

비정형 건축곡면 패널분할과 최적화 유형 분류에 관한 연구

유정원¹, 문준식^{2*}

¹선문대학교 건축학부, ²서울대학교 건축학과

A Study on Classification of the Panelizing for Architectural Freeform Surfaces and the Optimization of Panelizing

Jeong-Won Ryu¹ and JunSik Moon^{2*}

¹Division of Architecture, Sun Moon University

²Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University

요약 디지털 기술의 급속한 발전과 함께 비정형 건축은 그 실현가능성을 높여 왔으며, 비정형 형태로 계획된 복잡한 형태의 건축 외피를 성공적으로 구축하기 위한 패널분할과 최적화 기법 연구에 대한 필요성이 증가하고 있다. 본 논문은 비정형 건축곡면의 성공적인 구축을 위한 선행과제로서 비정형 곡면과 건축곡면 패널분할 기법을 통합적 관점에서 재분류하고 명확한 개념정립을 제시하였으며, 패널분할 최적화 기법의 유형 분류와 유형별 특징 및 사례를 연구하였다.

Abstract Freeform buildings have become the main trend that reflects complex and diverse nature of the society with the progress on the digital technology. Therefore, the demands of the researches about architectural freeform surfaces have increased rapidly over the past few years. As the fundamental research for the successful construction of the freeform buildings, this study focuses on the definition of terms, and the classification of curved-form, the methods of panelizing, and the optimization of panelizing through an integrated perspective.

Key Words : Architectural Freeform Surfaces, Panelizing, Optimization

1. 서론

1980년대 이후 디지털 기술의 급속한 발전과 함께 비정형 건축은 그 실현가능성을 높여 왔으며, 과거에는 기술적 한계로 인하여 구축이 불가능하여 형태 생성에만 그쳤던 비정형 건축들이 오늘날 구축에 많은 성공을 거두면서 더욱 복잡하고 거대한 규모의 비정형 건축물 설계 및 시공이 가능해 졌다. 성공적인 비정형 건축물들은 국가나 도시의 기술과 문화 및 경제를 대변하는 새로운 척도로 활용될 만큼 그 비중이 높아져 가고 있다.

비정형 건축물의 구축과정에서 비정형 형태로 계획된 복잡한 형태의 외피를 제작하고 시공하는 일은 비정형

건축의 성공을 좌우하는 중요한 과정으로서 일반적인 정형 건축물의 구축과는 차별되는 몇 가지 특징을 지닌다.

첫째, 설계, 시공, 구조, 재료, 패널제작, 에너지, 컴퓨터 공학 등 다양한 분야 전문가들의 기술적 협업이 요구되는 복잡성을 지닌다.

둘째, 패널의 종류(평면패널, 단일곡률패널, 이중곡률패널, 패널재료), 패널분할종류(패널 형태, 분할기법), 패널조립방법 등의 여러 가지 변수에 의해 다양한 대안이 생성되므로 정확한 경제성, 시공성에 대한 예측이 쉽지 않다.

셋째, 비정형 건축의 곡면 외피는 그 건물만이 가지는 유일한 곡률의 외피이며 규모면에서 하나의 거대한 몰드

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 2012-0008520)"

*Corresponding Author : JunSik Moon(Seoul National Univ.)

Tel: +82-2-880-8869 email: justinm@snu.ac.kr

Received August 1, 2012 Revised (1st May 2, 2013, 2nd August 22, 2013, 3rd September 5, 2013) Accepted September 6, 2013

를 사용하여 외피를 제작할 수 없으므로 패널분할(panelizing)이라는 과정을 필수적으로 수반하게 된다. 곡면의 패널분할(panelizing)이란 비정형 곡면을 금속, 유리 등의 패널로 구축하기 위한 패널로의 분할과정을 거치는 것을 말한다(거푸집을 이용한 콘크리트 등의 재료로 구축하는 경우 제외). 즉, 비정형 건축곡면의 생산 및 제작은 비교적 규모가 작은 제품을 생산하는 산업디자인의 경우처럼 비정형 곡면 제작을 위한 한판의 몰드를 형성하여 전체 곡면을 한개의 판으로 제작할 수 없으며, 대량생산이 가능한 자동차 산업의 경우처럼 비정형 곡면 생산을 위한 값비싼 몰드의 제작에 대한 투자 대신에 대량생산에 의한 비용절감이 가능한 경제성 확보가 가능한 경우도 아니므로 몰드의 규모 및 재사용 가능성에 의한 경제성 측면에서 다른 산업들과 차별된다.

넷째, 비정형 곡면의 원형을 최대한 유지하면서 경제성을 고려한 생산 가능한 패널로의 분할과 패널 변형의 일련의 과정인 패널분할 최적화(optimization)를 필요로 한다. 패널분할 최적화 기술은 부재 생산성 확보, 시공 용이성 확보, 합리적 공사비 확보, 원형 곡면 유지 등의 측면에서 그 중요성이 대두되고 있다.

다섯째, 비정형 곡면 외피의 구축을 위하여 어떠한 패널분할 유형을 적용하는가에 따라 외관(패널분할 패턴)과 시공성에서 다양한 차별화가 이루어지며, 적용되는 최적화 기법의 종류에 따라서는 외관(곡면의 시각적 연속성)과 경제성 측면에서 다양한 결과를 생성하게 된다.

이러한 비정형 건축곡면 구축의 특징으로 인하여 패널분할과 최적화 기법 연구에 대한 필요성은 증가하고 있다. 하지만, 비정형 곡면 패널분할 최적화를 위한 건축설계, 시공, 구조, 재료, 패널제작, 에너지, 컴퓨터 공학 등 여러 분야에서의 다양한 시도가 이루어지면서, 비정형 곡면의 패널분할과 최적화 기법에 대한 분류 및 유형정리가 다양한 기준으로 이루어져 있고 개념정립이 명확히 되어있지 않다.

따라서 본 연구에서는 비정형 건축곡면의 성공적인 구축을 위한 선행과제로서 비정형 곡면과 건축곡면 패널분할 기법을 문헌조사를 통하여 통합적 관점에서 재분류하고 명확한 개념정립을 제시하며, 패널분할 최적화 기법들에 대한 문헌조사와 국내 프로젝트의 실무담당 설계 전문가 인터뷰를 통하여 패널분할 최적화 기법의 유형 분류를 제시하고 유형별 특징과 사례를 논하고자 한다.

이는 향후에 비정형 건축 구축을 위한 설계 및 시공과정에서 새로운 패널분할 기법과 최적화 기법 기술 연구에 기초자료로서 큰 의미를 가질 것으로 생각된다.

2. 곡면(curved surface)

2.1 곡면의 정의

우리가 경험하는 3차원 공간상에 존재하는 2차원 곡면을 수학적으로 정의하는 방법은 크게 해석기하학적 정의와 미분기하학적 정의로 나눌 수 있다.

첫째, 해석기하학적 정의에 의한 곡면은 3차원 공간을 표현하는 3개의 좌표변수에 대한 방정식을 만족하는 점들의 집합으로 정의되며 이렇게 정의된 곡면은 대수곡면(algebraic surface)이라고 한다. 곡면은 표현하는 방정식의 차수에 따라 평면을 제외하면 2차 곡면과 그 이상의 고차곡면으로 분류할 수 있다[10]. 2차 곡면(quadratic surface)은 각 좌표변수에 대한 2차 방정식으로 표현되는 곡면으로서 원뿔면(cone), 주면(cylinder), 쌍곡포물면(hyperbolic paraboloid), 포물면(paraboloid), 구면(sphere) 등이 포함된다[11].

둘째, 미분기하학적 정의에 의한 곡면은 곡률을 통해 그 특성이 표현된다. 곡면 위 한 점에서의 가우스 곡률(Gaussian curvature) 부호에 따라 곡면의 각 부분을 분류하며, 가우스 곡률이 0보다 큰 경우 타원점(elliptic point), 0보다 작은 경우는 쌍곡점(hyperbolic point)이 된다. 가우스 곡률이 0인 경우는 모든 방향으로의 곡률이 0인 경우와 그렇지 않은 경우로 나눌 수 있으며, 전자는 평면적 점(planar point), 후자는 포물점(parabolic point)에 해당한다[12]. 이 중 평면적 점으로만 이루어진 곡면이 곧 평면이며, 한 방향으로의 곡률만으로 설명이 가능한 평면점과 포물점으로만 이루어진 곡면은 단일 곡률(single curved) 곡면에 포함된다. 한 방향으로의 곡률만으로 설명할 수 없는 타원점이나 쌍곡점을 포함한 곡면은 이중 곡률(double curved) 곡면이 되는 것이다. 앞서 예로 든 2차 곡면 중 원뿔면(꼭지점 제외)과 주면은 단일 곡률 곡면이며, 쌍곡면과 구면 등은 이중 곡률 곡면에 포함된다[1].

2.2 곡면 유형 분류

곡면의 유형을 분류하기 위해서 앞에서 살펴본 미분기하학적 정의에 의한 곡면 유형인 평면, 단일 곡률 곡면, 이중 곡률 곡면 세 가지와 이 범주에 해당하는 곡면의 종류들, 그리고 곡면의 전개가능성(가전성)에 따른 곡면의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 미분기하학적 정의에 따른 곡면 분류

곡률에 따라 분류되는 미분기하학적 정의에 의한 곡면은 평면, 단일 곡률 곡면, 이중 곡률 곡면 세 가지로 구분할 수 있다. 이중에서 평면적 점으로만 이루어진 곡면이

평면에 해당하며, 한 방향의 곡률로 정의되는 단일 곡률 곡면은 주면(cylinder)과 원뿔(cone)을 그 예로 들 수 있다. 주면(cylinder)은 평행한 직선들의 집합으로 정의되며, 원주면(cylinder)은 주면의 대표적인 예로서 원주의 표면으로 한 직선과 일정한 거리에 있는 점들의 집합으로 정의된다. 원뿔(cone)의 표면은 서로 만나는 두 직선 중 하나를 다른 직선에 대해 회전시켜 얻을 수 있으며, 평행하지 않은 직선들의 집합으로 표현할 수 있기 때문에 단일 곡률 곡면에 해당한다. 박정대(2005)는 정형화 곡면 중 전개가능한 단일 곡률 곡면을 이중 곡률 곡면과 별개로 분리하였으며, 정형화 곡면이 아닌 단일 곡률 곡면 또한 전개가능한(developable) 속성을 지닌다는 점에서 별개 곡면유형으로 분류하였다.

한 방향으로의 곡률만으로 설명할 수 없는 이중 곡률 곡면은 두 수직하는 곡률의 관계에 따라 가우스 곡률의 부호가 양수가 되는 정곡률 곡면, 음수가 되는 부곡률 곡면으로 구분할 수 있으며, 구면, 포물면은 정곡률 곡면에 속하고, 쌍곡면은 부곡률 곡면에 속한다. 이 가운데 정곡률을 지닌 이중 곡률 곡면은 직선의 집합으로 표현되는 선직면(ruled surface)이 될 수 없으나 부곡률 곡면은 선직면으로 표현될 수 있다[1]. 한편 이중 곡률 곡면이 완전하게 전개는 불가능하지만, 곡면의 곡률도 분석을 통해 부분적으로 나누어진 곡면의 일부에 대한 전개가능성을 검토할 수 있다. 이중 곡률 곡면의 종류로는 구면(sphere)와 고리면(torus)을 그 대표적 예로 들 수 있다. 구면(sphere)은 구의 표면으로, 한 점과 일정한 거리에 있는 점들의 집합으로 정의되며, 내포된 두개의 곡률이 동일하며 일정한 값을 가진다. 가우스 곡률은 양수인 정곡률 곡면에 속하며, 전개가 불가능하다. 고리면(torus)은 직선과 떨어져 있지만 그 직선과 한 평면상에 있는 원을 직선을 중심으로 회전함으로써 형성되며, 고리면의 바깥쪽 부분은 가우스 곡률이 양수인 정곡률 곡면이지만 안쪽 부분은 가우스 곡률이 음수인 부곡률 곡면에 해당한다.



■ elliptic points
■ hyperbolic points
■ parabolic points

[Fig. 1] The Gaussian Curvature of Torus[15]

2.2.2 가전성에 따른 곡면 분류

앞에서 언급된 곡률에 의한 곡면의 분류 외에도 곡면을 전개가능성에 의해 가전면(전개가능면)과 불가전면(전개불가능면)으로 분류할 수 있다.

곡면을 별도의 변형 없이 모든 부분의 곡률을 0으로 만들 수 있다면 이 곡면은 평면으로 전개가능(developable)하다고 말할 수 있다. 한 방향으로만 곡률이 0이 아닌 단일 곡률 곡면은 단순히 전개가능한 데 반해, 이중 곡률 곡면은 추가적인 변형 없이 평면 형태로 전개하는 것은 불가능하다[1]. 가전면은 크게 평면형 가전면(planar developable surface), 일반화된 주면(generalized developable surface), 원뿔형 가전면(conic developable surface), 접선 가전면(tangent developable surface) 4가지 범주로 나눌 수 있다. 일반화된 주면은 평행한 직선들의 집합이라는 점에서는 원주면과 같으나 단면이 원 대신 곡선으로 일반화된 것이며[13] 단면의 곡선을 직선으로 바꾸기만 한다면 매우 쉽게 평면으로 전개가 가능하다. 원뿔형 가전면 또한 평면 위에 전개된 모습을 쉽게 상상할 수 있는 곡면이다. 그러나 수학적으로는 원뿔의 꼭지점은 전개할 때 곡률을 정의할 수 없기 때문에 이론적으로는 평면 위에 전개될 수 있는 가전면에 속하지 않는다. 접선 가전면은 선직면의 일종으로, 공간상의 한 곡선에서 각 지점에 대해 그 지점을 지나며 그 지점에서의 곡선의 진행방향과 일치하는 접선들의 집합이다[14]. 선직면 중에서는 단일 선직면(single ruled surface)과 이중 선직면(double ruled surface) 중 하나의 모선(ruling)을 가진 단일 선직면의 경우가 가전면에 해당한다.

추가적인 변형 없이는 평면으로 전개가능하지 않은 곡면을 불가전면이라고 한다. 선직면의 한 쌍(두 개)의 모선을 지닌 이중 선직면(double ruled surface)이 불가전면에 해당하며, 일엽 쌍곡면(hyperboloid of one sheet)과 쌍곡 포물면(hyperbolic paraboloid)은 곡선의 이동곡면으로 표현할 수도 있지만 이중 선직면으로도 표현이 가능하다. 3차원 공간 안에 놓여있는 가전면은 반드시 선직면이어야 하지만, 그 반대의 경우 반드시 그렇지는 않다. 예를 들어, 일반화된 일엽 쌍곡면(general hyperboloid of one sheet)의 경우, 모든 점에서 두 개의 직선을 그을 수 있는 이중 선직면이지만, 가전면은 아니다. 불가전면은 완전하게 전개는 불가능하지만, 곡면의 곡률도 분석을 통해 부분적으로 나누어진 곡면의 일부에 대한 전개가능성을 검토할 수 있다. Gehry는 접선 불연속성(tangent discontinuity) 기법을 적용하여 가우스 곡률의 변화가 큰 영역을 상대적으로 줄여 전개성이 개선되는 결과를 얻을 수 있었다.

곡면의 가전성은 건축자재의 생산성에 있어서 생산기법과 재료에 따라 경제성을 확보할 수 있기 때문에 의미를 가지는 분류이기도 하다.

2.2.3 소결

본 연구에서는 곡면의 유형을 미분기하학적 정의에 의한 곡면 유형과 전개가능성(가전성)에 따라 다음과 같이 분류하였으며, 해당 곡면의 특성과 종류를 요약하면 Table 1과 같다.

[Table 1] The classification of curved surface

Types of Curved Surface		Curved Surface	Developability	Feature
Plane		Plane		No need to modify
Single Curvature		Cylindrical Surface, Conic, Tangent Surface	Developable	Possible to consist of Plane Components
Double Curvature	Constant Curvature	Spherical Surface, Paraboloid	Non-Developable	Impossible to create with Ruled Surface
	Non-Constant Curvature	Hyperboloid		Possible to create with Ruled Surface

3. 비정형 곡면 패널분할(Panelizing)

유클리드 기하학에서 벗어나 자유로운 자연의 모습에 근접한 형태를 모사하기 위해 비정형 건축은 디지털 기술의 발전 이후 형태생성과 구축의 용이성이 확보되기 시작하였다. 이들 비정형 건축은 대부분 다양하게 변화하는 곡물들을 가지는 자유 곡선들로 이루어지며, 이러한 자유 곡선이 이루는 자유 곡면들은 비정형 건물의 구축을 가장 어렵게 하는 제한요소이기도 하다. 이는 곡면의 구축기술, 제작기술 등의 한계와 이에 대한 비용 상승의 측면에서 더욱 그러하다.

비정형 건축에서 사용되는 비정형 곡면의 구현에 있어서 가장 핵심이 되는 것은 건축가의 의도에 부합되는 곡면의 구축과 가능한 예산비용 범위 내에서의 실현이다. 위의 두 가지 상충되는 필연조건을 충족시키기 위해서 곡면의 분할, 즉 패널분할(panelizing) 과정이 수행된다. 패널분할은 단순하게 외피를 자르지만 하는 것이 아니라 시공성, 경제성, 내구성, 심미성을 충족하는 패널의 패턴과 재료 등이 고려되어야 한다. 즉 패널의 실제 제작에 있어 필요한 정보는 패널의 형상정보, 좌표정보, 곡률 값, 길이 등의 정보가 필수적이며, 기계제작의 경우 기계의 제한에 맞는 적당한 패널 크기가 우선적으로 결정되어야 하는 것이다. 비정형 곡면에서의 패널분할 기법은 곡면의 기하학적인 형태, 건축가의 설계의도, 시공방식, 패널생

성 알고리즘, 제작 및 시공비용 등 여러 가지 복합적인 요인들에 의해 달라질 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구들에서 다양하게 분류되어 온 비정형 곡면 패널분할 유형을 패널분할 기법을 중심으로 하여 Table 2와 같이 재분류 하였으며, 제시된 분류항목은 메시(mesh), 가전면(developable surface), 모자이크(tessellation), 하위분할(subdivision), 복합적 패널분할 생성 5가지 유형이며, 이들 유형의 특징은 다음과 같다.

[Table 2] The classification of panelizing

Methodologies of panelizing	Panel Shape	Regularity of Pattern	Methodologies for Creating
Mesh	Triangle, Quadrangle, Pentagon, Hexagon, Hybrid	Regularity	Creating meshes through offset function
Developable Surface	Triangle, Quadrangle	Regularity	Creating Developable Surface
Mosaic	Triangle, Quadrangle, Pentagon, Hexagon, Customized Shapes	Regularity	Creating shapes through setting up with the customized patterns or the combination of the patterns
Sub-Division	Triangle, Quadrangle, Customized Shapes	Irregularity	Creating shapes through the combination of basic pattern and sub-divided pattern, already defined by designers
Hybrid Panel	Triangle, Quadrangle, Pentagon, Hexagon, Customized Shapes	Irregularity	Creating shapes through applying with the irregular panelizing methods

3.1 메시(mesh) 생성

메시 생성 패널분할 기법은 3차원 객체의 경계면 표현(boundary surface representation) 방법으로 면을 평면 다각형의 집합으로 나타내는 방법으로서 곡면의 개별 다각형을 일반적으로 메시(mesh)라고 한다. 이때 메시를 구성하는 다각형은 삼각형, 사각형, 오각형, 육각형, 복합(hybrid) 등이 포함되며 건축 곡면에서의 메시의 다각형 형태는 다음과 같은 특징을 갖는다.

메시 생성 기법 중에서 삼각형 메시를 이용한 패널분할 기법은 곡면을 삼각형 형태로 반복적으로 분할하는 면분할법을 이용해 패널을 생성하는 방식이며, 이 방식은 어떠한 곡면형태도 분할을 통해 원래의 형상에 가깝게 제작 가능하며, 곡면을 평판으로 분할하는 가장 쉬운 방

법이다. 곡면의 삼각형 분할은 간단해 보이지만, 건축에의 적용은 다양한 디자인 의도에 부합해야 하며, 동일한 패널 사이즈와 모양으로의 분할이 요구되고, 특정한 정렬이 요구되기도 하기 때문에 구축이 까다로울 수 있다.

사각형 메시는 곡면을 사각형 형태로 반복적으로 분할하는 면분할법을 이용해 패널을 생성하는 방식이며 평면형 사각 분할과 평면과 곡면 혼합의 사각 분할로 나눌 수 있다. 첫 번째의 경우는 삼각 메시보다 적은 수량의 보와 조인트가 필요하여 최소한의 부재를 사용할 수 있으며, 날카로운 예각의 면 분할이 되지 않고 패널 제작시 최소의 재료를 사용하며, 자재 손실률을 낮출 수 있다. 또한 운반, 설치 과정에서 피로골절을 피할 수 있고, 시공계약 측면의 장점을 확보해 준다. 이러한 모두 평면인 회전체면이거나 가로 세로 모서리들이 모두 평행한 이동곡면일 경우일 경우 외에 불가전면의 방식으로 분할된 사각형 면들은 인접한 분할면의 모서리가 어긋나는 부접합이 발생하여 높은 시공비와 고도의 시공정밀도를 요구한다. 사각형 패널분할 방식은 건물의 파사드 그리드로 구축하기에 가장 적합한 면분할 방식으로 디자인 요소로서도 활용성이 높아 기술적, 경제적, 심미적 관점에서 종합적으로 높은 평가를 받고 있다[1].

Hybrid 메시의 경우는 삼각형, 사각형, 오각형, 육각형 등 다양한 메시의 형태들을 혼합하여 원하는 비정형 곡면을 생성한다. Hybrid 메시 패널분할 기법의 경우 삼각형 메시의 장점 중 하나인 어떠한 형태의 비정형 곡면도 생성해낼 수 있는 장점과 사각형 메시의 장점인 보와 조인트의 부재량을 감소시키고, 자재 손실률 또한 줄일 수 있는 이점들을 동시에 취할 수 있다. Hybrid 메시는 주로 디자인 의도를 최대한 반영하기 위해서 최소의 절점이동을 통해 평판으로 최적화하는 것이 일반적이다.

3.2 가전면(developable surface) 생성

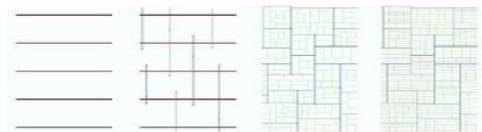
가전면 생성 기법은 곡면들을 전개도로 펼칠 수 있으므로 재료에 따라 제작 용이성 및 시공성을 높여주어 경제적인 측면에서 유리하다. Dennis Sheldon(2002)의 논문에서 다루어진 Frank O. Gehry의 비정형 건축물 사례들은 대부분 가전면을 생성하는 패널분할 기법을 사용하여 복잡하게 디자인된 곡면들을 표현하고 구축하였다. 가전면 생성기법은 특정 수학적인 조건(가우스 곡률이 0)에 부합하여야만 사용가능하며, 구조체계와 외장시스템이 일치하며, 전통적인 시공방식에 적용이 용이하다는 장점이 있고[1] 직선형의 부재사용이 가능하여 부재생산비용 절감 및 시공기간 단축 등이 장점인 패널분할 방식이다.

3.3 모자이크 생성(tessellation)

모자이크(tessellation)는 평면이나 공간을 어떠한 틈 또는 쪼개짐이 없이 도형으로 완벽하게 덮는 것을 말한다. 모자이크 생성방법에는 크게 두 가지가 있는데 모자이크가 가능한 정다각형(정삼각형, 정사각형, 정육각형 중 하나)로 패턴을 생성하는 정규 모자이크(regular tessellation)과 2개 이상의 정다각형을 결합하여 생성하는 반정규 모자이크(semiregular tessellation)방법이 있다. 또한, 단순한 기하학적인 무늬인 정다각형이 아닌 수학적 변환을 이용한 다양한 창조적 패턴을 이용한 모자이크 또한 가능하다. 알함브라 궁전의 무어인의 타일, 보로노이 테셀레이션 등을 그 사례로 들 수 있다.

3.4 하위분할생성(subdivision)

하위분할생성(subdivision) 기법은 분할하기 위한 패턴을 미리 정하고 허용기준을 초과 시 패널의 하위분할을 수행하며, 하위분할에 대한 규칙은 사전에 정의되어 있어야 한다. 이는 제작과 시공 모두를 고려한 패널분할 방법으로 근사를 위한 정밀도, 분할된 면의 형태와 최대, 최소 치수 등을 모두 고려하여 최적화된 패턴을 도출하는 방법이다. 주로, 규칙들을 알고리즘화하여 컴퓨터 프로그램이 자동으로 생성하여 면분할을 하는 방법이 활용되고 있다. 재료의 두께별로 가능한 휨의 정도와 시공오차 등도 반영한다[1]. 이 방법은 원형에 가까운 형상제작에 적합하지만 패널의 크기가 너무 작게 나누어지고, 다양한 형태의 패널들을 사용해야 한다는 점 때문에 경제성이 떨어지는 단점이 있다.



[Fig. 2] The Surface Fabrication Grammar of Gehry's EMP Project[2]

4. 비정형 곡면 패널분할 최적화 유형 분류

비정형 곡면은 패널 분할하는 과정에서 적용하는 패널 분할 기법과 패널 형태 등의 선택에 따라 다양한 대안이 생성될 수 있으며, 대안들은 유사한 곡면을 따르고 있지만, 각각의 대안은 서로 다른 특성을 가지게 된다. 사용되는 패널의 종류로는 평판패널, 단일곡률패널, 이중곡률패널

널이 있으며, 이들을 단독 또는 혼합하여 건축곡면을 구축하게 된다. 가장 보편적인 방법인 평판 패널을 이용한 패널분할은 곡면 패널을 이용한 패널분할보다 타당한 공사비를 확보할 수 있지만, 곡면을 원형 그대로 재현하기 어렵기 때문에 디자이너의 의도에 충실하지 않을 수 있는 특징을 가지며, 반대로 비정형 곡면의 정확한 재현을 위해 복잡한 곡면 형태의 다양한 패널들을 이용하는 방법은 일률적이지 않은 다양한 곡률을 가지는 분할된 곡면패널들의 대량생산에 의한 단가절감이 어려움으로 합리적인 제작 및 공사비의 확보가 어렵다는 특징을 갖는다.

즉, 건축곡면 패널분할은 원형곡면의 정확한 재현과 경제성이라는 상충되는 목적을 가지며, 프로젝트의 특성에 따라 설정된 목표에 부합하기 위하여 패널분할하는 과정에서 다양한 패널분할 최적화 기법이 도입되고 있다. 과거에는 설계 단계에서 비정형 곡면을 지양하고 생산에 적합한 정형화된 곡면으로 설계하는 것이 일반적이었으나, 근래에 와서 패널 제작공법과 시공기술의 발전으로 인해 패널분할 최적화 기법 또한 다양하게 시도되고 있다. 즉, 패널분할 최적화(optimization)는 건축곡면의 원형을 최대한 유지하면서 경제성을 고려한 생산 가능한 패널로의 분할과 패널 변형의 일련의 과정을 의미한다.

따라서, 본 연구에서는 비정형 곡면 패널분할 사례를 조사·분석하여 앞장에서 제시한 곡면 유형과 패널분할 유형 분류를 기준으로 패널분할 최적화 기법의 유형을 제시하고 유형별 특징과 사례를 논하고자 한다.

4.1 사례조사를 통한 비정형 곡면 패널분할 최적화 기법 고찰

본 절에서는 문헌조사를 통한 해외 사례 분석, 설계 전문가 인터뷰를 통한 국내 사례 분석을 통하여 건축곡면 패널분할 최적화 기법을 고찰하였다.

패널분할 최적화 기법의 국내 적용 현황을 파악하기 위한 전문가 인터뷰는 우리나라 대표적인 설계 사무소 3개소를 대상으로 2011년 11월 18일부터 25일까지 실시하였으며, 인터뷰 내용은 크게 비정형 건축물 구현을 위해 적용된 최적화 기법의 종류와 최적화 과정에 있어서 도출된 문제점 및 해결 방법 두 가지 측면을 조사하였다.

4.1.1 해외 사례

Norman Foster and Partners에 의해 디자인된 British Museum Great Court London(2000)은 약 40미터 간격과 800톤의 무게에 달하는 비정형 곡면 천장으로 이루어졌으며, 이를 구축하기 위한 최적화 기법으로서 정삼각형의 평판 유리 패널들로 분절하는 방법이 도입되었다. 이 건

물은 가운데 원형과 바깥쪽의 사각형이 서로 연결되어 있는 비정형 곡면 천장을 정삼각형들로만 구성된 메시를 형성하기 위하여 수학학자인 크리스 윌리엄스(Chris Williams)와 함께 기하학 형태를 생성하고 용수철 질량을 이용한 시뮬레이션 방법을 활용하는 물리적인 해석을 도입한 특징을 가진다. 이러한 패널 최적화 과정을 통해 패널의 수를 10,664개에서 최종적으로 3,312개로 줄일 수가 있었다[3].

디지털도구를 이용하여 지붕이 자유롭게 흐르는 파도와 같은 형태로 디자인된 Zlote Tarasy(Jerde Team, 2007)는 3D 디지털모델 데이터로부터 구조하중분석이 이루어졌으며, CFD 해석에 의한 유리판 제작이 이루어진 특징을 가지며, 울퉁불퉁한 비정형 곡면을 구축하기 위하여 디지털기술을 이용한 적합한 메쉬와 격자크기의 추출과 삼각형 패널의 크기와 각도 검토를 통한 유리생산비용에 대한 적정성을 찾는 최적화 방법이 적용되었다[3,4].

Eden Project(Grimshaw, 2001)는 비누거품 모양의 대형 식물 온실로 버블모양의 외피를 평면 육각 패널(planar hexagonal panel)로 분할하는 최적화 기법이 적용되었으며, 건축가가 격자의 교차점 좌표값을 추출하여 제공하고 시공업자는 좌표값으로부터 시공 디지털 모델을 새로 재구축하여 시공되었다.

Guggenheim Museum in Bilbao(Frank O. Gehry, 1997)는 디자인 전개과정에서 비선형적이고 복잡한 형태제어와 구조 생성을 위해 3D 스캐너 기술을 이용하여 아날로그 모형을 디지털데이터로 변환하여 형성한 디지털 마스터 모델을 사용하였으며, 이를 통한 3D 데이터의 제공은 시공단계의 디지털 성형과 시공을 가능케 하였다. 이 건물은 앞의 사례들과는 다르게 패널 분할의 최적화를 위하여 가전성이 검토되어 적용되었으며, 모든 곡면은 전개 가능한 패널로 변형되어 제작 및 시공되었다. Frank O. Gehry의 Experience Music Project 또한 3D 디지털모델(CATIA)를 사용하여 곡면 프레임(철제빔)을 구축, 제작하였으며, 분할된 모든 곡면 패널을 가전면으로 변형하여 제작하는 최적화 기법이 적용된 사례이다.

Norman Foster and Partners의 American Air Museum, Dubai Cultural Center, The Sage Music Center, Swiss Re는 패널 분할 최적화를 위한 기법으로서 건축 외피의 전체 형태를 생산성이 확보되는 고리면(torus)의 일부로 디자인함으로써 패널 제작의 경제성을 확보하는 방법을 도입하였다[9].

Norman Foster and Partners의 City Hall, London은 기울어진 원뿔(cone)을 건물 원형으로 도입하여 측면을 PQ(planar quadrilateral) 패널로 분할하였으며, 아트리움 부분은 삼각형 유리 패널로 분할하여 최적화 한 사례이

다.

BMW Pavilion(Bernard Franken, 1999)은 길이 135m, 폭 25m, 높이 18m 규모의 2개 물방울(bubble)이 혼합되는 형태로서 투명 아크릴 유리를 사용하여 물방울모양의 이중 곡률 곡면을 최대한 재현하기 위하여 350개의 사각형 메시에 의한 이중 곡률 패널로 분할하였으며, CNC milling 가공을 통해 곡률이 정확하게 재현된 몰드의 사용으로 곡면 셸구조의 제작이 가능하였다.

Lentille St Lazare(Jean-Marie Charpentier, 2003)는 blob모양을 가지는 형태로서 타원이 회전 하면서 생겨나는 도너츠 모양을 큰 구형에 결합시켜 그 구형을 중심으로 곡선의 선분들을 만들어 낼 수 있도록 하였으며, 이 선분들은 구형의 중심으로부터 위에 얹어진 도너츠 형태에 직교되는 단면들로 분할하는 구조프레임의 기준이 되었다[3]. 각 패널은 blob 모양 원형곡면의 재현성을 높이기 위하여 높은 단가의 이중 곡률 유리 패널로 구현되었으며, 유리 패널들의 수를 최소화 시키면서 정확한 좌표값에 따라 각 패널을 연결 할 수 있도록 최적화 과정을 거쳤다.

4.1.2 국내 사례[5]

꽃을 형상화하여 조성된 3개의 인공섬으로 구성된 한강 수상복합문화 레저시설인 플로팅 아일랜드는 외형이 비정형 곡면으로 이루어졌으며, 이중 곡률 곡면 형태 외피 구축을 위한 제작비의 경제성과 시공성 확보를 위하여 단일 곡률 곡면 또는 사변형 패널로 변환하는 과정을 거쳐 최종적으로 평판 유리 패널로 변환하는 최적화 작업이 진행되었다. 즉 이중 곡률 곡면으로 형성된 곡면을 분절된 호와 직선구간으로 분할하여 이를 이용한 곡면을 재생성 한 후 다시 PQ 유리 패널로 변환하는 최적화 과정이 도입되었다.

비정형 지붕으로 이루어진 화성종합운동장은[6] 지붕 마감재의 제작 및 시공 오차를 최소화하기 위해서 지붕의 이중 곡률 패널들을 가진면으로 변환하기 위한 조정이 수행되었다. 곡률의 재조정 작업은 각 전개도에서 이루어졌으며, 전개도 기준선은 곡면을 이루는 아이소 커브 등을 패턴의 기준으로 삼았다. 즉, 골방향에 대해서 전개도상에서 급격한 곡률이 조정 되었으며[7], 이러한 가진성의 확보로 인해 지붕재료의 정확한 제작과 시공성이 확보된 사례이다.

다양한 곡률을 가지는 한판의 거대한 비정형 곡면 지붕으로 이루어진 동대문 디자인 플라자(DDP)는 지붕의 형태적 특징 때문에 패널 제작비와 공사비의 경제성을 확보할 수 있는 패널분할과 복잡한 외피 시공을 위한 정확한 3D 데이터의 확보가 가장 중요했던 프로젝트이다.

비정형 곡면 지붕의 패널분할 최적화 작업은 Zaha Hadid가 작업한 Rhino 모델링을 기반으로 Evolute(패널링 전문 컨설팅 회사)에 의해 한정된 정형화된 곡면 패널(평면, 원주면, 포물면, 고리면, 삼차곡면 등)을 이용하여 수행되었다. 그러나 워낙 굴곡이 심한 비정형 지붕이 하나의 판으로 연결되어 있기 때문에 최적화 과정 이후 패널 사이가 서로 일치하고 앉고 들뜸 현상이 심하게 나타났으며, 이러한 문제점은 DDP의 BIM팀에 의해 Digital Project의 도입 및 보완과정을 거쳐 패널 최적화가 완성되었다.

4.1.3 소결

위에서 비정형 건축곡면 패널분할에 대한 해외 사례와 국내사례들을 살펴보았으며, 이들 사례를 본 논문의 2, 3장에서 제시한 곡면 유형과 곡면 패널분할 유형, 그리고 최적화기법의 특징을 요약하여 표로 정리해 보면 Table 3과 같다.

4.2 비정형 곡면 패널분할 최적화 기법 유형 분류

최적화 기법 사례 고찰을 통하여 본 연구에서는 평판 패널을 이용한 패널분할 최적화, 전개가능성을 이용한 패널분할 최적화, 생산성이 확보되는 곡면원형을 활용한 패널분할 최적화, 곡면 원형 패널을 이용한 패널분할 최적화, 이중 곡률 패널을 수용한 패널분할 최적화, 다섯 가지 비정형 곡면 패널분할 최적화 기법 유형 분류를 제안하며, 각 유형별 특징은 다음과 같다.

4.2.1 평판 패널을 이용한 패널분할 최적화

평판 패널을 이용한 패널분할 최적화 기법은 비정형 건축곡면을 평판 패널(planar panel)로 분할하는 기법으로서 British Museum Great Court London, The Sage Music Center, Gateshead, Eden Project, Zlote Tarasy, 플로팅 아일랜드 등 비정형 건축의 가장 많은 사례에서 보편적으로 적용된 경제성을 확보할 수 있는 기법이라고 할 수 있다. 비정형 곡면을 평판 패널로 분할하는 방식은 한 가지 패턴(삼각형, 사각형, 오각형, 육각형 등)을 사용하여 규칙적으로 분할하거나, 모자이크 생성, 하위분할 생성, 복합패널 생성 등 여러 가지 패널을 사용한 분할 기법이 적용될 수 있으며, 각 패널은 평판 패널로 치환되어 곡면을 구성하게 됨으로서 패널 제작비용의 절감과 시공 용이성을 확보할 수 있는 특징을 가진다.

[Table 3] The classification of case studies by the curve, paneling and optimization

Building Name		Curved Surface Type		Panelizing		Economic Feasibility	Reproducibility	Optimization
		Panel	Whole Skin	Methodologies	Shape			
British Museum Great Court London		Plane	Hybrid Double Curved Surface	Mesh	Triangle	Fine	Avg	Applied with the physics analysis of springs. Divided with the planar glass regular triangle panels
Zlote Tarasy		Plane	Hybrid Double Curved Surface	Mesh	Triangle	Fine	Bad	Optimized size and angle of the meshes through the digital technologies analyses Divided with the triangle panels
Eden Project		Plane	multi bubble	Mesh	Hexagon	Very Good	Bad	Divided with planar hexagonal panels
Guggenheim Museum in Bilbao		Developable Surface	Hybrid Double Curved Surface	Developable Surface	Quadrangle	Fine	Avg	Converted into the developable surface
Experience Music Project		Developable Surface	Hybrid Double Curved Surface	Developable Surface	Quadrangle	Fine	Avg	Converted into the developable surface
Sage Music Center		Plane	Part of torus	Mesh	Quadrangle	Very Good	Avg	Designed with the part of torus shape. Divided with STS and glass PQ panels
City Hall, London		Plane	Part of cone	Mesh	Hybrid	Very Good	Avg	Designed with the part of cone shape. Divided with PQ panels and glass triangle panels
Swiss Re		Plane	Part of cone	Mesh	Hybrid	Very Good	Avg	Designed with the part of cone shape. Divided with triangle and diamond panels.
National Holding Headquarters		Hybrid	Hybrid Double Curved Surface	Mesh	Quadrangle	Avg	Fine	Converted or divided into the standardized curved surfaces such as plane, cylindrical surface and paraboloid panels.
Heydar Aliyev Merkezi Cultural Center		Hybrid	Hybrid Double Curved Surface	Mesh	Quadrangle	Avg	Fine	Converted or divided into the standardized curved surfaces such as plane, cylindrical surface and paraboloid panels.
BMW Pavilion		Double Curved Surface	multi bubble	Mesh	Quadrangle	Bad	Very Good	Divided with double curved surface panels consisted in meshes
Lentille St Lazare		Double Curved Surface	blob	Mesh	Quadrangle	Bad	Very Good	Consisted in double curved surface glass panels Optimized the number of glass panels.
Floating Island		Plane	Hybrid Double Curved Surface	Mesh	Quadrangle	Very Good	Bad	Converted into developable surface or quadrangle panels consisted in planar glass.
Hwaseong Stadium		Developable Surface	Hybrid Double Curved Surface	Developable Surface	Quadrangle	Fine	Avg	Double curved surface panels of roof converted into developable surface.
Dongdaemun Design Plaza		Hybrid	Hybrid Double Curved Surface	Sub-Division	Quadrangle	Avg	Fine	Sub-divided with quadrangle and converted into the limited standardized curved surface panels.

4.2.2 전개가능성을 이용한 패널분할 최적화

Guggenheim Museum in Bilbao, Experience Music Project, 화성종합운동장 등의 사례에서는 전개가능성을 이용하여 패널을 가전면으로 분할 및 변환하는 기법이 적용되었으며, 이는 가전성을 확보할 수 있는 재료인 금속 외피 구현에 매우 효과적인 기법으로서 공사비 절감에 유리한 최적화 기법이다. 이 기법에서는 곡면의 전개가능성을 검토하는 도구로서 가우스 분석, 그리고 가전성 측정의 지표로서 가우스 곡률이 사용된다. 이때, 가우스 곡률이 반드시 0이 아니더라도 가우스 곡률이 충분히 작다면 허용 오차 안에서 평면 패널 부재를 가공하여 사용하는 것이 가능하며, 이러한 원리를 도입한 Frank O. Gehry의 한정된 가우스 곡률(constrained Gaussian curvature) 기법은 접선 불연속성(tangent discontinuity)을 도입하여 외피에서 전개 불가능한 영역을 최소화하고 평판 패널이 더 많이 적용될 수 있도록 한다[2]. 이러한 기법은 Frank O. Gehry의 프로젝트에서 전반적으로 활용되고 있으나, 가전성이 확보될 수 없는 유리 같은 재료의 경우는 적용할 수 없는 기법이라는 한계점을 지닌다.

4.2.3 생산성이 확보되는 곡면원형을 활용한 패널 분할 최적화

Swiss Re, City Hall, London, The Sage Music Center, American Air Museum, Dubai Cultural Center 사례들은 그 외부형태에서 공통점을 가진다. 즉, 건축의 형태가 비정형 곡면이지만, 구면(sphere), 원뿔면(cone), 고리면(torus) 등과 같은 곡면원형들의 일부를 도입하여 디자인된 것이다. 이러한 곡면원형들은 제작과 시공이 비교적 용이한 패널들로 분할될 수 있기 때문에 패널의 생산성 및 경제성이 확보될 수 있다. 이러한 곡면원형들의 비용 절감 측면의 패널 구축을 위한 특징은 다음과 같다.

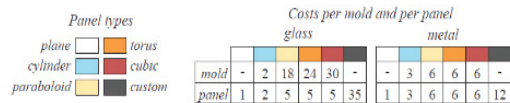
첫째, 구면(sphere)은 곡면을 정의하는 변수가 반지름 하나이므로 패널제작을 위한 몰드의 재사용 또는 변형 가능한 몰드의 사용이 가능한 패널 재료인 경우는 생산비 단가를 낮출 수 있다. 둘째, 고리면(torus)의 경우는 원형 단면의 연속 회전체로 구성되는 형태이기 때문에 같은 형상의 몰드를 사용할 수 있는 패널들을 그룹으로 분류할 수 있어 몰드 제작이 용이하고 몰드의 반복적인 재사용이 가능하며, 중심을 따라 일정하게 회전하는 성질 때문에 PQ 패널의 사용이 용이한 형태이기도 하다. 셋째, 원뿔면(cone)은 서로 만나는 두 직선 중 하나를 다른 직선에 대해 회전시켜 얻을 수 있으며, 단일 곡률 곡면에 해당하므로 패널분할 이후 각 패널의 가전성이 확보되며, PQ 패널의 사용도 용이한 특징을 지닌다.

4.2.4 정형화된 곡면 패널을 이용한 패널분할 최적화

비교적 쉽게 휠 수 있는 금속 재료인 경우에는 가전면을 이용한 패널분할로 경제성을 확보할 수 있으나, 외피를 구성하는 재료가 가전성이 확보되지 않는 유리 같은 재료의 경우에는 곡면 패널의 생산이 쉽지 않고 생산 비용 또한 상당히 상승된다.

이러한 패널의 다양성 때문에 생기는 생산비 상승요인을 줄이기 위해 건축곡면의 분할된 모든 패널들을 평면(plane), 원주면(cylinder), 포물면(paraboloid), 고리면(torus), 삼차곡면(cubic) 등과 같은 몇가지 정형화된 곡면, 그리고 이 범주에 적용할 수 없는 별도 제작 곡면(custom panel) 패널들로 변형하여 패널 생산비를 절감하는 기법이 Eigensatz 등(2010)에 의해 제안되었으며[8], 이러한 최적화 기법은 동대문 디자인 플라자, National Holding Headquarters, Abu Dhabi, Heydar Aliyev Merkezi Cultural Center, Baku 등의 사례에서 찾아 볼 수 있다.

정형화된 곡면 패널을 이용한 패널분할 최적화 과정에서 서로 다른 곡면 유형을 생산하고 시공하는데 따르는 경제적 여건을 반영하기 위하여 Eigensatz 등이 경제성을 측정하기 위한 지표로 제시한 Fig. 3을 보면, 금속의 경우 패널과 거푸집 비용이 비교적 낮고, 유리는 이중 곡률 곡면(포물면, 고리면, 삼차곡면)의 거푸집당 비용과 별도 제작 곡면(custom type)의 패널당 비용이 상당히 높게 나타난다. 이러한 유리 패널의 불리한 제작비용을 극복하기 위하여 Eigensatz 등은 거푸집을 최대한 재사용할 수 있도록 서로 유사한 형태의 패널을 허용 오차 범위 안에서 같은 형태로 대치하는 방법을 도입하였다.



[Fig. 3] The panel types currently supported by Evolute algorithm and two typical cost sets[8]

이 최적화 기법은 다양한 형태의 가전면을 이용한 패널분할 최적화 기법과 비교할 때, 유사한 형태의 패널을 제한된 수의 패널로 치환함으로써 패널 사이의 들뜸현상 또는 패널간의 연속성이 파괴되는 등의 한계점을 지니기도 한다. 그러나 한정된 패널유형으로의 치환으로 거푸집 재사용을 통하여 가전성을 확보하지 못하는 패널 재료에도 적용 가능한 경제성 있는 기법이라는 점에서 의의를 갖는다고 볼 수 있다.

4.2.5 이중 곡률 패널을 수용한 패널분할 최적화

마지막 최적화 기법 유형은 건축 곡면의 원형을 정확히 재현하기 위해서 높은 공사비용을 감수하고 이중 곡률 패널을 그대로 수용하여 곡면을 구축하는 방법이다. 이 기법은 패널의 형태를 변형함으로써 제작비를 줄이는 것이 아니라, 패널의 곡면형태는 유지하면서 제작비를 줄일 수 있는 패널의 적정 크기나 패널 수의 감소, 시공방법의 개선 등에 최적화의 목표를 두게 된다. 그 사례로는 BMW Pavilion과 Lentille St Lazare 등으로서 비교적 규모가 크지 않고 공사비용 보다 건물의 랜드마크로서의 중요성에 더 큰 비중을 두는 경우 주로 사용되는 기법이라고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 연구들에서 다양한 기준으로 분류되어왔던 비정형 곡면 유형, 비정형 곡면 패널분할 유형, 패널분할 최적화 기법 유형의 분류체계를 통합적 관점에서 재분류하고 명확한 개념정립을 제시하였으며, 유형별 특징과 사례를 연구하였다.

비정형 곡면 유형은 미분기하학적 정의에 의하여 평면, 단일곡률곡면, 이중곡률곡면으로 재분류하였으며, 이들에 해당하는 곡면의 종류와 가전성 및 특징에 대하여 살펴보았다.

비정형 곡면 패널분할 유형은 기존의 다양한 관점에서 분류되어 혼란스러울 수 있는 분류체계를 패널분할 생성 기법을 중심으로 하여 메시, 가전면, 모자이크, 하위분할, 복합적패널 생성으로 재분류하였다.

비정형 곡면 패널의 최적화 분류는 평판 패널을 이용한 패널분할 최적화, 전개가능성을 이용한 패널분할 최적화, 생산성이 확보되는 곡면원형을 활용한 패널분할 최적화, 곡면 원형 패널을 이용한 패널분할 최적화, 이중 곡률 패널을 수용한 패널분할 최적화, 다섯 가지 유형으로의 분류를 제시하였다.

이와 같은 통합적 관점에서의 유형 재분류에 관한 연구결과는 비정형 건축 구축을 위한 설계 및 시공과정에서 새로운 패널분할 기법과 최적화 기법 기술 연구에 기초자료로서 의미를 가질 것으로 생각된다. 또한 비정형 건축곡면의 성공적인 구축을 위한 향후 연구로서 패널분할 최적화 결과를 평가하는 평가기법에 관한 연구에 대한 필요성이 제기되며, 이러한 향후 연구에 본 연구에서 제시된 기초연구결과가 유용하게 쓰여지기를 기대한다.

(본 논문은 “유정원, 비정형 건축곡면의 BIM기반 패널분할 최적화 연구, 박사논문, 서울대학교, 2012”의 선

행작업 연구결과를 발표한 논문으로서 박사논문 발표 이전인 2012년 8월 1일 접수된 논문이지만, 심사과정에서 여러번의 수정을 거치는 과정 중에 박사학위논문이 발표 되었으므로, 참고문헌으로서 자기인용을 생략하였음.)

References

- [1] Park Jung-dae, *Digital Technology and Architectural Design Process on the Construction of Curved Forms*, Ph.D. Thesis in Architecture Department, Seoul National University, 2005
- [2] Shelden, Dennis R. *Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture*, Ph.D. Thesis in Architecture Department, MIT, 2002
- [3] Park Heung Sik, *A Study on a Surface Generation Method of Free-Form Architecture using a Planar Quadrilateral Mesh Technique*, Master, Thesis in Architecture Department, Hanyang University, 2009
- [4] Bae Kyung-Jin, Lee Sang-Heon, Jun Han-Jong, "A Study on Digital design process of the materialization of Free form Design architecture", *Proc. of Spring Annual Conference of the Architectural Institute of Korea (Planning & Design)*, v.29 n.1, 2009
- [5] Ryu Jeong-Won, "Digital Technologies for Freeform Building in Korea", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.13, No.9, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.4259>
- [6] Junglim Architecture(NUDL), *Design Document Series_37*, pp. 126-137, Damdi, 2011
- [7] No Hwi, "3 matrixes for 3 projects", *6th buildingSMART Korea Workshop*, 2009
- [8] Eigensatz, M., Deuss, M., Schiftner, A., Kilian, M., Mitra, N., Pottmann, H., & Pauly, M. "Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces". *Advances in Architectural Geometry*. 2010. p.8
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-0309-8_4
- [9] Kolarevic B. *Architecture in the digital age design and manufacturing*. Taylor & Francis, p.84, 2003
- [10] Weisstein, Eric W. "Algebraic Surface." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/AlgebraicSurface.html>
- [11] Weisstein, Eric W. "Quadratic Surface." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/QuadraticSurface.html>
- [12] Weisstein, Eric W. "Gaussian Curvature." From MathWorld--A Wolfram Web Resource.

<http://mathworld.wolfram.com/GaussianCurvature.html>

[13] Weisstein, Eric W. "Generalized Cylinder." From MathWorld--A Wolfram Web Resource.

<http://mathworld.wolfram.com/GeneralizedCylinder.html>

[14] Weisstein, Eric W. "Tangent Developable." From MathWorld--A Wolfram Web Resource.

<http://mathworld.wolfram.com/TangentDevelopable.html>

[15] http://www.grad.hr/itproject_math/Links/sonja/gausseng/ehpp/ehpp.html

유 정 원(Jeong-Won Ryu)

[정회원]



- 1995년 12월 : University of California, Los Angeles 대학원 석사 (Master of Arts, MA)
- 2012년 8월 : 서울대학교 건축학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축학부 교수

<관심분야>

건축설계 및 계획, BIM(건축정보모델링), 디지털건축

문 준 식(Jun-Sik Moon)

[정회원]



- 2003년 2월 : 연세대학교 공과대학 건축공학과 (공학석사)
- 2007년 6월 : MIT Computation in Architecture (Master of Science)
- 2009년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 공과대학 건축학과 박사과정

<관심분야>

건축계획, 디지털 건축, BIM