

IMD를 이용한 3차원 프레임의 지진 응답 해석(주파수 영역)

LUSAS 버전:	23.0
소프트웨어 제품:	모든 버전 (LT 버전 제외)
제품 옵션:	없음.
참고: 이 예제는 LUSAS Teaching and Training Version으로는 사용할 수 없습니다.	

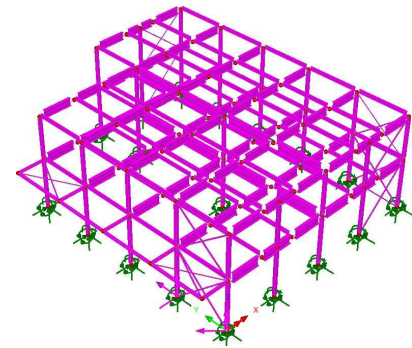
개요

이 예제에서는 2층 3차원 프레임의
스펙트럴 응답을 살펴봅니다.

구조물의 형상은 와이어프레임(스틱)
형태로 단순화했으며, 구조물의 각
부재는 라인 형상으로만 표현했습니다.

모델의 실제 형상 이미지는 오른쪽에
표시되어 있습니다.

단위는 N, m, kg, s, C를 사용합니다.



목표

이 해석에서는 CQC 조합에 의한 축력 및 휨모멘트 다이어그램을 확인합니다.

키워드

3D, Frame, Seismic, Spectral, Response, Mass Participation, Interactive Modal Dynamics, Excitation, Eigenvalue, CQC Combination.

관련 파일

관련 파일은 LUSAS 웹사이트에서 다운로드할 수 있습니다.

- ❑ 3D_frame.lvb는 이후 작업의 기초가 되는 초기 모델을 생성합니다.
- ❑ 3D_frame_spectrum_EC8.lvb는 유로코드 8에 따른 대표적인 스펙트럼 곡선을 정의합니다.

설명

동적 해석에 사용하는 메쉬는 정적 응력 해석에 사용하는 것과 다소 차이가 있습니다. 정적 해석에서는 경험이 쌓이면 높은 응력이 발생할 위치를 예측하는 것이 그리 어렵지 않습니다. 이러한 예측을 바탕으로 응력이 높은 위치에는 조밀한 메쉬를, 덜 중요한 위치에는 성긴 메쉬를 적용하는 메시 전략을 세울 수 있습니다. 반면 동적 해석에서는 강성과 관성력의 상호작용으로 인해 정적 해석에서 예상되는 것과는 매우 다른 변형 형상이 나타날 수 있습니다.

동적 해석에서는 강성뿐 아니라 질량 분포도 함께 고려해야 합니다. 일반적으로 동적 해석에 가장 적합한 전략은 구조물 전체에 균일한 메쉬를 적용하되, 강성이 큰 영역에는 더 성긴 메쉬를 사용하는 것입니다. 반대로 유연한 영역이나 무거운 질량이 위치한 영역에는 더 조밀한 메쉬를 적용할 수 있습니다.

이 예제에서는 지진 응답에 대한 건물의 전체 거동을 다룹니다. 이 해석에서는 저차 주파수가 지배적이므로 비교적 성긴 메쉬로도 충분합니다. 고차 주파수가 중요하거나 개별 보·기둥의 패널 모드에 의한 국부 응답을 고려해야 하는 경우에는 요소 수를 늘린 메쉬로 다시 구성해야 합니다.

스펙트럴 응답 해석은 다음 두 단계로 나뉘어 수행됩니다.

1. 먼저 고유진동수 해석을 수행합니다. 이 예제에서는 구조물의 처음 30개 고유 진동 모드를 계산하는 데 사용됩니다. 이때 얻어진 고유값, 주파수, 고유벡터(모드 형상)는 저장되어 이후의 응답 스펙트럼 해석에 사용됩니다. 스펙트럼 해석을 수행하려면 모드가 질량에 대해 정규화되어 있어야 합니다. 고유값 해석으로 고유진동수는 얻을 수 있지만, 변위나 모멘트의 크기에 관한 정보는 정량적이지 않습니다.
2. 다음으로 Interactive Modal Dynamics(IMD) 기능을 이용해 결과 처리 과정에서 대화형으로 응답 스펙트럼 계산을 수행합니다. 이는 LUSAS Solver에서 비대화형으로 응답 스펙트럼 해석을 수행하는 것을 대신하는 방법입니다.

응답 스펙트럼 해석에서는 구조물의 지점에 가진이 작용합니다. 이 예제에서는 이를 지진 하중의 영향으로 가정하지만, 다른 지점의 움직임도 고려할 수 있습니다. 가진은 주기 대 가속도 관계로 정의되는 스펙트럼 곡선으로 지정합니다. 감쇠는 스펙트럼 곡선에 암묵적으로 포함되어 있으며, 이 단계에서 별도로 지정할 수도 있습니다.

고유치 해석에서 참여 계수는 각 모드가 가진에 대해 구조물 응답에 기여하는 정도를 나타냅니다. 스펙트럼 해석에서는 모드 조합을 계산하여 최악의 경우에 해당하는 변위·모멘트 포락선을 얻을 수 있습니다.

모델링

LUSAS 모델러 실행하기

LUSAS 모델러 실행 방법에 대한 자세한 내용은 Introduction to LUSAS Worked Examples 문서의 Running LUSAS Modeller 항목을 참고하십시오.

참고. 이 예제는 새 LUSAS 모델러 세션을 시작했다고 가정하고 작성되었습니다.

기존 모델러 세션에서 이어서 진행하는 경우 **File>New** 메뉴 명령을 선택해 새 모델 파일을 시작합니다. 저장되지 않은 데이터가 있으면 모델러가 알려주며, New Model 대화상자가 표시됩니다.

새 모델 만들기

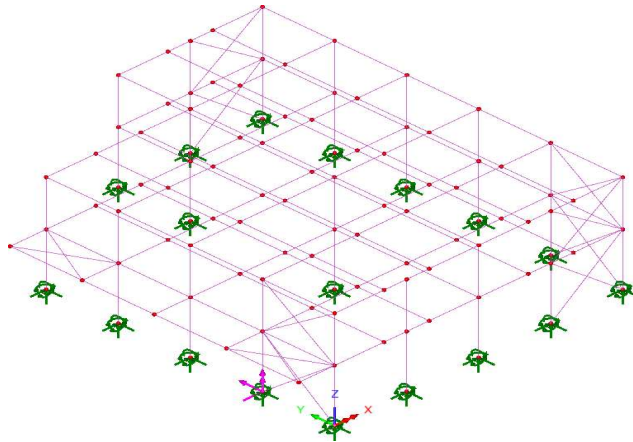
File > New...

- 파일 이름을 **3D_frame**으로 입력합니다.
- 기본값인 **User-defined** 작업 폴더를 사용합니다.
- **Analysis category**가 **3D**로 설정되어 있는지 확인합니다.
- OK 버튼을 클릭합니다.

참고. 스크립트를 실행해 초기 모델을 구축할 예정이라면 다른 새 모델 정보를 추가로 입력할 필요가 없습니다. 스크립트의 내용이 다른 설정을 모두 덮어쓰기 때문입니다.

File > Script > Run Script... 

- 모델을 만들려면, 미리 다운로드한 **3D_frame.lvb** 파일을 엽니다.



Isometric 버튼을 선택해 프레임을 3차원으로 봅니다.



Fleshing 버튼을 켜고 끄면 강재 부재의 배치를 볼 수 있습니다.

이제 고유진동수를 추출하는 데 필요한 컨트롤을 정의하여 모델링을 마무리합니다.

고유값 컨트롤 정의

고유값 컨트롤은 하중 케이스의 속성으로 정의됩니다.

- **Treeview> Analyses** 탭에서 **Loadcase 1**을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Controls** 메뉴에서 **Eigenvalue**를 선택합니다.

Eigenvalue 대화상자가 나타나면, 다음 매개변수를 지정합니다.

- **Number of eigenvalues**를 **30**으로 설정합니다.
- **Shift to be applied**가 **0**으로 설정되어 있는지 확인합니다.
- **Type of eigensolver**가 **Default**로 설정되어 있는지 확인합니다.

참고. **Eigenvector normalisation**은 기본적으로 **Mass**로 설정됩니다.

이는 이 예제처럼 고유벡터를 이후 결과 처리 단계의 IMD 해석에 사용하려는 경우 반드시 필요합니다.

구조물의 질량이 이미 고유값 진동수 해석에 포함되어 있으므로, 이 예제에는 중력 하중이 없습니다. Bridge 또는 Civil 메뉴에서 정의된 중력 하중이 할당되어 있거나 하중 케이스에 대해 중력 하중이 켜져 있는 경우, 중복 계산되지 않도록 제외됩니다.

구조 하중을 질량으로 환산해야 하는 경우, '**Convert Loading to mass**' 체크박스를 이용해 이를 추가 질량으로 포함시킬 수 있습니다.

참고. 이 예제에는 구조 하중이 없습니다. 다만 결과 처리 과정에서, 적용 하중과 무관한 고유진동수 해석 결과를 이용해 스펙트럴 조합이 수행됩니다.

File > Save



모델 파일을 저장합니다.

해석 수행

모델이 로드된 상태에서 다음을 수행합니다.



Solve Now 대화상자를 엽니다. **Analysis 1**이 선택되어 있는지 확인하고 OK를 누릅니다.

모델 정보로부터 LUSAS 데이터파일이 생성됩니다. LUSAS Solver는 이 데이터파일을 이용해 해석을 수행합니다.

결과 확인

각 고유값에 대한 해석 하중 케이스 결과는 트리뷰에서 확인할 수 있습니다. Eigenvalue 1이 기본적으로 활성화되어 있습니다.

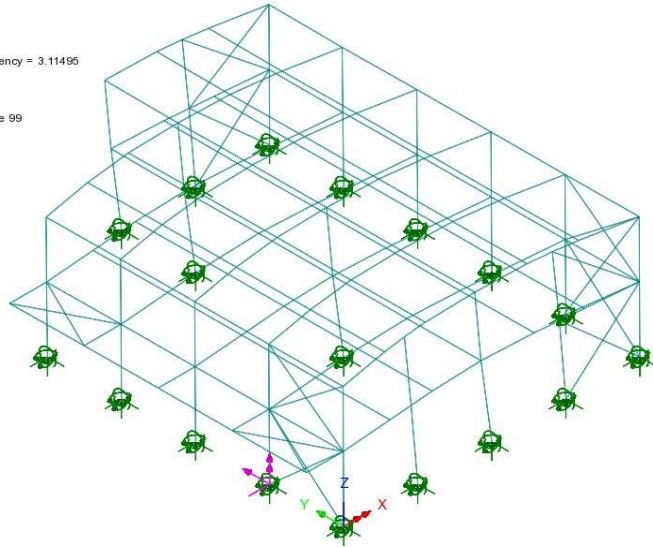
모드 형상 표시

- **Treeview > Layer** 탭에서 **Mesh, Geometry, Attributes** 레이어의 표시를 끕니다.
- 아무 항목도 선택하지 않은 상태에서 뷰 창을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Deformed mesh** 옵션을 선택합니다. 그러면 트리뷰에 Deformed mesh 레이어가 추가되고 Eigen mode 1의 모드 형상이 표시됩니다.

- 결과 개요를 보려면 Window Summary를 표시합니다. (이는 트리뷰 아래의 체크박스에서도 선택할 수 있습니다.)

Tools > Annotation > Window Summary

Scale: 1.153296
Zoom: 100.0
Eye: (-0.57735, -0.57735, 0.57735)
Eigenvalue analysis
Analysis: Analysis 1
Loadcase: 1: Loadcase 1, 1: Mode 1 Frequency = 3.11495
Results file: 3d_frame~Analysis 1.mys
Eigenvalue: 383.056
Natural frequency: 3.11495
Error norm: 1.26321E-12
Maximum displacement: 9.6613E-3 at node 99
Deformation exaggeration: 95.2022



참고. Window Summary에는 고유값과 고유진동수 값, 그리고 한 절점의 변위 값이 표시됩니다. 이 변위 값은 정량적인 값이 아니며, 질량 정규화 기법에 따라 해당 모드의 질량 크기와 관련된 값임에 유의해야 합니다. 따라서 기본적인 고유값 해석만으로 확인할 수 있는 것은 진동수와 모드 형상뿐입니다.

참고. 모드 형상은 위에 표시된 것과 반대 방향으로 나타날 수도 있습니다. 진동 중 변형 형상은 양방향으로 모두 나타날 수 있으므로 그 방향(부호)은 임의적이기 때문입니다.

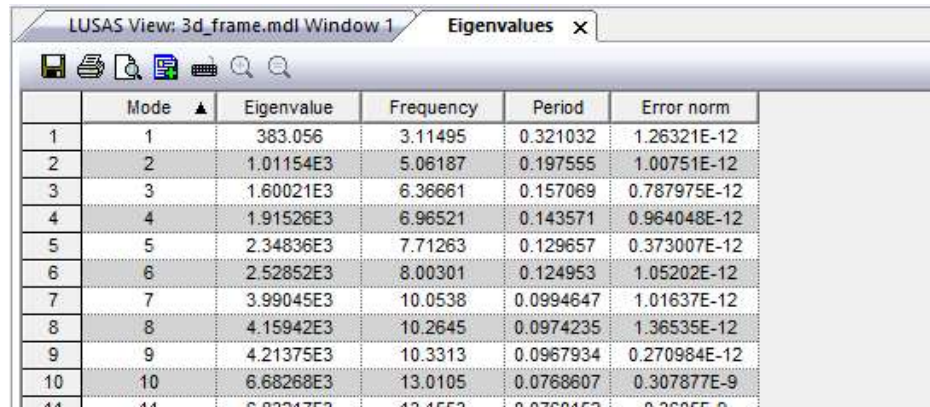
- Treeview > Analyses** 탭에서 Mode 2 Frequency = 항목을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Set Active** 메뉴를 선택합니다. Mode 2에 대한 모드 형상이 표시됩니다.

이런 방식으로 각 고유모드를 활성화하면 모든 모드의 모드 형상을 확인할 수 있습니다.

고유값 결과 출력

- 결과 유형으로 **Eigenvalues**를 선택합니다. Loadcase 1에 대해 available results 패널에서 **Eigenvalues (Frequency)**를 선택하고, **Display now** 옵션이 선택되어 있는지 확인한 뒤 OK를 클릭합니다. 고유값 결과가 표시되며, Utilities 트리뷰에 Print Results Wizard 항목이 추가됩니다.

Utilities > Print Results Wizard



	Mode ▲	Eigenvalue	Frequency	Period	Error norm
1	1	383.056	3.11495	0.321032	1.26321E-12
2	2	1.01154E3	5.06187	0.197555	1.00751E-12
3	3	1.60021E3	6.36661	0.157069	0.787975E-12
4	4	1.91526E3	6.96521	0.143571	0.964048E-12
5	5	2.34836E3	7.71263	0.129657	0.373007E-12
6	6	2.52852E3	8.00301	0.124953	1.05202E-12
7	7	3.99045E3	10.0538	0.0994647	1.01637E-12
8	8	4.15942E3	10.2645	0.0974235	1.36535E-12
9	9	4.21375E3	10.3313	0.0967934	0.270984E-12
10	10	6.68268E3	13.0105	0.0768607	0.307877E-9

여기서는 확인을 위해 처음 10개 모드만 표시합니다.

참고. 헤르츠 단위의 진동수는 고유값의 제곱근을 2π 로 나누어 구할 수 있으며, 초 단위의 진동 주기는 진동수의 역수($1/\text{진동수}$)로 구할 수 있습니다. Error norm 값은 여기 표시된 것과 다를 수 있습니다.

주의. 시스템 고유벡터는 정규화되어 있으므로(이 예제에서는 질량 기준), 변위나 모멘트처럼 이로부터 유도되는 값들도 모두 정규화된 값이며 실제 설계 값이 아닙니다.

- 창 오른쪽 위 모서리의 닫기 버튼을 선택해 결과 출력 창을 닫습니다. 

질량 참여 계수 확인

참고. 응답 해석을 제대로 수행하려면 전체 질량 중 상당 부분이 해석에 반영되었는지 확인해야 합니다. 이를 위해 전체 질량의 약 90%가 전체 좌표계 x , y 방향에 포함되어 있는지 확인해야 합니다. 상당한 비율의 질량이 반영되었는지 확인하지 않으면 중요한 모드를 놓쳐 이후 응답 해석 결과에 오류가 생길 수 있습니다.

- **Treeview> Utilities** 탭에서 **PRW1** 항목을 더블클릭합니다.🔑
- 결과 유형이 **Eigenvalues**인지 확인합니다. Loadcase 1에 대해 available results 패널에서 **Sum mass participation factors**를 선택하고 OK를 클릭합니다. Sum Mass Participation Factors 결과가 기존 Eigenvalues (frequency) 결과에 추가됩니다.
- **Treeview> Utilities** 탭에서 **PRW1** 항목을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Show results**를 선택합니다. 결과가 표시됩니다.
- Sum mass participation factors 탭을 선택합니다. 확인을 위해 다음 그림에는 x , y 방향으로 90%에 근접하거나 초과하는 모드만 표시했습니다. 모드 22에서 참여율이 90%를 넘는 것을 확인할 수 있습니다.

15	15	0.848049	0.812086	0.0107214	0.153462	0.0134136	0.135935	16.1856	0.0617832
16	16	0.855737	0.8121	0.0107242	0.153468	0.0134171	0.200033	16.8058	0.0595033
17	17	0.86072	0.812104	0.0107402	0.153473	0.013472	0.214892	17.074	0.0585687
18	18	0.860843	0.829767	0.011583	0.153478	0.0135032	0.21646	18.1605	0.0550644
19	19	0.862321	0.925586	0.0122783	0.153507	0.0135454	0.225696	18.3017	0.0546396
20	20	0.862414	0.933854	0.0122791	0.153616	0.0135461	0.226243	18.6756	0.0535458
21	21	0.871079	0.937903	0.012347	0.153618	0.0135554	0.2334	19.9166	0.0502094
22	22	0.945398	0.937907	0.0123493	0.153618	0.0138972	0.263902	21.4685	0.0465798
23	23	0.945501	0.937917	0.0155846	0.153618	0.0139001	0.27337	22.6383	0.0441729
24	24	0.945508	0.937994	0.304604	0.153644	0.0139003	0.273572	22.792	0.043875
25	25	0.945528	0.938103	0.308832	0.158184	0.0139003	0.273623	22.9463	0.04358

- 결과 출력 창을 닫습니다.

응답 스펙트럼 해석

응답 스펙트럼 해석은 **IMD(Interactive Modal Dynamics)** 기능을 이용해 수행합니다. 이를 위해 스펙트럼 곡선과 가진을 정의하고, IMD 하중 케이스에서 필요한 결과를 지정합니다. 이후 IMD 하중 케이스를 활성화하면 스펙트럴 결과를 확인할 수 있습니다.

응답 스펙트럼 해석에서는 추가적인 감쇠 정보도 설정할 수 있습니다. 고유진동수 해석 결과와 달리, 스펙트럴 조합으로 얻는 출력 값은 실제 설계 값입니다.

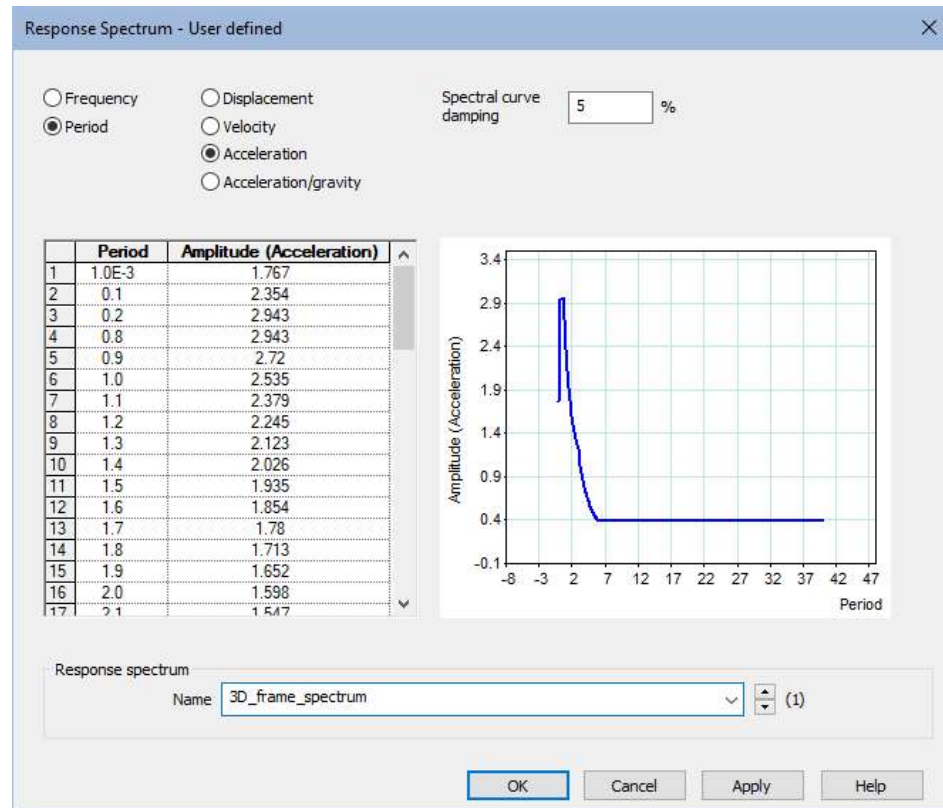
1단계: 스펙트럼 가진 곡선 정의하기

스펙트럼 가진 곡선의 값을 지정해야 합니다. 이 해석에서는 가속도 대 주기 값을 사용합니다.

3D_frame_spectrum_EC8.lvb는 유로코드 EC8에 따른 응답 스펙트럼을 정의합니다.

File > Script > Run Script...

- 다운로드하여 원하는 폴더에 저장해 둔 파일 **3D_frame_spectrum_EC8.lvb**를 선택합니다. OK를 클릭합니다.
- **Treeview> Utility**  탭에 주기·가속도로 이루어진 응답 스펙트럼 데이터셋 **3D_frame_spectrum**이 생성됩니다.
- **3D_frame_spectrum** 응답 스펙트럼 항목을 더블클릭해 응답 스펙트럼의 곡선 정의를 확인합니다.
- 스펙트럼 곡선의 감쇠 값을 **5(%)**로 정의합니다. 이는 EN1998-1 그림 3.2 및 3.3의 곡선에 가정된 감쇠 값입니다.



- OK 버튼을 클릭합니다.

2단계: 동적 가진 정의하기

- Excitation 드롭다운 목록에서 **Support Motion**을 선택합니다. 옆의 Set 버튼을 눌러 Acceleration support motion 옵션이 Relative인 **User specified direction**으로 설정되어 있는지 확인합니다. X direction 옆 칸에 1.0을, Y direction 옆 칸에 **0.6**을 입력합니다. OK 버튼을 클릭해 IMD loadcase 대화상자로 돌아갑니다.

Analyses > IMD Loadcase...

- Results 드롭다운 목록에서 **Spectral**을 선택합니다. 옆의 Set 버튼을 눌러 스펙트럴 응답 유형이 **CQC Combination**이고 **damping variation**

correction이 **Eurocode**로 설정되어 있는지 확인합니다. 이 방법은 앞서 지정한 곡선의 가정 감쇠 5%를 곱하여 **0.8%**로 지정할 구조물 감쇠에 맞게 보정하는데 적절한 방법입니다. 앞서 LVB 파일로 읽어들이 응답 스펙트럼 **3D_frame_spectrum**이 드롭다운 목록에 이미 선택되어 있을 것입니다. OK 버튼을 클릭해 IMD loadcase 대화상자로 돌아갑니다.

- **Damping type** 항목에서 **Specified values**를 선택합니다. **Set Damping** 버튼을 눌러 **Viscous damping** 비율을 **0.8**로 지정합니다. 이는 강재 프레임에 대한 EN1991-1-4 표 F.2에 따른 값입니다.
- **Modes** 항목에서 **Use all modes** 옵션이 선택되어 있는지 확인합니다.
- 이름이 IMD Loadcase 1로 정의되어 있는지 확인합니다.
- OK 버튼을 클릭해 마칩니다.

참고. **User-specified support motion** 옵션을 이용하면 하나의 지진 응답을 여러 방향에 동시에 적용할 수 있습니다. 이 예제에서는 X 방향으로 지진 응답의 100%를, 동시에 Y 방향으로 60%를 적용하고 있습니다. 사용자 방향을 지정하면 입력 운동이 벡터에 따라 방향과 크기가 재조정되므로, 별도로 조정하지 않으면 운동이 증폭(배율 적용)된다는 점에 유의해야 합니다.

참고. 모드 조합을 수행하는 방법에는 여러 가지가 있습니다.

1. 고유진동수들이 서로 충분히 떨어져 있는 경우, 제곱합의 제곱근(SRSS) 방법이 적절한 결과를 준다고 알려져 있습니다.
2. 모드들의 고유진동수가 서로 가까운 경우에는, 각 모드가 서로 같은 위상에서 최대값에 도달할 수 있다고 가정하는 절대합(AbsSum) 방법을 사용합니다.
3. 또는 이 예제처럼 완전 2차 조합(CQC) 방법을 사용할 수 있습니다. 이 방법은 모드 간 간격을 고려함으로써 SRSS와 AbsSum 두 방법을 사실상 결합한 방식입니다.

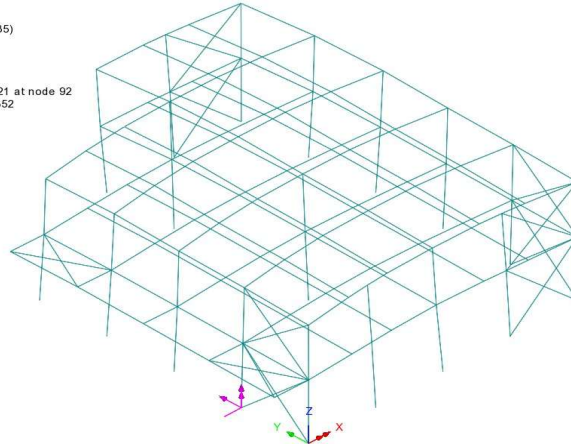
참고. 정의한 감쇠가 스펙트럼 곡선에 내재된 감쇠와 다른 경우 보정을 적용할

수 있습니다. 사용 가능한 **damping variation correction** 옵션은 여러 가지가 있으며, 자세한 내용은 **Theory Manual**을 참고하십시오.

3단계: IMD 결과 하중 케이스 선택

- **Treeview> Analyses**  탭에서 IMD Loadcase 1 하중 케이스 이름을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 Set Active 옵션을 선택합니다.

Scale: 1: 134.704
Zoom: 100.0
Eye: (-0.57735, -0.57735, 0.57735)
Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: 3D_frame_spectrum
Loadcase: 2: IMD Loadcase 1
Maximum displacement 0.0102521 at node 92
Deformation exaggeration: 78.8352



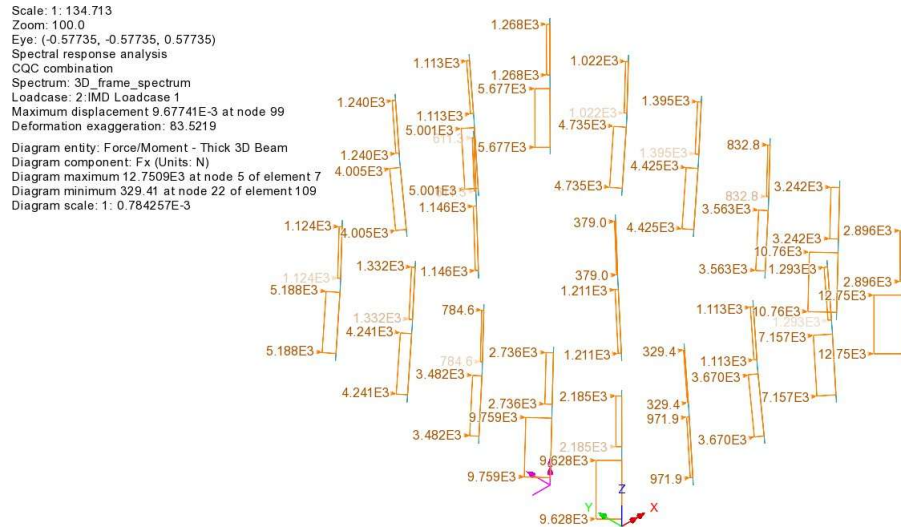
4단계: 스펙트럴 조합 결과 표시하기

스펙트럴 조합에 대한 부재의 축력 및 휨모멘트를 나타내는 결과 플롯을 표시합니다.

- **Treeview> Groups**  탭에서 **Columns**라는 그룹을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Set as Only Visible**을 선택해 기둥 부재만 표시합니다.
- **Treeview> Layer**  탭에서 **Deformed Mesh** 레이어의 표시를 끕니다.
- 아무 항목도 선택하지 않은 상태에서 Graphics 영역의 빈 곳을 마우스 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Diagrams** 옵션을 선택해 **Diagrams** 레이어를 추가합니다.

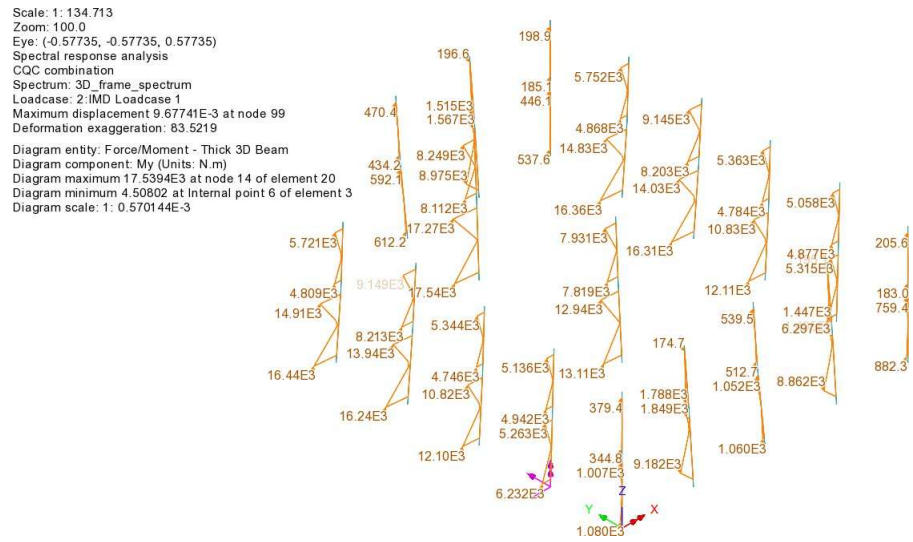
- 부재의 축력 **Fx**에 대한 **Force/Moment** 결과를 선택합니다. **Diagram display** 탭을 선택하고 **Label values** 옵션이 선택되어 있는지 확인합니다. OK 버튼을 클릭해 마칩니다.

'Orientate by element axes'와 'Orientate flat to screen/page' 옵션은 축응력 다이어그램에는 해당되지 않으므로 비활성화되어 있습니다. 기본적으로 'flat to screen/page' 형태의 플롯이 표시됩니다.



활성화된 IMD 하중 케이스에 대해 결과가 계산되며, 각 부재의 축력을 나타내는 다이어그램이 표시됩니다. 필요하면 Zoom in 버튼을 이용해 결과 정보를 자세히 볼 수 있습니다. 이러한 결과는 선택한 모델 요소에 대해서만 별도로 표시할 수도 있습니다.

- Treeview> Layer**  탭에서 **Diagram** 레이어를 더블클릭해 속성을 확인합니다.
- 부재의 휨모멘트 **My**에 대한 **Force/Moment** 결과를 선택합니다. OK 버튼을 클릭해 마칩니다.



Fx를 제외한 모든 성분에 대해서는 '**Orientate by element axes**'가 기본 다이어그램 표시 옵션입니다. 필요한 경우 **Diagram display** 탭에서 '**Orientate flat to screen / page**'를 선택해 변경할 수 있습니다.