

구조용 폼의 조성 및 열 노화에 따른 변형특성 관찰

최진영* · 권일준* · 박성민* · 권동준*†

Investigation of Properties of Structural Foam with Different Conformation and *via* Thermal Aging Condition

Jin-Yeong Choe*, Il-Jun Kwon*, Sung-Min Park*, Dong-Jun Kwon*†

ABSTRACT: Sandwich composites of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) and polymer foam will be used to automobile and aerospace industry according to increasing importance of light weight. In this study, mechanical and heat resistance properties of sandwich composites were compared with type of polymer foam (polyethylene terephthalate(PET), polyvinylchloride(PVC), epoxy and polyurethane). All types of polymer foams were degraded to 30, 60, 120, 180 minutes in 180°C. After heat degradation, the polymer foams were observed using optical microscope and compressive test was performed using universal testing machine(UTM). Epoxy foam had the highest compressive property to 2.6 MPa and after thermal degradation, the mechanical property and structure of foam were less changed than others. Epoxy foam had better mechanical properties than other polymer foams under high temperature. Because the epoxy foam was post cured under high temperature. As the results, Epoxy foam was optimal materials to apply to structures that thermal energy was loaded constantly.

초 록: 섬유강화고분자복합재료(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics)의 경량화는 자동차 및 항공 분야에서 끊임없이 요구되고 있으며, 구조용 폼과 CFRP를 혼합하여 샌드위치 복합재료로 사용되고 있다. 본 연구에서는 열경화성 소재인 에폭시 폼과 폴리우레탄 폼 및 열가소성 소재인 PET 폼과 PVC 폼의 조성 차이에 따른 폼의 형상 및 열 노화를 통해 변화되는 기계적 특성 변화를 관찰하였다. 성형한 에폭시 폼, 폴리우레탄 폼 및 상용화된 PET 폼과 PVC폼을 180도에서 열 노화시켰으며, 30, 60, 120, 180분의 노화시간에 따라 구조용 폼의 변화를 광학 현미경 및 만능시험기로 폼 셀의 형상 및 압축강도를 평가하였다. 궁극적으로 에폭시 폼이 가장 높은 2.6 MPa의 압축강도를 가졌으며, 열 노화 조건에서도 물성저하나 형상의 변화가 거의 발생되지 않았다. 이는 에폭시 폼이 타 구조용 폼에 비해 열 노화 조건에서 후경화되어 강직한 조성을 이루며, 타 구조용 폼과는 다르게 내열 특성이 우수하기 때문에 고온용 구조용 폼으로 적용하기 적합한 소재임을 확인하였다.

Key Words: 구조용 폼(Structural foam), 에폭시(Epoxy), 폴리우레탄(Polyurethane), 열 노화(Thermal aging), 열가소성 폼(Thermoplastic foam)

1. 서 론

자동차 산업은 편의성, 안전성 등에 대한 요구수준이 높아지면서 기능성 부품들이 늘어나 자동차 중량은 계속 증

가하는 추세이지만, 최근 전세계적으로 석유자원의 고갈 및 환경오염 문제로 인해 평균연비 및 배기가스 규제강화에 대비한 연비개선이 절실히 요구되고 있다[1]. 자동차의 연비개선 대책으로는 엔진, 구동 계의 효율 향상, 주행저항

Received 28 May 2018, received in revised form 13 August 2018, accepted 22 August 2018

*Korea Dyeing and Finishing Technology Institute, Polymer Resin Team

*†Korea Dyeing and Finishing Technology Institute, Polymer Resin Team, Corresponding author (E-mail: rorri@dyyetec.or.kr)

저감을 위한 차체 설계, 소형화 및 경량화 등이 있다[2]. 경량 재료로의 대체, 부품간소화 등에 의한 차체의 경량화는 연비를 향상시킬 수 있을 것으로 기대되어 현 상황에서 경량화가 가장 유력한 방안으로 제시되고 있다[3]. 이러한 차체 경량화를 위한 소재로 알루미늄, 마그네슘 등의 금속재료가 주로 사용되어 왔으나 최근에는 고분자 재료와 강도가 높은 고분자 복합재료가 비금속재료로서 금속재료를 대체해나감에 경량화 소재로서 자리매김하고 있다[4-6].

그 중 고분자 폼 소재는 경량화와 함께 단열, 충격성 및 방음성 등을 부여해주는 기능성 소재로서 최근 자동차 경량화를 위한 내외장재로 많이 이용되고 있다. 일반적으로 고분자 폼 소재를 성형하기 위한 수지는 크게 열가소성과 열경화성 수지로 나눌 수 있으며, 그 중 열가소성 폼 소재로 주로 쓰이는 수지는 PET, PVC, PP 등이 있으며 열경화성 발포소재로 쓰이는 수지는 페놀, 폴리우레탄 및 에폭시 등이 있다.

열가소성 발포소재의 장점은 가격이 저렴하고 비중을 낮으며 열에 약하기 때문에 성형이 용이하며, 다양한 형상의 제품을 쉽게 성형할 수 있다[6]. 열경화성 폼 소재는 가격이 비싸고 성형 방법이 까다로우며 한번 경화가 이루어지면 재 성형이 되지 않는 단점이 있으며, 특히 폴리우레탄의 경우 이소시아네이트를 사용하기 때문에 환경적으로 큰 문제가 되고 있다[7]. 하지만 일반적으로 폴리우레탄 폼이 다른 고분자 발포소재에 비해 성형성과 단열, 방음 효과, 기계적 강도가 우수하여 여러 산업분야에 많이 사용되고 있다[8]. 에폭시는 접착성 및 기계적 강도, 내수성, 내화학성, 내열성, 전기절연성이 우수하여 많은 장점을 보유하고 있으며, 성형성이 좋아 복합재료로의 적용이 용이한 장점을 가진다[9]. 에폭시 수지는 경화제의 종류에 따라 다양한 특성 구현이 장점이며, 여러 산업분야의 기본소재로 사용되고 있다[10].

발포소재를 성형하기 위한 발포제는 크게 화학적 발포제와 물리적 발포제로 나눌 수 있다[11]. 화학적 발포제는 유기, 무기 발포제로 물리적 발포제는 가스형과 팽창형으로 나뉘어진다[12]. 화학적 발포제는 열에 의해 화학적 분해가 일어나고 분해 물질 중 가스 물질에 의해 수지 속에 기공을 형성해주며 물리적 발포제는 화학적 분해나 구조 변화가 일어나지 않고 물리적인 상변이 및 부피변화가 일어나면서 기공을 형성시키는 물질로 구분된다[13]. 플라스틱 소재에 가스를 주입시키는 가스형과 액상형 발포제를 캡슐화하여 미립자 형태를 가지는 형태의 팽창형으로 다시 분류된다. 발포 소재의 물성은 발포 특성에 따라 달라지기 때문에 균일한 셀 크기, 높은 발포율이 요구되고 있다[14,15].

본 연구에서는 구조용 폼으로 이용되는 열가소성 소재인 PVC와 PET 폼 및 열경화성 에폭시와 폴리우레탄 폼의 조성 차에 따른 폼 형상 및 압축강도를 평가하였다. 구조용

폼의 180도 열 노화 조건에 의해 변화되는 폼의 형상과 압축강도를 확인하였으며, 내열 조건에서 사용하기 적합한 구조용 폼의 조성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료

에폭시 폼은 RESOLTECH사의 2080 M25 주체와 경화제 2085M를 사용하였다. 폴리우레탄 폼은 동성화인텍 260 타입을 이용하여 실험에 사용하였다. 열가소성 소재인 PVC와 PET 폼은 경화가 되어진 고체상의 폼을 실험에 사용하였다. PVC 폼은 3A사의 Airex C70와 Airex C71을 사용하였으며, PET 폼은 Airex T92를 사용하였다.

2.2 액상타입의 구조용 폼의 제조

Table 1은 에폭시 폼 성형에 사용하는 재료의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

Table 1. Density and viscosity of epoxy foam conformations

	2080 M25	2080 M	Mix prior to foaming	Mix after to foaming
Density	1.17	0.95	1.12	0.25
Viscosity (mPa·s)	4000	29	1950	-

성형한 액상타입의 구조용 폼의 경화 시간을 확인하기 위해 Differential scanning calorimetry(DSC, Perkin Elmer, DSC4000)를 사용하여 경화 반응열을 측정하였다. 주체와 경화제를 10:3의 비율로 섞어준 용액을 100°C의 조건에서 20분 경화하여 에폭시 폼을 얻었다. PU 폼은 2액형 수지를 1:1의 비율로 섞어 건조오븐을 이용하여 60°C에서 5분 경화하여 실험에 필요한 시편을 제조하였다.

2.3 구조용 폼의 압축강도 평가 및 폼 형상 분석

구조용 폼으로 사용할 수 있는 에폭시 폼, 폴리우레탄폼, PVC 폼(C70, C71), PET 폼(T92)에 대한 압축강도를 평가하기 위해 ISO 844 규격에 맞춰 실험을 실시하였다. 압축강도는 폼의 변형이 10%일 때의 측정값을 이용하였으며, 압축하중을 받는 면적은 25 cm²이었으며, 두께는 1 cm로 시편의 크기를 정형화하였다. Universal Testing Machine(UTM, Shimazu, AG-250kNX)를 사용하여 평가하였으며, 실험 속도는 두께의 10%/min으로 각 3회씩 실험하여 평균 값을 측정하였다.

폼의 형상을 분석하기 위해 구조용 폼의 밀도를 ISO 845의 규격에 따라 각 3회씩 측정하였고 기공 사이즈 측정과 형상 변화의 관찰을 위해 Stereoscopic Microscope(NIKON, SMZ18) 사용하였다.

2.4 구조용 폼의 노화 및 특성 변화 관찰

구조용 폼의 열 노화에 따른 안정성 평가를 위해 실제 차량 제조시 180도 열처리 도장공정이 존재하기 때문에 열 노화 조건을 설정하였으며, 이에 안정적인 구조용 폼의 조성을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 건조오븐을 이용하여 열 노화 상황을 구현하였으며 노화시간 변수는 30분, 1시간, 2시간, 3시간으로 하였다. 열 노화에 따라 변화되는 압축강도와 폼 형상, 밀도 변화를 바탕으로 내열 안정성이 높은 구조용 폼 조성을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구조용 폼의 조성에 따른 형상

Fig. 1은 구조용 폼의 조성에 따른 기공 사이즈를 정리한 결과이다. Fig. 2의 단면 관찰 결과를 바탕으로 정리한 그래프이다. Fig. 2의 결과는 대표적인 단면 표면을 측정한 결과이며, Fig. 1의 평균 결과를 도출하기 위해 폼 성형품의 상하좌우, 내부 단면까지 측정하여 평균값으로 정리한 결과

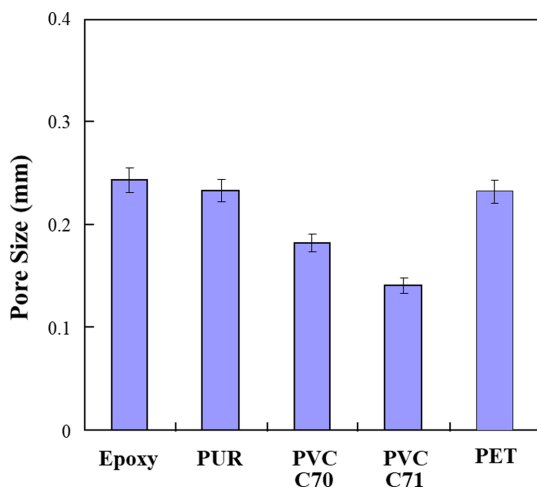


Fig. 1. The pore size of structural foam with different polymer composition

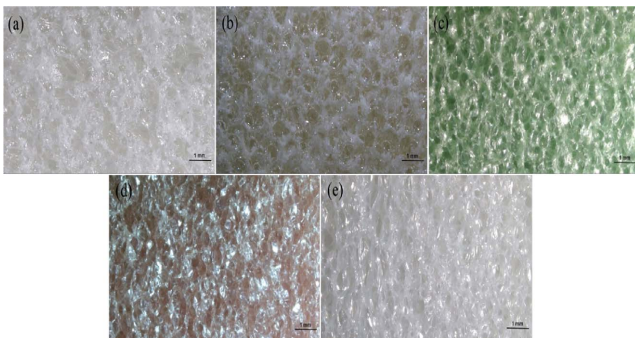


Fig. 2. The pore size of structural foam with different polymer composition: (a) Epoxy, (b) PUR, (c) PVC C70, (d) PVC C71 and (e) PET

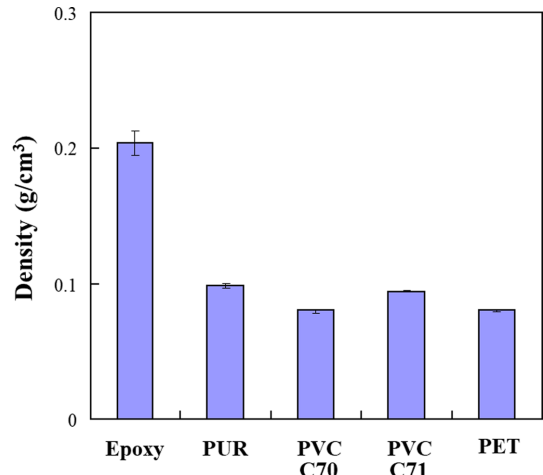


Fig. 3. The density of structural foam with different polymer composition

이다. 구조용 폼 자체의 특성만으로 본다면 PVC 폼 조성이 비교적 작은 기공사이즈를 보유하고 있으며, 에폭시, PUR, PET 폼이 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 3은 구조용 폼을 구성하는 고분자 조성의 차이에 따른 밀도 비교를 진행한 결과이다. 액상으로 실제 제조를 해야하는 에폭시 폼이나 PUR 폼의 경우 타 구조용 폼이 비해 구간별 폼의 밀도 편차가 조금 존재하는 상태였다. 하지만 상용화되어 구조용 폼의 경우 구간별 밀도 편차가 매우 낮은 상태였다. 또한 에폭시 폼은 폼을 구성하는 에폭시 수지의 조성적 특성에 의해 타 폼 수지에 비해 2배 높은 밀도를 가지고 있었으며, 이는 고분자량이 타 구조용 폼 조성에 비해 높은 상태임을 예측할 수 있었다. PUR, PET, PVC 폼의 경우 밀도가 0.1 이하의 수준을 나타내었으며, 경량 구조용 폼을 제조하는 조건으로는 최적의 폼 소재임을 확인할 수 있었다.

3.2 열 노화 조건에 따른 구조용 폼의 특성 변화

Fig. 4는 구조용 폼의 조성이 다른 소재를 180도 열 노화시키는 시간변화에 따른 압축강도 변화를 정리한 결과이다. 일반 열 노화를 진행시키지 않은 0 min 조건의 결과를 바탕으로 보면 구조용 폼의 압축강도는 구조용 폼의 밀도 결과와 비례하는 경향을 나타내었다. 가장 밀도가 높았던 에폭시 폼의 경우 가장 높은 2.5 MPa 압축강도를 나타내었다. 또한 폼의 기공 크기가 작았던 PVC C71의 조건도 2.4 MPa 수준으로 높은 압축강도를 가졌다.

하지만, 180도 조건에서의 열노화 진행 시간이 증가됨에 따라 열가소성 타입의 PVC, PET 폼의 경우 급격한 물성저하의 결과를 나타내었다. PET 폼의 경우 기본 Tm이 높은 소재라 열 노화에 따른 물성 저하는 낮은 편이었으나, PVC 나 PUR 조성의 경우 대략 50% 이상의 물성저하 결과를 보였다.

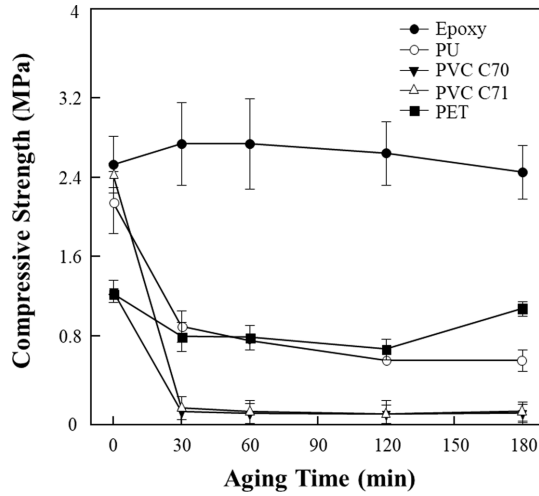


Fig. 4. Compressive strength of structural foam with different aging time

180도 열 노화 조건이 진행됨에 따라 에폭시 폼의 경우 타 구조용 폼과는 다르게 1시간 동안의 열 노화 조건에 따라 압축물성이 증가되는 경향을 나타내었다. 이는 에폭시 수지의 후경화에 따른 경화도 증가에 따른 고분자 조성에 의한 영향으로 예상해 볼 수 있었다. PVC C70, C71의 경우 상온조건에서는 T_g 가 65도 이었으나 열노화 이후 30% 정도 떨어졌으며, PET 폼의 경우 열노화 조건 이전에는 T_g 가 95도 수준이었으나, 열노화 이후 20% 낮게 떨어졌다. 에폭시 폼의 경우 초기 열 노화 전에 T_g 가 95도를 나타내었으나, 열 노화 30분에 103도, 1시간 후 105도, 2시간 후 100도, 3시간 후 90도로 변화되는 경향을 볼 수 있었다. 즉 에폭시 수지의 열 노화 조건에 의한 후경화 처리에 의해 강도가 증가되었다고 예상할 수 있었다.

Fig. 5는 조성이 다른 구조용 폼에 대한 열노화 후 시편의 기공크기 변화를 정리한 결과이다. PVC 폼의 경우 열노화에 따른 부피 팽창이 크게 발생되며 이러한 경향은 폼 내부

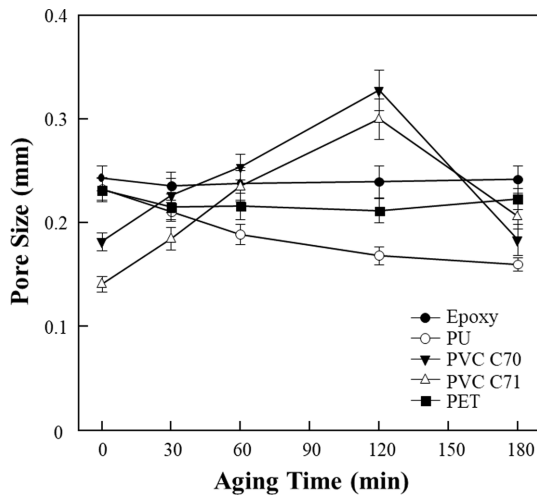


Fig. 5. Pore size of structural foam with different aging time

에 존재하는 발포제의 영향으로 발생된다고 예상된다. PUR 폼의 경우 열 노화에 따라 폼이 서서히 부피를 줄여가는 현상을 볼 수 있었으며, 이에 따라 기공 크기가 감소되는 경향을 나타내었다. 에폭시 폼과 PET 폼의 경우 비교적 열 노화 조건에 의해 형상의 변화에 안정적이라고 설명할 수 있으며, 이러한 특성은 높은 T_m 을 보유하는 고분자 조성의 영향이라고 생각할 수 있다.

Fig. 6는 조성이 다른 구조용 폼에 대한 열 노화 후 시편의 밀도 변화를 정리한 결과이다. Fig. 5에서 설명했듯이 PU 폼의 경우 열 노화 조건에 의해 폼의 수축이 발생되기 때문에 질량은 유지하지만, 부피가 줄어 폼의 밀도가 크게 저하

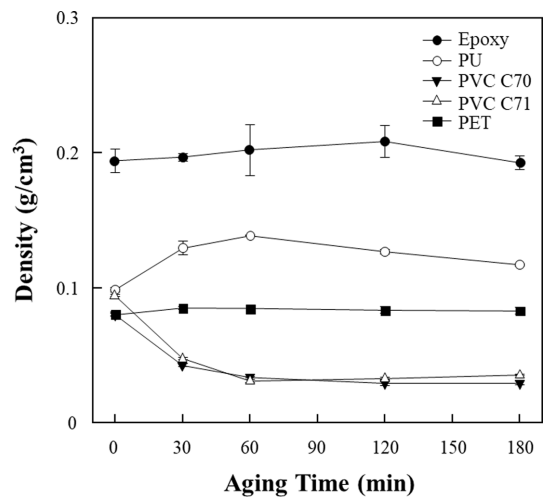


Fig. 6. Density of structural foam with different aging time

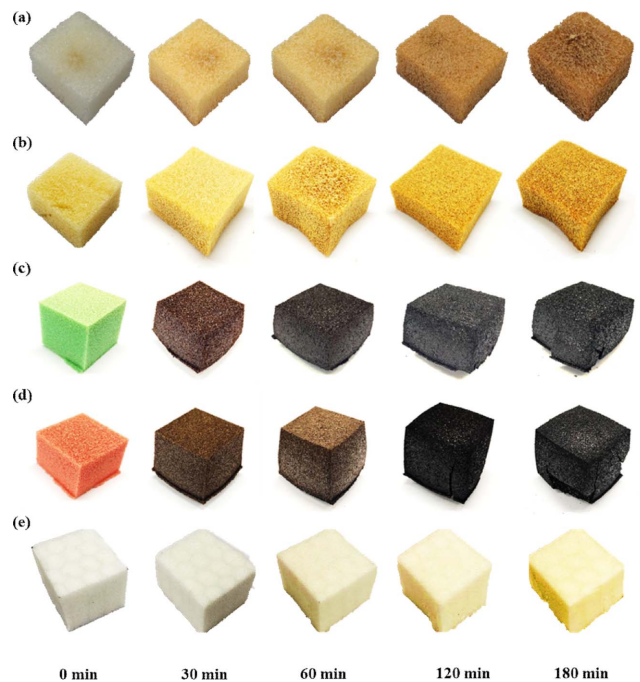


Fig. 7. Photograph of structural foam with different aging time: (a) Epoxy, (b) PU, (c) PVC C70, (d) PVC C71 and (e) PET

되는 결과를 나타내었으며, PVC 폼의 경우 열에 의한 부피 팽창이 문제되어 서서히 밀도가 더 크게 저하되는 결과를 나타내었다. 에폭시 폼의 경우 열 노화가 진행됨에 따라 지속적으로 밀도는 증가하지만, 그 변화의 폼은 비교적 안정적이라고 설명할 수 있었다. PET 폼 역시 유사한 결과를 나타내었으며, 이러한 폼의 특성 분석을 통해 에폭시 폼과 PET 폼이 고온환경에서 사용하기에 적합하다고 생각할 수 있었다.

Fig. 7의 결과는 열 노화 시간에 따라 변화되는 구조용 폼의 형상 변화를 나타낸 결과이다. 위 Fig. 5, 6의 결과와 같이 구조용 폼의 형상은 고분자 조성의 차이에 따라 변화되는 경향을 나타내었다. 중요한 변수는 색상변화와 폼의 형상 안정성이 열 노화에 따라 변화된다는 점이며, 그림과 같이 에폭시 폼과 PET 폼이 비교적 안정적인 상태이며, PVC와 PUR 폼의 경우 내열 조건에 적합하지 않은 구조용 폼임을 확인하였다.

Fig. 8의 결과는 180도 180분 노화시킨 시편의 단면을 촬영한 결과이다. PVC 폼과 PU 폼의 경우 열 노화 조건에 따라 전반적으로 색상변화가 발생된 결과를 확인할 수 있었으며, PVC 폼의 경우 내부에 균열이 크게 형성되어 내열 조건에서 구조용 소재로 사용하기에는 부적합한 소재임을 확인할 수 있었다. 그에 비해 PET 폼과 에폭시 폼의 경우 색상 변화는 비교적 적었으며, 에폭시 폼의 경우 폼의 표면부분에만 열 노화에 의한 색상 변화가 발생되었을 뿐 내부에는 열 노화에 의한 전체적인 변형은 진행되지 않았음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 PET 폼 보다 에폭시 폼의 내열 내구성 이 더 높은 조성임을 확인할 수 있었다.

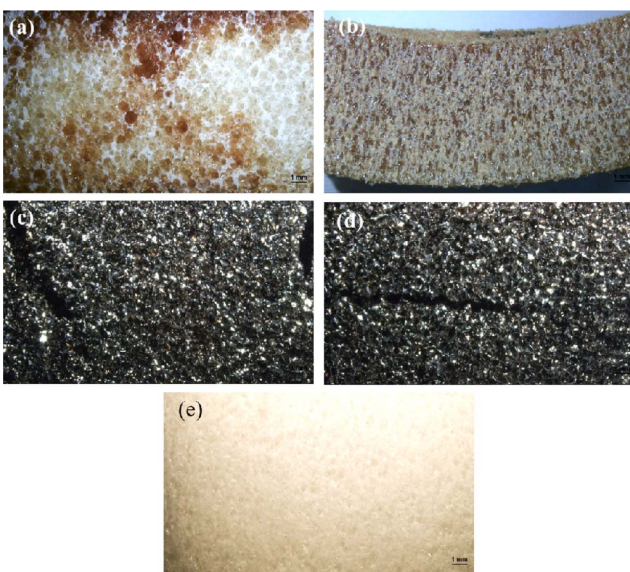


Fig. 8. Photograph of inside surface of structural foam after 180 min aging: (a) Epoxy, (b) PU, (c) PVC C70, (d) PVC C71 and (e) PET

4. 결 론

본 연구에서는 차량용으로 사용하기 위한 구조용 폼의 조성에 따른 특성 관찰과 내열 조건에서 안정적인 구조용 폼의 조성을 확인하기 위한 열 노화 조건에 따른 폼의 특성 변화를 조사하였다. 에폭시 폼의 경우 액상 상태로 제공되고 반응에 의한 변형이 발생할 가능성이 높아 기공크기의 조절에 지속적인 연구가 더 필요한 상황이지만, 압축강도 및 내열 조건에서의 구조적 안정성을 보유하고 있기 때문에 고온 조건에서 활용하기에 적합한 구조용 폼임을 확인하였으며, 이러한 구조용 폼의 기초 데이터가 다양한 경량 복합재료 개발에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부, KEIT가 지원하는 연구과제(탄소산업기반조성사업, 10083573)로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kim, K.S., Bae, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park, S.J., "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Light-weight Vehicles," *Elastomers and Composites*, Vol. 47, No. 1, 2012, pp. 65-74.
2. Meschut, G., Janzen, V., and Olfermann, T., "Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 5, 2014, pp. 1515-1523.
3. Ahn, W.S., and Lee, B.Y., "Fabrication of Inorganic Filler-Polyurethane Composite Foam and Postcure Effect on Mechanical Properties," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 5, 2011, pp. 2451-2456.
4. Hirsch, J., "Aluminium in Innovative Light-weight Car Design," *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 5, 2011, pp. 818-824.
5. Kim, J., Kim, K.D., Kim, S., Shin, D., and Kim, D., "Development of Carbon Continuous-fiber Composite Frame for Automotive Sun-roof Assembly," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 25, No. 3, 2017, pp. 350-359.
6. Obradovic, J., Boria, S., and Belingardi, G., "Lightweight Design and Crash Analysis of Composite Frontal Impact Energy Absorbing Structures," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, 2012, pp. 423-430.
7. Kim, S.T., "Development Trend for Thermoplastic Polymer Composite," *Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, 2013, pp. 25-29.
8. Jang, S.Y., and Kim, S., "Effect of Blowing Agents on Properties of Phenolic Foam," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 20, No. 2, 2016, pp. 30-34.
9. Lee, J.C., Seo, J.S., and Kim, S.B., "Study on Flame Retardancy and Thermal Resistance Properties of Phenolic Foam and Poly-

- urethane Foam,” *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 17, No. 1, 2013, pp. 35-41.
10. Yáñez-Flores, I.G., Ibarra-Gómez, R., Rodríguez-Fernández, O. S., and Gilbert, M., “Peroxide Crosslinking of PVC Foam Formulations,” *European Polymer Journal*, Vol. 36, No. 10, 2000, pp. 2235-2241.
 11. Kim, D., and Lee, S., “Properties and Thermal Characteristics of Phenol Foam for Heat Insulating Materials,” *Journal of Korean Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 17, No. 4, 2006, pp. 357-360.
 12. Mazzon, E., Habas-Ulloa, A., and Habas, J.P., “Lightweight Rigid Foams From Highly Reactive Epoxy Resins Derived from Vegetable Oil for Automotive Applications,” *European Polymer Journal*, Vol. 68, 2015, pp. 546-557.
 13. El Gazzani, S., Nassiet, V., Habas, J.P., Freydier, C., and Hilleshein, A., “High Temperature Epoxy Foam: Optimization of Process Parameters,” *Polymers*, Vol. 8, No. 6, pp. 2016. 215.
 14. Song, B., Chen, W., and Lu, W.Y., “Compressive Mechanical Response of a Low-density Epoxy Foam at Various Strain Rates,” *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 17, 2007, pp. 7502-7507.
 15. Tang, Z., Maroto-Valer, M.M., Andrésen, J.M., Miller, J.W., Listemann, M.L., McDaniel, P.L., Morita, D.K., and Furlan, W.R., “Thermal Degradation Behavior of Rigid Polyurethane Foams Prepared with Different Fire Retardant Concentrations and Blowing Agents,” *Polymer*, Vol. 43, No. 24, 2002, pp. 6471-6479.
 16. Kwon, H.J., Park, H.J., Lee, E.J., Ku, S.M., Kim, S.H., and Lee, K.Y., “Study of the Curing Reaction Rate of a Glass Fiber Reinforced Bisphenol-A (BPA) Epoxy Prepreg by Differential Scanning Calorimetry (DSC),” *Composites Research*, Vol. 31, No. 1, 2018, pp. 30-36.