



StrAuto를 활용한 철근콘크리트 건물의 구조설계 최적화

Structural Optimization of Reinforced Concrete Buildings by StrAuto

최현철 Hunchul Choi
(주)창소프트 아이앤아이 대표이사

1. 머리말

겹겹이 하중이 쌓이는 고층 건물 설계에서 수직부재의 하중에 대한 성능비를 최적화하는 것은 단순히 물량과 공사비를 줄이는 것 뿐만 아니라 보다 안정적이고 합리적인 구조물을 설계하려는 성실한 엔지니어의 소박한 바람이다. 기존의 수동 모델링 및 해석 방법으로는 대체로 이상적이라고 여겨지는 높이에서 단면과 강도를 변경하며 몇개의 대안을 비교할 수밖에 없었다.

본고에서는 파라미터를 다양하게 변경하면서 실시간 해석이 가능한 StrAuto를 활용한 고층건물 설계 최적화 사례를 소개하고자 한다. 특히, 해외 초고층 건물에 우리 기술을 적용한 것으로, 기본설계 완료 이후 실시설계 과정에서 Value Engineering(VE)을 수행한 사례들이다. StrAuto는 구조해석모델의 파라메트릭 모델링 기능을 지원하는 컴포넌트들과 SAP2000, ETABS 등의 상용 구조해석 패키지와 연동하여 이들을 컨트롤하는 컴포넌트들로 구성된다. 즉, StrAuto의 핵심 기술은 파라메트릭 기법에 의해 물리적 형상을 실시간 변경 가능한 해석모델과 SAP2000, ETABS 등의 상용 구조해석 패키지를 연동시키는 API에 있다. 외부의 구조해석 패키지와 연동하여 구조해석을 자동으로 수행하고, 그 결과를 실시간으로 평가하며 반복해석을 통한 최적화를 수행한다<그림 1>.

StrAuto를 활용한 최적설계는 층간변위 제어식을 정밀하게 설계하고 이로부터 최적설계함수를 유도하는 표준적인 최적설계와 근본적으로 다른 접근방식에서 출발한다. 해석 프로그램에 직접 구조해석모델 정보를 전송하고, 해석 기능을 직접 관리하여 구조해석의 자동화를 가능하게 한다. 파라미터 세트를 변경하면서 생성되는 수많은 대안을 반복적으로 해석하는 과정을 자동화하여 수천, 수만 번이라도 다양한 조합의 대안들을 해석할 수 있다. 그리고 평가된 해석결과가 특정 목표치에 도달할 때까지 새로운 파라미터 조합을 생성함으로써 해석모델을 진화시킨다. 따라서 StrAuto에 의한 최적설계는 근본적으로 수많은 대안들을 시행착오 방식으로 평가하고 그 평가 결과에 근거해 형상들을 스스로 진화시킴으로써 형상 최적

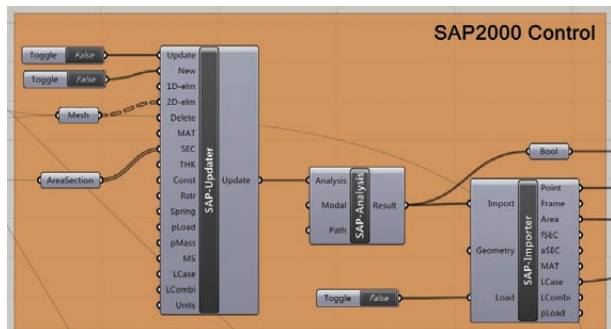


그림 1. StrAuto의 SAP2000 API Control 컴포넌트

안을 도출하는 방식이다. 즉 해석모델의 생성에만 수 시간 또는 수 일이 소요되던 물리적 제약에서 벗어나 수많은 형상 대안을 테스트하고 나아가 이를 진화적으로 수정하는 것이 가능하다.

2. 기둥 최적화

대상 건물은 모스크바 시티가든 개발지구 17, 18 공구에 지어지는 오피스와 주거 건물로, 철근콘크리트 구조를 채택한 높이 551m, 지상 62층 초고층 타워이다. 이미 1차 구조설계가 완료된 상태에서 VE 최적설계를 통해 비용 절감을 이루는 것이 본 프로젝트의 목표였다(그림 2, 3). 특히 기둥 단면적을 최소화하고 콘크리트 강도를 낮춤으로써 부재 물량·비용을 절감하는데 중점을 두어 예비 최적설계 등의 사전 테스트를 거쳐 최적화를 수행하였다.

우선 기본계획의 구조해석 결과로부터 유사한 거동을 보이는 기둥들을 평면에서 그룹으로 나누고, 기둥 그룹을 기준으로 가능한 단면형상 대안들을 마련하였으며, 강도별로 단면형상에 대한 전산최적설계를 수행하였다. 기둥 그룹별로 도출한 최적설계 결과를 기본계획의 수직조닝을 참고하여 비교 검토하면서 모든 기둥 그룹이 콘크리트 강도에 대해 동일한 수직 조닝을 이루도록 단면을 결정하였고, 최종 결정된 기둥의 단면형상과 강도를 해석모델에 반영하여 모델의 안전성을 평가하였다.

대상 건물의 기둥은 X축 방향으로 7.7m/11.94 m, Y

축 방향으로 9.1m 간격으로 배치되어 있다. 원 구조설계안에서는 평면상 각각 다른 단면형상을 적용한 세 가지 기둥 그룹이 존재했다. 최적설계를 위해 기둥의 실제 거동에 따라 이를 다섯 개 그룹으로 세분하였다. 특히 다른 거동을 보이는 모서리 기둥을 별도의 그룹으로 설정하였고, 각 그룹별로 각각 단면형상 대안 그룹을 생성하였다.

본 프로젝트에서는 모두 사각 기둥을 사용하였으므로 단면형상의 정의구간은 원 구조설계안에 준하여 건축계획이 허용하는 한의 범위까지 단면의 가로, 세로 길이를 100 mm씩 변경할 수 있도록 설정하였다(그림 4).

콘크리트 강도는 1차 구조설계에 근거, 5가지 등급으로 한정하고 강도별로 각 층의 해당 부재력을 만족하는 최소 단면크기를 개발된 StrAuto 컴포넌트를 이용해 산출한다. (그림 4)에서 보는 것처럼 대안으로 주어진 단면으로는 저층부에 저강도의 기둥을 사용할 수 없음을 알 수 있다.

이후의 최적설계는 StrAuto에 의한 전산최적 결과에 근거해 설계자의 판단으로 수직 강도와 단면의 변화를 조절하는 과정이다. 즉 5가지 강도 등급에 대한 최소 기둥 단면 정보를 비교 분석하여 경계층에서 해당 강도에 대한 최적 단면형상이 동일하거나 가장 유사한 것을 선택하고, 시공 효율을 검토하여 기둥에 대한 수직 조닝을 결정하였다. 특히 C5그룹의 34~40층은 기본 설계에 적용된 단면이 문제가 있음을 보여주고 있다(표 1, 그림 5).



그림 2. 모스크바 시티가든 Office+Residence

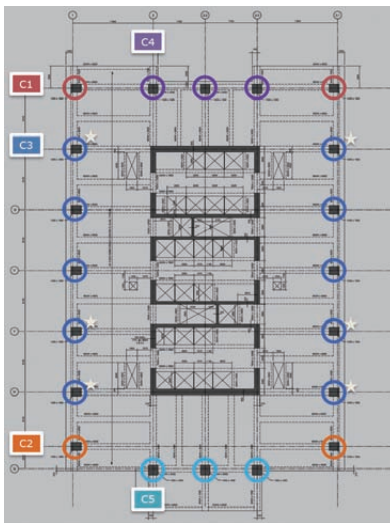


그림 3. 기둥 배치 평면

Reinforcement Ratio	4%				5%				6%				NG		
	Strength		Strength		Strength		Strength		Strength		Strength				
	B80	B70	B60	B50	B40	B80	B70	B60	B50	B40	B80	B70	B60	B50	B40
10F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
11F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
12F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
13F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
14F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
15F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
16F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
17F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
18F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
19F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
20F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
21F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
22F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
23F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
24F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
25F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
27F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
28F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
29F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
30F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
31F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
32F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
33F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
34F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
35F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
36F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
37F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
38F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
39F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
40F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
41F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
42F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
43F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
44F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
45F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
46F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
47F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
48F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
49F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
50F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
51F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
52F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
53F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
54F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
55F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
56F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
57F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
58F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
59F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
60F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
61F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
62F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

그림 4. 기둥별 층별 강도별 최적 단면 산출

표 1. 기둥 단면 최적화 결과

Floors	C1		C2		C3		C4		C5	
	As-is	VE	As-is	VE	As-is	VE	As-is	VE	As-is	VE
L57-RF		700 X 700		700 X 700		700 X 700		700 X 700		700 X 700
L54-L56										
L45-L53	900 X 900	800 X 800	900 X 900	800 X 800	900 X 900	800 X 800	900 X 900	800 X 800	900 X 900	900 X 900
L41-L44		900 X 900		900 X 900		900 X 900		900 X 900		
L34-L40										1,000 X 1,000
L27-L33	1,200 X 1,500	1,200 X 1,200	1,200 X 1,500	1,200 X 1,200	1,200 X 1,500	1,200 X 1,200	1,400 X 1,400	1,200 X 1,200	1,400 X 1,400	1,400 X 1,400
L15-L26		1,200 X 1,500		1,200 X 1,500		1,200 X 1,500		1,400 X 1,400		1,400 X 1,400
L09-L14		1,200 X 1,900		1,200 X 2,000		1,200 X 2,000		1,500 X 1,500		1,700 X 1,700
L04-L08	1,200 X 2,500	1,200 X 2,100	1,200 X 2,500	1,200 X 2,200	1,200 X 2,500	1,200 X 2,200	1,800 X 1,800	1,600 X 1,600	1,800 X 1,800	1,800 X 1,800
L00-L03		1,200 X 300		1,200 X 2,400		1,200 X 2,400		1,700 X 1,700		1,800 X 1,800
BASE-B1		1,200 X 2,400		1,200 X 2,500		1,200 X 2,500				

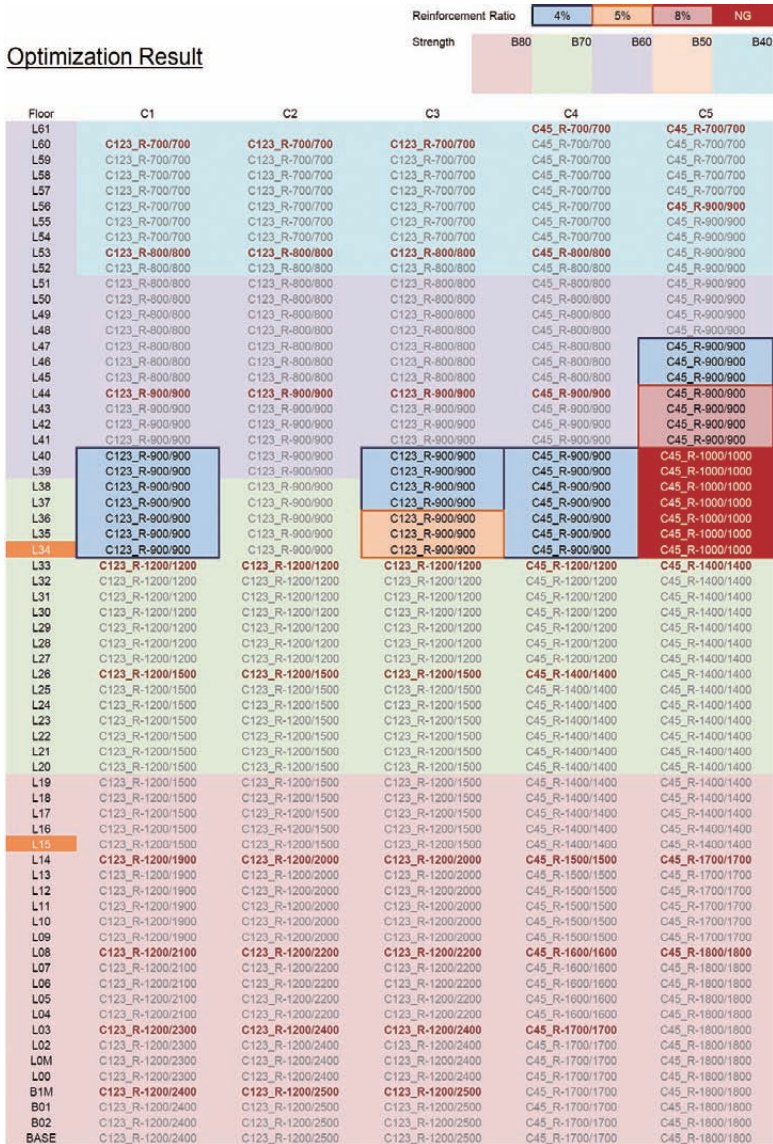


그림 5. 기둥 수직 조닝 최적화 결과

최적화 결과 부재 부피 및 중량은 원안의 88.73% 수준으로 감소하였으며, 비용은 원안의 87.19%로 약 13%의 비용 절감 효과를 달성하였다. 기둥 최적화 프로세스는 현업 프로젝트를 수행하는 과정에서 특정 부재의 최적설계만을 위해 집중적으로 개발된 것이므로 구조적 관점에서 미시적이고 수학적 관점에 치중하였지만, 현업에의 적용을 위한 실용적 관점에서 알고리즘 및 프로세스를 강도 높게 검증, 보완한 결과물로 차후 발전적 적용 및 개발이 가능할 것으로 기대한다.

3. 벽체 최적화

대상 건물은 싱가포르에 지어지는 철근콘크리트 구조의 53층 초고층 주거 건물이다. 마리나 베이 중심지에 53층의 주거타워와 24층의 오피스, 7층의 포디엄으로 이루어진 복합 건물로,



그림 6. UIC 프로젝트(대상: 우측 높은 타워)

주거타워를 최적화 대상으로 선정하였다. 구조적인 성능에 대한 요구사항을 만족하면서 코어 벽체의 물량을 줄이는 것을 목표로 코어 벽체의 두께와 콘크리트 강도를 변화시키면서 대안을 검토하였다(그림 6).

주거 타워는 두 개의 코어를 가지고 있으며, 저층부에서는 하나의 평면으로 붙어있고, 고층부에서는 두 개의 평면으로 나누어진다. 코어 벽체의 물량은 전체 건물의 약 25.7%로, X방향과 Y방향의 코어를 나누어 벽 두께가 다르게 설정되어 있으며, 대안 평가에서도 이를 고려하여 두 방향의 벽체 두께를 다르게 변화시켰다(그림 7).

대안 평가를 위해 단계별로 모듈을 설정하여 최종 비교자료의 기준으로 삼았다. '모듈 1'은 기본계획안으로 두 개의 코어 벽체 두께 준을 가지는 모듈이다. 벽체의 강도는 바닥부터 최고층까지 동일한 강도가 적용되었다. '모듈 2'는 StrAuto를 활용하여 분석한 결과 중 최적 대안을 선정한 것으로 이상적인 결과를 보여준다. 모두 8개의 벽체 두께 준과 3개의 강도 준으로 구성하였다. '모듈 3'은 '모듈 2'의 결과를 현실적으로 가능한 방향으로 수정한 것이다. 네 개의 벽체 두께 준과 두 개의 강도 준으로 이루어졌으며, 실시 설계에 적용하였다(그림 8).

벽체 두께에 대한 파라미터는 다음과 같이 설정되었다. X방향으로는 1,000 mm부터 시작하여 100 mm씩 줄이면서 300 mm까지 모두 8개의 준으로 구성하고, Y방향으로는 800 mm부터 시작하여 X방향의 두께가 달라지는 것과 같은 위치에서 100 mm씩 줄이면서 300 mm까지 모두 6개의 준으로 구성하였다(그림 9).

'모듈 1'은 저층부터 고층까지 모두 FCU60을 적용하였으나 어느 정도 이상의 층에서는 FCU60이 필요 이상의 고강도이기 때문에 FCU60, FCU40, FCU35의 세 개의

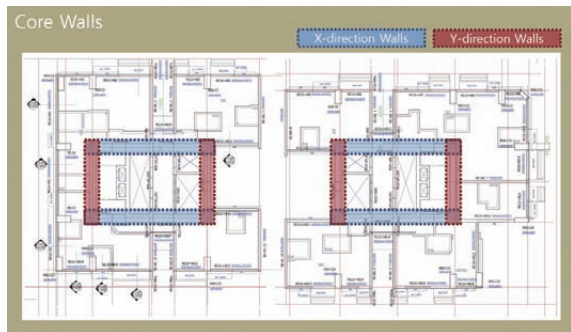


그림 7. 코어 벽체 위치 및 방향에 따른 그림

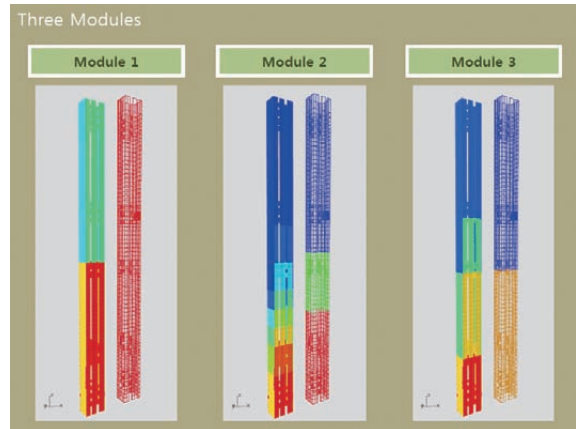


그림 8. 단계별 진행에 따른 모듈

준으로 구성하였고, 나누어지는 위치는 4층부터 40층까지 6개 층마다 바뀔 수 있도록 설정하였다(그림 10)

(그림 11)의 1단계 해석 결과는 최대 변위를 나타낸 것으로 세로 방향은 코어 벽체 두께의 변화를, 가로 방향은 코어 벽체 강도의 변화를 나타낸다. 즉, 케이스별로 변

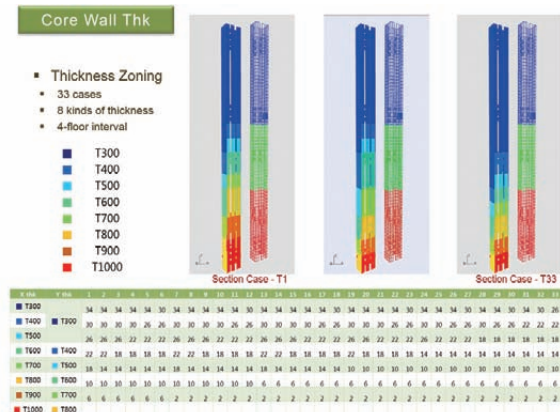


그림 9. 코어 벽체 두께 변화(1,000 mm > 300 mm)

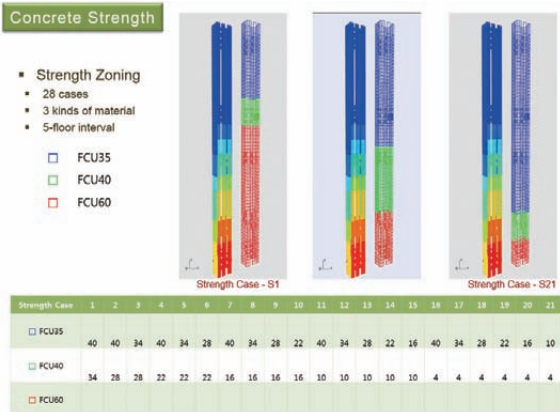


그림 10. 코어 벽체 강도 변화

