

마이크로 다공질 폴리머 폼의 UV 레이저 미세가공에 관한 기초 연구

A Fundamental Study on UV Laser Micro Machining of Micro Porous Polymeric Foams

오재용¹, 신보성^{1,✉}, 이정환², 박상후², 박철범³
Jae Yong Oh¹, Bo Sung Shin^{1,✉}, Jung Han Lee², Sang Hu Park² and Chul Beom Park³

¹ 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소 (ERC/NSDM, Department of Mechanical Engineering, Pusan Natl. Univ.)

² 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan Natl. Univ.)

³ 토론토 대학교 기계공학과 (Department of Mechanical and Industrial Engineering, Univ. of Toronto)

✉ Corresponding author: bosung@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2787

Manuscript received: 2011.11.9 / Accepted: 2012.1.31

Recently porous polymer has widely been applied to packaging, heat isolation, and sound absorption in various fields from the electrics to the automobiles industry. A lot of micro porosities inside foamed polymer provide lower heat conduction and lighter weight than non-porous polymer, because they involve gas or air during foaming process. In this paper experimental approaches of the UV laser micro machining behavior for Expanded Polypropylene (EPP) foamed polymer materials, which have different expansion rates, were investigated. From these results, the ablation phenomena were finally observed that the ablation is depended upon stronger photo-chemical than photo-thermal effect. This study will also help us to understand interaction between UV laser beam and porous polymer.

Key Words: UV Laser (자외선 레이저), Micro Porosity (마이크로 기공), Polymer Foam (폴리머 폼), Micro Machining (마이크로 가공), Ablation (어블레이션)

1. 서론

UV(파장영역: 200~400 nm) 펄스 레이저는 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 금속, 비금속 및 반도체 가공 공정뿐만 아니라 첨단 측정 분야 등에 널리 활용되고 있다. 나노초 펄스(nano second pulse) 레이저 광에 의한 재료의 제거 메커니즘은 어블레이션(ablation)이라고 하는 광열적(photo-thermal), 광화학적(photo-chemical) 그리고 광기계적(photo-mechanical) 효과의 복합적인 작용에 의하여 발생한다고 일반적으로 알려져 있다. 이러한 어블레이션은 레이저의 파장, 렌즈, 분위기 가스 및 가공 재료의 종류 등에 의하여 결정된다. 특히, 낮은

가공 에너지 영역에서의 광화학적 어블레이션은 폴리머 재료의 제거 가공에 있어서 폴리머 구성 원자의 결합력을 분해하는 광에너지에 의해 구조가 분해되면서, 마치 고체상태에서 기체상태로 제거되는 현상으로 실험적으로는 낮은 레이저 밀도 영역에서 관측되는 현상이다.^{1,2} 또한 가공 문턱값(threshold) 이상의 에너지 영역에서는 광열적 어블레이션이 가공현상의 대부분을 결정하게 되고, 이때 광화학적 효과는 상대적으로 미비하게 나타난다. 지금까지 폴리머 재료에 대한 어블레이션에 관한 이론적/실험적 연구들이 계속되어 왔고, 이들에 대한 메커니즘도 어느 정도 UV 레이저와 재료의 상호 작용 측면에서 규명되어져 있다. 그러나

폴리머 재료의 대량생산성과 다양한 기능추가로 인하여 지속적으로 새로운 기능의 다공질 폴리머 구조가 계속 개발되고 있기 때문에 이들에 대한 미세 가공 기술 또한 복잡하고 가공 변수가 많아 지는 게 현실이며, 이들의 이론적 모델링 결과와 실험결과와의 일관성을 연구하는 데 여전히 오차가 많이 발생하고 정확한 예측이 어렵다.

근래에 다공질 폴리머에 대한 수요가 급증하고 있고, 이들 재료는 부서지기 쉬운 제품들, 예를 들면, 전자부품, 항공부품, 음식 제품의 운송 중에 발생하는 충격에 대해 제품을 보호하기 위한 포장(packaging), 또는 헬멧(helmet), 무릎 패드(kneepads) 과 같은 개인 보호장비, 각종 건축, 자동차의 흡음재(absorption material) 및 방열재(isolation material) 등으로 산업 전반에 널리 사용되고 있다.

Y. M. Moreu 등은 PE(polyethylene), PS(polysylene) 그리고 PP(polypropylene) 등과 같은 재질을 비드 몰딩(bead moulding), 압출(extrusion) 오토크레이브 팽창(autoclave expanded)과 같은 저밀도화 공정을 통해 29 에서 50 kg m⁻³ 범위의 낮은 밀도값을 갖는 다공질 폴리머 폼(polymeric foam)들에 대하여 7 에서 -1 바(bar) 구간의 압축실험과 전산해석을 수행하여 폼 재료의 기계적 물성치를 규명하였다.³ R. Bouix 등은 EPP 폼에 대하여 동적 하중(dynamic loading)하에서의 밀도, 미세구조(microstructure) 및 변형률 속도(strain rate)등의 변수를 연구하였다. 이때 실험에 사용된 압축 변형률 속도의 범위는 0.01 - 1,500 sec⁻¹ 이고, 밀도는 34 에서 150 kg m⁻³ 까지 변화시켰다.⁴ 이에 앞서 C. B. Park 등은 가스 와 용융 폴리머를 섞고, 확산을 일으킨 다음 갑자기 대기압 상태로 분출함으로써 폴리머 내부에 녹아있던 가스가 팽창되면서 균일한 상태의 마이크로 셀룰러 구조(microcellular structure)를 갖는 폴리머 폼 성형 공정을 확립하였다.⁵ 이때 제작된 기공의 크기는 0.1 - 1.0 μm 이며, 기공의 밀도는 1012 - 1015 개/cm³ 로 알려져 있다.

이러한 폴리머 폼은 일반적으로 단순히 공구를 이용한 전통적인 기계 가공법으로 가공되어 왔으며 정밀한 가공에서는 핫 와이어(hot wire)나 레이저를 사용하기도 한다. 하지만 이러한 방법은 가공 표면에 열적인 영향이 남게 되고 매크로(macro)한 가공에 적용되고 있어 미세(micro) 가공에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 저밀도(low density)을 갖는 마이크로 기공 크기의 다공질 구조의 EPP 폴리머 폼에

대하여 UV 레이저의 펄스 미세가공에 관한 기초실험을 수행하였다. 그리고 이들 실험 결과를 통해 다공질 폼의 미세 절단(micro cutting), 구멍 가공(micro hole drilling)에서의 UV 레이저 유용성을 제시하고자 한다.

2. 실험 재료 및 가공공정

2.1 마이크로 다공성 폴리머 폼

본 연구에서 사용한 폴리머 폼은 스팀 체스트 몰딩(steam chest molding) 공정에 의해 제작된 재료를 사용하였다. 먼저 EPP 비드 재료를 몰딩 장비 내부에 주입하면, 스팀 몰딩 공정 조건에 따라 여러 가지 팽창비를 갖는 실험재료 제작이 가능하였다.

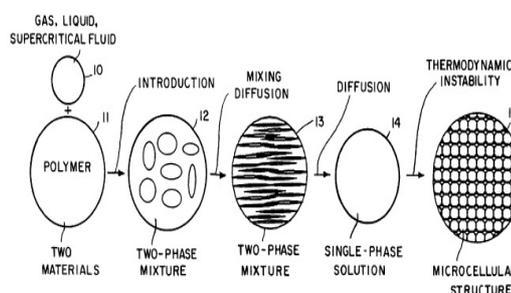


Fig. 1 Manufacturing process of microcellular foamed polymer⁵

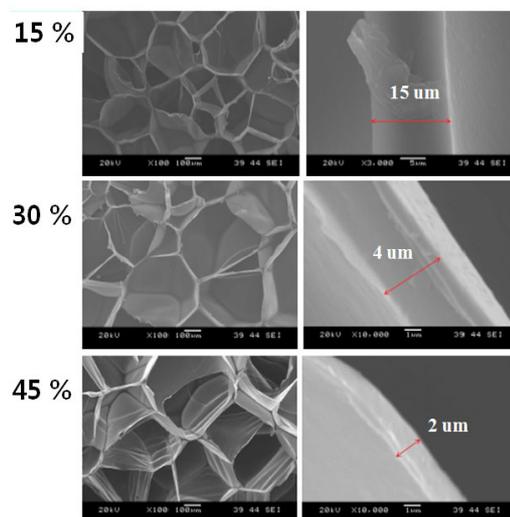


Fig. 2 EPP form microcellular structures and cell thickness according to expansion ratio⁶

체스트 몰딩 장비 내부적으로는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 폼 팽창을 돕는 에이전트(agent)로서 CO₂ 가스가 일반적으로 사용되며, 이러한 가스는 고온, 고압의 상태로 처음에는 원재료인 폴리머와 분리되었었지만 기계 내부에서 혼합(mixing)과 확산(diffusion)에 의해 핵(nuclei)으로 존재하다가 압력이 내려가는 순간에 모든 영역에서 균일하게 팽창하면서 거의 일정한 셀(cell) 크기를 갖는 마이크로셀룰러 구조의 폴리머 폼으로 성형된다.

본 실험에서는 15, 30 및 45 % 의 3 가지 팽창비를 갖는 EPP 폼 재료를 실험에 사용하였다. Fig. 2 는 실험에 사용된 EPP 폼들의 마이크로 셀룰러 구조로 팽창비가 클수록 각 셀의 크기는 더 크고 두께는 더 얇은 것을 알 수 있다.⁶ 15 % 팽창비를 가지는 EPP 폼의 셀 두께는 약 15 μm 이며 45 % 일 때는 2 μm 까지 얇아졌다.

2.2 UV 레이저 미세 가공공정

본 연구에 사용된 레이저는 Nd:YVO₄ DPSS (diode pumping solid state) 레이저로 3rd harmonic 355 nm 파장을 사용하였다. 펄스폭(pulse duration)은 25 ns 이며 펄스 반복률(repetition rate)은 30.3 kHz 이다. Fig. 3 은 광학계의 개략도로 레이저빔은 조리개(iris), 갈바노 스캐너(galvano scanner), F- θ 렌즈를 지나 재료에 조사된다.

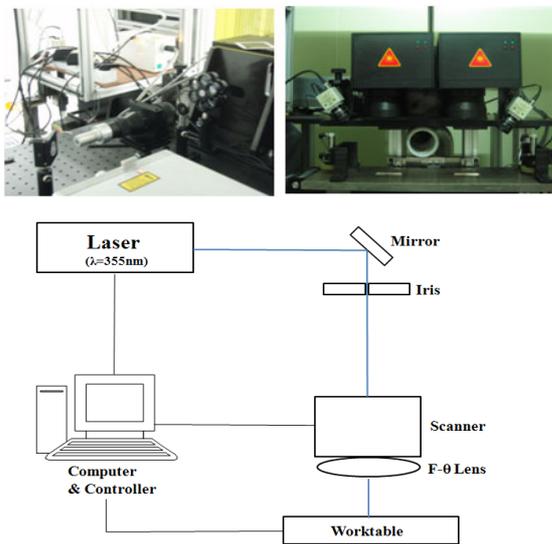


Fig. 3 Pictures and schematics of UV laser machining system

일반적으로 레이저를 이용한 미세 가공의 경우 가공 깊이가 수 - 수십 μm 정도이고 포커싱 렌즈의 DOF(depth of focus)가 매우 짧아서 정확한 실험을 위해 초점 거리에 시편을 정확히 위치시키는 것이 중요하다. 하지만 본 실험에서는 기초 실험 결과, EPP 폼은 UV 레이저에 대한 가공성이 좋아서 수 mm 깊이까지 가공이 되었다. 따라서 DOF를 크게 하기 위하여 조리개를 이용하여 F- θ 렌즈로 입사되는 레이저빔의 직경을 최소화하였다. 그리고 시편의 표면이 레이저빔의 초점 위치보다 조금 위에 위치하도록 하였다.

레이저를 이용한 다공질 구조의 재료 가공은 마치 아주 얇은 박막이 다층(multi-layer) 구조로 이루어진 재료를 가공하는 것과 유사하다. 레이저가 깊이 방향으로 셀 벽면을 하나씩 끊어나가기 때문이다. 따라서 다공질 구조의 재료를 레이저로 가공시, Fig. 4 에서와 같이 거시적으로는 가공 깊이를 측정하고 미시적으로는 관통된 셀의 개수를 측정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

또한 EPP 폼은 같은 조건에서 생성되어도 셀 두께 및 크기가 오차를 가지며 일정하지 않다. 그리고 발포 조건에 따라 셀의 두께도 Fig. 2 와 같이 2 - 15 μm 까지 차이가 난다. 따라서 본 실험에서는 셀의 형상적인 불규칙성과 오차를 고려하여 두꺼운 셀도 충분히 가공되는 높은 플루언스로 레이저 출력을 고정하고 가공하였다. 그리고 펄스를 여러 번 중첩시켜 EPP 폼에 조사하고 가공 깊이를 중첩률로 나누어 단위 펄스에 대한 셀의 평균적인 가공성을 분석하였다.

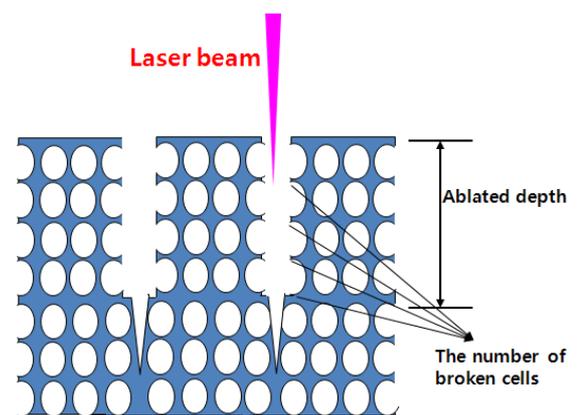


Fig. 4 Schematics of laser micro processing for porous polymer form

가공 현상은 SEM 으로 촬영하여 분석하였다. 특히 측정용 샘플을 제작할 때와 SEM 측정시, 급속하게 진공 상태가 만들어지면 폼이 찌그러지기 때문에 매우 천천히 진공 상태를 만들어 샘플의 수축 및 변형이 일어나지 않게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

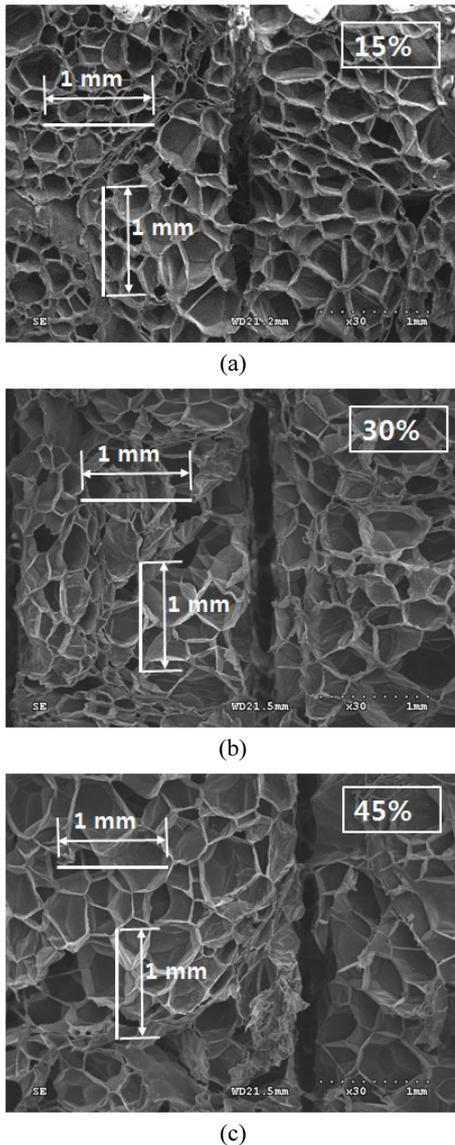


Fig. 5 SEM images of cross section of EPP form ablated by UV laser, at the expansion ratio of (a)15 % (b)30 % and (c)45 %

레이저 플루언스를 4.9 J/cm²으로 고정하고 EPP 폼을 가공하였을 때 가공 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 5(a), (b), (c)는 각각 15, 30, 45 % EPP 폼에 대한 SEM 사진이다. 레이저에 의해 깊이 방향으로 절단된 셀들은 열적 영향에 의해 녹은 흔적이 거의 없었으며, 이는 UV 레이저에 대한 EPP 폼의 어블레이션 현상이 광화학적 어블레이션이 지배적임을 나타낸다.

한편 절단된 셀의 개수를 유추하기 위하여 Fig. 5 로부터 EPP 폼의 단위 길이당 셀 밀도를 구하였다. 사진에서 임의로 1 mm 선을 그었을 때 그 안에 포함된 평균적인 셀의 개수를 계산하였는데, 이는 셀 크기의 편차가 크기 때문에 셀의 크기를 정의하기 어려워 위와 같은 방법을 적용하였다. 계산된 EPP 폼의 평균적인 길이당 셀 밀도는 Table 1 과 같다. 팽창비가 클수록 셀이 커지기 때문에 길이당 셀 밀도가 감소함을 알 수 있다.

Table 1 The number of cells of EPP form per unit length

| Expansion ratio (%) | The number of cells (cell/mm) |
|---------------------|-------------------------------|
| 15 | 5 |
| 30 | 4 |
| 45 | 3.5 |

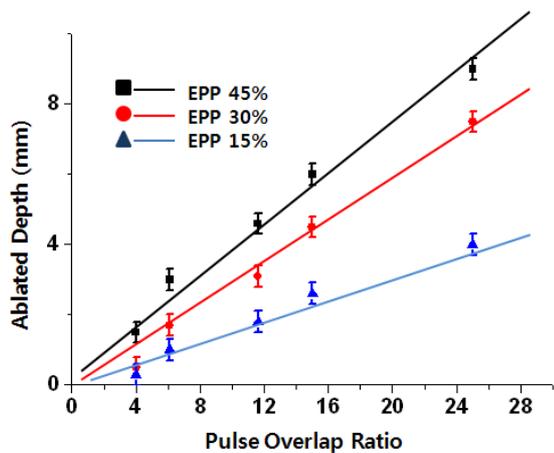


Fig. 6 Relationship between ablated depth and pulse overlap ratio for EPP form by UV laser according to its expansion ratio

Fig. 6 은 레이저 플루언스가 4.9 J/cm² 일 때 펄스 중첩률에 따른 EPP 폼의 어블레이션 깊이를 나타낸 것이다. 그리고 이에 Table 1 의 값을 적용하

여 펄스 중첩률에 따른 절단된 셀의 개수를 Fig. 7에 나타내었다. 동일 조건에서 EPP 폼의 팽창비가 클수록 어블레이션 깊이와 절단된 셀의 개수는 더 크게 나타나는데 이는 셀의 크기와 두께 차이에 따른 것으로 판단된다. Fig. 2와 Fig. 5에서 보듯이 팽창비가 클수록 셀 두께가 더 얇아지게 되므로, 셀을 절단하는데 더 작은 에너지가 소모되며 같은 에너지로 더 많은 셀을 절단할 수 있다. 그리고 셀 크기가 더 크기 때문에 같은 수의 셀이 절단되더라도 어블레이션 깊이는 더 깊게 나타난다.

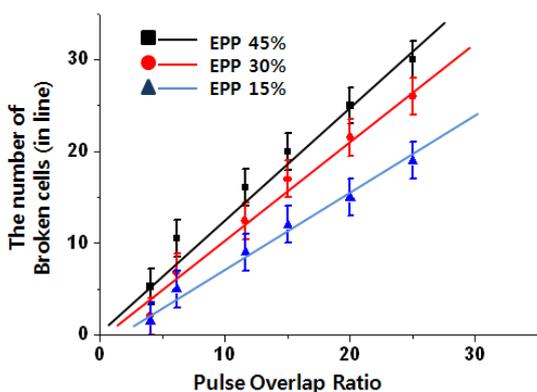


Fig. 7 Relationship between the number of broken cells and pulse overlap ratio for EPP form by UV laser according to its expansion ratio

그리고 어블레이션 깊이가 펄스 중첩률이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 평균적인 펄스당 어블레이션 깊이가 거의 일정함을 나타낸다. 계산되어진 펄스당 어블레이션 깊이와 펄스당 절단된 셀의 개수를 EPP 폼의 팽창비에 따라 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Ablated depth and broken cells by single pulse

| Expansion ratio (%) | Ablated depth per pulse (mm/pulse) | Broken cells per pulse (cell/pulse) |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 15 | 0.16 | 0.8 |
| 30 | 0.23 | 0.9 |
| 45 | 0.43 | 1.5 |

Table 2의 결과를 보면 15%와 30% EPP 폼의 단위 펄스당 어블레이션 깊이는 크게 차이가 나지 않는 반면 45% EPP 폼의 경우 두 배 가까이 차이가 난다. 이에 주목할 점은 15%, 30% EPP 폼의 경우 펄스당 절단된 평균적인 셀의 개수가 0.8, 0.9

개로 1개가 채 되지 않는다는 점이다. 즉 하나의 셀을 절단하기 위해서 펄스가 두 번 이상 조사되어야 하므로 가공성이 급격히 낮아지게 된다. 반면 45% EPP 폼은 펄스당 1개 이상의 셀이 절단되기 때문에 어블레이션 깊이가 급격히 증가하였다. 따라서 셀이 한번에 절단될 수 있는 높은 레이저 플루언스로 가공하는 것이 다공성 재료의 가공성에 있어서 중요함을 알 수 있다.

한편 앞서 Fig. 5를 보면 레이저가 조사된 부분은 셀의 벽면들이 절단되면서 닫힌 셀(closed cell) 구조에서 열린 셀(opened cell) 구조로 바뀌었음을 알 수 있다. 닫힌 셀 구조는 각 셀들이 서로 밀폐되어 있기 때문에 재료 내부에서 공기, 소리 등의 전파가 잘 이루어지지 않는다. 하지만 열린 셀 구조는 각 셀들이 공간적으로 연결 통로를 가지고 있기 때문에 진동 에너지가 재료 내부까지 침투되고 흡수될 수 있다.^{7,8} 이는 본 연구가 닫힌 셀 재료에 열린 셀의 특성을 부여하여 음파, 빛의 흡수 특성 개선 등과 같은 확장된 응용 분야에도 활용되어질 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 다공성 폴리머 재료인 EPP 폼과 UV 펄스 레이저에 대한 가공성을 실험적으로 분석하였다. 15, 30, 45%의 팽창비를 가지는 3종류의 EPP 폼을 사용하였으며 각각에 대하여 어블레이션 깊이와 절단된 셀의 개수를 측정하였다. EPP 폼의 팽창비가 클수록 내부 셀의 두께가 얇기 때문에 레이저에 의한 가공성이 좋았으며, 단일 펄스가 1개 이상의 셀을 절단할 수 있는 경우 가공성은 더욱 증가함을 알 수 있었다. 그리고 본 연구를 통해 다공성 재료의 레이저 가공은 커팅, 드릴링 등의 기계적인 가공뿐만 아니라 닫힌 셀에 열린 셀의 특성을 부여하는 응용 분야에도 활용될 수 있음을 제시하였다.

후 기

이 과제는 2009 학년도 부산대학교 교수국외장 기파견 지원비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Oh, J. Y. and Shin, B. S., "Photothermal and

- Photochemical Investigation on Laser Ablation of the Polyimide by 355nm UV Laser Processing,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 147-152, 2007.
2. Oh, J. Y. and Shin, B. S., “A Study on Laser Ablation of Copper Thin Foil by 355nm UV Laser Processing,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 134-139, 2007.
 3. Moreu, Y. M. and Mills, N. J., “Rapid hydrostatic compression of low-density polymeric foams,” Polymer Testing, Vol. 23, No. 3, pp. 313-322, 2004.
 4. Bouix, R., Viot, P. and Lataillade, J. L., “Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects,” International Journal of Impact Engineering, Vol. 36, No. 2, pp. 329-342, 2009.
 5. Park, C. B., Duh, N. P. and Baldwin, D. F., “Method for proving continuous processing of microcellular and supermicrocellular foamed material,” US Patent, No. 5866053, 1999.
 6. Jung, D. W., Lee, E. K. and Park, C. B., “Study on properties of EPP bead foam,” Trans. of Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 9, pp. 991-997, 2011.
 7. Jeong, Y. H., Kim, D. S. and Kim, H., “Characterization of sound absorption of open-cell inorganic foam prepared by polymer-sponge method,” Journal of the Research Institute of Industrial Technology, Vol. 19, pp. 489-494, 2000.
 8. Lee, B. H., Cha, S. W. and Kang, Y. J., “Study of sound absorption & transmission characteristics for MCPs foaming rate by bath process,” Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 364-368, 2004.