

Research Paper

비정형 콘크리트 패널의 생산데이터 자동생성을 위한 수학적 알고리즘

Mathematical Algorithms for the Automatic Generation of Production Data of Free-Form Concrete Panels

김도영¹ · 김선국² · 손승현^{3*}

Kim, Doyeong¹ · Kim, Sunkuk² · Son, Seunghyun^{3*}

¹Researcher, Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17104, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17104, Korea

³Researcher, Department of Architectural Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam, 58554, Korea

*Corresponding author

Son, Seunghyun
Tel : 82-61-450-2457
E-mail : seunghyun@mnu.ac.kr

Received : May 5, 2022

Revised : October 12, 2022

Accepted : October 28, 2022

ABSTRACT

Thanks to the latest developments in digital architectural technologies, free-form designs that maximize the creativity of architects have rapidly increased. However, there are a lot of difficulties in forming various free-form curved surfaces. In panelizing to produce free forms, the methods of mesh, developable surface, tessellation and subdivision are applied. The process of applying such panelizing methods when producing free-form panels is complex, time-consuming and requires a vast amount of manpower when extracting production data. Therefore, algorithms are needed to quickly and systematically extract production data that are needed for panel production after a free-form building is designed. In this respect, the purpose of this study is to propose mathematical algorithms for the automatic generation of production data of free-form panels in consideration of the building model, performance of production equipment and pattern information. To accomplish this, mathematical algorithms were suggested upon panelizing, and production data for a CNC machine were extracted by mapping as free-form curved surfaces. The study's findings may contribute to improved productivity and reduced cost by realizing the automatic generation of data for production of free-form concrete panels.

Keywords : mathematical algorithms, automatic generation, production data, free-form concrete panel

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 비정형 건축은 디지털 3D 모델링 도구의 발전으로 복잡하고 다양한 형태의 비정형 건축물이 증가하고 있다. 그러나 기하학적 복잡성과 수학적으로 정의가 어려운 자유곡면의 구현은 설계, 시공, 구조, 재료, 컴퓨터공학, 수학 등 다양한 분야의 기술적 협업이 요구된다. 특히, 비정형 콘크리트 패널(Free form concrete panel, FCP)은 각 패널마다 상이한 곡률을 가지기 때문에 몰드의 재사용이 불가능하다[1]. 또한, FCP의 실제 제작에 있어 다양한 분할기법의 적용과정은 복잡하고 생산데이터 추출에 많은 인력과 시간이 투입된다[2]. 예를 들면, 시공 엔지니어는 FCP를 생산하기 위해 BIM 또는 CAD정보를 바탕으로 패널을 분할하고 CNC(Computerized Numerical Control) 장비가 인식할 수 있는 NC data를 따로 생성해야 한다[3]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 모델설계 후 패널분할 과정을 빠르고 체계적으로 수행하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구의 목적은 FCP 생산데이터 자동생성 알고리즘을 제시하는 것이다. 향후, 본 연구의 결과는 CNC 장비의 생산데이터 자동 생성으로 인해 FCP의 빠르고 체계적인 생산을 가능하게 할 것이며, FCP 생산 시스템 개발의 기초자료로 활용될 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 Figure 1과 같이 진행된다. 첫째, 예비적 고찰을 통하여 패널 분할기법 및 비정형 콘크리트 패널 생산에 관한 기초조사를 실시하여, 기존 연구동향을 파악한다. 둘째, CNC 장비의 구동방식을 분석하여 FCP 생산을 위한 검토 요인을 조사한다. 셋째, 비정형 콘크리트 패널의 생산데이터 자동생성을 위한 알고리즘을 제시한다. 이때, 수학적으로 정의된 패턴정보를 활용하여 패널 분할을 실시하고, CNC 장비의 Capacity내에 생산이 가능한지 검토요인을 분석한다. 마지막으로 향후 연구에 대한 토론을 진행하고 결론을 제시한다.

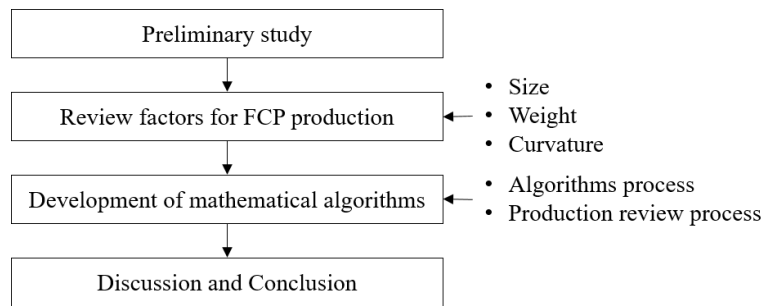


Figure 1. Methodology

2. 예비적 고찰

비정형 건축은 컴퓨터의 연산처리 능력 및 BIM, CATIA, Rhino 등의 3D 디지털 도구의 발전으로 비정형 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이와 관련하여 다양한 연구들이 진행되었다[4-7]. 예를 들면, Michael et al.[4]은 경제적인 패널 생산을 위한 패널링 최적화에 관한 연구를 하였다. 그들은 패널 간의 간격이 디자인의 최대 허용오차에 가까울수록 경제적이라 판단하였고, 컴퓨터 분석을 통해 패널 간의 간격을 검토하여 패널링 최적화를 도모하였다. Helmut et al.[5]은 1방향 곡면 패널(Single Curved Panel)을 이용한 비정형형상의 구현에 관한 연구를 진행하였다. 1방향 곡면 패널을 이용하여 비정형형상을 구현하면 각 패널간 연결에 관한 문제가 발생한다. 그들은 이를 해결하기 위해 와이어 프레임 모델을 활용하여 설계와 패널 제작을 위한 최적화 작업을 진행하였다.

또한, 비정형 콘크리트 부재 생산에 관한 연구들[8-11]을 살펴보면, Park et al.[8]은 3D 디지털 설계를 바탕으로 지오메트리 통제가 가능한 CNC 가공된 T형 경량철골을 이용하여 비정형 콘크리트를 구현하는 시공법을 개발하였으며, 기존 시공법들이 갖고 있는 문제점을 개선하고자 하였다. Ryu and Kim.[9]은 BIM기반으로 Tri-Bowl 형태의 비정형 콘크리트 부재의 설계와 시공사례를 분석하였다. Cauberg et al.[10]과 Lindsey and Gehry[11]은 EPS-formwork을 제작하여 이를 이용한 비정형 콘크리트 부재를 생산하는 기술에 대한 연구를 진행하였다. 이와 같이 대부분의 연구들은 비정형 곡면 형상의 구현에 관한 개념 연구가 진행되었고, 패널의 실제 제작을 위한 생산데이터 추출에 관한 연구는 미흡하다.

또한, 비정형 패널 제작에 있어 필요한 정보는 패널의 형상정보, 좌표정보, 곡률 값, 길이 등의 정보가 필수적이며, 기계제작의 경우 기계의 제원에 맞는 적당한 패널 크기가 우선적으로 결정되어야 한다. 따라서 본 연구의 비정형 콘크리트 패널 생산데이터 자동 생성 알고리즘을 위해서는 비정형 건축물의 디자인된 빌딩모델, 패널분할 시 생기는 Pattern(줄눈), 생산 장

비의 Capacity 등의 종합적인 검토로 이루어져야 한다. 이를 위해 개발된 CNC 장비의 형상구현 원리와 FCP 생산을 위한 검토요인 분석이 필요하다. 그에 대한 상세는 다음 장에서 자세히 설명한다.

3. FCP 생산을 위한 검토요인

본 연구를 위해 제작된 CNC 장비의 형상구현 원리를 살펴보면, 3차원 비정형 형상은 Figure 2와 같이 평면상의 X축과 Y축의 좌표에 Z값을 할당하여 표현할 수 있다. Figure 2에서 정의된 Z값의 집합이 곡면 데이터이다. Figure 2는 CNC 장비의 구현방식을 보여준다. 네 점($P_1 \sim P_4$)은 비정형 디자인의 절대좌표인 X, Y좌표와 Z좌표를 나타낸다. 또한, 네 길이값($H_1 \sim H_{max}$)은 XY평면에서 각 점까지의 거리(높이)를 나타낸다. CNC 장비는 X, Y좌표에 NCR(Numerical Control Rod)을 배치하고, NCR의 구동 높이를 통제하여 비정형 형상을 구현한다. 이때, 최대높이(H_{max})는 CNC장비의 생산가능 범위 내에 있어야 한다[12].

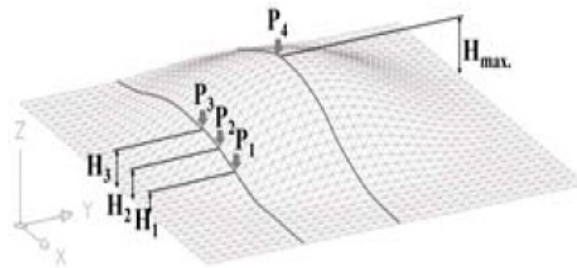


Figure 2. 3D Free-Form panel design shape

이와 같이 CNC 장비는 XY평면상의 좌표가 기준이 되어 그에 따라 정의되는 Z값으로 곡면을 형성한다. 따라서 본 연구에서는 패널을 분할할 때 XY평면을 기준으로 패턴화를 진행하고 이를 3차원 곡면으로 사상(mapping)한다. Figure 3은 비정형 패널의 생산을 위해 개발한 CNC 장비이다. 개발된 CNC 장비는 형상구현 면적 600mm*600mm의 크기로 제작하였으며 NCR은 7개*7개로 배치하였다. NCR의 구동높이는 Figure 4와 같이 장비의 규모를 고려하여 최대 250mm로 제한하였다. 최대 구동 높이는 광학센서를 활용하여 기계적으로 제어된다. 참고로 개발된 CNC 장비는 시제품으로 600mm*600mm의 사이즈로 제작되었으나, 장비의 사이즈는 현장에서 제작되어야 하는 패널 크기에 따라 얼마든지 변경 가능하다.



Figure 3. CNC machine prototype production

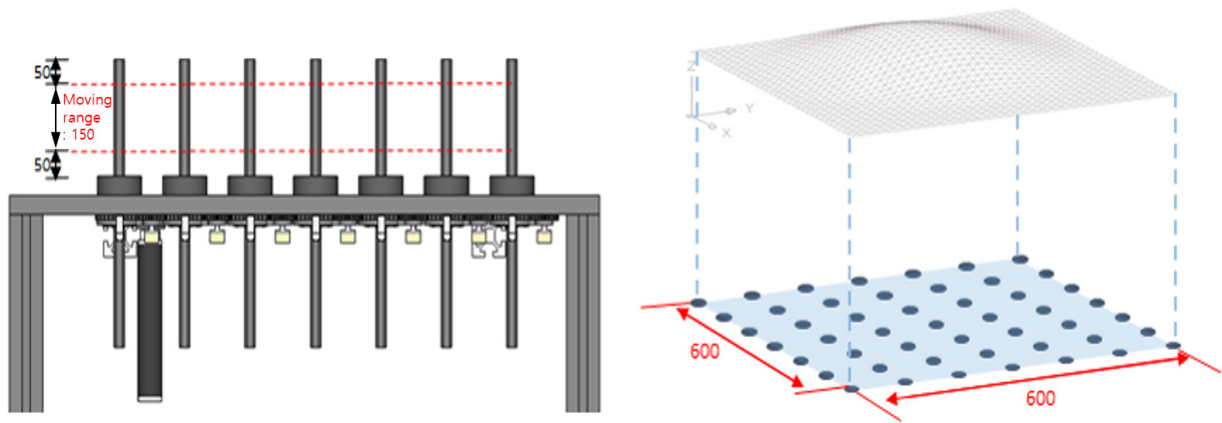


Figure 4. The capacity of CNC machine

본 연구에서 생산하고자 하는 콘크리트 패널은 Figure 4와 같이 CNC 장비의 동작범위인 로드길이 250mm로서 위, 아래 오차범위 50mm를 제외한 로드의 동작범위 150mm, 로드간격 100mm로서 기준평면으로 투영된 패널의 가로, 세로의 길이를 600mm 내로 제작되어야 한다. 이와 같이 FCP의 생산데이터 자동 생성 알고리즘은 FCP의 size, weight, curvature가 CNC 장비의 capacity 내에 생산 가능한지 검토 되어야 한다[13]. FCP의 생산 검토요인들을 정리하면, Table 1과 같다.

Table 1. Review factors for panelizing

Type	Constraints	Definition of variables
Size	$V_{FCP} \leq V_P$	<ul style="list-style-type: none"> V_{FCP} : size of free form concrete panel V_P : maximum size that can be produced by CNC machine
Weight	$W_{FCP} \leq W_P$	<ul style="list-style-type: none"> W_{FCP} : weight of free form concrete panel W_P : maximum weight that can be produced by CNC machine
Curvature	$C_{FCP} \leq C_P$	<ul style="list-style-type: none"> C_{FCP} : curvature of free form concrete panel C_P : maximum curvature that can be produced by CNC machine

Table 1과 같이 CNC 장비에서 생산 가능한 Size(가로, 세로), Weight(로드양정), Curvature(로드길이)을 고려한 패널 분할이 되어야 한다. 이를 위해 XY평면상에서 패널 분할을 위한 패턴화 작업 시 이를 고려한 줄눈의 범위를 설정하여야 한다. 본 연구에서는 이를 종합적으로 고려한 비정형 콘크리트 패널의 생산데이터 자동생성을 위한 수학적 알고리즘을 제시한다.

4. FCP 생산 데이터 자동생성 수학적 알고리즘

본 연구의 수학적 알고리즘의 개념은 Figure 5와 같다. Figure 5와 같이 비정형 빌딩모델에 따른 최적의 CNC 장비를 선택하고, 장비의 capacity에 따라 패널분할을 실시한다. 이때, 장비, 모델, 패턴을 종합적으로 고려한 패널정보 생성에 대한 일정한 규칙이 있다면 정확한 생산정보 자료로 인해 효율적인 생산이 가능하다.

Figure 5와 같이 비정형 모델은 패널의 기본정보인 절대좌표를 제공하고, CNC 장비는 capacity를 고려한 생산정보를 제공한다. 또한 수학적 규칙성에 의한 pattern정보는 패널분할 정보를 제공한다.

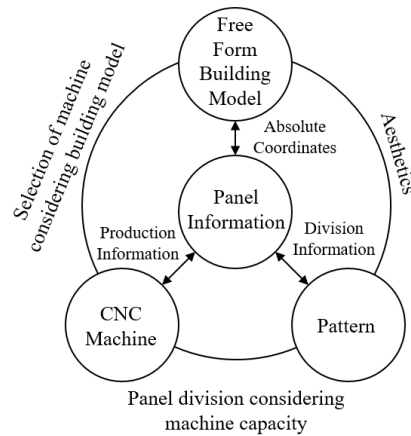


Figure 5. Conceptual diagram of the algorithms

이를 종합적으로 고려한 비정형 콘크리트 패널의 생산데이터 자동생성 과정은 Figure 6과 같이 총 6단계로 진행되고 각 단계별 상세는 다음과 같다.

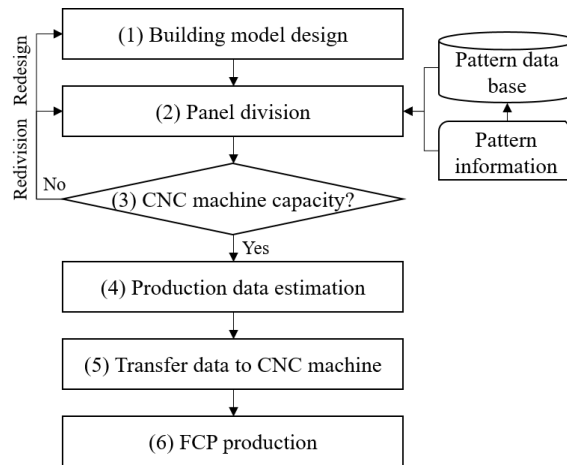


Figure 6. Algorithms process

Figure 6과 같이 첫째, 건축가에 의해 비정형 건물의 전체적인 모델이 설계된다. 둘째, 패널 분할이 실시된다. 이때, 수학적 알고리즘에 의한 패턴정보를 이용하여 패널분할이 진행된다. 참고로 패턴정보는 수학적 규칙성을 이용하여 패턴화 작업이 진행된 정보로서 본 연구에서 제시하는 FCP 생산데이터 자동생성을 위한 수학적 알고리즘이다. 이에 대해서는 다음 장에서 자세히 설명한다. 셋째, CNC 장비로 생산이 가능한지 검토한다. 넷째, FCP 생산데이터를 생성한다. 다섯째, CNC 장비로 FCP 생산데이터를 전송한다. 마지막으로 CNC 장비에서 FCP를 생산한다.

4.1 수학적 알고리즘

FCP 생산을 위해 Figure 7과 같이 수학적 규칙성을 이용한 패턴화 작업을 진행한다. 수학적으로 정의된 평면패턴을 비정형 곡면으로의 mapping을 통하여 패널분할을 실시한다.

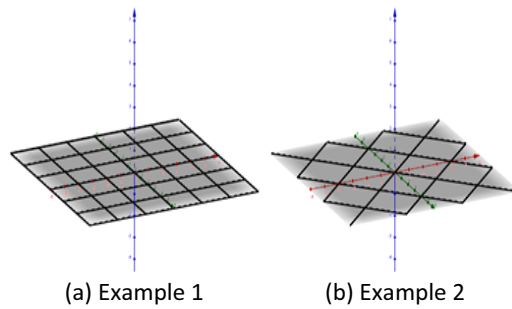


Figure 7. Pattern example based on the mathematical regularity

수학적 패턴화 작업에 대해 예를 들어 설명하면, Figure 7과 같이 평면상의 패턴을 형성하기 위해 직선을 이용한다. 이러한 직선들의 조합이 mesh 형태의 패턴을 형성한다. 패턴을 형성하는 수식은 식 (1)과 같다.

$$F(x) = mx + b_n, m = \tan\theta, b_n = a + (n - 1)d \tag{1}$$

여기서, θ : x 축과 이루는 양의 방향의 각, a : 첫째항, n : 항의 수, d : 공차

식 (1)은 직선의 방정식의 기울기와 y 절편을 변수화 하였다. y 절편의 경우 수열을 활용하여 규칙성을 만들었다. 이는 3차원 공간으로의 변환 시 패널의 형태, 배치 등이 일정한 간격을 유지할 수 있도록 한다. 또한, 분할선의 기울기를 결정하는 x 축과 양의 방향의 각(θ)을 변수화 함으로써, 패턴의 다양한 변화가 가능하다.

Figure 7(b)의 경우, 식 (1)의 변수들을 Table 2와 같이 정의하면 나타나는 패턴이다. 이와 같이 변수들의 변화에 따라 평면상에 다양한 패턴을 형성할 수 있다. 이러한 평면상의 패턴을 Figure 8과 같이 3차원 비정형 곡면으로의 mapping을 통해 패턴분할을 진행한다.

Table 2. Formula Expression of Figure 7(b)

n	$m = 1, a = -8, d = 4$	$m = -1, a = 8, d = 4$
1	$y = x - 8$	$y = -x - 8$
2	$y = x - 4$	$y = -x - 4$
3	$y = x$	$y = -x$
4	$y = x + 4$	$y = -x + 4$
5	$y = x + 8$	$y = -x + 8$

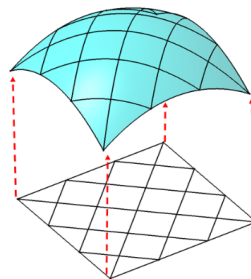


Figure 8. Concept of pattern mapping

일반적으로 유클리드 벡터공간에서 함수 f 의 정의역이 R^n 이고 그 공변역이 R^m 일 때, f 를 R^n 에서 R^m 으로의 변환 (transformation)이라 하고 f 는 R^n 을 R^m 으로 mapping한다고 한다[14]. 예를 들면, f_1, f_2, \dots, f_m 을 n 개의 실변수 실수값 함수, 즉, 식 (2)와 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} w_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ w_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ w_m &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)와 같이 m 개의 방정식을 R^n 의 각 점 (x_1, x_2, \dots, x_n) 에 R^m 의 유일한 점 (w_1, w_2, \dots, w_m) 을 대응시킨다. 따라서 이것은 R^n 에서 R^m 으로의 변환으로 정의되며, 이 변환을 T 로 정의하면 $T: R^n \rightarrow R^m$ 이고 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T(x_1, x_2, \dots, x_n) = (w_1, w_2, \dots, w_m) \quad (3)$$

이와 같은 방법으로 Figure 7(b)의 패턴을 $z = -0.05(x^2 + y^2)$ 로 정의된 곡면으로 mapping을 진행하였다. Figure 7(b)의 패턴을 형성하는 수식은 Table 2를 적용하였다. 이때, 방정식 $w_1 = x_1, w_2 = x_2, w_3 = -0.05(x_1^2 + x_2^2)$ 은 변환 $T: R^2 \rightarrow R^3$ 을 정의한다. 이 변환에 의하여 점 (x_1, x_2) 의 상(image)은 식 (4)와 같다.

$$T_n(x_1, x_2) = (x_1, x_2, -0.05(x_1^2 + x_2^2)) \quad (4)$$

Table 2는 10개의 수식으로 형성되어 있어 각각의 직선의 변환은 식 (5)부터 식 (14)까지와 같이 정의된다.

$$T_1(x, x-8) = (x, x-8, -0.05(x^2 + (x-8)^2)) \quad (5)$$

$$T_2(x, x-4) = (x, x-4, -0.05(x^2 + (x-4)^2)) \quad (6)$$

$$T_3(x, x) = (x, x, -0.05(x^2 + x^2)) \quad (7)$$

$$T_4(x, x+4) = (x, x+4, -0.05(x^2 + (x+4)^2)) \quad (8)$$

$$T_5(x, x+8) = (x, x+8, -0.05(x^2 + (x+8)^2)) \quad (9)$$

$$T_6(x, -x-8) = (x, -x-8, -0.05(x^2 + (x+8)^2)) \quad (10)$$

$$T_7(x, -x-4) = (x, -x-4, -0.05(x^2 + (x+4)^2)) \quad (11)$$

$$T_8(x, -x) = (x, -x, -0.05(x^2 + x^2)) \quad (12)$$

$$T_9(x, -x+4) = (x, -x+4, -0.05(x^2 + (x-4)^2)) \quad (13)$$

$$T_{10}(x, -x+8) = (x, -x+8, -0.05(x^2 + (x-8)^2)) \quad (14)$$

x 의 범위를 정수로 설정하여 좌표정보를 추출하면, Figure 9와 같다.

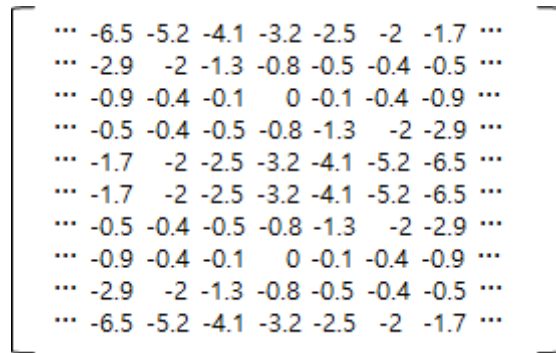


Figure 9. Transformed coordinate information

이와 같이 변환 $T: R^2 \rightarrow R^3$ 에 의해 평면패턴을 3차원 비정형 곡면으로 mapping을 진행하였다. Figure 10은 그 결과를 3D 모델링 툴인 CATIA로 재현된 모습이다. 또한 패널생산에 필요한 좌표는 Figure 10과 같이 CATIA에서 자동으로 추출할 수 있다. 이와 같이 평면상의 패턴을 이용하여 패널을 분할한다면 쉽고 체계적으로 분할이 가능하고 패턴의 변수를 변화함에 따라 다양한 패널분할 방법을 사전에 검토할 수 있다.

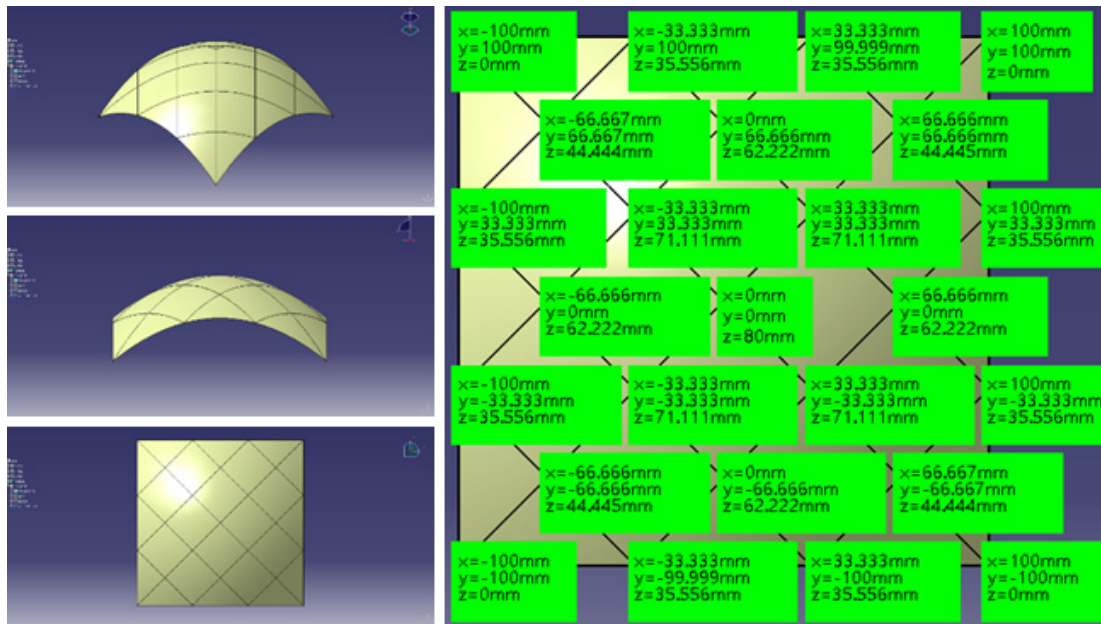


Figure 10. Automatic generation of coordinates using the 3D modeling tool

4.2 FCP 생산검토 프로세스

패턴에 의한 패널분할 후 자체 개발한 CNC 장비로 생산 가능여부가 고려되어야 한다. 비정형 콘크리트 패널의 CNC 장비의 capacity 내에 검토 과정은 Figure 11과 같다.

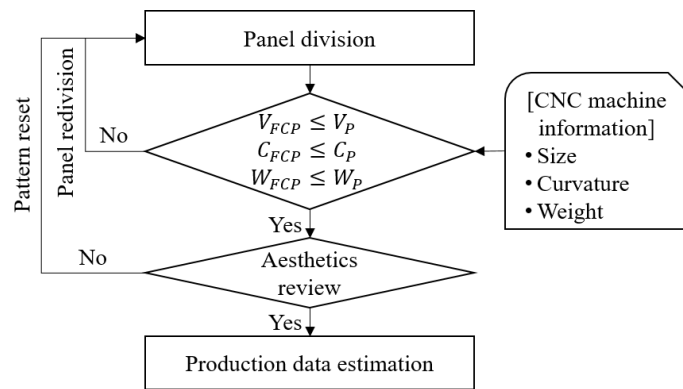


Figure 11. Production review process

- ① 패턴을 설정하여 비정형 빌딩모델을 패널 분할한다.
- ② 비정형 패널의 생산가능 검토요인은 Size, Curvature, Weight로서 $V_{FCP} \leq V_P$, $C_{FCP} \leq C_P$, $W_{FCP} \leq W_P$ 을 만족하는지 검토한다. 조건을 만족하지 못할 시, ①의 단계로 회귀하여 CNC 장비의 Capacity내로 생산이 가능하게 패널 재분할을 하여야 한다.
- ③ 장비의 Capacity내의 생산이 가능하다면 건축설계자의 의도된 아름다움을 잘 표현하였는지 심미성을 검토 한다.
- ④ 패널의 생산 데이터 정보를 확정한다.

(4), (5), (6) 단계는 분할된 패널의 생산정보(CNC 장비를 수치제어 할 좌표값)를 확정하여 프로그램을 이용하여 CNC 장비로 패널정보를 전송한다. 확보된 생산데이터로 패널을 생산한다.

이와 같이 비정형 패널의 생산데이터 자동생성 알고리즘은 비정형 건축물의 패널 분할 시 수학적 규칙성에 의한 패턴을 이용하여 3차원 곡면으로의 mapping을 통해 생산데이터를 자동 추출한다. 확보된 데이터를 CNC 장비로의 정보전송으로 인하여 비정형 콘크리트 패널의 빠르고 체계적인 생산이 가능할 것이라 기대된다.

5. 결론

디지털 기술의 발전으로 건축가의 창의성을 극대화한 비정형 설계가 증가하고 있으나 이러한 비정형 곡면을 구현하기에는 많은 어려움이 따른다. 특히, 비정형 콘크리트 패널의 제작을 위한 패널분할에서 생산데이터 추출의 일련의 과정에 많은 비용, 인력 및 시간이 투입된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 비정형 콘크리트 패널의 생산데이터 자동생성을 위한 수학적 알고리즘을 제시하였다.

본 연구의 결과는 첫째, 비정형 빌딩모델, 생산장비, 패턴정보의 종합적 검토에 의한 생산데이터를 추출 알고리즘을 제시하였다. 이는 패널 분할 시 수학적 규칙성에 의한 패턴을 활용하여 보다 쉽고 체계적인 패널분할이 가능하게 한다. 또한, 패턴의 변수를 변화함에 따라 다양한 패널분할 방법을 사전에 검토할 수 있다. 셋째, 비정형 패널의 생산을 위한 장비의 검토요인을 파악하여 실제 제작에 필요한 정보를 추출하였다.

본 연구의 결과를 통해 비정형 건축물의 프로젝트 초기설계단계에서 다양한 디자인 패턴을 수학적으로 검토할 수 있을 것이라 판단되고, 변수들의 변화로 인한 다양한 곡면분할방식을 검토할 수 있게 됨으로써 프로젝트의 완성도를 높일 것이라 기대된다. 향후, 본 연구에서 제시된 알고리즘을 기반으로 보다 효율적인 FCP 생산시스템 개발 연구를 추가적으로 진행할 것이다.

요약


최근 디지털 설계기술의 발전에 따라 건축가의 창의성을 극대화한 비정형 설계가 급증하고 있다. 그러나 다양한 비정형 곡면을 구현하기에는 많은 어려움이 발생하고 있다. 비정형 형상구현을 위한 패널분할은 mesh, developable surface, tessellation, subdivision 등의 분할기법이 적용된다. 비정형 패널의 제작 시 이러한 분할기법의 적용과정은 복잡하고 생산데이터 추출에 많은 인력과 시간이 투입된다. 따라서 비정형 건물의 설계 후 패널제작을 위한 생산데이터 추출과정을 빠르고 체계적으로 수행할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이에 본 연구는 빌딩모델, 생산장비 성능, 패턴정보를 종합적으로 고려하여 비정형 패널의 생산데이터 자동생성을 위한 수학적 알고리즘을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 패널분할 시 수학적 알고리즘을 제시하였고, 비정형 곡면으로의 Mapping을 통해 CNC 장비를 위한 생산데이터를 추출하였다. 본 연구의 결과는 비정형 콘크리트 패널 생산을 위한 데이터 자동생성을 가능하게 하여 생산성 향상과 원가절감에 기여한다.


키워드: 비정형 콘크리트 패널, 생산데이터, 컴퓨터 수치 제어 장비, 수학적 알고리즘


Funding

This research was supported by a grant(NRF-2021R1C1C2091677) from the National Research Foundation of Korea by Ministry of Science, ICT and Future Planning.

ORCID

Doyeong Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-1487-9998>

Sunkuk Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-7350-4483>

Seunghyun Son,  <https://orcid.org/0000-0003-1349-5586>

References

1. Ryu JW. BIM-based panelizing optimization for architectural freeform surfaces [dissertation]. [Seoul (Korea): Seoul National University; 2012. 199 p.
2. Ryu JW, Moon J. A study on classification of the panelizing for architectural freeform surfaces and the optimization of panelizing. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*. 2013 Sep;14(9):4616-26. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4616>
3. Lee DH, Hong WK, Kim JT, Kim SK. Conceptual study of production technology of free-form concrete segments. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015 Aug;7(4):321-5. <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.812>
4. Eigensatz M, Deuss M, Schiffner A, Kilian M, Mitra NJ, Pottmann H, Pauly M. Case studies in cost-optimized paneling of architectural freeform surfaces. *Advances in Architectural Geometry 2010*; 2010 Mar 17; Vienna, Austria., Vienna (Austria): Springer; 2010. P. 49-72. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0309-8_4
5. Pottmann H, Schiffner A, Bo P, Schmiedhofer H, Wang W, Baldassini N, Wallner J. Freeform surfaces from single curved panels. *ACM Transactions on Graphics*. 2008 Aug;27(3):1-10. <https://doi.org/10.1145/1360612.1360675>
6. Schiffner A, Gmbh E, Baldassini N, Bo P, Pottmann H. Architectural freeform structures from single curved panels. *Advances in Architectural Geometry*. 2008 Jan;45-8.

7. Liu Y, Pottmann H, Wallner J, Yang YL, Wang W. Geometric modeling with conical meshes and developable surfaces. *ACM Transactions on Graphics*. 2006 July;25(3):681-9. <https://doi.org/10.1145/1179352.1141941>
8. Park YM, Jo SJ, Kim SJ. Development of the free-formed concrete structure construction technologies using 3D digital design. *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*; 2012 May 18; Jeonju, Korea. Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2012. p. 205-8.
9. Ryu HG, Kim SJ. Case study of concrete surface design and construction method for freeform building based on BIM-focused on Tri-Bowl, Korea. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2012 Jun;12(3):347-57. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2012.12.3.347>
10. Cauberg N, Parmentier B, Vanneste M, Mollaert, M. Fabric formwork for flexible, architectural concrete. *Proceedings of the international symposium on fibre-reinforced polymer reinforcement for concrete structures, FRPRCS-9*; 2009 Dec 20; Sydney, Australia. London (U.K.): Taylor & Francis; 2009. p. 767-71.
11. Lindsey B, Gehry FO. *Digital gehry. Englische ausgabe.: Material resistance digital construction*. WA: Springer Science & Business Media. 2001. 93 p.
12. Lee DH. *A study of construction and management technology of free-form buildings [dissertation]*. [Yongin(Korea)]: Kyung Hee University. 2015. 186 p.
13. Lee DH, Lim JY, Kim SK. Analysis of influence factors on panelizing of free-form buildings. *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*; 2015 May 28; Yeosu, Korea. Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction. 2015. p. 126-7.
14. Anton H, Rorres C. *Elementary Linear Algebra*. New Jersey (United States): WILEY; 2010. 816 p.