국내외 비정형 건축물 외피시스템 사례 분석을 통한 설계 및 시공시 고려사항 도출

Deduction of Considerations During Design and Construction
by Analysing Domestic and Abroad Case Analysis of Freeform Building Envelope

류 한 국*

Ryu, Han-Guk

Abstract

Recently, architectural design has been changing from formal design to freeform design due to the digitalization of construction industry. Especially, the formal design has been accepted as a design trend recently and applied many times as a design concept in the architectural design competitions such as turn-key. However, various defects such as water leak and cracks have been occurred because the traditional construction methods had been applied without any revision or adaptation of the formal construction method for the freeform building construction. Design and construction of freeform building has been developed as a new method in order to solve the problems and minimize the construction duration and cost for the freeform building.

Therefore this research deduced the positive implications for developing freeform envelope by analyzing the domestic and abroad cases and proposed the considerations during design and construction of the freeform envelope as follows. First, the freeform design should consider the constructability for the freeform envelope. Second, manufacturing technology for the two-way curvature of the unit panel should be developed. Third, exposed concrete form method should be developed for the freeform envelope of concrete. Fourth, material characteristics, construction method and facility management should be considered in order to manage precipitation and keep water-proof according to the classification of the freeform envelope area.

Keywords : *Freeform Architecture, Envelope System, Case Study, Constructability*

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 건설 산업의 디지털화로 인하여 건축 디자인이 정형에서 자유로운 비정형 형태로 변화하고 있다. 특히, 국내에서는 최근 비정형 형태가 디자인 경향으로 도입되어 현상설계, 터키 등에서 설계 당선을 위한 디자인 요소로 많이 적용되고 있다.

일반적으로 정형 건축물과 달리 비정형 건축물은 외벽과 지붕의 구분이 없고 외피시스템의 개념으로 통합된다. 정형 건축

물의 외벽은 일반적으로 디자인을 결정한 후 외벽시스템을 결정하고 지붕마감 시스템은 배수, 방수 등의 기능에 맞추어서 설계 및 시공되고 있다. 그러나 비정형 건축물은 지붕과 외벽의 구분이 없어지면서 각각의 독립적인 기능을 통합하는 외피의 성능을 갖추어야 하므로 시스템화 된 설계와 외피 공법이 필요하다.

그러나 비정형의 부위별 특성에 맞게 선택적으로 정형 건축물의 외피 공법을 사용하여야 함에도 불구하고 비정형 설계에 대한 시공성 분석이 없이 그대로 사용하여 비정형 건축물의 완

* 종신회원, 국립창원대학교 건축공학과 교수, 공학박사(교신저자), hgryu@changwon.ac.kr

성도가 떨어지게 된다. 실제로 기존 정형 건축물의 외벽 공법을 비정형 건축물의 외피에 적용함으로써 누수와 크랙 등 다양한 하자가 발생하고 있다.

이러한 문제점을 개선하고 비정형 건축물의 완성도를 높임과 동시에 공사 기간과 공사비를 최소화할 수 있는 새로운 설계와 시공법이 개발되고 있다. 이는 비정형 건축물의 최적화 설계와 부재화를 통한 공장 생산 시스템과 현장 조립 및 설치 기술로 가능하다.(Guzik 2009) 기존의 비정형 건축물의 설계와 시공과 관련된 연구를 살펴보면 다음과 같다. 이 강(2008)은 비정형 건축물 프로젝트의 시공 문제점에 관해 도면 자동생성의 표현법에 대한 지적과 패널화에 시공의 기술적 지원 그리고 부품 제조상의 어려움 및 건축물의 측량에 대한 기술적 문제를 지적하고 박정근과 이명식(2008)은 비정형 건축의 형태적인 측면에서의 특성과 BIM적용 가능성을 제안하였다.

Kloft, H.(2009)는 비정형 건축물에 대한 건축가의 설계 프로세스와 기술 및 제작 방법, 윤수원 외(2009)는 BIM적용 사례를 통해 현재 시공현장에서 고민하고 있는 BIM 기술 도입의 필요성과 적용 기술과 가능성을 제시하고 BIM 도입을 위한 사례로 디큐브 시티의 BIM 적용 및 추진과정을 소개하며 BIM 적용을 통한 시공 및 공정 진도 계획 등의 기능을 검증하고 기대 효과로는 설계 검토의 오류 최소화화 4D CAD & 시뮬레이션 활용한 공정, 3D 모델과 연계한 도면 산출과 3D기반의 Shop DWG 제공으로 협력업체 등과의 커뮤니케이션 증진에 있다고 하였다.

최정민 외(2009)은 건축물의 외장재에 대한 설계방법과 시공단계에서 시공품질 확보방안, 시공 하자를 유발시키는 다양한 변수에 대한 대응방안 등이 부족하다고 지적하였다. 비정형 건축물의 설계에 사용되는 Architectural Geometry Control 도구 중 그 활용성이 부각 되는 Bentley 사의 Generative Components를 활용하여 비정형 건축물의 이중 곡률 곡면의 장재의 부재생산을 위한 패널화, 제작도면 추출에 대한 연구를 하였다.

배경진 외(2009)은 비정형 건축물 구현을 위한 디지털 디자인 프로세스를 분석하고 권순호 외(2010)은 비정형 건축물 외장재의 패널 최적화를 위한 프로세스를 개발하였으며 안지연 외(2009)은 비정형 건축물의 공사관리를 위한 시각화 기술을 적용하여 증강현실 기반의 공사관리 방법을 제시하였다.

그러나 비정형 건축물의 시공은 여전히 설계 오류와 시공자의 도면이해 부족, 시공경험 및 공법의 부재 등으로 인하여 시공 품질과 공기, 공사비 증가 등의 잠재적 리스크를 포함하고 있다.(Ryu 2012) 비정형 건축 디자인에 대한 실무와 연구가 진행되고 다양한 가능성을 제시하고 있으나 여전히 복잡한 기

하학적 형상을 건축 패널 시스템으로 구현하여 실무적으로 적용하는 것은 매우 어려운 실정이다.(Eigenstz 2010) 특히 현재 사용하고 있는 비정형 건축물의 설계와 시공 방법이 기존의 정형 건축물의 공법과 크게 다르지 않아 엄청난 시공오차 및 후속공정의 물량증가, 공기지연 등이 발생하며 이는 건축물의 품질 저하와 시공비 상승으로 직결된다.

따라서 본 연구는 국내외 비정형 건축물의 외피시스템 사례 분석을 통하여 실증적으로 시사점을 도출하고 비정형 건축물 외피시스템의 설계와 시공시에 고려해야 할 사항을 제시하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

기존 연구는 비정형 건축물의 외피시스템의 공법을 실증적으로 분석하고 개선하고자 하는 연구가 부족하였다. 이에 본 연구의 수행을 위하여 우선 비정형 건축물을 직접 방문하여 조사하거나 문헌조사를 통하여 분석하고 전문가 심층 상담을 실시하였다.

국내에서는 ○○연구원 내부 비정형 자유 곡면의 아트리움의 유리 설치 공법과 ○○복합체, ○○공항 교통센터, ○○기념관, ○○스포츠 콤플렉스의 외피시스템을 구성하는 패널 공법을 분석하였다.

국외에서는 Kansai Airport, BMW WELT, 페라리 월드(아부다비)의 외피시스템을 구성하는 패널 공법을 분석하였다. 또한 비정형 건축물의 외피시스템을 구성하기 위한 현장타설 콘크리트 공법으로 CNC(Computerized Numerical Control) 거푸집을 이용한 거푸집 공법, 유닛 거푸집을 이용한 거푸집 공법, 무거푸집 공법을 분석하였다.

이와 같은 비정형 건축물의 사례 조사 결과를 바탕으로 비정형 건축물의 설계와 시공에 대한 전문가들의 심층 면담을 통하여 비정형 건축물의 설계와 시공시 고려해야 할 사항을 도출하였다.

2. 국내 비정형 건축물 외피시스템의 사례 분석

본 장에서는 국내 비정형 건축물의 외피시스템의 대표적인 사례들을 조사하고 분석한 내용을 서술한다.

2.1 비정형 형상 구현을 위한 유리 설치 공법

○○연구원은 유리로 된 3층 높이의 정방형 형태로 건물 내부 중앙부에 위치한 비정형 자유곡면의 아트리움 구조로 형태는 2방향 비정형 곡면을 형성하였다.(그림 1. 참조)

그림 1. ○○연구원 내부 비정형 자유 곡면의 아트리움
(출처: <http://annews.kr/100115127462>, 아이아크)

2방향 곡면 방화 유리를 제작하여 설치하는 비용은 매우 높으므로 다이아그날 형식(Diagonal Pattern)의 메쉬 방식으로 평면 방화 유리를 제작하여 부착하였다. 유리의 제작 크기를 고려하여 곡면 방화 유리 모델링을 평면 유리 형태로 설계를 수정하여 평면 방화 유리를 시공하였다. 이를 위하여 그림 2와 같이 3차원 모델링과 모형을 제작하여 평면 유리의 크기, 개수, 유리를 지지하는 구조 프레임의 설치와 시공방법을 고려하였다.

그림 2. ○○연구원 내부 비정형 자유 곡면의 아트리움 구조 모델과 모형
(출처: <http://annews.kr/100115127462>, 디지털 건축연구소 위드웍스, 아이아크)

그러나 내부 아트리움의 철골 연결 부위 설계는 연결부(connector)가 곡면에 직각방향(법선 방향)으로 향한 것이 아니라 Z축의 직각 방향으로 설계되었다. 그러나 그림 3과 같이 곡률이 심한 상부 층으로 갈수록 곡률 변화가 심하게 발생함에 따라 경사부재를 지지하기 위한 연결부인 원형 플레이트가 커지게 된다. 즉, 철골 연결부와 원형 연결 플레이트가 Z축에 직각 방향으로 설치되어 형태 변화가 심해지는 상부 구간에서는 원형 연결 플레이트가 필요 이상으로 커지게 되었다.

또한 철골 부재 연결을 위한 큰 규모의 원형 연결 플레이트는 유리를 고정하기 위한 그레이징 시스템 설치가 어렵게 한다. ○○연구원의 비정형 자유곡면의 아트리움 구조는 내부에 설치되기 때문에 별도의 그레이징 시스템 설계가 필요없지만

그림 3. ○○연구원 내부 비정형 자유 곡면의 브라켓과 접합부 시공
(출처: 위드웍스, 아이아크)

외기에 면할 경우에는 반드시 결로 방지와 단열을 위한 그레이징 시스템이 필요하다.

결과적으로 그림 4와 같이 비정형 돔의 커튼월 유리마감선과 철골 중심선이 일치되지 않아 시공오차가 심하게 발생하여 철골 브라켓을 탈취 후에 재용접하여 재시공하였다.

그림 4. 비정형 돔의 스틸커튼월의 유리면이 구조 프레임의 중심에 접하지 않음.

이러한 문제는 설계 단계에서 시공 모델로 사전에 시공성을 검토하여 철골공사와 유리 마감 공사의 지오메트리와 정확하게 통제되었다면 상기한 하자가 없었을 것이다.

2.2 ○○복합플렉스 외피시스템 패널 공법

그림 5. ○○복합플렉스

○○복합체의 외피시스템은 그림 5와 같이 형태상 2방향 곡면으로 크게 시트 마감과 커튼월 마감으로 구성된다. 커튼월은 곡면 유리가 아닌 평면 유리의 스틸 커튼월 방식으로 시공되었다.

○○복합체의 외피시스템은 스틸 커튼월 방식에도 불구하고 주 구조 부재에 커튼월의 스틸 프레임 부재로 유리를 지지하는 방식이다. 주 구조 부재(원형강관)와 유리 고정용 스틸 프레임 부재(H-Beam)가 중복됨으로써 그림 6과 같이 유리 고정용 스틸 프레임 부재는 외부 전망시 시각적 장애물이 된다. 즉 곡면을 형성하기 위한 유리 모듈에서 커튼월 지지를 위한 스틸 프레임과 주 구조 부재와 일치하지 않고 있다.

그림 6. 비정형 곡면 외피 커튼월의 스틸 프레임 부재와 지지 구조 부재

그림 6의 상단 오른쪽과 그림 7의 상단 왼쪽에서 보는 바와 같이 한 지점에 8개의 부재가 모이는 유리 모듈로 되어 있으나 6개의 부재로 유리 모듈이 결정되었다면 부재량의 절감과 설계 상세도의 완성도가 높아졌을 것이다.

그림 7과 같이 금속 마감 시트는 2방향 곡면의 돌출 이음 방식으로 시공하여 곡면 형태가 변화하는 구간에 이음 처리를 하였으나 이음 방향 통제가 제대로 되지 않아 시공 완성도가 떨어진다. 왜냐하면 2방향 곡면 형태를 금속 돌출이음이나 평이음 방식으로 마감할 경우 현장 작업자가 임의로 이음 작업을 하기 때문에 마감선에 대한 통제가 이루어지기 어렵다. 실제로 그림 7에서 보는 바와 같이 현장에서 작업자에 의해 임의로 시공된 것을 알 수 있으며 비정형 형태의 디테일과 외피 끝부분의 상세 설계 및 시공의 정밀도가 떨어져 향후 누수의 원인이 될 수 있다.

그림 7. 스틸 프레임 부재의 8개의 부재 집적과 시공 정밀도 저하

2.3 ○○공항 교통센터 외피시스템 패널 공법

○○공항 교통센터는 국내 비정형 외피시스템의 초기 작품으로 이중 지붕 오픈조인트 시스템을 사용하였다. 하부 구조는 건식 철골 구조이며 방수 시스템은 EPDM 방수에 스텐리스 패널 마감이다.

초기 설계시에는 건물 표면의 정보를 알 수 없으므로 외장 패널과 그레이징을 시공할 수 있는 도면작성이 어려웠다. 이에 카티아 프로그램을 이용해서 다음 네가지 측면에서 시공성을 고려할 수 있었다. 첫째, 내외장 패널 형태가 표면에 그려진 1/500의 CAM에 의한 레진 모형을 만들었다.(그림 8. 참조) 이 모형으로 참여주체간의 협의와 검토가 가능하였다.

그림 8. ○○공항 교통센터 CAM에 의한 레진모형(출처:황재식 (2008))

둘째, 외피면에서 일정하게 오프셋된 면을 만들어 철골사이즈나 설비 등의 간섭여부를 체크하였다. 셋째, 외장마감재의 규격과 좌표 도면의 수치정보를 확보하였다. 넷째, 법선 방향

의 방수층, 주 철골과 하부 철골의 위치 정보를 확보하였다.(황재식 2008)

○○공항 교통센터는 국내 비정형 건축물의 초기 작품으로 외국과 국내의 설계에 기반하여 국내 기술로 시공을 실시하였으나 외국 설계사는 환차손 등의 이유로 도중에 포기하였다. 그러한 어려움이 있어서인지 비 시스템화 된 지붕마감 구조로 인하여 곡선 형태가 다소 부드럽지 못하다. 시공성과 경제성이 떨어져 대형 지붕에는 부적합하고 오픈 조인트로 인하여 하부 EPDM 방수 하자에 의한 누수¹⁾추적이 어렵고 하자의 유지관리가 어려운 공법이다.(표 1. 참조)

표 1. ○○공항 교통센터 외피시스템의 패널 공법

구분	인천국제공항
형상
외피 시스템	이중지붕 오픈조인트 시스템(스텐레스 패널)
하부 구조	철골구조(건식)
방수 시스템	스텐레스 마감 + EPDM 방수
장단점	-하부 EPDM 방수 하자에 의한 누수발생가능성이 있음 -비 시스템화 된 지붕마감 구조로 시공성, 경제성이 떨어지며 대형지붕에는 부적합 함

2.4 ○○기념관 외피시스템 패널 공법

○○기념관은 3개의 Bowl을 연결하면서 곡면이 발생하는 비정형 건축물이다. 2방향 곡면인 6M 이하 저층부와 3개의 Bowl이 만나면서 내측으로 곡면형상이 변화하는 상부 구간은 비정형의 곡률이 심하여 시공성과 경제성을 고려하여 노출콘크리트로 적용되었고, 그 외 1방향 곡면인 부분은 3T 알루미늄 아노다이징 곡면 패널로 시공되었다.

1) 국감자료에 따르면 3천억원의 공사비를 투입해 건설한 교통센터는 2001년 3월 이후 올9월까지 지붕 누수와 천장에 금이 가는 현상 등 136건의 하자가 발생했다. (출처: “인천공항 개항 이후 끊임없이 하자보수” 연합뉴스 2004.10.19.)

초기 설계는 BIM 설계가 아닌 일반적인 방법에 의하여 설계하고 시공성을 파악하기 위하여 시공 실물 모형(Mock-Up)을 수행하였다. 외장 패널 실물 모형에서 트리스월 공법으로 구축된 실물 모형의 콘크리트 구조체 위에 현장에서 실측하여 패널을 가공하는 방법으로 시공하였다.

그러나 그림 9와 같이 비정형 부분을 시공 실물 모형으로 구축한 결과 콘크리트 구조의 시공오차가 심하게 나타났으며 전체적인 비정형 형태 통제가 시공과정에서 이루어 지지 않았다. 특히 비정형 마감 패널의 경우 현장에서 실측해서 제작 설치하였는데 시공 오차가 심하여 수평, 수직줄눈의 위치, 패널의 평활도 등에 심각한 문제점이 발생하였다. 따라서 BIM의 가상 시공 모델을 통한 수치 정보의 생성과 패널 마감 전개가 없는 비정형 형태를 완성할 수 없게 되었다.

그림 9. ○○기념관 비정형 외피 골조의 시공 실물 모형
(출처: 디지털 건축연구소 위드웍스)

이에 실물 모형의 검토 후 그림 10과 같이 BIM 설계로 비정형 콘크리트 거푸집 작업을 진행하여 비정형 콘크리트공사 뿐만 아니라 연계된 외피 마감공사의 정밀도를 가진 시공이 가능하게 되었고, 전체 시공 품질을 유지하고 계획 공사 기간을 준수하였다.

그림 10. ○○기념관의 콘크리트 구조 및 외피 패널

1방향 패널은 가상 시공 모델로 곡률 및 제작사이즈를 최적화하여 90% 이상을 현장 실측 없이 공장에서 CNC로 가공하여 제작하였다. 패널 설치는 추출한 좌표 데이터값을 이용하여 트랜시트로 정확하게 디지털 모델과 일치시켜 현장 오차를 최소화하였다.

초기의 지붕 파라펫 COPING 시공은 그림 11과 같이 시공자의 편의에 의해 직선 세그먼트로 시공되었다. 비정형 패널이기 때문에 각 패널의 위치마다 경사도가 다르고 크기가 다르므로 전문시공업체는 시공품질보다는 공사비 절감과 편의상 기존 시공법으로 COPING부분을 시공하였다. 따라서 패널과 COPING간의 시공오차가 발생하였고 우수에 의한 누수 문제, 디자인의 완성도가 떨어져 전면적으로 재시공 되었다.

그림 11. 기존 시공법에 의한 지붕패널 COPING 설치

이에 지붕 COPING은 CNC로 공장에서 곡면 가공하여 다시 제작되어 제작비는 상승하였지만, 그림과 12와 같이 BIM 설계에 의해 정확한 곡률 시공이 가능하였다. 처음부터 BIM 설계에 의해 COPING이 제작되고 설치되었다면 재시공할 필요가 없었을 것이다.

그림 12. 지붕패널 COPING의 CNC 제작 및 설치

○○기념관의 패널 공법은 표 2와 같이 지붕에 알루미늄 리브루프 시스템과 외벽에 알루미늄 아노다이징 오픈 조인트 공법을 사용하였다. 하부구조는 철골구조와 콘크리트 구조로 구성되며 방수는 알루미늄 리브 루프 방수와 지붕에는 알루미늄 리브 루프 하부에 시트 방수로 보강하였다.

알루미늄 리브 루프의 이중 지붕 시스템은 방수 성능이 뛰어나고 공기 단축과 시공 품질 확보가 용이하다. 지붕 알루미늄 리브 패널은 내구성과 및 내식성이 우수하지만 시공비가 스틸 리브루프 시스템보다 높다.

표 2. ○○기념관 외피시스템의 패널 공법

구분	인천도시축전기념관(Tri-bowl)
형상
외피 시스템	알루미늄 리브루프 시스템(지붕) + AL, 아노다이징 오픈조인트 공법(외벽)
하부 구조	철골구조(건식, 지붕) + CON(습식, 외벽)
방수 시스템	AL, 리브루프 방수 + 하부 시트 방수(지붕)
장단점	-AL 리브루프 이중지붕 시스템은 완벽한 방수 구현이 가능하며, 공기단축 및 시공품질 확보가 용이함 -시스템화 된 공법으로 내구성 및 내식성이 우수함 -시공비는 스틸 리브루프보다 높음

2.5 ○○스포츠 콤플렉스 패널 공법

○○스포츠 콤플렉스는 패널에 시트를 부착시킨 Scarf roof adding 시스템을 사용하였다. 규격품의 패널 생산으로 전체 방수와 자유로운 곡면 형성이 가능한 매우 간단한 시공법이다.(표 3. 참조) 그러나 금속 지붕재 평이음 방식으로 경사도 1%이하 구간에서 누수 하자가 발생하기가 쉽다.²⁾

비정형 외피의 기술적인 부분을 검토하지 않아 시공되었기 때문에 예측하지 못한 부분에서 하자가 발생하여 지붕 전체의 보수나 재시공이 필요하였다. 따라서 가상 시공 모델에 의해 비정형 부분의 시공오차, 구매, 시공의 정밀도, 익스팬션 조인트의 설정 등 이중 외피의 특성이 고려되었다면 시공 디테일에 대한 수정이 가능하였을 것이다.

2) KAIST 스포츠 콤플렉스 부실공사 '논란' 고 류근철 박사 기부 받아 지은 지 1년 만에 '누수', 한국대학신문, 2011.06.07.

표 3. ○○스포츠 콤플렉스 외피시스템의 패널 공법

구분	카이스트 종합스포츠 콤플렉스
형상 및 단면도
외피 시스템	Scarf roof adding system
하부 구조	철골구조
방수 시스템	금속지붕재 평이음 방식
장단점	-경사도 1%이하 구간에서 누수에 의한 하자 발생

3. 국외 비정형 건축물 외피시스템의 사례 분석

3.1 Kansai Airport의 외피시스템 패널 공법

Kansai Airport 지붕의 비정형 형상은 주 철골 구조에 이중 지붕 오픈 조인트 시스템을 사용하였다.(표 4. 참조) 지붕 방수를 데크플레이트 층에서 함으로써 완벽한 방수 시스템을 구현하였지만 EPDM 방수보다는 금액이 다소 높다. 비 시스템화된 공법으로 현장 작업자의 작업량이 많아 시공성과 경제성이 다소 떨어진다.

표 4. Kansai Airport 외피시스템의 패널 공법

구분	Kansai Airport
형상
외피 시스템	이중지붕 오픈조인트 시스템(스테인리스 패널)
하부 구조	철골구조(건식)
방수 시스템	스테인리스 마감 + 데크플레이트 방수
장단점	-지붕 방수를 데크플레이트 층에서 함으로써 완벽한 방수시스템 구현. EPDM 방수보다는 금액이 높음 -방수성능은 완벽하지만 비 시스템화 된 공법으로 시공성, 경제성이 떨어짐

3.2 BMW WELT의 외피시스템 패널 공법

독일 뮌헨의 BMW WELT의 지붕 외피는 Kansai Airport와 마찬가지로 철골구조(건식)에 이중지붕 오픈 조인트 시스템을 사용하였고 스테인리스 마감에 데크플레이트로 방수하였다.(표 5. 참조) 패널은 공장에서 생산하여 현장에 설치하는 공법을 적용하였다.

2방향 곡면의 패널 설계는 가능하지만 제작상의 이유로 2방향 곡면 패널을 일방향 곡면으로 제작 시공하였다. 그러나 패속 조형(Rapid manufacturing)기술과 설계 데이터의 제조 기기의 전송 및 제작 기술이 가능하여 건설 부품화 생산이 가능하였다.(2008) CAM(Computer Aided Manufacturing)과 CNC(Computerized Numerical Control)로 디지털 제어 기술이 가능한 프로그램과 구현 장비로 디지털 좌표 정보를 근간으로 3차원 물체의 생산이 가능하다.(Schodek 2005)

지붕에 태양열 집열판을 설치하였으며 점검 통로를 설치하여 유지 관리를 용이하게 하였다. 오픈 조인트에 의한 이중 지붕 시스템으로 마감재의 신축 팽창으로 인한 누수 하자가 없지만 비 시스템화 된 공법으로 시공비가 다소 높다.

BMW WELT 패널의 비정형성은 표 5의 내부 bridge 사진에서 보는 바와 같이 줄눈의 연결은 곡률 형성이 되지만 패널 자체의 2방향 곡면은 완벽하게 만들어내지 못하고 있다. 즉, 패널의 CNC 가공기술은 BMW WELT에서 보는 바와 같이 불완전한 곡면을 나타낸다.

표 5. BMW WELT 외피시스템의 패널 공법

구분	BMW WELT
영상
외피 시스템	이중지붕 오픈조인트 시스템(스테인리스 패널)
하부 구조	철골구조(간식)
방수 시스템	스테인리스 마감 + 데크플레이트 방수
내부 시스템	3차원 형상 알루미늄 패널 가공하였으나 패널 자체의 2방향 곡면 형상 구현은 불완전함
장단점	<ul style="list-style-type: none"> -태양열 집열판 설치 -지붕 점검통로 설치 등으로 유지관리 요인 고려 -오픈조인트에 의한 이중 지붕 시스템으로 마감재의 신축팽창으로 인한 누수 하자가 없음 -비 시스템화 된 공법으로 시공비가 높음

3.3 페라리 월드(아부다비)의 외피시스템 패널 공법

페라리 월드(아부다비)의 지붕은 스틸 리브 루프 시스템을 사용하였다.(표 6. 참조) 스틸 리브의 특성상 굴곡된 형태로 인한 재료의 신축 팽창에 의한 하자가 없으며 다양한 칼라 표현

이 가능하다. 대형 지붕에 적합하며, 시스템화 된 공법으로 시공성이 좋고 알루미늄 리브루프 보다 스틸을 사용하여 다소 경제적이다.

표 6. 페라리 월드(아부다비) 외피시스템 패널 공법

구분	페라리 월드(아부다비)
영상
외피 시스템	스틸 리브루프 시스템
하부 구조	철골구조(간식)
방수 시스템	스틸 리브루프 방수
장단점	<ul style="list-style-type: none"> -스틸 리브루프 시스템으로 재료의 신축팽창에 의한 하자가 없으며 다양한 칼라 표현이 가능함 -대형 지붕에 적합하며, 시스템화 된 공법으로 시공성이 좋고 AL 리브루프 보다 경제적임

3.4 비정형 건축물의 외피시스템 구성을 위한 현장타설 콘크리트 공법

비정형 건축물의 외피 구성을 위한 현장타설 콘크리트 공법은 CNC 거푸집을 이용한 거푸집 공법, 유닛 거푸집을 이용한 거푸집공법, 무거푸집 공법으로 구분할 수 있다.

3.4.1 거푸집 공법(CNC Form) 분석

CNC 거푸집 공법은 컴퓨터 수치제어 기계로 비정형의 거푸집을 만들어 콘크리트를 타설하는 공법이다. CNC 가공된 SECTION FORM을 설치하여 비정형의 지오메트리를 형성한다.(표 7. 참조)

비정형 콘크리트 구조체 공사가 기존의 형틀 설치 방법으로 가능하지만 시공 정밀도가 떨어지고 공기가 길어질 수 있다.

가장 보편적으로 비정형 콘크리트를 시공할 수 있는 방법이나 CNC로 가공된 SECTION FORM을 재활용 할 수 없으므로 다소 경제성이 떨어진다.

표 7. 비정형 외피시스템의 거푸집(CNC Form) 공법

구 분	거푸집 공법 (CNC Form)
형상
방법	CNC 가공된 SECTION FORM을 설치하여 지오메트리를 형성하는 방법
특징	-기존의 거푸집공법으로 비정형 콘크리트 구조체 공사가 가능 -시공 정밀도가 떨어지고 공기가 길어질 수 있음 -가장 보편적으로 비정형 CON'C를 시공할 수 있는 방법이나 CNC가공된 SECTION FORM을 재활용 할 수 없으므로 경제적이지 못함.
시공 사례	Meiso-no-mori 장례식장 (Ito Toyo)

3.4.2 거푸집 공법(Unit Form) 분석

유닛 거푸집을 이용한 거푸집 공법은 비정형 부분을 유닛 거푸집으로 입체 목재 형틀을 구성하여 조립하는 공법이다. 주로 비정형 지오메트리 형성을 위하여 평면 슬라브의 측면을 유닛 거푸집으로 사용한다.(표 8. 참조)

그러나 단면에 의한 비정형 구현에는 제작비가 높아져 경제성이 떨어진다.

표 8. 비정형 외피시스템의 거푸집(Unit Form) 공법

구 분	거푸집공법 (Unit Form)
형상
방법	비정형 부분을 유닛으로 조닝하여 입체 목재 형틀을 제작하여 조립하는 공법
특징	-평면 슬라브 비정형은 가능하나 단면에 의한 비정형 구현에는 제작비가 높아져 경제성이 없음
시공 사례	벤초박물관(UN STUDIO) EPFL LEARNING CENTER(SANAA)

3.4.3 무거푸집 공법(망 거푸집 공법) 분석

무거푸집 공법은 철근 트러스를 비정형의 단면 형태에 맞게 가공하고 망 거푸집으로 구조체의 비정형 형태를 구성한 후에 콘크리트를 타설하는 공법이다.

돔과 같이 곡면이 정형일 때 유리하며 곡면 형상이 복잡할수록 철근 가공이 어렵다. 따라서 거푸집 작업이 없어 공사 기간이 단축되지만 규모가 크거나 복잡한 비정형 형태는 시공성과 경제성이 부족하다.(표 9. 참조)

표 9. 비정형 외피시스템의 무거푸집(망 거푸집) 공법

구분	무거푸집공법 (망 거푸집 공법)
형상
방법	철근 트러스를 비정형 단면 형태에 맞게 가공하여 망 거푸집에 콘크리트를 타설하는 공법
특징	<ul style="list-style-type: none"> -동과 같이 곡면이 정형일 때 유리함 -곡면 형상이 복잡할 경우 철근 가공이 어려울 수 있음 -거푸집 작업이 없으므로 공기가 단축됨 -규모가 크거나 복잡한 비정형 형태는 시공성, 경제성이 없음
시공 사례	Truss-Wall House, Taichung Metropolitan Opera House

4. 국내외 비정형 외피시스템의 공법 분석을 통한 시사점 도출

4.1 비정형 외피시스템 공법의 요약 및 시사점

○○연구원 내부 비정형 자유 곡면을 형성하는 아트리움의 유리 설치 공법은 설계시 비정형성을 구현하기 위한 모듈 설계, 방화 유리 재료의 특성, 철골 설치와 방화 유리 부착 방법이 충분히 고려되지 않고 시공하여 재시공한 사례이다. 기 제작 설치되었던 철골 브라켓과 방화 유리 모듈이 일치하지 않아

철골 브라켓을 탈취한 후 방화 유리에 맞춰 브라켓을 재용접하여 방화 유리를 설치하였다.

이는 설계시 비정형의 내부 아트리움 형태와 유리 설치 공법을 충분히 검토하지 않고 시공하였기 때문에 재시공을 한 것이다. 따라서 비정형 건축물을 시공시에는 가상으로 시공 상세 현황을 파악하고 사전에 검토하여 철골 공사와 유리 마감 공사의 지오메트리를 정확하게 통제하는 것이 중요하다.

○○콤플렉스는 스틸 커튼월 방식임에도 불구하고 주 구조 부재와 커튼월 고정용 스틸 구조 부재가 중복되어 시공되었다. 미적 측면에서 비정형성을 추구하였으나 오히려 구조 부재를 중복 사용하여 창호를 통한 외부 조감시에 커튼월 구조 부재가 시각적 장애요인이 되었다.

일반적인 스틸 커튼월 방식은 이중으로 구조를 지지하지 않고 스틸 커튼월 부재만으로 2방향 곡면 유리를 구축할 수 있는 공법이다. 따라서 외피 자체가 구조 역할을 담당함으로써 미적 경제적 효과를 도모할 수 있는 비정형 곡면 형상의 외피를 구축하여야 한다.

○○공항 교통센터는 국내 비정형 건축물의 초기 작품으로 비정형 외피 패널과 방수 공법이 비 시스템화된 지붕마감 구조로 시공되었다. 시공성과 경제성이 떨어지는 이중지붕 오픈 조인트 공법으로 스텐리스 패널로 시공하였다.

하부 EPDM 방수 하자에 의한 누수 발생 가능성이 높고 누수시 정확한 위치 파악이 어려워 재시공 및 유지관리가 어렵다. 따라서 비정형 외피 패널과 방수 공법을 일체화하여 시스템화 된 이중 지붕 오픈 조인트 공법을 적용하여야 한다. 시공성을 확보하고 향후 발생할 수 있는 하자 관리를 용이하게 할 수 있는 캐워크 등의 하자 및 유지 관리 공간이 반영되도록 해야 한다.

○○기념관은 비정형 건축물의 비정형 형태를 사전에 수차례 검토하고 설계자와 시공자, 협력업체 전문가들이 의논한 결과에 기반하여 설계하고 시공한 성공적 사례로 판단된다. 비정형의 1방향 또는 2방향 곡률 특성을 파악하여 그에 맞는 비정형 외피 재료를 선정한 사례이다. 3개의 Bowl을 연결하는 비정형 건축물로 곡률이 심한 2방향 곡률 부분과 곡률이 심하지 않은 1방향 곡률 부분으로 구분하여 시공하였다. 즉, 2방향 곡률 부분은 형태 구성이 자유로운 노출 콘크리트 공법으로 시공하고 1방향 곡률은 알루미늄 아노다이징 패널로 시공하였다.

수차례의 실물 모형 제작으로 시공성을 파악하고 BIM 설계로 비정형 건축물 외피 시스템 공법을 적용하였다. 방수와 외피의 시스템화 된 알루미늄 아노다이징 오픈 조인트 공법(외벽)과 알루미늄 리브 루프 시스템(지붕)으로 시공하였다. 그러나 재료가 알루미늄으로 시공비가 스틸 리브 루프보다 다소 높

은 편이며 노출 콘크리트 마감시 품질 확보에 각별히 신경을 써야 한다.

○○스포츠 콤플렉스의 외피시스템은 자유 곡면 처리가 가능한 Scarf roof system 공법을 적용하였다. 밀폐형 구조로 다양한 금속을 사용할 수 있고 후레싱과 거터가 불필요하며 시공이 매우 간단하다. 손상 부분의 부분 교체가 간단하지만 평이음 방식으로 경사가 거의 없는 경우에는 누수에 의한 하자가 발생하기 쉽다.

Kansai Airport는 철골 구조에 이중 지붕 오픈 조인트 공법을 적용하여 지붕 방수를 데크플레이트 층에서 하도록 하였다. 건식 구조로 경사가 있는 경우에는 완벽한 방수 성능을 확보할 수 있으나 Scarf roof system 공법과 마찬가지로 거의 경사가 없는 경우에는 누수에 의한 하자가 발생하기 쉽다.

○○기념관, BMW WELT, 페라리 월드(아부다비)의 금속 패널은 패속 조형, CAM, CNC 기술로 디지털 수치 정보를 활용하여 패널을 제작하고 설치 위치의 좌표 정보에 기준하여 시공하였다. 그러나 1방향 곡률의 패널은 자연스러운 곡면이 형성되고 있지만, 2방향 곡률의 단위 패널은 여전히 부자연스러운 곡면을 형성하고 있음을 알 수 있었다.

조사한 비정형 건축물의 외피시스템 구성을 위한 현장타설 콘크리트 공법 중에 CNC 거푸집 공법은 CNC로 가공된 SECTION FORM을 설치하여 비정형의 지오메트리를 형성하는 방법이나 시공시 SECTION FORM을 정확한 좌표에 설치하여야 하므로 시공성이 떨어지고 작업품이 많이 소요되는 공법이다.

유닛 거푸집 공법은 주로 슬라브 측면의 비정형 지오메트리를 만들기 위하여 유닛 거푸집을 사용하지만 CNC 거푸집 공법과 마찬가지로 다수의 유닛 거푸집을 제작하고 정확한 위치에 설치하여야 하므로 제작비가 많이 소요된다.

무거푸집 공법(망 거푸집 공법)은 기존 정형 거푸집의 단점을 개선한 공법으로 비정형 형태에 맞게 철근을 가공 설치한 후 망을 설치하여 거푸집 역할을 하도록 하는 공법이다. 콘크리트 타설 후 잉여수를 배출함으로써 고품질의 콘크리트 강도를 발현하도록 한다. 무거푸집 공법은 거푸집을 제거하지 않고 콘크리트에 매립하므로 콘크리트의 인장 균열을 방지하는 효과가 있다. 그러나 곡면 형상이 복잡하면 철근 가공이 어렵고 규모가 크거나 복잡한 경우에는 시공성과 경제성이 떨어진다.

4.2 비정형 외피시스템 설계 및 시공시 고려사항

조사한 결과를 바탕으로 비정형 건축물의 전문가들과의 심층 면담을 수행함으로써 비정형 외피시스템의 공법과 문제점,

고려 사항을 도출하였다. 비정형 외피시스템 설계 및 시공시 고려해야 할 사항을 크게 4가지로 다음과 같이 정리하였다.

① 시공성을 고려한 비정형 형태의 설계가 되도록 하여야 한다.

BIM에 의한 시공방법은 현재 대형 건설사에서 검토 및 적용하고 있지만, 현실상 하도급에 의해 전문 건설업체들이 각 공사를 진행하여 효과적인 BIM 구현이 되고 있지 않고 있다. 더욱이 비정형 건축물의 경우 BIM 설계와 시공이 필요하지만 현재는 시공단계에서 설계에 부합하는 3D 모델을 만들기에 급급한 실정이다.

또한 대부분 국내 대형 설계사무소의 경우 비정형 건물의 3차원의 모델링 설계가 신입 사원이나 경력이 낮은 직원들을 중심으로 이루어지고 있다. 정확한 시공에 대한 디테일이나 공법 등에 대한 설계 경험부족과 비정형 형상의 지오메트리에 대한 이해 부족으로 3차원 모델링 결과물에 시공성이 고려되지 못하는 경우가 많다. 이에 시공 단계가 되어야 3차원 모델링과 실물 모형 구축을 통하여 설계된 내용을 검토하므로 설계 단계에서 시공성과 공법이 충분히 고려될 수 있도록 하여야 한다.

② 2방향 곡면을 정확히 구현할 수 있는 단위 패널 생산 기술이 필요하다.

비정형 건축물의 시공 품질을 향상하고 공기를 단축하며 시공비 상승의 문제점을 해결하기 위한 3D 디지털 설계에 의한 제작 기술을 확보하는 것이 중요하다. BMW WELT의 내부 패널에서 보는 바와 같이 곡면 단위 패널 자체는 완벽한 곡면 형성을 만들어 내지 못하고 있다. 따라서 설계상의 2방향 곡면을 실제 단위 패널에서 만들어낼 수 있는 기술 개발이 매우 중요하다.

③ 비정형 특징에 맞는 노출 콘크리트 거푸집을 사용하여야 한다.

비정형 콘크리트 외피 구축시 지오메트리 통제를 위한 가설재와 구조재의 성격을 동시에 가지며, 3차원 디지털 기술에 의해 설계, 제작, 설치되는 비정형 노출 콘크리트용 거푸집을 사용하여야 한다.

CNC 기술 등을 활용하여 연결 철근과 자유 곡면 거푸집을 공장에서 생산하여 기존의 목재 거푸집 공법(Section Form or Unit Form)보다 재료비에 대한 절감 효과와 시공정밀도가 우수한 거푸집을 사용하여야 한다.

④ 외피 시스템을 부위별로 구분하여 우수 처리와 방수가 용이한 재료, 공법, 유지관리 방안을 고려하여야 한다.

비정형 건축물은 지붕과 외벽의 구분이 없으므로 우수 처리 및 방수에 대한 충분한 사전 계획을 수립하고 설계에 반영하여 시공하여야 한다. 비정형 건축물의 외피 지붕이 경사도가 거의

없는 경우에는 우수처리, 방수, 재료의 신축팽창, 유지관리에 대한 부분이 충분히 고려되어야 한다.

지붕과 외벽의 경계부위는 우수를 받을 수 있는 트렌치 설치가 필요하며 트렌치를 경계로 하여 지붕과 외벽의 상세도를 구분하여야 한다. 또한 방수 하자가 발생할 경우에 정확히 보수 위치를 파악하고 하자를 처리할 수 있는 공간을 확보하여야 한다. 특히, 비정형 건축물의 외피 시스템은 비정형의 구조체의 형상위에 외피를 덧씌우는 형태를 띠우므로 비정형 구조체와 외피 시스템을 함께 구현할 수 있도록 고려하여야 한다.

5. 결론

비정형 형태의 디자인과 설계는 급속한 디지털 장비 및 기술을 바탕으로 새로운 건축 패러다임으로 등장하고 있다. 기존 시공 방법과 시스템으로는 시공비 절감, 공기 단축, 품질 확보 등에 한계가 있으며, 디지털 기술을 바탕으로 한 신공법 연구 및 개발이 요구된다. 비정형 외피 시스템 설계 및 시공 기준으로 3D 설계 및 제작을 통한 전반적인 시공과 시스템화된 공법 적용으로 공기단축, 공사비 절감, 유지관리의 효율화가 중요하다.

이에 본 연구는 국내외 비정형 외피시스템이 구현된 사례를 분석하여 문제점과 시사점 및 고려 사항을 도출하였다. 다양하게 적용할 수 있는 비정형 외피 시스템을 개발하여 비정형 건축의 문제점을 해결하고, 다양한 비정형 건축이 활성화되기 위해서는 반드시 새로운 기술 개발이 필요하다.

지속적으로 비정형 건축물의 시공성과 공기를 고려하여 최대의 공장 제작에 의한 최소한의 현장 조립이 되도록 하여야 한다. 비정형 건축 디자인을 만족시킴과 동시에 공사비 절감, 완벽한 방수 성능, 준공 후 유지관리 등이 용이한 경제적인 비정형 외피시스템을 구축하여야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011~2012년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

권순호 · 심현우 · 장현승 · 옥종호 (2010). “비정형 건축물 외장재의 패널 최적화를 위한 프로세스 개발에 관한 연구”. 정기학술발표대회 논문집, 제10권, 한국건설관리학회,

pp. 373~374

박정근 · 이명식 (2008). “비정형 건축에 있어서 BIM(Building Information Modeling)의 적용방안에 관한 연구”. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제28권 제1호, pp. 209~212

배경진 · 이상현 · 전한중 (2009). “비정형 건축물 구현을 위한 디지털 디자인 프로세스에 관한 연구”. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제29권 제1호, pp. 221~224

안지연 · 최정민 · 권순호 · 옥종호 (2009). “비정형 프로젝트 공사관리를 위한 증강현실 기반의 디지털 콘텐츠 개발”. 정기학술발표대회 논문집, 제9권, 한국건설관리학회, p. 1054

윤수원 · 박광호 · 최철호 · 진상운 (2009). “국내 대형 시공현장의 BIM 도입 사례 및 시사점: 디큐브 시티 프로젝트”. 대한건축학회, pp. 52~55

이강 (2008). “비정형 건축의 시공 문제점들”. 대한건축학회, pp. 63~65

최정민 · 권순호 · 고기웅 · 김대옥 · 옥종호 (2009). “3D 엔지니어링 설계 도구를 활용한 비정형 건축물의 외장제작 도면화 개발에 관한 연구”. 한국산학기술학회 춘계 학술발표논문집, pp. 565~570

황재식 (2008). “[특집] 인천 국제공항 교통센터를 중심으로 한 비정형 건축물의 설계에 관하여”. 대한건축학회지 제52권 제4호, pp. 18~23

Buswell, R.A., Thorpe, A, Soar, R.C., Gibb, A.GF (2008). “Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction.” Automation in Construction, 17, pp. 923~929

Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N., Pottmann, H., Pauly, M. (2010). “Paneling Architectural Freeform Surfaces. Proceedings of Association for Computing Machinery Transactions on Graphics.” 29(4), New York (USA): Association for Computing Machinery; 2010. Article 45.

Guzik, A. (2009). “Digital fabrication inspired design: Influence of fabrication parameters on a design process.” [master's thesis]. [London]:University College London, p. 71

Kloft, H. (2009). “Fabricating architecture(selected readings in digital design and manufacturing).” New York(USA): Rinceton Architectural Press, p. 111

- Ryu, H.G., Kim, S.J. (2012). "Case study of concrete surface design and construction method for freeform building based on BIM." Journal of the Korean Institute of Building Construction, 12(3), pp. 347~357
- Schodek, D., Bechthold, M., Griggs, K., Kao, K.M. (2005). "Steinberg M. Digital design and manufacturing CAD/CAM application in architecture and design." Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., p. 13

논문제출일: 2013.03.08

논문심사일: 2013.03.15

심사완료일: 2013.05.08

요 약

최근 건설 산업의 디지털화로 인하여 건축 디자인이 정형에서 자유로운 비정형 형태로 변화하고 있다. 특히, 국내에서는 최근 비정형 이 디자인 경향으로 도입되어 현상설계, 터키 등에서 설계 당선을 위한 디자인 요소로 많이 적용되고 있다. 그러나 기존의 정형 건축물 의 외벽공법을 비정형 건축물의 외피에 그대로 적용함으로써 누수 및 크랙 등 다양한 하자가 발생하고 있다. 이러한 문제점을 개선하고 공사기간과 공사비를 최소화할 수 있는 비정형 건축물의 설계와 시공이 새로운 기술로 도입되고 있다.

이에 본 연구는 비정형 외피시스템 구현을 위한 공법을 국내외 비정형 건축물의 외피시스템 사례 분석을 통하여 실증적으로 시사점을 도출하고 비정형 건축물 외피시스템의 설계와 시공시 고려해야 할 사항을 다음과 같이 제시하였다. 첫째, 시공성을 고려한 비정형 형태 의 설계가 되도록 하여야 한다. 둘째, 2방향 곡면을 정확히 구현할 수 있는 단위 패널 생산 기술의 개발이 필요하다. 셋째, 비정형 콘크 리트 외피용 노출 콘크리트 거푸집을 개발하여야 한다. 넷째, 외피 시스템을 부위별로 구분하여 우수처리와 방수를 위한 재료와 공법 특 성과 유지관리 방안을 고려하여야 한다.

키워드 : 비정형 건축물, 외피시스템, 공법, 사례 분석, 시공성