

# 비정형 콘크리트 거푸집 제작을 위한 EPS Foam의 3D 가공기계 3D Cutting Machine of EPS Foam for Manufacturing Free-Formed Concrete Mold

서정환<sup>1</sup>, 홍대희<sup>2,#</sup>  
Junghwan Seo<sup>1</sup> and Daehie Hong<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University)

<sup>2</sup> 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)

# Corresponding Author | Email: dhhong@korea.ac.kr, TEL: +82-2-3290-3369, FAX: +82-2-3290-3864

KEYWORDS: Free-Formed building (비정형 건축물), EPS concrete mold (EPS 콘크리트 거푸집), CNC milling machine (CNC 밀링 기계), Hotwire (열선), Cutting machine (커팅 기계)

*We used a construction method using a CNC milling machine, where free-formed molds were made by cutting EPS (Expanded PolyStyrene) foam with the CNC machine, to build free-formed buildings. CNC milling is off-the-shelf technology that can easily cut EPS foam; however its production cost is too high and the time to manufacture an EPS mold is too long. This paper proposes a novel cutting machine with a fast and cost effective mechanism to manufacture EPS concrete molds. Our machine comprises a cutter and Cartesian coordinate type moving mechanism, where the cutter cuts EPS foam using a hotwire in the shape of 'I' and is capable of adjusting its cutting angle in real-time while keeping its cutting width. We proved through cutting experiments on the CNC machine that cutting time was greatly shortened compared to the conventional method and that the resulting concrete mold satisfied manufacturing precision.*

Manuscript Received: March 4, 2016 | Revised: August 6, 2016 | Accepted: August 28, 2016

## 1. 서론

최근 건축기술의 발달로 여러 가지 모양의 콘크리트 곡면을 제작할 수 있게 되었고,<sup>1,2</sup> 이로 인해, 건축물의 상징성과 심미성이 강조되는 비정형 건축물에 대한 연구가 활발하다.<sup>3-5</sup> 비정형 건축물은 다양한 곡면으로 이루어져 있기 때문에 이를 기존의 철근 콘크리트를 사용하는 정형 거푸집으로 건설하는 데는 한계가 있다. 이에 대한 대안으로 3D 프린팅 기술을 적용한 자동화 골조 또는 부재 프린팅 기술이 주목 받고 있다.<sup>6-8</sup> 대표적인 기술로 Contour Crafting과 Concrete Printing이 있다. USC (University of Southern California) 대학의 건축 로봇 시스템인 Contour Crafting은 로봇기술로 콘크리트를 분사한 뒤, 구조체를 만들어 건축물을 완성해 나가는 3D 프린팅 기술이다.<sup>9,10</sup> 영국의 Lough-Borough 대학과 Foster & Partners 건축사무소의 공동 연구로 진행된 Concrete Printing 또한, 대형 콘크리트 프린터를 이용하여 비정형 건축에 사용될 수 있는 곡면과 다양한 크기의 패널들

을 프린팅하는 기술이다.<sup>11,12</sup> 두 기술 모두 비정형 건축물을 지을 수 있는 새로운 방식으로 주목받고 있지만 아직 초기 연구 단계이며, 프린팅 소재와 기술에 대한 신뢰성 및 안정성 검증이 부족한 상황이다. 현재는 EPS Foam (Expanded Poly Styrene Foam) 을 CNC 밀링 기계를 사용하여 거푸집으로 가공한 후 콘크리트를 타설하는 시공법으로 비정형 골조공사를 시행하고 있다.<sup>13,14</sup> 이는 형상 재단이 쉽지만, CNC 밀링 기계의 가격이 비싸고, 커팅 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 또한 건축의 특성상 골조공사 시 외부요인에 의하여 발생하는 오차에 비해 CNC 밀링 기계로 가공한 거푸집의 정밀도는 불필요하게 매우 높다.

본 논문에서는 직교 좌표형 이동 메커니즘에 열선과 열봉을 이용한 커터를 결합함으로써 EPS Foam을 거푸집으로 가공할 수 있는 메커니즘을 제안한다. 특히, 공구부에 해당하는 커터는 가공 폭이 고정된 상태에서 열선의 각도를 조절할 수 있도록 설계되어 있어서 기존의 방법보다 가공시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 본 논문에서 제안된 방법과 기존 방법에 의한 커팅



### 3. EPS Foam 가공기의 특징

대표적인 EPS Foam을 가공할 수 있는 기존 기계로 CNC 밀링 기계와 VLM (Variable Lamination Manufacturing)이 있다. CNC 밀링 기계는 작은 공구를 사용하여 EPS Foam을 가공순서에 따라 한층 한층씩 커팅하는 동작기계이다. VLM은 열선 커터기를 이용하여 얇은 EPS Foam을 커팅한 후 이를 적층하여 원하는 3D 형상을 만드는 신속조형기 (Rapid Prototype)이다.<sup>15</sup> 본 EPS Foam 가공기의 특징을 다른 EPS Foam 가공 기계들과 비교하여 Table 1에 나타냈다. 3개의 기계 모두 EPS Foam을 원하는 형상으로 제작하는 커팅 기계이지만, 커터 공구와 커팅방식의 차이가 존재한다. 열선 커터기를 사용한 VLM과 같이, EPS Foam 가공기는 열봉과 열선을 사용하여 EPS Foam을 열로 녹여서 커팅한다. 이와 달리, CNC 밀링 기계는 작은 밀링툴을 이용하여 EPS Foam을 한층 한층씩 깎아서 커팅한다. 기계의 크기와 특성에 따라 커팅 크기에서도 차이가 존재한다. VLM은 얇은 EPS Foam을 커팅한 후 이를 적층하여 원하는 형상을 높이 제한없이 제작할 수 있으며, 크기가 큰 CNC 밀링 기계는 EPS 거푸집

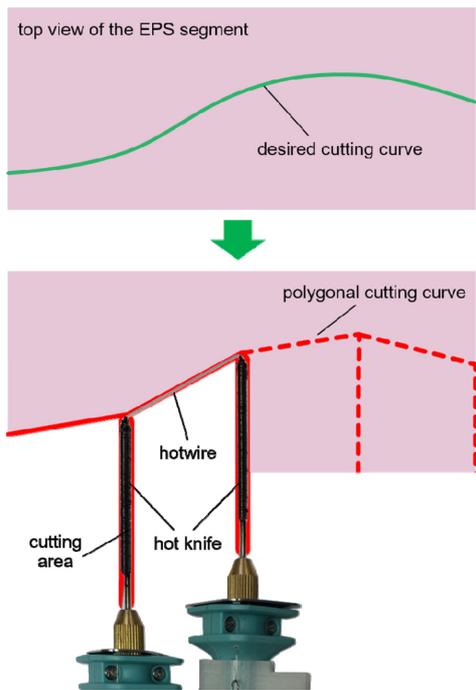


Fig. 4 Polygonal EPS segment

Table 1 Comparisons of EPS foam cutter to conventional EPS foam cutting machines

	EPS foam cutter	CNC milling machine	VLM
Cutter	Hot knife & Hotwire	Small milling tool	Hotwire
Material	EPS foam	Metal, EPS foam etc.	EPS foam
Lamination	No	No	Yes
Cutting method	Heat	Cut	Heat

(EPS Mold) 1개를 한번에 제작할 수 있다. 제안한 EPS Foam 가공기는 각도 조절이 가능한 열선 커터를 이용하여 일정 폭의 단면을 하나의 경로로 가공할 수 있기 때문에 CNC에 비해 매우 빠르며, 적층 또한 불필요하여 VLM에 비해 가공시간을 대폭 줄일 수 있다.

### 4. EPS 거푸집 제작 원리

일반적으로, 가공기의 크기 제한 때문에 여러 개의 EPS 거푸집을 하나로 조합하여 비정형 건축물을 짓는다. 본 연구에서 개발한 가공기도 마찬가지로 EPS 거푸집을 세그먼트화하여 가공 조립하는 방식이 적용될 수 있다. Fig. 5에 이러한 과정을 도식화하였으며, 순서를 정리하면 다음과 같다.

- (1) EPS 거푸집의 CAD 모델링
- (2) CAD 모델의 세그먼트화
- (3) EPS 세그먼트 가공을 위한 공구경로 생성(폴리곤화)
- (4) EPS 거푸집 세그먼트 가공
- (5) 가공된 세그먼트들을 조합하여 1개의 EPS 거푸집 제작

### 5. 커팅 실험

비정형 표면을 나타낼 수 있는 직선모양, 대각선모양, 곡선모양 등이 포함된 네 가지 종류의 샘플곡면을 커팅하여 커팅 시간과 가공의 정밀도를 측정하였다. 실험으로 설정한 네 가지 종류의 커팅 면은 다음과 같다 (Fig. 6).

- (a) EPS Foam 1 = 윗면만 곡선인 모양
- (b) EPS Foam 2 = 옆면만 곡선인 모양
- (c) EPS Foam 3 = 윗면과 옆면이 곡선인 모양
- (d) EPS Foam 4 = 대각선-곡선-직선이 합쳐진 모양

#### 5.1 EPS Foam의 커팅 시간 측정

EPS Foam 가공기를 사용한 커팅 시간과 CNC 밀링 기계를 사용한 커팅 시간을 비교하였다. 동일한 가공조건을 위해 같은

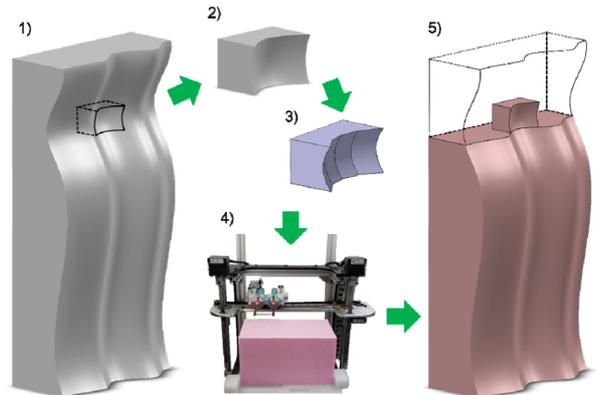


Fig. 5 Procedures to build an EPS concrete mold

크기와 재질을 가진 EPS Foam을 사용하여 가공하였다. EPS Foam 가공기의 경우, EPS Foam을 직교좌표형 이동부에 고정하고 기준 좌표를 설정한 후, 가공이 시작 되는 순간부터 완료되는 순간까지를 측정하였다. CNC 밀링 기계의 경우도 마찬가지로, EPS Foam을 바이스에 고정하고 좌표축에 대한 설정을 마친 후, 가공이 시작되는 순간부터 완료되는 순간까지의 시간을 측정하였다. 초 단위는 반올림하여 분 단위로 나타내었다 (Table 2).

5.2 EPS Foam의 가공 정밀도 측정

EPS Foam의 표면으로부터 높이 정보를 추출하기 위해서 광삼각법을 이용하는 3D 스캐너를 사용하였다. 이를 통해, 기준 좌표계로부터 가공한 EPS Foam 표면의 벡터 정보를 수집하였다. 이렇게 수집한 벡터 값을 CAD 프로그램을 사용한 EPS Foam의 모델링 값과 비교하여 그 차이를 색깔로 표현하였다 (Fig. 7). CAD 모델과 가공기로 가공한 EPS Foam의 표면 거리가 1 mm를 넘지 않으면 초록색으로 나타냈다. 빨간색으로 갈수록 CAD 모델보다 커팅이 덜 되었고, 파란색으로 갈수록 CAD 모델보다 더 커팅되었음을 의미한다.

6. 실험 결과 및 토의

EPS Foam 가공기와 CNC 밀링 기계를 사용하여 EPS Foam을 가공 할 때 걸린 시간을 Table 2에 나타냈다. EPS Foam 1을 가공하기 위해서 윗면을 폴리곤화하여 커팅하였으며, EPS Foam

가공기로 가공 시 6분이 걸렸다. CNC 밀링 기계는 15분이 걸렸으며, 가공기의 커팅 속도가 CNC 밀링 기계보다 2배이상 빨랐다. EPS Foam 2 커팅 실험에서는 가공기가 3분, CNC 밀링 기계는 14분이 걸렸다. 세번째 실험인 EPS Foam 3을 가공하기 위해서 윗면을 폴리곤화 하였으며, 가공기의 커팅 시간은 6분, CNC 밀링 기계는 28분이 걸렸다. 마지막으로 EPS Foam 4 커팅 실험에서 가공기는 2분, CNC 밀링 기계는 41분이 걸렸다. 모든 실험에서 가공기의 커팅 속도가 CNC 밀링 기계보다 빨랐다. 이는 커팅양의 차이 때문이다. 작은 밀링 툴을 사용하여 EPS Foam을 한층 한층씩 커팅하는 CNC 밀링 기계와 달리, 열선과 열봉을 사용하는 EPS Foam 가공기는 ‘IT’ 모양 커팅 방식으로 한번에 많은 양을 커팅할 수 있다. 그러므로 CNC 밀링 기계보다 가공 속도가 빠르다.

EPS Foam 가공기의 가공 정밀도는 색깔 분포로 표현하였다 (Fig. 7). 첫번째 실험인 EPS Foam 1의 오차 데이터는 4개의 커팅면 중 양쪽 끝의 두 면이 노란색으로 커팅이 덜 되었고, 안쪽 두 면은 하늘색으로 CAD 모델의 기준면으로부터 더 커팅되었다. 커팅 모양이 리니어 모터의 움직임이 없는 직선모양임에도 불구하고, 오차 값이 큰 이유는 바이스에 고정된 EPS Foam의 위치가 부정확했기 때문이다. 두번째 실험인 EPS Foam 2의 오차 데이터는 초기 커팅에서 정밀하였으나, 커팅의 끝부분 특히, 오른쪽 부분이 노란색으로 오차 값이 컸다. 세번째 실험인 EPS Foam 3의 오차 데이터는 모든 면의 끝부분과 마지막 면이 노란색으로 덜 커팅 되었으며, 마지막 면의 오른쪽 가장자리는 빨간

Table 2 Comparison of time consumption between EPS foam cutter and CNC milling machine

	EPS foam cutter (min.)	CNC milling (min.)
EPS foam 1	6	15
EPS foam 2	3	14
EPS foam 3	6	28
EPS foam 4	2	41

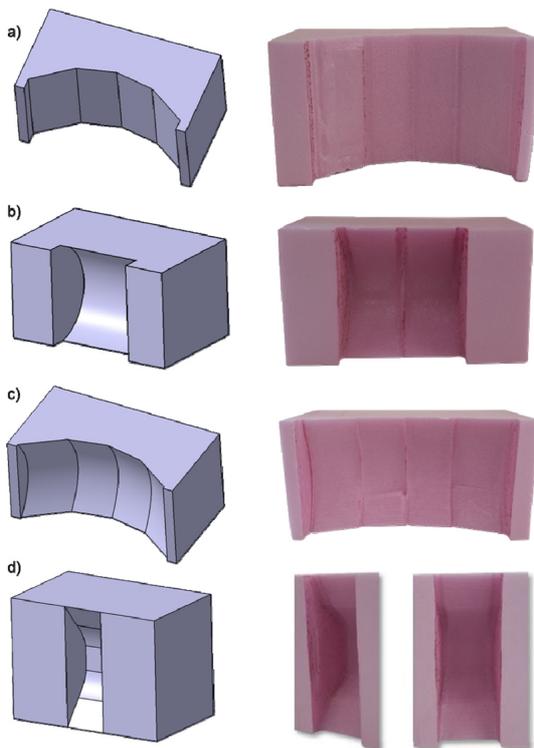


Fig. 6 Sample surfaces to compare cutting performance (CAD models and manufactured EPS foams)

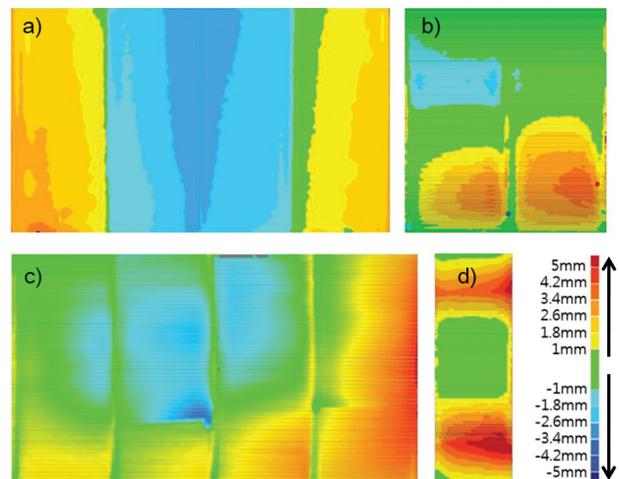


Fig. 7 Isometric view of cutting errors: (a) EPS foam 1, (b) EPS foam 2, (c) EPS foam 3, (d) EPS foam 4

색으로 오차 값이 가장 컸다. 마지막 실험인 EPS Foam 4의 오차 데이터는 리니어 모터의 움직임이 없는 직선모양이 초록색으로 오차 값이 작은 반면, 리니어 모터에 따라 커팅되는 대각선과 곡선모양은 주황색과 빨간색으로 오차 값이 컸다. 오차의 원인은 2가지가 있다. 먼저, 기구학 오차이다. 커터기와 열봉의 고정 위치가 부정확하여 기준 좌표계로부터 EPS Foam이 틀어졌기 때문이다. 두번째로 설치 오차이다. EPS 세그먼트를 가공하기 위해서 EPS Foam은 가공기의 바이스에 고정되어야 한다. EPS Foam을 바이스에 고정할 시, 위치가 틀어졌기 때문이다.

종합해서 보았을 때, 정밀도가 1 mm를 벗어나지 않는 CNC 밀링 기계보다 EPS Foam 가공기의 가공 정밀도가 우수하지는 않다. 하지만 벽체두께의 3%, 평면길이의 2%로 허용오차가 큰 건축 산업에서 거푸집을 가공하기 위한 기계로 사용할 수 있으며, 간단한 후처리를 통해서 건축현장에서 요구하는 수준의 가공 정밀도를 얻을 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 비정형 건축물을 짓기 위한 EPS 거푸집 공법에서 EPS 거푸집을 가공하는 EPS Foam 가공기 메커니즘 개발에 대한 연구를 하였다. 열봉과 열선을 사용한 커팅 방식으로 비정형 EPS 거푸집을 가공함으로써 기존의 CNC 밀링 기계보다 거푸집 커팅 시간을 단축시켰고, 비정형 EPS 거푸집을 만들기 위한 가공 정밀도를 증명하였다. 또한, EPS 거푸집을 세그먼트화하여 가공함으로써 소형화된 기계로 공사현장에서 신속한 대응에 활용 가능하도록 하였다. 즉, 기존 공사방법에 거푸집 가공 작업을 좀 더 효율적으로 적용시킴으로써 공사기간을 단축시키고, 경제적인 효과를 누릴 수 있도록 하였다. 이러한 EPS Foam 커팅 메커니즘은 향후 건설 산업의 비정형적인 요소들을 시공하기 위한 다양한 분야에서 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20144010200770).

REFERENCES

1. Lee, D., Hong, W.-K., Kim, J. T., and Kim, S., "Conceptual Study of Production Technology of Free-Form Concrete Segments," *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 4, p. 321, 2015.
2. Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., et al., "Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes," *Automation in Construction*, Vol. 21, pp. 262-268, 2012.

3. Buswell, R. A., Soar, R., Gibb, A. G., and Thorpe, A., "Freeform Construction: Mega-Scale Rapid Manufacturing for Construction," *Automation in Construction*, Vol. 16, No. 2, pp. 224-231, 2007.
4. Bae, K. J., Lee, S. H., and Jun, H. J., "A Study on Digital Design Process of the Materialization of Free Form Design Architecture," *Architectural Institute of Korea*, Vol. 29, No. 1, pp. 221-224, 2009.
5. Han, J. Y., Kim, D. H., and Park, J. D., "A Study on the Classification and Its Features of Fabrication Types in Realizing Double-Curved Surface of Free Form Architecture," *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning and Design*, Vol. 29, No. 12, pp. 3-14, 2013.
6. Khoshnevis, B., "Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies," *Automation in Construction*, Vol. 13, No. 1, pp. 5-19, 2004.
7. Le, T., Austin, S., Lim, S., Buswell, R., Gibb, A., et al., "High-Performance Printing Concrete for Freeform Building Components," *Proc. of International Fib Symposium on Concrete Engineering for Excellence and Efficiency*, pp. 499-502, 2011.
8. Zhang, J. and Khoshnevis, B., "Optimal Machine Operation Planning for Construction by Contour Crafting," *Automation in Construction*, Vol. 29, pp. 50-67, 2013.
9. Bosscher, P., Williams, R. L., Bryson, L. S., and Castro-Lacouture, D., "Cable-Suspended Robotic Contour Crafting System," *Automation in Construction*, Vol. 17, No. 1, pp. 45-55, 2007.
10. Khoshnevis, B. and Hwang, D., "Contour Crafting," In *Rapid Prototyping*, Kamrani, A. and Nasr, E. A., (Eds.), Springer, pp. 221-251, 2006.
11. Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S., et al., "Fabricating Construction Components Using Layer Manufacturing Technology," *Proc. of Global Innovation in Construction Conference*, pp. 512-520, 2009.
12. Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., et al., "Hardened Properties of High-Performance Printing Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 558-566, 2012.
13. Park, Y., Jo, S., and Kim, S., "Development of the Free-Formed Concrete Structure Construction Technologies Using 3D Digital Design," *Proc. of Autumn Annual Conference in the Korean Institute of Building Construction*, Vol. 12, No. 1, pp. 205-208, 2012.
14. Kolarevic, B., "Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age," *Proc. of Association for Computer Aided Design in Architecture*, pp. 268-278, 2001.
15. Ahn, D.-G., Lee, S.-H., and Yang, D.-Y., "Development of Transfer Type Variable Lamination Manufacturing (VLM-st) Process," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 14, pp. 1577-1587, 2002.