Composites Research*, Vol. 17, 2004, pp. 28-36.
3. Gianchandani, P.K., Casalegno, V., Salvo, M., Bianchi, G., Ortona, A., and Ferraris, M., "SiC Foam Sandwich Structures Obtained by Mo-wrap Joining", *Materials Letters*, Vol. 221, 2018, pp. 240-243.
4. Xie, Y., Li, J., Lu, Z., Jiang, J., and Niu, Y., "Effects of Bentonite Slurry on Air-void Structure and Properties of Foamed Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 179, 2018, pp. 207-219.
5. Prociak, A., Kurańska, M., Cabulis, U., Ryszkowska, J., Leszczyńska, M., Uram, K., and Kirpluks, M., "Effect of Biopolyols with Different Chemical Structures on Foaming of Polyurethane Systems and Foam Properties", *Industrial Crops & Products*, Vol. 120, 2018, pp. 262-270.
6. Mostafa, A., Shankar, K., and Morozov, E.V., "Effect of Shear Keys Diameter on the Shear Performance of Composite Sandwich Panel with PVC and PU Foam Core: FE Study", *Composite Structures*, Vol. 102, 2013, pp. 90-100.
7. Bedell, M., Brown, M., Kiziltas, A., Mielewski, D., Mukerjee, S., and Tabor, R., "A Case for Closed-loop Recycling of Post-consumer PET for Automotive Foams", *Waste Management*, Vol. 71, 2018, pp. 97-108.
8. Aliha, M.R.M., Linul, E., Bahmani, A., and Marsavina, L., "Experimental and Theoretical Fracture Toughness Investigation of PUR Foams under Mixed Mode I+III Loading", *Polymer Testing*, Vol. 67, 2018, pp. 75-83.
9. Wang, Y.C., and Foster, A., "Experimental and Numerical Study of Temperature Developments in PIR Core Sandwich Panels with Joint", *Fire Safety Journal*, Vol. 90, 2017, pp. 1-14.
10. Hu, Y., Fang, Q.Z., Sha, B.L., and Zhao, M., "Effect of the Large Cells on the Fatigue Properties of Closed-cell Aluminum Alloy Foam", *Composite Structures*, Vol. 200, 2018, pp. 59-68.
11. Duarte, I., Vesenjak, M., Krstulović-Opara, L., and Ren, Z., "Crush Performance of Multifunctional Hybrid Foams Based on an Aluminium Alloy Open-cell Foam Skeleton", *Polymer Testing*, Vol. 67, 2018, pp. 246-256.
12. Shunmugasamy, V.C., and Mansoor, B., "Aluminum Foam Sandwich with Density-graded Open-cell Core: Compressive and Flexural Response", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 731, 2018, pp. 220-230.
13. Hu, D., Gu, Y., Liu, T., and Zhao, L., "Microcellular Foaming of Polysulfones in Supercritical CO₂ and the Effect of Co-blowing Agent", *Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 18, 2018, pp. 30134-30137.
14. Nistor, A., Topiar, M., Sovova, H., and Kosek, J., "Effect of Organic Co-blowing Agents on the Morphology of CO₂ Blown Microcellular Polystyrene Foams", *Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 17, 2017, pp. 30294-30302.
15. Long, Y., Yuan, S., Wang, Y., and Xie, X., "Polyurethane Foaming with Engineered CO₂-releasing Nanoparticles: From the Thickening Effect to the Industrial Applications of the Blowing Agents", *Polymer*, Vol. 143, 2018, pp. 69-78.
16. Wu, H., Zhao, G., Wang, G., Zhang, W., and Li, Y., "A New Core-back Foam Injection Molding Method with Chemical Blowing Agents", *Materials and Design*, Vol. 144, 2018, pp. 331-342.
17. Long, Y., Zheng, L., Gu, Y., Lin, H., and Xie, X., "Carbon Dioxide Adduct from Polypropylene Glycol Grafted Polyethyleneimine as a Climate-friendly Blowing Agent for Polyurethane Foams", *Polymer*, Vol. 55, 2014, pp. 6494-6503.
18. Mohamed Aqhil Ahmed, M.A., and Safiulla, M., "Evaluation of Apparent Shear Modulus of Multilayer PUF Cored Sandwich Beams Using Novel Experimental Technique", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, 2018, pp. 429-435.
19. Birman, V., "Wrinkling of Functionally Graded Sandwich Structures Subject to Biaxial and In-plane Shear Loads", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 84, 2017, JAM-17-1320.
20. Stefani, P.M., Perez, C.J., Alvarez, V.A., and Vazquez, A., "Microcellulose Fibers-filled Epoxy Foams", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 109, 2008, pp. 1009-1013.
21. Zhong, F., He, J., and Wang, X., "Microstructure and Properties of Epoxy Foams Prepared by Microwave", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 112, 2009, pp. 3543-3547.