

비정형 건축곡면 패널분할 최적화를 위한 평가지표에 관한 연구

유정원^{1*}

¹선문대학교 건축학부

A Study on Evaluation Index of the Panelizing Optimization for Architectural Freeform Surfaces

Jeong-Won Ryu^{1*}

¹Division of Architecture, Sun Moon University

요약 비정형 건축곡면의 패널분할 최적화 정도를 평가하기 위한 여러 가지 최적화 평가기법들이 개발되어 적용되고 있으나 이러한 평가기법과 평가지표들은 독립성, 보편성을 확보하고 있지 못하다. 그러므로 본 연구에서는 비정형 곡면 패널분할 최적화 평가기법 및 평가지표에 관한 사례 및 선행연구 고찰을 통한 독립성 및 보편성이 확보되는 비정형 곡면 패널분할 최적화의 정량적 평가를 위한 평가항목 추출과 평가지표의 제안이 이루어진다. 제안된 세 가지 패널분할 최적화 평가항목은 원형 충실도, 생산 용이성, 연속성이며, 원형 충실도를 위한 평가지표로는 곡면 일치, 생산 용이성을 위한 평가지표로는 평면성, 평면 패널 비율, 연속성을 위한 평가지표로는 접선 연속성, 사이 간격이 제안되었으며 그 산출방법이 함께 제안되었다.

Abstract Evaluation indices of the panelizing optimization for Architectural freeform surfaces are proposed for quantitative evaluation through the case studies on panelizing optimization and evaluation index for Architectural freeform surfaces. Proposed evaluation items are adherence to original design intent, production ease, and continuity. The evaluation index for adherence to original design intent is surfaces fitness, the evaluation indices for production ease are planarity, planar panel ratio, and the evaluation indices for continuity are tangent continuity, and divergence. Algorithms are also suggested to compute the proposed evaluation indices.

Key Words : Architectural Freeform Surfaces, Panelization, Evaluation Index, Optimization

1. 서론

복잡한 비정형 건축곡면을 제작하고 시공하는 일은 설계, 시공, 구조, 재료, 패널 제작, 에너지, 컴퓨터 공학 등 다양한 전문가들과의 협업이 요구되는 작업이며, 일반적으로 패널 분할(panelizing) 과정을 수반하게 된다. 패널 분할은 적용하는 곡면 분할 기법과 패널 형태 등에 따라 원형곡면의 재현성, 시공성, 경제성 등이 상이한 대안들이 생성될 수 있다. 일반적으로, 평면 패널을 이용한 패널 분할은 경제성이 확보되는 이점이 있지만, 원형곡면

(original freeform surfaces)을 충실하게 재현하는데 한계가 있다. 반면 비정형 곡면의 정확한 재현을 위해 복잡한 곡면 형태의 패널을 이용하는 방법은 공사비용의 증가로 인해 적절한 경제성을 확보하기 어려운 단점이 있다. 즉, 곡면 패널 분할은 원형곡면의 재현성과 경제성이라는 상반된 목적을 동시에 지니게 되며, 이는 프로젝트의 특성 및 목적에 따라 그 위계를 선택하여 패널 분할을 수행하게 된다.

과거에는 설계 단계에서 비정형 곡면을 지양하고 생산에 적합한 평면 및 정형화된 곡면(구면, 원뿔면, 고리면

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

*Corresponding Author : Jeong-Won Ryu(Sun Moon Univ.)

Tel: +82-10-5581-7334 email: jwryu2005@hanmail.net

Received June 13, 2013

Revised June 24, 2013

Accepted July 11, 2013

등)으로 설계하는 것이 일반적이었으나, 패널 제작공법과 시공기술의 발전으로 비정형 곡면을 포함한 디자인이 증가하고 있으며, 이들 구축의 경제성을 확보하기 위한 곡면의 패널분할 최적화 기법 또한 다양하게 시도되고 있다. 패널분할 최적화란 곡면의 원형을 최대한 유지하면서 경제성을 고려한 생산 가능한 패널로의 분할과 패널 변형의 일련의 과정을 의미한다. 또한 분할된 패널들의 최적화 정도를 평가하기 위한 여러 가지 최적화 평가기법들이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 이러한 평가기법들은 패널분할 최적화 주제에 의해 개발되고 이에 종속된 평가기법들이 대부분이며 평가지표 또한 특정한 평가기법을 목표로 하여 개발·적용되고 있다. 따라서 비정형 건축곡면 패널분할 과정에서 건축가가 패널분할 결과에 대해 정량적으로 평가하여 설계 대안 생성의 근거로 삼을 수 있는 최적화기법에 종속되지 않은 독립적인 비정형 곡면 패널분할 평가항목 및 평가지표의 개발에 대한 필요성이 제기된다.

그러므로 본 연구에서는 비정형 곡면 패널분할 최적화 기법으로부터 독립성과 보편성이 확보되는 패널분할 최적화의 정량적 평가를 위한 평가항목 추출, 평가지표와 지표 산출방법의 제안을 그 목표로 한다.

연구방법은 현재 비정형 건축에 다양하게 시도되고 있는 비정형 곡면 패널분할 최적화 평가 기법과 평가지표의 사례 및 선행연구 고찰이 먼저 수행되며, 이를 통해 보편적 정량적 평가가 가능한 패널분할 최적화 평가항목을 추출하고, 마지막으로 추출된 평가항목들의 평가지표들을 제안하며 이들 지표의 평가방법 및 산출방법을 제안한다.

2. 비정형 곡면 패널분할 최적화 기법

비정형 곡면은 패널을 분할하는 과정에서 적용하는 곡면 분할 기법과 패널 형태 등의 선택에 따라 다양한 대안이 생성된다. 패널의 곡률별 종류는 평면패널, 단일곡률패널, 이중곡률패널 세 가지로 분류할 수 있으며, 이들의 단독 또는 혼용의 방법으로 건축곡면을 구축하게 된다.

비정형 곡면의 패널 분할 과정에서 원형곡면(original freeform surfaces)의 재현성, 경제성 등의 목표에 부합하기 위하여 여러 가지 최적화 기법들이 개발되어 적용되고 있으며, 패널분할 최적화 기법의 유형을 분류해 보면 평면 패널(planar panel)을 이용한 패널분할 최적화 기법, 전개가능성을 이용한 패널분할 최적화 기법, 생산성이 확보되는 곡면원형을 활용한 패널분할 최적화 기법, 정형화된 곡면 패널을 이용한 패널분할 최적화기법, 이중 곡률

패널을 수용한 패널분할 최적화 기법, 5가지 유형으로 나눌 수 있으며, 유형별 특징은 다음과 같다[5].

첫째, 평면 패널(planar panel)을 이용한 패널분할 최적화 기법은 비정형 건축곡면을 평면 패널로 분할하는 가장 보편적이고 경제적인 방법이다. 분할 방식은 한 가지 패턴(삼각형, 사각형, 오각형, 육각형 등)으로 규칙적으로 분할하거나, 모자이크 생성(tessellation), 하위분할 생성(subdivision), 복합패널 생성 등 여러 가지 패널분할 기법이 적용될 수 있으며, 분할된 각 패널은 평면 패널(planar panel)로 치환되어 곡면을 구성하게 된다.

둘째, 전개가능성을 이용한 패널분할 최적화 기법은 곡면들을 전개도로 펼칠 수 있는 가전면(developable surface) 패널로 분할하는 기법이다. 이는 재료에 따라 제작 용이성 및 시공성을 높여주어 경제적인 측면에서 유리한 방법이며, 가전패널 생산이 가능한 금속 외피의 구현에 매우 효과적인 방법이다. 가전면 생성기법은 특정한 수학적 조건에 부합하여야만 사용가능하며, 곡면의 전개가능성을 검토하기 위하여 가우스 분석(Gaussian analysis)이 사용된다.(보고 3.1절 참고)

셋째, 생산성이 확보되는 곡면원형을 활용한 패널분할 최적화 기법은 생산성이 확보되는 곡면원형인 구면(sphere), 원뿔면(cone), 고리면(torus) 등의 일부를 건물 외피로 도입하여 디자인함으로써 패널의 경제성과 생산성을 확보하는 최적화 기법이다. 이러한 곡면원형들은 곡면을 정의하는 변수가 적기 때문에 몰드 제작이 용이하고 몰드의 반복적인 재사용이 가능하며, 비틀림 없이 중심을 따라 일정하게 회전하는 성질 때문에 PQ 패널의 사용이 용이한 형태이므로 이중 곡률 곡면을 디자인 하더라도 최대한의 경제성을 확보할 수 있는 기법이다.

넷째, 정형화된 곡면 패널을 이용한 패널분할 최적화 기법은 모든 패널을 평면(plane), 원주면(cylinder), 포물면(paraboloid), 고리면(torus), 삼차곡면(cubic) 등 정형화된 곡면과 이 범주에 적용할 수 없는 별도 제작 곡면(custom panel)을 포함하는 곡면 패널의 범주내로 변형하여 패널 생산비를 절감하는 기법이다[1]. 가전면을 이용한 패널분할로 경제성을 확보할 수 있는 재료(금속 등)과 달리 외피를 구성하는 재료가 가전성이 확보되지 않는 재료(유리 등)의 경우 생산비 상승요인을 줄이기 위해 적용된다.

다섯째, 이중 곡률 패널을 수용한 패널분할 최적화 기법은 건축 곡면의 원형을 정확히 재현하기 위해서 이중 곡률 패널을 그대로 수용하여 구축하는 방법이다. 이 방법은 패널의 형태를 변형함으로써 제작비를 줄이는 것보다는 패널의 곡면형태를 유지하면서 제작비를 줄일 수 있는 패널의 적정 크기나 패널 수의 감소, 시공방법의 개

선 등에 최적화의 목표를 두게 된다.

3. 비정형 곡면 패널분할 최적화 평가기법 및 평가지표 사례

패널분할 최적화 과정은 디자인된 곡면의 원형유지와 경제성 및 시공성 확보를 위하여, 적용된 패널분할 방법에 부합하는 패널분할 최적화 평가를 거쳐 최적안 선정이 이루어지게 된다. 그러나 패널분할의 최적화 평가는 패널분할 방법뿐만 아니라 패널분할의 최적화 목표, 즉 경제성과 원형곡면의 재현성 확보라는 상이한 목표에 따라 평가기준, 평가지표 및 평가방법이 다르게 적용될 수 있으므로 단순히 정량화하여 평가하기 쉽지 않은 특징을 가지고 있다. 그러므로 대부분의 최적화 평가는 패널분할 최적화를 수행한 주체가 그들만의 패널분할 최적화 방법에 부합하는 최적화 평가 기법을 적용하여 이루어지고 있다.

본 절에서는 이러한 패널분할 최적화 기법의 주체에 의한 최적화 평가 방법과 이를 위해 사용된 평가 지표를 조사·분석하고, 최적화 기법에 종속되지 않는 독립적인 평가 지표 사례 몇 가지도 함께 조사·분석 하였다.

3.1 가우스 곡률 분석에 의한 패널분할 최적화 평가기법 및 평가지표

3.1.1 최적화 평가기법

전개가능성을 이용한 패널분할 최적화 기법을 적용하는 과정에서 사용하는 평가방법으로서 가우스 곡률(Gaussian curvature)을 평가지표로 한다.

가우스 곡률은 곡면의 형태를 결정하는 내재적 속성으로서 곡면의 형태 이외의 다른 요소(크기, 위치, 방향 등)에 영향을 받지 않는다. 즉, 가전성을 평가하기 위한 해당 영역에서의 가우스 곡률 값은 0이 되어야 가전면이 되는 것이다.

가우스 곡률 분석에 의한 패널분할 최적화 평가분석은 가전면을 이용한 패널분할 최적화에 적합한 분석방법이지만, 이를 통해서는 시공성만을 평가할 수 있을 뿐, 다른 가치와 비교하여 대안을 선택하는 데에는 한계점을 드러내며, 최적화 과정에서 설계 의도에 맞게 최적화가 진행되는지에 대한 정량적 평가 측면에서도 한계를 가진다.

3.1.2 평가지표

Frank O. Gehry의 가전면을 이용한 패널분할 최적화 기법은 가전면을 활용하여 시공하는 것을 전제로 곡면을

가전면화하게 되며, 가우스 곡률(Gaussian curvature)을 그 평가지표로 한다. 이는 가전면의 가우스 곡률 값이 0 이므로 가우스 곡률의 측정에 의해 패널의 가전면화 가능성을 측정하고 가전면으로 최적화하기 위해 가우스 곡률이 낮은 곡면으로 수정해 나간다. 이때 가우스 곡률 값은 안전율(factor of safety)의 허용범위 안의 작은 값을 갖도록 최대한 0에 가깝게 조정된다. Frank O. Gehry는 접선 불연속성(tangent discontinuity)을 도입하여 가우스 곡률이 작은 영역을 늘리는 한정된 가우스 곡률(constrained Gaussian curvature) 기법을 적용하고 최적화 평가를 위한 가우스 곡률 분석을 통하여 EMP를 비롯한 많은 비정형 건축물을 가전면 패널로 치환하는 최적화 방법을 사용하였다[7].

그러나 이 최적화 기법과 평가지표는 금속과 같이 가전면 생성이 용이한 재료에만 해당하는 분석방법과 평가 지표로서 그 활용범위가 제한적이다.

3.2 정형화된 대체 패널 최적화 평가기법 및 평가지표[2]

3.2.1 최적화 평가기법

비정형 건축의 외장재에 금속 이외의 다양한 재료들이 시도되면서 가전면 패널로 대체될 수 없는 외장재의 패널분할을 위하여 정형화된 곡면 패널을 이용한 패널분할 최적화 기법이 도입되었으며, 그 패널분할 결과를 평가하는 방법이다. 이는 2010년이 Eigensatz 등에 의해 제안된 최적화 평가방법으로서 건축 곡면 원형의 충실한 재현을 기본전제로 하는 범위 내에서 공사비 절감을 위한 최적화 평가방법으로, 초기 최적화 단계, 이산적 최적화 단계(discrete optimization step), 연속적 최적화 단계(continuous optimization step) 세 단계로 나뉘어진다. 선행 작업으로 패널의 개수와 몰드의 종류에 따라 패널당 비용, 몰드당 비용이 재료별, 곡면 유형별로 책정되는데, 이 비용을 최적화 결과 패널분할에 적용하여 공사비를 산출한다.

첫째, 초기 최적화 단계에서는 목표 한계치를 만족하지 못하는 패널을 찾아서 정형화된 곡면 패널중 목표를 만족하는 가장 경제성 있는 종류의 패널로 치환하는 작업이 이루어진다.

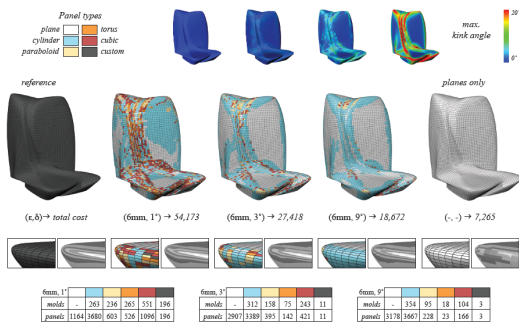
둘째, 이산적 최적화 단계(discrete optimization step)에서는 패널분할 결과가 얼마나 매끄러운 곡면을 재현하였는지 평가하는 단계이다. 더욱 매끄러운 곡면을 재현하기 위해서는 평면 패널과 단일 곡률 곡면 패널 대신 이중 곡률 곡면 패널을 많이 사용하여야 하며, 이는 이중 곡률 곡면 몰드의 사용을 증가시켜 급격한 비용 증가를 초래

한다. 그러므로 매끄러운 곡면을 재현하면서 최대한 공사비를 절감할 수 있는 정형화된 곡면 패널들로 치환하는 것이 이 단계의 목표이다. 즉, 비용을 최소화하는 몰드와 패널-몰드 할당 함수를 찾는 과정인 것이다.

셋째, 연속적 최적화 단계(continuous optimization step)는 서로 비슷한 형태의 패널들을 대표할 수 있는 공통의 패널 형태를 찾아 치환하며, 이는 패널생산과정에서 몰드 종류 수의 감소를 목표로 하며 원형 곡면의 재현성을 평가하기 위하여 좀 더 복합적인 평가방법이 사용된다. 이를 위하여 원형 곡면과 최적화된 곡면 사이의 관계를 다양하게 표현하는 surface fitting, divergence, kink angles, curve fairness, panel centering 등의 평가지표가 도입되고, 이들 지표의 합을 전반적 에너지(global energy)라고 정의하며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E = \alpha_{fit}E_{fit} + \alpha_{div}E_{div} + \alpha_{kink}E_{kink} + \alpha_{fair}E_{fair} + \alpha_{cen}E_{cen}$$

이와 같이 세 단계 과정을 거쳐 공사비를 평가한 후 최종 목표에 이를 때까지 이산적 최적화, 연속적 최적화, 초기 최적화, 목표치 낮춤의 과정을 반복하여 최적화 평가를 수행하게 된다.



[Fig. 1] Paneling results with varying kink angle thresholds and fixed divergence threshold and comparison of construction cost [2]

3.2.2 평가지표

정형화된 대체 패널 최적화 평가 기법의 두 단계 최적화 과정에서는 다음과 같은 평가지표들이 적용된다.

먼저, 이산적 최적화 단계(discrete optimization step)에서는 비정형 곡면패널의 재료가 유리인 경우에 패널 생산비가 금속의 최대 수십 배 까지도 상승할 수 있으므로 패널 모양의 다양성 때문에 생기는 생산비 상승요인을 줄이기 위해 모든 패널을 6가지 유형(평면, 원주면, 포물

면, 고리면, 삼차곡면의 5가지 정형화된 곡면, 그리고 특수 별도 제작 곡면)의 곡면 패널 범주로 변형하는 작업을 한다. 이러한 패널링 최적화의 수행은 특히 패널 사이의 들뜸 현상(패널들의 이웃하는 모서리들이 일치하지 않고 사이가 벌어지는 현상) 또는 패널간의 연속성 파괴를 유발하게 되므로 kink angle과 divergence라는 두 가지 평가지표를 적용하여 이들의 한계치 내에서 최소비용의 정형화된 곡면들로의 치환과정이 이루어지게 된다.

Kink angle은 이웃한 두 패널 사이의 벌어진 각도로서 곡선 네트워크에서 각 패널까지 가장 가까운 두 점의 법선 벡터 차이의 제곱합으로 산출되며, divergence는 이웃한 두 패널 사이의 벌어진 거리로서 곡선 네트워크에서 각 패널까지 가장 가까운 두 점까지의 거리 각각의 제곱합으로 산출된다.

Kink angle과 divergence가 제한되는 값 내에서 매끄러운 곡면을 재현하기 위해서는 6가지 유형의 곡면 패널 범주로의 변형이 제한적으로 진행될 수밖에 없으며, 이중 곡률 곡면 패널을 많이 사용하게 되어 경제성의 확보가 어려워지는 반면, 이들 지표의 한계치를 높이면 경제성을 확보할 수 있지만 매끄러운 곡면을 재현 할 수 없게 된다.

다음 분석 단계인 연속적 최적화 단계(continuous optimization step)에서 적용되는 평가지표들의 의미와 산출방법은 다음과 같다.

첫째, surface fitting은 원형곡면과의 변형정도를 나타내는 지표로서 원형곡면까지의 거리 제곱합이다. 둘째, curve fairness는 원형 곡선 레이아웃에 담긴 디자인 의도를 반영하기 위하여 경계 곡선 기복(undulations)의 정도와 접선 방향의 움직임(tangential motions) 정도를 측정하는 지표로서 곡선 네트워크에서 인접한 두 점의 법선 방향 변위(normal displacements)의 제곱합이다. 셋째, panel centering은 패널들의 무게중심(패널 중심들의 평균)과 패널 중심들의 거리의 제곱합으로서 패널 제작을 위한 몰드 형성시 몰드의 재사용성을 높일 수 있는 지표이다.

3.3 정성적 분석에 의한 최적화 평가기법 및 평가지표

비정형 건축 곡면의 패널 분할 평가를 위하여 정성적인 분석을 시도한 Hambleton(2009)[3]의 연구를 살펴보면, 분석을 위하여 네 가지 평가지표를 제안하였으며, 평가는 다양한 패널 모양과 방법으로 분할된 6개 곡면을 대상으로 하였고, 평가방법은 5점 척도의 정성적 평가로 이루어진다. 경제성, 시공성, 원형유지에 대한 평가를 위해 제안된 네 가지 평가지표의 종류와 평가범위는 다음과 같다.

[Table 1] Evaluation results for curved surfaces

	node simplicity	structural transparency	design intent	material efficiency
triangulated surface	1	1	3.5	2.5
primitive approximation (PQ meshes)	1.5	4	2	3.5
fitted rotational surface (PQ meshes)	4	3.5	2	3.5
principal curvature mesh (PQ meshes)	4	4	4	3.5
developable strip model	3	4	4.5	2.5

첫째, node simplicity 평가지표는 각 절점의 연결 용이성과 구조체의 뒤틀림 정도를 평가한다. 둘째, structural transparency 평가지표는 각 절점에서의 변(edge)의 수와 연결 복잡성을 평가한다. 셋째, adherence to original design intent 평가지표는 vertex distance(절점끼리 거리), edge distance(모서리의 수직거리), face distance(면의 수직거리) 세 가지 측정방법이 제시되어 디자인 의도와외의 부합성을 평가한다. 넷째, material efficiency(material wastage) 평가지표는 자재 손실률을 평가한다.

Hambleton에 의해 제시된 평가방식은 정량적 분석이 아닌 5점 척도의 정성적 분석 방법을 사용함으로써 평가 결과에 대한 객관적 평가에 한계를 가지는 방식이라고 할 수 있다.

3.4 곡면 구축 특성 분석을 위한 평가지표

한지연(2011)[4]은 논문에서 곡면을 분류하여 그 유형을 제시하였으며, 제시된 곡면 유형별 구축특성을 분석하기 위한 방법으로 재현성, 연속성, 복잡성, 경제성 이라는 네 가지 평가지표를 제안하였고 지표 산출방법은 다음과 같다.

첫째, 재현성은 원형곡면과의 변형거리의 평균값이며, 원형 곡면과의 기하학적 유사성을 측정하기 위하여 z축 방향으로 평면을 위치시켜 UV방향으로 포인트 그리드를 생성한 후 서페이스와의 거리를 측정하는 산출방법을 적용하였다. 둘째, 연속성은 Rhino 시스템의 zebra analysis를 이용한 시각적 분석방법을 적용하였다. 셋째, 복잡성은 하나의 노드에서 만나는 구조부재들의 수(패널을 지지하는 부재의 수 및 joint수)를 반영한다. 넷째, 경제성은 제작방식별 비용을 조사하여 그 비교 결과값을 산정한다.

위의 평가지표들은 다음과 같은 몇 가지 한계점을 드

러내고 있다. 우선, 재현성을 측정하기 위하여 제안된 지표 산출 방식은 원형 곡면과의 z축 방향 수직거리를 측정함으로써 엄밀한 원형곡면과의 변화된 정도의 측정이 아닌 z축 방향의 변위거리라는 한계를 지닌다. 또한 연속성에서 Rhino zebra analysis를 이용하여 분석하는 방법은 정량적인 분석이 아닌 시각적으로 확인하는 방법으로서 단일 곡면이 아닌 분할된 패널들의 집합체를 분석하고자 할 때에는 단일 곡면마다 별도의 zebra를 보여주는 Rhino 시스템의 한계점 때문에 곡면 전체의 정확한 정량적 분석이 어려운 한계가 있다.

3.5 소결

패널분할 최적화 평가 기법들과 이들의 평가를 위하여 제안된 평가지표들은 최적화를 수행한 주체의 최적화 목적에 따라 다양성을 보였으며 지표 산출 방법 또한 상이한 점이 많았다. 분석된 평가지표들은 다음과 같이 크게 4가지 범주로 나누어 분류할 수 있다. 첫째, 곡면의 원형을 얼마나 유지하고 있는지 평가하는 ‘원형유지(original form retainment)’, 둘째, 패널을 제작하기 위한 비용 측면을 평가하는 ‘경제성(economic feasibility)’, 셋째, 패널을 시공하기 위한 용이성을 평가하는 ‘시공성(constructability)’, 넷째, 패널분할에 의한 곡면이 얼마나 연속되게 유지되고 있는지 평가하는 ‘연속성(continuity)’이며, 각 평가항목에 해당하는 평가지표 및 지표 산출방법은 다음 표와 같다.

[Table 2] Evaluation items and indices

evaluation item	evaluation index	computation method	reference
original form retainment	adherence to original design intent	distance to original curved surface	Hambleton (2009)
	surface fitting	sum of squares of distance to original curved surface	Eigensatz (2010b)
	curve fairness	normal displacements	
	reproducibility	mean of distance to original curved surface	Han Zeeyeon (2011)
economic feasibility	material efficiency	material wastage	Hambleton (2009)
	panel centering	mean of center of panel gravity	Eigensatz (2010b)
	economic feasibility	cost by manufacturing	Han Zeeyeon (2011)
	developable possibility	gaussian curvature	Shelden (2002)

constructability	node simplicity	easiness of node connection	Hambleton (2009)
	structural transparency	number of edges at each nodes	
	complexity	number of structural members linking at one node	Han Zeeyeon (2011)
continuity	kink angle	angle between normal vectors of adjacent panels	Eigensatz (2010b)
	divergence	gap between adjacent panels	
	continuity	visual analysis by Zebra analysis	Han Zeeyeon (2011)

비정형 곡면 패널분할 최적화 평가의 목표는 비정형 건축곡면의 최적화가 추구하는 목표를 얼마나 달성하였는지 측정하는 것이다. 따라서 추구하는 목표가 다른 최적화 기법에 따라 서로 다른 평가기법이 도입되게 된다. 즉, Shelden(2002)의 가우스 곡률 분석에 의한 패널분할 최적화 평가는 패널의 가전성을 높여 패널의 합리적인 제작비를 확보하고자 하는 목표를 가지고 개발된 평가기법과 평가지표이다. 정형화된 대체 패널 최적화 평가는 Eigensatz 등(2010)에 의해 개발된 패널 최적화 시스템에 의해 생성된 패널분할 결과에 대한 검증을 위해 제시된 평가지표들이다. 이 두 가지 평가방법들은 해당 주체가 패널분할 최적화 과정을 수행 한 후 최적화의 목표 달성 정도를 확인하기 위해 해당 주체에 의해 개발, 적용되었다는 공통점이 있으며, 개발과정에서 전제된 조건사항들 또는 패널분할 도구나 방법이 다를 경우는 적용할 수 없으며 기술발전에 맞추어 평가방법을 지속적으로 수정해야 하는 한계점 또한 있다.

이와는 달리 Hambleton(2009)과 한지연(2011)은 최적화 기법에 종속되지 않은 보편적인 평가지표를 제안하였다. 그러나 Hambleton(2009)은 평가방법이 5점 척도에 의한 정성적 분석이라는데 그 한계점을 가지며, 한지연(2011)의 평가기법은 상이한 패턴으로 분할된 곡면들의 비교에만 그 범위가 한정되어 있다는 한계점을 지닌다.

그러므로 본 연구에서는 사례연구의 결과를 바탕으로, 최적화 기법에 종속되지 않는 비정형 건축곡면의 패널분할의 정량적 평가를 위한 평가항목을 추출하고, 이들 평가항목을 위한 평가지표와 이들의 구체적인 산출방법과 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

4. 비정형곡면 패널분할 평가지표 제안

4.1 비정형 곡면 패널분할 평가 항목의 범위

앞장에서 사례연구 고찰을 통하여 비정형곡면 패널분할 평가항목으로 분류된 원형유지, 경제성, 시공성, 연속성, 네 가지 평가항목을 근거로 본 연구에서는 다음과 같은 평가항목 범위를 제안한다.

첫째, 위의 네 가지 평가항목 중에서 ‘원형유지’ 평가항목은 곡면의 원형을 얼마나 유지하고 있는지 즉, 패널분할 결과가 건축가에 의해 디자인된 원형 곡면에 얼마나 충실한지를 평가할 수 있는 항목으로서 본 연구에서는 ‘원형 충실도’로 명명하여 평가항목의 첫 번째 범주로 설정한다. 이 항목은 원형 곡면을 패널분할하고, 최적화하는 과정에서 원형 곡면으로부터 변형된 정도를 정량적으로 측정하고 평가할 수 있다.

다음 평가항목으로 조사된 ‘경제성’은 패널 제작시 비용 절감을 위한 몰드의 재사용 가능성 및 패널의 가전면화 가능성, 또는 시공시 비용 절감을 위한 material efficiency 등 패널의 제작 및 시공비용을 절감하기 위한 평가항목이다. 본 연구에서는 패널의 제작비용 절감을 위한 측면에 초점을 맞춘 ‘생산 용이성’을 평가항목의 두 번째 범주로 설정한다.

패널의 시공 용이성 측정을 위한 ‘시공성’ 평가항목은 각 절점, 즉 하나의 노드에서 만나는 변(edge)의 수를 측정하여 연결 구조 부재, 패널 지지 부재, 조인트 등의 수가 많아질수록 시공이 복잡해지는 원리를 적용하여 이를 시공의 용이성에 대한 평가기준으로 삼았다. 그러나 본 연구에서는 비정형 건축곡면의 패널분할에 대한 정량적 평가, 즉 비정형 곡면의 다양한 패널 분할 방법으로 인한 경제성 및 심미성 확보에 대한 평가를 그 목표로 하므로 ‘시공성’은 본 연구의 평가항목 범위에서 제외한다.

다음으로 ‘연속성’ 평가항목은 심미적인 평가의 한 항목으로서, 패널분할에 의해 곡면이 얼마나 부드럽게 연결되어 유지되고 있는지를 평가하며, 본 연구에서는 이 항목을 세 번째 평가항목 범주로 설정한다.

결론적으로 본 연구에서는 위에서 분석된 비정형 곡면 패널분할 평가항목들 중 보편성이 확보되며 정량적 평가가 가능한 원형 충실도, 생산 용이성, 연속성 세 가지 평가항목을 본 연구에서 제안하는 평가모델에서의 평가항목 범위로 설정하며, 이들 평가항목에 대하여 제안되는 구체적인 평가지표 및 산출방법은 다음과 같다.

4.2 비정형 곡면 패널분할 평가지표 및 산출 방법 제안

비정형 곡면 패널분할 최적화 평가를 위하여 제안된

세 가지 평가항목은 설계자의 디자인 의도를 충분히 유지하고 있는지에 대한 측면(원형 충실도)과 경제성이 있는지에 대한 측면(생산용이성), 심미적 측면(연속성)의 서로 상반되는 개념을 동시에 포함하고 있다. 이는 실제로 건축 설계자, 시공자 또는 시행자의 우선되는 가치들에 의해 평가 결과 값이 다르게 판단되고 반영될 수 있음을 의미한다. 이들 각 평가항목에 대하여 제안되는 구체적인 평가지표는 다음과 같다.

4.2.1 원형 충실도

선행연구에서 조사된 원형유지 평가항목의 평가지표는 adherence to original design intent, surface fitting, curve fairness, 재현성 등이었으며, 이들 해당 평가지표는 원형곡면까지의 변형거리를 구하는 것을 기본 목표로 하고 있는 반면, 원형곡면까지의 변형거리에 대한 산출방법은 법선 방향 변위값, 거리의 제곱합, z방향 변위의 평균값 등으로 다양하게 정의되고 있다.

이러한 원형곡면유지 평가지표 산출방법들은 모두 원형곡면까지의 변형거리를 구하는 방법으로서 적합하다고 할 수 있지만, 동일한 건축곡면에 대하여 다양한 패널 분할을 시도한 후 생성되는 여러 대안들의 비교 평가를 목적으로 할 때는 한계점을 드러내며 다른 산출방법의 필요성이 제기된다. 즉, Hambleton(2009)의 ‘adherence to original design intent’ 지표 산출 방법은 그 정성적 평가로 인해 객관적인 정량적 비교가 어려우며, 한지연(2011)의 ‘재현성’ 지표 산출 방법은 원형 곡면과의 기하학적 유사성을 측정하기 위하여 z축 방향으로 평면을 위치시켜 UV방향으로 포인트 그리드를 생성하여 z축 방향 수직거리를 측정함으로써 엄밀한 원형곡면과의 변화된 정도의 측정이 아닌 z축 방향의 변위거리라는 한계를 지니며, Eigensatz(2010b)의 ‘surface fitting’은 거리값의 비교를 극대화하기 위하여 거리의 제곱합으로 산출하지만, 원형 곡면까지의 거리 값은 패널의 크기에 따라 그 절대값의 크기가 상이할 수밖에 없는 속성을 가지고 있으므로 패널의 크기로부터 독립적이지는 못하다는 한계점을 지니고 있다.

그러므로 본 연구에서는 원형곡면과 얼마나 근접하게 유지하고 있는지를 평가하기 위한 원형곡면과의 변화 정도 측정(원형곡면까지의 변형거리)을 위하여 위에서 언급된 한계점들을 극복할 수 있는 곡면 일치(surface fitness) 평가지표를 제안하며, 그 평가내용 및 산출방법은 다음과 같다.

1) 곡면 일치(Surface Fitness)

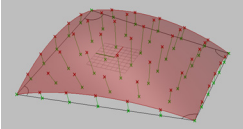
곡면 일치(surface fitness)는 원형곡면의 분할 이후 각

패널과 원형곡면의 변형정도를 측정하며, 대체된 패널이 원형 곡면과 얼마나 일치하는지 평가하는 척도이다. 산출 방법은 대체된 패널에서 표본점들을 추출하여 원형 곡면까지의 거리 값을 구하며, 이러한 거리 값은 모서리 절점 정보가 원형곡면과 유사한 경우에도 패널 내부 곡률의 상이함에 따라 이격 거리에 차이가 있을 수 있으므로 대체된 패널에 표본점들을 배치하고 이들로부터 원형곡면까지의 거리를 구하게 된다. 또한 이들 표본점의 수에 영향을 받지 않기 위해 이들 거리 값의 평균값을 사용한다.

원형 곡면까지의 거리 값은 패널의 크기에 따라 그 절대값의 크기가 상이할 수 밖에 없는 속성을 가지고 있으므로 이러한 패널의 크기에 대한 영향으로부터 독립적인 지표 값 도출의 필요성이 제기되며, 본 연구에서는 이러한 선행연구에서 드러난 한계점을 해결하기 위하여 거리 평균값을 패널의 둘레 길이로 나누어 곡면과의 절대 거리값이 아닌 상대 거리값을 구하는 방법을 제안한다. 그 결과값은 상이한 크기의 패널간의 분석결과인 경우에도 상대적인 평가가 가능하게 하여 평가 대상 범위의 확대와 평가의 보편성을 확보 한다고 볼 수 있다. 즉 패널의 크기에 영향을 받지 않기 위해 이 평균값을 대체된 패널의 둘레의 길이로 나누어 곡면 일치(surface fitness) 지표를 산출한다.

또한 본 연구에서는 원형곡면과의 최단거리를 지표 계산에 도입함으로써 원형곡면과의 변화된 정도를 측정하기 위한 지표라는 목적에 충실 할 수 있다.

[Table 3] Computation method for Surface Fitness

concept diagram	computation method
	$s = E(d_k)/l$ $d_k: \text{distance to original curved surface form panel}$ $l: \text{perimeter of panel}$

4.2.2 생산 용이성

패널 제작 비용을 고려한 경제성 평가항목의 평가지표 종류로는 material wastage, panel centering, 경제성, 가전성 등이 있으며, Hambleton(2009)의 ‘material efficiency’는 정량적 평가에 대한 기준을 제시하지 못한 한계가 있으며, Eigensatz(2010b)의 ‘panel centering’은 패널 제작을 위한 몰드의 재사용성을 측정하기 위한 지표이다. 한지연(2011)의 ‘경제성’은 패널의 제작 방식에 따른 비용을 계산하여 경제성의 지표로 삼았으며, Sheldon(2002)의 ‘가전성’은 가전면 생성이 가능한 재료에만 해당하는 한계점을 지닌다.

본 연구에서는 패널의 제작비용 절감을 위한 측면에 초점을 맞추어 곡면패널의 PQ 패널(planar quadrilateral panel)화 가능성을 측정하는 평가지표로 평면성(planarity)과 평면 패널 비율(planar panel ratio)을 제안한다. 이는 분할된 패널 중에서 평판으로 대체할 가능성이 있는 패널들을 추출하여 공사비 절감을 예측하거나 실제로 평판으로 대체할 척도로 삼을 수 있게 된다. 본 연구에서는 생산 용이성 범주에서 가장 보편적인 형태인 PQ 패널로의 치환을 평가하기 위한 평가지표를 그 연구범위로 삼으며, 향후 다양한 형태에 대한 포괄적인 생산 용이성 평가지표에 대한 연구가 필요하다고 본다. 이들 평가지표의 평가내용 및 산출방법은 다음과 같다.

1) 평면성(Planarity)

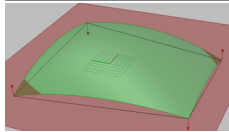
원형곡면을 패널들로 분절하는 과정에서, 각 패널의 모서리 점으로 추출한 네 점이 만드는 메시(mesh)가 얼마나 평면에 가까운지를 평가한다. 즉, 해당 패널을 평면 패널로 치환하였을 때 원형 곡면의 네 점이 평면 패널과 얼마나 떨어져 있는지를 상대적으로 알 수 있으며, 평면 패널로 대체할 경우, 네 모서리점의 변위 예측 값에 해당한다. 패널의 네 모서리 점이 평면에 가까울수록 평면성(planarity)은 '0' 값에 가까워지며 이는 PQ 패널(planar quadrilateral panel)로 대체할 경우 네 모서리 절점의 변위가 일어나지 않으며, 패널들 간의 사이에 들뜸 현상도 함께 일어나지 않을 것임을 의미한다. 즉 PQ 패널로 대체할 수 있는 조건에 유리해 짐을 의미한다.

평면성(planarity)을 확보하고자 하는 시도는 Evolute tool(www.evolute.at)에서 메시를 변형하는 조건값으로 제시가 되었으며 이 시스템 변수의 목적은 PQ 패널로의 대체가 용이하도록 메시를 변형하는 것이다. 이때 Evolute tool에서의 planarity는 사각형의 두 개의 대각선 사이의 최단거리로 정의되며, 이는 사각형의 뒤틀림의 정도를 측정하기 위함이다.

그러나 본 연구에서의 평면성(planarity) 산출방법은 네 수선의 발의 길이의 표준편차를 사용하여 PQ 패널로부터 네 점이 떨어진 거리를 구하며, 패널 크기에 따른 영향으로부터 독립적인 지표값을 도출하기 위하여 패널 둘레의 길이로 나누는 방법을 제안한다. 즉, 해당 패널을 PQ 패널로 치환하였을 때 원형 곡면의 네 점이 PQ 패널과 얼마나 떨어져 있는지를 상대적으로 알기 위해서 우선 네 점으로부터 수선의 발 길이의 합이 가장 작은 평면을 찾는다. 이 평면은 대체할 PQ 패널이 실제로 위치하게 되는 평면으로, 네 점의 수선의 발을 꼭짓점으로 하는 사각형이다. 평면성(planarity)는 네 수선의 발의 길이의 표준편차를 사용한다. 수선의 발의 길이를 원래 점의 위

치가 평면의 어느 방향인지에 따라 양의 부호 또는 음의 부호를 가지도록 계산하면 수선의 발의 길이의 평균을 항상 0으로 맞출 수 있기 때문에, 표준편차를 사용하면 PQ 패널로부터 네 점이 떨어진 거리를 직접적으로 나타낼 수 있다. 다만, 이 표준편차는 패널의 크기가 클수록 커지기 때문에, 각 패널과 네 점이 떨어진 정도를 절대값으로 판단할 수는 있지만, 서로 크기가 다른 패널들을 비교 할 수 없다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 지표값을 패널 크기에 비례하는 상대적인 값으로 변환해야 하며, 그 방법으로서 표준편차를 패널의 둘레 길이로 나누어서 평면성(planarity) 지표를 산출한다.

[Table 4] Computation method for Planarity

concept diagram	computation method
	$p = \sigma(d)/l$ <p><i>d</i>: distance of foot of perpendicular at each node <i>l</i>: perimeter of pane</p>

2) 평면 패널 비율(Planar Panel Ratio)

분절된 패널 중에서 평면 패널로 대체할 수 있는 패널의 비율을 측정하며, 평면 패널 대체 가능 패널 수를 전체 패널 수로 나눈다. 평면 패널로 대체할 가능성의 기준은 평면성(planarity)와 곡면 일치(surface fitness) 두 가지 지표 측면에서 고려될 수 있다. 즉, 평면성(planarity)을 기준으로 삼는 평면 패널 비율은 곡면을 PQ 패널로 대체할 경우 패널 네 절점의 변위가 최소화 되어 전체 줄눈의 변위가 최소화 되며 패널 사이의 들뜸 현상이 최소화 될 수 있음을 의미한다. 곡면 일치(surface fitness)를 기준으로 삼는 평면 패널 비율은 원형곡면의 곡률이 평판에 가까운 패널들은 평판으로 대체할 수 있다는 전제로 평면 패널 비율을 산정하게 되며, 이때 평판으로 대체할 수 있는 곡면 일치(surface fitness)값의 허용치 기준이 필요하게 된다.

4.2.3 연속성

패널분할에 의한 곡면의 연속성이 얼마나 유지되고 있는지 평가하기 위한 연속성 평가항목의 평가지표 종류로는 kink angle, divergence, 연속성 등이 있다. Eigensatz(2010b)의 'kink angle'은 이웃하는 패널들 사이의 벌어진 각도로서 법선 벡터간 차이값의 제곱합이며, 'divergence'는 두 패널 사이의 벌어진 거리로서 곡선 네트워크에서 각 패널까지 가장 가까운 두 점까지 거리값들의 제곱합으로 패널들의 부드러운 연속정도를 측정한다.

다. 또한 한지연(2011)의 ‘연속성’은 Rhino의 zebra analysis를 이용한 시각적 분석으로 단일 곡면마다 별도의 zebra를 보여주는 Rhino 시스템의 한계 때문에 정확한 분석이 어려우며, 정량적 분석이 아닌 시각적인 분석이라는 한계점을 지닌다.

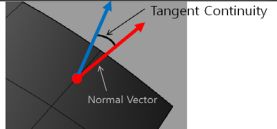
본 연구에서는 연속성 평가항목의 평가지표로 곡면의 연속성이 얼마나 부드럽게 유지되고 있는지에 대한 정량적 평가가 가장 효과적으로 이루어 질 수 있다고 판단되는 Eigensatz에 의해 제안된 kink angle과 divergence를 연속성의 평가지표로 정의하며, 접선 연속성(tangent continuity)과 사이 간격(divergence)으로 명명한다. 이들 평가지표의 평가방법 및 산출방법은 다음과 같다.

1) 접선 연속성(Tangent Continuity)

원형곡면을 패널들로 분절하는 과정에서 인접하는 패널들 사이에 접선의 연속성이 얼마나 유지되었는지를 평가한다. 인접 패널들 간의 연속성의 부드러운 정도를 측정할 수 있으며, 평면 패널로 대체하게 되는 경우는 패널 사이에 접선의 차이가 더 크게 발생하게 되므로 접선 연속성은 불리하게 되며, 접선 연속성을 좋게 유지시키려면, 원형에 가까운 곡면패널을 사용해야 함을 의미한다.

지표 산출방법은 각 패널들의 접선의 변화를 측정하기 위해서 인접한 패널들의 각 법선 벡터(normal vectors)를 구한 후 이들 사이의 각도를 측정한다.

[Table 5] Computation method for Tangent Continuity

concept diagram	computation method
	$t = E(\theta)$ $\theta: \text{angle between normal vectors of adjacent panels}$

2) 사이 간격(Divergence)

원형곡면의 패널분할 이후 패널의 변형이 일어날 경우 인접한 패널들 사이에 간격이 얼마나 발생했는지를 평가한다. 패널의 변형이 일어났을 경우 인접한 패널들 사이에 들뜸 현상이 발생하게 되며 이들 발생된 사이 간격을 측정하여 변형된 정도를 측정한다. 특히, 평면 패널로 대체하게 되는 경우는 패널 사이에 간격의 차이가 더 크게 발생하게 되므로 사이 간격(divergence)은 불리하게 된다.

산출방법은 각 패널 모서리의 대응하는 선들의 임의의 분할 점을 추출하여 각각의 간격을 구하여 평균값을 구한다. 이는 연속된 두 개의 패널은 평행하거나 같은 반경과 곡률은 가지는 경우가 아닌 이상 일정한 사이 간격을 가질 수 없기 때문이다.

[Table 6] Computation method for divergence

computation method
$d = E(d_k)$
d_k : gap between adjacent panels(each edge include 5 even division nodes)

4.2.4 기타

위에서 언급된 평가지표 이외에도 시각적 민감도를 거리, 각도, 재질의 반사에 따라 측정된 시각적 상대 평가, 그리고 줄눈의 균일성 측정에 의한 시공성 및 심미성 평가 등이 패널분할 최적화 평가를 위하여 평가지표로 추가 제안될 수 있으며, 거리, 각도, 재질의 반사에 따른 시각적 민감도 평가의 경우 시각적 민감도에 해당하는 평가 기준에 대한 제시가 선행되어야 한다. 이 평가지표는 보다 정성적인 평가의 범주에 속한다고 볼 수 있으며 정량적인 평가화를 위해서는 거리, 각도, 재질의 반사에 따른 시각적 반응 및 심리적 반응에 대한 이론적 연구와 함께 실험 및 설문조사 등의 연구가 병행되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 해당 평가지표를 연구범위에서 제외하지만, 후속 연구의 가능성에 대한 제안으로서 언급한다.

5. 결론

본 연구에서는 비정형 곡면 패널분할 최적화 평가기법 및 평가지표에 관한 사례 및 선행연구 고찰을 통하여 비정형 곡면 패널분할 최적화의 보편적인 정량적 평가를 위한 평가항목 추출과 평가지표의 제안이 이루어졌다. 제안된 세 가지 패널분할 최적화 평가항목과 평가지표는 다음과 같다.

첫 번째 평가항목은 원형과의 변형된 정도를 나타내는 원형 충실도이며, 이는 곡면 패널분할(panelizing)의 결과가 원곡면에 얼마나 충실하게 분할되었는지 측정하여 원곡면의 유지 또는 변형을 판단하는 근거로 삼을 수 있다. 원형 충실도 평가를 위한 평가지표는 곡면 일치(surface fitness)이다.

두 번째 평가항목은 부재 생산성, 경제성의 측정을 위한 생산 용이성이며, 분할된 패널 중에 평판으로 대체할 가능성이 있는 패널들을 추출하여 공사비 절감을 예측하거나 실제로 평판으로 대체할 근거로 삼을 수 있다. 생산 용이성을 위한 평가지표는 평면성(planarity), 평면 패널 비율(planar panel ratio)이다.

세 번째 평가항목은 인접 패널과의 연속관계를 측정하

는 연속성이며, 분할된 패널이 이웃하는 패널들과 얼마나 부드럽게 이어져 있는지 그 연속성을 측정하거나 대체된 패널에 의해 발생된 패널간 들뜸 현상의 정도를 측정하여 시공 이후 패널 외관의 부드러움 등의 심미적 결과를 예측할 수 있는 근거로 삼을 수 있다. 연속성을 위한 평가지표는 접선 연속성(tangent continuity), 사이 간격(divergence)이다.

또한 각 세 가지 평가항목을 위하여 다음과 같은 평가지표가 제안되었다.

첫째, 곡면 일치(surface fitness) 평가지표는 원곡면의 패널 분할 이후 각 패널과 원곡면의 변형정도를 측정하며, 대체된 패널이 원형 곡면과 얼마나 일치하는지 평가한다.

둘째, 평면성(planarity) 평가지표는 원곡면을 패널들로 분절하는 과정에서, 각 패널의 모서리 점으로 추출한 네 점이 만드는 메시(mesh)가 얼마나 평면에 가까운지를 평가한다.

셋째, 평면 패널 비율(planar panel ratio) 평가지표는 분절된 패널 중에서 평면 패널로 대체할 수 있는 패널의 비율을 측정하여 비용절감 평가의 근거로 삼을 수 있다.

넷째, 접선 연속성(tangent continuity) 평가지표는 원곡면을 패널들로 분절하는 과정에서 인접하는 패널들 사이에 접선의 연속성이 얼마나 유지되었는지를 평가한다.

다섯째, 사이 간격(divergence) 평가지표는 원곡면의 패널분할 이후 패널의 변형이 일어날 경우 인접한 패널들 사이에 간격이 얼마나 발생했는지를 평가한다.

본 연구에서 제안한 비정형 건축곡면의 패널분할 최적화 정도를 평가하기 위한 평가항목과 평가지표는 현재 사용되고 있는 대부분의 평가기법들이 패널분할 최적화 주체에 의해 개발되고 그에 종속되어 있으며 평가지표 또한 특정한 평가기법을 목표로 하여 적용되고 있는 것과 달리 패널분할 최적화 기법에 종속되지 않는 독립성과 보편성을 제공하는데 그 차별성이 있다.

또한 본 연구에서 제안된 평가지표 알고리즘을 활용한 평가 시스템의 구축과 사례 프로젝트의 적용 분석을 통한 평가지표들의 검증과 평가가 향후 연구로서 이루어져야 할 것이다.

2010a

- [2] Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N., Pottmann, H., & Pauly, M. Paneling Architectural Freeform Surfaces. *ACM Trans. Graphics* 29, 3. 2010b DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/1833349.1778782>
- [3] Hambleton, D., Howes, C., Hendricks, J., & Kooymans, J. Study of Panelization Techniques to inform Freeform Architecture. *Glass Performance Days 2009*
- [4] Han Zeeyeon. *A study on Claasification and Feature of Double-curved Surface Fabrication Techniques in Freeform Architecture*. Master. Thesis in Architecture Department, Sejong University, 2011
- [5] Ryu, Jeong-Won. Panelizing Optimization and Evaluation for Architectural Freeform Surfaces. *Review of Architecture and Building Science*, v.56 n.11, 2012
- [6] Ryu, Jeong-Won. *BIM-based Panelizing Optimization for Architectural Freeform Surfaces*. Ph.D. Thesis in Architecture Department, Seoul National University. 2012
- [7] Shelden, Dennis R. *Digital Surface Reprsesentation and the Constructibility of Gehry's Architecture*. Ph.D. Thesis in Architecture Department, MIT, pp.157-160, 2002

유 정 원(Jeong-Won Ryu)

[정회원]



- 1990년 2월 : 한양대학교 건축학과 (공학사)
- 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

References

- [1] 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*. p.8,