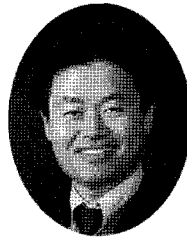


CDO : 건물 구조설계에서 컴퓨터 설계+최적화

CDO : Computational Design + Optimization in Building Practice



김종수*
Kim, Jong-Soo



김인호**
Kim, In Ho

이 기사는 OAP의 2005년 3호 The Arup Journal 에 게재된 내용을 OAP한국지사의 하승윤지사장과의 협의를 거쳐 국내에 널리 소개하는 의미에서 번역된 기사이다.

Chris Luebkehan, Kristina Shea

1. 서론

공학설계 분야는 컴퓨터를 통해 설계대상의 복잡성을 증가시키고 우리의 상상력과 이해력을 향상시키는 방향으로 계속해서 변화하고 있다. 오늘날의 국제적인 경쟁 시장에서 컴퓨터를 활용하는 새로운 방법을 탐구하고 개척하는 것이 '가능성의 경계'를 확장하고 혁신적인 디자인을 창조하고 실현하는 열쇠가 된다.

복잡한 형상을 가진 큰 규모의 건물 프로젝트를 수행하는 설계팀을 상상해보자. 다양하고 많은 설계 변수가 있을 때, 그것이 서로 다른 설계성능(design performance)에 미치는 영향을 항상 예측할 수 있는 것은 아니다. 설계팀은 새로운 디자인 접근법을 통해 고객, 건축 공학, 제작, 시공관련 변수, 요구 성능을 컴퓨터로 처리할 수 있는 최적화 모델을 창조하게 된다. Arup 네트워크를 통해 막대한 연산능력을 활용함으로써, 컴퓨터를 활용한 최적화 프로세스

를 통해 순식간에 수천 개의 설계안을 생성하고 평가하며 조정하게 된다. 결과물로서 최적화된 설계안의 집합 혹은 '점 구름(point cloud)'이 생성되고 이 설계안으로부터 선호되는 성능과 설계 관점을 통해 좋은 설계안을 선택하게 된다.

'성능공간(performance space)'를 탐색함으로써, 설계자의 '수평 사고(lateral thinking)¹⁾'를 증진시키고 설계안과 복잡한 성능들 간의 관계를 설명할 수 있다. 이 때, 변수의 변화에 따른 영향을 연구하기 위해 추가적인 노력을 거의 투여하지 않아도 최적화 모델을 일부 수정함으로써 최적화 프로세스를 반복할 수 있게 된다. 이를 통해, 설계자는 성능들 간의 최선 타협점(tradeoff)과 비용 영역(cost region)을 결정할 수 있고 또한 타 분야들과의 협의를 도울 수 있게 된다. 이러한 새로운 설계 프로세스를 통해, 보다 적은 시간과 비용으로 설계의 질을 향상시킬 수 있고 보다 높은 단계의 복잡성과 새로운 미학이 가능하게 된다.

* 한국셀 · 공간구조학회 회장,

(주)CS구조엔지니어링 대표이사/건축구조기술사

** 정회원, (주)CS구조엔지니어링 과장/공학박사

1) 어떤 문제를 해결하는 데 있어, 일정한 고정관념에서 벗어나 여러 각도에서 폭 넓게 생각하는 방법.

위에서 언급한 미래의 설계 프로세스 시나리오를 실현하기 위해서 Arup는 런던에 있는 FII(Foresight, Innovation and Incubation) 그룹에서 '컴퓨터 설계 + 최적화'(CDO: computational design + optimization)를 배양하고 있다. CDO는 설계 작업의 모든 측면들을 전산 모델로 정식화하여, 상호작용(interactive) 혹은 자동 반복연산 모두를 통해 기존의 연산법과 설계 프로세스를 통해서서는 도달할 수 없는 성능최적(feasible and performance-driven)의 설계안을 탐색할 수 있게 한다. CDO는 알고리즘 설계(algorithmic design), 3차원 매개변수 형상과 결합 형상(3-D parametric and associative geometry)²⁾, 성능기반 설계(performance-based design), 통합설계 툴(integrated design tools), 설계 자동화(design automation) 등을 포함하여 최근 출현된 설계연산(design computing) 기술에 기반하고 이들을 통합한다.

지난 3년에 걸친 CDO 배양기간의 주요 초점은 다음과 같은 질문을 던지는 데에 있다: "점점 복잡해지는 프로젝트에 대해 높은 품질의 공학적 솔루션을 요구하는 고객에게, 과연 CDO가 요구사항을 만족시키고 더 나아가 뛰어넘을 수 있는 경쟁력을 제공할 수 있는가?" 현재의 초점은 건물 프로젝트에서의 설계 작업을 공학적으로 다루는 데에 있다.

2. CDO의 주된 동기

자동차, 항공, 조선과 같은 산업에서 CDO는 성능이 중요한 응용분야에서 설계 프로세스의 핵심적인 요소이다. CDO를 통해 보다 가볍고 강하고 단단하며 값싼 자동차 본체, 비행기 날개, 배의 용골 등을 생산해왔다. 건설 및 기반시설 프로젝트에서 일부 영역, 즉 대부분이 상세설계 작업(예를 들면, 고층 건물의 철골과 RC부재의 크기 자동화)에만 적용되어 비용과 설계 시간을 절감하였다.

CDO에서 현재까지 Arup이 이룩한 성과와 미래 활용도를 조사하기 위해, 2004년 3월 한나절 동안 4

2) parametric geometry는 몇 개의 매개변수에 의해 형상을 표현하는 모델링 기법 혹은 모델. associative geometry는 구, 정육면체, 원통 등의 기본 도형들의 합집합, 교집합 등으로 형상을 표현하는 모델링 기법 및 모델.

개의 국제 본부와 여러 섹터에 걸친 53명의 대표자들이 참여하는 'Arup Explores' 이벤트가 열렸다. 여기서, 건물 프로젝트의 설계 초기단계부터 CDO를 적용함으로써 성능에 의해 주도된 건물형태의 변화에 영향을 끼칠 잠재력을 열었다고 대체적으로 의견이 모아졌다.

CDO의 전문지식을 축적하기 위한 동력으로, 발전된 경쟁력을 통한 시장장악, 향상된 품질에 대한 욕구, 설계시간과 비용의 절감, 보다 복잡해진 프로젝트, 여러 분야의 설계팀들 간 효율적인 협업화 등이 있다. 추가적으로, 현재 CDO의 업무영역과 전문지식을 확장하는 것이 시기적절하고 이는 하드웨어와 소프트웨어에서의 향상된 연산능력과 젊은 설계자들의 우수한 컴퓨터 활용능력에 의해 실현될 수 있다.

3. 연구와 실무의 연결

CDO의 영역은 광범위하여 수학, 연산학(operations), 건축, 항공우주 과학, 기계공학, 구조공학 등의 분야로 구성된다. 하지만, 건설산업에서 CDO의 연구와 실무 사이에 큰 격차가 존재한다.

이에 대한 원인은 방법, 도구, 사람에 관련된다. 첫째, 최적화법은 작은 규모의 벤치마크 작업에서만 검증될 뿐 모델링하기 어렵고 특정 프로젝트에 한정되는 실용적인 고려사항과 제한조건을 종종 포함하지 않는다. CDO를 통해 잠재적으로 효과를 볼 수 있는 최적화 작업은 5~25,000개의 변수, 1~1,000,000개의 설계 제한조건, 통합 가능한 수 만큼 설계 성능목표를 가지게 될 것이다.

또한, CDO가 가장 효과적인 영역(예를 들면, 설계 초기단계)과 컴퓨터 최적화 모델을 정식화하기가 쉬운 영역(예를 들면, 상세설계 단계)이 종종 일치하지 않는다.

둘째, CDO를 위한 현 상업용 소프트웨어는 대부분이 자동차 산업과 항공우주 과학산업을 위해 개발되어서 종종 건설산업의 요구(예를 들면, 특정 국가의 설계기준에 대한 고려)를 만족시키지 못하고 실정에 맞게 수정하거나 새로운 도구를 개발해야 한다. 이것은 구조부재의 단면 크기산정을 위한 몇몇 건설산업용 소프트웨어의 사례와 기계요소와 거의

유사한 개별적 건물요소에 다른 분야 소프트웨어를 적용한 사례를 제외하고는 일반적으로 사실이다.

마지막은 사람에 관련된 것으로, CDO가 사람들이 서로 다르게 생각하고 작업하기를 요구한다는 것이다. 설계 프로세스의 급격한 변화를 주는 것은 일반적으로 어렵다. CDO에서는, 설계팀에 의해 정식화된 최적화 모델에 기초하여 최적 변수값을 결정하는 프로세스에서 몇몇 설계변수를 연산과정에서 직접 제어하는 방법을 버리고, 설계작업을 정당화할 수 있는 설계변수, 제한조건, 성능 목표로 모델링하는 새로운 방법이 요구된다. 지금까지 CDO는 복잡성으로 인해 새로운 컴퓨터 프로세스 채택을 필요로 하는 프로젝트에서 매우 광범위하게 사용되어 왔다. 예를 들면, 2008년 북경 올림픽을 위한 수영경기장 프로젝트에서 총 25,000개의 철골단면 크기를 결정하고 설계기준을 검토하는 새로운 자동화 접근법이 없었으면 설계팀이 목표로 한 지붕무게에 근접한 실용적 설계안을 찾는 것이 불가능했을 것이다.

이와 같이, 연구와 실무 사이의 큰 격차를 해소하는 데에 도움을 주는 도전적 주제를 소개하는 것이 Arup FII그룹의 일이다. 고객에 대한 서비스를 향상시키고 확장하도록, 어떻게 CDO가 설계 프로세스에 잘 통합될 수 있는지 잘 이해하기 위해서는 실제 프로젝트에 적용하는 것이 최우선이다. 현재, Arup는 런던, 솔리힐 캠퍼스, 맨체스터, 홍콩, 디트로이트, 로스앤젤레스, 시드니 등의 지부에서 다양한 프로젝트에 CDO를 적용하고 있다.

설계 최적화 작업을 훌륭히 수행하기 위해서는, 설계변수가 존재하고 설계자가 설계 제한조건을 만족시키면서 성능을 향상시킬 수 있도록 성능에 대한 설계변수의 영향을 보다 잘 이해해야 한다. 설계변수의 수와 성능들 간의 타협점의 수는, 최적화 모델을 생성하고 통합화된 CDO툴을 찾거나 개발하며 최적화 연구를 수행하는 데에 소요되는 노력을 정당화할 수 있을 만큼의 양이 확보되어야 한다. 이러한 정당화 과정의 근거로는 급격히 변하는 설계변수의 개수 혹은 잠재적인 성능향상 정도 혹은 설계변수와 성능, 특히 여러 분야의 성능들이, 어떻게 상호작용하는 지에 대한 지식 등이 될 수 있다.

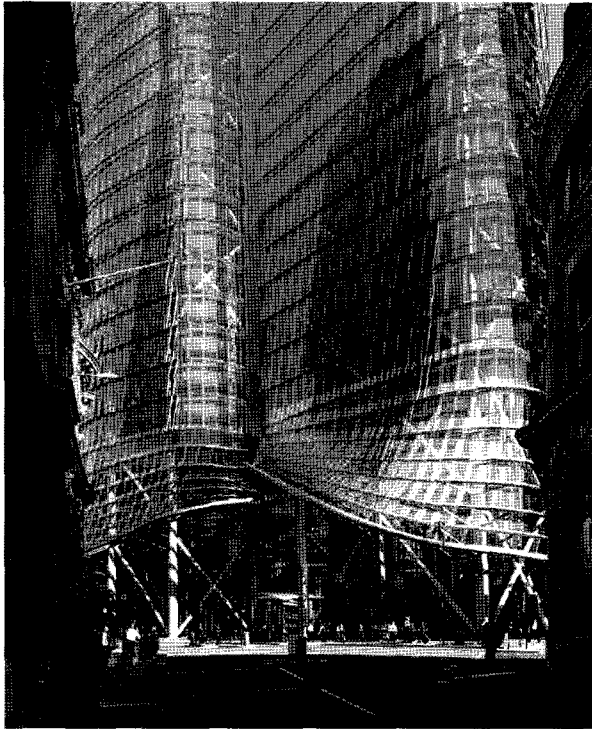
Arup 건물 프로젝트에서의 직접적인 프로젝트 작업과 효율적인 CDO 적용에 대한 많은 토론을 통해, 잠재력이 높은 다음의 3가지 분야가 출현하고 있다. : 구조(structure), 파사드(facade), 건물 물리화 응용(building physics applications).

4. 친적 구조 생성

구조 최적화에 관련해서, CDO는 런던에 있는 Bishopsgate Tower의 효율적이고 미학적인 가새시스템을 생성하는데 사용되었다. 이 타워는 Arup의 런던 건축그룹4(building London group 4)와 협업하고 건축사무소 Kohn Pedersen Fox Associates (International) PA (KPF)와 작업한 Deutsche Immobilien-Fonds AG(DIFA)을 위해 제안되었다<그림 1, 2>.



<그림 1> DIFA를 위해 제안된 Bishopsgate Tower의 런던 배치 렌더링



〈그림 2〉 Bishopsgate Tower의 복잡한 캐노피 출입구

이 타워는 약 307m높이의 곡선모양으로, 무작위로 배치된 가새로 구성된 철골 튜브 시스템 - 불규칙한 건물외피 주위를 감싸고 일정한 기울기를 가지며, 기둥 베이스부터 시작되어 건물높이까지 닿는 소용돌이(spiral)의 집합 - 으로 이루어졌다. 타워의 하부에는 가새가 많고 상부에는 적어지도록, 가새의 밀도가 변하게 설계되었다.

이를 위해 최적화 모델이 3×10^{48} 개의 설계안을 사용했는데, 이는 수작업에 의해 고려될 수 있는 설계안의 수에 비해 엄청나게 많은 양이다. 목표는 가새의 최대 축력과 페리미터 보의 최대 휨모멘트에 대한 구조 한계를 만족시키면서 가새 부재의 수를 최소화하는 것이다<그림 3>.

새로운 CDO툴은 건축가와 엔지니어가 설계안을 생성하고 해석하며 이해하기 위해 수행하는 공동의 수작업 과정을 자동화하기 위해 개발되었다. 여기에서 사용된 '탐색법(search method)'은 1961년에 처음 제안된 '패턴 탐색법'의 하나로서, 가새가 모두 다 배치된 상태에서 임의적으로 추가하거나 삭제함으로써 효율적인 가새 패턴으로 진화시킨다. '패턴 탐색법'은 기존의 수치적 최적화법이나 그래디언트

		BRACING FORCE LIMIT		
		7,000kN	8,500kN	10,000kN
BENDING LIMIT	750kN		262 bracing elements	216 bracing elements
	500kN	384 bracing elements	296 bracing elements	248 bracing elements
	400kN		303 bracing elements	

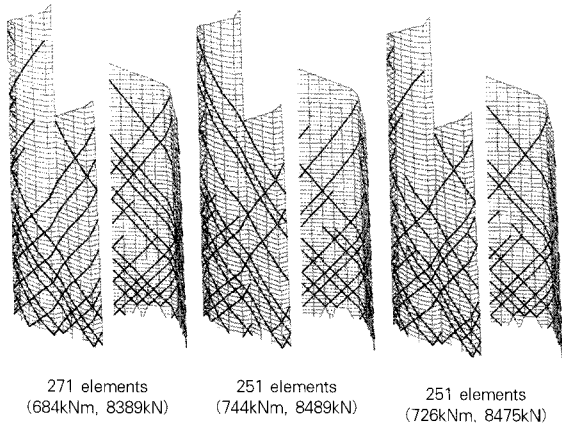
〈그림 3〉 Bishopsgate Tower를 위한 가새 패턴의 매개변수 연구

(gradient)에 기초한 최적화법을 통해서는 가능하지 않다. 이러한 인텔리전트(intelligent)한 '탐색법'은, 자동화된 반복해석 후 효율이 적은 부재를 제거하는 방식에 비해, 비슷한 구조 성능에 필요한 가새 부재의 개수를 줄여주기 때문에 보다 향상된 설계안을 제시해준다. 또한, 연산시간을 현저하게 줄여준다 : 기본적인 설계자동화에 14시간이 걸리는 것에 비해 3시간만이 소요된다.

탐색 절차와 초기 패턴의 확률적 변화에 무작위적 성분을 추가함으로써, 같은 과정으로부터 비슷한 구조 성능을 가지면서도 보다 다양한 설계안을 생성할 수 있게 해준다. 이를 통해, 설계팀이 CDO자체 안에서 모델링하기 어려운 미학적 요구에 따라 설계안을 선택할 수 있게 해준다. 설계팀이 어느 설계성능 영역에서 가새 패턴과 구조 한계 사이 최선의 타협점이 생성되는 지 판단할 수 있도록, 최소 가새 부재 개수에 대한 구조 한계의 영향을 살펴보기 위한 '매개변수 연구(parametric study)'를 수행하였다<그림 3>.

이 연구결과는 생성된 가새 형상과 새로운 설계 최적화 프로세스에 모두 열정적으로 관심이 있는 건축가에 제공되었다. 최종 가새 형상은 심의용으로 2005년 6월 런던 자치체에 제출되었다<그림 4>.

심의를 위해, 최종 가새 패턴은 건물 출입구에서 독서환경을 향상시키도록 약간 수정되었다. 설계안이



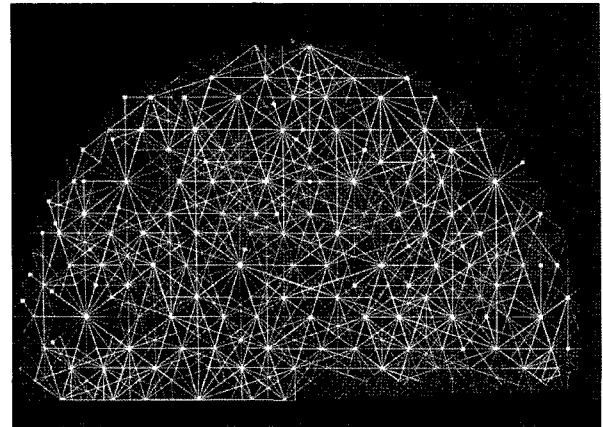
〈그림 4〉 Bishopsgate Tower의 가새 시스템을 위한 적용 설계안 계획

발전됨에 따라, 가새 패턴의 발전 가능성을 조사하고 또 같은 프로세스 안에서 가새 형상에 대한 위의 연구에 '철골부재 크기에 따른 구조체 전체성능의 변화 효과'를 통합하기 위해, CDO틀이 다시 사용될 수 있다. 이렇게 수정되고 확장된 탐색법을 잘 적용하면, 실제 건물 프로젝트에서 기존의 단면 최적화를 뛰어 넘어 구조 최적화를 효율적으로 적용하는데 가치 있는 사례 연구(case study)를 제공할 것이다.

구조 최적화 분야에서 다른 CDO 프로젝트에는 Rhino³⁾ CDO toolkit 개발하여 이것을 경기장 지붕을 위한 철골 스페이스 프레임에 적용하는 것을 포함하는데, 모두 CAD틀과 통합설계 틀인 GSA 사이의 자동화 개발에 관련된다. 첫 번째 프로젝트는 Rhino와 GSA를 연결하여 새로운 골조 구조를 진화시키는 것이고 두 번째 프로젝트는 CATIA⁴⁾의 매개변수 모델(parametric model)과 GSA를 연결하여 설계규준에 따라 철골 스페이스 프레임 지붕에 대한 단면을 최적화하는 것이다. CAD틀과 GSA의 통합을 통해 CAD환경에서 빠른 구조적 피드백을 잡

3) 라이노(Rhino), 혹은 라이노3D(Rhino 3D)는 미국의 Robert McNeel & Association사에서 개발한 강력한 3차원 Surface (NURBS) 모델링 도구로 개발된 Software로서, CAD / CAM, 산업/공업 디자인, 제품 디자인, 애니메이션등 다양한 분야에서 사용되고 있다.

4) 카티아(CATIA)는 프랑스 항공기 제조회사인 Dassult Aviation에서 개발된 대화식 그래픽 소프트웨어로서, 크라이슬러, BMW, 포드, 혼다, 메르세데스-벤츠, 기아 자동차, 가와사키, 대우 자동차, 보잉 등의 세계적 자동차와 항공기 관련 회사에서 항공기, 자동차, 기계, 금형, 전기, 전자 등의 디자인 툴로 현재 널리 사용되고 있다.



〈그림 5〉 진화구조 최적화(ESO)와 공간 채우기를 조합함으로써 제안된 구조물에 대해 복잡한 아크릴 튜브 네트워크 생성. 색은 구조 부식 프로세스의 반복계산 과정을 보여준다.

재적으로 얻을 수 있을 뿐만 아니라 CAD형상으로부터 자동적으로 GSA모델을 생성할 수 있고 형상에 구조 속성을 첨부하는 것이 가능하게 된다.

Rhino CDO toolkit은 독특한 아크릴 튜브 네트워크로 구성된 시설물로부터 유래된다. 사용된 접근법은 3차원 공간 채움 알고리즘인 '공간 타일채우기 (spatial tiling)'과 진화 구조 최적화로서 성능에 따른 '구조 부식법(structural erosion method)'를 조합하였다. '공간 채우기'는 그다지 효율적인 구조를 생성하지 못 하기 때문에, 강도, 좌굴, 변위와 같은 제한조건을 검토하는 반면 힘과 각 부재의 사용에 따른 주어진 '공간 채우기'안에 최적의 부재 네트워크를 찾는 것이 목적이다. 수천 개의 부재로 구성된 초기 설계안은 '가장 효율이 높은 500~800개의 부재와 과 지점의 네트워크'로 부식되게 된다<그림 5>.

5. 곡면을 패널화 하기

CDO의 다른 전망 분야는 곡면을 패널화하여 표준화하는 작업이다. 일반적으로 자유형태 곡면을 삼각형이나 사각형의 평평하거나 부분적으로 휘어진 패널로 패널화하기 위해서 모든 패널들이 서로 다른 치수를 가져야 한다. 이러한 패널들은 최신 CAD/CAM기술로 제조하는 것이 가능하나 제작 및 시공 비용이 엄청나게 커지게 된다.

CDO는 극단적인 자유형태 곡면과 과-표준화(over-

rationalization) 사이의 스펙트럼을 탐색하여 건물 형태 표준화에 대한 정보를 얻고 협상하는 데에 사용된다. 다음 두 가지 시나리오에 대해, 예제 곡면을 사용해서 개념 검증을 위한 연구가 수행되었다:

- 1) 바깥쪽 면은 바닥판에 연결되지 않는다는 가정 하에 곡면 어느 곳에서도 패널 접합부가 허용된다
- 2) 패널 접합부는 바닥판 높이에 남아 있어야 한다

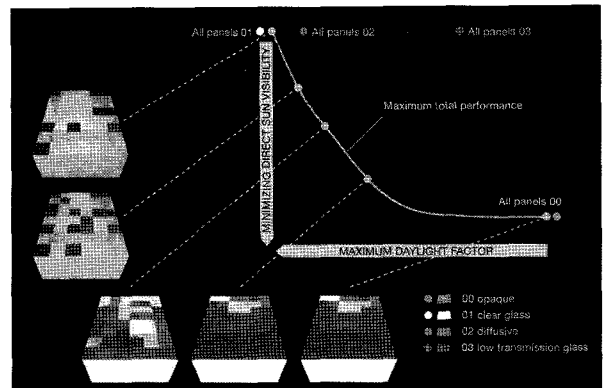
설계 목적 중에는 평평한 패널만을 사용하고 패널 형상을 반복하여 허용오차 내에서 본래의 곡면에 맞추는 것이 포함된다. 이러한 목적이 반영된 CDO들은 Rhino 플러그인 형태로 개발되어 메쉬(mesh)로 정의된 초기 패널화 조건이 주어지면 Rhino에서 정의된 어떠한 곡면에 대해서도 사용될 수 있다. 또한, 정의된 기하 구속조건을 유지하면서 패널들 사이의 기하적 균일성을 향상시키기 위해, 통계적 최적화법인 '모의 단련법(simulated annealing)'을 사용하여 15분 동안에 10,000회의 반복계산을 수행한다. CDO는 위의 두 가지 시나리오에 적용되어 각각 10%, 18%개의 패널 종류의 수를 감소시키는데 성공했다. 곡면 맞춤에 대한 허용오차 값을 조정함으로써 곡면 표준화를 조절할 수 있다. 곡면 건물형상에 대한 건축가의 욕구가 증대해짐에 따라, CDO를 통해 건축가의 설계의도를 보존하면서도 보다 비용 효율적인 패널화가 가능하게 할 수 있다.

6. 건물 외피 최적화

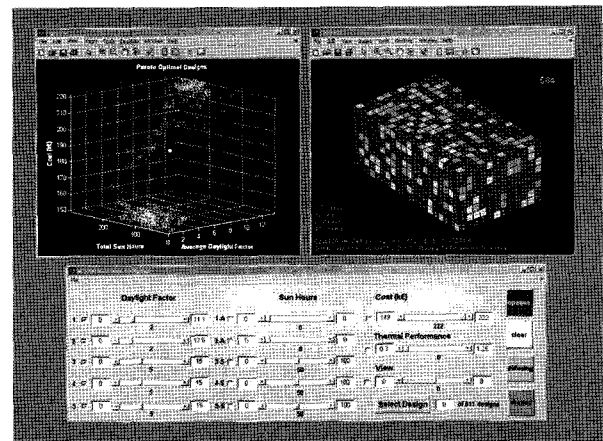
건물 물리학으로 설계하는 것에 대한, Arup의 증폭된 관심과 전문지식은 CDO에 연결된다. 여기서의 목적은 빛과 에너지 기준에 따라 최적화된 건물 외피 설계를 도와주는 새로운 CDO들을 개발하는 것이다<그림 6>.

예제로서, CDO는 파리에 있는 미디어 센터에 관련된 시나리오를 위해 최적화된 설계안을 생성하는 데에 사용되었는데, 그 건물에 포함된 갤러리 공간, 회의실, 응접실, 사무실 등은 모두 다른 채광 요구조건을 가지고 있다. 파사드는 4개의 타입(opaque, clear, diffused, shaded)으로부터 선택된 496개의 패널(설

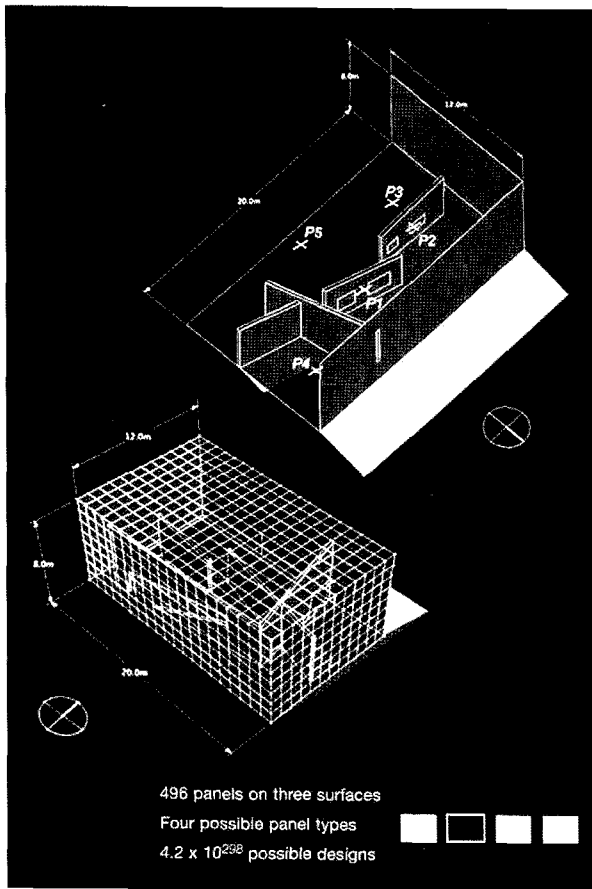
계변수)로 구성되어, 총 4.2×10^{298} 개의 설계안이 조합될 수 있다<그림 8>. 내부 벽은 천장까지 닿지 않아서 빛이 공간들 사이에 통과할 수 있다. 설계 성능은 건물 내의 5개 측정지점에서 일광 요소(daylight factor)와 일조 시간(sun hour), 두 점에서의 전망, 전체 공간에서의 비용과 열 성능 등 총 15개의 성능 목적에 대해 평가되어 결정된다. 최적화는 다목적(multi-objective) '개미 식민지(ant colony)' 최적화법을 사용해서 수행된다. 하나의 최적화 프로세스의 결과는 이 프로젝트를 위해 개발된 그래픽 환경을 사용하여 열람할 수 있는 '파레토 최적(Pareto optimal)' - 즉, 어느 한 성능의 손실이 없는 다른 성능의 향상이 없다 - 설계안의 집합 혹은 '점 구름(point cloud)'로 구성된다. 성능 목적에 미리 설정된 가중치는 없고 최적 집합안의 모든 설계안들은 어떤 특정 관점에서 보면 '최적' 설계안이 된다.



<그림 6> 2개 공간이 있는 시나리오에 대한 일광요소와 일조시간 사이의 타협점 탐색



<그림 7> 여러 설계성능 목표의 균형을 맞추기 위한 건물외피의 조정



<그림 8> 미디어 센터 다목적홀의 패널화된 파사드를 최적화하기 위한 시나리오

성능들 간 선호사항(preference)을 미리 설정함으로써, 설계자는 조합된 목적에 가장 잘 부합하고 균형을 맞출 수 있도록 설계안을 조정할 수 있다<그

림 6, 7>. 이를 위한 많은 노력들이 있는데, 미학 모델의 확장과 에너지와 비용 모델의 확장이 이에 속한다. 외벽 패널 배치의 변화뿐만 아니라 건물 외피의 형태 변화를 허용함으로써 더 좋은 설계안을 얻을 수 있을 것이다.

7. CDO의 미래

CDO의 전문지식을 확장하기 위해서 모델링, 방법, 툴, 사람을 성공적으로 조합해야 한다. CDO를 실무에 적용하는 것에 대한 최근의 성과는, 학계에 기여했을 뿐만 아니라 Arup의 기술적 수준을 확장시켰다. 현재까지 실현된 장점으로는 설계자가 현재할 수 있는 것의 확장, 설계 이해력 증진, 설계 품질의 향상, 시간 및 비용의 절감 등을 들 수 있다. 설계시간 절감은 CDO의 설계 자동화요소를 통해 실현된다.

CDO를 성공적으로 적용하기 위해서는, 설계자가 고려하고자 하는 설계안과 컴퓨터 방법 및 툴을 이용할 수 있는 새로운 설계 프로세스를 포용하는 관점 모두에서 고정관념을 벗어나야 한다. Arup에서 잠재적으로 이득을 창출할 것으로 생각되는 또 다른 CDO 적용 방안 중에는, CDO모델 안에 여러 분야의 관점을 통합하는 것과 CDO를 초기 설계단계에 적용하여 비슷한 생각을 가지고 있는 건축가 혹은 고객과의 협업을 통해 건물 형태 최적화 영역을 확장하는 것이 포함된다.