



## Analysis of Mechanical Characteristics of Polymer Sandwich Panels Containing Injection Molded and 3D Printed Pyramidal Kagome Cores

K. M. Yang, J. H. Park\*, T. G. Choi\*, J. S. Hwang\*\*, D. Y. Yang\*\*, and M.-Y. Lyu\*<sup>†</sup>

*Design and Engineering Program Department, Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, South Korea*

*\*Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, South Korea*

*\*\*School of Mechanical Aerospace & Systems Engineering, KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

(Received November 15, 2016, Revised November 16, 2016, Accepted November 22, 2016)

**Abstract:** Additive manufacturing or 3D printing is a new manufacturing process and its application is getting growth. However, the product qualities such as mechanical strength, dimensional accuracy, and surface quality are low compared with conventional manufacturing process such as molding and machining. In this study not only mechanical characteristics of polymer sandwich panel having three dimensional core layer but also mechanical characteristics of core layer itself were analyzed. The shape of three dimensional core layer was pyramidal kagome structure. This core layer was fabricated by two different methods, injection molding with PP resin and material jetting type 3D printing with acrylic photo curable resin. The material for face sheets in the polymer sandwich panel was PP. Maximum load, stiffness, and elongation at break were examined for core layers fabricated by two different methods and also assembled polymer sandwich panels. 3D printed core showed brittle behavior, but the brittleness decreased in polymer sandwich panel containing 3D printed core. The availability of 3D printed article for the three dimensional core layer of polymer sandwich panel was verified.

**Keywords:** 3D printing, injection molding, pyramidal kagome core, sandwich panel, mechanical characteristics

### Introduction

3D 프린팅은 제품개발 초기 단계에서 발생하는 오류의 수정 및 시행착오를 줄일 수 있고 개발비용 및 시간을 줄일 수 있는 제작기법으로 각광받고 있다.<sup>1</sup> 3D 프린팅에 관한 ASTM 규격 대표공정으로는 ‘Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Sheet Lamination, Vat Photopolymerization, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition’이 있다.<sup>2</sup> 3D 프린팅 공정 중 material jetting 방식은 재료를 이차원 프린터처럼 제팅하여 단면적을 제작하는 방식이다. 이 방식은 정교한 형상을 출력할 수 있는 장점이 있다. 그러나 3D프린팅은 약한 강도를 갖고 있어 시제품 제작과 형상유지 용도로 활용하고 있고 완제품 제작으로는 많이 사용되지 않고 있는 현실이다. 따라서 3D 프린팅 조형물의 강도에 대한 연구가 필요하다.

최근 들어 경량화 소재가 큰 화두가 되고 있다. 고분자의 경량화 방법은 다양하다. 소재의 물성을 증대시켜 적은 양을 사용하게 하는 방법, 내부에 폼을 형성하게 하여 비강성을 높이

는 방법, 유리섬유나 카본섬유를 이용한 복합소재를 사용하는 방법, 그리고 샌드위치 복합판재를 사용하여 비강성을 높이는 방법 등이 소재의 경량화를 위한 방법들이다.<sup>3-9</sup> 샌드위치 복합판재의 경우 코어층의 구조에 따라 복합판재의 강성은 크게 다르다. 피라미달 카고메 코어(pyramidal kagome core)를 사용한 고분자 복합판재는 카고메 구조의 고강성으로 역학적 특성이 매우 우수하다. 이렇게 코어의 특별한 디자인으로 새로운 소재를 개발하지 않고 기존소재를 사용하여 판재의 경량화와 강성을 높일 수 있다.<sup>10-12</sup> 그러나 카고메 코어는 복잡한 3차원 형상을 갖고 있어 기존의 고분자 성형 방법으로는 자유로운 형상 제작이 어렵다. 또한 복잡하고 정교한 피라미달 카고메 코어를 생산 하기 위해 높은 금형 비용이 들고 다양한 형상 디자인에 제약을 받는다.<sup>10,11</sup> 따라서 복잡한 형상을 구현하기 위한 성형방법의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 피라미달 카고메 코어를 갖고 있는 고분자 복합 판재에서 코어의 형상을 사출성형과 3D 프린팅으로 제작하여 코어 층 자체와 복합판재의 강도를 평가하였다. 이 평가를 통하여 3D 프린팅 조형물의 유용성을 분석 하였다. 3D 프린팅 조형물 단독으로는 강성을 요구하는 용도에 한계가 있지만 다른 부품과의 조합에 사용된다면 그의 유용성을 확보

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

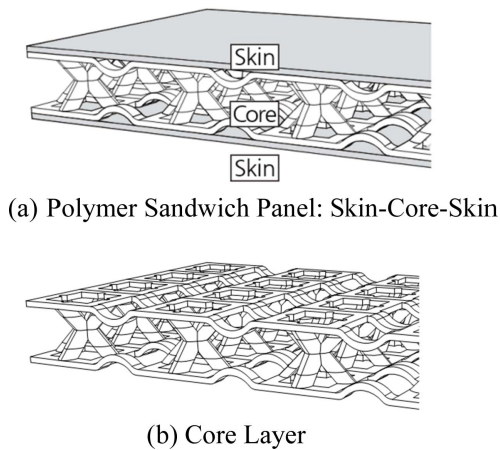
할 수 있을 것으로 판단된다.

**Experimental**

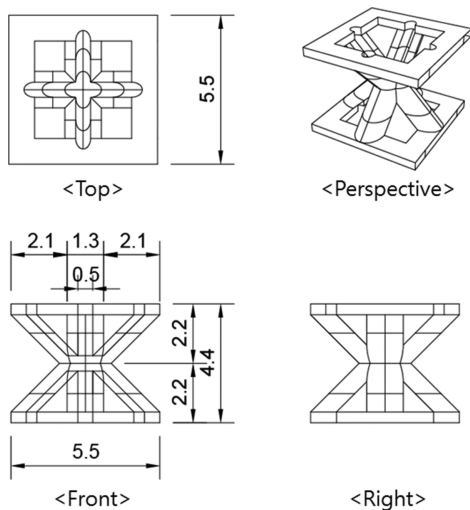
**1. 복합판재 모델**

본 연구에서 사용한 복합판재 모델은 기존에 제시된 모델이다.<sup>10-12</sup> 코어는 피라미달 카고메 형상이고 양쪽 스킨 층은 일반 판재이다. Figure 1에 전체적인 고분자 복합판재의 구성과 복합판재에 사용된 코어 층의 형상이 나타나 있다. 코어 층은 피라미달 카고메 형상이 반복되어 구성되어 있다.

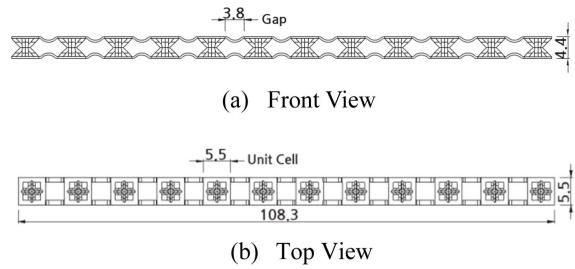
이 반복되는 구성을 단위 셀(unit cell)이라고 표현할 수 있는데 이 단위 셀의 형상이 피라미달 카고메 형상이다. Figure 2에는 본 연구에서 사용한 피라미달 카고메 코어 형상이 나타나 있는데, 단위 셀은 45도로 기울어진 4개의 반원형태 버팀대 단면이 대칭되어 있는 형태이다. 셀의 높이는 4.4 mm이고 가로와 세로는 5.5 mm이다.<sup>12</sup>



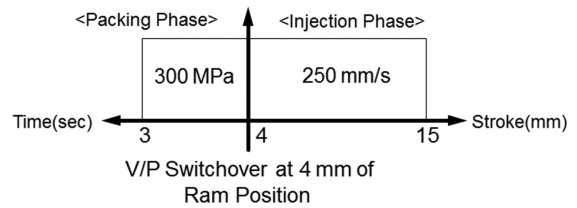
**Figure 1.** Example of Polymer Sandwich Panel and Core Layer.



**Figure 2.** Unit Cell of Pyramid Kagome Core Layer.



**Figure 3.** Strip of Pyramidal Kagome Core.



**Figure 4.** Injection Molding Condition for Pyramidal Kagome Core Strip.

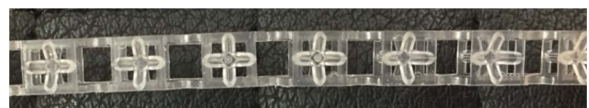
이러한 유닛 셀이 연속적으로 연결되어 있는 한 줄을 스트립(strip)이라 일컫는데 Figure 3과 같다. 셀과 셀 사이의 갭(gap)은 굽어진 복합판재에 쓰일 수 있도록 밴딩이 가능하게 하기 위해 코어의 가로방향 중심으로 오목한 반달 형상으로 된 연결된 부분이다. 갭의 길이는 3.8 mm이며 이 구조를 통해 피라미달 카고메 코어는 안정적으로 휘어질 수 있다.

피라미달 카고메 유닛셀이 연속적으로 연결되어 있는 스트립을 제작하고 상하면에 시트를 접착하면 고분자 복합판재가 된다.

**2. 피라미달 카고메 코어 스트립의 사출성형**

본 연구에서 피라미달 카고메 코어 스트립을 사출하기 위한 장비는 우진플라임(South Korea)의 TN-E Series를 사용했다. 사출기의 형체력은 250 ton이고 최대사출속도는 1,000 mm/s이다. 재료는 PP(J-560S, Lotte Chemical, South Korea)를 사용하였다. 사출성형 조건은 Figure 4와 같다. 사출속도는 250 mm/s, 스트로크 시작은 15 mm이고 보압전환 위치는 스트로크로 4 mm로 하였다. 보압은 3초동안 300 MPa로 설정하였다. 금형온도는 상온, 사출온도(노즐온도)는 260°C로 설정하였다.

Figure 5에 사출성형으로 제작된 카고메 코어 스트립이 나타나 있다.



**Figure 5.** Injection Molded Pyramidal Kagome Core Strip.



Figure 6. 3D Printed Pyramidal Kagome Core Strip.

### 3. 피라미달 카고메 코어 스트립의 3D 프린팅

본 연구에서 피라미달 카고메의 코어를 3D프린팅으로 제작하기 위해 스트라타시스 사(Stratasys, Israel)의 Connex500을 사용하였다. 이 장비는 광경화 재료 제팅 방식의 3D 프린팅이다. 인쇄 해상도는 X-axis: 600 dpi, Y-axis: 600 dpi, Z-axis: 1600 dpi이고, 적층 두께는 16 microns (0.00016 inch)이다. 주변온도는 18°C~22°C (64.5°F~71.5°F)이다. 3D 프린팅에 사용된 재료는 아크릴계열 광경화성 수지(VeroWhitePlus RGD835)이다. Figure 6에 3D 프린팅으로 제작된 카고메 코어 스트립이 나타나 있다.

### 4. 복합판재 제작

복합판재는 사출성형과 3D 프린팅으로 만들어진 피라미달 카고메 코어 스트립의 상하 면에 시트(face sheet)를 Figure 7과 같이 접착제로 부착하였다. 순간 접착제는 AXIA1500을 사용하였으며 피라미달 카고메 코어 스트립 상하 면의 편평한 면에 접착제를 바르고 시트를 붙였다. 판재는 PP로 두께 0.6 mm이다.

### 5. 인장 및 3점굽힘 시험

인장시험을 통해 피라미달 카고메 코어 스트립의 사출성형품과 3D 트린팅 출력물의 인장강도를 비교하였다. 인장시험기는 Lloyd Instruments사(England)의 EZ20을 사용하여 실험하였다. EZ20의 허용 하중은 20 kN이고 인장 속도는 0.001508

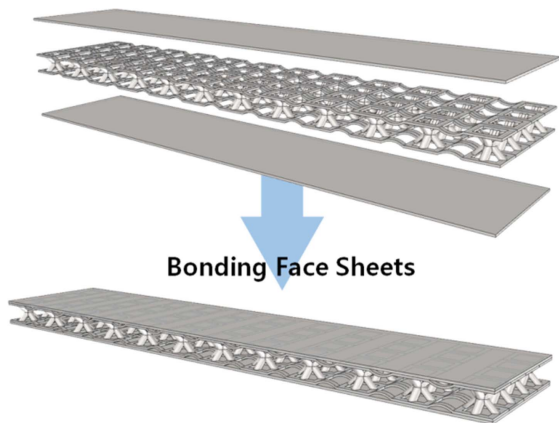


Figure 7. Polymer Sandwich Panel with Pyramidal Kagome Core.

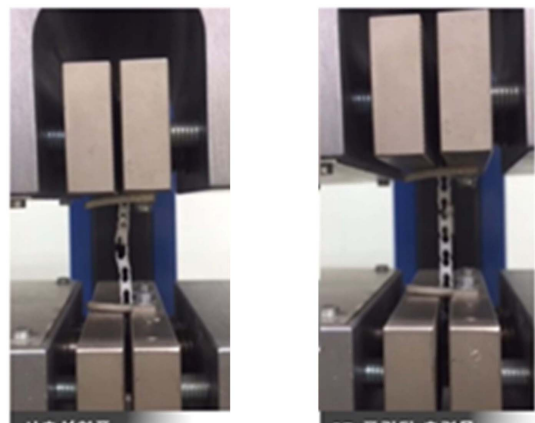
mm/min이다. 최소 하중 분해능은 0.001 N이고 로드 셀 정밀도는 0.5% 이하이다. 인장시험 시 인장 속도는 정적 하중을 부여하기 위하여 1 mm/min로 하였다. 또한 3점 굽힘 시험을 통해 두 가지 피라미달 카고메 코어 스트립을 사용한 복합판재를 비교하였다. 실험 장비는 Instron사(USA)의 5583으로 실험하였다. 압축 속도는 2 mm/min, 압축 변위는 10 mm이다. 양쪽 지지점 간의 거리는 75 mm이다.

## Results and Discussion

### 1. 피라미달 카고메의 인장 시험

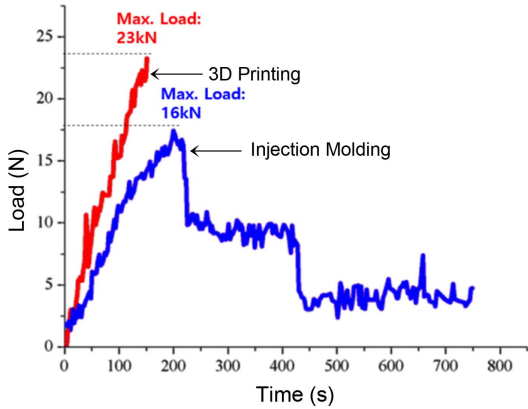
사출성형 및 3D 프린팅으로 제작된 피라미달 카고메코어 스트립은 폭이 좁고 길이가 길어서 유연성이 매우 크다. 그래서 3점 굽힘 실험은 불가능하였다. 따라서 인장실험을 통해 두 가지 방법으로 제작된 피라미달 카고메 코어 스트립의 기계적 물성을 측정하여 분석 하였다. Figure 8은 인장시험의 사진을 보여주고 있다. Figure 9에는 인장실험의 결과가 나타나 있다. 사출성형으로 제작한 카고메 코어 스트립의 경우 연성이 크기 때문에 변형이 크게 일어난 후 파단이 되었고, 3D 프린팅 출력물은 사출품에 비해 취성이 있어 적은 변형에 파단 되었다. Figure 9(a)의 파단시간을 보면 사출성형으로 제작된 스트립은 750초 근처까지 변형이 일어나고 파단된 반면 3D프린팅으로 제작된 스트립은 150초 근처까지 변형을 일으키고 파단이 되었다. 파단 시까지의 최대 하중을 보면, 사출 스트립의 경우 16 kN이고 3D프린팅 스트립은 23 kN을 보였다. 3D프린팅 스트립이 사출스트립보다 약 44% 더 큰 최대 하중을 보였다. 강성은 사출 스트립에서 268 MPa, 3D 프린팅에서는 275 MPa로 3D 프린팅 스트립이 더 높았다.

Figure 9(b)에 하중-변형 곡선이 나타나 있다. 3D 프린팅으로 제작한 피라미달 카고메 코어 스트립이 강성이 컸다.

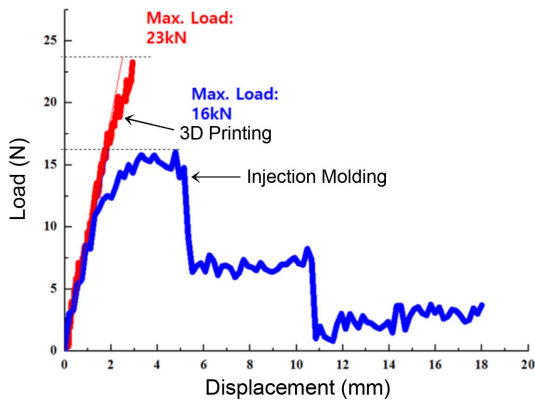


(a) Injection Molded Product (Left)  
(b) 3D Printed Product (Right)

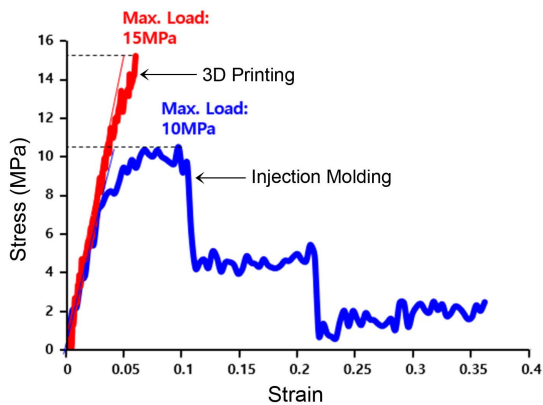
Figure 8. Tensile Test of Pyramidal Kagome Core Strip.



(a) Load vs. Time Curve



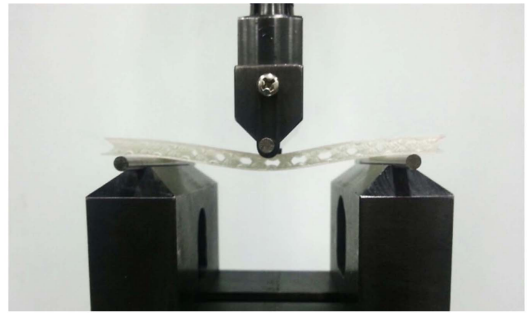
(b) Load vs. Displacement Curve



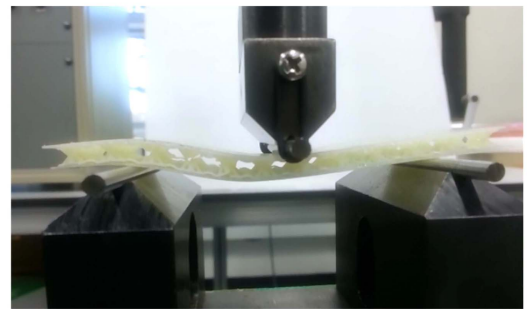
(c) Stress vs. Strain Curve

**Figure 9.** Results of Tensile Test of Pyramidal Kagome Core Strip.

Figure 9(c)는 응력-변형을 곡선을 보여주고 있다. 파단 시까지의 최대 응력을 보면, 사출 스트립의 경우 10 MPa이고 3D 프린팅의 경우 15 MPa를 보였다. 3D 프린팅의 스트립이 사출 스트립에 비해 50% 큰 최대응력을 보였다. 사출에 적합한 소재와 3D 프린팅에 적합한 소재가 달라서 이러한 특성을 보였다. 두 스트립이 파단 시까지 흡수한 에너지는 파단 시까지



(a) Sandwich Panel with Pyramidal Kagome Core Made by Injection Molding



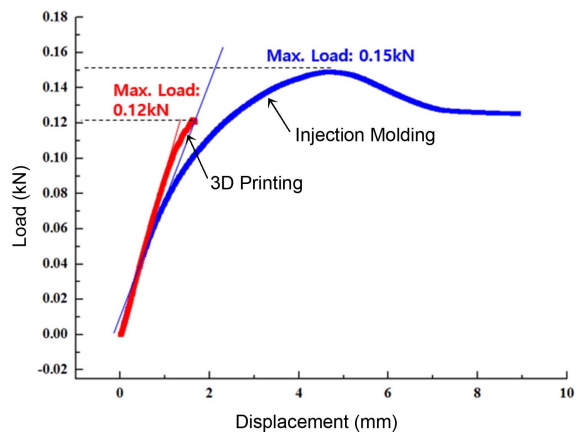
(b) Sandwich Panel with Pyramidal Kagome Core Made by 3D Printing

**Figure 10.** Three Points Bending Test of Pyramidal Kagome Core Sandwich Panel.

변형이 많이 일어난 사출성형 스트립이 크다.

## 2. 복합판재의 3점굽힘 시험

사출성형과 3D 프린팅으로 제작한 피라미달 카고메코어를 이용한 두 가지의 복합판재로 3점 굽힘 시험을 했다. Figure 10은 3점 굽힘 시험 사진을 보여주고 있고, Figure 11은 3점 굽힘 시험의 결과를 보여주고 있다. 복합판재의 최대하중은 사출로 성형한 피라미달 코어로 제작한 복합판재에서 0.15



**Figure 11.** Results of Three Points Bending Test of Pyramidal Kagome Core Sandwich Panel.

kN, 3D 프린팅으로 성형한 피라미달 카고메 코어로 제작한 복합판재에서 0.12 kN을 보였다. 3D 프린팅으로 성형한 피라미달 카고메 코어로 제작한 복합판재가 약 20% 낮은 최대하중을 보였다. 3D 프린팅으로 제작한 피라미달 카고메 코어 복합판재는 코어가 파괴되면서 파단이 일어났다. 두 복합판재의 강성을 보면 사출로 성형한 피라미달 코어로 제작한 복합판재에서 0.07 kN/mm, 3D 프린팅으로 성형한 피라미달 카고메 코어로 제작한 복합판재에서 0.11 kN/mm를 보였다. 3D 프린팅으로 성형한 피라미달 카고메 코어로 제작한 복합판재가 약 30% 더 큰 강성을 보였다.

## Conclusion

고분자 복합판재는 제품 경량화 실현방법중의 하나이다. 복합판재에서 강성 있게 설계된 코어는 새로운 소재와 같은 효과를 준다. 복합판재의 강성을 높여 경량화 효율을 높일 수 있는 피라미달 카고메 코어는 복잡한 3차원 형상으로 제작이 어렵다. 이러한 경우에 3D 프린팅 방법이 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 복잡한 형상의 피라미달 카고메 코어를 손쉽게 제작할 수 있는 3D 프린팅과 고비용이 요구되는 사출성형 방법으로 제작한 후 복합판재에 적용하여 그의 기계적 특성을 비교하였다.

3D 프린팅으로 제작한 피라미달 카고메 코어 스트립은 매우 취성이 강하여 아주 작은 변형에 파단이 일어나는 취약함을 보였다. 그러나 사출성형으로 제작한 피라미달 카고메 코어 스트립은 최대 하중은 작으나 큰 변형을 보였다. 이 두 가지 종류의 코어를 이용하여 제작한 복합판재에서는 3D 프린팅으로 제작한 코어를 사용한 경우 사출성형으로 제작한 코어에 비해 작은 최대응력을 보였으나 강성은 더 컸다. 즉 취성이 매우 컸다. 그리고 3D프린팅으로 제작한 코어를 사용한 복합판재의 파단 시 변형은 사출로 제작한 코어를 사용한 복합판재에 비해 작게 나타났으나 피라미달 카고메 코어 층 단독으로 인장 실험한 경우보다는 큰 변형을 보였다. 즉 3D Printing으로 제작한 Core층 자체는 취성이 크나 복합판재로 사용되는 경우에는 취성이 크게 감소되었다. 따라서 3D 프린팅으로 제작한 제품이 단독으로 쓰일 때는 한계가 있더라도 다른 부품과 조합하여 응용하게 되면 적절히 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgments

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로

수행되었습니다.

## References

1. D. G. Ahn and D. Y. Yang, "Principle of Rapid Prototyping and Tis Trend", *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, **22**, 7 (2005).
2. ASTM F2792-12a, 2012, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," ASTM International.
3. S. Doroudiani, C. B. Park, and M. T. Kortschot, "Effect of the Crystallinity and Morphology on the Microcellular Foam Structure of Semi-Crystalline Polymers", *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 2645 (1996).
4. T. Deligio, "Injection Molding with Mucell: Mucell Microcellular Foam Bubbling up in a Variety of Automotive Applications", *Modern Plastics Worldwide*, **87**, 12 (2010).
5. D. Raps, N. Hossieny, C. B. Park, and Volker Altstadt, "Past and Present Developments in Polymer Bead Foams and Bead Foaming Technology", *Polymer*, **56**, 5 (2015).
6. E. K. R. Lee, Novel Manufacturing Processes for Polymer Bead Foams. Diss. University of Toronto, Canada. pp. 20-215 (2010).
7. N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, N. K. Naik, and R. Komanduri, "On the Machining of Fiber Reinforced Plastic(FRP) Composite Laminates", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, **35**, 701 (1995).
8. K. W. Jung, Y. Kawahito, and S. Katayama, "Mechanical Property and Joining Characteristics of Laser Direct Joining of CFRP to Polyethylene Terephthalate", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **1**, 43 (2014).
9. K. Friedrich and A. A. Almajid, "Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications", *Appl. Compos. Mater.*, **20**, 107 (2013).
10. J. S. Hwang, T. G. Choi, D. Lee, M. Y. Lyu, D. G. Lee, and D. Y. Yang, "Dynamic and Static Characteristics of Polypropylene Pyramidal Kagome Structures", *Compos. Struct.*, **131**, 17 (2015).
11. J. S. Hwang, T. G. Choi, M. Y. Lyu, and D. Y. Yang, "Investigation for the Bending Modes of a Semi-circular Pyramidal Kagome Sandwich Structure and the Bending Load Calculation", *Compos. Struct.*, **134**, 10 (2015).
12. J. S. Hwang, T. G. Choi, D. Lee, M. Y. Lyu, D. G. Lee, and D. Y. Yang, "Development of a Bendable Pyramidal Kagome Structure and its Structural Characteristics", *Compos. Struct.*, **142**, 87 (2016).